



METRO SCIENCE AND TECHNOLOGY
COLLECTED THESES
地铁科技文集
2009

广州市地下铁道总公司 编

华南理工大学出版社



METRO SCIENCE AND TECHNOLOGY
COLLECTED THESES
地铁科技文集
2009

广州市地下铁道总公司 编



华南理工大学出版社

· 广州 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

地铁科技文集. 2009/广州市地下铁道总公司编. —广州: 华南理工大学出版社, 2009. 7
ISBN 978-7-5623-2772-1

I. 地… II. 广… III. 地下铁道-铁路工程-文集 IV. U231-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 090885 号

总 发 行: 华南理工大学出版社

(广州五山华南理工大学 17 号楼, 邮编 510640)

营销部电话: 020-87113487 87110964 87111048 (传真)

E-mail: z2cb@scut.edu.cn

http: //www.scutpress.com.cn

策划编辑: 何丽云

责任编辑: 朱彩翾

印 刷 者: 广州市穗彩印厂

开 本: 889mm × 1194mm 1/16 **印张:** 14 **字数:** 440 千

版 次: 2009 年 7 月第 1 版 2009 年 7 月第 1 次印刷

印 数: 1 ~ 1 100 册

定 价: 45.00 元

版权所有 盗版必究

《地铁科技文集 2009》编委会

名誉主任委员 丁建隆

主任委员 陈韶章

副主任委员 吴慕佳 梁巧明 何霖 刘光武 竺维彬

刘应海 邓承山 徐明杰 莫庭斌 钟学军

委员 (按姓氏笔画为序)

刘忠诚 余哲夫 张志良 李广元 李少璧

李鸿兴 陆缙华 陈穗九 庞绍煌 欧阳长城

高俊霞 曾耀昌 路水记 蔡昌俊 鞠世健

主 编 陈韶章

副 主 编 袁敏正

参 编 李文球 万丽君 张继冰 李宏辉

前言

当前，着力创建国家创新体系、切实发挥科技作为第一生产力的重要作用已成为我国社会经济各项事业发展的主旋律。发展我国城市轨道交通事业，科技创新是关键。《地铁科技文集2009》的适时编撰，目的在于借助对广州地铁工程建设、运营管理、科研技改等实践经验的不断总结与积累，不断提高科技创新的成果，促使科技成果向生产一线的转化与应用，乃至促进轨道交通行业整体技术水平的进步，最终为实现我国“资源节约型、环境友好型、技术创新型和安全便捷型”的城市轨道交通事业提供重要的参考作用。

《地铁科技文集》是系列专著，自2007年始，每年出版发行一部，至今已出版发行了3部。《地铁科技文集2009》分探讨与研究、土建与施工、设备与国产化、综述4部分，共录用专业论文49篇，内容涵盖轨道交通技术与设计、施工管理、运营管理、应用研究、设备国产化等5个方面，凝结了广大轨道交通建设科技工作者的心血和智慧，同时也是轨道交通科学技术飞速发展的一个缩影，体现了较高的学术价值和水平。总体来看，文集的作者们结合自己在工作实践中遇到的诸多技术问题，提出了一些既有科学理论，又有创新观点；既有实践案例，又可推广应用的新思维、新观点、新方法和新对策，供大家交流与参考。

文集付梓之际，谨对华南理工大学出版社为出版本文集付出的辛勤劳动深表感谢。同时，恳请国内外轨道交通行业专家、读者提出宝贵意见，共同提高轨道交通科技创新水平。

广州市地下铁道总公司副总经理、总工程师 陈韶章

2009年6月于广州

目 录

第 1 篇 探讨与研究

城市轨道交通 DC1500V 四轨技术研究	何治新 (2)
广州地铁轮轨磨耗初步分析	刘灿龙 许群峰 (8)
浅谈深圳清分中心系统设计	林 珊 (11)
广州地铁 2 号线钢轨伤损成因分析	曹明华 陈永贵 (17)
浅谈变频技术在地铁车辆空调系统中的应用	徐向彬 (21)
直线电机车辆与旋转电机车辆的性能对比分析	漆 瑾 (25)
城市轨道交通车辆直线电机气隙研究	王保坚 (30)
浅析广州地铁车辆轮对结构与检修工艺	赵彦峰 (33)
自动售检票仿真系统设计及其扩展性研究	吴文华 (38)
APM 屏蔽门系统特征探讨	胡振亚 (42)
地铁自动售检票系统车站设备网络构成方案探讨	詹占岚 (47)
浅谈广州轨道交通 4 号线感应板在安装中应注意的问题	辛治山 (50)
地铁屏蔽门绝缘处理探讨	张仕谦 (53)
浅谈地铁车辆的润滑管理	黄海东 (55)

第 2 篇 土建与施工

大跨度矿山法隧道断面拟定要点浅谈	周灿朗 (61)
富水砂层中联络通道冻结工法的选用及其关键控制措施	王 晖 竺维彬 (66)
盾构施工穿越岩石地层时隧道结构上浮的原因分析	张育青 竺维彬 (71)
高压旋喷止水帷幕在粉细沙层中的试验研究	李 勇 (77)

