



柏克寒 主编

带电作业

修订版

带 电 作 业

修 订 版

柏克寒 主编

水利电力出版社

内 容 提 要

本书对带电作业原理、常用材料、工具结构、操作方法及安全技术等方面作了较详细的阐述；对国外带电作业情况作了简介；并附有线路、变电、测试等方面的带电作业图片；在附录中还介绍了有关带电作业的实验、测量方法及其数据。以期通过这些问题的介绍，使读者建立起带电作业的基本概念，较全面地理解带电作业的有关问题。

本书的主要对象是供电部门、电厂从事带电作业的工人和检修、运行人员，也可供有关技术人员、生产管理干部参考。

带 电 作 业

修订版

柏克寒 主编

*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路8号)

各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

850×1168毫米 32开本 14.5印张 382千字

1981年10月第一版 1985年11月新一版

1988年2月第三版 1988年2月北京第三次印刷

印数20791—27400册

ISBN 7-120-00033-0

TM·14定价 3.75元

修 订 版 前 言

鉴于带电作业在近几年实践中又有新技术和经验需要总结，为此对1981~1985年出版的原书进行了修订。

修订版本在以下几个方面有所充实：

- (1) 较详细地阐述了带电作业原理；
- (2) 补充了带电作业常用金属材料性能；
- (3) 增加了国外带电作业情况；
- (4) 增添了近几年带电作业新项目和新工具。

原版本由柏克寒、李如虎、党应伟、薛磊、余松立、王传英、詹必川编写，李如虎参加了统稿工作，全书由柏克寒主编。此次修订本第四章的第八、九节由李如虎执笔，其余章节和附录由柏克寒执笔，全书由柏克寒主编。

修订版由昆明供电局张六荣审稿，水利电力部生产司崔江流在百忙中对全书提出了不少宝贵意见，在此表示衷心感谢。

作者

1986年11月

目 录

修订版前言

绪 论	1
第一章 带电作业基本原理	2
第一节 带电作业方法的分类	2
第二节 保证带电作业安全的原理	3
第三节 间接带电作业	11
第四节 等电位作业	16
第五节 沿耐张绝缘子串进入强电场的作业——等电位作业 的一种特殊方法	24
第六节 分相接地作业	28
第七节 对设备进行全绝缘作业	32
第二章 带电作业常用材料	33
第一节 带电作业对绝缘材料的要求	33
第二节 绝缘材料的分类	37
第三节 绝缘层压制品	37
第四节 塑料	44
第五节 绝缘粘结和涂料	56
第六节 绝缘绳索	59
第七节 其他绝缘材料	62
第八节 带电作业常用的金属材料	63
第三章 带电作业常用工具	70
第一节 屏蔽服	70
第二节 绝缘梯架	74
第三节 操作杆、检测杆及其部件	78
第四节 卡具	83
第五节 承力工具	85
第六节 绝缘遮盖工具	93

第七节 断接引工具	94
第八节 清扫工具	96
第九节 断线工具	102
第十节 液压绝缘斗臂车	105
第十一节 通讯工具	107
第四章 带电作业安全技术	110
第一节 过电压的概念	110
第二节 空气的绝缘强度	115
第三节 带电作业最小安全距离(间隙)的确定	120
第四节 保护间隙	123
第五节 间接带电作业静电感应的问题	127
第六节 绝缘工具最短有效绝缘长度的确定	128
第七节 泄漏电流问题	129
第八节 带电断、接引时导线电容和电容电流的计算	130
第九节 用最小临界安全悬重档距曲线判断能否在架空线路 上进行悬重作业	135
第十节 水冲洗的安全措施	141
第十一节 带电爆炸压接	147
第十二节 带电作业工具的试验	160
第十三节 工具的保管	165
第十四节 气象条件与安全的关系	165
第十五节 带电作业的组织措施	166
第五章 带电作业实例选编	168
第一节 线路	168
甲、杆塔	168
一、更换220kV线路整体铁塔	168
二、220kV线路铁塔整体加高	171
三、220kV线路杆塔整体移位	173
四、扩大220kV线路铁塔头部间隙	177
五、升高220kV线路铁塔塔头	179
六、拉大110kV线路Ⅱ型杆根开	182
七、更换110kV线路大转角Ⅱ型水泥杆	183
八、更换110kV线路直线水泥单杆	186

