



国家电网公司
电力科技著作出版项目

超/特高压

交直流输电线路带电作业

胡毅 刘凯 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



国家电网公司
电力科技著作出版项目

M 723

58

超/特高压

交直流输电线路带电作业

胡毅 刘凯 编著



试研院B0014595



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

针对超/特高压线路带电作业面临的技术问题,为满足线路运行维护人员和技术管理人员的需要,促进超/特高压输电线路带电作业的开展,根据超/特高压输电线路带电作业研究成果编写此书。

全书共分为6章,包括概述、750kV输电线路带电作业、直流输电线路带电作业、1000kV交流输电线路带电作业、输电线路带电作业工具与防护用具、输电线路带电作业仿真培训系统。

本书可作为超/特高压输电线路带电作业人员技术培训教材,也可供超/特高压输电线路运行管理人员和工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

超/特高压交直流输电线路带电作业 / 胡毅, 刘凯编著.

北京: 中国电力出版社, 2011. 12

ISBN 978 - 7 - 5123 - 2531 - 9

I. ①超… II. ①胡… ②刘… III. ①高压输电线路: 直流输电线路 - 带电作业②高压输电线路: 交流电路 - 带电作业
IV. ①TM726

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 274110 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>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2011 年 12 月第一版 2011 年 12 月北京第一次印刷

710 毫米 × 980 毫米 16 开本 20.25 印张 357 千字

印数 0001—3000 册 定价 56.00 元

敬 告 读 者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

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



前 言

随着我国电网的建设与发展,经过近60年的研究及应用,带电作业已成为输配电线路检测、检修、改造的重要手段和方法,对电力系统的安全可靠运行和提高经济效益起到了重要作用。近年来,为满足我国大容量、远距离输电的需要,750kV交流和特高压交、直流输电工程相继建设并投入运行,对带电作业技术提出了一系列新的课题。通过对超/特高压输电线路带电作业的系统研究,我国在作业技术、安全防护、作业工具等多方面都有了新的突破,研究成果已应用于线路设计及运行维护,对系统安全运行起到了重要作用。目前我国的带电作业与世界其他国家相比,在作业方法多样化、作业工具轻巧化、作业项目操作难度、应用的广泛性等方面都走在前列,并具有鲜明特点。

针对超/特高压线路带电作业面临的技术问题,为满足线路运行维护人员和技术管理人员的需要,促进超/特高压输电线路带电作业的开展,根据超/特高压输电线路带电作业研究(包括带电作业安全距离、间隙研究,作业人员安全防护研究,作业工器具研究,作业导则编制,仿真培训系统开发等),编写此书。全书共分为6章,包括概述、750kV输电线路带电作业、直流输电线路带电作业、1000kV交流输电线路带电作业、输电线路带电作业工具与防护用具、输电线路带电作业仿真培训系统。

参加超/特高压输电线路带电作业研究工作的主要工作者有胡毅、刘凯、王力农、刘庭、胡建勋、肖宾、彭勇、谷定燮、邵瑰玮、周沛洪、郑传广、徐莹、张丽华、张俊兰、陈勇、戴敏、李振强、

姜颖等；另外，参加750kV交流输电线路带电作业研究工作的还有西北电网公司的曾林平、顿连彪、杨震强等；参加1000kV交流输电线路带电作业研究工作的还有湖北省电力公司涂明、山西省电力公司董彦武、河南省电力公司李俊峰等；参加±660kV直流线路带电作业研究工作的还有山东电力集团公司刘洪正、孟海磊等；参加±800kV直流线路带电作业研究工作的还有中国南方电网超高压输电公司肖勇、樊灵孟等。刘庭、肖宾、彭勇参与了本书的编写并做了大量的统稿工作。

