

城市轨道交通系列丛书

城市轨道交通供电

(第二版)

宋奇吼 李学武 等 编著
张云太 主审

CHENGSHI GUIDAO JIAOTONG GONGDIAN

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

城市轨道交通系列丛书

城市轨道交通供电

(第二版)

宋奇吼 李学武 等 编著
张云太 主审

中国铁道出版社

2011年·北京

内 容 简 介

本书全面地介绍了城市轨道交通供电系统的各个子系统,包括变电所一次系统、变电所二次系统、接触网系统、电力监控系统,对各系统的功能需求、结构原理以及检修与运营管理都做了详细讲解。本书第二版针对城市轨道交通供电系统发展趋势,对直流馈出继电保护、电力监控、变电所主接线以及刚性和第三轨式接触网结构等部分做了较大的修改。

本书可作为城市轨道交通供电设计、制造、工程、维护、运行等技术人员的参考书,也可作为中、高等院校相关专业的教科书和培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

城市轨道交通供电/宋奇吼等编著. —2 版

—北京:中国铁道出版社,2011. 2

(城市轨道交通系列丛书)

ISBN 978-7-113-12467-0

I. 城… II. ①宋… III. 城市铁路—供电—电力系统 IV. U239.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 015524 号

书 名: 城市轨道交通系列丛书
城市轨道交通供电(第二版)
作 者: 宋奇吼 李学武 等 编著

责任编辑: 魏京燕 朱雪玲 电话: 010-51873115 电子信箱: dianwu@vip.sina.com
封面设计: 薛小卉
责任印制: 郭向伟

出版发行: 中国铁道出版社(100054, 北京市宣武区右安门西街8号)

网 址: <http://www.tdpress.com>

印 刷: 北京华正印刷有限公司

版 次: 2009年8月第1版 2011年2月第2版 2011年2月第2次印刷

开 本: 787 mm × 960 mm 1/16 印张: 20.5 字数: 417 千

书 号: ISBN 978-7-113-12467-0

定 价: 41.50 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社读者服务部调换。

电 话: 市电(010) 51873170, 路电(021) 73170(发行部)

打击盗版举报电话: 市电(010) 63549504, 路电(021) 73187

前 言

随着城市轨道交通事业不断发展,供电系统作为城市轨道交通的重要组成部分,大量采用先进技术与新型设备,逐步实现监控自动化、运动化,运行管理智能化,性能检测及故障诊断现代化。对广大城市轨道交通供电系统运行维护人员,在知识上、技能上提出更高要求。

编者结合轨道交通供电系统的实际情况,以轨道交通供电系统新技术新设备技术资料为依据,并参阅有关技术文献和生产厂家的技术资料,编写了本书。

本书主要介绍近年来轨道交通供电系统新技术的发展方向,以设备单元为载体,分别讲述了轨道交通供电系统变电所高压一次设备及其他接线、变电所二次系统、接触网设备与结构、电力监控系统的构成与功能,特别增加了第三轨式接触网和供电系统检修与运营管理的内容讲解,便于系统管理人员与维护人员学习。本书第二版针对城市轨道供电系统的技术发展趋势,对直流馈出继电保护、电力监控、变电所主接线以及刚性和第三轨式接触网结构等部分做了较大的修改。在本书的最后,附有“常用电气设备文字符号对照表”和“电气设备常用图形符号”,供读者参考学习。

《城市轨道交通供电》第一章、第四章由南京铁道职业技术学院宋奇吼撰写;第二章由郑州铁路职业技术学院张家祥和河南省电力勘测设计院陈宁共同撰写;第三章由郑州铁路职业技术学院李学武和吉鹏霄共同撰写;第五章由中铁上海设计院集团有限公司罗利平撰写;第六章由南京地铁有限责任公司高卫忠撰写。全书由宋奇吼、李学武担任主编,罗利平、高卫忠担任副主编,中铁电气化勘测设备研究院张云太担任主审。

