

城市电动公交车辆运营管理：综述与展望

曲小波¹, 刘亚君², 陈雨薇², 别一鸣^{2*}

(1. 清华大学, 汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084, 中国; 2. 吉林大学 交通学院, 长春 130022, 中国)

摘要: 随着公交车辆电动化进程的加快, 中国电动公交车保有量迅速增加, 已经成为中国城市规模最大的公交车型。科学的电动公交车辆运营管理对于降低公交系统碳排放以及公交企业运营成本具有重要意义。本文介绍了中国和主要西方国家的电动公交车辆发展历程, 总结了当前实际运营管理存在的问题; 给出了电动公交车辆运营管理的框架体系, 从运行能耗估计、车辆调度、节能驾驶、系统资源配置以及效益评价等5个方面对当前的研究成果进行了概述, 并对最新的运营管理技术与方法进行了梳理; 系统总结了当前研究面临的问题与挑战, 从电动公交系统线网规划、基于实际数据的电池寿命估计、智能化排班技术、引入新型供电与充电模式等4个方面对未来的发展趋势进行分析。

关键词: 电动公交车; 运营管理; 能耗估计; 车辆调度; 资源配置; 效益评价

中图分类号: U 491.2 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1674-8484.2022.03.001

Urban electric bus operation management: Review and outlook

QU Xiaobo¹, LIU Yajun², CHEN Yuwei², BIE Yiming^{2*}

(1. State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. School of Transportation, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: With the accelerating electrification of public transit systems, the number of electric buses (EBs) in China has increased substantially. The operation management of EBs is of great significance for reducing the carbon emissions of the public transit system. Herein, we firstly introduce the development history of EBs in China and Western countries, and summarize the existing issues in the EB operation management in practice. Then a framework of EB operation management is proposed, and current studies are summarized from the perspectives of energy consumption estimation, vehicle scheduling, energy-efficient driving, resource allocation and benefit evaluation. We point out the techniques and methods down the road on EB operation management. Finally, the challenges are systematically summarized. We conclude that the future works that need to be focused on include: electric bus network planning, battery life estimation based on actual data, intelligent scheduling, and adoption of new power supply and charging modes.

Key words: electric bus; operation management; energy consumption estimation; vehicle scheduling; resource allocation; benefit evaluation

收稿日期 / Received : 2022-08-23。

第一作者 / First author : 曲小波 (1983—), 男 (汉), 山东, 教授。E-mail : xiaobo@tsinghua.edu.cn。

* 通讯作者 / Corresponding author : 别一鸣 (1986—), 男 (汉), 河南, 教授。E-mail : yimingbie@126.com。

电动公交车具有零排放、低噪音、驾驶操作简单等优势，对于降低化石燃料依赖、减少城市机动车尾气排放、降低公交企业运营成本、助力实现“碳中和、碳达峰”国家战略具有重要意义。根据 2019 年世界资源研究所联合北京理工大学电动车辆国家工程实验室发布的《中国纯电动公交车运营现状分析与改善对策》^[1]所阐述：即使在没有政府购置和运营补贴情况下，纯电动公交车比燃油公交车的全生命周期成本低 27 万元，具有明显的成本优势；在环境效益方面，电动公交车的本地排放为零，即使考虑发电所造成的污染物排放，纯电动公交车的污染物排放总量也远低于国六标准的燃油公交车。

鉴于电动公交车的显著优势，中国近年来一直在大力推进城市公交车辆的电动化，并取得了显著成效。2006 年兰州市在 31 路公交线路上配备了 2 辆纯电动公交车，标志着中国电动公交车正式投入实际运营。2008 年北京奥运会期间，有 50 辆纯电动公交车运行在奥运村内环线、北部赛区内环线以及媒体村内环线的 3 条线路上。2009 年国家多部委联合出台新能源汽车“十城千辆”示范推广应用工程，鼓励在公交、邮政、出租等领域推进电动汽车的应用。2010 年上海世博会期间，一千多辆新能源汽车（含 120 辆纯电动公交车）在园区内完成了全球规模最大、使用强度最高的示范应用。

2015 年以来，中央政府以及各地方政府相继出台了新能源汽车推广应用方面的补贴政策，对购置新能源客车（含纯电动公交车）的公交企业进行财政补贴，以降低车辆购置成本。由于各种利好政策的激励以及纯电动公交车续驶里程的增加、充电时间的缩短，中国城市电动公交车保有量持续快速增加。根据交通运输部发布的各年度交通运输行业发展统计公报，中国城市电动公交车数量及电动化比例逐年上升（如表 1 所示），当前电动公交车已经成为规模最大的城市公交车型。深圳市已经在 2017 年将运营的 1.6 万辆公交车全部更换为电动公交车，成为全球首个专营公交车辆全面电动化的城市。截至 2021 年底广州市累计投放运营电动公交车超过 1.48 万辆。即使在中国气候最寒冷的省会城市哈尔滨，电动公交车保有量已超过 3 200 辆，约占城市公交车总量的 50%。随着中国城镇化进程的加快、城市人口的增加，电动公交车保有量仍将持续快速增加。

近年来国外在电动公交车推广应用方面也取得了长足的进步。美国于 2014 年在南卡罗莱纳州的 Seneca 市将一条公交线路的车辆全部更换为电动公交车，成

表 1 近年来中国城市公共汽车数量及电动化比例

年份	电动公交车数量 万辆	公共汽车总数量 万辆	电动化比例 %
2016	9.49	60.86	15.6
2017	17.13	65.12	26.3
2018	25.45	67.34	37.8
2019	32.45	69.33	46.8
2020	37.90	70.44	53.8
2021	41.95	70.94	59.1

为世界上首个运营车辆全部电动化的公交线路。但是目前电动公交车在美国的市场占有率仍不足 0.5%。根据美国公共利益研究小组（U.S. Public Interest Research Group, U.S. PIRG）的统计，在 2020 年 12 月美国一共有约 1 015 辆电动公交车投入运营，预计至 2045 年全国 7.5 万辆公交车中将有 1/3 被更换为电动公交车。纽约市预计至 2040 年将全部 5 700 辆公交车更换为电动公交车；洛杉矶市预计在 2030 年将全部 2 300 辆公交车更换为电动公交车，而旧金山市预计在 2035 年将全部 1 100 辆公交车更换为电动公交车，且从 2025 年开始只购买电动公交车。在欧洲方面，瑞典是城市公交车辆电动化进程最快的国家。2015 年 6 月瑞典哥德堡市率先在 55 路上投放 10 辆绿色公交车，包括 3 辆纯电动公交车、7 辆混合动力公交车；2020 年 12 月，145 辆新购置的电动公交车在哥德堡市投入运营；截至 2021 年 12 月，哥德堡市电动公交车保有量达到 220 辆。2018 年，西欧与波兰的电动车数量相比 2017 年增加了 48%，而在 2019 年的前 9 个月，注册登记 1 123 辆电动公交车，相比 2018 年的增长率就已经达到 100%。在 2020 年初，荷兰 10% 的城市公交车已经电动化，阿姆斯特丹市于 2020 年春季在市区开始运营第 1 辆电动公交车。英国伦敦市预计在 2037 年将该市的 8 000 辆公交车全部更换为零排放的电动公交车。预计至 2024 年欧洲的电动公交车数量将达到 11 866 辆。总体来看，目前国外的电动公交车保有量相对较少，但是很多北美、欧洲的城市都已经制定了严格的节能减排计划以及电动车发展愿景，预计在未来 10—20 年电动公交车数量将迅速增加。

电动公交车大规模投入运营仅有数年时间，理论方面，关于其运营管理的研究逐渐增加，但尚未形成系统的体系；实践方面，公交企业经常遇到购置成本高、充电桩不足、车辆运营效率低等问题，对于如何制定科学的运营方案以充分挖掘电动公交车效益还缺乏经验。

根据文献 1 所阐述，多数公交企业在电动公交车运营早期采用的是“摸着石头过河”的方法，车辆上线率低、单车日均运营里程短是当前电动公交车运营面临的普遍问题。根据该报告的统计数据：传统燃油公交车的上线率一般为 90%~95%，而 15 个调研城市的电动公交车在 2018 年夏季工作日平均上线率仅为 66.4%，跨度从 24% 到 84% 不等；2018 年电动公交车单车日均运营里程为 123 千米，仅为传统柴油公交车和插电混合动力公交车日均运营里程的一半，北京、天津等地的纯电动公交车单车日均运营里程仍不足 100 千米。对率先规模化推广电动公交车的城市而言，电动公交车运营中的问题影响到公交企业的日常运营质量与效率，加剧企业、地方财政负担；对尚未普及电动公交车的城市，这些问题也会造成它们对电动公交车认识上的误区，阻碍纯电动公交车的广泛推广。

科学的电动公交车运营管理不仅能够提高车辆的日均运营里程、上线率，还可以避免由于车辆补电导致的服务中断，对于提高公交线路可靠性、降低公交企业运营成本、加快电动公交车推广具有重要意义。随着中国城市公交车电动化比例逐步上升，更多的电动公交车将运营在使用强度大、日均运营里程高的线路上。在这种情况下，系统总结电动公交车运营管理方法体系，探讨电动公交车未来的理论与技术发展方向，已经成为中国当前城市公交行业的迫切需求，具有重要的理论与现实意义。

