

实验 1 空气间隙放电 实验报告

实验时间：第十三周周二 14:20-16:55

组员：吴晨聪 玄松元 张译文 郑瑞坚

1 实验目的

1. 高压试验的全过程，体会升压、击穿、跳闸、降压的全过程。
2. 掌握高压试验变压器的接线与操作，掌握交流高压测量方法。
3. 直流高压发生器与试品的接线与操作，掌握直流高压测量方法。
4. 掌握空气间隙在不同电压形式（交流和直流）、不同电极结构（球-球和尖-板）下，不同的间隙距离与击穿电压的关系。
5. 认识滑闪放电。

2 实验内容

1. 测量球间隙在 5mm、10mm、15mm 距离下，交、直流击穿电压；记录试验时的大气气象条件，按气象条件对击穿电压进行校正。
2. 测量尖-板间隙在 10mm、20mm、30mm 的距离下，交流、正极性直流、负极性直流的击穿电压，记录试验时的大气气象条件，按气象条件对击穿电压进行校正。
3. 滑闪放电演示。

3 实验原理

（1）稍不均匀电场的放电

均匀电场中，由于各点电场强度都是一样的，当施加稳态电压（直流、工频交流），电场强度达到空气的击穿强度时，间隙就击穿了。但日常很难见到均匀电场。

对于稍不均匀的电场，日常见得很多。如球-球间隙，球-板间隙等，以球-球间隙为例，当间隙距离 s 小于 $1/4D$ 时，其电场基本为均匀电场，当 $D/4 \leq s \leq D/2$ 时，其电场为稍不均匀电场。

均匀电场的放电电压也可用公式计算，公式为（单位为 kV）：

$$u = 24.4\delta s + 6.53\sqrt{\delta s}$$

式中： δ 为空气相对密度， s 为间隙距离。

（2）极不均匀电场的放电

不均匀电场的差别就在于空气间隙内，各点的电场强度不均匀，在电力线比较集中的电极附近，电场强度最大，而电力线疏的地方，电场强度很小，如棒-棒间隙，是一对称的不均匀电场，在电极的尖端处电力线最集中，电场强度也最大。当加上高压后，会在电极附近产生空气的局部放电—电晕放电，电压再加高时，电晕放电更加强烈，致使间隙内发生刷状放电，而后就击穿了（电弧放电）。如棒-板间隙，在尖电极附近电场强度最大，加上高压后，电极附近先产生电晕放电，而板上的电力线很疏，不会产生电晕。当电压足够高时，棒极也将产生刷状、火花放电，最后导致电弧放电（击穿）。

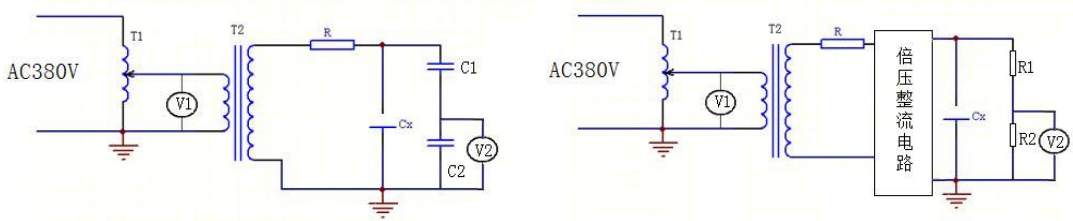
（3）滑闪放电

具有强垂直分量的表面会出现明显的滑闪放电。

（4）极性效应

在直流电压作用下，极性对放电电压有很大影响。这是因为正流注发展所需的平均电场与负流注发展所需的平均电场不同，因此在正负直流电压作用下有明显的极性效应。

4 实验接线



T1: 调压器 0~380V
T2: 高压试验变压器 100kV/30kVA
R: 保护电阻 11KΩ
Cx: 试品间隙
C1、C2: 电容分压器的高、低压臂电容
V1、V2: 低压电压表

图 1 工频高压试验线路

T1: 调压器 0~380V
T2: 高压试验变压器 100kV/30kVA
R: 保护电阻 11KΩ
Cx: 试品间隙
R1、R2: 电阻分压器的高、低压臂电阻
V1: 交流电压表, V2: 直流电压表

