

蓄电池储能式有轨电车运用车数计算方法^{*}

张梦然 房霄虹 段井松

(中铁工程设计咨询集团有限公司, 100055, 北京)

摘要 [目的]为解决传统运用车数计算方法不适用于蓄电池储能式有轨电车,以及列车运行图铺画过于繁琐的问题,提出一种运用车数计算公式修正方法。[方法]介绍了不受充电影响的传统运用车数计算方法;在此基础上,考虑有轨电车充电过程的影响,提出一种满足运营计划的蓄电池储能式有轨电车运用车数计算方法;提出计算假设,并介绍了各相关参数的计算方法;以某城市蓄电池储能式有轨电车线路的运用车数计算为例,用所提运用车数计算方法对列车上线运行达到续航里程后下线充电的情况进行分析。[结果及结论]将列车运行过程分为高峰前列车集中上线过程、列车线上运行过程、列车集中下线并向线上补充替换列车过程这3个阶段。通过计算所得的运用车数与通过列车运行图铺画的结果误差约为5%,说明所提运用车数计算方法能够满足运营要求并保有一定余量。

关键词 储能式有轨电车; 蓄电池; 运用车数

中图分类号 U482.1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.02.008

Calculation Method for Number of Battery Energy Storage Trams in Operation

ZHANG Mengran, FANG Xiaohong, DUAN Jing-song

(China Railway Engineering Design and Consulting Group Co., Ltd., 100055, Beijing, China)

Abstract [Objective] To address the issues that the conventional method for calculating the number of VO (vehicles in operation) is not applicable to battery energy storage trams and the overly complex layout of train operation diagrams, a revised calculation formula for determining VO number is proposed. [Method] The conventional method for calculating VO number unaffected by charging is introduced. Based on this, taking the influence of tram charging process into account, a calculation method for determining VO number of battery energy storage trams that meets operational plan is proposed. Calculation assumptions are presented, and the calculation methods for various related parameters are described. Taking the VO number calculation of a battery energy storage tram line in

a city as example, the proposed method is used to analyze the situation where the train goes off-line for charging after reaching the endurance mileage during on-line operation. [Result & Conclusion] The train operation process is divided into three stages: the concentrated on-line process before peak hours, the on-line train operation process, and the concentrated train off-line replacement and on-line supplement process. The calculated VO number has an error of approximately 5% compared to the results obtained through the layout of train operation diagram, indicating that the proposed method for calculating VO number can meet operational requirements with a certain margin.

Key words battery energy storage tram; storage battery; number of vehicles in operation

有轨电车属于低运量轨道交通系统,具有运行可靠、环境舒适等特点,特别适用于大城市轨道交通延伸线和补充线,以及中小城市公交骨干线路。随着有轨电车技术的不断发展,蓄电池储能式有轨电车解决了设置接触网对城市景观的影响问题,减少了地面供电部分的建设成本,目前在各城市的有轨电车系统中占有的比例越来越大^[1]。

蓄电池储能式有轨电车具有单体电压高、能量密度高等特点。在相同质量和体积条件下,该种有轨电车能输出的能量较大^[2],充电一次即可实现较长距离的运行,有效减少了沿线设置充电装置的工程投资。而蓄电池储能式有轨电车的缺点为蓄电池充电时间较长,当有轨电车运行电量不足时,其需下线至固定充电停车场/车辆段(以下简称“场段”)进行充电,在该有轨电车充电过程中,需向线上补充其他有轨电车以满足既定的开行计划,进而会引起运用车数有所增加。

通过传统的运用车数计算方法所获得的运用车数可以满足有轨电车高峰时段的运营需求,但其未考虑列车下线充电过程对运用车数的影响,因此

^{*} 中铁工程设计咨询集团有限公司科研项目(单轨-研2020-3-12)

该方法对蓄电池储能式有轨电车并不完全适用。目前,在实际应用中,蓄电池储能式有轨电车多采用铺画列车运行图的方式确定其运用车数^[3],一旦列车运行方案有所调整,则需重新铺画列车运行图,既费时又费力。此外,列车运行图的铺画结果会受到设计人员经验及个人能力的影响,其结果存在一定的偏差。

