

# 第2章 提高产品抗扰度的方法

## 2.1 电源线的干扰问题

对于用计算机控制和数字逻辑控制的设备，电磁干扰问题常常归结为由高能量电磁场引起的射频干扰，静电干扰和电源线干扰等。

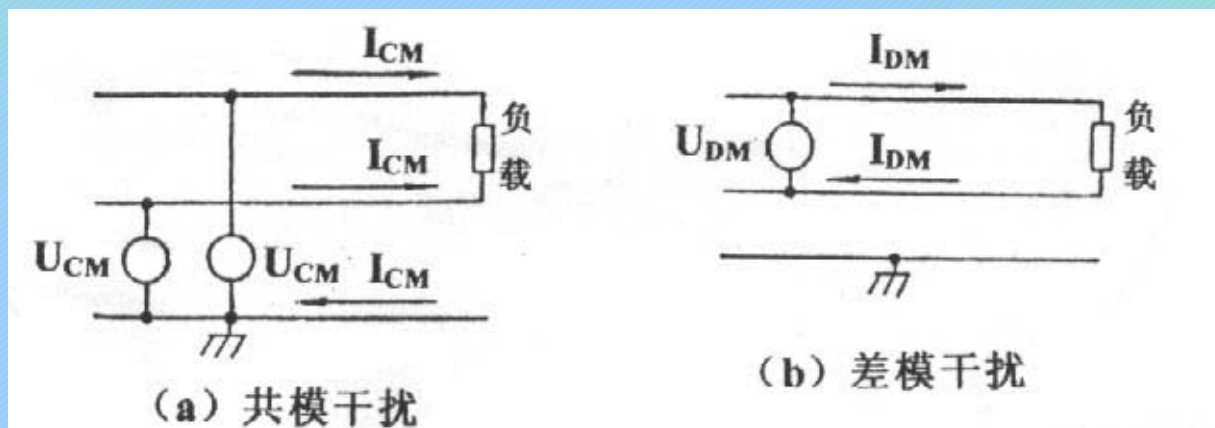
在不少情况下，电源线的干扰是设备制造厂所忽视的。但是对当代用计算机、微处理机以及其他复杂的、由集成电路所组成的设备来说，与电源干扰有关的干扰问题正日益严重，因为这些设备是在低功耗和高速度情况下工作的，导致它们对电源线的干扰特别敏感。

## 2.1.1 干扰的方式

电源干扰可以“共模”或“差模”方式存在。

“共模”干扰是指电源火线对大地，或中线对大地之间的干扰。对三相电路来说，共模干扰存在于任何一相与大地之间的干扰。共模干扰也称为纵模干扰、不对称干扰和接地干扰。这是载流导体与大地之间的干扰。

“差模”干扰是线与线之间的干扰，如电源相线与中线之间的干扰；对三相电路来说，差模干扰还存在于相线与相线之间的干扰。差模干扰有时也称为常模干扰、横模干扰或对称干扰。这是载流导体之间的电位差。



## 2.1.2 对干扰方式的判断

针对一些来路不明的干扰，利用对干扰所提供的定义，采用电流探头进行测试，可为确认干扰方式提供一种简便的方法：探头（可用磁环担当。在磁环上再绕几匝线圈用作测量用，测量线圈接到示波器的观察探头上）先分别套在每一根电源线上，观察这些线路的干扰情况。然后将探头同时套在几根电源线上，再观察线路上的干扰情况。如果在同时观察几根线的干扰比起在一根线上的干扰是加强的，则此种干扰属共模干扰；反之，则是差模的。

### 2.1.3 电源线上干扰的类型

造成电源干扰的复杂性的第二个原因是干扰表现的形式很多，从持续期很短的尖峰干扰直至电网完全失电。其中也包括了电压的变化（如电压跌落、浪涌和中断）、频率变化、波形失真（包括电压和电流的）、持续噪声或杂波，以及瞬变等等。

不是所有的干扰都会给电子设备带来麻烦，事实上只有两个是非常重要的原因：持续期短的尖峰干扰和长时间的电压跌落。尖峰干扰可以通过串扰或直接进入电源的方式耦合到系统去，从而引起内部逻辑电路的伪触发。电压的跌落可以引起存贮电路或其他易失数据的丢失。另一些干扰，例如轻微过电压、谐波失真或频率偏移等通常不会引起计算机化系统的误动作。

## 2.1.4 干扰是如何进入设备的

干扰进入设备不外是通过电磁耦合、电容耦合和直接进入等三条途径。

当一根导线通过一个磁场；或一个磁场在靠近一根导线时都会有电磁耦合，在导线上会感生出一个电动势，这就是变压器效应。因此当一个外磁场在靠近计算机时，就可能在计算机中引入噪声干扰。

电容耦合是产生噪声干扰的另一个原因。当两个物体相互靠近时，在两个物体之间存在的容抗就可以形成一条导电的通路，从而影响到两者固有的导电情况。如果两者之间的电压差达到相当高的程度，而且距离又很近时，甚至有可能在两个物体之间产生放电，形成电压的瞬变。

噪声干扰直接进入用电设备，则是一种最常见的干扰进入方式，无须作更多说明。

无论是哪种方式进入设备的干扰，只要它进入了系统，接下去便能肆意/system里传播开来了。噪声干扰对设备可能造成的第一个影响是设备的工作状态出错。噪声干扰可能造成的第二个直接影响是引起设备硬件损坏。

## 2.1.5 干扰对设备工作的影响

举出三组干扰对设备工作有影响的代表性数据，分别由IBM、AT&T及美国海军作出：

美国IBM公司的Allen和Segal在1974年对装在美国、加拿大和墨西哥的49台计算机的故障作了统计和分析，认为造成计算机故障中的电源起因，有49%是振荡瞬变，39.5%是脉冲干扰，11%是电压跌落，另有0.5%是电源中断。

美国AT&T公司的Goldstein和Sperenza在1982年对通信设备故障原因进行了分析，认为由电源造成的部分起因中，有87%是电压跌落，7.5%是脉冲干扰，4.7%是电源失效，另有0.8%是电压浪涌。

美国海军的Thomas Key汇总了海军系统十年内的计算机事故，认为电压过低是造成计算机故障的首要原因。

以上三组数据的结论大相径庭，其差异可归结为统计对象的不同。但从三组数据还是可以看出一些端倪，因电源问题造成设备故障的主要原因有两个，分别是电压过低和电源中有瞬变干扰（振荡瞬变和脉冲干扰）。

## 2.1.6 干扰的抑制技术

有各种各样的器件和设备能有效抑制电源线的干扰，它们中有简单的、只须单个元件的瞬变干扰抑制器，到复杂的、自动化的在线不间断电源（UPS）系统。全球每年有成百上千万美元的业务在增长，以便解决这些问题。对这些产品的正确选择和使用是很重要的，而不正确的应用方法则可能是电源干扰最普通的起因。

此外，对共模和差模的两种干扰区分非常重要。不同的干扰方式要用不同的方法才能得到解决。例如，我们不能期望用在线路板的电源和地之间拚命增加去耦电容的容量来解决脉冲群的干扰，这也就是我们不能用抑制差模干扰的方法来抑制共模干扰的道理。

常用的电源干扰的抑制技术有：专用线路；瞬变干扰吸收器件（能量转移方式：气体放电管、固体放电管；电压箝位方式：压敏电阻、硅瞬变电压吸收二极管）；滤波器（电源线滤波器、铁氧体抗干扰磁芯）；隔离变压器（普通的隔离变压器、带屏蔽层的隔离变压器、超级隔离变压器）；电压调整器（交流电子稳压器，包括机械的、电子的、铁磁共振的）；电源净化器多用途的（集干扰抑制、滤波和稳压于一身）；UPS / SPS系统。本章重点讲述瞬变干扰的吸收、电源线滤波和隔离变压器三个专题。



## 2.2 专用线路

专用线路指只带一个负载的单独线路，是简单、价廉而高度有效的措施。例如用一个单独变压器为设备供电。又如，当一个专用线路在主进线表盘上工作得很好时，就不要把它接到分支的进线表盘去，因为前者提供了最低的公共阻抗。

如果设备所在地是采用三相供电的，那么可以采取分相供电的办法，让产生干扰的设备和对干扰敏感的设备分相供电，这可有效地避免设备间的相互干扰，也有利于三相电网的平衡。

最后，考虑到现今的电网中有许多非线性负载，经常产生大量谐波电流。谐波电流在中线也是不能抵消的，要相互迭加，造成中线过载。结果之一，可能造成中线过热；结果之二，谐波电流在中线上的压降，对同一电网的其他设备是个干扰。基于这两个原因，目前要求采用截面积较大的导线来做中线（例如与相线有相同的截面积，甚至是相线截面积的一倍。而不是传统布线中，中线载面积是相线的一半）。

## 2.3 瞬变干扰吸收器件

瞬变干扰吸收器基本使用方法就是直接与被保护的设备并联，对超过预定电压的情况进行限幅或能量转移。常用的器件有气体放电管、金属氧化物压敏电阻、硅瞬变电压吸收二极管和固体放电管，及其组合。

为了对不同品种或品牌的瞬变干扰吸收器进行比较，常取一种或几种特殊形状的脉冲电压和电流波形进行考核。目前用得较多的是8/20  $\mu\text{s}$ （前沿8  $\mu\text{s}$ ，半峰持续时间20  $\mu\text{s}$ ）、10/700  $\mu\text{s}$ （前沿10  $\mu\text{s}$ ，半峰持续时间700  $\mu\text{s}$ ）和10/1000  $\mu\text{s}$ （前沿10  $\mu\text{s}$ ，半峰持续时间1000  $\mu\text{s}$ ）电流波考核器件的电流吸收能力。前者体现在电源线上的感应雷，由于电源线阻抗较低，因此感应的波形相对较窄；后两组波形则见于通信行业对瞬变吸收器件要求，由于通信线路阻抗相对较大，感应的波形也较宽。

此外，还用1.2/50  $\mu\text{s}$ （前沿1.2  $\mu\text{s}$ ，半峰持续时间50  $\mu\text{s}$ ）电压波来考核器件的响应速度。

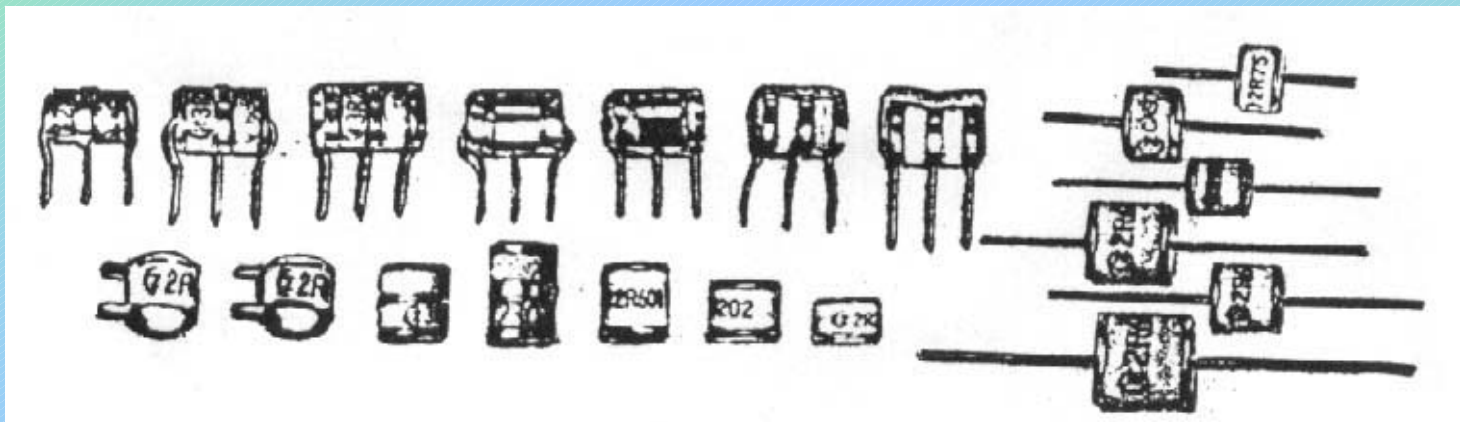
用1.2/50  $\mu\text{s}$ 和8/20  $\mu\text{s}$ 的综合波（同时在发生器内产生两种波形。发生器输出开路得到电压波；发生器输出短路得到电流波。发生器内阻用开路输出电压与短路输出电流之比表示，规定为2）考核器件的抑制特性。

关于峰值电流下的器件残余电压。与器件标称电压经常是不相等的，前者要大于后者。很显然，两者之比越接近于“1”，则说明器件的限制能力越好。

## 2.3.1 气体放电管

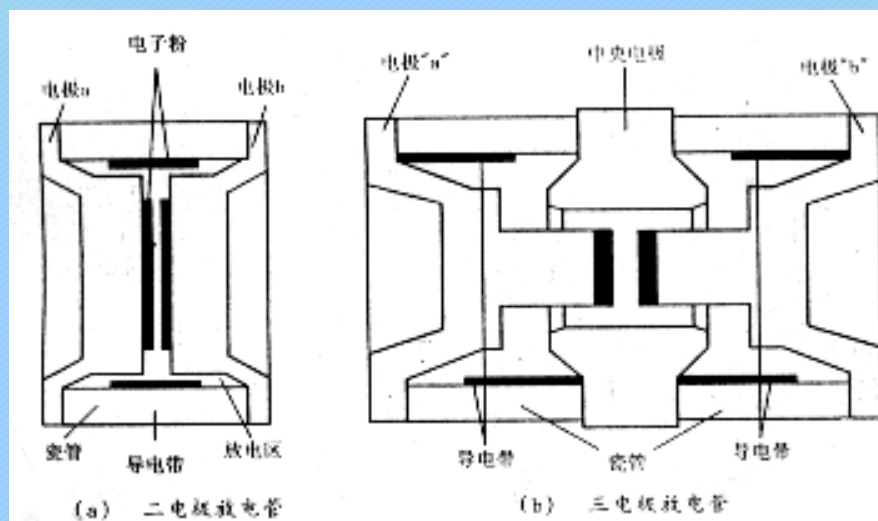
### · 概述

气体放电管是由金属电极和陶瓷管壳组成的密封气体放电器件。有二极和三极两种，可分别用在电源的线间和线-地之间作设备的过电压保护。



## 结构

气体放电管主要由电极、导电带、电子粉和稀有气体等组成。采用金属化陶瓷绝缘管壳和电极焊接技术，确保了放电管的气密性。优化选择放电管内部的气体种类（主要是氖、氩两种气体）和压力、电极涂敷材料成分及电极的间距，可以改变气体放电管的直流击穿电压（或称直流着火电压）、冲击击穿电压（冲击着火电压）、工频耐流能力和寿命等电气性能。

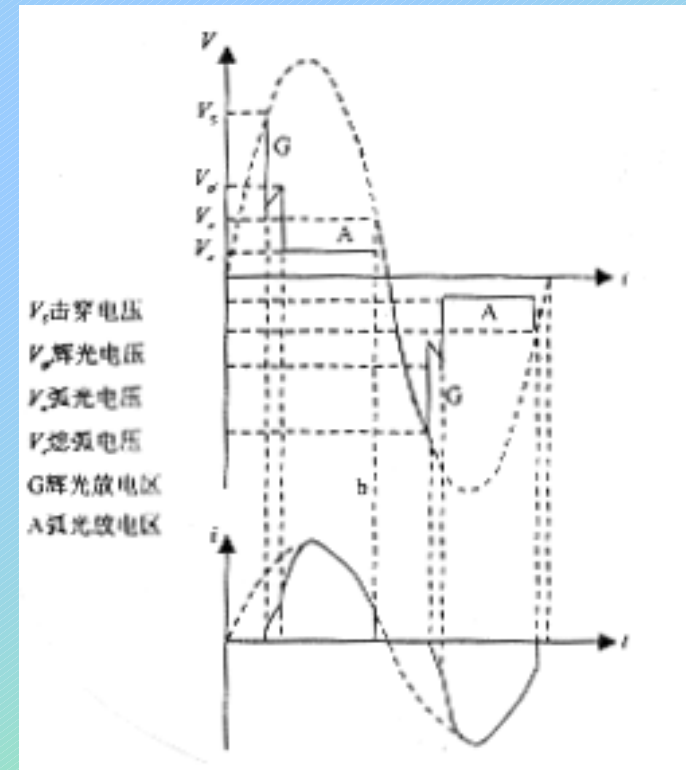


## 工作原理

以二极放电管作差模保护为例。使用时，放电管与被保护设备并联连接于电源线上。只要放电管两端的电压低于击穿电压，放电管将没有电流通过，放电管不会影响设备的正常工作。

一旦放电管两端的电压（由浪涌干扰所致）超过击穿电压，管内气体被电离，放电管开始放电。管子两端的压降迅速下降至辉光放电电压（约70~150V，取决于管子本身特性），管内电流开始升高。随放电电流增大，放电管进入弧光放电状态。放电管两端电压（弧光放电电压）跌得很低（只有10~35V，取决于管子本身特性），且在相当宽的电流范围内保持稳定。因此高电压浪涌干扰，被化解成低电压和大电流的受保护情况，免除干扰对设备带来的危害。

随着浪涌过电压的消退，流过放电管的电流降到维持弧光放电所需值以下（约为10~100mA，取决于管子本身特性），弧光放电停止，并再次通过辉光放电状态，结束整个放电状态（熄弧）。



## · 主要特性参数

气体放电管的主要特性参数有：

直流击穿电压。由低上升速率（ $dv/dt=100V/s$ ）的电压波来确定。

冲击（或浪涌）击穿电压。代表其动态特性，用上升速率 $dv/dt=1kV/\mu s$ （也有采用 $5kV/\mu s$ ）的电压波来确定。

标称冲击放电电流。指8/20  $\mu s$ 波形的额定放电电流，放电10次。

标准交流放电电流。指通过交流50Hz电流的额定有效值，每次放电的时间为1s，放电10次。

最大单次冲击放电电流。指对8/20  $\mu s$ 波的单次最大放电电流值。

耐工频电流值。指连续经受交流50Hz 9个周波的最大有效值电流。

绝缘电阻：指放电管未着火时绝缘电阻值。对90和150V的放电管测试电压用 $50V_{DC}$ ；其余规格放电管的测试电压用 $100V_{DC}$ 。要求放电管的绝缘电阻为 $1 \sim 10G$ 。

电容。指放电管电极间的电容，一般在 $2 \sim 10pF$ 。是所有瞬变干扰吸收器件中最小的。

附表6是某国内工厂的气体放电管特性参数，通过此例可知道参数的大体范围。

## · 参数分析

从附表6数据可以看出，气体放电管有很强的浪涌电流吸收能力。同时，它在起弧之前有很高的绝缘电阻和很小的寄生电容，因此对设备的正常工作不会产生有害影响。

但从冲击击穿电压的数据来看，与直流击穿电压有明显的差异，以90V的R098XA为例，直流击穿电压为90V，而冲击击穿电压达到700V。表明它对高速浪涌干扰的响应速度较低（而且浪涌波上升速率越高，气体放电管的响应能力越低。国外同类90V气体放电管，对5kV/ $\mu$ s波的响应电压要达到1000V）。故在选择气体放电管作为敏感设备的保护器件时，必须充分注意这一事实。

基于气体放电管有吸收能力强和响应速度低的特点，比较适合于在多级保护电路中作第一级的粗保护使用。

另外，在浪涌电压过去后，气体放电管不能马上熄弧。特别是当被保护线路由低阻抗电源供电（如由50Hz的交流电网供电），熄弧就不能马上实现。这是因为电路的低阻抗和起弧后放电管的低电阻（当大电流通过10~35V的电弧压降时，使放电管的等效电阻只有几 $\Omega$ ，或更低）所造成的。放电管的实际通过电流可能超过最大允许续流电流的许多倍（附表6中，对工频耐流规定，1s为5A；9周波为20A），只要续流的时间足够长，就有可能使放电管因过载而爆裂。这是系统保护中必须考虑的。

对通信系统的防护来说，一般使用直流供电，在浪涌电压过去后，放电管通常都能自动熄弧。这是因为通信线路有高阻抗的特点，故通信线路中的气体放电管能轻易完成熄弧。但当系统中存在高直流电压或低阻抗时，仍必须对放电管的熄弧性能进行确认。