图 2 直流高压试验线路

图 2 中倍压整流电路如图 3 所示，图中重复画出了升压变压器。

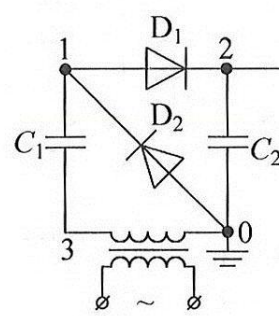


图 3 倍压整流电路原理图

5 数据处理

原始数据:

交流电压下空气间隙击穿电压 (kV, 有效值)

		第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	平均值
球-球间	5mm	9.81	10.61	10.53	10.51	/	10.37
	10mm	19.21	19.5	19.34	/	/	19.35
	15mm	25.66	26.99	28.62	28.62	/	27.47
尖-板间	10mm	10.88	12.77	11.97	12.57	10.57	11.75
	20mm	15.68	14.63	15.44	15.51	/	15.32
	30mm	18.92	19.71	19.49	/	/	19.37

直流电压下空气间隙击穿电压 (kV)

		第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	平均值
球-球间	5mm	14.34	13.85	14.18	/	/	14.12
	10mm	30.05	30.23	29.79	/	/	30.02
	15mm	42.27	42.37	42.58	/	/	42.41

尖-板间 (尖+板-)	10mm	15.42	14.50	14.80	13.97	16.8	15.10
	20mm	27.56	24.31	21.93	28.68	25.74	25.64
	30mm	27.09	27.63	28.39	/	/	27.70
尖-板间 (尖-板+)	10mm	16.91	16.69	16.52	/	/	16.71
	20mm	37.03	37.58	37.81	/	/	37.47
	30mm	56.24	56.26	55.64	/	/	56.05

大气条件修正：

标准参考大气条件为：温度 $t_0=20^{\circ}\text{C}$ ，压力 $p_0=101.3\text{kPa}$ ，绝对湿度 $h_0=11\text{ g}/\text{m}^3$ 。

实验前测量大气条件为：温度 $t=25.5^{\circ}\text{C}$ ，压力 $p=733\text{mmHg}=97.73\text{kPa}$ ，湿度 71%。

实验后测量大气条件为：温度 $t=26.5^{\circ}\text{C}$ ，压力 $p=732\text{mmHg}=97.59\text{kPa}$ ，湿度 72%。

取平均，大气条件为：温度 $t=26.0^{\circ}\text{C}$ ，压力 $p=732.5\text{mmHg}=97.66\text{kPa}$ ，湿度 71.5%。

由图 3-3 可知绝对湿度约为 $h=17.5\text{ g}/\text{m}^3$ 。

$$\text{相对空气密度 } \delta = \frac{p}{p_0} \frac{273+t_0}{273+t} = \frac{97.66 \times (273+20)}{101.3 \times (273+26)} = 0.9447, \quad h/\delta = 18.52\text{ g}/\text{m}^3。$$

由图 3-2 及式 3-5 可查到，对直流电压， $k=1.093$ ；对交流电压， $k=1.090$ 。

将 U_{50} 假定为 1.1 倍试验电压值（峰值）。根据 $g = \frac{U_{50}}{500L} \frac{1}{\delta k}$ ，计算对应的 g 参数，再

确定 m 和 w 。对于尖-板间隙，使用大气修正因数 $K_t = k_1 k_2 = \delta^m k^w$ 进行修正。对于球

-球间隙，属于稍不均匀场，不进行湿度修正，使用大气修正因数 $K_t = k_1 = \delta^m$ 进行修

正。从而换算出标准参考大气条件下的放电电压 $U_0 = U/K_t$ 。峰值再乘以 $\sqrt{2}$ 倍。修正后的结果如下：

交流电压下空气间隙击穿电压（峰值）

		g	m	ω	K	U/kV	U0/kV
球-球间	5mm	6.267	1.0	0	0.945	14.67	15.52
	10mm	5.847	1.0	0	0.945	27.37	28.97
	15mm	5.533	1.0	0	0.945	38.85	41.13
尖-板间	10mm	3.550	1.0	0	0.945	16.62	17.59
	20mm	2.314	1.0	0	0.945	21.67	22.94
	30mm	1.951	1.0	0.015	0.946	27.39	28.96