鉴于此,本文针对蓄电池储能式有轨电车的特点,基于列车运行图,分析储能式有轨电车的运行规律,考虑有轨电车充电过程的影响,提出一种适用于蓄电池储能式有轨电车的运用车数计算方法,使计算结果更符合工程设计需求。本文研究可为蓄电池储能式有轨电车运用车数计算提供新的思路与解决方案,具有一定的实用价值。

1 考虑充电影响的蓄电池储能式有轨电车运用车数计算思路

1.1 不受充电影响的传统运用车数计算方法

对于采用架空接触网供电或充电过程不影响列车正常运营的储能式有轨电车,其运用车数满足高峰时段的运营需求即可,所需运用车数仅与运营长度、旅行速度、列车高峰时段发车间隔及列车在折返站的停留时间有关,计算公式为:

$$N_{\text{计算}} = \frac{2(t_{\text{单程}} + t_{\text{折返}})}{\Delta t_{\text{高峰}}} \quad (1)$$

式中:

$t_{\text{单程}}$ ——列车正线单程运行时间,数值上等于单程运营里程除以旅行速度;

$t_{\text{折返}}$ ——列车折返站停留时间;

$\Delta t_{\text{高峰}}$ ——高峰小时列车发车间隔;

$N_{\text{计算}}$ ——利用传统运用车数计算公式计算所得运用车数。

1.2 满足运营计划的蓄电池储能式有轨电车运用车数计算方法

蓄电池储能式有轨电车列车运行主要存在以下3个过程:① 高峰前,为满足高峰时段列车的运营需求,列车自充电场段集中上线的过程;② 列车线上运行过程;③ 列车集中下线至充电场段充电,并向线上补充替换列车(包括列车充电)过程。其中,过程③需上线的替换列车数,即为由于列车充电而增加的运用车数。

需要说明的是,若列车集中下线之前已过高峰时段,根据运营计划需减少列车开行对数,这将导

致产生提前下线列车,提前下线列车具备富余电量,所需充电时间较后续集中下线列车短,待提前下线列车充至所需电量,即可作为替换列车再次上线,此时将由于列车充电而额外增加的运用车数定义为 $N_{\text{增加}}$,则有:

$$N_{\text{增加}} = N_{\text{替换}} - N_{\text{提前下线}} \quad (2)$$

式中:

$N_{\text{替换}}$ ——列车下线充电过程需向线上补充替换的运用车数;

$N_{\text{提前下线}}$ ——高峰时段过后至列车集中下线充电之前,由于开行对数减小而提前下线的运用车数,若无提前下线列车,则为0。

考虑充电过程的蓄电池储能式有轨电车运用车数计算,需在传统运用车数计算公式所得结果 $N_{\text{计算}}$ 的基础上,增加 $N_{\text{增加}}$,计算式为:

$$N = \lceil N_{\text{计算}} + N_{\text{增加}} \rceil \quad (3)$$

式中:

N ——满足运营计划的蓄电池储能式有轨电车运用车数。

2 计算假设及各参数计算方法

2.1 计算假设

1) 由于多数有轨电车线路设置1座或2座车辆基地^[4],故本文仅考虑全线设置1座或2座车辆基地的情况。

2) 当列车替换过程发生在非起点/终点站时,会引起某些区段的服务水平下降,本文仅考虑车辆基地在线路起点或终点与正线接轨的情况。

3) 假设高峰前列车以相同上线时间间隔集中上线,当列车需下线充电时,同样以相同下线时间间隔集中下线充电,替换过程中的列车发车间隔根据行车计划确定。

4) 在运行过程中,各时段列车运行线按照列车全日行车计划均匀分布。

2.2 $N_{\text{替换}}$ 的计算方法

通过计算求得 $N_{\text{替换}}$ 的过程是蓄电池储能式有轨电车运用车数计算中的核心内容,也是计算中最复杂和繁琐的部分。充电场段的数量及位置、车载蓄电池性能、列车运行计划和列车下线时间等因素均能影响其计算结果。其中,列车下线时间会影响列车下线时的剩余电量,进而影响列车的充电时间,该参数对计算结果的影响较大。

