

计及实时交通特征的电动公交车备用率与充电桩联合优化

曹 昉, 郑怡馨, 王斯琪, 王淳奕, 齐玥莹

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 为了提高电动公交车及充电站总投资和运营的经济性, 需综合考虑公交车和充电桩的购置成本以及充电成本。以道路特征、实时交通特征、环境温度为主要影响因素, 计算电动公交车的行驶时间和能耗; 在满足公交车运营基本需求和保证车内温度的前提下, 以日公交车购置成本、日充电桩建造成本、日充电成本之和最小为目标进行优化, 建立电动公交车备用率与充电桩的联合优化模型, 并采用改进的离散型自适应粒子群优化算法进行计算, 得到公交车和充电桩的最优购置方案以及各季节和全年的日均投资及运营成本。以某公交线路电动公交车年内多种运营条件为算例, 验证所建优化模型的正确性。

关键词: 电动公交车; 充电桩; 充电站; 公交车备用率; 实时交通特征; 联合优化; 环境温度

中图分类号: U469.72

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202308028

0 引言

随着我国“双碳”目标的提出, 人们越来越倾向于绿色清洁的出行方式, 电动公交车的发展迅速^[1-2]。据我国生态环境部统计, 截至2020年10月, 我国电动公交车比例已达60%。公交车充电站为公交车提供专属的充电服务, 一般设置在公交车的起点和终点站。此外, 为了保障公交运输的可靠性, 公交车必须具备一定的备用率以保障公交车运行的可靠性和稳定性。充电站装设较少的充电桩可以降低充电桩购置成本, 但可能会减少公交车的充电灵活性, 增加充电成本, 且为了保障正常发车可能需要提高公交车备用率, 从而导致公交车购置成本增加。如何合理地配备公交车的充电桩数量和合适的备用率, 在满足公交车日运营计划的同时, 尽量降低公交车和充电桩的购置成本以及充电成本, 促使公交车运营于整体投资最优的环境, 成为了一个亟需解决的问题。

为了提高电动公交车、充电站总投资和运营的经济性, 专家学者们分别从公交公司、充电站运营商角度进行了研究。其中, 从公交公司角度主要研究了发车时刻表优化^[3]、行车计划编制^[4]问题。文献[5]以公交车数量最小为目标, 建立了区域调度模型并响应分时电价, 减少了充电成本, 但采用的是固定的公交车运行时长。文献[6]以1 d内单位电量的净支出最小为目标, 给出了公交车的充电优化策略, 但未将公交车数量考虑在内。文献[7]以公交公司的日运营成本最小为目标, 获得了充电站的充放电计划, 但采用的是固定的耗电量和时速。从充电站运营商角度主要研究了充电站位置优化^[8]、公交车运营优化^[9-10]问题。文献[11]以充电站的年支付成本

最小为优化目标, 建立了充电站的优化规划模型, 确定了公交车充电站内的充电桩数量, 但仍采用固定的耗电量和时速。文献[12]以运营商投资快充站盈利为目的, 考虑公交车充电站的投资费用以及购售电价差, 得到了日最佳充电策略, 但未将公交车的日运行计划考虑在内。文献[13]基于分时电价, 从运营商的角度出发, 以电动公交车的充电成本最低为目标, 提出了一种有序充电控制策略模型, 但对公交车运行时间的变化考虑较少。

上述研究仅在电动公交车投资、充电站投资、充电成本中选择1种或2种进行优化, 而将三者联合优化的研究鲜有报道, 且现有研究在优化中大多采用固定的公交车运行时间和能耗数据, 对现实情况中包含复杂路况特征和实时特征的通行量特征、环境温度等多因素耦合影响带来的计算误差研究尚不深入。

为此, 本文针对非快充公交线路上的电动公交车及其配套充电桩, 考虑道路特征、实时交通特征以及环境温度3个相互独立的因素对公交车运行时间与能耗的影响, 建立了以日公交车购置成本、日充电桩建造成本、日充电成本之和最小为目标的电动公交车备用率与充电桩的联合优化模型。根据模型变量多维度耦合特征, 改进自适应粒子群优化(adaptive particle swarm optimization, APSO)算法, 得到改进后的离散型APSO算法。以某公交线路电动公交车的日运行充电情况为算例, 得到各季节和全年的优化结果, 并将该线路在其他特殊场景下的运行结果与最终优化结果进行对比, 验证所建模型的正确性。

1 基本思路及框架

电动公交车的总成本包括投资成本和运行成本两方面, 投资成本由车辆数量和充电桩安装数量决

定,运行成本主要由充电电价决定,其中充电桩安装数量由最大充电需求车辆数量决定。由于公交车的发车班次和行驶里程固定,在车辆购置数量较低的情况下,每辆公交车的总充电时长将增加,其对充电时间的可选择性将变弱,这在峰谷电价机制下会带来充电成本的增加;而当购置的车辆数量增多,车辆备用率增大时,电动公交车充电时间的选择余地增大,充电成本将减小。同时,充电时间可选择性的不同也会带来充电桩数量的改变。

除了峰谷电价带来的充电成本改变,公交车行驶过程中的耗电量还受到外界环境因素的影响。本文主要考虑道路特征(路网结构和道路的长度、坡度)、实时交通特征(实时道路车流量、上车客流量)、环境温度3个因素的改变对公交车行驶耗电量的影响。这3个因素的存在互相独立,且对公交车耗电量的影响也是互相独立的,但其对公交车耗电量的影响是相互叠加的。在3个因素的影响下,公交车的耗电量将随着不同的时间尺度、行驶区域等发生改变,故其可用充电时间的选择范围以及对需求的充电桩数量也会发生改变,同时其充电成本也随之变化。

因此,如何在计及外界影响因素的情况下,寻求公交车备用率与充电桩的联合优化,使公交车在经济性最优的条件下满足运营要求,是本文的重要目标。计及实时交通特征的电动公交车备用率与充电桩联合优化的基本原理及结构示意图见图1。

