



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 轨道交通牵引供电技术

贺威俊 高仕斌 等 编著

**Power Supply  
and Substation Techniques  
for Electric Traction of Rail Transit**



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

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 轨道交通牵引供电技术

Power Supply and Substation Techniques  
for Electric Traction of Rail Transit

贺威俊 高仕斌 王 勋  
黄彦全 张 丽 陈德明 编著

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

## 内 容 简 介

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。书中全面系统地介绍轨道交通牵引供变电技术的基本理论,电气一次主系统与电气设备以及二次系统的工作原理、设计计算、运行分析和实际知识。全书共分八章,主要内容包括:轨道交通交、直流牵引供电系统装置与电气设备概论;高压电器与开关设备;交、直流牵引供变电电气主设备原理;电气主接线与配电装置;控制、信号、监测电路与操作电源;变电所自动化与通信;交、直流牵引变电所设计等。全书突出以高速铁路和城轨交通电力牵引供变电系统技术原理和工作特性为主线进行阐述。

本书具有取材新颖、反映先进技术、重点突出、理论与实际并重、注意能力培养等特点,可作为高等学校电气工程及其自动化(铁道电气化、轨道交通电气化自动化)专业教材,也可作为工业自动化、交通工程、电力系统及其自动化等专业以及其他相近专业的参考教材,同时也可供上述专业的设计、科研和运行管理部门有关技术人员与研究生参考。

---

### 图书在版编目(CIP)数据

轨道交通牵引供变电技术 / 贺威俊等编著. —成都:  
西南交通大学出版社, 2011.5  
普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
ISBN 978-7-5643-1188-9

I. ①轨… II. ①贺… III. ①电气化铁道—供电装置  
—高等学校—教材 IV. ①U223.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第087248号

---

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

### 轨道交通牵引供变电技术

贺威俊 高仕斌 王 勳 编著  
黄彦全 张 丽 陈德明

\*

责任编辑 李芳芳  
特邀编辑 胡芬蓉  
封面设计 本格设计

西南交通大学出版社出版发行

成都二环路北一段111号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564

<http://press.swjtu.edu.cn>

成都勤德印务有限公司印刷

\*

成品尺寸: 185 mm×260 mm 印张: 30.25

字数: 752千字

2011年5月第1版 2011年5月第1次印刷

ISBN 978-7-5643-1188-9

定价: 55.00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

# 前 言

本书原版《电力牵引供变电技术》于1998年出版发行以来，已重印多次。2008年和2010年先后被教育部批准为普通高等教育“十一五”国家级规划教材，并更名为“轨道交通牵引供变电技术”。近年来我国高速铁路和城轨交通电力牵引得到了迅速发展，新技术、新设备、新材料不断涌现，牵引供变电系统的技术与装备发生了巨大变化，有必要对原教材重新进行修订，以适应新时期高校人才培养的需要。

《轨道交通牵引供变电技术》在原版的基础上，对教材内容作了较大调整和增删。全书共分八章，主要内容包括：轨道交通交、直流牵引供电系统装置与电气设备概论；高压电器与开关设备；交、直流牵引供变电气主设备原理；电气主接线及设计运行；高压配电装置；控制、信号和监测电路原理与操作电源；变电所自动化与通信；轨道交通交、直流牵引变电所设计等。

本书保持原教材的系统性、技术先进性和理论与实际相结合的原则，注重对学生能力的培养，并具有下列主要特点：

1. 重点增加了高速铁路和城轨交通电力牵引交、直流电气主设备工作原理与技术特性，电气主接线及其配电装置、设备的全面系统介绍。
2. 力图反映最新技术成就和自动化、智能化在供变电系统的应用，分别在供变电设备与配电装置、变电所自动化、供变电系统与牵引变电所设计等有关章节中阐述。
3. 全面系统地加强了城轨交通直流电力牵引供变电系统及装置的理论分析、设计计算、故障分析、杂散电流防护原理等内容。
4. 书中部分专业名词引入英文译名，全书增加了英文目录，便于对外交流。

本书可作为高等工科院校电气工程及其自动化专业、铁道电气化专业方向和城轨交通自动化专业方向的教材，也可供工业自动化、交通运输自动化、交通工程和电力系统及其自动化等相关专业以及相关专业技术人员和研究生参考。本科可根据各专业不同的培养目标，重点选择教材中相关内容组织教学。

本书由西南交通大学贺威俊教授、高仕斌教授担任主编。参加本书编撰和修订的人员及分工为：绪论、第二章第十一节由贺威俊、高仕斌共同完成；第一、三章（第一节除外）、第四章第五节、第八章（一至六节、十节、九节的前三部分）由贺威俊完成；第三章第一节、第四章第四节、第六章第五节和第八章第九节第五部分由高仕斌完成；第七章由西南交通大学陈德明副教授、高仕斌完成；第二章（第十一节除外）、第四章（第四、五、六节除外）、附录由华东交通大学王勋教授完成；第五章、第四章第六节由西南交通大学黄彦全教授完成；第六章（第五节除外）、第八章（第八节、九节第四部分）由西南交通大学张丽讲师完成。全书由贺威俊、高仕斌负责统稿和校审，张丽在全书编写过程中负责对内对外联系和协调，并在书稿整理校核中做了大量工作。