上海地铁、南京地铁公司各位同仁在编写过程中给予大力帮助,许继集团郑州地铁设备公司郑宁高级工程师提供了部分技术资料,并提出了许多宝贵意见,在此表示衷心感谢。

由于编者水平所限,书中疏漏和错误之处在所难免,诚恳欢迎读者提出宝贵意见。

编者
2011年1月

目 录

第一章 城市轨道交通供电系统概述.....	1
第一节 城市轨道交通概述.....	1
第二节 城市轨道交通供电系统概述.....	7
第三节 城市轨道交通供电系统的组成	14
第四节 城市轨道交通供电系统的特点	22
第二章 变电所一次设备	35
第一节 高压电器的分类	35
第二节 变压器与整流机组	36
第三节 电弧理论	43
第四节 高压断路器	50
第五节 其他开关电器	65
第六节 操动机构	69
第七节 互感器	81
第八节 电气主接线的型式	95
第九节 变电所.....	102
第十节 配电装置.....	110
第十一节 接地装置.....	121
第三章 变电所二次系统.....	132
第一节 二次接线概述.....	132
第二节 高压开关的控制信号电路.....	149
第三节 变电所信号装置.....	163
第四节 继电保护装置.....	166
第五节 自用电系统.....	192

第四章 接触网	217
第一节 接触网的组成	217
第二节 柔性接触网	220
第三节 刚性接触网	233
第四节 第三轨式接触网	242
第五章 电力监控系统	255
第一节 电力监控系统的概念及其硬件构成	255
第二节 系统软件构成	259
第三节 系统功能	262
第六章 城轨交通供电系统的运行管理	267
第一节 运行管理的任务和内容	267
第二节 运行管理组织及有关人员职责	272
第三节 运行管理的有关规程和制度	280
第四节 应备的记录和技术资料	295
第五节 应备的工具和备件	306
附录一 常用电气设备文字符号对照表	312
附录二 电气设备常用图形符号	314
附录三 复习思考题	318
参考文献	322

第一章

城市轨道交通供电系统概述

作为城市公共交通系统的一个重要组成部分,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之总称”。目前城市轨道交通有地铁、轻轨、市郊铁路、有轨电车以及悬浮列车等多种类型,号称“城市交通的主动脉”。

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用电,而且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、信号、防灾报警、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系统的瘫痪,而且还会危及乘客生命安全和造成财产的损失。因此,高度安全可靠而又经济合理的电力供给是城市轨道交通正常运营的重要保证和前提。

第一节 城市轨道交通概述

一、城市轨道交通的概念与分类

城市轨道交通是由地铁、轻轨铁路、独轨铁路等组成,是近代高科技的产物,大多采用全封闭道路、立体交叉、自动信号控制和电动车组等高科技产品和手段;其行车密度大,旅行速度快,载客能力大;其疏通客流的能力与传统的道路公共交通工具相比,具有无与伦比的优越性。

1. 地铁

地铁是地下铁道交通的简称,它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 30 000 人次以上,它的线路通常设在地下隧道内,也有的在市中心以外地区从地下转到地面或高架桥上。图 1-1 所示为广州地铁。

目前世界上一些著名的特大城市,如纽约、伦敦、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,延伸到城市的各个方向。

地铁有以下特征:

(1)全部或大部分线路建于地面以下。

(2) 建设费用大、周期长,成本回收慢。

(3) 行车密度大,速度高。

(4) 客运量大。

(5) 地铁列车的编组数决定于客运量和站台的长度,一般为 2~8 辆。

(6) 地铁车辆消音减振和防火均有严格要求,既安全,又舒适。

(7) 受电的制式主要有直流 750 V 第三轨受电或直流 1500 V 架空线受电弓受电。

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,主要在城市地面或高架桥上运行,线路采用地面专用轨道或高架轨道,遇繁华街区,也可进入地下或与地铁衔接。轻轨的输送能力为 1.5~3.0 万人次/小时,它的车辆轴重较轻,施加在轨道上的荷载相对于地铁的荷载来说比较轻,因而被称为轻轨。轻轨与地铁的不同之处在于运量较小,采用较小的车辆,线路曲线半径较小,线路的最大坡度较大,除此之外和地铁并无多大区别。图 1-2 所示为大连的城市轻轨。



图 1-1 广州地铁



图 1-2 大连城市轻轨

轻轨有以下特征:

(1) 它是以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、交流或线性电机驱动。

(2) 轻轨的建设费用比地铁少,每公里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 1.5~3.0 万人次,介于地铁和公共汽

车之间,属于中等运能的一种公共交通形式。

(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)轻轨车辆一般采用C型车辆、Lc型车辆(直线电机)。

(6)轻轨交通对车辆和线路的消音和减振有较高要求。

(7)电压制式以直流750V和1500V供电为主。

(8)轻轨车站分为地面、高架和地下三种形式。

3. 独轨

独轨交通的设想早在19世纪末已经形成。1901年德国鲁尔地区的三个工业城市之间,在险峻的乌珀河谷上空建成一条快速交通线,车辆吊在架空的导轨下面,沿着导轨行驶,后来三市合并成为乌珀塔尔市,这个独轨交通系统成为该市的一个标志。