第 3 篇 设备与国产化

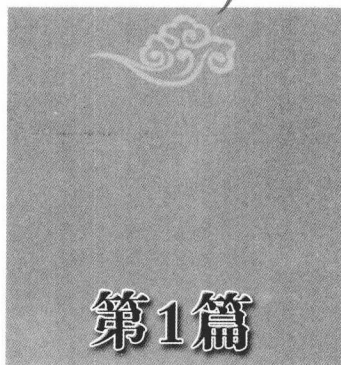
闸机电池充放电控制电路	张学斌 朱国杰 (83)
AFC 系统检测平台的建设与应用	黄旭宁 (88)
广州轨道交通 3 号线 33 kV 中压运行方式与继电保护的匹配	廖振宁 周 卫 王 强 (91)
硬币图像防伪技术在自动售票机上的应用	周 鹏 (95)
城市轨道交通车辆车门 IS 锁闭装置	员 华 潘丽莎 黄学翔 (99)

车辆悬挂系统参数选取对地铁车辆垂向动力学的影响	员 华	罗世辉 (103)
EP2002 制动控制系统在广州轨道交通 3 号线、4 号线车辆中的应用	巫红波	(109)
轨道交通架空刚性接触网接触导线局部更换方法	邓 强	(114)
地铁设计中的公共交通型重载自动扶梯	饶美婉	(118)
浅谈清分子系统在地铁 AFC 系统中的应用	蒋家升	(124)
广州地铁 1 号线车辆牵引电机速度传感器国产化改造	肖向前	宁韶安 (128)
AFC 系统自动售票机硬币钱箱技术改造	何广坚	何健栋 (131)
AFC 系统闸机发热问题技术改造	何广坚	何健栋 (134)
广州地铁车辆轴承清洗机结构分析与改造	赵彦峰	(138)
激光测距技术在直线电机车辆气隙测量中的应用	王保坚	(141)
持久化技术在自动售检票系统检测平台中的应用	陈静莎	(145)
虚拟仪器技术在国产化牵引逆变器中的应用	黄 蔚	(150)
索引技术在清分系统查询优化中的应用	陈 祥	(154)
屏蔽门系统运作常见问题及对策	陈 波	陈电旭 (157)
地铁屏蔽门与列车间隙防夹人方案设计	卢昌仪	(161)

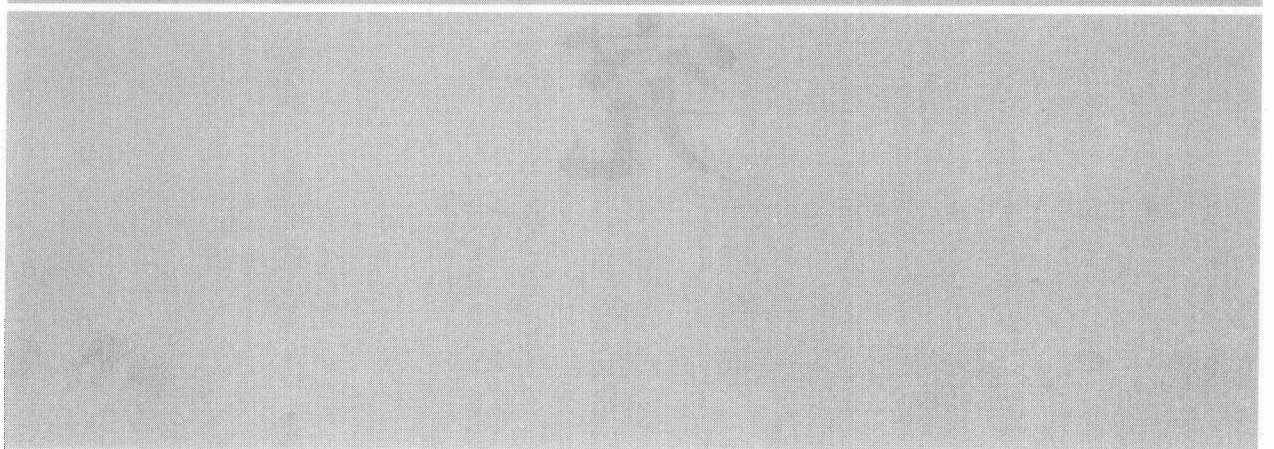
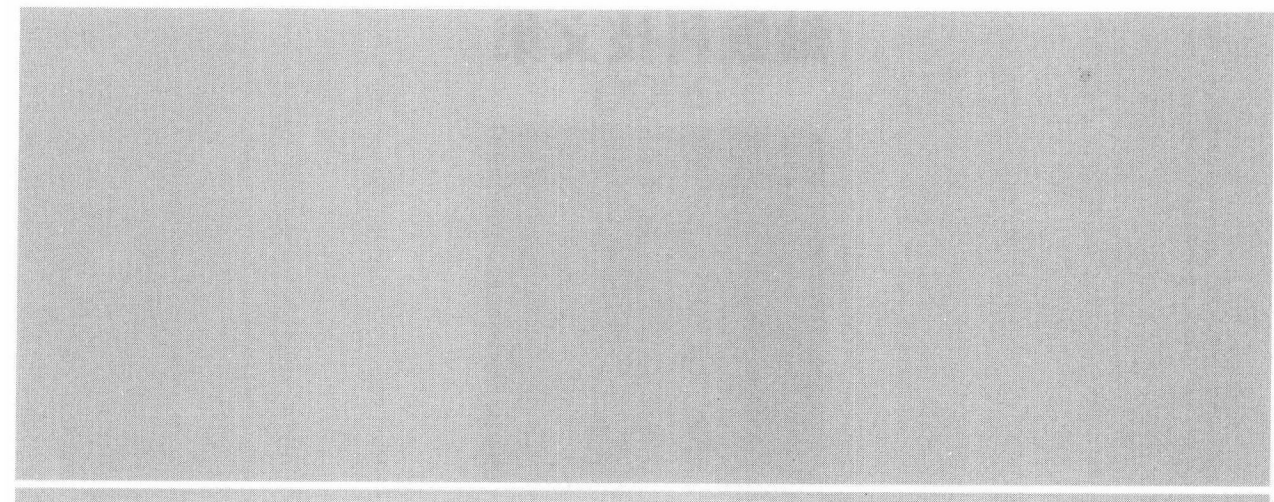
第 4 篇 综 述