由于时间仓促，难免有疏漏之处，敬请广大读者批评指正！

编者

2011年12月



目 录

前言

第一章 概述	1
第一节 带电作业技术的发展概况	1
第二节 带电作业技术原理	8
第二章 750kV 输电线路带电作业	22
第一节 750kV 单回输电线路带电作业	22
第二节 750kV 同塔双回路输电线路带电作业	46
第三节 750kV 输电线路带电作业人员的安全防护	72
第三章 直流输电线路带电作业	84
第一节 $\pm 660\text{kV}$ 直流输电线路带电作业	84
第二节 $\pm 800\text{kV}$ 直流输电线路带电作业	109
第三节 直流输电线路带电作业人员的安全防护	147
第四节 $\pm 800\text{kV}$ 与双回 500kV (220kV) 交流同塔多回线路带电 作业	171
第四章 1000kV 交流输电线路带电作业	190
第一节 1000kV 单回输电线路带电作业	190
第二节 1000kV 同塔双回路输电线路带电作业	212



第三节	1000kV 交流与其他交流混压并架输电线路的带电作业	243
第五章	输电线路带电作业工具与防护用具	260
第一节	绝缘工器具	260
第二节	金属工器具	270
第三节	安全防护用具	284
第六章	输电线路带电作业仿真培训系统	289
第一节	虚拟现实技术	289
第二节	带电作业仿真培训系统设计	291
第三节	仿真系统硬件操作模式选择	313
参考文献	316

第一章

概 述

第一节 带电作业技术的发展概况

一、国外带电作业的发展概况

1. 俄罗斯的带电作业

俄罗斯在 20 世纪 30 年代首次进行输电线路带电作业试验，这些作业包括用绝缘工具检测绝缘子及更换线路金具。

20 世纪 40 年代，等电位作业这一新的带电检修方法已得到应用并开始推广，第一本带电作业操作规程已经制定。到 20 世纪 50 年代中期，带电作业技术已经普及到全国电力系统 75% 的地区，在这些地区中，线路抢修工作有 85% 采用带电作业，带电作业内容包括绝缘检测、压接管电阻测量、涂刷防腐漆等。

1959 ~ 1962 年，根据 35 ~ 110kV 带电作业经验，开展了 6 ~ 10kV 配电线路的带电维修。330 ~ 750kV 线路建成后，考虑到输电线路及系统需要更高的运行可靠性及经济因素，带电作业进一步成为重点工作。

330 ~ 750kV 输电线路的带电作业已发展了一套完整、规范的操作方法，并配有专业化的装备。另外，随着 1150kV 特高压线路的建设，对 1150kV 输电线路的带电作业技术也有了少量探索性研究。

2. 美国的带电作业

线路带电作业工具于 1913 年最早出现在美国俄亥俄州，这些工具是木制的。在第一次世界大战与第二次世界大战期间，美国由于经济萧条，在电力开发应用中十分注重经济性，因此采用带电作业方法为用户提供不间断供电，推动了带电作业的发展。随着电压等级的不断提高，需要绝缘性能更完善的带电操作杆，1946 年 Chance 公司采用了塑料套木杆，20 世纪 50 年代 Chance 公司

研制了玻璃纤维增强型合成树脂管。目前,美国各主要电力公司都配有专门的带电作业队伍和培训基地,如弗吉尼亚州电力局就有输、变、配带电作业培训场,10~750kV线路均开展带电作业检修和运行维护,洛杉矶水电局则研制了专用的带电水冲洗车,不少电力单位还开展了直升机带电检修作业项目。

3. 加拿大的带电作业

加拿大从1929年开始在110kV线路上带电测试绝缘子串。20世纪30年代后开始在220kV线路上开展带电作业。1959年以后开始在460kV线路上开展带电作业,美国电力公司、加拿大安大略水电局、魁北克水电局在1960~1967年联合开展了等电位带电作业技术研究,并成立了一个工作组制定标准及进行技术和方法的评定工作。

