



国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十二五”国家重点图书

高速铁路安全建设工程技术研究及应用系列丛书



中国轨道交通学术文库

# 高速铁路牵引网

## 轨道回路电压电流分布及综合接地系统

GAOSUTIELU QIANYINWANG  
GUIDAO HUILU DIANYA DIANLIU FENBU JI ZONGHE JIEDI XITONG

戚广枫 辛成山 编著



西南交通大学出版社  
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)



国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十二五”国家重点图书

高速铁路安全建设工程技术研究及应用系列丛书



中国轨道交通学术文库

# 高速铁路牵引网

## 轨道回路电压电流分布及综合接地系统

GAOSU TIELU QIANYINWANG

GUIDAO HUILU DIANYA DIANLIU FENBU JI ZONGHE JIEDI XITONG

藏书

戚广枫 辛成山 编著

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 ( C I P ) 数据

高速铁路牵引网轨道回路电压电流分布及综合接地系统 / 戚广枫, 辛成山编著. —成都: 西南交通大学出版社, 2012.12

(高速铁路安全建设工程技术研究及应用系列丛书, 中国轨道交通学术文库)

“十二五”国家重点图书

ISBN 978-7-5643-2078-2

I. ①高… II. ①戚… ②辛… III. ①高速铁路—牵引供电系统—轨道电路—电压回路—电压分布—研究②高速铁路—牵引供电系统—轨道电路—电气回路—电流分布—研究③高速铁路—牵引供电系统—轨道电路—电气回路—接地系统—研究 IV. ①U238

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 289219 号

“十二五”国家重点图书

高速铁路安全建设工程技术研究及应用系列丛书

中国轨道交通学术文库

高速铁路牵引网轨道回路电压电流分布及综合接地系统

戚广枫 辛成山 编著

责任编辑	李芳芳
特邀编辑	宋彦博
封面设计	墨创文化
出版发行	西南交通大学出版社 (成都二环路北一段 111 号)
发行部电话	028-87600564 87600533
邮政编码	610031
网 址	<a href="http://press.swjtu.edu.cn">http://press.swjtu.edu.cn</a>
印 刷	四川省印刷制版中心有限公司
成品尺寸	185 mm × 260 mm
印 张	31
字 数	776 千字
版 次	2012 年 12 月第 1 版
印 次	2012 年 12 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-2078-2
定 价	160.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换  
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

# 序

与一般的工业电气系统接地相比，铁路综合接地系统有其特殊性，而且和运营安全密切相关，是铁路安全工程的基础设施之一。

随着我国高速铁路网和现代重载铁路的建设，广大工程技术人员迫切希望与安全密切相关的防雷接地技术体系能有一个可以遵循的系统解决方案。此前，我国对高速电气化铁路轨道电压、电流分布规律的理论研究相对缺乏，本书对其作了深入探索。

超大型工程接地系统的铁路综合接地，以电气、电子系统专业设计为主线，贯穿于设计、施工、验收测试和运营管理各个环节，涉及电气化各专业、通信信号专业及电力专业，并与线路路基、桥梁、隧道、车站、房屋建筑等工程密切相关。面对如此庞大复杂的系统工程，要提出较为完整的系统性解决方案是我们面临的技术难题。为此，自2004年起，中铁第四勘察设计院集团有限公司（简称“铁四院”）结合高速铁路建设的需要，展开了与铁路综合接地相关的系列研究，进行了“牵引网电压、电流分布及接触网工程接地技术研究”“铁路综合接地系统测量方法研究”等重点技术攻关，并于2006年在武广铁路客运专线工程设计中创造性地解决了无砟轨道条件下综合接地的工程技术难题。以武广、郑西、京沪、沪宁、沪杭等高铁以及宜万等山区长

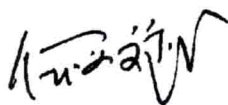
大干线电气化铁路通车运营为标志，铁四院全面掌握了高速铁路、复杂山区铁路的成套技术，成为中国铁路勘察设计的领跑者。通过高速铁路的工程实践，铁四院提出了道床结构包括无砟轨道混凝土内部钢筋的金属隔离及等电位连接的工程措施和系统设计理念，建立了完整的适应我国现代防雷接地安全技术规范，并兼容铁路特有的信号、电气化牵引工作要求的接地体系。

