

上海轨道交通崇明线牵引供电制式方案研究

王小峰

(上海市隧道工程轨道交通设计研究院, 200235, 上海)

摘要 [目的]为了解决传统采用钢轨回流的直流牵引供电系统存在杂散电流腐蚀、直流供电距离受限等问题。[方法]对国内外主要城市轨道交通 AC 25 kV/50 Hz 牵引供电制式和直流牵引供电制式的应用情况、技术特点、适用性等指标进行对比分析后,结合上海轨道交通崇明线工程的特殊性,提出采用 DC 1 500 V 架空接触网+负极专用回流轨的牵引供电方式;针对在越江段隧道内是否设置牵引变电所设计了两种供电方案,仿真计算了两种方案下供电系统供电能力达到 24 对/h 时牵引网最低电压、整流机组功率和牵引变电所有效电流等指标,并进行了比较分析。[结果及结论]采用负极专用回流轨的直流牵引供电制式可从根本上杜绝杂散电流的产生及其对周边管线的腐蚀;在长距离越江区段设置牵引变电所方案与牵引直流设备“双套配置”方案相比,前者的供电可靠性和供电能力更具优势。

关键词 上海轨道交通;崇明线;牵引供电制式;专用回流轨

中图分类号 U223.5⁺1:U239.5

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.01.017

Research on Traction Power Supply System for Shanghai Rail Transit Chongming Line

WANG Xiaofeng

(Shanghai Tunnel Engineering & Rail Transit Design and Research Institute, 200235, Shanghai, China)

Abstract [Objective] It is to address issues such as stray current corrosion and limited distance for DC traction power supply systems conventionally using rail return in urban rail transit. [Method] After conducting a comparative analysis of the application, technical characteristics and applicability indicators of AC 25kV/50Hz and DC traction power supply systems in major urban rail transit systems in China and abroad, and considering the uniqueness of Shanghai Rail Transit Chongming Line project, it is suggested to adopt DC 1 500 V catenary system with a dedicated negative special return rail for traction power supply. Two power supply schemes are designed for the tunnel section crossing Yangtze River, and simulation calculations for indicators of both schemes are performed, evaluating the minimum voltage of the traction network, rectifier unit power, and the effective current of the traction substation when the power supply system capacity reaches

24 pairs per hour. A comparative analysis is conducted. [Result & Conclusion] The use of a special negative return rail in the DC traction power supply system fundamentally eliminates the generation of stray currents and their corrosion impact on surrounding pipelines. Compared to the 'dual-set configuration' scheme for traction DC equipment, In the scheme with a traction substation set up in the long-distance section crossing the Yangtze River, exhibits advantages in power supply reliability and capacity.

Key words Shanghai rail transit; Chongming Line; traction power supply format; special return rail

随着国家“新基建”战略规划的启动和城市轨道交通的快速发展,国内已建成运营和正在规划及筹建的城市轨道交通线路越来越多。上海城市轨道交通崇明线(以下简称“崇明线”)是连接中心城和崇明两岛(长兴岛、崇明岛)的市域轨道交通,其线路全长约 44.69 km,共设车站 8 座,其中地下站 7 座、高架站 1 座,车站及配线示意图如图 1 所示。该线车辆采用 DC 1 500 V 市域 A 型车,列车为 6 辆编组,最高运行速度为 120 km/h;初、近、远期单一交路开行列车数量分别为 13 对/h、18 对/h 和 20 对/h,供电能力为 24 对/h。就牵引供电系统而言,崇明线必须解决两个问题:一是如何避免杂散电流对本工程沿线并行或交叉穿越的供油管、高压天然气管、原水管等重大管线的腐蚀;二是如何确保南港越江隧道(位于凌空北路站—长兴岛站区间,长约 7.7 km)和北港越江隧道(位于长兴岛站—陈家镇站区间,长约 9.2 km)长距离直流供电的能力。

