

封闭式景区纯电动客车调度方法

闫晟煜,程铭杰,田宏策,王洪瑀,周永恒,马博浩

(长安大学 汽车学院,西安 710018)

摘要:为满足封闭式景区纯电动客车(BEV)调度的需要,提出了一种多目标调度模型。以 BEV 购置、发班频次、停靠时间和充电价差等 4 个运营成本最优为目标,基于 UI 规则设计发车时刻表求解算法,运用启发式算法求解车次链集合,设计 BEV 性能测试方案,通过限制试验样车的行驶速度,获得单次往返行程时间,提出 CRUISE 仿真与实车测试相结合的最大往返次数推算方法。以五台山景区南线为实例,验证 BEV 调度模型和求解算法的可行性。结果表明:基于 UI 规则的分时段 BEV 调度求解算法可实现分钟级 BEV 发车时刻表;实例线路的 BEV 购车数求解结果与理想最小购车数的偏差率为 2.99%,求解时间为 0.89 s;在模拟日均客流量为 0.3 万~3.0 万人规模的调度计划时,实际运力供需的最大偏差率为 1.00%。研究成果可用于封闭式景区 BEV 动态调度算法和车数规模测算模型。

关键词:交通运输系统工程;封闭式景区;纯电动客车;多目标调度;成本最优模型;启发式算法
中图分类号:U492.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2025)06-1984-10

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20231277

Scheduling algorithm for battery electric vehicle in closed scenic area

YAN Sheng-yu, CHENG Ming-jie, TIAN Hong-ce, WANG Hong-yu, ZHOU Yong-heng, MA Bo-hao
(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710018, China)

Abstract: To meet the scheduling needs of battery electric vehicle (BEV) in closed scenic areas, a multi-objective scheduling model was proposed. With the goal of optimizing the operating costs of BEV procurement, frequency of departure, stopping time, and charging price difference, a departure schedule solving algorithm was designed based on UI rules. Heuristic algorithms were used to solve the train number chain set, and a BEV performance testing plan was designed. By limiting the driving speed of the test sample vehicle, the single round trip time was obtained, and a maximum round trip calculation method combining CRUISE simulation and real vehicle testing was proposed. Taking the south line of Mount Wutai scenic spot as an example, the feasibility of BEV scheduling model and solution algorithm was verified. The results indicate that the UI rule-based time slot BEV scheduling algorithm can achieve minute level BEV departure schedules. The deviation rate between the calculated number of BEV cars purchased on the example route and the ideal minimum number of cars purchased is 2.99%, with a solution time of 0.89 seconds. When simulating a scheduling plan with a daily passenger flow from 3 000 to 30 000, the

收稿日期:2023-11-20.

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFB3209803);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2021JQ-292);教育部人文社会科学研究项目(21YJC790137);山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目(2023TSGC0335).

作者简介:闫晟煜(1987-),男,副教授,博士.研究方向:公路运输规划,智慧交通运营.E-mail:leo9574@163.com

maximum deviation rate of actual transportation capacity supply and demand is 1.00%. The research results can be applied to the BEV dynamic scheduling algorithm and vehicle scale calculation model for enclosed scenic spots.

Key words: engineering of communication and transportation system; closed scenic area; battery electric vehicle(BEV); multi-objective scheduling; optimal cost model; heuristic algorithm

0 引言

近年来,4A级以上景区游客量持续增加,导致景区内社会车辆也随之增加,为提高运输组织效率,缓解景区内社会车辆的交通拥堵,各景区纷纷实施封闭式交通管理方案。旅游景区是低碳化出行的先行者,在实施封闭式交通管理方案的同时,纯电动客车(Battery electric vehicle, BEV)成为首选运载工具,景区逐步将传统客车替换为BEV,因而有必要建立封闭式景区BEV的调度方法,以支撑封闭式交通管理方案的正常运行。

与传统客车不同,当前BEV仍存在续驶里程和充电时间的限制,导致调度建模需要考虑BEV的动力、能耗和充电性能,如最大往返次数、单次往返时间和充电时间等。封闭式景区BEV调度需基于客流量、续航里程、车辆性能、充电方案等因素,制定发车时刻表以建立车次链,达到车辆有效周转的效果。鉴于景区道路多存在客流量大、陡坡、长纵坡和连续弯道等条件,实施调度前,需要一套完整的BEV性能测试方案^[1,2],以支撑车次调度搭建过程。

BEV调度分为发车时刻表优化和行车计划编制2个部分。制定发车时刻表依赖于发车频率,也有采用拥挤程度^[3]、发车间隔^[4]、车辆满载率^[5]等服务标准作为发车频率的确定依据,如管德永等^[6]分时段提取了具有高频需求量的出行点来建立调度优化模型。BEV行车计划与传统燃油客车有显著差异,BEV需考虑续航里程、车辆性能、充电方案等问题^[7,8],Ceder^[9]、Hassold等^[10]和Amir等^[11]分别以固定成本和运营成本最小为优化目标函数,采用DF函数等启发式算法求解调度问题。针对BEV的充电控制问题^[12],已有研究多采用混合的整数规划模型^[13]、变量微分进化算法^[14];而对于调度发车问题,现有文献多围绕总行程时间最小化^[15,16]、调度行程总成本最小化^[17,18]、路径可靠性最大化^[19,20]等目标展开探究。

封闭式景区的BEV调度问题不需要考虑车辆

满载率、道路拥堵情况、乘客出行路线和BEV车辆性能等因素,但更加注重运营成本的最小化与运行效率的最大化。综上研究,缺乏一种求解精度高的启发式算法用于BEV调度问题;多将BEV与传统客车的性能等同考虑,认为BEV充满电后完全能够承担单日繁重的调度任务,忽略了BEV的动力、能耗和充电性能;未在单日最大往返次数中考虑BEV的制动能量回收(Braking energy recovery, BER)能够回收10%以上电能的优势。本文针对封闭式景区的实际需求,提出一套完整的BEV性能测试方案,以成本最优为目标构建BEV调度优化模型,设计相应算法求解模型,最后以实例景区验证BEV调度方法的可行性。

