

电动城市客车充电调度研究

谢金焕^{1,2}, 杨凯^{1,2}, 叶标^{1,2}, 李祥^{1,2}, 汪昕源^{1,2}, 王江维^{1,2}

(1. 长沙中车智驭新能源科技有限公司, 长沙 410083; 2. 中车时代电动汽车股份有限公司, 湖南 株洲 412007)

摘要:当前电动城市客车充电鲜有考虑交通与能源双向耦合影响,且存在“即到即充”问题。本文提出一种综合考虑公交运营侧成本及电网侧负荷成本的充电调度模型。结果表明,本文提出的模型具有较好的综合效果。

关键词:电动城市客车; 充电调度; 交通能源融合; 优化算法

中图分类号:U469.72; TM732 **文献标志码:**A **DOI:**10.15917/j.cnki.1006-3331.2025.04.004

Research on Electric City Bus Charging Scheduling

XIE Jinhuan^{1,2}, YANG Kai^{1,2}, YE Biao^{1,2}, LI Xiang^{1,2}, WANG Xinyuan^{1,2}, WANG Jiangwei^{1,2}

(1. Changsha CRRC Intelligent Control and New Energy Technology Co., Ltd., Changsha 410083, China;

2. CRRC Electric Vehicle Co., Ltd., Zhuzhou 412007, China)

Abstract: Currently, electric bus charging seldom considers the influence of two-way coupling of transportation and energy, and there exist issues such as "charging on arrival". This paper proposes a charging scheduling model that comprehensively considers costs for both the bus operation side and the distribution network load side. The results show that the proposed model achieves superior overall effects.

Key words: electric city bus; charging scheduling; transportation-energy integration; optimization algorithm

相较于其他类型的电动汽车,电动城市客车具有以下显著特点:①其保有量庞大且增长迅速;②充电频率与充电量均处于较高水平^[1];③运营规律稳定,调控较为便捷^[2]。受限于电池技术,电动城市客车的续驶里程比燃油城市客车少约 33.33%^[3]。续驶里程的下降导致电动城市客车需要频繁入网充电,而合理高效的充电调度方式不仅能提高电力-交通耦合系统的稳定性,还能降低城市客车运营成本。随着交通-能源-信息网的融合程度不断加深,通过 V2G (Vehicle-to-Grid) 技术实现车辆充电经济性和电网负荷均衡性之间的平衡成为新的研究方向。

1 充电调度模型构建

站在交通能源融合^[4]的角度审视城市客车充电

调度方式,基于网间能量流和信息流充分挖掘电动城市客车电力-交通双重属性^[5],能够有效促进交通网和电力网的资源整合,提高社会经济价值和系统稳定性。

目前,电动城市客车^[6-7]受其运营性质约束,日间工作时间多采用直流快充方式补充电量。大部分城市客车为减轻载客任务途中的电量焦虑,在当前车次任务结束后即刻进入场站排队充电。这种仅关注电量的主观无序充电^[8]方式不仅会造成城市客车车队运营经济性大幅下降,还会给电网的安全稳定运行带来巨大隐患。

为解决上述问题,本文从电网负荷均衡性和车队运营经济性出发,提出一种考虑电池老化成本的电动城市客车充电调度模型,通过群体优化算法求解城市

收稿日期:2024-11-04。

第一作者:谢金焕(1998—),女,硕士,助理工程师,主要从事新能源车辆大数据架构开发与车载终端数据分析工作。E-mail: 2101222507@qq.com。

客车车队最优充电时段和最优时段充电量, 以此实现交通端和能源端的友好互动。

1.1 模型条件

针对本文公交调度模型提出如下条件: ①固定各线路城市客车发车时刻表; ②线路首末站即为公交场站, 并配备多台快速充电桩; ③将车辆车次线路能耗定义为车辆行程时间与其时间能耗率的乘积; ④将无序充电状态定义为车辆到站即开始充电, 电量到达电池额定容量阈值或临近班次发车时间时结束。本文定义的无序充电状态指此种充电调度方案仅考虑了车辆充电的时间便利性, 而未在经济性和电网负荷上进行综合调度。反之, 有序充电定义指综合考虑多方利益的最优充电调度方案。

图1为电动城市客车充电调度方案整体框架。充电调度平台根据收集到的电动城市客车运营信息, 以及监测到的充电场站车辆充电信息和电网负荷情况, 以日调度周期内的车辆充电综合成本为目标, 求解最优充电方案。

