

# 中华人民共和国国家标准

GB/T 21222—2007/IEC 60897:1987

---

## 绝缘液体 雷电冲击击穿电压测定方法

Methods for the determination of the lightning impulse breakdown voltage of  
insulating liquids

(IEC 60897:1987, IDT)

2007-12-03 发布

2008-05-20 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局  
中国国家标准化管理委员会 发布

## 前 言

本标准等同采用 IEC 60897:1987《绝缘液体 雷电冲击击穿电压测定方法》(英文版)。为便于使用,本标准做了下列编辑性修改:

- a) 删除了国际标准的“前言”;
- b) 用小数点符号‘.’代替小数点符号‘,’;
- c) 用阿拉伯数‘1、2’代替罗马数‘I、II’。

本标准的附录 A、附录 B 为资料性附录。

本标准由中国电器工业协会提出。

本标准由全国绝缘材料标准化技术委员会(SAC/TC 51)归口。

本标准起草单位:桂林电器科学研究所、西安交通大学。

本标准主要起草人:王先锋、曹晓珑。

本标准为首次制定。

## 绝缘液体 雷电冲击击穿电压测定方法

### 1 范围

1.1 本标准规定了两种试验方法 A 和方法 B,用来评定绝缘液体在发散场下经受标准雷电脉冲的电气强度。

方法 A 基于一个逐级试验程序,用来评定在规定条件下的脉冲击穿电压。

方法 B 是一个统计试验,用来检验绝缘液体在给定的电压等级下脉冲击穿概率的假设。

1.2 两种方法均适用于未使用或使用过的绝缘液体,该液体的粘度在 40℃时应低于 700 mm<sup>2</sup>/s。

两种方法都可以使用正、负脉冲。对于液体样品的准备,只要其符合工业使用的要求,并没有特殊的规定。然而,通过样品处理前和处理后进行的试验可以表明处理的效果如何。

1.3 两种方法主要用于建立评定绝缘液体的脉冲电气强度的标准程序。这些程序用来区分不同的电介质液体,也可用来检测当制造工艺或原料变化时液体的化学组成发生变化继而造成的特性变化。

### 2 概述

2.1 在电气设备中使用的绝缘液体可能会承受开关或雷电瞬时电压与工频正弦工作电压叠加的作用。

无论这样的过电压是单向的还是振荡的,其结果都将是正极性或负极性的瞬时作用,这就要求了解绝缘液体在这些条件下的特性。

然而,为了使在采用针—球形状电极的试验容器中得到的脉冲击穿电压与实际绝缘系统中液体的性能相一致,还需要更多的实践经验。

2.2 在绝缘液体中,脉冲击穿是一个至今还不清楚的复杂现象。它需要一个预击穿破坏(流注)的起始和蔓延过程。

击穿电压与如下的因素有关:电压波形,外加电压持续时间和电场分布。

为了得到具有可比性的结果,所有这些因素都要明确规定并严格控制。尽管如此,经常发现得到的结果比较分散,这种分散性通常被认为和预击穿机理的随机性有关。

2.3 虽然在均匀电场中,击穿特性不受施加电压的极性的影响,但是在发散场中,极性对击穿特性有显著的作用,特别是对针—球形状的电极则影响更大。实践证明,在这种电场分布下,液体的化学组成对负脉冲击穿特性起着主要的作用。因此,为了辨别在绝缘液体中化学组成的作用,必须采用上面所述两种方法中所用的高发散场形状的电极系统。

2.4 脉冲击穿电压与波的前沿时延有关,因此在两种方法中规定只使用标准全脉冲波(1, 2/50 μs)。

2.5 与工频击穿电压(IEC 60156)不同,针—球脉冲击穿基本上与水分、颗粒等杂质无关。因此,只要杂质浓度不超过液体的使用极限,就不采用任何预防措施来控制这些杂质。

### 3 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件,其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本标准,然而,鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件,其最新版本适用于本标准。

GB/T 311.6—2005 高电压试验技术 第 5 部分:测量球隙(IEC 60052:2002, IDT)

GB/T 16927.1—1997 高电压试验技术 第 1 部分:一般试验技术(eqv IEC 60060-1:1989)

GB/T 16927.2—1997 高电压试验技术 第 2 部分:测量系统(eqv IEC 60060-2:1994)

