



高等轨道交通
系列教材

CHENGSHI GUIDAO JIAOTONG
QIANYIN DIANQIHUA GAILUN

城市轨道交通 牵引电气化概论

刘文正 / 主编



北京交通大学出版社
<http://press.bjtu.edu.cn>

高等教育城市轨道交通系列教材

城市轨道交通牵引电气化概论

刘文正 主编



北京交通大学出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书面向城市轨道交通专业,是关于城市轨道交通牵引电气化的基础教材。

全书共分8章,内容包括:城市轨道交通电气系统,车辆的牵引传动系统,车辆的运行与控制,车辆辅助电器设备,城市轨道交通供电系统,电能的传输与受流,城市轨道交通供电系统电器设备与保护,新型轨道交通车辆。

本教材可供相关专业的全日制或在职学习的本专科学生使用,也可供从事相关工作的工程技术人员参考。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

城市轨道交通牵引电气化概论/刘文正主编. —北京:北京交通大学出版社, 2011. 12
(高等教育城市轨道交通系列教材)

ISBN 978 - 7 - 5121 - 0820 - 2

I. ①城… II. ①刘… III. ①城市铁路: 电气化铁道 - 概论 - 高等学校 - 教材
IV. ①U239.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 253205 号

责任编辑: 陈跃琴 贾慧娟

特邀编辑: 黄 瑶

出版发行: 北京交通大学出版社

电话: 010 - 51686414

地 址: 北京市海淀区高粱桥斜街 44 号

邮编: 100044

印 刷 者: 北京瑞达方舟印务有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 185 × 260 印张: 15.5 字数: 397 千字

版 次: 2012 年 1 月第 1 版 2012 年 1 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978 - 7 - 5121 - 0820 - 2/U · 80

印 数: 1 ~ 2 500 册 定价: 32.00 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。

《高等教育城市轨道交通系列教材》

编 委 会

顾 问：施仲衡

主 任：陈 庚

副 主 任：朱晓宁 司银涛 章梓茂

委 员：郑光信 毛保华 韩宝明

赵晓波 贾慧娟 李 菊

本书主编：刘文正

出版说明

为促进城市轨道交通专业教材体系的建设,满足目前城市轨道交通专业人才培养的需要,北京交通大学交通运输学院、远程与继续教育学院和北京交通大学出版社组织以北京交通大学从事轨道交通研究教学的一线老师为主体、联合其他交通院校教师,并在北京地铁公司、广州市地下铁道总公司、南京地下铁道有限责任公司、北京市轨道交通建设管理有限公司、香港地铁公司等单位有关领导和专家的大力支持下,编写了本套“高等教育城市轨道交通系列教材”。

教材编写突出实用性。本着“理论部分通俗易懂,实操部分图文并茂”的原则,侧重实际工作岗位操作技能的培养。为方便读者,本系列教材采用“立体化”教学资源建设方式,配套有教学课件、习题库、自学指导书,并将陆续配备教学光盘。本系列教材可供相关专业的全日制或在职学习的本专科学生使用,也可供从事相关工作的工程技术人员参考。

本系列教材的出版得到施仲衡院士的关注和首肯,多年从事城市轨道交通研究的毛保华教授和朱晓宁教授对本系列教材的编写给予具体指导,《都市快轨交通》杂志社主办和协办单位专家也给予本教材多方面的帮助和支持,在此一并致谢。

本系列教材从2011年8月起陆续推出,首批包括:《城市轨道交通设备》、《列车运行计算与设计》、《城市轨道交通运营管理》、《城市规划》、《轨道交通需求分析》、《交通政策法规》、《城市轨道交通规划与设计》、《企业发展战略》、《城市轨道交通土建工程》、《城市轨道交通车辆概论》、《城市轨道交通牵引电气化概论》、《城市轨道交通信号与通信概论》、《城市轨道交通列车运行控制》、《城市轨道交通信息技术》、《城市轨道交通运营统计分析》、《城市轨道交通安全管理》、《城市轨道交通运营统计分析》、《城市轨道交通客流分析》、《城市轨道交通服务质量管理》、《城市轨道交通客运管理》。

