

分类号:U41; U2

10710-2009021066



長安大學

博士学位论文

沥青路面节能减排量化分析方法
及评价体系研究

杨 博

导师姓名职称	张争奇 教授		
申请学位级别	博士	学科专业名称	道路与铁道工程
论文提交日期	2012年9月21日	论文答辩日期	2012年12月12日
学位授予单位	长安大学		

Quantitative Method and Evaluation System of Energy-Saving and Emission-Reduction for Asphalt Pavement

A Dissertation Submitted for the Degree of Doctor

Candidate: YANG Bo

Supervisor: Prof. ZHANG Zheng-qi

Chang'an University, Xi'an, China

论文独创性声明

本人声明：本人所呈交的学位论文是在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除论文中已经注明引用的内容外，对论文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本论文中不包含任何未加明确注明的其他个人或集体已经公开发表的成果。

本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名： 杨博 2012年12月13日

论文知识产权权属声明

本人在导师指导下所完成的论文及相关的职务作品，知识产权归属学校。学校享有以任何方式发表、复制、公开阅览、借阅以及申请专利等权利。本人离校后发表或使用学位论文或与该论文直接相关的学术论文或成果时，署名单位仍然为长安大学。

(保密的论文在解密后应遵守此规定)

论文作者签名： 杨博 2012年12月13日

导师签名： 张奇 2012年12月13日

摘 要

在目前资源与环境问题日益突出的国际背景下, 沥青路面建设和运营养护产生的能耗高、温室气体及有害烟尘排放量大等环境问题已日益引起国内外的广泛重视。但是目前我国对于沥青路面能耗与排放多采用定性分析, 缺乏量化分析与评价体系, 无法明确节能减排效果和生态效益, 这在一定程度上阻碍了沥青路面节能减排技术的推广和应用。因此, 建立科学合理的节能减排量化分析评价体系是目前沥青路面节能减排研究领域的一项重要研究课题。

以生命周期的分析视角, 采用文献调查与现场调查相结合的方式, 调查目前国内外沥青混合料生产过程、沥青路面建设过程以及沥青路面运营和使用过程中的能源消耗与气体排放现状, 收集路面材料、生产工艺、建设流程以及机械设备和车辆参数, 分析影响沥青路面能耗与排放的关键因素和工艺流程, 在此基础上确定沥青路面能耗与排放流程及影响因素。

论证生命周期分析方法用于沥青路面能耗与排放量化分析的可行性, 通过比较三种不同类型的生命周期分析方法, 选择基于流程的生命周期分析用于沥青路面能耗与排放量化分析, 同时参照 ISO14040 对生命周期分析的相关规定, 建立沥青路面节能减排量化分析体系的基本框架。

以定额法和排放因子法为基础, 结合调查法和理论法, 提出沥青路面建设阶段能耗与排放量化计算方法和详细计算过程; 在此基础上, 建立沥青路面建设阶段能耗与排放量化分析模型, 并应用该分析模型对新建沥青路面工程进行了量化分析, 为建设工程节能减排措施的应用提供科学的指导。

分析路面使用时间 t 、平整度指数 IRI、车辆行驶速度 v 以及油耗 F_c 之间的量化关系, 提出“路面状况-车速-能耗与排放”量化预估模型建立方法, 并采用参数传递法建立基于路面状况的能耗量化预估模型。同时, 结合养护工程材料与机械设备的特点, 在定额法与排放因子法的基础上, 提出沥青路面养护维修阶段能耗与排放量化分析方法, 建立了养护维修阶段能耗与排放量化模型。最终, 建立沥青路面使用阶段能耗与排放量化分析模型, 并采用该模型对新建沥青路面工程进行量化分析, 提出采用低碳技术、提高沥青路面路用性能等节能减排方向。

从科学性、约束性和激励性的角度,选取了沥青路面节能减排评价指标,并分别提出 I 水平和 II 水平评价指标的基准值,建立沥青路面节能减排评价指标体系。以此为基础,采用层次分析法和模糊综合评价法,建立三阶段的沥青路面节能减排综合评价方法及其评价流程。同时,以 Excel 为平台,设计开发具有实用简便的沥青路面节能减排分析评价系统 E3SAP。

本文研究成果可以为沥青路面节能减排评价提供科学指导,弥补我国节能减排量化评价方法空白,具有重要的理论意义和良好的推广应用前景。

关键词: 沥青路面, 生命周期分析, 节能减排, 能源消耗, 气体排放, 预估模型, 评价指标, 评价系统, 层次分析, 模糊综合评价

Abstract

Under the international background of resources and environmental issues are becoming increasingly prominent, environmental problems such as high energy consumption, large emissions of greenhouse gases and harmful dust resulted from construction, operation and maintenance of asphalt pavement have drawn extensive attention at home and abroad. But recently, there is still lack of quantitative analysis method and evaluation system, analysis of energy consumption and air emissions of asphalt pavement are usually based on qualitative analysis. So, the effects of energy-saving and emission-reduction and its ecological benefits are still unknown, which hindering the application and promotion of energy saving and emission reduction technology used in asphalt pavement. Therefore, establishing a scientific and reasonable quantitative analysis of energy conservation and emissions reduction evaluation system is an important research subject in the field of the energy conservation and emission reduction study for asphalt pavement.

According to the perspective of life cycle assessment, combining literature survey and field investigation, the current situation of energy consumption and air emission during the process of asphalt mixture production, asphalt pavement construction, asphalt pavement operation and maintenance was investigated, the construction materials, productive technology, construction process, mechanical equipment and vehicle parameters were collected, key factors and process which influencing energy consumption and air emission of asphalt pavement were analyzed. According to that, the flow and influencing factors of energy consumption and air emission of asphalt pavement were determined.

The feasibility of life cycle assessment used for energy consumption and air emission was analyzed, and according to comparative analysis of three different types of life cycle assessment methods, the process LCA was selected to conduct quantitative analysis of asphalt pavement energy consumption and air emission. Then, based on the provisions of ISO 14040, the framework of quantitative analysis of asphalt pavement energy saving and air emission reduction was established.

Based on quota and emission factor, combining with investigation and theoretical method, the quantitative calculation method and its detailed process of asphalt pavement energy consumption and air emission during asphalt pavement construction were proposed. According to that, the quantitative analysis model was established, and this model was used to conduct a quantitative analysis for new asphalt pavement project, the analysis results could provide scientific guidance for application of energy saving and emission reduction technology.

The quantitative relation of asphalt pavement service time, international roughness index, vehicle speed and fuel consumption was analyzed, and the quantitative prediction model ‘pavement surface condition-vehicle speed-energy consumption and air emission’ was established. At the same time, according to the feature of materials and equipments used in asphalt pavement maintenance project, the energy consumption and air emission model for asphalt pavement maintenance phase was established. Finally, the quantitative analysis model for this phase was established and used for a new asphalt pavement project. The energy saving and emission reduction measures, such as applying low carbon technology and improving asphalt pavement performance were proposed according to the analysis results.

From the perspective of scientific, binding and incentive, the evaluation indicators for energy saving and emission reduction of asphalt pavement were selected, and the reference value of these indicators for I level and II level were proposed respectively, according to that, the evaluation indicators system for energy saving and emission reduction of asphalt pavement was established. Applying analytic hierarchy process (AHP) and fuzzy comprehensive evaluation method, the three phase comprehensive evaluation method and process of energy saving and emission reduction of asphalt pavement was proposed. Then, based on Excel program, the simple and practical program E3SAP was designed.

Key words: asphalt pavement; life cycle assessment; energy-saving and emission reduction; energy consumption; air emission; prediction model; evaluation indicator; evaluation system; analytic hierarchy process; fuzzy comprehensive evaluation

目 录

第一章 绪论	1
1.1 问题的提出及研究意义	1
1.2 沥青路面节能减排量化分析与评价研究现状分析	2
1.2.1 基于生命周期分析的沥青路面能耗与排放量化分析研究	3
1.2.2 沥青路面能耗与排放量化分析体系研究	8
1.2.3 沥青路面节能减排量化分析与评价研究综述	14
1.3 主要研究内容及技术路线	18
1.3.1 主要研究内容	18
1.3.2 技术路线	19
第二章 沥青路面能源消耗与环境排放影响因素研究	21
2.1 沥青混合料生产过程的能耗与环境排放调查	21
2.1.1 沥青混合料生产设备及工艺流程	21
2.1.2 沥青混合料生产过程能耗类别与排放来源	24
2.2 沥青路面建设过程的能耗与环境排放调查	28
2.2.1 沥青路面施工机械设备及工艺流程	28
2.2.2 沥青路面建设过程能耗与排放	31
2.3 沥青路面运营过程的能耗与环境排放调查	34
2.3.1 路面状况对车辆油耗的影响调查	35
2.3.2 车辆行驶过程能耗与排放	36
2.4 本章小结	38
第三章 沥青路面节能减排量化分析体系框架	40
3.1 沥青路面节能减排量化分析体系理论基础	40
3.1.1 生命周期分析用于沥青路面节能减排量化分析评价的可行性	40
3.1.2 生命周期分析类型的选择	42
3.2 沥青路面节能减排量化分析评价体系组成及流程	47
3.2.1 分析评价目的与范围的确定	48
3.2.2 清单分析	50
3.2.3 量化评价	58

3.3 本章小节.....	62
第四章 沥青路面建设阶段能耗与排放量化分析研究	64
4.1 沥青混合料生产阶段能耗与排放量化分析.....	64
4.1.1 沥青生产过程的能耗与排放量化分析.....	64
4.1.2 石料生产过程的能耗与排放量化分析.....	66
4.1.3 沥青混合料生产过程能耗与排放量化分析.....	68
4.2 沥青路面施工阶段能耗与排放量化分析.....	70
4.2.1 沥青混合料运输过程能耗与排放量化分析.....	70
4.2.2 沥青路面施工过程能耗与排放量化分析.....	73
4.3 沥青路面建设阶段能耗与排放量化分析模型及应用.....	75
4.3.1 沥青路面建设阶段能耗与排放量化分析模型.....	75
4.3.2 沥青路面建设阶段能耗与排放量化分析模型应用示例.....	77
4.4 本章小结.....	86
第五章 沥青路面使用阶段能耗和排放量化分析研究	87
5.1 基于沥青路面状况的运营车辆能耗与排放量化分析研究.....	87
5.1.1 路面状况-车速-能耗与排放量化预估模型建立方法.....	87
5.1.2 沥青路面行驶质量参数及其衰变规律.....	89
5.1.3 沥青路面行驶质量参数与车辆行驶速度及油耗的量化关系.....	91
5.1.4 路面状况-车速-能耗与排放量化分析模型.....	95
5.2 养护维修阶段的能耗与排放量化分析研究.....	98
5.2.1 沥青路面养护维修措施及工艺流程.....	98
5.2.2 沥青路面养护时机及决策.....	102
5.2.3 沥青路面养护维修阶段能耗与排放量化分析.....	104
5.3 沥青路面使用阶段能耗与排放量化分析模型及应用.....	107
5.3.1 沥青路面使用阶段能耗与排放量化分析模型.....	107
5.3.2 沥青路面使用阶段能耗与排放量化分析模型应用示例.....	108
5.4 本章小结.....	113
第六章 沥青路面节能减排综合量化评价方法研究	115
6.1 沥青路面节能减排评价指标体系研究.....	115
6.1.1 评价指标体系的确定原则.....	115

6.1.2 评价指标的选取	116
6.1.3 评价指标基准值的选取	120
6.2 沥青路面节能减排评价指标权重的确定	124
6.2.1 基于层次分析法的沥青路面节能减排评价指标体系权重确定	124
6.2.2 沥青路面节能减排评价指标体系最终权重值分析	128
6.3 沥青路面节能减排评价方法研究	130
6.3.1 基于模糊综合评价的沥青路面节能减排评价方法	131
6.3.2 沥青路面节能减排评价流程及应用	133
6.4 本章小结	135
第七章 沥青路面节能减排量化评价系统研究	136
7.1 沥青路面节能减排评价系统 E3SAP 设计框架	136
7.1.1 E3SAP 系统的研发原则及功能要求	136
7.1.2 E3SAP 系统设计流程	138
7.2 沥青路面节能减排评价系统 E3SAP 组成模块	140
7.2.1 能耗与排放量化分析模块	140
7.2.2 节能减排分析评价模块	142
7.3 本章小结	144
结论	145
参考文献	148
攻读学位期间取得的研究成果	158
致 谢	159

图目录

图 1.1	PaLATE 分析评价系统框架	8
图 1.2	PaLATE 系统输入数据示例	9
图 1.3	PaLATE 系统数据及图形化显示	9
图 1.4	BE ² ST 评价系统分析评价流程	10
图 1.5	Greenroads 认证标志	13
图 1.6	技术路线	20
图 2.1	沥青混合料拌和设备简图	22
图 2.2	沥青混合料拌和设备工艺流程	23
图 2.3	不同条件下矿料输送阶段 PM 排放量对比	26
图 2.4	沥青混合料装载过程环境排放	27
图 2.5	沥青混合料生产过程环境排放流程图	28
图 2.6	沥青路面摊铺及压实施工现场排放	32
图 2.7	沥青混合料摊铺现场沥青烟排放	34
图 3.1	LCA 评价过程 ^[10, 75]	41
图 3.2	基于流程的 LCA 方法示意图	43
图 3.3	沥青路面建设过程综合性生命周期分析示例	47
图 3.4	沥青路面节能减排量化分析评价体系组成部分及评价流程	48
图 3.5	沥青路面生命周期阶段划分	50
图 3.6	数据收集流程图	51
图 3.7	沥青路面单元过程划分示意图	52
图 3.8	能耗计算方法流程图	55
图 3.9	量化分析影响评价与结果解释的基本流程	58
图 3.10	沥青路面节能减排综合量化评价方法组成及流程	61
图 4.1	石油沥青与改性沥青生产工艺流程简图	65
图 4.2	石料生产工艺流程	67
图 4.3	淮固高速公路公路沥青路面建设阶段生命周期过程能耗比	84
图 4.4	淮固高速公路沥青路面建设阶段生命周期环境排放比	85
图 5.1	路面状况-车速-能耗与排放量化预估模型建立流程图	89

图 5.2	国际平整度指数 IRI 与路面状况和车速的关系	91
图 5.3	两种不同车速-油耗模型比较（以小客车为例）	94
图 5.4	长平高速车辆油耗与速度回归关系.....	95
图 5.5	路面使用时间 5 年内大型客车油耗变化曲线.....	96
图 5.6	稀浆封层和微表处施工过程能耗与排放.....	100
图 5.7	碎石封层施工过程能耗与排放.....	101
图 5.8	超薄磨耗层施工过程能耗与排放.....	102
图 5.9	不采用与采用养护维修措施的路面 PCI 衰变情况	104
图 5.10	淮固高速养护前后 PCI 衰变曲线	111
图 6.1	沥青路面节能减排评价流程.....	133
图 7.1	E3SAP 系统设计研发流程.....	138
图 7.2	能耗与排放量化分析模块组成.....	140
图 7.3	路面信息工作簿（部分）	141
图 7.4	数据计算工作簿（部分）	141
图 7.5	量化分析模块工作簿（部分）	141
图 7.6	沥青路面能耗与排放量化分析工作簿.....	142
图 7.7	节能减排评价模块组成.....	142
图 7.8	辅助评价部分工作簿.....	143
图 7.9	指标评分部分工作簿.....	143
图 7.10	综合评价部分工作簿.....	144

表目录

表 1.1	BE ² ST 评价系统评价指标及标准	10
表 1.2	Greenroads 系统项目要求内容	12
表 1.3	Greenroads 评价结果	13
表 2.1	间歇强制式与连续滚筒式拌和设备比较	22
表 2.2	沥青混合料拌和设备能耗影响因素	24
表 2.3	沥青混合料拌和设备装机功率参数	25
表 2.4	自卸汽车分类代表车型	29
表 2.5	沥青混合料摊铺机分类代表型号	30
表 2.6	沥青混合料压实机械分类代表型号	30
表 2.7	沥青混合料各压实阶段机械设备型号及压实速度	30
表 2.8	柴油机排放控制措施	33
表 2.9	恒定速度情况下路面平整度对油耗的影响	35
表 2.10	PASSAT 型乘用车不同工况油耗	37
表 2.11	华北地区某高速公路小型车交通量统计资料	37
表 2.12	EEA 及我国国家标准车辆环境排放类别	38
表 3.1	经济投入-产出分析表	45
表 3.2	Process LCA 和 I-O LCA 方法的优缺点	46
表 3.3	沥青路面生命周期分析阶段	49
表 3.4	数据清单内容	53
表 3.5	不同数据源比较	53
表 3.6	缺省净发热值 (NCVs) 和 95%置信区间的下限和上限 MJ/kg	56
表 3.7	基于净发热值的燃料燃烧缺省排放因子 mg/MJ	56
表 3.8	影响类别、影响因子及特征因子	60
表 4.1	石油沥青和改性沥青的能耗与排放因子	66
表 4.2	沥青生产过程单位产量能耗	66
表 4.3	石料生产线单位产量能耗	67
表 4.4	石料生产过程排放因子 (kg/t)	68
表 4.5	1000m ³ 中粒式沥青混合料路面实体的重油和电力累计消耗量	68

表 4.6	Vm^3 中粒式沥青混合料路面实体的生产能耗计算	69
表 4.7	沥青混合料生产过程固体颗粒物排放因子 (kg/t)	69
表 4.8	沥青混合料生产过程气态污染物排放因子 (kg/t)	70
表 4.9	沥青混合料运输过程车辆台班及油耗	71
表 4.10	沥青混合料运输过程能耗计算表	72
表 4.11	重型柴油车运输沥青混合料过程环境排放因子	73
表 4.12	铺筑 $1000m^3$ 中粒式沥青混合料路面实体的机械台班及油耗	74
表 4.13	铺筑 Vm^3 中粒式沥青混合料路面的机械设备能耗计算表	74
表 4.14	柴油排放因子	75
表 4.15	沥青路面建设阶段环境排放量化分析模型表	76
表 4.16	淮固高速公路 8cmAC-25C 沥青砼下面层工程量预算表	77
表 4.17	淮固高速公路 6cmAC-20C 沥青砼中面层工程量预算表	78
表 4.18	淮固高速公路 4cmAC-13C 沥青砼面层工程量预算表	79
表 4.19	淮固高速公路沥青混合料生产阶段工料机汇总	79
表 4.20	淮固高速公路沥青生产过程环境排放量化结果	80
表 4.21	淮固高速公路沥青生产过程环境排放特征化结果	81
表 4.22	淮固高速公路石料生产过程环境排放量化及特征化结果	81
表 4.23	淮固高速公路沥青混合料生产过程环境排放量化及特征化结果	81
表 4.24	淮固高速公路沥青路面施工阶段机械使用量汇总	82
表 4.25	淮固高速公路沥青路面施工过程燃料消耗及能耗计算表	83
表 4.26	淮固高速公路沥青混合料运输过程环境排放量化及特征化结果	83
表 4.27	淮固高速公路沥青路面施工过程环境排放量化及特征化结果	84
表 4.28	淮固高速公路沥青路面建设阶段总能耗及能耗比	84
表 4.29	淮固高速公路沥青路面建设阶段环境排放总量 (kg)	85
表 5.1	RQI 衰变方程回归系数 (半刚性基层, BZZ-100)	91
表 5.2	油耗模型建立方法	93
表 5.3	平原微丘区公路车辆油耗预估模型	94
表 5.4	5 年内由 IRI 变化引起的油耗量	97
表 5.5	用于环境排放分析的车辆类别	97
表 5.6	道路运输车辆环境排放因子	98

表 5.7	稀浆封层与微表处的适用范围	99
表 5.8	同步碎石封层适用范围	100
表 5.9	超薄磨耗层适用范围	101
表 5.10	PCI 衰变方程回归系数 (半刚性基层, BZZ-100)	103
表 5.11	高速公路基于路面状况 PCI 的养护决策	103
表 5.12	乳化沥青的能耗与排放因子	105
表 5.13	乳化沥青生产过程单位产量能耗	105
表 5.14	沥青路面养护维修阶段能耗与排放量化分析流程	106
表 5.15	淮固高速公路交通组成	108
表 5.16	淮固高速公路 15 年内分类车型单位车辆累积油耗	110
表 5.17	淮固高速公路沥青路面使用过程车辆环境排放量化及特征化结果	110
表 5.18	1000m ² 乳化沥青稀浆封层材料生产过程能耗	111
表 5.19	1000m ² 乳化沥青稀浆封层生产过程的环境排放量化及特征化结果	111
表 5.20	1000m ² 乳化沥青稀浆封层施工过程能耗	112
表 5.21	1000m ² 乳化沥青稀浆封层施工过程的环境排放量化及特征化结果	112
表 5.22	淮固高速公路养护维修阶段环境排放及其特征化结果	113
表 5.23	淮固高速公路沥青路面使用阶段环境排放来源对比	113
表 6.1	沥青路面节能减排评价指标	120
表 6.2	II 水平定量评价指标基准值	122
表 6.3	II 水平定性评价指标基准值	123
表 6.4	9 标度法重要性标度及其说明	126
表 6.5	沥青路面节能减排一级指标重要性标度	126
表 6.6	沥青路面节能减排一级评价指标权重	127
表 6.7	平均随机一致性指标 R.I	128
表 6.8	资源利用二级指标权重	129
表 6.9	环境排放二级指标权重	129
表 6.10	管理控制二级指标权重	130
表 6.11	沥青路面节能减排指标体系指标权重	130
表 6.12	某温拌沥青混合料路面工程节能减排评价表	134

主要符号列表

1. 环境排放物

符号	英文全称	中文全称
HAP	Hazardous Air Pollutants	有害空气污染物
NMVOC	Non-Methane Volatile Organic Compounds	非甲烷挥发性有机物
PAH	Polycyclic Aromatic Hydrocarbons	多环芳烃
PM	Particle Matter	颗粒性物质
TOC	Total Organic Carbon	总有机碳
TSP	Total Suspended Particulates	总悬浮颗粒物
VOC	Volatile Organic Compounds	挥发性有机化合物

2. 组织机构

符号	英文全称	中文全称
EEA	European Environment Agency	欧盟欧洲环境局
EPA	Environmental Protection Agency	美国国家环境保护局（署）
FHWA	Federal Highway Administration	联邦公路管理局
IARC	International Agency For Research On Cancer	国际癌症研究机构
IEA	International Energy Agency	国际能源机构
IPCC	Intergovernmental Panel On Climate Change	联合国政府间气候变化专门委员会
ISO	International Standard Organization	国际标准化组织
NCAT	National Center For Asphalt Technology	美国国家沥青技术中心
SETAC	Society Of Environmental Toxicology And Chemistry	国际环境毒理学及化学学会
UNECE	United Nations Economic Commission For Europe	联合国欧洲经济委员会
UNEP	United Nations Environment Programme	联合国环境规划署

3. 其他

符号	英文全称	中文全称
BE ² ST	Building Environmentally And Economically Sustainable Transportation Infrastructure-Highways	道路建设环境与生态可持续性评价系统
IRI	International Roughness Index	国际平整度指数
LCA	Life Cycle Assessment (Analysis)	生命周期分析
LCI	Life Cycle Inventory	生命周期清单分析
PaLATE	Pavement Life-Cycle Assessment Tool For Environmental And Economic Effects	路面环境与经济效益评价系统
E3SAP	Energy-saving and Emission-reduction Evaluation System for Asphalt Pavement	沥青路面节能减排评价系统
RQI	Riding Quality Index	行驶质量指数

第一章 绪论

1.1 问题的提出及研究意义

近年来,随着我国经济的快速发展,作为服务于经济发展的公路交通建设事业取得了举世瞩目的成就。截至 2011 年底,我国公路网总里程达到 405.5 万公里,高速公路通车里程达到 8.5 万公里,稳居世界第二位。根据我国《交通运输“十二五”发展规划》,“十二五”期间,我国公路网规模将进一步增大,预计公路总里程达到 450 万公里,高速公路通车里程达到 10.8 万公里^[1],届时高速公路通车里程将跃居世界第一位。在我国公路网结构中,由于沥青路面具有行驶舒适、视觉效果好、噪声低、养护维修方便等优点,各等级公路均采用沥青路面作为主要铺装形式。

大规模的沥青路面建设随之带来了不可忽视的环境问题,在沥青路面建设过程中,不仅要消耗大量的资源和能源,而且普遍使用的热拌生产工艺会排放出大量的 CO₂ 等温室气体和其他有害气体。国外调查资料显示,美国每年大约需要投入 3.5 亿吨的原材料用于全国公路的建设与养护^[2],而修建一条 1 公里长的标准双车道沥青路面,则需要消耗大约 7.0×10^6 MJ 的能源^[3],相当于 240 吨标准煤;丹麦交通部门产生的 CO₂ 排放约占全年 CO₂ 排放总量的 1/3,其中 95% 直接源于交通基础设施建设及运营^[4]。据我国的调查统计,2004 年我国公路交通行业的二氧化碳排放量约为 2.9 亿吨,预计到 2015 年和 2030 年将分别达到 5.22 亿吨和 11.08 亿吨^[5]。沥青路面建设产生的能耗高、温室气体排放量大等环境问题已日益引起国内外的广泛重视。

近年来,全球性能源紧张以及气候变化已成为国际社会普遍关注的重大问题,节能减排,减缓全球气候变暖已经成为国际社会的共同责任。我国作为《联合国气候变化框架公约》的缔约国,承担着节能减排的国际义务,并且将节能减排作为约束性指标纳入国民经济和社会发展中长期规划。交通行业作为能源消耗的重点行业,也是温室气体和大气污染排放的重要来源,是国务院明确提出的要加快建设以低碳排放为特征的重点行业之一。沥青路面的建设作为交通行业中不可或缺的重要组成部分,交通运输部“十二五”发展规划中特别强调了公路建设与养护节能减排推广示范工程的重要性,提出构建以节能减排为主要特征的低碳环保型沥青路面建设模式^[1,6]。

为此,我国在沥青路面建设领域逐步开始推广具有低碳环保特征的温拌技术和废旧材料循环再利用技术,节约了资源和能源,减少了温室气体排放,取得了很好的社会效

益和经济效益。但是，仅仅推广应用低碳环保沥青路面技术还不足以建立真正意义上的低碳环保型沥青路面建设模式，而且由于没有对沥青路面建设环节的能耗与排放进行细致的量化分析，导致低碳环保沥青路面技术的开发与应用针对性不明显、理论依据不充分，同时也暴露出了节能减排效果难以定量评价等问题。因此，为了进一步完善以节能减排为主要特征的低碳环保型沥青路面建设模式，促进生产企业和管理部门重视沥青路面建设过程中的节能减排问题，有必要建立以能耗和排放量化分析为核心的沥青路面节能减排分析评价体系。

沥青路面建设的各个环节都有可能消耗资源和能源，并产生温室气体排放问题，因此，沥青路面节能减排量化分析可以采用生命周期的观点，借助生命周期分析方法，全面分析沥青路面建设的能耗与排放问题。生命周期分析是评估某一产品(包括工程项目)在其整个生命周期中对环境影响的一种量化评价方法，该方法考虑了产品的整个生命周期，即从原材料的获取、能源和材料生产、产品的制造和使用，直至产品生命末期的处理以及最终处置，因而可以识别整个生命周期各阶段或各环节的潜在环境影响，已成为目前国内外环境影响量化评价的主要方法之一。虽然我国从1998年起就开展了材料生命周期评价技术及应用研究，对钢铁、水泥、铝、工程塑料、建筑涂料、陶瓷等六大类典型、量大、面广的代表性材料进行了生命周期研究^[7]，但是采用生命周期评价方法对沥青路面建设工程的资源、能源消耗与气体排放问题至今还没有进行系统深入的研究，也没有建立沥青路面节能减排的量化分析评价体系。

针对沥青路面建设过程中的节能减排分析评价问题，本文采用生命周期分析方法作为沥青路面节能减排量化分析方法，研究沥青路面生命周期内各阶段的能耗和排放量数值，明确能耗高、排放量大的关键环节，为沥青路面节能减排技术的开发与应用提供量化依据；在此基础上，研究适用于沥青路面节能减排量化评价的评价指标和评价方法，建立沥青路面节能减排量化评价体系，开发简便实用的沥青路面节能减排系统软件，从节能减排角度对沥青路面材料、技术的研发以及生产和施工技术的合理优化提供指导。

1.2 沥青路面节能减排量化分析与评价研究现状分析

目前，国内外主要采用生命周期分析方法或借助生命周期分析理念开展沥青路面节能减排量化分析研究，主要研究方向多集中于沥青路面能耗与排放的量化分析和基于节能减排量化分析的评价体系两个方面。

1.2.1 基于生命周期分析的沥青路面能耗与排放量化分析研究

国外对生命周期分析方法已经进行了大量的基础研究，欧美一些发达国家和欧盟等国际组织均建立了各自的生命周期分析数据库，极大的支持了各行业生命周期分析研究的开展。二十世纪九十年代，道路工程研究人员第一次采用生命周期分析方法进行路面环境影响比较分析，自此，生命周期分析方法在道路工程中的应用逐渐发展，目前国外研究人员在沥青路面生命周期分析中所采用的研究方法包括了：基于流程的生命周期分析方法、基于输入-输出模型的生命周期分析方法和综合性生命周期分析方法三种常用的方法。

进行生命周期分析，首先需要确定合理的阶段划分。沥青路面的生命周期阶段包括其使用寿命期限内的各种工程活动，可以进一步细化为若干个具体的阶段，如设计、材料生产、施工等。目前，对沥青路面生命周期的阶段划分还没有形成统一的标准，通常根据分析研究问题的目的和要求合理划分其生命周期阶段。由于沥青路面设计阶段主要在室内完成，该阶段对能耗和排放的影响极其微小，可以忽略不计，因此，绝大多数沥青路面生命周期分析研究均没有考虑设计阶段^[2]，而多将其划分为材料生产阶段、施工阶段、使用阶段（包括养护阶段）以及寿命周期末四个主要阶段，并以此进行生命周期能耗与排放的量化研究。目前，国内外对沥青路面能耗与排放的生命周期分析研究主要集中在沥青路面与水泥混凝土路面的能耗与排放对比研究方面。

Häkkinen 和 Mäkelä^[8]采用基于流程的生命周期分析方法（Process LCA），比较了芬兰地区玛蹄脂碎石沥青路面与设传力杆的水泥混凝土路面在材料生产阶段、施工阶段以及使用阶段的能耗与排放。该研究采用能耗、CO₂ 排放、污染气体排放以及重金属浸出等 18 类不同的环境评价指标，以芬兰国家调查统计数据为基础，通过计算设计交通量 20000 辆/天的两种路面结构在 50 年分析期内的生命周期评价数据，结果表明：使用阶段车辆运营产生的排放大约是其他阶段排放量总和的 2 倍；单就 CO₂ 的排放而言，水泥混凝土路面的排放量比沥青路面高 40%~60%，而沥青路面消耗的非可再生资源大约是水泥混凝土路面的 2 倍。

Horvath 和 Hendrickson^[9]采用卡内基梅隆大学（Carnegie Mellon University）开发的基于输入-输出的生命周期分析模型（EIO-LCA），比较了热拌沥青混合料路面和连续配筋水泥混凝土路面的能耗与排放。其生命周期评价研究中包括能耗、气体排放、水资源消耗、污水排放以及土地占用等。该研究以 1992 年美国工业投入-产出数据为基础，通过计算设计交通量为 1×10^7 ESALs（等效单轴作用次数）的两种路面结构在 10 年分析期

内的生命周期评价数据，结果表明：在材料生产阶段，沥青路面的能耗比水泥混凝土路面高 40%（不包括沥青等材料在储存过程中的能耗），但是综合考虑其他环境因素，水泥混凝土路面对环境的不良影响更为明显，尤其当考虑沥青路面的有效再生利用时，沥青路面的环境友好性更为突出。

Stripple^[10]采用基于流程的生命周期分析方法，研究了设传力杆的水泥混凝土路面以及热拌和冷拌沥青混合料路面在材料生产阶段、施工阶段以及使用阶段的环境影响。其生命周期评价研究中包括能耗、不同类型的水质和空气污染、废弃物产生以及资源消耗等大量的环境评价指标。该研究以北欧地区的统计调查数据为基础，通过计算设计交通量为 5000 辆/天的三种路面结构在 40 年分析期内的生命周期评价数据，结果表明：如果不考虑原料能（原材料所包含的不作为能源使用的燃烧热^[11]），水泥混凝土路面比沥青路面消耗更多的能量，但是当考虑沥青的原料能时，结果则恰好相反。就 CO₂ 排放量而言，水泥混凝土路面明显高于其他两种沥青路面。

针对 Horvath 与 Stripple 研究结论的争议，Zapata 和 Gambatese^[12]采用基于流程的生命周期分析方法，研究了连续配筋水泥混凝土路面与热拌沥青路面在材料生产阶段、施工阶段的环境影响。其生命周期评价指标以及分析数据均借用了以往研究的结果，通过计算设计交通量为 1×10^7 ESALs（等效单轴作用次数）的两种路面结构在 10 年分析期内的生命周期评价数据，Zapata 和 Gambatese 分析认为，连续配筋水泥混凝土路面在材料生产和施工阶段的能源消耗量更多，其原因在于沥青提炼及生产过程的能耗低于水泥。但是该研究也不得不承认，收集分析沥青提炼加工过程的数据并得到比较准确的分析结果仍然存在一定的难度。

Park 等人^[13]首次将综合性生命周期分析方法（Hybrid LCA）用于路面研究，该研究将韩国的经济投入-产出模型与国家能源消耗平衡表相结合，用于路面生命周期材料阶段的分析。而路面生命周期的其他阶段，则采用基于流程的 LCA 分析方法。Treloar 等^[14, 15]同样采用综合性生命周期分析方法，研究了包括水泥混凝土路面、复合路面以及沥青路面在内的 8 种不同路面结构形式在材料生产阶段、施工阶段以及使用阶段的环境影响。研究结果表明，在相同的条件下，设传力杆的水泥混凝土路面的能耗最低，而全厚式沥青路面的能耗最高。同时，研究认为，采用综合性生命周期分析方法能够获得和基于流程的生命周期分析方法相同的准确性，同时能够减小采用输入-输出生命周期分析方法的误差。

随着生命周期分析在道路领域的应用和发展，一些国际和地区性组织也积极开展

道路生命周期分析研究。其中, Athena Institute^[16]根据美国和加拿大地区多个部门收集到的大量环境数据,比较了沥青路面和水泥混凝土路面在材料生产和维修养护阶段的能耗和温室气体排放情况。该研究采用美国力学-经验路面结构设计指南中的设计方法,确定了12种不同的路面结构,通过计算设计交通量为 4×10^7 ESALs(等效单轴作用次数)的12种路面结构在50年分析期内的生命周期评价数据,分析结果表明,水泥混凝土路面的能耗小于沥青路面;当考虑了沥青的原料能时,沥青路面在材料生产和养护维修阶段的能耗是正常情况下的2~5倍;即便不包括原料能,沥青路面的能耗比同等情况下的水泥路面要多30%~70%;就温室气体排放情况而言,不同材料路面并没有显著的差异。

近年来,随着资源紧张和环境问题日益严峻,有关道路环境影响的生命周期分析研究逐年增加,道路生命周期分析研究的范围逐渐扩大,已不仅仅局限于不同路面结构环境影响的比较。

Chan^[17]采用生命周期分析方法通过污染的货币化表示,从经济和环境两方面分析路面的环境影响,第一次将生命周期分析与寿命周期成本分析相结合,提出了路面生命周期分析的一个新的发展方向。White Philip^[18]以及Cass Darrell等^[19]采用生命周期分析方法重点研究了材料生产和路面施工阶段的气体排放,并分别提出了基于生命周期分析的气体排放计算方法。Kucukvar Murat和Tatari Omer^[20]在已有研究^[21, 22]的基础上,在生命周期分析方法中引入热力学评价参数——放射本能(Exergy),分析了连续配筋水泥混凝土路面和热拌沥青混凝土路面对生态系统的影响,同时进一步丰富了生命周期评价指标的科学性内涵;2012年,Omer Tatari、Munir Nazzal和Murat Kucukvar继续利用放射本能的概念,采用综合性生命周期分析方法,分析比较了Aspha-Min[®]、Sasobit[®]和Evotherm[™]三种温拌添加剂用于沥青路面建设工程所产生的环境影响^[23],有利于从生态环境的角度选择合适的温拌添加剂。

针对资源紧张的严峻现实,工业废料和路面再生料在道路建设工程中的应用逐渐增多,Mroueh等^[24]率先打破了生命周期分析用于沥青路面与水泥混凝土路面环境影响对比分析的局面,开始采用生命周期分析方法研究工业副产品用于沥青路面的环境影响,并且在影响分析中采用了专家评分的方法,通过不同指标的权重,量化计算得到环境影响评价结果。Chowdhury Raja等^[25]采用基于流程的生命周期分析方法,研究了新集料、再生料、粉煤灰以及高炉底灰用于路面建设产生的环境影响,认为再生料在降低能源消耗、减少温室气体排放以及改善生态环境等方面更有优势。Carpenter等^[26]采用综合性生命周期分析方法,重点研究了高炉底灰替代碎石集料而产生的环境影响,认为高炉底

灰替代碎石集料后可以降低能耗，减少材料消耗以及温室气体排放，但是由于高炉底灰的渗滤作用会导致水体污染，存在增加诱发癌症的可能。Jullien Agnès 等^[27]采用生命周期分析方法，根据现场实测数据，分析了在不同旧料掺配率条件下沥青路面的环境影响，为沥青路面再生料的合理使用提供了科学的指导。Thenoux Guillermo 等^[28]根据智利的国情，计算分析了沥青加铺层、翻修以及泡沫沥青就地冷再生三种维修方式在各自生命周期内的能耗，为基于环境影响的沥青路面维修方式的选择提供了依据。

目前，世界上主要发达国家的道路交通网基本形成，一些发展中国家的道路交通网络也正在不断完善，针对交通发展“后建设”时代日益凸显的道路养护问题，已有一些研究人员开始从能耗与排放的角度分析道路养护维修过程中的环境影响。

Han Zhang 等^[29]采用综合性生命周期分析方法，对比分析了设计交通量为 8×10^7 ESALs 的 100mm 工程纤维增强胶凝材料 ECC 加铺层、200mm 水泥混凝土加铺层以及 190mm 热拌沥青混合料加铺层在 40 年分析期内产生的能耗及温室气体排放。研究表明，与水泥混凝土加铺层和热拌沥青混合料加铺层相比，ECC 加铺层的能耗分别降低 15% 和 72%，温室气体排放分别减少 32% 和 37%。同时，该研究通过敏感性分析认为，交通增长对路面加铺结构生命周期能耗与排放的影响程度要远高于燃油经济性的改善。

Darrell Cass 等^[30]采用综合性生命周期分析方法对密歇根州西南部的一条州际干线公路大修工程的能耗及环境影响进行了量化分析，分析过程中采用了 FieldManager 数据采集系统，实测大修工程所涉及的材料生产、运输以及施工机械运转等各项数据。根据量化分析的对象，该研究采用不同的分析方法量化能耗与环境影响，并建立了两个综合性生命周期分析模型，上述两个模型的分析结果表明，该大修工程每车道英里的 CO_2 排放分别为 787.19 兆吨和 1383.28 兆吨，材料、燃料及机械加工生产过程产生的 CO_2 排放为总排放的 90% 以上。

Ting Wang 等^[31]采用基于流程的生命周期分析方法，分析了不同交通量的沥青路面和水泥路面进行预防性养护和路面修复的能源消耗和环境影响。该研究与以往的研究相类似，考虑了路面生命周期中的材料生产、施工及运营使用阶段，但是其重点分析了路面运营使用阶段由于道路路面状况下降而导致的车辆能耗与排放问题。该研究从路面 IRI 的衰减变化与车辆能耗和排放的角度出发，利用国际道路协会开发的 HDM-4 模型和美国国家环境保护局开发的 MOVES 模型，计算得到运营期间道路 IRI 变化所导致的车辆能耗与排放。研究表明，对于交通量较大的道路，运营使用阶段路面状况改善

能够显著降低路面生命周期能耗与排放，其影响程度要远大于材料生产和建设阶段。对于低交通量道路，路面平整度和材料对维修措施的路用性能影响显著，如果路面施工质量不佳，将导致生命周期能耗与排放增加。

与国外路面生命周期分析研究相比，我国的路面生命周期分析研究仍处于起步阶段，相关研究文献并不多见，并且大多集中在水泥混凝土路面生命周期分析研究方面。如长沙理工大学郑莉^[32]根据环境综合指标，研究了水泥混凝土路面、再生水泥混凝土路面以及粉煤灰水泥混凝土路面的生命周期能耗和排放；南京林业大学郑艳华^[33]采用生命周期分析方法，具体分析了重庆上界高速公路水泥混凝土路面在材料生产阶段、路面建设阶段、使用阶段以及拆除回收阶段的能耗和排放等环境影响，并根据分析结果提出了针对性的改善措施及建议；清华大学尚春静等^[5]采用综合性生命周期分析方法，具体研究了我国中西部地区标准 4 车道高速公路水泥混凝土路面在材料生产、路面施工、维修保养以及拆除回收 4 个阶段的能耗和排放，并给出了上述 4 个生命周期阶段能耗大小的排序，同时提出了减少水泥混凝土路面环境负荷的措施；台湾中华大学 Chiu Chui-Te 等^[34]采用生命周期清单分析方法（LCI）研究了在沥青路面大修工程中使用再生材料产生的环境影响，提出在减少沥青使用量的同时，降低沥青混合料生产和施工温度，是降低沥青路面环境负荷的有效措施；国立台湾大学 Hsiu-Ching Shih 等^[35]采用生命周期风险分析方法（LCRA），研究了炉底灰再生利用的环境和健康风险，明确了炉底灰用于道路建设对当地环境和施工人员健康的影响，为相关决策提供了依据；华南理工大学潘美萍等^[36]采用生命周期分析方法，探讨了路面生命周期碳排放量评价的方法和技术框架，界定了路面寿命周期碳排放的核算范围，明确了除使用阶段以外的各个生命周期阶段清单分析的具体内容。

与国外的路面生命周期分析相比，由于受制于我国生命周期分析方法研究的发展，目前国内仅完成了钢铁、水泥、铝、工程塑料、建筑涂料、陶瓷等六大类典型、量大、面广的代表性材料的生命周期研究，因此，路面生命周期分析研究数量较少，仅有的一些研究也均局限于水泥混凝土路面的生命周期分析研究方面，只有台湾地区的一些学者进行了沥青路面生命周期分析研究。

与国内目前沥青路面生命周期分析研究不对称的是，沥青路面是我国各等级公路，尤其是高速公路路面的主要形式，我国在沥青路面设计、施工和养护等方面已经积累了相当多的经验，在今后相当长的时期内，新建公路路面仍将以沥青路面为主。因此，在目前资源与环境问题日益严峻的背景下，有必要开展沥青路面生命周期节能减排量化分

析研究。

1.2.2 沥青路面能耗与排放量化分析体系研究

在沥青路面节能减排量化分析研究的基础上，从施工技术、项目管理以及制度规范三个方面出发，建立沥青路面节能减排量化分析评价体系也是目前国内外在道路节能减排量化分析研究方面的主要内容之一。目前，国内外已经进入实用阶段的路面节能减排（或生态道路）评价体系主要有美国华盛顿大学研究开发的 PaLATE 路面生命周期分析评价系统、美国威斯康星大学开发的 BE²ST 道路节能减排评价系统以及美国研究开发的 Greenroads 评价系统。

1. PaLATE 路面生命周期分析评价系统

路面环境与经济效益生命周期分析评价系统 PaLATE 由美国加州大学伯克利分校 Arpad Horvath 教授领导的科研小组于 2003 年开发而成，该系统采用美国本地的数据，用以分析评价路面建设工程的环境影响和经济成本^[37]。

PaLATE 作为一个典型的生命周期分析评价程序，严格按照 ISO 14040 标准确定的生命周期分析步骤，采用综合性生命周期分析方法，考虑了路面建设的材料生产阶段、施工阶段、养护维修阶段以及使用寿命终止阶段的能源消耗和气体排放。PaLATE 路面生命周期分析评价系统的基本框架如图 1.1 所示。

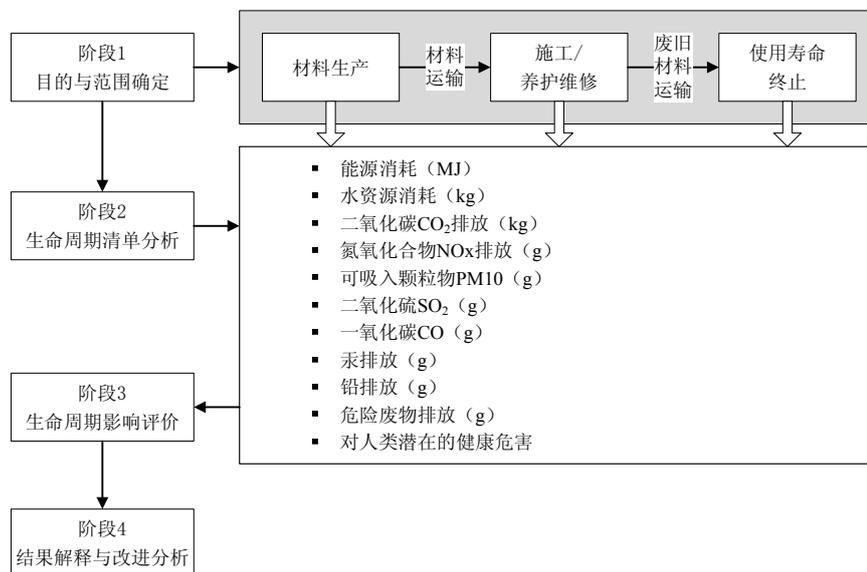


图 1.1 PaLATE 分析评价系统框架

由于 PaLATE 路面生命周期分析评价系统以生命周期分析评价为核心，为了便于数据的收集和分析，PaLATE 系统采用 Excel 电子表格，按照图 1.1 所示的系统框架，建立了各个阶段模块的工作表，并在工作表中编辑数学计算公式，用户仅需要按照程序使

用说明收集并输入各个阶段所要求的输入数据（图 1.2），就能很方便快捷的得到最终的环境影响和经济成本分析结果，并可以在 Excel 软件得到分析结果的图形化显示（图 1.3）。

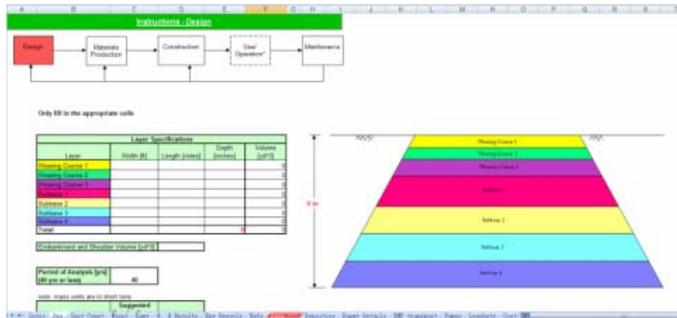


图 1.2 PaLATE 系统输入数据示例

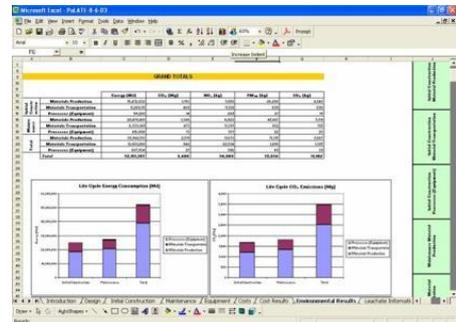


图 1.3 PaLATE 系统图形化显示

PaLATE 系统严格遵循生命周期分析方法的基本框架，采用电子表格辅助数据的收集和分析处理，具有很好的开放性，便于使用者根据具体情况对分析程序进行修改、编辑，同时人机交互的软件环境保证了该系统的简便、实用性。作为早期研发的分析评价系统，PaLATE 系统仍然存在一定的缺陷：

(1) PaLATE 系统使用的数据比较陈旧^[38]，仍然采用美国商务部 1992 年度经济投入产出表作为输入-输出生命周期分析的数据源，有可能导致分析结果不准确。

(2) PaLATE 系统并没有考虑完整的路面生命周期，分析程序中尚不包括道路使用阶段。虽然开发人员建议采用其他软件（如美国环境保护署的 MOBILE 6.2 软件）弥补这一缺陷，但是 PaLATE 系统中并没有专门计算这一阶段的模块。

(3) PaLATE 系统只能进行环境与经济分析计算，由于没有考虑评价指标的权重，不能很好的体现不同分析评价结果的重要程度，也无法得到更为综合的分析评价结果。

尽管存在一定的缺陷，但是 PaLATE 系统仍然是目前世界上为数不多的直接用于路面生命周期分析的程序软件，其开放性、简便性的特点有利于该系统的推广应用。

2. BE²ST 道路建设环境与生态可持续性评价系统

美国威斯康星大学再生资源研究中心 Lee Jincheol 等针对美国公路交通基础设施建设过程产生的大量资源、能源消耗以及温室气体排放问题，以生命周期分析方法为核心，结合主客观赋权评价方法，开发了针对公路建设项目的道路建设环境与生态可持续评价系统 BE²ST (Building Environmentally and Economically Sustainable Transportation Infrastructure-Highways)。目前，该评价系统已在威斯康星州推广应用^[3]。

BE²ST 评价系统以道路工程建设项目为评价对象，根据可持续性发展的 4R 原则

(Reduce-Recover-Reuse-Recycle, 即减量化、回收化、再使用、再循环)和可持续发展国际研究中心提出的贝拉吉奥原则^[39],在综合考虑施工方、管理方及使用方等各方面要求的基础上,选择健康安全、温室气体排放、能源消耗、水资源消耗、材料循环利用以及生命周期成本作为评价指标,并采用会议讨论的方式确定了各个评价指标的标准值(表 1.1)。

表 1.1 BE²ST 评价系统评价指标及标准

评价指标	健康安全	温室气体排放	能源消耗	水资源消耗	材料循环利用	生命周期成本
评价标准	有害材料用量减少 10%	排放量减少 24%	能耗降低 10%	水资源消耗降低 10%	材料循环利用率 20%	生命周期成本减少 10%

BE²ST 评价系统采用了加权评价方法,但是各个评价指标的权重相同,满足该指标要求即可得到 2 分,不满足则不得分,根据项目评价分数的高低比较不同施工技术对环境的影响,从而选择可持续性最佳的技术方案。BE²ST 评价系统的评价流程如图 1.4 所示。

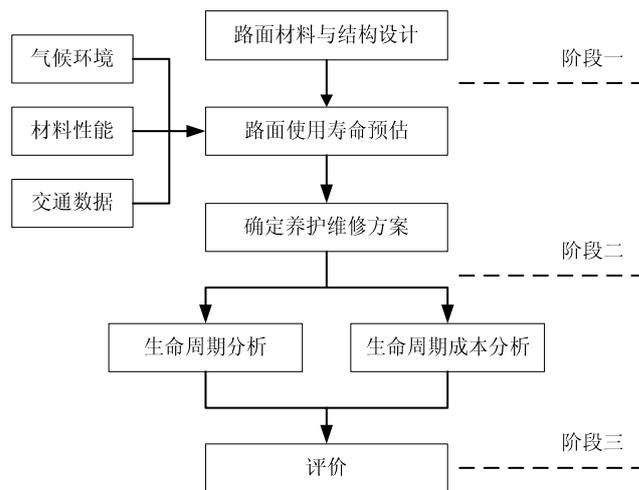


图 1.4 BE²ST 评价系统分析评价流程

BE²ST 评价系统的评价流程可以分为三个主要阶段:

(1) 路面设计阶段。BE²ST 评价系统要求从环境可持续发展的角度,选择并设计包括新材料及再生材料在内的两种以上的路面材料和结构,从而对不同材料和结构的设计方案进行分析比较。

(2) 路面性能预估阶段。BE²ST 评价系统采用力学-经验路面设计指南(M-EPDG)中的方法预估国际平整度指数 IRI,根据美国联邦公路管路局(FHWA)推荐的 IRI 标准确定不同路面设计方案的使用寿命,结合分析年限,确定在分析年限内需要进行的养护维修方案。

(3) 分析评价阶段。BE²ST 评价系统不仅关注评价对象的环境影响，而且还注重评价对象经济成本的分析，从环境和经济两个方面对评价项目进行全面分析。在环境影响评价方面，BE²ST 评价系统采用 PaLATE 路面生命周期评价系统，以 50 年为分析期限量化评价对象的能耗和气体排放量，并计算有毒污染物排放及水资源消耗等环境指标数值。在经济成本分析方面，BE²ST 评价系统依据生命周期成本的理念，采用美国联邦公路管理局开发的 RealCost 分析软件，同样以 50 年为分析期限，量化分析道路建设费用、管理费用以及用户费用。根据环境影响和经济成本分析结果，并按照表 1.3 中的评价标准并采用加权评价方法，即可得到最终的评价结果。

