

城市轨道交通职业教育系列教材——城轨供电技术

CHENGSHI GUIDAO JIAOTONG ZHIYE JIAOYU XILIE JIAOCAI  
CHENGGUI GONGDIAN JISHU

# 城市轨道交通 供电系统运行与管理

主 编 ○ 刘让雄  
副主编 ○ 戴慧吾

CHENGSHI GUIDAO JIAOTONG  
GONGDIAN XITONG YUNXING YU GUANLI



西南交通大学出版社

城市轨道交通职业教育系列教材——城轨供电技术

CHENGSHI GUIDAO JIAOTONG ZHIYE JIAOYU XILIE JIAOCAI  
CHENGGUI GONGDIAN JISHU

# 城市轨道交通 供电系统运行与管理

主 编 ○ 刘让雄  
副主编 ○ 戴慧吾

西南交通大学出版社  
· 成 都 ·



## 内容提要

本书为城市轨道交通职业教育系列教材之城轨供电技术专业教材之一。全书共分十二章,以“受电—变电—配电—馈电”为主线,系统介绍了外部电源、主变电所、中压网络、牵引供电系统和动力照明系统这5项供变电主体;以“监测防护”为主线,重点介绍了电力监控与数据采集、综合接地与过电压保护、杂散电流防护3大系统;以“运行校验”为主线,主要介绍了城轨供电系统的短路计算与电压损失计算;以“运行管理”为主线,全面介绍了运行管理的原则任务、规程职责、接口划分以及安全管理等。在书中相应章节还列举了有关实例。

本书是高等职业教育城轨供电技术专业教学用书,也可作为相应的职业技能培训教材使用,同时还可供从事城轨交通供电运行与管理的相关人员参考。

---

### 图书在版编目(CIP)数据

城市轨道交通供电系统运行与管理 / 刘让雄主编.  
—成都:西南交通大学出版社, 2015.9  
城市轨道交通职业教育系列教材. 城轨供电技术  
ISBN 978-7-5643-4268-5

I. ①城… II. ①刘… III. ①城市轨道交通—供电系统—  
高等职业教育—教材 IV. ①U239.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第209307号

---

城市轨道交通职业教育系列教材——城轨供电技术

城市轨道交通供电系统运行与管理

主编 刘让雄

责任编辑 宋彦博  
助理编辑 张少华  
封面设计 何东琳设计工作室

---

出版发行 西南交通大学出版社  
(四川省成都市金牛区交大路146号)  
发行部电话 028-87600564 028-87600533  
邮政编码 610031  
网 址 <http://www.xnjdcbs.com>

---

印刷 四川森林印务有限责任公司  
成品尺寸 185 mm × 260 mm  
印 张 22.25  
字 数 554 千  
版 次 2015年9月第1版  
印 次 2015年9月第1次  
书 号 ISBN 978-7-5643-4268-5  
定 价 46.00 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

## 出版说明

城市轨道交通凭借快捷、准时、舒适、运量大、能耗低、污染小、占地少等优点，日益成为城市现代化建设进程中重要的公益性基础设施项目。城市轨道交通涉及面广、综合性很强，其发展状况已被当成一个城市综合实力和现代化程度的重要评判指标。由此，城市轨道交通建设正在我国兴起一个新的浪潮，社会对城市轨道交通专业人才的需求巨大，给城市轨道交通类专业的职业教育发展带来了良好契机。

西南交通大学出版社与国内诸多交通院校一直保持友好往来，并整合它们在轨道交通领域的尖端科技优势和人才集成优势，致力于为国家轨道交通教育事业做出贡献，形成了以“轨道交通”为核心的出版特色，在教育界、学界都拥有良好的口碑和较高的品牌知名度。

本套丛书从满足快速增长的城市轨道交通专业实用型人才培养需求出发，从校企合作教学直接面向岗位需求这一特点出发，精心组织国内相关专业优秀教育工作者或优秀教育工作者，分“运营管理”“工程技术”“车辆”“控制”“供电技术”五大类系统地为读者呈现城市轨道交通教育课程全景。在编写时，力求体现如下特点：

### ◎ 适用性

理论知识够用即可，在讲述专业知识的基础上，突出实际操作技能的训练，注重岗位关键能力的培养。

### ◎ 专业性

图书的顶层设计从国家高职高专专业目录规范出发，内容编排紧密结合岗位应用实际，体现专业性和主流设备前沿特征，体现教学实际需求。同时，在编写或修改时，尽可能地让一线用人单位参与进来，根据生产现场实际提出建议。