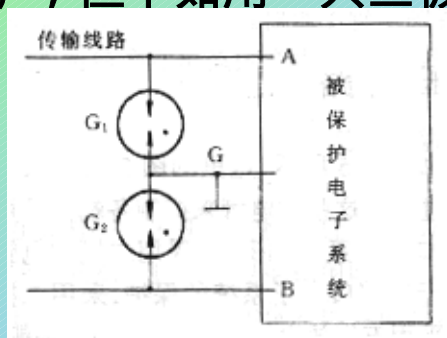
下列情况会造成气体放电管的特殊熄弧：当直流电压低于弧光放电电压（如低于10~35V）或低于辉光放电电压（如低于75~150V）。对后一种情况还应确保浪涌过后，线路中流过的电流低于弧光放电的维持电流（10~100mA）。



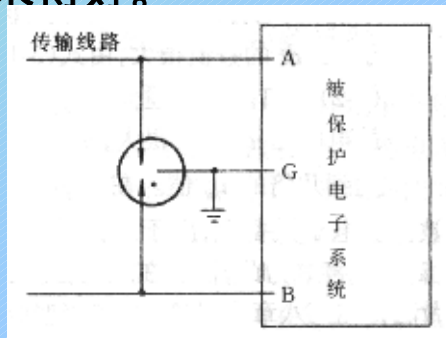
## 应用

### 用放电管完成线路的共模和差模保护问题

放电管的结构形式，决定它们各自的应用范围：二极管主要用于线间保护（差模保护）；三极管主要用于线-地保护（共模保护）。当然用两个二极管也可以完成线-地保护，但不如用一只三极管来得好。



a. 二极管保护电路



b. 三极管保护电路

图b采用三极管作保护的好处是可缩小保护线路体积，并能改善保护效果：对a，无法保证两个二极管特性完全一致，故共模过电压发生时，两个二极管动作有先后，结果使A、B两点有瞬间差模过电压出现，会危及被保护系统的安全。对b则不然，只用一个三极管作保护。即使三极管两部份特性不完全一致，只要其中一部分先放电，由管内气体电离所产生的自由电子会迅速扩散到另一部份，引起后者迅速放电。这大大减少了两只二极管放电的离散性，改善了保护的效果。图b还可以用在差模保护中，但要求输入过电压超过两个二极管的冲击击穿电压之和，方能进入保护。对一些脆弱的电子设备，可能难于承受，有必要在A、B间再接一个二极管，专门用于抑制差模过电压。这种情况，对图a也没有根本改善，也要加一个二极管用于抑制差模过电压。

## 放电管电极引线对干扰抑制的影响

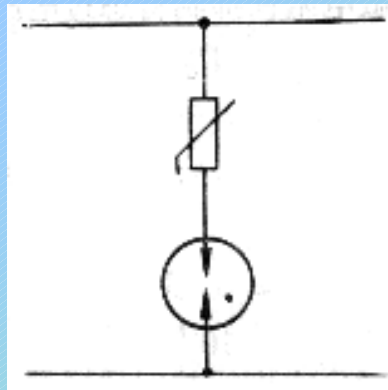
气体放电管的电极长度对限压有很大影响，这是因为放电管导电瞬间有很大的电流通过，线路中的 $di/dt$ 值很大，作为电极的引线，除了有电阻外，还存在寄生电感，因此在瞬态电流通过时，在引线上会产生瞬间高压，对被保护设备不利。基于这一现象，接地线应该采用长度短而截面积尽可能大的导线。尤其是截面积大的多股导线。

## 放电管的后续电流的切断问题

这是在交流电源中作保护时所不能不考虑的问题。

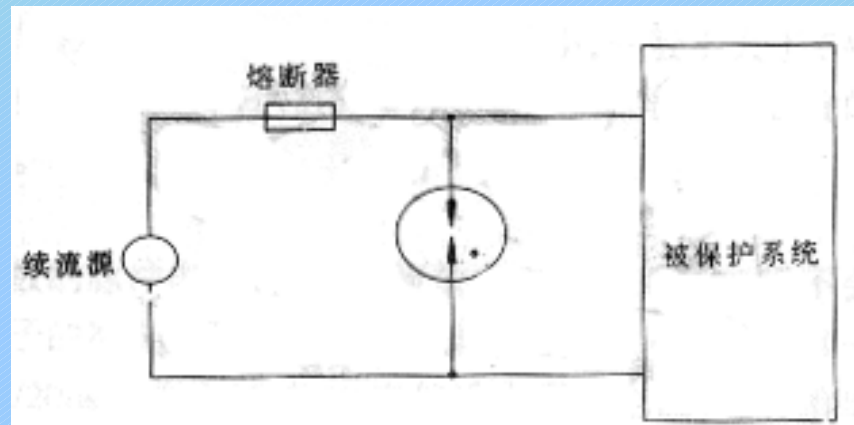
### 在放电管支路中串联压敏电阻

压敏电阻有较大的寄生电容，当它用于交流电源系统，会产生可观的泄漏电流，影响系统的正常运行。将压敏电阻与气体放电管串联，由于气体放电管的寄生电容很小，可使整个串联支路的总电容减至几个pF。此时，气体放电管将起一个开关的作用，没有暂态电压时，它能将压敏电阻与系统隔开，使压敏电阻几乎无泄漏电流，故压敏电阻的压敏电压可以选得较低，用不着顾忌压敏电阻有泄漏电流。过压出现时，放电管起弧，由于放电管的弧压降很低，使压敏电阻曝露在全部过电压下。此时压敏电阻起作用，将过电压限制在比单个压敏电阻更低的箝位电压下，使设备得到充分保护。过压过去后，只要压敏电阻能够切断气体放电管电弧区续流，整个保护电路便能回复到截止状态。事实上，只要压敏电阻能使后续电流小到 $10 \sim 100\text{mA}$ （由放电管特性定，大多数情况下，这个电流的临界值可保守地取 $50\text{mA}$ 左右），就能有效切断后续电流了。



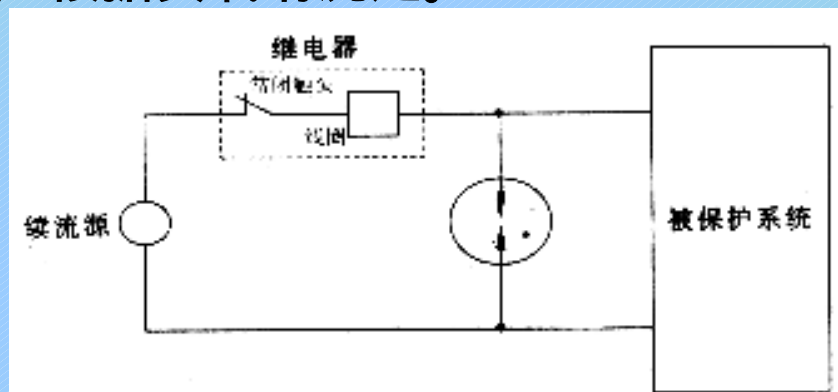
## 在主回路或放电管支路加接熔断器

图示线路可有效解决放电管的后续电流问题。但图中的线路在过电压过去后，主回路熔断器也将烧断，故在保护设备的同时却也使设备的连续供电遭到破坏，实非我们所愿。改进方案是在放电管支路加装一个熔断器，与主回路熔断器的电流容量之比为1:1.6，这样，在浪涌过后，只牺牲支路中的熔断器，设备的连续供电将不成问题，但受损熔断器必须及时更换，否则过电压再次发生时，设备将遭到破坏。



## 在主回路加接继电器

在图示线路里，保护继电器串联在主回路中。正常工作时，负载电流尚不足使继电器动作，电源经继电器常闭触头、继电器绕组向负载供电。一旦浪涌电压发生，气体放电管起弧，低的弧压降使输入电压全部出现在继电器绕组两端，促使继电器动作，图中常闭触头打开，有效地切断了放电管的后续电流。但同时继电器绕组也失电，因此继电器的常闭触头重新闭合，电源恢复向负载供电。对该线路的作用无用置疑，但负载的瞬间断电也是一个不争的事实，此方案能否使用应根据负载情况定。



## 气体放电管动作瞬间的对外辐射问题

气体放电管动作瞬间的电流变化率（ $di/dt$ ）极大，会在空间产生暂态电磁场向四周辐射能量，并在附近的电源线、信号线上产生干扰。处理的办法是，一方面拉大它与附近电源线和信号线的距离；另一方面应对采用气体放电管作保护的这一路线，采取屏蔽和吸收的措施。后者主要是在线路上套铁氧体的磁环和磁珠。

## 气体放电管标称电压的选择问题

气体放电管的直流击穿电压与标称电压之间有较大的偏差，再考虑到电源电压的波动情况，在直流电路中气体放电管的标称电压选择为工作电压的1.8倍；在交流电路中选择为工作电压有效值的2.5倍。

## · 气体放电管的质量问题

气体放电管的质量问题主要反映为慢性漏气、光敏效应、离散性 和长时间使用中的可靠性差。

## 13.3.2 金属氧化物压敏电阻 (MOV)

### · 概述

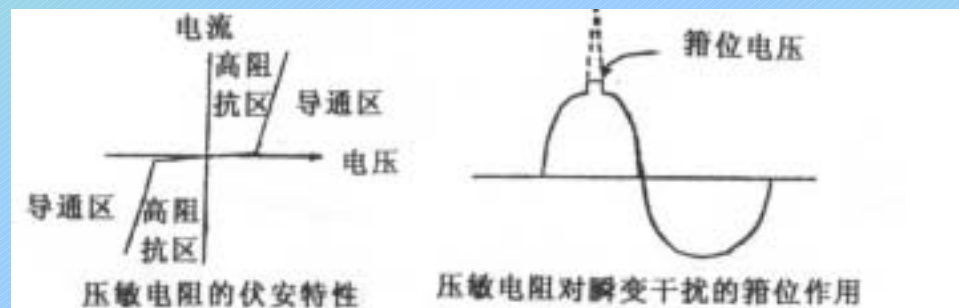
金属氧化物压敏电阻因其价格便宜、规格众多、使用方便和效果明显，是目前使用最多的瞬变干扰抑制器件。金属氧化物压敏电阻还经常与气体放电管、硅瞬变电压吸收二极管以及抗干扰铁氧体磁芯等构成组合式的、功能完善的瞬变干扰吸收器件。图示为常见的金属氧化物压敏电阻的外形结构图。





## · 结构

金属氧化物压敏电阻以氧化锌为主要成分，还掺有少量钴、锰、铋等其他金属的氧化物。其本体结构是被玻璃釉包裹的氧化锌颗粒，形成了许许多多的微型PN结。因此压敏电阻是众多PN结串联和并联的集合体。压敏电阻的这种结构使得它的特性与两只背对背连接的硅稳压二极管非常相似，有着毫微秒级的响应速度。它对瞬变干扰的抑制是通过箝位方式来实现的。对线路有危害的这部分能量将被压敏电阻通过转化成热量的形式来吸收掉。只要压敏电阻有足够的功率额定值，将不会对压敏电阻以及被保护设备造成任何损害。



由于氧化锌颗粒是一种良好的导电材料，因此正常工作的压敏电阻温度较低，散热条件较好，过载能力也较高。

压敏电阻对瞬变信号的吸收能力与压敏电阻的体积成正比：其厚度正比于电压；面积正比于电流；体积正比于容量。

另外，压敏电阻玻璃层的介电常数决定了压敏电阻有较大的寄生电容，这一点对于在高频场合的使用非常不利。

## . 特性参数

描述压敏电阻最主要的参数是压敏电压和对浪涌电流的吸收能力。下面对压敏电阻的一些常用的参数作介绍。

**压敏电压。**指恒流条件下出现在压敏电阻两端的压降，对直径为5mm的管芯，测试电流为100  $\mu$ A；对大于5mm的管芯，测试电流为1mA。

**残余电压。**指压敏电阻在通过规定波形（常为8/20  $\mu$ s）的浪涌电流时，在其两端出现的峰值电压。

**残压比。**压敏电阻的残余电压通常与压敏电压是不相等的，两者之比称为残压比，大约在1.8~2.2之间（或更高），这说明压敏电阻有较大的动态内阻。

**通流容量。**按规定时间间隔和次数，在压敏电阻上施加规定波形（常为8/20  $\mu$ s）的浪涌电流，压敏电阻的压敏电压变化率保持在规定范围内，所能通过的最大电流峰值。

**最大连续电压。**指允许长期连续施加在压敏电阻两端的工频电压有效值（或直流电压值）。压敏电阻在此电压下能正常冷却，不会发生热击穿。

附表7是国内某厂生产的压敏电阻的主要技术参数。

## . 使用

压敏电阻的使用原则是在其接入被保护设备后，不能影响设备的正常运行，又能有效地对设备实施保护。为此，除了根据压敏电阻的技术参数外，在实际选择时还要考虑以下几个问题：

### 压敏电压选择

考虑到压敏电阻实际的压敏电压与标称电压之间的偏差（误差，应考虑为标称电压的1.1~1.2倍）、交流电路中电源电压可能的波动范围（应考虑为额定电压的1.4~1.5倍）、交流电压峰值和有效值之间的关系（应考虑1.4倍），应选用压敏电压为额定电压2.2~2.5倍的压敏电阻。

在直流电路中，常选用压敏电压为直流电压额定值1.8~2倍的压敏电阻。

## 通流容量选择

原则上应按可能遭受的最大暂态浪涌电流来选择，但要做到这一点是困难的。实用中无非是按照使用场合，或是按照产品试验标准上规定的试验等级来选择压敏电阻。

按前者，1kA（8/20  $\mu$ s 电流波）的压敏电阻可用在可控硅整流器的保护上；3kA的用在电器设备的浪涌吸收上；5kA的用在对雷击及电子设备的过电压吸收上；10kA的用在对雷击的保护上。

按后者，常用综合波（发生器开路输出时产生1.2/50  $\mu$ s 的电压波；短路输出时产生8/20  $\mu$ s 的电流波；发生器的内阻为2  $\Omega$ ）来在线考核设备对抗雷击浪涌干扰的能力。在4kV试验时，保护器吸收的最大电流可达2kA；对6kV的试验，吸收电流的最大值为3kA。但在实际选择时，还应当适当加大所选压敏电阻的通流容量。因为通流能力大的压敏电阻，在吸收同样大小的浪涌电流时，应当有相对较小的残余压降；同时，对选用的压敏电阻来说，也有较大的保护裕度。

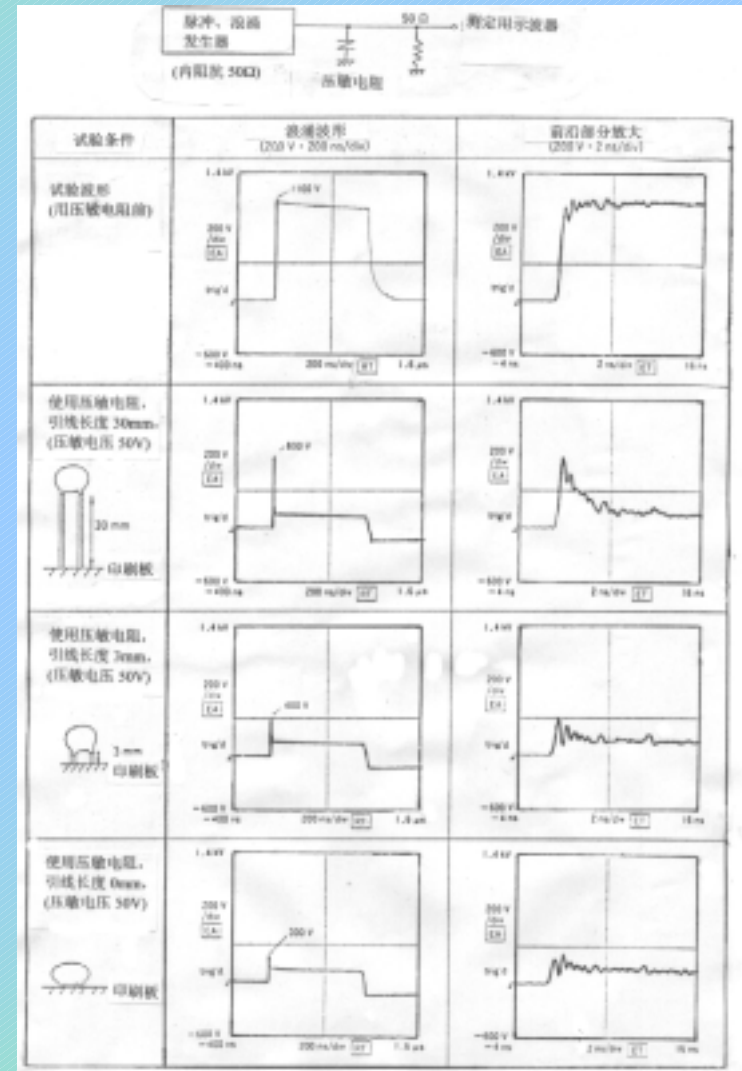
## 固有寄生电容问题

压敏电阻有一个固有电容问题，根据外形尺寸和标称电压的不同，其值在数百至数千pF之间。压敏电阻的固有电容决定了它不适合在高频场合下使用，否则会影响系统的正常运行。压敏电阻比较适合在工频系统里使用，如用作电源进线的保护、可控硅整流器的保护等等。

## . 响应速度

压敏电阻的动作与半导体元件的击穿导通非常相似，动作延时很小，一般认为是ns级的。故压敏电阻对瞬变干扰的箝位几乎可以看成是没有延迟的。但是压敏电阻的引线电感会掩盖其高速响应的特点。

压敏电阻引线电感引起的感应电压与引线电感量及压敏电阻箝位瞬间吸收电流的变化率 ( $di/dt$ ) 成正比。其中电流变化率与压敏电阻本身的特性，干扰源的干扰幅度、干扰源的内阻有关，是定数，不由使用人员改变。因此，感应电压的大小主要取决于引线电感的大小，亦即引线的长度。右图是一个用压敏电阻做试验的实例。此图表明，使用中应该将压敏电阻的引线剪得越短越好。



## . 压敏电阻的失效方式

常见的压敏电阻失效方式有如下几种：

**热击穿：**因压敏电阻的荷电率太高、已经劣化、内部均匀性差及吸收的脉冲能量过大等原因，会造成它的发热大于散热，引起热崩溃（或局部热崩溃），最终造成薄弱点穿孔而击穿。

**闪络：**指外部施加的瞬态电场强度太高，或外部绝缘水平差，在强电场作用下，沿元件侧表发生放电。

**开裂：**由于元件本身存在结构应力，在元件吸收大量能量时，因热应力作用而导致开裂。有时也有短路或开路情况发生。

**炸裂：**由于元件内部存在严重缺陷（如杂质、气孔等）在元件吸收了很大的脉冲能量时，局部电流集中，强大的热应力使元件炸裂。通常伴有开路失效情况。

以上各种失效，以短路失效较常见。

## . 使用中的注意事项

下面是对压敏电阻在使用中建议的注意事项：

尽量选择优质的产品（如已经过认证的产品）。

从抑制瞬变干扰的角度出发，要尽量降低外施电压与压敏电压的比率（它反映压敏电的荷电率），必要时可采取多级保护，以解决元件寿命和被保护设备对瞬变抑制的要求。

当压敏电阻应用在浪涌脉冲重复产生的场合时，通过压敏电阻的浪涌峰值电流和浪涌能量不应超过“脉冲电流寿命值”中的规定值。

当浪涌脉冲以很短的间歇重复施加于压敏电阻时，设计人员应计算此时的平均功率，并应该使其低于额定功率。通常5mm瓷片为0.1W；7mm瓷片为0.25W；10mm瓷片为0.4W；14mm瓷片为0.6W；20mm瓷片为1W。但压敏电压偏低的瓷片（例如低于68V的瓷片），能够承受的额定功率还要取低10~5倍。

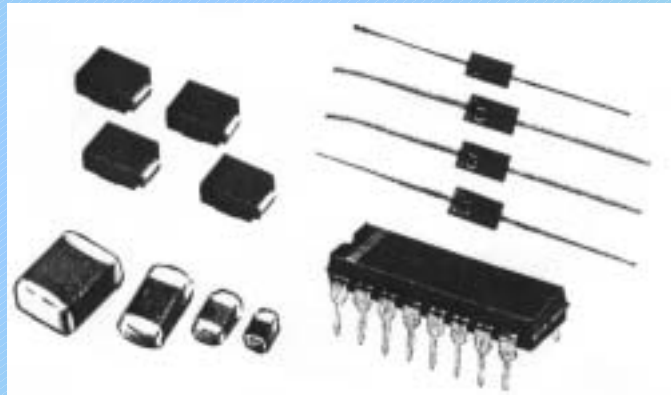


### 2.3.3 硅瞬变电压吸收二极管 (TVS管)

#### . 概述

硅瞬变电压吸收二极管具有极快的响应速度 (小于1ns) 和比较高的浪涌电流吸收能力, 可用于保护设备或电路, 甚至集成电路、MOS器件、混合电路和其地对电压敏感的半导体器件免受静电、电感性负载切换以及感应雷击等所产生的瞬变过电压。

