

# 如何顺利通过电磁兼容试验

## 一 认证检测中常见的电磁兼容问题与对策

### 1. 概述

#### 1.1 什么时候需要电磁兼容整改及对策

对一个电子、电气产品来说,在设计阶段就应该考虑其电磁兼容性,这样可以将产品在生产阶段出现电磁兼容问题的可能性减少到一个较低的程度。但其是否满足要求,最终要通过电磁兼容测试检验其电磁兼容标准的符合性。

由于电磁兼容的复杂性,即使对一个电磁兼容设计问题考虑得比较周全得产品,在设计制造过程中,难免出现一些电磁干扰的因素,造成最终电磁兼容测试不合格。在电磁兼容测试中,这种情况还是比较常见的。

当然,对产品定型前的电磁兼容测试不合格的问题,我们完全可以遵循正常的电磁兼容设计思路,按照电磁兼容设计规范法和系统法,针对产品存在的电磁兼容问题重新进行设计。从源头上解决存在的电磁兼容隐患。这属于电磁兼容设计范畴。

而目前国内电子、电气产品比较普遍存在的情况是:产品在进行电磁兼容型式试验时,产品设计已经定型,产品外壳已经开模,PCB板已经设计生产,部件板卡已经加工,甚至产品已经生产出来等着出货放行。

对此类产品存在的电磁兼容问题,只能采取“出现什么问题,解决什么问题”的问题解决法,以对产品的最小改动使其达到电磁兼容要求。这就属于电磁兼容整改对策的范畴,这是我们这次课程需要探讨的问题。

#### 1.2 常见的电磁兼容整改措施

对常见的电磁兼容问题,我们通过综合采用以下几个方面整改措施,一般可以解决大部分的问题:

可以在屏蔽体的装配面处涂导电胶,或者在装配面处加导电衬垫,甚至采用导电金属胶带进行补救。导电衬垫可以是编织的金属丝线、硬度较低易于塑型的软金属(铜、铅等)、包装金属层的橡胶、导电橡胶或者是梳状簧片接触指状物等。

在不影响性能的前提下,适当调整设备电缆走向和排列,做到不同类型的电缆相互隔离。改变普通的小信号或高频信号电缆为带屏蔽的电缆,改变普通的大电流信号或数据传输信号电缆为对称绞线电缆。

加强接地的机械性能,降低接地电阻。同时对于设备整体要有单独的低阻抗接地。

在设备电源输入线上加装或串联电源滤波器。

在可能的情况下,对重要器件进行屏蔽、隔离处理,如加装接地良好的金属隔板或小的屏蔽罩等。

在各器件电源输入端并联小电容,以旁路电源带来的高频干扰。

下面,我们分别就电子、电器产品在传导发射、辐射发射、谐波电流、静电放电、电快速脉冲、浪涌等电磁兼容测试项目试验过程中较常出项的问题及解决方案和补救措施与大家共同探讨。

我们根据各项目的特点,将这些内容分为三大类分别进行讨论:

电磁骚扰发射类: 传导发射、辐射发射

谐波电流类

瞬态脉冲抗扰度类: 静电放电、电快速脉冲、浪涌冲击

### 2. 电磁骚扰发射测试常见问题对策及整改措施

对于电磁发射测试对策及整改,我们将在下个专题《电子产品 3C 认证检测中常见电磁兼容问题与对策》中以 AV 和 IT 类产品为例加以详细探讨,在这儿仅进行一些提纲性介绍,不再深入展开探讨。

#### 2.1 电子、电气产品内的主要电磁骚扰源

设备开关电源的开关回路: 骚扰源主频几十 kHz 到百余 kHz, 高次谐波可延伸到数十 MHz。

设备直流电源的整流回路: 工频整流噪声频率上限可延伸到数百 kHz; 高频整流噪声频率上限可延伸到数十 MHz。

电动设备直流电机的电刷噪声: 噪声频率上限可延伸到数百 MHz。

电动设备交流电机的运行噪声: 高次谐波可延伸到数十 MHz。

变频调速电路的骚扰发射: 骚扰源频率从几十 kHz 到几十 MHz

设备运行状态切换的开关噪声: 噪声频率上限可延伸到数百 MHz。

智能控制设备的晶振及数字电路电磁骚扰：骚扰源主频几十 kHz 到几十 MHz，高次谐波可延伸到数百 MHz。

微波设备的微波泄漏：骚扰源主频数 GHz。

电磁感应加热设备的电磁骚扰发射：骚扰源主频几十 kHz，高次谐波可延伸到数十 MHz。

电视电声接收设备的高频调谐回路的本振及其谐波：骚扰源主频数十 MHz 到数百 MHz，高次谐波可延伸到数 GHz。

信息技术设备的及各类自动控制设备数字处理电路：骚扰源主频数十 MHz 到数百 MHz，高次谐波可延伸到数 GHz。

## 2.2 骚扰源定位

### 2.2.1 根据测量曲线定位：

依据：超标骚扰频率范围、超标骚扰频域分布、窄带骚扰还是宽带骚扰等

根据被测设备工作方式和内部结构定位：

有没有使用标准不建议使用的半波整流和对称/非对称电源调整电路？

内部结构中电路板布局是否合理？

内部电缆走线是否合理？

内部滤波器（滤波电路）安装是否合理？

内部电路接地和搭接方式是否合理？

机箱屏蔽是否满足对应产品的需求？

### 2.2.2 根据被测设备组成和功能定位：

设备内部有否二次电源，其工作方式？

设备内是否有驱动电机，电机类型？

设备内是否有变频调速电路？

设备内是否有数码控制或智能控制电路？是否使用晶振？

设备内是否存在程控的继电器或开关电路？

设备正常工作是否利用电磁波或微波？

设备内是否存在工作中的无线收发电路？

### 2.2.3 根据功能模块工作情况进行故障定位：

若设备的各个模块可以暂停和恢复工作，可以通过逐个暂停这些模块的工作来判断骚扰来源。

若模块不可以独立暂停和恢复工作，可以通过与设备其它功能模块一起组合进行暂停和恢复工作，从而判断骚扰的大概来源。

若模块不可以独立暂停和恢复工作，可以通过与其它设备的合格功能模块一起组合进行暂停和恢复工作，从而判断骚扰的大概来源。

对怀疑骚扰超标的模块，可以用置换的方式来来进行骚扰判定。

## 2.3 电子、电气产品连续传导发射超标问题及对策

家电类产品连续传导骚扰标称测量频率范围 148.5kHz-30MHz（实际为 150kHz-30MHz）。

测量分别在电源端子及负载端子和附加端子上进行。

连续传导骚扰的主要来源：

开关电源的开关频率及谐波骚扰、电源整流回路的整流噪声、

交流电机的运行噪声、直流电机的电刷噪声、

电磁感应加热设备的电磁骚扰、

智能控制设备的晶振及数字电路电磁骚扰等

当我们通过骚扰定位方式找到超标点的骚扰来源后，

即可采用相对应的骚扰抑制措施。

（针对故障定位及传导骚扰来源分别展开说明）

对一般的电源端连续传导骚扰可以通过以下的电路加以抑制：

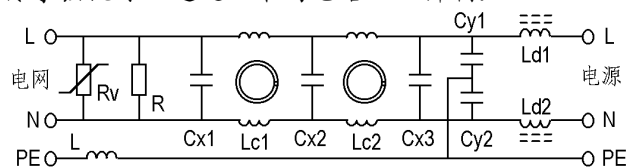


图 1：交流电源滤波网络

对于负载端子和附加端子的传导骚扰可以通过以下的电路加以抑制

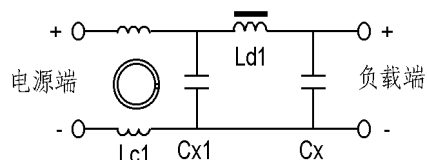


图 2: 直流输出滤波网络

无论是对电源端子、负载端子和附加端子采取抑制措施,若使用独立的滤波器时,需注意其安装方式。

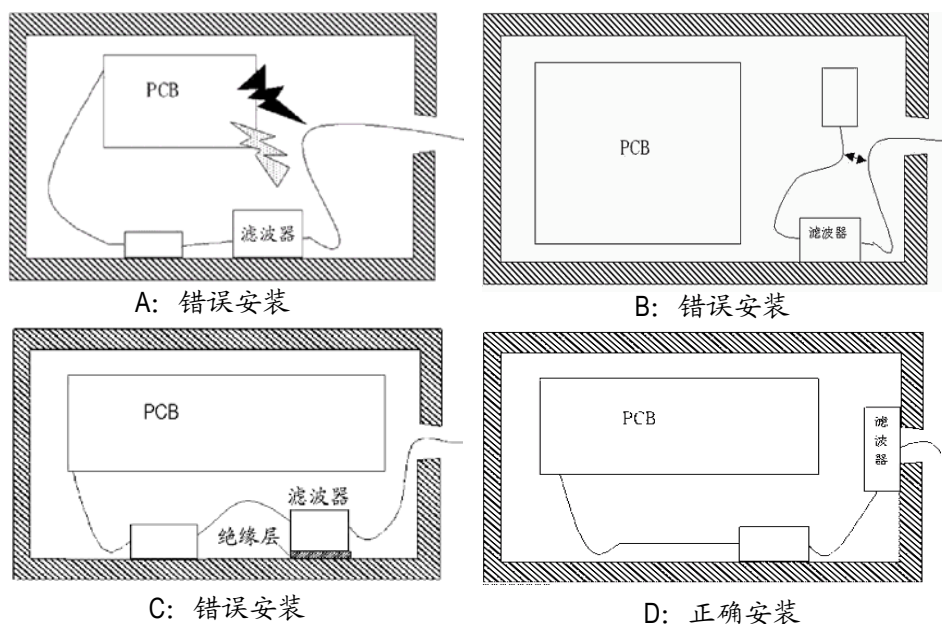


图 3: 滤波器的安装方法

## 2.4 电子、电气产品断续传导发射超标问题及对策

家电类产品断续传导骚扰标称测量频率范围 148.5kHz-30MHz (实际为 150kHz-30MHz)。

测量在电源端子上进行,喀咧声测量的频率点为: 150kHz、500kHz、1.4MHz、30MHz

断续传导骚扰的主要来源:

恒温控制器具,程序自动的机器和其他电气控制或操作的器具的开关操作会产生断续骚扰。

此类操作一般通过继电器和程控电子/机械开关等实现。

此类骚扰一般由继电器、开关的触点抖动及非纯阻负载通断所产生的电涌冲击形成。

可采用相对应的骚扰抑制措施主要针对以上两个方面进行。

## 2.5 电子、电气产品辐射骚扰超标问题及对策

电子、电气产品辐射骚扰场强测量频率范围 30MHz-1000MHz。

测量一般在开阔场或半电波暗室中进行。

辐射骚扰的主要骚扰来源:

开关电源的开关频率及谐波骚扰

交流电机的运行噪声、直流电机的电刷噪声

电磁感应设备的电磁骚扰

智能控制设备的晶振及数字电路电磁骚扰等

当我们通过骚扰定位方式找到辐射骚扰超标点的骚扰源后,即可采用相对应的骚扰源抑制措施。

(针对故障定位及骚扰来源分别展开说明)

一般来说,首先抑制骚扰源,这可以通过优化电路设计、电路结构和排版,加强滤波和正确的接地来达到。

其次是要切断耦合途径,这可以通过正确的机壳屏蔽和传输线滤波达到。

### 3. 谐波电流测试常见问题对策及整改措施

对于由交流市电供电的电子、电气产品，谐波电流是一个很重要的电磁兼容测量项目。

在低压市电网络使用的电子电气设备，其供电电压是正弦波，但其电流波形未必是正弦波，可能有或多或少的畸变。大量的此类设备应用，会造成电网电压波形畸变，使电网电能质量下降。

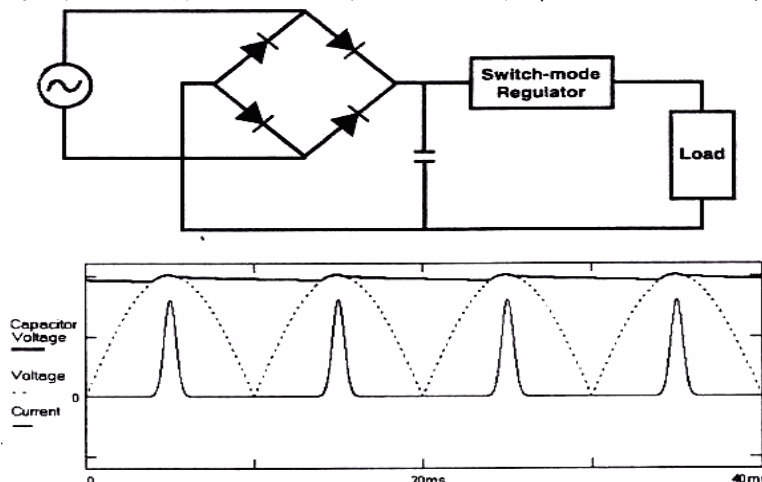


图 4: 高压整流电路及对应的畸变电流波形

一个周期函数可以分解为傅立叶级数，表示为多级正弦函数的和式，即可把周期信号当作是正弦函数的基波与高次谐波的合成。

所以，我们可以将设备的畸变电流波形分解为基波和高次谐波，通过特定的仪器测量高次谐波含量，就可以分析出设备电流波形畸变的程度。这些高次谐波电流分量我们简称为谐波电流。

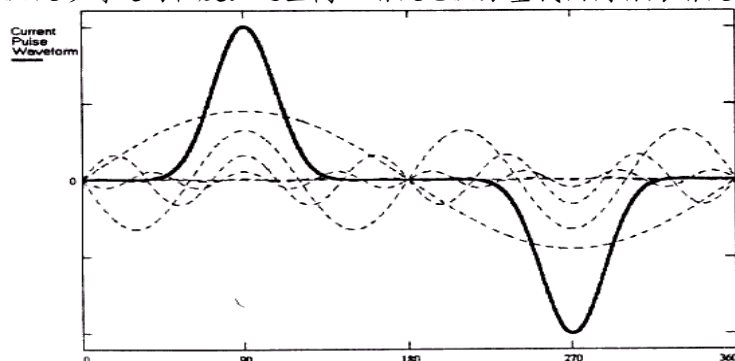


图 6: 畸变电流波形的傅立叶展开示意图

当电网中存在过量的谐波电流，不仅会使发电机的效率降低，严重时还会造成发电机和电网设备的损坏，同时还会影响电网用户设备的正常工作，比如计算机运算出错，电视机画面翻滚。

正是出于保护共用电网电能质量，保障电网和用户设备的正常进行，IEC 提出了谐波电流限值标准。谐波电流测试不适用于由非市电的低压交、直流和电池供电的电子、电气产品。

#### 3.1 测量标准介绍

下面以 GB17625.1 标准为例，对谐波电流的测量作一个简要介绍。

标准名称：GB17625.1-2003 idt IEC61000-3-2:2001 《电磁兼容 限值 谐波电流发射限值（设备每相输入电流≤16A）》

GB17625.1-2003 是众多电子电器产品认证检验的一个重要依据标准。该标准测量和限制的就是由低压市电供电的电子、电气产品（设备每相输入电流≤16A）在使用时其供电电流波形畸变的程度。

GB17625.1-2003 标准是通过限制设备电流的高次谐波分量的大小来限制设备电流波形的畸变的。GB17625.1 考虑到第 40 次谐波电流含量。

##### 3.1.1 标准的适用范围

该标准只对接入频率为 50Hz/60Hz、相电压为 220V/230V/240V 的低压供电系统且每相输入电流不大于 16A 的设备提出谐波电流限值要求。

该标准是一个通用电磁兼容标准。适合于本标准的产品类别较多，如家用电器、电动工具、电气照明设备、信息技术设备、影音设备等等。

### 3.1.2 设备的分类

分类是按照谐波电流限值不同而进行的。

A类：平衡的三相设备；

家用电器，不包括列入D类的设备；

工具，不包括便携式工具；

白炽灯调光器；

音频设备；

以及除以下几类设备外的所有其他设备。

B类：便携式工具；不属于专用设备的电弧焊设备

C类：照明设备

D类：有功功率不大于600W下列设备：个人计算机和个人计算机显示器；电视接收机。

B类、C类和D类设备定义比较简单，A类的区分比较复杂。

### 3.1.3 谐波电流限值

下列类型设备的限值在该标准中未作规定：

额定功率75W及以下的设备，照明设备除外（将来该值可能从75W减小到50W）；

总额定功率大于1kW的专用设备；

额定功率不大于200W的对称控制加热元件；

额定功率不大于1kW的白炽灯独立调光器。

（通常有生产厂家利用此条的限制项来达到免于进行谐波电流限制的目的）

#### 3.1.3.1 A类设备的谐波电流限值

A类设备的谐波电流限值见标准相应表格，限值是有效值，单位为安培。该限值是固定值，与产品的功率和基波电流大小不相关。

#### 3.1.3.2 B类设备的谐波电流限值

B类设备的谐波电流限值是A类设备的限值的1.5倍。

#### 3.1.3.3 C类设备的谐波电流限值

a) 有功输入功率大于25W

对于有功输入功率大于25W的照明电器，谐波电流不应超过C类设备的相关限值。该限值与产品基波电流大小不相关。

b) 有功输入功率不大于25W

对于有功功率不大于25W的放电灯，标准规定了其特定的合格判定条件。

#### 3.1.3.4 D类设备的谐波电流限值

a) 只限制奇次谐波电流。

b) 奇次谐波电流不仅要符合最大允许谐波电流，还要符合“每瓦功率允许的最大谐波电流”。

可以说对D类设备的要求是比较严格的，而实际情况却是D类设备的谐波电流往往比较大。

该规定是考虑到D类设备应用非常广泛，又经常是连续运转，客观上又经常同时使用。如此多的D类设备同时工作，它们产生的谐波电流在合成（矢量合成）后对电网电能质量的影响将是不能不考虑的。

### 3.1.4 谐波电流测量仪器

谐波测量设备一般由两部分组成：精密电源单元与测量仪表单元。

要求电源部分能向被测设备提供良好波形的电压源、负载能力和平坦的阻抗特性。

标准规定测量仪表单元必须是离散付氏变换（FFT）的时域测量仪器，能够连续、准确地同时测量全部各次谐波所涉及的幅值、相位角等需要量。

目前实验室多采用以FFT为频谱分析原理的谐波测量仪。测量仪的前级为采样电路、模-数变化器，后级是FFT分析仪（可以利用PC机实现）。

### 3.1.5 试验条件

标准中规定了部分类型设备谐波电流的试验条件。

对于没有提到的设备，发射测量应在用户操作控制下或自动程序设定在正常工作状态下，预计产生最大总谐波电流（THC）的模式进行。

这是规定了发射试验时设备的配置，而不是要求测量THC值或寻找最恶劣状态下的发射。

## 3.2 谐波电流发射的基本对策

解决谐波发射超标问题的基本办法是在原来的电源电路中增加功率因数校正（PFC）电路。或改变已有的 PFC 电路，使其满足测试标准要求。

功率因数校正一般分为两种类型，即主动式和被动式。

当然对于中小功率的电子、电器设备，尽可能将其消耗的有功功率降低到 75W 以下，也不失为一种有效的方法。因为标准没有对 75W 及以下的设备给出限值（照明设备除外）。

对于一些专用的或特殊用途的设备，使其满足标准限值中免于限制条款，也是可行的。

### 3.2.1 主动式功率因数校正

主动式功率因数校正电路可以最大限度的提高功率因数，使其接近于 1，这是目前较为理想的谐波电流解决方案。

这样的开关电源电路必须使用二级开关电路控制，其中一级开关电路用来控制电流谐波，另外一级开关电路用作电压调整。

该方案电路比较复杂，对电路元件要求高，增加的改进成本较高，而且对原来电源电路的设计概念必须作彻底的更新。

使用中还应该注意，设备注入电源的射频传导骚扰可能因此而增加，这时必须再根据需要增加抑制电源传导骚扰的元件。

显然，因为技术的原因，该方案一般不能应用在采用线形电源变压器供电的设备上。

由于该方案对电路改动太大，一般少在谐波电流测试不通过时作为整改对策使用。

### 3.2.2 被动式功率因数校正

目前消费类电子、电气产品所采用的开关电源电路多是开关频率比较低、电路结构简单、成本较低的那种形式，其谐波电流发射超过限值的问题也较普遍。

在这种情况下，成本控制可能是主要的考虑。

采用低频滤波电路可以降低谐波成份到标准限值以下，这种措施属于被动式功率因数校正。这种方案适合于中小功率设备。

因为需要滤除的是工频谐波，对功率较大的设备，滤波器的重量和成本可能会超过设备电源本身。

### 3.2.3 其它解决措施

对那些设备整体呈感性或容性的电子、电气设备（如电动设备等），在正常工作时，其电流波形的峰值出现时间可能会滞后或超前电压波形的峰值，造成产品的功率因素的下降。

对此类设备较常采用的方式是对应的容性或感性补偿，使补偿后的电流波形的峰值出现时间与电压波形的峰值出现时间保持同步。

此类补偿需注意，不要出现过补偿，否则，效果适得其反。

此类补偿方式多用于电力系统的功率因素补偿，一般的电子、电气设备上较少采用。

因为，一般的电子、电气设备的谐波问题主要表现为波形畸变，而不仅是电流波形相位滞后、超前的问题，这种补偿方式效果不明显。

下面首先介绍两种被动式功率因数校正电路，然后再介绍主动式功率因数校正电路。

对一般用电设备来说，这两种被动式功率因数校正电路所增加的元件成本均比较低，体积也不大，一般是可以接受的。

采用主动式功率因数校正电路的比被动式成本略高，但校正效果会比被动式好的多。

对有些采用其它方案不能凑效的产品，主动式功率因数校正电路可能是最后唯一的选择。

当然，有些产品为提高产品质量和档次，也会主动采用主动式功率因数校正电路。

## 3.3 利用电感储能电流泵式解决方案

该方案适用于直接利用高压整流方式来供电的产品。电路如图 7 所示。

这个电路仅仅由一个扼流圈 L1、一个快速开关二极管 D1 和一个耐冲击电容 C 组成。用这三只元件构成一个电流泵电路，取代原来开关电源里的由二极管和 RC 网络组成的限幅缓冲电路。

