

全国电力职业教育规划教材  
职业教育电力技术类专业培训用书

# 带电作业人员资质认证 培训专用教材

# 配电线路

雷冬云 主编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

全国电力职业教育规划教材  
职业教育电力技术类专业培训用书

# 带电作业人员资质认证 培训专用教材 配电线路

主 编	雷冬云	肖荣华	陈 亮	周 煜
编 写	刘夏清	汪志刚	郑克全	黄永超
	牛 捷	胡 斌	唐 力	陶雪峰
	陈 浩	胡 攀	夏增明	
主 审	潘 力			
	张锦绣			



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本教材是以国家电网公司对带电作业资质认证所涉及的专业理论知识和操作技能要求为基础,结合生产实际编写而成的。其内容涵盖配电线路带电作业的方法及原理、主要作业项目及作业方法,详细介绍了配电带电作业的基本原理、作业项目的劳动组合、操作步骤、主要安全措施、所需工器具等,每项作业附有小组作业控制卡和工序质量控制卡、操作评分细则等内容。

本教材适用于国家电网公司配电带电作业资质认证的培训,包括取证培训、复证培训,同时可作为高级工及专业技术人员上岗、转岗、晋级的继续教育培训教材,也可供有关管理人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

配电线路/雷冬云主编. —北京:中国电力出版社,2012.2  
全国电力职业教育规划教材 带电作业人员资质认证培训专用教材

ISBN 978-7-5123-2706-1

I. ①配… II. ①雷… III. ①配电线路—职业教育—教材  
IV. ①TM726

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第024241号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 http://www.cepp.sgcc.com.cn)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2012年3月第一版 2012年3月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 12.5印张 293千字

定价 25.00元

### 敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

## 编 审 委 员 会

顾 问 葛兆军 牛黎军 曹立逊 戴庆华

晏治喜 王周祥 李 龙 鞠宇平

叶卫星 谌家良 漆铭钧 任铁军

编委会主任 刘夏清

编委会副主任 彭学文 汤美云 汪少辉

编审委员会成员 柏克寒 易 辉 张锦绣 刘 凯

史小报 龚政雄 朱 亮 罗电兵

肖荣华 张奇志 周 煜 陈 川

牛 捷 汪志刚 雷冬云 黄永超

# 序

---

随着国民经济及市场经济发展的需要，在经济建设服务中带电作业技术越来越凸显其重要性，对于保证电网安全可靠运行，提高电网供电可靠性和经济性起着保驾护航的作用。提升带电作业水平，为客户提供持续可靠的绿色电能成为当今社会“促发展、保民生”的重要议题。

我国带电作业技术处于世界领先地位，并朝着规范化、标准化和现代化的目标不断迈进。相对停电作业而言，带电作业安全更为突出、技术更为密集、操作更为复杂，更富有技巧和挑战。从事带电作业的人员必须具备过硬的专业技能和综合素质，而加强带电作业人员培训工作，持续提升带电作业队伍的能力和水平，是推动带电作业又好又快发展的必由之路。国家电网公司已明确要求带电作业人员必须持证上岗，四年考核复证一次。本教材的初衷是运用带电作业的基本原理，以技能实训为突破口，快速推动带电作业专业技术人才发展，切实抓好带电作业人员取证、复证培训和考核工作。

本教材与国家电网公司生产技能人员职业能力培训专用教材一脉相承，围绕输电、配电线路带电作业人员的培训、资质认证和管理的要求，系统地提炼了多年来积累的知识要领和应用技能测试点，充分总结了长期以来带电作业领域所积累的生产和管理经验，注重技能培训的需要，反映了当前新方法、新工具、新技术、新工艺的推广应用情况。全教材理论联系实际，内容详尽、通俗易懂，具有很强的针对性和实用性，适用于输、配电线路带电作业的取证、复证培训以及带电作业人员的技术指导。本套教材分输电线路和配电线路，教材的出版将填补目前输配电线路带电作业资质认证培训教材的空白，对促进我国带电作业工作的开展，推动“人才强企”战略向纵深发展有着积极的意义。

易 辉

2011年10月15日

# 前 言

---

带电作业是提高供电可靠性的一种行之有效的重要手段。为满足工作要求，减少生产事故的发生，配电线路带电作业迫切需要对带电作业人员进行全面的职业技术培训，提高带电作业安全生产技术水平。

