

# 了解对电源开关电路使用寿命产生恶劣影响 并可能会导致短路击穿的电晕放电

Adphox 株式会社 成泽 鸿

## 1. 前言

电晕放电早已众所周知，但最近突然出现了新问题。是由于随着电子技术的不断进步与节能要求的不断提高，变频器电路迅速普及的缘故。

即使是直流电压或 50/60Hz 的频率，也会进行电晕放电，不过，由于只是每周期几微微库仑的小能量，因此产生的老化作用可以忽略不计。

相对于 50Hz 来说，开关频率为 50kHz 时，会消耗 1000 倍的放电能量。

更简单地说，如果将在 50Hz 下使用寿命为 100 年的部件换在 50kHz 下的相同电压条件下使用时，其使用寿命只有 1 个月。

## 2. 使用变频器的产品都潜伏有电晕放电

“光环”这个词很有亲近感，我们经常都能听到，但如果说起电晕放电，即使是电子技术人员，也几乎没什么兴趣。

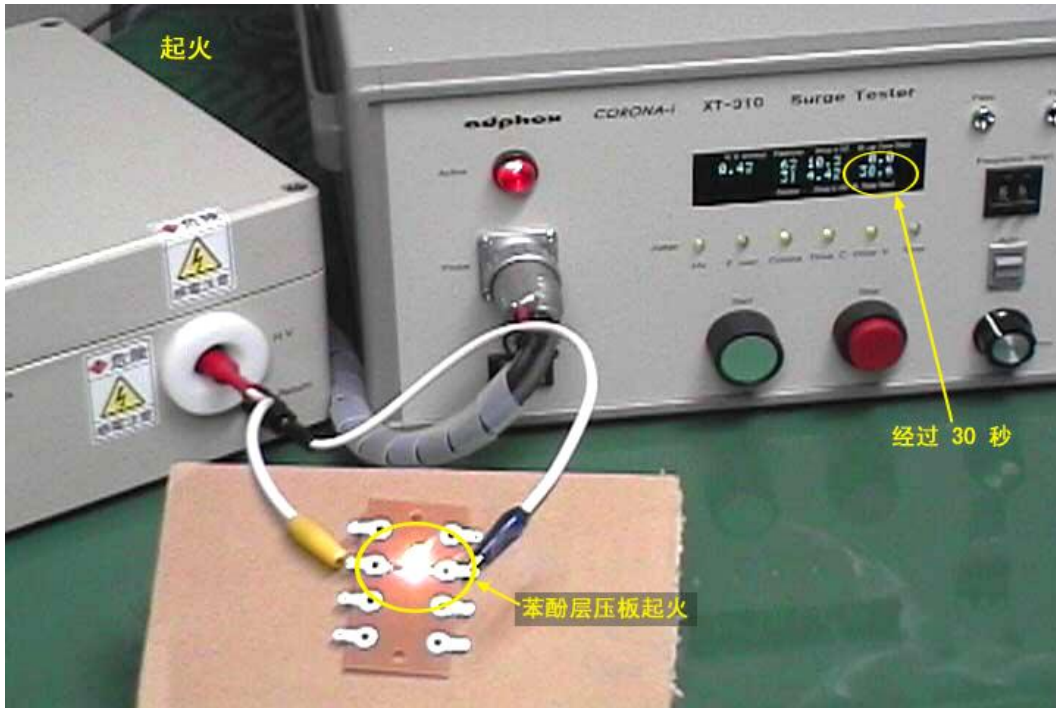
然而，以节能为目标的变频器电路的进步却成为电晕放电的温床。包括液晶电视的背光照用变频器/变压器以及高压印刷电路板、连接器、连接电缆在内，投影仪的光源、数字摄像机的闪光器电路、负离子发生器、高压开关电源、空调、洗衣机、电冰箱的变频马达等的使用寿命，都会受到电晕放电所产生的绝缘老化的影响。

另外，需要注意施加 300V 以上电压的部件，如光电耦合器的输入/输出之间、高压继电器的接点之间、绝缘变压器、印刷电路板以及连接器等。

绝缘体吸湿或表面产生的污损也会导致沿面放电。照片 1 所示为因污损而导致沿面放电的情形。



照片 1 (a)



照片 1 (b)

沿面放电是指如图 1 所示的，在绝缘板的表面上存在 2 个电极时，不通过空气进行放电，而是沿着电介质表面进行放电的现象。

也就是指以低于引起火花放电（等同于开始电晕放电）的电压  $V_s$ （详情后述）进行放电。

沿面放电也是一种电晕放电。是指贴着变压器绕线轴等绝缘体的表面进行放电的现象。

即使变压器高压端子与低压端子之间的距离超过 15mm，我们也会发现沿面放电持续形成轨迹的情况。

绝缘体的介电常数越高，沿面放电电压就越低。另外，带有背后电极时 [图 1 (b)、(c)]，该电压越低，即使电极之间保持相当间隔，也可能产生沿面放电。

虽然一般变压器绕线轴上的端子或印刷电路板上的图案（铜箔）与图 1 (a) 所示的情况相似，但如果印刷电路板上带有铁氧体芯或者图案内侧带有其他图案，则会变为图 1 (b) 与 (c) 所示的状态，放电电压降低。

