

面向机电产品绿色设计与评价协同的生命周期 评价参数计算方法

闫萌 李涛 杨晨 王明宇 杨东东

大连理工大学机械工程学院,大连,116024

摘要:为了协同分析机电产品绿色设计与评价过程,采用产品设计域、生命周期活动域和环境影响评价域多域关联的建模方法建立绿色设计与生命周期阶段之间的关联映射,通过生命周期评价参数计算方法,将生命周期活动域与环境影响评价域相关联。开发生命周期评价计算工具,将生命周期评价参数计算方法应用于产品绿色设计全生命周期阶段,当绿色设计信息改变时,只需在计算工具中调整相应参数就可以实时地得到设计信息更改之后的环境影响,从而帮助设计人员重新对产品进行绿色设计。以CWT3300D-165型风力发电机作为典型机电产品进行应用验证,建立产品结构树,计算产品整机、部件、零件的环境影响。由计算结果可知,地基、机舱这两个一级零部件对环境的影响最严重,需在产品设计阶段着重考虑绿色性,改进绿色设计方案。

关键词:生命周期评价;多域关联;FSMPT模型;参数化计算

中图分类号:TH122

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2023.12.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Calculation Method of LCA Parameters for Green Design and Assessment Collaboration of Electromechanical Products

YAN Meng LI Tao YANG Chen WANG Mingyu YANG Dongdong

School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning, 116024

Abstract: In order to collaboratively analyze the green design and assessment processes of electromechanical products, the correlation mapping between green design and life cycle stages was established using the modeling method of multi-domain correlation of product design domain, life cycle activity domain and environmental impact assessment domain. The life cycle activity domain was correlated with the environmental impact assessment domain through the calculation method of life cycle assessment parameters. The LCA calculation tool was developed, and the calculation method of LCA parameters was applied to the whole life cycle stage of product green design. When the green design information was changed, just adjusting the corresponding parameters in the calculation tool, the environmental impact could be obtained after the design information was changed in real time, so as to help designers to re-design the product to green design. CWT3300D-165 wind turbine was used as a typical electromechanical product for application verification, and a product structure tree was established to calculate the environmental impact of the whole machine, components and parts of the product. From the calculation results, it may be seen that the two first-level components, foundation and nacelle, have the most serious environmental impact and need to focus on greenness in the product design stages and improve the green design scheme.

Key words: life cycle assessment(LCA); multi-domain association; function-structure-material-process-transport(FSMPT) model; parametric calculation

0 引言

绿色设计可从源头上解决资源、能源的过度消耗和环境污染问题,是落实绿色制造战略的重要途径^[1],但现有绿色设计存在清单数据异构、设

计方法多元、设计流程分散、缺乏系统性平台工具支持等问题,阻碍了绿色设计在企业中的应用。目前,以网络化、智能化、集成化为特征的绿色设计工具已成为绿色设计研究的重点和应用的急需。

很多专家在产品设计领域进行了深入研究,GERO等^[2]首次提出功能-行为-结构(function-

收稿日期:2022-09-15

基金项目:国家重点研发计划(2020YFB1711600)

behavior-structure, FBS)模型,该模型可针对功能需求生成相应的结构方案。FBS 模型是初代模型,为了适应复杂的产品设计需求和环境需求,许多改良的绿色设计模型应运而生,如功能-环境-行为-结构设计模型^[3]、功能流模型^[4]、功能分解模型^[5]、功能-行为-状态模型^[6]。付岩等^[7]提出了基于功能-结构-材料-工艺(function-structure-material-process, FSMP)模型的机电产品绿色设计,综合考虑产品材料、工艺、使用、回收阶段的关联关系进行集成表达,结合生命周期评价(life cycle assessment, LCA)完成设计空间节点的环境影响评价,在产品绿色设计方案评价理论方面取得了重大进展,对绿色设计评价具有重要的指导作用。随后,又有许多学者提出设计-知识理论模型,构建了设计与知识的映射空间,从而生成新概念、新知识乃至有实用价值的新功能^[8]。公理化设计理论为需求和功能之间的映射提供指导^[9]。邢璐等^[10]提出一种集成面向环境的设计(environment-based design, EBD)和 TRIZ 理论的机电系统绿色设计方法,建立“需求-环境-冲突-原模型-解决方案”的设计逻辑,利用面向环境的设计方法识别设计需求与环境约束之间的矛盾,迭代分析需求与环境间的关联关系,从而解耦复杂抽象的专业问题。屠立等^[11]提出了基于面向对象技术的知识模板概念,用统一建模语言建立了复杂产品设计阶段的功能-行为-结构模型。杨应虎等^[12]提出了一种基于 NX 软件提供的机电一体化概念设计模块(mechatronics concept designer, MCD)的协同设计方法,考虑产品绿色性进行功能设计。上述基于改进的 FBS 模型研究可以支持产品绿色设计,但绿色设计涉及产品生命周期多个阶段,将原材料、工艺、使用、回收、运输等信息均考虑在内的协同设计与评价的研究相对较少。

信息技术的发展为生命周期评价软件的研究提供了条件。杨建新等^[13]提出了我国产品生命周期影响评价所需的标准化基准以及确定权重的方法。黄娜等^[14]提出了一种系统化评估和控制 LCA 数据质量的方法(CLCD-Q 方法),通过 LCA 实例对清单数据的不确定性进行评估。CIROTH^[15]开发了 open LCA;ONG 等^[16]开发了一种基于半量化原理的快速 LCA 工具,可以迅速对含有较多部件的机电产品进行 LCA 分析;SINGH 等^[17]开发了 Eco-LCA,可以对生态资源进行定量评价。除了上述软件,国外还有几款知名的商用 LCA 软件,如 Simapro, GaBi 和

TEAM。这些软件功能大体一致,但在方法、速度、适用性上有些许不同,并且这些计算软件通常用在产品服役后,而非用于产品绿色设计阶段,同时对输入清单、参数要求严格。为解决上述问题,笔者开发了一款产品 LCA 参数计算工具,通过有限的清单数据,将产品各阶段生命周期信息以参数的形式输入,经过计算,获得环境影响评价结果。

LCA 需要应用在产品生命周期的所有阶段,从而对产品环境影响进行全面的评价,提高产品绿色性能。除此之外,LCA 通常被用于产品服役后评估,而非用于改进产品绿色设计,因此无法提升产品的环境性能。本文的目标是将 LCA 方法应用于机电产品全生命周期阶段,协同分析产品设计与评价过程,并开发 LCA 参数计算工具。设计人员将产品生命周期信息以参数形式输入,即可对其进行完整的评估。此外,该工具允许随着设计的不断改进,输入改进之后的参数信息,以快速准确地获得环境影响结果。

本文提出了设计与评价协同模型,对产品设计信息进行生命周期评价,从而得到产品各零部件环境影响结果,回溯产品关键设计参数,提升产品绿色性。基于产品绿色设计模型-FSMPT(function-structure-material-process-transport)模型和产品生命周期阶段之间的关联关系建立生命周期映射矩阵(life cycle mapping matrix, LC-MM^[18]),再结合产品结构树对零件、部件、整机进行 LCA 计算,最后得到环境影响结果。

1 多域关联模型整体框架

由于机电产品设计信息存在着大量不确定性、跨生命周期阶段性,易在产品生命周期的不同阶段间形成信息孤岛,因此机电产品生命周期设计信息缺乏有效的集成以及形式化表达。传统绿色设计模型的数据关联性不强,设计与评价缺乏有效的关联,设计与评价协同运行机制的研究依然处于探索阶段。针对上述问题,本文建立了产品多域关联的绿色设计与评价协同模型,基于机电产品生命周期的物质流、能量流、信息流分析,构建机电产品环境影响评价指标体系,提出了产品多域关联的绿色设计与评价协同建模技术,支持产品设计与评价集成管理。通过建立绿色设计与生命周期阶段关联映射模型,将产品设计域与生命周期活动域相关联;通过参数 LCA 计算,将生命周期活动域与环境影响评价域相关联。

图 1 展示了多域关联模型,产品设计域包括

产品的功能、结构、材料、工艺、运输五部分；生命周期活动域包括产品的五个生命周期阶段的活动信息，通过绿色设计模型(FSMPT 模型)和生命周期活动信息建立生命周期映射矩阵(LCMM)；环境影响评价域包括六类环境影响指标和生命周期评价(LCA)。