根据国家电网公司颁布的 Q/GDW520—2010《10kV 架空配电线路带电作业管理规范》的要求，为了进一步总结、交流、推动带电作业培训工作和保证带电作业培训质量，结合湖南省电力公司多年来培训的经验，由国家电网公司输配电带电作业湖南实训基地组织编写了本教材。本教材仅介绍 10kV 配电线路带电作业相关知识。

带电作业的发展证实了理论和实践相结合的重要性。本教材对配电线路带电作业原理、主要作业项目和作业方法进行了阐述，详细介绍了配电带电作业的基本原理、作业项目的劳动组合、操作步骤、主要安全措施、所需工器具等，并附有具有湖南省电力公司特色的小组作业控制卡和工序质量控制卡等内容。该教材结合国家电网公司颁布的《配电线路带电作业实训大纲》，能够对配电线路带电作业培训人员进行全方位的培训。

本教材分为两篇，共九章。其中，基础篇共分五章，介绍配电带电作业的原理、基本方法、安全技术条件、作业工器具、班组管理；实操篇按作业分类的不同分为四章，详细介绍了第一类作业项目、第二类作业项目、第三类作业项目、第四类作业项目的操作方法。

本教材基础篇由刘夏清、陈亮、雷冬云、黄永超、汪志刚、牛捷、夏增明编写，实操篇及附录由肖荣华、周煜、郑克全、陈浩、陶雪峰、潘力、胡斌、唐力、胡攀编写。

本教材由雷冬云主编，周煜、黄永超统稿，全国早期知名带电作业专家柏克寒<sup>①</sup>初审，上海电力公司的带电作业专家张锦绣主审，带电作业专家易辉作序。此外，在编写过程中得到国家电网公司人资部、生技部曹爱民、宁昕，湖南省电力公司陈波、罗电兵、龚政雄、朱亮、吴学斌、陈桃清，上海电力公司蓝耕、刘振海等专家对书稿的多次修改和对编写工作的大力支持，此外还得到了长沙电业局李畅、邓铭、陈川、张惠、刘正谊、曹杰、骆省安、李江、周惟、饶刚、吴力柯等的帮助与支持，在此深表感谢。

由于时间仓促和编写工作量大，书中不足之处在所难免，尚望不吝指正。

编委会

2012年3月

# 目 录

---

序  
前言

## 第一篇 基 础 篇

第一章 带电作业概况 .....	1
第一节 国内带电作业发展简史 .....	1
第二节 国外带电作业现状及发展趋势 .....	2
第三节 带电作业的必要性及紧迫性 .....	3
第二章 配电带电作业基本条件及分类 .....	5
第一节 带电作业基本条件 .....	5
第二节 带电作业方式分类 .....	9
第三章 配电带电作业安全技术 .....	14
第一节 过电压 .....	14
第二节 绝缘配合 .....	16
第三节 安全距离 .....	18
第四节 泄漏电流 .....	20
第五节 电容电流 .....	21
第六节 起重基本知识 .....	22
第七节 安全规定及组织措施 .....	26
第四章 配电带电作业工器具 .....	30
第一节 电气绝缘特性基本知识 .....	30
第二节 工器具材料的选用 .....	32
第三节 工器具分类 .....	34
第四节 工器具使用和保管 .....	38
第五节 绝缘斗臂车 .....	40
第六节 旁路作业系统 .....	47
第七节 工器具试验 .....	50
第五章 配电带电作业班组管理 .....	62
第一节 班组基础管理 .....	62
第二节 班组安全管理 .....	67
第三节 班组生产管理 .....	72
第四节 班组培训管理 .....	73

