

巍巍交大 百年书香
www.jiaodapress.com.cn
bookinfo@sjtu.edu.cn



策划编辑 刘建
责任编辑 胡思佳
封面设计 黄燕美

CHENGSHI GUIDAO JIAOTONG GONGDIAN XITONG

城市轨道交通 供电系统

职业教育城市轨道交通系列创新教材

职业教育城市轨道交通系列创新教材

城市轨道交通 供电系统

主编 白冰 谭丽娜

城市轨道交通供电系统

主编 白冰 谭丽娜

上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

X-A

免费提供
精品教学资料包
服务热线: 400-615-1233
www.huatengzy.com



扫描二维码
关注上海交通大学出版社
官方微信

ISBN 978-7-313-20698-5



9 787313 206985

定价: 49.00元



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



职业教育城市轨道交通系列创新教材

城市轨道交通 供电系统

主 编 白 冰 谭丽娜

副主编 袁健男 王 刚 徐作华



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书共分 6 个模块，内容包括城市轨道交通系统及供电系统概述、牵引变电所的主要电气设备、变电站电气接线、接触网、SCADA 系统和城市轨道交通供电系统的运行管理等。

本书可作为职业院校城市轨道交通供配电技术等相关专业的教学用书，还可作为城市轨道交通企业的职业培训教材，同时也可作为城市轨道交通技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

城市轨道交通供电系统/白冰, 谭丽娜主编. —上海: 上海交通大学出版社, 2019(2024 重印)

ISBN 978-7-313-20698-5

I. ①城… II. ①白… ②谭… III. ①城市铁路—供电系统—高等教育—教材 IV. ①U239.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 295177 号

城市轨道交通供电系统

CHENGSHI GUIDAO JIAOTONG GONGDIAN XITONG

主 编: 白 冰 谭丽娜

出版发行: 上海交通大学出版社

地 址: 上海市番禺路 951 号

邮政编码: 200030

电 话: 021-64071208

印 制: 三河市骏杰印刷有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 17.25

字 数: 414 千字

版 次: 2019 年 1 月第 1 版

印 次: 2024 年 9 月第 4 次印刷

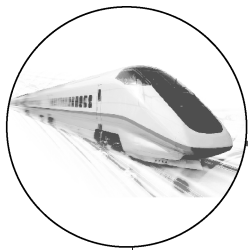
书 号: ISBN 978-7-313-20698-5

定 价: 49.00 元

版权所有 侵权必究

告读者: 如您发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 0316-3662258



前言

城市轨道交通的迅速发展,带动了社会对轨道交通人才的需求。目前,轨道交通领域人才缺口非常大,在生产一线从事施工、维修养护、运营管理、监理等工作的中、高级技能型人才尤其短缺。培养生产一线的高级技能型人才是职业教育的目标,为此,我们特组织具有一线教学经验的教师和企业在职人员共同编写了本书。

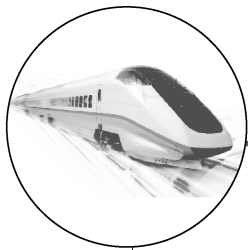
本书对城市轨道交通供电系统进行了较为全面、系统的介绍,内容包括城市轨道交通系统及供电系统概述、牵引变电所的主要电气设备、变电站电气接线、接触网、SCADA 系统和城市轨道交通供电系统的运行管理。本书旨在体现专业知识与职业意识教育相结合的特色,具有较强的针对性和可操作性,突出对学生技术技能的培养,注重学生职业能力的提高,努力让学生做到“学以致用”。

本书由长春职业技术学院白冰、谭丽娜任主编,长春职业技术学院袁健男、王刚、徐作华任副主编。编写分工如下:模块 1 和模块 6 由王刚编写,模块 2 由白冰编写,模块 3 由袁健男编写,模块 4 由谭丽娜编写,模块 5 由徐作华编写。

在本书的编写过程中,编者得到了长春市轨道交通集团有限公司、长春职业技术学院等单位的大力支持,在此表示衷心的感谢。另外,本书还引用了许多国内外专家、学者的有关城市轨道交通的资料和文献,在此向相关人员致以衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中存在的疏漏和不足之处,敬请广大读者批评指正。

编 者



目 录

模块 1 城市轨道交通系统及供电系统概述 1

1.1 城市轨道交通系统概述 1

- 1.1.1 城市轨道交通系统的定义、技术特征及特点 1
- 1.1.2 城市轨道交通系统的构成 3
- 1.1.3 城市轨道交通系统的分类 4
- 1.1.4 我国城市轨道交通系统的发展现状与存在的问题 5

1.2 城市轨道交通供电系统概述 5

- 1.2.1 城市轨道交通供电系统的供电制式 6
- 1.2.2 城市轨道交通供电系统的组成 8
- 1.2.3 城市轨道交通供电系统的功能 14
- 1.2.4 国内城市轨道交通供电系统的发展现状 16

1.3 城市轨道交通杂散电流 16

- 1.3.1 杂散电流的形成 16
- 1.3.2 杂散电流的危害 17
- 1.3.3 杂散电流的防护 18

技能实训 19

思考与练习 21

模块 2 牵引变电所的主要电气设备 22

2.1 牵引变电所概述 22

- 2.1.1 牵引变电所的类型 23
- 2.1.2 牵引变电所的特点 23
- 2.1.3 牵引变电所的工作原理 24
- 2.1.4 牵引变电所的设备分类 24

2.2 整流机组 25

- 2.2.1 整流机组概述 25
- 2.2.2 变压器的工作原理 27
- 2.2.3 变压器的主要技术参数 28
- 2.2.4 变压器的型号与分类 30
- 2.2.5 变压器的结构 32

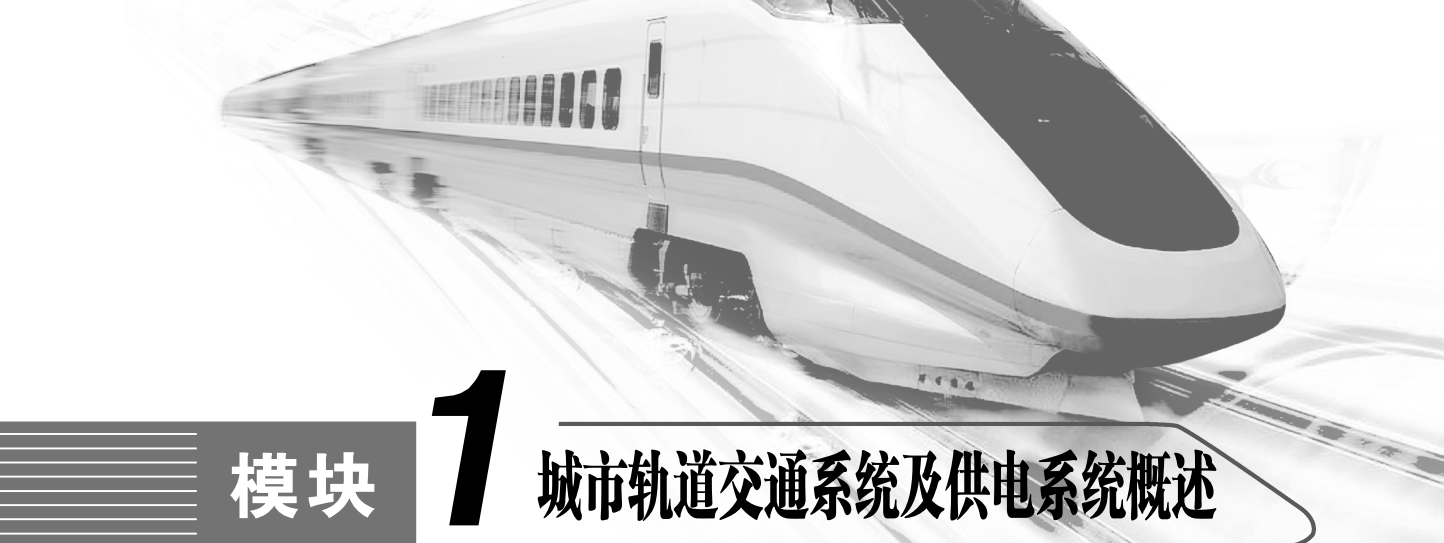


2.2.6	干式变压器	40
2.2.7	整流器	41
2.3	电弧的基本理论	45
2.3.1	气体电弧原理	45
2.3.2	开关电器中常用的灭弧方法	50
2.4	高压断路器	53
2.4.1	高压断路器概述	54
2.4.2	SF ₆ 断路器	58
2.4.3	真空断路器	60
2.4.4	直流断路器	65
2.5	其他开关电器设备	70
2.5.1	隔离开关	70
2.5.2	高压负荷开关	74
2.5.3	高压熔断器	78
2.6	操动机构	84
2.6.1	操动机构概述	84
2.6.2	弹簧操动机构	86
2.6.3	液压操动机构	88
2.6.4	弹簧储能液压操动机构	91
2.6.5	隔离开关电动操动机构	95
2.7	互感器	95
2.7.1	互感器概述	95
2.7.2	电流互感器	96
2.7.3	电压互感器	106
2.8	避雷器	114
2.8.1	避雷器概述	114
2.8.2	避雷器的主要类型	116
2.9	配电装置	120
2.9.1	配电装置概述	120
2.9.2	GIS 组合电器	123
2.10	接地装置	127
2.10.1	接地	127
2.10.2	城市轨道交通交流供电系统的接地	132
2.10.3	城市轨道交通直流牵引供电系统的接地	135
2.10.4	地铁综合接地系统的构成	136
技能实训		137
思考与练习		150
模块 3 变电站电气接线		152
3.1	电气主接线概述	152
3.1.1	电气主接线的基本要求及分类	153

