



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材



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

(第2版)

Power Supply and Substation Techniques for
Electric Traction of Rail Transit

贺威俊 高仕斌 等编著



西南交通大学出版社



教育本科国家级规划教材



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

(第2版)

Power Supply and Substation Techniques for
Electric Traction of Rail Transit
(The Second Edition)

贺威俊 高仕斌 黄彦全
王 勋 刘 炜 张 丽 编著
陈德明



西南交通大学出版社
· 成 都 ·

更多数字资源

内 容 简 介

本书为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材、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了轨道交通牵引供电技术的基本理论,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、运行分析和实际应用知识。全书共分九章,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、直流牵引供电变电气主设备原理;电气主接线与配电装置;直流牵引供电系统短路计算、常态下杂散电流和直流系统电能质量分析与再生电能利用;控制、信号、监测电路与操作电源;变电所自动化;交、直流牵引变电所设计等。全书以高速铁路和城轨交通电力牵引供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、着力反映先进技术、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,同时还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

轨道交通牵引供电技术 / 贺威俊等编著. —2版.
—成都:西南交通大学出版社, 2016.7
“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材 普通
高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-5643-4829-8

I. ①轨… II. ①贺… III. ①电气化铁道—牵引电气设备—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(2016)第172021号

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
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

(第二版)

贺威俊 高仕斌 等 编著

*

责任编辑 李芳芳

特邀编辑 王晓刚

封面设计 何东琳设计工作室

西南交通大学出版社出版发行

四川省成都市二环路北一段111号西南交通大学创新大厦21楼

邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564

<http://www.xnjdcbs.com>

成都勤德印务有限公司印刷

*

成品尺寸: 185 mm × 260 mm 印张: 28

字数: 698千字

2016年7月第2版 2016年7月第4次印刷

ISBN 978-7-5643-4829-8

定价: 59.00元

课件咨询电话: 028-87600533

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

再版前言

《轨道交通牵引供变电技术》教材自 2011 年 5 月出版发行以来，受到相关院校和广大读者的欢迎，先后进行了三次印刷以满足读者需求。

近年来，我国电气化铁路、城市轨道交通，特别是高速铁路得到了飞速发展，轨道交通牵引供变电系统采用了大量的新技术与新装备；更重要的是当前我国经济正处于转型升级时期，创新驱动已成为经济增长的重要引擎，上述形势的发展对高等教育和人才培养以及专业教学教材的质量，提出了更高的要求。因此，在本书被评为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材以后，作者结合本专业的培养目标和教学计划的规定，对本教材进行了部分章节内容的增删和优化调整与修订，进一步完善体系、提高质量，以便更好地适应经济社会发展对轨道交通建设人才培养的需要。

本次修订的内容主要如下：

绪论部分对国内外轨道交通电力牵引的发展做了系统介绍，阐明科学技术创新和社会经济发展催生工业交通转型升级的普遍规律，并从规划、节能、智能、安全的角度，对技术发展方向进行了梳理与阐述。

第二章的第五节，由于 SF₆ 断路器性能优越、应用增多，因此，增加了自能式灭弧装置的介绍，删减了落后的少油断路器内容；随着 GIS 的大量应用和数字化牵引变电所的逐步应用，电子式互感器将发挥重要作用，因此，增加了电子式互感器的篇幅并纳入第九节；第十一节对智能断路器进行了简要介绍。

第五章增加了 27.5 kV GIS 新产品及其应用的介绍。

为了充实城市轨道交通相关内容并使教材体系更加合理，将原来分散在各章节中的有关城市轨道交通牵引供变电技术的内容集中整理为第六章和第七章。第六章主要介绍城市轨道交通直流牵引供电系统短路故障的稳态与暂态分析计算，杂散电流分布与计算及其监测与防护；第七章主要介绍城市轨道交通供电系统电能质量的分析计算与控制方法以及城轨列车再生制动能量的吸收与利用。

第八章是对原版第六、七章进行删节调整而成，考虑到牵引变电所自动化系统的内容在其他课程中有专门介绍，对该部分进行了大量删节和重写。

第九章删除了“接地装置”，该部分应在“高电压技术”课程中讲授。

本书新版与第一版比较，主要有以下特点：

1. 从供变电系统电气设备的原理与应用，电牵引负荷特性及其不利影响，变电站一次、二次系统运行分析与管理、设计计算、研究试验等多层面对所需知识与能力的综合要求以及从认识规律出发，考虑本教材的体系和内容安排，增强了体系内容的完整性和科学性。

