

# 不同充电策略对电动公交线路运营影响评估研究

周正\*, 饶明华, 曹飞

重庆公交集团, 重庆

收稿日期: 2021年10月13日; 录用日期: 2021年10月28日; 发布日期: 2021年11月5日

## 摘要

基于“零排放”的绿色目标, 纯电动公交车在公共交通系统的应用越来越广泛。使用不同充电策略的纯电动公交车在运营过程中存在许多差异, 同时会对线路的运营效果产生不同的影响。本文选取快速充电策略和慢速充电策略作为研究对象, 从公交企业的角度出发, 将公交企业的经济效益作为线路运营的评价指标值。基于电动公交单线路运营规则建立基于规则的纯电动公交调度模型, 模型中设立车辆车场调度机制、剩余电量判断机制和车次衔接机制, 利用MATLAB软件进行模型流程编写。以天津市649线路作为模型算例, 带入相关参数, 求解使用不同充电策略的电动公交车行车计划和评估指标值, 进行策略对比和分析。为了更全面对比策略间的差异, 将发车间隔、车次数量和线路长度进行敏感性分析, 对比不同策略在这三大输入参数变化下, 对线路运营效果的影响。

## 关键词

纯电动公交车, 充电策略, 基于规则的调度模型, 行车计划

# Study on Impact Assessment of Different Charging Strategies on Electric Bus Line Operation

Zheng Zhou\*, Minghua Rao, Fei Cao

Chongqing Public Transport Group, Chongqing

Received: Oct. 13<sup>th</sup>, 2021; accepted: Oct. 28<sup>th</sup>, 2021; published: Nov. 5<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

Based on the green goal of “zero emission”, pure electric buses are increasingly used in public

\*通讯作者。

transportation systems. There are many differences in the operation of pure electric buses that use different charging strategies, and they will have different effects on the operation of the line. This article selects the fast charging strategy and the slow charging strategy as the research objects. From the perspective of the bus company, the economic benefits of the bus company are used as the evaluation index value of the line operation. A rule-based pure electric bus dispatching model is established based on the single-line operation rules of electric buses. The model sets up a vehicle yard dispatch mechanism, a remaining power judgment mechanism, and a train number connection mechanism. The MATLAB software is used to compile the model process. Take Tianjin 649 line as a model example, bringing in relevant parameters, solving electric bus driving plans and evaluation index values using different charging strategies, and comparing and analyzing strategies. In order to compare the differences between the strategies more comprehensively, the sensitivity analysis of the departure interval, the number of trains and the length of the route is carried out to compare the influence of different strategies on the operation effect of the route under the changes of these three input parameters.

## Keywords

Pure Electric Bus, Charging Strategy, Rule-Based Scheduling Model, Driving Plan

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

基于“零排放”的绿色目标和对社会经济效益的追求，以电动汽车、电动公交车为代表的许多新能源技术已经越来越受大家的欢迎。新能源技术的出现，带给我们不同于传统技术的思想和变革，它快速成为我们生活中的一部分，也在时刻影响和渗透着我们的日常生活。

然而从传统柴油公交车到纯电动公交车的过渡却遇到了很多的困难。传统柴油公交车虽然利用了非可再生能源，但其行驶里程长，单次载客量大，运营中途不用停靠充电，这对于公交企业的运营效率有着很大的保障。纯电动公交车最大的优势就是利用了可再生能源，对保护环境有着很大的贡献，但要达到和传统柴油公交车一样的运营效率，还需要做出很大的改进。

目前来看，传统柴油公交车向纯电动公交车的过渡主要存在里程限制和充电时间的约束条件。为了提高纯电动公交车在线路运营时的运营效率，需探索和解决里程限制和充电时间这两大障碍约束对电动公交车的影响，而这两大约束条件都体现在不同充电策略所带来的影响下。更是为了公交企业在购买新能源公交车时，能基于实际的公交线路情况更好地对具有不同充电策略的电动公交车进行选择，从而能达到节约公交企业的运营成本并节能减排的经济意义。

近年来，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。苗淼等人[1]分析北京市特定情况下的交通状况，建立了侧重于电力负荷波动的目标函数，引入耗时系数建立优化模型，旨在解决慢速充电下纯电动公交车“削峰填谷”的电力优化目标。王岱等人[2]基于纯电动公交车的整车换电模式，建立电池数量、车辆数量等变量和公交车充放电状态之间的优化模型，同时也考虑了充放电给电池带来的损耗成本。佟晶晶等人[3]基于慢速充电的模式，考虑了分时定价的影响因素，建立了优化模型求解充电成本和电网负荷构建的目标函数。F. R Bminsmac 等人[4]从乘客的角度出发，考虑乘客出行的时间满意度，将公交车的准点率作为公交运营服务水平的评价指标。实验结果表明，公交车的准点率能够综合反

映电动公交车在运营过程中发车时间可靠性。Yuyun Zeng 等人[5]提出了一种模拟公交服务水平的方法,从公交企业的角度分析公交时刻表可靠性,从乘客的角度分析候车时间可靠性。杨扬等人[6]把换电式纯电动公交的车辆调度问题转化为有向网络模型,并采用列生成算法进行求解优化,结果显示运用列生成算法可以降低使用车辆数和总成本。R. F. Roper 等人[7]将一条公交线路上的行程时间可靠性、间隔时间可靠性等指标进行综合,得到了一个综合服务指标,并通过实例分析了同一线路上,不同方向上的公交服务可靠性。

以上的研究者都从不同的角度建立了某种充电策略的优化模型,但总体来看,这些研究都缺少了对交通系统和交通整体运营状态的考虑。本文将从公交企业运营者的角度出发,从不同策略给线路、公交企业带来不同的经济效益进行分析。将评估指标设为公交企业的运营成本,根据单线路车辆调度的特点和实际的单线路公交发车情况建立基于车次衔接约束、充电时长、电量约束、车场容量约束建立单线路公交的调度模型,分析在一天的运营时间内,不同策略的电动公交车调度会给线路带来的运营影响和经济效果。