### ◎ 生动性

在架构设计和版式设计上，力求简洁生动，图文并茂；努力体现二维码技术等移动互联网时代元素在图书中的应用，尽可能把生产实际和研究成果，用立体生动的形式予以表达，便于读者理解掌握。

这套书可作为高等职业院校、中等职业学校城市轨道交通相关专业的教学用书，也可作为城市轨道交通企业新职工的培训教材。有关教材的课件资料等，可以联系我社使用。

联系电话：028-87600533

邮箱：swjtucbsfx@163.com

西南交通大学出版社

二〇一五年八月

# 前 言

城市轨道交通具有运量大、快捷舒适、安全节能、污染轻、占地少等诸多优势，正成为我国众多城市发展公共交通的优先领域。截至 2014 年年底，我国内地已有 22 个城市开通运营 94 条城市轨道交通线路，运营线路总长已接近 3 000 km，位居世界第一。全国 48 个百万人以上的大城市中已有近 40 个城市开展了城市轨道交通的建设或筹建工作。

城市轨道交通事业的大发展为我国高等职业院校的毕业生提供了大量的就业岗位。巨大的市场需求推动了我国高等职业教育城市轨道交通类专业的建设与发展，不少高等职业院校的城市轨道交通类专业学生总数已快速增至甚至超过轨道交通类专业学生总数的一半。然而，与人才培养数量快速增长的喜人形势相比，城市轨道交通类专业教材的建设却明显滞后于行业发展，难以适应高素质技能型人才培养的需求。“城市轨道交通供电系统”作为城轨供电专业的一门重要专业课程，近几年来，业内相继出版了几种与之相关的高职教材，但是这些教材的内容与变配电所以及接触网教材的重复率较高，而真正体现供电“系统”的内容又很少，因此，目前仍然难以选择合适的城轨供电系统教材。本书为此做了一些有益的探索与尝试。

全书共分为十二章。其中：

第一章，概述了城市轨道交通发展历程、电力系统与城市轨道交通供电系统。

第二章至第九章，从外部电源、主变电所、中压网络、牵引供电系统、动力照明系统、电力监控与数据采集系统、综合接地系统与过电压保护以及杂散电流防护共 8 个方面，系统介绍了城轨供电系统的构成、功能及相互关系等。

第十章与第十一章，介绍了城轨供电系统的短路计算与电压损失计算。计算分析是供电系统分析的重要内容，也是教学的难点。在编写这两章内容时，编者考虑了高职学生的知识基础，对一些内容作了适当删减。

第十二章，结合企业运行管理实际，较详细地介绍了城轨供电系统运行管理的原则任务、岗位职责、规程制度、接口划分以及安全管理等内容，有助于实现专业技术知识—设备运行—企业管理的融合，实现教学过程与生产过程较好的对接。

本书编写的总体指导思想是使学生较全面地了解与掌握城轨供电系统的相关知识，完善城轨供电系统的知识结构，培养系统分析问题的能力，增强学生的职业迁移能力和可持续发展能力。在编写过程中，一是力求全面系统地阐述城轨供电系统，同时力争减少或避免同变配电所和接触网教材内容的重叠，凡是涉及变配电所和接触网的具体设备与结构的内容，本书一概不予详细介绍；二是力求内容实用易懂，方便阅读。为此，在每章开始列出了本章的“教学目标”和“知识结构”，每节编写了“本节导读”，可以快速了解本节的内容要点；在相应章节配置了一定数量的实例；在每章末编写了形式多样的“综合练习”，既方便学生练习与自测，也方便教师布置作业与进行教学效果的检测。

本书的编写在充分考虑高职学生易读性要求的同时，也充分考虑了高职学生毕业以后的

自我学习与能力提升对知识系统性和结构完整性的要求，而不是一味地追求内容的简易性。因此，本书是一本努力追求知识结构完整性的教材。与高职教育“城轨供电系统课程标准”要求相比，该书的内容更多一些，难度更大一些。其中加注了“\*”号的章节，各个学校可根据各自的学时安排进行选学。其他未标注“\*”号的章节，教师在具体教学过程中也应结合各自学校的具体实际，注意精选其中的内容来教学，重点讲懂讲透最基本、最基础的原理性知识。

