

apqi ASIA
POWER
QUALITY
INITIATIVE

“十二五”国家重点图书出版规划项目

现代电能质量技术丛书

电气化铁路供电系统 及其电能质量控制技术

亚洲电能质量联盟中国合作组 组编
李群湛 解绍锋 张丽 张丽艳 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

现代电能质量技术丛书

电气化铁路供电系统 及其电能质量控制技术

亚洲电能质量联盟中国合作组 组编
李群湛 解绍锋 张丽 张丽艳 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

以谐波、负序为主的电气化铁路电能质量问题一直是被关注的重点。本书在介绍电气化铁路牵引供电系统的基础上,对电气化铁路电能质量进行了分析并对其控制技术进行了介绍,最后提出电气化铁路新型供电技术。

本书适合从事电气化铁路和电能质量工作的研究人员和工程技术人员阅读,也可对其他对该领域感兴趣的读者提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

电气化铁路供电系统及其电能质量控制技术 / 李群湛等编著; 亚洲电能质量联盟中国合作组组编. —北京: 中国电力出版社, 2015.12

(现代电能质量技术丛书)

ISBN 978-7-5123-8540-5

I. ①电… II. ①李… ②亚… III. ①电气化铁道—供电系统—电能—质量控制—研究 IV. ①U223.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 263581 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 12 月第一版 2015 年 12 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 12.5 印张 161 千字

印数 0001—3000 册 定价 50.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

丛书前言

电能质量问题近年来受到更多的关注。究其缘由，想来有三：第一，大量的非线性和冲击性负荷的广泛应用，对供电系统电能质量造成了严重的污染，恶化了电气设备的电磁环境；第二，以微电子控制技术为核心的高度自动化和智能化设备极其敏感，抗扰度能力不足，对电能质量的要求越来越高；第三，伴随行业的发展，相关组织和单位举办了各类交流会议以及展览，吸引大量媒体关注报道电能质量。在这样的大背景下，电能质量问题从冷门慢慢热了起来。

行业的健康发展，离不开理论的指导和技术经验的交流分享。但是，国内关于电能质量的书籍不是很多，系列丛书更是没有。基于这样的现状，亚洲电能质量联盟中国合作组（简称合作组）发起编写“现代电能质量技术丛书”，这个倡议当时获得了业内很多专家学者的支持。大家共同推选了林海雪教授担当丛书的牵头人，中国电力出版社也欣然应允出版这套丛书，并作为重点图书报送国家新闻出版总署（现为国家新闻出版广电总局），获批列入“‘十二五’国家重点图书出版规划项目”。原计划两年内完成的这套丛书，因多位作者身体抱恙，直至今天才最终陆续付梓，真是好事多磨。


姗姗来迟的这套丛书，从不同的维度介绍了电能质量，以及相应的

测量与控制技术。以基本理论与方法为主的，有《电力系统中电磁现象和电能质量标准》和《电能质量数学分析方法》；以介绍现代测量与实用控制为主的，有《现代电能质量测量技术》和《电能质量实用控制技术》；还有以热点或新问题为主的，有《电气化铁路供电系统及其电能质量控制技术》、《分布式电源接入电网的电能质量》、《电网中电压暂降和短时间中断》、《电力系统直流干扰》及《交流配电系统的接地方式及过电压保护》。

这套丛书整体适合从事电能质量工作的工程师和管理人员作为理论和实践的指引，也适宜对于电能质量问题感兴趣的相关人士阅读，从不同的侧面了解电能质量问题及其影响。希望我们编著的这套丛书可以更好地促进电能质量知识及技能的传播，使读者有所收获，这也是合作组与作者最希望达到的效果。另外，丛书也将成为由合作组作为主办方之一，并由国家人力资源和社会保障部教育培训中心考核认证的“高级电能质量工程师”培训的指定参考书。

最后特别感谢美国国际铜专业协会对于亚洲电能质量联盟中国合作组编著丛书的大力支持，感谢牵头人林海雪教授多年来的辛勤工作，感谢所有丛书作者的认真与执著，感谢编辑们的耐心与信任，感谢丛书审稿专家们提出的建设性的意见和建议。亚洲电能质量联盟将继续努力耕耘，为读者带来更多的接地气的电能质量专著。