本书由西南交通大学陈小川教授，中国中铁二院工程集团有限责任公司（简称中铁二院）副总工程师、教授级高工周建担任主审，中铁二院电气化设计研究院徐光强高工重点审阅了部分章节，并对本书多方面提出了改进意见，西南交通大学电气工程学院刘炜博士对第三章作了审校，最后，邀请同行专家、教授进行了审稿和评议，他们在审阅中提出了宝贵意见和建议，在此谨致衷心的感谢。

本书编写过程中得到西南交通大学、电气工程学院及电力工程系领导多方面的全力支持，中铁二院电气化设计研究院、中铁第一勘测设计院有限公司电气化设计处、成都交大许继电气公司、西安永电电气有限公司、上海立新电器厂等单位无私提供了有关技术资料 and 研发成果；特别是中铁二院电气化设计研究院徐光强高工、连鹏飞高工和陈桁高工，中铁二院专业工程师办李剑虹高工，中铁二院地下铁道设计研究院贺晶高工给予了多方面的协助和关注；本书所列参考文献和本书原版的作者和单位提供了有益借鉴，一并致以衷心的感谢。

对西南交通大学出版社领导、张雪总编、万方副总编和李芳芳责任编辑以及相关人员对本书出版的全力支持和辛勤付出表示感谢。

由于作者水平所限，书中可能存在疏漏之处，殷切希望读者和使用单位指正。

作 者

2010年12月于成都

# 目 录

绪 论	1
第一章 轨道交通牵引供变电装置与电气设备概论	12
第一节 交流电力牵引供变电装置及其功能	12
第二节 城市轨道交通直流电力牵引供变电装置及其功能	19
第三节 电力牵引供变电系统一次电气设备和监控设备简介	27
思考题与习题	28
第二章 高压电器与开关设备	29
第一节 高压电器的作用及分类	29
第二节 交、直流电弧的形成及熄弧原理与方法	30
第三节 断路器开断短路电流的工作状态及暂态分析	38
第四节 高压断路器的技术要求及基本参数	43
第五节 高压断路器的构造及工作原理	46
第六节 高压断路器的操动机构	67
第七节 熔断器、隔离开关及高压负荷开关	72
第八节 直流快速断路器	76
第九节 高压互感器	82
第十节 SF <sub>6</sub> 全封闭组合电器 (GIS)	97
第十一节 智能断路器与新型高压互感器简介	102
思考题与习题	106
第三章 牵引供变电电气主设备原理	108
第一节 交流电力牵引主变压器	108
第二节 牵引整流变压器与硅整流器结构和技术特性	117
第三节 12 脉波整流机组整流电路及其工作特性	133
第四节 基于两套整流机组四组三相整流桥并联构成的等效 24 脉波整流电路	147
第五节 整流机组的负载特性及其运行技术指标	155
思考题与习题	167



<b>第四章 电气主接线及其设计运行</b> .....	169
第一节 电气主接线的功能、基本要求与设计原则 .....	169
第二节 电气主接线的基本接线形式 .....	171
第三节 牵引负荷侧电气主接线特点 .....	177
第四节 交流牵引变电所和供电装置电气主接线 .....	179
第五节 城轨交通主变电所、直流牵引变电所、降压变电所电气主接线 .....	189
第六节 主接线的技术经济分析与比较 .....	205
第七节 电气主接线与一次系统可靠性分析 .....	214
思考题与习题 .....	228
<b>第五章 高压配电装置</b> .....	229
第一节 牵引变电所配电装置类型及其基本要求 .....	229
第二节 屋内配电装置 .....	230
第三节 屋外配电装置 .....	247
第四节 预装式变电所 .....	254
思考题与习题 .....	257
<b>第六章 供变电系统控制、信号、监测电路与操作电源</b> .....	258
第一节 控制方式和二次接线概述 .....	258
第二节 高压开关的控制、信号回路 .....	265
第三节 中央信号系统 .....	277
第四节 测量系统与绝缘监测电路 .....	281
第五节 交、直流自用电系统与操作电源 .....	291
思考题与习题 .....	306
<b>第七章 牵引变电所自动化系统</b> .....	307
第一节 变电所自动化系统构成及功能 .....	307
第二节 通信网络及通信协议 .....	312
第三节 间隔层 .....	336
第四节 站控层 .....	340
第五节 牵引变电所自动化新技术 .....	347
思考题与习题 .....	353
<b>第八章 轨道交通牵引变电所设计</b> .....	354
第一节 概 述 .....	354
第二节 电器与载流导体的发热和负载能力 .....	354
第三节 短路电流通过导体时的发热和电动力计算 .....	359
第四节 选择电气设备时短路计算点的确定 .....	367

