

城市轨道交通供电

李夏青 编著

西南交通大学出版社

·成都·

内容简介

本书系统地介绍了城市轨道交通供电系统的结构及工作原理,着重讨论了城市轨道交通供电工程中特殊问题的分析与解决方法。其主要内容包括:城市轨道交通供电系统外部电源获取,24脉波整流机组,直流断路器,直流牵引供电系统保护的原理与方法,隧道内牵引网阻抗分析计算,杂散电流的监测与防护,列车再生制动能量利用,牵引变电所容量计算,直流牵引网短路计算,现代信号处理方法在城市轨道交通牵引供电中的应用,以及牵引供电系统的稳定性分析等。

本书可作为高等学校电气工程及其自动化专业(城市轨道交通供电方向)本科生或研究生的专业教材,也可供城市轨道交通运营管理、工程设计、科学研究等相关人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

城市轨道交通供电 / 李夏青编著. —成都:西南交通大学出版社, 2016.6
ISBN 978-7-5643-4662-1

I. ①城... II. ①李... III. ①城市铁路 - 供电系统
IV. ①U239.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第085684号

城市轨道交通供电

李夏青 编著

责任编辑 宋彦博
封面设计 墨创文化

出版发行 西南交通大学出版社
(四川省成都市二环路北一段111号
西南交通大学创新大厦21楼)
发行部电话 028-87600564 028-87600533
邮政编码 610031
网 址 <http://www.xnjdcbs.com>

印 刷 四川五洲彩印有限责任公司
成品尺寸 185 mm×260 mm
印 张 10.25
字 数 255 千
版 次 2016年6月第1版
印 次 2016年6月第1次
书 号 ISBN 978-7-5643-4662-1
定 价 28.00 元

课件咨询电话:028-87600533

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

随着我国城市化进程的推进，越来越多的城市深受交通拥堵的困扰。为缓解城市交通所面临的巨大压力，许多城市正在或将要建设城市轨道交通系统。作为城市轨道交通的重要组成部分，城市轨道交通供电系统与众多工矿企业供电系统、干线电气化铁路供电系统有着较大区别，加之我国城市轨道交通事业发展很快，具有此类知识结构的人才相对较少，因此需要系统地介绍城市轨道交通供电方面的相关知识及技术。本书主要是为电气工程及其自动化专业（城市轨道交通供电方向）的本科生、研究生编写的专业教材，也可供城市轨道交通运营管理、工程设计、科学研究等相关人员参考。

本书共分为九章。第1章介绍城市轨道交通供电与电力系统的关系，以及牵引供电的发展历程。第2章介绍城市轨道交通供电系统的组成及外部电源的获取方式。第3章以设备单元为载体，分别阐述牵引变电所主接线、牵引整流机组的工作原理、直流断路器的灭弧原理与结构、接触网的类型与特点、杂散电流的产生与防治、电力监控系统的构成与功能。第4章则根据直流牵引网的运行特点介绍直流侧继电保护的配置、工作原理及整定配合原则。第5章、第6章介绍城市轨道交通牵引供电系统电气参数的设计、计算方法，牵引网短路故障的稳态、暂态分析方法，以及谐波分析。第7章介绍列车再生制动能量的利用。第8章、第9章是针对近年来直流牵引供电系统出现的异常现象，采用现代信号处理方法和非线性理论从不同侧面阐述其信号特征及产生机理。

本书参考了国内外有关城市轨道交通供电的著作和论文，并在书末列出了相关参考文献的目录，在此一并对其作者表示衷心感谢。

希望本书能对读者有所裨益，并恳请读者给予批评指正。

作 者

2016年1月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 城市轨道交通	1
1.2 电力系统与城市轨道交通供电系统	3
1.3 电力牵引制式	5
第 2 章 外部电源及供配电系统	8
2.1 外部电源	8
2.2 中压网络	15
2.3 动力照明供电系统	17
第 3 章 牵引供电系统	19
3.1 牵引变电所	19
3.2 牵引网	33
3.3 电力监控系统 SCADA	38
第 4 章 继电保护	48

