

带电自由作业

鞍山电业局

水利电力出版社

內 容 提 要

本书总结了鞍山电业局几年来，特别是无产阶级文化大革命以来，在带电自由作业方面所創造的先进經驗。着重介绍了穿金属均压服和絕緣服自由进入强电場带电检修电气設備的方法，并对电力系统过电压对人体自由进入强电場时的影响，做了一些試驗分析和探討。

可供电力系统从事送、变电运行、检修的工人、工程技术人员和有关领导干部閱讀。

带 电 自 由 作 业

鞍 山 电 业 局

(內 部 发 行)

*

水利电力出版社出版

(北京德胜門外六鋪炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

北京印刷六厂印刷

*

1972年11月北京第一版

1972年11月北京第一次印刷

书号 15143·3012 每册 0.24 元

目 录

前 言

第一章 带电自由作业新技术的产生和发展	1
第二章 推行带电自由作业工作中的几个问题	2
第 1 节 金属均压服.....	2
第 2 节 过电压对带电自由作业的影响.....	6
第 3 节 绝缘服在带电自由作业中的应用.....	12
第三章 带电自由作业工具	13
第 1 节 更换耐张瓷瓶使用的工具.....	14
第 2 节 切合负荷电流用的充油消弧器.....	15
第 3 节 在 10 千伏铝板母线上带电打眼使用的 打眼枪.....	16
第 4 节 在 10 千伏铝板母线上带电焊接使用的 焊接工具.....	17
第 5 节 在 44~220 千伏变电设备上进行带电 作业用的绝缘硬梯.....	18
第 6 节 自由进入 220 千伏耐张单串瓷瓶用的 绝缘硬梯.....	19
第 7 节 压式吊线器.....	20
第 8 节 臂式吊线架.....	21
第四章 带电自由作业基本操作方法	22
第 1 节 更换 154~220 千伏线路瓷瓶的操作方法.....	22
第 2 节 带负荷倒换 154 千伏单相三线圈备用 变压器的方法.....	26
第 3 节 在 44~220 千伏高压配电装置上进行 带电检修.....	34

第 4 节	在44~220千伏开关和变压器套管上的带电补油	36
第 5 节	更換220千伏通訊用阻波器	37
第 6 节	在10千伏及以下电压鋁板母綫上的带电打眼	40
第 7 节	在10千伏及以下电压鋁板母綫上的带电焊接	41
第 8 节	在10千伏及以下电压配电装置上的带电自由作业	43
第 9 节	配电网的带电自由作业	44
第五章	带电自由作业中的爆破断接引	51
第 1 节	用硝酸铵炸药爆破消弧带电断开220千伏空載綫路	51
第 2 节	利用火药接引枪带电接通220千伏空載綫路	56
第六章	带电作业的技术管理和安全注意事项	59
第 1 节	崗位責任制	59
第 2 节	現場規程的編制	61
第 3 节	培訓制度	62
第 4 节	新检修項目新技术的鉴定	62
第 5 节	工具的試驗和保管制度	63
第 6 节	检修班(組)应具备的技术資料和記錄文件	63
附录一	瓷瓶串絕緣特性試驗	65
附录二	聚丙烯薄膜絕緣特性試驗	84
参考文献		92

第一章 带电自由作业

新技术的产生和发展

一九六八年九月，鞍山电业局的工人和工程技术人员，高举《鞍钢宪法》的光辉旗帜，贯彻“独立自主、自力更生”的伟大方针，遵照伟大领袖毛主席关于“打破洋框框，走自己工业发展道路”的教导，提出了直接从瓷瓶串进入强电场作业的大胆设想。这个建议一提出，局革委会和驻局解放军立即大力支持，组成了三结合试验小组，经过充分发动群众，讨论制订方案，大胆实验，用毛主席哲学思想分析矛盾，解决矛盾，使认识不断深化，终于摸索出一套从瓷瓶串自由进入高压电场的方法，即自由进入强电场。利用这种方法来进行超高压线路耐张瓷瓶串的不良瓷瓶更换和其他多种检修项目，不但进一步简化了带电作业工具，而且大大地减轻了工人的笨重体力劳动，具有操作方便、检修时间短、作业人员少等许多优点。

