

高压电器的绝缘

〔苏〕 A. M. 扎列茨基主编

机械工业出版社



73.14
133

高 压 电 器 的 絕 緣

[苏] A. M. 扎列茨基 主編

李 紀 譯



本书叙述了对电器绝缘的要求，并介绍了空气绝缘和油绝缘的特性。论述了绝缘子的沿面放电、湿放电电压以及导电污垢对放电电压的影响。描述了支持绝缘子、瓷套和穿墙绝缘子的结构，并介绍了它们的计算原理。分章讨论了电流互感器和电压互感器绝缘的计算与结构。

本书的对象是从事电器的设计、计算、试验及研究工作的工程师。也可供高等院校高电压工程和电器专业学生参考。

A. M. Залесский 主编

ИЗОЛЯЦИЯ АППАРАТОВ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Госэнергоиздат 1961

(根据苏联动力出版社一九六一年版译出)

*

*

*

高压电器的绝缘

[苏] A. M. 扎列茨基 主编

李 纪 译

*

机械工业出版社出版 (北京苏州胡同141号)

(北京市书刊出版业营业登记证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ · 印张 $8 \frac{3}{8}$ · 字数 220 千字

1965年8月北京第一版·1965年8月北京第一次印刷

印数 0,001—7,000 · 定价(科六) 1.30 元

统一书号: 15033 · 3701

目 次

第一章 对电器絕緣的要求	1
1-1 电器絕緣的工作条件	1
1-2 絕緣水平	2
1-3 对电器絕緣的要求	3
第二章 空气絕緣	9
2-1 空气密度与湿度对其电气强度的影响	9
2-2 空气击穿电压和电极間距离的关系	12
2-3 压缩空气的电气强度	19
2-4 50赫与冲击电压时电器的絕緣配合	21
第三章 油絕緣及油紙絕緣	23
3-1 单一油絕緣	23
3-2 油紙絕緣	30
3-3 电容片边缘的保护方法	33
第四章 沿絕緣表面的放电现象	39
4-1 空气中及油中的电量	39
4-2 滑閃放电	41
4-3 絕緣子的干放电电压	44
4-4 压缩气体中及油中絕緣子的沿面放电	55
4-5 保护金具的应用	56
第五章 絕緣子的湿放电电压	59
5-1 基本关系	59
5-2 结构的影响	65
5-3 絕緣子在 50 赫时的湿放电电压的試驗数据	67
5-4 直流設備中絕緣子的湿放电电压	68
5-5 电压短時間作用下的湿放电电压	71
第六章 导电污垢对絕緣子放电电压的影响	74

6-1 污垢在絕緣子上組成的过程	74
6-2 污垢的种类	75
6-3 漏泄途徑长度的数值	77
6-4 提高污染絕緣子湿放电电压的措施	80
6-5 半导体釉的应用	83
6-6 污染絕緣子在直流电压下的工作	85
第七章 支持絕緣子的結構	87
7-1 概論	87
7-2 戶內裝置中的支持絕緣子	89
7-3 戶外裝置中的支持絕緣子	93
7-4 特种支持絕緣子	99
第八章 瓷套、支持柱、空气导管	102
8-1 概論	102
8-2 电流互感器和电压互感器的瓷套	102
8-3 避雷器的瓷套	104
8-4 断路器的絕緣支柱	105
8-5 高压力的絕緣空气导管	109
8-6 絕緣子的湿润問題	110
第九章 支持絕緣子和瓷套的計算原理	113
9-1 計算順序	113
9-2 支持絕緣子的計算	113
9-3 保护金具的計算	124
9-4 瓷套的計算	128
第十章 拉杆、軸、杠杆和管子	131
10-1 拉杆和軸	131
10-2 操作杆	134
10-3 絕緣杠杆	134
10-4 管型避雷器的管子	135
10-5 熔断器的管子	138
第十一章 穿墙絕緣子的結構	141
11-1 穿墙絕緣子結構的特点	141



