



# 第十二章

# 多媒体课件

2009-5-1 更新

2022-11-9



机械工业出版社  
China Machine Press

## 第十二章 检测系统的抗干扰技术

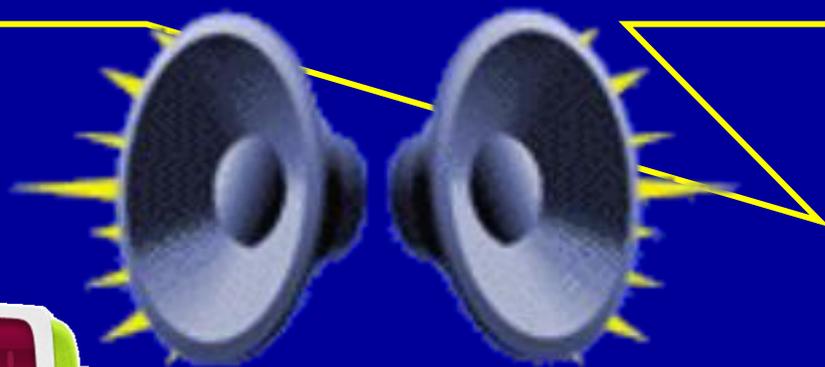
作为生产第一线的工程技术人员，经常会遇到测控系统受到干扰而不能正常工作的情况。现在，“干扰”这个名词在某些场合常被“骚扰”所代替。在这一章里，卡卡将给大家介绍几种常见的干扰，以及抗干扰的方法，还要介绍几种行之有效的电磁兼容技术。



# 做一个电磁干扰的小实验

将一台质量不佳的“电子镇流器式台灯”靠近示波器的探头，我们会发现示波器的显示屏上出现大量约宽度为数 $\mu\text{s}$ 的尖峰波形。

收音机了也会传出令人烦躁的“吱吱”噪声。



# 第一节 噪声干扰及防护

在测量过程中，往往会发现总是有一些无用的背景信号与被测信号叠加在一起，称之为骚扰或噪声。如果骚扰引起设备或系统的性能下降时，称之为干扰。

衡量噪声对有用信号的影响常用信噪比（S/N）来表示，它是指在信号通道中，有用信号功率 $P_S$ 与噪声功率 $P_N$ 之比，或有用信号电压 $U_S$ 与噪声电压 $U_N$ 之比即：

$$S/N=10\lg ( P_S / P_N ) =20\lg ( U_S / U_N ) \quad (\text{dB})$$

# 信噪比 (S/N) 的计算举例

在测量过程中应尽量提高信噪比，以减少噪声对测量结果的影响。



例：在扩音机输入端测得：话筒输出的做报告者声音的平均电压为50mV，50Hz干扰“嗡嗡”声的电压为0.5mV，求信噪比。

解  $S/N = 20 \lg (50/0.5) \text{ dB} = 40 \text{ dB}$

又问：当S/N分别为20 dB、0 dB、-20 dB时，说明做报告者声音与干扰声音之间各为什么关系？

# 噪声源及干扰源

## 一、机械骚扰

机械振动或冲击使电子检测装置中的元件发生振动，改变了系统的电气参数，造成可逆或不可逆的影响。

对机械骚扰，可选用专用减振弹簧-橡胶垫脚或吸振橡胶海绵垫来降低系统的谐振频率，吸收振动的能量，从而减小系统的振幅。



橡胶垫脚及弹簧



橡胶  
海绵软垫

# 振动试验台

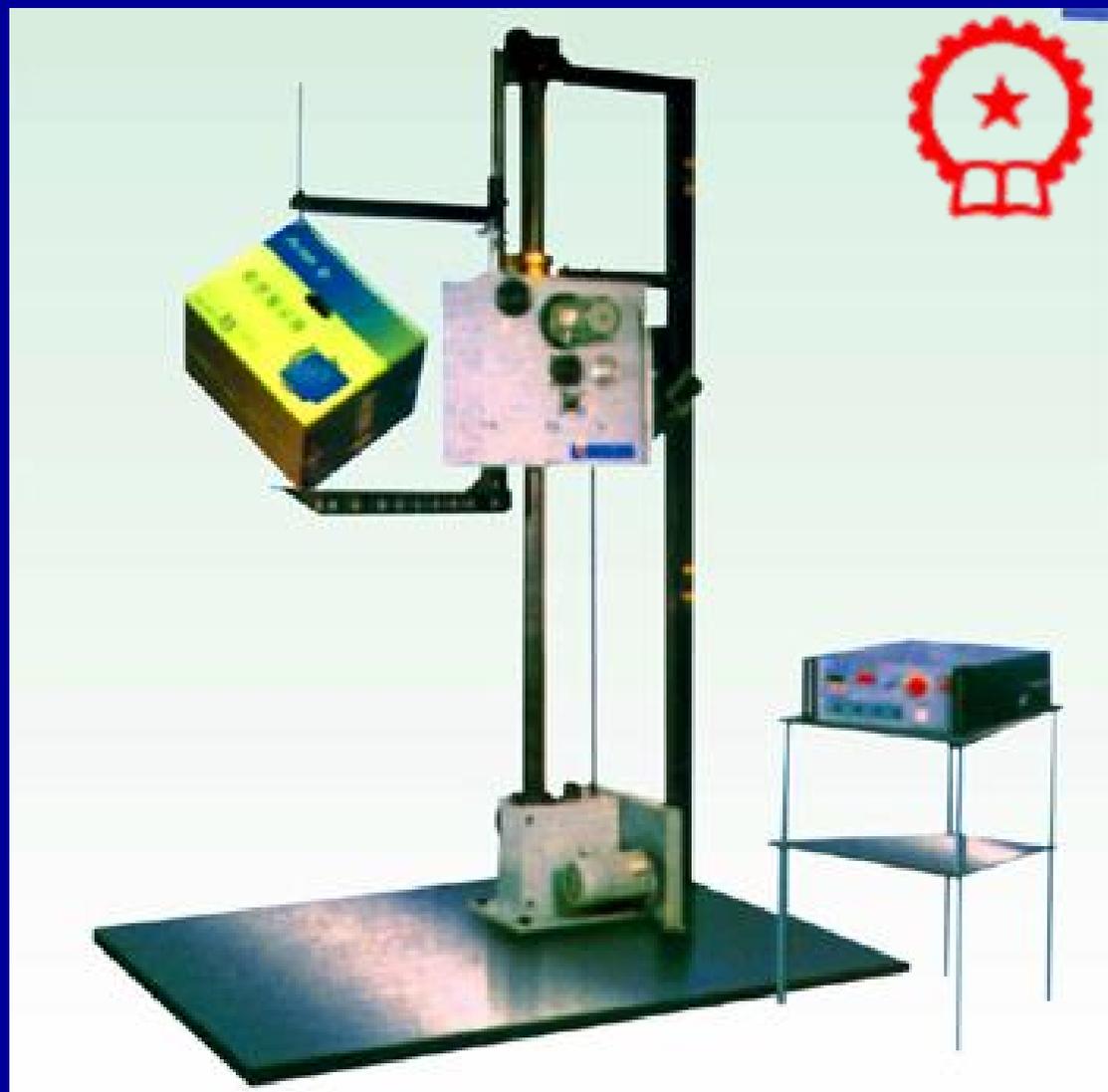
频率、振幅均可调节



将被测仪器（如图中的电子天平）固定在振动台上，逐渐增大振幅，测试在不同频率的规定振幅下，产品指标是否变化。

# 跌落试验

产品在运输过程中常因为遭受剧烈震动或跌落而损坏或性能变差，因此需要做抗跌落试验和测试。



跌落试验机

## 二、湿度及化学骚扰

当环境相对湿度增加时，物体表面就会附着一层水膜，并渗入材料内部，降低了绝缘强度，造成了漏电、击穿和短路现象；潮湿还会产生原电池电化学反应电压。

某些化学物品如酸、碱、盐、各种腐蚀性气体以及沿海地区的盐雾也会造成与潮湿类似的漏电腐蚀现象，必须采取以下措施来加以保护：浸漆、密封、定期通电加热驱潮等。

用绝缘漆浸渍过的控制变压器



浸漆可防止水分进入线圈内部

# 仪器设备的防潮试验

## 喷淋试验



机械工业出版社  
China Machine Press

# 仪器设备的防潮试验（续）



**“步入式”恒温恒湿房**（参考江苏省计量测试技术研究所资料）

体积： $25\text{m}^3$ ，温度调节范围： $(-40\sim+80)^\circ\text{C}$ ，  
湿度调节范围： $(30\sim90)\%RH$

可用于进行大型仪器设备的高低温、恒定湿热、  
交变湿热试验。

### 三、热骚扰

热量，特别是温度波动以及不均匀的温度场对检测装置的干扰主要体现在以下几个方面：

元件参数的变化（温漂）、接触热电势干扰、元器件长期在高温下工作时，引起寿命和耐压等级降低等。

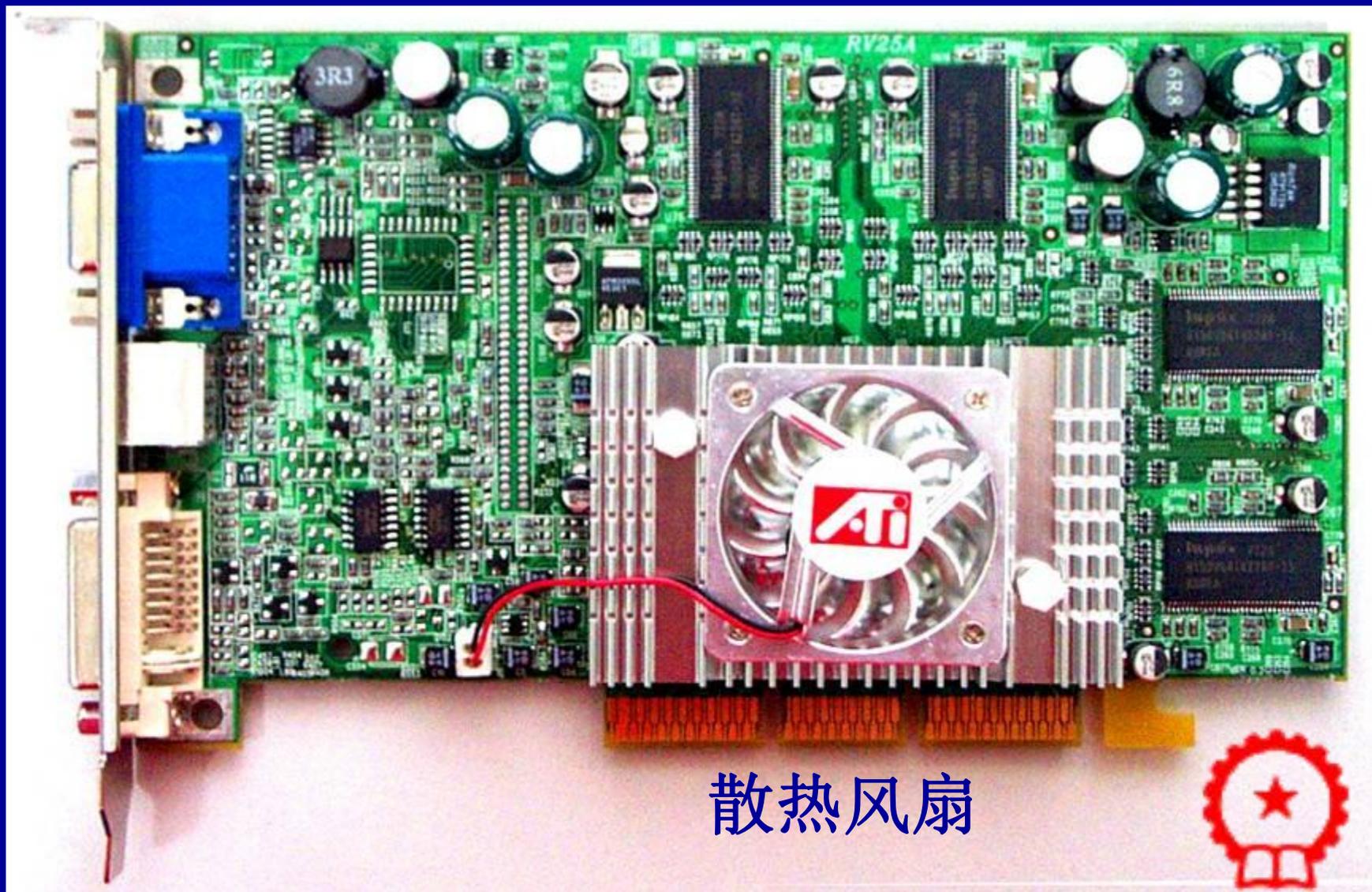
克服热干扰的防护措施有：

选用低温漂元件，采取软、硬件温度补偿措施，选用低功耗、低发热元件，提高元器件规格余量，仪器的前置输入级远离发热元件，加强散热、采用热屏蔽等。



机械工业出版社  
China Machine Press

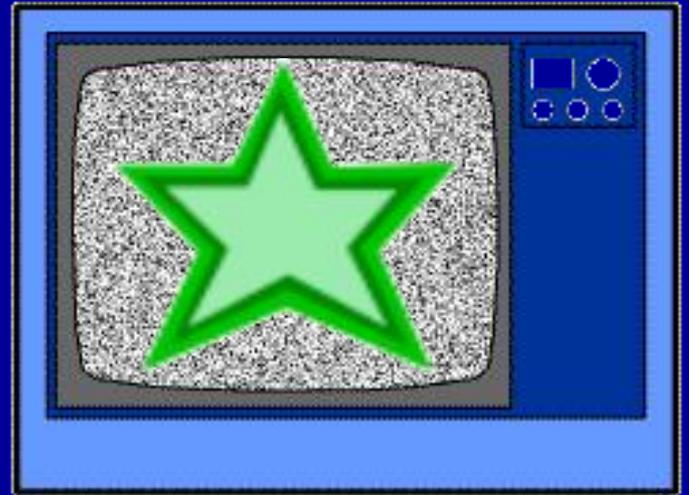
# 散热实例



散热风扇

## 四、固有噪声骚扰

在电路中，电子元件本身产生的、具有随机性、宽频带的噪声称为固有噪声。最重要的固有噪声源是电阻热噪声、半导体散粒噪声和接触噪声等。固有噪声可以从喇叭或耳机中反映出来，但更多的时候是反映在输出电压的无规律跳变上。