## 第二篇 实 操 篇

<b>第六章 第一类配电带电作业项目典型实操</b> .....	77
第一节 绝缘杆作业法修剪树枝及清除异物、拆除废旧设备 .....	77
第二节 绝缘杆作业法更换避雷器 .....	81
第三节 绝缘杆作业法断跌落式熔断器上引线 .....	84
第四节 绝缘杆作业法接跌落式熔断器上引线 .....	87
第五节 绝缘杆作业法断支接线路引线 .....	90
第六节 绝缘杆作业法接支接线路引线 .....	93
<b>第七章 第二类配电带电作业项目典型实操</b> .....	97
第一节 绝缘手套作业法加装或拆除接触设备套管、横担、故障指示器及附件 .....	97
第二节 绝缘手套作业法更换避雷器 .....	100
第三节 绝缘手套作业法断跌落式熔断器上引线 .....	103
第四节 绝缘手套作业法接跌落式熔断器上引线 .....	106
第五节 绝缘手套作业法断支接线路引线 .....	109
第六节 绝缘手套作业法接支接线路引线 .....	112
第七节 绝缘手套作业法断耐张线路引线 .....	115
第八节 绝缘手套作业法接耐张线路引线 .....	118
第九节 绝缘手套作业法更换跌落式熔断器 .....	121
第十节 绝缘手套作业法更换直线杆绝缘子 .....	124
第十一节 绝缘手套作业法更换直线杆绝缘子及横担 .....	127
第十二节 绝缘手套作业法更换耐张绝缘子串 .....	131
第十三节 绝缘手套作业法更换柱上开关（断路器）或隔离开关 .....	134
<b>第八章 第三类配电带电作业项目典型实操</b> .....	139
第一节 绝缘杆作业法更换直线绝缘子 .....	139
第二节 绝缘杆作业法更换直线绝缘子及横担 .....	141
第三节 绝缘手套作业法带负荷更换跌落式熔断器 .....	143
第四节 绝缘手套作业法更换耐张绝缘子串及横担 .....	146
第五节 绝缘手套作业法断电缆终端引线 .....	148
第六节 绝缘手套作业法接电缆终端引线 .....	151
第七节 绝缘手套作业法组立直线电杆 .....	153
第八节 绝缘手套作业法更换直线电杆 .....	156
第九节 绝缘手套作业法带负荷更换柱上开关或隔离开关 .....	158
第十节 绝缘手套作业法直线杆改终端杆 .....	161
第十一节 绝缘手套作业法直线杆改耐张杆 .....	164
<b>第九章 第四类配电带电作业项目典型实操</b> .....	168
第一节 绝缘手套作业法直线杆改耐张杆并加装柱上开关或隔离开关 .....	168
第二节 综合不停电作业法更换柱上变压器 .....	170

第三节 综合不停电作业法旁路作业·····	173
附录 A 小组作业控制卡（范本）·····	176
附录 B 工序质量控制卡（范本）·····	180
附录 C 带电作业工器具配置一览表·····	184
参考文献·····	185

# 第一篇 基础篇

## 第一章 带电作业概况

### 第一节 国内带电作业发展简史

带电作业是保证电网安全经济运行的一项重要技术措施，是提高供电可靠性和设备完好率必不可少的一项技术手段，是电力生产中的一项重大的技术成果，是“科学是第一生产力”的伟大实践。

我国早在 1952 年就开始进行了带电作业尝试，1954 年鞍山电业局研制出第一套 3.3~6.6kV 带电作业工器具，标志着我国带电作业的正式开展。1954 年 5 月 12 日被确定为我国的带电作业创始日。

1953~1956 年鞍山电业局在配电设施上开发了多种带电作业方法和工器具研制。1956 年，在原电力部的支持下，原东北电管局决定加强带电作业的研究工作，在局内成立 154~220kV 超高压线路带电作业研究组；同时鞍山电业局负责 3.3~6.6kV 线路带电作业的研究和工器具制造。1957 年两个研究组都先后完成了研制任务，给开展带电作业打下良好的基础。1958 年原东电带电作业组并入沈阳中心试验所，继续进行带电作业研究和工器具试制，制成 8 套 220kV 和 1 套 154kV 带电作业工器具。

1958 年 4 月《人民日报》发表文章：“电力工业的重大技术革新——不停电检修电力线路”。原电力部同时向全国发出通知，推广带电作业的新技术。

1964 年全国带电检修表演会在天津举办。1966 年、1973 年原水电部先后在鞍山、北京举行了全国性带电作业经验交流会。全国各地也先后举办带电作业经验交流会或现场表演会。

此后，220kV 以下电压等级的带电作业在全国普遍开始开展起来。据 1986 年年底统计，全国带电作业班组 314 个，带电作业人员 5000 余人。“三八”女子带电班施工现场如图 1-1 所示。

