



电力安全 生产与防护

任晓丹 刘建英 主编

DLAQ

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

高等职业教育“十二五”创新型规划教材

电力安全生产与防护

主 审 张 鹏

主 编 任晓丹 刘建英

副主编 张宇飞 王 飞 鲁珊珊

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

电力安全生产与防护 / 任晓丹, 刘建英主编. —北京: 北京理工大学出版社,
2013. 1 (2013. 2 重印)

ISBN 978 - 7 - 5640 - 7325 - 1

I. ①电… II. ①任… ②刘… III. ①电力工业—安全生产—高等学校—教材
IV. ①TM08

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 014670 号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (办公室) 68944990 (批销中心) 68911084 (读者服务部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京地质印刷厂

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 10

字 数 / 229 千字

版 次 / 2013 年 1 月第 1 版 2013 年 2 月第 2 次印刷

印 数 / 1501 ~ 3500 册

定 价 / 26.00 元

责任编辑 / 李志敏

责任校对 / 杨 露

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题, 本社负责调换

电力安全生产及防护是国家骨干高职院校示范建设专业——电力系统自动化技术专业的专业学习领域基础课程。它是一门基于典型工作任务驱动，理论与实际相结合的教、学、做为一体的专业基础课程。培养学生从事该专业领域所必备的安全专业知识与技能，以及良好的团队协作精神。课程建设以国家骨干专业建设方案为指导，以企业实际生产为准绳，以工学结合为宗旨，以电力安全作业规程、技能操作和职业素养为要求，与企业骨干成员进行课程内容的选择、开发与设计，实现“校厂一体，产学结合”的人才培养模式。

本教材由6个项目15个工作任务组成，以企业工作任务驱动课程教学。每个任务结合具体工作任务和工作过程，通过任务的完成，学习电力安全生产及防护专业知识，为今后的工作奠定坚实基础。

本书由任晓丹、刘建英担任主编，张宇飞、王飞、鲁珊珊担任副主编。其中，项目一由鲁珊珊老师撰写，项目二由王飞老师撰写，项目三由刘建英老师撰写，项目五、项目六的部分内容及附录工作页部分由任晓丹老师撰写，项目四、项目五的部分内容由张宇飞老师撰写。张鹏老师对本书进行了审定，提出了宝贵意见，在此表示诚挚的感谢。

本书适合作为高职高专电类相关专业教材，也可作为供电企业生产技能人员安全用电培训教材。

由于编者水平有限，疏漏及不足之处在所难免，请广大读者批评指正。

编 者

项目一 电力安全生产基本知识	1
任务一 电力安全生产概述	2
任务二 触电电流计算	7
任务三 防触电措施	15
项目二 电力安全生产技能	33
任务一 通用工作安全技能	33
任务二 供电安全技能	37
任务三 火力发电安全技能	41
项目三 电力安全工器具检查、使用与保管	49
任务一 电力安全工器具基本知识	49
任务二 安全用具的维护与管理	70
任务三 登杆作业	73
项目四 防火与防爆	79
任务一 灭火器的使用	80
任务二 电气防火措施	83
项目五 紧急救护	89
任务一 触电急救	89
任务二 创伤急救	95
项目六 电力生产典型事故及防护	103
任务一 常见人身伤害事故的防范措施	103
任务二 典型事故案例安全教育	111
附录	115
附录 1 触电电流计算工作页	117
附录 2 接触触电技术措施工作页	121

目 录

附录 3	电力安全生产技能工作页	127
附录 4	电力安全工器具检查、使用与保管工作页	129
附录 5	登杆作业工作页	131
附录 6	灭火器使用工作页	135
附录 7	电气防火措施工作页	141
附录 8	触电急救工作页	145
附录 9	创伤急救工作页	149
附录 10	电力生产典型事故分析工作页	151

项目一

电力安全生产基本知识

项目描述

2009年6月22日6时左右,某有限责任公司焦化厂运焦车间1#消火车熄焦后,司机张某某发现1#消火车无法向北行走,随后到1#焦台通知值班电工,值班电工汲某某接电话后与当班班长许某某一起赶到现场,许某某上到1#消火车上检查,初步判断缺一相电,便安排汲某某去1#煤塔下配电箱处停电。司机张某某去1#焦台通知运焦三班班长杨某某,因杨某某上厕所未联系上,电话向调度进行汇报后,去运焦一系统值班室找班长杨某某。汲某某停完电后遇见了班长杨某某,两人协商一人看护配电箱,一人监护许某某干活。张某某走到半路看到杨某某与汲某某站在配电箱西侧,认为杨某某已知道1#消火车故障,遂返回1#消火车处。6时10分左右人们发现许某某躺在地上,于是立即通知电工汲某某和班长杨某某到现场。人们有的对许某某在现场进行口对口人工呼吸和心肺复苏等急救,有的通知邯钢急救中心医务人员到现场救护,但许某某最终经邯钢医院抢救无效而死亡。

