

储能系统与工程

## 复杂运营环境下快充型公交充电策略优化方法

周 丹<sup>1</sup>, 任志伟<sup>1</sup>, 孙 可<sup>1</sup>, 陈锡祥<sup>2</sup>, 郑伟民<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>浙江工业大学信息学院, 浙江 杭州 310023; <sup>2</sup>国网浙江省电力有限公司, 浙江 杭州 310007)

**摘 要:** 纯电动公交车已逐渐成为城市公共交通的主要工具, 如何实现快速及时的电能补给同时避免电网系统在安全性和经济性方面受到影响是当前发展中面临的一个重要问题。在考虑复杂运营环境中影响充电策略的多种因素基础上, 利用双层优化模型和滚动优化方法, 本工作提出了一种纯电动公交车充电策略优化方法。首先建立了以充电费用和电池损耗成本为目标的快速充电双层优化模型, 上层模型预测层根据日前公交车期望满载率、交通指数和分时电价等预测数据给出纯电动公交车日前充电计划, 下层模型调度层根据实时运营数据对日前充电计划进行滚动优化。MATLAB的仿真结果验证了所提出的方法可以有效优化纯电动公交车充电过程, 提高纯电动公交车快速充电的经济性, 同时降低大量纯电动公交车集中充电对电网造成的影响。

**关键词:** 纯电动公交车; 有序充电; 双层优化模型; 间歇充电; 滚动优化; 充电成本

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2019.0140

中图分类号: U 469.72

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2020) 01-195-09

## Optimization method of fast charging buses charging strategy for complex operating environment

ZHOU Dan<sup>1</sup>, REN Zhiwei<sup>1</sup>, SUN Ke<sup>1</sup>, CHEN Xixiang<sup>2</sup>, ZHENG Weimin<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China; <sup>2</sup>State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310007, Zhejiang, China)

**Abstract:** Pure electric buses have gradually become the main mode of urban public transport in China. One of the key issues associated with this development is how to provide rapid and timely electric power supply for the electric buses while avoiding the potential safety and economic impacts associated with a power grid system. This study proposes a charging strategy optimization method for pure electric buses using a double-level optimization model and a rolling optimization method while considering multiple factors that affect the charging strategy in a complex operating environment. First, this study establishes a two-tier optimization model for rapidly charging pure electric buses, aiming to minimize the costs associated with the charging and battery loss. The upper tier predicts a forecast charging plan for pure electric buses based on the expected full load rate, traffic index and time-of-use electricity cost. The lower tier is the model-dispatching level, which performs rolling optimization of the forecasted charging plan according to the real-time operation data. The MATLAB simulation results reveal that the proposed method can effectively optimize the pure electric bus charging process, improve the economy of rapid charging, and reduce the impact of concentrated charging of a large number of pure electric buses on the power grid.

收稿日期: 2019-06-21; 修改稿日期: 2019-09-02。

基金项目: 浙江省重点研发计划项目 (2019C01149)。

第一作者及联系人: 周丹 (1983—), 男, 博士研究生, 高级工程师,

主要研究方向为储能并网、可再生能源消纳技术, E-mail: zhou dan@zjut.edu.cn。

**Key words:** pure electric bus; coordinated charging; two-layer optimization model; intermittent charging; rolling optimization; charging costs

近年来国家在城市公共交通领域开始优先推广使用纯电动公交车,并在《“十三五”现代综合交通运输体系发展规划》中提到在地市级及以上城市全面推进公交都市建设,新能源公交车比例不低于35%的指标<sup>[1]</sup>。尤其在北京、上海、杭州等城市,纯电动公交车发展势头迅猛,由纯电动公交车快速发展带来的问题也成为关注的热点。

首先,现有数据表明<sup>[2]</sup>,纯电动公交车的大量发展已经给电网规划和运行带来了多方面的挑战:①纯电动公交车集群并网主要在负荷高峰期,势必会拉大电网负荷峰谷差<sup>[3-4]</sup>,影响电网稳定性;②充电过程会产生大量谐波,引起设备的附加损耗,加速绝缘老化<sup>[5-6]</sup>;③快充型纯电动公交车短时大功率充电对配变提出了较高的要求<sup>[7-8]</sup>;④充电行为有可能增大线路网损<sup>[9-10]</sup>导致电网运行成本的增加。其次,纯电动公交车充电模式和充电策略的选择会影响车辆的运行调度<sup>[11]</sup>,纯电动公交车的充电时长及续航里程决定了公交车的投入数量和发车间隔。此外,经济成本作为纯电动公交车充电策略优化的主要目标<sup>[12]</sup>,需要考虑分时电价<sup>[13]</sup>、电池使用成本<sup>[14]</sup>、充电设施及配套电网建设和维护费用<sup>[15]</sup>等多种成本因素对纯电动公交车充电策略进行优化。因此,如何对纯电动公交车充电策略进行优化从而降低纯电动公交车的运营成本并减小对电网的冲击成为纯电动公交车推广应用亟需解决的关键问题。

国内外学者在纯电动公交车充电策略方面已经开展了一些研究。文献[16]分析了北京市特定的交通状况,引入了耗时系数来建立优化模型,在目标函数方面着重于负荷波动,最后结合实际数据通过遗传算法求解优化模型实现了削峰填谷的优化目标。文献[17]以电动公交车换电模式为前提,通过研究车辆数量、电池数量、车辆状态和电池充放电状态之间的联系建立充电优化模型,同时考虑了电池放电带来的电池损耗成本。文献[18]在文献[17]的基础上以北京奥运公交站为例,类似地通过研究电池供需关系建立优化模型,根据统计数据验证优化策略的可行性。文献[19]针对整车快速充电模式建立了优化模型,在约束条件方面考虑了配电变压器限制和连续充电限制,最后结合具体的公交车发