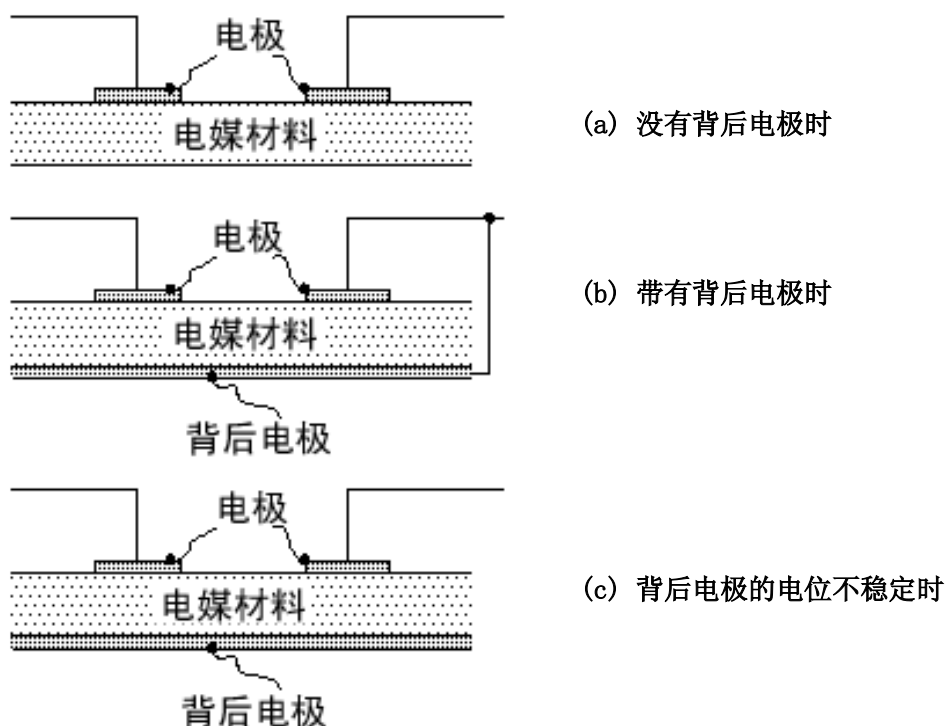


图 1

### 3. 电晕放电与绝缘击穿

电晕放电期间，电子因被阳极吸引而进行加速运动，变为超高速状态之后，逐渐从碰撞的空气分子中释放出电子，变为离子状态。此时，有产生臭氧 ( $O_3$ ) 的作用。

由于臭氧气体具有强氧化力，因此会逐渐使绝缘体氧化，产生老化现象。另外，高速电子或离子也有与绝缘体碰撞，逐渐损耗表面的作用。

另外，由于电晕也会产生热，因此绝缘体会因这些复合作用而逐渐老化，最终导致绝缘击穿，引起火花放电。

但是，电晕放电只是非常微弱的放电。而且几乎所有电路的动作波形都是正常的。因此，在产品检查中均为检查合格状态，无法检测出异常。

另外，虽然电晕放电的能量每周期只有几个微微库仑，但几个月累积起来的绝缘老化有时是非常可怕的。

### 4. 电晕放电的检测方法

由于伴随电晕放电会产生下述现象，因此可利用其中的某种现象检测有无电晕放电。

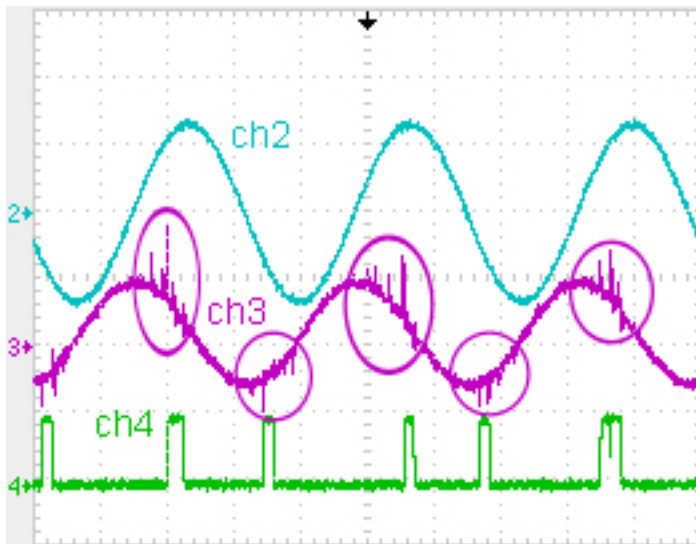


图 2 XT-311 的监视波形

ch2: 施加电压 3.7kVrms, 60kHz

即使有电晕放电，高压波形也正常。即使是 UL3239、DC20kV 耐压的有机硅酮高压电线，在 3.7kVrms 状态下也会产生电晕。

ch3: 电流波形

由于负载为电容，因此电流超前  $90^\circ$  相位。用○圈起的部分为电晕放电电流脉冲。

ch4: 表示检测到电晕的计数器波形

有电晕放电时，会产生计数器脉冲。

ch2 ;4kV/div, ch3 ;5mA/div, ch4 ;5V/div, 5 $\mu$ s/div

#### (1) 产生电晕放电脉冲

电晕放电脉冲是脉宽为数 ns、峰值电流为数 mA 的随机脉冲，频率成分处在数百 kHz~数 GHz 之间，分布在非常宽的频带内。

原来的部分放电测试仪以及本公司的电晕放电测试仪<CORONA-i XT 系列>都能检测出这种脉冲信号。

图 2 所示为电晕放电测试仪 XT-311 的电晕放电电流监视波形的实例。

该测试使用 DC20kV 耐压的有机硅酮包皮电线，在 3.7kVrms 时产生了电晕放电。

#### (2) 产生电波

由于伴随脉冲电流会产生电波辐射，因此可利用天线接收电波来检测有无电晕。

可采用非接触方式进行电晕检测，但需要对准电波的辐射方向与天线的方向。

三菱电机生产的天线已经予以披露（2008 年电气学会全国大会 2-012）。

#### (3) 产生弱光

虽然是非常弱的光，但在暗室中仍可看到。

可确定电晕产生部分的位置点就是最好的观测点，但内部产生的电晕有无法目视确认的缺点。

#### (4) 产生臭氧 (O<sub>3</sub>)

由于会发出特有的臭氧味，因此只要注意，就会感觉到电晕时产生的气味。这在没有测量仪器的年代，是一种检测电晕的有效手段。

不过据说臭氧的氧化力较强，并且可能会导致癌症，因此请注意不要吸入。

#### (5) 有时会发出声音

也有利用声振动检测电晕的方式，但由于电晕也可能不发出声音，因此作为检测方法还欠缺可靠性。

### 5. 忘掉此前的绝缘常识

#### 5-1 DC 耐电压不可信

一般来说，DC 耐电压与电晕放电起始电压之间有很大差异。从图 2 可以看出，即使是 DC20kV 耐压的 UL3239 标准电线，在 60kHz、3.7kVrms 时也会产生电晕。