独轨交通用作城市公共交通,开始进展比较缓慢。日本从德国引进专利,近30年开发了多种独轨铁路,在世界城轨交通中独树一帜。我国重庆市从日本引进的独轨交通系统已经开始运营。如图1-3所示。



图1-3 重庆独轨线路

独轨交通采用高架轨道结构,按结构型式分为跨坐式和悬挂式两种类型。前者车辆的走行装置(转向架)跨骑在走行轨道上,其车体重心处于走行轨道的上方。后者车体悬挂于可在轨道梁上行走的走行装置的下面,其重心处于走行轨道梁的下方。

独轨交通的优点是:

(1)独轨铁路线路占地小,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)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,具有交通和旅游观光的双重作用。

(7)跨座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。

独轨铁路交通的缺点是:

- (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轮钢轨大,故其能耗比一般轨道交通约大 40%,且有轻度的橡胶粉尘污染。
- (2) 运能较小。一般每小时单向最大客运量为 1~2 万人次。
- (3) 独轨线路不能与常规的地铁、轻轨等接轨。
- (4) 道岔结构复杂,笨重,转换时间较长,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。

二、城市轨道交通的特点

城市轨道交通与城市道路交通相比,有以下特点:

1. 安全

城市轨道交通因为有运量大的特点,人们在设计、建设、管理以及资金的投入方面,对城市轨道交通的安全特别重视。

2. 快捷

城市轨道交通不受地面环境影响。

3. 准时

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

4. 舒适

城市轨道交通的乘车环境好。

5. 运量大

城市轨道交通的车厢空间大,一列地铁可载 2000 人以上。

6. 无污染(或少污染)

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(装修)、机械、电子、供电、通信、信号等技术。设备多,点多面广,技术要求高,系统性、严密性、联动性要求高。土建工程大面多,且建设的周期长。涉及的资金投入一般是每公里 4~6 亿。一般大城市建成一个 200 km 的地铁网,要投资上千亿的资金,且时间要 10~12 年以上。

三、城市轨道交通发展概况

世界城市轨道交通已有 140 多年的历史,目前已呈现多元化的发展趋势。我国城市轨道交通起步较晚,但在城市化的推动下,建设态势在迅猛发展。

1. 世界城市轨道交通的发展

(1) 发展简史

1863年,世界上第一条用蒸汽机车牵引的地下铁道线路在英国伦敦建成通车,当时还没有电车和电灯,至今已有140多年。纵观世界城市轨道交通发展历史,大致可分为两大阶段。

第一阶段从1863年到20世纪中叶。从第一条地铁诞生起,欧美的城市轨道交通发展较快,第二次世界大战前,有13个城市修建了地铁。

第二阶段从20世纪中叶至今。第二次世界大战后,伴随着各国城市的快速发展,地铁发展极为迅速。全世界有142个城市拥有城市轨道交通系统。

(2) 技术发展

城市轨道交通属于集多工种、多专业于一身的复杂系统。1879年,电力驱动列车的研制成功,不仅使地铁乘客和工作人员免除了蒸汽机车的烟熏之苦,也使城市轨道交通开创了使用无大气污染的二次能源之先河,城市轨道交通从此步入了连续不断的发展时期,相继出现了传统轮轨系统、直线电机驱动系统、磁悬浮列车、单轨交通系统、新交通系统等。现代城市轨道交通技术进步的标志,当以先进舒适的车辆和行车控制技术为代表。

① 车辆技术

城市轨道交通车辆的技术发展,可以从车体结构、车辆传动和走行系统三个方面来介绍。

车体结构技术。城市轨道交通车辆的车体,过去主要采用碳素钢或耐候钢材料,现在已向不锈钢车体和铝合金车体发展。铝合金制成的车体,可以减轻车辆自重,增强抗腐蚀能力,延长使用寿命,还将减少大量的日常维护保养工作,可节省能源,并减轻对支撑结构物的压力而节省土建工程费用。但铝合金车体整体承载结构需要使用大型铝材,技术难度较大,目前有的国家已在研究组合结构的车体技术。另外,目前世界范围内不锈钢车体也得到了广泛应用。不锈钢车体有局部不锈钢车、表板不锈钢车、全不锈钢车、半不锈钢车等几种类型,其最大优点是耐腐蚀,不用涂漆、易于维修。

