



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/eng](http://www.elsevier.com/locate/eng)



Research Transport Engineering—Article

## 全生命周期成本分析框架下的电动公交充电站部署和车队管理

曾子凌<sup>a</sup>, 王帅安<sup>b</sup>, 曲小波<sup>c,\*</sup>

<sup>a</sup> Department of Architecture and Civil Engineering, Chalmers University of Technology, Gothenburg 41296, Sweden

<sup>b</sup> Department of Logistics and Maritime Studies, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China

<sup>c</sup> State Key Laboratory of Intelligent Green Vehicle and Transport, School of Vehicle and Mobility, Tsinghua University, Beijing 100084, China

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 29 September 2021

Revised 27 January 2022

Accepted 13 July 2022

Available online 11 November 2022

#### 关键词

电动公交车

充电站部署

电池尺寸

公交车调度

生命周期分析

### 摘要

尽管城市交通电气化快速发展,但电池电动公交车(EB)车队的系统规划和管理进展却较为落后。本研究首先综述了影响电池电动系统的基本问题,包括充电站部署、电池尺寸、公交车调度和生命周期分析。目前,EB系统的规划和运行是按顺序进行的,公交车调度是在公交车队和基础设施部署完毕后进行的,这导致了资源利用率低和资源浪费。对此,本文提出了混合整数规划模型整合充电站部署和公交车队管理,以尽可能低的生命周期成本(LCC),包括所有权、运营、维护和排放费用,缩小最佳规划与运营之间的差距。引入了分支定价算法,以减少寻找最佳解决方案所需的计算工作量。本研究还通过分析真实案例,与目前的公交运营策略和充电站布局相比,一条公交线路的LCC优化后可显著降低30.4%。提出的方法不仅可以进行生命周期分析,还可以为交通部门和运营商提供可靠的充电桩部署及单线和多线的公交调度计划,这两者都是未来具有高电气化普及率的交通系统中决策支持的关键要求,此研究也有助于推动可持续交通的发展。

© 2022 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. 引言

交通运输能源消耗在世界能源消耗中所占份额的不断增长,严重影响了气候、能源安全和环境,其排放量占温室气体(GHG)总排放量的29%,大约95%的运输能源仍由石油衍生燃料提供[1–3]。据美国联邦运输管理局报道,城市公交车是最节能的城市交通方式之一,虽然它由柴油提供动力[4]。如果公交车队由可再生能源供电,其排放量将进一步减少80%[5–6]。只有这样,人们才能实现碳中和的交通系统[7]。

全球正在努力建设基础设施并刺激电动汽车的购买[8–9]。中华人民共和国交通运输部承诺到2030年纯电动汽车的市场份额至少为20%[10]。随着政策的持续实施,中国充电桩数量在过去五年中蓬勃发展,2020年全国的充电桩达到168.1万个,电动车辆与充电桩的比例现在为3.13:1,预计到2025年将继续增加到2:1[11]。同样,美国白宫的两万亿美元基础设施和就业计划将投资1740亿美元,到2035年建立一个拥有50万个充电站的电气化交通网络,同时刺激电动汽车、公共汽车和卡车的购买[12]。在欧洲国家,自2014年以来,充电基础设施的部署

\* Corresponding author.

E-mail address: [drxiaoboqu@gmail.com](mailto:drxiaoboqu@gmail.com) (X. Qu).

2095-8099/© 2022 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

英文原文: *Engineering* 2023, 21(2): 45–60

引用本文: Ziling Zeng, Shuai Wang, Xiaobo Qu. Consolidating Bus Charger Deployment and Fleet Management for Public Transit Electrification: A Life-Cycle Cost Analysis Framework, *Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2022.07.019>

大幅增长了480%。到2035年，充电点建设的目标为280万个，是目前数量的14倍。此外，欧洲20个国家向电动汽车购买者提供奖金或保险费，使得2019年电动公交车（EB）注册量增加了两倍[13]。

根据国际能源署的数据，主要市场的EB数量已有所增加[14]。中国继续主导着EB行业，EB保有量占全球的99.0%，中国有30多个城市计划到2021年年初实现完全电气化的公共交通[15]。全球EB市场规模预计将翻一番，到2025年其数量将达到120万辆，在欧洲注册的新城市公交车中约有40%是电池电动车。图1总结了欧洲国家的市场细分和全球EB的进展。到2025年，EB数量翻一番是全球公交车队的主要目标。德国在欧洲处于领先地位，并计划在2030年之前购买约4800辆电动公交车，这个数字是2020年的7倍[16]。在这些发展计划下，政策制定者和交通规划者开始意识到，在如此紧张的初期阶段，有必要建立系统模型解决以下问题：①如何有效地规划采购？②在考虑EB车队特性的同时，如何安排和调整现有调度计划[17-18]？

本研究的出发点是推动未来公共汽车电气化的发展。本文其余部分组织如下：第2节回顾了生命周期分析、充电站部署和公交车队管理的最新技术；第3节建立了一个生命周期成本（LCC）分析框架，并介绍了数学优化模型，引入了针对公交车时刻表的定制列生成算法；第4节介绍并研究了两个关于电气化网络的现实案例；第5节对本研究的工作进行了总结。

## 2. 技术现状

### 2.1. 生命周期成本

基础设施或系统的LCC是规划和运营阶段最关键的因素之一。LCC为整个生命周期中成本的总和。它涵盖了从生产到淘汰的全部费用，包括基础设施的所有权、运营和维护、更新和改造以及报废和回收。它要求决策者考虑整个过程并相应地进行规划，同时考虑成本和长期利益。

作为一种决策支持工具，LCC分析被广泛应用于城市交通系统。它可用于告知运营商最佳采购计划和公交时刻表。Mitropoulos等[19]提出了一种LCC方法，通过比较各种车辆燃料和技术（包括内燃机、混合动力和电动汽车）完成公共汽车的采购。LCC综合了外部排放成本、时间损失和所有权成本。研究指出，电动汽车的LCC最低，外部成本最低。Ke等[20]提出了一种优化方法计算在早期阶段将运输系统转换为全电动车队的系统成本。

在环境方面，LCC分析是评估车辆利用率对温室气体排放影响的重要工具[21]。温室气体排放总量包括四大部分：①燃料生产阶段（well-to-tank, WTT）的排放量，代表从源头到公交车储能系统的电力输送；②车辆使用阶段（tank-to-wheel, TTW）的排放量，包括公交车内的能量转换和分配，对于从电网充电的EB来说，TTW阶段是零排放的；③车辆制造周期的排放量，包括公共汽车的生产、维护和回收过程；④动力总成排放，包括电机、电池

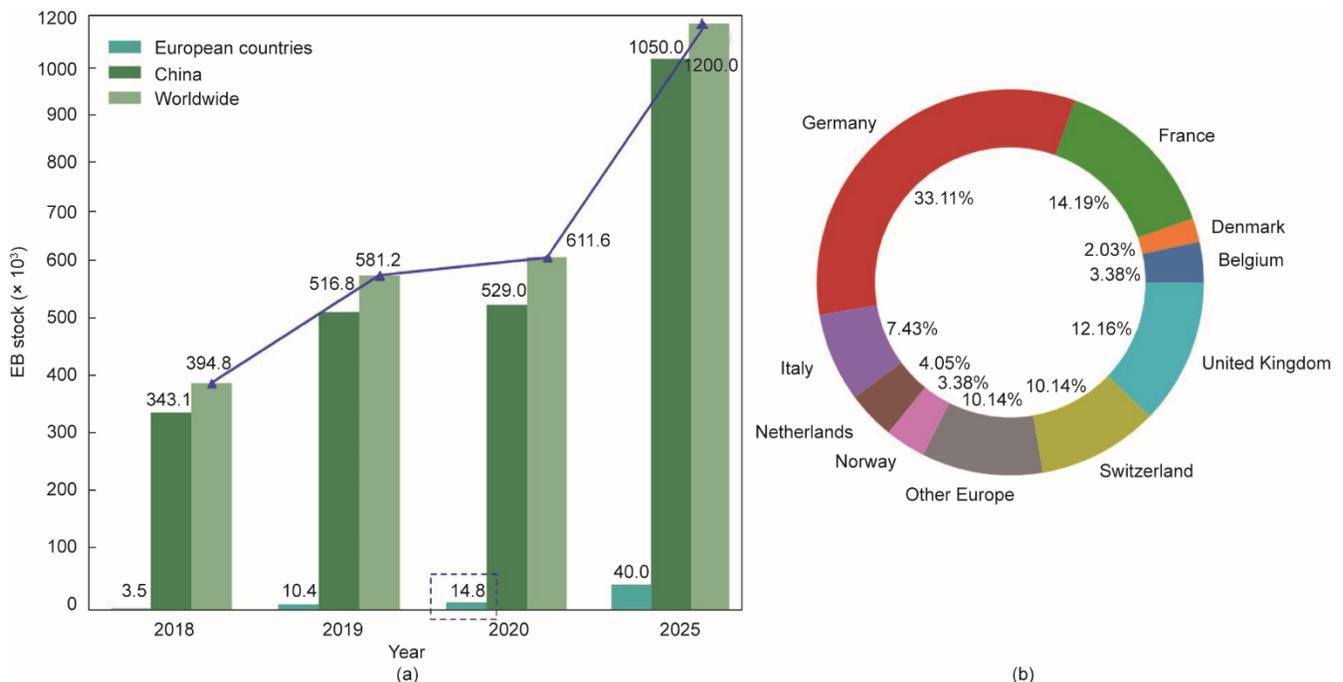


图1. 全球电动公交车的市场规模。(a) 2018—2025年电动公交车的市场规模发展；(b) 2020年欧洲国家的市场规模细分。

和电子生产。Ribau等[22]主要优化动力总成设计中的LCC,考虑投资成本、效率和生命周期的影响。研究指出,与传统公交车相比,EB的二氧化碳排放量减少了67%,燃料消耗减少了58%。Chan等[23]对燃料替代品进行了LCC分析,以评估其对温室气体排放的影响。研究指出,运营排放占生命周期排放的最主要部分,然而,结果在很大程度上取决于建模和操作方法。

在交通电气化的需求下,LCC对充电基础设施的分析引起了人们的关注。一项研究比较了相同导电和感应公交车充电系统的LCC,以支持充电站的选择[24]。研究人员报道,基于目前电池组件的价格,感应式充电的总体成本较低,但在维护方面仍然存在相当大的不确定性[25]。

## 2.2. 充电站部署

电动交通系统需要全面的基础设施规划,因为公交线路必须配备足够的充电站来支持日常运营[26]。基于电池电动车的特点,重点考虑了两种技术:在途充电和场站充电[27]。场站充电,通常也称为夜间充电,是EB最普遍的充电方式之一。在这种技术下,需要夜间有很长的连续充电时间。电池的容量决定了公交车的行驶范围。由于锂电池的技术限制,EB目前无法达到柴油车的行驶里程,这增加了EB车队的必要规模。场站充电问题旨在优化公交车的充电时刻表并最大限度地减少充电负荷[28]。与场站充电相比,途中快速充电站在公交车运行过程中提供了便利性并提高了充电的可达性。欧洲常用的途中快速充电系统是通过车顶自动连接实现的,常用的充电时间为4~6 min(完全充电)和15 s(部分充电)。通过在中间站或终点站安装充电站,该系统可以轻松集成到现有的公交线路中,这样做的好处是可以为公交车及时补充电能,使EB对电池容量的依赖性降低[29]。较小的电池包可以减轻公交车重量,提高载客量,降低电池的投资成本,但这会带来大量的基础设施成本和高电力需求费用[30]。最近的研究集中在这两种收费策略的比较和经济成本分析上。Mohamed等[31]模拟了公交网络中的充电方法,并得出结论,与场站充电相比,途中充电对于大规模公交网络的运营更可行。但是,它可能会受到高功率和间歇性功率需求的影响。Liu等[32]比较了场站充电与途中充电的费用。IR调查结果显示,鉴于目前途中快速充电站和电池的价格,为EB安装途中快速充电站是有利的。He等[33]分析了这两种充电策略的车载电池尺寸和系统成本。研究表明,夜间场站充电EB系统需要比在途快速充电EB系统大得多的车载电池。仿真结果进一步表明,途中快速充电系统的总成本比场站充电系统低50.7%。