扼流圈的电感 L1 大概是开关变压器的主电感 L 的 4 倍。

耦合电容 C 应该能够耐高压和冲击，它的容量是 10 到 30nF。

对应开关电源的功率从 75W 到 300W 的范围。

C1 电容应该大到足够满足最大的谐波电流限值，二极管选用快恢复特性功率二极管。

此电路结合主动功率因数校正的原理，利用电感储能延长整流导通的时间，从而有效减少了输入的谐波电流幅度。

应用此电路时，应注意调整开关变压器和开关晶体管的参数，否则易损坏开关晶体管。此电路宜应用在电源开关频率较高，开关晶体管导通电流大，内阻很小的电源电路中。

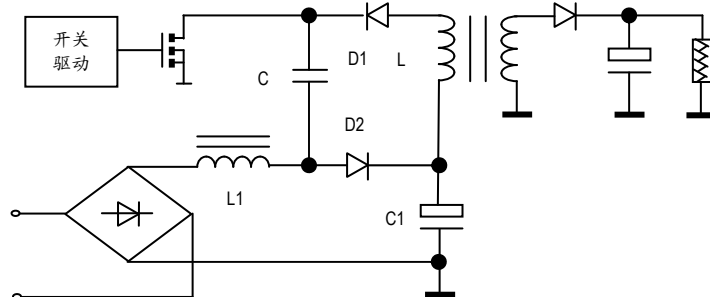


图7: 电流泵式被动功率因数校正电路

### 3.4 低频谐波电流抑制滤波解决方案

电路如图8所示。该方案适用于直接利用高压整流方式来供电的产品。

这个电路仅仅由一个低频扼流圈组成，插入整流桥和滤波电容之间。

其工作原理非常简单，低频扼流圈的电感和整流电容以及低频扼流圈的分布电容共同组成一个低频谐波电流滤波器。

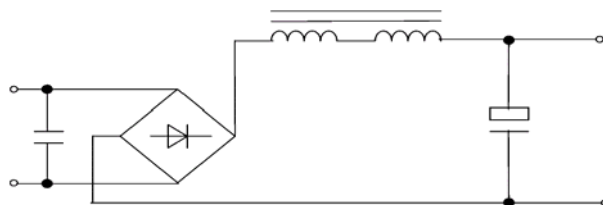


图8: 低频滤波器被动功率因数校正电路

电路参数要设计成对 50Hz 的基波成份衰减很小，对三次以上谐波成份衰减很大，尤其是第三次谐波（150Hz）的衰减最大。

低频谐波电流抑制滤波器在电源整流之后或者之前的某些点插入电流回路，就可以起到抑制谐波电流的目的。

可以解决 300W 以下产品的谐波电流问题，并且不需要电路其它参数作任何改变，也不会降低原电源电路的其它性能。

其缺点是体积较大，重量约 100-200 克。

### 3.5 主动 PFC 解决方案

该方案是在主电源上串联另一个电源变换器，它强迫电源紧密跟随正弦型线电压获取电流。

图9为其原理示意图。

该方案适用于直接利用高压整流方式来供电的产品。

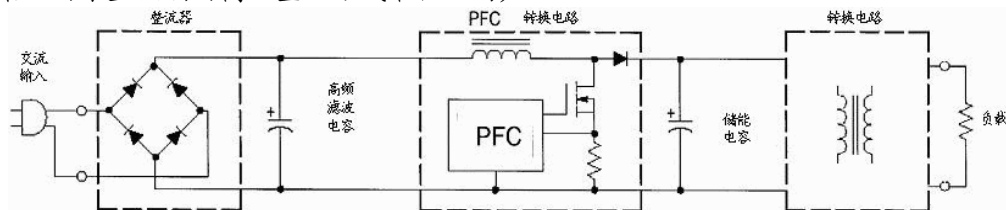


图9: 主动式PFC原理示意图

工频交流经过整流器整流后变成波动的直流，该波动直流提供给 PFC 转换电路进行转换。

对一般普通的开关电源来说，由于 PFC 控制电路相当于在原开关电源的整流和滤波回路之间增加了一级开关回路。

一方面增加了电路的复杂程度，可能需要对原系统的电源部分重新设计和排版；

另一方面，由于相当于增加了一级开关转换电路，电源产生的射频骚扰必然有所增加甚至超标，这时可能需要采取一些措施使其重新符合相关标准的要求。

### 3.6 谐波问题的其它对策

以上三种谐波电流问题解决方案主要适用于直接利用高压整流方式来供电的产品。

因为此类产品谐波电流非常大，若不采取相应对策，则难以满足谐波标准要求。

对通过工频变压器供电的产品和直接使用交流电源而不通过电源变换电路二次供电的家电产品，一般情况下谐波电流不大，且其谐波电流限值比较宽松，即使不采取谐波电流抑制措施，其谐波电流测试合格率还是非常高的。

但我们依然需要注意以下几个方面的内容。

对那些非高压整流方式来供电的家电产品，低次谐波电流限值比较宽松，合格是比较容易的，此时，应注意的是 20 次以上的高次谐波电流容易出现超标问题。

对此类的高次谐波超标问题，一般在电源回路中增加适当的高次谐波滤波电感（高频扼流圈）即可解决问题。

由于半波整流方式和利用相位截波方式调节（如可控硅非过零控制）对电源进行对称和非对称控制都很容易产生非常大的谐波电流。谐波电流标准一般不允许采用半波整流方式和对电源进行对称和非对称控制。

若测试时谐波电流超标，建议将电源半波整流方式和对称/非对称控制方式改为其他的控制方式。

如将半波整流改为全波整流或桥式整流方式。将利用相位截波方式调节的对称/非对称控制方式改成对称的过零触发控制方式。可以有效地解决此类谐波问题。

## 4. 瞬态脉冲抗扰度测试常见问题对策及整改措施

### 4.1 综述

电磁兼容所说的瞬态脉冲是指干扰脉冲是断续性的，一般具有较高的干扰电压，较快速的脉冲上升时间，较宽的频谱范围。一般包括：静电放电、电快速瞬变脉冲群、浪涌冲击等。

由于它们具有以上共同特点，因此在试验结果的判断及抑制电路上有较大的共同点。在此处先进行介绍。

#### 4.1.1 瞬态脉冲抗扰度测试常见的试验结果说明

对不同试验结果，可以根据该产品的工作条件和功能规范按以下内容分类：

A: 技术要求范围内的性能正常；

B: 功能暂时降低或丧失，但可自行恢复性能；

C: 功能暂时降低或丧失，要求操作人员干预或系统复位；

D: 由于设备（元件）或软件的损坏或数据的丧失，而造成不可恢复的功能降低或丧失。

符合 A 的产品，试验结果判合格。这意味着产品在整个试验过程中功能正常，性能指标符合技术要求。

符合 B 的产品，试验结果应视其产品标准、产品使用说明书或者试验大纲的规定，当认为某些影响不重要时，可以判为合格。

符合 C 的产品，试验结果除了特殊情况并且不会造成危害以外，多数判为不合格。

符合 D 的产品判为不合格。

符合 B 和 C 的产品试验报告中应写明 B 类或 C 类评判依据。符合 B 类应记录其丧失功能的时间。

#### 4.1.2 常用的瞬态脉冲抑制电路：

##### 4.1.2.1 箝位二极管保护电路：

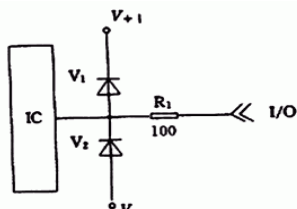


图 10 二极管保护电路

工作原理如图 10。

使用 2 只二极管的目的是为了同时抑制正、负极性的瞬态电压。瞬态电压被箝位在  $V_+ + V_{PN} - V_- - V_{PN}$  范围内，串联电阻担负功率耗散的作用。利用现有电源的电压范围作为瞬态电压的抑制范围，二极管的正向导通电流和串联电阻的阻值决定了该电路的保护能力。本电路具有极好的保护效果，同时其代价低廉，适合成本控制比较严、静电放电强度和频率不十分严重的场合。

##### 4.1.2.2 压敏电阻保护电路：

压敏电阻的阻值随两端电压变化而呈非线性变化。当施加在其两端的电压小于阈值电压时，器件呈现无穷大的电阻；当施加在其两端的电压大于阈值电压时，器件呈现很小电阻值。此物理现象类似稳压管的齐纳击穿现象，不同的是压敏电阻无电压极性要求。使用压敏电阻保护电路的特点是简单、经济、瞬态抑制效果好，且可以获得较大的保护功率。

##### 4.1.2.3 稳压管保护电路：

背对背串接的稳压管对瞬态抑制电路的工作原理是显而易见的。当瞬态电压超过  $V_1$  的稳压值时， $V_1$  反向击穿， $V_2$  正向导通；当瞬态电压是负极性时， $V_2$  反向击穿， $V_1$  正向导通。将这 2 只稳压管制作



在同一硅片上就制成了稳压管对，使用更加方便。

#### 4.1.2.4 TVS（瞬态电压抑制器）二极管：

这是最近发展起来的一种固态二极管，适用于 ESD 保护。一般选择工作电压大于或等于电路正常工作电压的器件。TVS 二极管是和被保护电路并联的，当瞬态电压超过电路的正常工作电压时，二极管发生雪崩，为瞬态电流提供通路，使内部电路免遭超额电压的击穿或超额电流的过热烧毁。由于 TVS 二极管的结面积较大，使得它具有泄放瞬态大电流的优点，具有理想的保护作用。但同时必须注意，结面积大造成结电容增大，因而不适合高频信号电路的保护。改进后的 TVS 二极管还具有适应低压电路(< 5V)的特点，且封装集成度高，适用于在印制电路板面积紧张的情况下使用。这些特点决定了它有广泛的适用范围，尤其在高档便携设备的接口电路中有很好的使用价值。

下面将对静电放电、电快速瞬变脉冲群、浪涌冲击的测试及常见问题对策及整改措施分别展开进行探讨。由于，这三个有较大的共同点，因此在测试及对策上都有较大共同点，下面将对静电放电问题展开详细深入的讨论，而在电快速瞬变脉冲群、浪涌冲击的讨论中出现的相同之处将不再重复探讨。

