

# 交能融合背景下电动公交充电设施配置与车辆调度优化研究综述

安 琨, 周翔宇, 马万经

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

**摘要:**在碳中和背景下,交通与能源系统的融合发展已成为推动城市绿色低碳转型的重要路径。本文基于交能融合视角,探讨了智能电网与电动公交基础设施之间、以及公交用能与电网供能之间的协同优化的关键技术与实施路径。系统梳理了国内外电动公交发展面临的主要问题及研究进展,重点针对多元化充电模式,深入探讨了考虑电网限制的充电设施配置优化方法及其对应的公交调度策略。在此基础上,结合车网互动(Vehicle-to-Grid, V2G)技术发展,分析了电动公交充放电协同调度策略,并对“光储充”一体化公交车站的运营优化进行了调研。最后,展望了未来交通-能源融合的发展趋势,为城市电动公交系统的可持续发展提供了理论参考与实践指导。

**关键词:**电动公交;充电设施配置;车辆调度;V2G技术;新能源消纳

**中图分类号:**U492.22 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2026)03-0639-14

**DOI:**10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20250384

## Review on charging infrastructure planning and vehicle scheduling for electric buses under transport-energy integration policy

AN Kun, ZHOU Xiang-yu, MA Wan-jing

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** Under the carbon neutrality framework, the integrated development of transportation and energy systems has emerged as a critical pathway to facilitate urban green and low-carbon transformation. Adopting a transport-energy integration perspective, this paper investigates key technologies and implementation approaches for synergistic optimization between smart grids and eg. electric bus (e-bus) infrastructure, as well as between bus energy consumption and grid power supply. The study systematically reviews major challenges and research advancements in global e-bus development, with particular emphasis on diversified charging modes. It provides an in-depth analysis of charging infrastructure configuration optimization methods considering grid constraints and their corresponding bus scheduling strategies. Building upon the development of Vehicle-to-Grid (V2G) technology, the paper examines coordinated charging-discharging scheduling strategies for e-buses and evaluates operational optimization

**收稿日期:**2025-04-30.

**基金项目:**国家自然科学基金面上项目(52472349),国家自然科学基金青年科学基金项目(72101186).

**作者简介:**安琨(1987-),女,教授,博士.研究方向:绿色智慧出行系统优化,复杂交通网络分析与优化.

E-mail: kunan@tongji.edu.cn

approaches for integrated photovoltaic-energy storage-charging (PV-ES-C) bus stations. Finally, the study outlines future trends in transport-energy integration, offering both theoretical references and practical guidance for sustainable development of urban e-bus systems.

**Key words:** electric public transportation; charging infrastructure configuration; vehicle scheduling strategy; V2G technology; renewable energy accommodation

## 0 引言

电动公交车作为推动交通领域低碳转型的关键举措,对促进交通行业能源结构转型和实现“双碳”目标具有重要战略意义,近年来因此获得快速发展。根据2020年国务院办公厅印发的《新能源汽车产业发展规划(2021—2035年)》<sup>[1]</sup>,我国明确将坚持纯电驱动战略取向。作为促进交通低碳转型的重要政策工具,交通运输部与财政部于2024年7月29日联合发布的《新能源城市公交车及动力电池更新补贴实施细则》<sup>[2]</sup>,通过创新财政补贴机制有效降低了电动公交购置成本。该政策不仅加快了电动公交的规模化应用,还从全生命周期经济性角度提升了运营企业的采购意愿。在此背景下,我国公交行业正通过“政策激励-技术迭代-市场响应”的协同机制,稳步构建以清洁能源为主导的可持续公共交通体系。例如,上海市计划在2024~2027年累计更新公交车6 200辆,年均置换率超过9%,预计到2027年新能源公交车占比将达到96%,并同步实现充电设施全覆盖<sup>[3]</sup>。

从国际实践来看,主要经济体正通过差异化路径推进公交电动化转型。2023年,欧盟电动公交注册量达5 166辆,同比增长39.1%,市场份额突破15.9%,其增长主要得益于成员国碳配额交易与购车补贴的协同作用;美国则更侧重基础设施建设,截至2024年已建成20万个公共充电桩,其中洛杉矶通过“公交电气化置换计划”设定了2030年全面禁售燃油公交车的强制性目标。全球经验表明,公交电动化已从技术验证阶段进入规模化应用期。

## 1 电动公交充电设施配置与车辆调度优化研究趋势

随着电动公交产业化进程的加速推进,大规模电动公交集中充电导致的局部电网过载问题逐渐加剧。同时,风电、光伏发电的间歇性带来可再生能源消纳难题。电动公交作为规模化储能单

元,即可通过V2G(车网互动)技术逆向电网放电,参与电网调峰调频、提升电网稳定性,又可作为可再生能源电网的灵活性资源,降低弃风弃光率。因此,交能融合是应对交通减排压力、电网稳定性需求、可再生能源消纳、运营降本增效的综合解决方案。

在此背景下,相关学术研究范式正经历从单一技术分析向多学科交叉研究的显著转变。为系统梳理该领域研究进展,本研究采用跨库检索策略,基于中国知识基础设施工程(CNKI)、Web of Science以及Google Scholar等权威中英文数据库进行文献检索。图1呈现了2018~2024年间电动公交充电设施规划布局及车辆智能调度领域学术论文的全球地理分布概况。从图中数据趋势可见,近年来全球范围内电动公交相关研究呈现持续升温态势,中国与美国已成为该领域的两大核心研究枢纽。尤为引人注目的是,电动公交调度策略优化方向的研究成果呈现爆发式增长,这种学术热潮与中美两国在公共交通电动化转型进程中取得的技术突破形成深度共振,充分体现了理论研究与实践的双向驱动效应。

通过系统分析2018~2024年间的高被引论文发现,充电设施配置优化的研究主题高度聚焦于节能减排、政策法规与交通运营三大维度。环境效益评估:美国橡树岭国家实验室Cullen等<sup>[4]</sup>构建全生命周期评估模型,从电气化设施整体布局视角量化碳减排潜力;政策驱动机制:加州大学戴维斯分校Hardman团队<sup>[5]</sup>通过政策仿真模型,实证检验充电补贴对公交运营商成本收益的调控效应;场站资源优化:北京航空航天大学Liu等<sup>[6]</sup>提出“光储充”一体化场站时空资源协同模型,显著提升设施利用率和经济回报率。

在电动公交调度优化研究中,相关高被引论文进一步深化至电网安全与运营系统经济性的协同层面。车辆-电网互动:Yao等<sup>[7]</sup>与Aghdam等<sup>[8]</sup>创新性地将公交车辆建模为移动储能单元,通过智能排班调度增强配电网稳定性与可再生

