

21

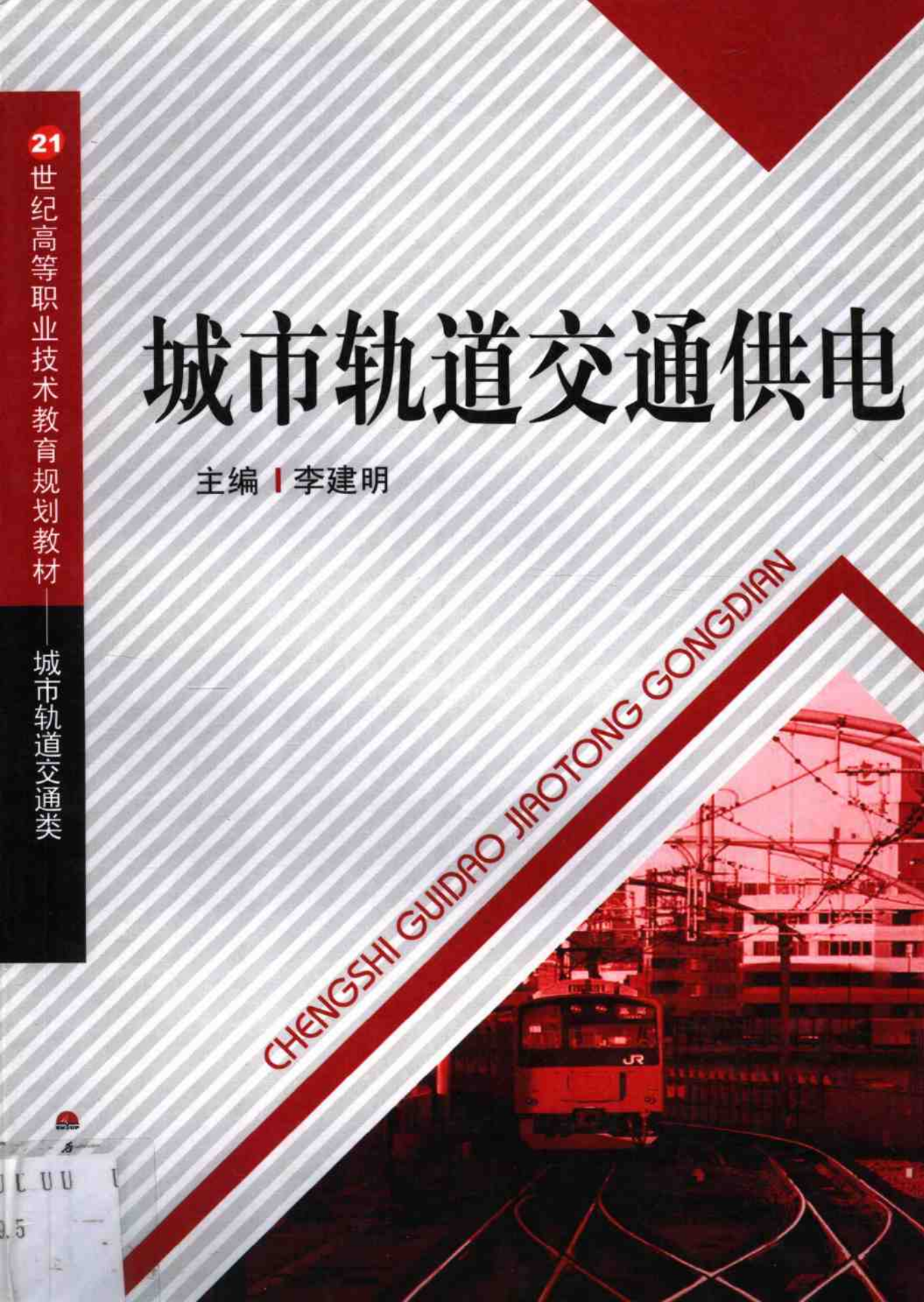
世纪高等职业技术教育规划教材

城市轨道交通类

城市轨道交通供电

主编 | 李建明

CHENGSHI GUIDAO JIAOTONG GONGDIAN



U U U U U U 1

U239.5

20

21 世纪高等职业技术教育规划教材——城市轨道交通类

城市轨道交通供电

主编 李建民

西南交通大学出版社

·成都·

图书在版编目 (CIP) 数据

城市轨道交通供电 / 李建民主编. —成都: 西南交通大学出版社, 2007.9

21 世纪高等职业技术教育规划教材. 城市轨道交通类
ISBN 978-7-81104-621-2

I. 城… II. 李… III. 城市铁路—电力系统—高等学校: 技术学校—教材 IV. U239.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 153376 号

21 世纪高等职业技术教育规划教材——城市轨道交通类

城市轨道交通供电

主编 李建民

责任编辑 唐 晴

封面设计 本格设计

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

四川森林印务有限责任公司印刷

*

成品尺寸: 185 mm × 260 mm 印张: 21.5

字数: 535 千字

2007 年 9 月第 1 版 2007 年 9 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-81104-621-2