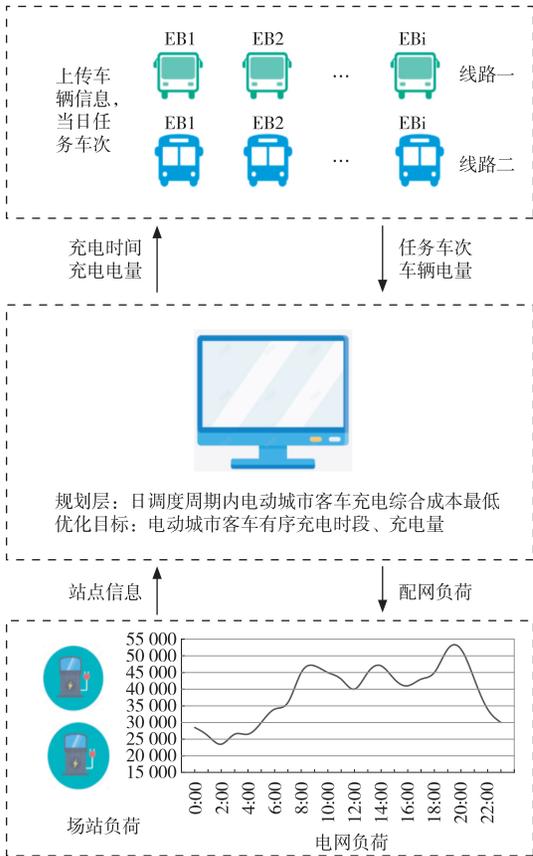


图1 电动城市客车充电调度方案整体框架图

1.2 模型构建

电动城市客车充电调度问题如下: 在已知区域内各条线路时刻表的前提下, 保证每辆车的行驶计划能严格符合车次时间窗口、空间布局以及电量续航等关键性条件约束。同时实现运行总成本的最优控制, 并输出与之对应的充电策略^[9]。根据每条线路车辆发车、进站时间, 创建第 n 辆电动城市客车的车次信息矩阵 T_n 。

$$T_n = \begin{bmatrix} t_{\text{dep},n,1}, & \cdots, & t_{\text{dep},n,i}, & \cdots, & t_{\text{dep},n,k} \\ t_{\text{arri},n,1}, & \cdots, & t_{\text{arri},n,i}, & \cdots, & t_{\text{arri},n,k} \\ t_{\text{slot},n,1}, & \cdots, & t_{\text{slot},n,i}, & \cdots, & t_{\text{slot},n,k} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $t_{\text{dep},n,i}$ 为第 n 辆电动城市客车第 i 次任务的车次发车时间点; $t_{\text{arri},n,i}$ 为第 n 辆电动城市客车第 i 次任务到达场站的时间点; $t_{\text{slot},n,i}$ 为第 n 辆电动城市客车第 i 次任务的运行时段。

1.2.1 城市客车充电调度综合成本

可在城市客车处于非运营状态时进行电能补充。非运营状态包括两个场景: 一是本次发车任务结束到下次发车任务开始前的休息时段, 二是结束当天所有任务后的空闲时段。充电调度综合成本由电动城市客车充电费用、电池充电损耗成本以及电网运行性能成本组成。

$$C_{\text{eb,charge}} = \sum_{n=1}^k \sum_{t=1}^M T_{n,t} W_{n,t} P_t \quad (2)$$

$$T_{n,t} = \min \left\{ \begin{array}{l} t_{\text{dep},n,i+1} - \max \left\{ t_{\text{arri},n,i}, t_{\text{start},n,i} \right\} \\ (E - \text{soc}_{n,t}) / W_{n,t} \end{array} \right\} \quad (3)$$

式中: $C_{\text{eb,charge}}$ 为电动城市客车的充电费用; $T_{n,t}$ 为第 n 辆电动城市客车在 t 时段的充电时间; $W_{n,t}$ 为第 n 辆电动城市客车在 t 时段的充电功率; P_t 为分时电价; $t_{\text{dep},n,i+1}$ 为第 n 辆电动城市客车第 $i+1$ 次任务的车次发车时间点; $t_{\text{start},n,i}$ 为第 n 辆电动城市客车第 i 次任务结束后开始充电的时间; E 为车辆电池容量; $\text{soc}_{n,t}$ 为车辆 n 在 t 时刻的荷电状态; k 为运营客车数量; 全天分为 m 个充电时段。

