

# 隔离变压器

钱振宇

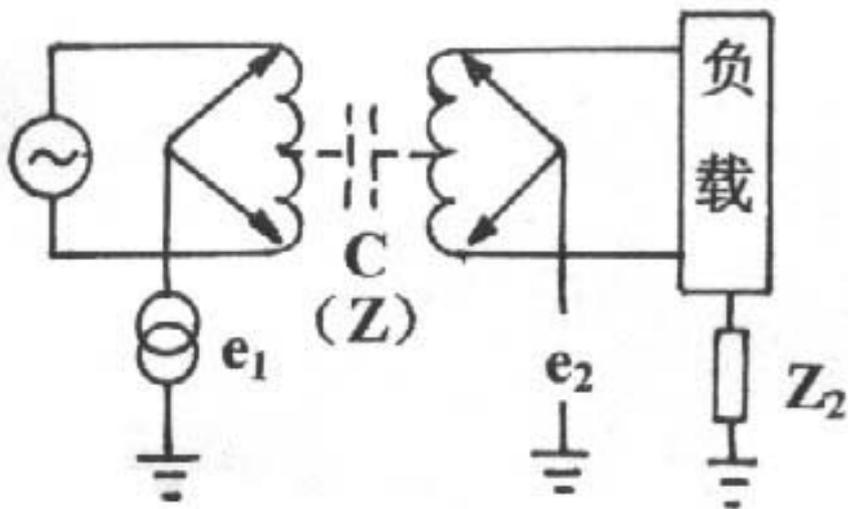
# 1 概述

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。但是隔离变压器的作用还不止这些，即使是普通的隔离变压器，它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会有很大提高。本章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 最简单的隔离变压器

最简单的隔离变压器是一种在初级与次级之间不设屏蔽层、匝数为一比一的变压器，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。根据最简单的隔离变压器主要解决了初、次级之间隔离，或者绝缘的这一特点，所以我们有时也把它称为绝缘变压器，

应该指出，最简单的隔离变压器对于共模干扰也有一定的抑制作用，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) 。  
 $e_2 = e_1 Z_2 / Z$

由于共模干扰是一种相对大地的干扰，所以它不会通过变压器来传递，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 $\text{pF}$ ，今假定为 $1000\text{pF}$ 。这样我们就得到了如前图所示的干扰通路，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。共模电压就按照由变压器耦合电容与装置电容构成的分压器中电容量的大小来分压，分压比为

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

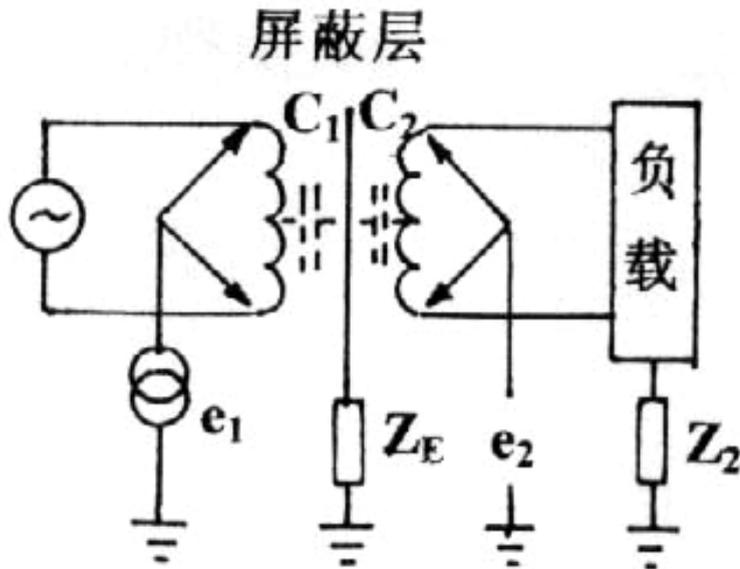
亦即干扰的衰减为10倍（20dB）。

有一个测试实例说，某 $1\text{kVA}$ 隔离变压器， $e_1$ 用 $1 \mu\text{s}$ 共模三角波注入，在变压器次级测得的共模衰减约为5dB（实际衰减尚不足一半）。

