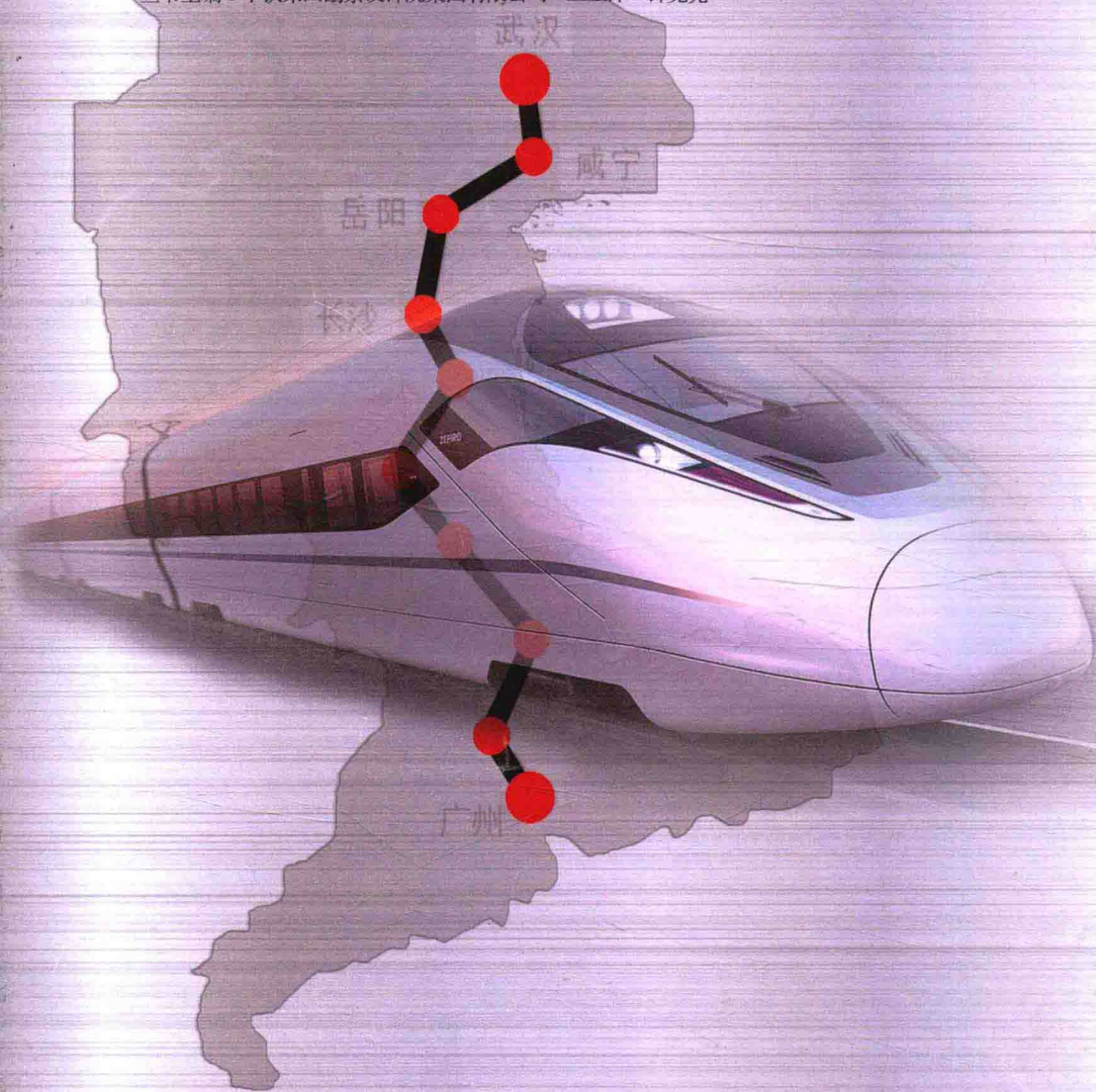


十二五国家重点出版物出版规划项目
湖北省学术著作出版专项资金资助项目

中国第一条长大高速铁路干线(武广高铁)技术创新工程丛书

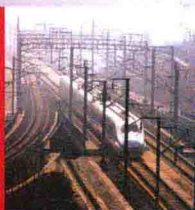
丛书主编◎中铁第四勘察设计院集团有限公司 王玉泽 许克亮



电气化与电力工程

戚广枫◎主编

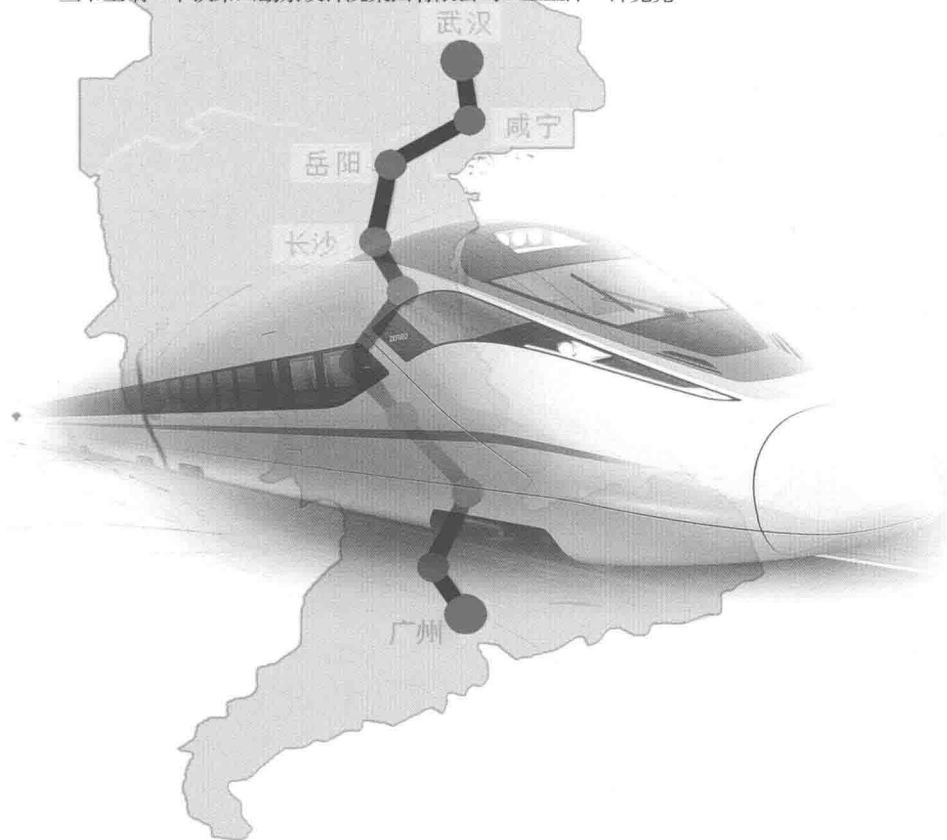
ZHONGGUO DIYITIAO CHANGDA GAOSU TIELU GANXIAN
(WUGUANG GAOTIE) JISHU CHUANGXIN GONGCHENG CONGSHU
DIANQIHUA YU DIANLI GONGCHENG



十二五国家重点出版物出版规划项目
湖北省学术著作出版专项资金资助项目

中国第一条长大高速铁路干线(武广高铁)技术创新工程丛书

丛书主编◎中铁第四勘察设计院集团有限公司 王玉泽 许克亮



电气化与电力工程

ZHONGGUO DIYITIAO CHANGDA GAOSU TIELU GANXIAN
(WUGUANG GAOTIE) JISHU CHUANGXIN GONGCHENG CONGSHU
DIANQIHUA YU DIANLI GONGCHENG

戚广枫◎主编



图书在版编目 (C I P) 数据

电气化与电力工程 / 戚广枫主编. -- 武汉 : 湖北科学技术出版社, 2015.12

(中国第一条长大高速铁路干线(武广高铁)技术创新工程丛书)

ISBN 978-7-5352-8179-1

I. ①电… II. ①戚… III. ①高速铁路—电气化铁道
②高速铁路—电力工程 IV. ①U238

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 178959 号

策 划: 何 龙 刘 玲
责任编辑: 刘志敏

责任校对: 蒋静
封面设计: 戴旻

出版发行: 湖北科学技术出版社
地 址: 武汉市雄楚大街 268 号
(湖北出版文化城 B 座 12-13 层)
网 址: [http: //www.hbstp.com..cn](http://www.hbstp.com.cn)