## 4.2 静电放电抗扰度测试常见问题对策及整改措施

### 4.2.1 静电放电形成的机理及其对电子产品的危害

静电是两种介电系数不同的物质磨擦时，正负极性的电荷分别积累在两个物体上而形成。就人体而言，衣服与皮肤之间的磨擦发生的静电是人体带电的主要原因之一。

静电源跟其它物体接触时，存在着电荷流动以抵消电压，这个高速电量的传送，将产生潜在的破坏电压、电流以及电磁场，这就是静电放电。

在电子产品的生产和使用过程中，操作者是最活跃的静电源，可能积累一定数量的电荷，当人体接触与地相连的元件、装置的时候就会产生静电放电。静电放电一般用 ESD 表示。

ESD 会导致电子设备严重地损坏或操作失常。

大多数半导体器件都很容易受静电放电而损坏，特别是大规模集成电路器件更为脆弱。

静电对器件造成的损坏有显性的和隐性的两种。隐性损坏在当时看不出来，但器件变得更脆弱，在过压、高温等条件下极易损坏。

ESD 两种主要的破坏机制是：由于 ESD 电流产生热量导致设备的热失效；由于 ESD 感应出高的电压导致绝缘击穿。

除容易造成电路损害外，ESD 也会对电子电路造成干扰。ESD 电路的干扰有二种方式。

一种是传导方式，若电路的某个部分构成了放电路径，即 ESD 接侵入设备内的电路，ESD 电流流过集成片的输入端，造成干扰。

ESD 干扰的另一种方式是辐射干扰。即静电放电时伴随火花产生了尖峰电流，这种电流中包含有丰富的成分。从而产生辐射磁场和电场，磁场能够在附近电路的各个信号环路中感应出干扰电动势。该干扰电动势很可能超过逻辑电路的阈值电平，引起误触发。辐射干扰的大小还取决于电路与静电放电点的距离。ESD 产生的磁场随距离的平方衰减。ESD 产生的电场随距离立方衰减。当距离较近时，无论是电场还是磁场都是很强的。ESD 发生时，在附近位置的电路一般会受到影响。

ESD 在近场，辐射耦合的基本方式可以是电容或电感方式，取决于 ESD 源和接受器的阻抗。在远场，则存在电磁场耦合。

与 ESD 相关的电磁干扰 (EMI) 能量上限频率可以超过 1GHz。在这个频率上，典型的设备电缆甚至印制板上的走线会变成非常有效的接收天线。因而，对于典型的模拟或数字电子设备，ESD 会感应出高电平的噪声。

一般来说，造成损坏，ESD 电火花必须直接接触电路线，而辐射耦合通常只导致失常。

在 ESD 作用下，电路中的器件在通电条件下比不通电条件下更易损坏。

### 4.2.2 电子产品的静电放电测试及相关要求

对不同使用环境、不同用途、不同 ESD 敏感度的电子产品标准对静电放电抗扰度试验的要求是不同的，但这些标准关于 ESD 抗扰度试验大多都直接或间接引用 GB/T17626.2-1998 (idt IEC 61000-4-2:1995)：《电磁兼容 试验和测量技术 静电放电抗扰度试验》这一国家电磁兼容基础标准，并按其中的试验方法进行试验。下面就简要介绍一下该标准的内容、试验方法及相关要求。

#### 4.2.2.1 试验对象：

该标准所涉及的是处于静电放电环境中安装条件下的装置、系统、子系统和外部设备。

#### 4.2.2.2 试验内容：

静电放电的起因有多种，但该标准主要描述在低湿度情况下，通过摩擦等因素，使操作者积累了静

电。电子和电气设备遭受直接来自操作者的静电放电和对临近物体的静电放电时的抗扰度要求和试验方法。

#### 4.2.2.3 试验目的:

试验单个设备或系统的抗静电干扰的能力。它模拟: (1)操作人员或物体在接触设备时的放电。(2)人或物体对邻近物体的放电。

#### 4.2.2.4 ESD 的模拟:

图 11 和图 12 分别给出了 ESD 发生器的基本线路和放电电流的波形。

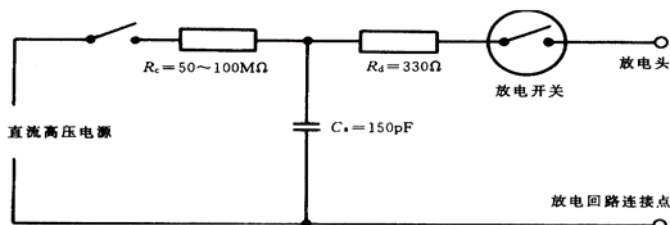


图 11: 静电放电发生器

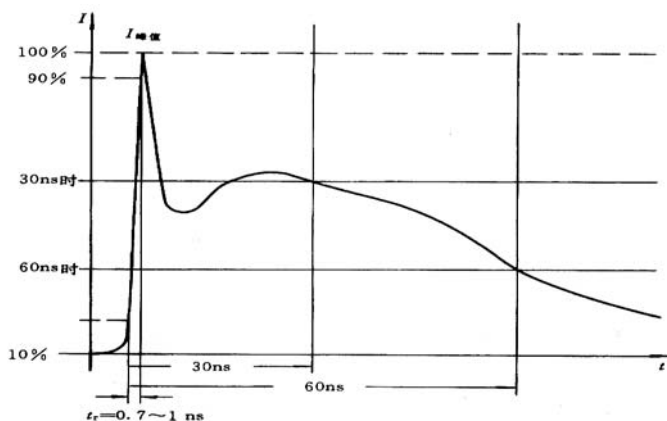


图 12: 静电放电的电流波形

放电线路中的储能电容  $C_s$  代表人体电容, 现公认 150pF 比较合适。放电电阻  $R_d$  为 330Ω, 用以代表手握钥匙或其他金属工具的人体电阻。现已证明, 用这种放电状态来体现人体放电的模型是足够严酷的。

#### 4.2.2.5 试验方法

该标准规定的试验方法有两种: 接触放电法和空气放电法。

**接触放电法:** 试验发生器的电极保持与受试设备的接触并由发生器内的放电开关激励放电的一种试验方法。

**空气放电法:** 将试验发生器的充电电极靠近受试设备并由火花对受试设备激励放电的一种试验方法。

接触放电是优先选择的试验方法, 空气放电则用在不能使用接触放电的场合中。

#### 4.2.2.6 试验等级及其选择:

试验电平以最切合实际的安装环境和条件来选择, 表 1 提供了一个指导原则。表 1 同时也给出了静电放电试验等级的优先选择范围, 试验应满足该表所列的较低等级。

表 1: 试验等级选择

接触放电		空气放电		安装条件		环境条件
等级	电压 kV	等级	电压 kV	抗静电材料	合成材料	相对湿度 %RH
1	2	1	2	✓	/	35
2	4	2	4	✓	/	10
3	6	3	8	/	✓	50
4	8	4	15	/	✓	10
X*	特殊	X*	特殊	/	/	/

注: \* “X” 是一个开放等级, 必须在专用设备的规范中加以规定。  
等级的选择取决于环境等因素, 对具体的产品来说, 往往已在相应的产品或产品族标准中加以规定。

#### 4.2.2.7 试验环境

对空气放电该标准规定了环境条件:

环境温度: 15℃~35℃、相对湿度: 30%~60%RH、大气压力: 86kPa~106kPa

对接触放电该标准未规定特定的环境条件。

#### 4.2.2.8 试验布置

标准对试验布置也做出了详细的规定, 图 13 所示为台式设备的试验布置示意图。

#### 4.2.2.9 试验实施

**实施部位:** 直接放电施加于操作人员在正常使用受试设备时可能接触到的点或面上; 间接放电施加于水平耦合板和垂直耦合板。

直接放电模拟了操作人员对受试设备直接接触时发生的静电放电情况。

间接放电则是对水平耦合板和垂直耦合板进行放电, 模拟了操作人员对放置于或安装在受试设备附近的物体放电时的情况。

直接放电时, 接触放电为首选形式; 只有在不能用接触放电的地方 (如表面涂有绝缘层, 计算机键盘缝隙等情况) 才改用气隙 (空气) 放电。

间接放电：选用接触放电方式。

试验电压要由低到高逐渐增加到规定值。

不同的产品或产品族标准对试验的实施可能根据产品的特点有特定的规定。

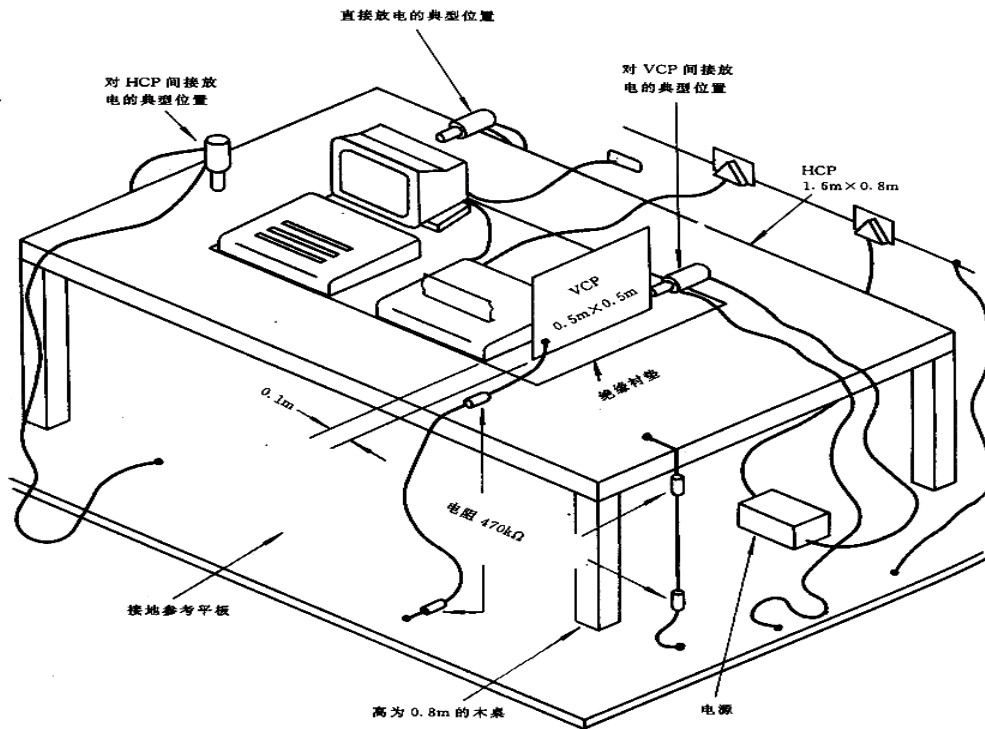


图 13: 台式设备静电放电布置示意图

#### 4.2.2.10 试验结果

若静电放电测试通不过，可能产生如下后果：

- (1) 直接通过能量交换引起半导体器件的损坏。
- (2) 放电所引起的电场与磁场变化，造成设备的误动作。

#### 4.2.3 电子产品的静电放电对策及改进要点

有很多办法减小 ESD 产生的电磁干扰 (EMI) 影响电子产品或设备：完全阻止 ESD 产生，阻止 EMI (本文中特指因 ESD 产生的 EMI) 耦合到电路或设备以及通过设计工艺增加设备固有的 ESD 抗扰性。

