



# 城市轨道交通 供电技术与应用

● 主 编 米秀杰 王 刚

 北京理工大学出版社  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

# 城市轨道交通供电技术与应用

主 编 米秀杰 王 刚  
副主编 韩玉辉 马延昕 刘长业  
参 编 李泽健 梁佳成 王 锐 王育波  
主 审 隋秀梅

## 内 容 简 介

全书的主要内容包括城市轨道交通供电系统概述、城市轨道交通供电系统一次设备的结构及原理、城市轨道交通供电系统二次系统的组成及原理、城市轨道交通供电系统的防雷与接地、城市轨道交通的电气安全及常用仪表的使用。

本书在讲述理论知识的同时,更注重实际应用,关注城市轨道交通供电系统的安全及常用仪器仪表的使用等,力求教材的内容与学生的实际工作相吻合,具有较强的可操作性。

本书可作为高等院校城市轨道交通类专业供电方面的专业教材,也可作为相关行业的参考书。

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目(CIP)数据

城市轨道交通供电技术与应用 / 米秀杰, 王刚主编. —北京: 北京理工大学出版社, 2016. 8

ISBN 978 - 7 - 5682 - 2641 - 7

I. ①城… II. ①米…②王… III. ①城市铁路 - 供电系统 - 高等学校 - 教材  
IV. ①U239.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 170614 号

---

---

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京富达印务有限公司

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 9.5

字 数 / 223 千字

版 次 / 2016 年 8 月第 1 版 2016 年 8 月第 1 次印刷

定 价 / 34.00 元

责任编辑 / 李秀梅

文案编辑 / 杜春英

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 马振武

---

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

# 前言

## P R E F A C E

本书是为适应高等院校人才培养的特点而编写的，编写原则以必需、够用为主，注重实用性，针对变电所的实际内容展开教学，把学生引入实际工作环境中，强化学生实践能力的培养。通过学习，学生可以有效地提升岗位适应能力。

本书根据城市轨道交通变电所的实际需要，编写了以下内容：单元1 城市轨道交通供电系统概述；单元2 城市轨道交通供电系统一次设备的结构及原理；单元3 城市轨道交通供电系统二次系统的组成及原理；单元4 城市轨道交通供电系统的防雷与接地；单元5 城市轨道交通的电气安全及常用仪表的使用。每单元后附有单元小结及复习思考题。通过以上内容的学习，学生可以尽快适应相应岗位的工作。

本书由城市轨道交通供配电编写委员会编写，具体分工为：米秀杰、王刚任主编，米秀杰编写单元3，王刚编写单元1和单元2；韩玉辉、马延昕、刘长业任副主编，共同编写单元4；李泽健、梁佳成、王锐、王育波共同编写单元5。本书由隋秀梅任主审。

本书适合作为高等院校城市轨道交通专业类供电方面的教材使用，也可供其他专业参考，如电气自动化专业、机电一体化专业等，还可供从事供配电运行、维护和管理工作的工程技术人员参考使用。

