



为什么要掌握电磁兼容技术

因为：

- 电子电路日益复杂，调试越来越难
- 电磁兼容标准强制实施
- 市场竞争日益激烈，开发周期越来越短



实践电磁兼容技术

课程特点：

- 注重物理概念和应用背景，避免空洞理论和复杂公式
- 内容实用，立竿见影
- 培养解决电磁干扰的综合能力（基本理论、分析方法、问题解决能力等）



课程发展过程

- 1996 年， “ 电磁屏蔽技术 ” ， 半天课程， 屏蔽技术
- 1997 年， “ 如何满足 GJB-151 ” ， 一天课程， 屏蔽、滤波
- 1998 年， “ 实践电磁技术 ” ， 两天， 屏蔽、滤波、接地、电缆
- 1999 年， “ 实践电磁技术 ” 两天， 屏蔽、滤波、接地、电缆、

线路板（减少了屏蔽内容）

- 2001 年， “ 实践电磁技术 ” 两天， 目前教材内容
- 2002 年， “ 实践电磁技术 ” 一天， 增加试验和诊断中

杨继深

2002年4月



课程内容

- 电磁兼容要求（标准）与试验方法
- 地线造成的干扰问题与解决方法
- 电磁屏蔽与搭接
- 电磁干扰滤波技术
- 线路板设计
- 电缆设计
- 瞬态抑制技术
- 电磁干扰问题诊断



通过学习本课程要达到:

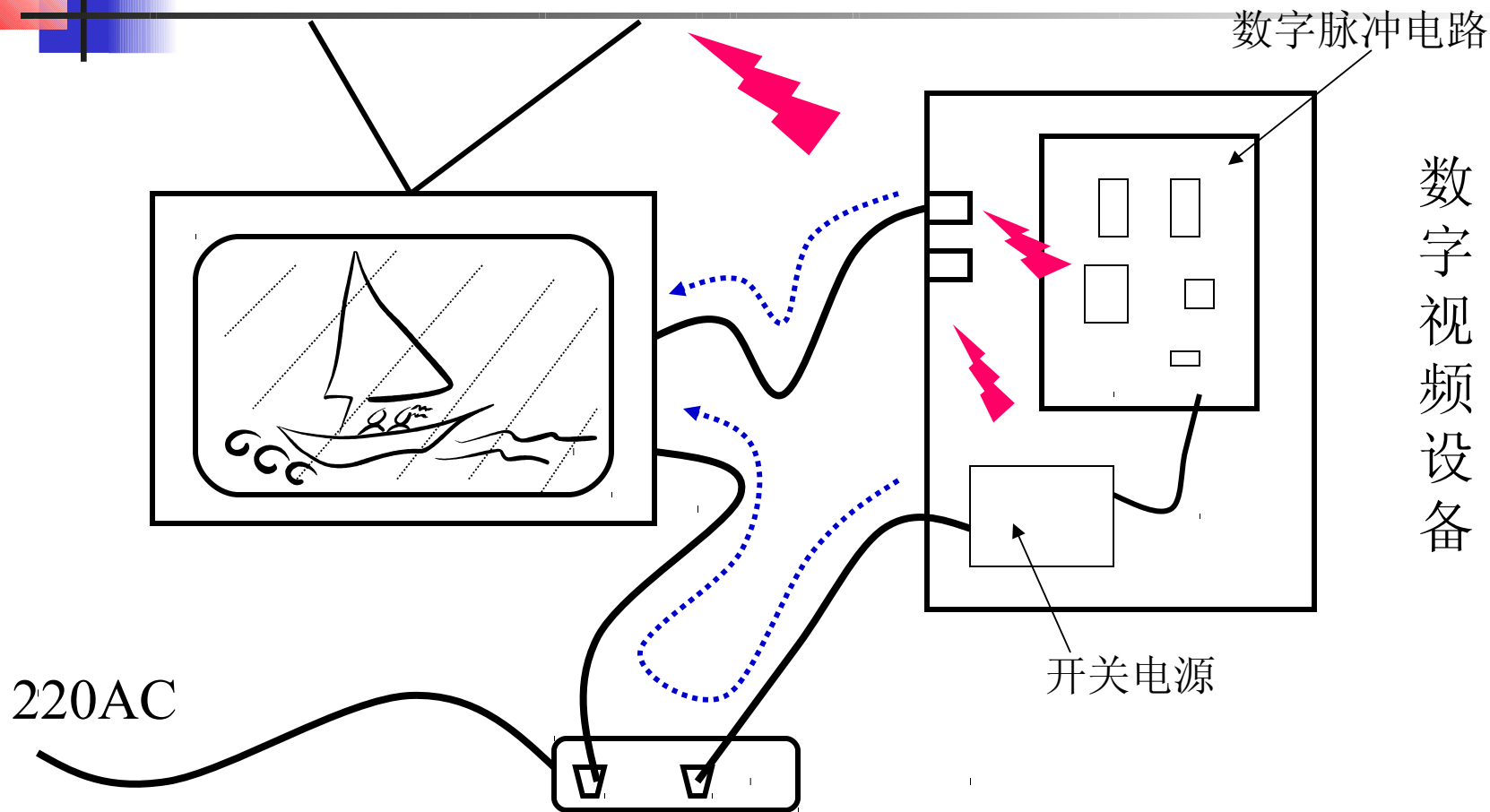
- 对电磁兼容技术有全面的了解
- 掌握常见干扰问题的诊断和解决方法（会自制简单的试验设备）
- 掌握接地、滤波、屏蔽等关键技术
- 在产品电磁兼容设计方面有明确的思路
- 使产品顺利通过电磁兼容试验
- 具备进一步学习的能力



第一章 基本概念

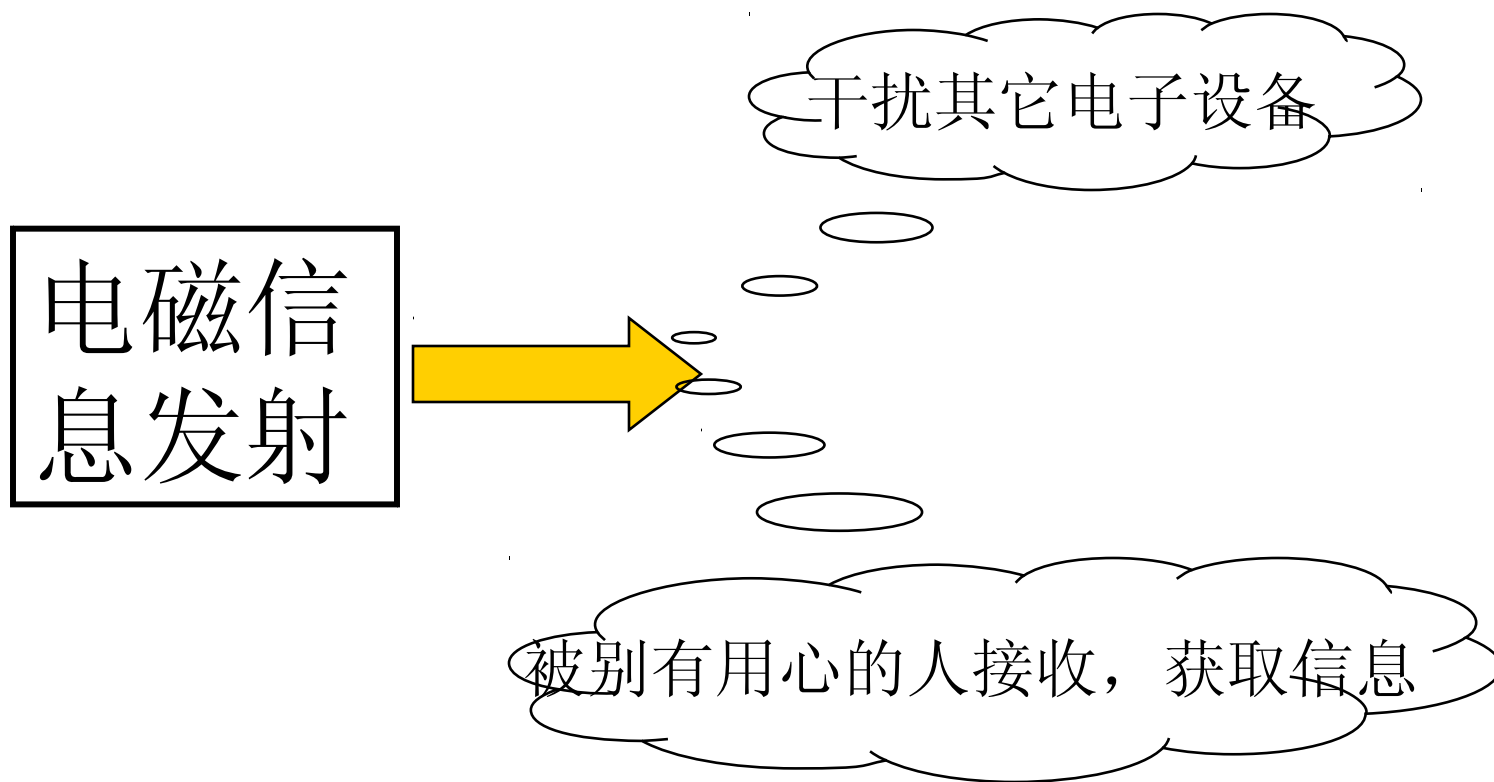
- 电磁干扰现象
- 电磁兼容标准
- 电磁兼容试验设备
- 频域与时域
- 分贝的概念

电磁干扰现象

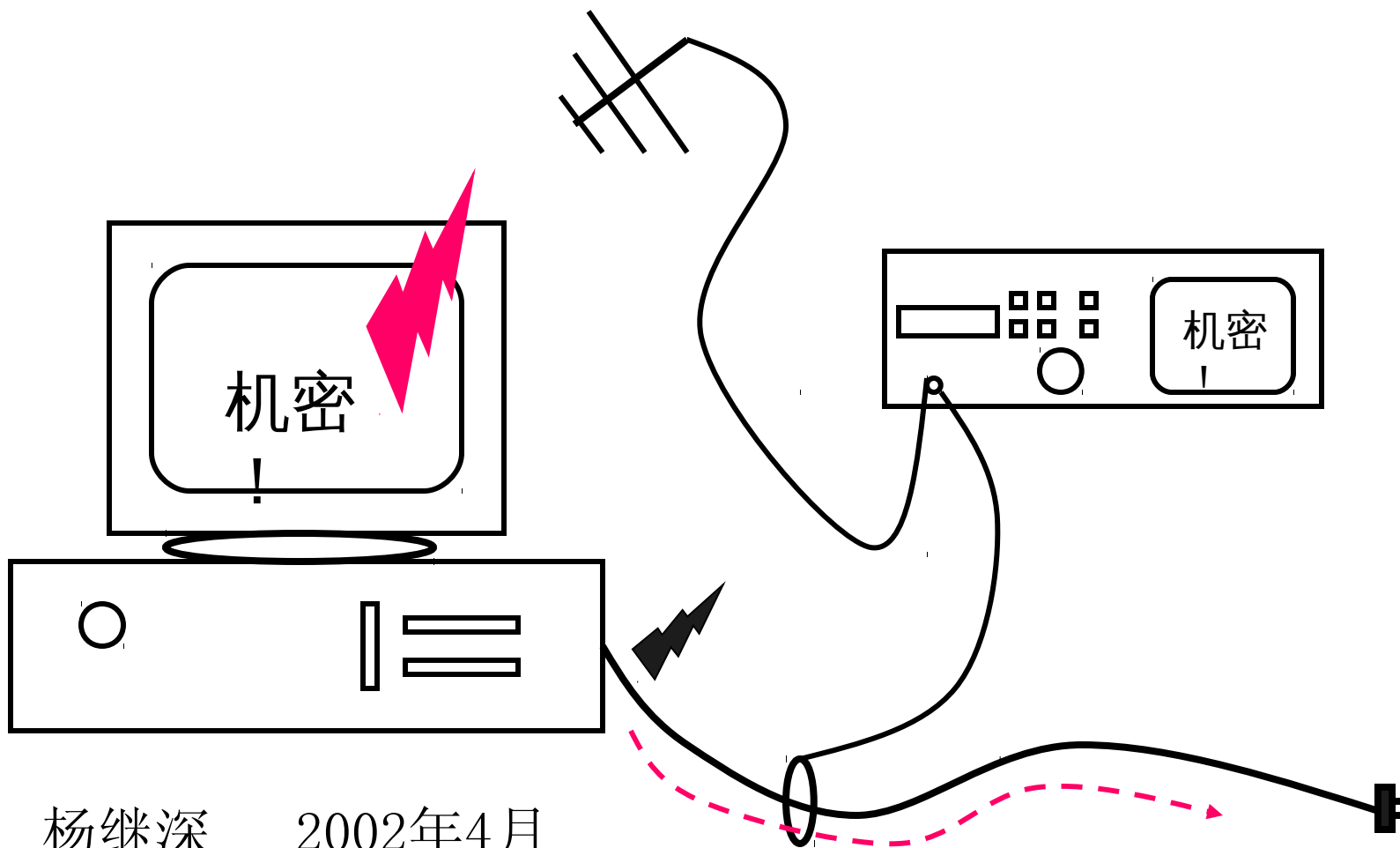




特殊的电磁兼容问题



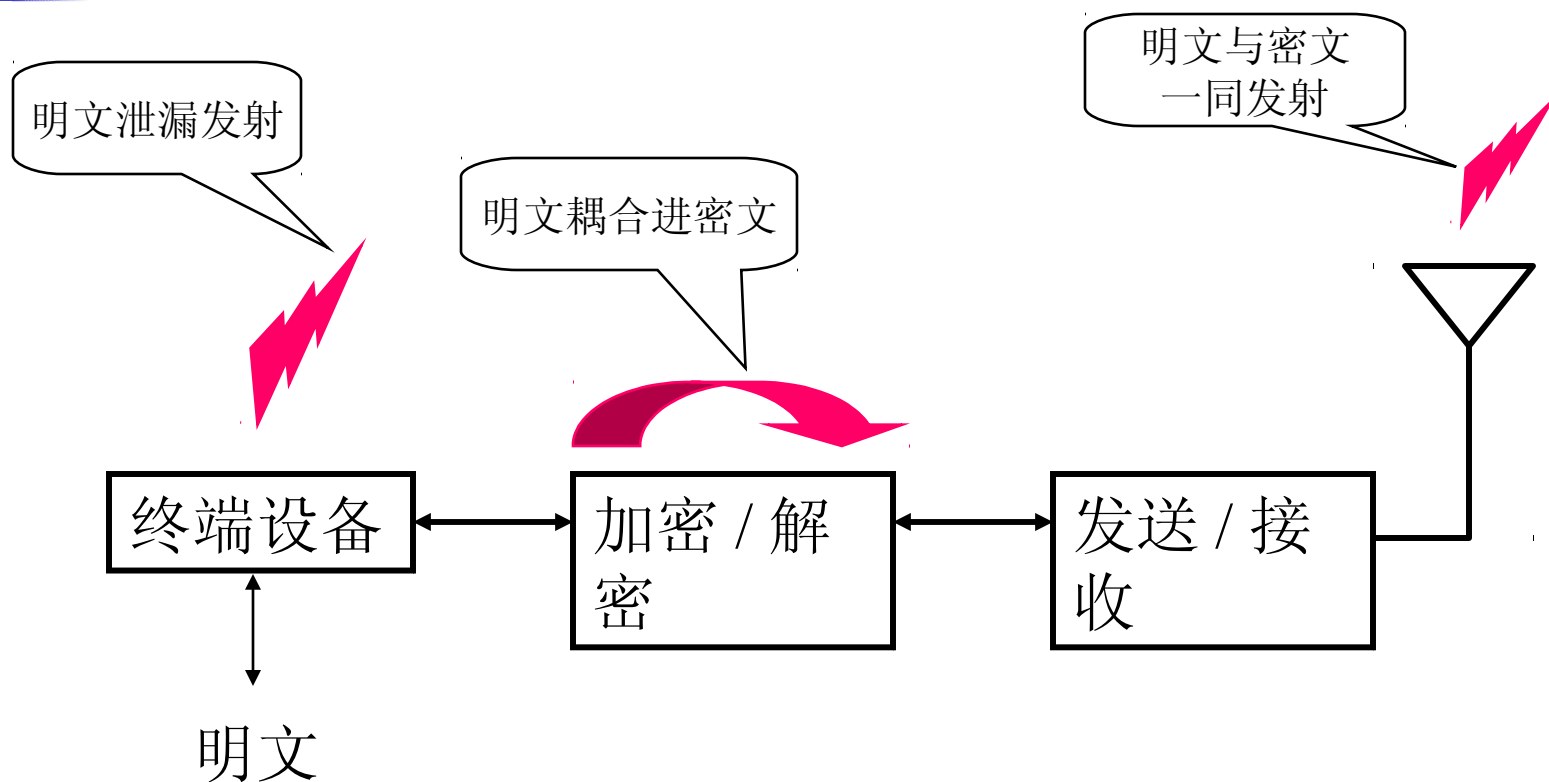
TEMPEST 现象



杨继深

2002年4月

保密通信系统中的 TEMPEST



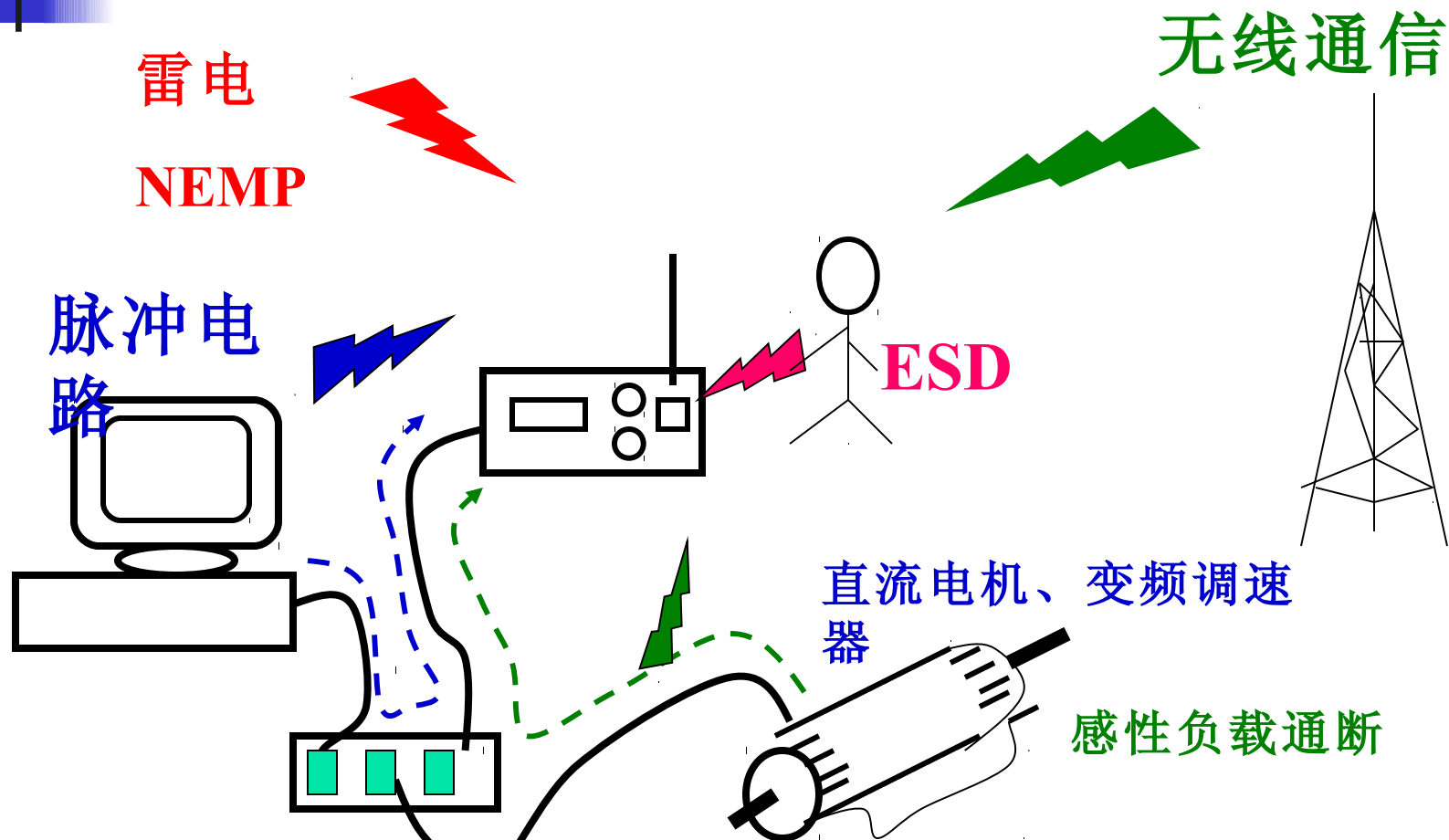


产生电磁干扰的条件

1. 突然变化的电压或电流，即 dV/dt 或 dI/dt 很大
2. 辐射天线或传导导体

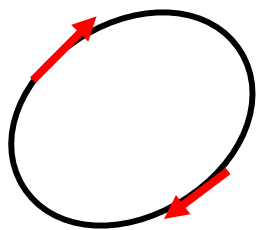
设计中，遇到电压、电流的突然变化，
需要考虑潜在的电磁干扰问题

常见干扰源

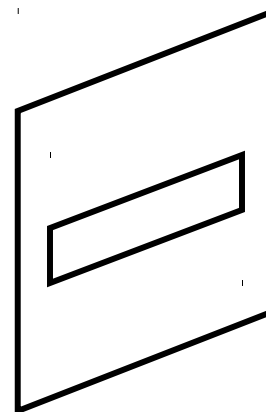
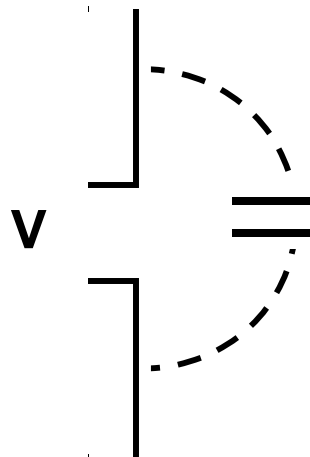


基本天线结构

环天线
缝隙天线

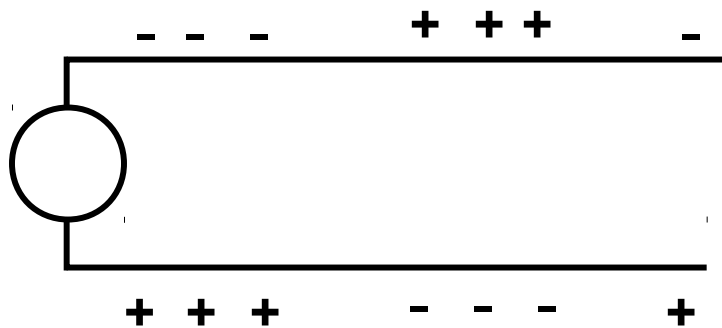


偶极天线



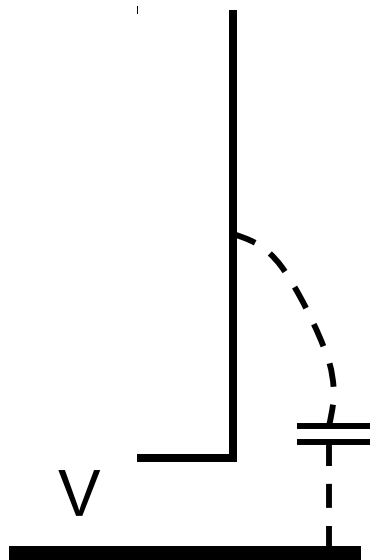
偶极天线的演变

传输线

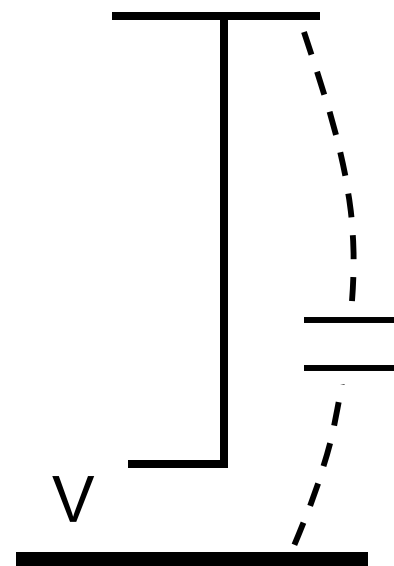


辐射很小

单极天线

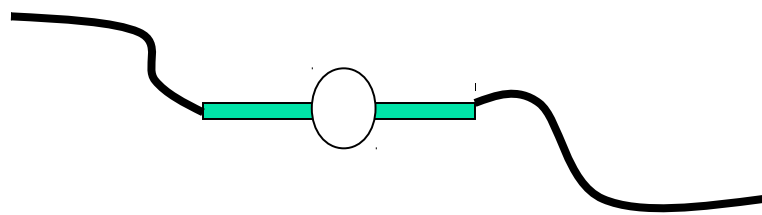
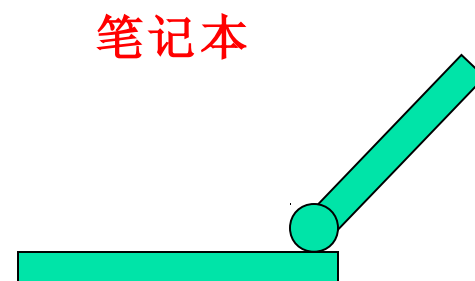
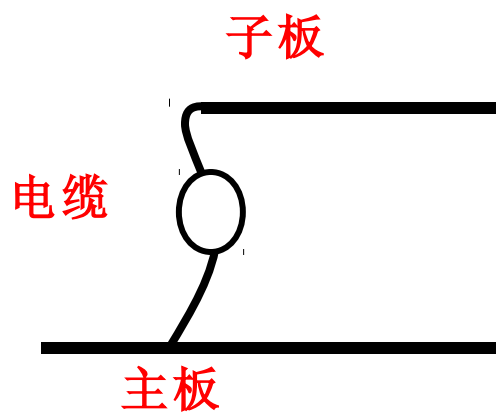
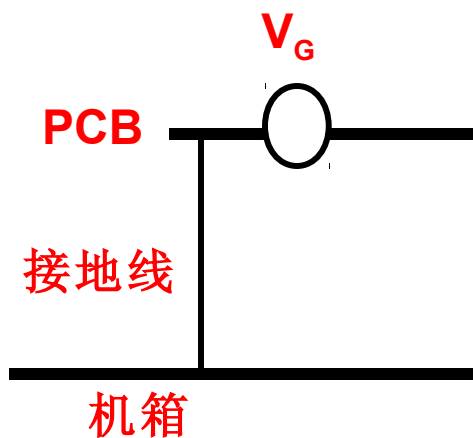


辐射同偶极



辐射高于单极

常见的等效天线



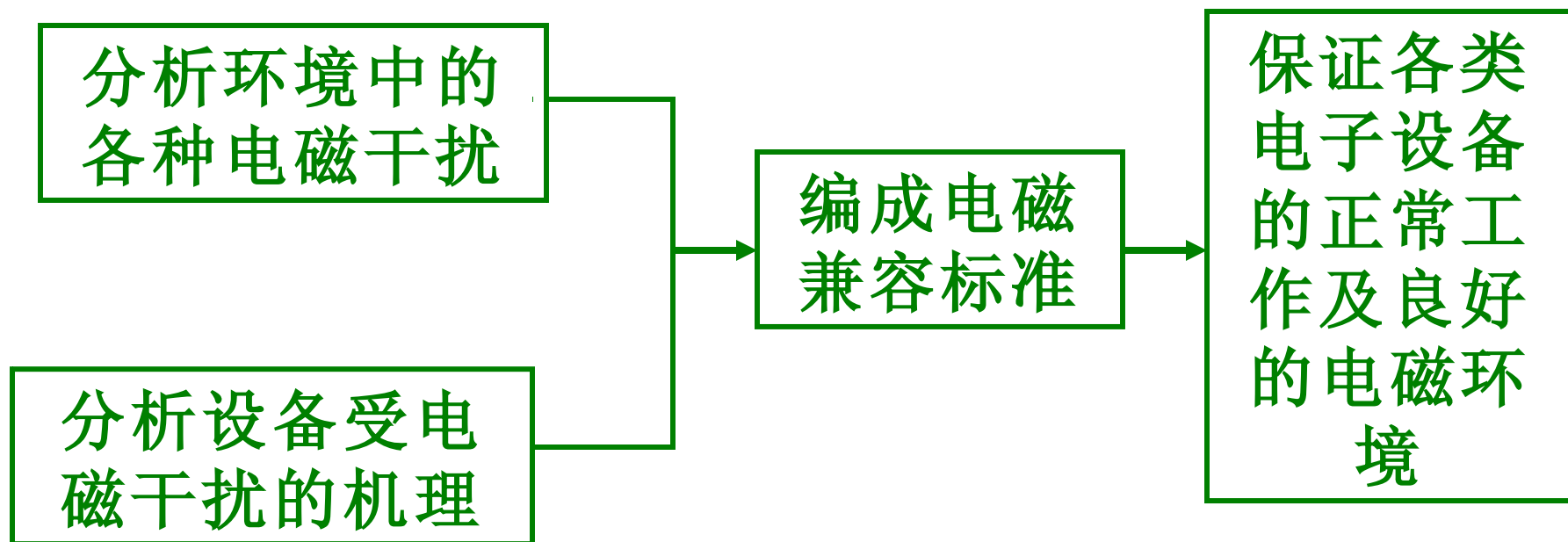
没接地散热片



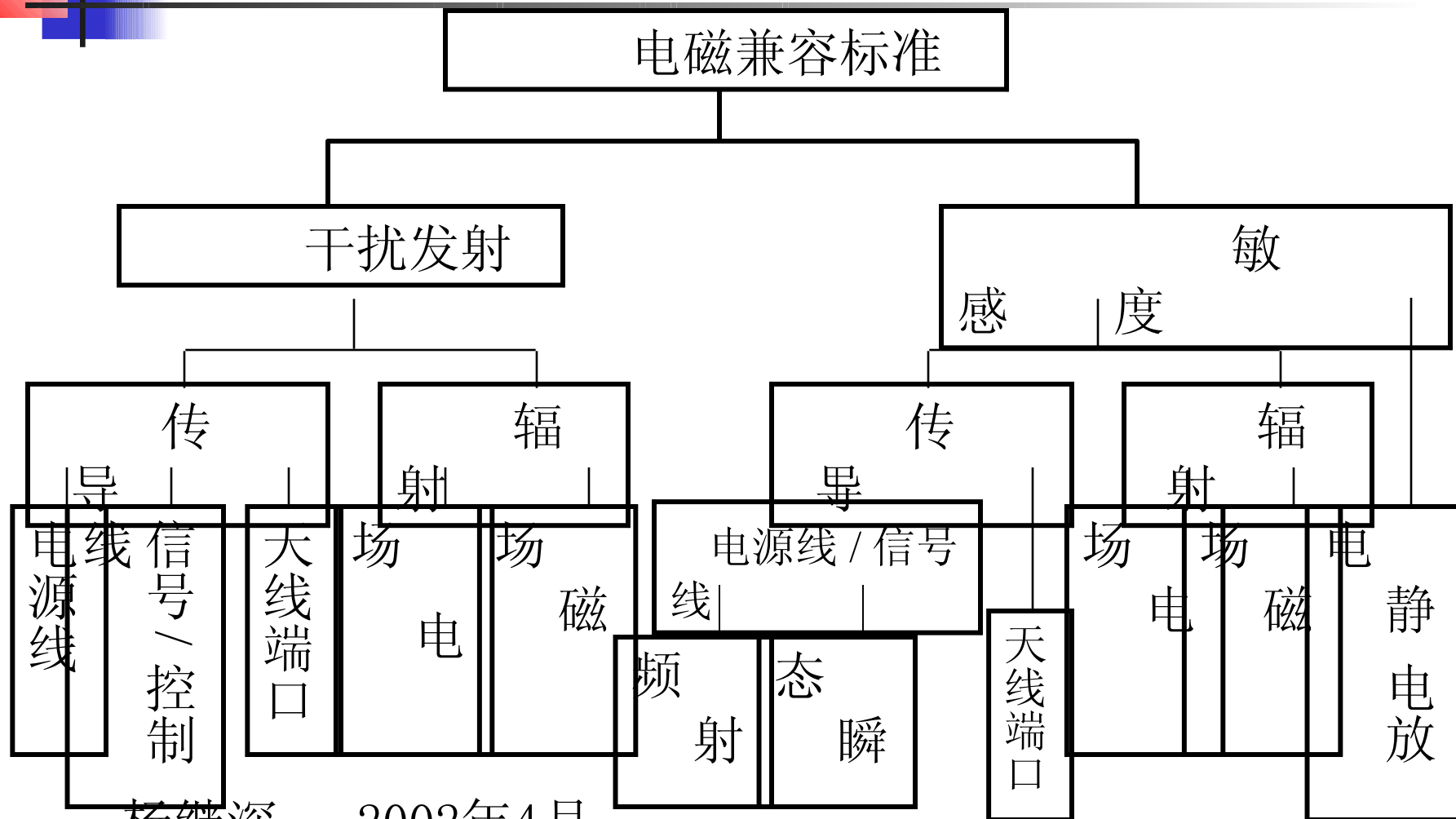
PCB 电缆



电磁兼容标准

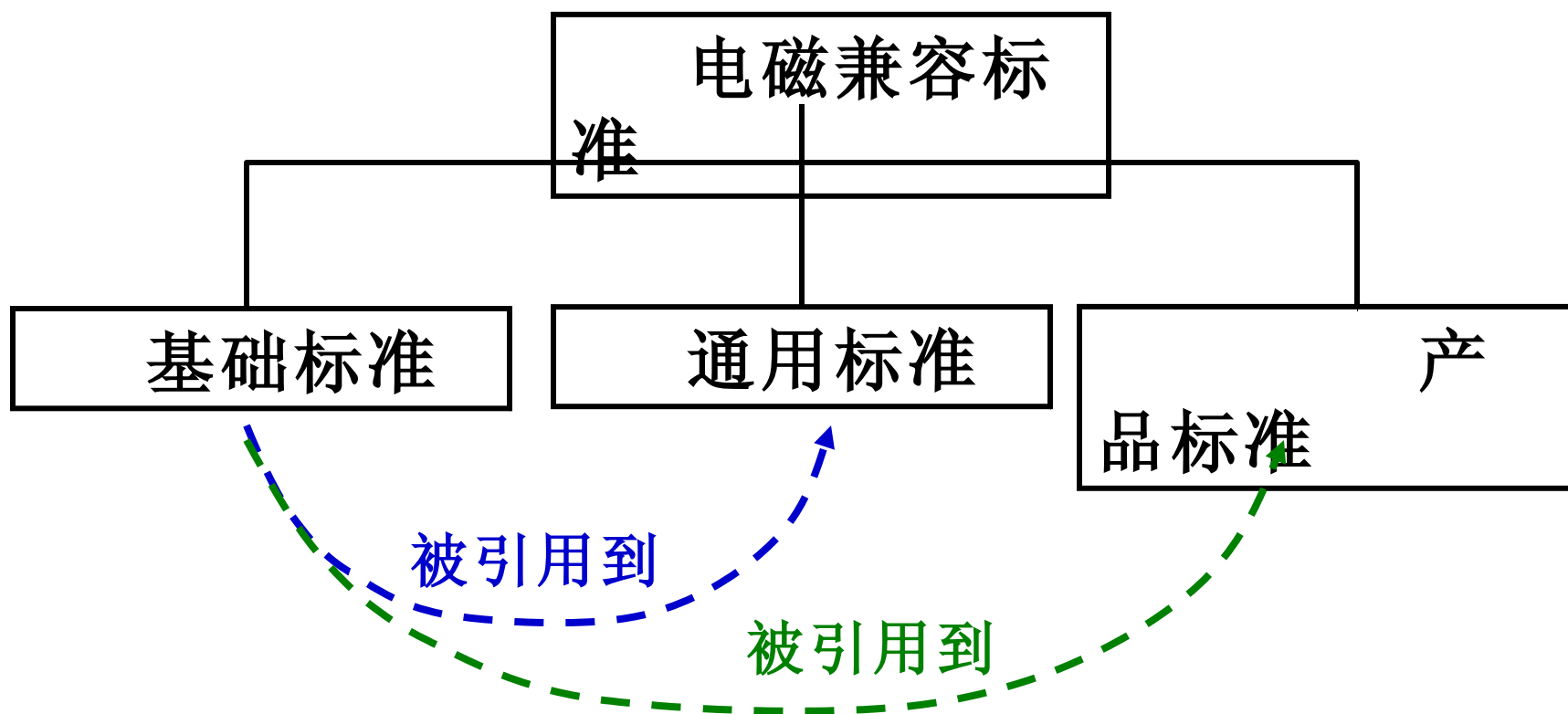


电磁兼容标准的内容





电磁兼容标准体系



标准编号的识别

国家或组织	制订单位	标准编号
IEC	CISPR	CISPR Pub. × ×
IEC	TC77	IEC × × × × ×
欧共体	CENELEC	EN × × × × ×
美国	FCC , DO D	FCC Part × ×, MIL-STD. × × ×
日本	VCCI	VCCI
杨继深 2002年4月 质量技术监察		GB × × × × × × × × × ×



典型电磁兼容试验项目

- 辐射发射（电场、磁场）
- 辐射抗扰度（电场、磁场）
- 传导发射（射频发射、电源谐波）
- 传导抗扰度（射频、电快速脉冲、浪涌）
- 静电放电（直接、感应）