BE²ST 评价系统采用主客观赋权评价方法可以实现公路建设项目环境与生态可持续性综合评价，但是 BE²ST 评价系统各个评价指标的权重相同，没有突出不同评价指标的重要性；且评价标准比较简单，仅仅给出了达到要求的限定标准，而没有给出不同等级的标准范围，一旦不同方案均通过标准要求，即最终得分相同，则难以进一步比较确定最优方案。

3. Greenroads 道路环境影响评价体系

2007 年美国华盛顿大学 Martina Soderlund 的硕士学位论文《可持续性道路设计-环境影响评价模型》^[40]从可持续发展的角度对道路环境影响评价进行了系统研究，并建立了量化分析评价模型，该模型即为 Greenroads 道路环境影响评价体系的雏形。在此基础上，华盛顿大学的科研小组进行了进一步深入的研究，并于 2008 年与美国西图集团 (CH2M HILL Cos., Ltd) 合作，提出了 Greenroads 评价指标体系。2009 年，Greenroads 评价体系推出了第一个用于指导该评价体系工作的评估手册 Greenroads Manual V0.95，通过西图集团以及其他行业团体和咨询人员的帮助，Greenroads 研究小组积累了丰富的数据，并开展了示范工程研究，Greenroads 评价体系不断完善，目前其评估手册已经发展到了 V1.5 版，而且仍处于不断的更新完善之中。

Greenroads 是一个用于评估道路工程项目的环境、经济和社会效益的非强制性第三方评估体系，有助于量化道路工程项目的可持续属性，主要用于：

- ① 定义有助于工程项目可持续性属性的评价指标；
- ② 提供道路工程项目可持续性量化评价方法；
- ③ 测量并跟踪可持续性评价指标随时间的变化情况；
- ④ 管理并改善道路项目的可持续性；
- ⑤ 鼓励有助于道路工程项目可持续性发展的新技术、新材料的推广应用；

⑥ 提供经济及技术激励机制确保道路工程项目的可持续发展。

Greenroads 的评价内容主要包括了用于道路设计、施工以及管理的各种可持续性措施的集合，Greenroads 评价系统将这些措施分为强制要求和可选要求两大类，分别提出强制要求和可选要求的评价内容以及评价指标^[41]，从上述两个方面对道路工程项目进行分级评价：

(1) 项目要求 (PRs)

通过 Greenroads 认证的道路工程项目至少应达到 11 项强制要求，这些强制要求称之为“项目要求”(Project Requirements)，Greenroads 评估系统的项目要求内容如表 1.2 所示。项目要求旨在从道路的规划、设计、施工和运营养护过程中，抓住最能反映工程项目可持续性本质的理念和措施，因此，工程项目如果要通过 Greenroads 系统认证，则需要满足全部的项目要求。

表 1.2 Greenroads 系统项目要求内容

序号	项目要求	内容
PR-1	环境审查程序	完成全面的环境审查
PR-2	生命周期成本分析 LCCA	对每一标段进行生命周期成本分析
PR-3	生命周期清单分析 LCI	汇总每一标段的生命周期清单分析结果
PR-4	质量控制计划	有承包商制定的正式的质量控制计划
PR-5	噪音控制计划	有施工过程产生噪音的预防控制计划
PR-6	废弃物管理计划	有拆建废弃物转运计划
PR-7	污染防治规划	有雨水污染防治规划和其他污染防治规划
PR-8	低影响开发 LID	完成低影响开发的可行性研究
PR-9	路面管理系统	有完善的路面管理系统
PR-10	现场养护维修计划	有道路的养护及维修计划
PR-11	教育推广	宣传项目的可持续发展特征及信息

实际上，Greenroads 系统的项目要求是根据美国联邦政府或者当地州政府的相关标准制定的，因此，绝大多数工程项目并不需要花费过多的精力就可以满足大部分的项目要求内容。Greenroads 的项目要求是通过认证必须达到的基本内容，因此，在实际操作过程中，项目要求只判断通过或未通过，而不评分。

(2) 可选积分 (VCs)

通过 Greenroads 系统的认证，除了要满足上述强制性的项目要求以外，还需要满足一定的可选要求，一般称之为“可选积分”(Volunteer Credits)。根据可选要求对可持续性的影响程度，每一个可选要求项目赋予不同的分数。目前，Greenroads 评估系统中总

共有 37 个可选要求项目，满分为 108 分。此外，Greenroads 评估系统还允许项目业主或其他管理部门根据实际情况，设置满分总计不超过 10 分的“自定义积分”（Custom Credits），从而能够保证该评估系统适用于不同的地区。

Greenroads 评估系统的可选积分项目涵盖的范围非常广，包括了环境与水资源污染控制、交通控制与安全措施、施工技术、材料及能源消耗控制以及路面技术等 5 大类 37 个分项，因此，满足所有可选积分项目要求是非常困难的。但是，这种包含范围极广的评估方法在使用过程中具有一定的优势：

① 具有足够多的可选积分项目以供选择，确保任何一个工程项目都能够选择到与之相适应的可选积分项目，并获得最低认证水平要求的分数；

② 评估内容多、范围广可以保证评估系统的应用范围较广，Greenroads 评估系统不仅可以用于投资较少、工程量较小的养护维修工程，也可以用于投资较多、工程量较大的大规模新建道路工程。

Greenroads 的评价采用了通过与否（项目要求）与得分评价（可选积分）相结合的方法，而且在得分评价中采用了加权的处理方式，根据环境可持续性的影响程度，不同评价项目的分数各不相同。根据上述评价方式，Greenroads 的评价结果采用了分级评价的形式，在通过项目要求的基础上，按照得分高低，将最终结果分为四个等级（表 1.3），并给与不同的认证标志（图 1.5）。

表 1.3 Greenroads 评价结果

等级	项目要求是否满足	可选积分分数	总分数比
通过	满足	32~42	30%~40%
银色认证	满足	43~53	40%~50%
金色认证	满足	54~63	50%~60%
绿色认证	满足	>64	>60%



图 1.5 Greenroads 认证标志

Greenroads 评价系统是目前道路工程领域综合程度较高、评价内容较广的道路环境影响综合认证分级体系，虽然 Greenroads 系统没有完全按照生命周期分析的框架，但是 Greenroads 系统渗透着生命周期分析的思想理念，评价内容包括了道路设计、施工、养

护等道路生命周期的各个阶段,也可以认为是生命周期分析方法与综合评价体系的有机结合。

Greenroads 系统作为一种认证分级体系,其评价内容及评价标准比较详细,评价流程比较清晰,并且 Greenroads 系统采用比较简单的方法计算确定工程项目的环境影响,综合评价结果结合了相关标准规范的基本要求和环境影响分析的特殊需要。因此,Greenroads 系统对于管理部门和项目单位而言都易于接受,在市场推广上比较受欢迎,目前 Greenroads 系统已经得到了一些地方道路管理部门的支持,并且已经开始了试点工程的验证和跟踪观测。

Greenroads 系统作为一种认证分级体系,对所有的环境影响指标进行加权评分是该系统的核心,这种以价值选择为基础的加权方法要求科学合理的确定权重以保证评价结果的客观、准确、公正。此外,与生命周期分析方法相比,这种综合性评价方法的评价过程并不十分透明,往往依赖于第三方机构开展,其他单位和公众难以再现其评价结果,加之对高评分的追求,这种评价方法也存在着诱发腐败的可能性。

除了上述三种典型的道路环境影响评价系统之外,国外也有一些道路环境影响评价研究中开发了适应于其研究内容的评价程序^[42, 43]。我国也在生命周期分析研究的基础上,参考国外生命周期分析系统,探讨了路面材料生命周期分析系统的开发,并进行了总体设计和详细的功能模块定义^[32, 44],但是还处于研究阶段,并没有进行实际应用。

总体而言,目前国内外道路环境影响评价系统不论其复杂程度、内容深度如何,大多以生命周期分析为基础或渗透着生命周期分析理念,但是相关的研究仍然相对较少,可供使用的评价系统更少,而且现有的道路环境影响评价系统均针对某一国家或地区的实际,并不具备通用性,难以直接借鉴用于我国道路环境影响分析。因此,分析国内外现有道路环境影响分析评价系统的优缺点,借鉴其设计开发理念,根据我国实际情况,开发适宜于我国沥青路面材料和技术水平的环境影响评价系统,有利于我国沥青路面节能减排思想理念及分析评价的推广和应用。

1.2.3 沥青路面节能减排量化分析与评价研究综述

从国内外沥青路面节能减排量化分析研究现状可以发现,国内外对沥青路面节能减排量化分析与评价已经开展了大量的研究,并取得了一些可以借鉴应用的研究成果。目前,国内外沥青路面节能减排量化分析研究主要呈现出如下特点:

1. 在理论方法方面,普遍采用生命周期分析方法

目前国内外沥青路面节能减排量化分析评价研究普遍采用生命周期分析作为理论基础和分析方法，所采用的生命周期分析类型也涵盖了基于流程的生命周期分析、输入输出生命周期分析和综合性生命周期分析三种常用的分析类型。虽然有些研究，如 Greenroads 评价系统，并没有明显的生命周期分析特征，但是生命周期理念及生命周期分析方法却贯穿始终。

2. 在研究对象方面，以水泥路面和沥青路面能耗及排放的对比分析为主

目前国内外沥青路面节能减排量化分析评价研究主要以不同路面能耗与排放的对比分析为主要研究对象，研究的路面类型则包括了水泥混凝土路面、沥青混凝土路面以及复合结构路面等多种路面形式。对比分析的评价指标以能源消耗、材料和资源消耗以及环境排放为主，其中，环境排放则不仅仅局限于 CO₂ 或温室气体排放，绝大多数研究同时考虑了多种有害气体、废弃物、重金属污染物等大气、水和土壤污染物，研究涉及的能耗与排放范围较广。

3. 在分析结论方面，提出了简单可行，具有实际指导意义的建议和对策

虽然不同研究采用的生命周期分析类型、数据来源、路面材料与结构、分析阶段划分等均存在差异，所得出的研究结论尚不具备可比性，甚至不同研究结果的结论，如 Horvath 等和 Stripple 的研究，还存在一定的矛盾冲突，但是，就单独每一项研究而言，均能够给出不同路面结构与材料的能耗与排放总量以及不同生命周期阶段能耗与排放的比例。尽管上述结论仅仅是简单的数值分析比较，但是大多数研究均能够以此为基础，给出相应的节能减排对策和建议。

4. 在发展趋势方面，逐渐向废旧料、再生、养护等多领域发展

近年来，沥青路面节能减排量化分析评价研究已不仅仅局限于不同路面的能耗与排放的对比分析，已有不少研究开始采用生命周期分析或者生命周期风险分析方法，研究高炉底灰等工业副产品、玻璃等废旧材料、路面再生材料以及道路养护等材料和技术的应用所产生的环境影响，并与常规的路面材料和技术进行对比，从环境影响的角度分析废旧再生材料以及道路养护技术的优势。这些研究不仅扩展了沥青路面节能减排量化分析评价研究的范围，而且提供了分析研究新问题的方法。

5. 在量化评价方面，进行了有益的探索，建立了评价系统

基于能耗与排放量化分析数据的综合评价也是目前沥青路面节能减排量化分析评价研究的主要内容之一。目前国内外均对此展开了相应的研究，不同研究均建立了评价的指标，并给出了评价的框架或者方法。虽然相关研究还存在着地域性突出、通用性差

以及评价方法不完善等缺陷，但是已经初步建立了沥青路面节能减排量化评价系统，有些评价系统，如 BE²ST，已经开始在小范围推广应用。

相对而言，沥青路面节能减排量化分析与评价研究尚属于一项较新的研究领域，在相关研究工作逐步深入并取得大量研究成果的同时，还需要清醒的认识到目前沥青路面节能减排量化分析与评价研究中依然存在着量化分析与评价相割裂、缺乏量化分析评价体系框架指导、考虑阶段不全面、数据选择不规范等缺陷：

1. 节能减排量化分析与评价相互割裂

目前大多数沥青路面节能减排量化分析与评价研究均只考虑了其中一方面，即仅进行了量化分析研究或仅进行了量化评价研究，而没有进行量化分析与评价综合研究，导致沥青路面节能减排量化分析与评价相互割裂。

虽然目前沥青路面节能减排量化分析研究普遍采用了生命周期分析方法，其中也包含了影响评价与结果解释的环节，但是该环节也仅仅是针对各阶段能耗与排放总量和比例的量化分析，并提出针对性的建议措施，而评价过程中需要的评价指标、指标权重以及评价标准和评价方法还需要进行系统的研究才能确定。因此，仅依靠量化分析的数值结果还无法进行综合评价，需要将量化分析与评价相结合，建立沥青路面节能减排量化分析与评价体系。

2. 尚未建立针对沥青路面的节能减排量化分析评价体系框架

生命周期分析是目前沥青路面节能减排量化分析与评价的理论基础和基本方法，但是生命周期是一种通用的分析方法，相关国际标准仅给出了该方法的主要组成部分和基本流程，并没有针对不同的研究领域给出具体的分析和处理方法。

而且，如前文所述，现有的沥青路面节能减排量化分析与评价研究是相互割裂的，如果将两者在生命周期分析的基础上进行有机结合，还需要合理的搭建量化分析和评价的桥梁，而现有的沥青路面节能减排量化分析与评价研究均没有对此进行系统的研究，因而也无法建立沥青路面节能减排量化分析评价体系的框架。

因此，需要以生命周期分析方法为基础，将量化分析与评价有机结合，明确沥青路面节能减排量化分析与评价的组成部分和基本流程等细节内容，构建适合于沥青路面的量化分析与评价体系框架，为沥青路面节能减排量化分析与评价的研究和应用提供指导。

3. 节能减排量化分析考虑的阶段尚不全面

由于沥青路面建设过程是材料和能源消耗以及环境排放相对集中的过程，因此，目

前绝大多数沥青路面节能减排量化分析研究均考虑了沥青路面建设阶段。与之相比，沥青路面运营使用过程中出现的能耗与排放问题并没有得到广泛的关注。

在沥青路面运营使用期间，由于环境因素和交通荷载的共同作用，沥青路面的使用性能会随时间逐渐衰减。为了保证沥青路面的使用性能，需要采取一定的养护维修措施。虽然养护维修措施的能耗与排放较小，但是由于其实施的次数较多，因而累积能耗与排放仍然不可忽视。

除此以外，由于路面使用性能的下降，势必导致行驶车辆速度的变化，从而引起车辆的油耗与排放发生变化。虽然行驶车辆的类型较多、车辆状况差别较大、车辆能耗与排放影响因素较多，但是考虑到车辆在行驶过程中产生的能耗与排放问题发生在路面运营和使用期内，而且车辆能耗与排放的变化与沥青路面使用性能的变化有着密切的关系，因此，从车辆能耗与排放和路面使用性能的交互关系出发，由于路面使用性能变化导致的车辆能耗与排放同样不能忽视。

4. 节能减排量化分析数据的选择尚不规范

数据是量化分析的根本，数据的可靠性和准确性是保证沥青路面节能减排量化分析结果科学合理的基础。目前国内外沥青路面节能减排量化分析与评价研究的数据来源较广，有本国的统计数据，也有地区和国际性组织的统计数据，还有政府机构和民间组织的统计数据。但是现有的相关研究都没有给出数据选择的基本原则，数据的选择和使用方面还比较混乱，甚至有些研究不加甄别的直接使用来源不明的数据，从而导致了现有相关研究的结论之间尚不具备可比性，甚至某些不同的研究结论之间还存在一定的矛盾冲突。

为此，有必要对沥青路面节能减排量化分析与评价研究中的数据来源进行仔细甄别，确定科学合理的数据来源选择和使用原则，对数据的收集、选择和使用进行规范化操作，至少应保证在本国或本地区的小范围内具有一定的通用性，从而保证分析与评价结果的科学性、准确性和通用性，便于不同研究的比较，更有利于采用研究结论指导实际。

针对目前沥青路面节能减排量化分析与评价研究取得的成果以及存在的缺陷，本文重点从以下几方面开展研究：

(1) 将沥青路面节能减排量化分析与评价有机结合，构建沥青路面节能减排量化分析与评价体系的基本框架，确定分析方法、组成部分、分析评价流程、数据选择原则和计算方法等指导性内容，为沥青路面节能减排量化分析与评价研究奠定理论基础。

(2) 全面考虑沥青路面生命周期能耗与排放的各个阶段，分别研究沥青路面建设阶段和运营使用阶段的能耗与排放量化分析方法，探讨沥青路面使用性能与车辆行驶的交互关系及其能耗与排放的计算方法，为沥青路面节能减排量化分析与评价提供可靠的数据支持。

(3) 探讨沥青路面节能减排量化分析与量化评价的合理结合方式，在量化分析的基础上，合理选择评价指标、评价标准、确定指标权重，采取综合评价方法建立沥青路面节能减排量化分析评价体系，为沥青路面节能减排量化分析与评价提供有效的工具。

1.3 主要研究内容及技术路线

1.3.1 主要研究内容

本文针对沥青路面建设过程中存在的高能耗、高排放问题，以“全面考虑沥青路面生命周期、科学准确量化分析评价”为原则，以能耗与排放的科学分析为基础依据，节能减排技术的应用效果评价为考核措施，结合我国沥青路面建设与运营养护的实际状况，深入开展沥青路面节能减排量化分析与评价体系研究，主要研究内容如下：

1. 沥青路面能源消耗与气体排放调查

目前，我国交通行业节能减排的工作重点在于交通运输工具方面，大规模沥青路面建设导致的能源消耗与气体排放还没有得到应有的重视。

本文采用文献调查与现场调查相结合的方法，依据生命周期理念，调查国内外在沥青混合料生产、沥青路面施工以及沥青路面营运过程中的能源消耗与气体排放现状，分析能耗与排放的关键环节和影响因素，为沥青路面节能减排量化分析与评价方法提供基础。同时，进一步证明沥青路面建设带来的能源消耗与气体排放问题的严重性，提高道路决策、管理、建设部门以及公众对该问题的重视程度，为沥青路面能耗与排放量化分析提供事实依据。

2. 沥青路面节能减排量化分析评价体系框架

目前沥青路面节能减排量化分析与评价研究处于相互割裂的状态，还没有建立沥青路面节能减排量化分析评价体系的基本框架，实际应用中还缺乏明确、规范的方法和流程指导。

本文以生命周期分析方法为基础，探讨生命周期分析方法用于沥青路面能耗与排放量化分析中的可行性，并根据沥青路面建设流程，选择合适的生命周期分析方法，建立沥青路面生命周期节能减排量化分析框架，确定其组成部分、计算方法等通用性内容，

为沥青路面节能减排量化分析与评价提供理论依据和科学指导。

3. 沥青路面能耗与排放量化分析研究

目前,对于沥青路面的能耗与排放以及节能减排技术应用的研究多采用定性分析方法,难以准确分析和衡量沥青路面节能减排技术的使用效果。定量分析沥青路面的能耗和气体排放有助于明确建设过程中能耗和气体排放的关键环节,有利于为沥青路面节能减排技术的研发和推广应用提供科学的数据支持。

本文根据沥青路面建设阶段和使用阶段能耗与排放调查,明确能耗与排放的来源及构成,探讨沥青路面使用性能-车辆行驶状况-能耗与排放的交互关系,研究并提出建设阶段和使用阶段能耗与排放量化计算方法及分析模型。

4. 沥青路面节能减排综合量化评价方法研究

构建以节能减排为主要特征的低碳环保型沥青路面建设模式,需要依据从源头控制能耗、降低排放的思路,体现沥青路面建设节能减排全过程控制的原则,制定具有科学性、约束性和激励性的节能减排量化评价体系,从而实现节能减排的指标化和科学化管理,为节能减排的效果提供科学可靠的评价。

本文在沥青路面能耗与排放量化分析研究的基础上,以节能减排评价为核心,合理选择评价指标,科学确定指标权重,建立沥青路面节能减排综合量化评价方法,为沥青路面节能减排技术优选、节能减排技术实施效果的评价提供科学合理的方法。

5. 沥青路面节能减排量化分析系统研究

目前,国内外已有用于生命周期分析的通用软件,但是这些通用软件的针对性不强。同时,考虑到生命周期分析方法在沥青路面建设工程中应用很少,基于生命周期的沥青路面节能减排量化评价体系在推广应用中可能存在一定的困难。

为此,本文结合沥青路面节能减排量化分析与评价体系研究,针对沥青路面节能减排分析与评价的特点,采用简便易用的软件平台,开发沥青路面生命周期节能减排量化分析评价系统,为沥青路面节能减排量化分析评价提供有效的工具。

1.3.2 技术路线

本文以沥青路面节能减排量化分析为核心,研究能耗与排放量化分析方法,选择节能减排量化分析评价指标,提出节能减排综合评价方法,开发沥青路面节能减排量化评价系统,最终建立沥青路面节能减排量化分析评价体系,其研究技术路线如图 1.6 所示。

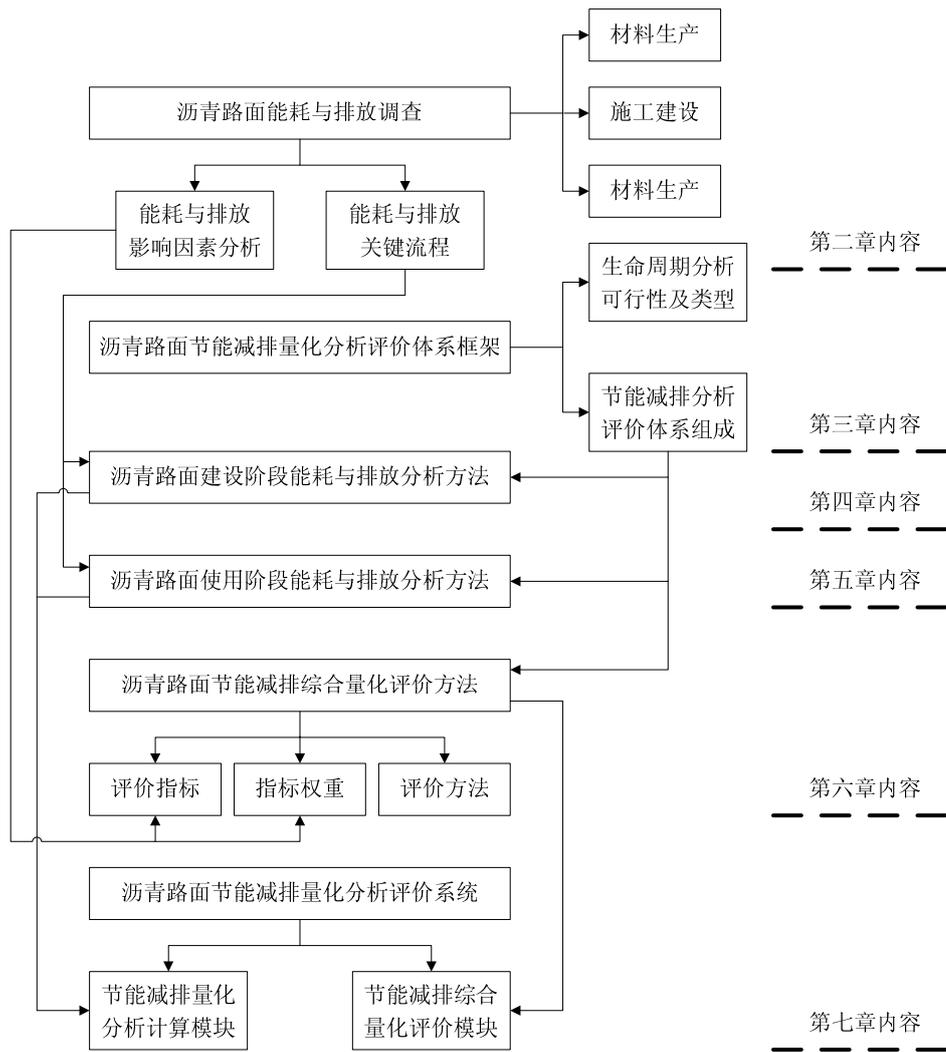


图 1.6 技术路线

第二章 沥青路面能源消耗与环境排放影响因素研究

交通行业是能源消耗和环境排放的重点行业，目前交通行业节能减排工作的重点在于运输车辆燃油消耗、尾气排放控制以及清洁能源的开发使用方面，大规模沥青路面建设带来的能耗和环境排放问题并没有得到足够的重视。事实上，作为能源密集型产业，沥青路面建设工程产生的资源和能耗消耗高，环境污染排放重的问题不容忽视。

为此，本章采用文献调查与现场调查相结合的方法，从生命周期的视角出发，调查沥青路面材料生产、建设以及运营过程的主要工艺流程、技术设备、能源消耗和气体排放的类别及数量，分析沥青路面材料生产、建设以及运营过程能耗与排放的关键环节和影响因素，建立能耗与排放流程，并为沥青路面节能减排量化分析研究奠定基础。

2.1 沥青混合料生产过程的能耗与环境排放调查

沥青混合料生产过程是沥青路面生命周期内能耗与排放比较集中的阶段，根据日本的相关调查^[45]，沥青混合料拌和过程中的能耗约占沥青路面建设工程总能耗的 44.1%。如按照我国 2011 年沥青混合料年产量 2~3 亿吨的统计数据计算，沥青混合料生产过程每年消耗的燃料折合为 0 号柴油大约为 120~180 万吨，同时产生 383.1~574.7 万吨温室气体（主要为 CO₂）排放^[46]。针对沥青混合料生产过程能耗与排放相对集中的现实状况，本文从沥青混合料生产设备、生产工艺、能源消耗类别及排放来源方面对沥青混合料生产过程的能耗与气体排放进行系统调查。

2.1.1 沥青混合料生产设备及其工艺流程

沥青混合料的生产是将一定级配的矿料与沥青按照规定的比例在规定的温度下均匀拌和而制成混合料的过程，在沥青混合料生产过程中，沥青混合料拌和设备是第一关键设备，其性能直接影响沥青混合料的质量，并与生产过程的能耗与排放直接相关。按照生产工艺流程，沥青混合料拌和设备可以分为间歇强制式与连续滚筒式两大类，两种拌和设备及其工艺流程简图如图 2.1 所示。

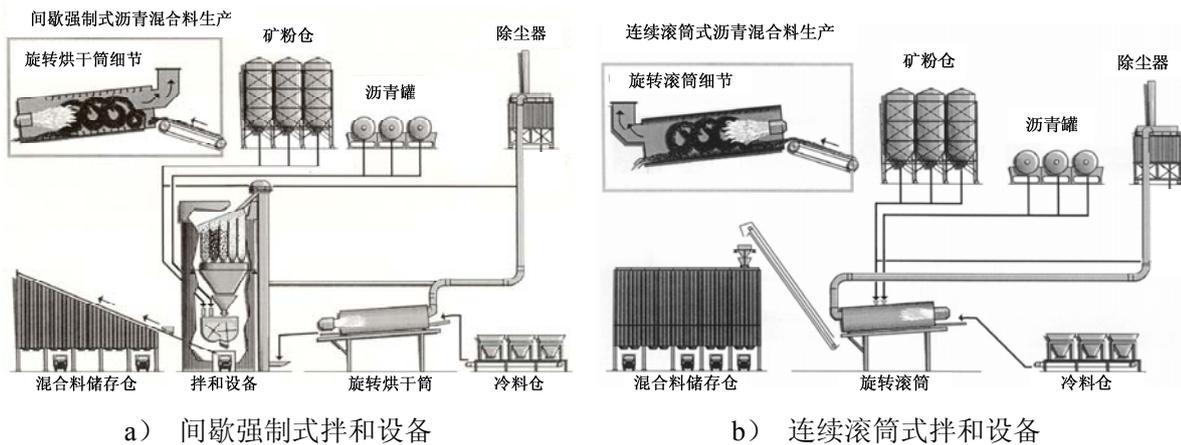


图 2.1 沥青混合料拌和设备简图

间歇强制式拌和设备采用分批次计量、搅拌的生产模式，即将配比好的各种矿料在烘干筒烘干、加热后，经过二次筛分、储存，每种矿料分别累计计量后，与单独计量的矿粉和热沥青，按照预先设定的顺序和配比，分别投入搅拌器进行强制搅拌，分批卸出拌和好的成品料后，接着进行下一个循环，形成周而复始的循环作业过程，其基本工艺流程如图 2.1 a 所示。

连续滚筒式拌和设备采用动态计量、持续搅拌的生产模式，即将动态计量级配的矿料和矿粉在滚筒内烘干加热，并与动态计量连续喷洒的热沥青在同一滚筒内连续拌和，形成持续的作业过程，其基本工艺流程如图 2.1 b 所示。

由于生产工艺流程的差别，上述两种拌和设备均有一定的优缺点，其适用范围也不尽相同，具体的分析比较如表 2.1 所示。

表 2.1 间歇强制式与连续滚筒式拌和设备比较

设备类型	间歇强制式	连续滚筒式
计量方式	分批计量	连续计量
材料要求	可用于料源复杂、不规范的情况	要求料源及矿料质量稳定
生产灵活性	配合比可灵活调整	配合比严格限制，难以随时调整
混合料质量	配合比控制准确，混合料质量好	热利用率较低，混合料含水量较大
再生料生产	需要对设备进行改造	可直接用于再生混合料生产
工艺与设备	工艺流程长、设备复杂	工艺及设备简单
能耗与排放	能耗较大，排放多	能耗少，对空气污染小

由于不同国家道路建设规模、材料质量以及装备技术等方面的差异，上述两种设备的使用状况略有差别。再生沥青混合料的使用在欧美等发达国家已经相当普遍，适应于再生沥青混合料生产的连续滚筒式拌和设备也随之逐渐增多。以美国为例^[47]，截至 1996 年，美国大约有 3600 个沥青混合料拌和厂，其中有 2300 个采用间歇式拌和设备，1300

个采用连续滚筒式拌和设备，两种拌和设备的沥青混合料产量则基本相当。2000 年前后，美国 90% 的新建或已建沥青混合料拌和厂采用了连续滚筒式拌和设备，间歇式拌和设备的市场占有率仅有 10%。

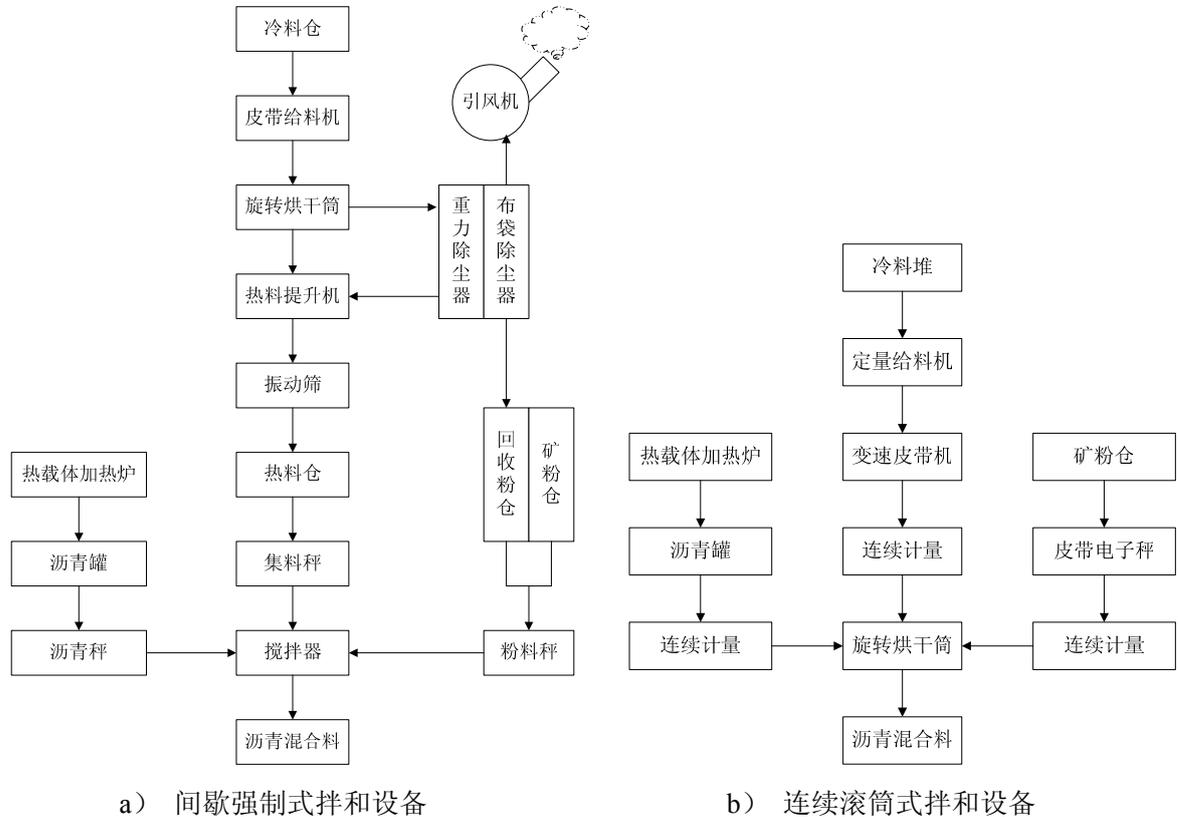


图 2.2 沥青混合料拌和设备工艺流程

目前，我国沥青路面建设使用的砂石料供应渠道较多且不规范，间歇式拌和设备因有二次筛分装置，并且各种材料在与热沥青拌和之前分别称量，矿料的适应性更强，沥青混合料生产质量有保证。因此，我国现行《沥青路面施工技术规范》（JTG F40-2004）明确规定^[48]：“高速公路和一级公路宜采用间歇式拌和机拌和，当料源或质量不稳定时，不得采用连续式拌和机”。在这种情况下，目前我国沥青混合料生产仍然以间歇式拌和设备为主。

不过，随着国内再生沥青混合料使用量的逐渐增大、连续滚筒式拌和设备的改进更新以及近年来新型连续滚筒式拌和设备在使用中的良好表现，广东省已经率先解除了连续滚筒式拌和设备用于高速公路沥青混合料生产的禁令，并在广佛高速大修以及其他新建高速公路建设工程中推广应用连续滚筒式拌和设备^[49]，国内兰亭高科等一些大型设备生产商也已经开始研发、生产连续滚筒式拌和设备。因此可以预见，随着我国再生混合料使用逐渐普遍，连续滚筒式拌和设备的优势将日益凸显，其应用规模也势必随之增大。

综上所述，目前对于沥青混合料的生产，欧美等发达国家多以连续滚筒式拌和设备为主，我国则呈现出“间歇式拌和设备为主、连续滚筒式拌和设备逐渐发展”的局面。针对国内外沥青混合料拌和设备的发展趋势，在沥青混合料生产过程的能耗与排放量量化分析过程中，有必要分别针对上述两种不同的拌和工艺进行具体分析。

2.1.2 沥青混合料生产过程能耗类别与排放来源

1. 沥青混合料生产过程能源消耗调查

根据本文对沥青混合料生产设备及工艺流程的调查，沥青混合料拌和过程中的能耗主要源于加热烘干系统的燃料消耗以及电气设备的电力消耗，其中加热烘干系统的燃料消耗约占沥青混合料拌和站所有燃料消耗量的 60%，而电力消耗约占其总能耗的 12%^[50]。

沥青混合料拌和设备加热烘干系统所使用的燃料类型主要为柴油、重油、渣油、混合燃料油、煤粉以及可燃性气体等。由于不同国家和地区的能源消费构成差异，沥青混合料拌和设备燃料使用情况也有所不同。据相关调查统计，美国大多数沥青混合料拌和设备均可以同时使用燃料油或天然气作为燃料，其中采用天然气为燃料的拌和设备生产的沥青混合料约占美国全年沥青混合料总产量的 70%~90%^[47]。目前我国沥青混合料拌和设备依然以柴油或重油作为主要的燃料，近年来也有一些拌和设备采用煤粉或煤转气作为燃料，但是其使用范围相对较小。

本文调查发现，影响沥青混合料拌和设备燃料消耗率的因素主要有：燃料、设备状况、设备类型、原材料含水量以及出料温度，其具体的影响作用如表 2.2 所示。虽然影响因素较多，但是根据本文调查结果，如按照我国交通行业标准《强制间歇式沥青混合料搅拌设备》(JTT270-2002)对燃料消耗率的相关规定^[51]，目前国内沥青混合料拌和设备的燃料消耗率（以柴油消耗表示）普遍集中在 5.5~8.0kg/t 范围内，按照上述标准规定的柴油发热值 46055kJ/kg 计算，则沥青混合料单位产量的能耗（源于液体燃料）为 253.3~368.4MJ/t。

表 2.2 沥青混合料拌和设备能耗影响因素

影响因素	影响作用
燃料	● 燃料质量好，热值高有利于降低燃料消耗率
设备状况	<ul style="list-style-type: none"> ● 排烟温度每降低 4℃，燃油消耗可降低 4%^[52] ● 低压雾化燃烧器比压力雾化方式可节约燃油 1kg/t^[52] ● 烘干筒、沥青罐等采取保温措施能明显减少燃料消耗
设备类型	● 连续滚筒式拌和设备比间歇强制式拌和设备能耗小

影响因素	影响作用
原材料含水量	● 矿料含水量增加 1%，燃油消耗率增加超过 10% ^[53]
温度控制	● 拌和温度超过规定温度 15~20℃，多消耗 4%~5%的燃料 ^[52] ● 出料温度升高 10℃，燃油消耗率增加 6% ^[54]

电气设备是沥青混合料生产过程中的主要设备之一，电力消耗也是沥青混合料生产过程的主要能耗。沥青混合料拌和设备中所有电气设备的额定功率总和为装机功率，通过搜集不同拌和设备的装机功率，可以初步了解沥青混合料拌和设备的电力消耗情况。本文搜集得到了国内目前常用的国产和进口沥青混合料拌和设备的装机功率等技术参数，根据其装机功率与额定生产率，可以计算出沥青混合料拌和设备生产单位质量的沥青混合料所消耗的电力，如表 2.3 所示。

表 2.3 沥青混合料拌和设备装机功率参数

设备型号	装机功率 kw	额定生产率 t/h	能耗率 kw·h/t	设备型号	装机功率 kw	额定生产率 t/h	能耗率 kw·h/t
日工 NBD 160ABZ	500	160	3.13	中交西筑 J2000	420	120~160	2.63~3.50
日工 NBD 240ABZ	600	240	2.50	中交西筑 J3000	700	200~240	2.92~3.50
日工 NBD 320ABZ	750	320	2.34	中交西筑 J4000	845	280~320	2.64~3.02
德基 DG5000	940	380	2.47	中交西筑 J5000	1003	360~400	2.51~2.79
三一重工 LB2000	465	160	2.91	南方路机 LB2000	510	160	3.19
三一重工 LB3000	650	240	2.71	南方路机 LB3000	685	240	2.85
三一重工 LB4000	750	320	2.34	南方路机 LB4000	865	320	2.70

表 2.3 的计算结果表明，沥青混合料拌和设备的电力消耗受装机功率和额定生产率的双重影响，不能简单的认为装机功率高，则单位产量的电力消耗量大。根据调查分析结果，由于设备型号的差异，沥青混合料拌和设备的电力消耗量大约为 2~3.5kw·h/t，电力的能耗按照 1kw·h 等效热值为 3.6MJ 计算，则沥青混合料单位产量的能耗（源于电力消耗）为 7.2~12.6MJ/t。

2. 沥青混合料生产过程环境排放调查

沥青混合料生产过程的大气污染类型主要有颗粒性物质 PM、CO₂、NO_x、SO_x 等燃烧产物、CO 以及少量的挥发性有机化合物 VOC、甲烷 CH₄ 和有害空气污染物 HAP

等。影响沥青混合料生产过程环境排放的关键环节集中于材料输送和沥青混合料拌和两个阶段。

(1) 材料输送阶段的环境排放

可吸入颗粒物 PM_{10} 是材料输送阶段的主要环境排放,该阶段的 PM_{10} 排放约占整个沥青混合料生产过程 PM_{10} 排放量的 19%^[55]。该阶段的 PM_{10} 排放主要源于料堆以及装载机将矿料由料堆输送至冷料仓的转运过程,其排放量的大小受温度、风速、降水等环境条件的影响。当空气干燥、温度较高、风速较大时, PM_{10} 排放量将会显著增加。相对与矿质集料而言,用于再生的废旧路面材料由于表层有旧沥青裹覆,因而并不会造成显著的 PM_{10} 排放问题(图 2.3)。



a) 风速较大时料堆 PM_{10} 排放量大

b) 再生料堆 PM_{10} 排放量小

图 2.3 不同条件下矿料输送阶段 PM_{10} 排放量对比

矿料的性质和含水量是影响材料输送阶段 PM_{10} 排放的主要因素,一般情况下,矿料的含水量大约为 3%~7%,如果增加矿料的含水量可以明显降低 PM_{10} 排放。但是,根据本文对沥青混合料拌和过程能耗的调查分析,提高含水量会导致能耗的显著增大。因此,提高矿料含水量以减小 PM_{10} 排放是一种得不偿失的方法。目前,采取拌和站场地硬化、及时洒水等方法有助于减小材料输送阶段的 PM_{10} 排放。

(2) 拌和过程的环境排放

沥青混合料拌和过程的环境排放一般可以分为源于燃料燃烧产生的燃烧排放以及源于其他工艺流程的非燃烧排放两大类。

燃烧排放: 燃烧排放主要由燃料完全燃烧和不完全燃烧产生的各种气态排放物构成,其中燃料完全燃烧产物主要包括氮氧化物 NO_x 、硫氧化物 SO_x 以及二氧化碳 CO_2 和水蒸气等,而燃料与空气未能充分混合而导致的不完全燃烧产物则主要有一氧化碳 CO 、挥发性有机化合物 VOC (包括苯、甲苯及二甲苯) 以及其它有机颗粒性物质。

燃烧排放的组成以及排放量与燃料的类型和燃烧方式等影响因素有关,例如,采用含硫量较高的燃料,则会导致燃烧排放中硫氧化合物的含量增加;而燃料燃烧不彻底,

则会导致不完全燃烧产物明显增加。在沥青混合料生产过程中，烘干设备通常是燃烧排放的主要来源。

非燃烧排放：非燃烧排放主要由沥青混合料组成材料在转运、加热过程中产生的颗粒性物质以及各种有机化合物组成，其中颗粒性物质主要来自于矿料的 PM_{10} ，有机化合物则主要包括挥发性有机化合物 VOC、多环芳烃 PAH 以及来源于沥青挥发性馏分的有害有机化合物等。

PM_{10} 排在沥青混合料拌和过程中仍然存在，直到矿料与沥青拌和后，由于矿料表面有沥青裹覆， PM_{10} 排放才会明显降低。由于间歇强制式拌和设备与连续滚筒式拌和设备的生产工艺有所不同，因此，沥青混合料拌和过程中的 PM_{10} 排放也各有特点。

对于间歇强制式拌和设备，从矿料烘干至与沥青拌和，还需要经过热料筛分、热料仓存储、称重器称量以及搅拌锅搅拌几个环节。由于烘干后矿料的含水量降低，而且烘干后材料的转运环节增多，由此会产生较多的 PM_{10} 排放，尤其是在不采取除尘措施的情况下， PM_{10} 排放将会明显增多。

对于连续滚筒式拌和设备，矿料烘干以及矿料与沥青拌和都是在旋转滚筒内完成的，没有其他与环境直接接触的中间环节。因此，旋转滚筒，尤其是旋转滚筒中的矿料烘干部分，是连续滚筒式拌和设备 PM_{10} 排放的主要来源。

除颗粒性物质外，各种有机化合物排放问题也不能忽视。沥青混合料拌和过程中通常需要将沥青胶结料加热到一定的温度，此时，沥青胶结料受热挥发，生成气态的有机化合物，当温度降低时，会冷凝形成液体气溶胶，并在混合料装载、运输及临时贮存的过程中以逸散的形式直接排放到大气中，造成比较严重的有害空气污染物 HAP 排放(图 2.4)。这种有机气溶胶的数量在很大程度上依赖于沥青胶结料和矿质集料进入搅拌设备时的温度，当生产再生沥青混合料，尤其是旧路面材料在拌和前没有进行预热的情况下，其排放将会明显增加。



图 2.4 沥青混合料装载过程环境排放

近年来，橡胶沥青在道路工程中的应用逐渐增多，陕西省已经铺筑了多条橡胶沥青混合料路面。制备橡胶沥青过程中，橡胶粉（或橡胶颗粒）需要在一定温度下与沥青混合均匀，在该过程中，沥青和橡胶粉（或橡胶颗粒）受热均会产生大量的挥发性有机化合物 VOC，据相关研究，其排放量为橡胶沥青掺量（内掺）和混合温度的函数^[56]。

根据沥青混合料生产过程排放调查结果，并结合沥青混合料生产设备及工艺流程调查，本文总结出间歇强制式与连续滚筒式拌和设备在沥青混合料生产过程中的环境排放流程图（图 2.5），其中 G 表示气态污染物排放，PM 表示可吸入颗粒物排放。以图中的主要工艺环节及排放类别为基础，收集相关数据，从而为沥青混合料生产过程环境排放的量化分析提供依据。

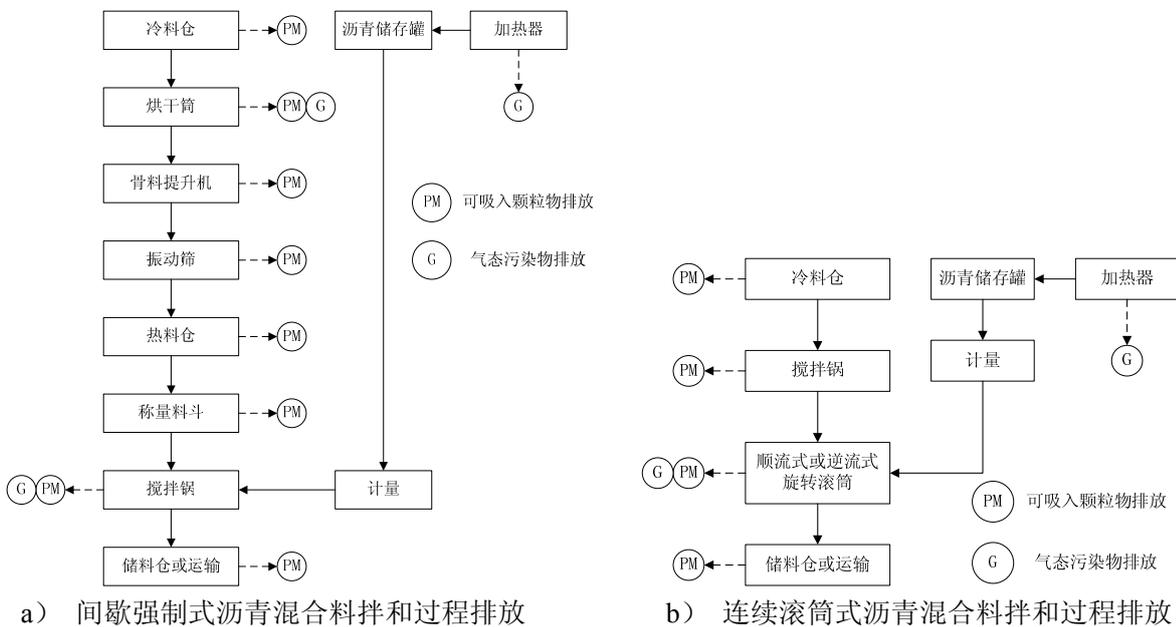


图 2.5 沥青混合料生产过程环境排放流程图

2.2 沥青路面建设过程的能耗与环境排放调查

沥青路面的建设过程包括了沥青混合料的运输、摊铺以及碾压等施工工艺流程，在目前普遍使用机械化施工的情况下，沥青路面建设过程的能源消耗主要表现为各种机械设备的液体燃料消耗，而环境排放则主要来源于相应的燃料消耗以及机械设备运转。

2.2.1 沥青路面施工机械设备及工艺流程

按照施工流程，沥青路面施工机械可以分为运输机械、摊铺机械以及压实机械三大类。本文结合施工流程，调查目前现有沥青路面施工机械类型及其能源消耗与环境排放的构成和影响因素，为沥青路面建设过程能耗与排放量化分析提供基础。

1. 沥青混合料运输机械设备

沥青混合料运输过程包括“等待装料→运输→卸载→空回”四个主要环节，为了与摊铺机配合，主要采用自卸汽车运输。目前国内自卸汽车种类繁多，载质量从 4t 到 20t 不等，我国现行《公路工程机械台班费用定额》（JTG/T B06-03-2007）根据自卸汽车的载质量（t），将其分为九大类，并给出了部分类别的代表车型^[57]（表 2.4）。

表 2.4 自卸汽车分类代表车型

分类	5 以内	6 以内	8 以内	10 以内	12 以内	15 以内	20 以内
代表车型	CA340	CA340X CQ340X	QD351	QD361	T138 SX360	SH361 T815	BJ374

在沥青混合料运输过程中，为了减少运输车辆在摊铺机前频繁换车卸料的情况，目前多采用载重量在 15t 左右的自卸汽车，符合定额中“15 以内”的自卸汽车类型，可以以此类代表车型为基础，分析沥青混合料运输过程的能耗与排放。

2. 沥青混合料路面铺筑机械设备

沥青混合料铺筑过程包括“清扫整理下承层→机械摊铺沥青混合料→碾压→初期养护”四个主要环节，其中涉及的机械设备包括沥青混合料摊铺机和压路机两大类。

（1）沥青混合料摊铺机械

沥青混合料摊铺机主要用于将拌和好的沥青混合料按照一定的技术要求（厚度和横截面形状）均匀的摊铺在已整好的基层上，并给以初步捣实和整平。沥青混合料摊铺机的类型较多，按照行走装置可以分为轮胎式和履带式两类，其中履带式摊铺机具有接地面积大、对地面的单位压力小、牵引力大、能充分发挥其动力特性、对路基的平整度不敏感等优点，目前在沥青路面摊铺工程中，90%以上采用履带式沥青混合料摊铺机。

目前国内履带式沥青混合料摊铺机种类繁多，我国现行《公路工程机械台班费用定额》（JTG/T B06-03-2007）根据摊铺机的最大摊铺宽度（m），将其分为四类，并给出了各个类别的代表型号^[57]（表 2.5）。

在高速公路沥青路面铺筑过程中，沥青混合料摊铺机的选择主要与其生产能力、摊铺速度和摊铺宽度有关，并且需要与沥青混合料拌和设备的生产能力相匹配（表 2.5）。一般情况下，沥青混合料摊铺机的生产能力宜大于拌和设备生产能力的 20%~30%^[58]，摊铺速度一般为 2~6m/min^[48]，多采用两台以上摊铺机进行联合摊铺，摊铺宽度一般为 6~8m^[59]。

为了保证沥青路面摊铺质量，国内目前多使用国际知名品牌的摊铺机，如沃尔沃

ABG、福格勒 VÖGELE 和戴纳派克 Dynapac 等。针对我国沥青混合料摊铺施工现状以及摊铺机械使用中的相关规定，目前国内在沥青路面摊铺过程中，使用量较多的沥青混合料摊铺机基本属于定额中“12.5m 以内”类型。

表 2.5 沥青混合料摊铺机分类代表型号

摊铺设备摊铺宽度 (m)	摊铺设备代表型号	拌和设备生产能力 (t/h)
4.5m 以内 (不带自动找平)	LT-6A	30 以内
4.5m 以内 (带自动找平)	2LTZ45	60 以内
6.0m 以内	S1500、S1502	120 以内
9.0 (8.5) m 以内	S1700	160 以内
12.5m 以内	S2000	240 以内
12.5m 以内		320 以内

(2) 沥青混合料压实机械

沥青混合料的压实过程一般包括“初压→复压→终压”三个环节，压实机械主要用于通过外力作用将松散的沥青混合料压实，以达到设计要求的密实度、强度和稳定性。因此，为了产生有效的压实，压实机械施加的压实力必须超过沥青混合料中抵抗压实的力。目前沥青路面施工使用的压实机械主要有：6~8t 双钢轮压路机、12~20t 或 20~25t 轮胎式压路机 2~6t 或 6~14t 振动压路机等。我国现行《公路工程机械台班费用定额》(JTG/T B06-03-2007) 根据压路机的碾压轮类型和机械自身质量 (t)，将其分为四类，并给出了各个类别的代表型号^[57] (表 2.6)。

表 2.6 沥青混合料压实机械分类代表型号

分类	双钢轮振动压路机			轮胎式压路机		
	10 以内	12 以内	15 以内	9~16	16~20	20~25
代表型号	YZC-10	YZC-12	YZC-15	YL16	YL20	YL27