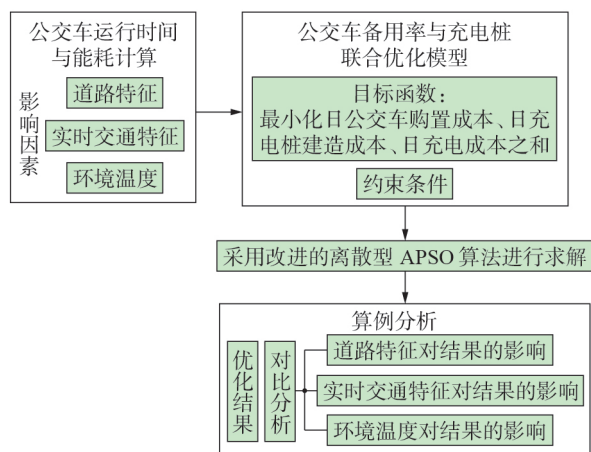


图1 联合优化的基本原理及结构示意图

Fig.1 Basic principle and structure diagram of joint optimization

1)公交车运行时间与能耗计算。公交车运行时间和能耗的主要影响因素包括道路特征、实时交通特征、环境温度。道路特征包括路网结构、任一路段的长度和路段坡度。单位长度的道路特征是指公交车所行驶路段需要克服的轮胎滚动阻力、空气阻力、坡度阻力、加速度阻力,对于1条固定的道路,这些阻力是相对不变的,其对公交车能耗的影响也基本

不变。实时交通特征是指随时间发生改变的实时道路车流量和上车客流量,其中实时道路车流量影响公交车的行驶速度,而上车客流量影响公交车的总质量。实时车流量随着时间、所处地理区域的不同而发生明显的变动,其对公交车能耗的影响也是实时变化的。道路特征和实时车流量为交通特征的一部分。环境温度决定了公交车空调的启停,当公交车的制冷或制热空调开启后,会带来额外的空调能耗。

2)公交车备用率与充电桩联合优化模型。电动公交车备用率是指满足最大需要运行公交车数量之外的备用车辆数量占总车辆数量的比例,最大需要运行公交车数量是指日内所有时间断面下行驶在路线上的公交车的最大数量。电动公交车备用率与公交车专属充电站内的充电桩数量、公交车的充电成本之间相互影响,因此,需要建立以包含公交车购置成本、充电桩投资成本、公交车运营成本在内的总成本最小为目标的联合优化模型。

3)考虑到所建模型存在变量多、变量的整数与实数并存的特点,本文采用改进的离散型APSO算法进行求解。

4)算例分析。选取某公交线路,对该线路上全部电动公交车的日运行充电问题进行算例分析,并在多种运行场景进行对比分析。

2 道路特征、实时交通特征、环境温度对电动公交车运行时间和能耗的影响

2.1 道路特征对电动公交车运行时间和能耗的影响

在不考虑电动公交车开启空调及车流量因素的前提下,公交车在特定路段上行驶所消耗的能量,即克服汽车轮胎在路面上滚动受到的阻力、汽车行驶遇到的空气阻力、汽车上/下坡的坡度阻力、汽车加速时遇到的加速阻力的能量需求。电动汽车的行驶功率 P_d (单位为kW)与上述因素之间的关系可表示为^[14]:

$$P_d = \eta_T \left(\frac{mgfv}{3600} + \frac{mg\gamma_i v}{3600} + \frac{B_D A v^3}{76140} + \frac{\delta m v}{3600} \frac{dv}{dt} \right) \quad (1)$$

式中: η_T 为传动系数; m 为汽车总质量,单位为kg; g 为重力加速度,单位为 m/s^2 ;v为汽车的速度,单位为km/h; f 为滚动阻力系数,表示车轮在一定的条件下滚动时所需之力与车轮负荷之比; γ_i 为路段*i*的坡度,即路段*i*的坡高与该路段水平长度之比,上坡时其值为正,下坡时其值为负; B_D 为空气阻力系数,表示汽车某一单位面积受到的空气阻力大小,一般汽车迎风面积受到的空气阻力与汽车的行驶速度呈平方正比关系; A 为汽车的迎风面积,表示汽车行驶方向的垂直投影面积,单位为 m^2 ; δ 为汽车旋转质量

换算系数,将汽车因转动的零部件(飞轮车轮等)加速行驶时旋转产生的惯性力偶矩换算成平移惯性力的系数。

在式(1)的所有因素中:汽车轮胎在路面上滚动受到的阻力在城市路面材料和道路铺设条件符合标准的情况下,基本不会随着路段的不同而产生差异,在城市道路采用沥青或混凝土路面的条件下,滚动阻力系数 f 的取值范围为 0.010~0.018;汽车行驶遇到的空气阻力系数 B_0 的取值范围为 0.5~0.8。公交车的加速度主要出现在道路交叉口和从站点上下客之后的短暂时间内,由于其启动较缓慢,且对载客行驶的速度及速度的变化要求非常严格,基本不允许出现显著的加速动作,故可以忽略公交车的加速度。据此,取滚动阻力系数 $f=0.015$,空气阻力系数 $B_0=0.65$,加速度为 0,则式(1)描述的电动汽车的行驶功率 P_d 主要与坡度阻力相关,可将式(1)变为:

$$P_d = \frac{mv(0.015 + \gamma_i)}{386.68} + 8.54 \times 10^{-6} Av^3 \quad (2)$$

假设公交车在以路段长度和坡度为参数的某特征路段上匀速行驶,其在 1 条完整线路上行驶所消耗的电量 E_d (单位为 kW·h) 可表示为:

$$E_d = \sum_{i=1}^n \left[\frac{ml_i(0.015 + \gamma_i)}{386.68} + 8.54 \times 10^{-6} Av^2 l_i \right] \quad (3)$$

式中: l_i 为特征路段 i 的长度,单位为 km; n 为该线路包含的特征路段总数。

电动公交车在 1 条完整线路上的行驶时间 t_{total} 可表示为:

$$t_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{v} + t_w n_s \quad (4)$$

式中: t_w 为公交车在各站点的平均停留时间; n_s 为公交车停靠站点数量。

2.2 实时交通特征对电动公交车运行时间和能耗的影响

2.2.1 实时道路车流量对电动公交车运行时间的影响

在 1 d 中,道路车流量一般呈现 M 形变化,即早晚高峰时段车流量较大,中午时段车流量中等,其余时段车流量较小。不同道路的拥挤状况不同,则汽车在道路上的行驶耗时也不相同^[15]。在早晚高峰时段,公交车作为公共交通工具,为了提升其行驶速度,启用公交专用车道。此时,公交专用车道的拥堵情况优于社会车道,因此公交车的行驶速度大于社会车辆的行驶速度。