通过对国内外城市轨道交通既有牵引供电制式特点及应用情况进行分析,结合崇明线工程的特点及客观情况,提出采用 DC 1 500 V 架空接触网+负极专用回流轨的牵引供电方式,同时提出在越江区段中部设或不设牵引变电所两种方案,并分别给出相应技术措施。这不仅从根本上杜绝了杂散电流的产生及其对周边管线的腐蚀问题,而且解决了越江段长距离牵引供电系统供电能力受限问题。

1 现有牵引供电制式分析

1.1 适用性分析

牵引供电制式是指供电系统向电动车辆或电力机车供电所采用的电流制式、电压等级和供电方式。根据相关标准规定,城市轨道交通车辆的供电制式为 DC 750 V 和 DC 1 500 V 两种,城市轨道交通市域快线的供电制式为 DC 1 500 V(列车最高运行速度 120 ~ 140 km/h)及 AC 25 kV/50 Hz(列车最高运行速度 120 ~ 160 km/h)。

AC 25 kV/50 Hz 制式一般适用于运量大、负荷重、速度高、运输距离长的干线电气化铁路,部分国家或地区的城郊快线铁路或机场线也采用 AC 25 kV/50 Hz 制式;直流牵引供电制式适用于列车功率不大、供电半径较小、列车密度高且起动频繁的城市轨道交通线路,绝大部分城市轨道交通线路均采用 DC 750 V 或 DC 1 500 V 的牵引供电制式,DC 3 000 V 牵引供电制式目前在意大利等西欧国家、前苏联加盟共和国等国家的一些国家干线电气化铁路,以及格鲁吉亚、巴西圣保罗地铁有应用,但国内针对 DC 3 000 V 供电制式体系化、标准化的研究及运营尚无案例可循。

双制式/多制式指不同线路区段采用不同的牵引供电制式。为适应行车组织决定的跨线列车运行和直通需要,或在既有线路必须与新建线路直接衔接又迫于既有线改造费用过大时,对具备双制式或多制式受电功能的同一车辆采用双制式/多制式供电,如通行在多个国家的欧洲之星高速列车,其能够适应 AC 25 kV、DC 3 000 V 和 DC 1 500 V 三种牵引供电制式,国内目前尚无双制式/多制式供电的运营经验。

我国干线电气化铁路、城市轨道交通、市域线发展至今,采用单相工频 25 kV 交流制和 DC 750 V、DC 1 500 V 两种牵引供电制式。国内绝大多数城市轨道交通采用的是 DC 1 500 V 接触网(接触轨)供电、走行轨(钢轨)回流的牵引供电方式。国内外主要市域线牵引供电制式的应用如表 1 所示。

1.2 主要技术特点

交、直流供电制式的主要技术特点如表 2 所示。综合分析,可将列车最高设计速度 120 km/h 作为选择牵引供电制式的参考分界点:当列车最高设计速度≤120 km/h 时,采用 DC1 500 V 牵引供电制式;当列车最高设计速度 > 120 km/h 时,优先考虑

表 1 国内外主要市域线牵引供电制式应用情况
Tab. 1 Application of traction power supply systems of main city lines in China and abroad

线路名称	最高速度/ (km/h)	供电制式
巴黎 Transilien 线	140	AC 25 kV, 架空接触网
巴黎 RER-A 线	130	DC 1 500 V/AC 25 kV, 架空接触网
旧金山湾区捷运系统 BART	130	DC 1 500 V, 接触轨
比利时国铁	140	DC 3 000 V/AC 25 kV, 架空接触网
温州市域 S1 线	140	AC 25 kV, 架空接触网
成都地铁 18 号线	140	AC 25 kV, 架空接触网
深圳地铁 11 号线	120	DC 1 500 V, 架空接触网
宁高城际铁路	120	DC 1 500 V, 架空接触网
青岛地铁 11 号线	120	DC1 500 V, 接触轨
上海轨道交通 16 号线	120	DC 1 500 V, 接触轨
广州地铁 14 号线	120	DC 1 500 V, 接触轨

采用 AC 25 kV/50 Hz 牵引供电制式。

2 影响牵引供电制式选择的因素

影响牵引供电制式选择的因素如表 3 所示。速度目标值、车辆选型及隧道断面对牵引供电制式的选择起着决定性作用,是确定整个项目的工程规模、系统制式、设备配置以及工程投资的重要基础和依据。

