

城市轨道交通系列丛书

城市轨道交通牵引供电系统

郑瞳炽 张明锐 主编

苏贵荣 主审



中国铁道出版社

城市轨道交通系列丛书

城市轨道交通牵引供电系统

郑瞳炽 张明锐 主编

苏贵荣 主审

中国铁道出版社

2003年·北京

(京)新登字 063 号

内 容 简 介

本书是《城市轨道交通系列丛书》之一。主要介绍城市轨道交通电力牵引供电系统的制式和组成,牵引变电所电气设备的原理、构造及技术参数,变电所的主结线图、控制和信号系统,接触网构成和有关器材,供电系统的运动技术和供电系统的设计等内容。

读者对象:从事电力牵引的工程技术人员、大专院校师生。

图书在版编目(CIP)数据

城市轨道交通牵引供电系统/郑瞳炽,张明锐主编.
北京:中国铁道出版社,2000.3
(城市轨道交通系列丛书/孙章,何宗华主编)
ISBN 7-113-03674-0

I. 城… II. ①郑…②张… III. 城市运输:轨道
运输-电力牵引-供电装置 IV. U264.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 13976 号

- 书 名: 城市轨道交通系列丛书
城市轨道交通牵引供电系统
- 作 者: 郑瞳炽 张明锐等
- 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)
- 策划编辑: 傅立彦
- 责任编辑: 傅立彦
- 封面设计: 陈东山
- 印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司
- 开 本: 850×1168 1/32 印张:4.875 字数:125千
- 版 本: 2000年4月第1版 2003年7月第3次印刷
- 印 数: 4001~6000册
- 书 号: ISBN 7-113-03674-0/U·1014
- 定 价: 12.00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,请与本社发行部调换

城市轨道交通系列丛书

主 编：孙 章

何宗华

Thomas Brodocz

Walter Christ

《城市轨道交通系列丛书》

序

世界上轨道交通很早就作为公共交通在城市中出现。随着科学技术和城市化的发展，大运量的轨道交通在现代大城市中越来越起着重要的作用。经济发达国家城市的交通发展历史告诉我们，只有采用大客运量的地铁和轻轨交通系统，才是从根本上改善城市公共交通状况的有效途径。

我国发展大运量轨道交通的历史也并不短，40年前北京就开始了地铁建设。想建地铁的城市也不少，但一直因造价太贵而却步。至今一些百万人以上的大城市，仍然用传统的公共汽车和无轨电车来维持客运的做法，已越来越不能满足城市居民高频率出行的需要。因而目前很多大城市又在考虑和策划修建轨道交通项目。除北京外，上海和广州都已经在建造现代化的地铁系统。北京、上海、天津、广州四城市虽已有地铁线路在运营，但远远不能较为普遍地满足需要。由于我国城市轨道交通的应用技术和基础理论都处于开拓阶段，项目实施的大多数情况是要引进技术和设备，国产化率低，成为工程造价昂贵的主要原因。因而提高我国城市轨道交通行业的技术力量，发挥自主建设能力，努力降低工程造价，已是健康发展大运量轨道交通的关键。

为此，我们组织了建设部和铁道部的有关专家，编写了这套《城市轨道交通系列丛书》，同时还与德国西门子股份公司技术集团进行合作，吸收了一些实用而先进的技术成果，分别按不同专业内容纳入这套丛书。

这套系列丛书以普及现代城市轨道交通基础理论、知识为目标，较为全面系统地阐述了城市轨道交通的发展历史和先进的技

术成果，同时也论述了不同类型轨道交通的系统特征、通用技术的适应范围、专业技术及其综合效应等。这套丛书可作为管理人员、专业技术人员和大专院校学生的基础理论知识读本，也可作为本行业专家学者在此基础上深化研究和促进技术发展的参考资料。

周干峙

* 周干峙 中国科学院院士、工程院院士、建设部顾问、原建设部副部长。

前 言

随着国民经济和科学技术以及城市的迅速发展，使人们越来越认识到采用大容量、无污染的快速轨道交通是解决大城市交通的有效方法。

我国发展城市快速轨道交通虽已有近 40 年的历史，但由于造价高等原因，至今只有北京、天津、上海和广州 4 个城市建有少量地铁线路，远不能满足交通的需要。

加快建设速度、降低建设成本，壮大技术队伍力量、普及基础理论知识和提高技术水平就成为当务之急。《城市轨道交通系列丛书》正是为此目的编写的。

电力牵引供电系统是城市轨道交通的重要组成部分，没有电力牵引供电系统的可靠安全供电，就不可能有城市轨道交通的正常运行。为此，必须对电力牵引供电系统有一个全面的了解。