在途充电可以通过传导式(插入)和感应式(无线)能量传输来实现。感应充电提供了一种更轻的车载电池,可以从磁场充电,这需要地下线圈系统和板载线圈系统[34]。感应式充电的功率可达200 kW,然而,由于线圈之间的气隙,充电效率相对较低[35]。导电充电技术较为成熟,通过高架或在地面安装的基础设施的最大充电功率为600 kW,且安装方便,对现有道路的影响很小。在电力技术集团Asea Brown Boveri(ABB)[36]的支持下,公交车可以在沿途充电站充电,在乘客上下车时进行15 s的能量提升。基于快速充电概念,沿途充电对时刻表没有重大影响[37]。在这个过渡阶段,导电式快充技术在法国、德国、意大利、英国和瑞典等欧洲国家得到广泛应用,目前只有少数感应充电项目在斯堪的纳维亚(Scandinavian)国家实施[38-39]。

由于在途充电桩的成本相对较高,安排充电桩的位置和数量已成为采购和规划过程中的一个挑战。规划政策须尽可能考虑可用性、有效性和效率。充电站部署的可用性可以通过设置能耗不超过电池容量的约束来实现[40]。两个站点之间的消耗通常根据最坏情况进行估计,使用更大的单位消耗或基于历史数据的特定值[41]。一些研究进一步深入探究能源消耗的特定组成部分并进行了估算[42]。在途充电站的优化部署从根本上源于实时能源消耗的有效补充。因此为了确保有效性,特别是延长电池寿命,电池充电状态(SOC)必须保持在最佳范围内[43],并与充电站部署计划保持平衡[44]。当SOC接近最低水平时需要充电[45]。目标是尽量减少充电站的数量,最大化充电需求覆盖率,并减少由于公交车充电造成的延误[46]。

已经有一些关于EB充电站部署的研究,但大多数研究采用固定的公交线路和时刻表作为输入[47]。研究的对象通常被认为是同质车队[48],车队规模是经验性的[49]或是假设性的[50]。这就造成了规划层面的优化结果与最佳实际操作目标之间存在较大差距。

## 2.3. 公交车队管理

有两个与公交车队管理有关的子问题:运营层面的电池大小和公交车调度[51]。

### 2.3.1. 电池大小

电池大小问题主要是根据蓄电池的能量消耗,为电气化线路分配具有特定蓄电池容量的客车[52]。在电池EB运输系统中,充电站和车载电池对成本的影响最大。车载电池的成本至少占总费用的20%,具体取决于电池的大小[53]。如果考虑具有相同电池容量的同质化公交车队,则

不可避免地会导致不必要的巨大投资成本。因此，建议根据储能需求，为每条公交线路单独确定公交车的电池容量，从而减少不必要的采购和LCC。

为了确定电池容量，对能耗进行充分表征至关重要。目前的技术主要集中在模拟真实交通条件下或基于不同场景设置下的公交车能耗[54–56]。研究表明，公交车重量、公交网络的分布和能源效率等因素会影响特定线路的能耗，并导致不同的充电需求。充电站的分布需要满足充电需求，这取决于公交车的停留时间、充电基础设施的可用性和电池SOC [57]。

### 2.3.2. 公交车调度

公交调度问题从传统的车辆路径问题（VRP）扩展到空车行程问题，其中行程是指时刻表中的公交车服务，包括起点、终点以及中间站点的到达和出发时间[58]与VRP不同，公交车运行时，每次行程的车站顺序是固定的，同时还需要考虑额外的能源兼容约束以保证服务（对VRP问题感兴趣的人可以参考文献[59–60]）。

由于充电时间的不同，解决问题的方法因不同的充电方式而异。在沿途充电领域，Niesterker等[61]提出了一个数学优化模型，以解决单点同质车队的调度问题，同时考虑了线性和非线性的充电时间，提出了一种列生成算法。仿真模拟方法也广泛用于解决关于公交车的调度问题，文献[62]基于运行数据获取足够数量的EB并确保公交车准时到达。对于场站充电，应仔细考虑终点与场站之间的空车行程以及相对较长的充电时间。Rogge等[63]提出了一种具有启发式和元启发式求解算法的混合整数线性规划方法。研究指出，虽然由于充电频率增加，空车行程会增加，但轻量级公共汽车提供了一种更节能的交通方式。异构车队可以提供5%的额外节能。因此，当在调度过程中考虑混合车队和能源消耗时，电池大小在公交车的调度中非常重要。

### 2.4. 充电站部署与公交车队管理的联合优化

由于规划和运营的不一致，在规划阶段提供的充电站布局与EB车队在实时运行时的表现存在一定的差距，导致基础设施不足或资源过剩[64]。在一定程度上，共同优化充电站部署和公交车队管理是有必要的。表1列出了不同研究的重点用途[32,47,49–52,63,65–66]。将这些研究按充电方式的不同进行分类，分为围绕场站充电的规划问题和围绕在途充电的规划问题。由于在场站充电下，EB的运行与电池大小有关，因此如何根据电池容量合理安排公交时刻表成为该领域研究的主流。文献[63,65–66]列出了

优化的公交车调度计划和场站充电调度计划。Rogge等[63]第一个在场站充电优化中考虑混合车队调度。他们根据给定的公交车类型生成了具有不同充电频率的调度计划。Li等[65]进一步考虑了收费调度和乘客需求的不确定性。An等[66]考虑了充电站覆盖范围，以支持日常运营，并最大限度地减少公交车队。虽然Rogge等[63]试图考虑异质车队，而其他两项研究则侧重于同质车队，但车队的组成是事先给定的。因此，只能实现对现有资源的合理利用，尽管更好的选择是充分考虑未来的运营计划，以实现完美配合，避免浪费资源。在途充电方式为日常操作及时补充电池提供了一种便捷的方法。大多数研究将这种方法与电池大小相结合，以平衡建造充电站的成本与电池所有权成本[32,47,51–52]。这些研究考虑了电池管理，主要是电池放电周期和延缓电池老化。但是，他们忽略了EB的调度。对于运输网络，电池大小会导致车队的异质性。因此，由于各种储能要求，行程之间的连续性可能会受到显著影响，而这些研究没有考虑到这一点。需求与供应之间存在的冲突也会为异质车队的调度带来额外的挑战。

综上所述，目前的研究已经从不同方面评估了EB的运营绩效。然而，这些研究中的大多数仅限于一个方面，如所有成本或充电费用，并且未能提供更全面的框架。进一步考虑生命周期的排放会有很大的好处，既可以评估电动汽车系统实现碳中和的潜力，还可以为调度问题提供改进的方向。此外，以往关于公交充电的研究主要集中在公交充电器选址时的战略层面，而没有考虑公交调度的运营层面。这给在大规模网络中运营EB时带来了困难，如具有不同储能要求的行程之间的连接。基于上述分析，本文认为，需要进一步研究系统的评估框架和复杂的综合模型。对电池大小、充电站部署、公交调度的联合优化，可以大大提高运营效率，填补研究空白。在此背景下，本文提出了一个综合优化模型来研究在途充电站的部署、电池大小和公交调度。

本文为这一研究领域做出了以下贡献：

(1) 提出了一个LCC分析框架，从经济和环境两个方面来评估基础设施和公交车队的性能。

(2) 引入优化模型来整合充电器部署、电池大小和公交车调度，从而打破规划和运营的界限，特别是对于在途充电。

(3) 采用定制的分支定价法，以较低的时间和计算负担生成最佳解决方案。

(4) 设计了两种应用场景，包括优化现有的单线公交车运营和规划未来的多线公交。

上述贡献都是第一次提到的。过去的文献中没有用于

表1 基于不同充电策略的研究重点

Charging method	Coupled with bus schedule	Coupled with battery sizing	Battery SOC management	Ownership cost	Maintenance cost	Charging cost	Life-cycle emission	Ref.
Depot charging	Yes	–	–	Yes	–	–	–	[63]
	Yes	–	Yes	Yes	Yes	–	–	[65]
	Yes	–	–	Yes	–	Yes	–	[66]
En-route charging	–	Yes	Yes	Yes	–	Yes	–	[32]
	–	Yes	–	Yes	–	–	–	[47]
	–	–	Yes	Yes	Yes	Yes	–	[49]
	–	–	Yes	Yes	Yes	Yes	–	[50]
	–	Yes	Yes	–	–	–	–	[51]
	–	Yes	Yes	–	–	–	–	[52]
	–	Yes	Yes	–	–	–	–	[47]
	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	This paper

整合这三个子问题的数学模型。此外，很少有研究提出一个系统的评估标准来评估电气化公共交通系统从生产到报废处理的全过程。

### 3. 框架和数学模型

#### 3.1. LCC 分析框架

本研究提出的 LCC 分析框架旨在从经济和环境方面评估 EB 运输系统的性能。图 2 为评估框架，该框架的输出为公交车队的组成、充电站的部署和公交的时刻表。目标函数为年等值 LCC（含利率），它包括基础设施所有权费用、排放的外部成本、充电的运营成本、更换电池的维护成本以及其他维修工作。输入包括公交线路（红线）和基于预定义时刻表的行程（步骤 3 中的灰色和蓝色块）、每个站点的停留时间以及一组可选的电池容量（如 50 kW·h、100 kW·h 和 150 kW·h）。根据此评估标准，步骤 1 确定每条线路的电池大小，以确保公交车的电池足以为该线路服务。如图 2 所示，在此步骤中，16 号线根据当前充电器部署计划下的储能需求，从一组可用的公交车中分配合适的电池类型。第 2 步是通过设置约束来设置充电站。这些约束条件用于管理电池的 SOC 范围，以确保当电池接近允许的最小 SOC 时，能够在下一站得到能量补充。在公交车调度部分，根据确定两个行程之间的连接可用性和公交车类型，提供完成每个服务行程后的可用路线选择。例如，当一辆公交车到达目的地时，即 16 号线（8:00—8:40）的行程已完成，图中对应将该块以灰色标记。然后开始公交车调度，根据特定标准（如空车距离）选择下一个行程。

为了更好地制定和评估充电站的部署、电池尺寸和公

交车调度的综合模型，本研究进行了以下假设：

（1）本研究假设公交车为电池 EB，通过不同的电池容量定义不同的公交类型，符合大多数公交运营公司的运营实际情况。

（2）一旦该站提供了充电设施，就假定充电行为从公共汽车到达车站时开始。充电时间等于每个站点的公交车停留时间减去充电器连接和断开时间。由于充电站部署规划层面的问题，因此不考虑个人驾驶行为。

（3）本文假设，由于公交车站的空间有限，一个车站最多提供一个快速充电器。当一个充电站由多条线路共享时，公交车到达车站的时间可能会重叠。假设后进站的公交车能够等待第一辆公共汽车完成充电后才能充电。由于大多数途中充电时间在 1 min 左右[67]，因此由等待造成的延迟不会很长，并且可以在行驶时间内进行补偿[68]。

（4）电池循环寿命将用于确定是否应更换电池。当电池达到指定的循环次数时，假定容量已降至初始值的 70%。此时认为电池不再适用于 EB。大量剩余容量可以应用于某些应用中，如公寓能源供应和可再生能源存储。因此，假设电池组的剩余价值将为  $400 \text{ SEK} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$  [53]，其中  $1 \text{ SEK} \approx 0.09$  美元。

#### 3.2. 综合优化模型

关于模型的目标函数和约束条件，将在以下两个小节中详细介绍。图 3 代表了电池尺寸、充电站部署和公共汽车调度等子问题之间的关系。每个子问题是目标函数的关键组成部分之一。例如，电池尺寸子问题处理最优电池尺寸，而充电站数量和公交车队的规模分别由充电站部署和公交车调度子问题决定。与顺序优化问题不同，综合模型在各个子问题之间具有相互限制的变量。例如，电池尺寸