几年来，带电自由作业在不停电检修中已得到了广泛应用，并有所发展，为在高压配电装置上穿绝缘服进行带电自由作业，可以进行较复杂的检修项目，从而解决了以往不易解决的相间及相对地距离较小不易进行操作的问题。在室内配电装置上，许多以前认为很难检修和不能检修的项目，特别象在硬母线上的带电打眼和带电焊接，采用穿绝缘服的方法，基本上得到了解决。

在配电网路上的带电自由作业。由于穿绝缘服解决了10千伏及以下的相间及对地距离小这个矛盾后，从而给配电线路上的不停电检修带来了广阔的前途。现在配电网的带电作业，已基本上甩掉了间接操作的绝缘工具，一般都可以进行直接操作。因而，对缩短检修时间、提高检修质量、为保证工农业生产的持续跃进提供不间断供电，创造了有利条件。

第二章 推行带电自由作业工作中的几个问题

第1节 金属均压服

均压服在带电自由作业工作中不外乎两种作用：一种是屏蔽作用。作业人员在转移电位的过程是处在强电场中，此处均压服便起到屏蔽作用，减弱到达人体的电力线，以免作业人员发生不舒服的感觉；一种是分流作用。作业人员转移电位时的暂态过程中，承受一个幅值较大的冲击电流，而均压服和人体对此电流进行分流，由于均压服与人体相比电阻很小，所以大部分电流是流经均压服的。

现在我们使用的均压服有两种：一种是针织方式织成的。这种均压服是采用直径0.05毫米紫铜丝与32支棉纱混纺合织而成，它和一般针织品秋衣秋裤差不多；另一种是化学镀铜或镀银均压服。这种均压服是在棉布服上进行化学镀铜或镀银的，它和一般工作服一样。这两种均压服在棉纱或棉布里面，都含有很大成分的金属导体，所以，一般便通称为金属均压服，简称均压服。

在带电自由作业中，作业人员与带电导体接触次数是较频繁的。在每次接触时导线都对人体充电，特别在带电自由作业中，作业人员沿瓷瓶串自由进入时，要短接2~3个瓷瓶，从而，由于短接引起的分流电流，绝大部分也要通过均压服，如果均压服用的紫铜丝不能承受这样的电流，那是很危险的，作业人员的人身安全就将得不到保证。因此，对均压服的载流量鉴定，是一项十分重要的工作。我们对0.05毫米紫铜丝，做了几项试验，见表2-1及表2-2。

表 2-1 单股0.05毫米紫铜丝承受电容电流试验

试验电压 (千伏)	电容电流 (微安)	承受时间 (秒)	试验次数	熔断情况
10	92	30	5	无
20	182	30	5	无
30	220	30	5	无
40	320	30	5	无
50	420	30	5	无
60	563	30	5	无
127	1000	30	5	无

