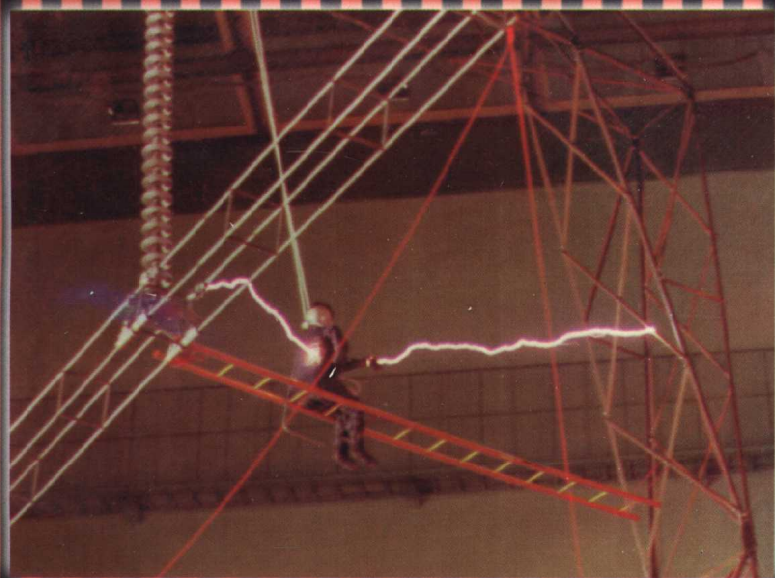


带电作业技术基础

国家电力公司 丁一正
武汉高压研究所 谈克雄 编著
清华大学



中国电力出版社

带电作业技术基础

张永清 主编
王德成 副主编



中国电力出版社

带电作业技术基础

国家电力公司 丁一正
武汉高压研究所

编著

清华大学 廖东雄

中国电力出版社

内 容 提 要

带电作业是一门涉及多种学科的新兴技术。在该项技术中,存在着许多新的高压绝缘问题以及涉及人身设备的安全问题。本书汇总了大量分散的专业性资料以及作者多年来的工作成果。全书共分八章,前三章为实用性的基础理论,后五章着重介绍了高压电场中的静电感应现象与防护、安全间距、绝缘杆与绝缘绳、带电水冲洗与绝缘子检测。

本书主要对象是从事带电作业的工程技术人员与具有中等文化程度并从事带电作业多年的熟练工人,也可作为从事高压绝缘、线路运行维护、电气专业的工程技术人员、设计人员和试验人员以及高压绝缘专业教师和学生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

带电作业技术基础/丁一正、谈克雄编著.-北京:中国电力出版社,1998

ISBN 7-80125-560-7

I. 带… I. 丁… II. 带电作业 N. TM72

中国版本图书馆CIP数据核字(97)第25637号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 邮政编码100044)

实验小学印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

1998年3月第一版 2000年8月北京第二次印刷

787毫米×1092毫米 32开本 10.875印张 234千字

印数3421—6420册 定价12.00元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

序

中国带电作业已有四十年的历史，经过广大科技人员和电业工人的艰辛探索、努力实践，带电作业技术已日臻完善，它已成为保障电网安全、经济、可靠运行和向用户不间断供电的一种行之有效的技术手段。随着我国 500kV 电网的形成和发展，以及三峡输变电工程的建设 and 投运，带电作业正面临一个新的再创辉煌的时期。

带电作业的产生源于生产的需要，但带电作业的发展离不开理论的指导和科学的实践。尽管它在电力系统内是一个小分支，但其所涉及的学科却是多方面的。因此，每一个新作业项目的产生、每一个优秀带电作业人员的培养，都是理论指导实践的结果。四十年来中国带电作业的发展，正是遵循这个法则从自然王国走向必然王国的。

回首四十年，我国专述带电作业技术理论基础的著作尚不多见。武汉高压研究所丁一正教授级高级工程师以紧密结合生产实践为特点，著成堪称我国第一部论述带电作业技术理论基础的专著《带电作业技术基础》。本书的出版无疑对我国带电作业队伍理论水平的提高、对促进我国带电作业技术的发展大有裨益，实为带电作业同行中的一件盛事，遂作序以记之贺之。

