

高压电器中层压绝缘材料热击穿的计算

四川电器厂 杨世权

内容提要：指出了在设计高压电器中层压材料绝缘件时考虑热击穿的重要性，对绝缘拉杆一类层压绝缘件进行热击穿近似工程计算作了探讨，计算中从简化计算出发，作了一些简化假定，从而得出了比传统热击穿计算公式更为简单的结果。

高压电器中大量采用层压材料作为绝缘。这种材料的最大缺陷是分层、多孔、受潮、易受环境温度的影响。我国南方正是这种温度与高湿的同时作用。在过去的设计中较多考虑电的击穿（沿面闪络或内部击穿），但大量的实例却是热的击穿。为此，笔者提出热击穿的计算方法，定量地求解热击穿与时间、温度、湿度的关系，并结合实例作出分析。热击穿的实例甚多，但国内尚少具体分析，本文只是一种探讨，期求对高压电器的设计方面能有所帮助。

热 击 穿

在介质击穿过程中，由于电场把能量转移到介质，引起介质发生变化。当外界条件（例如温度、电压、时间及其它）达到一定程度时，这种量变就突变为质变，“击穿”就开始了。固体介质的击穿可以分为：电击穿、热击穿和化学击穿。虽然击穿可能有不同的形式，但只要那一种发生在前，那就是击穿的主要原因。

过去在选用层压绝缘材料时都只考虑电击穿，这往往会导致错误的结果。例如某仿苏老式10千伏少油断路器的绝缘连杆，仅根据试验电压作了42千伏5分钟的耐压，认为既不发生电击穿又不沿面闪络就已经可以了。事实是怎样的呢？在大批制造和运行中，沿面闪络却极少见到，倒是热击穿却有时发生。这就是说：由于层压材料的特点，在设计时应该着重考虑热击穿而不是电击穿。

热击穿就是介质在电压作用下不断发生热破坏的结果，从击穿电压值大小这方面来看，它与电击穿的区别如图1，此点读者已清楚了。在图中范围Ⅰ，击穿电压和初始温度无关仅由电的条件来决定，即称“电击穿”；在范围Ⅱ，击穿电压和初始温度有显著关系，决定于发热和散热条件，电击穿已转变成热击穿。

层压材料是纸、布和木材以热固树脂热压而成，它们的最大弱点是多层、多孔、容易吸湿，从而使电气性能大大降低。归纳成：

1. 由于水的介电系数 $\epsilon \approx 81$ ，因此吸湿后材料的介电系数显著增加。
2. 绝缘电阻显著下降，如图2。
3. 介质损耗显著增加，如图3。
4. 受温度的影响比较显著，如图4、5。

