

考虑有序充电策略的多车型电动公交调度优化

张明业, 杨敏, 黎彧, 黄世玉, 李清韵

(东南大学交通学院, 南京 211189)

摘要:为解决时空客流不均衡带来的供需失衡问题,提出一种基于客流变化特征的多车型电动公交车调度优化方法。针对不同类型电动公交车辆的运营特性差异,考虑分时电价和有序充电策略,建立多车型电动公交车调度模型,协同优化车辆行车计划、充电方案及车队配置。设计遗传算法求解模型,并以南京市部分线路为例验证模型效果。案例表明:与仅采用小型车和大型车的调度方案相比,多车型调度方案的系统总成本分别降低 8.26% 和 11.25%,证明本文方法不仅能提高公交服务水平,而且可有效降低公交系统运营成本,其中充电成本下降 25.63%,表明有序充电策略能够充分利用低电价区间。灵敏度分析表明,单位时间成本和折旧成本系数是影响多车型车队构成的重要因素。

关键词:交通运输系统工程;电动公交调度;多类型车辆;充电策略;分时电价

中图分类号:U491 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2024)05-1293-09

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20220820

Optimal electric bus scheduling with multiple vehicle types considering coordinated recharging strategy

ZHANG Ming-ye, YANG Min, LI Yu, HUANG Shi-yu, LI Qing-yun

(College of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: To solve the problem of supply-demand mismatch caused by the imbalance of time-space passenger flow, this paper proposes an electric bus scheduling method with multiple vehicle types based on the characteristics of passenger flow variety. In view of the operating characteristics difference of multiple vehicle types, considering the time-of-use electricity price and coordinated charging strategy, an electric bus scheduling model is established to jointly optimize the vehicle driving plan, charging scheme and fleet configuration. A genetic algorithm model is designed to solve the problem, and a network in Nanjing are taken as examples to verify the effect of the model. compared with the small and large type scheduling scheme, the total system cost of the scheduling scheme with multiple vehicle types is reduced by 8.26% and 11.25%, respectively. The results show that the proposed method can not only improve the public transport service level, but also effectively reduce the operation cost of the public transport system.

Key words: engineering of communications and transportation system; electric bus scheduling; multiple

收稿日期: 2022-06-28.

基金项目: 国家自然科学基金项目(52072066); 江苏省杰出青年科学基金项目(BK20200014).

作者简介: 张明业(1994-), 男, 博士研究生. 研究方向: 公交调度. E-mail: 230218920@seu.edu.cn

通信作者: 杨敏(1981-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 城市公共交通系统规划理论与方法, 多方式智慧出行服务.

E-mail: yangmin@seu.edu.cn

vehicle types; charging strategy; time of use price

0 引言

电动公交车作为一种绿色的出行工具,在节约石油资源、减少有害气体排放方面效果显著。不同于燃油车辆,电动公交车具有续航里程短、充电时间长等特点,车辆往往在白天充电以满足运营需求。对电动公交而言,制订合理的运营调度计划,优化充电策略,对提高公交系统运营的经济性、促进公交电气化具有重要的意义。常用的无序充电策略无法充分利用低电价区间,且调度方式不灵活。为此,本文提出有序充电策略,即响应分时电价机制,在空闲时间为车辆充电,以降低车队规模,减少充电成本,在此基础上,协同优化电动公交车的行车计划和充电方案。此外,目前大多数线路仍采用单一车型的运营模式,无法适应客流变化,造成了资源的浪费和服务水平的降低。基于多车型的电动公交调度可根据客流需求优化调度方案,进而提高公交服务质量,并降低公交系统运营成本。

目前,电动车辆在公交领域的应用得到国内外学者的广泛关注,关于车辆行车计划、充电策略等已有不少研究成果。唐春艳等^[1]考虑到误时发车影响,构建电动公交柔性调度优化模型;Jiang等^[2]采用鲁棒优化方法解决了行程时距不确定下的电动公交车调度问题,并设计了分支定价算法进行求解;滕靖等^[3]联合优化电动公交时刻表和车辆排班计划,并以发车间隔平滑、使用车辆数少和充电费用低为目标建立多目标优化模型;杨敏等^[4]结合不同动力能源车辆的运行特性,提出一种包括电动公交与燃油公交的混合车队调度方法;Bie等^[5]提出一种考虑行程时间和能量消耗随机波动的电动公交车调度方法,并利用单条公交线路验证了方法的有效性;姚恩建等^[6]以充电任务为约束,建立电动公交区域行车计划模型,并采用遗传算法和贪婪算法对模型进行求解;Wen等^[7]以所需车辆数和空驶距离最小为目标,构建电动公交车优化模型;Tang等^[8]面对城市交通状况的随机性所带来的挑战,为避免电动公交车在途中发生故障,提出一种鲁棒的电动公交车调度策略。然而,上述研究更多地是针对车辆行车计划,未对充电策略进行协同优化,限制了模型的有

