

文章编号: 1005-0523(2024)04-0090-09



## 混编公交发车间隔及车辆运用计划协同优化

付雨<sup>1</sup>, 石俊刚<sup>1</sup>, 杨静<sup>1</sup>, 邸振<sup>1</sup>, 陈星<sup>2</sup>

(1. 华东交通大学交通运输工程学院, 江西 南昌 330013; 2. 南昌轨道交通集团有限公司, 江西 南昌 330038)

**摘要:**【目的】为燃油公交和电动公交共同组成的混编公交发车间隔与车辆运用计划协同优化,以发车间隔平滑化程度和综合运营成本最小为优化目标。【方法】考虑发车间隔范围、车辆数目、车辆接续、电动公交续航里程等多个约束,建立优化模型。设计遗传算法对两阶段模型进行求解,提升了求解的效率与准确性。【结果】案例表明:和既有运营方案相比,优化模型在较为均匀的发车间隔下,节约车辆总运营成本可达到13.04%。【结论】能够合理配置公交车辆使用数目,实现电动公交错峰充电,提升车辆利用率。

**关键词:**混编公交车队; 公交车辆运用计划; 公交时刻表; 遗传算法

中图分类号: U121

文献标志码: A

本文引用格式: 付雨, 石俊刚, 杨静, 等. 混编公交发车间隔及车辆运用计划协同优化[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(4): 90-98.

## A Two-Stage Model for Collaborative Optimization of Mixed Bus Departure Intervals and Vehicle Utilization Plans

Fu Yu<sup>1</sup>, Shi Jungang<sup>1</sup>, Yang Jing<sup>1</sup>, Di Zhen<sup>1</sup>, Chen Xing<sup>2</sup>

(1. School of Transportation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

2. Nanchang Rail Transit Group Co., Ltd, Nanchang 330038, China)

**Abstract:** 【Objective】Collaborative optimization of departure intervals and vehicle utilization plans for hybrid buses composed of fuel powered and electric buses, with the goal of minimizing the smoothness of departure intervals and overall operating costs. 【Method】With multiple constraints being considered, including departure interval range, number of vehicles, vehicle connectivity, and electric bus range, an optimization model was established to improve these aspects. A genetic algorithm was designed to solve the two-stage model, enhancing efficiency and accuracy of the solution. 【Results】The case study shows that compared with existing operational plans, the optimized model can save the total operating cost of vehicles by up to 13.04% under relatively uniform departure intervals. 【Conclusion】This optimization model could allocate the number of buses used more reasonably with a relatively uniform departure interval, achieved off-peak charging for electric buses and enhanced vehicle utilization.

**Key words:** mixed bus fleet; vehicle utilization plan; bus scheduling; genetic algorithm

**Citation format:** FU Y, SHI J G, YANG J, et al. A two-stage model for collaborative optimization of mixed bus departure intervals and vehicle utilization plans[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(4): 90-98.

收稿日期: 2023-07-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(71801093)

**【研究意义】**随着新能源汽车的快速发展,电动公交车逐渐得到广泛应用,采用电动公交车代替燃油汽车已成为趋势。在短时间内,因成本问题还无法实现完全更替,所以燃油车与电动车混合运行的局面在过渡期将普遍存在。由于不同类型的车辆动力特性、能源类别和消耗特征存在着巨大差异,如何合理安排燃油公交与电动公交是当前混编公交调度优化仍待解决的问题。

**【研究进展】**时刻表和车辆运用计划两者整体优化可以兼顾乘客与企业的利益,是公交运输管理领域研究的热点内容。关于公交时刻表和运用计划的整体优化主要分为两类:第1类是进行两个问题的协同优化求解,如Omar等<sup>[1]</sup>在面向公交区域网络的条件下,建立的双目标模型为车辆运营成本最低与乘客的换乘成功率最高。滕靖等<sup>[2]</sup>,袁振洲等<sup>[3]</sup>通过建立集成优化模型,根据公交调度模式建立时刻表和单类型车辆排班的多目标优化模型。第2类是分步优化求解,即先求出初始时刻表,再进行车辆排班计划优化。若生成的排班计划无法满足约束,则在时刻表的可行约束范围内不断反馈直至得到最优解。Avishai<sup>[4]</sup>设计了一种更高效的启发式算法,用于求解考虑发车时刻表间隔均衡、运营成本最低的公交时刻表和排班计划协同优化问题。关于混编公交车运行计划的研究主要集中在车队车辆组成和车次链优化方面。Edwin等<sup>[5]</sup>从碳排放角度研究如何配置公交和燃油公交车辆配置数量,以实现碳排放成本最低。Paul等<sup>[6]</sup>将电动公交运营里程最大作为目标函数生成车辆排班计划,其没有考虑电动公交最大行驶里程的限制同时也没有考虑因电动公交充电所造成的空驶里程等因素。Wang等<sup>[7]</sup>将充电技术纳入公交运行计划中考虑,建立充电成本最小为目标的优化模型,将其作为线性规划问题求解生成公交车辆排班方案。在此基础上,考虑充电限制等因素,Zhu等<sup>[8]</sup>对公交线路车辆的特性进行分析,根据电动公交的供能方式,以公交企业运营总成本和电动公交充电成本最小为目标构建了电动公交的排班方案。范毓琳<sup>[9]</sup>以公交运营总成本最低为目标,采用遗传算法和粒子群算法求解得出电动公交的行车计划。