11-2 戶內裝置中的穿牆絕緣子.....	142
11-3 戶外裝置中的電瓷穿牆絕緣子.....	145
11-4 電器穿牆絕緣子.....	147
11-5 油柵型套管.....	148
11-6 酚醛塑膠電容套管.....	150
11-7 電容型油紙絕緣套管.....	158
第十二章 支持絕緣子和穿牆絕緣子的零件	163
12-1 概論.....	163
12-2 結合劑和水泥.....	163
12-3 具有機械固定金具的支持絕緣子的結構.....	166
12-4 套管金具的機械固定.....	167
12-5 瓷套、支柱和空氣導管固定用的結構.....	170
12-6 密封和墊圈.....	173
12-7 油呼吸器.....	175
12-8 油面指示器.....	178
12-9 電容分壓器的抽頭.....	180
第十三章 穿牆絕緣子（套管）的計算原理	182
13-1 計算順序.....	182
13-2 滑閃放電的數值.....	182
13-3 套管的電氣特性的決定.....	183
13-4 套管的击穿電壓.....	185
13-5 電容型油紙絕緣的計算方法.....	186
13-6 電容型絕緣的熱穩定計算.....	192
13-7 油柵型絕緣計算的特點.....	200
13-8 穿牆絕緣子的機械計算.....	202
第十四章 油斷路器的內絕緣	204
14-1 概論.....	204
14-2 油在各類斷路器中的作用.....	205
14-3 油斷路器油箱的壁板、隔板、隔柵和封蓋.....	206
14-4 滅弧裝置的絕緣.....	208
14-5 油斷路器中的內部絕緣距離的計算.....	211
第十五章 電流互感器絕緣的計算與結構	214

15-1	概論	214
15-2	电流互感器的电瓷絕緣	215
15-3	戶外用油紙絕緣的电流互感器	220
15-4	戶外用电容型油紙絕緣的电流互感器	227
第十六章 电压互感器和电抗器絕緣的計算		235
16-1	对电压互感器絕緣的要求	235
16-2	絕緣的种类和使用的材料	235
16-3	匝間絕緣	238
16-4	主絕緣	240
16-5	电抗器的絕緣	244
第十七章 澆注絕緣		246
17-1	概論	246
17-2	澆注絕緣的特点和优点	246
17-3	环氧絕緣	248
17-4	环氧絕緣的工艺	251
17-5	具有澆注絕緣的电流互感器和电压互感器	254
17-6	澆注絕緣在其它高压电器中的应用	260
杂志的縮写符号		262

第一章 对电器絕緣的要求

1-1 电器絕緣的工作条件

对电器絕緣要求的看法，近来发生了显著的变化。在大約二十五年期間认为无可辯駁的电器試驗电压，由于防雷保护系統和避雷器质量的日益完善，現在人們建議要重新加以审訂。当电压达到400~500千伏及以上时，决定絕緣水平时要重新評價內部过电压和大气过电压的作用。因此，必須严肃地分析对电器絕緣的要求問題。可是在此以前必須簡短地研究一下决定这些要求的絕緣工作条件。这里不去詳談絕緣工作的所有条件，因为它们已在[1-1]中得到論述，而只研究特別重要的几个問題。

在戶內和戶外工作条件之間的差別对电器的外絕緣特別重要。在第一种情况下，大气对絕緣的影响（雨、雪和冰冻、固体与液体污垢等等）被隔絕了，而在第二种情况下絕緣受到这些影响。應該指出，風能起重要作用，它对高大的絕緣結構产生龐大的压力，从而在一定程度上决定了絕緣的机械强度。随着电压的上升（400~600千伏及以上）电器的高度大为增加，計算支持絕緣时应当严肃地考虑到風力負荷的影响。

外絕緣在戶內工作照例要比在戶外輕松些。但是，在这种情况下，也可能出現困难的工作条件。例如，在沒有暖气設備的室內，絕緣表面上可能出現露水，它将降低絕緣子的放电电压。在某些生产厂房內和在南方地区，絕緣只好在很高的溫度和近100%空气濕度的条件下工作。

