

城市轨道交通

牵引变电所运行与维护

主 编 王吉峰 邓春兰
副主编 谢雪芳 张 润

西南交通大学出版社
· 成 都 ·

内容简介

本书为全国高等职业教育城市轨道交通供配电技术和铁道供电技术专业立体化教材。全书共包括6个项目，分别为城市轨道交通供电系统概述，城市轨道交通牵引变电一次设备，城市轨道交通牵引变电二次设备，城市轨道交通供电设备维护及检修，城市轨道交通电力监控系统，交直流电源系统。

本书为校企合作开发，配数字资源，可作为高等职业教育城市轨道交通供配电技术专业、铁道供电技术专业城市轨道交通供电方向教学用书，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

城市轨道交通牵引变电所运行与维护 / 王吉峰, 邓春兰主编. —成都: 西南交通大学出版社, 2023.1
ISBN 978-7-5643-9109-6

I. ①城… II. ①王… ②邓… III. ①城市铁路—轨道交通—牵引变电所—运行—教材②城市铁路—轨道交通—牵引变电所—维修—教材 IV. ①U239.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2022)第251138号

Chengshi Guidao Jiaotong Qianyin Biandiansuo Yunxing yu Weihu

城市轨道交通牵引变电所运行与维护

主 编 / 王吉峰 邓春兰

责任编辑 / 何明飞

封面设计 / 吴 兵

西南交通大学出版社出版发行

(四川省成都市金牛区二环路北一段111号西南交通大学创新大厦21楼 610031)

发行部电话: 028-87600564 028-87600533

网址: <http://www.xnjdcbs.com>

印刷: 四川煤田地质制图印务有限责任公司

成品尺寸 185 mm × 260 mm

印张 13 字数 325 千

版次 2023年1月第1版 印次 2023年1月第1次

书号 ISBN 978-7-5643-9109-6

定价 35.00 元

课件咨询电话: 028-81435775

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



前言

PREFACE

城市轨道交通具有运量大、快捷舒适、安全节能、污染轻、占地少等诸多优点，已成为我国众多大城市公共交通优先发展的领域。截止到 2022 年 12 月，我国内地已有 55 个城市开通运营 302 条城市轨道交通线路，运营线路总长已达到 10 291 km，位居世界第一。且在多年的运营中，未发生安全责任事故。

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。“城市轨道交通牵引变电所运行与维护”作为城市轨道交通供配电技术专业的一门重要专业课程，近几年来，业内相继出版了几本与之相关的高职教材，但是这些教材的内容与常规变配电所教材的重复率较高，而城市轨道交通牵引供电系统方面内容却较少，因此，本书完整编写了城市轨道交通牵引变电所原理及设备，同时配置了数字化素材，可以通过扫描二维码进行辅助学习，是一次有益的探索与尝试。

全书共分为 6 个项目：项目一为城市轨道交通供电系统的概述；项目二和项目三，着重介绍城市轨道交通牵引变电一、二次设备构成，工作原理等，这两部分内容是本书的教学重点，也是本书教学的难点；项目四介绍了城市轨道交通供电设备的维护及检修方法；项目五介绍了城市轨道交通电力监控系统；项目六介绍了变电所交直流电源系统。

本书编写总的指导思想是使学生较全面的了解与掌握城市轨道交通牵引变电所运行与维护的相关知识，完善城市轨道交通牵引变电所的知识结构，培养系统分析问题的能力。在编写过程中，一是力求全面系统地阐述城市轨道交通牵引变电所系统和设备，同时力争减少或避免同其他变电所教材内容的重叠；二是力求内容实用易懂，方便阅读。

本书由广州铁路职业技术学院王吉峰、安徽交通职业技术学院邓春兰任主编，广州铁路职业技术学院谢雪芳、西安亚成智能科技有限公司张润任副主编。其中项目一、项目二由王吉峰编写，并负责全书统稿；项目三由张润编写；项目四和项目五由邓春兰编写；项目六由谢雪芳编写。

本书编写过程中得到了西安亚成智能科技有限公司、广州地铁集团有限公司等企业工程技术人员大力支持，还参考了大量文献资料，虽未注明它们的出处，在此一并感谢！

由于编写人员水平有限，书中难免存在疏漏与不妥之处，殷切希望广大读者批评指正。

编者
2022年8月

二维码目录

LIST OF QR CODE

序号	项目	类型	资源名称	页码
1	项目一	微课	如何保证地铁供电不间断	016
2	项目二	仿真	电压互感器简介	019
3		微课	认识城轨 35 kV 进线开关柜设备	023
4		微课	高压断路器的分类	027
5		微课	高压断路器的操动机构	027
6		仿真	变压器工作原理介绍	032
7		仿真	变压器铁心介绍	036
8		仿真	变压器散热器介绍	036
9		微课	变压器概述	038
10		动画	干式变压器温控仪	043
11		微课	如何获得接触网 1 500 V 直流电	049
12		动画	直流柜、负极柜、整流柜、馈线柜介绍	062
13		微课	倒闸操作的程序流程	062
14		微课	电缆结构认知	067
15		微课	电缆图片解析	070
16		微课	母线图片解析	070
17		项目三	微课	端子排介绍
18	微课		二次布线工艺的技术要求	077
19	微课		二次回路布线	077
20	动画		110 kV 断路器分合闸原理图分析	080
21	动画		110 kV 三工位隔离开关分合闸原理图分析	082
22	动画		35 kV 母联备自投动作逻辑	083
23	动画		35 kV 馈线断路器分合闸逻辑	085