## 2. 基于单线路运营规则的电动公交调度模型

### 2.1. 问题描述

本文的研究对象是两种类型不同的充电策略:慢速充电和快速充电。两种充电策略都有其对应的特定公交车类型,研究的公交线路为单线路。以天为单位制定电动公交车的调度模型,电动公交基于单线路一天的调度流程可以动态的表现:一天的单线路发车时刻表已定,每辆在车场可以被调度的公交车根据发车时刻表先后从车场出发被调度至首末站进行车次任务的执行,执行任务的过程中车辆会有里程限制、电量限制,每次任务结束后,系统都会根据车辆的剩余电量和剩余的续驶里程判断车辆是否需要到充电站进行充电,充电时长根据车辆所对应的充电策略所决定,充电任务结束后,车辆恢复可执行状态,继续等待被调度执行剩余的可执行班次。

根据单线路车辆调度的动态过程分析,本文建立使用不同策略的电动公交车在一天的运营时间内,基于单线路车辆运营规则的车辆调度模型,设立派车机制。

车辆剩余电量判断机制、车辆续驶里程判断机制、充电机制对车辆进行调度,得到单日车辆行车计划。

### 2.2. 基于单线路电动公交运营规则的调度模型设计

根据单线路电动公交实际运营规则设定,结合现实单线路公交调度的特点,编写调度过程设计如下:

- 1) 根据线路长度、站点设置、充电站设置设定电动公交线路的初始形态;
- 2) 设定系统输入参数,将线路发车时刻表、两种充电策略的电动公交车的充电费用、充电时长、各策略的电动公交车每公里耗电量、车辆放电深度、单位车辆购置成本等数据作为输入值;
- 3) 设定模型最小步长单位为分钟;
- 4) 电动公交车信息初始化,根据发车时刻表,先从车场派遣一部分的车辆分别前往首站和末站;
- 5) 设置车场车辆调用规则,每个车次有且仅有一辆车执行,当首末站车辆不够执行相关车次时应从车场调用车辆,直至车辆数恰好满足当天应执行的车次任务;
- 6) 设置车辆剩余电量判断规则,当车辆到达充电站时,系统应按顺序进行以下判断:
  - 车辆  $k$  在一次放电过程中的累计放电量是否小于该车辆的放电深度,若小于放电深度,则可以进行下一阶段的判断;若大于等于放电深度,则车辆应在充电站进行充电任务;
  - 该车辆完成下一车次并回到车场中的电量是否足够,若不够行驶这些里程,该车应在此充电站进行充电;
- 7) 设置车次衔接规则,电动公交经过车辆剩余电量判断后,需要充电的车辆应在充电站进行充电,

充电时长须小于两个相邻车次的时间间隔；若不进行充电，车辆在两个相邻车次间的衔接时间须小于两个车次的时间间隔；

8) 设置车辆电量更新规则，当车辆充电结束后，该车辆的初始电量变为 100%，累计放电量变为 0；

9) 设置车辆数据更新规则，当每辆车到达其执行车次的终点站时，系统进行车辆数据更新并判断车辆是否完成了今天的车次任务，若完成任务，系统应将车辆状态进行更新；

10) 在一天的运营时间内，从车场发出的车辆若能全部回到车场，则全部车次任务结束。

### 2.3. 车场车辆调用规则

基于单线路电动公交的运营规则和特点，且车辆需满足一天中发车时刻表的任务车次，车辆调用规则为：

1) 发车时刻表中每个车次有且仅需要一辆车执行即可，不能多辆车执行同一车次；

2) 任务开始时，车场先向首末站派遣部分车辆，当首末站车辆不够执行相关车次时，系统将信息反馈给车场，车场再向首末站调用车辆，直至车辆数恰好满足当天应执行的车次任务。