**【创新特色】**虽然目前在公交时刻表和车辆运用计划上已存在较多研究,但既有研究大多是针对单一类型车辆,对混编公交时刻表与车辆运用的集成优化问题研究较少。**【关键问题】**本文对公交时刻

表和混编公交车辆运用计划进行优化,提高发车间隔平滑性,对电动公交车的节能减排效益进行量化,实现电动公交错峰充电,达到降低整条线路运营成本、提升运营效率的优化效果。

## 1 问题解析

为提高车辆运用效率,在满足客流需求的同时,尽可能降低运营成本,有必要将公交时刻表和混编车的运营计划进行协同考虑。混编公交与单一车辆运用计划的主要差异为:前者由燃油、电动两种类型车辆共同执行车次任务,其中电动公交车在运行过程中会受最大行驶里程的限制,需合理安排车辆的充电时间和充电次序。

本文的研究背景是针对特定单线公交线路。车辆从起点站出发,运行至终点站再返回起点站的过程为一条完整的运行路径,车辆运行过程如图1所示。本文模型主要解决以下3个问题:①确定各车次之间最优发车间隔;②确定使用电动车辆、燃油车辆数量;③确定各车辆执行的车次、电动车充电时间。

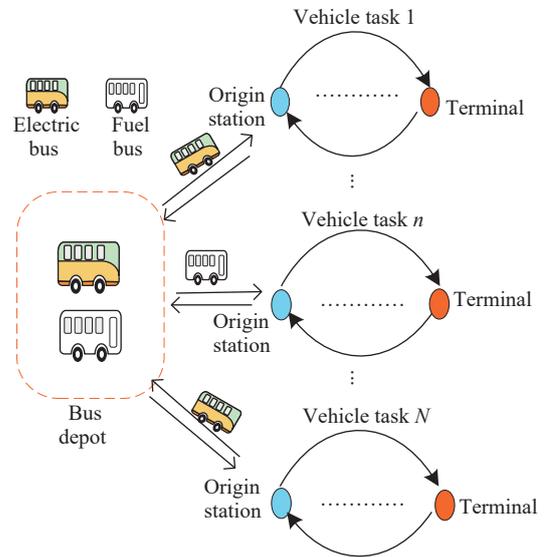


图1 混编公交车队运营模式

Fig. 1 Operation model of mixed bus fleet

## 2 问题优化建模

在本文优化问题中,将时刻表问题与车辆运用计划问题进行集成优化,构建集成优化模型会导致问题规模较大难以求解。故本文采用两阶段模型解决此问题。第1阶段首先将发车间隔标准差最小

作为优化目标,求解公交时刻表。第2阶段在第1阶段的基础上,选用总运营成本最小化为目标优化公交车辆运用计划。

## 2.1 时刻表优化

### 2.1.1 分时段线路发车班次确定

根据客流特性,将运营时间划分为若干个客流特征时段  $f \in [1, F]$ , 根据单位小时的最大断面客流量求出公交车辆发车班次<sup>[10]</sup>, 作为以下时刻表优化过程的前提。

$$n_f = P_{mf} T_f / 60aH, \quad \forall f \in [1, F] \quad (1)$$

$$T_f = T_f'' - T_f', \quad \forall f \in [1, F] \quad (2)$$

$$N = \sum_{f=1}^F n_f, \quad \forall f \in [1, F] \quad (3)$$

$$I_f = \left\{ \left( \sum_{i=1}^F n_f - n_f \right) + 1, \dots, \sum_{i=1}^F n_f \right\}, f \in [1, F] \quad (4)$$

式中:  $f$  为特征时段的编号,  $F$  为特征时段的总数,  $f \in [1, F]$ ;  $n_f$  为  $f$  时段内的发车班次;  $P_{mf}$  为  $f$  时段内的公交线路最大断面小时客流量, 人/h;  $a$  为  $f$  时段内车辆的满载率阈值, 满载率阈值分为高峰时期满载率  $a_1$  和平峰时期满载率  $a_2$ ;  $H$  为公交车辆额定载客量, 人;  $T_f$  为  $f$  时段的时间跨度, min, 其中,  $T_f'$  为时段起始时刻,  $T_f''$  为时段结束时刻;  $N$  为全日总发车班次, 次;  $I_f$  为各特征时段内车次编号。

