

成都轨道交通18号线综合接地方案的优化

邵 君

(中铁二院工程集团有限责任公司, 610031, 成都//高级工程师)

摘 要 成都轨道交通18号线采用AC 25 kV架空接触网供电,其接地系统设计不推荐参照既有铁路线的接地方案。在综合考虑接地电阻、等电位连接、钢轨电位等多个要素后,提出应用于交流牵引供电制式的城市轨道交通综合接地系统。该综合接地系统将上/下行钢轨作为主接地载体,以沿线架设的上/下行牵引网回流线为辅助接地载体,形成等电位综合接地平台。针对该线接地系统原设计方案在工程实施过程中出现的问题,从过分相区的接地优化、正线的接地优化两方面提出了具体的接地优化措施,可为后续交流牵引供电下的市域轨道交通线综合接地网的设计提供参考。

关键词 市域轨道交通;交流牵引供电;综合接地系统;过分相区接地优化;正线接地优化

中图分类号 U231.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.11.025

Optimization Scheme of Comprehensive Grounding for Chengdu Metro Line 18

SHAO Jun

Abstract Chengdu metro Line 18 adopts AC 25 kV overhead catenary for power supply, but the grounding scheme of existing railway line is not recommended for Line 18. After comprehensive consideration of various factors such as the grounding resistance, equipotential bonding, rail potential and so on, an integrated grounding system for urban rail transit with AC traction power supply system is proposed. This grounding system takes the up/down rails as the main grounding carrier, and the up/down traction network return line erected along the rail transit line as the auxiliary grounding carrier to form an equipotential integrated grounding platform. In view of problems in the implementation of the original grounding system design for Line 18, specific grounding optimization measures are proposed from two aspects: the grounding optimization of excess phase zone and the grounding optimization of the main track, which can provide a reference for the design of the follow-up integrated grounding network of city railway with AC traction power supply.

Key words city railway; AC traction power supply; comprehensive grounding system; grounding optimization of the

excess phase zone; grounding optimization of the main track

Author's address China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 610031, Chengdu, China

城市轨道交通机电设备种类繁多、数量庞大,其综合接地系统是保证设备安全、确保运维人员安全的重要措施。城市轨道交通线路通常采用直流牵引供电制式,但是随着城市范围的延伸,满足市域范围内客运交通需求的市域轨道交通线长度较长,对列车最高运行速度的要求也随之增加。为此,部分市域轨道交通项目改用供电能力较强的交流牵引供电制式。

目前,采用交流牵引供电制式的城市轨道交通项目中,除牵引供电系统外,其余系统(包括通信、信号、隧道、桥梁、轨道等)的设计方案与直流制式下的设计方案基本一致。这导致了这些系统的接地无法沿用交流牵引制式的铁路方案,也无法采用传统直流牵引制式的城市轨道交通方案。因此,很有必要对交流牵引供电下的市域轨道交通线的综合接地系统进行研究。本文以成都轨道交通18号线(以下简称“18号线”)为例,对该线综合接地系统的设计及其优化措施进行分析,以为交流牵引供电下市域轨道交通线路的综合接地方案优化提供参考。

1 交流牵引供电下铁路线的接地方案

关于交流牵引供电的综合接地,铁路上有一套完整的规程和规范,其实施均参考原铁道部经济规划研究院发布的标准图册——《铁路综合接地系统》(图号为通号(2009)9301)。在城市轨道交通项目中,采用直流供电制式的综合接地方案有很多已开通运营的工程案例,但采用交流牵引供电制式的城市轨道交通项目中可供参考的工程实施案例较少。目前,交流供电制式下铁路接地系统的实施主要有以下两种方案:

方案一:以速度等级小于 160 km/h、敷设信号专用贯通地线的铁路工程为代表^[1],敷设对地电阻小于或等于 $1\ \Omega$ 的贯通地线,使之成为接地平台,以实现线路沿线信号等弱电系统设备的等电位连接。该接地系统与强电系统的接地系统需保持一定的安全距离。

方案二:以速度等级为 200 km/h 及以上的高速铁路工程为代表,设置贯通地线^[2],强电和弱电系统均通过贯通地线构建等电位平台,形成综合接地系统。工程实施时,将铁路线路两侧附近 20 m 范围内的其他设施及距离接触网带电体 5 m 范围内需接地的设备和接地装置根据需要就近接入综合接地平台^[2-4]。在等电位接入综合接地系统时,强电设备接地系统和弱电设备接地系统间需保持一定的安全距离。

