



CHENGSHI GUIDAO JIAOTONG GONGCHENG  
GUANJIAN JISHU YANJIU ( XIANSHANG BUFEN )

# 城市轨道交通工程 关键技术研究 ( 线上部分 )

焦 莹 王存贵 徐 利◎编著



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

# 城市轨道交通工程 关键技术研究 (线上部分)

焦莹 王存贵 徐利 编著

## 编委会名单

王文灿 贾虎军 余流 张云富  
高璞 郭靖 易敏 刘晓敏  
任富芝 刘倩 陆桂红

华中科技大学出版社  
中国·武汉

图书在版编目(CIP)数据

城市轨道交通工程关键技术研究. 线上部分/焦莹,王存贵,徐利编著. —武汉:华中科技大学出版社, 2018.9

ISBN 978-7-5680-4374-8

I. ①城… II. ①焦… ②王… ③徐… III. ①城市轨道交通-铁路工程-工程施工 IV. ①U239.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 217713 号

城市轨道交通工程关键技术研究(线上部分)

Chengshi Guidao Jiaotong Gongcheng

焦莹 王存贵 徐利 编著

Guanjian Jishu Yanjiu(Xianshang Bufen)

策划编辑:金紫

责任编辑:陈忠

封面设计:原色设计

责任校对:何欢

责任监印:朱玢

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉) 电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园 邮编:430223

录排:华中科技大学惠友文印中心

印刷:武汉科源印刷设计有限公司

开本:787mm×1092mm 1/16

印张:8

字数:197千字

版次:2018年9月第1版第1次印刷

定价:36.00元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换  
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务  
版权所有 侵权必究

## 内 容 简 介

本书为中国建筑第六工程局有限公司实施中国建筑股份有限公司课题(课题号:CSCEC-2015-Z-1)的研究成果总结。课题自2015年3月份启动,研究团队积极进行相关理论的积累,搜集文献与模型试验并举,将相关成果汇集于本书。

城市轨道交通是一个庞大的系统工程,要完成预定的运营任务,需要许多个子系统参与并协调一致地工作。一般情况下,大部分运营中心(OCC)分别设有运行调度、电力调度、环控调度、防灾调度、维修调度等,各个子系统独立运行管理,相互之间的数据需要相互共享。尤其是城市轨道交通形成大规模路网时,需要构建整个城市轨道交通路网运营指挥中心(TCC),建设所有线路的信息共享平台,以便于路网中心的指挥和协调。构建一个数字信息共享平台已成为城市轨道交通发展的方向和实现城市轨道交通信息化的重要措施,采用综合监控系统是实现这一目标的最佳选择。

围绕综合监控系统的组建,将各系统进行独立的研究,从原理、应用再到发展前沿,本书触及了轨道交通工程除土建之外的几乎所有内容。经过梳理规划,本书包括以下方面的内容:

- ①接触网的制式选择及优化技术研究;
- ②屏蔽门的原理、监控和安全技术与研究;
- ③换乘站建筑及消防原则;
- ④地铁车站土建预埋件(预留孔洞)及机电设备层砌体施工质量控制;
- ⑤信号系统的控制过程和权限设置技术研究与应用;
- ⑥综合监控系统的总体布局、系统调研及演化技术研究与应用;
- ⑦换乘站自动售检票(AFC)设计及结算业务技术研究与应用;
- ⑧BIM技术在设备管线碰撞检查中的研究与应用。

由于时间仓促,本书对涉及内容研究较浅,肯定存在错漏之处,恳请广大同行、专家指摘,不胜感激。

# 前 言

自 1971 年 1 月 15 日北京地铁 1 号线正式开通开始,天津、上海、广州、深圳、南京等城市相继拥有了自己的地铁运营线路。截至 2017 年 12 月,北京地铁运营线路共有 22 条,均采用地铁系统,覆盖北京市 11 个市辖区,运营里程达 608 公里,共设车站 370 座;上海共开通轨道交通线路 15 条(1~13 号线、16~17 号线),上海轨道交通全网络运营线路总长 666 公里(地铁 637 公里+磁浮 29 公里),车站数 389 座(地铁 387 座+磁浮 2 座),换乘车站 52 座。随着地铁建设规模的扩大,地铁建设技术和运营经验取得了长足的进展,在不同地质、水文、气候等条件的地区,均拥有了丰富的经验。

我国许多城市轨道交通项目已经开展 PPP 融资模式,也称为公私合营的融资模式。这种模式将政府与私营公司两者结合起来。PPP 融资模式的关键就是通过政府的大力支持,实现公私双赢,加快我国城市轨道交通建设的步伐。PPP 项目对企业传统的土建、机电安装、装饰装修、各专业发包到集成化管理等方面提出了更高的要求,迫使企业更快地掌握轨道交通生命周期内各阶段、各专业的知识和组织协调能力。

本书为中国建筑股份有限公司的内部课题(课题号:CSCEC-2015-Z-1)的总结概述。课题组通过查阅国内外文献资料并结合自身工程经验,总结了轨道交通线上工程的技术理论和相关研究成果。