知识准备

学习电力安全生产的相关法律法规文件,让学生建立电力安全生产的理念,熟悉电力安全生产过程中的相关文件。

学习对中性点直接接地系统和中性点不接地系统触电回路电流的计算,分析触电电流对人体的危害,结合现场实际采取有效的防触电伤害措施,以保障电力作业人员人身安全。

现场作业环境中存在带电线路或带电设备时,为防止直接接触触电事故的发生,保证作业人员安全,必须采取一定的技术措施。结合10 kV、110 kV、220 kV架空线路对地安全距离以及110 kV室外变压器防直接接触触电等工作实际,要求提供有效完善的技术措施。

现场作业环境中存在设备漏电时,易导致间接接触触电事故。为防止该类事故的发生,保证设备和人身安全,需采取有效的技术措施。通过低压配电屏防间接接触触电措施的认识和漏电保护器的安装等任务,加强对防间接接触触电措施的理解与应用。

项目目标

- (1) 掌握电力安全生产的意义。
- (2) 掌握班组、部门、个人的安全职责。
- (3) 掌握电力安全生产相关法律法规条文。
- (4) 掌握政府部门和电力系统下发的安全文件。

- (5) 能指出影响触电危险程度的因素。
- (6) 能进行中性点接地系统触电回路分析, 计算触电电流。
- (7) 能进行中性点不接地系统触电回路分析, 计算触电电流。
- (8) 能结合现场实际采取有效的防触电伤害措施。
- (9) 能叙述防止人身直接接触触电的技术措施。
- (10) 能结合现场实际采取有效的防直接接触触电措施。
- (11) 能叙述防间接接触触电的技术措施。
- (12) 能熟练安装单相和三相漏电保护器。



知识链接

任务一 电力安全生产概述

一、电力安全生产的含义

在电力生产中, 安全有着三个方面含义:

- (1) 确保人身安全, 杜绝人身伤亡事故;
- (2) 确保设备安全, 保证设备正常可靠运行;
- (3) 确保电网安全, 消灭电网瓦解和大面积停电事故。

二、电力安全的意义

电力工业必须坚持“安全第一、预防为主”的方针, 这是由电力工业的客观规律所决定的, 是多年实践经验的积累, 甚至是用血的教训总结出来的。因此, 在任何时候都丝毫不能动摇这个方针, 否则多发事故的电力工业就会拖国民经济发展的后腿。

安全是企业改革和发展的重要保证, 是提高企业经济效益的前提, 没有安全就谈不上效益。从电力事故对企业经济效益和社会效益的影响程度上看, 安全就是最大的效益。

安全是电力工业的生命, 是职工及其家庭幸福常乐的保证, 因此每个职工都应高度重视安全, 并在实际工作中能居安思危、防微杜渐。

三、电力安全生产的重要和基本方针

电力工业是建立在现代电力能源转换、传输、分配科学技术基础上的高度集中的社会化大生产, 是供给国民经济能源的基础性行业, 也是关系城乡人民生活的公用事业。电力工业具有高度的自动化和发、供、用同时完成的特点。发电、输电、配电和用户组成一个统一的电网运行系统, 任何一个环节出了事故, 都会影响整个电网的安全稳定运行。严重的事故则会使电网运行中断, 甚至导致电网的崩溃和瓦解, 造成长时间、大面积停电, 直接影响到工农业生产和人民生活的正常进行, 给社会造成重大的经济损失, 影响社会的安定, 损害党和政府的形象。所以电力安全生产不仅是经济问题, 也是政治问题。为此, 我国一直坚持“安全第一, 预防为主”的方针, 并从电网的技术管理、规程制度建设、职工思想行为的规范和职业道德的建设等方面着手, 采取一系列措施, 加强和改进安全管理工作。

