

第 1 章 城市轨道交通供电系统概述

【问题导入】

城市轨道交通作为解决城市交通拥挤的一种重要手段，从起步发展到目前的全面建设，以其环保、舒适、快捷的优势，改变了人们的出行方式，已成为城市交通发展的必然选择。城市轨道交通供电系统负责为电动列车提供牵引电源和为各种运营设备提供动力照明电源，是城轨工程中重要的机电设备系统之一，同时也是城市电网的用电大户。城市轨道交通供电系统的发展与牵引供电技术及车辆技术的发展密切相关。因此，本章首先简要介绍城市轨道交通的工程概论，再对城市轨道交通供电系统的构成及特点、电力牵引制式、负荷分类及技术发展进行概述。

【学习目标】

- (1) 了解城市轨道交通的分类及其特点。
- (2) 掌握城市轨道交通供电系统的构成及其各部分的功能。
- (3) 掌握城市轨道交通的牵引制式。
- (4) 了解城市轨道交通供电系统的供电负荷分类。

【技能目标】

(1) 认知城市轨道交通供电系统的组成，主要包括外部电源、牵引供电系统、动力照明供电系统和电力监控系统。

(2) 掌握电力牵引的制式，主要包括电流制式和电压制式、电压等级以及馈电方式等。

1.1 城市轨道交通概述

1.1.1 城市轨道交通的分类

城市轨道交通是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、城市快速轨道系统。其中，地铁与轻轨，是我国城市轨道交通的主流。

1. 地铁系统

地铁是地下铁道交通的简称，是一种大运量的轨道运输系统，采用钢轮钢轨体系，标准轨距为 1435 mm。通常以电力牵引，线路通常设于地下隧道内，也可穿出地面，在地上或者高架桥上运行。地铁车辆的基本车型分为 A 型、B 型和 L₈ 型（直线电机）三种。根据选用车型的不同，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，可分为高运量地铁和大运量地铁。图 1.1 为广州地铁的示例。



图 1.1 广州地铁

目前世界上一些著名城市如纽约、伦敦、东京、巴黎及我国北京等，均已形成一定的城市轨道交通规模和网络，以地铁为主干，延伸到城市的各个方向。地铁作为大型的交通运输方式，具有以下优点：

(1) 全部或绝大部分线路和设备处于地下，节约出地面宝贵的土地资源。

(2) 客运量大，单向每小时运送能力达到 30 000~70 000 人次，远远高于公共汽车。

(3) 可信赖的准时性和速达性，行车密度大，有自己的专用线路，不会出现交通阻塞而延误时间。

(4) 安全性高，舒适度好。地铁车辆消音减振和防火措施均有严格要求，如果不发生意外或自然灾害，乘客安全是可以得到保障的。

(5) 受电的制式主要有直流 750 V、第三轨受电或直流 1 500 V 架空线受电弓受电。

(6) 地铁系统列车编组一般由 4~8 辆组成，列车长度 70~190 m。

但地铁的建设费用大，周期长，成本回收慢，我国每千米地铁造价达 8 亿人民币。

2. 轻 轨

轻轨是一种中运量的轨道运输系统，一般采用钢轮钢轨体系，标准轨距 1 435 mm，主要在地面或高架桥上运行，也可在地下运行或与地铁衔接。轻轨车辆包括 C 型车辆、Lc 型车辆（直线电机）。图 1.2 为大连城市轻轨的示例。

轻轨具有以下特点：

- (1) 列车运行使用自动化信号系统，车辆以电力提供牵引动力。
- (2) 轻轨线路单向高峰小时客运量在 15 000 ~ 30 000 人次，是地铁的 1/3 ~ 1/2。
- (3) 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。
- (4) 轻轨车辆对车辆和线路的消音和减振有较高要求。
- (5) 电压制式以直流 750 V 架空线（或第三轨）供电为主，部分采用直流 1 500 V 和直流 600 V 供电。
- (6) 轻轨车辆有单节 4 轴车、双节单铰 6 轴车和 3 节双铰 8 轴车等。
- (7) 轻轨车站可分为地面、高架和地下三种形式。



图 1.2 大连城市轻轨

3. 单轨铁路

单轨系统又称独轨交通，是一种车辆与特制轨道梁组合成一体运行的中运量轨道运输系统。轨道梁不仅是车辆的承重架构，同时也是车辆运行的导向轨道。独轨交通于 19 世纪末提出，德国于 1901 年建成首条独轨交通，后来日本从德国引进专利，用了近 30 年开发了多种独轨铁路系统，在世界城轨交通中独树一帜。