本书由广州铁路职业技术学院刘让雄任主编，苏州市轨道交通集团有限公司戴慧吾任副主编，其中第8章和第9章由戴慧吾负责编写，其余各章均由刘让雄编写。全书由刘让雄统稿，戴慧吾同时还参与了资料的收集与书稿的校对。在本书的编写过程中，得到了广州铁路职业技术学院电气化铁道供电专业团队王亚妮、谭慧铭、赵华军、黄鉴标、何桂娥、何发武等老师的大力支持，他们对本书的编写提出了很多宝贵意见；深圳市地铁集团有限公司朱新平提供了技术咨询。在此，对他们一并深表感谢。

本书编写过程中的主要参考文献，附在书末。在此，对这些文献的作者或单位表示衷心的感谢！

由于编写人员水平有限，书中难免存在遗漏与不妥之处，敬请广大读者与同行批评指正。

作者

2015年6月于广州

## 目 录

第一章 城市轨道交通供电系统概述 .....	1
第一节 城市轨道交通概述 .....	2
第二节 电力系统概述 .....	9
第三节 城市轨道交通供电系统构成 .....	20
第四节 城市轨道交通供电系统的功能与特点 .....	23
综合练习 .....	29
第二章 外部电源 .....	31
第一节 外部电源供电方式 .....	32
第二节 外部电源电压等级与基本要求 .....	36
第三节 无功功率补偿 .....	39
第四节 谐波影响与改善 .....	46
综合练习 .....	53
第三章 主变电所 .....	55
第一节 所址选择 .....	56
第二节 电气主接线 .....	58
第三节 主变压器的选择 .....	61
第四节 实例介绍 .....	66
综合练习 .....	69
第四章 中压网络 .....	70
第一节 中压网络的电压等级 .....	72
第二节 中压网络的构成形式 .....	75
第三节 供电系统运行方式 .....	82
第四节 环网电缆选择 .....	87
第五节 电缆敷设 .....	91
综合练习 .....	101
第五章 牵引供电系统 .....	103
第一节 牵引变电所的设置 .....	104
第二节 牵引变电所主接线 .....	111

第三节 牵引变电所运行方式·····	116
第四节 牵引供电系统保护概述·····	123
第五节 接触网概述·····	131
第六节 牵引动力系统概述·····	134
综合练习·····	138
<b>第六章 动力照明系统·····</b>	<b>141</b>
第一节 降压变电所的设置·····	142
第二节 降压变电所主接线与运行方式·····	144
第三节 车站动力照明系统·····	151
第四节 区间动力照明系统·····	156
第五节 变电所自用电系统·····	158
第六节 应急照明电源·····	164
综合练习·····	170
<b>第七章 电力监控与数据采集系统·····</b>	<b>172</b>
第一节 SCADA 系统概述·····	173
第二节 SCADA 系统功能及应用·····	179
第三节 自动化系统集成简介·····	192
综合练习·····	193
<b>第八章 综合接地系统与过电压保护·····</b>	<b>194</b>
第一节 综合接地系统·····	195
第二节 过电压保护·····	206
综合练习·····	216
<b>第九章 杂散电流防护·····</b>	<b>218</b>
第一节 杂散电流的成因及危害·····	219
第二节 杂散电流的防护与监测·····	223
第三节 杂散电流防护对相关专业的要求·····	236
综合练习·····	240
<b>* 第十章 短路计算·····</b>	<b>243</b>
第一节 短路与短路计算·····	244
第二节 标么值与网络化简·····	247
第三节 三相对称短路计算·····	260
第四节 直流系统短路计算·····	267
综合练习·····	279



---

* 第十一章 直流牵引供电系统电压损失计算	281
第一节 直流牵引供电系统电压损失概述	281
第二节 直流牵引供电系统计算概述	285
第三节 直流牵引供电系统电压损失计算	290
综合练习	296
第十二章 城轨供电系统运行与管理	298
第一节 运行管理任务和内容	299
第二节 运行管理组织及职责	304
第三节 运行管理规程和制度	311
第四节 供电系统接口管理	328
第五节 供电系统安全管理	332
综合练习	344
参考文献	346

