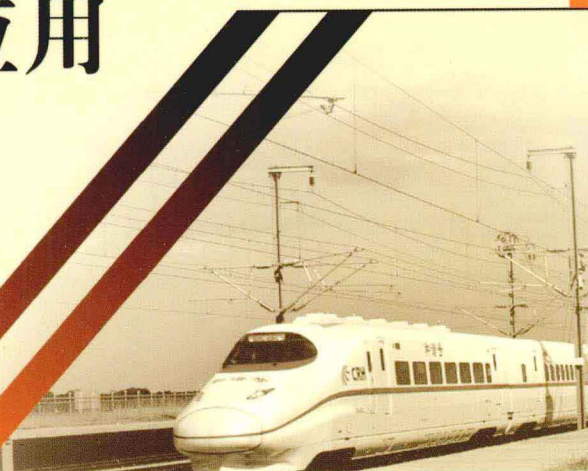


“十二五”国家重点出版物出版规划项目

RAMS Evaluation for Power Supply System of
High-Speed Railways: Theory and Application

高速铁路供电系统RAMS 评估理论及其应用

吴俊勇 著



北京交通大学出版社
<http://www.bjtu.cn>

“十二五”国家重点出版物出版规划项目

高速铁路供电系统 RAMS 评估理论及其应用

RAMS Evaluation for Power Supply
System of High – Speed Railways:
Theory and Application

吴俊勇 著

北京交通大学出版社

• 北京 •

内 容 简 介

本书是根据作者主持的国家自然科学基金项目“高速铁路牵引供电系统 RAMS 评估理论及其应用”(编号: 60674005)的研究成果整理而成,书中所有内容都是首次出版。本书写作的特点是理论联系实际,不仅系统地建立了高铁供电系统 RAMS 评估的完整理论体系,还紧密结合我国第一条高速铁路京津城际的实际,开发了高铁接触网精细化维修管理系统和风险评估系统,有些成果已得到成功应用。

本书内容共分 8 章:第 1 章是 RAMS 概述,阐述了本书研究的背景和意义,提出了高速铁路供电系统 RAMS 评估的主要研究内容和目标;第 2 章是 RAMS 评估的常用方法介绍;第 3 章是外部电力系统对高速铁路牵引供电的可靠性评估;第 4 章是高速铁路牵引变电站接入电力系统的电压等级研究,从多个方面回答了这一焦点问题;第 5 章是牵引变电站主接线及 10 kV 电力供电系统的可靠性评估;第 6 章是接触网设备及系统的可靠性评估;第 7 章为接触网系统预防性维修计划的多目标优化;第 8 章为基于风险理论的牵引供电系统安全性评估,对大风、覆冰和雷击等恶劣天气下高铁供电系统的综合风险进行实时定量评估,为高速铁路供电系统的早期故障预警奠定了理论基础。

本书适合铁道电气化、电气工程、可靠性工程等领域的专业人士和大中专院校的学生阅读,也可作为铁道规划、勘察、设计、运营、铁路变电和供电、接触网维护等技术人员的参考书。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

高速铁路供电系统 RAMS 评估理论及其应用/吴俊勇著. —北京:北京交通大学出版社, 2013. 10

ISBN 978-7-5121-1688-7

I. ① 高… II. ① 吴… III. ① 高速铁路-供电系统 IV. ① U238

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 248393 号

策划编辑:赵彩云

责任编辑:赵彩云 吴嫦娥

出版发行:北京交通大学出版社 电话:010-51686414

北京市海淀区高粱桥斜街 44 号 邮编:100044

印刷者:北京艺堂印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印张:14.75 字数:372 千字

版 次:2013 年 12 月第 1 版 2013 年 12 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-5121-1688-7/U·159

印 数:1~1 500 册 定价:49.00 元

本书如有质量问题,请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评,我们表示欢迎和感谢。

投诉电话:010-51686043, 51686008; 传真:010-62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。

序

铁路是国家的重要基础设施，对促进经济、社会的健康发展具有十分重要的作用和意义。“十一五”期间，我国铁道部迈进了引进、消化、吸收、再创新的中国式高速铁路跨越式发展的道路。目前，我国建成并运行高速铁路已达到 8 358 km，所建成的高速铁路网已成为世界上最大的高速铁路网络。京津城际、武广高铁特别是京沪高铁的相继开通，使我国一跃成为世界高速铁路大国，现在无论是高速铁路的已投运里程、在建规模，还是最高运营速度，都处于世界领先水平，我国高速铁路的建设和发展已经取得了令世人瞩目的成就。

在我国高速铁路实现跨越式发展的同时，高速铁路在运行过程中故障的发生也引起了全社会的高度关注。武广高铁在开通的第一年里就发生了 8 次故障，其中 4 次是供电系统的故障。2011 年 7 月 10 日至 14 日，刚开通运营不到半个月的京沪高铁在 5 天时间内连续发生 4 次事故。更为严重的是，7 月 23 日发生了震惊中外的甬温线特大铁路交通事故，造成 40 人遇难。这些事故的发生大多与供电系统故障有着直接或间接的联系。据铁道部运输局对全国 2 万公里电气化铁路运营事故调查统计的结果表明，因牵引供电系统和电力供电系统发生故障导致铁路运营中断的事故，占有事故的一半以上。高速铁路中频繁发生的故障给我们敲响了警钟，说明我国在快速发展高速铁路的同时，还必须同时密切关注高速铁路运行中的可靠性和安全性问题，使我国真正从一个高速铁路大国发展到一个高速铁路强国。