由于编者水平有限，书中难免存在一些错误和缺点，恳请读者批评指正。

编者

# 目 录

## CONTENTS

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| 单元1 城市轨道交通供电系统概述 .....            | 001 |
| 1.1 城市轨道交通概述 .....                | 001 |
| 1.1.1 城市轨道交通的分类 .....             | 001 |
| 1.1.2 城市轨道交通的功用 .....             | 004 |
| 1.1.3 城市轨道交通的特点 .....             | 005 |
| 1.1.4 城市轨道交通系统的组成 .....           | 005 |
| 1.2 城市轨道交通供电系统概述 .....            | 006 |
| 1.2.1 城市轨道交通供电系统的功能 .....         | 007 |
| 1.2.2 城市轨道交通供电系统的供电制式 .....       | 008 |
| 1.3 电力系统概述 .....                  | 010 |
| 1.3.1 电力系统的定义 .....               | 011 |
| 1.3.2 电力系统的组成 .....               | 011 |
| 1.3.3 组成电力系统的优越性 .....            | 015 |
| 1.4 电力系统供电的主要质量指标及额定电压的国家标准 ..... | 016 |
| 1.4.1 衡量电能的质量指标 .....             | 016 |
| 1.4.2 额定电压的国家标准 .....             | 017 |
| 1.4.3 供电电压的选择 .....               | 018 |
| 1.5 电力系统的中性点运行方式 .....            | 019 |
| 1.5.1 中性点直接接地的运行方式 .....          | 019 |
| 1.5.2 中性点不接地的运行方式 .....           | 020 |
| 1.5.3 低压配电系统的中性点运行方式 .....        | 021 |
| 1.6 城市轨道交通供电系统的组成 .....           | 024 |
| 1.6.1 城市轨道交通供电系统的外部供电系统 .....     | 024 |
| 1.6.2 城市轨道交通供电系统的牵引供电系统 .....     | 031 |
| 1.6.3 城市轨道交通动力照明系统 .....          | 033 |
| 1.7 城市轨道交通杂流及防护措施 .....           | 034 |
| 1.7.1 杂流的定义 .....                 | 034 |
| 1.7.2 杂流的危害 .....                 | 035 |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 1.7.3 速流的防护措施 .....            | 035 |
| 单元小结 .....                     | 036 |
| 复习思考题 .....                    | 036 |
| 单元2 城市轨道交通供电系统一次设备的结构及原理 ..... | 038 |
| 2.1 一次设备概述 .....               | 038 |
| 2.1.1 一次设备的概念 .....            | 038 |
| 2.1.2 一次设备的分类 .....            | 038 |
| 2.1.3 一次设备的基本要求 .....          | 039 |
| 2.2 变压器 .....                  | 039 |
| 2.2.1 变压器概述 .....              | 039 |
| 2.2.2 变压器的基本结构及工作原理 .....      | 040 |
| 2.2.3 变压器的铭牌及主要技术参数 .....      | 041 |
| 2.2.4 油浸变压器的结构和各部分功能 .....     | 042 |
| 2.2.5 干式变压器 .....              | 044 |
| 2.2.6 变压器的并列运行条件 .....         | 045 |
| 2.2.7 整流机组 .....               | 046 |
| 2.3 电弧 .....                   | 048 |
| 2.3.1 电弧基本理论 .....             | 048 |
| 2.3.2 熄灭电弧的基本方法 .....          | 050 |
| 2.4 高压断路器 .....                | 051 |
| 2.4.1 高压断路器的功能 .....           | 051 |
| 2.4.2 高压断路器的基本结构 .....         | 052 |
| 2.4.3 高压断路器的型号 .....           | 052 |
| 2.4.4 高压断路器的技术参数 .....         | 053 |
| 2.4.5 高压断路器的基本要求 .....         | 054 |
| 2.4.6 油断路器 .....               | 055 |
| 2.4.7 真空断路器 .....              | 056 |
| 2.4.8 高压六氟化硫断路器 .....          | 059 |
| 2.4.9 直流断路器 .....              | 060 |
| 2.5 操动机构 .....                 | 062 |
| 2.5.1 操动机构的结构及各部分的功能 .....     | 062 |
| 2.5.2 操动机构的基本要求 .....          | 062 |
| 2.5.3 操动机构的类型及特点 .....         | 063 |
| 2.5.4 电磁操动机构 .....             | 064 |
| 2.6 高压隔离开关 .....               | 065 |
| 2.6.1 高压隔离开关的作用 .....          | 065 |
| 2.6.2 高压隔离开关的基本结构 .....        | 065 |
| 2.6.3 高压隔离开关的分类 .....          | 066 |
| 2.6.4 高压隔离开关的型号 .....          | 066 |