希望本套教材的出版对城市轨道交通的发展、对城市轨道交通专业人才的培养有所贡献。

教材编写委员会
2011年6月

总 序

近年来,中国经济飞速发展,城市化进程逐步加快。在大城市中,地面建筑越来越密集,人口越来越多,交通量越来越大,交通拥堵对社会效益和经济效益都带来了很大影响。据统计,国内每年由于交通拥堵造成的损失将近一千多亿元。

解决交通拥堵,有各种各样的方法,其中城市轨道交通由于其在土地利用、能源消耗、空气质量、景观质量、客运质量等方面具有一定优势,正逐步成为许多大城市交通发展战略中的骨干,并形成以地铁、城市快速铁路、高架轻轨等为主的多元化发展趋势。

我国城市轨道交通从20世纪50年代开始筹划。1965年7月,北京市开始兴建中国第一条地下铁道。经过近50年,特别是近十年的发展,截至2010年年底,我国已有13个城市拥有49条运营线路,总里程达1 425.5 km。另有16个城市,总计96条、2 000余 km的线路正在建设中。目前已发展和规划发展城市轨道交通的城市总数已经接近50个,全部规划线路超过300条,总里程超过10 000 km。

随着城市轨道交通在全国范围的迅猛发展,各地区均急需轨道交通建设、运营管理的大批技术人员和应用型人才。目前全国有近百所高等院校和高等职业院校已开设或准备开设城市轨道交通及相关专业。全国几十家相关企业也都设立自己的培训中心或培训部门。

从目前的情况看,在今后几年,城市轨道交通人才的培养应该处于大专院校的学历教育与企业、社会的能力培训相结合的状态。但现实情况是相关的教材,特别是培养应用型人才的优质教材、教学指导书的建设和出版严重不足,落后于城市轨道交通发展的需要。

2011年年初,北京交通大学远程与继续教育学院、交通运输学院、北京交通大学出版社共同筹划出版了“高等教育城市轨道交通系列教材”。这套教材的出版,恰逢其时。首先,这套教材由国内该领域学术界和企业界的知名专家执笔。他们的参与,既保证了对中国轨道交通探索与实践的传承,同时也突出了本套教材的实用性。其次,它丰富、实用的内容和多样性的课程设置,为行业内“城市轨道交通”各类人才的培养,提供了专业的、实用的教材。

祝愿中国轨道交通事业蓬勃发展,也祝愿北京交通大学出版社这套“高等教育城市轨道交通系列教材”能够为促进我国城市轨道交通又好又快的发展提供支撑!

中国工程院院士

纪仲衡

2011年5月

前 言

世界上第一条地铁，即伦敦地铁采用的是蒸汽机车牵引。但是，随着电力牵引机车的出现，由于其动力强劲、运行控制方便、清洁等优点，在地铁系统中迅速取代了蒸汽机车。特别是自 19 世纪 90 年代以来，随着电力电子技术的发展，电力牵引控制技术发生着日新月异的变化，各种先进技术已经被广泛应用到了城市轨道交通电力车辆中。原来的直流电机牵引方式已逐渐被交流电机牵引方式所取代，并出现了以中低速磁悬浮技术为代表的新型交通工具。

目前，城市轨道交通均采用电能作为动力，并主要采用电力牵引方式驱动车辆运行，因此，电能的传输与电力牵引控制技术在城市交通客运中起着重要的作用。本书主要介绍当代城市轨道交通系统先进的车辆电力牵引传动控制技术与交直流电能变换传输技术。全书共分 8 章：第 1 章城市轨道交通电气系统，介绍了城市轨道交通的发展历程及其电气系统的构成与功能；第 2 章车辆的牵引传动系统，介绍了轮轨关系、牵引力与制动力的形成、牵引电机的基本工作原理及鼠笼式异步电动机的运行特性；第 3 章车辆的运行与控制，从车辆的运行模式出发，详细地介绍了车辆的传动、制动及黏着控制装置及控制方法；第 4 章车辆辅助电器设备，介绍了车辆辅助电源系统、车辆控制与制动系统、空调装置、照明系统与车体配线等；第 5 章城市轨道交通供电系统，重点介绍了供电系统主接线、牵引供电计算分析；第 6 章电能的传输与受流，论述了接触轨、架空接触网等电能传输系统及受流器，重点对柔性架空接触网进行了介绍；第 7 章城市轨道交通供电系统电器设备与保护，主要介绍了用于电能转换的牵引变压器和整流器，对断路器等高压电器设备的工作原理及作用进行了阐述，并对电力监控系统与防雷和接地系统的构成及其功能进行了介绍；第 8 章新型轨道交通车辆，介绍了中低速磁悬浮交通、直线电机轮轨交通、其他新型轨道交通车辆运行方式与技术特点。