本书作者为课题的研究人员,由中国建筑第六工程局有限公司总工程师焦莹领导,轨道交通公司总工徐利组织公司技术质量部和各项目骨干,在以王存贵为组长的高级技术顾问团队的指导下,以天津市地铁 6 号线金钟河大街站项目为依托,进行相关的试验研究。研究内容从最初的综合监控系统研究扩展到供电系统、信号系统等领域,涵盖了轨道交通土建施工以外的领域。

编 者

2018 年 4 月

# 目 录

第 1 章 概述 .....	(1)
1.1 轨道交通工程 .....	(1)
1.2 研究范围和内容 .....	(4)
第 2 章 供电技术 .....	(5)
2.1 城市轨道交通供电系统的模式 .....	(5)
2.2 城市轨道交通车辆供电制式 .....	(7)
2.3 城市轨道交通供电系统供电模式的选择 .....	(9)
2.4 刚性接触网的供电和优化研究 .....	(11)
2.5 刚性接触网施工流程 .....	(13)
第 3 章 通信系统 .....	(15)
3.1 城市轨道交通通信系统的要求 .....	(15)
3.2 各系统的原理和设置 .....	(16)
3.3 通信网络化的建设目标及总体架构 .....	(22)
第 4 章 信号系统 .....	(25)
4.1 系统要求 .....	(25)
4.2 列车自动控制系统 .....	(26)
4.3 信号系统的控制过程 .....	(30)
4.4 通信、信号系统施工方案 .....	(32)
第 5 章 自动售检票系统 .....	(39)
5.1 系统构成和功能 .....	(39)
5.2 换乘站系统设计 .....	(43)
5.3 自动售检票系统施工方案 .....	(45)
第 6 章 火灾自动报警系统 .....	(48)
6.1 FAS 的设计 .....	(48)
6.2 换乘站建筑及消防原则 .....	(49)
6.3 火灾自动报警系统施工方案 .....	(51)
6.4 气体灭火系统施工方案 .....	(52)
第 7 章 综合监控系统 .....	(58)
7.1 系统特点和结构 .....	(58)
7.2 系统网络方案 .....	(60)
7.3 系统接口方案 .....	(62)
7.4 研究点和创新点 .....	(71)
7.5 综合监控系统施工方案 .....	(73)
第 8 章 环境与设备监控系统 .....	(76)
8.1 系统的设置和功能 .....	(76)

## 2 城市轨道交通工程关键技术研究(线上部分)

8.2	系统的范围和功能 .....	(78)
8.3	天津地铁6号线系统设计原则 .....	(83)
8.4	环境与设备监控系统施工方案 .....	(84)
<b>第9章</b>	<b>门禁系统 .....</b>	<b>(87)</b>
9.1	系统构成和系统功能 .....	(87)
9.2	系统的联动与优化 .....	(90)
9.3	门禁系统的施工 .....	(92)
9.4	乘客信息系统施工方案 .....	(94)
<b>第10章</b>	<b>屏蔽门及站台施工技术 .....</b>	<b>(96)</b>
10.1	屏蔽门的类型和原理 .....	(96)
10.2	屏蔽门的安装和调试 .....	(97)
10.3	安全监控技术研究 .....	(103)
10.4	站台绝缘层施工技术 .....	(105)
<b>第11章</b>	<b>浮置板 .....</b>	<b>(108)</b>
11.1	浮置板应用及原理 .....	(108)
11.2	浮置板的结构形式 .....	(109)
11.3	浮置板参数分析和设计流程 .....	(110)
11.4	浮置板安装和施工问题研究 .....	(115)
	<b>参考文献 .....</b>	<b>(117)</b>

# 第 1 章 概 述

## 1.1 轨道交通工程

### 1.1.1 城市轨道交通的定义及系统制式

目前,《城市公共交通分类标准》(CJJ/T114-2016)将城市轨道交通分为地铁系统、轻轨系统、单轨系统、有轨电车系统、磁浮系统、自动导向轨道系统和市域快速轨道系统。各系统的分类、概念、特征、优缺点及适用地区见表 1-1。

表 1-1 城市轨道交通分类

系统分类	概念	特征	优缺点及适用地区
地铁	采用钢轮钢轨体系,标准轨距为 1435 mm,主要在大城市地下隧道中运行,条件允许时也可在地面或高架桥上运行	高运量,客运能力为 4.5 万~7.0 万人次/小时。大运量,客运能力为 2.5 万~5.0 万人次/小时。平均运行速度大于 35 km/h;最高行车速度不小于 80 km/h	优点:运量大,能耗低,技术成熟; 缺点:噪声大,造价高; 适用地区:特大、大城市中心区域
轻轨	采用钢轮钢轨体系,标准轨距为 1435 mm,主要在城市街道路面或高架桥上运行,线路采用地面专用轨道或高架轨道,在繁华街区,也可进入地下或与地铁接轨	中运量,客运能力为 1.0 万~3.0 万人次/小时、平均运行速度为 25~35 km/h;最高行车速度不小于 60 km/h	优点:能耗低,技术成熟; 缺点:振动噪声大; 适用地区:大、中城市
单轨	车辆与特制轨道梁组合成一体运行的中运量轨道系统,轨道梁既是车辆的承重结构,也是车辆运行的导向轨道,包括跨座式和悬挂式两种	中运量,跨座式客运能力为 1.0 万~3.0 万人次/小时,平均运行速度为 30~35 km/h;悬挂式客运能力为 0.8 万~1.25 万人次/小时,平均运行速度大于 20 km/h;最高行车速度不小于 80 km/h	优点:噪声小,爬坡能力强,转弯半径小; 缺点:胶轮易老化; 适用地区:大、中城市,专用线路