其体积电阻系数与温度的关系为：

$$e_t = e_0 \cdot e^{-a(t-t_0)} \quad (1)$$

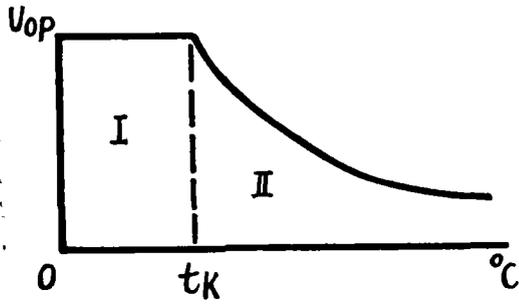


图1 击穿电压和温度的关系
I——电击穿范围
II——热击穿范围

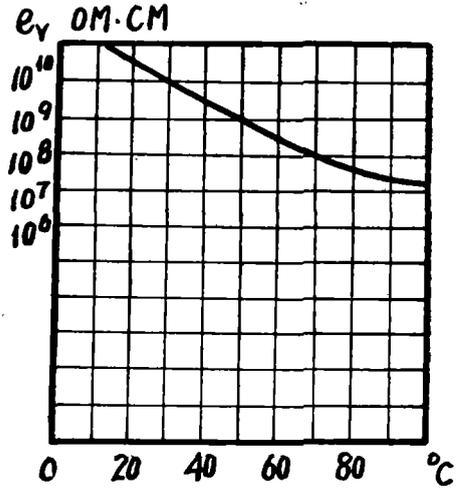


图4 胶纸板 e_v 与温度的关系示意图

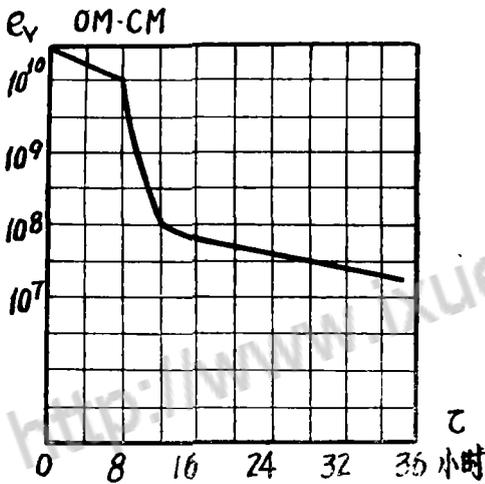


图2 胶纸板体积电阻系数与置于潮湿空气中时间的关系示意图

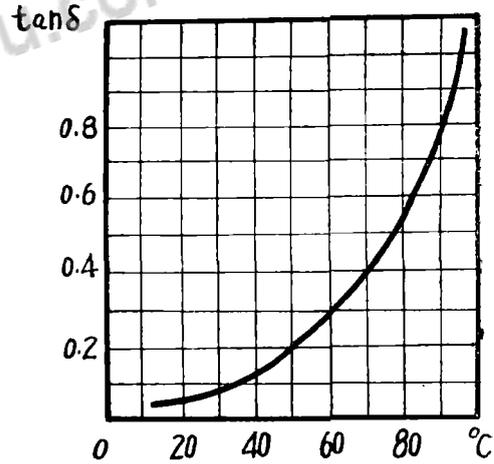


图5 胶纸板 $\tan \delta$ 与温度的关系示意图

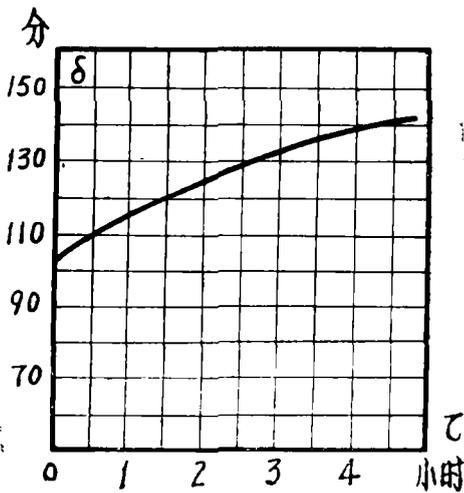


图3 胶纸板介损角与浸水时间的关系示意图

式中： e_t 温度为 t_t 时的体积电阻系数
 α 材料常数，和物理性质及化学结构有关， $1/^\circ\text{C}$

其介质损耗与温度的关系为：

$$\tan \delta_t = \tan \delta_0 \cdot e^{b(t-t_0)} \quad (2)$$

式中： $\tan \delta_t$ 温度为 t_t 时的介损正切值；

b 材料常数，和物理性质及化学结构有关， $1/^\circ\text{C}$ ， $b \approx 4.37 \times 10^{-2} 1/^\circ\text{C}$ (纸、布、木等)

热击穿的计算与分析

图6的绝缘拉杆，材料为层压绝缘板。

当电极加上电压时，电场能量转移到介质，使介质发热，同时沿介质表面散出热量。如果总是发热多而散热少，那么温度越来越高，经过一段时间，热击穿就产生了。

1. 热击穿临界电压的确定

今在拉杆轴向某处取如图7，厚 $2h$ 长1厘米高 H 的元体积来考虑。

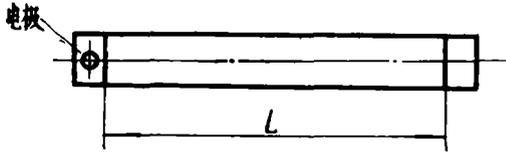


图6 SN10—10绝缘拉杆

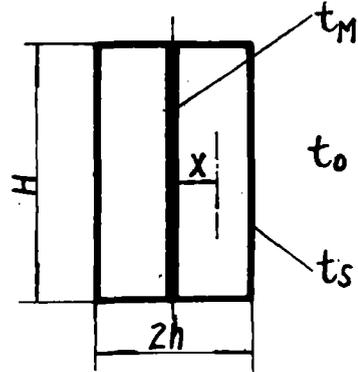


图7

t_M ——介质中心层温度 $^{\circ}\text{C}$
 t_s ——介质表面温度 $^{\circ}\text{C}$
 t_0 ——拐臂附近的环境温度 $^{\circ}\text{C}$