3.1.2 电气主接线图	154
3.1.3 电气主接线中开关电器的配置原则	155
3.1.4 倒闸操作注意事项	155
3.1.5 变电站的类型	156
3.2 常见电气主接线	156
3.2.1 桥形接线	156
3.2.2 单母线接线	157
3.2.3 单元接线	161
3.3 直流牵引变电所电气主接线	162
3.3.1 主变电站	162
3.3.2 降压变电站	165
3.3.3 牵引降压混合变电所	165
3.3.4 中压供电网络	167
3.4 二次接线概述	170
3.5 控制、信号电路	173
3.5.1 控制、信号电路概述	173
3.5.2 高压断路器的控制、信号回路	174
3.5.3 隔离开关的控制、信号回路	176
3.5.4 断路器与隔离开关联动控制、信号电路	178
3.6 继电保护系统概述	179
3.6.1 继电保护装置的定义及任务	179
3.6.2 继电保护装置的基本要求	180
3.6.3 继电保护装置的基本构成及工作原理	181
3.6.4 继电保护装置的分类	182
3.7 自用电系统	182
3.7.1 自用电系统概述	182
3.7.2 主变电站自用电配置	183
3.7.3 牵引变电所自用电配置	185
3.7.4 降压变电站自用电配置	187
技能实训	188
思考与练习	192
模块 4 接触网	193
4.1 接触网概述	193
4.1.1 接触网的供电制式	193
4.1.2 接触网的类型	194
4.1.3 接触网的基本要求	197
4.1.4 接触网的供电方式	197
4.2 柔性接触网	198
4.2.1 支柱和基础	199
4.2.2 支持装置	199



4.2.3	接触悬挂	201
4.2.4	定位装置	207
4.2.5	其他设备	211
4.3	刚性接触网	212
4.3.1	刚性接触网的结构	212
4.3.2	刚性接触网的技术参数要求	218
4.3.3	刚性接触网的特点	219
4.4	接触轨	219
4.4.1	接触轨的分类	220
4.4.2	接触轨系统的结构	221
技能实训		223
思考与练习		228
模块 5 SCADA 系统		230
5.1	SCADA 系统概述	230
5.1.1	SCADA 系统的主要作用	231
5.1.2	城市轨道交通 SCADA 系统的监控对象	231
5.1.3	城市轨道交通 SCADA 系统的主要特点	232
5.2	SCADA 系统的结构及功能	233
5.2.1	城市轨道交通 SCADA 系统的结构及原理	233
5.2.2	监控主站的功能及组成	234
5.2.3	被控站的功能及组成	238
5.3	城市轨道交通供电系统自动化	240
5.3.1	城市轨道交通供电系统变电站电气设备的自动化需求	240
5.3.2	城市轨道交通供电系统变电站自动化系统的表现形式	241
5.3.3	总线的运用	241
技能实训		242
思考与练习		244
模块 6 城市轨道交通供电系统的运行管理		245
6.1	城市轨道交通供电管理	245
6.1.1	运行管理的任务和内容	245
6.1.2	运行管理组织及有关人员职责	247
6.2	城市轨道交通供电系统运行管理制度	252
6.2.1	变电站管理规程和制度	252
6.2.2	接触网管理规程和制度	256
6.2.3	SCADA 系统管理规程和制度	262
技能实训		264
思考与练习		265
参考文献		266



模块

1

城市轨道交通系统及供电系统概述



知识目标

- (1) 掌握城市轨道交通系统的定义及特点。
- (2) 掌握城市轨道交通的类型。
- (3) 了解城市轨道交通的主要技术特征。
- (4) 掌握城市轨道交通的发展现状与存在的问题。
- (5) 掌握城市轨道交通供电系统的各子系统。
- (6) 掌握城市轨道交通所采用的供电方式。
- (7) 掌握不同类型变电站的功能。
- (8) 掌握杂散电流的形成、危害和防护。



技能目标

- (1) 会区分不同类型的城市轨道交通。
- (2) 会区分城市轨道交通供电系统的各子系统。
- (3) 会介绍城市轨道交通所采用的供电方式。
- (4) 会介绍不同类型变电站的功能。
- (5) 会介绍杂散电流产生的原因。

1.1 城市轨道交通系统概述

1.1.1 城市轨道交通系统的定义、技术特征及特点

1. 城市轨道交通系统的定义

“城市轨道交通”是一个范围较大的概念,在国际上没有统一的定义。一般而言,城市中



车辆在固定的轨道上运行并主要用于城市客运的交通系统称为城市轨道交通。

广义的城市轨道交通是指以轨道交通运输方式为主要技术特征,在城市公共客运交通系统中具有中等以上运量的交通系统,主要为城市公共客运服务,是一种在城市公共客运交通中起骨干作用的现代化立体交通系统。

狭义的城市轨道交通是指地铁、轻轨和单轨。

《城市公共交通分类标准》(CJJ/T 114—2007)中将城市轨道交通定义为:“城市轨道交通为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的要求,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工具。包括地铁系统、轻轨系统、单轨系统、有轨电车、磁浮系统、自动导向轨道系统和市域快速轨道系统。”

2. 城市轨道交通系统的技术特征

城市轨道交通系统的主要技术特征有以下几个:

- (1) 采用列车编组化运行,运量大。
- (2) 良好的线路条件与控制体系,速度快。
- (3) 电力牵引,污染少、环保。
- (4) 可采用地下和高架敷设方式,占地面积小。
- (5) 全隔离的路权方式,安全性、可靠性好。
- (6) 良好的环控体系和候车环境,乘车舒适性佳。

3. 城市轨道交通系统的特点

城市轨道交通系统具有以下几个特点:

(1) 样式的多样性。根据轨道交通系统基本技术特征的不同,轨道交通系统主要有市郊铁路、地下铁道、轻轨交通、独轨铁路和有轨电车等类型。

(2) 规划布局要求的科学性和合理性。轨道交通线网规划不仅与城市地面交通相配合,还与公路、铁路、民航等大交通相协调。

(3) 建设和服务的高标准化。城市轨道交通带来的不仅是科技和运力的提升,也是服务的高标准化。各大城市轨道交通的设计、建设、运营和管理都十分重视以优质的服务满足城市、经济、发展、不同乘客的需求,它比常规公交更加快捷、方便、舒适,这对于提升城市出行水平有很大作用。

(4) 发展性和复杂性。城市轨道交通的发展经历了生成期、成长期和成熟期三个阶段,每个时期均有其独特的技术特点。

① 生成期的技术特点。

- 轨道交通设计简单,技术装备水平低。
- 轨道交通在城市交通中所占份额有限。

② 成长期的技术特点。

- 在硬件方面,先进技术的采用主要表现为城市轨道交通运输工具的更新与完善。
- 在软件方面,先进技术的采用主要表现在城市规划与城市交通布局及轨道交通网络的发展开始以先进的设计思想为指导。



③ 成熟期的技术特点。城市交通体系不再单一,更注重公交协调合作的作用,强调大小公交的衔接和一体化,大容量快速轨道交通与传统汽(电)车地面交通两大类运输方式形成全方位、立体化、多层次的格局。

(5) 综合性。

① 建设规模大,一个城市的轨道交通线网一般有近百千米至数百千米。

② 技术要求高,涉及现代土木工程、机电设备工程等多个高新技术领域。

③ 项目投资大,每千米造价达3亿~4亿元。

④ 建设周期长,单线建设周期要4~5年,线网建设周期一般要30~50年。

⑤ 信息量大,建设、运营过程中所产生的信息量很大,处理工作非常繁重。

⑥ 系统复杂,要考虑轨道交通与其他交通方式、城市发展的关系,考虑轨道交通线网布局、建设次序、资源共享的关系,考虑轨道交通工程策划、建设、运营、资源利用的关系等。

1.1.2 城市轨道交通系统的构成

城市轨道交通系统由车辆系统、供电系统、通信系统、信号系统、自动售检票机、暖通空调、屏蔽(安全)门、自动扶梯和电梯、防火灭火系统、给排水系统、综合监控系统组成。

1. 车辆系统

城市轨道交通的车辆是用来运输乘客的工具,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,城市轨道交通列车一般采用动拖结合、固定编组的电动列车组形式。城市轨道交通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;同时要有良好的乘客服务设施,使乘客感到舒适、文明、方便。