作，努力提高电力生产安全的水平。

“安全第一，预防为主”的方针是由电力工业的特点和电力生产的客观规律决定的，是电力生产多年实践经验的结晶。坚持这一方针，是电力生产、建设、经营等各项工作顺利进行的基础和保证。任何时候都不能有丝毫的偏移和动摇。电力企业在各项工作中还应处理好安全与效益，安全与质量、速度以及安全与多种经营的关系，当其他方面与安全发生矛盾时，首先要服从安全。要十分明确安全是企业生产活动的头等大事，是带动全局的根本性任务。只有正确地处理好安全与其他事物间的关系，才能保证改革和发展的顺利进行。

“安全第一，预防为主”是一个有机的整体，二者不可偏废。安全第一的关键是坚持预防为主，对安全生产要有居安思危的忧患意识，绝不能麻痹大意。安全工作要警钟长鸣，防患于未然，不能等到出了问题再抓，必须为避免事故的发生而常抓不懈。全体电业职工都要牢固树立“安全第一，预防为主”的思想，进一步增强安全意识，改进和提高安全技术，坚持保人身、保电网、保设备安全的“三保”原则，真正做到安全生产，人人有责，使电力安全生产步入良性发展的轨道。

四、电力安全生产的基本规章制度

1. 规程制度在电力安全生产中的作用

电力安全生产的规程制度是电力生产科学规律的客观反映，是根据国家颁发的各种法规性文件和上级管理机关的要求制定的，也是设备系统设计制造技术要求的体现，是生产实践经验的总结和积累。它包括工艺技术、生产操作、劳动保护、劳动管理等方面的规程、规则、条例、办法和制度，它规定了电力职工在电力生产过程中，哪些是合法的，哪些是必须做和可以做的，哪些是违法的，哪些是禁止做和不可以做的。规程制度是电力生产设计中的行为规范和准则，具有法律效力。

电力生产在实践中已形成了一套比较完善的规程制度，需要我们严格、认真地贯彻执行，否则就可能造成事故。在实际的生产过程中，由于这样或那样的原因，如对安全工作要求不严，规程制度执行松弛，违章指挥，违章作业，冒险蛮干等，已造成过许多伤亡事故和财产损失，教训极为深刻。因此，必须加强对干部职工的安全教育和宣传，在干部职工中形成一个共识：电业规章制度是保障电力生产建设、确保安全运行的重要制度，遵章守纪是每一个电业职工的职业责任，必须严格遵守，不能自行其事。

电力企、事业单位都要严格执行国家及电力行政主管部门制定和颁布的有关安全生产建设的各项规程和制度。要严肃劳动纪律，严格要求，严格管理，对违反规章制度者，必须及时制止并进行处理，做到安全文明施工，安全文明生产。

2. 电力安全生产的基本规程制度

(1) 国家颁发的与电力安全生产有关的规程制度。

这些规程制度主要有：

- ① 《工厂安全卫生规程》；
- ② 《建筑工程施工安全技术操作规程》；
- ③ 《工人职员伤亡事故报告规程》；
- ④ 《工业企业设计卫生标准》；

- ⑤《劳动保护监察条例》；
- ⑥《锅炉压力容器安全监察暂行条例》；
- ⑦《中华人民共和国消防条例》；
- ⑧各种与电力生产有关的国家标准。

(2) 部颁有关规程、条例。

原电力工业部颁布的与电力安全生产有关的规程、条例主要有：

- ①《电力工业技术管理法规》；
- ②《电业安全工作规程》，包括发电厂和变电所部分、电力线路部分、热力机械部分；
- ③《电力工业锅炉监察规程》；
- ④《电力工业锅炉压力容器监察规程》；
- ⑤《电业生产事故调查规程》；
- ⑥《电力系统安全稳定导则》；
- ⑦《电力设备典型消防规程》；
- ⑧《电网调度管理条例》；
- ⑨《电业生产人员培训制度》；
- ⑩有关电力工程设计方面的各种技术规程；
- ⑪有关电力基本建设、施工方面的各种技术规程；
- ⑫有关电力生产方面的各种运行规程、检修规程和其他典型规程制度；
- ⑬有关电力试验方面的各种技术规程等。

(3) 各级电力部门（企业）内部颁发的各种规程与管理制度。

这是依据国家和原电力工业部颁布的安全法规、规章制度、有关技术资料并根据现场需要而制订的。如发电机现场运行规程、锅炉现场运行规程、变电现场运行规程、变电运行管理制度、本地区调度规程、各级人员安全责任制、“两票三制”（工作票、操作票、交接班制、巡回检查制、设备定期试验与轮换制）等规程和制度。这些规章制度都是从事电力生产的人员要认真学习、严格遵循的。