续表

序号	项目	类型	资源名称	页码	
24	项目三	学生实操	变压器绕组超温报警和超温跳闸实训	091	
25		学生实操	微机测控保护装置操作实训	091	
26		学生实操	整流器交流侧过电压保护实训	097	
27		学生实操	整流器直流侧过电压保护实训	098	
28		学生实操	整流器快速熔断器保护实训	100	
29		学生实操	整流器逆流保护实训	102	
30		现场实操	地铁现场整流器功能性测试	103	
31		动画	正极柜断路器合闸逻辑	113	
32		学生实操	正极柜逆流保护	114	
33		学生实操	35 kV 高压开关柜联跳正极柜实训	115	
34		动画	正极柜联跳 35 kV 高压开关柜逻辑	115	
35		动画	馈线断路器分闸逻辑	120	
36		动画	馈线柜过流速断保护逻辑	122	
37		动画	馈线低电压动作逻辑	127	
38		动画	直流负极柜 2011 隔离开关分闸逻辑	130	
39		动画	直流负极柜 2011 隔离开关合闸逻辑	130	
40		项目四	微课	变电所设备巡视	136
41			微课	变电所巡检内容	136
42			微课	设备巡视的重点要求	136
43	微课		变电所安全设施的分类	136	
44	微课		变电设备缺陷分类及示例说明	137	
45	微课		接地装置维护	137	
46	微课		防小动物设施检查维护	137	
47	微课		SF6 高压断路器的巡视	138	
48	微课		变电所检修流程	138	
49	微课		电流互感器巡视	148	
50	微课		电压互感器巡视	148	
51	微课		电流互感器二次回路故障处理	148	

续表

序号	项目	类型	资源名称	页码
52	项目四	现场实操	户外隔离开关巡视	148
53		微课	变压器的巡视	151
54		微课	变压器巡视的重点内容	151
55		现场实操	变压器呼吸器油杯油、吸潮剂更换	153
56		微课	干式变压器的运行与巡视检查	154
57		微课	整流元件的拆卸与安装	161
58	项目五	微课	城轨供电综合自动化系统的构成	172
59		微课	城轨供电综合自动化系统的功能	172
60		微课	继电保护及自动装置巡视	174
61	项目六	微课	变电所直流电源系统	185
62		微课	直流系统监控模块	189
63		微课	直流电源系统中的蓄电池	192
64		微课	蓄电池组的运行及维护	193
65		微课	蓄电池充放电作业	194
66		微课	直流系统巡视	196
67		微课	直流系统接地故障分析	196



目录

CONTENTS

项目一 城市轨道交通供电系统概述	001
任务一 供电系统组成及运行方式	001
任务二 直流牵引供电系统	007
任务三 降压及动力配电系统	009
任务四 城市轨道交通供电系统的功能与特点	010
项目二 城市轨道交通牵引变电一次设备	017
任务一 GIS 组合电器	017
任务二 变压器	032
任务三 干式动力变压器	040
任务四 整流机组	046
任务五 直流 1 500 V 系统	052
任务六 电力电缆	064
项目三 城市轨道交通牵引变电二次设备	071
任务一 二次电路图的组成	071
任务二 断路器、隔离开关控制电路	078
任务三 整流变压器、整流器控制及保护电路	088
任务四 直流 1 500 V 断路器控制及保护电路	103
项目四 城市轨道交通供电设备维护及检修	135
任务一 GIS 组合电器的维护与检修	137
任务二 变压器的维护与检修	149
任务三 整流器的维护与检修	158
任务四 直流开关柜的维护与检修	162

项目五 城市轨道交通电力监控系统	170
任务一 电力系统的功能和构成	170
任务二 电力系统的维护	175
项目六 交直流电源系统	181
任务一 交流 400 V 系统	181
任务二 交直流屏和蓄电池系统	184
参考文献	198

项目一

城市轨道交通供电系统概述

学习目标

1. 了解供电系统的组成。
2. 熟悉供电系统变电所的分类及运行方式。
3. 熟悉供电系统中直流牵引供电系统的组成。
4. 熟悉供电系统中降压及动力配电系统的组成。
5. 了解城市轨道交通供电系统功能与特点。

知识要求和技能要求

1. 掌握供电系统集中供电方式、分散供电方式及混合供电方式的区别。
2. 掌握主变电所、降压变电所、牵引降压混合变电所的功能和作用。
3. 能绘制直流牵引供电系统的一次接线图。
4. 能识读主变电所和牵引降压变电所主接线图中的各种电气设备。

任务一 供电系统组成及运行方式

供电系统是为城市轨道交通运营提供所需电能的系统，不仅为城市轨道交通电动列车提供牵引电能，还为城市轨道交通运营服务的其他设施提供电能，如照明、通风、空调、给排水、通信、火灾报警、自动扶梯等。在城市轨道交通的运营中，供电一旦中断，不仅会造成城市轨道交通运输的瘫痪，还会造成财产损失，甚至危及乘客的生命危险。因此，安全、可靠的电力供给是城市轨道交通正常运营的前提和重要保证。

一、供电系统的组成

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城市轨道交通供电系统实现电能的输送和变换，再以适当的电压等级供给城市轨道交通的各类用电设备。

城市轨道交通供电系统包括电源系统（主变电所或电源开闭所）、牵引供电系统和动力照

明供电系统。其中，牵引供电系统包括牵引变电所和牵引网，动力照明供电系统包括降压变电所和动力照明配电系统。

城市轨道交通用电负荷根据重要程度分为一级负荷、二级负荷和三级负荷。其中，一级负荷最重要，应由两路独立电源供电，当任何一路电源发生故障中断供电时，另一路应能保证继续供电。在城市轨道交通供电系统中，牵引用电负荷为一级负荷，动力照明等用电负荷根据重要程度不同分为一级、二级或三级负荷。城市轨道交通的外部电源从电力系统引入的方式不同，分为集中供电方式、分散供电方式和混合供电方式三种。