机械工业出版社  
China Machine Press

## 五、电、磁噪声骚扰

电磁波可以通过电网以及直接辐射的形式传播到离这些噪声源很远的检测装置中。在工频输电线附近也存在强大的交变电场，在强电流输电线附近存在干扰磁场，他们将对十分灵敏的检测装置造成干扰。由于这些干扰源功率强大，要消除他们的影响较为困难，必须采取多种措施来防护。



机械工业出版社  
China Machine Press

## 第二节 检测技术中的电磁兼容原理

### 一、电磁兼容（EMC）概念

我国从20世纪80年代至今已制定了上百个电磁兼容的国家标准，强制要求绝大多数电气设备必须通过相关电磁兼容标准的性能测试，否则为不合格产品。通俗地说，电磁兼容是指电子系统在规定的电磁干扰环境中能正常工作的能力，而且还不允许产生超过规定的电磁干扰。



机械工业出版社  
China Machine Press

## 二、电磁干扰的来源

电磁干扰源分为两大类：**自然界干扰源**和**人为干扰源**，后者是检测系统的主要干扰源。

1. 自然界干扰源包括地球外层空间的宇宙射电噪声、太阳耀斑辐射噪声以及大气层的天电噪声。后者的能量频谱主要集中在**30MHz以下**，对检测系统的影响较大。

2. 人为干扰源又可分为**有意发射干扰源**和**无意发射干扰源**。



# 自然界干扰源和人为干扰源



闪电产生电磁场干扰

X光机产生大功率  
高频干扰



机械工业出版社  
China Machine Press

# 自然界干扰源和人为干扰源（续）



雷达会产生大功率高频干扰

变电站会产生  
50Hz的高次  
谐波干扰以及  
电晕放电干扰



机械工业出版社  
China Machine Press

# 电吹风机干扰电视机的演示

电吹风机产生的电磁波干扰以两种途径到达电视机：一是**通过共用的电源插座**，二是**以空间电磁场传输的方式由电视机的天线接收**。



# 由电源配电回路引入的干扰



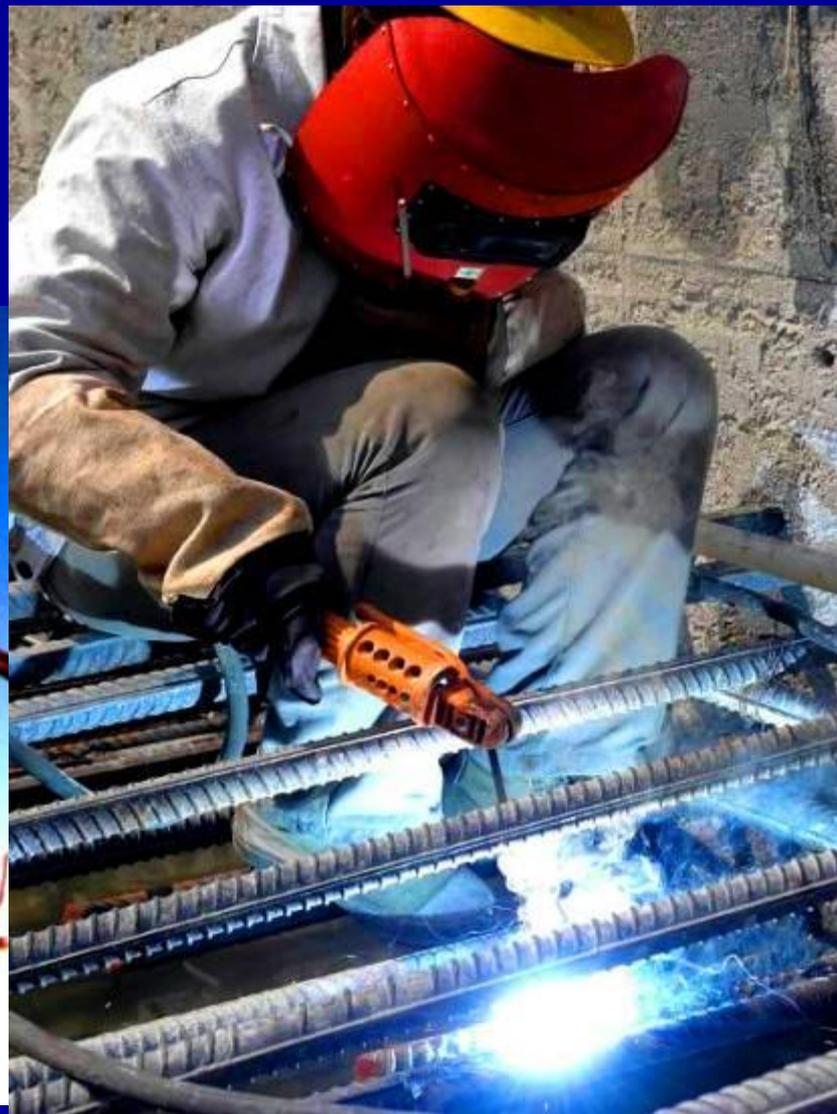
交流供配电线路在工业现场的分布相当于一个吸收各种干扰的网络，以电路传导的形式传遍各处，经检测装置的电源线进入仪器内部造成干扰。

电压突变和交流电源波形畸变使工频的高次谐波经电源线进入仪器的前级电路。

常见的大功率干扰有：调压或逆变电路中的晶闸管引起的大功率高次谐波干扰、开关电源经电源线往外泄漏出的几百千赫兹尖脉冲干扰。

# 由电焊引起的干扰

电焊机电缆产生强磁场干扰



磁场交链

信号线



机械工业出版社  
China Machine Press

## 第二节 电磁兼容技术

抗电磁干扰技术有时又称为电磁兼容控制技术。可采用破坏干扰途径和削弱检测系统电路对干扰的敏感性等方法，常用的抗干扰措施有屏蔽、接地、浮置、退耦、滤波、光电隔离等技术。



机械工业出版社  
China Machine Press



# 一、屏蔽技术

利用金属材料制成容器，将需要防护的电路包围在其中，可以防止电场或磁场耦合干扰的方法称为屏蔽。屏蔽可分为静电屏蔽、低频磁屏蔽和电磁屏蔽等几种。根据不同的对象，使用不同的屏蔽方式。

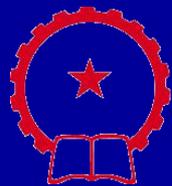
未加屏蔽罩时，中频变压器线圈易受外界干扰。



加屏蔽罩后的中频变压器

# 1.静电屏蔽

静电屏蔽是用铜或铝等导电性良好的金属为材料制作成封闭的金属容器，并与地线连接，把需要屏蔽的电路置于其中，使外部干扰电场的电力场不影响其内部的电路。反之，内部电路产生的电力线也无法影响外电路。静电屏蔽的容器器壁上允许有较小的孔洞（作为引线孔或调试孔）它对屏蔽的影响不大。



机械工业出版社  
China Machine Press

# 各种静电屏蔽

带孔屏蔽板

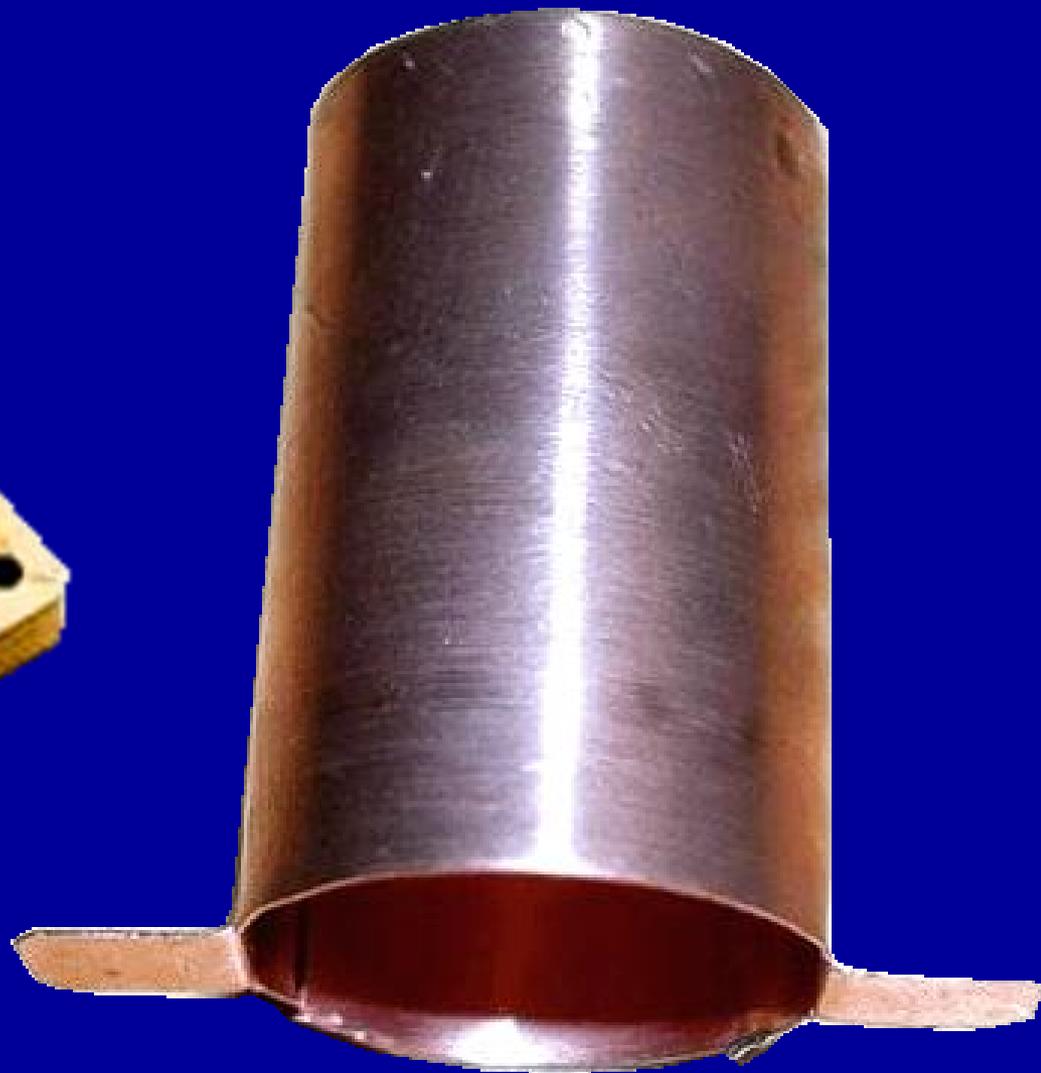
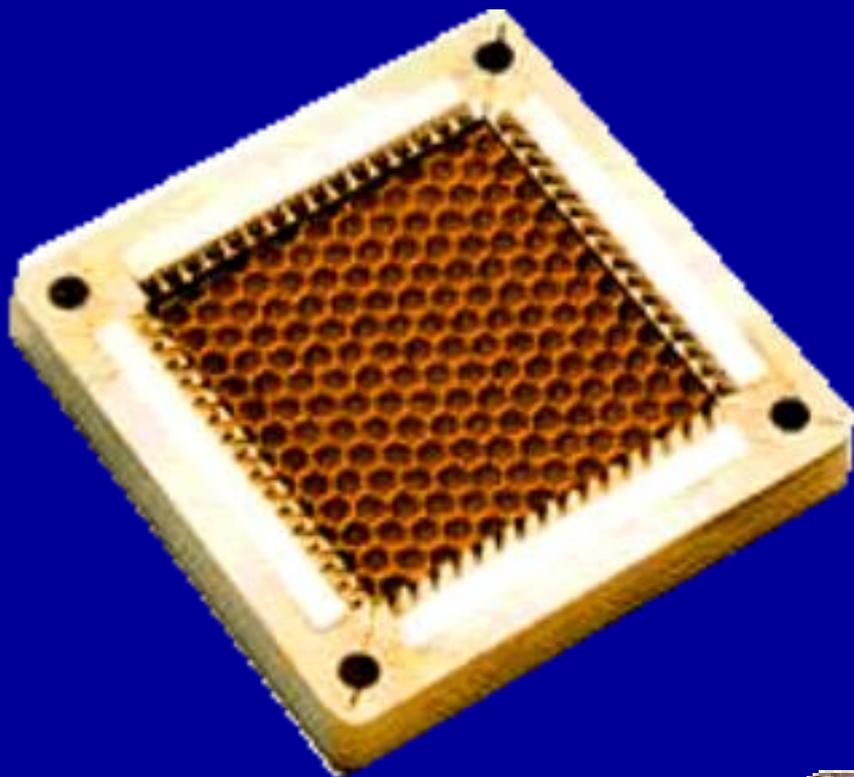