式(1)为各特征时段内的车次数量计算公式, 式(2)为各特征时段时间跨度的计算公式, 式(3)为各时段车次数累加后计算的全日总车次数, 式(4)为各时段内车次集合的表示方法。

### 2.1.2 各时段公交发车间隔优化

本文采用发车间隔平滑度作为目标函数, 主要是在特定时段内让列车的发车间隔尽量均衡。本优化模型选取发车间隔标准差  $Z_1$  最小值为目标函数, 分时段确定各车次的发车间隔, 对各车次的发车时间进行优化<sup>[11]</sup>。

该问题的输入条件为线路各时段客流信息、各时段的发车间隔范围, 输出结果为各车次发车时刻及模型中目标函数值。以发车间隔标准差  $Z_1$  最小值为目标, 目标函数如下

$$\min Z_1 = \sqrt{\frac{\sum_{f=1}^F \sum_{i=n_{f-1}+2}^{n_f} (t_i^s - t_{i-1}^s - \bar{t}_f)^2}{N-1}} \quad \forall i \in I_f, f \in [1, F] \quad (5)$$

全日时间此线路平均发车间隔  $\bar{t}_f$  可通过计算得到

$$\bar{t}_f = \frac{t_i^s - t_{i-1}^s}{|I_f| - 1} \quad (6)$$

发车间隔受服务水平的约束, 约束条件为

$$h_{f_{\min}} \leq t_i^s - t_{i-1}^s \leq h_{f_{\max}}, \quad \forall i \in I_f, f \in [1, F] \quad (7)$$

式中:  $t_i^s - t_{i-1}^s$  为发车间隔, 为决策变量,  $i$  为车次编号;  $\bar{t}$  为全日时间此线路平均发车间隔;  $h_{f_{\max}}, h_{f_{\min}}$  分别为  $f$  时段内最大和最小发车间隔, min, 与公交企业的服务水平有关。

式(5)为目标函数, 式(6)为线路全日平均发车间隔的计算公式, 式(7)约束任意发车间隔均介于此时段最小发车间隔和最大发车间隔之间。

## 2.2 混编公交车辆运用计划优化

### 2.2.1 运营成本分析

1) 电动公交运营成本  $P_e$  包括车辆使用成本  $P_{e,1}$  与电能消耗成本  $P_{e,2}$ 。按照行驶里程工作量法为依据, 其与电动公交的购买成本  $m_e$ , 公交车辆的净残值率  $R_0$ , 第  $j$  辆公交的行驶里程  $l_j$ , 电动公交的预计行驶里程  $d_e$  相关,  $P_{e,1} = m_e(1 - R_0)l_j/d_e$ 。电能消耗成本是指在公交车辆的运营过程中, 电动车耗电完毕后在车场进行充电过程中产生的电能消耗,  $P_{e,2} = E_e p_e(t)$ , 其中  $E_e = l_j q_e$ ,  $q_e$  为车辆单位里程耗电量。  $P_e$  计算式为

$$P_e = m_e(1 - R_0)l_j/d_e + E_e p_e(t) \quad (8)$$

2) 燃油公交运营成本  $P_o$  包括燃油公交使用成本  $P_{o,1}$ , 燃油消耗成本  $P_{o,2}$  以及碳排放成本  $P_{o,3}$ 。按照行驶里程工作量法作为依据, 其与燃油公交的购买成本  $m_o$ , 公交车辆的净残值率  $R_0$ , 第  $j$  辆公交的行驶里程  $l_j$ , 燃油公交的预计行驶里程  $d_o$  相关,  $P_{o,1} = m_o(1 - R_0)l_j/d_o$ 。燃油消耗成本与燃油单位成本  $p_o$  和  $E_o$  总燃油消耗有关,  $P_{o,2} = E_o p_o(t)$ ,  $E_o = l_j q_o$ ,  $q_o$  为燃油公交单位里程的耗油量。在燃油公交行驶过程中会产生碳排放,  $F_o$  为燃油公交消耗单位燃油产生的碳排放量,  $r$  为碳排放转化系数,  $P_{o,3} = E_o F_o r$ 。

$$P_o = m_o(1 - R_0)l_j/d_o + E_o p_o(t) + E_o F_o r \quad (9)$$

### 2.2.2 车辆运用计划优化模型

为简化问题, 在此模型中作出以下假设:

- 1) 各公交车辆在运营结束后返回停车场充电, 运营开始前默认为满电状态;
- 2) 各公交车辆返回停车场后即可充电;
- 3) 列车运行速度稳定, 不受其他因素影响。

模型以综合运营成本  $Z_2$  最小为目标,目标函数如下

$$\min Z_2 = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N x_j x_{i,j} P_e + \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N (1-x_j) x_{i,j} P_o \quad (10)$$