电磁兼容试验场地

电磁发射试验

开阔场（民用标准）

屏蔽暗室（半无反射室）

敏感度或抗扰度试验
：

可在普通环境中，但是注意对周围设备的影响

辐射发射测试

旋转找最大面



EUT

0.8m

1 ~ 4m

屏蔽墙

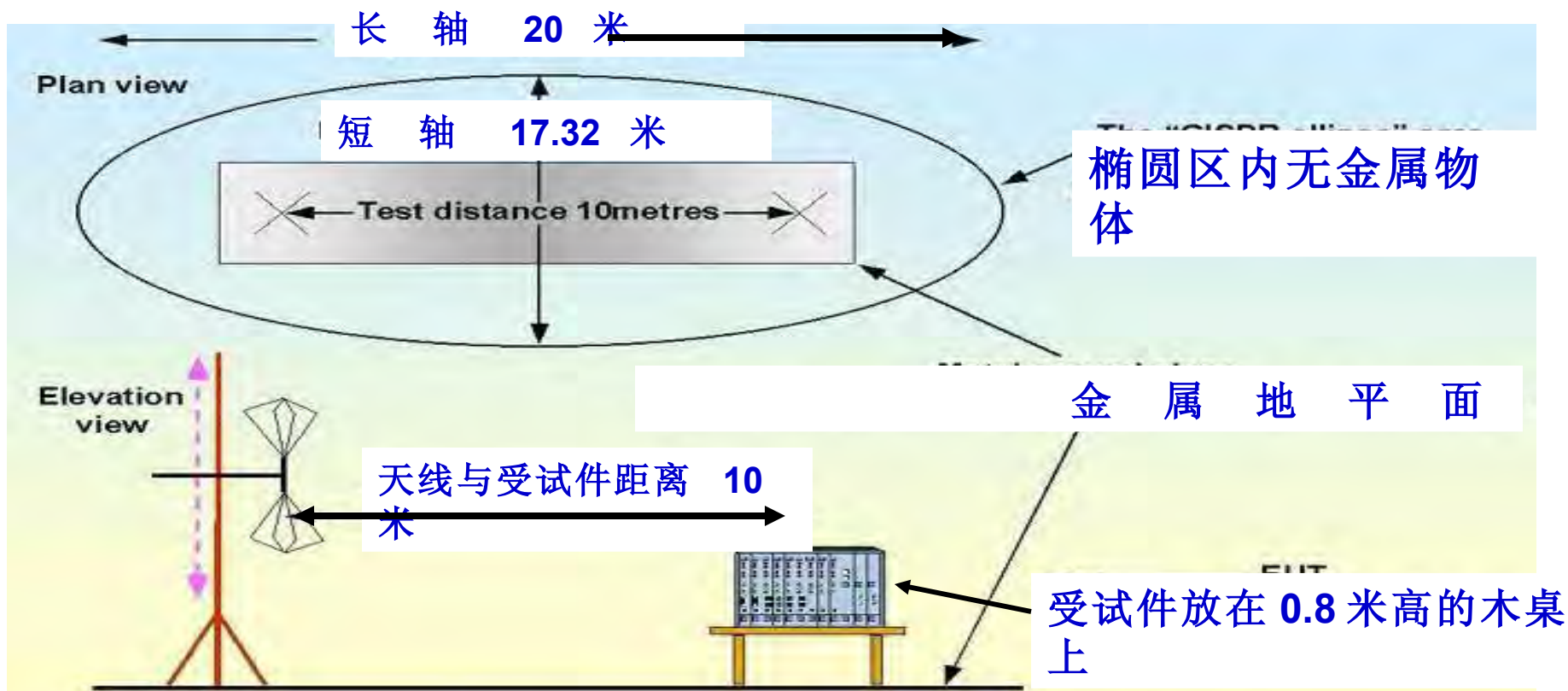
测试仪

1、3、10、30

杨继深

2002年4月

开阔场地要求

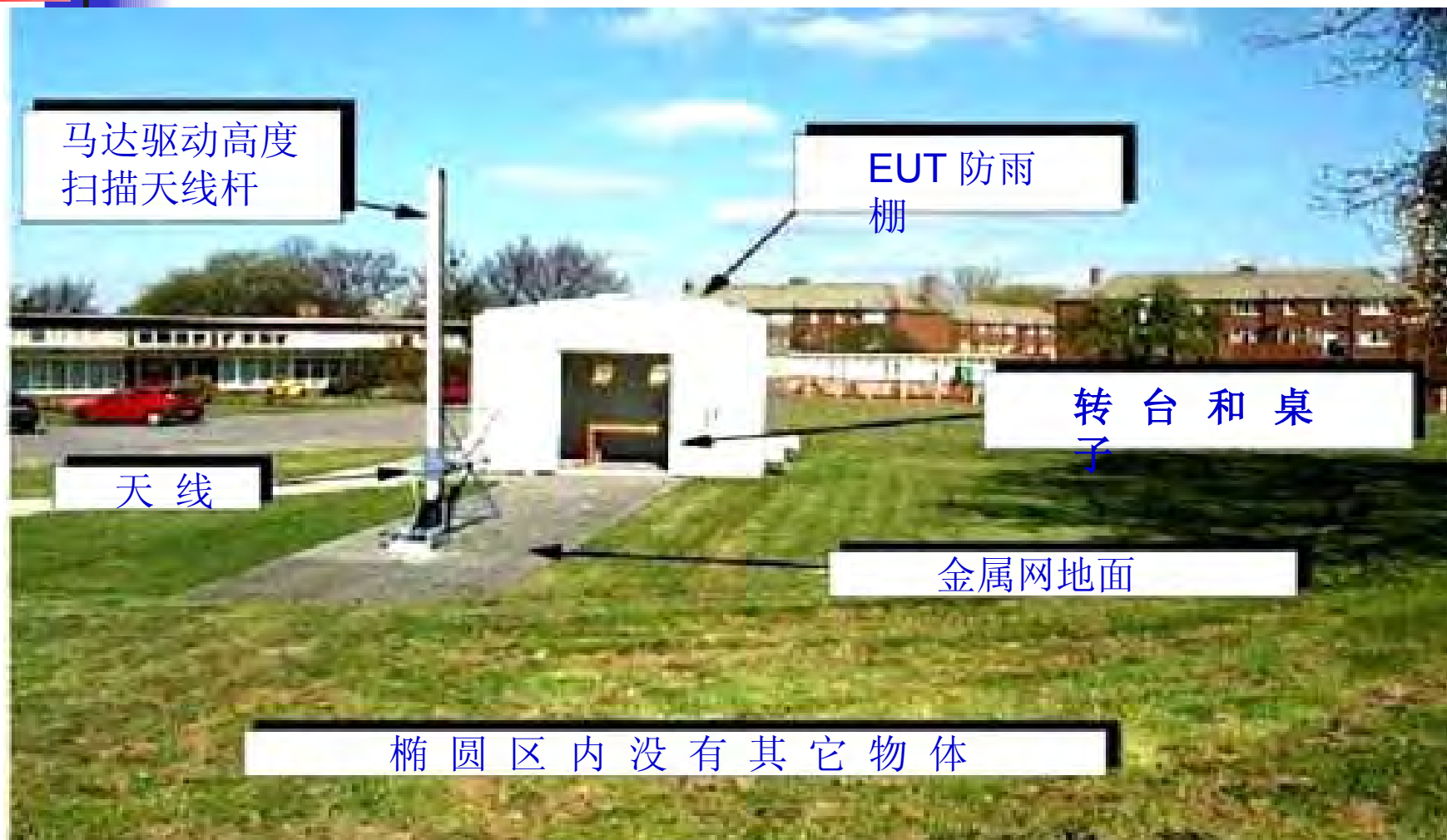


不同的天线在 1~4 米高度内变化，找出各种极化方向下的最强辐射值

开阔场实景



开阔场实景



电磁屏蔽室

电源滤波器

电缆接线板

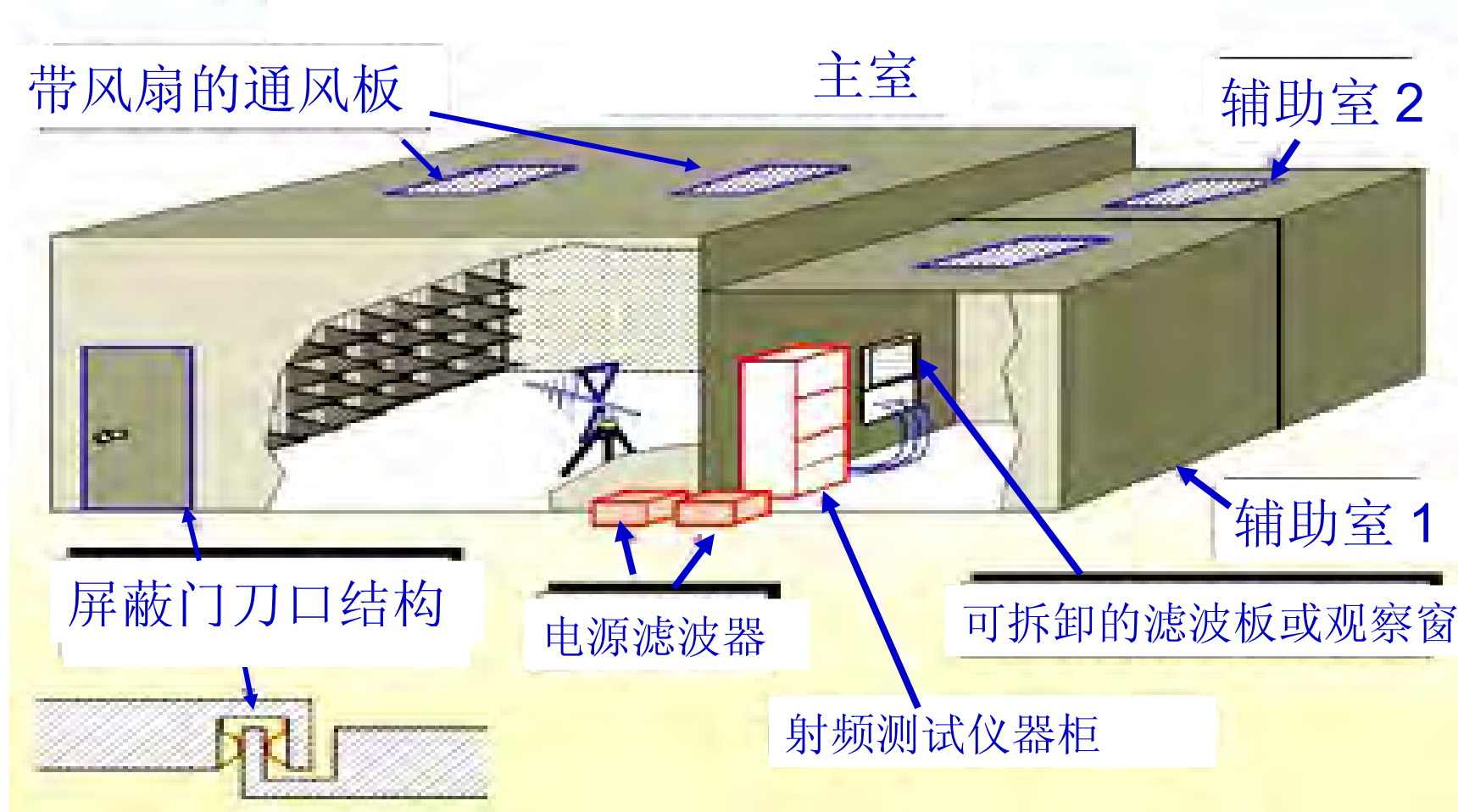
通风板

通风板

物继沐

2002年4月

电磁兼容试验室的结构



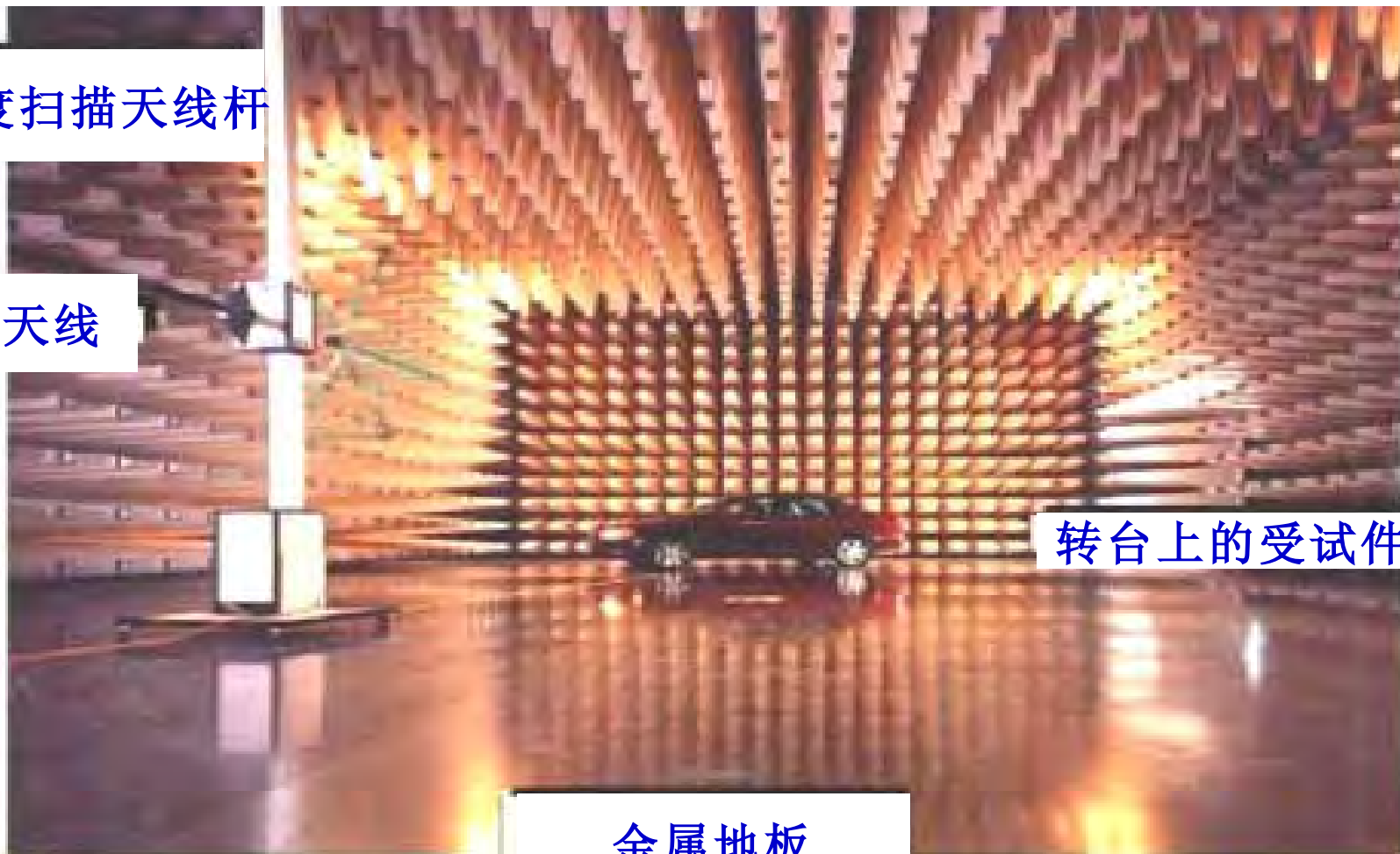
半无反射室实景

高度扫描天线杆

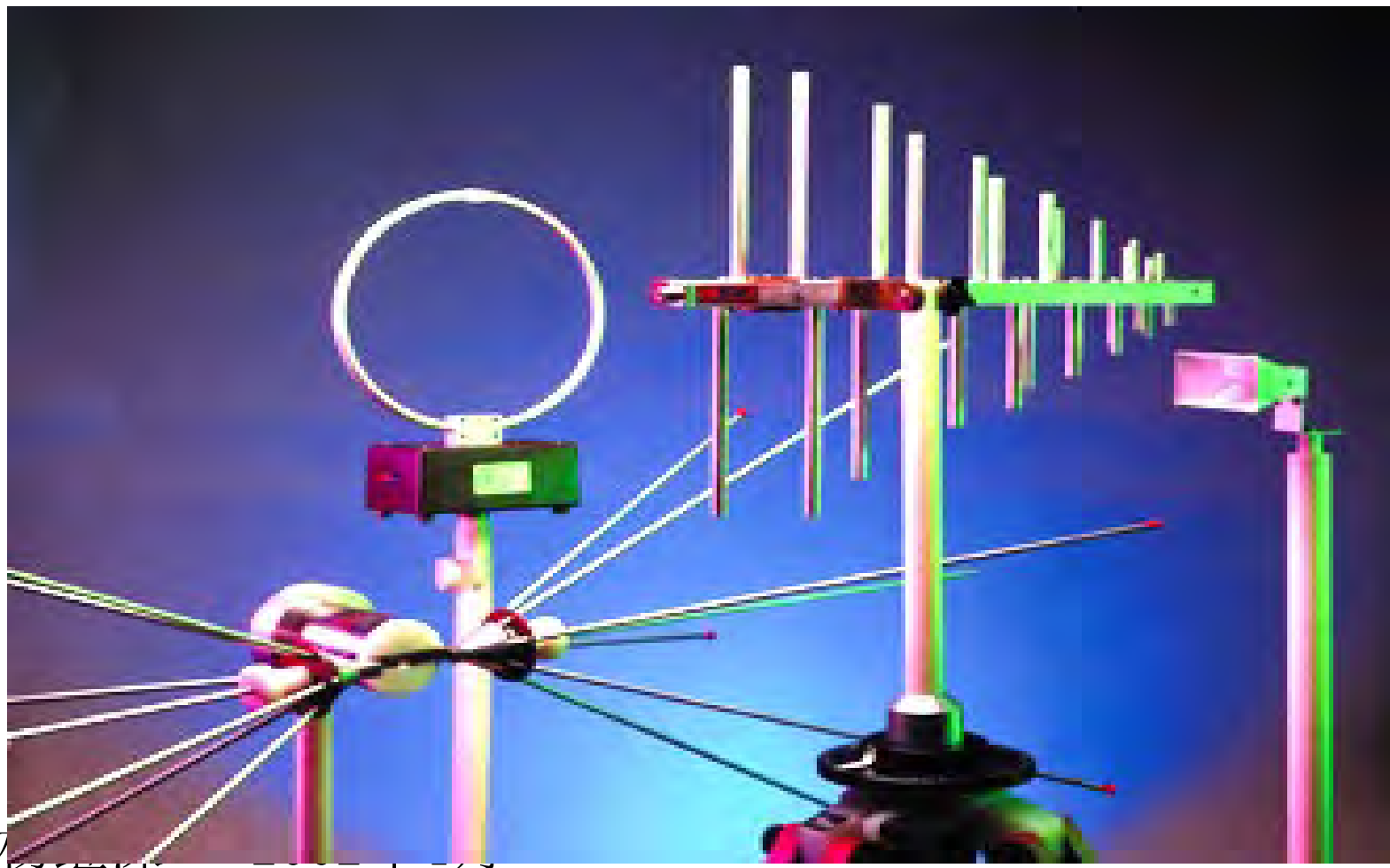
天线

转台上的受试件

金属地板



测量电磁干扰的天线





天线系数

进行电压与场强之间的转换：

$$AF = E / V$$

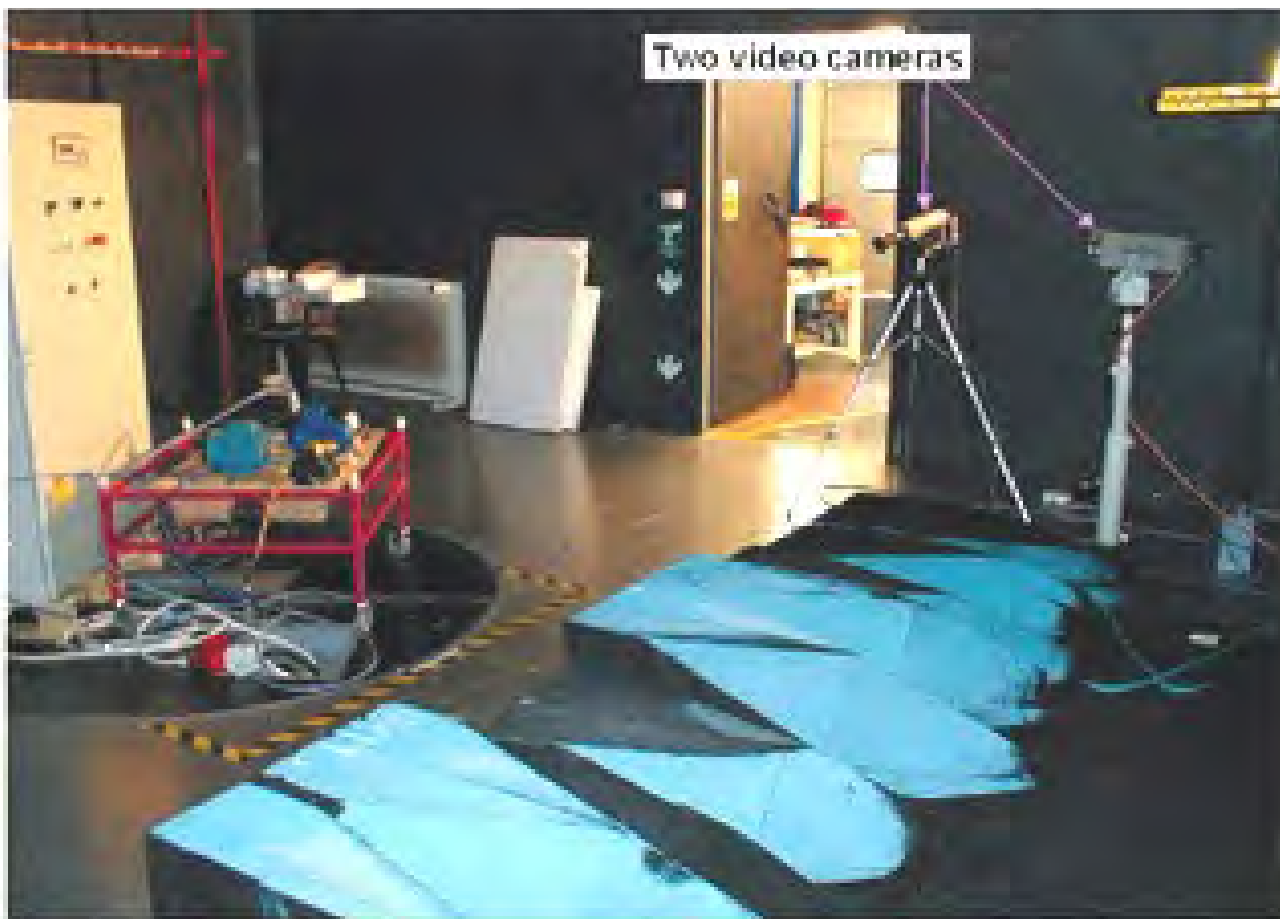
E = 电场强度，单位 **V/m**

V = 天线端口的电压

表征了天线的在电压与场强之间的转换效率。
不要与表征天线方向性的参数：天线增益相混

滑杨继深 2002年4月

抗扰度试验

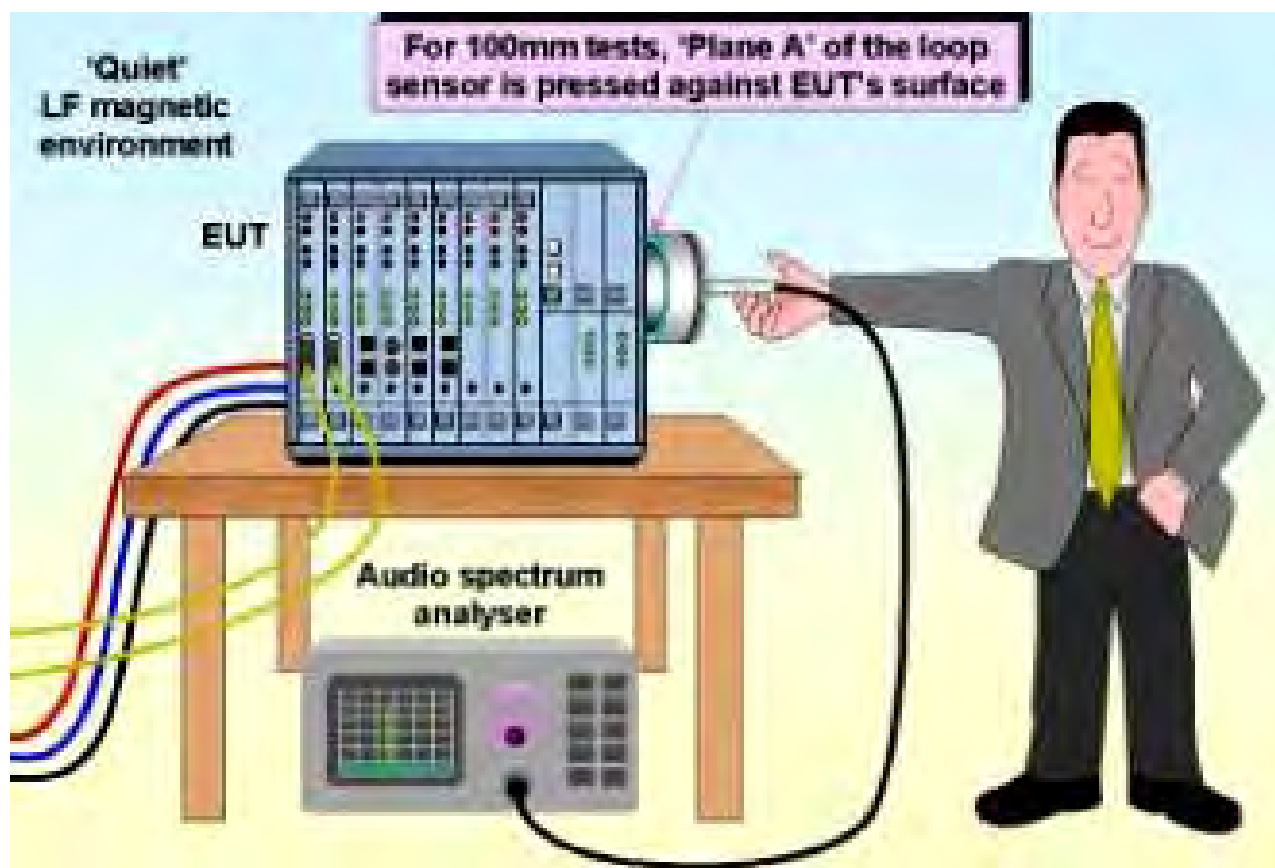


杨继深 2002年4月

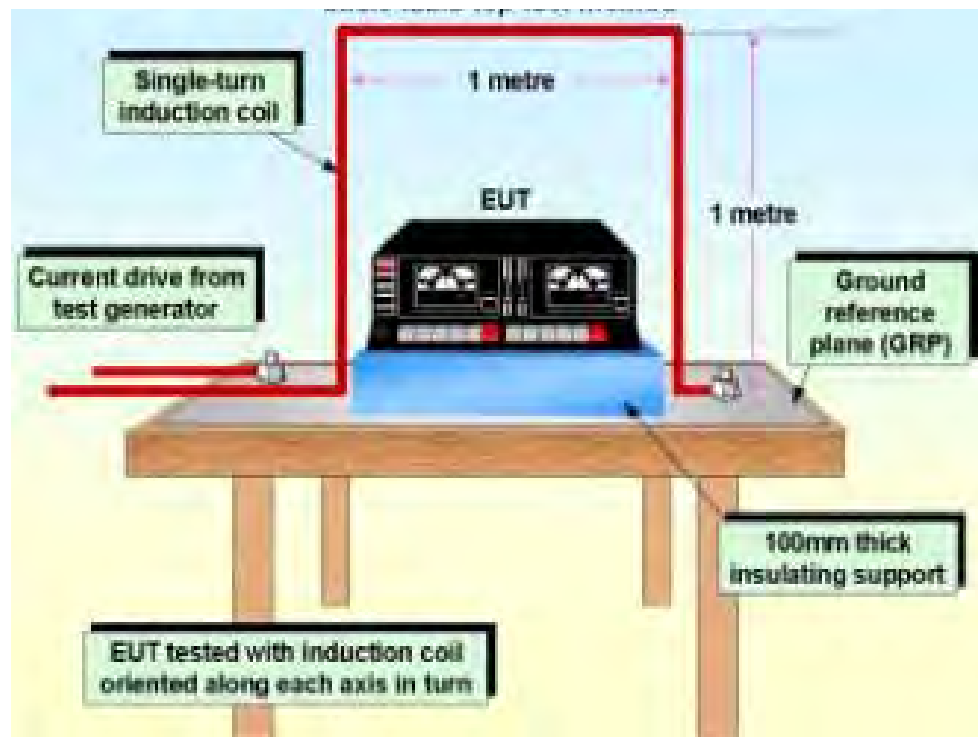
抗扰度的其它测试方法

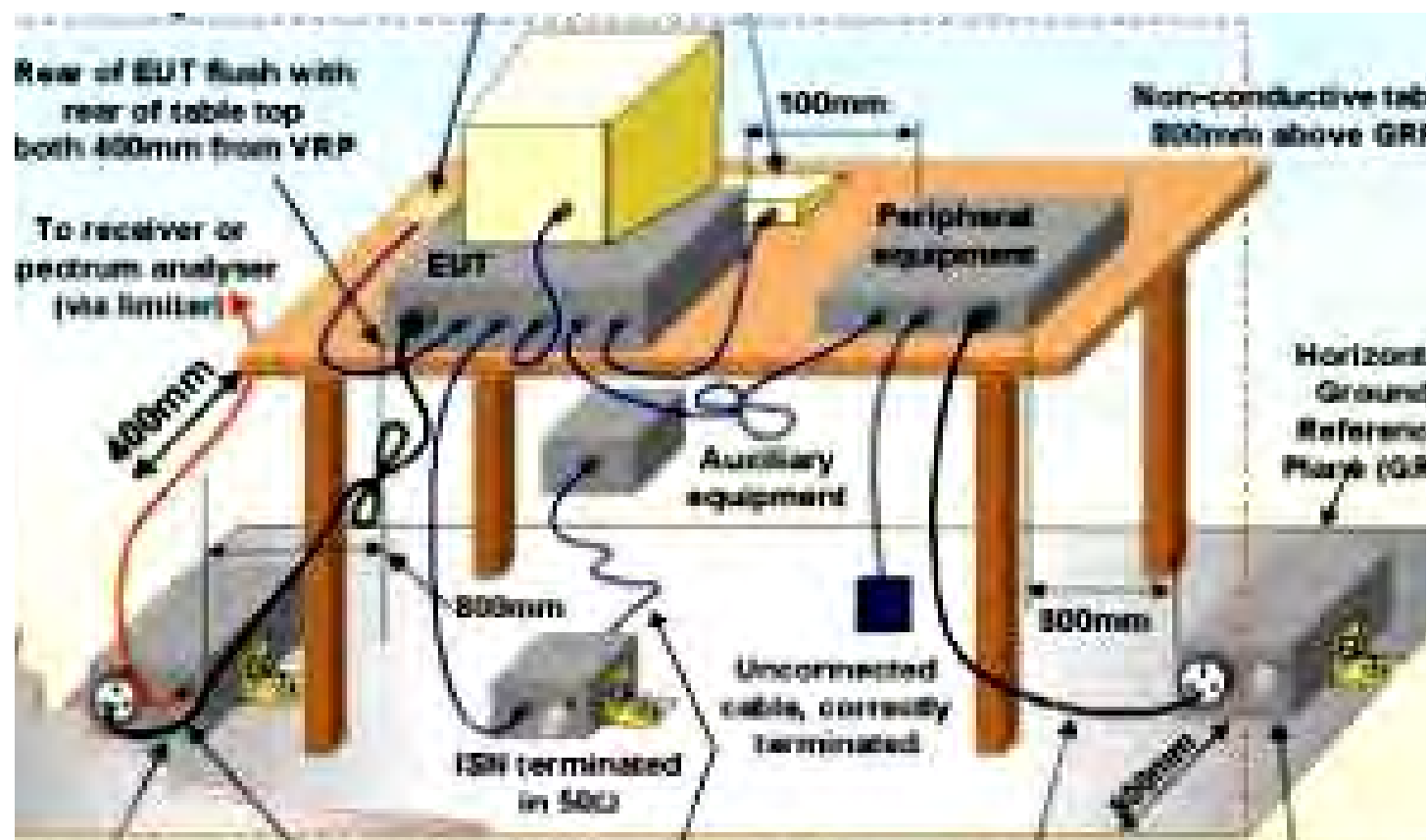


磁场发射测试



磁场敏感度试验



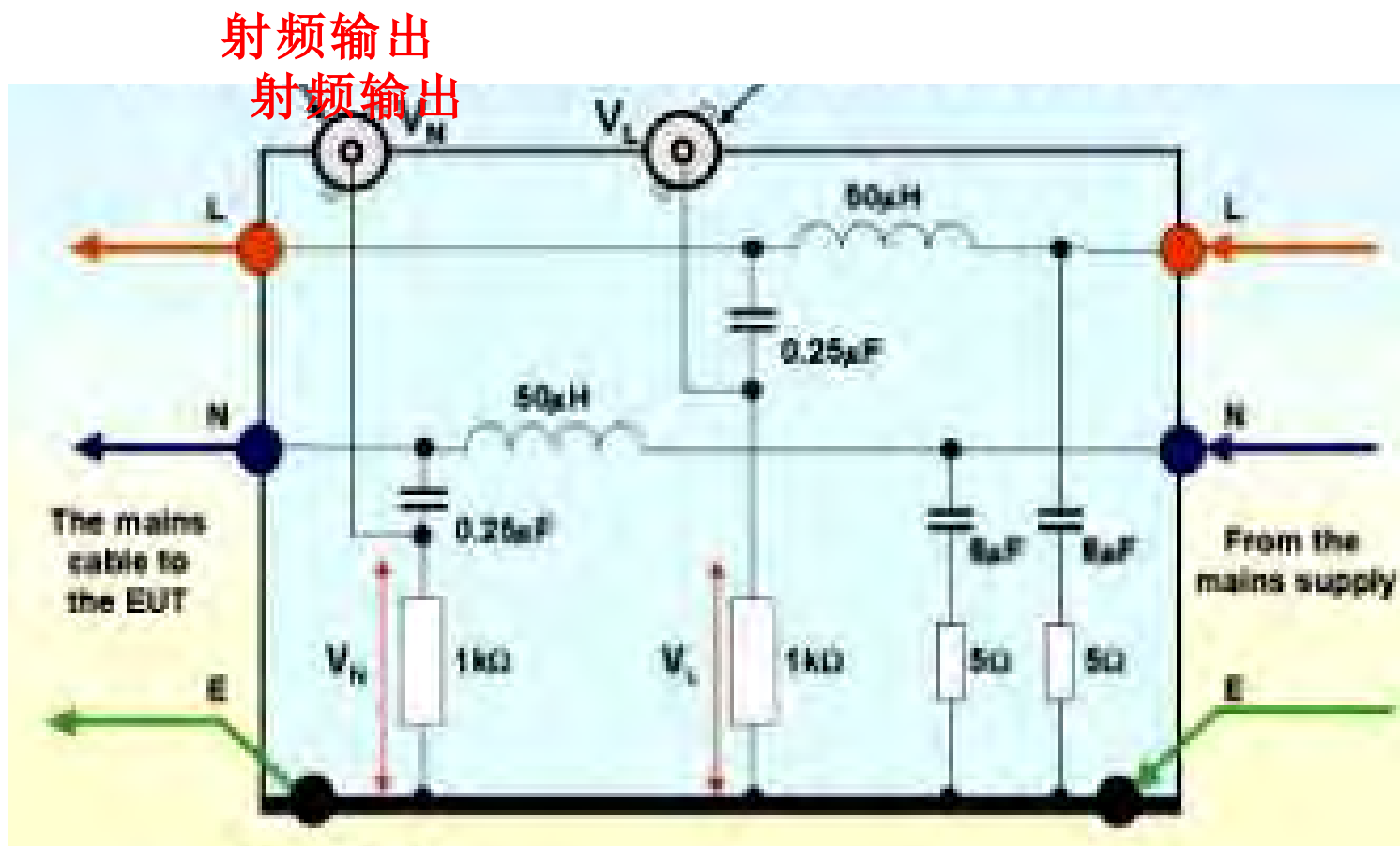


LISN 或 AMN



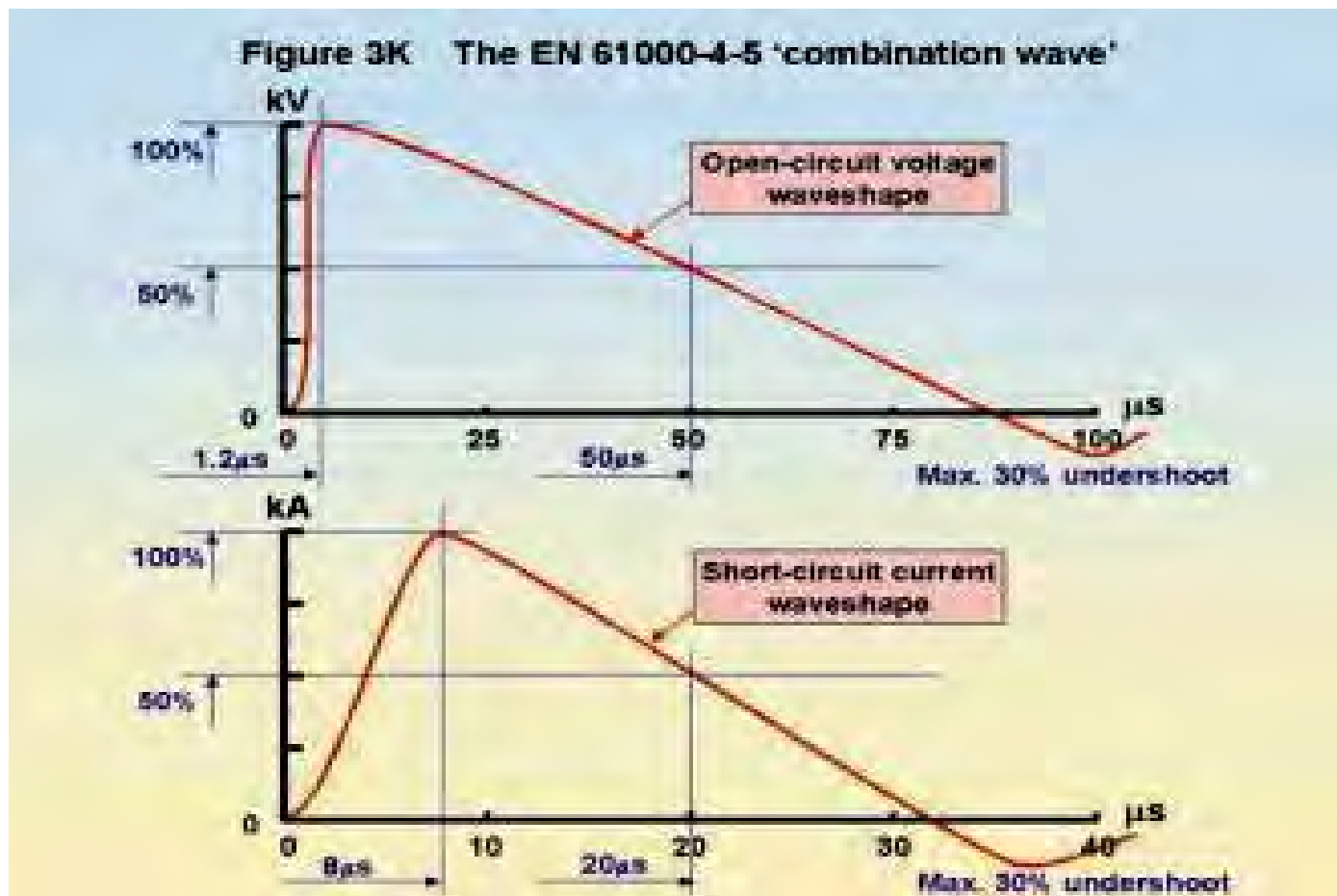
杨继深 2002年4月

LISN 的电路

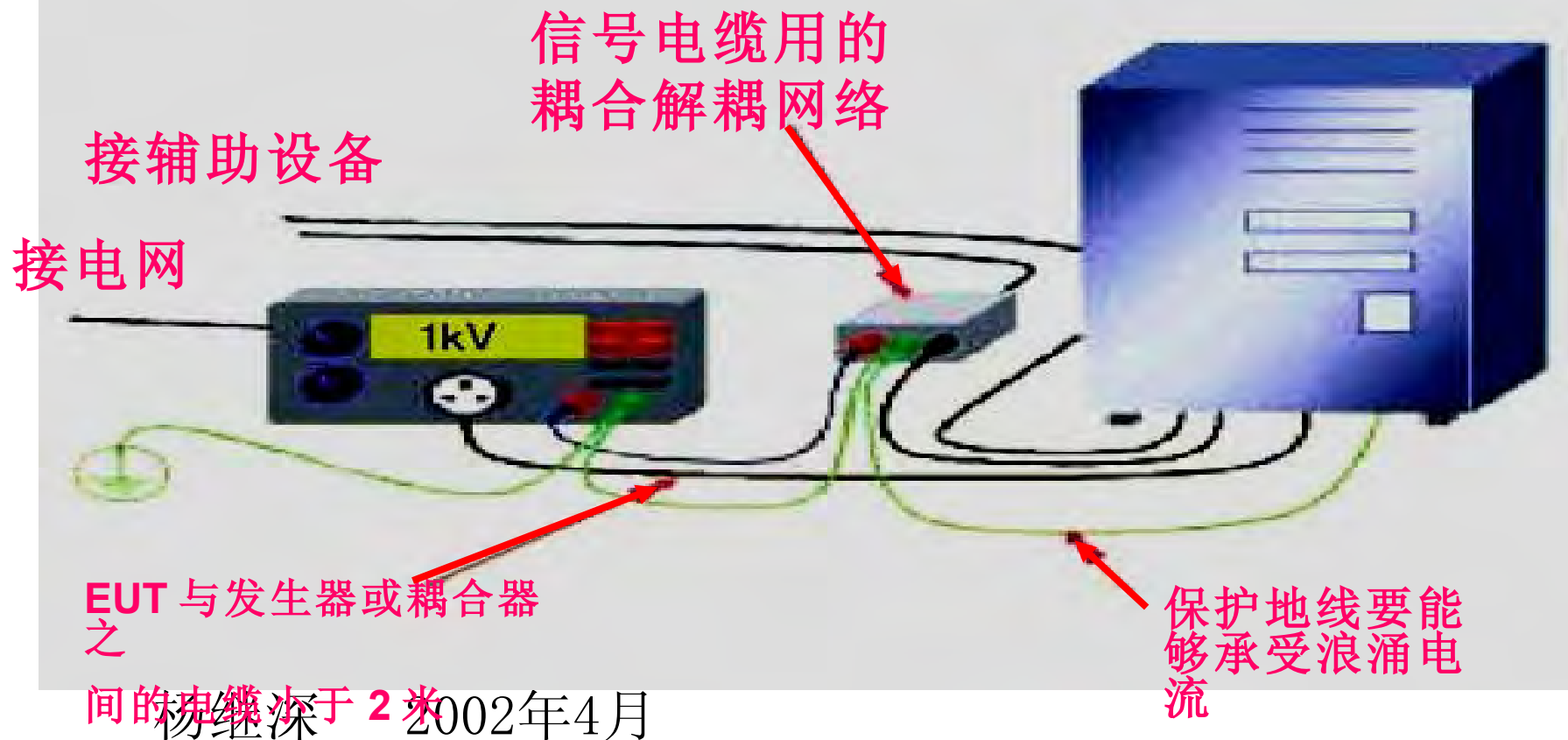


注意瞬态高压损坏仪器

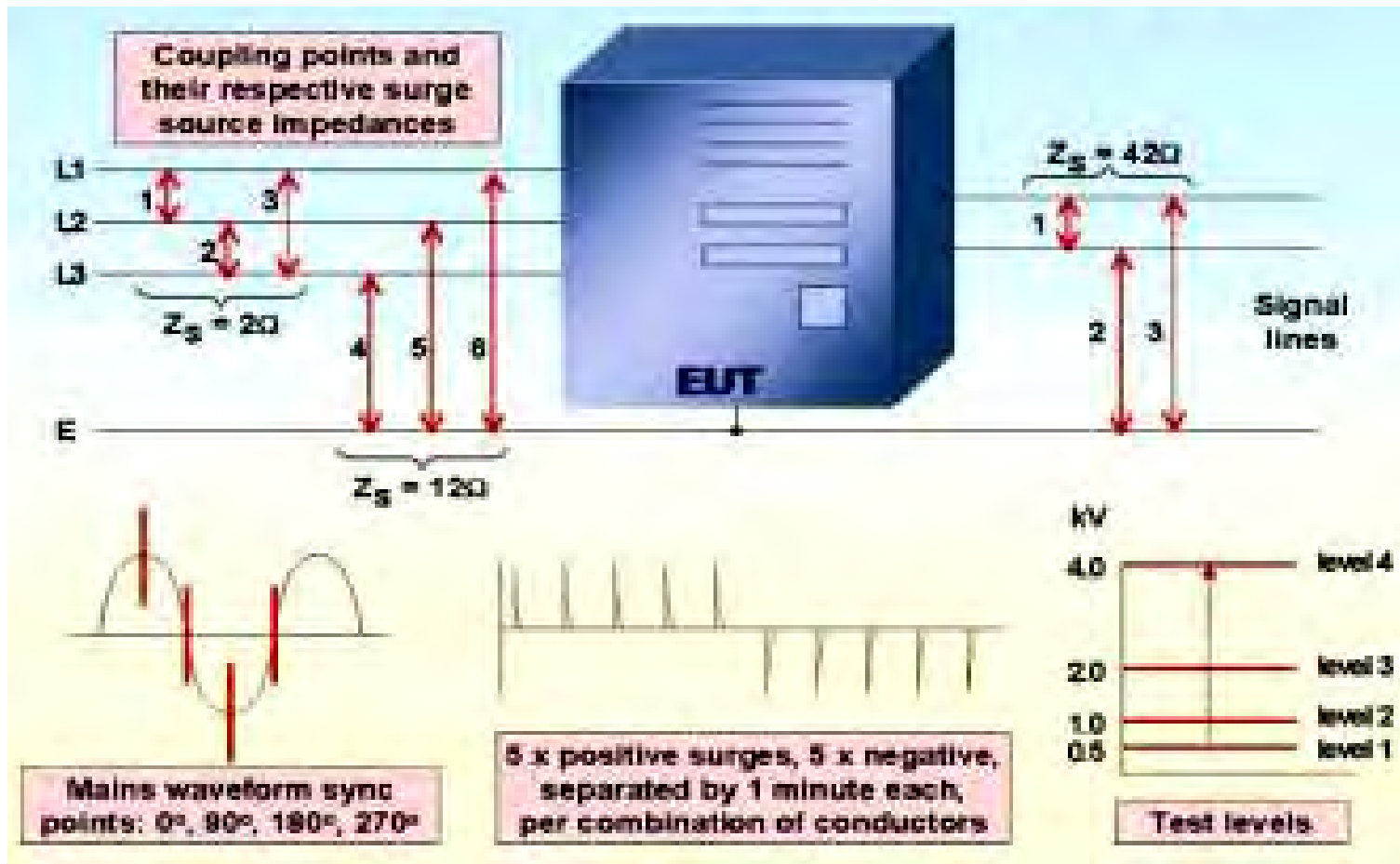
浪涌（模拟雷电干扰）试验波形



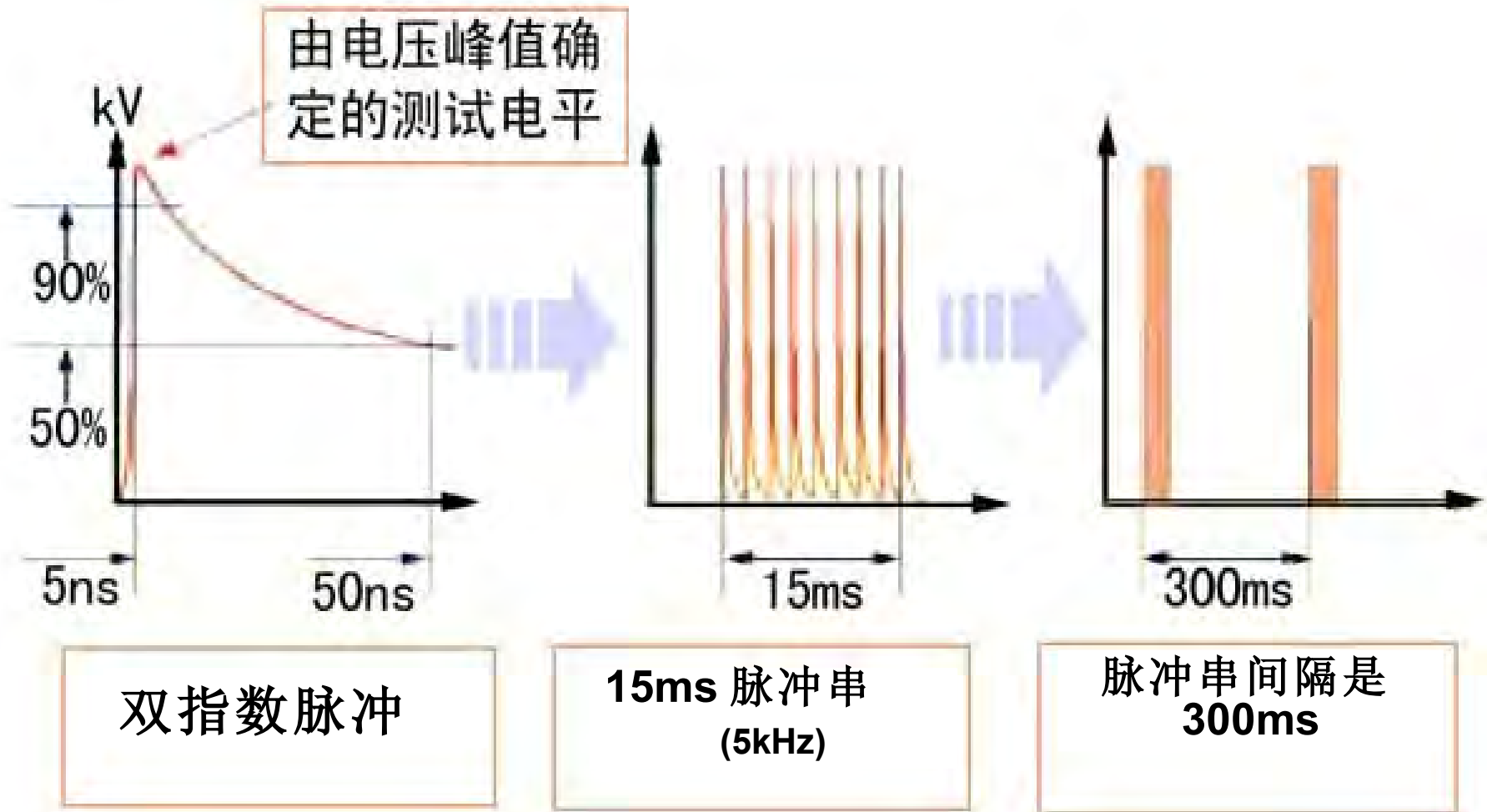
浪涌试验装置



浪涌试验内容

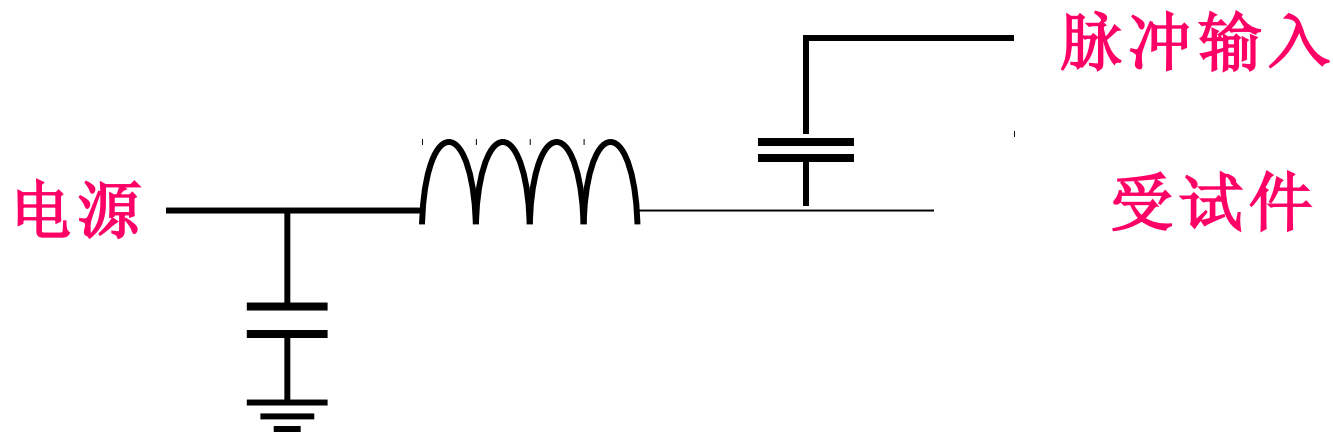


电快速脉冲（EFT 或 FTB）试验 波形



干扰注入方式

电源线注
入



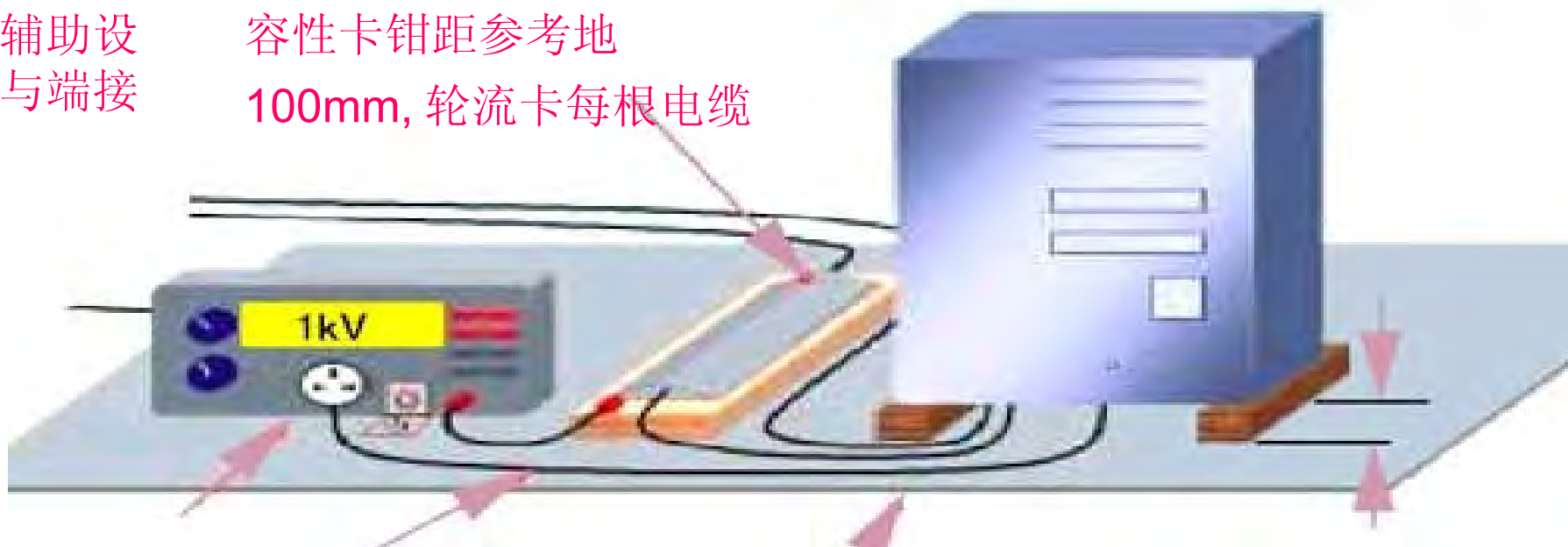
信号线注
入

耦合钳，或在电缆上绕金属箔，长
度 1 米，产生大约 100pf 电容

电快脉冲试验

连辅助设备与端接

容性卡钳距参考地
100mm, 轮流卡每根电缆



脉冲群
信号源

EUT 与发生器
或卡钳之间的电
源线或信号线长
度小于 1m

参考地平面的每个边
要超出 EUT 100mm
并与大地相连

EUT 与参考地平面
之间的距离大于
100mm

杨继深 2002年4月

静电放电

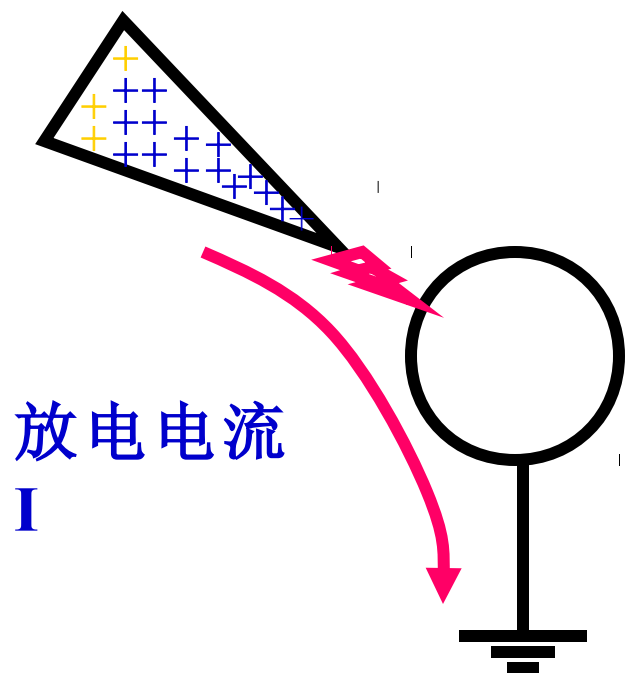