4. 英国的带电作业

英国在20世纪40年代开始用操作杆测量绝缘子串电压分布,1965年开始对输电线路的带电作业进行了一系列研究工作,从1967年开始在400kV线路上开展等电位带电作业,目前欧洲带电作业更多应用在配电线路上,而在输电线路相对减少,这主要是考虑输电网有较多备用设备。

5. 法国的带电作业

1960年以来,法国成立了带电作业技术委员会和带电作业试验研究所,对带电作业技术主要研究了以下方面:①安全性分析(包括带电作业原理、安全规程、人员培训和监督方法);②作业方法(包括采用工具的间接作业法、戴橡胶手套的配电线路直接作业法、输电线路的等电位作业法);③工具设备(包括参数、性能的确定,各种工具的操作方法和使用范围)。

6. 德国的带电作业

德国从1971年开始采用带电作业,从配电线路到400kV输电线路都开展带电作业项目。主要开展项目有绝缘子串的更换、导线的修补、配件的检查和更换、绝缘装置的清洗、带电区设备的涂漆、间隔棒的检查和更换。

7. 意大利的带电作业

意大利从1962年开始开展带电作业。1977年推出了带电作业的管理规程,1968年组成带电作业技术委员会,1969年建立了带电作业中心,在作业中心有一个高压和超高压线路试验场,试验场中有各种电压等级的模拟线段,各种作业方法及相应的工器具,均在试验场进行模拟操作试验,在带电中心内,有对技术人员和工人进行培训用的教室。

8. 丹麦的带电作业

丹麦从20世纪70年代开始开展带电作业,起步较晚,但发展较快,1971

年建立了带电作业协会。带电作业常规项目有带电更换绝缘子、导线补强、连接及拆除变压器连接线及分支线的电缆头。丹麦很重视带电作业理论和实际操作的培训。培训分为两种：一种是全面培训，包括理论学习和所有的基本操作项目；另一种是特殊培训，主要培训特定的项目和操作技能。

9. 日本的带电作业

日本的带电作业已逐步向机械化、自动化方向发展，与过去相比，输电线路的带电作业相对减少，配电线路的带电作业相对增多，原因一是许多地方已形成多回路环网供电；二是输电线路故障率相对减少，而对配电网的供电可靠性却提出了更高的要求，要求向完全不停电的方向发展。日本电力部门的目标是：使配电线路的带电作业全面实现机械化。

过去，以减小停电范围的带电作业法为主，还不能做到完全不停电检修。为了提高供电可靠性，现在积极推广完全不停电作业法，并为此开发了一系列机械化作业工具和设备，它们包括高压发电机车、低压发电机车、高压电缆旁路车、变压器车、低压不停电切换装置、事故点探查车、配电线路带电作业机械手以及其他用于直接带电作业法和间接带电作业法的工具及配套设施。

二、我国带电作业发展概况

我国的带电作业起步于 20 世纪 50 年代初，当时的电力工业基础薄弱、网架单薄、设备陈旧，经常需要停电检修和处理缺陷。由于生产上的迫切需要，1953~1957 年鞍山电业局首先在 3.3~66kV 配电线路上研究探索带电更换和检修设备。1957 年东北电业管理局首次在 154~220kV 高压线路上进行了不停电检修，1958 年又进一步研究等电位作业的技术问题，并成功在 220kV 线路上首次进行了等电位带电检修线夹的工作。

随后，带电作业在全国推广应用，从 10kV 配电线路到 500kV 输电线路的检测与更换绝缘子、线夹、间隔棒等常规项目到带电升高、移位杆塔等复杂项目均有开展。近年来，又进一步开展了紧凑型线路、同塔多回线路、750kV 线路和特高压交、直流输电线路带电作业的研究及应用。开展的工作主要有以下方面：

(1) 带电作业专业组织。为组织和协调全国带电作业技术的交流和开展，成立了全国带电作业标准化技术委员会、带电作业工器具设备质检中心等专业组织，它们对全国带电作业技术的提高和发展起到了促进作用。