集中供电方式是指在城市电网的适当位置，设置主变电所，由城市电网区域变电所以高压（通常为 110 kV）向主变电所供电，经主变电所降压成中压（通常为 35 kV 或 10 kV）向各车站变电所供电，结合各车站变电所进线形成中压环网，再由环网供沿线设置的牵引降压混合变电所和降压变电所供电。为了提高供电可靠性，同时便于城市轨道交通供电系统的统一管理，目前我国大多数城市地铁供电系统较多地采用集中供电方式。

分散供电方式是指不设主变电所，直接由城市电网区域变电所的 35 kV 或 10 kV 中压供电线路直接向城市轨道交通沿线设置的牵引降压混合所、降压变电所供电。采用这种供电方式的前提是城市电网比较发达，并且在相关车站附近有符合可靠性要求的供电电源。分散供电方式可设置电源开闭所，可与车站变电所合建。北京地铁 13 号线就采用了分散供电方式。

混合供电方式是以上两种方式的混合，即轨道交通线路的一部分采用集中供电方式，另一部分采用分散供电方式，但一般以集中供电方式为主，分散供电方式作为补充。有轨电车一般采用分散供电方式或混合供电方式。

城市轨道交通供电系统的组成如图 1-1-1 所示。

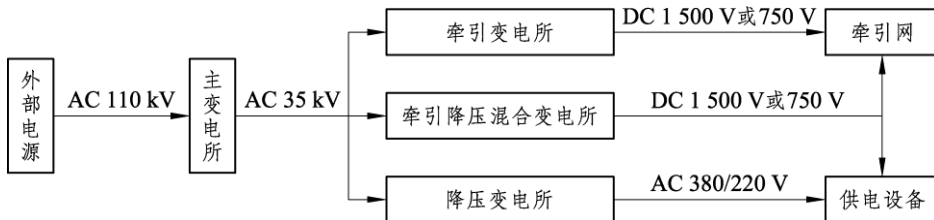


图 1-1-1 城市轨道交通供电系统的组成

二、变电所及其运行方式

（一）变电所的分类

变电所是城市轨道交通供电系统的重要组成部分，一般在城市轨道交通沿线设置，其数量及其在线路上的分布应综合考虑后确定。城市轨道交通的变电所可以建在地下，也可以建在地面。地下变电所不占用地上面积，但造价高；地面变电所占占地面积大，土建造价低。

城市轨道交通供电系统一般设置三类变电所，即主变电所（分散供电方式为电源开闭所）、降压变电所、牵引降压混合变电所。

主变电所是指采用集中供电方式时，引接城市电网 35 kV 及以上电压等级的电源，经其

降压后以中压供给城市轨道交通牵引变电所和降压变电所。主变电所位置选取时要考虑供电半径,一般一条地铁线路需要 2~3 座主变电所,两条地铁线路交叉位置附近可共用一座主变电所。

降压变电所从主变电所(电源开闭所)获得电能并降压变成低压交流电,供给地铁动力照明等设备使用。当由其他变电所引入中压电源而独立设置降压变电所时,成为跟随式降压变电所。

牵引变电所从主变电所(电源开闭所)获得电能,经过降压和整流后,变成电动列车需要的直流电(1500 V 或 750 V)。牵引变电所根据相邻车站之间距离,一般每隔一座车站设置一个牵引变电所。由于每个车站都需要降压变电所,所以一般没有单独的牵引变电所,而是和降压变电所合并建成牵引降压混合变电所。

(二) 变电所的运行方式

1. 主变电所

主变电所电源侧(如 110 kV)通常采用单元接线或桥形接线,两路电源同时供电,互为备用。负荷侧(如 35 kV)通常采用单母线分段形式,设置分段联络断路器,正常运行时,分段断路器断开,两台主变压器分列运行,共同负担全所的全部负荷。某主变电所的电气主接线如图 1-1-2 所示。