亚洲电能质量联盟秘书长 黄炜



本书前言

“十一五”是我国高速铁路飞速发展的五年。截至 2013 年底，中国铁路运营总里程突破 10 万 km，电气化铁路营业里程达 55 811km，其中 2013 年新开通电气化铁路 4810km，高速电气化铁路营业里程达 11 028km，其中 2013 年新开 1672km，成为世界上高速铁路投产运营里程最长的国家。目前，我国铁路电气化率达 59%，承担了全部运量的 76%。根据国务院批准的《中长期铁路网规划》（2004 年批准，2008 年调整），至 2020 年，我国铁路营运总里程将达到 12 万 km，电气化率 60%，其中高速铁路将达到 1.6 万 km。

众所周知，电气化铁路的单相牵引负荷相对于三相电力系统是一种不对称的非线性负荷，具有较强的波动性和随机性，对电力系统产生谐波、负序等不良影响。同时，牵引负荷属于一级负荷，要求较高的供电可靠性，因此是电力系统中比较特殊的用户。

现行普速铁路仍然使用的交一直型电力机车采用半控桥式整流装置，通过控制晶闸管的导通角来实现机车出力的调节，使得交一直型机车的功率因数较低，在 0.8 左右，电流波形和谐波含量随机车运行工况而调整的相控角的变化而改变，但主要是 3、5、7 等奇次谐波。现在大力发展的货运大功率电力机车和高速动车组采用交一直一交型主电路，功率因数大大提高，可接近 1，谐波含量也大大减小，但由于单车功率

更大，使牵引变电所负荷的单相不对称性增加，负序问题更为突出。

以谐波、负序为主的电气化铁路电能质量问题一直是被关注的重点。一方面，电气化铁路需要电力系统提供高质量、高可靠性的供电电源；另一方面，电气化铁路产生的电能质量问题又有新的变化。根据实测数据分析，电气化铁路对电力系统的电压波动与闪变以及频率的影响较小，因此在本书不作为详细内容介绍。本书是在参考《牵引供电系统分析》、《电气化铁路电能质量分析与控制》等著作的基础上，紧密结合电气化铁路电能质量实际以及相应电能质量指标控制技术现状与研究进展而撰写的，共分5章：第1章介绍我国电气化铁路的发展历程、现状及展望。第2章介绍电气化铁路牵引供电系统的构成与基本原理，讨论其内部供电方式和外部供电方式及其特点，重点讨论牵引变电所核心设备——牵引变压器的接线形式及电气量关系。第3章讨论电力系统作为电气化铁路电源以及电气化铁路作为电力系统的负荷，两者相互之间的约束——电能质量的要求，并结合电气化铁路实际情况，给出国家标准规定的相关电能质量指标的测量实例并加以分析，同时考虑到电力系统及其用户的随机性和不确定性，结合现场实测与国家标准，进一步讨论电能质量指标的预测评估方法。第4章阐述电气化铁路试验和应用的一些电能质量控制技术，并给出了工程实例。第5章讨论电气化铁路牵引供电新技术——同相供电和双边供电。

张丽艳重点负责第3章第1~4节和第6节，张丽重点负责第4章，解绍锋重点负责第3章第5节、第4章第6节的电压波动补偿装置部分，赵元哲负责第4章第6节的高通滤波器部分，贺建闽、郭锴、易东、马庆安、郭蕾、李亚楠也参与了本书的部分资料提供和整理工作。纳入本

书的一些研究成果得到了中国铁路总公司（原铁道部）、国家科技部、国家电网公司、南方电网公司等有关部门和单位的大力支持，同时得到了有关铁路设计院、铁路局等的大力支持，在此深表谢意。对引用的参考文献的作者和单位表示感谢。

因水平所限，书中难免存在不足之处，望同仁和读者不吝赐教，以便修订提高。

李群湛

2015年1月于成都九里堤

目 录

丛书前言

本书前言

1	绪论	1
1.1	发展电气化铁路的意义	1
1.2	国外电气化铁路发展概况	2
1.3	我国电气化铁路发展历程及现状	3
1.4	我国电气化铁路发展规划	4
1.5	电气化铁路供电与电能质量问题	5
2	电气化铁路牵引供电系统	8
2.1	概述	8
2.2	牵引供电系统的构成	13
2.3	电力系统对电气化铁路的供电方式	22
2.4	牵引变电所	28
2.5	牵引网的供电方式	40
3	电气化铁路电能质量分析	46
3.1	概述	46
3.2	电力系统电能质量标准	53
3.3	电气化铁路电能质量主要指标影响因素	73
3.4	电气化铁路电能质量实例分析	87