由表 3 可知,崇明线列车速度目标值为 120 km/h,在线网中不存在列车跨线运营的运输组织形式;除凌空北路站—长兴岛站—陈家镇站三站两区间因为穿越长江而采用单洞双线圆形隧道外,其余区段均采用传统单洞单线圆形隧道。在满足线路功能的前提下,考虑到整个工程的经济性,本项目车辆选型最终选用 DC 1 500 V 市域 A 型车,列车为 6 辆编组。

3 崇明线牵引供电系统方案设计

3.1 DC 1 500 V 专用回流轨设计

通过对国内外直流牵引供电系统进一步调研发现,“四轨”供电系统可作为解决本工程长距离直流供电能力不足和杂散电流腐蚀问题^[1-2]的技术方案。所谓“四轨”供电系统,就是负极专设回流轨的供电系统,即牵引变电所通过第三轨供电、第四轨

表 2 交、直流供电制式主要技术特点

Tab.2 Main technical characteristics of AC and DC power supply systems

供电制式	供电方式	变电所供电范围	牵引变电设施	牵引网结构	弓网速度适应性	设备运行可靠性	电分相装置	电气安全距离	车辆成本	对隧道净空的影响	防护处理	运营费用
AC 25 kV/50 Hz 供电制式	单边供电	电压等级高,供电范围为 30 ~ 60 km	变电设施数量少,接线结构简单	相同功率前提下,其电流比直流供电要小。牵引网截面积小,结构简单	可适应较高的列车运行速度。国内目前设计速度最高可达 350 km/h 及以上	设备数量相对较少,且有变电设备备用配置,可靠性高	需设置电分相。同相供电无电分相	安全防护距离较大	动车组购置费高	对净空要求大,盾构直径大	需进行电磁防护,实施方便	变电设施少、定员少、电能损耗小
直流供电制	双边供电	电压等级低,供电范围为 2 ~ 5 km (DC 1 500 V)、4 ~ 7 km (DC 3 000 V)	变电设施数量多,接线复杂。集中供电需设置主变电所,环网电缆投资稍大	结构复杂,牵引电流大。架空接触网为满足载流量要求,牵引网截面积大	采用柔性架空接触网。列车最高速度可达 140 km/h	双边供电,可靠性较高,但设备数量较多	无电分相	安全防护距离较小	车辆购置费低	对净空要求小,盾构直径小	需进行杂散电流防护,对轨道和结构防护措施要求高	牵引变电所数量多、定员多、电能损耗大