在高原地区，电器将在低气压下工作。这种情况首先在外絕緣上有所反映。但是，如果电器具有油紙絕緣并且沒有密封，則低气压可能引起此絕緣的游离电压降低。

不同种类的过电压对絕緣水平的影响，即对内外絕緣电气强度要求的影响是一个特別重要的問題。

由于发电厂功率的增长，短路电流随着增大，它們决定了电器和配电装置中的电动力。絕緣子和其他絕緣結構必須按照这些力来計算。

1-2 絕緣水平

比較細致地研究一下各种过电压对絕緣要求的影响問題。还在不久以前，认为最重要的过电压是大气过电压，所有电气設備都是根据它們来計算的。同时认为，如果該設備是按大气过电压計算的，則內部过电压（操作过电压、諧振过电压等）对它是沒有危險的。但是，大气过电压和电气设备的工作电压是无关的，在苏联研究出来的防雷保护系統中它們的上限是有一定限度的。实际上在220千伏电压的設備中，已經达到了这个界限。在更高的工作电压时首要的是内部过电压。在研究制定400千伏設備的絕緣水平时，已經碰到了這個問題，那时决定采用三倍于工作电压（ $3U_{\phi}$ ）的絕緣水平。自然，在电压更高时，大气过电压的作用下降得还要多。如果把电力变压器除外，則大气过电压只对电压互感器和电抗器之类的电器有意义，它們决定这类电器的匝間强度。其余一切电器的外絕緣在这样高的电压下均由内部过电压决定。

应当指出，所謂絕緣水平，是指这样的絕緣质量，它能承受住大于最大工作电压（相电压）已知倍数的操作过电压和已知的冲击电压的作用，这些冲击电压的数值由相应的避雷器所限制并和操作过电压相配合。由此可見，絕緣水平决定了电器应具备的最低放电电压。这就是降雨时的放电电压。很明显，考慮到絕緣在正常运行

条件下的工作，湿放电电压的倍数应当稍高于操作过电压的倍数（一般采用約 5% 的余量）。

目前已經有把由內部过电压决定的絕緣水平降到 $2.5U_{\phi}$ 的，至少电压在 330 千伏及以上时是这样。此时如果冲击試驗电压保持以前的数值，則絕緣的尺寸将由大气过电压决定。但是，加强防雷保护系統之后，可以重新使电器的尺寸回到由內部过电压决定的界限上来，而加强防雷系統无特殊困难，也不会耗費多大投資。

电压低于 500 千伏时能否降低絕緣水平，这牵涉到制造适于限制內部过电压的避雷器的问题。在通过能力大的避雷器的制造方面，有些科研机关和工厂虽然已經取得了很大进展，但是这项任务并未彻底完成。

总之，目前必须承认，对电压在 220 千伏及以下的电器說来，冲击电压作用下的絕緣特性有重要意义，而在更高的电压时，內部过电压作用下的絕緣特性将起决定性的作用。

应当指出，电器絕緣在內部过电压作用下的特性研究还很不够。一般认为，起作用的过电压的频率提高时，絕緣子的放电电压也上升。看起来这种上升不很大。所以一般认为，用工频电压試驗电器已經足以代表絕緣在內部过电压作用下的特性了。可以想像，这时絕緣将有一点余量，但其数值暫時是个未知数。