|        |                            |     |
|--------|----------------------------|-----|
| 2.6.5  | 直流馈线隔离开关 .....             | 067 |
| 2.6.6  | 10 kV 高压隔离开关 .....         | 067 |
| 2.6.7  | 隔离开关倒闸操作注意事项 .....         | 068 |
| 2.7    | 高压负荷开关 .....               | 069 |
| 2.7.1  | 高压负荷开关的分类 .....            | 069 |
| 2.7.2  | 高压负荷开关的型号 .....            | 069 |
| 2.7.3  | 高压负荷开关的结构特点 .....          | 069 |
| 2.7.4  | 对高压负荷开关的要求 .....           | 072 |
| 2.8    | 高压熔断器 .....                | 072 |
| 2.8.1  | 高压熔断器的功能及特点 .....          | 072 |
| 2.8.2  | 高压熔断器的分类及型号 .....          | 072 |
| 2.8.3  | 高压熔断器的基本结构和各部分功能 .....     | 073 |
| 2.8.4  | 高压熔断器的原理及特性 .....          | 073 |
| 2.8.5  | 户内式高压熔断器 .....             | 074 |
| 2.8.6  | 户外式高压熔断器 .....             | 074 |
| 2.9    | 互感器 .....                  | 075 |
| 2.9.1  | 互感器概述 .....                | 075 |
| 2.9.2  | 电流互感器 .....                | 076 |
| 2.9.3  | 电压互感器 .....                | 080 |
| 2.10   | 电气主接线 .....                | 083 |
| 2.10.1 | 电气主接线概述 .....              | 083 |
| 2.10.2 | 常见的电气主接线形式 .....           | 085 |
|        | 单元小结 .....                 | 091 |
|        | 复习思考题 .....                | 092 |
| 单元3    | 城市轨道交通供电系统二次系统的组成及原理 ..... | 093 |
| 3.1    | 二次系统的基本知识 .....            | 093 |
| 3.1.1  | 变电所电气设备分类 .....            | 093 |
| 3.1.2  | 二次系统介绍 .....               | 094 |
| 3.1.3  | 二次接线图及分类 .....             | 094 |
| 3.2    | 断路器控制电路的类型 .....           | 096 |
| 3.3    | 断路器控制、信号回路的基本要求 .....      | 096 |
| 3.4    | 手动操作断路器的控制回路及信号回路 .....    | 097 |
| 3.5    | 自动操作断路器的控制回路及信号回路 .....    | 098 |
| 3.5.1  | 控制、信号回路的组成 .....           | 099 |
| 3.5.2  | 控制、信号回路的工作原理 .....         | 101 |
| 3.6    | 继电保护回路 .....               | 102 |
| 3.6.1  | 继电保护概述 .....               | 103 |
| 3.6.2  | 继电保护的任務 .....              | 104 |
| 3.6.3  | 继电保护的基本要求 .....            | 104 |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 3.6.4 继电保护的基本原理 .....         | 105 |
| 3.6.5 继电保护分类 .....            | 106 |
| 单元小结 .....                    | 107 |
| 复习思考题 .....                   | 107 |
| 单元4 城市轨道交通供电系统的防雷与接地 .....    | 109 |
| 4.1 雷电与防雷设备 .....             | 109 |
| 4.1.1 雷电的形成及危害 .....          | 109 |
| 4.1.2 防雷装置简介 .....            | 111 |
| 4.1.3 建筑物防雷等级的划分 .....        | 118 |
| 4.1.4 建筑物的防雷要求 .....          | 119 |
| 4.2 电气装置的接地 .....             | 119 |
| 4.2.1 接地概述 .....              | 119 |
| 4.2.2 变电站接地的分类 .....          | 121 |
| 4.2.3 接地电阻允许值 .....           | 123 |
| 4.2.4 接地装置的敷设要求 .....         | 124 |
| 4.2.5 接地装置的运行与维护 .....        | 127 |
| 单元小结 .....                    | 127 |
| 复习思考题 .....                   | 128 |
| 单元5 城市轨道交通的电气安全及常用仪表的使用 ..... | 129 |
| 5.1 电气安全和触电急救的基础知识 .....      | 129 |
| 5.1.1 电气安全基础知识 .....          | 129 |
| 5.1.2 触电急救方法及措施 .....         | 132 |
| 5.2 保证电气安全的组织措施与技术措施 .....    | 134 |
| 5.2.1 组织措施 .....              | 134 |
| 5.2.2 技术措施 .....              | 135 |
| 5.3 常用电工仪表的使用 .....           | 136 |
| 5.3.1 万用表的结构及使用注意事项 .....     | 136 |
| 5.3.2 兆欧表的结构及使用注意事项 .....     | 138 |
| 5.3.3 接地电阻测试仪的结构及使用注意事项 ..... | 140 |
| 单元小结 .....                    | 142 |
| 复习思考题 .....                   | 143 |
| 参考文献 .....                    | 144 |