(2) 标准制定工作。标准化工作是促进带电作业安全开展的重要保证，在国际电工委员会 (IEC) 中设有带电作业技术委员会 (IEC/TC78)，我国 1978 年参加 IEC/TC78 的标准制定工作，1980 年开始制定带电作业工具标准。

30多年来,已颁布了配电线路带电作业技术导则及屏蔽服、绝缘绳、绝缘杆、绝缘滑车、绝缘遮蔽罩等方面的一批带电作业标准。

(3) 带电作业技术理论研究。随着带电作业实践经验积累,技术理论研究也不断深入,一大批带电作业的研究论文发表在国内外杂志和专业学术交流会议上,包括安全距离的研究、作业方式的研究、工器具的研究、新型绝缘材料的研究,涉及带电作业的各领域和各方面,对带电作业的安全开展起到了指导作用。

(4) 工器具研制和开发。为提高带电作业的安全性和可靠性,研制出了许多与先进的作业方法相配套的工器具,生产厂家也不断努力提高产品质量,使带电作业工器具的性能不断得到改进、完善和提高,目前正进一步向系列化、标准化、更高电压等级、更高机械强度方向发展。

(5) 人员技术培训。随着带电作业的发展及人员的新老替换,带电作业的培训工作在各电力单位得到了重视和加强,在全国相继建成了不同电压等级的模拟线路,可进行10~1000kV的带电作业项目培训,通过举办多种形式的学习班、培训班、研讨班、操作表演会和交流评比会,对提高带电作业人员的理论和操作水平起到了促进作用。

三、带电作业技术标准化工作

IEC/TC78主要负责带电作业国际标准的修订。1976年,该委员会在巴黎召开了第一次国际会议。该委员会原设10个工作组,其任务分别为:

第1工作组——名词术语。编写带电作业中所有工具设备的名词,术语和定义。

第2工作组——硬质绝缘器件。制定硬质绝缘器件的标准,包括绝缘管(填充管和空心管)、绝缘棒、操作杆端部装置及附件(金属附件)、绝缘梯、硬质遮蔽罩等硬质绝缘器件、便携式保护间隙。

第3工作组——柔性绝缘器件。制定软质绝缘器件的标准,包括防护性的绝缘材料及绝缘服、手套、鞋等,对横担、杆塔、绝缘子、导体进行遮蔽的柔性遮蔽罩、绝缘绳索等。

第4工作组——手工工具。制定用于交流10kV、直流15kV以下的带电作业手工工具及必要试验方法的标准。

第5工作组——高空作业装置。制定绝缘斗臂车、起重架、导线飞车、挂车、升降车等的标准。

第6工作组——带电作业用工作服。制定带电作业用屏蔽服、防电弧服的标准。

第7工作组——验电器。制定验电器及核相器的标准。

第8工作组——接地及短路装置。制定保护作业人员的接地短路装置的标准。

第9工作组——带电作业用起吊设备。制定输电线路及配电线路的带电安装——起吊设备的标准。

第10工作组——安全距离及计算方法。制定带电作业安全距离及相应计算方法的标准。

在1996年全体会议上，各国代表通过表决，决定将10个工作组合并为4个工作组，成立1个顾问组。顾问组的职责主要是监督和指导工作组及项目负责人工作，新成立的4个工作组是：