设温度对称分布，且各点电场相等。在稳定时，发热等于散热，对于宽 h 、高 1 、厚 1 的元体积，可以写出下列热平衡方程：

$$\int_0^h \frac{\epsilon f \tan \delta}{1.8 \times 10^{12}} E^2 dx = k(t_s - t_0) \quad (3)$$

由于 $\tan \delta_0 \cdot e^{b(t-t_0)}$ ，故各点 x 不同温度 t 也不同，故 t 是 x 的函数，且目前尚不知其函数式。为简化计算并从安全起见，取 $t = t_M$ ，即取各点的温度等于中心层的温度。从而可以积分得：

$$\frac{\epsilon f \tan \delta_0 e^{b(t_M - t_0)}}{1.8 \times 10^{12}} E^2 h = K(t_s - t_0) \quad (4)$$

从传热学知，对于图6这种自发热源（即在整个体积内都发热）固体，从中心层到 x 处之间单位时间产生的热量是：

$$\int_0^x \frac{\epsilon f \tan \delta}{1.8 \times 10^{12}} E^2 dx = \epsilon f \tan \delta_0 \frac{e^{b(t_M - t_0)}}{1.8 \times 10^{12}} E^2 x$$

而其内部为传导散热，则当热稳定时，得方程：

$$\frac{\epsilon f \tan \delta_0 e^{b(t_M - t_0)}}{1.8 \times 10^{12}} E^2 x = -\lambda \frac{dt}{dx}$$

对 x 积分（积分时，左端同样简化取 $t = t_M$ ）得：

$$\frac{\epsilon f \tan \delta_0 e^{b(t_M - t_0)}}{1.8 \times 10^{12}} E^2 \frac{x^2}{2} + C = -\lambda t$$

常数 C 由边界条件 $x = 0$ ， $t = t_M$ 得 $c = -\lambda t_M$ ，而 $x = h$ 时， $t = t_s$ ，故有：

$$\frac{\epsilon f \tan \delta_0 e^{b(t_M - t_0)}}{1.8 \times 10^{12}} E^2 h = \frac{2\lambda(t_M - t_s)}{h} \quad (5)$$

联合 (5)、(4) 式得:

$$(t_s - t_0) = \frac{2\lambda}{kh + 2\lambda} (t_M - t_0) \quad (6)$$

将 $(t_s - t_0)$ 所得代入 (4) 式, 得:

$$\frac{\epsilon f \tan \delta_0 e^{b(t_M - t_0)}}{1.8 \times 10^{12}} E^2 h = k \frac{2\lambda}{(kh + 2\lambda)} (t_M - t_0) \quad (7)$$

以 t_M 为自变量 (横坐标)、(7) 式左端或右端分别为因变量 p_r 与 p_s 。显然 p_r 表示单位时间内介质中发热量, 与 E (从而电压 u) 有关, 取不同 u (即不同外施电压, 可有不同 $p_r - t_M$ 曲线, 如图中 p_1, p_2, p_3); 而 p_s 为单位时间散热量。

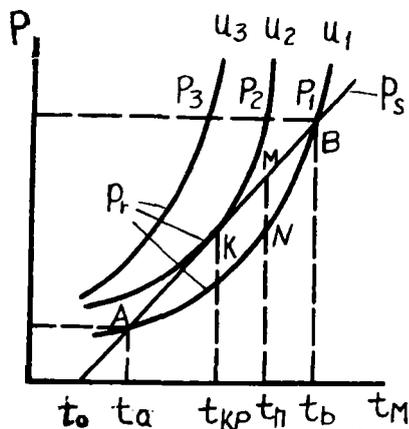


图 8 介质发热、散热与温度的关系

介质散热 p_s 为一直线, 当 $t_M = t_0$ 时 $p_s = 0$, 已知散热系数 k , 导热系数 λ 及材料厚度 h 就可求出直线的斜率。介质发热 p_r 为一指数曲线。设电压 U_1 下的发热曲线与直线相交于 A、B 二点。如果介质发热到某一温度 t_a , 因此时 $p_s < p_r$, 则介质将冷却到温度 t_a , A 点即是在电压 U_1 下介质的热稳定点, 介质温度不可能上升; 如果介质发热到另一温度 t_b 呢? 且因某种原因温度又稍稍升高, 则 $p_s < p_r$ 温度不断上升, 直至热击穿为止, 故 B 点称电压 U_1 下的热不稳定点。