3.5	电气化铁路谐波分布与统计特征	93
3.6	电气化铁路电能质量预测	108
4	电气化铁路电能质量控制技术	116
4.1	概述	116
4.2	静止无功补偿器 (SVC)	118
4.3	静止无功发生器 (SVG)	122
4.4	电力有源滤波器 (APF)	124
4.5	机车改型升级	125
4.6	牵引变电所电能质量控制技术的应用案例	135
5	电气化铁路新型供电技术	153
5.1	概述	153
5.2	全交一直一交型同相贯通供电	154
5.3	牵引变电所组合式同相供电技术	157
5.4	双边供电技术	176
	参考文献	184

1.1 发展电气化铁路的意义

电气化铁路 (electric railway) 是采用电力牵引的铁路。在电气化铁路上, 由牵引供电系统向电力机车、动车组等电气列车供电。

电气化铁路发展很快, 已成为当今最现代化的铁路, 其主要特点是:

(1) 电力机车效率高。采用火力发电的效率是蒸汽机车的 4 倍; 采用水力发电, 效率为蒸汽机车的 10 倍。

(2) 单机功率大。电力机车本身不带原动机和燃料, 单位质量功率大, 与内燃机车和内燃动车相比, 在相同或相近的持续牵引力 (以单轴计) 下持续速度高一倍以上, 牵引相同质量的列车可以实现更高的额定最高速度 (或称最高运营速度), 而且恒功速度范围宽, 特别适合于干线铁路和繁忙干线铁路。

(3) 加速快、爬坡能力强。启动、制动的加、减速性能优越, 特别适用于高速、重载以及山区铁路。

此外, 电力机车不污染环境, 司机工作条件好, 旅客在旅途中也可免受蒸汽机车和内燃机车的煤烟和废气困扰。

电力机车这种多拉快跑的牵引特性, 能更充分地满足铁路运输对提高行车速度、增加列车质量和加大行车密度的综合要求, 从而更加有利于大幅度提高旅客运输的旅行速度和高附加值商品运输的送达速度; 组织煤炭、建材、粮食等大宗货物高效、快捷地重载直达运输; 发挥速度

优势,不断推出运输新产品,拓广铁路运输的营销范围,增强其在运输市场上的竞争实力。特别轨道交通与高速公路、航空运输协调发展的“运输走廊”,吸引大中城市间和市郊运输的大量客流转乘高速和快速电气列车,可以明显改善人们的旅行条件、缓解交通堵塞、减少大气污染、节省石油及土地等有限资源。这些超越企业效益的重大国民经济效益和社会效益在唤醒政府和社会对铁路公益性的再认识,为铁路发展获取资金和支持方面,起了重要的作用。

1.2 国外电气化铁路发展概况

1825年,世界上第一条铁路在英国建成。1842年,苏格兰人R.戴维森造出了世界上第一台标准轨距电力机车。1879年5月31日,德国柏林世界贸易博览会展出了德国人W.V.西门子设计制造的能乘18人的敞开式“客车”的电力机车,这是电力机车的首次成功试验。1881年,法国巴黎展出了第一条由架空导线供电的电车线路,为提高供电电压、采用大功率牵引电动机创造了条件。1895年,美国在巴尔的摩—俄亥俄州5.6km长的隧道区段修建了直流电气化铁路。1903年,德国的三相交流电力机车创造了210km/h的世界纪录。

最初,电气化铁路都修建在城市近郊线路和一些工矿线路上。后来,随着工业的发展,才逐渐发展到城市之间和运输繁忙的干线铁路上来。20世纪六七十年代是世界电气化铁路发展最快的时期,平均每年修建达5000多千米。在此期间,工业发达的西欧、日本、苏联以及东欧等国家,运输繁忙的主要铁路干线都实现了电气化,而且基本上已经成网。1964年10月,日本建成世界上第一条高速电气化铁路——东海道新干线,以210km/h的运行速度令世人瞩目。