当汽车在道路特征相同的路段行驶时,其行驶速度与通行时间成反比,一般可以采用美国 BPR 函数^[16]计算路段的通行时间 t_p ,如式(5)所示。

$$t_p = t_0 \left[1 + \alpha \left(\frac{q}{S} \right)^\beta \right] \quad (5)$$

式中: t_0 为该类型汽车自由流通过路段的时间; q 为路段流量; S 为(实际)路段的通行能力; α 、 β 为待定系数,需通过路段实测交通数据进行标定。将式(5)应用于公交车:自由流通过某特征路段的时间 t_0 为路段长度除以公交车的最大速度(40 km/h);在确定待定系数时,仅考虑其与道路路幅和道路限速有关;路段的通行能力表示道路所能承担车辆通过的能力;路段流量表示单位时段内通过某路段的车辆数量。

目前,很多城市都采用间歇式公交车道,即在交通高峰时段开启公交专用车道,以便在拥堵状况下提高公交运力。当公交车的运行时间处于非公交专用车道的规定时间或者该路段无公交专用车道时,公交车与社会车辆混行并相互影响,此时需要考虑路段含社会车辆的总流量。而当路段的公交专用车道开启时,公交车的车速不受社会车辆的影响,只受公交车流量以及公交专用车道通行能力的影响。为了计算某时刻公交车的路段通行时间,将 1 d 划分为 M 个时段以量化公交车的路段流量。公交车行驶线路全程共有 n 个特征路段,于是公交车在时段 k 通过特征路段 i 的时间 t_i^k 可表示为:

$$t_i^k = \begin{cases} \frac{l_i}{40} \left[1 + \alpha_i \left(\frac{Q_i^{\text{car},k} + 1.5Q_i^{\text{bus},k}}{S_i} \right)^{\beta_i} \right] & \text{特征路段 } i \text{ 无公交专用车道或时段 } k \text{ 公交} \\ & \text{专用车道关闭} \\ \frac{l_i}{40} \left[1 + \alpha_i \left(\frac{1.5Q_i^{\text{bus},k}}{S_i^{\text{bus},k}} \right)^{\beta_i} \right] & \text{特征路段 } i \text{ 有公交专用车道且在时段 } k \text{ 开启} \end{cases} \quad (6)$$

式中: α_i 、 β_i 为路段 i 的待定系数; $Q_i^{\text{car},k}$ 、 $Q_i^{\text{bus},k}$ 分别为时段 k 特征路段 i 上社会车辆、公交车的流量; S_i 为路段 i 的通行能力; $S_i^{\text{bus},k}$ 为时段 k 路段 i 公交专用车道的通行能力。

因此,公交车在 1 条完整线路上的行驶时间 t_{total} 为:

$$t_{\text{total}} = \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^n t_i^k + t_w n_s \quad (7)$$

2.2.2 实时上车客流量对电动公交车运行能耗的影响

由式(3)可知,公交车的运行能耗随着公交车载客量的总质量的增大而增大。在公交车的运行过程中,随着时间、站点上下车的乘客数量变化,公交车的总质量发生改变。可用实时上车客流量来描述公交车的质量变化量,从而获得客流量对公交车运行能耗的影响。

断面客流量是表示客流需求量的一个重要指

标,其是指在单位时段内沿同一方向经过某公交线路2个相邻站点之间路段的乘客总数量。为了将以站点为分节点的断面客流量对应到用道路特征划分的路段上,需要将公交车的各站点作为区间节点,补充到路段分段中,从而可得路段*i*区间*j*的各时段断面客流量,进而可得时段*k*区间*j*路段*i*的断面客流量。已知公交车的发车计划,通过计算可获得某时段某区间的公交车数量,设置客流量在某时段所途经的公交车中平均分配,即可获得时段*k*公交车在特征路段*i*的总质量 m_i^k ,如式(8)所示。

$$m_i^k = m_0 + \frac{m_p V_{i,j}^k}{b_i^k} \quad (8)$$

式中: m_0 为公交车的自身质量; m_p 为乘客的平均质量; $V_{i,j}^k$ 为时段*k*特征路段*i*区间*j*的断面客流量; b_i^k 为时段*k*特征路段*i*通过的公交车数量。

因此,式(3)表示的公交车在1条完整线路上行驶所消耗的电量应细化修改为:

$$E_d = \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^n \left[\frac{m_i^k l_i (0.015 + \gamma_i)}{386.68} + 8.54 \times 10^{-6} A \frac{l_i^3}{(t_i^k)^2} \right] \quad (9)$$

2.3 环境温度对电动公交车运行能耗的影响

公交车的运行能耗除了包括行驶所需能耗外,还包括空调的能耗。公交车作为一种常见的公共交通,其除了能带来出行的便利,还需要考虑出行的舒适度,空调是公交车运行中不可缺少的一部分。一般而言,环境温度决定了公交车空调的启停,当夏天气温高于规定温度,或冬天气温低于规定温度时,公交车的制冷或制热空调需要开启。一般电动汽车的空调为变频空调,使用电动压缩机,空调运行时的简化一阶热力学等值模型^[17]为:

$$\frac{d\theta_{in}(t)}{dt_a} = -\frac{1}{DR} (\theta_{in}(t) - \theta_{out} + RP_c) \quad (10)$$

式中: $\theta_{in}(t)$ 为*t*时刻车内温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$; θ_{out} 为车外温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$; t_a 为空调运行时间; R 为等效热阻,单位为 $^{\circ}\text{C}/\text{kW}$; D 为等效热容,单位为 $\text{kW}\cdot\text{h}/^{\circ}\text{C}$; P_c 为空调的制冷/制热功率,单位为 kW , $P_c = \rho P$, P 为用电功率, ρ 为空调的能效比。

设在空调启动时刻,即公交车出发时刻,车内、外温度相同,则车内温度 $\theta_{in}(t)$ 的变化方程为:

$$\theta_{in}(t) = RP_c (e^{-DRt_a} - 1) + \theta_{out} \quad (11)$$

则空调以最大制冷/制热功率 $P_{\max}$ 使车内温度达到设定温度 θ_{set} 所需的时间 Δt_{set} 为:

$$\Delta t_{\text{set}} = -\frac{1}{DR} \ln \left(1 + \frac{\theta_{\text{set}} - \theta_{in}(t)}{RP_{\max}} \right) \quad (12)$$

车内温度达到设定温度 θ_{set} 后,变频空调会降低工作频率以减小电能消耗,维持车内温度在 θ_{set} 附近,此时空调进入稳态运行状态。在稳态运行时,可以近似认为车内温度保持不变,即:

$$\frac{d\theta_{in}(t)}{dt_a} = 0 \quad (13)$$

则稳态运行空调功率 P_{sta} 为:

$$P_{\text{sta}} = \frac{\theta_{\text{out}} - \theta_{\text{set}}}{R} \quad (14)$$