车时刻表实现了对分时电价的自主响应。文献[20-21]基于分时电价制度,考虑电网负荷和充电成本构建优化函数。上述研究从不同角度建立了纯电动公交车充电策略的优化模型,实现了纯电动公交车的有序充电,但总体来看仍缺少对实际交通状况以及公交运行状态的综合考虑,以至所得出的优化结果和实际存在一定的偏差,并且这些研究大都以慢充技术为研究对象,大部分研究成果不能直接应用于快充型电动公交系统。

针对上述问题,本工作提出的纯电动公交车充电优化策略采用了双层优化模型和滚动优化方法,通过在优化过程中考虑日前和实时公交车期望满载率、交通指数和分时电价等多个因素来提高充电策略优化效果。所建立的优化模型以“间歇充电”的充电模式为基础,分析了单条线路的充电问题,选择充电费用和电池损耗成本为优化目标,考虑了充电功率和发车电量等约束,最后进行算例分析。从优化结果可以看出所提出的优化方法能有效地应对随机突变的交通状况,明显地降低充电成本和对电网运行的影响。

## 1 纯电动公交车充电需求分析

### 1.1 充电模式分析

近年来,电池技术和快速充电技术的迅速发展,快充模式也在电动公交车的充电中得到应用。一般采用1.0 C充电电流的快充电站,可以30 min为动力电池充满50%的电量,而采用4.0~6.0 C充电电流的快充型电动公交,能实现15 min内充满90%以上的电量<sup>[22]</sup>。由此,在白天运营时段利用公交车跑完一圈的休息时间充电的“间歇充电”运营模式得到了广泛应用。“间歇充电”运营模式可以把车辆电池荷电状态(SOC)始终控制在20%和80%之间,或是30%和70%之间,这样电池一直处于“半充半放”状态,不会过充和过放,循环寿命长,而且“间歇充电”模式下公交车出勤率更高,更能满足线路高频次发车的需求。因此,本工作主要针对基于“间歇充电”模式的快充型纯电动公交车充电策略优化方法展开研究。

## 1.2 复杂运营环境分析

对复杂运营环境的分析是通过集成城市公共交通系统采集的站台、线路、道路、活动场所的交通数据，针对复杂交通系统行为的不可预测性，充分考虑简单对象的主动性和随机性，从行为生成的角度实现对城市公共交通系统的“等价”描述，生成可能情况下的实时、未来的乘客需求，再结合车辆满载人数，来计算得到某一时段内公交车期望满载率的预测数据 $d$ ，正常运行时满载的每公里能耗 $E'$ ，则可以预测第 $n$ 辆车第 $i$ 次充电结束后运行中的平均每公里能耗 $E_{ni}$ 为<sup>[23]</sup>

$$d = \frac{V_{\text{断面}}}{N' \times T} \times 100\% \quad (1)$$

$$m = m_0 + d \times N' \times m_p \quad (2)$$

$$E_{ni} = \frac{1}{\eta} \times \left[ \frac{9.8 \times m \times f}{360} + \frac{C_d \times A \times \left( \frac{L}{T' + T_{\text{delay}ni}} \right)^2}{76140} \right] \quad (3)$$

式中， $V_{\text{断面}}$ 为断面客流量； $N'$ 为公交车额定载客量； $T$ 为该线路公交车班次； $m$ 为公交车总质量， $m_0$ 为空车质量； $m_p$ 为乘客平均体重； $\eta$ 为传动系数； $f$ 为滚动阻力系数； $T'$ 表示道路畅通时运行一圈所用时间； $T_{\text{delay}ni}$ 为第 $n$ 辆车第 $i$ 次入站延迟时间； $A$ 为公交车迎风面积； $C_d$ 表示空气阻力系数。

除此之外，公交运行过程中还会遇到交通事故、恶劣天气、突发事件等异常条件下的道路拥堵情况。本文采用交通指数TPI（traffic performance index）反映交通堵塞情况，同时设立耗时系数 $\alpha$ ，用来预计车辆延迟进站时间，公式见式(4)

$$\text{TPI} = F\left(\frac{H}{H_d}\right) \quad (4)$$

式中， $H$ 为实际车速下该路段的运行时间； $H_d$ 为期望车速下的运行时间； $F(\cdot)$ 为该路段专家打分的换算关系<sup>[24]</sup>。根据交通指数TPI来划分相对应的耗时系数为 $\alpha$ ，如表1所示。

则可以预测第 $n$ 辆车第 $i$ 次入站延迟时

表1 交通指数与耗时系数

Table 1 Traffic index and time-consuming coefficient

交通指数	对应情况	耗时系数 $\alpha$
0~2	畅通	0
2~4	基本畅通	0.08
4~6	轻度拥堵	0.17
6~8	中度拥堵	0.25
8~10	严重拥堵	$\geq 0.25$

