

碳效比在变频调速设备低碳评价方法中的应用

马梦媛,王阳,王连杰,刘洁,张磊

(天津天传电控设备检测有限公司,天津 300300)

摘要:在我国提出“碳达峰,碳中和”目标的背景下,电工装备制造行业亟需低碳转型,变频调速设备作为电工装备的关键组成部分,以其调节精确、节能显著、控制灵活、对设备保护良好等优势,在工业自动化和能效管理领域具有极其重要的应用价值。然而该行业尚缺乏符合产品功能贡献的低碳评价技术参数,通过一则案例,介绍了“碳效比(CER)”这一概念在电工装备低碳评价方法中的应用,其中对于产品碳足迹的核算,选用了摇篮到坟墓的全生命周期阶段,以确保评估的准确性和全面性。通过对比不同规格的变频调速设备和不同类型的电工装备产品的碳效比数据,表明产品碳效比越小,实现相同功能贡献的碳排放量越小,低碳性能越高。碳效比这一概念的引入能更准确地评估变频调速设备产品的低碳性能,同时有助于制定该行业的低碳评价标准,促进电工装备行业实现“双碳”目标,并为其他行业的低碳转型提供了借鉴和启示。

关键词:碳效比;电工装备;变频调速设备;低碳评价;碳足迹

中图分类号:TM92 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd26029

Application of Carbon Efficiency Ratio in Low-carbon Evaluation Method of Variable-frequency Drive

MA Mengyuan, WANG Yang, WANG Lianjie, LIU Jie, ZHANG Lei

(Tianjin Tianchuan Electric Control Equipment Test Co., Ltd., Tianjin 300300, China)

Abstract: In the context of China's "carbon peaking and carbon neutrality goals", the electrical equipment manufacturing industry urgently needs a low-carbon transition. As a key component of electrical equipment, variable-frequency drive (VFD) devices offer significant advantages such as precise regulation, notable energy savings, flexible control, and excellent equipment protection. These attributes make VFDs highly valuable in industrial automation and energy efficiency management. However, the industry currently lacks technical parameters for low-carbon evaluation that align with the functional contributions of these products. The concept of carbon efficiency ratio (CER) was introduced through a case study to illustrate its application in the low-carbon evaluation of electrical equipment. For accurate and comprehensive assessment, the carbon footprint of products was calculated using a cradle-to-grave life cycle approach. By comparing CER data of VFD devices of different specifications and various types of electrical equipment, it was demonstrated that a lower CER indicates lower carbon emissions for the same functional contribution, thus reflecting higher low-carbon performance. The introduction of the CER concept enables more accurate evaluation of the low-carbon performance of VFD products, aids in establishing low-carbon evaluation standards for the industry, and facilitates the electrical equipment industry's achievement of the "dual carbon" goals, while also providing insights and references for low-carbon transitions in other industries.

Key words: carbon efficiency ratio (CER); electrical equipment; variable-frequency drive (VFD); low-carbon assessment; carbon footprint

2020年9月,国家主席习近平在第七十五届联合国大会上宣布,中国力争2030年前CO₂排放达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和目标。2020年12月,习近平主席在气候雄心峰会上再

基金项目:天津电气科学研究院有限公司自立科研项目(重点类)(JC2023ZL006)

作者简介:马梦媛(1998—),女,硕士研究生,工程师,主要研究方向为电工装备碳排放核算分析与认证,Email:mamy1325@163.com

通讯作者:王阳(1975—),男,本科,教授级高工,主要研究方向为电控配电绿色产品评价,Email:13602070846@126.com

次重申了这一“双碳”目标。2021年10月,国务院发布《2030年前碳达峰行动方案》,明确工业、能源、交通运输、城乡建设等行业的碳达峰实施方案。多种政策法规的实施表明,我国已经将绿色低碳发展确立为现代化强国建设的必然路径。