# 单元 1

## 城市轨道交通供电系统概述

城市轨道交通 (Rail Transit) 是指具有运量大、速度快、安全、准点、保护环境、节约能源和用地等特点的交通方式,简称“轨道交通”,包括地铁、轻轨、快轨和有轨电车等。世界各国普遍认识到,解决城市交通问题的根本出路在于优先发展以轨道交通为骨干的城市公共交通系统。在中国国家标准《城市公共交通常用名词术语》中,将城市轨道交通定义为“通常以电能为动力,采取轮轨运转方式的快速、大运量公共交通的总称”。轨道交通电力牵引是利用电能作为牵引动力,将电能转换为机械能,驱动车辆载物运行的一种方式。

### 1.1 城市轨道交通概述

我国城市轨道交通的建设相对滞后,北京地铁一期工程 1965 年开始建设,1969 年通车。20 世纪 80 年代,我国地下铁道的运营里程仅为北京 40 km、天津 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,城市人口数量的急剧增长,人员的出行和物资交流日益频繁,在我国的大城市中,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。由于城市轨道交通采用电力牵引,具有运量大、快捷舒适、安全节能、污染轻、占地少等特点,发展现代化轨道交通已成为大城市发展公共交通的根本方针和缓解城市交通拥堵问题的最佳选择。

20 世纪 90 年代,我国城市轨道交通进入了一个快速发展期,截至 2013 年,我国已开通轨道交通的城市有北京、天津、上海、广州、长春等 36 个城市,远期规划线网超过 3 000 km。

#### 1.1.1 城市轨道交通的分类

城市轨道交通存在的困扰问题,必须从载运工具革新和运输模式方面加以调整解决。目前,国内外较多采用的公共客运工具由地铁、轻轨、独轨和磁浮列车等组成,大多数采用全封闭道路,其行车密度大,旅行速度快,载客能力大,其运输能力与传统的公共交通相比具有极大的优越性。

##### 1. 地铁

地铁是地下铁道交通的简称,是一种在城市中修建的快速、大运量的轨道交通,通常以电力牵引,其单向高峰小时客运能力可达 3 万人次,它的线路通常设在地下隧道内,也有的

在城市中心以外地区从地下转到地面或高架桥上。目前世界上一些著名的大城市，如纽约、巴黎、莫斯科、东京等，均已形成一定的城轨交通规模和网络，且以地铁为主干。图 1-1 所示为巴黎地铁。



图 1-1 巴黎地铁

地铁的主要特征：

- (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，速度快；
- (4) 客运量大，一般在高峰时单向客运量为 3 万 ~ 7 万人次/h；
- (5) 地铁列车的编组数取决于客运量和站台的长度，一般为 2 ~ 8 辆；
- (6) 地铁车辆的消声、减振和防火均有严格要求，既安全又舒适；
- (7) 供电制式主要有直流 750 V 和直流 1 500 V。

## 2. 轻轨

轻轨是一种中等运量的轨道运输系统，主要在城市地面或者高架桥上运行，线路采用地面专用轨道或高架轨道，遇到繁华区，也可以进入地下。轻轨的运输能力为 1 万 ~ 3 万人次/h，它的车辆轴重较轻，施加在轨道上的载荷相对于地铁的载荷来说比较小，因而被称为轻轨。轻轨与地铁的不同之处在于其运量、采用车辆及线路曲线半径均较小，除此之外和地铁并无太大区别。不能认为位于地面和高架桥上的线路是轻轨，而地铁必须位于地下隧道内。例如，上海轨道交通 3 号线全部采用高架线路，许多人称之为轻轨，是不正确的，因为它完全是按照地铁标准设计的，运输能力达到 3 万人次/h。而位于地下的线路如果运输量较低，也只能称之为轻轨。图 1-2 所示为伦敦轻轨。