2. 着力对原教材内容去旧增新方面做了深入考虑，删除陈旧内容，注重并加强了新技术、新原理和新思维的介绍，同时注意了对学生创新意识的启迪和引导。

3. 注重对学生综合能力的培养, 加强对理论和原理及其应用的介绍, 坚持理论与实际相结合, 加强新技术、新方法的实例介绍, 配合习题、课程设计、实验、现场教学等环节, 培养学生的综合能力, 为从事本专业相关技术工作奠定基础。

本书由西南交通大学贺威俊教授、高仕斌教授担任主编并统稿。本次修订和撰写的主要人员及分工为: 绪论由贺威俊和高仕斌共同完成; 第一、三章(第三章第一节由高仕斌完成)由贺威俊完成; 第二章由高仕斌教授和华东交大王勋教授共同完成; 第四章由王勋、贺威俊、黄彦全、高仕斌教授共同完成; 第五章由黄彦全完成; 第六章由张丽讲师、刘炜副教授共同完成; 第七章由刘炜、贺威俊、高仕斌(第五节)共同完成; 第八章前四节、第九章由贺威俊、张丽共同完成; 第八章第五节由高仕斌完成, 第六节由陈德明副教授完成。张丽在本书修订编撰过程中负责内外联系协调, 并在协助统稿和文整、打印、校核中做了大量工作, 对按期完成本书修订任务发挥了重要作用。

本书由中国中铁二院工程集团有限责任公司副总工程师、教授级高工周建和西南交通大学贺建闽副教授担任主审。他们在审稿中提出了宝贵意见和建议, 谨致谢意。

衷心感谢本书原版的各位作者, 铁路、城轨交通有关设计研究院、各有关制造厂、电气公司无私提供了有关技术资料, 并提出有益建议, 在此一并致谢。

对西南交通大学电气工程学院、出版社领导、编辑对本书的修订与出版提供的支持与帮助表示感谢。

由于作者水平所限, 书中可能存在疏漏之处, 恳请广大读者和使用单位批评指正。

作 者

2016年1月于成都

第一版前言

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，张丽在本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	14
第一节 交流电力牵引供变电装置及其功能	14
第二节 城市轨道交通直流电力牵引供变电装置及其功能	21
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	29
思考题与习题	30
第二章 高压电器与开关设备	31
第一节 高压电器的作用及分类	31
第二节 交、直流电弧的形成及熄弧原理与方法	32
第三节 断路器开断短路电流的工作状态及暂态分析	40
第四节 高压断路器的技术要求及基本参数	45
第五节 高压断路器的构造及工作原理	48
第六节 高压断路器的操动机构	66
第七节 熔断器、隔离开关及高压负荷开关	71
第八节 直流快速断路器	74
第九节 高压互感器	81
第十节 SF ₆ 全封闭组合电器 (GIS)	101
第十一节 智能断路器简介	105
思考题与习题	107
第三章 牵引供变电电气主设备原理	109
第一节 交流电力牵引主变压器	109
第二节 牵引整流变压器与硅整流器结构和技术特性	118
第三节 12脉波整流机组整流电路及其工作特性	135
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	149
第五节 整流机组的负载特性及其运行技术指标	157
思考题与习题	169