针对不同下线时机,本文分为列车上线运行达

到续航里程后下线充电(情况1),以及列车上线后遇充电场段即下线充电(情况2)两种情况进行讨论,分别提出 $N_{\text{替换}}$ 的计算修正公式。其中,每种情况又分为充电场段位于线路一端和线路两端均设置充电场段两种情景。

1) 情况1(充电场段位于线路一端), $N_{\text{替换},1}$ 可以表示为:

$$N_{\text{替换},1} = \begin{cases} \frac{2(t_{\text{单程}} + t_{\text{折返}})}{\Delta t_{\text{充电}}}, & t_{\text{充电}} \geq 2(t_{\text{单程}} + t_{\text{折返}}) \\ \frac{t_{\text{充电}}}{\Delta t_{\text{充电}}}, & t_{\text{充电}} < 2(t_{\text{单程}} + t_{\text{折返}}) \end{cases} \quad (4)$$

式中:

$t_{\text{充电}}$ ——列车充至所需电量所需时间,其与列车下线时的剩余电量及蓄电池性能有关;

$\Delta t_{\text{充电}}$ ——列车下线充电过程中替换列车的平均发车间隔时间。

2) 情况1(线路两端均设置充电场段), $N_{\text{替换},2}$ 可以表示为:

$$N_{\text{替换},2} = \begin{cases} \frac{2(t_{\text{单程}} + t_{\text{折返}})}{\Delta t_{\text{充电}}}, & t_{\text{充电}} \geq t_{\text{单程}} + t_{\text{折返}} \\ \frac{2t_{\text{充电}}}{\Delta t_{\text{充电}}}, & t_{\text{充电}} < t_{\text{单程}} + t_{\text{折返}} \end{cases} \quad (5)$$

3) 情况2(充电场段位于线路一端),即列车仅需上线运行2个单程便下线充电($t_{\text{线上}} = 2t_{\text{单程}} + t_{\text{折返}}$, $t_{\text{线上}}$ 为列车上线运行时间),此时 $N_{\text{替换},3}$ 可以表示为:

$$N_{\text{替换},3} = \frac{t_{\text{充电}}}{\Delta t_{\text{充电}}} \quad (6)$$

4) 情况2(线路两端均设置充电场段),即列车仅需上线运行1个单程便下线充电($t_{\text{线上}} = t_{\text{单程}}$),此时 $N_{\text{替换},4}$ 可以表示为:

$$N_{\text{替换},4} = \frac{2t_{\text{充电}}}{\Delta t_{\text{充电}}} \quad (7)$$

值得注意的是, $N_{\text{替换},4}$ 小于 $N_{\text{替换},2}$, $N_{\text{替换},4}$ 虽然可以节省一定的运用车数,但列车频繁充放电可能会减少蓄电池的使用寿命,实际应用中可针对具体项目,对这两种情况进行经济比选后,确定较优的运用车数。

2.3 $\Delta t_{\text{充电}}$ 的计算方法

根据充电过程在不同整点时段所占的比例,将对应的列车开行对数进行加权平均,求出集中下线

过程中替换列车的平均开行对数 $M_{\text{充电}}$,即可求出 $\Delta t_{\text{充电}}$,则有:

$$M_{\text{充电}} = \frac{t_a A_a + t_b A_b}{t_a + t_b} \quad (8)$$

$$\Delta t_{\text{充电}} = \frac{60}{M_{\text{充电}}} \quad (9)$$

式中:

t_a ——首列下线列车下线时刻至充电过程跨越整点时刻所间隔的时间;

t_b ——充电过程跨越整点时刻至无需向线上补充列车时刻所间隔的时间;

A_a 、 A_b ——列车充电过程所跨越的整点时刻前后时段对应的开行对数(分别对应 t_a 、 t_b 所处整点时段)。

需要说明的是,当 $t_{\text{充电}} < \Delta t$ 时(Δt 为集中上线及集中下线过程时间段),列车集中下线过程中存在充满电的列车可再次上线, $t_b = t_{\text{充电}} - t_a$; 当 $t_{\text{充电}} \geq \Delta t$ 时,列车集中下线过程均需向线上替换新的列车, $t_b = \Delta t - t_a$ 。列车充电时间与列车集中下线时间之间的关系示意图如图1所示。