1-3 对电器絕緣的要求

現在討論一下对电器絕緣的电气要求。

在决定电器絕緣电气特性的基本文件中規定的工频与冲击試驗电压引列于下（表 1-1 和 1-2）。

表 1-1 中所指輕型絕緣的电气设备仅用于不遭受大气过电压侵襲的装置中，或者有專門的防雷保护措施，以便将这类过电压的幅值限制在不高于工频試驗电压幅值的範圍內。

表1-1 正常絕緣的电气设备的工頻 (50赫) 試驗电压

电压 等級 千伏	最大工 作电压 千伏	一分钟試驗电压, 千伏					外絕緣承受住的电压(平穩升压), 千伏			
		电 力 变 压 器	电 压 互 感 器	电 器 及 电 流 互 感 器	拉 杆 (手控 和测 量的)	单 独 試 驗 的 絕 緣 棒 子	在 干 燥 状 态 下			淋 雨 电 器、变 压 器及戶 外设备中 的絕緣子
							隔 离 开 关 同 相 触 头 間 的 間 隙	与 負 荷 断 路 位 置 時 觸 头 間 的 間 隙	电 器 和 变 压 器	单 独 試 驗 的 絕 緣 棒 子
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3	3.5	18	24	24	36	25	28	26	27	20
6	6.9	25	32	32	48	32	40	34	36	26
10	11.5	35	42	42	63	42	53	45	47	34
15	17.5	45	55	55	82	57	70	60	63	45
20	23	55	65	65	100	68	85	70	75	55
35	40.5	85	95	95	150	100	130	105	110	86
110	126	200	200	250/200	—	265	355	280	295	215
150	172	275	275	320/275	—	340	460	355	375	290
220	252	400	400	470/400	—	490	675	520	550	425

对輕型絕緣的电气设备, 同上

3	3.5	10	13	—	14	18	15	10
6	6.9	16	21	—	21	27	23	18
10	11.5	24	32	—	32	42	35	28
15	17.5	37	48	—	48	62	53	42

注: 第五栏斜綫下面的数字对内絕緣在油中的电器有效, 其外絕緣单独試驗。

絕緣承受住的工頻电压系指外絕緣在試驗电压平穩上升时应当能承受的电压。

外絕緣系指絕緣裝置暴露在大氣中的那一部分。內絕緣則是絕緣裝置安放在液体或半液体中的那一部分。

再研究一下电压在 330 千伏及以上时对设备絕緣的要求。在設計由伏尔加水电站向莫斯科輸电的綫路时, 采用了表 1-3 中所列的試驗电压。

制訂表 1-3 的出发点是假設电压在 400 千伏及以上时起决定作

表1-2 正常绝缘的电气设备的冲击试验电压

电压 等级 千伏	最大工 作电压 千伏	内绝缘的试验电压, 千伏(最大值)		外绝缘的试验电压, 千伏(最大值)					
		电器、电流互感器、 带激磁试验的电力变 压器及电压互感器和并 联电抗器	不带激磁试验的电力变 压器及电压互感器和并 联电抗器	变 压 器 和 电 器	变 压 器 和 电 器	单 独 试 验 的 绝 缘 子	隔离开关与负荷开关断头间、 断路器触头间的间隙、 熔断器触头的间隙		
		全波		截波	全波	截波	全波	截波	全波
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	3.5	42	43.5	50	42	50	44	52	50
6	6.9	57	60	70	57	70	60	73	65
10	11.5	75	80	90	75	90	80	100	90
15	17.5	100	108	120	100	120	105	125	115
20	23	120	130	150	120	150	125	153	140
35	40.5	180	200	225	185	230	195	240	220
110	126	425	480	550	460	570	480	600	570
150	172	585	660	760	630	785	660	825	790
220	252	835	945	1090	900	1130	950	1190	1100

注: 六至十栏的试验电压数值是对正常大气条件而言(压力 760 毫米水银柱、温度 20°C、空气绝对湿度 11 克/米³)。此注对表 1-1 同样适用。

表1-3 400 千伏设备的试验电压

试验电压的种类	电器和绝缘子	隔离开关断路时触头间距离
1.5/40 微秒全波冲击试验电压, 千伏(最大值)	1500	1800
2 微秒截波冲击试验电压, 千伏(最大值)	1800	—
绝缘子在 50 赫时的试验电压, 千伏	850	1100
电流互感器和多油断路器在 50 赫时的试验电压, 千伏	750	—
50 赫时的湿放电电压, 千伏	700	—

用的是内部过电压, 其倍数不大于三[●]。最近几年来, 有些研究机关和高等技术院校进行的大量内部过电压的研究工作表明, 这个倍数在某些情况下可能大得很多。与此同时, 也找出了降低这类过