IEC 60060-3 高电压试验技术 第 3 部分:测量装置

IEC 60060-4 高电压试验技术 第4部分:测量装置的使用导则

IEC 60475 液体电介质取样方法

## 4 设备

### 4.1 脉冲发生器

脉冲发生器应该能够产生一个标准  $1.2/50 \mu\text{s}$  雷电冲击电压全波,能按照 GB/T 16927.1—1997 中的要求调节脉冲正、负极性,并具有 GB/T 16927.2—1997 中规定的准确度,特别是峰值电压的测量必须准确到 $\pm 3\%$ 。发生器的额定电压至少为 300 kV,输出能量的范围宜在 0.1 kJ 到 20 kJ 之间。

### 4.2 脉冲电压的调整

此操作是非常重要的,峰值电压可用手控加压装置来设定,精确到  $1\%$ ;或用调节精度为 $\pm 0.5\%$ 自动触发装置来设定则更好。

### 4.3 脉冲电压的测量

脉冲电压的测量应按照 IEC 60060-3 和 IEC 60060-4 中的规定进行。用一个精确标定的电阻分压器和一个峰值电压表比用示波器更好一些。而且,可以根据 GB/T 311.6—2005 用球隙法来校正测量系统,脉冲电压的峰值电压测量误差应已知且不应超过  $3\%$ 。

### 4.4 试验容器的设计

4.4.1 试验容器是一个带有垂直间隙的容器,如图 1 所示。该试验容器可容纳液体的体积约为 300 mL,并限定只有两电极和它们的支撑部分可以为金属材料。

4.4.2 试验容器应设计成易拆卸易彻底清洗,其尺寸应保证闪络电压至少为 250 kV。

4.4.3 试验容器所用的绝缘材料必须具有高介电强度、在  $80^\circ\text{C}$  以下具有良好的热稳定性、能与被测绝缘液体相容,并耐溶剂、耐常用于被测液体的清洁剂。

4.4.4 由可调节的针—球形状的两电极来构成间隙。球电极为磨光的钢球,可用直径为 12.5 mm~13 mm 的轴承滚珠,并用一块磁铁使该球位置固定。针电极为一根留声机唱针,其锥顶的曲率半径为  $40 \mu\text{m}$ ~ $70 \mu\text{m}$ 。可以用显微镜来检验针的形状和曲率半径,附录 B 给出测量曲率半径的方法。

## 5 液体取样

根据 IEC 60475 中的规定完成被测液体的取样。

## 6 试验容器的准备与维护

### 6.1 试验容器的清洗

试验容器的所有零件包括球电极和唱针(电极)都应用试剂级的庚烷脱脂,用洗涤剂洗涤,用热自来水彻底冲洗,然后用蒸馏水冲洗。

用无油、脱水的压缩空气干燥各零件,并保存在干燥缸里等待使用。

### 6.2 日常使用

按照 6.1 中规定准备好的试验容器就可以进行试验了。但是,在对新样品进行试验以前,必须用合适的溶剂重复上述的清洗程序。

当对同样的样品进行试验时,只需在每次注样前用液体试样洗涤。

## 7 试验准备

7.1 用液体试样彻底地洗涤试样容器和电极,并慢慢地将试样注入试验容器,注意切勿有气泡产生,在试验前让液体静置至少 5 min。

### 7.2 电极间隙

轻轻地使两电极接触,用欧姆表检测是否接触良好。然后,用一个测微计或螺旋计或厚度规使其中

一个电极移开达到期望的间隙值。应将间隙调整到 8.1.2 中的规定值,其允许偏差为 $\pm 0.1$  mm。

7.3 将球电极接地,接线应尽可能的短。脉冲发生器的输出端应连接到针电极,而且必须注意不能形成太长的连接回路。

7.4 试验时试样的温度应与实验室温度相同,通常在 15℃到 30℃之间比较合适。

## 8 试验程序

### 8.1 方法 A——逐级试验

#### 8.1.1 原理

用针—球电极系统将逐级增加峰值的  $1.2/50 \mu\text{s}$  标准雷电脉冲电压加到液体试样上直到发生击穿。需进行五次击穿试验,取其平均值作为被试液体的雷电脉冲击穿电压。

