

城市轨道交通专用轨回流供电系统设计与应用

黄江伟¹ 李守杰¹ 王 龙²

(1. 宁波市轨道交通集团有限公司建设分公司, 315101, 宁波;
2. 中铁第六勘察设计院集团有限公司, 300250, 天津//第一作者, 高级工程师)

摘 要 通过对既有城市轨道交通线路沿线杂散电流的现场测试和数据分析,提出采用专用轨回流供电系统是解决杂散电流泄漏和对沿线管线腐蚀的根本方案。分析了走行轨回流与专用轨回流的区别,根据实际工程适用范围提出了“架空接触网结合专用轨回流”的系统设计方案。对采用专用轨回流供电系统后性能进行了分析,并对专用回流轨设计要求进行了详细阐述。

关键词 城市轨道交通; 专用轨回流; 杂散电流

中图分类号 U224.2⁺6; U231.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.01.037

Design and Application of Special Rail Return Current Power Supply System in Urban Rail Transit

HUANG Jiangwei, LI Shoujie, WANG Long

Abstract Based on the field test and data analysis of the stray current along existing urban rail transit lines, it is proposed that the use of special rail return current power supply system is the fundamental solution to stray current leakage and pipeline corrosion along the line. The difference between running rail return current and special rail return current is analyzed, and the system design scheme of ‘overhead contact system combined with special rail return current’ according to the practical application scope of the project is put forward. The performance of adopting special rail return current power supply system is analyzed, and the design requirements of special return current rail is expounded.

Key words urban rail transit; special rail return current; stray current

First-author’s address Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd., 315101, Ningbo, China

根据正线、场段内实际测试结果显示,已开通运行的城市轨道交通线路轨道对地过渡电阻,正线的不足 $5\ \Omega\cdot\text{km}$, 停车场车辆段的更是不足 $1\ \Omega\cdot\text{km}$ 。由此可见,过低的过渡电阻是杂散电流泄漏的主要原因。以宁波市轨道交通 1 号线为例,受

轨道交通杂散电流影响,江南停车场附近燃气管道地电位出现了较大波动,并超出了管道要求值。经深入了解和实际测试和研究分析,证实杂散电流主要是从正线变电所泄漏,并经大地、沿线金属管线及结构钢筋流入线路停车场及车辆段,再从场段内钢轨流回正线牵引变电所。为彻底解决杂散电流腐蚀及影响,引入专用轨回流供电系统。

1 不同回流方式分析

城市轨道交通直流牵引供电系统主要由牵引整流机组、直流开关柜、上网电缆及隔离开关、牵引网和回流网组成,回流方式有走行轨回流和专用轨回流两种方式。专用轨回流供电系统正极可采用架空接触网或接触轨,负极设置单独的回流接触轨。

1.1 走行轨回流方式

走行轨回流方式是利用走行轨(钢轨)回流,走行轨安装采用绝缘方式。但受环境条件、施工条件、工期等多方面因素影响,走行轨安装完毕后,其绝缘水平达不到设计要求的 $15\ \Omega\cdot\text{km}$,导致部分回流电流经走行轨向道床及其它金属结构回到负极柜,从而产生杂散电流并形成杂散电流腐蚀。图 1 为走行轨回流直流供电系统组成示意图。

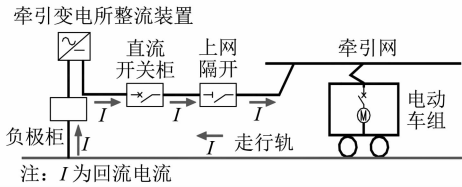


图 1 走行轨回流直流供电系统组成示意图
Fig. 1 Composition diagram of running rail return current DC power supply system

1.2 专用轨回流方式

专用轨回流是增加单独的专用回流介质并采用绝缘方式安装,走行轨只起车辆导向作用。绝缘方式安装采用绝缘子或复合材料绝缘支架。专用

轨绝缘效果远高于走行轨绝缘效果。专用轨回流直流供电系统组成如图 2 所示。

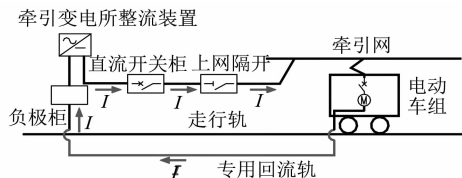


图 2 专用轨回流直流供电系统组成示意图

Fig. 2 Composition diagram of special rail return current DC power supply system

1.3 专用轨回流适用性分析

目前,国内外的专用轨回流方式主要有传统“四轨”方案^[2]、胶轮“四轨”方案及跨坐式单轨方案。上述方案在牵引所布点、载客量、隧道断面开挖、线路转弯及爬坡能力上均有特殊要求,不适用于常规城市轨道交通工程。传统“四轨”方案的供电电压低、牵引变电所布点有所增加;且供电轨和回流轨并排安装在走行轨侧,限界范围大;地下段需增大隧道开挖断面。胶轮“四轨”方案的运量低,不适用于大城市建设;跨坐式单轨方案具有运量大、爬坡能力强及转弯半径小的特点,但比较适用于地面线路。上述三种专用轨回流方案均有其特殊适用范围。本文提出了采用架空接触网结合专用轨回流的城市轨道交通供电系统方案。