第四章 电气主接线及其设计运行	171
第一节 电气主接线的功能、基本要求与设计原则.....	171
第二节 电气主接线的基本接线形式.....	173
第三节 牵引负荷侧电气主接线特点.....	179
第四节 交流牵引变电所和供电装置电气主接线.....	181
第五节 城市轨道交通主变电所、直流牵引变电所、降压变电所电气主接线.....	191
第六节 主接线的技术经济分析与比较.....	207
第七节 电气主接线与一次系统可靠性分析.....	215
思考题与习题.....	228
第五章 高压配电装置	229
第一节 牵引变电所配电装置类型及对其基本要求.....	229
第二节 屋内配电装置.....	230
第三节 屋外配电装置.....	246
第四节 预装式变电所.....	253
思考题与习题.....	255
第六章 城市轨道交通直流牵引供电系统短路故障分析和常态运行下的杂散电流	257
第一节 直流牵引供电系统短路故障分析方法.....	257
第二节 直流暂态短路电流分析与计算.....	268
第三节 直流供电系统中杂散电流对金属物腐蚀机理.....	270
第四节 杂散电流分布基本原理及分析计算.....	272
第五节 杂散电流对金属物腐蚀的防护措施及监测.....	278
思考题与习题.....	282
第七章 城市轨道交通供电系统电能质量分析与列车再生能量利用	283
第一节 城市轨道交通供电系统牵引负荷谐波特点及其危害.....	283
第二节 谐波发射水平评估及抑制措施.....	284
第三节 无功功率补偿方式和补偿装置配置原则.....	288
第四节 全系统无功补偿装置构成及其容量计算与设计.....	291
第五节 列车再生制动能量吸收与利用.....	303
思考题与习题.....	306
第八章 供变电系统控制、信号系统及其自动化、数字化	307
第一节 控制方式和二次回路接线概述.....	307
第二节 高压开关传统控制、信号回路.....	314
第三节 传统中央信号系统.....	326
第四节 电气量测量系统与绝缘监测电路.....	330
第五节 交、直流自用电系统与操作电源.....	340
第六节 牵引变电所自动化系统.....	353
思考题与习题.....	364

第九章 轨道交通牵引变电所设计	365
第一节 牵引变电所设计概述	365
第二节 载流导体的发热和负载能力分析计算	365
第三节 短路故障时载流导体的发热和电动力计算	370
第四节 载流导体和电气设备选择的一般条件和短路计算点的确定	378
第五节 母线、电缆与支持绝缘子的选择	380
第六节 开关设备的选择	392
第七节 仪用互感器的选择	395
第八节 轨道交通牵引变电所电气主接线设计示例	402
思考题与习题	417
附录 常用导体、电气设备与测量表计技术数据	418
参考文献	432

Contents

Introduction	1
Chapter 1 Introduction to Power Supply and Traction Substation Equipment for Rail Transit System	14
Section 1 AC Electric Traction Substations: Equipment and Functions	14
Section 2 DC Electric Traction Substations for Urban Rail Transit: Equipment and Functions	21
Section 3 Introduction to High Voltage Equipment and SCADA for Electric Traction Power Supply System	29
Problems and Exercises	30
Chapter 2 High Voltage Equipment and Switchgear	31
Section 1 Functions and Classifications of High Voltage Equipment	31
Section 2 Formation Theory and Extinction of AC and DC Arc	32
Section 3 Operating Condition and Transient Analysis While Breaking Short-circuit Current of Circuit Breaker	40
Section 4 Technical Requirements and Parameters of High-voltage Circuit-breaker	45
Section 5 Configuration and Principle of High-voltage Circuit-breaker	48
Section 6 Operation Device of High-voltage Circuit-breaker	66
Section 7 Fuse and High-voltage Switch	71
Section 8 Direct Circuit Quick Breaker	74
Section 9 High-voltage Instrument Transformers	81
Section 10 SF ₆ GIS (Gas Insulated Switchgear)	101
Section 11 Introduction to Automatic Circuit Breaker	105
Problems and Exercises	107
Chapter 3 Work Principle of the Main Equipment of Traction Power Supply and Substation System	109
Section 1 AC Traction Transformers	109
Section 2 Configuration and Technical Characteristic of Rectifier Transformers and Silicon Rectifiers	118

Section 3	The Circuit and Operating Characteristic of 12 Pulses Rectifying Unit	135
Section 4	Equivalent Circuit of 24 Pulses Rectifier Composed of 2 Rectifier Units and Based on Four Sets of Parallel Connected 3 Phase Rectifying Bridges	149
Section 5	Load Characteristics and Operation Specifications of Rectifier	157
	Problems and Exercises	169
Chapter 4	Main Electrical Connecting Scheme and Its' Design and Operation	171
Section 1	Function, Basic Requirements and Design Principles of Main Electrical Connection	171
Section 2	Basic Form of Main Electrical Connection	173
Section 3	Characteristic of Main Electrical Connection on Traction Load Side	179
Section 4	Main Electrical Connection Scheme of AC Traction Substation and Electrical Facilities	181
Section 5	Main Electrical Connection Scheme of Main Substations,DC Traction Substations and Step-down Substation in Urban Railway Transit	191
Section 6	Technical and Economic Analysis of Main Electrical Connection Scheme	207
Section 7	Reliability Analysis of Main Electrical Connection and High-voltage System	215
	Problems and Exercises	228
Chapter 5	High Voltage Switchgear and Apparatus Arrangement	229
Section 1	Basic Concepts and Requirements for High Voltage Apparatus Arrangement of Traction Substation	229
Section 2	Indoor Switchgear Arrangement	230
Section 3	Switchyard	246
Section 4	Fabricated Cubical Substation	253
	Problems and Exercises	255
Chapter 6	Short-circuit Analysis and Stray Current in Normal State in DC Traction Power Supply System of Urban Rail Transit	257
Section 1	Analysis Method of Short Circuit in DC Traction Power Supply System	257
Section 2	Analysis and Calculation of Transient DC Short-circuit Current	268
Section 3	Principle of Corrosion of Metal Caused by Stray Current	270
Section 4	Distribution, Analysis and Calculation of Stray Current	272
Section 5	Prevention and Monitoring of the Corrosion of Metal Caused by Stray Current	278
	Problems and Exercises	282