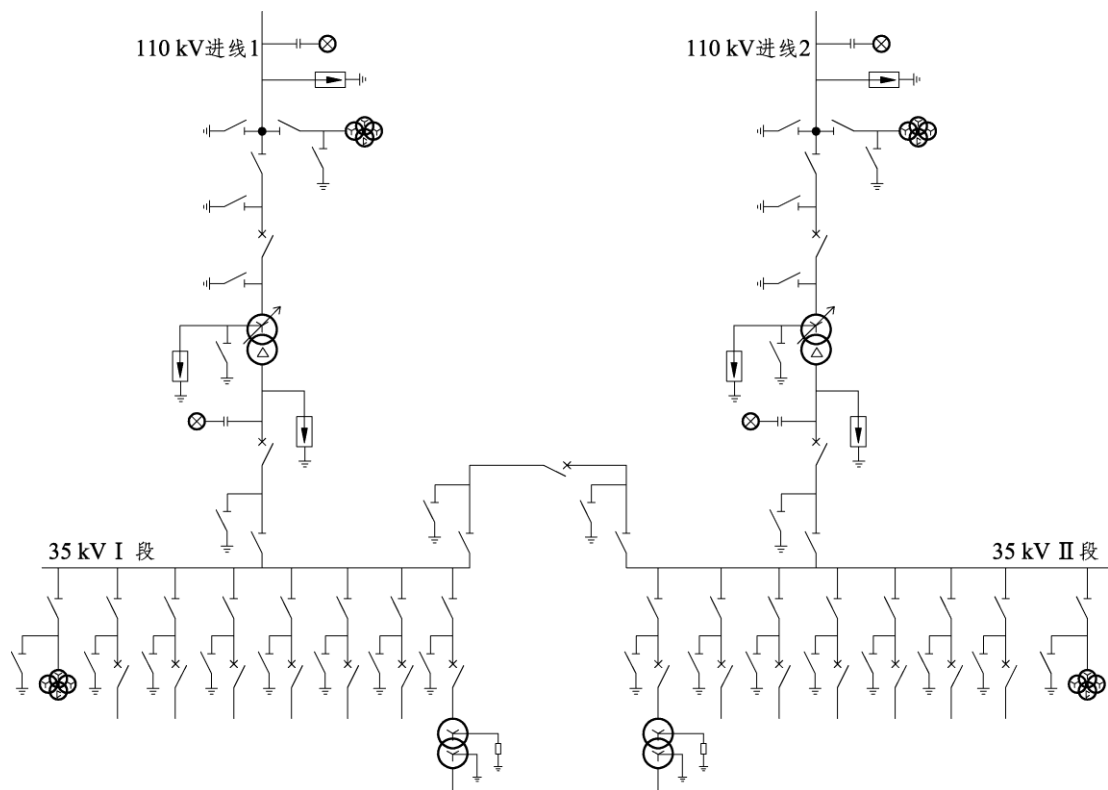


图 1-1-2 主变电所电气主接线图

2. 降压变电所

降压变电所高压侧为单母线分段接线，0.4 kV 侧也为单母线分段接线。每个降压变电所或跟随式降压变电所均设置两台降压变压器，分别负责向各变电所所在的半个车站及半个区间内的动力照明负荷供电。正常运行时，两台动力变压器分列运行，同时供电。

3. 牵引降压混合变电所

牵引降压混合变电所与降压变电所相比，多了一套牵引供电设备。某牵引降压混合变电所电气主接线如图 1-1-3 所示。35 kV 侧和 0.4 kV 侧均为单母线分段接线，与降压变电所相同。牵引部分有两台牵引整流机组，接在同一段 35 kV 母线上，降压整流后的直流经正负极母线分配出去。牵引降压混合变电所中的牵引部分高压侧和直流侧均采用单母线接线形式。正常运行时，这两组牵引整流机组并列运行。

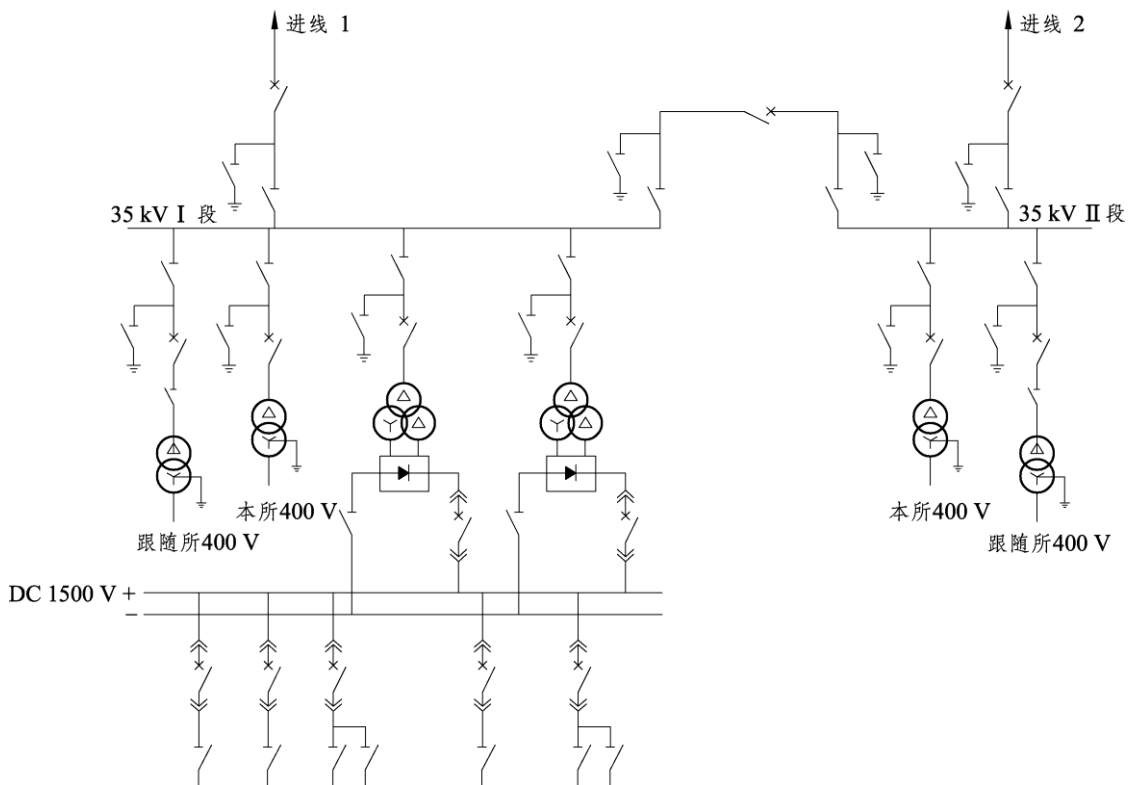


图 1-1-3 牵引降压混合变电所电气主接线图



任务练习

1. 城市轨道交通变电所有哪几类？

任务二 直流牵引供电系统

一、直流牵引供电系统的组成

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、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。牵引变电所和接触网是牵引供电系统的主要组成部分。

接触网按其结构可分为架空式和接触轨式,架空式按悬挂方式不同又可分为柔性接触网和刚性接触网。接触轨式是沿线路铺设的与轨道平行的附加轨,所以又称为第三轨。城市轨道交通牵引供电系统如图 1-2-1 所示。