定价: 32.00 元

图书如有印装问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

本书是顺应快速发展的城市轨道交通对相关供电专业人才需求的形势而组织编写的，以“理论适度，注重实际，有机整合，适当综合”为编写原则，以满足高职高专城市轨道交通专业（侧重于供电）的培养要求为目标。

该教材针对城市轨道交通供电系统的特点，介绍了基础理论知识、常见设备、系统结构、设备及系统运行等方面的内容。基本上涵盖了目前城市轨道交通供电系统的知识，反映了其技术和设备的状况。本书为读者能够尽快掌握城市轨道交通供电的相关知识，提供了较为系统而必要的参考知识，并为使读者能系统地学习相关知识，做了一些尝试，提供了一个较为全面的读本。其知识结构体系是：第一章介绍了高压技术的基础知识，在此基础上于第二章介绍城市轨道交通供电系统常用的高压设备；第三章重点讲解了城市轨道交通供电系统的变压器及整流设备；第四章主要讲解了接地技术；第五章介绍了继电保护基础知识以及城市轨道交通特殊保护设备。第六章主要介绍城市轨道交通供电系统变电所的相关知识。第七章主要讲解了城市轨道交通供电系统安全防护系统的相关知识。第八章介绍了城市轨道交通供电系统中常用电缆的一些基础知识。

本书可以作为大中专学校供电类专业学生和教师的教材或参考书，也可以作为从事轨道交通事业供电工作的相关技术人员和管理人员的普及读本。除此之外，也可以作为城市轨道交通系统电力供电相关专业的培训教材。本书适用于 140 个教学学时，教师可以根据需要自由组合。

本书由郑州铁路职业技术学院李建民副教授主编，其中，郑州铁路职业技术学院高级实验师王成有老师编写了第五章的第二节和第三节，郑州铁路职业技术学院李学武老师编写了第四章中的第四节和第五节，其余的所有章节由李建民编写。

在编写本书的过程中，得到了铁道部第四勘测设计院尹传贵高级工程师、天津地铁公司副总经理侯树民的帮助和大力支持。在前期的准备阶段，我们在上海地铁、深圳地铁、重庆地铁进行了参观学习，也得到了他们的大力支持，在此深表感谢。广州铁路职业技术学院的王亚妮也在编写前期提出了中肯的意见，在此，一并表示感谢！

由于编者水平所限，书中疏漏在所难免，所以诚恳地希望广大读者提出宝贵意见。

编 者

2007 年 1 月

目 录

绪 论	1
第一章 高压技术基础	4
第一节 气体放电理论	4
第二节 不均匀电场中气体放电	6
第三节 大气条件对空气间隙击穿电压的影响	9
第四节 提高气体间隙击穿电压的方法	10
第五节 介质的极化和介电常数	13
第六节 电介质中电导和损耗	16
第七节 固体绝缘介质的击穿	19
第八节 液体介质的击穿	23
第九节 高压测试技术基本知识	25
第十节 绝缘电阻的测量	27
第十一节 测定泄漏电流	30
第十二节 测定介质损失角正切 $\tan\delta$	33
第十三节 耐压实验	36
第十四节 波动过程	39
第十五节 行波的折射与反射	42
第十六节 行波过电容、电感	45
本章小结	48
复习思考题	48
第二章 城市轨道交通供电系统高压电器设备	49
第一节 断路器	49
第二节 隔离开关和熔断器	56
第三节 负荷开关和直流开关	59
第四节 互感器	60
第五节 高压开关柜	64
第六节 六氟化硫全封闭组合电器	70
第七节 绝缘子	76
第八节 绝缘子运行分析	78
第九节 绝缘子的保养方法和测试	82
本章小结	86
复习思考题	86

第三章 变压器及整流原理	87
第一节 变压器基础知识.....	87
第二节 变压器的极性和组别.....	92
第三节 城市轨道交通供电系统干式变压器.....	95
第四节 电力变压器继电保护.....	101
第五节 整流原理.....	107
第六节 牵引供电系统整流原理.....	113
第七节 整流器功率因数.....	119
第八节 城市轨道交通供电系统变压器和整流器的技术要求及选择.....	123
第九节 变压器运行与维护.....	127
本章小结.....	133
复习思考题.....	133
第四章 城市轨道交通供电接地系统	134
第一节 电气接地.....	134
第二节 接地装置的电阻选择及维护.....	141
第三节 城市轨道交通供电系统接地原则及构成.....	143
第四节 杂散电流的形成与危害.....	147
第五节 杂散电流腐蚀的监测与防护.....	149
第六节 框架泄漏保护设置及钢轨电位限制装置的设置.....	154
本章小结.....	157
复习思考题.....	157
第五章 城市轨道交通供电系统继电保护	158
第一节 继电保护的意義.....	158
第二节 电磁型继电器.....	161
第三节 瓦斯继电器.....	176
第四节 几种常用的继电保护分析.....	178
第五节 直流牵引供电系统的保护原理.....	188
第六节 城市轨道交通牵引供电系统继电保护的配置.....	190
第七节 微机保护及综合自动化介绍.....	195
第八节 微机保护装置的功能及硬件结构.....	198
第九节 数据采集系统实例.....	203
本章小结.....	211
复习思考题.....	211
第六章 城市轨道交通供电系统变电所及其运行	213
第一节 电力牵引制式和城市轨道交通供电系统设计原则.....	213
第二节 电气主接线.....	216
第三节 城市轨道交通供电系统变电所.....	222