1 BEV调度模型

景区同线路内使用同批次BEV便于运营管理,景区管理者通常大批量、一次性购置同车型BEV完成车辆更迭和降低运营管理的复杂性。调度任务以服务客流为本,景区客流以运营日为统计单位,每个运营日内含平峰、高峰等客流时段,均需调整BEV发车间隔以充分适配客流时段的变化。每个运营日内,BEV的锂离子动力电池随使用时间的延长会产生微量的放电量衰减^[21],每 1×10^6 km约有5%~7%的衰减率,按照2012年《机动车强制报废标准规定》中对营运客车10年使用年限(6×10^6 km,以先到者为准)的报废要求,预计每年衰减率为3.0%~4.2%,折算到每日衰减率时,可考虑忽略衰减率对调度模型的影响。

因此,建立BEV调度模型时应满足以下条件:①调度方案以运营日为单位制定;②参与调度的BEV车型相同;③不考虑动力电池SOC衰减问题。

1.1 目标函数

发车时刻表是体现BEV运力供给与客流需求平衡的依据,在运营中不仅要满足一定的服务水平,还要避免产生运力资源浪费,使企业运营成本增加。调度所得车队规模决定了车辆购置成

本。降低成本是旅游行业的核心目标。

管理部门通过调研五台山、黄果树景区等多个旅游景区发现, BEV 运营成本 Z 包含 4 部分, 即购置成本 Z_1 、发班频次成本 Z_2 、停靠时间成本 Z_3 和充电价差成本 Z_4 。建立多目标优化模型^[22,23], 在满足供需平衡的同时, BEV 运营成本最小为:

$$Z_{\min} = \sum_{h=1}^4 Z_h \quad (1)$$

1.1.1 购置成本 Z_1

Z_1 由调度中的车次链数量决定。通常每个车次链需要 1 辆 BEV 来完成。每条线路调度只使用单一车型, Z_1 可表示为:

$$Z_1 = M c_1 \quad (2)$$

式中: c_1 为车辆购置单价; M 为车队规模。

M 的确定应考虑景区淡旺季、平高峰时段等需求, 应以旺季高峰时段的运营要求来确定 M , 即确定最苛刻运营条件下的车队规模之后, 方可覆盖全运营周期对车辆的需求。

1.1.2 发班频次成本 Z_2

景区 BEV 在每个班次运营过程中, 都会产生维护费用 c_2 、人工及电耗费用 c_3 和折旧费用 c_4 , 则 Z_2 可表示为:

$$Z_2 = n(c_2 + c_3 + c_4) \quad (3)$$

式中: n 为线路实际安排发班频次。

1.1.3 停靠时间成本 Z_3

在旅游淡季或每日早晨和晚间等游客稀疏时段, 景区 BEV 每次到达换乘站时, 难以做到短时间内满载再出发, 因而需要在换乘站停靠以等待车辆达到满载状态, 增加了排班难度; 若使运力资源得到最大化的利用, 应使 BEV 在换乘站的停靠总时间尽可能缩短。因此, 设车辆在换乘站每分钟停靠的时间成本为 c_1 , 则 Z_3 可表示为:

$$Z_3 = \sum_{i=1}^n c_1 i_w \quad (4)$$

式中: i_w 为班次 i 中 BEV 在换乘站等待的总时间。

1.1.4 充电价差成本 Z_4

实际运营中, 白天的电价高于夜间电价, 为了降低充电成本, 尽量保证夜间补电, 则 Z_4 可表示为:

$$Z_4 = e_d c_5 + e_n c_6 \quad (5)$$

式中: e_d 为所有车辆运营时段内的充电电量; e_n 为所有车辆夜间的充电电量; c_5 为白天电价; c_6 为夜间电价。

1.2 约束条件

所有车型的行车计划表都需要满足班次的时间衔接条件。传统客车的常规调度模型不需要考虑车辆性能, 是由于车辆加满油/气后的续驶里程可满足每个运营日的需求, 不考虑补充燃料的时间, 传统客车无制动能量回收系统(Braking energy recovery system, BERS)也不考虑能量回收。然而, BEV 在调度时的性能表现受制于电池的充/放电能力, 电池的续驶里程和充电时间对调度模型的影响无法忽略, 且 BERS 能够在下坡过程中回收可观的电量, 故 BEV 的调度模型与传统客车不同, 需要在模型约束和求解过程中引入特殊的参数限制, 因而 BEV 还应满足续驶里程的约束条件。

1.2.1 车次链接续约束

一个合理的车次链中, 前序班次的结束时间必须小于后续班次的开始时间且前序班次的结束时间与后续班次之间至少留有 5 min 的场内周转时间。

$$l_{(i+1)s} - l_{ie} \geq 5, \quad i = 1, 2, \dots; \quad l = 1, 2, \dots, M \quad (6)$$

式(6)表示车次链 l 中第 $i+1$ 个班次的开始时间应前置车次链 l 中第 i 个班次结束时间 5 min。

1.2.2 里程约束

假设所选车型在景区运营线路上的最大往返次数 W_{\max} 已知, 每个班次均为线路上一个完整的往返行程, 因而 BEV 在执行完 W_{\max} 个车次后, 需要进行 1 次完整的充电(SOC 达到 100%), 方可继续再运营。参与运营的车辆每个运营日至少充电一次, 则:

$$\frac{l_m}{W_{\max}} \leq l_c \leq \frac{l_m}{W_{\max}} + 1 \quad (7)$$

式中: $l = 1, 2, \dots, M$; $l_c, l_m \in \mathbb{N}^+$; l_m 为车次链 l 中的发车频次; l_c 为车次链 l 中的充电次数。

