

城市公共汽车全生命周期碳排放测算

张文会, 付博, 周舸, 乔晓田

(东北林业大学土木与交通学院, 哈尔滨 150040)

摘要:为了测算城市公共汽车生命周期中各阶段的碳排放量,将公共汽车的生命周期划分为工艺周期与能源周期。考虑各系统生产制造、组装、运输、报废回收阶段,调研获取城市公共汽车的结构参数,综合公交企业提供的运营数据,使用 GREET 内部数据和 Gabi 软件对工艺周期 CO₂排放量进行测算。构建包含能源开采、生产加工、运输、使用阶段的 CO₂排放测算模型,分别对纯电动公共汽车和柴油公共汽车的能源周期 CO₂排放量进行测算。结果表明:在工艺周期,纯电动公共汽车 CO₂排放量比柴油公共汽车高 39.2%;在能源周期,纯电动公共汽车 CO₂排放量比柴油公共汽车低 14.2%;综合全生命周期,纯电动公共汽车 CO₂排放比柴油公共汽车低 9.73%。

关键词:交通运输工程;城市公共汽车;全生命周期;碳排放测算

中图分类号:U491 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2025)04-1232-09

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20230673

Carbon emissions calculation for urban buses throughout lifecycles

ZHANG Wen-hui, FU Bo, ZHOU Ge, QIAO Xiao-tian

(School of Civil Engineering and Transportation, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: To measure the carbon emissions at each stage of buses throughout life cycle, this paper divided the life cycle of buses into process cycle and energy cycle. Considering the production, assembly, transportation, and recycling stages of each bus system, carried out research to obtain bus production data, combined the data provided by the company and GREET internal data, used Gabi to measure CO₂ emissions of process cycle. Constructed a CO₂ emissions measurement model that included the stages of energy extraction, production processing, transportation, and usage to estimate the energy cycle CO₂ emissions of electric buses and diesel buses. The result shows that the CO₂ emissions of electric buses are 39.2% higher than those of diesel buses during the process cycle. In the energy cycle, the CO₂ emissions of electric buses are 14.2% lower than those of diesel buses. In a comprehensive life-cycle comparison, the CO₂ emissions of electric buses are 9.73% lower than those of diesel buses.

Key words: transportation engineering; urban buses; life cycle; carbon emissions calculation

收稿日期:2023-06-29.

基金项目:国家自然科学基金项目(51278158);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2572021DT09);黑龙江省重点研发计划项目(JD22A014).

作者简介:张文会(1978-),男,副教授,博士.研究方向:交通运输规划与管理.E-mail:rayear@163.com

0 引言

交通运输高度依赖化石燃料在移动终端的燃烧,2019年中国交通运输业的碳排放量达到9.1亿吨,占全国碳排放总量的9.17%^[1],这在碳减排方面引起了广泛的关注。

近年来,许多研究人员对车辆进行了生命周期评估研究,使用的方法包括但不限于GREET模型、车辆模拟工具等^[2],基于这些工具可以评估各种燃料基础上的排放效益^[3]。有研究^[4]从能源链角度构建了纯电动公共汽车全生命周期CO₂排放测算模型,结果显示,相较于柴油公共汽车,纯电动公共汽车减排效果显著。然而该方法只关注了车辆能源链的CO₂排放,并未涉及车辆链以及动力电池生命周期的CO₂排放。严格来说,车辆的综合生命周期评估还应包括车辆设备和设备材料上游部分的分析^[5]。为寻求更有效可行的减排方案,目前已有学者尝试对汽车的系统进行改良,进而评估改良后的整车在生命周期的减排效果^[6]。常见的碳足迹生命周期评估方法还包括经济投入产出生命周期评估^[7],融合了经济投入产出分析和传统生命周期评估的特点,为研究人员提供了一个更宏观的视角了解产品在整个生命周期中对环境的影响^[8]。有学者使用基于投入产出分析的混合生命周期评估方法,比较了柴油、电池电动和天然气公交车的生命周期对环境的影响^[9]。结果表明:虽然电池电动公交车和混合动力公交车排放的污染物较少,但依赖化石燃料发电对电池电动公交车的运营产生了极大的影响。但这种方法的粒度不如传统的基于过程的生命周期评估详细,而且需要高质量的数据,实施起来难度更大^[10]。

因此,本文将生命周期划分为能源周期与工艺周期,能源周期包括燃料开采、加工、运输和使用的过程;工艺周期包括公共汽车车身、动力系统 etc 从原材料生产、组装、运输到最终报废回收的过程,基于企业调研数据计算公共汽车工艺周期的CO₂排放,建立能源周期CO₂排放测算模型,对比分析两种公共汽车在整个生命周期各个阶段的碳排放情况。