作为工程项目主要设计人员和科研项目主要研究人员，铁四院副总工程师、教授级高工戚广枫等编写此著作，对上述工程成功经验进行了系统总结，其内容及相关研究结论具有很强的系统性、实用性，反映了铁路综合接地系统的最新理论和实践成果，呈现了现代接地系统设计的新技术理念，展示了未来世界电气化铁路综合接地系统的发展方向。

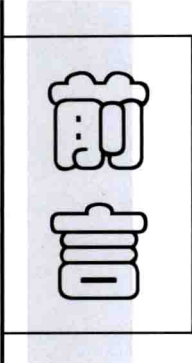
希望本书的出版能为高速铁路相关的桥梁、隧道、路基工程和电气化、信号专业的施工、设计及运用维护提供系统的、正确的接地技术理念和一些有益的思路启迪，为进一步保障高速铁路的设备、人员安全做出贡献，更好地服务社会经济发展。

中铁第四勘察设计院集团有限公司

院 长  
党委书记



2012年3月于武汉



电气化铁路的钢轨既是电力牵引接地的回流通道，又是轨道电路中信号电流的传输通道。随着高速和现代重载铁路列车电气功率的增大，钢轨中通过的电流密度、信号设备、道床结构、牵引电流分布均发生了很大的变化，如果不采取有效措施，轻则损伤轨旁人员、设备，重则威胁行车安全。

本书系统地总结了铁路综合接地系统最新理论和实践成果，通过轨道电压、电流分布规律的研究，提出了轨道—大地回路的计算模型理论，定义了受电弓和接触网工作接地安全区域，并结合武广、郑西等高速铁路的工程实践，提出了道床结构包括无砟轨道混凝土内部钢筋的金属隔离、连接的工程措施和系统设计理念，建立了完整的适应我国安全规范和兼容信号、电气化工作要求的接地体系。

本书不仅讨论了理论层面的系统解决方案，还根据工程现场应用层面的需要，系统阐述了建立共用电气接地系统的基本方法，介绍了典型的铁路综合接地模式的原理、方法，包括系统设计方案、测试方法，特别介绍了施工过程中的注意事项及实用方法，并配以大量的现场照片和原理图，因此对工程实践具有直接的指导和参照意义。

书中所涉及的方法和体系、工程研究和实施细则，完全满足我国目前各 300 ~ 350 km/h 的高速铁路系统 25 kV/50 Hz 交流电气化客运专线的回流、闪络保护接地和等电位控制要求，以及钢轨信号传输的电磁兼容性

要求，同时也满足相关综合接地工程设计及实施要求，包括综合接地系统的各专业接口设计要求。工程实践的经验和结果证明，本书所推荐的实施方案效果良好并具备通用性。

本书的内容及其相关研究具有较强的系统性、理论性、实用性和针对性，反映了现代接地系统设计的理念和未来铁路综合接地系统的发展方向，可供广大设计技术人员、电气工程师和信号设备专业人员参考。此外，本书对于施工技术人员、铁路土木工程师以及从事技术管理的相关人员，也有一定的借鉴意义。希望本书的出版，能够为生产一线的技术人员提供一个可以遵循的指导原则，以便结合具体工作应用好现代接地技术理论。

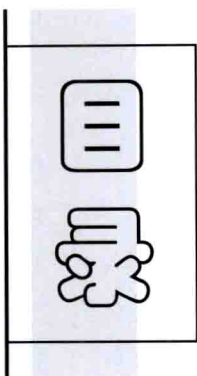
本书得以出版，要特别感谢其主要作者之一辛成山先生（现已去世）。辛成山先生曾任北京交通大学教授，是我国电气化铁路牵引供电技术领域著名的专家。他在武广高铁的前期工程方案研究中，对综合接地技术方案的研究尤其是理论建模、计算方法做出了重要贡献，曾主持解决我国大秦线重载列车大电流钢轨电位研究等技术难题。本书2.3~3.6节的牵引网钢轨电压、电流分布计算方法和理论模型主要是辛成山先生的研究成果。本书的出版亦旨在纪念辛成山先生为奠定电气化铁路综合接地系统分析理论基础所做出的杰出贡献。