《高速铁路供电系统 RAMS 评估理论及其应用》一书的出版符合国家的这一重大需求，也代表了该领域科研水平的最新进展，具有重要的理论意义和实用价值。该著作从保证高速铁路供电的可靠性、可用性、可维护性和安全性（简称 RAMS）出发，就 RAMS 评估的常用方法、外部电力系统对高速铁路供电的可靠性评估、高速铁路牵引变电站对电力系统的接入、牵引变电站主接线及 10 kV 电力供电系统的可靠性评估、接触网设备及系统的可靠性评估、接触网系统预防性维修计划的多目标优化、基于风险理论的牵引供电系统安全性评估等问题进行了系统的总结和介绍，是该书作者们长期研究工作的总结。该书是我国第一部系统地阐述高速铁路供电系统 RAMS 评估理论的学术专著。

这部专著的写作特点是理论结合实际，专著的作者在系统介绍高速铁路供电系统 RAMS 评估理论的同时，还介绍了他们将理论研究成果应用于我国第一条高速铁路京津城际的可靠性评估和精细化维修的成果，以及所提到的极具工程实用价值的建议。相信这些研究成果及其在我国高速铁路上的推广应用，一定会对高速铁路的安全可靠运行起到积极的推动作用，有助于将我国高速铁路供电系统的可靠性、可用性、可维护性和安全性提高到一个新的水平，使我国真正进入高铁强国的行列。

这部著作具有理论上的系统性和工程上的实用性，不仅是一部高速铁路供电系统

RAMS 评估理论的基础性读物，而且对于专门从事该领域研究工作的读者来说也是一部具有相当高参考价值的学术专著，读者可以从中了解到该领域的最新成果，并以此为起点，进行更深入的研究。

我衷心祝贺专著作者取得的丰硕学术研究成果，并预祝他们将来取得更大的成就。

A handwritten signature in black ink, appearing to be '李锐' (Li Rui), written in a cursive style.

中国科学院院士
华中科技大学教授
2012 年 8 月

前言

铁路作为国民经济大动脉，是国家的重要基础设施，对促进经济社会发展、实现我国全面建设小康社会宏伟目标具有重要意义。为适应全面建设小康社会的目标要求，铁路网要扩大规模，完善结构，提高质量，快速扩充运输能力，迅速提高装备水平。从1997年至今，铁路实施了六次大面积提速。2004年1月，国务院批准了我国铁路史上第一个《中长期铁路网规划》，确定到2020年，我国铁路营业里程将达到10万km，其中客运专线1.2万km，复线率和电气化率均达50%。2008年8月1日，京津城际高速铁路投入运营，线路全长120km，最高运营速度达到350km/h，是我国第一条真正意义上的高速铁路，也是目前世界上运营速度最高的铁路。2009年12月26日武广高铁开通运营。2008年4月18日京沪高铁开工建设，2011年6月3日正式投入运营，线路全长1318公里，是新中国成立以来一次建成里程最长、投资规模最大、技术标准最高的高速铁路。“十一五”期间，铁道部迈进了引进、消化、吸收、再创新的具有中国特色的高速铁路跨越式发展的道路，投入运营的高速铁路已达到8358km，成为世界上最大的高速铁路网络，在建的高速铁路有1万多km，到2012年将建成12500km的高速铁路，其中时速250km的高速铁路6000km，时速350km的高速铁路6500km，建成京哈、京沪、京广、沿海通道、沿江通道、沪昆通道、东陇海、青太等高速铁路构成“四纵四横”高速铁路网的基本构架，城际高速铁路覆盖环渤海、长三角和珠三角经济圈。

在我国高速铁路实现跨越式发展的同时，高速铁路的故障频发，也引起了全社会高度关注。武广高铁在开通的第一年里就发生了8次故障，其中4次是供电系统的故障。特别是2011年初湖南、湖北普降暴雪，武广高铁减速运行，1月19日和23日因暴雪两次导致供电系统故障。2011年7月10日至14日，刚开通运营不到半个月的京沪高铁在5天时间内连续发生4次事故。更为严重的是，7月23日20时50分，甬温线永嘉至温州南区间，供电系统遭雷击接触网停电，使D3115次列车失去动力临时停车，而后信号系统发生故障，D301次列车与D3115次列车发生追尾，导致6节车厢脱轨，事故造成40人遇难，192人受伤，酿成了震惊中外的“7.23”甬温线特大铁路交通事故。这些事故的发生大多与供电系统故障有着直接或间接的联系。据铁道部运输局对全国2万km电气化铁路运营事故调查统计的结果表明，因牵引供电系统和电力供电系统发生故障导致铁路运营中断的事故，占所有事故的一半以上。高铁频繁发生的故障告诉我们，我们在高速铁路特别是供电系统的安全运营和安全保障技术方面还有很大的提升空间，高速铁路供电系统的可靠性和安全性的研究不但非常必要，而且具有很强的紧迫性。

RAMS是可靠性(Reliability)、可用性(Availability)、可维护性(Maintainability)和安全性(Safety)四个英文单词首字母的组合。可靠性的定义是指，系统或部件在指定的条件下，在一定时间内完成指定功能的能力。可用性的定义是指，在所需外部条件已经全部