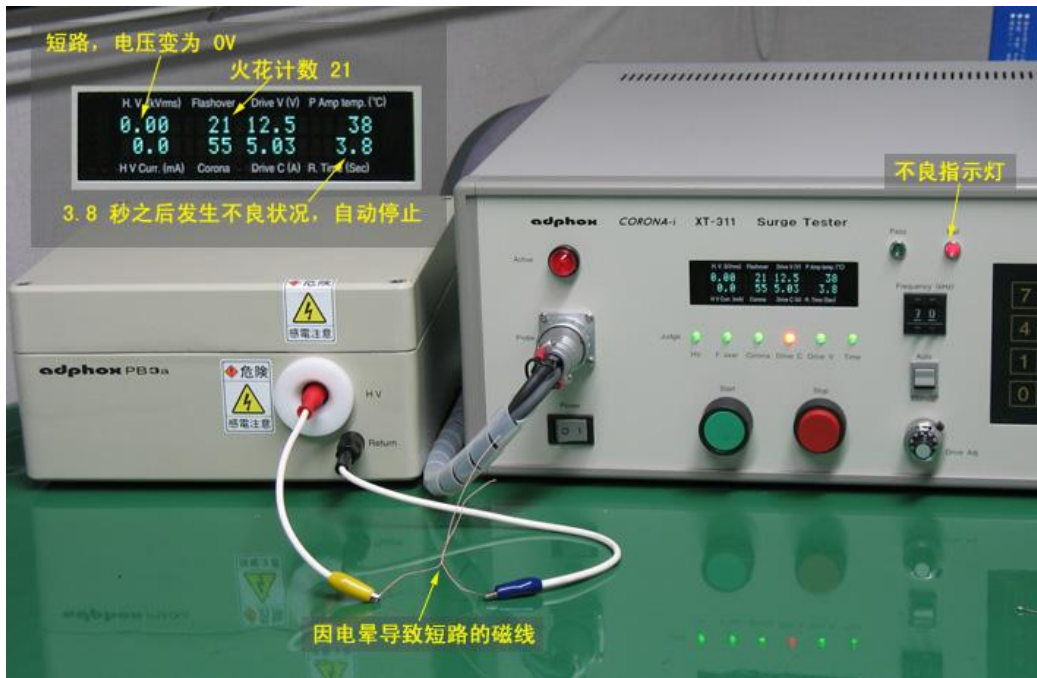
因此 DC 耐电压是不可信的。需事先利用电晕测试仪进行测量。

#### 5-2



照片 2 (a) 测试的情形





照片 2 (b) 3.8 秒之后, 磁线短路

### 5-3 绝缘板不是放电对策

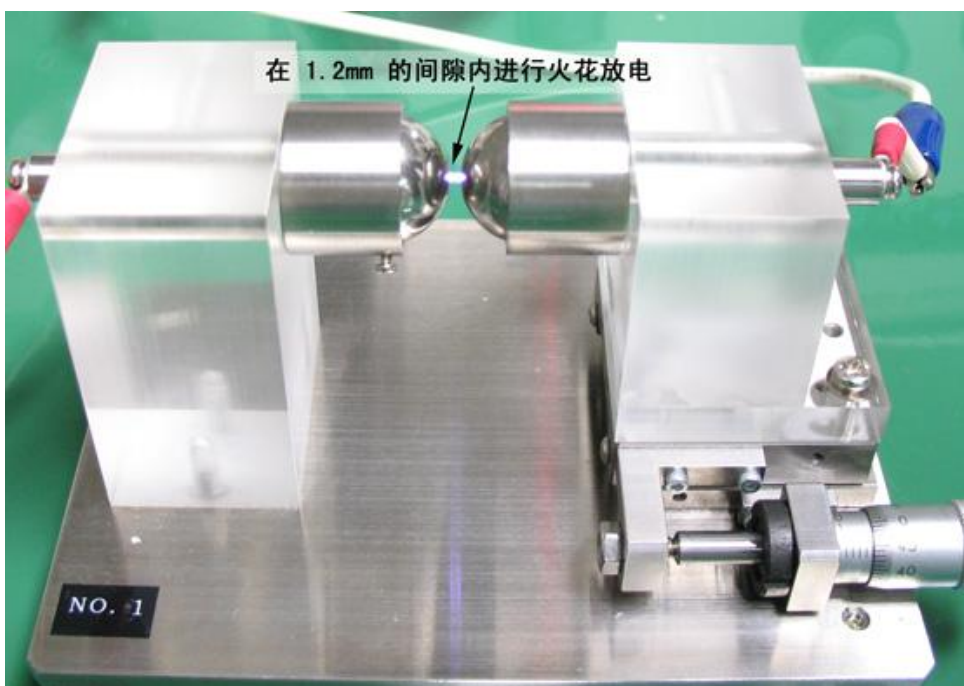
为应对 UL 标准而通常采用的放电对策对于电晕放电是否有效?