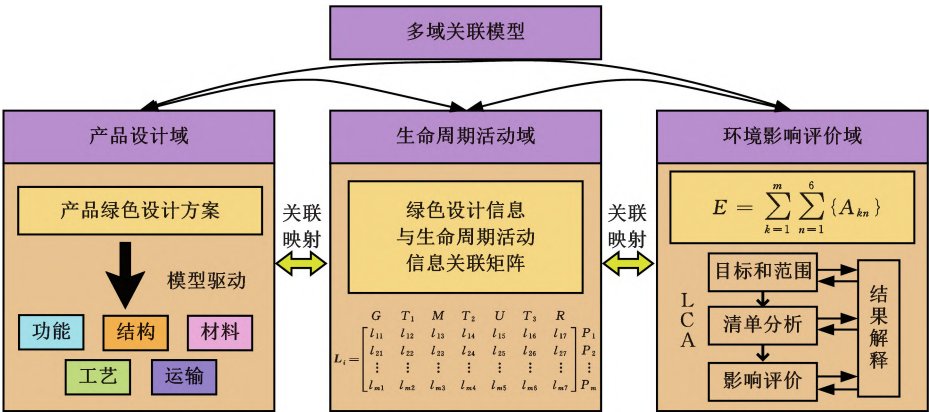


图 1 多域关联模型

Fig.1 A figure outlining the components of multi-domain association model

2 产品设计域与生命周期活动域关联模型

2.1 产品结构树模型

机电产品是由其零部件组成的。以树的形式表示产品的零部件关系可以将复杂产品自顶向下地分解为部件和零件，产品结构树如图 2 所示。产品结构树组成如下：

- (1)根节点。根节点指结构树中最顶端的节点，根节点只有一个。产品结构树中产品为根节点。
- (2)子节点。除根节点之外，自身下面还连接节点的部件节点为子节点。
- (3)叶子节点。叶子节点指结构树中最底端的节点，该节点下面没有子节点。零件节点为叶子节点。

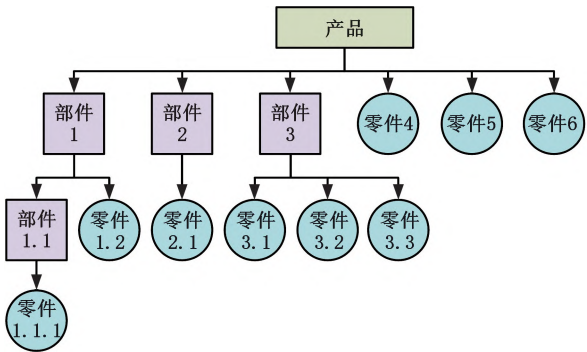


图 2 产品结构树模型

Fig.2 Product structure tree model

2.2 FSMPT 模型

为了更加科学、全面地进行产品生命周期评价，笔者在付岩等^[7]提出的 FSMP 模型基础上添加运输阶段，建立了包括功能、结构、材料、工艺、运输在内的产品绿色设计模型，即 FSMPT 模型，该模型中的功能(F)与结构(S)之间的映射是参

考 FBS 模型中功能、行为、结构三者的关联关系建立起来的。为了解决产品绿色设计与生命周期阶段集成度低、缺乏有效关联的问题，将 FSMPT 模型与生命周期阶段相关联。产品生命周期阶段包括原材料获取阶段、制造阶段、使用阶段、回收阶段和运输阶段。

FSMPT 模型与产品生命周期阶段的关联关系如图 3 所示。在 FSMPT 模型中，功能表示产品具有的功能，与使用阶段相关联；结构表示为实现某种特定功能所具有的特定结构，与回收阶段相关联；材料表示产品生产所需的原材料，与原材料获取阶段相关联；工艺表示产品生产制造方式，与制造阶段相关联；运输描述产品地理位置移动的过程信息，表示产品零部件的运输以及零部件原材料的运输，与运输阶段相关联。

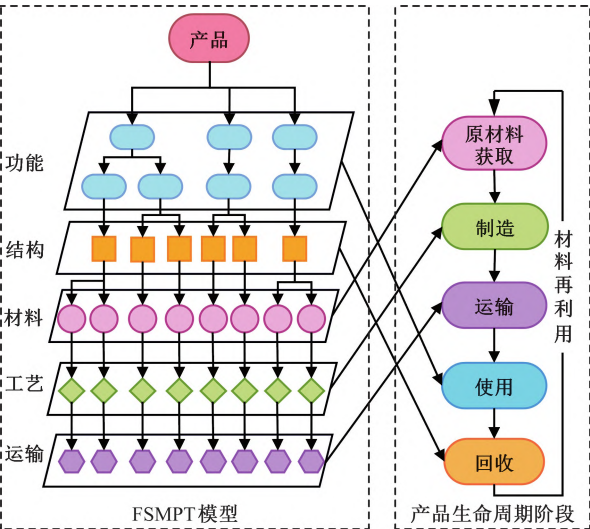


图 3 FSMPT 模型与生命周期阶段的关联映射

Fig.3 Association mapping between FSMPT model and life cycle stages

2.3 基于 FSMPT 模型的生命周期映射矩阵

基于 FSMPT 模型建立生命周期映射矩阵 L_i 如下:

$$L_i = \begin{bmatrix} G & T_1 & M & T_2 & U & T_3 & R \\ l_{11} & l_{12} & l_{13} & l_{14} & l_{15} & l_{16} & l_{17} \\ l_{21} & l_{22} & l_{23} & l_{24} & l_{25} & l_{26} & l_{27} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ l_{m1} & l_{m2} & l_{m3} & l_{m4} & l_{m5} & l_{m6} & l_{m7} \end{bmatrix} \begin{matrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_m \end{matrix} \quad (1)$$

当 i 分别为零件节点、部件节点、产品节点时, L_i 分别对应不同节点的生命周期映射矩阵。 l_{ij} 指在第 i 个节点(零件、部件、产品节点)的第 j 个生命周期阶段(FSMPT 模型关联的 5 个生命周期阶段)的生命周期信息。矩阵的行对应组成该节点的子零件的生命周期阶段信息,称为设计单元 P ;矩阵的列分别对应原材料获取阶段、运输阶段 1、制造阶段、运输阶段 2、使用阶段、运输阶段 3、回收处理阶段,这里考虑不同生命周期阶段的运输方式可能会有所差异,故将运输阶段划分为三个子阶段。式(1)中, G 是指该节点的材料信息,以该节点质量(kg)填入 l_{i1} ($i=1,2,\dots,m$); T_1 、 T_2 、 T_3 分别指从原材料采集到制造阶段的运输情况、从制造阶段到使用阶段的运输情况、从使用阶段到回收处理阶段的运输情况,以该节点单位运距(kg·km)填入 l_{i2} 、 l_{i4} 、 l_{i6} ; M 指该节点的加工工艺,以该节点加工工艺(字符型)填入 l_{i3} ; U 指在使用阶段的能源消耗,以该节点在使用阶段能耗(标准煤 kg)填入 l_{i5} ; R 指该节点的回收率,以该节点回收率填入 l_{i7} 。在式(1)中,通过横向聚合矩阵元素 l_{ij} 可以得到各个节点的清单数据:

$$I_i = \sum_{j=1}^7 l_{ij} \quad (2)$$

通过纵向聚合可以得到各个阶段的清单数据:

$$I_j = \sum_{i=1}^m l_{ij} \quad j=1,2,\dots,7 \quad (3)$$

产品整个生命周期的清单数据可以通过各个单元的累加得到:

$$I = \sum_{i=1}^m I_i \quad (4)$$

利用式(1),将产品绿色设计信息与产品生命周期阶段建立关联关系,从而为下一阶段的环境影响评价工作提供支撑。LCA 是评估产品在其整个生命周期内所造成环境影响的一个有效的方案决策支持工具^[19]。LCA 具体流程包括:目标和范围的定义、生命周期清单分析(life cycle inventory, LCI)、生命周期影响评价(life cycle impact assessment, LCIA)、结果解释(interpretation)^[20]。