效性。

在充电策略方面,目前的研究多为将充电策略与单车型调度结合,对多车型下充电策略的研究较少。其中,Zhang等^[9]以公交系统总运营成本最小为目标,结合电池衰减特性,对电动公交车的服务和充电策略进行优化;王岱等^[10]基于分时电价机制,构建了以电池投资和充电成本之和最小为目标的优化模型;高佳宁^[11]提出考虑分时电价的有序充电策略,在此基础上优化了车辆的行车计划;He等^[12]以总充电成本最小为目标建立模型,优化了快速充电下的电动公交车的充电调度和管理;李长留^[13]结合充电站实际运营数据,构建了一个以充电费用最小化为目标的电动公交充电模型。

综上所述,既有的对于电动公交调度问题大多为单车型的行车计划和充电策略,未考虑不同时段内客流量时空分布不均衡的问题,容易造成高峰期车厢拥挤、平峰期空座率高等问题。然而公共交通的主要服务对象为乘客,故应该从乘客的角度去考虑提升公交服务水平。基于多车型的电动公交运营计划的科学制订有利于公交资源的有效利用,提高运营效率。为降低充电成本,本文结合分时电价机制,提出了有序充电策略,以满足车辆运营所需的电量要求。在此基础上,建立多车型电动公交车调度模型,协同优化车辆行车计划、充电方案及车队配置,并设计了遗传算法对模型求解,以南京市部分线路为例验证模型效果,实验结果验证了模型的有效性。

1 问题描述与模型构建

1.1 问题描述

本文的研究对象是多车型电动公交车队,研究线路有多个车型可供选用,不同车型的电动公交车的差异性体现在车厢容量、电池容量、折旧成本、充电功率等方面,如图1所示。其中, u 为车辆类型的编号; U 为车型数; i 为车次的编号; n 为一天内公交行车计划的总车次数,充电站位于场站内。为简化问题,做出以下假设:①车辆在指定充电站充电,即为单充电站,且充电站空间足够;②车辆行车计划不发生改变,即按照时刻表运行固定的车次;③每次行程耗电量是确定的。

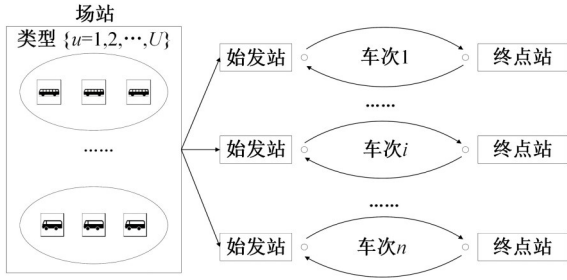


图 1 多车型电动公交调度示意图

Fig. 1 Electric bus scheduling with multiple vehicle types

1.2 模型构建

1.2.1 车辆折旧成本

本文的优化目标是公交系统总成本最小,包括车辆折旧成本、充电成本和拥挤成本 3 部分,其中车辆折旧成本与各类型车辆运行的车次有关:

$$Z_1 = \sum_{k=1}^K \sum_{u=1}^U \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \lambda_{kij} \mu_{k,u} \rho_u \quad (1)$$

式中: Z_1 为车辆折旧成本,元; k 为车辆的编号; K 为可用的车辆数,辆; λ_{kij} 为 0,1 变量,若车辆 k 在车次 i 之后运行车次 j ,则为 1,否则为 0; $\mu_{k,u}$ 为 0,1 变量,若车辆 k 为车型 u ,则为 1,否则为 0; ρ_u 为 u 车型公交车的单车次的折旧成本,元/车次。

系统中可用的车辆数等于各个车型可用的车辆数之和:

$$K = \sum_{u=1}^U K_u \quad (2)$$

式中: K_u 为 u 车型公交车的可用数量,辆。

其中公交网络中使用的车型 u 的车辆数可通过下式计算得到:

$$Y_u = \sum_{k=1}^K \mu_{k,u} y_k \quad (3)$$

式中: Y_u 为公交网络中使用的车型 u 的车辆数,辆; y_k 为 0,1 变量,若车辆 k 被使用,则为 1,否则为 0。

y_k 可通过下式计算得到:

$$y_k = 1 - \max \left\{ 1 - \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \lambda_{kij}, 0 \right\} \quad (4)$$

1.2.2 充电成本

在有序充电策略中,车辆每次结束行程之后都需要判断是否进行充电,以及充电的时间与电量,公交车的充电成本与充电电量及电价有关:

$$Z_2 = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n e_{kij} \omega_{ij} \quad (5)$$

式中: Z_2 为充电成本,元; e_{kij} 为公交车 k 在车次 i 与车次 j 之间的充电电量,kWh; ω_{ij} 为公交车 k 在车次 i 与车次 j 之间的充电电价,元/kWh。