为了更好的呈现车场和线路首(末)站之间的调度流程，建立车辆调用流程图，如图 1 所示。

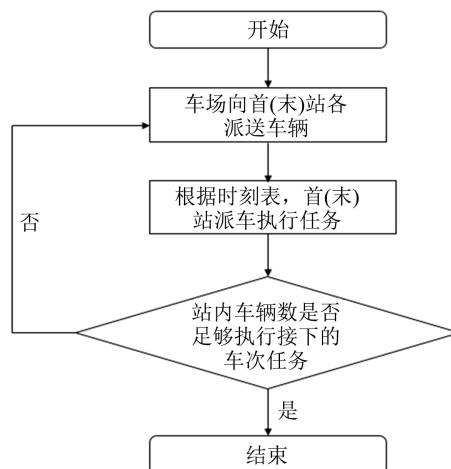


Figure 1. Vehicle call flow

图 1. 车辆调用流程图

### 2.4. 车辆剩余电量的判断规则

车辆执行完每个班次后，都会到达充电站(线路首末站)判断是否需要充电，当车辆到达充电站时，电量判断应满足以下阶段：

阶段一：

$$Q_k \leq E_R。$$

$Q_k$ ——为车辆  $k$  在一次放电过程中的累计放电量，等于车辆行驶里程乘以每单位里程耗电量(kw·h)。

$E_R$ ——为车辆的放电深度(%)。

若车辆  $k$  在一次放电过程中的累计放电量小于该车辆的放电深度，车辆即可进行下一阶段的判断；若累计放电量大于等于放电深度，则车辆应在充电站进行充电任务。

阶段二：

$$l_i * h_i + l_{i,o} * h_{i,o} \leq 1 - Q_k。$$



$l_i$ 、 $l_{i,o}$ ——为车辆  $k$  执行车次  $i$  的行驶里程和车辆从车辆  $o$  至车次  $i$  的行驶里程(km)。

$h_i$ 、 $h_{i,o}$ ——为车辆行驶每单位里程的耗电量(kw·h/km)。

判断车辆  $k$  完成下一车次并回到车场中的电量是否足够，若不够行驶这些里程，该车应在此充电站进行充电；若电量足够，则车辆可以等待执行下一车次。

### 2.5. 车次衔接规则

电动公交经过车辆剩余电量判断准则后即可得知车辆是否需进行充电，需要充电的车辆应在充电站进行充电，充电时长须在车辆执行前后两个相邻车次的间隔时间内：

$$\Delta t \leq t_1(i) - t_2(i-1)。$$

$\Delta t$ ——为车辆的充电时长(min)。

$t_1(i)$ 、 $t_2(i-1)$ ——分别为车次  $i$  的开始时间和车次  $i-1$  的结束时间(min)。

不需要充电的车辆在执行下一车次前，有可能需要空驶一段里程到达下一车次的起始站或者留在本站进行候车，此时车次之间的衔接时间应满足：

$$t_{i-1,i} \leq t_1(i) - t_2(i-1)。$$

$t_{i-1,i}$ ——车辆在车次  $i-1$  和车次  $i$  之间的衔接时间(min)。

基于车辆的剩余电量判断规则和车次衔接规则，将模型设立机制整合，编写模型流程图，如图 2 所示。

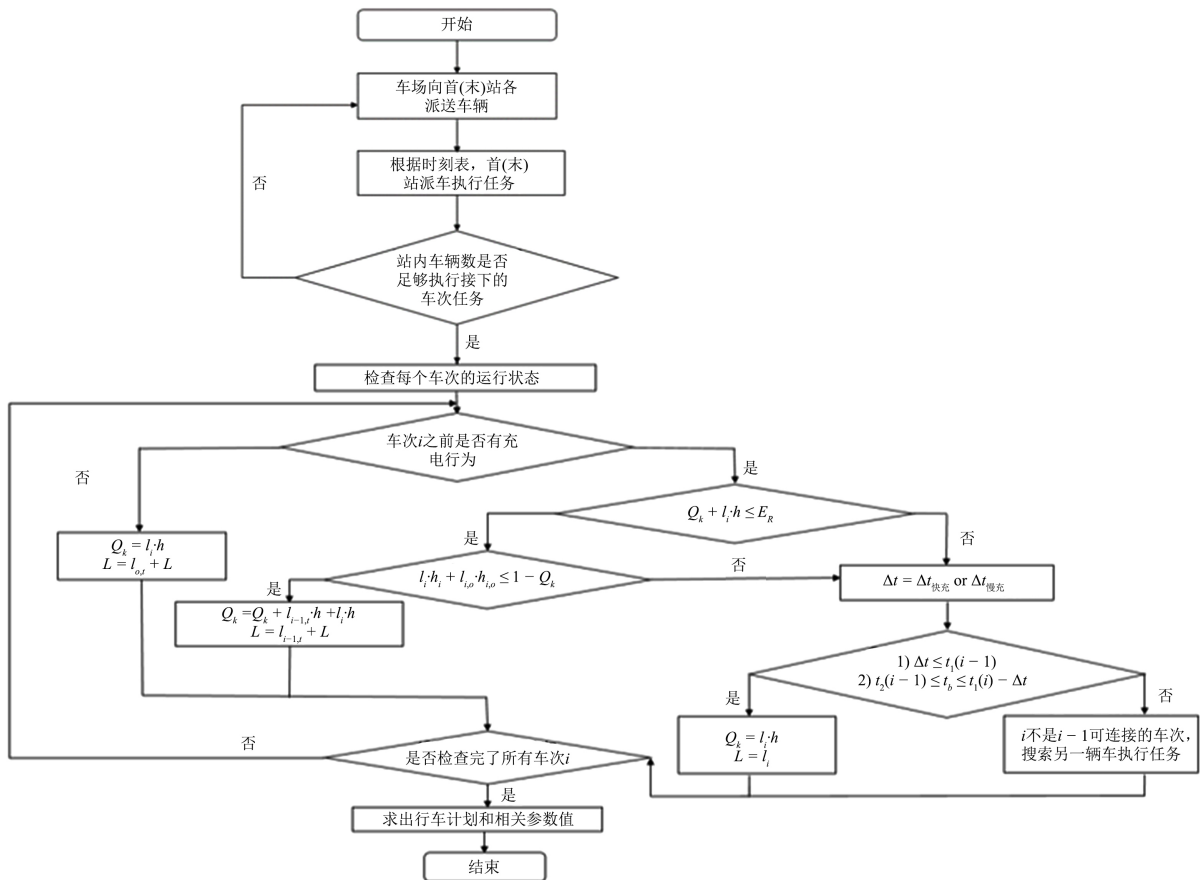


Figure 2. Dispatching model flow based on single line operation rules  
图 2. 基于单线路运营规则的调度模型流程图

## 2.6. 模型相关参数

调度模型数据输入主要包括静态数据和动态数据两部分。

### 1) 静态数据

- 线路数据：发车时刻表、线路长度、首末站位置、充电站位置、车场位置、车场与首末站之间距离；
- 车辆数据：单位车辆购置成本、额定续驶里程、车辆行驶单位里程耗电量、车辆行驶速度、使用年限中的维修成本、单位车辆单日使用成本(车辆购置成本和使用期内维修成本均摊到每一天的固定成本值)；
- 充电策略相关数据：快/慢充策略下电动公交充电时长、快/慢充策略下车辆行驶单位里程耗电量、快/慢充策略下电池购置成本、充电桩购置成本；

在调度过程中，快充策略和慢充策略所使用的车辆类型、电池类型不同，根据数据收集和调查，使用目前我国使用最广泛的两种电动公交车型参数，分别为快速充电策略所适用车型和慢速充电策略所使用的车型，正常情况下，一台充电桩能供 6 辆公交车同时充电；根据所查找的数据，本文研究两种充电策略的电动公交在一年内的运营天数为 330 天，公交车的预计净残值率为 3%。

### 2) 动态数据

判断车辆是否能执行下一个车次或者回到车场时，需要有车辆累计耗电量、累计行驶里程、现有车辆数等相关信息提取出来作为调度模型的输入变量。

## 3. 算例实验——以天津市 649 路线为例

### 3.1. 案例说明

天津市的 649 路公交车线路终点站分别是丁字沽站与河北工业大学站，共经过 16 个公交站点，其上行线路(丁字沽站→河北工业大学站)长度约为 21 km，运行时间为 40 min；下行线路(河北工业大学站→丁字沽站)长度约 20 km，运行时间 40 min，649 路公交的运营时间为 5:45~20:00。线路首末站均设置充电站。丁字沽站是纯电动公交车充电站，也是停放纯电动公交车的车场。则在此案例中不考虑车场至首站的空驶距离，车场至末站的空驶距离为 21 km。