硅瞬变电压吸收二极管有多种封装方式 (有表面贴装、普通二极管封装等等), 可满足不同场合的需要 (如其中有一款16脚双列直插封装的硅瞬变电压吸收二极管列阵包含了多达8~12对对地连接的二极管, 特别适合于对数字设备数据线及I/O线的保护)。



## . 工作原理与器件特点

硅瞬变电压吸收二极管与常用的半导体稳压二极管工作原理一样，都有限压功能，但后者常被用在调节稳态电压和小电流箝位中，没有特别强调对付暂态脉冲的吸收。

硅瞬变电压吸收二极管则是专门用在抑制暂态过电压，与稳压管相比，它有着更为优越的保护特性，为此硅瞬变电压吸收二极管有如下特点：

有较大的结面积，使通流能力较强。

管内有特殊材料（钼或钨）制成的散热片，故散热条件较好，有利于管子吸收较大的暂态功率。

由于结面积增大了，管子的寄生电容也就相应增大，其值达到几百甚至数千pF，使它在高频下使用受到限制。

## . 主要特性参数

主要参数有击穿电压、最大箝位电压、峰值脉冲吸收功率和结电容等。

额定直流持续工作电压 $V_{WM}$ 。在额定的工作温度内，只要外施电压不超过此值，硅瞬变电压吸收二极管绝对不会转为导通或微通状态。实用中所选器件的这一参数必须大于或等于被保护线路的最大工作电压。

最小击穿电压 $V_{BR(min)}$ 。在规定的恒流测试电流 $I_T$ 下，所测得的管子两端最小电压。

最大箝位电压 $V_C$ 。指管子通过额定峰值10/1000  $\mu s$ 电流波时，在管子两端出现的峰值电压的最大值。

峰值脉冲电流 $I_{PP}$ 。测试管子特性所使用的10/1000  $\mu s$ 峰值电流波。

峰值脉冲功率 $P_P$ 。在额定的10/1000  $\mu s$ 峰值电流波下，管子两端的最大箝位电压与管子通过电流峰值的乘积。

漏电流 $I_D$ 。在管子两端施逆向电压 $V_{WM}$ 时，所测到的管子通过电流。

测试电流 $I_T$ 。用来测试管子反向击穿电压的直流恒流电流，在多数情况下的 $I_T$ 为1mA。

顺向压降 $V_F$ 。只有单极性器件有此数据。一般以额定的正弦波电流通过半个周波时的压降表示， $V_F < 3.5V$ 。

结电容 $C_O$ 。结电容由硅瞬变电压吸收二极管的结面积决定。并在特定的偏置电压及特定的频率（通常是1MHz）下测得。

常用的硅瞬变电压吸收二极管有500W、600W、1.5kW、5kW和15kW（指峰值脉冲功率）等多种规格。今举某国外公司的1.5KE系列产品为例，以便熟悉这种器件的特点，详见附表8所示。

“1.5KE”系列硅瞬变电压吸收二极管的最大额定参数如下：

25 时的峰值脉冲功率达到1.5kW。

25 时的稳态功率为5W（引线长度3/8 ）。

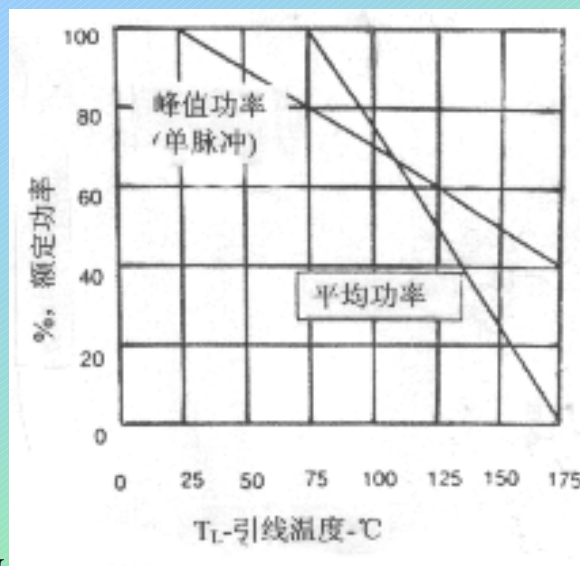
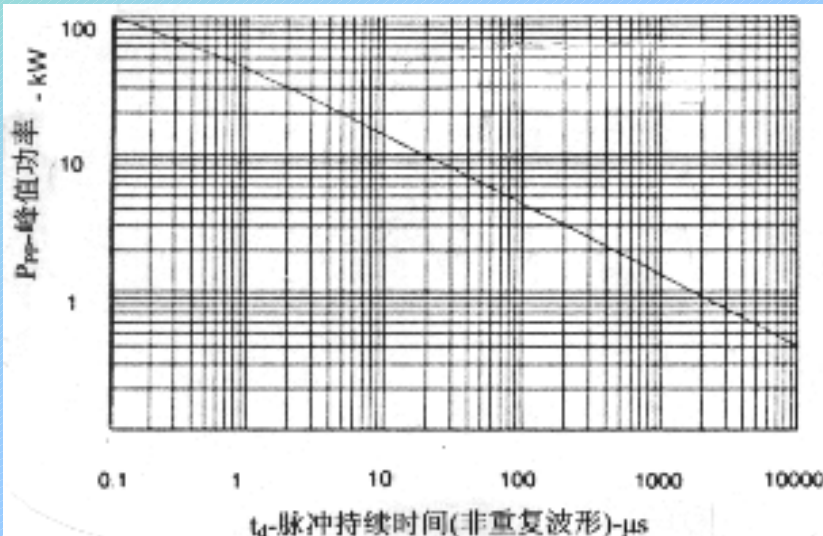
响应时间（从0V至 $V_{BR\ min}$ ） $< 1ns$ ；对双向硅瞬变电压吸收二极管， $< 10ps$ 。

重复率（占空比）为0.01%。

25 时顺向浪涌电流的额定值为200A（60Hz交流电，半个周期）。

工作与贮存温度为  $-65 \sim +125$  。

下面两图给出了该系列器件峰值脉冲功率与脉冲宽度之间的关系；引线温度与额定功率降额使用之间的关系。



## . 分析和应用

根据可能出现的暂态过电压极性选用单向极性管或是双向极性管。

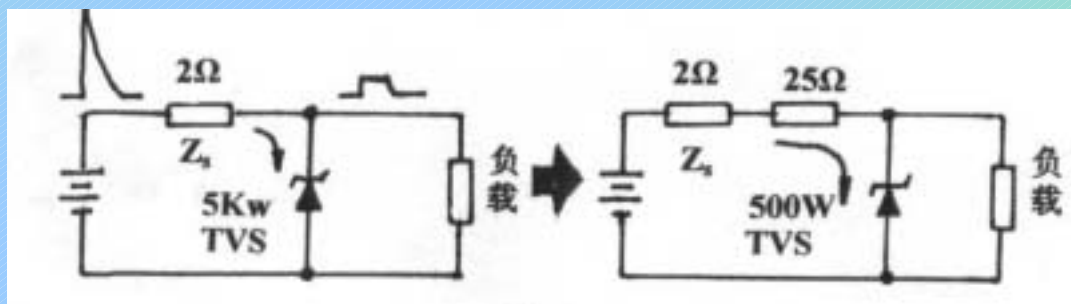
管子的最大箝位电压应低于被保护电子元件或设备的耐受水平。

应估计管子在抑制暂态过电压时可能吸收的最大功率，并按此来选择管子的脉冲功率。只是不同的波形要通过峰值脉冲功率—脉冲宽度曲线来合理选择。

附表8所给参数都是在25℃时作出的，随环境温度变化，吸收功率的值应降额使用，可参考降额曲线来确定降额的程度。

附表8中 $I_{PP}$ 时的最大箝压电压与击穿电压的关系相当于氧化物压敏电阻中残余电压与压敏电压之间的关系。根据表中数据可以计算得出两者之比大约在1.3 ~ 1.6之间，比压敏电阻的残压比要小得多，这表明硅瞬变电压吸收二极管有一定动态电阻，但比压敏电阻要小得多，限压要精确得多。所以硅瞬变电压吸收二极管常用在精密限压中；或用在组合式保护器的最后一级（靠近设备的这一级）。

与本章其他瞬变干扰吸收器件（气体放电管、压敏电阻和固体放电管）相比，硅瞬变电压吸收二极管的吸收能力相对较弱，价格相对较贵。基于这情况，对小电流负载可在保护电路适当串联一个电阻，限制流入二极管的浪涌电流，以便采用峰值吸收功率小的二极管来替代功率较大的二极管，从而降低保护成本。前提是增加的电阻要不影响被保护电路的工作。图中给出了这种情况的说明。原先用5kW硅瞬变电压吸收二极管处理的a线路，现由于在b线路串入一个25Ω的电阻，使二极管的吸收电流要减至a线路的1/13.5（电源线路的浪涌试验发生器内阻为2Ω），因此b线路只要用500W的二极管就足够了。而附加电阻由于静态功率消耗甚少，可以用一个额定功率为3W的线绕电阻来担当（理论上可以用额定功率更小的金属膜或碳膜电阻来担当，但这些电阻的抗冲击能力较弱）。



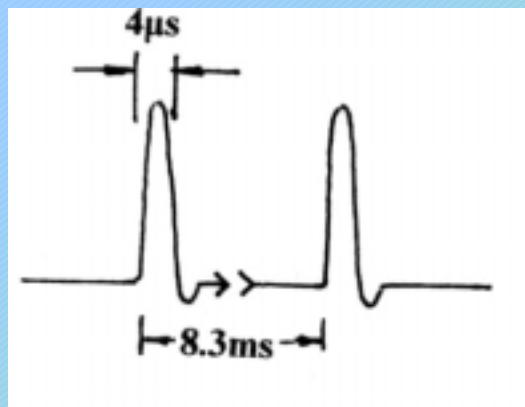
对于雷击，同一地点不可能高速重复出况；但是对于同一电路中的功率开关、继电器以及电机的控制，硅瞬变电压吸收二极管就可能遭受短时间、但是重复出现的瞬态过电压。针对后一种情况，在二极管里要引入平均功率的概念。通过计算短暂脉冲的宽度及脉冲的占空比来确定吸收脉冲的平均功率，要求此值小于二极管额定的稳态功率。图示为驱动电动机时在绕组中感应出来的一系列频率为120Hz、宽度为4 μs、峰值电流为25A的脉冲。在此例中选用表面贴装的硅瞬变电压吸收二极管，箝位至11.2V。这样，二极管的峰值脉冲吸收功率为

$$P_p = 11.2V \times 25A = 280W$$

二极管的平均吸收功率为

$$P_{avg} = 280W \times (4 \times 10^{-6}) s / (1/120) s = 0.134W$$

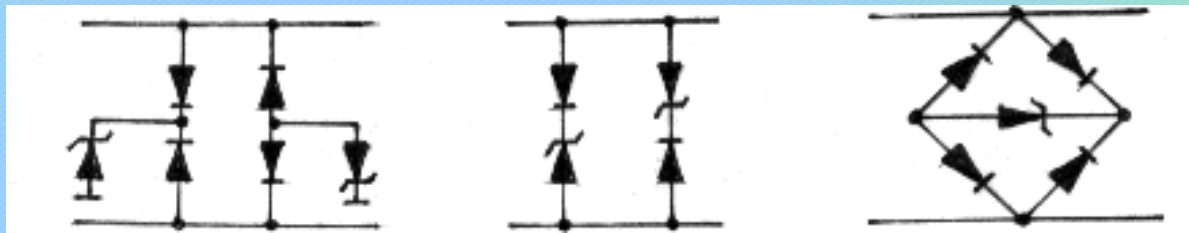
一个实际选出的二极管应当同时满足上述两个条件。





硅瞬变电压吸收二极管在高速传输电路上使用时，要特别注意它的结电容带来的有害作用。从附表3可以看到，低电压硅瞬变电压吸收二极管有着相应大的结电容，用在信号传输电路上，会造成信号的畸变。作为改进措施，可在硅瞬变电压吸收二极管支路中串联一个高速二极管。因为高速二极管有较小的结电容，二个相互串联的电容的等效电容为 $C_1 C_2 / (C_1 + C_2)$ ，所以等效电容取决于电容量小的这个电容。附表9是部分高速二极管的特性参教。

下图给出几例采用串联高速二极管降低硅瞬变电压吸收二极管结电容影响的方案。



从见到的硅瞬变电压吸收二极管的最高限是电压不超过440V，表面贴装的硅瞬变电压吸收二极管还不超过170V。当将这些硅瞬变电压吸收二极管串联起来就可获得更高限压。只是等效管的最大吸收电流取决于电流最低的这一个管子。

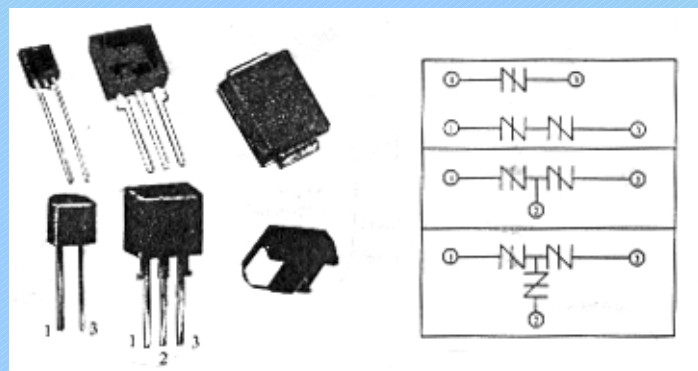
顺便指出，硅瞬变电压吸收二极管一般不宜通过并联方法来提高管子电流，因为在实用中难于找到几个特性完全一致的管子。这样，经常是一个管子过载(甚至是严重过载)、另一个欠载，但最终落得一个两败俱伤的结果。

硅瞬变电压吸收二极管的工作特性与一压敏电阻很相似，与气体放电管的应用也有相通之处。因此前两种器件的使用注意事项在硅瞬变电压吸收二极管中也有类同之处，如： 引线要短； 尽量安装在瞬变电压发生处； 为避免电磁耦合，附近应没有信号线和电源线经过。

## 2.3.4 固体放电管

### . 概述

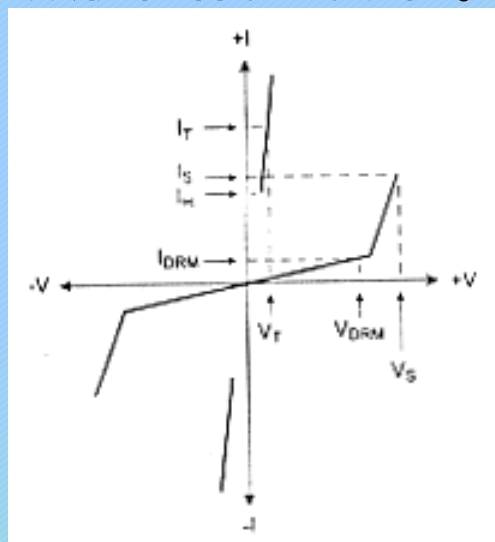
固体放电管是一种新型（仅十年左右历史）的瞬变电压吸收器件，与气体放电管一样同属能量转移型保护器件，但性能更理想。固体放电管的击穿电压从几十至300V；通态压降低至3~5V（近似于短路）；浪涌电流的吸收能力达100~500A，或更大（视型号）；有纳秒级的响应速度；动作电压稳定；使用寿命长；能双方向地吸收正/负极性的瞬变电压。



目前固体放电管已用在通信设备、计算机、传真机、火警及家用安全系统中，对雷击、静电、过电压等情况进行保护。

## . 工作原理

固体放电管是一种半导体四层二极管，它的电压-电流特性如下图所示。在固体放电管击穿之前，固体放电管几乎不导电（除了有漏电流通过，通常规定  $5\mu\text{A}$ ）。一旦固体放电管击穿，电流线性增加，放电管两端电压也相应增大。当电压达到  $V_S$  后，电流超过维持电流  $I_H$ ，管子的负阻特性使电流急剧增大，而管子两端的压降却降为  $V_T$ ， $V_T$  一般只有  $3\sim 5\text{V}$ 。此后，即使管内电流增加， $V_T$  值几乎不变（或只有少量增加）。只要外部电压超过固体放电管的箝位电压，放电管将保持继续导通。一旦电流中断，或降至维持电流  $I_H$  以下，放电管即转入高阻关断状态。从图中可知，固体放电管有双极性保护的功能。



## . 主要特性参数

固体放电管的主要特性参数如下：

漏电流 $I_{\text{DRM}}$ 。固体放电管处在关态最大可施电压 $V_{\text{DRM}}$ 下，测到的最大峰值关态电流。

转换电流 $I_{\text{S}}$ 。放电管进入导通状态所需的最大电流。

维持电流 $I_{\text{H}}$ 。保持放电管处于通态所需的最小电流。

峰值电流 $I_{\text{PP}}$ 。放电管可通过额定的最大峰值电流。

通态电流 $I_{\text{T}}$ 。额定的最大持续通态电流。

一周波内的峰值浪涌电流 $I_{\text{TSM}}$ 。指一个周波内，放电管可以通过额定的最大交流电流。

转换电压 $V_S$ 。指放电管转入通态之前，在管子两端可以施加的最大电压。

峰值关态电压 $V_{DRM}$ 。维持固体放电管为关态的最大可施电压。

通态电压 $V_T$ 。指在额定通态电流下，测到的放电管最大压降。

关态电容 $C_O$ 。指在放电管关断状态下测到的典型电容值。

电流上升速率 $di/dt$ 。指可以施加的电流最大上升速率。

电压上升速率 $dv/dt$ 。指对放电管所施加的电压上升速率。

为了使读者对固体放电管有进一步的认识，举国外某公司的TO-92“E”系列为例，说明固体放电管特性参数的大体范围，详见附表10和附表11所示。

## .应用

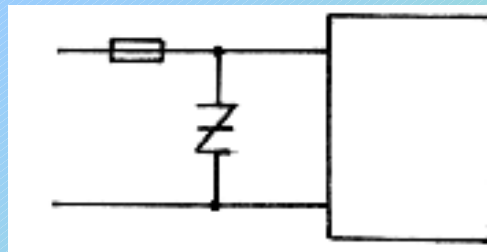
选择固体放电管，击穿电压是最优先考虑的参数。其值应大于被保护设备（或电路）的最大工作电压。转换电压必须小于瞬间电压峰值。

放电管的 $I_{PP}$ 应该大于最大浪涌峰值电流。万一放电管 $I_{PP}$ 值小于浪涌电流时，可通过附加电阻的办法来增加电流通过回路的电阻值，以限制放电管的通过电流。

对直流设备保护时，还须注意固体放电管的维持电流问题。只要在设备输入端短路的状态下，电路中的电流不超过140mA，那么浪涌电压过去后，固体放电管便能自动关断。

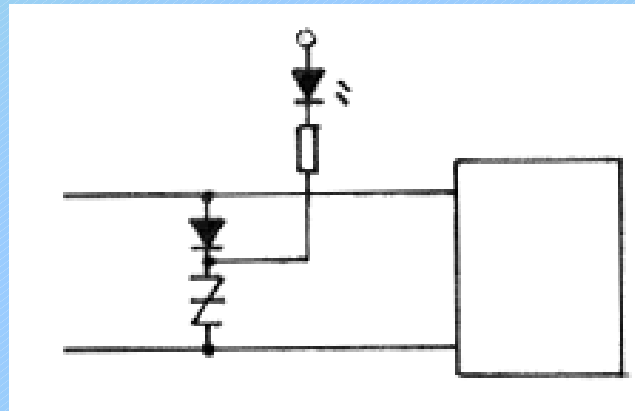
对于不能添加限流电阻的情况，为了保证固体放电管不会因吸收电流过大而遭受损坏，建议在保护回路中采用保险丝，。

由于保险丝的容量都是指连续工作状态下的电压和电流值，而对浪涌电压保护用的是峰值脉冲电流，两者缺少可比性。附表12是国外某固体放电管制造商提供的一组对照数据，供读者在选用保险丝时参考。



## . 其他

固体放电管的失效模式是短路，其意义在于不会使故障扩大，也便于值班人员及时发现故障和处理故障。图9.23是一个显示固体放电管失效的方案。正常情况下，固体放电管处于截止状态，故发光二极管不亮。一旦放电管发生短路失效，发光二极管由辅助电源供电，经限流电阻，再经过已经失效的固体放电管形成通路，发光二极管点亮，明确告诉值班人员设备目前处在故障状态，要求值班人员及时更换有故障的固体放电管。





