

## 模块电源可靠性应用技术专题系列---绝缘耐压的正确理解与测试

对于模块电源的绝缘耐压和绝缘阻抗安规测试，很多人都有所了解和耳闻，那么为什么要进行电气安规测试呢？通常得到的回答是“因为安规标准有要求啊”，那么安规标准为什么要要求呢？只有深入了解电气安规的背景，才能发现它背后所隐含的责任和意义。

模块电源做安规测试的意义之一是避免潜在的电气伤害，造成电气伤害的因素有很多种，其中最主要的是电流经过人体所造成的电气伤害。此类电气伤害对人类具有直接的影响性。本文从绝缘的定义、绝缘的分类、绝缘耐压的测试、绝缘耐压与绝缘阻抗的差异等方面深入的介绍，帮助用户在选择应用和模块电源时，正确的理解绝缘耐压和绝缘耐压测试，确保模块电源应用的可靠性和安全性。

### 1、何为电气伤害？

造成电气伤害的因素有很多种，其中最主要的是电流经过人体所造成的电气伤害。此类电气伤害对人类具有直接的影响性，伤害的严重性依电能的大小、湿度、接触面积等有所不同。

电流流过人体会引起人体的生理反应，反应的强烈程度取决于电流的大小、持续时间、通过人体的路径等。一般只需要 0.5mA 的电流，就能对健康的人体产生影响，并且可能造成间接性危害。更大的电流可能会对人体造成直接伤害，如烧伤或心室的纤维性颤动。

一般而言，在干燥的情况下，小于 40V 峰值或 60V 直流的电压，通常可视为没有危险性的电压。但是，对使用时必须触碰的或者是需要用手操作的裸露零件等都应该接到保护地或者是将其妥善地处理。

为了防止人体(操作人员或者维修人员)受到电击，需要在模块电源设计中，遵守相关

行业安规设计标准，如 IEC60950，国标 G4943 等；在这些标准中，对电源的不同位置的做了绝缘要求，来保证操作人员的安全。

## 2、电气伤害的主要测试有哪些？

**耐压测试(Dielectric Withstand Hi-pot Test)**: 耐压测试在产品的电源端与地端电路上，施以一高压并量测其崩溃状态。

**绝缘电阻测试(Isolation Resistance Test)**: 量测产品电气绝缘状态。

**漏电流测试(Leakage Current Test)**: 检测 AC/DC 电源流至地端的漏电流是否超过标准。

**接地保护测试(Protective Ground)**: 检测可接触之金属机构等部位是否有确实接地。

## 3、什么是绝缘？

绝缘，物理学名词，指使用不导电的物质将带电体隔离或包裹起来，以对触电起保护作用的一种安全措施。良好的绝缘对于保证电气设备与线路的安全运行，防止人身触电事故的发生是最基本的和最可靠的手段。绝缘通常可分为气体绝缘、液体绝缘和固体绝缘三类。在实际应用中，固体绝缘仍是最为广泛使用，且最为可靠的一种绝缘物质。

有强电作用下，绝缘物质可能被击穿而丧失其绝缘性能。在上述三种绝缘物质中，气体绝缘物质被击穿后，一旦去掉外界因素（强电场）后即可自行恢复其固有的电气绝缘性能；而固体绝缘物质被击穿以后，则不可逆地完全丧失了其电气绝缘性能。因此，电气线路与设备的绝缘选择必须与电压等级相配合，而且须与使用环境及运行条件相适应，以保证绝缘的安全作用。

**功能绝缘(Functional Insulation)**: 功能绝缘的目的，只在维持产品能够正常操作，并不具备任何安全上的功能。此类绝缘通常使用于同一线路中的两导体之间，即没有安全隔离要求的部分。例如 PWB 上的绿油，电解电容的塑胶外壳都是功能绝缘。

**基本绝缘(Basic Insulation)**: 基本绝缘的目的在于为防电击提供一个基本的保护, 以避免触电的危险, 不过此类绝缘只能保证正常状态下的安全, 却无法保障有瞬变电压出现时安全, 换言之, 当瞬变电压发生时, 基本绝缘便会有崩溃的可能。