---

第五节 母线、电缆与支持绝缘子的选择 .....	368
第六节 开关设备的选择 .....	380
第七节 仪用互感器的选择 .....	384
第八节 直流牵引供电系统短路电流计算 .....	390
第九节 城轨交通牵引供变电系统设计的若干问题 .....	401
第十节 轨道交通牵引变电所电气主接线设计示例 .....	433
第十一节 接地系统 .....	446
思考题与习题 .....	453
<b>附录 常用导体、电气设备与测量表计技术数据 .....</b>	<b>455</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>469</b>



# Contents

<b>Introduction</b> .....	1
<b>Chapter 1 Introduction to Power Supply and Substation Equipment for Rail Transit</b> .....	12
Section 1 AC Electric Traction Substation:Equipments and Functions .....	12
Section 2 DC Electric Traction Substation for Urban Rail Transit:Equipments and Functions .....	19
Section 3 Introduction to High Voltage Electric Equipment and SCADA for Electric Traction Power Supply System.....	27
Questions and Exercises .....	28
<b>Chapter 2 High Voltage Apparatus and Switchgear</b> .....	29
Section 1 Function and Classification of High Voltage Apparatus.....	29
Section 2 Formation Principle and Extinction Method of AC and DC Arc.....	30
Section 3 Operating Condition and Transient Analysis While Breaking Short Current of Circuit Breaker.....	38
Section 4 Technical Requirements and Rated Parameters of High Voltage Circuit Breaker.....	43
Section 5 Configuration and Operating Principle of High Voltage Circuit Breaker.....	46
Section 6 Operation Device of High Voltage Circuit Breaker.....	67
Section 7 Fuse, Disconnecter and Load-breaking Switch.....	72
Section 8 Fast Direct Current Circuit Breaker.....	76
Section 9 Voltage Transformer and Current Transformer.....	82
Section 10 SF <sub>6</sub> GIS (Gas-Insulated Switchgear) .....	97
Section 11 Introduction to Intelligent Circuit Breaker and New Type Voltage Transformer and Current Transformer .....	102
Questions and Exercises .....	106
<b>Chapter 3 Theorem of Main Electric Equipments of Traction Power Supply and Substation System</b> .....	108
Section 1 AC Traction Transformers .....	108

Section 2	Configuration, Technical Characteristics of Traction Rectifier Transformer and Silicon Rectifier .....	117
Section 3	Rectifying Circuit and It's Operating Characteristics of 12 Pulses Rectifier Unit .....	133
Section 4	Equivalent 24 pulses Rectifying Circuit Composed of 2 Rectifier Units and based on four sets parallel connected 3 phases Rectifying bridges .....	147
Section 5	Rectifier Load Characteristics and Operation Specifications .....	155
	Questions and Exercises .....	167
<b>Chapter 4</b>	<b>Main Electrical Connection Scheme and Its' Design and Operation .....</b>	<b>169</b>
Section 1	Function, Basic Requirements and Design Principles of Main Electrical Connection Scheme .....	169
Section 2	Basic Form of Main Electrical Connection Scheme .....	171
Section 3	Characteristics of Main Electrical Connection Scheme in Traction Load Side .....	177
Section 4	Main Electrical Connection Scheme of AC Traction Substation and Electrical Facilities .....	179
Section 5	Main Electrical Connection Scheme of Main Substation, DC Traction Substation, Step-down Substation in Urban Rail Transit .....	189
Section 6	Technical and Economic Analysis of Main Electrical Connection Scheme .....	205
Section 7	Reliability Analysis of Main Electrical Connection Scheme .....	214
	Questions and Exercises .....	228
<b>Chapter 5</b>	<b>High Voltage Switchgear and Apparatus Arrangement .....</b>	<b>229</b>
Section 1	Basic Concepts and Requirements for High Voltage Apparatus Arrangement of Traction Substation .....	229
Section 2	Indoor Switchgear Arrangement .....	230
Section 3	Switchyard .....	247
Section 4	Fabricated Cubical Substation .....	254
	Questions and Exercises .....	257
<b>Chapter 6</b>	<b>Control, Signal, Monitoring Circuit and Operation Power Supply of Substation System .....</b>	<b>258</b>
Section 1	Introduction to Control Mode and Auxiliary Circuit .....	258
Section 2	Control and Signal Circuit of High Voltage Switchgear .....	265
Section 3	Integrated Signal System .....	277
Section 4	Measurement System and Insulation Monitoring Circuit .....	281
Section 5	AC and DC Home-load Supply and Operation Power Supply .....	291
	Questions and Exercises .....	306