ESD 通常发生在产品自身暴露在外的导电物体，或者发生在邻近的导电物体上。对设备而言，容易产生静电放电的部位是：电缆、键盘及暴露在外的金属框架以及设备外壳上的孔、洞、缝隙等。

常用的改进方法是在产品 ESD 发生或侵入危险点，例如输入点和地之间设置瞬态保护电路，这些电路仅仅在 ESD 感应电压超过极限时发挥作用。保护电路可以包括多个电流分流单元。

有多种电路可以达到 ESD 保护的目，但选用时必须考虑以下原则，并在性能和成本之间加以权衡：速度要快，这是 ESD 干扰的特点决定的；能应付大的电流通过；考虑瞬态电压会在正、负极性两个方向发生；对信号增加的电容效应和电阻效应控制在允许范围内；考虑体积因素；考虑产品成本因素。

我们可以从以下几种抑制 ESD 干扰的方法中选择适用的对策：

##### 4.2.3.1 外壳设计：

外壳在人手和内部电路间建立隔离层，阻止 ESD 的发生，金属外壳同时也是阻止 ESD 间接放电形成的辐射及传导耦合的关键。

一个完整的封闭金属壳能在辐射噪声中屏蔽电路，但由于从电路到屏蔽壳体的 ESD 副级电弧可能产生传导耦合，因而一些外壳设计使用绝缘体，在绝缘壳中，放置一个金属的屏蔽体。这种设计的好处是既可以防止因操作者对金属外壳的直接接触放电造成干扰，又可以防止操作者对周围物体放电时形成的 EMI 耦合到内部形成干扰，同时在操作者对外壳的孔、洞、缝隙放电时给放电电流一个泄放通道，防止对内部电路直接放电。这种做法的简化是在设备金属外壳上涂绝缘漆或贴一层绝缘物质，使绝缘能力大于 20kV。

因为静电会穿过孔洞、缝隙放电，所以绝缘外壳的孔洞、缝隙与内部电路间应留有足够的空间，2cm 左右的空气隙可以阻止静电放电的发生。对外壳上的孔、洞、排气口等，用几个小孔代替一个大孔，从 EMI 抑制的角度来说更好。为减小 EMI 噪声，缝隙边沿每隔一定距离处使用电连接。

对金属外壳而言,外壳各部分之间的搭接非常重要,若机箱两部分之间的搭接阻抗较高,当静电放电电流流过搭接点时,会产生电压降,这可能会影响电路的正常工作。

解决这个问题的方法有两个:1)尽量使外壳保持导电连续,减少搭接阻抗。2)在电路与机箱之间增加一层屏蔽,减小电路与机箱之间的电容耦合。内层屏蔽要与外壳连接起来。

如果是塑料外壳,则要求对电路的接地进行仔细布置,以防止放电电流感应到电路上去。塑料外壳的优点是不会产生直接放电现象。如果塑料外壳上没有大的开孔,则塑料外壳能对电路起到保护作用,但塑料外壳对防止操作者对周围物体放电时耦合到内部形成干扰无抑制能力。

#### 4.2.3.2 接地设计:

一旦发生了静电放电,应该让其尽快旁路人地,不要直接侵入内部电路。例如内部电路如用金属机箱屏蔽,则机箱应良好接地,接地电阻要尽量小,这样放电电流可以由机箱外层流入大地,同时也可以将对周围物体放电时形成的骚扰导入大地,不会影响内部电路。

对金属机箱,通常机箱内的电路会通过 I/O 电缆、电源线等接地,当机箱上发生静电放电时,机箱的电位上升,而内部电路由于接地,电位保持在地电位附近。这时,机箱与电路之间存在着很大的电位差。这会在机箱与电路之间引起二次电弧。使电路造成损坏。通过增加电路与外壳之间的距离可以避免二次电弧的发生。当电路与外壳之间的距离不能增加时,可以在外壳与电路之间加一层接地的金属挡板,挡住电弧。

如果电路与机箱连在一起,则只应通过一点连接。防止电流流过电路。线路板与机箱连接的点应在电缆入口处。

对塑料机箱,则不存在机箱接地的问題。

#### 4.2.3.3 电缆设计:

一个正确设计的电缆保护系统可能是提高系统 ESD 非易感性的关键。作为大多数系统中的最大的“天线”—I/O 电缆特别易于被 ESD 干扰感应出大的电压或电流。从另一方面,电缆也对 ESD 干扰提供低阻抗通道,如果电缆屏蔽同机壳地连接的话。通过该通道 ESD 干扰能量可从系统接地回路中释放,因而可间接地避免传导耦合。为减少 ESD 干扰辐射耦合到电缆,线长和回路面积要减小,应抑制共模耦合并且使用金属屏蔽。对于输入/输出电缆可采用使用屏蔽电缆、共模扼流圈、过压箝位电路及电缆旁路滤波器措施。在电缆的两端,电缆屏蔽必须与壳体屏蔽连接。在互联电缆上安装一个共模扼流圈可以使静电放电造成的共模电压降在扼流圈上,而不是另一端的电路上。

两个机箱之间用屏蔽电缆连接时,通过电缆的屏蔽层将两个机箱连接在一起,这样可以使两个机箱之间的电位差尽量小。这里,机箱与电缆屏蔽层之间的搭接方式很重要。强烈建议在电缆两端的机箱与电缆屏蔽层之间 360° 搭接。

#### 4.2.3.4 键盘和面板:

键盘和控制面板的设计必须保证放电电流能够直接流到地,而不会经过敏感电路。

对于绝缘键盘,在键与电路之间要安装一个放电防护器(如金属支架),为放电电流提供一条放电路径。放电防护器要直接连接到机箱或机架上,而不能连接到电路地上。当然,用较大的按钮(增加操作者到内部线路的距离)能够直接防止静电放电。键盘和控制面板的设计应能使放电电流不经过敏感电路而直接到地。采用绝缘轴和大按钮可以防止向控制键或电位器放电。

现在,较多的电子产品面板采用薄膜按键和薄膜显示窗,由于该薄膜由耐高压的绝缘材料构成,可有效防止 ESD 通过按键和显示窗进入内部电路形成干扰。另外,现在大多数键盘的按键内部均有由耐高压的绝缘薄膜构成的衬垫,可有效防止 ESD 的干扰。

#### 4.2.3.5 电路设计:

设备中不用的输入端不允许处于不连接或悬浮状态,而应当直接或通过适当电阻与地线或电源端相连接。

一般来说,与外部设备连接的接口电路都需要加保护电路,其中也包括电源线,这一点往往被硬件设计所忽视。以微机为例来讲,应该考虑安排保护电路的环节有:串行通信接口、并行通信接口、键盘接口、显示接口等。

滤波器(分流电容或一系列电感或两者的结合)必须用在电路中以阻止 EMI 耦合到设备。如果输入为高阻抗,一个分流电容滤波器最有效,因为它的低阻抗将有效地旁路高的输入阻抗,分流电容越接近输入端越好。如果输入阻抗低,使用一系列铁氧体可以提供最好的滤波器,这些铁氧体也应尽可能接近输入端。

在内部电路上加强防护措施。对于可能遭受直接传导的静电放电干扰的端口,可以在 I/O 接口处串接电阻或并联二极管至正负电源端。MOS 管的输入端串接 100kΩ 电阻,输出端串接 1kΩ 电阻,以限制放电电流量。TTL 管输入端串接 22~100Ω 电阻,输出端串接 22~47Ω 电阻。模拟管输入端串接 100Ω~

100kΩ，并且加并联二极管，分流放电电流至电源正或负极，模拟管输出端串接 100Ω 的电阻。

在 I/O 信号线上安装一个对地的电容能够将接口电缆上感应的静电放电电流分流到机箱，避免流到电路上。但这个电容也会将机壳上的电流分流到信号线上。为了避免这种情况的发生，可以在旁路电容与线路板之间安装一只铁氧体磁珠，增加流向线路板的路径的阻抗。需要注意的是，电容的耐压一定要满足要求。静电放电的电压可以高达数千伏。

用一个瞬态防护二极管也能够对静电放电起到有效的保护，但需要注意，用二极管虽然将瞬态干扰的电压限制住了，但高频干扰成分并没有减少，该电路中一般应有与瞬态防护二极管并联的高频旁路电容抑制高频干扰。

在电路设计及电路板布线方面，应采用门电路和选通脉冲。这种输入方式只有在静电放电和选通同时发生时才能造成损坏。而脉冲边沿触发输入方式对静电放电引起的瞬变很敏感，不宜采用。

#### 4.2.3.6 PCB 设计:

良好的 PCB 设计可以有效地减少 ESD 干扰对产品造成的影响，这也是电磁兼容设计中 ESD 设计部分的一个重要的内容，大家可以从那部分课程中得到详细的指引。对一个成品进行电磁兼容对策时，很难再对 PCB 进行重新设计（改进成本太高），此处不再加以介绍。

#### 4.2.3.7 软件:

除了硬件措施外，软件抑制方案也是减少系统锁定等严重失常的有力方法。

软件 ESD 抑制措施分为两种常用的类别：刷新、检查并且恢复。刷新涉及到周期性地复位到休止状态，并且刷新显示器和指示器状态。只需进行一次刷新然后假设状态是正确的，其它的事就不用做了。检查/恢复过程用于决定程序是否正确执行，它们在一定间隔时间被激活，以确认程序是否在完成某个功能。如果这些功能没有实现，一个恢复程序被激活。

#### 4.2.4 一般 ESD 对策准则:

- (1) 在易感 CMOS、MOS 器件中加入保护二极管；
- (2) 在易感传输线上（地线在内）串几十欧姆的电阻或铁氧体磁珠；
- (3) 使用静电保护表面涂敷技术，使 ESD 难以机芯放电，经证明十分有效；
- (4) 尽量使用屏蔽电缆；
- (5) 在易感接口处安装滤波器；并将无法安装滤波器的敏感接口加以隔离；
- (6) 选择低脉冲频率的逻辑电路；
- (7) 外壳屏蔽加良好的接地。

### 4.3 电快速瞬变脉冲群抗扰度测试常见问题对策及整改措施

#### 4.3.1 电快速瞬变脉冲群形成的机理及其对电子产品的影响

电快速瞬变脉冲群是由电感性负载（如继电器、接触器等）在断开时，由于开关触点间隙的绝缘击穿或触点弹跳等原因，在断开处产生的暂态骚扰。当电感性负载多次重复开关，则脉冲群又会以相应的时间间隔多次重复出现。这种暂态骚扰能量较小，一般不会引起设备的损坏，但由于其频谱分布较宽，所以会对电子、电气设备的可靠工作产生影响。