2 18 号线接地系统原设计方案

2.1 城市轨道交通和铁路的工程特点对比分析

18 号线工程采用地铁制式 8 节编组市域 A 型车,采用 AC 25 kV 架空悬挂接触网供电,其他系统(通信、信号、桥梁、隧道、轨道等)的设计方案与直流供电模式下常规城市轨道交通线路的设计方案基本一致。为设计出适合本工程特点的接地系统方案,设计者对城市轨道交通和铁路的工程特点进行了对比分析,两者主要有以下几个方面的区别:

1) 土建施工方法不同:铁路工程地面段及高架段较多,由于钢轨与大地没有绝缘,钢轨、大地一起接受列车的牵引回流,其牵引回流的主要路径为大地回流、钢轨回流及回流线;城市轨道交通工程有较多的隧道区间,其施工方法大多采用盾构法,这导致经过隧道区段大地的回流较少^[4-5],城市轨道交通工程牵引回流的主要路径为钢轨、回流线和贯通地线。

2) 区间电缆的敷设方式不同:铁路工程一般采用电缆槽,电缆支架的使用较少;城市轨道交通工程中有大量的电缆支架,且在对线路进行检查、维修时常常会与之相接触。

3) 信号的传输方式不同:铁路工程一般采用轨道电路来传输列车运行控制信息;城市轨道交通不采用轨道电路进行信号传输。

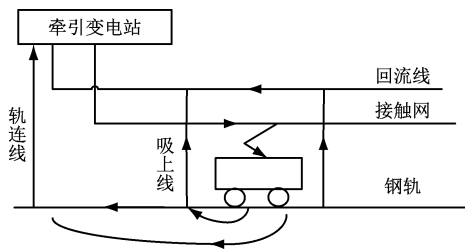
4) 贯通地线的敷设方式不同:铁路工程一般采用预埋/敷设电缆槽的方式;城市轨道交通工程隧道内一般不设置电缆槽。

5) 行车密度不同:城市轨道交通线路的行车密度较高,通常为 30 对/h;与之相比,铁路的行车密度较低。

2.2 交流牵引供电下城市轨道交通线路的综合接地系统

综上所述,18 号线工程不推荐参照既有铁路接地系统方案。在综合考虑接地电阻、等电位连接、钢轨电位、接触电压和跨步电压、系统安全、电流腐蚀等基本要素后,本文提出一种应用于交流牵引供电制式的城市轨道交通综合接地系统^[6]。该综合接地系统将牵引供电、动力照明、信号、通信、信息等系统设备,以及建筑物、道床、站台、桥梁、隧道、声屏障等需接地的装置通过共用地线连成一体,以上/下行钢轨作为主接地载体,以沿线架设的上/下行牵引网回流线为辅助接地载体,形成等电位综合接地平台。

如图 1 所示,交流牵引供电系统回流通路由上/下行钢轨、接触网回流线及大地构成^[7-9]。上/下行钢轨导体相隔 500 ~ 600 m,实现完全横向连接。该回流通路与沿线车站综合接地网、区间风井接地网、联络横通道接地网、牵引变电所接地网、隧道及桥梁等接地装置单点可靠连接,可降低接地电阻。弱电系统在区间电缆支架上设置接地连接体,连接体每隔 500 ~ 600 m 断开一次,每段接地连接体与钢轨连接一次。该等电位综合接地平台可避免各系统因与强电工作地相联而成为强电系统的回流通路,有效解决交流牵引供电下城市轨道交通项目的接地问题,充分保障人身安全、设备安全及运营安全。



注:箭头为牵引回流的方向。

图 1 交流牵引供电回流通路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of AC traction power supply return path

本文结合 18 号线的实际线路情况,对采用不同施工方法的施工区段构建了不同的接地系统,具体包括盾构隧道区段及车站接地系统、矿山法隧道接

地系统、联络横通道接地系统、区间风井接地系统、高架桥区段接地系统及路基区段接地系统等。将这些接地系统与钢轨相连,即可形成 18 号线工程的综合接地系统。

1) 盾构隧道区间和上下行联络横通道处:设置水平接地体和垂直接地体,构建隧道复合接地系统;该复合接地系统与上行钢轨、下行钢轨分别单点连接,构成等电位连接体。

2) 矿山法区段:土建隧道施工时参考《铁路综合接地系统》,每隔 200 m 预留 1 个接地端子;该接地端子在土建施工时实施;弱电区间接地体接入该接地端子,以保证接地电阻满足要求。

