

doi: 10.3969/j.issn.1673-6478.2023.03.021

基于全生命周期山区桥梁碳足迹评价

魏 鑫

(中交公路规划设计院有限公司 北京 100010)

摘要: 人类活动是自然界碳循环中一个重要影响因子,其中公路交通建设占有较大比重,国家“十四五”规划也对碳排放目标进行了重点部署,因此桥梁建设中的低碳策略成了设计中的重要考量。本文首先阐述了碳足迹的分析工具与核算方法,拆解出桥梁碳排放增量与区域碳固化减量两方面分别进行计算,并结合不同设计方案综合量化,分析比较不同方案全生命周期碳足迹特性,最后总结得出相应的碳减排措施。

关键词: 桥梁; 碳足迹; 全生命周期分析; 碳排放; 碳固化

中图分类号: U445

文献标识码: A

文章编号: 1673-6478 (2023) 03-0117-06

Assessment of Bridge Carbon Footprint in Mountainous Areas Based on LCA

WEI Xin

(CCCC Highway Planning and Design Institute Co., Ltd., Beijing 100010, China)

Abstract: Human activity is an important factor in the natural carbon cycle, and highway traffic construction accounts for a large proportion among these activities. Considering that the national "Fourteenth Five Year Plan" has also focused on the deployment of carbon emission target, strategy of lower carbon emission in bridge construction has become an important consideration in bridge design. Firstly, the paper expounded the analysis tools and accounting methods of carbon footprint, which disassembled carbon footprint into bridge carbon emission increment and regional carbon solidification reduction and calculated then separately. Then the life cycle carbon footprint characteristics were compared and comprehensively quantified combined with different design schemes. Finally, the corresponding carbon emission reduction measures were summarized.

Key words: bridge; carbon footprint; life cycle analysis; carbon emissions; carbon solidification

0 引言

“碳足迹”表现为产品或服务在生命周期内相关联的温室气体排放,涉及的气体类型有多种,但结果可统一用二氧化碳(CO₂)当量(CO₂-EQ)表示^[1]。当前碳足迹的核算方法有三种,清单因子法可基于IPCC温室气体清单^[2]对温室效应的不同贡献量值,统计出等效总碳当量;生命周期评价法^[3]是“从始至终”基于过程的分析方法,考虑了对象全生命时长内

碳足迹总和;投入产出分析^[4]是一种“自上而下”的分析方法,梳理了分部分项流程中投入产出之间的关系,以往碳足迹主要针对这三个方面进行研究。针对桥梁碳足迹,各学者们利用不同方法对桥梁结构进行了多方位的分析。张振浩^[5]分析了不同施工方案的桥梁碳排放量差异,张琦峰^[6]阐述了基于投入产出分析的桥梁碳足迹研究进展,张天辰^[7]总结出了基于全生命周期的低碳桥梁评价体系。另一方面,建筑信息模型也被应用于碳足迹研究,M.Dupuis^[8]提出了利用BIM模型进行LCA分析的研究方法,Sakdirat

收稿日期: 2022-09-02

作者简介: 魏鑫(1992-),四川雅安人,硕士,中级工程师,桥梁工程咨询与设计。(360258147@qq.com)

Kaewunruen^[9]则将碳足迹核算融入了 6D 的全生命周期 BIM 模型。

桥梁建设本身是人类对自然环境的改造,桥梁全生命周期中,都对结构空间范围内环境造成了一定影响。针对碳足迹,影响主要包含两大方面,一是桥梁本身建造、运营、拆除过程中的碳排放,二是桥址区域范围内,受影响的自然植被碳固化,二者共同参与了桥梁建筑区域范围内的碳当量变化,本文采用全生命周期分析方法对山区桥梁碳足迹进行计算分析,并对此类桥梁碳足迹特点作出评价。

1 碳足迹评估方法

1.1 基本分析思路

桥梁全生命周期各环节碳排放方式有所不同,计算时需针对各自特点采用不同方法进行拆分计算,后续结合实际案例计算不同方案桥梁建筑区域综合碳排放,并加入无桥状态区域自然碳固化作用进行综合分析对比。