满足的前提下,某产品或系统在给定的条件和给定时间间隔内,完成所要求功能的能力。可维护性的定义是指,在给定的条件下,按照指定的程序并使用给定的资源进行维护工作的前提下,可在指定的时间间隔内完成指定维护工作的可能性。安全性的定义是指,没有无法接受的伤害的风险。国外对高速铁路的可靠性和安全性的研究非常重视,最早有关铁道可靠性和安全性的国际标准是 EN 50126:1999,现在该标准已上升为《铁路应用:铁道可靠性、可用性、可维护性和安全性(RAMS)的规范和说明》(IEC 62278:2002)。作者曾有幸参加了我国第一条高速铁路京津城际的引进技术谈判。当看到西门子公司在投标书中拿出了全套京津城际 RAMS 设计和实施方案时,令作者大开眼界,也看到了我们在可靠性和安全性技术方面与国际先进水平之间的差距。在作者主持的国家自然科学基金项目“高速铁路牵引供电系统 RAMS 评估理论及其应用”(编号:60674005)的资助下,我们对高速铁路 27.5 kV 供电系统的牵引变电站和接触网,以及 10 kV 电力供电系统,在可靠性和可用性评估、维修策略的优化和安全性评估等方面开展了系统的研究,取得了一定的研究成果。本书就是在这些成果的基础上整理而成的。

本书主要内容包括 8 章:第 1 章是 RAMS 概述,阐述了本书的研究背景和意义,提出了高速铁路供电系统 RAMS 评估的主要研究内容和目标;第 2 章是 RAMS 评估的常用方法介绍;第 3 章是外部电力系统对高速铁路牵引供电的可靠性评估,考虑牵引供电系统的特殊性,提出并推导了外部电源供电可靠性评估指标和灵敏度表达式,开发了两种快速削负荷算法,并通过算例对评估指标和算法的有效性进行了验证;第 4 章是高速铁路牵引变电站接入电力系统的电压等级研究,从接触网电压损失、三相电压不平衡度和谐波等方面,详细分析了普速电气化铁路和高速电气化铁路接入电力系统时,对电力系统短路容量的要求和对其造成的影响,讨论了电气化铁路接入电力系统的电压等级问题,给出了牵引变电站接入点电压等级选择的理论依据和建议,为高速铁路的规划决策和电网的配套建设提供了理论参考;第 5 章是牵引变电站主接线及 10 kV 电力供电系统的可靠性评估,提出了电气主接线和电力供电系统的可靠性评估指标,运用邻接节点矩阵法搜索故障模式,通过故障后果分析制定牵引供电系统的故障判据,评估了京津客运专线的牵引变电站主接线和电力供电系统的供电可靠性;第 6 章是接触网设备及系统的可靠性评估,对高速铁路接触网设备缺陷和故障及其处理措施进行了分类统计,针对京津客运专线开通以来的故障数据进行可靠性建模和寿命分析,为维修策略多目标优化研究奠定了理论基础,本章还给出了京津城际接触网精细化维修辅助决策管理系统的实例;第 7 章为接触网系统预防性维修计划的多目标优化,建立了周期预防性维修方式下接触网设备和系统的动态可靠性模型和维修费用模型,提出了一种新的混沌自适应进化算法求解系统平均可靠性—维修费用的双目标优化问题,算例结果验证了该算法在最优解分布的完整性、多样性和工程策略的选取方面优越性显著;第 8 章为基于风险理论的高速铁路供电系统安全性评估,建立了大风、覆冰和雷击等极端恶劣天气下供电系统风险评估的指标体系,用严重程度函数表征接触网各区段实时载荷风险,用雷击跳闸率和行车密度来评估雷击停运风险,分析了牵引供电系统的风险评估层次,提出了基于层次分析理论和灰度最大关联度法的风险定量评估方法,最后通过 RBTS 系统的供电风险综合评估验证了该方法的有效性,为高速铁路供电系统综合风险的实时定量评估和早期故障预警奠定了理论基础。

本书的主要研究成果都是在本人的指导下,由我和我的学生们共同完成的。在研究过程

中和本书的撰写过程中，他们也付出了艰巨的劳动，做出了重要的贡献。可以说，没有他们的付出，要取得这些成果和完成本书的出版几乎是不可能的。各章的编写人员如下：第1章和第2章由吴俊勇撰写，第3章由杨媛和吴俊勇撰写，第4章由张小瑜和吴俊勇撰写，第5章由杨媛、谢将剑、刘海军和吴俊勇撰写，第6章由杨媛、李雪和吴俊勇撰写，第7章由杨媛、刘晓民和吴俊勇撰写，第8章由杨媛、王勇喆和吴俊勇撰写。全书由吴俊勇统稿。

在本书的编写过程中，华中科技大学程时杰院士，铁道部第三勘察设计院蒋先国，铁道科学研究院张继元，华北电力大学韩民晓，北京交通大学吴命利、刘明光、范瑜、王毅、刘小青、和敬涵等专家和专业人士对本书中相关课题的研究都提出了很多建设性的意见和建议，在研究过程和本书的撰写中还得到了博士生吴燕、田建伟、徐敏杰、宋洪磊、冀鲁豫和硕士生周东鹏、吴林峰、张西鲁、贺电、黄鹏洲、杜明军、高立志、刘印磊、夏冬、余淑琴、徐伟艳、胡艳梅等给予的诸多帮助，在此一并表示感谢。

本书适合铁道电气化、电气工程、可靠性工程等领域的专业人士和大中专院校的学生阅读，也可作为铁道规划、勘察、设计、运营、铁路变电和供电、接触网维护等技术人员的参考书。