3) 高架区段:在桥墩下设置桥下接地网,桥墩上部左右两侧分别设置接地端子;接地端子通过接地引下线与桥下接地网连接;每隔一定距离将上行和下行钢轨单点连接,并与桥墩上部预留的强电接地端子连接,以构成等电位连接体。

4) 路基区段:每隔一定距离将上行和下行钢轨、上行和下行牵引网回流线单点连接,以构成等电位连接体。

在上述全部区段内,强电环网区间电缆支架上的接地扁钢、弱电区间电缆支架上的接地扁钢每隔一定距离断开一次。每段接地扁钢在中间位置与上行和下行钢轨单点可靠连接一次。相邻轨道板钢筋连接在一起,每隔一定距离断开一次,每段连续的轨道板钢筋在中间位置与上行和下行钢轨单点可靠连接一次,以构成等电位连接体。参照相关试验资料及工程上普遍认同的观点,当 2 个接地体的间距大于 20 m 时,二者的互阻为 $0^{[10]}$,因此,强电区间接地扁钢、弱电区间接地扁钢在钢轨单点连接点的距离均应大于 20 m。

3 18 号线弱电接地系统优化措施

18 号线在施工阶段按上述方案进行施工,但在调试阶段出现了部分区间计轴受扰的情况。计轴受扰主要出现在列车过分相区及接触网停送电过程中。为此,本文对该问题进行详细的测试及分析,并提出弱电系统的优化措施。

3.1 过分相区的接地优化

列车过分相区时需切断受电弓主断路器,利用列车惯性滑行通过无电区域,在进入下一个供电分区后列车闭合受电弓主断路器。此过程中,列车先停电后受电,牵引回流突变产生较大的电磁场,干

扰了计轴磁头,进而影响了计轴磁头的正常工作。

经测试及分析,采集得到列车过分相区时受扰磁头的波形,其峰值为 8.415 V,超出了计轴磁头设备电磁兼容的最大容许值,因此需要进一步优化计轴设备。为增加设备的抗冲击能力,改善设备的电磁兼容性能,将计轴设备的纵向起动电压调整到 350 V。采用新设备后,计轴系统不再出现受扰占用的情况,但从波形采集分析结果看,计轴磁头仍存在脉冲干扰的情况。进一步分析后得知,受到脉冲干扰的计轴磁头,其位置主要在分相区附近。为此,在分相区增加吸上线,以减少牵引回流的干扰。经检测,上述措施可有效解决列车过分相区時計轴区段因计轴磁头受扰而输出线路区段被异常占用的问题。

3.2 正线的接地优化

在接触网停送电过程中,18 号线部分正线联锁区边界相关计轴传输通道受扰,导致这些区段输出线路区段被异常占用的信息。根据计轴受扰波形分析可能存在的影响因素,从计轴传输通道上看,干扰信号传输的路径主要有计轴电缆、强弱电区间接地扁钢、钢轨及回流线等。本文对可能的干扰路径进行了调查分析,并对部分干扰路径作了测试排查。在接触网停送电过程中采集得到计轴磁头受扰波形,该波形类似 1 个正弦波。同时对计轴通道芯线的对地电压进行了监测,其最大电压值为 174 V。

为了进一步分析计轴受扰的情况,对受扰线路区段内的 1 个车站进行接地电阻测试。采用接地电阻测试仪测试接地点的接地电阻(采用三极法测试),得到的测试结果如表 1 所示。

如表 1 所示,计轴电缆接续盒处与弱电区间接地扁钢断开时,测得的接地电阻为 243.00 Ω 。

此外,在轨旁弱电扁钢与钢轨连接线断开的情况下,在车站接触网停送电过程中使用监测记录仪采集弱电区间接地扁钢与钢轨之间的电位差,得到的测试结果为 0.9 V。在计轴电缆接续盒接地端与弱电区间接地扁钢断开的情况下,在车站接触网停送电过程中使用监测记录仪采集计轴电缆屏蔽层与弱电区间接地扁钢之间的电位差,得到的测试结果为 26.9 V,该电位差较大,因此,计轴电缆屏蔽层应与弱电区间接地扁钢连接。而弱电区间接地扁钢与钢轨断开后,弱电区间接地扁钢与钢轨的电位差可忽略不计,仍可认为两者是等电位连接。

表 1 计轴受扰车站的接地电阻测试结果

Tab. 1 Grounding resistance test results of the station with disturbed axle counter