随着带电作业技术的发展，许多问题需要研究。鞍山电业局、长沙电业局等单位先后成立了带电作业科研组织，国家电力科学研究院也有专业人员从事带电作业的试验研究工作，这些单位都结合带电作业中的实际问题，进行了大量试验研究工作，丰富了带电作业基础理论，并为制订规程和国家标准提供了依据。

1987 年 9 月原能源部在兴城召开了全国带电作业工作会议。这次会议之后，原能源部决定成立全国带电作业组织协调小组及其办事机构——中国带电作业技术中心，负责 500kV 工器具的定型、带电作业人员的培训，并组织技术攻关等任务。

根据当时发展及工作需要，湖南省成立了全国首



图 1-1 “三八”女子带电班施工现场

个带电作业服务中心，2010年3月该中心成为国家电网公司（简称国网公司）首批输配电带电作业实训基地之一，如图1-2所示。

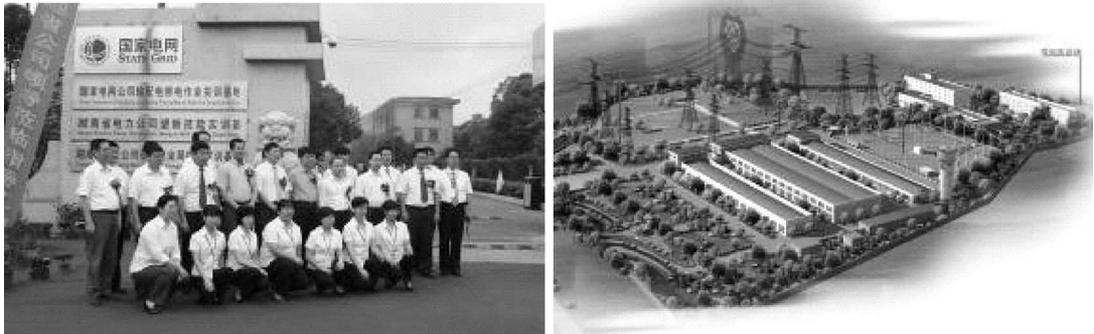


图1-2 国家电网公司输配电带电作业湖南实训基地图片



图1-3 带电作业机械人

1988年中国电机工程学会带电作业专委会成立。专委会进行了带电作业论文的评审，每年均出版带电作业论文专辑。这些活动推动了带电作业的学术交流。

随着科学技术的发展，出现了许多新的绝缘材料及金属材料。20世纪末到21世纪初，我国大量引进了用于配电作业的绝缘斗臂车，大大降低了作业安全风险，促使配电带电作业技术飞速发展。

近年来，国网公司大力推广配电带电作业，2010年在湖南省举办了10kV配网带电作业现场观摩会，2011年在山西举办了10kV配网架空线路带电作业技能竞赛。我国部分省份也大力开展配电带电作业革新，开展旁路作业法、箱变不停电作业法、移动电源车作业法、带电作业机械人（见图1-3）等研究，专用设备不断更新，作业方法不断创新，为我国配电带电作业翻开了光辉的新篇章。

## 第二节 国外带电作业现状及发展趋势

目前，世界上已有80多个国家开展了带电作业的研究与应用，其中中国、美国、俄罗斯、日本、加拿大、法国、英国、德国、瑞士、比利时、意大利及澳大利亚等40多个国家已广泛应用带电作业技术。

世界上最早开展带电作业的国家是美国。早在1923年，美国就开始在34kV配电线路上进行带电作业探索。随着新型绝缘材料尤其是环氧玻璃纤维绝缘材料的问世，20世纪50年代末，美国开始采用环氧玻璃纤维绝缘材料制成的带电作业工器具，并陆续在345、500、765kV超高压线路上进行带电作业。目前，美国已经在765kV及以下各个电压等级的线路上广泛开展带电作业，并进行了1000kV特高压人体接触带电体的试验。

日本从20世纪40年代初期开展带电作业，先是采用引进美国带电作业技术的方式，然后消化吸收，再创造自己的特点。1962年，日本开始在220kV输电线路上进行带电作业；

1972年,开始在500kV超高压输电线路上进行带电作业。日本的配电线路带电作业最具特色,其开发的配电带电作业工器具不仅门类繁多,而且系列和规格齐全,尤其是防护用具和遮蔽用具,适用于各个配电电压等级。日本的带电水冲洗装置和水冲洗方法在世界上居于领先水平,近年来,其在旁路带电作业工器具研发上也颇具特色。