在这一发展路径中,制造业绿色低碳化是实现“双碳”目标的关键步骤。制造业是我国经济发展的基础,面对复杂的国际形势和国内改革发展的艰巨任务,习近平主席多次强调制造业,特别是装备制造业的重要地位和作用^[1]。随着工业化进程的加速,我国制造业生产能力飞速发展,自2009年以来,我国制造业的能源消耗量呈现出持续增长的情况,而伴随着能源消耗量的上升,我国制造业的碳排放量不可避免地出现了排放的高峰^[2]。

电工装备行业作为制造业中企业单位数量最多的行业之一^[2],肩负着低碳转型的责任和使命。在电工装备行业中,变频调速设备占据着重要的地位。变频调速设备广泛应用于电力、制造业、建筑、石油化工等领域,其以调节精确、节能显著、控制灵活、对设备保护良好等优势,在工业自动化和能效管理领域具有极其重要的应用价值。因此,对电工装备及变频调速设备的低碳评价越来越受到重视。

目前为止,产品低碳评价方法主要为生命周期评价法(life cycle assessment, LCA)、环境标签和环境产品声明(environmental product declaration, EPD)^[3]。生命周期评价法(也称碳足迹评价法)是一种基于ISO 14067标准的过程分析评估方法,用于计算产品在生命周期或服务过程中所排放的CO₂。此方法对原材料获取、产品生产制造、产品使用以及产品废弃处置的全过程进行跟踪、定量分析与评价^[4]。环境标签分为I型环境标签、II型环境标签、III型环境标签三类,通常用于产品包装表明该产品的环保特性。环境产品声明是一种基于ISO 14025标准和生命周期评价的方法,用于评估产品生命周期内的环境影响。其中生命周期碳足迹评价法不仅具备全面性、标准化、适用范围广的特点,还是许多环境政策的重要基础,因此被国内外许多研究者广泛使用。文献[5]使用Gabi软件构建了制冷双开门冰箱的生命周期模型并核算了其碳足迹,结果表明使用阶段中的电力消耗碳排放量最高。文献[6]基于SimaPro7.0软件中的CML方法对中国台式电脑进

行了生命周期评价,结果表明其制造和使用阶段碳排放量远高于其他生命阶段。

多项研究结果表明,采用生命周期碳足迹评价法计算用能产品的碳排放总量,使用阶段的排放量均远高于其他生命阶段^[5-7]。电工装备(例如变频调速设备)属于重点用能产品,使用寿命均10 a以上,这类产品使用时的能源耗用所产生的碳排放量占全生命周期碳排放总量的90%以上。而采用生命周期碳足迹评价法评估这类产品的低碳性能,不仅未考虑其使用寿命长特点,还忽略了其可产生的电能传输等有效贡献,不能完全反映此类产品低碳性能的真实水平。因此,在评估电工装备的低碳性能时,应该综合考虑碳排放量和产品对社会的功能贡献^[8],这就要求电工装备制造行业探索并采纳更为全面的低碳评价指标。

碳效比(carbon efficiency ratio, CER)是指产品碳排放总量与其功能贡献总和之比,表征实现特定功能单位所排放的二氧化碳当量^[9]。使用碳效比作为评价指标,可以有效解决生命周期碳足迹评价法中存在的不足,能更为准确地评估电工装备产品在实现特定功能时所产生的碳排放水平。较低的碳效比意味着在实现相同功能时,产品碳排放量较少,即能够以产生更低的环境影响实现相同的功能。

对于电工装备中的变频调速设备产品而言,其功能贡献在于为用户在电力、制造业、建筑、石油化工等领域提供高效、可靠的电能转换和调节功能,同时可以降低能耗和碳排放。然而,目前变频调速设备行业尚未建立统一的低碳产品评价方法和技术标准,这为行业实现“双碳”目标带来了不便。因此,本文提出使用“碳效比”这一参数作为评价变频调速设备产品低碳性能的指标更为科学。以变频调速设备产品为例,本文介绍了“碳效比”在电工装备低碳评价方法中的应用,详细阐述了评价产品低碳性能的过程,旨在为制定相关低碳评价标准以及推动行业低碳转型提供技术参考,从而促进行业实现“双碳”目标。