## 2.3.5 组合式保护器

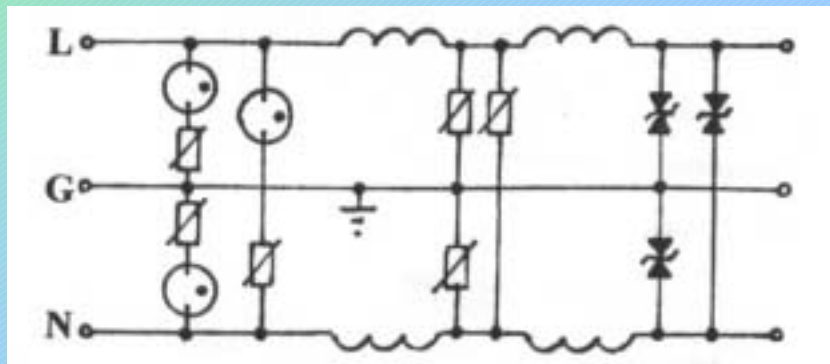
### . 概述

尽管各种瞬变电压吸收器件功能相似，但性能上仍有较大差异，也就决定了它们的不同应用面，下面是一些简单的比较。

器件名称	气体放电管	压敏电阻	硅瞬变电压吸收二极管	固体放电管
工作方式	能量转移	箝位吸收	箝位吸收	能量转移
泄漏电流	零	低	非常低	非常低
静电容	最小	较大	较大	较小
电流吸收能力	大	视外形尺寸定， 可以做得很大	较小	一般
箝位电压或残余电压	低	较高	一般	非常低
对脉冲的响应速度	低	高（ns级）	极高（< 1ns）	高（ns级）
标准电压及分档情况	75V ~ 1000V 约8 ~ 10个档次	几十伏 ~ 1kV 其间档次较多	几伏 ~ 400V 其间档次极多	10V ~ 30V 分10档左右
应用	一次粗保护。	不同的容量可以用在不同地方。	比较适合于做设备的板级（线路板）保护。	适合于做自网络到设备及部件一级的一般保护。

## . 组合式保护器件

一个理想的组合式保护器是充分利用了各种硅瞬变电压吸收器件的各自优点，组合在一个保护器内，既有吸收电流能力大的优点，又有电压实现精细保护的长处。下图是一个可能采用的方案。



理想工作状态是：当瞬变电压产生时，动作迅速的硅瞬变电压吸收二极管首先响应，使过电压不能进入被保护设备。随着电流增长，在它烧毁前，将吸收电流的功能转移到压敏电阻。当压敏电阻的吸收能力达到极限前，气体放电管已经响应，故瞬变电压的绝大部分能量转换成大电流经气体放电管被排放到地。被保护的设备因此得到幸存。

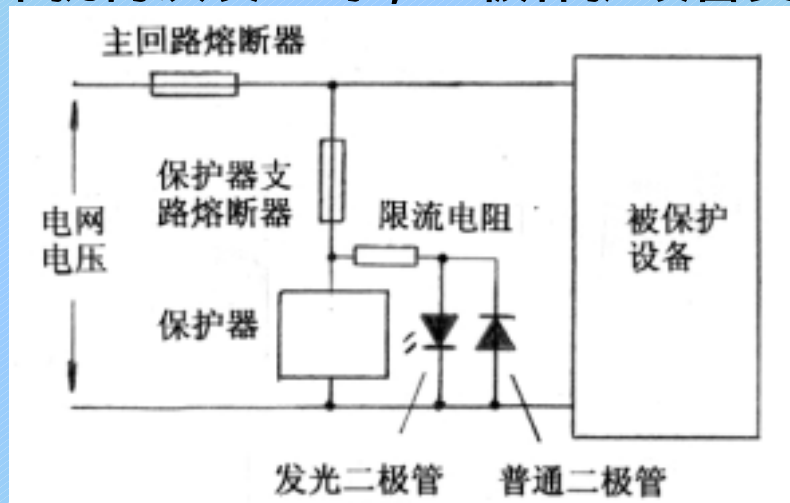
保护器设计时，级与级之间必须要有限流措施。小电流时，可以用电阻；对大电流，则要用电感。电感值不宜太大，一般选每个电感为 $10 \sim 15 \mu\text{H}$ 为适当。另外，器件的动作电压应尽量拉开差距，以保证每个器件都能发挥各自的最大效能。

## . 应用

针对不同的过电压场合，保护方案不能千篇一律：如在建筑物外，可能遭受直接雷击，上述任何器件都不能使用，必须采用避雷器作为建筑物的保护。在建筑物内，又分成两级，一级是建筑物内的主配电柜，可能遭受感应雷击和电网开关动作而引入的高能量切换瞬度，常用大容量的压敏电阻保护；另一级是楼层内的二次配电柜，经常遇到的是建筑物内开关切换和静电放电引入的瞬变较小的情况，也用压敏电阻进行保护，但容量比前一种要小。针对设备的保护，则经常采用组合式保护器，尽管瞬度的能量较小，但重点解决精细限压和快速响应这两个要求，确保设备万无一失。

保护器要装在电源线的开关和熔断器的后面，以便对开关切换和熔断器熔断时产生的瞬变也能起到保护。

为了避免保护器在吸收冲击电流时，可能使主回路熔断器熔断，使被保护设备被迫断电，建议在保护器支路中附加一个熔断器，它与主回路熔断器的电流容量比值为1 : 1.6。这样冲击电流首先熔断的将是保护回路的熔断器，而让主回路能保护连续供电。下图是一个可能采取的方案。保护回路熔断器正常时，熔断器正常导通，故图中的发光二极管点亮，代表保护回路正常。一旦保护回路熔断器熔断时，发光二极管的通路给断开，故发光二极管熄灭，告诉值班人班要及时更换熔断器，避免浪涌干扰再次发生时，让被保护设备受损。



保护器动作时伴有发热现象，故不能安装在木质材料上。

高能量瞬变会在电源线上产生非常大的电流瞬变，为避免它与被保护设备间的电磁耦合，保护器应装在电源入口处，并远离其他布线，如条件不许可时，应加电磁屏蔽措施。另外，保护器的接线要粗，要确保保护器有低阻抗的接地通路。

保护器的内部结构决定它对于抑制外部高频噪声的幅度和延缓其上升速率有明显作用。其实保护器对于由设备本身产生的电磁骚扰也有抑制作用。所以安装保护器，对于全面解决设备的电磁兼容问题都能起到一定作用。

## 2.4 滤波器

滤波器是一种用途很广的干扰抑制器件，诚如本篇第1章在介绍产品骚扰的抑制方法中提到，抑制骚扰的三大方法分别是接地、屏蔽和滤波。这表明滤波是抑制产品自身骚扰的有用技术。事实上，滤波对于抑制外界干扰对产品工作可靠性的影响，也是一种有效的技术。因此，滤波这技术具有两面性，它是解决产品电磁兼容性的主要手段之一。

本节打算介绍三个题目，分别是：《电源线滤波器》、《铁氧体抗干扰磁芯》和《信号线滤波器》。尽管我们在讲述时把它们归在一起，但工作原理也不尽相同。

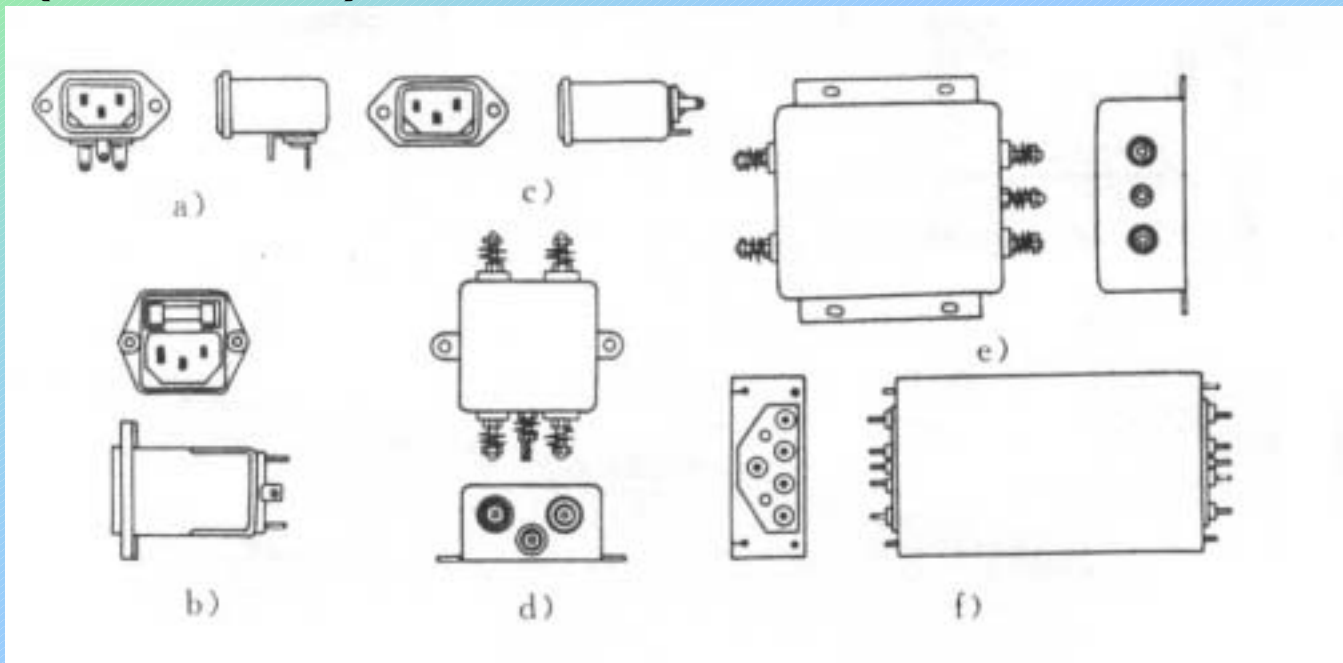
## 2.4.1 电源线滤波器

### . 概述

电源线滤波器则是安插在电源线和设备之间的一个专门用来抑制射频信号传播的器件。它的作用实际上是双方向性的，既能有效阻止外界的电磁干扰经电源线进入设备，又能阻挡设备自身工作中产生的电磁骚扰经电源线进入电网，传送到其他敏感设备。所以电源线滤波器是抗干扰和干扰抑制中都用得着的一种器件。

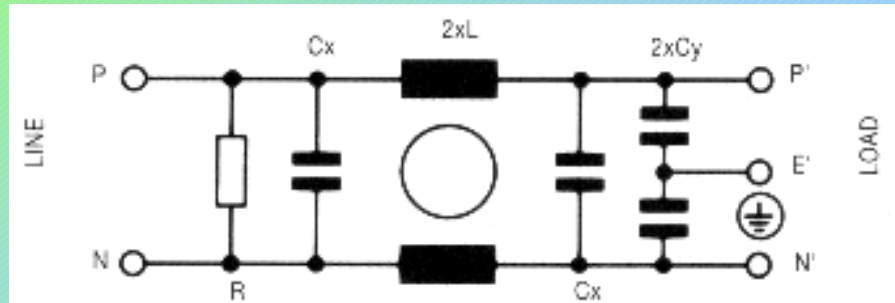
从标准的执行角度看，传导骚扰的测试频率范围是10kHz ~ 30MHz；而辐射骚扰的测试频率范围是30MHz ~ 1GHz。事实上设备电源线上的干扰和抗干扰问题不可能这样依频率来断然划分的。例如当设备电源线传导骚扰发射已经达标，但设备的辐射发射尚不合格，而设计人员对设备的结构一时又找不出更多破绽时，是不是还应当怀疑有经过电源线进行高频段的辐射发射（共模性质的发射）的可能性，必要时可通过对电源线滤波器的选择（选高频插入损耗高的滤波器）或在下一讲中要提到的铁氧体抗干扰磁芯的选用（套在设备的电源线入口处），来提高其对辐射发射的抑制能力。

常见的几种电源滤波器的结构型式：有单相和三相的；有带电源线插座的（通常是单相），也有安装式的。





## . 线路构成



图中，电感的两个线圈绕在同一磁芯上（同名端都在线圈左侧），这种接线对差模电流（包括电源电流）产生的磁通相互抵消，不会产生磁路饱和；而对共模电流则体现一个很大的电感，取得大的滤波效果，故这个电感被称为共模电感。滤波器的这一结构特点说明它在很大程度上是用来对付共模干扰的。对一定尺寸的滤波器来说，在磁芯选定以后，电感线圈的电感量将取决于所用导线的线径，通流小的，线径较细，线圈匝数可多一点，电感量就大一点；反之亦反。其典型值为几mH至零点几mH。

事实上，两个线圈不可能完全对称，两个线圈产生的磁力线也不会全部集中在磁芯中，这都会产生一部分抵消不掉的漏磁通，因此还有一定的寄生差模电感存在，这对于克服差模干扰是有好处的。寄生差模电感的电感量测量可在两个线圈的进线侧相互短接的情况下，从两个线圈的出线侧来测量。

$C_x$ 位于相线与中线之间，用于衰减差模干扰，故称为差模电容。电容量的大小仅涉及所用线路中容性差模电流的大小，对设备并无不利影响。故此值一般选得较大。电容器的耐压则与相线-中线电压相当。常用250VAC的CBB（聚丙烯）电容，典型值为几十至几百nF。

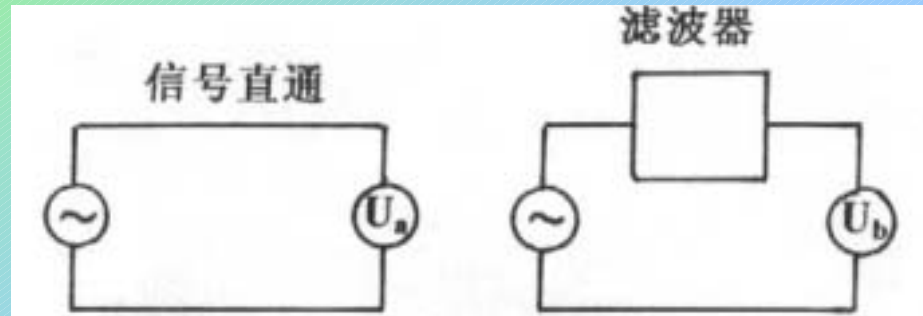
$C_y$ 位于相线对地和中线对地处，与共模电感一起用于衰减共模干扰，故称为共模电容。因为 $C_y$ 涉及直流耐压和工频耐压的检验，故 $C_y$ 耐压至少为 $3kV_{DC}$ 。同时，该电容又涉及对地泄漏电流问题，故电容量受到限制，不能任意取大，一般为1~4nF（典型值为2.2nF）。对医疗仪器，有时甚至不用此电容。

R用来泄放可能积聚在电容器上的静电荷，典型值为1M $\Omega$ 。此电阻不是必须的，在不少滤波器成品中无此电阻（但在医疗设备上用的滤波器，通常都有这个电阻）。

由于滤波器构成元件的参数值有限，特别是普通电源线滤波器的尺寸有限，构成元件的参数更是有限，因此电源线滤波器并不是理想的低通滤波器，而是一个带阻滤波器，通常在100kHz~30MHz范围内比较有效。频率超过30MHz以后，由于滤波器中电感电容的寄生参数开始起作用，滤波效能会有下降。

## 性能测试

测试按CISPR的第17号出版物规定进行，测试系统的信号源内阻和测试设备的输入阻抗都是50Ω。



滤波器的性能用插入损耗来表示， $U_a$ 和 $U_b$ 分别代表插入滤波器前后在负载端测到的信号电压。因此，滤波器的插入损耗

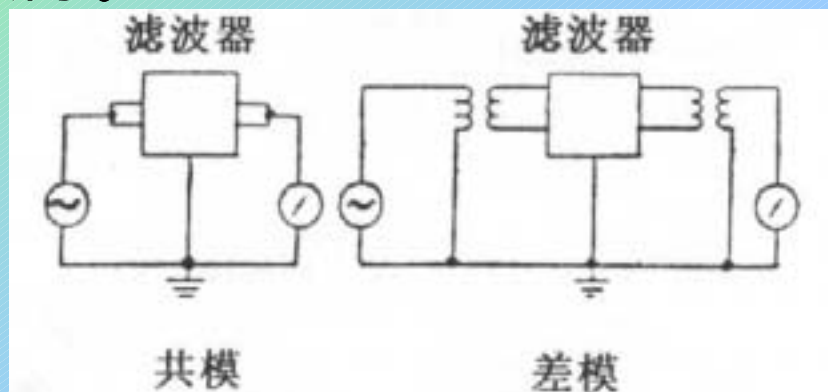
$$A = 10 \log (P_b / P_a)$$

式中， $P_a$ 和 $P_b$ 是滤波器插入前、后传到负载上的功率。由于测试设备输入阻抗不变，故插入损耗可用测试设备上测到的电压值来表示：

$$\begin{aligned} A &= 10 \log [ (V_b^2 / Z) / (V_a^2 / Z) ] \\ &= 10 \log (V_b^2 / V_a^2) \\ &= 20 \log (V_b / V_a) \end{aligned}$$

测试要在整个感兴趣的频段上（例如对电磁骚扰的传导发射频率范围9kHz ~ 30MHz内）进行。

干扰有共模和差模之分，因此插入损耗也有共模和差模之分，测试的原理线路见下图所示。



方法如下：用跟踪发生器和频谱仪作为测试线路中的信号源和测试仪器。在不带滤波器时建立一个0dB参考点，然后插入滤波器，记录所需频率范围内提供的衰减。

测试中所有的信号连接线要用50Ω同轴导线；零dB参考点要在整个频率范围内测量，而不是仅在1~2点内测量；滤波器外壳要有良好的射频接地；要确保滤波器的接线有很好隔离，以避免滤波器周围有射频耦合。

## . 安装

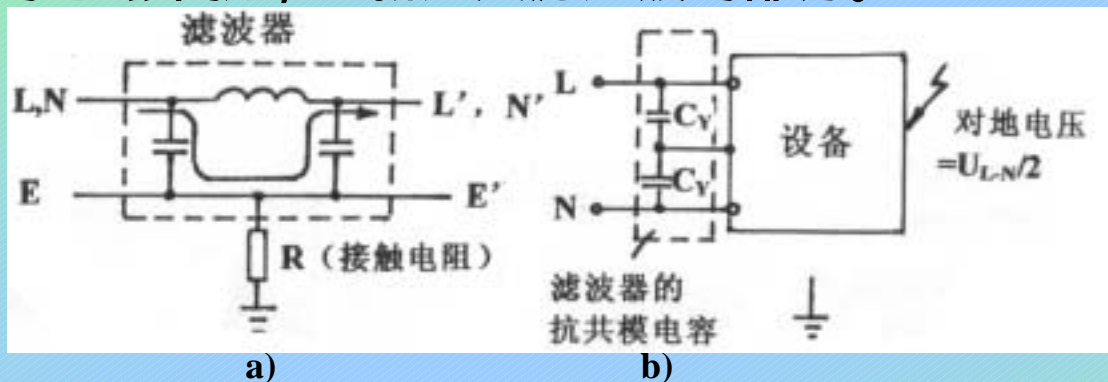
滤波器的滤波效果必须在安装正确时才能得到发挥。这里涉及滤波器的安装位置、接地和布线等一系列问题。

### 位置

滤波器安装的最佳位置应当是在机箱开口处，嵌装一只带有电源进线插座的金属外壳滤波器，以便阻止干扰进入或逸出机箱。基于这种想法，一些在机箱内布置相当长的电源线后再接滤波器的做法显然是错误的，因为电源线中的干扰在经过滤波器之前已经有了在机内辐射的机会，对于这类干扰，滤波器已经无能为力。辐射出来的干扰会被内部线路所吸收，造成设备的误动作。同样，对于设备工作时产生的电磁骚扰，也会因机箱内布置的电源线通过对辐射的接收，最后再通过传导的方式被引至机箱外部。