频繁的充放电操作会加速车辆电池老化, 老化程度可用电池损耗成本来表示^[10]。

$$C_{\text{eb,aging}} = \sum_{n=1}^k \sum_{t=1}^M C_B \frac{\beta_{n,t}}{E} \left| \frac{B_{\text{aging}}}{100} \right| \quad (4)$$

$$\beta_{n,t} = \max\{0, (soc_{n,t} - soc_{n,t-1})E\} \quad (5)$$

式中: $C_{eb,aging}$ 为车辆电池损耗成本; C_B 为电池更换成本; $\beta_{n,t}$ 为第 n 辆电动城市客车在 t 时段的充电量; B_{aging} 为电池退化系数绝对值; $soc_{n,t-1}$ 为车辆 n 在 $t-1$ 时刻的荷电状态。

电网运行性能成本用日负荷曲线方差来表示,以表征电动城市客车接入后对配电网运行的影响。

$$C_{eb,grid} = \sum_{t=1}^T [(Q_{base,t} + Q_{eb,t}) - \bar{Q}_{total}]^2 / T \quad (6)$$

式中: $C_{eb,grid}$ 为电网运行性能的成本指标; $Q_{base,t}$ 为电网 t 时刻的基础负荷; $Q_{eb,t}$ 为电网 t 时刻的电动城市客车充电负荷; \bar{Q}_{total} 为电网日负荷均值; T 为调度时段数。

则充电调度综合成本 C 为:

$$C = C_{eb,charge} + C_{eb,aging} + C_{eb,grid} \quad (7)$$

由于电动城市客车充电费用、电池损耗成本以及电网运行性能成本均为负向指标,为统一子目标模型单位量级,将目标函数 Z_{eb} 构建为:

$$Z_{eb} = \min \left\{ \alpha_1 \frac{C_{eb,charge}}{C_{eb,charge}^*} + \alpha_2 \frac{C_{eb,aging}}{C_{eb,aging}^*} + \alpha_3 \frac{C_{eb,grid}}{C_{eb,grid}^*} \right\} \quad (8)$$

式中: α_1 、 α_2 、 α_3 分别为充电费用、老化成本和电网运行成本的加权系数; $C_{eb,charging}^*$ 、 $C_{eb,aging}^*$ 、 $C_{eb,grid}^*$ 分别为无序充电状态(即仅考虑了车辆充电的时间便利性,而未在经济性和电网负荷上进行综合调度)下的电动城市客车充电费用、老化成本以及电网运行成本,其计算公式同有序充电模型,分别对应式(2)、(4)、(6)。

1.2.2 约束条件

1) 充电量约束。式(9)表示为满足下一任务车次要求,车辆在发车前的电量须不低于某个电量阈值, $Q_{arr,n,i}$ 为车辆 n 结束任务车次 i 后到达场站的剩余电量; λ_1 为加权系数。式(10)表示在车辆 n 结束全天运营任务后须充电至电池额定容量的 λ_2 倍来确保第二天车次任务顺利进行。

$$Q_{arr,n,i} + T_{n,t} \cdot W_{n,t} \geq \lambda_1 E \quad (9)$$

$$Q_{arr,n,i} + T_{n,t} \cdot W_{n,t} \geq \lambda_2 E \quad (10)$$

2) 容量约束。式(11)表示在 t 时刻处于充电状态的城市客车数量不能超过场站内配备的快充充电桩

总数 A_{fast} 。 $A_{n,t}$ 为 t 时刻车辆 n 的充电状态;若车辆处于充电状态,则 $A_{n,t} = 1$;若车辆不处于充电状态,则 $A_{n,t} = 0$ 。式(12)表示 t 时刻电网总负荷不能超过其最大限制容量 Q_{limit} 。

$$\sum_{n=1}^n A_{n,t} \leq A_{fast} \quad (11)$$

$$Q_{base,t} + Q_{eb,t} \leq Q_{limit} \quad (12)$$

2 充电策略求解

在满足车辆运行要求的基础上,模型需在求解个体充电时段和充电量的同时,求解城市客车车队在调度时段内的整体最优成本。本文采用粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)来求解电动城市客车队的最优充电调度策略,通过群体中个体与历史最优位置和群体历史最优位置之间的信息交互,引导整个群体中个体在保留自身多样性信息的同时朝向群体最优个体移动方向收敛^[11]。其具体求解流程如图2所示。