表 2-2 单股与多股紫铜丝工频电流熔断试验

股数	规格	熔断时间	熔断电流 (安培)
1	0.05×1毫米	瞬间	0.87
2	0.05×2毫米	瞬间	1.7
3	0.05×3毫米	瞬间	2.6

与此同时，我们又对220千伏瓷瓶串X-4.5×14在短接3个时的电压分布情况，及其在不同位置短接3个时的工频电容电流进行了试验，见表2-3及表2-4。

表 2-3 220千伏瓷瓶串 X-4.5×14在短接3个时的电压分布情况

相电压 (千伏)	瓷瓶 型式	瓷瓶状态	由横担数起瓷瓶顺序的分布电压(千伏)														备 注	
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
137.7	X-4.5	正常的	16.4	13.4	8.2	7.4	7.4	7.4	7.2	6	6	4.5	6	6.7	8.9	14.2	25.4	
130.5	X-4.5	2~4短接	22.5	—	—	—	14.9	9.7	7.4	6.7	6	6	6.7	7.4	8.9	14.2	26.1	
131.9	X-4.5	3~5短接	22.4	14.2	—	—	—	11.9	7.4	6.7	6	6	6.7	7.4	8.9	14.2	26.1	
132.9	X-4.5	4~6短接	22	14.2	10.4	—	—	—	8.9	7.4	6	6	6.7	7.4	8.9	14.2	26.8	
135.6	X-4.5	5~7短接	21.6	14.2	10.4	9.7	—	—	—	8.2	6.7	7.4	7.5	8.9	14.2	26.8		
133.1	X-4.5	6~8短接	21.6	13.4	9.7	8.9	8.9	—	—	—	7.4	7.4	6.7	8.9	13.4	26.8		
139.1	X-4.5	7~9短接	20.8	13.4	10.4	9.7	8.2	8.9	—	—	—	8.9	8.2	8.9	14.9	26.8		
142.2	X-4.5	8~10短接	20.1	13.4	9.7	8.9	8.2	8.2	8.2	—	—	—	8.9	10.4	16.4	29.8		
145.2	X-4.5	9~11短接	20.8	13.4	9.7	8.9	8.2	8.2	7.4	9.7	—	—	—	12.7	16.4	29.8		
151	X-4.5	10~12短接	20.8	13.4	9.7	8.9	8.2	8.2	7.4	8.9	11.9	—	—	—	20.8	32.8		
151.2	X-4.5	11~13短接	21.2	13.4	9.7	8.9	8.2	8.2	7.4	8.2	9.7	19.3	—	—	—	37		

表 2-4 220千伏瓷瓶串X-4.5×14在不同位置短
接 3 个时的工频电容电流值

次别	瓷瓶状态	电容电流(毫安)	备 注
1	1~3短接	1.5	瓷瓶顺序从横担数起
2	2~4短接	0.8	
3	3~5短接	1.0	
4	4~6短接	1.4	
5	5~7短接	1.5	
6	6~8短接	1.6	
7	7~9短接	1.8	
8	8~10短接	1.9	
9	9~11短接	2.0	
10	10~12短接	2.2	
11	11~13短接	2.5	
12	12~14短接	3.8	

试验表明，短接分布电压最高位置的瓷瓶串时，其最大分流为3.8毫安。由此可见，作业人员沿瓷瓶串自由进入时，不致由于短接瓷瓶串的分流而熔断紫铜丝。因为这种金属混纺均压服一厘米宽的实际载流量为3安培左右，而化学镀铜和镀银的均压服，一般载流量还要大些。因此，从目前带电自由作业的要求来看，这两种均压服的载流量都是能够保证安全要求的。

关于金属均压服的载流量标准问题，现在还没有统一规定，是否大些更好。但是，如果把均压服的载流量增大，势必引起金属导体加粗，或镀铜镀银厚度增加，这样使均压服的重量就要增加，可挠度减弱，而给作业人员带来操作上的不便。因此，均压服载流量的确定，还有待进一步积累技术经验和进行科学试验。

第2节 过电压对带电自由作业的影响

带电自由作业工作的可靠性，在很大程度上决定于人体接触的绝缘部件的工作状况。因此，正确地选择应有的绝缘水平，具有十分重要的意义。在正常运行条件下，绝缘受到额定工作电压的作用。当然，它必须能够长时间地承受，不致迅速老化和丧失绝缘性能。与此同时，由于各种各样的原因，系统中常会出现高于额定工作电压，而持续时间较短的电压升高和电位升高，这就是过电压。

在通常情况下，过电压对于系统绝缘水平的选择，起着决定性的作用。过电压对于带电自由作业如何正确保持应有绝缘水平和选择应有绝缘距离，也起着决定性的作用。

过电压分为外部过电压和内部过电压两种：

外部过电压是由线路、变电所遭受雷击所引起的。

内部过电压是由于系统参数发生变化时导致电磁能的振荡和积聚所引起的。它与雷击的单一原因不同，系统参数变化的原因是多种多样的。这决定了内部过电压形式的复杂性和多样性。一般地说，参数变化的主要原因，是系统中发生的故障和断路器的操作。另一方面，就振荡的形式和振荡过程的性质来讲，还可分为自由振荡（过渡过程振荡）和共振振荡两种。通常我们将内部过电压又分为两大类，即操作过电压和共振过电压。