间 $T_{\text{delay}ni}$ 为

$$T_{\text{delay}ni} = \alpha \times T' \quad (5)$$

## 2 基于双层优化模型的充电策略

文章提出的纯电动公交车充电策略采用双层优化模型，根据时间尺度不同分为预测层和调度层，充电策略结构如图1所示。预测层负责对采集的数据进行整合，在每天发车前进行日前优化，给出日前调度计划，下发给调度层；调度层对到达快速充电站的车辆进行策略分配以保证优化目标最优；位于调度层的中央控制器对整体执行流程进行监控以及数据链正常传输的控制。本地控制器位于各个充电桩，纯电动公交车进入充电站后立即与充电桩连接，位于充电桩的本地控制器获取该车进站时间、实时SOC、以及离站时间、车辆健康状态等信息，并将这些信息传递给调度层，调度层通过优化计算后得到充电安排，再传递给本地控制器，并由它控制车辆具体充电。

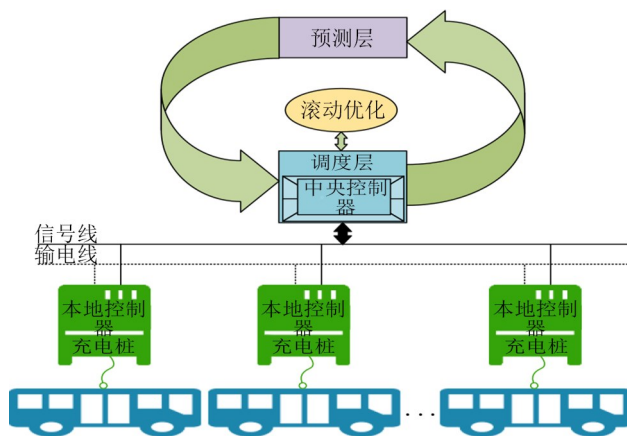


图1 充电站示意图

Fig.1 Charging station schematic

### 2.1 预测层

公交车行驶的线路为环形，在电动公交车环形线路起始站布置快速充电站（fast charging station, FCS）进行充电服务，该线路发车间隔固定为 $T_{\text{interval}}$ ，备用车裕量设置为 $k\%$ ，则维持正常发车计划的最少车辆数目为

$$N = \left( \frac{T'}{T_{\text{interval}}} + 1 \right) \times (1 + k\%) \quad (6)$$

对 $N$ 辆车进行编号1, 2, 3... $N$ ， $N$ 辆车循环发车来完成一天内的发车安排，如图2所示。在每一辆车进站后，司机都有 $T_{\text{interval}}$ 的休息时间，在这段



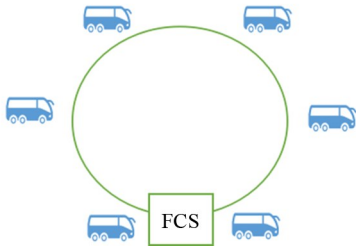


图2 环形线路车辆运行示意图

Fig.2 Ring line buses running diagram

时间内为公交车充电。在快充运营模式下,为了保证车辆的安全运行,每辆车每次充电时间都是固定的。如果实际情况下,有车辆延迟进站,导致在下次发车时刻时没有达到预期的充电时间,可以采用备用车顶班法:让备用车先顶替延迟车辆发车,下次发车时换回原车辆,继续执行公交公司预先制定发车时刻表。可以获知正常情况下该条线路第 $n$ 辆车某一天运行任务中停靠次数是 $a_n$  ( $n=1, 2, 3 \dots N$ ), 停站充电过程近似为恒功率充电, 充电功率 $P_{ni}$  ( $1 \leq n \leq N, 1 \leq i \leq a_n$ ) 表示第 $n$ 辆车第 $i$ 次充电的充电功率。为了防止电池过充和车辆安全运行, 设定 $\text{SOC}_{\max}$ 、 $\text{SOC}_{\min}$ 表示电池荷电状态的阈值。

优化目标为充电综合成本最小

$$\min W_{\text{总}} = W_1 + W_2 \quad (7)$$

式中,  $W_1$ 是充电费用;  $W_2$ 是电池损耗折算成本;  $W_1$ 表示为

$$W_1 = T_{\text{interval}} \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{a_n} (P_{ni} \times \text{price}_j) \quad (8)$$

将24小时分为 $J$ 个时间段,  $\text{price}_j$  ( $j=1, 2, 3 \dots J$ ) 表示第 $j$ 时段电价, 发车间隔 $T_{\text{interval}}$ 是固定的, 第 $n$ 辆车第 $i$ 次进站时间可以表示为

$$H_{ni} = H_s + \frac{i}{a_n} \times (H_m - H_s) \quad (9)$$

式中,  $H_s$ 、 $H_m$ 表示公交车首班车发车时间和末班车收车时间, 由公交车到站时间可以确定所处的 $j$ 时段, 以此得到当前时段所对应的分时电价。

根据锰酸锂电池充电损耗模型<sup>[25]</sup>, 在间歇充电模式下, 假设动力电池报废标准为电池最大荷电量低于80%, 则第 $n$ 辆车第 $i$ 次充放电电池损耗换算为充电成本的计算公式如下

$$W_{ni} = \frac{M_{\text{bat}}}{0.2} \times \zeta_{ni} \quad (10)$$

式中,  $M_{\text{bat}}$ 为电池购置成本;  $\zeta_{ni}$ 为第 $n$ 辆车第 $i$ 次充放电的电池容量损失百分比, 公式为

$$\begin{cases} \zeta_{ni} = (b_1 \times \frac{P_{ni}}{B} + b_2) \times Q^z \\ Q = n_{\text{life}} \times L \times E_{ni} \\ n_{\text{life}} = a \cdot D_{\text{OD}}^{-b} \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $B$ 为电池总电量;  $Q$ 为放电容量;  $b_1$ 、 $b_2$ 、 $z$ 为常量系数; 分别取值为 $0.1979 \times 10^{-3}$ 、 $0.325 \times 10^{-3}$ 、 $0.65$ ,  $n_{\text{life}}$ 为电池循环寿命,  $L$ 为线路长度;  $D_{\text{OD}}$ 表示放电深度;  $a$ 、 $b$ 为相应的系数; 分别设定值为<sup>[26]</sup>1533.8、2.39。 $W_{ni}$ 为在 $P_{ni}$ 充电功率下的电池损耗费用, 则总的电池损耗折算成本 $W_2$ 为

$$W_2 = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{a_n} W_{ni} \quad (12)$$