架空接触网授流与专用轨回流相结合的供电方式具体为:架空接触网系统采用传统 DC 1 500 V 刚性或柔性悬挂,设置全线贯通的专用回流轨作为回流通路;车辆采用钢轮,并增设回流靴,车内设置负极贯通母线;回流轨参考供电方案中接触轨相关技术要求设置;全线钢轨焊接连接并在变电所内可靠接地;各牵引变电所处设置单向导通装置^[3],接于地网母排与专用回流轨之间。

2 专用轨回流供电系统性能分析

2.1 供电系统

2.1.1 牵引变电所布点

传统牵引变电所布点主要受牵引网电压降及钢轨电位^[4]两个因素限制。一般电压降需满足网压 1 000 V、轨电位不超过 90 V 要求。采用专用轨回流后,不再考虑钢轨电位,只考虑牵引网压。目前 2 500 A 载流量的第三轨电阻为 0.008 3 Ω/km , 60 kg/m 钢轨的电阻为 0.036 0 Ω/km ,回流轨电阻约是钢轨的三分之一。根据模拟计算,以走行轨为

回流的牵引供电系统,牵引变电所布点间距在 2.8~3.0 km 之间;采用专用轨回流后,牵引变电所间距可在 3.5~5.0 km 之间。因此采用专用轨回流不仅能减少牵引变电所布点,还可减少相关土建面积,节省投资,优势明显。

以宁波轨道交通 4 号线为例,根据原初步设计供电系统方案及模拟计算结果,全线正线需设牵引降压混合变电所 14 座,采用专用轨回流方案后 4 号线正线可减少 3 座牵引变电所,即正线设置 11 座牵引变电所即可满足供电需求。牵引网正极维持 DC 1 500 V 架空接触网方式不变。模拟计算结果如表 1 所示。

2.1.2 杂散电流防护

采用专用轨回流供电系统方案后,全线回流轨采用绝缘方式安装,基本无杂散电流泄漏,变电所内也无需再设置杂散电流监测系统,钢轨无需进行杂散电流泄漏防护,可降低运维工作量。

2.2 轨道系统

钢轨只作为行车导向作用,不作为回流系统的一部分,因此对轨道的纵向电阻、接头焊接和钢轨安装要求等大大降低,只需考虑钢轨本体刚性和钢轨使用寿命。取消了道床内排流网钢筋,取消了钢筋间焊接要求,取消了相关排流网连接端子和杂散电流测试端子。

2.3 站台门

采用专用轨回流供电系统后,钢轨、站台门均与接地网可靠连接,形成等电位体,故无需再设置站台门绝缘带,更加提高了乘客乘车安全性。

3 专用轨回流直流牵引供电系统设计

3.1 牵引变电所设计

采用专用轨回流供电系统方案后,回流轨与走行轨分离。考虑架空接触网在区间断线后会搭在钢轨或回流轨上这一实际情况,在原变电所设计方案中增设带泄漏电流监测元件的负地单向导通装置(见图 3),装置一端连接变电所负极母线,另一端与接地网连接。导通方向由钢轨侧导向负极母线侧,为接触网发生接地故障后提供短路通路,实现继电保护可靠动作。

另外全线钢轨焊接连接成电气贯通长轨,采用鱼尾板连接的钢轨接头处用电缆连接完成。钢轨在每个变电所内通过电缆与车站接地网可靠连接。接地保护故障方案分析如下:牵引网正极(接触网)对架空地线、钢轨发生接地故障(F1);牵引网正极(接触网)对车辆壳体发生接地故障(F2);车辆内正

表 1 宁波轨道交通 4 号线牵引所仿真模拟计算结果(按 30 对/h 模拟)