1 研究方法与范围

1.1 研究方法

工艺周期测算过程采用全生命周期评价法,

根据本文的研究目标,测算步骤为:目标与范围的确定(系统边界)→清单分析→结果解释。借助全生命周期评价软件Gabi,结合调研获得的数据和GREET内部数据对公共汽车工艺周期各阶段的CO₂排放量进行测算。对于能源周期,本文参考“井到轮”(Wells to wheels, WTW)评价原理,建立了公共汽车能源周期碳排放测算模型。WTW评价方法将能源周期划分为两个阶段:油井到油泵阶段(Wells-to-pump, WTP),油泵到车轮阶段(Pump-to-wheels, PTW)^[11]。其中WTP阶段包括原材料的开采、运输以及燃料的生产、运输等;PTW为车辆运行过程的燃料消耗阶段^[12]。

1.2 系统边界

柴油公共汽车是传统燃料公共汽车的代表,曾经占据了相当大的比例,纯电动公共汽车是新能源公共汽车的代表,现阶段正被大规模推广使用。因此,本文以柴油公共汽车与纯电动公共汽车为例进行测算。研究方法同样适用于汽油、天然气、油电混合公共汽车等车型。在进行全生命周期评价前,需要对研究对象的系统边界进行设定。研究对象的系统边界如图1所示。

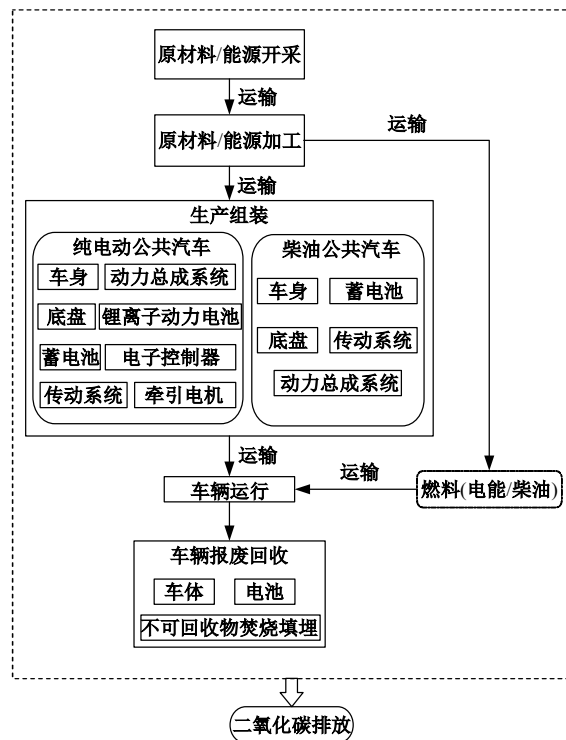


图 1 系统边界

Fig. 1 System boundary

1.3 能源周期碳排放测算模型

能源周期CO₂排放计算方法如式(1)所示:

$$P_{\text{co}_2} = \sum_{h=1}^4 \sum_{j=1}^8 (E_j + E_{\text{loop},j} + H_{h,j}) \times F_j \quad (1)$$

式中: P_{co_2} 为能源周期碳排放量, kg; E_j 为第 j 种能源的消费强度, kg, m^3 , $\text{kW}\cdot\text{h}$; j ($j=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$) 为能源的种类, 分别表示原煤、原油、天然气、柴油、电能、汽油、燃料油和褐煤; $H_{h,j}$ 为第 h 阶段第 j 种能源的消费量, kg, m^3 , $\text{kW}\cdot\text{h}$; h ($h=1, 2, 3, 4$) 为分析阶段, 分别表示原料开采、原料运输、加工生产和成品运输阶段; F_j 为第 j 种能源的 CO_2 排放因子。在计算第 j 种能源产品生命周期消费强度时, 会涉及其他能源的消费, 对于这些能源的生命周期消耗也需要进行计算, 在这个过程中, 仍涉及第 j 种能源的消费, 这样就构成了一次循环。把第 m ($m \geq 1$) 次生产某种能源的过程作为一次循环 $E_{\text{loop},j,m}$, 则这 m 轮循环过程中涉及的第 j 种能源的消费之和为 $E_{\text{loop},j} \circ E_{\text{loop},j}$ 的计算方法如式(2)所示:

$$E_{\text{loop},j} = \sum_{m=1}^m E_{\text{loop},j,m} \quad (2)$$

式中: $E_{\text{loop},j,m}$ 为第 m 次循环中第 j 种能源的消费强度, $\text{kg}, \text{m}^3, \text{kW}\cdot\text{h}$ 。计算方法如式(3)所示:

$$E_{\text{loop},j,m} = \sum_{h=1}^4 \sum_{j=1}^8 H_{m,h,j} \times \varphi_{m,h,j} \quad (3)$$

式中: $H_{m,h,j}$ 为第 m 次循环的 h 阶段中第 j 种能源的消费强度, $\text{kg}, \text{m}^3, \text{kW}\cdot\text{h}$; $\varphi_{m,h,j}$ 为在第 m 次循环的 h 阶段中第 j 类能源的消耗强度占比。