第1工作组——技术资料。

第2工作组——工具及设备。

第3工作组——保护装置。

第4工作组——检测装置。

我国从1980年开始制定带电作业工器具标准，已颁布的54项标准中，主要分为基础类、工设备类、规程导则三类。

(1) 第一类标准中主要包括术语定义、通用技术要求、试验及计算方法、设计原则等，有以下9项标准：

GB/T 2900.55—2002 电工术语 带电作业

GB/T 14286—2008 带电作业工设备术语

GB/T 18037—2008 带电作业工具基本要求与设计导则

GB/T 19185—2008 交流线路带电作业安全距离计算方法

DL/T 876—2004 带电作业绝缘配合导则

DL/T 877—2004 带电作业用工具、装置和设备使用的一般要求

DL/T 972—2005 带电作业用工具、装置和设备的质量保证导则

DL/T 974—2005 带电作业用工具库房

DL/T 976—2005 带电作业用工具、装置和设备预防性试验规程

(2) 第二类标准涉及带电作业工器具及装置，主要包括绝缘材料、作业工具、防护用具等。有以下34项标准：

1) 绝缘材料：

GB 13398—2008 带电作业用空心绝缘管、泡沫填充绝缘管和实心绝缘棒

GB/T 13035—2008 带电作业用绝缘绳索

GB/T 25097—2010 绝缘体带电清洗剂

2) 作业工具:

- GB/T 12167—2006 带电作业用铝合金卡线器
- GB/T 13034—2008 带电作业用绝缘滑车
- GB/T 14545—2008 带电作业用小水量冲洗工具（长水柱短水枪型）
- GB/T 15632—2008 带电作业用提线工具通用技术条件
- GB/T 17620—2008 带电作业用绝缘硬梯
- GB/T 18269—2008 交流 1kV、直流 1.5kV 及以下带电作业用手工工具
- GB/T 25725—2010 带电作业工具专用车
- DL/T 415—2009 带电作业用火花间隙检测装置
- DL/T 463—2006 带电作业用绝缘子卡具
- DL/T 636—2006 带电作业用 500kV 四分裂导线飞车
- DL/T 699—2007 带电作业用绝缘托瓶架通用技术条件
- DL/T 740—2000 电容型验电器
- DL/T 779—2001 带电作业用绝缘绳索类工具
- DL/T 854—2004 带电作业用绝缘斗臂车的保养维护及在使用中的试验
- DL/T 858—2004 架空配电线路带电安装及作业工具设备
- DL/T 879—2004 带电作业用便携式接地和接地短路装置
- DL/T 971—2005 带电作业用交流 1kV ~ 35kV 便携式核相仪
- DL/T 1007—2006 架空输电线路带电安装导则及作业工具设备
- DL/T 1145—2009 绝缘工具柜

3) 防护用具:

- GB/T 6568—2008 带电作业用屏蔽服装
- GB/T 12168—2006 带电作业用遮蔽罩
- GB/T 17622—2008 带电作业用绝缘手套
- GB/T 18136—2008 高压静电防护服装及试验方法
- GB/T 25726—2010 1000kV 带电作业用屏蔽服装
- DL/T 676—1999 带电作业用绝缘鞋（靴）通用技术条件
- DL 778—2001 带电作业用绝缘袖套
- DL/T 803—2002 带电作业用绝缘毯
- DL/T 853—2004 带电作业用绝缘垫
- DL/T 880—2004 带电作业用导线软质遮蔽罩
- DL/T 975—2005 带电作业用防机械刺穿手套
- DL/T 1125—2009 10kV 带电作业用绝缘服装

(3) 第三类标准主要包括技术规程、技术导则等。有以下 11 项标准:

GB/T 18857—2008 配电线路带电作业技术导则

GB/T 13395—2008 电力设备带电水冲洗导则

GB/T 25098—2010 绝缘体带电清洗剂使用导则

DL/T 392—2010 1000kV 交流输电线路带电作业技术导则

DL/T 400—2010 500kV 紧凑型输电线路带电作业导则

DL 784—2001 带电更换 330kV 线路耐张单片绝缘子技术规程

DL/T 878—2004 带电作业用绝缘工具试验导则

DL/T 881—2004 ± 500 kV 直流输电线路带电作业技术导则

DL/T 966—2005 送电线路带电作业技术导则

DL/T 1060—2007 750kV 交流输电线路带电作业技术导则

DL/T 1126—2009 同塔多回线路带电作业技术导则

随着带电作业工作的深入开展,对带电作业标准化工作也提出了新的要求,今后须进一步加强国际标准的采标,加快标准制定进度,将科研成果和生产运行经验尽快转化为标准,对安全生产起到指导作用,对产品质量提高起到促进作用,对带电作业工作的规范化起到提高作用。