Chapter 7	Analysis of Power Quality of Power Supply System and the Use of Regenerative Power of Urban Rail Transit	283
Section 1	Characteristic and Hazard of the Harmonics Caused by Traction Load in Urban Rail Transit	283
Section 2	Calculation and Verification of Harmonic Currents and Harmonic Voltages	284
Section 3	Methods of Reactive Power Compensation and Allocation of Compensation Devices	288
Section 4	System-wide Reactive Power Compensation Composition, Capacity Calculation and Design	291
Section 5	The Use of Regenerative Power Produced by Locomotive	303
	Problems and Exercises	306
Chapter 8	The Automation and Digitization of Control, Signal and Monitoring System and Operation Power Supply of Substation System	307
Section 1	Introduce to Control Method and Auxiliary System	307
Section 2	Traditional Control and Signal Circuit of High-voltage Switchgear	314
Section 3	Traditional Central Signal System	326
Section 4	Measuring System and Insulation Monitoring Circuit	330
Section 5	AC and DC home-load Supply System and Operating Source	340
Section 6	Automation System of Traction Power Supply System	353
	Problems and Exercises	364
Chapter 9	Design of Traction Substation of Rail Transit	365
Section 1	Introduce to Design of Traction Substation	365
Section 2	Heating and Load Capacity of Conductor	365
Section 3	Calculation of Heating and Electrodynamical Force of Conductor While Short Circuit	370
Section 4	Identification of Short-Circuit Location and Selection of Conductor and Electrical Equipment	378
Section 5	Selection of Bus, Cable and Insulator	380
Section 6	Selection of Switchgear	392
Section 7	Selection of Instrumental Transformer	395
Section 8	Examples of Main Electrical Connection Design	402
	Problems and Exercises	417
Appendix	Technical Data of Conductor, Apparatus and Measure Meter	418
References	432

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,机车或动力车总功率大,具有启动和加速快、过载能力强、运输能力大、快速、载重量大等特点,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 kWh 电能消耗 404 g 煤考虑,计算出内燃、电力牵引完成 1 亿 t·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 t/0.000 3 t)、一氧化碳为 47.4 (3.59 t/0.075 7 t)、氮氧化物为 7.1 (9.61 t/1.35 t)、二氧化硫为 62.3 (1.62 t/0.026 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)比以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比(电力牵引是指全部或部分为水电厂供电),按 2014 年数据,我国水电和其他清洁能源发电量占全国发电量的 24.8% (效率 80%)、火电约占 75.2% (效率 40%),计算得到的电力牵引加权平均总效率为 49.9%,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、轨道交通电力牵引发展概况

电力牵引始于 19 世纪末,1890 年英国伦敦首先在 5.6 km 地下铁道实现直流制(630 V)电力牵引商业运营。随后 1895 年美国巴尔的摩铁路在一个隧道区段采用直流制(675 V)的干线电力机车牵引。此后直流制长期被各国推广应用,因电力机车采用直流牵引电动机具有良好的调速特性。目前在欧、日等国仍保存部分直流电力牵引干线铁路,而城轨交通(地下铁道)则一直沿用直流电力牵引制。

干线铁路电力牵引制式经历了曲折的电流电压制改革和试验。20 世纪初,在欧洲相继出现了三相工频交流制和低频($16\frac{2}{3}$ Hz)单相交流制干线电力牵引,但前者因接触网结构复杂,