电话: 027-87679468
邮编: 430070

印 刷: 武汉市金港彩印有限公司

邮编: 430023

督 印: 刘春尧

787×1092 1/16
2015 年 12 月第 1 版

20.75 印张 4 插页 510 千字
2015 年 12 月第 1 次印刷
定价: 138.00 元

本书如有印装质量问题 可找本社市场部更换

丛书编委会

主 任:蒋再秋

副主任:王玉泽

主 编:王玉泽 许克亮

主 审:何华武

委 员:何 龙 罗世东 李小和 肖明清 戚广枫

石先明 孙 立 黄小钢 黄 盾 盛 晖

徐 川 刘一平 金福海 赵新益 李文胜

潘国华 彭永忠 温建明 张孟彬 刘文兵

王华成 梅志山

本书编委会

主 编：戚广枫

副主编：李红梅 张育明

编 委：黄足平 周 京 陶力军 汪自成

李丽雅 方志国 秦 岭 杨 剑

周静恒 李达纲

序

武广高铁(也称武广客运专线)是武汉至广州的铁路客运专线,位于湖北、湖南、广东三省境内,属京广高速铁路南段,其承东启西,属路网骨干,是我国铁路“四纵四横”快速客运网的重要组成部分。其自武汉站引出,向南经湖北咸宁,湖南岳阳、长沙、株洲、衡阳、郴州,广东韶关、清远、佛山等市,终于广州南站,正线全长 968.3km。

修建武广高铁,可实现京广线南段客货分线运输,有效而彻底地解决京广线武广段运能紧张的局面,可使粤汉间铁路旅行时间由 11h 缩短至 3.5h 左右。同时,武广高铁也是武汉城市圈、长株潭城市群及珠江三角洲都市圈间联系的现代化、大能力的快速交通纽带,对沿线国民经济的发展具有极大的推进作用,社会影响深远。

武广高铁是一条跨越华中、华南两大区域的行经山区的高速铁路,是我国长大高速铁路干线代表作之一,因其有线路长、规模大、标准高、技术新、工程复杂,且类型齐全等综合特点,而以“长大高新、复杂齐全”著称于世,是中国高速铁路发展的里程碑。

自 2002 年开始研究,至 2009 年 12 月底全线开通,前后历时 8 年。此过程中,先后成功解决复杂路段选线设计、路桥隧结构物沉降控制、无砟轨道设计、精密控制测量、长大隧道防灾救援、综合交通枢纽规划与设计、特大型站房设计、四电系统集成、联调联试等一系列技术难题。

武广高铁集高铁技术之大成,是我国当时一次性建设里程最长、运营速度最快的高速铁路,其顺利开通运营,使我国高铁技术水平“整体达到国际一流、部分项目国际领先”的新高度。

武广高铁是我国铁路快速发展的最新成果,是继京津城际铁路之后我国高速铁路发展的又一新标杆,是国家综合实力的体现,是改革开放成果的缩影。总结其成功经验,主要得益于以下几点:一是结合武广高铁需要切实开展了大量有针对性的科研、试验和攻关,取得了大量的科研成果和雄厚的技术积淀;二是借力国际资源,部分工程开展中外联合咨询;三是集中优势资源处置相关难题。

武广高铁成功建设,感受成功之余,也感悟到高铁设计应在系统性、前瞻性、包容性上再下功夫,系统提高设计跨专业整合集成能力,体会到后续高铁应秉持“高铁质量高于一切,高铁安全高于一切”的理念,全面推进系统仿真设计,实现物联智能高铁技术。

中国铁建第四勘测设计院在项目建成后,立即组织技术力量,对武广高铁勘察设计情况开展全面总结。现以此为基础,按《总体工程设计》《轨道工程》《路基工程》《桥梁工程》《隧道工程》《电气化与电力工程》《信号、通信及信息系统工程》《站房工程》《动车设备及综合维修工程》《环保工程》共十册,集成丛书出版,或许对有志于从事高铁工程设计的工程技术人员有所帮助。

潘再秋

2015年5月

前 言

武广高铁是我国第一批开工建设并首先建成的长大干线高速铁路。高铁工程中的电气化铁路工程和电力供电工程是为动车组直接提供持续动力,为沿线铁路设备提供电源的重要装备。在高速铁路两大科学技术领域即轮轨关系和弓网关系研究方面,高速运行中的列车,其对应的地面固定设施,即轨道和电气化工程中的接触网,直接与速度相关。接触网如何与高速运动中的列车良好匹配并保持高精度的平顺性是高铁技术的核心。