第四节	整流机组的输入和输出	234
第五节	城市轨道交通供电系统谐波影响分析	239
第六节	变电所内的控制和信号电路	243
第七节	交、直流自用电系统	258
第八节	二次回路及微机综合测控要求	260
第九节	变电所无人值班的具体措施	264
第十节	主要设备选择及布置	267
第十一节	变电所的生产房屋	270
	本章小结	273
	复习思考题	273
第七章	城市轨道交通供电系统防雷	275
第一节	过电压	275
第二节	雷电参数	278
第三节	雷电冲击电压下气隙的击穿特性	280
第四节	防雷设备	282
第五节	金属氧化物避雷器的运行分析和预防性试验	291
第六节	城市轨道交通供电系统过电压及防雷设计	295
第七节	变电所的防雷保护措施	299
第八节	变压器的防雷分析	302
第九节	变压器防雷保护的具体措施	307
	本章小结	308
	复习思考题	309
第八章	城市轨道交通供电系统电力电缆	310
第一节	城市轨道交通供电系统常用电力电缆的特点及结构	310
第二节	电力电缆故障及检测	315
第三节	电力故障的探测	318
第四节	城市轨道交通供电系统常用电缆技术标准	325
第五节	电缆的运行与维护	331
	本章小结	335
	复习思考题	335
	参考文献	336

绪 论

一、城市轨道交通的种类

城市轨道交通系统包括地下铁路、市郊铁路、轻轨交通、磁悬浮系统，它是一个立体的交通体系，其共性是：电力牵引，通常采用封闭的专用线路，自动化控制水平高，运输能力强。

1. 地下铁路

地下铁路又称重型地铁，采用标准轨距 1 435 mm。最高时速 80~100 km/h，平均时速 30~40 km/h；受电方式 DC 1 500 V 或 750 V，采用架空线或第三轨受电；行车间隔 90~120 s，行车密度高；断面客流 4~8 万人/h，线路形态以隧道为主。施工方式：一是采用浅埋式，当轨面距地面的高度差小于 20 m 时，采用明挖法，方便施工机械及人员出入，但施工时须注意对其他管线建筑的影响；二是深埋式，轨面距离地面的高度差一般大于 20 m，采用暗挖法，对管线、建筑影响较小。

2. 市郊铁路

与普通铁路类似，只不过行车密度较大，自动化控制水平较高。它主要用来满足远郊卫星城市、旅游景区、大型住宅区的客流要求，用于拓展市内交通的服务区。但其启动加速高于普通铁路，运行速度最高可达 100 km/h，采用电动车组，站间距离从 5 km 到几十千米不等。市郊铁路分为环城铁路和远郊铁路。

3. 轻轨交通

轻轨并非指轻型钢轨，而是一种电力驱动的城市轨道交通系统。它造价较低，约 1 亿元/km，仅为地铁的 1/5~1/7，断面客流 3~4 万人/h。一般采用全封闭专用线路形态，以保证车辆运行的安全和快速准时。它包括有轨电车、单轨交通系统和新交通系统。

钢轮、钢轨系统新型有轨电车是 20 世纪 60~70 年代在有轨电车的基础上发展起来的，特点是 70% 低地板（低地板部分离地面只有 350 mm，方便小孩和残疾人乘车）、弹性车轮减振、VVVF 调速控制（variable voltage variable frequency）。它利用晶闸管及微机控制技术，将直流电压转换成电压可变的三相交流电源，给交流牵引电动机供电，通过调节交流牵引电动机的端电压和频率来调节转速，以达到控制车辆速度的目的。交流电动机调速系统被公认为近代最先进的牵引调速系统，它的调速性能好、损耗较小。乘客定员 300 人，最大时速可达 80 km/h。单轨交通系统采用高架线路形态，机车车辆和线路的关系有跨座式和悬挂式两种。目前，日本投入运营的跨座式单轨交通有 7 条，悬挂式单轨交通有 3 条。重庆轻轨交通

采用高架跨坐式，单向断面客流为 1~5 万人/h。单轨交通的车辆编组和行车密度根据客流量确定。新交通系统与独轨相似，单向断面客流为 5 000~15 000 人/h，有专用车道，但没有轨道，也没有钢轨，车下受电，完全由计算机控制。日本运营 10 条这样的线路，总长 84 km，噪音较小。新交通系统设置导轨系统，分为侧面导向式和中央导向。新交通系统的车辆车轮采用橡胶轮，无须人工驾驶。