后者则需要同时进行变相和变频（将工频转换为低频）或单独设置低频发电机组与输变电系统供电，导致牵引供电装置设备和运行极大地复杂化。因而这两种供电制式都未得到推广应用，目前仅低频单相交流制在德国等少数国家尚有部分保存应用。

直到上世纪 30 年代中期，工频单相交流制电力牵引才在欧洲个别国家干线铁路中出现，并于 50 年代以后在法国、苏联等国得到进一步的完善和推广。由于二战结束后欧美和日本等国呈现强劲的经济复苏以及经济社会发展和科学技术的创新进步，推动了工业和铁路运输业的快速发展，同时得益于 50 年代以来大功率面接触硅整流器件和可关断晶闸管（GTO）相继面世，取代了长期使用笨重的引燃式离子变流器，同一时期计算机和微电子技术的推广应用和交-直-交型交流调速传动技术的开发研究获得成功，促进了无换向器交流异步（或同步）电机和采用变压变频调速（VVVF）技术的交流传动电力机车（动车）的诞生，它的特点是牵引力大，速度高且调速范围广，运行维护简单，经济性好，从而推动了高速铁路和重载铁路运输的发展。

截至上世纪末，全世界 50 多个国家和地区拥有电气化铁路总里程约为 22 万 km。其中西欧实现电力牵引的铁路里程为 8.1 万 km，电气化率为 51%，它承担西欧铁路总运量的 90% 左右。日本铁路电气化里程约为 1.2 万 km，电气化率接近 60%，承担其全国铁路总运量的比例高达 94%。同一时期，全世界高速铁路（250 km/h 及以上）里程约为 4 400 km，主要分布在西欧、日本等国。

城市轨道交通电力牵引的发展过程，和干线铁路电气化的发展相类似。上世纪 40 年代前，仅在欧美、日等少数国家的十几个大城市修建有地下铁道，二战结束后各国经济复苏和大中城市经济、社会的迅速发展，特别是近年来地面交通机动车大量增多和工业、生活等排放物共同造成城市环境严重污染，导致地下铁道等轨道交通的陆续兴建并网络化，截至 2011 年底，全世界已有 140 多个城市拥有各种形式的轨道交通系统。

城轨交通电力牵引动力电气系统关键技术的动车（车辆）牵引传动技术的发展，经历了从最早直流变阻器控制的直流串激牵引电动机传动系统和上世纪 60 年代的斩波调速直流传动控制，到 80 年代反映最新科技成就的直-交变频调速技术的交流异步电机传动控制的应用，使列车更易于实现调速，运行维护简化，更能满足列车频繁起动制动和运行平稳性的需要。

按照城市交通线路客运量的不同，城轨交通电力牵引的类型有所不同，除了大运量（单向最大小时客运能力为 3 万~6 万人次）的地下铁道外，上世纪 50 年代以来，欧、美、日等不少国家开发了中等客运量（单向最大小时客运能力为 1 万~3 万人次）的轻轨交通运输 LRT（Light Rail Transit），它是主要建在地面或为高架方式，用轨道（双轨或座式单轨）为车辆导向，采用先进信号和调度集中的一种较经济的现代化城轨交通。此外，低客运量（最大小时客运量为 0.4 万~1 万人次）的有轨电车仍在国外不少城市运营，因其造价低、建设工期短而得到较广泛推广应用。

二、我国铁路电力牵引发展简况

1949 年新中国成立前，我国仅在京、沪、津等少数大城市和大型工矿拥有有轨电车公共交通和工矿电力牵引运输，我国干线铁路不足 2 万 km，全部采用落后的蒸汽机车牵引，无任何线路实现电气化。

新中国成立后,国务院于1952年制订和启动了国家经济建设第1个五年计划,将铁路作为经济建设的“先行官”,列为优先发展项目,首先规划在西部山区和高陡坡、多隧道线路实施电气化牵引,同时通过开展干线电力牵引电流电压制研究,确定将单相交流工频25 kV牵引网电压列为国家标准,并适时从前苏联引进铁道电气化设计技术和电力机车等设备制造技术。

我国第一条电气化铁路宝成线的宝凤(州)段(长91 km),于1961年建成并通车,该线路跨越秦岭,限坡为32%,隧道相连,施行电力机车双机牵引后,货运量倍增,客运环境大为改善,为以后电力牵引的发展塑造了良好形象。1975年7月底,宝成铁路实现全线电力牵引,此后宝兰、北同蒲、京包等山区线路相继实施了电气化技术改造。