试验电压的起始值、电压步进值(级差)和电极间隙均取决于被试液体的击穿电压。

#### 8.1.2 程序

- 根据第 7 章规定准备试验容器。
- 参考表 1,并根据 15 mm 间隙时的预期击穿电压值( $U_e$ )选择合适的试验电压起始值( $U_i$ )、电压步进值(级差)和电极间隙。
- 施加一选定起始电压的(极性已定)脉冲,并逐级增加电压直至击穿发生。每个电压等级下要加一个脉冲,在相邻两脉冲之间时间间隔至少 1 min。
- 重复 a)、b)、c)项所述的程序,直至获得被试液体的五个击穿值。在每次击穿后,应更换针电极并转动球电极,在五次击穿后,应更换球电极。
- 为了使试验有效,试样在击穿发生前必须经受至少三个电压等级。如果在此之前发生击穿,则根据情况,选择更低的起始电压重复试验,例如 5 kV 或者 10 kV。
- 记录发生击穿时的预期脉冲峰值电压作为额定击穿电压。
- 如果被测液体的击穿电压不能预先估计,则使用 15 mm 间隙、50 kV 起始电压和步进(级差) 10 kV 升压来进行试验,按 a)和 c)项测定  $U_e$ ,然后按 a)到 d)项继续试验。

如果采用 15 mm 的间隙时,不能在低于试验容器闪络电压(约 250 kV)时发生击穿,则将间隙减少到 10 mm,必要时,甚至可以到 5 mm。

表 1 起始电压和间隙的选择

15 mm 时的预期击穿电压 $U_e$ /kV	$50 \leq U_e \leq 100$	$100 < U_e \leq 250$	$U_e > 250$
间隙/mm	$25 \pm 0.1$	$15 \pm 0.1$	$10 \pm 0.1$
起始电压 $U_i$ /kV	$1.5U_e$ 25	$U_e$ 50	150
步进(级差)电压/(kV)	5	5	10

#### 8.1.3 精确度

一种试验方法的精确度是由重复性  $r$  和再现性  $R$  来表示(见 ISO 5725),表 2 给出了按方法 A 进行试验的矿物绝缘油的这些参数值。

当正确地使用该方法时,对于同一种油,在相同的条件下(同一操作者、同样的设备、同样的实验室和短的时间间隔)进行的两次试验而获得的两个“单次结果”间的差异有 5% 的概率超过  $7.0\%U$ (负脉冲)或者超过  $15\%U$ (正脉冲),其中  $U$  为两个结果的平均值。

表 2 对于矿物绝缘油方法 A 的重复性和再现性

脉冲极性	$r/\%$	$R/\%$
负	7	10
正	15	30

注 1:  $r$  和  $R$  值表示为平均击穿电压的百分数。

注 2: 表中数值是由三种不同的矿物绝缘油在七个实验室的试验结果而得到的。

对于同一种油在不同条件下(不同的操作者、不同的设备、不同的实验室)进行的试验中得到的两个结果之间的差异,有5%的概率超过10% $U$ (负脉冲)或者超过30% $U$ (正脉冲)。

如果两个结果间的差异超过表2中规定值,则还需进一步工作,例如校准设备和重复试验。

注3:“单次结果”为8.1.1中规定的五次击穿电压的平均值。

## 8.2 方法 B——连续试验

### 8.2.1 原理

经验表明,将一个脉冲波(其峰值接近于用方法 A 测得的击穿电压)加到试验容器时,击穿可能会发生也可能不发生。这样,就应该引进击穿概率  $P$  的概念, $P$  是  $U$  的函数且是未知的。连续试验可将击穿概率  $P$  与任意值  $P_0$  相比较并检验假设:

$H_0: P \leq P_0$  (称作零假设);备择假设  $H_1: P > P_0$  (见附录 A)。

本方法是将一连串恒定峰值的脉冲加到试样上直至击穿,并将结果画到判定图上(见附录 A 和图 A.1)。

连续试验需一直进行到能进行判定为止,当超过事先规定的脉冲数还不能裁定时,则终止试验。

### 8.2.2 程序

- 根据相应的  $P_0$  值和附录 A 中定义的参数画出判定图;
- 选择一个脉冲电压峰值  $U_0$  并设定脉冲发生器(见注 1);
- 根据本标准第 7 章的规定准备试验容器并调节电极间隙到所要求的值;
- 施加第一个选择好极性和峰值的脉冲到电极上,如果没有发生击穿,则在加另一个脉冲前等待一分钟,然后再继续加脉冲直至发生击穿;
- 在每次击穿后,更换针电极、转动球电极、重新充满试验容器并继续上述程序,并每五次击穿后应更换球电极;
- 在判定图上对每个脉冲和相应的击穿描点(见图 A.1);
- 只要各点分布在直线  $D_1$  和  $D_2$  之间的区域内(见附录 A)则不能判定,必须继续试验(见注 2)。  
若各点分布区域与直线  $D_1$  相交,则零假设被接受:  $P \leq P_0$ 。  
若各点分布区域与直线  $D_2$  相交,则零假设被拒绝:  $P > P_0$ 。