轻轨的主要特征：

- (1) 它是采用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、交流或线性电动机驱动；
- (2) 轻轨的建设费用比地铁低，每公里单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 万 ~ 3 万人次，介于地铁和公共汽车之间，属于中等运量的一种公共交通形式；



图 1-2 伦敦轻轨

(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) 轻轨交通对车辆和线路的消声和减振有较高要求；

(6) 电压制式以直流 750 V 或直流 1 500 V 为主；

(7) 轻轨车站分为地面、高架和地下三种形式。

### 3. 独轨

独轨铁路简称独轨，是指车辆在一根轨道上运行的一种轨道交通系统。通常分为跨坐式和悬挂式两种类型，前者车辆的转向架跨骑在走行轨道上，其车体重心处于走行轨道上方；后者车体悬挂于可在轨道梁上行走的走行装置的下面，其重心处于走行装置的下面。图 1-3 所示为我国重庆的独轨铁路。



图 1-3 重庆独轨铁路

独轨交通的优点：

(1) 独轨铁路线路占地少，可充分利用城市空间，适宜在大城市的繁华中心区建设，对于城市景观及日照影响小；

(2) 独轨铁路构造简单，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) 独轨铁路架于空中,具有交通和观光旅游的双重功能;

(7) 跨坐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:

(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轨大,故能耗比一般轨道交通大40%左右,且有轻度的橡胶粉尘污染;

(2) 运能较小,每小时单向最大客运量为1万~2万人次;

(3) 独轨铁路不能与常规的地铁、轻轨等接轨;

(4) 道岔结构复杂,笨重,转换时间长,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,疏散和救援工作困难。

#### 4. 磁浮列车

磁浮列车是一种靠磁浮力(即磁的吸力和排斥力)来推动的列车。由于其轨道的磁力使之悬浮在空中,行走时不同于其他列车需要接触地面,因此只受来自空气的阻力。磁浮列车的速度可达400 km/h,比轮轨高速列车的380 km/h还要快。磁浮技术的研究源于德国,早在1922年,德国工程师赫尔曼·肯佩尔就提出了电磁悬浮原理,并于1934年申请了磁浮列车的专利。1970年以后,随着世界工业化国家经济实力的不断加强,为提高交通运输能力以适应其经济发展的需要,德国等发达国家以及中国都相继开始筹划进行磁浮运输系统的开发。

### 1.1.2 城市轨道交通的功用

(1) 城轨交通的建设与发展推动着城镇化的进程与城市繁荣。

城镇化是我国实现工业化和建设小康社会的重要内容,而城市公交特别是城市轨道交通建设是城市建设的基础,它有利于人们的出行和经济、文化活动,缩短了城镇之间的时空距离,推动了城镇工商业和经济文化的全面发展与繁荣。轨道交通的发展又与其城市化水平紧密相关,由于大城市人口高度聚集,城市地域不断扩张,交通问题日益突出,促使高效便捷的城市轨道交通得到快速发展。

(2) 发展城市轨道交通有利于发挥大城市的辐射功能。

城市轨道交通能带动周边城镇甚至一个区域的共同发展,使其形成“一小时经济圈”,强化互利互补,促进共同繁荣,北京、珠三角、长三角、深圳、香港和其他大城市轨道交通的发展充分印证了这一点。同时,跨越城市运营也有利于发挥城市轨道交通集约化运输和其他多方面的优势,达到物尽其用,充分节约人力资源和能源。

(3) 发展城市轨道交通可有效缓解大城市交通拥堵,有利于节能减排。

城镇化进程加速和城市机动车剧增,导致城市交通拥堵,运输效率降低。按国际大城市汽车保有量的饱和标准300万~400万辆计算,我国北京、上海等城市均已接近或超过饱和量。在此背景下,发展城市轨道交通对缓解交通拥堵就显得十分迫切和重要。另外,环境、气候已经成为世界关注的重要课题,据报道,2009年我国113个环保重点城市中有1/3的