2. 供电系统

电能是城市轨道交通车辆电力牵引系统必需的能源,电动车辆及为轨道交通运营服务的机电设备,包括通风、空调、照明、通信、信号、给排水、防灾报警、电梯、自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,而且有可能危及乘客的生命安全,造成财产损失。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,通过城市电网一次电力系统和轨道交通供电系统实现输送或变换,最后以适当的电压等级和一定的电流形式(直流或交流)供给车辆和其他用电设备。

3. 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、有线和无线通信、闭路电视、有线广播、时钟、电源等设备系统。城市轨道交通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。



4. 信号系统

城市轨道交通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高密度、短间隔、短站距和快速等特点,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。

5. 其他

自动售检票机、暖通空调、屏蔽(安全)门、自动扶梯和电梯等车站设施及防火灭火系统、给排水系统等环控设施,在保证乘客有一个良好的候车环境的同时,更保证了乘客能够安全、快捷地乘坐列车。

综合监控系统包括电力监控(supervisory control and data acquisition, SCADA)系统、机电设备监控系统、屏蔽门监控系统、防淹门互联系统、火灾自动报警系统、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、信号系统和时钟系统。它涉及的专业门类较多,是一个真正意义的综合系统。

1.1.3 城市轨道交通系统的分类

城市轨道交通系统在世界范围内发展较快,地区、国家、城市的不同,服务对象的不同等,使得城市轨道交通系统发展成为多种类型,技术指标差异较大,目前尚无十分统一的分类标准。

(1) 按导向方式的不同,城市轨道交通系统可分为轮轨导向的城市轨道交通系统和导向轮导向的城市轨道交通系统。

(2) 按线路架设方式的不同,城市轨道交通系统可分为地下(水下)城市轨道交通系统、高架城市轨道交通系统和地面城市轨道交通系统。

(3) 按线路隔离程度的不同,城市轨道交通系统可分为全隔离城市轨道交通系统、半隔离城市轨道交通系统和不隔离城市轨道交通系统。

(4) 按轨道材料的不同,城市轨道交通系统可分为钢轮钢轨城市轨道交通系统和橡胶轮混凝土轨道交通系统。

(5) 按牵引方式的不同,城市轨道交通系统可分为旋转式直流电动机牵引城市轨道交通系统、交流电动机牵引城市轨道交通系统和直流电动机牵引城市轨道交通系统。

(6) 按运营组织方式的不同,城市轨道交通系统可分为传统城市轨道交通、区域快速轨道交通和城市(市郊)铁路。

(7) 按高峰小时单向运输能力的不同,城市轨道交通系统可分为高运量轨道交通系统、中运量轨道交通系统和低运量轨道交通系统。高运量轨道交通系统的高峰小时单向运输能力在 30 000 人次以上,属于该种类型的轨道交通系统主要有地下铁道和高技术标准的轻轨铁路。中运量轨道交通系统的高峰小时单向运输能力为 10 000~30 000 人次,属于该种类型的轨道交通系统主要有轻轨和独轨。低运量轨道交通系统的高峰小时单向运输能力为 5 000~10 000 人次,属于该种类型的轨道交通系统主要有低技术标准的有轨电车。

(8) 按动能范围、车辆类型及主要技术特征的不同,城市轨道交通系统可分为有轨电车、地铁、轻轨、城市(市郊、城际)铁路、独轨交通、新交通系统、磁浮交通。

1.1.4 我国城市轨道交通系统的发展现状与存在的问题

1. 发展现状

近年来,我国城市轨道交通发展迅猛,在优化城市结构布局、缓解城市交通拥堵及促进经济社会发展等方面的作用日益凸显。据统计,截至2018年年末,我国内地共计35个城市开通城市轨道交通并投入运营,运营线路总长度达到5 766.6 km。预计到2020年左右,中国内地城市轨道交通运营线路总规模将达到9 000 km。我国经济向高质量发展阶段转型,需要大力推动轨道交通装备向绿色、智能方向发展。

中国城市轨道交通的快速发展在改善城市交通状况、改变市民出行和生活方式、服务和促进城市发展、推动产业进步与升级等方面发挥了重要作用。北京、上海、广州、深圳等城市的城市轨道交通已形成网络化运营格局,城市轨道交通在公共交通体系中起到了骨干作用。

中国城市轨道交通在服务和促进城市发展的同时,大规模的建设也造就了涵盖规划设计、工程建设、运营管理、技术装备等各领域的完整产业链。与高速铁路一样,中国城市轨道交通在过去20年间取得了巨大的进步和成绩,并在积极跨出国门,走向世界。

2. 存在的问题

随着我国城镇化进程的加快,城市人口的快速膨胀,轨道交通建设突飞猛进。《国家发展改革委关于加强城市轨道交通规划建设管理的通知》(发改基础[2015]49号)明确提出应超前编制线网规划,并提出了城市轨道交通长远可持续发展的总体性方案。而目前,在轨道交通的快速发展中,轨道交通规划设计暴露出不少问题。

(1) 对城市未来发展的认识不足,剖析不够,对轨道交通战略定位不准,发展模式单一;或因城市空间结构、人口规模等不稳定,轨道交通选取的系统规模与客流需求不匹配。

(2) 网络规划缺乏前瞻性,规划设计忽略城市特性和实际需要,网络层次及系统选型单一,后期运营组织灵活度差,服务水平较低,运营效率不高。

(3) 轨道交通规划设计与周边地下空间开发结合度不高,设计灵活度较差,地下空间没有得到高效利用,造成地下空间资源浪费。

1.2 城市轨道交通供电系统概述

城市轨道交通供电系统是城市轨道交通的动力源泉,在为线路上运行的机车提供所需要的牵引负荷的同时,为车站、区间、车辆段、控制中心(operating control center, OCC)等其他建筑物提供其所需要的动力照明电能。在城市轨道交通运营过程中,供电一旦中断,不仅会造成城市轨道交通运输系统的瘫痪,而且会危及乘客的生命安全,造成财产损失。因此,城市轨道交通供电系统的有效运行是城市轨道交通系统安全可靠运行的重要保障。



1.2.1 城市轨道交通供电系统的供电制式

电力牵引用于轨道交通系统已有 100 多年的历史,随着经济和科学技术的不断发展,用于轨道交通的电力牵引方式有许多不同的制式出现。这里所说的制式,是指供电系统向电动车辆或电力机车供电所采用的电流和电压制式,如直流制或交流制、电压等级、交流制中的频率(工频或低频)及交流制中是单相或三相等。

1. 供电制式的发展

城市轨道交通供电系统的供电制式经过了如下几个发展阶段:

(1) 直流制式。为了满足城市轨道交通车辆速度快、能耗小、平稳舒适的运输要求,对动力车辆有如下要求:

① 起动加速性能。要求起动加速力大且平稳,即恒定的、大的起动力矩,便于列车快速平稳起动。

② 动力设备容量利用。对列车的主要动力设备——牵引电动机的基本性能要求为:列车轻载时运行速度可以高一些,列车重载时运行速度可以低一些。这样无论列车重载或轻载,都可以实现牵引电动机容量的充分利用,因为列车的牵引力与运行速度的乘积为其功率容量,这时近于常数。

③ 调速性能。在调速过程中既要达到变速,还要尽可能经济,不要有太大的能量损耗,同时还希望容易实现调速。

直流串励电动机的机械特性(转矩与转速的关系特性)正符合重载时速度低、轻载时速度高的要求。此外,从直流串励电动机的起动和调速方法看,也是比较容易实现的。为了限制直流串励电动机刚接通电源时起动电流太大和正常运行时为了降速而降低其端电压,最早采用在电动机回路中串联大功率电阻的方法来达到限流和降压的目的。这种方法容易实现,但在列车起动和调速过程中却造成了大量的能量损耗,很不经济。尽管如此,由于局限于一定时期的技术发展水平,采用直流串励电动机作为牵引动力就成为最早也是迄今为止被长期采用的形式,这就是供电系统直接以直流电向电动车辆或电力机车供电的电力牵引“直流制式”。

(2) 低频单相交流制。随着矿山和干线电力牵引的发展,列车需要的功率越来越大,如果采用直流供电制式,则受直流串励电动机端电压不能太高的限制,会导致供电电流很大,因而供电系统的电压损失和能量损耗必然增大,由此出现了低频单相交流制。