注 1: 试验电压  $U_0$  的选择要比方法 A 中得到的平均击穿电压值小两个电压等级。

注 2: 如果在 85 次脉冲后不能判定,则应在更低电压水平上重复试验,如降低 5 kV 或 10 kV。

## 9 报告

报告应包括如下项目:

### 9.1 本标准号和采用的方法。

### 9.2 样品的名称和制备方法。

### 9.3 间隙距离。

### 9.4 方法 A

起始电压的峰值、极性和电压步进(级差)值;

每次击穿时的脉冲电压值;

平均击穿电压值;

标准平均偏差。

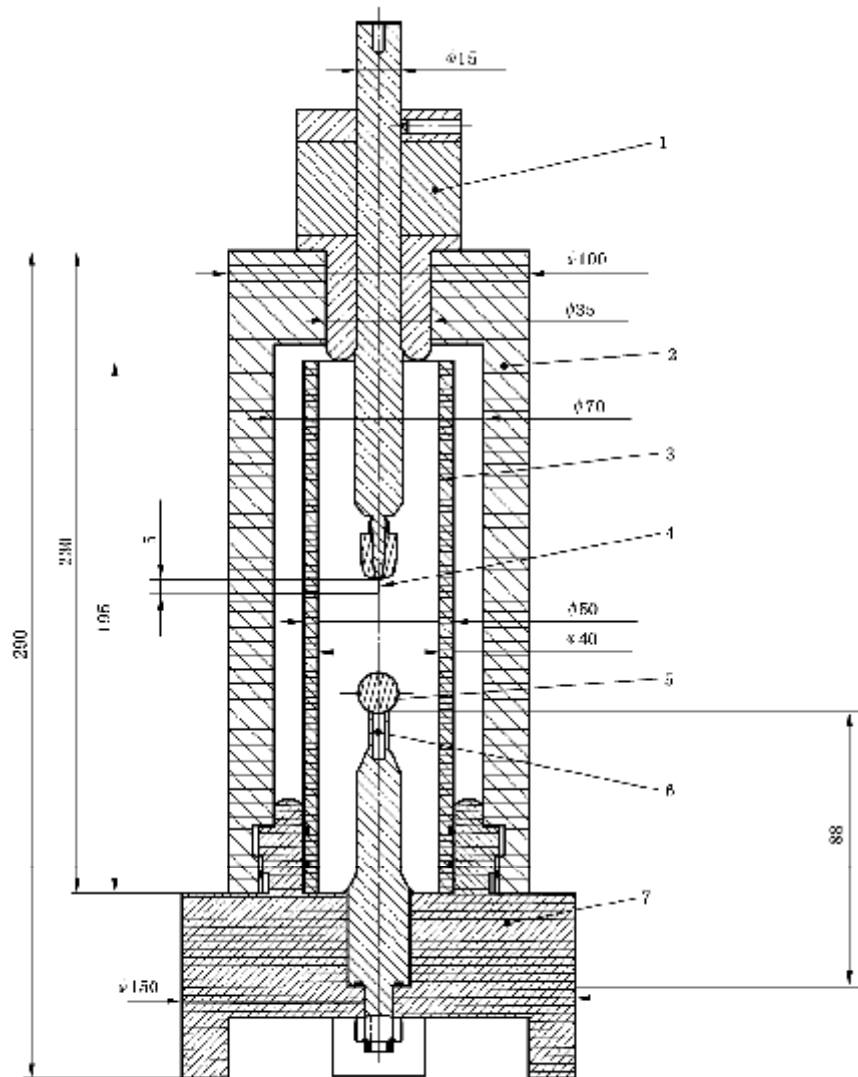
### 9.5 方法 B

电压峰值和极性;

选择的统计参数;