Tab.1 Simulation calculation results of traction station of Ningbo rail transit line 4 (based on 30 pairs/h)														
牵引 变电所	牵引 变电所 间距/km	正常情况高峰小时负荷						相邻所解列情况下高峰小时负荷						
		整流 机组 功率 /kW	整流 机组 有效 电流/A	馈线有效 电流/A		牵引 网最 低电 压/V	回 流 轨最 高电 位/V	故障 变电 所	整流 机组 功率 /kW	整流 机组 有效 电流/A	馈线有效 电流/A		牵引 网最 低电 压/V	回 流 轨最 高电 位/V
				上行	下行						上行	下行		
慈城	2.38	1 973	1 278	996	488									
官山河	4.90	3 360	2 214			1 491	19	右故障	3 916	2 496	1 684	1 380	1 074	33
						296	876		左故障	4 931	3 322	1 104	1 147	1 204
奥体中心	3.39	3 988	2 677	1 476	1 169	1 243	26	右故障	4 390	2 926	1 677	1 434	1 223	29
				802	1 179		左故障	4 144	3 418	1 248	1 447	1 074	33	
洪大路	2.87	3 749	2 492	1 229	642	1 348	24	右故障	4 204	3 444	1 474	1 061	1 236	49
				422	1 060		左故障	4 999	3 337	887	1 266	1 223	29	
丽江路	2.72	3 488	2 364	1 183	814	1 442	18	右故障	4 239	3 447	1 701	1 437	1 301	61
				744	1 072		左故障	4 447	3 743	1 487	2 012	1 236	49	
翠柏里	5.33	4 479	3 042	1 273	963	1 382	48	右故障	4 662	3 813	2 123	1 980	1 181	106
				449	940		左故障	4 978	4 144	918	1 488	1 301	61	
兴宁桥东	3.08	4 424	3 023	1 602	1 310	1 344	61	右故障	6 144	4 244	2 271	1 994	1 219	73
				1 431	1 491		左故障	6 046	4 066	1 912	2 114	1 181	106	
矮柳	3.33	3 913	2 613	1 333	1 011	1 386	47	右故障	6 242	4 286	1 883	1 603	1 247	74
				1 001	1 316		左故障	4 946	4 084	2 004	2 104	1 219	73	
嵩江东路	3.39	3 407	2 244	804	442	1 410	38	右故障	4 383	3 614	1 300	1 012	1 316	46
				747	996		左故障	4 103	3 460	1 346	1 448	1 247	74	
金达南路	4.30	3 042	2 017	1 283	640	1 436	19	右故障	4 108	3 478	1 641	1 088	1 308	44
				412	937		左故障	4 310	2 873	1 203	1 389	1 316	46	
东钱湖		2 244	1 466	881	476	1 448	24	右故障	4 874	3 309	1 447	1 391	1 246	62
				713	1 012		左故障	3 477	2 374	1 182	1 417	1 308	44	

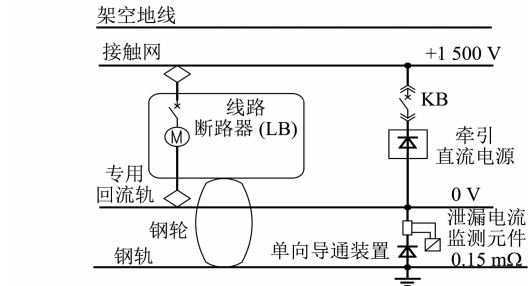


图 3 负地单向导通装置

Fig. 3 One-way electrical conduction device

极对车辆壳体发生接地故障(F3);车辆内正负极对车辆壳体绝缘不良或绝缘支架绝缘不良(F4);直流设备内正极对设备外壳短路(F5)。各种短路情况如图 4 所示。

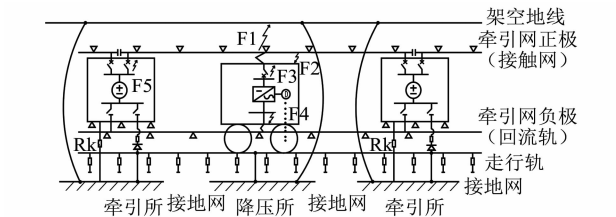


图 4 专用轨回流各种短路示意图

Fig. 4 Schematic diagram of various short circuits of return current of special rail

F1、F2、F3 发生接地故障与走行轨回流系统继电保护方案^[5]一致,短路电流通过钢轨、架空地线、车壳和接地网等流入负地单向导通装置再流回负极,保护装置动作。F4 属于车辆内正负极对车辆壳体绝缘不良或回流轨支架绝缘不良,此时对地单向导通装置内流过电流,监测元件监测到信号并发出报警,为检修人员查找泄漏点提供依据。F5 属于正常的直流设备对外壳短路,传统框架电压和电流元件保护即可实现故障切除。

3.2 专用回流轨设计

- 1) 专用轨回流系统:其组成包括专用回流轨、鱼尾板及紧固件、膨胀接头、防爬器(中心锚结)、端部弯头(高速和低速两种)、电缆连接板及电缆连接螺栓、绝缘支撑和防护罩及其支架等。
- 2) 专用回流轨安装位置:正线专用回流轨地下区段一般安装在线路行车方向的左侧,高架及敞开段区间设置在行车方向右侧。在遇到道岔以及安装条件限制时,考虑进行换边敷设,专用回流轨的授流面^[6]与钢轨轨面连线始终保持平行。专用回流轨安装位置根据车辆选型、受流器安装位置和牵引网额定电压等因素确定。专用回流轨的安装位置按专用回流轨授流面距走行轨轨面连线的高度