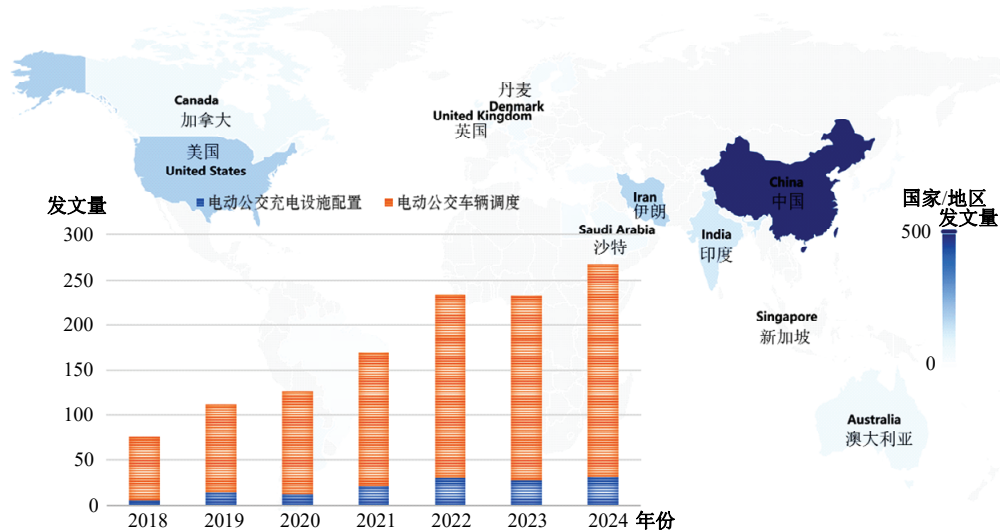


图1 2018-2024年电动公交充电设施规划布局及车辆智能调度领域已发表论文地理分布  
 Fig. 1 Geographical Distribution of Published Papers in charging infrastructure planning and vehicle scheduling for electric buses (2018-2024)

能源消纳能力;运营系统联合优化:He等<sup>[9]</sup>构建公交排班-充电设施动态耦合模型,实现全系统运营成本最小化与充电设施负载均衡性。

利用VOSviewer科学计量软件对中英文文献的关键词开展了系统的关联统计分析,通过提取文献标题、摘要及关键词构建了完整的语义网络。图2和图3分别展示了2018~2024年间CNKI中文数据库和Web of Science英文数据库中电动公交研究的关键词共现知识图谱,彩图参见电子版,下同。在知识图谱可视化呈现中,各节点代表特定关键词,其直径大小与关键词出现频次呈正相关关系,而色温梯度变化则反映研究热点的年度演变特征。节点间连线的宽度直观地体现了关键词共现的强度。

基于关键词共现网络分析结果,电动公交研究领域在2020年后呈现出明显的能源系统整合转向趋势。这一转变具体表现为:研究焦点已从

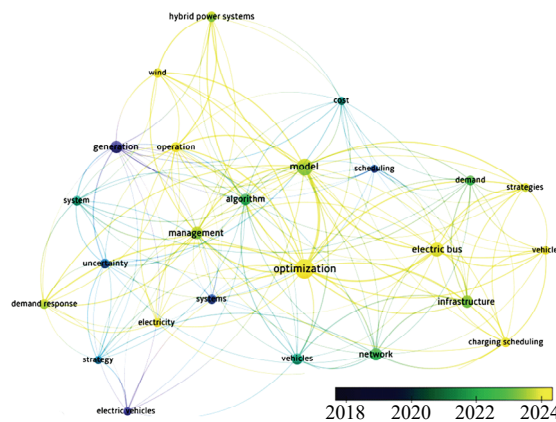


图3 Web of Science数据库中电动公交研究的关键词知识图谱

Fig. 3 Keyword co-occurrence network and knowledge mapping of electric bus research in web of science database

早期的设施布局优化(深蓝色节点簇)逐步演进至能源互联网协同(黄色节点簇),形成了以可再生能源并网(wind)、混合供能系统(hybrid power system)以及有序充电(coordinated charging)为核心的新兴研究热点。这种研究范式的转变主要源于两方面驱动因素:首先,电动车辆的快速增长使得可再生能源融合需求日益迫切;其次,既有的电动公交设施需要通过多元化补能方式来满足不断扩大的车队能源需求,同时确保电网运行安全。在此背景下,多模式运营环境下的电动公交调度策略必须动态适应场站内电网供能特性,以实现运营成本优化。因此,从能源融合视角深入研究电动公交的充电设施配置与车辆调度策略,不仅

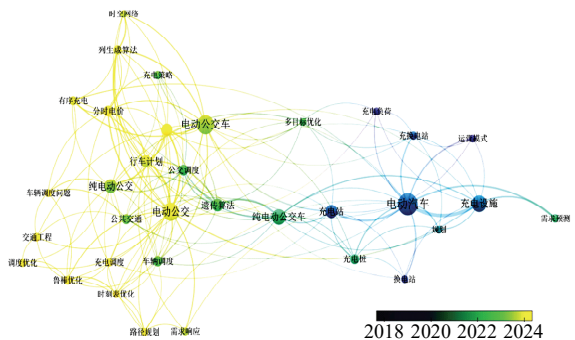


图2 CNKI数据库中电动公交研究的关键词知识图谱  
 Fig. 2 Keyword co-occurrence analysis and knowledge graph of electric bus research in CNKI database (2018-2024)

能促进电动公交产业向更经济高效的方向发展,还将有力推动低碳目标的实现。

基于对电动公交与能源系统融合发展趋势的全面考量,本文围绕两个关键领域展开系统综述:①电动公交充电设施配置优化;②多模式电动公交调度策略,并着重分析了“光储充”一体化、V2G 等新兴技术对该领域的影响。

## 2 考虑电网负荷约束的电动公交充电设施配置与运营优化

电动公交车的能源补给系统优化是制约其规模化运营的关键技术瓶颈,其中充电基础设施的科学规划与容量协同配置直接影响线网调度效率。在电动公交运营初期,运营商主要依据静态充电需求预测进行充电站选址决策,优化目标设为投资成本最小化与线路覆盖率最大化之间的权衡。然而,随着电动公交线路渗透率的持续提升,早期场站的规划电力负载能力逐渐成为限制线路扩展的主要约束条件。

在充电需求时空分布异质性显著的区域,建

立“公交-社会车辆”充电设施共享机制不仅能显著提升充电效率<sup>[10]</sup>,还能优化资源配置。但值得注意的是,在电网负载较高的区域,此类共享充电设施的设计与运营可能引发电网峰值负荷增加、对电网安全运行构成潜在风险<sup>[11]</sup>。

近年来提出的“光储充”一体化公交场站概念,通过多能流耦合机制实现了源-网-荷-储协同优化。在新型场站屋顶建设光伏发电系统,搭配储能电池,以实现清洁能源自给自足,减少对传统电网的依赖,公交场站光伏发电过剩时,可将电能出售给电网,创造额外收益。这种融合多种可再生资源的新型场站已在部分示范区域展现出显著优势。

在电动公交充电设施配置与运营领域,本文从电动公交专用充电设施配置优化、电动公交与电动汽车共享充电设施运营、光储充一体化场站运营优化 3 个方面展开综述。图 4 系统展示了其研究进展与技术发展脉络。