在沥青路面施工过程中，沥青混合料的压实作业通常分为初压、复压和终压三个阶段，每个阶段的压实目的不同，相应的压实机械选择及碾压速度也有不同。本文调查国内目前沥青路面施工压实工艺及机械配置，总结得到沥青混合料三个压实阶段的主要压实设备及碾压速度 (表 2.7)，用于沥青路面建设过程能耗与排放量化分析。

表 2.7 沥青混合料各压实阶段机械设备型号及压实速度

压实阶段	初压	复压	终压
压实设备	10 以内钢轮 (振动) 压路机	20~25 轮胎式压路机	10 以内钢轮压路机
型号	YZC-10	YL27	YZC-10
压实速度	2~3km/h	3~5km/h	3~6km/h

2.2.2 沥青路面建设过程能耗与排放

1. 沥青路面建设过程能源消耗调查

沥青路面建设过程是机械设备使用最为集中的过程，其能源消耗主要表现为机械设备的燃料消耗。沥青路面建设过程使用的机械设备包括运输设备、摊铺设备和压实设备，这些机械设备大多以柴油作为燃料，因此，沥青路面建设过程的能源消耗实质为各种施工机械的柴油消耗。

(1) 沥青混合料运输过程

沥青混合料运输设备能源消耗主要源于将拌和好的沥青混合料从拌和站运送至施工现场的运输过程，该过程的能源消耗量主要与运输车辆的载重量、运送沥青混合料的总量、运输距离和交通状况有关。一般而言，运输车辆载重量越小，运送沥青混合料总量越多，运输距离越长则沥青混合料运输过程中的燃料消耗量越大。

在实际生产过程中，沥青混合料的产量与工程量密切相关，难以人为减少，因此，在沥青混合料产量，即沥青混合料运送量一定的情况下，目前普遍采用载重量较大的自卸汽车进行沥青混合料运输。此外，为保证沥青混合料摊铺和压实温度，沥青混合料的运输距离也不宜过长，一般不宜超过 30km^[60]。国内有研究^[44]在考虑上述能耗影响因素的基础上，计算得出 1km 双向六车道半幅路面沥青混合料采用 15t 自卸汽车，在平均运距 10km 的条件下，其运输过程的柴油消耗量 13.8t，约占沥青路面施工阶段总柴油消耗量的 57.2%。

(2) 沥青路面施工过程

沥青路面施工设备的能源消耗主要源于沥青混合料摊铺和碾压过程，该过程的能源消耗量主要与施工机械设备的类型及施工工艺有关。

摊铺设备的生产能力和数量需要与沥青混合料拌和设备的生产能力相匹配，当拌和设备确定后，摊铺设备的类型及数量即可确定。因此，拌和设备的生产能力是影响摊铺设备选择及其能耗的主要因素。

压实设备主要用于沥青混合料压实，由于沥青混合料达到所需的压实度，需要一定的压实功，压实功的大小与压实设备的重量及其压实遍数直接相关，并决定了压实设备的类型及其油耗。因此，沥青混合料的压实度要求和压实工艺是影响压实设备选择及其能耗的主要因素。

国内有研究在考虑上述因素的基础上，根据施工机械设备生产能力相匹配的基本原则，按照沥青混合料标准压实工艺，计算得出 1km 双向六车道半幅沥青路面施工过程

中摊铺设备和压实设备的柴油消耗量为 5.69t，约占沥青路面施工阶段总柴油消耗量的 23.6%^[44]。

从上述调查数据可以发现，沥青混合料运输过程和沥青路面施工过程的能源消耗基本上代表了沥青路面建设阶段的能耗情况。但是，从沥青路面生命周期的角度，沥青混合料运输过程和沥青路面施工过程的能源消耗并不是十分显著。Zapta 和 Gambatese 的研究表明^[12]，沥青路面铺筑过程中的能耗不足沥青路面生命周期总能耗的 3%；Athena Institute 分析认为^[16]，沥青路面施工机械的能耗尚不足材料生产阶段能耗的 1%；其他相关研究也证明，与材料阶段等其他沥青路面生命周期阶段相比，路面建设阶段源于施工机械设备的能耗相对较小。虽然在一定程度上可以认为沥青路面建设阶段的能耗并不显著，但是由于沥青路面建设阶段是沥青路面生命周期中的一个重要阶段，该过程中的能源消耗问题仍然需要给予足够的重视。

2. 沥青路面建设过程环境排放调查

在沥青路面生命周期阶段中，沥青路面建设阶段的环境排放对公众而言最为直观，当途经沥青路面铺筑现场时，总能给人以“烟雾缭绕”的直观印象（图 2.6）。通常情况下，沥青路面施工过程中的环境排放可以分为源于燃料的燃烧排放和源于热态沥青混合料挥发的逸散排放。



图 2.6 沥青路面摊铺及压实施工现场排放

(1) 燃料燃烧排放

目前，沥青混合料运输及沥青路面施工机械均采用柴油发动机，其环境排放主要为柴油燃烧造成的各种气态污染物和颗粒物。

柴油发动机在工作过程中，柴油经高压喷入燃烧室，与空气混合料形成的燃料混合气压缩着火后，进行燃料喷入与燃烧同时进行的扩散燃烧方式，这种工作方式无法保证燃料与空气的均匀混合，从而不可避免的出现局部缺氧或局部富氧的状况。在高温缺氧的情况下，柴油易于碳化形成碳烟及各种颗粒物 PM；在空气富余的情况下，燃烧过

程则容易产生较多的氮氧化合物 NO_x ，而碳氢化合物 HC 及非完全燃烧产物一氧化碳 CO 的生成量较少。因此，柴油发动机的排放特点是颗粒物 PM 和氮氧化合物 NO_x 的排放量较大，而碳氢化合物 HC 和一氧化碳 CO 的排放量较少。

在沥青路面施工现场，各种运输车辆及施工机械设备往来频繁，上述有害气体排放会弥漫于整个工作面，当风速较小、通风状况不良时，施工现场的环境污染问题会更为突出，尤其是工作面位于相对封闭的隧道时，上述有害环境排放会极大的危害施工人员的身体健康并影响施工活动的正常进行。

针对柴油机的排放特点，减少颗粒物 PM 和氮氧化合物 NO_x 的排放量是控制柴油机排放的关键。目前，控制柴油机排放的措施^[61-63]主要包括以下几类（表 2.8）：

表 2.8 柴油机排放控制措施

控制措施	具体内容
改善燃油品质	<ul style="list-style-type: none"> ● 降低燃油含硫量 ● 减少燃油中的芳香烃 ● 提高燃油的十六烷值 ● 进行柴油乳化处理 ● 掺加消烟添加剂
机内净化	<ul style="list-style-type: none"> ● 改进喷油系统 ● 改进燃烧室结构 ● 采用增压中冷技术 ● 采用废气再循环技术
排放后处理	<ul style="list-style-type: none"> ● 采用颗粒物捕集技术 ● 采用 NO_x 催化反应技术

对于沥青路面建设工程而言，控制沥青路面建设阶段的施工机械燃烧排放，可以选择排放低的机械设备，同时保证柴油的供应质量，在机械设备排放较大的部位安装废气处理设备等措施。

（2）逸散排放

沥青混合料运输及沥青路面施工过程的逸散排放，主要源于高温状态下的沥青混合料产生的各种有机化合物。

为保证摊铺和压实的需要，沥青混合料拌和后的出场温度多为 $150\sim 180^\circ\text{C}$ ，达到施工现场的摊铺温度也要求不低于 120°C ，在如此高的温度条件下，沥青中的轻质组分挥发，产生大量含有液态烃类颗粒物和气态烃类衍生物组成的“沥青烟”（图 2.7）。



图 2.7 沥青混合料摊铺现场沥青烟排放

国内有研究人员采用现场实测的方法，调查得到了长隧道（约 4km）中段沥青路面摊铺过程中的环境排放量^[64]，结果表明，摊铺机周围空气中的总悬浮颗粒物 TSP 超过 $8\text{mg}/\text{m}^3$ ，约为未摊铺处浓度值的 2 倍；苯并[a]蒽、苯并[a]芘和二苯并[a,h]蒽均超标，其排放值分别为标准值的 6.8 倍、9.9 倍和 200 倍。由此可见，沥青路面建设过程的逸散排放量比较显著，当风速较小、通风状况不良时，施工现场的沥青烟污染问题会更为突出，尤其是工作面位于相对封闭的隧道时，上述有害环境排放会极大的危害施工人员的身体健康并影响施工活动的正常进行。

在沥青烟对人体健康的危害方面，国内外均进行了大量的研究。国际癌症研究机构（IARC）研究结果表明^[65]，沥青烟气属于潜在的人体致癌物质之一。沥青烟中共含有大约 196 种主要有机污染物^[66]，其中，苯并花、苯并葱、呋唑等多种多环芳烃类均为致癌或强致癌物质，且其颗粒较小，能够通过呼吸道进入人体，刺激人体的气管和肺部，引发支气管炎、肺炎、肺囊肿等呼吸系统疾病^[67, 68]。

沥青烟排放主要是沥青受热挥发而引起的，因此，影响沥青烟排放的因素主要为沥青种类、沥青组分以及温度。一般情况下，石蜡基沥青比环烷基沥青的沥青烟排放量大^[69]；沥青中轻质组分越多，则其受热挥发产生的沥青烟排放约为严重；沥青及沥青混合料的加热温度越高，则相应的沥青烟排放越大。

在沥青路面建设工程中，减小沥青烟的排放可以从沥青混合料生产环节入手，采用温拌沥青混合料技术，降低沥青混合料运输与摊铺和压实过程的温度；在沥青混合料运输过程中，采取遮盖的方式，不仅能够达到保温的效果，而且能够减少沥青烟排放；在沥青路面摊铺及压实过程中，则应加强工作面的通风，以减少沥青烟在工作面的富集。

2.3 沥青路面运营过程的能耗与环境排放调查

为车辆提供平整、舒适的行驶表面是沥青路面运营过程中的主要服务功能，随着运

营时间增加，在车辆荷载和环境因素的共同作用下，沥青路面会出现裂缝、坑槽、车辙等诸多病害现象，导致路面状况恶化，服务性能降低。此时，车辆在路面上行驶，不仅需要降低速度以保证舒适性，而且需要频繁加、减速以适应不同的路面状况，从而导致车辆油耗与环境排放增加。据丹麦的相关调查，丹麦全国约 1/3 的 CO₂ 排放源于交通部门，其中 95% 来源于交通运输领域，道路行驶车辆的燃油消耗降低约 3.3%，则每年可以直接节省燃油大约 4800 万升，减少温室气体排放大约 4.5 万吨^[4]。

在沥青路面运营阶段，车辆油耗及环境排放的增加直接源于车辆行驶状态的变化，间接源于路面状况的变化，是组成该阶段能耗与排放的主要因素。为此，本文从路面状况角度出发，调查分析路面状况变化对路面运营期间车辆油耗及排放的影响。

2.3.1 路面状况对车辆油耗的影响调查

路面状况通常包括路面病害状况和路面平整度状况，上述两类路面状况的变化均会影响车辆的正常行驶。而从车辆行驶的角度出发，路面病害会引起路面平整度的变化，因此，路面状况对车辆油耗的影响可以统一以平整度表征。

道路平整度直接影响驾驶的舒适性，国内外从道路平整度出发，对道路平整度与车辆油耗的关系进行了大量的研究。欧美国家在二十世纪八、九十年代曾采用实测方法，得到了路面平整度对油耗的影响结果^[70]（表 2.9）。

表 2.9 恒定速度情况下路面平整度对油耗的影响

研究来源	IRI 变化范围 (m/km)	车辆类型	油耗变化率 (%)
Young (1988)	1.3~4.0	货车	4.1
	3.3~5.6	小汽车	3.1
	2.3~4.4	小汽车	3.6
	1.7~5.4	小汽车	0.8
Ross (1982)	0.5~3.7	小汽车	0.4
Bester (1984)	1.4~5.5	小汽车	0.5
Descornet (1990)	0.8~7.7	小汽车	0.8
Laganier and Lucas (1990)	1.0~6.0	小汽车	1.2
Sandberg (1990)	1.0~6.0	小汽车	1.7
Du Plessis 等 (1990)	1.2~15	小汽车	0.7
		货车	1.1
Watanatada 等 (1987)	2~14	小汽车	0.5
		货车	0.5

近年来，美国内华达州西部环道试验测试结果表明^[71, 72]，IRI 由 1.2m/km 增加至

2.4m/km 时, 试验车辆的油耗会增加 4.5%; 密苏里州的调查资料表明^[73], 改善路面行驶状况, IRI 由 2.03m/km 降低至 0.95m/km, 则乘用车和载重车每加仑燃料可行驶的英里数将分别增加 0.80%和 3.38%; 阿拉巴马州国家沥青中心 NCAT 环道试验测试结果表明^[72], IRI 由 1.08m/km 增加至 1.18m/km 时, 试验车辆油耗会增加 2%; 北佛罗里达大学对当地 5 条道路的实测结果表明^[74], IRI 增加 10%, 则车辆油耗会相应的增加 1.3%。

车辆的燃油消耗是车辆运营费用的重要组成部分, 我国也在二十世纪八、九十年代开展了路面平整度与车辆油耗的关系研究。田赛男、姚祖康等采用实测法, 根据平直路段车辆稳态行驶下的油耗实测数据, 建立了路面平整度与油耗的量化关系^[75], 根据其研究结果, 对于汽油面包车、汽油轻型货车、柴油轻型货车、汽油中型货车以及汽油公共汽车, 每单位平整度变化导致的油耗增加率分别为 1.20%、2.70%、1.77%、1.68%、2.77%。中交公路规划院周育峰等根据上述研究成果, 并结合东北地区道路车辆油耗实测结果回归分析, 建立了油耗与车速和平整度指数 IRI 的关系, 并分析认为, 对于小汽车而言, IRI 每增加 1m/km, 油耗将增加 0.6~1.2%^[76]。

大量的调查结果表明, 车辆油耗与路面平整度之间存在着一定的相关关系, 但是, 由于车辆油耗的影响因素比较复杂, 除了路面平整度以外, 车辆本身的动力性能、轮胎规格、驾驶员的驾驶技术以及路面结构等都会对车辆油耗造成一定的影响, 从上述众多影响因素中将路面平整度单独剥离出来比较困难, 因此, 目前车辆油耗与路面平整度之间确切的量化关系尚不多见。

近年来研究表明, 路面平整度变化会直接影响车辆的行驶速度, 而车辆行驶速度的变化又直接影响油耗。因此, 本文认为, 从路面状况出发, 通过路面状况与车速、车速与油耗的关系, 建立路面状况-车速-能耗与排放预估模型是建立路面平整度与油耗量化关系的有效途径。

2.3.2 车辆行驶过程能耗与排放

在沥青路面运营阶段, 车辆行驶过程中的能耗主要表现为车辆的燃料消耗。目前, 在全球资源紧张的影响下, 车辆使用的燃料类型也日趋多样化, 天然气、电力以及多种燃料类型的混合动力车逐渐增多, 但是就国内公路车辆组成情况, 大多数车辆仍然以汽油或柴油为主。

影响车辆燃油消耗的因素较多, 在标准工况下, 车辆油耗主要与车辆类型有关。我国工业和信息化部根据国家标准《轻型汽车燃料消耗量试验方法》(GB/T 19233-2008),

分别模拟车辆在城市市区道路和市区以外其它典型道路条件下的行驶状态,统计得到了国内现有主要轻型汽车的标准油耗量 (L/100km)。以上海大众汽车有限公司生产的PASSAT 型乘用车为例^[77],不同工况下的油耗数据如表 2.10 所示。

表 2.10 PASSAT 型乘用车不同工况油耗

排量 (ml)	整车整备质量 (kg)	额定功率 (kW)	变速器类型	市区工况	市郊工况	综合工况
				(L/100km)		
1390	1435	96.0	MT	8.8	5.5	6.7
2975	1620	184.0	DCT	14.5	6.8	9.6
1798	1500	118.0	AT	11.3	6.2	8.1
1798	1520	118.0	DCT	10.4	6.0	7.6
1390	1435	96.0	MT	9.1	5.7	6.9
1390	1460	96.0	DCT	8.7	5.5	6.7
1984	1550	147.0	DCT	11.9	6.3	8.3

从上表数据可以发现,与市郊工况相比,由于市区道路存在设计速度低、平面交叉口多以及拥堵等诸多特征,因此,在市区工况下,车辆由于行驶速度较低、频繁加减速等原因,导致油耗普遍偏高。这也从侧面进一步证明了路面平整度恶化,导致车速降低、车辆频繁加减速,势必会引起车辆油耗的变化。

本文根据工信部的统计结果,进一步汇总得到:在交通干扰较小、车速比较稳定的市郊工况下,M1 类乘用车的油耗为 5~10L/100km,M2 类轻型客车的油耗为 7~12L/100km,N1 类轻型货车的油耗为 5~8L/100km。按照本文调查得到的华北地区某高速公路 13 个路段 2011 年小型车交通量统计资料(表 2.11),全年该路段小型车交通量为 13382 辆,每辆车的油耗按照 M1 类油耗的平均值 7.5L/100km 计,则该路段所有小型车全年油耗量约为 1003.65L/km,这仅是在稳态行驶状况下的油耗情况,如果考虑路面状况变化导致的油耗变化,则实际油耗将远大于上述理论计算数据。

表 2.11 华北地区某高速公路小型车交通量统计资料

路段	年交通量	日平均	路段	年交通量	日平均
1	11380847	31180	8	4030283	11042
2	10197442	27938	9	1808110	4954
3	6429560	17615	10	1916845	5252
4	5622465	15404	11	1857575	5089
5	3716044	10181	12	3850531	10549
6	4064256	11135	13	4161938	11403
7	4459395	12218	全年日平均		13382

以上仅是交通组成中轻型汽车的燃油消耗，如果加上中型和重型车辆的相关数据，则在沥青路面运营过程中的油耗会更大。上述调查分析数据进一步说明，在沥青路面运营阶段，作为运输成本、用户费用以及环境排放主要影响因素的车辆油耗是不能忽视的，有必要从路面状况对车辆油耗的影响出发，分析沥青路面运营阶段的车辆油耗问题。

沥青路面运营阶段的环境排放主要来源于车辆的燃油消耗产生的燃烧排放，在明确了车辆的油耗后，即可确定由此产生的车辆环境排放。燃油燃烧产生的主要环境排放物为 CO_2 和 H_2O ，同时还伴随有不完全燃烧产物 CO 、 THC 、 PM 以及非可燃物质氧化产物 NO_x 、 SO_x 。此外，车辆生产商为了能够达到环境排放要求，通常会在车辆上安装催化转化器、柴油颗粒过滤器等后处理装置，这些装置在工作过程中也会排放少量的污染物，如 NH_3 和 N_2O 。

世界上许多国家和地区从不同的目的出发，给出了车辆行驶过程环境排放种类、计算方法以及标准限值。如 EEA 将车辆行驶产生的环境排放分为 7 大类（表 2.12），并给出了环境排放量化计算方法；我国国家标准根据车辆类型的不同，规定了轻型和重型汽车污染物排放类别（表 2.12）及其标准限值^[78, 79]。

表 2.12 EEA 及我国国家标准车辆环境排放类别

EEA 排放类别		我国国标排放类别	
排放类别	具体污染物	车辆类型	气态污染物
臭氧前体物	CO 、 NO_x 、 NMVOC	轻型汽车 (汽油发动机)	CO
温室气体	CO_2 、 CH_4 、 N_2O		HC
酸性物质	NH_3 、 NO_x 、 SO_2		NO_x
颗粒性物质	PM		PM
致癌物质	PAHs 、 POPs	重型汽车 (汽油发动机)	CO
有毒物质	二噁英、呋喃		THC
重金属排放	Pb 铅		NO_x

从上表可见，国内外对环境排放类别划分的详略程度还存在一定的差别，总体而言 EEA 对环境排放的类别划分比较系统、全面，考虑到我国车辆环境排放标准在建立过程中也参考了欧洲等发达国家标准，因此，本文从大气环境影响角度，选择 EEA 车辆环境排放类别中的臭氧前体物、温室气体、酸性物质和颗粒性物质进行沥青路面运营阶段车辆环境排放量化分析。

2.4 本章小结

本章从生命周期视角出发，调查研究了材料生产过程、沥青路面建设过程以及沥青

路面运营过程中能源消耗和环境排放的来源、影响因素等关键问题，主要结论如下：

(1) 调查了目前沥青混合料生产过程中的主要生产设备及其工艺流程，并以此为基础，调查分析沥青混合料生产工艺流程中的能源消耗与环境排放来源及其控制方法，建立了不同生产工艺下的沥青混合料生产过程能耗与排放流程图。

(2) 调查了沥青路面建设过程中的主要生产环节及使用的机械设备类型，根据机械设备的燃料类型及其运转方式，调查分析了沥青路面建设过程能源消耗及环境排放的来源、影响因素，并提出了相应的控制措施。

(3) 根据国内外研究资料，调查了沥青路面运营过程中，路面状况变化对车辆油耗的影响，提出通过路面状况与车速、车速与油耗的关系，建立“路面状况-车速-能耗与排放”预估模型的思路。同时，根据华北某高速公路实测资料分析了沥青路面运营过程中车辆油耗总量，并调查得到了车辆环境排放的来源和种类。

第三章 沥青路面节能减排量化分析体系框架

目前,我国对沥青路面节能减排的评价大多采用定性分析的方法,虽然也有研究人员采用定量方法计算能耗与排放量,但是基本都是针对沥青路面建设生命周期中的某个环节。根据调查分析,沥青路面建设过程的各个环节都不可避免的要消耗一定的能源并产生气体排放问题。准确有效的量化分析沥青路面建设过程的能耗与排放是建立沥青路面节能减排分析评价体系,开展沥青路面节能减排工作的基础。

为此,本章首先分析生命周期分析方法的特点,论证生命周期分析方法用于沥青路面节能减排分析的可行性;然后分析比较三种常用的生命周期分析类型,选择适宜于沥青路面特点及数据收集分析的生命周期分析方法;在上述分析的基础上,按照生命周期分析流程和沥青路面节能减排量化分析评价的内容,建立基于生命周期分析的沥青路面节能减排量化分析体系的基本框架,为开展沥青路面节能减排量化分析与评价研究奠定基础。

3.1 沥青路面节能减排量化分析体系理论基础

沥青路面建设过程中的能源消耗与气体排放问题,其实质是沥青路面建设过程对环境的影响问题,目前,国内外主要采用生命周期分析 LCA (Life Cycle Analysis) 进行环境影响量化评价。为此,本文分析生命周期分析方法用于沥青路面节能减排量化分析评价的可行性,合理选择适合沥青路面节能减排量化分析评价的生命周期分析方法类型,为沥青路面节能减排量化分析评价奠定理论基础。

3.1.1 生命周期分析用于沥青路面节能减排量化分析评价的可行性

生命周期分析,通常又称之为生命周期评价或生态平衡分析,是综合考虑资源、能源消耗与环境影响的一种量化分析评价方法。根据国际标准化组织 ISO14040 标准的定义^[80],生命周期分析是对一个产品系统的生命周期中输入、输出及潜在环境影响的汇编和评价。目前,生命周期分析方法已经广泛应用于工商业企业、政府部门、研究机构等各个层次和领域,用以分析评价环境影响,指导环境影响决策。

根据 ISO14040 标准定义的技术框架^[81],LCA 分析评价过程一般分为目的与范围的确定、清单分析、影响评价和结果解释四个部分(图 3.1),上述四个部分之间相互联系、不断反复。其中:

(1) 目的和范围的确定是开展 LCA 分析评价的第一步,是随后进行清单分析、影

响评价和结果解释的基础。因此，必须首先明确 LCA 分析评价的目的与范围，并使之适合于分析评价的意图。

(2) 清单分析 LCI (Life Cycle Inventory) 包括数据的收集和计算程序，目的是对产品系统的有关输入和输出进行量化。可以根据 LCA 的目的和范围需要，依据量化的数据做出解释，也可以将其作为 LCA 影响评价输入的组成部分。

(3) 影响评价是理解和评价产品潜在环境影响大小和重要性的阶段。

(4) 结果解释是根据规定的目的和范围要求，对清单分析和（或）影响评价的结果进行归纳，以形成结论和建议的阶段。

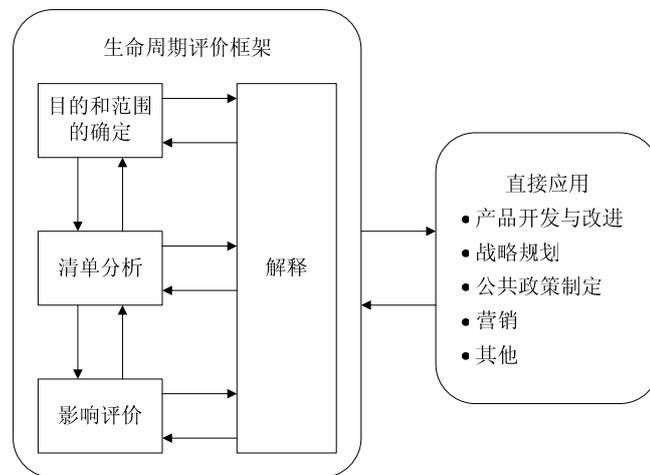


图 3.1 LCA 评价过程^[11, 82]

根据生命周期分析的主要步骤，生命周期分析与其他环境影响评价方法相比，具有系统性、全面性、透明性、科学性、开放性和灵活性的特点：

(1) 系统性：生命周期分析考虑了产品的整个生命周期，即从原材料的获取、能源和材料生产、产品的制造和使用，直至产品生命末期的最终处置。因此，通过这种系统性的观点，可以识别并可能避免整个生命周期各阶段或各环节的潜在环境影响。

(2) 全面性：生命周期分析考虑了自然环境、人类健康和资源的所有属性或影响因素，并将上述所有属性和因素进行全视角的考虑。

(3) 透明性：生命周期分析要求采用公开的数据，要求分析过程透明，要求在报告中详细说明数据来源和分析结果，保证了公众的知情权和分析结果的客观、公正。

(4) 科学性：生命周期分析要求以自然科学为基础，如果无法实现，则要求采用其他的方法或者参考国际惯例，如果上述要求均无法满足，则要求以价值选择为基础，从而可以保证分析评估结果的准确、科学。

(5) 开放性：生命周期分析方法是完全开放的，不存在知识产权保护问题。ISO

14040 标准中详细说明了生命周期分析方法的原则、组成以及分析过程；同时允许在上述标准框架下对生命周期分析方法进行补充和完善。

(6) 灵活性：生命周期分析的时间跨度和研究深度可以存在很大的不同，其时间跨度和研究深度可以根据目的和范围定义的变化做出相应的调整，以满足不同阶段、不同要求的生命周期分析。

根据生命周期分析方法的特点，结合沥青路面建设和使用的实际以及节能减排量化分析的需要，本文分析认为：

(1) 生命周期分析系统性、全面性的特点可以充分考虑沥青路面生命周期各个阶段各种材料、能源消耗产生的环境影响；

(2) 生命周期分析透明性、科学性的特点可以保证沥青路面节能减排量化分析方法和分析结果的可靠性、公正性；

(3) 生命周期分析开放性、灵活性的特点可以充分考虑沥青路面建设和使用的特殊性，能够满足沥青路面节能减排量化分析的需要，有利于沥青路面节能减排量化分析的推广应用。

此外，根据本文第一章对沥青路面节能减排量化分析研究现状的调查可以发现，生命周期分析方法目前在沥青路面环境影响量化分析方面已经有着广泛的应用，而且生命周期分析方法目前已经得到了国际环境毒理学和化学学会（Society of Environmental Toxicology and Chemistry）、欧洲生命周期评价开发促进协会（Society for Promotion of Life-cycle Assessment Development）等国际和地区性组织的认可，国际标准化组织 ISO 已发布并正在制定 LCA 系列标准，世界上主要的工业国家和一些发展中国家均成立了本国或地区性的 LCA 学会，指导和推进材料及其制品产业的环境协调发展。这些为生命周期分析在沥青路面节能减排量化分析中的应用提供了可靠的方法保证和数据支持。

综上所述，生命周期分析 LCA 考虑了项目整个生命周期阶段，同时在量化环境影响方面具有很强的优势，尤其是近年来在世界和地区性研究组织的推动下正逐渐发展完善。为此，生命周期分析方法有利于从生命周期的视角，研究沥青路面建设过程中的能耗和气体排放，可以作为沥青路面节能减排量化研究的有效分析方法。

3.1.2 生命周期分析类型的选择

ISO 14040 标准虽然给出了生命周期分析的通用框架，但是并没有给出开展生命周期分析的具体方法和步骤。国内外研究人员在 ISO 规范的基础上，研究并提出了开展生

命周期分析的具体方法，目前常用的生命周期分析方法主要有以下三种类型：基于流程的生命周期分析法（Process LCA）、输入-输出生命周期分析法（I-O LCA）以及综合性生命周期分析方法（Hybrid LCA）。

1. 基于流程的生命周期分析法（Process LCA）

基于流程的生命周期分析方法以产品系统的生命周期流程为基础，根据生命周期分析目的和范围的定义，将生命周期流程进一步细化为若干次一级流程，并具体的研究次一级流程中，每一个阶段的能耗和排放量，最后将各个阶段的能耗和排放量加和，就可以得到产品系统生命周期能耗和排放的总量。

以沥青路面建设为例，沥青路面建设可以粗略分为沥青混合料生产、运输以及沥青路面施工等若干环节（图 3.2）。其中，沥青混合料生产又可以进一步细分为矿料生产、沥青生产和沥青混合料拌和三个环节，每一个环节均存在能耗与排放。根据生命周期分析方法，计算每一个环节的能耗与排放量，求和就能得到沥青混合料生产阶段的能耗和排放量。沥青混合料施工阶段的分析与此相同。在得到沥青混合料生产、运输和沥青路面施工阶段的能耗和排放量后，再次求和就能得到沥青路面建设整个生命周期内的能耗与排放量。

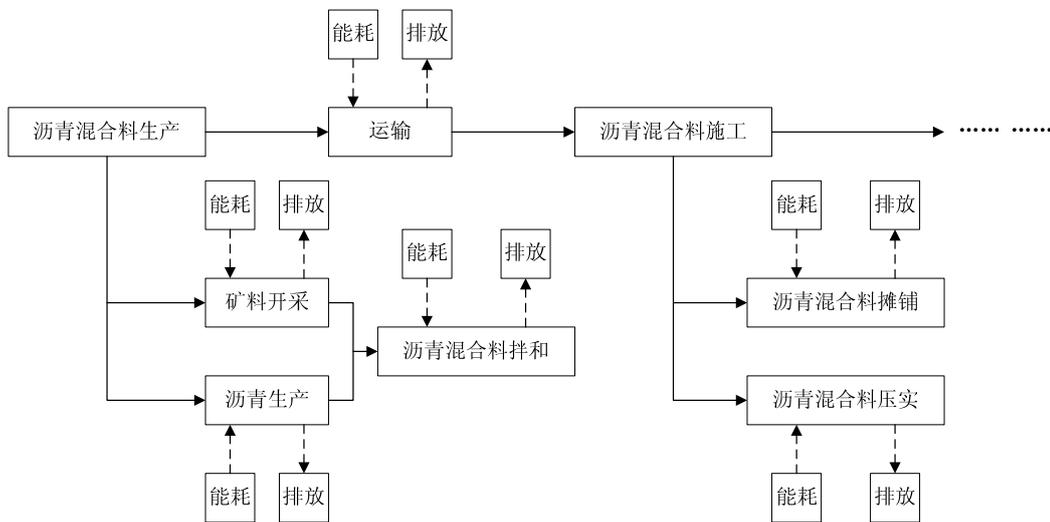


图 3.2 基于流程的 LCA 方法示意图

由图 3.2 可以发现，基于流程的生命周期分析具有重视细节、直观简单的特点：

(1) 基于流程的生命周期分析方法尤为注重产品的生命周期细节，由于构成产品生命周期流程的每一个环节都需要进一步细化，因此其分析结果更为准确。

(2) 基于流程的生命周期分析方法比较直观、简单，不需要太过于复杂的理论基础，仅需要对生产工艺流程进行合理准确的划分即可。

但是,在实际应用中,如果分析处理不当,基于流程的生命周期分析方法的上述优点就会变为该方法的致命缺陷:

(1) 分析规模难以控制。以图 3.2 所示的沥青路面建设流程示意图为例,在沥青混合料生产阶段,如果需要进一步细化,则沥青生产阶段又可以进一步细分为石油提炼、石油开采等次一级流程,而其中的每一个次一级流程又可以进一步细分。因此,对流程和细节的注重,有可能将一个简单的分析问题变得异常复杂。

(2) 收集、分析数据量大。在流程逐步细化的过程中,由于每一个流程都需要收集和分析大量的数据,这就会导致数据收集和分析的工作量突然增加,极大的影响了生命周期分析的效率。

(3) 数据完整性要求高。基于流程的生命周期分析按照工艺流程逐步分析,每一阶段都要求具有足够的的数据支持,如果其中某一阶段缺失了部分数据,必须找到相关的类似数据进行替代分析,这势必影响到分析结果的准确性。

(4) 边界条件误差难以排除。针对分析规模难以控制、收集和分析数据工作量大的问题,基于流程的生命周期分析需要人为的设置分析的边界条件以排除一些不必要的次一级流程,从而简化分析问题,并减小分析的工作量。但是这种简化的处理方法难免带来一些分析误差,影响分析结果的准确性。

根据上述分析,本文认为,基于流程的生命周期分析通常适用于工艺流程简单、相关数据完整、系统边界易于确定的情况。

2. 输入-输出生命周期分析法 (I-O LCA)

输入-输出生命周期分析以 Wassily Leontief 在 1936 年提出的经济投入-产出模型为基础,在经济投入-产出分析模型中增加了环境影响输入和输出分析,其主要分析步骤与经济投入-产出模型一致。因此,可以认为输入-输出生命周期分析方法其实质是经济投入-产出分析方法与生命周期理念在环境影响量化分析过程中的一种有机结合。

传统的经济投入-产出分析模型作为一种经典的分析方法,在经济预测、经济控制以及政策模拟分析等方面应用广泛,该模型将经济划分为若干部门分类结构,通过编制投入-产出表并建立相应的数学模型,反映经济系统各个部门(产业间)相互依存的平衡关系^[83]。典型的经济投入-产出分析模型如表 3.1 所示,表中的行、列、中间量以及总量之间均存在一定的平衡关系:

列平衡关系: 中间投入+增加值=总投入;

行平衡关系: 中间产出+最终产出=总产出;

总量平衡关系：总投入=总产出；

中间量平衡关系：中间投入合计=中间产出合计。

根据经济投入-产出分析表收集统计相关数据并依据上述平衡关系，就可以计算得到计划产出一定量的产品所需要的原材料、燃料以及劳动力等投入要素的数量。事实上，经济生产活动中的投入要素中通常还包括了一定数量的环境资源，而其产出中除了产品以外，还包括一些污染废物。因此，经济生产与自然环境有着密切的关系，在经济投入产出分析模型中增加环境影响因素，当已知最终产品的计划数量和最终需求领域的废物产生量，带入上述模型就可以定量的分析生产单位产品所需要的环境因素投入以及由此产生的废物总量。这种在经济投入-产出模型中考虑环境因素的分析方法，即输入-输出生命周期分析方法。

表 3.1 经济投入-产出分析表

产出部门 i	投入部门 j					中间 产出 O	最终 产出 F	总产出 X
	1	2	3	...	n			
1	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	...	X _{1n}	O ₁	F ₁	X ₁
2	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	...	X _{2n}	O ₂	F ₂	X ₂
3	X ₃₁	X ₃₂	X ₃₃	...	X _{3n}	O ₃	F ₃	X ₃
.....
n	X _{n1}	X _{n2}	X _{n3}	...	X _{nn}	O _n	F _n	X _n
中间投入 I	I ₁	I ₂	I ₃	...	I _n	GDP		
增加值 V	V ₁	V ₂	V ₃	...	V _n			
总投入 X	X ₁	X ₂	X ₃	...	X _n			

与基于流程的生命周期分析方法相比，输入-输出生命周期分析方法可以根据各个经济部门间投入和产出因素的流动计算生命周期各个环节的能耗和排放，而且不需要人为的设置系统边界，因此可以消除基于流程的生命周期分析方法的边界条件误差。但是，这种将经济划分为若干部门分类结构的分析方法也存在一定的缺陷^[84]。以沥青路面建设生命周期分析中沥青生产阶段的输入-输出生命周期分析为例：

(1) 在沥青路面建设过程中，为了保证原材料的质量稳定性，通常沥青都固定采用一家企业生产的产品。由于沥青是石油工业的产品之一，沥青生产的输入-输出生命周期分析数据以整个石油工业的数据为基础，但是不同沥青生产企业的技术和设备水平存在差异，沥青生产过程中的能源消耗和气体排放水平也不尽相同，因此采用整个行业的平均水平进行分析不可避免的会出现高估或低估实际水平的情况。

(2) 沥青是石油工业的产品之一，除此以外还有汽油、柴油等燃料油以及蜡等其他产品。由于众多产品均属于同一个经济部门，因此在进行输入-输出生命周期分析时需要合理的分配不同产品的环境影响比例。在输入-输出模型中，通常采用单位成本来区别沥青与其他石油加工产品，这种方法假定在给定的经济部门中，产品的单位成本与环境影响有非常好的正相关性。但是，由于这种假设与实际情况差异较大，在分析评价过程中不可避免的会产生误差。

由于输入-输出生命周期分析方法的上述缺陷，一般较少单独采用该方法进行生命周期分析。但是，输入-输出生命周期分析方法消除了基于流程的生命周期分析方法的缺陷，因此，输入-输出生命周期分析方法通常用于补充并完善基于流程的生命周期分析方法。

3. 综合性生命周期分析方法 (Hybrid LCA)

根据前文分析，基于流程的生命周期分析方法和输入-输出生命周期分析方法均有各自的优缺点，如表 3.2 所示。Hendrickson 等人研究认为，基于流程的生命周期分析方法和输入-输出生命周期分析方法具有互补的特点，两种方法相结合能够得到更加准确有效的分析结果^[85]。综合性生命周期分析方法就是以充分发挥上述两种生命周期分析方法的优点，并避免其缺陷为原则，将上述两种生命周期分析方法有机结合而形成的一种全新的生命周期分析方法。

表 3.2 Process LCA 和 I-O LCA 方法的优缺点

	基于流程的生命周期分析	输入-输出生命周期分析
优点	<ul style="list-style-type: none"> ● 详尽的具体流程分析 ● 可用于产品的环境影响比较 ● 可用于工艺流程改善分析 	<ul style="list-style-type: none"> ● 经济视角的综合分析 ● 可用于敏感性分析 ● 采用公开数据，结果具有可再现性
缺点	<ul style="list-style-type: none"> ● 系统边界设置过于主观 ● 分析耗费的时间和成本较大 ● 难以用于新的工艺流程 	<ul style="list-style-type: none"> ● 采用行业平均数据难以反映特殊性 ● 难以分析具体的工艺流程 ● 分析数据具有一定的不确定性

是否采用综合性生命周期分析方法主要依赖于分析项目的自身约束条件以及相关数据的有效性（可获得性）。通常情况下，综合性生命周期分析中主要以基于流程的生命分析为主，而采用输入-输出生命周期分析作为补充，以获得完善的分析结果^[14]。其中，基于流程的生命周期分析主要用于分析绝大多数直接和影响比较显著的流程，而输入-输出生命周期分析主要用于分析间接和一些相关的延伸流程。因此，采用综合性生命周期分析方法就能够充分发挥基于流程的生命周期分析方法详细、专一的特点和输入

-输出生命周期分析方法广泛、综合的特点，同时能够消除单独使用上述两种方法的种种缺陷。但是，相比较于基于流程的生命周期分析方法，综合性生命周期分析方法出现的时间不长，该方法在沥青路面生命周期分析中的应用还不是很多。

以沥青路面建设过程的能耗和排放问题的综合性生命周期分析为例，可以采用输入-输出生命周期分析方法分析沥青混合料生产阶段中沥青混合料原材料生产流程的能耗和气体排放，而采用基于流程的生命周期分析方法分析混合料拌和、运输、摊铺以及压实等阶段的能耗和气体排放（图 3.3）。

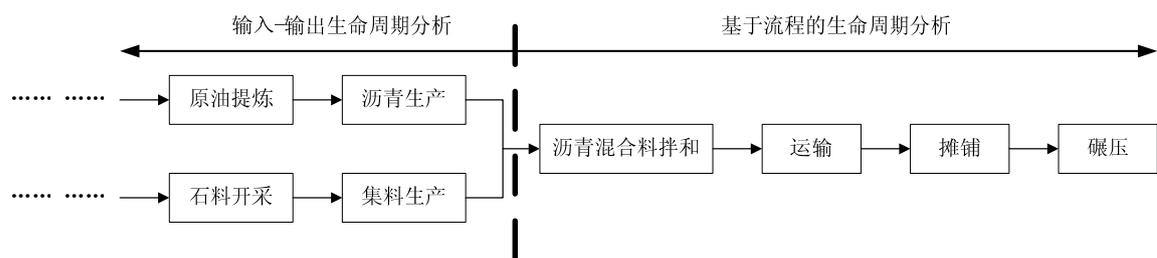


图 3.3 沥青路面建设过程综合性生命周期分析示例

综上所述，目前用于生命周期分析的三种类型各有优缺点，在沥青路面生命周期分析研究中，需要结合沥青路面的特点，采用合理的分析方法。Nicholas 在路面生命周期分析方法的综述研究中^[86]，总结了 1996 年~2010 年有关沥青路面生命周期分析的文献，其中 15 篇典型文献中有 11 篇采用了基于流程的生命周期分析方法，有 2 篇采用了输入-输出生命周期分析方法，有 2 篇采用了综合性生命周期分析方法，可以说基于流程的生命周期分析方法在沥青路面生命周期分析中有着最为广泛的应用。而且，基于流程的生命周期分析方法得到了国际毒理学和化学学会（SETAC）等国际和地区性组织的大力支持，联合国、欧盟以及其他国际和地区性组织所建立的生命周期分析数据库也大多以基于流程的生命周期分析方法为基础。此外，沥青路面建设过程包含的内容虽然较多，但是相对而言，沥青路面建设流程可以认为是一个前后衔接的线性过程，整个过程相对比较简单，相关数据有国际和地区性组织数据库的支持。因此，本文选择基于流程的生命周期分析方法（Process LCA）开展沥青路面生命周期分析。

3.2 沥青路面节能减排量化分析评价体系组成及流程

沥青路面节能减排量化分析评价体系主要包括两大组成部分，即沥青路面节能减排量化分析部分和沥青路面节能减排量化评价部分（图 3.4），本文在 ISO 14040 对生命周期分析方法相关规定的基础上，结合沥青路面节能减排量化分析评价的需要，确定量化

分析评价各组成部分的主要内容及分析评价流程，为沥青路面生命周期各阶段的节能减排量化分析奠定基础。

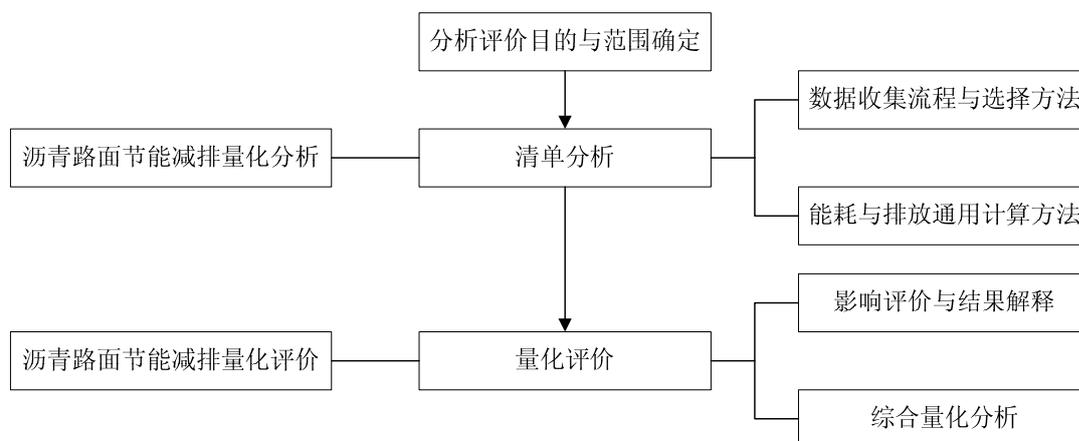


图 3.4 沥青路面节能减排量化分析评价体系组成部分及评价流程

3.2.1 分析评价目的与范围的确定

目的与范围的确定是进行生命周期分析的关键第一步，尤其是对于本文选择的基于流程的生命周期分析方法，合理确定分析目的与范围有利于控制分析规模，减小数据收集分析的复杂程度，从而获得比较准确的清单分析结果。

1. 确定分析研究目的

本文开展沥青路面生命周期分析研究，旨在从节能减排的角度，根据生命周期的理念，量化沥青路面生命周期各个阶段的能源消耗与气体排放，探讨沥青路面节能减排量化计算分析方法，明确沥青路面生命周期中能源消耗与气体排放最为严重的阶段，为沥青路面节能减排技术的研发和应用提供科学的依据。

2. 确定分析研究范围

根据生命周期的定义，沥青路面的生命周期应该包括沥青路面的设计、施工、运营、翻修、拆除废弃等多个阶段。如果全面的分析沥青路面生命周期每个阶段的环境影响，则势必导致分析规模过大、数据收集与分析量过多，分析的质量下降，难以得到准确、有实际指导意义的结论。但是，也不能将沥青路面生命周期过于简化，而忽略了环境影响较为突出的阶段，这同样也会导致沥青路面生命周期分析结果的准确性和指导性显著降低。因此，在进行沥青路面生命周期分析之前，需要合理确定沥青路面生命周期分析的范围，即确定沥青路面生命周期研究的系统边界。

沥青路面生命周期一般将可分为原材料开采与生产、路面施工、运营使用、养护维修以及生命周期末五个阶段，目前典型的沥青路面生命周期分析研究所包括的阶段类型

如表 3.3 所示。

表 3.3 沥青路面生命周期分析阶段

作者	设计	材料生产	施工	运营使用	养护维修	生命周期末
Häkkinen and Mäkelä ^[8]		√	√	√	√	
Horvath and Hendrickson ^[9]		√				
Roudebush ^[21]		√	√		√	
Berthiaume and Bouchard ^[22]		√			√	
Mroueh ^[24]		√	√		√	
Stripple ^[10]		√	√		√	
Park ^[13]		√	√		√	√
Treloar ^[15]		√			√	
Zapata and Gambatese ^[12]		√	√			
Athena ^[16]		√	√		√	
Chan ^[17]		√	√			
Huang ^[42]		√	√			
White ^[18]		√				

从表 3.3 可以发现，目前典型的沥青路面生命周期分析研究中：

(1) 沥青路面设计通常不在考虑的范围之内，这主要是因为设计阶段多在室内完成，虽然也有外业勘察阶段，但是很少使用大型机械设备，与其他阶段相比，设计阶段的能耗与气体排放相对很小，因而可以忽略不计。

(2) 材料生产、施工与养护维修阶段是材料消耗、机械使用最为集中的阶段，也是沥青路面能耗与气体排放最为显著的阶段，因此绝大多数沥青路面生命周期分析均考虑了上述三个阶段。

(3) 相比较而言，运营使用阶段主要是车-路交互作用，很多分析认为此阶段的能耗与排放主要源于车辆行驶，已经与沥青路面没有关系，因而大多数沥青路面生命周期分析均未考虑运营使用阶段。

(4) 生命周期末主要包括沥青路面的拆除、废旧沥青路面材料的运输、堆放及处置。大多数研究认为，沥青路面进行合理的养护和维修就可以长期使用，并假设沥青路面会永久的使用下去，而且该阶段的工程量较小，能耗及排放并不显著，产生的环境问题主要是土地的占用和污染，因而从能耗和排放角度，大多数沥青路面生命周期分析研究均忽略了该阶段。

根据目前典型的沥青路面生命周期研究，可以初步确定沥青路面生命周期阶段划

分，虽然绝大多数沥青路面生命周期分析均未考虑运营使用阶段，但是如果将沥青路面作为一种公共产品看待的话，沥青路面的基本功能正是为车辆行驶提供便利、安全、快捷的行驶条件，在沥青路面运营使用期内，车辆与沥青路面明显存在着交互作用，尤其是沥青路面状况恶化，将会导致车辆行驶速度变缓，从而增加车辆的油耗及气体排放。而且，从沥青路面生命周期的时间跨度而言，沥青路面的建设阶段通常仅有 1~2 年的时间，而沥青路面的运营使用阶段，则往往长达数十年，在此期间，由于车-路交互作用导致的能耗与气体排放问题有必要纳入到沥青路面生命周期分析之中。

为此，本文根据沥青路面的特点，并结合沥青路面生命周期分析研究的实际情况，将沥青路面生命周期综合为两个阶段——建设阶段与使用阶段。其中建设阶段包含了沥青路面材料的生产 and 沥青路面施工两个次级阶段；使用阶段则包含了沥青路面运营和沥青路面维修养护两个次级阶段，具体的阶段划分如图 3.4 所示。

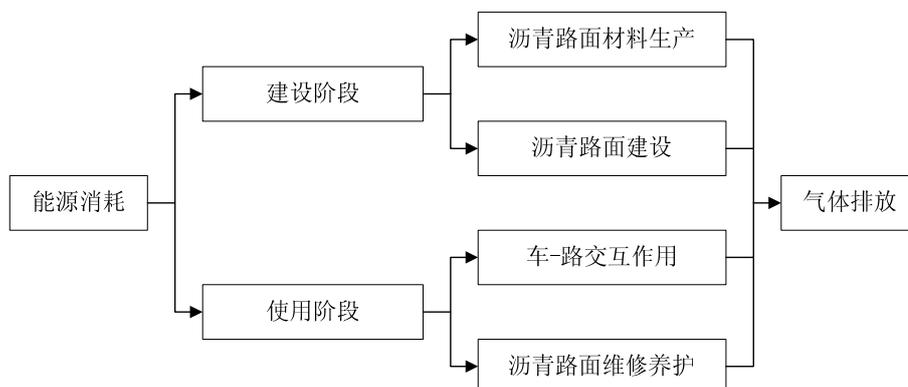


图 3.5 沥青路面生命周期阶段划分

3.2.2 清单分析

清单分析是对沥青路面生命周期各个阶段输入的能源消耗与输出的气体排放进行量化分析的过程，是生命周期分析中最为关键的一步。沥青路面生命周期节能减排量化清单分析的主要内容是根据沥青路面的建设流程，收集能源消耗与排放过程的相关数据，并采用科学合理的计算方法，确定沥青路面生命周期各个阶段的能源消耗与气体排放量，从而为沥青路面生命周期节能减排量化分析影响评价和结果解释提供可靠的依据。

1. 数据收集流程与选择方法

数据收集是沥青路面生命周期分析的重要环节，数据质量的好坏直接关系到沥青路面生命周期分析结果的准确性优劣。针对目前沥青路面节能减排量化分析研究中数据收集与选择不规范现状，本文根据沥青路面生命周期节能减排量化分析的目的与范围，

推荐数据收集工作的基本流程及数据选择方法（图 3.5）。

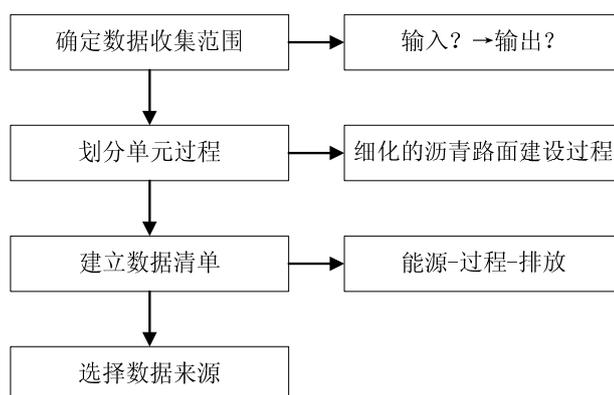


图 3.6 数据收集流程图

（1）确定数据收集范围

针对不同的分析目的，生命周期分析所需要的数据有很大的差别。沥青路面生命周期节能减排量化分析，以能耗和排放的量化为目标，需要输入的数据包括沥青路面的设计参数、材料用量、各种燃料以及电力等能动消耗量，最终的输出结果为沥青路面各个生命周期阶段的温室气体及主要污染气体和烟尘的排放量。