## 接地

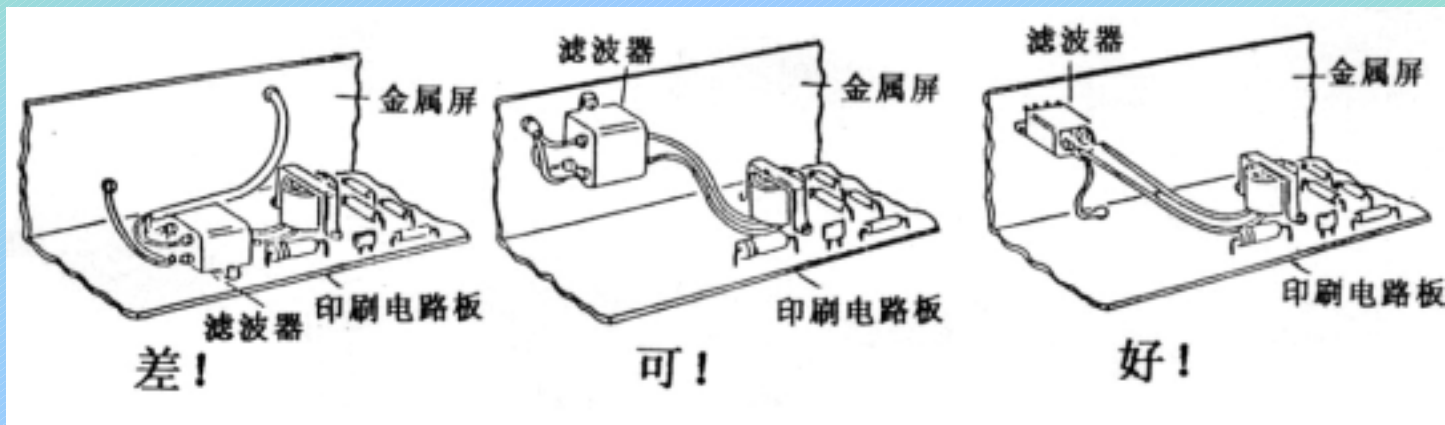
滤波器的接地必须良好。对于金属外壳的滤波器，不宜以单根导线接地，而要通过滤波器外壳与设备作大面积导电性连接方式接地，然后设备机箱再以粗而短的导线与大地连接。这一点对于发挥滤波器的共模衰减能力非常重要。在下图a中，由于滤波器接地不畅，使原先已经过共模衰减的电磁干扰，重新进入滤过波的部分。



图b给出了滤波器外壳必须接地的第二个原因。由于共模电容的公共连接点是滤波器的地，亦即是设备的外壳。滤波器正常工作时，共模电容公共连接点上的电压将是火线对中线电压的分压，由于两个共模电容的容量相等，公共点上的电压将是电源电压的一半。如果设备外壳不接地，则设备外壳就要带电，尽管共模电容的容量很小（几nF），人体在触摸时不会有生命危险，但毕竟有触电感觉，降低了安全感。所以，滤波器的接地，对提高设备的抗干扰能力和保障人员安全都是必须的。

## 布线

常见的一种布线不当是导线的集束捆扎法（下图a），由于滤波器的输入线和输出线扎在一起，线束间的射频耦合会使滤波效果严重受损。正确的做法是将滤波器的输入线和输出线分隔开来。机箱内部的线应当分门别类分开捆扎，而且留有足够的间距，怕干扰的线束应当靠底板布线（见图b）。而采用插座式滤波器则是最佳方案，因为输入和输出线分别处在两个电磁环境里，而滤波器的外壳和设备机箱保护良好接触（见图c）。



## . 滤波器的实际使用效果

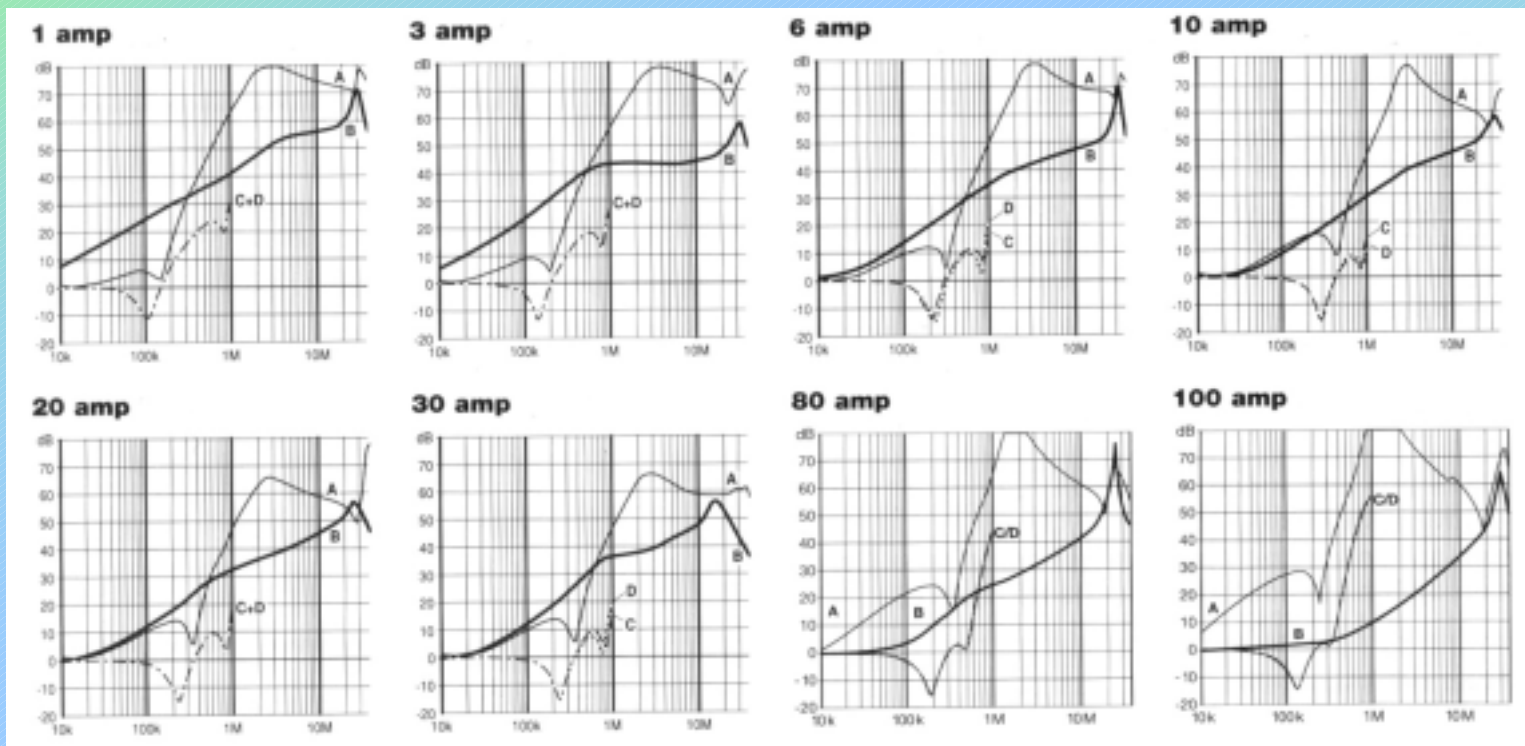
时常听到一些滤波器的用户反映，说是滤波器的实际使用效果不及想像中的那么有效。究其原因，部分可能是安装上的原因，使得滤波器的效用没有充分发挥出来；更大部分的原因则是实际使用环境中的滤波器与电源及设备（负载）的阻抗严重失配。

从滤波器的设计角度来看，考虑了电源线的共模阻抗相对较低（约在50Ω左右），故针对这种阻抗不匹配的概念，在滤波器的进线侧都是采用高的共模阻抗（串联共模电感来达到），以便让干扰被阻挡在滤波器的“门外”。

但是从负载（设备）侧来看，阻抗情况相当复杂（设备的输入阻抗有电感、电容，还有电阻性的），造成它与滤波器严重失配。



下图国外某著名滤波器制造商对其FN612滤波器的测试结果。曲线A和B是在信号源输出阻抗和测试仪器（负载）输入阻抗都是50Ω情况下测得的差模（对称）和共模（非对称）干扰的衰减情况。C和D则是在严重失配下（曲线C是源阻抗0.1Ω、负载阻抗100Ω；曲线D是源阻抗100Ω、负载阻抗0.1Ω）测到的滤波器差模（对称）衰减特性。图中可见，阻抗严重失配时，滤波器衰减特性明显变差，个别点上还出现衰减特性为负的情况，在这些频点上，滤波器对干扰非但不衰减，甚至出现了“放大”。

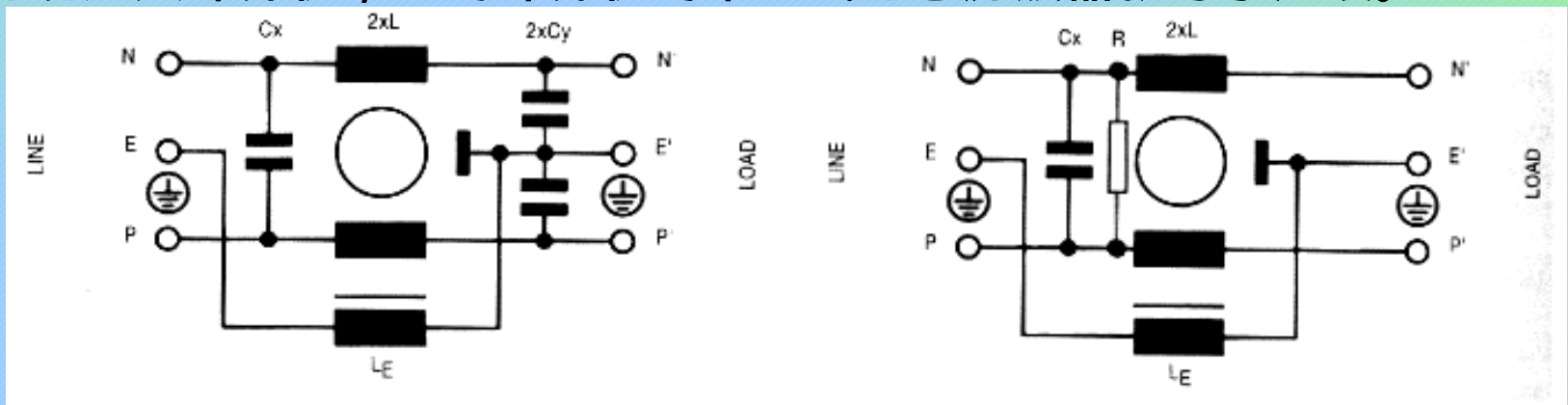


## 提高滤波器性能的一些措施

### 带有地线电感的滤波器

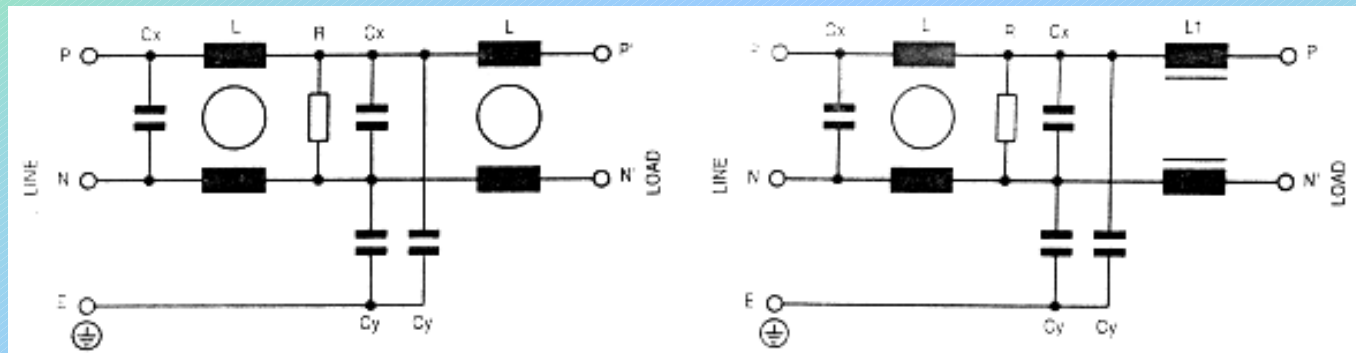
现时电源线（包括地线）都可能感受电磁干扰，一般滤波器可以减少相线和中线上的干扰，对地线上的干扰却无能为力，并因此可能引起设备失效。为了减少地线上的干扰，可以采用带有地线电感的滤波器，这个地线电感可提供地线干扰的额外衰减。下图是这种滤波器的线路图。使用时，单相电源的L、N和PE分别接图中滤波器的P、N和E。设备（连同滤波器在内）的外壳接大地。

使用带地线电感的滤波器要注意整个系统的协调了。例如个人计算机使用了这种滤波器，如果计算机与打印机相联，后者由电网来供电，若打印机没有用接地线电感，那么干扰就可能从电网进入打印机，并沿数据电缆进入计算机，此时计算机的带地线电感滤波器就等于虚设。



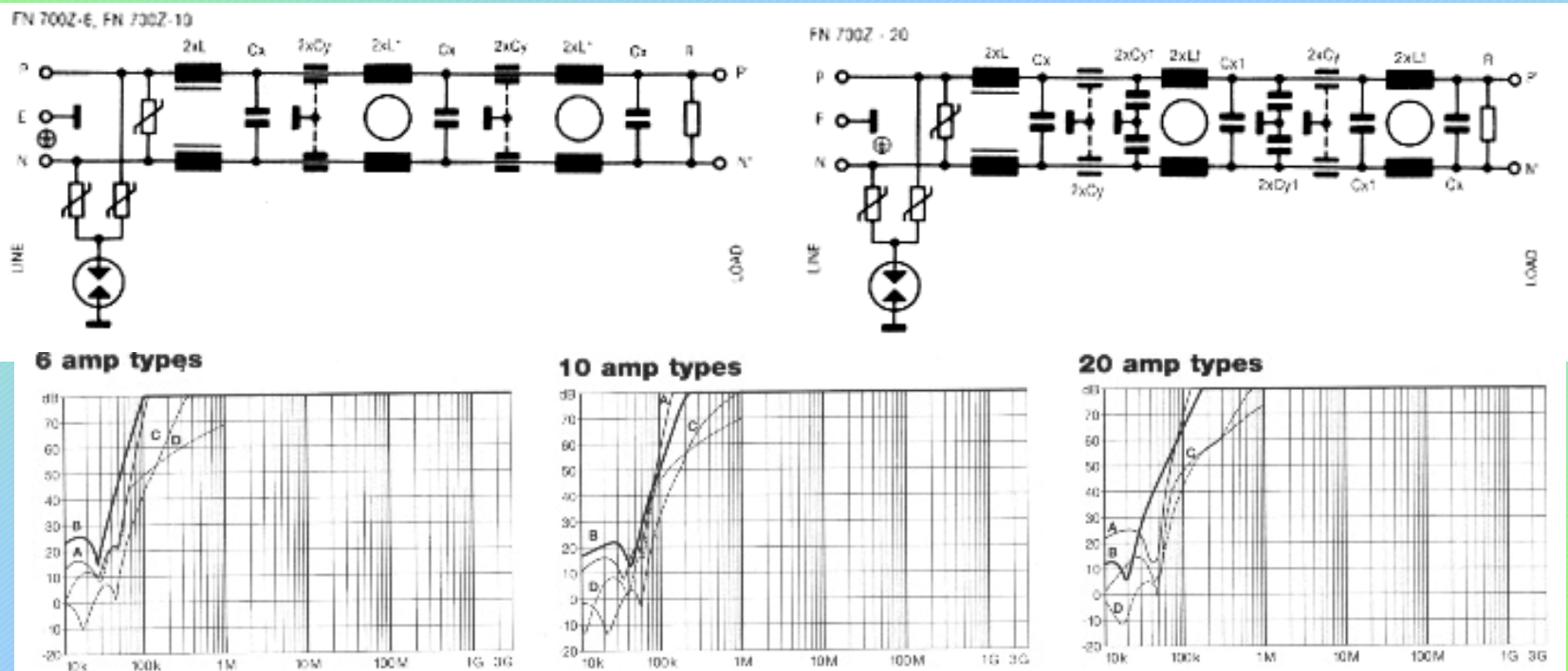
## 提高滤波器共模和差模滤波性能的方法

在滤波器中，为了增强其共模和差模滤波的性能，可以在滤波电路中串联增加共模和差模电感的数目，与此同时，再相应增加共模和差模电容的数目，下图是两个实例。



## 采用多级滤波器

单级滤波器结构简单、价格便宜，但阻抗失配问题对滤波性能有很大影响。采用多级滤波器可使这种情况得到一定程度的缓解。下图是国外某公司的FN700Z三级高性能滤波器及其特性。



参照CISPR17：A = 50 /50 对称；B = 50 /50 非对称；C = 0.1 /100 非对称；D = 100 /0.1 非对称

## 滤波器在有浪涌电压的场合下使用

普通滤波器对浪涌电压（特别是能量大、前沿长、持续时间长的浪涌）效果很差，这可以从阻抗失配，以及在浪涌波的作用下磁芯产生严重饱和等原因来解释。在滤波器里添加气体放电管和压敏电阻（也可以在滤波器外连接），用以改进滤波器对浪涌电压的抑制能力是个好办法，其实例已见于措施 的多级滤波器线路。一旦浪涌电压超过压敏电阻的压敏电压，压敏电阻便由平时的高阻抗（近似于电阻断开的情况）迅速转变为低阻抗，这样浪涌波就被箝位在压敏电压附近，浪涌波的大部分能量就通过压敏电阻被泄放掉，让设备得到了保护。

## 新型软磁材料的使用

滤波器低频段特性差的原因是受材料（铁氧体）的体积、重量、性价比、以及铁氧体的动态导磁率的限制。新型磁性材料（如非晶态）的使用，它的高导磁率使滤波器在低频段仍有高的电感量，从而改进了滤波器在低频段的插入损耗。另外，高的饱和磁感应特性（ $B_s$ ）使磁芯在大的脉冲电流下仍不致进入饱和区，而保持高的电感量和插入损耗。再有，高的材料居里点可使滤波器有较好的热稳定性。因此，用非晶态磁芯和铁氧体磁芯做成的两级滤波器有可能做成宽频带、高插入损耗并兼顾滤波器的体积、重量和性价比等指标的高性能滤波器。

### 加接有损元件来改进普通滤波器的高频特性

普通滤波器是用电容和电感等无损元件来构成的，实际上是把阻带频率的信号反射回信号源。因此，普通滤波器又称为反射滤波器。当滤波器和信号源阻抗不匹配时，部分频点上的信号能量有可能被多次反射，使干扰电平加强。在滤波器上加接有损的铁氧体磁环、磁珠（套在滤波器的进线上）有望改进滤波器的进线。有关铁氧体抗干扰磁芯详细说明请参阅本章4.2节。

## · 滤波器使用时的注意事项

下面提出一些滤波器使用的注意事项：

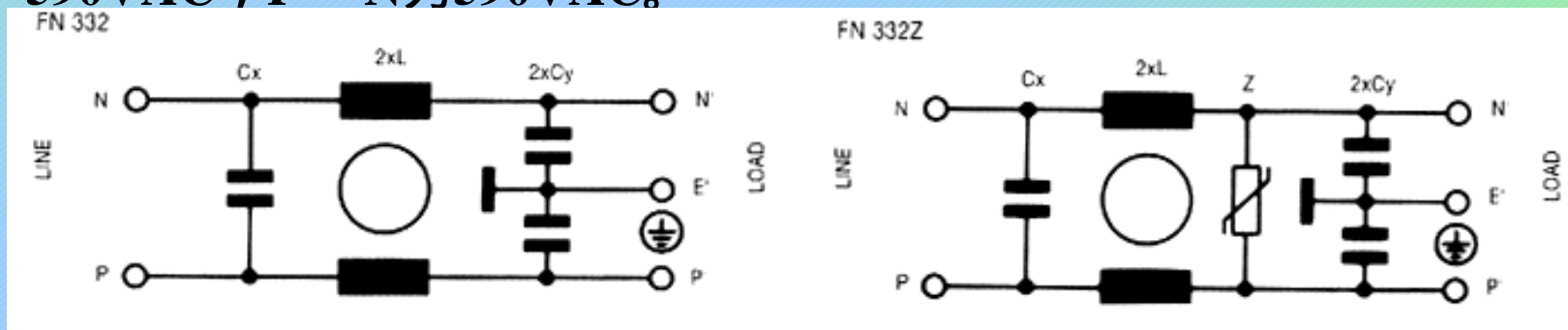
尽量选择有安全认证的产品。

选择滤波器除注意插入损耗外，还要注意额定电压和额定电流。工作电流超过额定电流时，不仅使滤波器过热，还会因电流过大造成磁芯饱和，造成实际电感量减小，影响低频段的滤波特性。