4.1	针对正极对负极短路的保护	48
4.2	直流牵引网的双边联跳装置	51
4.3	针对正极对地短路的保护	51
4.4	针对异常工作状态的保护	52
4.5	保护配合	53
4.6	自动重合闸	54
第 5 章 牵引供电计算		55
5.1	平均运量法	56
5.2	运行图法	60
5.3	供电方案的技术经济分析	62
5.4	牵引供电系统谐波分析	62
第 6 章 牵引供电系统短路计算		75
6.1	交流侧阻抗计算	76
6.2	直流侧短路稳态值计算	81
6.3	直流侧短路暂态值计算	91
第 7 章 列车再生制动能量利用		99

7.1 列车的再生制动	99
7.2 储能装置的容量	101
7.3 超级电容储能系统	104
第 8 章 现代信号处理方法在牵引供电中的应用	108
8.1 牵引网的低频振荡电流	108
8.2 牵引电流的能量特征	109
8.3 牵引电流的波形特征	123
8.4 牵引电流的几何特征	129
第 9 章 牵引供电系统的稳定性分析	139
9.1 牵引供电系统及列车电传动模型	139
9.2 牵引供电全系统模型及定性分析	142
9.3 牵引供电全系统稳定性分析	144
参考文献	155

第1章 绪论

在人类把车辆作为交通工具之前，公众出行以步行为主，或以骑牲畜、乘轿等代步。车辆出现后，马车很快成为交通工具的主体。

城市的出现是人类走向成熟和文明的标志。城市交通由私人交通、城市公共交通和货物专业运输三部分组成。1819年，巴黎市街上首先出现了为城市公众租乘服务的公共马车，从此产生了城市公共交通。

城市公共交通指在城市及其郊区范围内，为方便公众出行，用客运工具进行旅客运输的交通方式。

目前的城市交通方式可分为多种类型，如图 1-1 所示。

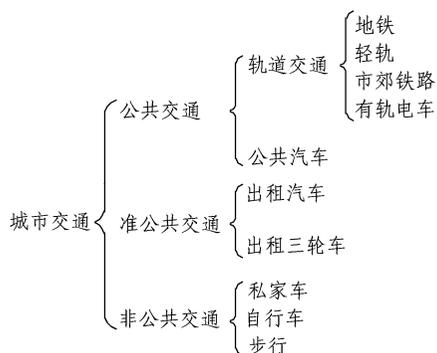


图 1-1 城市交通的分类

1.1 城市轨道交通

19 世纪中叶，英国伦敦街头的交通堵塞严重。一位名叫查尔斯·皮尔逊的律师看到一只老鼠在洞里跑来跑去，便提出一个让火车在地下跑起来的设想。1863 年，这一奇思妙想得以实现——在伦敦建成并开通了世界上第一条以蒸汽为动力的地下铁道，开创了城市轨道交通的新纪元。随后，世界各大城市纷纷建造地铁。这种速度快、不堵车、环保、舒适的交通工具深受大家喜爱。

城市轨道交通是指具有固定线路，铺设固定轨道，配备运输车辆及服务设施等的公共交通设施。“城市轨道交通”是一个涵盖范围较广的概念，在国际上没有统一的定义。一般而言，广义的城市轨道交通是以轨道运输方式为主要技术特征，是城市公共客运交通

系统中具有中等以上运量的轨道交通系统(有别于道路交通),主要为城市内(可涵盖郊区及城市圈范围)公共客运服务,是一种在城市公共客运交通中起骨干作用的现代化立体交通系统。

