

# 《仪器系统设计基础》第七讲

## 仪器可靠性

## 与电磁兼容技术

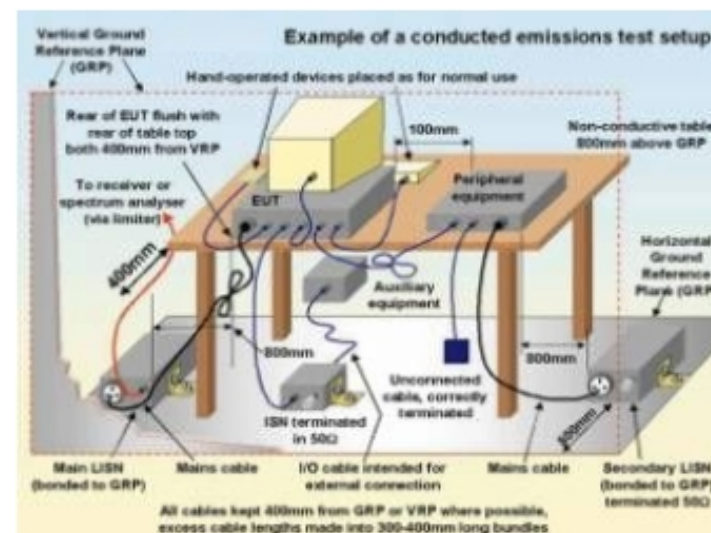
仪器科学与工程系专业必修课

主讲： 宋开臣 教授

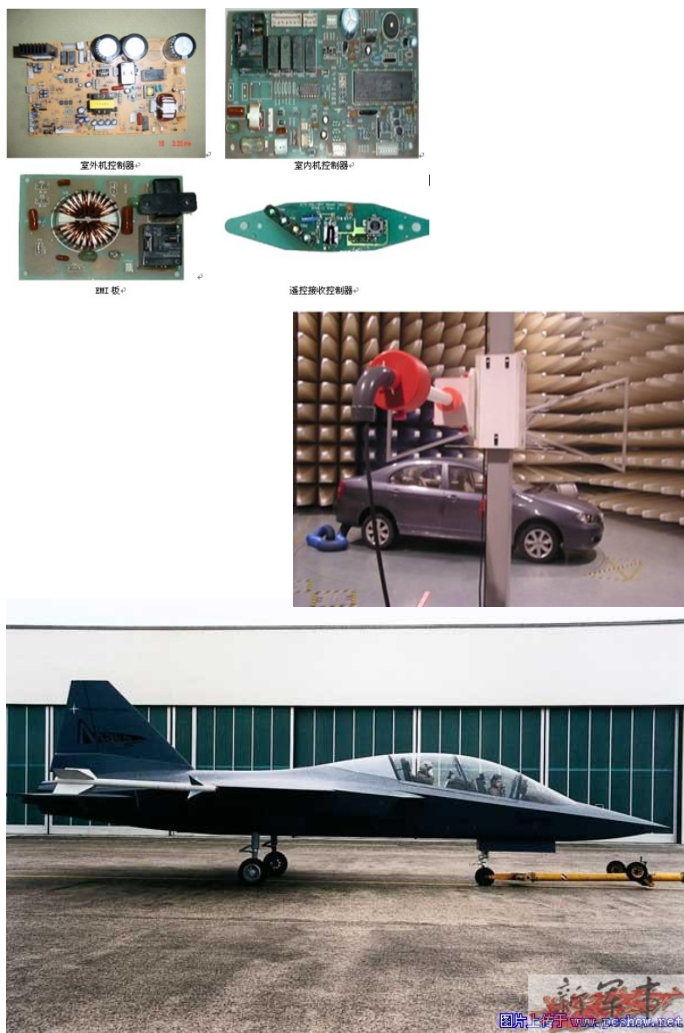
[kcsong@zju.edu.cn](mailto:kcsong@zju.edu.cn)

13600513662

## 二. 电磁兼容技术概念



# 一. 仪器的可靠性概述



1. 可靠性的概念
2. 通用可靠性参数
3. 可靠性设计准则
4. 可靠性设计方法
5. 可靠性试验
6. 可靠性设计分析流程
7. 可靠性设计分析技术



# 1. 可靠性的概念

---

- 可靠性的定义

产品在规定的条件下和规定的时间内，完成规定功能的能力。

- 三要素

- ⑩ 规定条件：包括使用时的环境条件和工作条件

- ⑩ 规定时间：指产品规定的任务时间

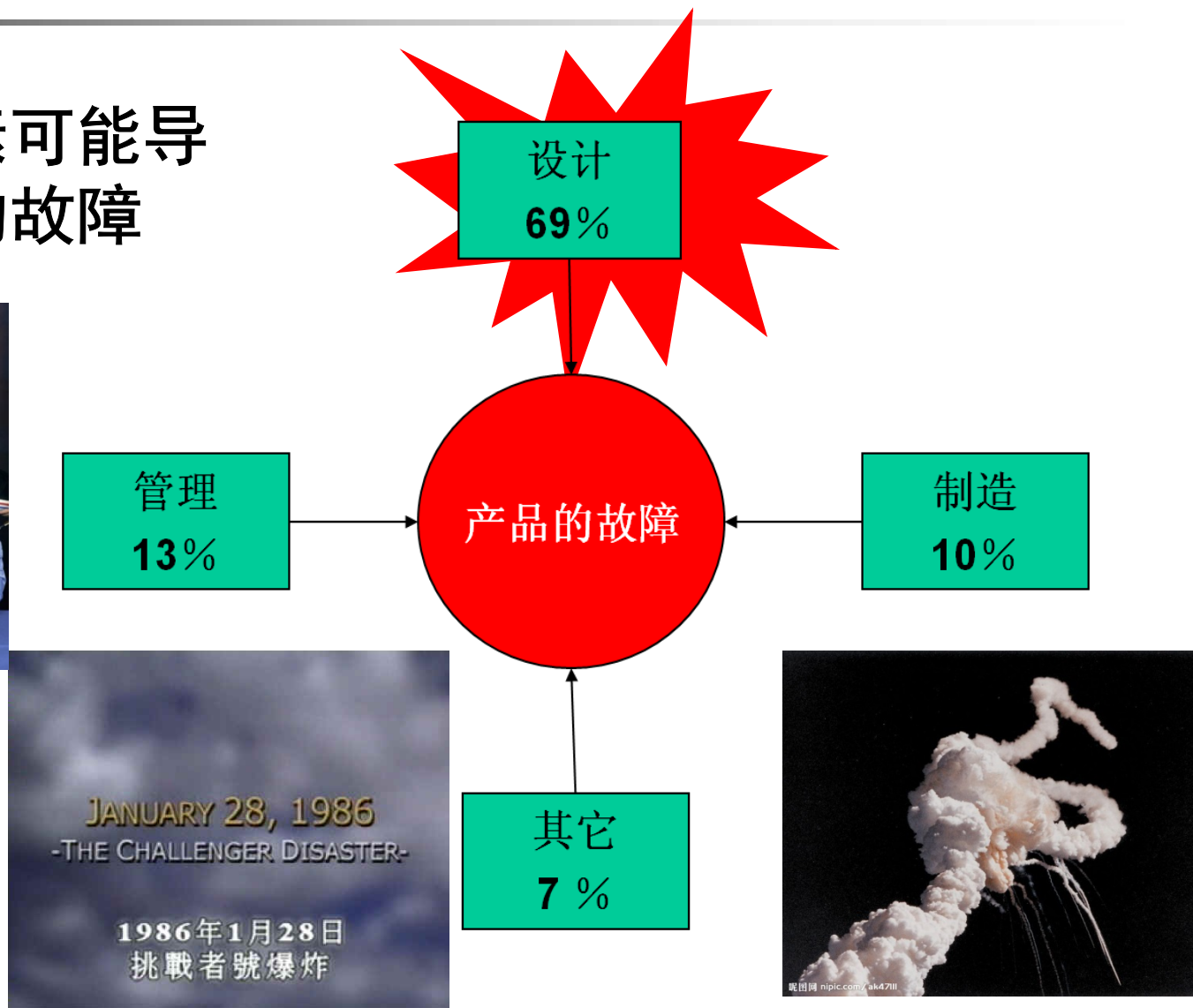
- ⑩ 规定功能：指产品规定的必须具备的功能及技术指标

# 1. 可靠性的概念

哪些因素可能导致产品的故障



女教师：（后，左2）  
克里斯塔·麦考利芙



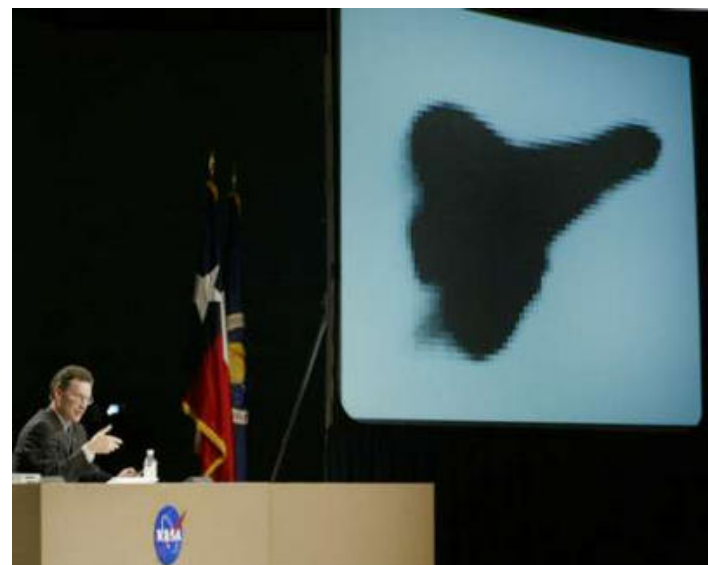


# 1. 可靠性的概念

## 美国政府花费4亿美元调查 哥伦比亚号航天飞机事故



失事前1分钟照片



发射升空时航天飞机外部燃料箱泡沫绝缘材料脱落击中了左翼，给返航埋下隐患。



7名宇航员

# 1. 可靠性的概念

中国强制性产品认证，简称CCC认证或3C认证。有四个版本：

CCC(S)安全认证

CCC(S&E)安全与电磁兼容认证

CCC(EMC)电磁兼容认证

CCC(F)消防认证。



**EMC<sup>2</sup>**  
where information lives®





## 2. 通用可靠性参数

(1) 可靠度  $R(t)$

(2) 可用度  $A(t)$

(3) 故障率  $\lambda$

(4) 平均故障间隔时间 MTBF

(5) 平均首次故障时间 MTTF







## (1) 可靠度 $R(t)$

- 指产品在规定条件下和规定时间内完成规定功能的概率。

$$R(t) = \frac{N_0 - r(t)}{N_0}$$

t时间点上；  
以产品数量的比例来衡量

注：  $N_0$ —— $t=0$ 时，产品在规定条件下进行工作的产品数；  
 $r(t)$ ——在0到t时间内，产品累计故障数



## (2) 可用度 $A(t)$

---

- 可用度—— $A(t)$

在规定时间 $t$ 内的任意随意时刻，产品处于可用状态的概率。

$$A(t) = \frac{\text{可工作时间}}{\text{可工作时间} + \text{不可工作时间}}$$

时间段0-t上，  
以时间来衡量



### (3) 故障率 $\lambda$

---

- 正规：工作到某时刻尚未发生故障的产品，在该时刻后单位时间内发生故障的概率。
- 通常：故障次数除以总工作时间
- 单位：一般为 $10^{-6}$ /小时或 $10^{-9}$ /小时

$$\lambda(t) = \frac{\Delta r(t)}{N_s(t) \Delta t}$$

式中：  $\Delta r(t)$ —  $t$ 时刻后，  $\Delta t$ 时间内故障的产品数；  
 $\Delta t$ —所取时间间隔；  
 $N_s(t)$ —残存产品数。



## (4) 平均故障间隔时间 MTBF

### ■ 平均故障时间间隔

### (MTBF, Mean Time Between Fail)

- ⑩ 故障率的倒数
- ⑩ 针对指数分布产品
- ⑩ 针对可修产品

例：一个可修的产品在使用过程中发生了 $N_0$ 次故障，每次故障修复后又重新投入使用，测得其每次工作持续时间为 $t_1$ 、 $t_2$ ……，其平均故障时间间隔为

$$MTBF = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} t_i = \frac{T}{N_0}$$



## (5) 平均首次故障时间 MTTF

---

- 平均首次故障时间

**(MTTF, Mean Time to Fail)**

- ⑩ 任意分布的参数
- ⑩ 一般指不可修复故障





## 3.可靠性设计准则

### ■ 通用设计准则

- ⑩ 元器件/零部件的选用控制 可靠、合适的器件以及生产商
- ⑩ 降额设计要求 使工作功率适当低于额定功率，分三级（I级降额幅度最大）
- ⑩ 热设计要求 元器件/线路/印刷电路板/机箱等的冷却散热
- ⑩ 冗余设计要求 多种手段执行同一种功能；冗余的等级/类型/配置/管理
- ⑩ 电磁兼容设计

### ■ 专用设计准则

- ⑩ 历史上相似产品曾经出现过哪些故障？
- ⑩ 这些故障的发生频次如何？影响如何？
- ⑩ 故障原因（技术归零五条：定位准确、机理清楚、问题复现、措施有效、举一反三）
- ⑩ 纠正措施（管理归零五条：过程清楚、责任明确、措施落实、严肃处理、完善规章）
- ⑩ 实施效果



## 4. 可靠性设计方法

---

### ■ 元器件/零部件选用控制

- ⑩ 建立元器件选用的控制机构
- ⑩ 指定元器件控制方案
- ⑩ 对转承制方的元器件选用进行控制
- ⑩ 进行必要的应力筛选

是保证系统固有可靠性、减少器件规格品种、降低保障费用的有效措施。



## 4. 可靠性设计方法

---

### ■ 降额设计

使电子元器件的工作应力适当低于其规定的额定值。可分成三个降额等级：

- a) I 级降额，是最大的降额，适用于设备故障将会危及安全，导致任务失败和造成严重经济损失的情况。
- b) II 级降额。
- c) III级降额，是最小的降额，可靠性增长效果和所花费的代价相比是最高的。

是电子产品可靠性设计中最常用的方法。

## 4. 可靠性设计方法

### ■ 热设计

热设计的基本程序：

- a) 明确设计条件，如设备功耗、发热量、工作环境等；
- b) 决定设备的冷却方式，并检查是否满足原始条件；
- c) 分别对元件、线路、印制电路板和机箱等进行热设计；
- d) 按热设计检查表进行检查，确定是否满足设计要求。





## 4. 可靠性设计方法

---

### ■ 冗余设计

是指系统或设备中具有多于一种手段执行同一种规定功能的能力。其主要任务：

- a) 确定冗余等级；
- b) 选定冗余类型；
- c) 确定冗余配置方案；
- d) 确定冗余管理方案。

在提供系统可靠性的同时将增加系统的复杂性、重量和体积等。





## 5. 可靠性试验

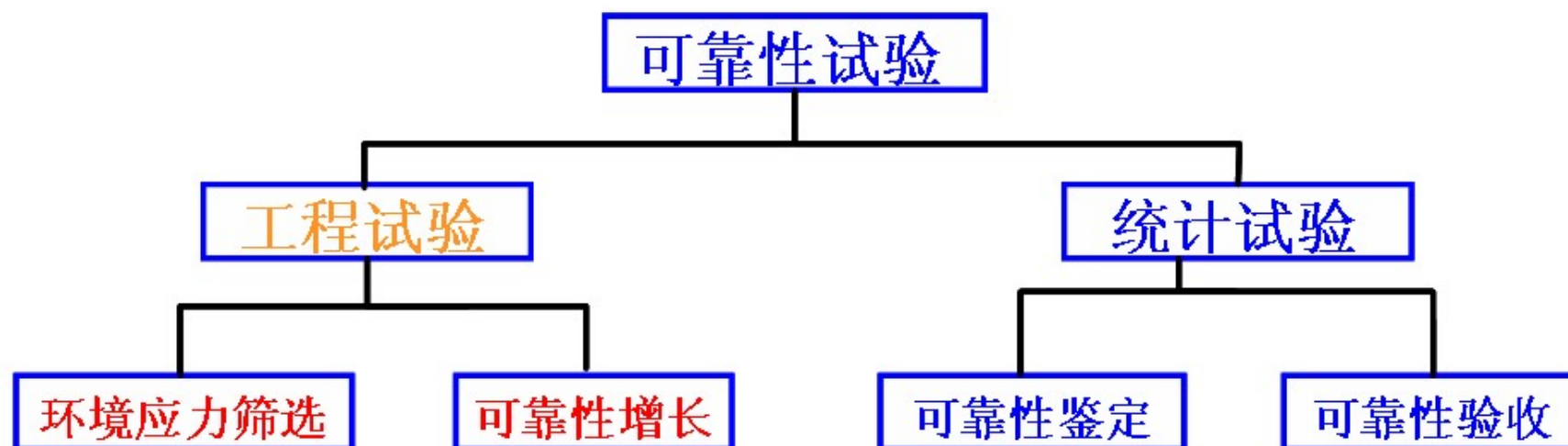
---

- 可靠性试验的目的
  - a) 发现产品在设计、元器件、零部件、原材料和工艺方面的各种缺陷；
  - b) 为提高产品的可靠性、任务成功性、减少维修人力和保障费用提供信息；
  - c) 确认是否符合可靠性定量要求；



