

考虑驾驶员舒适度的纯电动公交柔性调度优化

胡永仕,杨悠悠,张阳

(福建工程学院 交通运输学院,福建 福州 350118)

摘要: 为克服公交调度优化模型中纯电动公交车受续航里程约束、未考虑驾驶员舒适度的不足,提出了人-车固定模式的纯电动公交车柔性调度优化方法。采用休憩时长为衡量驾驶员舒适度的指标,将保证驾驶员舒适度产生的负面边际效应量化为延误成本,以公交企业总成本最小为目标构建优化调度模型,引入改进的粒子群算法求解。改进算法通过调整粒子群算法的位置和更新机制解决传统粒子群算法易陷入局部极值的问题,进一步提高算法精度。实验结果表明,柔性调度优化方法能有效降低公交企业的总运营成本,具有一定的实用性。

关键词: 纯电动公交车;驾驶员;公交调度;改进的粒子群算法

中图分类号: U491.17 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-4348(2021)03-0230-06

Flexible scheduling optimization of pure electric buses considering driver comfort

HU Yongshi, YANG Youyou, ZHANG Yang

(School of Transportation, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: In order to overcome the shortcomings of the traditional bus scheduling optimization model, i.e., the pure electric bus in the traditional bus scheduling model is constrained by the mileage and does not consider the driver's comfort, a flexible scheduling optimization method was proposed for pure electric buses with fixed man-vehicle mode. The method first used the driver's rest time as the index to measure driver comfort, quantified the negative marginal effect caused by ensuring the driver comfort into the delay cost, and then constructed the optimal scheduling model with the goal of minimizing the total cost of public transport enterprises. Finally, the improved particle swarm optimization algorithm (PSO) was introduced to solve the problem. By adjusting the position and update mechanism of PSO, the improved algorithm solved the problem that traditional PSO is easy to fall into local extremum, and further improved the accuracy of the algorithm. The experimental results show that the flexible scheduling optimization method could effectively reduce the total operating cost of public transport enterprises, and had certain practicability.

Keywords: pure electric buses; drivers; bus scheduling; improved particle swarm optimization

交通运输部数据^[1]显示,纯电动车占我国营运公交车的 46.8%。然而,纯电动车由于受到续航里程和充电时间的约束,实际续航里程通常只能达到设计里程的 40%~60%^[2],难以满足一天内不充换电运营的要求。对于单目标优化,Li^[3]和杨扬等^[4]考虑了电动公交的最大行驶里程约束,采用了基于列生成的启发式算法来解决调度问题;Li^[5]和 Dai 等^[6]不仅考虑了电动公交的行驶里程,还考虑了电动公交的充电时长,分别采用整数规划和整数非线性规划来解决混合公交车队管理问题,其他学者还分别考虑了充电区间^[7]、服务水平^[8]、重叠区间的公交线路^[9]等情况。对

于多目标优化,赵威^[10]建立载客满意度函数和乘客等待时间函数,Teng^[11]建立发车间隔和运营成本函数。然而,目前国内外学者对纯电动公交的调度问题的研究大多围绕充电策略优化进行,较少提及公交车驾驶员舒适度。驾驶员舒适度关系着驾驶员工作负荷和健康,也是安全行车的重要内容。

本课题研究的公交驾驶员舒适度指公交驾驶员处于工作时间内,执行公交车次任务时生理和心理上的舒适感。驾驶员舒适度受昼夜节律^[12]、驾驶员睡眠时间^[13]、驾驶持续时间^[14]和驾驶期间休憩时间共同影响,其中,昼夜节律、睡眠时间属于驾驶员工作外行为,公司较难干预,只能通过改变驾驶员工作时间内休憩时长来提高其舒适度。本研究在考虑纯电动公交车续航里程约束和驾驶员休憩时长约束条件下,针对人-车固定模式构建允许延误的纯电动公交柔性调度优化模型,提出改进的粒子群算法,以期在保障驾驶员舒适度的条件下降低公交企业运营成本,提高公交企业对运力和人力资源的利用率。