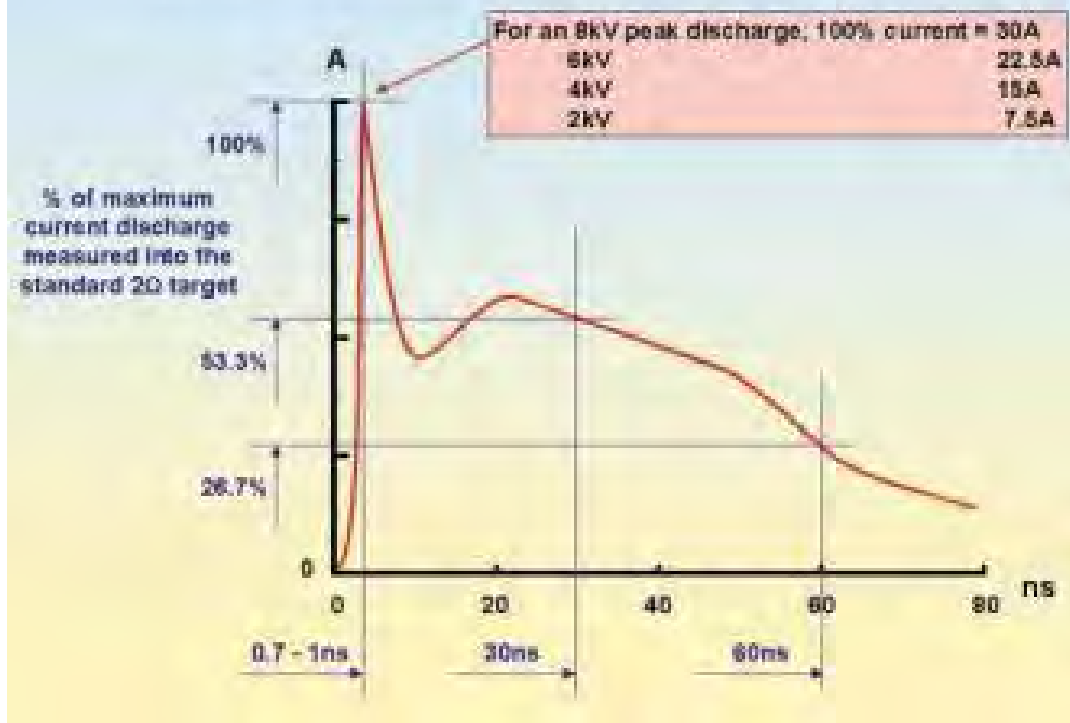
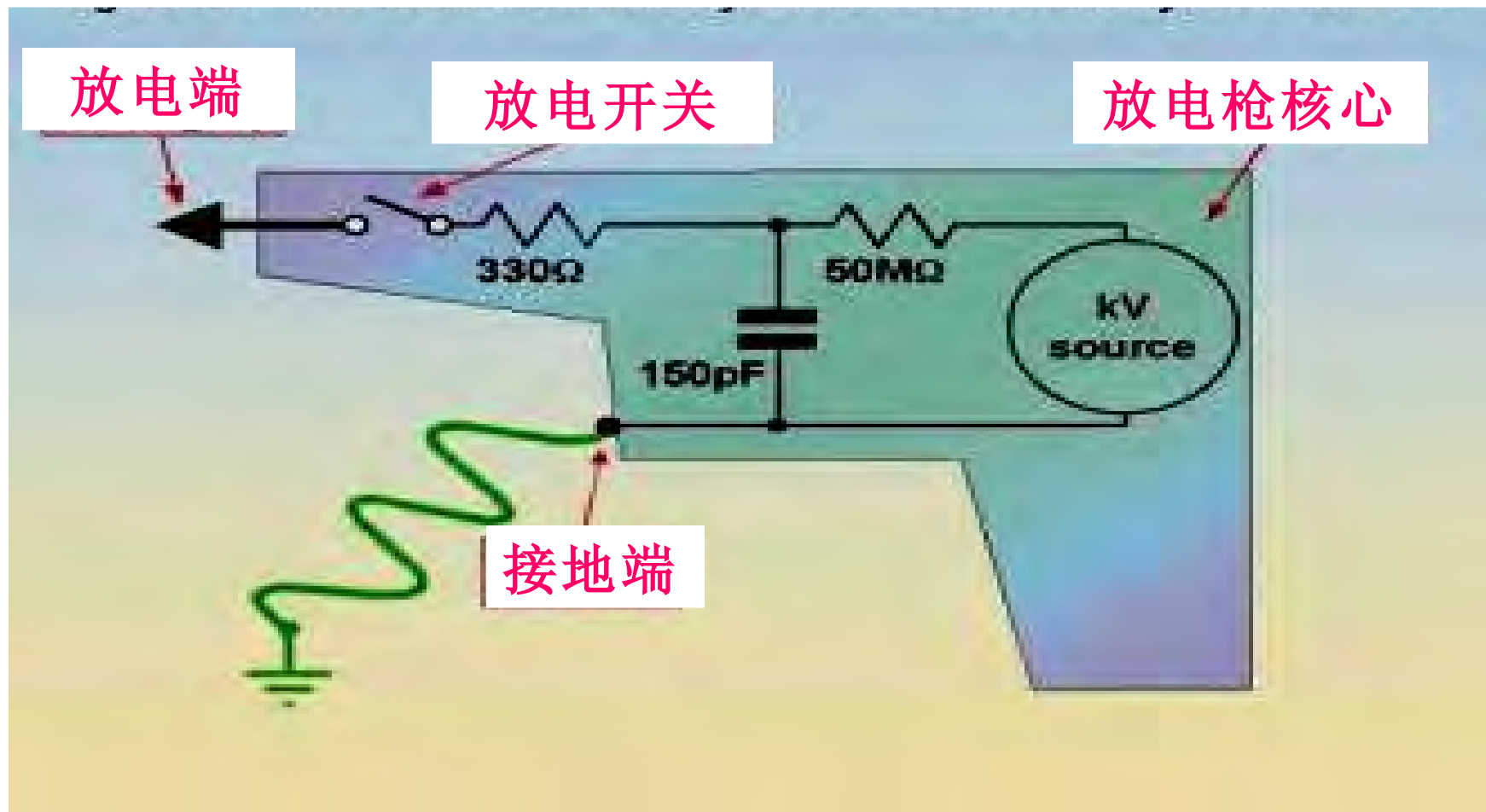


Figure 3P The standard EN 61000-4-2 current waveshape

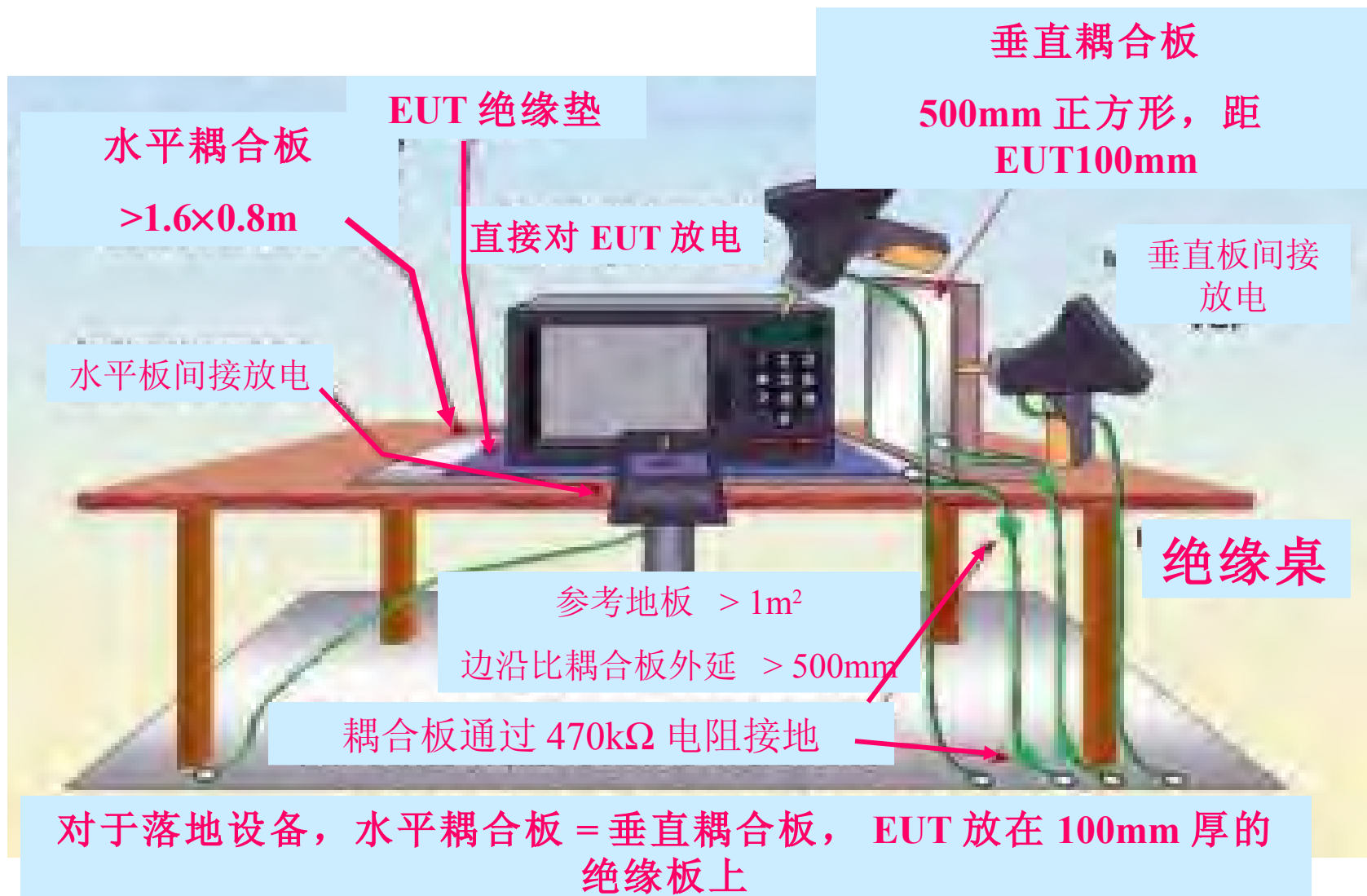


静电枪电原理路

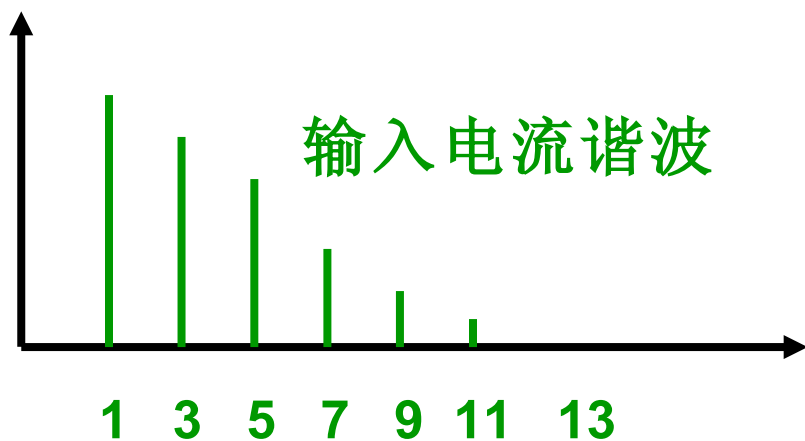
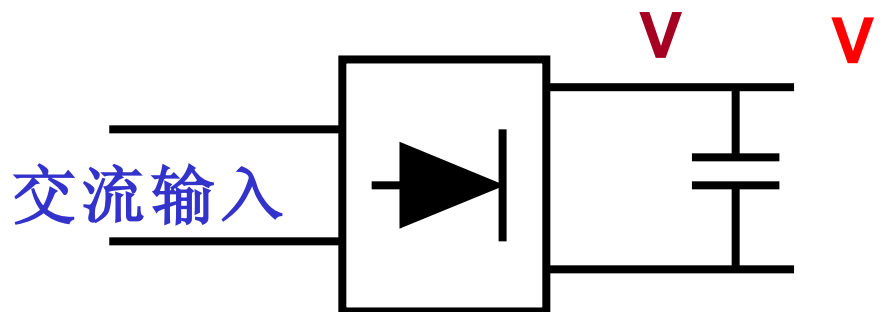
人体模型电路



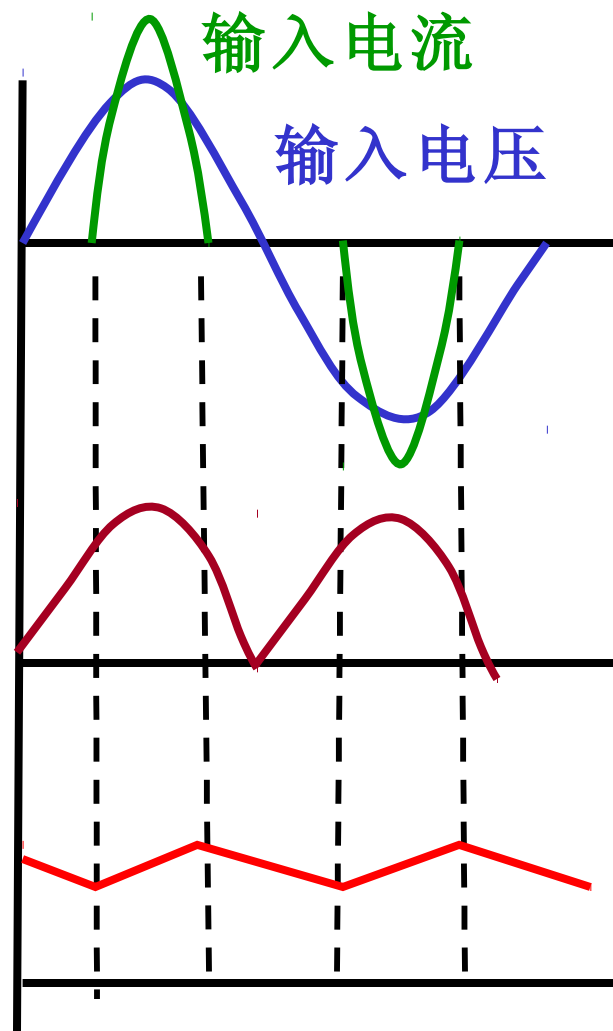
静电放电试验装置



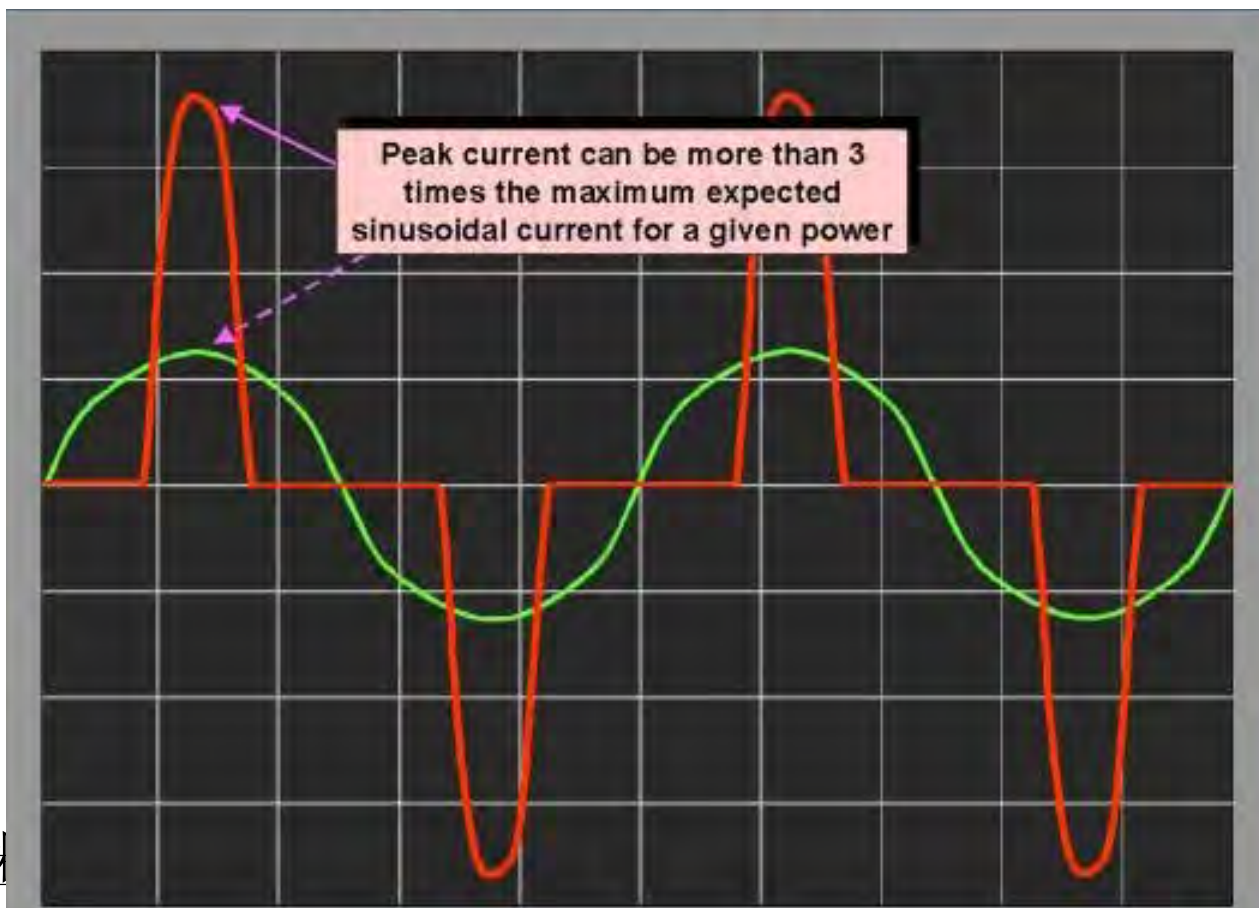
电源谐波



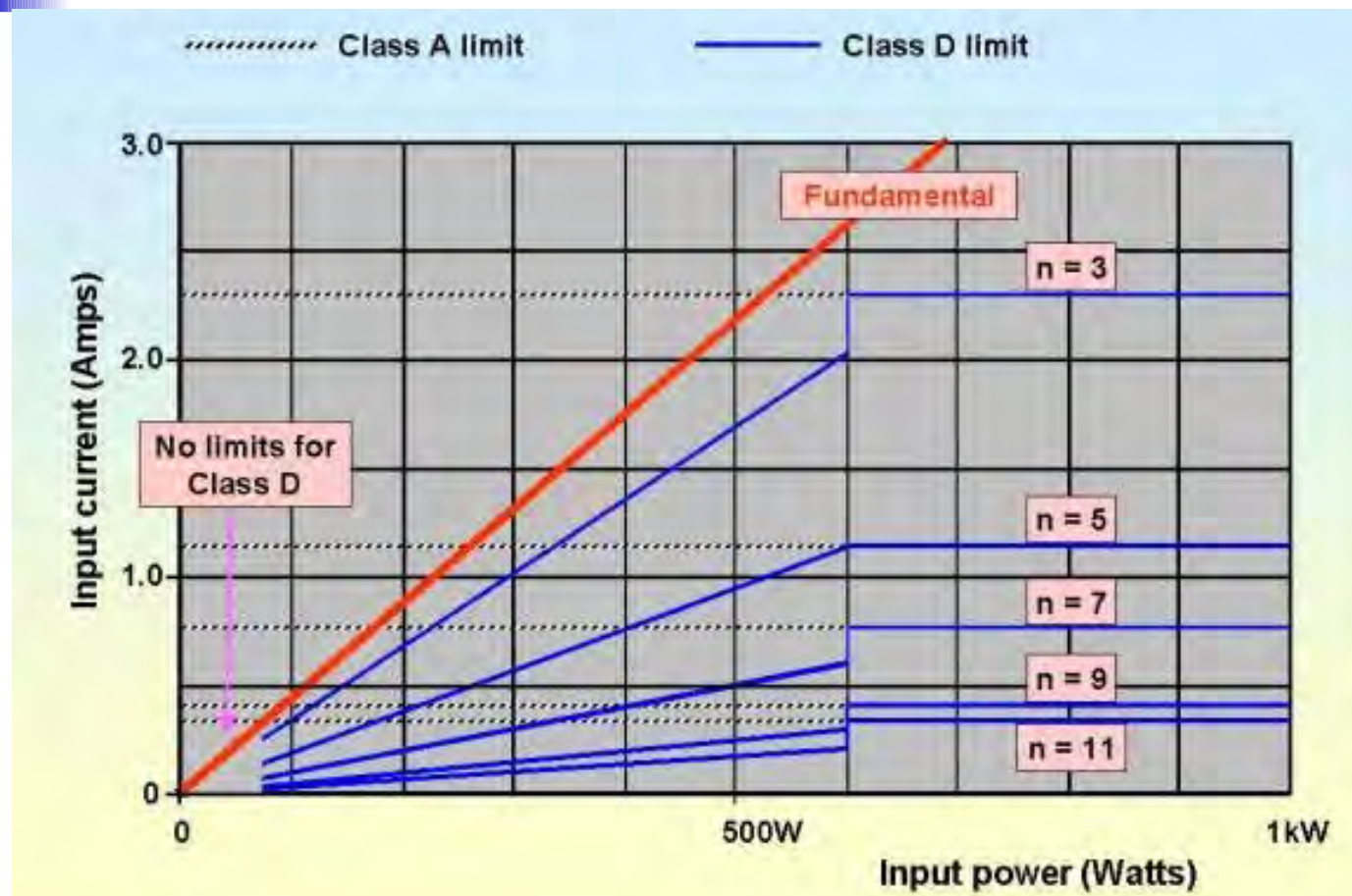
杨继深 2002年4月



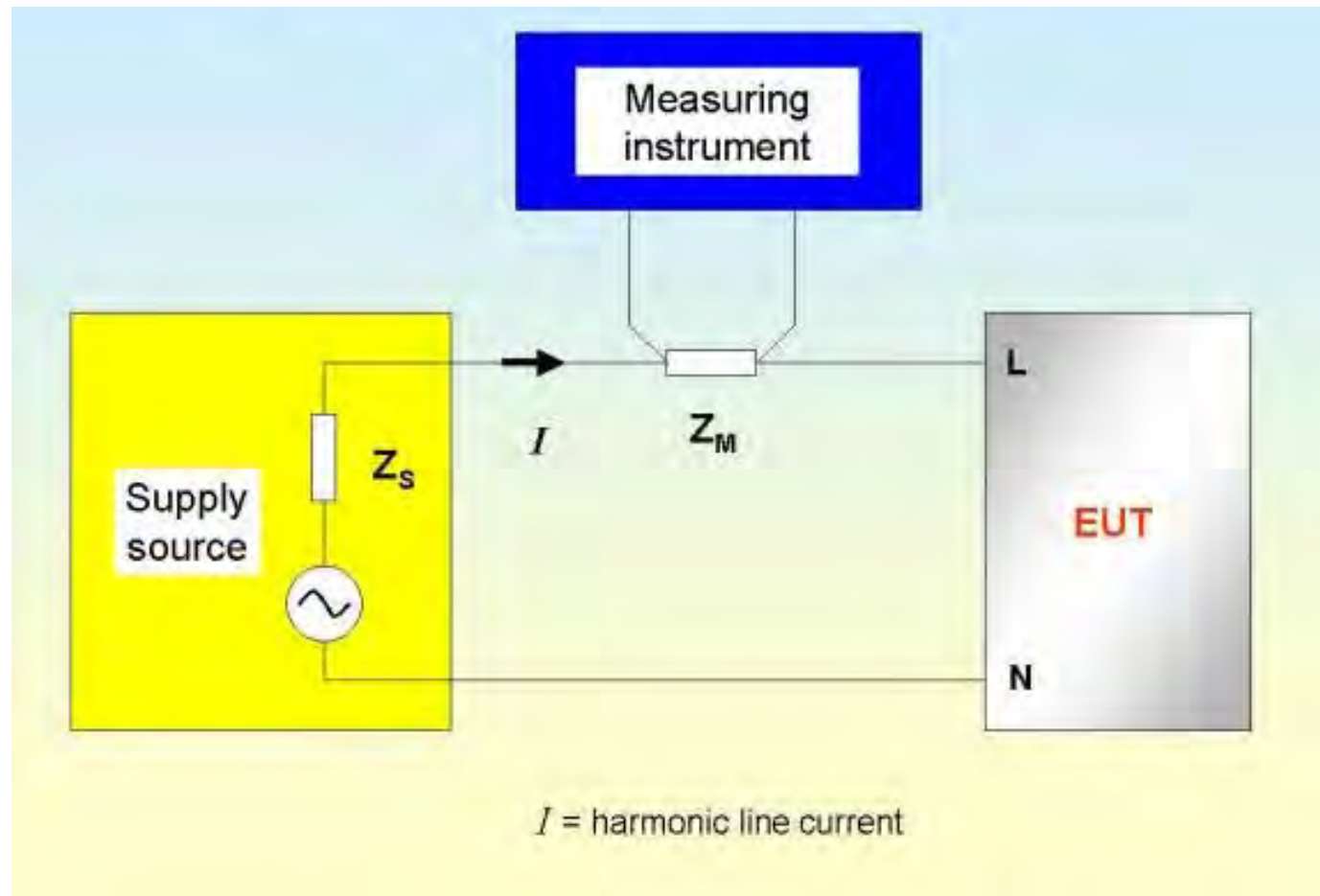
非线性电流



谐波限制



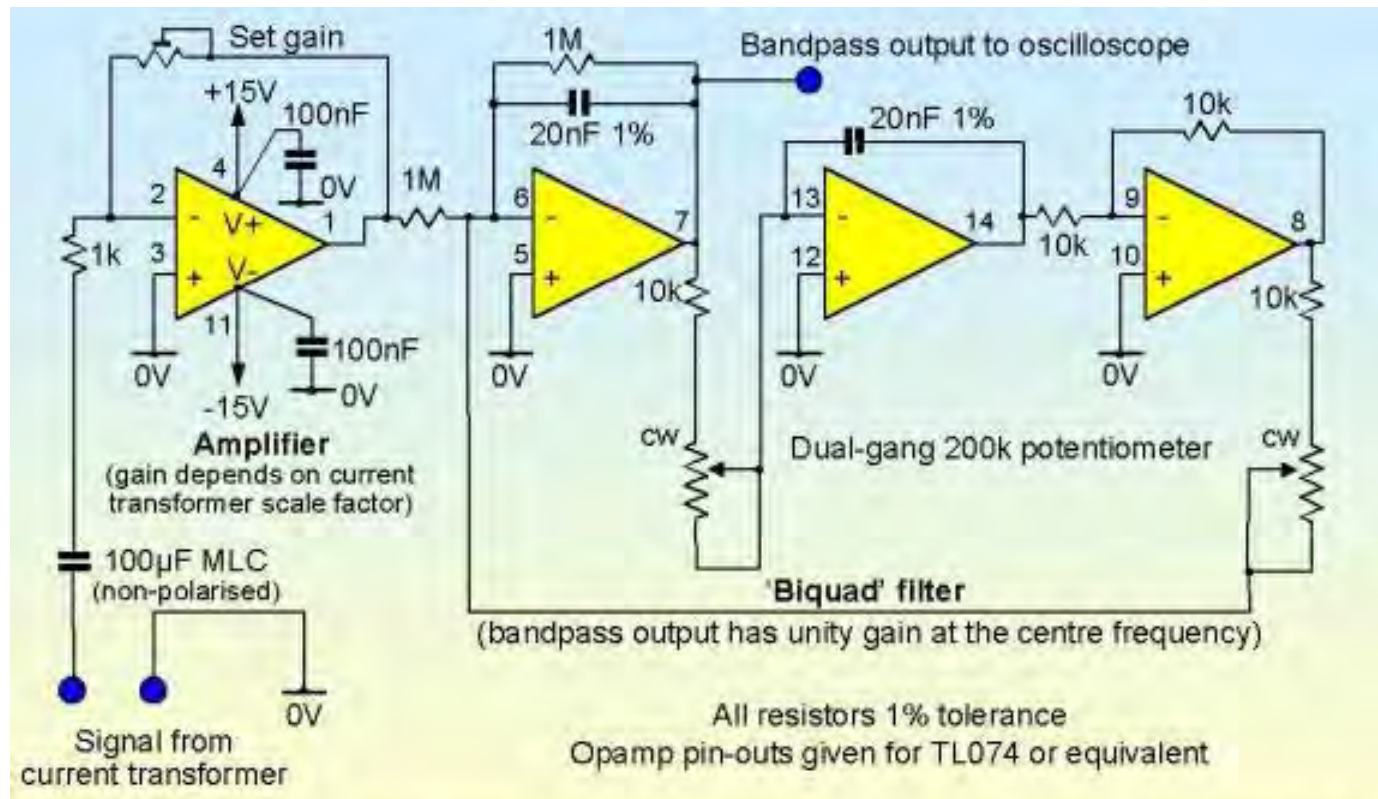
电源谐波测量



谐波测量仪



自制谐波测量仪





分贝 (dB) 的概念

分贝的定义：分贝数 = $\frac{P_2}{P_1}$
 $10\lg$

P_1 、 P_2 是两个功率数值，对于电流或电压，定义如下：

电压增益的分贝数 = $\frac{V_2}{V_1}$

$20\lg$

电流增益的分贝数 = $\frac{I_2}{I_1}$

$20\lg$



用分贝表示的物理量

电压：用 1V 、 1mV 、 $1\mu\text{V}$ 为参考（例如： $1\mu\text{V} = 0\text{dB}\mu\text{V}$ ）

则单位为： dBV 、 dBmV 、 $\text{dB}\mu\text{V}$ 等，
电流：用 1A 、 1mA 、 $1\mu\text{A}$ 为参考，则：
 dBA 、 dBmA 、 $\text{dB}\mu\text{A}$

场强：用 1V/m 、 $1\mu\text{V/m}$ 为参考，则：
 dBV/m 、 $\text{dB}\mu\text{V/m}$ 等，

功率：用 1W 、 1mW 为参考，则： dBW 、 dBm 等，

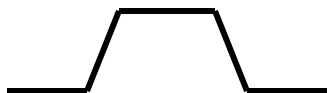
频域分析

时域波形

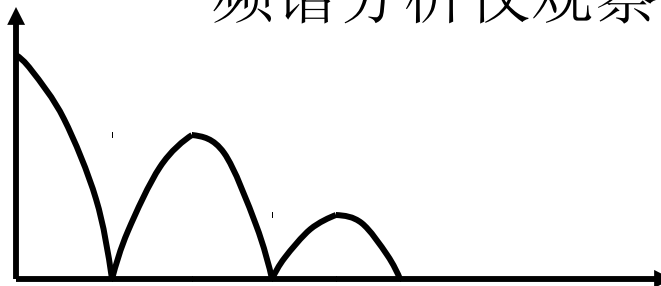
付立叶级数 (周期)
付立叶变换 (非周期)

频谱分量

示波器观察

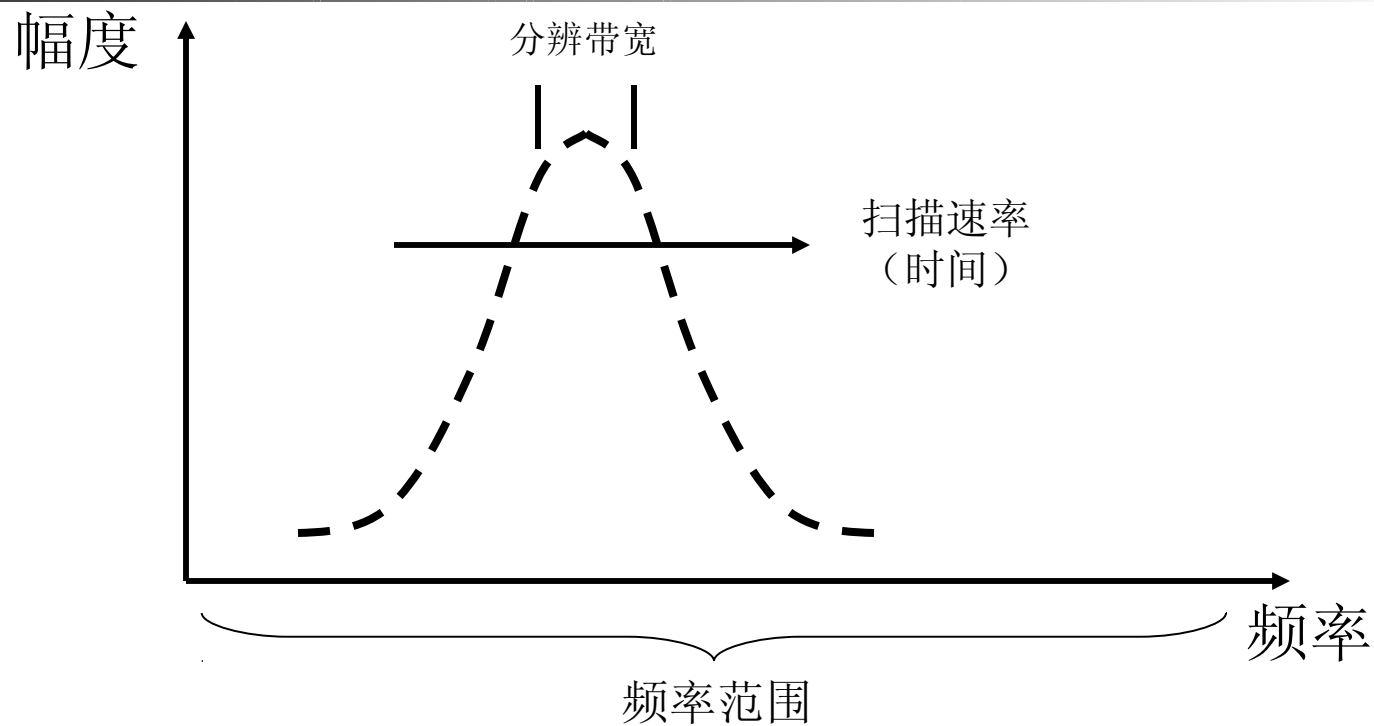


频谱分析仪观察

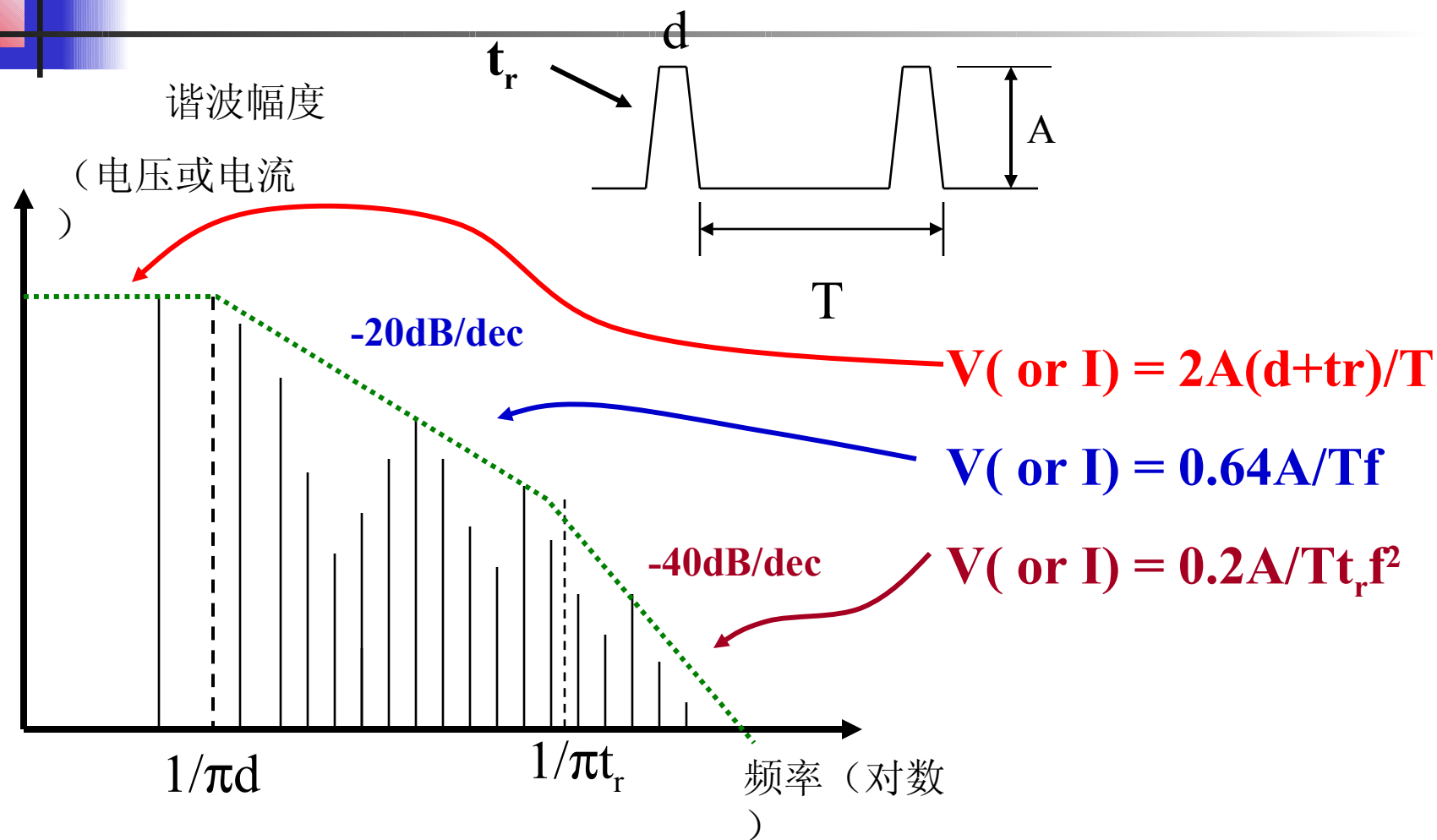


EMC 分析更多是在频域中进行，并且不考虑相位因素。

频谱分析仪



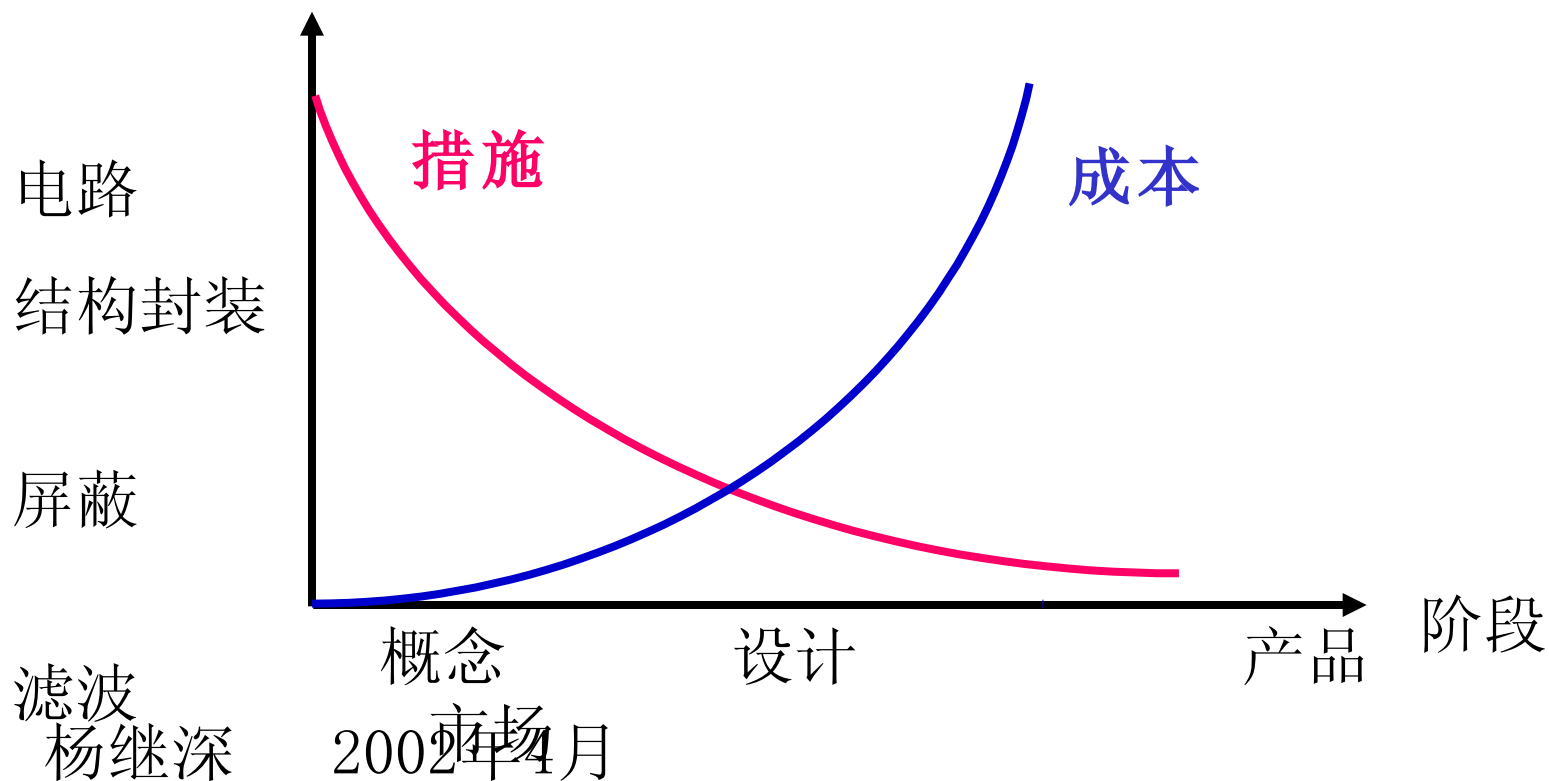
脉冲信号的频谱



电磁兼容的工程方法

1 测试修改法 系统级电磁措施

2

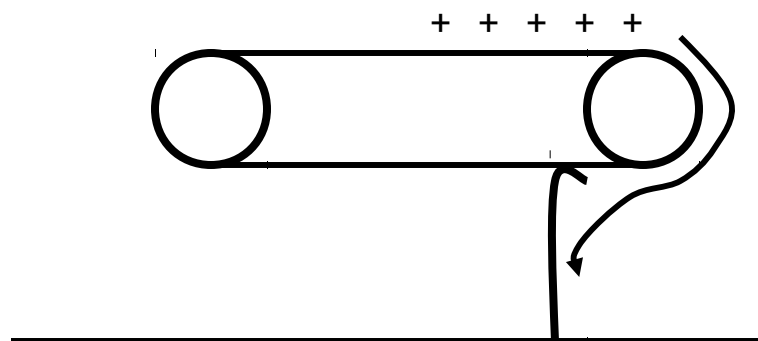
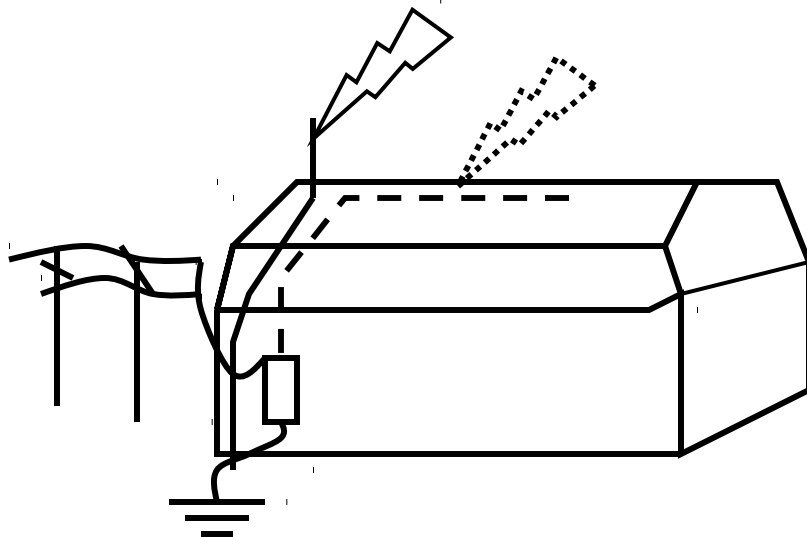
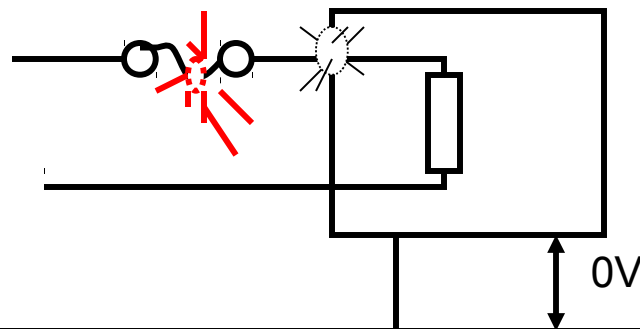
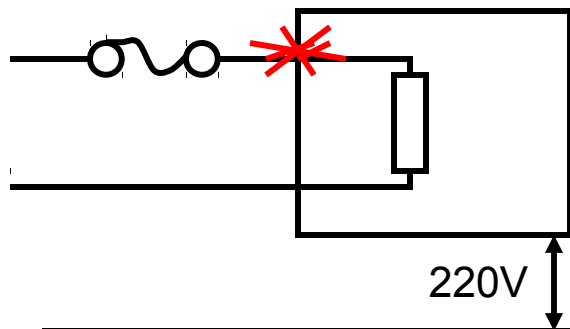