公交车 k 在车次 i 与车次 j 之间的充电电量可通过下式计算得到:

$$e_{kij} = \sum_{u=1}^U \mu_{k,u} \epsilon_u t_{ij} / 60 \quad (6)$$

式中: ϵ_u 为 u 型车的充电功率,kW; t_{ij} 为车次 i 与车次 j 之间的充电时间,min。

公交车在车次结束后的电量为:

$$E_{k,j} = E_{k,i} + e_{kij} - 60 \sum_{u=1}^U \mu_{k,u} \tau_u l_j / v \quad (7)$$

式中: $E_{k,j}$ 为车次 j 结束后的电量,kWh; τ_u 为 u 型车的放电功率,kW; l_j 为车次 j 所在线路的长度,km; v 为车辆平均速度,km/h。

1.2.3 拥挤时间成本

车次 i 的拥挤时间成本可通过下式计算得到^[14]:

$$B_i = \sum_{m=1}^{M-1} \alpha \rho_m l_{m,m+1} (X_m - b_u) / v \quad (8)$$

式中: T_i 为车次 i 的拥挤时间成本,元; α 为单位时间成本,元/h; ρ_m 为拥挤惩罚系数; $l_{m,m+1}$ 为站点 $(m, m+1)$ 之间的距离,km; X_m 为离开 m 站点时的车内人数,人; b_u 为 u 型车的座位数,个。

拥挤惩罚系数 ρ_m 可通过下式计算得到:

$$\rho_m = \begin{cases} 0.0, & X_m \leq 0.8V_u \\ 0.2, & 0.8V_u < X_m < V_u \\ 0.4, & X_m > V_u \end{cases} \quad (9)$$

式中: V_u 为 u 型车的额定载客量,人。

离开 m 站点时的车内人数可通过下式计算得到:

$$X_m = \sum_{h=1}^m (\sigma_{h,i}^a - \sigma_{h,i}^b) t_{f,i} \quad (10)$$

式中: $\sigma_{h,i}^a$ 为行程 i 在站点 h 的上车率,人/min; $\sigma_{h,i}^b$ 为行程 i 在站点 h 的下车率,人/min; $t_{f,i}$ 为车次 i 的发车间隔,min。

总拥挤时间成本可通过下式计算得到:

$$Z_3 = \sum_{i=1}^n B_i \quad (11)$$

式中: Z_3 为拥挤时间成本,元。

1.2.4 目标函数

模型的目标函数为:

$$\min Z = Z_1 + Z_2 + Z_3 \quad (12)$$

s.t.

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n \lambda_{kij} = 1, i \neq j \quad (13)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^n \lambda_{kij} = 1, i \neq j \quad (14)$$

$$Y_u \leq K_u, \forall u \in U \quad (15)$$

$$0 \leq t_{ij} \leq T_j^s - T_i^e - l_{ij}/v, \forall i, j \in n, j > i \quad (16)$$

$$0 \leq e_{kij} \leq E_u - E_{k,i}, \forall i, j \in n, j > i \quad (17)$$

约束(13)及约束(14)表示一次行程只能被一辆公交车服务;约束(15)表示车辆数约束;约束(16)表示充电时间小于两次连续行程之间的空余时间;约束(17)表示充电电量小于公交车辆电池的剩余电量, E_u 为 u 型车的电池容量, kWh。

2 求解算法

电动公交调度优化属于 NP-hard 问题,在本文建立的多车型电动公交调度模型中,随着车次的增加,决策变量的数目随之增大,若采用传统的线性规划方法会带来高昂的计算成本。遗传算法是一种面对优化问题的启发式算法,具有运行速度快、解集收敛性好等优点^[15,16],通常被用于求解电动公交调度问题^[17],为此,本文采用遗传算法对模型进行求解。为了便于说明,以下介绍一些关键步骤。

(1) 编码

本文采用整数编码方式,由于车辆需要在 2 个连续的车次间进行充电,因此,只有在车辆调度计划确定后,才能制订充电计划。

(2) 选择

由于模型中存在多个决策变量,本文采用锦标赛选择策略来寻找最优解。具体而言,每次从种群中抽取一定数量的个体,然后选择最佳个体进入后代种群。重复该操作,直到新的种群大小达到原始种群大小。