为 140 mm,专用回流轨中心距钢轨轨面连线中心距离为 1 417.5 mm。

3) 专用回流轨安装设计:全线采用整体绝缘支架进行固定安装。专用回流轨支撑跨距一般按 3~5 m 间隔进行布置,在端部弯头和膨胀接头处应根据实际需要进行布置。专用回流轨的标准制造长度一般为 15 m,正线、停车场及车辆段根据线路中的实际布置情况进行配轨,以减少切轨数量。普通连接接头通过鱼尾板方式将标准成品专用回流轨以及专用回流轨与端部弯头进行固定连接,连接处两轨之间的缝隙不应大于 2 mm。

膨胀接头采用整体式结构,设置于锚段中部。膨胀接头伸缩长度需满足专用轨回流随环境温度和运行温度条件下的伸缩要求。两组中心锚结之间的专用回流轨称为一个锚段,锚段长度应根据接触轨的温度伸缩补偿范围来确定,地面及高架段锚段长度一般不大于 75 m,地下隧道内锚段长度一般不大于 90 m。为保证列车回流靴平滑过渡,在专用回流轨的终端设置具有适量坡度的端部弯头。正线专用回流轨采用高速弯头,其坡度能够适应车速 80 km/h 的运行要求,通过区段采用低速端部弯头。

4) 断口设置:机械分段主要指专用回流轨自然断开,断口两端专用回流轨用电缆进行电气连接,以实现断口电气连通。人防门及场段平交道口等处,断口长度根据人防门工作区域及平交道宽度等情况确定。专用回流轨在电分段处、道岔区段、人防门处、车场内平交道口及车库库房内等位置设置断口。为了检修维护方便,同时考虑系统的安全保护需要,专用回流轨需要设置电分段,不同电分段间利用机械分段进行分隔。

5) 回流轨绝缘支架安装:在整体道床及高架轨道梁区段,支架安装采用现场打孔后扩底,用锚栓固定;在碎石道床区段,在轨枕上预留安装孔,后期在现场用螺栓固定。

6) 场段内专用回流轨设置方案:在场段电化范围股道进行专用回流轨设置,可避免因在场段出入线设置回流转换段而影响运营出车效率。按照回流通路考虑,在库内外设置专用轨时不需进行线间距调整。为便于库内运营检修及巡视,在停车列检库内,专用回流轨的设置考虑间断设置;在检修库

内,设置一段满足回流的专用轨。

4 结语

综上所述,采用专用轨回流供电系统可以从源头杜绝杂散电流的产生,不仅能够解决对城市轨道交通内部结构钢筋及对周边金属管线的腐蚀,还能降低工程施工难度;更重要的是,在后期运行过程中无需对杂散电流泄漏进行监测,不用对钢轨绝缘进行维护;另外,可减少牵引变电所布点,取消杂散电流监测及排流网设置,取消站台门绝缘带。虽然会增加部分投资,但具有非常良好的社会效益,还大大降低了施工和运营的难度,是目前解决国内城市轨道交通杂散电流问题最有效方案。

参考文献

- [1] 于志永. 地铁车辆段杂散电流的特征分析及防护[J]. 城市轨道交通研究,2017(10):44.
YU Zhiyong. Analysis of stray current characteristics in metro depot and protection measures[J]. Urban Mass Transit,2017(10):44.
- [2] 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 Rail Transit,2011(4):8.
- [3] 李威. 地铁杂散电流的监测与防治[J]. 城市轨道交通研究,2003(4):48.
LI Wei. The monitor and control system of stray current corrosion in metro[J]. Urban Mass Transit,2003(4):48.
- [4] 王晓保. 钢轨电位限制装置与框架保护关系的分析[J]. 城市轨道交通研究,2004(6):56.
WANG Xiaobao. Relation between rail over-voltage protection device and frame protection[J]. Urban Mass Transit,2004(6):56.
- [5] 王开康. 一种城轨环网供电继电保护配置方案[J]. 城市轨道交通研究,2010(12):43.
WANG Kaikang. A relay protection configuration scheme for urban rail ring network power supply[J]. Urban Mass Transit,2010(12):43.
- [6] 徐光强,江安,曹小相. 直流 1 500 V 接触轨系统创新设计[J]. 都市快轨交通,2010(1):18.
XU Guangqiang,JIANG An,CAO Xiaoxiang. Innovation design for DC 1 500 V conduct rail system[J]. Urban Rapid Rail Transit,2010(1):18.

(收稿日期:2020-01-25)