本书为《城市轨道交通系列丛书》之一，主要介绍城市轨道交通电力牵引供电系统的有关知识，共分六章：

第一章综述城市轨道交通电力牵引的制式、电力牵引供电系统的组成、电力系统向牵引变电所供电的典型方式、直流牵引变电所的核心设备——整流装置的工作原理和直流电力牵引在轨道沿线造成的迷流腐蚀现象及其保护问题。

第二章介绍牵引变电所中主要电气设备的作用、工作原理、构造、主要技术参数以及分类等，还对配电装置的类型及要求做了介绍。

第三章介绍牵引变电所主结线图、变电所内的控制、信号回路、中央信号系统等。

第四章介绍牵引网的构成、接触悬挂的型式、接触悬挂的器材、结点和部件、接触网的供电与分段等。

第五章介绍应用于供电系统的远动技术。

第六章介绍牵引供电系统的设计和计算,包括牵引供电系统的有关电气参数及计算方法,列车牵引计算和运行曲线的概念,馈电线、接触网及牵引变电所的容量计算以及整个牵引供电系统的设计与技术经济比较问题。

本书的第一、六章为郑瞳炽编写,第二章由张明锐和于涤编写,第三章由张明锐编写,第四章由于涤编写,第五章由王为和于涤编写。全书由郑瞳炽主编统稿。

在本书编写过程中,张明锐同志作了大量工作,特此致谢!

作 者

1999 年

目 录

第一章 电力牵引供电系统综述	(1)
第一节 电力牵引的制式.....	(1)
第二节 电力牵引供电系统的组成.....	(4)
第三节 向牵引变电所供电的接线图.....	(7)
第四节 直流牵引变电所的整流装置	(10)
第五节 电力牵引轨道沿线的杂流腐蚀与保护问题	(18)
第二章 变电所的主要电气设备	(22)
第一节 概 述	(22)
第二节 变 压 器	(23)
第三节 高压开关设备	(28)
第四节 互 感 器	(37)
第五节 避雷装置	(40)
第六节 六氟化硫全封闭组合电器 (GIS)	(40)
第七节 配电装置的类型及对它的要求	(42)
第三章 牵引变电所	(44)
第一节 牵引变电所的类型及原理	(44)
第二节 电气主接线	(48)
第三节 变电所内的控制和信号电路	(65)
第四章 牵引网	(88)
第一节 概 述	(88)
第二节 架空式接触网的组成与结构	(93)

第三节	接触轨式接触网·····	(111)
第五章	远动系统·····	(115)
第一节	概 述·····	(115)
第二节	远动系统的功能·····	(120)
第三节	远动系统的硬件结构·····	(127)
第四节	远动系统的软件·····	(129)
第六章	牵引供电系统的设计与计算·····	(134)

第一章 电力牵引供电系统综述

第一节 电力牵引的制式

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：

一、起动加速性能

要求起动加速力大而且平稳，即恒定的大的起动力矩，便于列车快速平稳起动。

二、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。

三、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起动和调速方法看，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。这种方法实现是容易的，但在起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，则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 $16\frac{2}{3}$ Hz、12~15 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联接，再提高供电电压其联接就更复杂，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。

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，如日本等国家。

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 550~1500 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 1500 V 三种。后两种

为推荐值。我国国标也规定为 750 V 和 1500 V，不推荐现有的 600 V。

我国北京地铁采用的是 750 V 直流供电电压，上海地铁采用的是 1500 V 直流供电电压。目前我国许多大城市都在考虑建造快速轨道交通线路，选择 750 V 或者 1500 V 供电电压就成为一个重大问题，它涉及到供电系统的技术经济指标、供电质量、运输的客流密度、供电距离和车辆选型等等，必须根据各城市的具体条件和要求，综合论证决定。

最后还必须说明，由于大功率半导体整流元件（晶闸管）的出现，在直流制机动车辆上，采用以晶闸管为主体的快速电子开关（斩波器），可对直流串激牵引电动机进行调压调速，消除了用串联电阻起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机动车辆也将采用这种形式。不过，尽管机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。