1.2 桥梁碳排放

桥梁碳排放贯穿建筑全生命周期,主要包含建造、运营、拆除三个阶段。本文拟对桥梁生命周期中占比约 90% 的碳足迹进行量化分析^[7]。

1.2.1 建造阶段

桥梁建造阶段,碳排放主要来自施工建材的加工运输与施工机械的能源消耗,桥梁施工建材种类繁多,不同地区生产工艺的不同也造成各地建材碳排放有一定差异,本文着重选取总量较大建材(钢筋、混凝土),基于余海勇^[10]、徐双^[11]、龚志起^[12]、张天辰^[7]的计算结论,对建材碳排放因子 C_J ,进行了标准化。

$$C_J = \sum_i Q_i \times a_{Qi} \quad (1)$$

式中, Q_i 为第*i*类建材用量; a_{Qi} 为第*i*类建材碳排放因子。

表 1 预拌商品混凝土温室气体排放因子 (kg/m³)

Tab.1 Greenhouse gas emission factors of premixed commercial concrete (kg/m³)

混凝土强度	CO ₂ 排放因子	N ₂ O 排放因子	除运输外总碳排放因子
C20	272.93	0.375	201.38
C30	362.98	0.489	306.78
C40	456.43	0.631	391.03
C50	509.23	0.722	510.94

表 2 钢材的温室气体排放因子 (kg/t)

Tab.2 Greenhouse gas emission factors of steel (kg/t)

钢材种类	CO ₂ 排放因子	CH ₄ 排放因子	N ₂ O 排放因子	总排放因子
大型钢材	4 339	225.4	34.8	20 344.4
中小型钢	3 589	187.3	28.9	16 883.7
线材	3 551	185.3	28.6	16 706.3
热轧带钢	3 755	196.3	30.3	17 691.9
冷轧带钢	4 524	233.4	36.3	21 176.4

建材运输与施工机械运作流程中,碳排放来源于机械本身排放的温室气体,以及运行消耗的化石燃料与电能,施工碳排放因子 C_S 可按运输距离与施工台班数进行标准化^[5]。

$$C_S = \sum_i D_i \times a_{Di} + \sum_i M_i \times a_{Mi} \quad (2)$$

式中, D_i 为第*i*类运输工具运距; a_{Di} 为第*i*类运输工具碳排放因子; M_i 为第*i*类施工机具台班数; a_{Mi} 为第*i*类施工机具碳排放因子。

表 3 交通运输温室气体排放因子

Tab.3 Greenhouse gas emission factors of transport

运输类型	运输工具	能耗类型	消耗量	碳排放因子/ kg/(t·km)
铁路运输	内燃机车	柴油 kg/(t·km)	0.002 5	0.007 7
	电力机车	电力 kW·h/(t·km)	0.011 1	0.008 7
公路运输	汽油货车	汽油 L/(t·km)	0.068 9	0.151 7
	柴油货车	柴油 L/(t·km)	0.060 6	0.155 3
水路运输	海轮	柴油 kg/(t·km)	0.004 2	0.015 4
	内陆货轮	柴油 kg/(t·km)	0.008 1	0.029 9

表 4 不同施工机械的碳排放系数

Tab.4 Carbon emission coefficient of different construction machinery

机械类型	碳排放因子/ (kg CO ₂ /kg 柴油)	碳排放因子/ (kg CO ₂ /台班)
以内履带式推土机	54.97	170.407
履带式单斗挖掘机	64.53	200.043
轮胎式装载机	49.03	151.993

综上,桥梁建设阶段碳排放 C_1 计算如下:

$$C_1 = C_J + C_S \quad (3)$$

1.2.2 运营阶段

桥梁运营阶段碳排放因子主要分为桥梁能源消耗、维护加固消耗以及交通流排放。

其中, 能源消耗可依据年消耗能源量进行标准化, 山区桥梁在无路灯与LED标志牌的情况下能源消耗较小, 可忽略此项; 维护加固可依据构件保养措施机具台班与原材料消耗量进行标准化, 依据以往桥梁工程经验, 山区常规桥梁维护加固主要包含裂缝修补、附属设施更换等工序, 此过程中混凝土、钢筋用量占碳排放主导, 可对这两类建材用量与对应机械台班以附加系数 δ 的方式放入建设阶段公式(1)中进行计算; 而针对运营期交通流, 则倚赖区域调研报告中对交通量总和与其车辆组成情况的描述细化为不同车型班次, 结合各车型碳排放量进行标准化。