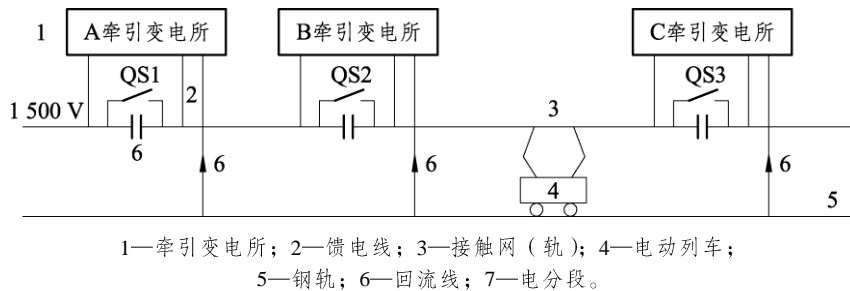


图 1-2-1 牵引供电系统

牵引变电所:供给城市轨道交通一定区域内牵引电能的变电所。

接触网(或接触轨):经过电动列车的受电器向电动列车供给电能的导电网(包括接触轨和架空接触网两种方式)。

馈电线:从牵引变电所向接触网输送牵引电能的导线。

回流线:供牵引电流返回牵引变电所的导线。

电分段:为便于检查和缩小事故范围,将接触网分成若干段,称为电分段。

轨道:列车行走时,利用走行轨作为牵引电流回流的电路称为轨道。在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。在城市轨道交通牵引供电系统中采用直流供电制。我国早期建成的城市轨道交通供电电压采用 DC 750 V,如北京地铁 1 号线、2 号线;后期建设的城市轨道交通供电电压多采用 DC 1 500 V。

二、直流牵引供电系统要求

牵引变电所的数量、容量和设置的距离需要根据牵引计算和经济技术比较后确定。一般设置在城市轨道交通沿线的若干车站和车辆段附近。每个牵引变电所按照所需容量设置两组牵引整流机组并列运行,如果沿线任一牵引变电所发生故障解列,由两侧相邻的牵引变电所共同承担该区段的全部牵引负荷。

牵引变电所的容量和设置的距离一般需考虑以下设计原则和技术条件。

(1) 正线任一牵引变电所发生故障时，其相邻牵引变电所应采用越区供电方式，负担起该区段全部牵引负荷，且满足远期高峰小时负荷。

(2) 牵引变电所的数量及其在线路上的位置，应满足在故障情况下越区或单边供电时的接触网的电压水平。直流牵引供电系统的电压及其波动范围应符合表 1-2-1 的规定。

表 1-2-1 直流牵引供电系统电压值

单位：V

标称值	最高值	最低值
1 500	1 800	1 000
750	900	500

三、直流牵引供电运行方式

牵引变电所向接触网（或接触轨）供电的方式有两种，即单边供电和双边供电。在每个牵引变电所附近的城市轨道交通接触网（或接触轨）由电分段进行电气隔离，分成两个供电分区，每个供电分区也称为一个供电臂。如果列车只从所在供电臂上的一个牵引变电所获得电能，这种供电方式称为单边供电；如果一个供电臂同时从相邻两个牵引变电所获得电能，则称为双边供电。

一般情况下，车辆段内采用单边供电方式，正线采用双边供电方式。在采用双边供电时，当某一牵引变电所发生故障退出运行时，该段接触网就变成了单边供电方式。如图 1-2-1 所示，正常运行时，列车以双边供电方式从 B 牵引变电所和 C 牵引变电所获得电能，越区隔离开关 QS1、QS2、QS3 断开。当 B 牵引变电所因故障退出运行时，越区隔离开关 QS2 合上，通过 QS2 由 A 牵引变电所和 C 牵引变电所进行大双边供电。正线上任何牵引变电所因故障退出运行时，均由相邻牵引变电所越区供电。在越区供电方式下，供电末端的接触网（或接触轨）电压较低，电能损耗较大。因此，根据情况要适当减少同时处在该供电区段的列车数量。另外，直流馈线保护整定时还需考虑大双边供电方式下的灵敏度。因此，越区供电只是在不得已的情况下短时间采用的一种运行方式。



任务练习

请写出图 1-2-2 中序号 1~7 的名称。

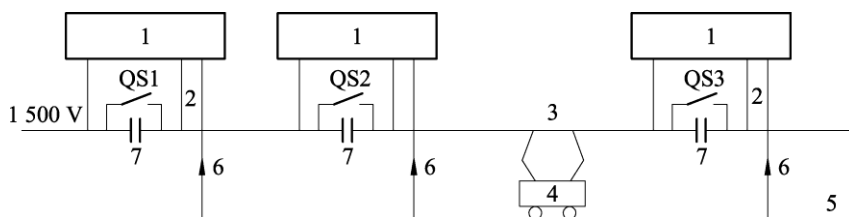


图 1-2-2 牵引供电系统

1

2

3

4

5

6

7

任务三 降压及动力配电系统

降压变电所将 35 kV 交流电降压成 380 V/220 V 交流电，向车站和区间隧道的各种动力、照明设备供电，保证各种车站设备的正常运行。降压及动力配电系统的组成如图 1-3-1 所示。