第二节 电力牵引供电系统的组成

我国和大多数国家一样，电力生产由国家经营管理，因此无论是干线电气化铁路，还是工矿电力牵引和城市轨道交通电力牵引用电均由国家统一电网供给。

为了说明电力牵引供电系统各个组成部分的关系和作用，下

面以城市轨道交通直流电力牵引供电系统为例，用示意图 1-1 表示之。

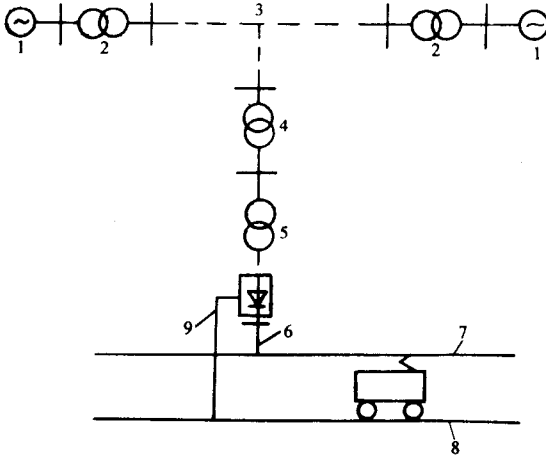


图 1-1 城市轨道交通电力牵引供电系统

1——发电厂（站）；2——升压变压器；3——电力网；4——主
降压变电站；5——直流牵引变电所；6——馈电线；7——接触
网；8——走行轨道；9——回流线。

生产电能的发电厂（站）由于它所利用的能源的不同，可以分为火力发电厂（用煤、油为燃料）、水力发电厂、原子能发电厂以及风力、地热、太阳能和潮汐发电厂等等。电厂可能与其用户相距甚远，为了能得到经济输电，必须将输电电压升高，以减少线路的电压损失和能量损耗，因此在发电厂的输出端接入升压变压器以提高输电电压。目前我国用得最普遍的输电电压等级为 110~220 kV。

通常国家供电系统总是把在同一个区域（或大区）的许多发电厂通过高压输电线和变电所联结起来成为一个大的统一的供电系统，向该区域的负荷供电，这样由各级电压输电线将发电厂、变电所和电力用户联结起来的一个发电、输电、变电、配电和用户

的统一体被称为电力系统。组成统一的电力系统有如下的一些优越性。

1. 可以充分利用动力资源。火力发电厂发出多少电能就需要相应地消耗多少燃料，而其他的某些类型发电厂，它能发出多少电能取决于当时该发电厂的动力资源情况，如水电站的水位高低，它随自然条件的变化而变化，因此，组成统一的电力系统以后，在任何时候，可以动态地调整各种动力资源，以求其发挥最大效益。

2. 减少燃料运输，降低发电成本。大容量火力发电厂所消耗的燃料是很可观的，如果不用高压远距离输电，则发电厂必然要建在负荷中心附近而不能建在燃料资源的生产地，这样就要大量运输燃料，造成发电成本升高。采用高压输电电力系统以后就可以解决以上问题，将发电厂建在动力资源丰富的地方。

3. 提高供电的可靠性。由于供电区域内的负荷是由多个发电厂组成的电力系统共同供电的，这样与单个发电厂独立向自己的负荷供电比较起来，对负荷的供电可靠性就可以提高很多，因为系统内发电厂之间可以起到互为后备的作用。与此同时，整个系统的发电设备容量也可以减少很多，降低了设备的投资费用。

4. 提高发电效率。没有组成电力系统之前，每个发电厂的容量是按照它的供电负荷大小来设计选择的，如果该地区负荷小，则发电设备单机容量必小。通常单机小容量的发电设备总是比大容量的设备运行效率低些，因此组成电力系统以后，不但各发电厂的单机容量可以尽可能选得大一些，以提高单机的运行效率，而且总机组数目也可减少，还不受各地区负荷大小的牵制，因为它们是由统一系统供电的，这就达到了提高发电效率的目的。

通常高压输电线到了各城市或工业区以后通过区域变电所(站)将电能转配或降低一个等级，如 $35\sim 10\text{ kV}$ 向附近各用电中心送电。城市轨道交通牵引用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，这取决于系统和城市

地方电网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，往往需要再设置一级主降压变电站，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。从管理的角度看，主降压变电站可以由电力系统（电业部门）直接管理，也可以归属于城市轨道交通部门管理。

以上，从发电厂（站）经升压、高压输电网、区域变电站至主降压变电站部分通常被称为牵引供电系统的“外部（或一次）供电系统”。

从主降压变电站（当它不属于电力部门时）及其以后部分统称为“牵引供电系统”。它应该包括：主降压变电站、直流牵引变电所、馈电线、接触网、走行轨及回流线等。直流牵引变电所将三相高压交流电变成适合电动车辆应用的低压直流电。馈电线是将牵引变电所的直流电送到接触网上。接触网是沿列车走行轨架的特殊供电线路，电动车辆通过其受流器与接触网的直接接触而获得电力。走行轨道构成牵引供电回路的一部分。回流线将轨道回流引向牵引变电所。

牵引供电系统各组成部分将在以后各章详尽讨论，这里不多加叙述。

第三节 向牵引变电所供电的接线图

由于交通运输的重要性，所有轨道的牵引供电都属于电力部门供电的一级负荷，即要确保向它供电的可靠性。为此，牵引变电所均由两个独立的电源供电。又由于轨道交通线路分布范围较广，通常需要在轨道沿线设置多个牵引变电所向它供电，再加上电源线路的具体分布情况不同，因此，造成向牵引变电所供电的形式复杂多样，但可以将它归纳成以下几种典型的形式。

1. 环行供电接线（图 1-2）