九、更换110kV线路Ⅱ型下节直线水泥杆	192
十、提高110kV线路水泥杆	195
十一、加高110kV线路Ⅱ型直线杆塔头	197
十二、110kV线路档距中加立水泥杆	198
十三、35kV线路Ⅱ型转角杆移位	200
十四、拉线更换	203
乙、地线	204
一、220kV线路单地线改为双地线	204
二、220kV线路地线更换	205
三、110kV线路升压为220kV时地线的更换	211
四、35kV线路升压为110kV时地线的更换	214
五、35kV线路V形地线架设	218
丙、导线	220
一、220kV导线移位	220
二、220kV线路直线压接管预绞丝爆压补强	222
三、220kV线路导线不良压接管更换	223
四、220kV线路耐张折型塔中相跳线更换	229
五、220kV线路长江大跨越垂线夹更换	232
六、220kV线路大跨越导线地面遥控涂油	233
七、110kV线路多档导线更换	235
八、用地线轮换代替三相导线运行来更换110kV线路导线	237
九、110kV线路导线开断重接	242
十、110kV线路升压为220kV线路时带电移位	244
十一、导线爆炸压接和补修	247
丁、横担	252
一、220kV线路带拉线单杆铁横担改为瓷横担	252
二、110kV线路Ⅱ型耐张杆和换位终端杆铁横担加长	256
三、110kV线路耐张铁塔横担加长	261
四、110kV线路Ⅱ型直线杆水泥横担升高	262
五、110kV线路上字型直线杆横担更换	265
六、35kV线路直线杆木横担换成铁横担	267
七、35kV线路水泥单杆耐张双木横担更换	268
八、35kV线路耐张单杆双木横担换为铁横担	269
九、35kV线路鸟骨型木横担更换	270
十、35kV线路鸟骨型横担换为瓷横担	271

十一、10kV 配电线路直线横担更换	272
成、绝缘子	272
一、绝缘子检测	272
二、沿绝缘子串进入强电场更换单片绝缘子	283
三、220kV线路耐张单串绝缘子更换	285
四、220kV线路耐张双串绝缘子更换	286
五、220kV线路直线单片绝缘子更换之一	287
六、220kV线路直线单片绝缘子更换之二	288
七、220kV线路直线单片绝缘子更换之三	289
八、220kV线路直线V形串单片绝缘子更换	290
九、220kV线路双分裂导线(水平排列)耐张双串绝缘子更换之一	290
十、220kV线路双分裂(水平排列)导线耐张双串绝缘子更换之二	292
十一、220kV线路双分裂(水平排列)导线直线绝缘子串更换	295
十二、110kV线路升压为220kV时直线串增加绝缘子	295
十三、110kV线路升压为220kV时耐张串增加绝缘子	296
十四、110kV线路耐张整串(或单片)绝缘子更换	297
十五、110kV线路耐张双串单片绝缘子更换	298
十六、110kV线路直线单片绝缘子更换	299
十七、110kV线路上字型直线杆绝缘子更换	300
十八、35kV线路耐张绝缘子更换	300
十九、35kV线路直线悬垂绝缘子串更换	301
二十、10kV线路耐张绝缘子更换	302
二十一、10kV线路转角杆针式绝缘子(或横担)更换	302
二十二、10kV线路直线杆针式绝缘子(或横担)更换	304
己、特殊作业	305
一、跨越	305
二、断、接引	310
三、水冲洗	313
四、钢芯断头检测	318
五、测温	323
六、雨天作业	329
第二节 变电	333
一、喷涂地腊涂料	333
二、喷涂硅油	336
三、电动刷清扫	337
四、气吹清扫	339

五、套管加油	344
六、220kV中相阻波器悬垂绝缘子更换	347
七、软母线耐张绝缘子更换	348
八、10kV 汇流排支柱绝缘子更换	349
九、阻波器更换	350
十、户外开关设备短接	351
十一、拆搭220kV耦合电容器引流线	352
十二、软母线引流线并沟线夹连接改为TY压接型连接	353
第三节 330kV输变电带电作业	354
一、零值绝缘子检测	354
二、绝缘子串的清扫	354
三、绝缘子串的更换	354
四、利用飞车处理导线断股、检查间隔棒等	356
五、杆塔基础高差处理	356
六、短接隔离开关	358
第六章 国外带电作业情况简介	359
第一节 国外带电作业特点	359
第二节 国外对一些项目的研究概况	360
附录一 220kV耐张绝缘子串正常电位分布和被短接 部分绝缘子后的电位分布	375
附录二 操作波放电电压和工频放电电压对比试验	376
附录三 220kV圆弧形保护间隙放电特性试验	380
附录四 $\times \times 110\text{kV}$ 输电线路升压为220kV 运行后的感 电问题	381
附录五 超高压屏蔽服(A型)	383
附录六 屏蔽服(B型)研制总结报告	397
附录七 部分绝缘材料电性能试验数据介绍	425
附录八 绝缘操作杆结构、工艺及试验方法的探讨	429
附录九 带电水冲洗试验第一阶段报告	438
附录十 盐密度测量方法	450