1.2.3 发车频次约束

线路实际安排班次数量 n 应小于理论需求班次数量 n_1 , 即:

$$n_1 = Q/V \quad (8)$$

$$n \leq n_1 \quad (9)$$

式中: Q 为日客流量; V 为 BEV 最大载客量。

发车时刻表应以 min 为单位, 相邻班次的发车间隔 t_{ij} 应满足如下约束条件:

$$i_s \in \mathbb{N}^+, \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (10)$$

$$t_{ij} \geq 0, \quad (i, j = 1, 2, \dots, n; i = j + 1) \quad (11)$$

$$t_{ij} = i_s - i_j, \quad (i, j = 1, 2, \dots, n; i = j + 1) \quad (12)$$

$$t_{\min} \leq i_s \leq t_{\max}, (i = 1, 2, \dots, n) \quad (13)$$

式中: i_s 为任意班次任务 i 的发车时刻; t_{ij} 为班次 i 与 j 的发车间隔; j_s 为任意班次的发车时刻; t_{\min} 、 t_{\max} 分别为景区每日运营的开始时间、结束时间。

1.2.4 充电价差成本约束

考虑到白天与夜间电价的差异,夜间双枪慢充不仅降低了充电成本,还降低了充电对动力电池寿命的影响,因而 BEV 在每个运营日中的最后一个任务便是夜间充电任务,见式(14)~(16)。

$$l_{dc} \geq 0, (l_{dc} \in \mathbf{N}^+) \quad (14)$$

$$l_{nc} \geq 1, (l_{nc} \in \mathbf{N}^+) \quad (15)$$

$$l_{dc} + l_{nc} = l_c, (l_{dc}, l_{nc}, l_c \in \mathbf{N}^+) \quad (16)$$

式中: l_{dc} 和 l_{nc} 分别为车次链 l 中白天充电的次数和夜间充电的次数。

2 求解算法

2.1 基于 UI 规则的发车时刻表求解算法

2.1.1 UI 规则

对于发车时刻表编制问题,均匀发车间隔规则(UI规则)是最实用的方法之一。UI规则能够快速生成发车时刻表^[24],通过逐分累积乘客数的算法,可消除UI规则不同游客到达率异质性的影响。给定首末班时刻 t_{\min} 、 t_{\max} 和 n_t ,则 t_{ij} 可表示为:

$$t_{ij} = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{n_t}, i, j = 1, 2, \dots, n; i = j + 1 \quad (17)$$

通过UI规则生成的发车时刻表虽然可以满足发车时刻表优化模型中所有约束条件,但是不能使模型的目标函数值达到最小。

2.1.2 发车时刻表求解算法

假设景区每个运营日内各时段的客流到达规律是不变的,将运营时间分成 m 个时段,各时段客流到达率用 $p_k (k = 1, 2, \dots, m)$ 表示,对每个时段采用UI规则生成发车时刻表。时段分段数越多,运力供需越平衡。

发车时刻表求解算法见图1。从时间最早的时段($k=1$)开始生成班次,通过时段 k 的游客到达率 p_k 和总时间计算出该时段的理论客流量,见式(18);根据 Q_k 计算时段 k 的理论排班数 n_{tk} ,见式(19);根据UI规则计算发车间隔,见式(20);根据已在场站中等待的游客数量 q 和游客到达率 p_k 确定时段 k 第1个班次开始时间,再根据开始时间,均匀分配 n_{tk} 个班次,见式(21)(22);每个班次开始时间与结束时间的关系见式(23);最后,计算时段 k 中未乘车的游客数量(即已在场站中等

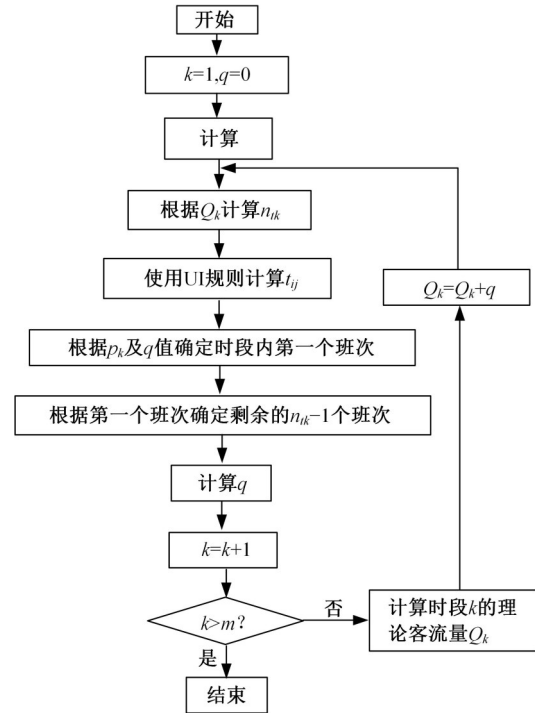


图 1 发车时刻表求解算法

Fig. 1 Algorithm for solving departure timetable

候的游客数量),并将其加入下一时段的理论游客量中,见式(24)。

$$Q_k = p_k \frac{t_{\max} - t_{\min}}{m}, k = 1, 2, \dots, m \quad (18)$$

$$n_{tk} = Q_k / V, k = 1, 2, \dots, m \quad (19)$$

$$t_{ij} = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{n_{tk}}, i, j = 1, 2, \dots, n; i = j + 1 \quad (20)$$

$$i_s = \frac{V - q}{p_k}, k = 1, 2, \dots, m; i = 1, 2, \dots, n \quad (21)$$

$$j_s = i_s + t_{ij}, i, j = 1, 2, \dots, n; j = i + 1 \quad (22)$$

$$i_e = i_s + 2t_1 + t_2 + t_3 \quad (23)$$

$$Q_k = Q_k + q, k = 1, 2, \dots, m \quad (24)$$

式中: n_{tk} 在计算过程中只保留整数部分; i_s 为 k 时段内第1个班次的开始时间; t_1 为 BEV 接送乘客换乘所需时间; t_2 为机务休息时间; t_3 为1个班次行驶所需时间。

采用上述算法时,将每个时段的时间缩小至 1 min,求解所得的发车时刻表将为最优解。

2.2 启发式求解算法

目前主流的求解算法有枚举类算法、两阶段算法、列生成法、搜索类算法、智能启发式算法。枚举类算法在大规模调度问题中,生成的可行车次链达几十万条甚至上百万条,虽然枚举出所有可行车次