(3) 交叉

交叉过程是多点交叉,即在染色体上随机设置多个交叉点。

(4) 适应度计算

如式(12)所示,优化目标为总成本最小,故使用目标函数的倒数作为适应度,适应度最高的染色体即为最优的多车型电动公交调度方案。遗传算法流程图如图 2 所示。

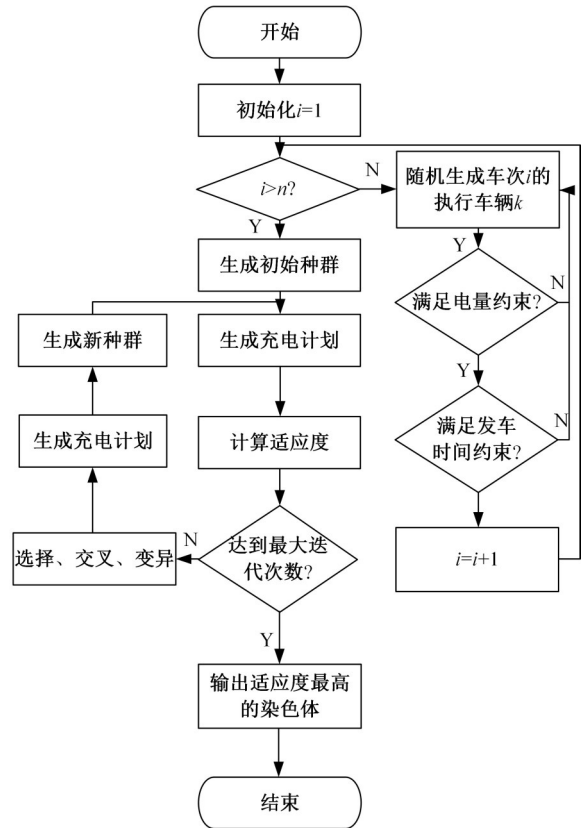


图 2 遗传算法流程图

Fig. 2 Flow chart of genetic algorithm

3 案例分析

3.1 实验背景

本文选取南京市的 68 路和 72 路进行案例分析,2 条线路共用同 1 个充电站,位于月苑南路站点所在的场站内,其中公交运营数据来自南京公交集团,运营时间为 2021 年 10 月,公交网络如图 3 所示。68 路和 72 路的信息如表 1 所示。

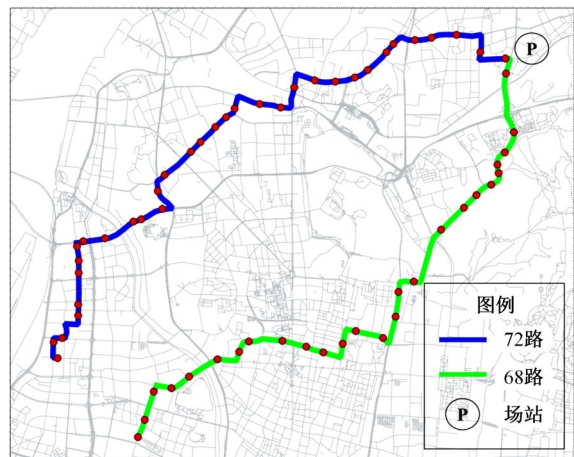


图 3 公交网络示意图

Fig. 3 Schematic diagram of a transit network

表 1 公交线路信息表

Table 1 Bus line information

线路	上行方向运营 时间	下行方向运营 时间	线路长度/ km	车次数
68	5:30~22:00	5:00~22:00	14.8	184
72	5:30~21:10	6:10~22:00	16.0	159

公交车辆的拥挤成本与乘客的到达率有关,以 68 路下行方向为例,高峰期和平峰期的乘客上车率如图 4 所示。高峰期和平峰期的乘客下车率如图 5 所示。

本文用到的多车型电动公交车包括大型车和小型车,车辆参数信息如表 2 所示,参数值的确定参照了 Yao 等^[18]的研究以及实地调研得到。实验用到的参数如表 3 所示。

南京市采用分时电价,一天 24 h 内的分时电价函数(单位:元/kWh)如式(18)所示:

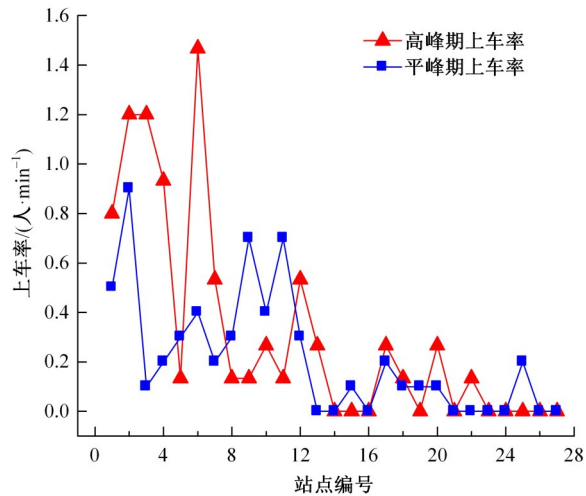


图 4 高、平峰期乘客上车率

Fig. 4 Boarding rates of peak and off-peak period

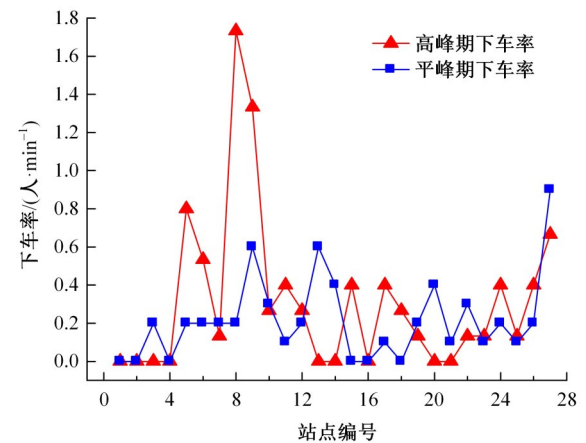


图 5 高、平峰期乘客下车率

Fig. 5 Alighting rates of peak and off-peak period

表 2 多车型电动公交车参数信息

Table 2 Parameters of large and small electric bus type

参数	大型车	小型车
座位数/个	25	15
载客数/人	70	40
折旧成本系数/(元·车次 ⁻¹)	30	18
电池容量/kWh	220	180
能量消耗率/(kWh·km ⁻¹)	1	1
充电功率/kW	150	120

表 3 实验参数表

Table 3 Experimental parameters

参数	含义	数值	参数	含义	数值
U	车型数量	2	K	车辆总数量	45
K_1	小型车数量	25	K_2	大型车数量	20
v	平均运行速度	15	n	车次数	343
α	单位时间成本	6			

$$f(t) = \begin{cases} 0.3, & 0 \leq t < 8 \\ 1.0, & 8 \leq t < 12, 17 \leq t < 21 \\ 0.6, & 12 \leq t < 17, 21 \leq t < 24 \end{cases} \quad (18)$$

3.2 结果分析

本文采用遗传算法对模型进行求解,遗传算法参数设置如下:种群规模为 50,交叉概率为 0.8,变异概率为 0.2,迭代次数为 50,优化后的多车型调度方案如图 6 所示,6 可得,在优化后的多车型公交调度方案中,小型车运营 184 个车次,大型车运营 159 个车次。以车辆 1 为例,行车计划如下:在上午 6:39 运行 68 路上行方向的车次 10,上午 8:30 运行 68 路下行方向的车次 114,上午 10:18 运行 68 路上行方向的车次 33,中午 12:32 运行 68 路下行方向的车次 137 等。

为验证模型的有效性,本文将多车型公交调度方案与单车型调度方案进行对比,包括全部采用大型车和小型车的公交调度方案,方案对比结果如表 4 所示,可得,与全部采用小型车和大型车的调度方案相比,多车型调度方案的总成本分别下降 8.26% 和 11.25%。与大型车调度方案相比,多车型调度方案的折旧成本降低 21.46%,与小型车调度方案相比,拥挤成本下降 46.67%。实验结果表明:构建的模型能够适应客流量的变化,且提高了公交服务水平。由于本文采用有序充电策略,充电成本下降 25.63%,表明本文方案能充分利用低电价区间,降低充电成本。