序号	接地点	测试的位置/状态	接地电阻/ Ω
1	站内综合地网扁钢	接地扁钢与车站上下行综合地网连接	0.13
2	强电接地桩	上下行联络通道处、强电接地端子与钢轨连接处	0.17
3	强电接地桩	上下行联络通道处、强电接地端子与道床钢筋网连接处	0.46
4	钢轨	上下行联络通道处	1.05
5	钢轨连接线头端	与弱电区间接地扁钢断开时	0.38
6	弱电区间接地扁钢	与钢轨连接时	0.36
7	弱电区间接地扁钢	与钢轨断开时	0.49
8	计轴电缆屏蔽层	计轴电缆接续盒处与弱电区间接地扁钢连接时	0.48
9	计轴电缆屏蔽层	计轴电缆接续盒处与弱电区间接地扁钢断开时	243.00

在工程实施时,具体的做法是:将弱电区间接地扁钢与钢轨的连接断开,将断开的弱电区间接地扁钢连接起来。同时,将弱电区间接地扁钢与车站接地系统、区间风井接地系统、矿山法隧道接地系统、联络横通道接地系统、高架桥区段接地系统及路基区段接地系统连接起来。

4 结语

在 18 号线工程的调试过程中,从改善设备性能和优化接地方案两个方面对原有的设计方案及设备进行了调整,从目前运营情况看,调整后取得了较好的效果,后续将继续跟踪 18 号线工程沿线设备的运营情况。建议在进行交流牵引供电下市域轨道交通线路设计时,首先应在设备选型上满足电磁兼容的相关要求,其次计轴点应尽量不要设在分相区内,同时应尽量减少牵引回流对轨旁设备的干扰和影响。

参考文献

[1] 张锐,杨岗,刘立峰,等.铁路综合化接地和信号设备防雷系统工程设计指南[M].2 版.北京:中国铁道出版社,2018:1.
ZHANG Rui,YANG Gang,LIU Lifeng,et al. Engineering Design Guide of Lightning Protection System for Railway Integrated Grounding and Signal Equipment[M]. 2nd ed. Beijing: China

Railway Press,2018:1.
[2] 国家铁路局.高速铁路设计规范:TB 10621—2014[S].北京:中国铁道出版社,2014:229.
State Railway Administration. Code for Design of High-speed Railway:TB 10621—2014[S]. Beijing: China Railway Press, 2014:229.
[3] 刘立峰,周南骏.武广铁路客运专线综合接地标准化设计[J].铁道标准设计,2010(1):169.
LIU Lifeng,ZHOU Nanjun. Integrated grounding standardization design for Wuhan-Guangzhou Passenger Dedicated Line. Railway Standard Design,2010(1):169.
[4] 王建国,樊亚东,张义,等.高速铁路综合接地系统的接地阻抗与散流特性[J].高电压技术,2015(11):3576.
WANG Jianguo,FAN Yadong,ZHANG Yi,et al. Grounding impedance and current dispersed characteristics of high-speed railway integrated grounding system[J]. High Voltage Engineering, 2015(11):3576.
[5] 朱远帆,陈民武,赵周鉴,等.电气化铁路长大隧道区段牵引回流特性研究[J].中国铁路,2019(8):92.
ZHU Yuanfan,CHEN Minwu,ZHAO Zhoujian,et al. Study on tractive reflux characteristics in the long tunnel section of electrified railway[J]. China Railway,2019(8):92.
[6] 邓云川,文蓁,徐剑,等.一种应用于交流牵引供电制式的城市轨道交通综合接地系统:201821050726.6[P].2019.03.12.
DENG Yunchuan,WEN Guo,XU Jian,et al. An integrated urban rail transit grounding system applied to AC traction power supply system:201821050726.6[P].2019.03.12.
[7] 肖萃,刘立峰.高速铁路综合接地技术[J].铁道经济研究,2010(3):29.
XIAO Ping,LIU Lifeng. Integrated grounding technology of high-speed railway[J]. Railway Economics Research,2010(3):29.
[8] 叶晓伟.地铁车站综合接地系统方案及施工配合要点[J].铁路工程技术与经济,2018(7):14.
YE Xiaowei. Comprehensive grounding system plan and key points for constructions coordination of subway station[J]. Railway Engineering Technology And Economy,2018(7):14.
[9] 程梁,张旭.城际轨道交通特殊工点综合接地设计[J].铁道标准设计,2014(8):156.
CHENG Liang,ZHANG Xu. Design of integrated earthing for special construction site of intercity railway[J]. Railway Standard Design,2014(8):156.
[10] 岳新华.城市轨道交通交流供电系统钢轨电位研究[D].成都:西南交通大学,2018.
YUE Xinhua. Research on rail potential of urban rail transit based on AC power supply system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2018.

(收稿日期:2022-04-10)