因此空调在一定时间 Δt 内的能耗*E*为:

$$E = \begin{cases} \rho \Delta t P_{\max} & \Delta t \leq \Delta t_{\text{set}} \\ \rho [\Delta t_{\text{set}} P_{\max} + (\Delta t - \Delta t_{\text{set}}) P_{\text{sta}}] & \Delta t > \Delta t_{\text{set}} \end{cases} \quad (15)$$

由于公交车一个班次的运行时间相对较短,室外气温变化不大,设置公交车在一个班次运行中,空调按出发时刻的车外温度决定是否开启,空调开启后,则维持开启状态不变。同时,公交车空调的开启时间远大于使空调达到设定温度的时间,因此公交车在1条完整线路上开启空调消耗的电量 E_a 为:

$$E_a = \varepsilon \rho [t_{\text{set}} P_{\max} + (t_{\text{total}} - \Delta t_{\text{set}}) P_{\text{sta}}] \quad (16)$$

$$\varepsilon = \begin{cases} 1 & \text{外界温度低于或高于规定温度} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

因此,公交车在1条完整线路上所消耗的总电量 E_{total} 包括公交车行驶所消耗的电量和开启空调消耗的电量,如式(17)所示。

$$E_{\text{total}} = E_d + E_a \quad (17)$$

3 电动公交车备用率与充电桩的联合优化模型

公交线路应具有一定的公交车备用率,以避免车辆运行故障影响正常发车,同时还可通过选择车辆的充电时间来降低充电成本。而电动公交车备用率、充电桩数量与充电成本相互影响。在峰谷电价机制下,若降低公交车备用率,则站内停驶车辆数量减少,公交车的充电自由度减小,充电时间的可选择性降低,公交车会更更多地偏向于在电价峰值时段充电,导致充电成本增加。而增加公交车备用率,则公交车的数量增加,充电成本会降低。同时,若充电桩的数量与需要充电的车辆数量不匹配,则也会带来充电成本增加或者投资成本增大。

本文针对公交线路年度内的投资及运行总成本进行优化,以各季节代表日为基础进行日运行成本模型计算,其中包含归算到每天的日公交车购置成本、日充电桩建造成本以及日充电成本。在满足公交车运营基本需求和保证车内温度的前提下,构建最小化总成本的数学模型。

3.1 目标函数

目标函数为最小化公交线路的日均总成本 C_{cost} ,如式(18)所示。

$$\min C_{\text{cost}} = c_b + c_e + c_f \quad (18)$$

$$c_b = n_b p_b \quad (19)$$

$$c_e = n_e p_e \quad (20)$$

$$c_f = \sum_{k=1}^M p_k t_{\text{int}}^k n_{\text{cd}}^k P_{\text{cd}} \quad (21)$$

$$p_b = \frac{\sigma_b}{365} \frac{\zeta_b}{1 - 1/(1 + \zeta_b)^{\chi_b}} \quad (22)$$

$$p_c = \frac{\sigma_c}{365} \frac{\zeta_c}{1 - 1/(1 + \zeta_c)^{\chi_c}} \quad (23)$$

式中: c_b 、 c_c 、 c_f 分别为日公交车购置成本、日充电桩建造成本、日充电成本; n_b 为公交车数量; p_b 为单辆公交车的日均购置成本; σ_b 为公交车的购置费用; ζ_b 为公交车的贴现率; χ_b 为公交车的运行年限; $\frac{\zeta_b}{1 - 1/(1 + \zeta_b)^{\chi_b}}$ 为公交车的资金年金回收系数,表示将一次性总投资折算为年平均投资费用; n_c 为充电桩数量; p_c 为单根充电桩的日均建造成本; σ_c 为充电桩的建造费用; ζ_c 为充电桩的贴现率; χ_c 为充电桩的运行年限; p_k 为时段 k 的充电电价,单位为元/(kW·h); t_{int}^k 为时段 k 内的充电时长,单位为h; n_{cd}^k 为时段 k 的充电公交车数量; P_{cd} 为公交车的充电功率。

3.2 约束条件

1) 公交车数量应不小于高峰期的最大运行车数,即:

$$n_b \geq n_{o, \max} \quad (24)$$

式中: $n_b = n_{o, \max} (1 + \omega)$, $n_{o, \max}$ 为高峰期的最大运行车数, ω 为公交车备用率。

2) 各时段的充电公交车数量应不大于充电桩数量和站内车数,即:

$$n_{\text{cd}}^k \leq \min \{ n_c, n_{\text{bus}}^k \} \quad (25)$$

式中: n_{bus}^k 为时段 k 站内车数。

3) 各时段的总剩余电量应不大于公交车电池电量的最大值,即:

$$E_{\text{left}}^k \leq n_b E_b \quad (26)$$

式中: E_{left}^k 为时段 k 的总剩余电量; E_b 为公交车电池的最大电量。

4) 1 d内的总充电电量应等于日内消耗总电量,即:

$$\sum_{k=1}^M t_{\text{int}}^k n_{\text{cd}}^k P_{\text{cd}} = \sum E_{\text{total}} \quad (27)$$

5) 各时段在运公交车数量、充电公交车数量、闲置公交车数量之和应等于公交车总量,即:

$$n_o^k + n_{\text{cd}}^k + n_w^k = n_b \quad (28)$$

式中: n_o^k 、 n_w^k 分别为时段 k 的在运、闲置公交车数量。

6) 各时段的总剩余电量应不小于在运公交车行驶完剩余路程所需电量加一定的电量警戒值,即:

$$E_{\text{left}}^k \geq E_{\text{finish}}^k + 0.2 n_b E_b \quad (29)$$

式中: E_{finish}^k 为时段 k 在运公交车行驶完剩余路程所需电量; $0.2 n_b E_b$ 为设定的公交车电池电量警戒值,当电池电量低于20%时,电池电压变化较大,这会缩短电池的寿命。

7) 各时段累计充电电量应不大于各时段累计归

站公交车总耗电量,即:

$$E_{\text{charge}}^k \leq E_{\text{back}}^k \quad (30)$$

式中: E_{charge}^k 为时段 k 的累计充电电量; E_{back}^k 为时段 k 的累计归站公交车总耗电量。

8) 各时段站内公交车及近期返回的公交车中电量最大的1辆公交车可以满足下一班次的发车要求,即:

$$E_{c, \max}^k \geq E_{\text{cost}}^k + 0.2 E_b \quad (31)$$

式中: $E_{c, \max}^k$ 为时段 k 站内公交车及近期返回的公交车中的电量最大值; E_{cost}^k 为下一班次在时段 k 发车的耗电量。

4 改进的离散型 APSO 算法的求解

粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法具有不要求被优化函数具有可微、可导、连续等性质,收敛速度较快等优点,但易早熟和陷入局部最优。为了弥补这一缺点,在粒子群的迭代循环中加入自适应策略构造 APSO 算法,从而大幅提高算法找到全局最优解的概率。