车辆传动技术。以前城市轨道交通车辆的牵引控制系统,主要采用直流电动机的凸轮变阻控制方式,这种方式使用了几十年,工作安全可靠,但车辆的启动和制动频繁,要消耗大量电能,其能量的散发还将引起隧道内温度的上升,对环境产生不良影响。自20世纪60年代初,新造车辆已越来越多地采用无级斩波调压控制方式。这确保了车辆的平稳启动与制动,又使得车辆设备的体积和重量大为减小,加上列车再生制动能量的利用,能耗显著降低,日常维护保养工作大大减少。1990年,随着GTO、IGBT等大功率电子元器件的发展,为了使车辆运行更为平稳并达到主电动机无维修化目的,各国成功地开发了交流异步电动机变压变频控制技术。同时,作为科技发展新成就的代表,直

线电机驱动技术、磁悬浮列车技术在城市轨道交通工程中也得到了实际应用。

车辆走行系统。传统的车辆走行系统是车体通过转向架及轮对在钢轨上行走。城市轨道交通车辆的走行系统也在不断革新和发展,并已在实际工程上有所突破。如法国里尔地铁的 VAL 系统和日本神户等地的新交通系统等,都已经把传统的钢轮钢轨取消,而改用橡胶轮承重和水平轮导向的体系,车下轨道则采用特制的混凝土结构或钢板结构,使振动和噪声大大降低。另外,悬挂式单轨交通和跨座式单轨交通,在城市轨道交通工程中也得到了实际应用。

② 行车控制技术

就行车控制技术而言,由于信息科学的不断进步,推动了微电子技术、信息传输技术和计算机网络技术的飞跃发展,城市轨道交通系统的行车控制技术充分利用了这些高新技术成果。行车系统使用的设备和技术,已从传统的电磁和电机设备,发展到功率电子和计算机技术;从运用普通金属电缆,发展到运用具有高速通信能力的光缆,使通信系统向无线通信与控制一体化的方向发展。就城市轨道交通的整体控制系统来说,将从以往的单一功能系统,向以模块化组成的适用于多种目的和多层次需要的综合控制系统发展;从单个列车局部而孤立的控制技术,向列车群的综合管理和控制方向发展;从中央集中控制管理方式,向集中管理、分散控制的自律分散式系统发展;从适用于固定闭塞的列车控制方式,向以列车自动运行为主体的移动闭塞方式发展。行车控制技术的发展,将使列车运行的安全度和准点率得到更为可靠的保障。

2. 国内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 1965 年开工,1969 年建成通车。由于受资金、技术等因素制约,在其后的 30 多年中,中国的轨道交通建设速度十分缓慢。

随着我国国民经济的持续发展,城市化进程的逐步加快,城市人口与机动车数量急剧增长,人员出行和物资交流频繁,在我国大城市及特大城市,普遍存在着交通道路阻塞、交通秩序混乱、交通事故频发、交通污染严重等问题。由于城市轨道交通具有运量大、快捷舒服、安全节能、污染轻、占地少等特点,发展城市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的最佳选择。

进入 20 世纪 90 年代以来,我国城市轨道交通进入了一个快速发展期,建设规模之大是世界城市轨道交通发展史上少有的,凸显了后发优势。2009 年已有 11 个城市拥有地铁,总运营里程达 1 038.7 km。其中,运营里程排名前三的城市是:上海、北京、广州,占总运营里程的比重依次为 31.8%、22.0% 和 15.4%。

预计到 2020 年我国城市轨道交通累计运营里程将达到 7 395 km,中国城市轨道交通建设将迎来黄金十年。

在我国城市轨道交通的未来发展中,其趋势与前景主要集中在以下几个方面:

(1) 城市轨道交通网络化

北京、上海、广州等特大城市已建成多条线路,在未来的5~10年内,将逐步形成城市轨道交通网络,以构建城市轨道交通为骨干的公共交通系统。例如,北京2015年之前,将建成城市轨道交通线路约580 km;而上海城市轨道交通目前为420 km,“十二五”期间,上海城市轨道交通新建里程将超过200 km。这些城市面对网络化发展,开展了一系列的网络化专题研究,如车辆段与综合基地、主变电站、控制中心、无线通信、AFC(自动售检票)等资源共享研究。

(2) 交通制式多元化

目前11个城市投入运行的近30条线路,虽大多数为传统地铁制式,但也出现了多样化的趋势。如长春建设了现代化轻轨交通;重庆轨道交通2号线为跨座式单轨交通;广州轨道交通4号线、北京机场线为直线电机系统;上海市区通往浦东机场则建成了高速磁悬浮线路。此外,还有100 km/h、120 km/h不同等级的市域快线等。