五、电力安全生产组织管理

1. 电力安全生产管理的重要性

安全生产管理是指企业为实现安全生产所进行的一切管理活动。它包括围绕确保职工在生产过程中的安全与健康、设备的正常运行及财产安全而进行的有关计划、决策、组织、指挥、协调和控制方面的一系列活动。

电力安全生产管理是电力企业管理的重要组成部分，是一项政策性强，需要运用多种学科知识进行综合管理的工作。要以“安全第一，预防为主”的安全生产方针为指导，以安全法规、规程制度为基础，从组织上、技术上、管理上、制度上，对人、物、环境采取切实可行的综合治理措施，从根本上解决人身及电网设备的安全和健康问题，促进电力安全生产的顺利发展。

实践证明，除了要有正确的安全生产方针和必不可少的规程、制度、标准之外，还必须建立相应的管理体制来监督、检查和贯彻执行。否则再好的方针、规程、制度、标准，也不可能收到好的效果。

因此，必须加强电力安全生产的管理。

2. 电力安全生产的组织管理

建立健全安全的管理体系是搞好安全工作的根本保证。电力企业经过多年的工作实践，积累并形成了一套适合电力生产特点和规律且行之有效的安全生产管理体系：以行政领导为主体的安全生产指挥体系，以党委书记为核心的安全思想政治工作保证体系，以总工程师为首的安全生产技术保障体系，以安全监察为主，工会协同的安全及劳动保护监督体系。这些是电力企业安全工作的四大保障体系。

电力安全生产管理工作主要包括各项安全生产责任制的建立、完善和贯彻落实；加强两个文明建设，创一流电力企业；健全和完善安全生产保证体系和安全监察体系；加强全过程的安全管理，提高安全工作规范化水平；依靠技术提高全员安全思想技术素质；实行安全生产重奖重罚制度等。

(1) 加强领导，全面落实各级安全生产责任制。

电力企、事业单位各级行政正职是本单位、本部门的安全第一责任者，对安全工作全面负责，统筹协调并亲自处理安全生产中的重大问题。各级行政副职负责抓好各自分管范围内的安全工作，并承担相应的安全责任。

安全生产责任制是加强安全管理的重要措施，它的核心是贯彻实行“管生产必须管安全”，“安全生产，人人有责”的原则。建立并完善各级各类人员的安全责任制，使每个职工都有明确的安全职责。做到各负其责，分级控制、分级把关。出现事故，按其责任论处。

(2) 加强两个文明建设；创一流电力企业。安全生产水平的高低，实际上是一个物质文明建设和精神文明建设水平的综合反映。衡量一个电力企业安全生产水平高低的主要指标有两个方面：一是发供电的可靠性；二是职工人身安全。可靠性需要完好的设备，需要较高的职工素质。高素质的职工队伍加上高质量的设备，才可能造就高水平的安全生产，才能创造真正的、一流的电力企业。所以，创一流的社会主义电力企业就是使安全生产工作更上一个新台阶，同时安全生产也是企业取得好的经济效益的基础。

(3) 健全安全生产保证体系和安全监察体系。

为保证安全生产要健全和完善安全生产保证体系和监察体系。安全生产保证体系是由安全生产指挥体系、安全思想政治工作保证体系、安全生产技术保障体系组成。它贯彻了“安全生产齐抓共管”的原则，充分发挥党、政、工、团各方面的积极性和优势，发动群众，共同搞好安全工作，使安全生产工作制度化、规范化、经常化。

健全安全生产保证体系就是要求全员全方位地做好安全工作，企业生产的每项工作、每个岗位人员都必须时时、处处考虑安全问题，并严格按照规章制度办事，协调配合。在生产工作中能够把握大局，统一思想，正确处理安全与其他工作的关系，并从组织、技术上提供可靠的保证。

保证安全的另一个体系是安全监察体系。各单位的安全监察机构由所在单位行政正职主管。要建立和完善以安全监察机构为主，各单位、部门的专兼职安全员为辅的三级安全管理网络。安全监察机构的主要任务是对电力建设和生产的安全过程进行监察。监督其电力安全工作方针、政策及各项规程制度、安全技术措施和反事故技术措施的贯彻执行；监督其发生设备和人身事故的单位认真落实“三不放过”的要求，即事故原因不清不放过，

事故责任和受教育者没有受到教育不放过，没有采取防范措施不放过。

(4) 加强全过程的安全管理，提高安全工作规范化水平。

保证电力工业的安全生产是电力规划、设计、制造（修造）、建筑、安装、调试及生产管理等各部门的共同任务，需要各部门密切合作，共同负责。因此必须实行电力生产全过程安全管理。要提高安全工作的规范化水平，严格按照电力生产过程的安全管理标准进行工作，以各环节工作的规范、完整、正确和高质量来确保电力安全生产。