表5 按车辆类型的温室气体排放因子 (kg/km)

Tab.5 Greenhouse gas emission factors according to vehicle types (kg/km)

车辆类型	CO ₂ 排放因子	CH ₄ 排放因子	N ₂ O 排放因子	总排放因子
轿车	6.68×10^{-2}	7.00×10^{-5}	2.00×10^{-5}	0.07
轻型汽油车	2.09×10^{-1}	6.00×10^{-5}	2.40×10^{-5}	0.22
中型汽油车	2.62×10^{-1}	9.00×10^{-5}	2.40×10^{-5}	0.27
重型汽油车	5.20×10^{-1}	8.00×10^{-5}	5.40×10^{-5}	0.54
轻型柴油车	1.81×10^{-1}	1.00×10^{-5}	1.40×10^{-5}	0.19
中型柴油车	5.33×10^{-1}	1.00×10^{-5}	3.10×10^{-5}	0.54
重型柴油车	7.36×10^{-1}	4.00×10^{-5}	3.10×10^{-5}	0.75
摩托车	1.72×10^2	1.70×10^4	2.00×10^{-6}	0.02

运营阶段碳排放量 C_2 计算如下:

$$C_2 = \sum_i N_i \times a_{Ni} \quad (4)$$

式中, N_i 为第*i*类车辆运营里程, 由*i*类车辆总交通量乘计算范围内路线长度得到; a_{Ni} 为第*i*类车辆运营碳排放因子。

1.2.3 拆除阶段

桥梁拆除阶段主要考虑施工机具与建筑废料两方面。机械台班与施工阶段考虑方式相同, 而建筑废料则按可回收物利用与不可回收物处理进行区分。

鉴于此类碳排放因子标准化数据目前较为缺失, 可回收物利用按建筑原材料回收系数考虑进建造阶段, 于公式(1)中计算原材料生产过程中碳排放量时各材料用量乘以系数(1-n), 公式(2)中运输过程碳排放不受回收系数影响。不可回收物处理则采用刘

燕^[13]总结的公式, 以施工过程中机械碳排放的8.95%对拆除阶段碳排放进行标准化。

表6 部分可回收建材的回收系数

Tab.6 Recovery factor of partially recoverable building materials

建材	回收系数 n
钢材	0.8
混凝土	0.55
钢筋	0.4
沥青	0.75

1.3 植被碳固化

山区公路廊带范围内受影响植被大致分为三种: 天然树林、果园与耕地, 天然树林固碳作用以气候与地区分类^[14], 耕地固碳作用以耕作模式与地区分类^[15], 果园固碳作用以垦殖方法与经营模式分类^[16]。综上, 植被碳固化速率在气候与人为活动双重影响下不同分类变化范围较大, 计算时可取各分类平均值近似按表7进行标准化:

表7 植被碳固化系数 [kg/(hm²·a)]

Tab.7 Carbon fixation coefficient of vegetation [kg/(hm²·a)]

土地类型	1类 固化因子	2类 固化因子	3类 固化因子	4类 固化因子	平均值
森林	1.78×10^3	1.43×10^3	2.84×10^3	2.51×10^3	2.14×10^3
果园	7.44×10^3	8.92×10^3	9.67×10^3	5.95×10^3	8.00×10^3
耕地	0.38×10^3	0.32×10^3	0.40×10^3	0.28×10^3	0.35×10^3