649 路公交车线路运营时间为 5:45~20:00，发车间隔为 15 分钟，具体的班次编号和班次时刻计划表见附录 A，全天的公交车次数为 96 次，在纯电动公交执行当天的班次任务前保证动力电池的电量是充满的状态之下的，即保证纯电动公交的初始电量 SOC 为 100%。车场的最大车辆容量为 32 辆车。

### 3.2. 快速充电策略下纯电动公交行车计划

通过计算，在车辆的排班方面，该线路全体运营车辆为快速充电模式下纯电动公交行车计划，表示了每辆纯电动公交运行的排班时序图，横坐标为班次时间与编号，纵坐标为纯电动公交车辆的编号，CH 表示在河工大站点(末站)进行充电，CD 表示在丁字沽站点(首站)进行充电。单号车次表示该车次从丁字沽站(首站)发车向河北工业大学站(末站)，双号车次表示该车次从河北工业大学站(末站)发车向河北工业大学站(首站)。车辆的排班计划方面，该线路全天运营车辆为 10 辆，分别从首站、末站各发出 5 辆纯电动公交车，各场站起始发出车辆与运营结束后返回该车场车辆数一致，满足实际中该线路电动公交车车场容量约束。具体的调度结果如下：

车辆 1：1 → 10 → 21 → 32 → 41 → 充电 → 52 → 61 → 72 → 81 → 92 → 充电；

车辆 2：3 → 14 → 23 → 34 → 43 → 充电 → 54 → 63 → 74 → 83 → 94 → 充电；

车辆 3：5 → 16 → 25 → 36 → 45 → 充电 → 56 → 65 → 76 → 85 → 96 → 充电；

车辆 4: 7 → 18 → 27 → 38 → 47 → 充电 → 58 → 67 → 78 → 87 → 充电;  
 车辆 5: 11 → 20 → 29 → 40 → 49 → 充电 → 60 → 69 → 80 → 89 → 充电;  
 车辆 6: 2 → 9 → 22 → 31 → 充电 → 42 → 51 → 62 → 71 → 82 → 充电 → 91 → 充电;  
 车辆 7: 4 → 13 → 24 → 33 → 充电 → 44 → 53 → 64 → 73 → 84 → 充电 → 93 → 充电;  
 车辆 8: 6 → 15 → 26 → 35 → 充电 → 46 → 55 → 66 → 75 → 86 → 充电 → 95 → 充电;  
 车辆 9: 8 → 17 → 28 → 37 → 充电 → 48 → 57 → 68 → 77 → 88 → 充电;  
 车辆 10: 12 → 19 → 30 → 39 → 充电 → 50 → 59 → 70 → 79 → 90 → 充电。  
 模型的输出参数为车辆数, 总空驶里程和充电次数, 具体数值如表 1 所示。

**Table 1.** Output parameters of fast charging bus dispatching process  
**表 1.** 快速充电公交车调度过程输出参数

车辆数(辆)	10
总空驶里程(公里)	180.0
总载客里程(公里)	2016
充电次数(次)	23

根据快充型公交的行车计划图和输出参数值, 可以得知:

- 1) 在此案例中, 快速充电公交车平均每行驶五个相邻的车次后就要执行充电计划;
- 2) 快速充电公交的充电次数多但是充电时间短, 因此每辆车在一天内也能执行多个车次, 这对节省该线路所投入的车辆数有很大的作用;
- 3) 车辆调度的结果接近实际车辆调度结果, 快充公交的充电时间短, 所以车辆在运营期间发现电量不足时可以立即补充电量, 并能保证接着执行下一次的车次任务, 所以充电任务分布在全天的各个时间段;
- 4) 由车次衔接可看出, 车辆在车辆行驶中尽可能的减少了车辆的空驶距离, 尽量保证在执行完一个车次后不空驶返回充电站进行充电任务, 保证车辆单日内行驶总里程不超过车辆续驶里程且减少了车辆的空驶成本。

根据模型输出参数值计算线路评估指标值, 如表 2 所示。

**Table 2.** Cost values of fast charging buses  
**表 2.** 快速充电公交车各成本数值

单日充电成本(元)	5097.95
单日空驶成本(元)	153.18
车辆单日使用成本(元)	5876
车辆单日载客成本(元)	1848.672
充电设施单日使用成本(元)	236.13
车辆单日运营成本(元)	13,211.93

### 3.3. 慢速充电策略下纯电动公交行车计划

通过计算,在车辆的排班计划方面为慢速充电模式下纯电动公交行车计划,车辆的排班计划方面,该线路全天运营车辆为14辆,分别从首站、末站各发出7辆纯电动公交车,各场站起始发出车辆与运营结束后返回该车场车辆数一致,满足实际中该线路电动公交车车场容量约束。具体的调度结果如下:

车辆1: 1 → 16 → 29 → 44 → 57 → 72 → 85 → 充电;  
 车辆2: 3 → 18 → 31 → 46 → 59 → 74 → 87 → 充电;  
 车辆3: 5 → 20 → 33 → 48 → 61 → 76 → 89 → 充电;  
 车辆4: 7 → 22 → 35 → 50 → 63 → 78 → 91 → 充电;  
 车辆5: 9 → 24 → 37 → 52 → 65 → 80 → 93 → 充电;  
 车辆6: 11 → 26 → 39 → 54 → 67 → 82 → 95 → 充电;  
 车辆7: 13 → 28 → 41 → 56 → 69 → 84 → 97 → 充电;  
 车辆8: 2 → 15 → 30 → 43 → 58 → 71 → 86 → 充电;  
 车辆9: 4 → 17 → 32 → 45 → 60 → 73 → 88 → 充电;  
 车辆10: 6 → 19 → 34 → 47 → 62 → 75 → 90 → 充电;  
 车辆11: 8 → 21 → 36 → 49 → 64 → 77 → 92 → 充电;  
 车辆12: 10 → 23 → 38 → 51 → 66 → 79 → 94 → 充电;  
 车辆13: 12 → 25 → 40 → 53 → 68 → 81 → 96 → 充电;  
 车辆14: 14 → 27 → 42 → 55 → 70 → 83 → 98 → 充电。