试析“地铁捆绑式开发”如何破解土地集约利用难题	周冠成	(167)
广州轨道交通 3 号线北延段开通后运营交路探讨	杨普杰 梁强升	卢锦生 (172)
城市轨道交通建设对地价影响的实证研究		
——以广州市轨道交通为例	袁亮亮 覃宪姬	陈 桥 (178)
广州轨道交通 4 号线大小交路运行模式研究	骆 进 梁强升	卢锦生 (182)
广州市轨道交通线网综合维修、物流基地设计研究	唐 薇	(186)
条形码系统在固定资产管理中的应用	谭乘明	(190)
建设工程项目监理机构在安全监理方面的问题及对策	李瑞桦	(194)
利用正线夜间停放运营客车提高线路运营效率	梁强升 杨普杰	(198)
广州轨道交通 3 号线朝夕客流运输组织优化	梁强升	(202)
城市轨道交通线网的形成对客流的拉动效应分析		
——以广州地铁 1 号线、2 号线为例	陈 桥 袁亮亮 覃宪姬	(208)
城市轨道交通建设安全问题探讨	罗凤霞 王招洪	(211)

METRO SCIENCE AND TECHNOLOGY
COLLECTED THESES
地铁科技文集
2009



探讨与研究



城市轨道交通 DC 1500 V 四轨技术研究

何治新*

摘 要 针对城市轨道交通牵引供电系统利用走行轨回流而产生杂散电流的问题,结合 DC1500 V 供电距离长、电压损失小的优点,提出采用 DC1500 V 四轨技术以彻底解决产生杂散电流的问题。并深入研究了 DC1500 V 系统的技术方案、工程的可行性和投资影响等方面,认为 DC1500 V 四轨系统在城市轨道交通工程中应用是完全可行的,而且应用前景广阔。

主题词 城市轨道交通 接触轨 杂散电流 DC1500 V 四轨

城市轨道交通供电系统的牵引网是为车辆提供牵引动力的系统,由接触网和回流网组成。接触网按安装位置和接触导线不同分为接触轨和架空接触网两种型式。世界上城市轨道交通线路的牵引网系统中,除加拿大、美国、马来西亚等国家的少数线路采用第四轨回流外,大部分的线路均利用走行轨作为回流轨。

目前,我国已运营和正在建设的城市轨道交通,均采用接触网或接触轨向车辆供电,通过走行轨回流的牵引网系统。这种牵引供电制式,由于走行轨不可能完全绝缘于道床,牵引回流会通过钢轨泄漏阻抗流出钢轨,进入道床形成杂散电流。杂散电流会腐蚀钢轨、整体道床结构钢筋、隧道结构钢筋以及城轨沿线的金属设备,影响隧道的综合使用寿命,后果严重。虽然在以往的供电设计中考虑在整体道床内设置杂散电流收集网来减少杂散电流对金属结构的腐蚀,但杂散电流防护措施只能减少杂散电流对金属的腐蚀程度,不能够完全消除杂散电流的腐蚀。同时,牵引回流在钢轨上产生电位差,对旅客的人身安全也会产生威胁,需要在车站上设置钢轨电位限制装置,在设置屏蔽门的站台还需设置绝缘垫。这种方案虽然能够解决钢轨电位对旅客的影响,但钢轨电位限制装置的动作又会对供电系统运行的可靠性有所影响。为了消除杂散电流的不利影响,国外在接触轨系统的基础上提出四轨系统技术,即牵引变电所通过牵引轨(第三轨)将电能输送

给机车,然后通过专用回流轨(第四轨)回流至牵引变电所,从而形成供电回路。采用该系统后,杂散电流防护问题将不再存在,虽然接触网系统的工程投资有所增加,但保护了车站和隧道的结构钢筋不被腐蚀,减少了杂散电流防护工程投资,极大地提高了相关系统的安全性和使用寿命。

各国城市轨道交通直流牵引网电压等级繁多,主要有 DC600 V、DC750 V、DC825 V、DC1200 V、DC1500 V 等几种。其中,后期建成的线路多采用 DC750 V 和 DC1500 V 两种电压制式,也是国际电工委员会(IEC)推荐采用的电压等级。直流 1500 V 电压制式具有供电距离长、电压损失小、可承受客流量大、杂散电流影响小等优点;而接触轨不影响城市景观,且具有使用寿命长、维护量小等优点。在加拿大、美国、马来西亚等国家采用的四轨系统均为 DC750 V 电压等级。国际上尚无采用 DC1500 V 电压等级四轨系统的先例。因此,为了将四轨回流的优越性与 DC1500 V 供电制式的优越性更好地结合起来,开展 DC1500 V 四轨系统的技术可行性研究是十分必要的。