考虑价格因素，由用户自行搭制滤波器时，要注意这样一个事实，即滤波器的电路结构仅仅决定了它的低频特性，要想提高滤波器的高频特性，关键是注意其制作工艺。如要选用寄生电感小的电容和寄生电容小的电感；在焊接时，电容器的引线要尽量短，并在内部采用适当隔离等。

滤波器要尽量安装在设备的电源线入口处，这样可使电网干扰一进入机箱就被滤除。同时，电源线的进线和出线要尽量远离，电源的进线与出线采用绞线，以避免高频干扰在线间直接耦合。为了体现滤波器的共模抑制作用，滤波器的外壳要可靠地接设备机箱，以及设备的机箱可靠与大地连接就显得至关重要。这里提到的一些做法对于防止设备内部产生的电磁骚扰经电源线向外传导和辐射发射也同样有效。

滤波器对付高频传导干扰比较适用，对雷击浪涌试验要配合使用压敏电阻等干扰吸收器件。对此有人提出，浪涌试验过了，而安全试验又不过了。事实上，用压敏电阻就是要对付超过正常电压的干扰，所以安全耐压试验的高压必然使压敏电阻产生动作，造成了耐压试验通不过的假像。在国外，滤波器制造商在对待有浪涌抑制和无浪涌抑制的滤波器的考核指标是不同的。通常无浪涌抑制的滤波器的P、N—E（火线、中线对地）耐压试验用2000VAC~2500VAC，P—N（火线对中线）用1700VDC或760VAC。一旦滤波器内部增加了压敏电阻后，考核指标就变了，如FN332Z（带浪涌保护的滤波器，参看下图）的P、N—E试验电压为2000VAC，P—N为350VDC。又如FN700Z（高性能滤波器，在线间及线、地之间都带有浪涌保护，见“采用多级滤波器”这一节），规定P、N—E为590VAC，P—N为590VAC。

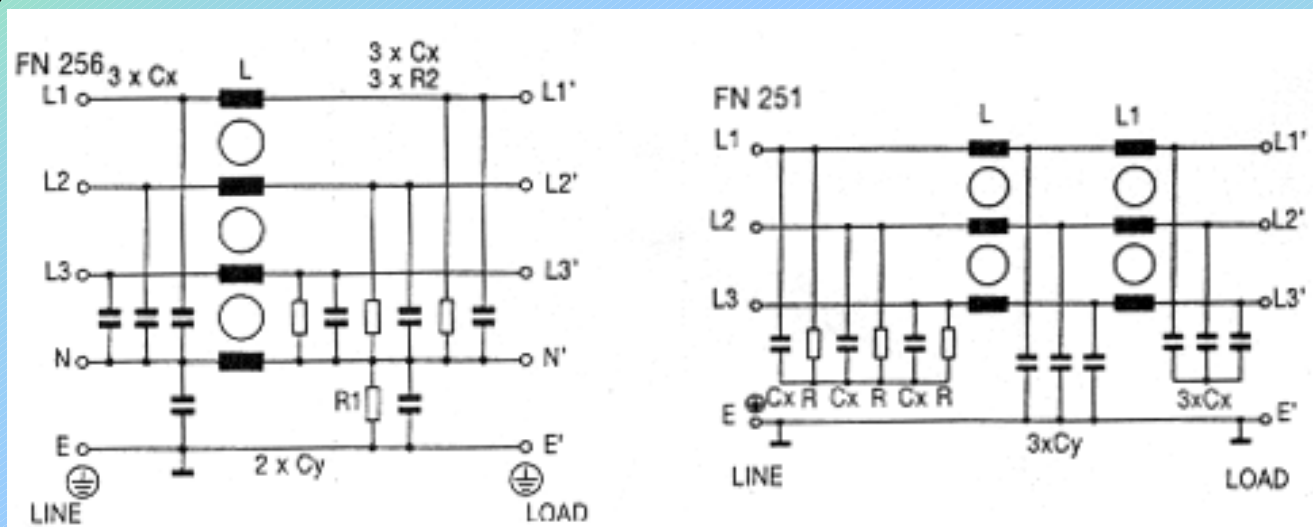




在用户自行制作滤波器时，要特别注意改进它的高频特性。造成高频特性欠佳的主要原因是：结构不好，导致输入与输出之间有高频耦合。选用器件的高频特性不好。为此，滤波器电路的结构设计要求循一个方向布局，在空间允许的情况下，电感与电容要保持一定距离，必要时可设置些隔板来减小空间耦合。在器件选用上，为控制电感的分布电容，电感器尽量用单层绕制，必要时可采用多个电感串联的办法来达到所需电感量。对电容的引线，要求短（“短”意味着引线电感小）。共模电容对于保证共模滤波特性尤其重要，而在实际使用中，共模干扰的频率又比较高，所以选择共模电容的特性好坏是关键。除了用高频陶瓷电容外，目前市上还用三端电容和穿心电容出售（见“信号线滤波”一节），对改进滤波器高频特性很有帮助。此外，滤波器的接地线要保持粗短，保证与地是低阻抗连接。

## . 三相电源滤波器

迄今为止，讨论的都是单相电源滤波器，在结束本节时，再举两例三相电源滤波器的结构。下图是某国外公司生产的三相四线（三根相线加一根中线）滤波器FN256和专供马达驱动用的三相三线滤波器FN251。



## 2.4.2 铁氧体抗干扰磁芯

### . 概述

铁氧体抗干扰磁芯是近年来发展起来的新型干扰抑制器件，其作用相当于低通滤波器，较好地解决了电源线、信号线和连接器的射频干扰抑制问题，而且具有使用简单、方便、有效（使用时只要把铁氧体磁芯套在被保护线路上，无需接地，利用铁氧体磁芯所以对高频干扰所反映出来的阻抗，使高频干扰得到有效抑制。）、占用空间不大及价格便宜等一系列优点，被获得了广泛的应用。

### . 材料构成

铁氧体是铁的氧化物和多种其他粉末状金属（通常是锰、锌、镍和钴），放在一起，经挤压和一定时间的高温烧结后形成的陶瓷晶体。

铁氧体材料的电磁性能与添加的金属成份，以及烧结过程中的时间、温度和气氛有关。

· 铁氧体材料的主要用途，以及应用在抗干扰方面材料的主要特点

铁氧体材料的主要应用：

在低电平信号方面的应用。要求铁氧体材料具有损耗小、稳定性好（随时间和温度的变化不大）。主要应用有高Q值电感，共模电感，宽带、匹配脉冲变压器，无线电发射天线等。

在电源方面的应用。要求铁氧体材料在工作频率和温度上具有高磁通密度和低损耗的特点。主要应用有开关电源，磁放大器，DC-DC变换器，电源线滤波器，触发线圈和蓄电池充电变压器等。

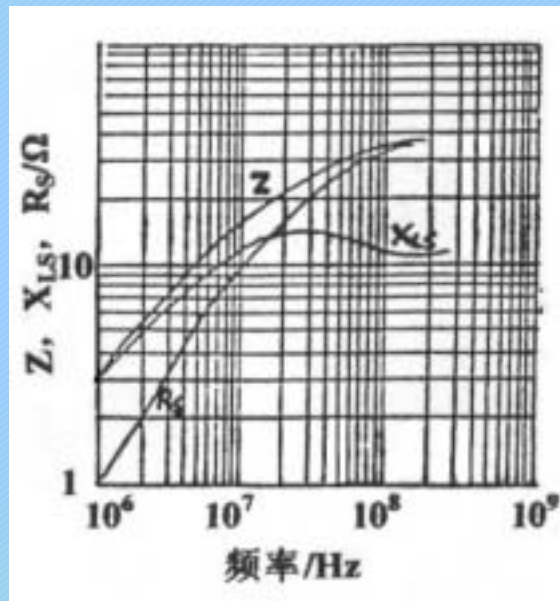
在射频干扰抑制方面。要求铁氧体材料体现的阻抗要大。用于抑制线路中的寄生振荡及衰减传输线路中的无用信号。

很明显，不同的应用对铁氧体材料的性能要求是不同的。我们给以特别关注的射频干扰抑制用铁氧体材料，不仅要求它有很高的磁导率（有大的电感）外，还要求它有大的损耗。后者体现为一个等效电阻。这样，铁氧体材料的这种高电感和高电阻特性保证了它对高频干扰所起的阻挡和衰减作用。

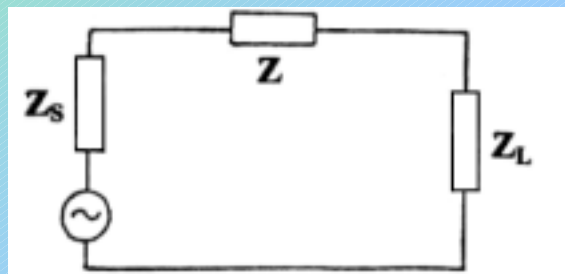
## · 铁氧体抗干扰磁芯的工作原理

铁氧体材料的阻抗由两部分串联组成：感抗 $X_{LS}$  等效损耗电阻 $R_S$ 。这两者都和频率有关，如下图所示。

低频时；磁芯的阻抗主要是感抗，它与材料的导磁率有关，干扰信号大部分被反射掉；随频率升高，导磁率迅速下降，平抑了感抗增长势头（甚至出现了感抗减少的情况）。但高频下的铁损明显增加，使总阻抗 $Z=(X_{LS}^2+R_S^2)^{1/2}$ 继续攀升，此时铁损成为阻抗主要成份，干扰信号被吸收掉。



下图为铁氧体磁芯的等效电路。



若磁芯使用前后在 $Z_L$ 上的电压分别为 $E_1$ 和 $E_2$ ，则磁芯对干扰的衰减作用为

$$A=20\lg ( E_1/E_2 ) =20\lg ( Z_S+Z+Z_L ) /(Z_S+Z_L)$$

此式表明，信号源内阻 $Z_S$ 与负载阻抗 $Z_L$ 之和越小，而铁氧体磁芯的等效阻抗 $Z$ 越大，则铁氧体磁芯对高频干扰的抑制作用越好。

## . 用于抗干扰目的的铁氧体材料的选择

不同的铁氧体材料有不同的最佳抑制频率范围，它与磁导率有关。材料的磁导率越高，最佳衰减频率就越低；相反，材料的磁导率越低，衰减频率就越高。所以锰锌铁氧体比较适合于用在低频（例如30MHz或更低频率）的场合；而镍锌铁氧体比较适用在高频（例如25MHz ~ 200MHz，或更高频率）的场合。

在有直流或低频交流电流偏流的情况，要考虑到抑制性能的下降和饱和现象，应尽量用磁导率低的材料。

## . 铁氧体抗干扰磁芯的应用范围

铁氧体抗干扰磁芯被广泛用于印刷板、电源线和数据线的干扰抑制上。

### 在印刷板上的应用

印刷板上的干扰主要来自数字电路，其高频开关电流在电源线和地线之间产生一个强烈的干扰。电源线和信号线会将数字电路开关时的高频噪声以传导或辐射的方式发射出去。常用的干扰抑制办法是在电源和地之间加去耦电容，以便使高频噪声短路掉。但单用去耦电容有时会引起高频谐振，造成新的干扰。在印刷电路板的入口处加入铁氧体干扰抑制磁珠，将会有效地衰减高频噪声。



## 在电源线上的应用

电源线会把外界电网的干扰、开关电源的噪声传到设备的线路中来。在电源的出口和印刷板的电源入口处设置铁氧体抗干扰磁芯，既可抑制电源与印刷板之间的高频干扰传输，也可抑制印刷板之间高频噪声的相互干扰。

值得注意的是，在电源线上应用铁氧体抗干扰磁芯，常有偏流问题存在，甚至出现磁芯的饱和现象。降低铁氧体的磁导率可降低偏流的影响，所以在电源线上使用的铁氧体抗干扰磁芯要选用磁导率低和横截面大器件（当然也可以通过给铁芯开气隙的办法来解决偏流的影响）。在偏流较大的时候还可以将AC和DC的电源进线与回线同时套在一个磁芯里，这样可避免饱和，但这种方法对于抑制进线和回线上的共模噪声还是有作用的。

## 在信号线上的应用

铁氧体抗干扰磁芯也常用在信号线上，以抑制设备之间的噪声传输。对于扁平电缆更可以采用扁平的铁氧体磁芯，将噪声抑制在传导和辐射发射之前。只是信号线的阻抗一般要大于电源线，所以干扰的抑制效果将不及在电源线上来得更明显些。

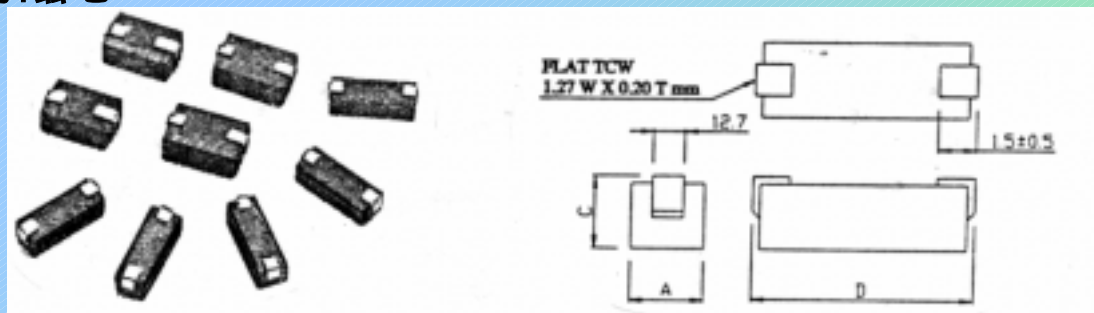
## · 铁氧体磁芯的外形和尺寸选择

铁氧体磁芯的外形和尺寸影响到对干扰的抑制效果，通常铁氧体磁芯的体积越大，抑制的效果越好。在体积一定时，长而细的磁芯比短而粗的阻抗要大，抑制效果要更好。在有偏流的情况下，要考虑饱和问题，铁氧体磁芯的横截面越大，越不容易饱和，可承受的偏流也越大。另外，铁氧体磁芯的内径越小，抑制效果也越好。

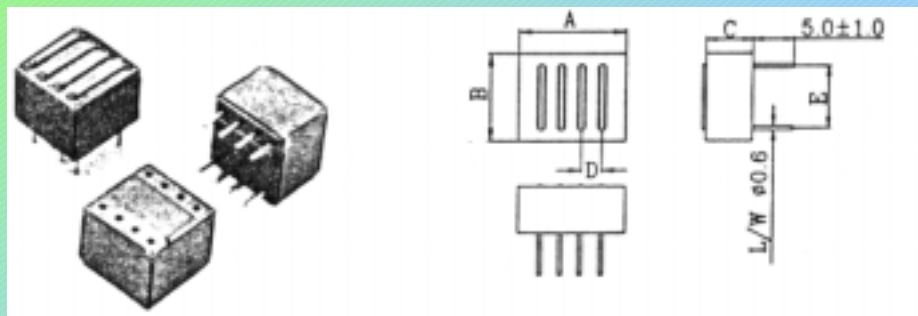
总之，铁氧体磁芯的选择原则是：在使用空间允许的条件下，选择尽量长、尽量厚和内孔尽量小的磁芯。

考虑到铁氧体磁芯有简便、有效和价格便宜的优点，目前正越来越多地被用在设备的干扰抑制上，在下面8张图里给出了多种铁氧体磁芯的形状，相应的参考规格见附表13至附表20所示。

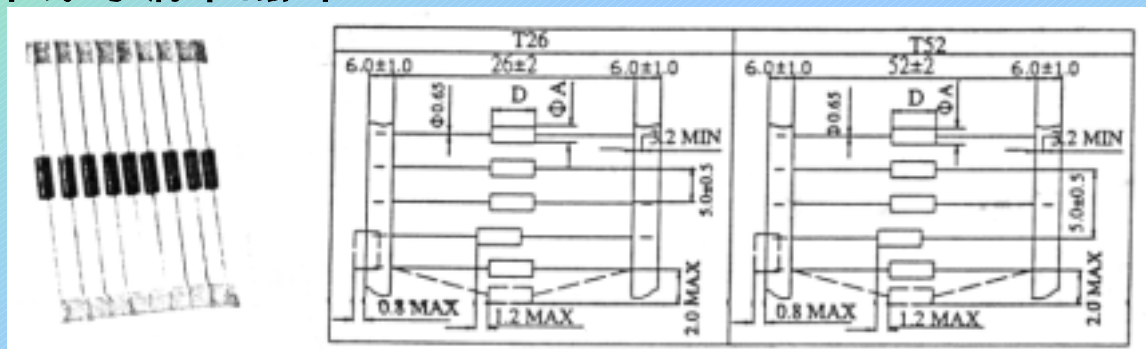
### 1.表面贴装用磁芯



## 2.印刷板安装用滤波器



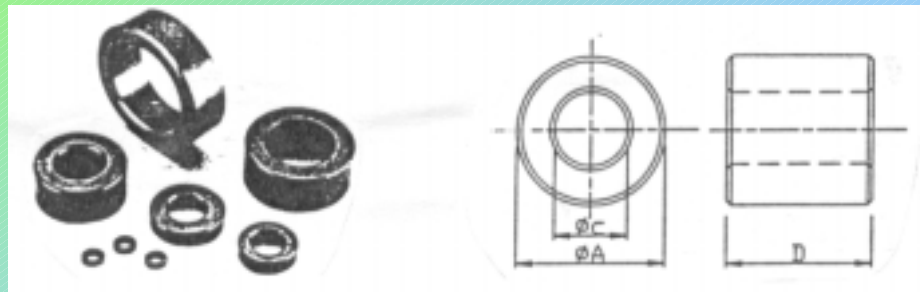
## 3.轴向引线的编带磁珠



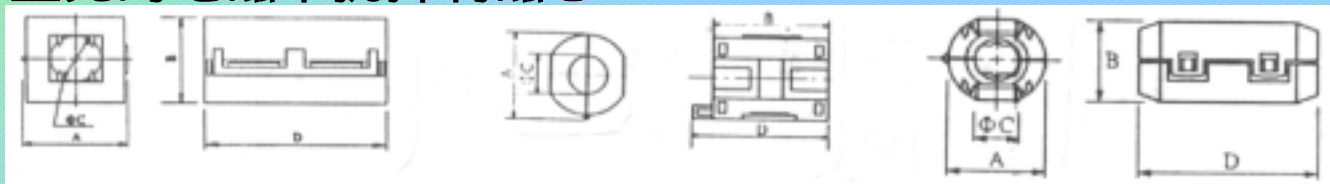
## 4.筒形磁芯



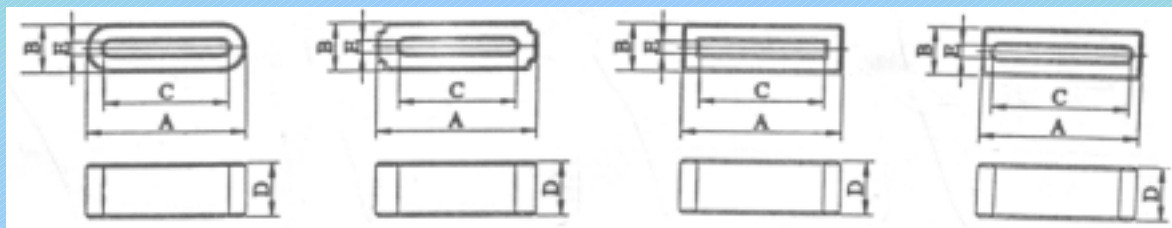
## 5. 环形磁芯



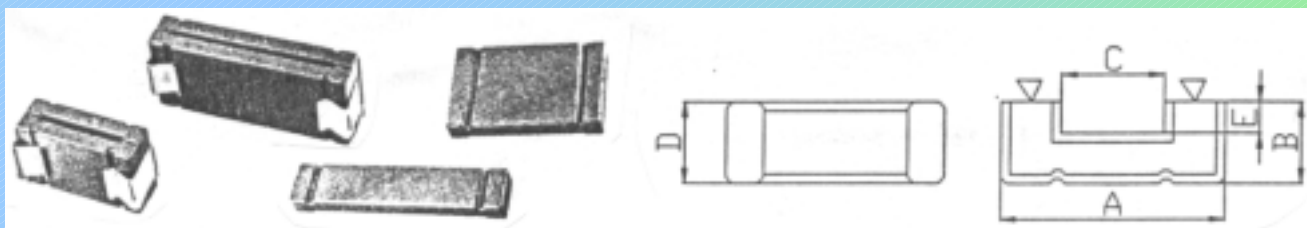
## 6. 带塑壳的电磁干扰抑制磁芯



## 7. 扁平电缆的干扰抑制磁芯



## 8. 用于扁平电缆的干扰抑制磁芯夹



## · 铁氧体磁芯的使用要点

下面是铁氧体磁芯的使用要点，部分曾有过说明，为保持本节内容完整性，将结论重提于下：

磁芯应用在干扰源上、受干扰设备的信号入口和干扰信号传送途径上，以减少干扰对产品工作的影响。

不同的干扰频率范围应选用不同的磁芯材料。锰锌适合于干扰频率低的情况；镍锌则用在高频的情况中。即使同是锰锌（或镍锌）材料，不同牌号，其抑制特性也不相同。

根据不同应用场合，应选择适当形状的铁氧体磁芯材料，如在线上可用环形、珠形、筒形、扁平夹条形及多孔形；在印刷板上可用珠形、或珠形与瓷片电容的组合件、或表面贴装材料等。