这些过电压对带电自由作业的影响极大，也就是说作业人员能否保证人身安全，在很大程度上取决于过电压能否引起瓷瓶闪络或空气间隙放电。

当带电作业人员直接在 $\times\times\times$ 千伏耐张瓷瓶串上活动时，势必短路一部分瓷瓶，将会影响瓷瓶串的电容分布和电

压分布，从而使绝缘水平降低。这种降低能否导致闪络放电，这就要求我们进行必要的科学实验工作。

为了进一步研究过电压对带电自由作业的影响，我们在原水电部电力科学研究所的大力协助下，做了外部过电压和内部过电压对带电自由作业影响的研究试验工作。但由于当时人力、设备等所限，这些试验还不够完善，可能还存在一些问题，希望得到指正，以便在实际工作中加以改进。

兹将试验方法说明如下：

1) 外部过电压

一般进行带电自由作业，都是在晴天良好气候条件下进行的。但有些地方，如有时在作业地点晴天，而离作业地点一、二十公里外便下雨打雷，由于我们线路延伸很远，因此，要考虑雷电波的侵入问题。为此，我们做了瓷瓶串在不同位置短接情况下的冲击放电试验，求出放电电压值。再根据线路可能侵入的雷电波最大幅值，这个幅值由瓷瓶型式和片数所定，参考进行波衰减曲线，将波经过15公里后的衰减值，与瓷瓶串在不同位置短接情况下的放电电压值相比较，以此来判断能否引起瓷瓶串闪络或空气间隙放电。

2) 内部过电压

根据过电压保护规程规定，内部过电压一般不超过三倍相电压。这次试验是按照系统工作最大相电压的三倍考虑的。

从国外对内部过电压下的绝缘特性研究来看，由于试验电压的波形、发生装置、试验方法和试验对象的不同，研究结果还很不一致。由于各种内部过电压具有不同的波形，即使同一种过电压的波形也往往因系统的特点（开关特性、线路长度、结线方式、有无保护设备等等）而异。因此，这种

试验波形迄今尚未标准化。我国现在也还没有统一规定。所以，这次试验只是根据原电力科学研究所现有设备条件，产生一个类似长波的非周期的衰减振荡波来进行试验的。这种波形不能代表所有的内部过电压波。

为了弥补上述试验的不足，我们还在瓷瓶串上做了工频干闪试验。根据绝缘闪络的一般规律，在等长的绝缘物上，内部过电压的冲击闪络电压将高于工频闪络电压，所以，实际上用工频进行试验比内部过电压的冲击波来得严格。

3) 模拟方法

根据作业人员在耐张瓷瓶串上的一般移动方法，都是侧身前进的，即在双串瓷瓶串上是两脚登在一串上，弓着腰，两手扶在另一串的瓷瓶沿上，实际上停止时只短接一片瓷瓶，再加上相邻部分瓷面，前进时要求作业人员只允许短接两片瓷瓶，并加上相邻部分瓷面。在这里我们按一串中通常出现零值瓷瓶两片考虑，再加上作业人员移动时有效短接两片，所以，这次在模拟试验中都是按短接四片试验的。同时也做了短接三片的冲击干闪电压试验，但短接三片的工频和内部过电压未做。

我局曾在耐张瓷瓶串上做了金属模拟人短接瓷瓶串和直接以金属线短接瓷瓶串的对比试验。这两种方法在瓷瓶串上引起的电压分布是有差异，但试验结果说明工频放电电压影响很少，基本一样。正如高压工程一书中所指出的：“电压沿链分布不均匀，对于绝缘子表面在干或湿时的放电电压的影响很少，因为，随着电压增加的程度，沿链的场强受电晕放电的作用而均匀起来了”。

其次，在瓷瓶串上做了模拟人短接不同位置的瓷瓶和变动零值瓷瓶的分布位置的工频干闪放电电压值，与模拟人短

接瓷瓶加上零值瓷瓶在一起的工频干闪放电电压值的对比试验。试验结果其放电电压也基本一样。

根据以上两个对比试验结果，没有显著差异，所以在本次试验中，都是以金属线短接瓷瓶来代替金属模拟人和以集中短接瓷瓶来代替分散短接瓷瓶，而进行试验的。试验结果见附录一。