1.3.1 能源消耗强度计算

要获取能源周期的 CO_2 排放量, 首先需要获取能源的消耗强度, 第 j 种能源的消费强度 E_j 的计算方法如式(4)所示:

$$E_j = \frac{L_j}{100} \times S_j \quad (j=4, 5) \quad (4)$$

式中: L_j 为使用第 j 种能源车辆的全生命周期行驶里程, km; S_j 为使用第 j 种能源的车辆每百公里消耗, $\text{L}/100 \text{ km}, \text{kW}\cdot\text{h}/100 \text{ km}$ 。

1.3.2 开采过程能源消费

开采过程能源消费如式(5)所示:

$$H_{1,j} = \frac{E_j}{\mu_j} \times e_{1,j} \quad (5)$$

式中: μ_j 为第 j 种能源原材料加工的转化系数; $e_{1,j}$ 为原材料开采过程中, 开采单位数量第 j 种能源的消费, $\text{kg}, \text{m}^3, \text{kW}\cdot\text{h}$ 。

1.3.3 原材料运输过程能源消费

原材料运输在计算时需要考虑运力占比、运距和单位里程的消耗。原材料运输过程的能源消费如式(6)所示:

$$H_{2,j} = \frac{E_j}{\mu_j} \times \sum_{n=1}^5 \delta_{2,j,n} \times L_{2,j,n} \times e_{2,j,n} \quad (6)$$

式中: $\delta_{2,j,n}$ 为第 n 种运输方式在第 j 种能源的原材料运输方式中的占比; n ($n=1, 2, 3, 4, 5$) 为运输方式, 分别表示远洋、铁路、管道、水运和公路运输; $L_{2,j,n}$ 为第 j 种能源原材料的运输方式中第 n 种运输方式的平均运距, km; $e_{2,j,n}$ 为第 j 种能源的原材料的运输方式中, 第 n 种运输方式的单位里程能源消费, $\text{kg}, \text{m}^3, \text{kW}\cdot\text{h}$ 。

1.3.4 加工生产过程能源消费

加工生产过程的能源消费如式(7)所示:

$$H_{3,j} = \frac{E_j}{\mu_j} \times e_{3,j} \quad (7)$$

式中: $e_{3,j}$ 为能源加工生产过程中, 生产单位数量第 j 种能源的消费, $\text{kg}, \text{m}^3, \text{kW}\cdot\text{h}$ 。

电能的生产需要考虑发电效率。计算方法如式(8)所示:

$$H_{3,5} = \sum_{i=1}^4 \frac{E_5 \times \alpha_i}{\eta_i} \quad (8)$$

式中: E_5 为电能消费强度; α_i 为第 i 类发电方式的占比, i ($i=1, 2, 3, 4$) 为发电方式, 分表示火电、水电、风电和核电; η_i 为第 i 类发电方式的发电效率。

1.3.5 产品运输过程能源消费

产品运输过程的能源消费如式(9)所示:

$$H_{4,j} = E_j \times \sum_{n=1}^5 \delta_{4,j,n} \times L_{4,j,n} \times e_{4,j,n} \quad (9)$$

式中: $\delta_{4,j,n}$ 为第 n 种运输方式在第 j 种能源产品运输方式中的占比; $L_{4,j,n}$ 为第 j 种能源产品的运输方式中, 第 n 种运输方式的平均运距, km; $e_{4,j,n}$ 为第 j 种能源产品的运输方式中, 第 n 种运输方式的单位里程能源消费, $\text{kg}, \text{m}^3, \text{kW}\cdot\text{h}$ 。

对于输电过程, 能源消耗是由线路损耗造成的。线路损耗计算如式(10)所示:

$$H_{4,5} = E_5 \times \bar{\omega} \quad (10)$$

式中: $\bar{\omega}$ 为线损率。

2 全生命周期碳排放测算

2.1 工艺周期碳排放测算

调研得到两种类型公共汽车参数如表1、表2

所示。本研究忽略公共汽车中占比较小的零件,只考虑其主体构造,不考虑汽车润滑油、制动液、冷却液等液体的使用。

表 1 公共汽车参数

Table 1 Buses parameters

参数	柴油公共汽车	纯电动公共汽车
尺寸/mm	12 000×2 550×3 150	12 000×2 550×3 290
整备质量/kg	11 600	13 000
动力源	柴油	锂离子动力电池
动力电池质量/kg	—	1 324.5
电池容量/(kW·h)	—	210.56
附加电源	铅蓄电池	铅蓄电池
附加电源质量/kg	28	28

表 2 系统质量

Table 2 Quality of systems

系统	质量/kg	
	柴油公共汽车	纯电动公共汽车
车身	6 026	5 677.3
动力总成系统	1 775	521.6
传动系统/齿轮箱	731	638.7
底盘(不含电池)	2 946.4	2 774.4
牵引电机	—	1 040.5
电子控制器	—	654