国家电力公司安全运行及发输电部

教授级高级工程师 崔江流

1997年9月于北京

前 言

在电力工业中，带电作业是一门十分年轻的学科。但是在其短短数十年的历史中却取得了迅速的发展，并已日趋成熟，成为一门涉及多种专业的综合性技术。目前，我国已在500kV、国外已在750kV和1150kV电压等级的超高压、特高压系统中成功地开展了带电作业。

最初的带电作业只是研究配电系统应用的作业工具与作业方法，随着电网电压等级的不断升高，带电作业技术的内容相应发生了质的变化。超高压系统的带电作业遇到了许多新问题需要解决，其中主要是电气方面的，例如静电感应现象、组合间隙的放电特性、人体对带电体的安全距离、绝缘子长串的清扫与检测等。我国各供电单位和研究院所都为我国带电作业事业的发展做了许多创新工作，并在世界带电作业领域内占有一定的地位。

本书作者通过多年来在带电作业领域内的工作实践，深感有必要将国内外现有的、以专题形式发表的大量技术文献汇总整理，结合自己的工作心得，编著一本涉及技术基础方面的专业参考书。其必要性的理由如下：

(1) 将目前带电作业领域内具有普遍性的、较成熟的、共同关心的内容进行总结，使现有分散的知识和经验系统化。

(2) 对带电作业技术中的一些基本概念与物理过程予以

阐明，并进行分析。

(3) 从大量分散性较大的试验数据中，挑选出较合适可信的数据供读者参考。

(4) 对常用的基本名词术语、符号、主要系数的取值等，做某种统一工作，以利今后带电作业技术的发展。

编写本书存在较大的难度，因为带电作业技术所涉及的专业面较广，并且正处于不断发展之中，人们的认识也在不断地深化。此外，我国的带电作业在发展上存在着不平衡：一是侧重于线路，变电方面较薄弱；二是侧重于高压与超高压，配电方面较薄弱。因此，作者希望以出版本书为契机，在带电作业界扩大交流，并通过讨论，在我国带电作业队伍中起到统一认识、共同提高的作用，进一步推动我国的带电作业事业向更高一个层次发展。

本书的主要对象是从事带电作业的工程技术人员和具有中等文化程度的、从事带电作业多年的工人，也可供从事高压绝缘以及电气专业的工程技术人员、设计人员和运行维护人员参考。

全书由丁一正执笔编写，张六荣、谈克雄主审。谈克雄（第一、三章），周琴娥、张俊兰、黎季勋（第四章），万启发、黄长学（第五章），陶恒、胡毅（第六章），王如璋、赵辅（第七章），丁明威（第八章）为有关章节提供了初稿或部分素材。方瑜、容健纲、邵方殷、毛凤麟对本书有关章节提出了宝贵意见。在本书编写过程中，还得到崔江流、张文汉、王立、陆圣尧、李如虎、胡定超、项立人等的关心和支持。桂玲玲、张俊兰为出版本书在稿务方面给予了很大的帮助。在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平所限，书中难免有不妥和错误之处，敬希

读者批评指正。

丁一正

1997年9月于武汉

目 录

序
前言

第一章 带电作业中的高压电场

第一节 电场及其分类	1
一、电场的基本概念	1
二、电场的分类与基本特征	11
三、最大场强的求取	12
第二节 带电作业中的电场	15
一、研究的意义	15
二、带电作业中的电场	15
三、电场分布图形的求取	15
四、500kV 带电作业电场测量实例	19
第三节 电场中空气介质的击穿	23
一、研究的意义	23
二、空气击穿的基本物理过程	23
三、极不均匀电场中空气间隙击穿的机理	25
四、影响空气间隙击穿特性的因素	26
第四节 电场中固体介质的击穿	28
一、研究的意义	28
二、击穿的类型与特点	28
三、影响固体介质击穿特性的因素	30
第五节 沿面放电	32