---

<b>Chapter 7 Automation System of Traction Substation</b> .....	307
Section 1 Configuration and Function of Automation System of Traction Substation .....	307
Section 2 Communications Network and Protocol .....	312
Section 3 Bay Layer .....	336
Section 4 Substation Control Layer .....	340
Section 5 New Techniques of Automation system of Traction Substation .....	347
Questions and Exercises .....	353
<b>Chapter 8 Rail Transit Traction Substation Design</b> .....	354
Section 1 Introduction .....	354
Section 2 Heating and Load Capability of Electric Apparatus and Current-carrying Conductor .....	354
Section 3 Heating and Electric Power Calculation while Short Current through Conductor .....	359
Section 4 Decision of Short-Circuit Position for Electric Apparatus Selection .....	367
Section 5 Selection of Conductor, Cable and Support Insulator .....	368
Section 6 Selection of Switching Facilities .....	380
Section 7 Selection of Instrument Transformer .....	384
Section 8 Short Current Calculation in DC Traction System .....	390
Section 9 Some Issues of Urban Rail Transit Traction System Design .....	401
Section 10 Examples of Main Electrical Connection Scheme in Rail Transit Traction Substation .....	433
Section 11 Grounding System .....	446
Questions and Exercises .....	453
<b>Appendix Technical Data of Conductor, Apparatus and Measure Meter</b> .....	455
<b>References</b> .....	469

# 绪 论

轨道交通电力牵引是利用电能作为牵引动力,将电能转换为机械能,驱动铁路列车、电动车组和城市轨道电动车辆等载运工具运行的一种运输形式。

电力牵引按其牵引网供电电流制式不同,分为工频单相交流制、低频单相交流制和直流制。我国电气化铁路采用工频单相交流制电力牵引,直流制电力牵引仅用于地下铁道、城市轻轨运输系统和工矿运输系统。

现代轨道交通电力牵引相对于其他地面交通系统,具有一系列优点:一是它本身不带燃料,为非自给式牵引动力,并由大容量电力系统供电,机车或动车组总功率大,具有启动和加速快、过载能力强、运输能力大等特点,能满足各种现代交通运输对快速、大运输能力的需要。二是电力牵引对环境污染小,电力机车或动车组本身不产生污染,其采用的电能中,水电基本没有污染,即使是采用火电,火电厂影响范围小,且易于集中治理。按每发  $1 \text{ kW} \cdot \text{h}$  电能消耗  $404 \text{ g}$  煤考虑,计算出内燃、电力牵引完成  $1 \text{ 亿 t} \cdot \text{km}$  运输总换算周转量污染物排放量的比例:颗粒物为  $25\ 600$  ( $7.68 \text{ t}/0.000\ 3 \text{ t}$ )、一氧化碳为  $47.4$  ( $3.59 \text{ t}/0.075\ 7 \text{ t}$ )、氮氧化物为  $7.1$  ( $9.61 \text{ t}/1.35 \text{ t}$ )、二氧化硫为  $62.3$  ( $1.62 \text{ t}/0.026 \text{ t}$ )。三是电力牵引的总效率(包括发电厂、输变电和供电系统以及机车、电动车辆效率在内),比用内燃机为动力的内燃机车和汽车等载运工具的总效率要高出几个至几十个百分点(电力牵引是指全部或部分为水电厂供电),按 2006 年数据,我国水电发电量约占全国发电量的  $20.67\%$ (效率  $70\%$ )、火电约占  $77.82\%$ (效率  $35\%$ ),计算得到的电力牵引加权平均总效率为  $41.8\%$ ,而现代内燃机车总效率约为  $30\%$ ,汽车运输则更低。因而采用电力牵引可有效节约能源,尤其是减少对石油资源的依赖,并降低运营成本。四是随着信息技术、微电子技术的广泛应用,电力牵引系统易于实现全面信息化和自动化,从而大大提高劳动生产率和经济效益。当然,电力牵引也存在某些缺点,主要是其一次投资费用较同类载运工具要高些。

## 一、我国铁路发展电力牵引的适应性和重大意义

我国于 1961 年首先在西部地区建成第一条单相工频交流电气化铁路,半个世纪以来,从西部山区铁路发展到东部繁忙干线,从普速铁路发展到高速铁路,截至 2009 年底,我国电气化铁路通车里程已达  $32\ 000 \text{ km}$ ,约占全国铁路总里程  $37.2\%$ ,承担了全部客运货和运量的  $50\%$ 。根据国务院《中长期铁路网规划》,到 2020 年,我国铁路营业里程将超过  $120\ 000 \text{ km}$ ,其中电气化铁路比重将达到  $60\%$ ,运输能力可满足国民经济和社会发展的需要。

特别值得提出的是,以 2008 年时速达  $350 \text{ km}$  的京津城际高速铁路胜利建成通车为标志,揭开了我国进入高速铁路时代的序幕,截至 2010 年底,已有武广、郑西、沪宁、石太等高速客运专线相继建成投运,“高速铁路总运营里程达  $8\ 358 \text{ km}$ ,在建里程超过  $1 \text{ 万 km}$ 。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”。