照片 3 (a) 所示为在间隔为 1.2 mm 的球间隙中施加 70kHz、6kVrms 引起火花放电的情形。

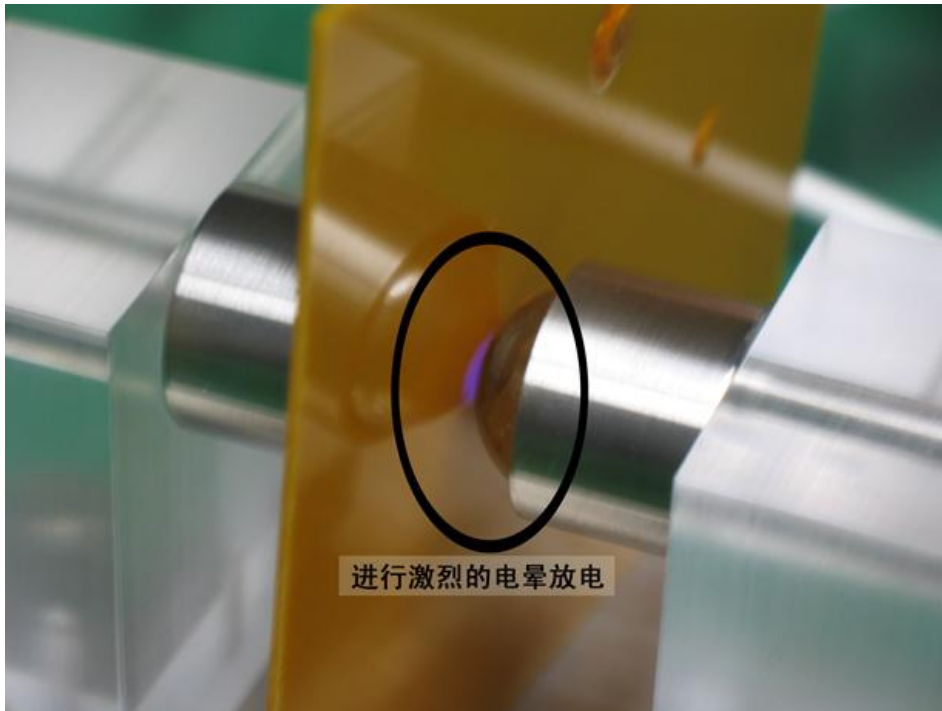
照片 3 (b) 所示为在间隙中放入厚度为 1.0mm 的苯酚层压板以防止放电的情形。苯酚层压板的耐电压为 16kV/mm, 以此作为对应 UL 等的放电对策应该是万全之策了。

火花放电确实停止了。但仔细观察后发现, 电极的头端正发出猛烈的电晕。由于此时的电晕放电非常强烈, 仅仅 10 秒钟之后, 苯酚层压板就被烧成照片 3 (c) 所示的情形。