1 城市电动公交系统运营管理体系

电动汽车目前具有续驶里程相对较短、充电时间长等缺点，在长距离出行方面与燃油汽车相比还存在较大劣势。但是公交车主要在市区运行，具有线路固

定、里程固定、运营时间固定等独特优势，在线路首末站或者公交场站设置充电桩，当公交车闲置或者当天运营结束后可以及时为公交车补电，因此公共交通非常适合电动化，这也是中国在公共交通领域大力推广电动公交车应用的一个重要原因^[2]。传统的公交运营管理主要是面向燃油公交车，但是电动公交车与燃油公交车存在较大差异，在运营管理中需要考虑电池衰减、续驶里程、充电模式、充电速率等因素，这也导致传统的公交车运营管理方案并不适用于电动公交车。

图 1 给出了电动公交系统运营管理的理论体系，包括资源配置、静态线路调度、动态节能驾驶、全生命周期评价等各个环节。由于公交车运营需要以充足的剩余电量为前提，所以准确估计电动公交车的运行能耗、计算续驶里程不仅是静态线路调度和动态节能驾驶的关键，也是进行系统资源配置和效益评价的基础。下面对各个环节的主要内容进行概述。

(1) 电动公交车运行能耗估计。电动公交车的运行能耗受多种因素的影响，只有准确估计出公交车在线路上的运行能耗或者断面上的瞬时能耗，才能生成精确的线路调度以及节能驾驶方案。这也是区别于传统燃油公交车运营管理的一个重要特征。

(2) 电动公交线路静态车辆调度。静态车辆调度是在线路时刻表的约束下，合理安排电动公交车的充电方案、车辆排班方案、驾驶人排班方案，以节约电费支出以及司乘人员工资。

(3) 电动公交车辆动态节能控制。动态节能控制是指通过控制公交车在线路上的运动过程，一方面使公交车的运行尽量贴近时刻表规定方案，另一方面尽量减少公交车能耗。

(4) 电动公交系统资源配置。资源配置是保障公交

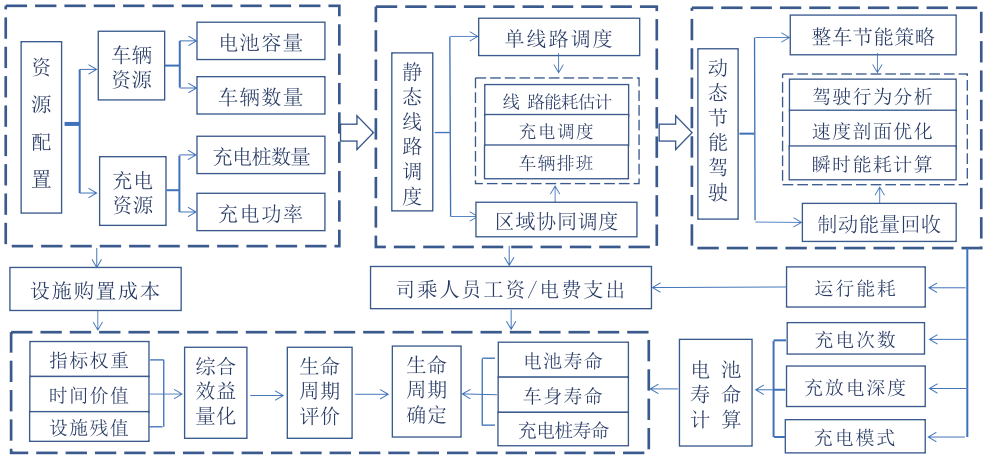


图 1 电动公交系统运营管理研究体系

系统正常运营的前提。一般来讲资源包括车辆资源和充电资源 2 部分：前者主要涉及线路配置的电动公交车数量、电池容量，后者主要包括充电桩数量、充电功率以及充电桩布设位置等要素。

(5) **电动公交系统效益评价**。公共交通具有公益性，尤其近年来电动公交车占比在快速提升，如何从社会、经济等角度全面科学评价电动公交系统的效益是公众关切的主要问题。该内容主要涉及生命周期时长的确定和效益量化两部分。

2 研究现状

2.1 电动公交车运行能耗估计

公交公司在制定运营管理方案时，只有准确估计电动公交车在线路上的运行能耗，才能完成如下工作：1) 制定合理的车辆调度方案、充电方案，避免由于电量不足导致的服务中断；2) 考虑不同情景下不同驾驶操作所导致的耗电量差异，制定合适的节能驾驶策略；3) 计算电动公交车辆的能耗需求，合理配置公交线路的充电设施与公交车型；4) 描述电动公交车的电池放电深度，估计电池寿命，并从生命周期角度评价电动公交车

的效益。由此可见，电动公交车运行能耗估计是公交车辆运营管理的前提。

目前电动公交车运行能耗估计方法可以分为 3 类，即经验方法、动力学方法和数据驱动方法。这 3 类方法的对比如表 2 所示。

2.1.1 经验方法

经验方法是指利用每千米平均耗电量来估计电动公交车的运行能耗，以简化公交运营优化问题的复杂度。现有研究中采用的电动公交车平均耗电量包括 1.24~2.48 kWh/km^[2]，1.20~2.90 kWh/km^[4]，1.20 kWh/km^[5]，1.50 kWh/km^[6] 等。这里的每千米平均耗电量一般通过 2 种途径得到。第 1 种途径是用汽车制造商标称的电池额定容量除以续驶里程，但是续驶里程是在给定工况下(如新标欧洲循环测试工况、中国汽车行驶工况)测试得到，而公交车的实际行驶工况与给定工况存在巨大差异。第 2 种途径是将电动公交车的历史总耗电量除以累积运行里程。根据上述方法很难准确估计电动公交车在线路上的运行能耗，因为它们无法考虑不同班次的行程时间、平均车速、环境温度、道路坡度等因素变化导致的随机性能耗波动。

表 2 现有电动公交车能耗估计方法的比较

类别	理论基础	优点	缺点
经验法	无	方法简单	估计精度较差
动力学方法	纵向动力学、比功率模型	估计精度中等；较好地反映车辆运动状态；适用于车辆运行控制	数据采集困难；忽略环境温度对电池热损失和车载辅助系统的影响
数据驱动方法	多元回归 深度学习	估计精度中等；可量化各个影响因素的影响程度；外推性好 估计精度较高；不需要预先明确数据之间的物理关系	多采用线性形式，结构简单 对训练数据样本量要求高

2.1.2 动力学方法

动力学方法通常以车辆的瞬时速度、加速度和道路坡度等数据作为输入，应用纵向动力学模型或者比功率模型计算车辆行驶过程的能耗^[7-8]。刘月晨^[9]基于车辆的基本动力学原理，结合实时工作状态下储能系统和电气传动系统的效率估计结果，建立了整车在运行过程中的实时能耗估计模型。张红妮^[10]基于实际采集的数据，搭建纯电动公交仿真平台并分析了速度、加速度、行驶工况等对能耗的影响。M. Gallet 等^[11]提出了基于纵向动力学模型的电动公交车能耗需求预测方法，采用日常运营低频数据来代替常用的高频速度剖面数据，使其便于应用至大型公交网络。A. Łebkowski^[12]提出了基于车辆动力学模型的电动公交车能耗估计方

法，并采用波兰市实际公交线路数据进行验证。A. Al-Ogaili 等^[13]基于纵向动力学模型和数字高程模型，分析了大型公交网络的能耗需求。N. El-Taweel 等^[14]使用车辆实际运行信息生成各公交站点间速度剖面曲线，结合车辆动力学模型和车载辅助系统能耗需求预测方法，建立了电动公交车的能耗估计模型。相较于经验模型，动力学方法以公交车瞬时运行参数为输入，估计精度有所提高，适用于微观层面的车辆运行控制。但是它多依赖于车辆实时运动工况数据，采集困难，而且忽略了环境温度对电池热损失和车载辅助系统的影响，导致模型预测性能下降。