本文将 APSO 算法用于解决公交车和充电桩的联合优化问题具有可行性。然而,传统 APSO 算法选取的变量种群通常是连续且线性无关的,但本文建立的模型中所描述的公交车总数、充电桩总数、各时段充电公交车数量这3个变量离散、维度不同且存在非线性耦合关系,因此需要对传统 APSO 算法进行改进。改进的离散型 APSO 算法的流程图如图2所示。

改进算法针对离散型 APSO 算法的具体改进如下:①需要保证所生成的粒子具有离散性且为整数,因此粒子的位置和速度在初值生成及后续迭代中均需根据上下限取整,以保证粒子在算法中的离散性;②针对多维粒子的非线性耦合问题,需要去耦合。算法以公交车总数和各时段充电公交车数量为自变量,充电桩数量为各时段充电公交车数量的最大值。由于各时段充电公交车数量的维度高于公交车总数且相互关联,先形成满足约束的公交车总数,并根据各时段在外运行公交车数量(已知量),获得各时段的充电公交车数量,从而得到充电桩数量。在粒子群的迭代过程中,需要先后对2个自变量更新其速度与位置并进行自适应变异,以保证自变量的非线性耦合关系。

5 算例分析

以某公交线路的全部电动公交车在1 d内的运行充电为背景,分析电动公交车、充电桩和日均充电总成本及其变化关系。该线路发车时段为06:00—23:00,公交车在1 d内共运行125班次,每个小时内的发车间隔随客流量的大小变化。该公交线路全长19.85 km,共有19个经停站点,各站点之间的路段长

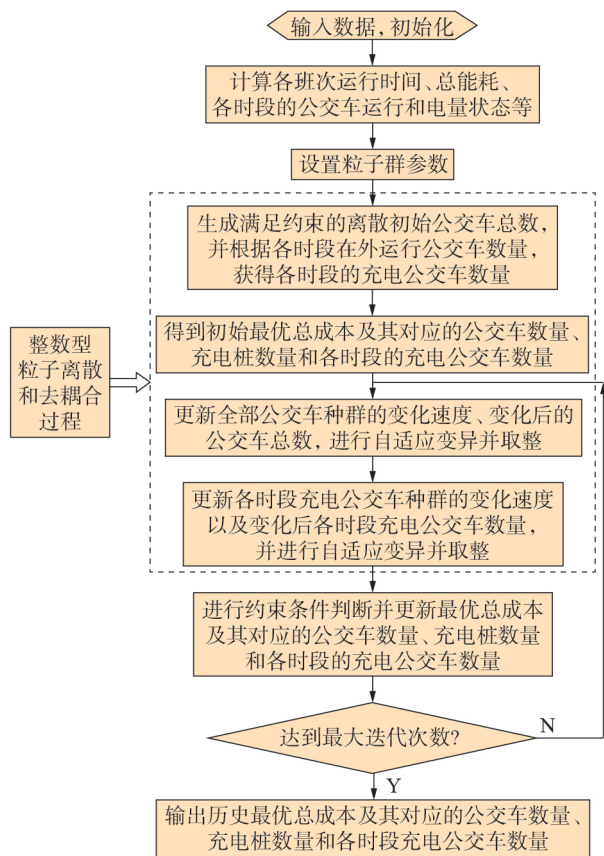


图2 改进的离散型APSO算法的流程图

Fig.2 Flowchart of improved discrete APSO algorithm

度、坡度均不同,见附录A表A1。

纯电动公交车的购置成本为57.5万元/辆,贴现率为5%,运行年限为5a,折合成日购置成本为364.28元/辆;60kW充电桩的建造成本为6.1万元/根,贴现率为5%,运行年限为5a,折合成日建造成本为38.58元/根;充电价格采用峰平谷电价,峰、平、谷时段的电价分别为1.4002、0.8745、0.3748元/(kW·h)。公交车的运行路线示意图见附录A图A1。

5.1 算例结果

5.1.1 公交车发车班次及运行时长

根据公交线路的长度、坡度以及公交专用车道的分布情况,结合各路段的车流量和各站点的客流量,得到公交车各班次的运行时长如图3所示。由图可知,公交车的运行时长不均匀,整体呈现M形,这与道路车流量的规律相符。

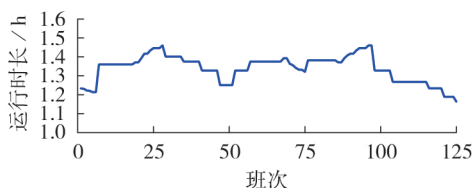


图3 公交车各班次的运行时长

Fig.3 Operation duration of each bus shift

5.1.2 各班次公交车在不同季节的运行能耗

基于公交车运行时间内各站点的客流量,以某地四季的日内气温变化为参考,当夏季环境温度大于26℃时开启制冷空调,设定温度为26℃;当冬季环境温度低于6℃时开启热空调,设定温度为18℃。不同季节各班次公交车的运行能耗如图4所示。由图可看出:不同季节公交车的运行能耗相差较大,各班次的能耗变化趋势也大不相同;夏季公交车的运行能耗高峰出现在曲线中段,冬季公交车的运行能耗高峰出现在曲线的两端,春秋季公交车的运行能耗曲线相对平稳。

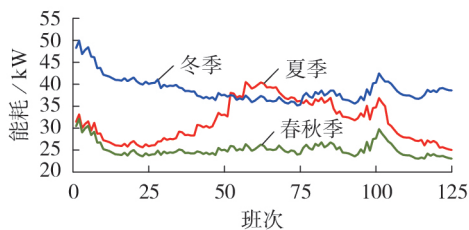


图4 不同季节各班次的运行能耗

Fig.4 Operation energy consumption of each shift in different seasons

5.1.3 全年最优购置方案和日均投资及运行总成本

将上述数据代入电动公交车备用率与充电桩的联合优化模型,在MATLAB 2019环境下编写改进的离散型APSO算法,采用APSO算法和传统PSO算法得到各季节的最优购置方案和日均投资及运行总成本,并将各季节的购置方案代入全年运营环境,发现只有冬季的购置方案能满足全年运营要求,由此得到全年的最优购置方案及全年日均投资及运行总成本,如表1所示。