1 DC1500 V 四轨系统构成

1.1 典型四轨系统的构成

目前工程上成功运用的四轨系统是在三轨系

* 广州地铁设计研究院有限公司。

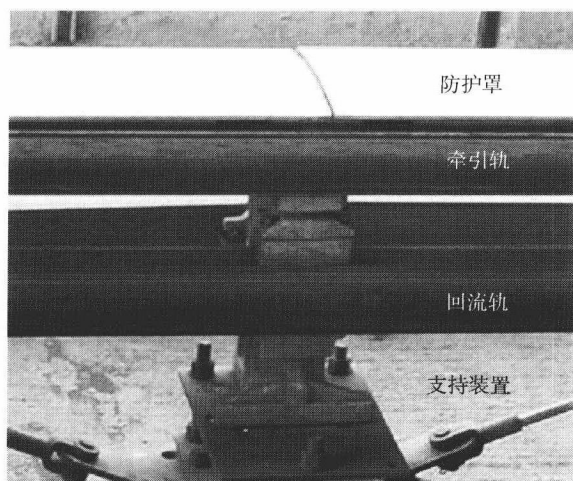


图1 典型四轨安装图

统的基础上发展起来的，主要由牵引轨、回流轨、支持装置、防护罩、膨胀接头、端部弯头、中心锚结和普通接头等组成（见图1）。牵引轨和回流轨采用相同类型的钢铝复合轨，牵引轨负责向机车不间断地提供电能，回流轨与变电所负极柜相连，形成一个完整的向机车供电的回路，通常采用侧部受流方式。

1.2 DC1500 V 四轨系统方案

1.2.1 牵引轨与回流轨同侧与两侧安装的比较

按照车辆受流方式及接触轨安装位置的不同，DC1500 V 四轨系统可采用牵引轨和回流轨分别安装在线路两侧或同侧两种方式。两种方式相比，前者在工程可实施性等方面较差：

- （1）支持装置的数量增加一倍，增加的工程投资较大。
- （2）上下行线路的牵引轨和回流轨的布置方式须交替，工程实施困难。
- （3）在道岔等处布置时，牵引轨和回流轨不能换边布置，使断电区长度加大，列车通过时会瞬时断电，影响行车。