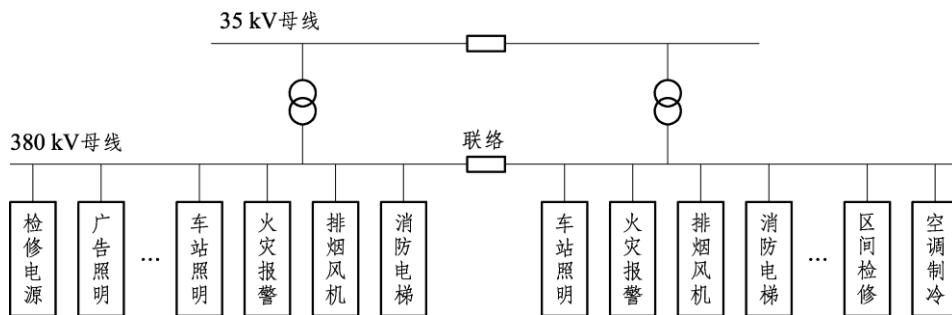


图 1-3-1 降压变电所电气主接线图

(1) 组成：降压及动力配电系统由动力变压器、低压开关柜、各级配电箱和控制柜、供电电缆、电线、用电器组成。

(2) 功能：其功能是将交流 220 V/380 V 电压提供给全线的动力、照明用电负荷。

(3) 负荷分类：按用途和重要性不同，分为一、二、三级负荷。

① 一级负荷：一级负荷必须采用双电源、双回线路供电；对于一级负荷中特别重要的负荷，除有双电源双回线路供电外，应增设应急电源，并严禁其他负荷接入。常见的一级负荷有火灾自动报警系统设备、防排烟风机及各类防火排烟阀、防火（卷帘）门、消防疏散用自动扶梯、消防电梯、地下车站照明等。

② 二级负荷：二级负荷宜采用双电源、单回线路专线供电。常见的二级负荷有变电所检修电源、地上站厅站台等公共区照明。

③ 三级负荷：三级负荷可采用单电源、单回线路供电。当系统中只有一个电源工作时可切除三级负荷。常见的三级负荷有区间检修设备、附属房间电源插座、车站空调制冷及水系统设备、广告照明等。

当一台动力变压器退出运行时，自动切除三级负荷，由另一台动力变压器担负该供电区域的所有一、二级负荷。

任务四 城市轨道交通供电系统的功能与特点

一、供电系统的功能

城轨供电系统是城市轨道交通运营的动力源泉，负责电能的供应与传输，为电动列车提供牵引供电，为车站、区间、车辆段、控制中心等其他建筑物提供所需要的各种动力与照明用电，应具备安全可靠、技术先进、功能齐全、调度方便和经济合理等特点，其总体功能如下。

（一）供电服务功能

城轨供电系统的服务对象除运送旅客的电动车辆外，还有保证旅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等。在这个庞大的用电群体中，用电设备有不同的电压等级、不同的电压制式，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要求，使城轨供电系统的每种用电设备都能发挥各自的功能和作用，保证城轨系统能够安全、可靠地运营。

（二）故障自救功能

系统的安全、可靠是供电系统的首要条件，无论供电系统如何构成，采用什么样的设备，安全、可靠的供电总是第一位的。在系统中，发生任何一种故障，系统本身都应有备用措施（接触网除外），以保证城市轨道交通的正常运行不受影响。双电源是构成供电系统的主要原则，当一路电源故障时，另一路电源应能保证正常供电。主变电所、牵引变电所和降压变电所为双电源、双机组；动力、照明的一级负荷采用双电源、双回路供电；牵引网同一馈电区采用双边供电方式。这些都是系统故障自救功能的体现。

（三）自我保护功能

系统应有完整、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，应当只切除故障设备，从而缩小故障影响范围。系统的各级保护应当满足可靠性、选择性、灵敏性、速动性的要求。分散式供电系统的中压交流侧保护，应和城市电网的保护相配合和协调，因此其保护选择性会受到一定制约。

（四）防误操作功能

系统中任何一个环节的操作都应有相应的联锁条件，不允许因误操作而发生故障。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在操作规程上所规定的。防止误操作，是保证系统安全、可靠地运行所不可缺少的环节。

（五）便于调度功能

供电系统应能在控制中心进行远程控制、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。

（六）控制、显示和计量功能

系统应能进行就地和远距离控制，并可以方便地进行操作转换，同时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与分析。

（七）电磁兼容功能

城市轨道交通处于强电与弱电多个系统共存的电磁环境中，为了使各种设备或系统在这个环境中能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干扰，各种电气和电子设备的系统内部以及和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城市轨道交通这个电磁环境中，首先是作为电磁干扰源存在的，同时也是敏感设备。在城市轨道交通电磁环境中，供电系统与其他设备、装置或系统应是电磁兼容的。这要在技术上采取措施，抑制干扰源，消除或减弱电磁耦合，提高敏感设备的抗干扰能力。

二、系统的基本要求

城轨供电系统应满足安全性、可靠性、适用性、经济性、先进性的基本要求。

（一）安全性

城轨供电系统的安全性，是指在城市轨道交通工程运营过程中的安全程度。供电系统的安全性，关系着乘客安全、运营人员安全、行车安全和设备安全等多个方面，而且各种安全性是相互联系、不可分割的。

供电系统设计时，一般从系统安全性和设备安全性两个方面进行分析研究。系统安全性

分析，一般包括联锁关系、继电保护、牵引网、直流牵引系统、综合接地系统、应急照明电源等方面；设备安全性分析，一般包括变压器、牵引整流器、断路器、隔离开关、接地开关、电缆等方面。

（二）可靠性

城轨供电系统的可靠性，是指城市轨道交通供电系统对列车及各种动力照明负荷的持续供电能力。

供电系统的可靠性是正常运营、事故处理、灾害救援等方面的前提条件。供电系统可靠性涉及规划、设计、运行管理等各个方面，并渗透到供电、变电、配电等不同环节。每一个环节的可靠性既包括电气原理的可靠性又包括电气设备的可靠性。例如，构成变电所的可靠性包括变电所主接线可靠性及组成主接线的断路器、变压器、母线等设备的可靠性。