判定图和试验结果的分布。

单位为毫米



- 1 厚度规；
- 2 聚甲基丙烯酸甲酯盖；
- 3 聚甲基丙烯酸甲酯盖；
- 4 可更换的标准电唱机针；
- 5 钢球；
- 6 磁铁；
- 7 聚酰胺底座。

图 1 绝缘液体脉冲电强度试验的针—球电极系统

## 附录 A

(资料性附录)

用于将液体介质击穿概率和标准值进行比较的连续试验法  
判定图的结构

## A.1 引言

本附录规定了连续试验的原理并提供了构建判定图的方法,对于连续分析详见 Abraham WALD (J. Wiley 和 Sons Inc. Editor)的文章《连续分析》。

## A.2 符号说明

文中所用符号与国际标准 ISO 3534 中的定义相符。

$P(U)$ 或  $P$ :液体介质在给定试验电压  $U$  的标准雷电脉冲作用下的击穿概率(见注)。

$P_0$ :对应于可接受的质量标准的任选击穿概率。

$P_1$ :低于  $P_0$  的击穿概率,该值的选择考虑了所施加试验电压的精度等影响因素。

$P_2$ :高于  $P_0$  的击穿概率,选择理由同上。

$H_0$ :零假设: $P \leq P_0$ 。

$H_1$ :备择假设,与零假设相反,即  $P > P_0$ 。

$\alpha$ :当  $P \leq P_1$  时,拒绝  $H_0$  的最大风险。

$\beta$ :当  $P \geq P_2$  时,接受  $H_0$  的最大风险。

$n$ :施加的脉冲冲击数。

$d_n$ :在施加  $n$  个脉冲冲击后击穿放电的次数。

$A_n$ :合格判定数。

$R_n$ :不合格判定数。

注:  $P$  的数值在任何情况下都难以得到,连续试验的目的并不是确定这个概率,否则要做太多的试验。连续试验主要是工业实践中通过一个加速程序将它与一个确定概率  $P_0$  相比较,对绝缘液体给出一个令人满意的耐雷电冲击水平的信息。

A.3 统计试验允许对试验数据存在可接受的错判概率。它需要定义零假设  $H_0$  来检验,并需要利用试验结果的函数,在这里就是判定图上各点  $(d_n, n)$  提供的的数据。

在连续试验的特殊情况下,试验结果的函数是在试验结果的集合中取三个相互独立的子集,随着试验的进行来判断接受  $H_0$  还是拒绝  $H_0$ ,还是继续进行试验。

A.4 设  $P_0$  为一任意值。我们希望在给定的试验电压下检验零假设  $H_0: P \leq P_0$  和备择假设  $H_1: P > P_0$ 。

实际上,  $P_1$  小于  $P_0$  且  $\alpha$  为一确定值,这样,当  $P \leq P_1$  时,拒绝  $H_0$  的概率小于或等于  $\alpha$ 。

同样地,  $P_2$  大于  $P_0$  且  $\beta$  也为一确定值,这样,当  $P \geq P_2$  时,接受  $H_0$  的概率小于或等于  $\beta$ 。

A.5 设  $L$  为概率比,并定义为:  $L = L_1/L_2$ , 其中  $L_1$  为  $P = P_1$  时,一组观测值所得的概率;  $L_2$  为  $P = P_2$  时,一组观测值所得的概率。

连续试验要求在试验的任一阶段计算  $L$  并按如下的规定判断:

如果  $L \leq A$  时,则  $H_0$  被接受,

如果  $L \geq R$  时,则  $H_0$  被拒绝,

如果  $A < L < R$  时,则进一步观察,继续进行试验。

$A$  和  $R$  的选择:当  $P = P_1$  时,拒绝  $H_0$  的概率为  $\alpha$ ,当  $P = P_2$  时,接受  $H_0$  的概率为  $\beta$ ,近似公式为:

$$A = \beta / (1 - \alpha) \quad R = (1 - \beta) / \alpha$$

通常当  $P \leq P_1$  时,拒绝  $H_0$  的概率小于或等于  $\alpha$ ;而当  $P \geq P_2$  时,接受  $H_0$  的概率小于或等于  $\beta$ 。