本书的出版，得到了中铁第四勘察设计院集团有限公司的大力支持：院长兼党委书记何义斌对本书的编写给予了深切关怀，并于百忙之中为此书拨冗作序；王玉泽、余心沪、陈泽建、郭志勇、王华成对全书进行了审阅，提出了许多宝贵意见。在此对他们表示衷心的感谢。

本书由戚广枫和辛成山编著。在本书主要内容研究和编著过程中，中铁第四勘察设计院的李红梅、张华志和北京交通大学的吴命利、武汉大学的王建国提供了大量综合接地系统工程设计参考资料、钢轨电压计算算例、测量方法研究等技术资料；武广客运专线有限公司的曹澄宇提供了施工现场接口管理、实施作业有关内容和技术资料；中铁第四勘察设计院的朱江、吴德昌同志也参与了本书的编写工作。在此对以上人员一并表示感谢。

由于个人水平和经验有限，书中不妥之处在所难免，广大读者在阅读和使用过程中如发现需改进和完善之处，请及时向作者反馈，以便修订。

2012年3月



0 绪 论 .....	1
1 交流电气化铁道牵引轨回路及接地系统 .....	7
1.1 概 述 .....	9
1.2 接地基础理论与接地系统 .....	27
1.3 直接接触防护和非直接接触防护的基本要求 .....	56
2 牵引网轨道回路电压电流分布 .....	67
2.1 牵引供电系统回流及钢轨电位研究分析的 边界条件 .....	69
2.2 多重接地系统下的铁道信号传输工作电路与 牵引供电回流和闪络保护通道 .....	74
2.3 钢轨电位与钢轨电流 .....	78
2.4 钢轨电位与接地 .....	92
3 牵引网回路数学建模及计算分析 .....	101
3.1 导线内阻抗计算 .....	103
3.2 架空导线—大地回路阻抗计算 .....	104
3.3 埋地裸导线相关电气参数计算 .....	107
3.4 多导体传输线理论 .....	109
3.5 牵引网电路特点及其计算机解法 .....	109
3.6 AT 牵引网计算分析方法 .....	115
3.7 铁路综合接地的系统参数与相关导线选型 .....	158



3.8	小 结 .....	163
4	铁路综合接地的系统设计 .....	167
4.1	概 述 .....	169
4.2	牵引供电子系统的电气接地及对综合接地系统的要求 .....	170
4.3	信号子系统综合接地及电磁兼容要求 .....	229
4.4	接地系统工程的设计 .....	234
4.5	牵引供电子系统电气接地及相关的土建工程接口设计 .....	253
4.6	接地极系统的设计及新材料工艺技术的应用 .....	263
4.7	接地系统的设计施工注意事项 .....	277
4.8	接地导体之间的连接和施工注意事项 .....	282
5	铁路综合接地系统的工程实施方案 .....	293
5.1	综合接地系统的相关设施和一般原则 .....	295
5.2	路基和轨道工程的综合接地系统实施方案 .....	306
5.3	桥梁区段综合接地系统的实施方案 .....	338
5.4	隧道区段综合接地系统的实施方案 .....	367
5.5	站场区段综合接地系统的实施方案 .....	398
5.6	铁路沿线相邻相关设施的综合接地实施方案 .....	413
5.7	综合接地的工程量参考清单 .....	436
6	综合接地的测量与验收方法 .....	441
6.1	一般要求 .....	443
6.2	阻抗测量方法 .....	445
6.3	铁路综合接地系统轨道电位和设备电位测量方法 .....	473
6.4	电气完整性测量 .....	475
6.5	其 他 .....	476
6.6	中间检查和验收测量 .....	477
	结 语 .....	481
	参考资料 .....	485