1. 城市轨道交通的主要作用

① 城市轨道交通是城市公共交通的主干线,是城市运送客流的大动脉,是城市的生命线工程。城市轨道交通建成运营后,将直接关系到城市居民的出行、工作、购物和生活。

② 城市轨道交通是世界公认的低能耗、少污染的“绿色交通”,是解决“城市病”的一把金钥匙,对于实现城市的可持续发展具有非常重要的意义。

③ 城市轨道交通是城市建设史上最大的公益性基础设施,将对城市的全局和发展模式产生深远的影响。为了建设生态城市,应把“摊大饼”式的城市发展模式改为“伸开的手掌形”模式,而手掌状城市发展的骨架就是城市轨道交通。城市轨道交通的建设可以带动城市沿轨道交通发展,促进城市繁荣,形成郊区卫星城和多个副中心,从而缓解城市中心人口密集、住房紧张、绿化面积小、空气污染严重等城市通病。

④ 城市轨道交通的建设与发展有利于提高市民出行的效率,改善市民的生活质量。众多国际知名的大都市,由于轨道交通十分发达,人们出行时很少乘坐私人车辆,而主要依靠地铁、轻轨等轨道交通,故城市交通秩序井然,市民出行方便、省时。

2. 城市轨道交通的技术特性

(1) 具有较大的运输能力

城市轨道交通因列车行车时间间隔短、行车速度快、列车编组辆数多而具有较大的运输能力。市郊铁道单向高峰每小时的运输能力最大可达到6万~8万人次;地铁达到3万~6万人次,有的甚至达到8万人次;轻轨能达到1万~3万人次,有轨电车能达到1万人次;城市轨道交通的运输能力远远超过公共汽车。据文献统计,地下铁道每千米线路年客运量可达100万人次,最高达到1200万人次,如莫斯科地铁、东京地铁、北京地铁等。城市轨道交通能在短时间内输送较大的客流。据统计,地铁在早高峰时1h能通过全日客流的17%~20%,3h能通过全日客流的31%。

(2) 具有较高的准时性

城市轨道交通列车由于在专用行车道上运行,不受其他交通工具干扰,不产生线路堵塞现象,并且不受气候影响,因此是全天候的交通工具,能按运行图运行,具有可信赖的准时性。

(3) 具有较高的速达性

与常规公共交通相比,城市轨道交通列车运行在专用行车道上,不受其他交通工具

干扰，因此有较高的运行速度，以及较高的起、制动加速度。加之多数车站采用高站台，列车停站时间短，乘客上下车迅速，而且换乘方便，因此城市轨道交通可以使乘客较快地到达目的地，缩短了出行时间。

(4) 具有较高的舒适性

与常规公共交通相比，城市轨道交通列车运行在不受其他交通工具干扰的线路上，具有较好的运行特性，加之车辆、车站等装有空调、引导装置、自动售票机等直接为乘客服务的设备，因此城市轨道交通具有较好的乘车条件，其舒适性优于公共电车、公共汽车。

(5) 具有较高的安全性

城市轨道交通列车运行在专用轨道上，没有平交道口，不受其他交通工具干扰，并且有先进的通信、信号设备，极少发生交通事故。

(6) 能充分利用地下和地上空间

大城市地面拥挤、土地费用昂贵。城市轨道交通由于充分利用了地下和地上空间，不占用地面街道，能有效缓解由于汽车大量发展而造成的道路拥挤、堵塞，有利于城市空间合理利用，特别有利于缓解大城市中心区过于拥挤的状态，提高了土地利用价值，并能改善城市景观。

(7) 系统运营费用较低

城市轨道交通由于主要采用电力牵引，而且轮轨摩擦阻力较小，因此与公共电车、公共汽车相比更节省能源，运营费用较低。

(8) 对环境的污染小

城市轨道交通由于采用电力牵引，与公共汽车相比不产生废气污染。城市轨道交通的发展，还能减少公共汽车的数量，进一步减少了汽车的废气污染。由于在线路和车辆上采用了各种降噪措施，城市轨道交通一般不会对城市环境产生严重的噪声污染。