空气质量未能达标,机动车(主要是汽车)尾气排放成为空气污染的主要来源。2009年,全国机动车排放一氧化碳、碳氢化合物和氮氧化物等污染物总计5 143.3万t,日均达14.1万t,其中主要是城市客货运输汽车排放所造成的。对于大电力系统供电且相对容量有限的城市轨道交通牵引负荷,采用城市轨道交通电力牵引一般可视为污染物零排放的绿色交通。显然,增加城市轨道交通在城市公共交通总量中的比例,将有效减少污染物排放,改善城市空气质量,有利于环保。城市轨道交通采用电力牵引,其单位(人·km)能耗小于公交燃油汽车的1/3,且电力牵引比内燃机传动的公交车总效率高出10%以上,因而城市轨道交通电力牵引相对燃料消耗要低得多,增加城市轨道交通在城市公共交通总量中的比例,显然可以大幅度实现节能。

### 1.1.3 城市轨道交通的特点

城市轨道交通是城市公共交通的一个重要组成部分,随着城市的不断发展,它逐步成为城市中最主要的交通工具,并以其鲜明的特点赢得了城市管理者和市民的青睐,成为“城市交通的主动脉”。它的特点包括以下几点。

#### (1) 安全。

城市轨道交通大部分与地面隔离,其特定的路权方式使系统安全可靠。此外,因为城市轨道交通具有运量大的特点,人们在设计、建设、管理以及资金的投入方面,对其安全也特别重视。

#### (2) 快捷。

城市轨道交通的线路条件不受地面环境影响,并具有良好的控制体系,速度快。

#### (3) 准时。

城市轨道交通在其专用的轨道上行驶,在可靠的技术支持下,按照运营计划行驶,一般都会正常准时运营。

#### (4) 舒适。

城市轨道交通有良好的环控体系和候车环境,乘车舒适性好。

#### (5) 运量大。

城市轨道交通的车辆空间大,一列城市轨道列车可载1 400人。

#### (6) 无污染。

城市轨道交通的动力是电能,没有污染。

#### (7) 占地少,不破坏地面景观。

城市轨道交通的线路主要在地下,占用城市地面面积少,不会破坏地面景观。

#### (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、机械、电子、供电、通信、信号等技术,设备多,技术要求高,系统性、严密性、联动性要求高。土建工程大面多,且建设周期长,涉及的资金投入一般每公里4亿~6亿元。一般城市建设一条地铁网,投资往往达到上千亿元,建设周期要10年左右。

### 1.1.4 城市轨道交通系统的组成

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、暖通空

调、屏蔽门（安全门）、自助扶梯和电梯、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于运输乘客的工具，按照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。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

电能是城市轨道车辆电力牵引系统必需的能源，电动车辆以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，而且还有可能危及旅客的生命安全，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、一定的电流形式（直流或交流电）供给用电设备。

### 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。

### 4. 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。以前列车运行，主要是驾驶员根据色灯信号（红、绿、黄）进行操作。而城市轨道交通具有高密度、短间隔、站距短和快速等特点，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（Automatic Train Control System, ATC）。

### 5. 其他

自动售检票、暖通空调、屏蔽门（安全门）、自动扶梯和电梯等车站设施和防火灭火系统、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、火灾自动报警系统、广播系统、闭路电视系统、车载信息系统、自动售检票系统、信号系统、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。



## 1.2 城市轨道交通供电系统概述

城市轨道交通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供电，还为城市轨道交通运营服务的其他设施提供电能。它应具备安全、可靠、调度方便、技术先进、功能齐全、经济合理等特点。

## 1.2.1 城市轨道交通供电系统的功能

### 1. 全方位的服务功能

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。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正常供电。如主变电所、牵引变电所和降压变电所为双电源、双机组,动力照明的一、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,靠两个相邻变电所的过负荷能力对牵引网进行大双边供电,保证列车可以正常运行。