由于 A、B 两点都能满足式 (7), 这就不能从式 (7) 单一地解出发生热击穿的条件。

在电压 U_3 下, 发热始终高于散热, 因而在任何时候都不可能热平衡。显然只有在 U_2 下它们恰恰切于 k 点, 而一旦温度或电压稍波动 (增加), 则击穿过程必然开始。图中, 为了引起热击穿所必需的温度 t_k , 显然是所有热不平衡点中最低的, 称临界击穿温度; 发生热击穿所必需的电压 U_2 也是最低的, 称“临界热击穿电压 U_{np} ”。于是引起热击穿的条件可归纳为:

$$p_r = p_s \text{ 和 } dp_r/dt = dp_s/dt$$

据上述, 将 (7) 式两边对温度 t_M 微分, 得:

$$\frac{\epsilon f \tan \delta_0 e^{b(t_M - t_0)}}{1.8 \times 10^{12}} \cdot b E^2 h = k \frac{2\lambda}{(kh + 2\lambda)} \quad (8)$$

上式之 E 就是热击穿临界电场强度, 为:

$$E_{np} = \sqrt{\frac{1.8 \times 10^{12}}{\epsilon f \tan \delta_{np}} \cdot b \cdot h} \cdot \frac{k \cdot 2\lambda}{(kh + 2\lambda)} \text{ 伏/厘米} \quad (9)$$

式中 $\tan \delta_{np} = \tan \delta_0 e^{b(t_M - t_0)}$, $t_M = t_{np}$

用式 (7): 式 (8) 得:

$$t_{np} = t_0 + 1/b \text{ 度}$$

$$\text{故 } \tan \delta_{np} = \tan \delta_0 \cdot e \quad (10)$$

由式可见, 热击穿和下列因素有关:

(1) 和材质即 $\epsilon \cdot \tan \delta$ 有关, 特别是易于吸潮的材料 “ $\epsilon \tan \delta$ ” 急剧增加, 热击穿电压显

著下降。对于工作在交流电压下的绝缘材料，常把 $\epsilon \tan \delta$ 联系在一起考虑，称为“品质因数”，单纯测量绝缘电阻未必反映出过程的本质。

(2) 和结构尺寸有关，愈薄的材料易于散热，中心层温度不高，故热击穿就不容易。

(3) 和环境温度有关， t_0 提高则 $\tan \delta_0$ 亦增加，故热击穿电压降低。

(4) 和相对湿度有关，因材料易于吸湿使 $\epsilon \tan \delta$ 增大，但这类数据目前可惜太少。

2. 热击穿电压和电压作用时间的关系

以上所述是临界情况，即尽管所施电压、温度是最起码的，击穿无论发展如何缓慢，但只要时间足够长，则总有可能发生。现在我们要找出无限长时间的热击穿电压和短时间下热击穿电压间的对应关系。

在短时间 $d\tau$ 内：

$$p_r d\tau = k(t_s - t_0) d\tau + CG dt$$

$$\therefore d\tau = C\gamma h dt / [p_r - k(t_s - t_0)]$$

C比热 γ 密度

将(6)式代入，得：
$$a\tau = CG dt / [p_r - k \frac{2\lambda}{kh + 2\lambda} (t_M - t_0)]$$

注意到 t_M 也为变量，且 $dt = dt_M$ ，初始条件为 $\tau = 0$ 时， $t_M = t_0$ ，并在求解时，把 $\tan \delta_0 e^{b(t_M - t_0)}$ 近似地看作常数，经求解整理后，得出介质温度与时间的关系：

$$(t_M - t_0) = \frac{kh + 2\lambda}{2k\lambda} p_r [1 - e^{-\tau/Q}]$$

式中 Q 为介质发热的时间常数 $= \frac{ch\gamma(kh + 2\lambda)}{2k\lambda}$ 秒，稍加整理得：

$$\frac{\epsilon \tan \delta_0 e^{b(t_M - t_0)}}{1.8 \times 10^{12}} E^2 h [1 - e^{-\tau/Q}] = \frac{2\lambda k}{(kh + 2\lambda)} (t_M - t_0)$$