(5) 依靠技术进步和提高职工队伍素质。

保证安全生产必须强调依靠技术进步。一方面要加强隐患治理，提高设备健康水平，改善设备性能；另一方面，要采用新技术、新方法，增加和完善保证安全的技术手段，提高总体安全水平。当前，要特别注重计算机技术、网络技术、通信技术和电力电子技术在电力系统的应用，努力实施高度自动化、厂站自动化、信息管理现代化、设计制图自动化以及营业抄表收费的微机化、集约化，使各项管理工作程序化，以减少人为的干扰和人员的过失，提高安全生产水平。

电力企业要在现有的设备、装备条件下实现安全生产，很重要的一个方面取决于职工的思想素质和技术素质。要实现电力工业的现代化，就需要有一支高素质的职工队伍，而高素质的职工队伍是靠管理、培训和教育逐步形成的。因此，要不断加强对电业职工的思想教育，把安全生产教育同技术教育、岗位技术培训结合起来，把提高安全意识和自我防护能力同提高技术业务能力结合起来，才能夯实安全工作的基础。

(6) 实行安全生产重奖重罚制度。

在安全生产中应贯彻重奖重罚的原则，对安全生产中作出显著贡献的集体和个人，应给予重奖；对在工作中严重失职、违章作业、违章指挥等责任者，给予重罚。情节严重触犯刑律者，应由司法部门追究其刑事责任。

总之，安全管理是一项系统工程，安全管理工作贯穿于电力生产的全过程，因此，必须做好电力生产全过程的安全管理。只有这样才能治标又治本，从根本上解决安全管理中存在的问题，才能把我们的安全生产管理工作搞得更好。

3. 安全管理现代化

安全管理现代化是指现代化管理科学广泛应用于安全生产的各个方面。它包括在管理体制、管理组织、管理手段、管理方法、管理观念等方面实行管理的现代化。传统安全管理属于“事后出发型”，是解决事故发生之后的善后问题的事后管理方法。现代安全管理是在传统安全管理基础上的进一步发展、提高、充实和完善，属于“事前预测型”。它有三个特征：以预防事故为中心，进行预先分析与评价；从提高设备可靠性入手，把安全和生产的稳定发展统一起来；安全部门与生产管理各职能部门协调统一实行全员、全方位、全过程的“三全”管理。

目前较为普遍使用的各种现代化管理方法有以下几个方面。

(1) 全面安全管理：就是全目标、全员、全过程、全方位的安全管理。把安全工作的重点放在坚持建设项目主体工程与安全工程“三同时”上，以消除系统的潜在危险；深入研究人与物两大要素在事故致因中的辩证关系，从整体和全局上抓安全生产；建立监察、管理、检测、信息系统和科学决策系统；实行安全目标管理等。

(2) 安全目标管理：是使安全管理、安全状况指标化，提出控制指标值和长远目标

值，以便检查对比，为安全工作计划提供依据。

(3) 安全人机工程：按人对危险及环境的耐受程度，调整机器设施、环境机器操作，以符合人的舒适要求。

(4) 安全行为科学与心理学：预先掌握不安全行为度和心理状态的出现，采取有效的措施给予积极影响和疏导，以控制不安全行为。

(5) PDCA 循环：是对工作、项目或指标采取调查分析、制定目标、实施整改、总结提高四个步骤的若干循环，从而改善安全状况。

(6) 计算机辅助安全管理：可以辅助进行事故统计和分析、隐患整改、违章行为统计分析、生物节律计算等安全管理方法。

(7) 电化教育：是在安全教育上采取直观、直感电声方法（电视、录像、幻灯片、录音、现场安全标志声、光化等）。

(8) 安全评价：在对系统安全进行分析的基础上，需对系统的危险性进行评价，以便确定危险的后果，提出措施，消除或减轻危险性。

(9) 生物节律：按人的体力、智力、情绪波动周期曲线分布，给操作者予以劝告、警告或禁止作业，另行安排工作的指令，以约束行为。

(10) 可靠性管理：在预定时间内和规定条件下，保持系统、设备、部件或零件规定功能的一系列管理活动。此外还有预先危险性分析，事故树分析，故障类型及影响分析，AB 法，信息管理等现代安全管理方法。总之，掌握应用现代化安全管理的知识和方法，能较好地解决安全工作中的实际问题，使安全工作变“事后出发型”为“事前预测型”，不断提高电力企业的安全管理水平和对事故的控制、预测的能力。