4. 磁悬浮系统

磁悬浮 (magnetic levitation maglev) 是当今世界最新的地面交通运输技术，它彻底摆脱了轮轨关系的束缚，能量损耗小、噪声低。其安全性是飞机的 20 倍、公路系统的 700 倍、轮轨列车的 250 倍。对距离为 1 000 km 以上的行程，能发挥高速运行的优势。磁悬浮铁路适宜高速穿梭于机场与市中心之间或作为城际列车之用，为城市群的协调共同发展创造良好的交通条件。

二、城市轨道交通的特点

城市轨道交通有利于保护环境，采用电力牵引和大运量集约化运输，不污染，能耗小，被誉为绿色交通；城市轨道交通占地少，充分利用了城市的地下空间；城市轨道交通的运量大，断面客流每小时高达几万人（地铁 4~5 万人/h，轻轨 1~3 万人/h），而公共汽车只有 1 800 人/h；城市轨道交通速度快，平均时速为 50 km/h，较公共汽车快 1 倍；城市轨道交通舒适性佳，候车、检票、售票、乘车等环境方面质量好，且候车时间少，安全准时。现代化地铁列车与车站均有空气调节装置，能使温度与湿度保持在最舒适的范围内；城市轨道交通可靠性强、相对封闭，受环境影响少，也不受其他交通的影响。

三、城市轨道交通的作用

城市的发展大多经历自由村落→都市→城市带→城市圈→城市群的过程。在这个发展过程中，交通起着很重要的作用。当城市交通满足要求、适应发展需要时，这个发展过程就会加速，否则就会受滞。轨道交通是城市的血脉，也是现代化城市的主要资源之一，它已和土地资源、人力资源、文化资源、环境资源等一起成为现代化城市的主要资源。

城市轨道交通是现代化城市框架的支撑。在城市发展中不再是追随者，而是引导者，甚至在某种程度上引导着城市的发展方向。它不仅可以优化城市的结构，还可以调整城市的布局和功能，有利于文化中心、经济中心、政治中心、工业中心、生活中心科学地建设与形成。它还有利于周边中小城市的发展，使得城市发展由“摊饼式”向“五指式”或“组团式”方向发展，有利于建设和谐的生态城市。

城市轨道交通系统的水平直接体现了一个城市的现代化水平，是现代化城市的主要标志之一。城市轨道交通可以极大地发散中心城市、区域性城市的辐射带动作用，带动一省甚至某一区域的经济的发展，它是城市带—城市圈—城市群的组合纽带。

城市轨道交通可以解决城市中心的交通拥挤问题，为进一步优化多种交通形式提供支持。其带动效益明显、社会效益显著，可以增强城市的吸引力，增加就业岗位，同时促进相

应专业技术的发展；它还会促进城市化进程，拉大城市框架，增强辐射力。在当前以中心城市为热核，大力发展区域经济的模式，为城市轨道交通的发展提供了机遇。

根据有关资料显示，目前我国城市轨道交通的发展迅速，前景广阔。北京、上海、广州、天津等 10 多个城市，将陆续投资 8 000 亿元资金建设 450 km 的城市轨道交通，此外，还有全国 20 个城市正在规划、筹建地铁与轻轨。

四、城市轨道交通供电系统

城市轨道交通系统无论形式如何，都有一个共同的特点，那就是全部采用电力牵引，而且采用封闭的专用线路，自动化控制水平高，运输能力强。因此建立一个安全、可靠、经济的城市轨道交通供电系统就显得尤为重要。

城市轨道交通供电系统是城市轨道交通的能源补给线，它的安全、可靠运行应被放在第一位，它对城市轨道交通的影响是全面的。一旦供电系统出现问题，将会导致城市轨道交通的混乱和瘫痪。因而，目前的设计者多采用集中供电模式，建有独立的 SCADA 系统，以提高安全性、可靠性。

城市轨道交通供电系统的电源一般取自国家电力系统供电系统，主要由以下三部分构成：中压环网供电系统、牵引供电系统和动力照明供电系统。

1. 中压环网供电系统

城市轨道交通电力的能量来源于所在城市的国家电力系统，直接取自城市或区域电力网。城市轨道交通中压环网供电系统就是指国家电网向城市轨道交通系统供电的方式。因此，城市电网或区域电网的结构对城市轨道交通供电系统起着决定作用。

2. 牵引供电系统

它是城市轨道交通供电系统的核心，负责向轨道交通车辆提供电能的任务。其主要作用是降压、整流和传输电能。

3. 动力照明信号供电系统

它负责向信号设备、照明、通风、排水、制冷设备馈送电能。其主要作用是降压、分配和传输电能。

城市轨道交通供电属于一级供电负荷，一旦中断，将打乱运输计划和机车车辆运行图，影响城市轨道交通的环控系统、照明系统等的运行，会造成很大的社会影响。特别考虑到城市轨道交通大都处在我国重要城市，是国家或某一区域的政治、经济、文化中心，其影响更是不可估量。因而，建设一个安全、灵活、经济、可靠的城市轨道交通供电系统，对城市轨道交通有着极为重要的意义。