• 1456 •

3 生命周期活动域与环境影响评价域关联模型

3.1 基于产品结构树的生命周期映射矩阵

按照产品结构树中的零件、部件、产品节点,建立各节点生命周期映射矩阵如下:

$$L_{\text{par}}(P_{\text{par}}) = \begin{bmatrix} G & T_1 & M & T_2 & U & T_3 & R \\ l_{11} & l_{12} & l_{13} & l_{14} & 0 & l_{16} & l_{17} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式(5)矩阵的维数为 1×7 , P_{par} 为零件节点的设计单元,部件节点由其零件子节点组合而成, P_i 为组成该部件的子节点, m 为组成该部件的子节点个数。部件节点此时还未组装为产品,故使用阶段 $l_{i5} = 0$,部件节点生命周期映射矩阵如下:

$$L_{\text{com}} = \begin{bmatrix} G & T_1 & M & T_2 & U & T_3 & R \\ l_{11} & l_{12} & l_{13} & l_{14} & 0 & l_{16} & l_{17} \\ l_{21} & l_{22} & l_{23} & l_{24} & 0 & l_{26} & l_{27} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ l_{m1} & l_{m2} & l_{m3} & l_{m4} & 0 & l_{m6} & l_{m7} \end{bmatrix} \begin{matrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_m \end{matrix} \quad (6)$$

式(6)矩阵的维数为 $m \times 7$ 。根据式(3)对式(6)矩阵进行纵向聚合,得到维数为 7×1 的部件节点生命周期映射矩阵如下:

$$L_{\text{com}}(P_{\text{com}}) = [l_{s1} \quad l_{s2} \quad l_{s3} \quad l_{s4} \quad 0 \quad l_{s6} \quad l_{s7}] \quad (7)$$

其中, P_{com} 表示部件节点的设计单元, l_{sj} ($j=1,2,\dots,7$) 表示将式(6)矩阵中元素纵向聚合之后的结果。产品节点是产品结构树的最终节点,根据式(4)将所有的零部件信息在该节点聚合,同时该节点也作为最终产品投入使用,在该节点需计算使用阶段,产品节点生命周期映射矩阵如下:

$$L_{\text{prd}} = \begin{bmatrix} G & T_1 & M & T_2 & U & T_3 & R \\ l_{11} & l_{12} & l_{13} & l_{14} & 0 & l_{16} & l_{17} \\ l_{21} & l_{22} & l_{23} & l_{24} & 0 & l_{26} & l_{27} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ l_{m1} & l_{m2} & l_{m3} & l_{m4} & 0 & l_{m6} & l_{m7} \end{bmatrix} \begin{matrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_m \end{matrix} \quad (8)$$

式(8)矩阵的维数为 $m \times 7$,其中 P_i ($i=1,2,\dots,m$) 是组成该产品的子部件, m 为组成该产品的子节点个数。根据式(3)对式(8)矩阵进行纵向聚合,得到维数为 7×1 的产品节点生命周期映射矩阵如下:

$$L_{\text{prd}}(P_{\text{prd}}) = [l_{p1} \quad l_{p2} \quad l_{p3} \quad l_{p4} \quad l_{p5} \quad l_{p6} \quad l_{p7}] \quad (9)$$

其中, P_{prd} 表示产品节点的设计单元, l_{pj} ($j=1,2,\dots,7$) 表示将式(8)矩阵中元素纵向聚合之后的结果。

3.2 参数化 LCA 计算方法

3.2.1 清单分析

以下二元数组展示了各节点的清单信息 Q_i :

$$Q_i = \begin{cases} I_{in}(S_a, V_a) \\ O_{out}(S_b, V_b) \end{cases} \quad (10)$$

当*i* 分别为零件节点、部件节点、产品节点时,*Q_i* 分别对应不同节点的清单信息。*Q_i* 中 *I_{in}* 表示每个节点的初级能源消耗的种类 *S_a* 和数值 *V_a* (以煤、石油、天然气作为清单物质, 单位为 kg); *O_{out}* 表示环境影响排放的种类 *S_b* 和数值 *V_b* (以 CO、CO₂、SO₂、NO_x、CH₄、H₂S、HCL、COD、NH₃、CFCs 作为清单物质, 单位为 kg)。*I_{in}* 和 *O_{out}* 二者共同构成了该节点整个生命周期过程的清单。

3.2.2 环境影响评价

结合 ISO、SETAC 以及美国环保署提供的 LCIA 框架模型, 建立典型的“分类、特征化、量化”三步走的生命周期环境影响评价模型如图 4 所示。

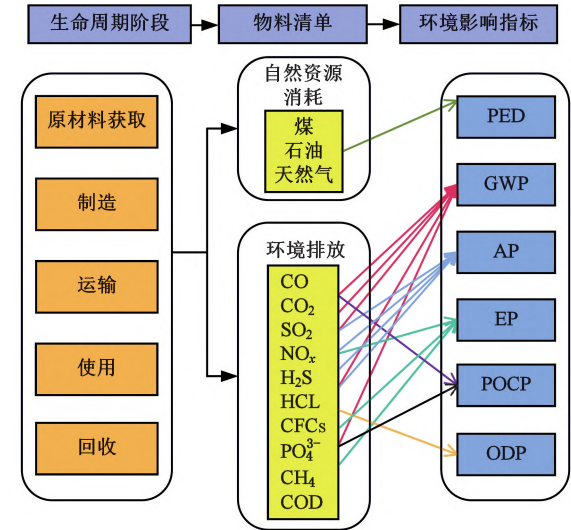


图 4 环境影响评价模型

Fig.4 Life cycle impact assessment model

生命周期影响评价方法步骤如下：

(1) 指标选择。基于中点法 (midpoints), 着眼于环境影响, 采用 EDIP2003 方法^[21] 解释 LCI 数据对环境问题的贡献度。选择的环境影响指标为初级能源消耗 (PED)、全球变暖 (GWP)、酸化 (AP)、富营养化 (EP)、光化学烟雾 (POCP)、臭氧层破坏 (ODP)。本文采用的指标选择方法为 EDIP2003 方法, 为了方法具有通用性, 决策者也可以根据需要进行其他的环境影响指标作为其他案例进行研究, 而不对本文所提出的 LCA 参数计算方法进行更改。

(2) 分类。将不同类型的清单物质划分到不同的环境影响指标中, 分类方法以及标准参考物质如表 1 所示。

表 1 特征化、标准化、加权因子汇总^[19]

Tab.1 Summary of characterization, standardization, and weighting factors^[19]

影响物质	清单物质	特征化因子	参考物质	标准化因子	权重因子
PED	煤	0.714	标准煤	828	3.3
	石油	1.429			
	天然气	1.693			
GWP	CO	2	CO ₂	9700	21.6
	CO ₂	1			
	CH ₄	25			
	NO _x	320			
	CFC ₁₁	4000			
	CFC ₁₂	8500			
AP	SO ₂	1	SO ₂	36	0.05
	CO _x	0.7			
	H ₂ S	1.88			
	HCL	0.88			
EP	NO _x	1.35	PO ₄ ³⁻	11.6	3
	NH ₃	3.641			
	PO ₄ ³⁻	0.23			
POCP	CO	0.03	C ₂ H ₄	0.65	0.2
	C ₂ H ₄	1			
	CH ₄	0.007			
ODP	CFC ₁₁	1	CFC ₁₁	0.2	9.1
	CFC ₁₂	0.82			
	CFC ₁₃	0.9			

(3) 特征化。清单数据的特征化就是计算环境影响潜值, 是量化生命周期资源消耗、环境排放所产生的环境影响潜在贡献的过程, 利用特征化因子对归属于各个环境影响指标的清单物质进行加和, 计算公式如下：

$$K(q) = \sum K(q)_p = \sum C(q)_p (I_{in} + O_{out}) \quad (11)$$

式中, *K(q)* 为第 *q* 种环境影响类型的环境影响潜值; *K(q)_p* 为第 *p* 种排放物或消耗的资源对所属的第 *q* 种环境影响类型的贡献值; *C(q)_p* 为第 *p* 种排放物或消耗的资源对所属的第 *q* 种环境影响类型的特征化因子, 详见表 1 特征化因子。

(4) 标准化。对所选择的各个环境影响指标进行比较, 量化各环境影响类型对综合环境影响的贡献率, 采用标准人当量 (每人每年平均环境影响潜值) 作为标准化基准, 计算公式如下：

$$N(q) = \frac{K(q)}{H(q)_y} \quad (12)$$

式中, *y* 为基准年; *H(q)_y* 为在基准年指定区域的第 *q* 种环境影响的人均环境影响潜值, 即标准化因子, 如表 1 所示; *N(q)* 为在基准年指定区域的第 *q* 种环境影响的总环境影响潜值。