车辆发车时必须满足电量限制。每辆车在充电后的SOC都必须大于 $\text{SOC}_{\min}$ 加上之后运行单圈消耗的电量, 且要小于 $\text{SOC}_{\max}$ 。第 $n$ 辆车第 $i$ 次入站的SOC记为 $S_{ni}$ , 充电之后运行时每公里能耗为 $E_{ni}$ 。由于在每次计算时, 当前时刻之后的车辆入站的SOC无法获知,  $S_{ni}$ 为每天发车前的车辆起始电量, 而 $S_{ni}$ 在每次优化计算时不会改变, 所以这里采用累加形式, 即第 $n$ 辆车前 $i$ 次充电电量分别满足要求。约束条件见式(13)

$$\begin{cases} \text{SOC}_{\min} \leq S_{n1} + \sum_{i=1}^{a_n} [(T_{\text{interval}} - T_{\text{delay}ni}) \times P_{ni} - LE_{ni}] \leq \text{SOC}_{\max} \\ n=1, 2, 3 \dots N; i=1, 2, 3 \dots a_n \end{cases} \quad (13)$$

充电功率约束见式(14)

$$\begin{cases} P_{\min} \leq P_{ni} \leq P_{\max} \\ n = 1, 2, 3 \dots N \end{cases} \quad (14)$$

## 2.2 调度层

调度层功能是根据预测层提供的日前调度模型进行优化计算, 获得最新的充电安排。纯电动公交车进入充电站后立即与充电桩连接进入充电握手阶段, 位于充电桩的本地控制器获取该车进站时间、当前SOC、以及离站时间、车辆健康状态等信息, 调度层得到这些信息后, 通过优化计算后得到充电安排, 再通过中央控制器传递给本地控制器, 并由它控制车辆具体充电。

为了降低预测误差对优化调度的影响, 本文采用滚动优化技术和离散时间控制, 将运营时间片段化, 对每段进行滚动优化

$$\Delta t = \frac{24h}{J} \quad (15)$$

式中,  $\Delta t$ 为时间段的长度。滚动优化首先以日前计划为第一辆公交车配置充电策略, 随后每次有车驶入充电时, 都会根据预测层最新实时数据和预

测数据进行下一次优化计算，随着时间流不断向前滚动修正日前计划，最终完成一天内的充电优化。滚动优化过程示意如图 3 所示。

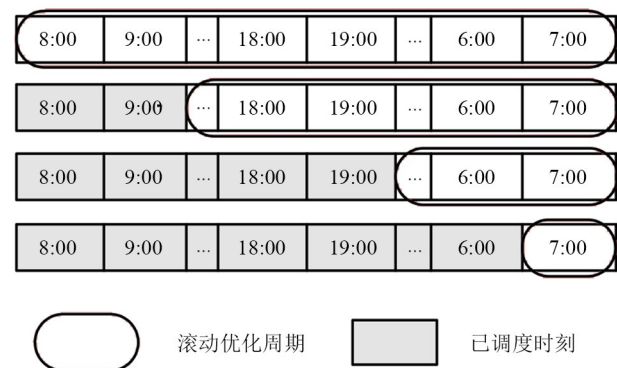


图3 滚动优化过程图  
Fig.3 Rolling optimization process diagram

调度层对于不可控的电动公交车的突发状况例如车辆抛锚、充电桩损坏等，会向预测层给予调度反馈以满足实际情况需要。因此需要调度层中央控制器实时监控所有车辆的健康状态，充电机的健康状态，一旦出现异常情况，立即执行紧急控制策略，即由公交公司决定是否降低离站 SOC 或变动发车时刻表，如果同意，逐次降低 SOC<sub>min</sub>，若在最大修改次数内仍然无法解决异常情况，则仍可以采用备用公交车顶替方案，保证整条线路正常运营。

### 3 算例分析

#### 3.1 参数设置

在离散分段的时间尺度上结合预测数据和实时数据进行滚动优化的过程中，每个时间片段都是随机变量，同时每条公交运行线路的起始时间有所差异，因此算例选取对象为某一个快充充电站，且只考虑一条线路的充电优化问题。本节算例中主要对所提优化策略的可操作性及有效性进行分析验证。选取的公交运行线路最早发车时刻是 7:00，至 21:00 结束运营，发车间隔固定为 0.25 h，备用车裕量为 20%，由式(6)得出总共所需车辆数  $N=6$ 。算例所用电动公交车数据如表 2 所示，乘客平均体重  $m_p$  取 60 kg，传动系数  $\eta$  为 0.9，滚动阻力系数  $f$  为 0.012，公交车迎风面积  $A$  为 6.5 m<sup>2</sup>，空气阻力系数  $C_d$  为 0.65。