充电设施的选址与定容通常需要与公交线路排班、车队规模等进行协同优化,以实现系统总成

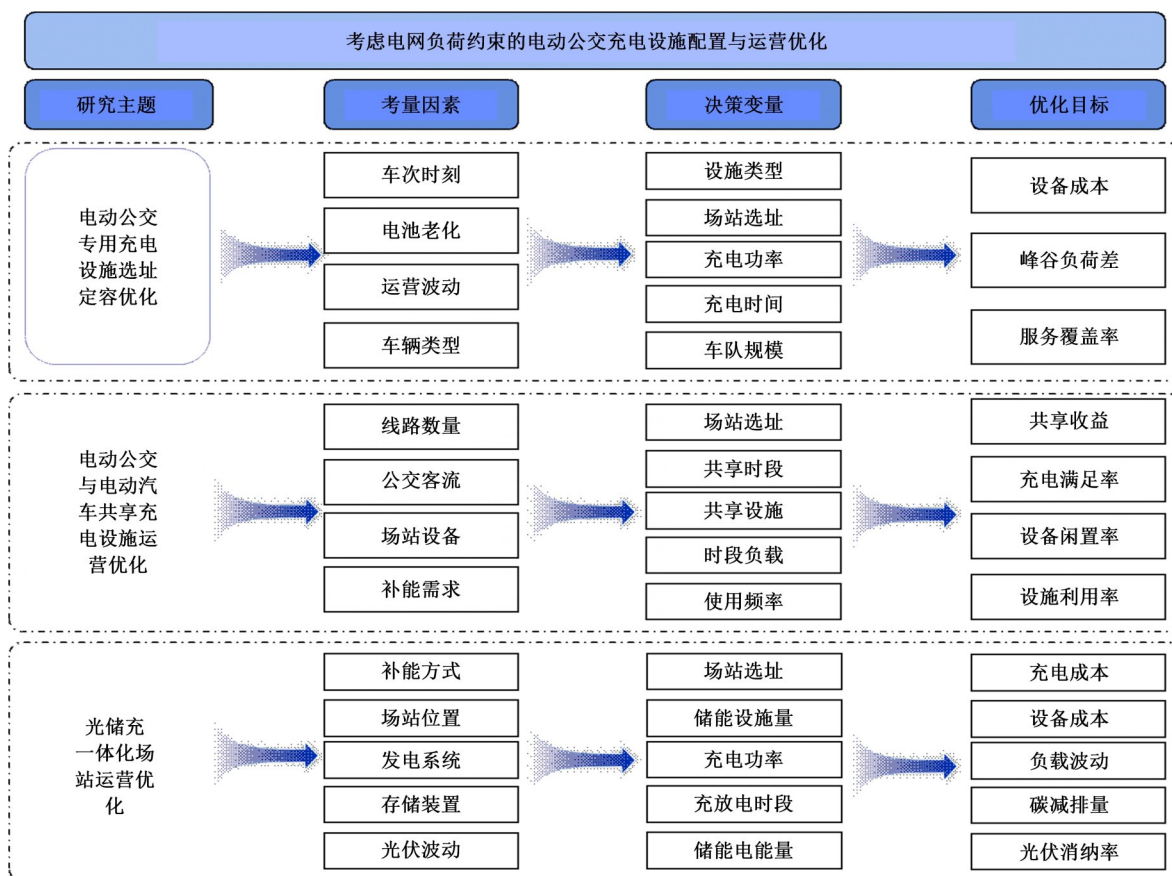


图 4 电动公交充电设施配置优化研究框架

Fig. 4 Research framework for optimization of electric bus charging infrastructure configuration

本最小化目标。王玉生等<sup>[12]</sup>和熊杰等<sup>[13]</sup>基于运营时刻表,构建了以车队购置成本和充电设施布局成本最小化为目标的时空协同优化模型;Zhou等<sup>[14]</sup>考虑电池老化和运营时间不确定性,提出了两阶段随机规划模型:第一阶段优化车辆调度方案,第二阶段确定多类型充电设备配置方案;Wang等<sup>[15]</sup>针对混合车型运营环境,采用自适应大邻域搜索(ALNS)算法优化多线路充电调度并降低场站峰谷负荷差;Esmailnejad等<sup>[16]</sup>提出沿公交线路设置充电站以增强运营可靠性及覆盖率,降低异常天气对公交线路运营的影响;An<sup>[17]</sup>考虑充电需求的不确定性,构建了充电场站选址与公交车队规模联合优化模。

随着城市化发展,公交网络需要动态调整以适应客流变化。然而,充电设施建设周期和电网容量限制可能导致线路扩展时充电能力不足,或线路缩减时设施冗余。为此,推动公交与社会车辆充电设施共享成为有效解决方案。Zhang等<sup>[18]</sup>提出了公私充电设施协同运营模式,响应公交公司线路调整带来的充电需求变化;Hu等<sup>[19]</sup>通过客流需求预测分析区域内公交线路未来的扩增状况,建立了一个考虑当前和未来公交充电需求的电动公交车充电站选址方法。该方法优化了场站内充电服务区域布局,可减少电动汽车11.47%的充电时间。当公交客流降低时,区域内公交线路需要削减,前期建设的充电设施可能会出现冗余闲置。为了降低运营成本并提高充电设施的利用率,可以将这些冗余的充电设施共享给社会车辆使用<sup>[20]</sup>。Jia等<sup>[21]</sup>在上海嘉定的案例测试表明,公交场站可在白天公交运营阶段开放共享时段,将58%的充电功率和30%的充电桩共享给社会车辆使用。这种共享充电运营模式不仅满足了场站周边5公里范围内97.54%的社会充电需求,还为场站带来了每天千元的额外收益。

此外,为缓解在用电高峰时段的电力资源短缺问题,拓展公交场站电力资源获取方式,构建与可再生能源融合的新型场站,成为了新的研究热点。“光储充”一体化场站应运而生,通过在场站屋顶建设光伏发电系统,清洁的光电成为电动公交车队补能的新方式<sup>[22]</sup>。姚志力等<sup>[23]</sup>建立了蒙特卡洛概率负荷模型,联合多个场站内充电负载功率调整来应对部分场站内出现新增用电需求时导

致的电力负载波动;肖白等<sup>[24]</sup>结合公交场站中不同线路的电动公交运行规律,推演场站内电力负载波动曲线,使用多目标粒子群算法确定场站内的充电桩数量以及光伏发电系统和配电变压器的容量;Bie等<sup>[25]</sup>通过改进的NSGA-II(Non-dominated sorting genetic algorithm II)算法求解,发现优化储能装置充放电时段策略,让“光储充”一体化场站的相比单一电网供电降低了25.48%运营成本和68.71%的碳排;Li等<sup>[26]</sup>发现混合供电系统可延长场站运营时间4.2%~7.8%,节省5.7%车队成本。敏感性分析显示,光伏效率每提高10%,可减少7.5%充电设备投资。在每小时太阳辐照度超过1 000 W/m<sup>2</sup>的地区构建“光储充”一体化场站具有更高的实用价值;Liu等<sup>[27]</sup>考虑将北京现有公交场站全部改造为具有光伏并网供电系统功能,测试表明,场站净充电负荷总量与峰值将分别实现23%和8.6%的降幅。通过耦合储能装置提高光伏消纳,上述降幅可进一步扩大至28%与37.4%,验证了源-储-荷协同优化对电网调峰的积极作用,证实了“光储充”场站在未来特定电力市场机制下的经济可行性。考虑到“光储充”场站设备升级可能对线路乘客服务产生影响,Liu等<sup>[6]</sup>发现,虽然场站升级能降低日常运营成本8%以上,但由于新型场站充电服务的特性,乘客量也相应减少了8%以上。

在电网约束条件下,电动公交充电设施配置与运营的协同优化仍面临诸多挑战,尤其是在多能源供给背景下的场站协调问题中尤为突出。当前研究表明,在“光储充”一体化场站中,源(光伏)-网(配电)-荷(充电负荷)-储(电池)4个关键环节之间协同机制尚不健全,具体表现为:光伏出力与公交车队的充电负荷在时空上匹配度较低,储能系统的充放电策略未能有效响应电网的实时波动,导致可再生能源利用效率与系统调控能力均受限制。针对上述瓶颈问题,亟需构建“光-储-荷-储”四维联动优化模型,从源头提升多能协同水平。一方面,应优化光伏出力与车辆充电负荷的时空匹配策略,提升光伏自发自用率;另一方面,需引入基于运行状态的储能系统动态阈值调整机制,使储能设备能更灵活地参与调峰调频,从而实现线路运行的动态适配,增强配电网在高负荷时段的韧性与稳定性。

