

低压电器常用电气间隙击穿电压 受海拔高度影响的试验分析报告

《低压电器适用海拔高度范围及有关措施的研究分析》

验证分析项目报告之二

昆明电器科学研究所

1975. 12.



一、序 言	1
二、试验条件	3
2.1 试验样品的选择	3
2.2 试验用气候参数的选定	5
2.3 主要试验设备和试验电路	6
2.4 试验方法	9
2.5 试验样品予试结果	10
三、实验结果及其分析	12
3.1 单个气候因素对空气间隙击穿电压的影响	12
3.1.1 空气压力降低对空气间隙击穿电压值的 影响	12
3.1.2 空气温度降低对空气间隙击穿电压值的 影响	16
3.1.3 空气相对湿度变化对空气间隙击穿电压 值的影响	20
3.1.4 空气绝对湿度变化对空气间隙击穿电压 值的影响	25
3.1.5 空气相对密度变化对空气间隙击穿电压 值的影响	28

5.2 综合气候因素 (海拔高度) 对空气间隙击穿电压值的影响 30

3.2.1 在空气相对湿度固定为 90% 的条件下, 海拔高度变化对空气间隙击穿电压值的影响 31

3.2.2 在维持绝对湿度 21.4 g/m^3 不变的条件下, 海拔高度变化对空气间隙击穿电压值的影响 35

3.2.3 空气相对湿度在 39~90% 条件下, 海拔高度对空气间隙击穿电压值的影响 39

3.3 关于空气间隙击穿电压值的海拔修正问题 41

3.4 低压电器最小电气间隙 (2mm) 在高海拔地区的绝缘耐压裕度 43

四、结论及建议 45

五、附录

附录一 试验样品一览表 47

附录二 某些电工专业标准中对使用环境条件的规定 53

附录三 试验数据汇总表 54

一、序 言

我国幅员广大，海拔在1000米以上的地区，约占全国总数的65%。在制订我国低压电器的新国家标准时，必须充分考虑一因素，以使新的标准适合我国国情。因此，于1972年7月在上海召开的《低压电器基本标准座谈会》上，确立了题为《低压电器适用海拔高度范围及其有关措施的研究分析》验证分析项目。本报告即为该验证分析项目的内容之一。

长时期以来，人们通过实践已经认识到，随着海拔的增加，空气逐渐变得稀薄，以空气为绝缘介质的电工产品，其绝缘强度将随海拔的增加而逐渐降低。过去根据生产发展的需要，在这方面进行了不少试验研究工作，取得了很大成果。但从定量方面来看，这些工作还有待继续深入。对低压电器产品所用的小电气间隙和小绝缘距离来说，情况更是如此。特别是对海拔变化的影响程度如何，是否必须进行海拔修正，如何修正等等问题，意见很多，看法不一。本报告在试验数据的基础上，经过综合分析，从空气间隙的击穿放电方面，对以上这些问题定量地给予了初步回答。至于绝缘材料表面的绝缘强度（漏电距离）受海拔变化的影响问题，另有专门报告。

本报告所述的试验工作，是在模拟的气候条件下进行的，也就是说，在人工气候箱内，在模拟的各种气候参数条件下，对类似于低压电器产品中常用电气间隙和某些低压电器产品，进行工频交流击穿放电试验。

本报告所进行的工作可以分为三个阶段：

准备工作阶段：包括试验方案的确定、试验条件和样品的准

备。在准备工作中，承昆明开关厂和昆明电机厂的大力支持，协助加工了模型电极，上海开关厂、上海机床电器厂、上海人民电器厂等热情地提供了试验产品。

试验工作阶段：分为三步。

第一步为探索性试验。主要目的是探索试验设备、试验样品的适用性，试验方法（如施加电压的上升速度、两次击穿放电间的间歇时间等等）的比较和选择。

第二步为正式试验。

第三步为补点试验。由于对空气湿度影响的试验结果有怀疑，均重作一遍。对其他试验项目，也补试了一些有怀疑的点。

试验工作从1973年5月中开始，至8月中旬结束，除人工气候箱出现故障的检修时间外，试验时间约近两个月。

在试验过程中，对17种试验样品，在24组模拟气候条件下及本所自然条件下，共进行了近万次工频击穿放电，获得了7000多个数据。

分析总结阶段：对获得的7000多个数据，经过换算、整理、比较，选用了5000余个有用数据。再在对这些数据进行计算、分析的基础上，编写了本报告。

本报告中所叙述的工作，是在伟大领袖毛主席的革命路线指引下，在无产阶级文化大革命的伟大胜利鼓舞下，在党的团结胜利路线的推动下完成的。根据1972年九月在昆明召开的本验证分析项目《开展工作讨论会》上的分工，本报告中的全部工作由昆明电器所进行。