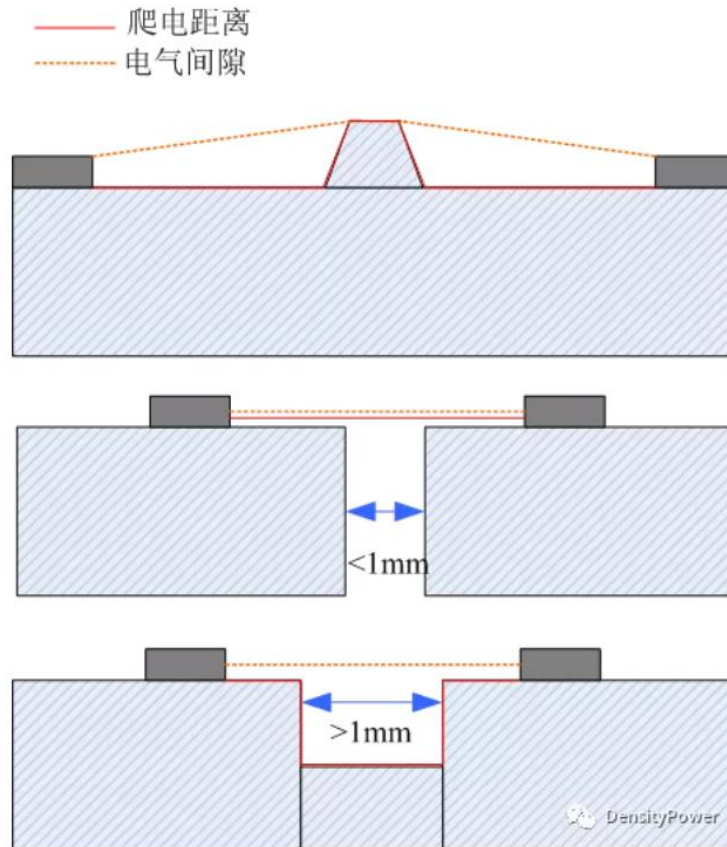
**补充绝缘(Supplementary Insulation)**: 在基本绝缘以外, 再附加的绝缘, 目的是当基本绝缘失效时, 提供另一层的绝缘功能。一般来说, 对补充绝缘的要求和基本绝缘是一样的, 因此两者之间的角色是可以互换的。例如一条电缆有两层的绝缘, 我们可以说内层是基本绝缘, 外层是补充绝缘, 而反过来说也是可以的。

**双重绝缘(Double Insulation)**: 这是指包含基本绝缘和补充绝缘两者的绝缘。只要使用的场所正确, 这种绝缘可以提供足够的安全保护, 不会有触电的危险。

**加强绝缘(Reinforce Insulation)**: 其提供的绝缘程度同于双重绝缘, 但和双重绝缘不同之处在于, 其不易被划分为基本绝缘和补充绝缘两部分, 它可能是个一体成形的隔离物, 或是由许多隔离物构成的绝缘。

**电气间隙**: 是指两个导电零部件之间或导电零部件与设备界面之间测得的最短空间距离。此距离的量测并不限制采用何种途径。例如某产品使用绝缘材料当外壳, 此外壳的开口或缝隙处都应当成导体考虑, 就如有层铝箔铺于其上, 依然须和内部的危险部件保持一定的距离, 因为这些地方都是易于被使用者触及的地方。

**爬电距离**: 是指沿绝缘表面测得的两个导电零部件之间或导电零部件与设备防护界面之间的最短距离。一般而言, 如果不是污染等级为 1, 爬电距离通常要大于电气间隙。电气间隙与爬电距离与工作电压、污染等级、海拔高度、绝缘材料等有关。PCB 上的实际设计电气间隙与爬电距离的要求, 需要根据绝缘等级要求、工作电压、污染等级、海拔高度、绝缘材料等具体细节, 按标准要求进行查表计算。



#### 4、什么是绝缘耐压测试？

耐压测试(Dielectric Voltage Withstand Test)也就是俗称的高压测试(High Voltage Test), 通过对隔离电源的原副边、原副边对外壳或地施加一个高于其额定值的电压并维持一定时间来判定设备的绝缘材料和空间距离是否符合要求的测试, 是检验隔离电压承受过电压能力的主要方法之一。