式中:  $x_j$  为0-1变量,表示车辆  $j$  是否为电动公交,  $j$  为公交车辆编号,  $j \in [1, M]$ ,  $M$  为可用车辆总数;  $x_{i,j}$  为0-1变量,表示车辆  $j$  是否执行车次  $i$ ,  $i$  为车次编号,  $i \in [1, N]$ 。

混编公交车辆运用计划编制问题也是车次链求解问题,此模型的决策变量有

$$x_j = \begin{cases} 1, & \text{车辆 } j \text{ 为电动公交} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

$$x_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{车辆 } j \text{ 执行车次 } i \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

$$x_{h,i}^j = \begin{cases} 1, & \text{车辆 } j \text{ 执行车次 } h \text{ 后执行车次 } i \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

常规约束条件有

$$\sum_{j=1}^M x_{i,j} = 1, \forall i \in [1, N] \quad (14)$$

$$\sum_{j=1}^M \sum_{h=1}^N x_{o,h}^j = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N x_{i,o}^j \quad (15)$$

式中:  $x_{o,h}^j$  为车辆  $j$  从车场出发执行车次  $h$ ;  $x_{i,o}^j$  为车辆  $j$  执行完车次  $i$  后回到车场。

式(10)为目标函数,式(11)为车辆类型判断变量,式(12)为车辆执行状态判断变量,式(13)为车辆车次链的衔接状态判断变量,式(14)约束每个车次必须有车辆执行,且只有一辆车执行,式(15)约束任意从停车场出发的车辆最终会回到停车场。

优化方案中使用车辆数目不应超过线路可供使用的车辆数目。相关约束条件为

$$N_e \leq N_e^{\max} \quad (16)$$

$$N_o \leq N_o^{\max} \quad (17)$$

式中:  $N_e, N_o$  分别为使用电动,燃油车辆总数目;  $N_e^{\max}, N_o^{\max}$  分别为电动,燃油车辆最大可用数目。

式(16)为电动公交车辆数目约束,式(17)为燃油公交车辆数目约束。

因电动公交在行驶过程中受续航里程限制,若车辆剩余运行里程不足以执行下一车次任务并返回车场,则该车辆必须进行充电;若剩余行驶里程足够,可以根据车辆空余时间进行“灵活充电”。约束条件为

$$L_{\max} - l_{i,j} \geq (2L + L_0) - UC_{i,j}, \forall i \in [1, N], j \in [1, M] \quad (18)$$

式中:  $L_{\max}$  为电动公交车辆的最大续航里程;  $U$  为无穷大的常数;  $l_{i,j}$  为车辆  $j$  最近一次充电开始至执行完车次  $i$  时累计行驶里程, km;  $L$  为单程线路长度, km;  $L_0$  为起点至车场的距离, km;  $C_{i,j}$  为1,表示车辆执行完此车次回场充电,否则为0。

同一车辆在执行车次链上两相邻车次任务时应保证有充足时间间隔,且此间隔不小于车辆衔接时间<sup>[12]</sup>。约束条件为

$$t_i^s - t_h^a \geq t_{h,i,j} x_{h,i}^j, \forall h, i \in [1, N], j \in [1, M] \quad (19)$$

衔接时间  $t_{h,i,j}$  可通过计算得到

$$t_{h,i,j} = \begin{cases} t_{h,i,j}^c + \frac{2L_0}{v} + t_z, & \text{若 } C_{i,j} = 1 \\ t_z, & \text{其他} \end{cases} \quad (20)$$

电动车辆充电时间  $t_{h,i,j}^c$  可通过计算得到

$$t_{h,i,j}^c = \frac{(l_{i,j} + L_0)q_c}{\varepsilon} \quad (21)$$

式中:  $t_i^s, t_h^a$  分别为车次  $i$  的开始时间,车次  $h$  的结束时间;  $t_{h,i,j}$  为车辆  $j$  在车次  $h$  和  $i$  之间的衔接时间, min;  $t_z$  为发车准备时间;  $t_{h,i,j}^c$  为车辆  $j$  在车次  $h$  和  $i$  之间的充电时间, min;  $v$  为车辆运行速度, km/h;  $\varepsilon$  为充电功率, (kW·h)/min。

式(18)为充电约束,式(19)为约束同一车辆的到发时间间隔,式(20)为衔接时间的计算公式,式(21)为电动车辆充电时间计算方法。

### 3 算法设计

#### 3.1 算法描述

本问题两阶段模型均存在非线性约束,无法采用 CPLEX/GROUBI 等求解器直接求解。此前,已有学者采用启发式算法中的遗传算法和自适应大邻域搜索算法求解得出了公交车辆运用问题的最优结果,借鉴此方法来设计本文模型的高效启发式算法。

#### 3.2 求解步骤

步骤1 编码。本文时刻表优化模型在确定各时段车次的基础上,按照车次顺序,进行时刻表染色体编码,车次1的发车时刻默认为05:30,编码时刻为0,进行时刻表染色体编码,如图2所示。车辆运用计划模型采用整数编码方式,基于车辆编号进行编码,构建一个  $N \times M$  的二维0-1矩阵,如图3所示。