低频单相交流制是交流供电方式,交流电可以通过变压器升降压,因此,可以升高供电系统的电压,到了列车以后再经车上的变压器将电压降低到适合牵引电动机应用的电压等级。由于早期整流技术的限制,这种制式采用了在原理上与直流串励电动机相似的单相交流整流子牵引电动机。这种电动机存在整流换向的问题,其困难程度随电源频率的升高而增大。由于采用低频电源使供电系统复杂化,需要由专用低频电厂供电,或由变频电站将国家统一工频电源转变成低频电源再输出,因此没有得到广泛应用,只在少数国家的工矿和干线上应用。

(3) 工频单相交流制。工频单相交流制式既保留了交流制可以升高供电电压的长处,



又仍然采用直流串励电动机作为牵引电动机。在电力机车上装设降压变压器和大功率整流设备,可将高压电源降压,再整流成适合直流牵引电动机应用的低压直流电。电动机的调压调速可以通过改变降压变压器的抽头或可控整流装置的电压来实现。工频单相交流制是当今世界各国干线电气化铁路应用较普遍的牵引供电制式。我国干线电气化铁路即采用这种制式,其供电电压为 25 kV。

(4) 三相交流制。三相交流制式的供电网比较复杂,必须有两根架空接触线和走行轨道构成三相交流电路,两根架空接触线之间又要高压绝缘,造成的困难和投资更大,因此已经被淘汰。

2. 供电制式的选择原则

牵引网的供电制式主要指电流制、电压等级和馈电方式。目前,城市轨道交通的直流牵引电压等级有 DC 600 V、DC 750 V 和 DC 1 500 V 等多种。我国国家标准《城市轨道交通直流牵引供电系统》(GB/T 10411—2005)规定了 DC 1 500 V 和 DC 750 V 两种电压制式。

电压制式与馈电方式是密不可分的。一般架空接触网馈电方式电压等级采用 DC 1 500 V。第三轨馈电方式电压等级主要采用 DC 750 V,第三轨馈电方式电压等级有向 DC 1 500 V 发展的趋势。

供电制式的选择原则如下:

(1) 供电制式与客流量相适应。客流量是轨道交通设计的基础。根据预测客流量大小,选择适用的电动客车类型和列车编组数量,一般大运量的轨道交通系统采用 DC 1 500 V 电压和架空接触网馈电方式,中运量的轨道交通系统采用 DC 750 V 电压和接触轨馈电方式。

(2) 供电安全可靠。城市轨道交通是城市交通的骨干,一旦牵引网发生故障,造成列车停运,就会影响市民出行,引起城市交通混乱。因此,安全可靠是选择供电制式最重要的条件。

(3) 便于安装和事故抢修。选用的牵引网应便于施工安装和日常维修;一旦发生牵引网故障,应便于抢修,尽快恢复运营。

(4) 牵引网使用寿命长,维修工作量小,是降低轨道交通运营成本的重要条件。

(5) 城市轨道交通是城市的基础设施,应注重环境和景观效果。

3. 采用直流供电制式的原因

城市轨道交通几乎毫无例外地都采用直流供电制式。采用直流供电制式的原因有如下几点:

(1) 城市轨道电动车辆的功率不是很大,供电半径也不大,因此供电电压不需要太高。

(2) 在同样的电压等级下,直流制因为没有电抗压降而比交流制的电压损失小。

(3) 城市轨道交通供电系统的供电线路处在城市建筑群之间,供电电压不宜太高,以确保安全。

(4) 大功率半导体整流元件(晶闸管)的出现,使得可在直流制电动车辆上采用整流器对直流串励电动机进行调压调速,减少了能耗,给直流制增添了新的生命力。

(5) 快速晶闸管出现后,由快速晶闸管等组成的逆变器可将直流电逆变成频率可以调



节的交流电,这样就实现了多年来想采用结构简单、结实的鼠笼式异步电动机作为牵引电动机的愿望。这种用改变频率来改变异步电动机速度的方法(简称变频调速),可使异步牵引电动机的性能满足牵引列车特点的要求。虽然电动车辆上采用的是交流异步牵引电动机,但其供电电压还是直流的,所以还属于直流制式的范畴,这就给直流制的应用提供了一个更广阔的发展空间。

1.2.2 城市轨道交通供电系统的组成

城市轨道交通作为城市电网的一个用户,一般是从城市电网取得电能,无须单独建设电厂,城市电网也把城市轨道交通作为一个重要用户。因此,无论是干线电气化铁路、工矿电力牵引,还是城市轨道交通的电力牵引用电,均由国家统一电网供给。城市轨道交通供电系统主要由外部供电系统、牵引供电系统、动力照明供电系统和 SCADA 系统组成。

1. 外部供电系统

发电厂(站)是发出电能的中心,一般可分为火力发电厂、水力发电站和原子能核电站等。为减少线路的电压损失和能量损耗,发电厂中发电机发出的电能要先经过升压变压器升高电压,然后以 110 kV 或 220 kV 的高压,通过三相传输线输送到区域变电站。

在区域变电站中,电能先经过降压变压器把 110 kV 或 220 kV 的高压降低电压等级(如 10 kV 或 35 kV),再经过三相输电线输送给本区域内的各用电中心。城市轨道交通牵引用电既可以从区域变电站高压线路得电,也可以从下一级电压的城市地方电网得电,这取决于系统和城市地方电网的具体情况及牵引用电容量的大小。

对于直接从系统高压电网获得电力的城市轨道交通系统,往往需要再设置一级主降压变电站,将系统输电电压由 110 kV 或 220 kV 降低到 10 kV 或 35 kV,以适应直流牵引变电所的需要。从管理的角度看,主降压变电站可以由电力部门直接管理,也可以归属于地方城市轨道交通部门管理。

如图 1-1 所示,虚线 2 以上,即从发电厂(站)经升压变电站、高压输电网、区域变电站至主降压变电站部分通常被称为城市轨道交通供电系统的外部(或一次)供电系统。城市轨道交通企业作为城市电网的重要用户,属于一级负荷,需要引入双路高压电源对其供电系统进行供电。

电源由城市电网引入,根据不同城市的电网构成,采用合适的供电方式。城市轨道交通系统作为城市电网的特殊用户,一般用电范围多在几千米到几十千米,采用何种供电方式,与城市电网的构成及城市轨道交通线路的分布及电源的容量有密切关系。城市轨道交通供电系统对城市电网来说是用户,对城市轨道交通的各类负荷来说是电源。城市电网对城市轨道交通系统的供电方式可分为以下三种:

(1) 集中供电。由城市轨道交通专用主变电站构成的供电方案称为集中供电。如图 1-2 所示,沿着城市轨道交通线路,根据用电容量和城市轨道交通线路的长短,建设一座或几座轨道交通专用的主变电站。主变电站应有两路独立的电源,一般为 110 kV 或 63 kV,由发电厂或区域变电站对其供电。主变电站经过变压后,输出 AC 35 kV 或 AC 10 kV 等级的电压,给城市轨道交通的牵引供电系统和动力照明系统供电。