与传统公交车不同,电动公交车在运行过程中需要满足电量约束,公交车的电量变化如图 7

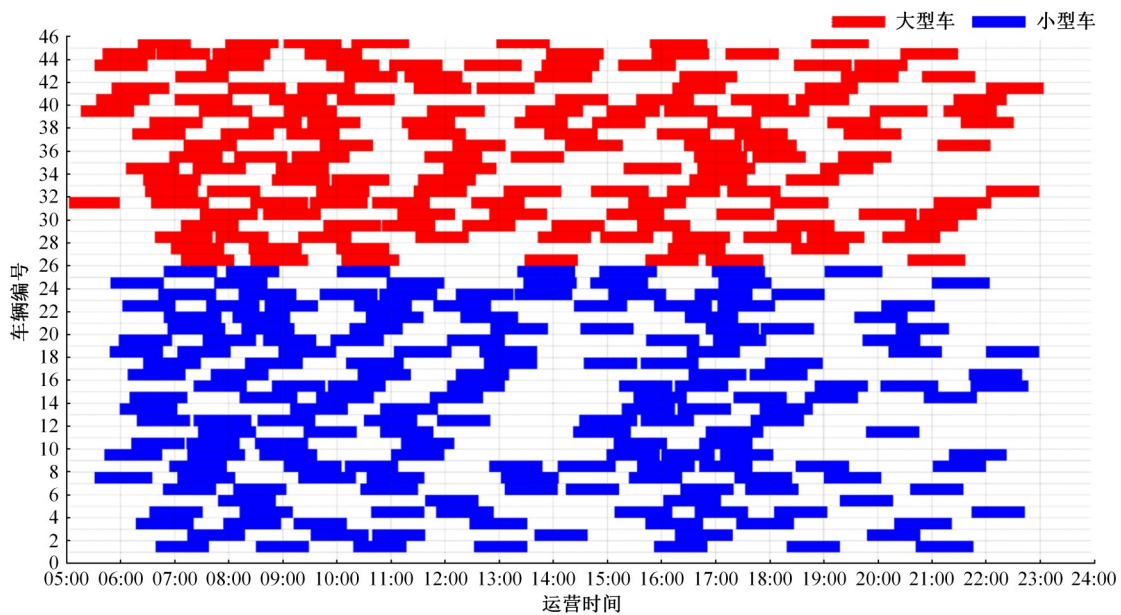


图 6 电动公交调度方案

Fig. 6 Electric bus scheduling scheme

表 4 公交调度方案对比

Table 4 Comparison of electric bus scheduling schemes

方案	折旧成本/ 元	充电成本/ 元	拥挤成本/ 元	总成本/ 元	变化 幅度/%
多车型	8 082	2 803	2 440	13 325	-
小型车	6 174	3 775	4 575	14 524	-8.26
大型车	10 290	3 769	955	15 014	-11.25

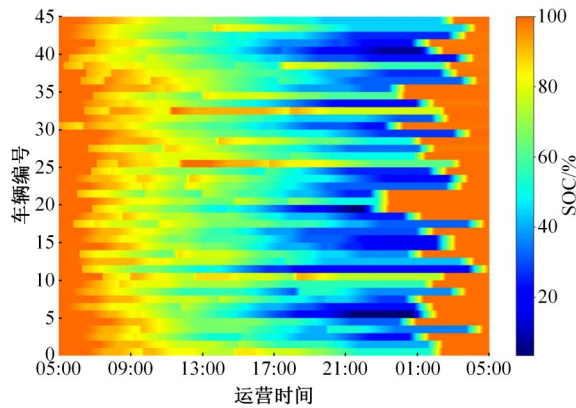


图 7 公交车电量实时变化

Fig. 7 Real-time variation on the electricity amount of buses

所示,可得,随着公交车运行任务车次增多,电池电量逐渐减少。结合分时电价机制,车辆在两个连续车次之间部分充电,以满足电量需求。由于白天电价更高,故车辆在白天的充电时间较短,在一天的任务车次运营结束后,车辆在夜间充满电,进而为第二天的运营做准备。

由于大型车方案的充电成本相比小型车方案

更低,故本文将多车型方案与大型车方案在各电价区间的充电成本进行了对比,如图 8 所示,可得,在多车型部分充电方案中,低电价区间的充电成本占比为 55.97%,而在大型车无序充电方案中,低电价区间的充电成本占比为 4.46%,说明本文方案能更多地利用低电价区间,且有利于降低用电高峰期的电网负荷。

优化后的充电计划如图 9 所示,红色和蓝色表示的是不同时刻车辆的充电功率。由图 9 可得,由于白天电价更高,故车辆在白天部分充电,而夜间电价更低,故夜间充电时间较长。