因此，从工程可实行性和节省投资方面考虑，采用牵引轨和回流轨在线路同侧安装的方案适合工程应用。

1.2.2 牵引轨与回流轨同侧安装方案

（1）受流方式比较。

按照接触轨悬吊方式的不同，牵引轨和回流轨同侧安装时，又可分为上部受流、下部受流和侧部受流三种方式（见图2、图3、图4）。

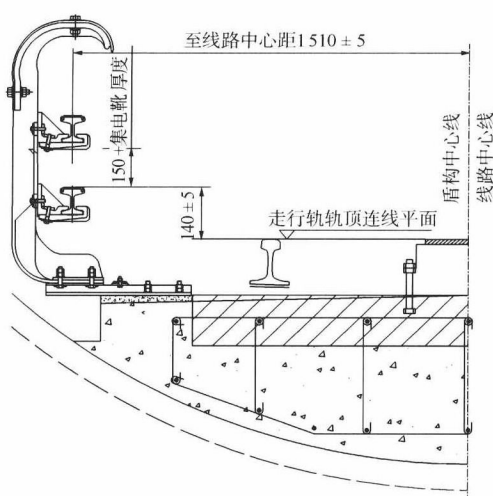


图2 同侧上部受流方式安装示意图

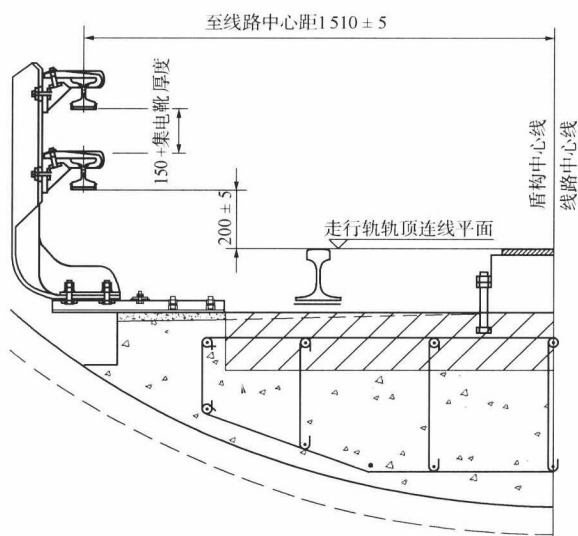


图3 同侧下部受流方式安装示意图

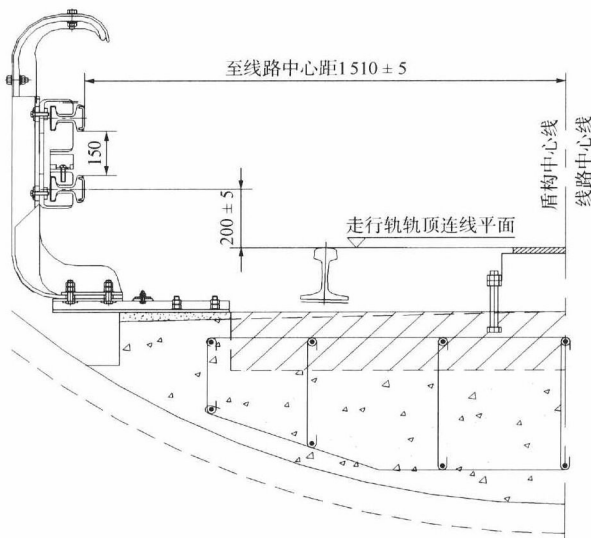


图4 同侧侧部受流方式安装示意图

以上三方案的牵引轨和回流轨均被安装在整体绝缘支架上,可以保证牵引轨和回流轨均随着温度变化自由伸缩,且均设置了防护罩使牵引轨和回流轨受到保护。

三方案均安装方便,零部件成熟。但在车辆取流方面,前两种安装方式,集电靴从上面或下面与牵引轨和回流轨同时接触,车辆运行时两集电靴与牵引轨、回流轨的接触压力不易同步,取流较不稳定,技术不成熟,没有应用的实例;同侧侧部受流方式,车辆运行时两集电靴与牵引轨、回流轨的接触压力同步变化,集电靴取流更趋稳定,并且已有 DC750 V 四轨系统采用的实践经验。

(2) 对其他专业的影响。

① 对限界专业的影响。同侧上部受流及同侧下部受流方式,由于牵引轨和回流轨同侧上下安装,因此整体绝缘支架高度增加,需要的限界增大,与 DC1500 V 三轨系统相比,垂直方向净空约增加 350 mm,水平方向限界基本不变;同侧侧部受流方式,由于牵引轨和回流轨侧部安装,与 DC1500 V 三轨系统相比,垂直方向净空增加约 200 mm,水平方向增加约 50 mm。

② 对车辆专业的影响。与传统供电方式车辆相比,四轨系统对车辆专业的影响最大,车辆的集电靴和牵引供电回流电路需作相应调整。对于三种受流方式而言,同侧上部受流方式和同侧下部受流方式要求车辆集电靴在空间上的距离比同侧侧部受流方式要大,至少多一个轨高,因此对车辆整体构造影响较大。

③ 综合比较。通过上述各方面比较,可以得出如表 1 所示的基本结果。

由以上比较可看出,从经济性和工程可实行性上考虑,牵引轨和回流轨分别安装在线路两侧的悬挂方式较不可取,推荐采用牵引轨和回流轨同侧安装方式。

2 DC1500 V 四轨系统工程应用可行性

2.1 四轨系统工程适用性

四轨系统与三轨系统相比较,三轨系统适用的工程对四轨系统同样适用。根据国外四轨系统的应用经验,在隧道内四轨的设置模式基本与三轨系统一致;牵引轨和回流轨同时架设,在安装空间上要略大于三轨系统单根牵引轨所需要的空间。因此,在隧道内、高架桥上以及地面区段,四轨系统均适用。

2.2 四轨安装对相关专业的要求

DC1500 V 四轨系统与 DC1500 V 三轨系统相比,对于土建的要求基本一致,隧道净空要求可以不变;四轨安装空间要求较大,部分地段需与其同侧敷设的其他专业管线,如区间给排水管、弱电电缆等,进行适当调整避让。

采用四轨系统后,原三轨系统中实施的杂散电流防护和限制钢轨电位措施以及对其他专业的要求可取消,如对轨道的绝缘要求、对整体道床及结构钢筋的焊接要求、对接地网与结构钢筋的绝缘要求、对区间金属管线的绝缘要求、对屏蔽门与钢轨的等电位要求等等,均可以取消。

表 1 同侧三种受流方式比较结果

比较类别	同侧上部受流方式	同侧下部受流方式	同侧侧部受流方式
维护费用	一致		
工程投资	一致		
对车辆专业的影响	正负集电靴距离大	正负集电靴距离大	正负集电靴距离小
接触轨系统的稳定性和可靠性	较好	较好	好
受流性能	较好	较好	好
对限界专业的影响	较大	较大	较小
国外经验可借鉴性	无	无	可以借鉴
安装简易性	较简单	较简单	简单

2.3 四轨系统安全防护措施

DC1500 V 四轨系统与 DC1500 V 三轨供电系统, 在安全防护措施方面需重点考虑的关键技术点是一致的。应对 DC1500 V 四轨系统的对地绝缘、泄漏保护、人身防护和防雷保护等四个方面严格控制, 以提高系统的安全性。

(1) DC1500 V 四轨系统对地绝缘措施。由于牵引轨的安装位置与轨道齐平, 与其他轨旁设备在同一个层次及人为触及的有效范围内, 因此, DC1500 V 四轨系统在设计控制上除对自身的设备重点保证对地绝缘要求和满足标准规定的绝缘距离以外, 还要重点考虑如何屏蔽对其他专业的电磁干扰, 加强自身的防护等级, 尽可能地减少带电体的裸露范围。对系统自身而言, 主要是从以下几个方面加强系统构件的绝缘水平设计及产品的工艺设计。