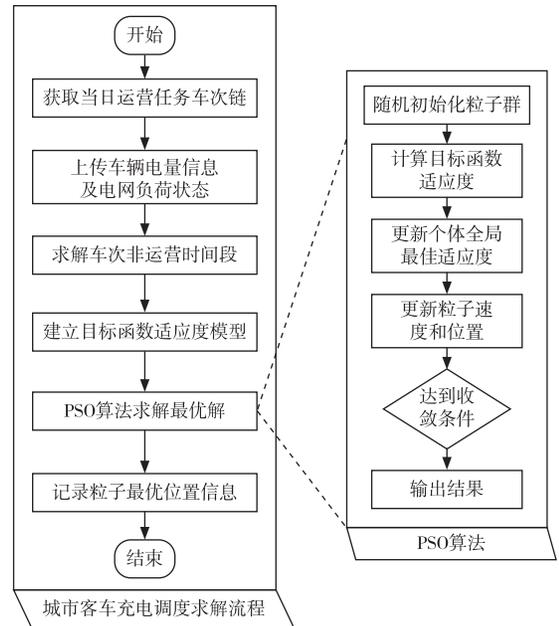


图2 基于 PSO 算法的充电策略求解流程

1) 获取当日城市客车行程信息,新建车辆 n 在 t 时刻的信息集合 $N_n = [T_n, soc_{n,t}, E, \dots]$ 。

2) 求解车辆结束上一次行程任务到下一次发车任务之间的可用休息时段。根据车辆参数信息及车次信息初始化可知,车辆 n 在 t 时刻的信息集合 N_n

包括车辆发车信息、荷电状态、电池容量等信息。

3) 基于城市客车充电费用、电池老化成本及电网运行性能成本建立目标函数适应度数学模型 Z_{eb} 。

4) 采用 PSO 算法迭代更新车辆充电时间和充电电量, 求解不同车次、线路的车辆最优充电位置。

5) 根据不同车辆的最优充电时段及最优时段充电量, 利用公式(7)求解充电调度最优成本 Z_{eb} 。

6) 输出各线路日运营周期内的最优充电调度方案并记录对应电网日负荷曲线。

3 算例分析

3.1 算例设置

选取湖南某地 68 路和 17 路城市客车途经站点作为本文算例线路, 计算时不区分线路上下行参数, 表 1 为其具体运营数据。选取宇通 E10 和 E8 两种车型分别作为线路一(68 路)和线路二(17 路)公交载客车型, 参考官网数据和文献[12]得到车辆参数(表 2)。车辆不同时段充电价格见表 3。假设在运营时段内车辆充电均采用快充方式, 快充功率为 100 kW。

表 1 公交线路运营数据

线路名称	运营时间	途经站点	预计时长/min	路线长度/km	发车频率
68 路	6:00~21:00	42 站	50	26.4	30 分钟/趟
17 路	6:00~20:30	33 站	43	22	30 分钟/趟

表 2 车辆参数信息

车型	电池容量/(kW·h)	时间能耗率/[(kW·h)·min ⁻¹]
宇通 E10	200.54	0.40
宇通 E8	121.13	0.33

表 3 区域分时电价

负荷时段	时间范围	电价
峰时段	11:00~14:00	0.704 元/(kW·h)
	18:00~23:00	
平时段	7:00~11:00	0.604 元/(kW·h)
	14:00~18:00	
谷时段	23:00~次日 7:00	0.504 元/(kW·h)

3.2 结果与分析

相关资料表明, 某电池生产商生产 1 GW·h 电池的成本约为 7.18 亿元。由此可得, 宇通 E8 和 E10 的电池更换成本为 143 987.72 元和 86 971.34 元。电池退化系数绝对值 B_{aging} 设为 0.006; 基于浅充浅放原则, 充电容量约束中的 λ_1 和 λ_2 分别取 0.3 和 0.8; 式(8)中的 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 采用主观赋值法, 取值均为 1。本文基于 Python 编程语言对 1.2 节所述数学模型进行建模及求解, 以文中所提综合最优有序充电调度模型为目标进行分析, 得到有序和无序充电方式中不同时间段的充电负荷, 如图 3 所示。峰谷时段电动城市客车充电负荷曲线如图 4 所示。