2.4 $N_{\text{提前下线}}$ 的计算方法

根据列车集中下线过程是否已过高峰时段分类,主要存在以下两种情况。

1) 高峰时段与列车集中下线时段之间存在过渡段。假设过渡段列车均匀下线,则过渡段占该整点时段的比例,即为提前下线列车占该整点时段内由于开行对数减少所需下线路列车的比例,则有:

$$N_{\text{提前下线}} = \frac{t_c}{60} \Delta N_{\text{计算}} \quad (10)$$

式中:

t_c ——高峰时段截止时刻与列车集中下线开始时刻之间过渡段的时段长度;

$\Delta N_{\text{计算}}$ ——高峰后的一个整点时段内,由于列车开行对数减少所需下线的运用车数。

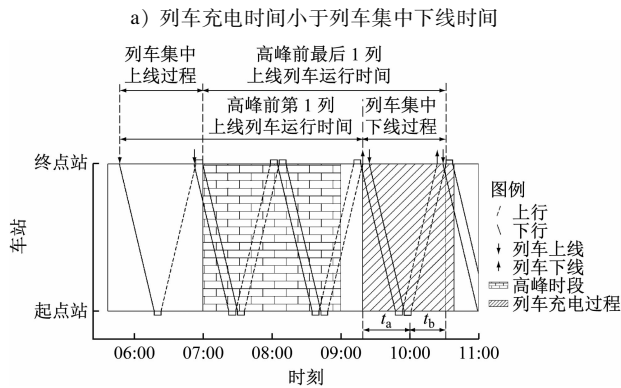
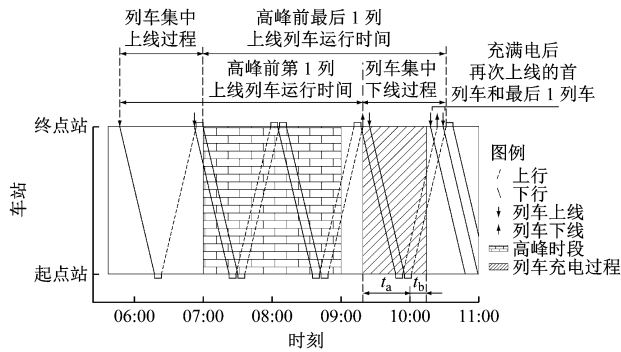
2) 高峰时段持续至列车集中下线过程,此时 $N_{\text{提前下线}} = 0$ 。

3 案例及计算结果验证

针对所提计算方法,以某城市采用蓄电池储能式有轨电车线路的运用车数计算为例,对列车上线运行达到续航里程后下线充电的情况进行分析。

3.1 案例概况

某项目线路运营里程为31.8 km,共设9座车



注:图中仅显示第1列及最后1列有控制作用的列车运行线,省略中间列车运行线。

图1 列车充电时间与列车集中下线时间之间的关系示意图
Fig. 1 Relation diagram of train charging time and train centralized offline time

站,平均站间距为 3.975 km,全线采用高架方式敷设,旅行速度为 50 km/h,设 1 座车辆段,于线路起点与正线接轨。全线不设接触网与接触轨,列车自带动力电池,采用车辆基地自动充电方式,单模块动力电池电量为 152 kWh。满载情况下,有轨电车满电量行驶里程为 153.3 km,蓄电池充满所需时间为 80 min。列车开行对数及全日行车计划如表 1 所示。

3.2 运用车数计算

本案例中,车辆段位于线路起点位置,根据蓄电池续航里程及单程运营里程之间的关系,列车上线 4 个单程即需下线回车辆段充电,其中包括 3 次起终点站折返过程。根据式(1)可知, $t_{\text{单程}} = 38.16 \text{ min}$, $N_{\text{计算}} = 2(t_{\text{单程}} + t_{\text{折返}}) / \Delta t_{\text{高峰}} = 22.49 \text{ 列}$ 。