(5) 加权评估。为了确定综合环境影响大小, 需给予每一个环境影响指标相应的权重。权重利用“目标距离法” (当前某项环境水平与目标

水平的距离商) 来表征其重要性。权重因子如表1所示, 利用下式得到综合环境影响:

$$E = \sum N(q)W(q) \quad (13)$$

式中, E 为生命周期综合环境影响; $W(q)$ 为第 q 种环境影响类型的权重。

3.2.3 结果解释

产品结构树上的节点类型分为零件节点、部件节点以及产品节点。选择各节点生命周期过程中的原材料获取阶段、制造阶段、使用阶段、回收处理阶段、运输阶段, 环境影响指标选择 PED、GWP、AP、EP、POCP、ODP, 计算各节点环境影响。

节点 i 的最终计算结果三元组 W_i 由节点的清单信息 Q_i (包括 I_{in} 和 O_{out}) 和环境影响指标 D_{res} 共同组成:

$$W_i = \{I_{in}, O_{out}, D_{res}\} \quad (14)$$

$$I_{in} = \{(煤, V_{a1}), (石油, V_{a2}), (天然气, V_{a3})\}$$

$$O_{out} = \{(CO, V_{b1}), (CO_2, V_{b2}), (SO_2, V_{b3}), (NO_x, V_{b4}),$$

$$(CH_4, V_{b5}), (H_2S, V_{b6}), (HCL, V_{b7}), (COD, V_{b8}),$$

$$(NH_3, V_{b9}), (CFC_{11}, V_{b10}), (CFC_{12}, V_{b11}), (CFC_{13}, V_{b12})\}$$

$$D_{res} = \{(PED, V_{c1}), (GWP, V_{c2}), (AP, V_{c3}), (EP, V_{c4}),$$

$$(POCP, V_{c5}), (ODP, V_{c6})\}$$

其中, D_{res} 表示该节点各项环境影响指标的种类 S_c 和计算结果 V_c , V_{cr} ($r=1, 2, \dots, 6$) 表示 6 类环境影响指标的环境影响潜值。将数据清单 Q_i 中 I_{in} 和 O_{out} 根据式(11)~式(13)进行特征化、标准化、加权计算得到三元组 W_i 中的环境影响指标 D_{res} , 然后将计算方法集成到 LCA 参数计算工具上。

4 软件实现及案例分析

4.1 计算工具开发和运行环境

LCA 计算工具选择了最流行的开发环境和工具, 便于使用和维护。其中, 工具开发平台为 Windows 10 操作系统; 工具开发语言为 Java、JavaScript; 工具开发工具为 IDEA 2019.3、Powder Designer 15.0、WebStorm 2020; 工具开发数据库为 MySQL 5.5、Redis 3.2; 工具开发框架为 Spring Boot、Bootstrap; 工具运行平台为 Linux 7.6 操作系统; 工具运行服务器为阿里云轻量型服务器; Java 运行环境为 JDK1.8; 工具运行数据库为 MySQL 5.5、Redis 3.2; 工具反向代理为 OpenResty。

4.2 风力发电机产品结构树

以 CWT3300D-165 型风力发电机作为典型机电产品构建产品结构树, 如图 5 所示。部件轮毂、部件机舱、部件塔架、零件叶片、零件变流器、零件地基构成 1 级零部件, 1 级零部件再往下分

为 2 级零部件, 变桨系统为 2 级零部件, 其标号为 1.1, 2 级零部件之下还有 3 级、4 级、5 级零部件, 3 级零部件标号为 1.1.1, 所有零部件共同组成完整的产品。根据中车山东风电有限公司提供的 CWT3300D-165 型风力发电机物料清单 (bill of material, BOM) 进行筛选、整合可得到进行 LCA 计算的物料清单。

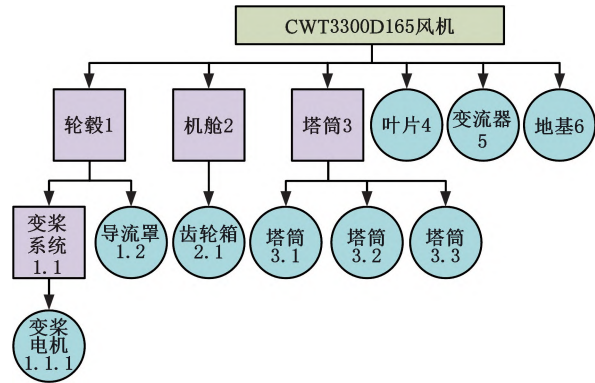


图5 CWT3300D-165 型号风力发电机结构树

Fig.5 CWT3300D-165 wind turbine structure tree

将 CWT3300D-165 型号风力发电机 BOM 导入计算工具, 产品各级零部件结构如图 6 所示, 这里只展示产品、1 级零部件和 2 级零部件。

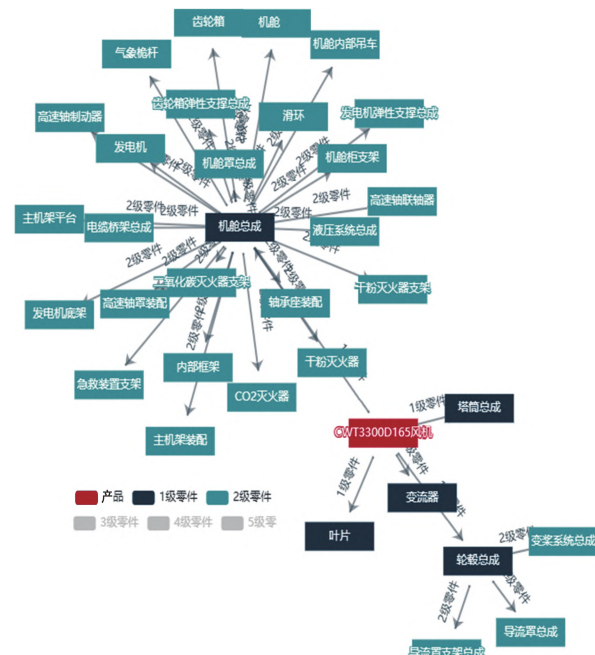


图6 计算工具展示产品各级零部件结构

Fig.6 A figure displaying the structure of the product on the LCA calculation tool

本研究的功能单元为: 一台风力发电机每天工作 18 h, 服役 20 年。系统边界为: 从原材料采掘到风机部件回收的全过程, 产品应用在中国西北内陆地区。由于产品的安装和维护阶段对结果影响小于 5%, 因此在计算时不予考虑。

4.3 应用验证

CWT3300D-165 型风力发电机一小时发电量约为 3000 kW·h,发电效率为 80%,一年运转 300 天,一天工作 18 h,累计工作 20 年的发电量为 2.592×10^8 kW·h。火力发电发一度电需要 0.3 kg 煤,产出等量的电,风力发电相当于节省 7.776×10^7 kg 煤。通过对中国某风机企业实地调研,得到风机详细信息如表 2 所示,包括产品质量、产品材料、运输距离、运输方式、使用阶段标准化煤质量。

表 2 风机清单参数信息

Tab.2 Life cycle inventory parameters of wind turbine

产品名称	CWT3300D-165 风机
产品质量(kg)	7 091 110
加工工艺	装配件(按零件节点划分)
三阶段运输距离(km)	173,1130,200
运输方式	10 t 货车运输
使用阶段标准化煤(kg)	77 760 000
回收率	装配件(按部件节点划分)

根据表 3 和式(9)建立风机产品节点生命周期映射矩阵如下:

$$\begin{matrix} & G & T_1 & M & T_2 & U & T_3 & R \\ L_{\text{prd}}(P_{\text{prd}}) = & [7\ 091\ 110 & 1.227 \times 10^{10} & \text{装配件} & 8.013 \times 10^9 & -7.776 \times 10^7 & 1.418 \times 10^9 & \text{装配件}] \end{matrix} \quad (15)$$