第一章 高压技术基础

第一节 气体放电理论

一、气体原子的激发与游离

气体原子在接受外界能量时，会引起内能的改变，即引起气体原子激发。气体原子可以通过不同方式由外界获得能量，而能否引起激发与游离，则取决于气体本身。依照原子结构模型，原子中有一带正电的核，周围有若干电子沿一定轨道绕核旋转。当各电子位于离原子核最近的轨道上时，原子具有最小的位能（正常状态的原子即有最小的位能）。当原子由外界获得能量时，其电子可跃至能级较高的轨道，称此过程为激发，此时该原子为激发态原子。如果由外部获得的能量足够大，以致使原子的一个或几个电子脱离原子核之束缚而成为自由电子与正离子（即带电质点），称此过程为原子的游离。

二、气体带电质点的产生和消失

1. 碰撞游离

在电场作用下，带电的质点（电子或离子）得到加速，并与气体分子相碰撞，当其能量足够时，可使气体分子游离。此时气体的游离，主要是电子与气体分子碰撞而引起。因为电子质量小，自由行程（质点无碰撞走过的距离）大，易于积累能量。

2. 光游离

光辐射引起气体分子游离的过程称光游离。光是频率不同的电磁辐射，也具有粒子性，可视为质点，称为光子。（光子的速度为光速 3×10^6 km/s）。导致气体光游离的光子可由紫外线、宇宙射线，或 X 射线等供给，或来自气体放电过程本身的辐射，如激发的原子回到正常状态时，将放出激发能。

3. 热游离

热游离是指由气体热状态引起的游离过程，一般是在电弧放电的数千度高温下发生的。

4. 负离子的形成

在气体中，游离而产生电子、正离子的同时，还可能产生一种带负电的离子，称为负离子。它是由于电子与气体分子相遇时被分子吸附形成的。易形成负离子的气体，称为电负性

气体。由于负离子不易形成游离，故负离子对放电起着阻碍的作用。

在气体内部发生放电的同时，有游离过程的发生，同时也有相反的过程。带电质点的消失过程，除其一部分消失于电极外，还可通过扩散与复合消失。

(1) 扩散。当气体中带电质点分布不均匀时，则会由其浓度高处向浓度低处移动，使其均匀。这种运动是由热运动造成，与气体扩散规律相似，与气体状态（压力、温度）有关。

(2) 复合。正负带电质点相遇，电荷彼此中和变为中性分子的过程称复合。在一定条件下，复合过程中也会发生光游离。

正负离子间复合的可能性比正离子与电子间复合的可能性要大，另外在一定空间内带电质点的复合速度还与其浓度有关，正负离子浓度愈大，复合过程的速度就愈大，即带电质点消失的速度也愈大。

三、气体放电的基本过程

通常情况下，气体是一种良好的绝缘体，但当外界条件发生变化后，或者当作用的电压足够大时，气体也会产生大量的电荷，由绝缘体变成导体。

1. 自持放电和非自持放电

(1) 非自持放电。当外界游离因素消失时，放电就消失。外界游离因素包括碰撞游离、光游离、热游离等。

(2) 自持放电。即使当外界游离因素消失时，间隙放电仅在电场的作用下就能够继续下去。如我们常见的日光灯就是一种自持放电，而经常在高压线路上看到的电晕放电也是自持放电。

2. 汤逊理论

气体施压过程中电压与电流的关系如图 1.1 所示。较均匀电场的空气的击穿场强约为 30 kV/cm 。图中， Oa 段，由于外部游离因素的作用，带电质点不断增加，电流随所加电压的升高而增多； ab 段，此时单位时间内的带电质点数不变，电流几乎不变； bc 段，电流急剧增加，此时在间隙中，必然出现了新的游离因素，即电子的碰撞游离； c 点之后气体进入良好的导电状态。解释气体放电的主要观点：一个是电子崩，另一个是正离子撞击阴极表面释放自由电子。电子崩是汤逊理论的核心。电子崩产生大量的自由电荷，使良好的绝缘气体变成了可以导电的导体。碰撞游离是气隙击穿的主要原因。其次汤逊用正离子碰撞阴极材料释放自由电子来解释自持放电。正是由于阳极材料在正离子的碰撞作用下，不断地释放自由电子，才使电子崩能够不断地持续下去。