2.1.3 数据驱动方法

数据驱动方法一般以多种影响因素作为输入、以

电动公交车运行能耗作为输出, 采用多元回归或深度学习方法构建估计模型。仇敬宜^[15]采集了保定市线路、天气状况、运行日期、运行时段和行驶状态等数据, 采用多元线性回归方法建立了以多种外部因素为分类变量、以路线长度为自变量的电动公交车耗电量估计模型。曹芳博^[16]使用随机森林与极端梯度提升方法, 通过网格调参、指标评价、模型对比, 建立了基于驾驶员行车数据的驾驶风格分析和电动公交车能耗预测模型。H. Abdelaty 等^[17]考虑道路坡度、电池荷电状态 (state of charge, SOC)、道路状况、乘客载客量、驾驶员风格、平均速度、空调状态和站点密度等因素的影响, 建立多元线性回归模型来预测电动公交车能耗。GAO Zhiming 等^[18]基于保定市电动公交车运行数据, 采用灰色关联分析方法建立多种影响因素与能耗的特征库, 并利用小波神经网络进行训练。T. Pamuła 等^[19]运用了波兰市南部的温度和线路相邻站点间高程数据, 采用深度学习网络建立了电动公交线路逐站能耗估计模型。CHEN Yuche 等^[20]基于查塔努市的连续观测数据, 采用长短时记忆神经网络模型来估计电动公交车的瞬时能耗。JI Jinhua 等^[21]在高寒城市采用不同车型、多条线路的电动公交车实际运行数据, 采用多元回归方法建立了电动公交车牵引能耗与空调能耗估计模型。LIU Yuan 和 LIANG Hao^[22]基于随机实时乘客数的电动公交车重量估计和随机运动参数 (速度、加速度等), 将决策树的特征丢弃算法扩展到回归树中, 使用改进 Kalman 滤波算法来估计电动公交车的运行能耗。深度学习方法具有相对较高的估计精度, 且不需要预先明确数据之间的物理关系, 但是难以获得电动公交车能耗与各影响因素间的具体函数关系, 对训练数据样本量要求较高; 回归分析方法可以量化各个影响因素对电动公交车耗电量的影响程度, 外推性好, 但是现有的研究多采用线性形式, 结构简单。

2.2 电动公交线路静态车辆调度

电动公交线路静态车辆调度问题研究思路如图 2 所示, 具体可以描述为: 在给定的时刻表及电池 SOC 约束下, 考虑车辆的电量消耗, 优化每辆公交车应该执行的班次集合以及充电方案。电动公交车既可以利用运营期间的闲置时间进行充电, 也可以在夜间集中充电。电费支出受电价、车辆排班方案等因素的共同影响。根据优化模型中所涉及线路数量的不同, 车辆调度可以分为单线路调度和区域多线路协同调度 2 类。

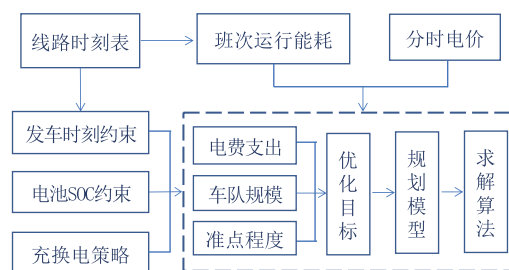


图 2 电动公交线路车辆调度研究思路

2.2.1 单线路调度

单线路调度问题通常被描述为指派问题^[23-24]。李军等^[25]等考虑电池 SOC、充电区间、充电速率等因素, 以最小化所需车辆数为目标, 建立了单线路单充电站的电动公交车车辆调度算法。何佳利^[26]以放电深度以及充电倍率为约束, 以车辆成本和空驶成本最小为目标, 建立了纯电动公交线路调度模型。徐刚^[27]考虑续航里程约束和换电约束, 以乘客出行成本最小和公交企业收益最大为目标, 建立了纯电动公交车调度多目标优化模型, 并采用改进的遗传模拟退火算法对模型进行求解。唐春艳等^[28]以公交车辆运营总成本最小为目标, 建立了允许存在误时发车的纯电动公交车柔性调度优化模型。王春露等^[29]提出了基于文化基因算法的车辆调度方法, 并设计了一种基于行程链的评价函数来改进邻域搜索算子。LI Jingquan 等^[30]基于列生成算法, 建立了更换电池或在充电站快速充电情景下的电动公交车调度模型。WANG Yueshang 等^[31]以年运营成本最小为目标协同优化电动公交车的调度方案与充电计划。N. Van Kooten 等^[32]考虑了实际电价和电池折旧成本对电动公交调度的影响, 建立了 3 种车辆调度模型, 采用整数线性规划和列生成方法求解。TANG Xindi 等^[33]提出了一种电动公交车的鲁棒调度策略, 在静态模型中引入缓冲距离来应对城市交通状况和行程时间随机性带来的不利影响。TENG Jing 等^[34]以单条电动公交车线路为研究对象, 以最小化发车间隔的标准偏差、车队规模和总充电成本为目标, 综合优化电动公交车的运行时刻表和车辆调度问题。BIE Yiming 等^[35]以最小化公交车队晚点发车时长期望、总耗电量期望以及车辆购置成本为目标, 提出了在公交车闲置时间为公交车充电的策略, 建立了一种考虑行程时间和能耗随机波动的车辆调度方法。ZHANG Le 等^[36]考虑电池退化和非线性充电特性的影响, 以公交系统总运营成本最小为目标建立纯电动公交车调度与充电调度协同优化模型。WANG Jing 等^[37]以电动公交车队在整

使用寿命期内更换电池的成本最小为目标,建立了一种基于动态规划的最优调度方法。BIE Yiming等^[38]针对电动公交线路区间车与全程车混合调度问题,提出了白天和夜间组合充电的策略以降低电费支出。ZENG Ziling等^[39]建立了混合整数规划模型来求解电池衰退、分时电价影响下的公交线路车辆充电方案。HE Jia等^[40]考虑分时电价的影响,建立了以每日电费支出最小为目标的公交车充电方案优化模型。LIU Yuhan等^[41]根据实际电动公交车运行数据建立能耗模型,以最小化日常电费支出成本为目标建立了考虑分时电价和行程时间随机性的充电计划优化模型。

2.2.2 区域多线路协同调度

区域内的多线路协同调度主要是考虑多条线路客流在时间和空间上的不均衡性,统一调配公交运力,实现多线路公交资源共享,以解决公交线路运营过程中低峰车辆闲置、高峰运力不足的问题,并节约公交企业运营成本。该调度策略常被映射为网络流模型^[42-43],相比于单线路调度问题,优化模型与求解算法更加复杂。

王海星^[44]将电动公交车辆区域调度问题归结为有续驶里程和充电时间约束的多车场多线路车辆调度问题。孟越^[45]以电动公交车的续驶里程和充电时间作为约束,建立了区域行车计划编制模型。张婷^[46]以所需纯电动公交车辆数最小、空驶距离最小以及碳收益最大为目标,建立了纯电动公交车辆区域调度优化模型。LIU Yuhan等^[47]考虑了充电时间窗约束和车辆跨线行驶造成的空驶里程增加量,以最小化车队规模、充电设施购置成本和车辆的空驶里程为优化目标,建立了纯电动公交车辆区域调度模型。WEN Min等^[48]以最小化车辆数和总行驶里程为优化目标,构建了多场站电动公交车辆调度模型,并提出了一种自适应大邻域搜索启发式求解算法。杨扬等^[49]将区域车辆调度问题的车次任务、公交场站、充电站作为节点,将车辆执行车次任务间的跨线空驶作为边,建立了一个网络流模型,并采用列生成法进行求解。姚恩建等^[50]将多场站区域调度问题转变为多目标优化问题,以最小化电动公交车辆及其配套设施在内的总成本为优化目标,构建了一个区域行车计划与充电计划协同编制模型。熊杰等^[51]对多场站多线路的电动公交车辆实行区域跨线调度,以最小化车辆数和空驶成本为优化目标,建立了一个多线路纯电动公交调度模型。YAO Enjian等^[52]考虑不同车型的电动公交车辆在充电时间、续驶里程和耗电率方面的

差异,以最小化年运营成本为优化目标,提出了基于时刻表的多车型电动公交车辆调度方法。聂少康^[53]针对车辆与驾驶员集成调度问题,提出了基于文化基因算法的调度方法。考虑到车辆运行过程中能耗的不确定性, HUANG Di和WANG Shuaian^[54]提出了一种快速充电与换电模式混合的充电计划编制方法。K. Gkiotsalitis等^[55]规定电动公交车辆可以在运营区域的任意充电站内进行充电,并考虑车辆的运营成本和等待时间,建立了多车场协同调度模型。

2.3 电动公交车辆动态节能驾驶

电动公交车辆动态节能驾驶研究的总体思路如图3所示,它是指通过对电动公交车进行科学合理的驾驶操作,用相对少的能耗完成正常的运营任务,从而实现乘员、电动公交车、道路和环境的高效和谐^[56]。

2.3.1 传统环境下的电动公交车节能驾驶

传统环境主要是指人工驾驶电动公交车,此时公交车的能耗与驾驶行为存在密切关系。已有的驾驶行为特征分析主要是从车辆运行安全角度进行,并在实车上得到应用^[57-59]。近年来一些学者研究了驾驶行为对电动公交车能耗的影响。严英等^[60-61]对公交运行数据进行分析,发现驾驶行为对电动公交能耗有显著影响,并证明在满足驾驶任务需求的前提下,对驾驶行为主动管理、降低平均车速、限制加速度分布的离散程度可以有效降低电动公交车能耗。时军辉^[62]分析了速度、加速度以及加速度标准差等参数对能耗的影响,并采用模型预测控制方法修正了传达给驾驶人的指令,以达到降低车辆能耗的目的。