系统分类	概念	特征	优缺点及适用地区
有轨电车	分为单箱或铰接式有轨电车和导轨式胶轮有轨电车两类,运量低,适用于地面(独立路权)、街面混行或高架。按运行模式分为混合车道、半封闭专用车道(优先信号)、全封闭专用车道(平道口立交)	低运量,单箱或铰接式有轨电车客运能力为0.6万~1.0万人次/小时,平均运行速度为15~25 km/h;导轨式胶轮电车客运能力小于1.0万人次/小时,最高运行速度为70 km/h	优点:介于轨道交通和公交之间,布线灵活,造价低; 缺点:噪声大,运量与路权关系大; 适用地区:中、小城市,专用线路
磁浮	利用电导磁力悬浮技术使列车悬浮运行,采用直线电机驱动,主要在高架桥上运行,特殊地段也可在地面或地下隧道中运行。按照运行速度可分为高速磁浮和中低速磁浮两类	中运量,客运能力1.5万~3.0万人次/小时,高速磁浮列车最高行车速度为500 km/h,中低速最高行车速度为100 km/h	优点:噪声小,爬坡能力强,转弯半径小,可实现全自动和无人驾驶; 缺点:胶轮易老化; 适用地区:城市机场专用线或客流相对集中的点对点线路
自动导向轨道	采用特制胶轮车辆在专用轨道上运行的旅客运输系统,列车沿着特制的导向装置行驶,可实现全自动化管理和无人驾驶,线路可采用地下隧道或高架桥形式	中运量,客运能力为1.0万~3.0万人次/小时,平均运行速度大于25 km/h	优点:爬坡能力强、转弯半径小、振动噪声小、综合造价低; 缺点:能耗略高,车辆造价较高; 适用地区:大、中城市,大城市开发区,山地城市,江河城市或旅游区
市域快速轨道	适用于城市区域内重大经济区之间中长距离的客运交通。主要在地面或高架桥上运行,必要时也可采用隧道,采用钢轮钢轨体系时,轨距为1435 mm	大运量,客运量可达20万~45万人次/天,运行速度可达120 km/h	优点:能耗低、技术成熟; 缺点:振动噪声大; 适用地区:城市长距离郊区

不同制式的轨道交通在车型特点、供电制式、受流方式等方面也各有不同。

(1) 在车型方面,受运量的影响,地铁系统可选用的基本车型有A型车、B型车等,一般适合高、大运量的旅客输送,高峰期时单向运输能力可达到2.5万~7万人次/小时。此外,地铁系统还包括直线电机驱动的LB型车辆,高峰期时单向运输能力可达到2.5万~4万人次/小时。轻轨系统采用C型车和LC型车,单轨、磁浮和有轨电车等制式采用专用车辆。

(2) 在供电制式方面,城市轨道交通供电系统划分为外部电源、主变电所、牵引供电系统、动力照明供电系统、电力监控系统等。外部电源一般采用中压供电系统,分为集中式、分散式和混合式,一般以集中式供电为主,以分散式供电为辅。我国国家标准规定直流供电电压等级为 750 V 和 1500 V 两种,通常根据车辆、线路结构、电气设备水平等因素来决定采用何种电压等级。我国的市域快轨列车适合双供电制式,可在交流 25 kV 的高速动车组供电系统和直流 1500 V 的地铁列车接触网之间切换,实现在高速动车组轨道上和地铁线路共轨运营。

(3) 在受流方式方面,轨道交通的接触网方式包括架空接触网、接触轨和感应式三种。架空接触网是指沿走行轨顶部架设由承力索、接触线以及支持装置构成的“之”字形接触网。列车通过安装在顶部的受电弓受电,供给车辆电气设备。接触轨供电则是沿走行轨敷设一条与线路平行的附加轨道,列车集电靴与其接触摩擦取电。接触轨又称为第三轨,结构较简单,易于安装。感应式供电体现在采用长定子直线电机的磁浮线路上,对安装在轨道上的定子供电,安装在车辆上的转子不供电,车辆受力和电器设备供电则依靠电磁感应发电提供列车驱动力。