1 变频调速设备碳效比计算方法

产品碳效比计算评价方法中两个关键参数分别为产品碳足迹和产品功能贡献总和。在进行产品碳足迹的核算时,通常会使用摇篮到大门(半生命周期)和摇篮到坟墓(全生命周期)两种

不同的方法,本文在碳足迹核算过程中选用了摇篮到坟墓的全生命周期阶段,相较于其他产品碳效比计算方法,包含了产品报废处理阶段碳足迹的计算过程,确保了对产品环境影响评估的完整性,进而使得碳效比计算在评估产品的低碳性能时更为准确和全面。

1.1 变频调速设备技术参数

本文选取高压变频调速设备样机作为核算案例,其基本信息如表1所示。

表1 样机基本参数表
Tab.1 Table of prototype basic parameter

项目	描述	项目	描述
额定容量	1 250 kV·A	额定输出功率	1 000 kW
输出电压	0~10 kV	功率因数	>0.96
输入电压	10 kV	防护等级	IP20
输出电流	0~75 A	整机效率	≥96%
输入频率	50 Hz		

表2 高压变频调速设备原材料获取阶段元器件碳足迹数据表

Tab.2 Table of cfp of components for the raw material acquisition stage of high-voltage variable-frequency drive

元器件名称	材质/成分	质量/kg	排放量/ kgCO ₂ e	元器件名称	材质/成分	质量/kg	排放量/ kgCO ₂ e
薄膜电容	—	110.74	4 315.37	电缆托架	FRP型材	0.13	1.21
整流模块	硅	2.16	19.74	柜内电缆架	SMC型材	1.44	13.16
散热器	1060铝	46.96	1 124.67	采样支架	FRP板	1.75	16.01
整机柜体	Q235-A	810	1 812.54	干式变压器(纸包扁铝线)	电工圆铝杆	131	3 137.65
BM壳体	覆铝锌板	170.16	380.77	干式变压器 (铁心无取向硅钢片)	硅钢	1 437	3 315.92
散热器固定件	覆铝锌板	12.48	27.93	干式变压器(夹件)	钢材	125	279.71
风机壳体	Q235	100	223.77	干式变压器 (绝缘筒和绝缘端圈)	玻璃丝	31	283.24
单元板	SMC	20.3	185.29	干式变压器(其他绝缘件)	树脂	80	154.37
隔板	SMC	23.8	217.45	电线(BVR)	护套材质:PVC 线芯材质:铜	2.39	16.64
插件安装梁	FRP型材	14.93	136.39	高压变压器接地电缆	护套材质:PVC 线芯材质:铜	0.9	6.26
立柱	FRP型材	24.7	225.7	电缆 (RVVP)	护套材质:PVC 线芯材质:铜 绝缘材质:PE	3.71	25.82
插件垫板	FRP型材	1.73	15.79	组合螺钉	碳钢镀锌	7.71	17.25
控制隔板	环氧玻璃丝布板	0.82	7.46	沉头螺丝	碳钢镀锌	0.09	0.19
垫块	SMC	0.55	5.04				
隔离横板	环氧玻璃丝布板	0.02	0.22				
隔离竖板	环氧玻璃丝布板	0.07	0.66				
挡板	SMC	2.24	20.48				
横向支撑梁	FRP型材	2.9	26.53				

表3 高压变频调速设备原材料获取阶段原材料运输碳足迹数据表

Tab.3 Table of CFP of raw material transportation of high-voltage variable-frequency drive