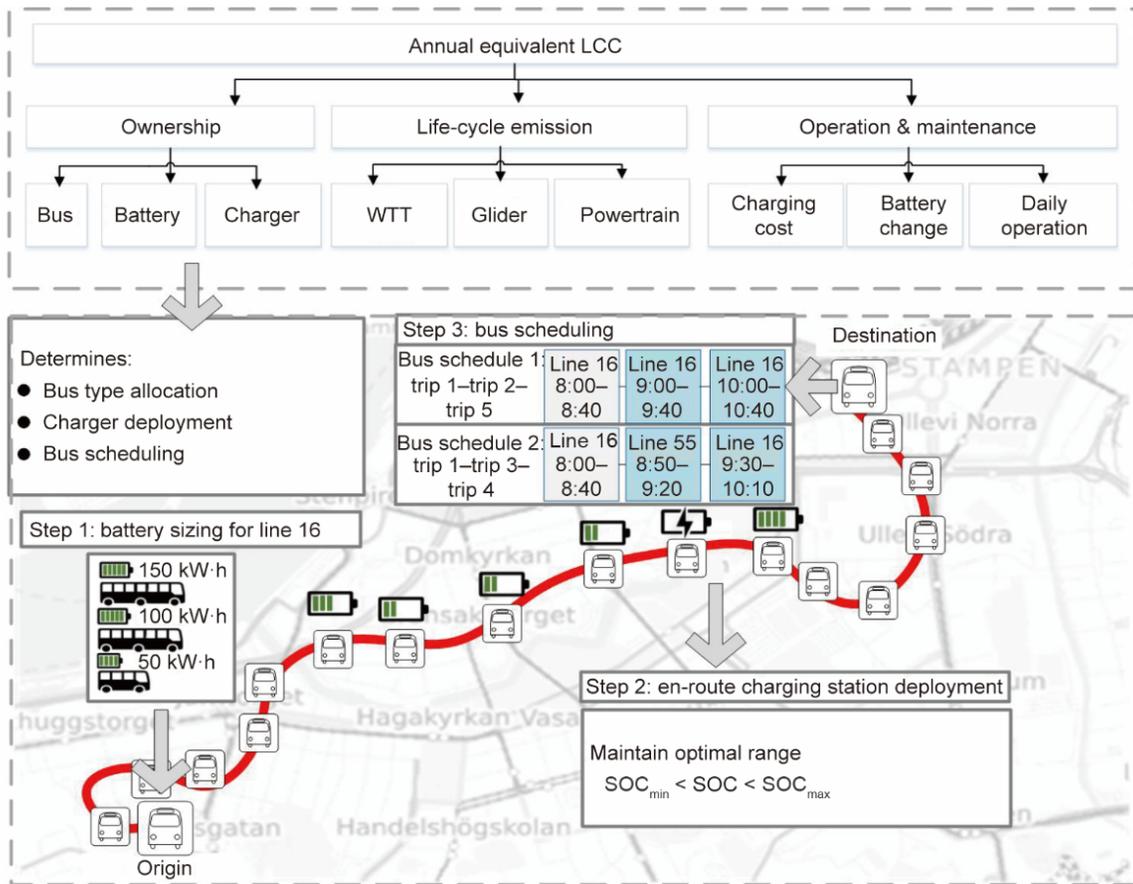


图2. 生命周期优化模型概述。SOC<sub>min</sub>、SOC<sub>max</sub> 分别为允许的最小和最大电池SOC。

问题决定了车辆的SOC如何影响充电点的选择。它还限制了在解决公交调度子问题时是否可以连接两个行程。相反，途中充电桩的位置和数量也会影响公交线路所需的电

池尺寸。总线调度子问题的解决方案方法将在3.3节中说明。表2 [1,30,51,53,69–71]为本节中讨论的集合、参数和变量的主要说明。

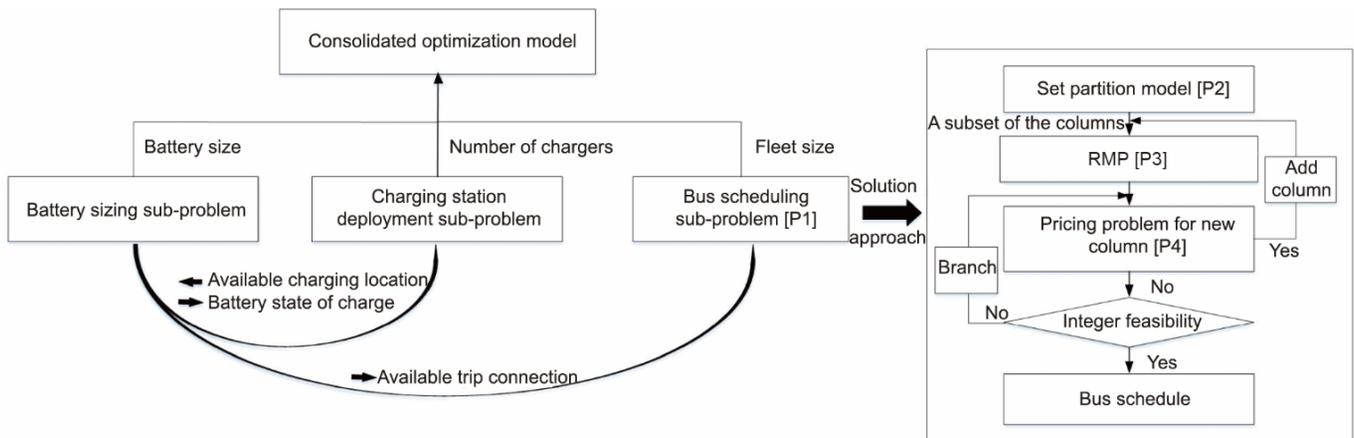


图3. 综合优化模型示意图。RMP: 限制性主问题；[P1]~[P4]表示四个问题。

表2 模型的集合、变量和参数的定义

Definition	Description	Value
$G$	Set of trips $\{g, h\}$	Index 0 represents the bus depot
$G_r$	Set of trips running on line $r$	-

Definition	Description	Value
$L, L'$	Set of trips $\{l\}, L' \subseteq L$	–
$P$	Set of bus types $\{p\}$	–
$R$	Set of lines $\{r\}$	–
$S$	Set of stations $\{i\}$	–
$V$	Set of buses $\{v\}$	–
$V_p$	Set of buses of type $p$	–
$\text{In}(g, p)$	Inbound node set of trip $g, \text{In}(g, p) \subseteq G$	–
$\text{Out}(g, p)$	Outbound node set of trip $g, \text{Out}(g, p) \subseteq G$	–
$a_{\text{GL}}^v$	100-year global warming impact delivered by glider	35 gCO <sub>2</sub> eq·km <sup>-1</sup> [70]
$a_{\text{PT}}^v$	100-year global warming impact delivered by powertrain	170 kgCO <sub>2</sub> eq·(kW·h) <sup>-1</sup> [71]
$a_{\text{WTT}}^v$	100-year global warming impact delivered by WTT	20 gCO <sub>2</sub> eq·km <sup>-1</sup> [71]
$B_p$	The energy consumption rate of bus type $p$	–
$b_v$	The energy consumption rate of bus $v$	–
$C_{\text{BAC}}^p$	Ownership cost of an onboard battery of bus type $p$	5400 SEK·(kW·h) <sup>-1</sup> [53]
$C_{\text{BAR}}^v$	Battery replacement fee for bus type $v$	3000 SEK·(kW·h) <sup>-1</sup> [53]
$C_{\text{BAS}}^p$	Salvage value of battery of bus type $p$	400 SEK·(kW·h) <sup>-1</sup> [53]
$C_{\text{BUC}}^p$	Ownership cost of bus type $p$	4 000 000–6 000 000 SEK [53]
$C_{\text{BUM}}^p$	Maintenance fee of bus type $p$	3% of ownership cost [53]
$C_{\text{CHS}}$	Ownership cost of charging station	1 500 000 SEK [53]
$C_{\text{CSM}}$	Charging station maintenance fee	4.6% of ownership cost [53]
$d_{i, i+1}^r$	Distance between stations $i$ and $i+1$ of line $r$	–
$H_{gl}^v$	Indicating whether trip $g$ is covered by trip $l$ and can be served by bus $v$ ; if true, $H_{gl}^v = 1$ , otherwise, $H_{gl}^v = 0$	–
$N_{p, v}$	Bus inventory, $N_{p, v} = 1$ when bus $v$ is type $p$ , $N_{p, v} = 0$ otherwise	–
$n$	Estimated lifetime (years)	12 [51]
$Q_p$	Battery capacity of bus type $p, Q_p < Q_{p+1}$	–
$q_v$	Battery capacity of the bus $v$	–
$\text{SOC}_{\text{max}}$	Maximum battery SOC allowed	0.95
$\text{SOC}_{\text{min}}$	Minimum battery SOC allowed	0.45
$T_i^r$	Bus dwell time at station $i$ of line $r$ minus average charger connecting and disconnecting times	–
$u$	Charging cost	1.0 SEK·(kW·h) <sup>-1</sup>
$\beta$	Battery applicability level	0.7 [72]
$\gamma$	Discount rate	2.083% [70]
$\varepsilon$	Power of charging stations	450 kW [30]
$\theta$	maximum energy consumption rate	2 kW·h·km <sup>-1</sup> (worst-case scenario)
$\zeta$	External cost of emissions in SEK·(tCO <sub>2</sub> eq) <sup>-1</sup>	490 SEK·(tCO <sub>2</sub> eq) <sup>-1</sup> [1]
$C_{\text{EAC}}$	Life-cycle equivalent annual cost	–
$C_{\text{OWN}}$	Infrastructure ownership cost	–
$C_{\text{EM}}$	External cost of emissions	–
$C_{\text{OM}}$	Annual bus operational and maintenance cost	–
$C_{\text{BM}}^p$	Type $p$ bus maintenance cost	–
$\text{DIS}_v$	Annual travel distance of bus $v$	–
$\phi_i^r$	Energy storage requirement for serving station $i$ on line $r$	$\phi_1^r = 0$
$e_i^r$	Amount of energy left when the bus arrives at station $i$	–
$\text{SOC}_i^r$	Battery SOC at the station	–
$\omega_v$	Times of battery replacement of bus $v$	–
$\pi_g$	Dual variable in column generation algorithm	–

Definition	Description	Value
$\sigma_v$	Reduced cost of bus $v$	-
$\lambda_l^v$	Binary variable: whether bus $v$ serves trip $l$	-
$x_i$	Binary variable: whether $i$ is a charging station	{0, 1}
$y_p^r$	Binary variable: whether bus type $p$ is assigned to line $r$	{0, 1}
$\vartheta_v$	Binary variable: whether vehicle $v$ is in use	{0, 1}
$z_{gh}^v$	Binary variable: whether bus $v$ serves trips $g$ and $h$ sequentially	{0, 1}

### 3.2.1. 目标函数

本节给出了目标函数的公式，计算了从生产到淘汰整个过程中，电动交通系统的年度等效LCC。

$$\min C_{EAC} = C_{OWN} + C_{EM} + C_{OM} \quad (1)$$

公式 (1) 中定义的目标函数旨在最小化基础设施所有权成本  $C_{OWN}$ 、排放的外部成本  $C_{EM}$  及年度运营和维护成本  $C_{OM}$  的总和。

$$C_{OWN} = \left( \sum_{p \in P} \sum_{v \in V_p} (C_{BUC}^p + C_{BAC}^p - C_{BAS}^p) \cdot \vartheta_v + \sum_{i \in S} C_{CHS} \cdot x_i \right) \cdot \frac{\gamma}{1 - (1 + \gamma)^{-n}} \quad (2)$$

$$C_{EM} = \sum_{v \in V} (a_{WTT}^v + a_{PT}^v + a_{GL}^v) \cdot \zeta \cdot n \cdot DIS_v \cdot \frac{\gamma}{1 - (1 + \gamma)^{-n}} \quad (3)$$

$$C_{OM} = \left( \sum_{p \in P} \left( \sum_{v \in V_p} C_{BUM}^p \cdot \vartheta_v + u \cdot n \cdot b_v \cdot DIS_v + C_{BAR}^v \cdot \omega_v \right) + \sum_{i \in S} C_{CSM} \cdot x_i \right) \cdot \frac{\gamma}{1 - (1 + \gamma)^{-n}} \quad (4)$$

$$\omega_v = \left[ \frac{n \cdot DIS_v \cdot b_v}{\left( \frac{1 - SOC_{min}}{145.71} \right)^{-1/0.6844} \cdot q_v \cdot (SOC_{max} - SOC_{min})} \right] \forall v \in V \quad (5)$$

公式 (2) 计算了年度等效基础设施所有权成本，由两部分组成：公共汽车的资本成本和充电站的资本成本。公式 (2) 的第一部分等于电池和公共汽车的购买成本减去电池的剩余价值。决策变量  $\vartheta_v$  表示公交车  $v$  是否正在使用中，这是优化公交车时刻表的关键参数，如公式 (15) 所示。第二部分为公交车站安装充电器的成本。公式 (3) 根据年行驶距离  $DIS_v$ ，计算 WTT、车辆制造周期和动力总成的年度等效生命周期排放量，以公式 (20) 计算。然后，根据参考文献[1]中的工作，设计一个货币标量  $\zeta$  以将排放量转换为外部成本。等式 (4) 中的年度运维成本包括四个部分：公交车维护费用、车队充电成本、电池更换成本和车站维护成本。公交车  $v$  在整个生命周期内的电池更换频率可按公式 (5) 进行计算，其中更换电池前的理论循环寿命基于参考文献[48]中引入的疲劳模型，定义为