一般认为电快速瞬变脉冲群之所以会造成设备的误动作，是因为脉冲群对线路中半导体结电容充电，当结电容上的能量累积到一定程度，便会引起线路乃至设备的误动作。

#### 4.3.2 电快速瞬变脉冲群测试及相关要求

不同的电子、电气产品标准对电快速瞬变脉冲群抗扰度试验的要求是不同的，但这些标准关于电快速瞬变脉冲群抗扰度试验大多都直接或间接引用 GB/T17626.4-1998（idt IEC 61000-4-4:1995）：《电磁兼容试验和测量技术 电快速瞬变脉冲群抗扰度试验》这一国家电磁兼容基础标准，并按其中的试验方法进行试验。下面就简要介绍一下该标准的内容、试验方法及相关要求。

##### 4.3.2.1 试验对象:

适用于在住宅区和商业区/工业区使用的在运行条件下的电子、电气设备的电快速瞬变脉冲群的抗扰性能测试。

##### 4.3.2.2 试验内容:

对电气和电子设备的供电电源端口、信号和控制端口在受到重复性快速瞬变脉冲群干扰时的性能进行评定。

##### 4.3.2.3 试验目的:

重复快速瞬变试验是一种将由许多快速瞬变脉冲组成的脉冲群耦合到电气和电子设备的电源端口、

信号和控制端口的试验。试验的要点是瞬变的短上升时间、重复率和低能量。

电快速瞬变脉冲群试验的目的就是为了检验电子、电气设备在遭受这类暂态骚扰影响时的性能。

#### 4.3.2.4 试验发生器

试验发生器性能的主要指标有三个：单个脉冲波形、脉冲的重复频率和输出电压峰值。

GB/T 17626.4 要求试验发生器输出波形应如图 14, 15 所示。

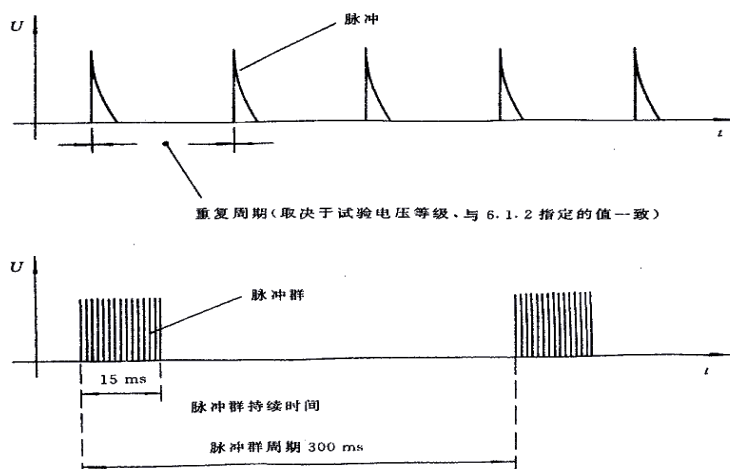


图 14: 快速瞬变脉冲群概略图

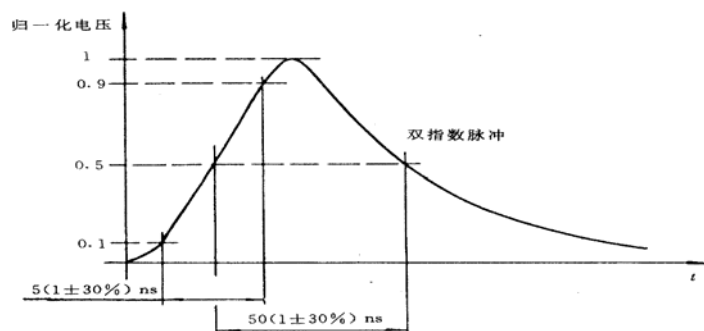


图 15: 接 50Ω 负载时单个脉冲的波形

#### 4.3.2.5 试验方法

对交/直流电源端子的选择耦合/去耦网络来施加快速瞬变脉冲群干扰信号。

对 I/O 信号、数据和控制端口选择快速瞬变脉冲群测试专用的容性耦合夹来施加快速瞬变脉冲群干扰信号。

#### 4.3.2.6 试验等级及其选择:

表 2: 试验等级

等级	供电电源端口、保护接地		I/O、数据和控制端口	
	电压峰值 kV	重复频率 kHz	电压峰值 kV	重复频率 kHz
1	0.5	5	0.25	5
2	1	5	0.5	5
3	2	5	1	5
4	4	2.5	2	5
x	特定	特定	特定	特定

注: X 是一个开放等级。开路输出试验电压精度 $\pm 10\%$ ; 和脉冲的重复频率精度 $\pm 20\%$

试验等级应根据下列情况来选择:

---电磁环境; ---骚扰源与关心的设备的邻近情况; ---兼容性裕度。

对具体的产品来说, 试验等级选择往往已在相应的产品或产品族标准中加以规定。

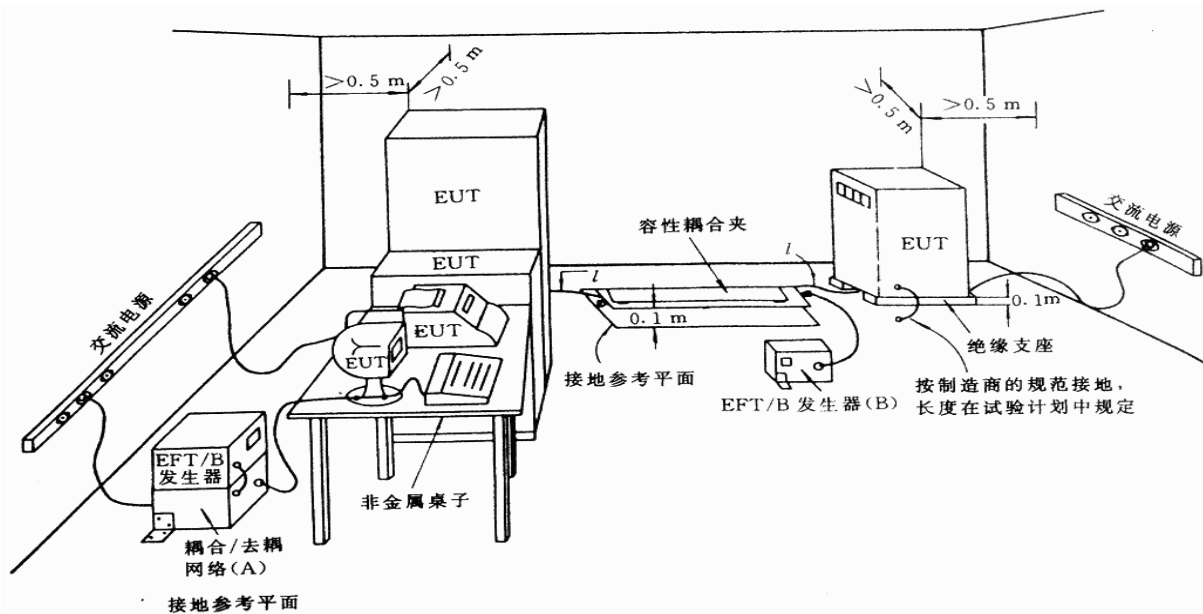
#### 4.3.2.7 试验环境

该标准规定的环境条件:

环境温度: 15°C~35°C、相对湿度: 25%~75%RH、大气压力: 86kPa~106kPa

#### 4.3.2.8 试验布置

标准对试验布置也做出了详细的规定，图 16 所示为用于实验室型式试验的一般试验配置示意图。



L=耦合夹与 EUT 之间的距离，不应大于 1m；(A)=电源线耦合位置；(B)=信号线耦合位置

图 16: 用于实验室型式试验的一般试验配置

#### 4.3.2.9 试验实施

电源、信号和其他功能电量应在其额定的范围内使用，并处于正常的工作状态。

根据要进行试验的 EUT 的端口类型选择相应的试验等级和耦合方式。

使受试设备处于典型工作条件下，根据受试设备端口及其组合，依次对各端口施加试验电压。

每种组合应针对不同脉冲极性进行测试，每种状态的试验持续时间不少于 1min。

不同的产品或产品族标准对试验的实施可能根据产品的特点有特定的规定。

#### 4.3.2.10 试验结果

若电快速变脉冲群测试通不过，可能产生如下后果：造成设备的误动作。

#### 4.3.3 导致电快速脉冲试验失败的原因

从脉冲群试验主要是进行电源线和信号/控制线的传导差/共模干扰试验，只是干扰脉冲的波形前沿非常陡峭，持续时间非常短暂，因此含有极其丰富的高频成分，这就导致在干扰波形的传输过程中，会有一部分干扰从传输的线缆中逸出，这样设备最终受到的是传导和辐射的复合干扰。

电快速脉冲试验波形的上升沿很陡，包含了很丰富的高频成分。另外，由于试验脉冲是持续一段时间的脉冲串，因此它对电路的干扰有一个累积效应，大多数电路为了抗瞬态干扰，在输入端安装了积分电路，这种电路对单个脉冲具有很好的抑制作用，但是对于一串脉冲则不能有效地抑制。

电快速脉冲对设备影响的原因有三种，包括：

a) 通过电源线直接传导进设备的电源，导致电路的电源线上有过大的噪声电压。当单独对火线或零线注入时，在火线和零线之间存在着差模干扰，这种差模电压会出现在电源的直流输出端。当同时对火线和零线注入时，仅存在着共模电压，由于大部分电源的输入都是平衡的（无论是变压器输入，还是整流桥输入），因此实际共模干扰转变成差模电压的成分很少，对电源的输出影响并不大。

b) 干扰能量在电流线上传导的过程中，向空间辐射，这些辐射能量感应到邻近的信号电缆上，对信号电缆连接的电路形成干扰（如果发生这种情况，往往会在直接向信号电缆注入试验脉冲时，导致试验失败）。

c) 干扰脉冲信号在电缆（包括信号电缆和电源电缆）上传输时产生的二次辐射能量感应进电路，对电路形成干扰。

#### 4.3.4 通过电快速脉冲试验的整改措施

针对脉冲群干扰，主要采用滤波（电源线和信号线的滤波）及吸收（用铁氧体磁芯来吸收）。采用铁氧体磁芯吸收的方案非常便宜也非常有效，但要注意做试验时铁氧体磁芯的摆放位置，就是今后要使用铁氧体磁芯的位置，千万不要随意更改，因为脉冲群干扰不仅仅是一个传导干扰，更麻烦的是它还含有辐射的成分，不同的安装位置，辐射干扰的逸出情况各不相同，难以捉摸。一般将铁氧体磁芯用在干