表3为慢速充电策略下电动公交调度过程输出参数值。

**Table 3.** Output parameters of slow charging bus dispatching process  
**表3.** 慢速充电公交车调度过程输出参数

车辆数(辆)	14
总空驶里程(公里)	252.0
总载客里程(公里)	2016
充电次数(次)	14

根据快充型公交的行车计划图和输出参数值,可以得知:

- 1) 在此案例中,慢充型公交车单次放电过程中能连续执行7个车次任务;
- 2) 模型模拟的调度结果符合实际中慢充型公交的调度流程,慢充公交车充电次数少,续驶里程长,为了不影响车辆白天执行车次任务,慢充型公交的充电任务需要集中在一个非营运的大单位时间段内进行充电——夜间充电;
- 3) 该线路所有的慢充公交车都集中在夜间充电,由此可以在电价低谷时间段进行充电,单次充电费用会降低,也不会对电网产生影响;
- 4) 车次的衔接结果表明此线路的调度过程合理,车辆尽可能地在车辆执行车次任务的过程中减少了车辆的空驶次数。

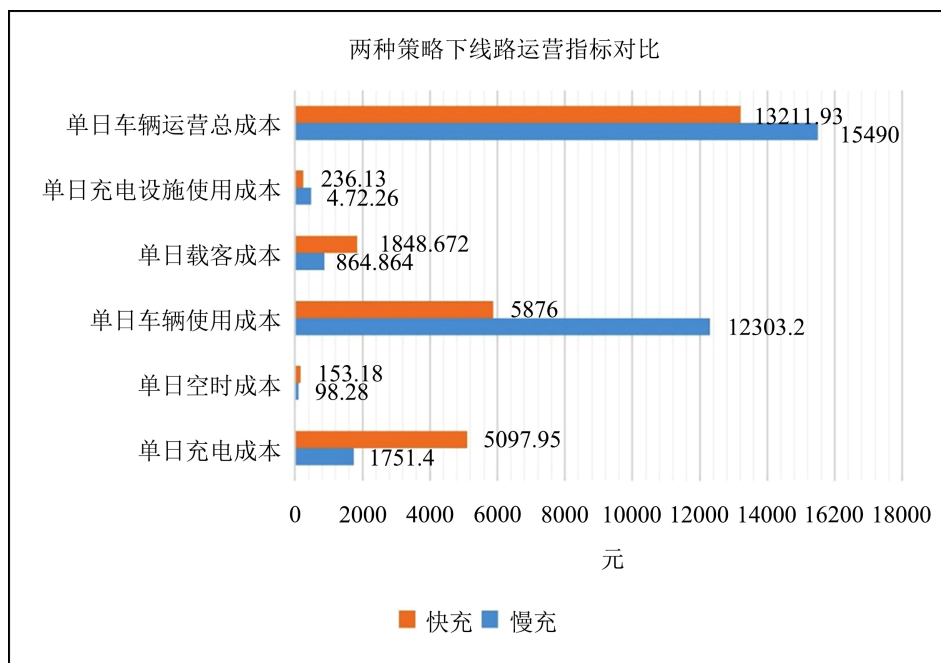
根据模型输出参数值计算线路评估指标值,如表4所示。

**Table 4.** Cost values of slow charging buses  
**表 4.** 慢速充电公交车各成本数值

单日充电成本(元)	1751.4
单日空驶成本(元)	98.28
单日车辆使用成本(元)	12,303.2
单日载客成本(元)	864.864
单日充电设施使用成本(元)	472.26
单日车辆运营总成本(元)	15,490

### 3.4. 两种充电策略下线路运营指标分析

基于前两节求解出的两种充电策略对应的线路评估指标值，本节将两种策略进行对比分析，讨论两种充电策略对 649 公交线路的运营影响，如图 3 所示。



**Figure 3.** Comparison of line operation indicators under two strategies

**图 3.** 两种策略下线路运营指标对比

由图可知：

- 1) 此案例中，慢充型公交车的单日运营成本大于快充公交单日运营成本，快充型公交更适合天津 649 线路的运营；
- 2) 对于慢充型公交，对车辆单日运营总成本影响最大的是单日车辆使用成本，车辆数越多更容易导致慢充公交的运营总成本变大；
- 3) 对于快充型公交，对车辆单日运营总成本影响最大的是单日车辆充电成本和单日车辆使用成本，



车辆数和充电次数增多会同时导致快充公交的运营总成本变大；

4) 对于充电成本：快充公交的充电成本大于慢充公交的充电成本，原因是快充型车辆电池容量小，续驶里程短，充电时间也短，在运营过程中发现电量不足可以立即充电，且还能在充电任务完成后及时执行剩余车次，所以充电次数多。而对于慢充型公交车，车辆电池容量大，续驶里程长，充电时间也长，为了保证执行车次任务，满足电量要求的慢充公交车持续参与发车直至电量不足，前往充电站，等待夜间充电；

5) 对于车辆空驶成本：慢充公交车和快充公交车空驶成本相差很小，几乎不存在区别，这表示两种充电策略的公交车在调度过程中车次衔接完成的很好，没有在相邻车次间浪费过多的空驶里程；

6) 对于车辆使用成本：快充公交的车辆使用成本小于慢充公交的车辆使用成本，原因是被调用的快充车辆少，慢充车辆多且单位车辆购置成本和维修成本高；

7) 对于车辆单日运营成本：快充公交的单日运营成本小于慢充公交的单日运营成本，虽然快充策略的公交充电成本高，但车辆使用成本占单日运营成本中最大最重要的部分，所以车辆使用成本的大小决定了车辆单日运营成本的大小。

## 4. 敏感性分析

### 4.1. 发车间隔变化对线路运营影响

目前我国大部分城市的电动公交车的发车间隔都在 5 分钟~40 分钟的区间内，大部分的电动公交发车间隔集中在 15 分钟，基于此，本节设定线路的发车时刻表间隔分别为 5 分钟、10 分钟、15 分钟、20 分钟、30 分钟、40 分钟，根据每种时间间隔的发车时刻表建立基于单线路运营规则的调度模型，求解两种策略下公交车的行车计划并分析电动公交成本。

其他输入参数不变，输入快充策略和慢充策略的相关参数值，改变发车间隔运行车辆调度模型，依次得到 5 种发车间隔对应的行车计划，根据表格数据，制作两种策略的成本变化对比图，如图 4 所示。