本书是在杨会胜、龚兆丰、孔飞、贾凌云、刘冉、王伟亮、张德金、潘利江等同学的大力帮助下完成的，在此深表感谢！本书的出版得到了北京交通大学出版社和北京交通大学远程与继续教育学院的各位老师的鼓励和支持，在此表示衷心的感谢！此外，书中的部分内容还选用了其他作者的一些成果和文献，在此也向这些作者表示谢意！

由于编者的水平有限，错误和不当之处在所难免，殷切希望读者批评指正。

编者

2011 年 5 月于北京

目 录

第1章 城市轨道交通电气系统

- 1.1 城市轨道交通电气技术的发展历程 3
 - 1.1.1 城市轨道交通的发展历程 3
 - 1.1.2 电气化技术的发展历程 8
- 1.2 城市轨道交通电气系统构成 10
 - 1.2.1 牵引供电系统概况 10
 - 1.2.2 电力牵引系统概况 11

第2章 车辆的牵引传动系统

- 2.1 车辆传动系统概况 15
 - 2.1.1 车辆的组成 15
 - 2.1.2 车辆行走装置 16
 - 2.1.3 车辆牵引传动系统构成 19
- 2.2 轮轨关系 20
 - 2.2.1 黏着特性 20
 - 2.2.2 牵引力的形成及限制 24
 - 2.2.3 制动力的形成 25
- 2.3 牵引电机 26
 - 2.3.1 交流电机基础知识 27
 - 2.3.2 三相交流异步电动机 31
 - 2.3.3 三相鼠笼式异步电动机 32
- 2.4 牵引异步电动机的运行 34
 - 2.4.1 三相异步电动机的运行状态 34
 - 2.4.2 三相异步电动机的启动与运行 39

第3章 车辆的运行与控制

- 3.1 车辆的运行模式 48
- 3.2 车辆的传动 50
 - 3.2.1 逆变电路 50
 - 3.2.2 逆变电路开关器件 IGBT 58
- 3.3 车辆的传动控制 63
 - 3.3.1 VVVF 转速控制 63

- 3.3.2 力矩转速闭环控制 66
- 3.4 车辆的制动与黏着控制 70
 - 3.4.1 制动控制 70
 - 3.4.2 黏着控制 73

第4章 车辆辅助电器设备

- 4.1 车辆辅助电源系统 77
 - 4.1.1 辅助电源系统的概述 78
 - 4.1.2 辅助逆变器 79
 - 4.1.3 直流电源部分和蓄电池组 82
- 4.2 车辆控制与制动系统 83
 - 4.2.1 车辆控制系统 83
 - 4.2.2 制动系统 88
- 4.3 车辆空调装置与照明系统 92
 - 4.3.1 车辆空调装置 92
 - 4.3.2 照明系统 95
- 4.4 其他电器设备 97
 - 4.4.1 断路器 97
 - 4.4.2 传感器 98
 - 4.4.3 电磁阀 98

第5章 城市轨道交通供电系统

- 5.1 城市轨道交通供电系统组成与供电方式 103
 - 5.1.1 城市轨道交通供电系统的组成 103
 - 5.1.2 电网向牵引变电所供电方式 104
- 5.2 主变电所与中压网络 106
 - 5.2.1 主变电所 106
 - 5.2.2 中压网络 110
- 5.3 牵引变电所与降压变电所 115
 - 5.3.1 牵引变电所 115
 - 5.3.2 降压变电所 120

5.4 城市轨道交通供电计算分析	122
5.4.1 牵引供电计算方法简介	123
5.4.2 牵引变压器容量计算	124
5.4.3 牵引网的电压损失	127
5.4.4 短路故障	127

