

组编前言

全国高等教育自学考试

高电压技术 同步练习册

(2002 年版)

全国高等教育自学考试指导委员会组编

罗云霞 等编著

ISBN 7-308-03883-1

1. 高... 2. 高... 3. 高... 4. 高... 5. 高... 6. 高... 7. 高... 8. 高... 9. 高... 10. 高...

1. 高... 2. 高... 3. 高... 4. 高... 5. 高... 6. 高... 7. 高... 8. 高... 9. 高... 10. 高...

1. 高... 2. 高... 3. 高... 4. 高... 5. 高... 6. 高... 7. 高... 8. 高... 9. 高... 10. 高...

1. 高... 2. 高... 3. 高... 4. 高... 5. 高... 6. 高... 7. 高... 8. 高... 9. 高... 10. 高...

1. 高... 2. 高... 3. 高... 4. 高... 5. 高... 6. 高... 7. 高... 8. 高... 9. 高... 10. 高...

1. 高... 2. 高... 3. 高... 4. 高... 5. 高... 6. 高... 7. 高... 8. 高... 9. 高... 10. 高...

1. 高... 2. 高... 3. 高... 4. 高... 5. 高... 6. 高... 7. 高... 8. 高... 9. 高... 10. 高...

1. 高... 2. 高... 3. 高... 4. 高... 5. 高... 6. 高... 7. 高... 8. 高... 9. 高... 10. 高...

1. 高... 2. 高... 3. 高... 4. 高... 5. 高... 6. 高... 7. 高... 8. 高... 9. 高... 10. 高...

1. 高... 2. 高... 3. 高... 4. 高... 5. 高... 6. 高... 7. 高... 8. 高... 9. 高... 10. 高...

1. 高... 2. 高... 3. 高... 4. 高... 5. 高... 6. 高... 7. 高... 8. 高... 9. 高... 10. 高...

1. 高... 2. 高... 3. 高... 4. 高... 5. 高... 6. 高... 7. 高... 8. 高... 9. 高... 10. 高...

浙江大學出版社

组编前言

依靠自己的力量,在有限的时间内学习一门新学科,从不懂到懂,从不会到会,从不理解到理解,从容易遗忘到记忆深刻,从不会应用到熟练应用,从模仿到创新,把书本知识内化为自己的知识,是一个艰难的过程。在这个过程中,自学者不仅需要认真钻研考试大纲,刻苦学习教材和辅导书,还应该做适量的练习,把学和练有机地结合起来,否则,就不能达到预定的学习目标。“纸上得来终觉浅,绝知此事要躬行。”这是每一位自学者都应遵循的信条。

编写练习,同样是件不容易的事。它对编写者提出了相当高的要求:

- 有较深的学术造诣;
 - 有较丰富的教学经验;
 - 对高等教育自学考试有深刻的理解并有一定的辅导自学者的经历;
 - 对考试大纲、教材、辅导书有深入的了解,对文中的重点、难点、相互联系等有准确的理解;
 - 对自学者的学习需要和已有的知识基础有一定的了解。
- 只有把这些因素融会在一起,作者才能编写出高质量的,有利于举一反三、事半功倍的练习。

基于以上考虑,我们组织编写出版了同步练习册,使之与考试大纲、教材、自学辅导书相互补充,形成一个完整的学习媒体系统。

之所以把这些练习称为同步练习,是因为:

- 第一,它与考试大纲、教材的内容及顺序是一致的。按照考试大纲、教材的章、节、知识点的顺序编选习题,方便自学者循序渐进地学习与练习。
- 第二,它与自学者的学习过程是一致的。自学过程包括初步接触、大体了解、理解、记忆、应用、创新、复习等阶段。在每一个阶段,自学者都容易找到相应的练习。

如此学与练同步的方式,有利于激发自学的兴趣,有利于集中注意力于当前所学的内容,有利于理解、巩固、记忆、应用,尤其有利于自学者及时知道自己的学习状态与结果,以便随时调整学习计划,在难度较大处多投入精力。

基于对学习目标的考虑,我们把同步练习大致分为四类:

第一,单项练习:针对一个知识点而设计的练习。其目的在于帮助自学者理解和记忆基本概念和理论。

第二,综合练习:针对几个知识点而设的练习。这又可分为在本章综合、跨章综合、跨学科综合三级水平。其目的在于帮助自学者把相关知识联系起来,形成特定的知识结构以便灵活地应用。

第三,创造性练习:提供一些案例、事实、材料,使考生应用所学到的理论、观点、方法创造性地解决问题。这类问题可能没有统一的答案,只有一些参考性的思路。其目的很明显,就是培养自学者的创新意识和能力。

第四,综合自测练习:在整个学科范围内设计练习,尽量参照考试大纲的题型,组成类似考卷的练习。其目的在于使自学者及时检测全部学习状况,帮助自学者作好迎接统一考试的知识及心理准备。

希望应考者在使用同步练习之前了解我们的构想,理解我们的意图,以便主动地选择适合自己学习的练习题目。

孔子说:“学而时习之,不亦说乎?”一边学,一边练,有节奏、有规律地复习,不仅提高了学习效率,也会给艰难的学习过程带来不少的快乐。圣人能够体会到这一点,我们每一位自学者同样能体会到。如果通过这样的学习过程,实现了学习目标,实现了人生的理想,实现了对自我的不断超越,那么,我们说这种学习其乐无穷也毫不夸张。

全国高等教育自学考试指导委员会

2000年10月

第1章 气体放电的基本物理过程

第1章 气体放电的基本物理过程 (1)

1.1 基本内容和知识点 (1)

1.2 基本要求 (4)

1.3 习题及解答 (4)

第2章 气体介质的电气强度 (12)

2.1 基本内容及知识点 (12)

2.2 基本要求 (14)

2.3 习题及解答 (14)

第3章 液体和固体电介质的电气特性 (17)