四、超/特高压输电线路的特点及其对带电作业提出的新要求

超/特高压输电线路在整个电网中具有重要作用,其运行的可靠性要求较一般高压线路更高,需要根据线路的特点,结合积累的线路运行维护经验,研究提出超/特高压输电线路带电作业的技术方法,以保证线路安全稳定运行。

1. 超/特高压输电线路的特点

与一般线路相比,超/特高压输电线路具有以下特点:

(1) 线路的结构参数高。超/特高压输电线路的杆塔高、塔头尺寸大、导线分裂数多、绝缘子串长、绝缘子片数多、吨位大。

(2) 线路的运行参数高。线路的额定运行电压高,使带电体周围的电场强度较高。

(3) 线路长、沿线地理环境复杂。超/特高压输电线路多途经山区、丘陵、采空区、江河等地形,沿线地貌复杂,所经地区还会遇上重污、覆冰、强风、雷暴等极端气象条件。

(4) 安全运行的可靠性要求高。由于超/特高压输电线路的输送容量较大,在电网中的地位重要,因此必须确保其安全运行的高度可靠性。

2. 对带电作业新的要求

超/特高压输电线路的这些特点给线路带电作业提出了新的要求,主要有:

(1) 对安全距离等关键技术参数要求更高。由于超/特高压线路的电压等级高,带电作业时可能出现的过电压也将更高。因此,为满足带电作业时的安全要求,带电作业时的安全距离、组合间隙、绝缘工具的有效绝缘长度等关键技术参数要求将更高。

(2) 对作业工器具要求更高。由于超/特高压线路的结构参数高,对作业工器具提出了更高的要求。例如,塔头尺寸大就要求作业工器具的长度长,导线分裂数多就要求提线工具、绝缘子更换工具等的荷载能力大,绝缘子吨位大也要求相应的卡具与之配套。

(3) 对安全防护要求更高。由于超/特高压线路的电压等级更高,使得带电体周围的电场强度更高,常规高压线路带电作业屏蔽服装已不能满足超/特高压输电线路带电作业人员安全防护的要求,需要研制专用的屏蔽服装;电压等级的提高还会使电位转移脉冲电流增强,这也对安全防护提出了更高的要求。

(4) 对新工具新方法的研究和应用提出了要求。如硬质绝缘工具在常规高压线路带电作业中应用较多,而超/特高压线路中的硬质工具长度更长、荷重更大,因而质量也更大,从而给运输和使用带来了一定的困难,需要研究轻型的软质工具以便于运输和使用;又如超/特高压线路杆塔高,所以提出了将直升机应用于特高压线路带电作业的要求。

第二节 带电作业技术原理

带电作业是指在带电的情况下,对电气设备进行测试、维护和更换部件的作业。

一、电对人体的影响

电对人体的危害方式有两种:一种是人体的不同部位同时接触有电位差的带电体,电流通过人体时发生的;另一种是在带电设备附近工作时,尽管人体并未接触带电体,但却有风吹、针刺等不适之感,这是由空间电场引起的。为什么带电作业人员可以在运行的电气设备上安全工作,甚至直接接触高达数十万伏电压的带电体而不遭受触电伤害呢?这就需要了解并掌握带电作业的工作原理。

(一) 电流对人体的影响

如果人体被串接于闭合电路中,人体中就会流过电流,其大小按 $I_r = U/Z_r$ 计算。 Z_r 为人体的阻抗,人体阻抗包括人体内阻抗和皮肤阻抗两部分。可以认