通过沥青路面能源消耗调查，沥青路面建设过程中各种机械设备、运输车辆消耗的能源主要有车用汽油、柴油、残留燃料油（重油）、液化石油气、煤等不同形式的固、液体燃料。这些燃料在不同的使用过程中，由于燃烧器、燃烧形式的差异，导致的气体排放类型也有所差异。根据《京都议定书》规定的具有减排义务的温室气体类别^[87]，结合沥青路面建设过程中的实际排放调查结果，同时考虑到人类健康和环境影响，本文收集的气体（烟雾）排放类型主要有：二氧化碳 CO_2 、甲烷 CH_4 、氧化亚氮 N_2O 、一氧化碳 CO 、氨气 NH_3 、硫化物 SO_x 、氮氧化物 NO_x 、非甲烷挥发性有机物 NMVOCs、颗粒物 TSP、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 。

除了上述气体排放以外，由于沥青路面建设过程中的环境影响包含的范围较广，不仅仅局限于对大气的影 响，但是本文进行沥青路面生命周期节能减排量化分析的重点在于能耗与气体排放，因此，本文在数据收集范围中仅考虑了与之相关的数据，而沥青路面建设所导致的土地占用、土壤污染、水体污染、噪音污染等不在本文研究范围内，与其相关的数据也不在数据收集的范围之中。

（2）划分单元过程

确定数据收集范围后，还需要进一步明确沥青路面建设过程中的哪些环节产生的环境影响在数据收集的范围之内，亦即明确沥青路面的哪些生产和使用环节会消耗能源并

产生气体排放。因此，需要根据能源消耗与气体排放情况，将沥青路面生命周期的各个环节划分为若干更为细化的单元过程，以明确该过程的具体能源消耗与产生的气体排放类别。

根据沥青路面建设过程的实际情况，并结合现有沥青路面生命周期分析研究的单元划分，按照精细程度不同，本文将单元过程的划分方法分为两个层次：基于产品的单元过程划分和基于流程的单元过程划分。以沥青混合料生产为例，两种单元过程划分方法的示意图如图 3.6 所示。

对于基于产品的单元过程划分方法，沥青混合料生产过程以沥青混合料最终产品为对象，具体过程不再细分，最终数据表现为生产单位重量或体积沥青混合料的能源消耗及气体排放。而对于基于流程的单元划分方法，沥青混合料生产过程以沥青混合料的生产流程为对象，需要将沥青混合料生产进一步细分为若干个单元过程，最终数据表现为若干个单元过程能耗及气体排放的总和。

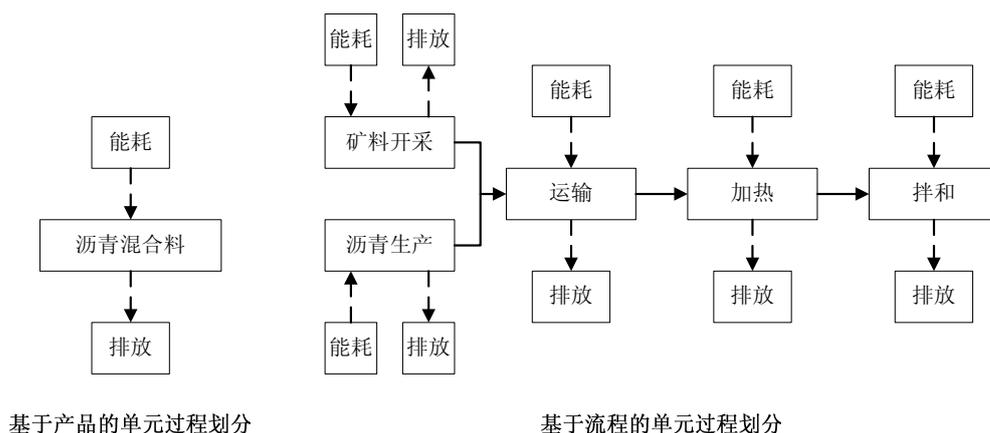


图 3.7 沥青路面单元过程划分示意图

在实际应用过程中，上述两种单元过程的划分方法并不是互斥的，可以在同一个生命周期分析同时采用这两种单元划分方法。本文根据沥青路面建设过程、数据统计分析方法、数据来源，在不同的分析阶段分别采用上述两种分析方法进行单元过程的划分。

(3) 建立数据清单

确定数据收集范围并合理划分单元过程后，就需要根据单元过程，建立与单元过程相关的数据清单，通常包括路面参数、工艺流程（单元过程）参数以及设备车辆参数三项主要内容，其中路面参数主要用于确定路面材料用量，工艺流程（单元过程）参数主要用于确定机械设备、运输车辆组合，设备车辆参数主要用于确定燃油消耗量。详细的数据清单内容如表 3.4 所示。数据清单是进行能耗与排放量化分析的数据基础，为了能

够快捷、清晰的建立数据清单并进行整理，通常采用 Excel 电子表格作为辅助工具。

表 3.4 数据清单内容

数据类别	清 单 内 容
路面参数	● 与路面相关的数据，包括沥青面层的厚度、沥青混合料的密度、沥青混合料配合比、道路路线长度等。
工艺流程参数 (单元过程参数)	● 每一个工艺流程（单元过程）使用的与能源消耗和气体排放有关的机械设备、车辆消耗的燃料类型及用量。
设备车辆参数	● 设备以及车辆的代表类型、参数、油耗（单位时间油耗或单位距离油耗）、排放效率等。

(4) 选择数据来源

采用实测数据能够保证获得更为准确的能耗与排放量化结果，但是目前实测沥青路面生命周期各个阶段的能耗与排放数据比较困难，需要投入大量的设备和人员，测量周期较长，而且基于实测数据的能耗与排放量化分析必须在整个沥青路面建设过程结束后才能有具体的结果，其实质是一种事后分析方法，无法在沥青路面建设前给出能耗与排放的量化信息，并有针对性的采取改进措施。因此，目前沥青路面生命周期能耗与排放量化分析均采用计算（预估）的方法，这种方法需要大量的中间数据进行计算分析，因而需要合理选择数据的来源。

进行沥青路面生命周期节能减排量化分析可用的数据源主要包括论文、科研报告、科研机构以及国家、地区和国际性专业组织的统计资料。本文从数据源的权威性、公开性、数据量等方面对上述数据源进行了比较，比较结果如表 3.5 所示。

表 3.5 不同数据源比较

数据源	权威性	公开性	数据量	应用情况
论文和科研报告	依据数据存在争议	根据版权	有限	引证
科研机构	较好	有限	比较丰富	引证 直接应用
国家、地区和国际性专业组织	较好	普遍公开	丰富	引证 直接应用

由表 3.5 可见，来源于国家、地区和国际性专业组织的数据具有较好的权威性和公开性，数据量更为丰富，从而能够保证生命周期分析的科学性、公开性和透明性的特点。因此，本文选择国家、地区和国际性专业组织的数据用于沥青路面生命周期节能减排量化分析。

需要注意的是，为了保证分析结果的准确性，选择的数据应能够反映当地沥青路面

材料、施工、机械设备及运行车辆的实际情况，亦即选择国家级的数据更为可靠。当缺乏国家级数据时，宜选择与本国情况类似的地区级数据；当上述数据均难以获得时，可以考虑采用国际（政府间）级数据。

由于我国生命周期分析研究起步较晚，沥青路面生命周期分析研究所涉及的数据难以获得，同时也缺乏地区性组织数据的支持，而且考虑到本文的研究目标在于建立沥青路面生命周期节能减排量化分析方法，可以在方法建立后，根据所涉及的数据，有目的完善数据源。因此，本文选择联合国政府间气候变化专门委员会 IPCC、欧盟欧洲环境局 EEA 以及美国国家环境保护局 EPA 等目前权威性较高的地区和国际性组织的数据进行沥青路面生命周期节能减排量化分析研究。

2. 沥青路面生命周期能耗与排放通用计算方法

根据收集到的数据，采用科学合理的方法计算沥青路面生命周期的能耗与排放量是进行沥青路面生命周期节能减排清单分析的最终目标。本文根据国内外相关研究，汇总分析建立沥青路面生命周期能耗与排放通用计算方法。

（1）沥青路面生命周期能耗通用计算方法

沥青路面生命周期能耗计算较为简单，可以直接通过机械设备、运行车辆的参数和使用频率计算得到。根据数据来源方式、适用范围的不同，本文将沥青路面生命周期能耗量化计算方法分为以下三种类型：

① 实测法

实测法以某个特定生产工艺流程能耗的实测数据为基础，在具体工程计算中，根据实际使用的生产设备及其运转状况，测定单位产量能耗。在特定的生产工艺流程中，如材料生产阶段，由于材料类型多样，通常以某一生产设备或生产企业单位产量能耗的实测值为基础，计算其平均能耗用于计算。实测法以企业平均值为核心，其关键在于企业平均值的合理获取。

② 理论法

理论法以生产设备的标准参数为依据，计算其在标准工况下的能耗。在数据缺失的情况下，理论算法也可以采用相关行业单位产量能耗的平均值作为代表值，用于能耗的量化计算。理论法以理想状况下设备参数为核心，其关键在于设备参数的获取及量化计算过程。

③ 定额法

定额法以我国现行《公路工程预算定额》（JTG/T B06-02-2007）和《公路工程机械

台班费用定额》(JTG/T B06-03-2007)为依据,首先根据预算定额规定的施工工艺流程,确定单位产量的机械台班数量;然后根据机械台班费用定额规定的机械设备单位台班能耗参数,确定能耗总量;最终计算得到单位产量的能耗。定额法是实测法和理论法的综合,该方法不仅体现了社会平均水平下的施工工艺流程,而且能够以相对具体的机械设备参数为核心。

上述三种能耗量化计算方法的流程图如图 3.7 所示,其中,实测法考虑了不同生产设备、生产商、设备运转等实际情况,计算结果比较准确,但是该方法仅局限于特定的工程,适用范围有限。理论法以生产设备标准工况及其工艺流程平均值为基础,具体到某一特定情况,可能会出现高估或低估等误差,但是该方法充分考虑了行业的普遍情况,具有一定的代表性,尤其在目前国内相关统计数据缺失的情况下,具有很好的适应性。定额法是采用现代管理技术建立的一套系统、完整的量化体系,由国家权威部门管理和完善,具有较高的权威性、稳定性和实效性,但是仅适用于定额中规定的机械设备的能耗计算。

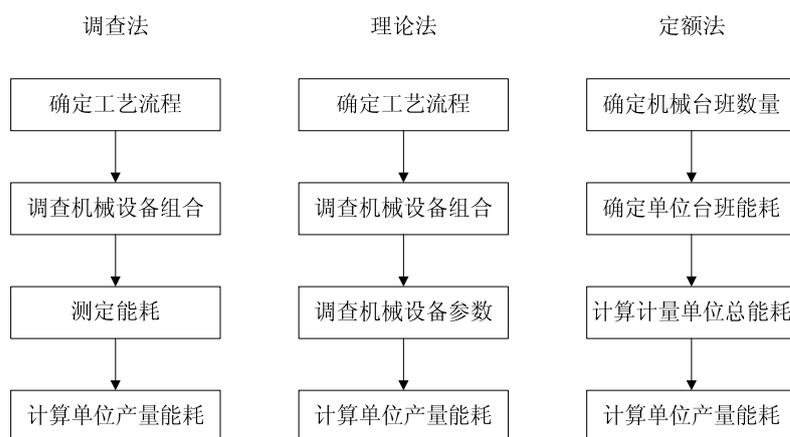


图 3.8 能耗计算方法流程图

上述三种方法各有优缺点,而且并不互斥,因此,本文在生命周期能耗量化计算过程中,采用“定额法为主,理论法为辅,实测法为补”的基本原则,在保证计算结果具有广泛性和代表性的基础上,提高计算结果的准确性。

在能耗计算过程中,由于固体、液体和气体燃料的生产量和消耗量有着特定的物理单位,此时得到的能源消耗数据是以不同能源消耗的质量或体积来表示的,这种表示方式无法将不同能源消耗量进行加和,得到综合能源消耗量,从而无法进行能源消耗量的对比分析和评价。

燃料燃烧发热是其释放自身能量的途径,因此,可以采用燃料的发热值将能源消耗

数据转换为普通能源单位，如焦耳（J）。目前，生命周期分析方法中多采用净发热值法计算能源消耗量。联合国政府间气候变化专门委员会 IPCC 基于年度温室气体清单提交缔约方文件、IPCC 排放因子数据库以及国际能源机构 IEA 的燃料数据库，进行统计分析，得到了不同燃料的净发热值统计数据。本文汇总得到沥青路面工程中各种车辆、机械设备常用的燃料净发热值如表 3.6 所示：

表 3.6 缺省净发热值（NCVs）和 95%置信区间的下限和上限 MJ/kg

燃料类型及英文说明	净发热值	较低	较高
车用汽油 Motor Gasoline	44.3	42.5	44.8
汽油/柴油 Gas/Diesel Oil	43.0	41.4	43.3
残留燃料油 Residual Fuel Oil	40.4	39.8	41.7
液化石油气 Liquefied Petroleum Gases	47.3	44.8	52.2
无烟煤 Anthracite	26.7	21.6	32.2

注：机械台班费用定额中的重油发热值可参考残留燃料油的数据

根据以上方法，可以得到净发热值法的通用计算公式如式 3.1 所示：

$$E = \sum_{i=1}^n (F_i \times NCV_i) \quad (3.1)$$

（2）沥青路面生命周期环境排放量化通用计算方法

排放量的计算则相对复杂，目前排放因子法是生命周期分析中通用的排放量计算方法。排放因子是人类活动与该活动导致的排放之间的代表数值，通常表示为单位质量、单位体积或单位距离的排放量，例如，在能源部门，燃料消费量可构成活动数据，而每单位被消耗燃料排放的二氧化碳的质量即为一个排放因子^[88]，IPCC 根据燃料 100%氧化的假设，计算得到了不同工业部门常用燃料的排放因子：

表 3.7 基于净发热值的燃料燃烧缺省排放因子 mg/MJ

燃料类型及英文说明	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
车用汽油 Motor Gasoline	69300	3	0.6
汽油/柴油 Gas/Diesel Oil	74100	3	0.6
残留燃料油 Residual Fuel Oil	77400	3	0.6
液化石油气 Liquefied Petroleum Gases	63100	1	0.1
无烟煤 Anthracite	98300	1	1.5

根据以上方法，可以得到排放因子法的通用计算公式如式 3.2 所示：

$$E = A \times EF \times \left(1 - \frac{ER}{100}\right) \quad (3.2)$$

式中：E 为排放量，A 为活动数据，EF 为排放因子，ER 为减排效率。

例如，计算以车用汽油作为燃料的车辆在道路上行驶所产生的 CO₂ 排放量，假定某型车辆油耗为 75g/km（百公里油耗 10l，汽油密度 750kg/m³），欧盟欧洲环境局 EEA 的道路运输过程燃油消耗 CO₂ 排放因子为 3.18，即消耗 1kg 车用汽油会产生 3.18kg 的 CO₂，则在不考虑减排效率的情况下（ER=0），排放量为：75g/km×3.18g/g=238.5g/km。

以上仅是排放因子法的通用计算形式，实际应用中，由于排放因子、数据详略程度、数据来源方式等差异，上述计算公式可以更为复杂，本文根据国内外相关研究^[89]，将目前排放因子计算方法归纳总结为以下三个水平：

① 排放因子 1 水平（典型平均）计算方法

1 水平计算方法通过活动数据与排放因子之间简单的线性关系计算排放量（如式 3.1 所示的通用计算公式），其排放因子代表了“最典型”或者“平均意义”的过程状况，可以采用相关数据库中排放因子的平均值或缺省值进行计算。因此，排放因子 1 水平计算方法可以用于各种数据源分析，尤其适用于缺乏特定状况数据的粗略估算和排放量的简单比较分析。

② 排放因子 2 水平（国家平均）计算方法

2 水平计算方法采用了特定国家的排放因子替代 1 水平计算方法中的平均排放因子。特定国家的排放因子考虑了当地特定工艺流程信息、燃料质量以及节能减排技术等，更具有针对性，可以减小 1 水平计算方法产生的误差。因此，排放因子 2 水平计算方法适用于能够获得特定国家排放因子的情况，从而用于计算特定国家某一产品生命周期的排放量。

③ 排放因子 3 水平（工艺平均）计算方法

3 水平计算方法采用基于测量的活动数据，并采用设备级的排放因子和更为复杂的计算模型，但是由于计算所需的数据大多采用实测值，往往因为数据测量方法的误差导致计算结果的不确定性，因此要求在实际应用中对测量数据进行验证。在确保实测数据质量的前提下，3 水平计算方法具有很好的可靠性，计算结果最为准确，但是其成本较高，耗费的时间较多，目前应用较少，一般仅仅适用于分析规模较小的某一特定工艺流程的排放量计算。

上述三个水平的排放计算方法并不是互斥的，允许根据数据来源而在同一个分析问题上同时采用上述三种方法，从而提高分析结果的可靠性。根据本文数据源的选择，考虑到目前我国车辆运行以及各种工业部门的排放因子还处于研究阶段，尚未形成标准的

数据，因此，本文在沥青路面生命周期节能减排量化分析研究中采用排放因子 1 水平及 2 水平计算方法确定沥青路面生命周期阶段的排放量。同时，根据上述三水平排放因子的特点，本文建议在进一步的研究中可以考虑首先采用 3 水平计算方法，实测沥青路面生命周期各个阶段的排放量，建立适合我国沥青路面建设、运营与使用状况的排放因子数据库，随后在沥青路面生命周期节能减排量化分析的大规模推广应用，采用相对简单、可靠性具有一定保证的 2 水平计算方法确定沥青路面生命周期各阶段的排放量。

3.2.3 量化评价

量化评价是根据生命周期清单分析结果进行定量分析与评价的阶段，本文根据量化分析评价的广度、深度和复杂性，将其分为两个层次，即影响评价与结果解释和综合量化分析。

1. 影响评价与结果解释

影响评价与结果解释是根据沥青路面生命周期节能减排清单分析结果，从能耗与排放角度对沥青路面的环境影响程度进行评价，并根据分析评价结果提出相应的改善措施。根据 ISO14040 规定的生命周期影响评价技术框架，结合分析需要，本文确定了沥青路面生命周期节能减排量化分析影响评价与结果解释的基本流程（图 3.8）：

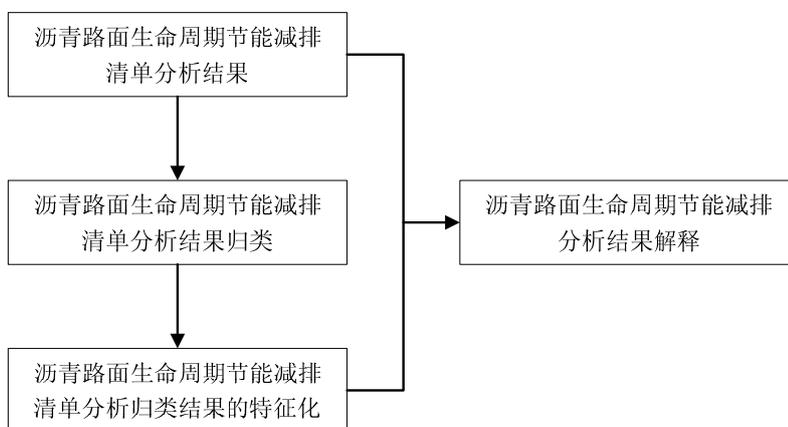


图 3.9 量化分析影响评价与结果解释的基本流程

(1) 清单分析结果归类

沥青路面生命周期清单分析的结果都是某一环境影响因子具体、单一的数值，需要根据环境影响因子对环境造成的具体影响，以及环境影响因子的环境机制将不同的环境影响因子归为一定的分类中。例如，CO₂、CH₄、N₂O 均会产生温室效应导致气候变暖，因此，需要将其归为与温室气体相关的类别中。

联合国环境规划署（UNEP）、国际环境毒理学与化学学会（SETAC）以及中科院

生态环境研究中心分别给出了生命周期影响评价中清单结果的具体类别^[90],主要包括臭氧耗竭、全球变暖、生态毒性等。本文结合沥青路面节能减排量化分析的需要以及清单分析的数据收集范围,将沥青路面生命周期清单分析结果划分为材料消耗、能源消耗以及环境排放三个大类,具体的分类如表 3.8 所示。

需要注意的是,当清单分析的结果只涉及一种影响类别时,分类很明显,也易于完成。但是,当清单分析结果涉及两种或两种以上的类别时,需要分析环境影响因子的作用机制将其进行合理分配。本文的沥青路面生命周期清单分析结果中,SO_x和NO_x分属于酸化和健康危害两个类别。其中SO_x参与人体健康损害后,性质变化,不具有酸化效应,反之亦然;而NO_x产生光化烟雾危害人体健康后,还可以继续产生酸化效应。因此,本文将SO_x清单分析结果在酸化效应和健康危害两种影响类别中各取一半(即分配因子为0.5),而将NO_x清单分析结果在酸化效应和健康危害两种影响类别中均取全部值(即分配因子为1)。

(2) 清单分析归类结果的特征化

在同一个影响类别中,不同环境影响因子对该影响类别的贡献率是不同的。例如,在全球变暖类别中,CO₂、CH₄、N₂O所引起的温室效应是不同的。因此,需要根据一定的科学过程,选择影响类别的代表因子,即特征因子,将其他影响因子的作用通过特征因子唯一表征,从而汇总得到某个影响类别以量化数值表示的影响能力。目前,国内外通常采用当量模型,即以特征因子作为当量系数来进行清单分析结果的特征化,其计算公式如式 3.3 所示:

$$EI_i = \sum_j (I_{ij} \times C_{ij}) \quad (3.3)$$

式中:EI_i为第i个影响类别的特征化结果;I_{ij}为第i个影响类别中,第j个影响因子的清单分析结果;C_{ij}为第i个影响类别中,第j个影响因子的特征参数。

本文进行沥青路面生命周期节能减排清单分析归类结果的特征化同样采用上述当量模型,其中的影响类别、影响因子以及各影响因子对应的特征因子如表 3.8 所示。

表 3.8 影响类别、影响因子及特征因子

影响类别	影响因子	特征因子单位	特征因子	
材料消耗	矿料、沥青等	吨	1	
能源消耗	汽油、柴油、液化石油气等	MJ	1	
环境排放	全球变暖	CO ₂	1	
		CH ₄	25	
		N ₂ O	298	
	酸化效应	SO _x	kg 等效 SO ₂	1
		NO _x		0.7
NH ₃		1.88		
健康危害	SO _x	kg 等效 1,4-二氯苯	0.096	
	NO _x		1.2	
	CO		2.4	
	NMVOC		0.64	
颗粒物	PM ₁₀ 、PM _{2.5}	kg	1	

注：1. 全球变暖采用 IPCC 第四次报告中的 100 年气候变暖潜势数值；SO_x 数据采用 SO₂ 数据，NO_x 数据采用 NO₂ 数据。2. 数据来源：联合国政府间气候变化专门委员会 IPCC、国际应用系统分析学会 IIASA

(3) 分析结果的解释

分析结果的解释又可称为改善评价，主要是根据量化分析的结果，分析环境影响的构成，并提出相应的改善建议。从节能减排的角度，本文根据沥青路面生命周期分析结果，从以下几个方面提出具体的改善建议：

① 分析生命周期各个阶段的材料消耗、能源消耗以及环境排放的构成比例，明确上述三个影响类别中影响最为显著的阶段，进而提出具体的改善措施。

② 根据材料消耗、能源消耗以及环境排放三个指标及其次级指标，并综合考虑其他定量和定性分析指标，建立沥青路面节能减排评价指标体系，对沥青路面节能减排措施等进行综合评价。

2. 综合量化评价

影响评价与结果解释是传统的生命周期分析方法的最后一个阶段，该阶段分析所得到的结论和建议措施可以为工程项目节能减排提供科学合理的指导。但是，影响工程项目能耗与排放的因素较多，包括材料、技术、管理等诸多方面；同时，在工程应用中，不仅期望得到有针对性的分析和对策，而且更希望得到该工程项目的节能减排效益如何，究竟处于何种等级水平。为此，本文根据生命周期分析方法开放性的特点，在其基础上增加综合量化评价部分，以完善和发展现有生命周期分析方法，其组成部分和流程

如下图 3.10 所示。

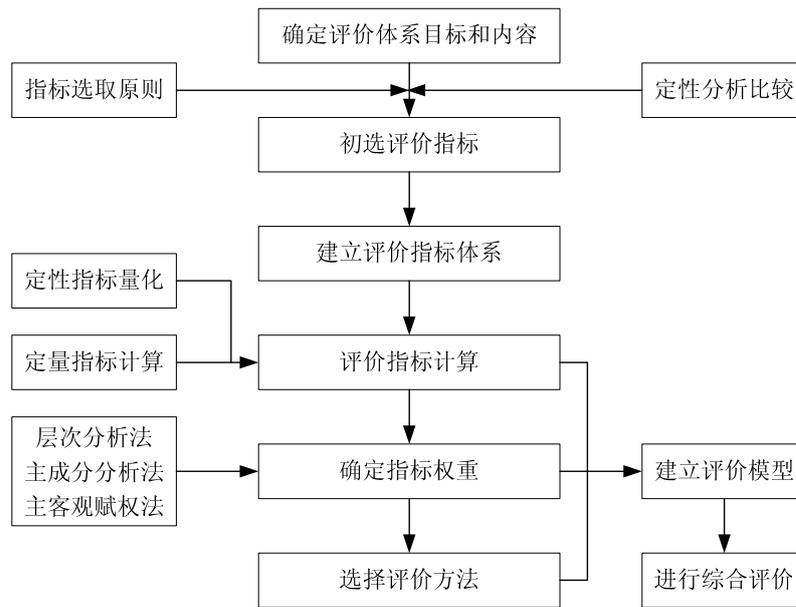


图 3.10 沥青路面节能减排综合量化评价方法组成及流程

(1) 综合量化评价指标体系

量化评价指标体系是综合量化评价的基础，主要包括以下两方面内容：

① 选择合理的评价指标

目前沥青路面节能减排量化评价研究中所提出的评价指标较多，而且不同的研究由于其研究对象、目的等的差别，所采用的评价指标也互不相同。为此，需要以沥青路面节能减排量化分析评价的目的与范围为基础，考虑工程项目建设方、管理方以及社会公众的要求，在现有技术水平的条件下，从保证评价结果准确、公正、客观的前提下，合理确定评价指标的选择原则。

在评价指标的选择过程中，需要遵循评价指标的选择原则，同时以影响工程项目能耗与排放的材料、技术、管理等因素出发，从定性评价和定量评价的角度，选择既有利于分析评价开展，同时能够反映沥青路面节能减排效果的评价指标。

② 确定评价指标的基准值

评价指标的基准值是根据评价指标的量化数值或评价内容，判断其所属等级的标准。根据定性评价指标与定量评价指标属性的不同，本文分别提出其基准值确定方法。

对于定性评价指标，可以根据现行规范，制定不同等级所要求的标准条文或文件资料，按照评价对象提供的相应证明文件资料，判断其所属等级。

对于定量评价指标，本文依据节能减排量化的实质，提出节能减排率的概念，即工程项目的实际能耗与排放和社会平均意义下能耗与排放参照值的减小比例，公式表示

如下：

$$\text{节能减排率} = \frac{\text{实际能耗与排放} - \text{社会平均意义能耗与排放}}{\text{社会平均意义能耗与排放}} \quad (3.4)$$

根据评价等级，将节能减排率分为不同的水平范围，按照计算得到的节能减排率数值，即可判断工程项目节能减排实施效果所达到的等级水平。

（2）评价指标权重

由于评价指标的内涵不同，反映的环境影响类别不同，因此对能耗与排放的影响程度也存在差别。为了能够合理的反映不同评价指标的影响程度差异，需要给评价指标赋以一定的权重。

目前，确定指标权重的方法有层次分析法、主成分分析法、主客观赋权法等多种，为了更科学合理的确定权重，需要结合沥青路面的实际，从沥青路面节能减排量化分析评价的管理者、参与者、实施者以及评价对象的角度出发，选择合理的指标权重确定方法，在此基础上确定沥青路面节能减排量化评价指标权重。

（3）沥青路面节能减排综合量化评价方法

现有的沥青路面节能减排量化评价大多是针对能耗与排放减少量的一种简单的数值分析，虽然反映了采用节能减排措施后的直接效果，但是没有能够反映诸如材料、技术、管理等因素对节能减排效果的影响。此外，仅得到基于能耗与排放减少量的量化评价数值还不能满足节能减排量化评价的需要，设计应用中还需要得到节能减排效果所属的等级，如优、良、中、次、差等。

为此，需要在确定的评价指标及其基准值和权重的基础上，采用模糊评价理论、灰色评价理论等综合评价方法，结合沥青路面节能减排量化评价实际，建立沥青路面节能减排综合量化评价方法，确定沥青路面节能减排效果达到的等级，为节能减排量化评价提供科学的支持。

3.3 本章小节

本章首先分析总结了生命周期分析方法的特点，论证了生命周期分析用于沥青路面节能减排量化分析的可行性；进一步对比分析了生命周期分析类型的特点，结合沥青路面建设与养护实际，选择合理的使用寿命分析方法用于沥青路面节能减排量化分析；根据生命周期分析理论，建立了基于生命周期分析的沥青路面节能减排量化分析体系的基本框架。本章的主要结论如下：

(1) 根据生命周期分析方法系统性、全面性、透明性、科学性、开放性和灵活性的特点, 结合沥青路面节能减排量化分析研究的需要以及沥青路面建设和使用的实际, 探讨了生命周期分析方法用于沥青路面节能减排量化分析研究的可行性。

(2) 对比分析了三种生命周期分析类型的优缺点, 结合沥青路面建设和使用的实际, 以及我国生命周期研究和相关数据的可获取性, 推荐采用基于流程的生命周期分析进行沥青路面节能减排量化分析研究。

(3) 根据 ISO 14040 对生命周期分析的相关规定, 结合沥青路面节能减排量化分析评价的需要, 明确了节能减排量化分析评价的主要内容与流程, 建立了基于生命周期分析的沥青路面节能减排量化分析评价体系的基本框架。

(4) 针对沥青路面生命周期单元过程划分, 提出了基于产品和基于流程的两种生命周期单元过程划分方法; 分析了调查法、理论法和定额法三种能耗量化分析方法的优缺点, 推荐了沥青路面能耗量化分析方法; 分析了典型平均、国家平均和工艺平均三水平排放因子量化分析方法的优缺点, 推荐了沥青路面环境排放量化分析方法。

第四章 沥青路面建设阶段能耗与排放量化分析研究

沥青路面建设阶段包括沥青混合料生产和沥青路面施工两个次级阶段，是沥青路面生命周期中材料消耗最为集中的阶段。而且，由于沥青混合料独特的粘弹性性质，为了保证沥青混合料的施工和易性，目前国内外普遍采用热拌法进行沥青混合料的生产 and 施工，导致沥青路面建设阶段的能源消耗与排放问题尤为突出。因此，沥青路面建设阶段的能耗与排放是目前沥青路面生命周期分析研究的重点。

为此，本章根据沥青路面节能减排量化分析研究的基本框架，按照本文提出的基于流程的单元过程划分方法确定的单元过程，针对沥青路面建设阶段的各个具体过程，从数据收集、数据计算等方面详细探讨沥青路面建设阶段能耗与排放量化分析的具体方法及步骤，最终建立沥青路面建设阶段能耗与排放量化分析模型，并结合实例说明具体应用过程。

4.1 沥青混合料生产阶段能耗与排放量化分析

用于铺筑沥青路面的沥青混合料主要由沥青和石料组成，根据基于产品的单元过程划分方法，沥青混合料生产阶段的能耗与排放量化分析只需要明确生产每单位沥青混合料的能耗与排放即可；而根据基于流程的单元过程划分方法，沥青混合料生产阶段的能耗与排放量化分析则需要明确生产每单位沥青和石料的能耗与排放，并将其合理汇总。本文通过调查国内外相关数据和文献，从分析计算准确性和全面性的角度出发，采用基于流程的单元过程划分方法，具体分析沥青混合料生产阶段的能耗与排放量化方法。

4.1.1 沥青生产过程的能耗与排放量化分析

沥青混合料中使用的沥青胶结料主要为石油沥青（基质沥青）和聚合物改性沥青，上述两种常用的沥青胶结料生产工艺存在一定的差别，石油沥青（基质沥青）是石油通过多种蒸馏工艺后得到的残留物，或残留物进一步氧化得到的产品；而改性沥青则是在石油沥青（基质沥青）中添加一定数量的高分子聚合物，并通过高温剪切搅拌使两者混合均匀而制成的产品。两种沥青胶结料典型的生产工艺流程如图 4.1 所示。

由于石油沥青（基质沥青）与改性沥青的生产工艺有很大的不同，其生产过程能耗与排放也有较大的差异。但是，目前有关沥青路面生命周期的研究中，均未将石油沥青和改性沥青分开考虑，虽然有些研究在数据清单中分别收集了石油沥青和改性沥青的材

料消耗量^[44],但是在能耗与排放量化分析中仍然采用相同的排放因子计算石油沥青和改性沥青生产过程的排放,这样势必低估改性沥青生产过程的能耗与排放,进而导致计算结果产生很大的不确定性。因此,针对目前国内改性沥青使用普遍、用量较大的现状,有必要在沥青生产阶段对石油沥青和改性沥青的能耗与排放分别进行分析计算。

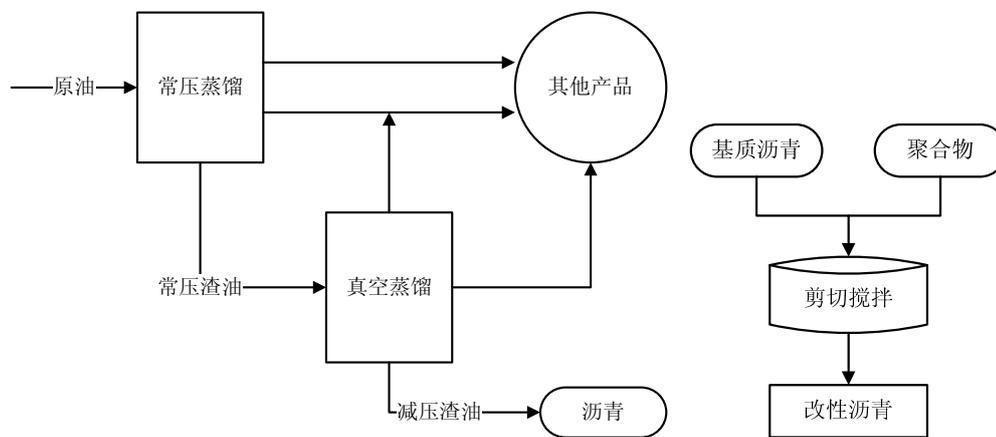


图 4.1 石油沥青与改性沥青生产工艺流程简图

目前,国内还没有对沥青材料进行系统深入的生命周期分析研究,也没有建立沥青类材料的能耗与排放量化清单。国外的相关研究大多针对本国的具体情况,由于不同国家的原油来源、生产工艺、技术水平等存在较大的差异,相关数据难以直接用于本文的研究。在地区或国际组织的相关研究中,欧洲沥青协会(European Bitumen Association)早在1999年就进行了比较全面的沥青材料生命周期清单分析,2009年对研究成果进行了进一步的更新和完善。该项研究主要针对道路铺装用沥青材料,包含了针入度等级20~220(0.1mm)的石油沥青、聚合物改性沥青和乳化沥青,生产工艺则考虑了直馏、半氧化、丙烷脱等多种加工流程,数据来源则涵盖了欧洲主要工业国家,具有广泛的代表性。为此,本文根据前文确定的数据源选择方法,采用欧洲沥青协会沥青生命周期清单分析中的排放因子数据。

根据本文确定的沥青路面生命周期能耗与排放量化分析数据收集范围,参考欧洲沥青协会的沥青生命周期清单分析结果^[91],石油沥青和改性沥青的能耗与排放因子如表4.1所示。根据表中数据,结合能耗与排放通用计算公式3.1和3.2,即可计算得到消耗一定数量的石油沥青和改性沥青所产生的能耗与排放量。其中,计算得到的石油沥青和改性沥青生产过程单位产量能耗(MJ/t)如表4.2所示。

表 4.1 石油沥青和改性沥青的能耗与排放因子

沥青类型		石油沥青	改性沥青
能耗 (kg/t)	天然气	20.1	50.0
	原油	40.9	59.9
	煤	1.03	8.5
	铀	0.0001	0.0002
排放 (g/t)	CO ₂	174,244	295,910
	SO ₂	781	1630
	NO _x	770	1375
	CO	613	671
	CH ₄	595	1085
	NM VOC	331	331
	颗粒物	161.2	265

注：以上数据包括了原油开采、运输、提炼以及储存过程

表 4.2 沥青生产过程单位产量能耗

燃料	发热值 (MJ/kg)	单位燃料消耗 (kg/t)		单位能耗 (MJ/t)	
		石油沥青	改性沥青	石油沥青	改性沥青
	①	②	③	④=①×②	⑤=①×③
天然气	48.0	20.1	50.0	964.8	2400
原油	42.3	40.9	59.9	1730.07	2533.77
煤	26.7	1.03	8.5	27.501	226.95
铀	8.5×10^7	0.0001	0.0002	8500	17000
总计				11222.371	22160.72

4.1.2 石料生产过程的能耗与排放量化分析

石料是沥青路面建设和养护过程中使用量最大的一种材料，目前，国内外普遍采用专用的石料生产线进行石料的规模化生产，该生产线主要由振动给料机、颚式破碎机、反击式破碎机、振动筛、胶带输送机、集中电控等设备组成，其生产工艺流程如图 4.2 所示。

大块石料经料仓由振动给料机均匀地送进颚式破碎机进行粗碎，粗碎后的石料由胶带输送机送到反击式破碎机进行进一步破碎；细碎后的石料由胶带输送机送进振动筛进行筛分，筛分出几种不同规格的石料，满足粒度要求的石料由成品胶带输送机送往成品料堆；不满足粒度要求的石料由胶带输送机返料送到反击式破碎机进行再次破碎，形成

闭路多次循环。

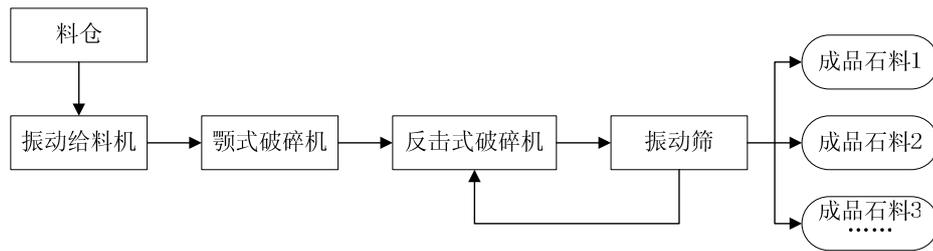


图 4.2 石料生产工艺流程

1. 石料生产过程能耗计算

石料生产过程中的主要机械设备多采用电力驱动，因此，石料生产过程的能耗主要为电力消耗。本文调查得到了目前国内常用的石料生产线的主要技术参数，根据其处理能力和总装机功率，初步计算出在理想状态下石料生产线的单位产量能耗如表 4.3 所示：

表 4.3 石料生产线单位产量能耗

最大进料 mm	处理能力 t/h	装机功率 kw	能耗 kw·h/t
340	30	120	4.00
340	50	140	2.80
420	80	200	2.50
480	100	280	2.80
560	150	300	2.00
630	200	350	1.75
630	250	400	1.60
630	300	450	1.50
700	350	500	1.43
700	450	600	1.33

本文采用理论法，采取以行业平均值作为代表值的方法计算石料生产过程中的能源消耗。根据表 4.3 中的数据，目前国内石料生产线的产量能耗约为 1.3~4kw·h/t，本文取其平均值为 3kw·h/t 用于石料生产阶段能耗的估算，电力的能耗按照 1kw·h 等效热值为 3.6MJ 计算，则在行业平均理想状态下，石料生产阶段的能耗约为 10.8MJ/t。

2. 石料生产过程环境排放计算

根据本文进行的文献和现场调查，石料生产过程中产生的环境排放主要为颗粒性物质，欧盟欧洲环境局 EEA 以及美国国家环境保护局 EPA 均对石料生产过程的排放问题进行了系统的研究，其中 EPA 按照石料生产的工艺流程，对各个环节的环境排放进行了较为细致的统计分析，而且其中涉及的石料生产工艺流程及机械设备配置与我国目前

的情况基本一致。为此，本文采用 EPA 调查分析得到的排放因子用于石料生产过程环境排放计算。石料生产各个环节及汇总的排放因子如表 4.4 所示^[92]，结合排放通用计算公式 3.2，即可计算得到消耗一定数量的石料所产生的排放量。

表 4.4 石料生产过程排放因子 (kg/t)

生产环节	粗料破碎	细料破碎	粗料筛分	细料筛分	转运	总计
TSP	0.0027	0.0195	0.0125	0.15	0.0015	0.19
PM ₁₀	0.0012	0.0075	0.0043	0.036	0.00055	0.05

4.1.3 沥青混合料生产过程能耗与排放量化分析

1. 沥青混合料生产过程能耗计算

根据前文调查结果，沥青混合料生产过程能耗主要为液体燃料消耗以及电力消耗。按照能源消耗计算的定额法，采用《公路工程预算定额》(JTG/T B06-02-2007)和《公路工程机械台班费用定额》(JTG/T B06-03-2007)的相关数据计算沥青混合料生产过程的能源消耗量。按照前文确定的定额法计算流程，本文以中粒式沥青混合料生产过程为例，详细说明定额法的计算过程。

预算定额确定了生产 1000m³ 中粒式沥青混合料路面实体所需的机械台班数量，机械台班费用定额规定了拌和设备每一机械台班的液体燃料及电力消耗量，则可计算得到生产 1000m³ 中粒式沥青混合料路面所需的重油和电力累计消耗量 (表 4.5)。

表 4.5 1000m³ 中粒式沥青混合料路面实体的重油和电力累计消耗量

设备	台班	重油消耗 (kg/台班)	电力消耗 (kw·h/台班)	累计消耗量	
				重油 (kg)	电力 (kw·h)
	①	②	③	④=①×②	⑤=①×③
30 以内	16.51	897.6	606.06	14819.38	10006.05
60 以内	6.92	1795.2	1318.11	12422.78	9121.32
120 以内	3.74	3590.4	1859.23	13428.1	6953.52
160 以内	2.64	4787.2	3052.46	12638.21	8058.49
240 以内	1.76	7180.8	4474.63	12638.21	7875.35
320 以内	1.34	9574.4	5917.61	12829.7	7929.6

预算定额中以 1000m³ 沥青路面为计量单位，根据实际路面实体数量 V (m³)，并按照不同燃料的发热值 (表 3.6)，最终可以计算得到生产 Vm³ 路面实体所需沥青混合料过程中的总能耗。其计算表如表 4.6 所示。

表 4.6 Vm^3 中粒式沥青混合料路面实体的生产能耗计算

设备	分项能耗		总能耗 (MJ)
	重油 (MJ)	电力 (MJ)	
	⑥=④×40.4	⑦=⑤×3.6	⑧=(⑥+⑦)×V/1000
30 以内	598702.95	36021.78	634.72V
60 以内	501880.31	32836.752	534.72V
120 以内	542495.24	25032.672	567.53V
160 以内	510583.68	29010.564	539.59V
240 以内	510583.68	28351.26	538.93V
320 以内	518319.88	28546.56	546.87V

按照上述方法还可以计算得到细粒式、粗粒式等其他沥青混合料以及沥青碎石和 SMA 混合料的单位产量能耗，根据施工预算或施工计划确定的沥青混合料拌和设备，即可确定沥青路面建设阶段，沥青混合料生产过程的能耗量化数值。

2. 沥青混合料生产过程环境排放计算

根据本文调查，沥青混合料生产过程所涉及的环境排放种类多、环节多，其计算过程相对复杂。按照本文调查得到的沥青混合料生产过程环境排放流程图，实测各环节的环境排放，需要耗费大量的时间和精力。目前，欧盟欧洲环境局 EEA 以及美国国家环境保护局 EPA 等国际或地区性组织均对沥青混合料生产过程的排放问题进行了系统的研究，其中 EPA 按照沥青混合料生产设备及其工艺流程，分别对间歇强制式拌和设备 and 连续滚筒式拌合设备各个环节的环境排放进行了较为细致的统计分析，可以借鉴用于沥青混合料生产过程环境排放的量化计算。

根据本文调查，沥青混合料生产过程由燃料燃烧和非燃料燃烧产生的环境排放又可以归为固体颗粒物排放和气态污染物排放两大类，沥青混合料生产过程关键环节固体颗粒物排放因子如表 4.7 所示，气态污染物排放因子如表 4.8 所示^[93]。

表 4.7 沥青混合料生产过程固体颗粒物排放因子 (kg/t)

间歇强制式			连续滚筒式		
生产环节	PM ₁₀	PM _{2.5}	生产环节	PM ₁₀	PM _{2.5}
烘干筒、振动筛、拌和器 (未除尘控制)	2.25	0.14	旋转滚筒 (未除尘控制)	3.2	0.75
烘干筒、振动筛、拌和器 (纤维织物除尘)	0.0049	0.0042	旋转滚筒 (纤维织物除尘)	0.0021	0.0015

表 4.8 沥青混合料生产过程气态污染物排放因子 (kg/t)

生产设备 工艺流程	CO	CO ₂	NO _x	SO ₂	TOC	CH ₄	VOC
间歇强制式 烘干筒等	0.2	18.5	0.06	0.044	0.0075	0.0037	0.0041
连续滚筒式 旋转滚筒等	0.065	16.5	0.0275	0.029	0.022	0.006	0.016

需要说明的是, 根据相关调查, 燃料类型对固体颗粒物排放影响较小, 而对气态污染物排放影响较大, 因此, 固体颗粒物排放因子未考虑不同燃料类型的影响, 气态污染物排放因子则针对目前我国普遍使用燃油设备的现状, 采用相应的排放因子。确定沥青混合料生产过程环境排放因子后, 即可按照排放通用计算公式 3.2, 计算得到生产一定数量 (吨) 的沥青混合料所产生的排放量。

4.2 沥青路面施工阶段能耗与排放量化分析

沥青路面施工阶段是各种运输车辆和施工机械设备使用最为集中的环节, 该阶段的能耗主要为车辆和施工机械的液体燃料消耗, 环境排放则主要源于车辆和施工机械运行以及燃料的消耗。本文以沥青路面施工阶段能耗与排放调查为基础, 结合沥青路面生命周期能耗与排放量化分析方法, 具体分析沥青路面施工阶段能耗与排放量化分析方法及其流程。

4.2.1 沥青混合料运输过程能耗与排放量化分析

1. 沥青混合料运输过程能耗计算

根据前文调查结果, 沥青混合料运输过程能耗主要为液体燃料消耗, 影响沥青混合料运输过程能耗的主要因素为运输距离、运输车辆数量以及运输车辆类型等。本文在此分别采用理论法和定额法详细说明其计算过程。

(1) 理论法

国外有研究提出了路面建设过程中材料运输过程的能耗计算公式^[94], 本文以该公式为基础, 结合沥青混合料运输过程中的实际情况, 提出基于理论法的沥青混合料运输过程能耗计算方法。

在沥青路面施工过程中, 为了保证拌和设备运转和路面铺筑工作的连续性, 需要根据拌和设备的生产能力 G (t/h)、车辆载重能力 G_0 (t) 以及重载运程时间 t_1 、空载运程时间 t_2 和卸料等待时间 t_3 确定运输车辆的数量 N ^[95]:

$$N = \alpha \times (t_1 + t_2 + t_3) / (60G_0/G) \quad (4.1)$$

式中， α 为储备系数，视交通状况而定，一般取 $\alpha=1.1\sim 1.2$ 。

调查每一运输车辆的燃油消耗量 (l/km)，根据燃油的密度及其发热值，将其转换为单位距离的能量消耗 e_u (MJ/km)。按照沥青混合料的运输距离 L (km)，则可以计算得到每一运输车辆的能耗 E_i ：

$$E_i = e_u \times L \quad (4.2)$$

根据以上确定的运输车辆数量 N 及每一运输车辆的能耗 E_i ，考虑沥青混合料运输过程中去程重载和返程空载的实际情况，则可以得到沥青混合料运输过程总能耗 E_{total} 的计算公式：

$$E_{total} = (1 + \beta) \sum_{i=1}^N E_i \quad (4.3)$$

式中， β 为返程系数，其数值主要取决于返程是否负载。当空载返回时，重载去程和空载返程为一个运输流程，空载返回的能耗约占总能耗的 80%^[96]，故返程空载时 $\beta=0.8$ ；当返程负载时，则返程可视为下一个独立的运输流程，不在此流程中考虑，故返程负载时， $\beta=0$ 。

(2) 定额法

预算定额充分考虑了影响沥青混合料运输过程能耗的主要因素，以 1000m^3 路面实体为单位，给出了不同运输车辆、不同运距条件下的台班数量；机械台班费用定额则规定了每种运输车辆单位台班的耗油量 (kg/台班)。根据上述定额数据，并结合路面工程数量 V (m^3) 和沥青混合料平均运输距离 L (km)，就可以计算得到沥青混合料运输过程消耗的燃料数量 (kg)，按照柴油的发热值 (表 3.6)，最终可以得到沥青混合料运输过程的能耗 (MJ)。计算过程中涉及的相关表格如下，表 4.9 为预算定额和机械台班费用定额中的相关基础数据 (本文仅列出部分设备)，表 4.10 为沥青混合料运输过程能耗计算过程表。

表 4.9 沥青混合料运输过程车辆台班及油耗

设备	第一个 1km (台班)	每增运 0.5km (台班)			油耗 (kg/台班)
		平均运距 (km)			
	5 以内	10 以内	15 以内		
	①	②	③	④	⑤
10t 以内自卸车	10.92	1.07	0.96	0.91	55.32
12t 以内自卸车	9.49	0.94	0.84	0.79	61.60

设备	第一个 1km (台班)	每增运 0.5km (台班)			油耗 (kg/台班)
		平均运距 (km)			
	5 以内	10 以内	15 以内		
	①	②	③	④	⑤
15t 以内自卸车	7.99	0.73	0.65	0.62	67.89
20t 以内自卸车	6.14	0.56	0.49	0.47	77.11

表 4.10 沥青混合料运输过程能耗计算表

设备	1000m ³ 路面所需台班数量	沥青混合料运输过程能耗 (MJ)
	平均运距 L (km)	
	⑥=①+②×(L-1)/0.5 L≤5 ⑥=①+③×(L-1)/0.5 L≤10 ⑥=①+④×(L-1)/0.5 L≤15	⑦=⑤×⑥×43.0×V/1000
.....		
12t 以内自卸车		
15t 以内自卸车		
.....		