$\left( \frac{1 - SOC_{min}}{145.71} \right)^{-1/0.6844}$ 。假设公交车时刻表每年保持不变，则整个能耗可以估算为  $n \cdot DIS_v \cdot b_v$ 。当已知充电  $SOC_{max}$  和放电  $SOC_{min}$  的边界条件时，就可以估计电池更换的频率。对于每辆车，能耗率  $b_v$ （对于每辆车  $v \in V_p$ ,  $b_v = B_p$ ）和电池容量  $q_v$  是已知的（对于每辆车  $v \in V_p$ ,  $q_v = Q_p$ ），此时公式 (5) 中的唯一变量是  $DIS_v$ ，类似于公式 (3)。还应该注意的，当公共汽车不使用时， $\vartheta_v = DIS_v = 0$ 。

### 3.2.2. 约束条件

本节说明了电池大小的计算公式[如公式 (6) ~ (8) 和公式 (14)]、充电站部署的计算公式[如公式 (9) ~ (13)]和公交车调度的计算公式[如公式 (15) ~ (20)]。公交车调度子问题的求解方法为公式 (21) ~ (27)。按照日常运营的实际情况，本文假设公交车在从仓库出发之前充满电，在一天的开始时，将 SOC 设置为  $SOC_{max}$ 。本文还将为不同的方向设置不同的充电站。

$$\varphi_{i+1}^r = \varphi_i^r + \theta \cdot d_{i,i+1}^r - \varepsilon \cdot \frac{T_i^r}{60} \cdot x_i \quad \forall i \in S, \forall r \in R \quad (6)$$

$$\sum_{p \in P} \beta \cdot Q_p \cdot y_p^r \geq \frac{\max \varphi_i^r}{SOC_{max} - SOC_{min}} \quad \forall i \in S, \forall r \in R \quad (7)$$

$$\sum_{p \in P} y_p^r = 1 \quad \forall r \in R \quad (8)$$

$$e_{i+1}^r = e_i^r - \sum_{p \in P} B_p \cdot d_{i,i+1}^r \cdot y_p^r + \varepsilon \cdot \frac{T_i^r}{60} \cdot x_i \quad \forall i \in S, \forall r \in R \quad (9)$$

$$e_i^r + \varepsilon \cdot \frac{T_i^r}{60} \cdot x_i - \sum_{p \in P} B_p \cdot d_{i,i+1}^r \cdot y_p^r \geq SOC_{min} \cdot \sum_{p \in P} Q_p \cdot y_p^r \quad \forall i \in S, \forall r \in R \quad (10)$$

$$e_i^r \leq SOC_{max} \cdot \sum_{p \in P} Q_p \cdot y_p^r \quad \forall i \in S, \forall r \in R \quad (11)$$

$$SOC_i^r = \frac{e_i^r}{\sum_{p \in P} Q_p \cdot y_p^r} \quad \forall i \in S, \forall r \in R \quad (12)$$

$$x_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in S \quad (13)$$

$$y_p^r \in \{0, 1\} \quad \forall p \in P, \forall r \in R \quad (14)$$

公式 (6) 用于计算在最大能耗  $\theta$  下，为  $i+1$  站服务的公交车的预估计储能需求。参数  $\theta$  是指所有可用公交车类型中单位最大能耗。本文的目标是根据特定的充电站布局计算出最高的能源需求。能源需求最大的车站可能不是

终点站，而是中间站，因为途中有充电站。当提供一个充电站时，此要求会降低  $\varepsilon \cdot T_i^r$ 。当两辆公交车几乎同时到达同一站点时，假设较晚的公交车将等待较早的公交车出发并充电。因此，在案例研究中，为停留时间增加了缓冲时间，以应对充电等待情况。在某一类型的公交车被分配到指定路线后，与公交车类型相关的能耗率将由  $\sum_{p \in P} B_p \cdot y_p^r$  更新。引入途中充电不应中断预定义的时刻表，因此假设每个充电站的充电时间等于乘客的实际上车时间[36]。公式(7)根据库存  $P$  确定电池大小。电池适用性级别  $\beta$  表示退化后电池容量的百分比，如70%。在更换之前，退化的电池容量应适用于公交线路。因此，需要确保最低的电池容量  $\beta \cdot Q$  足以运行具有最高能量需求  $\max \varphi_i^r$  的路线。公式(8)进一步确保每条线路应分配一种公交车类型。公式(9)计算公交车到达车站  $i+1$  时剩余的能量，并更新能耗率  $B_p$  和充电站布局  $x_i$ 。为了使电池 SOC 保持在最佳范围内，通过公式(10)约束剩余能量，使得当公共汽车离开车站  $i$  时，剩余能量大于两个相邻站点之间的行驶消耗和最低允许能量水平的总和。公式(11)定义了电池能量的上限不应超过允许的最大 SOC 乘以电池容量。公式(12)计算了公交车到达线路  $r$  车站  $i$  时的电池 SOC。这种 SOC $_i^r$  的非线性表达式在案例研究中仅用作评估标准，不会包含在优化中。在公式(13)和公式(14)中分别定义了充电站布局和路线电池大小这两个决策变量。公式(13)引入了二元决策变量  $x_i$ ，它表示车站  $i$  是否为充电站。公式(14)定义了一个二元决策变量  $y_p^r$ ，表示线路  $r$  的电池大小。

虽然容量较大的电池比容量较小的电池成本更高，但是，更大的容量可以支持更长的行程，并且在调度过程中更加灵活，受到距离因素的限制更少。为了进一步管理异构公交车队，本文基于节点-弧形框架提出了整数网络流子模型[P1]，该子模型决定了公交车队的大小， $\sum_{v \in V} \vartheta_v$  进一步决定了公式(2)和公式(4)中的  $C_{OWN}$  与  $C_{OM}$  值。

在此子模型中，节点集  $G$  包括：①公交行程节点，由索引  $g$  和  $h$  表示；②公交站节点，用索引 0 表示。本文将具有特定出发和到达时间和空间的公交车行程压缩到一个节点中。弧集  $A$  表示公交车可能的服务路线，包括从场站到每次行程的弧  $g$ ，从行程  $g$  到另一个可用行程  $h$  的弧，以及从行程  $h$  返回场站的弧。当连接两个节点时，就会生成弧。本文还为连接可用性设置了与时间兼容的约束，表明公交车有足够的时间完成第一次行程，然后开往下一个行程的起点。基于时间约束，进一步定义一个集合  $\text{In}(g,p) \subseteq G$ ，其中包含在行程  $g$  开始之前可以按公交车类

型  $p$  提供服务的可用入站节点。如果公交车类型的电池容量  $p$  满足  $Q_p \geq Q_g$  且  $Q_p \geq Q_h$ ，则将行程  $h$  添加到集合  $\text{In}(g,p)$  中。类似地，将集合  $\text{Out}(g,p)$  定义为行程  $g$  的可用出站节点集，完成行程  $g$  后可以通过类型  $p$  的公交车提供服务。在公共汽车场站  $V_p$  中，记录类型  $p$  的车辆。考虑到网络描述的问题，认为从场站开始到场站结束的一系列行程对应于一个公共汽车调度计划。因此，最小化公共汽车的总数与最小化离开场站（节点 0）的总流量等价。为了便于使用算法来解决这个问题，将以下子模型描述为[P1]。

公交车调度子模型[P1]:

$$\min \sum_{v \in V} \vartheta_v = \min \sum_{v \in V} \sum_{h \in G} z_{0h}^v \quad (15)$$

约束条件:

$$\sum_{v \in V_p} \sum_{h \in G_r} z_{0h}^v = y_p^r \quad \forall p \in P, \forall r \in R \quad (16)$$

$$\sum_{h \in \text{In}(g,p)} z_{hg}^v = \sum_{h \in \text{Out}(g,p)} z_{gh}^v \quad \forall v \in V_p, \forall p \in P, \forall g \in G \quad (17)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{v \in V_p} \sum_{h \in \text{Out}(g,p)} z_{gh}^v = 1 \quad \forall g \in G \quad (18)$$

$$z_{gh}^v \in \{0, 1\} \quad \forall v \in V, \forall g \in G, \forall h \in G \quad (19)$$

公式(15)中描述的目标函数不是独立存在的，是对公式(2)中  $\sum_{v \in V} \vartheta_v$  的具体描述，表示最小化公交车队规模，等价于最小化从场站出发的公交车数量。

方程(16)描述了变量  $y_p^r$  和  $z_{gh}^v$ ，确保当公交车类型  $p$  分配给线路  $r$  时，应该有一个公交车  $v$  为线路  $r$  的时刻表提供服务。公式(17)确保公交车流量的守恒。场站为 0 表示从车站出发的公共汽车应在一天结束时返回。对于行程节点  $g$ ，节点之间的连接应该根据入站和出站节点集生成。根据公式(18)，每个行程节点必须被覆盖。公式(19)定义了一个二元决策变量  $z_{gh}^v$ ，当  $z_{gh}^v$  等于 1 时，公交车  $v$  按顺序  $h$  提供行程服务  $g$ ；否则，变量  $z_{gh}^v$  为 0。 $z_{gh}^v$  记录了公交车的每日服务路线  $v$ 。如果假设这条服务路线在一年中保持不变，则根据每次行程的距离和空车行程，可以确定  $\text{DIS}_v$ ，如方程(20)所示：

$$\text{DIS}_v = \text{days} \cdot \sum_{g \in G} \sum_{h \in \frac{G}{\{0\}}, h \neq g} z_{gh}^v \cdot (\text{dis}_g + \text{deadhead}_{gh}) \quad \forall v \in V \quad (20)$$

式中， $\text{dis}_g$  表示行程  $g$  的行驶距离； $\text{deadhead}_{gh}$  表示两个连续行程  $g$  和  $h$  之间的空车距离。假设公共汽车的路线在全年内不会改变，引入该参数是为了记录一年中的天数。

### 3.3. 解决方法

作为 VRP 的一个分支，可以确定两种类型的解决方法：用于快速搜索的启发式方法和用于全局最优解的精确方法[72]。列生成技术是精确方法的一部分[73]。当这个

问题是一个整程序时，引入分支定价算法，该算法结合了列生成和分支约束过程，旨在为大规模问题生成可证明的高质量解决方案[74]。有很多研究已经引入了该算法来解决EB的调度问题[74–76]。在分支定价算法中，主问题[P1]首先转换为具有二元变量[P2]的分区问题，然后进一步简化为考虑列子集的线性有限主问题[P3]。定价子问题[P4]的任务是查找满足一组要求的其他潜在列（即公交时刻表）。在这项工作中，定价问题创新性地包括定制的公交车类型约束。最后，提出了分支和约束方法，以确保松弛解为整数。该算法有助于减小决策变量的大小并加速求解过程。本节介绍了针对EB调度子问题的分支定价算法。

### 3.3.1. 设置分区模型

首先将[P1]转换为集合分区模型[P2]，其中的行程由可行的调度计划覆盖。

设置分区模型[P2]:

$$\min \sum_{v \in V} \vartheta_v = \min \sum_{v \in V} \sum_{l \in L} \lambda_l^v \quad (21)$$

约束条件:

$$\sum_{v \in V} \sum_{l \in L} H_{gl}^v \lambda_l^v = 1 \quad \forall g \in G \quad (22)$$

$$\lambda_l^v \in \{0, 1\} \quad \forall v \in V, \forall l \in L \quad (23)$$

用 $L$ 表示一天内公交车的可行调度计划。对于相同类型的公共汽车，可行的调度计划是相同的。目标函数如等式(21)所示，确保最小化公交车队规模等同于最小化调度的总数量。等式(22)确保每个行程 $g$ 都包含在最佳调度计划中。 $H_{gl}^v$ 是一个预定义的参数，表示行程是否是计划 $l$ 的一部分，是否可以由公共汽车 $v$ 提供服务，此参数显著减少了解决方案的空间。对于每个调度计划 $l \in L$ ，方程(23)中定义了一个二元变量 $\lambda_l^v$ 来表示公交车 $v$ 是否服务于调度计划 $l$ 。

### 3.3.2. 受限主问题(RMP)

在模型[P3]中指定了具有潜在调度计划子集 $L' \in L$ 的RMP。首先通过3.3.3节中提出的 $L'$ 标号算法进行校正。

RMP [P3]:

$$\min \sum_{v \in V} \vartheta_v = \min \sum_{v \in V} \sum_{l \in L'} \lambda_l^v \quad (24)$$