在本报告所叙述的全部工作中，我们主观上虽然尽了很大努力，但由于条件较差，水平所限，缺点一定不少，错误在所难免，望批评指正。

二、试验条件

2.1 试验样品的选择

低压电器产品种类繁多，结构各异。由于时间和条件的限制，不可能在模拟的气候条件下，对各种产品都进行海拔高度影响试验。然后通过数学统计分析方法来求取其影响规律。而且即使进行了这样的试验，由于受各个产品具体情况的影响，试验数据的分散，恐难得出统一的影响规律。因此，在本报告的试验中，选取最有代表性的、试验结果分散性较小的模型电极作为主要试验样品。根据低压电器产品中各单（部）电件的形状及其结构的具体情况，诸如同相动静触头间、异相触头间、异相导电件间、各带电件对地间等等，选取了球—球、球—方块、方块—方块三种模型电极。针形类电极，由于代表性较差，同时加工制作和试验上都有些困难，因此未选作试验样品。

选用的电极形状和尺寸见图1和2。电极材料为黄铜。球形电极由车削成型，再用擦铜油稍加抛光。方块形电极由铣切成型，再用细砂纸打光。由于条件限制，对电极的尺寸误差和椭圆度未加严格控制。

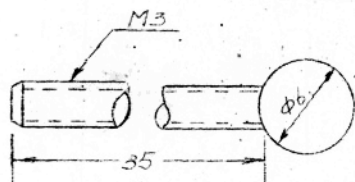


图1 球形电极

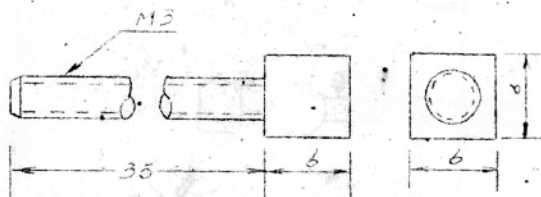
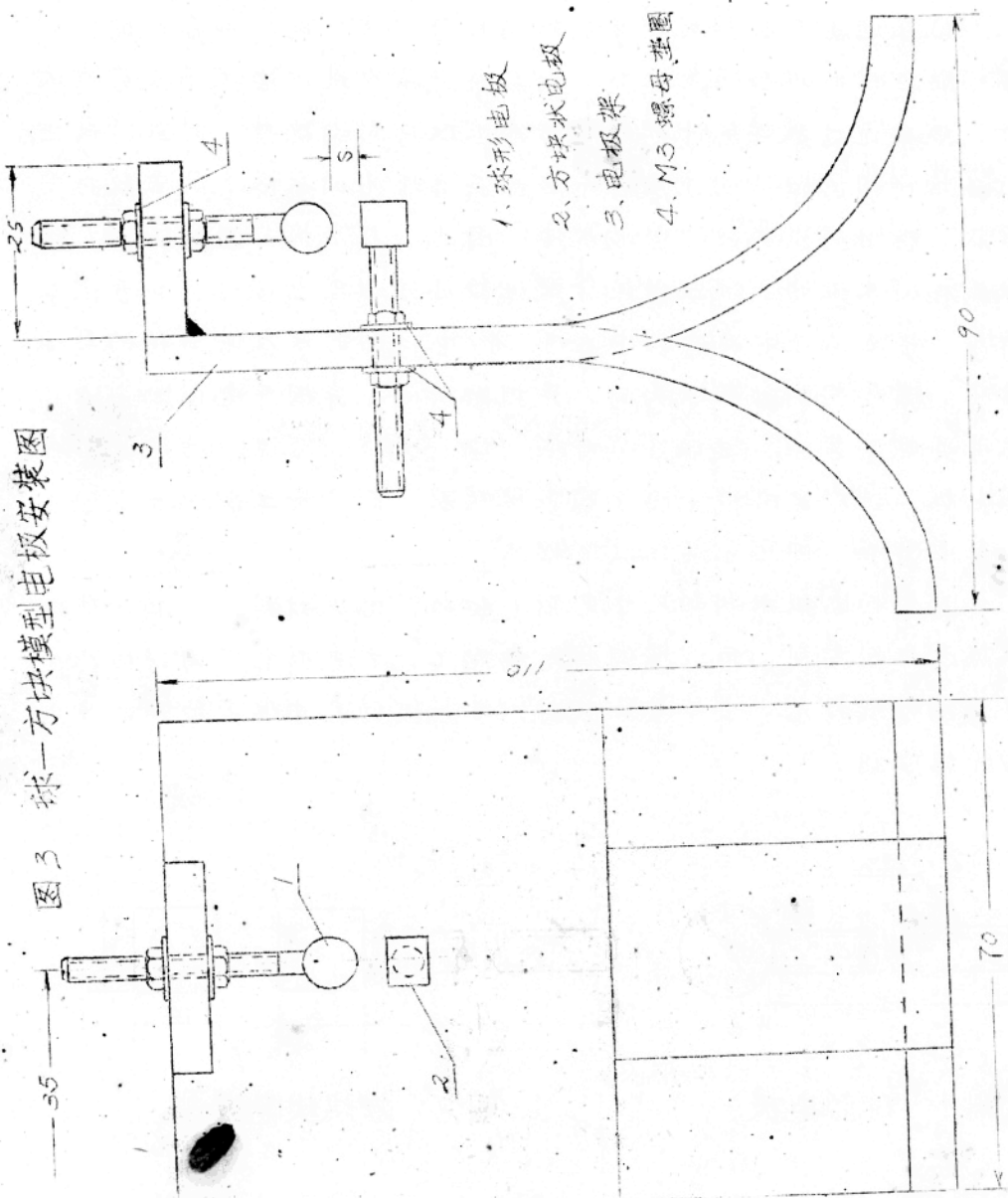