限于作者水平，书中难免有疏漏与不足之处，请读者批评指正。

北京交通大学

吴俊勇

2013年12月

目 录

序

前言

第1章 RAMS 概述..... 1

1.1 研究背景及意义 1

1.1.1 我国高速铁路发展现状 1

1.1.2 高速铁路供电系统的特点 2

1.1.3 RAMS 的定义与标准 8

1.1.4 高速铁路供电系统 RAMS 评估的主要研究内容 9

1.1.5 高速铁路供电系统 RAMS 评估研究的意义 10

1.2 国内外 RAMS 评估的研究 现状..... 12

1.2.1 系统可靠性评估的研究现状 12

1.2.2 以可靠性为中心的维修研究 现状 14

1.2.3 安全性评价的研究现状 16

1.2.4 高速铁路供电系统 RAMS 评估理论研究现状 17

1.3 本书的章节安排及逻辑关系..... 20

第2章 RAMS 评估的常用方法 23

2.1 RAMS 的基本概念 23

2.1.1 可靠性的基本概念 23

2.1.2 可用性的基本概念 26

2.1.3 可维修性的基本概念 26

2.1.4 安全性的基本概念 28

2.2 简单串并联系统的可靠性 分析..... 28

2.2.1 简单串联系统 28

2.2.2 简单并联系统 29

2.3 蒙特卡罗 (Monte - Carlo) 仿真法..... 29

2.3.1 蒙特卡罗方法的概率收敛性 29

2.3.2 蒙特卡罗方法的误差及其改进 ... 30

2.3.3 蒙特卡罗仿真法的实施步骤 31

2.4 故障树分析法 (FTA) 32

2.4.1 故障树分析法的基本概念和 常用符号..... 32

2.4.2 故障树分析的步骤 34

2.4.3 故障树的定性分析 35

2.4.4 故障树的定量分析 36

2.5 故障模式、影响及危害度分析 (FMECA) 39

2.5.1 FMECA 中的常用术语 39

2.5.2 故障模式、影响分析 (FMEA) 40

2.5.3 危害性分析 (CA) 42

2.6 本章小结..... 45

第3章 外部电力系统对高速铁路 供电的可靠性评估 46

3.1 外部电力系统供电可靠性评估 解析模型..... 46

3.1.1 时序蒙特卡罗法模拟外部电力 系统评估状态 46

3.1.2 外部电源供电可靠性评估指标 体系及灵敏度分析 47

3.2 基于交流潮流的启发式就近 削负荷可靠性评估..... 52

3.2.1 算法原理..... 52

3.2.2 程序框图及实现 53

3.3 基于直流潮流的灵敏度削 负荷可靠性评估..... 56

3.3.1 算法原理..... 56

3.3.2 程序框图及实现 62

3.4	IEEE - RTS 79 算例分析	64	5.2.4	任意网络最小割集计算程序 设计	89
3.4.1	网络结构及评估状态生成	64	5.3	FMECA 分析牵引变电站主接 线故障判据	89
3.4.2	供电可靠性指标及灵敏度分析	65	5.4	京津客运专线牵引变电站主接 线的可靠性评估	90
3.5	本章小结	67	5.5	京津客运专线 10 kV 电力供电 系统的可靠性评估	93
第 4 章	高速铁路牵引变电站接入 电力系统的电压等级	69	5.6	本章小结	97
4.1	牵引供电系统的组成和供电 方式	69	第 6 章	接触网设备及系统的可靠性 评估	99
4.1.1	牵引供电系统组成	70	6.1	设备可靠性分布参数拟合及 检验方法	99
4.1.2	牵引供电方式	70	6.1.1	设备可靠性分布参数拟合	99
4.1.3	单边和双边供电	72	6.1.2	拟合结果的优度检验	101
4.2	电气化铁路的负荷特性和 牵引变压器	73	6.2	系统概述及设备故障分类	102
4.2.1	电气化机车负荷	73	6.2.1	高速铁路接触网系统设备 概述	102
4.2.2	牵引变电所负荷特性	74	6.2.2	接触网设备缺陷 (故障) 及 处理措施分类	103
4.2.3	高速铁路的负荷特性	75	6.3	京津城际接触网精细化维修 辅助决策管理系统	105
4.2.4	常用的牵引变压器	75	6.3.1	系统总体结构	105
4.3	接触网电压损失的计算	76	6.3.2	各功能模块介绍	106
4.4	三相电压不平衡度的计算	78	6.3.3	京津城际接触网各工区故障 统计结果	121
4.5	谐波的计算	78	6.3.4	故障规律与维修建议	133
4.6	计算结果与分析	80	6.4	京津客运专线接触网系统的 可靠性评估	133
4.6.1	接触网最大电压损失	80	6.4.1	各工区接触网设备运行情况 及检修方式概述	133
4.6.2	三相电压不平衡度	81	6.4.2	设备运行缺陷数据统计	135
4.6.3	谐波	82	6.4.3	关键设备的可靠性建模	138
4.7	本章小结	83	6.4.4	系统的可靠性评估	141
第 5 章	牵引变电站主接线及电力 供电系统的可靠性评估	84	6.5	本章小结	143
5.1	可靠性评估指标	84	第 7 章	接触网系统预防性维修计划 的多目标优化	144
5.1.1	牵引变电站主接线的可靠性 评估指标	84	7.1	周期预防性维修活动下的接触 网系统可靠性模型	144
5.1.2	10 kV 电力供电系统的可靠性 评估指标	86			
5.2	最小割集的基本理论与搜索 方法	86			
5.2.1	网络割集的若干定义	86			
5.2.2	系统 n 阶割集的搜索与概率 计算	87			
5.2.3	邻接终点矩阵算法搜索最小 割集原理	88			