因而不难看出，热击穿电压和电压作用时间的关系为：

$$E_{np\tau} = \sqrt{\frac{1.8 \times 10^{12}}{\epsilon \tan \delta_{np} b h} \frac{2\lambda k}{(kh + 2\lambda)}} / \sqrt{1 - e^{-\tau/Q}}$$

$$= E_{np} / \sqrt{1 - e^{-\tau/Q}} \quad (\text{伏/厘米}) \quad (11)$$

计算实例：SN10—10绝缘拉杆

取 $k = 12 \times 10^{-4}$ 瓦/厘米²度 $c = 6.25$ 瓦/克度

$h = 0.6$ 厘米 $\gamma = 1.35$ 克/厘米³

$\lambda = 17 \times 10^{-4}$ 瓦/厘米度

得 $Q \approx 5400 \approx 1$ 小时30分

结果列于表1。

由图9见，当电压作用时间短时，据(11)式击穿电压提高，且时间愈短电压愈高。

3. 热击穿电压和环境温度的关系：

由(9)式知 E_{np} 与 $\sqrt{\tan \delta_{np}}$ 成正比，而 $\tan \delta = \tan \delta_0 e^{b(t-t_0)}$ ，则热击穿电压和环境温度的关系见表2。

由表2见，当环境温度为50℃时的热击穿与0℃相比，则下降了66%，过去往往没有看到环境温度的重要影响。

表1

时间 (L)	1分钟	5分钟	Q秒	3.5Q秒
$E_{np\tau}/E_{np}$	≈ 2.5	≈ 1.25	≈ 3.86	≈ 1

表2

环境温度 (°C)	0	10	20	30	40	50
$\tan\delta_{t_0}/\tan\delta_{t_0=0}$	1	1.55	2.43	3.70	5.75	8.9
$E_{np t_0}/E_{np t_0=0}$	1	0.80	0.65	0.52	0.41	0.34

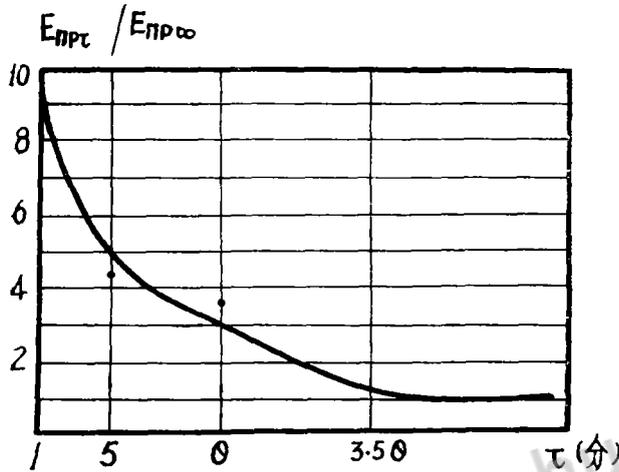


图9 热击穿电压和电压作用时间关系

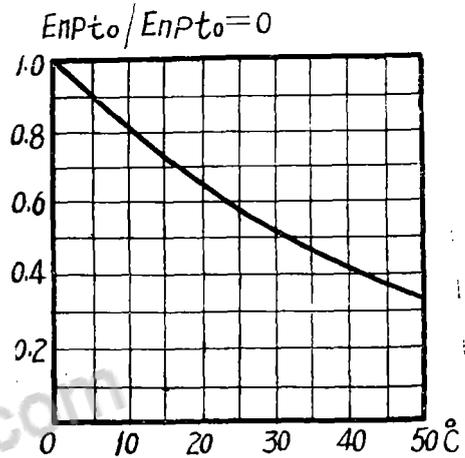


图10 热击穿电压和环境温度的关系

4. 湿度对热击穿的影响

吸湿愈多 $\epsilon \tan\delta$ 愈大，但遗憾的是至今还缺少：吸湿量—— $\epsilon \tan\delta$ ——热击穿电压间的数
据，所以，我们只能根据，由于吸潮，绝缘电阻系数陆续按 10^9 、 10^8 、 10^7 欧姆·厘米下降的事
实，再分别归算到 $\epsilon \tan\delta$ 。