3.1 基本内容及知识点 (17)

3.2 基本要求 (18)

3.3 习题及解答 (18)

第4章 电气设备绝缘的预防性试验 (24)

4.1 基本内容及知识点 (24)

4.2 基本要求 (25)

4.3 习题及解答 (25)

第5章 电气设备绝缘的高电压试验 (31)

5.1 基本内容及知识点 (31)

5.2 基本要求 (32)

5.3 习题及解答 (32)

第6章 输电线路和绕组中的波过程 (37)

6.1 基本内容和知识点 (37)

6.2 基本要求 (39)

6.3 习题及解答 (39)

第7章 雷电放电及防雷保护装置 (66)

7.1 基本内容及知识点 (66)

7.2 基本要求 (66)

7.3 习题及解答 (67)

第8章 电力系统防雷保护 (76)

8.1 基本内容及知识点 (76)

8.2 基本要求 (76)

8.3 习题及解答 (77)

第9章 内部过电压	(88)
9.1 基本内容及知识点	(88)
9.2 基本要求	(89)
9.3 习题及解答	(89)
第10章 电力系统绝缘配合	(97)
10.1 基本内容及知识点	(97)
10.2 基本要求	(98)
10.3 习题及解答	(98)
模拟试卷	(102)
A 卷	(102)
B 卷	(106)
C 卷	(109)
D 卷	(112)
模拟试卷参考答案	(116)
A 卷	(116)
B 卷	(118)
C 卷	(120)
D 卷	(122)
参考文献	(125)
后 记	(126)

第1章 气体放电的基本物理过程

1.1 基本内容和知识点

绝大多数电气设备都在不同程度上以不同的形式利用气体介质作为绝缘材料,但在一定条件下,气体中也会出现放电现象,甚至完全丧失其作为电介质而具有的绝缘特性。

1.1.1 带电粒子的产生和消失

1. 激发(激励):在原子内部分层排布在原子核外围的电子吸收了能量以后,从靠近原子核的轨道(低能级)跳到远离原子核的轨道(高能级)的现象称为激发,亦称激励。

2. 游离(电离):被激发的电子在获得足够的能量后,摆脱原子核的束缚而成为自由电子和正离子(即带电粒子)的过程称为游离,亦称电离。游离(电离)有碰撞游离、光游离、热游离、表面游离几种形式。

3. 扩散:带电质点从浓度较大的区域运动到浓度较小的区域,从而使其在空间各处的浓度分布均匀,这种物理过程称为扩散。

4. 复合:带有异号电荷的质点相遇时,发生电荷的传递与中和,从而还原成中性质点的过程,称为复合。复合发生在电子和离子之间的称为电子复合;复合发生在正离子和负离子之间的称为离子复合。带电质点复合时,会以光辐射形式将电离能释放出来,可导致其他中性质点电离,促使放电在整个间隙中发展。这在流注理论中是很重要的。

5. 附着效应:当电子与气体分子碰撞时,不但有可能引起碰撞电离而产生正离子和新电子,而且也可能发生电子与中性分子相结合而形成负离子的情况,这种现象称为附着效应。

1.1.2 电子崩

1. 电子崩:设外界电离因子在阴极附近产生了一个初始电子,如果空间的电场强度足够大,那么该电子在向阳极运动时就会引起碰撞电离,产生一个新电子,初始电子和新电子继续向阳极运动,又会引起新的碰撞电离,产生出更多的电子。依次类推,电子将按几何级数不断增多,像雪崩似地发展,因而这种急剧增大的空间电子流被称为电子崩。电子崩过程是汤逊理论、流注理论的共同基础。

2. 三个系数

(1) 系数 α :表示一个电子从阴极到阳极的每厘米行程中与中性质点碰撞电离次数(平均值)。

(2) 系数 β : 表示一个正离子从阳极到阴极的每厘米行程中与中性质点相碰所产生的自由电子数(平均值)。

(3) 系数 γ : 表示一个正离子撞击到阴极表面时使阴极逸出的自由电子数(平均值)。

1.1.3 自持放电及其条件

1. 非自持放电: 需要外界游离因素存在才能维持的放电称为非自持放电。
2. 自持放电: 不需要外界游离因素存在也能维持的放电称为自持放电。
3. 自持放电的条件是自持放电过程产生的二次电子能完全取代外界电离因素产生的初始电子。汤逊理论的自持放电判据为

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) \geq 1 \quad \text{或} \quad \gamma e^{\alpha d} \geq 1 \quad (1-3.1)$$

式中: γ ——正离子的表面游离系数;

α ——电子碰撞电离系数;

d ——极间距离。

1.1.4 巴申定律

利用汤逊理论的自持放电条件 $\gamma(e^{\alpha d} - 1) \geq 1$ 以及碰撞电离系数 α 与气压 p 、电场强度 E 的关系式 $\alpha = Ape^{-\frac{Bp}{E}}$, 并考虑均匀电场中自持放电起始场强 $E_c = \frac{U_c}{d}$ (式中 U_c 为起始电压, d 为极间距离), 可得

$$U_0 = \frac{B(pd)}{\ln \left[\frac{A(pd)}{\ln \left(1 + \frac{1}{r} \right)} \right]} \quad (1-4.1)$$

由于均匀电场气隙的击穿电压 U_0 等于它的自持放电起始电压 U_c , 所以上式表明: U_c 或 U_0 是气压和极间距离的乘积 (pd) 的函数, 即

$$U_0 = f(pd) \quad (1-4.2)$$

上式所示规律称为巴申定律, $U_0 = f(pd)$ 曲线称为巴申曲线。

1.1.5 汤逊理论和流注理论

1. 汤逊理论能够较好地解释低气压、短间隙(即 pd 值较小)、均匀电场中的气体放电现象; 流注理论能够较好地解释气压较高、间隙较长(即 pd 值较大)的电场中的气体放电现象。两者的共同基础是电子崩放电过程, 差别是二次电子产生的机制。