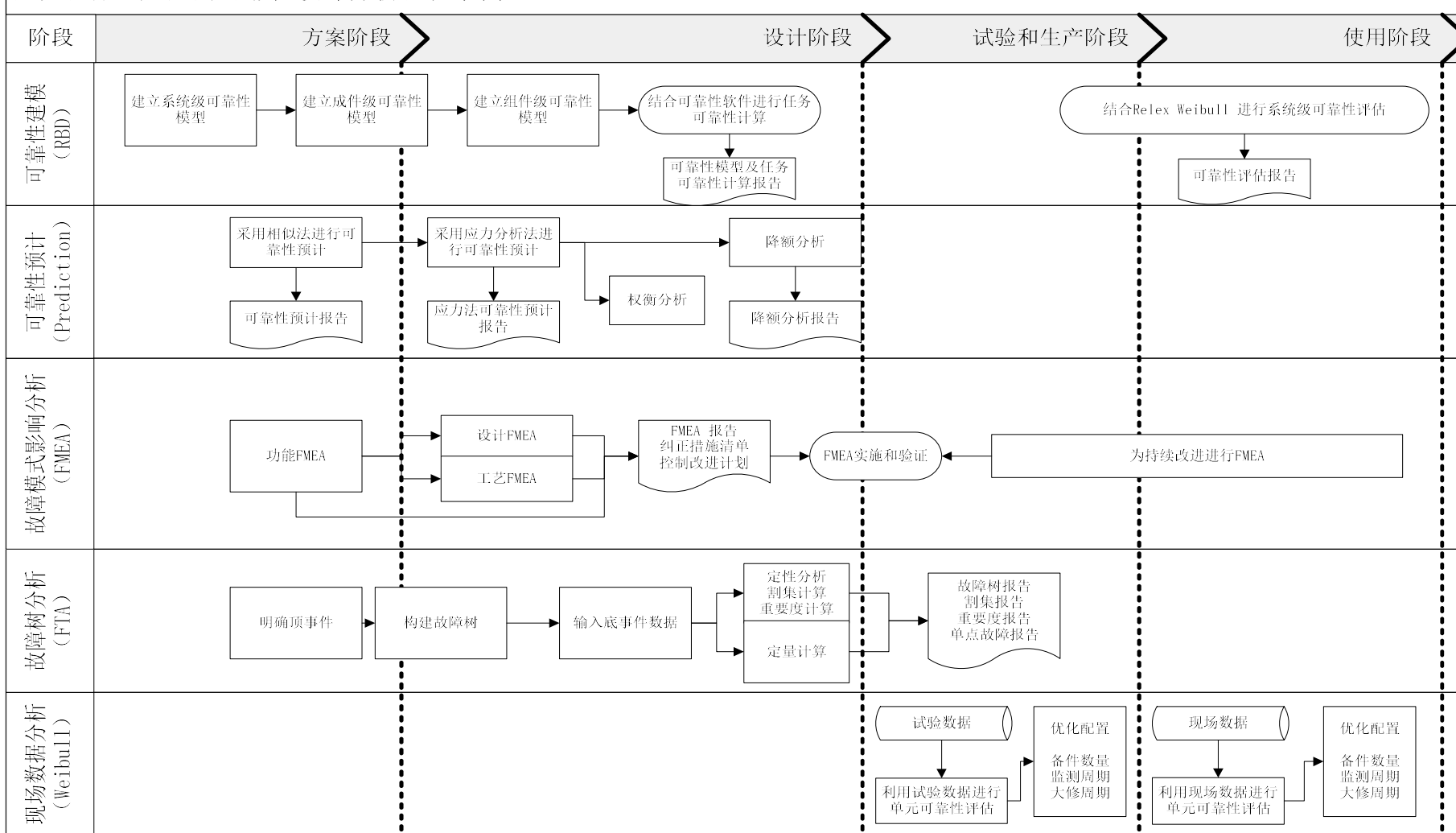
## 5. 可靠性试验

可靠性试验的分类：



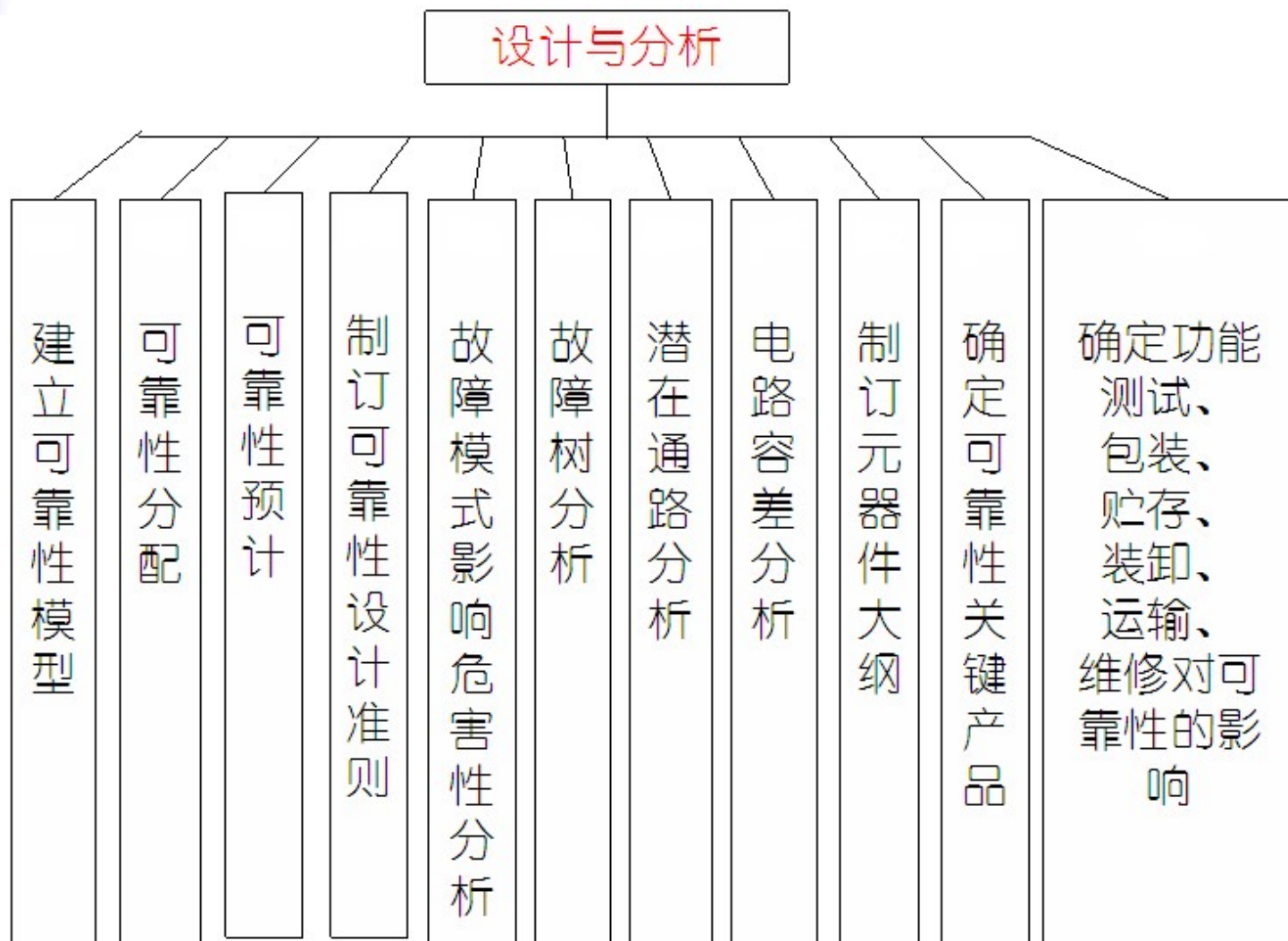
# 6. 可靠性设计分析流程

流程名称：产品的可靠性设计分析流程示例





## 7. 可靠性设计分析技术

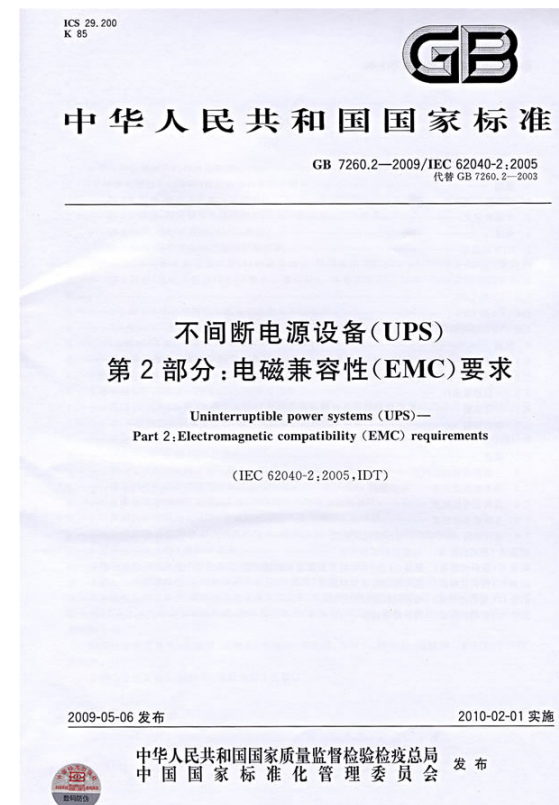
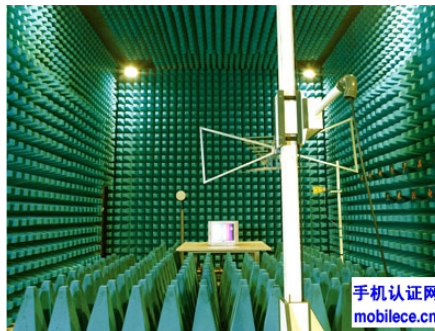




## 二. 电磁兼容技术概述

1. 电磁兼容的概念
2. 电磁兼容现象
3. 何时解决EMC

**EMC<sup>2</sup>**  
where information lives®







# 1. 电磁兼容的概念

- **电磁兼容(EMC, Electronic Magnetic Compatibility),**

是指设备或系统在其电磁环境中符合要求运行并不对其环境中的任何设备产生无法忍受的电磁干扰能力。

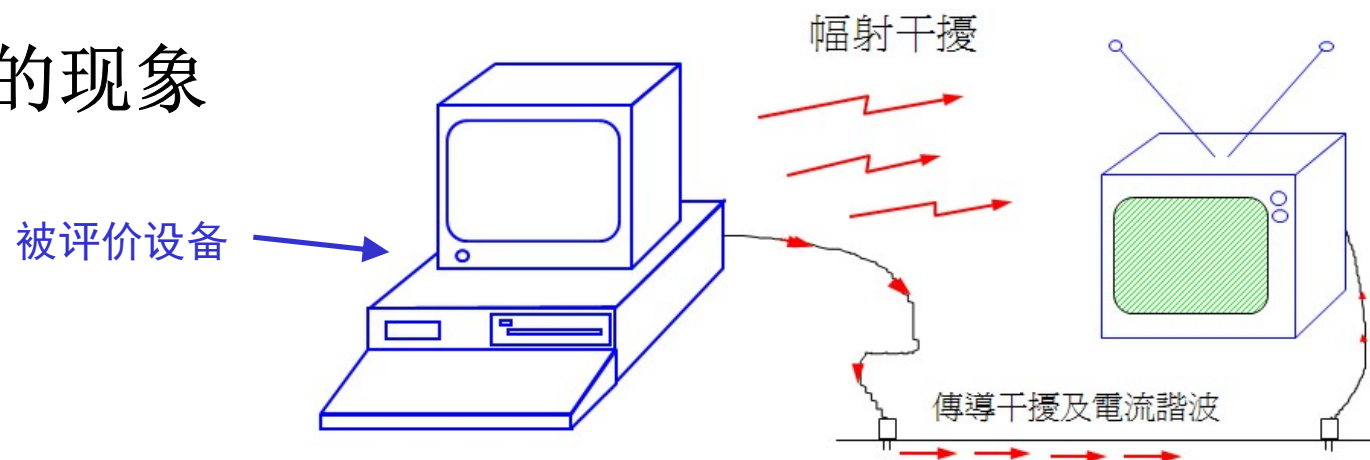
包括EMI和EMS两部分:

- **EMI:** 设备本身在执行应有功能的过程中所产生不利于其它系统的电磁噪声 (干扰源)
- **EMS:** 设备在执行应有功能的过程中不受周围电磁环境影响的能力。 (被干扰)