铁氧体磁芯在线路中体现的阻抗与磁芯上绕的圈数有关，圈数越多，体现的阻抗越大，但容易饱和；另外，线间分布电容也大，于高频特性不利。应通过试验来确定。

铁氧体磁芯用在电源线时，由于有直流偏流或过大的交流电流通过，会使磁芯进入饱和区，导致铁氧体阻抗和插入损耗减小。为此，应选用导磁率低的和截面积大的材料；或在两个半环之间垫气隙。当用于抑制电源线上的共模干扰时，可将电源进线及其回线同时穿过一个磁芯，由于两根线上电流走向相反，磁芯不会进入饱和。

套在导线上的磁珠或磁筒尺寸要与导线直径相配合，磁芯内径越小，抑制干扰的效果越好。另外，在空间尺寸允许的前提下，尽量选用长度和壁厚都较大的磁芯。

使用时特别要注意铁氧体磁芯的安装位置，位置不同，抑制效果会有很大不同。因此，要求铁氧体磁芯的最后使用位置必须和做试验时选定的位置保持一致。选位时，磁芯应安装在接近干扰源的地方，防止干扰被耦合到其他地方去。对I/O电路，磁芯应放在导线（或电缆）进入或引出屏蔽壳体的地方，以避免干扰在通过铁氧体磁芯之先已耦合到了其他部分。

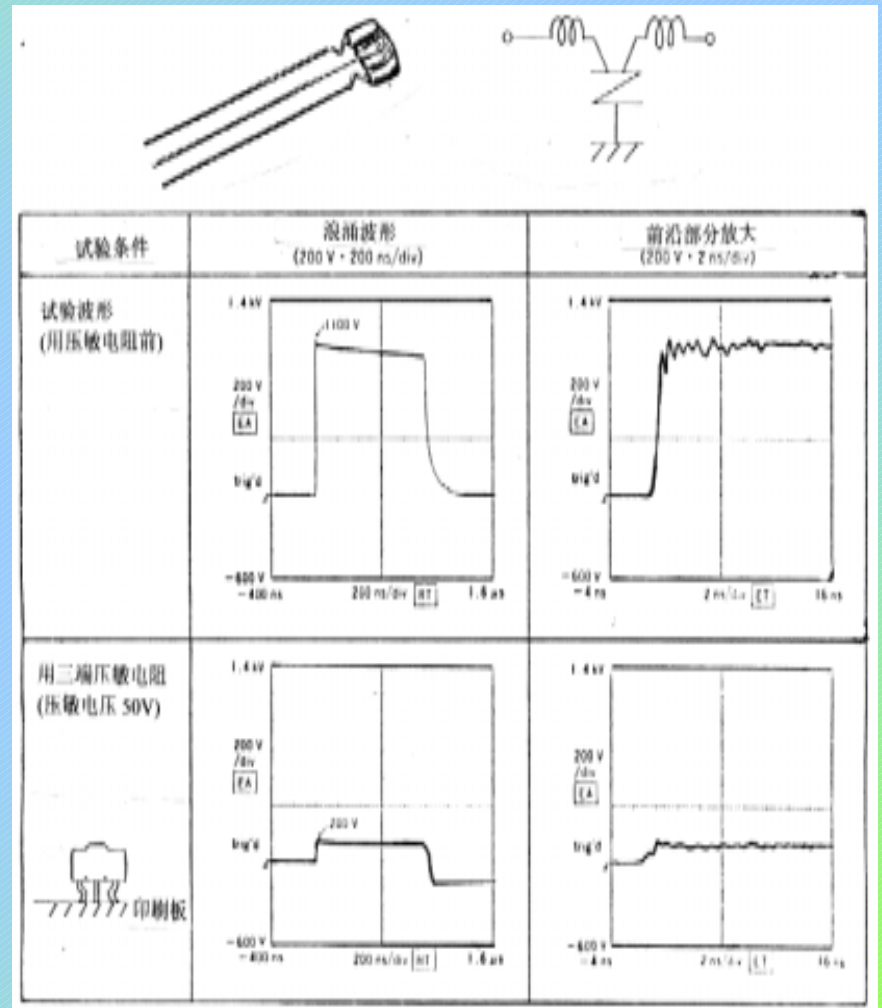
对印刷板，电磁干扰主要来自数字电路，在其电源和地之间的高频电流会产生很强的干扰，还会通过电源线、信号线辐射出去。为此，常在IC电路的电源线上串入磁珠，及并联去耦电容以抑制电磁干扰。也可在电源线入口处加接磁珠及电容器。

由于磁芯在干扰抑制时体现为一个损耗电阻，它与干扰源、负载之间存在着能量分配问题。因为电源线的阻抗比信号线要低很多，因此，在电源线上加接磁芯的作用要比信号线明显得多。

为避免磁芯在电线上活动，擦伤导线，或与其他元件相碰撞，磁芯穿在线上后要用热缩套管固定位置。

## 铁氧体磁芯的应用实例

在介绍压敏电阻的应用时，我们曾给出压敏电阻的引线长度与干扰抑制效果的示波图，指出由于压敏电阻的引线电感使得干扰吸收的同时，在干扰波前沿的位置出现了一个幅度可观的“尖刺”，如果被保护电路足够灵敏这根“尖刺”仍将影响被保护线路的工作。如果我们能将压敏电阻与铁氧体磁芯结合使用，就有可能取得明显的尖刺抑制效果。右图给出了一个应用实例。图中使用的压敏电阻是所谓“三端压敏电阻”，其“三端”的作用与即将介绍的“信号线滤波”中的三端电容有异曲同工之妙。



## 2.4.3 信号线滤波

### . 概述

解决电缆引进的干扰问题有两种办法可以采用，一个是屏蔽（采用屏蔽线）；另一个是滤波。屏蔽要在屏蔽层端接良好的情况下才有较好的屏蔽效能，在很多情况下较难做到这一点，所以，对信号线的滤波不失为一个好办法。

信号线的滤波作用更多是用来对付来自空间的干扰问题（包括从空间辐射进设备的干扰，和设备向空间发射的干扰）。它说明了为什么电缆线是电磁兼容的薄弱环节，也说明了为什么我们经常认为共模干扰是为设备的主要危害。这一情况也正好解释了为什么屏蔽已经非常严密的设备还会出现电磁兼容问题。这一切都是信号线所起的天线作用在作怪。基于这一原因，我们通常都要对非屏蔽的信号线端口安装信号线滤波器，滤波器要安装在信号线进出的交界面上，要滤除的主要是一些频率相当高的干扰信号。



常用的信号线滤波器有两种方案：

### 安装在印刷板上的滤波器

优点是便宜。缺点是效果差些。主要原因是：输入与输出没有隔离，容易产生耦合。滤波器的接地阻抗做不低，削弱了高频旁路的作用。

滤波器与机箱之间的一段连线会起到被动天线的作用，既会引入外界干扰，通过机内部分连线产生辐射，影响内部电路工作的可靠性；也会拾取内部电路产生的电磁骚扰（通过辐射感应的方式），把它引到设备外部。

### 安装在机箱及其构件上的滤波器

直接将滤波器（贯通滤波器、滤波阵列板和滤波连接器）安装在设备的金属机箱及其构件上，可使滤波器的输入与输出之间完全隔离，而且接地也良好，故滤波效果十分理想。唯价格较贵，而且在设计之初就就要在结构上给予考虑。

## . 安装在印刷板上的信号线滤波器

虽然在印刷板上安装信号线滤波器的效果一般，但如能使用得当，仍不失为一个价廉物美的方案。下列建议请考虑。

滤波器要放在印刷板靠近进线电缆插头的地方。

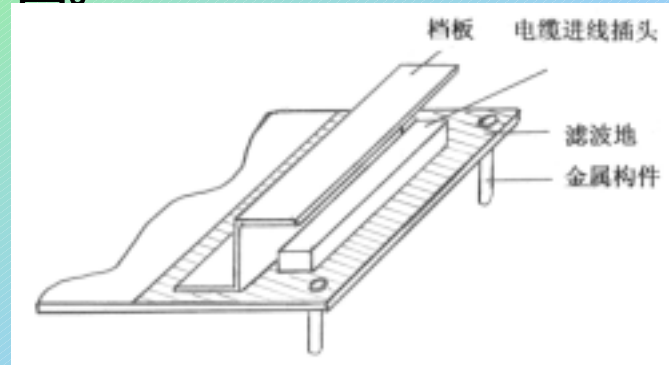
为防止同一组需要滤波的信号线中，已滤过波的，和还没有滤过波的信号线之间产生耦合，滤波器要放置成一排，对所有进入印刷板的信号线同时滤波。

在印刷板上要专门为滤波器辟出一个“地”，滤波器和进线电缆插头都安装在这个“地”上。注意，这个地仅仅供滤波器的滤波电容使用，而与印刷板的信号地只有一点连接，或干脆不连，留到最后，在设备的统一接地点上再连接。

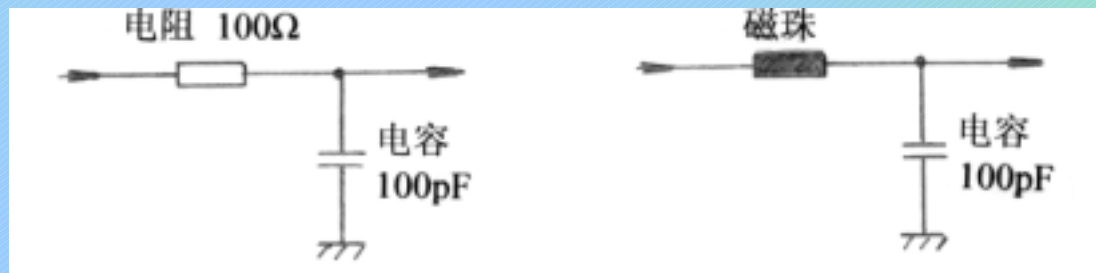
上述印刷板的滤波器专用地要与金属机箱可靠搭接。如果机箱不是金属的，可在印刷板下面放一块面积大的金属板作为“滤波地”。所谓可靠搭接，必须用粗而短的金属构件或射频连接线进行低阻抗连接。

有滤波的电缆和没有滤波的电缆在布局上应尽可能分离得远一点，防止射频耦合现象发生。

在电缆插头进入印刷板的地方还应当设立一块金属挡板，这会使隔离效果更好，参看下图。



印刷板的信号线滤波器可以是电阻和电容组成的RC滤波器，也可以是磁珠和电容组成的LC滤波器，后者是目前常见形式，见下图。元件参数选择是关键，参数过大，会造成波形畸变，对高频信号传输不利。通常电阻在 $100\ \Omega$ 左右，电容在 $0.1$ 至 $1\text{nF}$ ，经试验后确定。



除传统RC和LC滤波器外，在国内还有三端电容器和带铁氧体磁珠的三端电容器可使用，有体积小、效果好的特点，详见本节所述。

## · 安装在机箱及其构件上的信号线滤波器

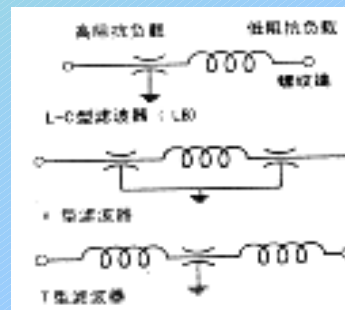
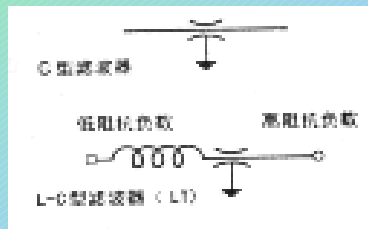
总体设计时就考虑在机箱及其构件上安装信号线滤波器，虽然价格较贵，但由于信号线被分割在两个空间里，信号线在经过滤波器时得到了充分滤波，故可靠、高效是它的最大特点。

根据参加滤波的信号线数目的多少，分为单线独立滤波器和多线合用的滤波器两大类：

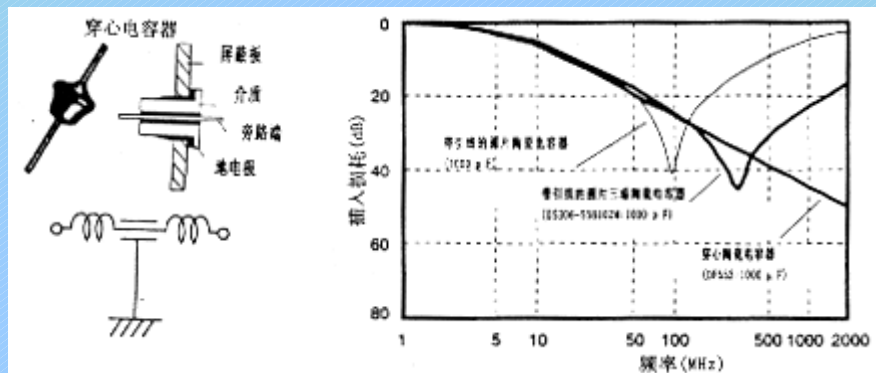
### 单线独立滤波器（贯通滤波器）

对于为数不多的几根信号线可使用通常被称为贯通滤波器的单线独立滤波器。最普通的贯通滤波器就是穿心电容。如果将穿心电容与铁氧体磁珠按照不同的电路结构组合起来可以构成L型（一个穿心电容加一个电感）、T型（两个电感加一个穿心电容）及π型（两个穿心电容加一个电感）等滤波电路，以适合不同源阻抗和负载阻抗的需要（以50Ω为参考，电容输入、输出的滤波器用在高阻抗的电路中；而电感输入、输出的滤波器则用在低阻抗的电路中）。通常，滤波器的器件数量越多，对干扰的衰减也越大，滤波器的过渡带也越短（滤波特性陡峭）。

下图是贯通滤波器的外形及电路结构。



穿心电容的结构是地电极围绕在介质周围，同时信号线通过介质。由于这种电容器的接地端面和信号端面都不存在剩余电感，因此它提供的插入损耗近乎是理想的（见下图，作为比较，图中也给出了普通电容和三端电容的损耗特性）。



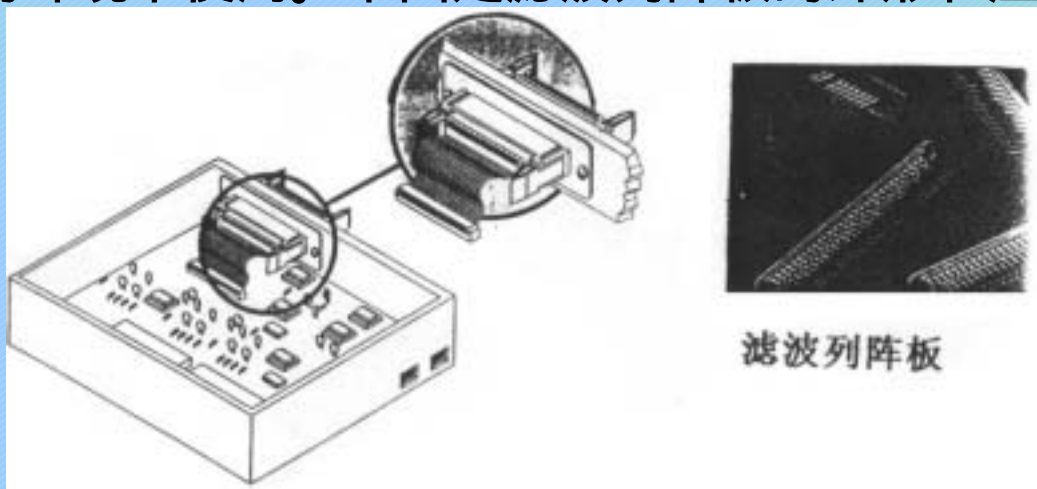
对贯通滤波器的固定，部分滤波器外壳带有螺纹，使用时在设备面板上开孔，滤波器的螺纹穿过面板，在面板后用螺帽固定，要求滤波器外壳与面板保持良好的接触。部分滤波器在使用时则是将接地电极直接焊在屏蔽板（或面后板）上。

## 多线合用滤波器（滤波连接器）

当穿过屏蔽体的导线数目很多时，必须使用多线合用滤波器。目前有两种，分别是滤波列阵板和滤波连接器。不管哪一种滤波器，实际上都在它的每个插针中安装了低通滤波器。

### 滤波列阵板

滤波列阵板有单排和双排两种形式，引脚的间距为2.54mm，扁平电缆的接头可直接插上，所以组装十分方便，十分适合于作电路之间的隔离。滤波列阵板还有一种是90°的弯脚，可直接连到印刷电路板上。滤波列阵板的输出引脚的品种繁多，单排的可以达到30线，双排的最多可达64线；滤波列阵板的电容值可选；滤波带宽从5MHz至1GHz，甚至更高。滤波列阵板还有较好的抗振机械振动的性能，能在较恶劣的环境下使用。下图是滤波列阵板的外形和应用例。



## 滤波连接器

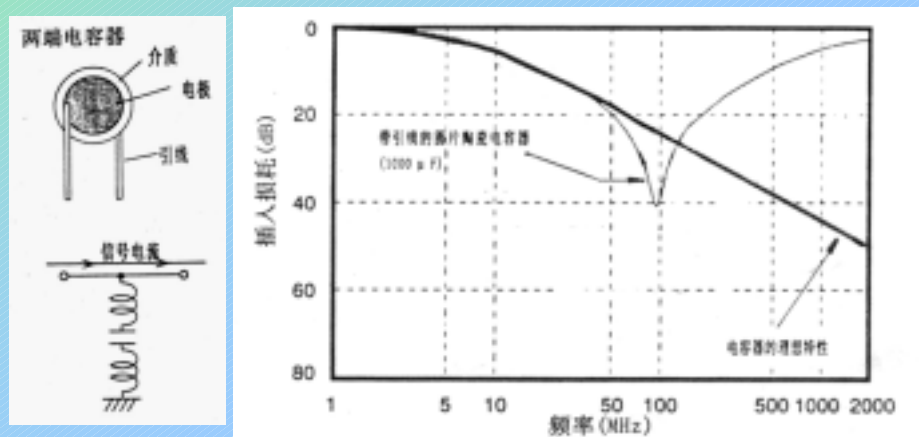
滤波连接器采用标准的矩形和圆形连接器的接口尺寸，所以可方便地和普通连接器实现对接。它的每一根插针均由一完整C型低通滤波电路构成。加长尾部型有C型、L型或 型滤波电路形式可选。全密封的设计，适合于恶劣环境使用，尤其适合于航空/航天和军用电子设备使用。此外，滤波连接器的滤波特性有多种，用户可根据不同要求选用。

除了将滤波连接器用在机箱间的信号线连接外，有的滤波连接器的引脚设计成90°的弯脚，滤波连接器装在构件壁上，引脚可直接焊在印刷板上，实现设备内部各部件之间的连接。下图是各种滤波连接器的外形图。



## 三端电容器及带铁氧体磁珠的三端电容器

我们常用陶瓷圆片电容器作为旁路电容，将高频干扰短路到地，达到抗干扰的目的。但是电容器的引线电感及电容内部的剩余电感却限制了它的高频特性发挥。下图是电容器做高频旁路时的引线电感影响例。

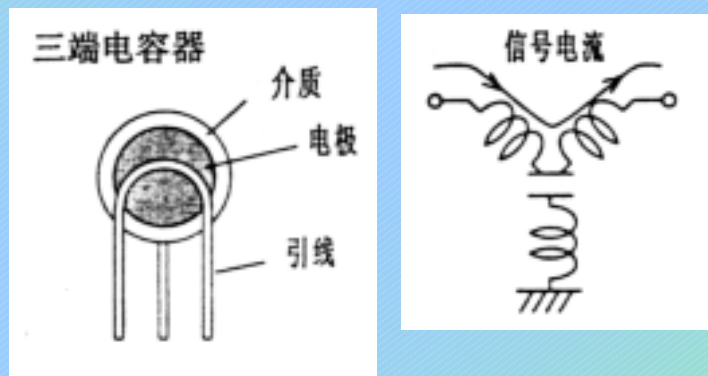


图中可见，电容器的插入损耗一开始随频率增加而增加，直至达到自谐振频率（等效电感与电容的串联谐振），插入损耗也达到最大值。此后，由于等效电感的感抗增大，使插入损耗开始下降。