2004年版“铁路主要技术政策”明确规定的铁路技术发展方向是“旅客运输高速化、快速化,货物运输重载化、快捷化,运营管理信息化,安全装备系统化,工程建设现代化,经营管理科学化”,要求:“大力发展电力牵引技术,客运专线、运煤专线、主要干线及长大坡道、长隧道、高海拔地区等线路采用电力牵引”。

我国制定铁路大力发展电力牵引的政策并积极推进实施,是和我国地广人多、地貌复杂(山区、高原多)、资源分布不均衡,以及铁路网的长度和密度远不能适应国民经济发展,长期以来铁路运输一直成为制约国民经济发展的瓶颈等具体情况密切相关的。按照我国国情和国家的财力、物力,要又快又省地提高铁路运输能力、有效地解决铁路运能和不断增长的运量之间的矛盾,必须从铁路本身的技术改革,首先从牵引动力改革和增建新线与改善路网结构两方面着手。我国和世界各国铁路技术改革的长期实践经验证明,大力发展电力牵引、加速繁忙干线电气化,是在最短时间内提高铁路运输能力的一条有效途径。

发展电力牵引,对我国铁路的适应性和重要意义主要表现在如下几个方面:

(1) 提高运输能力和效益,主要取决于对列车重量、密度和速度(称为铁路运输三要素)的优化组配。

过去,我国铁路基本上是采用客、货共线的运输模式,在线路固定、设备定型的情况下,运输三要素是相互制约的。一般来说,在提高铁路运送能力方面,主要依靠提高行车密度和列车重量;在加速客、货列车运行速度和加速机车车辆周转方面,提高行车速度是重要因素。

为适应社会主义市场经济的需要,根据铁路网结构、不同线路和运输模式的特点,按照“客运高速化、货运重载化”大力加强铁路网建设是十分必要的;对于客、货共线的繁忙干线铁路,提高客、货列车速度和货物列车重量,积极增加行车密度都是刻不容缓的现实任务。

牵引动力的类型和功率是提高列车载重量的主要因素,也是提高行车速度、密度的关键。电力机车不带原动机,机车功率主要受牵引电机绝缘材料和悬挂空间的限制。目前国产SS<sub>4</sub>电力机车功率(货运用)为8轴、双节2×3 200 kW,最高速度100 km/h,国外达12轴10 000 kW以上,最高速度120 km/h;国产SS<sub>8</sub>客运电力机车最高速度可达170 km/h,功率为3 600 kW。和谐系列大功率货运电力机车为6轴或8轴,每轴1 200 kW的和谐1、2、3型(HXD<sub>1</sub>、HXD<sub>2</sub>为8轴,HXD<sub>3</sub>为6轴),每轴1 600 kW的和谐1B、2B、3B(HXD<sub>1B</sub>、HXD<sub>2B</sub>、HXD<sub>3B</sub>均6轴)以及正在试制(HXD<sub>2C</sub>、HXD<sub>3C</sub>)或交付使用(HXD<sub>1C</sub>)的和谐1C、2C、3C型(6轴,每轴1 200 kW),设计最高速度均为120 km/h。而内燃机车功率(电传动式),则因柴油机、交流发电机、整流器和传动、辅助设备体积大,受车体空间限制以及柴油机加工技术要求极高等条件影响,其单节(机)功率不可能做得很大,国产主型DF<sub>4</sub>内燃机车功率为2 430 kW,最高速度可达120 km/h。引进的ND<sub>5</sub>或国产DF<sub>8</sub>内燃机车功率为2 942 kW或稍大些(DF<sub>8</sub>, 3 140 kW)。最高时速170 km/h的DF<sub>11</sub>内燃机车轴功率为3 040 kW。

在站线长度允许的情况下,如列车重量为4 000 t,则牵引力在平原6‰限坡下,可采用SS<sub>3</sub>电力机车或DF<sub>8</sub>内燃机车;列车重量增至5 000 t时,根据试验需采用SS<sub>4</sub>或和谐型货运电力机车或功率更大的内燃机车牵引(46‰限坡用单机,66‰限坡用双机)。我国主型货运电力、内燃机车技术特性列入表1。

表 1 我国主型货运电力、内燃机车技术特性

技术特征		电力机车		内燃机车	
		SS <sub>3</sub> /SS <sub>1</sub>	SS <sub>4</sub>	DF <sub>4</sub>	ND <sub>5</sub>
机车功率/kW		4 800/4 200	6 300	2 430	2 942
启动牵引/N		470 736/487 408	627 648	401 597	450 141
最低计算速度/(km/h)		47.2/41.2	51.0	20.0	22.2
各种限坡下的启动牵引重量/t	4‰	5 350	6 900	4 400	4 950
	6‰	4 200	5 400	3 450	3 850
	12‰	2 350	2 950	1 950	2 100