任务二 触电电流计算

一、电流对人体的伤害类型

人体触电是最主要的电气事故之一。人体触电是指人体触及带电体后，电流通过人体，电流能量施于人体而造成的伤害。电流对人体造成的伤害类型主要有电击和电伤两种。

电击是指电流通过人体内部对人体造成的伤害。大部分触电死亡事故都是由电击造成的。电击主要伤害的是人体的心脏、呼吸和神经系统，从而破坏人的生理活动，甚至危及人的生命。例如，电流通过心脏时，心脏泵室作用失调，引起心室震颤，导致血液循环停止；电流通过大脑的呼吸神经系统时，会遏止呼吸并导致呼吸停止；电流通过胸部时，迫使呼吸停顿、引起窒息。所以，电击对人体的伤害属于生理性质的伤害，多数触电死亡事故都是由电击造成的。

电伤是指电流的热效应、化学效应、机械效应及电流本身作用造成的人体伤害。电伤往往出现在高压触电事故中，常在人的肌体留下伤痕，严重时，可导致人的死亡。电伤可分为电烧伤、电烙印和皮肤金属化。

电烧伤是由电流的热效应造成的伤害，分为电流灼伤和电弧烧伤。电流灼伤是指人体与带电体接触时，电流通过人体由电能转换成热能造成的伤害，一般发生在低压设备或低

压线路上。电弧烧伤是由弧光放电造成的伤害。电弧温度高达 $2\,500\,^{\circ}\text{C} \sim 6\,000\,^{\circ}\text{C}$ ，大电流通过人体，可烘干、烧焦机体组织，造成大面积、大深度的烧伤，甚至烧焦、烧掉四肢及其他部位。电弧烧伤是最常见也是最严重的一种电烧伤。

当载流导体较长时间接触人体时，因电流的化学效应和机械效应作用，接触部分的皮肤会变硬并形成圆形或椭圆形的肿块痕迹，如同烙印一样，称为电烙印。

在电流作用下，产生的高温电弧使周围的金属熔化、蒸发并飞溅渗透到皮肤表层，使皮肤变得粗糙、硬化并呈现一定颜色（灰黄色或蓝绿色），称为皮肤金属化。金属化的皮肤经过一段时间后会逐渐剥落。

二、影响触电危险程度的因素

触电的危险程度，即电流对人体的伤害程度取决于以下几个因素。

1. 电流的大小

通过人体电流的大小对触电者的伤害程度起决定性作用，不同电流对人体的影响见表 1-1。

表 1-1 不同电流对人体的影响

电流/mA	交流电（50 Hz）	直流电
0.6	开始有感觉，手指有麻感	无感觉
2	手指强烈麻刺，颤抖	无感觉
5	手指痉挛，手部剧痛，勉强可以摆脱带电体	感觉痒、刺痛、灼热
20	手迅速麻痹，不能摆脱带电体，剧痛，呼吸困难	手部轻微痉挛
50	呼吸麻痹，心室开始颤动	手部痉挛，呼吸困难
90	呼吸麻痹，持续 3 s 或更长时间则心脏麻痹，心室颤动	呼吸麻痹

对于工频交流电，按照通过人体的电流大小和人体呈现状态的不同，可将其划分为下列三种。

（1）感知电流：是指引起人体感知的最小电流。人体平均感知电流有效值，女性约为 $0.7\,\text{mA}$ ，男性约为 $1.1\,\text{mA}$ 。感知电流一般不会对人体造成伤害。

（2）摆脱电流：是指人触电后能自行摆脱的最大电流。人体的平均摆脱电流，女性约为 $10\,\text{mA}$ ，男性约为 $16\,\text{mA}$ ，儿童的摆脱电流相比成人较小。当电流增大到超过摆脱电流值时，触电者肌肉收缩，发生痉挛而抓紧带电体，将不能自主摆脱电源。摆脱电源的能力随着触电时间的延长而减弱，一旦触电后不能及时摆脱电源，后果将十分严重。