交通工具种类	运输距离/km	排放量/kgCO ₂ e
货车(国V)3.5~7.5 t	108.38	58.91
货车(国V)7.5~16 t	2 161.33	487.60
货车(未指定类型)	200.53	26.84

1.2 原材料获取阶段碳足迹

生产高压变频调速设备所需的原材料种类及质量等信息可以通过制造商提供的物料清单等途径获取,相应排放因子的来源为Ecoinvent数据库,相关计算过程如下式:

$$G_M = \sum_{i=1}^n (M_i \times MEF_i) + \sum_{i=1}^n (M_i \times D_i \times EF_i) \tag{1}$$

式中:G_M为原材料获取阶段碳排放总量;M_i为第i类原材料实物量;MEF_i为第i类材料的生产排放因子;D_i为运输第i类原材料的距离;EF_i为交通工具的运输排放因子。

结合式(1)可求得高压变频调速设备原材料获取阶段的碳足迹为16 586.58 kgCO₂e,各元器件排放量如表2所示,原材料运输碳排放量如表3所示。

1.3 产品生产制造阶段

在产品生产制造阶段,碳排放主要来源于元器件制造和产品组装过程中的能源消耗,其中能源消耗电力排放因子根据制造商及外协工厂所在地采用生态环境部发布的《2021年电力二氧化碳排放因子》相关数据,具体计算过程如下:

$$G_p = \sum_{k=1}^m (E_k \times EF_k) \quad (2)$$

式中: G_p 为产品生产制造阶段碳排放总量; E_k 为产品制造过程中消耗的第 k 类能源实物量; EF_k 为能源排放因子。

结合式(2)可求得高压变频调速设备生产制造阶段的碳足迹为70.23 kgCO₂e,具体排放量如表4所示。

表4 高压变频调速设备生产制造阶段碳足迹数据表

Tab.4 Table of CFP of production and manufacturing stage of high-voltage variable-frequency drive

能源种类	消耗量/(kW·h)	排放量/kgCO ₂ e
外购电力	106.88	62.35
电力(外协工厂)	13.50	7.88

1.4 产品分销阶段

产品分销阶段指的是从制造商所在地到销售地区的运输过程中所产生的碳排放量,本案例产品的制造商所在地区为上海市,主要销售地区为山西省,相关排放因子的来源为Ecoinvent数据库,其计算公式如下:

$$G_T = \sum_{t=1}^p (M \times D_t \times EF_t) \quad (3)$$

式中: G_T 为产品分销阶段碳排放总量; M 为运输产品的质量; D_t 为第 t 类交通工具的运输产品的距离; EF_t 为第 t 类交通工具的运输排放因子。

结合式(3)可求得高压变频调速设备分销阶段的碳足迹为2 460.29 kgCO₂e,其为3.5~7.5 t货车(国V)运输距离为1 365.50 km的排放量。

1.5 产品使用阶段

在产品使用阶段,碳排放主要来源于电能消耗,其中无法确定的产品安装及维护过程的碳排放,不考虑计算。由于没有国家/地方标准对高压变频调速器系列产品的使用年限作出明确规定,产品使用寿命采用企业提供的产品用户手册中的数据信息:“在定期进行保养与维护的情况下产品寿命可大于15 a”,故以15 a计;能源消耗电力排放因子根据用户所在地采用生态环境部发布的《2021年电力二氧化碳排放因子》中山西省电力平均二氧化碳排放因子,本阶段的计算公式如下:

$$G_U = E \times T_w \times 365 \times 24 \times EF \quad (4)$$

其中

$$E = Q \times \lambda \times \eta \quad (5)$$

式中: G_U 为产品使用阶段碳排放总量; E 为实际日

耗电量; T_w 为使用寿命; EF 为使用地电力排放因子; Q 为变频调速设备额定容量; λ 为产品功率因数; η 为产品整机效率。

结合式(4)和式(5)可求得高压变频调速设备使用阶段的碳足迹为4 555 059.84 kgCO₂e,其为额定容量1 250 kV·A、使用寿命15 a的设备的碳排放量。