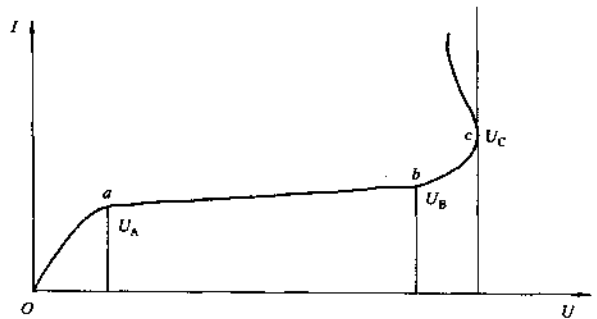


图 1.1 气体施压过程电压-电流关系

描述撞击游离和阴极表面游离性能，采用游离系数。

(1) 电子撞击游离系数 α 。表示 1 个电子由阴极到阳极每 1 cm 路程中与气体质点相撞击所产生的自由电子数。

(2) 正离子撞击游离系数 β 。表示 1 个正离子由阳极到阴极每 1 cm 路程中与气体质点相撞击所产生的自由电子数。

(3) 表面游离系数 γ 。表示 1 个正离子撞击到阴极表面时使阴极逸出的自由电子数。

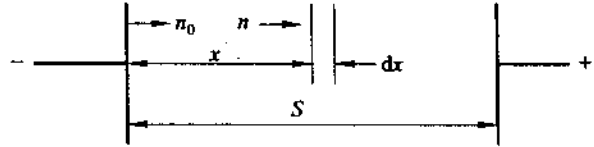


图 1.2 电子崩过程

电子崩过程如图 1.2 所示。在平行板电极均匀电场中, 设最初从阴极表面游离

出 1 个初始自由电子 (由外界因素形成), 即 $n_0=1$ 。此电子在电场作用下向阳极运动, 不断撞击游离, 到 x 处时游离出的总电子数为 n , 这些电子继续运动 dx 距离, 游离出 dn 个电子。

$$dn = \alpha \cdot n \cdot dx \quad (1.1)$$

即 $x=0$ 处, $n=n_0=1$

$x=S$ 处, $n=n_a$

边界条件 $dn = \alpha \cdot n \cdot dx \quad (1.2)$

$$dn/n = \alpha \cdot dx$$

两边积分 $n = e^{\alpha x} \quad (1.3)$

α 与 x 无关 (各处场强相等), 且 $n_{(x=0)} = n_0$, 所以

$$n = n_0 \cdot e^{\alpha x} = e^{\alpha x}$$

一个自由电子由阴极到达阳极时, 撞击出的自由电子数: $na = e^{\alpha S}$, 撞击游离产生的正离子数 (新电子数) $n+S = e^{\alpha S} - 1$ 正离子撞击阴极表面游离出的新的自由电子数: $(e^{\alpha S} - 1) \cdot \gamma$, 所以

$$(e^{\alpha S} - 1) \cdot \gamma \geq 1 \quad (1.4)$$

是自持放电的条件, 也就是说当满足这个条件后, 不需要外界游离因素的存在就可致气隙击穿。

汤逊理论适用于解释低气压、小间隙中的放电现象 (比较均匀的电场), 但用于解释大气放电现象时, 与实际不符, 表现如下: 按此理论计算出来的放电时间太长, 比实测大 10~100 倍; 按此理论阴极材料与放电关系非常大, 而实际放电电压与阴极材料几乎无关; 按此理论, 放电应均匀向前发展, 而实际上会出现明亮的分支, 说明是不均匀的, 而且有明显的方向性。

第二节 不均匀电场中气体放电

电力工程的大多数结构中, 电场都是不均匀的。因此必须研究不均匀电场中气体放电的规律。

一、不均匀电场中气体放电的基本规律

在电场不均匀的间隙中，最大场强 E_{\max} 通常出现在曲率半径小的电极表面附近。其他条件相同时，电极曲率半径愈小， E_{\max} 愈大，电场愈不均匀。

在球隙间隙形成的对称电场中，随球隙间隙距离的增大，电场的均匀程度增加，最后将达到这样一个程度：当 E_{\max} 已达到自持放电条件，但其他区域的场强仍很低，使自持放电只能局限在间隙中场强最大的部分（曲率半径小的电极附近），即“电晕放电”。此时，整个间隙尚未击穿。若要使间隙击穿，必须继续提高电压。通常，此类电场为“极不均匀电场”。极不均匀电场的特征：能够出现稳定电晕，电晕起始电场低于击穿电压。稍不均匀电场的特征：不均匀程度较小，不能出现稳定的电晕。

在极不均匀电场中，最大场强与平均场强相差很大，当外加电压和平均场强还较低时，在电极尖端附近的局部场强已很大，足以产生强烈的游离。但由于电极较远处的场强仍很小，所以次游离不能扩展。伴随着游离过程，存在着正负离子的复合和反激励，发出大量的光辐射和“丝丝”的声音以及蓝色的晕光，这就是电晕。电晕是有很多危害的，它有声、光的产生和能量的损耗；产生的高频脉冲电流含有许多高次谐波，造成对无线电干扰；使空气局部游离，产生的臭氧和氧化氮等会腐蚀金属器具。但也可以利用电晕进行除尘，以及制造负氧离子发生器。

二、极不均匀电场中放电的发展过程（以棒-板间隙为例）

1. 短间隙

逐步升高加在间隙上的电压，将首先在电场最大的棒端部出现电晕。电晕有两种形式，一种是电子崩式：当棒端部曲率半径很小时，电晕开始时表面高场强区很窄，所以电晕层很薄，且较均匀，自持放电采取汤逊放电的形式。另一种是流注式：随电压的升高，电晕层不断扩大，个别电子崩，形成流注，即转入流注式电晕放电，电晕层不再均匀。若电极曲率半径较大，因高电场区域较宽，电晕一开始就表现为强烈的流注形式。电压进一步升高，个别流注继续发展，最后流注贯通间隙，导致间隙完全击穿。所谓流注就是第1次电子崩崩头的正离子和随后发展而形成的第2次电子崩崩头的电子，互相混合而形成的一种正负电荷的混合体或者混合通道。当这个混合通道贯穿间隙时，就形成了流注式放电。