2.1.1 清单数据分析

结合表 2 与 GREET 数据库,得到两种公共汽车的零部件组成数据,如表 3 和表 4 所示。

锂离子动力电池与铅蓄电池的组成清单如表 5、表 6 所示。

表 3 柴油公共汽车主要材料组成

Table 3 Main material composition of diesel bus

系统	原材料	质量/kg	系统	原材料	质量/kg	
车身	钢	4007	传动系统	钢	219.2	
	普通塑料	1 331.6		普通塑料	36.5	
	玻璃	270		系统	锻造铝	219.2
	铜	116.6		铸铁	219.2	
	锻造铝	190.2		橡胶	36.5	
	橡胶	110.6		—	—	
动力总成系统	钢	752.5	底盘	钢	1968.2	
	锻造铝	85.2		铸铝	548	
	铸铝	395.8		锻造铝	44.2	
	铜	120.7		铜	38.3	
	橡胶	39		普通塑料	67.8	
	普通塑料	337.2		橡胶	271.1	
	玻璃纤维增强塑料	44.4		镁	8.8	
	—	—		—	—	
	—	—		—	—	
	—	—		—	—	

表 4 纯电动公共汽车主要材料组成

Table 4 Main material composition of electric bus

系统	原材料	质量/kg	系统	原材料	质量/kg
车身	钢	3776.6	传动系统	钢	388
	普通塑料	1254		铜	121.2
	玻璃	257		锻造铝	128.2
	铜	109.8		普通塑料	1.3
	锻造铝	177.6		钢	1856.3
	橡胶	102.3		铸铝	516.9
动力总成系统	钢	260.8	底盘	锻造铝	41.9
	铜	106.9		铜	36.8
	普通塑料	159.9		镁	2.8
牵引电机	钢	544.1	电子控制器	橡胶	254.4
	不锈钢	12		普通塑料	65.3
	铸铝	343.7		玻璃纤维	4.5
	铜	110.5		镍	1.1
	钨(钨)铁	30.2		尼龙	0.5
	硼磁铁	—		—	—
电子控制器	钢	18.5	电子控制	PET	20.1
	铸铝	357.9	器	聚丙烯	28.8
	铜	183.6	聚氨酯	14.3	
	橡胶	7.4	锌	7.4	
	普通塑料	6.5	—	—	
	氧化铝	1.8	—	—	
	环氧树脂	1.6	—	—	

表 5 锂离子动力电池主要组成清单

Table 5 List of components of lithium-ion power battery

材料	质量/kg	材料	质量/kg
锰酸锂	331	LiPF ₆	12
石墨	188.1	钢	321.9
铜	98	不锈钢	58.3
锻造铝	160.3	乙二醇	42.1

表 6 铅蓄电池主要组成清单

Table 6 List of main components of lead batteries

材料	质量/kg
聚丙烯	1.7
铅	19.3
硫酸	2.2
玻璃纤维	0.6
水	4

2.1.2 组装、配送与报废回收

公共汽车组装过程中主要消耗电能。根据调查,组装 1 kW·h 的锂离子电池需要 217 341.5 kJ 的能量,组装 1 kg 的铅蓄电池需要 3 586.1 kJ 的能量,折合电能分别为 12 712、28 kW·h;纯电动公共汽车、柴油公共汽车组装过程分别需要电能 8

938.7、10 404 kW·h。

运输配送阶段可近似视为重型卡车运输,取平均运距 1 600 km^[13]。在报废处理阶段,车身体体的金属材料、锂电池经过处理可回收,玻璃、塑料等材料则需要进行焚烧填埋处理。目前国内缺少此类材料回收处理的数据库,因此,处理工艺选择 Gabi 软件内置的处理流程。参考文献[14]的研究,回收 1 kg 的金属材料的能源消耗如表 7 所示。

表 7 单位千克金属材料回收能耗

Table 7 Metal material recycling energy consumption

能源种类	钢材	铝材	铸铁	铜
煤/kg	—	—	0.313	—
柴油/kg	—	3.08E-05	—	—
汽油/kg	—	4.85E-05	—	—
天然气/m ³	0.006 6	0.047	—	—
电力/(kW·h)	1.176	0.2211	0.622	2.65

锂电池的回收采用文献[15]的方法,回收 1 324.5 kg 的锂电池消耗盐酸 504.5 kg、氢氧化钠溶液 126.2 kg、 γ -MnO₂ 离子固体粉末 31.5 kg、电能 56.7 kW·h、天然气能 12.6 kW·h,得到 LiCl 固体 114 kg,电池外壳经过回收处理可获得铝箔碎片 46.4 kg。铅蓄电池报废处理阶段能耗为 31 MJ/kg。

2.1.3 结果分析

使用 Gabi 软件测算工艺周期的 CO₂ 排放,结果如表 8 所示。

纯电动公共汽车与柴油公共汽车在工艺周期

表 8 工艺周期 CO₂ 排放量

Table 8 CO₂ emissions during process cycle

阶段	工艺周期 CO ₂ 排放量/kg	
	柴油公共汽车	纯电动公共汽车
车身	10 832.5	13 835.6
动力总成系统	6 670	1 332.7
牵引电机	—	5 047.5
电子控制器	—	4 572.7
传动系统	2 826	2 578.6
底盘	8 625	10 451.7
组装	7 810.5	8 920.4
锂离子动力电池	—	15 365.1
铅蓄电池	60.8	60.8
运输	1 138.2	1 216
金属报废回收	7 089.6	11 581
不可回收物焚烧	1 813.2	1 807
回收锂电池	—	321.8
铅蓄电池报废	8.7	8.7