表 3 影响牵引供电制式选择的主要因素

Tab.3 Main factors affecting the selection of traction power supply systems

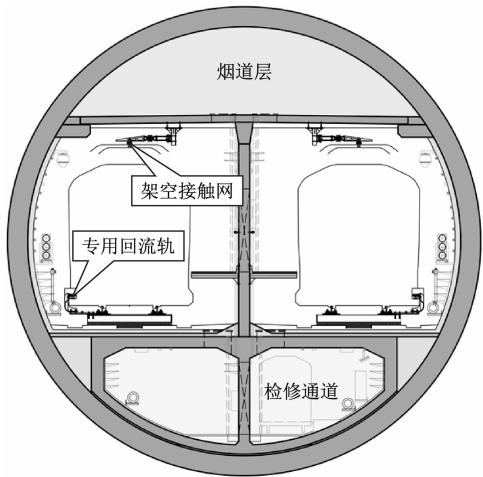
项目	线网衔接	车辆选型	速度目标值	隧道断面	电磁及杂散电流防护	对城市景观的影响
市域线	乘客换乘衔接:乘客通过换乘车站的站台/厅或通道,实现跨线换乘。运输组织衔接:通过联络线实现列车跨线运营	市域 A、B 型车交流制;市域 D 型车交流制;CRH6F 型动车组;中低速磁悬浮、双流制机车	列车速度≤120 km/h,一般选用直流供电制式;介于 120 ~ 140 km/h,交、直流供电制式均可选用;≥140 km/h,选用交流供电制式	由速度等级、车辆及供电制式共同决定。6.0 ~ 6.2 m (≤100 km/h、DC 1 500 V、交流供电制式需对市域 A/B 型车);6.7 m (120 km/h、DC 1 500 V、市域 A/B 型车);7.0 ~ 7.2 m (≤120 km/h、DC 1 500 V、中低速磁悬浮);8.5 m (140 km/h、市域动车组)	电气化的电磁进行防护;直流供电制式需对杂散电流进行防护	与线路敷设方式有关。地下敷设时,交流和直流供电制式对环境景观均无影响;地面和高架敷设时,直流供电制式较交流的对景观的影响稍大
崇明线	线网中不存在对铁路通道的利用或与铁路网衔接,仅与上海轨道交通 9 号线和 12 号线分别在金吉路站和申江路站通道换乘	DC 1 500 V 市域 A 型车、6 辆编组	120 km/h	南港和北港越江隧道采用单洞双线圆形隧道,总长约 16.763 km,盾构外径为 12.9 m,内设独立排烟道和检修通道;其余区段采用单洞单线圆形隧道,盾构外径为 6.9 m	沿线与本工程并行、穿越的重大管线较多,特别是存在供油管及高压天然气管	本工程除裕安站为高架站(正线高架线长 1.773 km)、车辆段和停车场为地面设置外,其余均为地下线

回流^[3]的供电方式。受车辆结构及制造、接触轨布置、靴轨关系、最高运行速度下靴轨受流稳定性等其他一系列未经技术验证因素的制约,国内外目前均无 DC 1 500 V 电压等级“四轨”供电系统的先例。

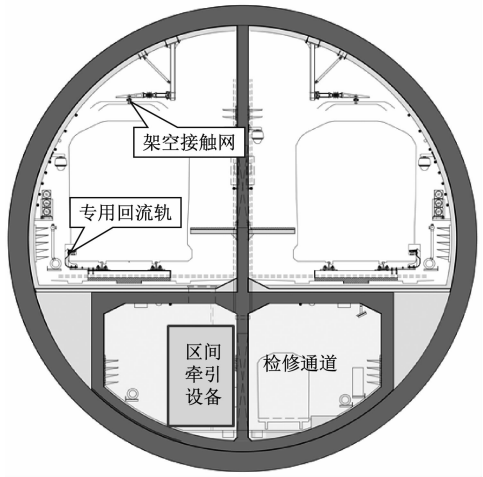
但是,国内如上海浦江线工程、重庆跨座式单轨工程、长沙磁浮线工程等的供电方式有值得借鉴的地方,其供电轨的结构形式虽各有不同,但供电原理本质上与“四轨”一致,即采用负极均独立于钢轨之外的专用供电回路。因此,可将架空刚性接触

网与接触轨进行组合,即正极采用架空接触网供电,负极采用专用回流轨回流的组合供电方式。车辆同时配备集电靴和受电弓,无论从车辆还是从牵引网方面来看,都不存在技术困难。该方案在已开通运营的宁波地铁 4 号线工程上得到论证,其列车最高运行速度仅为 80 km/h。但是架空刚性接触网、接触轨(第三轨)在国内最高运行速度 120 km/h 城市轨道交通线路上均有成熟应用(如表 1 所示)。基于此,本工程提出采用 DC 1 500 V 架空接触网 + 负极专用回流轨的牵引供电技术方案,牵引网正极

采用已成熟应用的架空刚性悬挂(地下段)和架空柔性悬挂(地面段);负极采用专用回流轨(下部接触方式),其相关指标与既有接触轨(第三轨)保持一致,此处不再赘述。崇明线越江盾构段供电系统设备布置断面如图 1 所示。



a) 越江段大盾构标准断面



b) 越江段中部大盾构优化标准断面

图 1 崇明线越江盾构段供电系统设备布置断面示意图
Fig. 1 Profile diagram of equipment layout of Chongming Line river-crossing shield section