0

# 绪论





按国家铁路中长期规划,我国将修建总里程 12 000 km 以上的高速铁路网。高速、高密度的铁路客运牵引负荷电流比常规铁路大得多。由于高速铁路采用新的路基和道床技术,钢轨对地漏泄电阻都比较大,导致钢轨电位要比既有电气化线路高得多,威胁到人身和设备安全,因此必须采取一定的技术措施把钢轨电位降低到限制值以下。但电气化铁路的钢轨在作为电力牵引接地的回流通道的同时也是轨道电路中信号电流的传输回路,接地的技术措施显然还需要和信号传输系统取得兼容,不能采用简单的接地或等电位联结方法。在多年来的电气化铁路的设计和运行中,曾采取了多种降低钢轨电位的措施,但评估方法较为粗略,而且随着高速和现代重载铁路列车电气功率的增大,钢轨中通过的电流密度、信号制式和设备、道床结构、牵引电流分布均发生了很大的变化,技术措施的有效性和工程实施的条件也需要进一步研究。

国外已经有一些实用措施,这些措施的效果如何、设计参数如何确定,国内在 2005 年以前的工程设计和研究中也并没有进行过系统的定量计算。查阅公开发表的国际文献会发现,比较缺乏深入的理论性研究,缺乏可以借鉴的有针对性的数学模型和系统方法。在客运专线和高速铁路大规模兴建过程中急需我们自己的理论研究成果,用来指导工程应用,解决实际问题。作为以最终满足通用性、实用性为目标的研究,需要系统总结理论方法和实践成果,特别需要定义和规范应用的条件和范围,完整地提出容易被忽略的却是对于工程实践有效性来说至关重要的工程应用措施(包括系统设计的理念和工艺注意事项),指导建立完整的适应我国安全技术规范、兼容具有不同电气系统特征的共用接地体系,满足安全运营和高质量的工程建设的需求。本书研究和涉及的工程实施范围包括但不限于以下内容:轨道和牵引回流电路,信号(轨道电路、阻抗连接器或线圈、电缆和机房),通信(电缆和机房),建筑、车站、站台、桥梁、隧道和雨棚等混凝土结构和钢结构的内部和外部接地,电力和电力牵引系统的接地、屏蔽隔离和连接等。

本书首先对铁路接地特有的术语、约定和基本定义进行了重新梳理,结合现代防雷接地系统理论和大型建筑物共用接地系统的技术原则,进行了详细的应用说明和规范,试图消除一些不同电气系统之间接地兼容性方面的错误概

念、误区或定势思维，并结合当今国际铁路工程的接地与安全防护技术主流趋势，引入了受电弓和接触网安全防护控制区的新概念，以及直接防护、非直接防护的原理和方法。

目前正在设计、在建或已经投入运营中的京沪高铁、武广客运专线等一大批高密度、大容量客运专线，通常采用自耦变压器（AT）供电方式。AT 供电方式牵引网网络结构复杂，系统设计中需要获得钢轨电位与电流的准确分析结果，以便对各种降低钢轨电位的技术措施做出准确评价。期待这种成果作为应用支持的要求是强烈的。

交流电气化铁路牵引网供电方式有直接供电方式（包括 BT 供电方式、单设回流线的直接供电方式）、AT 供电方式、同轴电缆供电方式等。研究和设计这些供电方式时，需要获得电流分布、牵引网阻抗、牵引网电压损失、牵引网短路、对邻近铁路的通信线的干扰及防护、钢轨电位等参数。以上各种计算，大多可以利用简化的近似解析公式。但是如 AT 供电方式、同轴电缆供电方式和单设回流线供电方式等计算，以往的解析分析更多是定性的，通过这种简化解析能认识主要规律，而定量分析结果如通信干扰计算和钢轨电位、电流等则显得较为粗糙。欲获得更准确的结果则必须研究统一的精确模型，并在此基础上编制计算机软件，用计算机进行计算。通过这种计算为工程技术的系统方案研究提供较为可行的支持和参考，可避免工程上的浪费或措施的不足。