### 1.1.2 国内外城市轨道交通发展概况

世界上第一条有轨公共马车于 1827 年出现在纽约百老汇大街上。伦敦是地铁的诞生地,一条由英国律师皮尔逊投资建设的地下城市铁路于 1863 年 1 月 10 日正式通车运营。1881 年,德国研制出架空接触导线供电系统,使电动车辆的供电线路由地面转向空中,电动车辆的电压和功率都大大提高。1890 年,英国首次用电力机车牵引车辆,地下铁道也改用电力牵引,地铁的环境条件大为改善。世界上第一个投入商业运行的有轨电车系统来自于 1888 年美国弗吉尼亚州的里士满市。1908 年,我国第一条有轨电车在上海建成通车。

我国智能轨道交通的发展呈现出如下特点。

(1) 我国的城市轨道交通正处于快速发展时期。我国的城市轨道交通从建成至今,已有近 50 年的历史,这期间经过了起步、建设、调整及建设高潮阶段。现阶段,轨道交通已经成为城市发展不可或缺的元素。截至 2016 年末,我国累计有 30 个城市建成投运城市轨道交通线路 134 条,运营里程近 4153 km。2016 年新增了 18 条运营线路,里程 535 km,创历史新高。2016 年新增福州、东莞、南宁、合肥 4 个运营城市。

(2) 高端技术推动我国轨道交通的智能化发展。智能化、信息化、数字化技术的应用和推广为轨道交通快速和可持续发展提供了坚实的基础,成为我国轨道交通快速、健康、可持续发展的有力保证。

(3) 新能源、新技术、新材料引领城市轨道交通走向节能环保。新能源方面,城市轨道交通为分布式光伏的电力消纳问题找到了一条崭新的路径。新技术方面,城市轨道交通储能技术逐步发展,机车制动能量得以回收利用。新材料方面,阻尼材料、铝制车体、高性能橡胶材料等高分子减振降噪产品以及高分子复合改性材料和新型绝缘材料的研发应用,引领城市轨道交通向低噪音、低振动方向发展。

(4) 我国城市轨道交通装备制造业的产业链基本形成。目前,我国城市轨道交通装备制造的国产化率已基本达到了 70%,后期的各种服务环节也有很大改善,设备定期的维护、维修也由相关企业承担。城市轨道交通装备制造业的产业链各个环节基本形成,整个产业链也趋于完整。

## 1.2 研究范围和内容

### 1.2.1 轨道交通线上工程技术界定

从不同的角度出发(如经营范围、系统制式、系统容量、路权、车辆类型等),我们可以对轨道交通进行不同性质的分类。按线路运营范围划分,轨道交通可以分为铁路、城际轨道交通、城市轨道交通三大类。

轨道交通是一个包含了规划、设计、勘探、工程建设、车辆制造、通信信号、供电、防灾报警、给排水、消防、环控和运营管理等庞大范围的领域。本课题从总承包企业的角度出发,将已经比较熟悉的工程建设领域(勘察、设计、施工)之外的技术领域称为轨道交通线上工程,即供电、信号、通信、综合监控系统等技术领域。

### 1.2.2 本书主要研究内容

为了促进我国城市轨道交通产业的快速发展,需要引进和吸收国外的先进技术和管理经验。在引进和吸收国外先进技术的过程中,我们要重视对技术的消化、吸收和提高,力求掌握具有自主知识产权的先进核心技术,以摆脱国际垄断集团的制约,从而抢占产业发展的制高点。同时,要不断积累经验,注重对自身技术研发能力的培养。本书主要研究内容包括供电技术、通信系统、信号系统、自动售检票系统、火灾自动报警系统、综合监控系统、环境与设备监控系统、门禁系统、屏蔽门及站台施工技术,下面简单介绍以下方面的内容。

#### 1. 综合监控系统

综合监控系统是以行车指挥与列车运行自动化为核心的复杂系统,它包括通信系统管理、车站设备监控、电力监控等各个职能系统的运行管理和综合监控。

综合监控系统的智能化体现在集成的实现上,可以从横向和纵向两个维度来设计。

#### 2. 信号系统

信号系统是城市轨道交通自动化系统的关键部分,是保证列车和乘客安全,以及实现列车高效运行、管理有序的自动控制系统。

从闭塞方式来考虑,列车自动控制系统可以分为固定闭塞方式自动控制系统、准移动闭塞方式自动控制系统和移动闭塞方式自动控制系统三类。

目前,我国有轨电车信号控制系统的实施经验相对缺乏。有轨电车交通综合自动化系统是通信、信号和信息化综合的运行控制系统,可建立无线通信专用网络。在加强现代有轨电车车地双向通信技术研究的同时,可以使我国现代有轨电车交通综合自动化系统向通信信号一体化、网络化、信息化、智能化方向发展。