供电系统设计时，应从各个环节着手，分析系统的供电需求，研究定性或定量的评定指标，提出提高可靠性的措施。双电源供电方式是供电系统可靠性实施的重要手段。

根据城市轨道交通可靠性要求，供电系统应满足“ $N-1$ 准则”，又称单一故障安全准则。按照这一准则，供电系统的 N 个元件中的任一独立元件（发电机、输电线路、变压器等）发生故障而被切除后，其他元件不过负荷，电压和频率均在允许范围内，供电系统应能保持稳定运行和正常供电。

对于城市轨道交通电源网络来说，当一个电源退出时，另一个电源应能保证系统的正常供电，保证列车正常运行；当一个电源点（主变电所或电源开闭所）的两个电源都退出时，应从相邻电源点引入两路应急电源，提供一定的运输能力和必要的动力照明，维持城市轨道交通继续运行。

（三）适用性

城轨供电系统的适用性，是指城轨供电系统的建设应满足业主建设目的与性能要求。设计是实现业主建设需求的首要环节。供电系统设计应根据业主需求进行，供电系统的建设标准、技术水平、设备档次、工期要求、投资控制等，应与城市特点、本线功能定位及特殊要求相适应。

（四）经济性

城轨供电系统的经济性，指从项目全生命周期的角度实现供电系统费用的经济合理。在满足供电系统的安全性、可靠性、适用性的前提下，要重视供电系统的经济性。经济性不但要求节省工程投资，同时还要求降低运营成本，争取得到最佳的技术经济效果。

供电系统设计应优化电源网络结构，实现外部电源资源共享；另外，应尽可能地采用成熟设备、新型材料，做到经济合理与简便实用。

（五）先进性

城轨供电系统的先进性，体现在先进的设计理念、先进的系统方案、先进的设备及工艺、先进的管理手段等方面。

供电系统应具有一定的先进性，但要兼顾系统基本功能、投资规模、运营成本、环保要求、操作灵活性以及技术发展等因素，合理选择。

供电系统设计应采用先进的理念。要充分认识到环境保护与节约能源的重要性，采取必要措施进行环境保护与降低能耗。要解决好电磁辐射、噪声、温室气体和不易分解废料等问题。

三、城轨供电技术的发展

随着时代的发展、科技的进步，城轨供电技术发展非常迅速，下面从牵引网供电制式、中压网络、基础设备、控制保护与自动化等几个方面进行介绍。

（一）牵引网供电制式

牵引网供电制式主要指电流制、电压等级和馈电方式等。

1. 牵引网系统的电流制

直流电相对交流馈电而言，其电动车辆具有调速范围大、调速方便、易于控制、启动制动平稳、接触网简单、投资省、电压质量高等优点，它不但适合于电阻启动控制方式，而且适用于斩波调压和变频调压等电子控制方式。目前，车辆无论采用直流牵引电动机或交流牵引电动机还是线性电动机驱动方式，牵引网系统基本上都采用了直流制。

2. 牵引网系统的电压等级

世界上城市轨道交通中的直流牵引电压等级繁多，如 570 V、600 V、625 V、650 V、700 V、750 V、780 V、825 V、900 V、1 000 V、1 100 V、1 200 V、1 500 V 和 3 000 V 等，其发展趋势是采用 IEC 标准中的 600 V、750 V 和 1 500 V。我国国家标准规定为 750 V 和 1 500 V 两种，其电压允许波动范围分别为 500 ~ 900 V、1 000 ~ 1 800 V。具体选用哪种电压等级，要结合馈电方式，根据车辆、线路等工程特点综合比较确定。

3. 牵引网系统馈电方式及与电压等级的关系

牵引网系统的馈电方式有架空接触网和接触轨两种方式。电压等级与馈电方式是牵引网供电制式中的关键点，两者密切相关。对于一个具体的城市，电压等级与馈电方式的选择，应该结合起来，统一考虑。我国牵引网供电制式可以选择以下 4 种方式：直流 1 500 V 架空接触网、直流 1 500 V 接触轨、直流 750 V 架空接触网和直流 750 V 接触轨。

4. 我国城市轨道交通接触网发展应用情况简介

北京地铁 1 号线一期工程、天津地铁首期工程，采用的是直流 750 V 上部受流低碳钢接触轨系统；其后建成的北京地铁复八线、八通线、13 号线，采用的也是这一系统。

1995 年投入试运营的上海地铁 1 号线，采用了引进德国的直流 1 500 V 柔性架空接触网系统；其后上海地铁 2 号线等采用了这一形式。1999 年通车的广州地铁 1 号线、2004 年底通车的深圳地铁一期工程、2005 年通车的南京地铁 1 号线，也采用了 1 500 V 柔性架空接触网这一形式。

2002年建成通车的长春轻轨采用了直流750V柔性架空接触网系统；大连快轨3号线采用了直流1500V柔性架空接触网系统。

2003年6月28日开通运营的广州地铁2号线，在国内首次采用了直流1500V刚性架空接触网系统；其后广州地铁3号线、南京地铁2号线、上海地铁多条线路也采用了直流1500V刚性架空接触网系统。

2005年6月28日建成通车的武汉轨道交通1号线一期工程，是国内首次采用直流750V下部受流钢铝复合接触轨的系统。

2005年12月28日建成通车的广州地铁4号线大学城段，是国内首次在正线采用直流1500V下部受流钢铝复合接触轨系统；深圳轨道交通3号线，其正线与车辆段都将采用直流1500V下部受流钢铝复合接触轨系统。