（3）致命电流：是指在短时间内危及生命的最小电流。电击致命的主要原因是电流引起心室颤动造成的。因此，可以认为室颤电流是最小致命电流。

大量的研究资料表明，直流 $50\,\text{mA}$ 以下、工频 $30\,\text{mA}$ 以下电流通常不会产生心室颤动的危险，故可视为安全电流。

2. 电压

当人体电阻一定时，作用于人体的电压越高，通过人体的电流越大。实际上，通过人体的电流大小并不与作用于人体上的电压成正比。这是因为随着电压的升高，人体电阻因

皮肤破损而下降，导致通过人体的电流迅速增加，从而对人体产生严重的伤害。

3. 人体电阻

人体触电时，人体电阻越大，触电电流越小。人体电阻主要包括人体内部电阻和皮肤电阻。人体内部电阻是固定不变的，与外界条件无关，为 $500 \sim 800 \Omega$ 。皮肤电阻主要由角质层决定，角质层越厚，电阻就越大，一般其值为 $1\,000 \sim 1\,500 \Omega$ 。因此人体电阻一般为 $1\,500 \sim 2\,000 \Omega$ ，为保险起见，通常取 $800 \sim 15\,000 \Omega$ 。如果皮肤角质层有破损，则人体电阻将大为下降。

人体电阻会随时、随地、随人等因素而变化，存在着相当大的不确定性。

4. 电流通过人体的时间

电流对人体的伤害与电流通过人体时间的长短有关。通电时间越长，因人体发热出汗和电流对人体组织的电解作用，人体电阻逐渐降低，导致通过人体的电流增大，触电危险性亦随之增加。

5. 电源频率

触电的伤害程度与电流的频率相关，各种频率触电死亡率统计数据见表 1-2。

表 1-2 各种频率触电死亡率

频率/Hz	10	25	50	60	80	100	120	200	500	1000
死亡率/%	21	70	95	91	43	34	31	22	14	11

可见，频率在 $30 \sim 60 \text{ Hz}$ 的交流电易引起人体心室颤动，常用的 50 Hz 的工频交流电对人体的伤害程度最为严重。当电源的频率偏离工频越远，对人体的伤害程度越轻。不过，高压高频电流对人体依然是十分危险的。

6. 电流通过人体的途径

电流通过人体头部会使人昏迷而死亡；通过脊髓会导致截瘫及严重损伤；通过中枢神经或有关部位，会引起中枢神经系统强烈失调而导致残疾；通过心脏会造成心跳停止而死亡；通过呼吸系统会造成窒息。实践证明，从左手至脚是最危险的电流路径，从右手到脚、从手到手也是很危险的路径，从脚到脚是危险较小的路径。电流途径与通过心脏电流的百分数见表 1-3。

表 1-3 电流途径与通过心脏电流的百分数

电流通过人体的途径	通过心脏电流的百分数/%	电流通过人体的途径	通过心脏电流的百分数/%
从一只手到另一只手	3.3	从右手到脚	3.7
从左手到脚	6.4	从一只脚到另一只脚	0.4

三、人体触电的方式

发生触电的情况是多种多样的。经过对大量触电事故的分析，将发生的触电情况大体分为直接接触触电和间接接触触电两大类。

1. 直接接触触电

这是指人体直接接触或过分靠近电气设备及线路的带电导体而引发的触电现象。直接接触触电分为单相触电和两相触电。

1) 单相触电

人体站在地面或其他接地体上，人体的某部分触及一相带电体所引起的触电称为单相触电。单相触电的危险程度与系统电压的高低、系统的中性点是否接地以及环境情况等因素有关，是较常见的一种触电事故。

(1) 中性点直接接地系统单相触电。在中性点直接接地系统中，发生单相触电时，电流回路如图 1-1 所示。

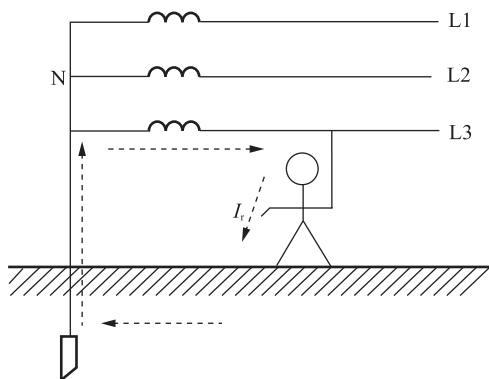


图 1-1 中性点直接接地系统单相触电

通过人体的电流为

$$I_r = \frac{U_p}{R_r + R_0} \quad (1-1)$$

式中 U_p ——系统相电压，单位 V；

R_r ——人体电阻，单位 Ω ；

R_0 ——系统的接地电阻，单位 Ω 。

由于 R_0 比 R_r 小得多，可忽略不计。可见，中性点直接接地系统中发生单相触电时，通过人体的电流取决于系统相电压及人体电阻。例如，对于 380/220 V 三相四线制系统， $U_p = 220$ V， $R_0 = 4$ Ω ， $R_r = 1\ 000$ Ω ，则