#### 3. 自动售检票系统

轨道交通自动售检票系统是基于计算机、通信网络、自动控制等技术,实现售票、检票、计费、收费、统计、清分、票务管理等全过程自动化的系统。

根据设备和子系统的管理职能、位置和功能等因素,一般可将自动售检票系统分为清分中心系统、线路中央计算机系统、车站计算机系统、车站终端设备、票卡五个层次。

自动售检票系统未来将向三个方向发展:①地铁互联网加应用融合;②大数据建立与应用;③云技术应用与云服务。

## 第2章 供电技术

### 2.1 城市轨道交通供电系统的模式

城市轨道交通供电系统的作用是变压、整流、传输或馈送电流。城市轨道交通供电系统分为外部电源、主变电所或电源开闭所、牵引供电系统、动力照明供电系统、电力监控系统等。以下介绍外部电源模式和内部供电模式。

#### 2.1.1 外部电源模式

外部电源模式包括城市轨道交通供电系统从城市电网引入高压或中压电源,再将引入的外部电源进行电压转换或直接分配至轨道交通的牵引变电所或降压变电所,由牵引变电所和降压变电所分别为轨道交通运行主体的车辆和辅助用电设备(动力照明负荷)供电。

轨道交通从外部电源引入的模式上一般分为集中供电、分散供电和混合供电三种。国内除一些城市采用分散供电模式,部分线路采用混合供电模式外,大部分城市均采用集中供电模式。

##### 1. 集中供电模式

集中供电模式是指设置数量不等的主变电所,从若干个有限的集中点获取电能。城市轨道交通电力系统所有电能均通过主变电所获取。集中供电模式是目前我国轨道交通的主要供电模式。我国许多城市(如上海、广州、南京、香港、深圳、成都等)地铁均采用集中供电模式。图 2-1 就是典型的城市轨道交通供电系统集中式供电-牵引降压联合供电模式。

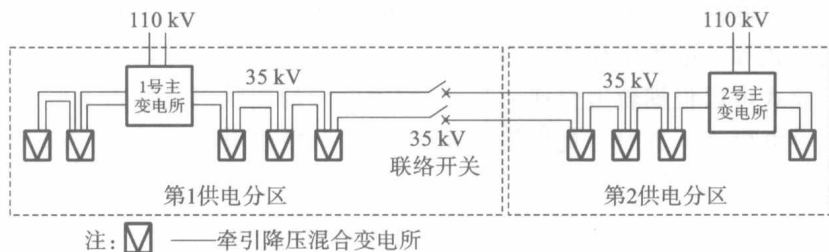


图 2-1 城市轨道交通供电系统集中式供电-牵引降压联合供电模式

集中供电模式的优点如下。

- (1) 受电点少,要求公用电网提供的备用容量低。
- (2) 隧道外电缆敷设量少,通道易解决,隧道内敷设量多,有利于电缆的施工和维护。
- (3) 受外部电网影响小,有利于形成轨道交通电网,可靠性、安全性高。
- (4) 供电资源共享,可提高供电可靠性。
- (5) 与公用电网相互影响小,可监测和处理谐波。
- (6) 在运行过程中便于集中管理,电网损耗相对较低。

从经济性方面来讲,集中供电模式下的交叉和邻近线路供电不仅能节约土地资源,还可

以充分利用公用电网的电力资源。但这种供电模式需要建立主变电所和电力通道,投资相对较高。

由于目前我国电力资源紧缺,电力调度控制技术还无法满足城市轨道交通综合控制的要求,集中供电模式因此成为现阶段我国城市轨道交通的主要供电模式。这种供电模式主要的缺点是必须设置专门的供电机构,其运营管理较为复杂。同时,没有和国家电力系统实现资源共享,会造成不必要的浪费。此外,就目前状况来看,电力和城市轨道交通两部门的信息资源共享还无法实现,集中供电模式易造成信息的断路,引起不必要的损失,从而影响城市轨道交通的安全可靠运行。

### 2. 分散供电模式

城市轨道交通的电能来源于所在城市的国家电力系统,它直接取自城市或区域电力网。城市轨道交通电力网供电系统是指国家电力网以某种方式向城市轨道交通供电。因此,城市电网或区域电力网的结构必将对城市轨道交通供电系统起着决定作用。

分散供电模式即不设置专门的主变电所,根据城市电网的实际情况,分别从不同地点获取电能。该模式不便于集中管理和实施综合控制技术(如行车调度、电力调度、环境控制等一体化管理)。

分散供电模式的优点是可以降低城市轨道交通系统建设的一次性投资,充分利用国家的电力资源;但同时也需要进行多座城市电网变电所的增容扩建,需要轨道交通部门和电力公司多次沟通协商,并且要求城市电网具有较大承载能力和高效的调度控制水平。随着国家电网运行水平的提高,分散供电模式也逐步得到广泛应用。到目前为止,北京城市轨道交通1号线、2号线、4号线、5号线、9号线、10号线,长春轻轨以及大连轻轨等都采用这种供电模式。

### 3. 混合供电模式

混合供电模式是以集中供电模式为主、分散式供电模式为辅的供电方式,作为一些地区集中供电的补充使用城网电源。使用混合供电模式,供电系统将更加稳定、完善,但管理也随之复杂。混合供电模式是介于集中供电模式和分散供电模式之间的一种结合方案,它吸收了集中供电模式和分散供电模式各自的优点,系统方案灵活、可靠、经济。