仪器设备的屏蔽  
外壳必须接地

# 各种静电屏蔽（续）

自制的屏蔽罩

通风屏蔽窗

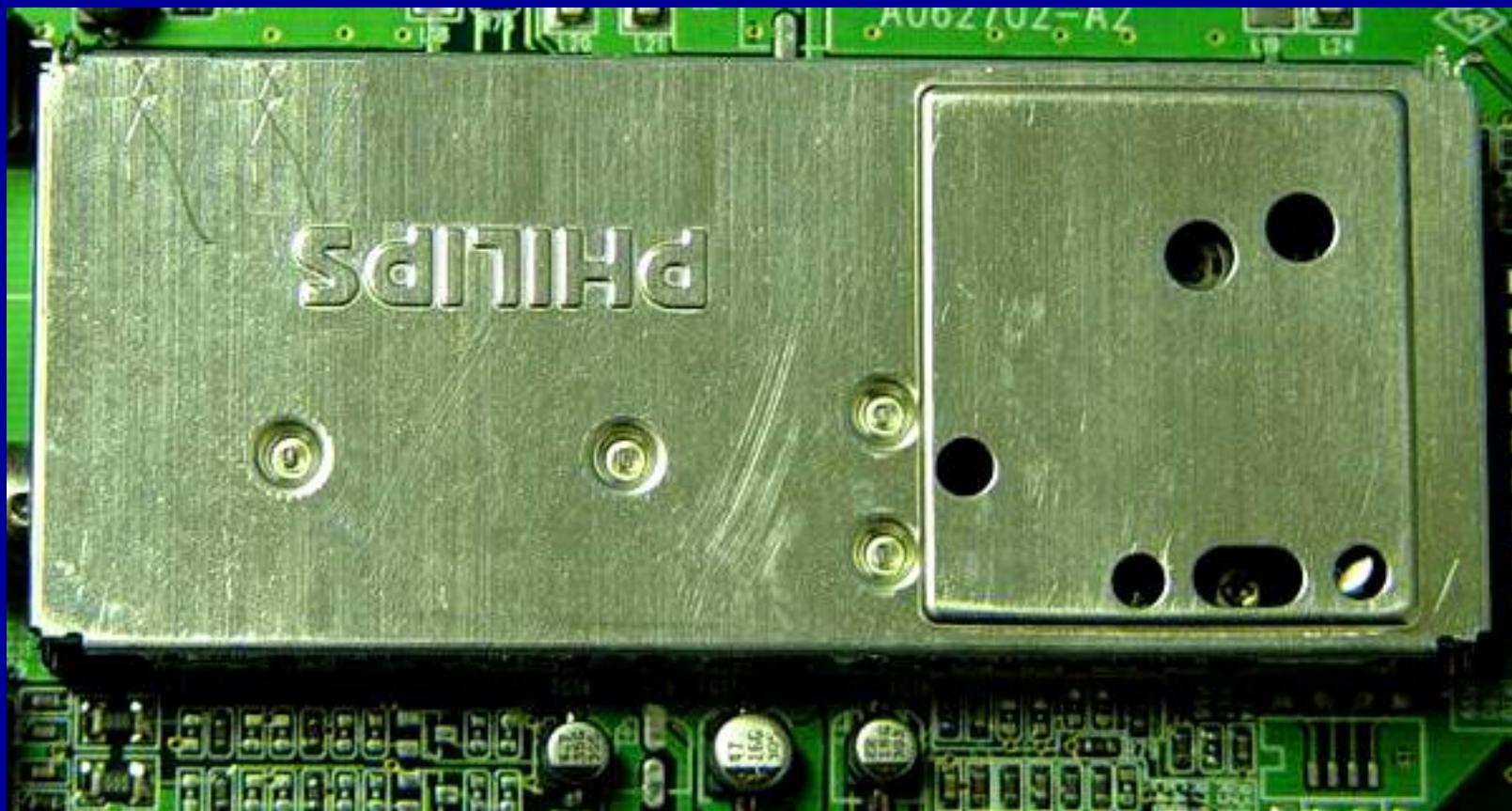


# 各种静电屏蔽（续）

开关电源采用带孔的屏蔽外壳，既可散热，又可防止电磁干扰外泄



# 各种静电屏蔽（续）



带调试孔的屏蔽盒



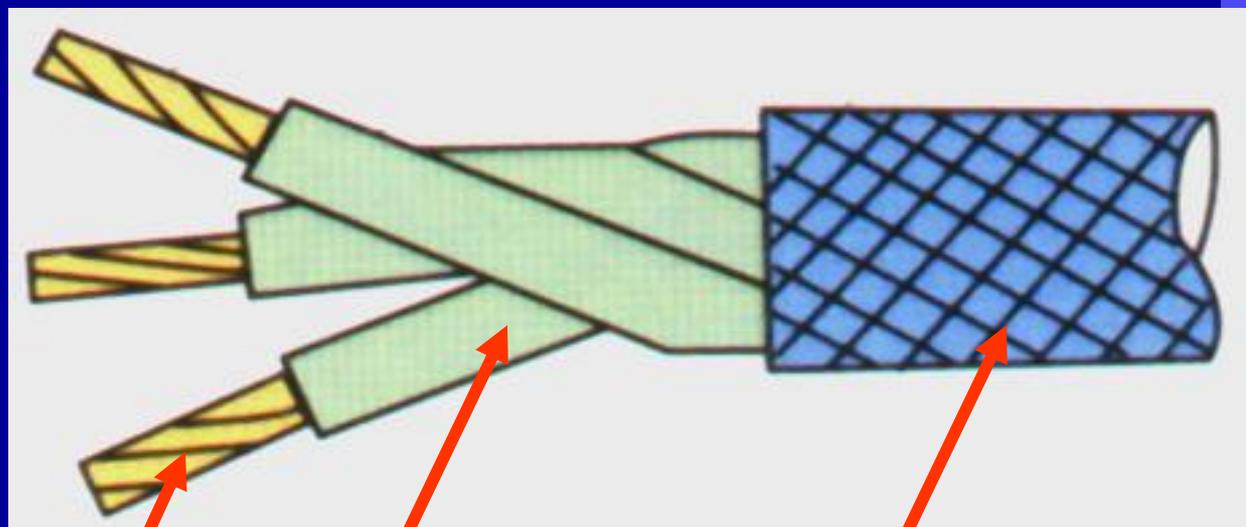
机械工业出版社

China Machine Press

# 屏蔽线

4对双绞扭屏蔽线  
(屏蔽层接地)

三绞扭屏蔽线



铜芯

聚氟乙烯  
绝缘层

铜线编织网  
(接地)

## 2.低频磁屏蔽

低频磁屏蔽是用来隔离低频（主要指50Hz）磁场和固定磁场（也称静磁场，其幅度、方向不随时间变化，如永久磁铁产生的磁场）耦合干扰的有效措施。静电屏蔽线或静电屏蔽盒对低频磁场不起隔离作用。必须采用高导磁材料作屏蔽层，以便让低频干扰磁力线只从磁阻很小的磁屏蔽层上通过，使低频磁屏蔽层内部的电路免受低频磁场耦合干扰的影响。有时还将屏蔽线穿在接地的铁质蛇皮管或普通铁管内，同时达到静电屏蔽和低频屏蔽的目的。

# 低频磁屏蔽举例

多数仪器的外壳采用导磁材料（例如：铁质机壳）作屏蔽层，让低频干扰磁力线从磁阻很小的磁屏蔽层上通过，使受外壳保护的内部电路免受低频磁场耦合干扰的影响。如果将外壳接地，则同时达到静电屏蔽和低频磁屏蔽的目的。



参考中国（厦门）微波高频通信设备销售公司资料

### 3.电磁屏蔽



镀铜电磁屏蔽盒

电磁屏蔽是采用导电良好的金属材料做成屏蔽罩、屏蔽盒等不同的外形，将被保护的电路包围在其中。它屏蔽的干扰对象是高频（40kHz以上）磁场。

干扰源产生的高频磁场遇到导电良好的电磁屏蔽层时，就在其外表面感应出同频率的电涡流，从而消耗了高频干扰源磁场的能量。其次，电涡流也将产生一个新的磁场，抵消了一部分干扰磁场的能量，从而使电磁屏蔽层内部的电路免受高频干扰磁场的影响。



机械工业出版社  
China Machine Press

# 几种用导电纤维材料编织而成的军用电磁屏蔽器材

(参考常州雷宁电磁屏蔽设备公司资料)



屏蔽通信车



军用屏蔽帐篷



军用  
电子方舱

# 几种用导电纤维材料编织而成的 电磁屏蔽服

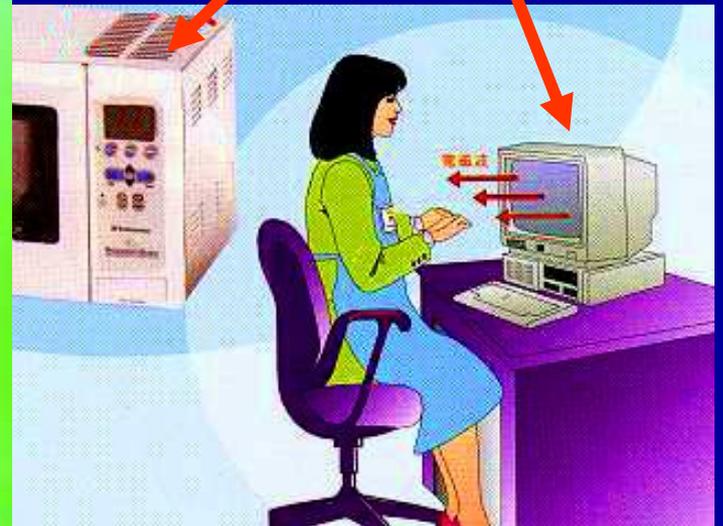


防电磁波  
屏蔽服装

防电磁波屏蔽围裙



辐射源

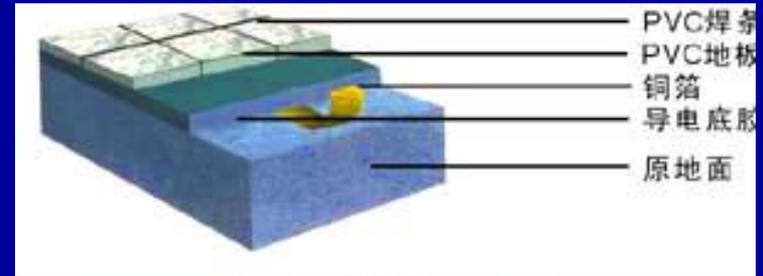


防电磁波屏蔽  
围裙的使用

# 屏蔽室



导电PVC地板  
用于防静电及  
底部屏蔽



干扰信号无法穿透  
钢板屏蔽室



## 二、接地技术

### (一) 地线的种类

接地起源于**强电技术**，它的本意是接大地，主要着眼于安全。这种地线也称为“**保安地线**”。它的接地电阻值必须小于规定的数值。

对于仪器、通讯、计算机等电子技术来说，“地线”多是指电信号的**基准电位**，也称为“**公共参考端**”，它除了作为各级电路的电流通道之外，还是保证电路工作稳定、抑制干扰的重要环节。它可以接大地，也可以与大地隔绝。



机械工业出版社  
China Machine Press

# 四种触电情况

四种常见的触电情况



跨步电压触电



单相触电



双相触电



乱拉电线触电



# 保安地线

电烙铁的外壳  
必须良好地接大地，  
以保证人身安全以  
及焊接对象不致被  
静电击穿。



# 接大地与防静电的关系

人在工频电场中工作时，身体可能感应出几十伏以上的电压；当人在地板上行走时，也可能因摩擦而带上几百伏以上的静电。因此在焊接集成电路时，人体必须良好地接大地，以保证集成电路的CMOS输入端不致被静电击穿。人体接地的方法之一是带上接地的防静电手腕带。



防静电手腕带



机械工业出版社  
China Machine Press

# 防静电手腕带的使用



接地



# 信号地线分类

## 1. 模拟信号地线

模拟信号地线是模拟信号的零信号电位公共线。因为模拟信号电压多数情况下均较弱、易受干扰，易形成级间不希望的反馈，所以模拟信号地线的横截面积应尽量大些。



机械工业出版社  
China Machine Press

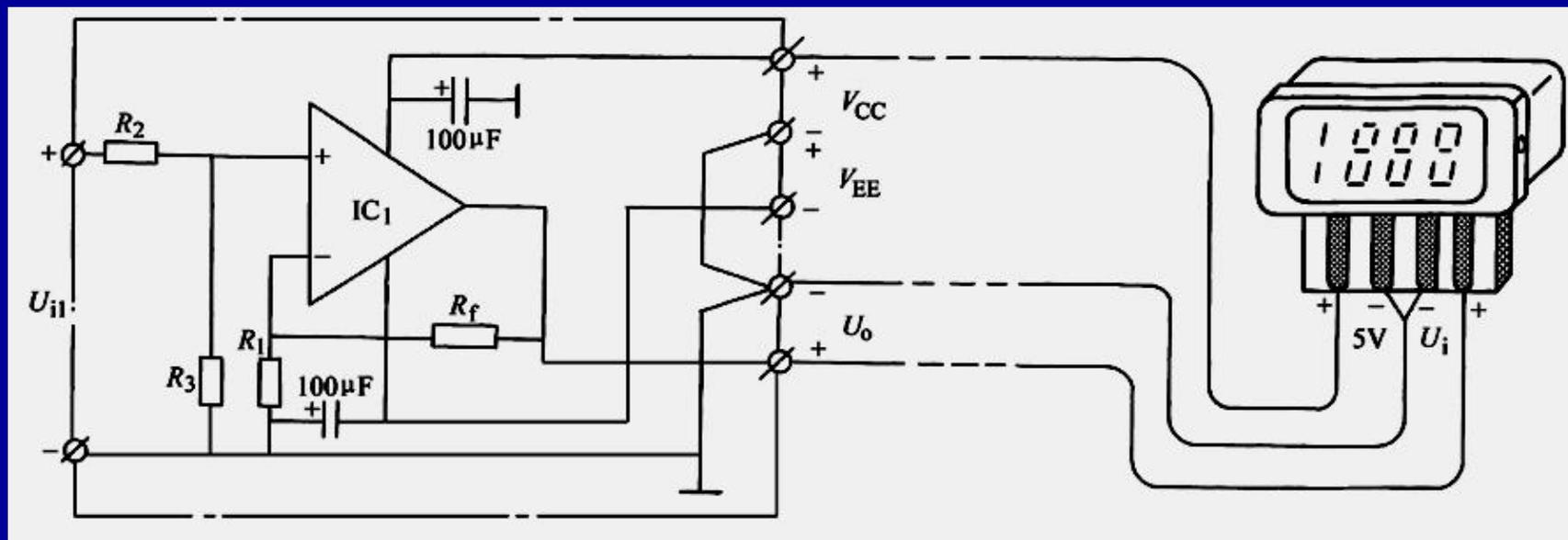
## 2. 数字模拟地线

数字信号地线是数字信号的零电平公共线。由于数字信号处于**脉冲工作状态**，动态脉冲电流在接地阻抗上产生的压降往往**成为微弱模拟信号的干扰源**，为了避免数字信号对模拟信号的干扰，**两者的地线应分别设置为宜**，否则会严重干扰模拟信号的测量结果。