在同等牵引重量的情况下，列车速度与机车技术特性密切相关。由表 1 可知，电力牵引的最低计算速度（限坡下）比内燃牵引高 1 倍以上。电力机车不需加水和燃料，机车整備时间短，启动时间短（电力约 1 min，内燃约 2 min）。此外，电力机车具有有效的电气制动手段，能使列车在长大下坡道上高速行驶且空气制动的制动力迅速降低的情况下，保证以较高速安全运行。综合上述各项因素，电力机车牵引的列车技术速度、旅行速度都比内燃机车高。

行车密度牵涉的制约因素较多。电力机车牵引力大，行车速度高，有利于减少双线自动闭塞条件下追踪列车间隔时间，以提高行车密度。

从以上分析可知，采用电力牵引对列车重量、密度、速度三者的优化组配十分有利，从而达到提高铁路运输能力的目的。例如，我国京沪、京广和陇海三大干线铁路进行电气化改造后，运输能力提高了 30%。

对于大运量的煤运区段，大秦重载电力牵引运煤专线 2010 年完成运量 4.0 亿 t，列车载重量达 20 000 t；自我国成功进行六次大提速以后，合宁、京津、石太、合武、福厦、武广、郑西客运专线相继建成并投入运行，尤其是世界上里程最长、运营速度最快的武广客运专线于 2009 年 12 月 26 日投入运营，极大地缓解了既有京广铁路特别是武汉至广州线运输紧张的状况。武广客运专线运营里程 1 069 km，采用先进交流传动技术，牵引总功率为 8 800 kW 的国产 CRH<sub>3</sub> 型动车组，其运营时速达 350 km。可以预见，随着我国铁路运输的发展和运量的不断增长，电力牵引必将发挥更加重要的作用。

(2) 铁路电气化为快速、又好又省地缓解我国铁路运输紧张状态提供了有效途径。

截至 2010 年，虽然我国铁路网总长达到 91 000 km，但与国土面积相比是不相称的。一方面，投入大量资金修建铁路新线，解决铁路运能与运量之间的矛盾和拉动内需，促进国民经济的健康发展；另一方面，在短期内大量投资修建足够的铁路新线也是不现实的，因为新建铁路要形成运输能力所需周期较长，且新建铁路投资巨大。例如，修建 250 km/h 的客运专线的单位投资为 7 000 万元/km~8 000 万元/km，350 km/h 的客运专线则超过 10 000 万元/km。考虑到铁道电气化部分的投资仅占整个铁路投资的 1/10~1/7，且建成投产的周期一般为 1~2 年，投资回收期为 8~10 年，结合上述电力牵引对提高运输能力的显著效果，对现有铁路实现电气化改造，其投资相对较省且见效快，综合效益极为显著。

(3) 铁路牵引动力电气化适应我国能源资源结构状况，并可大幅度实现节能。

铁路牵引动力现代化的决策必须以国家的能源资源结构和能源政策为依据, 并应大力节约能源消耗。我国一次能源资源以水电和煤炭最丰富, 原油储量十分有限。“十一五”时期我国能源建设的总体安排是: 有序发展煤炭; 加快开发石油天然气; 在保护环境和做好移民工作的前提下积极开发水电, 优化发展火电, 推进核电建设; 大力发展可再生能源。2009年, 全国原煤产量 29.6 亿 t, 比上年增长 12.7%; 全年发电量 36 506 亿 kW·h, 增长 7%; 原油产量 1.89 亿 t, 下降 0.4%; 原油净进口 1.99 亿 t, 增长 13.6%; 天然气产量 829.9 亿 m<sup>3</sup>, 增长 7.7%; 煤层气(瓦斯)抽采量达到 71.8 亿 m<sup>3</sup>, 利用量 23.5 亿 m<sup>3</sup>, 分别增长 23.8%和 36.6%。至 2009 年年底, 全国火电装机 6.52 亿 kW, 比上年增长 8.2%, 约占全国电力总装机的 74.6%, 较 2008 年年底下降 1.5 个百分点; 水电装机 1.97 亿 kW, 增长 14%, 约占 22.5%, 较 2008 年年底上升 0.74 个百分点; 风电装机突破 2 000 万 kW, 光伏发电超过 20 万 kW。

随着发电用一次能源结构的变化, 水电及高参数、高热效率火电厂在总发电量中所占比例的日益提高, 其直接效果是国家宏观的能源利用率增高。对铁路运输采用电力牵引带来的好处是, 电力机车总效率可相应提高。电力牵引完成每万 t·km 运量所需折合标准煤燃料的平均消耗量约为内燃牵引的 2/3, 由于电力牵引比内燃牵引总效率高 10%以上, 因而电力牵引相对燃料消耗要更低, 可大幅度实现节能。