第6章 电能的传输与受流

6.1 电能传输及接触网分类	131
6.1.1 电能的传输	131
6.1.2 接触网的分类	132
6.2 接触轨	132
6.2.1 接触轨的组成及受流方式	132
6.2.2 接触轨材质	134
6.3 柔性架空接触网	135
6.3.1 柔性架空接触网基本组成	135
6.3.2 柔性架空接触网的悬挂类型及特征	137
6.3.3 柔性架空接触网的工作特点及基本要求	144
6.4 刚性架空接触网	145
6.4.1 刚性架空接触网的结构	145
6.4.2 刚性架空接触网的特点	147
6.4.3 接触网不同形式的对比	148
6.5 受流器	148
6.5.1 集电靴结构及工作原理	149
6.5.2 受电弓结构及工作原理	150
6.5.3 受电弓与接触网的相互作用	152
6.6 杂散电流的形成及危害	154
6.6.1 概述	154
6.6.2 杂散电流的产生	155
6.6.3 杂散电流的危害及防护	156

第7章 城市轨道交通供电系统 电器设备与保护

7.1 牵引变压器与整流器	162
7.1.1 变压器	162

7.1.2 整流器	167
7.2 高压电器设备	174
7.2.1 开关电器	174
7.2.2 保护与测量电器	177
7.2.3 限流与补偿电器	180
7.2.4 六氟化硫全封闭组合电器	181
7.3 城市轨道交通供电系统的保护	182
7.3.1 继电保护概述	182
7.3.2 城市轨道交通牵引供电系统继电保护装置的配置情况	185
7.3.3 微机保护系统	193
7.3.4 电力监控系统	198
7.4 牵引供电系统的防雷与接地	201
7.4.1 防雷	201
7.4.2 接地	203

第8章 新型轨道交通车辆

8.1 中低速磁悬浮交通	210
8.1.1 磁悬浮列车的发展历史	210
8.1.2 常导型常速磁悬浮交通	215
8.2 直线电机轮轨交通	218
8.2.1 直线电机轮轨交通的特点	218
8.2.2 直线电机轮轨交通牵引与制动原理	219
8.3 其他新型轨道交通车辆技术特点	223
8.3.1 独轨交通	223
8.3.2 索轨交通	226
8.3.3 自动轨道交通	229
8.3.4 胶轮交通	233

附录A 《城市轨道交通牵引电气化概论》 模拟试题

A1 模拟试题1	236
A2 模拟试题2	237

参考文献	240
------------	-----

1

第1章

城市轨道交通电气系统

概 要

本章主要讲述世界城市轨道交通的发展状况、我国城市轨道交通的发展状况以及城市轨道交通电气系统构成等方面的内容。

自1863年伦敦建成世界上第一条蒸汽机车牵引的地下铁道线路开始,城市轨道交通已经有140多年的发展历史。之后,随着世界各大城市流动人口膨胀和交通拥挤的凸显,城市轨道交通兴起了一个建设高潮。世界上许多城市如纽约、伦敦、巴黎、莫斯科、东京等很早就建立了各自的地铁系统。

我国由于经济实力和技术水平的限制,城市轨道交通建设起步较晚,第一条投入运营的地铁是1969年建成的北京地铁一期工程。1995年4月10日,上海地铁正式运营,它是目前中国线路最长的城市轨道交通系统。在新型轨道交通方面,我国也有很多应用。2003年,上海磁悬浮列车开通,成为世界上第一段投入商业运行的高速磁悬浮列车。2004年,重庆市从日本引进的独轨交通系统开始运营。作为直线电机的应用,2007年,广州地铁四号线开通运行;2008年7月1日,首都国际机场快轨开通运行。

城市轨道交通的电气化发展历程,主要体现在车辆牵引传动的技术变革。城市轨道交通的车辆的牵引控制系统通常可分为4种:直流变阻、直流斩波调阻、直流斩波调压和交流变压变频。城市轨道交通车辆的牵引电机长期以来普遍采用直流牵引电机,其控制方式有变阻控制和斩波调压控制,但这种方式在车辆启动停止时能量浪费严重,目前已被淘汰。交流变频调速装置一出现就以其优秀的调速性能及明显的节电效果迅猛发展,并逐步取代过去的变阻控制调速和斩波调压调速等装置。

目前,世界上许多国家在地铁与轻轨的基础上进行变革与创新,又派生出多种新型城市轨道交通系统,如独轨交通、AGT(Automated Guideway Transit,自动导轨交通系统)、索轨交通、胶轮交通、磁悬浮交通和直线电机轨道交通等。