1.2 电力系统与城市轨道交通供电系统

为了说明城市轨道交通供电系统各个组成部分的关系和作用，下面以图 1-1 为例介绍电力系统与城市轨道交通供电系统的构成和作用。

1.2.1 电力系统

电力系统是由发电、变电、输电、配电和用电等环节组成的电能生产与消费系统。它

的功能是将自然界的一次能源通过发电动力装置转化成电能，再经输、变电系统及配电系统将电能供应到各负荷中心，最后通过各种设备转换成动力、热、光等不同形式的能量，为地区经济和人民生活服务。

生产电能的发电厂（站）由于它所利用的一次能源的不同，可以分为火力发电厂（以煤、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。

由于电源点与负荷中心多数处于不同地区，且电能无法大量储存，故其生产、输送、分配和消费都在同一时间内完成，并在同一地域内有机地组成一个整体，使电能的生产与消费时刻保持平衡。因此，电能的集中开发与分散使用，以及电能的连续供应与负荷的随机变化，就制约了电力系统的结构和运行。为了实现经济输电，必须将输电电压升高，以减少输电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，我国的输电电压等级为 110 kV、220 kV、330 kV、500 kV、750 kV；也有采用超高压直流输电方式将电能从发电厂输送到负荷中心区域的，如葛洲坝至上海的 ± 500 kV 直流输电。

为了提高供电的可靠性、经济性，需要将多个电厂合理地连接起来，构成输、配电网，这样就构成了大型的电力系统。建立结构合理的大型电力系统有如下优点：

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，而其他类型的发电厂，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，各类电厂组成统一的电力系统以后，可以在任何时候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，如果不采用高压远距离输电，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，这样就要运输大量燃料，造成发电成本升高。采用高压输电电力系统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统一供电，这样与单个发电厂独立向某些负荷供电比较起来，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小很多，降低了设备的投资费用。

④ 提高发电效率。在组成电力系统之前，每个发电厂的容量是按照它的供电负荷大小来设计的，如果该地区负荷小，则发电设备单机容量就小。通常单机容量小的发电设备总是比容量大的设备的运行效率低些，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，这样就达到了提高发电效率的目的。

1.2.2 城市轨道交通供电系统

通常高压输电的电能到了各城市或工业区以后将被区域变电所(站)转配或降低一个等级(如35 kV或10 kV),然后向附近各用电中心送电。城市轨道交通供电系统的电源一般由城市电网供给,它既可以从电力系统的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,这取决于电力系统和城市电网的结构。

城市轨道交通供电系统由主变电所或电力系统的区域变电所、中压配电网(简称“中压网络”)、牵引变电所、牵引网、降压变电所组成,如图1-2所示。

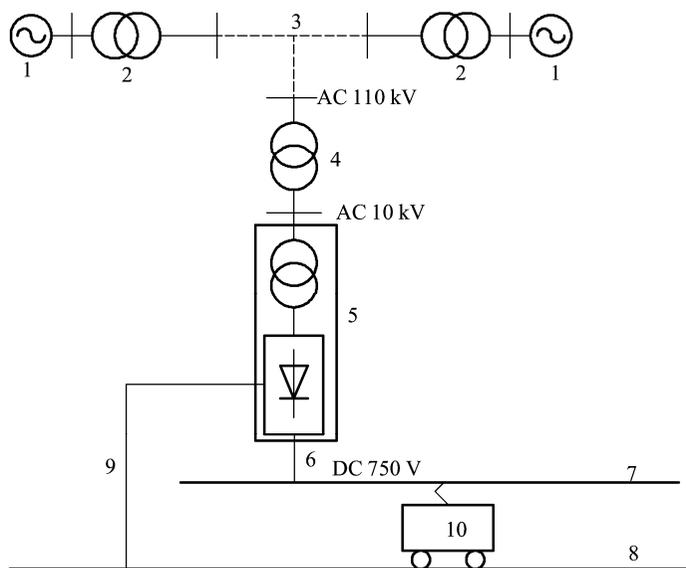


图 1-2 电力系统与城市轨道交通供电系统

- 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(第三轨); 8—走行轨道; 9—回流线; 10—列车