桥梁结构通过植被区域时, 可近似认为桥梁平面映射范围内植物受桥梁结构影响, 固碳作用完全失效, 故桥梁影响范围内植物固碳减少量可按式(5)计算:

$$C_3 = \sum_i A_i \times a_{Ai} \times T \quad (5)$$

式中, A_i 为第*i*类土地面积; a_{Ai} 为第*i*类土地碳固化因子; T 为桥梁设计使用年限。

1.4 碳足迹计算

对桥梁结构生命周期碳排放增量与桥位占地植被碳固化减量进行量化后, 叠加可得桥址区碳排放 C :

$$C = C_1 + C_2 - C_3 \quad (6)$$

2 工程应用

2.1 工程概况

凤凰大桥是四川省广元市昭化区虎青路上跨越嘉陵江支流的一座大桥，平面线形呈缓和曲线接直线，桥面宽 8.5m，设计分两种方案。方案一跨径组合为 $7 \times 20\text{m}$ ，上部结构采用预应力砼小箱梁，桥墩采用柱式墩，桥台采用重力式桥台，台后接路基挡墙；方案二跨径组合为 $11 \times 20\text{m}$ ，上部结构采用预应力砼小箱梁，桥墩采用柱式墩，桥台采用轻型桥

台。桥址区穿越耕地、林地与少量果园，现结合地方交通规划与碳排放估算公式对两种方案碳足迹进行评估。

2.2 各阶段碳排放

桥梁设计阶段对两个方案进行比选，方案一跨长 140m，计入桥头两侧引道共 220m，方案二跨长 220m，两方案采用全生命周期碳足迹计算公式，基于施工图深度预算清单数据，进行桥址区整体碳足迹分析，利用前述表格和公式得出各阶段碳排放统计如表 8 所示（前表中未涉及项采用 GHG Protocol^[17]缺省值）：

表 8 桥梁结构碳排放计算表
Tab.8 Carbon emission calculation of bridge structure

项目	80m 路基	220m 桥	140m 桥	运距/km	运距碳排放因子	建材碳排放因子	回收系数	桥方案 1 碳排放/kg	桥方案 2 碳排放/kg
大型钢材	1.7	19.7	17.2	115.0	0.2	20 344.4	0.8	76 974.2	80 318.6
小型钢材	4.8	21.3	17.7	115.0	0.2	16 883.7	0.8	75 694.2	71 919.7
线钢材	62.6	32.1	20.7	115.0	0.2	16 706.3	0.8	273 390.1	107 328.1
热轧带钢	5.1	451.2	394.8	115.0	0.2	17 691.9	0.4	4 247 343.2	4 794 535.9
冷轧带钢	0.0	18.2	10.9	115.0	0.2	21 176.4	0.4	139 191.4	231 795.5
石油沥青	10.9	11.4	7.4	150.0	0.2	189.0	0.8	954.5	601.9
改性沥青	9.3	8.2	5.3	150.0	0.2	323.0	0.8	1 247.1	708.9
乳化沥青	5.4	0.0	0.0	150.0	0.2	142.0	0.8	217.8	0.0
重油	3 019.6	2 978.6	1 933.1	—	—	2.6	—	12 790.3	7 811.2
汽油	105.6	0.0	0.0	—	—	3.2	—	328.2	0.0
柴油	10 243.2	8 947.8	10 378.3	—	—	3.3	—	66 187.4	29 080.4
电	3 766.7	183 155.1	140 691.7	—	—	0.7	—	93 836.7	119 050.8
砂	933.5	2 427.3	2 669.9	77.5	0.2	—	0.4	27 052.1	18 341.1
片石碎石	4 584.4	3 834.5	4 606.6	40.0	0.2	—	—	54 458.2	23 006.8
路面碎石	289.4	282.9	183.6	92.0	0.2	—	—	6 427.5	3 903.4
水泥	382.4	1 425.3	1 438.5	150.0	0.2	—	—	40 754.5	32 069.1
推土机	2.4	11.7	12.3	—	—	793.2	—	11 643.0	9 289.6
挖掘机	11.5	5.5	8.9	—	—	679.8	—	13 697.8	3 725.1
装载机	15.7	12.9	15.5	—	—	339.9	—	10 470.0	4 395.4
压路机	11.1	3.2	2.1	—	—	495.7	—	6 407.7	1 596.4
凿岩机	28.0	0.0	0.0	—	—	708.2	—	19 314.9	0.0
摊铺机	1.2	0.0	0.0	—	—	793.2	—	908.3	0.0
搅拌机	31.5	38.2	42.8	—	—	6.8	—	499.4	259.4
载货汽车	63.9	20.3	27.9	—	—	617.5	—	55 681.9	12 509.0
洒水车	2.3	0.1	0.0	—	—	849.8	—	1 934.4	56.1
起重机	20.6	79.9	87.5	—	—	147.3	—	15 852.4	11 772.5
卷扬机	0.0	1 429.0	1 062.0	—	—	56.7	—	60 167.9	80 960.1
空压机	36.3	14.3	17.2	—	—	424.9	—	22 354.0	6 089.0