与电气化铁路的电气系统不同,城市轨道交通的电力牵引系统有着自己的特点。城市轨道交通供电系统是城市轨道交通工程中重要的机电设备系统之一,它担负着为电动列车和各种运营设备提供电能的重要任务。牵引供电技术与车辆技术的发展史及城市轨道交通技术的发展史紧密相关、直接相联。城市轨道交通车辆

的供电电源是直流电网，电网经过变电站，再通过直流变电所，最后进入城市轨道交通的供电网。城市轨道交通车辆的电力传动形式可以分为三类：直流牵引电机驱动直—直型电动车组形式、交流异步牵引电机驱动直—交型电动车组形式，以及直线牵引电机驱动直—交型电动车组形式。

本章重点

1. 了解世界和我国的轨道交通的发展历史。
2. 了解城市轨道交通车辆的电力驱动方式。
3. 了解直流传动方式的基本概念。
4. 掌握交流传动方式的基本概念。
5. 掌握城市轨道交通供电系统的组成。

1.1

城市轨道交通电气技术的发展历程

1.1.1 城市轨道交通的发展历程

纵观世界城市轨道交通发展历史，大致可分为两大阶段。

第一阶段从1863年到20世纪中叶。从第一条地铁诞生起，欧美的城市轨道交通发展较快，第二次世界大战前，有13个城市修建了地铁。

城市轨道交通公共的雏形是轨道公共马车，如图1-1所示。

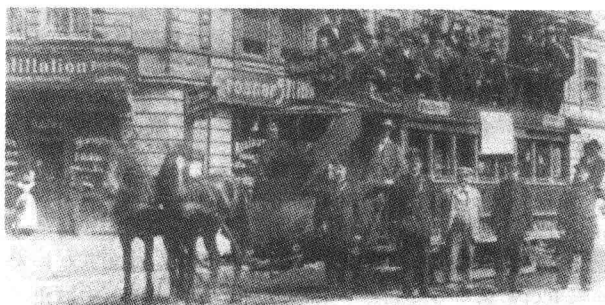


图1-1 城市轨道交通公共的雏形——轨道公共马车

有轨电车已有100多年历史。在1881年德国柏林工业博览会期间，展示了一列3辆电车编组的小功率有轨电车（DC 120 V，22 kW），车辆只能乘坐6人，在400 m长的轨道上往返运行，如图1-2所示。这是世界上第一辆有轨电车，它给世人提供了富有创意的启示。

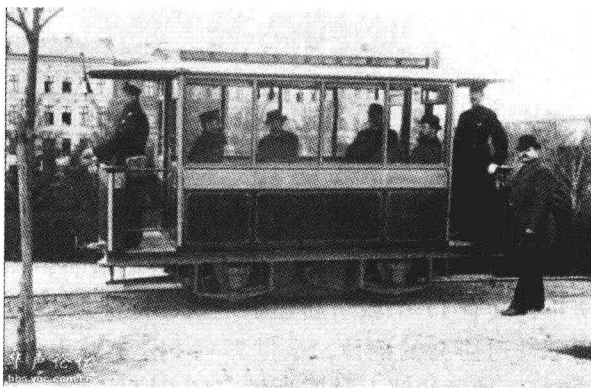


图1-2 1881年德国柏林工业博览会上展示的小功率有轨电车

1863 年,世界上第一条用蒸汽机车牵引的地下铁道线路在英国伦敦建成通车,当时还没有电车和电灯,至今已有 140 多年的历史。1890 年伦敦地铁改用电力牵引,采用 DC 600 V,由第三轨供电。如今的伦敦地铁系统已成为世界上的先进技术范例之一,尤其是地铁实现了电气化后,伦敦的地铁几乎每年都有新进展。目前,伦敦地铁线路总长度约 410 km (地下隧道 171 km),共设置车站 275 座,地铁车辆保有量总数约 4 139 辆,年客运总量已突破 8 亿人次,图 1-3 为 1890 年的伦敦地铁。