在武广高铁开通以前,国际上尚没有双弓重联运行时速超过 280km 的线路。面对我国特有的 350km 时速、双弓重联运行,世界范围内无可借鉴先例。按照过去传统的理念、思维和方式方法,不可能建设高速铁路。我国高铁的系统建造技术研究,历经十年的基础理论研究和大量现场试验验证。早在 20 世纪 90 年代中期就开始预备和启动研究工作,但涉及工程应用的绝大部分关键或重大技术难题,都是在 2005 年后,结合武广高铁工程建设的实际应用才得到根本性的解决,并首先于 2008 年 3 月在武汉试验段完成工程试验和示范。可以说,武广高铁是我国高铁工程技术真正成功的摇篮,也是当今高铁技术的基础研究和应用研究的创新基地。因此,及时对武广高铁工程进行技术总结,实际上也是对中国高铁技术取得成功的研究过程的总结,具有十分重要的科学意义和历史意义。在电气化铁路方面,正是基于我们在武广高铁工程的成功实践,基于对高速牵引供电规律的深入而超前的认识,得益于对双弓重联时前后受电弓之间的振动干扰和波动耦合特征的正确认识与把握,使得我国在 2005 年后,快速达到和赶超世界先进水平。武广高铁于 2009 年正式开通运营,完美实现了双弓重联运行条件下当时的最高时速即 350km/h 的世界领先水平。

通过武广高铁的工程研究与建设,首创并推广了 300km/h 商业运行速度双弓重联的高速电气化牵引供电和接触网系统成套工程解决方案。系统理论层面,解决双弓运行的波动耦合与匹配难题、牵引供电的大功率持续可靠供电系统技术难题;技术方案层面,创立“技术先进、安全更优”的体系;工程应用层面,在武广高铁工程建设中提出了多项世界首创的科学的工程技术措施。比如,国际创新的“宽型受电弓制式的无交分线岔定位技术”、首创的六跨锚断关节式高速电分相技术方案,在新武汉站还创新了适用时速 200km 的长达 90m

跨距的世界第一跨链形悬挂技术。高速铁路接触网疲劳故障机制,和单弓、双弓不同工况对可靠性的影响程度的定量分析等等创新实践,填补了国际的行业空白,均达到国际先进水平。工程相关的技术成果全面推广应用到后续近5 600km已开通、约10 000km在建项目中。

这些高铁电气化和电力研究的全面成功应用,不仅取得了良好的经济效益,更推动了我国乃至当今世界时速300km电气化高铁技术的进步,体现在以下四个层次:提出电气化工程系统解决方案,为我国高速铁路工程建设与实践奠定了技术基础;高速接触网系统设计、施工、制造、安全可靠性评估等方面形成了具有自主知识产权的成套技术,推动了我国高速铁路技术进步,促进了我国材料科学、项目管理科学等行业的发展;促使我国形成了以《高速铁路设计规范》、O2、O3接触网零部件标准等专业、行业标准;工程实践中获得的多项重要参数已纳入《架空牵引接触网》(IEC60913)等国际标准,推动了世界高铁接触网的技术进步。

武广高铁还是国内第一条完全自主设计的当时世界上规模最大、技术标准最高的高速铁路。其项目管理具有明显的不同于其他工程项目的特点,即采用“四电系统集成”的实施方案进行工程项目的组织和现场管理。这种新的施工管理模式带来了新的接口管理问题。接口管理优劣是工程建设中最能体现建设过程管理水平和工程质量控制优劣的特征。武广高铁建设项目是我国第一个按照国际工程惯例,全面实行项目全体单位参与的统一接口管理制度并取得成功的范例。总体上有效且质量优良,堪称高速铁路工程建设管理的典范。在武广高铁工程实施阶段,第一次在我国的工程建设中正式增加了联调联试阶段的工程项目,通过强化联调联试的试验过程、试运营时间和内容,结合动态验收进行全面的系统功能、性能的测试,安全、有序地逐步达到开通条件。因此,在工程项目管理方面也取得了特别值得总结的经验和教训。

武广高铁工程建设中,电气化与电力工程下面细分有多个不同专业子系统,其设计和施工方法虽然看起来有较大区别,技术重点和关键技术难点各异,但共性的特点都是在总体设计的系统指导下,共同实现系统目标。各专业工程的建设历程,除了常规的工程设计与施工内容外,都明显增加了新的用户需求分析、关键技术解决方案的研究性工作内容,因此,本工程从项目可行性研究、决策到技术方案稳定、项目实施和装备技术研究、施工技术研究、最后的工程试车、联调联试的工程验收、测试各个阶段和全过程的创新实践值得全面、系统地加以总结,供我国进行高铁技术发展规律研究和其他工程建设实践参考,亦有利于开拓工作思路,促进高铁技术的进步和现代化铁路的发展。