● 即不大于 $3U_{\phi}$ 。——译者

电压的各种措施，或者对它們进行防护。因此决定，电压在 330 千伏及以上时，可以从内部过电压为 $2.5 U_{\phi}$ 的观点出发来决定絕緣水平。

上列各表中没有对絕緣的电气强度（击穿电压）的要求。可是击穿电压乃是絕緣最重要的特性之一，因为絕緣的击穿是电器的严重事故，一般它将使电器损坏。为了避免这类事故，必須使电器絕緣的击穿电压高于它的干放电电压。根据 ГОСТ 1516-60 規定，50 赫平稳升压时絕緣子的最低击穿电压必須大于干燥状态时外絕緣承受住的电压：对基本是液体或油紙絕緣的絕緣子至少要大 120%；对基本是半液态和塑性絕緣（复合物填充的）的絕緣子至少要大 130%；以及对基本是固体絕緣的絕緣子至少要大 160%。

处在油中的电器放电电压至少必須大于干燥的外絕緣耐受的电压的 120%。

保証含油电器具有較大的击穿安全系数是特別重要的。伴随油被击穿而产生的电弧将引起油的蒸发和分解，因而导致电器内部的压力上升，这在很多情况下会引起电器的爆炸和火灾。

还必須談談对陶瓷絕緣子的机械强度和抗热性能的要求。

表 1-4 内列有各工厂生产的戶内用标准电器絕緣子（支持的和穿墙的）的机械

表 1-4 电器絕緣子的机械强度

絕 緣 子 种 类	破坏負荷, 公斤
ОА, ПА	375
ОБ, ПБ	750
ОВ, ПВ	1250
ОД	2000
ОМЕ	3000

强度，其电压为 6~35 千伏。

表 1-5 中列有 ГОСТ 689-55 規定的对戶外用隔离开关支持絕緣子的要求。

电气设备安装規程(ИУЭУ)中要求在露天变电所中的絕緣子机械强度安全系数不得小于三，因此，絕緣子的允許工作負荷不能大

表1-5 戶外用隔离开关絕緣子的弯曲破坏应力

隔离开关的额定电流, 安	隔离开关的额定电压, 千伏	隔离开关絕緣子的弯曲破坏应力, 公斤 (不小于)
200; 400; 600	3; 6	350
200; 400; 600	10	500
600	35	500
1000; 2000	35	1000
600; 1000	110; 150	300
2000	110	500
600; 1000	220	250

于破坏負荷的三分之一。电气设备安装規程中沒有規定戶內变电所中絕緣子机械强度的安全系数, 但是, 由于电瓷的不均匀性大, 这个安全系数不应当小于二。

在标准中沒有規定电压在 110 千伏以上的穿墙絕緣子的机械强度, 制造厂給它生产的每种型号的絕緣子专门标出这个数值。

应当說明, 400 千伏支持絕緣子的破坏应力規定为不小于 1500 公斤。这个要求显然是偏高了, 現在正在重新进行审定。应该指出, 生产 380~400 千伏支持絕緣子的多数工厂只保証它們能承受約 400 公斤的破坏应力。

为了发现陶瓷(瓷、块滑石等)内部的应力以及因金具与陶瓷溫度膨胀系数不同而引起的溫度应力, 規定了对陶瓷絕緣子抗热性能的要求。电器电瓷絕緣子必須在 $t = 15 + 0.7 G$ (G ——絕緣子重量, 公斤) 時間内, 但不超过 60 分钟, 耐受住在 $80 \sim 90^\circ\text{C}$ 溫度热水中的加热, 然后沉入比上述溫度低 70°C 的冷水中。已經安装金具的絕緣子必須兩度經受这种試驗。对未装金具的巨型絕緣子(直徑自 400 至 750 毫米和壁厚小于或等于 50 毫米)溫度降减小到 60°C , 而对更大的——沒有列入标准。

参 考 文 献

- 1-1. А. М. Залесский, Электрические аппараты высокого напряжения, Гостэнергиздат, 1951.