链,但是实际应用中不宜选择;两阶段算法只能用于中小规模的调度问题;列生成法求解时间较长;搜索类算法(如遗传算法)不仅只能得到1个近似最优解,而且求解难度也会随着调度规模的增大而成倍增大;智能启发式算法求解速度较快,但求解精度不高,车次链求解需满足高精度的要求。

逆差算法(Deficit function, DF)是一种用于求解调度车队规模的精确求解算法。常规调度算法需先使用逆差函数求解最小车队规模 M_{min} ,再运用调度算法求解发车时刻表。逆差函数只能用于求解 M_{min} ,但不能求解发车时刻表。本文针对 BEV 调度模型,提出改进启发式算法直接求解发车时刻表,无需逆差函数求解 M_{min} ,所得发车时刻表中车次链的数量即车队规模,在保证求解速度的前提下,能够提高车次链集合的求解精度。

启发式算法认为 BEV 调度问题是每个班次在众多不完整的车次链中“对号入座”的过程,即发车班次对车次链的选择过程,算法流程见图 2。

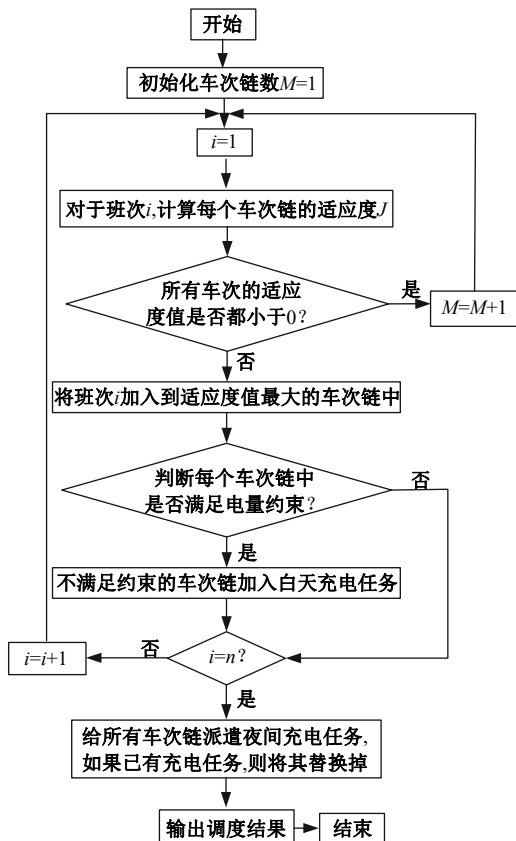


图 2 启发式算法流程图

Fig. 2 Flow chart of heuristic algorithm

图 2 中的适应度算法为:

$$J_i = \frac{1020 - T_k}{2t_1 + t_2 + t_3} + \frac{i_s - l_{isc}}{0.1} \quad (25)$$

式中: l_{isc} 为车次链 l 中最后 1 个班次或充电任务的结束时间; T_k 为 BEV 完成 1 次完整充电所需时间。

若车次链 l 不满足时间或里程约束,则适应度将会被赋予 1 个极大的负整数;常数 0.1 是通过大量实验迭代得到的最优值,即该常数取 0.1 时调度所得车队规模最小,参数最优化过程见图 3。

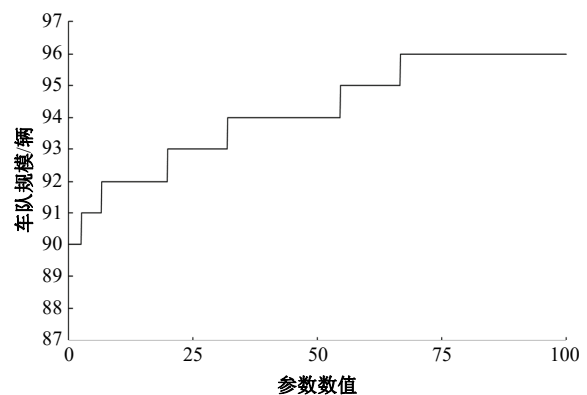


图 3 参数最优化过程

Fig. 3 Parameter optimization process

3 BEV 性能测试方案及案例分析

3.1 测试方案

BEV 用于封闭式景区运营需要的基本参数有 Q 、 p_k 、 t_{max} 、 t_{min} 、 W_{max} 、 V 、 T_m 、 T_k 、 t_1 、 t_2 和 t_3 等参数。 W_{max} 、 t_3 需通过线路测试获得,故提出 BEV 性能测试方案以满足景区的运营需求。

根据景区路况勘测及路谱数据分析,考虑线路的加速、制动和电耗性能来确定 W_{max} 、 t_3 。试验样车需 SOC 达到 100%,完成模拟加载,加载方式为模拟乘客质量。按照座椅布置,除驾驶员外,理论每人按 68 kg 加载(每名乘客 65 kg+背包 3 kg),结合 BEV 整备质量模拟车辆满载状况。

往返行程中包含上坡、下坡路段,以每次往返行程为单位开展测试。将测试坡道分为 3% 以内坡道、3.0%~8.0% 坡道和 8.0% 以上坡道 3 类典型坡道,坡道长度越长对测试结果越有利。测试时将 BEV 的速度范围予以规定,测试方法见表 1。

按照表 1 的安全车速,待 SOC 值降低至 20% 时终止测试。测试过程中,通过安装在 BEV 上的 VBOX 3i 设备采集车速数据,在车辆规定负载下开展 4 次测试得到 t_3 。

W_{max} 与 BEV 的 SOC 值有关。实车测试时,

表 1 BEV 的行驶车速要求

Table 1 Driving speed requirement of BEV

弯道分类	坡度	上坡车速/ (km·h ⁻¹)	下坡车速/ (km·h ⁻¹)
多弯道 路段	3%以内	[30,70]	[40,70]
	3%~8%	[20,60]	[30,50]
	8%以上	[20,50]	[20,40]
少弯道 路段	3%以内	[40,80]	[40,80]
	3%~8%	[30,60]	[40,60]
	8%以上	[20,40]	[30,50]