1 公交调度优化模型

本研究通过构建单一公交线路双向运营的纯电动公交车柔性调度模型来保障驾驶员休憩时长。在公交车辆计划问题中,一辆纯电动公交车的行车计划即从上行或下行车站开始,经过1 d的公交车次任务链,最后回到保停场的过程。如图1所示,每一辆纯电动公交车的车次任务链连续,往返于上行车站和下行车站之间。

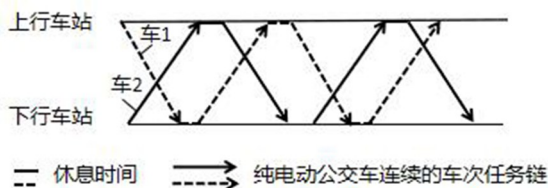


图1 某辆公交车的单日行车计划

Fig.1 One-day bus plan for a bus

1.1 基本假设

本研究基本假设如下:纯电动公交车在首末站更换电池,每辆公交车首班车次任务驶出时为满电状态,相当于换电一次;每辆公交车在某一时刻只能执行一个车次任务,不能中断;纯电动公交车的续航里程取固定保守值,每千米能源消

耗取固定值;纯电动公交车驶出场站前,需保证剩余电量可以完成邻接车次任务;驾驶员休憩时长取固定值;驾驶员和车辆一一对应;驾驶员的月工资取当年平均值。

1.2 模型目标函数

刚性调度成本即未考虑驾驶员舒适度时的公交车辆总固定成本与车辆能耗成本之和,固定成本 Z_1 包括车辆购置成本、维修成本和驾驶员薪酬成本,车辆每日能耗成本 Z_2 与车辆换电次数相关,是1 d换电总次数与更换一次电池成本的乘积,换电成本与电费、电池充放电折旧费、充电设备使用费、换电人员以及换电设备费用有关。

以公交企业总运营成本最小为目标函数,

$$\min Z = Z_1 \cdot k + t \cdot Z_2 \quad (1)$$

式中, t 表示纯电动公交车从开始使用到退役的服务时间(d); K 是公交车编号集合, $K = \{1, 2, 3, \dots, k\}$ 。

$$Z_2 = c_1 \cdot \sum_{k=1}^{|K|} \left\lceil \frac{\sum_{i=1}^{|I|} x_{ki}}{\lceil L_{\max}/L \rceil} \right\rceil \quad (2)$$

式中, c_1 表示纯电动公交车更换一次的总费用(元/次); i 是公交车执行的车次序号, $I = \{1, 2, 3, \dots, i\}$; L 表示单次运营里程(km); x_{ki} 为0-1变量,公交车 k 执行车次 i 时 $x_{ki} = 1$, 否则为0; L_{\max} 为车辆 k 的最大行驶里程,即动力电池荷电状态(SOC)大于等于0.3时能行驶的最大里程,纯电动公交车 k 在执行完某车次时,依据车辆的剩余SOC值能否满足该公交车完成邻接车次,判断是否需要先更换电池,故每辆公交车只经过一次换电的累计行驶里程小于 L_{\max} 。

柔性调度情况下,公交企业的运营成本较刚性调度增加误时成本,其他不变,即公交运营成本包括公交车辆总固定成本、车辆能耗成本和误时成本,误时成本即因允许驾驶员休憩后发车带来的成本。每日误时成本 Z_3 表示为了保证司机休憩时间,允许超过时刻表安排一定时间造成的成本,与投诉率和乘客损失有关。

以公交企业总运营成本最小为目标函数,

$$\min Z = Z_1 \cdot k + t \cdot (Z_2 + Z_3) \quad (3)$$

其中,

$$Z_3 = \sum_{k=1}^{|K|} \sum_{i=1}^{|I|} c_d y_{ki} \quad (4)$$

式中, y_{ki} 是 0-1 变量, 表示是否延误, 如式(5)所示。延误时间为公交车执行车次 i 时实际发车与规定发车的时间差, 换电时间小于驾驶员休憩时间, 故包含在休憩时间内。

$$y_{ki} = \begin{cases} 1, & t_{is} + t_1 + t_2 - t_{ie} \leq 0 \\ 0, & t_{is} + t_1 + t_2 - t_{ie} > 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, t_{is} 是车次任务 i 的发车时刻, t_{ie} 是车次任务 i 的结束时刻, 即邻接车次任务的发车时刻; t_1 表示载客行驶完一趟车次所需时间 (min), t_2 是驾驶员休憩所需时间 (min)。