$t_{\text{线上}} = nt_{\text{单程}} + mt_{\text{折返}} = 164.64 \text{ min}$ (n 为列车运行单程数量,此处取为 4; m 为列车折返次数,此处取为 3);下线后, $t_{\text{充电}} = 80 \text{ min}$ 。由于 $\Delta t = 82.5 \text{ min} > t_{\text{充电}}$,则 $t_a + t_b = t_{\text{充电}} = 80 \text{ min}$, $t_c = 22 \text{ min}$, $t_a = 38 \text{ min}$, $t_b = 42 \text{ min}$ 。根据式(8)一式(9),在充电过程

表 1 列车开行对数及全日行车计划

Tab. 1 Train operation pairs and full day timetable

列车运行时间段	开行对数/(对/h)
06:00—07:00	8
07:00—08:00	12
08:00—09:00	16
09:00—10:00	12
10:00—11:00	8
11:00—12:00	8
12:00—13:00	8
13:00—14:00	8
14:00—15:00	8
15:00—16:00	8
16:00—17:00	8
17:00—18:00	12
18:00—19:00	16
19:00—20:00	12
20:00—21:00	8
21:00—22:00	4
合计	156

中, $M_{\text{充电}} = 9.9 \text{ 对}$, $\Delta t_{\text{充电}} = 6.06 \text{ min}$ 。

全线仅设置 1 座车辆段且位于线路起点位置,且 $2(t_{\text{单程}} + t_{\text{折返}}) = 84.32 \text{ min} > t_{\text{充电}}$,根据式(2)一式(4)及式(10), $N_{\text{替换}} = t_{\text{充电}} / \Delta t_{\text{充电}} = 13.20 \text{ 列}$, $N_{\text{提前下线}} = 1.47 \text{ 列}$, $N = 35 \text{ 列}$ 。

3.3 计算结果验证

铺画列车运行图,以验证公式计算结果的合理性。列车运行图验证结果如图 2 所示。由图 2 可知:为满足高峰时段发车间隔,需集中上线列车数量为 22 列;列车充电过程中需上线替换列车数量为 12 列;集中下线充电前提前下线的列车数量为 1 列;所需运用车数为 33 列。公式计算与列车运行图铺画所得结果误差约为 5%,所得运用车数能够满足有轨电车日常运营要求并保有一定余量,验证了所提计算方法的可靠性。

4 结语

基于蓄电池储能式有轨电车列车运行图,本文提出将其运行过程分为列车集中上线过程、列车线上运行过程、列车集中下线充电及列车替换过程三部分,在传统运用车数计算方法的基础上,考虑有轨电车充电过程的影响,提出一种适用于蓄电池储