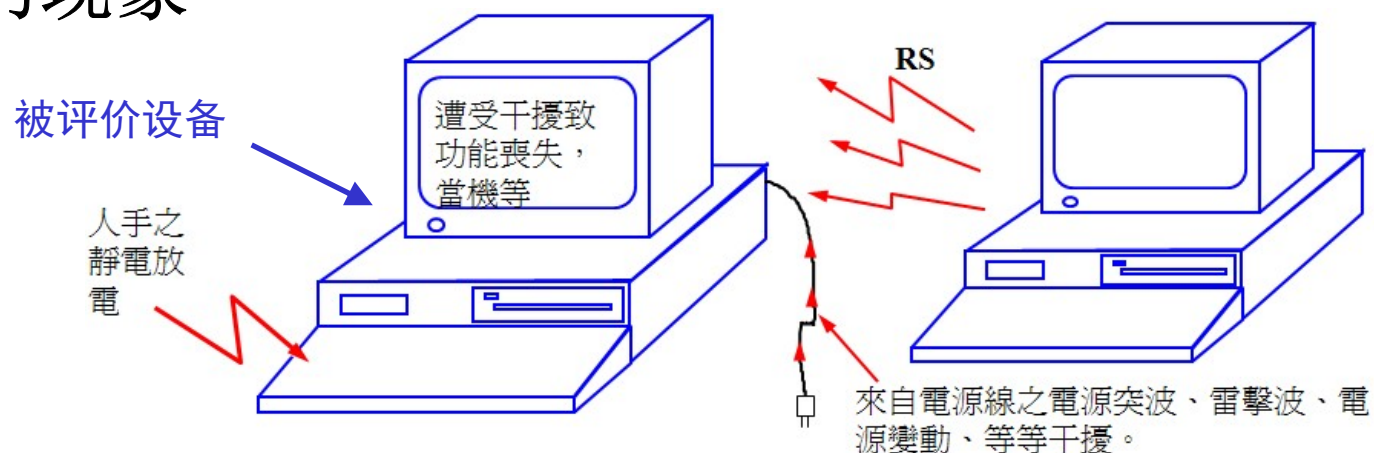
注：仪器仪表的电磁兼容性是可靠性设计的重要组成部分。

## 2. 电磁兼容现象

### EMI的现象

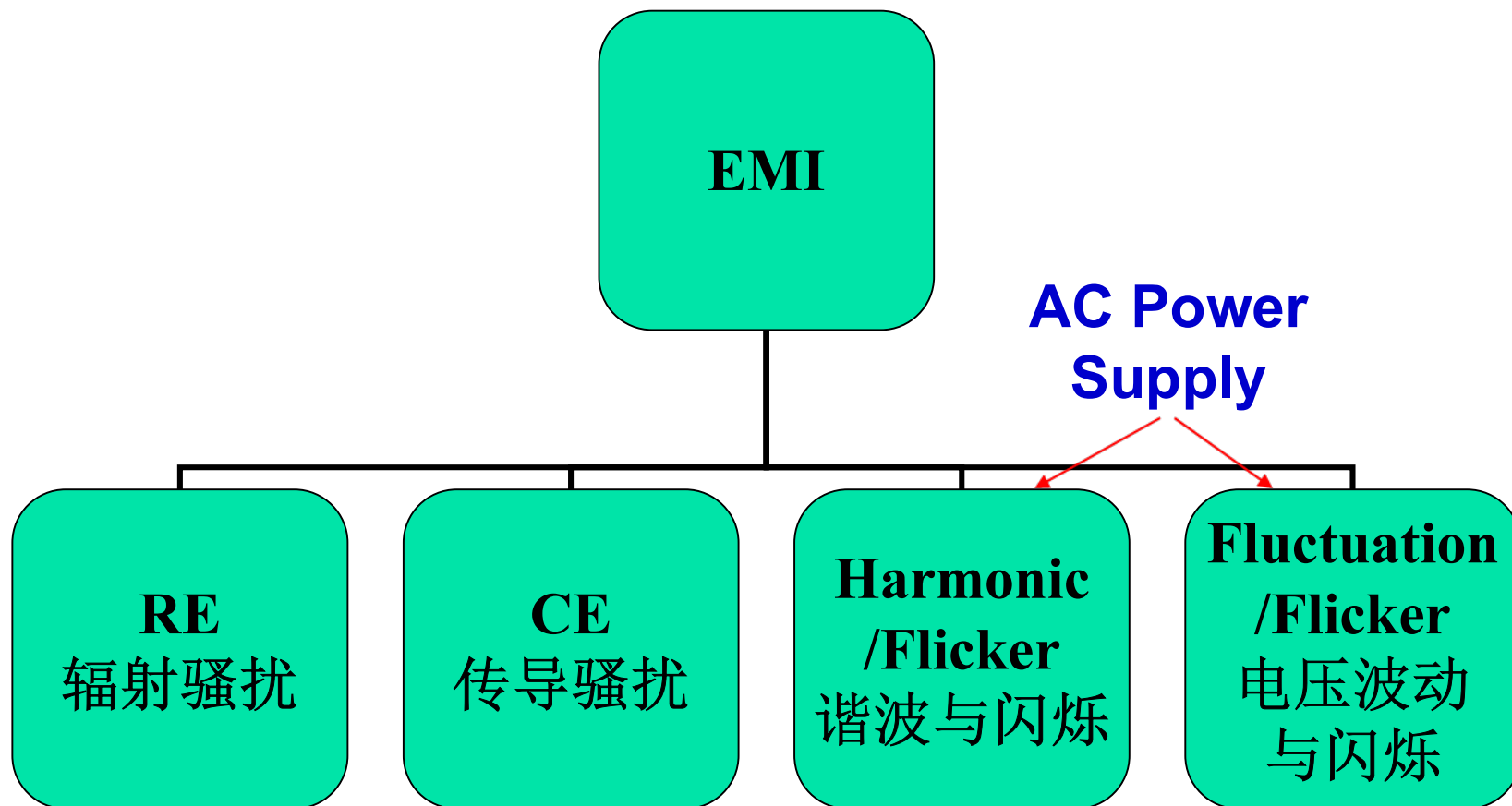


### EMS的现象



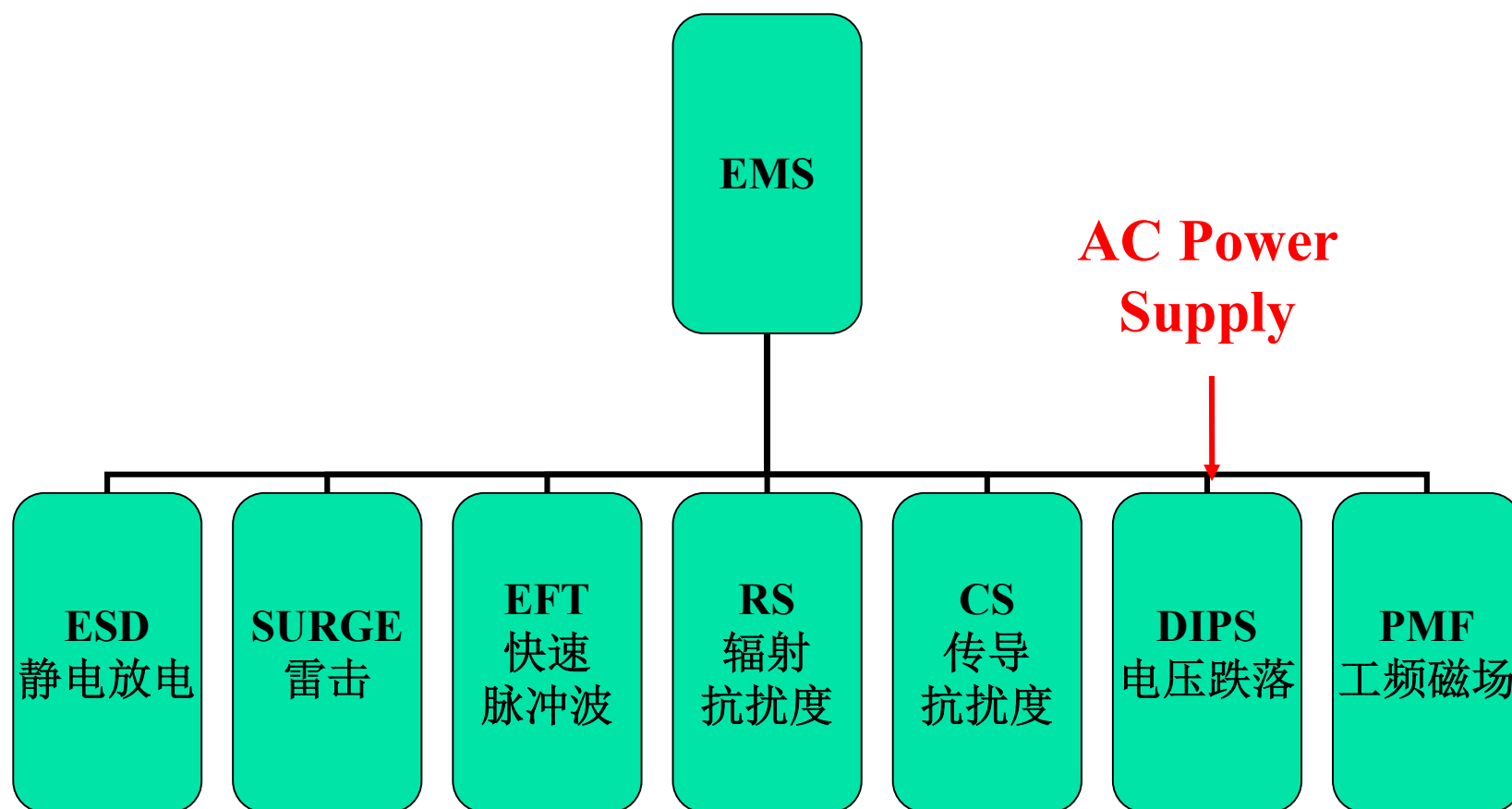


## (1) EMI电磁干扰项目

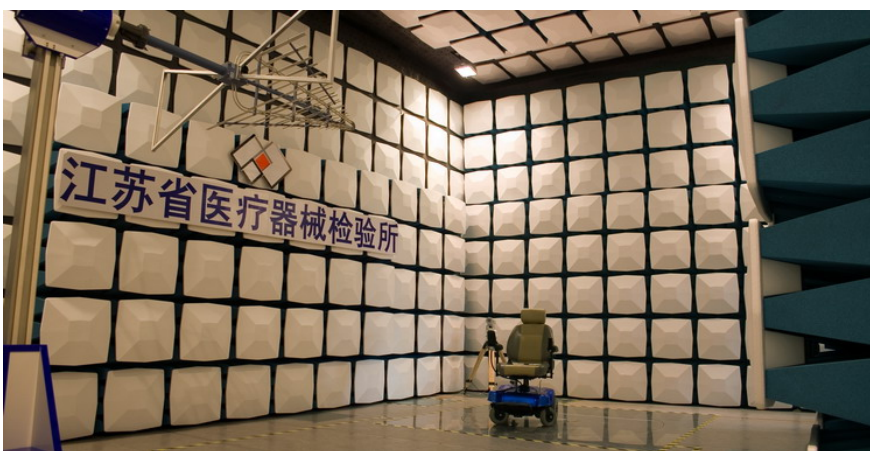
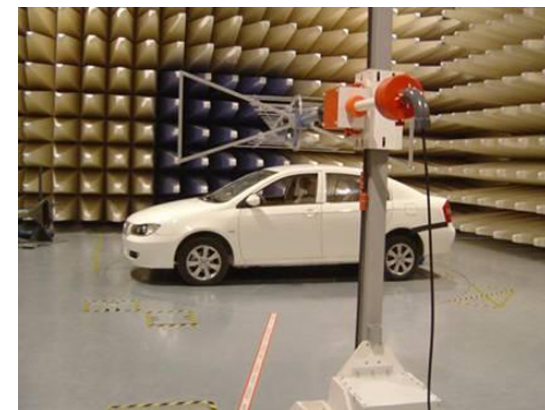
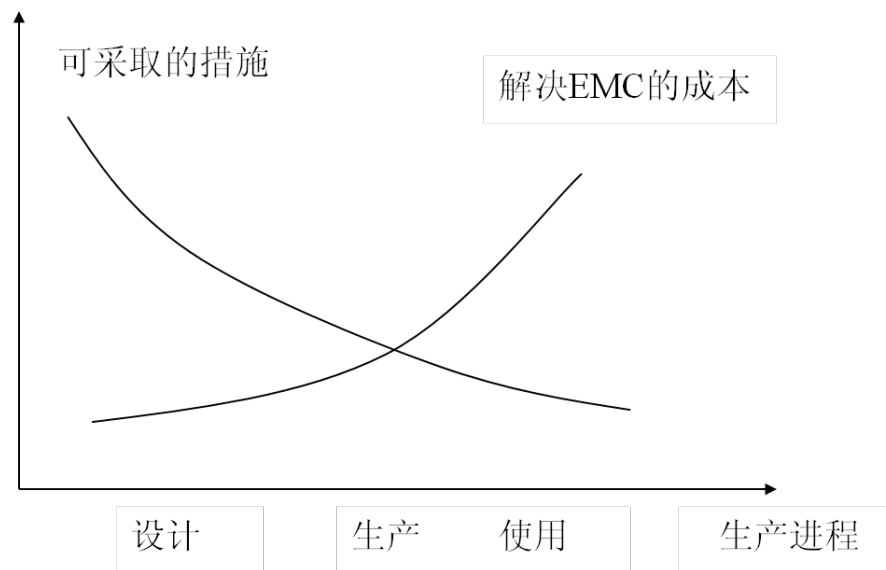




## (2) EMS干扰免疫项目



### 3. 何时解决EMC

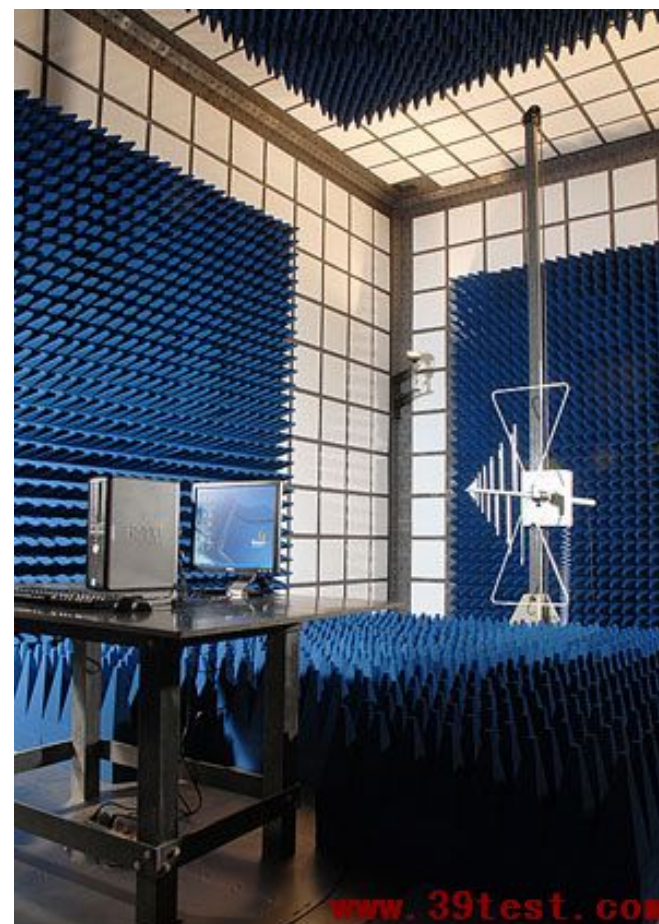






## 三. 电磁兼容及抗干扰技术

1. EMC三要素
2. EMC对策
3. EMC与接地技术
4. EMC与屏蔽技术
5. EMC与滤波技术





# 1. EMC三要素

---

- 干扰源

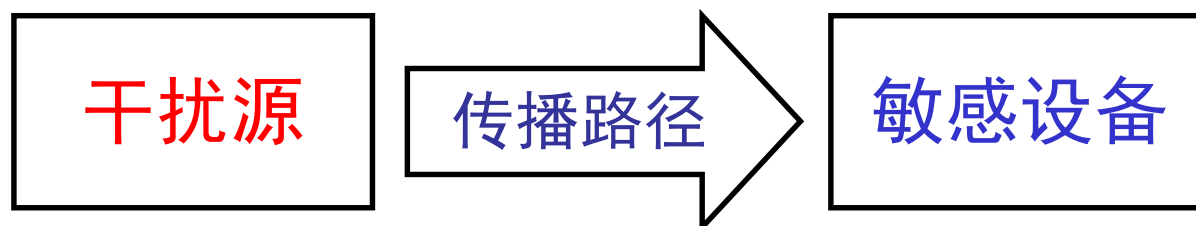
时钟电路、开关电源、高速总线、感性器件

- 传播路径

传播**RF**能量的各种媒介，例如自由空间或互连电缆

- 敏感设备

易接收干扰的信号或装置，如复位信号、光模块.....