这就是说, 绝缘板不能用作放电对策。



照片 3 (a) 实验的情形



照片 3 (b) 在间隙中插入厚度为 1.0mm 的苯酚层压板以防止火花放电…



照片 3 (c)  
仅仅 10 秒钟之后，  
苯酚层压板就发生了变形

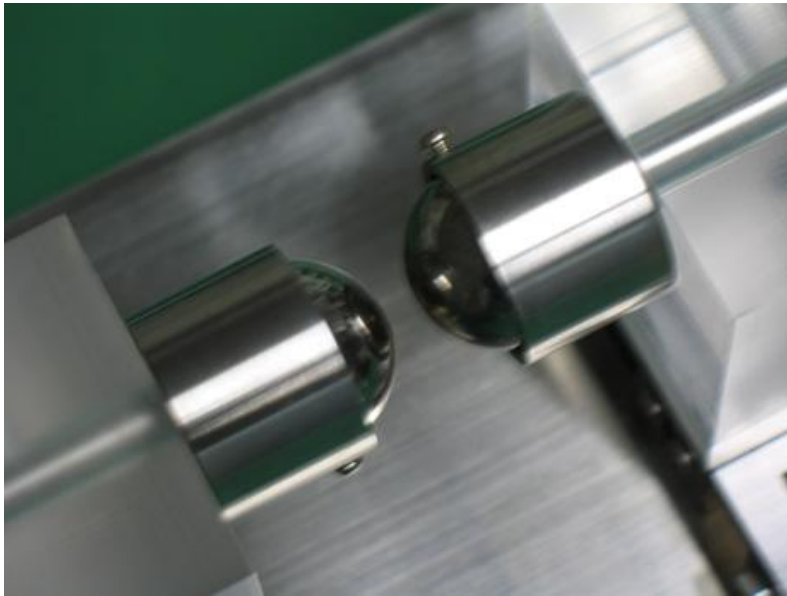
#### 5-4 绝缘体是电介质

将球间隙扩大到 3.2mm，然后施加 70kHz、5kVrms。照片 4 (a)。由于间隙充分扩大，因此没有产生电晕放电，也没有火花放电。

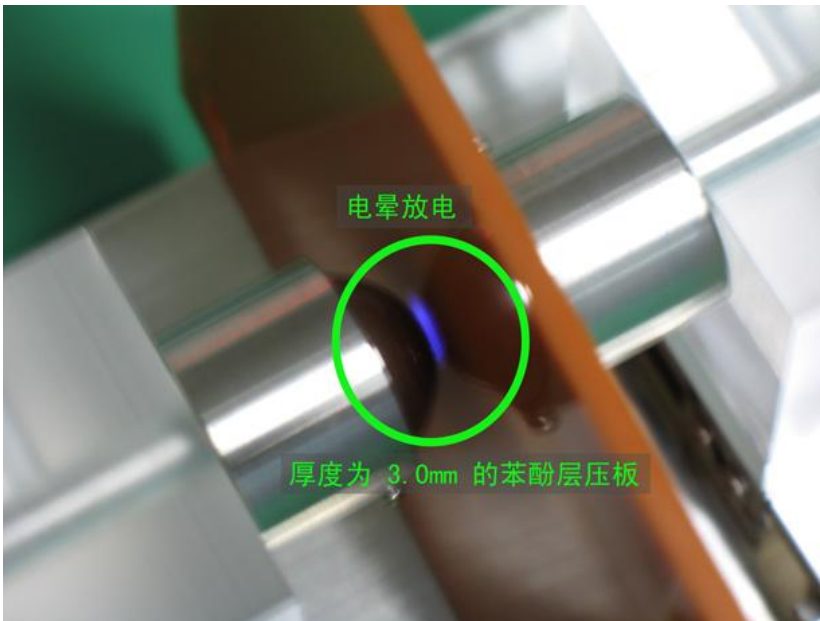
因此，保持这种状态即可对火花与电晕进行充分的绝缘，但为了可靠地进行绝缘，在该间隙中放入了厚度为 3mm 的绝缘板（苯酚层压板）。然而，如照片 4 (b) 所示，却产生了激烈的电晕放电。

本意是用作绝缘板，然而却变成了电晕介质板。30 分钟之后，苯酚层压板被烧成照片 4 (c) 所示的情形。

与其说是绝缘体，还不如说是电介质。设想变压器绕线轴的情况，这会成为非常棘手的问题。



照片 4 (a)  
间隙为 3.2mm 时, 即使  
施加 5kVrms 也不产生  
放电



照片 4 (b)  
如果在本来不放电的间  
隙中放入厚度为  
3.0mm 的绝缘板, 则开  
始电晕放电



照片 4 (c)  
厚度为 3.0mm 的苯酚  
层压板烧焦

## 6. 什么是电晕放电？

### 6-1 真面目为气体电离

像这种来路不明的电晕放电，其真面目与火花放电是相同的，都是气体电离（离子化）。对气体施加超出一定强度的电场就会产生离子化。

向平行平板电极施加电压时，引起火花放电的电压 $V_S$ 在空气状态下由下式表达。

（大木正路：高电压工学 P.57 [ISBN4-8375-0506-6]）

$$V_S = 126pl \div (\log_{10}(pl) + 0.22) \cdots \cdots (1)$$

$V_S$ ：火花放电电压 [V<sub>DC</sub>]

$p$ ：气压 [mmHg]

$l$ ：电极间距 [cm]

在 1 个大气压的空气中，将式 (1) 绘制成图形，则如图 3 所示。电极间充满离子化的空气时，则会引起全部放电（火花放电）。

在电极之间放入绝缘板时，由于电流被绝缘板阻止，因此未引起火花放电，但由于不能阻止电场，因此气体部分产生电离。这种现象称为部分放电，是具有代表性的电晕放电。

这里应注意的是，绝缘板可阻止电流，但不能阻止电场。

反倒是，由于放入绝缘板（电介质）而引起（由于电介质的介电常数比空气大）空气中的电场增强。

这就是 5-4 中引起电晕放电的理由。

式 (1) 中的  $V_S$  为产生火花放电的电压。这是形成空气电离的电场的电压。电离的空气进行全部（火花放电）还是部分放电（电晕放电）取决于电极间的形状。也就是说， $V_S$  与电晕放电起始电压相同。

上面所述为平行平板电极的情况。为针电极时，电场仅集中在顶端部分，因此这里易于引起电晕放电。实际上，是在变压器端子等的顶端部分产生的放电。

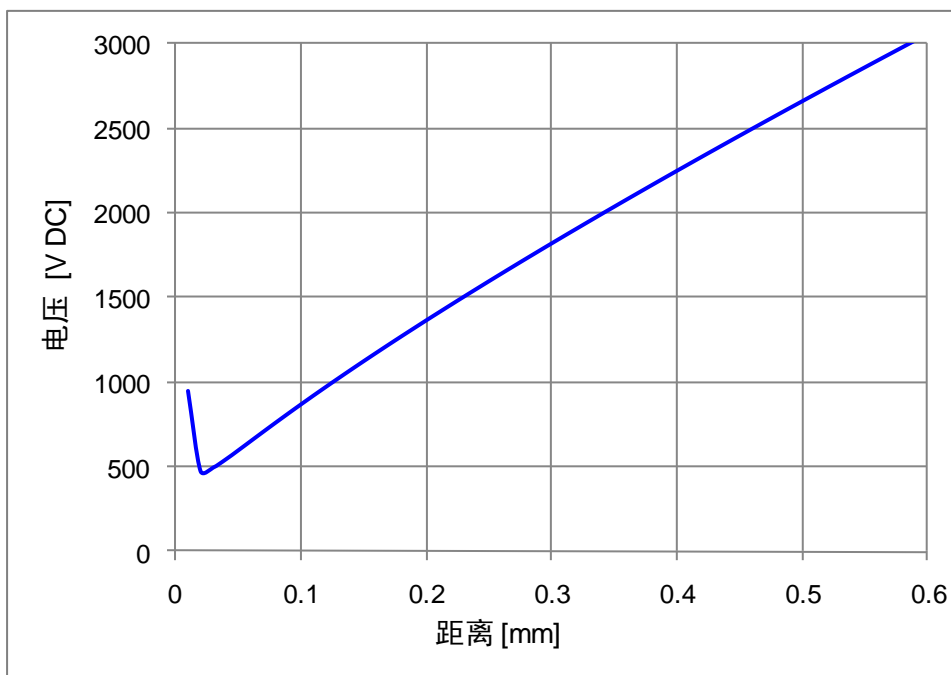


图 3 1 个大气压空气中的火花放电电压



## 6-2 产生原理

利用图 4 说明电晕放电的产生原理。由于紫外线与宇宙线等的作用，空气中会存在很少的离子与游离电子。

因此，如图 4 (a) 所示，如果向电极施加电压，电子则会移向阳极，而阳离子则会移向阴极。

如果增强电场，电子则进行高速运动，每次与空气中的分子碰撞时都会释放出电子，分子就会离子化。电子流入阳极，阳离子流入阴极。这就是电晕放电。

但如图 4 (b) 所示，绝缘板上逐渐带电，空间电场因此而减弱，放电停止。

向电极施加直流电压时，在开关刚刚接通的一瞬间，就会产生如图 4 (a) 所示的电晕放电，但随后变为图 4 (b) 所示的无电晕状态，因此，可以说是几乎没有因电晕而产生的老化现象。