通过试验大致归纳出如下意见：

(1) 耐张瓷瓶串在不同位置短接3~4片瓷瓶后，与等值瓷瓶串（即中间没有短接的）的工频放电电压值和冲击放电电压值，基本相同。

(2) 耐张瓷瓶串从横担起顺次在不同位置短接3~4片，其工频放电电压值和冲击放电电压值的变化规律，也基本一样。

(3) 在试验过程中，所有的工频闪络和冲击放电都是沿瓷瓶串沿面闪络发展的，并没有发生过空气间隙的放电情况。足以证明，空气间隙的绝缘强度是大于被短接后的其他瓷瓶串的绝缘强度。

(4) 根据工频干闪电压的试验结果，可以看出，从接地侧向导线侧逐次推移短接瓷瓶时，其放电电压愈来愈低，接近导线侧时放电电压最低。

110千伏、154千伏、220千伏瓷瓶串在不同位置短接4片后的最低干闪电压分别为：302.5千伏、424千伏、591千伏，而其相应的最大工作相电压分别为：73千伏、102.5千伏、146千伏。所以，最低工频干闪电压与之最大可能的相电压^①之比分别为：4.15、4.13、4.05，都在四倍以上。显然，都

① 最大工作相电压系指最大工作电压126、177、252千伏下之相应相电压。

有较大的绝缘裕度。

瓷瓶串电压分布的试验结果表明，没有短接瓷瓶时，瓷瓶串两端的瓶子承受电压较高，中间瓷瓶承受电压较低。当短接瓷瓶后，其电压分布规律仍然不变，分布电压最大的是在220千伏电压级靠导线侧的瓷瓶，最大相电压146千伏时靠近导线一片的瓷瓶承受的电压为37千伏。标准规定单片X-4.5瓷瓶的干闪电压不小于75千伏，湿闪电压不小于45千伏，仍有一定裕度。

(5) 操作过电压干闪试验结果：110千伏、154千伏采用波头1.5毫秒的过电压波，220千伏采用波头2.4毫秒的过电压波。当110千伏、154千伏、220千伏瓷瓶串在不同位置短接4片时，其干闪电压都比过电压保护规程所规定的三倍相电压高，分别为： $3.45U_{\phi}$ 、 $3.36U_{\phi}$ 、 $3.99U_{\phi}$ 。虽然，瓷瓶串的放电电压还有一定的分散性，但也不难看出其干闪电压值比规程规定值还有一定裕度。

操作过电压波形种类很多，这次只作了波头较长的过电压波。国内有关单位试验结果表明，当波头长200微秒左右时，瓷瓶串放电电压最低。国外也有资料介绍波头50~100微秒时，瓷瓶串放电电压最低，但比这次试验的低多少，有待进一步研究试验。这次试验只能作为在该波头试验条件下的放电电压值。

(6) 根据耐张瓷瓶串短接瓷瓶的冲击干闪试验可以看出，110、154、220千伏瓷瓶串相应的短接四片瓷瓶，其最低干闪电压分别为：440、564、757千伏(最大值)。

当送电线路一相侵入电波后，波发生变形、衰减的情况，目前国内无实测数据(原电科院在一条35千伏线路上做了波衰减试验。试验结果见附录一)。查参考文献4，经加工整

理可得出雷电波衰减曲线。按此曲线，当110、154、220千伏线路一相侵入880、1050、1500千伏（分别按X-4.5×8片、10片、14片的冲击干闪电压决定的）雷电波时，经过10公里后，就相应地衰减到320、480、620千伏（相当于短接四片瓷瓶后的冲击干闪电压的85%以下）。如考虑15公里内有雷雨不进行作业，显然，保证安全是有一定裕度的。

根据几年来带电自由作业的生产实践和科学分析，初步归结如下：

（1）按过电压试验分析表明：110、154、220千伏耐张瓷瓶串进行带电自由作业时，为了保证安全，作业人员短接瓷瓶片数（包括零值瓷瓶在内）不应超过四片，和与之相适应的空气间隙，应保持绝缘良好的瓷瓶片数如下：

110千伏	4片瓷瓶；
154千伏	6片瓷瓶；
220千伏	10片瓷瓶。

（2）220千伏耐张瓷瓶串，如作业人员在第一片至第十片瓷瓶（从横担算起）之内作业，允许短接五片瓷瓶（包括零值在内），保持良好瓷瓶九片，其他位置应保持十片，则不会发生闪络。