约束条件:

$$\sum_{v \in V} \sum_{l \in L'} H_{gl}^v \lambda_l^v = 1 \quad \forall g \in G \quad (25)$$

$$\lambda_l^v \geq 0 \quad \forall v \in V, \forall l \in L' \quad (26)$$

模型[P3]的对偶变量定义如下:

$\pi_g$ : 约束方程(25)的对偶变量,  $\forall g \in G$

在每次迭代的列生成时，模型[P3]的对偶变量

$\Omega \equiv \{\pi_g | g \in G\}$ 包含定价子问题[P4]的输入参数，以生成成本降低最低的新列（即模型[P4]的目标）。

### 3.3.3. 定价问题

列生成方法通过反复求解带有潜在调度计划的子集 $L' \in L$ 的RMS [P3]和松弛决策变量 $\lambda_l^v \geq 0$ ，设法找到主问题[P2]的最佳解。为了有效地找到这个调度计划 $l \in L/\{L'\}$ ，需要解决一个定价问题。目标是找到一个行程链，对于最小化问题来说这个行程链应该是负的，其弧成本等于 $-\pi_g$ 。

定价问题会产生与负成本降低相关的可行调度计划。

定价模型[P4]:

$$\min \sigma_v = - \sum_{g \in G} \pi_g \sum_{h \in G} z_{gh}^v \quad (27)$$

约束条件:

公式(16) ~ (19)

定价问题是最短路径问题的扩展，可以通过动态编程方法有效地进行解决。第2.2.2节中定义的入站和出站集通过提前处理时间和空间约束进一步加快求解速度，集合中的行程按出发时间继续排序。为了解决定价问题，本文采用了Feillet等[77]提出的标号校正算法。标号表示从仓库到当前行程节点 $g \in G$ 的部分行程链：标号定义为 $\text{label}(g, c, S)$ ，其中 $g$ 是部分行程链中访问的最后一个行程节点； $c$ 是部分行程链的降低成本； $S$ 表示行程链含有的一组行程节点集合。

无法到达的行程节点也在集合中 $S$ 中；在不超过时间或容量约束的情况下，行程节点不被标签所代表的链所覆盖。

标号校正算法的伪代码见算法1。

#### 算法1 公交调度的定价程序

---

```

Initialize label(0, 0, ∅);
LABELS [0].add (label);
for all  $g \in G$  do
    LABELS[ $g$ ]  $\leftarrow \emptyset$ 
end for
 $W = \{0\}$ 
while  $W \neq \emptyset$  do
     $g = W$ . extractUnreachableNodes()
    for all  $\text{label}(g, c, S) \in \text{LABELS}[g]$  do
        if label is not processed do
            for all  $h \in \text{out}(g, p)$  do
                if  $h \notin S$  then
                    label'( $h, c - \pi_h, S \cup \{h\}$ )

```

---

```

label!.updateUnreachableNodes()
if LABELS [h].insert(label!) then
  W ← W ∪ {h}
end if
end if
end if
label! = (h, c, S)
label!.updateUnreachableNodes()
if LABELS [h].insert(label!) then
  W ← W ∪ {h}
end if
end for
end if
end for
end while
return LABELS [0]

```

当[P4]的最优目标为负时，成本降低最小的公交调度计划将作为新的输入列添加到[P3]中，并且由确定的路由  $z_{gh}^v$  进入子集  $L' \in L$ 。当最小降低成本为非负值时，列的生成过程终止，表明模型[P3]中没有可行的行程链可以被添加到  $L'$  中，以改进当前解决方案。

#### 3.3.4. 分支方案

分支过程拆分解空间以限制搜索并收紧约束[78]。这可确保添加的约束与主问题兼容。车辆调度的规则是一个节点最多被访问一次[79]。

Ryan 和 Foster 引入的分支规则[80]已被证明是最有效的方案之一。当  $\lambda$  是 RMP 的部分解时，沿路线的流量可以定义为  $f_{ij}^\lambda := \sum_{l \in L: i, j \in l} \lambda_l$ ，其中， $f_{ij}^\lambda \geq 0$  和  $f_{ij}^\lambda \leq 1$ 。对于每个解决方案  $\lambda$ ，至少存在两个节点  $g$  和  $h$ ，使得  $0 < \sum_{l: H_{gl} = H_{hl}} \lambda_l < 1$ 。在主问题中， $\lambda$  为 0 或 1。因此，对于任何弧  $(g, h)$ ，可以生成两个分支。

- 在第一个分支中，弧上的流量上限为  $(g, h)$ ；此时， $H_{gl} = H_{hl} = 0$ 。

- 在第二个分支中，弧上的流量下限为  $(g, h)$ ；此时， $H_{gl} = H_{hl} = 1$ 。

此 Ryan-Foster 分支方案可以在列生成过程中通过以下约束轻松管理： $\sum_{l \in L: i, j \in l} \lambda_l = \lceil f_{ij}^\lambda \rceil$  和  $\sum_{l \in L: i, j \in l} \lambda_l = \lfloor f_{ij}^\lambda \rfloor$ 。

## 4. 案例研究

本文所提出的模型和算法提供了一种简单的方法，用于将公交车分配给线路、部署公交车充电站，将公交车队的规模降到最低并对实际问题进行优化安排。为了将其与当前的运营效果进行比较，本研究设计了两种场景，其中

一个场景是对单线现行方案提出计划方案，而另一个场景则是对多线公交服务的最优计划。每个场景下都包括一条现有线路和一条规划线路。本节中的所有实例都是在通用代数建模系统（GAMS）25.1.3 中实现的。使用的电脑为英特尔笔记本电脑，具有 1.9 GHz 英特尔酷睿 i7 CPU 和 8 GB 运行内存，电脑系统为 Windows 10，使用 CPLEX 12.0 线性规划软件进行计算。

### 4.1. 现有电气化公交线路优化

此场景旨在优化哥德堡现有的电气化公交线路，这是沃尔沃公交车公司开发、示范和评估下一代可持续公共交通的第一项举措[81]。目前的运营策略如图 4 (a) 所示。它完整地描绘了现有的电气化线路 55，整条线路距离约为 7.6 km，每个终点站配备有一个充电桩。虽然两个方向的终点站位置不同，但电池充满电后可以自动断充。公交运营商提供的公交时刻表包含 73 个去程和 73 个回程班次，目前由 10 辆电池容量为 200 kW·h 的纯 EB 提供服务，运营数据由 Vasttrafik 提供。所提出的最优解如图 4 (b) 所示。与当前计划相比，在此方案中每个方向的充电桩部署都是单独考虑的，为去程提供两个充电器（蓝色圆圈），为回程提供两个充电器（紫色圆圈）。充电器数量的增加是因为电池容量变小。在选定的充电站中，两个位于终点站，为行程连接提供足够的能量，而其他充电站则用于将电池 SOC 保持在最佳范围内。所提出的方案中的公交车队规模从 10 个减少到 7 个，电池容量从 200 kW·h 减少到 30 kW·h。为了与当前的运行条件（沃尔沃 7900）保持一致，本研究使用锂离子电池作为牵引电池，最大充电功率为 450 kW。由于在单线公交车调度中无需考虑公交车的类型，因此对行程连接的唯一限制是时间限制。为了更有效地调度公交车，首选出发时间较早且空车行程较少的行程，这反映在所定义的进出行程集中。

本文使用 LCC 评估框架对现行计划和优化计划进行了比较。图 5 (a) 描述了年度等效 LCC 的明细，表示了所提出的计划带来的改进效果。在电池选型模块中，为短线（7.6 km）分配了合适的电池容量（30 kW·h）。详细计算见公式（7），将公式（6）计算的储能需求除以特定的放电深度（如 0.6）并将其与退化的电池容量进行比较。研究发现，30 kW·h 的电池容量足以支持最佳充电站配置下的单程操作。此外，公交车队优化模块可以缩小车队规模，从而降低公交车投资费用。更具体地说，年度等效 LCC 减少了 196 万 SEK，与当前计划相比减少了 30.4%。各项措施（即拥有成本、排放和运营维护）分别减少了 180 万、13 万和 3 万 SEK，排放的外部成本降至当前计划

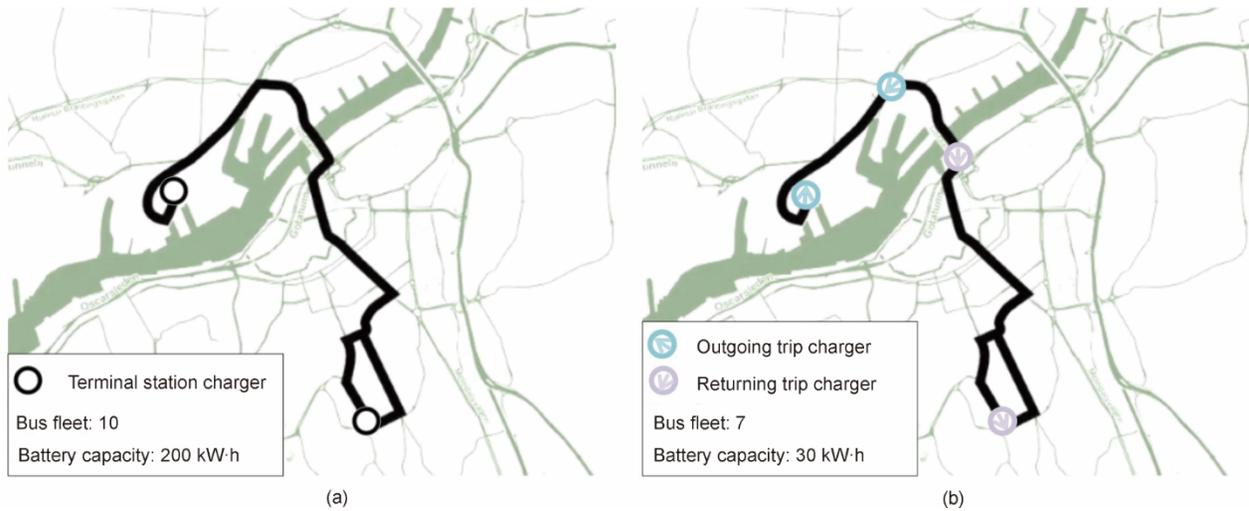


图4. 现行计划与优化计划的运营策略。(a) 现行计划；(b) 优化计划。

的一半左右。可以看出，尽管充电站的数量翻了一番，但所有权成本的降低主导了最终成本的降低。因此，有效的公交车调度是降低LCC的最关键因素。

图5 (b) 将年度当量生命周期排放量的优化细分与实际操作计划进行比较。结果表明，车辆制造周期、动力总成和WTT阶段的年减排量分别为16.28 t、28.51 t和9.04 t CO<sub>2</sub>eq，动力总成的减排量最高，通过使用低容量电池实现了86%的减排。值得注意的是，瑞典的碳密集型电力结构是世界上最低的，因为它包括可再生能源和核能，强度为20 g CO<sub>2</sub>eq·(kW·h)<sup>-1</sup>。因此，WTT的排放量远低于普通国家。在英国，WTT排放量占整个生命周期排放量的50%以上，强度为300 g CO<sub>2</sub>eq·(kW·h)<sup>-1</sup> [69]。如果以英国的能源强度作为投入，WTT将超过动力总成，成为排放的第二大组成部分。与车队规模的影响相比，电池容量对排放的缓解作用更为显著。图5 (c) 和 (d) 分别为两种计划和两个方向的SOC曲线。绿线表示当前计划下的SOC曲线，而蓝线和粉线表示SOC在提出的计划中不同方向的变化。如果SOC先下降，然后在同一个横坐标处先下降后上升，则意味着此时设置了一个充电站。在提出的计划中，对于去程，当公共汽车行驶约5 km时，到达充电站，电池SOC增加到0.87。为了给下一次行程提供足够的能量存储，另一个充电站位于终点站，公交车到达目的地后电池SOC增加到0.95。对于回程，公共汽车行驶4.6 km，然后到达第一个充电站。因此，当公交车离开此站点时，电池SOC增加到0.89。同样，在目的地提供第二个充电站。相比之下，在现行计划中，由于电池容量大，整个行程消耗了10%左右的储能。在提出的计划中，电池容量较小，所以充电站的数量也增加了一倍，并且SOC波动高于现有计划。SOC的波动取决于行进的

距离和能耗率[82]。为了清楚地表明每一站的电池SOC，并直观地评估充电计划，本文假设SOC仅在公交车到达充电站时才会发生变化。两个停靠点之间的SOC由一条水平线表示，这与方程(12)的结果一致。