## 2. EMC对策

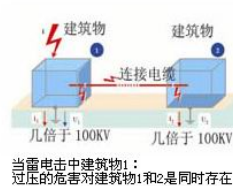
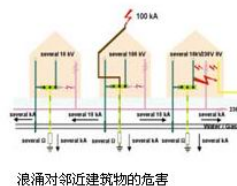
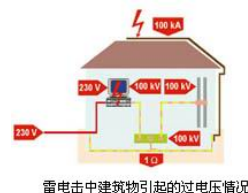
---

- 降低干扰源
- 切断或削弱传播路径
- 提高设备的抗干扰能力

接地、屏蔽、滤波

### 3. EMC与接地技术

- **接地**（Grounding）的目的
  - A. 提供公共的参考零电位
  - B. 防止外界电磁场的干扰
  - C. 保证安全工作（防止触电）





## (1) 地线引发干扰问题的原因

---

$$V=IR$$



地线电压



地线是等电位的  
假设不成立

电流走最小  
阻抗路径

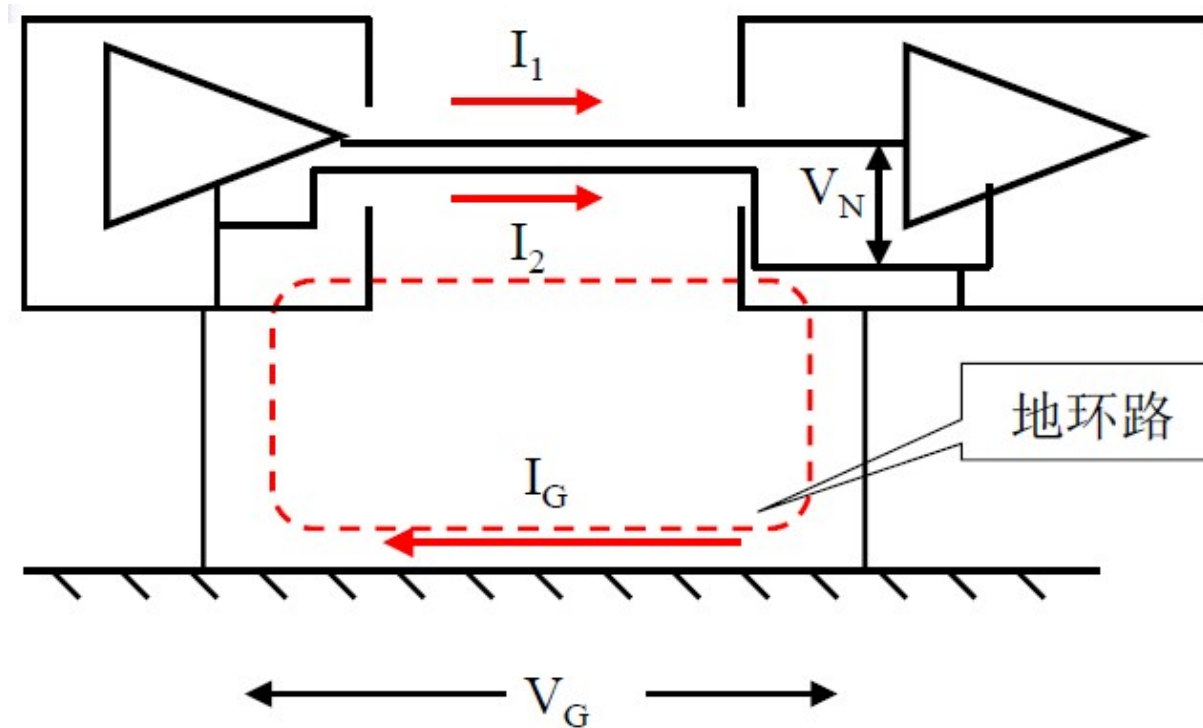


电流的确切  
路径不清楚



地电流  
失去控制

## (2) 地环路干扰

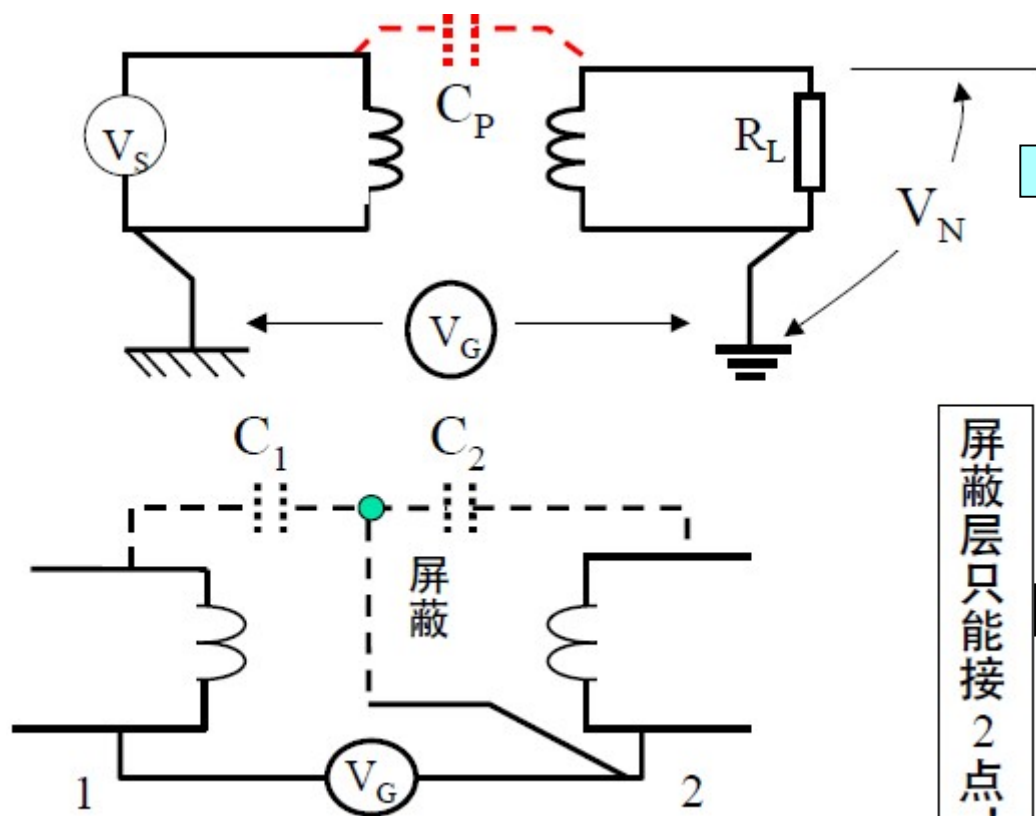


对策：减小/彻底消除地环路中的电流

变压器隔离、光耦隔离、共模扼流圈

# 地环路干扰对策 (1)

## ■ 隔离变压器



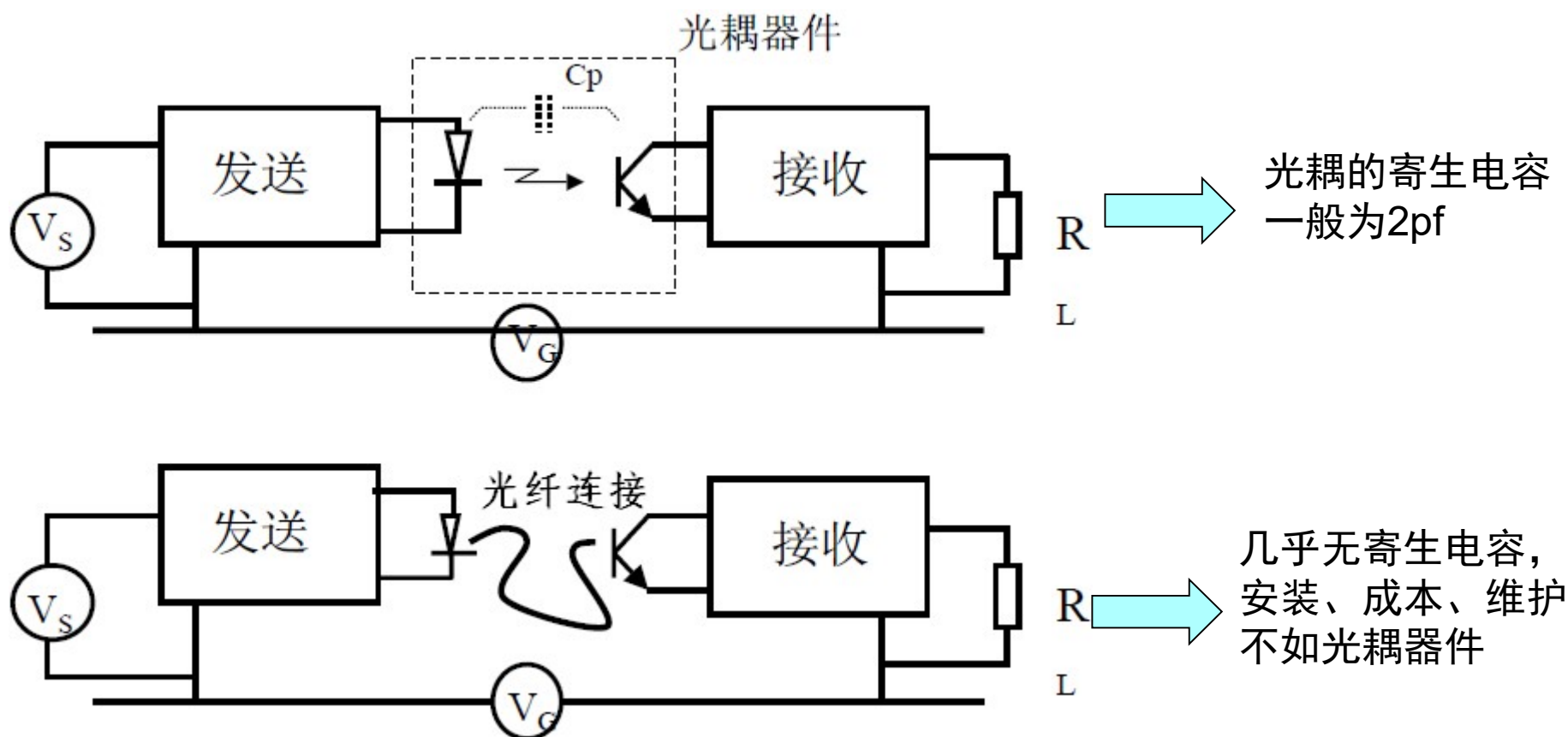
存在寄生电容，对高频的抑制效果差

屏蔽层只能接2点！

初次级间设置屏蔽层  
1MHz以下频率可有效隔离

## 地环路干扰对策（2）

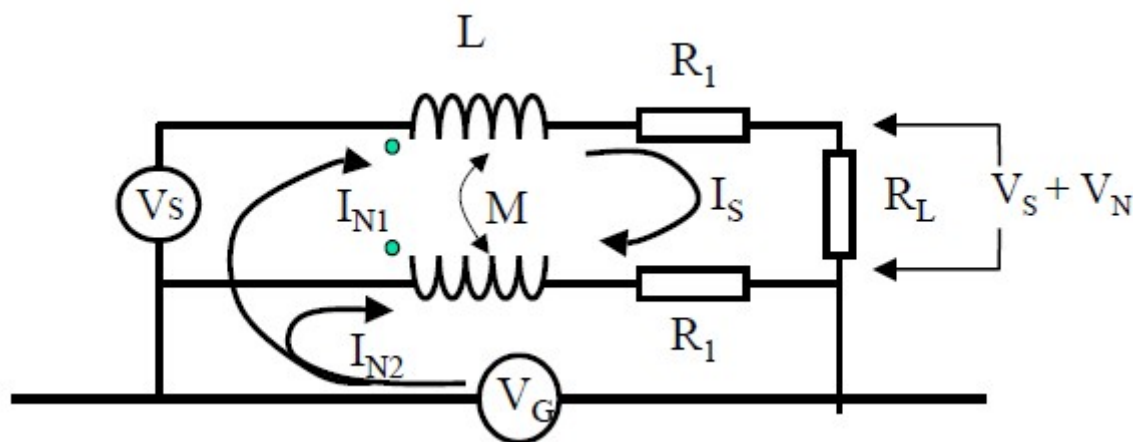
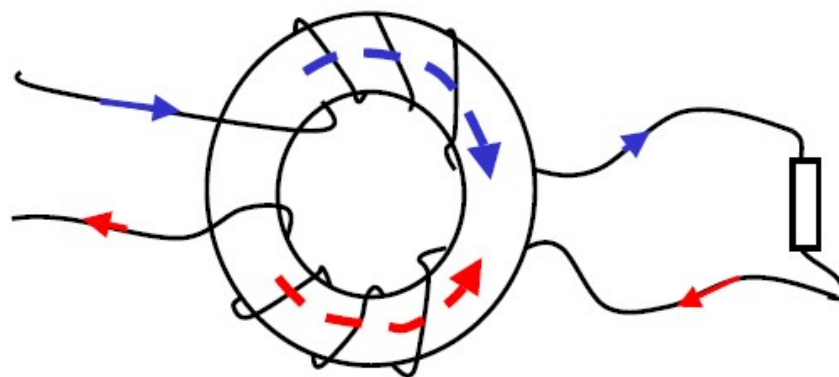
### ■ 光隔离器