图2 方块状电极

成对电极互相垂直地安装在有机玻璃板制成的电极架上，依靠
 旋动螺丝来调节其极间距离和同心度。极间距离用标准块规来测
 定。图3以球—方块模型电极为例，示出了模型电极的安装结构。



根据部颁标准《JB 911-66 一般工业用低压电器的电气间隙和爬电距离》的规定，660伏以下的多数产品，其电气间隙一般在10MM以下，但不小于2MM。我国目前统一设计的低压电器新产品中，一般产品的绝缘距离多采用2、4、6MM，船用产品多采用4、6、8MM。因此，本报告的试验选用了2、4、6、8MM四种尺寸的空气间隙距离。再大的间隙有足够的绝缘强度，试验中未予考虑。

为了验证模型电极的试验结果，也选取了一些常用的低压电器产品一同进行试验。试验部位都在动静触头间，根据触头开距约近于2、4、6、8MM的要求，选取了主令控制器、自动开关、直流继电器、热继电器四种产品。而且在试验前将其开距加以调整，使其符合整数值。微动开关是电气间隙较小的一种产品，也选作试验样品，以验证具有小于标准规定的极小电气间隙（小于2MM）的产品应用于高海拔地区的可行性。

试验样品的详细情况见附录一（试验样品一览表）。

2.2 试验用气候参数的选定

随着海拔高度的变化，大气压力、空气温度、湿度和相对空气密度、幅射强度、气温较差等气候参数都有所变化。由于低压电器大多数情况是用于户内的，起主要影响的是气压、气温和湿度。而且在低压电器实践中，一般都采用相对湿度这一概念。所以，本报告中的试验研究以气压、气温、相对湿度这三个参数为主，其他气候参数未多加考虑。

关于低压电器的使用环境条件，目前还没有一个统一的正式标准。国际电工委员会（IEC）推荐的有关标准中，已将海拔由1000米提高至2000米，而气温和湿度的规定也更趋详尽。我国有关环

环境条件的标准正在拟订中。已有低压电器产品标准中对使用环境条件的规定很不一致（参见附录二）。因此，只能根据现有试验条件，在分析现有标准规定的基础上，充分考虑拟议中的新标准的趋向，选定本报告中的气候参数值如表1。