扰的源头和设备的入口处最为有效。下面根据端口的不同分别进行探讨。

#### 4.3.4.1 针对电源线试验的措施

解决电源线干扰问题的主要方法是在电源线入口处安装电源线滤波器，阻止干扰进入设备。

快速脉冲通过电源线注入时，可以是差模方式注入，也可以是共模方式注入。

对差模方式注入的一般可以通过差模电容（X电容）和电感滤波器加以吸收。

若注入到电源线上的电压是共模电压，滤波器必须能对这种共模电压起到抑制作用才能使受试设备顺利通过试验。

下面是用滤波器抑制电源线上的电快速脉冲的方法。

##### a) 设备的机箱是金属的：

这种情况是最容易的。因为机箱是金属的，它与地线面之间有较强的杂散电容，能够为共模电流提供比较固定的通路。这时，只要在电源线的入口处安装一只含有共模滤波电容的电源线滤波器，共模滤波电容就能将干扰旁路掉，使其回到干扰源。由于电源线滤波器中的共模滤波电容受到漏电流的限制，容量较小，因此对于干扰中较低的频率成分主要依靠共模电感抑制。另外，由于设备与地线面之间的接地线具有较大的电感，对于高频干扰成分阻抗较大，因此设备接地与否对试验的结果一般没有什么影响。除了选择高频性能良好的滤波器以外，在安装滤波器时，注意滤波器应靠近金属机箱上的电源入口处，防止电源线二次辐射造成的干扰。

##### b) 设备机箱是非金属的

如果设备的机箱是非金属的，必须在机箱底部加一块金属板，供滤波器中的共模滤波电容接地。这时的共模干扰电流通路通过金属板与地线面之间的杂散电容形成通路。如果设备的尺寸较小，意味着金属板尺寸也较小，这时金属板与地线面之间的电容量较小，不能起到较好的旁路作用。在这种情况下，主要靠电感发挥作用。此时，需要采用各种措施提高电感高频特性，必要时可用多个电感串联。

#### 4.3.4.2 针对信号线试验应采取的措施

快速脉冲通过信号/控制线注入时，由于是采用容性耦合夹注入，属共模注入方式。

##### a) 信号电缆屏蔽：

从试验方法可知，干扰脉冲耦合进信号电缆的方式为容性耦合。消除容性耦合的方法是将电缆屏蔽起来，并且接地。因此，用电缆屏蔽的方法解决电快速脉冲干扰的条件是电缆屏蔽层能够与试验中的参考地线面可靠连接。如果设备的外壳是金属的并是接地的设备，这个条件容易满足。当设备的外壳是金属的，但是不接地时，屏蔽电缆只能对电快速脉冲中的高频成分起到抑制作用，这是通过金属机壳与地之间的杂散电容来接地的。如果机箱是非金属机箱，则电缆屏蔽的方法就没有什么效果。

##### b) 信号电缆上安装共模扼流圈：

共模扼流圈实际是一种低通滤波器，只有当电感量足够大时，才能对电快速脉冲群有效果。但是当扼流圈的电感量较大时（往往匝数较多），杂散电容也较大，扼流圈的高频抑制效果降低。而电快速脉冲波形中包含了大量的高频成分。因此，在实际使用时，需要注意调整扼流圈的匝数，必要时用两个不同匝数扼流圈串联起来，兼顾高频和低频的要求。

c) 信号电缆上安装共模滤波电容。这种滤波方法比扼流圈具有更好的效果，但是需要金属机箱作为滤波电容的地。另外，这种方法会对差模信号有一定的衰减，在使用时需要注意。

d) 对敏感电路局部屏蔽。当设备的机箱为非金属机箱，或者电缆的屏蔽和滤波措施不易实施时，干扰会直接耦合进电路。这时只能对敏感电路进行局部屏蔽。屏蔽体应该是一个完整的六面体。

### 4.4 浪涌冲击抗扰度测试常见问题对策及整改措施

#### 4.4.1 浪涌冲击形成的机理

电磁兼容领域所指的浪涌冲击一般来源于开关瞬态和雷击瞬态。

##### 4.4.1.1 开关瞬态

系统开关瞬态与以下内容有关：

- a) 主电源系统切换骚扰，例如电容器组的切换；
- b) 配电系统内在仪器附近的轻微开关动作或者负荷变化；
- c) 与开关装置有关的谐振电路，如晶闸管；
- d) 各种系统故障，例如对设备组接地系统的短路和电弧故障。

##### 4.4.1.2 雷击瞬态

雷电产生浪涌（冲击）电压的主要原理如下：

- a) 直接雷击于外部电路（户外），注入的大电流流过接地电阻或外部电路阻抗而产生电压；
- b) 在建筑物内、外导体上产生感应电压和电流的间接雷击（即云层之间或云层中的雷击或击于附近物体的雷击，这种雷击产生的磁场）；



c) 附近直接对地放电雷电入地电流耦合到设备组接地系统的公共接地路径。

当保护装置动作时，电压和电流可能发生迅速变化，并可能耦合到内部电路。

#### 4.4.2 浪涌冲击测试及相关要求

不同的电子、电气产品标准对浪涌（冲击）抗扰度试验的要求是不同的，但这些标准关于浪涌（冲击）抗扰度试验大多都直接或间接引用 GB/T17626.5-1999 (idt IEC 61000-4-5:1995):《电磁兼容 试验和测量技术 浪涌（冲击）抗扰度试验》这一国家电磁兼容基础标准，并按其中的试验方法进行试验。下面就简要介绍一下该标准的内容、试验方法及相关要求。

##### 4.4.2.1 适用范围:

适用于电气和电子设备在规定的工作状态下工作时,对由开关或雷电作用所产生的有一定危害电平的浪涌（冲击）电压的反应。

该标准不对绝缘物耐高压的能力进行试验。该标准不考虑直击雷。

##### 4.4.2.2 试验内容:

对电气和电子设备的供电电源端口、信号和控制端口在受到浪涌（冲击）干扰时的性能进行评定。

##### 4.4.2.3 试验目的:

评定设备在遭受到来自电力线和互连线上高能量浪涌（冲击）骚扰时产品的性能。

##### 4.4.2.4 试验发生器

a) 信号发生器的特性应尽可能地模拟开关瞬态和雷击瞬态现象;

b) 如果干扰源与受试设备的端口在同一线路中，例如在电源网络中（直接耦合），那么信号发生器在受试设备的端口能够模拟一个低阻抗源;

c) 如果干扰源与受试设备的端口不在同一线路中（间接耦合），那么信号发生器能够模拟一个高阻抗源。

对于不同场合使用的产品及产品的不同端口，由于相应的浪涌（冲击）瞬态波形，各不相同，因此对应的模拟信号发生器的参数也各不相同。

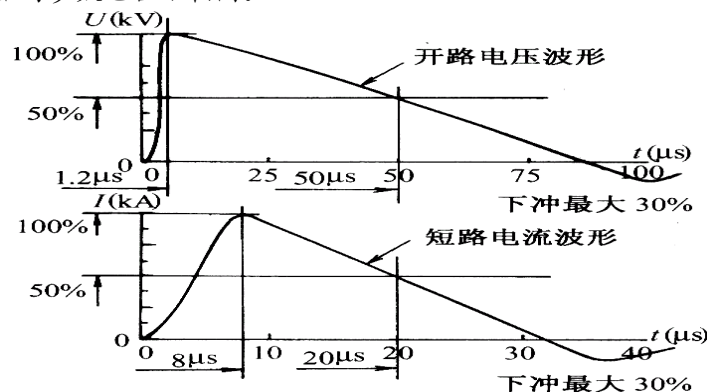


图 17: 浪涌（冲击）信号电压及电流波形

例如：对交流电源端口，通常采用的是 1.2/50 $\mu$ s (8/20 $\mu$ s)组合波信号发生器；对电信端口，通常采用的是 10/700 $\mu$ s 的符合 CCITT 要求的试验信号发生器。浪涌（冲击）波形见图 17 所示。

##### 4.4.2.5 试验方法

浪涌（冲击）测试一般应在线进行。

测试时，应根据不同的端口选择对应的波形发生器和相应的耦合/去耦单元，同时也应注意不同状态下的信号源内阻选择。

##### 4.4.2.6 试验等级及其选择:

表 3: 试验等级

等级	开路试验电压 ( $\pm 10\%$ ), kV
1	0.5
2	1.0
3	2.0
4	4.0
X	特定

注: X 是一个开放等级,可以在产品要求中加以规定。

试验等级应根据安装情况来选择。

对较高等级测试时，试验应满足该表所列的较低等级。

对具体的产品来说，试验等级选择往往已在相应的产品或产品族标准中加以规定。

#### 4.4.2.7 试验环境

该标准规定的环境条件：

环境温度：15℃~35℃、相对湿度：10%~75%RH、大气压力：86kPa~106kPa

#### 4.4.2.8 试验布置

图 18、图 19 是交/直流电源端浪涌（冲击）差模和共模试验配置示意图。

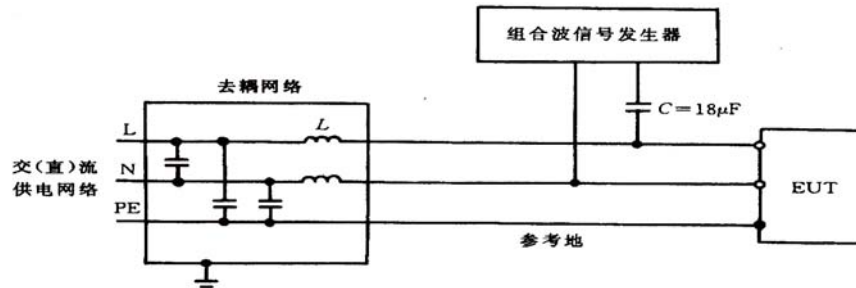


图 18: 用于电源端浪涌（冲击）试验配置（差模方式）

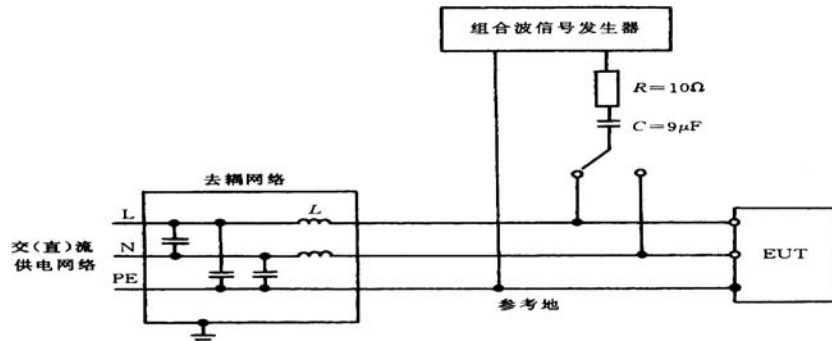


图 19: 用于电源端浪涌（冲击）试验配置（共模方式）

#### 4.4.2.9 试验实施

电源、信号和其他功能电量应在其额定的范围内使用，并处于正常的工作状态。

根据要进行试验的 EUT 的端口类型选择相应的试验试验波形发生器和耦合单元及相应的信号源内阻。

使受试设备处于典型工作条件下，根据受试设备端口及其组合，依次对各端口施加冲击电压。

每种组合应针对不同脉冲极性进行测试，两次脉冲间隔时间不少于 1min。

对电源端子进行浪涌测试时，应在交流电压波形的正、负峰值和过零点分别施加试验电压。

对电源线 and 信号线应分别在不同组合的共模和差模状态下施加脉冲冲击。

每种组合状态至少进行 5 次脉冲冲击。

若需满足较高等级的测试要求，也应同时进行较低等级的测试，只有两者同时满足，我们才认为测试通过。

不同的产品或产品族标准对试验的实施可能根据产品的特点有特定的规定。

#### 4.4.2.10 试验结果

若电快速变脉冲群测试通不过，可能产生如下后果：

- (1) 引起接口电路器件的击穿损坏。
- (2) 造成设备的误动作。

#### 4.4.3 导致浪涌冲击抗扰度试验失败的原因

浪涌脉冲的上升时间较长，脉宽较宽，不含有较高的频率成分，因此对电路的干扰以传导为主。主要体现在过高的差模电压幅度导致输入器件击穿损坏，或者过高的共模电压导致线路与地之间的绝缘层击穿。由于器件击穿后阻抗很低，浪涌发生器产生的很大的电流随之使器件过热发生损坏。