3.2 牵引变电所设置方案

采用 DC 1 500 V 架空接触网 + 负极专用回流轨的牵引供电技术方案,避免了杂散电流腐蚀及防护和钢轨电位的问题,理论上只要牵引网最低电压大于国标规定 1 000 V 的要求、牵引变电所的设备选型满足成熟可靠的要求即可。针对在越江段隧道内是否设置牵引变电所,设计了两种供电方案。

方案一:沿崇明线由金吉路站至裕安站除高宝路站和长兴岛站外,在其余车站及转换井设置牵引

变电所,在越江段中部不设置区间牵引变电所。转换井内牵引变电所直流设备采取“双套配置”。为了解决当越江段两端大小盾构转换井内的牵引变电所退出/解列时,直流大双边供电距离超过 10 km (如崇明岛转换井牵引变电所解列退出时,长兴岛北转换井至陈家镇站直流大双边供电距离达 11.575 km),导致整流机组容量配置过大、牵引网电压过低等问题,浦东转换井、长兴岛南转换井、长兴岛北转换井和崇明岛转换井内牵引变电所直流设备采取“双套配置”,即:在传统 2 套整流机组的基础上在另一段 35 kV 母线再配置 2 套整流机组,确保转换井内牵引变电所不退出。在本文仿真中,默认 4 座转换井内牵引变电所不退出。

方案二:全线车站及转换井牵引变电所设置同方案一,在越江段中部增设区间牵引变电所(在浦东转换井至长兴岛南转换井之间设置南港区间牵引变电所,在长兴岛北转换井至崇明岛转换井之间设置北港区间牵引变电所)。通过环控系统对隧道排烟方案进行调整和优化,进而优化越江段隧道断面形式,将越江隧道中部区段的下部空腔高度由标准断面的 2 400 mm 提高到 3 550 mm,实现下部空腔设置区间牵引变电所的要求。该方案下,转换井内牵引变电所不再采用“双套配置”,全线各牵引变电所均为常规配置,同一时刻允许任一个牵引变电所解列退出运行。越江段大盾构标准断面示意图如图 1 a) 所示,越江段中部区段优化后的隧道断面示意图如图 1 b) 所示。

3.3 供电能力仿真测试

通过系统建模,对上述两种牵引变电所设置方案的供电能力进行仿真测试。分别计算两种方案下供电能力达到 24 对/h 时的牵引网最低电压、整流机组功率和牵引变电所有效电流等指标。在牵引变电所均正常供电及相邻牵引变电所解列供电条件下,两种方案对比分别如图 2 和图 3 所示。

由图 2 和图 3 可知,方案二牵引网最低电压在牵引变电所正常情况下均大于 1 400 V,当牵引变电所解列时均大于 1 200 V,特别是整流机组的功率在牵引变电所正常情况下降低了 24.4%,指标同比均优于方案一;同时避免了方案一 4 座转换井内供电设备冗余配置、长期承受长距离供电、运行方式复杂、故障倒闸操作时间较长、长期运营能耗高等问题,也将直流供电能力由高峰时 24 对/h 提升到 30 对/h,供电可靠性和供电质量也得到进一步提升。

