

# 地铁专用回流轨牵引供电系统应用方案

喻 奇

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉//高级工程师)

**摘 要** 分析了常规地铁牵引供电系统采用走行轨兼做回流轨存在的问题,以及杂散电流腐蚀问题带来的严重危害。针对目前专用回流轨技术方案发展现状,推荐采用网轨混合牵引供电系统的应用方案。通过对该方案中重点问题的分析,推荐采用专用回流轨和接触网同位置设置电气分段的方案,在牵引供电上网点和回流点处设双极隔离开关;推荐在负极对地之间设置单向导通装置作为漏电保护装置;推荐设置绝缘监测装置对各区段的专用回流轨对地绝缘状况进行定期监测,以便及早发现绝缘薄弱点并清查处理。

**关键词** 地铁;牵引供电系统;专用回流轨

**中图分类号** U231.8; U244.2\*6

**DOI:** 10.16037/j.1007-869x.2021.01.008

**Research on Application Scheme of Traction Power Supply System with Special Return Conductor Rail for Metro**  
YU Qi

**Abstract** The problems that exist in using running rail as return rail in conventional metro traction power supply system are analyzed, and serious hazards caused by stray current corrosion are described. In view of the current development status of the technical scheme of special return conductor rail, the application scheme of adopting the traction power supply system that consists of catenary and special return conductor rail is recommended. Through analysis of key problems in this application scheme, it is recommended to adopt the scheme in which special return conductor rail and catenary are sectionalized at the same position, and bipolar isolation switch is set up at the catenary connection point and traction power supply return point. It is recommended to set up one-way conduction device between the negative pole and ground as the leakage protection device. It is recommended to set up insulation monitoring device for the special return conductor rail of each section to ground, and the insulation resistance shall be monitored regularly so that insulation weak points are discovered, checked upon and dealt with as early as possible.

**Key words** metro; traction power supply system; special return conductor rail

**Author's address** China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 430063, Wuhan, China

目前我国地铁牵引供电系统通常采用走行轨兼做回流轨。根据文献[1]中的方案三(该方案为目前国内大规模采用的常规方案,即“绝缘+监测+排流”方案)的要求:走行轨对结构、对地应保持绝缘,其过渡电阻值不应小于  $15 \Omega \cdot \text{km}$ 。依照国内目前对杂散电流防护的重视程度,新建线路在建成时基本无法达到该技术标准规定的过渡电阻值。而且随着运营时间的增加,受到沿线潮湿和积水、粉尘及可导电沉积物等因素影响,沿线各种绝缘材料的绝缘性能逐渐下降,钢轨对地铁结构和地的过渡电阻值越来越小,杂散电流向外扩散问题日益严重<sup>[2]</sup>。近年来,关于地铁杂散电流影响沿线周边的金属管线和设施的反映陆续在国内多个城市出现,不得不引起高度重视,特别是对于高度敏感的油气管线,若发生杂散电流腐蚀造成穿孔泄漏事故,后果将不堪设想。

采用走行轨兼做回流轨,不仅带来杂散电流腐蚀问题,随之也带来钢轨电位过高的问题。按照 GB 50157—2013《地铁设计规范》要求,正常双边供电运行时,站台处走行轨对地电位不应大于 120 V,车辆基地库线走行轨对地电位不应大于 60 V。当走行轨对地电压超标时,应采取短时接地措施<sup>[3]</sup>。该条款作为强制性条文,必须严格执行。因此,钢轨对地电位限值对于确定牵引变电所布设方案至关重要。目前国内已经运营的地铁线路大多存在钢轨实际电位比设计值高很多的情况,导致钢轨电位限制装置频繁动作。一旦车站站台边缘地板出现绝缘损坏,乘客在钢轨电位过高时触碰站台门,将会有触电危险<sup>[4]</sup>。