第二章 地线干扰与接地技术

- 为什么要地线
- 地环路问题与解决方法
- 公共阻抗耦合问题与解决方法
- 各种接地方法
- 电缆屏蔽层的接地

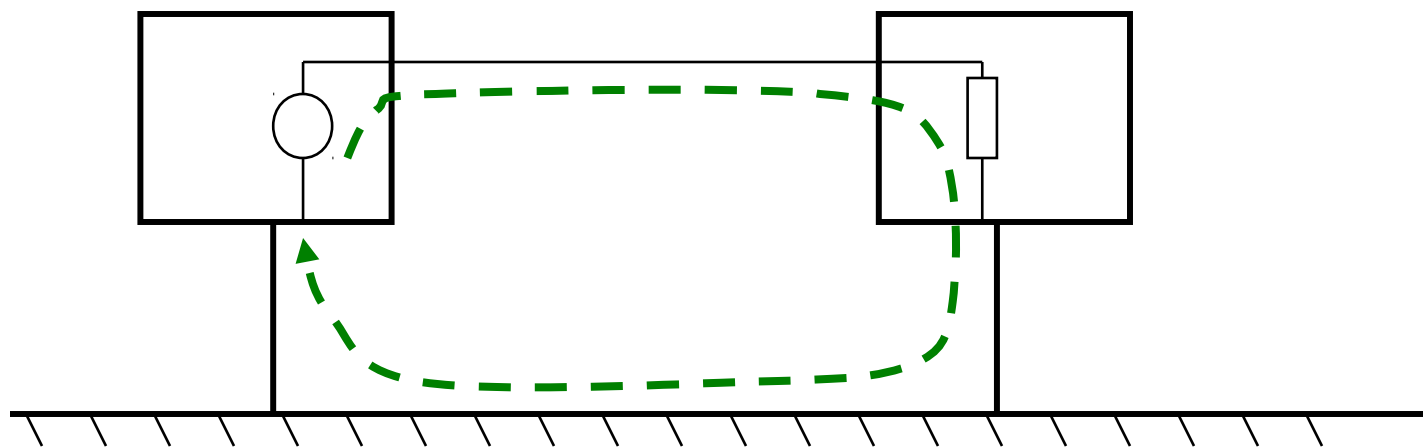
安全地





信号地

定义：信号电流流回信号源的低阻抗路径





地线引发干扰问题的原因

$$V = IR$$

地线电压

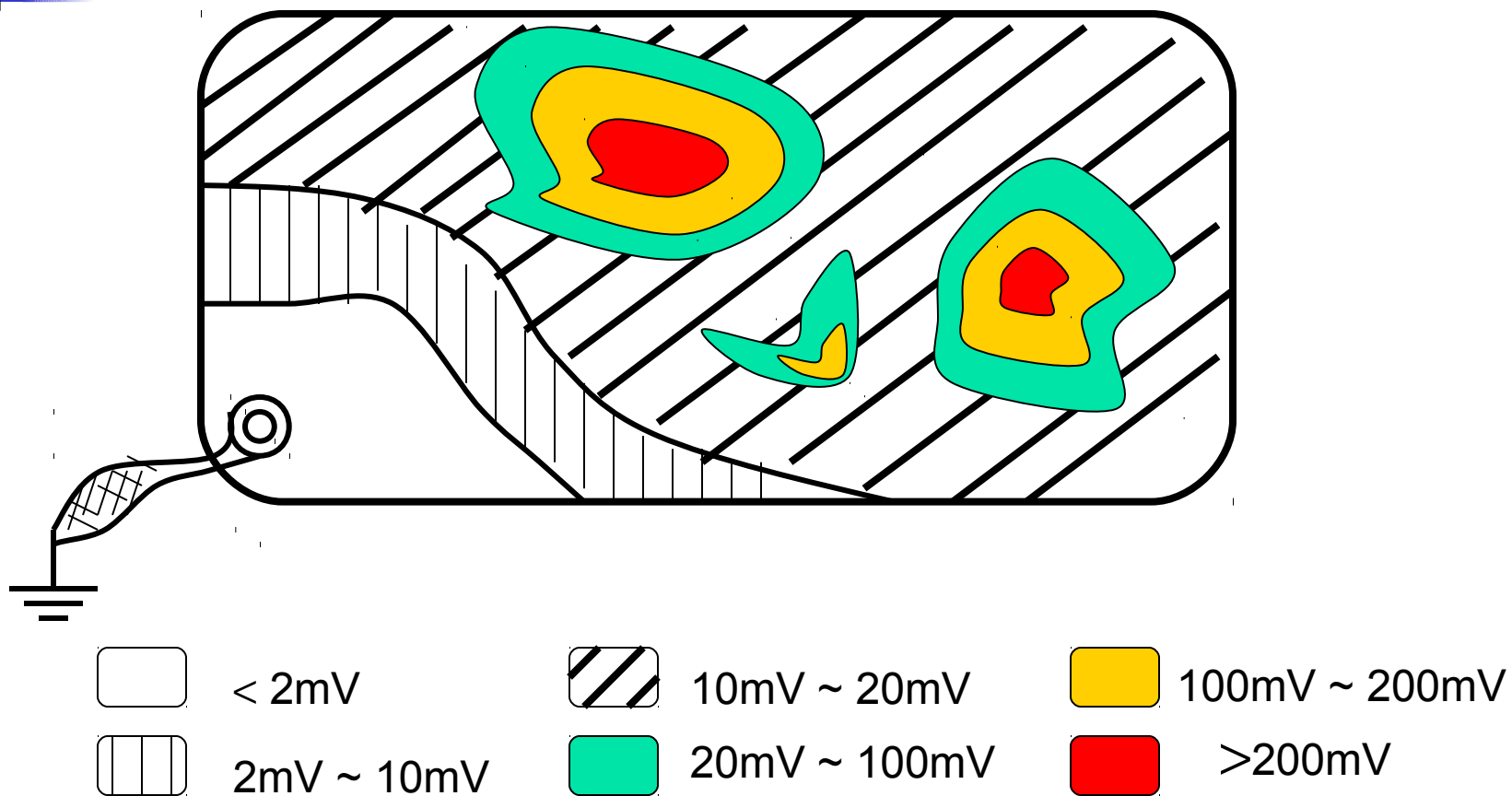
地线是等
电位的假
设不成立

电流走最
小阻抗路
径

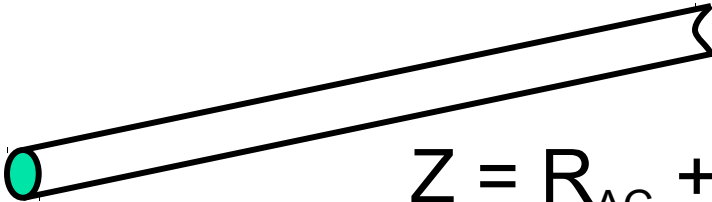
我们并不知
道地电流的
确切路径

地电流
失去控
制

地线电位示意图



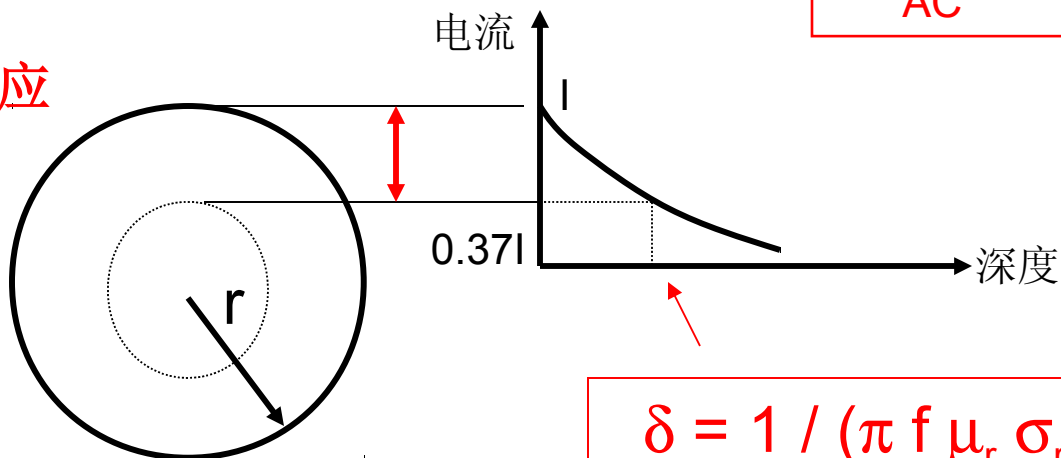
导线的阻抗


$$Z = R_{AC} + j\omega L$$

$$L \approx 1\mu\text{H/m}$$

$$R_{AC} = 0.076r f^{1/2} R_{DC}$$

趋肤效应

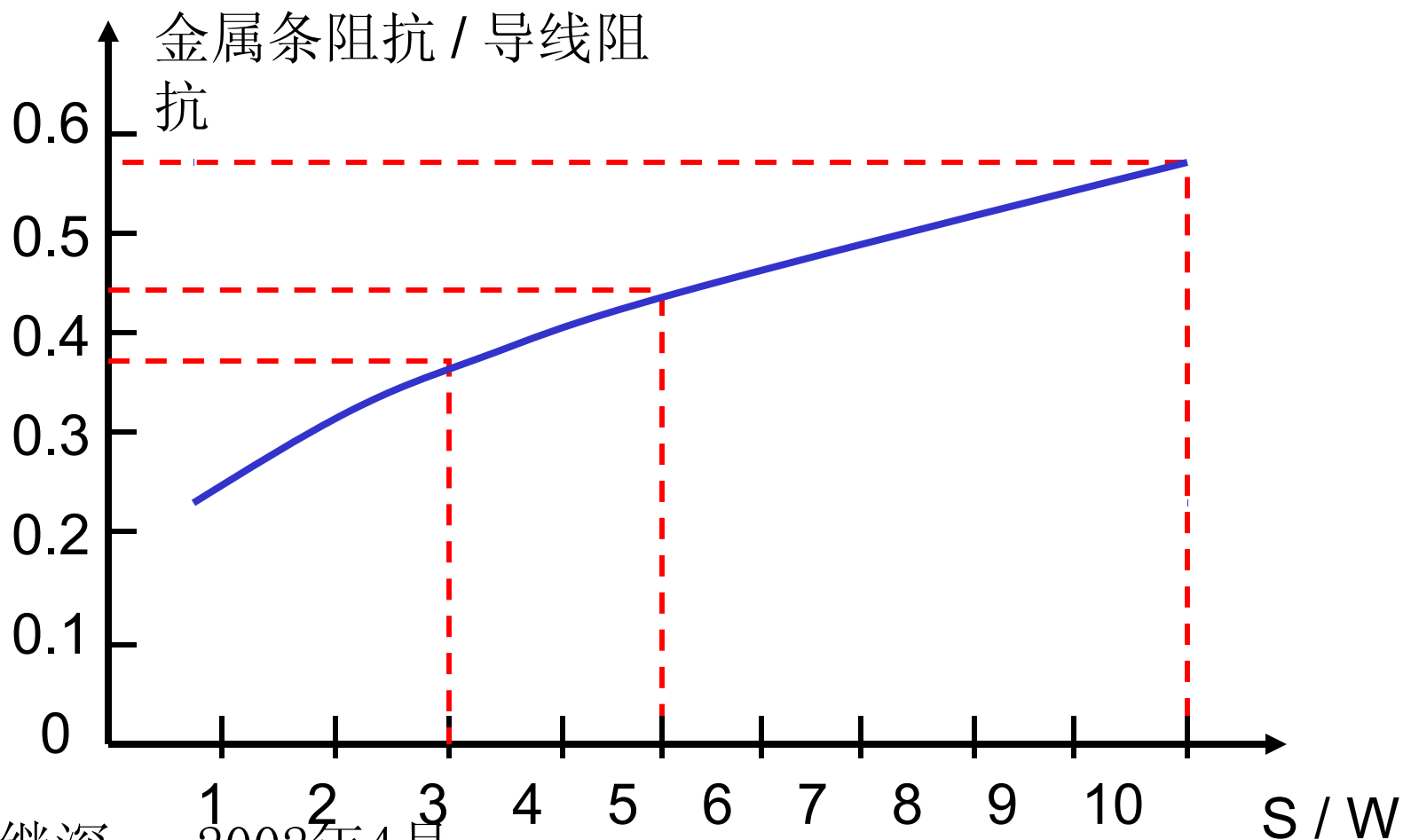


$$\delta = 1 / (\pi f \mu_r \sigma_r)^{1/2}$$

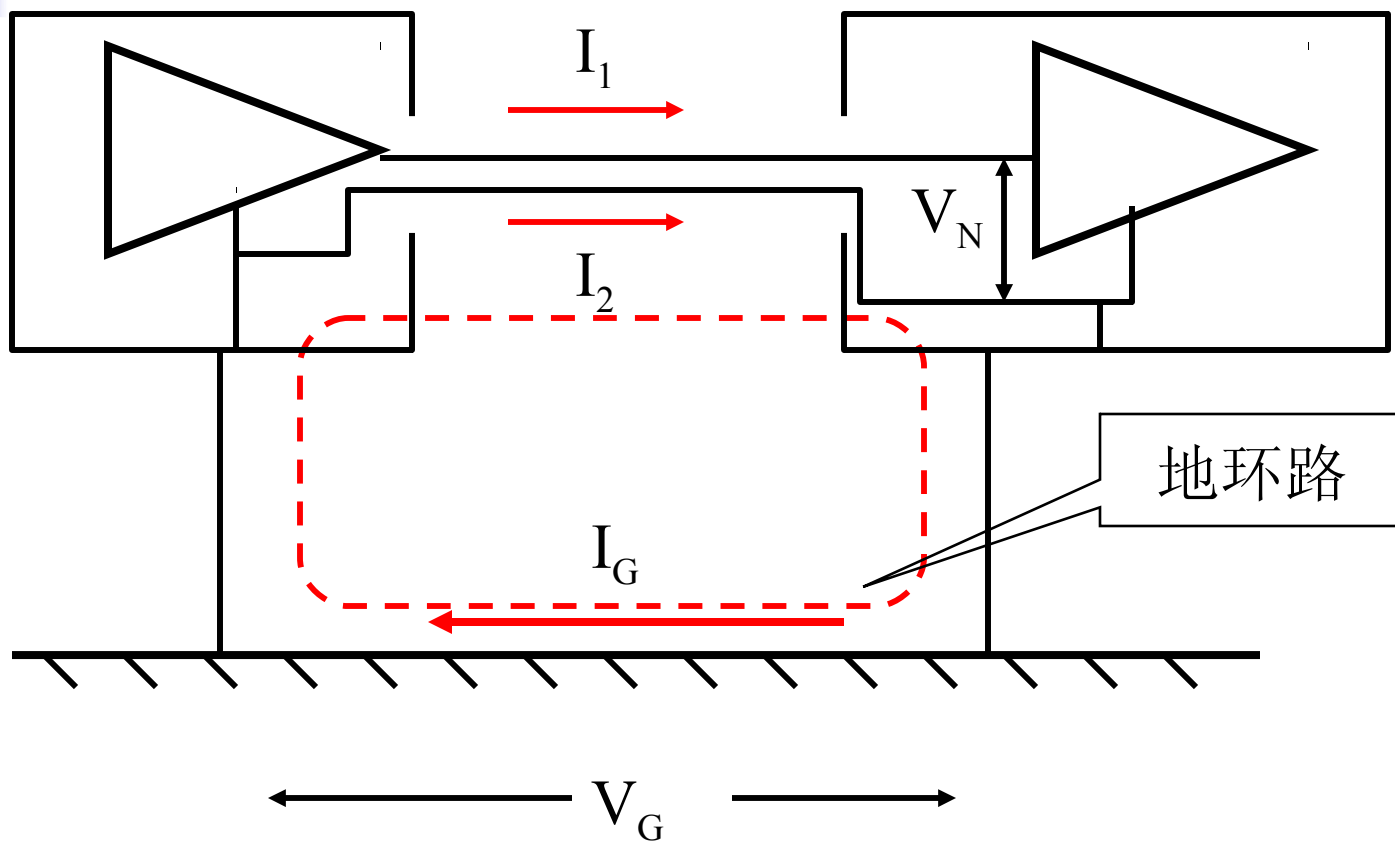
导线的阻抗

频率 Hz	d = 0.65cm 10cm 1m		d = 0.27cm 10cm 1m		d = 0.06cm 10cm 1m		d = 0.04cm 10cm 1m	
10Hz	51.4 μ	517 μ	327 μ	3.28m	5.29m	52.9m	13.3m	133m
1k	429 μ	7.14m	632 μ	8.91m	5.34m	53.9m	14m	144m
100k	42.6m	712m	54m	828m	71.6m	1.0	90.3m	1.07
1M	426m	7.12	540m	8.28	714m	10	783m	10.6
5M	2.13	35.5	2.7	41.3	3.57	50	3.86	53
10M	4.26	71.2	5.4	82.8	7.14	100	7.7	106
50M	21.3	356	27	414	35.7	500	38.5	530
100M	42.6		54		71.4		77	
150M	63.9		81		107		115	

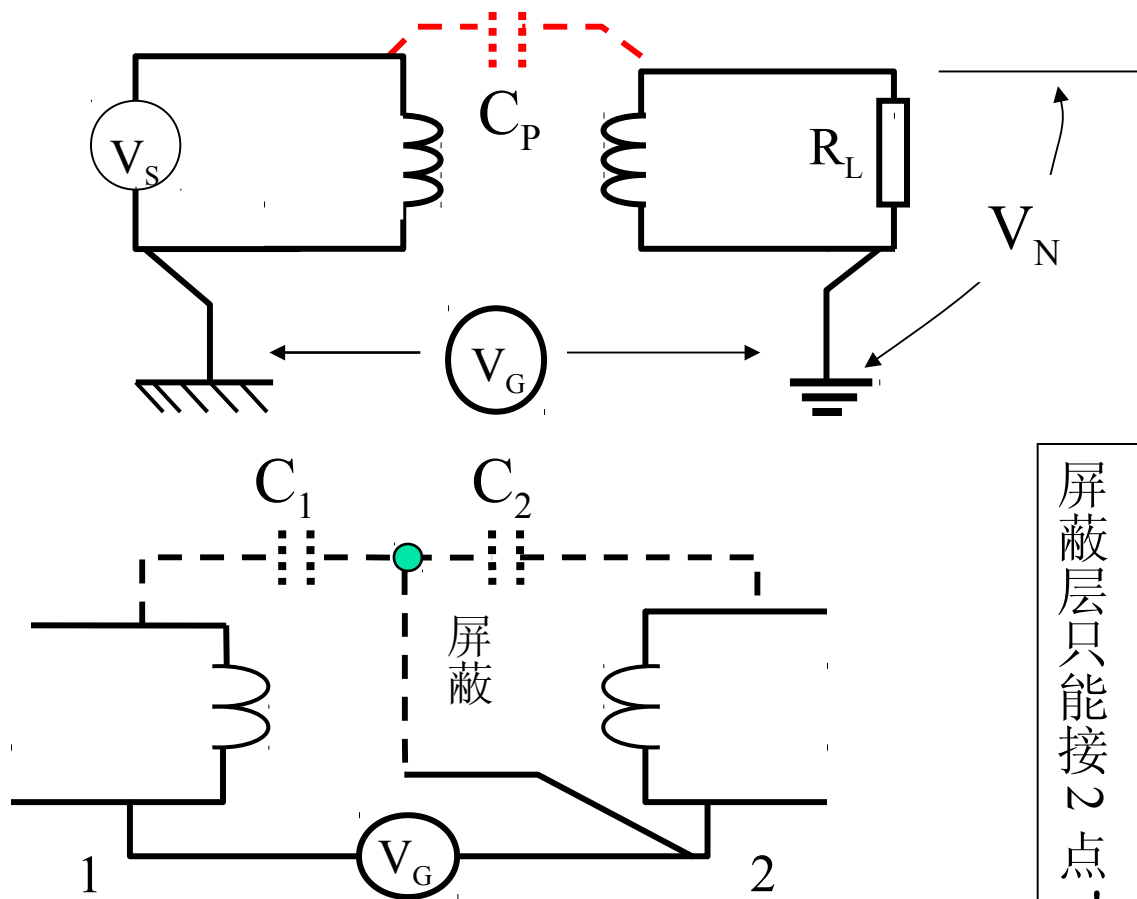
金属条与导线的阻抗比较



地线问题—地环路

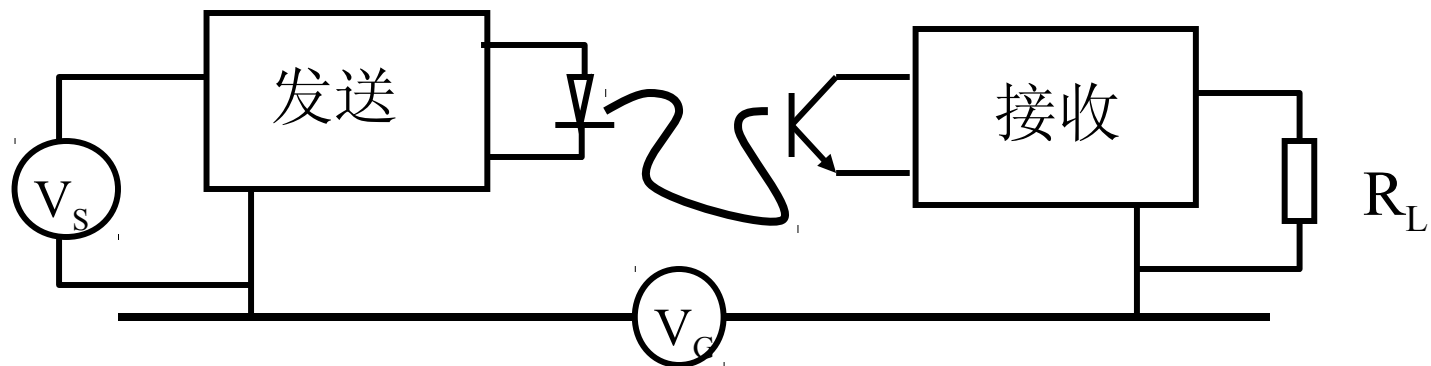
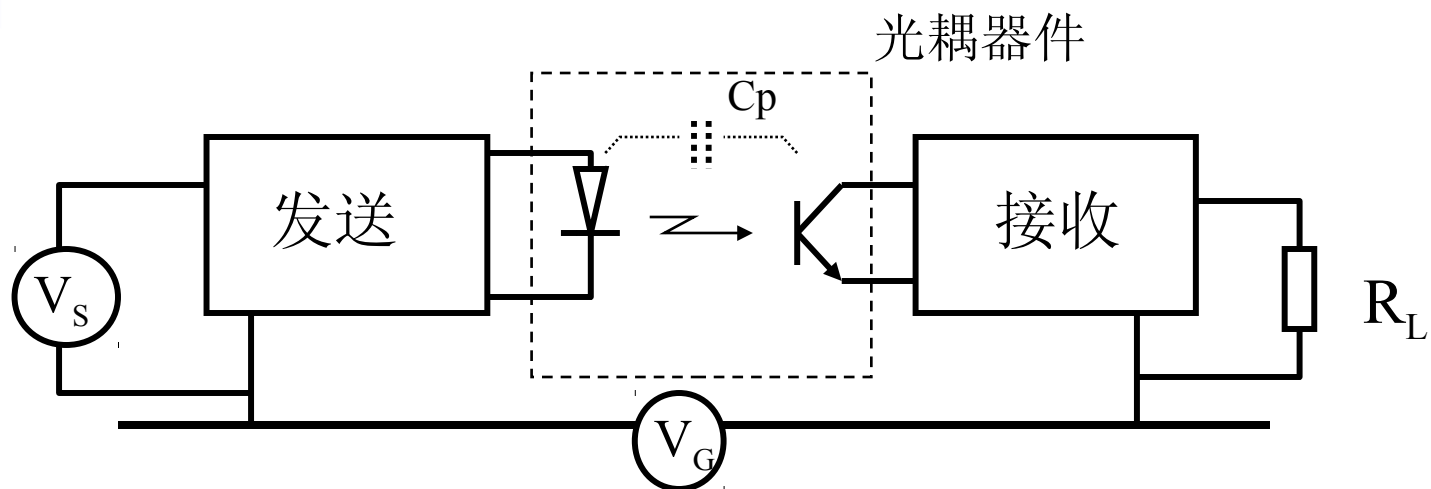


隔离变压器

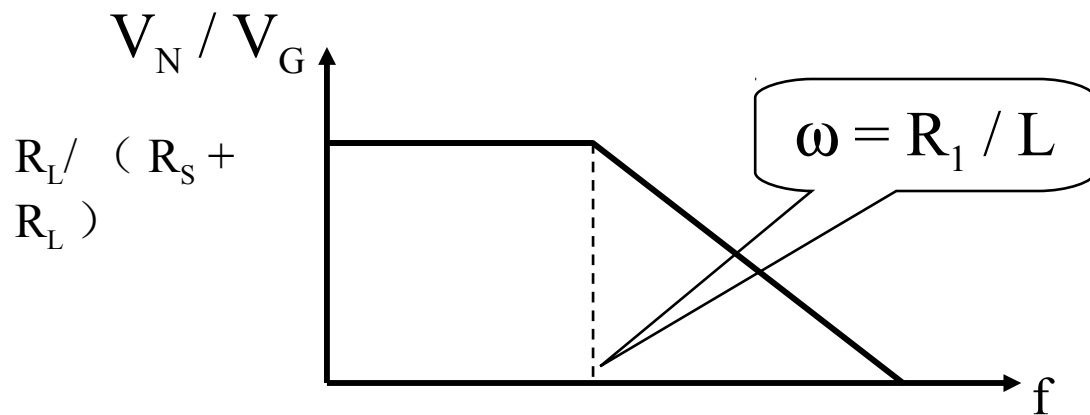
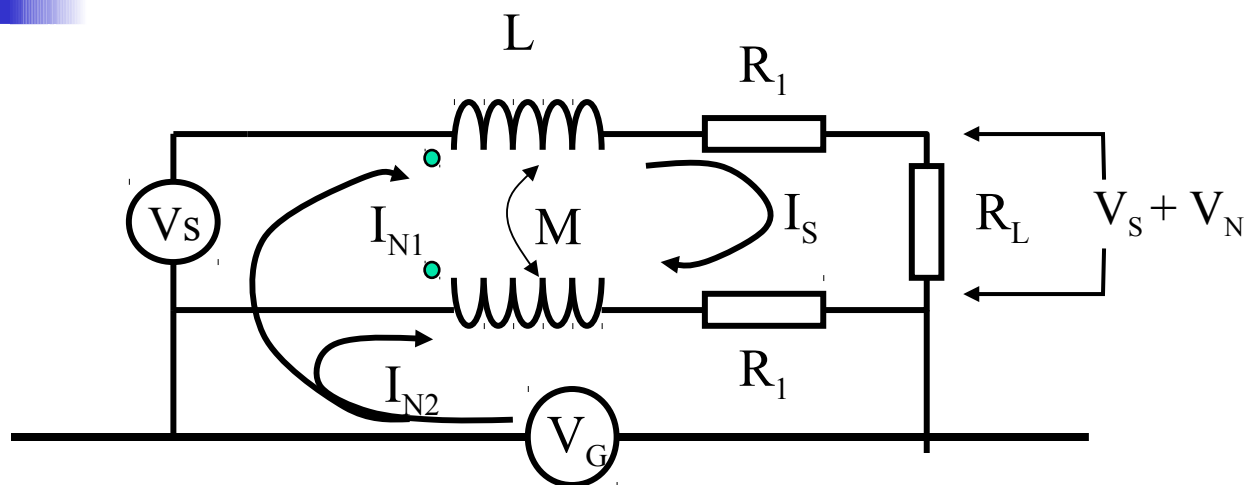


屏蔽层只能接~点!

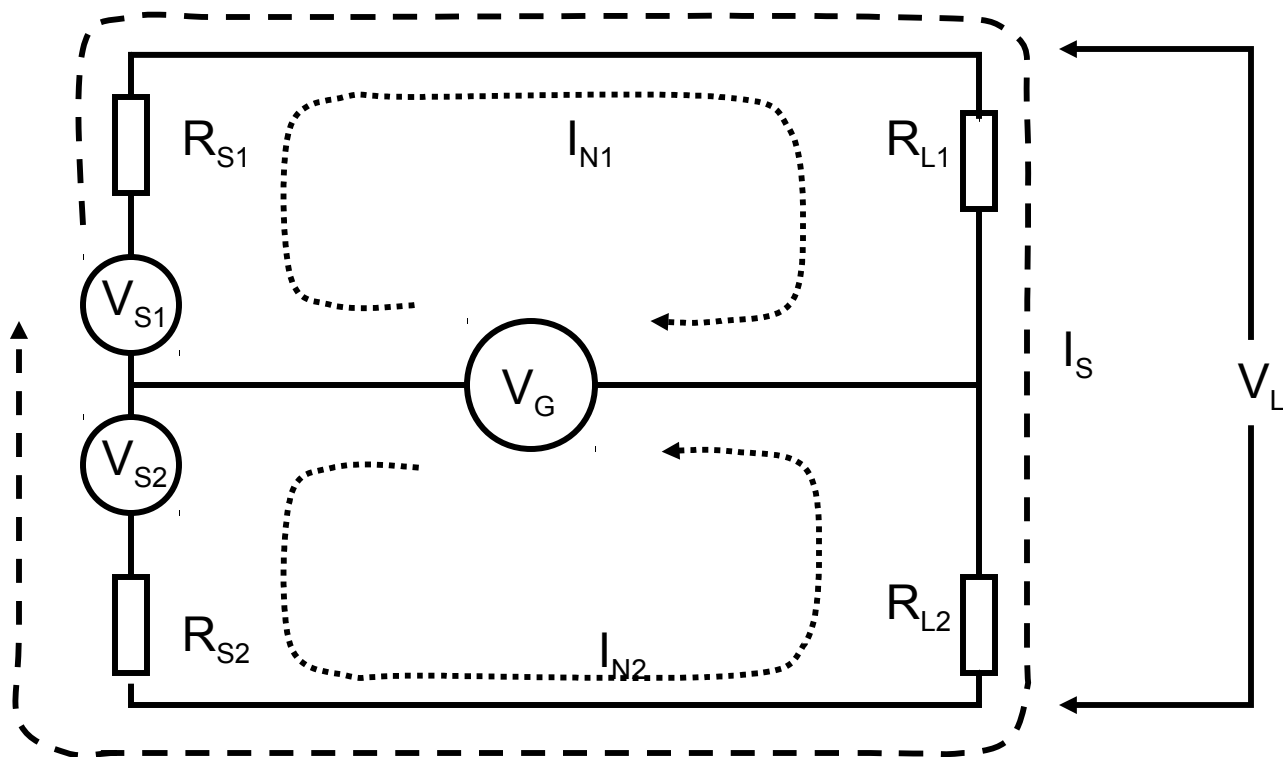
光隔离器



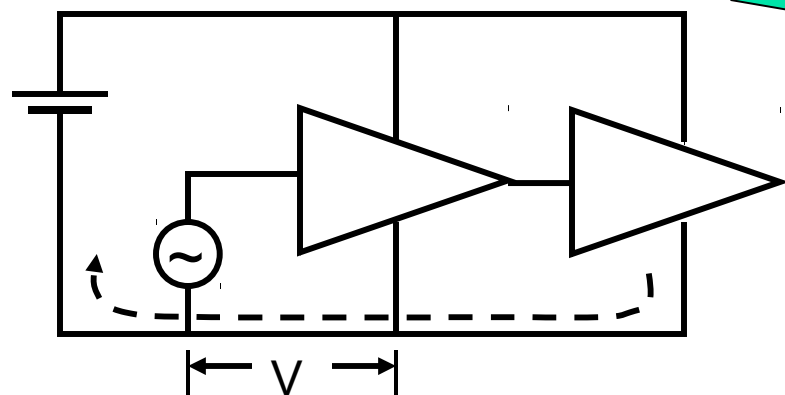
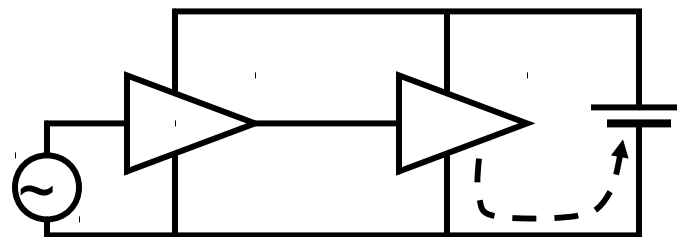
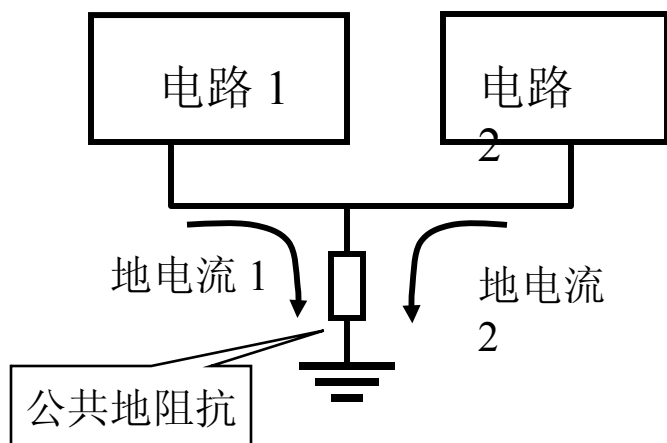
共模扼流圈的作用