其中, G 为产品质量,大小为 7 091 110 kg; T_1 、 T_2 、 T_3 分别为三个运输阶段的单位运距,分别为 1.227×10^{10} kg·km、 8.013×10^9 kg·km、 1.418×10^9 kg·km; M 表示产品加工工艺,不同零件的加工工艺不同,按照零件节点划分; U 表示产品使

$$\begin{matrix} & G & T_1 & M & T_2 & U & T_3 & R \\ L_{\text{hub}}(P_{\text{hub}}) = & [48\ 397 & 7.274 \times 10^6 & \text{装配件} & 1.5 \times 10^8 & 0 & 9.679 \times 10^6 & 0.64] \\ & G & T_1 & M & T_2 & U & T_3 & R \\ L_{\text{nacelle}}(P_{\text{nacelle}}) = & [989\ 13 & 1.4 \times 10^7 & \text{装配件} & 1.78 \times 10^8 & 0 & 1.978 \times 10^7 & 0.73] \\ & G & T_1 & M & T_2 & U & T_3 & R \\ L_{\text{tower}}(P_{\text{tower}}) = & [220\ 000 & 4.62 \times 10^7 & \text{钢板辊弯-焊接} & 5.192 \times 10^8 & 0 & 4.4 \times 10^7 & 0.75] \\ & G & T_1 & M & T_2 & U & T_3 & R \\ L_{\text{blade}}(P_{\text{blade}}) = & [67\ 200 & 2.419 \times 10^7 & \text{挤压成形} & 1.008 \times 10^8 & 0 & 1.344 \times 10^7 & 0.80] \\ & G & T_1 & M & T_2 & U & T_3 & R \\ L_{\text{converter}}(P_{\text{converter}}) = & [5000 & 0 & \text{成品} & 8.5 \times 10^5 & 0 & 1.3 \times 10^7 & 0.60] \\ & G & T_1 & M & T_2 & U & T_3 & R \\ L_{\text{foundation}}(P_{\text{foundation}}) = & [6\ 651\ 600 & 1.131 \times 10^9 & \text{机立窑煅烧} & 7.051 \times 10^9 & 0 & 1.33 \times 10^9 & 0.05] \end{matrix} \quad (16)$$

使用计算工具依次计算轮毂总成、机舱总成、塔筒总成、叶片、地基、变流器的环境影响,环境影响结果如表 4 所示,上述部件节点的背景清单数据见表 5~表 10。经过 LCA 计算工具计算之后,得到产品节点最终结果 W_{prd} 如下:

$$W_{\text{prd}} = \{I_{\text{in}}, O_{\text{out}}, D_{\text{res}}\} \quad (17)$$
$$I_{\text{in}} = \{(\text{煤}, -2.43 \times 10^7), (\text{石油}, 2.69 \times 10^6), (\text{天然气}, 2.54 \times 10^6)\}$$
$$O_{\text{out}} = \{(\text{CO}, 4.54 \times 10^5), (\text{CO}_2, 1.16 \times 10^5), (\text{SO}_2, 2.28 \times 10^5), (\text{NO}_x, 2.25 \times 10^5), (\text{CH}_4, 2.20 \times 10^5), (\text{H}_2\text{S}, 6.42 \times 10^2), (\text{HCL}, 2.11 \times 10^4), (\text{COD}, 2.89 \times 10^3), (\text{NH}_3, 3.91 \times 10^2), (\text{CFC}_{11}, 5.00 \times 10^{-3}), (\text{CFC}_{12}, 1.00 \times 10^{-3}), (\text{CFC}_{13}, 7.00 \times 10^{-4})\}$$
$$D_{\text{res}} = \{(\text{PED}, -26\ 030.75), (\text{GWP}, 7965.79), (\text{AP}, 3174.8), (\text{EP}, 24\ 368.57), (\text{POCP}, 18\ 527.33), (\text{ODP}, 0.17)\}$$

LCA 计算工具提供了丰富的图表展示,图 7

所示为风机各零部件环境影响对总环境影响贡献度情况。图 8 展示了对环境影响最大的前 19 个零部件,以及 6 项环境指标对该零部件的环境影响分布情况。图 9 列举了风力发电机生命周期各阶段的环境影响情况。

因为零件数量过多,图 8 仅展示了 1 级和 2 级零件,分析图 8 可以看出,1 级零部件中环境影响最大的是地基,占比 66.34%,其次是机舱总成,占比 17.51%,影响最小的是变流器,占比 0.05%。分析 2 级零部件的对比结果可以得出,影响最大的 2 级零部件是叶片 1、叶片 2、叶片 3,各占 14.01%。

由图 9 可以看出,该风力发电机所有零部件中环境影响最大的前 3 个零部件依次为:地基、机舱总成、塔筒总成。1 级零件地基对富营养化(EP)和光化学烟雾(POCP)这两类环境影响贡献度最大,分别为 17 125.16 和 21 831.86。

表 3 CWT3300D-165 型风力发电机物料清单

Tab.3 BOM of CWT3300D-165 wind turbine

序号	名称	材料	总重(kg)	运输地点	三个阶段 运输距离(km)	运输方式	工艺方式	回收率 (%)
1	轮毂总成	装配体	48 397	A ₁ ~2-B ₁ -C-D	150,3100,200	货车运输	装配件	64
1.1	变桨系统总成	铸铁	35 400	A ₁ -B ₁ -C-D	200,3100,200	货车运输	铸造毛坯-喷丸-车削-镗铣	60
1.2	导流罩支架总成	铸铁	343	A ₁ -B ₁ -C-D	200,3100,200	货车运输	铸造成形-焊接	81
1.3	导流罩总成	玻璃钢	737	A ₂ -B ₁ -C-D	170,3100,200	货车运输	真空灌注成形	50
2	机舱总成	装配体	98 913	A ₁ ~5-B ₂ -C-D	142,1800,200	货车运输	装配件	73
2.1	轴承座	铸铁	22 264	A ₁ -B ₂ -C-D	220,1800,200	货车运输	铣-钻	77
2.2	内部框架	铸铁	497	A ₁ -B ₂ -C-D	220,1800,200	货车运输	铸造成形-焊接	59
2.3	主机架	铸铁	26 814	A ₁ -B ₂ -C-D	220,1800,200	货车运输	铸造成形-焊接	82
2.4	发电机底架	铸铁	3085	A ₁ -B ₂ -C-D	220,1800,200	货车运输	铸造成形-焊接	84
2.5	主轴	合金钢	430	A ₃ -B ₂ -C-D	340,1800,200	货车运输	锻造毛坯-调制-淬火-车削-钻-镗-抛光	51
2.6	电缆桥架总成	铸铁	146	A ₁ -B ₂ -C-D	220,1800,200	货车运输	铸造成形-焊接	85
2.7	齿轮箱弹性支撑总成	铸铁	1922	A ₁ -B ₂ -C-D	220,1800,200	货车运输	钻	56
2.8	机舱罩总成	玻璃钢	3573	A ₂ -B ₂ -C-D	460,1800,200	货车运输	真空灌注成形	76
2.9	气象桅杆	铸铁	160	A ₁ -B ₂ -C-D	220,1800,200	货车运输	车-铣-磨	55
2.10	齿轮箱	成品	29 000	B ₂ -C-D	0,1800,200	货车运输	铸造毛坯-退火-时效处理-喷丸-喷涂防锈漆-车-数控钻镗铣-喷涂防护漆	52
2.11	高速轴制动器	成品	82	B ₂ -C-D	0,1800,200	货车运输	成品	76
2.12	发电机	成品	9800	B ₂ -C-D	0,1800,200	货车运输	成品	68
2.13	发电机弹性支撑总成	铸铁	16	A ₁ -B ₂ -C-D	220,1800,200	货车运输	铸造成形	74
2.14	机舱柜	铸铁	450	A ₁ -B ₂ -C-D	220,1800,200	货车运输	真空灌注成形	75
2.15	机舱柜支架	铸铁	54	A ₁ -B ₂ -C-D	220,1800,200	货车运输	铸造成形-焊接	74
2.16	滑环	橡胶	25	A ₁ -B ₂ -C-D	510,1800,200	货车运输	注塑成形	69
2.17	机舱内部吊车	成品	150	B ₂ -C-D	0,1800,200	货车运输	成品	61
2.18	高速轴联轴器	成品	322	B ₂ -C-D	0,1800,200	货车运输	成品	65
2.19	液压系统总成	成品	158	B ₂ -C-D	0,1800,200	货车运输	成品	84
2.20	干粉灭火器支架	铸铁	3	A ₁ -B ₂ -C-D	220,1800,200	货车运输	铸造成形-焊接	10
2.21	干粉灭火器	成品	5	B ₂ -C-D	0,1800,200	货车运输	成品	10
2.22	CO ₂ 灭火器	成品	5	B ₂ -C-D	0,1800,200	货车运输	成品	10
2.23	CO ₂ 灭火器支架	铸铁	3	A ₁ -B ₂ -C-D	220,1800,200	货车运输	铸造成形-焊接	60
2.24	高速轴罩装配	碳钢	14	A ₅ -B ₂ -C-D	380,1800,200	货车运输	真空灌注成形	60
2.25	急救装置支架	铸铁	6	A ₁ -B ₂ -C-D	220,1800,200	货车运输	铸造成形-焊接	75
3	塔筒总成	装配体	220 000	A ₆ -B ₃ -C-D	210,2360,200	货车运输	钢板辊弯-焊接	75
3.1	塔筒 1	Q235	55 000	A ₆ -B ₃ -C-D	210,2360,200	货车运输	钢板辊弯-焊接	75
3.2	塔筒 2	Q235	55 000	A ₆ -B ₃ -C-D	210,2360,200	货车运输	钢板辊弯-焊接	75
3.3	塔筒 3	Q235	55 000	A ₆ -B ₃ -C-D	210,2360,200	货车运输	钢板辊弯-焊接	75
3.4	塔筒 4	Q235	55 000	A ₆ -B ₃ -C-D	210,2360,200	货车运输	钢板辊弯-焊接	75
4	叶片	装配体	67200	A ₇ -B ₄ -C-D	360,1500,200	货车运输	挤压成形	80
4.1	叶片 1	玻璃纤维	22 400	A ₇ -B ₄ -C-D	360,1500,200	货车运输	挤压成形	80
4.2	叶片 2	玻璃纤维	22 400	A ₇ -B ₄ -C-D	360,1500,200	货车运输	挤压成形	80
4.3	叶片 3	玻璃纤维	22 400	A ₇ -B ₄ -C-D	360,1500,200	货车运输	挤压成形	80
5	变流器	成品	5000	B ₅ -C-D	0,2600,200	货车运输	成品	60
6	地基	装配体	6 651 600	A ₈ -B ₅ -C-D	170,1060,200	货车运输	机立窑煅烧	5