### 3 带屏蔽层的隔离变压器

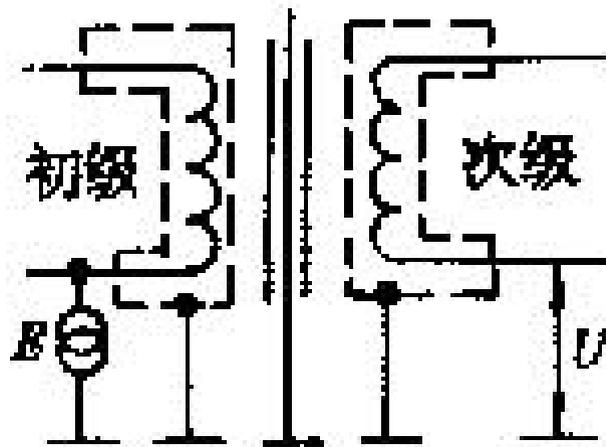
上述例子表明，要使变压器获得优良的共模抑制性能，其关键是设法减小初、次级之间的耦合电容值。为此，在初、次级之间设立屏蔽层（有些书上把这一屏蔽层称为法拉弟屏蔽层，Faraday屏蔽层），它不影响变压器的能量传输，但影响了绕组间的耦合电容。

图中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，普通隔离变压器初级与次级之间的分布电容被屏蔽层一分为二，初级与屏蔽层之间的为 $C_1$ ，次级与屏蔽层之间的为 $C_2$ ，屏蔽层的接地阻抗为 $Z_E$ ，负载对地的阻抗为 $Z_2$ 。这样变压器由初级传到次级的共模电压实际上要经过两次分压，即 $Z_{C1}$ 与 $Z_E$ 的第一次分压； $Z_{C2}$ 与 $Z_2$ 的第二次分压。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。

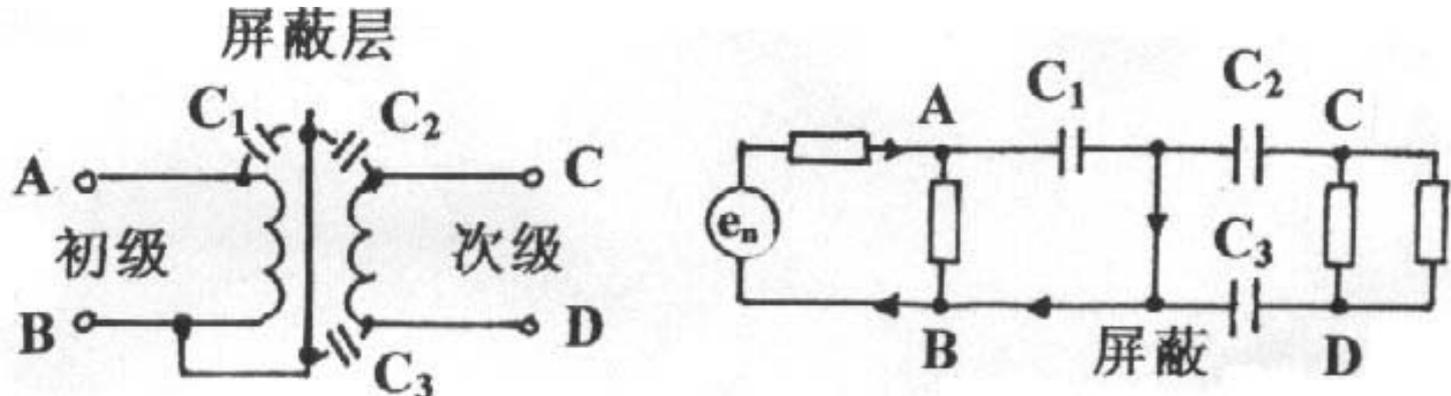


- $C_1$ ：初级-屏蔽层的分布电容；
  - $C_2$ ：次级-屏蔽层的分布电容；
  - $Z_{C1}$ ： $C_1$ 的阻抗；
  - $Z_{C2}$ ： $C_2$ 的阻抗；
  - $Z_E$ ：屏蔽层的接地阻抗；
  - $Z_2$ ：负载的对地阻抗；
  - $e_1$ ：初级共模干扰电压；
  - $e_2$ ：次级共模干扰电压。
- $e_2 = e_1 \times (Z_E / Z_{C1}) \times (Z_2 / Z_{C2})$   
 因 $Z_{C1} \gg Z_E$ ， $Z_{C2} \gg Z_2$ ，故 $e_1 \gg e_2$