BEV 在上坡行程时 SOC 值下降快,在下坡行程中开启 BERS。BERS 在下坡行程可反拖电机对电池充电,节约 SOC 存量,通常 BERS 电能回收率为 10%~15%^[25]。由于景区坡道条件通常较为复杂,BEV 整车电耗和 BERS 对电量的节约均需要通过实测和模拟分析来确定,因而采用 CRUISE 搭建车辆动力学模型,模拟最为省电、最为耗电的 2 种极限工况下电耗经济性^[26],如图 4 所示。

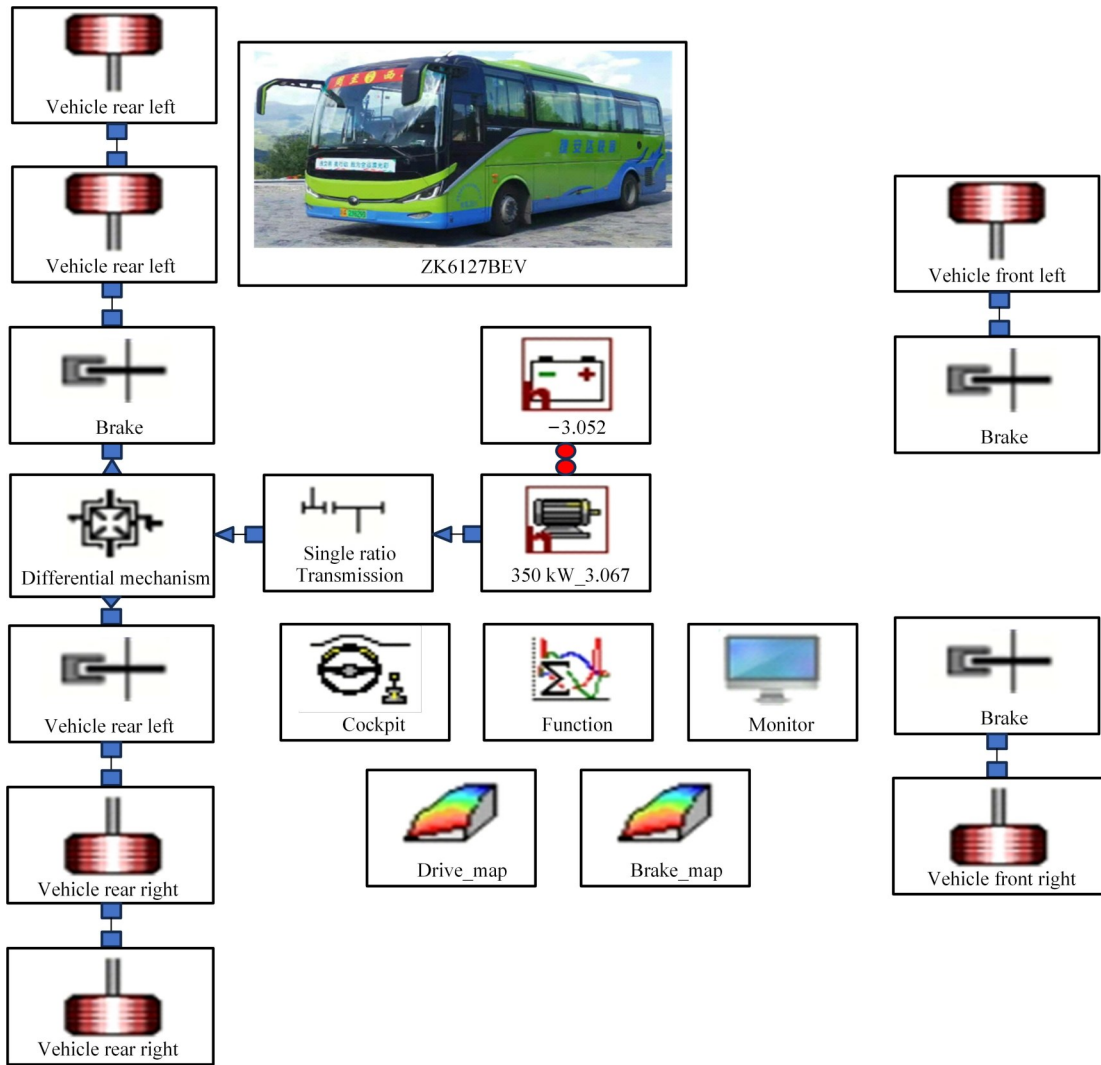


图 4 电耗经济性 CRUISE 模型

Fig. 4 Model of electricity consumption on CRUISE

根据 CRUISE 仿真结果初步评估 2 种极限工况下 BEV 的 SOC 值消耗,最低电耗工况的最大往返次数计为 W_1 ,最高电耗工况的最大往返次数计为 W_2 。选择合适主减速比的试验样车,不开空调,开启 BERS,监控电池和电机系统温度,防止过温过载,全程记录车速和电耗情况。通过 CAN 总线采集实时输出电流、SOC 值,记录每次往返

测试后的 SOC 值。重复以上过程 4 次,得到 4 组测试的最大往返次数平均值计为 \bar{W} 。根据 2 次 CRUISE 仿真结果和 4 次实车测试的平均值计算 W_{max} ,计算公式为:

$$W_{max} = \frac{W_1 + 4\bar{W} + W_2}{6} \quad (26)$$

3.2 案例分析

以五台山景区南门至景区中心台怀镇的 BEV 运营路线为例,基于调度结果验证算法可行性。

3.2.1 样车与线路基本参数

在 BEV 生产厂家车辆型谱内,选取能够有效完成景区单日多次满载运营的 BEV 车型,试验样车的基本参数见表 2。

表 2 BEV 车型基本参数

Table 2 Basic parameters of the tested BEV

试验样车	型号与技术参数
车型	ZK6127BEV
整备质量/kg	10 600
长×宽×高/(mm×mm×mm)	11 970×2 550×3 635
动力电池额定功率/(kW·h)	350
座位数/座	49+1
驱动电机型号	TZ400XSYPB49
开启空调的续航里程/km	305