注:①运输地点 A 指原材料获取阶段的地理位置,其中 A_i (i=1,2,...,8)是指原材料获取阶段不同的地理位置,第一阶段运输距离是根据原材料种类进行分配的,由于存在小部分成品件无法获取原材料数据,本文对上述成品件只考虑第二、三运输阶段;运输地点 B 指制造阶段的地理位置,其中 B_i (i=1,2,...,6)是指制造阶段不同的地理位置,这里按照一级部件分配运输距离,故第二阶段运输中在一级部件下的二级零件的运输距离相同;运输地点 C 指产品使用阶段的地理位置;运输地点 D 指回收阶段的地理位置。产品使用阶段的地理位置在中国西北部,回收阶段也是就地回收处理,因此地理位置 C、D 无更改,第三阶段运输距离相同。②由于 CWT3300-D165 型风力发电机产品结构过于复杂,本表仅展示 1 级、2 级零部件。所有子节点的两个运输阶段的运输距离均由其下的叶子节点的单位运输距离之和除以该子节点质量得到。

表 4 一级部件节点环境影响
Tab.4 Environment impact for key components

	PED	GWP	AP	EP	POCP	ODP
轮毂总成	79.45	124.21	71.51	408.06	66.11	0
机舱总成	501.76	1608.95	899.29	5405.40	552.48	0
塔筒总成	491.20	946.70	544.05	3120.04	460.79	0
叶片	2178.89	176.31	130.08	584.17	60.74	0.17
变流器	10.70	3.43	2.35	11.56	1.16	0
地基	3332.23	6160.83	2916.64	17 125.16	21 831.86	0

表 5 轮毂背景清单数据
Tab.5 Hub background information

清单物质 (kg)	材料数据 (kg)	运输数据 (kg · km)	工艺数据 (kg)
煤	1.76	3.81×10^{-7}	133.485
石油	3.77×10^{-5}	2.23×10^{-5}	0.218
天然气	2.89×10^{-6}	4.06×10^{-8}	0.076
CO	2.41×10^{-5}	1.13×10^{-6}	0.035
CO ₂	1.49×10^{-3}	1.5×10^{-4}	3.135
SO ₂	3.60×10^{-6}	1.34×10^{-7}	0.597
NO _x	3.21×10^{-6}	$4.839\ 99 \times 10^{-6}$	0.564
CH ₄	6.46×10^{-6}	5.32×10^{-7}	0.581
H ₂ S	1.87×10^{-7}	1.66×10^{-10}	0.002
HCL	9.84×10^{-8}	1.05×10^{-9}	0.056
COD	5.20×10^{-6}	2.02×10^{-7}	0.006
NH ₃	1.12×10^{-7}	3.69×10^{-11}	8.13×10^{-4}
CFC-11	1.45×10^{-18}	3.73×10^{-20}	1.82×10^{-15}
CFC-12	1.02×10^{-15}	1.89×10^{-18}	2.26×10^{-12}
CFC-13	1.21×10^{-16}	1.77×10^{-18}	1.68×10^{-13}

表 6 机舱背景清单数据
Tab.6 Nacelle background information

清单物质 (kg)	材料数据 (kg)	运输数据 (kg · km)	工艺数据 (kg)
煤	1.76	3.81×10^{-7}	135.599
石油	3.77×10^{-5}	2.23×10^{-5}	0.221
天然气	2.89×10^{-6}	4.06×10^{-8}	0.077
CO	2.41×10^{-5}	1.13×10^{-6}	0.036
CO ₂	1.49×10^{-3}	1.5×10^{-4}	3.185
SO ₂	3.60×10^{-6}	1.34×10^{-7}	0.607
NO _x	3.21×10^{-6}	$4.839\ 99 \times 10^{-6}$	0.573
CH ₄	6.46×10^{-6}	5.32×10^{-7}	0.590
H ₂ S	1.87×10^{-7}	1.66×10^{-10}	0.002
HCL	9.84×10^{-8}	1.05×10^{-9}	0.057
COD	5.20×10^{-6}	2.02×10^{-7}	0.006
NH ₃	1.12×10^{-7}	3.69×10^{-11}	8.26×10^{-4}
CFC-11	1.45×10^{-18}	3.73×10^{-20}	1.84×10^{-15}
CFC-12	1.02×10^{-15}	1.89×10^{-18}	2.30×10^{-12}
CFC-13	1.21×10^{-16}	1.77×10^{-18}	1.71×10^{-13}

由图 9 可知,对 PED 贡献度最大的是原材料获取阶段,其次是制造阶段;对 GWP、AP、EP 贡献度最大的均是运输阶段,因此在进行产品 LCA 分析时,很有必要考虑运输阶段的信息;对 POCP 贡献度最大的是制造阶段;风机生命周期所有阶段对 ODP 的贡献度很小。产品使用阶段和回收阶段对 6 类环境影响均有一定的抑制作用。

表 7 塔筒背景清单数据
Tab.7 Tower background information

清单物质 (kg)	材料数据 (kg)	运输数据 (kg · km)	工艺数据 (kg)
煤	1.25	3.81×10^{-7}	146.748
石油	7.56×10^{-3}	2.23×10^{-5}	0.239
天然气	2.62×10^{-4}	4.06×10^{-8}	0.083
CO	2.46×10^{-2}	1.13×10^{-6}	0.038
CO ₂	1.81	1.5×10^{-4}	3.446
SO ₂	2.89×10^{-3}	1.34×10^{-7}	0.657
NO _x	2.65×10^{-3}	$4.839\ 99 \times 10^{-6}$	0.620
CH ₄	1.22×10^{-5}	5.32×10^{-7}	0.639
H ₂ S	1.76×10^{-4}	1.66×10^{-10}	0.002
HCL	5.22×10^{-5}	1.05×10^{-9}	0.061
COD	5.21×10^{-3}	2.02×10^{-7}	0.007
NH ₃	1.07×10^{-4}	3.69×10^{-11}	8.94×10^{-4}
CFC-11	1.30×10^{-15}	3.73×10^{-20}	2.00×10^{-15}
CFC-12	9.13×10^{-13}	1.89×10^{-18}	2.49×10^{-12}
CFC-13	1.19×10^{-13}	1.77×10^{-18}	1.85×10^{-13}