A.6 当  $P=P_1$  时,  $n$  次脉冲冲击产生  $d_n$  次击穿的概率为:

$$L_1 = \binom{n}{d_n} P_1^{d_n} (1 - P_1)^{n-d_n}$$

当  $P=P_2$  时,  $n$  次脉冲冲击产生  $d_n$  次击穿的概率为:

$$L_2 = \binom{n}{d_n} P_2^{d_n} (1 - P_2)^{n-d_n}$$

因此, 概率比为:

$$L = P_2^{d_n} (1 - P_2)^{n-d_n} / P_1^{d_n} (1 - P_1)^{n-d_n}$$

假设在  $n$  次脉冲冲击后满足条件  $L \leq A$ , 则:

$$P_2^{d_n} (1 - P_2)^{n-d_n} / P_1^{d_n} (1 - P_1)^{n-d_n} \leq \beta / (1 - \alpha)$$

由上述表达式可知观察到的放电次数  $d_n$  为:  $d_n \leq h_1 + sn$ , 其中  $h_1$  和  $s$  是常数, 并由下式决定:

$$h_1 = \lg \frac{\beta}{1 - \alpha} / \left( \lg \frac{P_2}{P_1} - \lg \frac{1 - P_2}{1 - P_1} \right)$$

$$s = \lg \frac{1 - P_2}{1 - P_1} / \left( \lg \frac{P_2}{P_1} - \lg \frac{1 - P_2}{1 - P_1} \right)$$

令

$$A_n = h_1 + sn \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

当  $d_n \leq A_n$  时, 条件  $L \leq A$  满足, 零假设  $H_0$  被接受, 因此,  $A_n$  被称为合格判定数。

A.7 现在假设在  $n$  次脉冲冲击后  $L \geq R$ , 用与上述同样的方法  $d_n \geq h_2 + sn$ , 而  $h_2$  由公式计算为

$$h_2 = \lg \frac{1 - \beta}{\alpha} / \left( \lg \frac{P_2}{P_1} - \lg \frac{1 - P_2}{1 - P_1} \right)$$

令

$$R_n = h_2 + sn \quad \dots\dots\dots (A.2)$$

当  $d_n \geq R_n$  时, 条件  $L \geq R$  满足, 零假设  $H_0$  被拒绝, 因此,  $R_n$  被称为不合格判定数。

A.8  $n$  次冲击后的试验结果, 可用点  $(n, d_n)$  在  $n$  和  $d_n$  的坐标图上表示。此外,  $A_n$  和  $R_n$  (见 A.1 和 A.2) 分别为两平行直线  $(D_1)$  和  $(D_2)$  的方程, 它们将图分成三个区域 (见图 A.1)。