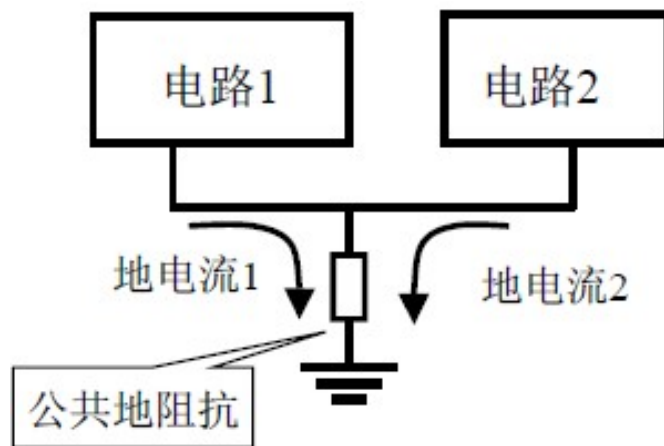
## 地环路干扰对策（3）

### ■ 共模扼流圈



在连接电缆上使用共模扼流圈相当于增加地环路阻抗。  
共模扼流圈匝数越多，寄生电容越大，高频干扰的隔离效果越差。

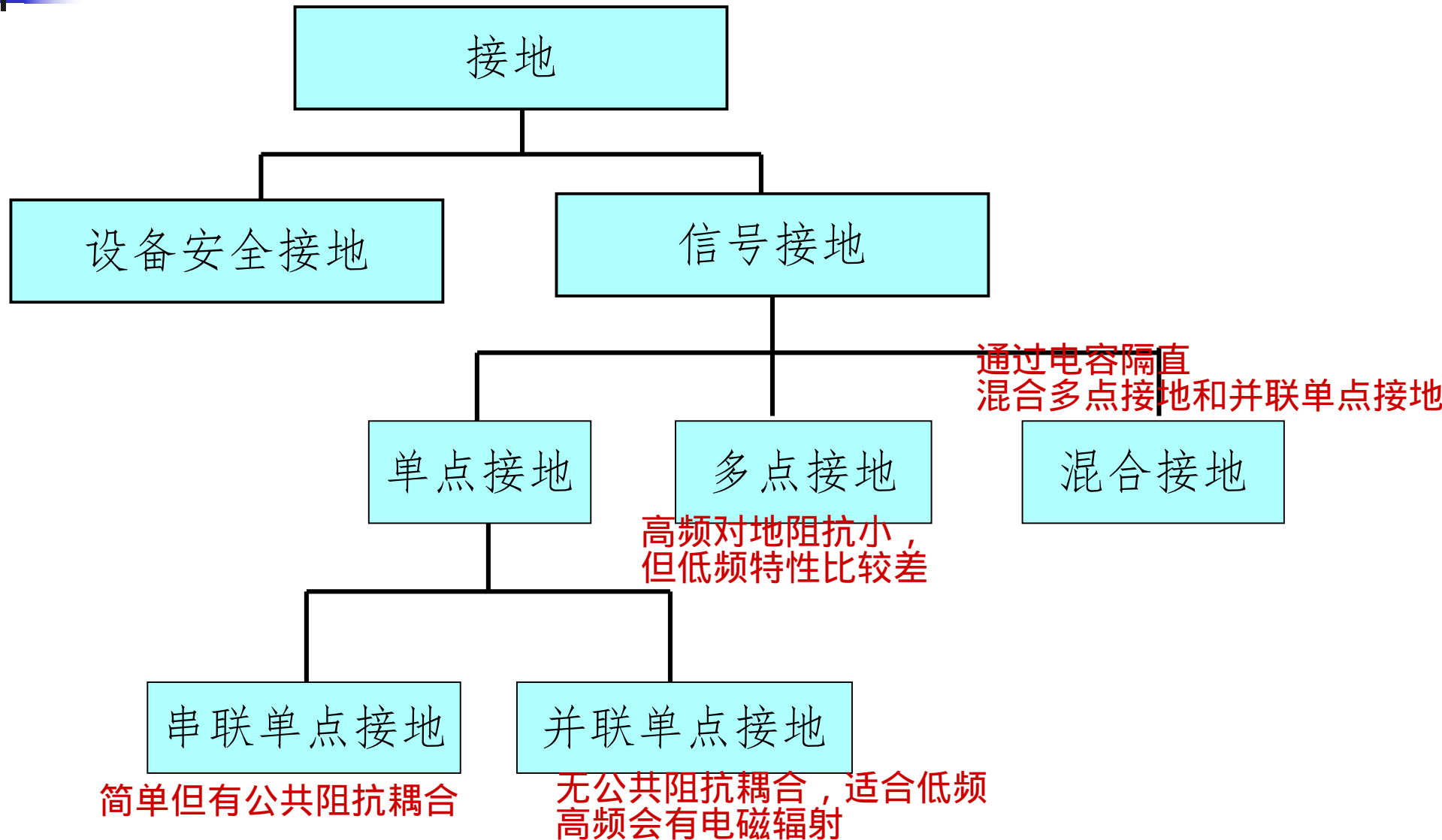
### (3) 公共阻抗耦合



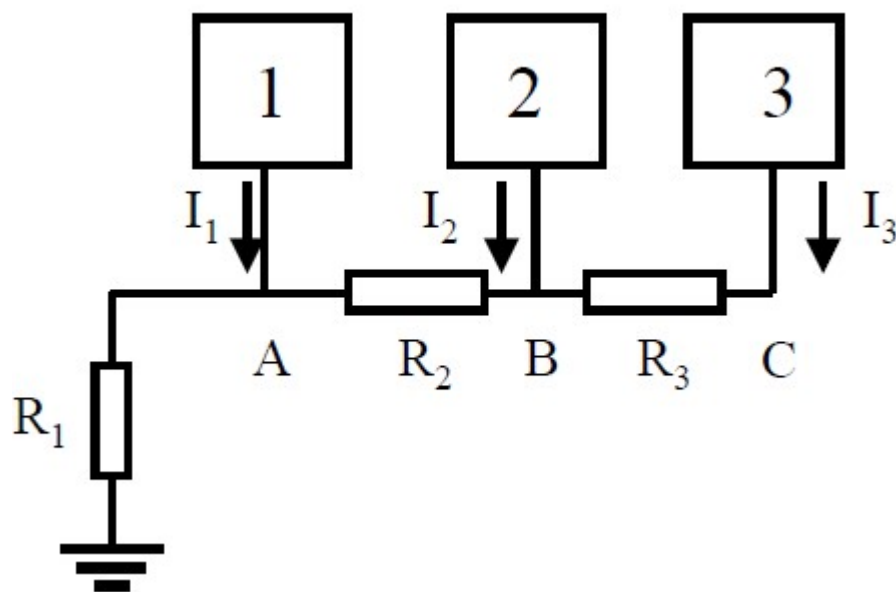
对策：

1. 减小公共地线部分的阻抗
2. 通过适当的接地方式避免容易干扰的电路共用地线。一般要避免强电电路和弱电电路，数字电路和模拟电路共用地线。

# 公共阻抗耦合的接地方式



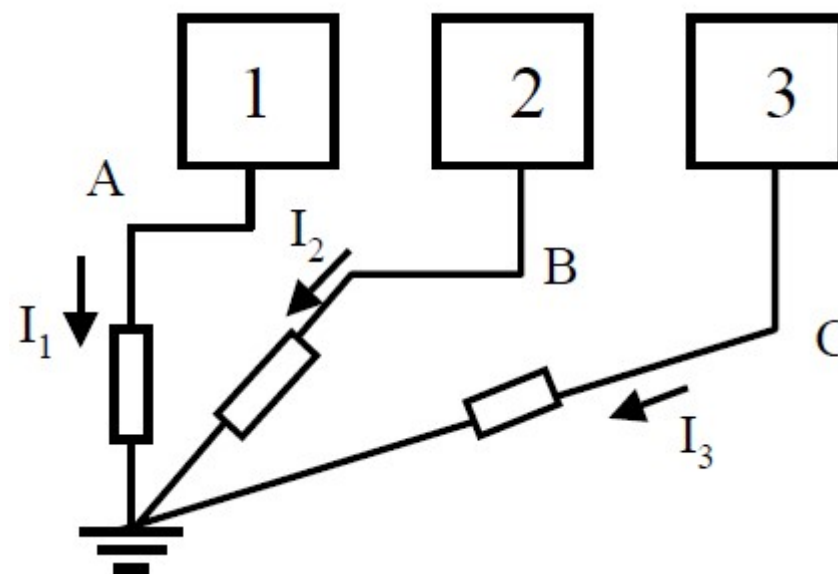
## 单点接地方式



串联单点接地

优点：简单

缺点：公共阻抗耦合

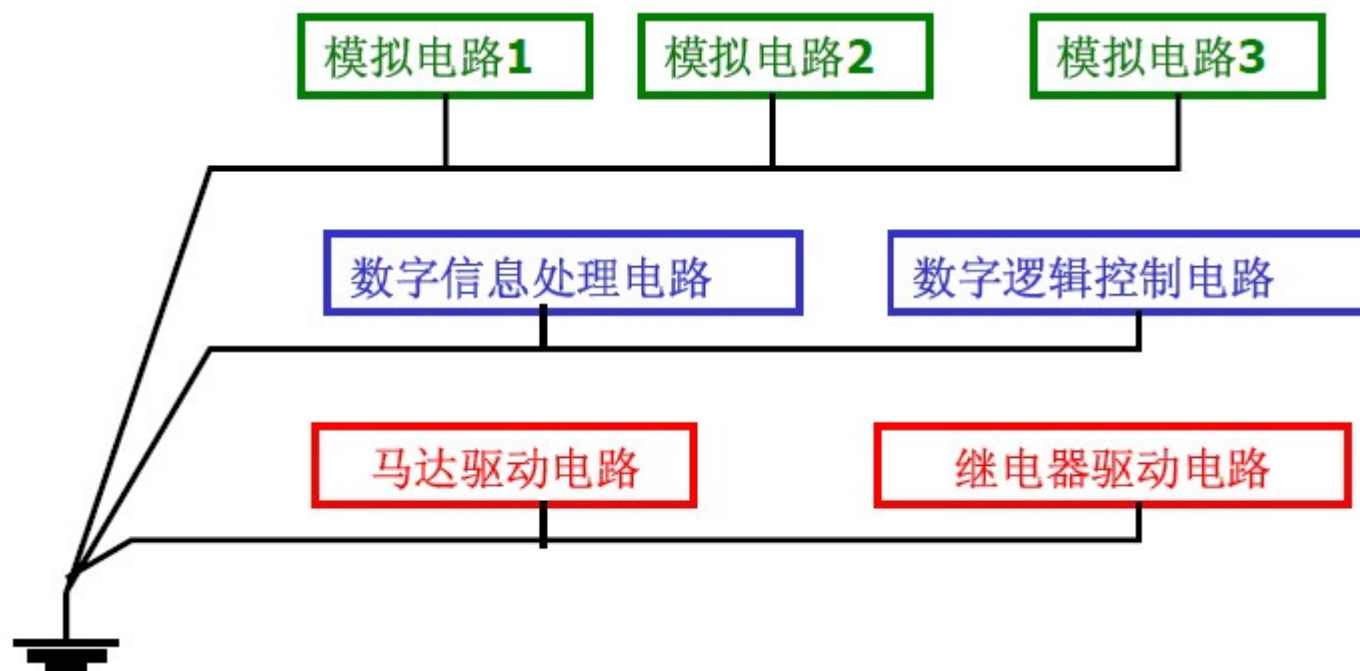


并联单点接地

优点：无公共阻抗耦合

缺点：接地线过多

# 串/并联单点混合接地





## 关于接地的注意事项

---

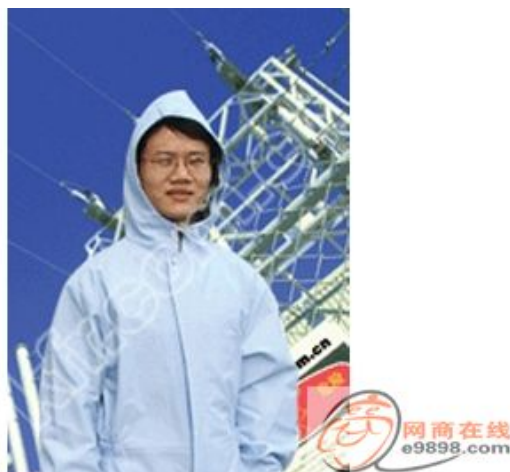
- 由于频率的关系，无论何种接地方法均应尽量缩短接地线，否则不但增加阻抗，同时，因其天线作用，会产生辐射杂波。接地线的长度 $L < \lambda/20$ 。
- 不论何种接地法，最大的困扰均源自于环路地电流的产生，因此设计中应该尽量去除地环路。