一、研究的意义	32
二、沿面放电的基本概念	32
三、沿面放电的特点	33

第二章 带电作业应用的电介质

第一节 概述	35
一、电介质在带电作业中的作用	35
二、电介质的分类	36
三、电介质的物性结构	36
四、电介质的基本电性参数	37
第二节 电介质的极化与介电常数	38
一、均匀电介质的极化	38
二、介电常数的物理意义	40
三、不均匀电介质的极化	42
四、电介质的介电常数	45
五、研究介电常数的实用意义	45
第三节 电介质的电导与绝缘电阻	46
一、固体介质的电导与绝缘电阻	46
二、影响固体介质泄漏电流的因素	49
三、常用介质的电阻率	51
四、研究介质电导的实用意义	51
第四节 介质损耗与介质损耗因数	51
一、介质损耗	51
二、介质损耗因数	52
三、固体介质的损耗	56
四、常用介质的 $\text{tg}\delta$ 值	57
五、研究介质损耗的实用意义	57
第五节 介质的击穿强度与放电特性	58

一、空气介质的放电特性	58
二、空气间隙的工频放电特性	59
三、空气间隙的直流放电特性	61
四、空气间隙的操作冲击放电特性	61
五、固体介质的击穿强度	67
六、沿面闪络强度	68
七、水柱的电气特性（参阅第七章）	71

第三章 带电作业中的绝缘配合

第一节 带电作业中的作用电压与 绝缘介质的类型	72
一、带电作业中作用电压的类型	72
二、绝缘介质的类型	75
第二节 操作冲击电压	75
一、标准操作冲击电压	75
二、50%放电电压 (U_{50})	76
三、标准偏差 (σ)	80
四、正态分布	82
第三节 带电作业中的绝缘配合	86
一、绝缘配合的基本概念	86
二、绝缘配合的惯用法	86
三、绝缘配合的统计法	87
四、简化统计法	88
第四节 带电作业的安全性	89
一、绝缘损坏危险率的基本概念	89
二、带电作业的安全性	90
三、应用实例	91
四、带电作业的事故率	97

[附录] 带电作业危险率计算机程序	98
-------------------------	----

第四章 静电感应与安全防护

第一节 静电感应	103
一、工频电场中的静电感应	103
二、由静电感应引起的电击	105
第二节 电场对人体的生态效应	109
一、人体阻抗	109
二、工频电场对人体的生态效应	111
三、直流电场对人体的生态效应	115
四、IEC 对人体电流生态效应的推荐意见	115
第三节 静电感应的计算	120
一、电场的数值计算方法	120
二、模拟电荷法的计算结果	120
第四节 电场强度的测量	123
一、电场强度的测量方法	123
二、带电作业人员体表场强的实测	125
第五节 强电场中的安全防护	131
一、概述	131
二、屏蔽服的保护原理	132
三、屏蔽衣料的技术要求	132
四、屏蔽服的技术要求	137

第五章 间隙试验与安全间距

第一节 带电作业间隙	139
一、间隙的类型	139
二、组合间隙	140

第二节	求取空气间隙 U_{50} 的试验方法	142
一、	升降法确定 U_{50}	142
二、	加压次数的选择	143
三、	U_{50} 与 $[\sigma_a]$ 的求取过程	143
第三节	第一代 500kV 交流线路带电作业	
	间隙试验实例	151
一、	试验内容	152
二、	主要试验设备	153
三、	主要试品	153
四、	试验接线与试区布置	155
五、	试验方法与试验电压	155
六、	试验结果	157
七、	分析与讨论	160
八、	安全性检验	164
第四节	第二代 500kV 交流线路带电作业	
	间隙试验实例	165
一、	试验内容	165
二、	主要试验设备	165
三、	主要试品	166
四、	试验接线与试品布置	167
五、	试验方法与试验电压	168
六、	最小安全距离试验结果	168
七、	最小组合间隙试验结果	170
八、	分析与讨论	175
第五节	±500kV 直流线路带电作业间隙试验实例	177
一、	试验内容	177
二、	主要试验设备	178
三、	主要试品	178
四、	试验接线与试品布置	179