独轨交通的类型主要分为两种：一种是车辆跨骑在单根梁上运行的方式，称之为跨座式单轨系统；另一种是车辆悬挂在单根梁上运行的方式，称之为悬挂式单轨系统。我国重庆市从日本引进的独轨交通系统，即为跨座式，如图 1.3 所示。



图 1.3 重庆独轨

独轨交通具有以下特点：

- (1) 独轨交通铁路线路占地面积小，可充分利用城市空间，适宜于在大城市的繁华中心区建线，对城市景观及日照影响小。
- (2) 独轨线路构造较简单，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) 运能较小，一般每小时单向最大客运量为 10 000~20 000 人次。

(5) 走行装置采用空气弹簧和橡胶轮结构，并采用电力驱动，运行噪声低，无废气，乘坐舒适。但其与混凝土轨面的滚动摩擦阻力比钢轮钢轨大，故其能耗大，比一般轨道交通增加约 40%。

(6) 一般采用轻型车辆，列车编组为 4~6 辆。

(7) 独轨交通道岔结构复杂、笨重，转换时间较长，因此列车折返时间长，且一般不能与常规地铁、轻轨等接轨。

4. 磁浮列车

磁浮列车是依靠磁悬浮技术将列车悬浮起来并利用直线电动机驱动列车行驶的交通工具，有常速、中速、高速和超高速之分。城市轨道交通主要利用中低速磁悬浮，它一般运行距离较短，如我国上海的磁悬浮列车，从浦东龙阳路到浦东国际机场近 30 km 只需 6~7 min。

1.1.2 我国城市轨道交通的发展

我国城市轨道交通开始于 20 世纪 50 年代的北京地铁建设。北京地铁一期工程于 1965 年开工，1969 年建成通车。直到 20 世纪 80 年代，我国轨道交通仅有北京地铁 40 km，天津地铁 7.6 km。随着经济的持续发展，我国进入了城市化和机动化的快速发展阶段，城市人口和机动车数量的急剧增长，造成了交通道路堵塞、交通秩序混乱、事故频发、污染严重等问题，越来越多的学者致力于发展公共交通。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，迅速成为许多大城市解决交通问题的首要选择，并在我国形成以地铁、

城市快速铁路、高架轻轨等为主的多元化发展趋势。

我国“十一五”规划明确提出：“优先发展公共交通，完善城市路网结构和公共交通场站，有条件的大城市和城市群地区要把轨道交通作为优先领域，超前规划，适时建设”。在国家政策的正确引导和各城市积极努力下，目前我国北京、天津、上海、广州、长春、大连、重庆、武汉、深圳、南京、沈阳、成都、西安、苏州、杭州、昆明、佛山、郑州等城市均已开通城市轨道交通，全国百万人以上的大城市已有 50 多个城市开展了城市轨道交通的建设和筹建工作。根据 2016 年 5 月发改委和交通部联合印发的《交通基础设施重大工程建设三年行动计划》，仅 2016—2018 年就将推进 103 个项目的前期工作，新建城轨 2 000 km 以上。我国远期线网总长将超过 14 000 km。

1.2 城市轨道交通供电系统概述

城市轨道交通供电系统主要为城市轨道交通运营提供所需电能，主要包括牵引供电系统和动力照明系统。牵引供电系统供给电动车辆运行的电能，由牵引变电所和接触网组成。动力照明供电系统提供车站和区间各类照明，扶梯、风机、水泵等动力机械设备电源，以及通信、信号、自动化等设备电源，由降压变电所和动力照明配电线路组成。

城市轨道交通牵引供电既可从区域变电所高压线路得电，也可以从下一级电压的城市地方电网得电，这取决于城市地方电网和供电系统具体情况以及牵引用电容量大小。对于直接从系统高压电网获得电力的城市轨道交通系统，一般需要再设置一级主降压变电站，即主变

电所，将系统输电电压如 110~220 kV 降低到 10~35 kV 以适应直流牵引变电所的需要。

城市电网一次电力系统由国家电力部门建造与管理，它包括发电厂、传输线和区域变电所。发电厂是发出电能的中心，一般可分为火力发电厂、水力发电厂、原子能核电厂等。发电厂的发电机发出的电能，要先经过升压变压器升高电压，然后以 110 kV、220 kV 或更高的电压，通过三相传输线输送到区域变电所。在区域变电所中，电能先经过降压变压器把 110 kV 或 220 kV 的高压降低等级（如 10 kV 或 35 kV），再经过三相输电线输送给本区域内的牵引变电所和降压变电所，然后再降为城市轨道交通所需的电压等级（如 1 500 V、380 V 等）。