2. 汤逊理论解释气体放电的要点是:

- (1) 气隙中电流的增长是由于电子运动加速, 产生碰撞游离, 形成电子崩。
- (2) 电子奔向阳极时, 正离子撞击阴极, 使阴极表面释放电子, 因而间隙中电子获得补偿, 非自持放电转为自持放电。

3. 流注理论是建立在汤逊理论基础之上的, 但它强调下面两点:

- (1) 空间电荷的影响: 电子崩发展到一定程度, 崩头、崩尾场强增大, 正、负电荷之间的空间电场减弱, 使原有的电场畸变。
- (2) 光游离作用: 游离愈激烈, 复合愈激烈, 崩头、崩尾中间的空间最有利于复合, 复合产

生的光子又去碰撞游离或光游离产生新的电子崩。

4. 汤逊理论和流注理论解释大气放电的差异如表 1-1 所示。

表 1-1 汤逊理论和流注理论解释大气放电的差异

	汤逊理论的解释	流注理论的解释	实际大气放电情况
放电形成时延	电子崩要经过好几个循环, 放电形成的时延至少应是离子穿过整个间隙的时间, 因而放电时间较长。	多个位置不同的电子崩同时发展和汇合, 新崩的起始电子由光子形成, 光子速度极快, 并且光子又在加强了的电场中前进, 所以流注具有高速、放电发展迅速的特点。	实际的大气放电时间极快。
阴极材料对击穿电压的影响	自持放电是靠正离子撞击阴极使阴极逸出电子来维持的, 间隙击穿电压应与阴极材料的性质有关。	大气放电的发展不是靠正离子撞击阴极作用产生的二次电子, 而是靠空间光游离作用产生的电子来维持的, 击穿电压的大小与阴极材料的性质无关。	实际的大气击穿电压与阴极材料的性质无关。
放电外形	放电应沿整个间隙均匀地、连续地发展。	电场特别集中的流注头部始终半径很小, 因此放电通道应是狭窄的, 加之新崩可能从各个不同方面向流注头部汇合, 所以流注头部有分枝, 即放电通道会出现分枝。	实际的大气放电常会出现有分枝的、明亮的放电细通道。

1.1.6 不均匀电场中的放电过程

1. 电晕放电: 在极不均匀电场中, 当所加电压达到某一临界值时, 曲率半径较小的电极附近空间的电场强度首先达到了起始场强值 E_c , 因而在这个局部区域先出现碰撞游离和电子崩, 甚至出现流注, 这种仅发生在强场区的局部放电现象称为电晕放电。电晕起始场强的计算可利用皮克公式。

2. 在极不均匀电场中的放电存在明显的极性效应, 击穿前有稳定的电晕放电, 有较长的放电时延, 与所加的电压波形有显著关系, 应该用流注理论分析。典型的不对称电场为尖-板、线-板, 典型的对称电场为尖-尖、线-线。

1.1.7 放电时间和冲击电压下的气隙击穿

因为气体是自恢复绝缘, 所以气隙放电和气隙击穿的含义是相通的。

从开始加压的瞬时起到气隙完全击穿的时间称为击穿时间, 包括升压时间、统计时延、放电发展时间, 后两者之和称为放电时延。

1. 完成气隙击穿的三个必备条件为:

(1) 有足够大的电场强度或足够高的电压;

(2) 在气隙中, 存在能引起电子崩并导致流注和主放电的有效电子;

(3) 有一定的时间, 让放电得以逐步发展并完成击穿。

2. 因为冲击电压作用时间短, 放电时延对间隙是否会击穿有很大的影响, 而放电时延具统计性, 所以冲击放电电压有明显的统计性。通常说的 50% 冲击击穿电压 ($U_{50\%}$) 是指, 多次施加此电压时, 间隙的击穿概率为 50%。

50%冲击击穿电压和静态击穿电压之比称为间隙的冲击系数。

3. 伏秒特性:表示冲击放电电压随击穿时间的减少而增大的曲线,通常以间隙的冲击放电电压与电压作用的时间关系曲线 $U_{\text{最大}}=f(t)$ 表示。

——因为放电时延具有分散性,所以伏秒特性实际上是一条具有上下包络线的带子。

1.1.8 沿面放电和污闪事故

1. 沿面放电:沿着固体介质表面发生的气体放电现象。界面电场分布、表面受潮情况、污染情况对沿面放电有影响。根据界面电场分布不同,沿面放电有三种类型:

(1) 固体介质处于均匀电场中,且界面与电力线平行。这种情况在工程中是少见的。

(2) 固体介质处于极不均匀电场中,且界面电场的垂直分量比平行于此表面的切线分量大得多。套管沿面放电属于这种情况。

(3) 固体介质处于极不均匀电场中,但大部分界面上的电场切线分量大于垂直分量。支柱绝缘子就属于这种情况。

2. 污闪的发展过程实际上是局部电弧延伸的过程,需要相当长的时间。污闪通常在工作电压下发生,会持续很长时间,要等不利的气象条件消失后,才能恢复供电。

防止污闪的主要对策是减小污层的泄漏电流,包括减小绝缘子表面的污层沉积、避免形成连续的水膜、加强绝缘子的泄漏路径。

1.2 基本要求

了解气体在高电压(强电场)的作用下逐步由电介质演变成导体的物理过程,理解和掌握气体放电的机理及自持放电的条件,领会均匀电场和不均匀电场中的气隙放电过程,冲击电压下的气隙击穿及沿面放电和污闪事故等。

1.3 习题及解答

1-1 气体游离的类型主要有哪几种?试作解释。

答 气体游离的类型有4种,具体为:

(1) 碰撞游离:电子在电场作用下加速向阳极运动的过程中,获得足够的能量,运动加快并不断与途中其他中性原子发生碰撞,从而激发出自由电子。这种由于碰撞而产生游离的形式称为碰撞游离。

(2) 光游离:正、负带电粒子复合时,都以光子的形式释放出能量,其他中性原子内的电子吸收此能量后变为自由电子。这种由于光辐射而产生游离的形式称为光游离。

(3) 热游离:在高温下,气体内的各种粒子动能增加,当动能超过一定值时,粒子相互碰撞而产生游离。这种由气体热状态引起的游离方式称为热游离。

(4) 表面游离:金属电极表面由于碰撞、光辐射、加热以及强电场等的作用,释放出自由电子,这种游离称为表面游离。

1-2 气体中带电粒子的消失有哪几种形式?