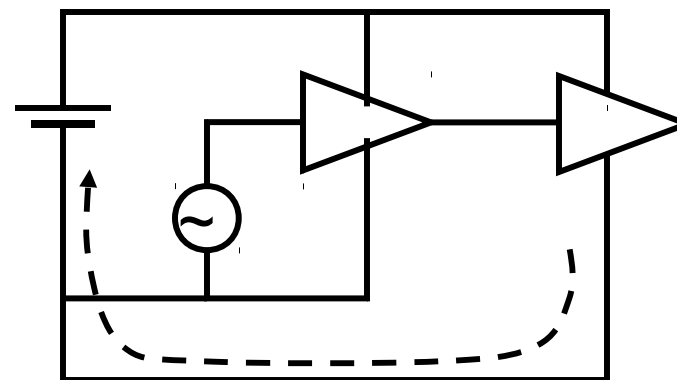
平衡电路对地环路干扰的抑制



地线问题—公共阻抗耦合

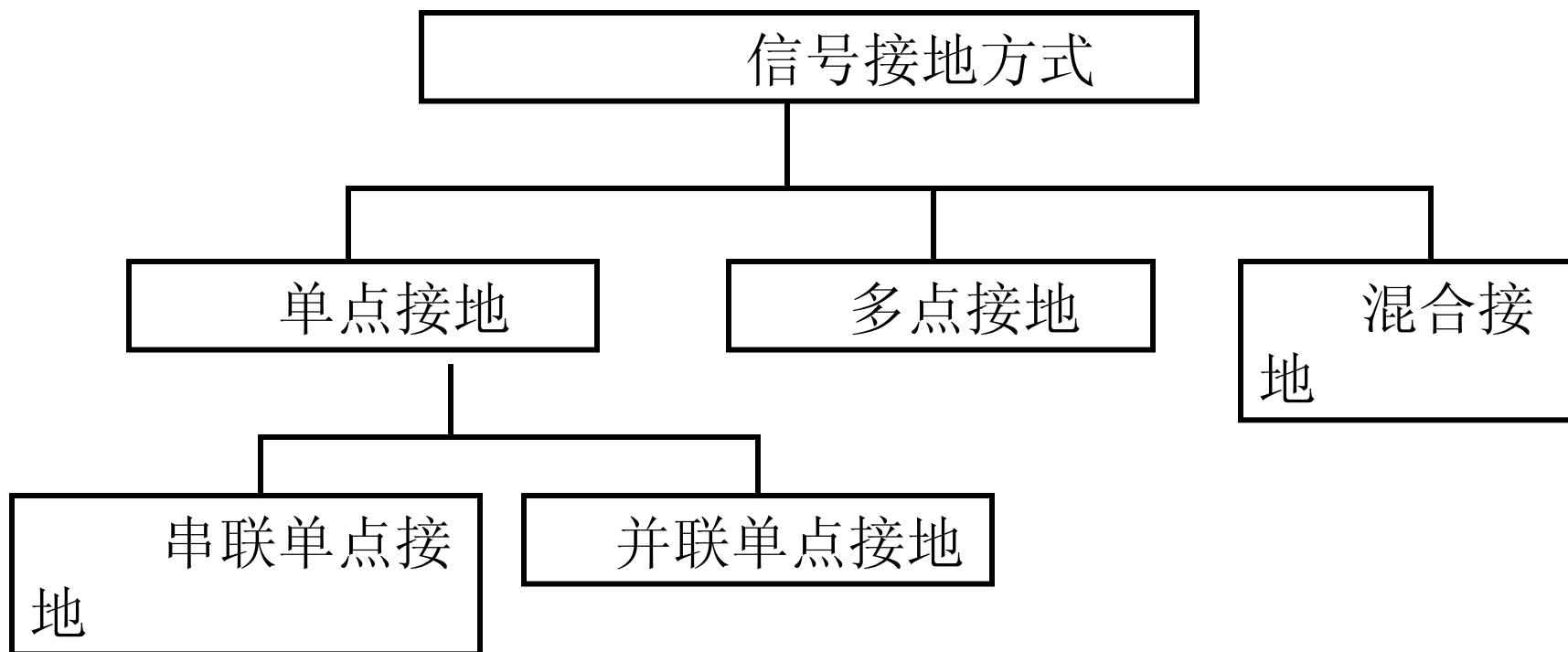


改进 1
改进 2

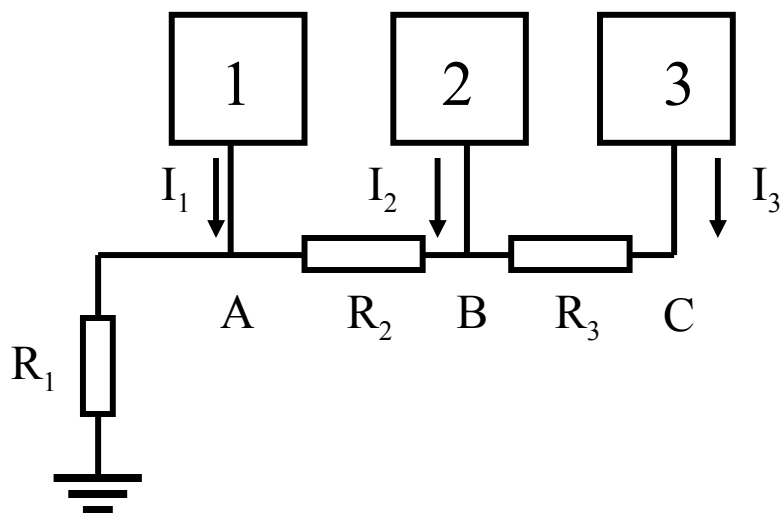




接地方式种类



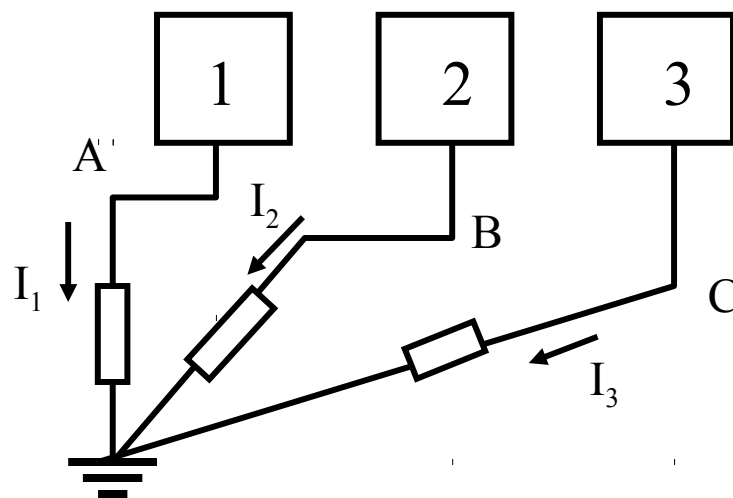
单点接地



串联单点接地

优点：简单

缺点：公共阻抗耦合

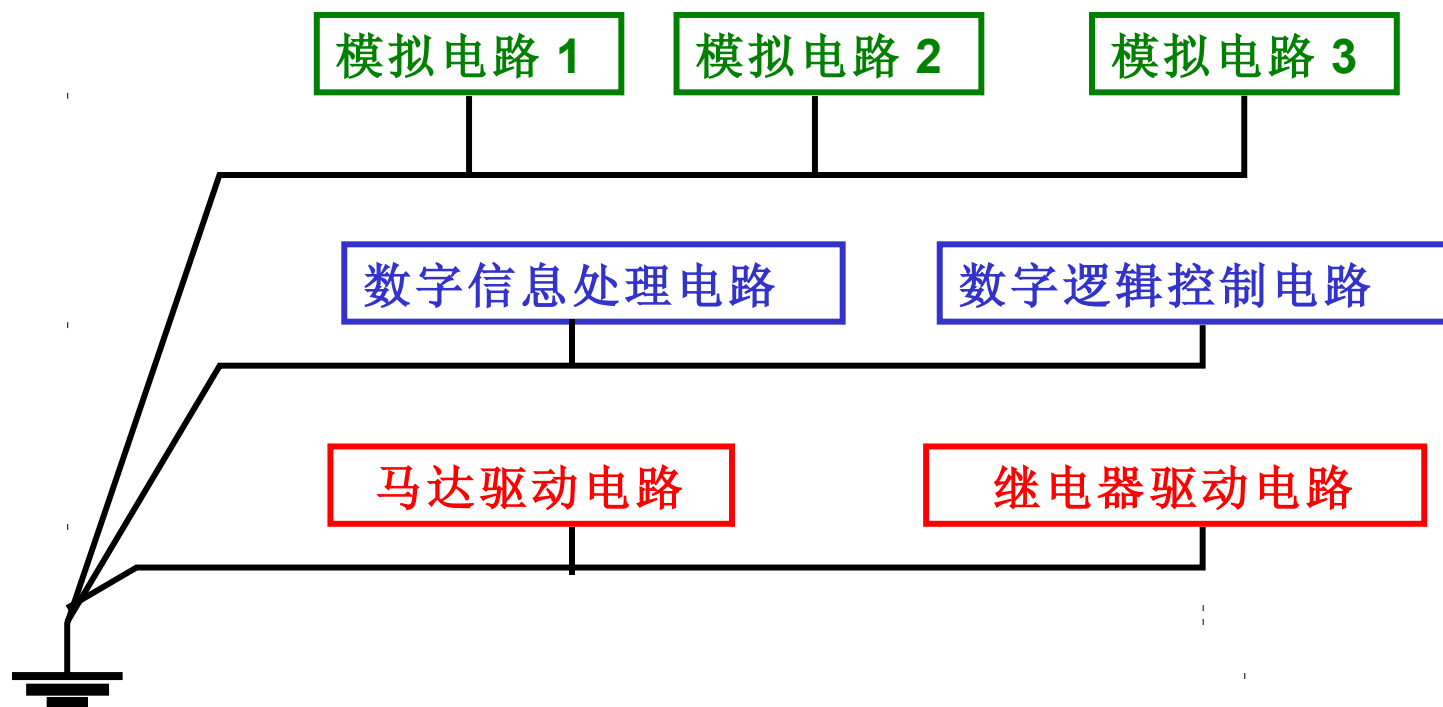


并联单点接地

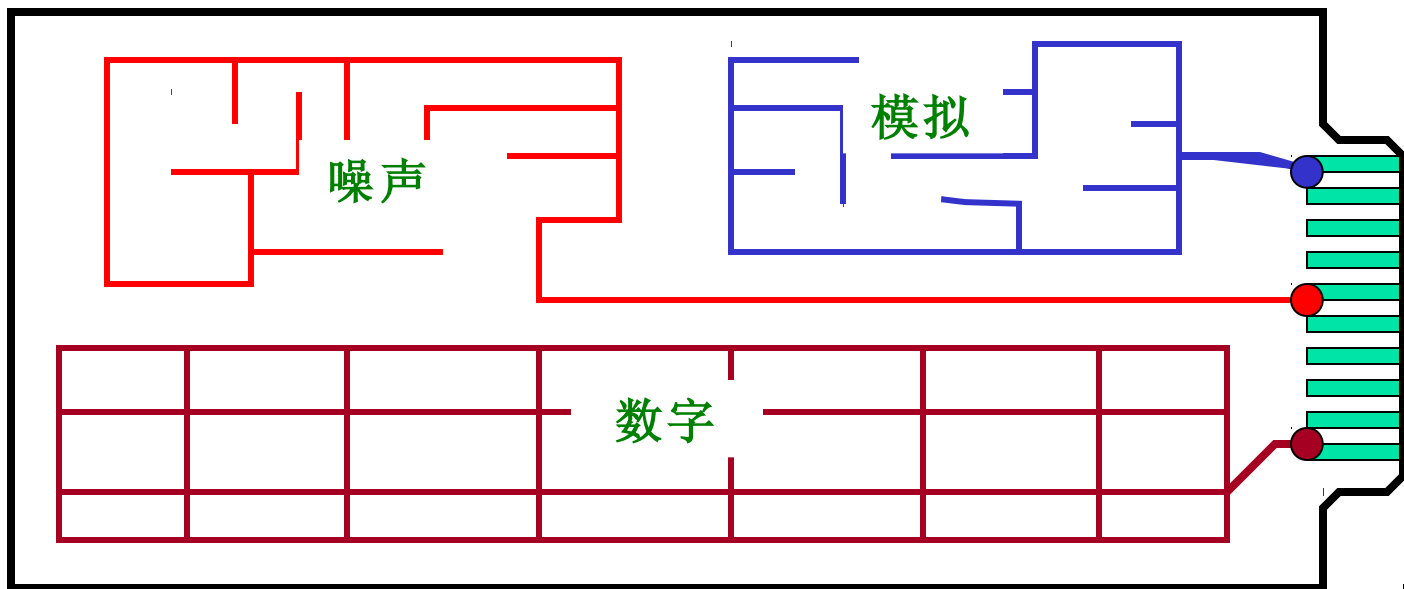
优点：无公共阻抗耦合

缺点：接地线过多

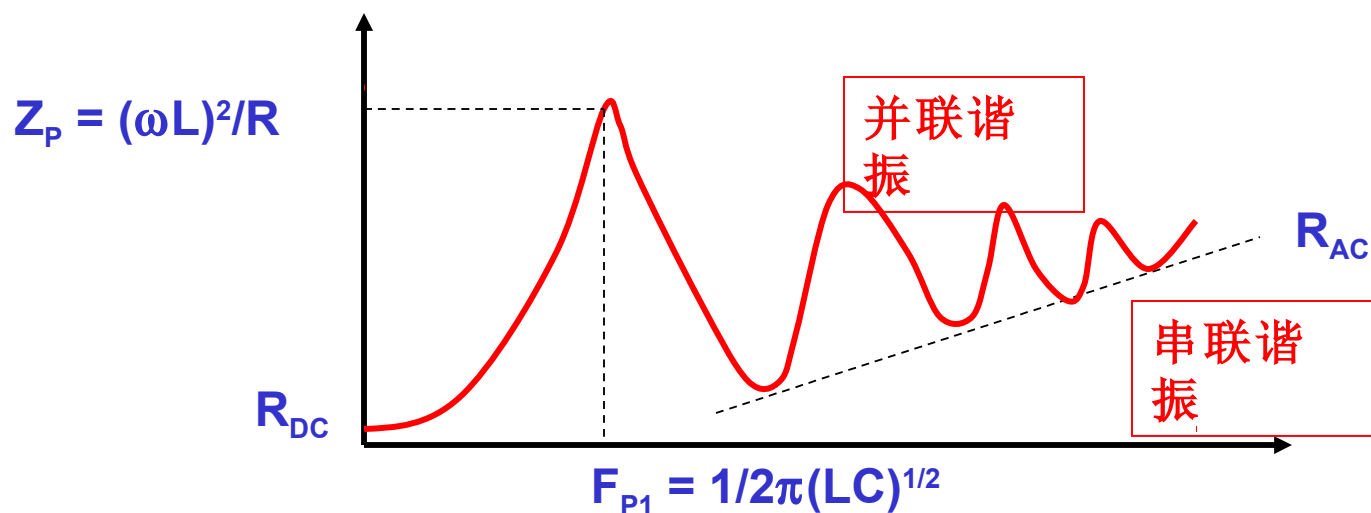
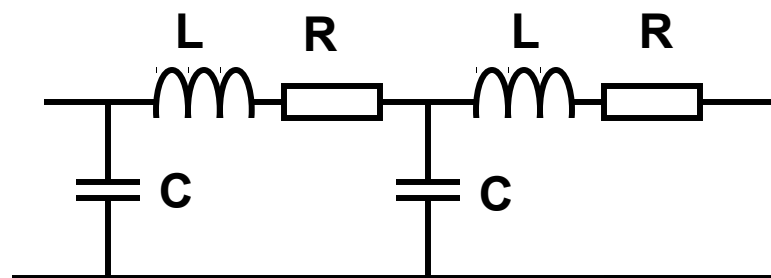
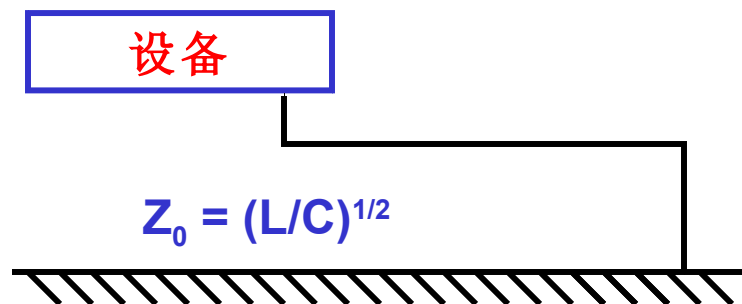
串联单点、并联单点混合接地



线路板上的地线

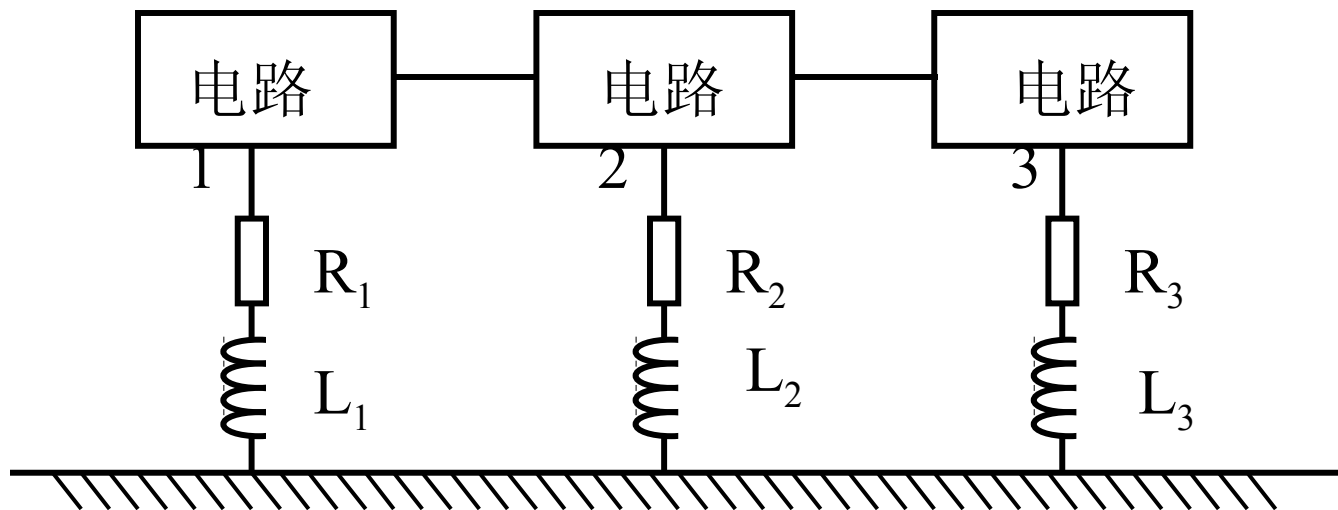


长地线的阻抗

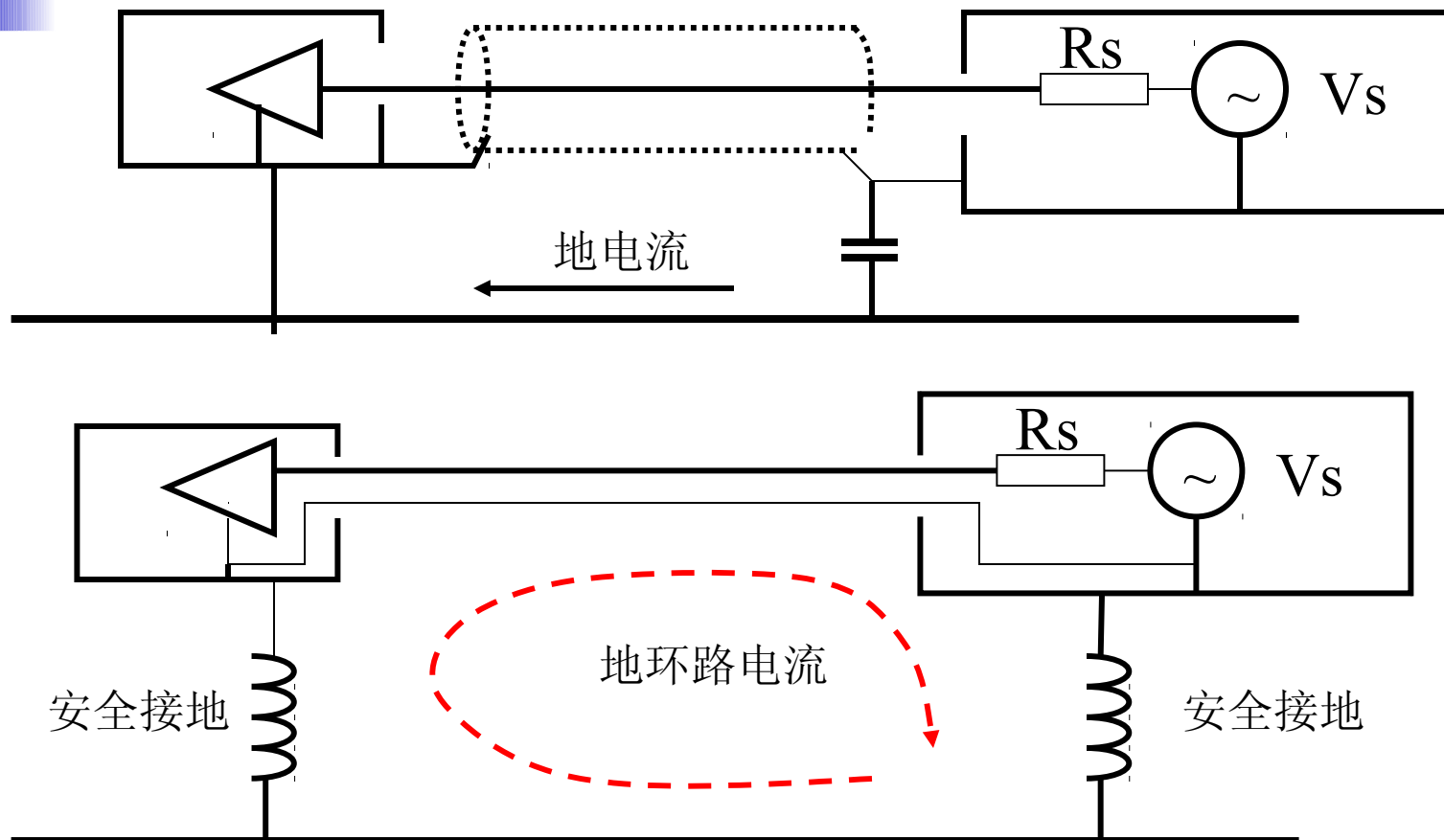




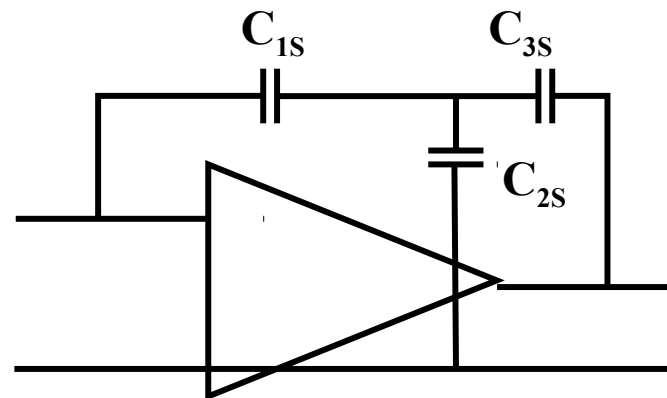
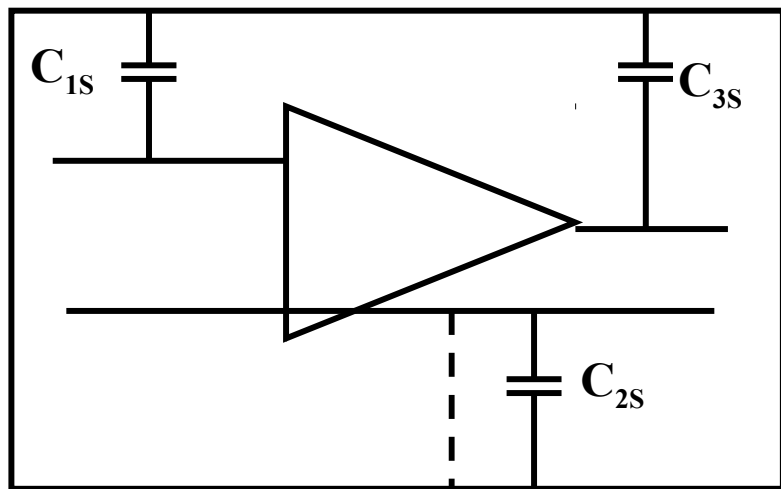
多点接地



混合接地

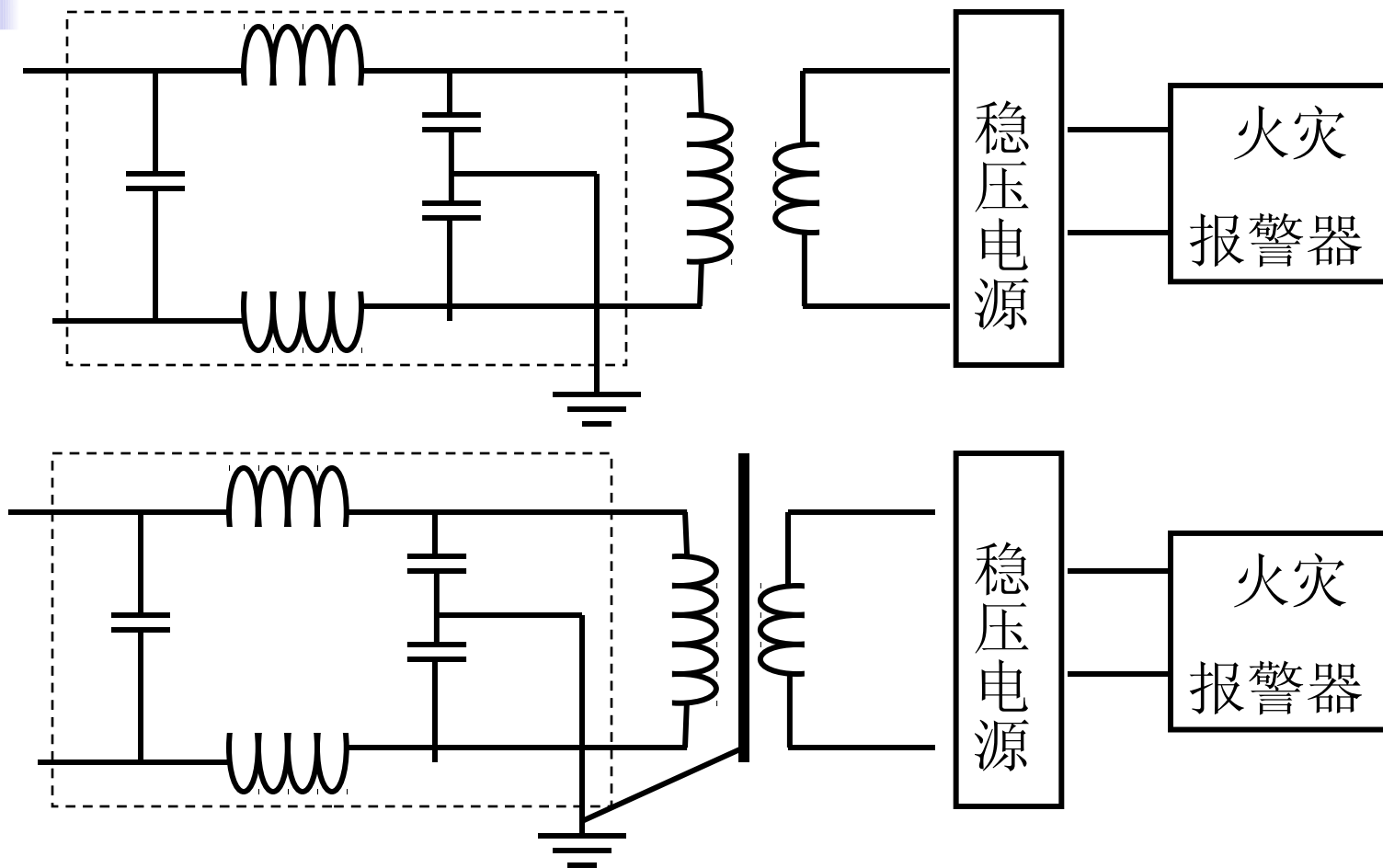


放大器屏蔽壳的接地



等效电路

接地位置不当造成的干扰

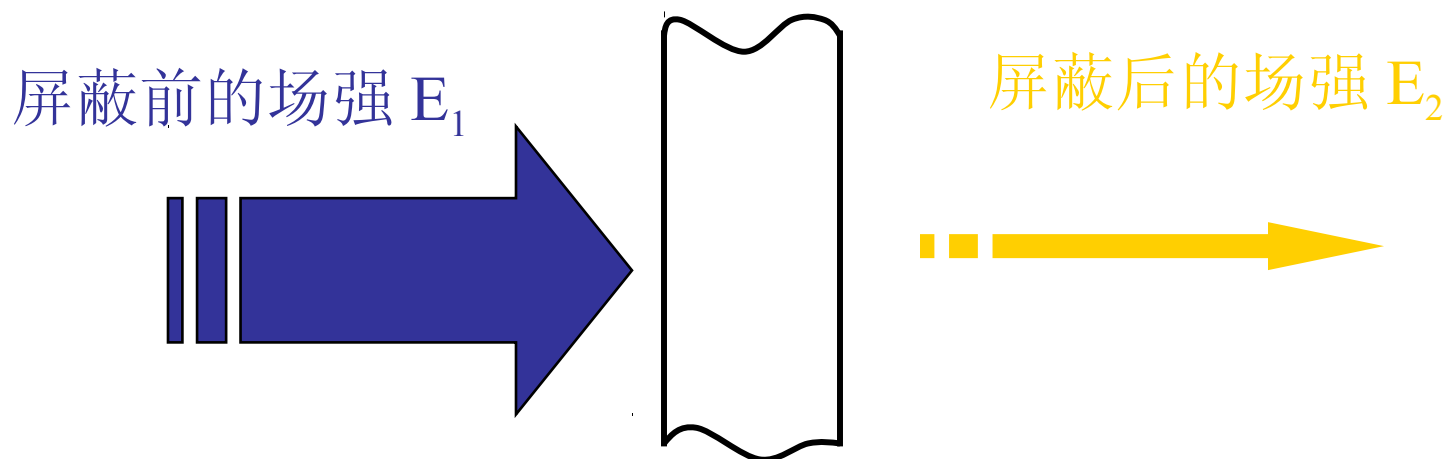




第三章 电磁屏蔽技术

- 屏蔽材料的选择
- 实际屏蔽体的设计

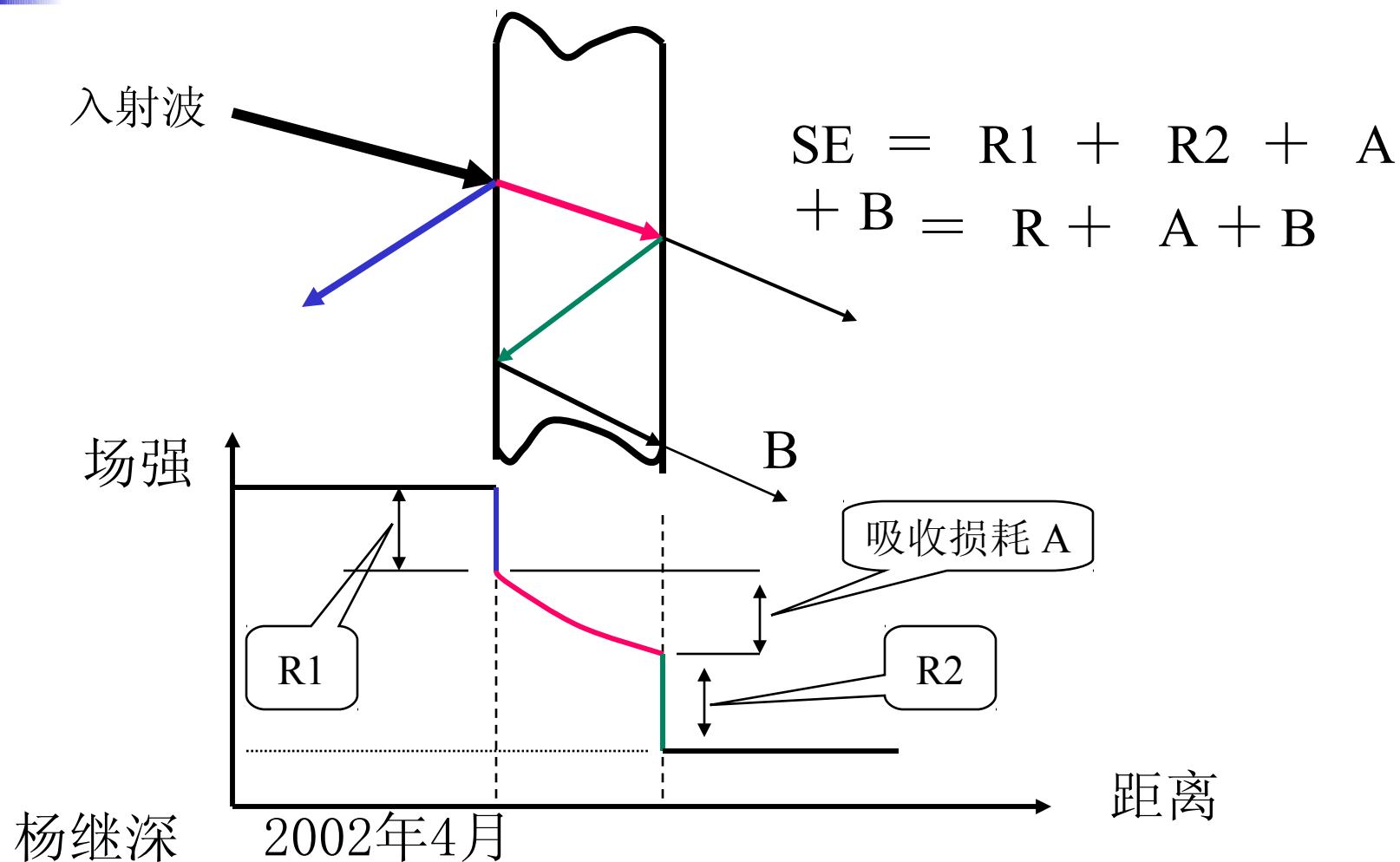
电磁屏蔽



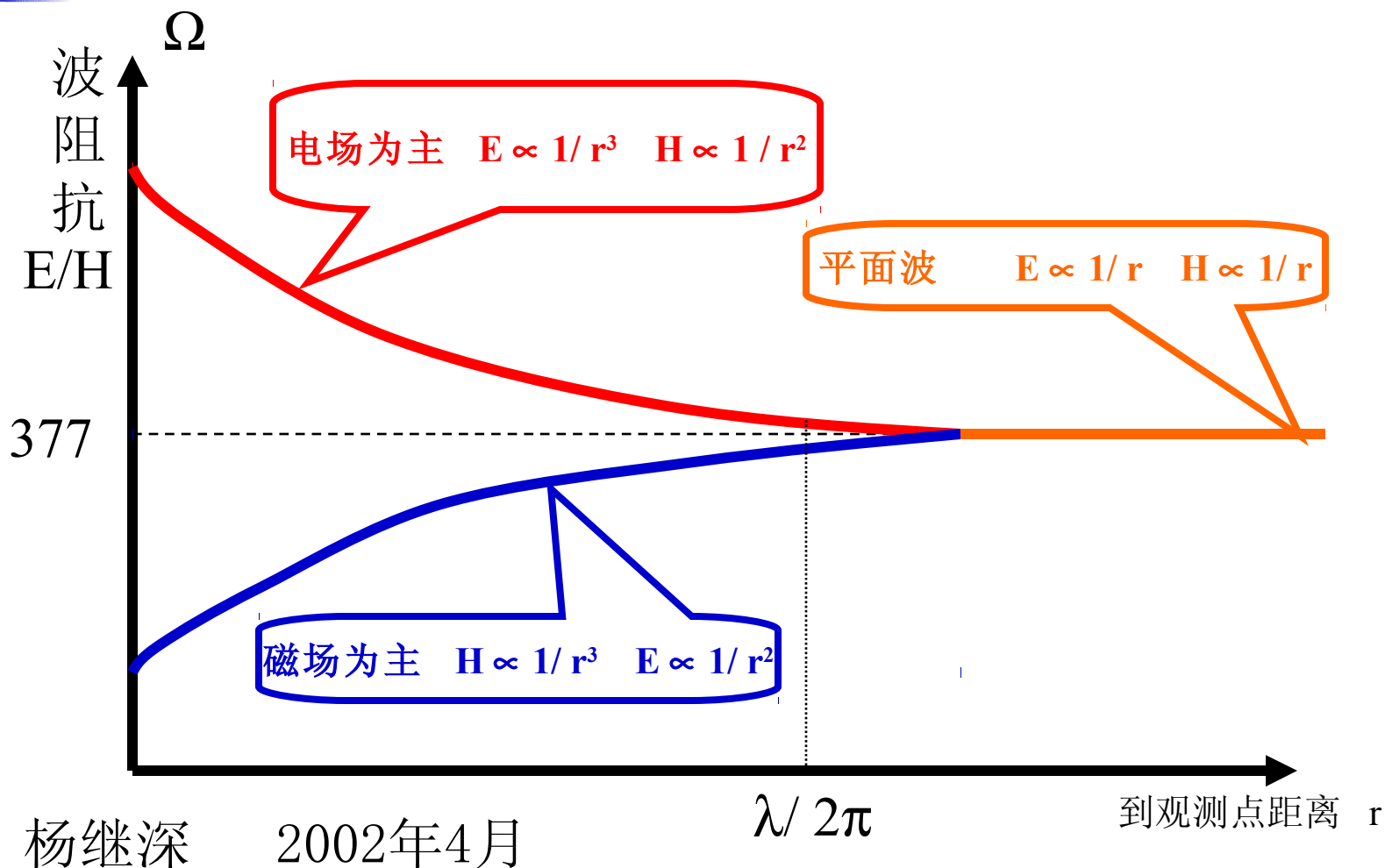
对电磁波产生衰减的作用就是电磁屏蔽，
电磁屏蔽作用的大小用屏蔽效能度量：

$$SE = 20 \lg (E_1 / E_2) \quad \text{dB}$$

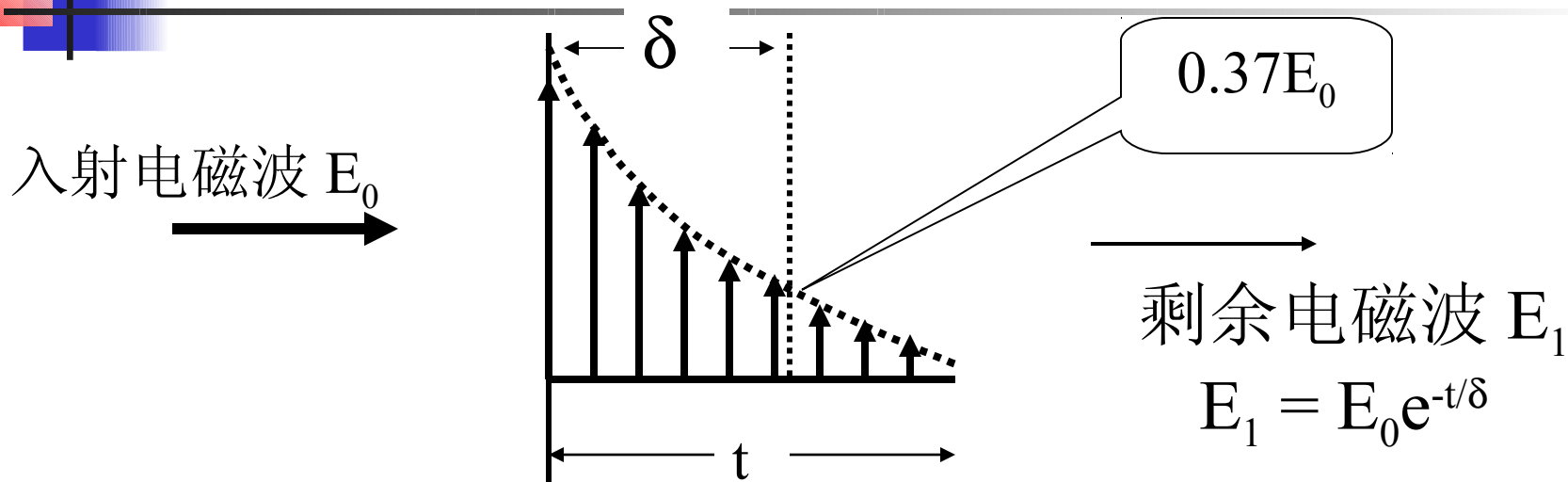
实心材料屏蔽效能的计算



波阻抗的概念



吸收损耗的计算



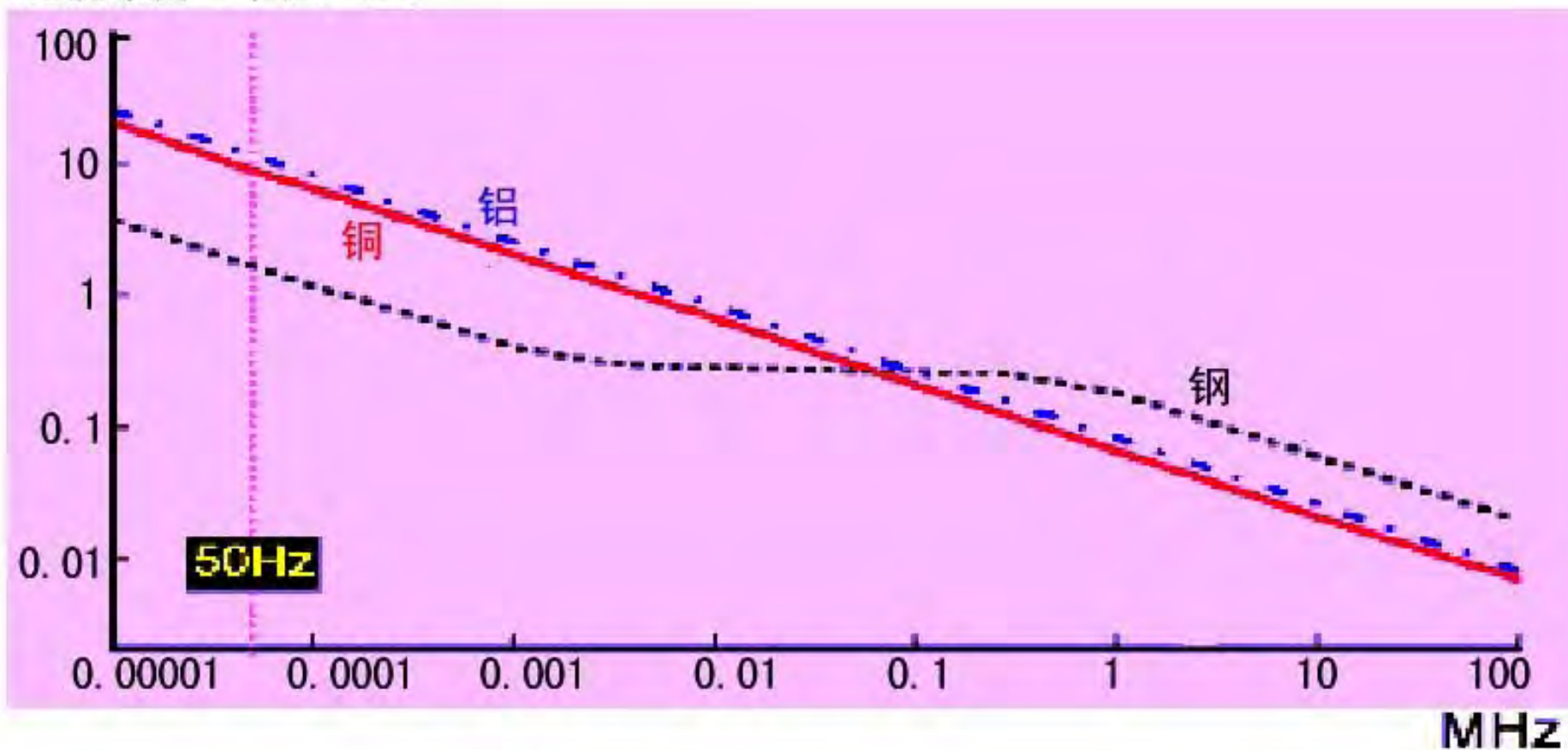
$$A = 20 \lg (E_0 / E_1) = 20 \lg (e^{t/\delta}) \quad \text{dB}$$

$$A = 8.69 (t / \delta) \quad \text{dB}$$

$$A = 3.34 t \sqrt{f \mu_r \sigma_r} \quad \text{dB}$$

趋肤深度举例

趋肤深度（单位：mm）





反射损耗

$$R = 20 \lg \frac{Z_W}{4 Z_S}$$

远场: 377Ω

近场: 取决于源的阻抗

$$Z_S = 3.68 \times 10^{-7} \sqrt{f \mu_r / \sigma_r}$$

同一种材料的阻抗随频率变

反射损耗与波阻抗有关，波阻抗越高，则反射损耗越大。



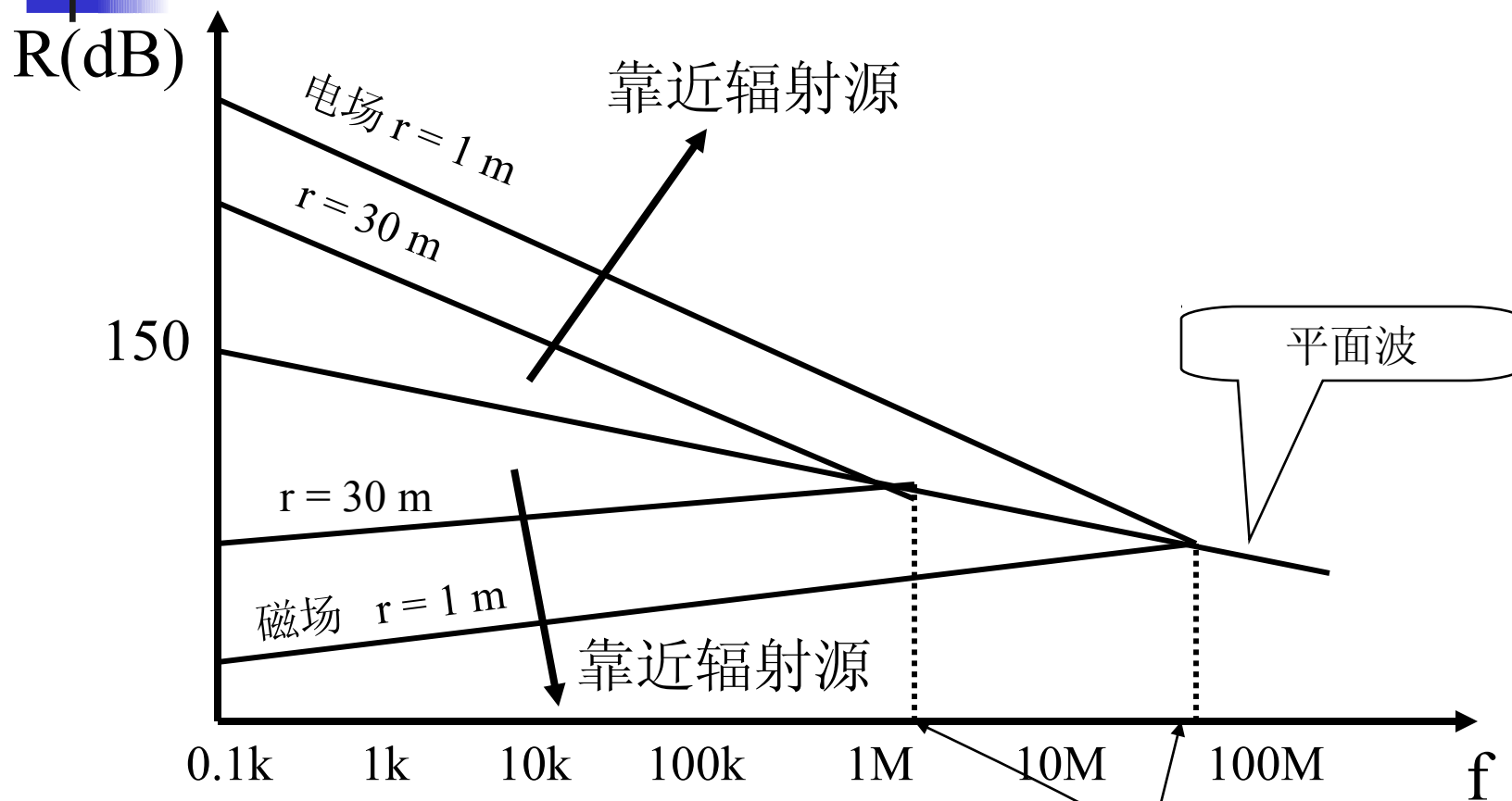
不同电磁波的反射损耗

$$\begin{array}{lll} \text{远场:} & R = 20 \lg \frac{377}{4 Z_s} & \\ \text{电场:} & R = 20 \lg \frac{4500}{D f Z_s} & \\ \text{磁场:} & R = 20 \lg \frac{2 D f}{Z_s} & \end{array} \quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} \\ \\ \end{array}} \right\} \text{dB}$$

Z_s = 屏蔽体阻抗, D = 屏蔽体到源的距离 (m)

f = 电磁波的频率 (MHz)

影响反射损耗的因素



综合屏蔽效能

(0.5mm 铝板)

屏蔽效能

(dB)

250

150

0

电场波 $r = 0.5$

平面波

磁场波 $r = 0.5 \text{ m}$

高频时
电磁波种类
的影响很小

频率

0.1k 1k 10k 100k 1M 10M

杨继深

2002年4月



多次反射修正因子的计算

电磁波在屏蔽体内多次反射，会引起附加的电磁泄漏，因此要对前面的计算进行修正。

$$B = 20 \lg (1 - e^{-2t/\delta})$$

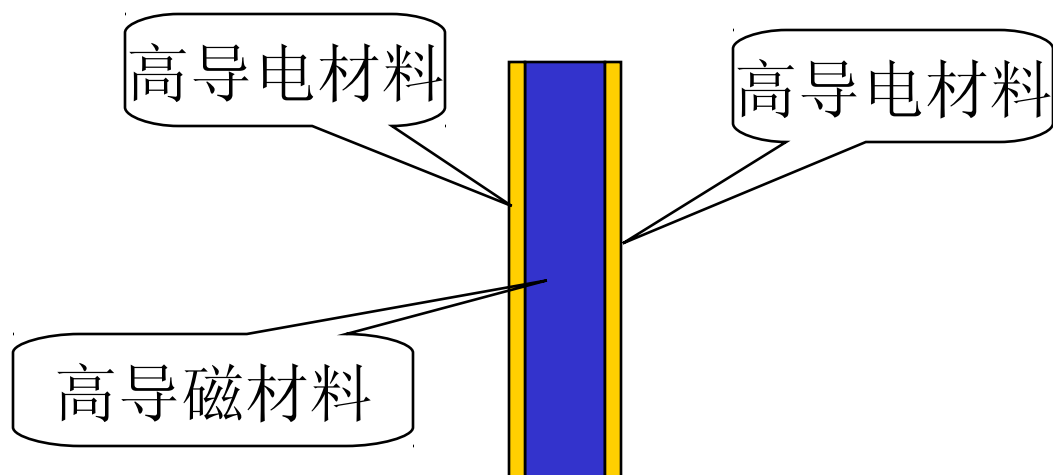
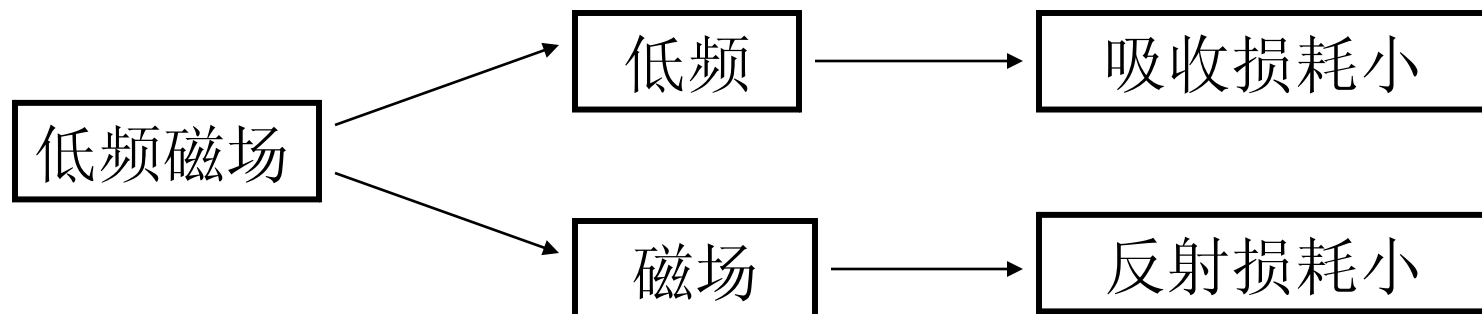
说明：