编者

2015年10月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 电气化铁路牵引供电	1
1.2 铁路电力供电系统	3
1.3 高速铁路带来的挑战	5
1.4 武广高铁电气化与电力工程	5
1.4.1 工程概况	5
1.4.2 电气化与电力工程的里程碑	6
1.5 电气化与电力工程的主要工程数量	9
第 2 章 项目管理及工程接口关键技术	10
2.1 四电集成工程实施方案	11
2.1.1 四电集成方案的形成	11
2.1.2 总体设计进程与四电集成	11
2.2 整体工程的接口管理	12
2.2.1 接口管理的基本要求	12
2.2.2 接口管理中的技术要求	13
2.2.3 路基段电气化接口工程	15
2.2.4 桥梁段电气化接口工程	17
2.2.5 隧道段电气化接口工程	20
2.2.6 小结	27
2.3 无砟轨道的电气安全与接口系统技术	28
2.3.1 高速铁路的电气工况和整体道床结构	28
2.3.2 电气安全接口兼容技术	29

第 3 章 系统设计与关键技术参数研究	32
3.1 武广高铁工程的总体设计理念	32
3.2 高速铁路电气化列车负荷特性和功率需求	33
3.2.1 高速铁路牵引负荷特点	33
3.2.2 牵引供电系统设计面临的问题	36
3.2.3 高速铁路的电气功率需求	36
3.3 牵引供电系统的系统仿真技术与主要技术指标	37
3.3.1 牵引供电系统的仿真方法和手段	37
3.3.2 牵引供电系统的前提条件	38
3.3.3 牵引供电系统总体技术要求	40
3.3.4 牵引供电技术方案和主要技术参数	41
3.4 牵引网电压、电流分布及电气安全接地技术研究	44
3.4.1 计算评估的前提条件	45
3.4.2 单车运行条件下回流系统的电流、电压结算结果	46
3.4.3 高峰小时多车运行条件下回流系统电流、电压计算结果	47
3.4.4 短路条件下仿真计算结果及分析	50
3.4.5 无砟轨道结构的电气安全接地技术要求	50
3.5 高速铁路电分相设置方案与运行时分目标	51
3.5.1 电分相设置方案	52
3.5.2 高铁动车组过分相分闸区设置	53
3.5.3 电分相设置方案与运行时分	54
3.6 可靠性、有效性、可维护性、安全性指标	57
3.6.1 电气化铁路的 RAMS 体系	57
3.6.2 铁路电力系统的 RAMS 体系	59
3.7 弓网匹配与 SiFCAT350 接触网系统研发	61
3.7.1 高速运行的列车受电弓给接触网技术性能带来挑战	61
3.7.2 系统研究的基本方法和过程	61
3.7.3 SiFCAT350 系统方案	62
3.7.4 武广高铁接触网工程实施的关键技术	69
3.8 铁路电力供电的特点和用户需求分析	76
3.8.1 铁路电力供电的用户需求分析	76
3.8.2 铁路电力供电的系统目标	81

3.8.3	长大干线 10kV 电力线路方案研究	82
3.8.4	全电缆线路方案工程应用的关键技术	84
3.9	高速电气化铁路的无线电干扰水平研究	90
3.9.1	电磁兼容性的总体要求	90
3.9.2	研究采用电磁环境影响评估的技术标准	90
3.9.3	不同运行速度下的无线电干扰频率特性	91

第 4 章 基本设计与工程解决方案 94

4.1	电气化牵引供电系统及其电源工程	94
4.1.1	牵引供电方案研究应考虑的因素	94
4.1.2	牵引供电设施分布方案研究	95
4.1.3	外部电源工程	102
4.2	高速接触网系统的工程技术方案	103
4.2.1	边界条件与系统设计	104
4.2.2	高速接触网工程的施工设计	110
4.2.3	施工允许误差和工艺要求	124
4.2.4	接触网设备、零件参数选型设计	130
4.2.5	设备选型的采购与供货	150
4.3	新型大功率供变电设备方案	151
4.3.1	牵引变电工程解决方案	152
4.3.2	大功率新型供变电设备参数选型设计	154
4.3.3	主要设备的技术规格参数	164
4.3.4	合同供货商与设备选型	174
4.4	自动化设备系统方案	175
4.4.1	武广高铁的自动化系统构成	175
4.4.2	设备主要技术标准	186
4.5	电力配电工程及大型站房电力供电方案	188
4.5.1	变配电所	188
4.5.2	柴油发电机组	190
4.5.3	10/0.4kV 变电所	193
4.5.4	10/0.4kV 箱式变电站	194
4.5.5	电力线路	197
4.5.6	电力设施与 SCADA 等自动化系统的配合	197