五、试验方法与试验电压	182
六、最小安全距离试验结果	182
七、最小组合间隙试验结果	185
八、分析与讨论	188
第六节 带电作业安全间距	190
一、安全间距的含义	190
二、最小安全距离 (L_{sd})	190
三、最小对地安全距离 (L_{sd}')	191
四、最小相间安全距离 (L_{sp})	191
五、最小安全作业距离 (L_{sw})	192
六、最小组合间隙 (L_{sc})	192

第六章 带电作业用绝缘杆 与 绝 缘 绳

第一节 概述	194
第二节 环氧树脂	195
一、环氧树脂的主要成分	195
二、环氧树脂中可能存在的缺陷	198
三、环氧树脂的内部损伤	200
四、环氧树脂的性能	203
第三节 带电作业用绝缘杆	204
一、绝缘杆的分类	204
二、绝缘杆的制造工艺	204
三、常用绝缘管(棒、板)的性能	206
四、绝缘杆的最短有效长度	210
第四节 绝缘杆的试验	211
一、试验类型	211
二、各类型试验的试验项目	212

三、外观与尺寸检查	212
四、电气试验方法	212
五、机械试验方法	213
六、绝缘杆材质的电气试验方法	215
第五节 绝缘杆的试验标准	218
一、绝缘杆的耐压试验标准	218
二、材质的泄漏电流标准	219
三、绝缘杆的机械试验标准	219
第六节 绝缘杆的分段试验	220
一、分段系数	220
二、分段系数变化原因的分析	223
第七节 绝缘杆的老化	225
一、绝缘材料的老化	225
二、绝缘材料的老化试验	228
三、绝缘杆的老化	229
第八节 绝缘绳	232
一、蚕丝的构成与基本性能	232
二、锦纶丝的成分与基本性能	233
三、绝缘绳的结构与编织	233
四、绝缘绳的电气性能	234
五、绝缘绳的物理和机械性能	236
六、绝缘绳的电气和机械试验	236
七、绝缘绳(带)工具的静、动负荷试验	241
八、阻燃绝缘绳	241

第七章 带电水冲洗

第一节 概述	243
第二节 绝缘子的污闪	245

一、防止绝缘子污闪的意义	245
二、污闪的原因、条件与特点	245
第三节 带电水冲洗的设备	246
一、水枪	247
二、水泵	249
三、水箱	250
第四节 高压水柱的物理特性	250
一、高压水柱的物理状态	250
二、高压水柱的结构	250
三、决定高压水柱有效射程的参数	252
第五节 高压水柱的电气特性	255
一、工频电压下水柱的泄漏电流特性	255
二、水柱的工频放电特性	261
三、水柱的操作冲击放电特性	266
第六节 带电水冲洗的安全距离	270
一、水冲洗安全距离的含义	270
二、由人体安全电流确定的最小水柱长度 (L_{min1})	271
三、由操作过电压确定的最小水柱长度 (L_{min2})	272
四、水冲洗安全距离 (L_{ws}) 的确定	274
第七节 带电水冲洗中的一些实际问题	276
一、带电水冲洗的基本过程	276
二、影响被冲洗绝缘子冲闪强度的因素	278
三、溅闪效应	283
四、安全水冲洗的临界盐密法	284
五、带电水冲洗时应注意的要点	288

第八章 绝缘子检测

第一节 概述	289
--------------	-----

第二节 检测工具	292
一、火花间隙型检测器	292
二、仪表型检测器	295
第三节 绝缘子串的电压分布	298
一、绝缘子串的电压分布曲线	298
二、绝缘子串分布电压的标准	303
三、影响绝缘子串电压分布的因素	306
四、电压分布曲线中的几个参数	307
五、改善电压分布不均匀程度的新思路	308
第四节 绝缘子检测	309
一、检测条件	309
二、检测方案	310
三、读数误差的分析	310
四、电压换算系数 α	313
五、劣化绝缘子的判别标准	315
第五节 新的展望	316
[附录] 换算绝缘子串分布电压计算机程序	319
主要参考文献	327