采用上述表格计算时,需要注意的是,对于平均运距 L 非整数而有小数尾数的情况,可以参照预算定额中的相关计算规定执行;对于平均运距超过 15km 的情况,则应按照工程所在地社会运输的有关规定计算其耗油量。

2. 沥青混合料运输过程环境排放计算

根据本文调查,沥青混合料运输过程中的环境排放主要源于车辆运行以及燃料燃烧产生的各种气态污染物。目前沥青混合料运输多采用重型柴油车,由于重型柴油车对环境影响较大,国内外对柴油车的排放因子进行了大量的研究。我国相关科研部门采用实测法分析了不同地区和工况条件下柴油车的排放情况,给出了 NO_x、CO 以及 THC 等主要污染物的排放因子^[97-100]。但是,其研究仅局限于某一特定的地区,相关结论并不具有普遍性。

联合国政府间气候变化专门委员会 IPCC 以及欧盟欧洲环境局 EEA 等国际或地区性组织均对运输过程的排放问题进行了系统的研究,IPCC 仅提出了主要排放物 CO₂、CH₄ 和 N₂O 的排放因子,而 EEA 则采用不同水平的排放因子确定方法,根据欧盟 15 国的统计数据,提出了包括 IPCC 建立的主要污染物清单在内的车辆运输排放因子清单。EEA 建立的车辆运输过程排放因子具有一定的广泛性和代表性,本文采用其平均排放因子用于沥青混合料运输过程排放的量化计算,各环境排放产物的平均排放因子如表 4.11 所示。

表 4.11 重型柴油车运输沥青混合料过程环境排放因子

环境排放产物	CO	NMVOC	NO _x	PM	N ₂ O	NH ₃	CO ₂
排放因子 (g/kg)	8.0	1.6	37.0	1.2	0.061	0.015	3.14*

*注：CO₂ 排放因子基于燃料 100%氧化假设得出，其单位为 kg 等效 CO₂ 排放/kg 柴油消耗

按照排放通用计算公式 3.2，根据上表中的排放因子 (g/kg) 以及理论法或定额法计算得到的燃油消耗量 (kg)，即可计算得到沥青混合料运输过程中的环境排放量。

4.2.2 沥青路面施工过程能耗与排放量化分析

1. 沥青路面施工过程能耗计算

沥青路面施工过程中的机械设备主要为摊铺设备和压实设备，其能耗主要为液体燃料消耗。在沥青路面施工过程中，上述施工机械不会进行长距离的行驶，因此，机械设备的类型是影响沥青路面施工过程能耗的主要因素。在沥青路面施工过程中，通常需要根据沥青混合料拌和设备的生产能力，确定相应的摊铺机械和压实机械配置，以避免施工机械“吃不饱”而造成浪费或施工机械“吃不了”而造成工程延误的情况。

我国现行公路工程预算定额中，根据不同沥青混合料拌和设备的生产能力，确定了相应的沥青混合料摊铺机械类型（表 2.5）。因此，从施工机械优化合理配置的角度，本文采用预算定额中确定的沥青混合料路面铺筑工程内容及机械设备配置，以中粒式沥青混合料为例，说明采用定额法计算沥青路面施工过程能耗的基本过程。

预算定额确定了铺筑 1000m³ 中粒式沥青混合料路面实体所需要的摊铺和压实机械的台班数量，机械台班费用定额给出了相应的施工机械的台班燃料消耗量（表 4.12）。根据上述数据，可以计算得到铺筑 1000m³ 中粒式沥青混合料路面过程中，摊铺机和压路机所需的柴油消耗量 (kg)。

由于预算定额中以 1000m³ 沥青路面为计量单位，因此，根据实际路面实体数量 V (m³)，并按照柴油的发热值（表 3.6），最终可以计算得到铺筑 Vm³ 路面实体所需机械设备的总能耗。以目前沥青路面大面积施工中常用的 240t/h 沥青混合料拌和设备的配套摊铺和碾压设备为例，其计算过程如表 4.13 所示。

表 4.12 铺筑 1000m³ 中粒式沥青混合料路面实体的机械台班及油耗

设备台班数		拌和设备生产能力 (t/h)						油耗 (kg/台班)
		30	60	120	160	240	320	
摊铺设备 摊铺宽度 (m)	4.5	10.47						32.00
	4.5		7.32					42.06
	6			3.96				46.63
	8				2.79			96.69
	12.5					1.86	1.42	136.41
光轮压路机 轮胎压路机 (t)	6~8	10.3	7.20	7.79	5.49	3.67	2.80	54.86
	12~15	10.3	7.20	5.84	5.49	3.67	4.19	80.92
	9~16	10.04	7.02	3.80	2.68	1.79	2.73	33.71

表 4.13 铺筑 Vm³ 中粒式沥青混合料路面的机械设备能耗计算表

设备	台班	柴油消耗 (kg/台班)	累计油耗 (kg)	累计能耗 (MJ)
		②	④=①×②	⑤=④×43.0×V/1000
12.5m 以内摊铺设备		1.86	136.41	253.72
光轮压路机 轮胎压路机 (t)	6~8	3.67	54.86	201.34
	12~15	3.67	80.92	296.98
	9~16	1.79	33.71	60.34
所有机械设备总能耗 (MJ)				34.93V

根据施工预算或施工计划确定的沥青混合料拌和设备及与之匹配的摊铺和碾压设备,按照上述方法就可以计算得到铺筑细粒式、粗粒式等其他沥青混合料以及沥青碎石和 SMA 混合料过程中,各种施工机械设备的能耗,从而可确定沥青路面建设阶段,沥青混合料施工过程的能耗量化数值。

2. 沥青路面施工过程环境排放计算

根据本文调查,沥青路面施工过程的环境排放主要为各种施工机械运行及燃油消耗产生的气体污染物。目前,国内外对沥青路面施工机械的排放因子尚未开展系统的研究,有研究以施工机械设备的柴油机功率为基础,借用柴油机排放因子进行沥青路面施工过程环境排放量化分析^[42]。考虑到沥青路面施工机械普遍采用柴油作为燃料,其环境排放主要源于柴油的燃烧,因此,本文采用柴油燃烧的排放因子(表 4.14)用于沥青路面施工机械环境排放的量化计算。

按照排放通用计算公式 3.2 根据计算得到的沥青路面施工过程总能耗 (MJ) 和柴油排放因子 (mg/MJ),即可计算得到沥青路面施工过程中的环境排放量。

表 4.14 柴油排放因子

环境排放产物	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
排放因子 (mg/MJ)	74100	3	0.6

4.3 沥青路面建设阶段能耗与排放量化分析模型及应用

沥青路面建设阶段的能耗与排放量化结果可以简单的表示为生产阶段和建设阶段能耗与排放量化结果之和,本文在前文沥青混合料生产阶段和沥青路面建设阶段能耗与排放量化计算方法的基础上,汇总相关量化分析结果,提出沥青路面建设阶段能耗与排放量化分析模型,并结合沥青路面新建工程实例,进一步说明其应用方法。

4.3.1 沥青路面建设阶段能耗与排放量化分析模型

本文将沥青路面建设阶段分为沥青混合料生产阶段和沥青路面建设阶段两个次级阶段,上述两个次级阶段则分别包括沥青生产过程、石料生产过程和沥青混合料生产过程以及沥青混合料运输过程和沥青路面施工过程。将上述各个过程的能耗与排放量化计算结果分类汇总,就可以得到沥青路面建设阶段能耗与排放总量。

1. 沥青路面建设阶段能源消耗量化分析模型

沥青路面建设阶段能耗量化计算模型,包括沥青路面在建设阶段各个生命周期过程的能耗之和(式 4.4)。其中 E_{ij} 表示沥青路面建设阶段第 i 个次级阶段,第 j 个过程的能耗量,其计算方法在前文已有详细说明。

$$E_{cons} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n E_{ij} \quad (4.4)$$

仅仅确定沥青路面建设阶段能耗总量 E_{cons} 并不能满足实际应用的需要,还需要进一步确定各个过程或次级阶段在沥青路面建设阶段总能耗中的比例。本文采用能耗比例系数 ER (Energy Ratio) 表示沥青路面建设阶段能源消耗构成,沥青路面建设阶段中第 i 个次级阶段的能耗比例 ER_i 和第 j 个过程的能耗比例 ER_j 的计算公式分别为式 4.5 和式 4.6:

$$ER_i = \frac{\sum_{j=1}^n E_{ij}}{E_{cons}} \quad (4.5)$$

$$ER_j = \frac{E_{ij}}{E_{cons}} \quad (4.6)$$

根据沥青路面建设阶段能源消耗量化分析模型计算得到的能耗总量和生命周期过程的能耗比例，可以从整体上掌握建设阶段能耗情况，进行横向对比分析；而且还可以获得能耗比例较高的过程，有针对性的采取节能措施。

2. 沥青路面建设阶段环境排放量化分析模型

沥青路面建设阶段的环境排放种类繁多，难以采用相同的单位将不同的环境排放量化分析结果统一为一个量化数值。根据第三章对沥青路面生命周期节能减排量化分析结果归类与特征化的研究，本文采用基于特征因子 C 的特征化表示方法建立沥青路面建设阶段环境排放量化分析模型：

$$EE_{cons,k} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n EI_{ijk} \quad (4.7)$$

式中， EI_{ijk} 表示第 i 个次级阶段，第 j 个过程，第 k 个影响类别的环境排放特征化结果。当次级阶段 i 及过程 j 确定时， EI_{ijk} 的计算方法如式 3.3 所示。

为了便于计算以及实际应用，本文给出了以表格形式表示的沥青路面建设阶段环境排放量化分析模型（表 4.15）。其中，行和即表示沥青路面建设阶段各生命周期过程的某一排放类别的累计排放量。

表 4.15 沥青路面建设阶段环境排放量化分析模型表

次级阶段		沥青混合料生产阶段			沥青路面施工阶段		总计
过程		沥青生产	石料生产	沥青混合料生产	沥青混合料运输	沥青路面施工	
环境排放	全球变暖	E_{111}	E_{121}	E_{131}	E_{211}	E_{221}	
	酸化效应	E_{112}	E_{122}	E_{132}	E_{212}	E_{222}	
	健康危害	E_{113}	E_{123}	E_{133}	E_{213}	E_{223}	
	颗粒物	E_{114}	E_{124}	E_{134}	E_{214}	E_{224}	

同样的，仅仅确定某一排放类别的累计排放量 $EE_{cons,k}$ 并不能满足实际应用的需要，还需要进一步确定各个过程或次级阶段在沥青路面建设阶段总排放中的比例。本文采用排放比例系数 EER (Environmental Emission Ratio) 表示沥青路面建设阶段环境排放构成，沥青路面建设阶段中第 i 个次级阶段的排放比例系数 EER_i 和第 j 个过程的排放比例系数 EER_j 的计算公式分别为式 4.8 和式 4.9：

$$EER_i = \frac{\sum_{j=1}^n E_{ijk}}{EE_{cons,k}} \quad (4.8)$$

$$EER_j = \frac{E_{ijk}}{E_{cons,k}} \quad (4.9)$$

根据沥青路面建设阶段环境排放量化分析模型计算得到的环境排放总量和生命周期过程的环境排放比例，可以从整体上掌握沥青路面建设对环境的影响，而且还可以获得各环境影响类别中排放比例较高的过程，从而能够有针对性的采取减排措施和方案。

本文提出的沥青路面建设阶段能耗与排放量化分析模型不仅可以计算得到沥青路面建设阶段的总能耗及排放（式 4.4，4.7），而且还可以计算得到沥青路面建设阶段中各个次级阶段和各个过程的能耗与排放比例（式 4.5~4.6，式 4.8~4.9）。根据量化分析模型得到的量化计算数据，不仅能够分析得到沥青路面建设阶段的总能耗与排放，为沥青路面管理、建设等单位的经济成本分析和控制提供基础；而且还能够分析得到沥青路面建设阶段能耗与排放集中的次级阶段或过程，为沥青路面建设阶段节能减排技术的研发和推广提供科学的指导。

4.3.2 沥青路面建设阶段能耗与排放量化分析模型应用示例

根据前文建立的沥青路面建设阶段能耗与排放量化计算方法及能耗与排放量化分析模型，本文以河南省淮滨至固始高速公路（以下简称淮固高速公路）新建工程为例，详细说明沥青路面建设阶段能耗与排放量化分析模型在实际中的应用。

淮固高速公路全线按双向四车道高速公路标准建设，路线全长 49.2km（路面工程部分），设计速度为 100km/h，路基宽度 26m。行车道 2×2×3.75m，中央分隔带 2.0m，左侧路缘带 2×0.75m，硬路肩 2×3.0m，土路肩 2×0.75m。路面结构整体为沥青混合料路面，主线以及服务区贯通车道、一般互通匝道等路面结构方案为：4cm 细粒式改性沥青混凝土(AC-13C)+6cm 中粒式沥青混凝土(AC-20C)+8cm 粗粒式沥青混凝土(AC-25C)。各沥青路面结构层的工程量预算表分别如表 4.16、表 4.17 和表 4.18 所示。

表 4.16 淮固高速公路 8cmAC-25C 沥青砼下面层工程量预算表

工程项目		粗粒式		沥青混合料路面铺筑		沥青混合料运输	
工程细目		沥青混凝土拌和 (240t/h 以内)		机械摊铺沥青混合料 (240t/h 以内)		15t 以内自卸汽车 平均运距 5km	
定额单位		1000m ³ 路面实体		1000m ³ 路面实体		1000m ³ 路面实体	
工程数量		81.035		81.035		81.035	
工料机名称	单位	定额	数量	定额	数量	定额	数量
石油沥青	t	105.857	8578.154				
矿粉	t	96.104	7787.816				

工程项目		粗粒式		沥青混合料路面铺筑		沥青混合料运输	
工程细目		沥青混凝土拌和 (240t/h 以内)		机械摊铺沥青混合料 (240t/h 以内)		15t 以内自卸汽车 平均运距 5km	
定额单位		1000m ³ 路面实体		1000m ³ 路面实体		1000m ³ 路面实体	
工程数量		81.035		81.035		81.035	
工料机名称	单位	定额	数量	定额	数量	定额	数量
石屑	m ³	168.130	13624.465				
路面用碎石 (1.5cm)	m ³	259.890	21060.264				
路面用碎石 (2.5cm)	m ³	299.070	24235.227				
路面用碎石 (3.5cm)	m ³	469.280	38028.246				
6~8t 光轮压路机	台班			3.750	303.882		
12~15t 光轮压路机	台班			3.750	303.882		
240t/h 以内 沥青混合料拌和设备	台班	1.770	143.432				
12.5m 以内 沥青混合料摊铺机	台班			1.910	154.777		
16~20t 轮胎式压路机	台班			0.550	44.569		
20~25t 轮胎式压路机	台班			1.280	103.725		
15t 以内自卸汽车	台班					13.830	1120.718

表 4.17 淮固高速公路 6cmAC-20C 沥青砼中面层工程量预算表

工程项目		中粒式		沥青混合料路面铺筑		沥青混合料运输	
工程细目		沥青混凝土拌和 (240t/h 以内)		机械摊铺沥青混合料 (240t/h 以内)		15t 以内自卸汽车 平均运距 5km	
定额单位		1000m ³ 路面实体		1000m ³ 路面实体		1000m ³ 路面实体	
工程数量		60.777		60.777		60.777	
工料机名称	单位	定额	数量	定额	数量	定额	数量
石油沥青	t	113.465	6896.006				
矿粉	t	117.720	7154.610				
石屑	m ³	226.750	13781.071				
路面用碎石 (1.5cm)	m ³	334.740	20344.326				
路面用碎石 (2.5cm)	m ³	520.050	31606.819				
6~8t 光轮压路机	台班			3.780	229.735		
12~15t 光轮压路机	台班			3.780	229.735		
240t/h 以内 沥青混合料拌和设备	台班	1.760	106.967				
12.5m 以内 沥青混合料摊铺机	台班			1.920	116.691		
16~20t 轮胎式压路机	台班			0.550	33.427		
20~25t 轮胎式压路机	台班			1.290	78.402		
15t 以内自卸汽车	台班					13.830	840.539

表 4.18 淮固高速公路 4cmAC-13C 沥青砼面层工程量预算表

工程项目		细粒式		沥青混合料路面铺筑		沥青混合料运输	
工程细目		沥青混凝土拌和 (240t/h 以内)		机械摊铺沥青混合料 (240t/h 以内)		15t 以内自卸汽车 平均运距 5km	
定额单位		1000m ³ 路面实体		1000m ³ 路面实体		1000m ³ 路面实体	
工程数量		40.518		40.518		40.518	
工料机名称	单位	定额	数量	定额	数量	定额	数量
改性沥青	t	122.536	4964.877				
矿粉	t	128.404	5202.635				
石屑	m ³	261.180	10582.413				
路面用碎石 (1.5cm)	m ³	723.220	29303.211				
6~8t 光轮压路机	台班			3.800	153.967		
12~15t 光轮压路机	台班			3.800	153.967		
240t/h 以内 沥青混合料拌和设备	台班	1.760	71.311				
12.5m 以内 沥青混合料摊铺机	台班			1.930	78.199		
16~20t 轮胎式压路机	台班			0.560	22.690		
20~25t 轮胎式压路机	台班			1.300	52.673		
15t 以内自卸汽车	台班					13.830	560.360

以上述预算数据为基础,采用本文提出的沥青路面建设阶段能耗与排放量化分析模型,进行能耗与排放量化分析。

1. 沥青混合料生产阶段能耗与排放量化计算

沥青混合料生产阶段的物料和机械使用数量汇总如表 4.19 所示。其中,路面用碎石和石屑分别按照预算定额规定的路面材料松方干密度 1.521t/m³ 和 1.530t/m³ 转换为质量单位 (t), 石料取矿粉、石屑和路面用碎石的总和。

表 4.19 淮固高速公路沥青混合料生产阶段工料机汇总

工料机 (单位)	石油沥青 (t)	改性沥青 (t)	石料 (t)	240t/h 沥青混合料拌和设备 (台班)		
				粗粒式	中粒式	细粒式
总量	15474.16	4964.877	328589.90	143.432	106.967	71.311

(1) 沥青混合料生产阶段能源消耗量化计算

① 沥青生产过程

石油沥青和改性沥青的单位产量能耗分别为 11222.371MJ/t、22160.72MJ/t, 则可计算得到沥青生产过程的总能耗为:

$$11222.371 \text{ MJ/t} \times 15474.16 \text{ t} + 22160.72 \text{ MJ/t} \times 4964.877 \text{ t} = 2.84 \times 10^8 \text{ MJ}$$

② 石料生产过程

石料的单位产量能耗约为 10.8MJ/t，则可计算得到石料生产过程的总能耗为：

$$10.8 \text{ MJ/t} \times 328589.90 \text{ t} = 3.55 \times 10^6 \text{ MJ}$$

③ 沥青混合料生产过程

$V\%m^3$ 细粒式、中粒式和粗粒式沥青混合料生产过程能耗分别为 538934.859MJ、538934.859MJ 和 541996.989MJ，则可计算得到沥青混合料生产过程的总能耗为：

$$538934.859 \times 40.518 + 538934.859 \times 60.777 + 541996.989 \times 81.035 = 9.85 \times 10^7 \text{ MJ}$$

④ 沥青混合料生产阶段总能耗

根据各生产过程的能耗，可以计算得到沥青混合料生产阶段的总能耗为：

$$2.84 \times 10^8 \text{ MJ} + 3.55 \times 10^6 \text{ MJ} + 9.85 \times 10^7 \text{ MJ} = 3.861 \times 10^8 \text{ MJ}$$

(2) 沥青混合料生产阶段环境排放量化计算

① 沥青生产过程

根据沥青生产过程的环境排放因子，可以计算得到各种环境排放物的排放量（表 4.20）：

表 4.20 淮固高速公路沥青生产过程环境排放量化结果

排放物	排放因子 (g/t)		排放量 (kg)		总计 kg
	石油沥青	改性沥青	石油沥青 t1=15474.16t	改性沥青 t2=4964.877t	
	①	②	③=①×t1/1000	④=②×t2/1000	
CO ₂	174,244	295,910	2696279.535	1469154.682	4165434.22
SO ₂	781	1630	12085.31896	8092.7381	20178.0571
NO _x	770	1375	11915.1032	6826.69625	18741.7995
CO	613	671	9485.66008	3331.42777	12817.0879
CH ₄	595	1085	9207.1252	5386.88395	14594.0092
NM VOC	331	331	5121.94696	1643.37197	6765.31893
颗粒物	161.2	265	2494.434592	1315.69055	3810.12514

根据环境排放影响因子及其特征因子（表 3.8），上述环境排放归类及特征化结果如表 4.21 所示：

表 4.21 淮固高速公路沥青生产过程环境排放特征化结果

影响类别	影响因子	特征化因子	排放量	特征化结果	总计 kg
		kg/kg	kg	kg	
		①	②	③=①×②	
全球变暖	CO ₂	1	4165434.22	4165434.22	4530284.45
	CH ₄	25	14594.0092	364850.23	
酸化效应	SO ₂	1	20178.0571	20178.0571	33297.31675
	NO _x	0.7	18741.7995	13119.25965	
健康危害	SO ₂	0.096	20178.0571	1937.093482	59518.06796
	NO _x	1.2	18741.7995	22490.1594	
	CO	2.4	12817.0879	30761.01096	
	NM VOC	0.64	6765.31893	4329.804115	
颗粒物	PM	1	3810.12514	3810.12514	3810.12514

② 石料生产过程

石料生产过程的环境排放主要为各种颗粒物，本文根据石料生产过程排放因子，将各种颗粒物排放量汇总，计算得到石料生产过程的环境排放量及特征化结果：（表 4.22）

表 4.22 淮固高速公路石料生产过程环境排放量化及特征化结果

影响类别	影响因子	排放因子	排放量	特征化因子	特征化结果	总计 kg
		kg/t	kg	kg/kg	kg	
		①	②=①×t*	③	④=②×③	
颗粒物	TSP	0.19	62432.081	1	328589.9	657179.8
	PM	0.05	16429.495	1	328589.9	

*注：t 为石料产量，本文计算得到 t=328589.90t

③ 沥青混合料生产过程

根据目前我国沥青混合料生产普遍采用间歇强制式沥青混合料拌和设备，且大多数具有纤维织物除尘设备的实际情况，选择相应的排放因子。淮固高速公路公路上、中、下面层沥青混合料总计(81.035+60.777+40.518)×1020=185976.6t，则计算得到沥青混合料生产过程的环境排放量化及其归类和特征化结果如表 4.23 所示：

表 4.23 淮固高速公路沥青混合料生产过程环境排放量化及特征化结果

影响类别	影响因子	排放因子	排放量	特征化因子	特征化结果	总计 kg
		kg/t	kg	kg/kg	kg	
		①	②=①×t*	③	④=②×③	
全球变暖	CO ₂	18.5	3440567.1	1	3440567.1	3457769.94
	CH ₄	0.0037	688.11342	25	17202.8355	

影响类别	影响因子	排放因子	排放量	特征化因子	特征化结果	总计 kg
		kg/t	kg	kg/kg	kg	
		①	②=①×t*	③	④=②×③	
酸化效应	SO ₂	0.044	8182.9704	1	8182.9704	15993.99
	NO _x	0.06	11158.596	0.7	7811.0172	
健康危害	SO ₂	0.044	8182.9704	0.096	785.565158	104825.34
	NO _x	0.06	11158.596	1.2	13390.3152	
	CO	0.2	37195.32	2.4	89268.768	
	VOC	0.0041	762.50406	0.64	488.002598	
	TOC	0.0075	1394.8245	0.64	892.68768	
颗粒物	PM10	0.0049	911.28534	1	911.28534	1692.39
	PM2.5	0.0042	3440567.1	1	781.10172	

*注：t 为沥青混合料用量，本文计算得到 t=185976.6t

2. 沥青路面施工阶段能耗与排放量化计算

沥青路面施工阶段的机械使用数量汇总如表 4.24 所示。根据沥青路面施工阶段能耗量化分析方法，按照不同沥青混合料类型施工所用的机械设备，可以计算得到 Vm^3 沥青路面所用机械设备的能耗。在实际预算定额中，给出了 Vm^3 不同沥青混合料类型所需施工机械的台班数量。因此，也可以根据总台班数和定额中的单位台班燃料消耗量，计算沥青路面施工阶段的能耗。

表 4.24 淮固高速公路沥青路面施工阶段机械使用量汇总

施工机械 (台班)	15t 以内 自卸汽车	沥青混合料摊铺机	光轮压路机		轮胎压路机	
		12.5m	6~8t	12~15t	16~20t	20~25t
总量	2521.617	349.667	687.584	687.584	100.686	234.8

(1) 沥青路面施工阶段能源消耗量化计算

① 沥青混合料运输过程

15t 以内自卸汽车运输过程的单位台班油耗为 67.89kg/台班，则可计算得到：

总油耗为：67.89kg/台班×2521.617 台班=1.71×10⁵kg；

总能耗为：67.89kg/台班×2521.617 台班×43.0MJ/kg=7.36×10⁶MJ

② 沥青路面施工过程

沥青路面施工过程所使用的摊铺机械和压实机械的燃油消耗及能耗计算如表 4.25 所示。则可计算得到沥青路面施工过程总油耗为 157124.33kg (1.57×10⁵kg)，总能耗为 6756346.36MJ (6.76×10⁶MJ)。

表 4.25 淮固高速公路沥青路面施工过程燃料消耗及能耗计算表

机械类型	台班数 (台班)	单位台班油耗 (kg/台班)	油耗 (kg)	能耗 (MJ)	备注
	①	②	③=①×②	④=③×43.0	
12.5m 沥青混合料摊铺机	349.667	136.41	47698.08	2051017.25	柴油热值: 43.0MJ/kg
6~8t 光轮压路机	687.584	54.86	37720.86	1621996.90	
12~15t 光轮压路机	687.584	80.92	55639.30	2392489.78	
16~20t 轮胎式压路机	100.686	42.29	4258.01	183094.47	
20~25t 轮胎式压路机	234.8	50.29	11808.09	507747.96	
总 计			157124.33	6756346.36	

③ 沥青路面施工阶段总能耗

根据各建设过程能耗，则可以计算得到沥青路面施工阶段的总能耗为：

$$7.36 \times 10^6 \text{MJ} + 6.76 \times 10^6 \text{MJ} = 1.412 \times 10^7 \text{MJ}$$

(2) 沥青路面施工阶段环境排放量化计算

① 沥青混合料运输过程

根据沥青混合料运输过程重型柴油车排放因子，可以计算得到沥青混合料运输过程环境排放量化及其归类和特征化结果（表 4.26）：

表 4.26 淮固高速公路沥青混合料运输过程环境排放量化及特征化结果

影响类别	影响因子	排放因子 g/kg	排放量 kg	特征化因子 kg/kg	特征化结果 kg	总计 kg
		①	②=①×t*/1000	③	④=②×③	
全球变暖	CO ₂	3140	536940	1	536940	540048.44
	N ₂ O	0.061	10.431	298	3108.438	
酸化效应	NO _x	37	6327	0.7	4428.9	4433.72
	NH ₃	0.015	2.565	1.88	4.8222	
健康危害	NO _x	37	6327	1.2	7592.4	11050.70
	CO	8	1368	2.4	3283.2	
	NM VOC	1.6	273.6	0.64	175.104	
颗粒物	PM	1.2	205.2	1	205.2	205.20

*注：t 为运输过程柴油消耗量，本文计算得到 t=1.71×10⁵kg。

② 沥青路面施工过程

根据沥青路面施工机械柴油燃烧排放因子，可以计算得到沥青路面施工过程环境排放量化及其归类和特征化结果（表 4.27）：

表 4.27 淮固高速公路沥青路面施工过程环境排放量化及特征化结果

影响类别	影响因子	排放因子	排放量	特征化因子	特征化结果	总计 kg
		mg/MJ	kg	kg/kg	kg	
		①	②=①×E*/10 ⁶	③	④=②×③	
全球变暖	CO ₂	74100	500916	1	500916	502631.69
	CH ₄	3	20.28	25	507	
	N ₂ O	0.6	4.056	298	1208.688	

*注：E 为施工过程总能耗，本文计算得到 E=6.76×10⁶MJ。

3. 沥青路面建设阶段能耗与排放量化分析

(1) 沥青路面建设阶段能源消耗量化分析

根据计算得到的沥青路面建设阶段各生命周期过程的能耗量化数值，从而可以确定沥青路面建设阶段的总能耗及各个生命周期过程的能耗比，如表 4.28 所示：

表 4.28 淮固高速公路沥青路面建设阶段总能耗及能耗比

次级阶段	沥青混合料生产阶段			沥青路面施工阶段		总计
	沥青生产	石料生产	沥青混合料生产	沥青混合料运输	沥青路面施工	
过程						
能耗 (MJ)	2.84×10 ⁸	3.55×10 ⁶	9.85×10 ⁷	7.36×10 ⁶	6.76×10 ⁶	4.0×10 ⁸
能耗比%	70.97	0.89	24.61	1.84	1.69	1

由上表数据可见，淮固高速公路沥青路面建设阶段的总能耗达到 4.0×10⁸MJ，相当于标准煤（净发热值 29.31MJ/kg）1.36 万吨。进一步分析各个生命周期过程的能耗比（图 4.3）可以得到沥青路面建设阶段各生命周期过程能耗比排序为：沥青生产>沥青混合料生产>沥青混合料运输>沥青路面施工>石料生产。

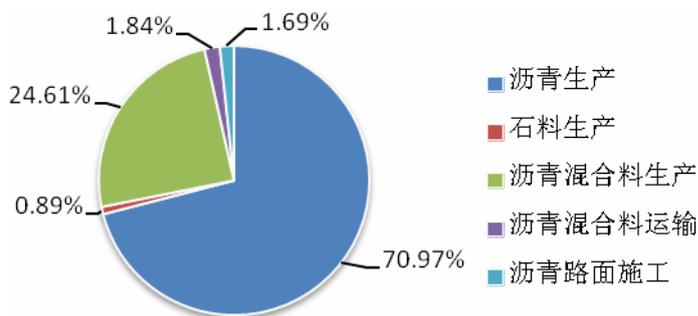


图 4.3 淮固高速公路公路沥青路面建设阶段生命周期过程能耗比

根据上述量化分析结果，沥青生产过程的能耗最高，占沥青路面建设阶段总能耗的一半以上，因此从沥青路面建设的生命周期视角出发，减小沥青生产过程的能耗有利于减小沥青路面建设阶段的总能耗。但是，由于沥青生产和应用沥青铺筑道路分属于石油

化工和道路建设两个行业,从沥青路面建设与管理单位的角度出发,除去沥青生产过程,沥青混合料生产过程的能耗最高。因此,采取提高沥青混合料生产过程的热利用效率或使用无需高温加热的温拌沥青技术等措施,减小沥青混合料生产过程的能耗,是降低沥青路面生产阶段能源消耗的有效途径。

(2) 沥青路面建设阶段环境排放量化分析

将计算得到的沥青路面建设阶段各生命周期过程的环境排放量化数值,按照表格形式表示的沥青路面建设阶段环境排放量化分析模型,汇总如表 4.29 所示:

表 4.29 淮固高速公路沥青路面建设阶段环境排放总量 (kg)

次级阶段	沥青混合料生产阶段			沥青路面施工阶段		总计
	沥青生产	石料生产	沥青混合料生产	沥青混合料运输	沥青路面施工	
全球变暖	4.53×10^6	-	3.46×10^6	5.40×10^5	5.03×10^5	9.03×10^6
酸化效应	3.33×10^4	-	1.60×10^4	4.43×10^3	-	5.37×10^4
健康危害	5.95×10^4	-	1.05×10^5	1.11×10^4	-	1.75×10^5
颗粒物	3.81×10^3	6.57×10^5	1.69×10^3	2.05×10^2	-	6.63×10^5

由上表数据可见,淮固高速公路沥青路面建设阶段的环境排放总量为 9.03×10^6 kg 等效 CO₂, 5.37×10^4 kg 等效 SO₂, 1.75×10^5 kg 等效 1,4-二氯苯, 6.63×10^5 kg 颗粒物。就排放产物对环境的影响而言,淮固高速公路沥青路面建设产生的全球变暖影响最为显著,产生的颗粒物质和健康危害影响次之,产生的酸化效应最小。因此,在沥青路面建设过程中,需要采取措施加强温室气体排放、粉尘排放和各种有害气体排放的控制。

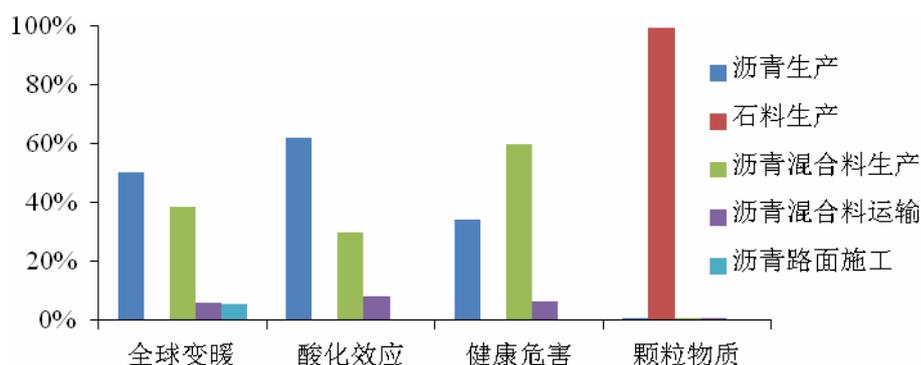


图 4.4 淮固高速公路沥青路面建设阶段生命周期环境排放比

分析淮固高速公路沥青路面建设阶段各生命周期过程的环境排放比例(图 4.4)可以发现,由于各生命周期过程的环境排放类别不同,就某一环境影响类别而言,各生命周期过程的影响程度也有所不同。对于全球变暖、酸化效应及健康危害,沥青和沥青混

合料生产过程的影响最为显著；对于颗粒物，则石料生产过程的影响最为显著。

根据上述分析结果，对沥青路面建设和管理单位而言，从全球变暖、酸化效应和健康危害影响分析出发，采取减排措施和技术方案控制并减少沥青混合料生产过程的环境排放；从颗粒物影响分析出发，采取减排措施和技术方案控制并减少石料生产过程的环境排放，是减小沥青路面建设阶段环境影响的有效途径。

4.4 本章小结

本章以基于生命周期分析的沥青路面节能减排量化分析方法为基础，结合沥青路面能源消耗与气体排放调查，具体分析沥青路面建设阶段各生命周期过程能耗与排放量化分析方法及其过程。在此基础上，提出沥青路面建设阶段能耗与排放量化分析模型，并结合工程实例进行应用。取得的主要结论如下：

(1) 以定额法为主，结合调查法和理论法，提出了沥青混合料生产阶段沥青生产过程、石料生产过程以及沥青混合料生产过程和沥青路面建设阶段沥青混合料运输过程以及沥青路面施工过程的能源消耗量化计算方法和详细计算过程。

(2) 根据沥青路面建设阶段环境排放调查，结合沥青路面建设工艺及机械设备组合，以沥青路面生命周期环境排放因子法为基础，确定了沥青路面建设阶段各生命周期过程的主要环境排放产物及其排放因子。

(3) 在沥青路面建设阶段各生命周期过程能耗与排放量化分析的基础上，提出了沥青路面建设阶段能耗与排放量化分析模型，用于分析沥青路面建设阶段能耗与排放总量以及各生命周期过程的能耗与排放比例，为沥青路面建设阶段节能减排提供指导。

(4) 采用本文提出的沥青路面建设阶段能耗与排放量化分析方法及分析模型对河南省淮滨至固始高速公路沥青路面新建工程进行了量化分析，结果表明，除去沥青生产过程，沥青混合料生产过程的能耗最高；沥青路面建设工程对全球变暖影响较大，其中对于全球变暖、酸化效应及健康危害，沥青和沥青混合料生产过程的影响最为显著；对于颗粒物，则石料生产过程的影响最为显著。上述结论可为淮固高速公路沥青路面建设工程节能减排措施的应用提供科学的指导。

第五章 沥青路面使用阶段能耗和排放量化分析研究

根据道路等级不同,公路沥青路面设计使用年限最少为6~15年,因此,相对于沥青路面生命周期的其他阶段而言,沥青路面使用阶段是沥青路面生命周期中持续时间最长的部分。在沥青路面使用阶段中,沥青路面要承受繁重的设计交通量作用,同时为了保证沥青路面的服务性能,需要定期或不定期的进行各种形式的养护维修。车辆行驶以及养护维修产生的能耗和排放是沥青路面使用阶段能耗和排放的主要内容,虽然每一台车辆或每一次养护维修产生的能耗和排放可能微不足道,但是由于沥青路面使用阶段持续时间长、交通量大、养护维修次数较多等原因,沥青路面使用阶段的能耗和排放问题仍然需要给予足够的重视。

为此,本章针对沥青路面使用阶段能耗和排放量化分析问题,从沥青路面行驶状况和沥青路面路面状况角度出发,探讨在沥青路面使用阶段车辆和养护维修产生的能耗和排放的量化分析方法,计算沥青路面使用阶段每功能单位的能耗和排放量,根据能耗与排放量化分析结果,提出沥青路面使用阶段节能减排建议。

5.1 基于沥青路面状况的运营车辆能耗与排放量化分析研究

为车辆提供平整、舒适的行驶表面是沥青路面的基本服务功能,当沥青路面的行驶质量下降时,势必导致车辆运行速度降低,引发车辆油耗的变换,并进而影响车辆排放。为此,本文从沥青路面行驶质量参数入手,分析沥青路面行驶质量对车速的影响,建立车速与能耗和排放的量化关系,综合分析路面状况、车速以及能耗与排放之间的交互关系,提出路面状况-车速能耗与排放量化分析模型,用于沥青路面使用阶段由车辆行驶而产生的能耗与排放的量化分析。

5.1.1 路面状况-车速-能耗与排放量化预估模型建立方法

在沥青路面运营使用阶段,路面状况、车速、油耗、排放四个因素之间有着千丝万缕的联系:路面状况影响车速,路面状况与车速影响油耗,油耗与排放有直接关系。因此,从路面状况出发,通过上述四个因素之间的内在联系,建立“路面状况-车速-能耗与排放”量化预估模型是合理评价沥青路面使用阶段能耗与排放的基础。

目前,沥青路面生命周期研究中大多忽略了使用阶段车辆产生的能耗与排放^[86],虽然有研究人员提出该阶段能耗与排放的重要性^[101],但是关于沥青路面运营阶段车辆行驶产生的能耗与排放研究并不多,仅有的研究大多采用科研机构或政府部门在大量统计

数据基础上开发的相关模型,根据路面状况参数,输入模型计算确定由于路面状况变化导致的车辆能耗与排放^[4,31]。这种计算方法比较简单,只需要按照计算模型的要求,确定相应的输入参数即可。但是,由于这些计算模型均以统计数据为基础,因此存在着使用条件的限制,大多仅适用于某一国家或地区的情况,如 EPA 开发的 MOVES (Motor Vehicle Emission Simulator) 模型仅适用于美国境内的 50 个州^[102]。

进一步分析可以发现,目前在路面生命周期分析研究中所采用的车辆能耗与排放计算模型,如 GREET^[103]、MOVES、HDM-4^[104]、MOBILE^[105]以及 IVE^[106]等,虽然不同程度的存在着通用性的问题,而且其输入参数等各不相同,但是上述计算模型的分析思路具有一定的相似性,绝大多数都是根据路面状况与车辆行驶状态,车辆行驶状态与能耗和排放的关系,通过上述相关关系的传递,建立路面状况变化而导致的车辆能耗与排放模型。此外,也有一些研究通过调查数据,建立了车辆油耗与路面状况的直接关系。如南佛罗里达大学的 Bin Yu 等根据密苏里州的调查数据,建立了乘用车和载重车油耗因子 FCF 与 IRI 的回归关系^[107]:

$$FCF=7.377\times 10^{-3} IRI+0.993 \quad \text{乘用车}$$

$$FCF=2.163\times 10^{-2} IRI+0.953 \quad \text{载重车}$$

根据现有相关研究的基本思路,本文提出建立“路面状况-车速-能耗与排放”量化预估模型的技术路线如图 5.1 所示。根据上述技术路线,在建立该量化预估模型过程中,需要解决以下技术问题:

(1) 沥青路面行驶质量表征参数

影响沥青路面行驶质量的因素很多,包括车辆性能、车辆类型等车辆参数以及路面平整度、路线纵坡等路面参数,需要从车辆行驶速度影响因素以及路面状况合理表征角度出发,选择沥青路面行驶质量表征参数。

(2) 沥青路面行驶质量表征参数衰变规律

沥青路面行驶质量随着使用时间的增长而逐渐衰减,从而导致车辆行驶速度降低是造成沥青路面使用阶段能耗与排放问题的根源。因此,有必要确定沥青路面行驶质量表征参数的衰变规律,为沥青路面使用期内能耗与排放量化分析提供基础。

(3) 沥青路面行驶质量与车辆行驶速度及油耗的量化关系

沥青路面行驶质量与车辆行驶速度及油耗的量化关系是建立能耗与排放量化预估模型的核心,需要确定沥青路面行驶质量、车辆行驶速度、油耗三者之间的关系,直接

确定沥青路面行驶质量与油耗的量化关系，或者以车辆行驶速度为桥梁，建立沥青路面行驶质量与油耗的量化关系。

(4) 基于路面状况的车辆能耗计算方法

根据沥青路面状况衰变规律和沥青路面行驶质量与油耗的量化关系，可以进一步确定在一定时间内，由于路面状况变化导致的油耗变化量 F_c ，即：

$$F_c = \int_{t_1}^{t_2} f(IRI, RQI(t)) dt$$

(5) 基于路面状况的车辆排放计算方法

车辆行驶过程产生的排放属于典型的移动源排放，主要源于燃油燃烧。需要根据排放因子法，选择合理的排放因子，计算沥青路面运营期间，车辆行驶过程造成的环境排放量。

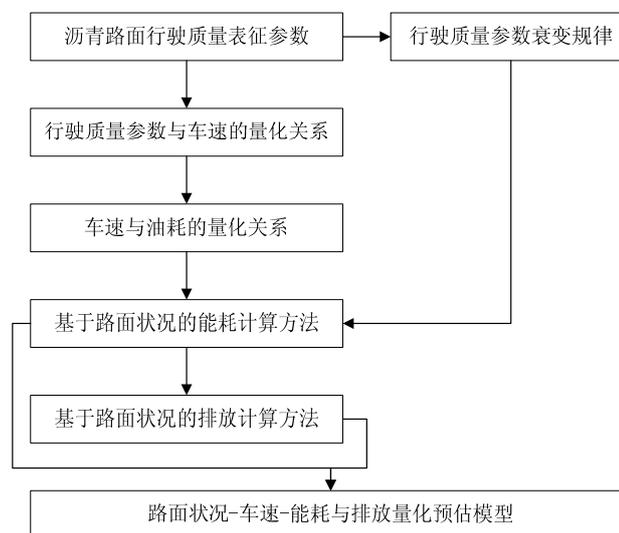


图 5.1 路面状况-车速-能耗与排放量化预估模型建立流程图

5.1.2 沥青路面行驶质量参数及其衰变规律

沥青路面的路面状况通常包括沥青路面的表面损坏状况、路面修补状况、路面行驶状况、路面结构强度状况以及路面车辙和抗滑状况等，其中，路面行驶质量反映了路面为车辆提供快速、安全、舒适和经济的行驶表面的能力。路面行驶质量与路面表面的平整度特性、车辆悬挂系统的振动特性以及乘客对振动的反应和接受能力有关，从路面状况的角度出发，路面平整度是影响路面行驶质量的主要因素。

路面平整度通常可以定义为路面表面诱使行驶车辆出现振动而导致车辆竖直方向的位移变化。路面平整度发生变化，引起车辆振动，会对车辆的行驶速度、燃油消耗和路面损坏以及交通安全等产生直接的影响。因此，平整度是度量沥青路面行驶质量的重

要指标。

目前,国内外普遍采用国际平整度指数 IRI 和行驶质量指数 RQI 作为评价路面平整度的量化指标。其中,国际平整度指数 IRI 为单位行驶距离内悬挂系统的累积竖向位移 (m/km),行驶质量指数 RQI 则反映了道路平整度与行驶舒适性的量化关系。在上述两个量化评价指标中,IRI 直接体现了路面平整度变化对车辆振动的影响;而 RQI 则以 IRI 为基础,以舒适性为主要评价目标,给出了类似于百分制的无量纲评价结果。虽然上述两个评价指标略有差别,但是在实际应用中可以通过试验和统计数据,建立不同等级道路 IRI 与 RQI 的对应关系^[108],因此,路面行驶质量可以采用 IRI 与 RQI 其中之一表示。

随着道路运营时间的增长,路面行驶质量会随之逐渐衰减,表现为 IRI 或 RQI 值逐渐恶化。自从 20 世纪 50 年代末 60 年代初美国 AASHO 试验开始对路面性能衰变规律进行系统研究以来,许多国家和地区建立了不同的路面性能衰变方程^[109-112]。从路面状况出发,通常可以采用 IRI 或 RQI 实测数据与理论分析相结合的方法,建立沥青路面行驶质量衰变方程。

长安大学邵东野根据西安市附近 5 条道路 IRI 实测数据,采用双边外差预测方法,回归得到了沥青路面 IRI 的衰变方程^[113] (式 5.1)。这种回归方法建立的路面行驶质量衰变模型形式简单,便于使用,符合实际路面衰减状况,但是由于不同道路情况有别,其通用性较差。

$$IRI = -8 \times 10^{-6} t^3 + 0.0026 t^2 - 0.0198 t + 1.3339 \quad (5.1)$$

同济大学陈子建根据 200 组实测有效数据,采用多级分组归纳法,提出了路面行驶质量 RQI 衰变方程 (式 5.2),并给出了不同路面结构、面层厚度、结构参数以及交通量组合影响下,RQI 衰变方程的回归参数^[111]。相对而言,该方法考虑因素较为全面,具有一定的通用性,但是衰变方程较为复杂,需要查表以获得相关回归参数值。

$$RQI = RQI_0 \left\{ 1 - \exp \left[- \left(A/t \right)^B \right] \right\} \quad (5.2)$$

其中,RQI₀为路面新建或改建后的初始行驶质量指数;t为新建或改建路面的使用时间;A、B为方程的回归参数,其表达式如下:

$$A = ah^b ESAL^c l_0^d \quad (5.3)$$

$$B = ah^b ESAL^c l_0^d \quad (5.4)$$

式中,h为面层厚度(cm);ESAL为日当量轴载作用次数(次/日/车道);l₀为初始

弯沉值 (0.01mm); a、b、c、d 为回归常数, 在式 5.3 和式 5.4 中各不相同, 对于半刚性基层沥青路面, 在标准轴载 BZZ-100 作用下的回归参数值如表 5.1 所示。

表 5.1 RQI 衰变方程回归系数 (半刚性基层, BZZ-100)

参数	a	b	c	d
式 5.3	19.492	0.239	-0.238	-0.119
式 5.4	0.3686	0.150	-0.164	-0.050

通过上述分析, 本文建议:

(1) 对于具备某一条道路多年 IRI 或 RQI 实测资料的情况, 可以根据 IRI 或 RQI 实测数据, 参照式 5.1 的方法, 回归得到 IRI 或 RQI 与时间 t 的关系, 建立特定道路的行驶质量衰变方程。

(2) 对于具备道路路面结构参数、交通参数等详细资料, 但仅有道路新建或改建后初始路面状况实测参数的情况, 可以利用式 5.2, 计算得到预测的道路路面行驶质量衰变规律。

5.1.3 沥青路面行驶质量参数与车辆行驶速度及油耗的量化关系

1. 行驶质量参数与车辆行驶速度的量化关系

路面行驶质量参数 IRI 与 RQI 存在着相互转化的关系, 且 IRI 可以通过现场实测的方法得到, 因此, 国内外曾经对 IRI 与车速的关系进行了大量的研究^[114-119], 得出了 IRI 与路面状况及车速的简略关系, 如图 5.2 所示^[120]。

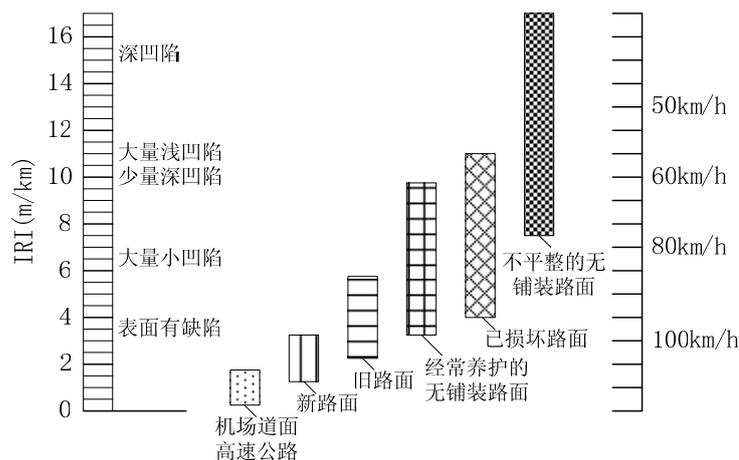


图 5.2 国际平整度指数 IRI 与路面状况和车速的关系

随着相关研究的逐步深入, 基于大量实测数据的计算结果表明, 车速与 IRI 之间的关系比较复杂, 难以用比较简单的对应关系描述两者之间的联系^[121, 117]。为此, 建立车速 v (km/h) 与 IRI (m/km) 之间的量化关系逐步成为研究的重点。目前, 在车速与平

整度量化关系的研究中，多采用正弦波模型模拟路面的平整度（式 5.5）：

$$y=A \times \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \quad (5.5)$$

式中：A 为振幅， λ 为波长，x 为水平方向位移，y 为路面垂直方向位移。

同济大学周晓青等^[17]在正弦波模型的基础上，结合 1/4 车辆模型，得到了国际平整度指数 IRI 的数学解析式，建立了 3 种代表性路面波长条件下 IRI 与 v 的关系图。该研究重点在于分析 IRI 与 v 的数值关系，建立的数学解析式计算过程比较复杂，纯理论解与实际情况是否存在差别尚不清楚。因此，采用该研究成果量化 IRI 与 v 之间的关系还需要做进一步的实测或模拟数据修正。

北京工业大学张金喜等^[18]选择了 4 种代表性路面波长，在正弦波模型的基础上，考虑垂直方向振动加速度，结合 ISO2631/CD-1991 草案中确定的加速度值与人的主观感觉间的关系，采用驾驶舱模拟法，室内模拟 10 位驾驶员在双向四车道高速公路上的驾驶行为，并利用统计分析法得出了 IRI 与 v 的量化关系。该研究借助先进的模拟工具，真实再现了实际道路状况，充分考虑了驾驶员的实际驾驶行为，较为准确的反映了“人-车-路”的交互关系；而且得出的分析结果在 $IRI < 12m/km$ 时，与世界银行公布的推荐速度值具有较高的符合度。考虑到对于一般情况且正常养护的沥青路面，其 IRI 难以超过 12m/km，因此，可以认为该研究提出的相关关系具有较好的准确性。

综上所述，从计算过程简便、分析结果准确的角度出发，同时考虑车与路的振动方程的一致性，假设“人-车-路”的交互作用与车辆类型无关，本文选择北京工业大学驾驶舱模拟研究结果得出的 IRI 与 v 的关系式（式 5.6），用于确定路面行驶质量与车速的量化关系：

$$v = 116.555 - 22.631 \ln IRI \quad (R = 0.962, IRI < 12m / km) \quad (5.6)$$

2. 车辆行驶速度与燃油消耗的量化关系

车辆的燃油消耗是道路用户费用的重要组成部分，也是沥青路面运营阶段能耗与排放量化分析的基础，油耗研究是目前世界各国车辆运营费用及道路经济研究中的重要课题。在油耗研究中，建立油耗与车速等油耗影响因素的量化关系是其核心关键。建立油耗模型通常可以采用多元回归法、理论计算法和台架试验法三种方法，上述三种方法的特点如表 5.2 所示。

表 5.2 油耗模型建立方法

方法	基础/依据	特点
多元回归法	现场实测	<ul style="list-style-type: none"> ● 考虑因素全面，可以考虑不同车辆类型、路面条件等 ● 基于现场实测数据，模型计算结果准确 ● 仅适用于特定条件，普适性较差
理论计算法	能量守恒原理 功率守恒原理	<ul style="list-style-type: none"> ● 综合试验数据和力学分析并进行标定 ● 具有较好的普适性和准确性 ● 推导和计算过程比较复杂
台架试验法	室内试验 比油耗-功率-转速图	<ul style="list-style-type: none"> ● 室内试验数据具有较好的普适性 ● 需要专用的试验设备 ● 可信度较差

上述三种油耗模型的建模方法中，多元回归法考虑因素比较全面，平均车速中包含了车辆加速、减速行驶过程产生的油耗变化，能够真实反映车辆在路面上行驶的真实状况，对于某一确定的道路而言，采用该方法建立的油耗模型具有很好的准确性。理论计算法则具有较好的理论基础，适用性较广，为反映车辆行驶的实际状况，需要输入的参数较多。台架试验法完全以专用试验设备的试验数据为基础，其油耗模型计算结果的需要进行修正才能满足准确性要求。综合以上分析，本文建议在沥青路面油耗模型的建立过程中，在条件许可的情况下，宜首选多元回归法，或者参考类似道路的油耗模型，以提高油耗分析的准确性。

国内有研究根据道路交通组成情况，选择代表车型，实测车辆行驶油耗，建立了车辆油耗与车速的回归关系^[122, 123]。其中，基于长春-四平高速公路（长平高速）和基于北京-石家庄高速公路（京石高速）实测数据建立的油耗模型的计算结果如图 5.3 所示（以小客车为例）。从图中数据可以发现，不同高速公路实测数据建立的油耗模型计算分析结果存在一定的差异，这主要是由于不同道路的实际情况以及测试车辆的差别等因素造成的，也再次验证了多元回归模型特定性和准确性的特点。大量研究表明^[124]，车辆油耗与车速的关系为典型的凹形抛物线形式。为此，本文选择长春-四平高速公路实测油耗数据建立的油耗模型为基础，探讨车辆行驶速度与油耗的量化关系。