本书的主要内容之一是关于轨道对地计算理论模型及其电气参数，包括高速铁路大负荷牵引条件下的电压、电流分布规律的研究，通过对钢轨电位的产生机理进行分析，并对各种降低钢轨电位的技术措施进行简化定性分析，研究了牵引网各种基础性电气参数的计算方法和网络的数学建模方法及其计算机解法。考虑到牵引网的特殊性，如接触线和钢轨的异形截面、埋地裸导线、钢轨磁饱和，以及负荷电流富含高次谐波等，为了获得较高的计算精度，在牵引网的基础性电气参数计算中，采用了和以往不同的更为严格的公式。例如，对于牵引网中的架空导线采用了精确 Carson 公式计算串联阻抗，推导了新的用于计算埋地裸导线自阻抗、自电位系数、互阻抗、互电位系数以及埋地裸导线同架空导线之间互阻抗的计算公式，解决了电气化铁道特有的异形截面接触线内阻抗计算问题；在牵引网链型电路模型中，采用了基于矩阵函数理论的多导体传输线精确等值  $\pi$  电路，从而减少了模型误差，改善了计算精度，按照该方法，

能连续给出牵引网各导线的电压、电流分布,从而能够准确分析牵引网的电气性能。本书中介绍了如何建立轨道对地计算理论模型,以便为利用计算机仿真手段开展包括长大钢轨这种特殊构筑物在内的大型复杂电气接地系统设计提供理论基础。

在建立牵引网数学模型的基础上,本书结合武广、郑西等第一批实施建设的客运专线工程需要,进行了大量的典型算例研究,对钢轨电位的分布规律以及牵引回流网络的主要电气参数对钢轨电位的影响规律获得了新的认识,进而对工程实施中的上下行钢轨横连、增设 CPW 线、利用支柱接触接地、特设埋地地线和特设集中接地等措施降低钢轨电位的效果进行了计算和评估分析,有效地指导了工程实践。在牵引网基础电气参数计算和数学建模过程中,所依据的相关理论和公式更为严密和严格。大量计算算例表明,它的精度和所考虑的因素基本满足工程设计有关设备参数选型的需要。

本书结合工程实际案例,详细分析了牵引回流系统的各种降低钢轨电位措施的效果,包括上下行钢轨横连、增设 CPW 线、PW 线利用支柱接地、特设埋地地线和特设集中接地极,同时,提出了回流网络对地综合漏泄电阻的概念,并分析了它与钢轨电位的量化关系。依据牵引网的数学模型和计算机解法得到的科学结论,已经在武广高速客运专线和郑西高速客运专线施工设计中得到应用,取得了良好效果。通过和国外著名的工程咨询机构 OPB 所采用的多种仿真方法互为验证,根据理论分析和对数值计算结果的分析,得出了相似的结论,证明了该软件所采用的数学模型和计算方法的正确性。广深港客专工程等近期开通项目中所进行的相关科学试验和现场测试,也充分验证了工程措施的有效性和计算方法的准确性。

研究表明,从经济性与可靠性角度考虑,降低钢轨电位应首先降低牵引网回流网络的纵向串联阻抗,这是最有效且实用的工程措施,即充分利用沿线贯通的金属导体和相邻的大型自然接地体来实现,对上下行钢轨横连、增设 CPW 线;其次,应该充分利用支柱、桥墩、隧道、混凝土道床等线路旁建筑和结构物大型自然接地体;在大地电阻率比较高的情况下,根据评估计算研究是否需要再特设埋地地线和沿线路特设集中接地极。大量计算显示,在贯通的上下行回流网络充分横连后,即使在列车牵引功率为 25 000 kW 或系统短路电流高达 25 kA 的条件下,采用等电位和屏蔽隔离接地措施构成的大型、低阻和

可靠的共用接地系统，即铁路综合接地系统，仍可以将可能威胁人身安全的地方，如车站站台区域或其他接触网和受电弓危险接地区域的钢轨电位或电位梯度控制在安全范围以内。

1

# 交流电气化铁道 牵引轨回路及接地系统