绪 论

带电作业是在运行的电气设备上进行检修和改造的新技术，是我国电力生产的一项重要技术创新。近三十年的实践证明，这一新的检修方法与停电检修比较，具有下列优点。

(1) 保证了不间断供电。过去，电气设备发生故障，那怕是坏了一片绝缘子，也要停电更换，一大片用户就得停产，严重影响国民经济计划的完成。带电作业这一技术出现后，发现设备缺陷后可以及时处理，保证了对用户不间断供电。

(2) 加强了检修计划性。由于停电检修与用户用电有矛盾，不能经常停电进行检修且每次停电只能有很短时间。因此，停电检修是集中地、不均衡地突击进行的。这样，每次检修设备缺陷多，集中劳力多，造成检修杂乱，甚至对安全带来隐患。推行带电作业这一新技术后，不受时间限制，可充分做好一切准备工作。从而提高了检修的计划性，保证了检修质量，更有效地保证操作人员和设备安全。

(3) 节省了检修时间。要安全地进行带电作业，要求操作人员有熟练的技术；工具必须在安全的前提下轻巧多用；施工方法必须大家心中有数。因此，每次作业都能迅速完成任务。如更换一片220kV线路的耐张绝缘子只要20多分钟、更换220kV线路直线V形串单片绝缘子只要几分钟就可以完成。与停电检修比较，既减轻了劳动强度，又大大节省了检修时间。

(4) 给简化设备创造了条件。带电作业能在运行的电气设备上检修，就可保证对用户的不间断供电。这样，对一般用户就没有必要考虑双回路供电，节约了基建投资。同时也避免了因停电造成的倒闸操作和不合理的电网运行方式。

总之，带电作业对保证电网的安全、经济运行，提高供电企业的经济效益，提高电力的综合经济效益作用都很大，已经成为电气设备检修的主要方式之一。

第一章 带电作业基本原理

第一节 带电作业方法的分类

我国从开展带电作业以来，带电作业方法就不断发展。截至目前止，带电作业方式有间接作业、等电位作业、沿绝缘子串进入强电场作业、分相作业、全绝缘作业等几种。如果按作业人员是否直接接触带电体则可分为直接作业和间接作业；如果按作业人员作业时所处电位高低，又可分为等电位作业、中间电位作业和地电位作业。其具体分类如下：

一、按作业人员是否直接接触带电体分

（一）直接作业

这种作业系作业人员直接与带电体接触而进行的各种作业。它包括：

（1）等电位作业（又称同电位作业），国外叫徒手作业。

（2）沿绝缘子串进入强电场作业，以往叫“自由作业”。

（3）分相作业。即将中性点不直接接地的 35kV 及以下电力系统的电气设备的一相人为接地，另两相升高 $\sqrt{3}$ 倍相电压运行，作业人员对接地相进行检修的作业。