有一种比前一张图更好的结构，是在初、次级绕组绕好，包好绝缘后，再放入用金属箔做成的盒子（法拉弟屏蔽盒），全部密封起来，并使其良好接地，包括引出线也全部屏蔽起来，见下图所示。这种结构使得初级的干扰电流大部分流入大地，进一步改善了隔离变压器的性能。



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，参见图中。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。

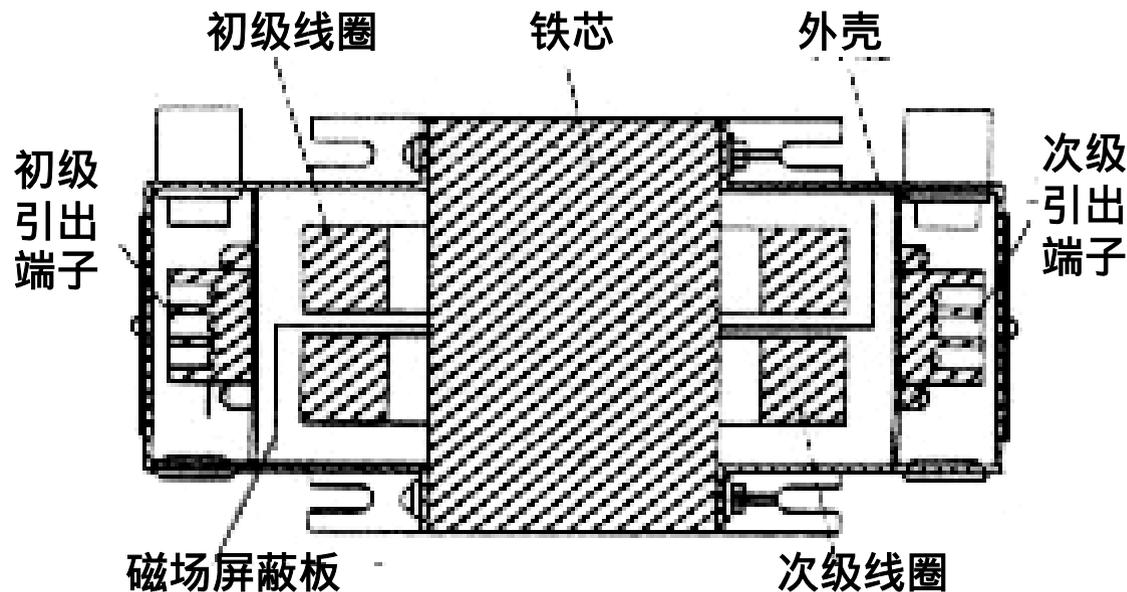


上述干扰抑制措施，同样适合于开关电源高频变压器设计。

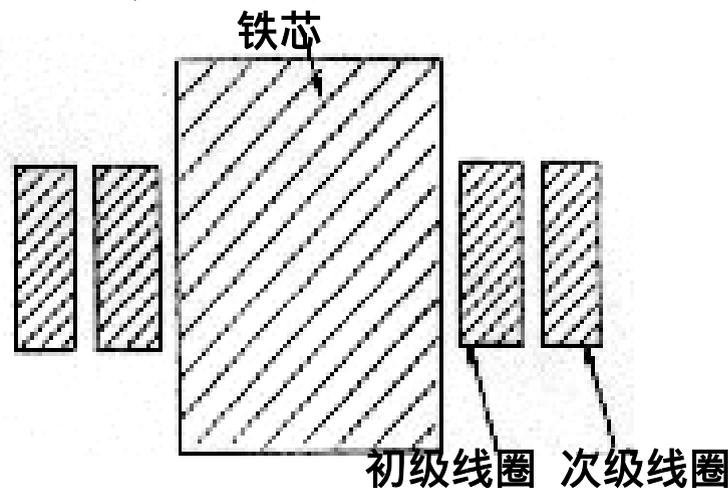
## 4 高性能隔离变压器（超级隔离变压器）

已经看到，带屏蔽层隔离变压器对于电网中存在的共模和差模干扰都有一定的抑制作用，所以这种变压器在日常的抗干扰措施中是作为一种用途很广的措施在使用。那么有没有一种比带屏蔽层隔离变压器性能更好隔离变压器可供使用呢？答案是肯定的，这就是高性能的隔离变压器，也称超级隔离变压器（意思是这种隔离变压器的隔离和抗干扰性能超群）。