- ① 满足 IEC 标准的基本要求, 即满足对地最小静态间隙 150 mm、最小动态间隙 100 mm 的要求。
- ② 通过优化绝缘支架、防护罩等构件的结构及材料设计, 提高绝缘元件的结构绝缘特性参数、耐污性能、承受过电压等技术水平。
- ③ 在设备选材方面, 重点考虑承受过电压的水平, 采用工程技术要求与经济性相结合的设计方针, 在安装条件允许的情况下尽量加大绝缘耐压水平; 在设备电气参数的选配方面, 适度提高等级。

④ 重点控制钢铝复合轨不锈钢接触面的光滑度、表面平整度等工艺技术参数, 保证受流器与钢铝复合轨之间的良好接触及取流。

(2) DC1500 V 四轨系统绝缘泄漏时的保护方案。

对于 DC1500 V 制式四轨供电方式, 由于电压等级较高, 其安全防护等各方面的要求都较 DC750 V 制式高。如果四轨系统不单独设置接地线, 当发生牵引轨单点对地短路时, 会造成轨电位升高, 不利于整个供电系统的正常运行, 所以装设贯通的接地线, 并与牵引变电所的接地母排相连接。结合四轨的安装方式, 可选择使用接地扁铜或接地扁铝作为接地线, 装在整体绝缘支架底座上。

(3) DC1500 V 四轨系统的人员防护措施。
为防止和避免乘客或检修人员无意中触碰到

带电的牵引轨及其附属设备, 在四轨系统的设计中主要可采取以下两个措施加以防范:

- ① 全线安装防护罩。为保证人身安全, 体现“以人为本”的工程理念, 在全线所有架设的四轨上均安装防护罩。防护罩通过防护罩支撑卡安装在钢铝复合轨上。防护罩和防护罩支撑卡均采用玻璃纤维增强树脂 (GRP) 材质, 因其绝缘性能好, 结构强度高, 从而有效地防止触电。
- ② 在站台处, 四轨换边布置 (见图 5)。

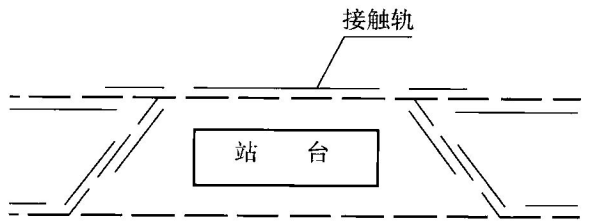


图 5 四轨系统在站台处换边布置

在车站站台对侧布置四轨系统, 远离旅客, 减少了旅客跌落在线路上发生电击事故的可能性。

3 投资影响分析

DC1500 V 四轨系统如应用于工程, 对牵引网系统的工程造价将有所增加, 但由于取消了杂散电流防护和钢轨电位限制措施, 相应系统的工程造价将会下降, 综合投资变化分析见表 2。

表 2 DC1500 V 四轨与三轨系统综合投资比较

专 业	投资变化	数 量
供电系统	增加	70 万元/条公里
车辆专业 (与三轨受流车辆相比)	增加	44 万元/辆
屏蔽门专业	减少	20 万元/站
轨道专业	减少	1 万元/条公里
建筑专业	变化可不计	

注: 以上数据为相关专业提供及根据以往工程估算所得。

4 结 语

采用 DC1500 V 四轨系统技术, 虽然在工程建设时增加了工程投资, 但消除了杂散电流的腐蚀

危害,提高隧道或桥梁等的使用寿命,所产生的社会效益远远大于工程建设增加的投资。通过对DC1500 V 四轨系统构成及受流方式的研究,四轨系统在城市轨道交通工程中的应用是完全可行的。

我国城市轨道交通事业的蓬勃发展为DC1500 V 四轨系统的应用和国产化研制提供了较好的环境。虽然,目前DC1500 V 四轨系统在上世界上还没有经验可循,但是,通过研究分析,DC1500 V 四轨系统可以作为各城市在新线建设时选择接触网型式的方案之一,应用前景广阔。

参考文献

- [1] 广州市地下铁道设计研究院. DC1500 V 四轨系统技术可行性研究报告 [R]. 广州: 广州市地下铁道设计研究院, 2008.
- [2] GB 50157-2003, 地铁设计规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.

广州地铁轮轨磨耗初步分析

刘灿龙^① 许群峰^②

摘 要 通过广州地铁的轮轨磨耗进行分析, 提出减缓轮轨磨耗的有效方法, 延长轮轨的使用寿命, 提高列车通过能力, 以满足地铁安全运营的需要。

主题词 城际轨道 轮轨关系 道床类型 轨道参数 磨耗型车轮踏面 非对称轨头打磨

根据广州地铁近十年来的运营实践, 证明钢轨磨耗超限已成为曲线地段钢轨更换的决定因素。如何减缓曲线地段钢轨侧向磨耗和轮缘磨耗, 是地铁设计、施工、维修管理工程技术人员需要考虑的问题。

轮轨非正常磨耗与轨道设计、轨道施工、维修保养和ATO(自动驾驶)与线坡的关系以及不同道床类型的过渡地段的轨道弹性等因素有关。因此, 对轮轨磨耗必须进行深入分析研究, 找出轮轨磨耗的主要原因, 指导日常维修, 从而达到延长轨道使用寿命的目的。