机械工业出版社  
China Machine Press

# 接地改错



图示为**数字电路干扰模拟电路的例子**。该图错误地将数字面板表的**电源负极**（有较大的数字脉冲电流）与被测电压（**易受干扰的模拟信号**）的负极在数字面板表的接插件上用一根地线连接到印制电路板上，就会使**数字面板表的示值跳动不止**。如果**将数字电路的地线与模拟电路的地线分开设置**就能有效地消除这种干扰。**请指出地线的错误之处，并改正之。**

### 3. 信号源地线

传感器可看作是测量装置的信号源，多数情况下信号较为微弱。通常传感器安装在生产设备现场，而测量装置设在离现场一定距离的控制室内，从测量装置的角度看，可以认为传感器的公共参考端就是信号源地线，它必须与测量装置进行正确的连接才能提高整个检测系统的抗干扰能力。



机械工业出版社  
China Machine Press

## 4. 负载地线

负载的电流一般都比前级信号电流大得多，负载地线上的电流有可能干扰前级微弱的信号，因此负载地线必须与其他信号地线分开。例如，若误将喇叭的负极（接地线）与扩音机话筒的屏蔽线碰在一起，就相当于负载地线与信号地线合并，可能引起啸叫。又如当负载是继电器时，继电器触点闭合和断开的瞬间经常产生电火花，容易反馈到前级，造成干扰，因此应正确连接。

## (二) 一点接地原则

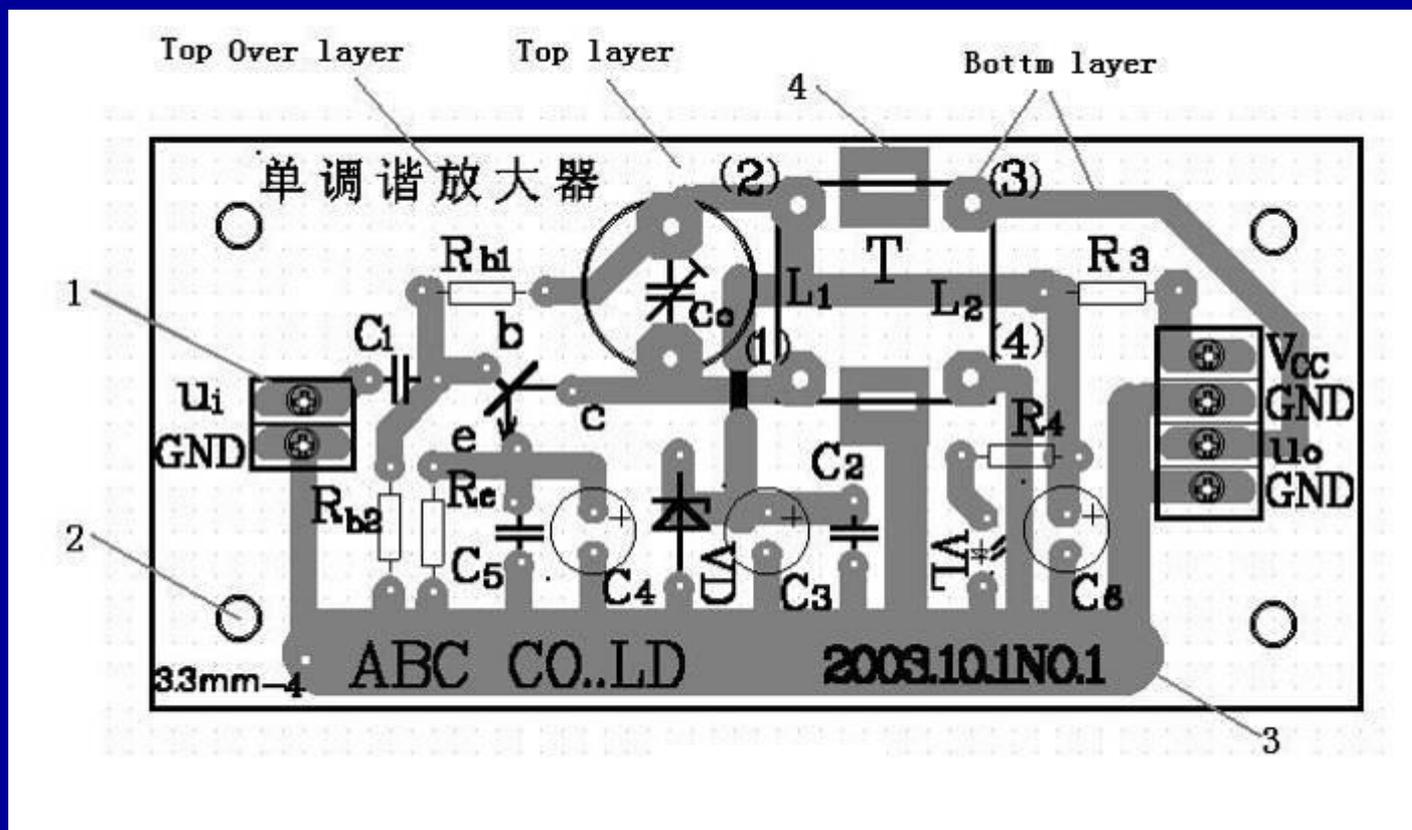
对于模拟信号地线、数字信号地线、信号源地线、负载地线等几种地线一般应分别设置，在电位需要连通时，也必须仔细选择合适的点，在一个地方相连，才能消除各地线之间的干扰。



机械工业出版社  
China Machine Press



# 1.单级电路的一点接地原则



考虑到加工工艺，在实际的印制电路板设计中，只能做到各接地点尽量靠近、并加大地线的宽度。

1—接线端子

2—印制板安装孔

3—接地母线

4—高频变压器屏蔽外壳接地点

## 2.多级电路的一点接地原则

若将多级电路的地线逐级串联，在**最后一段地线上将存在一定的对地电位差**，有可能产生共阻抗耦合干扰，应采取并联接地方式，才不易产生级与级之间的相互干扰。

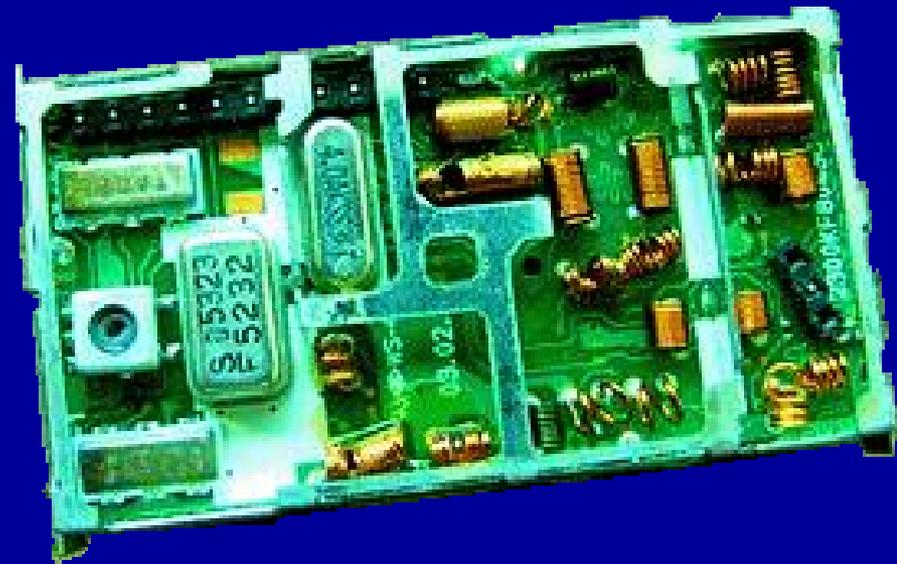
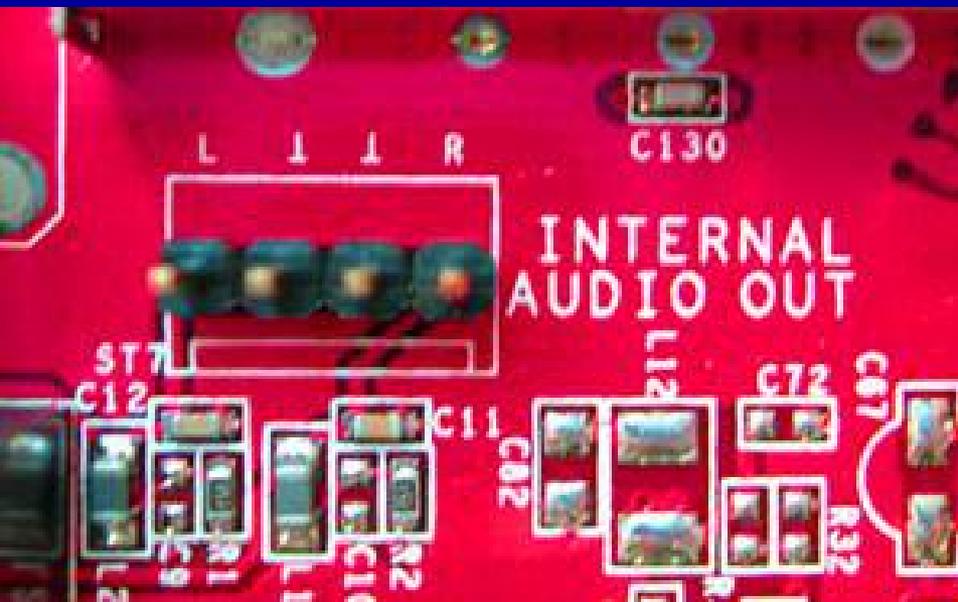
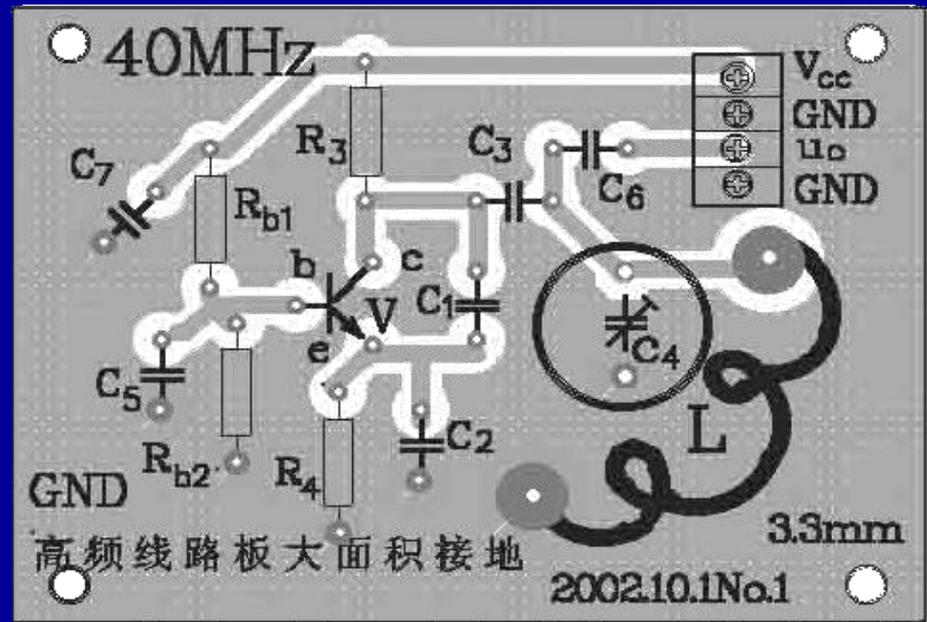
设计多级电路的地线应注意以下两个原则：一是**公用地线截面积应尽量大些**，以减小地线的内阻，二是**应把电流最大的电路放在距电源的接地点最近的地方**。