表 8 变流器背景清单数据
Tab.8 Converter background information

清单物质 (kg)	材料数据 (kg)	运输数据 (kg · km)	工艺数据 (kg)
煤	1.76	3.81×10^{-7}	133.485
石油	3.77×10^{-5}	2.23×10^{-5}	0.218
天然气	2.89×10^{-6}	4.06×10^{-8}	0.076
CO	2.41×10^{-5}	1.13×10^{-6}	0.035
CO ₂	1.49×10^{-3}	1.5×10^{-4}	3.135
SO ₂	3.60×10^{-6}	1.34×10^{-7}	0.597
NO _x	3.21×10^{-6}	$4.839\ 99 \times 10^{-6}$	0.564
CH ₄	6.46×10^{-6}	5.32×10^{-7}	0.581
H ₂ S	1.87×10^{-7}	1.66×10^{-10}	0.002
HCL	9.84×10^{-8}	1.05×10^{-9}	0.056
COD	5.20×10^{-6}	2.02×10^{-7}	0.006
NH ₃	1.12×10^{-7}	3.69×10^{-11}	8.13×10^{-4}
CFC-11	1.45×10^{-18}	3.73×10^{-20}	1.82×10^{-15}
CFC-12	1.02×10^{-15}	1.89×10^{-18}	2.26×10^{-12}
CFC-13	1.21×10^{-16}	1.77×10^{-18}	1.68×10^{-13}

表 9 地基背景清单数据
Tab.9 Foundation background information

清单物质 (kg)	材料数据 (kg)	运输数据 (kg · km)	工艺数据 (kg)
煤	1.68×10^{-1}	3.81×10^{-7}	2.29×10^{-1}
石油	5.47×10^{-4}	2.23×10^{-5}	3.03×10^{-5}
天然气	9.00×10^{-5}	4.06×10^{-8}	1.05×10^{-5}
CO	1.61×10^{-4}	1.13×10^{-6}	0.066
CO ₂	5.84×10^{-1}	1.5×10^{-4}	0.901
SO ₂	4.90×10^{-4}	1.34×10^{-7}	8.3×10^{-5}
NO _x	2.79×10^{-4}	$4.839\ 99 \times 10^{-6}$	7.84×10^{-5}
CH ₄	1.17×10^{-6}	5.32×10^{-7}	8.07×10^{-5}
H ₂ S	4.73×10^{-7}	1.66×10^{-10}	2.36×10^{-7}
HCL	1.79×10^{-5}	1.05×10^{-9}	7.75×10^{-6}
COD	9.94×10^{-6}	2.02×10^{-7}	8.43×10^{-7}
NH ₃	1.19×10^{-5}	3.69×10^{-11}	1.13×10^{-7}
CFC-11	9.10×10^{-17}	3.73×10^{-20}	2.52×10^{-19}
CFC-12	2.15×10^{-13}	1.89×10^{-18}	3.14×10^{-16}
CFC-13	8.46×10^{-15}	1.77×10^{-18}	2.34×10^{-17}

表 10 叶片背景清单数据

Tab.10 Blade background information

清单物质	材料数据	运输数据	工艺数据
(kg)	(kg)	(kg·km)	(kg)
煤	2.66	3.81×10^{-7}	3.591 96
石油	38	2.23×10^{-5}	5.8608×10^{-3}
天然气	37.4	4.06×10^{-8}	$2.033 52 \times 10^{-3}$
CO	1.05×10^{-3}	1.13×10^{-6}	9.4128×10^{-4}
CO ₂	2.1	1.5×10^{-4}	8.436×10^{-2}
SO ₂	5.97×10^{-3}	1.34×10^{-7}	$1.607 28 \times 10^{-2}$
NO _x	0	$4.839 99 \times 10^{-6}$	$1.518 48 \times 10^{-2}$
CH ₄	8.86×10^{-3}	5.32×10^{-7}	1.56288×10^{-2}
H ₂ S	1.92×10^{-5}	1.66×10^{-10}	4.5732×10^{-5}
HCL	8.76×10^{-5}	1.05×10^{-9}	$1.500 72 \times 10^{-3}$
COD	7.93×10^{-4}	2.02×10^{-7}	$1.633 92 \times 10^{-4}$
NH ₃	9.84×10^{-5}	3.69×10^{-11}	2.18892×10^{-5}
CFC11	7.62×10^{-8}	3.73×10^{-20}	4.884×10^{-17}
CFC12	1.64×10^{-8}	1.89×10^{-18}	6.0828×10^{-14}
CFC13	1.03×10^{-8}	1.77×10^{-18}	4.5288×10^{-15}

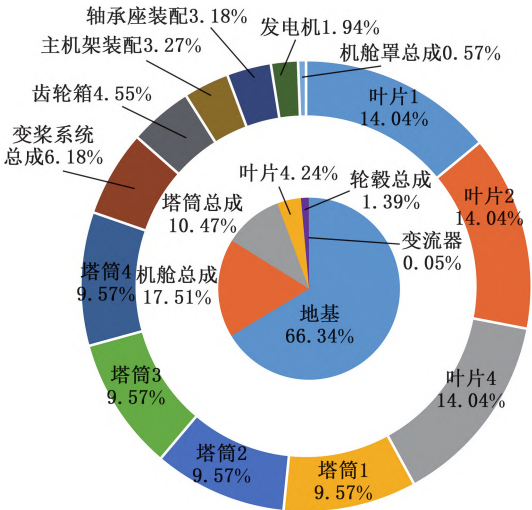


图 7 零部件环境影响饼状图

Fig.7 A pie figure showing environmental impact of components

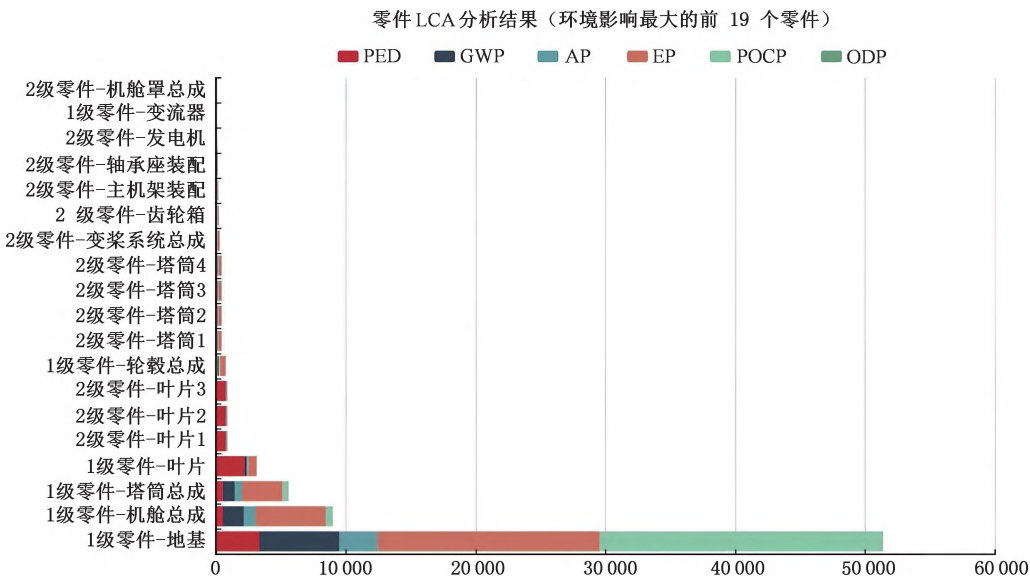


图 8 环境影响最大的环境影响潜值前 19 个零部件

Fig.8 A figure illustrating top 20 components with the greatest environmental impact

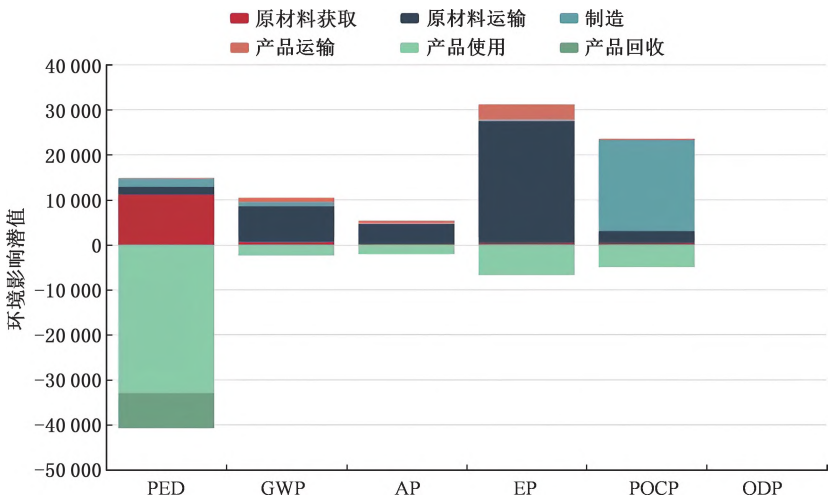


图 9 风机环境影响结果

Fig.9 Summary of the potential environmental impact of wind turbine

5 结论

(1)提出机电产品绿色设计与评价协同的多域关联模型,通过产品绿色设计与生命周期阶段关联建模将产品设计域与生命周期活动域相关联;通过 LCA 计算将生命周期活动域与环境影响评价域相关联。将 LCA 参数方法应用于产品绿色设计中,并开发 LCA 参数计算工具,将产品生命周期信息以参数的形式输入能够快速准确地进行环境影响评价。此外,该工具允许设计不断改进,输入改进之后的产品信息可以快速准确地获得环境影响结果。