# 第一章 城市轨道交通供电系统概述

## 【教学目标】

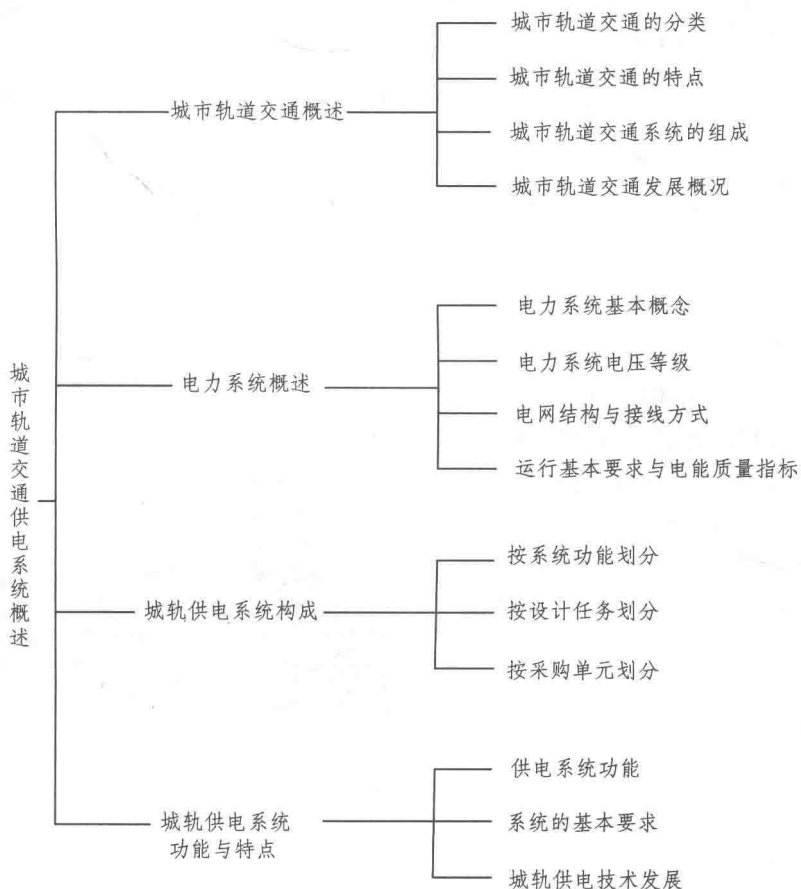
通过本章的学习，主要了解与掌握以下知识：

1. 了解城市轨道交通的分类与特点。
2. 了解城市轨道交通发展的历史与我国城市轨道交通发展的现状。
3. 熟悉电力系统的基本概念、电压等级、电网结构与接线方式。
4. 掌握电力网与电能质量要求等供电基础知识。
5. 掌握城市轨道交通供电系统的功能与构成等。

主要具备以下能力：

1. 会区分城市轨道交通的类型，会分析其不同的特点。
2. 会分析城市轨道交通供电系统的不同负荷及与电力系统的关系等。

## 【知识结构】



## 第一节 城市轨道交通概述

### 本节导读

城市轨道交通有多种类型,各具特点,可供不同条件与不同特点的城市选择;它是由线路、车辆等众多设备组成的一个庞大的综合系统,构成“城市交通的主动脉”,实现安全、快捷地完成大运量的旅客运输,与传统道路交通相比具有很多优势,正越来越成为人们市区出行首选的交通方式;虽然其发展历史不长,但是其发展速度惊人,尤其是在我国,城市轨道交通正在 40 多个城市铺开,正迅速进入人们的日常生活。

《城市公共交通常用名词术语》(GB/T 5655—1985)将城市轨道交通定义为“通常以电能作为动力,采取轮轨运转方式的快速大运量公共交通之总称”。目前,城市轨道交通已成为城市公共交通系统的一个重要组成部分,号称“城市交通的主动脉”。

**【城市轨道交通】** 一种采用轨道结构进行承重和导向的车辆运输系统,依据城市交通总体规划要求,设置全封闭或部分封闭的专用轨道线路,以列车或单车形式运送相当规模客流量的公共交通方式。城市轨道交通属于城市公共交通范畴。

### 一、城市轨道交通的分类

根据建设部行业标准《城市公共交通分类标准》(CJJ/T 114—2007),我国城市轨道交通(以下简称“城轨交通”)包括:地铁、轻轨、单轨、有轨电车、磁悬浮系统、自动导向轨道系统、市域快速轨道系统等。其中地铁与轻轨是我国城市轨道交通的主流方式。