- **B 为负值，其作用是减小屏蔽效能**
- **当趋肤深度与屏蔽体的厚度相当时，可以忽略**

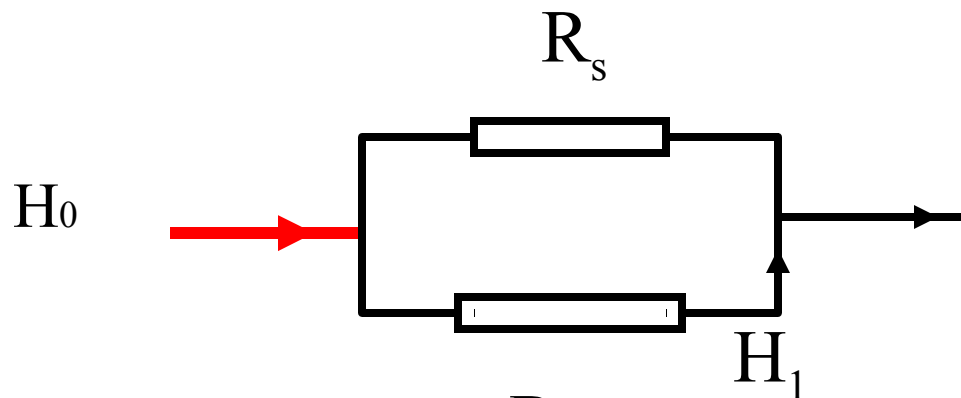
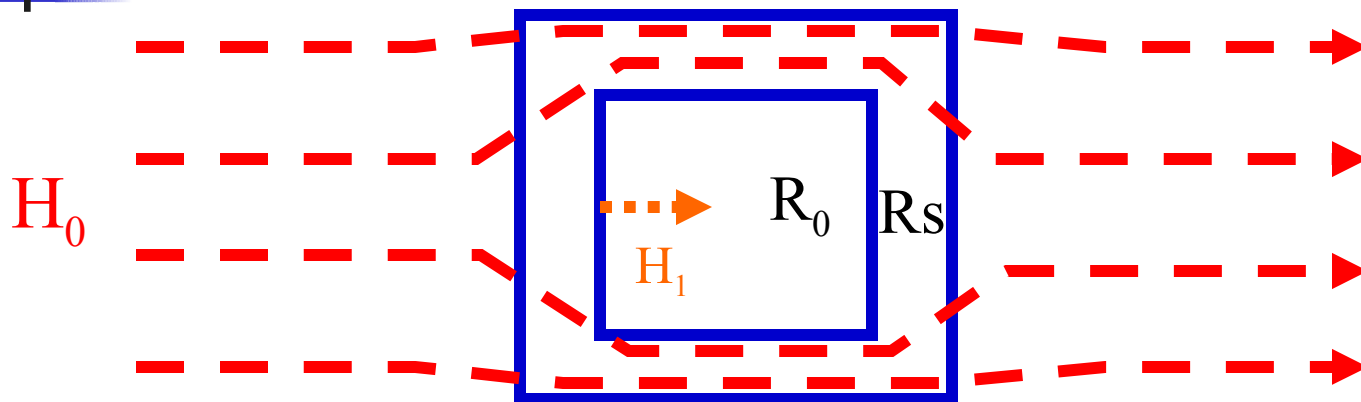
杨继深 2002年4月

• **对于电场波，可以忽略**

怎样屏蔽低频磁场？



高导磁率材料的磁旁路效果

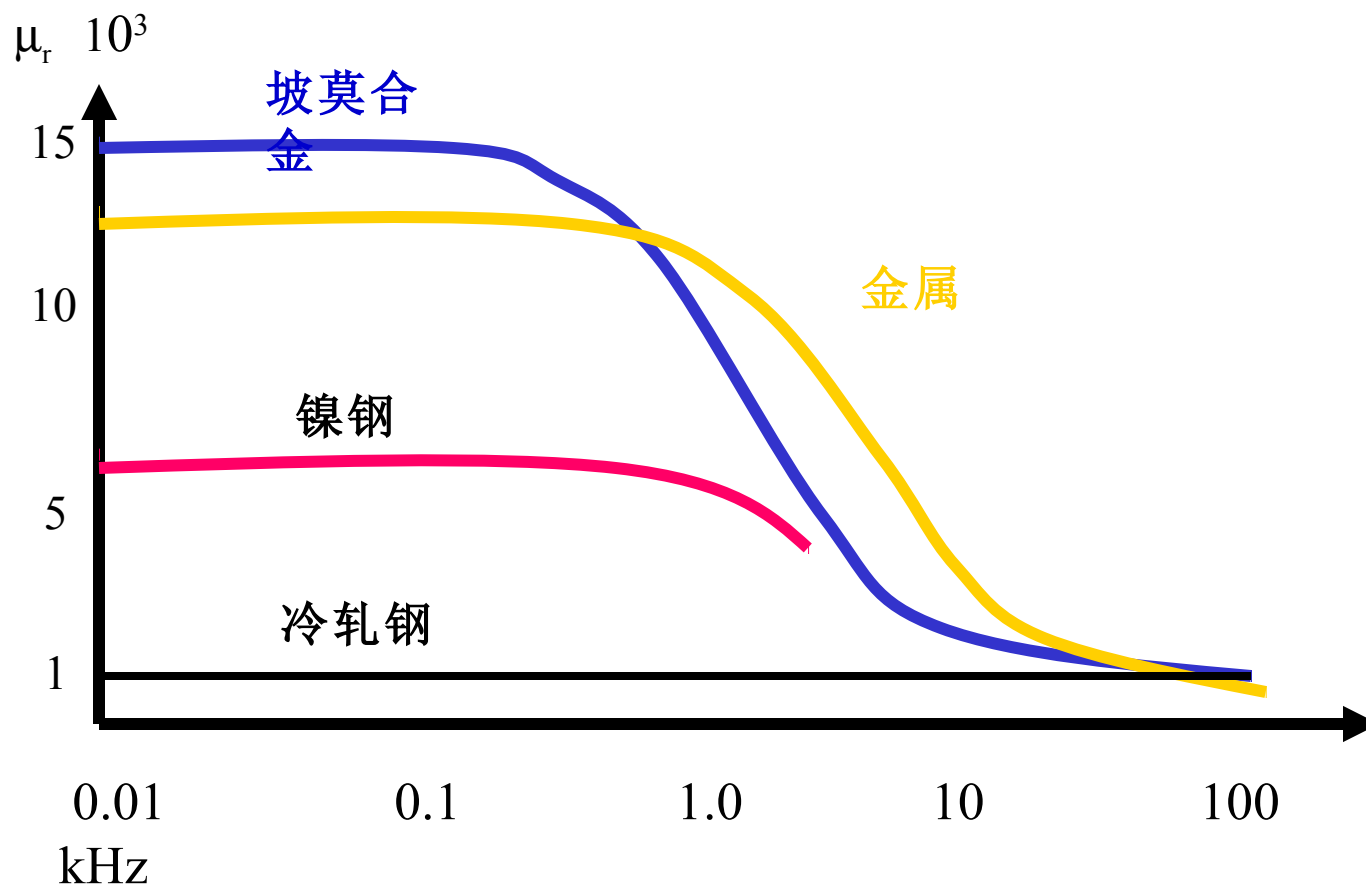


$$SE = 1 + R_0/R_s$$

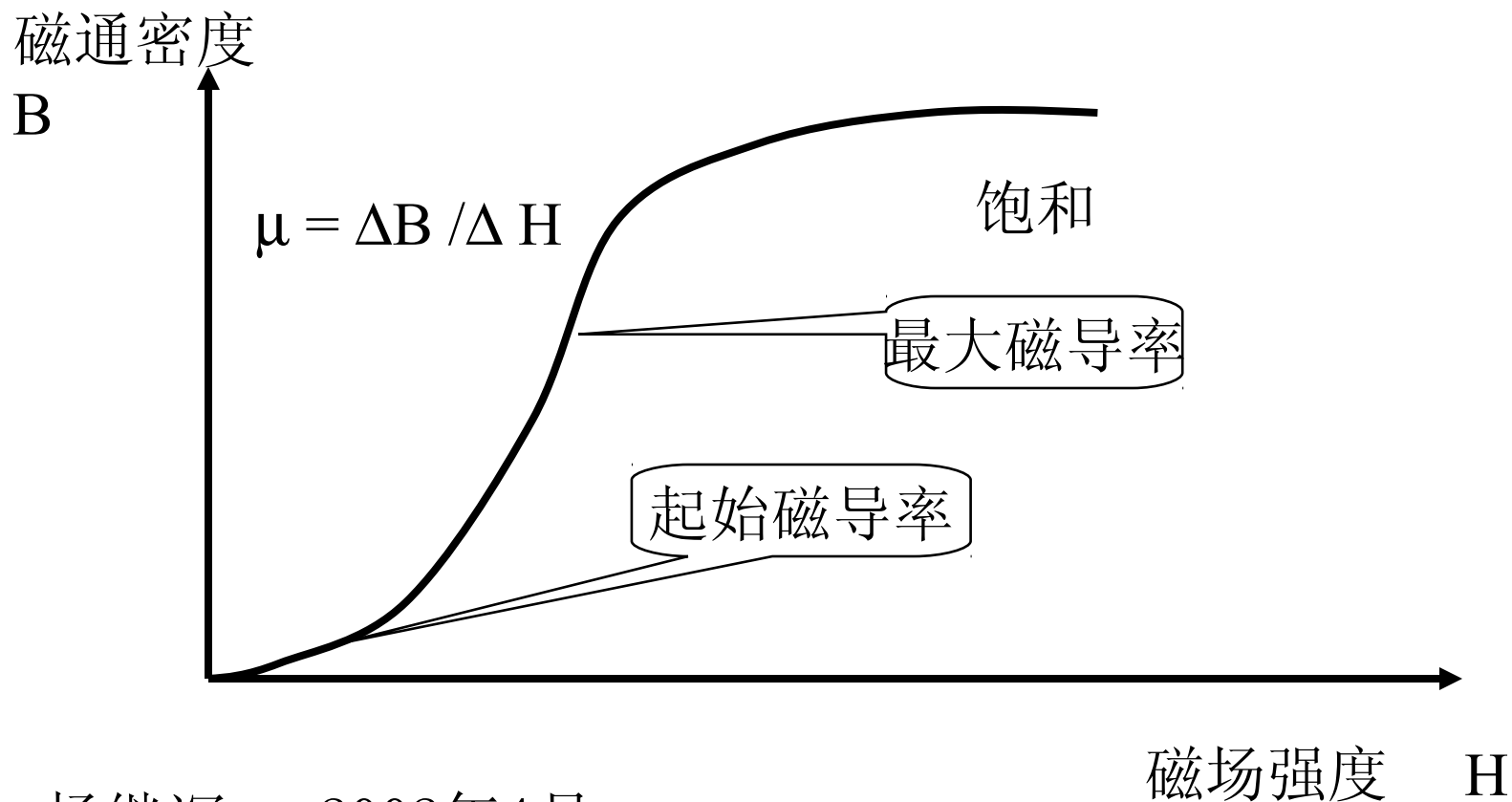
低频磁场屏蔽产品



磁屏蔽材料的频率特性



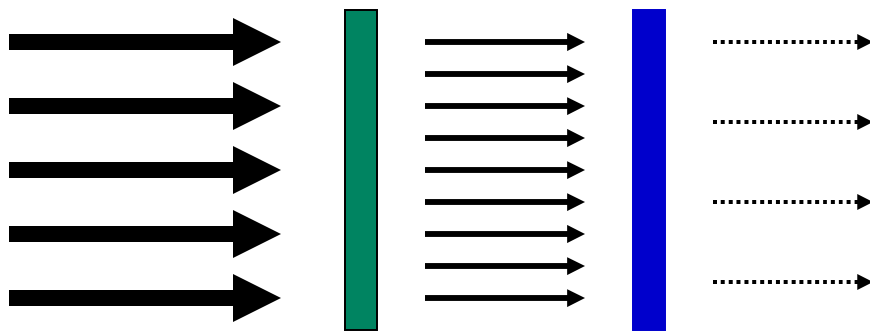
磁导率随场强的变化



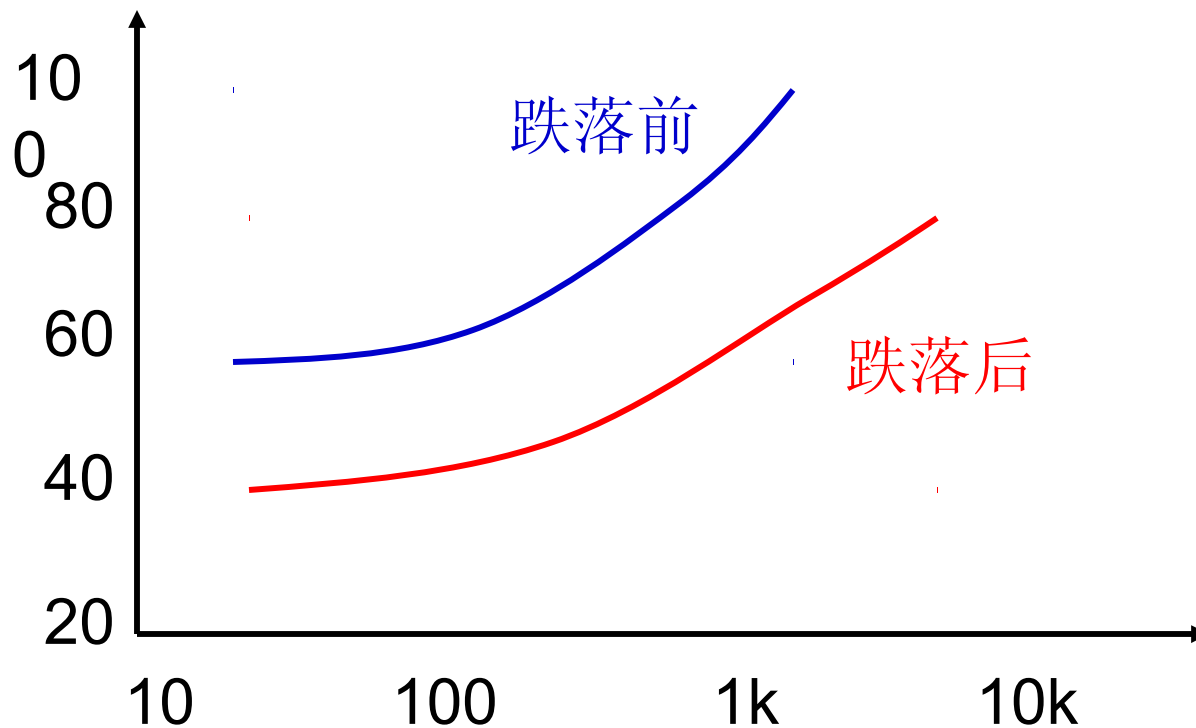
强磁场的屏蔽

高导磁率材料：饱和

低导磁率材料：屏效不够



加工的影响

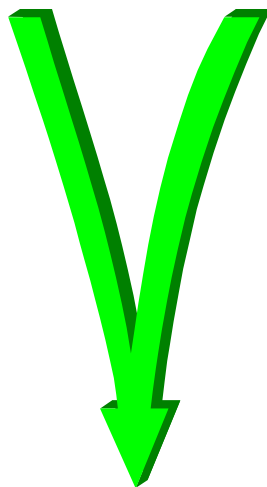




良好电磁屏蔽的关键因素

屏蔽体
导电连续

没有穿过屏
蔽体的导体



不要忘记：

选择适当的屏蔽材料

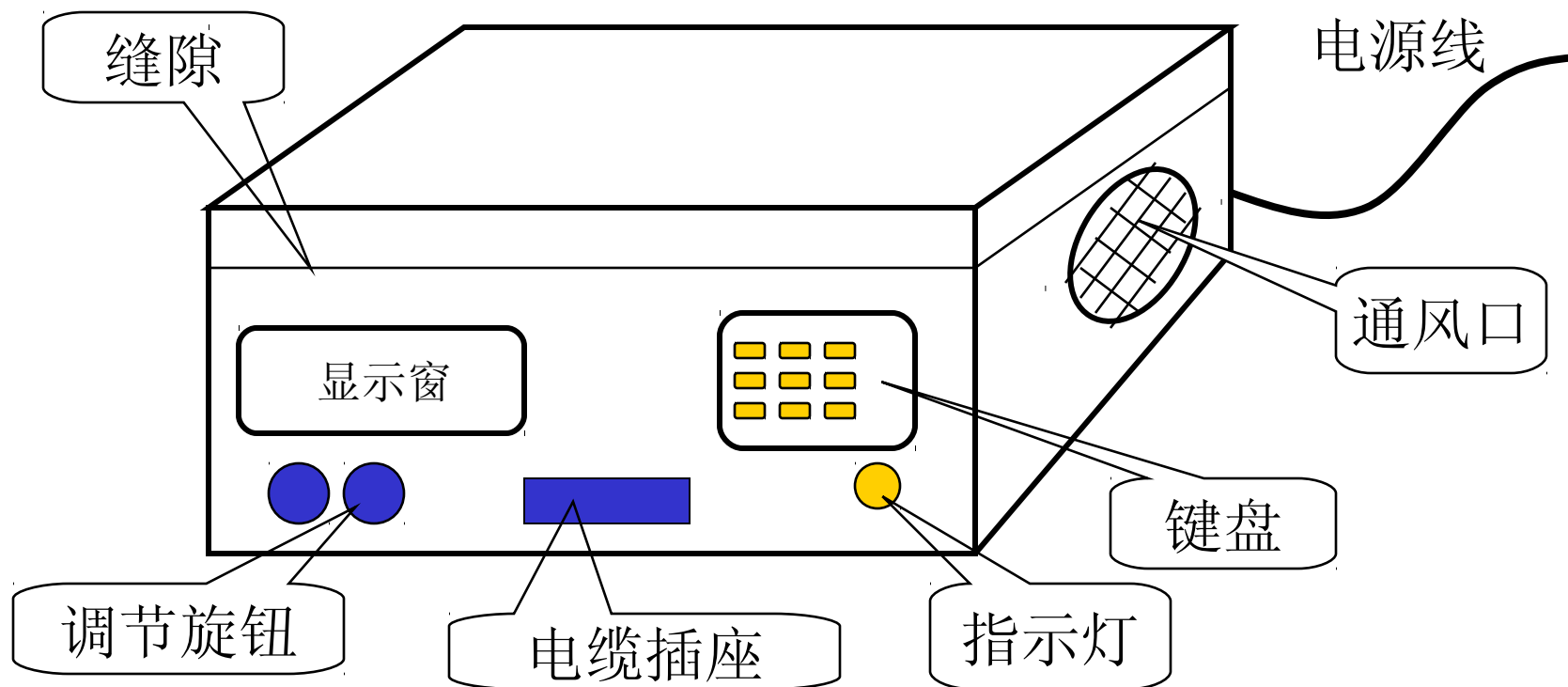
你知道吗：

与屏蔽体接地与否无关

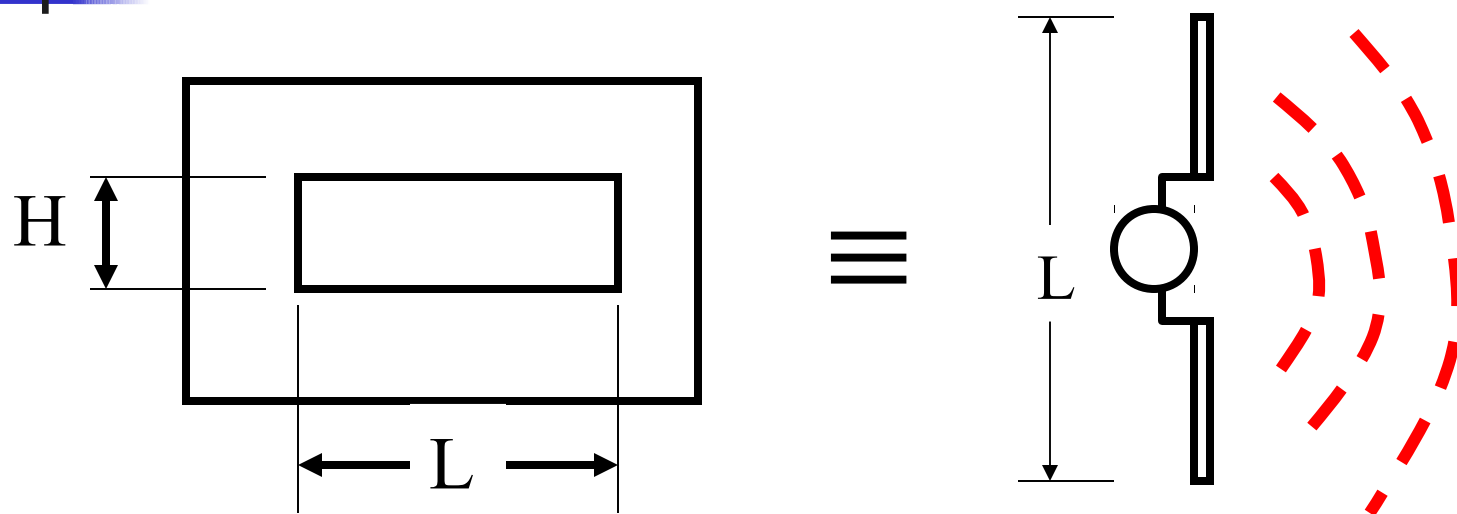
屏蔽效能高的屏蔽体

实际屏蔽体的问题

实际机箱上有许多泄漏源：不同部分结合处的缝隙通风口、显示窗、按键、指示灯、电缆线、电源线等



远场区孔洞的屏蔽效能



$$SE = 100 - 20\lg L - 20\lg f + 20\lg (1 + 2.31\lg(L/H))$$
$$= 0 \text{ dB} \quad \text{若 } L \geq \lambda / 2$$



孔洞在近场区的屏蔽效能

若 $Z_c > (7.9/Df)$: (说明是电场源)

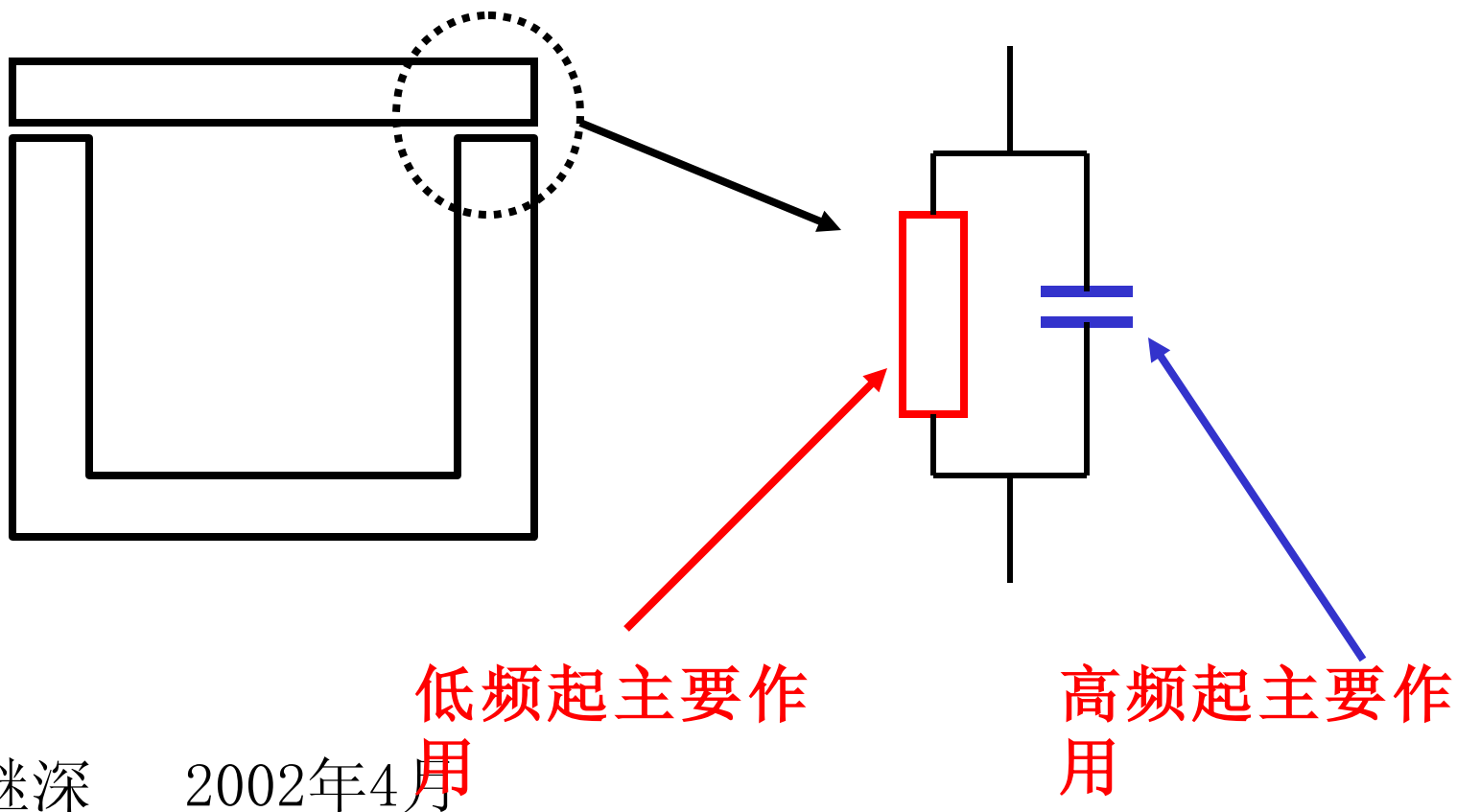
$$SE = 48 + 20\lg Z_c - 20\lg L f \\ + 20\lg (1 + 2.3\lg (L/H))$$

若 $Z_c < (7.9/Df)$: (说明是磁场源)

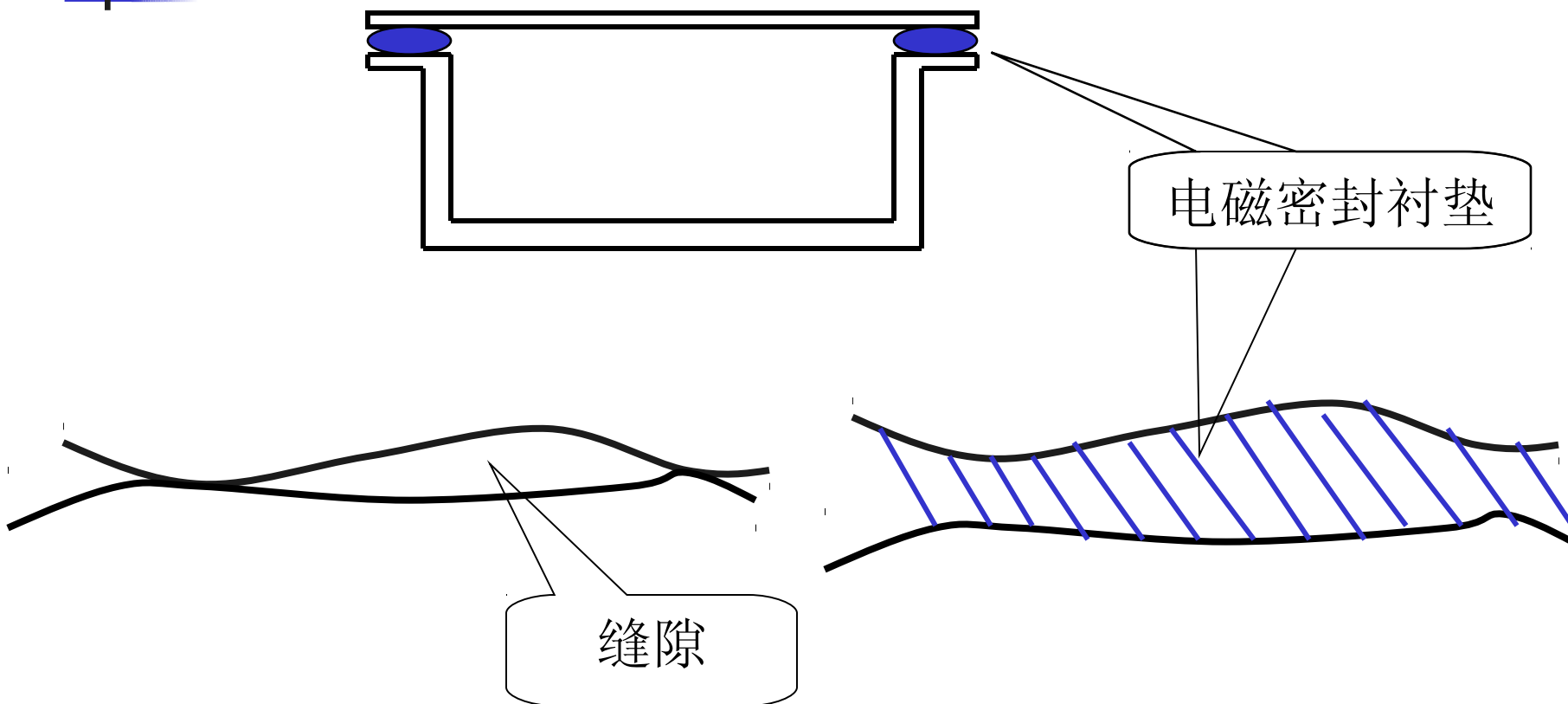
$$SE = 20\lg (\pi D/L) + 20\lg (1 + 2.3\lg (L/H))$$

(注意: 对于磁场源, 屏效与频率无

缝隙的泄漏



缝隙的处理





电磁密封衬垫的种类

- 金属丝网衬垫（带橡胶芯的和空心的）
- 导电橡胶（不同导电填充物的）
- 指形簧片（不同表面涂覆层的）
- 螺旋管衬垫（不锈钢的和镀锡铍铜的）
- 导电布

指形簧片





螺旋管电磁密封衬垫



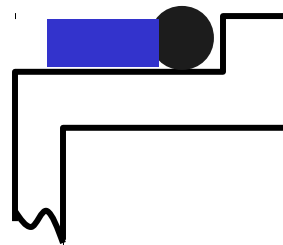
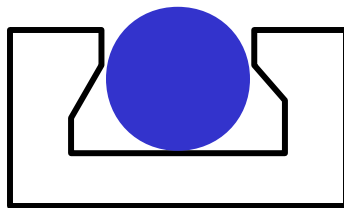
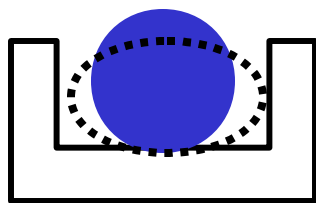
杨继深 2002年4月



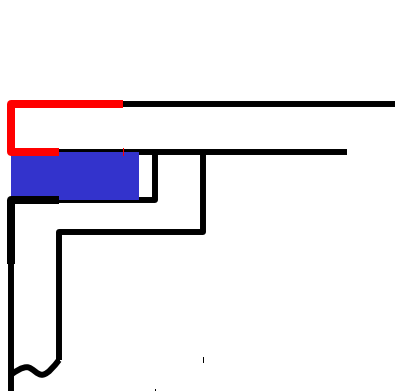
电磁密封衬垫的主要参数

- 屏蔽效能（关系到总体屏蔽效能）
- 回弹力（关系到盖板的刚度和螺钉间距）
- 最小密封压力（关系到最小压缩量）
- 最大形变量（关系到最大压缩量）
- 压缩永久形变（关系到允许盖板开关次数）
- 杨氏模量²⁰⁰²和蠕变⁴性（关系到屏蔽效能的稳定

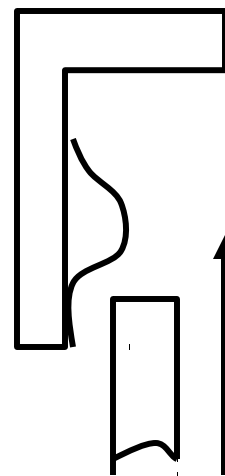
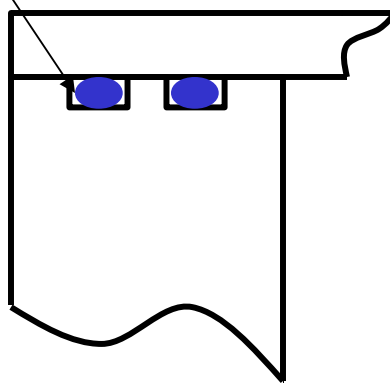
电磁密封衬垫的安装方法



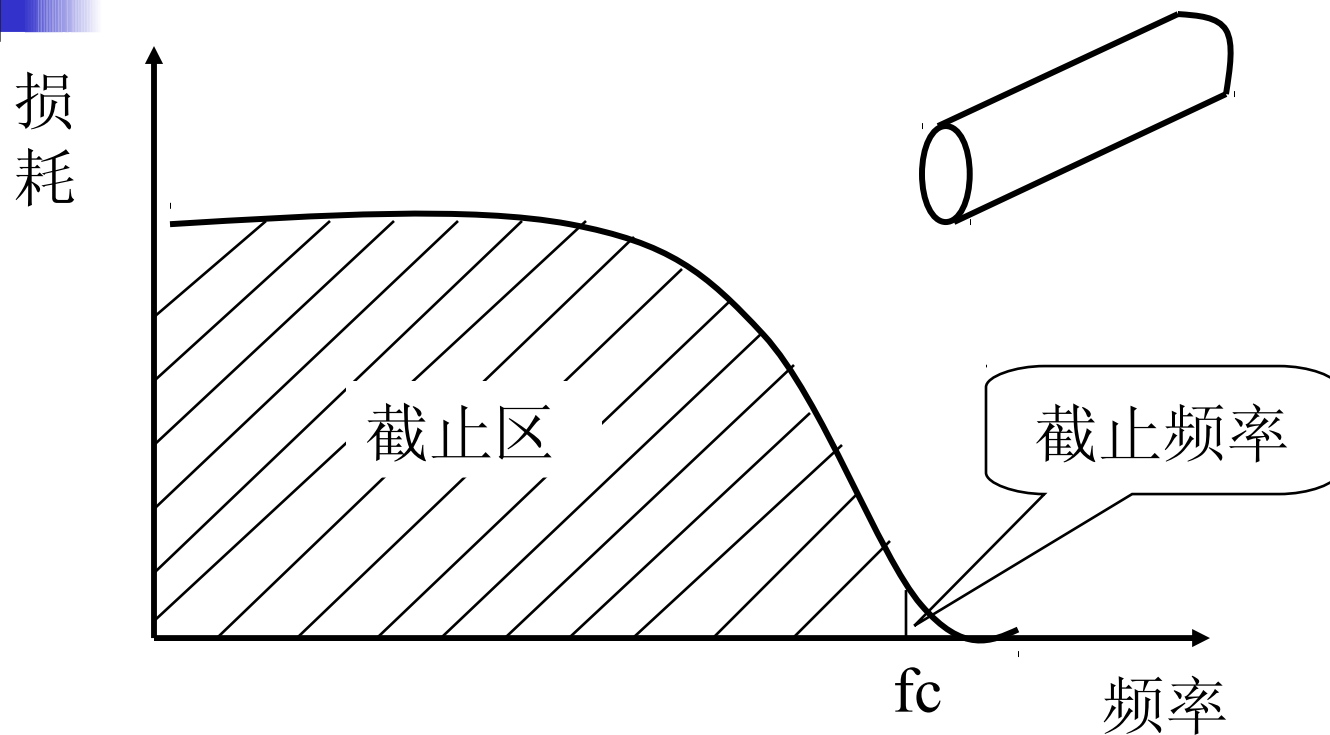
绝缘漆



环境密封



截止波导管



频率高的电磁波能通过波导管，频率低的电磁波损耗很大！工作在截止区的波导管叫截止波导。



截止波导的屏蔽效能

截止波导管
屏蔽效能

=

反射损耗：
远场区计算公式
近场区计算公式

+

吸收损耗

圆形截止波导
:

$32 t / d$

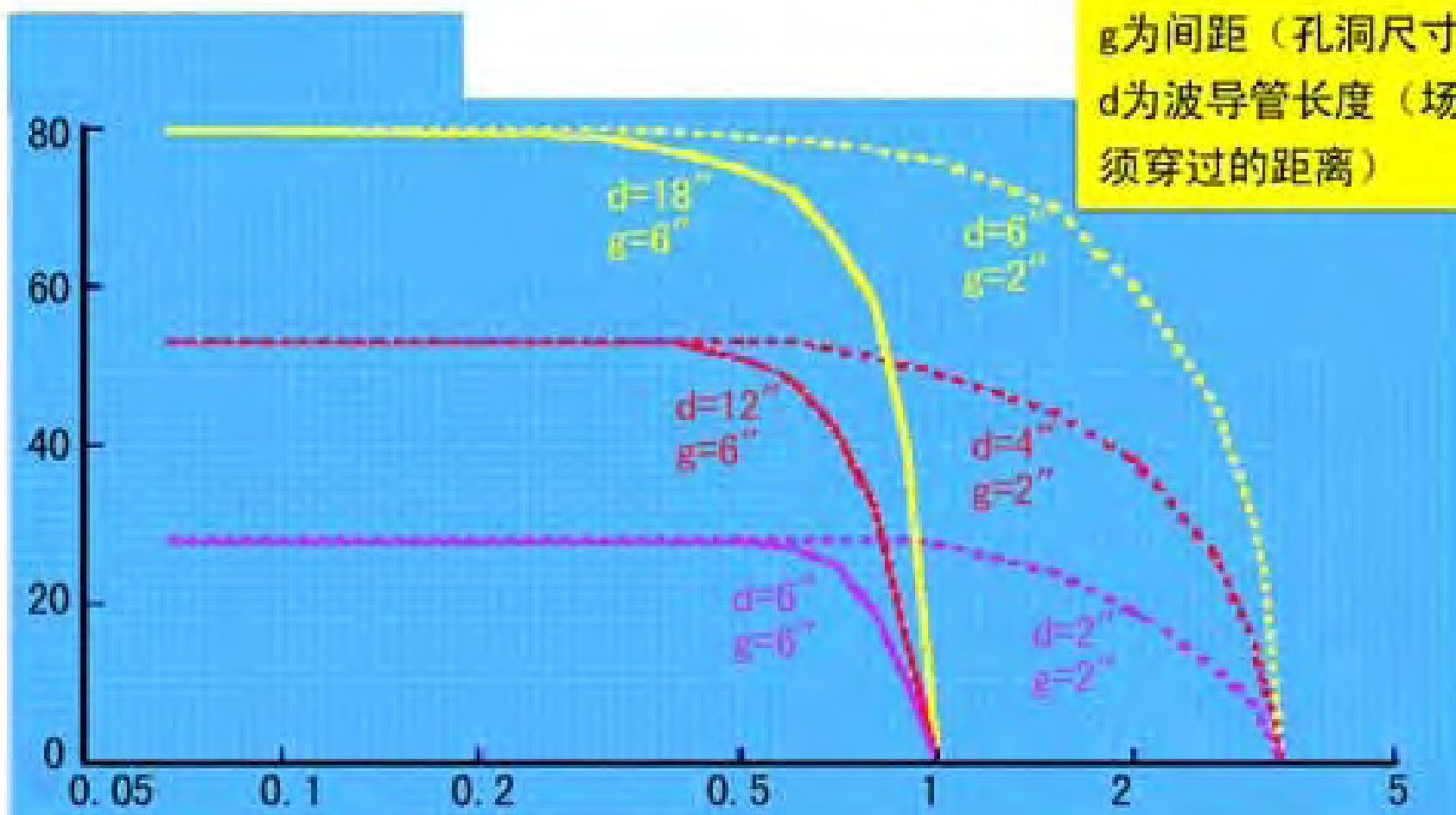
矩形截止波导
:

$27.2 t / l$

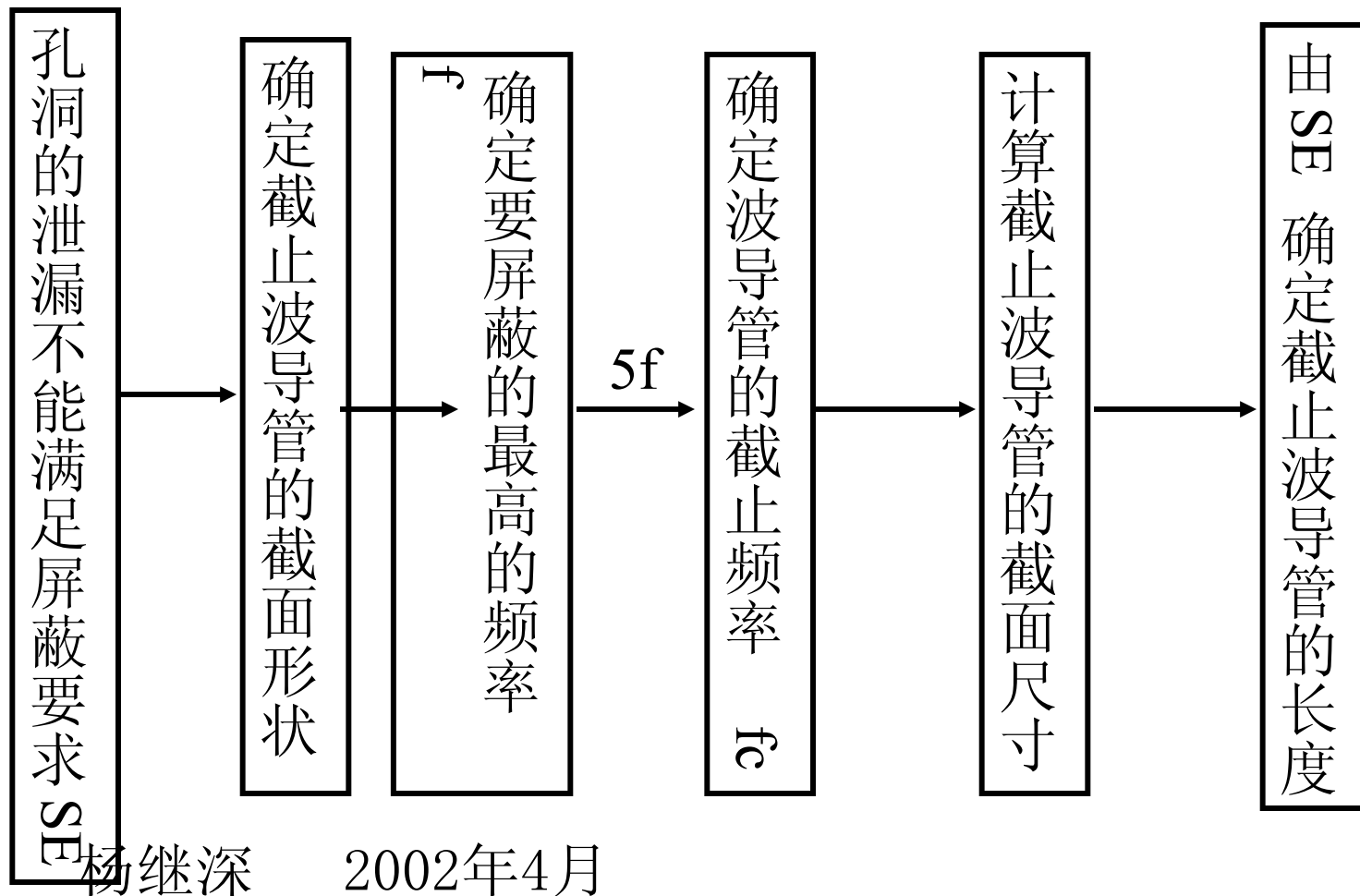
孔洞计算屏蔽效能公
式

截止波导管的损耗

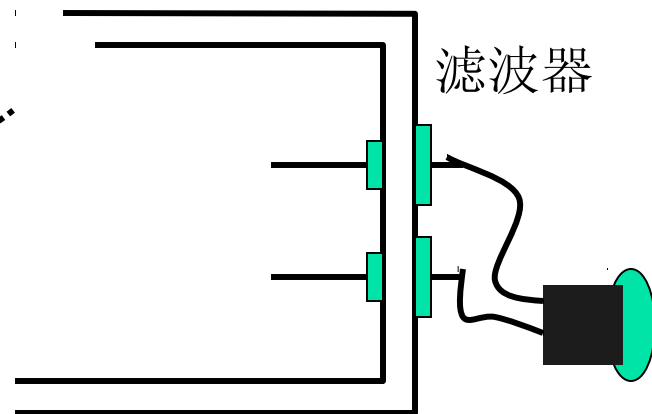
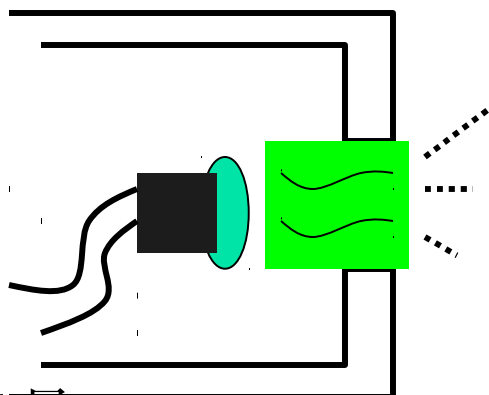
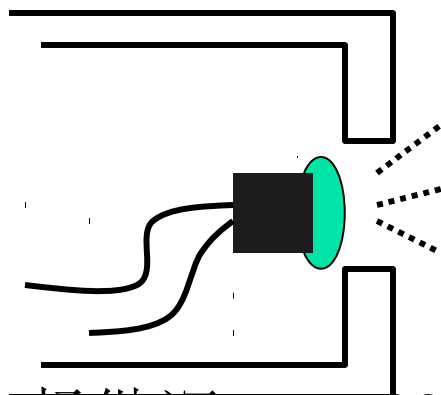
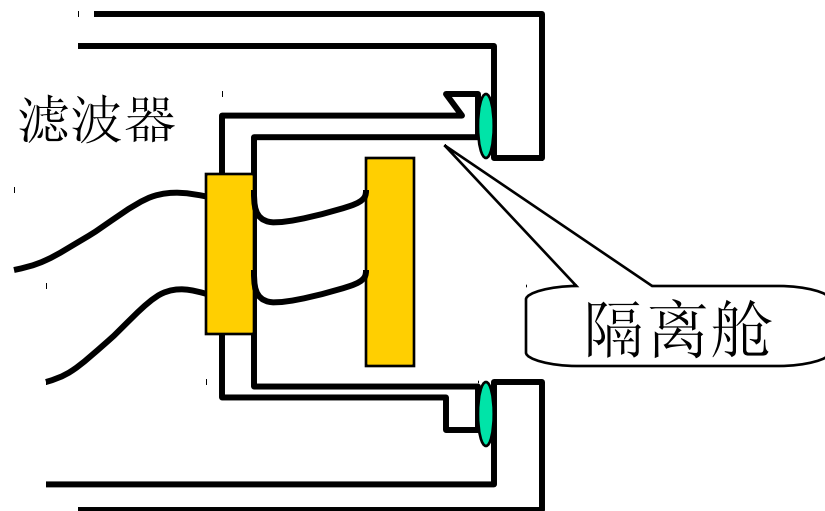
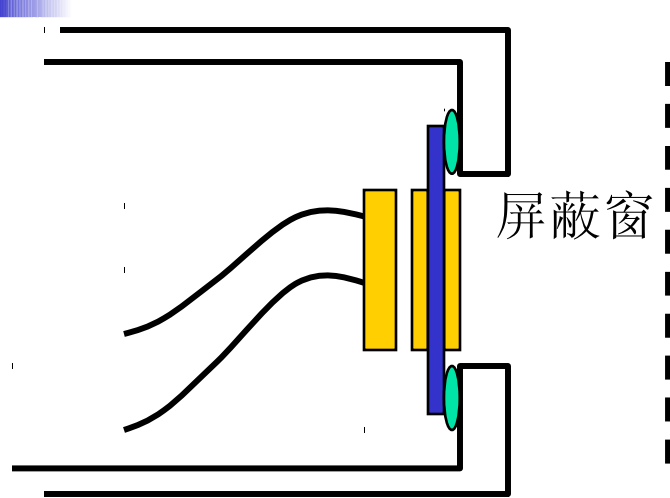
g 为间距（孔洞尺寸）
 d 为波导管长度（场必须穿过的距离）