机械工业出版社  
China Machine Press

# 大面积接地

当频率较高时，应采取大面积的地线。这时允许“多点接地”，这是因为接地面积十分大，内阻很低，事实上相当于一点接地，不易产生级与级之间的共阻耦合。



# 多级电路的一点接地原则的改错

请指出下图的电源接地错误



# 检测系统的一点接地原则

有许多传感器的两根信号线均不接大地。如果这时二次仪表也采用浮置电路，容易出现静电积累现象，且易产生电场干扰。

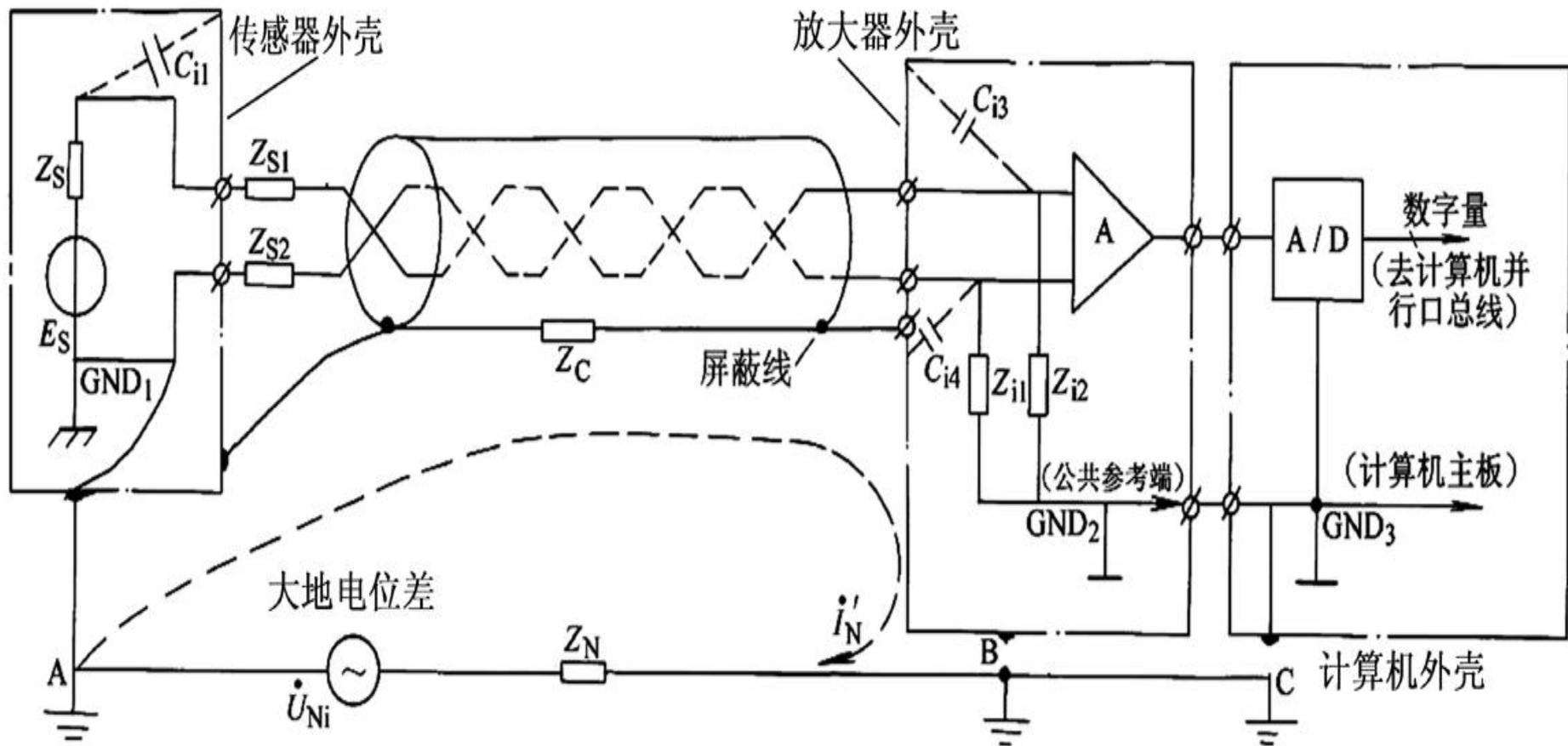
在这种情况下多采用二次仪表测公共参考端接地的方案。此种情况下，检测系统仍然符合一点接地原则。在二次仪表与计算机相连接的情况下，由于计算机的公共参考端已被接金属机箱，并通过保安地线接大地，所以这时二次仪表的零电位端（公共参考端）也就通过计算机接大地了。在这种情况下，传感器的公共参考端不应再接地，否则会产生大地环流，造成干扰。



机械工业出版社  
China Machine Press

# 检测系统一点接地原则的改错

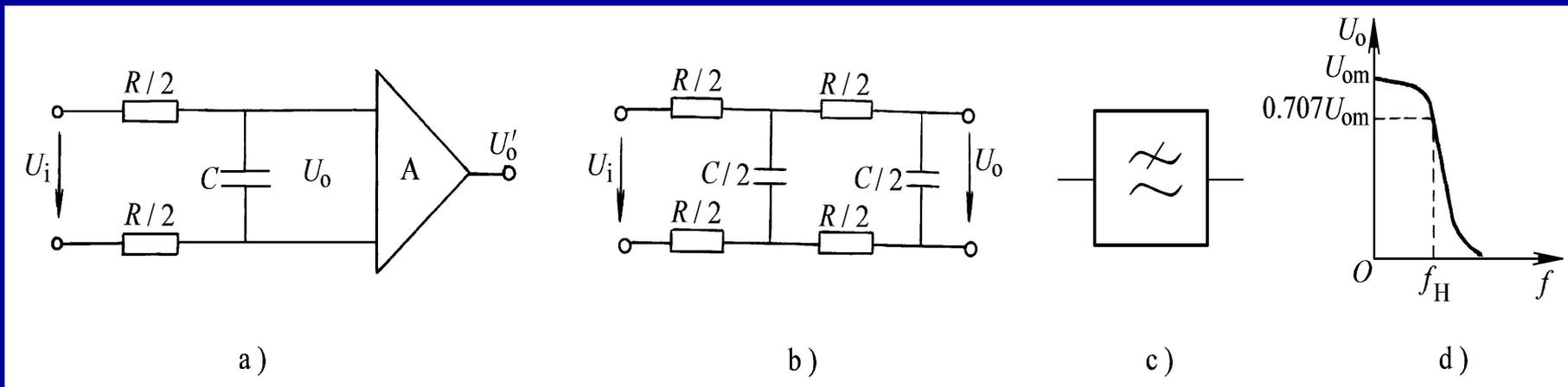
请指出下图的接地错误



# 三、滤波技术

滤波器是抑制交流差模干扰的有效手段之一。有RC滤波器和LC滤波器等几种。

1. RC滤波器：当信号源为热电偶、应变片等信号变化缓慢的传感器时，利用小体积、低成本的无源RC低通滤波器将对串模干扰有较好的抑制效果。



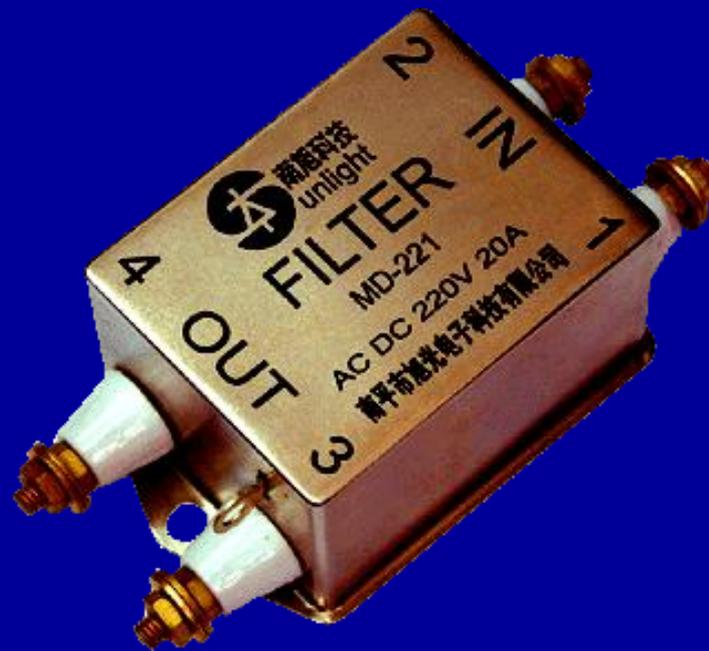
a) 单节RC滤波器与放大器的连接 b) 双节RC滤波器  
c) 低通滤波器图形符号 d) 频率特性

## 2. 交流电源滤波器

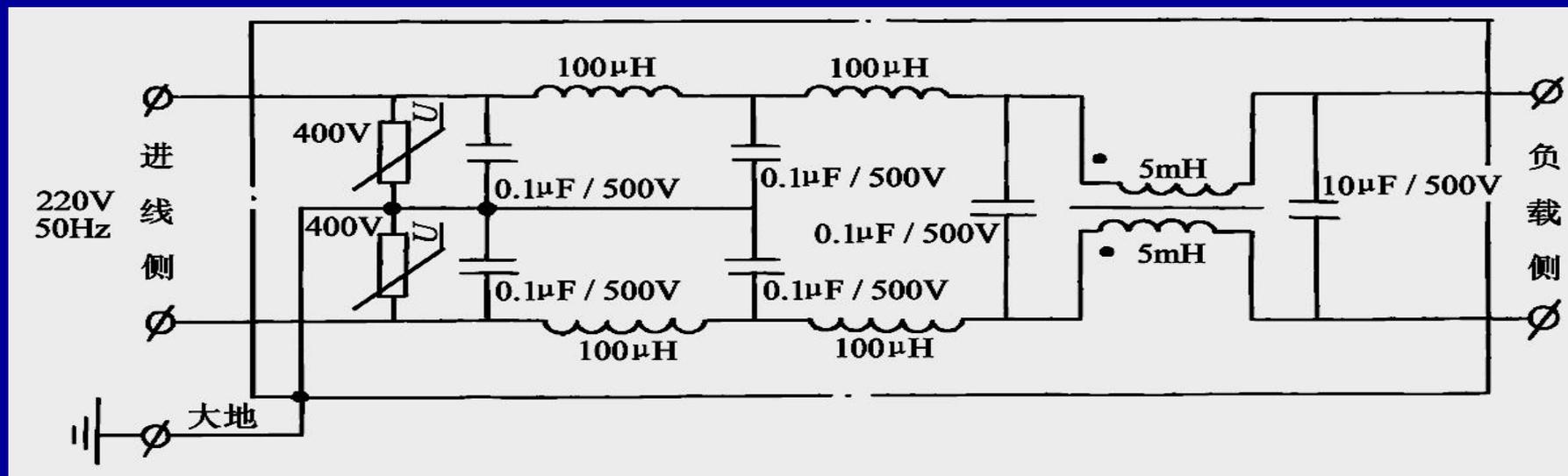
电源网络吸收了各种高、低频噪声，对此常用压降较小的LC滤波器来抑制混入电源的噪声。



# 交流电源滤波器外形

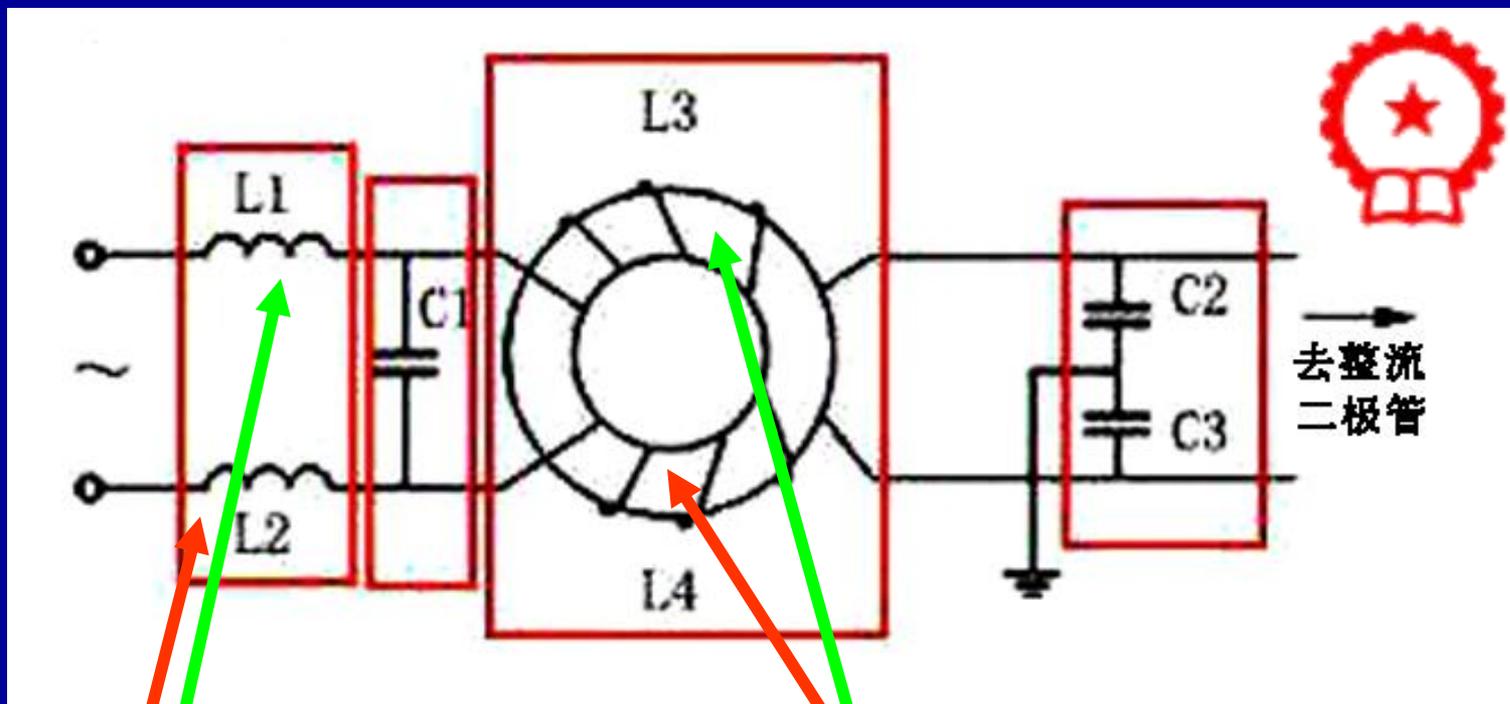


# 交流电源滤波器的内部电路



图中的**100 $\mu$ H电感**、**0.1 $\mu$ F电容**组成高频滤波器，用于吸收从电源线传导进来的中短波段的高频噪声干扰；图中两只对称的**5mH电感**是由绕在同一只铁心两侧、匝数相等的电感绕组构成的，称为共模电感，用于吸收因电源波形畸变而产生的谐波干扰；图中的**压敏电阻**用于吸收因雷击等引起的浪涌电压干扰。