由图可知：

1) 一定范围内，车辆发车间隔的增加有利用快充和慢充车型减少单日运营成本，对公交企业提高经济效益有正向的帮助；

2) 发车间隔的增加，有利于快充公交降低车辆数，充电次数和空驶里程；

3) 发车间隔的增加，对慢充公交车辆数，充电次数和空驶里程的影响是有限的，在本案例中，发车间隔增加至 10 分钟后，慢充型公交的各部分成本便不再变化；

4) 随着发车间隔的增加，快充车辆的运营成本由一开始大于慢充车辆的运营成本逐渐变成小于慢充运营成本，由此可知，发车间隔的变化对快充策略影响更大；

5) 对于快充和慢充的单日运营成本而言，单日车辆使用成本都是单日运营成本中占比最大的部分，所以单日运营成本的变化趋势很大程度上取决于车辆单日的使用成本；

6) 对于快充型公交，随着发车间隔增加，快充车辆的充电任务就会更稳定的处于车次任务之间，此时快充的充电时间将会稳定于相邻车次间隔的时间，不会影响接下来的发车任务，此时车场中调用的车辆数便会减少，车辆的充电次数和空驶成本也会减少，车辆的运营成本随之减少；

7) 慢充公交车的电池额定电量高，车辆能连续多走几个车次才需要执行充电任务，但由于慢充电动公交的充电时间由于长达 5 个小时，充电任务结束后车辆的运营时间很可能已经结束，此时车辆并没有机会参与下一次的车次任务，所以慢充公交的发车数量要恰好满足该日的全部车次任务，和发车间隔的变化关系不大。

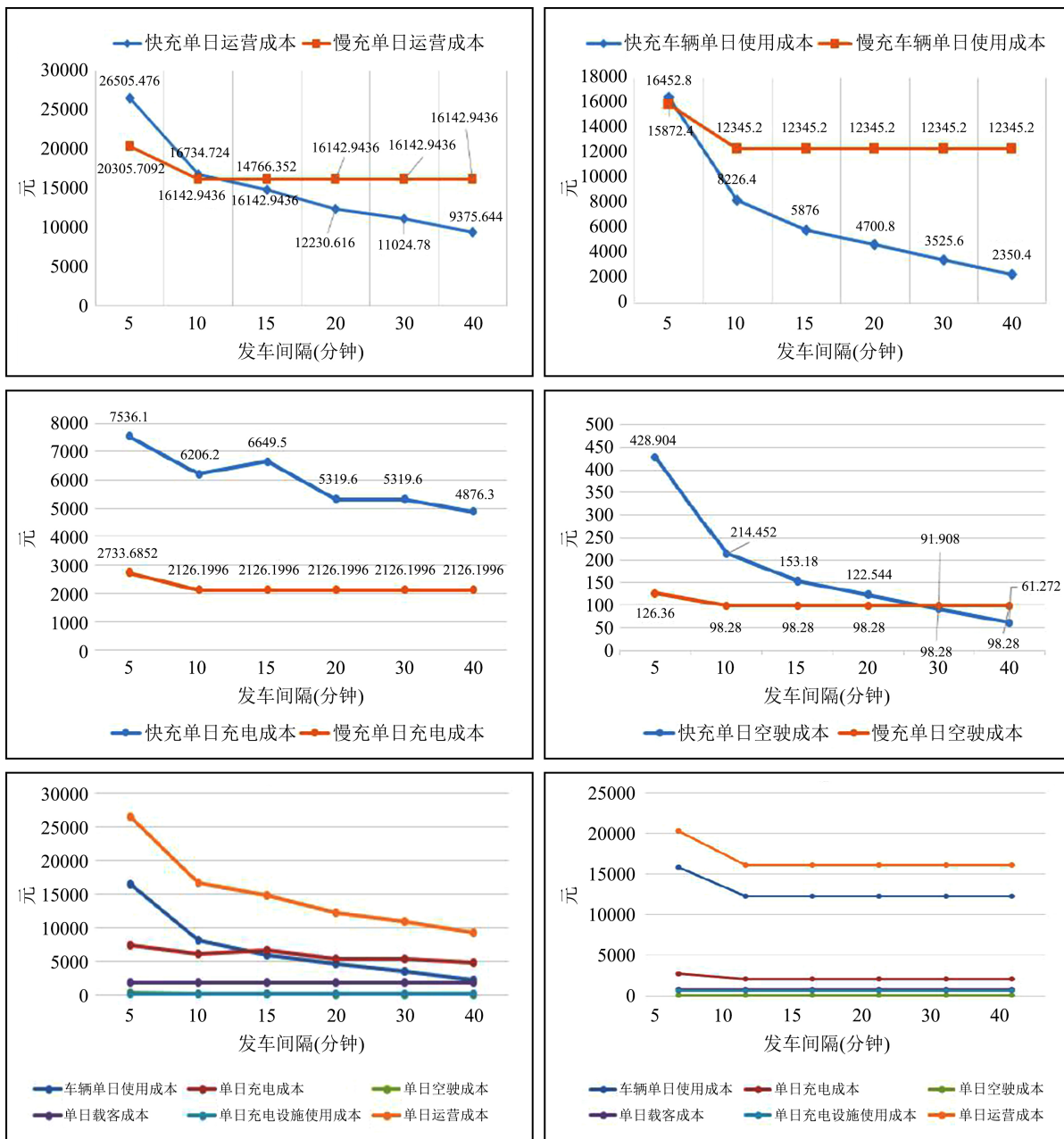


Figure 4. Comparison chart between departure interval and cost change

图 4. 发车间隔 - 成本变化对比图

#### 4.2. 车次数量变化对线路运营影响

根据公交数据显示，目前我国大部分城市公交车发车时刻表的车次数量都在 70 次~130 次之间，基于此，设定线路的发车时刻表的车次数量分别为 76 次、86 次、96 次、116 次、126 次，根据每种车次数量的发车时刻表建立基于单。

线路运营规则的调度模型，求解两种策略下公车的行车计划并分析电动公交成本。其他条件一定，输入快充策略和慢充策略的相关参数值，改变车次数量运行车辆调度模型，依次得到 5 种车次数量对应的行车计划，并得到两种测量的成本变化图，如图 5 所示。