1 影响轮轨磨耗的因素

1.1 最小半径曲线的选择对轮轨磨耗的影响

在一般情况下, 我国PD₃ 60 kg/m钢轨疲劳

极限为列车通过钢轨总重量 7×10^{12} kg。根据我们对小半径曲线地段钢轨的磨耗实测记录, 分析结果表明, 列车通过总量在 2×10^{12} kg左右时钢轨侧磨接近12 mm, 钢轨磨耗速率增加较快, 需要进行更换。地铁两个半径为300 m的曲线的磨耗发展情况见表1。

根据上述统计、推算资料分析, 地铁设计最小曲线半径应大于300 m为宜, 困难地段也应小于250 m, 这有利于今后运营和轨道养护维修。列车进入曲线地段时车体受力情况见图1。

1.2 减振道床、减振扣件、减振胶垫等类型对轮轨磨耗的影响

目前广州地铁在部分小半径曲线上铺设弹性短轨枕, 铺设的地段钢轨磨耗较为严重, 经过分析, 其原因如下:

表1 地铁某区段两个半径为300 m的曲线的磨耗发展情况

区 间	股别	2006年9月测量数据						2007年1月测量数据					
		垂磨	垂磨发展速度	侧磨	侧磨发展速度	总磨耗	总磨发展速度	垂磨	垂磨发展速度	侧磨	侧磨发展速度	总磨耗	总磨发展速度
A区段上行	上股	4.33	3.22	4	2.97	6.33	4.71	4.92	3.33	4.85	3.28	7.35	4.97
	下股	2.92	2.17	0		2.92	2.17	3.1	2.1	0		3.1	2.1
A区段下行	上股	3.51	2.5	3.69	2.63	5.13	3.82	3.95	2.67	4.63	3.13	6.27	4.24
	下股	2.58	1.84	0	0	2.5	1.86	2.9	1.96	0		2.9	1.96

注: 表中垂磨、侧磨和总磨耗为本段曲线各测点磨耗的平均值, 单位为mm; 垂磨、侧磨和总磨耗的发展速度由磨耗值除以本段曲线的通过总量得到, 单位为mm/亿t。

①② 广州市地下铁道总公司运营总部。

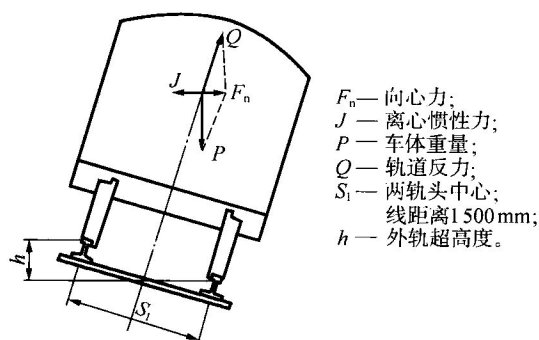


图1 曲线上车体受力分析

1.2.1 轨枕底下混凝土整体道床平面标高的误差难于控制

① 列车通过时，橡胶套靴和橡胶微孔垫板的反弹量难于控制。

② 列车经过该区段时，由于弹性原因，产生冲击角过大，致使钢轨与轮缘接触点产生疲劳磨损后导致侧磨加快及剥落掉块。

1.3 ATO 与线坡的关系对轮轨磨耗的影响

由于ATO自动驾驶的特点是启动制动，属于固定模式，地铁设计规范规定在曲线内不设加宽而设置竖曲线，不设加宽不能满足列车在曲线内运行的动态游间，设置竖曲线范围内的标高精度不足造成钢轨受力不均，是产生磨耗加大的原因之一。

1.4 轨道不平顺加速钢轨磨耗

轨道不平顺，当列车在蛇行运动时，对钢轨冲击和磨耗增大，加速了轮轨的磨耗。轨道不平顺可分几种类型：

(1) 高低不平顺。即轨道的竖向不平顺，通常是指钢轨顶面在相同轮载作用下顺着轨道延长的高低不平。它是由于轨面磨耗不均，以及轨下构件及路基、道床弹性不同，导致各部件出现间隙所造成的。

(2) 水平不平顺。指左右轮轨接触点的轨面高差（不计曲线超高值），它是由于左右两股钢轨高低不等，致使列车侧向倾斜和振动。

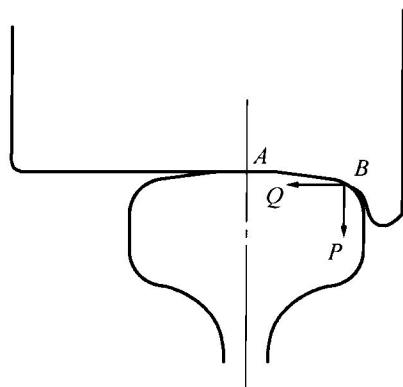
(3) 方向不平顺。在车轮作用下，钢轨侧面凹凸不平，它是由于轨头侧面磨耗不均、轨道横向弹性阻力不等、扣件失效等原因造成的，直接导致车辆的横向振动。