归算的公式是：

$$\text{直流下的介质损耗 } p_r = \frac{1}{\epsilon_B} E^2$$

$$\text{交流下的介质损耗 } p_r = \frac{\epsilon \tan\delta}{1.8 \times 10^{12}} E^2$$

近似地认为两者相等，则：

$$\epsilon \tan\delta \approx 1.8 \times 10^{12} / f \cdot \epsilon_B$$

表3

ϵ_B (OM·CM)	10^{10}	10^9	10^8	$10^{7.5}$	10^7
$\tan\delta$	3.6	36	360	1150	3600
热击穿电压下降率	1	0.316	0.1	0.056	0.0316

据此且从 (9) 式得出热击穿电压与内绝缘电阻系数或 $\epsilon \tan\delta$ (品质因数) 的关系，如表3。

由表和图可见，如果当 ϵ_B 由 10^{10} 下降到 10^8 ，其击穿电压可怕地跌落了90%。如果再加上环境温度的恶化，这就不难明白，为什么高压电中层压绝缘材料（特别是胶布板吸湿最快），其热击穿事故何以如此普遍了。

实例分析

现将SN 10—10少油断路器绝缘拉杆的绝缘计算归纳于后：

1) 计算公式 (引用式 (9) 或 (10)), b 、 k 、 λ 值见前, ϵ 取 8 (酚醛布板)、6 (环氧玻璃布板), $\tan\delta_0$ 取 40℃ 下的值:

$$\tan\delta_0 = 0.5 \text{ (酚醛布板)}$$

$$\tan\delta_0 = 0.24 \text{ (环氧玻璃布板)}$$

h 取绝缘拉杆厚度的一半、厘米

2) 计算结果见表 4 (40℃ 下)

“吸潮后”是指内绝缘电阻下降到 10^8 欧·厘米。据热击穿计算, 10 千伏级的绝缘距离

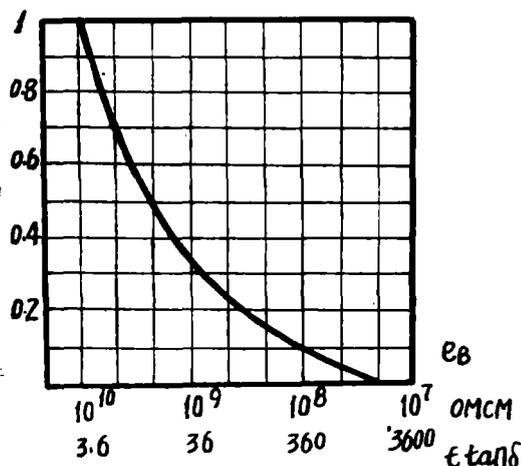


图11 热击穿电压下降率与内电阻系数关系

表4

项 目	干 燥 下	吸 潮 后
热击穿临界电场 E_{np} (KV/CM)	17.1	1.71
有效绝缘距离 (CM)	~15 (合闸)	
热击穿临界电压 U_{np} (KV)	273	27.3
临界介质损耗角正切 $\tan\delta_{np}$	0.65	65
材料名称	环氧酚醛玻璃布板	
评 价	安 全	较 安 全

需取170毫米才比较安全。但从电击穿的观点, 则误认为130毫米就够了, 两者显然不同。因此, 对于一个高压电器设计者, 如果不充分考虑热击穿, 那将铸成大错。这就是本文的意图, 并且期望同志们能探索出更好的方法来。

(上接第38页)

电活动相差悬殊的实际情况, 仅有一种 5 千伏等级的阀式避雷器不能满足要求, 所以同时发展配电型管式避雷器是十分必要的。

参考资料

- (1) 配电系统典型雷击通过避雷器的雷电流 Electra 1978.3 (CIGRE33)
- (2) 对大电流试验的建议 IEC37 (Secretari-at) 56 NoV. 1978
- (3) 电力网过电压 巴茨著
- (4) 雷电流上升率对避雷器特性的影响 IEEE 1979 Vol
- (5) 电力设备过电压保护设计技术规程. 电力部
- (6) 电力系统过电压 多尔金诺夫著
- (7) 无线流避雷器保护配电变压器的效果分析 上海交大 78.12
- (8) 10 千伏配电变压器雷害事故调查分析和高压试验 武汉水院 78.1