答 气体中带电粒子的消失有以下几种形式:

- (1) 在电场驱动下作定向运动,在到达电极时,消失于电极上而形成外电路中的电流;
- (2) 因扩散现象而逸出气体放电空间;
- (3) 复合。

1-3 气体放电的基本特点是什么?解释气体放电现象常用的理论有哪两个?

答 (1) 气体放电的基本特点是:在外电场作用下,气体间隙中带电粒子数增加,气隙击穿时,其中带电粒子数剧增,而在撤去外电场后,气体间隙中带电粒子又消失并恢复其原有的绝缘强度。

(2) 解释气体放电现象常用的理论是:汤逊理论和流注理论。

1-4 试用汤逊理论解释气体间隙中电流随外电压而变化的规律。

答 用汤逊理论解释气体间隙中电流随电压变化的规律,可见如图 1-1 所示气体放电的伏安特性。

(1) 当 $0 < U$ (外施电压) $< U_a$ 时,由于宇宙射线及地层放射性物质的作用,使气体分子电离,或由于气体介质中的带电粒子与其他粒子碰撞而使分子离解成为离子,这些带电粒子沿电场方向移动,间隙中出现微弱电流。外施电压上升,带电粒子运动速度加大,所以气隙中的电流增加。

(2) 当 $U_a \leq U \leq U_b$ 时,由于外界电离因素所产生的带电粒子几乎能全部抵达电极,所以电流趋于饱和,电流值很小,仅取决于电离因子的强弱。

(3) 当 $U_b \leq U \leq U_c$ 时,由于外加的电场增强,电子获得足够的动能,使气隙内发生碰撞游离,所产生的电子碰撞别的中性原子,形成电子崩,气隙中的电子数急剧增加,电流 I 也迅速增加。

(4) 当 $U \geq U_c$ 时,碰撞游离更加激烈,在电子从阴极出发向阳极运动的途中,由于电子崩而产生的大量电子都奔向了阳极,间隙电子消失,但与此同时,正离子撞击阴极,使阴极表面逸出电子,弥补了间隙中的电子,因此,此时进入自持放电阶段。

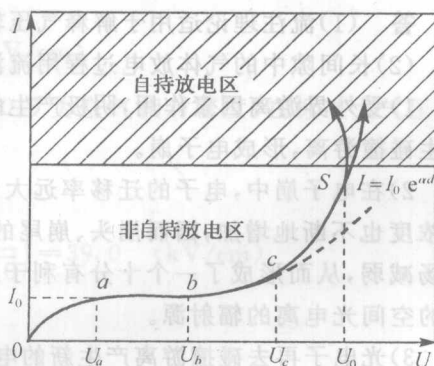


图 1-1

1-5 在一极间距离为 1cm 的均匀电场气隙中,电子碰撞电离系数 $\alpha = 11\text{cm}^{-1}$ 。有一初始电子从阴极表面出发,求到达阳极的电子崩中的电子数。

解 到达阳极的电子崩中的电子数应为 $n = n_0 e^{\alpha d}$,

因为 $n_0 = 1, \alpha = 11\text{cm}^{-1}, d = 1\text{cm}$,

所以 $n = e^{11} = 59806$ (个)。

由此可见,一个初始电子在 1cm 内产生的电子总数远大于 α (碰撞电离次数),因为这个电子的碰撞电离产生的电子也会在行进过程中发生碰撞电离而产生新的电子。

1-6 应用巴申定律分析气体放电的条件是什么?为什么巴申曲线呈 U 形?

答 (1) 巴申定律与汤逊理论的应用条件一致,都适用于分析均匀电场中低气压、短间隙的条件下气体放电现象。

(2) 由碰撞电离系数 α 的定义 $\alpha = Ape^{-\frac{Bp}{E}}$ 可知,当间隙距离 d 不变时,在 p 很大或很小

的情况下,碰撞电离系数 α 都较小,击穿电压都较高,因此击穿电压具有极小值,当 p 一定时,极间距离增大,击穿电压增大,而当极间距离很小时,电子来不及碰撞就到了阳极,击穿电压也增大,所以巴申曲线呈U形。由此可知,提高气压到某一高度或降低气压至真空,都能提高气隙的击穿电压。

1-7 什么叫流注? 流注形成的条件是什么?

答 (1)初始电子崩头部成为辐射源后,就会向气隙空间各处发射光子而引起光电离,如果这时产生的光电子位于崩头前和崩尾附近的强场区内,那么它们所造成的二次电子崩将以大得多的电离强度向阳极发展或汇入崩尾的正离子群中。这些电离强度和发展速度远大于初始电子崩的新放电区(称为二次电子崩)不断地汇入初崩通道的过程称为流注。

(2)流注形成的条件(即自持放电的条件)为:出现空间光电离。

1-8 应用流注理论有什么条件? 试用流注理论解释长间隙中气体放电的过程。

答 (1)流注理论适用于解释气压较高、距离较长的气隙中气体放电现象。

(2)长间隙中的气体放电过程用流注理论解释如下:

1)受外界游离因素作用,阴极产生的起始电子在从阴极走向阳极的途中,受外电场作用产生碰撞游离,形成电子崩。

2)在电子崩中,电子的迁移率远大于正离子,所以电子越来越集中在崩头,崩尾的正离子浓度也不断地增加,因而崩头、崩尾的电场增加,使原有电场发生畸变,正、负电荷之间的电场减弱,从而形成了一个十分有利于复合的区域,强烈的复合辐射出许多光子,成为引发新的空间光电离的辐射源。

3)光电子再去碰撞游离产生新的电子崩(二次电子崩),二次电子崩与一次电子崩汇合,形成有正负电荷混合的放电通道——流注。

4)流注通道的形成加强了其余部分的电场,从而不断产生新的电子崩,它又不断地汇合于一次电子崩。当流注通道逐步延伸贯通两电极时,气体间隙就被击穿。

1-9 汤逊理论与流注理论对气体放电过程和自持放电条件的解释观点有何不同? 这两种理论适用于何种场合?