## 1 专用回流轨技术方案

由于采用走行轨兼做回流轨,钢轨无法完全绝缘于道床,牵引回流电流势必经钢轨向道床和其他结构泄漏并产生杂散电流<sup>[5]</sup>。即使加强钢轨绝缘安装水平(比如采用绝缘轨枕),走行轨对结构、对地的过渡电阻值才能达到  $100 \Omega \cdot \text{km}$  级的水平,也无法

从根本上解决杂散电流产生的问题。若比照牵引供电网的绝缘强度(如接触轨)来设置专用回流轨,理论上可以完全避免杂散电流的泄漏。

根据国内地铁建设情况和装备技术水平,牵引供电系统若采用专用回流轨,有网轨混合牵引供电系统和四轨牵引供电系统两种方案。

### 1.1 网轨混合牵引供电系统

网轨混合牵引供电系统即采用接触网授电、接

触轨回流的牵引供电系统。接触网设置方案与常规DC 1 500 V 接触网供电制式方案完全保持一致,地下区间采用刚性悬挂,高架及地面区间采用柔性悬挂;专用回流轨的设置方案与DC 1 500 V 接触轨供电制式方案完全一致,采用同类型的钢铝复合轨,其受流方式采用安全性相对高的下部受流,专用回流轨建议安装于走行轨轨旁远离疏散平台的一侧。图1为接触网与专用回流轨在圆形隧道区间安装示意。

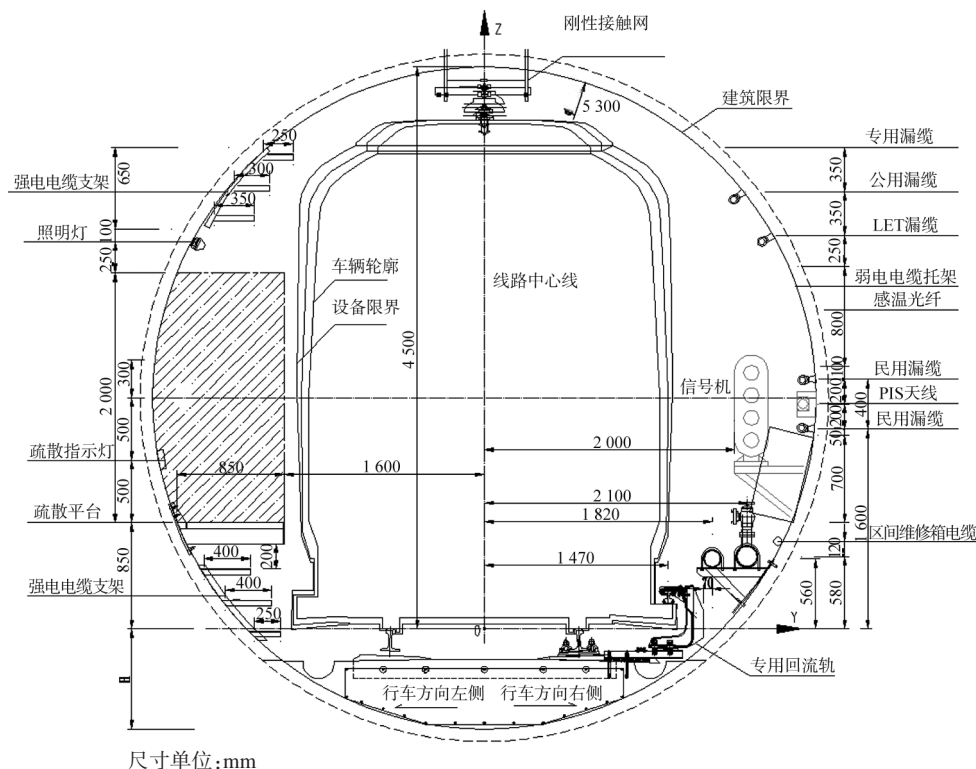


图1 接触网与专用回流轨在圆形隧道区间安装示意图

由图1可知:国内地铁通常采用的5 500 mm 盾构内径的圆形隧道完全可布置下接触网和专用回流轨;对于矿山法(马蹄型)隧道和明挖法(矩形)隧道,以及高架桥梁和地面线路,其限界空间相比圆形隧道更为充裕,同时布置接触网和专用回流轨也没有问题。因此,采用网轨混合牵引供电系统对土建工程并不会产生实质影响。已投运的既有地铁运营线路同样具备改造成网轨混合牵引供电系统的土建条件。