#### 1. 地铁

地铁是地下铁道交通的简称,它是一种在城市中修建的快速、大运量的轨道交通,采用电力牵引和钢轮钢轨体系,标准轨距为 1 435 mm,主要在城市地下空间修筑的隧道中运行,当条件允许时,也可在地上或高架桥上运行。按照选用车型的不同,地铁可分为常规地铁和小断面地铁;根据线路客运规模的不同,又可为高运量地铁和大运量地铁。如图 1.1 所示为地铁地面车辆段。

目前世界上一些著名的特大城市,如纽约、伦敦、巴黎、莫斯科、东京等以及我国的北京、上海、广州等城市,均已形成较大规模的城市轨道交通网络,且以地铁为主干,延伸到城市的各个方向。

地铁有以下特征:



图 1.1 地铁车辆段

- (1) 全部或大部分线路建于地面以下。
- (2) 建设费用高, 周期长, 成本回收慢。
- (3) 行车密度大, 速度高。
- (4) 客运量大, 能适应远期单向高峰每小时客流量为 4.0 万人次以上。
- (5) 地铁列车的编组数决定于客运量和站台的长度, 一般为 2~8 辆。
- (6) 地铁车辆的消音减振和防火均有严格要求, 既安全, 又舒适。
- (7) 地铁的电压制式以直流 1 500 V 供电为主, 部分采用直流 750 V 供电。

## 2. 轻轨

轻轨是一种中等运量的轨道运输系统, 一般采用钢轮钢轨体系, 主要在城市地面或高架桥上运行, 线路采用地面专用轨道或高架轨道, 遇繁华街区, 也可进入地下或与地铁衔接。轻轨系统的车辆轴重较轻, 施加在轨道上的荷载相对于地铁的荷载来说更轻, 因而被称为轻轨。轻轨与地铁的不同之处主要在于其运量相对较小, 采用较小型的车辆, 线路曲线半径较小, 线路的最大坡度较大, 而其所采用的钢轨与地铁相同, 所采用的信号设备、通信设备、机电设备以及运营管理则与地铁系统没有明显区别。如图 1.2 所示为城市轻轨线路。



图 1.2 城市轻轨交通

轻轨有以下特征:

- (1) 它是钢轮和钢轨为车辆提供走行的一种交通方式, 车辆由电力提供牵引动力, 可以采用直流、交流或线性电机驱动。
- (2) 轻轨的建设费用比地铁低, 每千米线路造价仅为地铁的 1/5~1/2。
- (3) 轻轨交通的每小时单向运输能力一般为 1.5~3.0 万人次, 介于地铁和公共汽车之间, 属于中等运能的一种公共交通形式。
- (4) 轻轨线路可以为地面、地下和高架混合型, 一般与地面道路完全隔离, 采用半封闭或全封闭专用车道。
- (5) 轻轨车辆一般采用 C 型车辆或 Lc 型车辆 (直线电机), 宽度均为 2 600 mm。
- (6) 轻轨交通对车辆和线路的消音和减振有较高要求。
- (7) 轻轨的电压制式以直流 750 V 和 1 500 V 供电为主。
- (8) 轻轨车站分为地面、高架和地下三种形式。

## 3. 独轨

独轨交通的设想早在 19 世纪末就已经形成。1901 年德国鲁尔地区的三个工业城市之间, 在险峻的乌珀河谷上空建成了一条快速交通线, 车辆吊在架空的导轨下面, 沿着导轨行驶。后来三市合并成为乌珀塔尔市, 这个独轨交通系统成为该市的一个标志。

独轨交通用作城市公共交通, 开始进展比较缓慢。日本从德国引进专利后, 近 30 年开发

了多种独轨铁路，在世界城轨交通中独树一帜。我国重庆市从日本引进的独轨交通系统现已开始运营，如图 1.3 所示。

独轨交通采用高架轨道结构，按结构型式分为跨座式和悬挂式两种类型。前者车辆的走行装置（转向架）跨骑在走行轨道上，其车体重心处于走行轨道的上方。后者车体悬挂于可在轨道梁上行走的走行装置的下面，其重心处于走行轨道梁的下方。