(3) 车辆与机电设备国产化

在国家城市轨道交通设备国产化政策推动下,通过建立合资企业,引进消化吸收新技术,开展多种形式的技术合作,我国将不断提高城市轨道交通的车辆、设备制造的技术水平和国产化率,逐步形成城市轨道交通车辆与机电设备的产业化。

第二节 城市轨道交通供电系统概述

一、城市轨道交通供电系统的供电制式

城市轨道交通的供电系统,由变电所、接触网(接触轨)和回流网三部分构成。变电所通过接触网(接触轨),由车辆受电器向电动客车馈送电能,回流网是牵引电流返回变电所的导体。

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《地铁直流牵引供电系统》规定了DC 1 500 V和DC 750 V两种电压制式。

牵引网的馈电方式分为架空接触网和接触轨两种基本类型。其中电压制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。目前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。

供电制式选择的原则是:

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,中运量的系统采用 DC 750 V 和接触轨供电方式。

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的最重要条件。

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。

二、国外轨道交通供电系统的发展

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)启动加速性能。要求启动加速力大而且平稳,即恒定的大的启动力矩,便于列车快速平稳启动。

(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,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。

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。这种方法实现是容易的,但在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应用的形式,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”。

随着矿山和干线电力牵引的发展,列车需要的功率愈来愈大,如果采用直流供电制式,因受直流串激电动机(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,这种制式采用的牵引电动机在原理上与直流串激电动机相似的单相交流整流子电动机。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 kV 和 16 $\frac{2}{3}$ ~ 15 kV 等类型。由于用了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应用。

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”。这种制式既保留了交流制可以升高供电电压的长处,又仍旧采用直流串激电动机作为牵引电动机的优点,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可控制整流装置电压来达到。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。

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,必须要有两根(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,因此被淘汰。

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,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。这种制式在原苏联和东欧一些国家应用最普遍。

由于大功率半导体整流元件(晶闸管)的出现,在直流制电动车辆上,采用以晶闸管为主体的快速电子开关(整流器),可对直流串激牵引电动机进行调压调速,消除了用串联电阻启动和降压调速的不经济方法。这种方法给直流制增添了新的生命力。

另外还由于快速晶闸管的出现,近年来发展为由快速晶闸管等组成逆变器,不但将直流电逆变成交流电,而且频率可以调节,这样就解决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。用变频率改变异步电动机速度的方法(简称变频调速),使异步牵引电动机性能满足牵引列车特点的要求。这种方法在国外无论在城市轨道交通还是在工矿和干线电牵引车辆上都应用较多。上海市地铁二号线的电动车辆也采用这种形式。不过,尽管电动车辆上采用的是交流异步牵引电动机,其

架线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打开一个更宽广的天地,使它更有生命力。

从 1863 年伦敦建成世界上第一条地下铁道以来,在 140 多年的时间内,各国已有近百座城市修建了城市轨道交通。城市轨道交通几乎毫无例外地都采用直流供电制式,这是因为城市轨道交通的列车功率并不是很大,其供电半径(范围)也不大,因此供电电压不需要太高;还由于直流制比交流制的电压损失小(同样电压等级下),因为没有电抗压降。另外由于城市内的轨道交通,供电线路都处在城市建筑群之间,供电电压不宜太高,以确保安全。基于以上原因,世界各国城市轨道交通的供电电压都在直流 550 ~ 1 500 V 之间,但其档级很多,这是由各种不同交通形式,不同发展历史时期造成的。现在国际电工委员会拟定的电压标准为:600 V、750 V 和 1 500 V 三种。后两种为推荐值。我国国标也规定为 750 V 和 1 500 V,不推荐现有的 600 V。DC 1 500 V 接触网和 DC 750 V 第三轨馈电都是可行的。从世界范围来看,采用第三轨馈电的占多数。

目前,为了降低工程造价,各国城市轨道交通有向地面线和高架线发展的趋向。随着人们环保意识的增强,越来越重视轨道交通的城市景观效果,因此,新建的轨道交通系统采用第三轨馈电的日益增多。例如,1990 年建成的新加坡地铁,号称集中了世界最先进的技术,为保护旅游城市环境,采用第三轨馈电。近年新建的吉隆坡轻轨、曼谷地铁、德黑兰地铁,都采用 DC 750 V 第三轨馈电。