$$I_r = \frac{U_p}{R_r + R_0} = \frac{220}{1\ 000 + 4} = 219 \text{ (mA)}$$

该值已大大超过人体能够承受的能力，足以致命。

防范措施是增大 R_r 。如人体站在干燥的木质地板、绝缘垫上或穿绝缘靴，这些材料的电阻可高达 0.5 ~ 1 M Ω ，仅此一项就可以把流经人体的电流限制在 0.22 ~ 0.44 mA。因此，对于有可能误触低压带电部分的电气工作人员来说，在工作时穿戴绝缘靴作为辅助安全用具是十分必要的。

(2) 中性点不接地系统单相触电。如图 1-2 所示，在中性点不接地系统中，假设系

统对称, 且忽略电网各相纵向参数, 图中 Z 为电网的各相对地绝缘阻抗 (也称为系统的零序负阻抗, 为每相对地绝缘电阻 R 与对地电容 C 的并联值, 单位为 Ω), U_p 为系统的相电压。当系统正常运行时, 三相电压对称, 各相对地绝缘阻抗 Z 相同, 根据节点电位法, 系统中性点 N 与大地 N' 点之间的电位差为

$$\dot{U}_{NN'} = \frac{\frac{\dot{U}_A}{Z} + \frac{\dot{U}_B}{Z} + \frac{\dot{U}_C}{Z}}{\frac{1}{Z} + \frac{1}{Z} + \frac{1}{Z}} = \frac{\frac{1}{Z} (\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C)}{\frac{3}{Z}} = 0$$

如果人接触到某相时, 则人体电阻 R_r 与该相对地绝缘阻抗 Z 并联, 这样就彻底破坏了对地绝缘的对称性, 此时, 变压器中性点与大地间的电位 $\dot{U}_{NN'} \neq 0$, 这说明有电流 I_r 流过人体, 电流通路如图 1-2 所示。

求人身触电电流时, 根据戴维南定理可得图 1-2 所示的等效电路, 如图 1-3 所示。

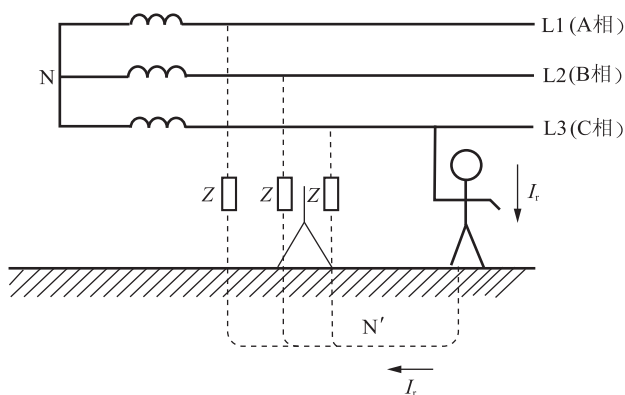


图 1-2 中性点不接地系统单相触电图

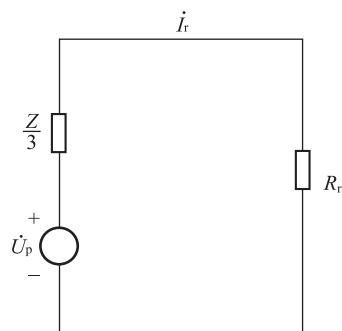


图 1-3 中性点不接地系统单相触电等效电路图

根据图 1-3 所示电路, 可求出加在人体上的电压 U_r 与流过人体的电流 I_r 分别为

$$U_r = \frac{3R_r}{|3R_r + Z|} U_p \quad (1-2)$$

$$I_r = \frac{3U_p}{|3R_r + Z|} \quad (1-3)$$

对于绝缘电阻较低、对地绝缘电容较小的情况, 计算时可不计对地电容的影响, 只考虑绝缘电阻的影响即可。假设三相对地绝缘电阻均为 R , 则式 (1-2)、式 (1-3) 可简化为:

$$U_r = \frac{3R_r}{3R_r + R} U_p \quad (1-4)$$

$$I_r = \frac{3U_p}{3R_r + R} \quad (1-5)$$

对于对地电容较大, 同时绝缘电阻又很高的情况, 计算时可不计绝缘电阻的影响, 只考虑对地电容的影响即可。假设三相对地电容均为 C , 则式 (1-2)、式 (1-3) 可简