电动公交车具有能量回收特性,这是与传统燃油车的显著区别之一^[63-65]。魏敦烈^[66]建立了反映加速过程中的驾驶员意图、电动公交车速度及能耗之间关系的数学模型,并对所提出的动力型和经济型2种控制模式下的加速曲线进行了优化,减少了加速过程中的单位里程能耗。袁伟等^[67]和张雅丽等^[68]针对电动公交车在交叉口和停靠站进出过程中的高能耗问题,将交叉口场景划分为4类、将进出站场景分为3类,分别提出对应的加速、匀速和减速曲线组合策略,相比驾驶员自然驾驶可节省较多能耗。ZHANG Yali等^[69]对实际运行的电动公交线路进行能耗分析,确定了匀速行驶时的低能耗速度区间和起步时的节能加速曲线。张丽君^[70]采用自适应神经模糊推理系统识别驾驶意图,并考虑制动需求和制动安全性,以制动能量回收最高为目标建立了制动控制策略。JIANG Yu等^[71]考虑电

池荷电状态和电机速度,通过将前后轮之间分配的摩擦制动力维持在固定值,确保安全性的同时提高了纯电动公交车再生制动过程中的能量回收效率。

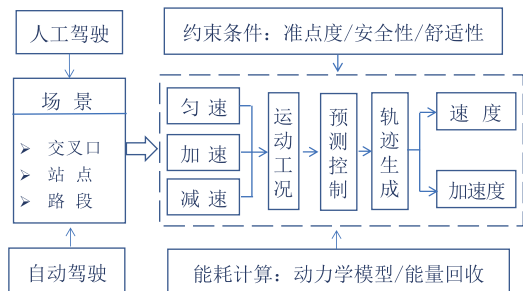


图3 电动公交车动态节能驾驶研究思路

2.3.3 网联环境下的电动公交车节能驾驶

随着车辆网联化、自动化进程的加快,关于智能网联电动公交车节能驾驶方面的研究也逐渐增多。J. Paredes 等^[72]将公交专用道下的纯电动公交车的速度优化过程表达为一个最优控制问题,并采用收缩时域方法进行求解,以最小化车辆能耗、实现电动公交车节能驾驶。YU Lingli 等^[73]提出了自动驾驶电动公交车的路径规划框架,用于规划不同驾驶场景下的驾驶行为,如变道、转弯等,并利用三次多项式生成局部能耗最优轨迹。胡林等^[74]在车路协同环境下预先获取各路段交叉口信号灯的位置和配时信息,考虑通过信号交叉的 4 种方式:绿灯匀速通行、红灯前匀加速、红灯匀减速和红灯停车等待,采用改进的 A* 算法来寻找能耗最小路径。王虹霞^[75]在车路协同环境下提出不同的加速、匀速、减速曲线组合策略,以应对交叉口和停靠站的不同场景,实现电动公交车节能驾驶。

2.4 电动公交系统资源配置

合理的资源配置是保障电动公交线路正常运营、节约成本的关键。现有研究主要从充电设施规划、车辆配置优化两方面入手,以乘客需求为约束,以最小化充电设施铺设成本、公交企业运营成本等为目标建立优化模型。

2.4.1 充电设施规划

电动公交车充电技术分为有线充电、无线充电 2 类。有线充电方式又可以划分为常规充电、快速充电、自动有线充电以及超级电容式充电 4 类；无线充电模式分为静态无线充电和动态无线充电 (dynamic wireless charging, DWC) 2 类。

目前大部分城市电动公交车采用有线充电方式,

充电桩的选址、充电桩数量将对电动公交车充电行为产生较大影响^[76-78]。王芳芳^[79]建立了使规划期内充电站年均总成本最小的多等级充电站选址模型,并使用禁忌搜索算法对该模型进行求解。庄桢^[80]建立了以成本最小化为目标的电动公交充电设施选址模型,优化充电站的位置、容量和充电运营时间表。孙萌萌^[81]分析了不同充电方式的优缺点,确定了建设充电站的类型,建立了以充电时间最小为目标的多种类电动公交车充电站选址模型。WANG Chenlei等^[82]将充电站分为“停车维护”型充电站和“中途供应”型充电站,根据公交线路充电需求优化两类充电站的位置及站内布设的充电桩数量,提高了充电设施建设的经济性。J. Lee等^[83]考虑随机电量消耗,对充电桩数量、电动公交车队规模和电池容量进行优化,并提出一种基于基本排队理论的两阶段顺序求解算法。LIN Yuping等^[84]考虑了电动公交车充电需求随时间增长的特性,提出了电动公交充电站位置和规模优化模型,最后采用多阶段规划策略进行求解。LIU Kai等^[85]提出了一个混合整数规划模型,通过优化充电功率和充电时间来降低电动公交车队的总充电成本,并采用列生成算法进行求解。WU Xiaomei等^[86]提出了以最小化建设成本、运营和维护成本、到充电站的行程时间成本以及已建成总充电站的电力损耗成本为优化目标,兼顾公交运营网络和配电网络的电动公交快速充电站选址规划模型。ZHANG Le等^[87]考虑多种充电模式对电池容量衰减的影响,设计了终点站充电桩数量的双层优化模型,分别用启发式算法和禁忌搜索方法求解。

无线充电是近年来新兴起的一种充电技术,研究成果相对较少。静态无线充电设施方面的研究主要集中在技术层面,例如提升充电效率^[88-89]、提高电磁安全性能^[90-91]等,从充电设施布设等资源配置角度考虑较少。郝明杰^[92]建立了以最小化静态无线充电桩总布设成本、乘客出行成本变化量以及最大化站点有效利用率作为优化目标的静态无线充电桩布局优化模型。而动态无线充电技术能为运动中的电动公交车辆充电,可以布设在沿途公交线路路上,使得车“边行驶边充电”。LIU Zhaocai 和 SONG Ziqi^[93]以 DWC 设施的布设位置以及电动公交电池容量为决策变量,分别建立了基于固定耗电量的确定性模型以及基于随机耗电量的不确定性模型,并采用鲁棒优化方法求解不确定模型。Y. Alwesabi 等^[94-95]首先以 DWC 设施的布设位置以及电池容量为决策变量建立混合整数规划模型,同时以

成本效益最优为目标建立了一个线路运行车辆数优化模型;之后又建立了电动公交车队规模和DWC设施协同优化模型,并采用粒子群算法求解。

2.4.2 车辆配置优化

在车辆配置方面,已有研究主要集中在纯电动公交车队规模优化、混合公交车队向纯电动公交车队的过渡优化方面。唐春艳和李小雨^[96]以降低公交车队运营管理成本为优化目标,研究多车型纯电动公交车可供选择使用下的混合车队替换决策问题,确定了最佳电动公交车替换计划。马晓磊等^[97]以最小化车队的生命周期成本为优化目标,将政策补贴、碳排放考虑在内,建立了适用于纯电动公交车逐年替换传统公交车的混合整数规划模型。LI Lu等^[98]以纯电动、混合动力、燃油、天然气共4种动力类型公交车的数量作为决策变量,考虑预算限制,提出了基于全生命周期成本效益的车队管理优化模型。A. Islam和N. Lownes^[99]考虑车辆温室气体排放,以最小化整个车队的采购成本、排放成本、运营成本和维护成本之和为目标,建立了纯电动公交车逐年替代柴油公交车队的混合整数规划模型。由于纯电动公交车队规模影响线路的调度计划,因此也有学者将二者进行协同考虑。周斌^[100]以电动车续驶里程和充电时间约束为基础,建立以车辆数和空驶距离最小为目标的纯电动公交车调度模型。朱鹰屏等^[101]采用一种改进的双中心粒子群算法对电动公交车充电方案进行优化,以获得最优的电动公交车运营数量。叶鑫宇等^[102]考虑电动公交车充电需求建立双层规划模型,对电动公交线路的发车频率、运营车辆数、车辆充电计划进行优化设计。An Kun^[103]以充电设施建设成本、车队购置成本、充电成本等组成的总成本最小为目标,建立了电动公交系统充电站选址与车队规模优化模型。

2.5 电动公交系统效益评价

与燃油公交车相比,电动公交车在减小运行能耗、降低碳排放等方面具有显著优势。但是电动公交车的购置成本高于燃油公交车,且需要为其配置大容量电池、充电桩。在这种情况下不能仅仅采用每日运营指标对电动公交车的效益进行评价,而是要综合考虑各种设施的生产、装配、运营和回收等全生命周期过程^[104-106],建立系统全面的经济效益与社会效益评价方法。具体流程如图4所示。

2.5.1 电动公交系统全生命周期效益评价

相关研究将电动公交车与传统燃油车、混合动力车等类型车辆进行对比分析,并进行全生命周期评价。



图4 电动公交系统效益评价基本流程

L. Nurhadi等^[107]对2辆具有不同续驶里程和不同充电形式的电动公交进行生命周期成本分析,归纳出线路里程、运营年限和投资成本的百分比变化是影响总拥有成本的最重要因素。A. Lajunen^[108-109]基于能耗分析,介绍了在车队运行中的混合动力和纯电动公交车的成本效益分析方法,并评估了生命周期成本和CO₂排放量;仿真结果表明:与传统的柴油公交车对比,插电混合动力公交车和纯电动公交车的节能减排潜力较大,其中纯电动公交车最多可降低75%的CO₂排放。王雪然等^[110]构建了基于能源链的纯电动公交车全生命周期CO₂排放模型,结果表明:相比柴油公交车,在相同运营环境下纯电动公交车在全生命周期内每百千米可以实现CO₂减排61.20%。潘应久^[111]从生命周期角度分别对纯电动公交车的燃料生命周期阶段和车辆材料生命周期阶段的总体能源消耗强度、温室气体及污染性气体的排放强度进行量化和评估,并与传统柴油公交车及液化天然气公交车的评估结果进行对比。