加载试验以 30 kg 水桶计,共装载水桶 114 个,水桶固定且均匀分布在车厢地板上。通过实施 BEV 性能测试方案,对试验样车在景区南线开展测试。在求解发车时刻表之前,基于南线基本运营规则和历史客流数据,得到分钟级的客流量是运力供需适配程度的前提。采用 320 kW 直流双枪充电桩,白天采用单枪快充,夜间采用双枪充电,参数见表 3。

表 3 南线基本运营参数与充电桩参数

Table 3 Basic parameters of the south line and charging pile

参数	数值
$Q/(人 \cdot 日^{-1})$	24 000
$W_{max}/次$	3
t_1/min	6
t_2/min	20
t_3/min	70
320 kW 直流单枪快充电流/A	500
320 kW 直流双枪充电电流/A	250
320 kW 直流单枪快充功率/kW	320
320 kW 直流双枪充电功率/kW	160

表 3 充电桩参数中,单枪、双枪的充电时间分别为 1.21、2.41 h,充电时间算法为:

$$T_{k(m)} = \frac{60\%C}{P_{1(2)}} + \frac{15\%C}{50\%P_{1(2)}} + \frac{5\%C}{25\%P_{1(2)}} \quad (27)$$

式中: $T_{k(m)}$ 为单/双枪充电时间; C 为 BEV 电池容量; $P_{1(2)}$ 为单/双枪充电功率。

3.2.2 发车时刻表求解分析

将车型、运营和充电桩参数数据代入发车时刻表优化模型,采用基于 UI 规则的求解算法且依托 Visual Studio 2022 编写程序,景区每日运营时间为 6:00~23:00,将运营时段分为 1 020 个时段(每分钟为 1 个时段),精确求解最优发班频次为 489 个。

Oukil 等^[27]提出采用列生成、变量预处理和稳定变量相结合的方法,用于求解大规模多车场的调度问题,实际上该方法是一种整数规划类的精确求解方法,在求解速度和大规模运算能力上有一定局限性。为展现本文改进的启发式算法、整数规划类的加速列生成算法与运力需求的适配状况,将全天运营时段按照每 30 min 分成 34 段,计算南线从开始运营至结束期间的运力供给,并统计南线每 30 min 的客流量(即运力需求),绘制景区南线的运力供需适配图,见图 5。

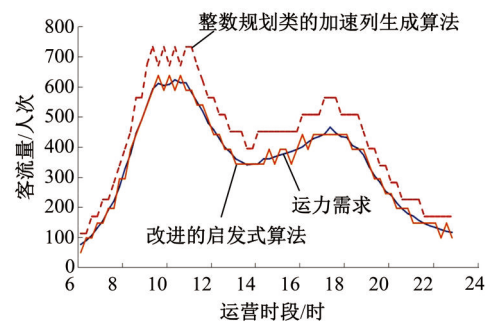


图 5 运力供需适配图

Fig. 5 Balance of transportation capacity supply and demand

采用 Pearson 相关系数 ρ 衡量运力供需情况,当 ρ 在 0.80~1.00 区间时供需适配结果为强相关。根据图 5 的数据,得到 ρ 为 0.998 6,该数值体现了发车时刻表的求解精度,表明 BEV 的运力供给围绕运力需求波动,波动幅度小且调度发车间隔响应及时,验证了 BEV 调度算法的可行性。求解的车队规模与常规调度模型中逆差函数 DF 求得的结果只相差 2.90%,且改进启发式算法的求解速度快,对于多数封闭式日均客流量不超过 6 万的 5A 景区,调度问题不到 1 s 即获得结果。

为便于在图 5 中同时对 2 种求解算法,将整数规划类的加速列生成算法形成的运力供给线(虚线)在图 5 中整体向上抬高一些。由该求解算法得到运力需求与运力供给的 ρ 为 0.891 1,虽然供需适配结果仍为强相关,但求解精度明显低于

改进的启发式算法^[28]。求解速度上,通过多次调试,整数规划类的加速列生成算法最快需要 21 min 方可得到最优求解结果,与改进的启发式算法的求解速度相比,明显运算效率较低。

3.2.3 调度计划结果及分析

基于 4.1 节参数值,取充电时间保守值,在 6:00~23:00 运营时间内采用 100% 功率的单枪快充,取白天单枪充电所需时间为 1.21 h,取夜间双枪充电所需时间为 2.41 h。采用 Visual Studio 2022 编程求解南线调度问题,求解时间约为 0.89 s,调度排班计划结果见图 6。

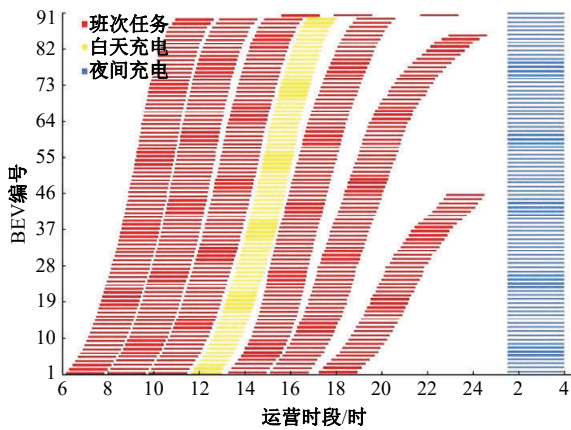


图 6 调度排班计划甘特图

Fig. 6 Gantt chart of scheduling

南线基于平均发车间隔的最小 BEV 购置数为 100.49 辆,而调度结果显示,当所有参与调度的 BEV 均在夜间充电时,南线所需的最小 BEV 车辆数为 $90 \times 1.15 = 103.50$ 辆,表明调度模型具有可靠的精度,较理想最小购车数的偏差率仅为 2.99%,见图 7。

BEV 调度模型与传统客车的常规调度模型区别不大,特点是在里程约束中引入 W_{max} ,由

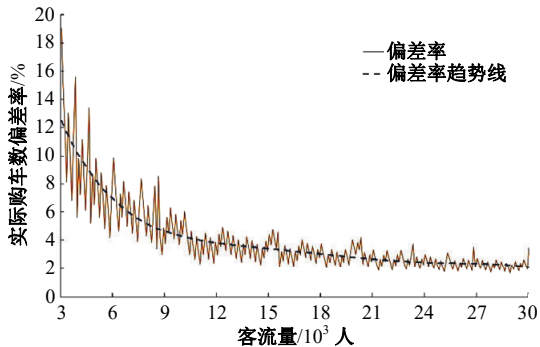


图 7 不同客流量下的实际购车数偏差率

Fig. 7 Deviation rate of actual vehicle purchases under different of passenger flow