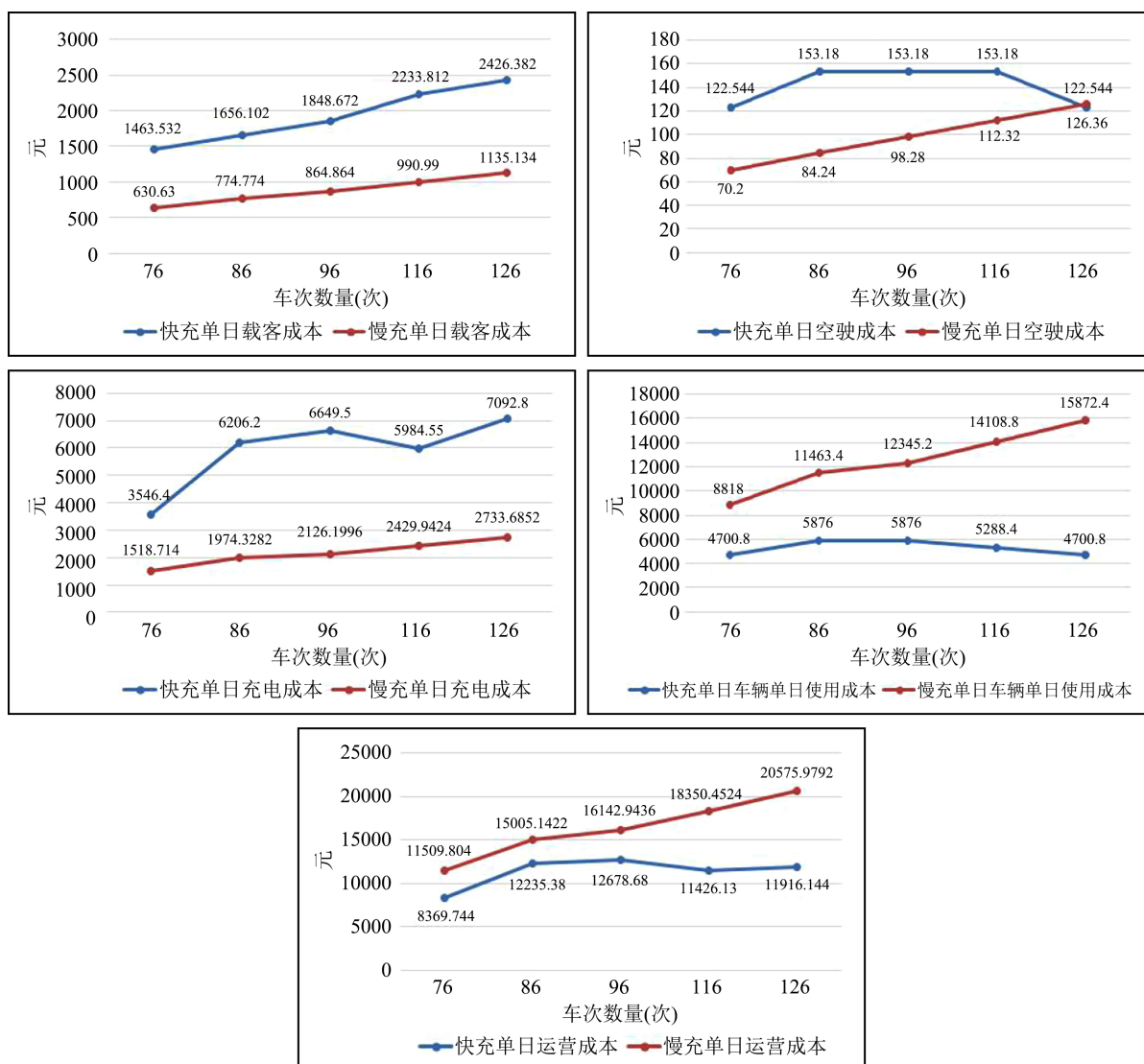


Figure 5. Comparison chart between train number and cost change

图 5. 车次数量 - 成本变化对比图

由图可知:

- 1) 一定范围内, 车次数量的增多会使快充和慢充车辆单日运营成本增多, 不利于公交企业的经济效益维持与提高;
- 2) 车辆数的增多, 会导致快充型公交的载客成本和充电成本增多, 但会减少其车辆使用成本(车辆数), 对空驶成本的影响不大;
- 3) 车辆数的增多, 会使慢充型公交各部分的成本增加, 总运营成本也随之增加;
- 4) 车次数量的变化对慢充策略影响大, 且在此案例中, 车次数量的增加会使慢充公交的单日运营成本稳定居于快充公交之上, 不利于慢充公交节约成本;
- 5) 对于需要花费大量时间充电的慢充公交车而言, 车次增多意味着需要派遣执行的车辆增多, 而车辆使用成本是车辆单日运营成本中占比最大的一部分, 所以车辆使用成本的增加带动了慢充型公交的单日运营成本增加。

### 4.3. 线路长度变化对线路运营影响

根据公交数据显示, 由于电动公交续驶里程短, 目前我国大部分城市公交线路长度都小于 40 公里, 基于此, 本节设定线路长度分别为 10 公里、21 公里、42 公里, 不同的线路长度建立基于单线路运营规则的调度模型, 求解两种策略下公车的行车计划并分析电动公交成本。其他条件一定, 输入快充策略和慢充策略的相关参数值, 改变线路长度运行车辆调度模型, 依次得到 5 种车次数量对应的行车计划, 据以制作两种策略的成本变化对比图, 如图 6 所示。