耐压测试或高压测试(HI-POT 测试), 是用来验证电源产品的质量和电气安全特性(如 JSI、CSA、BSI、UL、IEC、TUV 等国际安全机构所要求的标准)的一种 100%的生产线测试, 也是最多人知道的和经常执行的生产线安全测试。HI-POT 测试是确定电子绝缘材料足以抵抗瞬间高电压的一个非破坏性的测试, 是适用于所有设备为保证绝缘材料已足够的一个高压测试。进行 HIPOT 测试的其它原因是, 它可以查出可能的瑕疵, 譬如在制造过程期间造成的漏电距离和电气间隙不够。

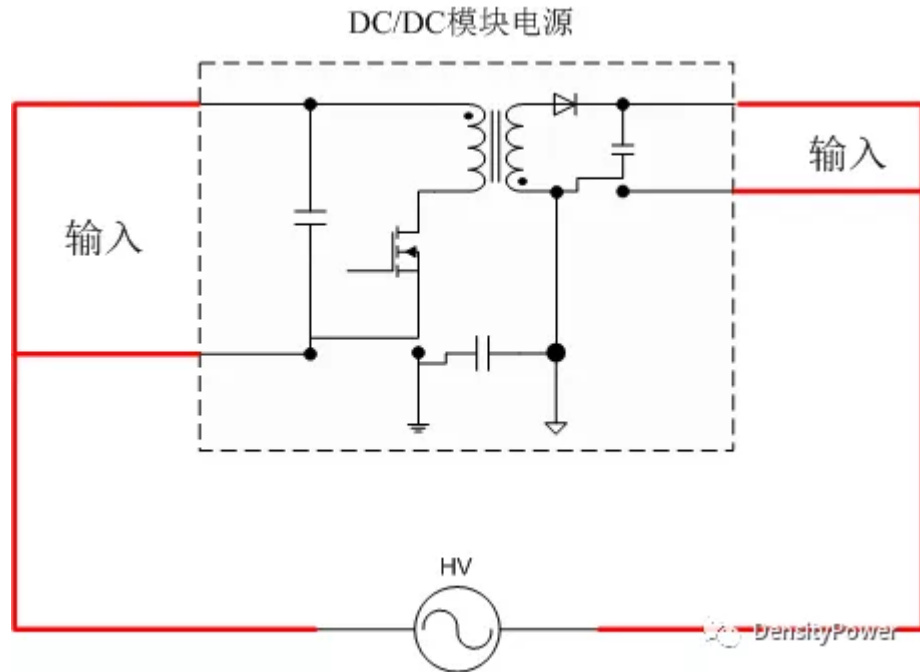
## 5、为什么要测试绝缘耐压？

正常情况下，交流电力系统中的电压波形是正弦波，直流供电系统的电压是稳定的直流电源。但是电力系统在运行中由于雷击、操作、故障或电气设备的参数配合不当等原因，引起系统中某些部分的电压突然升高，大大超过其额定电压，这就是过电压。

过电压按其发生的原因可分为两大类，一类是由于直接雷击或雷电感应而引起的过电压，称为外部过电压。雷电冲击电流和冲击电压的幅值都很大，而且持续时间很短，破坏性极大。另一类是因为电力系统内部的能量转换或参数变化引起的，例如切合空载线路，切断空载变压器，系统内发生单相弧光接地等，称为内部过电压。内部过电压是确定电力系统中各种电气设备正常绝缘水平的主要依据。也就是说，产品的绝缘结构的设计不但要考虑额定电压而且要考虑产品使用环境的内部过电压。耐压测试就是检测产品绝缘结构是否能够承受电力系统的内部过电压。

## 6、如何进行绝缘耐压测试？

耐压测试仪主要是由交（直）流高压电源，定时控制器，检测电路，指示电路和报警电路组成。基本工作原理是：将被测隔离电源在耐压测试仪输出的试验高电压下产生的漏电流与预置的判定电流比较，若检出的漏电流小于预设定值，则被测电源通过测试，当检出的漏电流大于判定电流时，则被测电源绝缘耐压测试失效。对于绝缘耐压测试回路，请参考下图：