2.5.2 基于全生命周期评价的运营管理优化

一些学者考虑全生命周期经济效益或社会效益优化电动公交车队配置、搜寻电动公交车最优调度方案。A. Kunith等^[112]为解决电动化初期成本较高的问题,以不影响电动公交的日常运营为约束,以最小化总拥有成本为目标建立了混合整数线性优化模型,用于优化公交网络所需充电站的最小数量和位置以及每条公交线路的电池容量。O. Teichert等^[113]从车辆制造商和公交运营商的角度出发,考虑了电池衰退,建立了一种优化电池容量、充电设施功率和充电设施数量的最优组合问题,从而在给定时刻表、车辆特性和环境条件下实现总拥有成本的最小化。A. Harris等^[114]考虑服务频率、容量和续驶里程限制对电动公交车日常运营、车队和基础设施规模的影响,以最小化生命周期成本和温室气体排放的风险和不确定性为目标,提出了一个车队混合配置的框架。苏岳^[115]以上下游站点密度函数、高/平峰发车间隔以及上下游惰性行驶速度为决策变量,优化电动公交车站间运行方案,并从全生命周期角度与其他公交车型进行对比。

3 总结与展望

以上描述表明:在过去 10 年左右的时间里,国内外学者紧紧围绕“城市公交车辆电动化”这一发展趋势,在电动公交运营管理方面取得了大量研究成果,有力促进了城市电动公交系统运营管理水平的提升。今后的研究方向还应该聚焦于以下方面:

1) 构建城市电动公交线网规划方法体系。

当前针对电动公交线网规划方面的研究较少,大多是在公交线路固定情况下优化充电设施布局或者在充电设施固定情况下优化线路调度方案。公交线网规划是公交车辆调度的前提,合理的线网走向不仅能够提高乘客出行效率、减少乘客换乘时间,也可以高效调配电动公交车辆运力、减少电动公交车由于充电造成的空驶距离以及电量消耗,并为公交车及时补电。因此,未来可以考虑电动公交车辆运营过程中需要“充电”这种特殊情况,以乘客效益、公交企业运营成本最优为目标建立面向电动公交系统的线网规划方法。

2) 开展基于实际运行数据的电动公交车电池寿命估计方法。

在运营过程中电动公交车的电池容量将不可避免地出现衰退。从短期来看,这将影响公交车每日的充电次数以及充电方案,进而影响线路车辆排班方案;从长期来看,精确刻画电池的衰退过程并估计电池寿命是确定全生命周期长度的关键,也是进行全生命周期效益评价的前提。已有研究大多采用实验室数据建立电池寿命估计模型,然而电动公交车实际运行工况与实验室工况存在巨大差异,只有采用实际运行数据才能建立比较可靠的电池寿命估计方法。该研究最大的难点是需要采集多种类型、不同天气、不同工况下的电动公交车多年运行数据,构建丰富的数据样本库,为估计模型的建立与评价奠定数据基础。

3) 建立电动公交线路智能化、精细化调度技术。

已有的公交智能调度系统主要是面向传统燃油车。然而电动公交车不仅需要每日充电,电池也存在逐步衰减过程,导致公交线路调度问题更加复杂,传统调度系统并不适用。当前很多公交企业仍然依靠人工经验进行线路的车辆与驾驶人排班,效率较低,无法通过精细化调度节约线路运营成本;尤其当线路运营过程中出现突发事件时(如公交车抛锚、充电桩损坏),调度人员无法及时生成新的调度方案,严重制约了公交系统效率提升。在这种情况下,亟需考虑电动公交运营特殊性,建立新的智能化、精细化的调度技术,并开发

新型调度系统,

4) 引入新型供电与充电模式提升电动公交系统效益。

及时补充电量是保证电动公交线路正常运营的前提。供电与充电模式不仅影响充电成本、充电时机,也会影响线路日常调度与全生命周期效益。由于公交车续驶里程有限、且夜间国家电网的电价较低,所以公交企业普遍倾向于为公交车配置大容量电池以满足其日间运营的电量需求,然后在夜间利用国家电网的低电价时段进行集中充电。但是这种模式会导致公交车辆购置成本急剧增加,且会增加公交车的车体重量,进而导致公交车每千米能耗的上升。此外,如果国家电网的电力来源于风能、水能、太阳能等清洁能源,还可以大幅度降低电动公交车全生命周期的碳排放量。因此,未来需要着重考虑新型能源电力供应与电动公交系统运营之间的融合,配合需求响应式公交系统^[116]、模块化公交系统^[117]等新型公交系统,进一步提升电动公交系统的经济效益与社会效益。同时改变电动公交车的充电模式,可以使公交车利用白天闲置时间多次有序充电,不仅可以缓解驾驶人的续驶里程焦虑,还可以降低电池容量,避免夜间集中充电模式带来的弊端。

参考文献 (References)

- [1] 薛露露, 韦围, 刘鹏, 等. 中国纯电动公交车运营现状分析与改善对策 [R]. 北京: 世界资源研究所, 2019. XUE Lulu, WEI Wei, LIU Peng, et al. Overcoming the operational challenges of electric buses: Lessons learnt from China [R]. Beijing: World Resources Institute, 2019. (in Chinese)
- [2] QU Xiaobo, WANG Shuaian, Niemeier D. On the urban-rural bus transit system with passenger-freight mixed flow [J]. *Commun Transport Res*, 2022, 2: 100054.
- [3] GAO Zhiming, LIN Zhenhong, LaClair T, et al. Battery capacity and recharging needs for electric buses in city transit service [J]. *Energy*, 2017, 122: 588-600.
- [4] HE Xiaoyi, ZHANG Shaojun, KE Wenwei, et al. Energy consumption and well-to-wheels air pollutant emissions of battery electric buses under complex operating conditions and implications on fleet electrification [J]. *J Clean Prod*, 2018, 171: 714-722.
- [5] LI Lu, Lo Hong K, XIAO Feng. Mixed bus fleet scheduling under range and refueling constraints [J]. *Transport Res Part C: Emerg Tech*, 2019, 104: 443-462.
- [6] Xylia M, Leduc S, Patrizio P, et al. Locating charging infrastructure for electric buses in Stockholm [J]. *Transport Res Part C: Emerg Tech*, 2017, 78: 183-200.
- [7] Beckers C, Besselink I, Nijmeijer H. Assessing the impact of cornering losses on the energy consumption of electric city buses [J]. *Transport Res Part D: Transport Envi*, 2020, 86: 102360.