在路线平面线形不变的情况下, 两方案运营期间车流量一致, 依据工程研究报告中交通量预测结果, 此项结合公式(4)计算得到表9:

表9 交通流碳排放计算表

Tab.9 Carbon emission calculation of traffic flow

年份	轻型		重型		交通量/ (pcu · d ⁻¹)	碳排放/ (kg · d ⁻¹)	碳排放 (kg · a ⁻¹)	
	轿车 占比/%	汽油 车占 比/%	柴油 车占 比/%	汽油 车占 比/%				
2024	62	8	13	11	6	1 598.00	66.58	24 301.26
2030	68	7	11	8	6	2 991.00	112.29	40 987.22
2038	70	6	11	8	5	4 943.00	178.00	64 970.32
2043	70	6	11	8	5	5 947.00	217.57	79 414.63

由表中数据可知, 20年内交通流碳排放约为1 060t, 鉴于往后交通流若继续膨胀有导致路线承运能力不足而需改建的可能, 后80年碳排放按2043年标准进行计算, 可得结构寿命周期内碳排放约为7 413t。

2.3 植被碳固

桥址区植被类型复杂, 包含耕地、林地和少许果园, 两方案依据桥长与桥台型式的区别, 占地量有所不同, 结合公式(5)计算植被碳固如表10所示:

表10 碳固定计算表

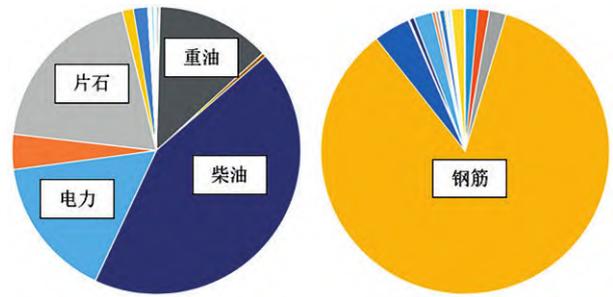
Tab.10 Carbon fixation calculation

项目	方案1 占地/hm ²	方案2 占地/hm ²	碳固定 因子	设计 年限	方案1 碳固/kg	方案2 碳固/kg
森林占地	0.215	0.112	2 140	100	46 095.60	24 010.80
耕地占地	0.090	0.047	8 000	100	71 800.00	37 400.00
果园占地	0.054	0.028	350	100	1 884.75	981.75

2.4 碳足迹分析

方案一结构碳排放5 336t, 方案二结构碳排放5 651t, 方案一降低碳固120t, 方案二降低碳固62t, 两方案交通量碳排放7 413t。综合评估方案一碳排放较方案二降低258t。

以上结果可知, 仅从碳排放总量考虑方案一更优, 但路基高填方情况下占地较多, 对路线周边环境和植被生态造成较大破坏, 宜对表格参数进行综合评估。



(a) 路基段碳排放组成 (b) 桥梁段碳排放组成

图1 工程碳排放组成

Fig.1 Composition of engineering carbon emission

首先分析路基段与桥梁段, 从碳排放饼状图可知, 路基段碳排放主要来源为重油、柴油、电力、片石, 而桥梁段绝大部分碳排放则由钢筋产出, 且主要增量体现在建材生产与拆除回收阶段, 具备较大优化空间。经计算, 调整钢筋回收利用率至0.63或改进工艺降低19%钢筋加工碳排放, 两方案碳足迹即可持平。