充电站提供充电倍率范围为 0.2~2 C，分时电价信息如表 3 所示。

表 2 车辆参数表

Table 2 Vehicle parameter list	
名称	参数
电池总量 $B$	324 kW·h
满载时每公里能耗 $E'$	1.6 kW·h/km
空车质量 $m_0$	14500 kg
线路长度 $L$	50 km
道路通畅时平均单圈运行时间 $T'$	1 h
电池购置成本 $M_{bat}$	20 万元
SOC <sub>max</sub>	0.8
SOC <sub>min</sub>	0.2
额定载客量	50 人

表 3 分时电价信息

Table 3 Time-of-use price information	
时间段	电价/元·(kW·h) <sup>-1</sup>
0: 00—8: 00	0.365
8: 00—12: 00	0.869
12: 00—14: 00	0.488
14: 00—17: 00	0.488
17: 00—21: 00	0.869
21: 00—24: 00	0.365

电动公交车夜间收车时电池电量为 30%，为保养公交车的动力电池，延长使用寿命，电池起始电量  $S_{in}$  设置为 80%。在夜间需要通过慢速充电将电池 SOC 从 30% 充至 80%。该公交车在快速充电模式与常规模式下电池 SOC 对比见图 4。

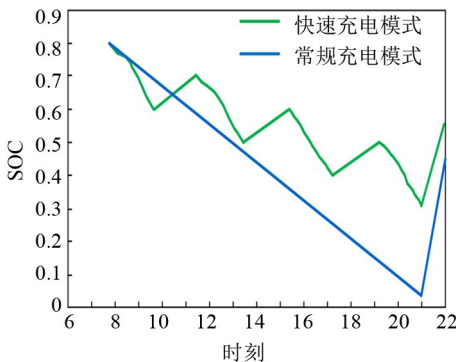


图4 两种充电模式电池 SOC 对比  
Fig.4 Comparison of two charging modes of battery SOC

从图中看到该公交车在白天运营期间的 4 次的快速电能补充，每次充电深度为 10%，放电深度为 20%，而常规的慢充模式一直处于放电状态。从全天的公交车 SOC 来看，快速充电模式下放电深度远

小于常规充电模式，全天运营中的SOC最低为30%，有效防止动力电池过放现象的发生。多次快速的电力补充使得电动公交车有充足的能源应对突发状况。而常规充电模式，收车之前动力电池一直处于放电模式，对电池寿命影响较大，同时限制了公交车的处理突发状况的机动性能。

3.2 滚动优化

算例中所分析的快充型电动公交车在夜间有很长的停靠充电时间，且都属于谷电价时段，所以不考虑夜间充电时的充电优化问题，仅针对白天运营中的充电控制策略进行优化。在每日开始发车前，预测层根据日前调度对今日的公交车期望满载率，交通指数做出预测，预测数据的时间尺度是整个运营时长14 h，如表4、表5所示。在此基础上得到的优化计算结果如图5、6所示。

表4 期望满载率预测数据

Table 4 Expected full load forecasting data

时间段	7:00—10:00	10:00—16:00	16:00—18:00	18:00—21:00
期望满载率	0.8	0.6	0.8	0.6

表5 道路拥堵情况预测数据

Table 5 Road congestion situation forecast data

时间段	7:00—8:00	8:00—11:45	11:45—14:00	14:00—18:00	18:00—19:00	19:00—21:00
交通指数	1	2	1	3	5	2
对应情况	道路畅通	基本畅通	基本畅通	轻度拥堵	轻度拥堵	基本畅通
耗时系数	0	0.10	0	0.10	0.17	0

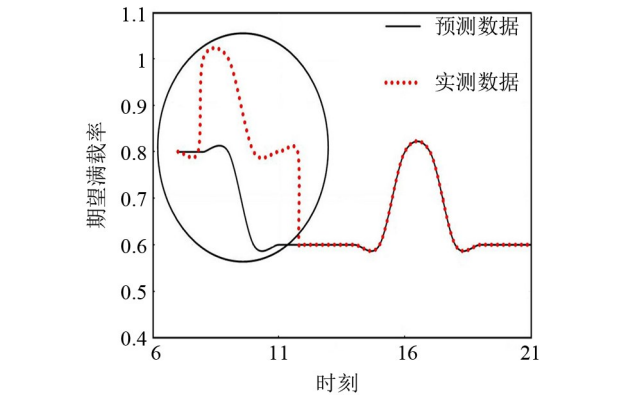


图5 期望满载率曲线  
Fig.5 Expected full load curve

结合图5、6，可以直观了解实时路况对策略优化的影响：在早上8:00到12:00之间，线路上某处

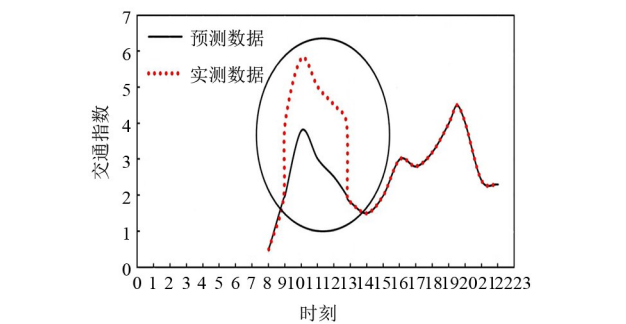


图6 交通指数曲线  
Fig.6 Traffic index curve

表7 充电策略调度图

Fig.7 Charging strategy schedule

停战 <i>i</i>	车辆1	车辆2	车辆3	车辆4	车辆5	车辆6
1	151kW	151kW	129kW	129kW	97kW	97kW
2	152kW	152kW	130kW	130kW	98kW	98kW
3	151kW	151kW	130kW	130kW	291kW	281kW
4	275kW	346kW	130kW	367kW	291kW	281kW
5	275kW	345kW	345kW	367kW	292kW	280kW
6	276kW	345kW	346kW	367kW	292kW	65kW
7	275kW	65kW	65kW	65kW	65kW	65kW
8	65kW	65kW	65kW	65kW	65kW	
9	65kW	65kW	65kW	65kW		