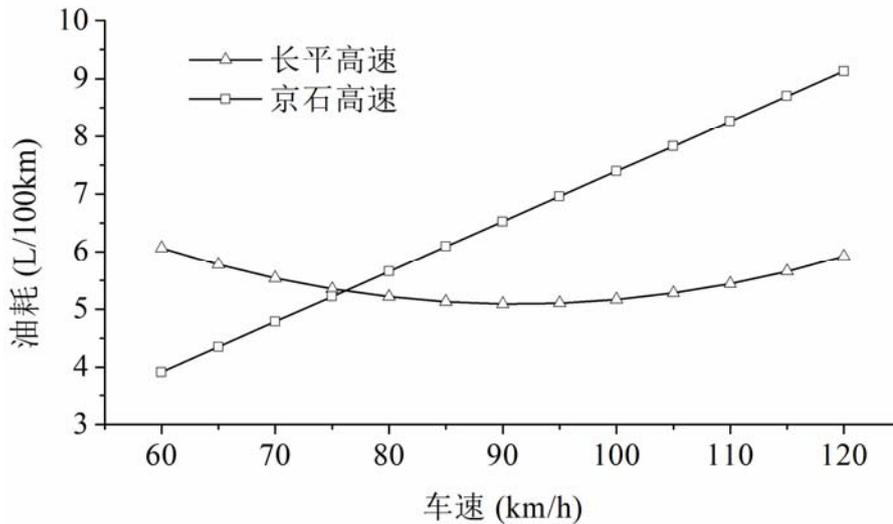


图 5.3 两种不同车速-油耗模型比较（以小客车为例）

影响车辆油耗的因素较多，其中路面状况和道路路线纵坡是影响车辆油耗的主要外在因素。在消除路线纵坡影响后，车辆油耗主要与路面状况有关，而路面状况对车辆油耗的影响则主要表现为与路面平整度变化有关。通过数据修正，消除路线纵坡影响后，长平高速及其邻近国道 102 线长平段各种车辆油耗与速度的回归关系如图 5.4 所示。

长平高速公路及 102 国道长平段属于平原微丘区公路，建成通车已有 10 余年时间，基本上代表了我国平原微丘区且运营时间较长的公路车辆油耗的实际状况。为此，本文根据上述实测数据分析，推荐我国平原微丘区公路不同车辆油耗 F_c 与行驶速度 v 的预估模型（表 5.3）：

表 5.3 平原微丘区公路车辆油耗预估模型

车 型	划分标准	油耗预估模型
大型客车	>35 座	$F_c = 0.008v^2 - 1.072v + 58.33$
中型客车	12~35 座	$F_c = 0.003v^2 - 0.453v + 27.33$
小型客车	<12 座	$F_c = 0.001v^2 - 0.216v + 14.54$
大型货车	>7t	$F_c = 0.014v^2 - 1.647v + 70.45$
中型货车	2.5~7t	$F_c = 0.006v^2 - 0.770v + 41.39$
小型货车	<2.5t	$F_c = 0.004v^2 - 0.566v + 27.96$

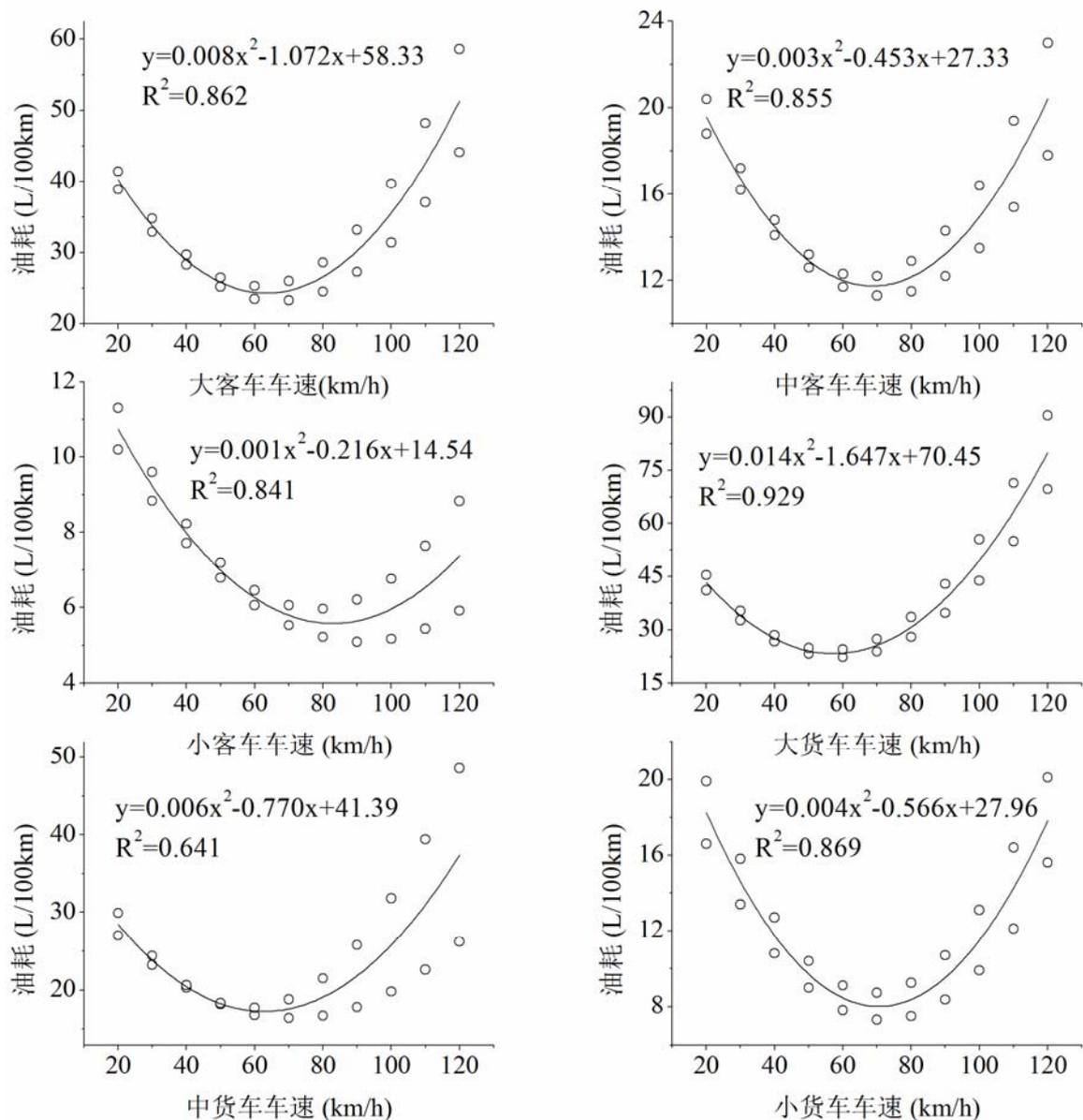


图 5.4 长平高速车辆油耗与速度回归关系

对于情况类似的平原微丘区道路，可以参考上述车辆油耗预估模型计算不同车型的油耗。对于条件具备的情况，可以根据道路交通组成，选择代表车型，实测车辆油耗，建立更为准确的油耗预估模型。

5.1.4 路面状况-车速-能耗与排放量化分析模型

1. 基于路面状况的能耗预估模型

通过上述分析可以发现，路面使用时间 t ，平整度指数 IRI ，车辆行驶速度 v 以及油耗 F_c 之间存在着一定的量化关系，即：

$$IRI = f(t), \quad v = f(IRI), \quad F_c = f(v)$$

通过上述关系之间的传递，可以得到在一定时间段 $t_1 \sim t_2$ 内，由于路面状况 IRI 变化，

导致车速 v 变化，而引起的某一种车型中每一辆车的油耗 Fc 变化，即：

$$Fc_i = \int_{t_1}^{t_2} f[(IRI, v)t] dt \quad (5.7)$$

将该时间段 t 内不同车型中所有车辆 Ne_i 的油耗量加和，即可得到基于路面状况的油耗预估模型：

$$Ne_i = \frac{365N_1}{\gamma} [(1+\gamma)^t - 1] \quad (5.8)$$

$$Fc = \sum_{i=1}^n (Ne_i \times Fc_i) \quad (5.9)$$

式 5.8 计算得到的油耗是以体积单位表示的 L/100km，因此，需要根据柴油和汽油的标准密度 ρ （柴油为 0.85kg/L，汽油为 0.73kg/L），换算为质量单位 kg，然后按照表 3.6 确定的柴油和汽油的发热值，将其转换为能耗单位 MJ/km。

需要说明的是，在路面使用期内，由于路面状况逐渐衰减，需要采取一些养护维修措施以恢复道路的使用性能，从而引起 IRI 出现突变，影响 IRI 与使用时间 t 的量化关系，进而影响使用期内的能耗。如果引入养护维修对车辆油耗的影响，则需要考虑交通组织、交通延误等养护维修措施对车辆行驶状况的影响，导致分析规模增大。而且养护维修措施对车辆行驶状况以及车辆油耗的影响目前国内外鲜有研究，难以建立准确的量化关系。为此，本文从控制分析规模、提供简便实用的分析方法的角度，忽略运营期间养护维修对路面状况的影响及对交通的干扰。

为了简单明了的说明上述油耗预估模型的计算过程，本文以平原微丘区大型客车油耗预估模型为例，假设 IRI 衰变方程为式 5.1，则根据上述量化关系，则可以计算得到路面在 5 年使用时间内的油耗变化数据，从而拟合得到油耗变化曲线（图 5.5）：

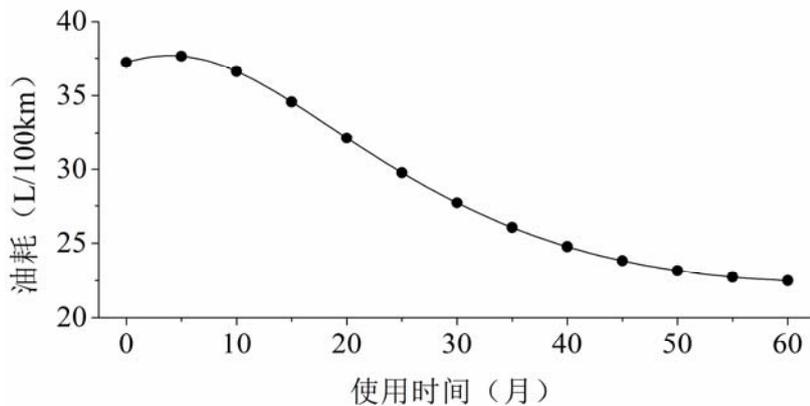


图 5.5 路面使用时间 5 年内大型客车油耗变化曲线

对上述油耗变化曲线积分，即可得到一定时间段内的油耗量（表 5.4）：

表 5.4 5 年内由 IRI 变化引起的油耗量

使用时间 (月)	油耗 (L/100km)	使用时间 (月)	油耗 (L/100km)	使用时间 (月)	油耗 (L/100km)
5	187.213	25	872.501	45	1399.174
10	372.896	30	1016.238	50	1516.608
15	550.902	35	1150.668	55	1631.321
20	717.707	40	1277.715	60	1744.387

从上表数据可以得到，在 5 年运营时间内，由于路面状况变化，一辆大型客车的累计油耗为 17.44387L/km，由于大型客车的燃油主要为柴油，则以质量单位表示的油耗为：

$$17.44387\text{L/km} \times 0.85\text{kg/L} = 14.827\text{kg}/(\text{km} \cdot \text{辆})$$

按照柴油的发热值，则单位车辆能耗为：

$$14.827\text{kg}/(\text{km} \cdot \text{辆}) \times 43.0\text{MJ/kg} = 637.561\text{MJ}/(\text{km} \cdot \text{辆})$$

假设大客车初始年平均日交通量 N_1 为 1000 辆/天，交通量增长率为 $\gamma=5\%$ ，则 5 年时间内大客车的累计交通量为 2×10^6 辆，则 5 年内的车辆能耗为：

$$637.561\text{MJ}/(\text{km} \cdot \text{辆}) \times 2 \times 10^6 \text{ 辆} = 1.35 \times 10^9 \text{ MJ/km}$$

2. 基于路面状况的环境排放量化模型

沥青路面运营阶段，由于路面状况衰减，引起车辆油耗变化而产生的环境排放主要与车辆及燃料类型有关。目前，道路，尤其是高速公路上行驶的车辆，其燃料类型主要为柴油和汽油两大类。而车辆类型则表现出明显的多样性和复杂性，从不同的分析和研究目的出发，车辆类型分类存在很大的差别。联合国欧洲经济委员会（UNECE）和我国国家标准均给出了道路运输车辆的类型划分，从车辆环境排放分析的角度，EEA 在 UNECE 车辆类型划分标准的基础上，给出了道路运输车辆类别。本文将 EEA 车辆类型划分标准和油耗模型建立过程中的车辆类型划分标准相结合，给出环境排放分析过程中的车辆划分标准（表 5.5），为环境排放量化分析中排放因子选择提供参考。

表 5.5 用于环境排放分析的车辆类别

车辆类别 (燃料类型)	UNECE 及国标车型 ^[125]	油耗模型车型
客车 PC (汽油为主)	M1-座位数 ≤ 8 座客车	小型客车
中型车 LDV (柴油为主)	N1-最大设计总质量 ≤ 3.5t 货车	小型货车

车辆类别 (燃料类型)	UNECE 及国标车型 ^[125]	油耗模型车型
大型车 HDV (柴油)	N2-3.5t<最大设计总质量≤12t N3-最大设计总质量>12t M2-座位数>8座, 最大设计总质量≤5t 客车 M3-座位数>8座, 最大设计总质量>5t 客车	中型客车 大型客车 中型货车 大型货车

根据不同的车辆类别及其燃料类型, EEA 给出了三个水平的排放因子计算方法, 其中排放因子 1 水平计算方法中, 给出了各种环境污染物的排放因子, 本文选择其平均值用于沥青路面使用阶段环境排放量化分析, 各环境污染物排放因子的平均值如表 5.6 所示:

表 5.6 道路运输车辆环境排放因子

车辆类型	燃料类型	CO	NM VOC	NO _x	N ₂ O	NH ₃	PM	CO ₂
		g/kg						kg/kg
客车 PC	汽油	132	14.0	14.5	0.213	0.173	0.037	3.180
中型车 LDV	柴油	11.0	1.75	15.0	0.069	0.014	2.80	3.140
大型车 HDV	柴油	8.0	1.6	37.0	0.061	0.015	1.20	

根据道路运输车辆分类及其排放因子, 结合沥青路面生命周期环境排放通用计算公式 3.2 和车辆油耗预估模型 (式 5.9), 即可得到车辆运行过程环境排放预估模型:

$$EE_i = \sum_j \left(\sum_m (F_{c_{j,m}} \times EF_{i,j,m}) \right) \quad (5.10)$$

式中, EE_i 为环境排放物 i 的排放量, $F_{c_{j,m}}$ 为 j 型车使用 m 型燃料的消耗量, $EF_{i,j,m}$ 为相应车辆类型和燃料类型的排放因子。

5.2 养护维修阶段的能耗与排放量化分析研究

沥青路面在使用过程中, 随着时间的推移, 在交通荷载和环境因素的共同作用下, 路面状况不断恶化, 使用性能逐渐下降, 需要根据其使用性能衰减规律, 采取合适的技术措施, 对沥青路面进行及时养护维修。在沥青路面养护维修过程中, 需要投入养护维修材料和机械设备, 消耗一定量的燃料, 并产生环境排放问题。为此, 本文首先分析目前沥青路面常用的养护维修措施及其工艺流程, 然后确定沥青路面养护时机及养护措施决策方法, 最后提出沥青路面养护维修阶段能耗与排放量化分析方法。

5.2.1 沥青路面养护维修措施及工艺流程

按照沥青路面养护工作的工作性质、规模以及时效性, 我国《公路沥青路面养护技

术规范》(JTJ 073.2-2001) 将其分为日常养护、小修保养、中修、大修、改建和专项养护工程等, 所采用的具体养护维修措施可以分为罩面养护技术、加铺技术以及翻修技术等。从沥青路面生命周期的角度, 加铺和翻修过程往往需要对路面、路基等路面结构层进行大范围的重建, 加铺和翻修后的沥青路面可以说已经属于新路面的范畴, 已不属于原有路面的生命周期阶段。因此, 本文在沥青路面养护维修措施中, 重点分析罩面技术及其能耗与排放来源。

罩面是目前高速公路沥青路面常用的一种预防性养护措施, 主要用于路面表面功能的恢复。目前常用的罩面养护技术主要有稀浆封层与微表处、碎石封层以及热拌沥青混凝土薄层罩面。

1. 稀浆封层与微表处

稀浆封层与微表处是采用适当级配的石屑或砂、填料与乳化沥青或改性乳化沥青、外掺剂和水按照一定比例拌和而成的流动型沥青混合物。稀浆封层与微表处具有较好的防水、防滑、填充和耐磨耗作用, 目前主要用于以下方面^[126] (表 5.7):

表 5.7 稀浆封层与微表处的适用范围

项目	稀浆封层	微表处
适用情况	<ul style="list-style-type: none"> √ 轻度纵、横向裂缝和块裂 √ 路面磨耗严重或松散路面 √ 老化路面 √ 缺乏摩擦系数的路面 √ 渗水的路面 √ 车辙发展稳定且车辙不严重的路面 	<ul style="list-style-type: none"> √ 轻度纵、横向裂缝和块裂 √ 磨耗严重及松散的路面 √ 轻度或中度泛油的路面 √ 轻度不平整路面 √ 缺乏摩擦系数的路面 √ 渗水的路面 √ 疲劳裂缝轻微的路面 √ 车辙稳定的路面
避免情况	<ul style="list-style-type: none"> × 出现明显疲劳裂缝的路面 × 温缩裂缝严重的路面 × 车辙较深的路面 × 炎热地区的泛油路面 	<ul style="list-style-type: none"> × 疲劳裂缝严重的路面 × 路面损坏严重的路面 × 剩余寿命短的路面 × 温度裂缝严重的路面 × 炎热地区的泛油路面

注: 对于松散路面, 必须首先将松散材料清除

根据技术定义, 稀浆封层和微表处的主要原材料包括乳化沥青、改性乳化沥青以及矿料。稀浆封层和微表处的施工工艺主要包括前期路面处理、稀浆混合物拌和与摊铺以及后期养护, 其中稀浆沥青混合料的拌和与摊铺是整个施工过程中的关键环节, 目前多采用专用的稀浆封层车, 将稀浆沥青混合料的拌和与摊铺整合在一起。根据材料组成及

施工工艺,本文总结提出稀浆封层和微表处技术实施过程中的能耗与排放如图 5.6 所示:

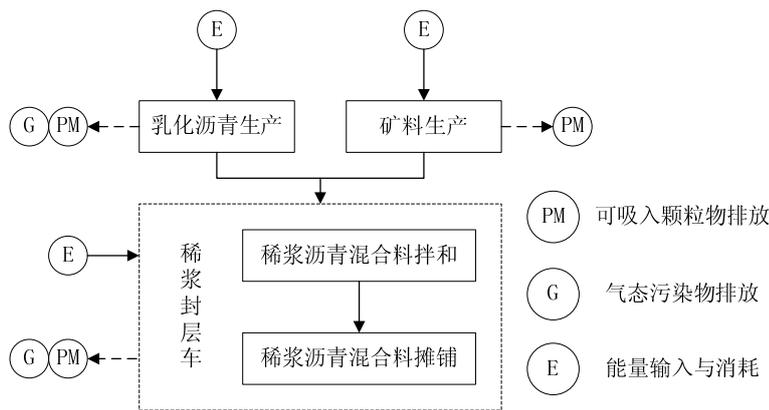


图 5.6 稀浆封层和微表处施工过程能耗与排放

2. 碎石封层

碎石封层是在道路表面撒布一定量的结合料,然后再撒布一定量的单粒径碎石,最后通过碾压使碎石部分嵌入结合料的一种道路表面处治方法。碎石封层的厚度一般不大,具有改善路面抗滑、耐磨耗、防渗水性能以及提高道路平整度等作用。同步碎石封层由于其较好的防水、防滑和耐久性,以及施工方便、使用经济的特点,目前在道路养护维修过程中应用较广,通常用于以下方面^[126](表 5.8):

表 5.8 同步碎石封层适用范围

	适用范围
同步碎石封层	<ul style="list-style-type: none"> ■ 旧沥青路面加铺防水磨耗层; ■ 低等级、农村公路沥青路面铺筑; ■ “白改黑”路面的防水黏结层; ■ 桥面防水层施工; ■ 与稀浆封层或微表处结合施工(开普封层); ■ 路面标志、停车位等标示施工

根据技术定义,碎石封层的主要原材料包括沥青结合料以及矿料。碎石封层的施工工艺主要包括沥青结合料及碎石撒布和初压及复压两大关键环节,目前多采用专用的碎石封层车进行沥青结合料及碎石的撒布,胶轮压路机进行初压,钢轮压路机进行复压。根据材料组成及施工工艺,本文总结提出碎石封层技术实施过程中的能耗与排放如图 5.7 所示:

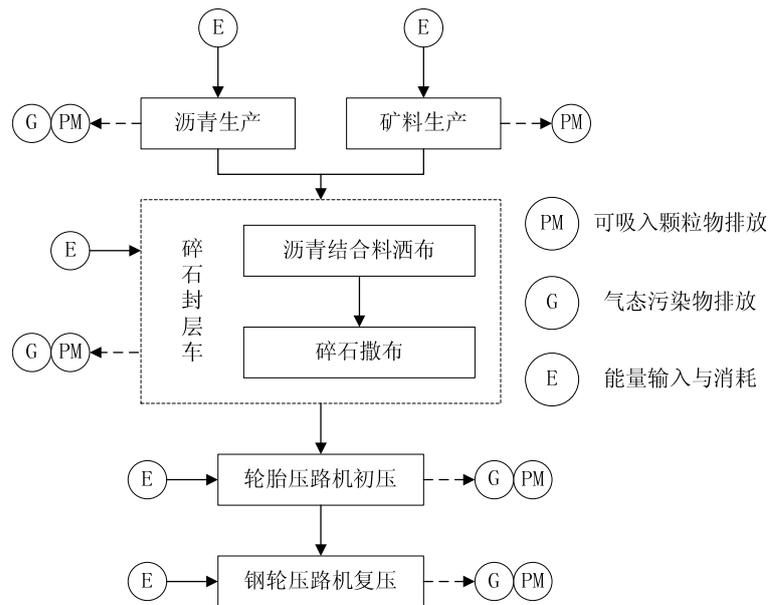


图 5.7 碎石封层施工过程能耗与排放

3. 热拌沥青混凝土薄层罩面

热拌沥青混凝土薄层罩面是在旧路面上铺设一层厚度为 15~30mm 的沥青混合料进行道路修复的一种技术措施。与传统的磨耗层和厚表面处治方法相比，热拌沥青混凝土薄层罩面具有较好的抗滑、防水、降噪及耐久性，在沥青路面的养护维修工作中应用广泛。其中，采用间断级配沥青混合料与乳化沥青的超薄磨耗层具有施工时间短、使用性能好、经济效益高的特点，是目前常用的一种薄层罩面形式，主要用于以下方面（表 5.9）：

表 5.9 超薄磨耗层适用范围

	适用范围
超薄磨耗层	<ul style="list-style-type: none"> ■ 出现龟裂-网裂-脱皮-露骨-渗水的高等级路面 ■ 路基强度满足要求，路面变形不大的路面 ■ 路面光滑，摩擦系数不够或路面纹理深度不足的路面 ■ 路基完好的超期服役的高等级沥青路面 ■ 路面噪声过大，需要减少路面轮胎噪声的特殊路面 ■ 路表面横向排水不畅，需改善表面排水的路面

根据技术定义，超薄磨耗层的主要原材料及施工工艺与普通热拌沥青混合料相类似，为此，本文总结提出超薄磨耗层技术实施过程中的能耗与排放如图 5.8 所示：

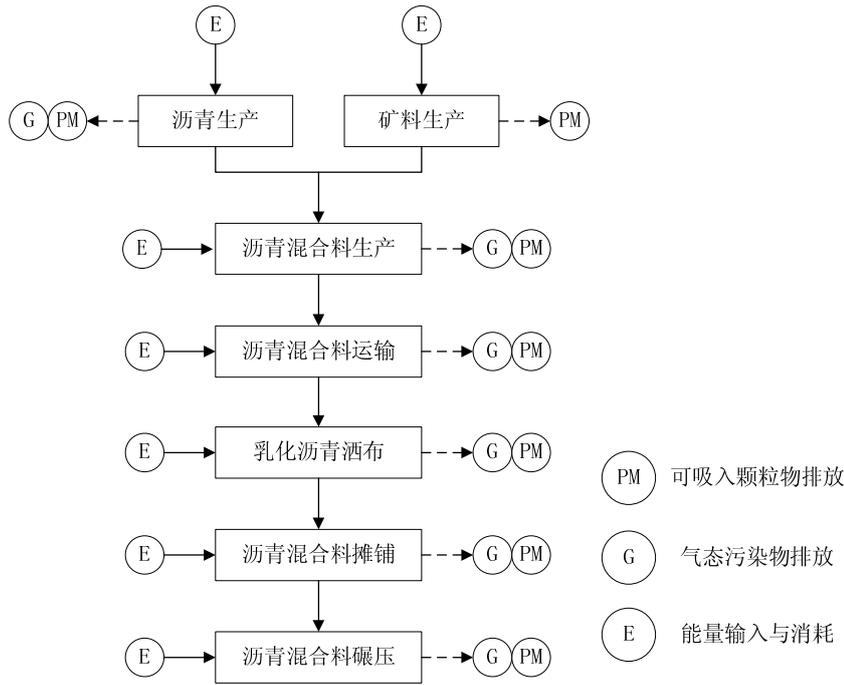


图 5.8 超薄磨耗层施工过程能耗与排放

5.2.2 沥青路面养护时机及决策

在沥青路面养护维修阶段，需要根据沥青路面使用性能随时间的衰减情况，结合一定的评价标准，在合适的时间，针对合适的路段，选择合适的养护维修措施，并确定进行养护维修的次数。其中，建立沥青路面使用性能衰变模型是确定养护决策的基础。国内外许多国家和地区建立了各自的路面性能衰变模型，如美国 AASHO 模型^[127]、加拿大 ALBERTA 模型^[128]以及我国北京、天津和广东地区建立的路面性能衰变模型^[111]等。

目前使用的路面性能衰变模型大多以某一国家、地区或具体试验路段的实测数据为基础，进行回归分析及修正得到，通用性及可移植性较差。同济大学孙立军等结合路面使用性能典型衰变模式分析，提出了通用的路面使用性能衰变方程^[129]。本文确定的养护维修阶段范围及相应的技术措施主要针对路面的病害状况，因此，本文选择路面状况指数 PCI 的衰变模型分析路面使用性能随时间的变化情况，PCI 衰变模型方程如下所示：

$$PCI = PCI_0 \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{\alpha}{t} \right)^\beta \right] \right\} \quad (5.11)$$

$$\alpha = \lambda \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{\eta}{l_0} \right)^\xi \right] \right\} \quad (5.12)$$

$$\lambda = a_1 h^{b_1} ESAL^{c_1} \quad (5.13)$$

$$\eta = a_2 h^{b^2} ESAL^c \quad (5.14)$$

$$\xi = a_3 h^{b^3} ESAL^c \quad (5.15)$$

$$\beta = a_4 h^{b^4} ESAL^c l_0 \quad (5.16)$$

式中， PCI_0 为初始路面状况指数， t 为使用时间（年）， α 为路面寿命因子， β 为形状因子， h 为新建路面沥青层厚度（cm）， $ESAL$ 为轴载作用次数（标准轴次/天/车道）， l_0 为初始弯沉值（0.01mm）， a 、 b 、 c 、 d 为回归系数，对于半刚性基层沥青路面，在标准轴载 BZZ-100 作用下的回归参数值如表 5.10 所示。

表 5.10 PCI 衰变方程回归系数（半刚性基层，BZZ-100）

参数	a	b	c	d
式 5.13	15.7238	0.5861	-0.2064	-
式 5.14	119.66	-0.1124	-0.1053	-
式 5.15	1.5247	-0.1016	-0.0986	
式 5.16	0.6536	0.3349	-0.0255	-0.0981

确定沥青路面路面状况衰变模型后，即可根据路面状况衰减情况，结合不同养护维修措施的技术特点，考虑经济和社会因素，确定合适的养护时机及具体的养护维修措施。在养护时机及决策方面，国内外也进行了大量的研究，提出了诸如时间-路况法、费用效益法、寿命周期效益评估法、决策树/决策矩阵法、排序法以及基于老化的方法等多种方法用于确定路面养护时机，制定养护对策。我国《公路沥青路面养护技术规范》(JTJ 073.2-2001) 给出了在满足结构强度要求的前提下，基于 PCI 的路面罩面类养护维修措施的养护对策（表 5.11）：

表 5.11 高速公路基于路面状况 PCI 的养护决策

评级	优、良	中及以下
PCI	≥ 70	< 70
养护方法	日常养护，局部修补	罩面

根据上表数据，本文认为，在结构强度满足要求，无需进行结构改善的情况下，仅从路面状况出发，可以将 $PCI=70$ 作为养护维修阶段罩面类养护措施决策过程中的阈值，从而便于结合 PCI 衰变模型，确定罩面类养护措施的实施时机。

路面进行罩面处理后，路面状况将会得到一定程度改善，表现为 PCI 值发生跃迁(图 5.9)，跃迁后的 PCI 值通常需要实测才能确定，而养护维修阶段能耗与排放量化分析一般是先于养护维修措施而开展的预估，因此无法获得基于实测的 PCI 跃迁后的数值。考

虑到采用罩面修复措施后，路面的破损状况会有明显改善，其评价等级应能达到优，即 $PCI \geq 85$ ；此外，罩面类养护维修措施也具有一定的使用寿命，一般为 5~7 年^[130]，从罩面类养护维修措施改善路面状况，延缓路面状况衰变的角度，可以认为采用罩面类养护维修措施后，路面状况 PCI 可以恢复到使用寿命年限前的水平，即恢复到 5~7 年前的 PCI 数值。根据上述分析，本文在养护维修阶段能耗与排放量化分析中，对修复后 PCI 跃迁数值预估做出如下假设：

- (1) 采用罩面类养护维修措施修复后，路面状况 PCI 恢复至 5 年前 PCI 数值；
- (2) 当 5 年前 $PCI \geq 85$ ，则取恢复后的 PCI 为 5 年前的 PCI 数值；
- (3) 当 5 年前 $PCI < 85$ ，则取恢复后的 $PCI = 85$ 。

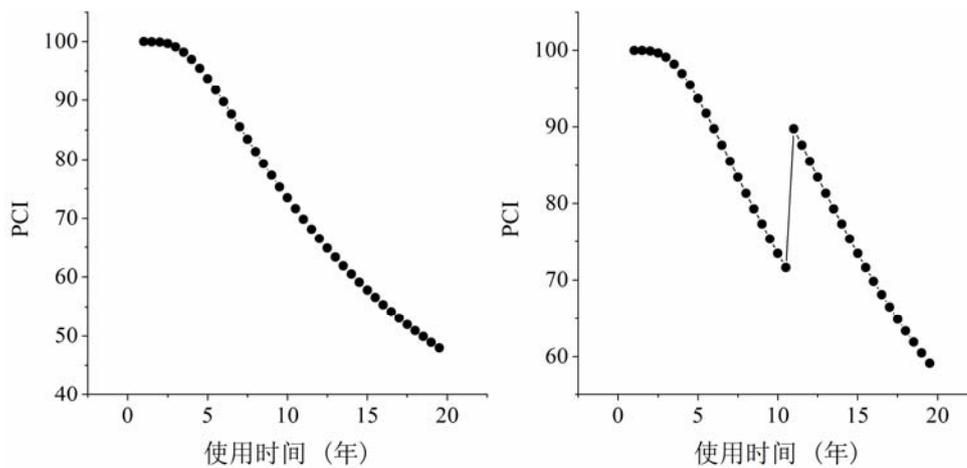


图 5.9 不采用与采用养护维修措施的路面 PCI 衰变情况

根据以上假设，结合路面状况 PCI 衰变模型及罩面类养护维修措施时机和决策，即可确定何时采用何种养护维修措施以及在生命周期分析期限内进行养护维修的次数，从而为沥青路面养护维修阶段能耗与排放量化分析提供依据。

5.2.3 沥青路面养护维修阶段能耗与排放量化分析

1. 沥青路面养护维修阶段能源消耗与环境排放量化分析方法

根据沥青路面养护维修措施及其工艺流程，沥青路面养护维修阶段的能源消耗与环境排放主要来源于各种养护维修材料生产以及养护机具运转过程。目前，我国大部分省份都结合本省公路养护工程实际情况，编制了地方性的道路养护工程预算定额。因此，养护维修阶段的能耗计算方法仍然可以采用“定额法”，并结合养护维修材料和机械设备的特點进行适当补充。当确定了具体的能源消耗量后，即可按照“排放因子法”确定沥青路面养护维修阶段的环境排放。

与沥青路面建设阶段类似，养护维修阶段也包括了材料生产以及施工等过程，而且养护维修措施与新建工程混合料铺筑有很多相似性，尤其是热拌沥青混合料薄层罩面，在材料及工艺流程方面与沥青混合料铺筑基本一致，完全可以采用沥青路面建设阶段能耗与排放量化分析方法。而稀浆封层与微表处以及碎石封层技术的原材料和施工工艺流程与新建工程沥青混合料有所不同，为此，本文给出了其能耗与排放量化分析过程中的相关补充说明。

(1) 材料生产过程

稀浆封层与微表处以及碎石封层技术中采用的沥青结合料通常为乳化沥青或改性乳化沥青，欧洲沥青协会 EBA 给出了比较权威的乳化沥青生产过程能耗与排放因子(表 5.12)，以此为基础，可以计算稀浆封层与微表处以及碎石封层技术中乳化沥青生产过程的能耗与排放(表 5.13)。

表 5.12 乳化沥青的能耗与排放因子

能耗 (kg/t)	天然气	21.9
	原油	44.9
	煤	5.32
	铀	0.0004
排放 (g/t)	CO ₂	203746
	SO ₂	876
	NO _x	835
	CO	629
	CH ₄	640
	NMVOC	338
	颗粒物	185.5

注：以上数据包括了原油开采、运输、提炼以及储存过程

表 5.13 乳化沥青生产过程单位产量能耗

燃料	发热值 (MJ/kg)	单位燃料消耗 (kg/t)	单位能耗 (MJ/t)
	①	②	③=①×②
天然气	48.0	21.9	1051.2
原油	42.3	44.9	1899.27
煤	26.7	5.32	142.044
铀	8.5×10 ⁷	0.0004	34000
总计			37092.514

(2) 养护维修措施实施过程

沥青路面养护维修措施在实施过程中,除了常规的运输车辆、压路机等机械设备外,还有专用的沥青洒布机、稀浆封层车和碎石封层车。在具备专用的养护定额的情况下,可以根据养护工程预算定额及机械台班费用定额,确定养护维修过程中使用的专用设备的机械台班及台班能源消耗量;当不具备专用养护定额的情况下,可以参考公路工程预算定额中“乳化沥青表面处治”和“乳化沥青稀浆封层”分别作为碎石封层和稀浆封层机微表处施工过程机械设备油耗及排放量化测定标准。

2. 沥青路面养护维修阶段能源消耗与环境排放量化分析流程

根据前文分析,在沥青路面养护维修阶段能耗与排放量化分析方法的基础上,本文提出沥青路面养护维修阶段能耗与排放量化分析流程(表 5.14):

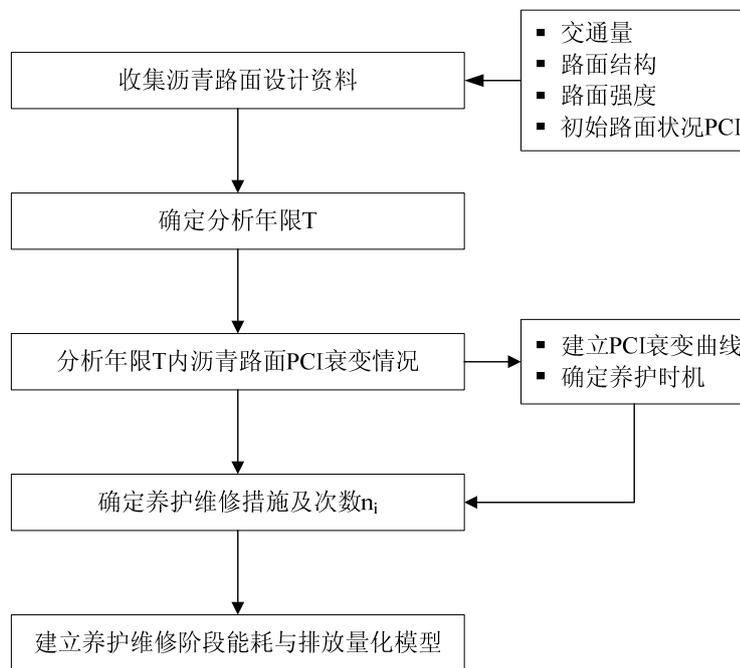


表 5.14 沥青路面养护维修阶段能耗与排放量化分析流程

(1) 根据 PCI 衰变方程,收集路面设计资料,主要包括交通量、标准轴载作用次数、沥青层厚度、路面结构强度-初始弯沉值以及初始路面状况等。

(2) 根据分析期限 T 和 PCI 衰变方程 $PCI=f(t)$,建立在分析期 T 内 PCI 随时间的衰变曲线,分析沥青路面 PCI 衰变情况,确定养护时机。

(3) 根据本文确定的路面修复后 PCI 跃迁假设及养护时机,结合 PCI 衰变曲线,确定在分析期 T 内的养护维修次数以及具体的养护维修措施。

(4) 建立养护维修阶段能耗与排放量化模型(式 5.17~5.18),采用定额法和排放因子法计算沥青路面养护维修过程的能耗与排放的量化数值。

$$E_{main} = \sum_{i=1}^n n_i \times E_{main,i} \quad (5.17)$$

$$EE_{main} = \sum_{i=1}^n n_i \times EE_{main,i} \quad (5.18)$$

式中， E_{main} 和 EE_{main} 分别为养护维修工程的总能耗和总排放， $E_{main,i}$ 和 $EE_{main,i}$ 分别为进行一次 i 类养护维修措施的能耗与排放， n_i 为养护维修次数。

5.3 沥青路面使用阶段能耗与排放量化分析模型及应用

沥青路面使用阶段的能耗与排放主要源于运营期间车辆运行以及养护维修措施的实施，使用阶段的能耗与排放量化结果为上述两个组成部分能耗与排放量化结果的总和。本文根据前文建立的“路面状况-车速-能耗与排放”预估模型和养护维修阶段能耗与排放预估模型，将上述过程的量化分析结果按照一定的功能单位合理汇总，建立沥青路面使用阶段能耗与排放量化分析模型。

5.3.1 沥青路面使用阶段能耗与排放量化分析模型

1. 沥青路面使用阶段能源消耗量化分析模型

沥青路面使用阶段能耗量化计算模型，可以表示为沥青路面运营阶段车辆能耗与养护维修工程能耗之和。但是，由于车辆能耗与养护工程能耗计算方法不同，计算结果表示存在一定差异：车辆能耗计算结果表示为单位公里能耗 MJ/km，而养护维修工程能耗计算结果可以表示为该工程的总能耗 MJ 或按照定额单位表示为单位工程数量能耗 MJ/m²。

为了将不同计算方法得到的能耗统一求和，需要引入生命周期分析方法中功能单位的概念，将沥青路面使用阶段的能耗统一表示为 MJ/功能单位。为此，本文采用功能单位转换因子 UI，根据确定的功能单位，将不同计算方法得到的能耗转换为 MJ/功能单位，由此得到沥青路面使用阶段能耗量化分析模型（式 5.19）。

$$E_{using} = Fc \times UI_{Fc} + E_{main} \times UI_{E_{main}} \quad (5.19)$$

2. 沥青路面使用阶段环境排放量化分析模型

沥青路面使用阶段源于车辆及养护维修工程的环境排放种类繁多，同样可以根据能耗量化分析结果，采用基于特征因子 C 的特征化表示方法，建立沥青路面使用阶段环境排放量化分析模型（式 5.20）。为了便于计算以及实际应用，同样可以采用与表 4.15

相类似的表格形式表示沥青路面使用阶段环境排放量化分析模型。

$$EE_{using,k} = EI_{vehicle,k} + EI_{main,k} \quad (5.20)$$

式中， $EE_{using,k}$ 、 $EI_{vehicle,k}$ 和 $EI_{main,k}$ 分别为沥青路面使用阶段、车辆运行过程以及养护维修工程中第 k 个影响类别的环境排放特征化结果。

5.3.2 沥青路面使用阶段能耗与排放量化分析模型应用示例

根据前文建立的沥青路面使用阶段能耗与排放量化分析模型，本文以河南省淮滨至固始高速公路（以下简称淮固高速公路）新建工程为例，详细说明沥青路面使用阶段能耗与排放量化分析模型在实际中的应用。

1. 资料收集

(1) 道路横断面

淮固高速公路为平原微丘区双向四车道高速公路，主线行车道 $2 \times 2 \times 3.75\text{m}$ 。

(2) 交通量及交通组成

根据交通调查及预测结果，现状交通组成情况如表 5.15 所示。淮固高速公路预计与 2012 年底竣工，2013 年正式投入使用，按照交通量预测结果，2013 年交通量为 10072pcu/d，2020 年交通量为 14857pcu/d，2027 年交通量为 21215pcu/d，2032 年交通量为 26053pcu/d。计算得到预测交通量年平均增长率前 7 年为 5.7%，中间 7 年为 5.2%，最后 5 年为 4.2%。设计年限内一个车道累计标准轴载当量轴次为 1.334×10^7 次，则日当量轴载作用次数 ESAL 为 2436 次/日/车道。

表 5.15 淮固高速公路交通组成

车型类别		折算比例
货 车	小 货	21.68%
	中 货	10.91%
	大 货	16.84%
	拖挂车	10.15%
	合 计	59.59%
客 车	小 客	29.01%
	大 客	11.40%
	合 计	40.41%
合 计		100.00%

(3) 路面结构及结构强度

淮固高速公路为沥青混合料路面，主线以及服务区贯通车道、一般互通匝道等路面

沥青面层结构方案为：4cm 细粒式改性沥青混凝土（AC-13C）+6cm 中粒式沥青混凝土（AC-20C）+8cm 粗粒式沥青混凝土（AC-25C），沥青面层总厚度为 18cm。根据相关设计文件，淮固高速公路路面结构设计弯沉值 $L_d=22.5$ （0.01mm），竣工顶面验收弯沉值为 18.4（0.01mm）。

2. 功能单位及分析期确定

为了能够将运营阶段车辆能耗与排放和养护维修措施的能耗与排放量化结果有效统一，本文选择以 1km 双向四车道高速公路的一个车道作为基本功能单位，同时根据淮固高速公路设计年限，以运营通车起 15 年为分析期，将分析期 15 年内的能耗与排放量化分析结果统一表示为 MJ/功能单位和 kg/功能单位。

3. 沥青路面运营阶段车辆能耗与排放量化计算

按照“路面状况-车速-能耗与排放”量化分析模型，淮固高速公路沥青路面运营阶段车辆能耗与排放量化计算过程如下：

（1）根据淮固高速公路设计资料，按照沥青路面行驶质量参数衰变模型（式 5.2~5.4）计算确定在分析年限 15 年内 RQI 随时间的变化情况，并参照《公路沥青路面养护技术规范》（JTJ 073.2-2001）给出的 RQI 与 IRI 的换算关系，计算得到 15 年内 IRI 随时间的变化；然后根据 IRI 与车速的关系（式 5.6），得到 IRI 变化对车速的影响。

（2）淮固高速公路属于平原微丘区高速公路，因此，道路行驶车辆的分类油耗模型可以参考表 5.3。据此，可以依据车速计算得到大客车、小客车、大货车（包括拖挂车）、中货车以及小货车在分析期 15 年内的油耗变化曲线。对该曲线积分，即可得到上述 5 种车型 15 年内的单位车辆累积油耗 F_{c_i} （表 5.16）。

（3）根据淮固高速公路交通预测及交通分布资料，可以按照式 5.8 和式 5.9 分别计算得到上述 5 种车型 15 年内的累积交通量 Ne_i 以及汽油和柴油的消耗总量。

（4）将汽油和柴油的消耗总量乘以各自的发热值，并求和，即可得到 15 年分析期内的总能耗 MJ/km。

（5）计算得到的总能耗其实质为四车道高速公路的能耗，按照确定的功能单位，在不考虑车辆横向分布的情况下，1km 双向四车道高速公路一个车道的能耗为计算得到总能耗的 1/4（功能单位转换因子），由此可以确定在 15 年分析期内由于车辆运行而产生的能耗为 $9.94 \times 10^9 \times 1/4 = 2.48 \times 10^9$ MJ/功能单位。

表 5.16 淮固高速公路 15 年内分类车型单位车辆累积油耗

车辆类型	小客车	大客车	大货车	中货车	小货车
燃油类型	汽油	柴油	柴油	柴油	柴油
单位车辆累积油耗 (L/km)	0.47	3.55	4.54	2.74	1.25
单位车辆累积油耗 (kg/km)	0.34	3.02	3.86	2.33	1.06
累积交通量 Nei	33982594	13354070	31616346	12780079	25396161
总燃油消耗量 (kg/km)	11659428	219051612			
总能耗 (MJ/km)	9.94×10 ⁹				

(6) 根据客车 PC、中型车 LDV 和中型车 HDV 运行过程的排放因子 (表 5.6), 可以计算得到车辆的环境排放量化及其归类和特征化结果 (表 5.17)。

表 5.17 淮固高速公路沥青路面使用过程车辆环境排放量化及特征化结果

影响类别	影响因子	特征化因子	排放量	特征化结果	总计 kg/功能单位
		kg/kg ①	kg ②	kg ③=①×②	
全球变暖	CO ₂	1	7.25×10 ⁸	7.25×10 ⁸	7.30×10 ⁸
	N ₂ O	298	1.61×10 ⁴	4.79×10 ⁶	
酸化效应	NO _x	0.7	7.68×10 ⁶	5.38×10 ⁶	5.39×10 ⁶
	NH ₃	1.88	5.28×10 ³	9.92×10 ³	
健康危害	NO _x	1.2	7.68×10 ⁶	9.22×10 ⁶	1.76×10 ⁷
	CO	2.4	3.37×10 ⁶	8.09×10 ⁶	
	NMVOC	0.64	5.18×10 ⁵	3.31×10 ⁵	
颗粒物	PM	1	3.06×10 ⁵	3.06×10 ⁵	3.06×10 ⁵

4. 沥青路面养护维修工程能耗与排放量化计算

按照沥青路面养护维修工程能耗与排放量化计算方法, 淮固高速公路沥青路面养护维修阶段能耗计算过程如下:

(1) 根据淮固高速公路设计资料, 按照沥青路面状况 PCI 衰变模型 (式 5.11~5.16), 计算确定在分析年限 15 年内 PCI 随时间的变化情况 (图 5.10)。

(2) 根据基于 PCI 的路面罩面类养护维修措施的养护对策 (表 5.11), 确定淮固高速在通车运营后 11 年末进行罩面类养护。由于淮固高速在 15 年分析期内的 PCI 整体状况良好, 因此选择稀浆封层和微表处作为主要养护维修方案。

(3) 根据本文提出的 PCI 跃迁假设, 确定采用罩面类养护维修后路面的 PCI 数值, 得到采取养护措施后的路面 PCI 衰变曲线 (图 5.10)。根据衰变曲线, 可以判断在 15 年分析期内, 只需进行 1 次养护维修。

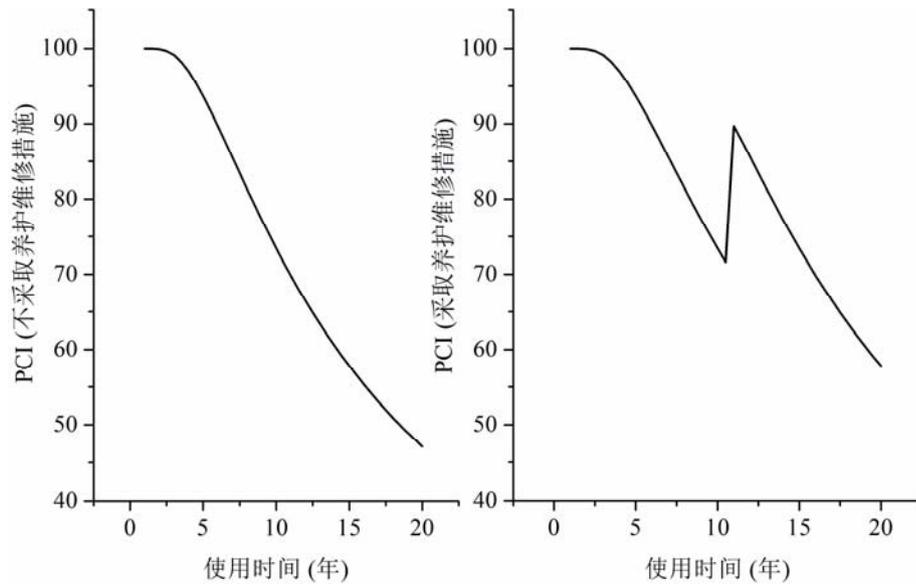


图 5.10 淮固高速养护前后 PCI 衰变曲线

(4) 参照《公路工程预算定额》(JTG/T B06-02-2007), 确定 1000m²ES-2 型乳化沥青稀浆封层的材料用量为: 乳化沥青 1.476t, 石料 5.685t。根据表 5.13 计算得到的乳化沥青单位产量能耗 37092.514MJ/t 以及石料生产阶段的能耗 10.8MJ/t, 则可计算得到 1000m² 乳化沥青稀浆封层材料生产过程的能耗 (表 5.18)。

表 5.18 1000m² 乳化沥青稀浆封层材料生产过程能耗

材料	材料用量 (t/1000m ²)	单位产量能耗 (MJ/t)	材料生产过程能耗 (MJ/1000m ²)	材料生产过程总能耗 (MJ/1000m ²)
	①	②	③=①×②	④
乳化沥青	1.476	37092.514	54748.551	54809.949
石料	5.685	10.8	61.398	

根据乳化沥青和石料生产过程排放因子 (表 5.12, 表 4.4), 可以计算得到 1000m² 乳化沥青稀浆封层生产过程的环境排放量化及其归类和特征化结果 (表 5.19)。

表 5.19 1000m² 乳化沥青稀浆封层生产过程的环境排放量化及特征化结果

影响类别	影响因子	特征化因子 kg/kg	排放量 kg	特征化结果 kg	总计 kg
		①	②	③=①×②	
全球变暖	CO ₂	1	300.729	300.729	324.354
	CH ₄	25	0.945	23.625	
酸化效应	SO ₂	1	1.293	1.293	2.155
	NO _x	0.7	1.232	0.862	
健康危害	SO ₂	0.096	1.293	0.124	4.149
	NO _x	1.2	1.232	1.478	
	CO	2.4	0.928	2.227	

影响类别	影响因子	特征化因子	排放量	特征化结果	总计 kg
		kg/kg	kg	kg	
		①	②	③=①×②	
	NM VOC	0.64	0.499	0.319	
颗粒物	PM	1	1.638	1.638	1.638

(5) 参照《公路工程预算定额》(JTG/T B06-02-2007), 确定铺设 1000m²ES-2 型乳化沥青稀浆封层的机械台班用量, 同时根据《公路工程机械台班费用定额》(JTG/T B06-03-2007), 确定各种机械的燃料消耗量(表 5.20)。

表 5.20 1000m² 乳化沥青稀浆封层施工过程能耗

机械设备	台班 (台班/1000m ²)	台班油耗 (kg/台班)	施工过程油耗耗 (kg/1000m ²)	施工过程总能耗 (MJ/1000m ²)
	①	②	③=①×②	④
液态沥青运输车 4000L 以内	0.3	34.28 (汽油)	21.084	2315.176
洒水汽车 4000L 以内	0.3	36.00 (汽油)		
稀浆封层机 2.5~3.5m	0.31	103.62 (柴油)	32.122	

由于缺乏相关机械设备生产运行过程的排放因子, 本文采用其燃料燃烧产生的排放因子(表 3.7) 计算确定 1000m² 乳化沥青稀浆封层施工过程的环境排放量化及其归类和特征化结果(表 5.21)。

表 5.21 1000m² 乳化沥青稀浆封层施工过程的环境排放量化及特征化结果

影响类别	影响因子	特征化因子	排放量	特征化结果	总计 kg
		kg/kg	kg	kg	
		①	②	③=①×②	
全球变暖	CO ₂	1	167.079	167.079	167.666
	CH ₄	25	0.007	0.174	
	N ₂ O	298	0.001	0.414	

(6) 将材料生产与施工过程的能耗求和, 得到沥青路面养护维修阶段总能耗为 54809.949+2315.176=57125.125MJ/1000m²。根据确定的功能单位, 淮固高速公路 1 个车道 1km 的面积为 3.75 (1000m²), 即功能单位转换因子为 3.75 (1000m²), 由此可以确定沥青路面养护维修阶段的总能耗为 57125.125MJ/1000m²×3.75 (1000m²)=2.14×10⁵MJ/功能单位。同样的, 可以计算得到养护维修阶段每功能单位的环境排放及其特征化结果(表 5.22)。