7.1.1 设备动态可靠性及故障率 模型	144	8.2.1 接触网系统风偏值的建模与 计算	169
7.1.2 系统动态可靠性与维修费用 模型	147	8.2.2 接触网系统冰载荷的建模与 计算	170
7.2 多目标优化方法和关键问题 ...	148	8.2.3 接触网系统的合成负载	171
7.2.1 多目标优化问题描述	148	8.2.4 雷电参数和雷击跳闸率	172
7.2.2 多目标进化算法 (MOEAs) 及其关键理论	149	8.2.5 雷击跳闸率的计算与验证	173
7.3 可靠性—维修费用多目标维修 计划的优化	152	8.2.6 考虑风偏覆冰和雷击的接触网 系统运行风险评价	178
7.3.1 优化问题描述	152	8.3 基于层次分析法和灰度关联度法 的牵引供电系统风险评估	181
7.3.2 混沌自适应进化算法	153	8.3.1 层次分析理论计算风险指标 权重	181
7.4 京津客运专线接触网周期性 预防维修计划的多目标优化 ...	157	8.3.2 灰度最大关联度法定量评估 牵引供电系统供电风险	186
7.4.1 与 NSGA-II 算法结果比较 ...	158	8.3.3 牵引供电系统风险评估的层次 分析模型	188
7.4.2 优化结果及维修计划的选择 ...	161	8.4 恶劣天气下 RBTS 对某高速 铁路的供电风险综合评估	189
7.5 本章小结	163	8.4.1 RBTS 对高速铁路供电风险 评估	191
第 8 章 基于风险理论的牵引供电 系统安全性评估	164	8.4.2 接触网系统的运行风险评估 ...	194
8.1 恶劣天气下外部电源的供电 风险评估	165	8.4.3 牵引供电系统风险评估	196
8.1.1 恶劣天气下电力系统输电线 的故障率建模	165	8.5 本章小结	199
8.1.2 恶劣天气下外部电源供电 风险指标	167	附录 A IEEE-RTS 79 系统	201
8.1.3 评估方法及过程	168	附录 B 高速铁路接触网设备故障 (缺陷) 及处理措施	204
8.2 考虑大风覆冰和雷击的接触网 系统运行风险评估	169	参考文献	214

第1章

RAMS 概述

1.1 研究背景及意义

1.1.1 我国高速铁路发展现状

铁路作为国民经济大动脉，是国家的重要基础设施，其发展对促进经济社会发展，实现我国全面建设小康社会宏伟目标有重要意义。为适应全面建设小康社会的目标要求，铁路网要扩大规模，完善结构，提高质量，快速扩充运输能力，迅速提高装备水平。自1997年至今铁路实施了六次大面积提速。2004年1月，国务院批准了我国铁路史上第一个《中长期铁路网规划》，确定到2020年，我国铁路营业里程将达到10万km，其中客运专线1.2万km；复线率和电气化率均达50%^[1]。

高速铁路是指具有高加速和高减速性能及对列车运行进行自动控制，时速在200km以上的铁路。作为一种安全可靠、快捷舒适、超大运量、低碳环保的运输方式，高速铁路已经成为世界铁路发展的重要趋势，是解决客运供需矛盾的重要手段之一。与其他运输方式相比，高速铁路具有全天候、安全好、运能大、速度快、耗能低、污染轻等优点。从20世纪初至50年代，德、法、日等国都开展了大量的有关高速列车的理论研究和试验工作。铁路高速技术至60年代已进入实用阶段，80年代又取得了一系列新突破，90年代后进入建设与发展的新时期。例如，日本的新干线于1964年投入运用，法国的高速列车TGV于1981年开始运行，意大利的摆式列车在1988年连接了米兰和罗马，德国的高技术ICE列车在1961年6月正式通车，等等^[2]。法国的高速列车TGV于2007年创造了578.4km的最高测试时速。2010年12月，第七届世界高速铁路大会宣布，全球投入运营的高速铁路已近2.5万公里，分布在中国、日本、法国、德国、意大利等17个国家和地区。

2007年4月18日，通过区间半径的改造，路、桥、隧道的加固和改造，提速道岔的更换，以及列车提速系统装备、客运设施、跨线设施和相关检修设施的提升，在京哈、京沪、京广、京九、陇海、沪昆、兰新、广深、胶济等18条既有干线上成功实施了第六次大面积提速。提速以后既有线列车最高运营速度提高到了200km/h，部分区间达到了250km/h，全国铁路时速200km及以上线路里程达到6003km，其中速度250km/h的线路延展长度达到840km。具有自主知识产权的国产系列时速250km和谐号动车组成功应用于铁路第六次大面积提速。截至2008年底，时速250km和谐号动车组已投入运营140余列，它采用动力分散方式，可以两

端驾驶。开行列车型号分别是 CHR1 型、CHR2 型、CHR3 型、CHR5 型。

2008 年 8 月 1 日, 京津城际铁路投入运营, 最高运营速度达到 350 km/h。全长 120 km, 其中 87% 为桥梁工程, 采用公交化城际列车和跨线列车混合开行的运输组织模式, 全程运行时间在 30 min 内, 列车最小追踪间隔 3 min。京津城际铁路开行具有自主知识产权的时速 350 km CHR3 型和 CHR2-300 型和谐号动车组, 在高架桥梁线路设计、无砟轨道、无缝线路、列车运行控制、节能环保、安全防灾和舒适性设计等方面取得了大量创新, 并实现了成套装备国产化, 基本形成由高速列车、工务工程、牵引供电、运行控制、客运服务、运营调度等子系统构成的高速铁路技术体系, 标志着我国高速铁路建设跨入世界先进行列。