图7 充电策略调度图  
Fig.7 Charging strategy schedule

发生特殊情况致使乘客需求上升，公交车的期望满载率也随之上升，为了安全运行，这段时间内车辆在站充电功率也会相应有所提高。

执行滚动优化后，每次优化计算都用最新的预测数据，不断修正日前调度预测数据。对所得到的实时数据及表2、3中参数对优化模型在MATLAB中进行仿真求解，利用YALMIP工具箱，所调用的求解器为IBM公司的CPLEX软件包。最后滚动优化的求解结果如图7所示。

根据优化结果数据可得到图8中一天中电动公交车的充电总功率曲线。曲线中很明显的功率尖峰和低谷是因为车辆入站时间有不同程度的延迟，在单条线路问题中，充电站出现两辆车同时出现或没有车充电的情景，对应充电总功率会有明显的尖峰和低谷。

通过两条曲线对比看到在8:00到12:00，滚动优化的充电总功率明显比跟据日前调度预测数据优化的高，符合实际的公交运营状况，优化结果更加可靠。

3.3 有序充电策略经济性分析

为了验证有序充电策略的经济性，对电动公交

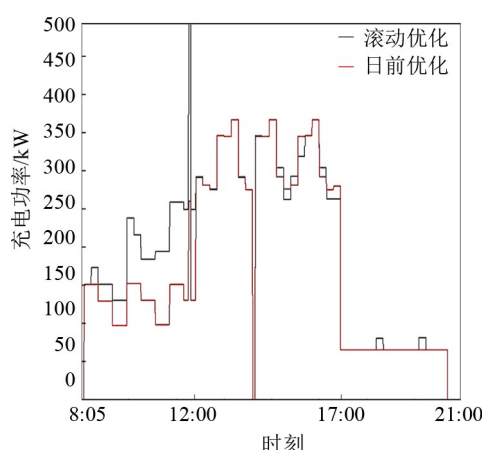


图8 调度预测数据优化

Fig.8 Scheduling forecasting data optimization

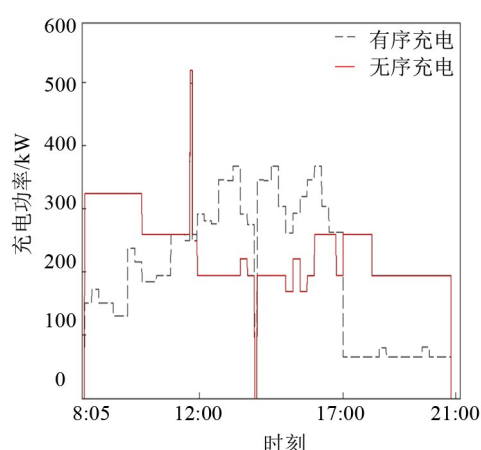


图9 无序充电与滚动优化

Fig.9 Disorderly charge and rolling optimization

的无序充电进行仿真计算并与有序充电进行比较。在无序充电情形下，公交车每次充电的功率只需正好保证下一次发车运营即可。无序充电与滚动优化对比见图9，两者计算所用数据一致。

从图中可看到在峰电价时段（8:00—12:00，17:00—21:00），经过优化后的充电功率明显低于不做优化情形下的充电功率，在平电价时段（12:00—

17:00），经过优化后的充电功率明显高于不做优化情形下的充电功率。所提的有序充电控制策略在分时电价的引导下能实现削峰填谷的作用，减少了对电网运行的冲击。表6为算例中模型目标函数的最终优化计算结果，两种充电方式最终合计充电量一致，但有序充电考虑分时电价的影响，通过比较得出实行有序充电策略后，相比于无序充电综合成本