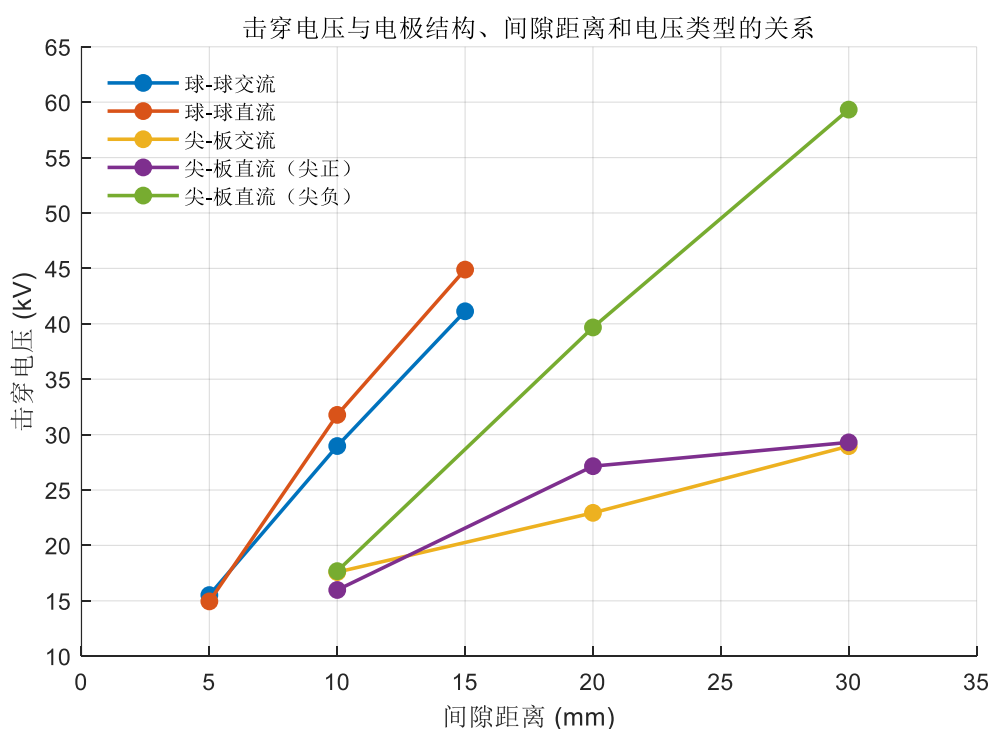
直流电压下空气间隙击穿电压

		g	m	ω	K	U/kV	U0/kV
球-球间	5mm	6.018	1.0	0	0.945	14.12	14.95
	10mm	6.397	1.0	0	0.945	30.02	31.78

	15mm	6.024	1.0	0	0.945	42.41	44.89
尖-板间 (尖+板-)	10mm	3.217	1.0	0	0.945	15.10	15.98
	20mm	2.732	1.0	0	0.945	25.64	27.15
	30mm	1.968	1.0	0.009	0.945	27.70	29.30
尖-板间 (尖-板+)	10mm	3.560	1.0	0	0.945	16.71	17.68
	20mm	3.992	1.0	0	0.945	37.47	39.67
	30mm	3.980	1.0	0	0.945	56.05	59.33

6 结果分析

绘制球-球间隙和尖-板间隙直流、交流击穿电压与间隙长度的关系：



(1) 球-球间隙

理论上，对球-球间隙而言，当间隙距离 s 小于 $1/4D$ 时，其电场基本为均匀电场，当 $D/4 \leq s \leq D/2$ 时，其电场为稍不均匀电场，直流、交流击穿电压峰值理论上应该几乎一致，可用经验公式估算，击穿电压随间隙距离增加而增加。

实际测量结果表明，球-球间隙的击穿电压随间隙距离的增加而增加，间隙距离较小时直流、交流击穿电压峰值接近，间隙稍大时交流击穿电压峰值略低。

(2) 尖-板间隙

理论上，尖-板间隙属于极不均匀电场。极不均匀电场的直流击穿电压存在明显的极性效应，正极性尖-板击穿电压低于负极性；而工频电压的击穿发生在正半周期峰值附近，故击穿电压与直流的正极性相近。间隙距离不太大时，击穿电压基本与间隙距离呈线性上升的关系，当间隙距离很大时，平均击穿场强明显减低，出现饱和。