## 7、绝缘耐压测试规格怎么定义？

耐压测试分工频交流耐压试验和直流耐压试验两种。工频交流耐压试验其试验电压为被试设备额定电压的一倍多至数倍，不低于 1000V。根据一般的安规标准，绝缘耐压的测试时间为 1 分钟。

耐压测试会针对绝缘状况而施以不同电压：

- ✧ 在基本绝缘 (Basic insulation) 下为 2 倍产品工作电压+1000V，所以工作电压为 220V 时，即是打  $220 \times 2 + 1000 = 1440V$ ；
- ✧ 在加强绝缘 (Reinforced insulation) 下为 4 倍产品工作电压+2000V，所以工作电压为 220V 时，即是打  $220 \times 4 + 2000 = 2880V$ 。

由于在生产线上要进行大量的产品耐电测试，测试时间通常降低到只有几秒钟。有一个典型实用的原则，当测试时间降到只有 1~2 秒的情况下，测试电压必须增加 10~20%，以保证短时间测试时绝缘的可靠性。



注意：模块电源的绝缘特性是由绝缘材料、空气间隙、爬电距离等因素决定的，特别是固体绝缘材料，绝缘测试对其绝缘特性有一定的影响，建议正常应用时，避免重复多次对模块电源进行绝缘耐压测试，重复多次绝缘耐压测试会对模块电源的绝缘性能造成一定的下降。

## 8、什么是绝缘耐压测试之漏电流？

绝缘体是不导电的，但实际上几乎没有什么一种绝缘材料是绝对不导电的。任何一种绝缘材料，在其两端施加电压，总会有一定电流通过，这种电流的有功分量叫做泄漏电流，而这种现象也叫做绝缘体的泄漏。对于电源的绝缘耐压测试，泄漏电流是指在无故障施加电压的情况下，电气中带相互绝缘的金属零件之间，或带电零件与接地零件之间，通过其周围介质或绝缘表面所形成的电流称为泄漏电流。泄漏电流包括两部分，一部分是通过绝缘电阻的传导电流  $I_1$ ；另一部分是通过分布电容的位移电流  $I_2$ ，后者容抗为  $X_C = 1/2\pi fC$  与电源频率成反比，分布电容电流随频率升高而增加，所以泄漏电流随电源频率升高而增加。

## 9、选用直流耐压还是交流耐压进行测试？

耐压测试有两种：AC 耐压测试和 DC 耐压测试。由于绝缘材料的特性决定了交流和直流电压的击穿机理不同。大多数绝缘材料和系统都包含了一系列不同的介质。当对之施加交流试验电压时，电压将按材料的介电常数和尺寸等参数的比例来分配电压。而直流电压只按材料的电阻的比例来分配电压。而且实际上，绝缘结构发生击穿，往往是电击穿，热击穿，放电等多种形式同时存在，很难截然分开。而交流电压比直流电压增加了热击穿的可能性。所以，业界一般认为交流耐压测试比直流耐压测试更加严格。

**AC 优点：**通常 AC 耐压测试比 DC 耐压测试更容易获得安全机构的接受。主要理由是大多数被测物品将工作于 AC 电压之下，而且 AC 耐压测试提供两种极性交替给绝缘施

加压力的优点，更接近产品在实际使用中会碰到的压力。由于 AC 测试不会给容性负载充电，从开始施加电压到测试结束电流读数保持一致。因此，由于不存在监视电流读数所要求的稳定化问题，也就不需要逐渐升高电压。这意味着，除非被测产品感应到突然施加的电压，操作员可以立即施加全电压并读出电流而不用等待。由于 AC 电压不会给负载充电，在测试之后用不着给被测设备放电。

**AC 缺点：**在测试容性负载时，总电流由电抗性电流和泄漏电流组成。当电抗性电流量远大于真实泄漏电流时，可能难于测出有过量泄漏电流的产品。在测试大容性负载时，所需要的总电流远大于泄漏电流本身。由于操作员面对更大的电流，这可能是一个更大的危险。