20世纪80年代以后,世界上又出现了一个电气化铁路建设高潮。一些发展中国家,如中国、印度、土耳其、巴西等国的电气化铁路建设

也开始加快。例如：印度 1990~1991 年两年就建成电气化铁路 1557km，平均每年建成近 800km；从 1981~2000 年，我国在 20 年内建成电气化铁路约 13 000km。我国的电气化铁路在建设里程和建设速度上都已经跃居世界前列。在此期间，继日本高速电气化铁路时速提高到 270~300km 之后，德国和法国相继建成时速达 250~350km（ICE 和 TGV）的高速电气化铁路，工业发达国家正在集中力量兴建时速 200km 以上的高速电气化铁路。

目前，已建成高速电气化铁路的国家有中国、日本、法国、德国、意大利、西班牙、比利时、韩国、荷兰、瑞典、英国、俄罗斯，正在积极建设或规划建设的还有美国、瑞士、奥地利、丹麦、加拿大、澳大利亚、印度等国；欧洲已经突破了国界，向路网化、国际化发展。

1.3 我国电气化铁路发展历程及现状

1958 年，我国第一条电气化铁路宝（鸡）成（都）线的宝鸡—凤州段（长 93km）开工，并于 1961 年 8 月 15 日投运。经过 50 多年的建设，我国电气化铁路取得了举世瞩目的成就。截至 2013 年底，中国铁路运营总里程突破 10 万 km，电气化营业里程达 55 811km。其中，2013 年新开通电气化铁路 4810km，我国铁路电化率达 59%，承担了全部客货运量的 76%。

特别值得提出的是，以 2008 年时速达 350km 的京津城际高速铁路建成通车为标志，揭开了我国进入高速铁路（含客运专线）时代的序幕。2013 年，随着宁杭、杭甬、津秦、厦深、西宝等一批新建高速铁路投入运营，我国高速铁路总营业里程达到 11 028km。目前中国已成为世界高速铁路系统技术最全面、集成能力最强、运营速度最高、运营里程最长，在建规模最大的国家。

根据国务院批准的《中长期铁路网规划》（2004 年批准，2008 年调

整),至2020年,我国铁路营运总里程将达到12万km,电气化率60%,其中高速铁路将达到1.6万km。

1.4 我国电气化铁路发展规划

2004年1月7日,国务院常务会议原则通过了《中长期铁路网规划》。2008年10月31日,经国家批准,《中长期铁路网规划》(2008年调整)正式颁布实施。《中长期铁路网规划》规定,到2020年,全国铁路营业里程达到12万km,主要繁忙干线实现客货分线,复线率和电气化率分别达到50%和60%以上,运输能力满足国民经济和社会发展需要,主要技术装备达到或接近国际先进水平,具体目标如下:

(1) 发展客运专线。为满足快速增长的旅客运输需求,建立省会城市及大中城市间的快速客运通道,规划“四纵四横”等客运专线以及经济发达和人口稠密地区城际客运系统。建设客运专线1.6万km以上。

(2) 以扩大西部路网规模为主,形成西部铁路网骨架,完善中东部铁路网结构,提高对地区经济发展的适应能力。规划建设新线约4.1万km。

(3) 加强既有路网技术改造和枢纽建设,提高路网既有通道能力。规划既有线增建二线1.9万km,既有线电气化2.5万km。

根据《中长期铁路网规划》,到2020年,中国几条主要繁忙长大干线:京哈线、京广线、京沪线、陆桥线、沪汉蓉线和沪昆线都将全线实现电气化;几个主要省会城市之间及环渤海地区、长江三角洲地区和珠江三角洲地区都将建成快速客运专线,其总里程将超过1.6万km。中国西南、西北、华北、东北、中南和华东的电气化铁路将基本连接成网。一个运输能力大,行车速度快,燃料消耗低,运输成本低,技术装备先进,旅行环境好,不污染环境,分布比较合理的全国电气化铁路网将基