超级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。图a是超级隔离变压器的例子，作为对比，将普通隔离变压器的结构画在图b中。



a) 超级隔离变压器



b) 普通隔离变压器

从图a可知，超级隔离变压器一般采用E形铁芯，铁芯的夹件和变压器的屏蔽外壳做成一体，直接用螺栓与铁芯紧固在一起，使变压器的整体结构紧凑。铁芯的材料采用在高频杂波分量作用下其磁导率会急剧下降的材料。对于功率较大的变压器，也可以选用C形铁芯，以减轻变压器的重量。

为了减少初级绕组与次级绕组之间的分布电容，线圈的绕制不能采用传统的初级与次级迭绕成交叉绕制的方法，而应当将初级与次级绕组分别绕制。在E形铁芯中，初级线圈与次级线圈采用上下同心式结构，初级线圈绕在铁心的上半部分，次级线圈绕在铁心的下半部分，套装在铁芯的中柱上。对C形铁芯，初级和次级绕组各分成一半，分别分布在两个铁心柱上，每个铁芯柱上的半个初级绕组和半个次级绕组按上、下同心式套装。这样可以大大减小两个绕组间的分布电容，增加绕组间的漏感，使进入次级的共模干扰与差模干扰大幅减少。相形之下，在图b的普通隔离变压器的结构图中，可以很清楚的看到变压器的线圈是采用所谓同心配置构造，即其次级侧的线圈绕在里面，在次级线圈的外面再绕初级线圈。从变压器的电磁转换的效率上来说，这是一个很好的电力转换变压器，但这种结构也非常容易将干扰从初级传导到次级去。

对超级隔离变压器而言，要使线圈一点也不外露，必须对其进行严密的多重盒式屏蔽。把包好绝缘的初级和次级绕组分别放进各自的法拉弟屏蔽盒。要注意屏蔽盒既要密闭，又不能短路，而且要有良好的接地。目前大多采用在绝缘薄膜上覆铜箔的材料制作屏蔽盒。当然也可采用铜箔直接包制，但体积、重量要比前一种方法大，代价也高。

另外，在超级隔离变压器初级与次级线圈之间又插进“磁场屏蔽板”，专门用来隔离初级与次级线圈之间的泄漏电感，以防止泄漏电感将初级这一侧的干扰感应至次级这一侧。

最后，超级隔离变压器必须对初级和次级绕组的引出线进行严格屏蔽。引出线必须采用屏蔽线或双层屏蔽线，其屏蔽层与各自屏蔽盒焊接起来，两个法拉弟屏蔽盒的引出线要尽可能短，并从不同方向引出。

**超级隔离变压器安装时必须要有良好的接地。接地不限于大地，在同一回路中被看成等电位的良导体都认为是地。对一个良好的接地来说，即使对于高频干扰也应体现出极低的接地阻抗。**

**超级隔离变压器的接线视使用情况不同而不同，从考虑与接地的最佳连接条件出发，初级绕组的屏蔽接电源侧地；次级绕组的屏蔽接设备侧的地；法拉弟屏蔽接大地；变压器与电源侧和负载侧的连接线采用双层屏蔽线，外层屏蔽接变压器外壳，内层分别接电源侧和负载侧的地。用户也可以根据实际不同的使用场合进行适当连线。**

为了进一步改善超级隔离变压器对差模的抑制能力，可在变压器的输出端并联一个电容器，电容器的工作电压高于变压器的次级输出电压，流过电容的电流取变压器负载电流。则当电源频率为50Hz时，电容器的电容量为