前苏联于20世纪50年代初期才开始带电作业的试验研究。1970年前后,前苏联成功研究了采用绝缘水平梯进入高电位的等电位作业方法,并应用于220kV及以下的线路上。十余年后,前苏联成功建设了1150kV特高压输电线路,带电作业逐渐推广到330、500、750kV超高压输电线路和1150kV特高压输电线路。

欧洲国家的输电线路运行维护工作70%都是通过带电作业方式完成,在意大利和丹麦开设有专门的带电作业培训机构。

### 第三节 带电作业的必要性及紧迫性

从世界范围来看,带电作业向两个方向发展:一是随着特高压线路、紧凑型线路、超高压同杆多回线路、超高压直流线路的发展,对超高压、特高压线路带电作业提出了新的课题,要求研究相应的安全作业方式、方法、配套工器具及人身安全防护用具;二是随着生产、生活用电设施的日益普及,对供电可靠性要求越来越高,带电作业正面临一个新的发展时期,需要在更广泛的领域中推广应用,并向更高的水平和阶段推进。

电力的供应关系到国计民生,随着生产、生活用电设施的日益普及,人们对电力的依赖性和对供电可靠性的要求日益提高,许多大型企业,大型的政治、经济、文化、社会活动均需要不间断供电;电力企业具有社会公益性,特别是在经济转型期社会责任越来越大,要求服务于党和国家的工作大局,服务于地方经济的发展,自觉地履行社会责任。而目前电网结构还不太坚强,尤其是中西部地区,220、500kV线路大多是单回线,110、220kV线路同杆架设双回、多回的线路也不少,停电检修十分困难,一旦因个别设备缺陷而进行停电检修,即使时间很短,也会给电网和国民经济带来很大的直接和间接的经济损失。另外,对于直接为用户服务的配电系统,由于它具有网络庞杂、覆盖面大的特点,现阶段大多为单电源供电,不少城网老旧设备较多、检修维护工作量大,满足不了可靠性的要求。为了搞好优质服务、提高市场占有率,有必要大力开展带电作业工作,以提高配电网供电可靠性,提高履行社会责任和承诺的能力,进而增供扩销,最终达到提高企业自身经济效益的目的。



图 1-4 用直升飞机进行带电更换线路间隔棒



图 1-5 ±500kV 江城线带电水冲洗

从目前带电作业发展形势看，带电作业面临新的发展机遇，许多新的方式、方法有待研究开发，尤其以直升飞机带电作业应用（见图 1-4）、带电作业遥控机械手、全自动带电水冲洗系统（见图 1-5）、新型的检测仪表及安全防护用具、特高压带电作业方式方法最为迫切。配电带电作业新技术、新方法、新工器具的研发，特别是随着城市电缆化率的不断提高，配电电缆不停电作业的研究，已成为“十二五”期间需要解决的重大课题。

## 配电带电作业基本条件及分类

### 第一节 带电作业基本条件

带电作业要求在作业过程中不发生设备和人身事故，由于后者较前者会带来更为严重的后果，因此，带电作业基本条件在于满足作业时的人身安全。

配电线路带电作业，由于作业人员在作业区域的活动范围，受到配电线路导线对地距离和相间距离过小的限制，其带电作业方法、防护措施与输电线路相比有较大的不同。其显著的差异是，配电线路由于相对地和相间距过小，不能进行等电位带电作业，只能进行地电位或中间电位作业。

由于配电带电作业电压等级低，电场强度相对输电带电作业来说，对人体不构成威胁，最大的安全隐患来自于相间短路和相对地短路时流过人体电流的伤害。

#### 一、电流对人体的伤害

电对人体的伤害有两种类型，即电击和电伤。电击是电流通过人体内部，造成人体内部组织的破坏，乃至死亡。电伤主要是由电弧的热效应所造成，造成人体外部局部伤害，包括电弧烧伤、熔化的金属渗入皮肤和火焰烧伤等伤害。在带电作业过程中，不慎接地或短路时，往往伴随着强大的电弧，因此，对作业人员来说，两类伤害则同时出现。不过，绝大部分触电伤亡都是由电击造成的，通常所说的“触电”基本都是指电击而言。