2008 年 4 月 18 日, 京沪高速铁路全面开工建设, 作为国家“十一五”期间规模最大的基础设施建设项目, 是中国高速铁路建设的重点项目。技术方面, 京沪高铁需要克服区域跨度、持续运营速度、运输需求、运营维护、节能环保、安全防灾等方面的诸多挑战。2010 年 11 月 15 日, 京沪高铁全线铺通, 标志着以线下工程和铺轨为主的站前工程全部结束, 全力推进以牵引供电、通信、信号、电力“四电集成”施工和站房建设为主的站后工程施工, 展开全线联调联试。2010 年 12 月 3 日, 在京沪高铁枣庄至蚌埠间的先导段联调联试和综合试验中, 国产 CRH380A 新一代高速动车组最高运行时速达到 486.1 km。这是继 9 月 28 日沪杭高铁试运行创下时速 416.6 km 之后, 中国高铁再次刷新世界铁路运营试验最高速度记录。作为京广高速铁路的重要组成部分, 武广铁路已于 2009 年 12 月 26 日开通运营。

“十一五”期间, 铁道部走出了引进、消化、吸收、再创新的中国式高速铁路发展的道路。运行的高速铁路已达到 8 358 km, 成为世界上最大的高速铁路网络, 在建的高速铁路有 1 万多 km, 到 2012 年将建成 12 500 km 的高速铁路, 其中时速 250 km 的高速铁路 6 000 km, 时速 350 km 的高速铁路 6 500 km, 建成京哈、京沪、京广、沿海通道、沿江通道、沪昆通道、东陇海、青太等高速铁路, 构成“四纵四横”高速铁路网的基本构架, 城际高速铁路覆盖环渤海、长三角和珠三角经济圈。到“十二五”末, 铁路新线投产总规模控制在 3 万 km, 全国铁路运营里程将增加到 12 万 km 左右。其中, 快速铁路 4.5 万 km 左右, 西部地区铁路 5 万 km 左右, 复线率和电化率分别达到 50% 和 60% 以上。

中国高速铁路的快速发展, 提升了中国铁路现代化的水平和铁路运输保障的能力, 有效地缓解了铁路运力不足对经济社会发展的严重制约, 有利地带动了装备制造、新材料研发, 以及各类服务业的快速发展; 在促进技术创新, 产业结构优化升级, 减少土地占用, 节能减排, 改善民生等方面, 发挥了重要的作用, 取得了良好的经济和社会效益。《中长期铁路网规划(2008 年调整)》规划到 2020 年将建成 16 000 km 时速 250 km 以上的高速铁路, 铁路“瓶颈”制约基本消除, 铁路对经济社会发展的保障能力明显增强。铁路在综合交通骨干地位的作用进一步突显, 为国家节能减排、建设资源节约型和环境友好型社会发挥重要作用。

1.1.2 高速铁路供电系统的特点

高速铁路供电系统分为牵引供电系统和电力供电系统两部分, 其中牵引供电系统(Traction Power Supply System, TPSS)的主要功能是从外部电力系统获取电能(AC220 kV 或 AC330 kV), 通过牵引变电所变压为适合电力机车运行的电压制式(AC25 kV 或 $AC2 \times 25$ kV), 然后通过接触网将电能连续传送给高速动车组。铁路电力供电系统从公共电网获取电能, 通过铁路沿线的 10 kV 贯通线向沿线的信号基站、远动操动机构和车站供电。

1. 高速铁路的运行特点

按照 2008 年世界高速铁路大会的定义, 高速铁路必须具备三个条件: 新建的专用铁路、时速 250km 动车组列车、专用的列车控制系统。中国的客运专线和城际铁路就是典型的高速铁路。高速铁路具备速度快、安全可靠、经济实惠和运载量大四大优势。在运行方面, 我国的高速铁路具备两大突出特点。

1) 列车功率大

在采用 CRH 系列动车组之前, 我国拥有 SS3、SS4、SS6、SS7、SS8、SS9 等交传动电力机车和“春城”号、“大白鲨”号交传动电动车组。之后研制出来的交直传动电动车组有动车分散型的“中原之星”号和“先锋”号、动力集中型的“蓝剑”号和“中华之星”号, 编组车辆数较少、载客量少、轴重大、速度一般在 200 km/h 以下 (中华之星 270 km/h)。功率较小, 单机功率一般为 4 800 kW 或 6 400 kW。

现在客运专线采用的 CRH 系列动车组, 250 km/h 长编组动车组功率一般为 $2 \times 5\,500$ kW, 350 km/h 长编组动车组功率一般为 $2 \times 8\,800$ kW/9 600 kW。

试验表明空气阻力与列车的运行速度平方成正比, 机械阻力与速度一次方成正比。列车运行阻力可以表示为

$$\omega_0 = a + b \times v + c \times v^2 \quad (1-1)$$

式中, ω_0 为列车运行基本阻力; v 为列车速度; a, b, c 为常数。

时速 200 km 动车组的阻力公式表示为

$$\omega_0 = 1.65 + 0.000\,1v + 0.000\,117\,9v^2 \quad (1-2)$$

列车牵引功率一般是指在平直道上以目标速度运行时所具备的功率, 同时还需要具备一定的加速能力。列车牵引功率的计算模型为

$$P_k \geq P[\omega_0 \times g \times 10^{-3} + a(1 + \gamma)] \times v \times 1\,000 / 3\,600 \quad (1-3)$$

式中, v 为列车速度 (km/h); P_k 为列车功率 (kW); P 为列车牵引质量 (t); a 为列车剩余加速度 (m/s^2); γ 为回转质量系数; ω_0 为单位运行阻力 (N/kN)。