在现行的计划中，利用大电池容量大的公交车也有一些优点，例如，延长电池循环寿命。为了比较不同计划的周期寿命，图5 (c) 和 (d) 总结了出程和回程的SOC曲线。对于两个方向，当前计划中SOC保持在0.95~0.85的区间内，而所提出计划中SOC在去程中从0.95到0.61波动，在返回行程中从0.95到0.65波动。对于每个计划，使用SOC的最低值SOC<sub>min</sub>进行评估，分别为0.85和0.61。当SOC<sub>min</sub>为0.85时，如现行计划，电池循环寿命可以达到49 000次。当该值减小到0.61时，循环寿命减少到6720次左右。因此，所提出方案中的电池更换频率增加，年度运营费用也将相应增加。一般来说，结合上述几点，轻质电池和较小的公交车队在经济和环境方面表现更好。同时，电池更换和维护可以补偿SOC波动造成的循环寿命降低的问题。

案例计算使用的是CPLEX 12.0软件。生成最佳解决方案需要43 s。

#### 4.2. 多线规划

该方案侧重于近来的电气化公交线路规划，其中包含一条现有线路（与第4.1节相同）和一条计划线路，目前由柴油公交车运行，但正在接受电气化测试[83]。所提出的模型并没有限制问题的规模。选择这两条公交线路是因为它们完全符合哥德堡目前的电气化计划，可以代表线路之间的情况。表3总结了两条线路的主要特征，包括长度、行程时间、服务时间、行程次数和停靠站数，其中本

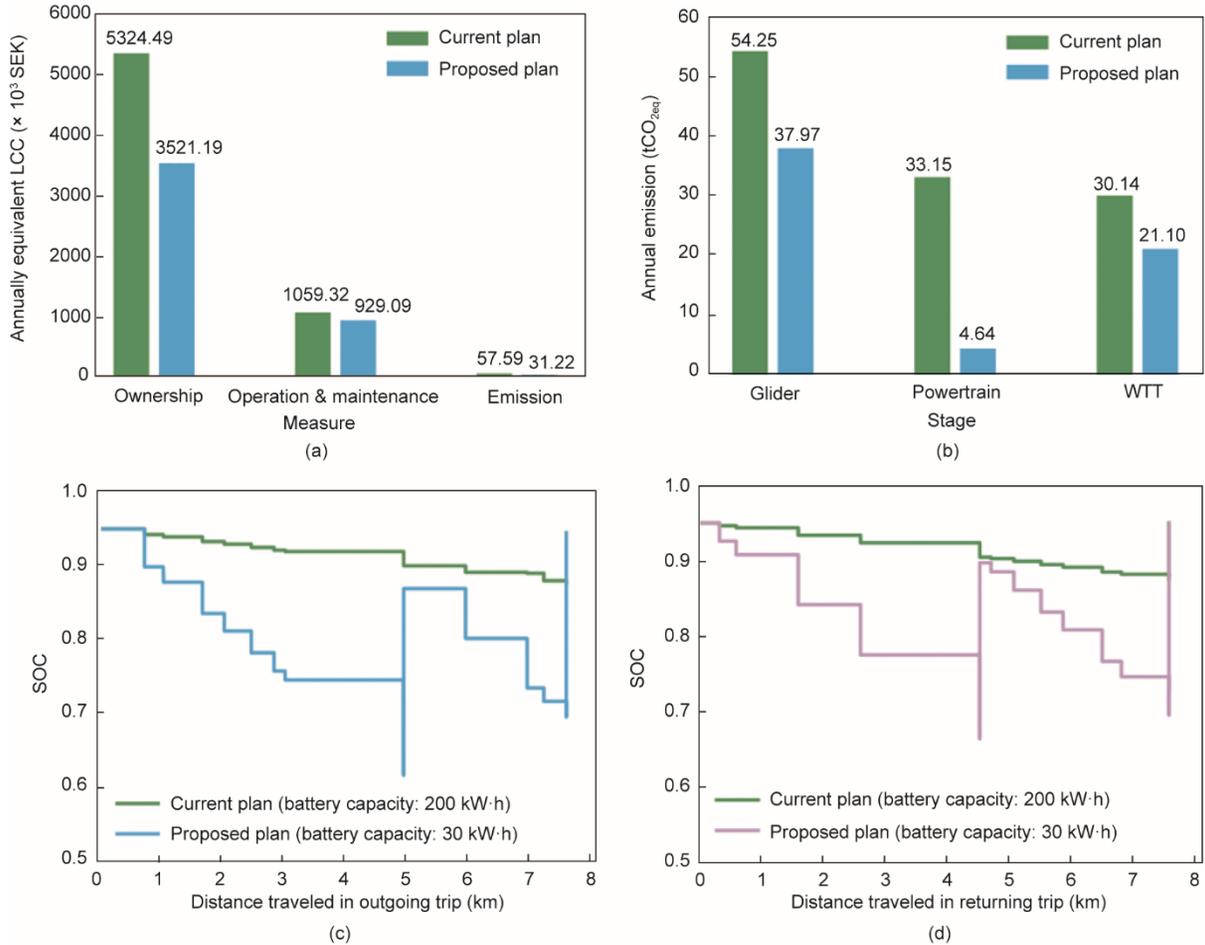


图5. 现行和所提出计划的表现情况。(a) 年度等效LCC明细；(b) 年度排放量明细；(c) 去程的SOC曲线；(d) 回程的SOC曲线。

文将去程和回程方向的停靠站分开考虑。有关其他建模参数的更多信息，请参阅附录A。

表3 电气化线路的主要特点

Bus line	Length (km)	Travel time (min)	Serving time	Stops	Trips
Existing line	7.6	26	06:00–19:00	26	146
Planned line	16.6	46	00:10–00:40 (+1)	50	312

可能的行程连接及其相应的空车行程如图6所示。公交车通常在同一条线路上来回运行，如第一行第一列和第二行所示。但是，在日常运营中，允许公共汽车依次服务于不同的线路，以便进行灵活的时间安排并减少车队的规模，如第三行所示。同样，由于两个方向的时刻表规划不协调，一个方向的出发频率往往高于另一个方向的出发频率。因此，允许公共汽车按顺序服务于同一方向，并进行长时间的空车行程，如第二列所示。当一辆公交车被分配到两条线路服务时，我们消除了单向服务选择，因为空车行程太长，这不利于产生高效的调度计划。

图7显示了此网络的最佳充电器部署情况，现有线路为黑色实线，计划线路为虚线棕色。电池选型模块为公交车分配30 kW·h的电池容量，将其分配到两条线路上。充电器部署模块从可用的站集中选择8个停靠点作为充电站，其中包含64个总线站（去程方向32个，回程方向32个）。选定的充电站中有半数由两条线路共享（图7中的实心圆），而其他充电站靠近目的地（图7中的空心圆），以确保存储足够的能量为下一次行程提供服务。比较图4(b)和图7可知，即使是同一条电气化线路，在单线和网络规模优化的条件下，充电站的选择也是不同的。更具体的是，四个充电站中只有一个在单线和多线计划中共存。与单线优化方案中不同的其他三个充电站位于两条线路共享的停靠站上。优点是，由于两条线路的到达时间不重叠，这些充电站可以更高效、更充分利用。

最佳公交站调度如图8所示，共有26辆公交车。每个子图中分别显示了每辆公共汽车的服务行程数、运营时间和空车行程。在优化中，相同的公交车类型分配给两条线路，这样可以减少公交车队的规模，因为公共汽车可以从

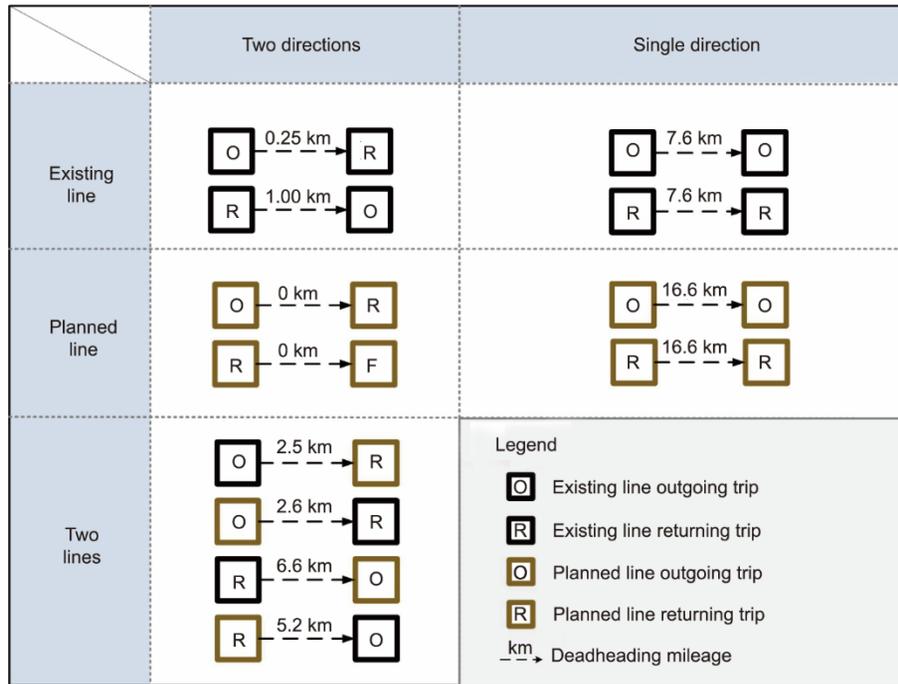


图6. 可能的行程连接。

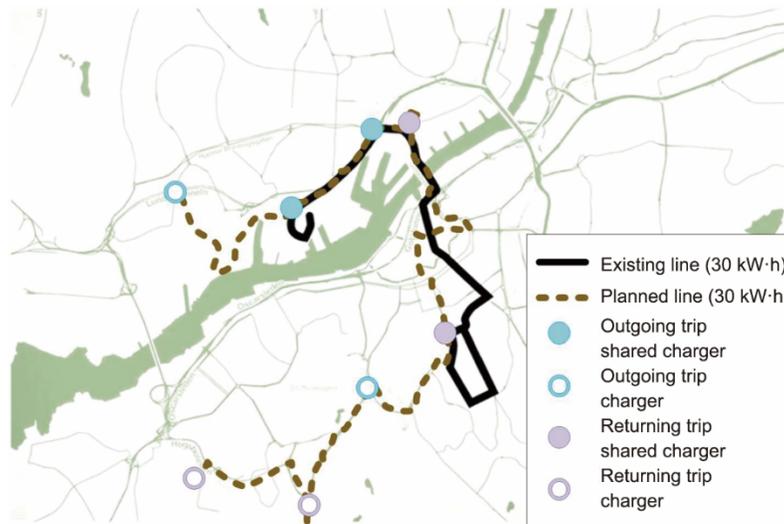


图7. 多线公交车服务的最佳充电器部署。

两条线路出发。为避免长时间的空车行程，最好在同一条线路上来回运行公共汽车。在第一个子图中，每辆车服务的行程数按升序收集，在显示时间和空车行程方面时，顺序保持不变。分析第一个和第三个子图中的数据可知，共享线路的策略是有利的，在可接受的公交车空车行程下，公共汽车的行程覆盖范围会增加。一辆公交车的最高覆盖率是25次。提取这两个子图的第一列（公交车1）时，可以看出行程次数最少的公交车具有最长的空车距离。由于时刻表不协调，每辆公交车服务的行程都会波动。该图显示，波动幅度在10~25之间，平均每辆公共汽车有13个

车次。第二个子图中显示的公交车运行时间是指公交车从车辆段出发和返回车辆段之间的持续时间，这不是确切的公交车运行时间，因为行程连接的等待时间也包括在内。每辆公交车的平均运营时间约为15 h，而计划线路的最长运营时间为24 h。子图1和2中的最后几列表示，最长的行程覆盖范围需要最长的公交车运行时间。在第三个子图中，有14辆公交车的空车为0，这表明它们被专门分配来回服务于计划线路。但是，起点和目的地在现有线路的两个方向上的位置不同，因此所有来回服务于现有线路的公共汽车仍然有大约1 km的空车行程。综上，大多数公共

汽车都有一定的空车行程。平均空车长度约为 12 km，而当公共汽车在两条线路之间行驶或为一条线路提供单向服务时，最长的长度为 50 km。需要注意的是，由于本研究是根据现有时刻表安排新线路的计划，当不允许多线服务时，调度计划和公交车时刻表无法有效配合。因此，两个方向的不协调出发时间要求公共汽车运行整个空车行程，以连续在同一方向上连续服务两个行程，减小车队规模。这个明显的缺点为联合优化调度计划和公交车时刻表提供了机会。