## 4. EMC与屏蔽技术

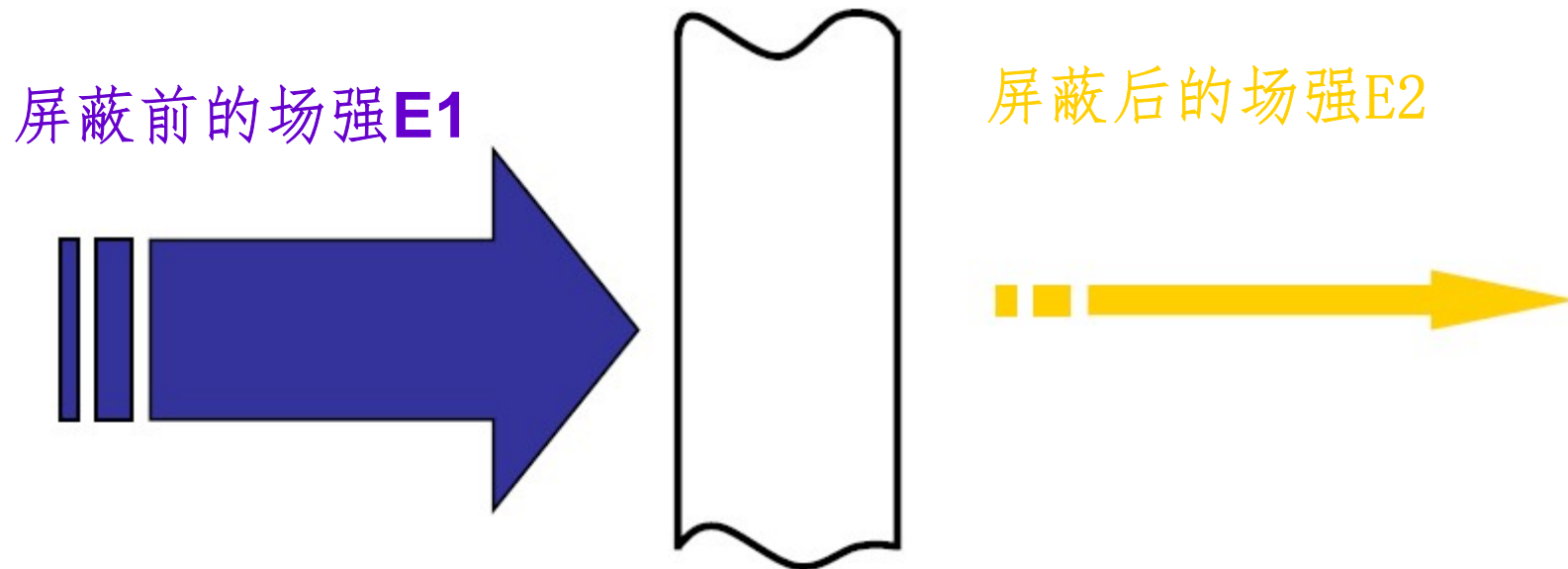
- 屏蔽可有效地抑制通过空间传播的电磁干扰。

### 屏蔽的目的:

- 限制内部的辐射电磁能越过某一区域
- 防止外来的辐射进入某一区域



## (1) 电磁屏蔽的原理

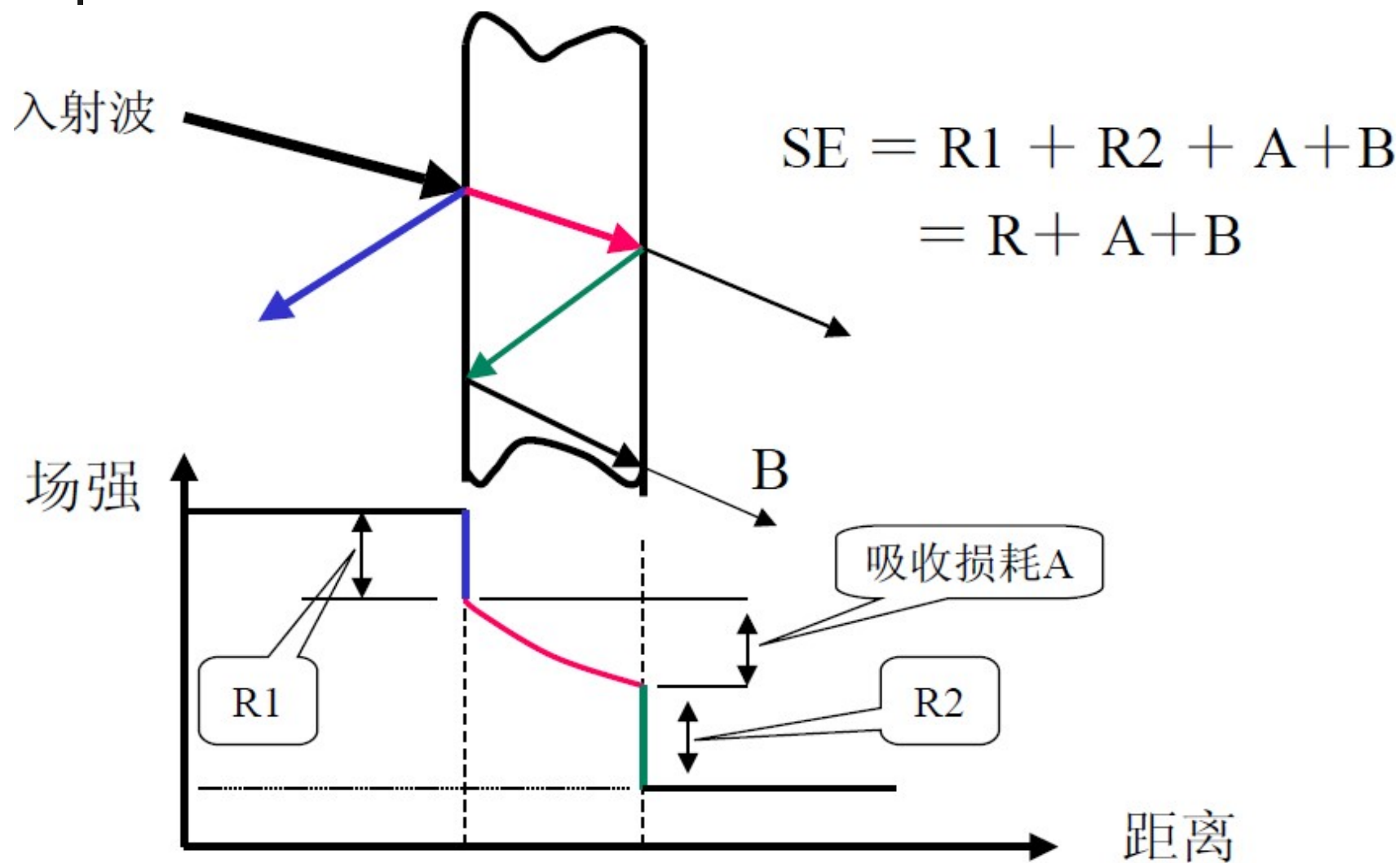


对电磁波产生衰减的作用就是电磁屏蔽，电磁屏蔽作用的大小用屏蔽效能度量：

$$SE=20\lg(E1/E2) \text{ dB}$$



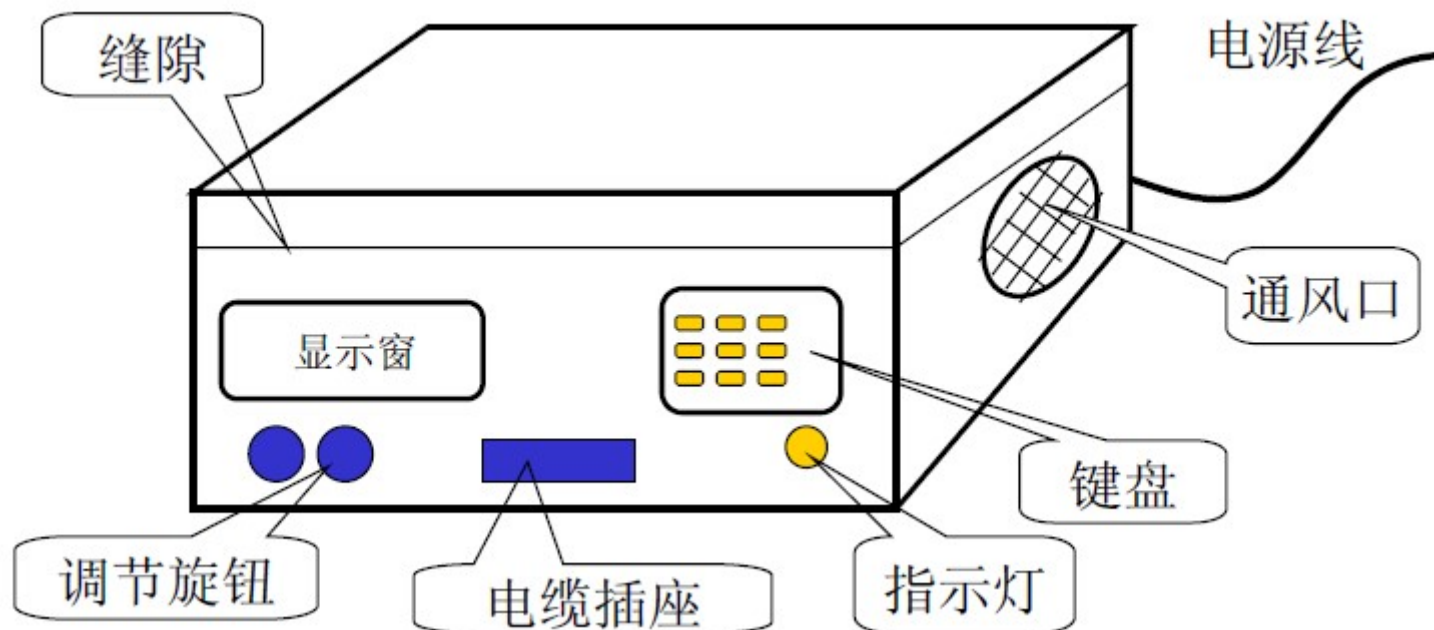
## (2) 实心材料屏蔽效能的计算



### (3) 实际屏蔽体的问题

- 实际机箱上会有许多泄漏源：

不同部分结合处的缝隙通风口、显示窗、按键、指示灯、电缆线及电源线等。





## (4) 縫隙的处理

---

### 影响因素:

**a.** 紧固点的距离

越小越好，主要方式有螺钉连接、铆接、点焊及锁

**b.** 零件的刚性

刚性越好，屏蔽效能越好

**c.** 縫隙的深度

越深越好

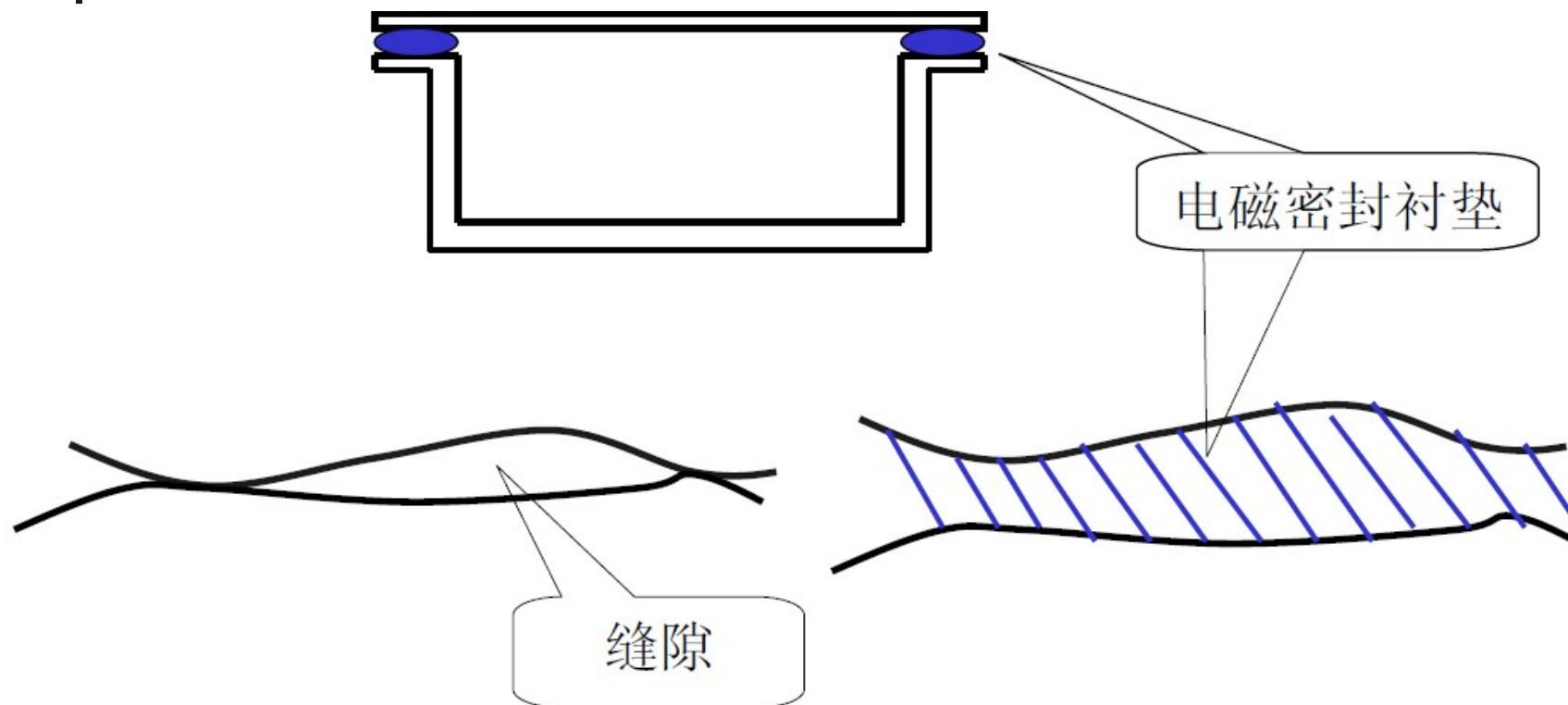
**d.** 屏蔽材料的特性

自身导磁导电特性

**d.** 结合面表面精度

加工精度、安装方式

## 缝隙的处理（实例）



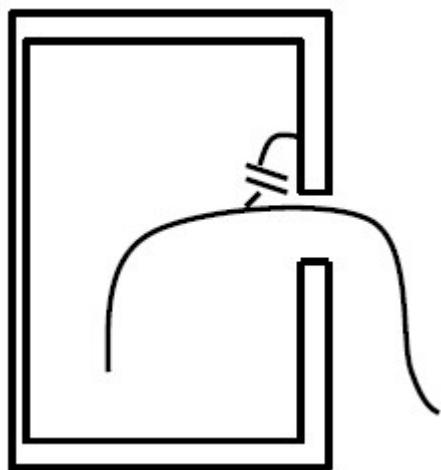
电磁密封衬垫种类:

金属丝网衬垫、导电橡胶、指形簧片、螺旋管衬垫、导电布……

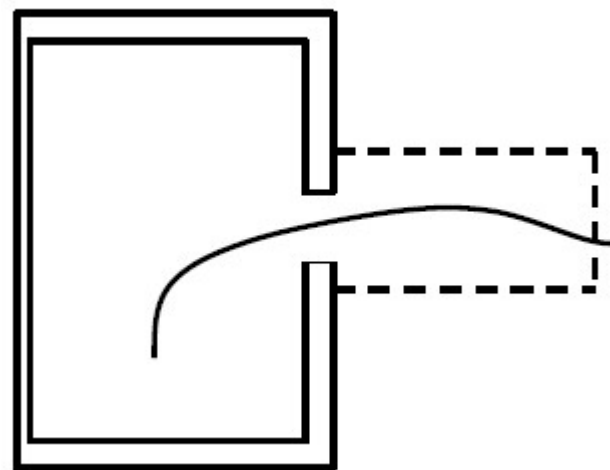


## (5) 贯通导体的处理

---

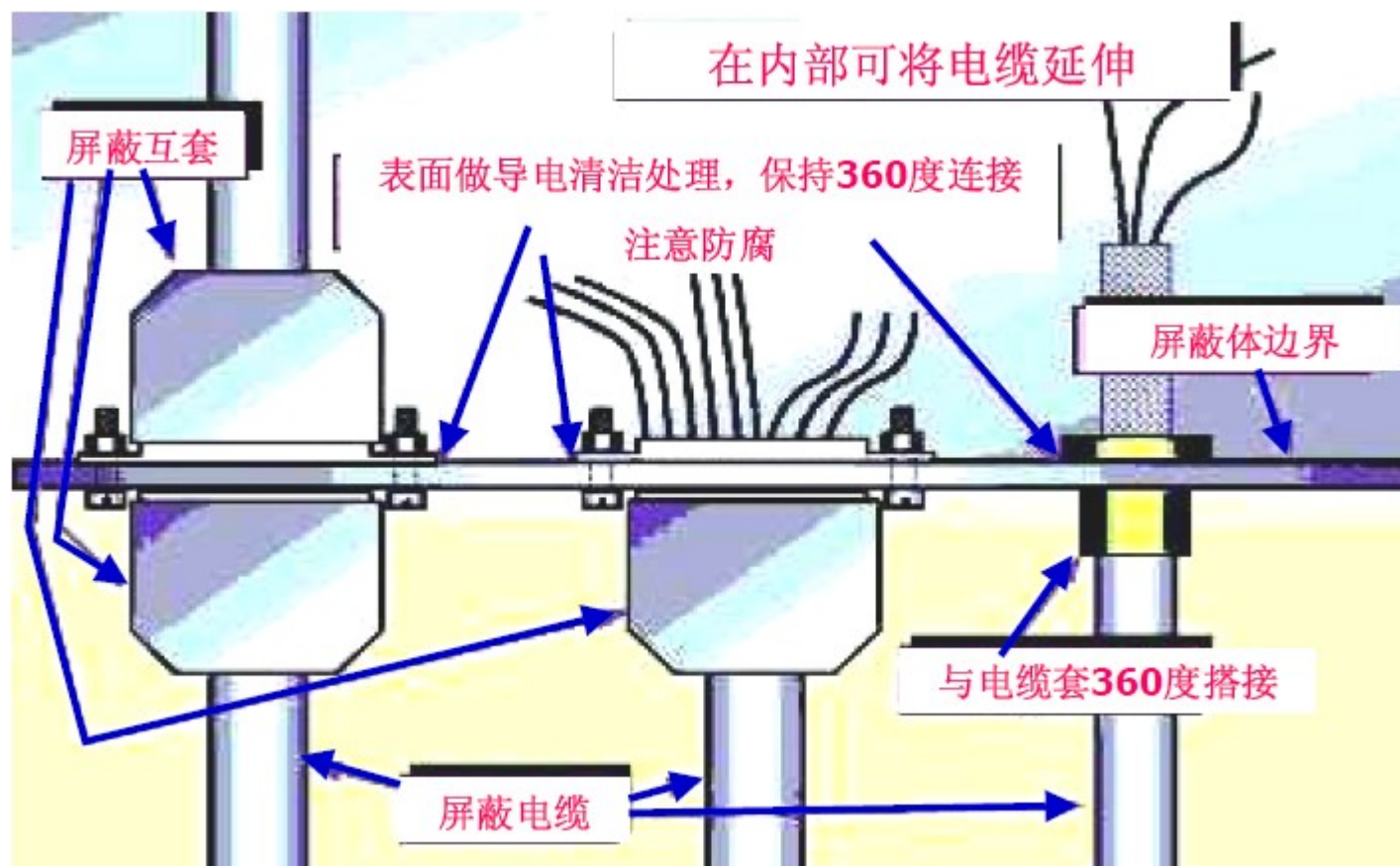


加滤波器件

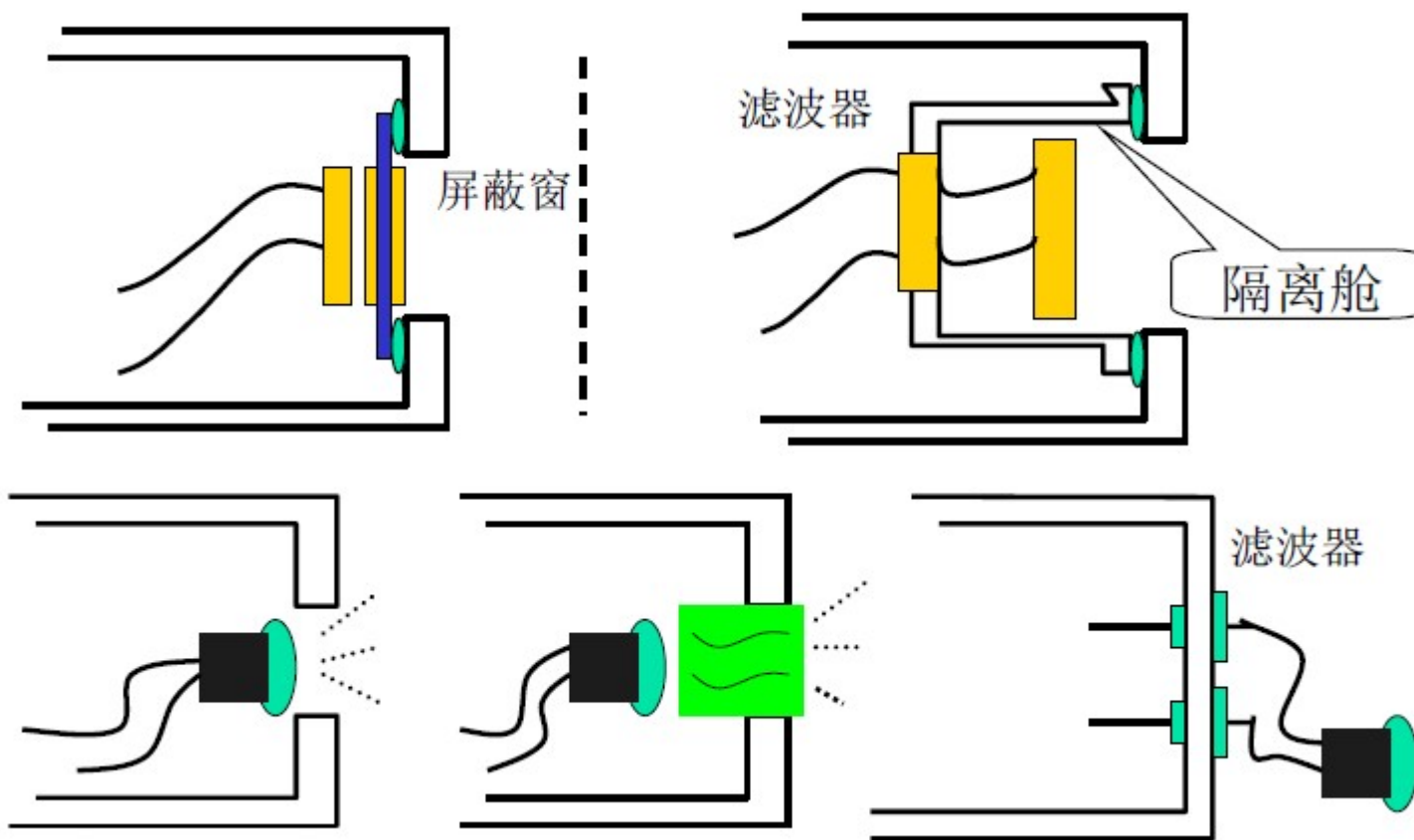


波导管效应

## (6) 屏蔽电缆穿过屏蔽机箱的方法



## (7) 显示窗/器件处理

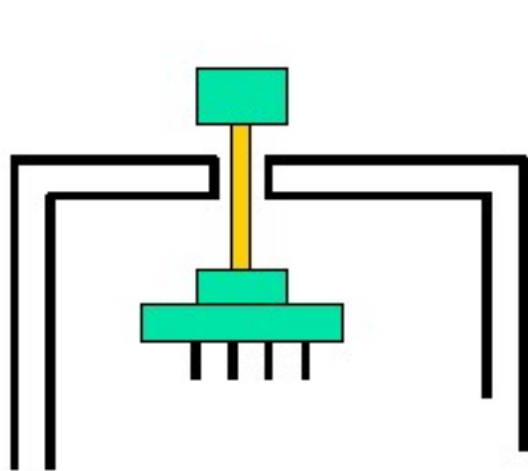


小孔，屏蔽效能足够可不处理

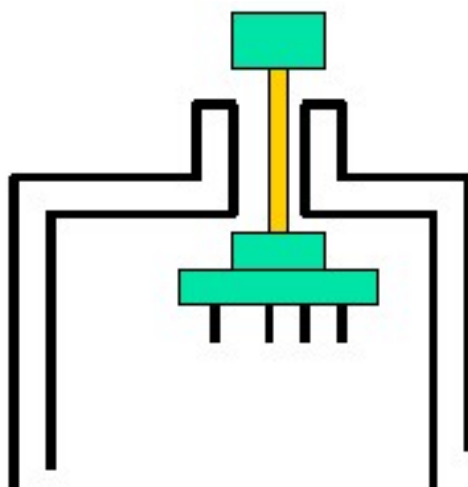
屏蔽玻璃



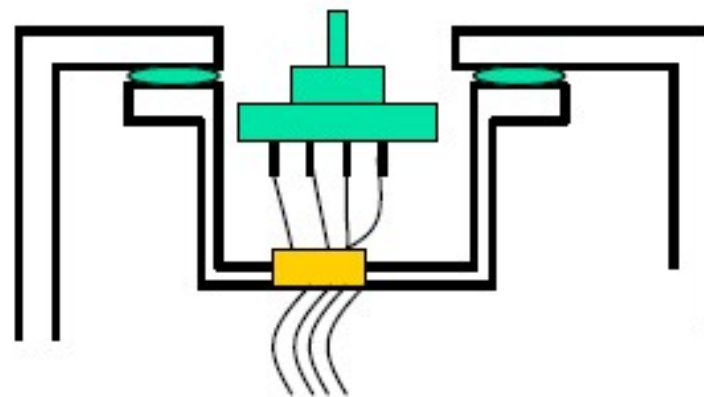
## (8) 操作器件（按键）的处理



屏蔽体上开小孔



屏蔽体上载上  
截止波导管

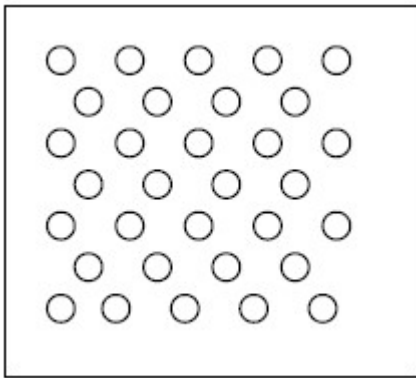


用隔离舱将  
操作器件隔离出

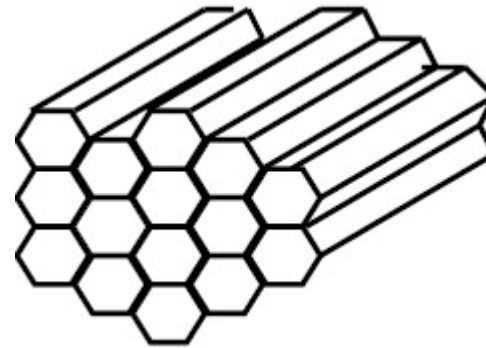


## (9) 通风孔的处理

通风孔的屏蔽主要需要均衡通风与散热之间的矛盾，可采用穿孔金属板和波导通风板。



穿孔金属板



波导通风板

影响因素：孔的最大尺寸和深度

优点：结构简单，价格低廉

缺点：屏蔽效能差，不超过30-40dB

影响因素：波导管厚度和长度

优点：屏蔽效能高

缺点：工艺复杂，造价高



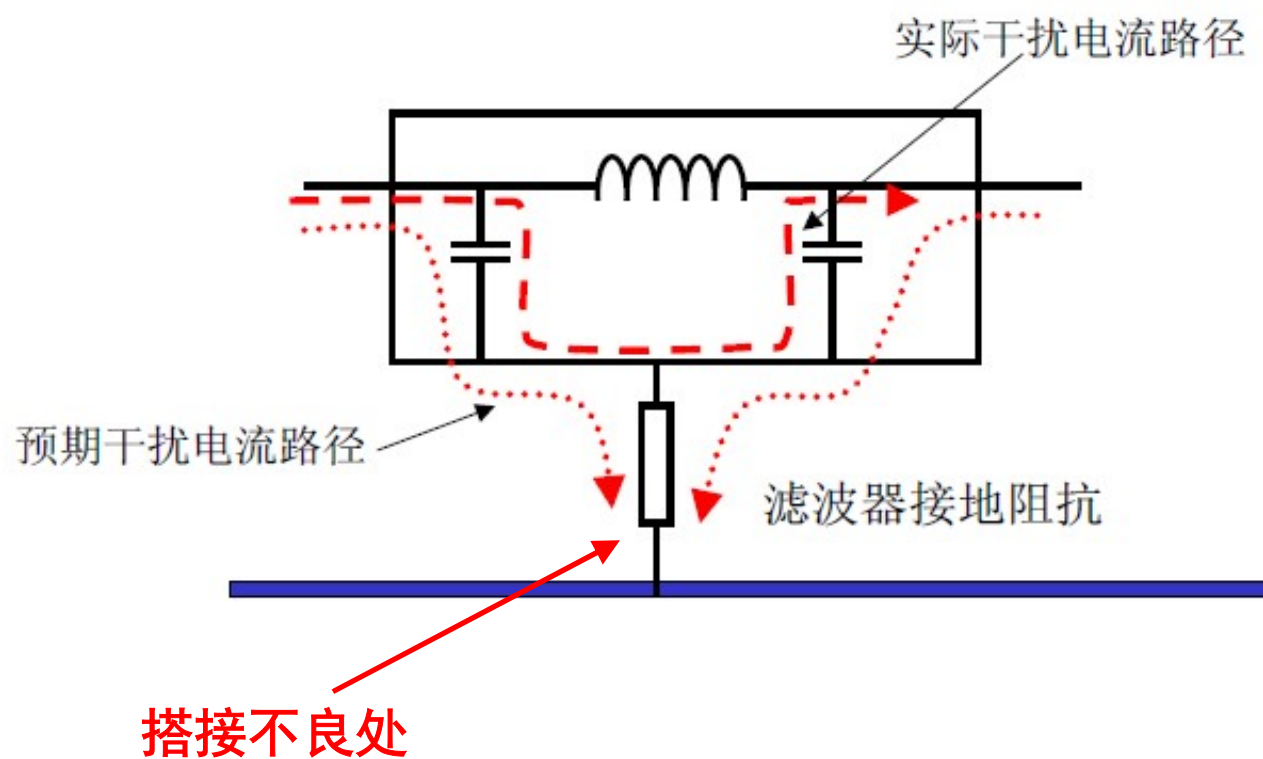
## (10) 搭接

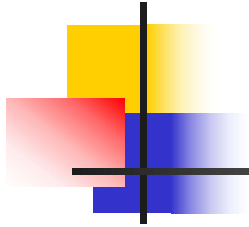
---

电子设备中，金属部件之间的低阻抗连接称为搭接。例如：

- ⑩ 电缆屏蔽层与机箱之间搭接
- ⑩ 屏蔽体上不同部分之间的搭接
- ⑩ 滤波器与机箱之间的搭接
- ⑩ 不同机箱之间的地线搭接

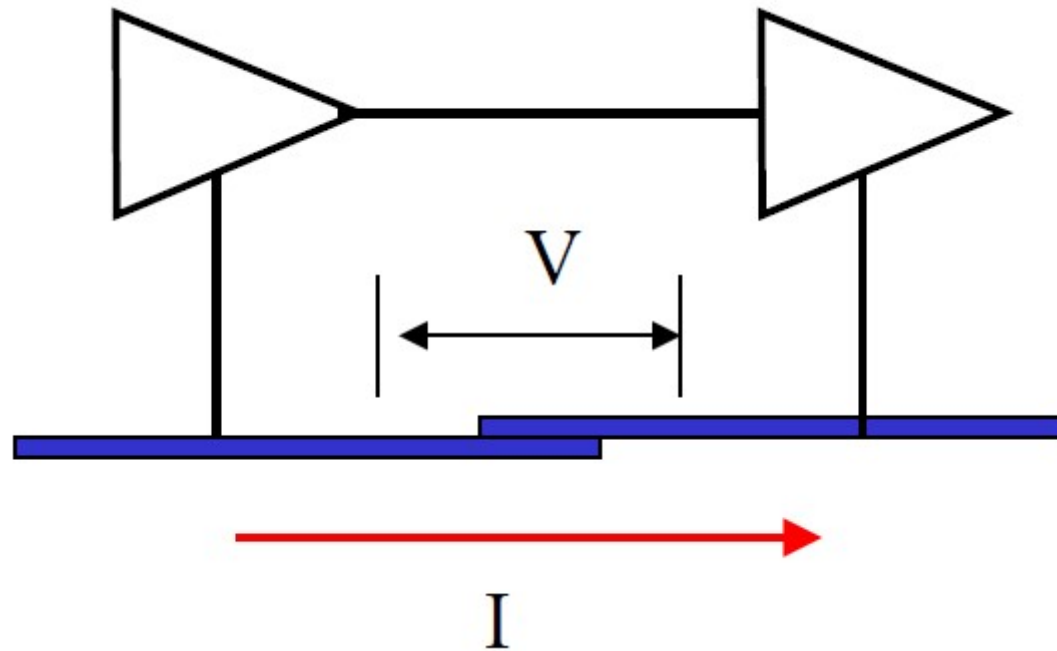
# 搭接不良的滤波器





# 搭接不良的机箱

航天飞行器上的搭接阻抗要小于 $2.5\text{m}\Omega$ ！





## 5. EMC与滤波技术

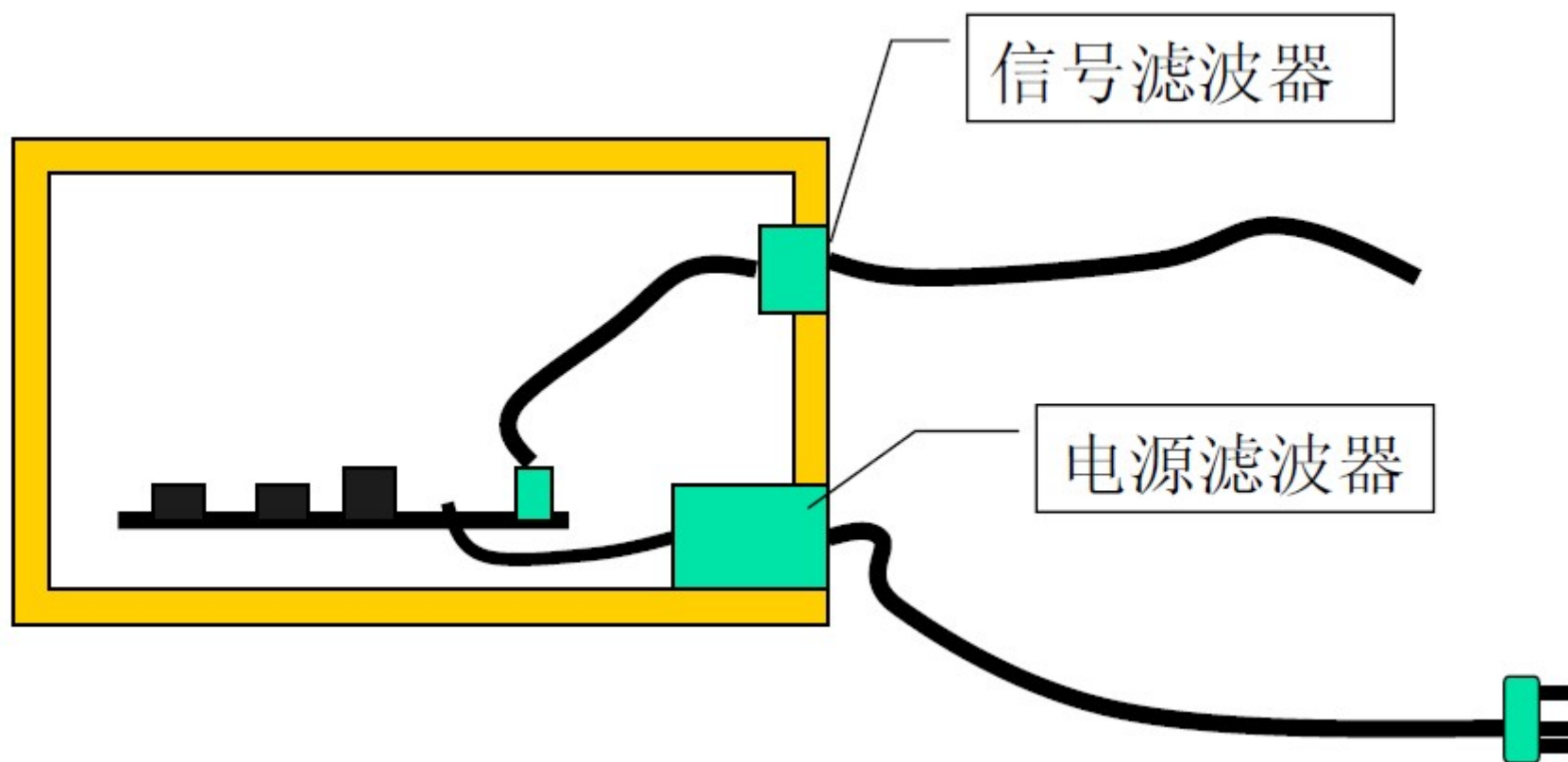
---

许多设备单台做电磁兼容试验没有问题，但当两台设备连接起来以后，就不能满足要求了。这就是由于电缆起了接收和辐射天线的作用，解决这个问题最有效的方法时在电缆的端口使用滤波器。