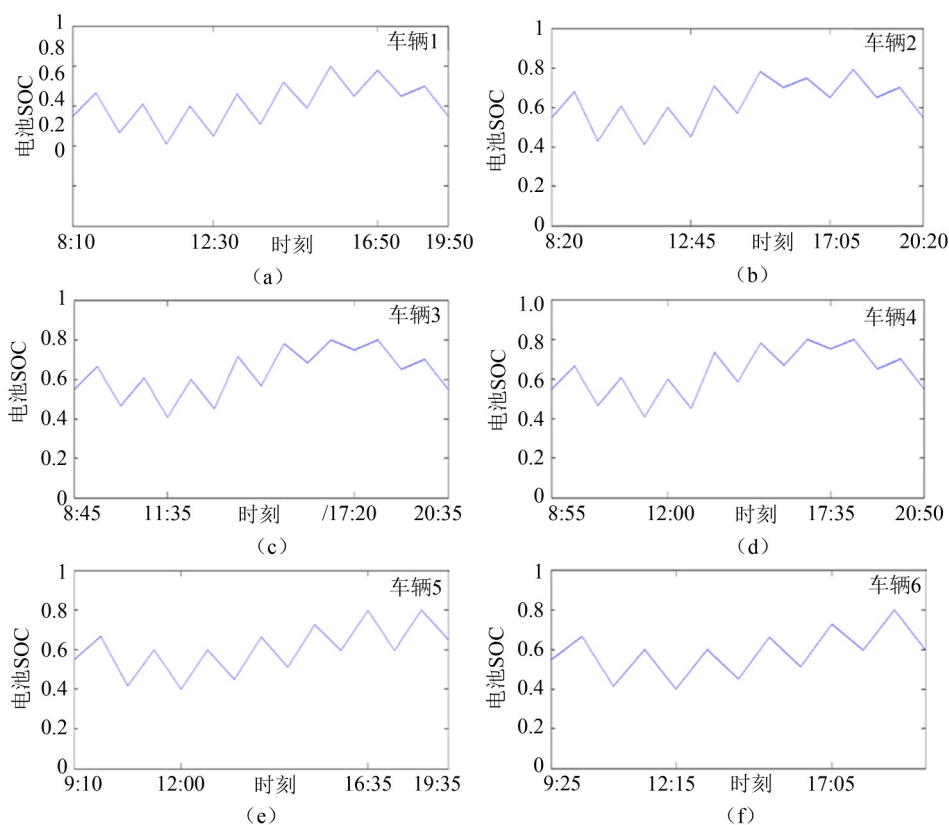


图10 电动公交车SOC变化时序图

Fig.10 SOC change sequence diagram of electric bus



表 6 无序充电与滚动优化

Table 6 Disorderly charge and rolling optimization

分时电价	滚动优化	无序充电
峰电价时段/kW·h	1029.5	1960.2
平电价时段/kW·h	1563.25	1020.6
谷电价时段/kW·h	388.05	0
合计/kW·h	2980.8	2980.8

下降了 18.20%，达到减少公交的成本投入的目标，提高了电动公交运营的经济性。

图 10 为根据滚动优化结束后的结果统计各车辆在运行中的电池 SOC 变化情况。从图中看到所有车辆电池 SOC 都在预先设置好的  $SOC_{max}$  和  $SOC_{min}$  之间，且都处于“浅充浅放”状态。

以由车辆 1 为例，在运营当天平均放电深度为 21%，充电 9 次，快速充电纯电动公交车在循环充放电 2000 次后，容量仍可保持初始容量的 98% 左右；循环充放电 20000 次后，容量衰减了 20% 左右，因此实际使用寿命可达 6 年。对比传统的慢充纯电动公交车，电池经过 1000 次充放电循环后，容量衰减了 20% 以上，续航里程随之下降，电池使用寿命仅为 2~3 年。因此文章提出的快充型充电策略有利于减少电池损耗，提高电池循环寿命。

## 4 结 论

文中针对根据日前调度所得充电策略优化的不确定性，提出了双层优化控制策略，建立了以综合成本为目标的策略模型，采用滚动优化保证公交充电策略的实时性、准确性。仿真分析表明：采用滚动优化可以有效减小预测数据误差对优化结果的影响。并且滚动优化的计算周期不断减小，计算时间不断减小，适用于为多条线路提供充电服务的快速充电站。

本文所提出的方法适用于采用快速充电模式的实际公交系统。预测层依托现代智能交通研究的不断深入，逐渐提升预测数据的准确性；调度层通过多时段优化，实现充电功率削峰填谷和充电成本的降低。基于分时电价，快速充电站在保证正常发车的条件下通过合理分配充电功率可以改变各时段的充电量，降低充电成本，这不仅对公交车“油改电”有利，也对电网安全运行有利，实现双赢。

## 参 考 文 献

[1] 张孝德. “十三五”经济转型升级新思维: 新能源革命引领战略[J]. 国

家行政学院学报, 2015(2): 21-26.

ZHANG Xiaode. "13th Five-Year" new thinking in economic transformation and upgrading: A new energy revolution leading strategy[J]. Journal of China Institute of Public Administration, 2015(2): 21-26.

[2] 郑言冲, 肖新平, 文江辉, 等. 电动汽车智能充电策略研究综述[J]. 集成技术, 2015, 4(1): 83-91.

ZHENG Yanchong, XIAO Xinping, WEN Jianghui, et al. Review of research on intelligent charging strategy for electric vehicles[J]. Integrated Technology, 2015, 4(1): 83-91.

[3] 高赐威, 张亮. 电动汽车充电对电网影响的综述[J]. 电网技术, 2011, 35(2): 127-131.

GAO Ciwei, ZHANG Liang. A Review of the impact of electric vehicle charging on the power grid[J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 127-131.

[4] 李惠玲, 白晓民. 电动汽车充电对配电网的影响及对策[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(17): 38-43.

LI Huiling, BAI Xiaomin. Influence of electric vehicle charging on distribution network and countermeasures[J]. Electric Power System Automation, 2011, 35(17): 38-43.

[5] 周敏, 雷晶晶, 袁语. 电动汽车充电谐波对电能计量影响的仿真分析[J]. 科技创新与应用, 2017(6): 1-5.

ZHOU Min, LEI Jingjing, YUAN Yu. Simulation analysis of electric vehicle charging harmonic effect on electric energy measurement[J]. Scientific Innovation & Application, 2017(6): 1-5.

[6] 程浩, 王光汉. 电动汽车充电谐波抑制技术的进展[J]. 电子世界, 2014 (17): 66.

CHENG Hao, WANG Guanghan. Progress in charging harmonic suppression for electric vehicles[J]. Electronics World, 2014(17): 66.

[7] 熊希聪, 王强钢, 周念成, 等. 于谐波解析的电动汽车充电对配电变压器影响概率评估方法[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2283-2290.