（4）全绝缘作业。即对作业相的邻近带电体或接地部分进行妥善的绝缘遮盖；或将作业人员自身进行全绝缘，然后对带电体进行检修的作业。

（二）间接作业

这种作业系作业人员不直接接触导体，而是相隔一定距离，用各种绝缘工具对带电设备进行检修的作业。国外叫距离作业。

二、按作业人员作业时自身电位高低分

（一）等电位作业

这种作业系作业人员与带电体处于同一电位下直接对带电体

进行的作业。如图1-1(a)所示。

(二) 中间电位作业

这种作业系利用绝缘工具将人置于带电体及接地体之间，使作业人员在低于带电体电位而高于接地体电位下用绝缘工具对带电体进行的作业。如图1-1(c)所示。

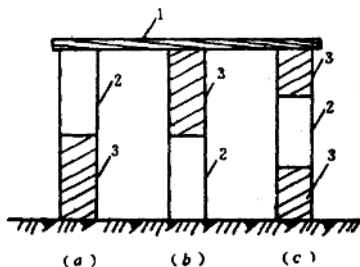


图 1-1 等电位、中间电位、地电位作业示意图

(a)等电位作业；(b)中间电位作业；(c)地电位作业

1—导体；2—人体；3—绝缘体

(三) 地电位作业

这种作业系作业人员处于地电位，用绝缘工具对带电体进行的作业，故又称间接作业。如图1-1(b)所示。

综上所述，带电作业方式是多种多样的。为了完成带电作业任务而在选择作业方式时，可根据实际情况任意选择其中一种方式或者数种方式同时使用。不过，在选择作业方式时，必须以人身安全和设备安全为前提，从设备实际情况出发，周密细致，灵活选用，以确保安全。

第二节 保证带电作业安全的原理

所谓带电作业安全，就是在作业过程中不发生设备和人身事故。由于后者较前者带来更为严重的后果，因此，本节将重点叙述带电作业时人身事故的原因和预防措施。

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，使人体外部局部伤害，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”基本上都是指电击而言。

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。

根据资料记载，工频交流1mA或直流5mA的电流通过人体就能引起麻痛的感觉，但自己能够摆脱电源。而当通过人体的工频交流超过20~25mA或直流超过80mA时，会使人感觉麻痹和剧痛，并且呼吸困难，自己不能摆脱电源，有生命危险。100mA的工频电流通过人体，只要很短的时间就会使人呼吸窒息，心脏停止跳动，失去知觉而死亡。表1-1便是不同电流值对人体作用的特征。

一般来说，10mA以下的工频交流电流或50mA以下的直流电流通过人体，人还可以自己摆脱电源，可以看作是安全电流。但是，所谓安全电流长时间通过人体，也是危险的。

通过人体电流的大小，决定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，约在 500Ω 左右。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表1-2。

(2) 电极与皮肤的接触面积越大时，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和皮肤与接触物之间的接触电阻

表 1-1

电流对人体作用的特征

电 流 (mA)	作 用 特 征	
	50~60Hz交流	直 流
0.6~1.5	开始有感觉——手轻微颤抖	没有感觉
2~3	手指强烈颤抖	没有感觉
5~7	手部痉挛	感觉痒和热
8~10	手已难于摆脱电极, 但还能摆脱, 指尖到手腕剧痛	热感觉增强
20~25	手迅速麻痹不能摆脱电极, 剧痛, 呼吸困难	热感觉剧增, 手部肌肉不强收缩
50~80	心房麻痹, 心房开始震颤	强烈的热感觉, 手部肌肉收缩、痉挛, 呼吸困难
90~100	呼吸麻痹, 延续3s或更长时间——心脏麻痹心房震颤	呼吸麻痹
300及以上	作用0.1s以上时, 呼吸和心脏麻痹, 机体组织遭到电流的热破坏	

注 本表的数据不是直接实验得来的, 而是触电事故的分析统计资料。

表 1-2

不同条件下的人体电阻

接 触 电 压 (V)	人 体 电 阻(Ω)			
	皮肤干燥①	皮肤潮②	皮肤湿③	皮肤浸入水中④
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

① 相当于在干燥场所的皮肤, 通电途径为单手-双脚;

② 相当于在潮湿场所的皮肤, 通电途径为单手-双脚;

③ 相当于在水蒸气等特别潮湿场所的皮肤, 通电途径为双手-双脚;

④ 相当于在游泳池或浴池中的情况, 基本上为体内电阻。

减小。

(3) 所加接触电压越高人体电阻越小, 表 1-2 数值就充分

说明了这个问题。

根据欧姆定律可知，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。综合国内试验数值，考虑国外情况，并从严要求，人体电阻取 1500Ω 为宜。