为人体内阻抗基本上是电阻,仅有一小部分的电容分量。皮肤阻抗可看作是一阻容网络,随电压、频率、电流持续时间、接触面积、接触压力、皮肤湿度和温度等的变化而变化。

表 1-1 给出的是在干燥条件下,接触面积为 $50 \sim 100\text{cm}^2$, 电流路径为手—手或手—脚的人体阻抗值。

表 1-1 人 体 阻 抗

接触电压 (V)	人体阻抗低于下列数值 (Ω)		
	人数百分比 5%	人数百分比 50%	人数百分比 95%
25	1750	3250	6100
50	1450	2625	4275
75	1250	2200	3500
100	1200	1875	3200
125	1125	1625	2875
220	1000	1350	2125
700	750	1100	1550
1000	700	1050	1500

从表 1-1 数据可看出,人体阻抗因人而异。在接触电压为 220V 时,有 5% 的人阻抗小于 1000Ω , 50% 的人阻抗小于 1350Ω , 95% 的人阻抗小于 2125Ω 。从安全出发,人体阻抗一般可按 1000Ω 进行估算。

电击对人体造成损伤的主要因素是流经人体的电流大小。电击一般分为暂态电击和稳态电击。

人体对工频稳态电流的生理反应可以分为感知、震惊、摆脱、呼吸痉挛和心室纤维性颤动等,其相应电流阈值见表 1-2。

表 1-2 人体对工频稳态电流产生生理反应的电流阈值 mA

生理反应	感知	震惊	摆脱	呼吸痉挛	心室纤维性颤动
电流阈值 (男性)	1.1	3.2	16.0	23.0	100.0
电流阈值 (女性)	0.8	2.2	10.5	15.0	100.0

心室纤维性颤动被认为是电击引起死亡的主要原因,但超过摆脱电流阈值的电流,也可以是致命的。因为此时人手已不能松开,使得电流继续流过人体,引起呼吸痉挛甚至窒息而导致死亡。

IEC 对交流电流下人体生理效应的推荐电流阈值见表 1-3。其中,感知电流阈值与接触面积、接触条件(湿度、压力、温度)和每个人的生理特征有关,心室纤维性颤动电流阈值与电流的持续时间有密切关系。

表 1-3 IEC 对交流电流下人体生理效应的推荐电流阈值

人体生理效应		15 ~ 100Hz 交流电流阈值 (mA)
感知		0.5
摆脱		10
心室纤维性颤动	持续时间为 3s	40
	持续时间为 1s	50
	持续时间为 0.1s	400 ~ 500

暂态电击是作业人员接触不同电位导体的瞬间,积累在导体上的电荷以火花放电的形式通过人体突然放电。这时,流过人体的电流是频率很高的电流,由于这种放电电流变化复杂,所以通常都以火花放电的能量来衡量其对人体产生的危害程度。表 1-4 是人体对暂态电击产生生理反应的能量阈值。

表 1-4 人体对暂态电击产生生理反应的能量阈值

生理效应	感知	烦恼	损伤或死亡
能量阈值 (mJ)	0.1	0.5 ~ 1.5	25000

(二) 电场对人体的影响

作业人员在带电作业过程中,构成了各种各样的电极结构。其中主要的电极结构有导线—人与构架、导线—人与横担、导线与人—构架、导线与人—横担、导线与人—导线等。带电作业的现场环境和带电设备布局的不同、带电作业工具和作业方式的多样性、人在作业过程中有较大的流动性等因素,使带电作业中遇到的高压电场变化多,这就要求作业人员了解电场的基本特征和分类。

自然界存在着正、负两种电荷,电荷的周围存在着电场,相对于观察者是静止的,其电量不随时间而变化的电场为静电场。例如在直流电压下两电极之间的电场就是静电场。在工频电压下,两电极上的电量将随时间而变化,因而两电极之间的电场也随时间而变化,但由于其变化的速度相对于电子运动的速度而言是相对缓慢的,并且电极间的距离也远小于相应的电磁波波长,因此任何一个瞬间的工频电场可以近似地按静电场考虑。