XIONG Xicong, WANG Qianggang, ZHOU Niancheng, et al. Probability evaluation method of electric vehicle charging influence on distribution transformer based on harmonic analysis[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2283-2290.

[8] 王飞. 电动汽车充电负荷对配电变压器寿命损失的影响研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016.

WANG Fei. Study on the impact of electric vehicle charging load on the life loss of distribution transformer[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2016.

[9] 唐兴, 吕林, 王华伟, 等. 考虑网损因素的示范小区电动汽车接入研究 [J]. 华东电力, 2012(3): 434-438.

TANG Xing, LinLYE, WANG Huawei, et al. Study on the access of electric vehicles in model community considering network loss factors [J]. East China Electric Power, 2012(3): 434-438.

[10] 陈加盛, 张建华, 林建业, 等. 以降低电网损耗为目标的电动汽车充电策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(3): 139-144.

CHEN JiaSheng, ZHANG JianHua, LIN Jianye, et al. Electric vehicle charging strategy with the goal of reducing grid losses[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2012, 24(3): 139-144.

[11] 徐刚. 城市纯电动公交车调度优化问题研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2017.



- XU Gang. Study on the optimization of urban pure electric buses scheduling[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017.
- [12] HABIB Salman, KAMRAN Muhammad, RASHID Umar. Impact analysis of vehicle-to-grid technology and charging strategies of electric vehicles on distribution networks: A review[J]. Journal of Power Sources, 2015, doi: 10.1016/j.jpowsour.2014.12.020
- [13] 孙晓明, 王玮, 苏粟, 等. 基于分时电价的电动汽车有序充电控制策略设计[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 191-195.
- SUN Xiaoming, WANG Wei, SU Su, et al. Design of ordered charge control strategy for electric vehicle based on time-of-use price[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 191-195.
- [14] 刘冬梅, 余翔. 杭州市纯电动公交运营现状调查与分析[J]. 交通节能与环保, 2016, 12(2): 18-20.
- LIU Dongmei, SHE Xiang. Investigation and analysis of current status of pure electric bus operation in Hangzhou[J]. Journal of Transportation Energy-Saving & Environmental Protection, 2016, 12(2): 18-20.
- [15] 林程, 孙逢春, 秦志东, 等. 快充型纯电动客车关键技术及应用[J]. 中国科技成果, 2016, 17(18): 64-65.
- LIN Cheng, SUN Fengchun, QIN Zhidong, et al. Key technologies and applications of fast-charged pure electric buses[J]. China Science & Technology Achievements, 2016, 17(18): 64-65.
- [16] 苗淼, 雷霞, 何建平, 等. 考虑削峰填谷的电动公交换电站充电优化研究[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2015(4): 37-41.
- MIAO Miao, LEI Xia, HE Jianping, et al. Research on charge optimization of electric power exchange station considering peak load filling[J]. Journal of Xihua University (Natural Science), 2015(4): 37-41.
- [17] 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 Yuzhe, et al. Charging optimization of pure electric bus based on time-of-use price[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science), 2013, 33(3): 81-87.
- [18] 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 Shaobing, WU Mingli, JIANG Jiuchun, et al. Economic operation optimization strategy of quick-change electric bus charging station[J]. Power System Technology, 2014, 38(2): 335-340.
- [19] 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): 2623-2629.
- LI Bin, LIU Chang, CHEN Huimiao, et al. Ordered charging strategy of electric bus rapid charging station based on mixed integer programming [J]. Power System Technology, 2016, 40(9): 2623-2629.
- [20] 佟晶晶, 温俊强, 王丹, 等. 基于分时电价的电动汽车多目标优化充电策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 17-23.
- TONG Jingjing, WEN Junqiang, WANG Dan, et al. Multi-objective optimization charging strategy of electric vehicle based on time-of-use price[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 17-23.
- [21] 魏大钧, 张承慧, 孙波, 等. 基于分时电价的电动汽车充放电多目标优化调度[J]. 电网技术, 2014, 38(11): 2972-2977.
- WEI Dajun, ZHANG Chenghui, SUN Bo, et al. Multi-objective optimal scheduling for charge and discharge of electric vehicles based on time-of-use pricing[J]. Power System Technology, 2014, 38(11): 2972-2977.
- [22] 邹启凡. 磷酸铁锂快充技术在新能源客车上的应用[J]. 城市公共交通, 2017(9): 45-48.
- ZOU Qifan. Application of lithium iron phosphate fast charge technology to new energy passenger cars[J]. Urban Public Transport, 2017(9): 45-48.
- [23] 陈翠利, 刘广武. 城市轨道交通断面客流量计算方法探讨[J]. 交通科技与经济, 2015, 17(4): 43-46.
- CHEN Cuili, LIU Guangwu. Discussion on calculation methods of passenger volume in urban rail transit[J]. Transport Science & Technology, 2015, 17(4): 43-46.
- [24] 王璐媛, 于雷, 孙建平, 等. 交通运行指数的研究与应用综述[J]. 交通信息与安全, 2016, 34(3): 1-9+26.
- WANG Luyuan, YU Lei, SUN Jianping, et al. A survey of research and application of traffic operation index[J]. Traffic Information and Safety, 2016, 34(3): 1-9+26.
- [25] 高涛. 考虑老化的锰酸锂电池荷电状态估计方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2012.
- GAO Tao. Research on the state of charge estimation method for lithium manganese oxide batteries considering aging[D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.
- [26] DUGGAL I, VENKATESH B. Short-term scheduling of thermal generators and battery storage with depth of discharge-based cost model [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(4): 2110-2118.