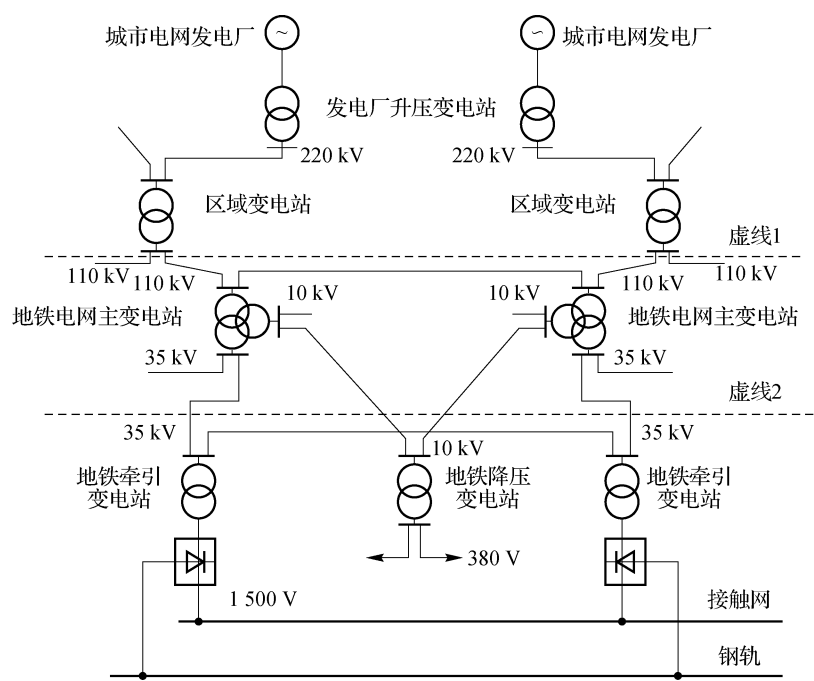


图 1-1 城市轨道交通供电系统

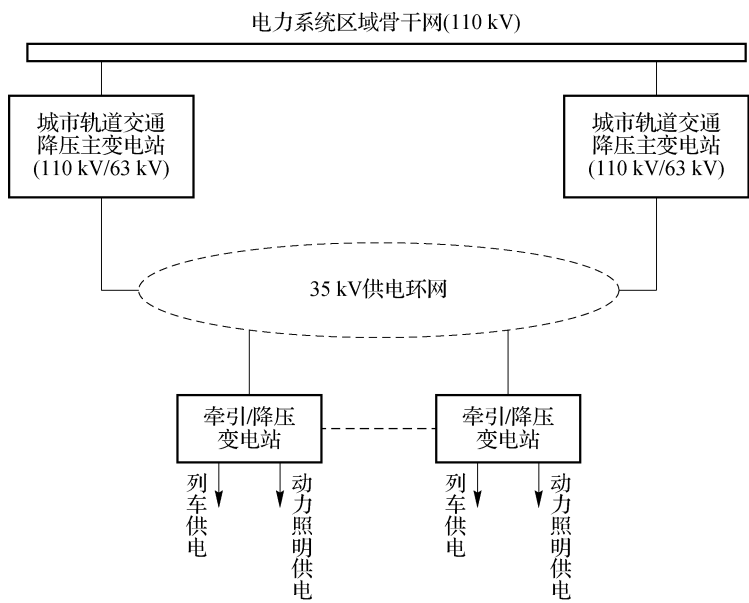


图 1-2 集中供电

上海、香港地铁采用三级电压制集中供电方式(见图 1-3),集中供电的牵引供电系统的电压为 35 kV,供配电系统的电压为 10 kV。目前,国内只有少数城市采用这种形式。

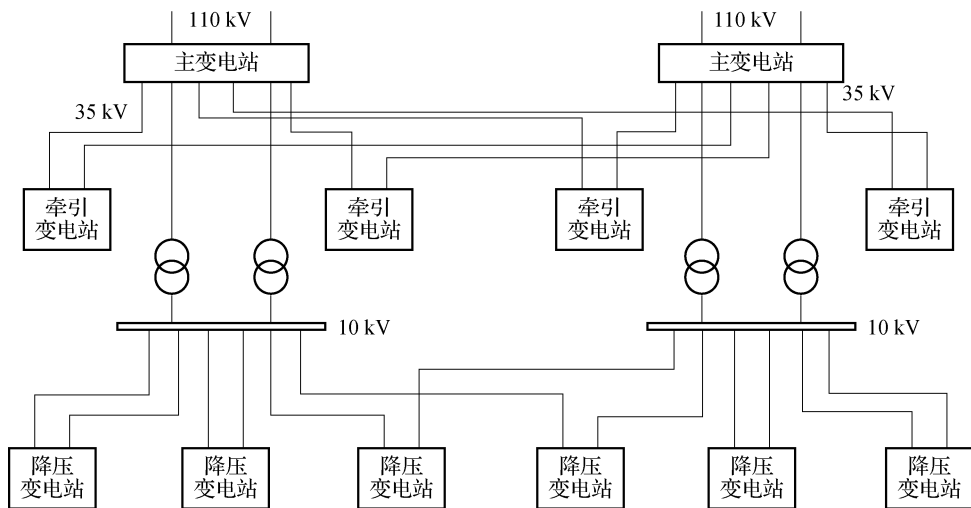


图 1-3 三级电压制集中供电方式

广州地铁采用两级电压制集中供电方式(见图 1-4),牵引供电系统和供配电系统的电压均采用 33 kV。目前,国内采用集中供电的城市多采用此种形式。

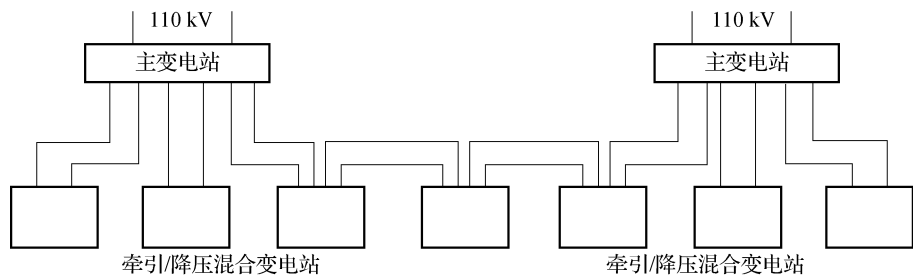


图 1-4 两级电压制集中供电方式

① 主变电站。城市轨道交通负荷作为一级负荷,主变电站进线一般为双电源。双电源的设计有两种:一种是两路电源均为专用线路,电源可靠性高;另一种是一路电源为专用线路,另一路电源并接于供电线路,与其他用户共享电源。并接电源的可靠性虽然相对来说较差,但也能满足地铁供电的要求。两路电源分列运行,相互备用。同时,在设计中,通过地铁环网电缆将两座主变电站的母线进行连接,即使两路外部电源同时发生故障,也可以实现主变电站之间的相互支援,提高外部电源的安全可靠性。

主变电站进线电源侧可采用内桥接线或线路变压器组接线(见图 1-5),采用何种接线形式,主要考虑外部电源的可靠程度和电力部门的要求。内桥接线的可靠性要略高于线路变压器组接线,主要体现在当一路进线电源故障时,完全不影响地铁供电系统的运行,而此时线路变压器组接线就只能有单台主变压器运行。

主变电站中压侧采用单母线分段接线形式,当其中一台主变压器或一路中压进线不能正常运行时,通过母联开关合闸来保证地铁供电的可靠性。当外部电源不稳定时,通过主变压器有载调压开关来保证地铁电源的稳定性和可靠性。

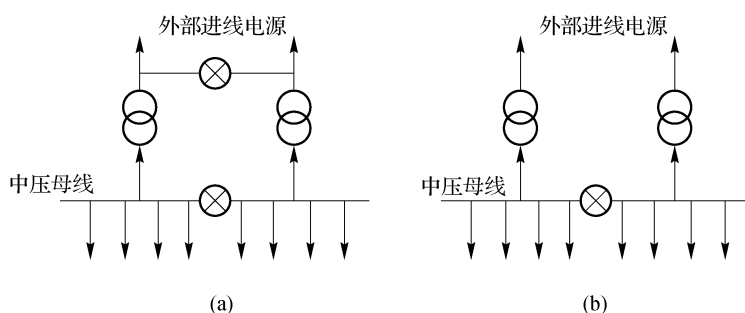


图 1-5 主变电站进线电源侧接线形式
(a)内桥接线形式 (b)线路变压器组接线形式

② 中压供电网络。中压电缆可纵向把上级主变电站和下级牵引变电所、降压变电站连接起来,横向把全线的各个牵引变电所、降压变电站连接起来,便构成了中压供电网络,其功能类似于电力系统中的输电线路。

城市轨道交通的中压交流环网系统可采用牵引与动力照明相对独立的网络形式,也可采用牵引与动力照明混合的网络形式。对于牵引与动力照明相对独立的网络,牵引供电网络与动力照明网络的电压等级可以相同,也可以不同。供电系统中的中压供电网络应按列车运行的远期通过能力设计,对互为备用线路,当一路退出运行时,另一路应能承担其一、二级负荷的供电,线路末端电压损失不宜超过 5%。

一个运行可靠、调度灵活的环网供电系统一般需满足以下设计原则和技术条件:

- 供电系统应满足经济、可靠、接线简单、运行灵活的要求。
- 供电系统(含牵引供电)容量按远期高峰小时负荷设计,根据路网规划的设计可预留一定裕度。
- 供电系统按一级负荷设计,即平时由两路互为备用的独立电源供电,以实现不间断供电。
- 环网设备容量应满足远期最大高峰小时负荷的要求,并满足当一个主变电站发生故障时(不含中压母线故障),另一个主变电站能承担全线牵引负荷及全线动力照明一、二级负荷的供电。
- 电缆载流量不仅应满足最大高峰小时负荷的要求,同时当主变电站正常运行,环网中一条电缆故障时,应能保证城市轨道交通正常运行。此时可不考虑主变电站和环网电缆同时故障的情况,但需考虑主变电站与一个牵引变电所同时故障(三级负荷除外)的情况。

在中压环网电压等级的选取上,国内一般有 35 kV/33 kV 和 10 kV 两种等级,环网电压高,可相应减少主变电站的个数和降低线路损耗。目前,国内已经开通和即将开通的地铁线路多数采用集中供电方式,中压环网电压多采用 35 kV/33 kV 等级。

(2) 分散供电。在地铁沿线直接由城市电网引入多路地铁所需要的电源而构成的供电系统称为分散供电,如图 1-6 所示。这种供电方式多为 10 kV 电压等级。因为我国各大城市的电网在逐渐取消或改造 35 kV 这一电压等级,因此要想在几千米到几十千米的范围内引入多路 35 kV 电源是不可能的。分散供电要保证每座牵引变电所或降压变电站皆能获得双路电源。北京地铁主要采用分散供电方式。