在地铁供电系统中，根据实际需要，也可以专设高压主变电所。发电厂或区域变电所对城市轨道交通主变电所供电，经主变电所降压后，分别以不同的电压等级对牵引变电所和降压变电所供电，如图 1.4 所示。

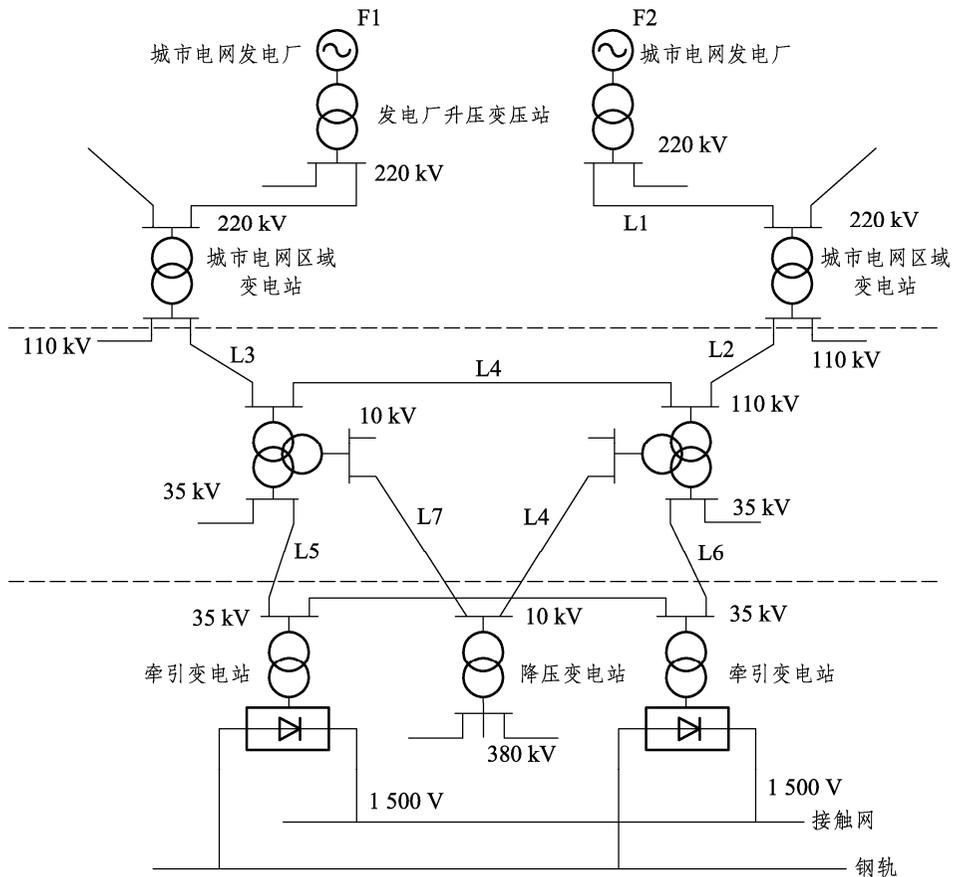


图 1.4 电力系统和城市轨道交通供电系统示意图

供电系统一旦发生断电事故，不仅会造成城市轨道交通的瘫痪，还会危及乘客生命安全和造成财产的损失，因此供电系统必须保证其安全性和可靠性，以保证城市轨道交通正常运营。

1.2.1 城市轨道交通供电系统的基本要求

城市轨道交通供电系统担负着城市轨道交通的所有用电需求，负责电能的供应与传输，为电动列车牵引供电并提供车站、区间、车辆段、控制中心等其他建筑物所需要的动力照明用电。因此，供电系统必须保证安全性与可靠性，同时应满足适用性、经济性和先进性的基本要求。

1. 安全性

安全性是指城市轨道交通运营过程中的安全程度，关系着乘客安全、行车安全、设备安全等多个方面，各种安全性相互联系、不可分割。在对供电系统进行设计时，一般从系统安全性和设备安全性两个方面进行分析研究。

系统安全性主要包括联锁关系、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。

2. 可靠性

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，是正常运营、事故处理、灾害救援等的前提条件。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也包括电气设备的可靠性。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。

根据城市轨道交通可靠性要求，供电系统应满足“ $N-1$ 准则”，即单一故障安全准则。当供电系统的 N 个元件中的任一独立元件发生故障而被切除后，其他元件在不超过负荷、电压和频率的允许范围情况下，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，