DC 1 500 V 的接触网和接触轨这两种供电制式在国内地铁领域均有广泛应用,建设和运营经验丰富,尤其是DC 1 500 V 接触网供电制式为大多数地铁城市所采用。因此,从技术成熟度来看,地铁采用网轨混合牵引供电系统不存在技术困难。

对于既有车辆装备来说,只需对既有定型的接触网制式车辆加设集电靴,同时在车体内设置切换

电路(可选用专用回流轨回流或者钢轨回流),无需对车体结构进行较大改造,还可共享既有车辆基地检修资源,可大大节省工程投资和运营综合成本。

### 1.2 四轨牵引供电系统

四轨牵引供电系统是在三轨供电系统的基础上发展起来的,二者的授电轨和回流轨采用相同类型的钢铝复合轨,授电轨负责向车辆不间断地提供电能,回流轨与变电所负极柜相连,形成一个完整的供电回路。

目前国内外跨坐式单轨和悬挂式单轨、APM(旅客自动运输)系统、中低速磁悬浮均是采用三轨供电、四轨回流。而英国伦敦地铁、意大利米兰地铁M1线、马来西亚吉隆坡轻轨是少有的地铁和轻轨采用三轨供电、四轨回流的钢轮轨道交通系统,牵引供电电压均不超过DC 750 V。

相比DC 750 V 牵引供电系统,DC 1 500 V 牵

引供电系统所需布设牵引变电所数量较少,工程经济性较好,且运营维护成本更低。无论是 DC 1 500 V 接触网,还是 DC 1 500 V 接触轨,在我国轨道交通领域均有成熟的建设、运营经验。根据我国目前轨道交通建设发展情况,除原采用 DC 750 V 接触轨线路延伸,已不会再采用 DC 750 V 牵引供电电压等级。

按照车辆受流方式及接触轨安装位置不同,DC 1 500 V 四轨牵引供电系统可采用牵引轨和回流轨分别安装在走行轨两侧、牵引轨和回流轨安装在走行轨同侧两种方案。从工程可行性和节省投资方面考虑,牵引轨和回流轨在走行轨同侧安装的方案优于在走行轨两侧安装的方案,该方案对车辆的结构设计影响最大,车辆集电靴和牵引回流电路需作相应调整。由于牵引轨与回流轨同时存在,两根轨间绝缘的可靠性、对车辆构造的影响以及受流的稳定性应作为重点考虑<sup>[6]</sup>。由于两轨同侧架设且距离很近,大大增加了发生短路故障的几率,特别是露天段线路,受天气影响严重,难以应对雨雪天气。

我国地铁和轻轨若采用 DC 1 500 V 四轨牵引供电系统,需重新研发车辆设备,并且国内外无可借鉴的成熟运营经验。

综上所述,无论从既有技术装备水平来看,还是

从建设和运营经验的成熟度来看,采用网轨混合牵引供电系统更符合我国当前的国情。已将建成的宁波地铁 4 号线和正在建设之中的郑许市域铁路(该线按地铁系统设计)均采用网轨混合牵引供电系统。

## 2 专用回流轨电气分段方案

由于走行轨不可能断开,因而当走行轨兼做回流轨时,没有设置电气分段的条件。若采用专用回流轨,则具备设置电气分段的基础条件。若专用回流轨采用全线贯通的设置方案,其直流系统接线示意图与常规接线方案保持一致(如图 2)。但专用回流轨全线贯通将导致排查回流轨对地绝缘故障的难度大大增加,易形成杂散电流,背离专设回流轨的初衷。因此很有必要对专用回流轨进行电气分段。其电气分段原则可结合接触网电分段设置,在接触网上网和回流轨回流处设置双极隔离开关实现同时分断和接通。其直流系统接线如图 3 所示。