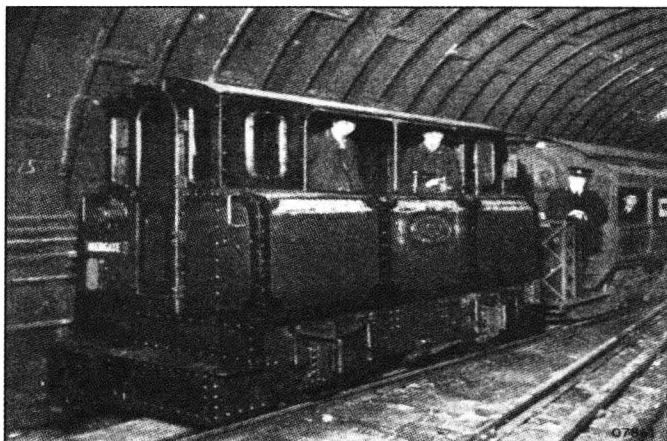


图 1-3 1890 年的伦敦地铁

受伦敦成功建设地下铁道的影响,美国纽约也于 1867 年建成了第一条地铁。现在纽约已发展成为世界上地铁线路最多、里程最长的一座城市。法国巴黎也是最早修建地铁的城市之一,时至今日,巴黎市区已拥有地铁线路 15 条,图 1-4 为巴黎的早期地铁。



图 1-4 法国巴黎的早期地铁

第二阶段从 20 世纪中叶至今。第二次世界大战后,伴随着各国城市的快速发展,地铁发展极为迅速。到 1969 年,又有 17 个城市新建了地铁,特别是 1970 年以后,地铁发展更快。根据 2005 年日本地下铁道协会的统计,全世界有 142 个城市拥有城市轨道交通系统。其中 112 个城市拥有 8 227 km 地铁线路,计有地铁车辆 64 587 辆,其中 90% 以上线路均在 20 世纪 90 年代以前建成。排名前 10 位的城市依次是:巴黎、纽约、伦敦、首尔、莫斯科、

东京、芝加哥、柏林、波士顿、旧金山, 其中巴黎、纽约、伦敦, 均在 400 km 以上。

1925—1949 年, 其间经历了第二次世界大战, 各国都着眼于自身的安危, 地铁建设处于低潮, 但仍有日本的东京、大阪, 苏联的莫斯科等少数城市在此期间修建了地铁。图 1-5 为日本名古屋地铁, 图 1-6 为美国华盛顿地铁。



图 1-5 日本名古屋地铁

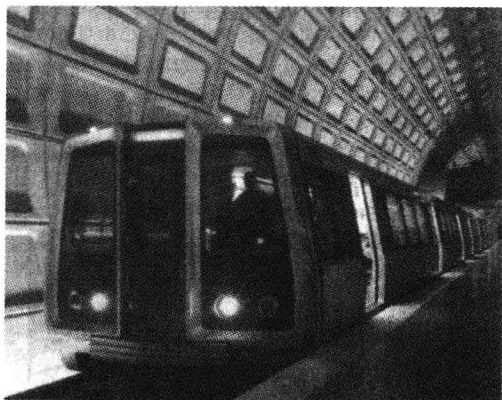


图 1-6 美国华盛顿地铁

1975 年至今的几十年时间里, 由于城市人口的膨胀和道路交通的拥挤, 城市轨道交通建设又进入一个新的发展阶段, 世界上许多城市在此期间建成了地铁或正在修建地铁。并且, 由于高科技的飞速发展, 中等运量的轨道交通系统已不完全局限在传统的钢轮钢轨系统方面, 而是形成了一个形式多样的全新概念, 如 AGT、独轨交通系统 (见图 1-7)、直线电机车系统和橡胶轮体系的新交通系统。如日本从德国引进专利, 近 30 年开发了多种独轨铁路, 在世界城市轨道交通中独树一帜。新型轨道交通的车辆特点在第 8 章有详细介绍。

由于经济实力和技术水平的限制, 我国城市轨道交通建设起步较晚。第一条投入运营的地铁是 1969 年建成的北京地铁一期工程, 总计 23.6 km, 图 1-8 是 1971 年开行的北京地铁一号线。