### 3 电动公交车辆调度策略优化

随着电动公交场站的规模化应用,电动公交车队的智能调度已成为城市公交运营优化的关键环节<sup>[28,29]</sup>。通过系统梳理近十年国内外研究成果,现有电动公交调度策略可依据技术特征划分为三大研究方向:①基于多模式充电的静态调度优化;②考虑乘客需求响应的动态调度机制;③融合V2G技术的协同调度方法。如图5所示,本文构建了包含场景特征、技术路径与关键算法的三维分析框架,对各研究方向进行了系统对比与分析。

#### 3.1 多模式充电场景下的电动公交调度优化

当前电动公交主要采用3种充电技术路线:整车充电;电池模块化换电;非接触式无线充电。各类技术在实际应用中呈现显著的差异化特征。

##### 3.1.1 整车充电调度优化

整车充电作为应用最广泛的补能方式,其调度策略的科学性直接影响车辆运营效率与能耗管理水平。要实现高效的整车充电调度,需首先对线路运营中的用电负荷特性进行系统分析,为能

耗管理提供理论依据<sup>[30-34]</sup>。在整车充电规划方面,现有研究主要聚焦以下方向:

(1)基础充电策略优化:多数研究建议在场站首末站设置充电设施<sup>[35,36]</sup>,并优先选择电力低谷时段进行补能或实施有序充电,以维持电网负荷稳定。例如,Zhou<sup>[37]</sup>,熊杰等<sup>[38]</sup>建立了多车型车队充电优化模型,利用大规模领域搜索算法有效解决了分时电价下的充电调度问题。翁剑成等<sup>[39]</sup>利用改进遗传算法优化混合车型的公交车队行车计划表。Gkiotsalitis<sup>[40]</sup>,Bao<sup>[41]</sup>,Lacombe等<sup>[42]</sup>通过设置充电时间窗,优化了固定时刻表线路的有序充电方案。

(2)技术适配性研究:随着电池快充技术的进步,电动公交的充电功率呈现出多样化的特点。高功率快充技术能显著缩短充电时间,降低充电设施占用率和运营调度复杂度<sup>[43]</sup>。为保障充电场站的电力安全,Xiao等<sup>[44]</sup>提出差异化充电策略:对大容量电池车辆采用快充、小容量电池车辆采用慢充,该方案可使车队总成本降低约10%;Lee等<sup>[45]</sup>提出考虑场站总充电功率有限条件下的

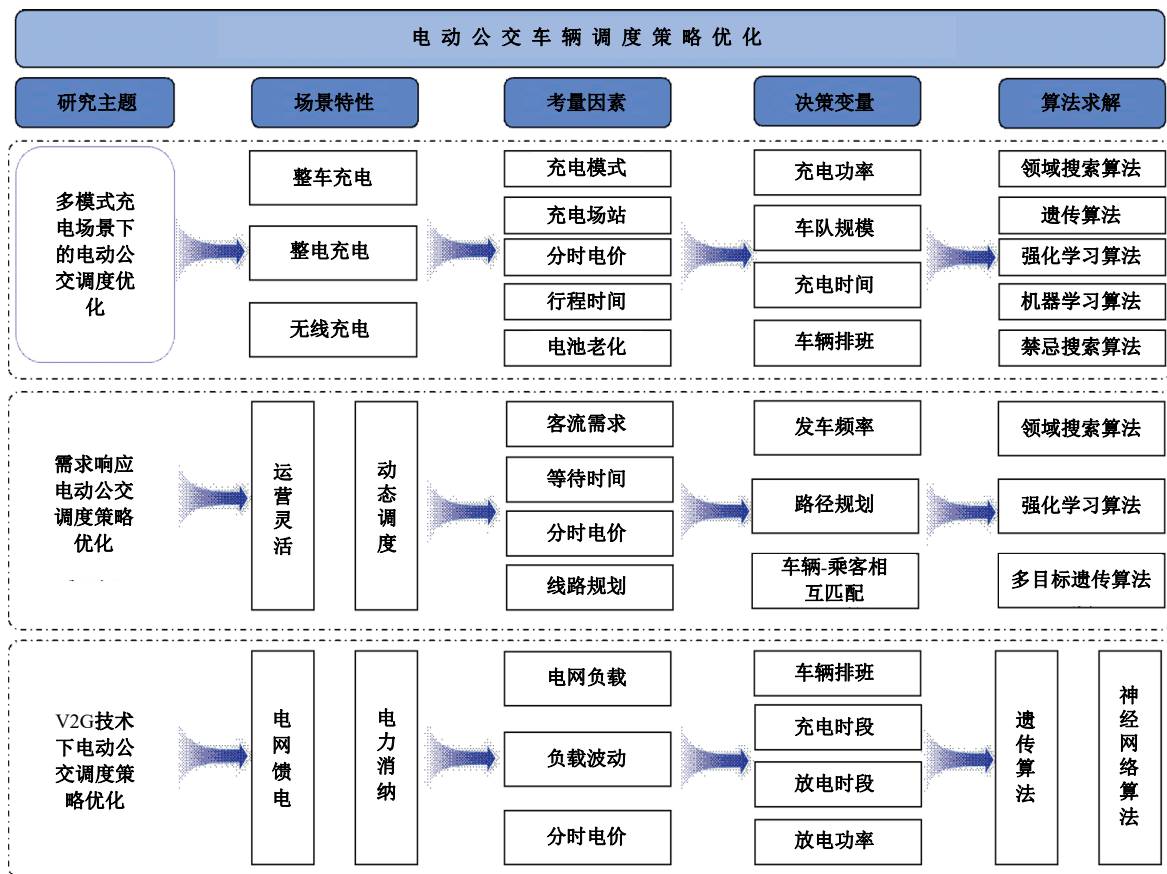


图5 电动公交车辆调度策略优化研究框架

Fig. 5 Research framework for optimization of electric bus fleet scheduling strategies

车队规模-充电功率分配协同优化模型,结果发现,确保快充桩的满负荷状态运行是保障该场景公交线路可靠运营的首要条件。

(3)不确定性应对:在实际运营中,受到天气和交通状况等因素影响,公交线路行程时间与能耗呈现不规律的波动,进而影响电动公交充电调度的可行性<sup>[46]</sup>。针对行程时间波动问题<sup>[47]</sup>,Yan等<sup>[48]</sup>开发了混合整数线性规划(MILP)充电调度模型,支持在车辆发生故障或行程时间波动较大的情况下,重规划公交前往多场站充电的动态调度。在香港路网测试中,其强化学习Q-learning算法的运营指标优于商业求解器结果。姚恩建等<sup>[49]</sup>则通过设置延误惩罚函数,利用接续时间进行机会充电,既提升运营稳定性,又降低电网冲击。

### 3.1.2 电池模块化换电调度优化

相较于整车充电,换电模式具有补能速度快(通常5~10 min)、调度复杂度低的优势<sup>[50-52]</sup>。然而,换电设备的高投资成本使得电池配置优化成为关键研究课题<sup>[53]</sup>。Li<sup>[54]</sup>提出快充-换电混合模式优化了车队规模与电网负载;Xiong等<sup>[55]</sup>则针对多场站场景,构建了多电池容量车型的换电调度模型,有效降低了区域换电成本;Huang等<sup>[56]</sup>通过设计有排序机制的机器学习算法预测公交线路的能耗,并依此决策换电场站的换电调度。

### 3.1.3 非接触式无线充电调度优化

无线充电通过电磁感应/磁共振(大功率充电弓)实现非接触式补能,充电功率高达400 kW<sup>[57-59]</sup>。Li等<sup>[60]</sup>提出了公交站点无线充电模式,可利用车辆在停靠站时的上下客时间进行快速补电,在北京路网的测试中,该模式的运营成本比整车充电降低10.12%,电网峰值负荷降低70%;Alwesabi等<sup>[61]</sup>建立了充电弓选址与充电调度联合优化模型。然而,高频电磁耦合可能引发电网谐波污染,影响无线充电速率。