图 1.3 城市独轨交通

独轨交通的优点是：

- (1) 独轨交通线路占地小，可充分利用城市空间，适宜在大城市的繁华中心区建线，对城市景观及日照影响小。
- (2) 独轨交通构造较简单，建设费用低，为地铁的 1/3 左右。
- (3) 能实现大坡度和小曲线半径运行，可绕行城市的建筑物。
- (4) 一般采用轻型车辆，列车编组为 4~6 辆。
- (5) 走行装置采用空气弹簧和橡胶轮结构，并采用电力驱动，故运行噪声低，无废气，乘坐舒适。
- (6) 独轨交通架于空中，具有交通和旅游观光的双重作用。
- (7) 跨座式轨道梁采用预应力混凝土梁制成，悬挂式轨道梁一般为箱形断面的钢结构。

独轨交通的缺点是：

- (1) 能耗大。由于其走行装置采用橡胶轮，它与混凝土轨面的滚动摩擦阻力比钢轮钢轨大，故其能耗比一般轨道交通约大 40%，且有轻度的橡胶粉尘污染。
- (2) 运能较小。一般每小时单向最大客运量为 1~2 万人次。
- (3) 独轨交通不能与常规的地铁、轻轨系统等接轨。
- (4) 道岔结构复杂、笨重、转换时间较长，从而延长了列车折返时间。
- (5) 列车运行至区间时若发生事故，疏散和救援工作的开展会很困难。

## 二、城市轨道交通的特点

城市轨道交通与城市道路交通相比，有以下特点：

### 1. 安全

城市轨道交通运量大，客流集中，对安全性要求特别高。因此，在设计、建设、管理以及资金的投入等方面都特别注重保证系统的安全性。运行实践证明，城市轨道交通具有很好的安全性。

### 2. 快捷

城市轨道交通不受地面环境影响，可以高效快捷运输。

### 3. 准时

城市轨道交通在其专用的轨道上行驶,在可靠技术支持下,按照运营计划行驶,一般都会正常准时运营,具有很高的运行准点率。

### 4. 舒适

城市轨道交通的乘车环境好。

### 5. 运量大

城市轨道交通的车厢空间大,一列地铁可载 2 000 人以上。

### 6. 无污染(或少污染)

城市轨道交通的动力是电能,没有废气排放等污染。

### 7. 对地面景观影响较小

城市轨道交通的线路主要在地下,占用城市地面面积少,较少破坏地面的城市景观。

### 8. 投资大,技术复杂,建设周期长

城市轨道交通是一个庞大的系统工程,它涉及土建(装修)、机械、电子、供电、通信、信号等多项技术;涉及的设备类型多、数量大,点多面广,技术复杂,系统性、严密性与联动性均要求高;土建工程量大,施工难度大,建设周期长,资金投入大,一般每千米造价为 4~6 亿元。一般大城市建成一个 200 km 的地铁网,要投资上千亿元的资金,且时间要 10~12 年以上。

## 三、城市轨道交通系统的组成

城市轨道交通系统主要由线路、车辆、供电系统、通信系统、信号系统、自动售检票系统、暖通空调、屏蔽门与防淹门、自动扶梯和电梯、消防系统、给排水系统和综合监控系统等组成,是一个庞大的复杂的综合技术系统。其技术专业门类既包括传统的土木建筑、机械制造、电机电器,也包括属于高新技术的控制技术、网络技术、计算机技术、通信技术等。城轨交通既有土建机电的工程技术,又有运营维护的管理科学。

### 1. 线路

线路是机车车辆和列车运行的基础。只有确保线路设备始终处于良好状态,才能保证列车按规定速度安全、平稳与不间断地运行,较好地完成旅客运输任务。城市轨道交通线路按其在运营中的作用分为正线、辅助线(含折返线、停车线、渡线、联络线、安全线及车辆段出入线等)和车场线。辅助线是为保证正线运营而配置的不载客列车运行的线路,如车辆段试车线、区间折返线等。车场线是车辆段内厂区作业与停放列车的线路。此外,为了城市轨道交通建设、运营和战略需要,还应设置与国家铁路相衔接的专用线。