W_{max} 计算 t_c 的范围,比常规调度模型多了 1 个约束条件。当 W_{max} 明显不足时,可通过增加 M 来解决,以保证 BEV 调度模型的可行性。

常规调度模型的 t_3 由往返里程与平均速度之比获得,而在 BEV 调度模型中,发车时刻表求解过程中的 t_3 来源于实测试验,原因在于封闭式景区常为山地路段,对上坡、下坡均有车速管理要求,开展 BEV 的动力和制动性能模拟及测试可提取更准确的 t_3 。经南线实测,常规算法的 t_3 为 64 min,由实测方案计算的 t_3 为 70 min(见表 3), t_3 迟滞主要是路段限速和 BEV 加速能力的限制,此法可提高 t_3 的精度 9.38%。

3.2.4 算法稳定性分析

通过程序计算每日客流量从 3 000 人变化至 30 000 人的过程中,实际购车数、均匀发车间隔下最小购车数、实际运力供给、实际运力需求 4 个数值的变化,见图 8。

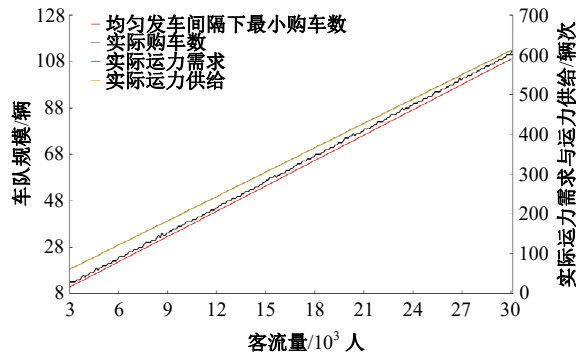


图 8 算法稳定性验证图

Fig. 8 Algorithm stability verification chart

由图 8 可见,随着每日客流量的增大,实际运力供给与实际运力需求曲线始终保持基本重合态势,二者最大偏差率仅为 1.00%;该 BEV 调度模型适应上万级客流的场景,单日客流量越大,模型精度越高;实际购车数并未偏离均匀发车间隔下理论最小购车数的趋势,表明基于 UI 规则的分段式 BEV 发车时刻表调度算法具有良好的求解稳定性。

虽然封闭式景区每个运营日的客流量不同,但客流到达规律基本一致。基于 UI 规则,将运营日划分为小时时段后,可在每 1 h 内搭配合适的均匀发车间隔,因而该 BEV 调度模型适用于每小时客流到达规律较为均匀的封闭式景区大规模 BEV 调度场景。由于采取封闭式管理,BEV 不受社会车流的影响,提供可靠的 t_3 可保证 M 与 n 良

好的协调关系。图 8 中实际购车数与实际运力需求的间距逐渐缩短,表明单日客流量越大,模型精度越高,该 BEV 调度模型适用于多数封闭式景区客流量大且客流到达规律复杂的情形,以及拥有上万级客流量且采取封闭式管理的各类景区运营场景。

4 结 论

(1)五台山景区南线 BEV 调度验证表明,基于 UI 规则的调度求解算法合理且高效,具有良好的稳定性、收敛性,适用于解决封闭式景区 BEV 大规模调度问题和日客流到达规律复杂的场景。

(2)当每日客流量为 2.4 万人规模下时, BEV 调度求解算法偏差率为 2.99%,求解时间 < 1 s,算法精度高且运行效率高。通过模拟改变客流量规模,分析求解算法的稳定性,实际运力供需的最大偏差率仅为 1.00%。

(3)基于启发式算法的求解结果中实际购车数的偏差率有随客流量增加而减少的趋势,本文暂未考虑环境温度、电池容量衰减、BEV 运行工况等因素产生的微观影响。

(4)现阶段,调度计划滞后于客流量的变化,以运营日为单位制定的行车计划表已不能完全满足封闭式景区平峰、高峰小时时段内的实时调度要求,在下一步研究中,将着重探索智能 BEV 与实时调度在封闭式景区内的应用问题。

参考文献:

- [1] 汪洋,田韶鹏.纯电动城市客车动力参数匹配与优化分析[J].武汉理工大学学报:信息与管理工程版,2015,37(6):688-692.
Wang Yang, Tian Shao-peng. Dynamic parameter matching and optimization analysis of pure electric city bus[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Information and Management Engineering Edition), 2015, 37(6): 688-692.
- [2] 朱凌,王秋成.空间几何约束下新能源汽车驱动系统协调控制方法[J].吉林大学学报:工学版,2022,52(7):1509-1514.
Zhu Ling, Wang Qiu-cheng. New energy vehicle drive system coordinated control method under spatial geometric constraints[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52(7): 1509-1514.
- [3] 王雪然,刘文峰,李斌,等.考虑服务水平的纯电动快速公交发车间隔优化研究[J].交通运输系统工程与信息,2017,17(1):171-175.
Wang Xue-ran, Liu Wen-feng, Li Bin, et al. Research on optimization of departure interval of pure electric rapid bus considering service level[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information, 2017, 17(1): 171-175.
- [4] 朱文韬,钱国敏,马东方,等.考虑路上游停靠站影响的公交延误模型[J].浙江大学学报:工学版,2020,54(4):796-803,815.
Zhu Wen-tao, Qian Guo-min, Ma Dong-fang, et al. Bus delay model considering influence of stop at upstream of intersection[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2020, 54(4): 796-803, 815.
- [5] 陈治亚,欧阳灏,徐光明,等.基于出行可靠性的城轨线路多时段发车频率优化[J].铁道科学与工程学报,2022,19(12):3526-3535.
Chen Zhi-ya, Ouyang Hao, Xu Guang-ming, et al. Optimization of multi time departure frequency of urban rail transit lines based on travel reliability[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(12): 3526-3535.
- [6] 管德永,吴晓芳,赵杰,等.需求响应型公交车辆调度及路径优化[J].公路交通科技,2022,39(5):140-148.
Guan De-yong, Wu Xiao-fang, Zhao Jie, et al. Demand response bus dispatching and route optimization [J]. Highway Traffic Science and Technology, 2022, 39(5): 140-148.
- [7] 沈吟东,陈晨.电动公交车辆调度问题研究综述[J].物流科技,2021,44(4):62-66.
Shen Yin-dong, Chen Chen. Overview of research on the dispatching problem of electric bus vehicles[J]. Logistics Technology, 2021, 44(4): 62-66.
- [8] 王晓娟,刘磊,王井邵.考虑纯电动公交车续航里程的行车计划编制方法[J].城市公共交通,2021(9):39-43.
Wang Xiao-juan, Liu Lei, Wang Jing-shao. Method for developing a driving plan considering the range of pure electric bus vehicles[J]. Urban Public Transport, 2021(9): 39-43.
- [9] Ceder A A. Public-transport vehicle scheduling with multi vehicle type[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2011, 19(3): 485-497.
- [10] Hassold S, Ceder A A. Public transport vehicle scheduling featuring multiple vehicle types[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2014, 67