1.5 轨道接触应力加大，促使钢轨塑性变形和磨损

钢轨磨损主要原因是轮轨相互作用时产生巨大的接触应力和蠕滑率（蠕滑率就是轮对在滚动中潜伏着滑动，它用速度差的百分比来表示），车轮的线速度为 v (m/s)，列车实际运行的速度为 v' (m/s)，当 $v > v'$ ，纵向蠕滑率为

$$\frac{v - v'}{v} \times 100\%$$

列车是在水平牵引力作用下运行的，列车在直线上运行不是纯粹的滚动摩擦，而是在滚动中潜伏着少量滑动摩擦，这是直线地段钢轨发生磨损的原因之一。当列车进入曲线地段，蠕滑率有所增加，则曲线地段钢轨顶面及工作边的磨损要比直线地段钢轨顶面及工作边磨损大一些。曲线上股钢轨由于列车转向架中第一轮轮缘紧挨着轨头内侧，当轨头和车轮几何尺寸不相吻合时，造成轮轨接触面积小，接触应力增大。接触应力大，蠕滑率高，从而导致轮轨磨损加剧。轨头经过初期磨耗后，轮轨磨合处接触应力降低，这时轮轨磨耗减缓，轮轨在正常磨耗状态下运行，细心观察列车轮缘踏面在钢轨上的运行轨迹时，可看到钢轨侧向磨耗，在蠕滑率高的地段可观察到轨顶波浪纹磨耗，在小半径曲线段或轨底坡不合适的地段，甚至可以观察到由于接触应力过高导致的轨头挤压、飞边、剥离掉块等现象。轮轨接触点情况和轮轨轮缘受力分析见图2、图3。



A—轨面一点；P—重向力；B—轮缘一点；Q—侧向力

图2 轮轨接触点情况

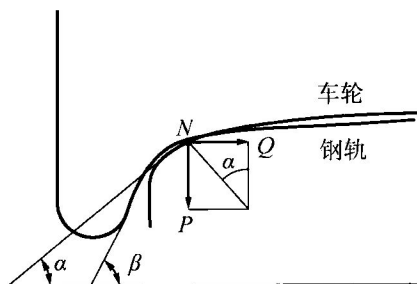


图3 轮轨轮缘受力分析

2 减缓轮轨磨损的措施

2.1 建立轮轨润滑系统，减缓轮轨磨损

为了减缓轮缘与轨头侧向磨损，可采用轮缘和钢轨轨头工作边润滑方法。由于地铁运营间隔为每3 min一趟，采取人工涂油的方式已满足不了减轻钢轨磨损的需要。人工涂油只能使用液态油，用量难于控制，另外，油渗入疲劳纹导致疲劳纹的加速发展，同时加大了车轮横向滑动。建议采用在列车上安装固体涂油装置的方法。安装固体涂油装置投资少、见效快，是减缓轮轨磨损和延长轮轨使用寿命的有效方法。

2.2 调整轨道参数，改善轮轨接触状态

轮轨磨损与轮轨间摩擦力所做的功有关。影响导向力、冲角大小的线路和轨道参数有：曲线半径、纵向坡度、曲线外轨超高度、轨底坡、轨距、水平、方向等轨道平顺状态。

(1) 广州地铁对曲线地段钢轨通过静态和动态测试的数据进行分析后，采取了以下措施：

① 插入坡度垫板，调整内轨轨底坡，使钢轨磨光带尽可能靠近轨顶中央。增加轨底坡对稳定轨距、水平、方向有好处，轨头光带加宽了，从而减缓轮轨磨损。由于地铁调整轨底坡时间较短，目前尚未有实测磨损减缓记录，根据相关研究的试验，得出实测结果（见表2）。

表2 轮轨磨损研究试验的实测结果

内轨轨底坡坡度	运量 (Mt)	
	11.05	26.34
1/20	0.13	0.24
1/30	0.16	0.59
1/40	0.24	1.01

② 加强曲线地段轨道养护维修。应经常测量曲线正矢，保持曲线良好的方向和圆顺度，紧固好轨道扣件，控制轨道位移，轨道平顺可减缓轮轨磨损。

2.3 曲线地段轨头非对称打磨，可减小轮轨接触应力

轮轨表面接触应力是采用弹性力学的赫兹理论进行计算的，轮轨的接触应力与材质、车速、轮轨作用力和轮轨几何形状有关。在曲线地段，外轨圆弧要比内轨圆弧长，同时外轨要超高，所以轨头打磨应采取非对称打磨，才能优化轮轨几何形状。

对于车轮来说，优化设计就是指减小轮缘根部圆弧半径，从而降低轮缘接触应力。另外，建议定期采用车辆掉头方法来减缓轮轨磨损。

对钢轨来说，曲线地段轨头非对称打磨，其道理是轮对通过曲线时，使外轨的轮轨间接触点尽量靠近轮缘根部，而内轨接触点尽量靠近踏面外侧，尽量避免轮缘与轨侧接触。

3 结语

综上所述，列车在轨道上运行，就必然会产生轮轨磨损，如何减缓轮轨磨损，延长轮对及钢轨使用寿命，是当前研究的焦点，因此，要找出非正常的轮轨接触方式，调整轮轨接触状态，达到互相匹配，使磨合处于相对稳定状态，并用科学方法来设计和管理轨道、维修轨道，延长轮轨使用寿命，提高列车通过能力，以满足地铁安全运营和发展的需要。

参考资料

- [1] 陈秀方. 轨道工程 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [2] 刘钊, 余才高, 周振强. 地铁工程设计与施工 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.