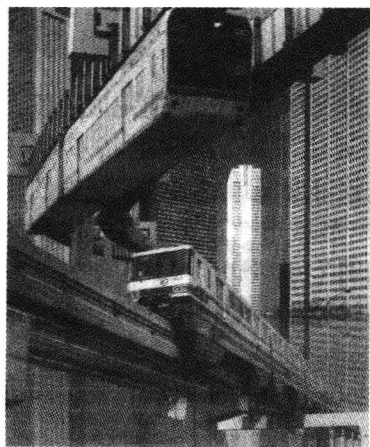


图 1-7 独轨交通系统



图 1-8 1971 年开行的北京地铁一号线

1995 年 4 月 10 日, 上海地铁正式运营, 是继北京地铁、天津地铁建成通车后中国内地投入运营的第三个城市轨道交通系统, 也是目前中国线路最长的城市轨道交通系统。截至 2010 年 4 月 20 日, 上海轨道交通线网已开通运营 11 条线、266 座车站, 运营里程达 410 km (不含磁悬浮示范线), 近期及远期规划则达到 510 km 和 970 km。目前, 上海轨道交通的总长超过 400 km, 位居世界第一。图 1-9 为上海轨道交通 8 号线。



图 1-9 上海轨道交通 8 号线

总体来讲, 我国的城市轨道交通大致经历以下几个阶段。

(1) 起步阶段 (1965—1997 年)

20 世纪 50 年代, 我国就开始筹备地铁建设, 规划了北京地铁网络。1965—1976 年建设了北京地铁 1 号线一期工程。随后建设了天津 1 号地铁线 (7.1 km)、北京地铁 2 号线、上海地铁 1 号线, 广州地铁 1 号线等。之后, 我国的城市轨道交通建设一直处于停滞状态。

(2) 兴起阶段 (1999—2004 年)

随着我国经济的高速发展, 城市化进程加快, 城市轨道交通进入到高速发展阶段, 除了北京、上海、广州、天津这四大城市继续展开城市轨道交通建设外, 国家于 1999 年开始陆续审批了深圳、武汉、南京、长春、重庆、大连等 6 座比较重要城市的地铁或轻轨的建设项目, 建设速度大大超过前 30 年, 并且从国外引进了一些新型城市轨道交通系统。例如, 我国重庆市从日本引进的独轨交通系统也已经开始运营, 如图 1-10 所示。2003 年, 上海磁悬浮列车开通, 它是世界上第一段投入商业运行的高速磁悬浮列车 (见图 1-11), 设计最高运行速度为每小时 430 km, 当时是仅次于飞机的时速。

2007 年, 广州地铁四号线 (见图 1-12) 开通运行, 2008 年 7 月 1 日, 首都国际机场快轨开通运行。上述两条线路都是利用直线电机作为牵引传动系统。

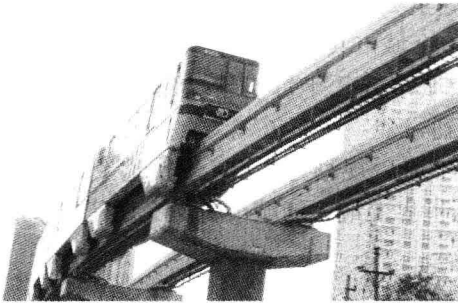


图 1-10 重庆独轨交通系统

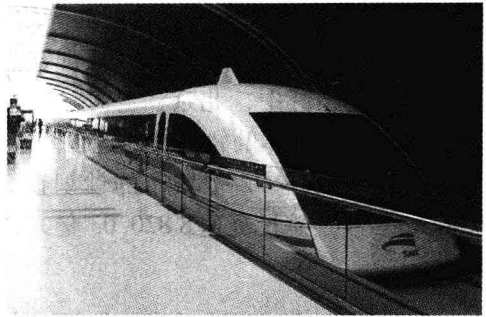


图 1-11 上海磁悬浮列车

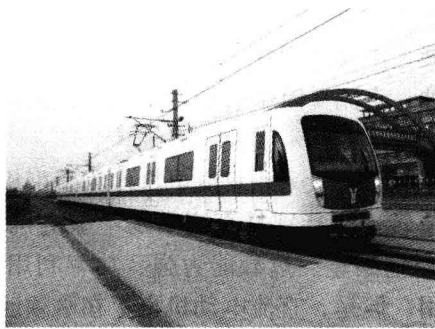


图 1-12 广州地铁四号线

(3) 高速发展阶段（2005 年至今）

在这一阶段，10 个城市的轨道交通建设继续蓬勃发展，北京、上海、天津等 10 个城市已有建成运营的轨道交通见表 1-1。

表 1-1 我国 10 城市轨道交通营运统计汇总表（截至 2008 年底）

城 市	运营线路/km	地铁/km	轻轨/km	有轨电车/km
北京	200	200	—	—
上海	253	187	48	—
天津	79	26	45	8
大连	87	—	63	24
长春	40	—	32	8
南京	22	22	—	—
武汉	10	—	10	—
广州	116	116	—	—
深圳	22	22	—	—
重庆	19	—	19	—
总计	848	573	217	40