在高速区段, 列车需要功率可认为与速度的 3 次方成正比。

图 1-1 为列车牵引功率和列车速度关系曲线。

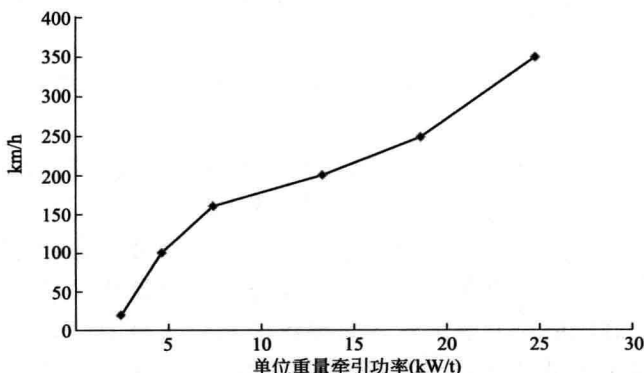


图 1-1 列车牵引功率和列车速度关系曲线

2) 行车密度大

普速铁路列车最小追踪间隔一般为 6 min, 高速铁路的最小追踪间隔为 3 min, 高速铁路

列车对数也多,如武广客专有些区段客车设计对数达到 216 对之多。

2. 考虑供电质量下的高速铁路牵引供电系统特点

与普通的客货共线铁路相比,我国高速铁路具有高密度、长编组等特点,高速铁路的电力牵引负荷较大。16 辆编组动车组以时速 350 km、间隔 3 min 运行时,牵引变电所负荷高峰时可达 130 MVA,瞬时可达 170 MVA^[3]。为保证供电可靠性,满足高速铁路在运行时速和追踪间隔方面的要求,以及综合考虑对电力系统产生的高次谐波和负序,与普速电气化铁路相比,高速铁路牵引供电系统具有以下特点。

1) 牵引供电外部电源电压等级

电力牵引负荷按一级供电负荷设计,牵引变电所由两路独立 220 kV 或 330 kV 电源供电,互为热备用。

为满足最高时速 350 km 的电动车组和 3 min 追踪运行间隔的牵引负荷要求,其功率需求将达到 1.5~2.0 MW/km,每座牵引变电所主变压器安装容量应达到 63~100 MVA。从牵引负荷的需用功率与电力系统输送功率匹配来看,牵引变电所的外部电源宜采用 220 kV 或 330 kV。这样可以提高整个电力系统的经济运行指标,保证牵引供电系统具有较高的供电质量,改善电气化铁道对电力系统的负序和谐波的影响,使系统具有更大的负序承受能力,减少电压畸变,从而保证牵引供电系统具有较高的安全可靠性能。

2) 牵引变压器结线和供电方式

从供电质量的要求及变压器的容量利用率、节约能源、降低运营费用的角度考虑,目前我国高速铁路牵引变压器多采用单相结线与三相一两相平衡变压器。

单相结线变压器的优点为变压器容量利用率高,一次设备简单,有利于动车组再生制动时产生电能的内部平衡消耗;接触网电分相数量较其他形式减少一半,有利于动车组的高速运行。但其产生负序较大,对电力系统短路容量高;超大容量的单相结线变压器(80 MVA 以上)尚无成熟设备,且二次侧电流较高,断路器、隔离开关及母线等设备选用较为困难。而三相 V 接变压器恰恰弥补了上述缺点。

结合我国高速铁路需求,近期牵引变压器接线优先采用单相结线;但在安装容量较大的牵引变电所预留三相 V 结线条件,电力系统短路容量小或变压器安装容量大的,采用 V 结线形式。

Scott 变压器是一种典型的三相 V 接变压器,典型的 Scott 变压器结线牵引供电系统结构示意图如图 1-2 所示。

图中 TPS 表示牵引变电所,它采用 Scott 变压器接线方式;T、R、F 分别表示牵引网的接触线、钢轨和正馈线;DK 表示分相绝缘器(图中共有 10 个,仅 2 个有标号)。为了改善三相不平衡状况,变电所一次侧采用换相连接。各供电臂之间采用分相绝缘器分隔。

牵引供电系统供电方式根据负荷大小、线路条件及外部电源等因素确定。从保证动车组供电电压水平和载流能力要求来看,只要供电系统设计合理,带回流线的直接供电方式和自耦变压器供电方式均能满足高速铁路需要^[4]。在国外,除德国高速铁路采用带加强线的直供带回流供电方式外,日本、法国和西班牙高速铁路均采用 2×25 kV 的 AT 供电方式。

图 1-3 所示为 AT 供电方式下 Scott 变压器在牵引变电所内部的接线原理图^[5]。

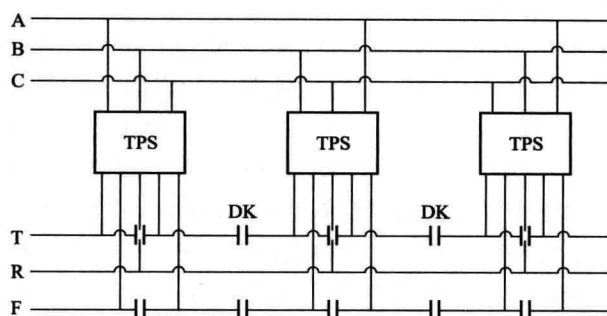


图 1-2 牵引供电系统 AT 供电方式

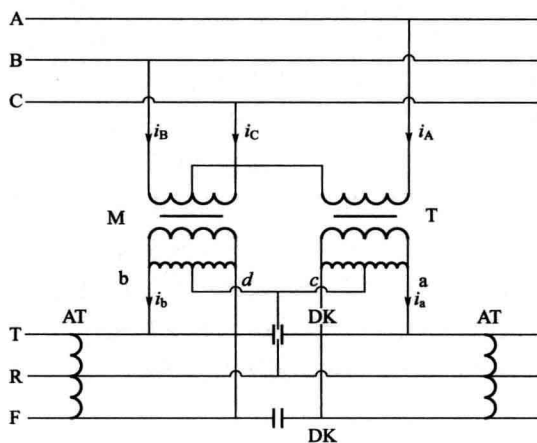


图 1-3 Scott 变压器在牵引变电所内部的接线原理图

这种供电方式的优点如下。^[4]