每个方向上每条线的 SOC 曲线如图 9 所示。最大 SOC 波动约为 0.35，在电池寿命期间可实现 6720 次循环。在现有线路的两个方向上，公交车充电两次，而在计划线路中公交车充电四次。此外，这种配置确保了在公交车到达终端后，现有线路的剩余 SOC 仍高于 92%，计划线路的剩余 SOC 为 100%。与上一节的充电站布局不同，现有线路中的充电站不是终点站，而是前一站。原因是两个车站之间的距离很小，两条线路共享所选车站。但是，如果最后两个站点相距较远，则通常将终点站设置为充电站，以保证后续的行程。因此，本文所提出的计划不仅确保了足够的能量储存，而且更经济。

为了进一步评估性能，表 4 总结了年度当量 LCC 的细分。与上一节的结论一样，基础设施所有权投资占最大份额，为 62.5%。其次是运维成本，即电池更换和能耗，占 36.9%。瑞典的绿色电力生产使得排放的外部成本远低于其他成本，仅占 LCC 总量的 0.56%。车辆制造周期、动力

总成和 WTT 元件的排放量小于  $200 \text{ t CO}_2\text{eq}\cdot\text{a}^{-1}$ 。在网络规模的 EB 系统中 WTT、动力总成和车辆制造周期的排放量与上一节相比具有一致的趋势，车辆制造周期占最大份额，其次是 WTT，最后是动力总成。由于公交车队规模更大，充电站数量增加，LCC 的每个组成部分都比所提出的单线服务计划高出约三倍。然而，本研究没有考虑到绿色制造的未来或清洁能源的广泛使用，如果考虑上述因素，预计两者都会将车辆制造周期和 WTT 的排放量减少到相对较低的水平。假设不允许在两条线路之间空车，那么公交车队将至少增加三个。此外，共享充电器节省的成本也可以减轻资本负担。

为了评估所提出的算法的性能，本文使用 GAMS 在同一情况下测试了两种不同的方法。如果算法不包括列生成，则第 2.2 节中引入的模型将由混合整数规划 (MIP) 求解器直接求解。否则，[P2]~[P4]将在所提出的框架下按顺序求解。表 5 显示，使用混合整数规划求解器求解模型时，所需的计算时间要长 20 倍。结果表明，所提出的求解算法在实际应用中具有一定的效率。

## 5. 结论

本工作提出了一种新的优化方法整合充电站部署、电池选型和公交调度问题。引入 LCC 分析框架来评估电气化基础设施投资决策的性能。为了使问题易于处理且计算

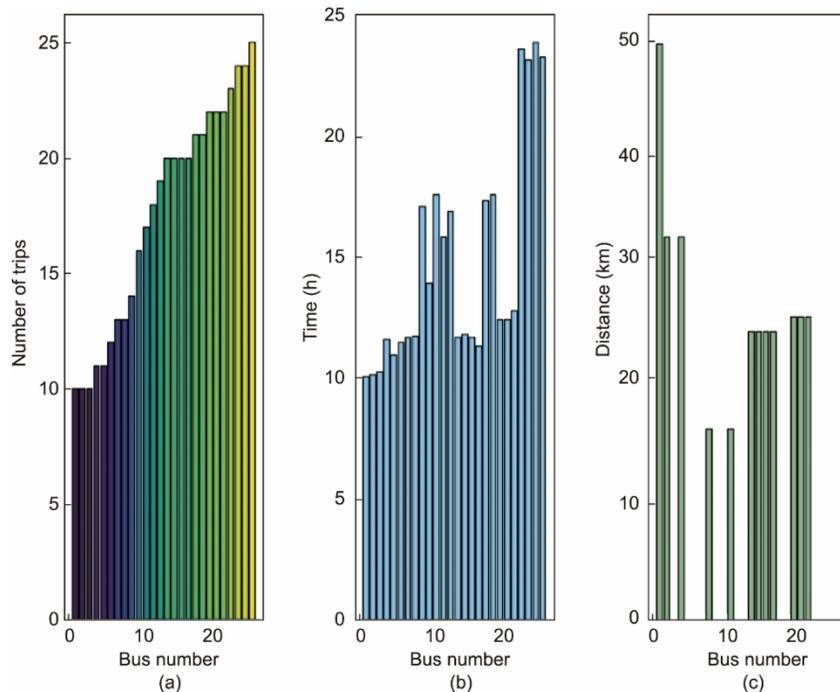


图 8. 每辆公交车的最佳时刻表。(a) 行程服务量；(b) 服务时间；(c) 空车距离。

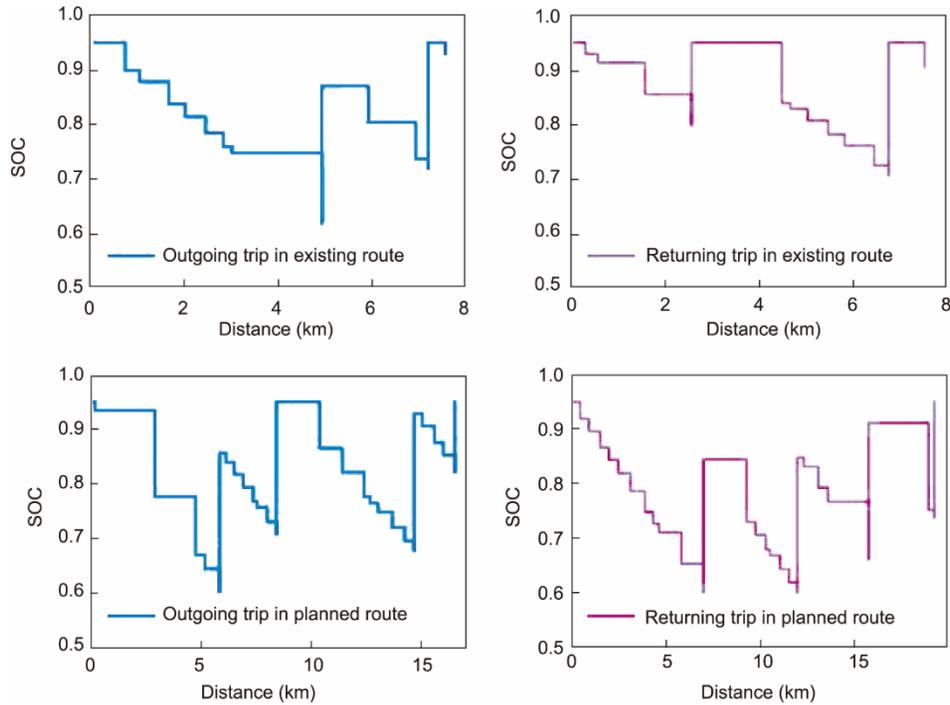


图9. 现有线路和计划线路的SOC曲线。

表4 计划线路的年度当量LCC明细

LCC components	Value
Infrastructure ownership cost ( $\times 10^6$ SEK)	9.96
Maintenance and operation ( $\times 10^6$ SEK)	5.89
Life-cycle emission ( $\times 10^6$ SEK)	0.09
Glider (tCO <sub>2</sub> eq)	113.92
Powertrain (tCO <sub>2</sub> eq)	13.93
WTT (tCO <sub>2</sub> eq)	63.29
Annual equivalent LCC ( $\times 10^6$ SEK)	15.94

表5 不同算法性能对比

Algorithm	CPU run (s)
Proposed	106
Mixed-integer program (MIP)	1950

负担低，提出了一种定制的分步定价算法。

在优化的结果中，评估了两个案例研究，包括单线优化和多线规划。结果表明，规划层和运营层的集成使LCC大大降低了30.4%，特别是基础设施所有权成本降低了33.87%。减少公交车队规模是减少LCC和生命周期排放的最关键步骤。通过对比单线和多线的实际运营和优化结果，所有权占优化结果的比例从单线的82.7%下降到78.6%，多线的所有权份额下降到62.5%，这意味着大型道路网络将更倾向于依赖高效的日常运营策略。这就是为什么公交车调度被引入模型作为一个重要的子问题的原因。虽然缩小电池容量和减少充电站数量是相互对立的目

标，但即使充电器数量增加一倍，采用更小容量的电池也可以显著降低评估框架中的经济成本。电池小型化的目的是为线路提供可靠的服务，这也体现了电池大小和充电站优化相结合的好处。此外，研究发现，随着道路网络的扩大，动力总成、WTT和车辆制造周期的排放量始终增长，约为单线的三倍，这使得引入绿色制造和清洁能源变得越来越重要。结果表明，该模型不仅最大限度地减少了LCC，而且保证了可靠的公共交通服务。本文还从经济和环境角度总结了迫切需要改进的基本问题。

所提出的方法将战略层和运营层进行了综合考虑，具有广泛的应用前景，适用于现有的计划评估和调整以及未来规划的可行性分析，可以确定充电基础设施部署、公交车队投资和运营公交车调度之间的合理平衡。在不同情况下，也可以观察到不同影响因素的重要性。因此，无论是优化还是规划，运输公司都可以直接利用生成的计划或根据需要对其进行定制。此外，这种优化方法可以扩展并适用于具有不同基础设施的公共汽车网络，如无线充电器和动态充电车道，以协助未来充电技术的实施。所提出方法的应用和扩展将有助于详细评估公共交通从柴油到EB的转变。

进一步的研究应首先包括将已开发的模型扩展到大规模网络，以便更好地符合现实情况，包括多线共享充电站等方面。还应该解决运营干扰问题，例如，乘客需求的波动，以避免不稳定的公交车停留时间和延误到达。因此，

应将此类干扰造成的延迟添加为惩罚函数。最后，必须进一步考虑不同充电站配置下电池电化学特性对其循环寿命的影响。本文提出的模型可用于更符合实际情况的框架中。

## Acknowledgements

This research is financially supported by EU Project SMUrTS under JPI initiatives.

## Compliance with ethics guidelines

Ziliang Zeng, Shuaian Wang, and Xiaobo Qu declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

## Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.eng.2022.07.019>.