# 交流电源滤波器的内部电路（续）



差模电感

共模电感



机械工业出版社  
China Machine Press

## 交流电源滤波器外形（续）

用户可根据需要，选择内部包含一级LC或两级甚至三级LC的电源滤波器。使用时外壳需要良好接大地。



右图的电源滤波器共有几级LC滤波电路？



机械工业出版社  
China Machine Press

# 交流电源滤波器外形

带交流电源  
滤波器的插座



机械工业出版社  
China Machine Press

# 开关电源内部的电源滤波器及共模电感



电容



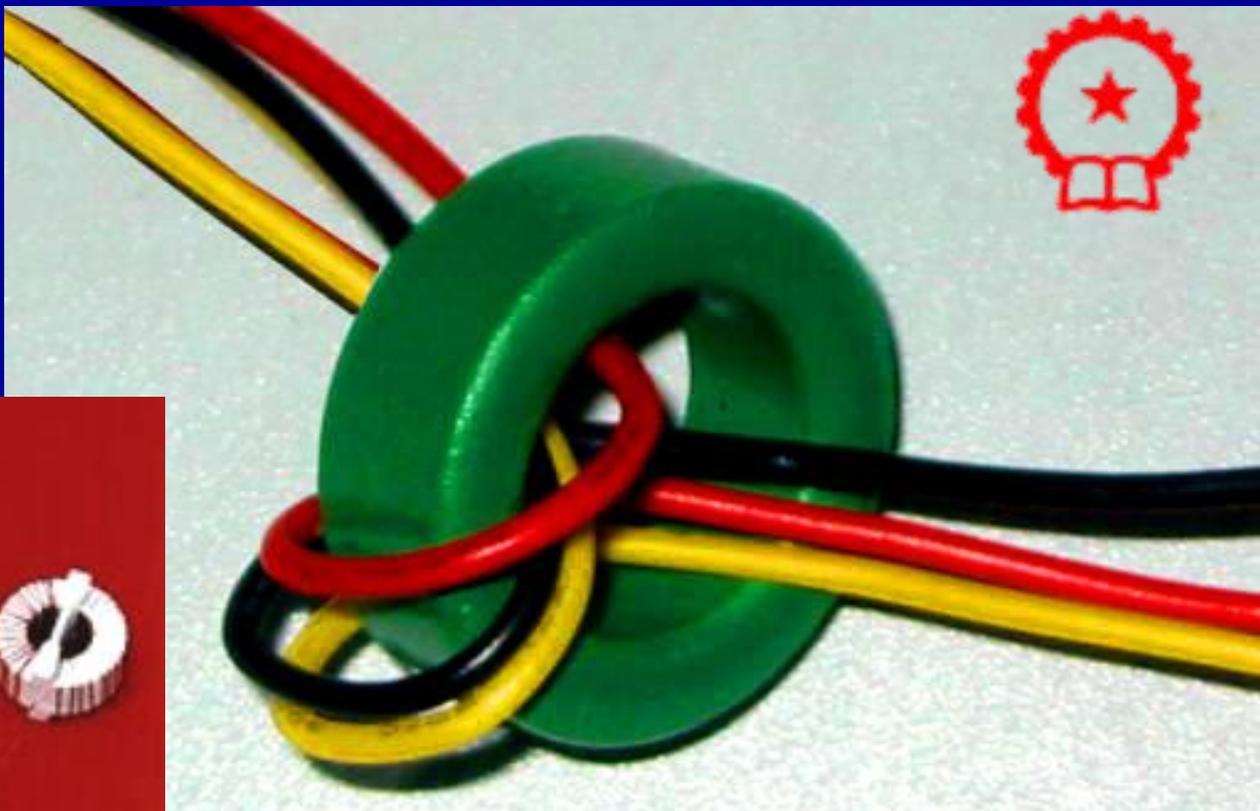
电感线圈

保险丝

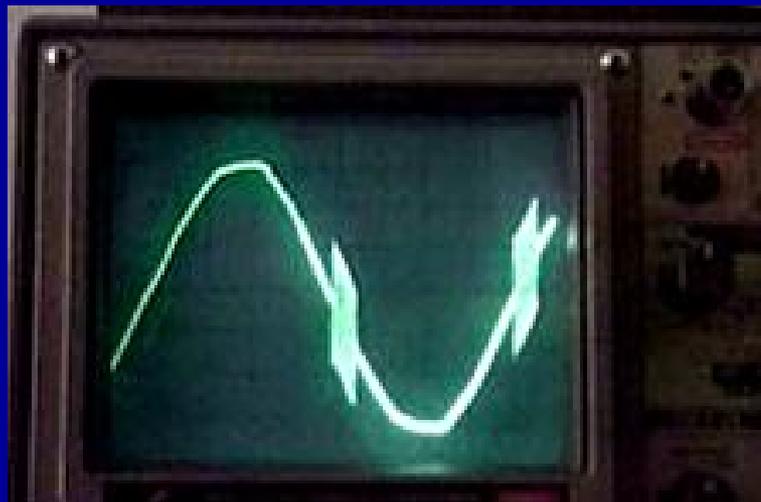
# 电源滤波器中的共模电感

当50Hz负载大电流流经共模电感时，由于进线与出线产生的磁场方向相反，相互抵消，不会产生压降，但共模电感对高频共模干扰却有较大的感抗。

## 三相共模电感

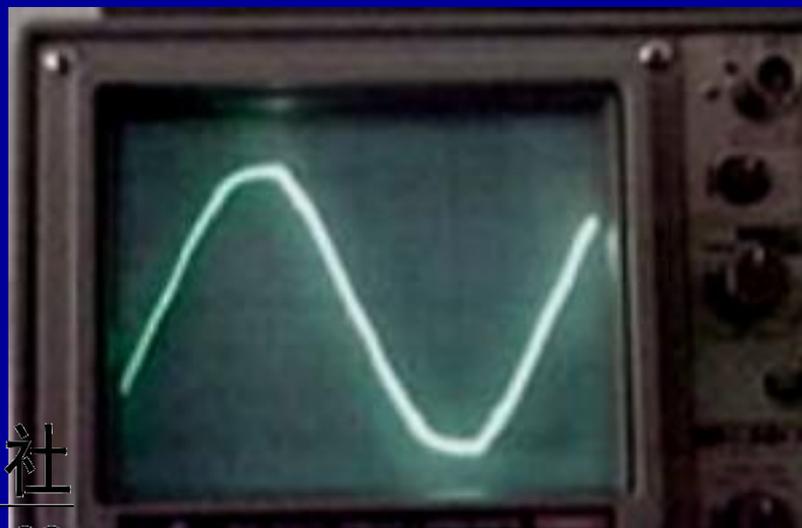


# 交流电源滤波器的使用效果



使用电源滤波器前观察到的干扰

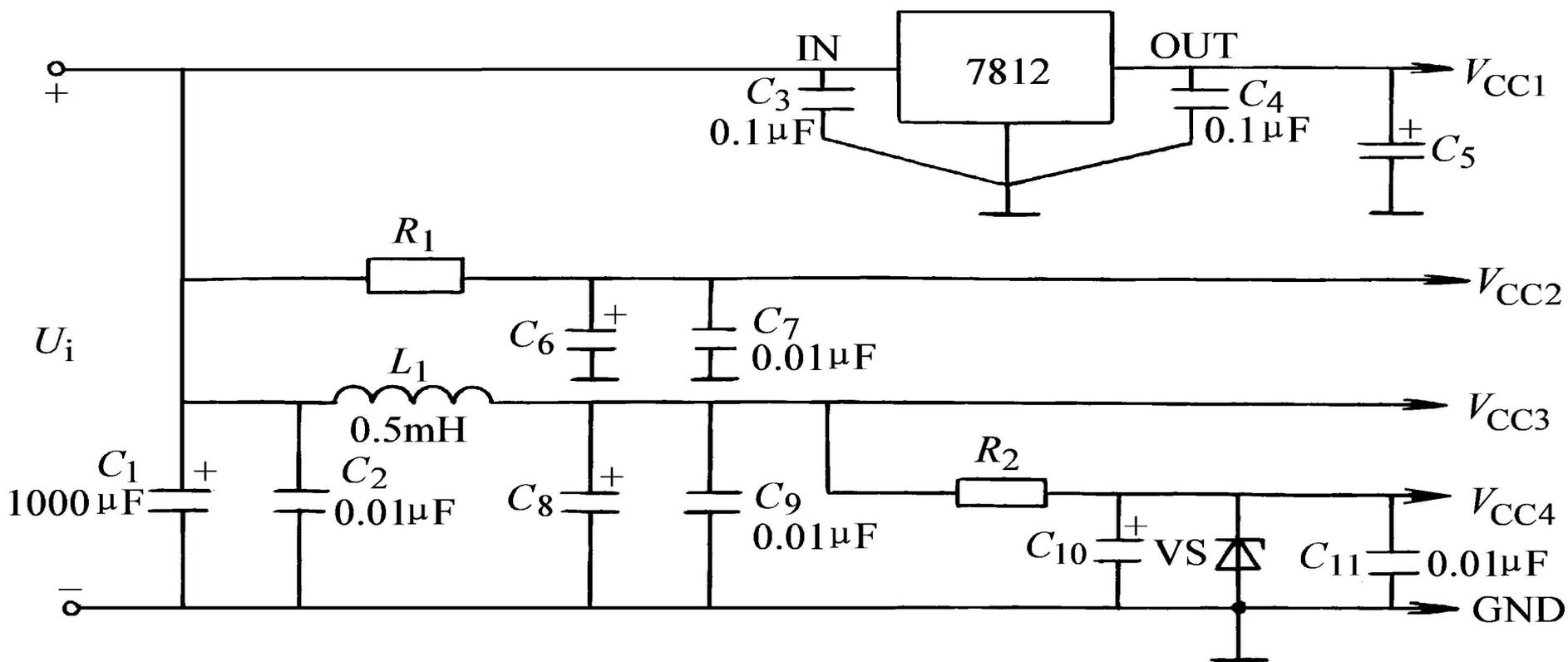
使用电源滤波器  
后干扰消失



机械工业出版社  
China Machine Press

### 3. 直流电源滤波器

直流电源往往为几个电路所共用，为了**避免通过电源内阻造成几个电路间互相干扰**，应在每个电路的直流电源上加上**RC或LC退耦滤波器**。下图中的**电解电容用来滤除低频噪声**，**电解电容旁边并联一个 $0.01\sim 0.1\mu\text{F}$ 的磁介电容或独石电容**，用来滤除高频噪声。



## 四、光电耦合技术

目前检测系统越来越多地采用**光耦合器**，也称**光电耦合器**或**光耦**，它可较大地提高系统的**抗共模干扰能力**。

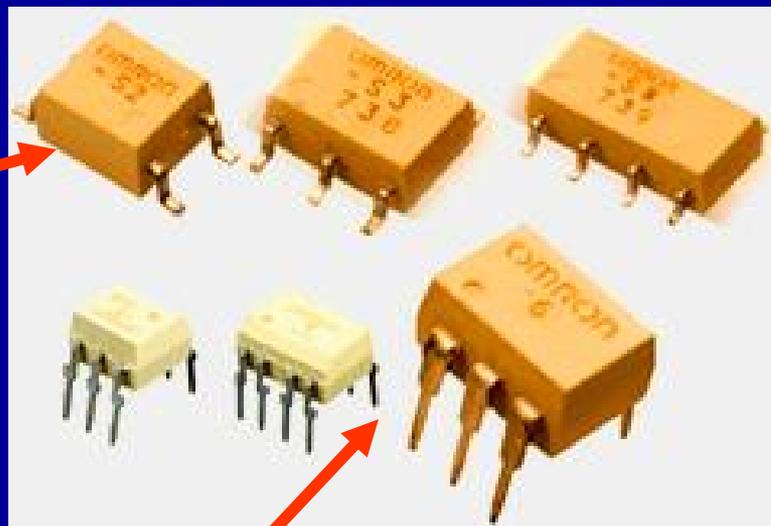
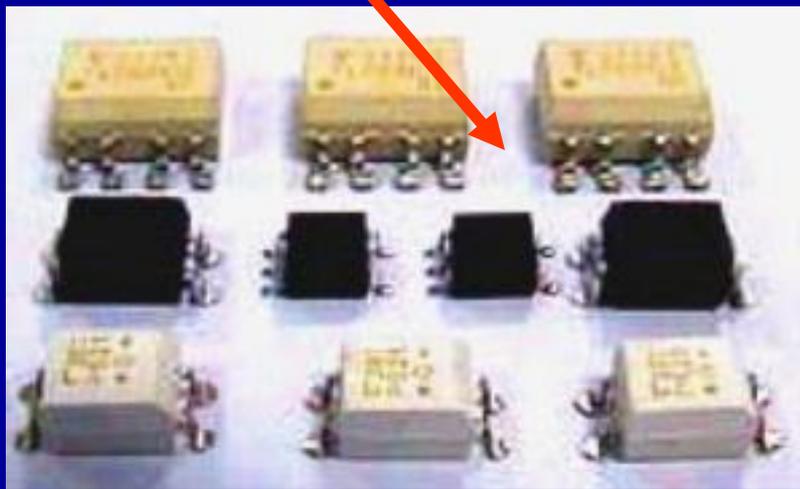
光耦合器是一种**电→光→电耦合器件**，它的**输入量是电流**，**输出量也是电流**，可是两者之间从电气上看却是**绝缘的**，输入、输出回路的**绝缘电阻可高达 $10^{10}\Omega$** 、**耐压超过1kV**。光耦中的**发光二极管**一般采用**砷化镓红外发光二极管**，而**光敏元件**可以是**光敏二极管**、**光敏三极管**、**达林顿管**，甚至可以是**光敏双向晶闸管**、**光敏集成电路**等。