（3）110千伏耐张瓷瓶串，作业人员进入后所剩空气间隙很小，作业人员前进时只允许短接二片瓷瓶，坐下时应只短接一片瓷瓶及相邻部分瓷面。在传递工具及操作过程中，都不要超越人体的空气间隙，人的活动范围必须特别注意。

（4）220千伏悬垂瓷瓶串进行带电自由作业，应按设备条件区别对待，如对220千伏旧有线路，绝缘裕度较大（系C-5×17），一般可以满足上述要求，但多数220千伏线路（系II-4.5×14、II-4.5×13或X-4.5×13），在悬垂

串上进行带电自由作业时，需短接瓷瓶片数较多，一般达五片左右(包括零值一片在内)，而且从多次实验中观察到闪络路径是从最近的间隙发生，而不是沿绝缘子表面闪络。试验表明：外部过电压还可达到要求，但内部过电压水平达不到要求(见附录一：模拟悬垂瓷瓶串的带电自由作业试验)。分析表明：220千伏系统切断空载线路的操作过电压，一般幅值较高可达 $3.0U_{\phi}$ 。如有适当措施(使用并联电阻的开关、磁吹避雷器、电压互感器，以及自耦变压器等)，也可以有效地将其过电压限制到 $2.5U_{\phi}$ 以下。一定要慎重地具体分析作业的可能性和必要性。

(5) 带电自由作业一般应在晴天和良好气候条件下进行。为避免线路遭受雷击引起的外部过电压威胁，工作人员应注意气候变化，以及沿线15~20公里内须没有雷雨，并不致发生异常雷击情况下方可进行作业。

(6) 为了确保工作安全，在工作前必须测量每片瓷瓶的绝缘状况。

(7) 关于雨天带电自由作业问题，根据瓷瓶串的湿放电电压研究来看，其放电电压只有干放电电压的60%左右，显然，低了很多。绝缘裕度达不到要求，对安全没有可靠保证，一般不宜进行带电自由作业。

第3节 绝缘服在带电自由作业中的应用

一九六九年，我局在总结超高压线路带电自由作业试验的基础上，研究出用塑料薄膜制成绝缘服装，穿在身上便可以自由地触摸高压带电导体，进行各种不停电检修，从而，解决了在高压配电装置上进行带电作业的主要矛盾，即空气间隙小的问题。因为这种服装起绝缘作用，所以，一般通称

为绝缘服。

现在我们进行带电自由作业，经常使用的绝缘服有两种：一种是以聚乙烯薄膜经热合加工制成的绝缘服；一种是以聚丙烯薄膜经热合加工制成的绝缘服。

试验表明，聚丙烯绝缘服比聚乙烯绝缘服好些，主要表现在耐高温和耐低温方面，其次在绝缘性能方面。特别在耐低温上更适合绝缘服的要求。如聚丙烯薄膜可在零下30°C不变形、不硬化，其比重亦小于聚乙烯，在抗张与冲击强度以及渗透性方面，聚丙烯都超过了聚乙烯。聚丙烯材质绝缘特性试验见附录二。

根据聚丙烯薄膜的绝缘特性和它的厚度，按照带电自由作业不同电压等级的要求，须穿不同厚度的绝缘服。我们现在使用的这种聚丙烯绝缘服，每套是由8层薄膜热合在一起的。每层薄膜厚度为0.025毫米。

在10千伏及以下电压设备上进行带电自由作业时，作业人员是穿4套绝缘服，共32层（0.8毫米厚），脚上穿32层绝缘袜，并穿绝缘靴。此时，绝缘服的工频击穿电压是60千伏左右。它可以满足10千伏系统 $6U_0$ 内部过电压的要求，并超过10千伏系统的绝缘水平。所以，在安全上是可靠的。

第三章 带电自由作业工具

带电自由作业工具除了常用的金属均压服和绝缘服外，尚辅以绝缘杆、板、绳和各种金具组装而成。各种工具应选用机械强度大、绝缘性能高、吸湿性小、比重轻的绝缘材料