第二章 空气絕緣

2-1 空气密度与湿度对其电气强度的影响

在很多电器中空气絕緣起着重要作用。这里所說的，不是电瓷或其他絕緣材料表面的絕緣，而是空气絕緣，例如，在电器同相或不同相的套管触点間、在分閘位置时隔离开关的刀閘和靜触头間等等，就存在这种絕緣。关于沿介质表面空气絕緣的电气强度問題，将在下面第4-3节中去研究。

在多数情况下，电器中的电极形状使其間的电場很不均匀。这种电极間的击穿电压一般接近針状电极（或截面不大的棒形电极）間和針（棒）与平面間的击穿电压。因此，必須对此类形状电极間的击穿电压进行特別詳細的研究，并且要全面弄清所有对它有影响的因素。当然，对其他形状电极間的击穿电压作些介紹也是有益的。

如所周知，空气密度和湿度对各种电极間的击穿电压有显著的影响。在溫度 20°C ($T_0=293^{\circ}\text{K}$) 和压力760毫米水銀柱时的空气密度被采用为計算电气强度的空气密度单位。因此，空气的相对密度将由下列等式决定：

$$\delta = \frac{T_0 p}{T p_0} = \frac{293 p}{760 T} = 0.386 \frac{p}{T}。 \quad (2-1)$$

如以毫巴測量空气压力，空气相对密度用下列等式表示：

$$\delta = \frac{293 p}{1013 T} = 0.289 \frac{p}{T}。 \quad (2-2)$$

一般认为，空气的击穿电压与相对密度成比例。但是，由图2-1中可以看出，这是不准确的。在均匀电場时，与正比例的規律相差不算大，但在用針状和棒形电极时，差别十分明显，并且不可忽略。

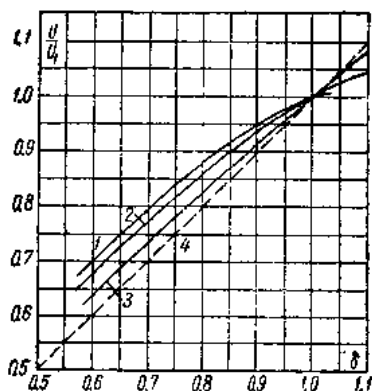


图2-1 空气的击穿电压和相对密度的关系:

1—针与针; 2— $\phi 1$ 厘米球間; 3—平面間(均匀电场); 4—正比例规律。电极間距离为1厘米, $U_1 - \delta = 1$ 时的击穿电压(弗兰克的数据)。

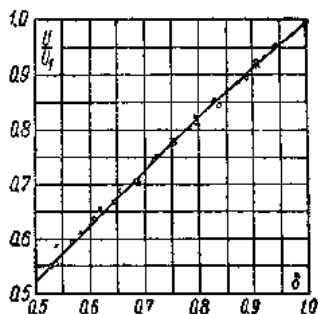


图2-2 空气击穿电压和相对密度的关系:

○ ○ ○ — $\phi 25$ 厘米球間, $s = 7.62$ 厘米, 二球与地絕緣; $\times \times \times$ — $\phi 12.5$ 厘米球間, $s = 6.35$ 厘米; --- 球接地, $U_1 - \delta = 1$ 时的击穿电压(皮克的数据)。

应当指出, 图 2-1 中的数据是在小距离电极間取得的。很遺憾, 現在还没有长距离棒形电极間击穿电压和空气密度的关系曲线。可以設想, 在距离更大时, 这个关系仍将差于正比关系。图 2-2 上引有圆球間的关系曲线。比較图 2-2 和图 2-1 可見, 球間隙曲线实际上和均匀电场曲线相重合。

在三十年代已詳細地研究了空气湿度对其电气强度的影响。在 [2-1]、[2-2] 中对此影响做了許多研究工作。这些研究說明, 空气的绝对湿度上升时, 棒形电极間(以及棒与平面間)的击穿电压直线增加, 这可以从图 2-3 看出。为了比較結果, 采用了归算的办法, 将某种湿度 γ 时由試驗求得的结果, 和空气的正常湿度时相比, 这个湿度在 20°C 时等于 11 克/米^3 。空气的这个绝对湿度相应于 64% 相对湿度, 即一般平均室内湿度。順便說明, 在美国 25°C 时每立方英尺 6.55 英呎绝对湿度算做正常湿度, 这相当于 15.0