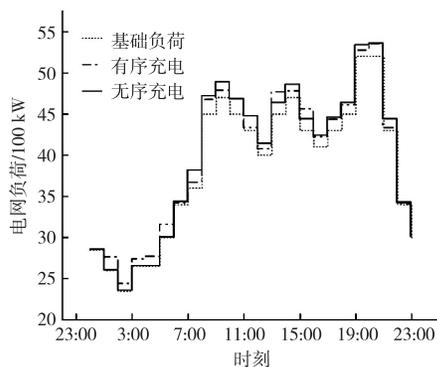


图 3 电网日负荷曲线

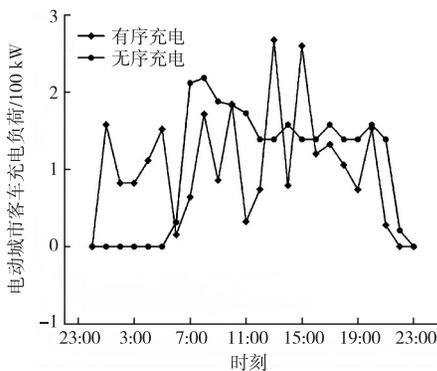


图 4 峰谷时段电动城市客车充电负荷曲线

从图 3 的整体变化趋势看, 无序充电方式下的电动城市客车充电负荷多集中在 8:00~22:00 时段, 覆盖了电网负荷高峰期的大部分时段, 未充分利用负荷压力较低的夜间充电时段。

由图 4 可知, 1:00~6:00 为有序充电状态下的电动城市客车充电负荷填谷时段, 11:00~12:00 和

18:00~23:00为削峰时段。相较于到站即充的无序充电方式,本文所提充电调度模型能有效利用电动城市客车运营间隙和晚间充电时段平滑日负荷曲线,减小时段负荷峰谷差,在实现电网侧安全稳定运行的同时提升充电运营的经济性。

具体来说,在成本费用方面,相比无序充电方式,采用本文提出的综合最优调度模型后,两条线路的充电费用分别降低8.07%和5.41%,电池老化损耗成本下降1.37%,如图5所示。有序充电总成本为1481.87元,相比无序充电总成本下降7%。因此,本文的有序充电调度方案在降低车辆使用成本方面具有明显优势。

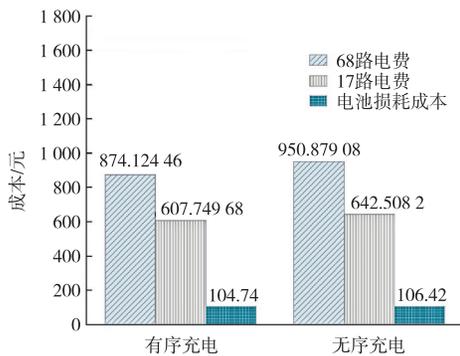


图5 不同调度方式的成本费用

4 结束语

本文结合当前城市客车无序充电现状,提出了一种交通-能源协同优化的城市客车充电调度方案,论述了有序和无序两种充电方式在不同线路车辆充电成本、电网时段负荷量上的差异性影响。结果表明,本文提出的模型不仅能满足城市客车日常运营要求,还能有效降低公交公司充电运营费用,同时帮助缓解电网高峰负荷。

参考文献:

- [1] 陈丽娟,秦萌,顾少平,等. 计及电池损耗的电动公交车参与V2G的优化调度策略[J]. 电力系统自动化,2020,44(11):52-60.
- [2] 徐冉,徐潇源,王晗,等. 考虑公交车移动特性的电动公交车-充电站-配电网联合调度[J]. 电力系统自动化,2022,46(24):36-44.
- [3] ZHOU Y, MENG Q, ONG G P. Electric bus charging scheduling for a single public transport route considering nonlinear charging profile and battery degradation effect[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2022(159):49-75.
- [4] 闫苏,王军强,徐亚东,等. 交通与能源融合发展的现状与展望[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),2024,21(4):1-27.
- [5] 徐潇源,李佳琪,王晗,等. 城市电力-交通系统韧性研究综述及展望[J]. 电力系统自动化,2024,48(23):1-15.
- [6] 瞿谦. 绿色交通驶向低碳未来[N]. 光明日报,2024-09-19(15).
- [7] 董岩斌,李泉,蒋康,等. 湖南省交通领域减污降碳路径研究[J]. 湖南交通科技,2024,50(3):7-11.
- [8] 熊杰,赖可凡,李同飞,等. 考虑非线性充电的纯电动公交充电计划优化[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2024,52(9):115-130.
- [9] 姚恩建,王鑫,刘莎莎,等. 考虑机会充电与行程时间可靠性的区域多车型电动公交调度优化[J]. 交通运输系统工程与信息,2024,24(4):151-165.
- [10] 黄久鸿. 计及新能源消纳的电动公交车充放电优化控制策略[D]. 吉林:东北电力大学,2024.
- [11] 冯茜,李擎,全威,等. 多目标粒子群优化算法研究综述[J]. 工程科学学报,2021,43(6):745-753.
- [12] 刘彤. 考虑多车型的电动公交运营组织优化研究[D]. 北京:北京交通大学,2020.