从上表可以看出，我国城市轨道交通建设发展迅猛。1999—2008 年的 10 年间，我国内地建有地铁的城市从 4 个增加到 6 个（北京、上海、天津、广州、深圳、南京）；建有轻轨的城市，从零增加到 6 个（上海、天津、武汉、长春、重庆、大连）；以上 10 个城市拥有已建成的轨道交通 29 条线路并投入运营，运营里程达 848 km。

杭州、苏州、成都、沈阳、哈尔滨、西安 6 座经济比较发达或地理位置重要的城市中的

建设项目也得到了国家发改委的批准。此外,截至2008年底,北京、上海、天津、广州、深圳、武汉、南京、杭州、苏州、成都、沈阳11个城市共46条线路正在开工建设,建设总里程1212.3 km;其中,北京、上海、广州3个城市近几年每年新增的线路长度都达到了30~50 km。我国总体的轨道交通建设明显进入到一个“快车道”。

目前,全国已有22个城市的计划在2015年前后规划建设79条轨道交通线路,总长2259.84 km,涉及总投资达8820.03亿元,成为世界上最大的城市轨道交通建设市场。

1.1.2 电气化技术的发展历程

轨道交通车辆的技术发展,主要体现在车辆牵引传动的技术变革。地铁和轻轨车辆的牵引控制系统,通常可分为4种:直流变阻牵引控制系统、直流斩波调阻牵引控制系统、直流斩波调压牵引控制系统和交流变压变频牵引控制系统。

在早期的城市轨道交通车辆中一般采用直流电机作为牵引机。由于改变直流电机的端电压或励磁电压可以方便地调节转速,特别是直流串励牵引电机,具有适合牵引需要的“牛马”特性、起动性能好、调速范围宽、过载能力强、功率利用充分、控制简单等优点,在城市轨道车辆上得到广泛使用。但是,直流电动机也存在必须通过换向器才能工作,结构复杂,检修工作量大等缺点。早期的直流牵引电机的控制方式一般采用变阻控制。虽然其结构简单,但由于车辆需要频繁启动和制动,使约20%的电能消耗在电阻上产生大量的热能。既浪费能源,又会造成隧道内温度升高,易引发火灾等问题。

随着电力电子器件的迅速发展,在20世纪70年代出现了采用大功率门极可关断全控型晶闸管(GTO)器件的斩波控制方式。斩波调压控制可以实现无触点,无级调速,使车辆运行平稳,可靠性也大大提高;无需启动电阻,并可实现再生制动,大大节约了电能,降低了运营成本。采用直流斩波控制方式可比变阻控制方式节省电能为20%~30%,国外轨道交通车辆从70年代起普遍采用了斩波调压技术。

近年来,各国为了使车辆运行更为平稳顺畅并达到主电动机无维修化目的,成功开发了交流异步电动机变压变频控制技术。20世纪80年代后,发展起来的使用VVVF(Variable Voltage Variable Frequency, 变压变频)控制最新技术的城市轨道交通车辆已进入实用阶段。VVVF控制系统是将DC 750 V或1500 V通过GTO或IGBT逆变器和微机控制获得一个频率和电压可控制的三相交流电源,使交流异步牵引电机的转速可以平滑调节。由于采用了微机控制,可使系统更可靠,还可实现系统自动检测和故障诊断,为车辆的安全运行、维修及保养提供了极大方便,因此获得了强大的生命力。

1975年,加拿大庞巴迪公司提出可将直线感应电机应用于轨道交通系统。直线电机无旋转部件,呈扁平形,可降低车辆高度,从而缩小了地铁隧道直径,降低了工程成本;直线电机运行不受黏着限制,可得到较高的加速度和减速度;此外还具有噪声较小等突出优点。近年来在城市轨道交通车辆中也得到一定程度的应用。常见的电动车辆技术性能如表1-2所示。