机械工业出版社  
China Machine Press

# 光耦的外形

贴片式



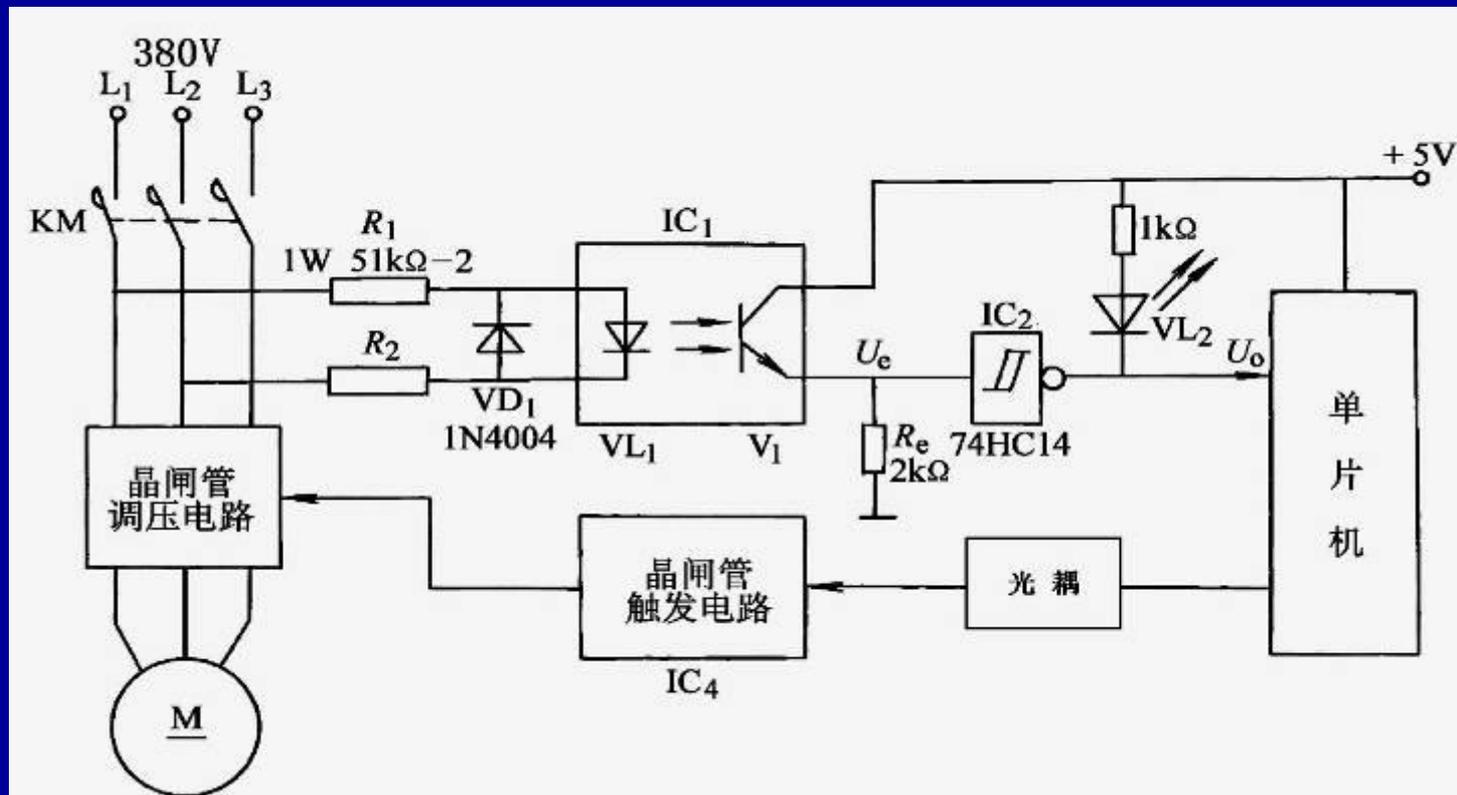
双列直插式



# 光耦的隔离、传输作用举例

光耦的红外发光二极管经两只限流电阻 $R_1$ 、 $R_2$ 跨接到三相电源路中。请分析当交流接触器未吸合时和吸合后两种状态下流过光耦中的红外发光二极管 $VL_1$ 的电流、光耦中的光敏三极管 $V_1$ 的状态，以及 $U_e$ 、 $U_o$ 的电平。

用  
“测电笔”  
测试 $IC_1$ 左  
右两侧的  
带电状态，  
哪一侧电  
笔亮？



# 电磁兼容实验室及新产品的电磁兼容试验

(参考上海市计量测试技术研究院电磁兼容实验室资料)



机械工业出版社  
China Machine Press

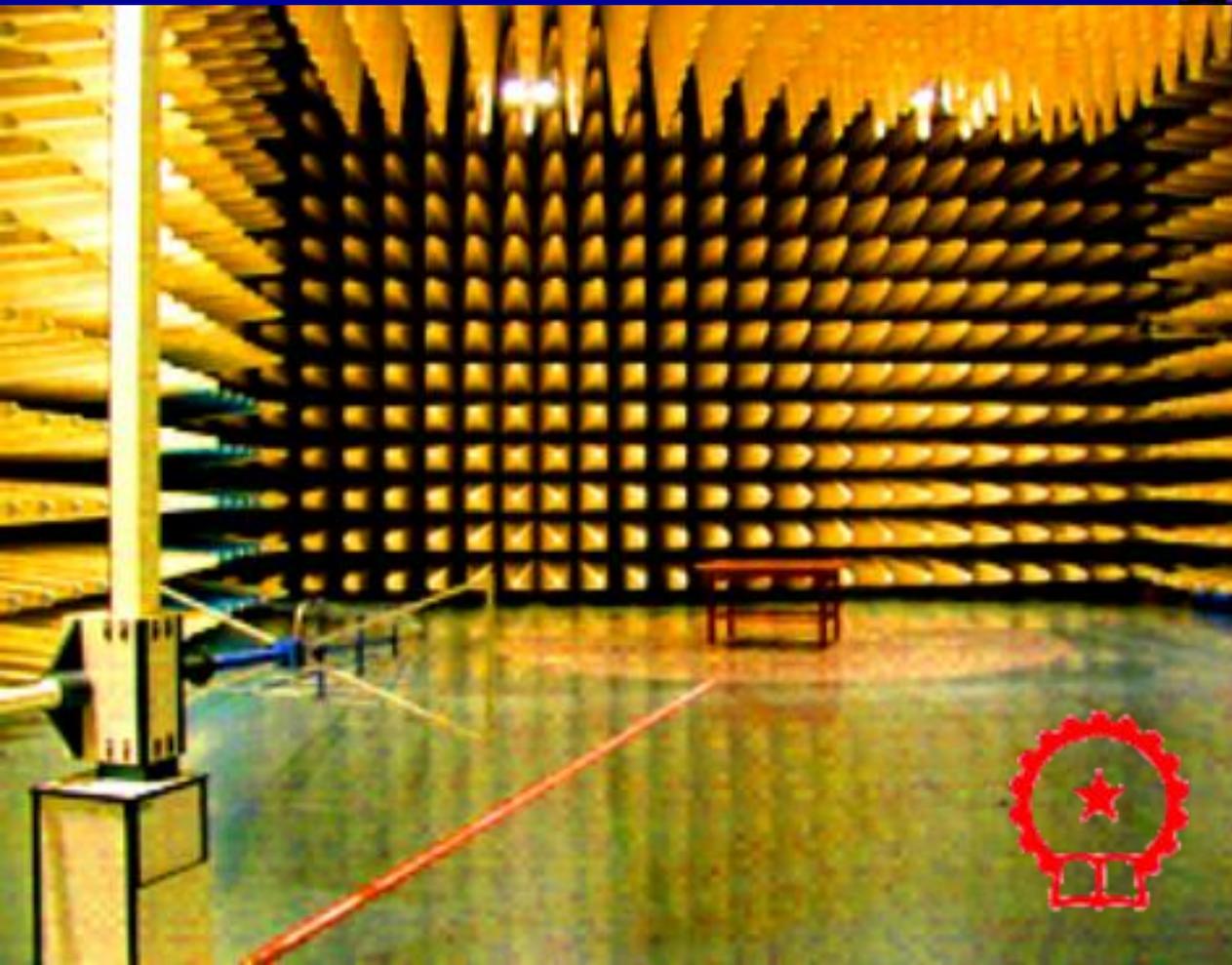
# 空调的电磁兼容试验



机械工业出版社  
China Machine Press

# 电磁兼容实验室及新产品的电磁兼容试验（续）

（参考上海市电磁兼容检测  
重点实验室资料）



# 电磁兼容 实验室及 角锥形吸 波材料



机械工业出版社  
China Machine Press

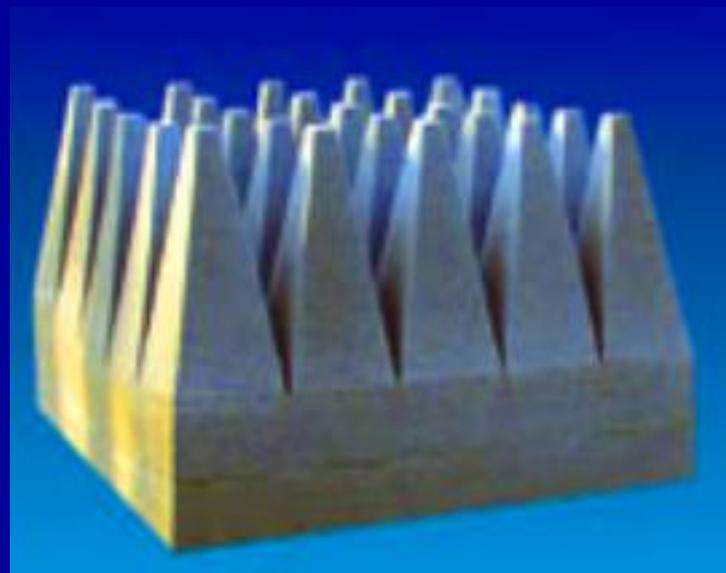
# 各种吸波材料

(参考大连东信微波吸收材料有限公司资料)

**角锥型吸波材料**是由软质聚氨酯泡沫经过浸炭及阻燃处理等工序加工制成，使用频带宽，是建造无回波暗室的最常用材料。



吸波角锥



# 各种吸波材料

(参考大连东信微波吸收材料有限公司资料)



劈形吸波材料



大形角锥



机械工业出版社  
China Machine Press

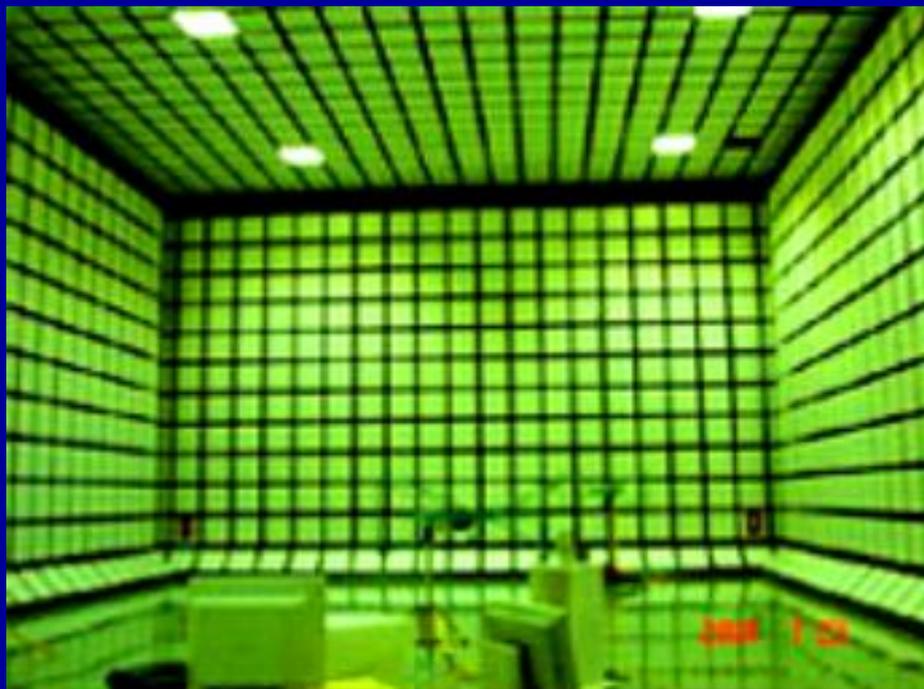
# 电波暗室的结构及特点

电波暗室的结构分为3层，最外层是金属屏蔽层，起到隔离空间电磁波的作用；中间一层是铁氧体吸波材料，主要吸收低频段的电磁波；最里层为聚合物泡沫吸波材料，吸收低频至高频所有频率。其中几百毫米长的尖劈可吸收2-3GHz以下的电磁波，一百多毫米长的尖劈可吸收高达40GHz的电磁波。电波暗室的屏蔽性能在18GHz时仍可衰减几十分贝。