- (2): 129-143.
- [11] Amir M F, Mostafa H, Reza T. Red deer algorithm (RDA): a new nature-inspired meta-heuristic[J]. *Soft Computing*, 2020, 24(19): 1-29.
- [12] Liu Wei-li, Gong Yue-jiao, Chen Wei-neng, et al. Coordinated charging scheduling of electric vehicles: a mixed-variable differential evolution approach[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, 99(10): 1-16.
- [13] 李斌, 刘畅, 陈慧妙, 等. 基于混合整数规划的电动公交车快速充电站有序充电策略[J]. *电网技术*, 2016, 40(9): 2623-2630.
- Li Bin, Liu Chang, Chen Hui-miao, et al. Ordered charging strategy of electric bus rapid charging stations based on hybrid integer programming[J]. *Power Grid Technology*, 2016, 40(9): 2623-2630.
- [14] 杨少兵, 吴命利, 姜久春, 等. 快换式电动公交充电站经济运行优化策略[J]. *电网技术*, 2014, 38(2): 335-340.
- Yang Shao-bing, Wu Ming-li, Jiang Jiu-chun, et al. Optimization strategy for economic operation of fast swap electric bus charging stations[J]. *Power Grid Technology*, 2014, 38(2): 335-340.
- [15] Zhang R Y, Liu Z J, Feng X H. A novel flexible shuttle vehicle scheduling problem in scenic areas: Task-divided graph-based formulation and algorithm[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, 156(6): No. 107295.
- [16] Costa A, Fernandez-viagas V, Framinan J M. Solving the hybrid flow shop scheduling problem with limited human resource constraint[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2020, 146(8): No. 106545.
- [17] Wu W T, Lin Y, Liu R H, et al. The multi-depot electric vehicle scheduling problem with power grid characteristics[J]. *Transportation Research Part B*, 2022, 155(1): 322-347.
- [18] Yao J, Shao C W, Xia X M, et al. A multi-objective emergency vehicle scheduling optimization model[J]. *International Journal of Sensor Networks*, 2020, 34(4): 236-243.
- [19] Mo Y D, Lam Y H, Xu W K, et al. Design of flexible vehicle scheduling systems for sustainable paratransit services[J]. *Sustainability*, 2020, 12(14): 1-18.
- [20] Lin Y. VSSHA: A vehicle scheduling scheme for tourist attractions based on intelligent heuristic algorithm[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1802(3): No. 032048.
- [21] 梁海强, 何洪文, 代康伟, 等. 融合经验老化模型和机理模型的电动汽车锂离子电池寿命预测方法研究[J]. *汽车工程*, 2023, 45(5): 825-835, 844.
- Liang Hai-qiang, He Hong-wen, Dai Kang-wei, et al. Research on lithium ion battery life prediction method based on empirical aging model and mechanism model for electric vehicles[J]. *China Journal of Highway Transportation*, 2023, 45(5): 825-835, 844.
- [22] Gkiotsalitis K, Berkum V E. An exact method for the bus dispatching problem in rolling horizons[J]. *Transportation Research Part C*, 2020, 110(1): 143-165.
- [23] Palma D A, Kilani M, Proost S. Discomfort in mass transit and its implication for scheduling and pricing[J]. *Transportation Research Part B*, 2015, 71(1): 1-18.
- [24] Ceder A, Hassold S, Dano B. Approaching even-load and even-headway transit timetables using different bus sizes[J]. *Public Transport*, 2013, 5(3): 193-217.
- [25] 靳立强, 孙志祥, 王熠, 等. 基于模糊控制的电动轮汽车再生制动能量回收研究[J]. *汽车工程*, 2017, 39(10): 1101-1105, 1197.
- Jin Li-qiang, Sun Zhi-xiang, Wang Yi, et al. A research on regenerative braking energy recovery of electric-wheel vehicle based on fuzzy control[J]. *Automotive Engineering*, 2017, 39(10): 1101-1105, 1197.
- [26] 李浩, 陈浩. 考虑充电排队时间的电动汽车混合交通路网均衡[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2021, 51(5): 1684-1691.
- Li Hao, Chen Hao. Mixed traffic network equilibrium with battery electric vehicles considering charging queuing time[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2021, 51(5): 1684-1691.
- [27] Oukil A, Amor H B, Desrosiers J, et al. Stabilized column generation for highly degenerate multiple-depot vehicle scheduling problems[J]. *Computers & Operations Research*, 2007, 34(3): 817-834.
- [28] 闫晟煜, 赵佳琪, 尤文博, 等. 高速公路货车差异化通行费折扣的双层规划模型[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2025, 65(7): 1347-1358.
- Yan Sheng-yu, Zhao Jia-qi, You Wen-bo, et al. Bi-level programming model for differentiated toll discounts for expressway trucks[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2025, 65(7): 1347-1358.