论文写作，论文降重，
论文格式排版，论文发表，
专业硕博团队，十年论文服务经验



SCI期刊发表，论文润色，
英文翻译，提供全流程发表支持
全程美籍资深编辑顾问贴心服务

免费论文查重：<http://free.paperyy.com>

3亿免费文献下载：<http://www.ixueshu.com>

超值论文自动降重：http://www.paperyy.com/reduce_repetition

PPT免费模版下载：<http://ppt.ixueshu.com>

阅读此文的还阅读了：

- [1. X线机高压硅柱热击穿故障检修与分析](#)
- [2. 110千伏户外复合绝缘高压交流隔离开关在扬州诞生](#)
- [3. 新型高压电器设备](#)
- [4. LXP-160产品在南京220kV长江大跨越运行后的性能测试](#)
- [5. 数字错位散斑术的自控音频激振加载研究](#)
- [6. 中面单向受拉\(压\)的阶梯式矩形薄板的振动](#)
- [7. 一种高压电器外用有机硅绝缘材料](#)
- [8. 温度对发射机的影响和降温实践](#)
- [9. GaAs光导开关的热击穿实验研究](#)
- [10. 风冷式矿用防爆三相异步电动机定子绕组温度场的计算](#)
- [11. 高压电气设备外绝缘试验时高海拔修正因数的计算](#)
- [12. 上海市打虎山路第一小学](#)
- [13. 串联臂压电微电机及驱动电源的研究](#)
- [14. 六氟化硫高压电器设备运行、检修技术问题分析](#)
- [15. 垂直电极火花放电现象分析](#)
- [16. 测定SF6气体湿度时的温度校正公式](#)

17. [基于模糊控制的恒压供水智能监控系统的研究](#)
18. [汽车电子电路故障的特点及检修要点](#)
19. [高压电器仲裁模计算机辅助设计系统](#)
20. [一种高压电器外用有机硅绝缘材料](#)
21. [用耦合有限元方法计算高压电器电场的研究](#)
22. [直流ZnO避雷器有关技术问题的讨论](#)
23. [N,N'-双\[双\[4-\(二甲氨基\)苯基\]甲基\]尿素合成的反应机理](#)
24. [一种油包水乳化压裂液的实验研究](#)
25. [超导腔的热击穿和超导铌材料RRR值的无损测量](#)
26. [基层医院感染管理重点科室间工作的比较](#)
27. [好玩至型设计单品](#)
28. [CT₁型瓷介电容器全国质量分等试验耐久性试验浅析](#)
29. [土石坝施工综合机械化方案的选择](#)
30. [SF₆高压电器用新型环氧浇注绝缘材料](#)
31. [温压工艺在硬质合金制备中的应用](#)
32. [可编程序控制器在大容量实验室的应用](#)
33. [伯克霍夫平均的压谱\(英文\)](#)
34. [玻璃绝缘子集中自破的原因分析](#)
35. [浅谈电源SPD安全性能和热稳定性](#)
36. [塔克拉玛干沙漠地区温压湿分布规律研究](#)
37. [浅谈箏的左手技法](#)
38. [苏联高压电器点滴](#)
39. [SF₆电器双层气密结构密封机理的分析和计算](#)
40. [光纤传感干度测量仪研制](#)
41. [静电放电应力下深亚微米栅接地NMOSFET源端热击穿机理](#)
42. [从噪声测量确定探测器双极迁移率及电学参数](#)
43. [SF₆断路器开断能力数值预测方法研究综述](#)
44. [液压系统油液压力非插入式测量的新方法](#)
45. [塑封三极管的温升问题分析](#)
46. [欢迎订阅《高压电器》](#)
47. [6kV电缆中接头故障原因分析及制作工艺改进](#)
48. [凝聚映象的锥拉或压不动点定理及其应用](#)
49. [如何克服电除尘器绝缘子的热击穿和绝缘老化](#)
50. [远方投退重合闸装置的研制及存变电站中的应用](#)