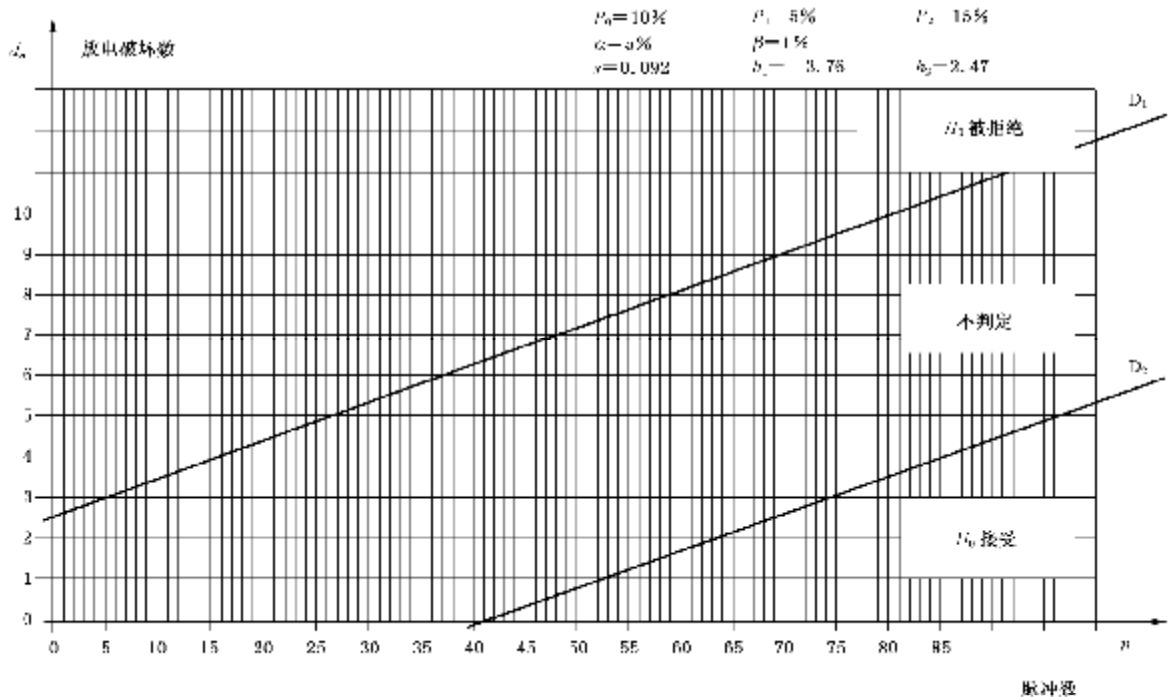


图 A.1 判定图

如果点 $(n, d_n)$ 位于直线 $(D_1)$ 以下的区域,则 $H_0$ 被接受;如果点 $(n, d_n)$ 位于直线 $(D_2)$ 以上的区域,则 $H_0$ 被拒绝;如果点位于两条线之间,则不能判定,需改变冲击电压继续试验。

A.9 图 A.1 所显示的判定图是一个例子,它是根据以下值画出的:

$$P_0 = 10\%; P_1 = 5\%; P_2 = 15\%; \alpha = 5\% \text{ 和 } \beta = 1\%。$$

A.10 与一般的统计试验不同,等值连续试验不需要预先确定要进行的试验次数。试验次数是一个随机变量,平均来说,比一般的统计试验所需的试验次数要少。

而且,连续试验被无限制进行下去的概率为零。然而,为了保证试验在限定次数内完成,可以用截止规则来终止试验,也可以按 8.2.2 进行判定来终止试验。

**附录 B**  
(资料性附录)  
**针的曲率半径的测量**

本附录叙述了用金相显微镜测定针电极曲率半径的方法。

图 B.1 给出了光学系统示意图。

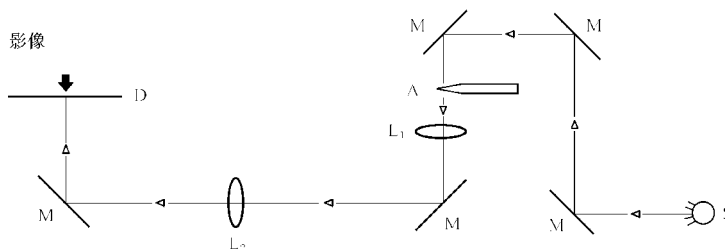
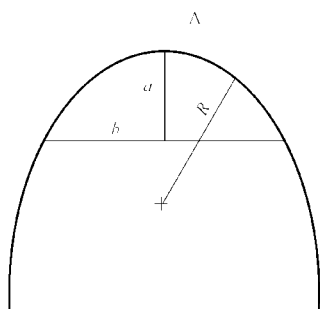
由显微镜光源(S)发出的光波被一组与待测物体(A)成 45°角的镜子(M)所反射。然后,图像通过透镜(L<sub>1</sub>、L<sub>2</sub>)投影到磨光玻璃(D)上,调节显微镜使物体放大到 1 000 倍。

用毫米标度尺在磨光玻璃(D)上直接测量对应于弦(b)的弦高(a)。

为了提高准确度,进行两次对应于不同弦值的测量。

从如下表达式得到曲率半径值:

$$R = \left[ \left( \frac{b}{2} \right)^2 + a^2 \right] / 2a$$

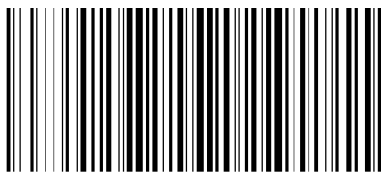


- R 曲率半径;
- a 矢;
- b 弦;
- S 光源;
- M 镜子;
- A 留声机唱针;
- L<sub>1</sub> 放大倍数为 32 的凸透镜;
- L<sub>2</sub> 放大倍数为 18 的凸透镜;
- D 磨光玻璃。

图 B.1 针的曲率半径的测定

参 考 文 献

- [1] IEC 60156 绝缘油电气强度的测定方法.
  - [2] ISO 2854 数据的统计解释.
  - [3] ISO 3534 统计学 名词和符号.
  - [4] ISO 5725 试验方法的精确度 实验室间多次试验的重复性和再现性的确定.
-



GB/T 21222-2007

GB/T 21222—2007/IEC 60897:1987