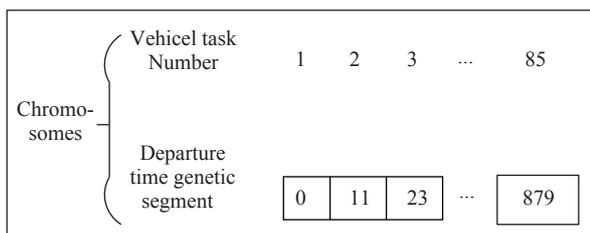


图2 时刻表染色体编码示例  
Fig. 2 Timetable chromosome coding example

$$X = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}_{N \times M}$$

图3 车辆运用计划染色体编码示例  
Fig. 3 Utilization plan chromosome coding example

步骤2 初始化种群。第1阶段模型初始种群数量为500,第2阶段模型初始种群数量为500。

步骤3 计算适应度值。本文两阶段模型的目标分别为发车间隔标准差和公交运营总成本最小化,本文以目标函数作为适应度函数。

步骤4 选择算子。本文采用的方法为轮盘选择,个体适应度越高,被选择的概率越大即遗传到下一代的概率越大。

步骤5 交叉。时刻表模型采用单点交叉法进行交叉操作,以交叉概率随机产生交叉点并互换基因。

本文车辆有两种车型,若选用常规的交叉算子,则会生成较多的不可行解降低计算效率。因此,本文将交叉过程进行改进。

① 情况1:若车辆种类相同,则仅需考虑车次链交叉,两染色体交叉之后代入车辆接续约束条件进行检验,若满足,则交叉成功,产生新染色体进入

子代;否则交叉失败,原染色体重新进行交叉操作。

② 情况2:若车辆种类不同,还应考虑车型交叉情况。两染色体交叉后,判断是否符合各约束条件。若满足,则交叉成功,产生新染色体进入子代;否则交叉失败,原染色体重新进行交叉操作。

通常,交叉概率的取值范围为0.5~0.8,本文交叉概率取  $P_c=0.5$ 。

步骤6 变异。时刻表模型对部分发车时间进行变异,随机选择发车时间更换为任意数,判断是否满足各约束。若满足,则变异成功,新染色体进入子代;否则变异失败,重新进行变异操作。

车辆运用计划模型针对公交车次部分进行变异,随机选择车次更换为随机车辆后,判断是否满足接续等约束条件。若满足,则变异成功,产生新染色体进入子代;否则变异失败,原染色体重新进行变异操作。

变异概率的取值范围一般为0.001~0.1,本文变异概率取  $P_m=0.1$ 。

步骤7 停止条件判断。当迭代次数达到最大迭代次数  $\max\_gen$  或者无可行解时,结束搜索。

## 4 实例研究

### 4.1 实例数据

选取江西省南昌市某混编公交线路作为本节的示例研究,线路共设18个车站。通过有序聚类对线路客流量进行分析,客流情况以及发车间隔范围如表1所示。公交线路相关参数如表2所示,配备公交车辆技术参数取值如表3所示。

本实例所在城市的工业用电电价为:高峰时段(10:00—15:00; 18:00—21:00),电价为1.289 3元/(kW·h);平峰时段(07:00—10:00; 15:00—18:00; 21:00—23:00),电价为0.873 1元/(kW·h);低谷时段(23:00—07:00),电价为0.60元/(kW·h)。燃油车在

表1 线路分时段客流及发车间隔  
Tab.1 Line passenger flow and departure interval in each period

Characteristic period	Maximum cross-section passenger flow/h	Departure interval/min	No. of trips
05:30—06:00	237	10~25	3
06:00—10:00	419	5~10	30
10:00—16:00	139	10~25	21
16:00—19:00	374	5~10	20
19:00—22:00	109	10~15	11
Total trips	-	-	85

表2 线路相关参数

Tab.2 Line related parameters

Operating time	L/km	$L_0$ /km	v/km	$t_2$ /min	$a_1$ /%	$a_2$ /%
05:30—22:00	25.6	3	25	5	70	50

表3 公交车辆技术参数

Tab.3 Technical parameters of bus

Parameter	Fuel bus	Electric bus
Purchase cost	$72 \times 10^6$ yuan	$116 \times 10^6$ yuan
$d_c$	700 000 km	700 000 km
$R_0$	60%	60%
H	80	80
$L_{max}$	-	180 km
$q_o, q_e$	0.32 L/km	0.84 (kW·h)/km
$\varepsilon$	-	80 (kW·h)/h

运营过程中产生大量的燃油消耗,其中消耗燃油成本为6.75元/L<sup>[13]</sup>。在测算公交碳排放成本时,主要参考《中国能源统计年鉴2019》<sup>[14]</sup>以及碳交易的成交额确定参数,其中碳排放因子 $F_o=3$  kg/L,转化系数 $r=0.05$ 元/kg。本公交线路燃油公交车最大可使用数量为8辆,电动公交最大可使用数量为18辆。