- [8] Fiori C, Montanino M, Nielsen S, et al. Microscopic energy consumption modelling of electric buses: model development, calibration, and validation [J]. *Transport Res Part D: Transport Envi*, 2021, **98**: 102978.
- [9] 刘月晨. 锂离子电池公交车与超级电容公交车系统能量效率及能耗综合分析 with 系统优化 [D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
LIU Yuechen. Energy efficiency & consumption analysis and system optimization of lithium ion battery bus system and supercapacitor bus system [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [10] 张红妮. 基于驾驶行为的纯电动公交车能耗规律与节能对策 [D]. 西安: 长安大学, 2020.
ZHANG Hongni. Energy consumption law and energy-saving measures based on driving behavior [D]. Xi'an: Chang'an University, 2020. (in Chinese)
- [11] Gallet M, Massier T, Hamacher T. Estimation of the energy demand of electric buses based on real-world data for large-scale public transport networks [J]. *Appl Energy*, 2018, **230**: 344-356.
- [12] Lebkowski A. Studies of energy consumption by a city bus powered by a hybrid energy storage system in variable road conditions [J]. *Energies*, 2019, **12**(5): 951-990.
- [13] Al-Ogaili A, Ramasamy A, Hashim T, et al. Estimation of the energy consumption of battery driven electric buses by integrating digital elevation and longitudinal dynamic models: Malaysia as a case study [J]. *Appl Energy*, 2020, **280**: 115873.
- [14] El-Taweel N, Zidan A, Farag H. Novel electric bus energy consumption model based on probabilistic synthetic speed profile integrated with HVAC [J]. *IEEE Trans Intel Transport Syst*, 2020, **22**(3): 1517-1531.
- [15] 仇敬宜. 电动公交车行驶耗电量建模及充电策略研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
QIU Jingyi. A study on power consumption modeling and charging strategy of electric buses [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017. (in Chinese)
- [16] 曹芳博. 基于驾驶员行车数据的驾驶风格分析和新能源公交车能耗预测 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
CAO Fangbo. Driving style analysis and energy consumption prediction of new energy buses based on driving data [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
- [17] Abdelaty H, Mohamed M, Katsaprakakis D. A prediction model for battery electric bus energy consumption in transit [J]. *Energies*, 2021, **14**(10): 2824.
- [18] GAO Yajing, GUO Shixiao, REN Jiafeng, et al. An electric bus power consumption model and optimization of charging scheduling concerning multi-external factors [J]. *Energies*, 2018, **11**(8): 2060.
- [19] Pamula T, Pamula W. Estimation of the energy consumption of battery electric buses for public transport networks using real-world data and deep learning [J]. *Energies*, 2020, **13**(9): 2340.
- [20] CHEN Yuche, ZHANG Yunteng, SUN Ruixiao. Data-driven estimation of energy consumption for electric bus under real-world driving conditions [J]. *Transport Res Part D: Transport Envi*, 2021, **98**: 102969.
- [21] JI Jinhua, BIE Yiming, ZENG Ziling, et al. Trip energy consumption estimation for electric buses based on multivariate regression modelling [J]. *Commun Transport Rese*, 2022, **2**: 10069.
- [22] LIU Yuan, LIANG Hao. A data-driven approach for electric bus energy consumption estimation [J/OL]. *IEEE Trans Intel Transport Syst*, 2022, 1-12. DOI: 10.1109/TITS.2022.3152679.
- [23] Gavish B, Shlifer E. An approach for solving a class of transportation scheduling problems [J]. *Europ J Operat Rese*, 1979, **3**(2): 122-134.
- [24] Richard F, Huisman D, Albert P. Models and algorithms for integration of vehicle and crew scheduling [J]. *J Scheduling*, 2003, **6**(1): 63-85.
- [25] 李军, 唐晓宇, 赵长相. 基于充电策略的纯电动公交车调度优化 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2015, **34**(4): 107-112.
LI Jun, TANG Xiaoyu, ZHAO Changxiang. Multiple depots and types bus scheduling problems based on integer programming [J]. *J Chongqing Jiaotong Univ (Nat Sci)*, 2015, **34**(4): 107-112. (in Chinese)
- [26] 何佳利. 基于不同充放电过程的纯电动公交调度研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
HE Jiali. Study on pure electric bus scheduling based on different charge-discharge process [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [27] 徐刚. 城市纯电动公交车调度优化问题研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
XU Gang. Research on optimization of battery electric city bus scheduling [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2017. (in Chinese)
- [28] 唐春艳, 杨凯强, 郭娜. 单线纯电动公交车柔性调度优化 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2020, **20**(3): 156-162.
TANG Chuanyan, YANG Kaiqiang, GUO Na. Optimizing flexible vehicle scheduling for single-line battery electric buses [J]. *J Transport Syst Engi Info Tech*, 2020, **20**(3): 156-162. (in Chinese)
- [29] 王春露, 聂少康, 左兴权, 等. 基于文化基因算法的电动公交车调度方法 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2022, **50**(1): 7-12.
WANG Chunlu, NIE Shaokang, ZUO Xingquan, et al. Memetic algorithm based electric bus scheduling approach [J]. *J Huazhong Univ Sci Tech (Nat Sci Ed)*, 2022, **50**(1): 7-12. (in Chinese)
- [30] LI Jingquan. Transit bus scheduling with limited energy [J]. *Transport Sci*, 2014, **48**(4): 521-539.
- [31] WANG Yusheng, HUANG Yongxi, XU Jiuping, et al. Optimal recharging scheduling for urban electric buses: A case study in Davis [J]. *Transport Res Part E: Logi Transport Rev*, 2017, **100**: 115-132.
- [32] Van Kooten N, Van den A, Hoogeveen J. Scheduling electric vehicles [J]. *Public Transport*, 2017, **9**(1): 155-176.
- [33] TANG Xindi, LIN Xi, HE Fang. Robust scheduling strategies of electric buses under stochastic traffic

- conditions [J]. *Transport Res Part C: Emerg Tech*, 2019, **105**: 163-182.
- [34] TENG Jing, CHEN Tong, FAN Wei. Integrated approach to vehicle scheduling and bus timetabling for an electric bus line [J]. *J Transport Engi, Part A: Systems*, 2020, **146**(2): 04019073.
- [35] BIE Yiming, JI Jinhua, WANG Xiangyu, et al. Optimization of electric bus scheduling considering stochastic volatilities in trip travel time and energy consumption [J]. *Computer-Aided Civil Infrastt Engi*, 2021, **36**(12): 1530-1548.
- [36] ZHANG Le, WANG Shuaian, QU Xiaobo. Optimal electric bus fleet scheduling considering battery degradation and non-linear charging profile [J]. *Transport Res Part E: Logi Transport Rev*, 2021, **154**: 102445.
- [37] WANG Jing, KANG Lixia, LIU Yongzhong. Optimal scheduling for electric bus fleets based on dynamic programming approach by considering battery capacity fade [J]. *Rene Sustain Energ Rev*, 2020, **130**: 109978.
- [38] BIE Yiming, HAO Mingjie, GUO Mengzhu. Optimal electric bus scheduling based on the combination of all-stop and short-turning strategies [J]. *Sustainability*, 2021, **13**(4): 1827.
- [39] ZENG Ziling, WANG Shuaian, QU Xiaobo. On the role of battery degradation in en-route charge scheduling for an electric bus system [J]. *Transport Res Part E: Logi Transport Rev*, 2022, **161**: 102727.
- [40] HE Jia, YAN Na, ZHANG Jian, et al. Battery electric buses charging schedule optimization considering time-of-use electricity price [J]. *J Intel Connect Vehi*, 2022, **5**(2): 138-145.
- [41] LIU Yuhan, WANG Linhong, ZENG Ziling, et al. Optimal charging plan for electric bus considering time-of-day electricity tariff [J]. *J Intel Connect Vehi*, 2022, **5**(2): 123-137.
- [42] Mesquita M, Paixão J. Exact algorithms for the multi-depot vehicle scheduling problem based on multicommodity network flow type formulations [M]// *Computer-aided transit scheduling*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1999: 221-243.
- [43] Löbel A. Solving large-scale multiple-depot vehicle scheduling problems [M]// *Computer-aided transit scheduling*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1999: 193-220.
- [44] 王海星. 公交车辆区域调度理论与方法研究: 以电动车为背景 [D]. 北京: 北京交通大学, 2007.
- WANG Haixing. Research on the theory and method of bus regional scheduling, with electric bus as the background [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007. (in Chinese)
- [45] 孟越. 纯电动公交车区域行车计划编制模型及算法研究 [D]. 南京: 东南大学, 2015.
- MENG Yue. Research on regional bus scheduling model and algorithm based on pure electric vehicle [D]. Nanjing: Southeast University, 2015. (in Chinese)
- [46] 张婷. 考虑碳排放权交易的纯电动公交车经济调度策略研究 [D]. 淄博: 山东理工大学, 2015.
- ZHANG Ting. Research on the scheduling of electric buses: taking carbon emission rights trading into consideration [D]. Zibo: Shandong University of Technology. (in Chinese)
- [47] LIU Yuhan, YAO Enjian, LU Muyang, et al. Regional electric bus driving plan optimization algorithm considering charging time window [J]. *Math Prob Engi*, 2019, **2019**: 7863290.
- [48] WEN Min, Linde E, Ropke S, et al. An adaptive large neighborhood search heuristic for the electric vehicle scheduling problem [J]. *Comput Operat Res*, 2016, **76**: 73-83.
- [49] 杨扬, 关伟, 马继辉. 基于列生成算法的电动公交车辆调度计划优化研究 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, **16**(5): 198-204.
- YANG Yang, GUAN Wei, MA Jihui. Battery electric transit bus scheduling problem based on column generation approach [J]. *J Transport Syst Engi Info Tech*, 2016, **16**(5): 198-204. (in Chinese)
- [50] 姚恩建, 卢沐阳, 刘宇环, 等. 考虑充电约束的电动公交区域行车计划编制 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2019, **47**(9): 68-73.
- YAO Enjian, LU Muyang, LIU Yuhuan, et al. Electric bus area driving plan preparation considering charging constraints [J]. *J South China Univ Tech (Natu Sci Ed)*, 2019, **47**(9): 68-73. (in Chinese)
- [51] 熊杰, 白宸宇, 李向楠, 等. 整车充电模式下的纯电动公交行车计划优化 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2020, **39**(11): 38-44.
- XIONG Jie, BAI Chenyu, LI Xiangnan, et al. Vehicle scheduling optimization of pure electric buses based on plug-in recharge mode [J]. *J Chongqing Jiaotong Univ (Nat Sci)*, 2020, **39**(11): 38-44. (in Chinese)
- [52] YAO Enjian, LIU Tong, LU Tianwei, et al. Optimization of electric vehicle scheduling with multiple vehicle types in public transport [J]. *Sustain Cities Soc*, 2020, **52**: 101862.
- [53] 聂少康. 纯电动公交车调度及人员排班方法研究和实现 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2021.
- NIE Shaokang. Research and implementation of pure electric bus scheduling and personnel scheduling method [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021. (in Chinese)
- [54] HUANG Di, WANG Shuaian. A two-stage stochastic programming model of coordinated electric bus charging scheduling for a hybrid charging scheme [J]. *Multimodal Transport*, 2022, **1**(1): 100006.
- [55] Gkiotsalitis K, Iliopoulou C, Kepaptsoglou K. An exact approach for the multi-depot electric bus scheduling problem with time windows [J/OL]. *Europ J Operat Res*, 2022. DOI: 10.1016/j.ejor.2022.07.017.
- [56] 王延伟. 城市公交车驾驶节能技术的研究 [D]. 西安: 长安大学, 2010.
- WANG Yanwei. Study on energy-saving skills in driving city buses [D]. Xi'an: Chang'an University, 2020. (in Chinese)
- [57] SHI Xia, ZHANG Liang. Effects of altruism and burnout