实际测量结果表明，尖-板交流击穿电压与尖正板负直流击穿电压相近，而尖负板正击穿电压则更高。尖-板直流和负极性交流与间隙距离基本呈线性，正极性交流略微出现饱和现象。实验与理论存在一定的误差，且实验数据本身存在一定的分散性，分析原因可能有以下几点：

(1) 电压表读数误差：由于短路瞬间过程很快，读数存在难度，且电压表示数有一定延时，

因此电压表读数可能并不是准确的击穿瞬间的电压，可能造成各次实验之间的数据分散性。

（2）施加电压操作不稳定：由于手动调整调压器速度较难控制，在操作中可能存在升压过快导致击穿电压偏高，或速度过慢造成多次预放电累积损伤绝缘，造成测量值偏离实际值；

（3）间隙距离测量误差：安装电极时采用的量尺肯能有磨损，且对于球-球电极难以准确确定电极距离，可能导致击穿电压测量值和理论值有出入；

（4）电极表面情况变化：调整电极形状、尺寸时难免使电极表面沾上油渍、指纹等污染物，可能造成电场均匀程度变化，影响结果准确性；

（5）环境条件变化：环境条件（温度、湿度、压强等）随时间发生了变化，在数据处理中简单地采用取平均值的方式，统一进行大气条件修正，可能导致不同时间进行的实验结果产生差异。

7 思考题

1. 试验时线路与墙和控制台的净空绝缘距离应如何考虑？

实验中的线路是裸线，电位很高，而墙体和控制台是地电位，应留出足够的绝缘距离以避免线路向周围物体放电，同时应考虑控制台的电子设备可能需要进行电磁屏蔽。实验室实际情况是，线路与墙体的距离远大于实验所加电压能够击穿的绝缘距离（几十毫米），且周围有金属笼进行电磁屏蔽，控制台在金属笼外不收干扰。

2. 试分析说明极不均匀电场下，强垂直分量下交直流放电现象的差别。

极不均匀电场下，具有强垂直分量的电场在交流电压作用下会出现滑闪放电。随电压升高，先出现电晕放电，电压进一步升高，放电形成平行向前伸展的细线状辉光放电，电压达到某临界值时，其中某些细线的长度迅速增长，并转变为较为明亮的树枝状火花。出现滑闪放电后，放电发展很快，会很快贯通两级，完成闪络。滑闪放电起始电压可用如下公式计算：

$$U_0 = \frac{E_0}{\sqrt{\omega C_0 \rho_s}}$$

直流电压作用下则不会出现滑闪放电现象。由上式可知直流电压 ω 可视为0，起始电压为无穷大，因此不发生滑闪，电压增加到一定程度后直接发生闪络或击穿。

8 总结与感想

本次实验中我们现场见证和操作了高压试验的全过程，包括合闸、升压、击穿、跳闸、降压和读数等，掌握了高压试验的操作规范（包括熟悉设备仪器的安全操作规程、呼叫口令、正确接线等）。在实验过程中通过对现象的观察，我们对课程学习理论有了更深的理解，理论规律基本上得到了验证，对于误差的产生也进行了合理充分的思考。

9 原始数据

七. 数据表格

实验条件: 温度: 25.5°C 湿度: 71% 气压: 733 mmHg

1. 交流电压下空气间隙击穿电压

		第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	平均值
球-球间 隙 kV	5mm	9.81	10.61	10.53	10.51		10.365
	10mm	19.21	19.50	19.34			19.35
	15mm	25.66	26.99	28.62	28.62		27.4725
尖-板间 隙 kV	10mm	10.88	12.77	11.97	12.57	10.57	11.752
	20mm	15.68	14.63	15.44	15.51		15.315
	30mm	18.92	19.71	18.49			19.373

2. 直流电压下空气间隙击穿电压 线、地、表

	距离	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	平均值
球-球间 隙	5mm	14.34	13.85	14.18			14.123
	10mm	30.05	30.23	30.29 29.79			30.023
	15mm	42.27	42.37	42.58			42.4067
尖-板间 隙 (尖正 -板负)	10mm	15.42	14.50	14.80	13.97	16.80	15.098
	20mm	27.56	24.31	21.93	28.68	25.74	
	30mm	27.09	27.63	28.39			
尖-板间 隙 (尖负 -板正)	10mm	16.91	16.69	16.52			16.7067
	20mm	37.03	37.58	37.81			37.473
	30mm	58.24	58.26	55.64			

26.5°C 72% 732 mmHg.

邓靖宇