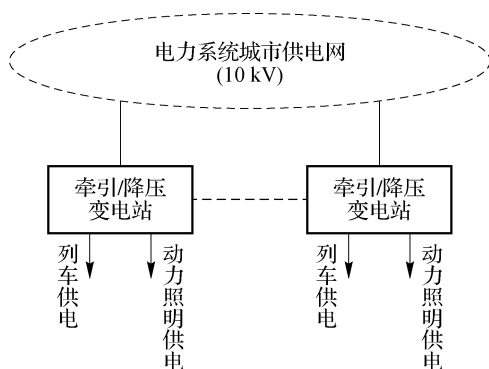


图 1-6 分散供电

采用分散供电方式,可以取消地铁主变电站,从而节省主变电站的投资,但是地铁电源系统能否采用这种方式与城市电网的发达情况密切相关。采用集中供电方式可使地铁供电系统与外界的接点减少,便于日后的运营维护。

(3) 混合供电。混合供电方式是前两种供电方式的结合,以集中供电方式为主,在个别地段引入城市电网电源作为集中供电方式的补充,使供电系统更加完善和可靠。武汉轨道交通、北京城市轨道交通 1 号线和 2 号线即采用此种供电方式。

2. 牵引供电系统

城市轨道交通的电能由国家统一电网供给,其电力牵引供电系统如图 1-7 所示。

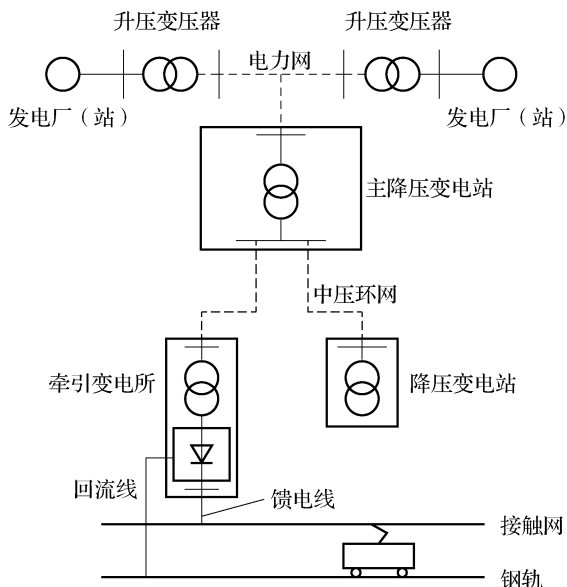


图 1-7 城市轨道交通电力牵引供电系统

主降压变电站(当它不属于电力部门时)及其以后部分分为以牵引变电所为主的牵引供电系统和以降压变电站为主的动力照明供电系统。

如图 1-8 所示,主降压变电站及其以后部分统称为牵引供电系统,其包括牵引变电所、

馈电线、接触网、钢轨及回流线等。在城市轨道交通牵引供电系统中,电能从牵引变电所经馈电线、接触网输送给电动列车,再从电动列车经钢轨(轨道回路)、回流线流回牵引变电所。由馈电线、接触网、轨道回路及回流线组成的供电网络称为牵引网。牵引供电系统即由牵引变电所和牵引网组成,其中,牵引变电所和接触网是牵引供电系统的主要组成部分。

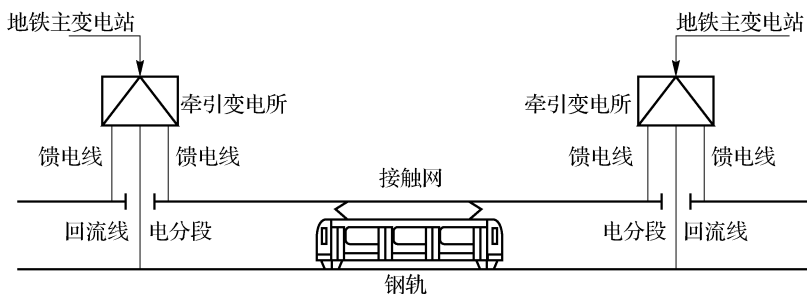


图 1-8 城市轨道交通牵引供电系统

(1) 牵引变电所。牵引变电所是牵引供电系统的核心,一般由进出线单元、变压变流单元和馈出单元构成。其主要功能是将中压环网的 AC 35 kV 或 AC 10 kV 三相高压交流电源经变压变流单元转换为城市轨道交通列车所需的电能,并分配到上下行区间供列车牵引用。在城市轨道交通工程中,由于地下土建工程造价较高,因而在地面有条件时最好将牵引变电所建于地面。但降压变电站由于压损的要求仍应设在车站内,这样可以有效地降低工程造价。

(2) 牵引网。

① 馈电线。馈电线中的“馈”字就是“送”的意思,因此,馈电线可以理解为送电线或供电线。馈电线是从牵引变电所向接触网输送牵引电能的导线。

② 接触网。接触网是沿列车钢轨架设的一种特殊供电线路,可经电动列车的受电器向其供给电能。接触网是为城市轨道交通车辆运行提供电能的供电设备,机车通过受电弓或集电靴从接触网中得到电能。接触网的特点是电压高、电流大、露天架设、点多线长、没有备用、维护保养复杂、难度大、要求高,其状态好坏直接影响轨道交通的正常运行。

③ 轨道回路。轨道构成了牵引供电回路的一部分。列车行走时,利用钢轨作为牵引电流回流的电路。当采用跨座式单轨电动车组时,需沿线路专门敷设单独的回流线。

④ 回流线。用以供牵引电流返回牵引变电所的导线称为回流线。通过吸流作用,迫使由大地回归的电流大部分由回流线返回牵引变电所,其回归方向与接触网中的电流方向相反,因而可抵消绝大部分由接触网电流产生的对通信线路的干扰。

3. 动力照明供电系统

动力照明供电系统可为除城市轨道交通列车以外的其他所有地铁用电负荷提供电能,其中包括通信、信号、事故照明和计算机系统等许多一级负荷。这些一级负荷均与城市轨道交通正常运营密不可分,所以在设计、设备选型和施工过程中都应对动力照明供电系统给予足够的重视。城市轨道交通降压变电站与城网 10 kV 变电站一样,都是将中压电经变压器变为 380 V 或 220 V 电源供动力照明负荷用电。在引入电源方面,每座降压变电站均从中压环网引入两路电源,有条件时还应从相邻变电站或市电引一路备用电源;对于特别重要的



负荷(如控制系统计算机设备等负荷),还应设蓄电池作为备用电源。城市轨道交通动力照明供电系统如图 1-9 所示。

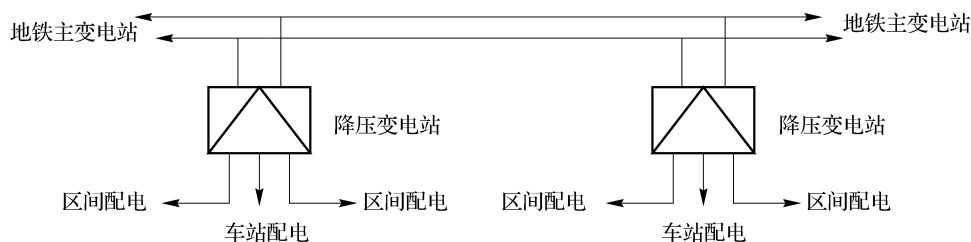


图 1-9 城市轨道交通动力照明供电系统

其中,降压变电站将三相电源进线电压降压变为三相 380 V 交流电,其主要用电设备是风机、水泵、照明设备、通信设备、信号设备、防火报警设备等。在动力供电系统中,降压变电站一般每个车站设置一个,有时也可几个车站合设一个;也可将降压(动力)变压器附设在某个牵引变电所之中,构成牵引与动力混合变电站。

配电所(室)仅起到电能分配的作用。降压变电站通过配电所(室)将三相 380 V 和单相 220 V 交流电分别供给动力、照明设备,各配电所(室)对本车站及其两侧区间动力和照明等设备配电。

地铁车站及区间照明电源采用 380 V/220 V 系统三相五线制系统配电。正常时,工作照明、事故照明均由交流电源供电;当交流电源失去时,事故照明自动切换为蓄电池供电,确保事故期间必要的紧急照明。

配电所(室)与用电设备之间的导线为配电线路。

车站设备负荷可分为 3 级:一级负荷(包括事故风机、消防泵、主排水站、售检票机、防灾报警、通信信号、事故照明)、二级负荷(包括自动扶梯、普通风机、排污泵、工作照明)和三级负荷(包括空调、冷冻机、广告照明、维修电源)。对于一、二级负荷,一般有两路电源供电,当一台变压器故障解列时,另一台变压器可承担全部一、二级负荷。三级负荷由一路电源供电,当一台变压器故障解列时,可根据运营需要自动切除。