4.5.7	机电设备监控系统	198
4.5.8	火灾自动报警系统	199
4.5.9	站场、室外照明及控制方式	205
4.5.10	动力照明	206
4.6	电力供电系统主要元件的设备选型	207
4.6.1	主要设备的技术规格	207
4.6.2	合同供货商与设备选型	221
4.7	路外通信防护工程设计	223
4.7.1	路外通信防护设计原则	223
4.7.2	迁改工程	223
4.7.3	无线电干扰评估	223
第 5 章	专业工程实施的典型案例	224
5.1	广州枢纽牵引供电方案的优化	224
5.2	广州南牵引变电所工程合建方案	227
5.2.1	供变电设备集成化、小型化	229
5.2.2	设备集成化、小型化关键工艺	229
5.2.3	变电所和电力配电所合建	234
5.3	接触网施工放线和预配安装施工技术	237
5.3.1	高速接触网关键施工技术	237
5.3.2	大张力铜镁 150 接触线展放工艺	239
5.3.3	支柱装配、悬挂调整预配安装一体化工艺	247
5.4	接触网专业工程的景观设计	253
5.4.1	接触网景观设计的原理	254
5.4.2	典型案例说明	256
5.5	隧道照明电力工程	260
5.5.1	隧道照明供电方案	260
5.5.2	隧道照明控制	262
5.5.3	隧道照明设备安装	262
5.6	大型站房照明电力工程	266
5.6.1	用户需求	266
5.6.2	总体设计思路和技术原则	267
5.6.3	特大型站房照明应用研究	267

第 6 章 高速铁路电气化、电力维修设施	271
6.1 武广高铁电气化工程的维修性研究	271
6.1.1 高速铁路电气化专业的可维护性设计原则	271
6.1.2 电气化维修系统	271
6.1.3 关于高铁电气化维修体制的设想	272
6.2 维修设计方案	275
6.2.1 变配电设备的维修设计方案	275
6.2.2 接触网的维修设计方案	280
第 7 章 工程试验与验收	289
7.1 概述	289
7.1.1 验收范围	289
7.1.2 验收方法与过程	289
7.2 专业工程的试验与验收	290
7.2.1 供变电专业工程的试验与验收	290
7.2.2 接触网专业工程的试验与验收	294
7.2.3 电力专业工程的试验与验收	306
7.3 整体工程的验收	306
7.3.1 专业工程验收情况	306
7.3.2 整体验收评估	307
第 8 章 创新成果与经验总结	308
8.1 高铁牵引供电系统技术标准	308
8.1.1 牵引供电系统主要技术标准	308
8.1.2 电力供电系统主要技术标准	310
8.2 工程建设部分经验总结	310
8.2.1 供变电专业工程	310
8.2.2 接触网专业工程	311
8.2.3 电力专业工程	312
参考文献	313

第 1 章

概 述

在现代旅客运输系统中,高速电气化铁路在运输安全、速度、舒适程度、运能、环境保护、效率与效益等方面,都占有明显优势。发展高速铁路,按照绿色、高效和大功率需求,采用电力牵引的供电制式成为必然选择。

铁路供电系统根据其职能可以分为两种,一种是用于对牵引机车供电的牵引供电系统,另一种是用于对铁路车站、货场、维修段所等生产、生活配套房屋以及铁路区间信号中继站、无线通信基站、光纤直放站、电力牵引各所用电、隧道照明、立交桥排水等设施的电力供电系统。这两种供电系统所对应的工程建设,通常称为铁路电气化和电力工程。

1.1 电气化铁路牵引供电

电力牵引供电系统提供电力能源的作用,是通过电气化铁路安全运送旅客和/或货物。牵引供电的目标就是保证电力牵引车辆不间断地、可靠地和安全地运行,就技术环节的角度看,牵引供电包括电力牵引系统的全部相关固定设施,可以细分为牵引电能的产生、传输和馈出以及运行中的电力牵引车辆受流几部分。我国目前的电气化铁路体系下,均利用来自国家电网或工业电网的发电能源,即将电能从国家工业三相 220kV 或 110kV 电网接引,作为铁路用户,称这种通用国家工业用电网络为外部电源或地方电源,再经过输变电线路输送到铁路专用的牵引变电所,经牵引变电所转换成单相 27.5kV,再通过接触网输电给动车组。