电击伤害的严重程度与通过人体电流的大小、持续时间、途径、频率以及人体的健康状况等因素有关。电击时电流大小与人体生理反应见表 2-1。

表 2-1 电击时电流大小与人体生理反应

电流 (mA)	生理反应
0~0.9	无感觉
0.9~3.5	感到麻木，但并非病态
3.5~4.5	有些不适的麻和痛楚，轻微痉挛，反射性手指肌肉收缩
5.0~7.9	手感到有疼痛，表皮有痉挛
8.0~10.0	全手病态痉挛，收缩且麻木
10~12	肌肉痉挛并能致肩部强烈疼痛（接触带电体时间不能超过 30s）
13~14	手全部自己抓紧，需用力才能放开带电体（接触带电体时间不能超过 30s）
15	手全部自己抓紧，不能放开带电体

一般来说，10mA 以下的工频交流电流通过人体，人能摆脱电源，可以看作是安全电流，但长时间通过人体，也是危险的。

通过人体电流的大小，取决于作用于人体的电压和人体本身的电阻。人体电阻包括皮肤电阻与体内电阻。体内电阻基本不受外界因素的影响，其值较为稳定，约为  $500\Omega$ ，皮肤电阻则随外界条件不同而在较大范围内变化。影响人体电阻的主要因素有以下几个：

(1) 皮肤干燥时电阻大，皮肤潮湿时电阻小；皮肤完整时电阻大，皮肤破损时电阻小。不同条件下的人体电阻详见表 2-2。

(2) 电极与皮肤的接触面积越大，人体电阻越小，电击的伤害程度越严重。有时增加接触压力也会使人体电阻减小，因为加压往往导致接触面积加大的皮肤与接触物之间的接触电阻减小。

(3) 接触电压越高，人体电阻越小。表 2-2 中的数值就充分说明了这个问题。

表 2-2 不同条件下的人体电阻

接触电压 (V)	人体电阻 ( $\Omega$ )			
	皮肤干燥	皮肤潮	皮肤湿	皮肤浸入水中
10	7000	3500	1200	600
25	5000	2500	1000	500
50	4000	2000	875	440
100	3000	1500	770	375
250	1500	1000	650	325

由欧姆定律可知，在电压不变的情况下，人体电阻越大通过人体电流越小，反之，则越大。一般人体电阻取  $1500\Omega$  为宜。

带电作业中人体触电的方式有三种，即单相触电、两相触电、跨步电压（包括接触电压）触电。带电作业事故统计表明，单相触电所占比例最大。

(1) 单相触电。单相触电是指人体处于低电位的情况下接触三相导线中任何一相所引起的触电。其危害程度与电压的高低、与地的接触情况、电网中性点是否接地和每相对地电容的大小有关。单相触电分为中性点直接接地系统的单相触电和中性点不直接接地系统的单相触电。

中性点直接接地系统的单相触电如图 2-1 所示。当人体接触一相导体时，承受相电压，电流经过人体、横担、接地引下线、大地和变压器中性点接地装置、绕组及导线，形成电流回路，通过人体电流很大，其值取决于相电压和回路的阻抗。