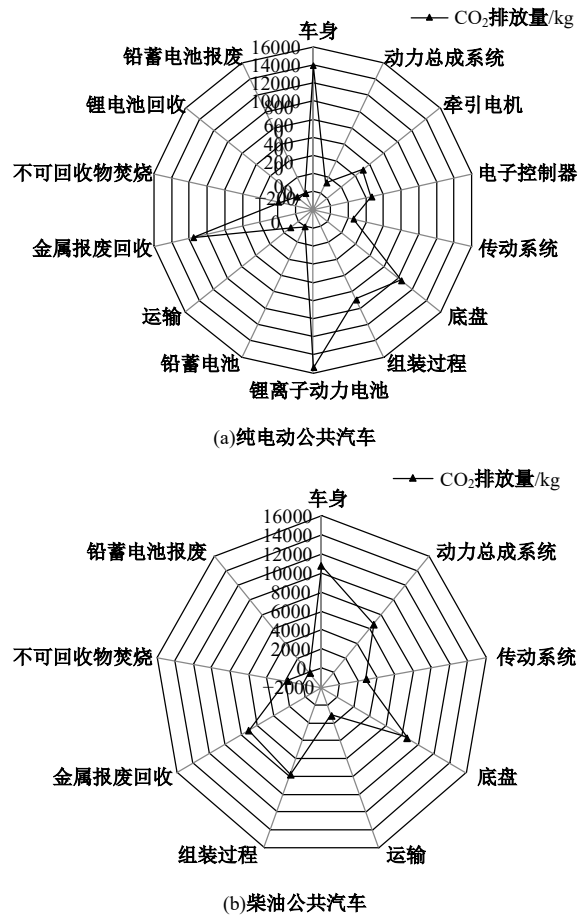


图 2 公共汽车工艺周期 CO₂ 排放

Fig. 2 CO₂ emissions of buses during process cycle

的 CO₂ 排放总量分别为 77 099.6、46 874.9 kg。柴油公共汽车比纯电动公共汽车减少了 39.2% 的 CO₂ 排放。由图 2(a) 可知,纯电动公共汽车工艺周期中的 CO₂ 排放主要来自车身的生产、锂离子动力电池的制造、底盘的制造以及金属报废回收过程,分别占工艺周期的 18%、20%、13.5% 和 15%。锂离子动力电池的制造消耗了大量的能量,这导致了锂离子动力电池生产过程的高排放。

柴油公共汽车工艺周期中的 CO₂ 排放主要来自车身、动力总成系统和底盘部分的制造过程,分别占工艺周期排放的 23%、14.2% 和 18.4%。此外,组装和报废回收过程也会产生一定量的 CO₂ 排放,分别占工艺周期的 16.7% 和 15.1%。柴油公共汽车的动力总成系统和传动系统的制造过程所产生的 CO₂ 排放量分别比纯电动公共汽车高 5 338.3、247.4 kg。

2.2 能源周期碳排放测算

2.2.1 能源消费强度测算

根据最新《机动车强制报废标准规定》,公交

客运汽车使用13年即达到报废标准。因此,本文设定公共汽车的寿命为13年。调研公交系统的相关数据,得到各类公共汽车的行驶能耗及运营里程数据与生命周期能源的消费强度如表9所示。

表9 公共汽车运营数据

Table 9 Buses operation data

车辆类型	百公里能耗	年运营里程/km	能源消费强度
柴油公共汽车	31 L	5.48×10^4	220 844 L
纯电动公共汽车	90 kW·h	5.48×10^4	641 160 kW·h

2.2.2 柴油WTP阶段数据

原油开采装置原油液生产过程中,吨液百米用电准入值如表10所示。不同地区的油田开采出的原油比例不同,本文以我国辽河油田为例,产品中普通稠油占60%,稀油占40%。

表10 机械采油装置能耗

Table 10 Mechanical oil extraction unit energy consumption

原油分类	能耗准入值(kW·h)/(10 ² m·t)
稀油	5.65
普通稠油	3.9

本文设定油井深度为2 000 m。根据《炼油单位产品能源限额》(GB 30251—2013),炼油设施综合能耗应不大于63 kgoe/t,我国柴油加工的转化系数为0.2。石油加工过程中消耗各种能源比例如表11所示。

表11 石油加工过程能源消耗比例

Table 11 Energy consumption ratio of oil refining process

能源	原煤	天然气	燃料油	柴油	电力
比例/%	48.9	3.8	11.9	1.7	33.8

对于原油运输阶段,需要考虑进口与国产两部分。结合《中国统计年鉴》与文献[16]和文献[17]的研究,各运输阶段的参数如表12所示。其中运输比例总和大于100%是因为考虑到进口原油的运输:进口原油通过海运的方式运抵港口后,需要以铁路、管道或水运等方式运至炼油厂。