2. 长间隙

间隙距离较长时，在流注通道还不足以贯通整个间隙的电压下，仍可能发展起击穿过程。当从棒极开始的流注通道发展到足够的长度后，由于增大了流注与对面电极之间的电容，导致流注根部电流增大，并使其温度升高到足以出现热电离的程度，这个具有热电离过程的通道，称为“先导通道”。先导通道中带电粒子的浓度远大于流注通道，因而电导大，压降小。又由于流注的一部分转变为先导，就使得流注区头部的电场加强，从而为流注继续伸长到对面电极并迅速转变为先导创造了条件。

当先导通道发展到接近对面电极时，在余下的小间隙中场强达到极大的数值，从而引起强烈的电离，这一强电离区域又以极高的速度向相反方向传播，这一过程为“主放电”。主放

电在极间形成高电导通道，相当于使间隙短路，击穿过程于是完成。

三、极性效应

对于电场不均匀的间隙（如棒-板间隙），击穿电压与棒的极性有很大关系，即“极性效应”。棒为负极性时击穿电压比正极性时高得多。解释如下：棒为正时，场强最大的棒极附近首先形成电子崩。电子崩的电子迅速进入电极，留下的正空间电荷则加强了朝阴极方向的电场，有利于流注向间隙深处发展，因而击穿电压较低。如图 1.3 所示，空间的正电荷加强了电子崩发展处的电场，而减小了棒极附近的电场，因此不易形成电晕放电（或者说电晕放电不易维持下去）；棒为负时，同样形成的正空间电荷却削弱了朝向电极方向的电场，使放电的发展比较困难，因而击穿电压较高。棒为负极时，空间的正电荷形成的电场减小了电子崩发展处的电场，而加强了棒极附近电场，有利于电晕的产生，但不利于放电，如图 1.4 所示。因此工频交流电压作用于棒-板间隙，击穿总是发生在棒极为正的半周内，并且击穿电压稍低于直流电压作用下的击穿电压。因为：交流前半周留下的空间电荷对棒极前方电场有所加强。

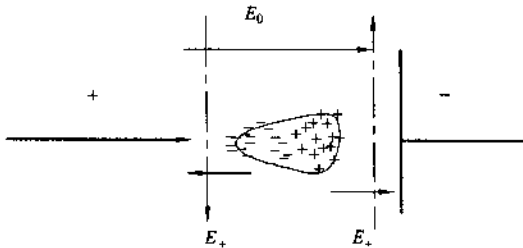


图 1.3 棒为正极时，空间电场的变化情况

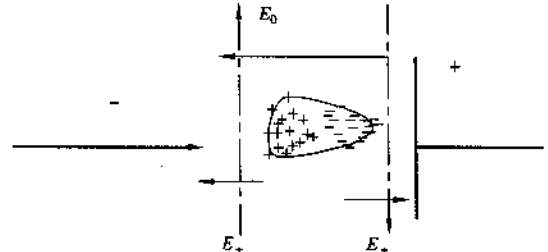


图 1.4 棒为负极时，空间电场的变化情况

四、长时电压（工频或直流）作用下气隙的放电特性

工频或直流作用下的击穿电压又称为静态击穿电压。以不同球径的球间隙和棒-板间隙，改变其间隙距离，观察击穿电压的变化规律。注：棒-棒间隙比棒-板间隙更均匀些。一般情况下，工频或直流击穿电压和距离的关系是：距离越大，击穿电压越高。

(1) 当间隙距离增加到一定数值时，间隙将由稍不均匀电场转变为极不均匀电场。这时，将会在较低的电压下首先出现电晕，当电压进一步升高时才发生击穿。

(2) 间隙的电晕起始电压，主要取决于电极的表面形状，即曲率半径，而与间隙距离关系不大。球径愈小，电晕起始电压愈低。

(3) 随间隙距离的增加，电场不均匀程度逐步增大，间隙的平均击穿电压也逐步减小。极不均匀电场中平均击穿场强远低于均匀电场。这是因为：前者在较低的平均场强下，局部场强已超过自持放电的临界值，形成电子崩和流注（长间隙还存在先导放电）。流注通道向间隙深处发展，相当于缩短了间隙的距离，所以击穿就比较容易，需要的平均场强也较低。

(4) 在极不均匀电场的情况下，击穿电压和距离的关系曲线较接近，即：极不均匀电场中，击穿电压主要取决于间隙距离，而与电极形状关系不大。

总之，对于同一间隙，在其他条件都一样的情况下，工频击穿电压小于直流击穿电压；

而冲击击穿电压大于工频击穿电压。全波冲击击穿电压又大于截波击穿电压。在电场均匀时，冲击击穿电压与工频击穿电压和直流击穿电压相差较小；而在极不均匀电场，冲击击穿电压与工频击穿电压和直流击穿电压相差较大。