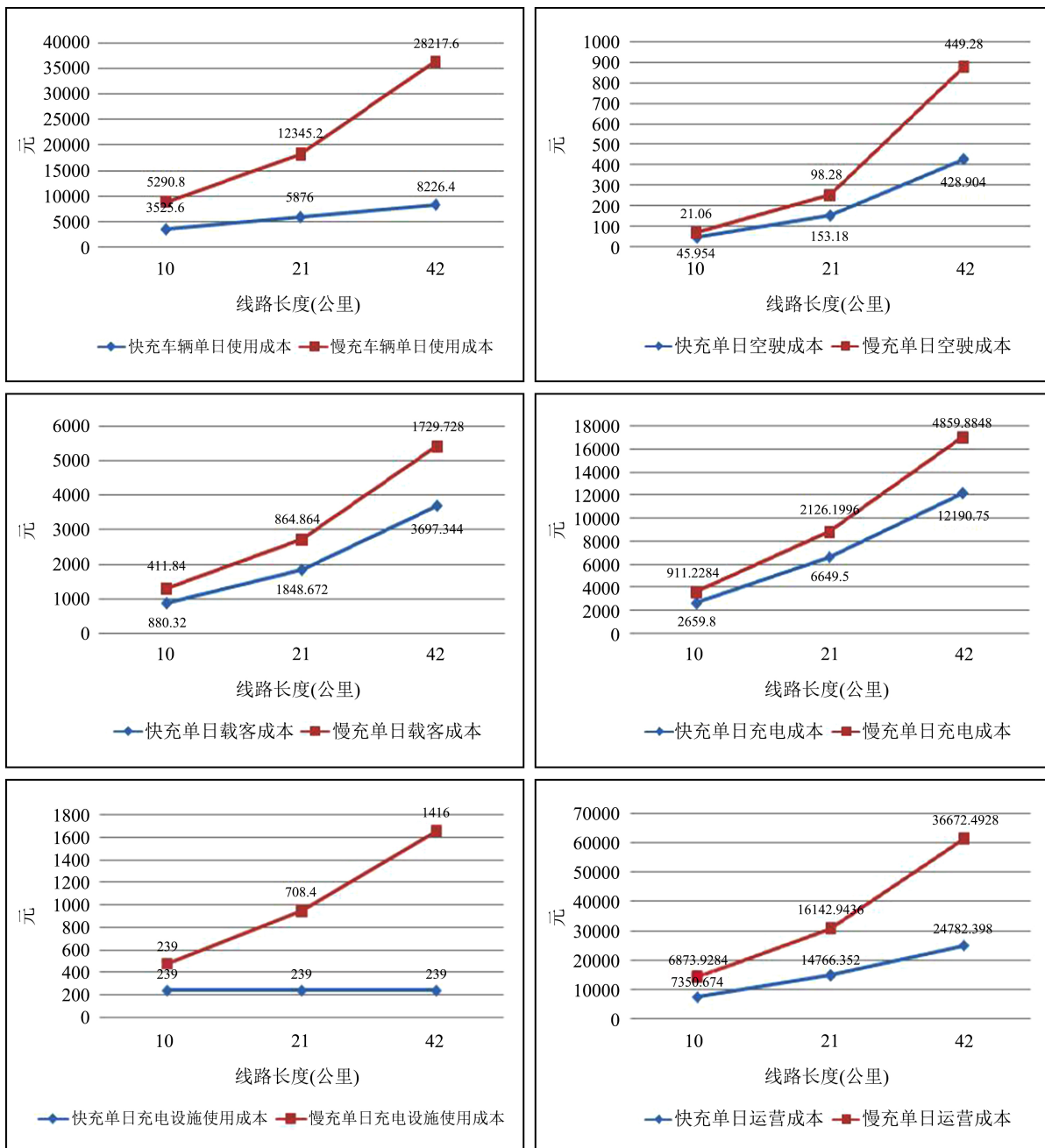


Figure 6. Comparison diagram between line length and cost change  
图 6. 线路长度 - 成本变化对比图

由图可知:

1) 线路长度的增加不利于快充车辆和慢充车辆减少其单日运营成本,不利于公交企业的经济效益的维持与提高;

2) 本案例中,线路长度的变化对慢充公交各部分成本和总成本的影响大,慢充车辆的成本数值增长快,且各成本数值都在快充公交的成本之上。

## 5. 总结

基于对不同充电策略特点和单线路电动公交的运营方式的调查研究,本文建立基于单线路运营规则的电动公交调度模型,在模型设计中加入车辆车场调用规则、电量判断规则、车次衔接规则,并输入不同策略的相关参数,用 MATLAB 软件进行模型流程编写,基于天津 649 线路对模型进行算例实验,得到在 649 线路上不同充电策略的行车计划和相关的输出参数值(车辆数、空驶里程、载客里程、充电次数),根据参数值进行不同策略下公交企业的成本计算并进行分析,最终得出基于 649 路线,快速充电策略比慢速充电策略的运营成本更低,从企业经济效益的角度来看,快充策略更适合此条线路。并进一步对其做出敏感性分析,得出以下结论:

1) 发车间隔的变化对快充型公交车的单日运营成本影响大,且发车间隔越大,快充型公交的单日运营成本越小。公交企业可通过增加快充型公交运营路线的发车间隔使企业经济效益增加。

2) 车次数量的变化对慢充型公交车的单日运营成本影响大,且车次数量越多,慢充型公交的单日运营成本越大。公交企业可通过减少慢充型公交运营路线的车次数量使企业经济效益增加。

3) 线路长度的变化对慢充型公交车的单日运营成本影响大,线路长度越长,慢充型公交的单日运营成本越大。公交企业可通过减少慢充型公交运营路线的线路长度使企业经济效益增加。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 王岱, 李盼, 包宇喆, 周琛溟, 吴江. 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.
- [3] 佟晶晶, 温俊强, 王丹, 张建华, 刘文霞. 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.
- [4] Rietveld, P., Bruinsma, F.R. and van Vuuren, D.J. (2001) Coping with Unreliability in Public Transport Chains: A Case Study for Netherlands. *Transportation Research Part A*, **35**, 539-559. [https://doi.org/10.1016/S0965-8564\(00\)00006-9](https://doi.org/10.1016/S0965-8564(00)00006-9)
- [5] Zeng, Y.Y., et al. (2018) Machine Learning Based System Performance Prediction Model for Reactor Control. *Annals of Nuclear Energy*, **113**, 270-278. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2017.11.014>
- [6] 杨扬. 电动公交车行车计划问题建模与算法研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- [7] Roper, R.F., Renooij, S. and van der Gaag, L.C. (2018) Discretizing Environmental Data for Learning Bayesian-Network Classifiers. *Ecological Modelling*, **368**, 391-403. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2017.12.015>