表1 试验时选用的模拟气候参数值

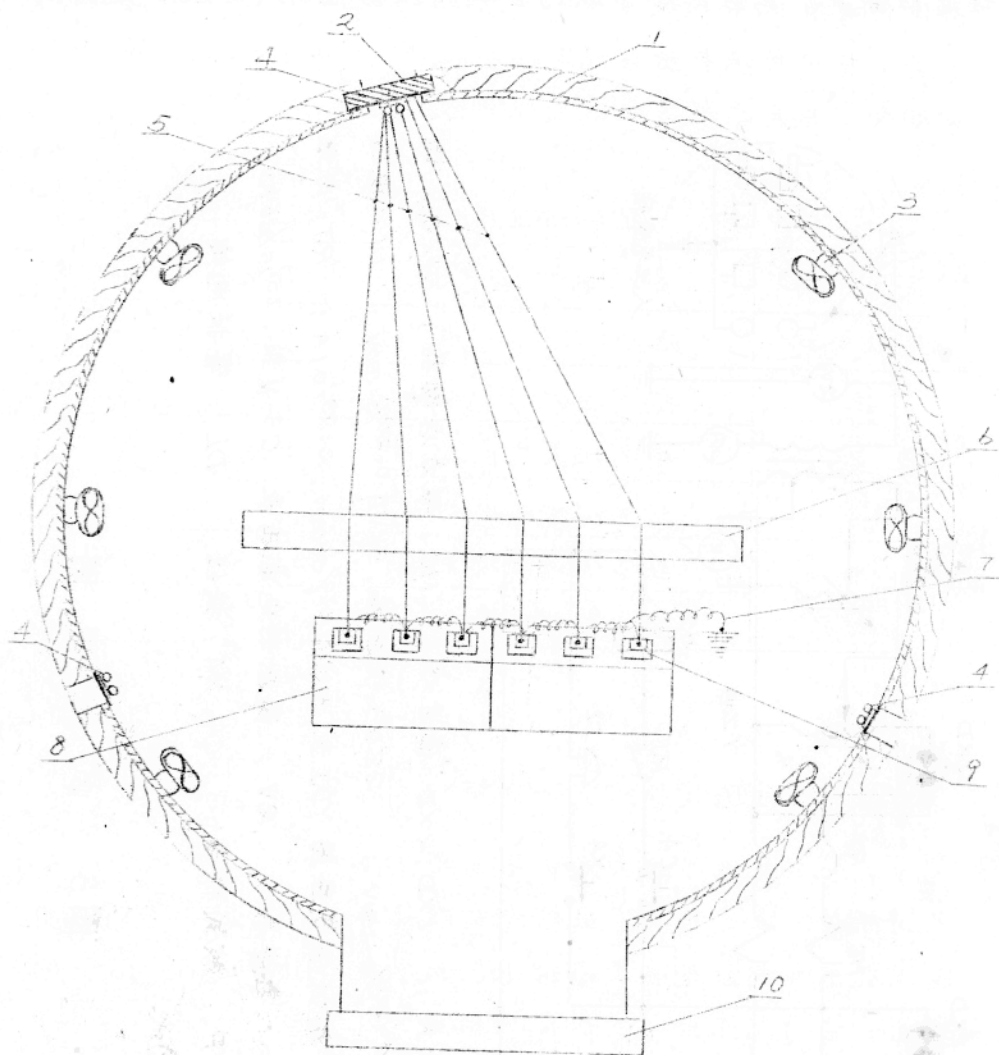
类 别	参 数 名 称	基准值	变化范围
基础参数	海拔高度, 米	0	0~4000
主要参数	空气压力, mmHg	760	760~454
	空气温度, $^{\circ}\text{C}$	40	25~40
	空气相对湿度, %	90	30~90
参考参数	空气绝对湿度, g/m ³		7~49
	空气相对密度		0.99~0.59

2.3 主要试验设备和试验电路

试验是在我所大型人工气候箱内进行的。箱内容积：直径6米，高4.5米。箱内温度可由室温升至40 $^{\circ}\text{C}$ ，但不能降温。箱内湿度靠压缩空气喷射雾状水来加以提高，降温则由硅胶吸潮来实现。箱内气压分别由真空泵和空压机来降低和升高。箱内各模拟气候参数的均匀度靠装于箱壁上面的六台电风扇的搅拌来达到。