作用于人体的电压对流经人体电流的影响，包含以下两个方面的内容。

一、电压高低

接触电压越高，在人体电阻值不变的情况下，通过人体的电流也越大，反之，则越小。例如在500kV和110kV带电作业，不慎单相触电时，对人体电流的计算公式和计算结果如下：

$$\text{计算公式} \quad I = \frac{U_e}{\sqrt{3} z} \quad (1-1)$$

式中 I —— 流过人体电流 (A)；

U_e —— 额定线电压 (V)；

z —— 电流回路中阻抗 (忽略了杆塔接地电阻，可以认为就是人体电阻，取 1500Ω)。

计算结果 500kV单相接地时

$$I = \frac{500000}{\sqrt{3} \times 1500} = 192.45(\text{A})$$

110kV单相接地时

$$I = \frac{110000}{\sqrt{3} \times 1500} = 42.34(\text{A})$$

上述计算结果表明，由于触电时电压高低不同，通过人体电流则相差很大。

二、触电方式

这有三种情况：单相触电、两相触电、跨步电压（包括接触电压）触电。现分述如下：

1. 单相触电

单相触电是人体处于地电位的情况下接触三相导线中任何一相所引起的触电。它的危险程度根据电压的高低、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等有关。

(1) 中性点直接接地系统的单相触电，触电情形如图1-2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、线圈及导线所形成的回路，其值取决于相电压和回路的阻抗。根据公式 1-1 和 500kV 以及 110kV 单相接地的计算结果可知其通过人体电流是很大的，这样大的电流会使触电者立即死亡。尽管电压越高的输电线路对地的净空距离越大，但亦须注意，如果造成单相接地其后果是不堪设想的。

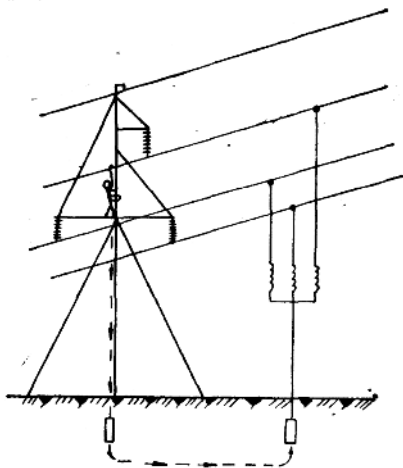


图 1-2 中性点直接接地系统引起单相触电示意图

(2) 中性点不直接接地的单相触电，触电情形如图 1-3 所示。由于中性点不直接接地，单相触电时电流是经过人体、电杆、大地与其他两相对地绝缘阻抗形成回路。就是说，当人体不慎触及 A 相导线后，电流从 A 相-人体-电杆-大地-线路对地绝缘阻抗 Z -B、C 相，又都经变压器线圈后到 A 相导线。因此，通过人体电流决定于线电压和回路抗阻。其计算公式为：

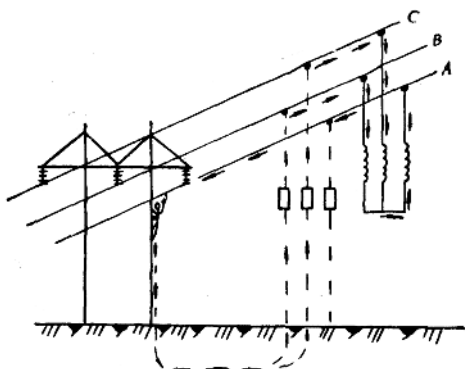


图 1-3 中性点不直接接地系统单相触电示意图

$$I = \frac{U_\phi}{z} = \frac{U_\phi}{\sqrt{(\sqrt{3}R_\lambda)^2 + \left(\frac{X_{c0}}{\sqrt{3}}\right)^2}} \quad (1-2)$$

式中 $z = \sqrt{(\sqrt{3}R_\lambda)^2 + \left(\frac{X_{c0}}{\sqrt{3}}\right)^2}$ ——触电回路阻抗 (Ω);

R_λ ——人体电阻 (Ω);

X_{c0} ——每根导线对地容抗 (Ω).

由于人体电阻与导线对地容抗相比小得多, 故可忽略不计。这样, 限制回路中电流的阻抗就是导线对地容抗。因为 U_ϕ 等于 $\sqrt{3}U_\phi$ (相电压), $X_{c0} = \frac{1}{\omega C_0 L}$, 因此, 公式(1-2)就可化简为:

$$\begin{aligned} I &= \frac{U_\phi}{\sqrt{(\sqrt{3}R_\lambda)^2 + \left(\frac{x_{c0}}{\sqrt{3}}\right)^2}} \\ &= \frac{\sqrt{3}U_\phi}{\frac{1}{\omega C_0 L}} \\ &= (\sqrt{3})^2 \omega C_0 L U_\phi \\ &= 3\omega C_0 L U_\phi \end{aligned} \quad (1-3)$$