2.2.3 电能WTP阶段数据

根据《中国能源统计年鉴》,2020年我国火力发电占比为71%。清洁能源发电不会产生CO₂的排放,本文只考虑火力发电的碳排放。

煤炭开采过程中涉及的能源包括电能、汽油、柴油等。为方便计算,开采过程中的综合能耗采用标准煤为计量单位。电能是褐煤洗选过程中的

表12 油品运输数据

Table 12 Oil transportation data

运输方式	原油运输		成品油运输	
	比例/%	平均运距/km	比例/%	平均运距/km
远洋	50	11 000	25	7 000
铁路	45	749	50	900
管道	80	590	0	0
水运	10	250	15	1 200
公路	0	0	10	50

主要能源,此过程消耗的电能同样需要发电厂燃烧提供。根据《煤炭井工开采单位产品能源消耗限额》(GB 29444—2012)规定,新建煤炭井工开采企业单位产品综合能耗应不大于7.0 kgce/t。我国火力发电厂通常使用动力煤发电,主要包括褐煤、不黏结煤、贫煤等。本文假设火力发电厂全部使用褐煤发电,褐煤可直接从自然界开采获得。开采后的褐煤要经过洗选,干法洗选效率为95%,根据《选煤电力消耗限额》(GB 29446—2019),新建动力煤选煤场洗选能耗不得高于3.0 kWh/t。假设褐煤的燃烧效率为90%,发电机组发电效率为40%,线损率为8%。褐煤运输情况如表13所示。褐煤开采过程各类能源消耗比例如表14所示^[18]。

表13 褐煤运输方式

Table 13 Transportation mode for lignite

方式	百分比/%	平均运距/km
铁路	50	1000
公路	20	310
水路	17	650

表14 褐煤开采能源消耗比例

Table 14 Energy consumption ratio of lignite mining

能源	原煤	天然气	汽油	柴油	电力
比例/%	80	1	1	2	16

2.2.4 天然气WTP阶段数据

天然气黏度小,在地层和管道中的流动阻力也小;由于膨胀系数大,其弹性能量也大。因此,天然气开采时一般采用自喷方式。这种开采方式的能耗极小,天然气的开采一般采用这种方式。因此,本文不考虑天然气开采过程的能耗。开采的天然气经集输管线进入液化厂,通过处理单元脱杂质、水;脱硫;脱重烃、轻烃后才能作为燃料使用。天然气处理效率为94%,压缩天然气的平均运距为625 km。天然气净化处理能耗组成来源于文献[19]的研究,如表15所示,天然气净化处

理过程燃料混合比例为:精炼天然气(99%),电力(1%)。

由表 15 可知,天然气净化装置单位能耗为 66.763 4 kg·ce/10⁴m³。上述的各种运输方式的燃

表 15 天然气净化处理能耗

Table 15 Energy consumption of natural gas purification

项 目	单位能耗/[kgce·(10 ⁴ m ³) ⁻¹]
新鲜水	0.006 9
循环水	3.785 4
除盐水	0.000 0
凝结水	0.000 0
电/kW	10.619 1
蒸汽/0.5 MPa	44.137 4
燃气/(m ³ ·h ⁻¹)	8.214 6
合计	66.763 4

表 17 公共汽车能源周期 CO₂排放量

Table 17 CO₂ emissions of buses during energy cycle

类型	WTP			PTW	总计
	开采阶段	加工阶段	运输阶段	使用阶段	
柴油公共汽车/kg	89 606.6	102 553.3	24 727	568 231.6	785 118.8
纯电动公共汽车/kg	8 445.7	660 333.1	5 234	0	674 012.8

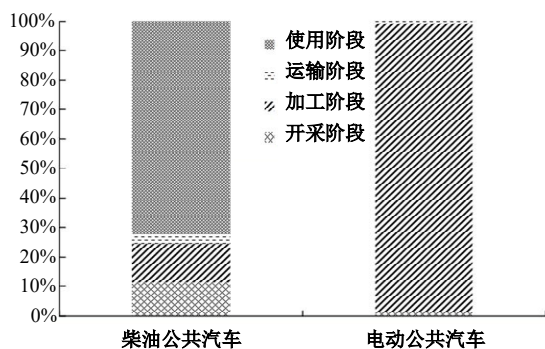


图 3 公共汽车能源周期 CO₂排放比例

Fig. 3 CO₂ emissions ratio of buses during energy cycle

在能源周期,纯电动公共汽车的减排能力优于柴油公共汽车,柴油公共汽车的 CO₂排放量比纯电动公共汽车高 14.2%。在纯电动公共汽车的加工阶段,即煤炭燃烧转化为电力的阶段,产生的 CO₂排放占 WTP 阶段总排放量的 98%;在 PTW 阶段,纯电动公共汽车实现了零排放,但本质上其 CO₂的排放只是被转移到了加工阶段。尽管如此,在加工阶段和使用阶段的 CO₂排放之和仍然比柴油公共汽车低。