人工气候箱的平面示意图见图4。

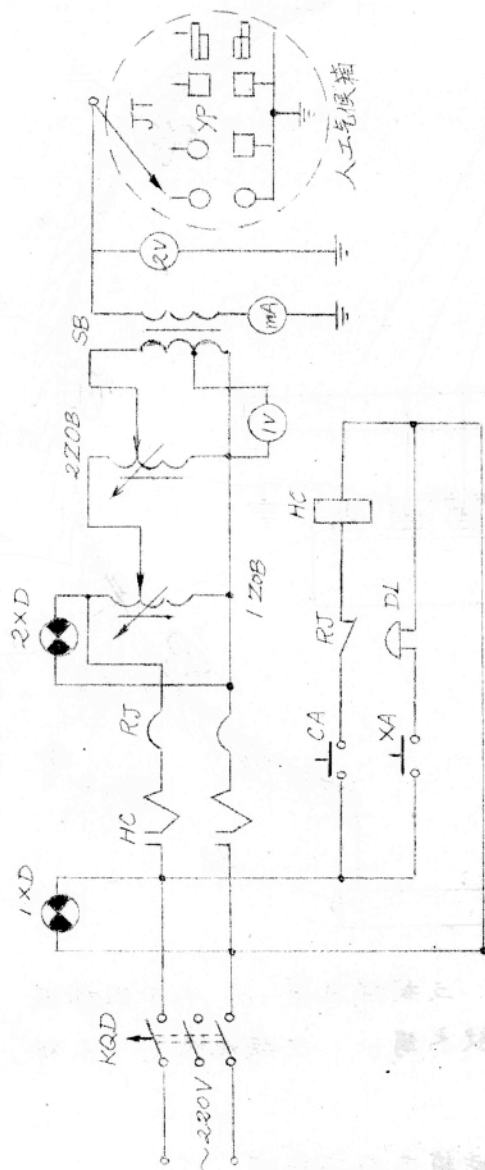
箱内温度和湿度用悬于不同方向的三组干湿球温度计来测量，温度计的最小分度为0.2 $^{\circ}\text{C}$ 。箱内气压由MYM2-1型固定槽式气压计和U形管比压计来测量。



1.人工气候箱； 2.接线板； 3.搅拌风扇； 4.干湿球温度计组； 5.高压引线； 6.胶木筒； 7.接地线； 8.样品架； 9.试验样品

图4 人工气候箱平面示意图

试验电路见图5。试验电源由按钮 CA 操纵磁力启动器 HC 来接通和断开，再经两台串联的自耦调压器 1ZOB、2ZOB 送到试



KQD: 自动开关; 1XD, 2XD: 信号灯; HC: 磁力启动器; 1ZOB: 调压器, 5kVA 0~220/0~250V; 2ZOB: 调压器, 3kVA 0~220/0~250V; 1V: 电压表; SB: 单相试验变压器 YDJ 型, 5kVA 220/5000V, 22.73/0.1A; RJ: 热继电器; mA: 毫安表; 2V: 高压静电电压表, Q3-V 型, 7.5/15/30kV; 1.5 级; YP: 被试样品; CA, XA: 按钮; DL: 警报警铃; JT: 切换夹头

图5 试验电路

验变压器 SB 中。SB 高压侧的一端接地，一端经人工气候箱箱壁上的接线板引入箱内，分别送至被试品 YP 上。在箱外将接线夹 JT 夹于接线板上的不同接线柱上时，可将高电压施于不同的被试品上。被试品并排放置在箱中央的试验桌上，其一端串接后接地。探索试验证明，被试品如图 4 所示的排列和引进高电压的方式，不会对试验结果产生可见的影响。

高电压的测量仍用 Q3-V 型高压静电电压表直接在 SB 高压侧进行。放电电流由毫安表 mA 来监视。在试验过程中，放电电流始终未超过 0.1 安，故 SB 高压侧未加接限流电阻。