想想将直流电压置为 ON/OFF 状态的情形。如图 4 (c) 所示，即使将施加电压置为 OFF，绝缘板上带有的电荷也不会轻易进行放电，因此，再次置为 ON 时，也不会变为图 4 (a) 所示的状态，而是重复图 4 (c) → (b) → (c) → (b)，很难形成电晕放电。

另外，从这一现象可以看出，重复施加同一极性的电压并不适合于电晕放电的检查。

向电极施加交流电压时，则重复图 4 (a) → (b) → (c) → (d) → (c) → (f)。需要注意的是，从图 4 (c) 切换为图 4 (d) 的瞬间，绝缘板上带有的电子与阳离子会一起涌向电压反转的电极。

因此，电子对碰撞的空气分子进行阳离子化（称为  $\alpha$  效应），另外，阳离子碰撞电极，释放出 2 次电子（称为  $\gamma$  效应）。

从图 4 (f) 切换为图 4 (a) 时，可理解为产生了较大的电晕放电。

## 6-3 与干扰噪声波形的区别

通过上述说明，虽然可以理解，但电晕放电仅在交流电压极性反转的瞬间以及图 4 (a) 及图 4 (d) 所示开始增大电压期间产生。

电压保持一定电压期间，图 4 (b) 及图 4 (e) 中未引起电晕放电；电压降低期间，图 4 (c) 及图 4 (f) 中也未引起电晕放电。

请看图 2。仅在电压波形增大时，才会出现电晕放电电流脉冲。

（电晕脉冲在电流波形的下降部分出现，这是因为负载为电容，电流相位比电压相位超前  $90^\circ$  的缘故）。

从图 2 可以看出，电晕放电电流脉冲形成难以与干扰噪声区分的波形，通过与电压波形对比，可确认是检测到真正的电晕放电电流脉冲，还是错误检测到干扰噪声。

另外，电晕放电电流流向施加在电极上的电压的方向。

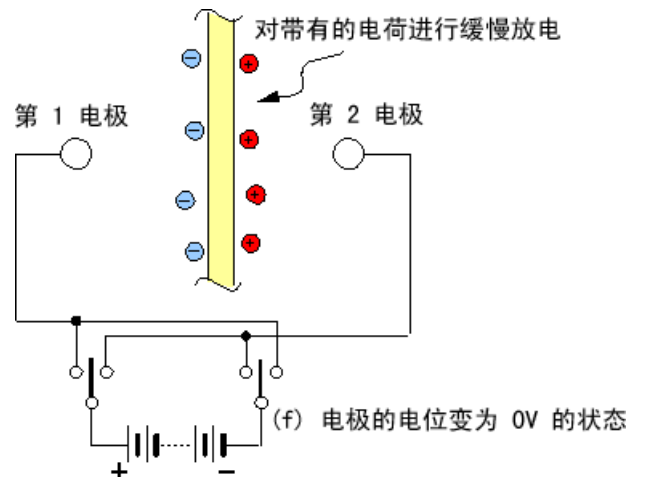
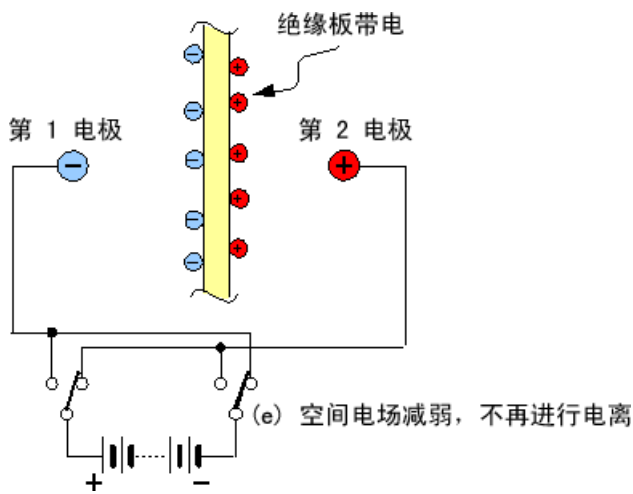
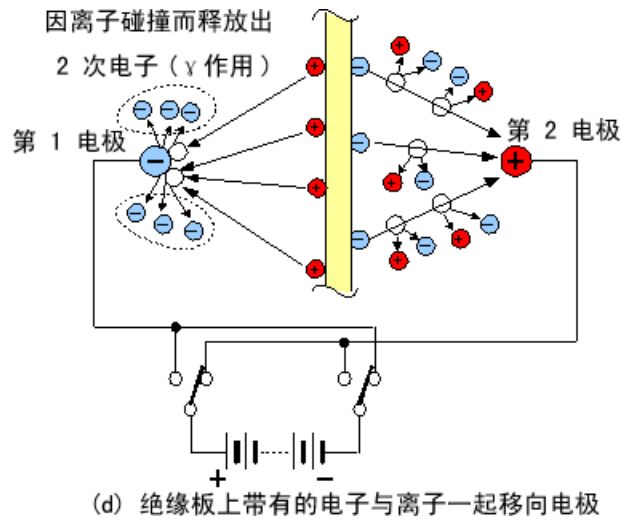
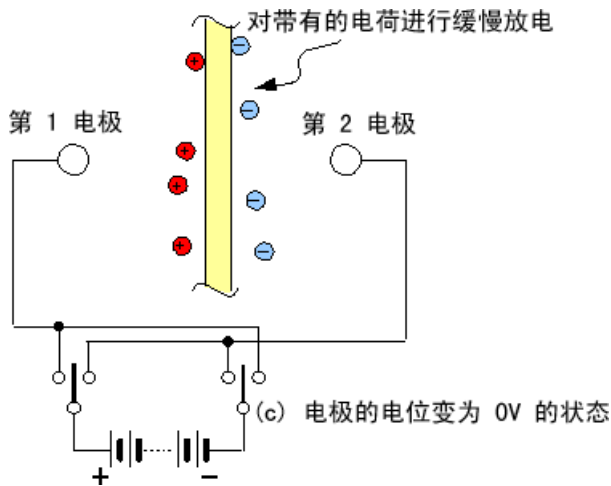