表1 各季节、全年的最优购置方案和日均投资及运营成本

Table 1 Optimal purchase scheme and average daily investment and operation cost of each season and all year

季节	算法	公交车数量/辆	充电桩数量/根	日均投资及运行总成本/元	公交车备用率/%
春秋季	APSO	16	6	8365.3096	0
	PSO		5	8569.7949	
夏季	APSO	17	7	9632.0622	5.88
	PSO		9	9940.4079	
冬季	APSO	18	9	10982.1451	11.11
	PSO		9	11420.5255	
全年	APSO	18	9	9662.1917	11.11
	PSO		9	10171.0942	

对比表1中APSO算法和PSO算法的结果可知,2种算法所得公交车数量、充电桩数量和公交车备用率结果差别不大,但APSO算法获得的各季节和全年情况下的日均投资及运行总成本均明显小于

PSO 算法。综合考虑该地区四季的公交车运行情况,为了保证公交车的正常运行、公交车及其充电桩投资及运行总成本最小,该线路应购置 18 辆公交车,建造 9 根充电桩,此时全年日均投资及运行总成本约为 9662.19 元。

5.2 交通特征对结果的对比分析

考虑到包含道路特征、实时车流量、公交专用车道和客流量的交通特征对电动公交车运行时间和能耗的影响,而其映射到公交车及其充电桩投资运行和公交车备用率方面的结果尚不可知。因此,针对道路特征,采用公交车在不同运行路线上的路段坡度数据,将线路的道路特征划分为平坦、一般、陡峭 3 种情况。不同的坡度下全年的最优购置方案和日均投资及运行总成本结果见附录 A 表 A2。针对车流量,考虑车流变化更大的车流量数据和车流量相对不变的理想情况,不同的车流量情况下全年的最优购置方案和日均投资及运行总成本结果见附录 A 表 A3。在公交专用车道方面,考虑各路段没有公交专用车道以及公交专用车道数较多的情况,不同的公交专用车道情况下全年的最优购置方案和日均投资及运行总成本结果见附录 A 表 A4。对于客流量因素,采用本文算例的断面客流量数据平均值作为运行时间内各站点的实时客流量,得到客流量不变情况下的结果,并将其与采用高峰期客流量差异变化增多 1 倍的情况进行对比,结果如附录 A 表 A5 所示。

不同交通特征对公交车运行时间、能耗、投资及运行总成本、公交车备用率等结果的具体影响见表 2。

表 2 不同交通特征对结果的具体影响
Table 2 Specific impact of different traffic characteristics on results

交通特征	具体影响
道路特征	坡度越大,公交车运行能耗越大,公交车和充电桩总数越大,日均投资及运行总成本越大,公交车备用率越大
实时车流量	车流量变化越大,公交车运行时间差越大,最大运行车数越大,公交车总数越大,公交车备用率越小
公交专用车道	公交专用车道越多,高峰期平均运行时间越小,最大运行车数越小,公交车备用率越大
客流量	客流量变化越大,能耗差越大,充电桩数量越大,日均投资及运行总成本越大

5.3 环境温度对结果的影响

环境温度决定了公交车的空调是否开启,同时也会影响公交车空调的能耗,不同地域不同季节的环境温度差别明显,因此需要考虑其对公交车及其充电桩投资的影响。分别采用不同季节以及夏、冬 2 个季节气温相对极端的其他地区的环境温度数据代入模型进行计算,具体环境温度见附录 A 表 A6。

不同季节和气温条件下的最优购置方案和日均总成本结果见表 3。

表 3 不同季节和气温条件下的最优购置方案和日均投资及运营成本

Table 3 Optimal purchase scheme and average daily investment and operation cost under different seasons and temperature conditions

季节	气温条件	各班次平均耗电量 / (kW·h)	日均投资及运行总成本 / 元	充电成本 / 元	公交车总数 / 辆	充电桩总数 / 根
夏季	一般	31.58	9632.062	3169.242	17	7
	较热	36.84	10552.163	4012.183	17	9
冬季	一般	38.88	10982.145	4077.885	18	9
	较冷	44.95	12203.047	4895.927	19	10
春秋季	一般	25.18	8365.309	2305.349	16	6

对比各班次平均耗电量可以看出,夏季、冬季的平均耗电量明显大于春秋季的平均耗电量,冬季较冷时公交车的平均耗电量比春秋季大 78.5%,夏季较热时公交车的平均耗电量比春秋季大 46.3%,且夏季、冬季极端气温的耗电量也有明显上升,这是因为空调在夏季、冬季开启更频繁,且温差变大时空调需要耗费更多的电量来维持空调设定温度。环境温度造成的能耗影响也会映射在公交车及其充电桩的投资和运行成本上,对比一般气温条件与极端气温条件下的日均投资及运行总成本可知,夏季较热、冬季较冷气温条件下的成本都有明显上升,虽然公交车总数和充电桩总数的增加均是使日均投资成本上升的因素之一,但是极端气温条件下充电成本的显著增加使得日均运行成本增加更为明显。

6 结论

本文综合考虑道路特征、实时交通特征、环境温度这 3 个要素,以日公交车购置成本、日充电桩建造成本、日充电成本之和最小为目标,建立了公交车备用率与充电桩的联合优化模型,并采用改进的离散型 APSO 算法进行求解。以某公交线路多场景下的运行充电为例进行对比分析,验证所建优化模型的正确性,并得到如下主要结论。

1)车流量和公交专用车道对公交车及其充电桩的投资及运行成本的影响相对较小,但对公交车备用率的影响较为直接。车流量峰谷差的增大会导致公交车总数上升,公交车备用率下降;公交专用车道越多,公交车总数基本不变,而公交车备用率会上升。

2)公交车的运行能耗对公交车及其充电桩投资及运行成本的影响直接且显著,但对公交车备用率的影响较小。道路坡度越大、公交车车内外温差越大,则公交车的运行能耗越高,公交车及充电桩总数

和日均投资及运行成本均上升;客流量变化量与充电桩总数呈正相关。

3)考虑交通特征和环境温度对电动公交车及其充电桩的投资及运行成本进行分析,可以得到更符合现实情况的结果,使得公交车及其充电桩运行于有足够备用率且经济性较优的环境。