表 5.22 淮固高速公路养护维修阶段环境排放及其特征化结果

影响类别	全球变暖	酸化效应	健康危害	颗粒物
特征化结果 (kg/功能单位)	1845.075	8.081	15.559	6.143

5. 沥青路面使用阶段能耗与排放量化分析

按照功能单位汇总分析结果，在沥青路面使用阶段，以 15 年为分析期，由于路面状况变化导致车辆运行速度变化而产生的累积车辆能耗为 2.48×10^9 MJ/功能单位。在 15 年分析期内，进行路面养护维修，由于养护维修材料生产及施工而消耗的能量为 2.14×10^5 MJ/功能单位。由于能源消耗，在 15 年分析期内，车辆运行和路面养护维修产生的环境排放对比情况如表 5.23 所示。

表 5.23 淮固高速公路沥青路面使用阶段环境排放来源对比

来源	全球变暖	酸化效应	健康危害	颗粒物
车辆运行 (kg/功能单位)	7.30×10^8	5.39×10^6	1.76×10^7	3.06×10^5
路面养护维修 (kg/功能单位)	1845.075	8.081	15.559	6.143

通过上述对比可以发现：

(1) 在沥青路面使用阶段，沥青路面运营期间车辆运行产生的能耗与排放远远高于源于路面养护维修的能耗与排放，而且差别一般在 5 个数量级以上。由此可见，沥青路面使用阶段的能耗与排放主要来自于车辆运行，而源于路面养护维修的能耗与排放基本可以忽略。

(2) 源于车辆运行和源于路面养护维修的环境排放中，各类别排放量排序均为全球变暖 > 健康危害 > 酸化效应 > 颗粒物。这说明，在沥青路面使用阶段，温室气体排放最为突出，采用低碳技术，减少温室气体排放量，是该阶段节能减排的重点。

(3) 从沥青路面使用阶段能耗与排放组成来看，保证沥青路面路况良好，不仅有利于车辆的稳态行驶，避免频繁加减速而导致能耗与排放增多；而且减少了路面维修养护次数，直接降低了维修养护工程的能耗与排放。因此，提高沥青路面施工质量，保证沥青路面良好的路用性能也是沥青路面节能减排的有效措施。

5.4 本章小结

本章从沥青路面行驶状况角度出发，分析其对车辆油耗的影响，建立“路面状况-车速-能耗与排放”量化分析模型；同时根据沥青路面路面状况分析，探讨养护维修过程的能耗和排放的量化分析方法。在此基础上，提出沥青路面使用阶段能耗与排放量化

分析模型，并结合工程实例进行应用。取得的主要结论如下：

(1) 提出了“路面状况-车速-能耗与排放”量化预估模型建立方法，选择沥青路面行驶质量参数，分析及其衰变规律，根据路面使用时间 t 、平整度指数 IRI、车辆行驶速度 v 以及油耗 F_c 之间存在的量化关系，采用参数传递法建立了基于路面状况的能耗量化预估模型。

(2) 分析确定了车辆及燃料类型是道路运输车辆环境排放的主要影响因素，参考国内外研究成果，并结合基于路面状况的能耗预估模型，给出了用于环境排放分析的车辆类别划分标准以及不同类别车辆的排放因子，建立了车辆运行过程环境排放预估模型。

(3) 分析稀浆封层与微表处、碎石封层以及热拌沥青混凝土薄层罩面三类罩面技术的施工工艺，在此基础上建立了上述三类罩面技术的能耗与环境排放流程图。

(4) 分析沥青路面路面状况 PCI 衰变模型，给出养护维修后 PCI 跃迁假设，以此确定沥青路面养护时机及在一定分析年限内的养护维修次数。

(5) 在定额法与排放因子法的基础上，结合养护工程材料与机械设备的特点，提出了沥青路面养护维修阶段能耗与排放量化分析方法，建立了养护维修阶段能耗与排放量化模型。

(6) 汇总研究结果，提出了沥青路面使用阶段能耗与排放量化分析模型，采用该模型对河南省淮滨至固始高速公路沥青路面新建工程进行了量化分析，结果表明，路面使用阶段的能耗与排放主要来自于车辆运行，源于路面养护维修的能耗与排放基本可以忽略；同时结合量化分析结果提出了采用低碳技术、提高沥青路面路用性能等节能减排方向。

第六章 沥青路面节能减排综合量化评价方法研究

构建以节能减排为主要特征的低碳环保沥青路面建设模式,需要科学合理的评价沥青路面建设是否达到节能减排的目标。目前对沥青路面建设节能减排的评价大多针对沥青路面建设的某一阶段或者针对具体技术工艺的效果评价。而实现沥青路面建设节能减排的目标,需要从材料、设备、技术工艺以及管理措施等多方面综合考虑。因此,有必要在各方面、各层次分析评价的基础上,从整体优化的角度,综合各种评价结果,建立沥青路面节能减排综合评价方法。

本章在沥青路面节能减排量化分析研究的基础上,根据沥青路面能耗与排放分析方法,以量化评价指标为基础,结合定性分析指标,对沥青路面建设过程中的能耗与排放等环境问题进行综合评价,建立沥青路面节能减排综合量化评价方法。

6.1 沥青路面节能减排评价指标体系研究

沥青路面节能减排评价指标体系为沥青路面材料生产、建设以及运营养护全生命周期的环境效益评价提供了一个有效的比较标准,具有标杆和导向的功能。针对目前我国尚无沥青路面节能减排评价指标体系的现实,本文从科学性、约束性和激励性的角度出发,建立以能耗与排放量化分析为核心的沥青路面节能减排评价指标体系,为沥青路面节能减排工作实施效果提供评价尺度,以实现沥青路面节能减排的指标化和科学化管理。

6.1.1 评价指标体系的确定原则

指标是定量化信息的集合,提供了量化评价的尺度。沥青路面节能减排评价指标,是国家和地方道路管理部门及施工企业根据现有的科学技术水平、生产施工工艺以及经济条件,参照国家和地方节能减排目标,在一定时期内必须达到的节能减排具体目标和水平。本文根据我国工业清洁生产及循环经济评价指标,结合沥青路面节能减排评价的特点,提出沥青路面节能减排评价指标体系的确定原则:

(1) 科学、客观、准确评价原则

沥青路面节能减排评价指标体系应以沥青路面能耗与排放量化分析为科学基础,选择的评价指标应具有明确的概念和一定的科学内涵,不仅能够客观的反映沥青路面材料生产、施工以及运营养护的实际状况,而且可以真实、客观、准确、科学的度量与评价

沥青路面节能减排目标的实现程度。

(2) 全过程评价原则

沥青路面节能减排应体现源头控制、过程控制的理念，在沥青路面节能减排目标实现程度的评价过程中，需要从生命周期的角度出发，对于沥青路面材料生产、施工、运营养护等整个生命周期所涉及的资源、能源消耗以及环境排放等环境影响因素进行全面、系统的分析，体系全过程评价的思想。

(3) 以节能减排量化分析为评价核心原则

沥青路面节能减排评价指标的范围无需过大，不需要涵盖所有环境、社会和经济等指标，应以节能减排为核心，重点反映沥青路面生命周期过程中所消耗的资源、能源数量，以及由此产生的环境排放量。以节能减排为核心，通过能耗与排放的量化分析，达到实现沥青路面节能减排的目的。

(4) 定量评价与定性评价相结合原则

建立量化评价模式，选取量化评价指标，计量其分析结果，可以保证评价结果的准确性和科学性。但是，沥青路面生命周期过程涉及面广、包含的内容多，无法对所有的评价对象给予量化分析方法和评价指标。因此，对于难以量化的指标应选取相应的定性指标，将定量评价与定性评价相结合，以保证节能减排评价的实用性和可行性。

(5) 先进性和前瞻性评价原则

沥青路面节能减排评价应能够促使道路管理和建设单位在达到现有指标的基础上，追求更先进的管理和生产技术，以实现更高的目标。这就要求评价指标具有一定的前瞻性，体现一定的先进性，引导相关部门根据现有情况，积极主动采用节能减排新技术、新工艺、新材料，根据相应的评价指标，不断进行持续性的升级和改进。

(6) 实用性和可操作性原则

沥青路面生命周期涉及的环节很多，应突出节能减排的重点，评价指标体系应切实考虑其可操作性。同时，选择评价指标应考虑相关数据的可获得性以及指标量化的难易程度，尽可能选择公认的、有代表性的指标。

6.1.2 评价指标的选取

根据沥青路面节能减排评价指标体系的确定原则，参考 GreenRoads、LEED 以及循环经济和清洁生产方面的国内外研究成果^[7, 131, 132]，根据我国公路水路交通节能中长期规划，结合沥青路面节能减排工作的实际需要，本文选择资源利用、能源消耗、环境排

放、管理控制和路面技术 5 类普遍性、概括性指标作为沥青路面节能减排评价指标体系的一级指标。在上述 5 类一级指标中,进一步细化若干具有代表性、易于评价与考核的指标作为二级指标,从而形成完整的沥青路面节能减排评价指标体系。

(1) 资源利用指标

在沥青路面生命周期中,沥青路面的建设及养护维修工程需要投入大量的原材料,是自然资源的主要消费者。根据本文对沥青路面生命周期能耗与排放的量化分析,沥青路面材料生产过程的能耗在沥青路面生命周期总能耗中占有相当大的比例;而且,资源利用指标不仅可以反映道路施工企业的技术工艺和管理水平,同时也反映了材料生产过程对环境的影响程度。因此,有必要在沥青路面节能减排评价指标体系中考虑资源的使用情况。

根据沥青路面建设及养护维修过程中的材料使用情况,本文选择以下 4 项指标为资源利用指标中的二级指标:

- ① 矿料消耗量(包括各档集料、矿粉和砂)
- ② 沥青消耗量(包括基质沥青、改性沥青、乳化沥青等沥青结合料)
- ③ 再生材料使用量
- ④ 其他材料使用量(包括各种纤维、抗车辙剂等添加剂)

由于不同沥青路面工程的规模大小有很大差别,不应采用资源消耗总量进行评价。为此,本文采用资源相对消耗情况,即单位沥青路面的资源消耗量,并参考工程预算中沥青路面材料单位,采用每 1000m^3 沥青路面实体的资源消耗量 kg ($\text{kg}/1000\text{m}^3$) 用于资源利用指标评价。

(2) 能源消耗指标

在沥青路面生命周期中,沥青路面建设、养护维修以及车辆运行都会消耗大量的电力、燃油等不同类型的燃料。根据本文的调查及量化计算分析,上述沥青路面生命周期过程的能源消耗通常以 10^9MJ 计,是目前社会能源消耗的重要组成部分。由于能源消耗与环境排放和经济效益有直接的关系,反映了沥青路面生命周期过程对生态环境和经济效益的影响,同时也是沥青路面节能减排的主要目标,因此,有必要在沥青路面节能减排评价指标体系中考虑能源消耗指标。

根据沥青路面生命周期能源消耗情况调查分析,结合沥青路面能源消耗量化分析评价模型,本文选择以下 2 项指标作为能源消耗指标中的二级指标:

- ① 电力消耗量

② 燃油消耗量（包括汽油、柴油、重油等燃料油）

与资源利用指标类似，考虑到沥青路面工程的规模差异，本文采用能源相对消耗量，并将不同动力或燃料的消耗根据其热值转换为能量单位，最终采用每 1000m^3 沥青路面实体的能源消耗量 MJ ($\text{MJ}/1000\text{m}^3$) 用于能源消耗指标评价。

（3）环境排放指标

沥青路面不仅是自然资源、能源的主要消费者，而且是环境排放的主要生产者。根据本文的调查及量化分析，在沥青路面生命周期中，沥青路面材料生产、建设、养护维修以及车辆运行过程均会在温室气体、酸性物质、有害物质以及颗粒物方面产生相当大的排放量，对生态环境产生不利影响。环境排放指标是反映沥青路面生命周期运行过程状况的指标，可以代表沥青路面生命周期中相关生产工艺和管理水平的高低，而且也是沥青路面节能减排的主要目标。因此，有必要在沥青路面节能减排评价指标体系中考虑环境排放指标。

根据沥青路面环境排放情况调查分析，结合沥青路面环境排放量化分析评价模型，本文从环境排放物质种类对生态环境的影响角度，选择以下 4 项指标作为环境排放指标中的二级指标：

- ① 温室气体排放量（包括 CO_2 、 CH_4 、 N_2O ，以等效 CO_2 排放量表示）
- ② 酸化气体排放量（包括 SO_x 、 NO_x 、 NH_3 ，以等效 SO_2 排放量表示）
- ③ 健康有害气体排放量（包括 SO_x 、 NO_x 、 CO 、NMVOC，以等效 1,4-二氯苯排放量表示）
- ④ 颗粒物排放量（包括 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ ，以其排放总量表示）

与资源利用指标类似，考虑到沥青路面工程的规模差异，本文对上述 4 项二级指标，采用每 1000m^3 沥青路面实体的环境排放量 kg ($\text{kg}/1000\text{m}^3$) 用于环境排放指标评价。

（4）管理控制指标

沥青路面的资源、能源消耗与环境排放属于一种过程行为，强化相关过程的管理控制是实现节能减排目标的有效措施之一。此外，本文的相关计算分析表明，提高沥青路面施工质量，保证沥青路面良好的路用性能也是沥青路面节能减排的有效措施。而且，管理控制指标反映了相关部门对沥青路面节能减排思想和工作的重视程度，有助于促使、激励相关企业开展沥青路面节能减排工作。因此，有必要在沥青路面节能减排评价指标体系中考虑管理控制指标。

管理控制指标可以分为工程质量管理控制指标和环境排放管理控制指标两大类，根

据沥青路面节能减排评价的需要和目前工程管理的实际,本文选择以下 5 项指标作为管理控制指标中的二级指标:

- ① 质量管理认证(包括企业资质、质量管理体系认证)
- ② 工程质量奖励(包括企业获得国家或省部级工程质量奖励)
- ③ 工程质量管理措施(包括工程质量管理计划、人员培训、质量自检情况)
- ④ 环境排放控制计划(包括环境排放控制计划书、人员培训计划)
- ⑤ 环境排放控制措施(包括环境排放检测人员和设备配置、环境排放控制设备配置、环境排放控制设备完好情况)

与前述 3 项定量指标不同,管理控制指标为定性指标,需要进一步结合指标基准值,将其量化后用于沥青路面节能减排评价。

(5) 路面技术指标

沥青路面是沥青路面节能减排目标的主体,在沥青路面生命周期中,采用具有节能减排功能的新技术、新材料和新工艺,对沥青路面的节能减排效果具有直接的作用。结合循环经济理论和沥青路面使用性能的特点,本文认为沥青路面节能减排技术应具有减量化(Reduce)、再利用(Reuse)、再循环(Recycle)以及长寿命(Longlife),即 R³L 特征,具有 R³L 特征的路面技术可以直接或间接的达到节能减排的效果,从而减小沥青路面对生态环境的影响。因此,有必要在沥青路面节能减排评价指标体系中考虑路面技术指标。

根据上述分析,路面技术指标主要解决两方面问题,即判断采用的新技术、新材料、新工艺是否符合节能减排技术特征以及路面节能减排技术的使用规模。为此,本文选择以下 2 项指标作为路面技术指标中的二级指标:

- ① 路面节能减排技术分析(判断路面技术是否符合 R³L 特征)
- ② 路面节能减排技术应用量

其中,路面节能减排技术分析为定性指标,路面节能减排技术应用量为定量指标。参考前述定量指标的评价方法,本文采用路面节能减排技术相对应用量,即沥青路面中采用节能减排技术的路面工程量的比例(%),用于路面节能减排技术应用量指标评价。

上述选取的沥青路面节能减排评价指标反映了沥青路面生命周期对环境、经济、社会和技术的影响,且包含了定量评价指标与定性评价指标(表 6.1),涵盖了沥青路面生命周期影响的主要方面,能够实现沥青路面节能减排效果的综合评价。

表 6.1 沥青路面节能减排评价指标

序号	一级指标	二级指标	影响方面				指标属性	
			环境	经济	社会	技术	定量	定性
A	资源利用	① A ₁ 矿料消耗量 ② A ₂ 沥青消耗量 ③ A ₃ 再生材料使用量 ④ A ₄ 其他材料使用量	•	•			•	
B	能源消耗	① B ₁ 电力消耗量 ② B ₂ 燃油消耗量	•	•			•	
C	环境排放	① C ₁ 温室气体排放量 ② C ₂ 酸化气体排放量 ③ C ₃ 健康有害气体排放量 ④ C ₄ 颗粒物排放量	•		•		•	
D	管理控制	① D ₁ 质量管理认证 ② D ₂ 工程质量奖励 ③ D ₃ 工程质量管理措施 ④ D ₄ 环境排放控制计划 ⑤ D ₅ 环境排放控制措施		•		•		•
E	路面技术	① E ₁ 路面节能减排技术分析 ② E ₂ 路面节能减排技术应用量				•	•	•

6.1.3 评价指标基准值的选取

沥青路面节能减排评价指标基准值是上述各项评价指标的量化尺度，是开展沥青路面节能减排评价的主要依据。根据我国沥青路面能耗与排放量化分析以及节能减排量化评价工作现状及发展趋势，本文将沥青路面节能减排评价指标基准值分为以下 2 个水平：

1. I 水平评价指标基准值

I 水平评价为 3 标度评价，即将评价结果分为节能减排先进、节能减排合格和节能减排不合格三个等级，并依次用 A、B、C 表示。则定量评价指标和定性评价指标的基准值可分别确定如下：

(1) I 水平定量评价指标基准值

I 水平定量评价指标的基准值以定额为基础，体现评价指标基准值的动态性与公平性，以此为基础计算节能减排率 a_{ij} ：

$$a_{ij} = \frac{D_{ij} - S_{ij}}{D_{ij}} \quad (6.1)$$

式中, D_{ij} 和 S_{ij} 分别为第 i 项一级指标中, 第 j 项二级指标的定额数值和实际数值;
 a_{ij} 为节能减排效益值, 根据 a_{ij} 可以确定定量指标的基准值:

当 $a_{ij} > 0$ 时, 表明实际的能耗与排放比定额数值小, 即能耗与排放小于目前平均水平, 为节能减排先进, 记为 A;

当 $a_{ij} = 0$ 时, 表明实际的能耗与排放和定额相等, 即能耗与排放达到目前平均水平, 为节能减排合格, 记为 B;

当 $a_{ij} < 0$ 时, 表明实际的能耗与排放大于定额数值, 即能耗与排放超过了目前平均水平, 为节能减排不合格, 记为 C。

再生材料使用量和沥青路面节能减排技术应用量没有相关定额数据, 目前国内外也没有关于上述两项指标的强制性规定。考虑到再生材料和路面节能减排技术的使用有助于实现节能减排的目标, 因此, 对于再生材料使用量和沥青路面节能减排技术应用量指标, 本文规定:

当使用再生材料或沥青路面节能减排技术时, 为节能减排先进, 记为 A, 其数值 a 为其使用比例, 即再生材料用量或沥青路面节能减排技术应用量与总量之比表示;

当未使用再生材料或沥青路面节能减排技术时, 为节能减排合格, 记为 B, 其数值 a 为 0。

其他材料使用量也没有相关定额数据, 考虑到其他材料使用量较小, 且其使用对沥青路面生命周期的能耗与排放影响较小, 因此, 本文规定该指标仅记录其实际用量, 不参与评价。

(2) I 水平定性评价指标基准值

从 3 标度出发, 定性评价指标主要解决相关评价内容“有”与“没有”的问题, 然后在“有”中定“优”。根据以上确定原则, 本文规定 I 水平定性评价指标的基准值为:

具有第三方颁发、编制或出具的符合评价内容的相关文件资料, 为节能减排先进, 记为 A;

企业自行制定符合评价内容的相关文件, 为节能减排合格, 记为 B;

不具有或未制定相关文件资料, 为节能减排不合格, 记为 C。

其中, E1 路面节能减排技术分析指标仅判断路面技术是否符合 R^3L 特征, 不参与评价。

2. II 水平评价指标基准值

II 水平评价为 5 标度评价, 即将评价结果分为节能减排国际先进、节能减排国内领

先、节能减排国内先进、节能减排国内一般以及节能减排不合格五个等级，并依次用 A、B、C、D、E 表示。则定量评价指标和定性评价指标的基准值可分别确定如下：

(1) II 水平定量评价指标基准值

II 水平定量评价指标基准值仍然以动态性和公平性的定额数据为基础，采用与 I 水平评价相同的方法计算节能减排率 a_{ij} 。然而，与 I 水平不同的是，II 水平评价为 5 标度评价，其评价指标基准值划分较 I 水平评价更细致。

在 II 水平定量评价指标基准值确定过程中，考虑到目前沥青面层混合料中再生料的掺配率一般不大于 50%，且在排放因子法中，环境排放与材料的消耗量存在一定的线性关系，因此，本文根据 a_{ij} 计算结果（再生材料使用量和沥青路面再生技术应用量指标的 a_{ij} 分别以其掺配率和使用率表示），确定 II 水平定量评价指标基准值如表 6.2 所示：

表 6.2 II 水平定量评价指标基准值

等级	A	B	C	D	E
a_{ij}	≥ 0.5	[0.3, 0.5)	[0.1, 0.3)	[0, 0.1)	< 0

与 I 水平评价相同，其他材料使用量指标在 II 水平评价中，仍然仅记录其实际用量，不参与评价。

(2) II 水平定性评价指标基准值

II 水平评价在 I 水平评价“有”中定“优”的基础上，从 5 标度评价出发，进一步细化评价基准，“优”中选“好”。根据以上确定原则，本文规定 II 水平定性评价指标的基准值如表 6.3 所示。其中，高等级要求均需要满足其次一等级要求；E1 路面节能减排技术分析指标同样仅判断路面技术是否符合 R^3L 特征，不参与评价。

表 6.3 II 水平定性评价指标基准值

等级 指标	A	B	C	D	E
D1	<ul style="list-style-type: none"> ● 通过国家低碳与能效认证 ● 通过国家能源管理认证 	<ul style="list-style-type: none"> ● 通过国家低碳与能效认证或能源管理认证 	<ul style="list-style-type: none"> ● 通过 ISO 质量管理体系认证 	<ul style="list-style-type: none"> ● 满足工程质量管理规范要求 	无
D2	<ul style="list-style-type: none"> ● 获得国家级工程质量奖 	<ul style="list-style-type: none"> ● 获得省部级工程质量奖 	<ul style="list-style-type: none"> ● 获得地市级工程质量奖 	<ul style="list-style-type: none"> ● 获得其他级别工程质量奖 	无
D3	<ul style="list-style-type: none"> ● 主要项目管理人员通过 PMP 等国际普遍认可的项目管理专业人员资格认证 	<ul style="list-style-type: none"> ● 主要项目管理人员通过一级注册建造师资格认证 ● 有甲级试验检测资质机构协助工程质量管理 	<ul style="list-style-type: none"> ● 主要项目管理人员通过二级注册建造师资格认证 ● 有乙级试验检测资质机构协助工程质量管理 	<ul style="list-style-type: none"> ● 有满足规范要求的工程质量管理措施 	无
D4 D5	<ul style="list-style-type: none"> ● 有专职环境影响评价工程师组成项目环境排放控制管理小组 ● 有动态性的环境排放控制计划 ● 有针对环境排放突出环节的专业环境排放监测及控制设备 	<ul style="list-style-type: none"> ● 有甲级建设项目环境影响评价机构出具的环境影响报告书 ● 有针对上述报告书的环境排放控制计划 ● 有专门的环境排放监测及控制设备 	<ul style="list-style-type: none"> ● 有乙级建设项目环境影响评价机构出具的环境影响报告书 ● 有针对上述报告书的环境排放控制计划及控制措施 	<ul style="list-style-type: none"> ● 有企业或管理部门制定的环境排放控制计划及相应的控制措施 	无
E1	有				无
量化分数	[0.8, 0.6)	[0.6, 0.4)	[0.4, 0.2)	[0.2, 0)	0

根据 I 水平与 II 水平评价指标基准值的分析可以发现, I 水平评价比较简单, 评价基准值比较“粗糙”, 可以判断节能减排目标是否达到, 但是对实现节能减排的效益无法进一步作出评价。因此, 本文建议: 在沥青路面节能减排评价体系应用初期可以采用 I 水平评价, 以督促相关部门采取节能减排措施, 同时积累相关数据和使用经验, 为 II 水平评价奠定坚实的基础。

II 水平评价是 I 水平评价的进一步发展, 其评价基准值划分较细, 不仅能够判断是否达到节能减排目标, 同时还能对节能减排实现效果进行分类评价。因此, 本文建议: 在沥青路面节能减排技术普遍应用后, 可以采用 II 水平评价, 从而可以优选出节能减排效果更好的材料、技术、工艺和管理措施, 同时在 II 水平评价的基础上可以进一步开展节能减排认证及相应的经济奖励举措, 推动沥青路面节能减排向更高、更好的方向发展。

6.2 沥青路面节能减排评价指标权重的确定

评价指标的权重值反映了该评价指标在沥青路面节能减排评价体系中的重要性, 权重值的大小直接影响沥青路面节能减排评价结果, 如果评价指标权重设置不当, 会导致量化评价结果的不合理、评价过程的逻辑错误以及评价结果的误导等问题。因此, 确保沥青路面节能减排评价指标体系权重分配的科学性及其合理性尤为重要。为此, 本文根据确定的沥青路面节能减排评价指标及其对节能减排评价结果的影响程度等因素, 选择合理的权重确定方法, 确定沥青路面节能减排评价指标权重。

6.2.1 基于层次分析法的沥青路面节能减排评价指标体系权重确定

1. 层次分析法用于沥青路面节能减排评价指标权重确定的可行性

目前, 评价指标权重的确定方法主要有层次分析法 (AHP)、平均值法、系统动力学法以及神经网络法等多种方法。其中, 层次分析法是目前最常用的评价指标权重确定方法。该方法不仅可以把复杂问题中的各种影响因素划分为相互联系的有序层次, 而且在权重确定的过程中能够综合客观数据、专家以及分析者的基本判断, 并最终以此为基础建立数学模型, 通过计算确定每一层次的相对权重。与其他权重确定方法相比, 层次分析法在确定沥青路面节能减排量化评价指标体系权重的过程中, 具有以下突出优势:

(1) 层次分析法适用于既有定量指标又有定性指标的权重确定

层次分析法的本质是一种定量与定性相结合的分析方法, 通过专家意见对指标体系

进行层次化分析、排序，建立数学模型，采用量化计算的方法确定评价指标体系的权重，从而克服了定性指标量化表达的难度，实现了定量指标和定性指标的综合评价。

（2）层次分析法强调人的思维判断在决策过程中的作用

层次分析法确定指标权重时，需要依据专家意见给出评价指标的重要性排序，而后通过一定的数学方法将上述思维判断过程规范化，从而能够以数量形式表达和处理人的思维判断。与完全量化的客观方法相比，层次分析法可以考虑决策过程中社会公众的意见，保证决策过程能够充分反映社会需求。

（3）层次分析法比较简便易行

层次分析法以评价指标的重要性排序为切入点，对复杂的评价指标体系进行层次化分析，逐层次分析确定评价指标的权重，思路简单、清晰，易于理解。其权重计算过程以矩阵特征值和特征向量分析为基础，无需高深的数学理论知识和繁杂的计算程序，易于推广使用。

本文建立的沥青路面节能减排评价指标体系采用二级指标构成，其中包含了定量指标与定性指标，便于层次分析法从定量评价与定性评价的角度，进行逐层次分析确定指标权重。此外，沥青路面节能减排评价隶属于环境评价，需要考虑社会公众的意见，符合层次分析法强调人的思维判断的优势。综上所述，根据层次分析法的优势以及沥青路面节能减排分析评价的特点，本文分析认为，采用层次分析法确定沥青路面节能减排评价指标的权重具有合理性和可行性。

2. 基于层次分析法的沥青路面节能减排评价指标权重确定流程

层次分析法确定指标权重的过程包括评价指标的重要性标度、权重计算和一致性判断三个步骤，本文以一级指标的权重确定过程为例，说明层次分析法权重的确定流程。

（1）评价指标的重要性标度

层次分析法确定指标权重时，首先需要对指标间两两重要性进行比较和分析判断。通常是根据专家意见，采用 9 标度法（表 6.4）对评价指标的重要性进行量化，据此建立判断矩阵。由于在判断矩阵中，指标与自身的比较值为 1，i 指标与 j 指标的重要性标度和 j 指标与 i 指标的重要性标度呈倒数关系。因此，判断矩阵为一正交矩阵，确定标度时只需进行 $n(n-1)/2$ 次比较即可。

表 6.4 9 标度法重要性标度及其说明

标度	定义
1	i 指标与 j 指标相同重要
3	i 指标与 j 指标略重要
5	i 指标与 j 指标较重要
7	i 指标与 j 指标非常重要
9	i 指标与 j 指标绝对重要
2, 4, 6, 8	为以上两判断之间的中间状态对应的标度值
倒数	若 j 指标与 i 指标比较, 得到的判断值为倒数

本文以 A~E 表示资源利用、能源消耗、环境排放、管理控制和路面技术 5 个沥青路面节能减排一级评价指标, 为了保证专家调查意见的代表性和可靠性, 本文选择长期从事沥青路面设计、管理、建设、养护和科研工作, 并具有高级以上职称的 10 位专家, 按照九标度法对上述 5 项一级评价指标的重要性做出判断, 并取其平均值确定重要性标度 (表 6.5), 从而可以建立相应的判断矩阵 **A**。

表 6.5 沥青路面节能减排一级指标重要性标度

评价指标	A	B	C	D	E
A	1	1/2	1/3	4	2
B	2	1	1/2	5	3
C	3	2	1	5	3
D	1/4	1/5	1/5	1	1/3
E	1/2	1/3	1/3	3	1

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1/3 & 4 & 2 \\ 2 & 1 & 1/2 & 5 & 3 \\ 3 & 2 & 1 & 5 & 3 \\ 1/4 & 1/5 & 1/5 & 1 & 1/3 \\ 1/2 & 1/3 & 1/3 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

(2) 权重计算

层次分析法的权重计算以判断矩阵为基础, 通过计算判断矩阵的最大特征值及其特征向量, 从而得到评价指标的相对权重向量, 以此确定评价指标的权重。计算判断矩阵的最大特征值及其特征向量, 可以借助专业的数学软件, 如 MATLAB、Mathmatic 等得到精确的数值。但是, 在层次分析法的实际应用中, 求取判断矩阵的最大特征值及其特征向量并不需要很高的精度, 因此, 可以采用近似算法进行计算。本文采用方根法^[7]近似计算确定判断矩阵 **A** 的最大特征值及其特征向量, 其计算步骤如下:

① 计算判断矩阵 \mathbf{A} 每行所有元素的几何平均值:

$$p_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6.2)$$

得到 $p = (p_1, p_2, \dots, p_n)^T$ 。

② 将 p 归一化, 即:

$$p'_i = \frac{p_i}{\sum_{j=1}^n p_j} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6.3)$$

得到 $p' = (p'_1, p'_2, \dots, p'_n)^T$ 为所求特征向量的近似值, 即为各评价指标的相对权重。

采用上述方法, 计算得到判断矩阵 \mathbf{A} 的特征向量近似值, 从而确定沥青路面节能减排一级评价指标的权重为 (表 6.6):

表 6.6 沥青路面节能减排一级评价指标权重

一级指标	资源利用	能源消耗	环境排放	管理控制	路面技术
权重值	0.1693	0.2747	0.3931	0.0511	0.1117

(3) 一致性判断

在判断指标重要性的过程中, 往往会出现 3 个以上指标相互比较的情况, 如果判断之间出现不一致, 则会出现相互矛盾的判断结果。如指标 a、b、c 两两比较, 在 a 比 b 重要, b 比 c 重要的情况下, 出现 c 比 a 重要的评价结果, 则认为上述评价过程存在非一致性问题。

为避免非一致性问题的出现, 层次分析法计算确定的权重需要通过一致性检验, 保持逻辑传递上的一致性。一般要求评价结果的一致性要满足一致性比率要求, 其计算过程如下:

① 计算判断矩阵 \mathbf{A} 的最大特征值:

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(Ap')_i}{np'_i} \quad (6.4)$$

其中, $(Ap')_i$ 为向量 Ap' 的第 i 个元素。根据本文判断矩阵 \mathbf{A} , 可以计算得到最大特征值 $\lambda_{\max} = 5.139203$ 。

② 计算一致性指标 C.I.:

$$C.I = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (6.5)$$

根据最大特征值计算结果，可以计算得到 C.I=0.034801。

③ 确定随机一致性指标 R.I:

随机一致性指标一般是按照确定的矩阵阶数 n，随机构造正互反矩阵，该矩阵中的元素可从 1~9 及其倒数中随机选取，取充分大的子样可以得到该正互反矩阵最大特征值的平均值，而后根据该平均值计算确定 R.I，上述计算过程可以借助 MATLAB 等矩阵分析软件得到。由于其计算过程比较复杂，目前在实际应用中，多直接借用许树伯给出的 1~15 阶矩阵的平均随机一致性指标^[133]（表 6.7）。查表可知，当矩阵阶数为 5 时，平均随机一致性指标 R.I=1.12。

表 6.7 平均随机一致性指标 R.I

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R.I	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49

④ 计算一致性比率指标 C.R:

$$C.R = \frac{C.I}{R.I} \quad (6.6)$$

通常情况下，当 C.R<0.10 时，认为判断矩阵的一致性是可以接受的；否则，需要调整判断矩阵，直至 C.R 满足一致性判断要求。

根据计算得到的 C.I 和查表确定的 R.I，本文确定的判断矩阵 A 的 C.R=0.031072，满足一致性判断 C.R<0.10 要求，可以认为本文确定的沥青路面节能减排一级评价指标权重值是合理的。

6.2.2 沥青路面节能减排评价指标体系最终权重值分析

根据层次分析法权重确定流程，当一级指标权重确定后，可以进一步确定上述 5 项一级指标中的各个二级指标权重。

(1) 资源利用指标

与一级指标的确定类似，选择相同专家对指标重要性进行评判，结合专家评分，得到资源利用指标中 4 项二级指标的判断矩阵 A₁ 为：

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1/2 & 3 \\ 2 & 1 & 1 & 5 \\ 2 & 1 & 1 & 3 \\ 1/3 & 1/5 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$$

近似计算得到其特征向量，经检验 $C.R=0.014425<0.1$ ，满足一致性判断要求，最终确定 4 项二级指标的权重值为（表 6.8）：

表 6.8 资源利用二级指标权重

指标名称	矿料消耗量	沥青消耗量	再生材料使用量	其他材料使用量
指标权重	0.1907	0.3064	0.4333	0.0696

（2）能源消耗指标

能源消耗二级指标仅有两个，可以结合专家评分，按照重要性比例，电力消耗量：燃油消耗量=1：3 分配权重，即二级指标权重分别为 0.25（电力消耗量）和 0.75（燃油消耗量）。

（3）环境排放指标

结合专家评分，得到环境排放指标中 4 项二级指标的判断矩阵 A_3 为：

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 & 4 \\ 1/3 & 1 & 3 & 5 \\ 1/5 & 1/3 & 1 & 1/3 \\ 1/4 & 1/5 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

近似计算得到其特征向量，经检验 $C.R=0.078436<0.1$ ，满足一致性判断要求，最终确定 4 项二级指标的权重值为（表 6.9）：

表 6.9 环境排放二级指标权重

指标名称	温室气体排放量	酸化气体排放量	健康有害气体排放量	颗粒物排放量
指标权重	0.5264	0.2828	0.0730	0.1177

（4）管理控制指标

结合专家评分，得到管理控制指标中 5 项二级指标的判断矩阵 A_4 为：

$$A_4 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 1/3 & 1/5 & 1/7 \\ 1/3 & 1 & 1/3 & 1/5 & 1/7 \\ 3 & 3 & 1 & 1 & 1/3 \\ 5 & 5 & 1 & 1 & 1/2 \\ 7 & 7 & 3 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

近似计算得到其特征向量，经检验 $C.R=0.042671<0.1$ ，满足一致性判断要求，最终确定 5 项二级指标的权重值为（表 6.10）：

表 6.10 管理控制二级指标权重

指标名称	质量管理认证	工程质量奖励	工程质量 管理措施	环境排放 控制计划	环境排放 控制措施
指标权重	0.0719	0.0464	0.1825	0.2427	0.4565

(5) 路面技术指标

路面技术二级指标也仅有两个，同样结合专家评分，按照重要性比例，路面节能减排技术分析：路面节能减排技术应用量=1:4 分配权重，即二级指标权重分别为 0.2（路面节能减排技术分析）和 0.8（路面节能减排技术应用量）。

根据一级指标和二级指标的权重分析，本文确定的沥青路面节能减排评价指标体系的最终权重如表 6.11 所示：

表 6.11 沥青路面节能减排指标体系指标权重

序号	一级指标	一级指标 权重	二级指标	二级指标 权重
A	资源利用	0.1693	① A ₁ 矿料消耗量	0.1907
			② A ₂ 沥青消耗量	0.3064
			③ A ₃ 再生材料使用量	0.4333
			④ A ₄ 其他材料使用量	0.0696
B	能源消耗	0.2747	① B ₁ 电力消耗量	0.2500
			② B ₂ 燃油消耗量	0.7500
C	环境排放	0.3931	① C ₁ 温室气体排放量	0.5264
			② C ₂ 酸化气体排放量	0.2828
			③ C ₃ 健康有害气体排放量	0.0730
			④ C ₄ 颗粒物排放量	0.1177
D	管理控制	0.0511	① D ₁ 质量管理认证	0.0719
			② D ₂ 工程质量奖励	0.0464
			③ D ₃ 工程质量管理措施	0.1825
			④ D ₄ 环境排放控制计划	0.2427
			⑤ D ₅ 环境排放控制措施	0.4565
E	路面技术	0.1117	① E ₁ 路面节能减排技术分析	0.2000
			② E ₂ 路面节能减排技术应用量	0.8000

通过表中各评价指标的权重可以发现，在一级指标中，能源消耗和环境排放指标的权重值最高；在二级指标中，体现 R³L 特征的评价指标权重较高，从而反映了沥青路面节能减排评价指标体系“节能”和“减排”的最终目标。

6.3 沥青路面节能减排评价方法研究

在沥青路面节能减排评价指标、指标基准值及权重确定的基础上，即可采用一定的

方法,对沥青路面节能减排水平进行评价。目前,国内尚无针对沥青路面节能减排评价方法,考虑到沥青路面节能减排评价与环境质量评价有许多相似之处,为此,本文在参考环境质量评价方法的基础上,结合沥青路面节能减排评价的特点,提出沥青路面节能减排评价方法。

6.3.1 基于模糊综合评价的沥青路面节能减排评价方法

目前,常用的环境质量评价方法主要有专家评价法、综合指数法、灰色聚类评价法以及模糊综合评价法等。本文开展的沥青路面节能减排评价,其评价对象为沥青节能减排水平,不同评价水平的内涵易于理解,而其外延则难以确定,属于模糊综合评价“内涵明确,外延不明确”的“认知不确定”问题,因此,本文以模糊综合评价为基础,建立沥青路面节能减排评价方法。

模糊综合评价方法以模糊数学理论为基础,通过建立模糊数学模型,确定模糊关系矩阵,计算评价等级的隶属度,最终得到评价结论。本文将基于模糊综合评价的沥青路面节能减排评价方法归纳为以下四个步骤:

1. 建立因素集、评价集和权重集

① 评价对象的因素集 U ,即沥青路面节能减排评价指标集,表示如下:

$U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\}$,其中 $u_1 \sim u_5$ 分别表示 5 个沥青路面节能减排一级评价指标。

② 评价集 V ,即沥青路面节能减排评价的评语或评价结论集,以 II 水平评价为例,表示如下:

$V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$,其中 $v_1 \sim v_5$ 分别表示沥青路面节能减排 II 水平评价等级。

③ 权重集 A ,即沥青路面节能减排评价指标的权重值,表示如下:

$A = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\}$,其中 $a_1 \sim a_5$ 分别表示 5 个沥青路面节能减排评价一级指标的权重值,本文采用上文基于层次分析法确定的一级指标权重值。

2. 建立模糊关系矩阵

在进行模糊评价的过程中,按照一定的评价标准,每一个评价指标均会对应一个或多个评语,以此可以建立因素集 U 与评价集 V 之间的模糊关系 $R=U \times V$,其矩阵表示形式如式 6.7 所示,其中 r_{ij} 为第 i 个评价指标评价为第 j 等级的量化结果。

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} & r_{25} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} & r_{35} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} & r_{45} \\ r_{51} & r_{52} & r_{53} & r_{54} & r_{55} \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

本文规定， r_{ij} 为第 i 个一级评价指标中达到第 j 等级的量化结果 a_{ij} 占第 i 个评价指标中 a_{ij} 总和的比例（式 6.8）：

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{j=1}^n a_{ij}} \quad (6.8)$$

3. 计算综合评价矩阵

根据确定的模糊关系矩阵 R 和权重集 A ，利用模糊合成运算，可以得到模糊综合评价向量 B （式 6.9）。

$$B = A \circ R = (b_1, b_2, b_3, b_4, b_5) \quad (6.9)$$

其中 $b_1 \sim b_5$ 表示量化评价结果对第 j 等级的隶属程度，通常有多种计算方法，本文采用最基本的矩阵乘法进行计算，根据计算结果，取隶属程度数值最高的等级作为最终的判定结果。

4. 计算综合得分，补充综合评价

根据模糊综合评价，可以得到沥青路面节能减排水平等级，但是当评价结果处于同一等级时，无法进一步评判两者的高低差别。为此，本文在模糊综合评价的基础上，引入综合评分 W ，根据综合评分 W 的数值，进一步比较属于同一评价等级的量化差别。以百分制表示的综合评分 W 的计算方法如下：

$$W = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n 100 \times A_i \times a_{ij} \times A_{ij} \quad (6.10)$$

其中， A_i 表示一级指标权重， A_{ij} 表示一级指标 i 中二级指标 j 的权重， a_{ij} 为二级指标量化结果。

根据本文建立的沥青路面节能减排评价方法，不仅可以给出简单、准确的沥青路面节能减排的水平等级，而其增加了考虑指标权重的综合得分，可以定量的描述同一等级中的具体差别，弥补了仅采用模糊综合评价的缺憾，能够得到比较完整、准确、合理的评价结果。

6.3.2 沥青路面节能减排评价流程及应用

为了便于沥青路面节能减排评价工作的开展，根据沥青路面节能减排评价方法及其评价步骤，本文建立了三阶段的沥青路面节能减排评价流程（图 6.2）：

1. 沥青路面节能减排资料审查阶段

首先，参与评价的企业等相关部门需要按照沥青路面节能减排评价指标要求，提供真实、详细、可靠且正式的说明文件和相关材料。对于相关材料齐备的，可以参照资料内容进行沥青路面节能减排评价；如果相关材料缺失不全，或提供资料的真实性、准确性和可靠性无法保证，则不能进入评价阶段，待资料完善后，再进行评价。

2. 沥青路面节能减排评价阶段

然后，根据提供的资料，按照沥青路面节能减排评价指标的基准值，计算定量指标的数值，同时对定性指标进行量化，并按照评价流程，进行沥青路面节能减排模糊综合评价，根据计算得到的隶属度，评判参评单位的节能减排水平等级。

3. 沥青路面节能减排分级阶段

最后，根据模糊综合评价结果，当评价等级为合格及以上时，给出评价结论，如需要进一步分析评价，则计算其综合评价得分；当评价等级为不合格时，根据定量评价指标，参照本文提出的沥青路面能耗与排放量化计算方法，分析能耗与排放数据，查找能耗与排放不达标的原因，并以此为基础，提出具体的改进计划及改进措施。

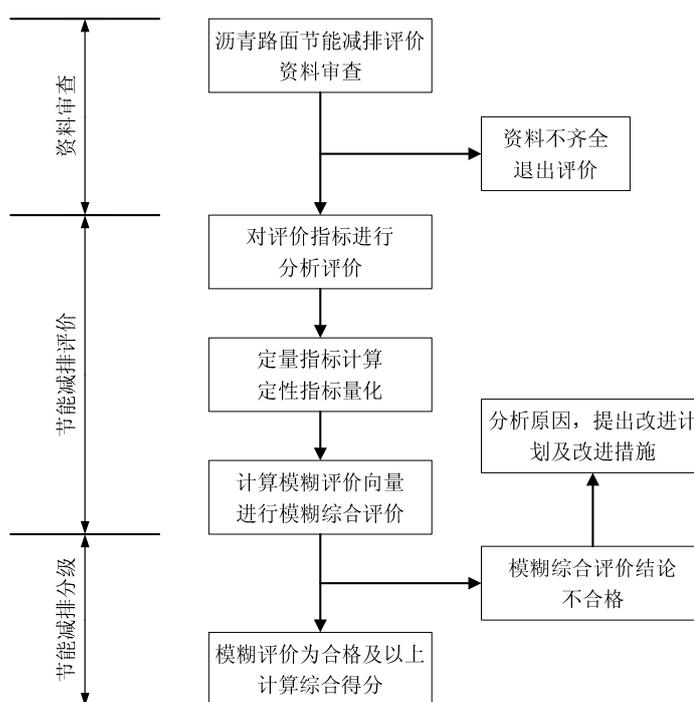


图 6.1 沥青路面节能减排评价流程

根据本文提出的沥青路面节能减排评价方法及评价流程,结合国内外公开发表的数据资料,本文以温拌沥青混合料技术为例,说明沥青路面节能减排评价方法的应用流程:

(1) 基本情况

假设某沥青路面工程全部采用符合 R³L 特征的温拌技术,路面建设过程中,邀请省级环境检测中心站全程监测其环境排放,有甲级建设项目环境评价机构出具的环境影响报告书以及针对上述报告书的环境排放控制计划,相关环境排放控制措施落实到位。施工企业通过 ISO9001 质量体系认证,施工工程曾获得省级工程质量奖励,主要项目管理人员通过一级注册建造师资格认证,同时有甲级检验检测资质机构作为第三方协助工程质量管理。

(2) 量化评价

根据以上资料,同时参考国内外对温拌沥青混合料节能减排情况的实测研究^[134, 135],采用 II 水平评价指标基准值,对评价指标进行量化(表 6.12):

表 6.12 某温拌沥青混合料路面工程节能减排评价表

序号	一级指标	一级指标权重	二级指标	a _{ij}	水平
A	资源利用	0.1693	① A ₁ 矿料消耗量	0	D
			② A ₂ 沥青消耗量	0	D
			③ A ₃ 再生材料使用量	0	D
			④ A ₄ 其他材料使用量	-	-
B	能源消耗	0.2747	① B ₁ 电力消耗量	0.15	C
			② B ₂ 燃油消耗量	0.23	C
C	环境排放	0.3931	① C ₁ 温室气体排放量	0.60	A
			② C ₂ 酸化气体排放量	0.63	A
			③ C ₃ 健康有害气体排放量	0.80	A
			④ C ₄ 颗粒物排放量	0.10	D
D	管理控制	0.0511	① D ₁ 质量管理认证	0.40	C
			② D ₂ 工程质量奖励	0.60	B
			③ D ₃ 工程质量管理措施	0.60	B
			④ D ₄ 环境排放控制计划	0.60	B
			⑤ D ₅ 环境排放控制措施	0.60	B
E	路面技术	0.1117	① E ₁ 路面节能减排技术分析	-	-
			② E ₂ 路面节能减排技术应用量	1	A

根据上述量化数据,可以得到模糊关系矩阵 **R** 为:

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0.953 & 0 & 0 & 0.047 & 0 \\ 0 & 0.857 & 0.143 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

其权重集 \mathbf{A} 为: $A = \{0.1693, 0.2747, 0.3931, 0.0511, 0.1117\}$;

从而可以得到模糊综合评价向量 \mathbf{B} : $B = \{0.4863, 0.0438, 0.2820, 0.0185, 0\}$ 。

根据评价向量 \mathbf{B} 中数值的隶属程度可知, 该沥青路面工程可以评为 A 等, 即达到节能减排国际先进水平。进一步按照公式 6.10 可以计算得到该项目的综合评价得分为 39.8749, 根据该综合得分, 可以与其他处于同一等级的项目进行优选比较。

6.4 本章小结

本章根据沥青路面节能减排量化分析方法, 以量化评价指标为基础, 结合定性分析指标, 对沥青路面建设过程中的能耗与排放等环境问题进行综合评价, 提出沥青路面节能减排综合量化评价方法。取得的主要结论如下:

(1) 从科学性、约束性和激励性的角度, 提出了沥青路面节能减排评价指标体系的确定原则, 并在此基础上, 选取了资源利用、能源消耗、环境排放、管理控制以及路面技术 5 个一级指标及各一级指标中的二级指标, 初步建立了沥青路面节能减排评价指标体系。

(2) 根据沥青路面节能减排评价指标体系, 结合我国沥青路面能耗与排放量化分析以及节能减排量化评价工作现状及发展趋势, 提出了两水平评价指标基准值, 同时根据定性指标和定量指标量化方法的差别, 分别提出了 I 水平和 II 水平评价指标的基准值, 为沥青路面节能减排评价提供了有效的尺度标准。

(3) 根据确定的沥青路面节能减排评价指标及其对节能减排评价结果的影响程度等因素, 在层次分析法用于确定评价指标权重可行性分析的基础上, 结合专家评分, 分别确定了沥青路面节能减排一级评价指标和二级评价指标的权重, 为评价指标体系权重分配的科学性及其合理性提供了可靠的保证。

(4) 根据沥青路面节能减排指标及其权重, 以模糊综合评价方法为基础, 结合加权综合得分, 建立了三阶段的沥青路面节能减排综合评价方法及其评价流程, 并根据国内外实测数据, 以 II 水平评价为例, 进行了示例应用。

第七章 沥青路面节能减排量化评价系统研究

生命周期分析过程中涉及大量的数据收集和处理,相关研究表明,根据 ISO14040 推荐的分析程序对某种材料进行生命周期评价,可能需要至少 60 万个基本数据,这些数据的收集、分类和处理分析需要耗费大量的人力和时间。沥青路面建设作为一个相对复杂的生产过程,进行生命周期分析所需要的数据量更为庞大。此外,沥青路面生命周期分析属于一种新兴的分析评价方法,在国内沥青路面建设过程中应用不多,相关基层单位缺乏使用经验和理论支持。虽然目前国内外已有用于生命周期分析的通用软件,但是这些软件系统大都针对本国具体行业的特殊情况,由于不同国家和地区的资源分布、能源消耗和科技水平存在差异,这些软件系统并不能很好的满足我国沥青路面节能减排量化分析评价的需要。

因此,为了缩短生命周期分析周期,减小数据收集和分析的工作量,推广生命周期分析在沥青路面建设过程中的应用,本文在国内外生命周期分析评价系统的基础上,针对我国沥青路面材料、结构与施工工艺的实际情况,开发适合我国国情的沥青路面节能减排评价系统。

7.1 沥青路面节能减排评价系统 E3SAP 设计框架

目前国内外一些大型企业或研究机构已经研发了多种生命周期分析评价软件,很多已经投入商业化运作,如 BEES, Gabi, Simpro 以及 TEAM 等,上述软件系统多为通用性软件,难以考虑沥青路面的具体特点,有针对性的进行分析与评价。而且上述国外研发的软件大多未提供中文操作环境,使用不便,购买价格比较昂贵,难以大规模的推广应用。为此,本文在借鉴参考现有生命周期分析软件功能的基础上,结合沥青路面节能减排评价的特点,提出沥青路面节能减排评价系统的研发原则及其应有的功能需求和设计研发流程,构建沥青路面节能减排评价系统 E3SAP (Energy-saving and Emission-reduction Evaluation System for Asphalt Pavement) 的设计框架。

7.1.1 E3SAP 系统的研发原则及功能要求

1. E3SAP 系统的研发原则

E3SAP 系统以沥青路面节能减排分析评价为对象,以简便、实用、专业性为基本特征,在研发过程中需要遵循以下基本原则:

(1) 生命周期原则

E3SAP 系统以基于生命周期的沥青路面能耗与排放量化分析为基础,在该系统研发过程中,需要体现生命周期分析的思想,系统的分析计算流程应符合沥青路面生命周期基本流程,主要组成模块应能够反映沥青路面生命周期的主要组成阶段。

(2) 专业针对性原则

E3SAP 系统主要针对沥青路面节能减排分析与评价,与传统的通用型生命周期分析软件不同,无需包含过多的功能与参数,但是,需要以沥青路面能耗与排放量化分析方法和沥青路面节能减排评价方法为基础,合理设计系统构成,并采用有效的方法实现其分析与评价功能。

(3) 简便实用原则

简便实用是 E3SAP 系统的基本要求,简便实用原则主要体现在以下三个方面:

- ① E3SAP 系统的功能简单,满足沥青路面节能减排分析与评价要求即可;
- ② E3SAP 系统的操作简单,满足基层管理单位的实用,无需专业的培训;
- ③ E3SAP 系统的开发平台简单,采用通用、简单的软件开发平台,满足基层单位的管理和应用。