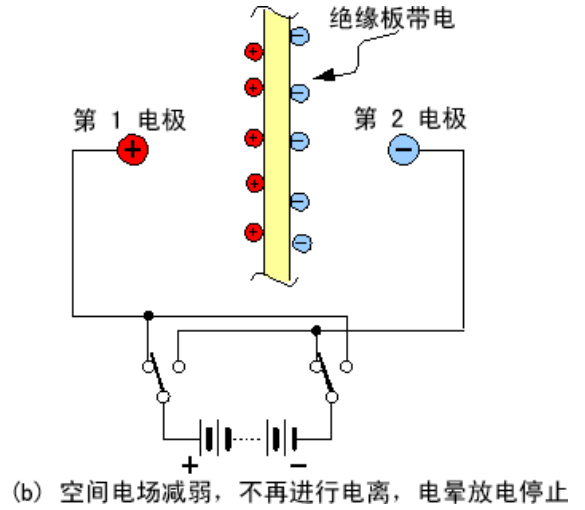
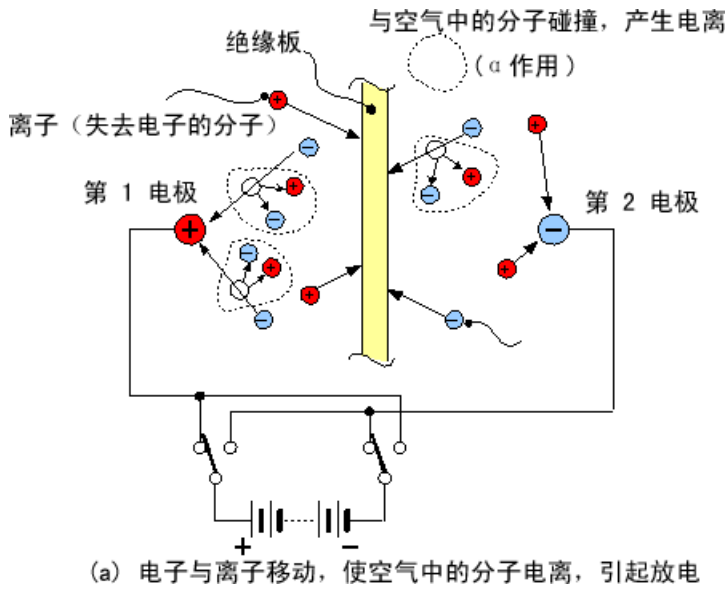
如果电压的极性反转，电流方向也必然反转。但由于干扰噪声与施加电压无关，产生的方向也几乎是正负对称，因此可将电晕放电电流脉冲与噪声分离开来。

## 6-4 电晕放电能量与频率成比例

以图 4 (a) ~ 图 4 (f) 为 1 个周期，反复施加交流电压。每 1 周期产生的电晕放电能量都相同，但在 50Hz 下存在每秒 50 次的电晕放电周期，因此，50kHz 时的放电周期为每秒 50,000 次。

如果电晕导致的绝缘体老化与放电能量成比例，将在 50Hz 下使用寿命为 100 年的部件换在 50kHz 下使用时，使用寿命只有 1 个月。因此，越是高频，越要注意电晕放电。

图 4 电晕放电的产生原理



## 7. 磁线的耐电晕使用寿命测试

磁线的耐电晕使用寿命利用**照片 3** 所示的双绞线进行测试。

**表 1** 所示为以高出电晕起始电压约 20% 的电压进行测试的情况。虽然电晕起始电压几乎与频率无关，但结果表明，频率越高使用寿命越短。

**表 1 磁线的耐电晕使用寿命**

测试频率	电晕起始电压	寿命（测试电压 550Vrms）
17kHz	470Vrms	638 秒
35kHz	480Vrms	342 秒
70kHz	480Vrms	156 秒

## 8. 电晕放电的对策

电晕放电是强电场导致的气体离子化现象。因此，不会引起强电场的设计是至关重要的。以式 (1) 为基本，但该式是关于平行平板电极的公式。由于实际的电极形状为曲线形的，产生的电场也不相同，因此需要以式 (1) 为基本作延伸推断。

首先，从利用电晕放电测试仪确认产生电晕放电的部分开始。然后推测其理由，并采取相应的应对措施。主要对策方法如下所示。

### 对策 1

电极间距最低需要满足式 (1) 的要求。电极间存在电介质时，周围的电场强度会因介电常数效应而上升，敬请注意。另外，芯体具有导电性时，经常会发现经由芯体进行电晕放电的现象。