4. SCADA 系统

SCADA 系统是贯穿于整个供电系统的监视和控制部分,是控制技术在电力系统中的应用。SCADA 系统由控制中心、通信通道和被控站系统组成,对全线变电站及沿线供电设备实行集中监视、控制和测量。其中,控制中心由数据服务器、通信前置机、工程师工作站及模拟盘显示器等组成,实现对所采集数据的分析、计算、存储、设备状态监视及控制命令的发送等功能。被控站系统由变电站上位可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC)或后台计算机、所内通信通道及下位 PLC 组成,实现对设备状态、信号等数据的采集、整理、简单分析计算及所内控制等功能。

1.2.3 城市轨道交通供电系统的功能

城市轨道交通供电系统应具备安全、可靠、调度方便、技术先进、功能齐全、经济合理的特点,并应具备以下一些功能。



1. 全方位的服务功能

供电系统的服务对象除运送乘客的电动车辆外,还有保证乘客在旅行中有良好卫生环境和秩序的通风换气、空调设施、自动扶梯、自动售检票、屏蔽门、排水泵、排污泵、通信信号、消防设施和各种照明设备。在这个庞大的用电群体中,用电设备有不同的电压等级和电压制式,既有固定的,也有时刻在变化着的,供电系统就是要满足这些不同用途的用电设备对电源的不同需求,使城市轨道交通系统的每种用电设备都能发挥各自的功能和作用,保证城市轨道交通系统能够安全、可靠地运营。

2. 故障自救功能

无论供电系统如何构成,采用什么样的设备,安全、可靠地供电总是第一位的。在系统中发生任何一种故障,系统本身都应有备用措施,以保证城市轨道交通系统的正常运营。供电系统设计以双电源为主要原则,当一路电源故障时,另一路电源应能保证系统的正常供电。例如,主变电站、牵引变电所和降压变电站为双电源、双机组;动力照明的一、二级负荷采用双电源、双回路供电;牵引网同一馈电区采用双边供电(双电源供电)方式,当一座牵引变电所故障解列时,靠两个相邻变电站的过负荷能力对牵引网进行大双边供电,保证列车可以照常运行而不受影响。

3. 自我保护功能

系统应有完善、协调的保护措施,供电系统的各级继电保护应相互配合和协调,当系统发生故障时,应当只切除故障部分的设备,从而使故障范围缩小。系统的各级保护应当满足可靠性、灵敏性、速动性、选择性的要求。对牵引供电系统而言,为保证乘客的安全,保护的速动性是第一位的,其保护的准则是“宁可误动作,不可不动作”。误动作可以用自动重合闸校正,而保护不动作则很危险,因为直流电弧在不切断电源时可以长时间地维持燃烧,从而威胁乘客安全。由于城市轨道交通供电系统中压交流侧保护应与城市电网的保护相配合和协调,因此,其保护的选择性也受到制约。

4. 防止误操作的功能

系统中任何一个环节的操作都应有相应的联锁条件,不允许因误操作而导致发生故障。尤其是各种隔离开关(无论是电动还是手动)或手车式开关的隔离触头,都不允许带负荷操作。防止误操作的联锁条件可以是机械的,也可以是电气的,还可以是电气设备本身所具备的或是在操作规程和程序上严格规定的。防止误操作是保证系统安全、可靠运行所不可缺少的环节。

5. 方便灵活的调度功能

系统应能在控制中心进行集中控制、监视和测量,并应能根据运行需要,方便、灵活地进行调度,变更运行方式,分配负荷潮流,使系统的运行更加经济合理。当系统发生故障而使一路或两路电源退出运行时,为保证地铁列车的正常运行,电力调度可以对供电分区进行调度和调整,以达到安全可靠、经济运行的目的。



6. 完善的控制、显示和计量功能

系统应能进行本地和远程控制,并可以方便地进行操作转换,系统各环节的运行状态应有明确的显示,使运行人员一目了然。各种信号显示应明确,事故信号和预告信号应分别显示。各种电量的测量和电能的计量应准确,并便于运行人员查证和分析,牵引用电和动力照明用电应分别计量,以利于对用电指标进行考核和经济分析。在控制中心应能对整个供电系统进行控制、信号显示、各种量值的计量统计。

7. 电磁兼容功能

国际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)对电磁兼容性(electro magnetic compatibility, EMC)的定义为设备或系统在其电磁环境中能正常工作且不对该环境中任何事物构成不能承受的电磁骚扰的能力。其中,“任何事物”可以是设备、装置、系统,也可以是有生命的生物或无生命的物体。城市轨道交通车辆是强电、弱电多个系统共存的电磁环境,为了使各种设备或系统能在这个环境中正常工作,且不对该环境中其他设备、装置或系统构成不能承受的电磁骚扰,各种电气和电子设备的系统内部以及与其他系统之间的电磁兼容显得尤为重要。供电系统及其设备在地铁这个电磁环境中,首先是作为电磁骚扰源存在的,同时也是敏感设备。在城市轨道的电磁环境中,供电系统与其他设备、装置或系统应是电磁兼容的。在技术上应采取措施抑制骚扰源,消除或减弱电磁耦合,提高敏感设备的抗干扰能力,以达到各系统的电磁兼容,使城市轨道交通车辆安全可靠地运行。

1.2.4 国内城市轨道交通供电系统的发展现状

我国自1969年在北京建成第一条地下铁道以来,相继已有上海、广州、南京等城市的轨道交通投入商业运营。国内正在运营或将要运营的城市轨道交通的供电系统主要采用架空式接触网和接触轨式(第三轨式)接触网两种馈电类型。其中,北京、天津等地铁采用DC 750 V的第三轨馈电,无锡地铁采用DC 1 500 V的第三轨馈电,电压提高到1 500 V是第三轨馈电技术发展的一个方向;上海、南京等地铁采用DC 1 500 V架空式接触网馈电。

1.3 城市轨道交通杂散电流

1.3.1 杂散电流的形成

在理想的状况下,直流牵引供电系统的牵引电流由牵引变电所的正极出发,经由接触网、电动列车和回流轨(钢轨)返回牵引变电所的负极。但由于钢轨与隧道或道床等结构钢之间的绝缘电阻不是无限大,因此势必造成流经牵引轨的牵引电流不能全部经由钢轨流回牵引变电所的负极,有一部分牵引电流会泄漏到隧道或道床等结构钢上,然后经过结构钢和大地流回牵引变电所的负极,这部分泄漏电流因大地土壤的导电性质及地下金属管道的位置不同可以分布很广,故称为杂散电流或迷流。图1-10所示为直流牵引杂散电流。

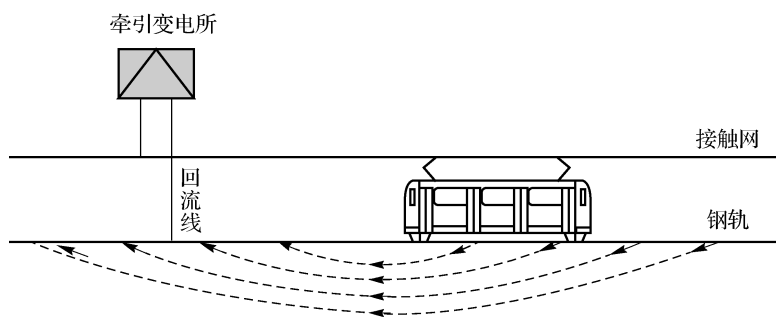


图 1-10 直流牵引杂散电流

根据图 1-10,在牵引变电所回流线与钢轨相接的回流点处,杂散电流回到牵引变电所。当轨道沿线的地下有金属管道或建筑物钢筋等导电物时,杂散电流必沿金属导体流动,到回流点附近再通过钢轨流回变电所,在回流点附近的金属管道上形成阳极区,如图 1-11 所示。而且阳极区总是在回流点处不动,使得阳极区的金属正离子流向大地,发生电解腐蚀,从而损坏金属。

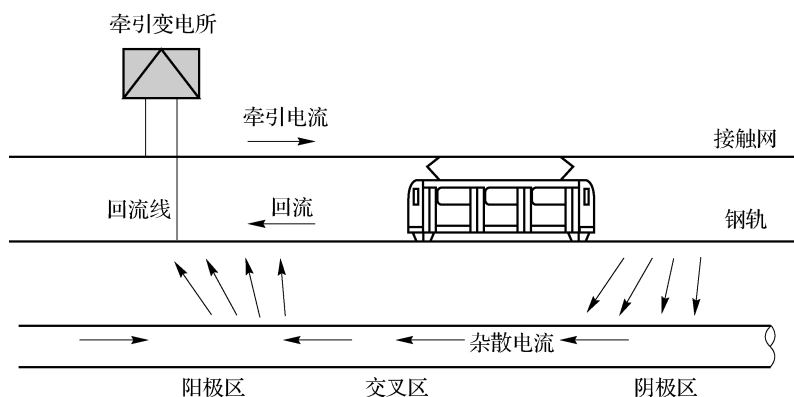


图 1-11 杂散电流腐蚀原理

当接触网为负极性时,阳极区与阴极区将转变,阳极区将随着列车的移动而移动,这样阳极区是不固定的。由于金属物的腐蚀现象较均匀,因而腐蚀情况不会太严重。

1.3.2 杂散电流的危害

城市轨道交通中的杂散电流是一种有害的电流,不仅会对城市轨道交通中的电气设备设施的正常运行造成不同程度的影响,还会对隧道、道床的结构钢和附近的金属管线造成危害。这种危害主要表现在以下几个方面:

(1) 若地下杂散电流流入电气接地装置,则会引起过高的接地电位,使某些设备无法正常工作。

(2) 若钢轨局部或整体对地的绝缘能力变差,则此钢轨对大地的泄漏电流增大,地下的杂散电流增大,这样就有可能引起牵引变电所的框架保护动作。而框架保护动作会引起整个牵引变电所的断路器跳闸,全所失电,同时还会联跳相邻牵引变电所对应的馈线断路器,从而造成较大范围的停电事故,影响城市轨道交通系统的正常运营。



(3) 对隧道、道床或其他建筑物的结构钢和附近的金属管线(如电缆、金属管件等)造成电腐蚀。如果这种电腐蚀长期存在,将会严重损坏城市轨道交通系统附近的各种结构钢和地下金属管线,从而破坏结构钢的强度,缩短其使用寿命。

1.3.3 杂散电流的防护

工程上可以采取增加轨道与大地间的绝缘、降低钢轨道的电阻、缩短变电站之间的距离、金属管道远离轨道线路、设置其他专门的电保护等措施使轨道电流少泄入大地。即使有少量杂散电流泄入大地,也会通过地下回流点处专设的“电旁泄通道”直接流回变电站,不形成腐蚀阳极区。“电旁泄通道”是一种专设的电流通道,它保证杂散电流从地下建筑物回流到钢轨、牵引变电所回流线或直接流入与钢轨网相连的牵引变电所母线,使地下建筑物处于阴极状态。

1. 杂散电流的防护原则

为了改善地下电流造成的迷流腐蚀状况,应采取“以防为主,以排为辅,防排结合,加强监测”的原则。

(1) 防。防就是隔离和控制所有可能的杂散电流泄漏途径,减少杂散电流进入城市轨道交通的主体结构、设备及可能与其相关的设施。

(2) 排。排就是通过杂散电流的收集及排流系统,提供杂散电流返回至牵引变电所负极的通路,防止杂散电流继续向本系统外泄漏,以减少腐蚀。

(3) 监测。设计完备的杂散电流监测系统对杂散电流的大小进行监视、测量,为运营维护提供依据。

2. 杂散电流的防护措施

(1) 降低钢轨对地电位。牵引供电系统采用双边供电方式。正常运行时采用双边供电方式,事故状态(一座牵引变电所解列)时也应采用大双边供电方式。因为双边供电比单边供电有更多优点,降低钢轨对地电位就是其中之一,无论是轨道中平均电压损失还是最大电压损失,双边供电都为单边供电的 $1/4 \sim 1/3$,即双边供电轨道对地电位为单边供电时的 $1/4 \sim 1/3$,在线路条件相同的情况下,双边供电比单边供电时的杂散电流要小 $60\% \sim 75\%$ 是显而易见的。

减小钢轨电阻,上下行钢轨并联可降低回流电阻,将上下行钢轨在区间用铜芯电缆连接,以减小回流电阻,降低钢轨对地电位,起到抑制杂散电流的作用。

(2) 增加钢轨对地过渡电阻。钢轨应绝缘安装。安装钢轨时,在其混凝土垫块上安装绝缘垫;用绝缘螺栓固定钢轨,以加大钢轨对地绝缘电阻,使每个绝缘垫的绝缘电阻在 $4\text{ M}\Omega$ 以上,钢轨敷设完毕时应为 $15\text{ M}\Omega \cdot \text{km}$ 以上,这样可以保证对杂散电流的抑制符合《地铁杂散电流腐蚀防护技术规程》(CJJ 49—1992)的要求。

道床的排水沟设在列车运行方向的右侧。混凝土道床的潮湿与干燥对其电阻率影响很大,因此,保证混凝土整体道床的干燥是增加钢轨对地过渡电阻的有效措施。过去,地铁的通常做法是将排水沟设在两轨之间,这样会使钢轨下道床潮湿,降低钢轨对地过渡电阻,从而加大了杂散电流的泄漏。

(3) 敷设杂散电流收集网。在钢轨下,整体道床中敷设有网状钢筋,它们纵向连通,通

过排流柜引向牵引变电所的负极,这样使泄漏至道床的杂散电流被收集网回收,避免其流向结构,以减小对结构钢的腐蚀。收集网的纵向钢筋的总截面积不小于1 600 mm²。

技能实训

技能实训 1-1 城市轨道交通供电技术发展过程认知

授课地点:机房、图书馆、城市轨道交通实训室

授课形式:分组教学

教课教师:校内专任教师

1. 实训目的

通过查阅书籍或上网查阅相关资料,了解国内外城市轨道交通供电系统的发展历程,进一步加深对供电系统应用情况的了解,培养自主学习及对相关资料分析总结的能力。

2. 实训设备

机房、图书馆计算机,城市轨道交通供电相关实训室设备。

3. 实训内容

- (1) 以小组为单位,以国内外城市轨道交通供电系统为核心,查找相关参考资料及手册。
- (2) 查阅有关参考资料和手册,正确认知并总结城市轨道交通供电系统的发展过程。
- (3) 查阅有关参考资料和手册,了解国内外主要城市轨道交通供电系统的应用情况。
- (4) 对相关内容进行小组讨论,将讨论结果填入表 1-1。

表 1-1 城市轨道交通供电系统发展过程认知

序号	项 目	认知内容	
1	国外城市轨道交通发展历程概述		
2	国内城市轨道交通发展历程概述		
3	城市轨道交通接触网采用直流供电的原因		
4	国际电工委员会拟定的接触网电压标准		
5	我国城市轨道交通接触网采用的国标电压标准及代表城市	电压标准	代表城市
6	两种供电制式的对比分析		

- (5) 根据相关材料撰写实习报告。

4. 注意事项

- (1) 安全使用学校机房、图书馆的计算机设备。
- (2) 安全使用实训室设备。

技能实训 1-2 城市轨道交通牵引网供电设备认知

授课地点:城市轨道交通实训室、本地城市轨道交通沿线

授课形式:分组教学

教课教师:校内专任教师、城市轨道交通企业供电段技术员

1. 实训目的

通过观察牵引网相关设备,认识城市轨道交通牵引供电系统,培养学习兴趣,提高安全意识和责任意识。

2. 实训设备

城市轨道交通供电相关实训室设备、城市轨道交通牵引降压混合变电所设备、接触网设备。

3. 实训内容

- (1) 观察城市轨道交通牵引降压混合变电所设备,认识相关变(配)电设备机柜。
- (2) 观察城市轨道交通沿线接触网,认识接触网的相关设备。
- (3) 观察城市轨道交通供电相关实训设备,找出实训设备与真实设备的异同之处。
- (4) 对相关内容进行小组讨论,将讨论结果填入表 1-2。

表 1-2 城市轨道交通牵引网供电设备认知

序号	项 目	认知内容		
1	()市	线路名称	牵引降压混合变电所的数量	接触网的形式
2	牵引变电所设备	名称	位置及内部主要设备	作用
		高压柜		
		电业局进线隔离柜		
		进线柜		
		计量柜		
		牵引变压器柜		
		母联柜		
		母联隔离柜		
		整流器		
3	接触网	形式	设备组成及特点	
4	实训设备与真实设备的区别			

- (5) 根据相关材料撰写实习报告。

4. 注意事项

- (1) 安全使用实训设备。
- (2) 安全用电。
- (3) 听从企业工作人员的安排,与带电设备保持安全距离。

思考与练习

- (1) 简述城市轨道交通系统的特点。
- (2) 简述城市轨道交通系统的主要技术特征。
- (3) 简述城市轨道交通系统的构成。
- (4) 简述城市轨道交通系统的分类方法。
- (5) 简述我国城市轨道交通系统的发展现状与存在问题。
- (6) 简述城市轨道交通供电系统采用直流供电制式的原因。
- (7) 简述城市轨道交通供电系统的组成。
- (8) 举例说明城市电网对城市轨道交通系统的供电方式,并说明每种供电方式的特点。
- (9) 简述城市轨道交通牵引供电系统的组成。
- (10) 举例说明车站设备负荷等级。
- (11) 举例说明城市轨道交通供电系统的功能。
- (12) 举例说明杂散电流的形成原因。
- (13) 简述杂散电流的防护原则及防护措施。