延误给公交企业带来负面影响, 比如超过一定时间并对乘客后续安排产生一定后果导致的投诉^[15]和损失乘客数, 设比例为 s (s_1 为索赔人数比例, c_2 为赔偿值, s_2 为不乘坐该车的乘客比例, c_3 为票价)。1 d 内所有车辆造成的总延误次数与单位延误成本的乘积为每日延误成本, 故纯电动公交车运营 1 d 的总误时成本为如式(6)所示, Q 为乘客数。

$$c_d = c_2 \cdot Q \cdot s_1 + c_3 \cdot Q \cdot s_2 \quad (6)$$

1.3 约束条件

$$\sum_{k=1}^{|K|} x_{ki} = 1, \forall i \in I \quad (7)$$

$$g'_{ki} = \sum_{i=1}^{|I|} (g_{ki} + L) \cdot x_{ki}, \forall k \in K \quad (8)$$

$$t_{is} + t_1 + t_2 - t_{ie} \leq \sigma, \forall k \in K; \forall i \in I \quad (9)$$

$$y_{ki} = \begin{cases} 1, & (1 - \lfloor \frac{g'_{ki}}{L_{\max}} \rfloor) \cdot L_{\max} + g'_{ki} < L \\ 0, & L \leq (1 - \lfloor \frac{g'_{ki}}{L_{\max}} \rfloor) \cdot L_{\max} + g'_{ki} \end{cases}, \quad \forall k \in K; \forall i \in I \quad (10)$$

式(7)表示每个车次任务有且仅由一辆纯电动公交车执行; 式(8)表示续驶里程约束, g_{ki} 公交车 k 执行车次 i 前累计行驶里程数, g'_{ki} 为执行车次 i 之后的累计行驶里程数; 式(9)表示同一辆公交车执行车次 i 后执行邻接车次时, 其延误时间不高于允许的最大延误时间 σ ; 式(10)表示换电条件, y_{ki} 是 0-1 变量, 公交车 k 执行完车次 i , 在上/下行路线发站需要更换电池时 $y_{ki} = 1$, 否则为 0。

2 改进的粒子群算法

粒子群算法是一种模拟鸟群的捕食行为的随机搜索算法。粒子群算法具备较好的鲁棒性、并行性和正反馈特性, 可以很好地应用于空间函数

的优化问题和单目标优化问题。但是这个算法容易早熟收敛, 取得局部极值, 对于约束较复杂的模型甚至陷入无可行解。为了克服粒子群这个缺点, 本研究提出了改进的粒子群算法, 以期增强离散粒子群优化算法的全局搜索能力。

本研究的模型自变量为 $N \times N$ 维矩阵, 且存在较多约束条件, 针对这一模型的特征, 改进粒子群算法的初始位置和速度更新机制。

2.1 粒子群算法核心机制改进

粒子群算法里有两个重要的机制, 也是粒子群的核心, 分别是位置和速度更新机制。图 2 中, x 和 p 分别表示粒子的初始位置和搜索到的粒子最优位置, v 是粒子“飞行”的速度, 粒子位置更新受 3 部分影响, 本研究主要针对 v 进行改进。