(4) 有利于环保和可持续发展。

铁路运输覆盖面广, 遍布全国城乡, 是我国主要运输形式。2010 年年旅客运送量和货物发送量分别达到 15.25 亿人次和 33.2 亿 t, 并分别以每年 2%~4.5%的速度增长, 全年总换算周转量为 33 118.06 亿 t·km。如果全国铁路客货运量由电力牵引完成的比例由目前的 40%提高到 50%, 其他由内燃牵引完成, 按前述内燃、电力牵引每完成 1 亿 t·km 换算周转量污染物排放量的比例计算, 则电力牵引的比例每提高 10%, 全国每年铁路运输可减少各种主要污染物排放的总量, 分别为颗粒物(PM)减少 25 434.67 t, 一氧化碳(CO)减少 11 525.08 t, 二氧化硫(SO<sub>2</sub>)减少 1 404.21 t, 氮氧化物(NO<sub>x</sub>)减少 27 355.52 t。

以上数据表明, 采用电力牵引对铁路沿线广大地区的环保和提高空气质量、构建绿色铁路将产生重大影响, 有利于经济社会的良性发展和人民群众的卫生健康, 并符合国家新的产业政策要求。

电力牵引能适应国家一次能源结构的变化, 能满足各种清洁能源和其他新能源为燃料的分布式发电及电力系统供电的需求, 有利于国民经济协调、可持续发展。

铁路电气化存在对通信线路产生干扰, 对电力系统产生某些不利影响等缺陷, 随着技术的不断发展, 已经获得或正在寻求有效的解决途径。

## 二、我国城市轨道交通电力牵引的发展及其功用

### 1. 发展简况

我国大城市的公共交通运输, 最早采用有轨电车和公交汽车, 以后发展为汽车运输和无轨电车。城市轨道交通的建设相对滞后, 北京地铁一期工程 1965 年开始建设, 1969 年建成通车。直到 20 世纪 80 年代, 中国城市(不包括台湾、香港和澳门)地下铁道的运营里程仅北京 40 km、天津 7.6 km。

随着我国国民经济的持续发展, 城市化进程的逐步加快, 城市人口与机动车数量急剧增



长,人员的出行和物资交流频繁,在我国特大城市和大城市,普遍存在着交通道路堵塞、交通秩序混乱、交通事故频发、交通污染严重等问题。由于城市轨道交通采用电力牵引,具有运量大、快捷舒适、安全节能、污染轻、占地少等特点,发展现代化轨道交通已成为大城市发展公共交通的根本方针和缓解城市交通拥堵的最佳选择。

进入 20 世纪 90 年代以后,我国城市轨道交通进入了一个快速发展期,截止到 2009 年年底,全国(不包括台湾、香港和澳门)已开通城市轨道交通的城市有北京、天津、上海、广州等 10 个城市,近 31 条线路,运营里程已超过 800 km。全国 48 个百万人以上的大城市中已有 30 多个城市开展了城市轨道交通的建设或筹建工作,近期规划建设 55 条线路,长度约 1 700 km,远期规划线网将超过 3 000 km。

城市轨道交通存在的困扰问题,必须从载运工具革新和运输模式方面加以调整解决。目前,国内外较多采用的公交客运工具有三种:一是大运量的地下铁道,其单向最大小时客运能力为 3 万~6 万人次;二是中等客运量的轻轨交通运输 LRT (Light Rail Transit),它是利用轨道作为车辆导向,采用先进信号、调度集中的现代化电力牵引运输系统,其单向最大小时客运能力为 1 万~3 万人次;三是低客运量的公共汽车、电车,其小时客运能力为 0.4 万~0.8 万人次。利用这几种载运工具的优化匹配,可因地制宜地构成各种公共交通运输模式,从而达到预期效果。

## 2. 城市轨道交通的功用

(1) 城轨交通的建设与发展,直接推动着城镇化的进程与城市繁荣。

城镇化是我国实现工业化和建设小康社会的重要内容,而城市公交特别是城市轨道交通建设是城市建设的基础,它有利于人们的出行和经济、文化活动,缩短了城镇之间的时空距离,推动了城镇工商业和经济文化的全面发展与繁荣。

城轨交通的发展又与其城市化水平紧密相关,近 30 年来我国城市化进程明显加快,城镇化率由 1979 年的 17.9% 增长到 2008 年的 45.68%,预计到 2020 年城镇化率将达到 60%,至 2008 年年底全国城市数为 655 个,其中 100 万以上人口的大城市达到近 50 个。由于大城市人口高度聚集,城市地域不断扩张,交通问题日益突出,促使高效便捷的现代城市交通方式得到快速发展。