(2)基于产品绿色设计模型(FSMPT 模型)和产品结构树建立生命周期映射矩阵(LCMM),实现了对机电产品零部件设计信息和生命周期阶段信息的有效集成,通过对产品结构树各节点的遍历,实现了对具有复杂零部件关系的机电产品进行生命周期评价的目标,并获得了最终环境影响结果。以 CWT3300D-165 型风力发电机作为典型机电产品,计算出在其生命周期内的 5 个阶段所消耗的能源以及相应的环境影响。根据 1 级部件的环境影响结果可知,地基对环境影响最大,其次是机舱总成,因此这两个主要 1 级部件需在产品设计阶段着重考虑产品绿色性,改进产品绿色设计方案。

(3)本文采用 EDIP2003 影响评价方法进行研究,为了方法具有通用性,决策者也可以根据需要选择其他的环境影响指标进行其他案例研究。

(4)设计人员将生命周期信息以参数输入,对产品进行环境影响评价,帮助设计人员快速找到对环境影响较大的零部件并重新对其进行绿色设计,可提高机电产品整体的绿色性,使产品设计朝着“更绿色,可持续”的方向发展。

参考文献:

- [1] 余南平,王德恒. 中国制造 2025[M]. 上海:上海人民出版社, 2017.
YU Nanping, WANG Deheng. Made in China 2025 [M]. Shanghai: Shanghai People's Publishing House, 2017.
- [2] GERO J S, KANNENGISSER U. The Situated Function-behavior-structure Framework[J]. Design Studies, 2004, 25(4): 373-391.
- [3] DENG Y M, TOR S B, BRITTON G A. Abstracting and Exploring Functional Design Information for Conceptual Mechanical Product Design[J]. Engineering with Computers, 2000, 16(1): 36-52.

- [4] STONE R B, WOOD K L. Development of a Functional Basis for Design[J]. Journal of Mechanical Design, 2000, 122(4): 359-370.
- [5] YUAN L Y L, LIU Y L Y, SUN Z S Z, et al. A Hybrid Approach for the Automation of Functional Decomposition in Conceptual Design [J]. Journal of Engineering Design, 2016(4/6): 333-360.
- [6] HABIB T A, KOMOTO H B. Comparative Analysis of Design Concepts of Mechatronics Systems with a CAD Tool for System Architecting [J]. Mechatronics, 2014, 24 (7): 788-804.
- [7] 付岩,王黎明,李方义,等. 基于 FSMP 模型的机电产品绿色设计方案生成方法[J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(4): 1301-1312.
FU Yan, WANG Liming, LI Fangyi, et al. Generation Method of Green Design Scheme for Electro-Mechanical Products Based on FSMP Model [J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2023, 29(4): 1301-1312.
- [8] LI M, CAO S, QIN Z Q. Creation Method and Evolution Evaluation of Concept Knowledge Maps [J]. Journal of Internet Technology, 2016, 17 (2): 179-189.
- [9] AWASTHI A, OMRANI H. A Goal-oriented Approach Based on Fuzzy Axiomatic Design for Sustainable Mobility Project Selection [J]. International Journal of Systems Science: Operations & Logistics, 2019, 6(1): 86-98.
- [10] 邢璐,华一雄,张执南. 集成 EBD 和 TRIZ 的机电系统概念设计方法[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(5): 576-583.
XING Lu, HUA Yixiong, ZHANG Zhinan. Conceptual Design Method of Electromechanical System Integrating EBD and TRIZ [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2022, 56(5): 576-583.
- [11] 屠立,张树有,陆长明. 基于知识模板的复杂产品设计重用方法研究[J]. 计算机集成制造系统, 2009, 15(6): 1041-1048.
TU Li, ZHANG Shuyou, LU Changming. Design Reuse Method of Complex Product Based on Knowledge Template [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2009, 15(6): 1041-1048.
- [12] 杨应虎,陈映,吕洪杰. 基于 NX MCD 的协同设计方法与应用技术研究[J]. 中国机械, 2021, 32(4): 20-21.
YANG Yinghu, CHEN Yi, LYU Hongjie. Research on Collaborative Design Method and Application Technology Based on NX MCD [J]. China Machinery, 2021, 32(4): 20-21.
- [13] 杨建新,王如松,刘晶茹. 中国产品生命周期影响

- 评价方法研究[J]. 环境科学学报, 2001, 21(2): 234-237.
- YANG Jianxin, WANG Rusong, LIU Jingru. Research on Life Cycle Impact Assessment Method of Chinese Products [J]. Journal of Environmental Science, 2001, 21(2): 234-237.
- [14] 黄娜, 王洪涛, 范辞冬, 等. 基于不确定度和敏感度分析的 LCA 数据质量评估与控制方法[J]. 环境科学学报, 2012, 32(6): 1529-1536.
- HUANG Na, WANG Hongtao, FAN Cidong, et al. LCA Data Quality Evaluation, and Control Method Based on Uncertainty and Sensitivity Analysis [J]. Journal of Environmental Science, 2012, 32(6): 1529-1536.
- [15] CIRITH A. ICT for Environment in Life Cycle Applications OpenLCA: a New Open Source Software for Life Cycle Assessment [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2007, 12(4): 209-10.
- [16] ONG S, KOH T, NEE A. Development of a Semi-quantitative Pre-LCA Tool [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 89, 574-582.
- [17] SINGH S, BAKSHI B R. Eco-LCA: a Tool for Quantifying the Role of Ecological Resources in LCA[C]// Proceedings of the 2009 IEEE International Symposium on Stainable Systems and Technology. Tempe: IEEE, 2009: 10772767.
- [18] 孟强, 李方义, 李静, 等. 基于绿色特征的方案设计快速生命周期评价方法[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(3): 626-633.
- MENG Qiang, LI Fangyi, LI Jing, et al. A Rapid Life Cycle Assessment Method Based on Green Features in Supporting Conceptual Design [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(3): 626-633.
- [19] PENG Shitong, LI Tao, DONG Mengmeng, et al. Life Cycle Assessment of a Large-scale Centrifugal Compressor: a Case Study in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 139: 810-820.
- [20] XIMENES F A. Life Cycle Assessment—Principles, Practice and Prospects [J]. Austral Ecology, 2010, 5(1), 117-118.
- [21] GUINÉE J, HEIJUNGS R. Life Cycle Assessment: an Operational Guide to the ISO Standards [J]. Environmental Science, 2002: 128062003.
- (编辑 王艳丽)
-
- 作者简介:** 闻 萌, 男, 1998 年生, 硕士研究生。研究方向为机电产品可持续设计与评价。李 涛(通信作者), 女, 1977 年生, 副教授、博士研究生导师。研究方向为产品可持续性评价方法、激光增材修复技术、机械装备能耗分析与评估方法等。E-mail: litao@dlut.edu.cn.
-
- (上接第 1445 页)
- [23] FONSECA C M, FLEMING P J. Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization[C]// International Conference on Genetic Algorithms. San Mateo, 1993: 7129189.
- [24] MURATA T, ISHIBUCHI H. MOGA: Multi-objective Genetic Algorithms [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation. New York: IEEE, 1995: 5248085.
- [25] 王炳刚, 饶运清, 邵新宇, 等. 基于多目标遗传算法的混流加工/装配系统排序问题研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(12): 1434-1438.
- WANG Bingang, RAO Yunqing, SHAO Xinyu, et al. A MOGA-based Algorithm for Sequencing a Mixed-model Fabrication/ Assembly System [J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(12): 1434-1438.
- [26] 玄光男, 林林. 网络模型与多目标遗传算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2017.
- XUAN Guangnan, LIN Lin. Network Models and Multi-objective Genetic Algorithms [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2017.
- (编辑 王艳丽)
-
- 作者简介:** 陈西忍, 男, 1997 年生, 硕士研究生。研究方向为气动特性分析与气动结构优化。叶文华(通信作者), 男, 1965 年生, 教授、博士研究生导师。研究方向为智能制造、数控装备技术、现代集成制造系统等。E-mail: whye@nuaa.edu.cn.