2.4 试验方法

采用瞬间击穿放电的试验方法。所施加的交流试验电压为正弦波形，实测频率为 50.23 周/秒。用阴极射线示波器实测的 SB 高压侧的电压波形示于图 6。

当人工气候箱内的温度、湿度、气压调节到要求值后，稳定 0.5 ~ 1 小时，再开始进行击穿放电试验。

在试验过程中，一般不须再调节气象参数。

击穿放电试验是在 20 ~ 40 秒钟内，将试验电压由零升至击穿电压值。在约 40% 的击穿电压值前，试验电压的升高速度不严格控制，其后直至

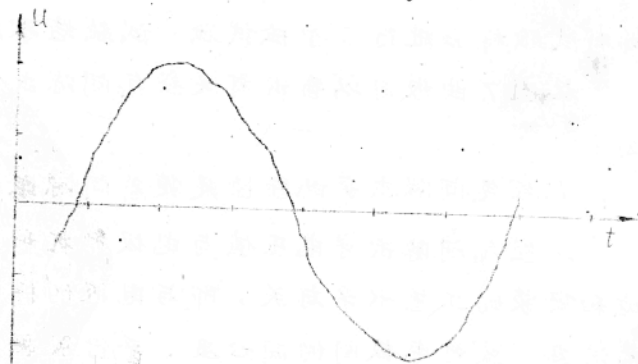


图 6 试验电压波形

击穿放电，尽量控制试验电压均匀地上升。待击穿放电后，立即切除电源，以减少电极的加热和烧损。同一被试样品前后两次击穿放电之间，保持间歇时间约三分钟，让电极得到充分冷却，且使空气间隙的绝缘强度得以充分恢复。

在每一组气象条件下，每种间隙距离的击穿放电至少连续重复13次，取用后10次连续放电电压值的平均值为该点击穿电压值，而且要求每次放电电压值对平均值的偏差不大于 $\pm 10\%$ 。在少数情况下，数据分散性较大，不能满足上述偏差要求时，则取用连续30次击穿放电电压的平均值。

在整个试验过程中，气象参数的偏差允许为：气压 $\pm 3 \text{ mmHg}$ ，温度 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ ，相对湿度 $\pm 3\%$ 。在绝大多数情况下，都能控制在气压 $\pm 2 \text{ mmHg}$ 、温度 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $\pm 2\%$ 的范围内。

2.5 试验样品予试结果

在本所试验大厅的自然气候条件（海拔1926.19米，气压605~608 mmHg，气温23~26 $^\circ\text{C}$ ，相对湿度60~70%）下，对所有试验样品进行了予检试验。试验结果示于图7。

从图7曲线可以看出有关空气间隙击穿放电的规律得到了体现：

1. 空气间隙击穿电压值是随着间隙距离的增大而显著提高的；
2. 空气间隙击穿电压值与电极形状和大小有关，也和电极制造和安装的工艺水平有关，即与电极的椭圆度、表面的平整度、光洁度、成对电极间的同心度、平行度等因素有关。