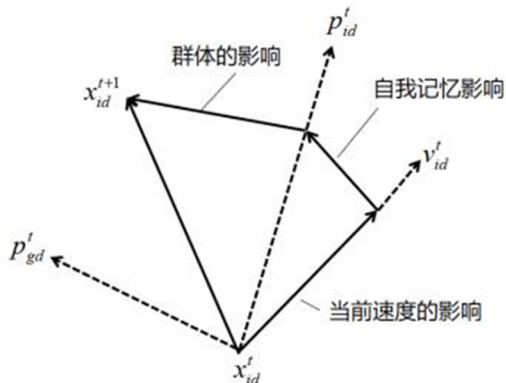


图 2 每代粒子位置的更新方式

Fig.2 Update of particle positions per generation

(1) 初始位置机制

粒子群中每个优化问题的解都是搜索空间中的一个粒子, 其位置是在搜索空间内的一个可能点, 即粒子的位置 x 是可能解所在的位置。本研究采用基于 0-1 矩阵的编码方式, 生成特定解结构的粒子, 将公交车辆和车次任务的排序在编码中表示出来, 矩阵的行表示车辆编号, 列表示车次任务。如图 3 所示, $x(1,1) = 1$ 表示编号为 1 的纯电动公交车执行车次任务 1, 为减少运行时间, 初始位置设定将车次任务数量固定, 即矩阵中随机产生的 0-1 矩阵中 1 的数量为固定值。最优解结构需要先满足列和全部为 1, 表示每一个车次任务均有且由一辆纯电动公交车执行, 行和满足最大执行车次数和最小执行车次数要求, 才能进行是否延误和换电判断。

(2)速度更新机制

$$X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

图3 粒子位置模式

Fig.3 Particle position mode

速度表示粒子移动的快慢,传统粒子群算法主要改进权重,如自适应权重法、随机权重法、线性递减权重法。速度 v 随机性仍然较强,对于特定结构的解空间方向性不够强,如图4所示,本研究依据解空间的结构要求,确定 v 增加1和-1的位置和数量,根据式(11),利用速度 v 消除当前位置 x 不满足解空间的部分,使其逐步靠近目标解。

$$X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

↑ 新增 ↓ 抵消

图4 速度更新模式

Fig.4 Speed update mode

2.2 改进的粒子群算法的实现

为了提高算法的收敛速度和性能,本研究对粒子群算法进行改进。算法步骤的具体描述如下:

第一,随机均匀产生 M 个粒子。

第二,计算每个粒子的适应度值,确定一个粒子的运动状态是利用位置和速度两个参数。每个粒子的位置参数设置为0-1矩阵,其中1的数量表示车次数量,为固定值,速度参数为与位置同行同列的空矩阵。将当前各个粒子的位置(由自变量的个数和取值范围)作为各自的个体最优位置 $zbest$,并将适应值最优个体的位置作为全局最优位置 $fitness_zbest$;

第三,先更新速度并对速度进行边界处理,即将 $zbest$ 和目标解结构对比,确定 v 的某几个列需要随机产生一个1, v 的某一列的某几个位置需要换成-1,按(11)更新粒子位置并对位置进行边界处理;

$$x_{mu} = x_{mu} + v_{mu} \quad (11)$$

第四,进行自适应变异,进行约束条件判断并计算新种群各个个体位置的适应度。新适应度与个体历史最佳适应度 $fitness_zbest$ 做比较,取更好者记录为个体历史最优位置。同时,比较当前

位置与全局最优位置 $fitness_gbest$,取更好者作为群体的历史最优位置;

第五,若满足所设定的迭代次数,则将当前这些粒子作为最优结果输出,否则返回步骤3继续搜索;

第六,判断算法是否达到所设定的最大迭代步数,达到则停止,并输出最优解。

3 实例分析

以福州20路公交车为例子。据2020年5月福州公交集团官网显示,福州公交20路上行长度约14.2 km,设25个车站,该车队属于斗门保停场,与福建警察学院站距离13.4 km,与火车站南广场站距离1.2 km。该路线发车间隔小,相对均匀,每日的乘客流量大,运输压力也很大。

3.1 基本数据

20路纯电动公交车辆为XML6105JEVW0C1型客车。路线时刻表从福州掌上公交获得,上下行线路每日的运营时间为05:00~23:40,共1060 min,上行车次编号1~118,发车间隔9 min,下行车次编号119~245,发车间隔8 min。 $L = 14.2\text{ km}$, $t = 1825\text{ d}$ (车辆使用寿命)即5年,平均的单趟运行时间 $t_1 = 80\text{ min}$,每辆纯电动公交车购置成本为45万元,平均每辆车使用期内的维修成本为20万元,司机薪酬8000元/月, $t_2 = 10\text{ min}$, $\sigma = 10\text{ min}$,电动公交车百千米耗电100 kW·h,充电电价为0.75元/(kW·h), $L_{\max} = 126\text{ km}$,更换电池1次的总费用 c_d 为180元,本研究采用陈华^[15]的方法,取百万人次服务投诉率来衡量服务质量,即 $s_1 = 2.6$ 次/百万人次,按照发生误点超过增加10 min,并对乘客造成一定后果的线路,将赔偿投诉者5元车资费,日平均客流量为1万人,损失乘车比例 $s_2 = 1$ 次/百万人次。