(1) 牵引网阻抗小，约为 BT（吸流变压器）供电方式牵引网阻抗的 $1/4$ 左右，从而提高了牵引网的供电能力，大大减小了牵引网的电压损失和电能损失。牵引变电所间距可进一步增大，减小变电所数量，降低投资；经分析和试验表明，AT 供电方式对邻近通信线的综合防护效果优于 BT 供电方式^[7]。

(2) 无须在 AT 处实行电分段，故有利于高速、重载列车顺利通过。

(3) 当变电所 2 个供电臂负荷完全相同时，系统三相完全平衡。也就是说，当 $\dot{i}_a = j\dot{i}_b = I$ 时，则

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_A \\ \dot{i}_B \\ \dot{i}_C \end{bmatrix} = \frac{2I}{\sqrt{3}K_M} \begin{bmatrix} 1 \\ e^{-j120^\circ} \\ e^{-j240^\circ} \end{bmatrix} \quad (1-4)$$

式中， $K_M=110/55$ 为 M 座变压器变比。

为适应高速度、高密度、大功率的需要，国内在建 $300 \sim 350$ km/h 客运专线铁路均采用 AT 供电方式，在建 $200 \sim 250$ km/h 客货共线铁路以采用 AT 供电方式为主。鉴于 AT 供电方式具有高电能传输的能力，同时可降低对接触悬挂载流量的要求和减轻牵引网电流密

度,有利于大运量客运专线接触网的轻型化和系统匹配设计。铁道部铁集成函[2007] 273号文中规定“构建时速200~250公里、300~350公里客运专线技术平台和技术体系,优先采用220 kV进线电源、AT供电方式”。《高速铁路设计规范(试行)》(TB/ 10020—2009)中11.2.3规定“正线牵引网宜采用 2×25 kV供电方式;枢纽地区跨线列车联络线、动车组走行线和动车段(所、场)等可采用 1×25 kV供电方式”。以2008年建成的京津客专为例,正线及天津站城际场采用单相工频交流AT供电方式供电;北京南站采用带回流线直接供电方式供电。正常情况下牵引变电所通过4个供电臂向两侧上、下行区间供电,特殊情况下具备相邻变电所越区供电条件。已实施的武广、郑西、合武、合宁客运专线正线均采用 2×25 kV供电方式。

3) 越区供电

与电力系统配电网相比,牵引供电系统最突出的特点是能够实现越区供电。以AT供电方式为例,牵引供电设施由变电所、分区所、AT所、开闭所(分区所兼开闭所、AT所兼开闭所)。变电所间距一般为50~80 km(视负荷大小而定),变电所和分区所之间设有1个或2个AT所(视供电臂长度而定,AT间距一般为10~15 km)。牵引变电所出口附近接触网设有电分相,负荷电流经钢轨、回流线、大地最终流回牵引变电所。如图1-4所示,正常时一个变电所(图中TPS2)对其左右A、B供电臂供电,当该变电所(TPS2)停电时,其相邻变电所(TPS1、TPS3)将通过分区所分别对故障变电所(TPS2)的A、B两供电臂进行越区供电。分区所是实现越区供电的关键设施,正常供电情况下,分区所用于实现上下行接触网并联运行;越区供电情况下,分区所用于实现其左右供电臂的串联运行(此时分区所处的上下行接触网一般不再并联)。高速铁路牵引供电系统中AT所需具备上下行并联供电运行条件。

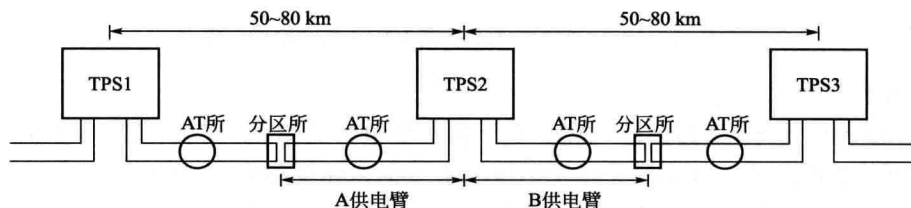


图 1-4 AT 供电方式牵引供电设施分布示意图

4) 变电子系统主接线及电气设备选用

高速铁路变电子系统设计原则为:具有较高的可靠性、集成化及自动化程度,优化主接线设计和设备选型,减少占地面积、节约能源和提高设备防灾水平。

变电所电源侧接线方式采用线路变压器组或线路分支接线,二次侧母线采用单母线分段接线;电源侧高压设备优先采用室外布置设计、单体设备,在地形困难或重污秽地区及主要城市可采用气体绝缘组合电器(GIS);时速300 km及以上高速铁路的27.5 kV配电装置采用无维修的220 kV SF₆气体绝缘开关柜(GIS),分区所、开闭所、AT所除AT变压器外采用箱式布置。

变电子系统的各所配备具有远动终端功能综合自动化系统、安全监控系统,实现变电设施的自动化、远动化和无人值班;各所设置独立的接地网,并纳入综合接地系统。