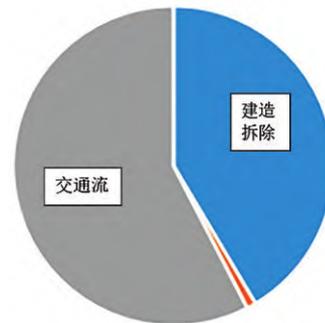


图2 生命周期碳排放组成

Fig.2 Composition of life cycle carbon emission

分析桥梁结构生命周期中各项碳足迹占比可知, 交通流碳排放占有较大份额, 且此项数值受结构后期运营策略影响较大, 故可采用周边种植强固碳植被、优化区间车型等多种措施降低碳排放, 改善桥梁碳生态。

响应“绿色交通”倡导, 对两方案安全性、美观度、经济性以及碳足迹进行综合评估后, 推荐该工点采用改进后方案二实施。

3 结论

(1) 常规公路桥梁占地碳固化约占建造与拆除阶段碳排放的1.1%~2.2%, 占比偏低。但公路桥梁结构生命周期中交通流碳排放量较大, 可利用周边土地种植固碳能力较强的植被, 增大区域植被固碳量。

(2) 路基碳排放主要集中于建材运输与施工机械方面, 常规预制拼装桥梁结构碳排放则主要受钢筋工艺与用量影响, 建筑结构碳足迹受原材料类别与工艺影响较大, 方案设计时应着重考虑。

(3) 公路建设阶段桥梁与路基碳排放组成内容基本相同, 但侧重点相差较大, 桥梁方案评估比选时, 优化桥梁构造与建造工艺减少钢筋相关碳排放可有效降低工程碳排放总量。

参考文献:

- [1] MATTHEWS H S, HENDRICKSON C T, WEBER C L. The importance of carbon foot-print estimation boundaries[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(16): 5839-5842
- [2] IPCC. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013
- [3] SCHMIDT H. Carbon footprinting, labeling and life cycle assessment [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2009, 14(1): 6-9.
- [4] LEONTIEF W W. Quantitative input and output relations in the economic systems of the United States [J]. *The Review of Economic Statistics*, 1936, 18(3): 105-125.
- [5] 张振浩, 谭荣平, 曾意, 等. 不同桥梁施工方案的碳排放差异分析[J]. *交通科学与工程*, 2019(1): 38-43.
- [6] 张琦峰, 方恺, 徐明, 等. 基于投入产出分析的碳足迹研究进展[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(4): 696-708.
- [7] 张天辰. 基于全生命周期的低碳桥梁评价体系研究[D]. 徐州: 中国矿业大学.
- [8] Dupuis M, April A, Lesage P, et al. Method to Enable LCA Analysis through Each Level of Development of a BIM Model[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 196: 857-863.
- [9] Kaewunruen S, Sresakoolchai J, Zhou Z. Sustainability-Based Lifecycle Management for Bridge Infrastructure Using 6D BIM[J]. *Sustainability*, 2020, 12(6): 2436.
- [10] 俞海勇, 王琼, 张贺, 等. 基于全寿命周期的预拌混凝土碳排放计算模型研究[J]. *粉煤灰*, 2011, 23(6): 42-46.
- [11] 徐双. 不同结构材料的桥梁生命周期碳排放研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- [12] 龚志起. 建筑材料生命周期中物化环境状况的定量评价研究[D]. 北京: 清华大学, 2004.
- [13] 刘燕. 基于全生命周期的建筑碳排放评价模型[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- [14] 吴庆标, 王效科, 段晓男, 等. 中国森林生态系统植被固碳现状和潜力[J]. *生态学报*, 2008, 28(2): 517-524.
- [15] 韩冰, 王效科, 逯非, 等. 中国农田土壤生态系统固碳现状和潜力[J]. *生态学报*, 2008, 28(2): 612-619.
- [16] 王义祥. 不同经营措施下果园土壤有机碳库特性及固碳潜力研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2011.
- [17] 宋然平, 杨抒, 孙森. 能源消耗引起的温室气体排放计算工具指南[M]. 世界资源研究所, 2012.
- [18] JTG/T 3833—2018. 公路工程机械台班费用定额[S].