城市轨道交通线路在城市中心地区宜设在地下,在其他地区,条件许可时可设在高架桥

或地面上。正线设计为双线且列车单向右侧行车。由于行车速度高、密度大，对线路标准要求较高，一般要求铺设 60 kg/m 以上类型钢轨。

## 2. 车辆

城市轨道交通的车辆是用来运输旅客的工具，按有无动力可分为两大类：拖车（T），本身无动力牵引装置；动车（M），本身带有动力牵引装置。在运营时城轨列车一般采用动拖结合、固定编组的电动列车组形式。城轨车辆不仅要有良好的牵引、制动性能，保证运行安全、正点、快速；同时又要有良好的旅客服务设施，使旅客感到舒适、文明、方便。

## 3. 供电系统

电能是城市轨道交通车辆电力牵引系统所必需的能源，电动车辆以及为轨道交通运营服务的所有机电设备，包括通风、空调、照明、通信、信号、给排水、防灾报警、电梯、电动扶梯等也都依赖并消耗电能。在城市轨道交通运营中，供电一旦中断，不仅会造成城市轨道交通运营瘫痪，而且还有可能造成财产损失，甚至危及旅客生命安全。因此，高度安全、可靠而又经济合理的供电系统是城市轨道交通正常运营的重要条件和保证。

城市轨道交通供电电源一般取自城市电网，通过城市电网向轨道交通供电系统输送电能，经过轨道交通供电系统实行变换，最后以适当的电压等级和一定的电流形式（直流或交流）供给各用电设备。

## 4. 通信系统

城市轨道交通的通信系统是传递语言、文字、数据、图像等多种信息的综合业务数字系统。它包括：数字传输、电话交换、调度电话、有线和无线通信、闭路电视、有线广播、时钟、电源等设备系统。城轨通信系统要求高可靠、易扩充、组网灵活、独立采用通信网络，并能与公共通信系统联网。

## 5. 信号系统

城市轨道交通的信号系统是保证列车运行安全和提高线路通过能力的重要设施。以前的列车运行，主要是驾驶员根据色灯信号（红、黄、绿）进行操作。而城市轨道交通具有列车密度高、站间距离短和行车速度快等特点，其信号系统也从传统的方式，即以地面信号的显示传递行车命令，驾驶员按行车规则操作列车运行的方式，发展到按地面发送的信息自动监控列车速度和自动调整列车追踪间隔的方式。实现这一方式的关键设备是列车自动控制系统 ATC（Automatic Train Control System）。

## 6. 其他

城市轨道交通系统除了包括以上系统外，还包括自动售检票、暖通空调、屏蔽（安全）门、自动扶梯和电梯等车站设施，消防系统、给排水系统等环控设施以及确保各系统安全正常运行的综合监控系统，这些也是城市轨道交通不可缺少的组成部分。

综合监控系统涉及的专业门类较多，主要包括：电力监控系统、机电设备监控系统、屏蔽门监控系统、防淹门（FG）互联系统、火灾自动报警、广播系统、闭路电视系统、车载信息系统、车站信息系统、自动售检票系统、信号系统、时钟系统等。

城市轨道交通的安全运行与优质服务,要求各组成部分之间要有严格的技术配合,如列车和钢轨、列车和接触网、列车和信号、供电和通信信号、通信和信号等,相互之间环环相扣,共同保证列车正常运行和服务。任何一环故障均会不同程度地影响城市轨道交通的正常运行,严重的甚至造成列车停运,使城市轨道交通陷入瘫痪。

## 四、城市轨道交通发展概况

### (一) 世界城市轨道交通发展

#### 1. 发展简史

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,至今已有150多年,当时还没有电车和电灯。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,已有13个城市修建了地铁。

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2014年世界城市轨道交通列表数据显示,全世界共55个国家或地区,168个城市拥有城市轨道交通系统。轨道交通线路运营里程排名前10位的城市依次是:上海(548 km)、北京(527 km)、伦敦(402 km)、纽约(369 km)、东京(326 km)、首尔(314 km)、莫斯科(312.9 km)、马德里(284 km)、广州(260.5 km)、香港(218.2 km)。

#### 2. 技术发展

城市轨道交通是集多工种、多专业于一身的复杂系统。1879年,电力驱动列车的研制成功,不仅使地铁乘客和工作人员免除了蒸汽机车的烟熏之苦,也使城市轨道交通开创了使用无大气污染的二次能源之先河,城市轨道交通从此步入了连续不断地发展时期,相继出现了传统轮轨系统、直线电机驱动系统、磁悬浮列车、单轨交通系统、新交通系统等。现代城市轨道交通技术进步的标志,当以先进舒适的车辆和行车控制技术为代表。