4.2 结果分析

根据前文所提,分时段对此公交线路客流进行客流聚类,对线路客流量进行分析,如图4所示,时段特征明显。可观察得到:7:00—8:00时段最大断面客流量为419人次,为整日线路断面客流量最高;18:00—19:00时段最大断面客流量为374人次,为整日线路断面客流量次高。公交线路客流规律为“双峰形”,线路客流高峰时期为每天7:00—9:00和17:00—20:00,在实际生活中,公交客流高峰出现在早晚通勤高峰时段,聚类结果较符合实际。

本文采用遗传算法对优化模型进行求解,本文

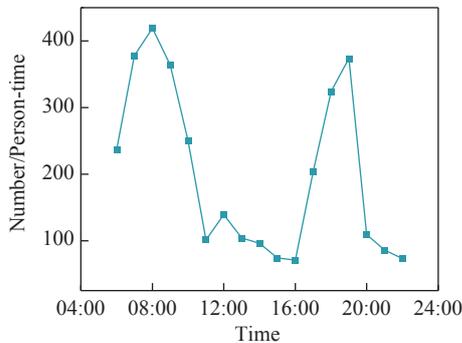


图4 线路最大断面客流

Fig. 4 Maximum section of passenger flow per hour

遗传算法参数设置如下:种群规模为500,GAP值为0.9,GAP值用于控制每代中种群被替换的比例。交叉概率为0.5,变异概率为0.1,设置最大迭代次数为500。

按照上文公交发车间隔平滑化目标,得到的车辆发车时刻表如图5所示,其中上下两个行程代表同一车次的往返过程。蓝色代表燃油公交车,黄色代表电动公交车。

公交车辆执行此发车时刻表,发车间隔标准差相对较小,为2.3689,与原公交时刻表相比降低了9.8%。在7:00—9:00与17:00—20:00时段发车频次高,发车频次与客流量数据高度吻合。

对时刻表车辆运用计划优化、协同优化求解得到的计划如图6所示。设立对照组:线路现有时刻表不变,仅对车辆运用计划进行优化求解得到的计划如图7所示。

协同优化方案中使用车辆总数目为20辆,此时混编公交综合运营成本最小,为7289元。燃油车共使用5辆,车辆编号为16~20,共执行17个车次任务;电动车共使用15辆,车辆编号为1~15,执行68个车次任务。在总运营班次数量不变的情况下,优化方案比既有方案车辆数节省6辆。并且,燃油车数量小于电动车数量,尽可能实现混合公交车队节能减排效益最大化。由于采用灵活充电方法,解决了电动车辆集中充电问题,同时有效避免车辆在晚上居民用电高峰期进行充电,减少了公交车数量和充电成本。