(2) 发展城市轨道交通有利于发挥大城市的辐射功能。

城市轨道交通能带动周边城镇和卫星城市甚至一个区域的共同发展,使其形成一小时经济圈,强化互利互补,促进共同繁荣。北京地区、珠三角、长三角、深(圳)、港(香港)和其他大城市与城市群城轨交通的发展现实及其对城市群的促进作用,充分印证和说明了这一点。

同时,跨越城市运营也有利于发挥城轨交通集约化运输和其他多方面的优势,达到物尽其用,充分节约人力资源和能源。

(3) 有效缓解大城市交通拥堵,有利于节能减排。

城镇化进程加速和城市机动车的剧增,导致城市交通拥堵、运输效率降低。按国际大城市汽车保有量的饱和标准 300 万~400 万辆计算,我国京、沪等城市均已接近或超过饱和量。在此背景下,发展城市轨道交通对缓解交通拥堵显得十分迫切和重要。

世界主要大城市城轨交通(地铁)发展的统计资料显示,一般城轨交通运量占公共交通总运量的 50% 以上,其中巴黎人口 1 000 万,公交年总客运量 12 亿人次,城轨交通占 70%;东京大城市圈人口 1 200 万,城轨交通日运量 3 000 多万人次,占总客运量的 86%。可见各国

际大城市依靠发展轨道交通并提高其所占总客运量的比例,有效解决了城市交通的拥堵问题。

据估计,北京到 2015 年城轨交通日客运量可达 1 000 万人次左右,占公交总运量的 50% 以上。上海预计 2010 年城轨交通日客流量达 600 万人次,可占全市公交总运量的 35%。对比之下,要达到国际大都市城轨交通运量的平均水平、缓解城市交通的困境,我国大城市城轨交通的发展仍有较大空间。

环境、气候已成为当今世界关注的重要课题,据报道,2009 年我国 113 个环保重点城市中有 1/3 的空气质量未能达标,机动车(主要是汽车)尾气排放成为空气污染的主要来源。2009 年全国机动车排放一氧化碳(CO)、碳氢化物(HC)和氮氧化物(NO<sub>x</sub>)等污染物总计约 5 143.3 万 t,日均达 14.1 万 t,其中主要是城市客货运输汽车排放所造成的。对于大电力系统供电且相对容量有限的城轨交通牵引负荷,在忽略系统中部分远离城市的火力发电厂排除污染物由牵引负荷分摊少量份额的情况下,采用城轨交通电力牵引一般可视为污染物零排放的绿色交通,显然,增加城轨交通在城市公交总运量中的比重,将有效减少污染物排放,改善城市空气质量,有利于环保。

城轨交通采用电力牵引,其单位(人·km)能耗小于公交燃油汽车的 1/3,且电力牵引比内燃机传动的公交车总效率高出 10% 以上,因而城轨交通电力牵引相对燃料消耗要低得多,增加城轨交通在城市公交总运量中的比重,显然可大幅度实现节能。

### 三、轨道交通电力牵引及其供电系统技术的发展前景

轨道交通属于国家和城市公共基础设施,为国民经济、社会发展和提高人民生活水平,建设营造便捷、通畅、高效安全的综合运输体系,是铁路运输和城轨交通的根本任务。进入 21 世纪以来,随着国家对技术创新和产业振兴规划的实施,轨道交通迎来新的发展机遇,必须在把握国内外本行业现状的基础上,充分了解其建设和技术发展方向,并制订相应的分阶段目标,组织各方面的技术力量全力以赴予以实施。

(1) 通过合理规划和布局,铁路和城轨交通电力牵引在相当一段时期将有较快发展。

我国已确定加快电力牵引客运专线、城际轨道交通和重载电力牵引煤运专线的建设,在近期内基本建成以“四纵四横”客运专线\*为骨架的全国高速客运网,形成以北京为中心、涵盖绝大部分省级城市在内和以各区域经济为基础的城际高速客运网相结合的高速铁路网体系;到 2020 年,高速铁路总里程将达到 16 000 km。扩大大秦线 2 万 t 重载列车数量,增开侯月线等 5 500 t 重载列车,完善重载运输体系。

城轨交通除京、沪、穗等特大城市加快增建速度外,已有 20 多个大城市新建城轨交通列入国家建设规划,并陆续实施在建。城轨交通将向网络化和从单一城市向卫星城镇与邻近都市群延伸发展,以提高运输效益。

(2) 铁路和城轨交通电力牵引总体技术发展的目标是运营管理信息化、智能化,牵引动力和供电系统高度自动化、智能化,向“智通交通”ITS(Intelligent Transportation System)的方向发展。确保列车安全、可靠运行,保持任何时候运输都通畅和高效。

\* “四纵”客运专线包括北京—上海,北京—武汉—广州—深圳,北京—沈阳—哈尔滨(大连),杭州—宁波—福州—深圳客运专线。“四横”客运专线包括徐州—郑州—兰州,杭州—南昌—长沙—贵阳—昆明,青岛—石家庄—太原,南京—武汉—重庆—成都客运专线。