城市轨道交通供电系统通常被划分为外部电源系统、牵引供电系统和动力照明供电系统。

外部电源系统是连接城市电网与城市轨道交通内部电网的纽带,为牵引或降压变电所输送电力。根据城市轨道交通供电系统从城市电网取得电能形式的不同,一般称主变电所或电力系统的区域变电所为外部电源系统。

牵引供电系统由牵引变电所和牵引网组成。牵引变电所将三相交流电降压、整流后,向在城市轨道交通线路上运行的列车供电。

动力照明供电系统由降压变电所、低压母线排、配电设备、线缆、用电设备等组成,负责向城市轨道交通系统的车站、区间、车辆段、控制中心等设施、机构输送电力。

1.3 电力牵引制式

为了便于理解电力牵引制式的变化和发展原因，首先介绍一下列车的运行特点及对牵引动力设备的基本要求。

① 要求列车平稳且较快地起动力矩，即要求牵引动力设备具有恒定的、大的起动力矩，以便于列车快速平稳起动。

② 因为列车的牵引力与运行速度的乘积为其功率容量，所以为充分利用列车牵引动力设备的功率容量，在列车轻载时，运行速度可以高一些，而在列车重载时运行速度可以低一些。无论列车重载或轻载，均应使列车牵引动力设备的容量得到充分利用。

③ 列车运行，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，同时还希望调速的便捷性好。

基于对列车牵引特性的基本要求，不难看出，直流串激电动机的起动和调速方法比较容易实现。而且，直流串激电动机的机械特性（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。所以，早期电力牵引的轨道交通系统均采用直流串激电动机作为牵引动力设备。

为了避免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。这种方法是容易实现的，但在起动和调速过程中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”产生的原因。

随着列车需要的功率越来越大，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，必须提高供电电流，导致供电系统的电压损失和能量损耗增大，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，到了列车上再经车载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是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。“低频”单相交流制的供电频率有 25 Hz 和 $16\frac{2}{3}$ Hz 两种。由于低频电源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，使供电系统复杂化，因此没有得到广泛应用，只在少数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，又保留了采用直流串激电动机作为牵引电动机的优点。这种牵引供电方式是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。

在牵引制式的发展过程中也曾出现过“三相交流制”，但由于其牵引网比较复杂，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，且两根架空接触线之间还要高压绝缘，从而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 供电需要将两台电动机串联连接。若再提高供电电压，电动机连接就更加复杂，还涉及当时整流装置绝缘水平的问题，所以未被推广。这种制式仅在原苏联和东欧一些国家有应用。

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。由于交流电机调速困难等历史原因，还由于直流电路没有电抗压降，因此直流制比交流制的电压损失小（同样电压等级下）。另外，由于城市轨道交通的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等历史原因，世界各国城市轨道交通的供电电压都在直流 500 ~ 1 500 V，但其档级很多，这是由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。我国国标规定的电压标准为 750 V 和 1 500 V。

我国北京地铁采用的是直流 750 V 和 1 500 V 供电电压，上海地铁采用的是直流 1 500 V 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，选择供电电压就成为一个重大问题，它涉及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问题，必须根据各城市的具体条件和要求，综合论证决定。

随着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（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问题，这种方法给直流制增添了新的生命力。

近年来，随着 GTO、IGBT 等高速可关断器件的出现，采用 PWM 技术组成逆变器，不但可将直流电逆变成三相交流电，而且频率可以调节，这样就实现了多年来人们想采用结构简单、结实耐用的鼠笼式异步电动机作为牵引电动机的愿望。用变频率、调电压的方法改变异步电动机的转速（简称 VVVF），可使异步牵引电动机的性能满足牵引列车的要求。不过，尽管电动车辆上采用的是交流异步牵引电动机，但其牵引网输送的还是直流电，所以仍然属于直流制式的范畴。

本书将围绕城市轨道交通供电系统的结构及工作原理，讨论城市轨道交通供电工程中特殊问题的分析与解决方法。