$$C = 320 I_2 / U_2$$

式中， $I_2$ 为变压器次级的负载电流，A；

$U_2$ 为变压器次级的负载电压，V；

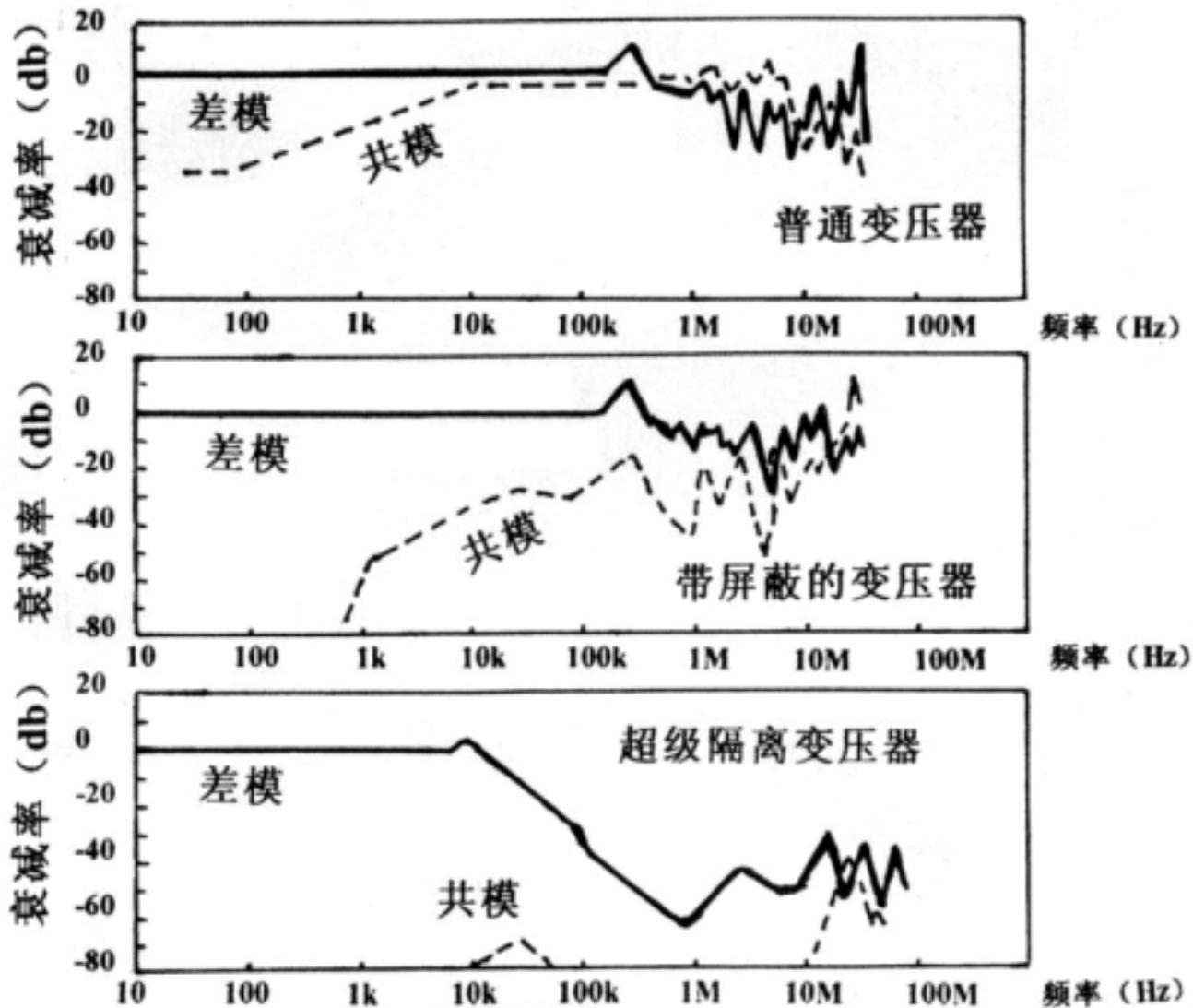
C为并联电容的电容量， $\mu F$ 。

目前已有现成的超级隔离变压器在产品市场上出售，其额定功率从100VA至几十kVA。典型差模衰减量为60B。共模衰减量则按大小形成若干系列，如美国TOPAZ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。

作为本讲结束，将三种隔离变压器的基本性能给出在表中。

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

下图是三种隔离变压器的性能测试结果。



从中可以看出，超级隔离变压器从10kHz开始对差模干扰有衰减作用，在1MHz附近衰减量达到60dB左右，在这以后由于分布参数的作用，衰减曲线变得有点起伏不定。对于共模干扰的衰减几乎从直流开始即有极好的衰减特性（在图中已看不出它的确切数值，说明衰减量要远大于80dB），只是到了10MHz之后，由于分布参数的作用，衰减曲线开始有点起伏。由此可见，超级隔离变压器对干扰确有良好的抑制作用，特别是对低频部分的衰减是普通电源线滤波器所不能比拟的，这也正是人们对这种变压器给予关注的原因所在。对于频率更高干扰的衰减可以通过与电源线滤波器的级联来达到，这样从低频到高频都可以得到比较理想的干扰抑制特性。

## 5 隔离变压器的安装

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。下图给出了一些安装的例子。另外，隔离变压器的屏蔽层连接线必须粗、短，而且直接，否则在高频时的屏蔽效果就要下降。