- on driving behavior of bus drivers [J]. *Accid Anal Prevent*, 2017, **102**: 110-115.
- [58] ZHANG Zuobo, MA Tianshan, JI Nuoya, et al. An assessment of the relationship between driving skills and driving behaviors among Chinese bus drivers [J]. *Adva Mech Engi*, 2019, **11**(1): 1687814018824916.
- [59] HANG Junyu, YAN Xuedong, MA Lu, et al. Exploring the effects of the location of the lane-end sign and traffic volume on multistage lane-changing behaviors in work zone areas: A driving simulator-based study [J]. *Transport Res Part F: Traf Psych Behav*, 2018, **58**: 980-993.
- [60] 严英. 纯电动公交车加速踏板驾驶特性辅助优化策略研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012.
YAN Ying. Study on the driving assistant of acceleration pedal for the pure electric bus [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese)
- [61] 严英, 庄继晖, 谢辉. 纯电动公交车司机驾驶行为差异对能耗的影响 [J]. 天津大学学报 (自然科学与工程技术版), 2014, **47**(3): 231-236.
YAN Ying, Zhuang Jihui, Xie Hui. Influence of the driver behavior difference on the energy consumption of the pure electric buses [J]. *J Tianjin University (Sci Tech)*, 2014, **47**(3): 231-236. (in Chinese)
- [62] 时军辉. 纯电动城市客车驱动控制策略优化研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
SHI Junhui. Study on the optimization of driving control strategy for pure electric urban bus [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [63] YANG Ye, ZHANG Youtong, TIAN Jingyi, et al. Research on a plug-in hybrid electric bus energy management strategy considering drivability [J]. *Energies*, 2018, **11**(8): 2177.
- [64] SHI Junzhe, XU Bin, ZHOU Xingyu, et al. A cloud-based energy management strategy for hybrid electric city bus considering real-time passenger load prediction [J]. *J Energy Storage*, 2022, **45**: 103749.
- [65] Kusuma C, Budiman B, Nurprasetyo I, et al. Energy management system of electric bus equipped with regenerative braking and range extender [J]. *Int'l J Autom Tech*, 2021, **22**(6): 1651-1664.
- [66] 魏敦烈. 面向加速过程的纯电动公交车动力控制策略研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
WEI Dunlie. Study on powertrain control tactics of electric bus oriented the acceleration process [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [67] 袁伟, 张雅丽, 王虹霞, 等. 纯电动公交车交叉口节能驾驶策略 [J]. 中国公路学报, 2021, **34**(7): 54-66.
YUAN Wei, ZHANG Yali, WANG Hongxia, et al. Energy-saving driving technique for pure electric buses in intersection [J]. *China J Highway Transport*, 2021, **34**(7): 54-66. (in Chinese)
- [68] 张雅丽, 袁伟, 付锐, 等. 纯电动公交车进出站节能驾驶策略的设计与仿真 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, **21**(4): 106-117.
ZHANG Yali, YUAN Wei, FU Rui, et al. Design and simulation of energy saving driving strategy for pure electric bus entering and leaving stops [J]. *J Transport Syst Engi Info Tech*, 2021, **21**(4): 106-117. (in Chinese)
- [69] ZHANG Yali, YUAN Wei, FU Rui, et al. Design of an energy-saving driving strategy for electric buses [J]. *IEEE Access*, 2019, **7**: 157693-157706.
- [70] 张丽君. 基于制动意图识别的纯电动公交制动控制策略研究 [D]. 西安: 长安大学, 2015.
ZHANG Lijun. Research on braking control strategy based on braking intention recognition of pure electric bus [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015. (in Chinese)
- [71] JIANG Yu, ZHENG Yanping, GUO Yang, et al. Regenerative braking control strategy to improve braking energy recovery of pure electric bus [J]. *SAE Int'l J Vehi Dyna, Stab, NVH*, 2020, **4**(10-04-03-0015).
- [72] Paredes J, Cazar G, Donkers M. A shrinking horizon approach to eco-driving for electric city buses: implementation and experimental results [J]. *IFAC-Papers OnLine*, 2019, **52**(5): 556-561.
- [73] YU Lingli, KONG Decheng, YAN Xiaoxin. A driving behavior planning and trajectory generation method for autonomous electric bus [J]. *Future Internet*, 2018, **10**(6): (Article ID) 51.
- [74] 胡林, 周登辉, 黄晶, 等. 考虑信号灯和能耗的电动车最优路径规划 [J]. 汽车工程, 2021, **43**(5): 641-649.
HU Lin, ZHOU Denghui, HUANG Jing, et al. Optimal path planning for electric vehicle with consideration of traffic light and energy consumption [J]. *Autom Engi*, 2021, **43**(5): 641-649. (in Chinese)
- [75] 王虹霞. 车路协同环境下纯电动公交车节能驾驶策略研究 [D]. 西安: 长安大学, 2020.
WANG Hongxia. Energy-saving driving strategy under the environment of V2X: Some cases for electric buses [D]. Xi'an: Chang'an University, 2020. (in Chinese)
- [76] CHEN Zhibin, YIN Yafeng, SONG Ziqi. A cost-competitiveness analysis of charging infrastructure for electric bus operations [J]. *Transport ResPart C: Emerg Tech*, 2018, **93**: 351-366.
- [77] LI Jingquan. Battery-electric transit bus developments and operations: A review [J]. *Int'l J Sustain Transport*, 2016, **10**: 157-169.
- [78] 肖白, 朱珈汛, 姜卓, 等. 考虑车辆充电调度机制的电动公交车充电站规划 [J]. 电力自动化设备, 2022, **42**(1): 148-155.
XIAO Bai, ZHU Jiaxun, JIANG Zhuo, et al. Planning of electric bus charging station considering vehicle charging scheduling mechanism [J]. *Electr Power Autom Equip*, 2022, **42**(1): 148-155. (in Chinese)
- [79] 王芳芳. 多等级纯电动公交充电站选址问题研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
WANG Fangfang. Research on the location of multi-level electric bus charging station [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014. (in Chinese)
- [80] 庄桢. 考虑行驶里程预测的电动公交充电设施选址研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
ZHUANG Zhen. Research on the location of electric bus charging facilities considering travel distance prediction [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021. (in Chinese)
- [81] 孙萌萌. 多类型电动公交车充电站选择问题 [D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
SUN Mengmeng. Multi-type electric bus charging station selection problem [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [82] WANG Chenlei, XIE Da, Gu Chenghong, et al. Planning