实际上,公交车充电站的运行还受制于电网结构和容量限制,此外,公交车充电站与可再生分布式发电联合运行的方式也会得到大力发展,故结合电力网络结构约束,探讨公交车充换电的多种优化运行方式,将成为下一步工作的研究重点。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 徐冉,徐潇源,王晗,等.考虑公交车移动特性的电动公交车充电站-配电网联合调度[J].电力系统自动化,2022,46(24):36-44.
XU Ran, XU Xiaoyuan, WANG Han, et al. Coordinated dispatching of electric bus, charging station and distribution network considering bus travelling characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(24): 36-44.
- [2] 曹昉,胡佳彤,罗进奔,等.基于路网动态模型下EV路径模拟的快速充电站容量配置[J].电力自动化设备,2022,42(10):107-115.
CAO Fang, HU Jiatong, LUO Jinben, et al. Capacity configuration of fast charging stations based on EV path simulation under dynamic model of transportation network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(10): 107-115.
- [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] 蔡子龙,束洪春,杨博,等.计及行车计划编制的电动公交车有序充电策略[J].电力自动化设备,2021,41(6):45-56.
CAI Zilong, SHU Hongchun, YANG Bo, et al. Coordinated charging strategy of electric bus considering driving plan[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(6): 45-56.
- [5] 蔡子龙,束洪春,杨博,等.电动公交区域调度计划与有序充电策略研究[J].电网技术,2021,45(6):2246-2257.
CAI Zilong, SHU Hongchun, YANG Bo, et al. Research on regional dispatching plan and coordinated charging strategy of electric bus[J]. Power System Technology, 2021, 45(6): 2246-2257.
- [6] 姚蓝霓,张勇军,唐渊,等.考虑响应程度反馈和昼夜充电分布的公交车站双阶段响应模型[J].电力自动化设备,2022,42(10):62-69.
YAO Lanni, ZHANG Yongjun, TANG Yuan, et al. Two-stage response model of bus station considering response degree feedback and day-night charging distribution[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(10): 62-69.
- [7] 陈丽娟,秦萌,顾少平,等.计及电池损耗的电动公交车参与V2G的优化调度策略[J].电力系统自动化,2020,44(11):52-60.
CHEN Lijuan, QIN Meng, GU Shaoping, et al. Optimal dispatching strategy of electric bus participating in vehicle-to-grid considering battery loss[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(11): 52-60.
- [8] 钱斌,石东源,谢平平,等.电动公交车换电站-电池充电站优化规划[J].电力系统自动化,2014,38(2):64-69,84.
QIAN Bin, SHI Dongyuan, XIE Pingping, et al. Optimal planning of battery charging and exchange stations for electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(2): 64-69, 84.
- [9] LIANG Y C, DING Z H, DING T, et al. Mobility-aware charging scheduling for shared on-demand electric vehicle fleet using deep reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(2): 1380-1393.
- [10] 高虹.考虑能耗不确定性的电动公交车队鲁棒充电策略[D].大连:大连理工大学,2021.
GAO Hong. Robust charging strategy for electric bus fleet considering uncertainty of energy consumption[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [11] 肖白,朱珈汛,姜卓,等.考虑车辆充电调度机制的电动公交车充电站规划[J].电力自动化设备,2022,42(1):148-155.
XIAO Bai, ZHU Jiaxun, JIANG Zhuo, et al. Planning of electric bus charging station considering vehicle charging scheduling mechanism[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(1): 148-155.
- [12] 李珂,王华昕,倪静,等.基于双层规划的电动公交快充站经济性充电策略研究[J].电测与仪表,2021,58(4):128-135.
LI Ke, WANG Huaxin, NI Jing, et al. Research on economical charging strategy of electric bus fast charging station based on bi-level programming[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(4): 128-135.
- [13] 武小梅,冯琪劲,严干贵,等.基于双层优化的电动公交车有序充电策略[J].电网与清洁能源,2021,37(1):119-126.
WU Xiaomei, FENG Qijin, YAN Gangui, et al. A coordinated charging strategy of electric buses based on bi-level optimization[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(1): 119-126.
- [14] 陈浩,王岩松.汽车理论[M].北京:清华大学出版社,2015:42-43.
- [15] 曹昉,李赛,张姚.考虑充电站吸引力的EV充电负荷时空分布模拟[J].电网技术,2021,45(1):75-87.
CAO Fang, LI Sai, ZHANG Yao. Temporal and spatial distribution simulation of EV charging load considering charging station attractiveness[J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 75-87.
- [16] WANG X, SHAHIDEHPOUR M, JIANG C W, et al. Coordinated planning strategy for electric vehicle charging stations and coupled traffic-electric networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(1): 268-279.
- [17] 曹昉,李赛,张姚.基于前景理论量化充电效用的浮动充电服务费用优化[J].电力建设,2019,40(9):107-115.
CAO Fang, LI Sai, ZHANG Yao. Optimization of floating charging service fee based on the prospect theory for quantifying charging utility[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(9): 107-115.

作者简介:

曹昉(1971—),女,副教授,博士,主要研究方向为电动汽车用电行为和电网规划运行(E-mail: caofang@ncepu.edu.cn);

郑怡馨(1998—),女,硕士研究生,主要研究方向为电动汽车用电行为(E-mail: zhengyixin1998@126.com)。

(编辑 陆丹)

(下转第150页 continued on page 150)

Two-stage transient stability assessment of power system based on boundary enhanced hybrid sampling

ZHOU Shengcun¹, LUO Yi¹, YI Xuancheng¹, WU Yaning¹, LI Ding¹, LEI Cheng²

- (1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
2. Development Research Institute of China Southern Power Grid, Guangzhou 510530, China)

Abstract: Due to the inherent imbalance of samples, the transient stability prediction method based on data mining is tough to be used in engineering practice, for which, a two-stage transient stability evaluation model based on boundary enhanced hybrid sampling is proposed. In the first stage, the pre-trained cascaded convolutional neural network model is used to determine the boundary and non-boundary sample sets, the conditional generative adversarial network is used to synthesize the unstable samples of boundary set, and the stable samples of non-boundary set are under sampled to achieve boundary reinforcement. In the second stage, the convolutional neural network model is retrained with the reconstructed sample set after hybrid sampling to better mine the hidden features of unstable samples, and the improved focal loss function is used for enhancing the learning ability of the model to the samples of boundary set. The simulative results of New England 39-bus system and a provincial power grid in Southern China show that the proposed model can effectively reduce the omission rate of unstable samples, improve the overall prediction accuracy, and still have good evaluation performance in the case of extremely unbalanced samples.