在加工阶段和使用阶段,纯电动公共汽车的 CO₂排放量之和比柴油公共汽车高 10 451.8 kg。

料结构及能源消耗强度如表 16 所示。

表 16 运输能源消耗

Table 16 Energy consumption for transportation

运输方式	能源强度 /[kJ·(t·km) ⁻¹]	燃料结构
远洋	23	燃料油(100%)
铁路	240	柴油(55%),电(45%)
原油管道	300	燃料油(50%)
天然气管道	372	天然气(99%),电力(1%)
水运	148	燃料油(100%)
公路	1 362	柴油(68%),汽油(32%)

2.2.5 结果分析

综合以上数据,利用能源周期碳排放测算模型,即式(1)~(10)的模型获得柴油公共汽车与纯电动公共汽车能源周期碳排放量,如表 17 所示。能源周期各阶段 CO₂排放比例如图 3 所示。

在开采阶段与运输阶段,柴油公共汽车分别比纯电动公共汽车高 9.6、3.7 倍。

2.3 全生命周期结果分析

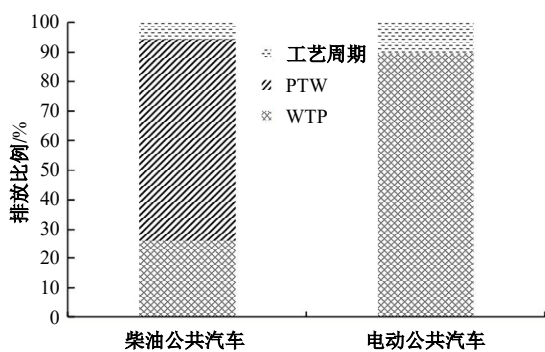
全生命周期 CO₂排放量如表 18 所示,为便于比较全生命周期各阶段 CO₂排放量的情况,本文绘制了百分比堆积直方图,如图 4 所示。

表 18 公共汽车全生命周期 CO₂排放量

Table 18 CO₂ emissions of buses during life cycle

类型	工艺周期	能源周期		总计
		WTP	PTW	
柴油公共汽车/kg	46 873.9	216 886.9	568 231.6	831 992.7
纯电动公共汽车/kg	77 099.6	674 012.8	0	751 112.4

在工艺周期,柴油公共汽车的 CO₂排放量比纯电动公共汽车低 30 225.7 kg;在能源周期,柴油公共汽车的 CO₂排放比纯电动公共汽车高 111 105.3 kg,纯电动公共汽车的 CO₂排放主要集中在 WTP 阶段,占全生命周期的 90%。柴油公共汽车的 CO₂排放主要集中于 PTW 阶段,占全生命周期的 68.3%。结合工艺周期与能源周期分析,纯电动公共汽车相比柴油公共汽车降低

图4 公共汽车全生命周期CO₂排放比例Fig. 4 CO₂ emissions ratio of buses during life cycle

了9.73%的CO₂排放量。在目前的电力结构下,纯电动公共汽车相较于柴油公共汽车具有显著的减排效果。

3 结 论

(1)在工艺周期,纯电动公共汽车并无减排优势,两种车型的车身和底盘生产、金属回收过程均产生大量的碳排放;纯电动公共汽车锂离子动力电池生产过程CO₂排放量远高于车身和底盘生产过程。金属报废回收阶段产生的CO₂排放同样不可忽视,但这一过程可以推动金属的再利用,在一定程度上减少零部件材料生产制造阶段的碳排放。

(2)在能源周期,纯电动公共汽车具有明显的减排优势,纯电动公共汽车碳排放集中在WTP阶段,柴油公共汽车碳排放集中在PTW阶段,柴油公共汽车在能源开采与运输阶段碳排放总和较高。虽然纯电动公共汽车在能源加工阶段碳排放比柴油公共汽车多650 077.8 kg,但在使用阶段达到了零排放。

(3)在整个生命周期,纯电动公共汽车相比柴油公共汽车,CO₂排放量降低9.73%,两种类型公共汽车主要碳排放集中在能源周期。根据测算结果,未来电力结构调整、电池技术进步以及车身材料革新,均可降低纯电动公共汽车整个生命周期的碳排放。

参考文献:

- [1] 肖红, 邓梓浩, 任艳娟, 等. 城市交通运输碳排放预测模型及碳减排策略[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2023, 42(9): 85-92, 98.
Xiao Hong, Deng Zi-hao, Ren Yan-juan, et al. Urban transportation carbon emission prediction model strategies[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2023, 42(9): 85-92, 98.
- [2] Bieker G. A global comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of combustion engine and electric passenger cars[J]. Washington D. C.: Communications, 2021, 49(30): 847129-102.
- [3] Wong E Y C, Ho D C K, So S, et al. Life cycle assessment of electric vehicles and hydrogen fuel cell vehicles using the greet model—a comparative study[J]. Sustainability, 2021, 13(9): 4872.
- [4] 王雪然, 刘文峰, 张龙文, 等. 基于能源链的纯电动公交车全生命周期CO₂减排效果研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2019, 19(1): 19-25.
Wang Xue-ran, Liu Wen-feng, Zhang Long-wen, et al. CO₂ emission reduction effect of electric bus based on energy chain in life cycle[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2019(1): 19-25.
- [5] 宋大风, 吴西涛, 曾小华, 等. 基于理论油耗模型的轻混重卡全生命周期成本分析[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2018, 48(5): 1313-1323.
Song Da-feng, Wu Xi-tao, Zeng Xiao-hua, et al. Life cycle cost analysis of mild hybrid heavy truck based on theoretical fuel consumption mode[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2018, 48(5): 1313-1323.
- [6] 王童, 杜轶群, 陈轶嵩, 等. 基于结构轻量化的城市客车车身生命周期评价[J]. 汽车工程, 2022, 44(5): 778-788.
Wang Tong, Du Yi-qun, Chen Yi-song, et al. Life cycle assessment of city bus body based on structural lightweighting[J]. Automotive Engineering, 2022(5): 778-788.
- [7] 田成诗, 张诗雅. 中国行业供应链碳足迹的来源分解分析——基于投入产出的生命周期评价模型[J]. 环境经济研究, 2019, 4(2): 58-75.
Tian Cheng-shi, Zhang Shi-ya. Source decomposition analysis of carbon footprint in China's industry supply chain: based on IO-LCA model[J]. Journal of Environmental Economics, 2019, 4(2): 58-75.
- [8] Harris A, Soban D, Smyth B M, et al. Assessing life cycle impacts and the risk and uncertainty of alternative bus technologies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 97: 569-579.
- [9] Chang C C, Liao Y T, Chang Y W. Life cycle assessment of alternative energy types—including hydrogen—for public city buses in Taiwan[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(33): 1239-1248.

- 18472-18482.
- [10] Ferrao P, Nhambiu J. A comparison between conventional LCA and hybrid EIO-LCA: analyzing crystal giftware contribution to global warming potential[M]// Handbook of Input-Output Economics in Industrial Ecology, Dordrecht: Springer Netherlands, 2009: 219-230.
- [11] 余大立, 张洪申. 纯电动与柴油货车全生命周期能耗及排放分析[J]. 环境科学学报, 2019, 39(6): 2043-2052.
Yu Da-li, Zhang Hong-shen, The life cycle analysis of energy consumption and emission of pure electric van and diesel van[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019(6): 2043-2052.
- [12] 丁舟波, 李彬, 牛继高, 等. 电动汽车燃料生命周期评价研究[J]. 森林工程, 2017, 33(6): 56-59, 66.
Ding Zhou-bo, Li Bin, Niu Ji-gao, et al. Research on life cycle assessment of electric vehicle fuel[J]. Forest Engineering, 2017, 33(6): 56-59, 66.
- [13] 施羽, 张华, 于智涵. 电动汽车全生命周期节能减排效益分析及环境影响评价[J]. 资源与产业, 2021, 23(2): 100-109.
Shi Yu, Zhang Hua, Yu Zhi-han. Energy-saving benefits and environment impacts of electric vehicles lifecycle[J]. Resources & Industries, 2021(2): 100-109.
- [14] 李娟, 杨沿平, 陈轶嵩. 铝合金与铸铁缸盖的生命周期评价对比分析[J]. 环境工程学报, 2015, 9(11): 5642-5648.
Li Juan, Yang Yan-ping, Chen Yi-song. Comparative analysis on life cycle assessment between aluminum alloy and cast iron cylinder cover[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015(11): 5642-5648.
- [15] 张雷, 刘志峰, 王进京. 电动与内燃机汽车的动力系统生命周期环境影响对比分析[J]. 环境科学学报, 2013, 33(3): 931-940.
Zhang Lei, Liu Zhi-feng, Wang Jin-jing. Comparative analysis of life cycle environmental impact between power system of electric and internal combustion engine vehicles[J]. Acta Scientiae Circumstantiae. 2013(3): 931-940.
- [16] 程冬茹. 汽柴油全生命周期碳排放计算[D]. 北京: 中国石油大学化学工程与环境学院, 2016.
Cheng Dong-ru. Carbon emissions calculation of gasoline and diesel fuel based on life cycle assessment [D]. Beijing: College of Chemical Engineering and Environment, China University of Petroleum, 2016.
- [17] 欧训民, 张希良. 中国终端能源的全生命周期化石能耗及碳强度分析[J]. 中国软科学, 2009(增刊 2): 208-214.
Ou Xun-min, Zhang Xi-liang. Fossil energy consumption and GHG emissions of final energy by LCA in China[J]. China Soft Science, 2009(Sup. 2): 208-214.
- [18] Ou X M, Yan X Y, Zhang X L. Life-cycle energy consumption and greenhouse gas emissions for electricity generation and supply in China[J]. Applied Energy, 2011, 88(1): 289-297.
- [19] 井晓燕. 天然气净化系统能耗分析及其节能优化研究[D]. 西安: 西安石油大学化学化工学院, 2019.
Jing Xiao-yan. Research on energy consumption analysis and energy saving optimization of natural gas purification system[D]. Xi'an: College of Chemistry and Chemical Engineering, Xi'an Shiyou University, 2019.