由于工艺水平的影响，球—球模型电极的数据重现性较好，规律性较强，而方块—方块模型电极数据分散性较大，规律性较

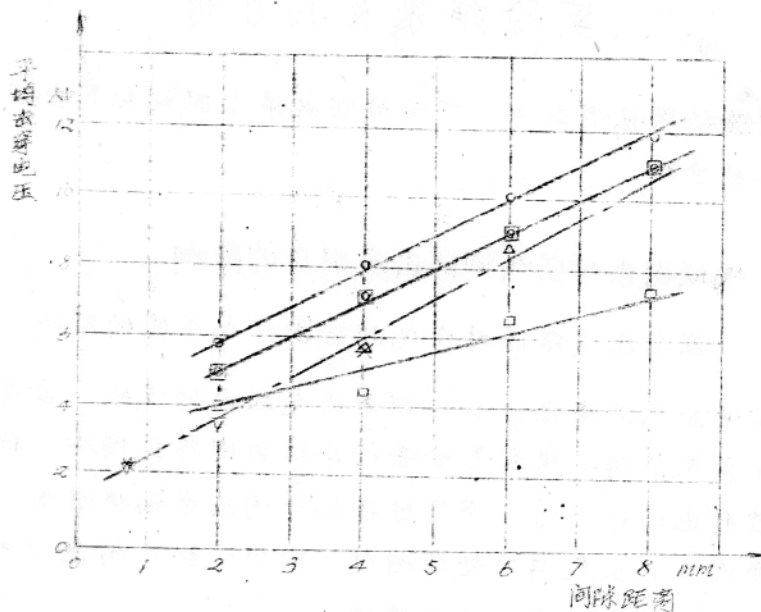


图7 试验样品予测试验结果

图中：○—○ 球—球模型电极；○—□ 球—方块模型电极

□—□ 方块—方块模型电极；

—— 产品样品，其中：

x：主令控制器，※：直流继电器，△：自动开关

▽：热继电器，※：微动开关

差。由于电极形状和大小不同，产品样品的试验结果介于球—球和方块—方块模型电极的曲线之间。

由此可以作出结论：上述试验条件，不管是所选取的试验样品、试验设备、测试仪器或者试验方法，尽管存在不足之处，但基本上是符合要求的。

三、实验结果及其分析

全部实验结果见附录三。下面分别就单个因素和综合因素的影响作出一些分析。

3.1 单个气候因素对空气间隙击穿电压的影响

3.1.1 空气压力降低对空气间隙击穿电压值的影响

在恒定的空气温度条件下，随着空气压力的降低，空气变得稀薄，空气密度下降，使空气分子的平均自由行程增加。在这种情况下，若有电场作用时，空气分子的平均动能也将增加，从而使碰撞机率增多，空气游离趋势增强。所以，空气间隙的击穿电压值是随着空气压力的降低而下降的。

在维持空气温度为 25°C 、相对湿度为 90%，而空气压力在 $760 \sim 454 \text{ mmHg}$ 范围内变化的人工模拟气候条件下，进行了空气间隙的瞬态击穿放电试验，其结果见图 8~11。由图中曲线可以明显地看出，空气间隙的击穿电压值是随着空气压力的降低而明显地下降的，其间有着强烈的依赖关系。而且，这种关系受着电极形状、间隙距离等因素的一定程度的影响。

如果以空气压力 760 mmHg 时的击穿电压值为基准，可计算出空气压力由 760 mmHg 降低至 454 mmHg 时，各种试验样品的空气间隙击穿电压值的降低百分率。计算结果列于表 2 中。

从表中数据可以看出，击穿电压值随气压降低^{而降低}的降低百分率除方块—方块电极外，其余样品都很接近。这是由于其余样品的电极都带有圆弧形状，电场分布状况较近似，故击穿电压值随气压变化的降低百分率就接近。而方块—方块电极是平面形状，电