为 EE 芯体时，有效的方法是将高电压部分的芯体与低电压部分的芯体分离开来并进行绝缘，或增大高电压部分的线圈与芯体之间的距离。

### 对策 2

如果电极头端比较尖，电场则会集中在该头端上，从而引起电晕放电。端子头端与底座之间产生电晕放电时，即使将绝缘板放在与底座之间的位置上，也无法阻止电晕产生（理由已在前面说明），因此，需要切掉端子头端或扩大与底座之间的安装间隔。

### 对策 3

电晕放电是由气体的离子化引起的。因此，如果没有气体，就不会产生放电。

如果将有机硅酮与环氧树脂进行真空含浸处理，则非常有效。然而，只要是内部残留有很少的气泡（空隙），该部分就会产生电晕放电，因此考虑易于排出空气的结构是至关重要的。

通过**图 5** 所示则易于理解，将真空度置为 1/10 大气压，但即使置为 1/100 大气压或 1/1000 大气压，这种较差的结构也会形成空隙。请在芯体与绕线轴的形状方面多下功夫，以免空气积存。

另外，如果线圈的卷绕起点、卷绕终点与端子之间的距离过长，光是引出线部分就会形成高电场，这可能会导致电晕放电。在这种局部性情况下，仅将该部分的有机硅酮进行封装即可。

#### 对策 4

沿面放电也是一种电晕放电，虽然可利用电晕测试仪进行检测，但遗憾的是，目前尚未发现有关适用对策的技术说明。

不论插在绕线轴（电介质）上的针之间是否为 20mm 以上的间距，只要电压达到 2kVrms 左右，就会产生沿面放电，因此，必须利用测试仪进行测试。

UL 的对策中经常采用苯酚层压板（绝缘胶木），但由于给人的感觉是防止沿面放电方面较弱，因此，建议测量夹具等使用聚四氟乙烯纤维或聚缩醛树脂。

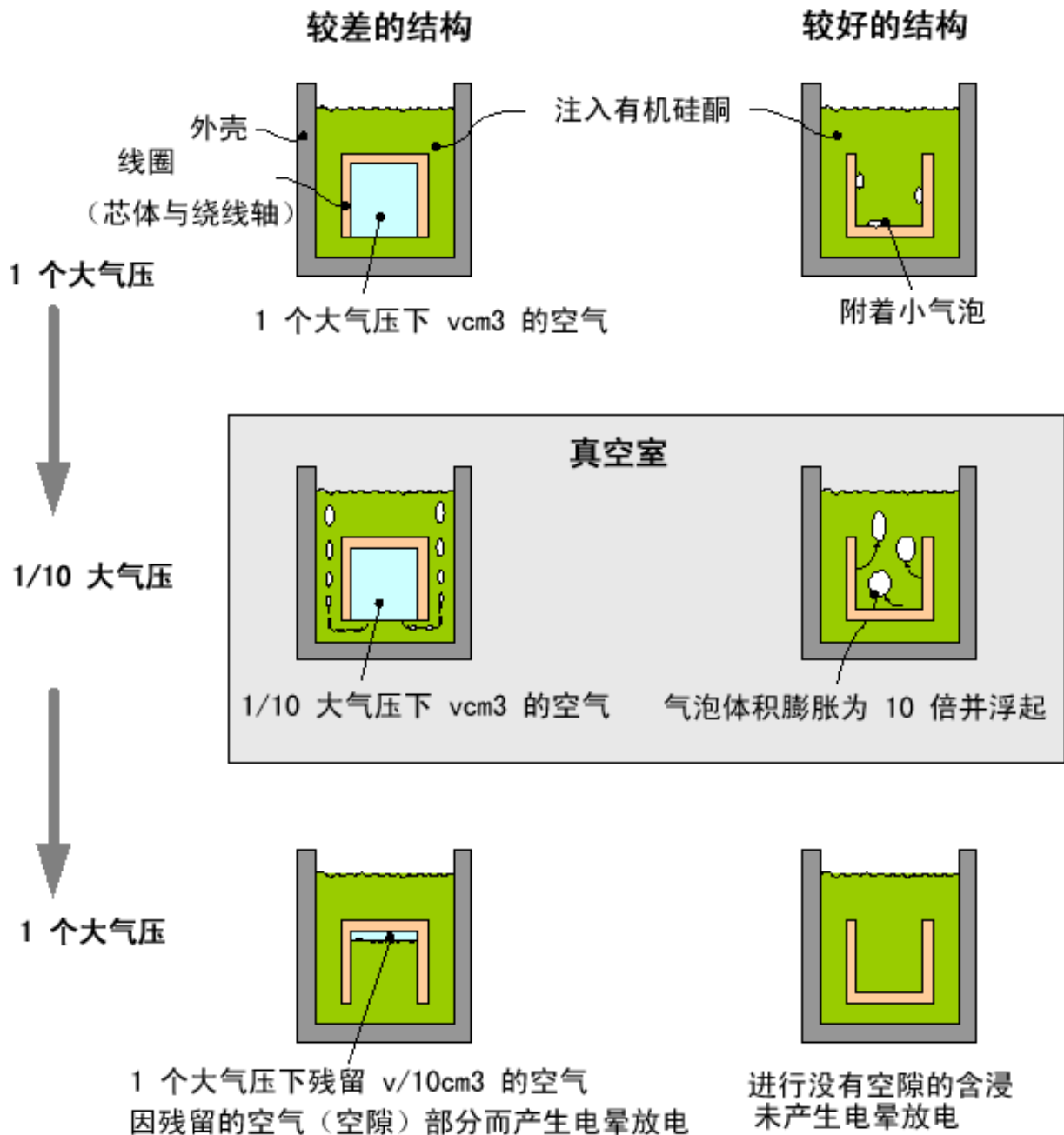


图 5 真空含浸时，应考虑易于排出空气的结构