1.6 产品报废处理阶段

由于没有国家/地方标准对高压变频调速器报废处理进行明确规定,根据企业提供的产品用户手册中关于产品报废阶段的处理方式说明,采用对此产品中的物料全部进行回收利用的处理方式核算碳排放数值,相应排放因子的来源为Ecoinvent数据库,其计算公式如下:

$$G_R = \sum_{j=1}^q (M_j \times MEF_j) \quad (6)$$

式中: G_R 为产品报废处理阶段碳排放总量; M_j 为报废处理的第 j 类材料实物量; MEF_j 为第 j 类材料的回收处理排放因子。

结合式(6)可求得高压变频调速设备报废处理阶段的碳足迹为432.27 kgCO₂e,具体排放量如表5所示。

表5 高压变频调速设备报废处理阶段碳足迹数据表

Tab.5 Table of CFP of disposal stage of high-voltage variable-frequency drive

报废元器件名称	质量/kg	排放量/kgCO ₂ e
薄膜电容	110.74	273.84
散热器	46.96	33.58
整机柜体	810.00	7.56
BM壳体	170.16	1.59
散热器固定件	12.48	0.12
风机壳体	100.00	0.93
干式变压器 (电工圆铝杆)	131.00	93.69
干式变压器(硅钢)	1 437.00	13.41
干式变压器(钢材)	125.00	1.17
电线	2.39	2.15
高压变压器接地电缆	0.90	0.81
电缆	3.71	3.35
组合螺钉	7.71	0.07

1.7 产品碳足迹

综上所述,本案例所评估的高压变频调速设备产品在其全生命周期各阶段碳排放量如表6所示,高压变频调速设备全生命周期碳足迹计算公式如下:

$$CFP = G_M + G_p + G_T + G_U + G_R \quad (7)$$

结合式(7)和表6可得高压变频调速设备全生命周期碳足迹为 $45.75 \times 10^5 \text{ kgCO}_2\text{e}$ 。

表6 高压变频调速设备产品碳足迹数据表

Tab.6 Table of CFP of high-voltage variable-frequency drive

产品生命周期阶段	排放量/kgCO ₂ e
原材料获取阶段	16 586.58
产品生产制造阶段	70.23
产品分销阶段	2 460.29
产品使用阶段	4 555 059.84
产品报废处理阶段	432.27

据表6可得,高压变频调速设备产品的碳排放量主要产生在使用阶段,占整体排放量高达99.57%,其原因主要为高压变频调速设备属于电工装备产品,使用寿命越长其阶段碳排放量越大,则产品碳足迹值越大,而其中为确保产品制造和使用阶段的碳足迹计算更加准确,本文采用国家生态环境部发布的《2021年电力二氧化碳排放因子》中的省级电力平均二氧化碳排放因子,因本案例产品用户所在地为山西,而山西省电力排放因子高于其他省份,因此使用阶段排放量水平较高。

1.8 产品功能贡献总和

产品的功能贡献总和指的是在评价系统边界内,产品实现功能单位的总量,即变频调速设备功能贡献总和在使用寿命期内输出电能的总和,其计算公式如下:

$$TFC = T_w \times 365 \times 24 \times P \quad (8)$$

式中: TFC 为产品的功能贡献总和,即变频调速设备寿命周期内总输出电能; P 为变频调速设备额定输出功率。

结合式(8)、表1以及分销阶段的碳排放量($2 460.29 \text{ kgCO}_2\text{e}$)可得高压变频调速设备功能贡献总和为 $1.314 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。