针对这一问题, Ji等<sup>[62]</sup>进一步分析了充电弓部署位置对成本的影响。通过对比路段布设和交叉口布设两种方式,发现双向运营的线路中路段布设的设备成本更低。此外,伴随电动公交运营周期的增加,电池老化问题不可避免。王永兴等<sup>[63]</sup>考虑全生命周期的无线充电设施成本与电池老化成本,设计禁忌搜索求解电池容量与设施布局联合优化问题;Liu等<sup>[64]</sup>对比了不同季节下

无线充电、整车充电以及混合充电模式的运营总成本,发现由于当前无线充电设备成本较高,混合充电模式在总成本上更具优势。

### 3.2 需求响应电动公交调度策略优化

需求响应公交(Demand-responsive transit, DRT)是一种动态公交调度模式,其核心特征在于根据实时乘客需求调整发车频率、行驶路径及车辆配置,而非依赖固定时刻表运营。相较于传统公交,DRT系统在高峰时段增加运力供给,在低谷时段减少发车班次,从而提高资源利用效率并优化乘客出行体验<sup>[65]</sup>。

Zhang等<sup>[66]</sup>设计了减少电动公交车辆转弯的路径行驶策略,以延长需求响应电动公交的运营时间;Lian等<sup>[67]</sup>提出了一种先充电规划再线路规划的理念,旨在通过均衡区域乘客分布,并结合领域算法来降低乘客等待成本;Wu等<sup>[68]</sup>提出了一种基于启发式引导的多智能体强化学习框架,来解决混合需求(预约需求与即时需求)下的动态调度问题。该框架与启发式算法结合,可将训练样本需求降低约40%,且策略收敛速度提升2.5倍。车辆载客能力和电池容量同样限制着需求响应公交运营模式的发展。为此,王晓伟等<sup>[69]</sup>建立了灵活公交发车时刻与多车型配置联合优化模型,结合使用多目标遗传算法(NSGA-II)优化得出,该案例降低12.8%的乘客平均等待时间与5.7%的线路运营成本。高虹等<sup>[70]</sup>则通过灵活调度模块化公交的方式来应对时空不均衡的站点需求。通过对模块化电动公交车在站点进行解构与重组,动态调整车辆的容量,可使总体运营成本降低26.6%。

### 3.3 V2G技术下电动公交调度策略优化

V2G技术使电动公交具备双向充放电能力,既可作为交通工具,又可作为分布式储能单元参与电网调峰<sup>[71-73]</sup>。我国浙江嘉善县于2022年投运了浙江省首个V2G公交充电站,标志着该技术进入实践验证阶段。随着充电设施持续升级,V2G技术将为公共交通低碳化发展提供新路径。

在V2G技术研究中,电网负载均衡问题是研究的重点。早期研究主要关注电动网约车<sup>[74,75]</sup>和私家车<sup>[76]</sup>的放电潜力,但由于这类车辆用途广泛、行驶模式多变,其放电行为存在较大的随机性<sup>[77]</sup>。相较而言,电动公交具有固定的运营时刻表,能更可靠地参与电网调峰,因此逐渐获得更多

的关注<sup>[78]</sup>。目前,V2G技术在电动公交调度中的应用主要体现在3个方面:通过放电获取经济效益、参与电网调峰以及消纳可再生能源。

在放电收益方面,学校公交因其运营规律性成为理想研究对象。Noel等<sup>[79]</sup>对美国Red Clay学区的对比研究表明,综合考量车辆补能费用与电池成本,采用V2G技术的电动校车每年可为学校节省6 070美元运营成本;Elliott等<sup>[80]</sup>优化V2G环境下的校园公交时刻表,研究发现14 000辆V2G公交车可聚合2.6 GW·h电能,每年减少1 130吨二氧化碳排放,但电动公交的额外放电加速电池老化;Manzoli等<sup>[81]</sup>构建了考虑电池老化成本的公交运营模型,发现只有当电池成本低于100欧/(kW·h)时,放电收益才能覆盖老化成本。此外,电力回收政策对收益影响显著。叶丽雅等<sup>[82]</sup>从V2G场站运营商的角度出发,设计了含电动公交在内的多种电动车辆的充放电策略,以实现放电收益最大化;Fei等<sup>[83]</sup>设计了两种非线性公交放电策略,以最大化V2G场站运营商的放电收益。两种策略分别为“即时售卖”(实时按照市场电力回收价格售卖电力)和“储备售卖”(存储电力依据电网需求进行出售)。研究发现,无论采用哪种策略,电力回收补贴价格都是决定收益的关键因素。

在电动公交参与电网调峰方面,电网负载波动性是电动公交参与放电的重要考量因素。在微观层面,Verbrugge等<sup>[84]</sup>开发的双层规划模型,设计遗传算法来确保场站在公交充放电过程中的电网谐波失真值保持最优,从而保障车辆充放电功率的稳定。在宏观层面,章锐等<sup>[85]</sup>基于公交充换电模式响应特性,构建多时间尺度内关联资源分配的评估模型,来量化电动公交车在不同时段内对电网的调峰能力;Rafique等<sup>[86]</sup>针对大型公交场站能源管理问题,设计了两阶段随机优化模型并结合神经网络算法进行求解,可有效应对能源价格波动带来的不确定性。

另外,在光储充一体化场站中,也可采用具备放电功能的V2G充电桩,从而降低车辆日间运营的成本,维护公共电网的负载稳定。Ke等<sup>[87]</sup>设计了包括具有太阳能和风能两种可再生能源的新型场站能源供应系统,并针对不同电池容量优化了电动公交充放电计划。研究发现,当放电电力回收价格是日常电价两倍时可平衡V2G放电带来

的电池老化成本。这类场站通过建立微电网,不仅能利用可再生能源为车辆充电,还能通过储能系统平抑光伏出力波动和充电负荷突变<sup>[25]</sup>。

综合现有研究成果,电动公交车辆调度策略优化面临两大核心挑战:

(1)充电模式适配范式缺失。尽管当前充电技术路径日益多样化(如整车充电、换电、无线充电等),但尚缺乏面向具体线路运营场景的充电模式选择标准体系,难以基于线路能耗特征与区域电网条件实现技术方案的科学匹配,导致运营成本控制与电网稳定性提升难以协同达成最优。

(2)V2G协同机制与经济研究薄弱。V2G技术与新型“光-储-充”场站的深度融合仍处于初级探索阶段,尤其在绿色电力消纳方面,多能流(源-网-荷-储)协同不足,电动公交作为移动式分布式储能的调峰潜力尚未有效释放。同时,当前V2G的放电收益模式高度依赖财政补贴,缺乏可持续、市场化的商业机制支持,制约了其大规模推广应用。

针对上述问题,未来研究需聚焦以下关键突破路径:

(1)构建充电模式决策图谱。基于线路能耗的时空分布特征(如日均行驶里程、峰谷负荷比)与区域电网承载能力(如配电网容量裕度、可再生能源渗透率),建立“技术-场景”适配矩阵,为多样化公交运营场景提供定量化的充电技术选择依据。

(2)深化V2G协同机制研究。推动场站-车辆-电网的动态联动,构建融合光伏、储能与V2G的协同控制模型,提升绿色电力就地消纳水平,量化其在削峰填谷、平抑负荷波动中的边际效益。在经济机制上,提出融合碳交易收益、电网辅助服务补偿等多维收益模型,并设计差异化的补贴与激励机制,以推动V2G向可持续、市场化方向演进。