电力牵引供电系统中直接给列车供电的部分,也叫牵引网,具体由 27.5kV 馈电线和接触网构成。和一般的工业输变电网络相比,牵引系统的用电负荷特点与地方公共电网负荷不同,因为它不仅在用电时间上与地方公共电网有很大差别,其用电负荷点的位置也是不断变化的。原理上,通过接触网向移动中的负载用户供电,是牵引供电系统和工业电网之间的主要区别。电气化铁路采用的是单相供电的原理。即经牵引变压器输出的两相电源,变压器次边侧接线端的一相直接接地,另一相作为高压电源加载到接触网,经过高速运动中的受电弓传输给列车,经过动车组负载后,电流入地经钢轨和大地回流到变电所电源端。

电气化工程主要由供变电(含 SCADA 系统)、接触网系统两大环节构成。牵引供电系统的电气构造图,如图 1.1 所示。

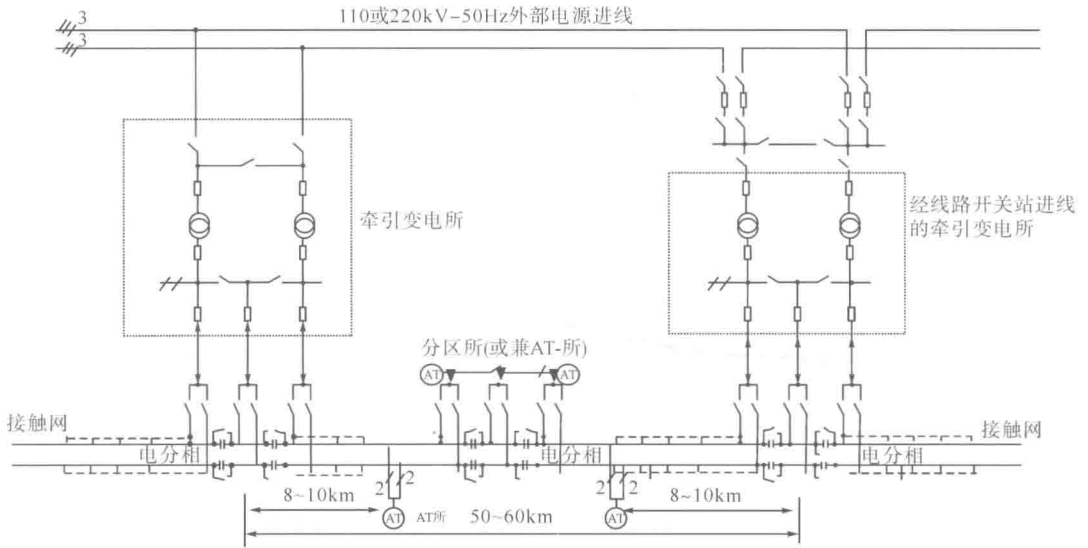


图 1.1 牵引供电系统的电气构造图

运动中的列车受电弓车载设备和直接接触提供能量的接触网地面设施，是列车能量供给不可或缺的关键设备。确保列车上的受电弓从地面的接触网上获取稳定持续的电能是高速、重载列车运行的前提条件。

受电弓是在机车顶上安装的弓形受流装置，负责在滑动的过程中接触取得牵引网传输的电能，向电力牵引机车供电，和接触网之间的配合关系如图 1.2 所示。

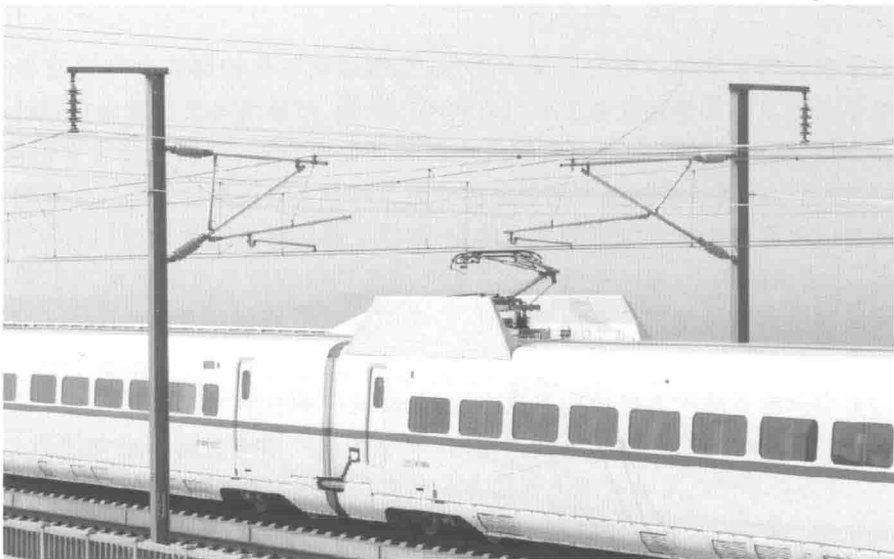


图 1.2 受电弓接触网的相互关系

接触网的基本结构形式正如其功能定义所描述的，作为一定长度的电源传输线，为各种条件下的运动中的受电弓提供稳定的滑行接触。典型的接触网就是承托各个横向支持装置（我们这里通称为悬挂腕臂）的支柱，沿钢轨两侧架设，以额定电压（通常是 25kV）通过架空在铁路正线上方的导线如接触线等构件，实现向电力机车上方的受电弓传输电能。如图 1.3 所示。