1980年改革开放以来随着经济社会的迅速发展,铁路运输的瓶颈效应凸显,从而加快了铁路电气化的步伐,促使京广、陇海、京沈、兰新、京沪等一批大运量繁忙干线铁路逐步实现电力牵引,相应提高运输能力30%以上。80—90年代期间,为满足煤炭运输需要,新建大秦重载电气化铁路,首次开行了万吨单元列车,在经济发达的珠江三角洲地区建成了我国第一条采用自耦变压器(AT)供电方式和摆式车辆、时速为200 km的广深准高速电气化铁路,全长147 km,为以后高速铁路的建设和发展创造了条件。

特别值得提出的是,2008年,时速达350 km的京津城际高速铁路的胜利建成通车,揭开了我国进入高速铁路时代的序幕。截止到2015年年底,已有京广、京沪、京津城际、京哈、郑西、石太、沪杭、兰新、贵广、南(宁)广等高速客运专线建成投运,我国高速铁路(时速200 km以上)总营业里程已达到1.9万 km,在建和即将兴建的高速铁路里程约2万 km,并初步形成以北京为中心的高铁网络架构。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。举世瞩目的京沪高速铁路全长1318 km,设计时速350 km,创造了一次建成里程最长、线路标准最高、运行速度最快的世界纪录,代表中国高速铁路最高技术水平。

经过半个多世纪的运营实践、科研开发和技术引进再创新,我国铁路电力牵引技术与装备水平有了很大提高,电力机车和动车从仿造到产品升级换代、自主开发创新,从交-直型直流牵引传动系统和部分微机控制发展为采用新型交-直-交型交流牵引传动系统和微机控制与网络控制系统,机车性能和可靠性不断提高,已形成多种轴式、多种功率系列最高持续功率为6400 kW、时速120 km的韶山型货运电力机车和时速170 km的客运机车,以及近年来开发研制的和谐型(CRH380)等总功率达1万 kW、最高时速为380 km系列高速动车与和谐(HXD型)系列高速电力机车时速达120 km,前者被誉为“代表当代中国高端制造业的最高水平之一”,满足了重载铁路和高速、普速铁路电力牵引发展的需要。

同一时期铁路电力牵引供电技术和科研创新,也不断出现了新的面貌,上世纪80年代以来研制开发了技术性能优良的牵引网高电压(2×27.5 kV)自耦变压器(AT)供电方式及成套供电设备,自主研制了高速铁路供电综合监控系统、牵引变电所自动化测定、牵引网同相供电技术、数字化牵引变电所和高速铁路牵引网自动过分相以及受电弓—接触网综合检测与监测系统等,保证了普速与高速电气化铁路安全运营,其中某些技术达到了世界先进水平。

截至2015年年底,我国已建成运营的电气化铁路总里程为7.0万 km,占全国铁路营业里程11.1万 km的57.8%,承担了铁路总客货运量的70%以上,接近欧、日等发达国家20世纪90年代的水平。

2013年《铁路主要技术政策》指出“铁路技术发展的总目标是：依靠科技进步与创新，构建完善客运高速、便捷，货运重载、快捷，速度、密度、重量合理匹配，高新技术与适用技术并举，不同等级技术装备协调发展，具有中国铁路特点的技术体系，建设安全、高效、节能、环保、高度信息化的现代化铁路”。要求“提高既有铁路电气化率，快速客运网和大能力干线、煤运通道建设电气化铁路”。

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证明，大力发展电力牵引、加速繁忙干线电气化、高速化，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，对我国铁路的高实效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。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。

此前，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，根据铁路网结构大力加强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提高运输能力的有效途径。

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。国产SS₄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；国产SS₈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（HXD₁、HXD₂为8轴，HXD₃为6轴），每轴1 600 kW的和谐1B、2B、3B（HXD_{1B}、HXD_{2B}、HXD_{3B}均6轴），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DF₄内燃机车功率为2 430 kW，最高速度可达120 km/h。国产DF₈内燃机车功率为3 140 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SS₃电力机车或DF₈内燃机车；列车重量增至5 000 t时，根据试验需采用SS₄或和谐型货运电力机车或功率更大的内燃机车牵引。我国普速铁路主型货运电力、内燃机车技术特性如表1所示。