- of regional urban bus charging facility: A case study of Fengxian, Shanghai [J/OL]. *IEEE Trans Intel Transport Syst*, 2021. DOI: 10.1109/TITS.2021.3125833.
- [83] Lee J, Shon H, Papakonstantinou I, et al. Optimal fleet, battery, and charging infrastructure planning for reliable electric bus operations [J]. *Transport Res Part D: Transport Envi*, 2021, **100**: 103066.
- [84] LIN Yuping, ZHANG Kai, SHEN Zuojun, et al. Multistage large-scale charging station planning for electric buses considering transportation network and power grid [J]. *Transport Res Part C: Emerg Tech*, 2019, **107**: 423-443.
- [85] LIU Kai, GAO Hong, LIANG Zhe, et al. Optimal charging strategy for large-scale electric buses considering resource constraints [J]. *Transport Res Part D: Transport Envi*, 2021, **99**: 103009.
- [86] WU Xiaomei, FENG Qijin, BAI Chenchen, et al. A novel fast-charging stations locational planning model for electric bus transit system [J]. *Energy*, 2021, **224**: 120106.
- [87] ZHANG Le, ZENG Ziling, GAO Kun. A bi-level optimization framework for charging station design problem considering heterogeneous charging modes [J]. *J Intel Connect Vehi*, 2022, **5**(1): 8-16.
- [88] 董一帆. 电动汽车动态无线充电线圈优化研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2020.
- DONG Yifan. Optimization research on dynamic wireless charging coils of electric vehicle [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020. (in Chinese)
- [89] 邓明阳, 郭应时. 电动汽车插补耦合无线充电技术的研究 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2021, **40**(6): 130-135.
- DENG Mingyang, GUO Yingshi. Interpolation coupling wireless charging technology for electric vehicles [J]. *J Chongqing Jiaotong Univ (Nat Sci)*, 2021, **40**(6): 130-135. (in Chinese)
- [90] 陈琛, 黄学良, 谭林林, 等. 电动汽车无线充电时的电磁环境及安全评估 [J]. 电工技术学报, 2015, **30**(19): 61-67.
- CHEN Chen, HUANG Xueliang, TAN Linlin, et al. Electromagnetic environment and security evaluation for wireless charging of electric vehicles [J]. *Trans China Electrotech Soc*, 2015, **30**(19): 61-67. (in Chinese)
- [91] SUN Longzhao, MA Dianguang, TANG Houjun. A review of recent trends in wireless power transfer technology and its applications in electric vehicle wireless charging [J]. *Rene Sustain Energy Rev*, 2018, **91**: 490-503.
- [92] 郝明杰. 公交专用道条件下电动公交线路无线充电设施布设方法 [D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- HAO Mingjie. Layout optimization of the wireless charging infrastructure for electric bus route with dedicated bus lane [D]. Changchun: Jilin University, 2022. (in Chinese)
- [93] LIU Zhaoai, SONG Ziqi. Robust planning of dynamic wireless charging infrastructure for battery electric buses [J]. *Transport Res Part C: Emerg Tech*, 2017, **83**: 77-103.
- [94] Alwesabi Y, WANG Yong, Avalos R, et al. Electric bus scheduling under single depot dynamic wireless charging infrastructure planning [J]. *Energy*, 2020, **213**: 118855.
- [95] Alwesabi Y, LIU Zhaoai, Kwon S, et al. A novel integration of scheduling and dynamic wireless charging planning models of battery electric buses [J]. *Energy*, 2021, **230**: 120806.
- [96] 唐春艳, 李小雨. 多车型纯电动公交车使用下的混合车队替换优化 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, **21**(2): 151-157.
- TANG Chunyan, LI Xiaoyu. Optimizing mixed transit fleet replacement with multi-type battery electric buses [J]. *J Transport Syst Engi Info Tech*, 2021, **21**(2): 151-157. (in Chinese)
- [97] 马晓磊, 闫昊阳, 缪然. 考虑财政补贴的电动公交车队置换优化模型 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, **21**(3): 200-205.
- MA Xiaolei, YAN Haoyang, MIAO Ran. Optimization model of electric bus fleet replacement considering financial subsidies [J]. *J Transport Syst Engi Info Tech*, 2021, **21**(3): 200-205. (in Chinese)
- [98] LI Lu, Lo Hong K, XIAO Feng, et al. Mixed bus fleet management strategy for minimizing overall and emissions external costs [J]. *Transport Res Part D: Transport Envi*, 2018, **60**: 104-118.
- [99] Isiam A, Lownes N. When to go electric? A parallel bus fleet replacement study [J]. *Transport Res Part D: Transport Envi*, 2019, **72**: 299-311.
- [100] 周斌. 基于改进遗传算法的电动公交车行车调度研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2012.
- ZHOU Bin. Electric bus dispatching based on improved genetic algorithm [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2012. (in Chinese)
- [101] 朱鹰屏, 韩新莹, 刘世立, 等. 基于改进双中心粒子群算法的电动公交车运营数量优化策略研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2017, **45**(8): 126-131.
- ZHU Yingping, HAN Xinying, LIU Shili, et al. Optimization of operation quantities of electric buses based on improved double center particle swarm optimization algorithm [J]. *Power Syst Prot Contr*, 2017, **45**(8): 126-131. (in Chinese)
- [102] 叶鑫宇, 刘昊翔, 龙建成. 考虑充电需求的电动公交车运营优化模型与算法 [J/OL]. 交通运输工程与信息学报: 1-26. [2022-08-17]. <https://doi.org/10.19961/j.cnki.1672-4747.2021.12.027>.
- YE Xinyu, LIU Haoxiang, LONG Jiancheng. Optimization model and algorithm of electric bus operation considering charging demand [J/OL]. *J Transport Syst Engi Info Tech*: 1-26. [2022-08-17], <https://doi.org/10.19961/j.cnki.1672-4747.2021.12.027>. (in Chinese)
- [103] An Kun. Battery electric bus infrastructure planning under demand uncertainty [J]. *Transport Res Part C: Emerg Tech*, 2020, **111**: 572-587.
- [104] Berkhout F. Life cycle assessment and innovation in the automotive industry [J]. *SAE Tran*, 1998, **107**(2): 1988-1997.
- [105] Sawyer-Beaulieu S, Tam E. Applying life cycle assessment (LCA) to North American end-of-life vehicle (ELV) management processes [R]. *SAE Technical Paper*, 2005-01-0846, 2005.
- [106] 王人洁. 电动车和天然气车能源环境影响的燃料生命周期评价研究 [D]. 北京: 清华大学, 2015.
- WANG Renjie. Fuel-cycle assessment of energy and environmental impacts from electric vehicles and natural gas vehicles [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015. (in Chinese)
- [107] Nurhadi L, Borén S, Ny H. A sensitivity analysis of total cost of ownership for electric public bus transport

- systems in Swedish medium sized cities [J]. *Transport Res Proceed*, 2014, **3**: 818-827.
- [108] Lajunen A. Energy consumption and cost-benefit analysis of hybrid and electric city buses [J]. *Transport Res Part C: Emerg Tech*, 2014, **38**: 1-15.
- [109] Lajunen A, Lipman T. Lifecycle cost assessment and carbon dioxide emissions of diesel, natural gas, hybrid electric, fuel cell hybrid and electric transit buses [J]. *Energy*, 2016, **106**: 329-342.
- [110] 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 Xueran, LIU Wenfeng, ZHANG Longwen, et al. CO₂ emission reduction effect of electric bus based on energy chain in life cycle [J]. *J Transport Syst Engi Info Tech*, 2019, **19**(1): 19-25. (in Chinese)
- [111] 潘应久. 基于多源数据的新能源公交车排放特性分析与估计 [D]. 南京: 东南大学, 2020.
PAN Yingjiu. Characteristic analysis and estimation for exhaust emissions of new-energy buses with multi-source data [D]. Nanjing: Southeast University, 2020. (in Chinese)
- [112] Kunith A, Mendelevitch R, Goehlich D. Electrification of a city bus network: An optimization model for cost-effective placing of charging infrastructure and battery sizing of fast-charging electric bus systems [J]. *Int'l J Sustain Transport*, 2017, **11**(10): 707-720.
- [113] Teichert O, Chang F, Ongel A, et al. Joint optimization of vehicle battery pack capacity and charging infrastructure for electrified public bus systems [J]. *IEEE Trans Transport Electr*, 2019, **5**(3): 672-682.
- [114] Harris A, Soban D, Smyth B M, et al. A probabilistic fleet analysis for energy consumption, life cycle cost and greenhouse gas emissions modelling of bus technologies [J]. *Appl Energ*, 2020, **261**: 114422.
- [115] 苏岳. 考虑多类公交车的公交线路设计优化及实例分析 [D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
SU Yue. Optimization and case study of bus route design for different vehicle types: continuum approximation [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [116] Peled I, Lee K, Jiang Y, et al. On the quality requirements of demand prediction for dynamic public transport [J]. *Commun Transport Res*, 2021, **1**: 100008.
- [117] CHEN Zhiwei, LI Xiaopeng, QU Xiaobo. A continuous model for designing corridor systems with modular autonomous vehicles enabling station-wise docking [J]. *Transport Sci*, 2022, **56**(1): 1-30.

曲小波 教授

清华大学车辆与运载学院院长聘教授、教育部“长江学者”讲席教授。回国前任瑞典查尔莫斯理工大学讲席教授, 在澳洲、欧洲任教十余年。主要研究方向为未来公交系统、车城互联系统

建模与优化、地空协同物流与出行。现任期刊 *Communications in Transportation Research* 主编、*Journal of Intelligent and Connected Vehicles* 执行主编, *Transportation Research Part A/E*、*The Innovation*、*IEEE Trans on Cybernetics*、*Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering (CACIE)* 等 9 个行业内知名期刊编委。迄今主持澳大利亚基金委、瑞典创新局、欧盟等资助的 10 余项重大项目, 累积经费超过 1 200 万欧元, 在交通领域顶级期刊发表论文 140 余篇。于 2020 年当选为欧洲科学院 (*Academia European*) 院士。

Prof. QU Xiaobo

Xiaobo Qu is a Changjiang Chair Professor with *School of Vehicle and Mobility, Tsinghua University*. Prior to his current appointment, he was a Chair Professor with *Chalmers University of Technology*, and a faculty member with two Australian universities from 2012—2018. His research is focused on improving large, complex and interrelated urban mobility systems by integrating with emerging technologies. He is the editor in chief of the *Communications in Transportation Research* and the executive editor in chief of *Journal of Intelligent and Connected Vehicles*. He also serves as an associate editor or on the editorial boards of some famous journals, such as *Transportation Research Part A / E*, *The Innovation*, *IEEE Trans on Cybernetics*, and *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. To date, he has secured research funding well above 12 million Euros from the *Australian Research Council*, *Swedish Innovation Agency Vinnova*, *Swedish Foundation for International Cooperation in Research and Higher Education (STINT)*, and *European Union*. He has published over 140 journal articles at top tier journals in the area of transportation. He has been a member in *Academia European-The Academy of Europe* since 2020.