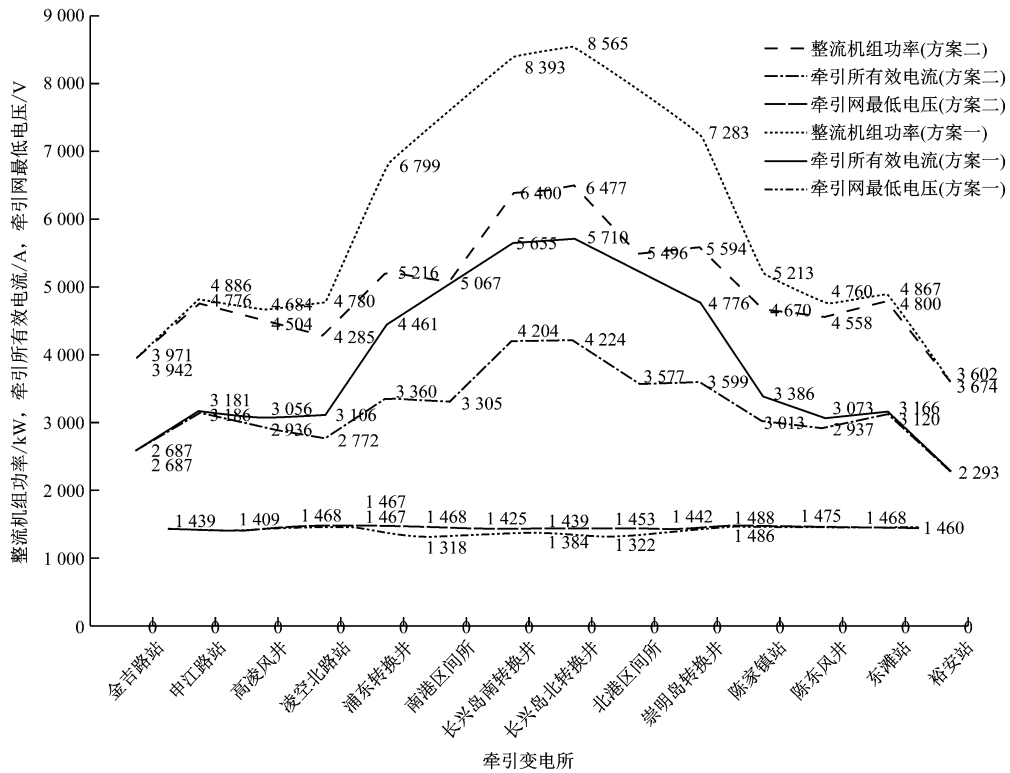


图2 牵引变电所两种设置方案供电能力对比(牵引变电所均正常供电)

Fig. 2 Comparison of power supply capacity of two traction substation set-up schemes (all substations are normally powered)