本形成。到 2020 年，中国几条主要长大干线的旅客列车运行速度将普遍达到 160km/h，部分区段将达到 200km/h，新建的快速客运专线和城际客运线路将达到 200km/h 及以上，几条主要繁忙干线的货物列车载重量将普遍达到 5000t 以上，而大秦和朔黄两条运煤专线的重载单元列车载重量将突破 1.5 万 t，达到 2 万 t。旅客运输将全面实现“快速、准时、舒适”，主要城市间铁路旅行将实现 500km 范围内“朝发夕归”，1200~1500km 范围内“夕发朝至”，2000~2500km 范围内“一日到达”的目标，货物运输将实现“大宗货物直达化，高值货物快速化”的目标。到 2020 年，中国电气化铁路在牵引供电设备的自动化水平，设备的国产化率，设备的运营可靠性及高速技术的应用等方面将呈现一个全新的局面，达到一个更高的水平。中国电力牵引动力设备的研发和生产，也将有重大的发展，跻身于世界先进国家行列。与此同时，在铁路电气化工程设计手段和标准化程度、电气化工程施工装备和施工质量标准、电气化铁路的运营管理现代化及电气化专用器材的生产等方面，也将达到或接近世界先进水平。到 2020 年，中国电气化铁路的各项运营技术指标，如电力机车完成的工作量一日车公里和日产量、燃料消耗的降低和能源利用率的提高、能源使用结构的合理化、运输成本的降低和运输质量的提高以及环境的保护等都将达到或接近世界先进水平。还有，中国电气化铁路的分布不合理状况、铁路电气化的投资回报率偏低、电气化铁路承担的铁路运量不大、牵引供电技术的自主开发力度不足等情况也将得到彻底扭转。

1.5 电气化铁路供电与电能质量问题

电能质量 (power quality) 即电力系统发电、输电、供电、配电、用电的质量和品质。理想的电能应该是完美对称的正弦波。一些因素会

使波形偏离对称正弦，由此便产生了电能质量问题。关于电能质量，一方面要研究存在哪些影响因素会导致电能质量问题，另一方面要研究这些因素会导致哪些方面的问题，最后，还要研究如何消除这些因素，从而最大程度上使电能接近正弦波。电能质量的下降会严重影响人们的正常生产和生活，同时，电能质量关系着电力系统的安全经济运行，是工业产品质量的保障，对节能降耗及人类生活环境等有重要影响。

从严格意义上讲，衡量电能质量的主要指标有电压、频率和波形。从普遍意义上讲是指优质供电，包括电压质量、电流质量、供电质量和用电质量。电能质量问题可以定义为：导致用电设备故障或不能正常工作的电压、电流或频率的偏差，其内容包括频率偏差、电压偏差、电压波动与闪变、三相不平衡、瞬时或暂态过电压、波形畸变（谐波）、电压暂降、电压中断、电压暂升以及供电连续性问题等。

随着社会的发展，电能质量问题越来越突出。一方面，造成电能质量问题的因素不断增长，如以电力电子装置为代表的非线性负荷的使用，各种大型用电设备的启停等；另一方面，各种复杂的、精密的、对电能质量敏感的用电设备不断普及，如高性能家用电器、办公设备、精密实验仪器、连续且精密生产过程的自动控制设备等，人们对电能质量及可靠性的要求不仅越来越高，而且电能质量问题对电力系统和配电系统造成的直接危害和可能对人们生活和生产造成的损失也越来越大，毋庸置疑，电能质量问题直接关系到国民经济的总体效益。

工频交流电气化铁路经济、可靠的优势依赖于给其供电的强大供电网——电力系统。相比三相电力系统而言，工频交流电气化铁路的供电系统是单相接地的一个特殊系统，负序问题突出，同时，目前大量使用的交一直型（AC/DC 整流）电力机车无功成分多（功率因数低）、谐波含量大，而新发展起来的交一直—交型（AC/DC/AC）电力机车和动车组却有高次谐波谐振隐患，一直受到电力系统和铁路供电技术人员和学者的广泛关注，并制订和正在制订相关法规、行业标准和国家标准加以约束。

电能质量控制是一个复杂的系统工程，主要涉及电力系统、电工理论、电力电子技术、自动控制理论等学科，还与牵引供电系统三相一两相异相供电的特殊结构有关，从而使得电气化铁路的电能质量控制技术除了常规的牵引变电所无功、谐波与负序综合补偿措施，又出现了着眼于系统结构的新型供电技术。