(请读者练习)

1-10 什么是电晕放电? 为什么电晕是一种局部放电现象? 电晕会产生哪些效应?

答 (1)在极不均匀的气隙中,当所加电压达到某一临界值时,曲率半径较小的电极附近空间先出现碰撞电离和电子崩,甚至出现流注,这种仅发生在强场区的局部放电现象称为电晕放电。

(2)在极不均匀电场中,由于电晕放电时的起始电压小于气隙击穿电压,气隙总的来说仍保持着绝缘状态,所以电晕放电是一种局部放电现象。

(3)气体中的电晕放电会产生以下几种效应:

1)伴随着游离、复合等过程有声、光、热等效应,表现为发出“丝丝”的声音、蓝色的晕光以及周围气体温度升高等;

2)在尖端或电极的某些突出处,电子和离子在局部强场的驱动下高速运动,与气体分子交换动量,有“电风”效应;

3)产生高频脉冲电流,对无线电会产生干扰;

4)产生许多化学反应,反应产生的氧化物对金属及绝缘体有强烈的腐蚀作用;

5)产生能量消耗。

1-11 输电线路上的电晕有什么危害? 常采用什么方法来限制电晕?

答 输电线路上的电晕放电所引起的光、声、热等效应都会消耗能量;电晕使空气发生化学反应,产生的氧化物会腐蚀导线;在电晕放电过程中,电子崩和流注不断消失和重现所造成的放电脉冲会产生高频电磁波,对无线信号产生干扰;此外,电晕放电还会产生可闻噪声。

限制输电线路上的电晕,最根本的途径是限制和降低导线表面的电场强度。常用的方法有:增大导线半径,如采用分裂导线;增大电极的曲率半径以减小电场的不均匀程度;去除污秽。

1-12 试近似估算标准大气条件下半径分别为1cm和1mm的光滑导线的电晕起始场强。

解 根据皮克公式 $E_c = 30m\delta \left(1 + \frac{0.3}{\sqrt{r\delta}} \right)$ (kV/cm)

式中, m 为导线表面粗糙系数,对于光滑导线 $m \approx 1.0$; δ 为空气相对密度,在标准大气压下 $\delta = 1.0$; r 为导线半径,cm。

(1)当导线半径 $r=1\text{cm}$ 时

$$E_c = 30 \times 1.0 \times 1.0 \times \left(1 + \frac{0.3}{\sqrt{1 \times 1.0}} \right) = 39.0 \text{ (kV/cm)}$$

(2)当导线半径 $r=1\text{mm}$ 时

$$E_c = 30 \times 1.0 \times 1.0 \times \left(1 + \frac{0.3}{\sqrt{0.1 \times 1.0}} \right) = 58.5 \text{ (kV/cm)}$$

1-13 什么是极性效应? 比较棒-板气隙极性不同时电晕起始电压和击穿电压的高低,并简述其理由。

答 (1)在极不均匀电场中,虽然放电一定从曲率半径较小的电极表面开始,而与该电极的极性无关,但放电的发展过程、气隙的电气强度、击穿电压等都与该电极的极性有很密切的关系。这种现象称为极性效应。

(2)在棒-板气隙中,正极性的电晕起始电压大于负极性的电晕起始电压;正极性的击穿电压小于负极性的击穿电压。理由如下:

当棒极带正电位时,棒极附近强场区内的气体发生游离,如图1-2(a)所示。电子迅速进入棒极,在棒极附近空间留下许多正离子。这些正离子虽朝板极移动,但速度很慢而暂留在棒极附近,如图1-2(b)所示。这些正空间电荷削弱了棒极附近的电场强度而加强了正离子群外部空间的电场,如图1-2(c)所示。棒极附近由于场强减弱而难以形成流注,从而使自持放电难以实现,即电晕放电难以实现,故其电晕起始电压较高,而由于外部空间场强的加强,有利于流注向间隙深处发展,故其击穿电压较低。

当棒极带负电位时,棒端气体发生游离,如图1-3(a)所示。形成电子崩的电子迅速向板极移动,棒极附近正空间电荷缓慢向棒极移动,如图1-3(b)所示。正空间电荷产生的附加电场加强了朝向棒端的电场,从而易形成流注,形成自持放电,所以其电晕起始电压较低。在间隙深处,正空间电荷产生的附加电场与原电场方向相反,削弱了朝向板极方向的电场强度,如图1-3(c)所示,使放电的发展比较困难,因而击穿电压就较高。