3.3 灵敏度分析

为增加模型的适用性,本文对关键参数进行灵敏度分析,其中单位时间成本 α 的大小影响拥

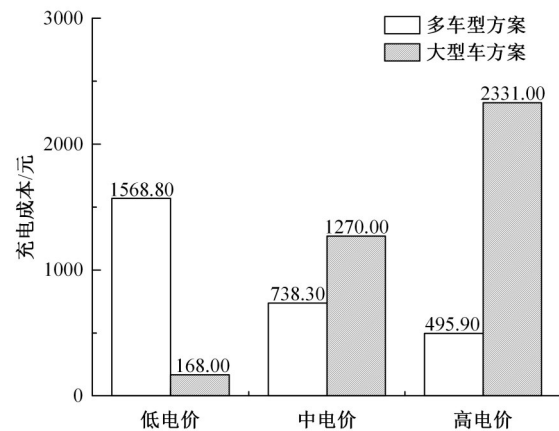


图 8 各电价区间充电成本对比

Fig. 8 Charging costs comparison of the two schemes

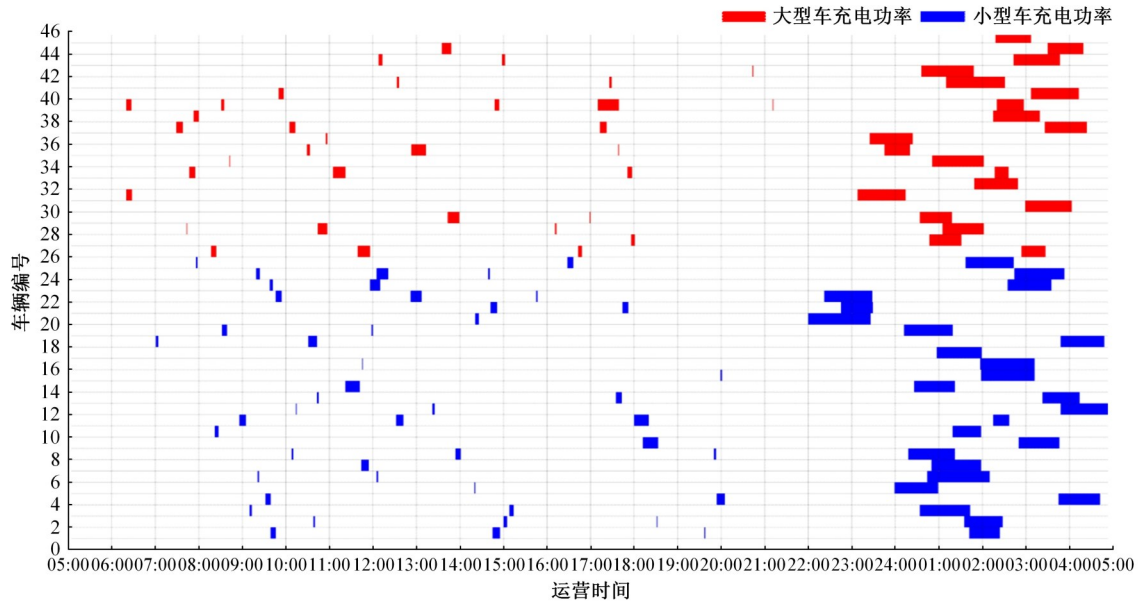


图 9 优化后的充电计划

Fig. 9 Charging plan of the optimal scheduling scheme

挤成本,进而对车型的配置产生影响。因此,首先对不同单位时间成本下的系统总成本进行分析,取值范围为 3~9 元/h,实验结果如图 10 所示,可得,大型车的车厢容量较大,对应的拥挤成本较小,故随着单位时间成本的增加,全部采用大型车的方案优于小型车方案。对于多车型调度方案,单位时间成本对车型配置产生了影响,在单位时间成本较低时,相对于折旧成本,应用小型车依然是更经济的选择,随着单位时间成本的增大,最优方案更多地选用大型车。

此外,本文对大型车和小型车的折旧成本系数进行了分析,其中大型车的折旧成本系数变化范围为 12~24 元/km,小型车的折旧成本系数变

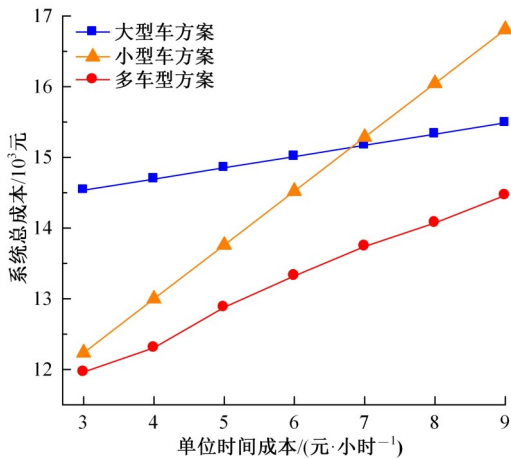


图 10 单位时间成本对系统总成本的影响

Fig. 10 Influence of unit time cost on total system cost

化范围为 24~36 元/km,实验结果如图 11 所示,可得,随着大型车和小型车的折旧成本系数的增加,系统总成本随之增大,在大型车和小型车的折旧成本系数相差过大时,如分别为 36 元/车次和 12 元/车次时,将小型车替换成大型车的成本大于拥挤时间成本,故在此时的多车型调度方案中采用更多的小型车。

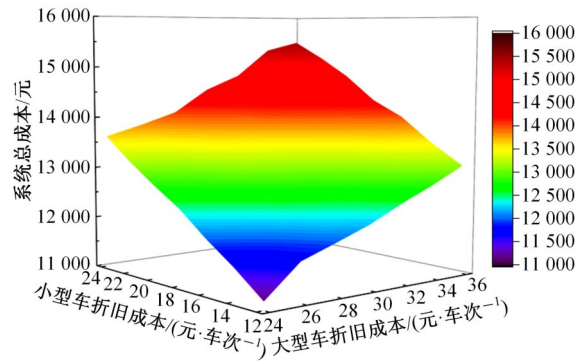


图 11 折旧成本系数对系统总成本的影响

Fig. 11 Influence of depreciation cost coefficient on total system cost

4 结束语

本文提出一种基于客流变化特征的多车型电动公交车调度优化方法,结合不同类型公交车的运行特性,综合考虑分时电价和有序充电策略,协同优化车辆行车计划、充电方案及车队配置,采用遗传算法求解。案例结果表明:多类型车辆不仅能更好地适应客流量的变化,还

能有效提高电动公交的运营效益;有序充电策略充分利用低电价区间,降低充电成本,且能缓解高峰期间用电紧张。灵敏度分析表明:单位时间成本和折旧成本系数对是否将小型车更换成大型车产生影响,单位时间成本较高时,多车型调度方案倾向于运行更多的大型车,以减少拥挤时间成本,反之则配置更多的小型车,以减少折旧成本。下一步,将在此基础上研究随机的能量消耗对建模的影响,考虑充电站内充电桩数目的约束,以提高模型的适用性,使生成的调度方案更加完善。