混合供电模式可以根据轨道交通的需要、城市电网的现状以及城市电网未来的规划,选择不同的侧重供电模式。有时以集中供电模式为主,分散供电模式为辅;有时以分散供电模式为主,集中供电模式为辅。

#### 2.1.2 内部供电模式

城市轨道交通供电系统的主要作用如下:一是把满足质量要求的电能可靠、安全地输送到轨道交通运行的主体车辆上;二是把满足质量要求的电能可靠、安全地输送到辅助用电设备(动力照明负荷)等各支持系统上。

##### 1. 牵引、降压联合模式

牵引、降压联合模式的生产任务包括以下几点。

(1) 对于直流牵引供电,正常运行时,两套整流机组并联运行,接触网越区隔离开关打开,与相邻牵引变电所构成双边供电方式,共同向供电范围内的车辆供电。当该牵引变电所解列时,相邻的牵引变电所通过直流母线或接触网越区隔离开关恢复对该区段的供电,实现大双边供电。

(2) 对于动力变压器供电,正常运行时,降压变电所的两台动力变压器分列运行,负责其供电范围内的全部负荷的供电。当一台动力变压器退出运行时,切除三级负荷,由另一台动力变压器负责向其供电范围内的全部一、二级负荷供电。

## 2. 牵引与降压混合相对独立模式

牵引与降压混合相对独立模式设置了独立的牵引变电所和独立的降压变电所,二者之间影响较小。

牵引变电所两路 35 kV 进线电源来自城市电网区域变电所或地铁主变电所,正常运行时,两路进线电源分别向所连接的 35 kV 母线供电,母联断路器断开。当一路进线停电时,母联断路器合闸,由另一路进线向原供电区域内的负荷供电。两组整流机组均由相同的牵引降压变压器和整流器组成,它们的直流侧并联工作,两个二次绕组和整流器组成多相整流,整流器输出的直流电的正极(+)经直流高速空气开关接到直流侧的正母线上,直流电的负极(-)经开关接到负母线上,通过直流馈线将电能送到接触网。

而降压变电所是为车站与线路区间的动力、照明负荷和通信信号电源供电而设置的。降压变电所对供电电源的要求应按一级负荷考虑,由环形电网或两路电源供电,进线电压侧采用单母线分段接线,一般设有两台动力、照明变压器,每台变压器应满足一、二级负荷所需的容量。正常情况下,两台变压器分别供电。动力、照明的一级负荷包括排烟事故风机系统、通信系统、防灾报警系统、售检票系统、门禁系统等,此类负荷如中断供电,将导致地下车站及其通信信号设备无法工作,引起列车运行秩序混乱,并在发生事故时不能报警和消防。二级负荷包括车站、线路区间和作业场所的工作照明,地下车站风机,排水、排污泵,自动扶梯,人防工程等。此类负荷一旦断电,将对正常运营造成影响。除上述一、二级负荷以外,维修、清扫机械、空调等其他动力和照明均属于三级负荷。

## 2.2 城市轨道交通车辆供电制式

在受流方式上,城市轨道交通的供电制式主要有接触轨和架空接触网两种形式。接触轨如图 2-2 所示。

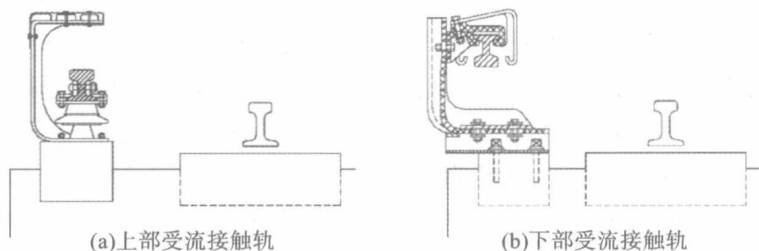


图 2-2 接触轨

接触轨供电方式指车辆通过受流器获得电能。接触轨供电方式适合多种电压制式,如伦敦、纽约的地铁采用直流电压 600 V 供电,巴尔的摩的地铁采用直流电压 700 V 供电,圣地亚哥、加拉加斯、墨西哥城、圣保罗、巴黎等城市的地铁采用直流电压 750 V 供电,莫斯科、圣彼得堡、基辅等城市的地铁采用直流电压 825 V 供电,旧金山的地铁采用直流电压 1000 V 供电,巴塞罗那的 3 号及 4 号地铁线路采用直流电压 1200 V 供电,哥伦比亚麦德林的地铁采用直流电压 1500 V 供电。

接触轨亦称第三轨,通常是沿地铁旁铺设第三根钢轨,一般均较正线钢轨略轻。但巴尔的摩地铁的第三轨采用  $42\text{ kg/m}$  外包铝的钢轨,电能由此通过受电器引入电动车内。虽然这种外包铝的钢轨比用全钢钢轨作第三轨的造价高,但其导电率远高于全钢钢轨,在运营中能够减少电能损失,可以补偿多使用的材料。其后,大阪和横滨的地铁也采用这种包铝的钢轨作第三轨,效果良好。同时,日本已将其定为国家标准。随后,巴塞罗那的地铁也采取同样方法作第三轨供电。