1.9 产品碳效比

变频调速设备碳效比计算公式如下:

$$CER = \frac{CFP}{TFC} \quad (9)$$

式中: CER 为变频调速设备碳效比,即基于全生命周期角度,变频调速设备输出满足用户需求的单位电能的碳足迹。

将1.7节和1.8节中的碳足迹和功能贡献总和计算结果代入式(9),求得高压变频调速设备的碳效比为 $3.48 \times 10^{-2} \text{ kgCO}_2\text{e}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。

2 产品碳效比评价与对比

基于天津天传电控设备检测有限公司积累的产品核算案例,将本文案例(高压变频调速设备A)与其他不同规格的变频调速设备产品进行了碳足迹和碳效比的对比分析,具体数据如表7所示。

表7 不同规格变频调速设备产品的碳足迹和碳效比

Tab.7 Table of CFP and CER of variable-frequency drive of different specifications

变频调速设备类型	输入电压/V	输出功率/kW	碳足迹/kgCO ₂ e	碳效比/[kgCO ₂ e·(kW·h) ⁻¹]
低压变频调速设备A	890~1 035	900	5.22×10^4	6.60×10^{-4}
低压变频调速设备B	380	7.5	8.26×10^3	1.53×10^{-2}
高压变频调速设备A	10 000	1 000	4.58×10^6	3.48×10^{-2}
高压变频调速设备B	10 000	500	1.02×10^6	2.42×10^{-2}

根据表7的分析结果可得出,不同规格的变频调速设备在碳足迹和碳效比方面有显著差异。低压变频调速设备A碳足迹较高,但其碳效比最低,表示其在每提供一单位功能贡献的情况下排放了较少的二氧化碳总量,适用于需要高效能的应用场景。低压变频调速设备B虽然碳足迹较低,但碳效比高,适用于中小型负荷的应用场景。高压变频调速设备B的碳足迹和碳效比均低于高压变频调速设备A,说明高压变频调速设备B在同样高负荷、高电力需求的工业场景中更低碳环保。不同规格产品碳效比的比较,可为采购此类产品的企业和用户提供数据参考,帮助其选择更合适的用能产品以实现节能减排的目标。

碳效比还可用于比较相同领域不同类型的产品的低碳性能,本文以电控配电类产品作为对比案例,其碳足迹和碳效比如表8所示,电控配电类产品的碳足迹值均属于较高水平,同时其具备使用寿命长、功能贡献有效可靠等特点,因此,采用碳效比参数评价其低碳性能更为科学。

结合表7、表8可得出,低压配电箱的碳效比显著低于低压动力柜,表明在提供相同单位电能的情况下,低压配电箱的环境影响更小。因此,在中小型负荷应用中,如住宅或小型商业设施,选择低压配电箱可以显著减少碳排放。两种母线槽的碳效比均远远低于变频调速设备和低压成套开关设备,表明此类产品具备极高的电能传

表8 不同类型电工装备产品的碳足迹和碳效比

Tab.8 Table of CFP and CER of electrical equipment of different types

产品名称	数量/ 单位	碳足迹/ kgCO ₂ e	碳效比/ [kgCO ₂ e·(kW·h) ⁻¹]
低压动力柜	1台	2.23×10 ⁴	0.21
低压配电箱	1台	1.66×10 ⁴	7.2×10 ⁻²
密集型铜铝复合 母线槽	1m	9.81×10 ³	4.7×10 ⁻⁵
密集型母线槽	1m	1.45×10 ⁴	7.3×10 ⁻⁵

输效率和极低的环境影响,其中密集型铜铝复合母线槽的碳效比低于密集型母线槽,表明其在电能传输中的能效更高,更加环保,更适合高效率和高密度电能传输的场景。

综上所述,碳效比作为衡量产品低碳性能的重要参数,具有广泛的应用价值。其既可用于对比属于同类型但不同规格产品间的低碳性能,也可以对比具有相同功能但属于不同类型的产品间的低碳性能。这种比较方法能够帮助企业和消费者更全面地了解及评估不同产品对环境的影响的大小。具体而言,碳效比越低,意味着产品在提供相同单位功能贡献时,所产生的碳排放量越少,其低碳性能越高。因此,企业在选择变频调速设备、配电箱或母线槽等电工装备时,可以通过比较这些产品的碳效比来确定哪些产品在相同工作条件下更加环保,有助于企业优化设备选型和采购决策,降低碳排放量,从而提升企业的绿色竞争力和品牌形象。