已建成的宁波地铁 4 号线在正线并未设置专用回流轨电气分段,正在建设的郑许市域铁路正线专用回流轨则设置有电气分段并采用双极隔离开关。网轨混合牵引供电系统在具体工程的应用方案也是在实践中不断优化。

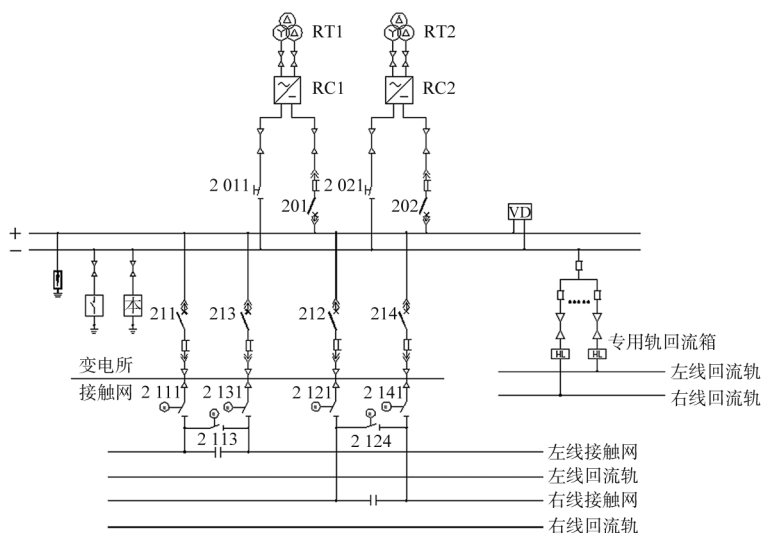


图 2 全线贯通的专用回流轨直流系统接线图

## 3 专用回流轨对应的系统保护配置方案

对于采用走行轨回流的直流牵引供电系统,其接地保护通常采用框架泄漏保护装置,直流设备柜内正、负极对外壳发生泄漏超标时,保护快速动作将故障切除,以保证系统的安全运行,是一种高灵敏度

的保护<sup>[7]</sup>。框架泄漏保护装置由电流元件和电压元件组成,保护范围通常只包含直流开关柜、整流器柜和负极柜。

采用专用回流轨后,钢轨不再流过牵引回流,为保证区间检修和疏散的安全,钢轨应直接接地。由于专用回流轨对地绝缘良好,接触网和专用回流轨对

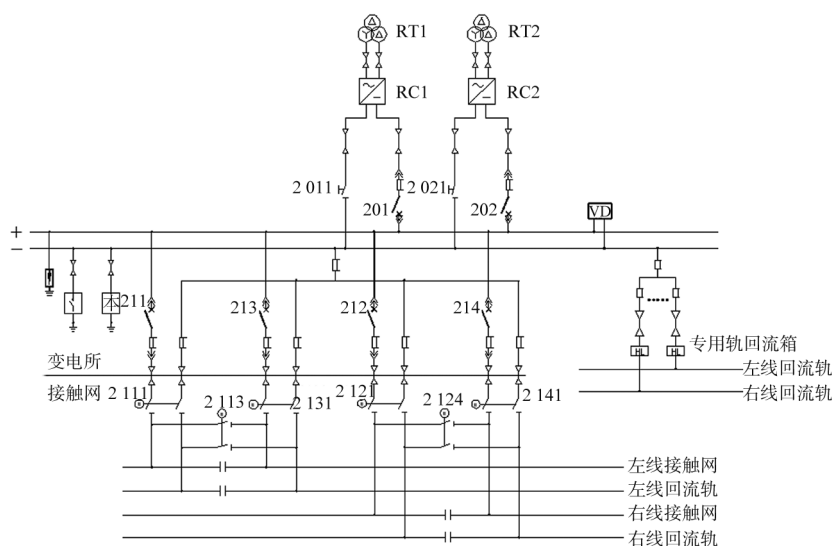


图3 接触网与专用回流轨同位置分段直流系统接线图

地的泄漏电阻达到  $M\Omega \cdot km$  级以上,当发生接触网对钢轨(或地)短路故障时,故障电流太小,且不在变电所直流感地框架泄漏保护范围内,因此需要专设的接地保护装置。