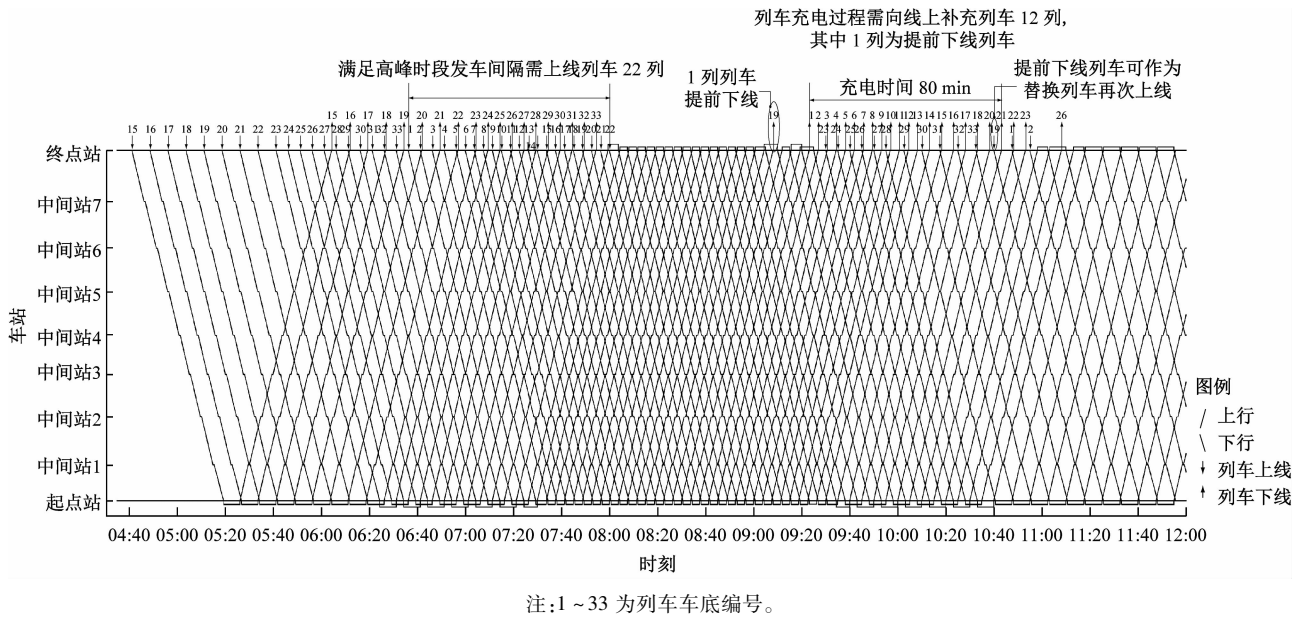


图 2 列车运行图验证结果

Fig. 2 Verification results of train operation diagram

能式有轨电车的运用车数计算方法,解决了铺画列车运行图过于繁琐的问题。实际案例验证结果表明,计算所得运用车数与列车运行图铺画结果误差约为 5%,能够满足运营要求并保有一定余量,验证了所提计算方法的可靠性。

参考文献

[1] 牛悦丞,李芾,杨阳,等. 国外新一代 100% 低地板有轨电车技术特征及发展趋势[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(11): 144.

NIU Yuecheng, LI Fu, YANG Yang, et al. Technical characteristics and development tendency of new generation foreign 100% low floor tram[J]. Railway Standard Design, 2018, 62(11): 144.

[2] 苏国强,郑磊,黄坤林. 新型有轨电车供电方式分析[J]. 铁路技术创新, 2013(6): 46.

SU Guoqiang, ZHENG Lei, HUANG Kunlin. Analysis of power supply mode of new tram[J]. Railway Technical Innovation, 2013

(6): 46.

[3] 刘羽,李凯龙. 现代有轨电车运用车配属数量需求分析[J]. 天津建设科技, 2021, 31(2): 10.

LIU Yu, LI Kailong. Analysis on demand for number of modern tram service vehicles[J]. Tianjin Construction Science and Technology, 2021, 31(2): 10.

[4] 姚幸. 有轨电车与地铁的车辆段比较[J]. 城市轨道交通研究, 2015, 18(7): 133.

YAO Xing. Comparative study of tram and subway vehicle depots [J]. Urban Mass Transit, 2015, 18(7): 133.

· 收稿日期:2021-07-19 修回日期:2021-11-15 出版日期:2024-02-10
Received:2021-07-19 Revised:2021-11-15 Published:2024-02-10
· 通信作者:张梦然,工程师,1063726803@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 42 页)

[8] 张孟喜,杨芝璐,张靖,等. 复合地层盾构滚刀磨损风险等级模糊评判[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(1): 78.

ZHANG Mengxi, YANG Zhilu, ZHANG Jing, et al. On the fuzzy assessment of the wear risk grade of the shield disc cutter in the complex strata[J]. Journal of Safety and Environment, 2021, 21(1): 78.

[9] 左翠凤,唐德高,戎晓力,等. 基于刀盘摩擦扭矩参数的刀具磨损状态识别[J]. 隧道建设, 2016, 36(3): 344.

ZUO Cuifeng, TANG Degao, RONG Xiaoli, et al. State recogni-

tion of cutter wear based on frictional torque parameters of cutter-head[J]. Tunnel Construction, 2016, 36(3): 344.

· 收稿日期:2022-01-28 修回日期:2022-05-01 出版日期:2024-02-10
Received:2022-01-28 Revised:2022-05-01 Published:2024-02-10
· 第一作者:李雪,副教授,jialixue521@163.com
通信作者:陈霖,硕士研究生,cl13558831074@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license