架空接触网供电方式指车辆采用受电弓受流方式,可以采用不同等级的电压。架空接触网如图 2-3 所示。例如,伊斯坦布尔的地铁采用直流电压  $750\text{ V}$  供电,巴塞罗那 2 号、3 号及 5 号地铁线采用直流电压  $1200\text{ V}$  供电,那不勒斯、开罗、毕尔巴鄂、巴伦西亚、上海、仙台、京都、米兰、都灵等城市的地铁采用直流电压接触网供电,直流电压为  $750\text{ V}$  或  $1500\text{ V}$ ,巴西的累西啡、阿雷格里港等城市的地铁均采用直流电压  $3000\text{ V}$  供电,东京的地铁除采用第三轨直流  $600\text{ V}$  以及  $750\text{ V}$  供电外,还采用直流电压  $1500\text{ V}$  架空线供电。还有少数城市的地铁采用交流电输电,如美国波士顿地铁红线行驶的地下地上双车辆即以交流电驱动。

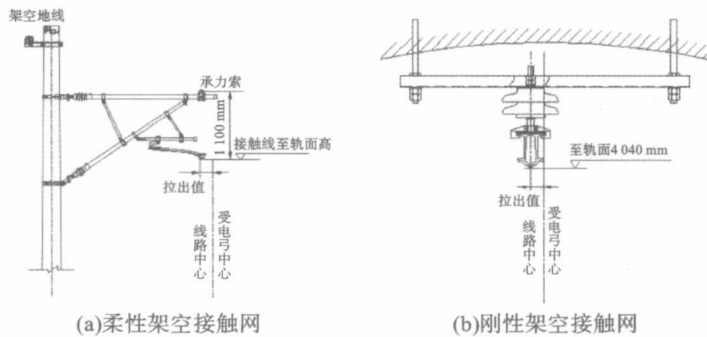


图 2-3 架空接触网

不论哪种方式,也不论采用何种电压,供电距离都是设计者所关心的重点之一。一般情况下,不同电压等级的最大牵引供电距离如下。当直流电压为  $1500\text{ V}$ ,供电距离为  $6\sim 10\text{ km}$ ;直流电压为  $3000\text{ V}$  时,供电距离为  $10\sim 15\text{ km}$ 。直流电压为  $750\text{ V}$  时,供电距离为  $3\sim 5\text{ km}$ ;直流  $1500\text{ V}$  电压相对直流  $750\text{ V}$  电压供电距离较长,牵引变电所数量少,可以相对减少初期投资。但由于线路较短,且城轨线路是以城市区域面进行规划的,因而这种效应并不太明显。只有城市轨道交通网络发展到一定规模,它的价值才会凸现出来。此外由于采用直流  $1500\text{ V}$  电压,电能损耗较少(同样负荷情况下,损耗减少近  $50\%$ ),可以减少运营成本。但由于采用直流  $1500\text{ V}$  电压造成隧道断面扩大,也扩大了投资。采用直流  $750\text{ V}$  电压可以减少约  $15\%$  的隧道断面,而且在采用第三轨方式时,较直流  $1500\text{ V}$  架空式运营维护量少。

世界范围内,城市轨道交通牵引网电压等级分类多,仅直流制(从直流  $400\text{ V}$  至直流  $3000\text{ V}$ )就有近二十种。早期线路普遍采用直流  $750\text{ V}$  及以下电压等级,随着电子技术的发展,直流  $1500\text{ V}$  以上电压等级得到广泛应用。目前,国际电工委员会(IEC)推荐采用的直流电压等级有直流  $750\text{ V}$ 、直流  $1500\text{ V}$ 、直流  $3000\text{ V}$  三种。其中,以直流  $750\text{ V}$  和直流  $1500\text{ V}$  两种应用最广,如尼斯和美国波特兰港轻轨、泰国曼谷地铁采用直流  $750\text{ V}$ ,土耳其布尔萨轻轨和中国香港地铁采用直流  $1500\text{ V}$ 。

其中,直流 1000 V 以下供电电压的线路约 80% 采用接触轨形式,直流 1500 V 以上供电电压的线路约 90% 采用架空接触网形式。有些国家(如日本、英国)规定,供电电压为直流 1500 V 时不得采用接触轨。

截止到 2014 年底,国内已开通运营的城市轨道交通线路有 84 条,牵引网电压等级分为直流 750 V 和直流 1500 V 两种。

## 2.3 城市轨道交通供电系统供电模式的选择

### 1. 影响城市轨道交通供电系统供电模式的主要因素

#### (1) 安全、可靠运行的要求。

城市轨道交通供电系统是城市轨道交通的能源补给线,它对城市轨道交通的影响是全面的。一旦供电系统出现问题,将会导致城市轨道交通的混乱和瘫痪。因而,设计者应把城市轨道交通供电系统的安全、可靠运行放在首位,宁可多增加投资,也要留有充足的安全余度。基于这种理念,目前的设计者多采用集中供电模式,建有独立的 SCADA 系统,安全且可靠运行的水平较高。