3.2 算法结果分析

利用数学软件MATLAB7.0(R2017b)编程实现改进的粒子群算法,参数设置为500个粒子,自我学习因子为-1,群体学习因子为1,惯性权重0.5,最大速度4,迭代次数500次,算法终止条件为最优适应度不再变化。收敛图如图5所示,迭代330次获得最优解。

根据计算,公交企业若采用纯电动公交车柔性调度的总成本3547.326万元,1 d运行中车队总更换电池次数为43次,总延误时间13 min;刚

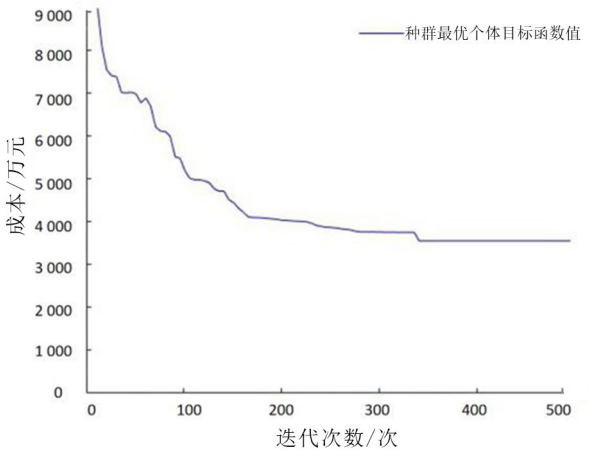


图 5 收敛图
Fig.5 Convergence graph

性调度总成本 3 581.2 万元,1 d 换电总次数为 50 次,延误时间为 12 min。

对比可知,纯电动公交车的柔性调度优化使得换电总数量减少 7 次,产生延误 13 min,成本减少 33.874 万元,可见柔性调度优于刚性调度。

表 1 给出纯电动公交车柔性调度下 23 辆公交车的执行车次任务链,其中,如编号 12 的车辆从火车站南广场站始发,依次执行车次 125、13、142、30、160、45、177、58 后进行更换电池操作,再依次执行车次 196 与 78,返回 A 站,完成当日任务即驶回保停场;编号为 8、13、22 的纯电动公交车日执行车次均为 8 次,其始发站满电状态出发刚好满足全天的车次任务要求,且剩余电量满足末站返回保停场;编号为 1、11 的纯电动公交车执行车次均为 8 次,末站为 A 站,需换电方可满足返回保停场要求。

表 1 柔性调度班次链
Tab.1 Flexible scheduling shift chain

车辆编号	车次任务链
1	1-124-11-140-27-158-44-176-换电
2	2-126-15-144-31-162-47-184-换电-66-204-86-225-103-238-116
3	3-127-14-145-164-52-189-71-换电-209-91-228-106-241
4	4-129-17-147-166-49-185-67-换电-205-87-226-104
5	5-130-18-148-34-163-188-70-换电-208-90-227-105-239-117

续表	
车辆编号	车次任务链
6	6-131-19-149-35-167-50-187-换电-69-207
7	120-7-133-21-151-37-169-194-换电-76-214-95-231-109
8	121-8-134-22-152-38-171-53
9	122-9-136-24-154-40-174-55-换电-197-79-216-97-233-111
10	123-10-138-26-156-42-170-181-换电-62-201-83-220-101-236-114
11	12-141-29-159-65-203-85-221-换电
12	125-13-142-30-160-45-177-58-换电-196-78
13	128-16-146-33-165-48-182-63
14	119-132-20-150-36-168-51-56-换电-193-75-213-94-230-108-242
15	135-23-153-39-186-68-206-88-换电-222
16	137-25-155-41-190-72-210-89-换电-224
17	139-28-157-43-173-192-73-212-换电-93
18	143-32-161-46-180-61-200-81-换电-219-100
19	172-54-191-74-211-92-229-107-换电-240-118
20	183-64-202-84-223-102-237-115-换电-244
21	175-57-195-77-215-96-232-110-换电-245
22	178-59-198-80-217-98-234-112
23	179-60-199-82-218-99-235-113-换电-243