## 4 总结与展望

电动公交在全球范围内蓬勃发展,国内外学者在充电设施配置与车辆调度策略优化方面已取得丰硕成果,显著提升了电动公交的运营效率和服务水平。基于现有研究成果和技术发展趋势,未来电动公交充电设施配置与车辆调度优化应重点关注以下方向:

### (1)多模式充电设施协同优化配置

未来区域电动公交运营需因地制宜,科学配置不同充电模式。具体而言:换电模式凭借其高效性,特别适用于高频次、高强度的运营场景。未来应重点突破电池健康管理关键技术,可结合人工智能算法实现电池状态的精准评估与预测,从而延长电池使用寿命。

无线充电作为新兴的自动化充电技术,适合在公交站点等短暂停靠区域部署。虽然当前技术成熟度有待提升,但其在减少设备物理损耗和实现智能化管理方面具有独特优势。可运用大数据分析技术,基于站点客流量、停靠时长和电量需求等数据,动态优化无线充电功率配置。

此外,充电设施的功率配置直接影响运营效率。可建立慢充与快充协同的混合充电体系,日间采用快充满足运营需求,夜间利用谷电进行慢充。并基于线路特征、车辆负载和场站条件,优化不同功率充电桩的配比,提高资源利用效率。

### (2)可再生能源消纳导向的调度优化

由于当前我国电力结构中火电占比仍然较高,制约了电动公交的环保效益,亟需提升可再生能源在公交电力供给中的比重。V2G技术和“光储充”一体化场站为这一问题提供了创新解决方案。通过将电动公交作为移动储能单元,既可消纳可再生能源,又能参与电网调峰。关键研究方向包括:①放电策略优化:需综合考虑电价政策、电池老化等因素,建立科学的放电决策模型;②电池寿命管理:深入研究V2G场景下的电池衰减机理,开发寿命预测算法;③微电网协调控制:针对可再生能源的波动特性,开发光储充协同优化算法。

### (3)交能融合的调度策略框架

当前车辆调度模型多聚焦于单一目标(如车辆利用率、运营成本最小化等),但在考虑能源侧(如电网负载、能源价格、绿电出力)的反馈机制上存在一定不足。未来应构建面向“交能融合”的多目标优化框架,将公交运行与能源动态系统纳入统一调度体系中,构建“车-桩-网-源”联动模型,实现车辆运行与场站能源供应的协同最优调度策略。

后续研究重点包括:建立多时间尺度的电动公交充电设施规划方法、开发考虑电池健康状态的智能调度系统、构建车-站-网协同的能源管理

系统、完善V2G商业模式和政策激励机制。

这些研究将推动电动公交向更高效、更环保、更智能的方向发展,为城市交通低碳转型提供有力支撑。

### 参考文献:

- [1] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于印发新能源汽车产业发展规划(2021—2035年)的通知(国办发(2020)39号)[R]. 北京: 国务院办公厅, 2020.  
General Office of the State Council. Notice on Issuing the Development Plan for the New Energy Vehicle Industry (2021-2035) (No. 39 [2020]) [R]. Beijing: General Office of the State Council, 2020.
- [2] 交通运输部, 财政部. 新能源城市公交车及动力电池更新补贴实施细则(交运函(2024)390号)[R]. 北京: 交通运输部, 财政部, 2024.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China, Ministry of Finance of the People's Republic of China. Implementation Rules for Subsidies on the Renewal of New Energy Urban Public Transport Vehicles and Power Batteries (Jiao Yun Han No. 390 [2024]) [R]. Beijing: Ministry of Transport, Ministry of Finance, 2024.
- [3] 上海市道路运输管理局. 上海市道路运输行业“十四五”发展规划(沪道运规(2021)286号)[R]. 2021.  
Shanghai Municipal Road Transport Administration. Development Plan for the Road Transport Industry in Shanghai During the 14th Five-Year Period (2021-2025) (Hudao Yun Gui No. 286 [2021]) [R]. Shanghai: Shanghai Municipal Road Transport Administration, 2021.
- [4] Cullen D A, Neyerlin K C, Ahluwalia R K, et al. New roads and challenges for fuel cells in heavy-duty transportation[J]. Nature energy, 2021, 6(5): 462-474.
- [5] Hardman S. Understanding the impact of reoccurring and non-financial incentives on plug-in electric vehicle adoption—a review[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2019, 119: 1-14.
- [6] Liu X, Liu X C, Liu Z, et al. A solar-powered bus charging infrastructure location problem under charging service degradation[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2023, 119: 103770.
- [7] Yao S, Wang P, Zhao T. Transportable energy storage for more resilient distribution systems with multiple microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,

- 2018, 10(3): 3331-3341.
- [8] Aghdam F H, Mudiyansele M W, Mohammadi-Ivatloo B, et al. Optimal scheduling of multi-energy type virtual energy storage system in reconfigurable distribution networks for congestion management[J]. *Applied Energy*, 2023, 333: 120569.
- [9] He Y, Liu Z, Song Z. Integrated charging infrastructure planning and charging scheduling for battery electric bus systems[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2022, 111: 103437.
- [10] Yang X, Liu J, Zhuge C, et al. Exploring the potential of sharing private charging posts: A data-driven micro-simulation approach[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2024, 100: 105053.
- [11] 创元期货股份有限公司. 铜专题-电力需求对电网的影响——新能源汽车篇[EB/OL]. 南京: 创元期货股份有限公司, 2024. (2024-11-08)[2025-04-30]. <http://www.chyqh.com/research/copper2024>  
Chuangyuan Futures Co., Ltd., Copper Sector Analysis: Impact of Power Demand on Power Grid-New Energy Vehicle Sector[EB/OL]. Nanjing: Chuangyuan Futures Co., Ltd., 2024. (2024-11-08)[2025-04-30]. <http://www.chyqh.com/research/copper2024>
- [12] 王玉生, 罗欣欣, 单香琦. 电动公交车队置换与充电设施布局协同优化[J]. *中国公路学报*, 2024, 37: 72-83  
Wang Yu-sheng, Luo Xin-xin, Xiang Qi-Shan. Collaborative optimization of electric bus fleet replacement and charging facility layout [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2024, 37: 72-83
- [13] 熊杰, 甘凯伦, 李同飞, 等. 电动公交车队规模与充电桩配置协同优化[J]. *交通运输工程与信息学报*, 2024, 22: 95-110  
Xiong Jie, Gan Kai-lun, Li Tong-fei, et al. Collaborative optimization of electric bus fleet size and charger deployment[J]. *Journal of Transportation Engineering and Information*, 2024, 22: 95-110
- [14] Zhou Y, Ong G P, Meng Q, et al. Electric bus charging facility planning with uncertainties: Model formulation and algorithm design[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2023, 150: 104108.
- [15] Wang Y, Chen J, Tang T, et al. A holistic approach to multi-depot electric bus scheduling for energy saving considering limitations in charging facilities [J]. *Energy*, 2024, 303: 131880.
- [16] Esmaeilnejad S, Kattan L, Wirasinghe S C. Optimal charging station locations and durations for a transit route with battery-electric buses: A two-stage stochastic programming approach with consideration of weather conditions[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2023, 156:104327.
- [17] An K. Battery electric bus infrastructure planning under demand uncertainty[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, 111: 572-87.
- [18] Zhang M, Yang M, Gao Y. Tripartite evolutionary game and simulation analysis of electric bus charging facility sharing under the governmental reward and punishment mechanism[J]. *Energy*, 2024, 307: 132783.
- [19] Hu X, Lei H, Deng D, et al. A two-stage approach to siting electric bus charging stations considering future-current demand[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 434:132783.
- [20] Wang W, Yu B, Zhou Y. A real-time synchronous dispatching and recharging strategy for multi-line electric bus systems[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2024, 185: 103516.
- [21] Jia Z, An K, Ma W. Utilizing electric bus depots for public Charging: Operation strategies and benefit analysis[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2024, 130: 104155.
- [22] Liu X, Liu X, Zhang X, et al. Optimal location planning of electric bus charging stations with integrated photovoltaic and energy storage system[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2023, 38 (11): 1424-1446.
- [23] 姚志力, 江斌开, 龚春阳, 等. 计及电动汽车充电负荷特性的区域多能源站规划设计 [J]. *电网技术*, 2022, 46: 3304-3318  
Yao Zhi-li, Jiang Bin-kai, Gong Chun-yang, et al. Planning and design of regional multi-energy stations considering electric vehicle charging load characteristics[J]. *Power System Technology*, 2022, 46: 3304-3318
- [24] 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: 148-155  
Xiao Bai, Zhu Jia-xun, Ang Zhuo, et al. Planning of electric bus charging station considering vehicle charging scheduling mechanism[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42: 148-155
- [25] Bie Y, Qin W, Wu J. Optimal electric bus scheduling method under hybrid energy supply mode of photo-