近年来,有人说第三轨馈电是陈旧落后的技术,接触网是先进技术。这是一种片面的说法。衡量一条地铁是否先进,应该是它的自动化水平高低,计算机技术和信息技术应用程度,以及是否符合环保要求和景观效果,而不是采用了哪种供电方式。

三、国内轨道交通供电系统的发展现状

我国自 1969 年建成北京第一条地下铁道之后,相继已有上海、广州等城市的轨道交通投入商业运营。其中北京和天津地铁采用 DC 750 V 第三轨馈电。上海、广州、南京、深圳和大连采用 DC 1 500 V 接触网馈电。正在筹建或将要运营轨道交通的城市地铁采用 DC 1 500 V 接触网馈电。苏州、杭州、武汉和青岛采用 DC 750 V 第三轨馈电。无锡地铁采用 DC 1 500 V 第三轨馈电。

下面我们从不同的角度对以上的两种供电制式进行分析比较。

1. 设备施工安装比较

架空接触网悬挂在钢轨轨面上方,由承力索、滑触线、馈电线、架空地线、绝缘子、支柱、支持与悬挂零部件、隔离开关、电缆及拉锚装置等组成,结构比较复杂,零部件较多。架空接触网施工安装时,因作业面较高,作业不方便,安装调整比较困难。需要使用专用的架线车和大型机具,施工费用较高。

第三轨安装在车辆走行轨外侧,由导电接触轨、绝缘子、绝缘支架、防护罩、隔离开关和电缆组成,结构比较简单,零部件较少。第三轨安装高度较低,钢铝复合接触轨每

延米重量为 14.25 kg, 施工安装方便, 施工机具简单, 施工安装费用较低。

2. 设备投资比较

现以青岛地铁为例, 对两种供电制式的设备投资进行比较。青岛地铁第一期工程长约 16.455 km, 全部为地下线, 设 13 座车站。采用以主变电所为主的混合式供电方案。除去两种供电制式相同部分设备的投资(2 座主变电所、车辆段的 1 座牵引降压混合变电所和两座降压变电所、10 kV 电缆网络), 对两种供电制式下可比部分的设备投资比较如下。

(1) DC 1500 V 架空接触网方案

青岛地铁第一期工程, 采用 DC 1500 V 架空接触网方案, 正线上设牵引降压混合变电所 6 座, 设降压变电所 7 座。按牵引降压混合变电所每座造价 1000 万元, 降压变电所每座造价 400 万元, 架空接触网(柔性隧道内)每公里造价 165 万元计算, 系统中可比部分的造价为 14262 万元。

(2) DC 750 V 低碳钢接触轨方案

采用 DC 750 V 低碳钢接触轨方案, 正线上设 9 座牵引降压混合变电所, 设 4 座降压变电所。该方案变电所的单价与 DC 1500 V 架空接触网方案相同, 接触轨每公里造价按 103 万元计算, 系统中可比部分的造价为 14009 万元。

(3) DC 750 V 钢铝复合接触轨方案

钢铝复合接触轨是由不锈钢带, 通过机械方法, 与铝合金型材相结合制成的接触轨。其特点一是重量轻, 每延米重 14.75 kg; 二是电阻率低, 牵引网损耗小; 三是供电距离较长。

青岛地铁第一期工程, 采用 DC 750 V 钢铝复合接触轨方案, 正线上设 7 座牵引降压混合变电所(接触网方案为 6 座), 设 6 座降压变电所。钢铝接触轨每公里造价按 125 万元计算。系统中可比部分的造价为 13538 万元。

由此可见, 以设备投资而论, 架空接触网方案和低碳钢接触轨方案基本持平, 钢铝复合接触轨方案造价最低。

3. 供电可靠性比较

地铁每天运营 18 h, 必须保证不间断地供电。一旦供电中断, 就会造成地铁停运, 打乱城市交通秩序。因此, 安全可靠的供电是选择供电制式的重要条件。

(1) 架空接触网系统

柔性架空接触网结构复杂, 固定支持零部件较多, 所以薄弱环节也多。一旦某个零部件发生问题, 会引起滑触线脱落, 甚至发生刮弓等恶性事故。

另外, 架空接触网靠导线张力维持其工作状态, 经过多年磨损及电弧烧伤, 导线的截面会逐渐减小, 其强度也随之降低。加上导线材料的缺陷, 在拉锚装置及故障电流作用下, 极易发生滑触线断线事故, 造成地铁停运。

上述架空线事故, 国内几家地铁已发生多起。2001 年 7 月上海地铁 1 号线, 因架空线断线, 造成部分路段停运近 2 h。