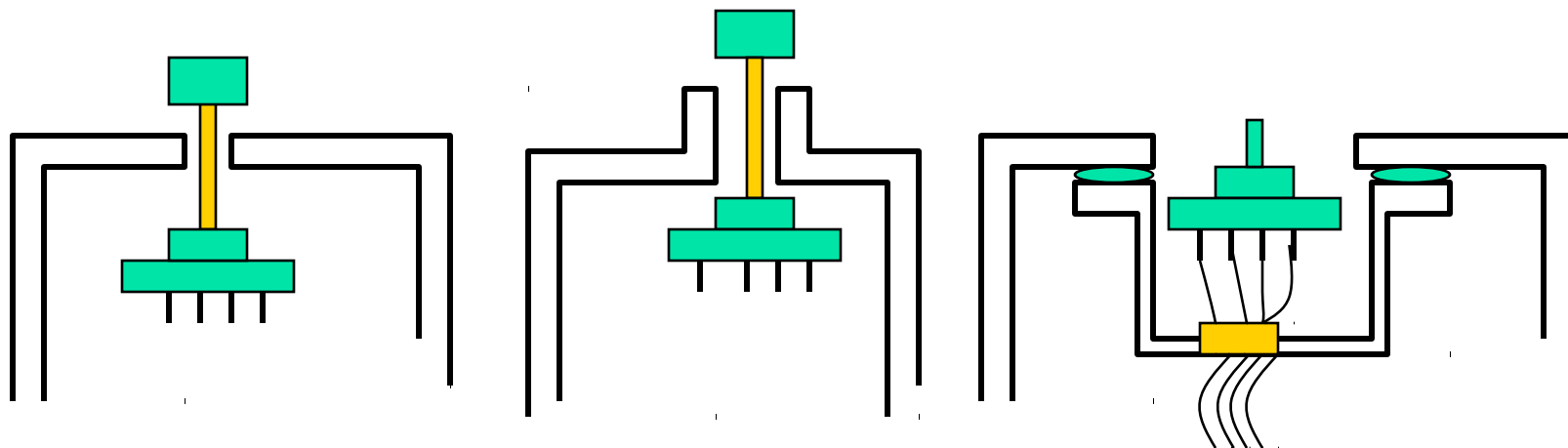
截止波导管的设计步骤



显示窗 / 器件的处理



操作器件的处理



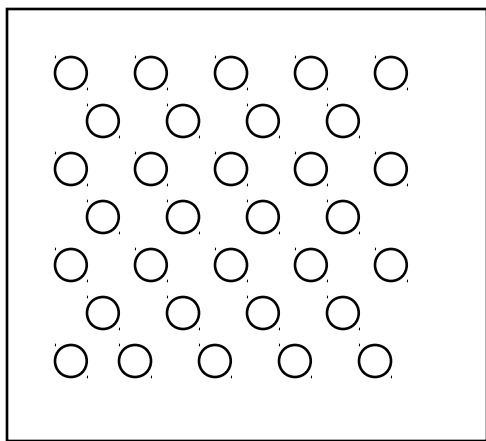
屏蔽体上
开小孔

屏蔽体上
栽上截止
波导管

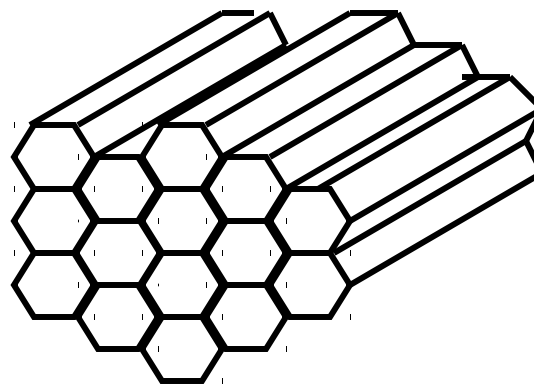
用隔离舱
将操作器
件隔离出



通风口的处理



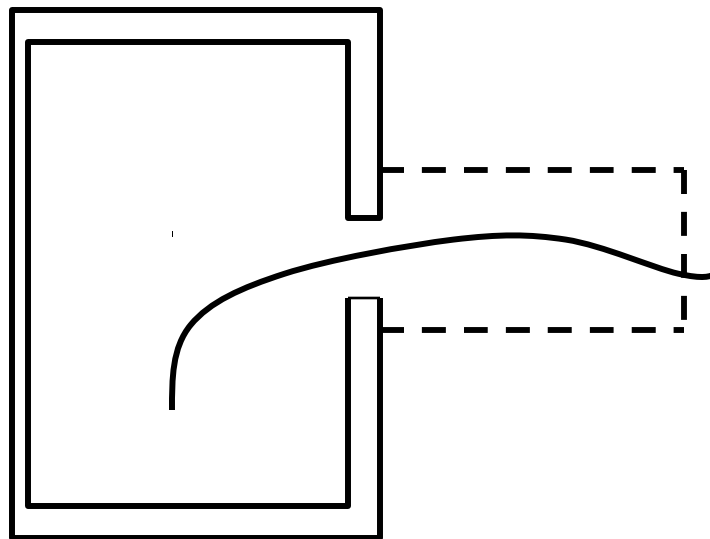
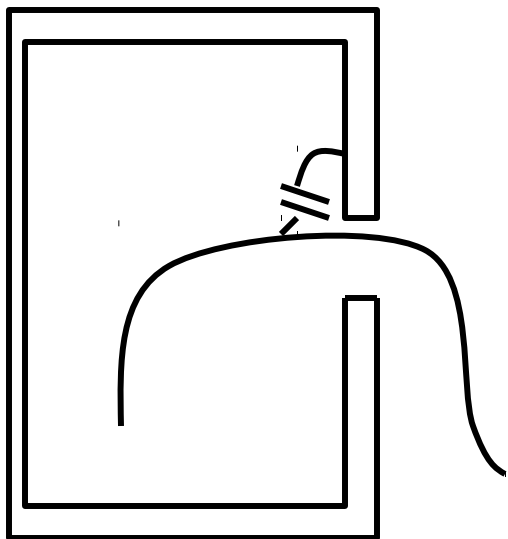
穿孔金属板



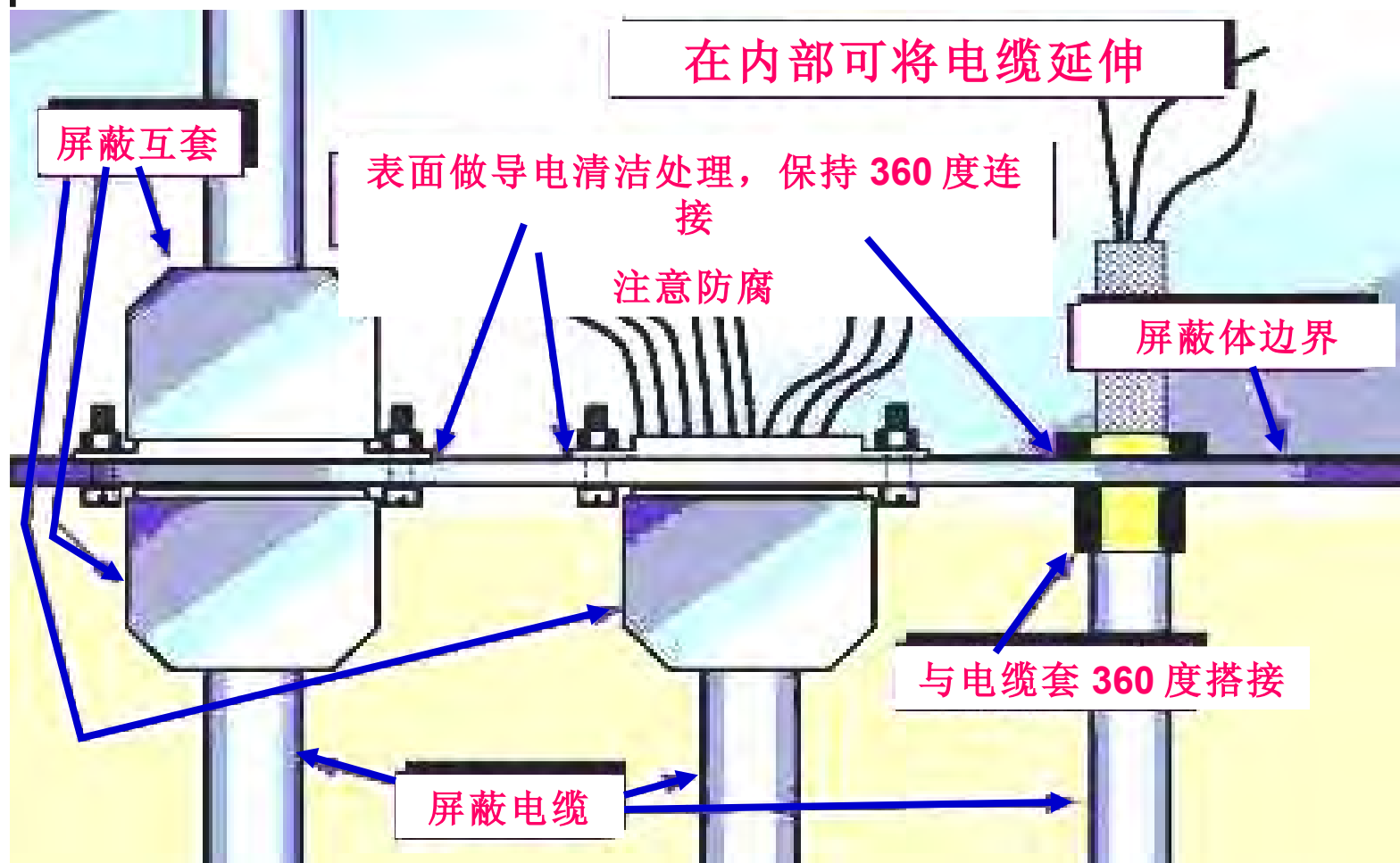
截止波导通风板



贯通导体的处理



屏蔽电缆穿过屏蔽机箱的方法



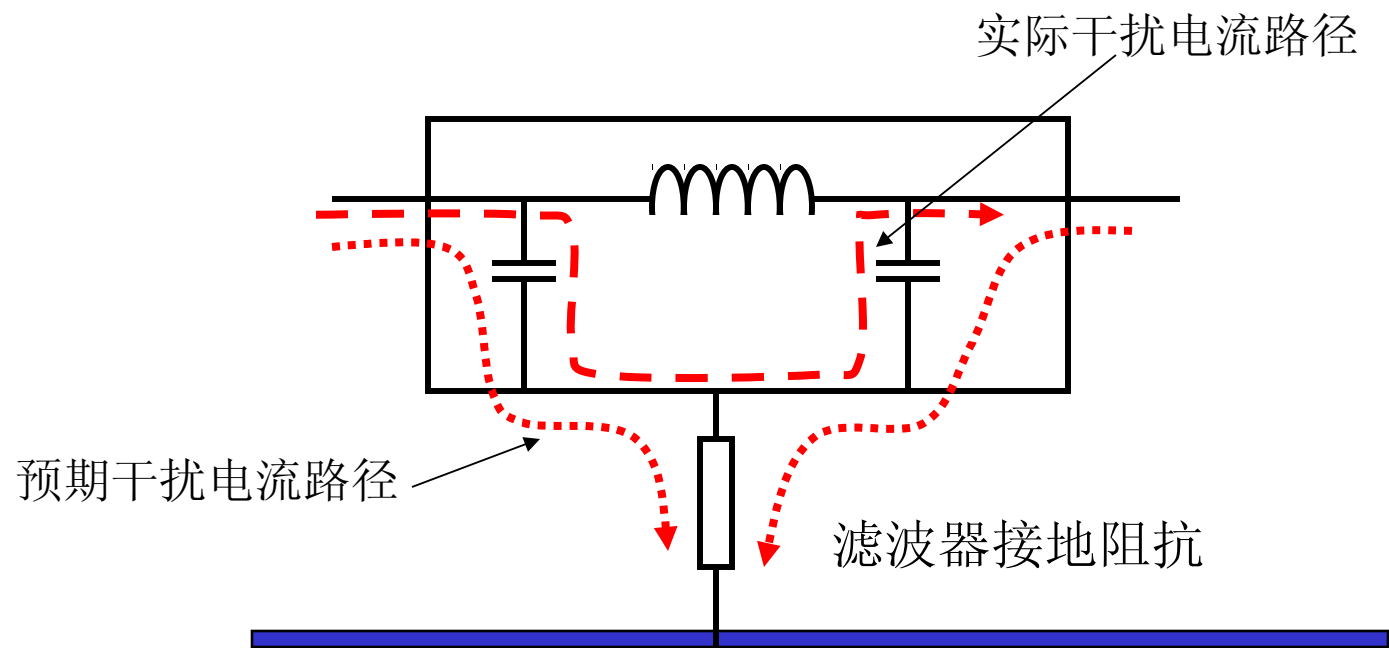


搭接

电子设备中，金属部件之间的低阻抗连接称为搭接。例如：

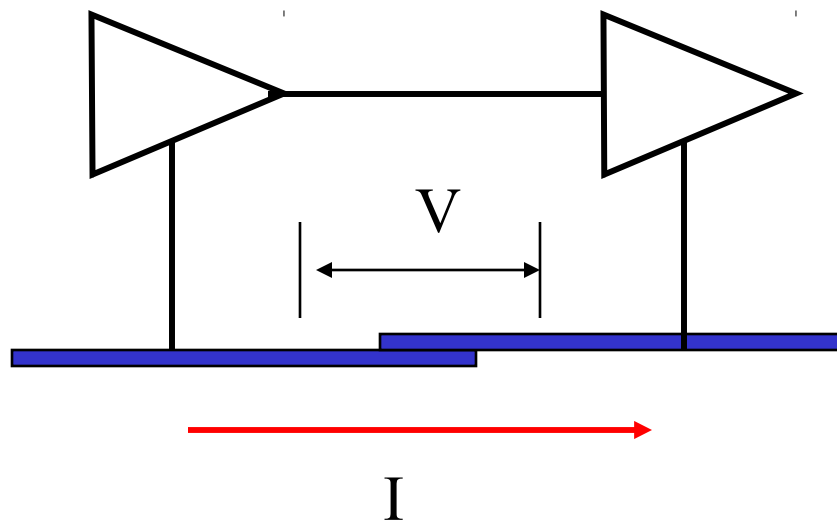
- 电缆屏蔽层与机箱之间搭接
- 屏蔽体上不同部分之间的搭接
- 滤波器与机箱之间的搭接
- 不同机箱之间的地线搭接

搭接不良的滤波器

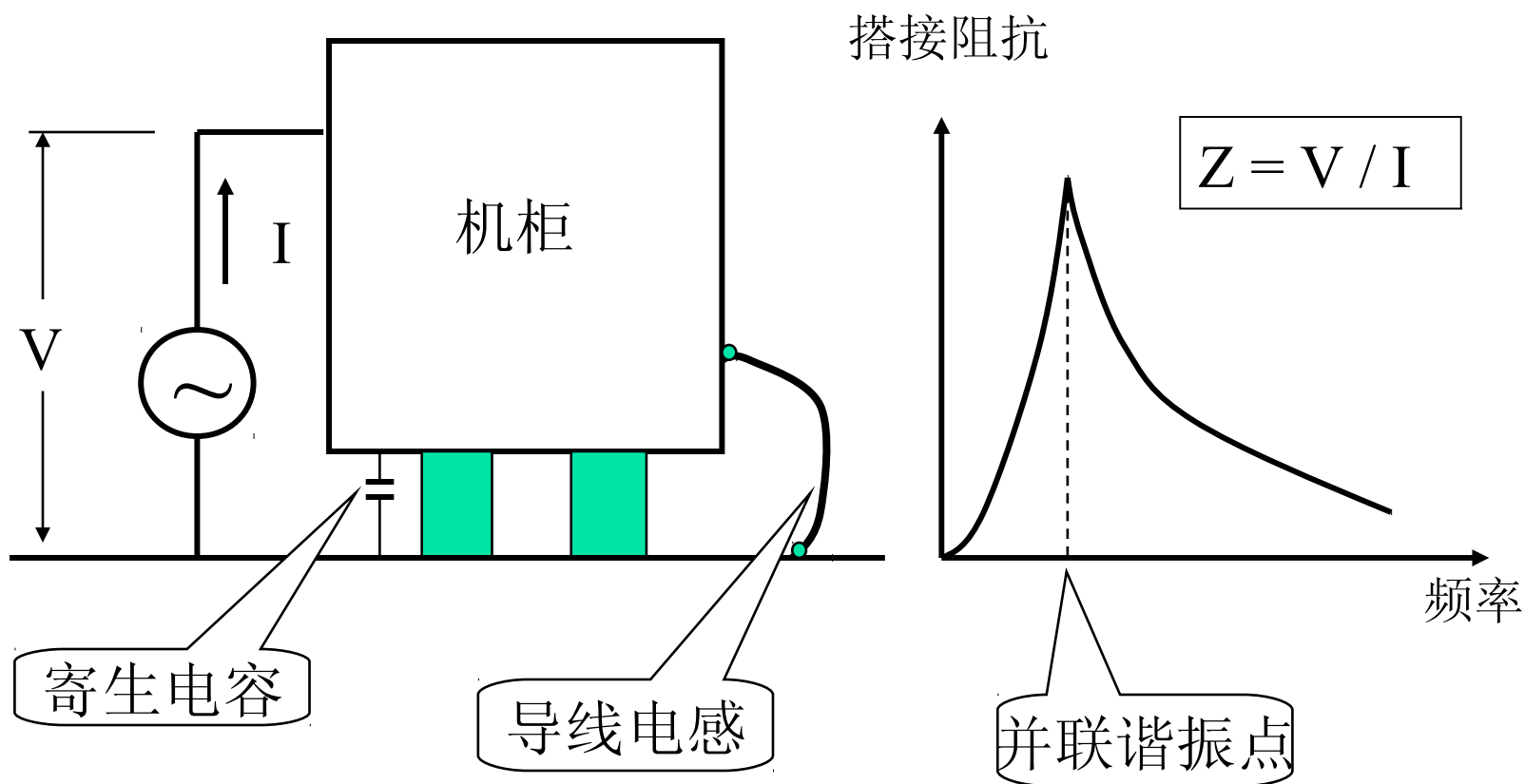


搭接不良的机箱

航天飞行器上的搭接阻抗要小于 $2.5\text{m}\Omega$!



搭接阻抗的测量

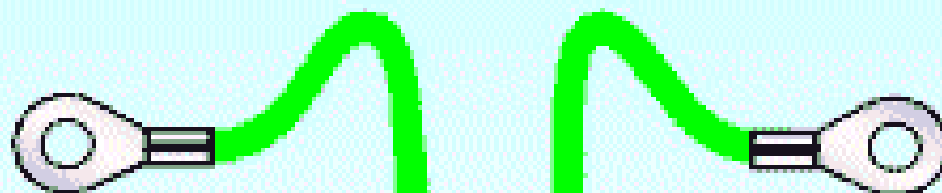


不同的搭接条

Figure 2F Bonding conductors

Only use bonding conductors where direct metal-to-metal bonding is not practical

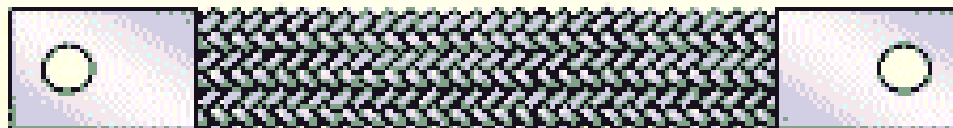
Long wire is OK for DC-60Hz
but poor for higher frequency EMC



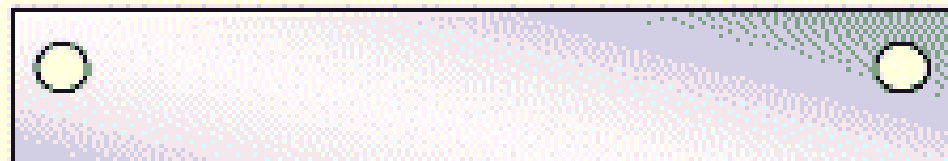
Minimum wire length is better for
control of higher frequencies



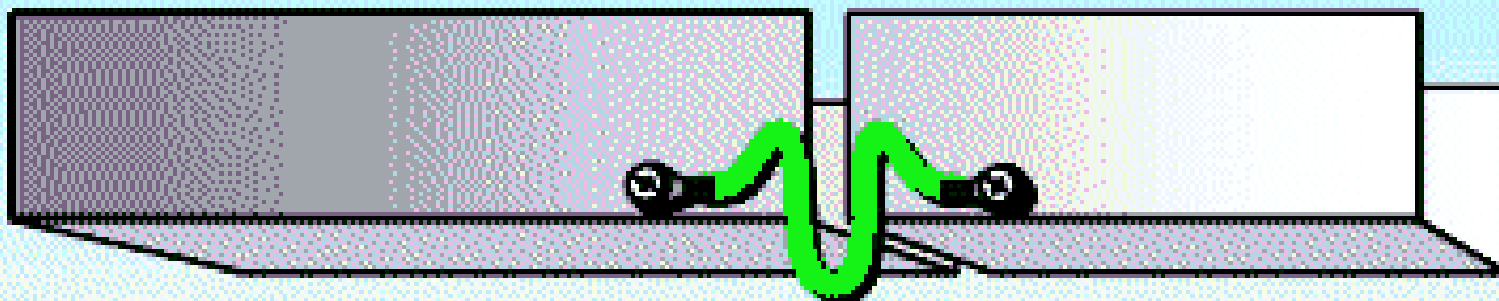
Short, wide braid strap on its own is
good up to approximately 3MHz



Short wide metal plates (with multiple
bonds) are better for controlling high
frequencies, but direct metal-metal



频率不同搭接方式不同



直流或低频时宜采用长导线，但在较高频率时最好使用短、宽的带状线（每边一根）



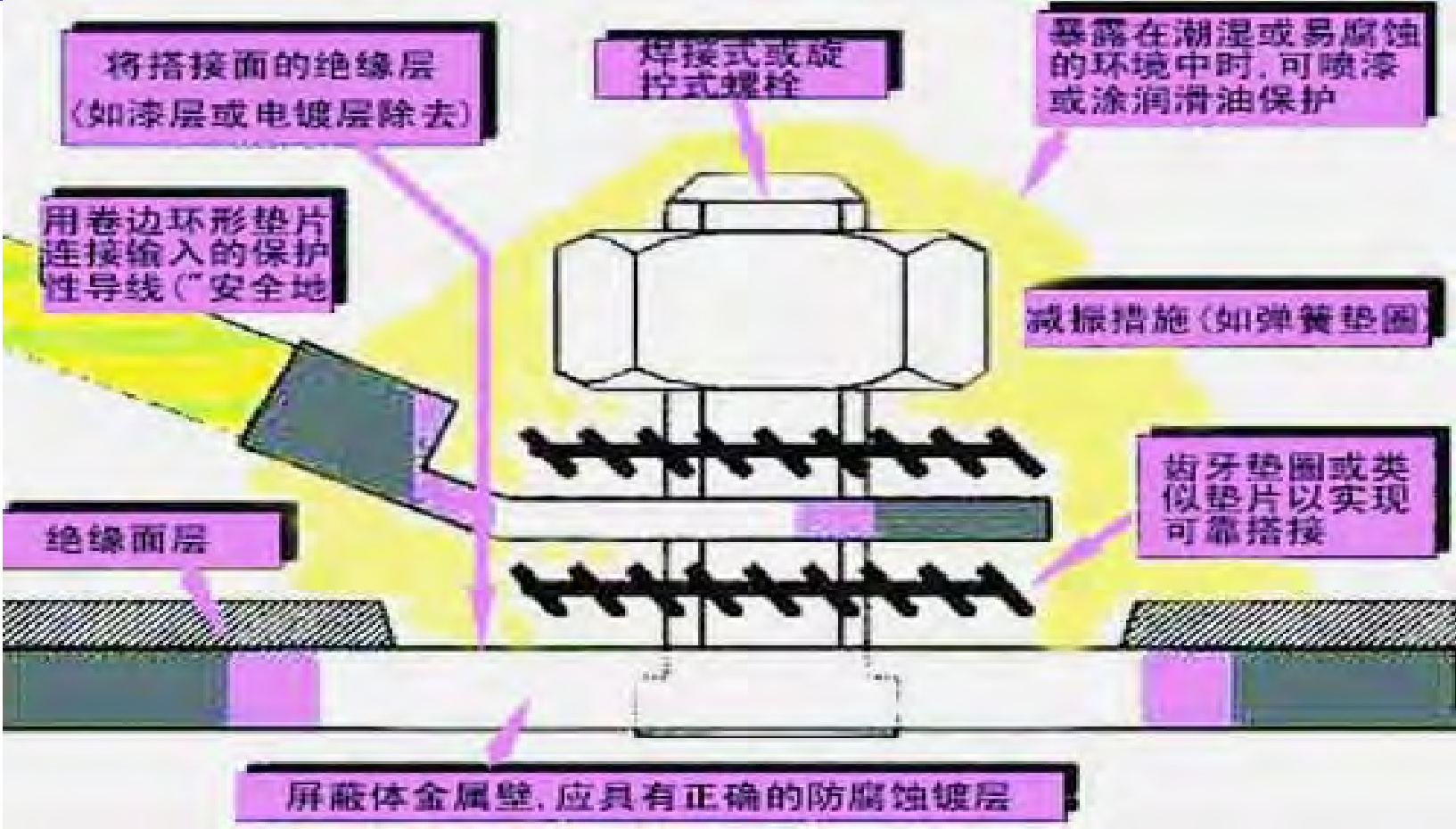
可用带多个紧固螺钉的 U 形托架来控制高频，但最好将接头焊接

如果整个电缆沟槽和导管电气搭接，则其外部的压片也可改善电磁兼容性



搭接面的腐蚀

	金属	电极电位	金属	电极电位	
I	镁 / 镁合金	- 2.37			
II	铍	- 1.85	铜	+ 0.34	IV
	铝	- 1.66	蒙乃尔合金		
	锌	- 0.76	不锈钢		
	铬	- 0.74	银	+ 0.799	
III	铁/钢/铸铁	- 0.44	铂	+ 1.200	
	镉	- 0.4	金	+ 1.420	
	镍	- 0.25			
	锡	- 0.14			
	铅	- 0.13			

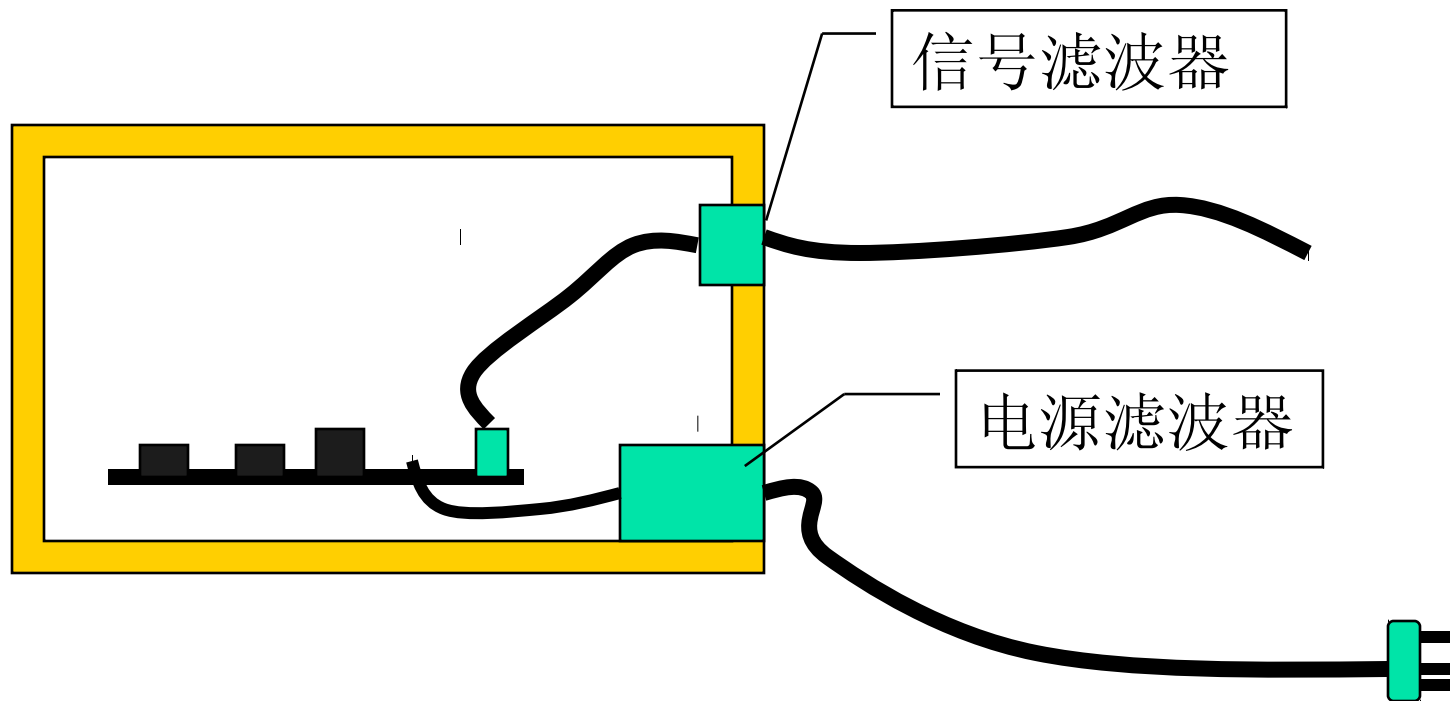




第四章 干扰滤波技术

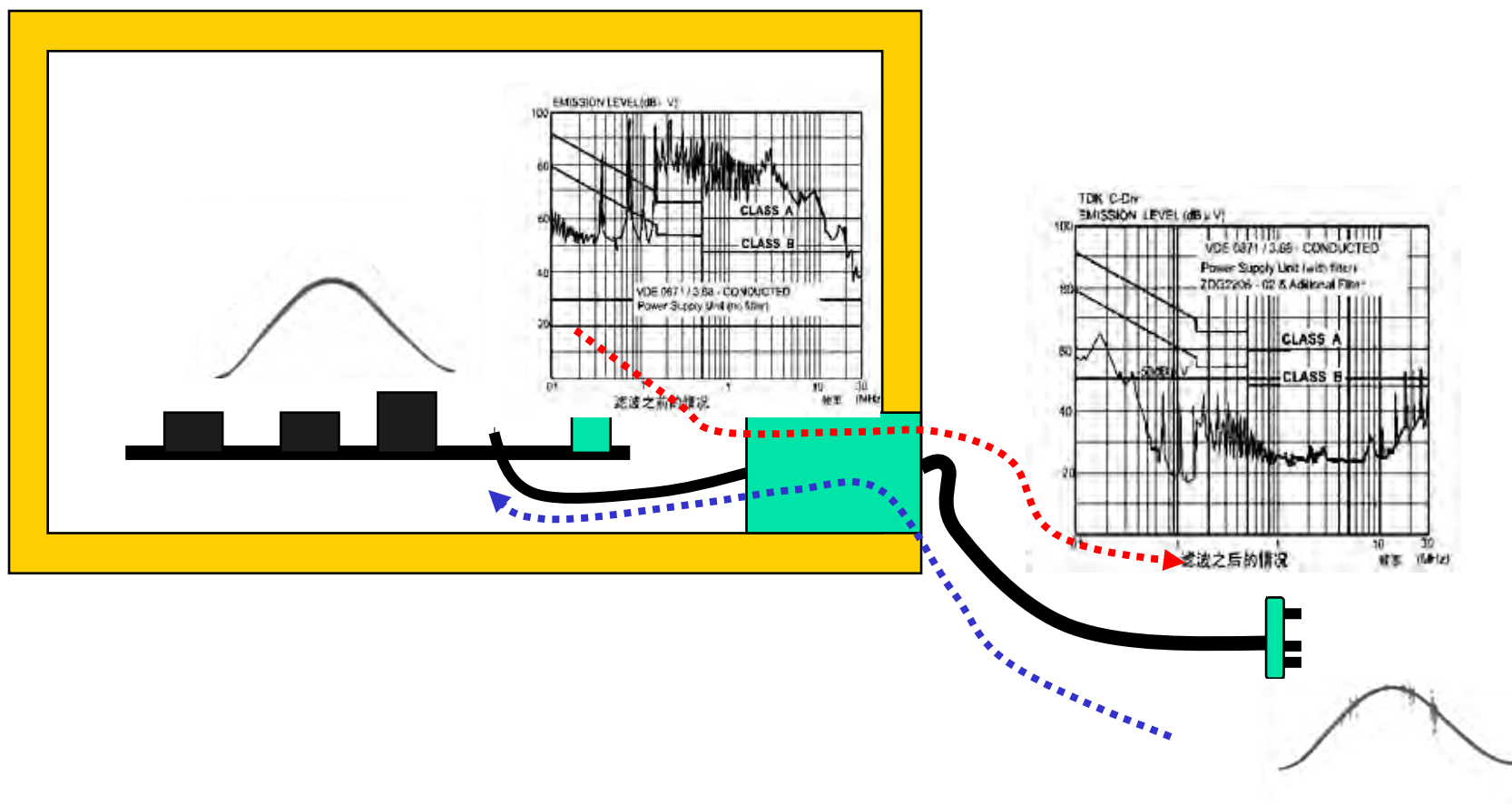
- 干扰滤波在 **EMC** 设计中作用
- 差模干扰和共模干扰
- 常用滤波电路
- 怎样制作有效的滤波器
- 正确使用滤波器

滤波器的作用

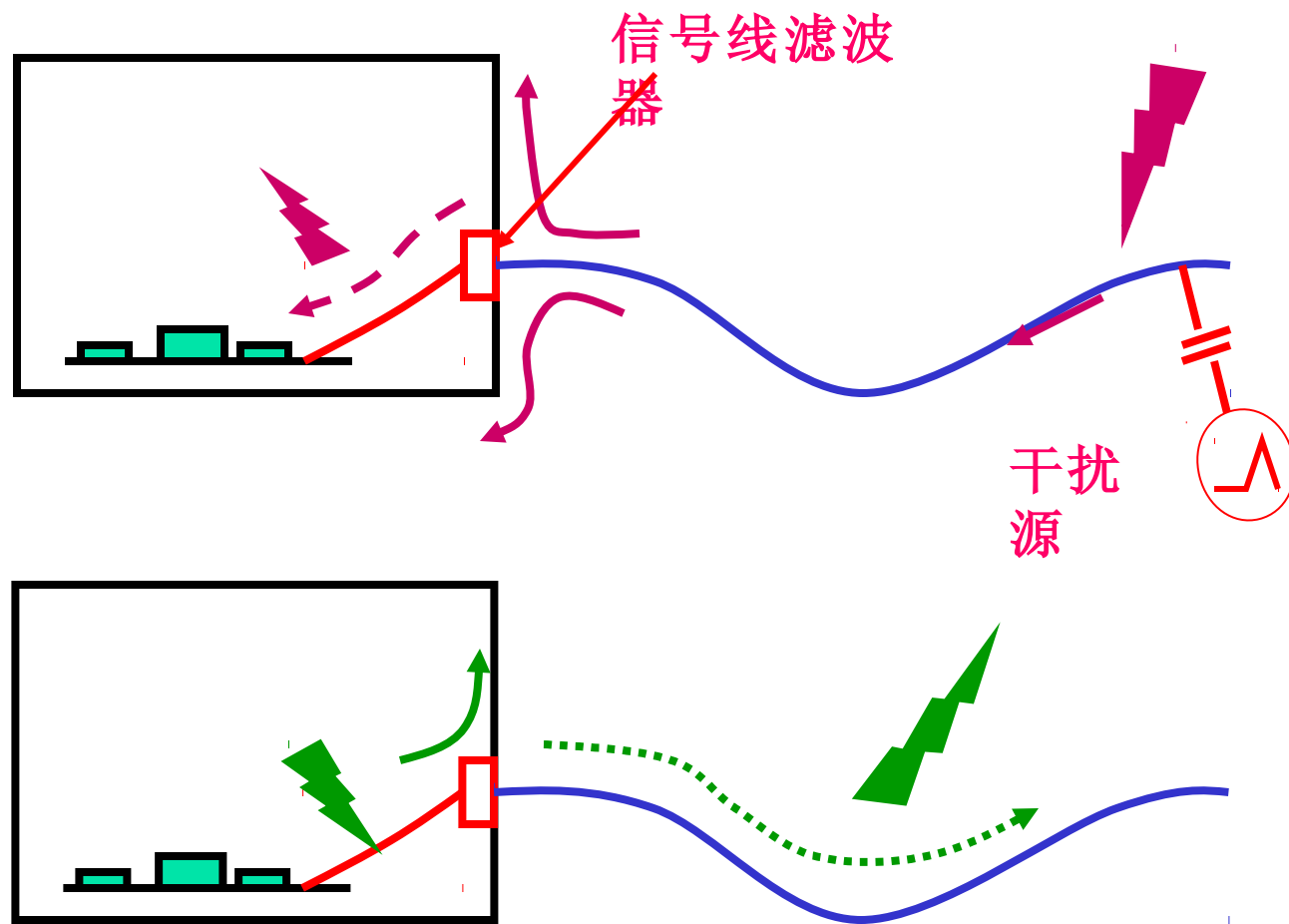


切断干扰沿信号线或电源线传播的路径，与屏蔽共同构成完善的干扰防护。

满足电源线干扰发射和抗扰度要求

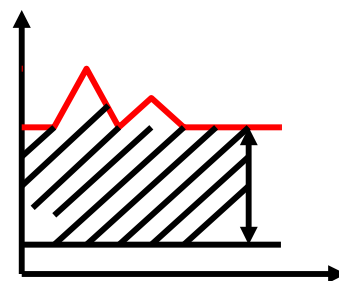
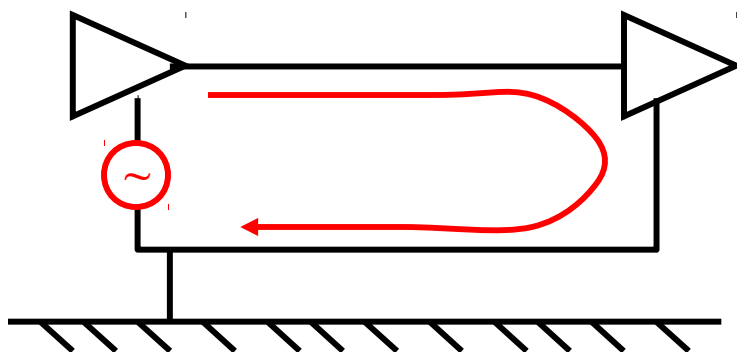
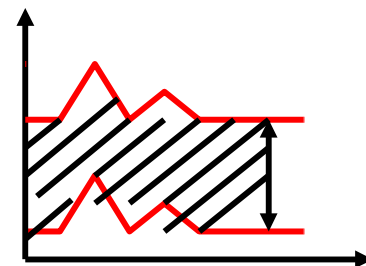
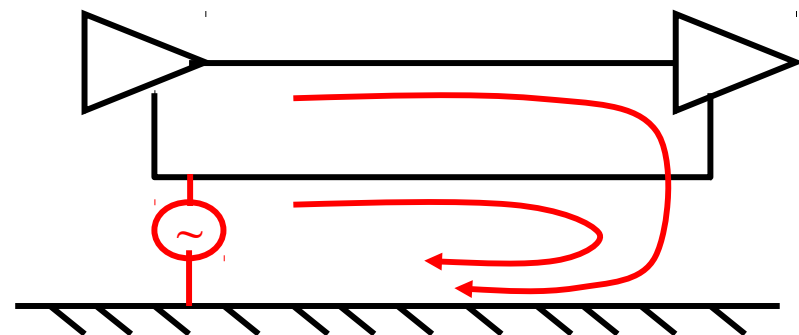


满足抗扰度及设备辐射发射要求

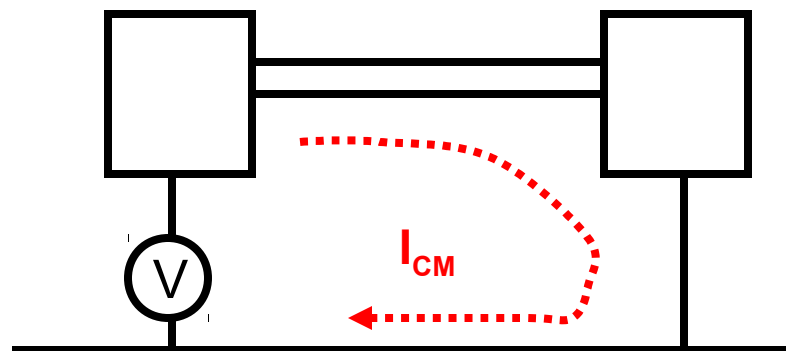
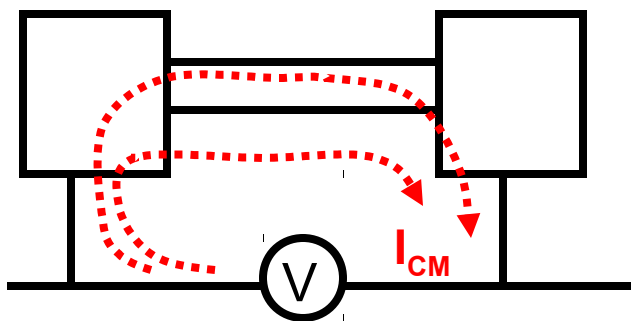
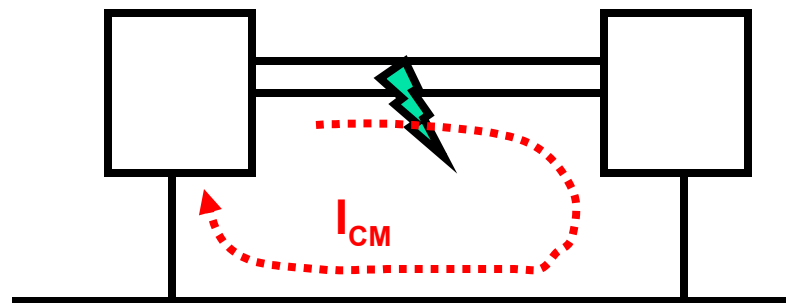
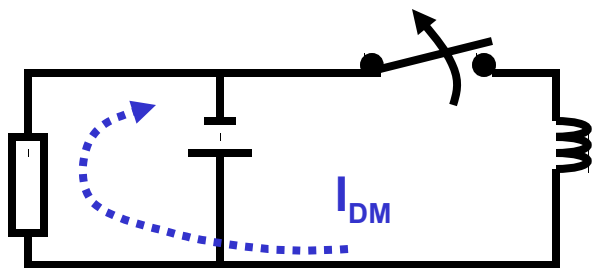