- voltaic-energy storage system-power grid[J]. Applied Energy, 2024, 372: 123774.
- [26] Li Y, Li X, Zhang C, et al. Optimizing the photovoltaic-assisted electric bus network with rooftop energy supply[J]. Renewable Energy, 2024, 234:121244.
- [27] Liu X, Plötz P, Yeh S, et al. Transforming public transport depots into profitable energy hubs[J]. Nature Energy, 2024, 9(10): 1206-1219.
- [28] Kapatsila B, Grisé E, Crumley M, et al. Empirical analysis of battery-electric bus transit operations in Portland, OR, USA[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2024, 128: 104120.
- [29] 刘昊翔, 吴啊峰, 龙建成, 等. 基于列生成启发式的单线电动公交车与司机整合调度优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21: 211-220  
Liu Hao-xiang, Wu A-feng, Long Jian-cheng, et al. Column Generation-based Heuristic Approach for Electric Bus and Driver Scheduling on Single Bus Lines[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2021, 21: 211-220
- [30] 何聪, 耿建, 刘建涛, 等. 基于数据模型双驱动的电动公交车多时段负荷建模和调节潜力评估[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52: 25-34  
He Cong, Geng Jian, Liu Jian-tao, et al. Multi-period load modeling and regulation potential assessment for electric buses based on data-driven and model-driven[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52: 25-34
- [31] 张雅丽, 付锐, 魏文辉, 等. 考虑速度模式的纯电动公交进出站生态驾驶策略[J]. 交通运输系统工程与信息, 2024: 1-16  
Zhang Ya-li, Fu Rui, Wei Wen-hui, et al. Eco-driving strategy for electric bus entering and leaving stops considering velocity mode[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2024: 1-16
- [32] 奇格格, 李丹, 段梦媛, 等. 考虑电动公交在途特性的电池状态梯次划分[J]. 中国公路学报, 2022, 35: 44-54  
Qi Ge-qi, Li Dan, Duan Meng-yuan, et al. Echelon division of battery status considering on-road characteristics of electric buses[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35: 44-54
- [33] 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]. 交通运输工程与信息学报, 2023, 21: 135-151  
Ye Xin-yu, Liu Haoxiang, Long Jian-cheng. Optimization model and algorithm for electric bus operation considering charging demand[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2023, 21: 135-151
- [34] Zhang Z, Ye B, Wang S, et al. Analysis and estimation of energy consumption of electric buses using real-world data[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2024, 126: 104017.
- [35] Guschinsky N, Kovalyov M Y, Pesch E, et al. Cost minimizing decisions on equipment and charging schedule for electric buses in a single depot[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2023, 180:103337.
- [36] Tang J, Yu Y, Li J. An exact algorithm for the multi-trip vehicle routing and scheduling problem of pickup and delivery of customers to the airport [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2015, 73: 114-132.
- [37] Zhou Y, Meng Q, Ong G P, et al. Electric bus charging scheduling on a bus network[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2024, 161: 104553.
- [38] 熊杰, 梁晶晶, 李向楠, 等. 考虑分时电价和多车型的电动公交车计划优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2024, 24: 188-199, 211  
Xiong Jie, Liang Jing-jing, Li Xiang-nan, et al. Optimization of electric bus scheduling considering time-of-use electricity pricing policy and multiple vehicle types[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2024, 24: 188-199, 211
- [39] 翁剑成, 乔润童, 王茂林, 等. 考虑场景差异性的混合车型公交调度优化方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2024, 24 (04): 176-187  
Weng Jian-cheng, Qiao Run-tong, Wang Mao-lin, et al. Optimization method for mixed vehicle bus scheduling considering scenario differences[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2024, 24(4): 176-187
- [40] Gkiotsalitis K, Iliopoulou C, Kepaptsoglou K. An exact approach for the multi-depot electric bus scheduling problem with time windows [J]. European Journal of Operational Research, 2023, 306(1): 189-206.
- [41] Bao Z, Li J, Bai X, et al. An optimal charging scheduling model and algorithm for electric buses[J]. Applied Energy, 2023, 332: 120512.
- [42] Lacombe R, Murgovski N, Gros S, et al. Integrated

- charging scheduling and operational control for an electric bus network[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2024, 186: 103549.
- [43] Xie D F, Yu Y P, Zhou G J, et al. Collaborative optimization of electric bus line scheduling with multiple charging modes[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2023, 114: 103551.
- [44] Xiao G, Xiao Y, Shu Y, et al. Technical and economic analysis of battery electric buses with different charging rates[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2024, 132: 104254.
- [45] Lee J, Shon H, Papakonstantinou I, et al. Optimal fleet, battery, and charging infrastructure planning for reliable electric bus operations[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2021, 100: 103066.
- [46] Lee J, Oh S, Son S. Optimal battery electric bus planning and its economic and environmental impacts [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2023, 122: 103066.
- [47] 巫威眺, 林越, 李余, 等. 随机行程时间的电动公交调度模型[J]. *中国公路学报*, 2023, 36: 235-53  
Wu Wei-tiao, Lin Yue, Li Yu, et al. Electric bus scheduling model with stochastic travel time[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2023, 36: 235-253
- [48] Yan Y, Wen H, Deng Y, et al. A mixed-integer programming-based Q-learning approach for electric bus scheduling with multiple termini and service routes [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2024, 162: 104570.
- [49] 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: 151-165+87  
Yao En-jian, Wang Xin, Liu Sha-sha, et al. Regional electric bus scheduling optimization with multiple vehicle types considering opportunity charging and travel time reliability[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2024, 24: 151-165+87
- [50] 阳岳希, 胡泽春, 宋永华. 电动公交充换电站的优化运行研究[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(31): 35-43.  
Yang Yue-xi, Hu Ze-chun, Song Yong-hua. Research on optimal operation of battery swapping and charging station for electric buses[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(31): 35-43.
- [51] 张帝, 姜久春, 张维戈, 等. 基于遗传算法的电动汽车换电站经济运行[J]. *电网技术*, 2013, 37(8): 2101-2107.  
Zhang Di, Jiang Jiu-chun, Zhang Wei-ge, et al. Power system technology[J]. *Power System Technology*, 2013, 37(8): 2101-2107.
- [52] Rao R, Zhang X, Xie J, et al. Optimizing electric vehicle users' charging behavior in battery swapping mode[J]. *Applied Energy*, 2015, 155: 547-559.
- [53] Zeng B, Wu W, Ma C. Electric bus scheduling and charging infrastructure planning considering bus replacement strategies at charging stations[J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 125328-125345.
- [54] Li J Q. Transit bus scheduling with limited energy [J]. *Transportation Science*, 2014, 48(4): 521-539.
- [55] Xiong H, Xiang T, Rong X, et al. Optimal allocation of electric vehicle battery swap stations[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2012, 32(9): 1-6.
- [56] Huang D, Zhang J, Liu Z, et al. A novel ranking method based on semi-SPO for battery swapping allocation optimization in a hybrid electric transit system [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2024, 188: 103611.
- [57] Luo X, Fan W. Joint design of electric bus transit service and wireless charging facilities[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2023, 174: 103114.
- [58] Sun R, Luo Q, Chen Y. Optimizing dynamic wireless charging for electric buses: A data-driven approach to infrastructure planning[J]. *Applied Energy*, 2024, 373: 123912.
- [59] Wang X, Song Z, Xu H, et al. En-route fast charging infrastructure planning and scheduling for battery electric bus systems[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2023, 117: 103659.
- [60] Li W, He Y, Hu S, et al. Planning dynamic wireless charging infrastructure for battery electric bus systems with the joint optimization of charging scheduling[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2024, 159:104469.
- [61] Alwesabi Y, Liu Z, Kwon S, et al. A novel integration of scheduling and dynamic wireless charging planning models of battery electric buses[J]. *Energy*, 2021, 230: 120806.
- [62] Ji J, Wang L, Yang M, et al. Optimal deployment of dynamic wireless charging facilities for electric bus route considering stochastic travel times[J]. *Energy*, 2024, 289: 129873.