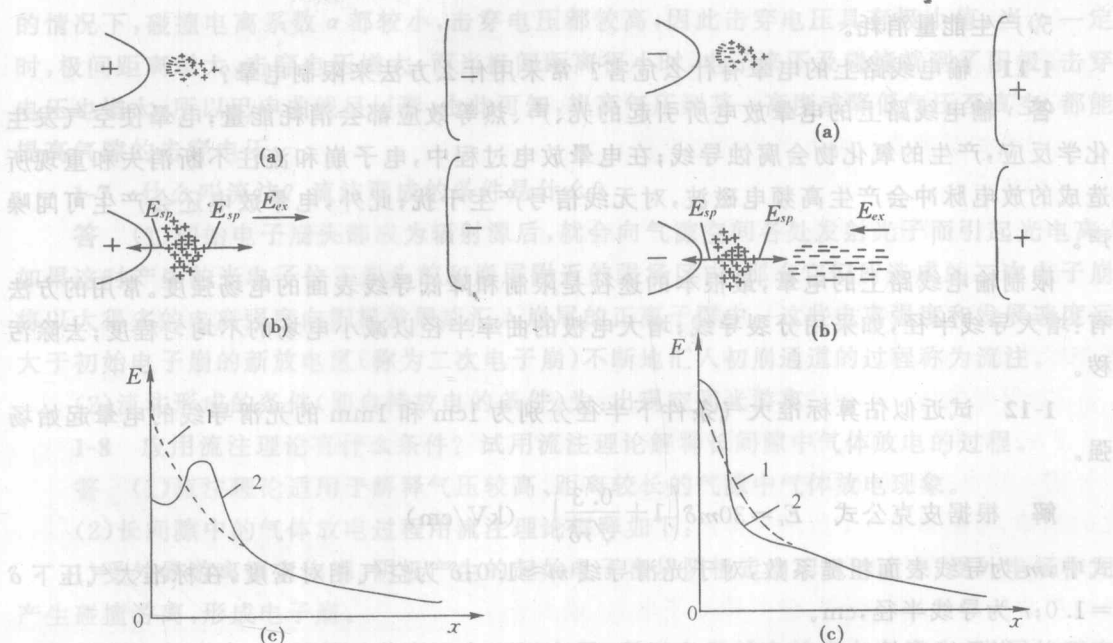


图 1-2 正棒-负极间电场中电荷的移动

 E_{sp} —正空间电荷的电场 E_{ex} —外电场

1—原电场分布 2—有空间电荷时的电场分布

图 1-3 负棒-正极间电场中电荷的移动

 E_{sp} —正空间电荷的电场 E_{ex} —外电场

1—原电场分布 2—有空间电荷时的电场分布

1-14 气体介质在冲击电压作用下的击穿有何特点？冲击电气强度通常用哪些方式来表示？

答 (1) 冲击电压是指幅值瞬间上升到很大, 此后又逐渐衰减变小, 其作用时间为几或几十微秒的电压。

气体介质在冲击电压作用下的击穿存在时延现象。如图 1-4 所示, 当间隙上施加一冲击电压, 电压经过 t_1 时间从零上升到静态击穿电压 U_0 时, 间隙并不能立即击穿, 而是要经过一定的时间间隔至 t_2 时才能击穿。因为在 t_1 时, 气隙中可能未出现有效电子, 从 t_1 开始到气隙中出现第一个有效电子所需的时间为 t_s 。由于有效电子的出现是一个随机事件, 所以 t_s 具有统计性。出现有效电子后, 该电子将引起碰撞游离, 形成电子崩, 发展到流注和主放电, 最后形成气隙的击穿。这个过程所需时间为 t_f , 它也具有统计性。

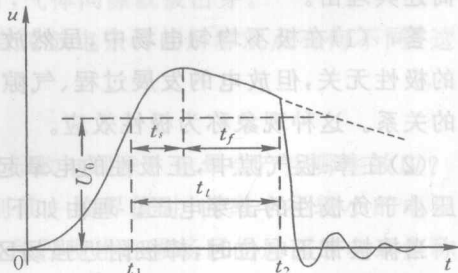


图 1-4 冲击电压作用下空气间隙的击穿电压波形

(2) 冲击电气强度通常用以下两种方法表示:

1) 50% 冲击击穿电压 ($U_{50\%}$): 指在该冲击电压下气隙击穿的概率为 50%。实际上 $U_{50\%}$ 和绝缘的最低冲击击穿电压已相差不远, 故可用 $U_{50\%}$ 来反映绝缘的电气强度。

2) 伏秒特性: 表示该气隙的击穿电压和放电时间的关系。由于气隙的击穿存在时延现象, 所以其冲击击穿特性最好用电压和时间两个参数来表示。

1-15 在什么电压作用下长空气间隙的击穿特性会出现“饱和”现象？为什么？

(请读者练习)

1-16 如何求取伏秒特性曲线?

答 伏秒特性曲线可用实验方法求取:将冲击电压施加于某间隙,并保持其标准的冲击电压波形不变,逐渐升高电压幅值,可得到该间隙的放电电压 U_b 与放电时间 t_b 之间的对应关系,绘出伏秒特性曲线,如图 1-5 所示,图中 U_0 为静态击穿电压。由于间隙放电时间具有统计性,即同一间隙在同一幅值的标准冲击电压波的多次作用下,每次击穿所需的时间不同,在每级电压下,可得到一系列的放电时间,故伏秒特性曲线实际上是以上、下包络线为界的一个带状区域。

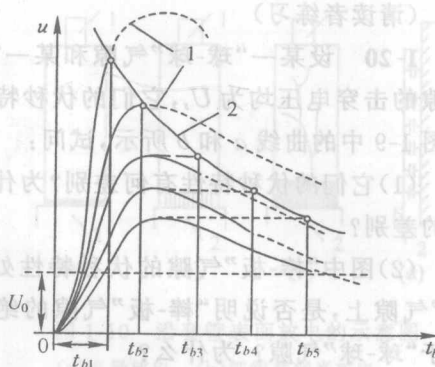


图 1-5 某间隙的伏秒特性

1—冲击电压 2—伏秒特性

1-17 伏秒特性对于选择电气设备的保护设备有何实用意义?