为了在高频时也有较好的旁路作用，必须让旁路电容的自谐振频率也较高，所以电容器的引线绝对不能长。另外，旁路电容也不是越大越好，电容大，自谐振的频点偏低。所以，最好的办法是通过试验来选择合适的电容，尽可能让要抑制的干扰频率与自谐振点一致，以便使担当滤波的电容器带来的插入损耗为最大。



由于普通的两端电容有引线电感，所以总的剩余电感较大，自谐振点也比较低。下图给出了一个三端电容器，与两端电容相比，这个电容的上引线化成了两根（所以三端电容有三根引线）。三端电容器的这两根上引线化成了信号传输线的一部分，于是引线电感与电容器变成了一个“LC”滤波器。正是三端电容器巧妙地利用了引线电感，使得三端电容器对干扰的抑制作用更好。

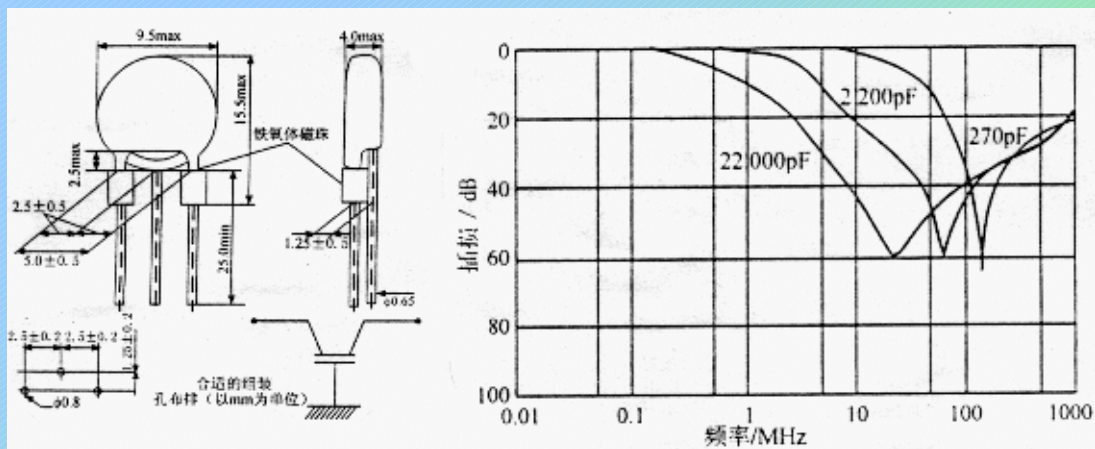
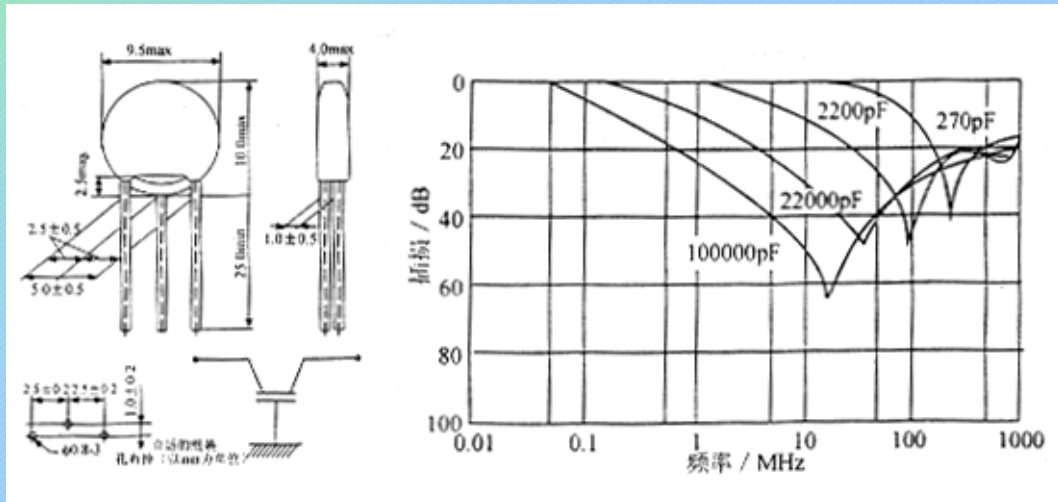


三端电容器也有自谐振问题，电容量越大，自谐振频率越向低频处移动。右上图是日本某公司的DS310系列三端电容及其插入损耗例。

三端电容之所以有较强的抑制干扰的能力，是由于在电容器设计中巧妙地利用了引线电感，由此使人们联想到，如能人为增大电感，例如在电容器上端的两根引线中串联两个磁珠，就可以展宽抑制干扰的频带，提高抗干扰的能力。右下图便是同一个日本公司生产的带铁氧体磁珠的DST310系列三端电容器及其损耗特性例。

使用中，应注意三端电容器的良好接地。

2004.6.23



## 2.5 隔离变压器

### 2.5.1 概述

隔离变压器是电源线抗干扰的一种常用措施，用以解决设备间的电气隔离。通过浮地，较好地解决了电路环流在公共阻抗上产生的电压变化对敏感设备带来的干扰问题。

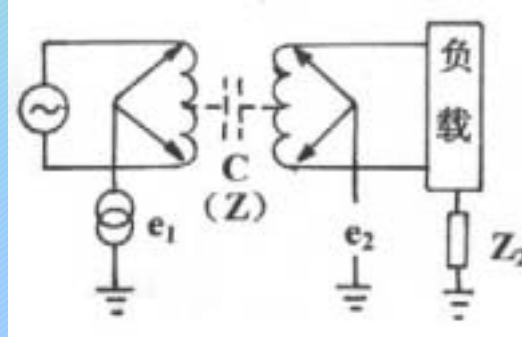
普通隔离变压器对于设备所经受的共模干扰也有一定抑制作用，只是效果较差。随着变压器屏蔽层的采用，再在变压器结构上采取一定措施，变压器的抗干扰能力也在不断提高。本节讲述普通隔离变压器、带屏蔽层的隔离变压器和超级隔离变压器，以及它们的抗干扰效果。

## 2.5.2 最简单的隔离变压器

最简单的隔离变压器是初级与次级间不设屏蔽层的变压器，主要用于解决输入与输出间的电气隔离，从而解决两者之间的共地问题。它对共模干扰有一定的抑制作用，但效果一般。

图中给出了普通隔离变压器对共模干扰抑制作用的原理分析简图。

- C：绕组间的分布电容；
  - Z：绕组间的耦合阻抗；
  - $Z_2$ ：负载对地的等效阻抗；
  - $e_1$ ：初级干扰（共模电压）；
  - $e_2$ ：次级干扰（共模电压）。
- $$e_2 = e_1 Z_2 / Z$$



由于共模干扰是相对大地的干扰，它不会通过变压器传递，而必须通过变压器绕组间的耦合电容传递。我们用一个装置电容（装置对地的分布电容）来与整个用电设备等效，其典型值为 $0.01 \mu\text{F}$ 。而一台普通隔离变压器的耦合电容为几百至上千pF，今假定为 $1000\text{pF}$ 。这样就得到了图中的干扰通路，共模干扰通过变压器的耦合电容，经过装置电容再返回大地的。于是得到一个由变压器耦合电容与装置电容的分压器，共模电压就按照分压器中电容量大小来分压，分压比为

$$C_2/C_1 = 0.01 \times 10^{-6} / 1000 \times 10^{-12} = 10$$

亦即干扰的衰减为10倍（20dB）。

一个测试实例说，某 $1\text{kVA}$ 隔离变压器， $e_1$ 用 $1 \mu\text{s}$ 共模三角波注入，测得的共模衰减约为5dB。

### 2.5.3 带屏蔽层的隔离变压器

上述例子表明，要使变压器获得优良的共模抑制性能，其关键是设法减小初、次级之间的耦合电容值。为此，在初、次级之间设立屏蔽层，它不影响变压器的能量传输，但影响了绕组间的耦合电容。下图画出了带屏蔽层隔离变压器的共模干扰通路。从图中可以看出，要使共模衰减变大，只要变压器屏蔽层的接地阻抗变小（变压器的屏蔽层可靠接地），便能奏效。通常带屏蔽层隔离变压器的共模衰减做到60~80dB是可能的。

屏蔽层是绕完初级后再绕制，选用0.02~0.03mm的薄铜皮，铜皮的始端和末端要有3~5mm重叠，但要相互绝缘。像这样的屏蔽层如能多做1~2层，层与层之间绝缘，则效果更好。通过这样的措施，可将等效的耦合电容降至几个pF。此外，如能在变压器次级两根引出线上各连一个高频特性好的陶瓷片状电容（电容量选0.05μF左右），电容器的另一端与变压器屏蔽层同时接地，则该变压器的共模干扰抑制效果会更好。

$C_1$ ：初级-屏蔽层的分布电容；

$C_2$ ：次级-屏蔽层的分布电容；

$Z_{C1}$ ： $C_1$ 的阻抗；

$Z_{C2}$ ： $C_2$ 的阻抗；

$Z_E$ ：屏蔽层的接地阻抗；

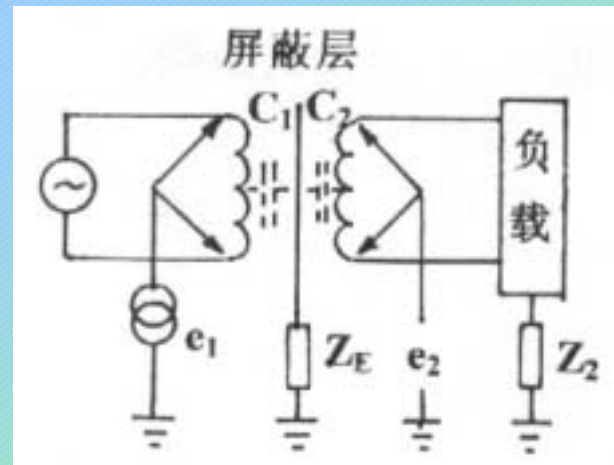
$Z_2$ ：负载的对地阻抗；

$e_1$ ：初级共模干扰电压；

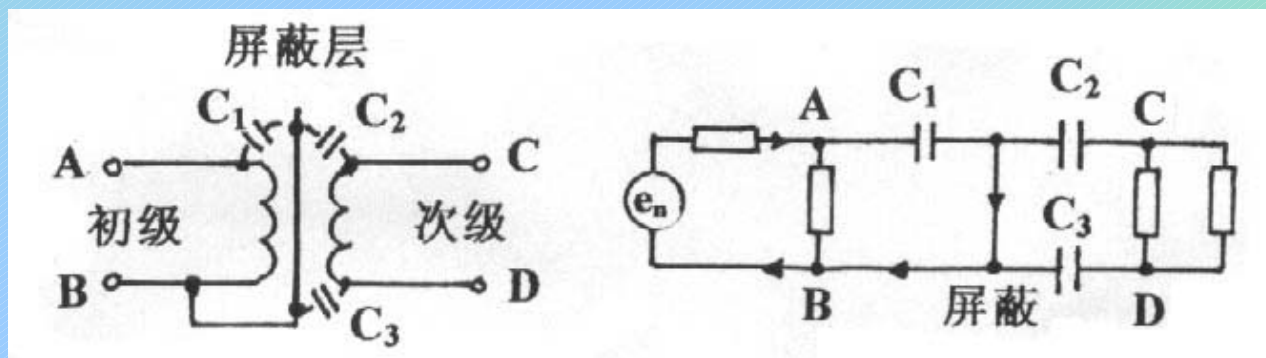
$e_2$ ：次级共模干扰电压。

$$e_2 = e_1 \times (Z_E / Z_{C1}) \times (Z_2 / Z_{C2})$$

因 $Z_{C1} \gg Z_E$ ， $Z_{C2} \gg Z_2$ ，故 $e_1 \gg e_2$

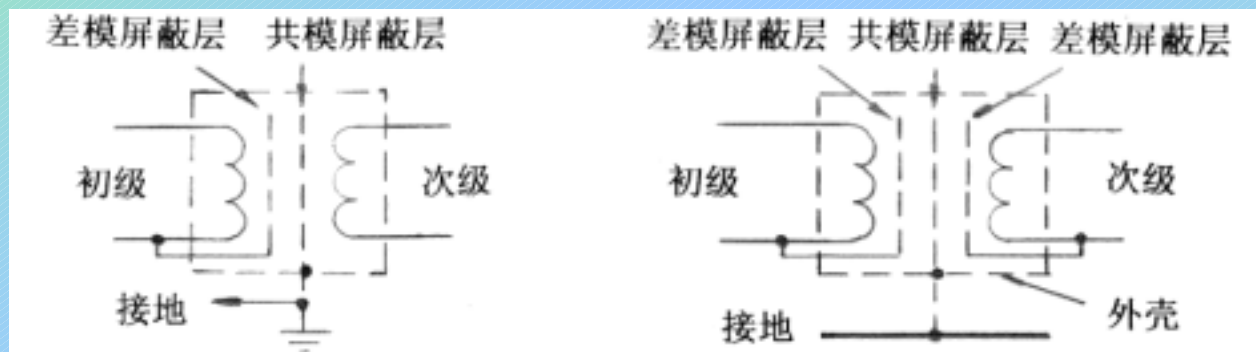


上面的分析是针对电网中的共模干扰来说的，事实上电网中还存在差模干扰，利用隔离变压器的屏蔽层还可以衰减差模干扰。具体的做法是，将变压器的屏蔽层接到初级去。如果初级有中心抽头，那么屏蔽层最好接在中心抽头上。如果变压器初级无中心抽头，则用低阻抗的金属条将屏蔽层连到初级的中线端，参见下图。对50Hz的电网频率来说，由于初级绕组与屏蔽层之间容抗值很高，50Hz的市电还是要通过变压器效应送到负载侧，未作任何衰减。对于频率较高的差模干扰，由于初级绕组与屏蔽层间的容抗变小，屏蔽层与初级绕组之间的金属条趋向于使有害的差模干扰给短路掉。



## 2.5.4 高性能隔离变压器

顾名思义，高性能隔离变压器是一台性能比较完善的变压器，除了有一般的隔离功能外，还同时兼有抗共模和差模干扰的能力，而且各项指标都较高。下图是两种高性能隔离变压器的例子，其中a为双重屏蔽的隔离变压器，一层连到变压器初级，做差模抑制用；另一层接大地，做共模抑制用。b是三重屏蔽的隔离变压器，屏蔽层中靠近初级绕组的这一层接初级低端；中间层与变压器外壳连在一起，再接大地；余下一层接变压器次级绕组的一端。

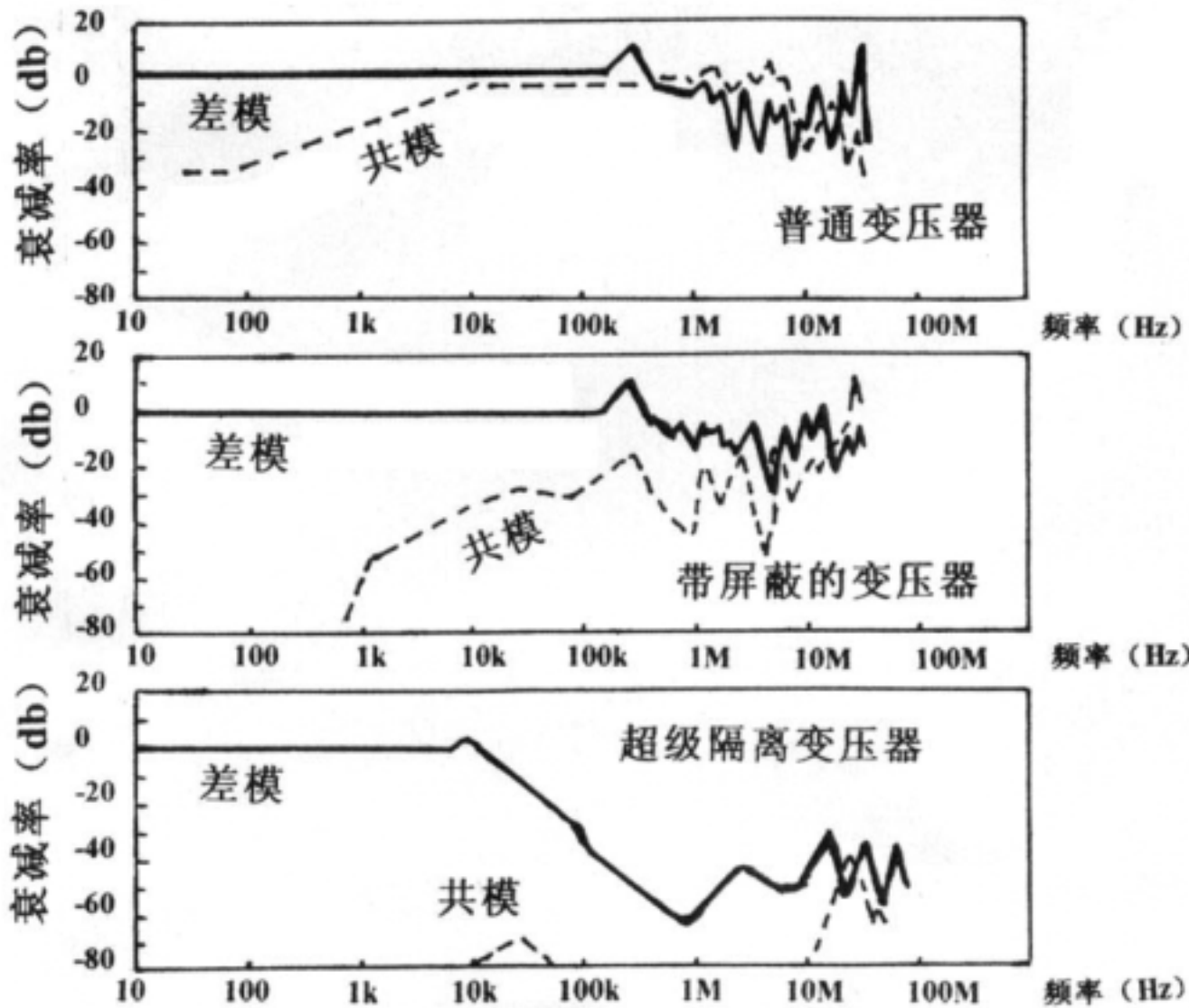


目前国内外都已把高性能隔离变压器作为一种标准化的产品在市场上出售了，称之为超级隔离变压器。其额定功率从100VA至几十kVA。典型差模衰减量为60dB。共模衰减量则按大小形成若干系列，如某国外公司推出的4个系列（40系列、30系列、20系列和10系列），其共模衰减能力分别达到152dB、146dB、140dB和126dB。

作为本节结束，将三种隔离变压器的基本性能以列表及图片形式给出。从中可以看出，超级隔离变压器对干扰确有良好的抑制作用，这也正是人们对这种变压器给予关注的原因所在。

变压器型式	作用	性能						结论
		共模干扰			差模干扰			
		高次谐波	低频段干扰	高频段干扰	高次谐波	低频段干扰	高频段干扰	
普通隔离变压器	初级与次级绕组间无直接联系	好	一般	差	差	差	差	对低频的共模干扰有抑制作用
带屏蔽层的隔离变压器	初级与次级绕组间无直接联系； 初级与次级绕组间无静电耦合	好	好	一般	差	差	差	对低频与高频干扰中的较低频段干扰有抑制作用
超级隔离变压器	初级与次级绕组间无直接联系； 初级与次级绕组间无静电耦合； 初级与次级绕组间无高频的电磁感应	好	好	好	差	好	好	对从低频到高频段的所有共模干扰都有抑制作用；对高次谐波以外的所有差模都有抑制作用





隔离变压器的安装要求与滤波器相似，要避免初级与次级之间的电磁耦合。



最后，再指出两点：隔离变压器的屏蔽层连接线必须粗、短，而且要直接，否则在高频时的屏蔽效果就要下降。隔离变压器对低频干扰的抑制比频率升。频率升高后，由于受分布参数的影响，其衰减特性明显下降，如想对所有频段实行保护，可串联一只滤波器，这样的组合可提供宽频带的保护，而且价格和器件的尺寸也比较合理。