中性点不直接接地的单相触电如图 2-2 所示。由于中性点不直接接地，单相触电时，电流经过人体、电杆、大地与其他两相的相对地绝缘阻抗形成回路。

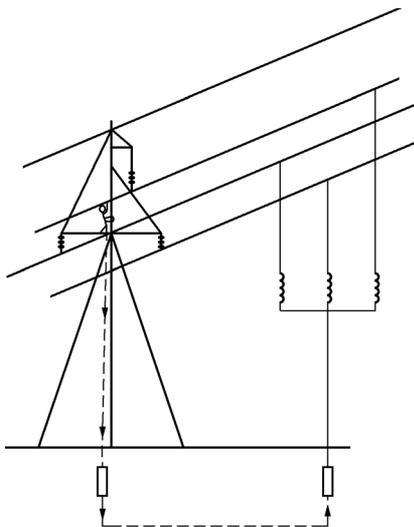


图 2-1 中性点直接接地系统的单相触电示意图

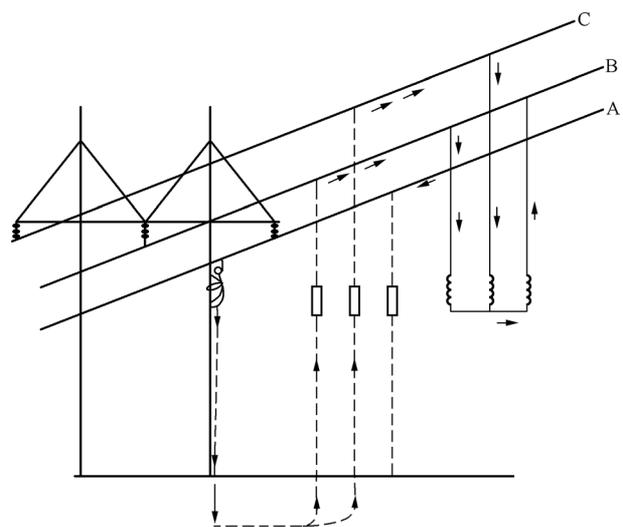


图 2-2 中性点不直接接地系统的单相触电示意图

**【例 2-1】** 在一条 20km 长的 10kV 单回路输电线路路上发生人体单相触电事故，试计算通过人体的电容电流。

**解** 根据 10kV 单回线无架空地线时每千米单相接地电容电流为 0.02A，可得通过人体电容电流为

$$I = 0.02 \times 20 = 0.4(\text{A})$$

(2) 两相触电。两相触电是指人体同时接触带电的任何两相，不管中性点是否接地，人体均处于线电压之下，非常危险。例如在上述 10kV 输电线路路上发生两相触电，将人体的电阻取为  $1500\Omega$ ，通过人体电流达到 6.67A，为单相触电时的 16 倍。

(3) 跨步电压触电。当带电导体断脱后掉在地上，或采取一相人为接地，另两相运行（即分相作业）时，电流从导线落地点（或人为接地点）流入大地，会在入地点（或人为接地点）附近地面上产生不同的电位。接近入地点土层的导电截面最小、电阻最大、电压降也大；当距离入地点处较远，导电截面变大，电阻减小，电压降也减小。以电流入地处作为圆心，并且假设入地处及附近的土质为匀质，在 20m 范围内画上若干同心圆，那么这些同心圆上的电位彼此是不相同的，而同一圆周上的电位则是相同的。如果人的双足分开站立，就会受到地面上不同点之间的电位差，电流便从人的一脚到另一脚流过，造成触电伤害，即跨步电压触电。

电流通过人体的持续时间是影响电击伤害程度的重要因素，时间越长，人体电阻越低，后果越严重。此外，人的心脏每收缩扩张一次，大约需要 1s 的时间，其中约有 0.1s 的间隙，如果电流在这一瞬间通过心脏，即使电流很小，也会引起心脏震颤；反之，即使电流很大（10A），也不会引起心脏麻痹。因此电流持续时间超过 1s，必然与心脏最敏感的间隙期重合，造成危险后果。

电流通过人体的途径与电击伤害程度有直接关系。一般认为，通过呼吸系统和中枢神经的电流越大，电击的危险性也越大；电流通过人的头部会造成人员立即昏迷，直到死亡。电流通过脊髓，会使人半截肢体瘫痪；电流通过心脏，会引起心房震颤或心脏停止跳动，中断全身血液循环，造成死亡。从手到脚的电流途径对人体最为危险，其次是从手到手的电流途径，再次是从脚到脚的电流途径。

综上所述，触电伤害的程度与电流大小、电压高低、人体电阻等几个因素有关。从以下两方面可以降低带电作业时通过人体的电流：

(1) 减少作用于人体的电压。

(2) 增大触电回路的阻抗。例如使用绝缘性能优良的操作杆进行操作；站在绝缘梯（台）上处理设备缺陷及保证规程规定的最小安全距离，保持人体对带电设备的距离等。

## 二、空气的绝缘强度及电场

空气是绝缘介质的一种。在架空线路相与相之间、相对地之间都是靠空气绝缘的，带电作业安全距离的确定、保护间隙的使用都是按空气的击穿放电特性考虑。

处于正常状态并隔绝各种外电离因素作用的空气是完全不导电的。由于紫外线、宇宙射线及地球内部辐射的作用，空气中的中性质点会产生电子和离子的游离过程，同时也互相复合，所以空气并非绝对的绝缘体，但由于带电质点极少，空气电导极小，仍为优良的绝缘体。