### 信号滤波器和电源滤波器：

- 信号滤波器不能对工作信号有严重的影响。
- 电源滤波器要注意当负载电流较大时，电感不能发生饱和。

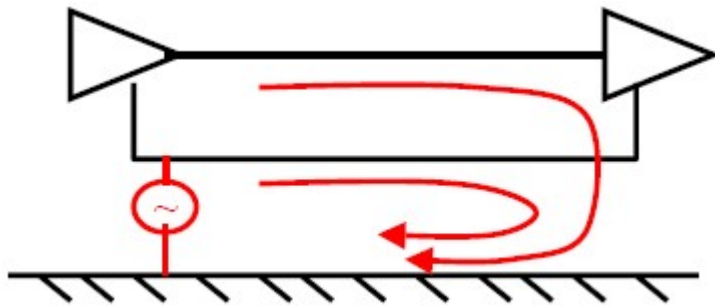
## (1) 滤波器的作用



可切断干扰沿信号线或电源线传播的路径，与屏蔽共同构成完善的干扰防护

## (2) 干扰电流的种类

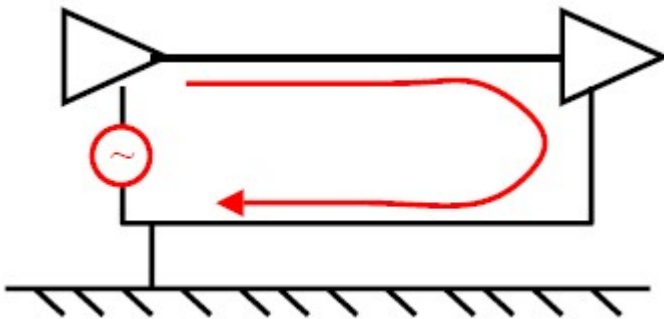
### 1. 共模电流



共模干扰电流的危害：

1. 如果电路不平衡，共模干扰会转化为差模干扰，对电路产生影响。
2. 会造成电缆强烈的电磁辐射。

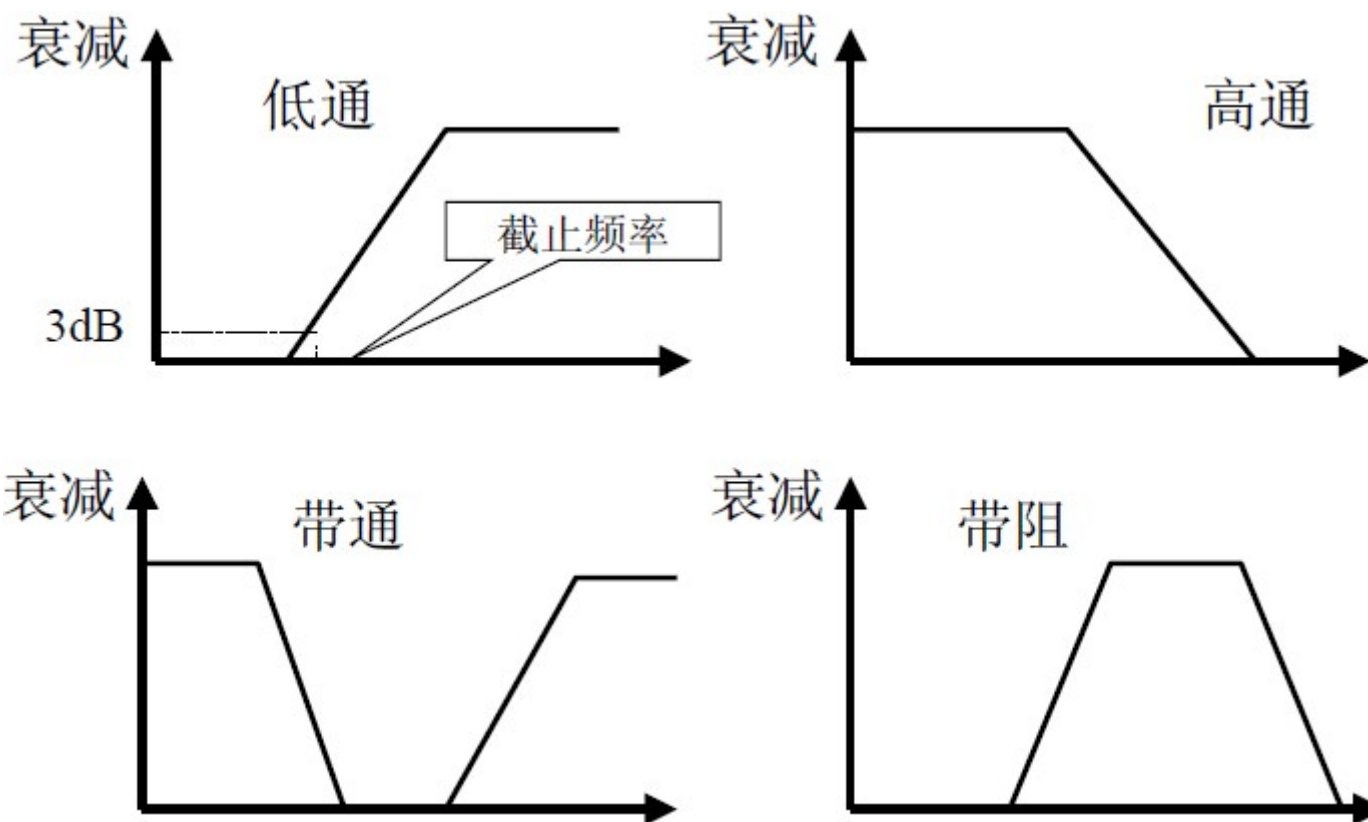
### 2. 差模电流



差模干扰主要由于电缆中不同信号之间的电容耦合和电感耦合所致，会严重影响信号质量。

从受干扰的角度看，差模干扰比共模干扰危害性更大，  
从干扰发射的角度看，共模干扰比差模干扰危害性更大。

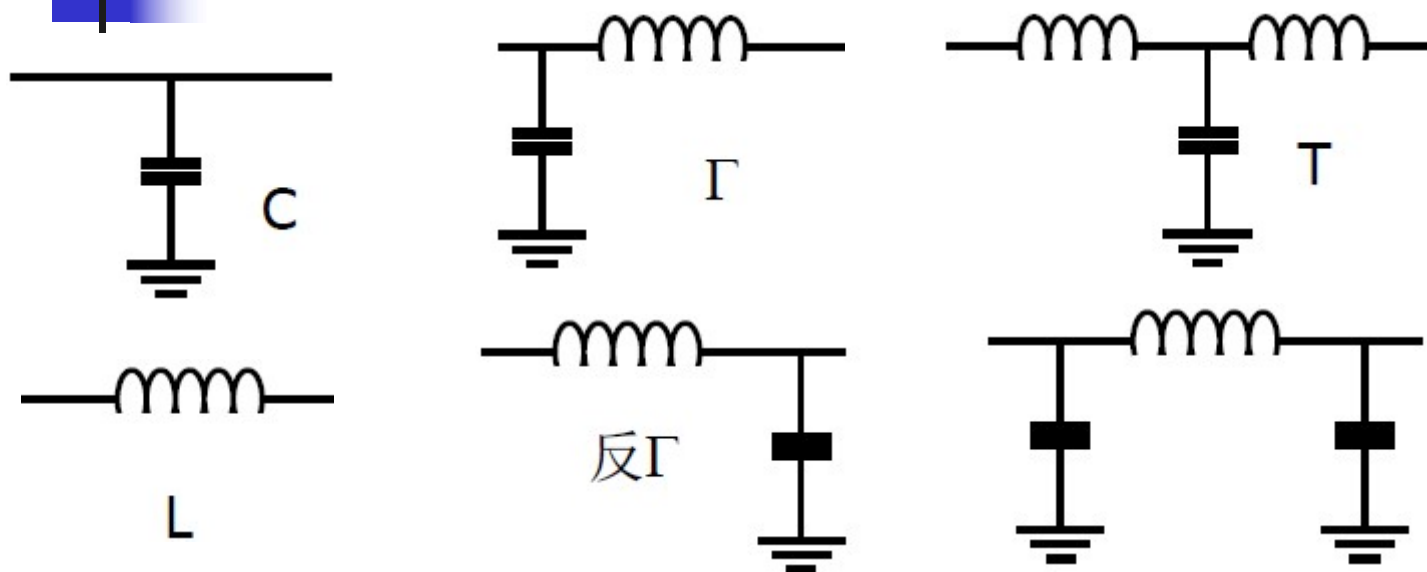
### (3) 抗干扰滤波器的种类



其中，低通滤波器是最常用的一种。



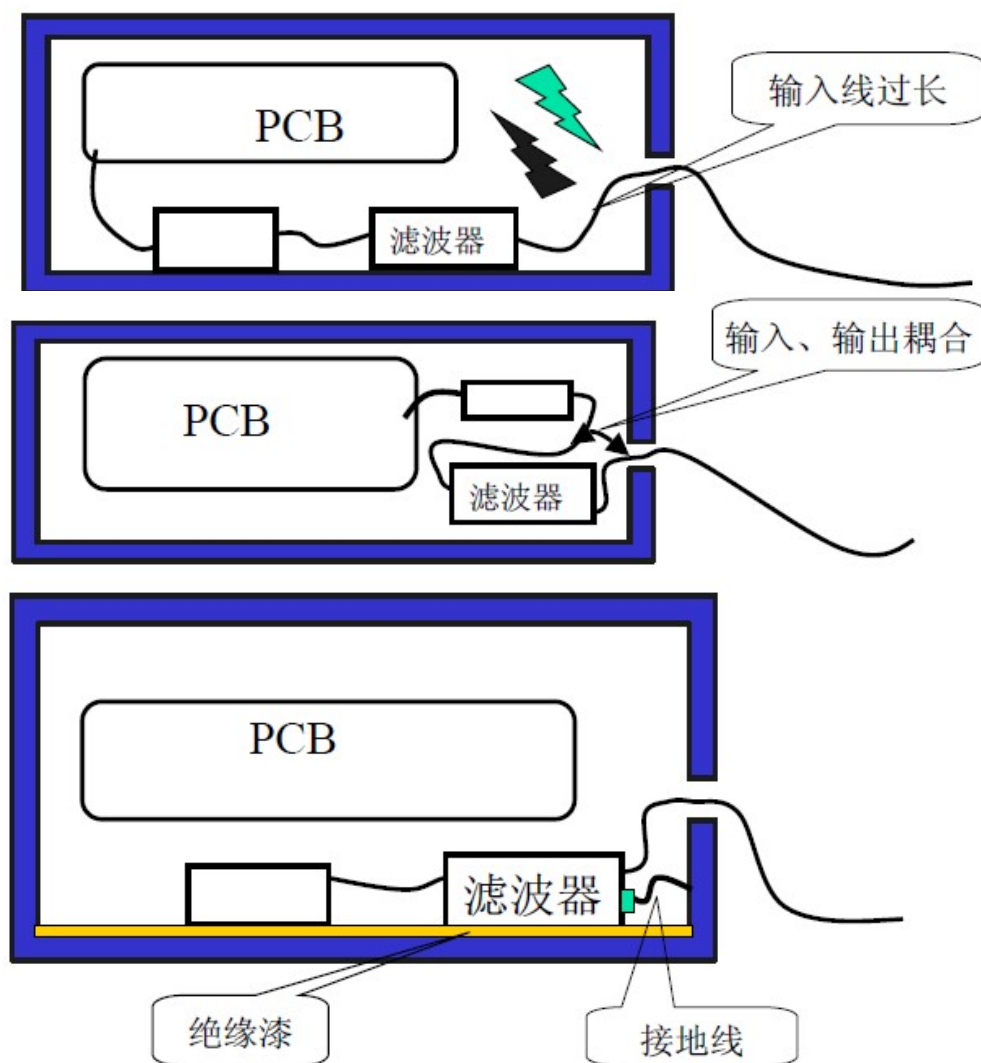
## (4) 低通滤波器类型



源阻抗	电路结构	负载阻抗
高	<b>C</b> 、 $\pi$ 、多级 $\pi$	高
高	$\Gamma$ 、多级 $\Gamma$	低
低	反 $\Gamma$ 、多级反 $\Gamma$	高
低	<b>L</b> 、多级 <b>L</b>	低

规律：  
电容，对高阻；  
电感，对低阻。

## (5) 电源线滤波器的错误安装

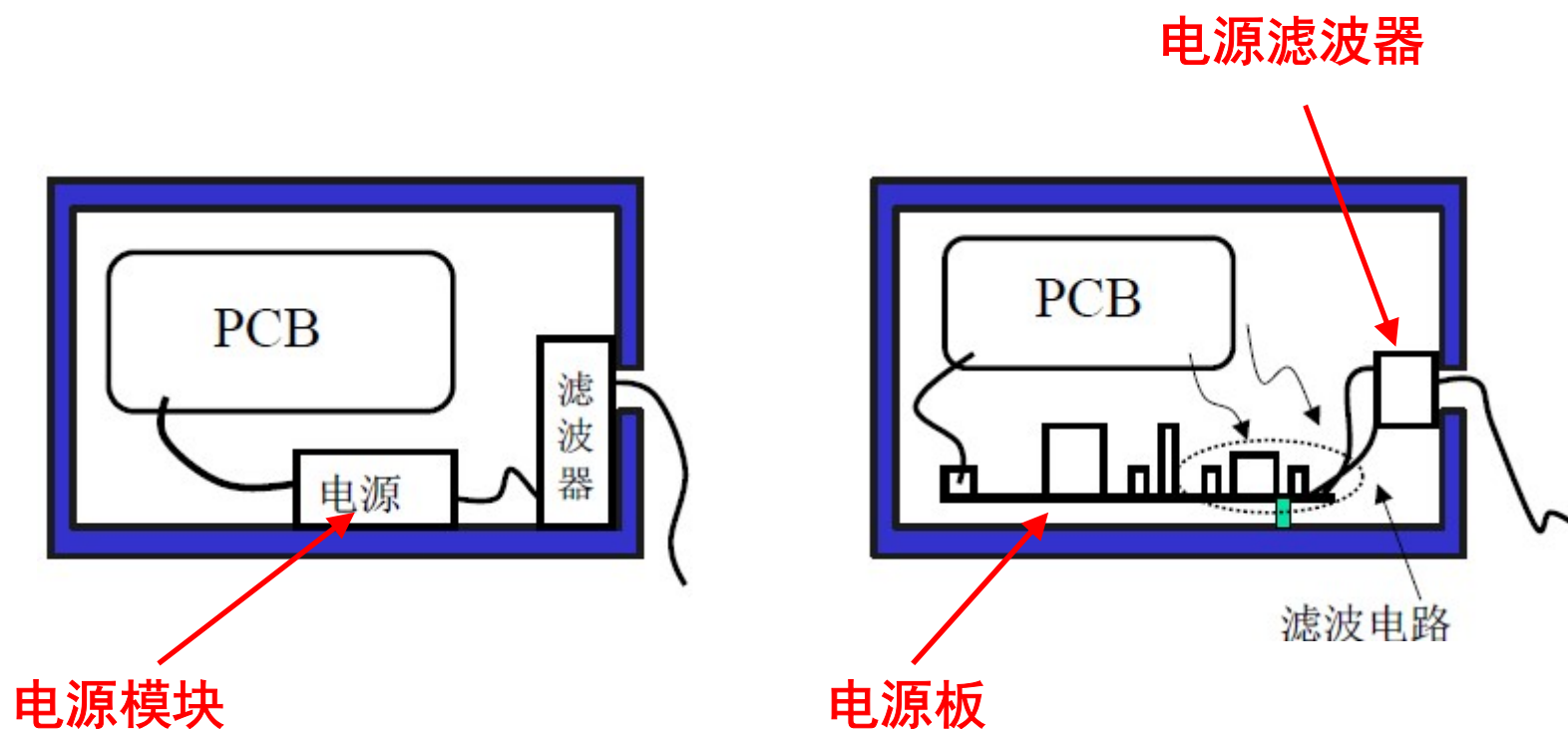


1. 输入线过长，外面进来的干扰还未经滤波器，就已通过空间耦合的方式干扰到线路板上了，而线路板上产生的干扰也可直接耦合到滤波器的输入线上，传导到机箱外面。

2. 输入、输出线之间的寄生电容直接发生耦合，使滤波器高频滤波效果变差。

3. 滤波器的外壳没有与金属外壳或者用导线连接，共模滤波电容的滤波效果大大降低。

## (6) 电源线滤波器的正确安装





## 参考资料

---

- 1、《电子设备的电磁兼容性设计》 区健昌等 电子工业出版社
- 2、《电磁兼容原理与设计技术》 杨克俊编著 人民邮电出版社
- 3、《产品中的**EMC**技术》 李迪等译 电子工业出版社
- 4、《电磁兼容原理、设计和预测技术》 蔡仁钢主编

北京航空航天大学出版社

- 5、《电子元器件可靠性工程》 孙青等 电子工业出版社
- 6、《电磁干扰及控制》 林国荣编著 电子工业出版社
- 7、《**3C**认证中的电磁兼容测试与控制》 钱振宇编著

电子工业出版社



## 课后作业

---

- 1、简述可靠性、可靠度、故障率的定义。
- 2、介绍3C认证及其四个版本。
- 3、描述可靠性通用设计准则，解释其中每一条的含义。
- 4、叙述EMC的定义，发生EMC问题的三要素和三种常用的对策。
- 5、通过检索资料回答如何解决电路设计中的各种接地问题。