(4) 动态开放性原则

E3SAP 系统以沥青路面能耗与排放计算方法和节能减排评价方法为核心,而上述计算与评价方法中的参数、指标和计算分析流程不是一成不变的,随着相关计算分析和评价方法的改进,E3SAP 系统也应随之更新。因此,E3SAP 系统不应成为一个封闭的系统,而应为开放的系统,便于应用单位随时更新,同时允许应用单位结合自身使用要求,对该系统进行自定义完善。

2. E3SAP 系统的功能要求

E3SAP 系统作为适用于沥青路面节能减排分析评价的专业系统,以沥青路面节能减排量化分析评价为基本目标,应具有以下功能:

(1) 沥青路面能耗与排放量化计算功能

E3SAP 系统应能够根据沥青路面结构、材料、施工工艺流程、机械设备、交通量及交通组成等输入参数,按照本文建立的沥青路面生命周期能耗与排放量化分析方法,计算沥青路面生命周期的能耗与排放。E3SAP 系统进行能耗与排放量化分析的目的主要有以下两点:

- ① 计算能耗与排放量化数据,为后一阶段沥青路面节能减排评价提供数据支持;
- ② 计算能耗与排放总量,为相关经济效益分析和环境影响分析提供依据,即便因

为各种原因未能参加节能减排评价，计算得到的能耗与排放数据仍旧具有较好的可用性。

(2) 沥青路面能耗与排放分析功能

E3SAP 系统应能够根据计算得到的沥青路面生命周期能耗与排放量化数据，具体需要实现以下两项功能：

① 定量的分析沥青路面生命周期阶段能耗与排放比例，并根据量化数据分析给出能耗与排放最为严重的阶段或流程；

② 生成相关数据分析输出图表，便于直观的展现相关分析结果。

上述功能的实现，有利于应用单位及时、准确、快速的判断沥青路面生命周期能耗与排放的组成情况，从而针对能耗与排放突出的阶段、环节以及影响因素，有目的性的研发沥青路面节能减排技术，并在日后的工程项目中采取有效的节能减排措施。

(3) 沥青路面节能减排评价功能

E3SAP 系统应能够按照本文提出的沥青路面节能减排评价指标、指标权重及评价方法，根据输入的沥青路面能耗与排放量化分析数据以及相关定性评价指标量化数据，计算模拟评价的评价向量，并输出节能减排水平和综合得分评价结果。

7.1.2 E3SAP 系统设计流程

根据 E3SAP 系统的研发原则及其功能要求，本文将 E3SAP 系统的研发设计流程分为以下三个阶段（图 7.1）：

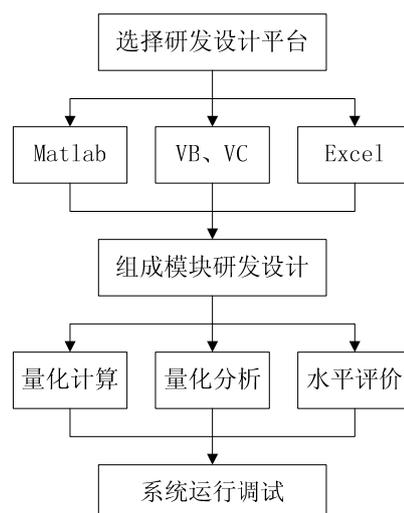


图 7.1 E3SAP 系统设计研发流程

1. 选择研发设计平台

E3SAP 系统以大量数据的管理、计算和分析为基础，因此，E3SAP 系统的研发设

计平台需要满足上述基本条件。目前，常用的数值分析计算及软件开发平台主要有 Matlab、VB、VC 以及 Excel 等，上述软件开发平台各有特点：

Matlab 具有很好的数值计算和矩阵计算能力，同时兼具比较完善的科学绘图功能，可以借助其 GUI 功能，自主开发具有一定输入输出界面的可执行程序；

VB、VC 作为完善的程序设计语言，具有强大的程序设计能力，同时通过其内部的函数和程序语言，同样能够实现较好的数值分析功能，同时也能开发具有人机交互功能的可执行程序；

Excel 是目前常用的数据管理、计算、分析和处理软件，具有简便实用的操作界面，能够实现大量数据的管理，通过内部函数，可以实现数据的计算，同时内置多种图形模板，可以实现不同功能要求的图形绘制。

在上述软件开发平台中，Excel 的日常使用最为普遍，使用比较简单，不需要进行长时间的专业培训，方便用户对数据的管理、维护和使用，具有简单、易用性的优势，根据《周易·系辞》的说法：“易则易知，简则易从，易知则有亲，易从则有功”，因此，从简易性的原则出发，本文选择 Excel 作为沥青路面节能减排分析评价系统的研发平台，以此为基础，实现相关功能要求。

2. 组成模块设计

E3SAP 系统的操作和运行主要包括数据输入和输出、数据计算以及数据分析等过程，其功能模块可以分为能耗与排放量化计算与分析模块以及节能减排评价模块两大主要组成部分。

在沥青路面能耗与排放计算模块，主要进行数据的收集管理与计算，采用 Excel 中内置的数学函数，利用单元格的引用，编辑相应的计算公式，实现根据输入沥青路面参数，自动计算输出能耗与排放结果的功能。

在沥青路面能耗与排放分析模块，主要采用 Excel 中的图表模板，根据计算得到的能耗与排放数据，自动绘制相应的分析图，如饼状图、柱状图等，直观的展现能耗与排放量化分析的结果，便于识别能耗与排放的组成情况，判断能耗与排放最为突出的阶段。

在沥青路面节能减排评价模块，主要根据能耗与排放量化计算数据以及定性评价指标的输入量化数据，按照模糊综合评价计算流程，采用 Excel 中的数学函数和矩阵行列式计算函数 MDETERM（求矩阵行列式值）、MMULT（求矩阵乘积），计算综合评价向量，并输出最终评价结果。

3. 系统运行调试

E3SAP 系统主要模块设计完成后，需要根据本文中的相关示例，进行应用验证，查找其中的疏漏、错误，对运行中出现的不完善之处进行改进完善。

7.2 沥青路面节能减排评价系统 E3SAP 组成模块

根据 E3SAP 系统的功能要求，本文将其分为以沥青路面生命周期能耗与排放量化分析方法为基础的量化分析模块和以沥青路面节能减排评价方法为基础的评价模块，同时采用选择确定的 Excel 开发平台，利用其工作簿 sheet 包含的数据计算、分析和图形绘制功能，提出 E3SAP 系统的实现方法。

7.2.1 能耗与排放量化分析模块

根据本文提出的沥青路面生命周期阶段划分以及建设阶段和使用阶段能耗与排放量化计算方法，以 Excel 工作簿 sheet 为基础，能耗与排放量化分析模块的主要构成如图 7.2 所示：

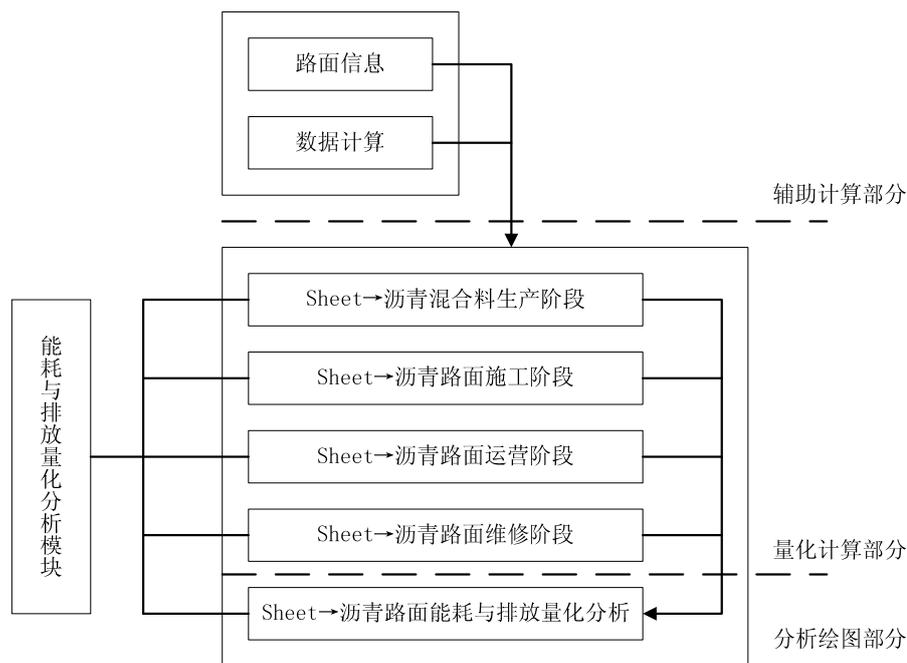


图 7.2 能耗与排放量化分析模块组成

1. 辅助计算部分

辅助计算部分包括路面信息工作簿和数据计算工作簿，其中路面信息工作簿包含了沥青路面结构层几何尺寸信息和交通量等路面设计资料以及生命周期分析年限等分析资料（图 7.3），为量化分析模块提供与路面设计和分析相关的基础数据。

数据计算部分是由一系列工作簿组成的集合，其中包含了能耗与排放量化分析所需的燃料热值、排放因子等基础数据，以及各生命周期阶段单位能耗计算过程及结果，从

而为能耗与排放量化分析提供依据（图 7.4）。

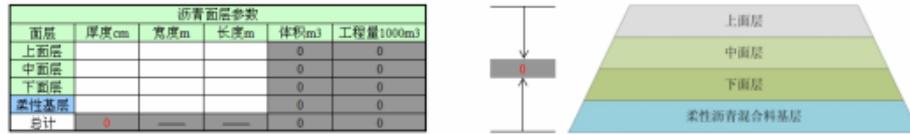


图 7.3 路面信息工作簿（部分）

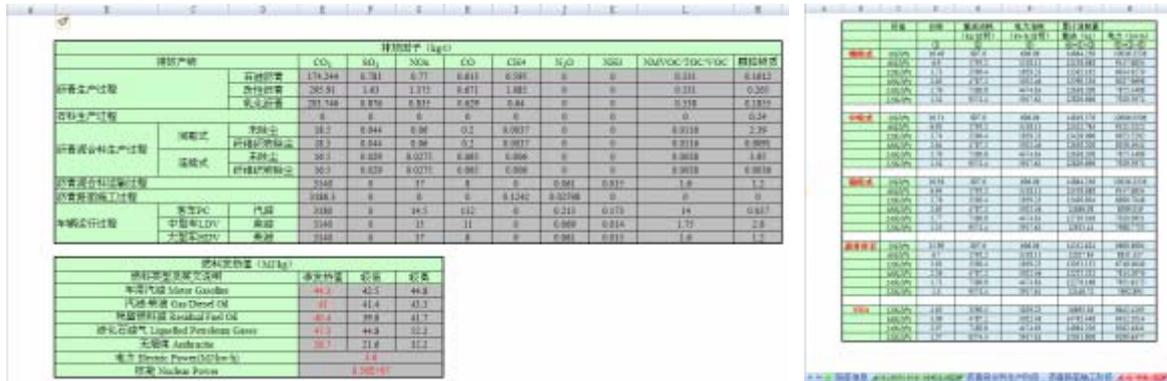


图 7.4 数据计算工作簿（部分）

2. 量化计算部分

量化计算部分以本文确定的沥青路面生命周期过程为基础，设置沥青混合料生产阶段、沥青路面施工阶段、沥青路面运营阶段和沥青路面养护维修阶段 4 个工作簿，每个工作簿以能耗与排放量化分析方法为基础，编辑相应的计算公式，根据路面信息和数据计算工作簿提供的相关信息以及用户输入信息，计算出各个阶段的能耗与排放。

为了便于用户使用，E3SAP 系统中采用不同颜色填充单元格表示其功能区别，用户仅需要在空白单元格输入或通过下拉菜单选择相应的数据，即可在灰色区域得到最终计算结果（图 7.5）。



图 7.5 量化分析模块工作簿（部分）

3. 分析绘图部分

分析绘图部分以沥青路面能耗与排放量化分析工作簿为主，将量化计算部分得到的

各个生命周期阶段的能耗与排放计算结果分类汇总，并利用 Excel 的绘图功能，根据汇总数据，自动绘制相应的数据分析图，以便于用户根据图形化和数值化的分析结果，确定沥青路面生命周期能耗与排放最为突出的阶段（图 7.6）。



图 7.6 沥青路面能耗与排放量化分析工作簿

7.2.2 节能减排分析评价模块

根据本文提出的沥青路面节能减排评价指标及评价方法，节能减排分析评价模块主要有指标评分和综合评价两个部分组成，各部分的主要内容如图 7.7 所示。

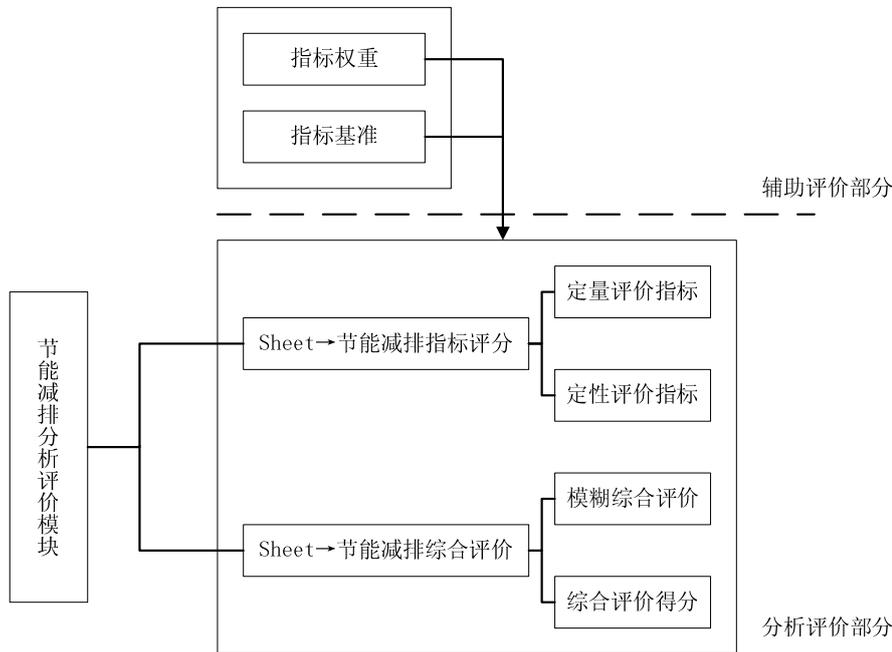


图 7.7 节能减排评价模块组成

1. 辅助评价部分

辅助评价部分包括指标权重和指标基准值两个工作簿，包含了沥青路面节能减排量化评价所需要的一级和二级指标权重以及各评价指标基准值及其等级评分的相关信息（图 7.8），为沥青路面节能减排量化评价提供基础。

指标权重工作簿主要包括采用层次分析法确定的一级指标和二级指标的权重,这里仅给出指标权重的最终计算结果,而未给出相应的计算过程,将指标权重工作簿如此设计的目的在于:层次分析法仅为指标权重确定方法中的一种常用方法,在实际使用过程中,用户可以根据需要选择不同的权重确定方法,从而提高了 E3SAP 系统的开放性,便于用户在合理范围内选择最易用的方法。

指标基准值工作簿主要包括定量指标和定性指标的各个等级及其所对应的量化得分,从提高评价结果合理性和激励性的角度出发, E3SAP 系统采用本文提出的 II 水平评价指标基准值。

序号	一级指标	权重
A	资源利用	0.1693
B	能源消耗	0.2747
C	环境排放	0.3931
D	管理控制	0.0511
E	路面技术	0.1117

二级指标	权重
① A1材料消耗量	0.1907
② A2沥青消耗量	0.3064
③ A3再生材料使用量	0.4333
④ A4其他材料使用量	0.0696
① B1电力消耗量	0.2300
② B2燃油消耗量	0.7300
① C1温室气体排放量	0.5264
② C2酸化气体排放量	0.2828
③ C3健康有害气体排放量	0.0730
④ C4颗粒物排放量	0.1177
① D1质量管理认证	0.0719
② D2工程质量奖励	0.0464
③ D3工程质量保障措施	0.1825
④ D4环境排放控制计划	0.2427
⑤ D5环境排放控制措施	0.4365
① E1路面节能减排技术分析	0.2000
② E2路面节能减排技术应用量	0.8000

序号	一级指标	二级指标	指标属性
			定量 定性
A	资源利用	① A1材料消耗量	•
		② A2沥青消耗量	•
		③ A3再生材料使用量	•
		④ A4其他材料使用量	•
B	能源消耗	① B1电力消耗量	•
		② B2燃油消耗量	•
C	环境排放	① C1温室气体排放量	•
		② C2酸化气体排放量	•
		③ C3健康有害气体排放量	•
		④ C4颗粒物排放量	•
D	管理控制	① D1质量管理认证	•
		② D2工程质量奖励	•
		③ D3工程质量保障措施	•
		④ D4环境排放控制计划	•
		⑤ D5环境排放控制措施	•
E	路面技术	① E1路面节能减排技术分析	•
		② E2路面节能减排技术应用量	•

图 7.8 辅助评价部分工作簿

2 指标评分部分

指标评分工作簿主要包含定量评价指标和定性评价指标评分两方面的内容,主要根据实测数据和指标基准值要求,对不同的评价指标赋予合理的评价分数(图 7.9)。

定量评价指标评分部分,根据相应评价指标的定额数值和实测数值,计算其节能减排率,并参照指标基准值,确定其相应的评价分数。

定性评价指标评分部分,根据评价对象提供的相关评价材料,参照指标基准值,确定指标评价等级及其相应的评价分数。

指标名称	定额数值D ₀	实际数值D ₁	评价分数	等级水平
① A1材料消耗量	1590.018693	700	0.559753548	A
② A2沥青消耗量	75.087125	0	1	A
③ A3再生材料使用量	1	0	1	A
④ A4其他材料使用量	5329.28433	0	1	A
① B1电力消耗量	9090.014055	0	1	A
② B2燃油消耗量	47331.56816	0	1	A
① C1温室气体排放量	216.3521713	0	1	A
② C2酸化气体排放量	572.488671	0	1	A
③ C3健康有害气体排放量	6813.378402	0	1	A
④ C4颗粒物排放量	0.675	0	0	D

指标名称	等级水平	分数范围	评价分数
① D1质量管理认证	B	[0.6, 0.9]	
② D2工程质量奖励	B	[0.6, 0.4]	
③ D3工程质量保障措施	B	[0.6, 0.4]	
④ D4环境排放控制计划	A	[0.8, 0.6]	
⑤ D5环境排放控制措施	C	[0.4, 0.2]	
① E1路面节能减排技术分析	D	[0.2, 0]	

图 7.9 指标评分部分工作簿

3. 综合评价部分

综合评价部分工作簿主要包含节能减排模糊综合评价以及综合评价得分计算过程及评价结果，给出 E3SAP 系统的最终结论（图 7.10）。

模糊综合评价部分，根据一级指标的权重以及评价指标的最终得分分析，按照模糊综合评价的计算过程，计算评价对象的评价等级隶属程度，从而确定模糊综合评价的最终评价结果。

综合评价得分部分，根据一级指标和二级指标的权重，以及评价指标的最终得分，计算评价对象的综合评价得分，从而为模糊综合评价为同一等级的两个不同评价对象提供更进一步的量化评价依据。



图 7.10 综合评价部分工作簿

7.3 本章小结

本章从实用性和简便性的角度出发，在国内外生命周期分析评价系统的基础上，针对我国沥青路面材料、结构与施工工艺的实际情况，以 Excel 为平台开发了适合我国国情的沥青路面节能减排评价系统。取得的主要结论如下：

(1) 从简便、实用以及专业性的角度出发，提出了 E3SAP 系统研发过程中需要遵循的生命周期原则、专业针对性原则、简便实用原则以及动态开放性原则，并明确了 E3SAP 系统应具有的基本功能。

(2) 根据 E3SAP 系统的研发原则及其功能要求，提出了三阶段的 E3SAP 系统研发设计流程，并通过不同设计开发平台的比较，选择 Excel 作为 E3SAP 系统的研发设计平台。

(3) 根据沥青路面能耗与排放量化计算方法和沥青路面节能减排综合评价方法，利用 Excel 平台的数据管理、计算分析与图形绘制功能，设计开发了 E3SAP 系统的能耗与排放量化分析模块和节能减排分析评价模块，实现了 E3SAP 系统的基本功能要求。

结 论

1 主要结论

本文以沥青路面节能减排量化分析为核心,研究并提出了沥青路面生命周期能耗与排放量化分析方法,建立了沥青路面节能减排量化分析评价指标,最终构建了沥青路面节能减排量化分析体系,并在此基础上开发了沥青路面节能减排量化评价系统。取得的主要研究结论如下:

(1) 调查了沥青混合料生产过程和沥青路面建设过程的主要生产环节、机械设备及其工艺流程,分析了上述过程中能源消耗及环境排放的来源、构成、影响因素以及控制方法,并建立了不同生产工艺下的沥青混合料生产过程能耗与排放流程图。

(2) 调查了沥青路面运营过程中,路面状况变化对车辆油耗的影响,提出了通过路面状况与车速、车速与油耗的关系,建立“路面状况-车速-能耗与排放”预估模型的思路,并调查得到了车辆环境排放的来源和种类。

(3) 分析了生命周期方法用于沥青路面能耗与排放量化分析的可行性,比较了三种不同类型的生命周期分析方法的优缺点,结合沥青路面能耗与排放量化分析的特点,提出采用基于流程的生命周期方法用于沥青路面能耗与排放量化分析,并根据ISO14040对生命周期分析的相关规定,建立了沥青路面节能减排量化分析评价体系的基本框架。

(4) 提出了基于产品和基于流程的两种生命周期单元过程划分方法;分析了调查法、理论法和定额法三种能耗量化分析方法的优缺点,提出了“定额法为主,理论法为辅,实测法为补”的沥青路面能耗量化分析原则;同时分析了典型平均、国家平均和工艺平均三水平排放因子量化分析方法的优缺点,推荐了沥青路面环境排放量化分析方法,初步建立了通用的沥青路面能耗与排放量化分析方法。

(5) 以定额法为主,结合调查法和理论法,提出了沥青路面建设阶段能源消耗量化计算方法和详细计算过程;以排放因子法为基础,确定了沥青路面建设阶段各生命周期过程的主要环境排放产物及其排放因子,并提出了相应的环境排放量化计算方法。

(6) 在沥青路面建设阶段能耗与排放量化分析方法的基础上,提出了沥青路面建设阶段能耗与排放量化分析模型,并应用该分析模型对河南省淮滨至固始高速公路沥青路面新建工程进行了量化分析,明确了能耗与排放的总量及相对比例,为建设工程节能

减排措施的应用提供科学的指导。

(7) 在定额法与排放因子法的基础上, 结合养护工程材料与机械设备的特點, 提出了沥青路面养护维修阶段能耗与排放量化分析方法, 建立了养护维修阶段能耗与排放量化模型。

(8) 提出了“路面状况-车速-能耗与排放”量化预估模型建立方法, 根据路面使用时间 t 、平整度指数 IRI、车辆行驶速度 v 以及油耗 F_c 之间存在的量化关系, 采用参数传递法建立了基于路面状况的能耗量化预估模型。

(9) 提出了沥青路面使用阶段能耗与排放量化分析模型, 采用该模型对河南省淮滨至固始高速公路沥青路面新建工程进行了量化分析, 结合量化分析结果提出了采用低碳技术、提高沥青路面路用性能等节能减排方向。

(10) 从科学性、约束性和激励性的角度, 提出了沥青路面节能减排评价指标体系的确定原则, 并选取了资源利用、能源消耗、环境排放、管理控制以及路面技术 5 个一级指标及其二级指标, 初步建立了沥青路面节能减排评价指标体系。

(11) 根据沥青路面节能减排评价指标体系, 考虑定性指标和定量指标量化方法的差别, 分别提出了 I 水平和 II 水平评价指标的基准值, 为沥青路面节能减排评价提供了有效的尺度标准。

(12) 采用层次分析法确定了沥青路面节能减排一级评价指标和二级评价指标的权重, 并以模糊综合评价方法为基础, 结合加权综合得分, 建立了三阶段的沥青路面节能减排综合评价方法及其评价流程。同时根据国内外实测数据, 以 II 水平评价为例, 采用该评价方法进行了示例应用。

(13) 提出了 E3SAP 系统研发过程中需要遵循的基本原则, 并明确了 E3SAP 系统应具有的基本功能。在此基础上提出了三阶段的 E3SAP 系统研发设计流程, 并通过不同设计开发平台的比较, 选择 Excel 作为 E3SAP 系统的研发设计平台。

(14) 根据沥青路面能耗与排放量化计算方法和沥青路面节能减排综合评价方法, 利用 Excel 平台的基本功能, 设计开发了 E3SAP 系统的能耗与排放量化分析模块和节能减排分析评价模块, 实现了 E3SAP 系统的基本功能要求。

2 创新点

(1) 以生命周期分析方法为基础, 将节能减排量化分析与评价有机结合, 建立了沥青路面节能减排量化分析评价体系的基本框架, 明确了其组成部分、主要内容及分析

评价流程。

(2) 在沥青路面生命周期能耗与排放影响因素调查的基础上,分析了现有能耗与排放量化计算方法的优缺点,提出了沥青路面能耗与排放量化分析方法的基本原则,推荐了基于定额法和基于排放因子法的沥青路面建设阶段能耗与排放量化分析方法。

(2) 调查分析路面状况变化对车辆油耗的影响,根据路面使用时间 t 、平整度指数 IRI、车辆行驶速度 v 以及油耗 F_c 之间存在的量化关系,采用参数传递法建立了“路面状况-车速-能耗与排放”预估模型。

(3) 从科学性、约束性和激励性的角度,选取了资源利用、能源消耗、环境排放、管理控制以及路面技术 5 个一级指标及其二级指标,并分别提出了 I 水平和 II 水平评价指标的基准值,建立了沥青路面节能减排评价指标体系。

(4) 根据沥青路面节能减排评价指标体系,采用层次分析法和模糊综合评价法,建立了三阶段的沥青路面节能减排综合评价方法及其评价流程。

(5) 以 Excel 为平台,设计开发了实用简便的沥青路面节能减排分析评价系统 E3SAP。

3 进一步研究的建议

本文对沥青路面能耗与排放量化分析方法和节能减排评价方法及其应用方面开展了一些有益的探索,但是由于研究时间和研究条件的限制,在以下几方面仍需进一步深入研究:

(1) 排放因子是进行环境排放量化分析的基础,由于目前国内尚未建立沥青路面建设和运营养护等关键环节的排放因子数据库,本文在环境排放量化计算过程中主要采用欧美发达国家的排放因子,因此,需要结合我国沥青路面建设实际,针对排放因子进行深入研究。

(2) 油耗模型是建立“路面状况-车速-能耗与排放”模型中的主要环节,由于研究条件和时间等限制,本文采用国内相关研究数据,只建立了平原微丘区的油耗模型,因此,需要进一步开展相关研究,建立不同地区或具有通用性特征的油耗模型。

(3) 根据沥青路面节能减排的需要和相关管理要求,本文建立了节能减排评价方法并研发了 E3SAP 系统,该评价方法及评价系统的全面性、完善性和实用性还有待大规模实践检验,因此,需要跟踪其应用情况,继续对其进行丰富和完善。

参考文献

- [1] 中华人民共和国交通运输部. 交通运输“十二五”发展规划[EB/OL]. <http://www.mot.gov.cn/zhuantizhuanlan/jiaotongguihua/shierwujiaotongyunshufazhanguihua/index.html>, 2011
- [2] Nicholas Joseph Santero. Pavements and the Environment: A Life-Cycle Assessment Approach[D]. Berkeley: University of California, Berkeley, 2009
- [3] Jincheol Lee, Tuncer B. Edil, Craig H. Benson, et al. USE of BE²ST In-Highways for Green Highway Construction Rating in Wisconsin[A]. N Weinstein. Green Streets and Highways 2010: An Interactive Conference on the State of the Art and How to Achieve Sustainable Outcomes[C]. ASCE, 2010: 480-494
- [4] Bjarne Schmidt, Jeppe C. Dyre. CO₂ Emission Reduction by Exploitation of Rolling Resistance Modelling of Pavements[J]. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2012, 48(2012): 311-320
- [5] 尚春静, 张智慧, 李小冬. 高速公路生命周期能耗和大气排放研究[J]. 公路交通科技, 2010, 27(08): 149-154
- [6] 中华人民共和国交通运输部. 公路水路交通节能中长期规划纲要[EB/OL]. http://www.gov.cn/gzdt/2008-11/04/content_1139571.htm, 2008
- [7] 左铁镛, 冯之浚. 循环型社会材料循环与环境影响评价[M]. 北京: 科学出版社, 2008
- [8] Tarja Häkkinen, Kari Mäkelä. Environmental Adaptation of Concrete Environmental Impact of Concrete and Asphalt Pavements[R]. Espoo: T R C o Finland, 1996
- [9] A. Horvath, C. Hendrickson. Comparison of environmental implications of asphalt and steel-reinforced concrete pavements[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1998, 1626(-1): 105-113
- [10] H. Stripple. Life Cycle Assessment of Road: A Pilot Study for Inventory Analysis[R]. Stockholm: S N R Administration, 2001
- [11] GB/T 24040-2008, 环境管理-生命周期评价-原则与框架[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008
- [12] Pablo Zapata, John A. Gambatese. Energy Consumption of Asphalt and Reinforced

- Concrete Pavement Materials and Construction[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2005, 11(1): 9-20
- [13] Kwangho Park, Yongwoo Hwang, Seongwon Seo, et al. Quantitative Assessment of Environmental Impacts on Life Cycle of Highways[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2003, 129(1): 25-31
- [14] GJ Treloar, Peter E. D. Love, Robert H. Crawford. A hybrid life cycle assessment method for construction[J]. Construction Management & Economics, 2000, 18(1): 5-9
- [15] Graham J. Treloar, Peter E. D. Love, Robert H. Crawford. Hybrid Life-Cycle Inventory for Road Construction and Use[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2004, 130(1): 43-49
- [16] Athena Institute. A Life Cycle Perspective on Concrete and Asphalt Roadways: Embodied Primary Energy and Global Warming Potential[R]. Ottawa: C A o Canada, 2006
- [17] A.W.C. Chan. Economic and Environmental Evaluations of Life Cycle Cost Analysis Practice: A Case Study of Michigan DOT Pavement Projects[D]. Ann Arbor: University of Michigan, 2007
- [18] Philip White, Jay S. Golden, Krishna P. Biligiri, et al. Modeling climate change impacts of pavement production and construction[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2010, 54(11): 776-782
- [19] Darrell Cass, Amlan Mukherjee. Calculation of Greenhouse Gas Emissions Associated with Highway Construction Projects Using an Integrated Life Cycle Assessment Approach[A]. J Ruwanpura, Y Mohamed, S Lee. Construction Research Congress 2010: Innovation for Reshaping Construction Practice Proceedings of the 2010 Construction Research Congress[C]. ASCE, 2010: 141-144
- [20] Murat Kucukvar, Omer Tatari. Ecologically based hybrid life cycle analysis of continuously reinforced concrete and hot-mix asphalt pavements[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2012, 17(1): 86-90
- [21] Wilfred H. Roudebush. Environmental Value Engineering (EVE) Environmental Life Cycle Assessment of Concrete and Asphalt Highway Pavement Systems[R]. Skokie: P C Association, 1999
- [22] R. Berthiaume, C. Bouchard. Exergy Analysis of the Environmental Impact of Paving

- Material Manufacture[J]. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering and Green Manufacturing, 1999, 23(1): 187-196
- [23] Omer Tatari, Munir Nazzal, Murat Kucukvar. Comparative sustainability assessment of warm-mix asphalts: A thermodynamic based hybrid life cycle analysis[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2012, 58(2012): 18-24
- [24] Ulla-Maija Mroueh, Paula Eskola, Jutta Laine-Ylijoki, et al. Life cycle assessment of road construction[R]. Helsinki: F N R Administration, 2000
- [25] Raja Chowdhury, Defne Apul, Tim Fry. A Life Cycle Based Environmental Impacts Assessment of Construction Materials Used in Road Construction[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2010, 54(4): 250-255
- [26] A. C. Carpenter, K. H. Gardner, J. Fopiano, et al. Life cycle based risk assessment of recycled materials in roadway construction[J]. Waste Management, 2007, 27(10): 1458-1464
- [27] Agnès Jullien, Pierre Monéron, Gaetana Quaranta, et al. Air emissions from pavement layers composed of varying rates of reclaimed asphalt[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2006, 47(4): 356-374
- [28] Guillermo Thenoux, Ivaro González, Rafael Dowling. Energy consumption comparison for different asphalt pavements rehabilitation techniques used in Chile[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2007, 49(4): 325-339
- [29] H. Zhang, M.D. Lepech, G.A. Keoleian, et al. Dynamic Life-Cycle Modeling of Pavement Overlay Systems: Capturing the Impacts of Users, Construction, and Roadway Deterioration[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2010, 16(4): 299-309
- [30] D. Cass, A. Mukherjee. Calculation of Greenhouse Gas Emissions for Highway Construction Operations by Using a Hybrid Life-Cycle Assessment Approach: Case Study for Pavement Operations[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2011, 137(11): 1015-1025
- [31] Ting Wang, In-Sung Lee, Alissa Kendall, et al. Life cycle energy consumption and GHG emission from pavement rehabilitation with different rolling resistance[J]. Journal of Cleaner Production, 2012, 33(2012): 86-96
- [32] 郑莉. 路面材料 LCA 及其信息化开发[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2007

- [33] 郑艳华. 生命周期评价法在公路建设项目环境影响分析中的应用[D]. 南京: 南京林业大学, 2009
- [34] Chui-Te Chiu, Tseng-Hsing Hsu, Wan-Fa Yang. Life cycle assessment on using recycled materials for rehabilitating asphalt pavements[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2008, 52(3): 545-556
- [35] Hsiu-Ching Shih, Hwong-Wen Ma. Life cycle risk assessment of bottom ash reuse[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 190(1-3): 308-316
- [36] 潘美萍, 王端宜. 路面寿命周期碳排放评价方法的研究[J]. 中外公路, 2011, (04): 83-86
- [37] Rachel Katherine Nathman. Palate User Guide, Example Exercise, and Contextual Discussion[D]. Newark: University of Delaware, 2008
- [38] Rachel Nathman, Sue Mcneil, Thomas Van Dam. Integrating Environmental Perspectives into Pavement Management[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2009, 2093(-1): 40-49
- [39] International Institute for Sustainable Development. Assessing Sustainable Development: Principles in Practice[R]. Winnipeg: I I f S Development, 1997
- [40] Martina Soderlund. Sustainable Roadway Design- A Model For An Environmental Rating System[D]. Washington D. C: University of Washington, 2007
- [41] University Of Washington. Green Roads™ Version 1.5 Manual[EB/OL]. www.greenroads.org/files/236.pdf, 2011
- [42] Yue Huang, Roger Bird, Oliver Heidrich. Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavements[J]. Journal of Cleaner Production, 2009, 17(2): 283-296
- [43] H. Birgisdóttir. Life cycle assessment model for road construction and use of residues from waste incineration[D]. Copenhagen: Technical University of Denmark, 2005
- [44] 潘美萍. 基于 LCA 的高速公路能耗与碳排放计算方法研究及应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2011
- [45] 建設工事における省エネルギー. 省資源について考える[J]. 建設の機械化, 1981, 1: 50
- [46] 孙祖望. 沥青搅拌设备的节能减排[J]. 建设机械技术与管理, 2011, 24(06): 41-44

- [47] Emissions Monitoring and Analysis Division Office of Air Quality Planning And Standards. Hot Mix Asphalt Plants Emission Assessment Report[R]. North Carolina: U S E P Agency, 2000
- [48] JTG F40-2004, 公路沥青路面施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004
- [49] 孙祖望. 连续式搅拌设备的发展及其与间歇式搅拌设备的比较[J]. 市政技术, 2011, 29(3): 17-22
- [50] Oliver Stotko. Energy and Related Carbon Emission Reduction Technologies for Hot Mix Asphalt Plants[EB/OL]. <http://www.capsa11.co.za/bulletinpapers/approved/CarbEmissRedTechHMA.pdf>, 2011
- [51] JTT 270-2002, 强制间歇式沥青混合料搅拌设备[S]. 北京: 人民交通出版社, 2002
- [52] 苏红云. 沥青搅拌设备节能减排大家谈[J]. 建设机械技术与管理, 2011, (6): 27, 29, 31, 33, 35, 37-41
- [53] 田可兵, 刘晓帆. 沥青拌和楼燃油用量的分析探讨[J]. 广东交通职业技术学院学报, 2006, 5(2): 21-23, 27
- [54] 孙绪法. 沥青拌和站节能措施[J]. 工程机械与维修, 2010, (11): 184-185
- [55] Virginia Department Of Transportation. Dealing with Title V Operating Permits: the Synthetic Minor Alternative[R]. Lanham, Maryland: NAPA, 1995
- [56] Office of Air Quality Texas Natural Resource Conservation Commission. Asphalt Concrete Plants: Emissions Calculations Instructions[R]. Austin, Texas: M S Engineers, 1994
- [57] JTG/T B06-03-2007, 公路工程机械设备台班费用定额[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007
- [58] 李际贵. 沥青路面施工机械优化配置[J]. 山西建筑, 2007, 33(14): 345-346
- [59] 徐晓枫, 蓝伟生. 沥青混合料摊铺机选型原则和摊铺质量浅析[J]. 黑龙江交通科技, 2009, (05): 55-56
- [60] 冯良生. 浅谈公路工程施工机械的合理选择[J]. 交通标准化, 2008, (7): 164-167
- [61] 丁波, 于永. 浅析柴油机排放控制技术[J]. 交通科技与经济, 2004, (004): 51-52
- [62] 赵西安, 赖可坚, 邹颂宇. 浅谈柴油发动机排放的环保对策[J]. 建筑机械化, 2004, 25(010): 63-64
- [63] 杨挺然. 控制柴油机排放的技术分析[J]. 交通节能与环保, 2006, (2): 29-31
- [64] 郑建军, 周志恩, 张丹, 等. 隧道路面沥青摊铺过程空气中 TSP 和多环芳烃污染

- 研究[J]. 环境监测管理与技术, 2010, (006): 39-41
- [65] International Agency for Research On Cancer. Bitumens and Extracts of Steam-Refined and Air-Refined Bitumens [R]. Lyon: IARC, 1987
- [66] 史宝成, 刘景泰. 沥青烟化学组分的气相色谱—质谱联机分析[J]. 环境化学, 2001, 20(2): 200-201
- [67] E Sikora, S Stone, S Tomblyn, et al. Asphalt exposure enhances neuropeptide levels in sensory neurons projecting to the rat nasal epithelium[J]. Journal of Toxicology and Environmental Health Part A, 2003, 66(11): 1015-1027
- [68] Mh Simmers. Petroleum Asphalt Inhalation by Mice. Effects of Aerosols and Smoke on the Tracheobronchial Tree and Lungs[J]. Archives of environmental health, 1964, 9: 728
- [69] E. Gasthauer, M. Mazé, Jp Marchand, et al. Characterization of asphalt fume composition by GC/MS and effect of temperature[J]. Fuel, 2008, 87(7): 1428-1434
- [70] J. Mclean, G. Foley. Road surface characteristics and condition: effects on road users[R]. Bentley Australia: A G Limited, 1998
- [71] Ja Epps, Rb Leahy, T. Mitchell, et al. WesTrack—The road to performance-related specifications[A]. International Conference on Accelerated Pavement Testing[C]. Reno, NV: Transportation Research Board 1999: 1-31
- [72] F. Hugo, A.E. Martin. Significant findings from full-scale accelerated pavement testing[R]. Washington DC: T R Board, 2004
- [73] D. Amos. Pavement Smoothness and Fuel Efficiency: An Analysis of the Economic Dimensions of the Missouri Smooth Road Initiative[R]. Washington D.C: FHWA, 2006
- [74] James S. Gillespie, Kevin K. Mcghee. Get in, get out, come back! What the relationship between pavement roughness and fuel consumption means for the length of the resurfacing cycle[J]. Transportation Research Record, 2007, (1990): 32-39
- [75] 田赛男, 姚祖康, 黄美德, 等. 路面平整度对油耗的影响[J]. 中国公路学报, 1990, 3(1): 1-14
- [76] 周育峰, 张浩然. 路面表面特性与汽车油耗关系研究[J]. 公路, 2005, (01): 30-36
- [77] 中华人民共和国工业及信息化部. 轻型汽车燃料消耗量通告 [EB/OL]. <http://gzly.miit.gov.cn:8090/datainfo/miit/babs2.jsp>, 2012.3
- [78] GB 14762-2008, 重型车用汽油发动机与汽车排气污染物排放限值及测量方法 (中

- 国III、IV阶段) [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008
- [79] GB 18352.3-2005, 轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国III、IV阶段) [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005
- [80] ISO 14040, Environmental management -- Life cycle assessment --Principles and Frameworks[S]. Geneva: International Standard Organization, 2006
- [81] ISO 14044, Environmental management -- Life cycle assessment -- Requirements and guidelines[S]. Geneva: International Standard Organization, 2006
- [82] GB/T 24044-2008, 环境管理-生命周期评价-要求与指南[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008
- [83] 刘起运, 陈璋, 苏汝劫. 投入产出分析(第二版) [M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2011
- [84] Manfred. Lenzen. Errors in Conventional and Input - Output—based Life—Cycle Inventories[J]. Journal of Industrial Ecology, 2000, 4(4): 127-148
- [85] C.T. Hendrickson, L.B. Lave, H.S. Matthews. Environmental Life Cycle Assessment of Goods and Services: An Input-output Approach[M]. Washington, DC: Resources for the Future, 2006
- [86] Nicholas J. Santero, Eric Masanet, Arpad Horvath. Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2011, 55(9-10): 801-809
- [87] United Nations Framework Convention on Climate Change. Kyoto Protocol[EB/OL]. <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.html>, 1997
- [88] National Greenhouse Gas Inventories Programme. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[M]. Hayama, Kanagawa: IGES, Japan, 2006
- [89] European Environment Agency. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2009[M]. Copenhagen: European Environment Agency, 2009
- [90] 夏青, 于洁, 等 ISO14020 系列国际标准教程[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004
- [91] Timo Blomberg, Jeff Barnes, Frédérick Bernard, et al. Life Cycle Inventory:Bitumen[M]. Brussels: European Bitumen Association, 2011
- [92] Environmental Protection Agency. Crushed Stone Processing and Pulverized Mineral

- Processing[EB/OL]. <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch11/final/c11s1902.pdf>, 2004
- [93] Environmental Protection Agency. Hot Mix Asphalt Plants[EB/OL]. <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch11/bgdocs/b11s01.pdf>, 2004
- [94] H. Tung, D. Cédric, V. Anne, et al. A global tool for environmental assessment of roads—Application to transport for road building[EB/OL]. <http://www.ectri.org/YRS05/Papiers/Session-3bis/ventura.pdf>, 2011
- [95] 张登良. 沥青路面工程手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003
- [96] European Bitumen Association. Partial Life Cycle Inventory for Paving Grade Bitumen[R]. Brussels: Eurobitume, 1999
- [97] 郭淑霞, 于雷, 宋国华. 重型柴油车实测排放因子和 MOBILE6 预测值的对比分析[J]. 安全与环境工程, 2007, 14(02): 17-21
- [98] 黄成, 陈长虹, 景启国, 等. 重型柴油车实际道路排放与行驶工况的相关性研究[J]. 环境科学学报, 2007, 27(02): 177-184
- [99] 郝艳召, 邵春福, 于雷, 等. 交通路网中重型柴油车油耗和排放多层次分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2010, 10(005): 123-129
- [100] 黄成, 陈长虹, 楼狄明, 等. 重型柴油车实际道路油耗与排放模拟及其应用研究[J]. 环境科学学报, 2010, 30(12): 2369-2376
- [101] Nicholas J. Santero, Eric Masanet, Arpad Horvath. Life-cycle assessment of pavements Part II: Filling the research gaps[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2011, 55(9-10): 810-818
- [102] Environmental Protection Agency. Motor Vehicle Emission Simulator (MOVES) 2010 User Guide[EB/OL]. <http://www.epa.gov/otaq/models/moves/420b09041.pdf>, 2010
- [103] A. Burnham, Mq Wang, Y. Wu. Development and applications of GREET 2.7--The Transportation Vehicle-CycleModel[R]. Argonne: I U Argonne National Lab., 2006
- [104] H.G.R. Kerali, Jb Odoki, Ee Stannard. Overview of HDM-4[J]. Highway and Management Series, International Study of Highway Development and Management 2006, 1
- [105] Environmental Protection Agency. User's Guide to MOBILE6.1 and MOBILE6.2[EB/OL]. <http://www.epa.gov/otaq/models/mobile6/420r03010.pdf>, 2003
- [106] Nicole Davis, James Lents, Mauricio Osses, et al. Development and Application of an

- International Vehicle Emissions Model[EB/OL]. <http://www.issrc.org/ive/>, 2005
- [107] B. Yu, Q. Lu. Life cycle assessment of pavement: Methodology and case study[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2012, 17(5): 380-388
- [108] JTG H20-2007, 公路技术状况评定标准[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007
- [109] American Association of State Highway and Transportation Officials. Guide for Design of Pavement Structures[R]. Washington, DC: AASHTO, 1993
- [110] Kp George, As Rajagopal, Lk Lim. Models for predicting pavement deterioration[J]. Transportation Research Record, 1989, (1215)
- [111] 陈子建. 沥青路面行驶质量研究[D]. 上海: 同济大学, 1996
- [112] 孙立军. 沥青路面结构行为理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005
- [113] 邵东野. 基于国际平整度指数 (IRI) 的沥青路面养护评价体系[D]. 西安: 长安大学, 2007
- [114] Ma Karan, R. Haas, R. Kher. Effects of pavement roughness on vehicle speeds[R]. Washington D C: N R Council, 1976
- [115] D. Cebon. Handbook of vehicle-road interaction[M]. Netherlands: Swets & Zeitlinger Publishers, 1999
- [116] Satish Chandra. Effect of Road Roughness on Capacity of Two-Lane Roads[J]. Journal of transportation engineering, 2004, 130(3): 360-364
- [117] 周晓青, 孙立军. 国际平整度指数与行驶车速的关系[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2005, 33(010): 1323-1327
- [118] 张金喜, 苏蕊葳, 王睿锋. 路面平整度与驾驶速度关系的实验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(10): 59-63
- [119] 郭成超, 陶向华, 王复明. 车速和路面不平度特性对车路相互作用的影响[J]. 华北水利水电学院学报, 2004, 25(3): 42-45
- [120] 姚祖康. 公路设计手册——路面[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999
- [121] R. Perera, S. Kohn. Effects of variation in quarter-car simulation speed on international roughness index algorithm[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2004, 1889(-1): 144-151
- [122] 贾洪飞, 隽志才, 张泉雄, 等. 高速公路后评价油耗指标的确定与对比[J]. 吉林大学学报(工学版), 2004, 34(2): 298-301

- [123] 张卫华, 王炜, 牛学勤, 等. 京石高速公路及其辅道汽车油耗比较分析[J]. 公路交通科技, 2003, 20(3): 182-185
- [124] 余志生. 汽车理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009
- [125] GB T 15089-2001, 机动车辆及挂车分类[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2002
- [126] 张争奇. 高速公路沥青路面维修养护技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010
- [127] American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO Guide for Design of Pavement Structures[R]. Washington D.C: AASHTO, 1993
- [128] Ma Karan, Tj Christison, A. Cheetham, et al. Development and implementation of Alberta's pavement information and needs system[J]. Transportation Research Record, 1983, (938)
- [129] 孙立军, 刘喜平. 路面使用性能的标准衰变方程[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 1995, 23(005): 512-518
- [130] R.G. Hicks, J.S. Moulthrop, J. Daleiden. Selecting a preventive maintenance treatment for flexible pavements[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1999, 1680(-1): 1-12
- [131] 陈文晖, 马胜杰, 姚晓艳. 中国循环经济综合评价研究[M]. 北京: 中国经济出版社, 2009
- [132] Emad S. Bakhoun, David C. Brown. Developed Sustainable Scoring System for Structural Materials Evaluation[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2012, 138(1): 110-119
- [133] 许树伯. 实用决策方法——层次分析法原理[M]. 天津: 天津大学出版社, 1988
- [134] 秦永春, 黄颂昌, 徐剑, 等. 温拌沥青混合料节能减排效果的测试与分析[J]. 公路交通科技, 2009, 26(008): 33-37
- [135] 程玲, 闫国杰, 陈德珍, 等. 温拌沥青混合料摊铺节能减排效果的定量化研究[J]. 环境工程学报, 2010, (9): 2151-2155

攻读学位期间取得的研究成果

攻读博士学位期间取得的学术成果

- [1] Bo Yang, Zhengqi Zhang, Huixian Zhang. Influence of Base Course on Permanent Deformation of Asphalt Pavement Based on Viscoelastic Finite Element Analysis. 3rd International Conference on Transportation Engineering. ASCE, 2011: 1672-1677. (EI)
- [2] Bo Yang, Zhengqi Zhang, Huixian Zhang. Influence of Boundary Conditions on Composite Structure Wheel-Tracking Test Based on Viscoelastic Finite Element Analysis. 11th International Conference of Chinese Transportation Professionals. ASCE, 2011: 3389-3398. (EI)
- [3] 杨博, 张争奇, 栗培龙, 张慧鲜. 面层层间接触对沥青路面设计参数的影响. 武汉理工大学学报, 2011, 33(12): 37-40.
- [4] Bo Yang, Zheng-Qi Zhang, Le Wang. Cracking Resistance Performance of Asphalt Treated Base. International Workshop on Energy and Environment in the Development of Sustainable Asphalt Pavements. 2010: 236-24. (ISTP)
- [5] 杨博, 张争奇. 沥青路面组合结构车辙试验研究. 武汉理工大学学报, 2012, 34(7): 46-51
- [6] 张争奇, 杨博, 陶晶. 多层组合结构沥青混合料车辙试验模具. 实用新型专利. ZL201120008720.4
- [7] 张争奇, 杨博, 陶晶. 用于沥青混合料车辙试验的圆柱形试件承载装置. 实用新型专利. ZL201120008734.6
- [8] 陶晶, 张争奇, 燕海峰, 杨博. 一种沥青路面施工质量实时控制方法. 发明专利. ZL201110009444.8

攻读博士学位期间参与的主要科研项目

- [1] 基于粘弹性的沥青混合料设计分析体系研究, 交通运输部西部交通建设科技项目(2006-318-812-21), 2006.6~2011.9, 负责沥青路面车辙预估研究。
- [2] 基于汉堡车辙仪的沥青路面车辙成因分析及设计优化, 河北省交通运输厅科学技术项目计划(Y-080134), 2008.1~2010.7, 负责沥青路面材料高温性能优化、结构优化和基于有限元分析程序的沥青路面车辙预估系统研究。

致 谢

五年的求学生活即将结束，自从 2007 年师从张老师以来，张老师渊博的学识、开阔的思路、严谨求实的治学态度、诲人不倦的学者风范给我留下了极为深刻的印象，并时时影响着我、激励着我。在师从张老师的五年时间里，张老师对我的学习和科研工作悉心指导，手把手的指导我如何开展科研工作、如何撰写科研论文……我在学习和科研上的每一次进步和取得的每一个成果，都渗透着张老师的心血。在论文完成之际，谨向悉心指导我学习和论文的导师张争奇教授表示由衷的感谢和崇高的敬意！

在论文的选题、构思和研究过程中，得到了师兄栗培龙副教授的指导和帮助，栗师兄提出的许多宝贵意见帮助我明确目标、理清思路；而且在研究生求学期间，栗师兄毫无保留的传授了许多宝贵的经验，让我的求学之路少了许多不必要的曲折。在此，向栗师兄表示由衷的感谢。

在这五年中，虽然师弟师妹们换了几届，但是大家始终都像一家人，课题组时刻充满着温馨与欢乐，枯燥紧张的学习生活也变得丰富多彩。特别是在论文研究过程中，师弟师妹们利用课余时间，不辞辛苦的帮我翻译了大量的外文文献资料，对论文进行了仔细的校核，在此向各位师弟师妹表示衷心的感谢。

特别感谢爱妻张慧鲜女士在五年研究生生活中给我的理解与支持，在论文研究中，你帮助我收集了大量的数据和资料；在生活上，你远离家乡和亲人，忍受着独在异乡的孤独和寂寞，让我倍受感动与愧疚……

最后，感谢我的父母和亲人，感谢他们多年来对我的教育和帮助！

杨 博

2012 年 12 月 6 日

于长安大学本部 1 号楼 208