### 3. 系统的自我保护功能

系统应有完善、协调的保护措施,供电系统的各级保护应相互协调和配合,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、速动性和选择性的要求。对牵引供电系统而言,为保证旅客的安全,保护速动性是第一位的,其保护的原则是“宁可误动作,不可不动作”。误动作可以用自动重合闸校正,而保护不动作则是很危险的,因为直流电弧在不切断电源时可以长时间维持燃烧,从而威胁乘客安全。城轨供电系统中压交流侧保护,应和城市电网的保护相配合和协调,因而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,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,是使系统安全、可靠地运行所不可或缺的一环。

### 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,为保证城轨列车的正常运行,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,系统各环节的状态应有明确的显示,使运行人员一目了然。各种信号显示明确,事故信号、预告信号分别显示。各种电量的测量和电能的计量应明确,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(IEC)对电磁兼容(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干扰的能力”,其中,“任何事物”可以是设备、装置、系统,也可以是有生命或无生命的物体。城轨车辆是强电、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。供电系统以及设备在地铁这个电磁环境中,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,抑制干扰源、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,使城轨车辆安全可靠地运行。

## 1.2.2 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)以及交流制中是单相或三相等。为了便于理解电力牵引制式的变化和发展原因,首先介绍一下对牵引列车的电动车辆或电力机车特性的基本要求。

### (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——牵引电动机基本性能的要求为,列车轻载时运行速度可以高一些,而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达到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。

列车运输,特别是旅客运输,要求有不同的运行速度,即需要调速。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。

## 1. 供电制式的发展过程

### 1) 直流制式

了解了以上对列车牵引的基本特性要求以后不难看出,直流串激电动机的性能是很符合这个要求的,即其机械特性(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。更形象一点说,它具有牛马特性,牛可以拉得多一些,但跑得慢,马跑得快,但力气小,拉得少一些。

此外,从直流串激电动机的启动和调速方法看,也是比较容易实现的。为了限制直流串激电动机刚接通电源时启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,但在列车启动和调速过程中却带来了大量的能量损耗,很不经济。尽管如此,由于局限于一定时期的技术发展水平,采用直流串激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，则受直流串激电动机（牵引电动机）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。因此出现了“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关系，这种电动机存在着整流换向问题，其困难程度随电源频率的升高而增大，因此采用了“低频”单相交流制，它的供电频率和电压有 25 Hz、6.5 ~ 11.0 kV 和  $16\frac{2}{3}$  ~ 15 kV 等类型。由于采用低频电源使供电系统复杂化，需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送出，因此没有得到广泛应用，只在少量国家的工矿或干线上采用。

## 3) 工频单相交流制

由于低频单相交流制存在以上缺点，长期以来人们一直在寻求一种更理想的牵引供电方式，这就是“工频单相交流制”。这种制式保留了交流制可以升高供电电压的优点，且仍旧采用直流串激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，它们将高压电源降压，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控制整流装置的电压来达到。工频单相交流制是当前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

在牵引制的发展过程中曾出现过“三相交流制”的形式，但由于供电网比较复杂，必须有两根（两相）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. 城轨供电系统的供电制式

关于直流制式的电压等级应用情况大致如下：干线电气化铁路的供电电压有 3 kV 的，电压没有再提高是因为受到直流牵引电动机端电压的限制，其值一般为 1.5 kV 左右，用 3 kV 供电，一般就需要将两台电动机串联连接，再提高供电电压其连接就更复杂，还涉及当时整流装置绝缘水平的问题。这种制式在苏联和东欧一些国家应用最普遍。供电电压为 1.2 ~ 1.5 kV 的直流制多用于工矿和部分国家的干线电力牵引，如日本等。城市轨道交通几乎毫无例外地都采用直流供电制式，这是因为：

(1) 城轨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) 城轨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。

(4) 由于大功率半导体整流元件（晶闸管）的出现，在直流电动车辆上，采用整流器可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) 快速晶闸管的出现。近年来发展了由快速晶闸管等组成逆变器，它不但将直流电逆变成交流电，而且频率可以调节，这样就实现了多年来想采用结构简单、结实的鼠笼式异