机械工业出版社  
China Machine Press

# 电磁兼容实验室（续）



平板型吸波材料  
由橡胶和磁性吸波填  
料膜压成形，可弯曲  
和切割。

# 电磁兼容实验室的天线

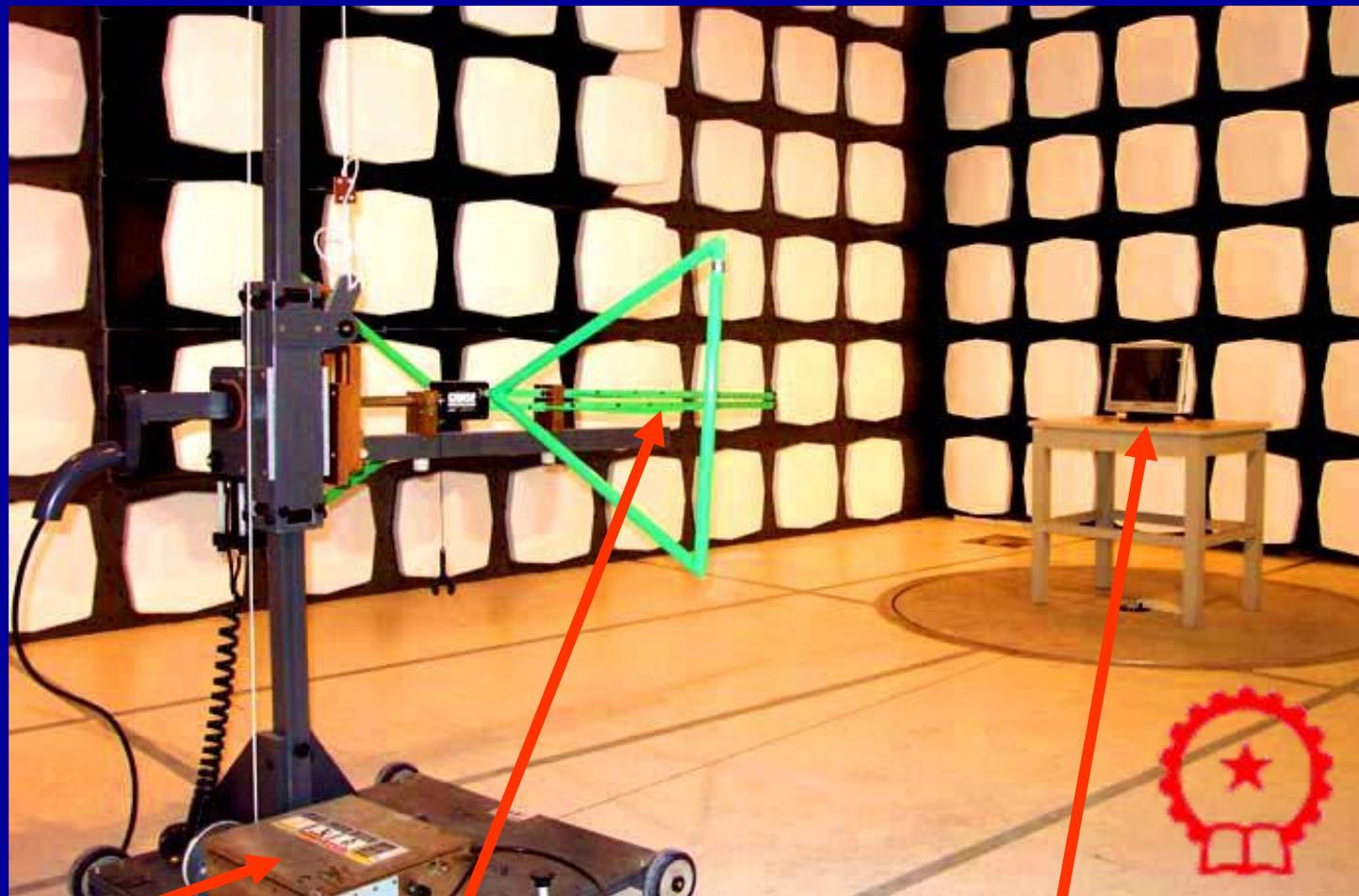
“三米法”和“十米法”暗室天线的高度分别为1.8m和3m，与被测物的距离分别为3m和10m。



机械工业出版社  
China Machine Press

# EMC辐射干扰测试室

(参考江苏省电子产品监督检验所资料)



干扰源

干扰辐射天线

被测试仪器

# 用于传导测量的屏蔽室

(参考信息产业部通信计量中心资料)



# EMC传导干扰测试室



干扰源将高压电火花信号迭加到被测仪器的电源线上，再测试此时仪器性能的变化。

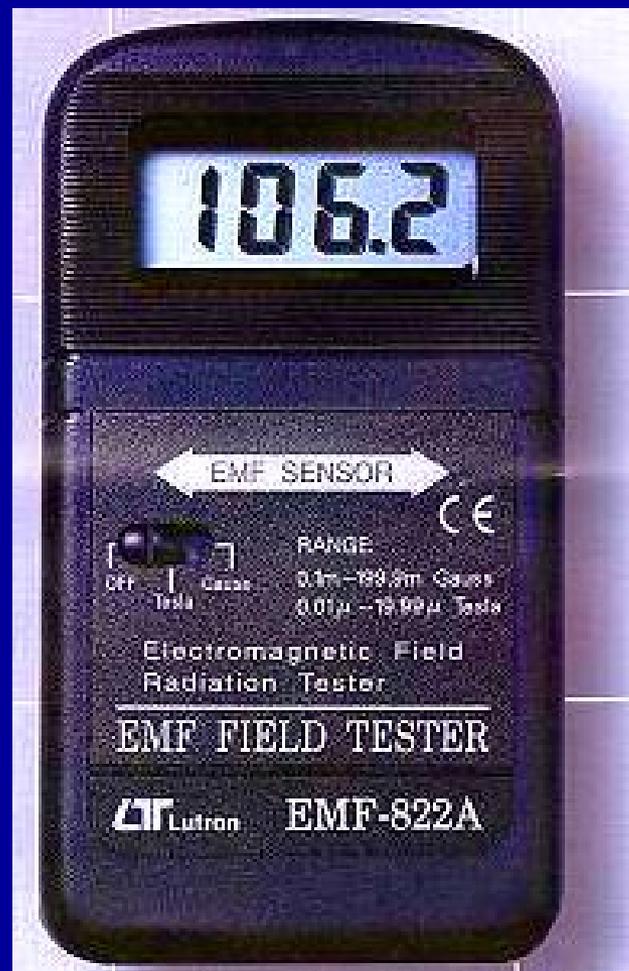
# 电磁兼容试验及 试验报告



参考Rainford公司资料

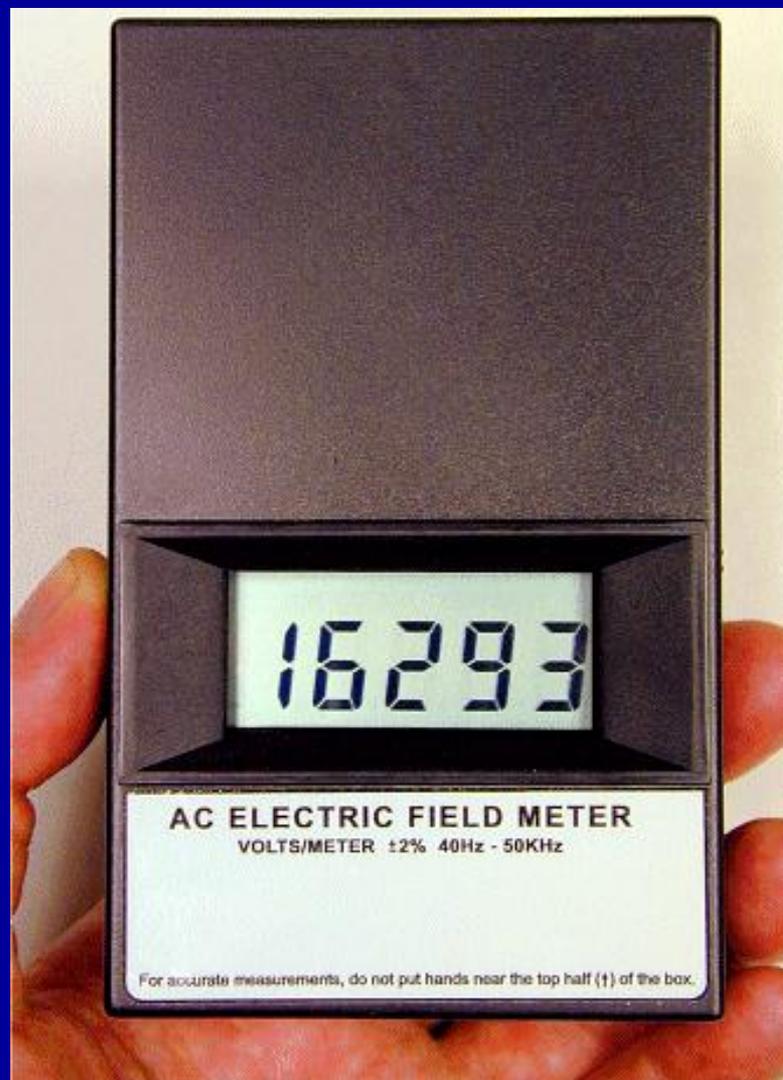


# EMI（电磁干扰）测试仪表



交直流电场、磁场检测仪表  
(接收测头未画出)

# EMI测试仪器



AEFM型交流电场计

# 射频电磁场辐射抗扰度测试 和电磁敏感度测试

射频电磁场辐射抗扰度

（Radiated Susceptibility, 简称RS）和  
电磁敏感度（Electromagnetic Susceptibility,  
简称EMS）测试可以在吉赫兹横电波小室  
（Gigahertz Transverse Electromagnetic Cell,  
简称GTEM小室）中进行。



机械工业出版社  
China Machine Press

# GTEM小室与电波暗室相比的优点

占地小，造价低，能对外界的电磁场进行有效的隔离，不对外泄漏。GTEM小室的上限频率较高，电场强度较均匀，比较适合小件产品EMC指标的测试。

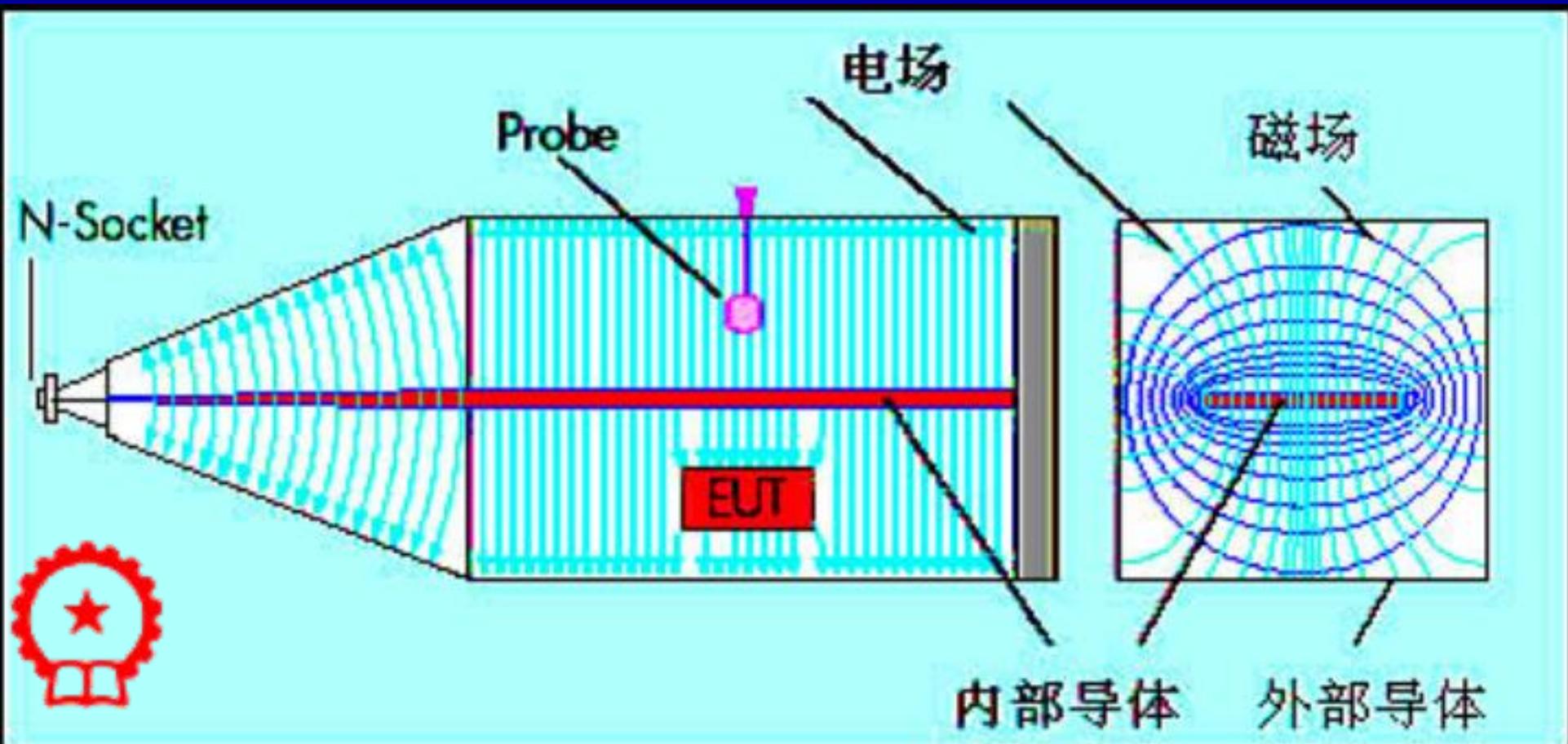
GTEM小室采用  
渐变结构，

其上限工作频率  
可达1GHz以上。

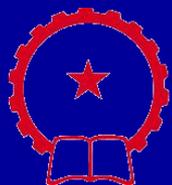
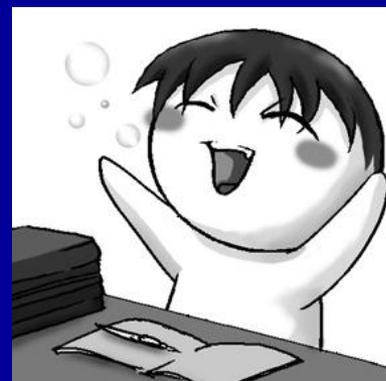


# GTEM小室原理

GTEM小室是根据同轴及非对称矩形传输线原理设计的。其“芯板”和导电外壳可分别看作同轴线的内外导体。



# 休息一下



机械工业出版社  
China Machine Press