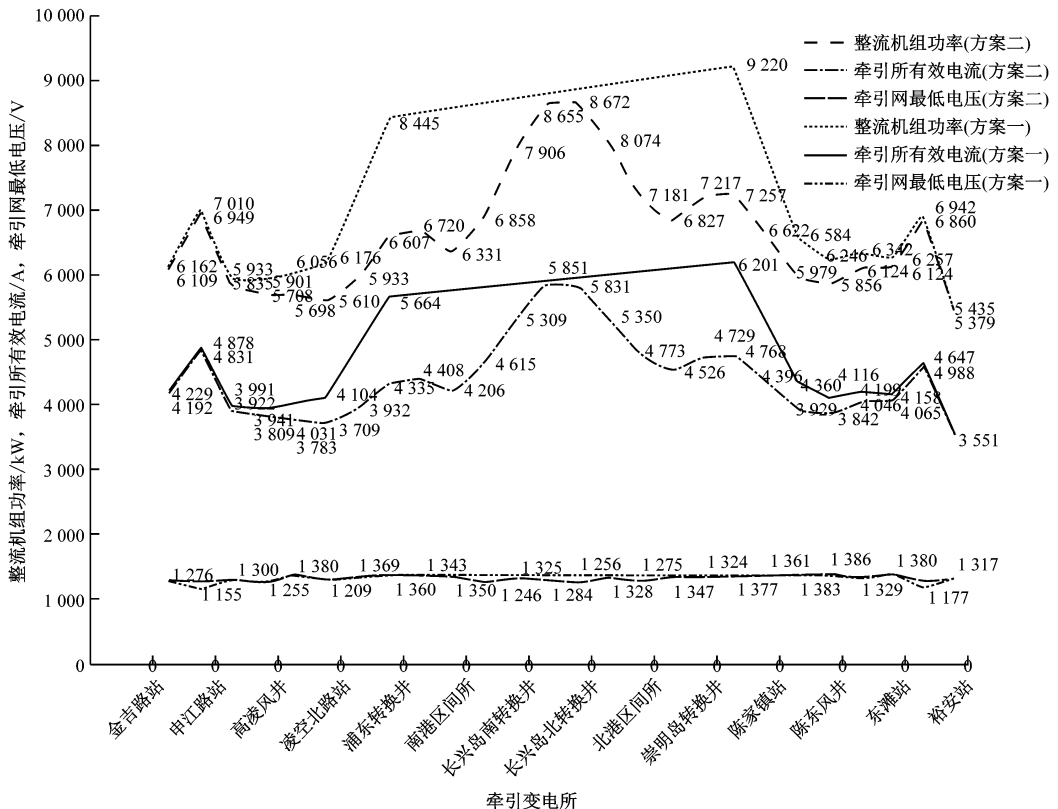


图3 牵引变电所两种设置方案供电能力对比(相邻牵引变电所解列供电)

Fig. 3 Comparison of power supply capacity of two traction substation set-up schemes (power supply of adjacent traction substations is disconnected)

鉴于南港区间牵引变电所和北港区间牵引变电所设于越江隧道轨道板下位置及环境的特殊性,牵引变电所在无人值班设计的基础上,增加 35 kV 断路器和 1 500 V 断路器故障录波、所内温湿度及环境监测、开关柜局放监测、视频监控(自动巡检设备或云台高清摄像头)等功能,结合在线监测、互联网、大数据和人工智能等先进技术,实现运维人员远程实时了解牵引变电所内设备的运行状态,提前制定相应的维修策略或应急预案,确保供电系统安全运行。

4 结语

本文借鉴“四轨”供电系统可解决长距离直流供电能力不足和杂散电流腐蚀的技术优势,针对崇明线特点,提出 DC 1 500 V 架空接触网+负极专用回流轨牵引供电方式,从根本上杜绝了杂散电流的产生及其对周边管线的腐蚀,确保了隧道和桥梁等的使用寿命;针对在越江区段中部是否设置牵引变电所,设计了两种供电方案;系统供电能力仿真测试结果表明,两种技术方案下牵引供电系统均可满足相应行车组织的要求,虽然设置区间牵引变电所在工程建设投资方面有所增加,但是可从根本上解

决本工程越江段长距离直流牵引供电能力受限的问题,可为未来崇明线运能的进一步提升提供空间。

参考文献

[1] 陈屹. 城市轨道交通四轨供电方式的探讨[J]. 电气化铁道, 2010, 21(2): 49.
CHEN Yi. Discussion on urban rail transportation fourth rail power supply mode[J]. Electric Railway, 2010, 21(2): 49.

[2] 成吉安. 城市轨道交通专用回流轨牵引供电技术方案研究[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(9): 143.
CHENG Ji'an. Traction power supply scheme for urban rail transit special return raft[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(9): 143.

[3] 张云太. 城市轨道交通第四回流轨牵引供电技术[J]. 现代城市轨道交通, 2011(4): 8.
ZHANG Yuntai. Technology of traction power supply for the fourth traction return rail of transit[J]. Modern Urban Transit, 2011(4): 8.

· 收稿日期:2022-03-29 修回日期:2022-07-30 出版日期:2024-01-10
Received:2022-03-29 Revised:2022-07-30 Published:2024-01-10
· 作者:王小峰,高级工程师,xfwangswjtu@sohu.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 93 页)

[7] 丁长权,陈喜红,陶功安,等. 基于 VB 的铁道车辆几何曲线通过参数化计算[J]. 电力机车与城轨车辆, 2012, 35(1): 33.
DING Changquan, CHEN Xihong, TAO Gong'an, et al. Parameter calculation of rolling stock geometry curve negotiation based on VB[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2012, 35(1): 33.

[8] 曹恺. 基于 ADAMS 的悬挂式单轨车辆悬挂参数优化和侧风影响研究[D]. 成都:西南交通大学, 2015.
CAO Kai. The effect of crosswind and the parameter optimization

of the suspended monorail car based on ADAMS[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.

· 收稿日期:2021-06-22 修回日期:2021-08-04 出版日期:2024-01-10
Received:2021-06-22 Revised:2021-08-04 Published:2024-01-10
· 第一作者:吕国敏,工程师,a1527879173@163.com
通信作者:杨百岭,高级工程师,E-mail:675568521@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

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728 转 821