当提高空气间隙的电压达到一定数值后，电流突然剧增，绝缘性能下降。气体这种由绝

缘状态突变为良导电状态的过程，称为击穿。当击穿过程发生在气体与液体（或固体）交界面上时，称为沿面闪络。击穿和闪络均称为气体放电。发生击穿或闪络的最低电压称为击穿电压或闪络电压。均匀电场中击穿电压与间隙距离之比称为击穿强场，它反映了气体耐受电场作用的能力。不均匀电场中击穿电压与间隙距离之比称为平均击穿场强。

由于放电条件不同，气体放电可以分为完全放电与不完全放电。空气间隙的放电和绝缘子放电，属于完全放电；导线周围的电晕和带电作业工器具做耐压试验时在加压端出现的刷形放电，属于不完全放电。在均匀电场与稍不均匀电场中（如板—板电极间）放电是完全的，不可能产生不完全放电；在不均匀电场中（如棒—棒、棒—板电极间）放电一般是从不完全放电开始，而后才发展成完全放电。均匀电场与不均匀电场示意图如图 2-3 所示。

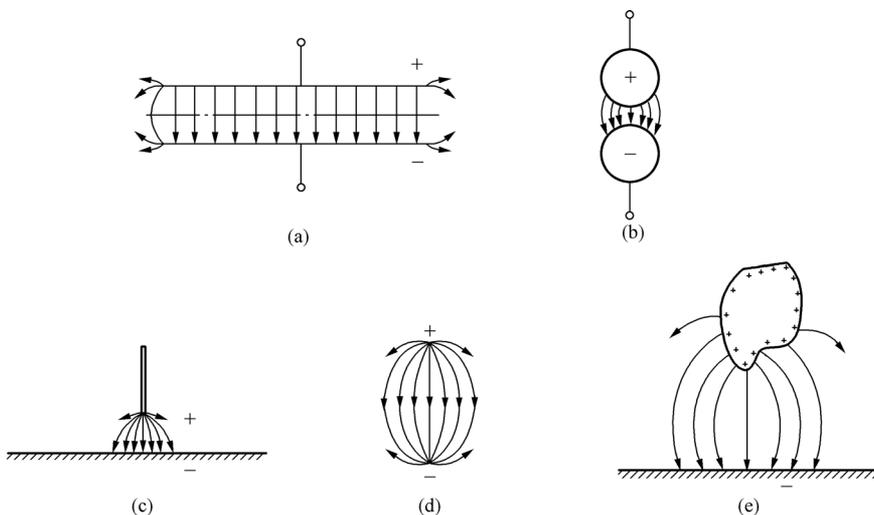


图 2-3 均匀电场与不均匀电场示意图

(a) 均匀电场（中间部分）；(b) ~ (e) 不均匀电场

在实际高压电气设备和带电作业中所遇到的大都是不均匀电场，如架空线相间、变压器和断路器各相套管间、带电导体对大地间、等电位作业人体对地间。在不均匀电场中，当电场不够高时，气体游离过程只限于在电场强度较强的电极周围，只发生不完全放电，产生稳定的电晕或不稳定的火花。如果电压继续升高，使电极间达到击穿的数值，这时不完全放电就发展成完全放电。在均匀电场中，情况就不一样了，因为均匀电场的平均电场强度与最大的电场强度相差极小，只要在一点发生游离，此过程就会很快贯穿整个间隙，此时将发生完全放电。在不均匀电场中，起始放电电压即电晕电压比击穿电压低；而在均匀电场中，起始放电电压即是间隙的击穿电压。

带电作业过程中，作业人员往往要在高压电气设备或高压线路的高电位体附近工作，甚至直接接触高电位。作业人员周围就是一个空气绝缘的电场。为了保证作业人员的安全，《国家电网公司安全工作规程》（以下简称《安规》）对带电作业最小安全距离、组合间隙等有详细规定，目的就是为了防止空气放电对作业人员产生危害。

影响空气放电的因素很多，如电场的均匀程度（由电极现状和间隙距离决定）和间隙上所加电压的波形、湿度、温度等。同一间隙的临界击穿电压大小顺序为：雷电击穿放电电压