同时有效避免车辆在晚上居民用电高峰期

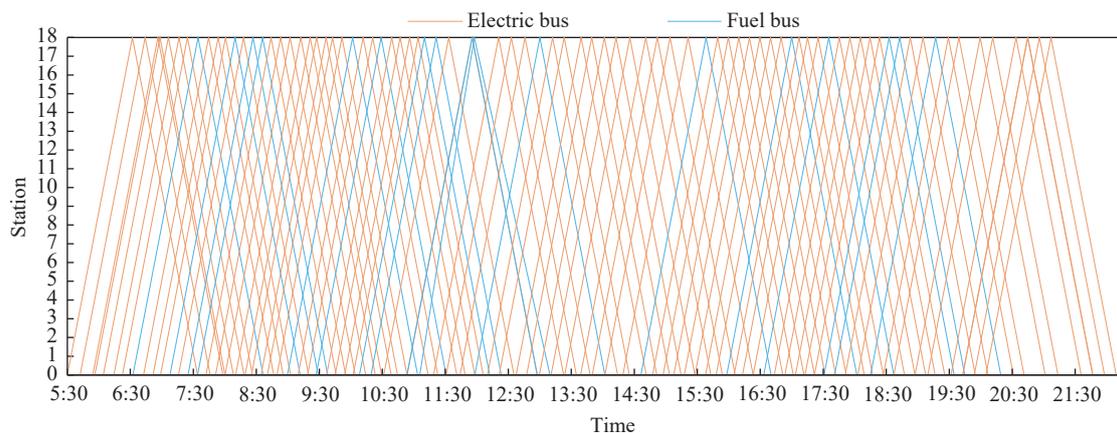


图5 公交列车时刻表

Fig. 5 Bus vehicle scheduling

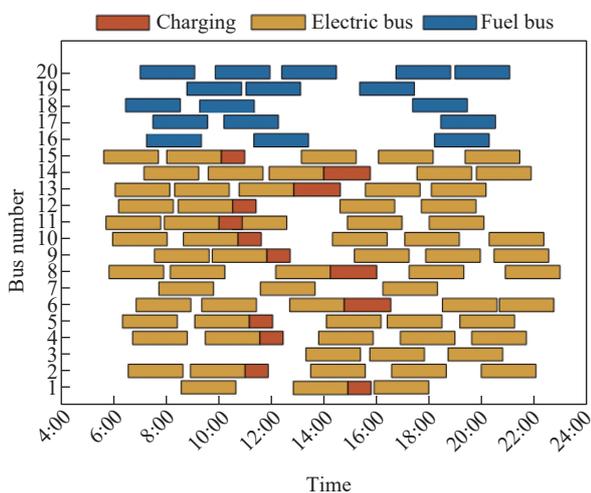


图6 协同优化结果

Fig. 6 Integrated optimization result

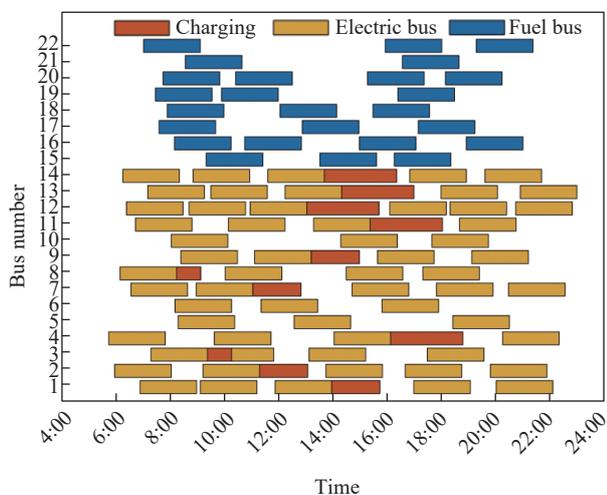


图7 对照结果

Fig. 7 Comparison result

(17:00—21:00)进行充电,实现电动公交“错峰充电”。而仅对车辆运用计划进行优化的方案中使用车辆总数目为22,综合运营成本为7 908元。较协同优化方案相比,总车辆数增加2辆,综合运营成本提高了8.49%,证明了协同优化的有效性。

和线路现有运营方案相比,总运营班次不变的情况下,协同优化方案中减少了线路使用车辆数目总数,车均运营里程有所提高。综合运营成本相比于线路既有运营方案节省了约13.04%,车均运营里程比线路既有方案增加了约30%,如表4所示。

#### 4.3 灵敏度分析

为增加模型的适用性,在总车次数不变的情况下,对两种车辆数不同比率情况下的各项指标进行灵敏度分析,不同任务承担率情况下综合成本、车辆总数、能耗变化情况输出结果如图8,图9所示。

当车辆全部为燃油车时,由于不受车辆续航里程限制,车辆总使用数目最小。但由于燃油公交行驶单位公里的油耗费用大于电动公交行驶单位公里的耗电费用,此时综合运营成本最大。

当电动公交占比率为80%时,此时车辆总数目较小,线路既有车辆配置可满足此方案,综合运营成本最低。随着电动公交车辆比率的增高,电能消耗量呈正相关增长趋势;反之,燃油消耗量逐渐减小。燃油消耗量是影响碳排放量的关键因素,电动公交比率的增高导致碳排放量逐渐降低。故公交企业在配置车辆时,可将电动公交占比率设置在70%~80%,此时车辆数目相对较小,车辆运营成本低,节能减排效益相对较高。

表4 车辆运用计划比较

Tab.4 Comparison of vehicle schedules

Methods	No. of trips	Vehicle number	Average kilometers of vehicles/km	Costs/yuan
Existing schedule	85	26	165.42	8 382
Integrated schedule	85	20	215.04	7 289
Comparison schedule	85	22	195.50	7 908

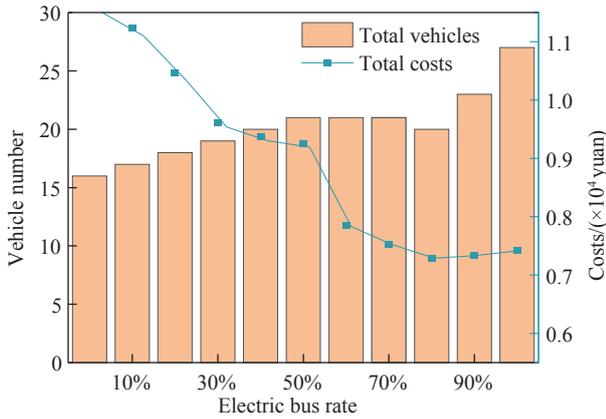


图8 不同车辆比率对车辆总数和综合成本影响

Fig. 8 Impact of different vehicle ratios on total number of vehicles and overall costs