图 6 为纯电动公交车单日运行图,横轴表示时间,纵轴表示车站,每一辆公交车的车次任务链是连续的,即从 A 站出发到达 B 站后,邻接任务必然返回 A 站,反之亦然,故纵轴为 A-B 站交替,同一编号的纯电动公交车的当日车次任务链线型一致。由图可知,在满足公交企业最小运营成本

条件下,为满足当日 245 个车次任务,除了少数几个车次任务链运营时间短,存在 8 个车次链的驾驶员的持续工作时长包括休憩时间在内将近 15 h,此时稳定驾驶员的休憩时长是十分有必要的。

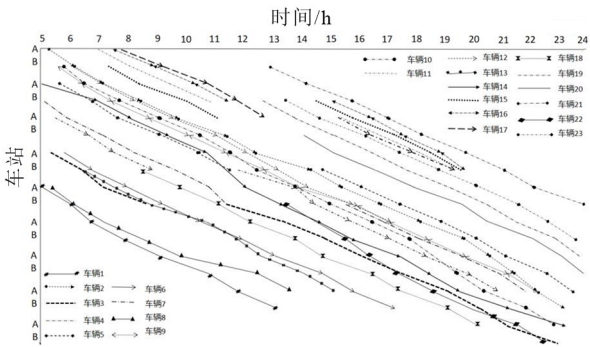


图6 柔性调度班次链

Fig.6 Flexible scheduling shift chain

4 结论

本研究针对人-车固定模式,构建考虑驾驶员舒适度的单线纯电动公交车辆柔性调度优化模型,以总车辆的总运营费用即人-车固定总成本以及车辆在任务车次链中的成本为目标,并在换电情况下增加驾驶员舒适度的约束条件,采用改进的粒子群算法求解,该算法可增强全局搜索能力。实验结果表明,本研究提出的柔性调度优化方法可以同时保障高频公交线路驾驶员舒适度以及公交调度的有序进行,即在保障驾驶员工作内休憩时长条件下可减少运营车辆数,公交企业的总运营成本成本可减少 33.874 万元,与传统的刚性调度相比,该方法对公交公司提高现有公交资源的利用效率,保证日常运营具有一定的意义。

参考文献:

[1] 交通运输部. 2019 年交通运输行业发展统计公报[N]. 中国交通报, 2020-05-12.

[2] 孟越. 纯电动公交车区域行车计划编制模型及算法研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.

[3] LI J Q. Transit bus scheduling with limited energy[J]. Transportation Science, 2014, 48(4): 521-539.

[4] 杨扬, 关伟, 马继辉. 基于列生成算法的电动公交车辆调度计划优化研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16(5): 198-204.

[5] LI L, LO H K, XIAO F, et al. Mixed bus fleet management strategy for minimizing overall and emissions external costs[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2018, 60: 104-118.

[6] DAI Z, LIU X Y, CHEN X, et al. Joint optimization of scheduling and capacity for mixed traffic with autonomous and human-driven buses: a dynamic programming approach[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020, 114: 598-619.

[7] 李军, 唐晓宇, 赵长相. 基于充电策略的纯电动公交车辆调度优化[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2015, 35(4): 107-112.

[8] 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, 198.

[9] 宋现敏, 张明业, 姜景玲. 考虑区间重叠的多运营商公交调度优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2020, 20(5): 142-147.

[10] 赵威. 基于多目标优化的公交车调度问题的模型与算法[J]. 交通信息与安全, 2010, 28(1): 79-83, 89.

[11] TENG J, CHEN T, FAN W. 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] 裴玉龙, 刘颖慧, 翟博韬. 营运长途客车驾驶员疲劳累积规律及模型研究[J]. 交通信息与安全, 2017, 35(1): 26-34.

[13] 李瑞瑞, 王雪松, 高岩. 车队安全氛围与驾驶员个人特征对公交汽车事故的影响[J]. 交通信息与安全, 2019, 37(5): 33-39, 106.

[14] 艾倩楠. 基于驾驶员指标的驾驶员风险感知水平评价[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(12): 144-149.

[15] 陈华. 探究加强公交服务投诉管理的策略[J]. 人民公交, 2020(2): 78-81.

(责任编辑: 方素华)