2007年9月建成运营的北京地铁5号线工程，采用了直流750V上部受流钢铝复合接触轨系统。2008年投运的10号线一期与奥运支线、建设中的4号线以及后续多条线路，都采用直流750V上部受流钢铝复合接触轨系统。

总之，接触轨电压等级已由750V发展到1500V，接触轨悬挂方式由上部接触向着下部接触发展过渡，导电轨材料由低碳钢发展成为钢铝复合轨，同时在柔性架空接触网的基础上，刚性架空接触网在国内也得到了更加广泛的应用。

（二）中压网络

1. 电压等级

北京地铁1号线一期工程建设时，因35kV设备绝缘要求高、设备体积大、价格高等，中压网络的电压等级采用的是10kV。20世纪90年代，建设上海地铁1号线、广州地铁1号线与2号线，因设备引进原因，牵引变电所的中压开关柜采用了国外的33kV设备。

20世纪90年代末，随着35kV中压开关柜设备小型化的发展及价格的下降，35kV中压开关柜应用得愈加广泛。广州、深圳、南京及上海的后续建设线路，都采用了35kV中压网络。

另外，在国外广泛应用的20kV中压网络，目前我国也已经成为城市轨道交通可以使用的电压等级。

2. 系统接线

随着环网技术的发展，国内城轨供电系统多采用环网接线形式。以负荷开关代替断路器作为车站变电所电源进线控制，构成环网接线系统，其保护简单、运行灵活，这种接线系统已经在伊朗德黑兰城市轨道交通中成功应用，具有广阔的发展前景。

（三）基础设备

1. GIS 高压开关柜

城市轨道交通工程使用的110kV和66kV电压级的气体绝缘变电站（Gas Insulated Substation, GIS）高压开关柜，已由敞开式室外设备，发展为室内安装的高压GIS设备，并且由三相分箱发展为三相共箱，设备体积大大减小。

2. 变压器

变压器从油浸式逐步发展为体积小、重量轻、性能优的环氧树脂浇注干式变压器，并由绝缘纸干式变压器向环氧树脂绝缘干式变压器发展。目前，牵引变压器、配电变压器已全部采用环氧树脂绝缘干式变压器；主变压器因电压等级高、容量大，仍多采用油浸式，但已有采用干式变压器的工程实例。

3. 牵引整流机组

随着大功率电子元器件的发展，牵引整流机组已由双机组等效 12 脉波整流，发展成为单机组 12 脉波整流和双机组等效 24 脉波整流。

4. 中压开关柜

20 世纪 80 年代后期，我国开始引进国外中压断路器生产技术，有真空断路器也有 SF6 断路器。其中，中压真空断路器的技术性能如额定电流、分断能力及使用寿命已得到了很大提高。基于真空断路器的优良性能，目前城市轨道交通工程使用的中压断路器基本为真空断路器。

5. 直流快速开关柜

国内直流快速开关的发展历程大致如下：从 20 世纪 60 年代上海整流器厂的 DS1、70 年代上海立新电器厂的 DS12 开始，上海立新厂、西安电力整流器厂、西安电器设备制造厂、上海新联电器有限公司等进行了大量研发工作，最近几年江苏长江电气股份有限公司，通过引进瑞士 SECHERON 技术，又将直流快速开关的国产化工作向前推动了一步。

6. 低压开关柜

低压开关柜由最早只有一种固定式，已发展成固定式、插拔式、抽屉式并存，并各具特点，适用国内低压开关柜不同要求。低压空气断路器已发展成智能化产品；塑壳开关的分断能力与保护性能也日益提高。

7. 无功补偿装置

无功补偿装置由三相共补向分相补偿发展，同时向着多功能、智能化方向发展。无功功率补偿技术改进和新技术应用归纳起来主要有以下几方面。

(1) 由三相共补到分相补偿，以求达到更理想的补偿效果。

(2) 由单一的无功补偿到同时具有滤波及抑制谐波功能的补偿装置，采用电抗器/电容器模块，有效防止供电网的谐振和谐波分量。

(3) 选用晶闸管开关电路投切，以及发展为等电压投、零电流切的最佳投切模式。

(4) 智能型自动补偿控制器和配电变压器的运行记录仪相结合，设有通信口，在软件的支持下可进行遥控、遥测、遥信。

(5) 采用先进的 DSP（数字信号处理器），补偿过程全智能化。

(6) 内设故障检测和自诊断程序，一旦有故障，自动显示故障信息，供操作人员在排除故障时参考。

（四）控制、保护、自动化装置

随着基础设备智能化的发展，以及控制技术、网络技术、计算机技术、通信技术的发展，控制、保护、自动化装置已由分立元器件发展成微机综合保护装置，这为变电所综合自动化创造了条件。

同时，整个供电系统从以调度电话下达调度命令、人工操作，已发展为由电力监控系统实现遥控、遥信、遥测等远动系统控制。

20 纪末 21 世纪初，随着计算机技术和网络技术的进一步发展，各种分立的自动化系统走向综合集成，各种自动化系统采用统一的计算机网络平台和软件体系，构成了综合监控系统。目前，电力监控系统已经被集成到综合监控系统之中，这有利于不同系统之间的数据互通、软硬件资源共享和运营管理水平的提高。

（五）供电设备国产化

改革开放以来，我国供电设备技术水平有了长足发展，总体水平已达到或接近当代国际水平，个别产品达到国际先进水平。城市轨道交通工程供电设备基本上实现了国产化，但个别产品还需要自主研发，如 35 kV 的 GIS 开关柜、20 kV 的 GIS 开关柜，直流开关柜内的直流快速断路器、微机保护监控单元，再生制动能量吸收装置等。



如何保证地铁供电不间断