第三节 大气条件对空气间隙击穿电压的影响

在计算电压时，应以标准气象条件下的电压为准。各种大气状态的击穿电压值与标准状态时击穿电压值，可按规定相互换算。GB311—64 规定标准大气状态：压力 $P=760 \text{ mmHg}$ ；温度 $t=20^\circ\text{C}$ ；绝对湿度 $f=11 \text{ g/m}^2$ 。

一、相对密度不同时对击穿电压的影响

空气间隙击穿电压与空气密度有关，而空气密度与气压和温度有关。下面对它们进行定性的分析和研究。

大家知道，当气体的温度或压力改变时，其结果都反映在密度的变化，空气的相对密度 δ 为实验条件下的密度 δ_s 和标准大气状态的密度 δ_0 之比。又因为空气的密度和压力成正比，与温度成反比，有：

$$\delta = \frac{\delta_s}{\delta_0} = \frac{P/T}{P_0/T_0} = \frac{P}{T} \cdot \frac{T_0}{P_0} = \frac{P}{T} \cdot \frac{273+20}{760} = \frac{0.386P}{273+t}$$

式中 P —— 试验条件下空气的压力 (mmHg)；

T —— 试验条件下空气的湿度 (K)；

t —— 试验条件下空气的温度 ($^\circ\text{C}$)。

巴申定律：低气压下，间隙的放电电压是气压 P 与间隙距离 d 的乘积的函数。对于密闭的容器，其气体密度在一定范围时，气压越高，放电电压越高；气压越低，放电电压也越高。当外加电压很小时，间隙中的电流是由外界因素所造成的电子和离子所形成的。随电压的升高，这些质点中和后，电流饱和，但仍有极微小的泄漏电流。当电压的升高到一定数值，场强高达某一定值后，气体发生连续的碰撞电离，向雪崩似的增长，称电子崩。当体积一定时，气压越高，电子密度越大，电子的平均自由行程越短，电子本身具有的动能较低，虽容易发生碰撞，但不宜发生游离，因而击穿电压高；当气压越低时，电子密度越小，电子的平均自由行程增大，尽管电子本身具有很高的动能，一旦碰撞，就会发生游离，但碰到中心分子和原子的机率很低，因此击穿电压也很高。这说明：在大气条件下，空气间隙的击穿电压和空气的相对密度有关，一般随 δ 的增大而升高。实验表明：当空气相对密度 δ 在 0.95 以上及 1.05 以下的情况时，空气间隙击穿电压与其密度成正比。因此，空气相对密度为 δ 时的击穿电压和它在标准状态下的击穿电压具有如下换算关系：

$$U = \delta U_0 \tag{1.6}$$

式中 U_0 ——标准状态下空气间隙的击穿电压及绝缘子的干闪络电压；

U ——实际状态下空气间隙的击穿电压及绝缘子的干闪络电压。

式 (1.6) 对于均匀电场、不均匀电场、直流、工频、冲击电压均适用。

当用球隙测量击穿电压时，如果空气相对密度 δ 与 1 相差很大时，可用可查阅校正系数代替上述 δ 值来校正击穿电压值。

二、湿度不同时对空气击穿电压的影响

实验表明：在均匀或稍不均匀电场中空气间隙的击穿电压随空气中湿度增大而略有增加，但程度极微，可以忽略不计。但在极不均匀电场中，空气中水分的含量对提高间隙击穿电压的效应就很明显。

击穿电压与湿度有关，可能是由于水分子容易吸引电子而形成负离子的缘故。电子形成负离子后，电离能力大大降低。当湿度增大时，电子附着在水分子上形成负离子的比例增加，间隙中的电离过程被削弱，从而击穿电压增大。均匀电场中击穿场强较高，电子运动速度较大，所以湿度的影响较小；而在极不均匀电场中，平均击穿场强较低，放电形成时延较长，所以湿度的影响也就比较明显。在均匀或稍不均匀电场中，湿度的影响可忽略不计。极不均匀电场中，一般要对湿度进行校正。

湿度校正系数：

$$K_h = (k)w \quad (1.7)$$

式中 k ——是绝对湿度与电压形式的函数；

w ——其值与电极形状、距离以及电压形式、极性有关。具体数值可参阅有关标准。

三、海拔高度的影响

随着海拔高度的增加，空气逐渐稀薄，大气压力及密度下降，因此空气间隙的击穿电压也随之下降。国标中规定：对于拟用于海拔高于 1 km（但不超过 4 km）处的设备的外绝缘，其试验电压应按规定的标准大气条件下的试验电压乘以系数 k_a 。

$$k_a = 1/(1.1 - H \times 10^{-4}) \quad (1.8)$$

式中 H ——安装地点的海拔高度 (m)。

第四节 提高气体间隙击穿电压的方法

高压电气设备中经常遇到气体绝缘间隙。为了减小设备尺寸，一般希望间隙的绝缘距离尽可能缩短。为此需要采取措施，以提高气体间隙的击穿电压。组合电器提高气体击穿电压可能有两个途径：一是改善电场分布，使其尽量均匀；二是利用其他方法来削弱气体中的游