3 结论

近年来,电工装备行业绿色低碳发展受到广泛关注。本文利用碳效比计算方法,以高压变频调速设备产品作为实践案例,结合产品全生命周期碳足迹数据,核算其碳效比,帮助电工装备行业评估其产品的低碳性能大小。采用碳效比作为电工装备产品低碳评价的技术参数,既可用于对比属于同类型不同规格产品间的低碳性能,也可对比具有相同功能但属于不同类型产品间的低碳性能。产品碳效比越低,代表在提供相同单位功能贡献时,产生的碳排放量越少,低碳性能越高。

综上所述,使用碳效比参数评估产品的低碳性能,可以引导装备制造企业在产品设计、生产和应用过程中采取更加环保、节能的措施,降低碳排放,还可以为消费者提供更全面的产品信

息,帮助其选择更具低碳性能的电工装备产品,进而助力电工装备行业实现绿色低碳发展,促进节能减排目标的实现。

参考文献

- [1] 董天舒. 变频调速设备行业经济运行分析与未来展望[J]. 电器工业, 2021(10):28-31.
DONG Tianshu. Bianpin tiaosu shebei hangye jingji yunxing fenxi yu weilai zhanwang[J]. Electric Industry, 2021(10):28-31.
- [2] 侯晨. 碳达峰碳中和背景下我国制造业转型升级研究[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2023.
HOU Chen. The study on transformation and upgrading of Chinese manufacturing industry under the background of carbon peaking and carbon neutrality[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2023.
- [3] DE FELICE F, ELLA V, GNON M G, et al. Comparing environmental product footprint for electronic and electric equipment: a multi-criteria approach[J]. International Journal of Sustainable Engineering, 2014, 7(4):360-373.
- [4] 杨建新. 面向产品的环境管理工具:产品生命周期评价[J]. 环境科学, 1999, 20(1):100-103.
YANG Jianxin. Toward a product orientated environmental management: life cycle assessment[J]. Environmental Science, 1999, 20(1):100-103.
- [5] XIAO R F, ZHANG Y, LIU X, et al. A life-cycle assessment of household refrigerators in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 95:301-310.
- [6] DUAN H, EUGSTER M, HISCHIER R, et al. Life cycle assessment study of a Chinese desktop personal computer[J]. Science of the Total Environment, 2009, 407(5):1755-1764.
- [7] 孙铎,张鹏,赵明楠. 汽油发动机生命周期能源消耗和环境影响评价[J]. 环境科学学报, 2016, 36(8):3059-3065.
SUN Xin, ZHANG Peng, ZHAO Mingnan. Life cycle energy consumptions and environmental impact assessment of the gasoline engine[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(8):3059-3065.
- [8] 何冠成,刘岩,母志鹏,等. 碳效比—装备产品低碳性能关键技术参数[J]. 环境技术, 2024, 42(01):93-98.
HE Guancheng, LIU Yan, MU Zhipeng, et al. Carbon efficiency ratio—key technical parameters of low-carbon performance of equipment products[J]. Environmental Technology, 2024, 42(1):93-98.
- [9] 何冠成,王继伟,刘国荣. 空调行业产品碳效比(CER)核算与实践[J]. 环境技术, 2022, 40(4):142-146.
HE Guancheng, WANG Jiwei, LIU Guorong. Accounting and practice of carbon efficiency ratio(CER) of products in air conditioning industry[J]. Environmental Technology, 2022, 40(4):142-146.

收稿日期:2024-07-01

修改稿日期:2024-09-02