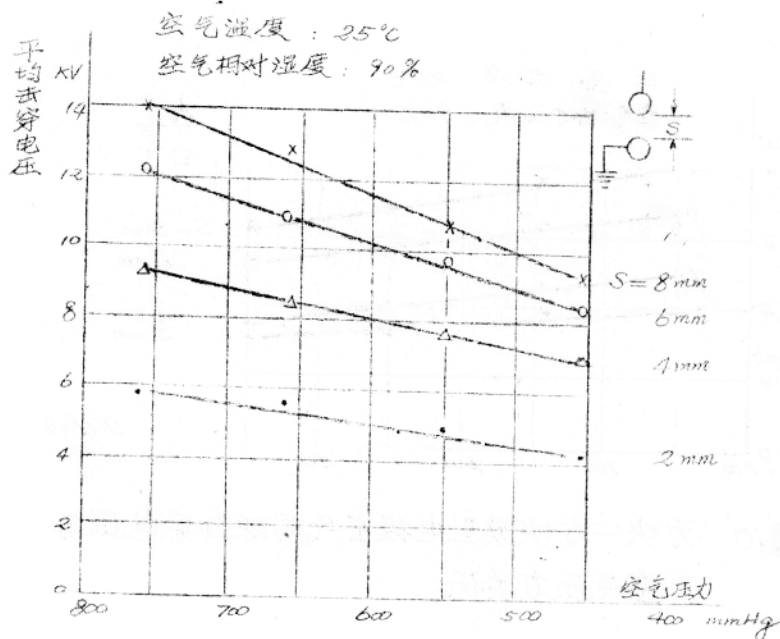


图8 球-球模型电极空气间隙击穿电压与空气压力的关系

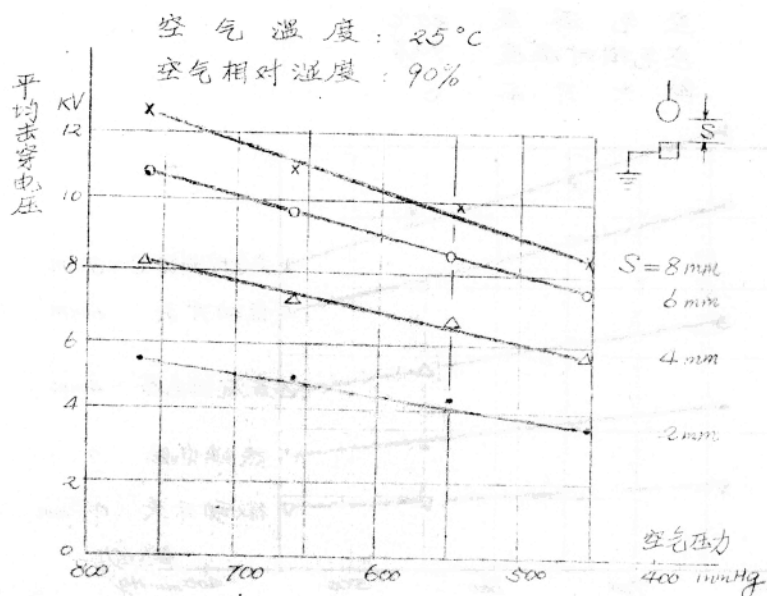


图9 球-方块模型电极空气间隙击穿电压与空气压力的关系

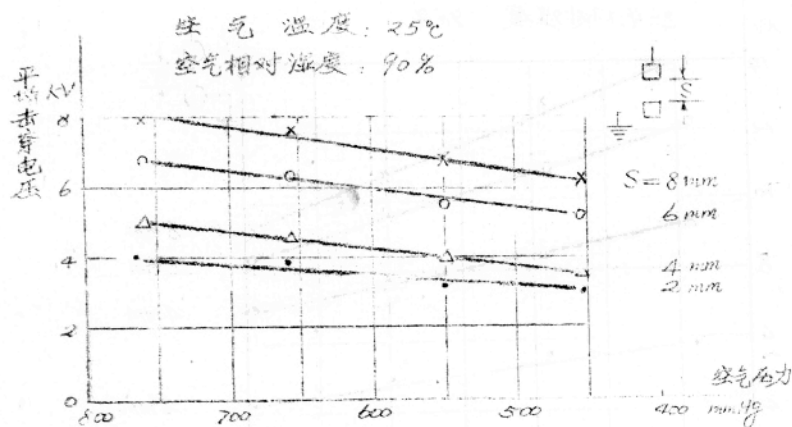


图10 方块—方块模型电极空气间隙击穿电压与空气压力关系

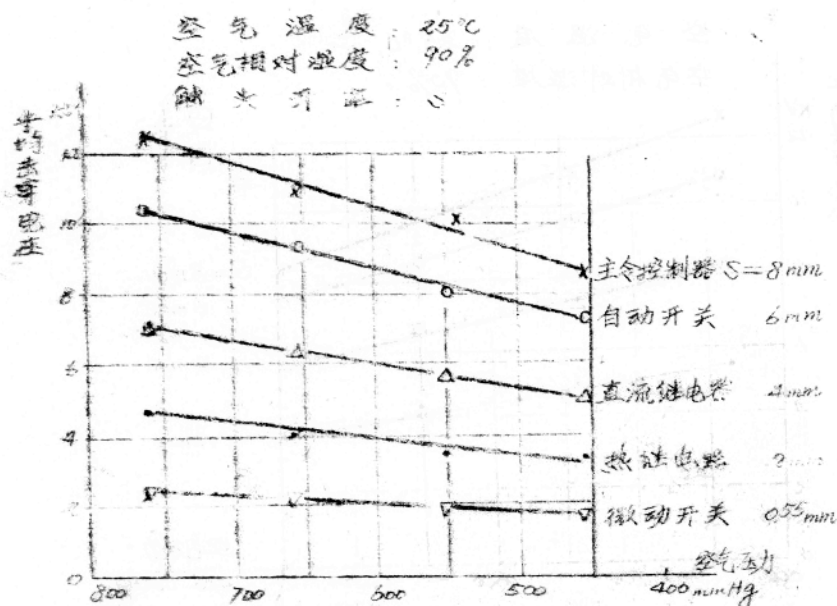


图11 动静触头间空气间隙击穿电压与空气压力的关系