#### (2) 投资计划的影响。

城市轨道交通供电系统受投资影响很大,不同的供电模式所需资金也相差巨大,因此必须结合实际和当地经济发展的水平,选择合适的供电模式。

#### (3) 传统思维模式的影响。

受制于传统思维模式,人们不喜欢合作与共享,总认为建立自己的系统不会受制于人,城市轨道交通建设也存在这类问题。但随着社会的进步、观念的改变、科学研究的发展,一些不合时宜或缺乏科学的作法和认识会逐步被淘汰。城市轨道交通建设作为一个庞大的系统,会逐步走向专业化管理,将更多专业化管理运营项目推向社会。从而化解运营风险,降低运营成本,提高维护效率和质量。同时可以充分利用社会或其他行业的专业人员,如高压电力、空调制冷、车辆维护等方面的人才资源,以减少专业人员的储备,降低人才消费的成本。

### 2. 确定城市轨道交通电力系统的供电模式

#### (1) 根据城市电网结构的具体情况确定。

对于城市电网结构发达的城市,可在增加容量的情况下,采用分散供电模式。对于城市电网结构相对不足的城市,可采用集中供电模式。根据城市轨道交通线路情况和城市电网结构,还可以和电力部门共同协商,采用集中供电和分散供电相结合的模式。

#### (2) 根据城市轨道交通的规划确定。

城市轨道交通的近期规划和远期规划直接影响轨道交通供电系统的供电结构及模式,如电网结构、所入容量等。供电系统的运输能力需求应按最大预测设计来选择供电模式。

#### (3) 根据城市轨道交通的研究水平确定。

在实际决策中,应积极采用拥有自主知识产权和技术研发能力的供电模式,从而推进城市轨道交通的研究发展和未来供电模式的进一步优化。

### 3. 城市轨道交通供电系统供电模式的评价标准

#### (1) 安全性与可靠性。

城市轨道交通供电系统的安全性与可靠性体现在以下几个方面。一是必须保证不间断供电。二是必须保证供电质量,供电质量的好坏直接影响设备运营,甚至影响其安全。当电压不能满足车辆要求时,车辆会跳闸,造成停运的严重后果。三是保证人身安全和贵重高压电气设备的安全。四是具有一定的抗御外界环境影响的能力,如在大风、大雪、雷雨、雷电、高温等情况下,首先不能影响正常运营,其次保证不会出现安全问题,或能够缩小故障范围,尽量减少损失。五是要求城市轨道交通供电系统不会对周围环境或其他事物造成危害,如减少杂散电流,减小对城市管线、通信设施、高楼等的损害,以及减少对居民生活的影响。

#### (2) 经济性。

城市轨道交通供电系统必须科学建设和运营,以获得较好的效益。主要体现在以下方面。一是采用科学合理的结构模式,减少一次性投资和资金偿还的压力。二是建成后,采用合理科学的运行模式,提高效能,节约用电。三是要有全网电力规划的概念,要结合未来整个城市的轨道交通网络,进行供电系统的建设,并选择更为科学的模式。

#### (3) 灵活性。

首先,在事故、正常、非正常状态下,城市轨道交通供电系统应能灵活选择不同的运行方式,以满足运营要求。其次,在进行模式变化时,应力求灵活、操作简单。

### 4. 城市轨道交通供电系统建设的建议

通过分析,建设轨道交通时,应根据不同的地区选择不同的供电模式。而且,城市轨道交通供电系统和城市电网应具有深度融合基础,能充分发挥电力公司的建设经验和运营管理水平,把城市轨道交通供电系统大胆地分化给电力公司,实行专业化运营模式,既可以减少运营费用,又可以发挥电力公司的专业能力。为此,对城市轨道交通供电系统的建设提出以下建议。

(1) 积极促进电力部门参与城市轨道交通供电系统的建设与运营工作。对于集中式供电,建议轨道交通 10 kV 以上电网的建设由电力部门承担建设运营与维护工作。远期可实施城市轨道交通供电系统全部由电力部门承担。对于这种新理念,不但要求城市轨道交通公司要敢于接受,而且电力部门也要敢于承担其社会责任。

#### (2) 因地制宜,选取科学合适的供电模式。

首先要和隧道的形式选择相结合,包括断面形状的选择、断面的大小等。其次对于电压等级、受流方式和电网结构的选择,甚至运营模式的选择,要敢于创新,不要照搬照抄,更不要盲目攀比。对于不同结构形态的城市,如有的城市属于狭长结构,有的城市属于环形结构,要根据实际情况,科学制定。

#### (3) 渐次合作。

应积极推进电力部门与城市轨道交通公司合作的深度。如在建设期可以开展项目合作,把部分建设任务交由电力部门,在运营期,可以采取维修、维保全权委托的方式。总之,在双方共赢的基础上,充分利用本地现有资源,努力实现“集中供电、资源共享”或“资源共享、分散供电”的目标。