参考文献:

- [1] 唐春艳, 杨凯强, 邬娜. 单线纯电动公交车柔性调度优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2020, 20(3): 156-162.
Tang Chun-yan, Yang Kai-qiang, Wu Na. Optimizing flexible vehicle scheduling for single-line battery electric buses[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2020, 20(3): 156-162.
- [2] Jiang M, Zhang Y. Optimal electric bus scheduling under travel time uncertainty: a robust model and solution method[J]. Journal of Advanced Transportation, 2021(11): 1191443.
- [3] 滕靖, 林琳, 陈童. 纯电动公交时刻表和车辆排班计划整体优化[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2019, 47(12): 1748-1755.
Teng Jing, Lin Lin, Chen Tong. Optimizing the combination of timetable and vehicle scheduling for pure electric buses[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(12): 1748-1755.
- [4] 杨敏, 黎彧, 王建, 等. 动力能源差异下混合公交车队调度方案生成方法[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2022, 50(3): 328-338.
Yang Min, Li Yu, Wang Jian, et al. Generation method of mixed bus fleet scheduling scheme under power and energy difference[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2022, 50(3): 328-338.
- [5] Bie Y, Ji J, Wang X, et al. Optimization of electric bus scheduling considering stochastic volatilities in trip travel time and energy consumption[J]. Computer-Aided Civil & Infrastructure Engineering, 2021, 36(12): 1530-1548.
- [6] 姚恩建, 卢沐阳, 刘宇环, 等. 考虑充电约束的电动公交区域行车计划编制[J]. 华南理工大学学报:自然科学版, 2019, 47(9): 68-73.
Yao En-jian, Lu Mu-yang, Liu Yu-huan, et al. Electric bus area driving plan preparation considering charging constraints[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(9): 68-73.
- [7] Wen M, Linde E, Ropke S, et al. An adaptive large neighborhood search heuristic for the electric vehicle scheduling problem[J]. Computers & Operations Research, 2016, 76: 73-83.
- [8] Tang X, Lin X, He F. Robust scheduling strategies of electric buses under stochastic traffic conditions[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2019, 105: 163-182.
- [9] Zhang L, Zeng Z, Qu X. On the role of battery capacity fading mechanism in the lifecycle cost of electric bus fleet[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(4): 2371-2380.
- [10] 王岱, 李盼, 包宇喆, 等. 基于分时电价的纯电动公交的充电优化[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2013, 33(3): 81-87.
Wang Dai, Li Pan, Bao Yu-zhe, et al. Charging optimization for electric bus based on time-of-use price[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2013, 33(3): 81-87.
- [11] 高佳宁. 考虑分时电价的纯电动公交行车计划编制方法研究[D]. 北京: 北京交通大学交通运输学院, 2018.
Gao Jia-ning. Research on the pure electric vehicle scheduling problem considering time-of-use price[D]. Beijing: School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, 2018.
- [12] He Y, Liu Z, Song Z. Optimal charging scheduling and management for a fast-charging battery electric bus system[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2020, 142: 102056.
- [13] 李长留. 电动公交充电站优化充电策略研究[D]. 北京: 北京交通大学电气工程学院, 2018.
Li Chang-liu. Research on optimal charging strategy of electric bus charging station[D]. Beijing: School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, 2018.
- [14] 常正帆. 考虑乘客选择行为的大站公交组合调度研究[D]. 西安: 长安大学公路学院, 2018.

- Chang Zheng-fan. Combinational scheduling of skip-stop bus considering passenger choice behavior[D]. Xi'an: Highway School, Chang'an University, 2018.
- [15] 贾洪飞, 叶飞, 杨丽丽. 基于多模式运营网络平衡的出租车票价结构优化模型[J]. 吉林大学学报:工学版, 2023, 53(7): 1970-1980.
- Jia Hong-fei, Ye Fei, Yang Li-li. Optimization model of taxi fare structure under multi-mode taxi service network equilibrium[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 53(7): 1970-1980.
- [16] 马敏, 胡大伟, 舒兰, 等. 城市轨道交通网络韧性评估及恢复策略[J]. 吉林大学学报:工学版, 2023, 53(2): 396-404.
- Ma Min, Hu Da-wei, Shu Lan, et al. Resilience assessment and recovery strategy on urban rail transit network[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 53(2): 396-404.
- [17] Zhu C, Chen X. Optimizing battery electric bus transit vehicle scheduling with battery exchanging: model and case study[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2013, 96(6): 2725-2736.
- [18] Yao E, Liu T, Lu T, et al. Optimization of electric vehicle scheduling with multiple vehicle types in public transport[J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 52(1): 101862.