##### 1) 车辆技术

城市轨道交通车辆的技术发展,可以从车体结构、车辆传动和走行系统三个方面来介绍。

##### (1) 车体结构技术。

城市轨道交通车辆的车体,过去主要采用碳素钢或耐候钢材料,现在已向不锈钢车体和铝合金车体发展。铝合金制成的车体,可以减轻车辆自重,增强抗腐蚀能力,延长使用寿命,还将减少大量的日常维护保养工作,可节省能源,并减轻对支撑结构物的压力而节省土建工程费用。但铝合金车体整体承载结构需要使用大型铝材,技术难度较大,目前有的国家已在研究组合结构的车体技术。另外,在世界范围内不锈钢车体也得到了广泛应用。不锈钢车体有局部不锈钢车、表板不锈钢车、全不锈钢车、半不锈钢车等几种类型,其最大优点是耐腐蚀,不用涂漆,易于维修。

##### (2) 车辆传动技术。

以前城市轨道交通车辆的牵引控制系统,主要采用直流电动机的凸轮变阻控制方式,这



种方式使用了几十年,工作安全可靠,但车辆的启动和制动频繁,要消耗大量电能,其能量的散发还将引起隧道内温度的上升,对环境产生不良影响。自 20 世纪 60 年代初,新造车辆已越来越多地采用无级斩波调压控制方式。这确保了车辆的平稳启动与制动,又使得车辆设备的体积和质量大为减小,加上列车再生制动能量的利用,能耗显著降低,日常维护保养工作大大减少。1990 年,随着 GTO、IGBT 等大功率电子元器件的发展,为了使车辆运行更为平稳并达到主电动机无维修化目的,各国成功地开发了交流异步电动机变压变频控制技术。同时,作为科技发展新成就的代表,直线电机驱动技术、磁悬浮列车技术在城市轨道交通工程中也得到了实际应用。

### (3) 车辆走行系统。

传统的车辆走行系统是车体通过转向架及轮对在钢轨上行走。城市轨道交通车辆的走行系统也在不断地革新和发展,并已在实际工程上有所突破。如法国里尔地铁的 VAL 系统和日本神户等地的新交通系统等,都已经把传统的钢轮钢轨取消,而改为用橡胶轮承重和水平轮导向的体系,车下轨道则采用特制的混凝土结构或钢板结构,使振动和噪声大大降低。另外,悬挂式单轨交通和跨座式单轨交通,在城市轨道交通工程中也得到了实际应用。

### 2) 行车控制技术

就行车控制技术而言,由于信息科学的不断进步推动了微电子技术、信息传输技术和计算机网络技术的飞跃发展,城市轨道交通系统的行车控制技术充分利用了这些高新技术成果。行车系统使用的设备和工艺流程技术,已从传统的电磁和电机设备,发展到功率电子和计算机技术;从运用普通金属电缆,发展到运用具有高速通信能力的光缆,使通信系统向无线通信和控制一体化的方向发展。就城市轨道交通的整体控制系统来说,将从以往的单一功能系统,向以模块化组成的、适用于多种目的和多层次需要的综合控制系统发展;从单个列车局部而孤立的控制技术,向列车群的综合管理和控制方向发展;从中央集中控制管理方式,向集中管理、分散控制的自律分散式系统发展;从适用于固定闭塞的列车控制方式,向以列车自动运行为主体的移动闭塞方式发展。行车控制技术的发展,将使列车运行的安全度和准点率得到更为可靠的保障。

## (二) 我国城市轨道交通发展

我国内地城市轨道交通开始于 20 世纪 60 年代的北京地铁建设。北京地铁一期工程于 1965 年开工,1969 年竣工,1971 年正式通车。直到 20 世纪 80 年代,我国内地城市仅有北京地铁 40 km,天津地铁 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,人员出行和物资交流频繁,在我国各大城市及特大城市,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。由于城市轨道交通具有运量大、快捷舒适、安全节能、污染轻、占地少等特点,发展城市轨道交通已成为各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 年代以来,在国家政策的正确引导和各城市的积极努力下,我国城市轨道交通进入了一个快速发展期,建设规模之大是世界城市轨道交通发展史上少有的,凸显了后发之势。截至 2014 年年底,我国内地已开通城市轨道交通的城市有北京、上海、广州、天