答 伏秒特性在考虑保护设备(如保护间隙或避雷器)与被保护设备(如变压器)的绝缘配合上具有重要意义。保护设备的伏秒特性应该低于被保护设备的伏秒特性。

如图 1-6 和图 1-7 所示, S_1 表示被保护设备绝缘的伏秒特性, S_2 表示与其并联的保护设备的绝缘的伏秒特性。在图 1-6 中, S_2 总是低于 S_1 , 说明在同一过电压作用下, 总是保护设备先动作, 被保护设备能得以保护。在图 1-7 中, S_1 和 S_2 相交, 则在电压作用时间很短时, 保护设备的击穿电压高于被保护设备的绝缘击穿电压, 被保护设备就有可能先被击穿, 保护设备起不到保护作用。

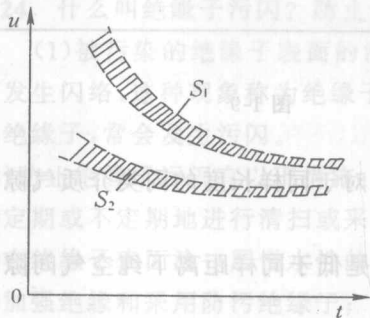


图 1-6 两个间隙伏秒特性, S_2 低于 S_1 时

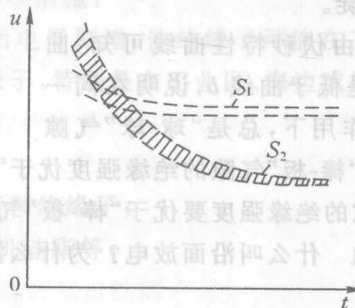


图 1-7 两个间隙伏秒特性, S_2 与 S_1 相交时

1-18 试述在 50% 冲击击穿电压和 50% 伏秒特性两个术语中“50%”所指的意义有何不同? 两个术语之间有无关系?

答 (1) 50% 冲击击穿电压是指在该冲击电压作用下气隙击穿的概率为 50%。50% 伏秒特性是指以 50% 概率放电时间为横坐标(纵坐标仍为电压)连成的曲线, 如图 1-8 所示。50% 概率放电时间的含义是: 在伏秒特性曲线的上、下包络线间选择某一时间数值, 使在每个电压下的多次击穿中放电时间小于该数值的恰占一半。

(2) 两个术语分别应用于不同的场合: $U_{50\%}$ 是不考虑放电时延情况下表征间隙冲击击穿特性, 而 50% 伏秒特性是考虑时延情况下的表征。

1-19 如何确定雷电冲击电压的标准波形和操作冲击电压的标准波形?

(请读者练习)

1-20 设某一“球-球”气隙和某一“棒-板”气隙的击穿电压均为 U_0 ，它们的伏秒特性分别如图 1-9 中的曲线 a 和 b 所示，试问：

(1) 它们的伏秒特性有何差别？为什么有这样的差别？

(2) 图中“棒-板”气隙的伏秒特性处于“球-球”气隙上，是否说明“棒-板”气隙的绝缘强度优于“球-球”气隙？为什么？

答 (1) 它们的伏秒特性的差别是：“球-球”气隙的伏秒特性较平坦，而“棒-板”气隙的伏秒特性较陡。这是因为“球-球”气隙的电场分布为稍不均匀电场，平均击穿场强较高，放电发展较快，放电时延较短，而“棒-板”气隙的电场分布为极不均匀电场，平均击穿场强较低，放电形成时延受电压影响大，放电时延较长且分散性也大，所以其伏秒特性曲线在放电时间还相当大时，便随时间减少而明显上翘，比较陡。

(2) 由伏秒特性曲线可知，曲线 a 总是低于曲线 b ，说明在同一过电压作用下，总是“球-球”气隙先击穿，“棒-板”气隙的绝缘强度优于“球-球”气隙。但对于同样长度的同类介质气隙，则“球-球”气隙的绝缘强度要优于“棒-板”气隙。

1-21 什么叫沿面放电？为什么沿面放电电压总是低于同样距离下纯空气间隙的击穿电压？

答 (1) 沿面放电是指沿着固体绝缘物表面所发生的一种气体放电现象。

(2) 沿着固体绝缘介质表面的气体放电受电场形式、电压波形、间距大小等因素的影响；固体表面高低不平及有毛刺、杂质、水膜等污物，使介质表面电阻不等，影响电场分布的均匀性；介质与电极接触处存在着气隙，气隙中的气体在电场作用下首先放电。以上原因使沿面放电电压低于同一间隙的正常气体放电电压。

1-22 什么是滑闪放电现象？提高套管沿面闪络电压有哪些措施？

答 (1) 图 1-10 为沿套管表面放电的示意图。图中法兰盘与导电杆可看作两个电极，极间是强法线分量的极不均匀电场。由于介质表面电容的影响，沿轴面的电压分布极不均匀，在法兰盘根部的电压梯度最大，即电场强度最大。当外施电压较低时，先在场强较高的法兰盘根部产生电晕；随着电压的升高，电晕放电火花向外延伸，放电区逐渐形成许多平行的细线状火花(辉光放电)。细线状火花中的带电粒子被电场的法线分量紧压在介质表面上，在切

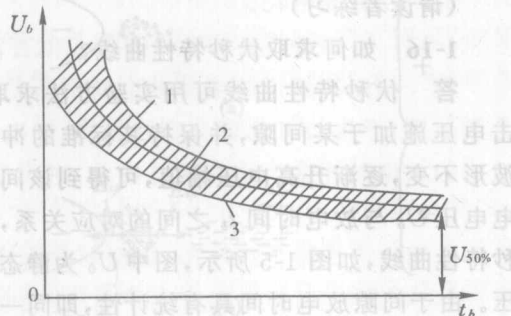


图 1-8 50%伏秒特性

1—上包线 2—50%伏秒特性 3—下包线

$U_{50\%}$ —50%冲击击穿电压

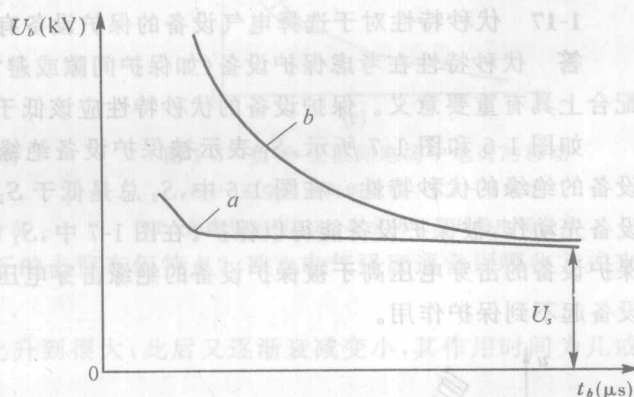


图 1-9

线分量的作用下向另一电极运动,使介质表面局部发热,引起气体热游离,使通道中带电粒子数目剧增,电阻剧降,导致火花通道迅速向前发展,此现象为滑闪放电。

(2)提高套管沿面闪络电压的措施为:

①加大法兰边瓷套的外直径和壁厚,也可采用介电常数较小的介质;

②减小绝缘的表面电阻,如在套管近法兰处涂半导体漆或半导体釉,使电压分布变得均匀。

1-23 为什么湿度增加时,不均匀电场中气体间隙的击穿电压增加,而沿面放电电压反而下降?

答 当湿度增加时,水分子容易吸收电子成为负离子,使间隙中的电子数减少,游离减弱,不容易发展成电子崩和流注,使击穿增加困难,击穿电压增加。对于均匀电场,放电的形成时延短,平均场强又较大,电子运动速度较大,不容易被水分子俘获;对于极不均匀电场,放电的形成时延较长,平均场强较小,电子速度较小,易被水分子俘获,所以均匀电场受湿度变化的影响很小,而在不均匀电场中湿度的变化对击穿电压影响较大。

当湿度增加时,固体介质表面吸附潮气形成水膜,水分子在高压电场作用下分解为离子,离子沿着固体介质表面向电极附近积聚,使电极附近的场强增大,电极附近的空气首先发生游离,从而引起整个介质表面闪络,导致沿面放电电压降低,且与电场均匀性无关。

1-24. 什么叫绝缘子污闪? 防止绝缘子污闪有哪些措施?

答 (1)被污染的绝缘子表面的污秽被润湿,表面电导剧增,使绝缘子可能在工频电压作用下发生闪络,这种现象称为绝缘子污闪。户外绝缘子,特别是在工业区、海边或盐碱地区运行的绝缘子,常会发生污闪。

(2)防止绝缘子污闪有以下措施:

①定期或不定期地进行清扫或采用带电水清洗污秽绝缘子;

②在绝缘子表面涂一层憎水性的防尘材料,如有机硅脂等;

③加强绝缘和采用防污绝缘子;

④采用半导体釉绝缘子。

1-25 悬式绝缘子串上的电压是如何分布的? 为什么? 如何改善其不均匀性?

(请读者练习)

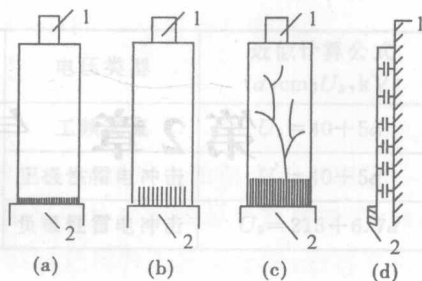


图 1-10 沿套管表面放电的示意图

(a)电晕放电 (b)细线状辉光放电

(c)滑闪放电 (d)套管表面电容等值图

1—导电杆 2—法兰盘

第2章 气体介质的电气强度

2.1 基本内容及知识点

2.1.1 均匀和稍不均匀电场气隙的击穿特性

1. 均匀电场气隙的特点是各处的电场强度均相等, 击穿所需的时间极短, 因而击穿电压对所加电压的类型不敏感, 不存在极性效应, 且击穿电压的分散性很小, 伏秒特性很快就变平, 冲击系数 $\beta=1$, 其击穿特性可用经验公式表示为

$$U_b = 24.55\delta d + 6.66\sqrt{\delta d} \quad (\text{kV}) \quad (2-1.1)$$

式中: U_b ——击穿电压的峰值, kV;

d ——极间距离, cm;

δ ——空气相对密度。

相应的平均击穿场强为

$$E_b = \frac{U_b}{d} = 24.55\delta + 6.66\sqrt{\delta/d} \quad (\text{kV/cm}) \quad (2-1.2)$$

2. 稍不均匀电场气隙的击穿特性与均匀电场相似, 不存在稳定的电晕放电, 一旦有局部放电, 就会导致整个气隙击穿。

2.1.2 极不均匀电场气隙的击穿特性

1. 极不均匀电场气隙的击穿特性常用“棒-棒”和“棒-板”两种典型气隙的击穿特性来描述。在实际工程中, 常用其来估算“导线-导线”气隙和“导线-大地”气隙的击穿电压。

2. 极不均匀电场气隙的特点是: “棒-板”气隙在直流电压和雷电冲击电压下具有明显的极性效应, 在工频交流电压和操作冲击电压下具有“饱和现象”。

3. “棒-棒”气隙和“棒-板”气隙的工频击穿电压(幅值)和雷电冲击 50% 击穿电压经验公式如表 2-1 所示(标准大气条件下, 极间距离 $d > 40\text{cm}$)。

2.1.3 大气条件对气隙击穿特性的影响及其校正

1. 不同气隙在各种电压下的击穿特性均受大气的压力、温度和湿度等条件的影响, 我国规定的标准大气条件为: 压力 $p_0 = 101.3\text{kPa}$ (760mmHg)、温度 $t_0 = 20^\circ\text{C}$ 或 $T_0 = 293\text{K}$ 、绝对湿度 $h_0 = 11\text{g/m}^3$ 。

2. 实际试验条件下的气隙击穿电压 U 与标准大气条件下的击穿电压 U_0 之间可按下式