**DC 优点：**当被测设备(DUT)充满了电，流过的就只有真正的泄漏电流。这使 DC 耐压测试器能够清楚地显示出被测产品的真正泄漏电流。由于充电电流是短暂的，DC 耐压测试器的功率要求通常可以比用来测试同样产品的 AC 耐压测试器的功率要求小得多。

**DC 缺点：**由于 DC 耐压测试的确给被测物(DUT)充电，为了消除在耐压测试后处置被测物(DUT)之操作员触电的危险，在测试后就必须给该被测物(DUT)放电。DC 测试会对电容充电。如果 DUT 实际上用交流电源的话，DC 法就没有模拟实际情况。

实际操作中，在进行耐压测试时，如果要使用直流做耐压测试时，试验电压要求比交流工频的试验电压高。一般直流耐压测试的试验电压是通过把交流试验电压的有效值乘以一个常数 K。通过对比测试，如：电线电缆产品，常数 K 选用 3；航空工业，常数 K 选用 1.6 至 1.7；CSA 对民用产品一般使用 1.414。

综上所述，直流耐压试验和工频交流耐压试验都能有效地发现绝缘缺陷，但各有特点，因此两种方法不能相互代替，必要时，应同时进行，相互补充。



## 10、绝缘阻抗与绝缘耐压的差异？

什么是绝缘阻抗？

我们知道，绝缘阻抗测试的电压一般是直流 500V 或者 1000V，这相当于测试一个直流耐压测试，仪器在这个电压下面，量测出一个电流值，然后通过内部的线路计算，将这个电流放大，最后通过欧姆定律： $R = U/I$ ，其中 U 就是测试的 500V 或者 1000V，而 I 就是在这个电压下的漏电流，根据耐压测试经验我们可以了解到，这个电流都是非常小的，一般都是小于  $1\mu A$ 。

由上面可以看出，绝缘阻抗测试的原理，和耐压测试完全一样，只不过是欧姆定律的另外表述，耐压测试使用漏电流来表述被测物的绝缘性能，而绝缘阻抗则是用电阻。

绝缘阻抗测试为非破坏试验，且能侦测绝缘是否良好，在某些规范中，是先做绝缘阻抗测试再进行耐压测试，而绝缘阻抗测试无法通过时，往往耐压测试也无法通过。

## 11、绝缘耐压与雷击浪涌的差异？

浪涌是指超出正常电压的瞬间过电压，从本质上讲，浪涌就是发生在仅仅百万分之一秒的一种剧烈脉冲，浪涌电压的产生原因有两个，一个是雷电，另一个是电网上大型负荷接通或断开(包括补偿电容的投切)时产生的。

浪涌电压保护的基本要求是：在电路没有干扰时，不影响设备的正常运行；工作电路中一旦有浪电压侵入时，将浪涌电压抑制在设备可接受的阈值范围内，保证设备有受到浪涌干扰时的正常运行，并且防止电路元器件和系统的损坏。从电路联接关系的角度来看，保护的方式有两种，一是将设备从受干扰的工作电路中断开，二是给浪涌电压提供泄放通道，最终使浪涌电压不作用到被保护的设备上。由于保护器件在系统正常工作和浪涌干扰时所表现出的电气性能完全不同，保护器件的伏安特性必须具有强烈的非线性特征。

因此可发现，浪涌保护是指保护设备不被瞬间的过电压或过电流所损坏，而隔离耐压是指两个没有直接电气连接的系统所能承受的最高绝缘电压。

**下期预告：**模块电源可靠性应用技术专题系列---如何正确看待电源模块的热性能。敬请期待.....

### 思考题：

如轨道交通应用的模块电源，根据 EN50155 或 GB/T 25119 规定，对于 110VDC 输入的模块电源，请绝缘耐压要求是 1500VAC，但是一般要求通过的雷击浪涌等级为 Level 4：共模 4KV，差模 2KV。那请问，选择 1500VAC 绝缘耐压的模块电源，能满足雷击浪涌的要求吗？在测试 Level4 的雷击浪涌时，绝缘会被击穿吗？



扫一扫关注我们，  
更多精彩内容等着您！