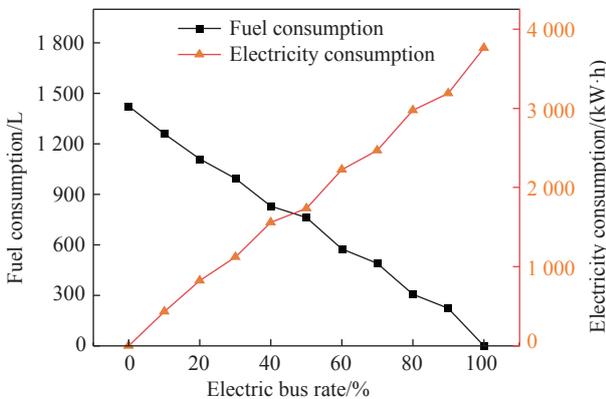


图9 不同车辆比率对燃油、电能消耗影响

Fig. 9 Impact of different vehicle ratios on fuel and electricity consumption

### 5 结论

针对混编公交系统中的发车间隔与车辆运用计划优化问题,综合考虑线路车辆发车间隔平滑性和车辆运营成本,采用遗传算法求解,生成最优车次链。主要结论如下。

- 1) 公交发车时刻表和车辆运用计划优化可以提升优化空间,有效缩小车队规模,降低运营成本,提高车辆运营效率。
- 2) 车辆运用计划优化可以实现错峰充电,避免

车辆聚集充电,降低对公交停车场充电桩条件的要求。避免电动公交车辆在晚间居民用电高峰期充电,有效节约电动公交充电成本。下一步,将在此基础上考虑充电桩数量限制及车辆能耗影响因素做进一步研究。

### 参考文献:

- [1] OMAR J, IBARRA R, RICARDO G, et al. An integrated approach for timetabling and vehicle scheduling problems to analyze the trade-off between level of service and operating costs of transit networks[J]. Transportation Research Part B, 2014, 70: 35-46.
- [2] 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 J, LIN L, CHEN T. Optimizing the combination of timetable and vehicle scheduling for pure electric buses [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(12): 1748-1755.
- [3] 袁振洲, 刘立强, 王佳冬, 等. 考虑不均匀发车间隔的高铁接运公交时刻表与车辆调度优化[J]. 北京交通大学学报(自然科学版), 2021, 45(4): 44-53.  
YUAN Z Z, LIU L Q, WANG J D, et al. Feeder bus timetabling and vehicle scheduling optimization for high-speed railway station with uneven departure interval[J]. Journal of Beijing Jiaotong University (Natural Sciences), 2021, 45(4): 44-53.
- [4] AVISHAI C. Optimal multi-vehicle type transit timetabling and vehicle scheduling[J]. Procedia Social and Behavioral Sciences, 2011, 20: 19-30.
- [5] EDWIN R G, MARTINEZ J M L. Analysis of the reduction of CO<sub>2</sub> emissions in urban environments by replacing conventional city buses by electric bus fleets: Spain case study[J]. Energies, 2019, 12(3): 525.
- [6] PAUL T, YAMADA H. Operation and charging scheduling of electric buses in a city bus route network[C]// New

- York: IEEE 17th International Conference on Intelligent Transportation Systems(ITSC), 2014.
- [7] WANG Y, HUANG Y, XU J, et al. Optimal recharging scheduling for urban electric buses: A case study in Davis [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2018, 211: 282.
- [8] ZHU C, CHEN X H. Optimizing battery electric bus transit vehicle scheduling with battery exchanging: Model and case study[J]. Proceedings of Society Behavior, 2013, 96: 25-36.
- [9] 范毓琳. 考虑可靠性的混编公交车计划编制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- FAN Y L. Research on vehicle scheduling planning for mixed bus fleet considering reliability[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [10] 武琳琳. 基于Fisher最优分割法的聚类分析应用[D]. 郑州: 郑州大学, 2013.
- WU L L. Cluster analysis based on the method of Fisher optimal division[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2013.
- [11] TENG J, CHEN T, FAN W D. Integrated approach to vehicle scheduling and bus timetabling for an electric bus line[J]. Journal of Transportation Engineering Part A: Systems, 2020, 146(2): 04019073.
- [12] 唐春艳, 杨凯强, 鄂娜. 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 C Y, YANG K Q, WU N. Optimizing flexible vehicle scheduling for single-line battery electric buses[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2020, 20(3): 156-162.
- [13] 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 M, LI Y, WANG J, 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.
- [14] 中华人民共和国国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴2019[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- DEPARTMENT OF ENERGY STATISTICS, NATIONAL BUREAU OF STATISTICS OF THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA. China Energy Statistics Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2020.



第一作者: 付雨(1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向为城市交通优化。E-mail: 1069402223@qq.com。



通信作者: 石俊刚(1986—), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师, 研究方向为轨道交通系统优化。E-mail: jgshi@ecjtu.edu.cn。

(责任编辑:吴海燕)