目前国内已运营的采用专用回流轨的重庆轨道交通2号线、3号线和长沙磁悬浮快线,均采用64D接地漏电保护装置(该装置原理图见图4)。当接地泄漏电流流过该装置接地回路串接的可调电阻产生的电压降达到整定值,保护装置动作。由于引起64D保护动作的故障原因很多,加之无故障定位手段,导致故障时需花费大量的人力物力及时间进行排查<sup>[8]</sup>。该保护装置动作将导致本所所有直流断路器及邻所向本所方向供电的直流馈线断路器跳闸,一旦出现故障将造成3~4座牵引变电所直流开关跳闸,造成大面积停电,严重影响线路正常运营。重庆和长沙两地的实际运营中均发生过此类事件。

对于采用网轨混合的牵引供电系统,接触网对钢轨短路故障较为常见,若仍然采用64D接地漏电保护装置,一旦出现故障将对运营产生严重影响。因此,如若采用在负极和地之间设置单向导通装置作为接地保护装置(接线原理图见图5),当接触网对钢轨发生短路故障,故障电流流向为:直流设备正极母线→直流馈线断路器→接触网→钢轨→地→单向导通装置→负极母线。与常规的走行轨回流的同类型地铁线路相比,其短路电流路径仅多了单向导通装置,由于单向导通装置的主回路二极管正向阻抗极小,因而两者对应短路电流相差很小。若采用该方案,专用回流轨对应系统保护配置方案与常规

直流牵引供电系统保护配置方案基本相同,直流保护动作导致停电范围也与常规走行轨回流的直流牵引供电系统一致,有利于延用以往的运营管理经验。

已建成的宁波地铁4号线和正在建设的郑许市域铁路均采用在负极和地之间设置单向导通装置作为接地保护装置的方案。

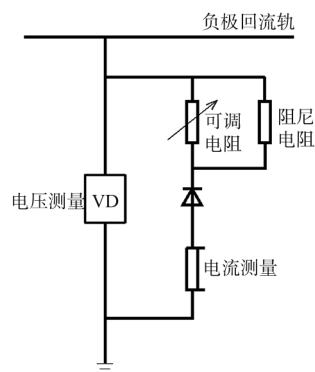


图4 64D接地漏电保护装置原理图

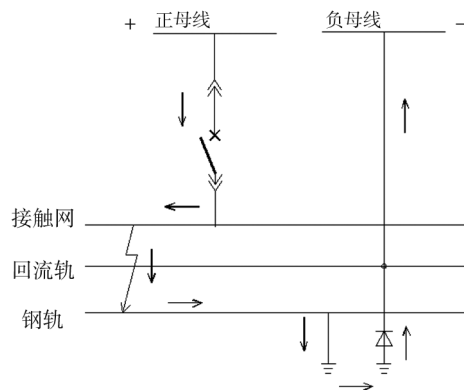


图5 接触网对钢轨短路电流路径示意图



#### 4 专用回流轨对应绝缘监测方案

由于负极和地之间设置单向导通装置,并且钢轨直接接地,若专用回流轨与地(或钢轨)之间出现短路,系统无法准确识别此类故障,更难以进行故障定位。对于正负极均不直接接地的悬浮供电系统,负极出现接地时并不会影响系统正常运行,但会产生杂散电流。若为单点接地,杂散电流将经过单向导通装置流回负极;若为多点接地,就类似于走行轨回流的情况,难以准确测量杂散电流总量。因此,不宜采用保护装置动作跳闸断电方式切除故障,以避免影响线路正常运营。

针对上述情况,可采用设置绝缘监测装置的方案,对全线负极对地绝缘情况进行监测和比对,及早发现负极对地的绝缘薄弱点。整流器和负极柜的负极对地绝缘监测可通过采集柜体框架对地泄漏电流进行在线监测,专用回流轨对地的绝缘监测可采用定期测试绝缘电阻方案。各项测试数据通过变电所综合自动化系统上传至控制中心进行集中比对,以便确定绝缘薄弱点位置。绝缘监测接线方案如图6所示。