- [63] 王永兴, 毕军, 谢东繁, 等. 计及电池老化特征的电动公交车静态无线充电设施布局优化[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2024, 52: 45-55  
Wang Yong-xing, Bi Jun, Xie Dong-fan, et al. Layout optimization of static wireless charging facilities for electric buses by considering battery degradation characteristics[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2024, 52: 45-55
- [64] Liu J, Pei Y, Dong C, et al. Optimizing electric bus charging infrastructure deployment under two charging modes considering seasonal differences[J]. Transportation Letters, 2023: 1-14.
- [65] Tang X, Yang J, Lin X, et al. Dynamic operations of an integrated mobility service system of fixed-route transits and flexible electric buses[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2023, 173: 103081.
- [66] Zhang W, Zhao H. Optimal design of electric bus short turning and interlining strategy[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2024, 134: 104334.
- [67] Lian Y, Lucas F, Sørensen K. The electric on-demand bus routing problem with partial charging and nonlinear function[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2023, 157: 104368.
- [68] Wu W, Zhu Y, Liu R. Dynamic scheduling of flexible bus services with hybrid requests and fairness: Heuristics-guided multi-agent reinforcement learning with imitation learning[J]. 2024, 190: 103069.
- [69] 王晓伟, 吴松屿, 曹恺, 等. 多车型混编公交车队发车时刻及车型联合优化[J]. 中国公路学报, 2024, 37: 253-266.  
Wang Xiao-wei, Wu Song-yu, Cao Kai, et al. Joint Optimization of departure times and vehicle types for a multi-type bus fleet[J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37: 253-266.
- [70] 高虹, 刘锴, 姚恩建. 站点需求响应的电动模块公交车重组调度优化[J]. 中国公路学报, 2024, 37: 24-36.  
Gao Hong, Liu Kai, Yao En-jian. Formation and scheduling optimization of electric modular buses with station-based demand-responsive model[J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37: 24-36.
- [71] 周珊珊. 电动汽车行为特性建模与优化调度策略研究[D]. 北京: 华北电力大学控制与计算机工程学院, 2022.  
Zhou Shan-shan. Research on behavior characteristics modeling and optimal scheduling strategy of electric vehicle[D]. Beijing: School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, 2022.
- [72] 罗荣. V2G系统电力资源管理策略研究[D]. 成都: 电子科技大学信息与通信工程学院, 2019.  
Luo Rong. A research on power resource management strategy of V2G system[D]. Chengdu: School of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- [73] 李锦璐. 电动汽车V2G充电站充放电控制策略与谐波特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 2015.  
Li Jin-tang. Research on charge-discharge control strategy and harmonic characteristics of V2G charging station[D]. Harbin: School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, 2015.
- [74] 牛振宁, 安琨, 马万经. 车网互动场景下电动网约车运营与充放电动态调度策略[J]. 交通运输系统工程与信息, 2024, 24: 50-59.  
Niu Zhen-ning, An Kun, Ma Wan-jing. Electric vehicle ride-hailing operation and charging-discharging dynamic scheduling strategy in vehicle-to-grid scenario[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2024, 24: 50-59.
- [75] 金珉宇. 分时电价下考虑充放电的电动配送车路径优化[D]. 北京: 北京交通大学交通运输学院, 2023.  
Jin Min-yu. Electric vehicle routing with charging/discharging under time variant electricity prices [D]. Beijing: School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, 2023.
- [76] 王岱, 管晓宏, 吴江, 等. 基于车辆行驶行为特性建模的电动汽车充放电策略与分析[J]. 电网技术, 2014, 38: 2322-2327  
Wang Dai, Guan Xiao-hong, Wu Jiang, et al. Vehicle driving pattern based modeling and analysis of centralized charging/discharging strategy for plug-in electric vehicles[J]. Power System Technology, 2014, 38: 2322-2327
- [77] 杨晓龙. 电动汽车参与区域电网需求响应优化管理研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京)经济与管理学院, 2022.  
Yang Xiao-long. Optimal management of electric vehicles participating in regional power grid demand response[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022.

- [78] Steward D M. Critical elements of vehicle-to-grid (v2g) economics[R]: National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), 2017.
- [79] Noel L, De rubens G Z, Kester J, et al. Leveraging user-based innovation in vehicle-to-X and vehicle-to-grid adoption: A Nordic case study [J]. *Journal of cleaner production*, 2021, 287: 125591.
- [80] Elliott M, Kittner N. Operational grid and environmental impacts for a V2G-enabled electric school bus fleet using DC fast chargers[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2022, 30: 316-330.
- [81] Manzolli J A, Trovão J P F, Antunes C H. Electric bus coordinated charging strategy considering V2G and battery degradation[J]. *Energy*, 2022, 254: 124252.
- [82] 叶丽雅, 汪震, 文福拴, 等. V2G代理商调频服务经济效益评估[J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2016, 50: 1831-1840  
Ye Li-ya, Wang Zhen, Wen Fu-shuan, et al. Economic benefit evaluation of V2G aggregator for frequency regulation[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2016, 50: 1831-1840
- [83] Fei F, Sun W, Iacobucci R, et al. Exploring the profitability of using electric bus fleets for transport and power grid services[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2023, 149: 104060.
- [84] Verbrugge B, Rasool H, Baghdadi M E, et al. Modelling and bi-level control design of a SiC off-board charging system for battery electric buses with V2G capability[C]//proceedings of the 2021 23rd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'21 ECCE Europe), F 6-10 Sept. 2021.
- [85] 章锐, 于继来. 电动公交车负荷参与新型城网调峰的能力评估[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42: 82-94  
Zhang Rui, Yu Ji-lai. Capacity evaluation of electric bus load participating in peak shaving of new urban power grid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42: 82-94
- [86] Rafique S, Nizami M, Irshad U, et al. A two-stage multi-objective stochastic optimization strategy to minimize cost for electric bus depot operators[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 332: 129856.
- [87] Ke B R, Lin Y H, Chen H Z, et al. Battery charging and discharging scheduling with demand response for an electric bus public transportation system[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2020, 40: 100741.