对于有较大平滑电容的整流电路，过电流使器件损坏也可能是首先发生的。例如，对开关电源的高压整流滤波电路而言，浪涌到来时，整流电路和平滑电容提供了很低的阻抗，浪涌发生器输出的很大的电流流过整流二极管，当整流二极管不能承受这个电流时，就发生过热而烧毁。随着电容的充电，电容上的电压也会达到很高，有可能导致电容击穿损坏。

#### 4.4.4 通过浪涌抗扰度试验应采取的措施

雷击浪涌试验有共模和差模两种,因此浪涌吸收器件的使用要考虑到与试验的对应情况。为保证使用效果,浪涌吸收器件要用在进线入口处。由于浪涌吸收过程中的  $di/dt$  特别大,在器件附近不能有信号线和电源线经过,以防止因电磁耦合将干扰引入信号和电源线路。此外,浪涌吸收器件的引脚要短;吸收器件的吸收容量要与浪涌电压和电流的试验等级相匹配。

雷击浪涌试验的最大特点是能量特别大,所以采用普通滤波器和铁氧体磁芯来滤波、吸收的方案基本无效,必须使用气体放电管、压敏电阻、硅瞬变电压吸收二极管和半导体放电管等专门的浪涌抑制器件才行。

浪涌抑制器件的一个共同特性就是阻抗在有浪涌电压与没浪涌电压时不同。正常电压下,它的阻抗很高,对电路的工作没有影响,当有很高的浪涌电压加在它上面时,它的阻抗变得很低,将浪涌能量旁路掉这类器件的使用方法是并联在线路与参考地之间,当浪涌电压出现时,迅速导通,以将电压幅度限制在一定的值上。

压敏电阻、瞬态抑制二极管和气体放电管具有不同的伏安特性,因此浪涌通过它们时发生的变化不同,图 20 对浪涌通过这三种器件时的变化进行了比较。

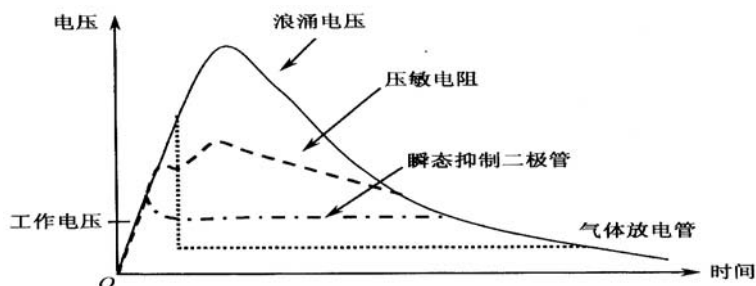


图 20: 浪涌冲击通过不同的抑制器件时的电压波形示意图

##### 4.4.4.1 压敏电阻

当压敏电阻上的电压超过一定幅度时,电阻的阻值大幅度降低,从而浪涌能量泄放掉。在浪涌电压作用下,导通后的压敏电阻上的电压(一般称为钳位电压),等于流过压敏电阻的电流乘以压敏电阻的阻值,因此在浪涌电流的峰值处钳位电压达到最高。

(1) 优点: 峰值电流承受能力较大,价格低。

(2) 缺点: 钳位电压较高(取决于最大浪涌电流),一般可以达到工作电压的 2~3 倍,因此电路必须能承受这么高的浪涌电压。另外,压敏电阻随着受到浪涌冲击次数的增加,漏电流增加。如果在交流电源线上应用会导致漏电流超过安全规定的现象,严重时,压敏电阻会因过热而爆炸。压敏电阻的其他缺点还有: 响应时间较长,寄生电容较大。

(3) 适用场合: 直流电源线、低频信号线,或者与气体放电管串联起来用在交流电源线上。

##### 4.4.4.2 瞬态抑制二极管(TVS)

当 TVS 上的电压超过一定幅度时,器件迅速导通,从而将浪涌能量泄放掉。由于这类器件导通后阻抗很小,因此它的钳位电压很平坦,并且很接近工作电压。

(1) 优点: 响应时间短,钳位电压低(相对于工作电压)。

(2) 缺点: 由于所有功率都耗散在二极管的 PN 结上,因此它所承受的功率值较小,允许流过的电流较小。一般的 TVS 器件的寄生电容较大,如在高速数据线上使用,要用特制的低电容器件,但是低电容器件的额定功率往往较小。

(3) 适用场合: 浪涌能量较小的场合。如果浪涌能量较大,要与其他大功率浪涌抑制器件一同使用,TVS 作为后级防护。

##### 4.4.4.3 气体放电管

当气体放电管上的电压超过一定幅度时,器件变为短路状态,阻抗几乎为零。这种导通原理与控制电感性负载的开关触点被击穿的原理相同,只是这里两个触点之间的距离和气体环境是控制好的,可使击穿电压为一个确定值。气体放电管一旦导通后,它上面的电压会很低。

(1) 优点: 承受电流大,寄生电容小。

(2) 缺点: 响应时间长。另外,由于维持它导通所需要的电压很低,因此当浪涌电压过后,只要加在气体放电管上的电压高于维持电压,它就会保持导通,在交流场合应用时,只有当交流电过零点时,它才会断开,因此会有一定的惯用时间。由于跟随电流的时间较长,会导致放电管触点迅速烧毁,从而缩短放电管的寿命。

(3) 适用场合: 信号线或工作电压低于导通维持电压的直流电源线上(一般低于 10V); 与压敏电

阻组合起来用在交流电源线上。

#### 4.4.4.3 气体放电管和压敏电阻组合应用

气体放电管和压敏电阻都不适合单独在交流电源线上使用。气体放电管的问题是它的电流效应。压敏电阻的问题是随着受浪涌作用的次数增加交流漏电流增加。一个实用的方案是将气体放电管与压敏电阻串联起来使用。如果同时敏电阻上并联一个电容，浪涌电压到来时，可以更快地将电压加到气体放电管上，缩短导通时间。

这种气体放电管与压敏电阻的组合除了可以避免上述缺点以外，还有一个好处就是可以降低限幅电压值。在这里可以使用导通电压较低（低于工作电压）的压敏电阻。从而可以降低限幅电压值。

该连接方式对浪涌电压的抑制作用如图 21 所示。

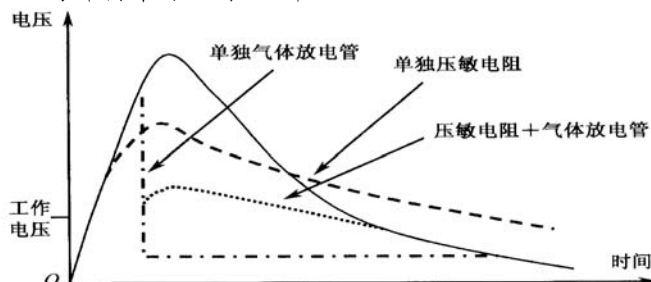


图 21: 气体放电管和压敏电阻串联使用的效果

采用组合式保护方案能发挥不同保护器件的各自特点，从而取得最好的保护效果。

浪涌经过压敏电阻和气体放电管后，会残留一个较窄的脉冲，这是由于气体放电管导通点较高所致。由于这个脉冲较窄，因此很容易用低通滤波器滤除。实用的浪涌防护电路是在浪涌抑制器的后面加低通滤波器。

#### 4.4.4.4 地线反弹的抑制

当并联型的浪涌抑制器发挥作用时，它将浪涌能量旁路到地线上。由于地线都是有一定阻的，因此当电流流过地线时，地线上会有电压。这种现象一般称为地线反弹。

地线反弹对设备的影响如下：

(1) 浪涌抑制器的地与设备的地不在同一点，设备的线路实际上没有受到保护，较高的浪源电压仍然加到了设备的电源线与地之间。解决办法是在线路与设备的外壳(地)之间再并联一只浪涌抑制器。

(2) 浪涌抑制器的地与设备的地在同一点，这时，该台设备的线路与地之间没有浪涌电压，受到了保护，但是如果这个设备与其他设备连接在一起，另一台设备就要承受共模电压。这个共模电压会出现在所有连接设备 1 与设备 2 的电缆上。解决的方法是在互连电缆的设备 2 一端安装浪涌抑制器。

#### 4.4.4.5 浪涌抑制器件的正确使用

需要注意的是，浪涌抑制器件的寿命不是永久的，总会失效。因此，在结构设计上，应该便于更换浪涌抑制器件。并且，当浪涌抑制器件失效时，应该有明显的显示，提醒维护人员进行更换。浪涌抑制器件的失效模式一般为短路，这可以称为安全模式。因为当浪涌抑制器短路时，线路会出现故障，从而提醒维修人员更换浪涌抑制器。但是，也有开路失效模式的可能性，这时往往会给设备带来潜在危险，因为设备会直接处于没有保护的条件下。

#### 参考文献：

- [1] 杨继深 电磁兼容技术之产品研法与认证 [M] 电子工业出版社 2004.6
- [2] 中国赛宝实验室 电子产品安全要求、试验与设计 [M] 中国标准出版社 2004.2
- [3] 白同云 如何实现电磁兼容 [M] 中国电子学会电子产品战略研究分会 2000.4
- [4] 沙 斐 机电一体化系统的电磁兼容技术 [M] 中国电力出版社 1999.5
- [5] 陈穷等 电磁兼容性工程设计手册 [C] 国防工业出版社 1993.10
- [6] 国家标准 GB/T17626.2-1998 电磁兼容 试验和测量技术 静电放电抗扰度试验 [S] 中国标准出版社 1999.6
- [7] 国家标准 GB/T17626.5-1999 电磁兼容 试验和测量技术 浪涌(冲击)抗扰度试验 [S] 中国标准出版社 1999.9
- [8] 国家标准 GB/T17626.4-1998 电磁兼容 试验和测量技术 电快速瞬变脉冲群抗扰度试验 [S] 中国标准出版社 1999.6