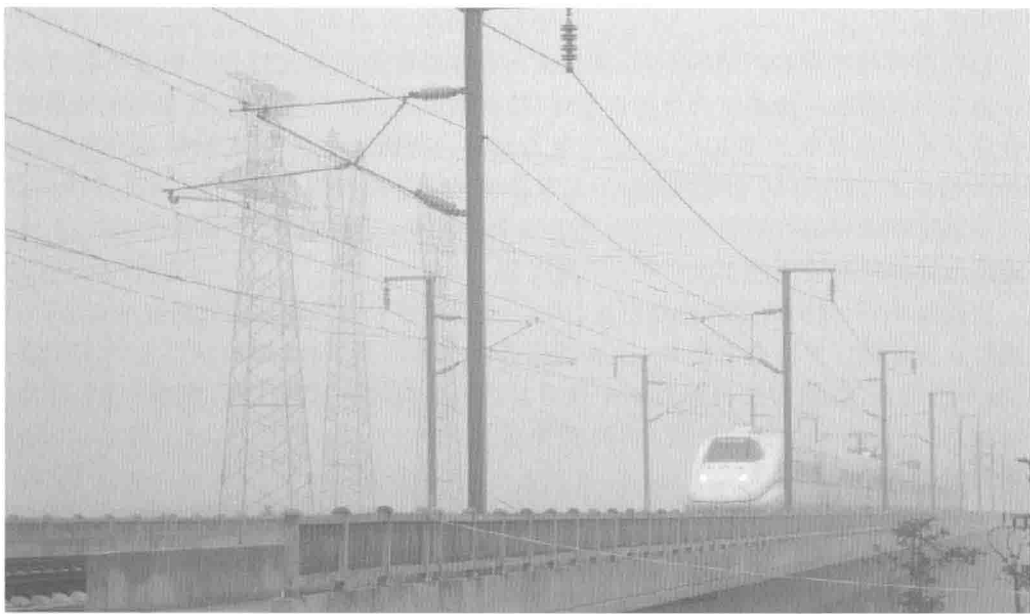


图 1.3 采用腕臂支撑结构的接触网

这种运动中的受电弓和接触网之间,以滑动接触并保持相对稳定的相互作用力的关系,所涉及的学科领域除了电气工程、力学和材料科学,在高速铁路应用领域还很大程度地涉及动力学关系研究领域。对于高速铁路,轮轨关系、弓网关系,是支撑高速铁路发展的基础科学问题,是高速铁路系统成功必须攻克的两大大关键技术难题。

1.2 铁路电力供电系统

如上所述,我们把给电力机车车辆(对高铁而言,亦常被称为动车组)这种特殊负荷供电的系统,定义为电气化供电系统。而给其他铁路负荷供电的供配电系统,我们通常称之为铁路电力供电系统,作为为铁路运输生产、生活供电且由铁路自行管理的电力设施和电力网络的统称。铁路电力供电系统也有一定的、不同于普通工业配电网的特殊之处。

同电气化牵引供电专业一样,铁路行业内,通常把铁路供配电系统以外的能够向铁路用电负荷供电的电源,包括公共电网、公共电网以外的发电厂、变电站及输配电线路统称为“外部电源”或“地方电源”。这里的公共电网,特指面向非铁路的一般社会负荷用户提供电能的电力配电网。

具体到武广高铁电力工程中的供电系统,除了大型客专和中心城市地区以外,主要由国家或工业电网接引 35kV 的中压电源,经地方电源线路,到独立或合建的铁路 10kV 变配电所给铁路设备供电,除了给武广线路中间的铁路车站、货场、维修段所等生产、生活配套房屋等地区负荷较大或较为集中的铁路用户提供电源外,主要通过沿铁路线敷设的两路 10kV 电力贯通线路,给沿线分散布置的铁路区间信号中继站、无线通信基站、光纤直放站、电力牵引各所用电、隧道照明、立交桥排水等设施提供可靠电源,保证铁路重要设备