## References

- [1] Liang X, Zhang S, Wu Y, Xing J, He X, Zhang KM, et al. Air quality and health benefits from fleet electrification in China. *Nat Sustain* 2019;2(10):962–71.
- [2] Palmer C. Electric car market poised to accelerate. *Engineering* 2021; 7(2): 136–8.
- [3] European Automobile Manufacturers Association. Vehicles in use, Europe 2021. Report. Brussels: ACEA; 2021.
- [4] Hodges T. Public transportation's role in responding to climate change. Darby: Diane Publishing; 2010.
- [5] Houston S. Electric utility investment in truck and bus charging: a guide for programs to accelerate electrification. Report. Cambridge: Union of Concerned Scientists; 2019.
- [6] Zhang W, Zhao H, Xu M. Optimal operating strategy of short turning lines for the battery electric bus system. *Commun Transp Res* 2021;1:100023.
- [7] Xie M, Duan H, Kang P, Qiao Q, Bai L. Toward an ecological civilization: China's progress as documented by the Second National General Survey of Pollution Sources. *Engineering* 2021;7(9):1336–41.
- [8] JddOrtúzar. Future transportation: sustainability, complexity and individualization of choices. *Commun Transp Res* 2021;1:100010.
- [9] Weiss P. Charger collaborations power global electric vehicle expansion. *Engineering* 2019;5(6):991–2.
- [10] Jiang CL. All buses in key cities will be replaced by new energy vehicles by the end of 2020. Report. Beijing: China Daily; 2018 Jun. Chinese.
- [11] IntelligenceEO. China charging infrastructure trend report (2020 to 2025). Report. Beijing: EO Intelligence; 2020 Aug. Chinese.
- [12] The White House. Fact sheet: Biden administration advances electric vehicle charging infrastructure. Report. Washington: The White House; 2021 Apr.
- [13] European Automobile Manufacturers Association. Making the transition to zero-emission mobility—2020 progress report. Report. Brussels: ACEA; 2020 Oct.
- [14] International Energy Agency. Net zero by 2050 data browser. Report. Paris: IEA; 2021 May.
- [15] IntelligenceMordor. China electric bus market—growth, trends, COVID-19 impact, and forecasts (2022–2027). Report. Hyderabad: Mordor Intelligence; 2021.
- [16] International Energy Agency. Global EV outlook 2021. Reprint. Paris: IEA; 2021 Apr.
- [17] Guo F, Yang J, Lu J. The battery charging station location problem: impact of users' range anxiety and distance convenience. *Transp Res E Log* 2018; 114: 1–18.
- [18] Wang Y, Huang Y, Xu J, Barclay N. Optimal recharging scheduling for urban electric buses: a case study in Davis. *Transp Res E Log* 2017;100:115–32.
- [19] Mitropoulos LK, Prevedouros PD, Kopelias P. Total cost of ownership and externalities of conventional, hybrid and electric vehicle. *Transp Res Procedia* 2017;24:267–74.
- [20] Ke BR, Chung CY, Chen YC. Minimizing the costs of constructing an all plug-in electric bus transportation system: a case study in Penghu. *Appl Energy* 2016; 177:649–60.
- [21] Harris A, Soban D, Smyth BM, Best R. A probabilistic fleet analysis for energy consumption, life cycle cost and greenhouse gas emissions modelling of bus technologies. *Appl Energy* 2020;261:114422.
- [22] Ribau JP, Silva CM, Sousa JMC. Efficiency, cost and life cycle CO<sub>2</sub> optimization of fuel cell hybrid and plug-in hybrid urban buses. *Appl Energy* 2014;129:320–35.
- [23] Chan S, Miranda-Moreno LF, Alam A, Hatzopoulou M. Assessing the impact of bus technology on greenhouse gas emissions along a major corridor: a lifecycle analysis. *Transp Res Part D Transp Environ* 2013;20:7–11.
- [24] Bi Z, Song L, De Kleine R, Mi CC, Keoleian GA. Plug-in vs. wireless charging: life cycle energy and greenhouse gas emissions for an electric bus system. *Appl Energy* 2015;146:11–9.
- [25] Bi Z, De Kleine R, Keoleian GA. Integrated life cycle assessment and life cycle cost model for comparing plug-in versus wireless charging for an electric bus system. *J Ind Ecol* 2017;21(2):344–55.
- [26] El-Taweel NA, Farag HEZ, Mohamed M. Integrated utility-transit model for optimal configuration of battery electric bus systems. *IEEE Syst J* 2020; 14(1): 738–48.
- [27] He Y, Liu Z, Song Z. Optimal charging scheduling and management for a fast-charging battery electric bus system. *Transp Res E Log* 2020;142:102056.
- [28] Jahic A, Eskander M, Schulz D. Charging schedule for load peak minimization on large-scale electric bus depots. *Appl Sci* 2019;9(9):1748.
- [29] Charging InfrastructureABB EV. ABB introduces automated fast chargers for electric city busses: enabling zero emission public transportation in cities. Report. Rijswijk: ABB EV Charging Infrastructure; 2015.
- [30] Lin Y, Zhang K, Shen ZJM, Ye B, Miao L. Multistage large-scale charging station planning for electric buses considering transportation network and power grid. *Transp Res Part C Emerg Technol* 2019;107:423–43.
- [31] Mohamed M, Farag H, El-Taweel N, Ferguson M. Simulation of electric buses on a full transit network: operational feasibility and grid impact analysis. *Electr Power Syst Res* 2017;142:163–75.
- [32] Liu Z, Song Z, He Y. Economic analysis of on-route fast charging for battery electric buses: case study in Utah. *Transp Res Rec* 2019;2673(5):119–30.
- [33] He Y, Song Z, Liu Z. Fast-charging station deployment for battery electric bus systems considering electricity demand charges. *Sustain Cities Soc* 2019; 48: 101530.
- [34] Machura P, Li Q. A critical review on wireless charging for electric vehicles. *Renew Sustain Energy Rev* 2019;104:209–34.
- [35] Lempidis G, Zhang Y, Jung M, Marklein R, Sotiriou S, Ma Y. Wired and wireless charging of electric vehicles: a system approach. In: Proceedings of 2014 4th International Electric Drives Production Conference (EDPC); 2014 Sep–Oct 1; Nuremberg, Germany. IEEE; 2014. p. 1–7.
- [36] ABB. ABB demonstrates technology to power flash charging electric bus in 15 seconds. Report. Zurich: ABB; 2013.
- [37] Miles J, Potter S. Developing a viable electric bus service: the Milton Keynes demonstration project. *Res Transp Econ* 2014;48:357–63.
- [38] Pamula T, Krawiec S. Electric buses: a review of selected concepts solutions and challenges. In: Krawiec K, Markusik S, Sierpiński G, editors. Electric mobility in public transport—driving towards cleaner air. Cham: Springer; 2021. p. 71–82.
- [39] ElectriCity. ElectriCity—samarbete kring framtidens elektrifierade transporter. Report. Gothenburg: Lindholmen Science Park; 2020.
- [40] Xie F, Liu C, Li S, Lin Z, Huang Y. Long-term strategic planning of inter-city fast charging infrastructure for battery electric vehicles. *Transp Res E Log* 2018; 109:261–76.
- [41] Liu Y, Wang L, Zeng Z, Bie Y. Optimal charging plan for electric bus considering time-of-day electricity tariff. *J Intell Connected Veh* 2022; 5(2): 123–37.
- [42] Ji J, Bie Y, Zeng Z, Wang L. Trip energy consumption estimation for electric

- buses. *Comms Transp Res* 2022;2:100069.
- [43] Zhang H, Peng J, Tan H, Dong H, Ding F, Ran B. Tackling SOC long-term dynamic for energy management of hybrid electric buses via adaptive policy optimization. *Appl Energy* 2020;269:115031.
- [44] Xu M, Meng Q. Fleet sizing for one-way electric carsharing services considering dynamic vehicle relocation and nonlinear charging profile. *Transp Res B Meth* 2019;128:23–49.
- [45] Xie S, Qi S, Lang K, Tang X, Lin X. Coordinated management of connected plugin hybrid electric buses for energy saving, inter-vehicle safety, and battery health. *Appl Energy* 2020;268:115028.
- [46] Sebastiani MT, Lüders R, Fonseca KVO. Evaluating electric bus operation for a real-world BRT public transportation using simulation optimization. *IEEE Trans Intell Transp Syst* 2016;17(10):2777–86.
- [47] Kunitz 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. *Int J Sustain Transp* 2017; 11(10):707–20.
- [48] Xu Y, Gbolagah FE, Lee DY, Liu H, Rodgers MO, Guensler RL. Assessment of alternative fuel and powertrain transit bus options using real-world operations data: life-cycle fuel and emissions modeling. *Appl Energy* 2015;154:143–59.
- [49] Xylia M, Leduc S, Patrizio P, Kraxner F, Silveira S. Locating charging infrastructure for electric buses in Stockholm. *Transp Res Part C Emerg Technol* 2017;78:183–200.
- [50] Bi Z, Keoleian GA, Ersal T. Wireless charger deployment for an electric bus network: a multi-objective life cycle optimization. *Appl Energy* 2018; 225: 1090–101.
- [51] De Filippo G, Marano V, Sioshansi R. Simulation of an electric transportation system at The Ohio State University. *Appl Energy* 2014;113:1686–91.
- [52] Rogge M, Wollny S, Sauer DU. Fast charging battery buses for the electrification of urban public transport—a feasibility study focusing on charging infrastructure and energy storage requirements. *Energies* 2015;8(5):4587–606.
- [53] Hooftman N, Messagie M, Coosemans T. Analysis of the potential for electric buses: a study accomplished for the European Copper Institute. Report. Brussels: European Copper Institute; 2019.
- [54] Basso R, Kulcsár B, Egardt B, Lindroth P, Sanchez-Diaz I. Energy consumption estimation integrated into the electric vehicle routing problem. *Transp Res Part D Transp Environ* 2019;69:141–67.
- [55] De Cauwer C, Van Mierlo J, Coosemans T. Energy consumption prediction for electric vehicles based on real-world data. *Energies* 2015;8(8):8573–93.
- [56] Vepsäläinen J, Otto K, Lajunen A, Tammi K. Computationally efficient model for energy demand prediction of electric city bus in varying operating conditions. *Energy* 2019;169:433–43.
- [57] Millner A. Modeling lithium ion battery degradation in electric vehicles. In: Proceedings of 2010 IEEE Conference on Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply; 2010 Sep 27–29; Waltham, MA, USA. IEEE; 2010. p. 349–56.
- [58] Wang J, Kang L, Liu Y. Optimal scheduling for electric bus fleets based on dynamic programming approach by considering battery capacity fade. *Renew Sustain Energy Rev* 2020;130:109978.
- [59] Toth P, Vigo D. The vehicle routing problem. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM); 2002.
- [60] Vidal T, Laporte G, Matl P. A concise guide to existing and emerging vehicle routing problem variants. *Eur J Oper Res* 2020;286(2):401–16.
- [61] van Kooten Niekerk ME, van den Akker JM, Hoogeveen JA. Scheduling electric vehicles. *Public Transp* 2017;9(1–2):155–76.
- [62] Teoh LE, Khoo HL, Goh SY, Chong LM. Scenario-based electric bus operation: a case study of Putrajaya. *Malaysia Int J Transp Sci Technol* 2018; 7(1):10–25.
- [63] Rogge M, van der Hurk E, Larsen A, Sauer DU. Electric bus fleet size and mix problem with optimization of charging infrastructure. *Appl Energy* 2018;211: 282–95.
- [64] González LG, Cordero-Moreno D, Espinoza JL. Public transportation with electric traction: experiences and challenges in an Andean city. *Renew Sustain Energy Rev* 2021;141:110768.
- [65] Li L, Lo HK, Huang W, Xiao F. Mixed bus fleet location-routing-scheduling under range uncertainty. *Transp Res B Meth* 2021;146:155–79.
- [66] An K. Battery electric bus infrastructure planning under demand uncertainty. *Transp Res Part C Emerg Technol* 2020;111:572–87.
- [67] Meng Q, Qu X. Bus dwell time estimation at bus bays: a probabilistic approach. *Transp Res Part C Emerg Technol* 2013;36:61–71.
- [68] Liu Z, Yan Y, Qu X, Zhang Y. Bus stop-skipping scheme with random travel time. *Transp Res Part C Emerg Technol* 2013;35:46–56.
- [69] Nordelöf A, Messagie M, Tillman AM, Ljunggren Söderman M, Van Mierlo J. Environmental impacts of hybrid, plug-in hybrid, and battery electric vehicles—what can we learn from life cycle assessment? *Int J Life Cycle Assess* 2014; 19(11):1866–90.
- [70] Messagie M. Life cycle analysis of the climate impact of electric vehicles. *J Life Cycle Assess* 2014;2014:1–14.
- [71] Saxena S, Le Floch C, MacDonald J, Moura S. Quantifying EV battery end-of-life through analysis of travel needs with vehicle powertrain models. *J Power Sources* 2015;282:265–76.
- [72] Chabrier A. Vehicle routing problem with elementary shortest path based column generation. *Comput Oper Res* 2006;33(10):2972–90.
- [73] Zhang L, Zeng Z, Gao K. A bi-level optimization framework for charging station design problem considering heterogeneous charging modes. *J Intell Connected Veh* 2022;5(1):8–16.
- [74] Jiang M, Zhang Y, Zhang Y. Optimal electric bus scheduling under travel time uncertainty: a robust model and solution method. *J Adv Transp* 2021;2021: 1191443.
- [75] Zhang L, Wang S, Qu X. Optimal electric bus fleet scheduling considering battery degradation and non-linear charging profile. *Transp Res E Log* 2021; 154:102445.
- [76] Wu W, Lin Y, Liu R, Jin W. The multi-depot electric vehicle scheduling problem with power grid characteristics. *Transp Res B Meth* 2022;155:322–47.
- [77] Feillet D, Dejax P, Gendreau M, Gueguen C. An exact algorithm for the elementary shortest path problem with resource constraints: application to some vehicle routing problems. *Net* 2004;44(3):216–29.
- [78] Ben Ticha H, Absi N, Feillet D, Quilliot A, Van Woensel T. A branch-and-price algorithm for the vehicle routing problem with time windows on a road network. *Net* 2019;73(4):401–17.
- [79] Irnich S, Desaulniers G. Shortest path problems with resource constraints. In: Desaulniers G, Desrosiers J, Solomon MM, editors. Column generation. Boston: Springer; 2005. p. 33–65.
- [80] Ryan DM, Foster BA. An integer programming approach to scheduling. In: Wren A, editor. Computer scheduling of public transport. Amsterdam: North-Holland Publishing Company; 1981. p. 269–80.
- [81] BusesVolvo. Volvo’s first electric bus now on the roads of Gothenburg. Report. Wacol: Volvo Buses Australia; 2015.
- [82] Zeng Z, Wang S, Qu X. On the role of battery degradation in en-route charge scheduling for an electric bus system. *Transp Res E Log* 2022;161:102727.
- [83] ElectriCity. Routes 55 and EL16 comes to a stop—but ElectriCity keeps on going. Report. Gothenburg: Lindholmen Science Park; 2020.