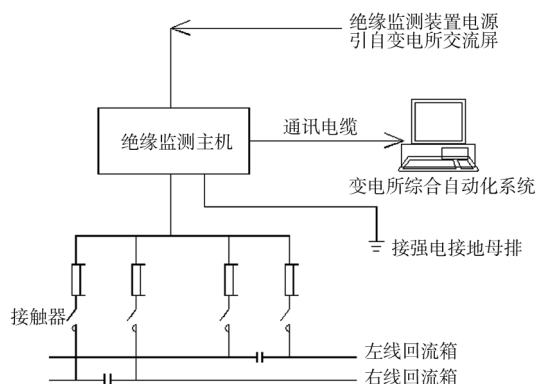


图6 绝缘监测装置接线示意图

每座牵引变电所均设绝缘监测装置。该装置接受电力监控系统调度,实现远程监测。为保证绝缘电阻测试的准确性,在测试之前应先将直流馈线断路器和双极上网回流开关断开,并将负极接地,以释放残压,而后断开负极接地开关。在各区段专用回流轨与地之间施加直流测试电压进行绝缘电阻测试,对测试结果中单位长度绝缘电阻值偏低的区段进行重点清查并处理,尽可能减少泄漏电流。宁波地铁4号线和郑许市域铁路均没有设置固定式绝缘监测装置,需人工搬运试验装置进行移动测试。

#### 5 结语

国内外钢轮制式地铁线路绝大多数采用走行轨

兼做回流轨方案,既可节省工程投资,又能减少运营维护工作量、降低运营成本。但其走行轨对地泄漏电阻值随着运营时间增加而逐渐减小,导致杂散电流不断增大,其影响已不容忽视<sup>[9]</sup>。为彻底解决走行轨回流带来的杂散电流问题,在地铁工程中采用回流轨技术是必要和可行的<sup>[10]</sup>。

本文立足于我国地铁发展现状和技术装备水平,为避免杂散电流对沿线管线和设施产生的不利影响,推荐地铁采用网轨混合牵引供电系统。对于具体工程实践,推荐如下应用方案:专用回流轨结合接触网电分段的位置设置电气分段,以便于排查专用回流轨对地绝缘故障;在负极和地之间设置单向导通装置,以保证接触网发生对地短路故障时,保护装置能快速动作切除故障;在牵引变电所设置绝缘监测装置,通过电力监控系统远程调度方式定期监测各区段专用回流轨对地的绝缘情况,及早发现问题,而后清查处理。

目前国内外地铁均无网轨混合牵引供电系统的成熟运营经验,宁波地铁4号线刚于2020年12月开通运营,郑许市域铁路也还在建设中,其应用方案还需在工程实践中逐步优化和完善。

#### 参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部.地铁杂散电流腐蚀防护技术标准:CJJ/T 49—2020[S].北京:中国建筑工业出版社,2020.
- [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(9):143.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.地铁设计规范:GB 50157—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [4] 喻奇.新型城市轨道交通牵引供电制式的探讨[J].电气化铁道,2012(5):43.
- [5] 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.
- [6] 何治新.城市轨道交通DC 1500 V四轨技术研究[J].电气化铁道,2008(3):38.
- [7] 盛蓉蓉.中低速磁浮交通牵引供电系统接地保护研究[J].铁道工程学报,2016(10):97.
- [8] 梁焜,姚永高.城市轨道交通(单轨)接地漏电保护故障定位探析[J].中国新技术新产品,2019(14):66.
- [9] 谢勇,张国龙,刘洋.上海轨道交通浦江线牵引供电系统设计创新[J].城市轨道交通研究,2019(10):63.
- [10] 谢宗荣.地铁独立轨回流技术应用研究[J].铁路技术创新,2018(2):113.

(收稿日期:2020-05-20)