Key words: boundary reinforcement; hybrid sampling; transient stability; imbalanced classification; convolutional neural network

(上接第134页 continued from page 134)

Joint optimization of electric bus reserve rate and charging piles considering real-time traffic characteristics

CAO Fang, ZHENG Yixin, WANG Siqi, WANG Chunyi, QI Yueying

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In order to improve the total investment and operation economy of electric buses and charging stations, the purchase cost of buses and charging piles and the charging cost should be considered comprehensively. The driving time and energy consumption of electric buses are calculated with road characteristics, real-time traffic characteristics and environment temperature as the main influencing factors. On the premise of meeting the basic needs of bus operation and ensuring the temperature inside the bus, the joint optimization model of electric bus reserve rate and charging piles is established with the goal of minimizing the sum of the daily purchase cost of buses, the daily construction cost of charging piles and the daily charging cost. The improved discrete adaptive particle swarm optimization algorithm is used to obtain the optimal purchase scheme of buses and charging piles, as well as the average daily investment and operation cost of each season and all the year. The validity of the established optimization model is verified by taking the electric buses on a bus route under various operation conditions in a year as an example.

Key words: electric buses; charging piles; charging station; bus reserve rate; real-time traffic characteristics; joint optimization; environment temperature

附录 A

表 A1 公交车运行路段距离及坡度

Table A1 Distance and gradient of bus operation section

路径编号	起终点	距离/km	纵坡/%
1	1-2	1.79	3
2	2-3	0.99	5
3	3-4	0.95	1
4	4-5	1.15	0
5	5-6	1.21	2
6	6-7	1.25	1
7	7-8	0.78	4
8	8-9	1.18	3
9	9-10	1.16	1
10	10-11	0.66	2
11	11-12	0.62	0
12	12-13	1.00	2
13	13-14	1.46	3
14	14-15	0.84	1
15	15-16	1.09	6
16	16-17	0.72	0
17	17-18	1.25	2
18	18-19	0.76	0
19	19-1	1.01	0

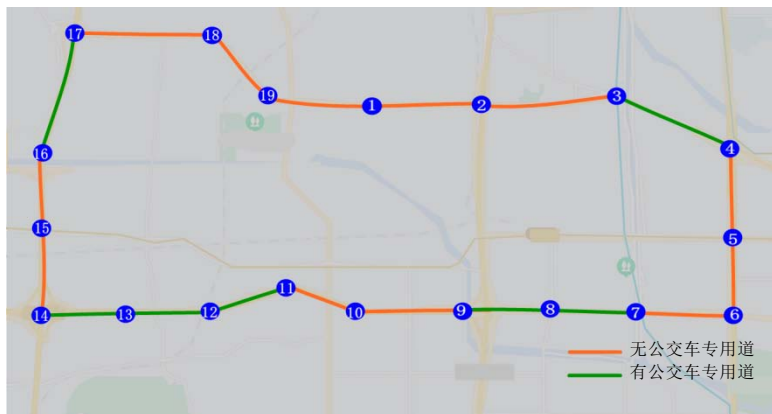


图 A1 公交车运行线路图

Fig.A1 Bus operation route diagram

表 A2 不同坡度下的全年最优购置方案和日均投资及运行总成本

Table A2 Annual optimal purchase scheme and daily average total investment and operation cost under different gradients

道路特征	各班次平均耗电量/(kW·h)	日均投资及运行总成本/元	公交车总数/辆	充电桩总数/根	公交车备用率/%
平坦(最大爬坡角度不超过 6°)	11.19	7175.3100	16	8	0
本文算例	25.18	9662.1917	18	9	11.11
陡峭(最大爬坡角度为 10°)	30.86	10898.4592	19	12	16.67

表 A3 不同车流量变化情况下全年最优购置方案和日均投资及运行总成本
Table A3 Annual optimal purchase scheme and daily average total investment and operation cost under different traffic flow changes

车流量变化情况	最长运行 耗时/h	最短运行 耗时/h	日均投资及运行 总成本/元	公交车总数/辆	充电桩总数/根	公交车备用率/%
车流量不变	1.31	1.26	9460.8615	17	15	11.76
本文算例	1.46	1.16	9662.1917	18	16	11.11
车流量变化大 (车速标准差大近 1 倍)	1.99	1.16	10422.1676	19	19	0

表 A4 不同专用车道情况下全年最优购置方案和日均投资及运行总成本
Table A4 Annual optimal purchase scheme and daily average total investment and operation cost under different special lanes

公交专用 车道情况	公交专用车道 路段数	日均投资及运行 总成本/元	公交车总数/辆	充电桩总数/根	公交车备用率/%	高峰期平均运行时间/h
无公交专用车道	0	9716.3636	18	17	5.56	1.48
本文算例	7	9662.1917	18	16	11.11	1.37
公交专用车道多	15	9423.1824	17	14	17.65	1.23

表 A5 不同客流量变化情况下春秋季最优购置方案和日均投资及运行总成本
Table A5 Optimal purchase scheme and daily average total investment and operation cost in spring and autumn under different passenger flow changes

客流量情况	第 2 班次能耗/ (kW·h)	第 125 班次能耗/ (kW·h)	全天运行总能耗/ (kW·h)	日均投资及运行 总成本/元	公交车总数/辆	充电桩总数/根
客流量不变	27.79	27.62	3148.09	8329.8738	16	6
客流量变化	35.62	23.05	3186.58	8533.2106	16	8

表 A6 夏季和冬季各时段温度
Table A6 Temperature of each period in summer and winter

时段	夏季一般温度/℃	夏季较热温度/℃	冬季一般温度/℃	冬季较冷温度/℃
06:00—07:00	27	35	-7	-15
07:00—08:00	28	36	-6.5	-14
08:00—09:00	28	37	-6	-13
09:00—10:00	29	38	-4.5	-12
10:00—11:00	30	39	-3	-10
11:00—12:00	32	39	-1	-8
12:00—13:00	34	40	-0.5	-7
13:00—14:00	38	41	0.5	-6
14:00—15:00	40	41	1	-5
15:00—16:00	40	40	1	-6
16:00—17:00	38	39	1	-6
17:00—18:00	36	38	0	-7
18:00—19:00	34	37	-0.5	-8
19:00—20:00	33	36	-1	-9
20:00—21:00	30	36	-2	-10
21:00—22:00	29	35	-3	-12
22:00—23:00	28	35	-4	-13
23:00—24:00	28	34	-5	-14
00:00—01:00	28	33	-5	-15