杨继深 2002年4月

共模和差模电流

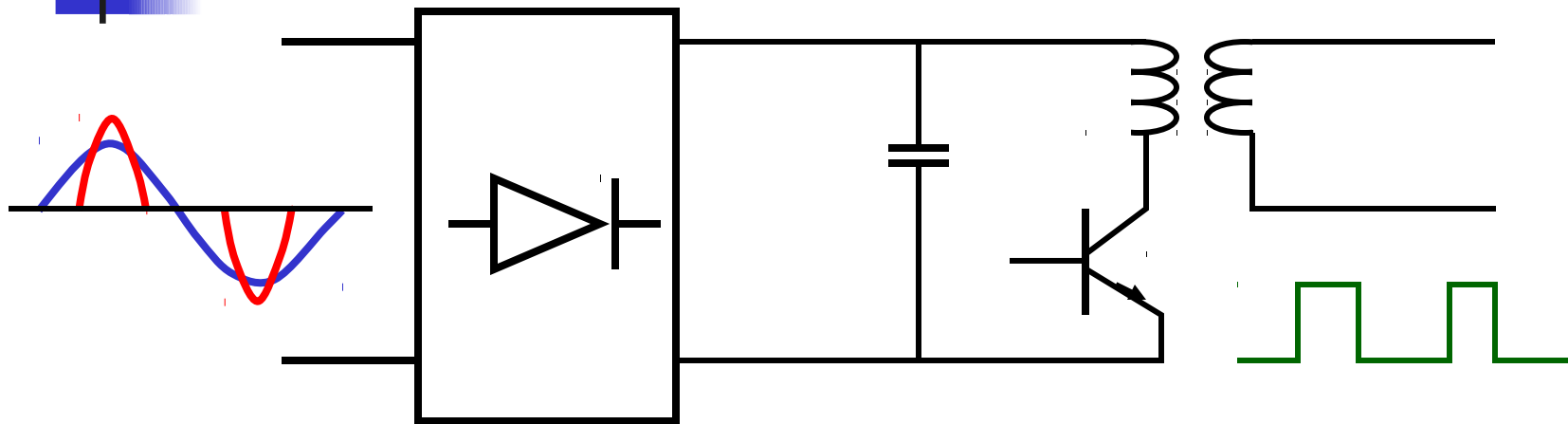


共模 / 差模干扰的产生



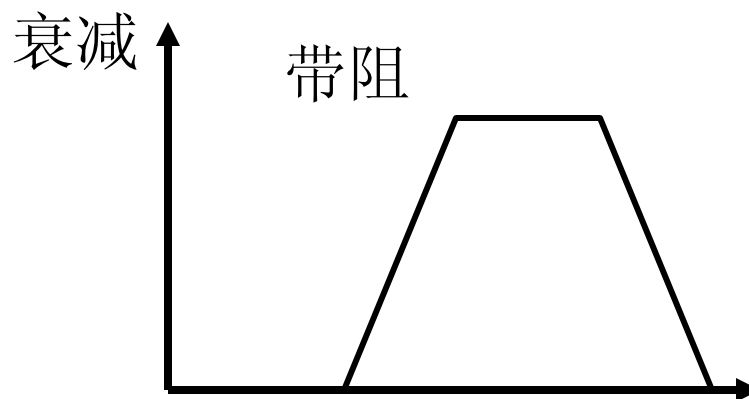
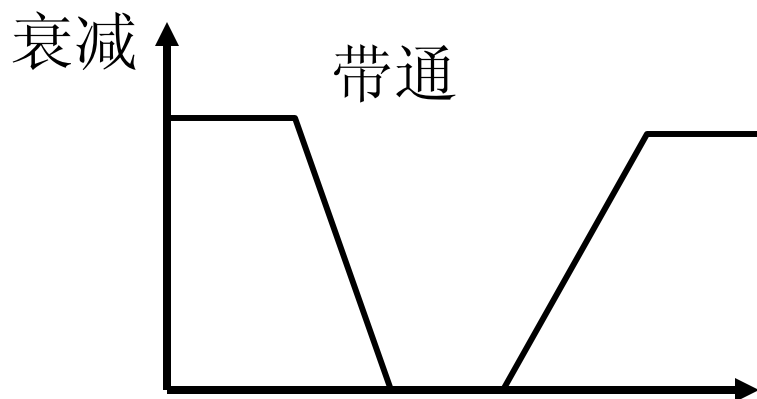
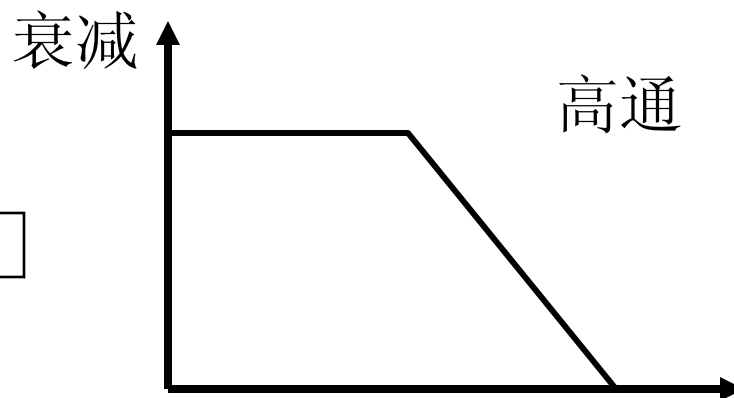
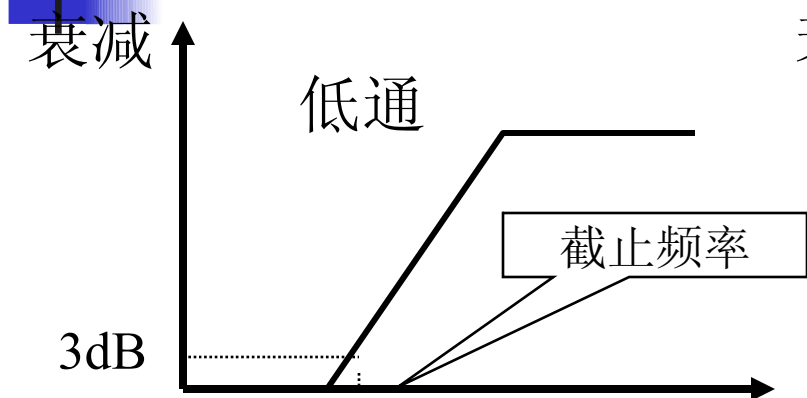


开关电源噪声



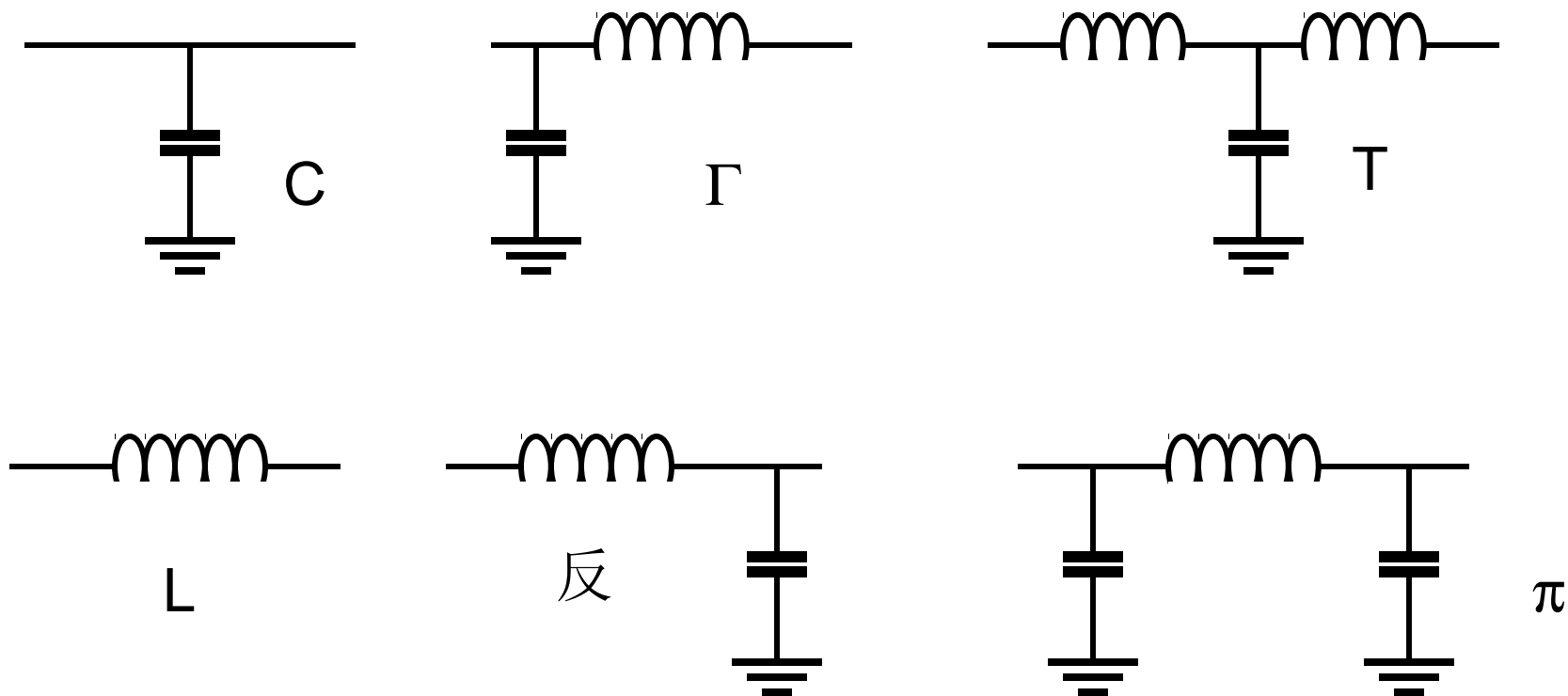
1. **50Hz 的奇次谐波 (1、3、5、7)**
2. **开关频率的基频和谐波 (1MHz 以下差模为主, 1MHz 以上共模为主)**

干扰滤波器的种类

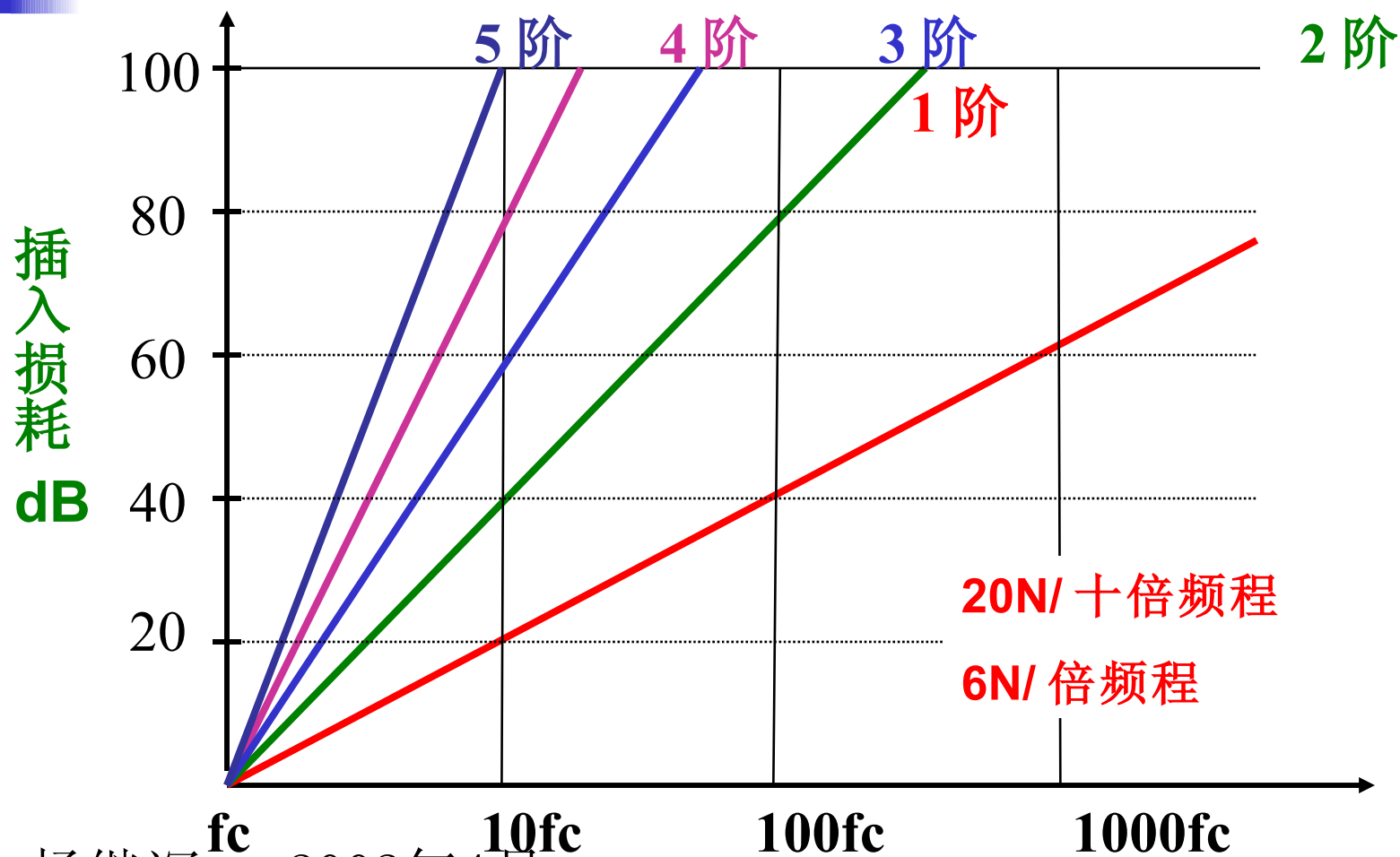




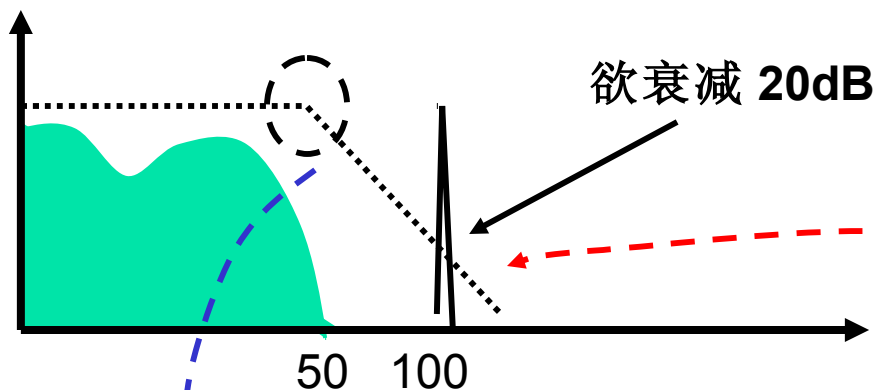
低通滤波器类型



电路与插入损耗的关系

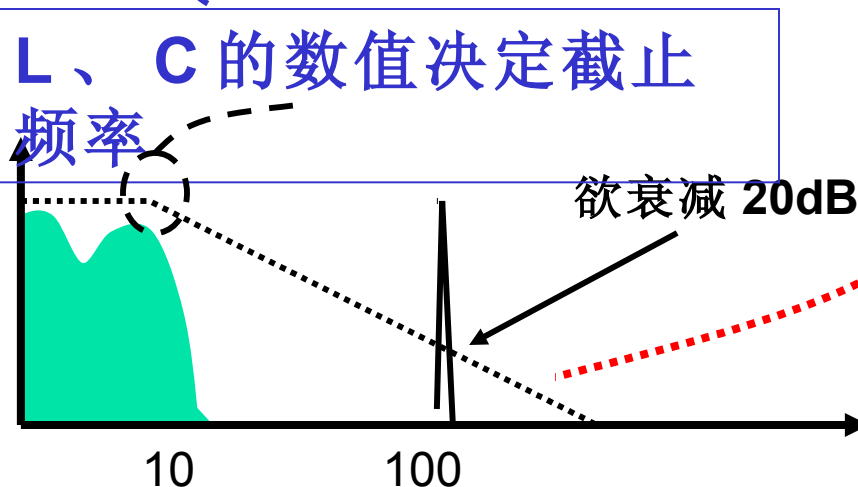


确定滤波器阶数



$$4 \times 6 = 24 > 20$$

至少 4 阶滤波器



阶数决定过渡带的陡度

$$1 \times 20 = 20$$

1 阶滤波器就可以了

为了保险，可用 2 阶

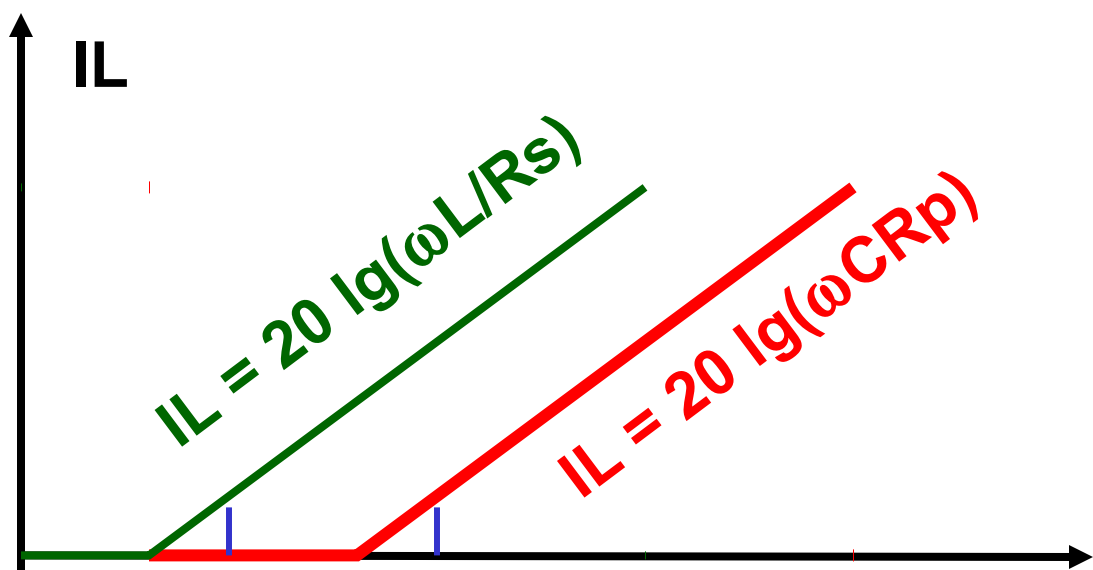


根据阻抗选用滤波电路

源阻抗	电路结构	负载阻抗
高	C、反、多级	高
高	、多级	低
低	反、多级	高
低	L、多级 L	低

规律：反电容对高阻，电感对低阻

插入损耗的估算

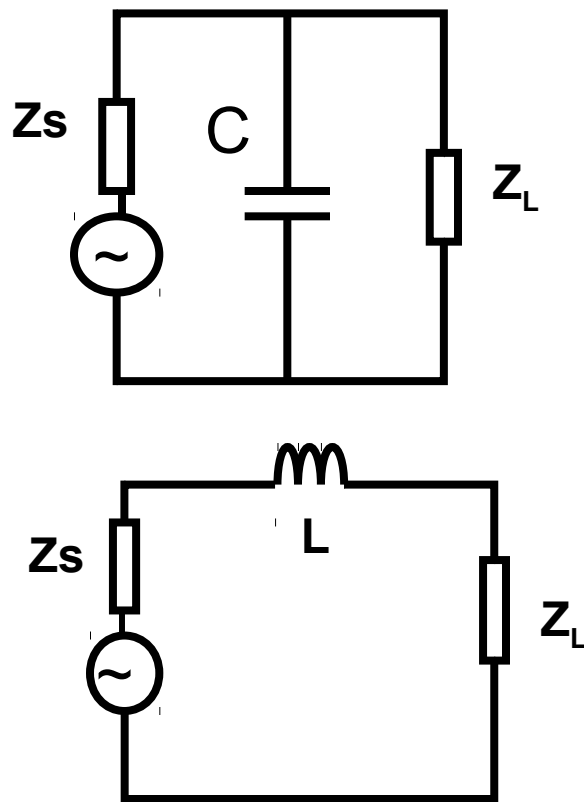


$$F_{co} = 1 / (2\pi R_p C)$$

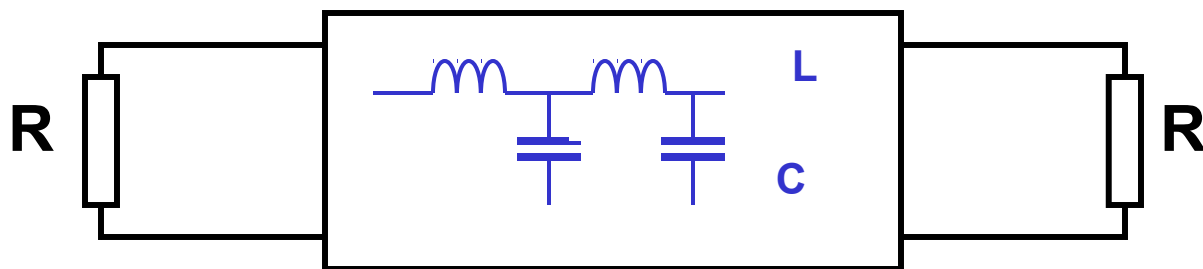
$$F_{co} = R_s / (2\pi L)$$

Z_s 、 Z_L 串

Z_s 、 Z_L 并
联



器件参数的确定

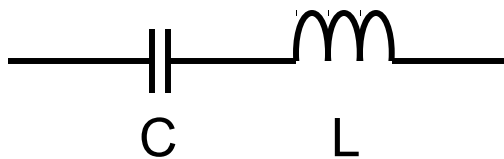
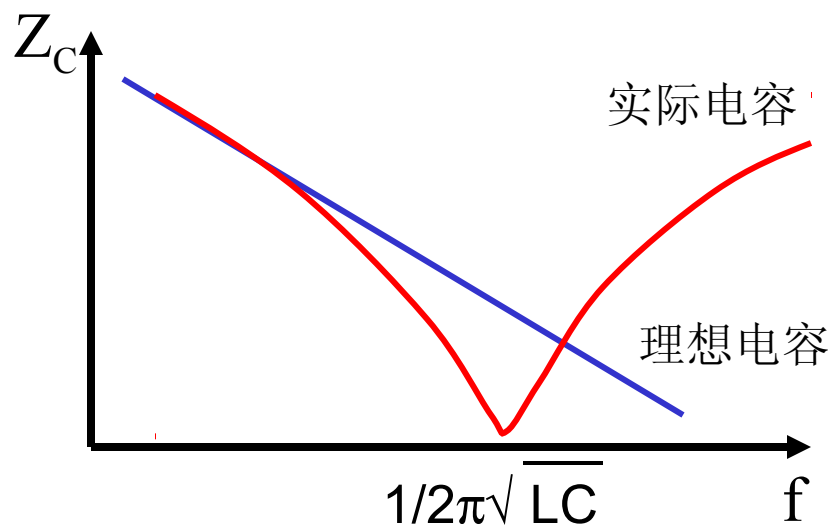


$$L = R / 2\pi F_c$$

$$C = 1 / 2\pi R F_c$$

对于 T 形（多级 T）和 π 形（多级 π ）电路，最外边的电感或电容取 $L/2$ 和 $C/2$ ，中间的不变。

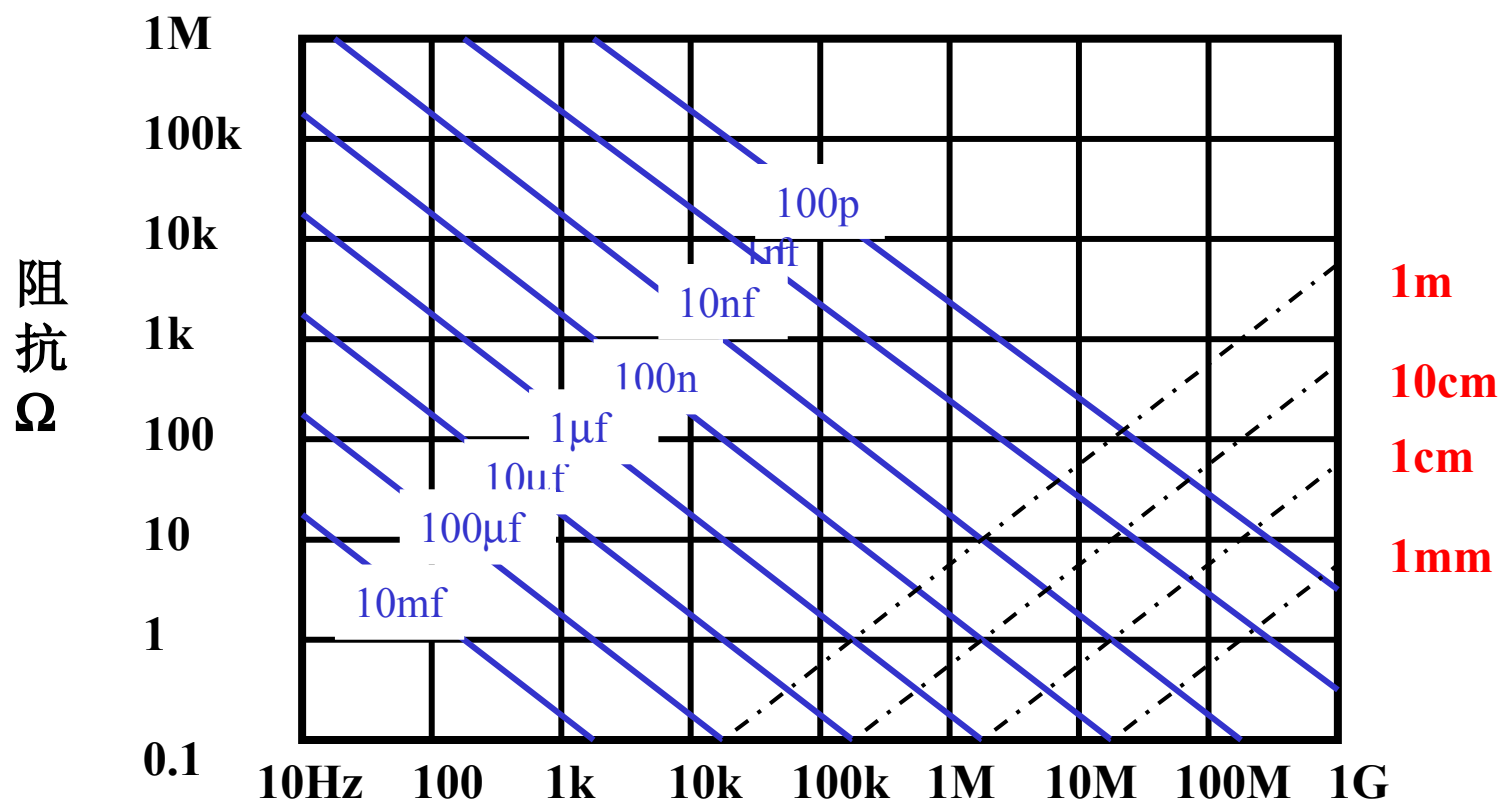
实际电容器的特性



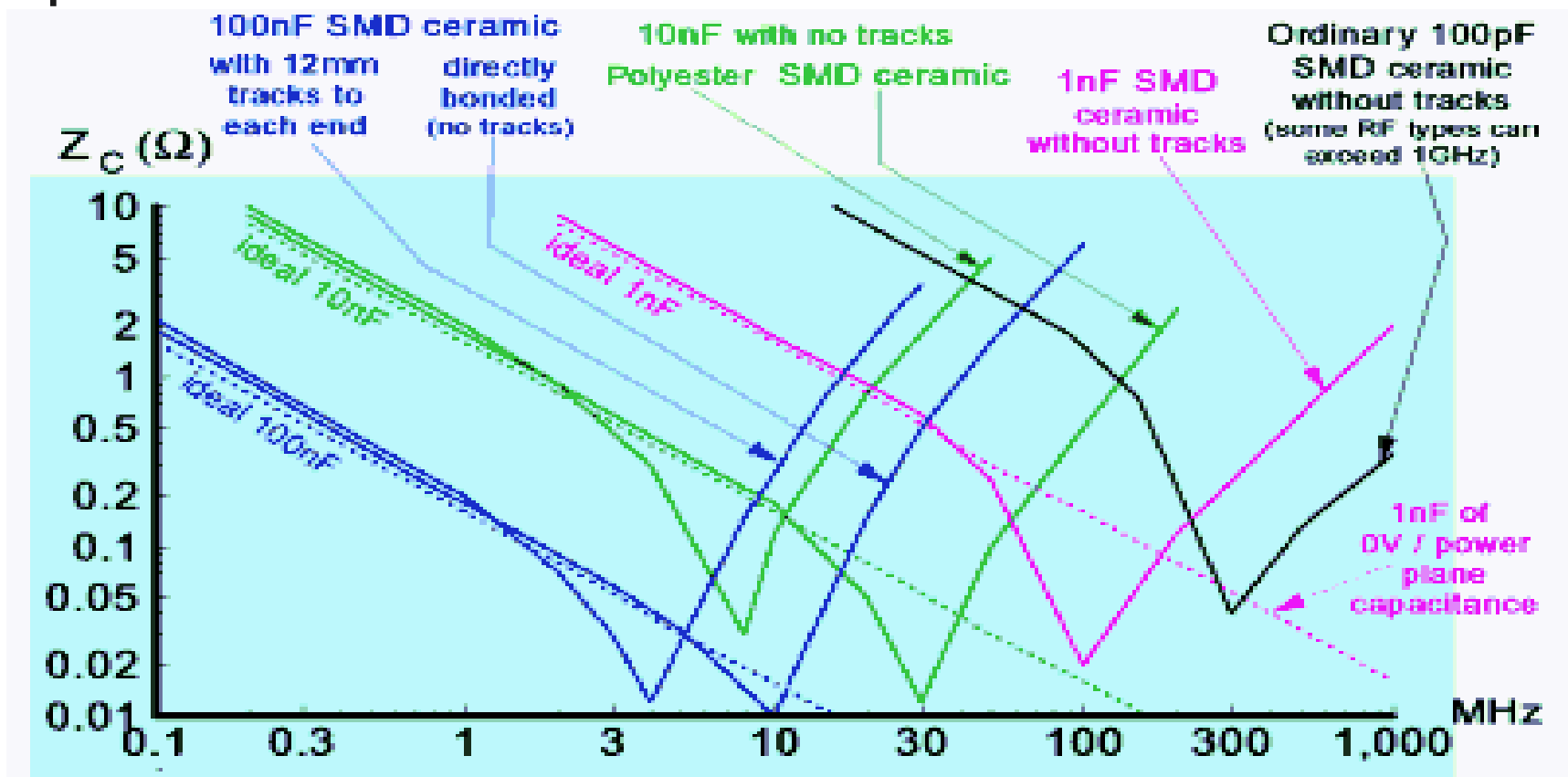
引线长 1.6mm 的陶瓷电容器

	谐振频率 (MHZ)
1 μF	1.7
0.1 μF	4
0.01 μF	12.6
3300 pF	19.3
1100 pF	33
220 pF	66

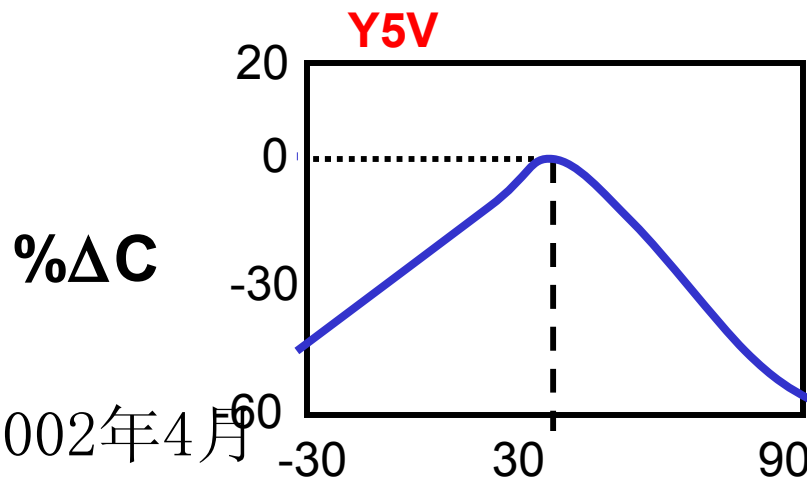
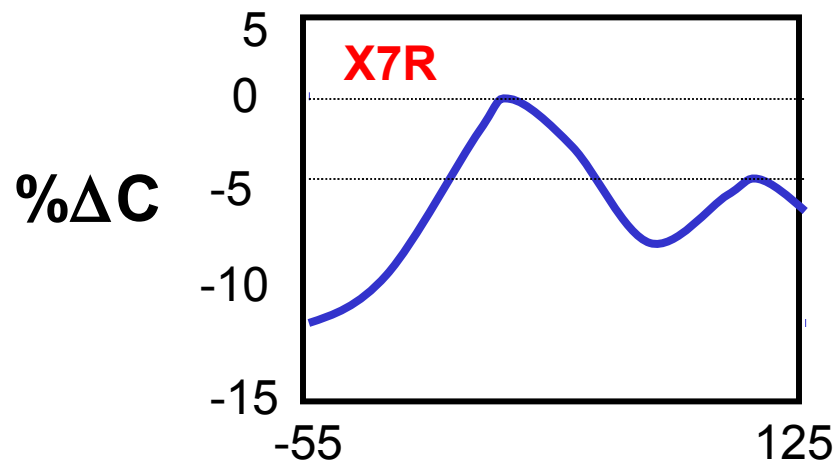
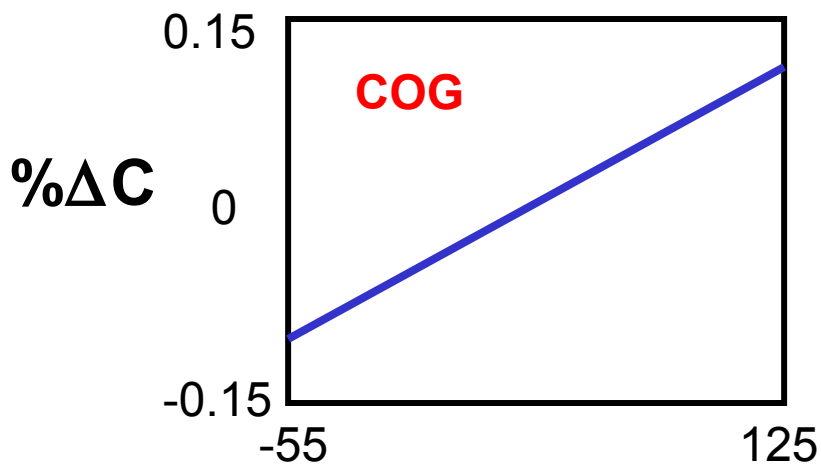
陶瓷电容谐振频率



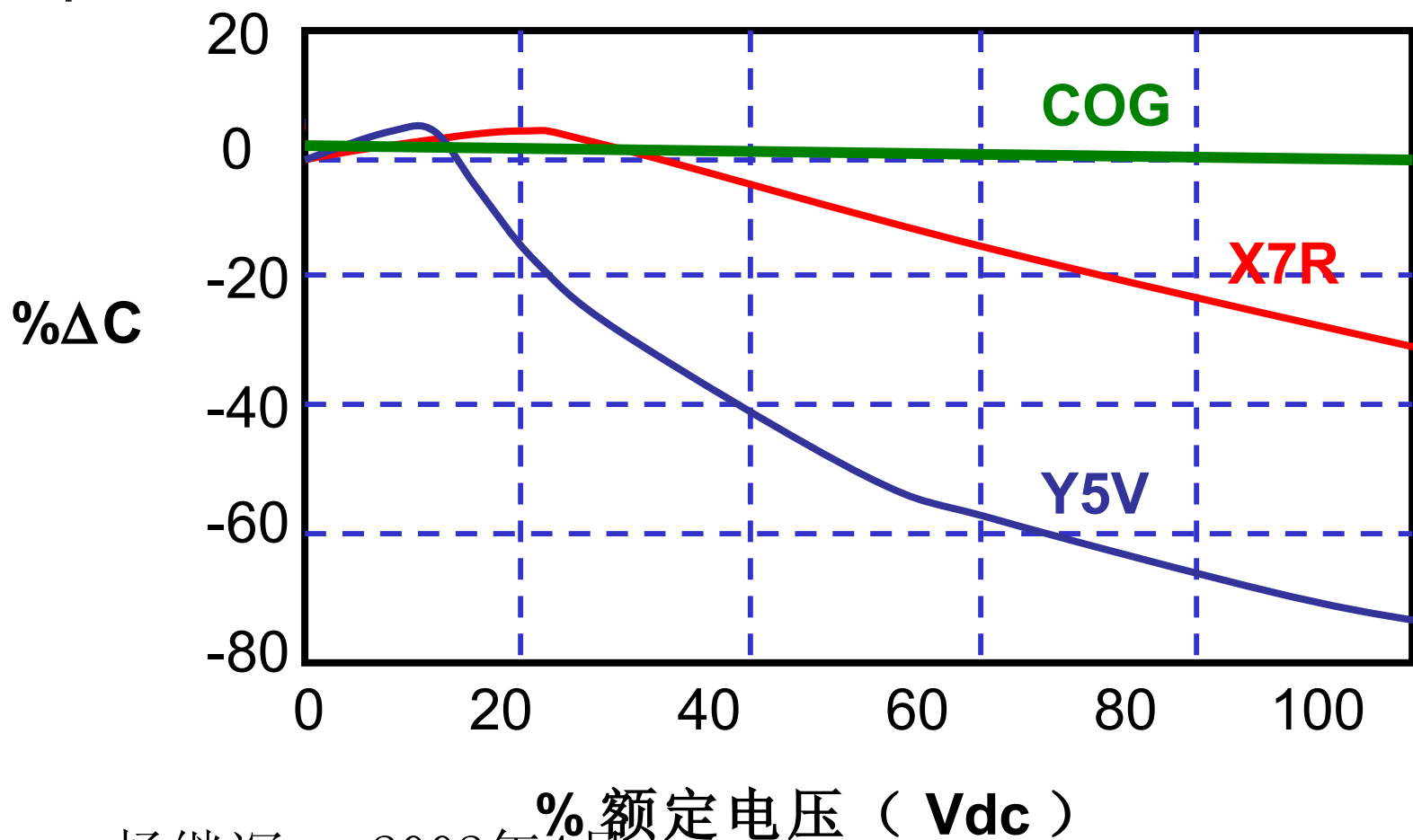
表面贴装电容的阻抗特性



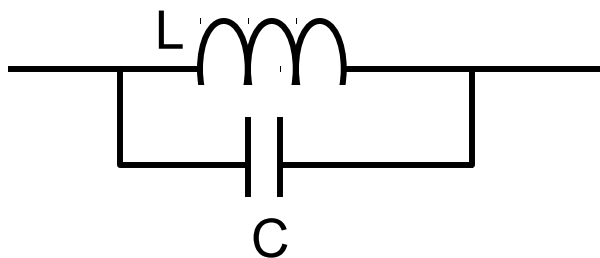
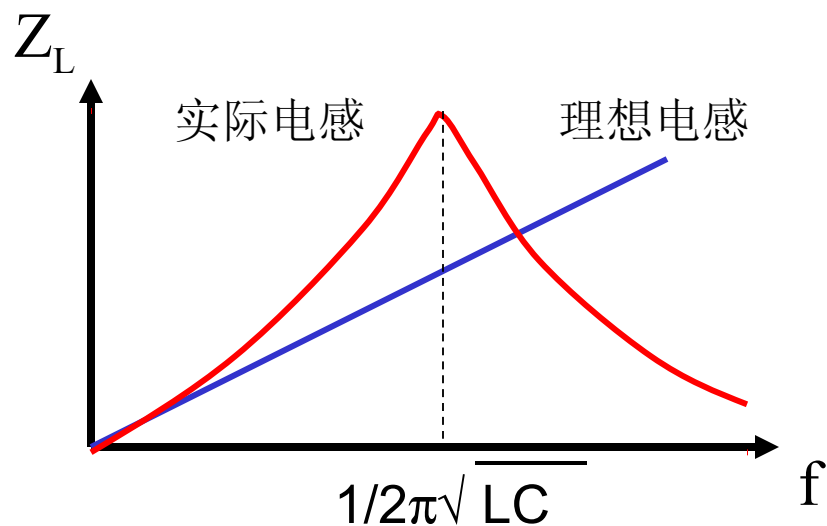
温度对陶瓷电容容量的影响



电压对陶瓷电容容量的影响



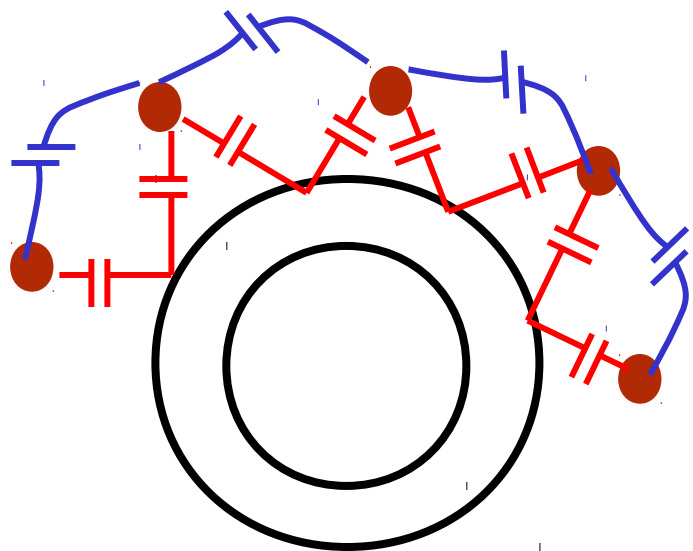
实际电感器的特性



绕在铁粉芯上的电感

电感量 (H)	谐振频率 (MHZ)
3.4	45
8.8	28
68	5.7
125	2.6
500	1.2

电感寄生电容的来源

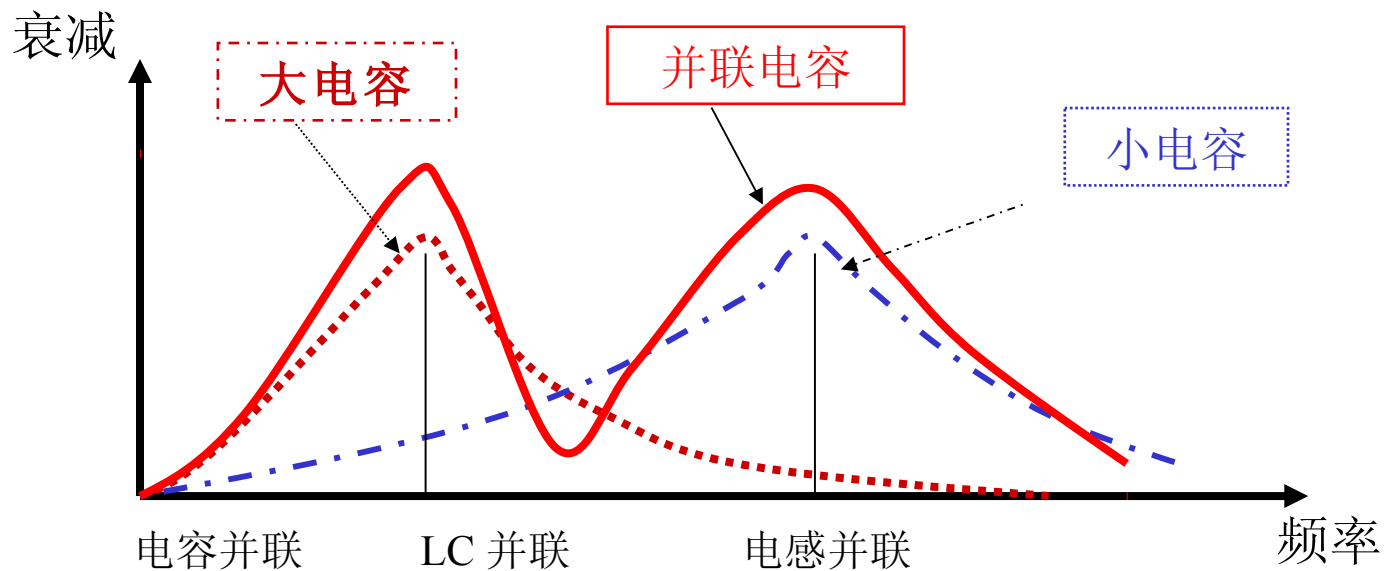
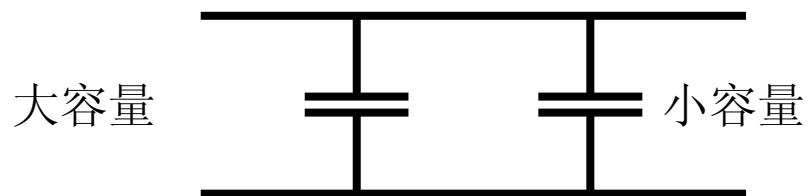


每圈之间的电容 C_{TT}

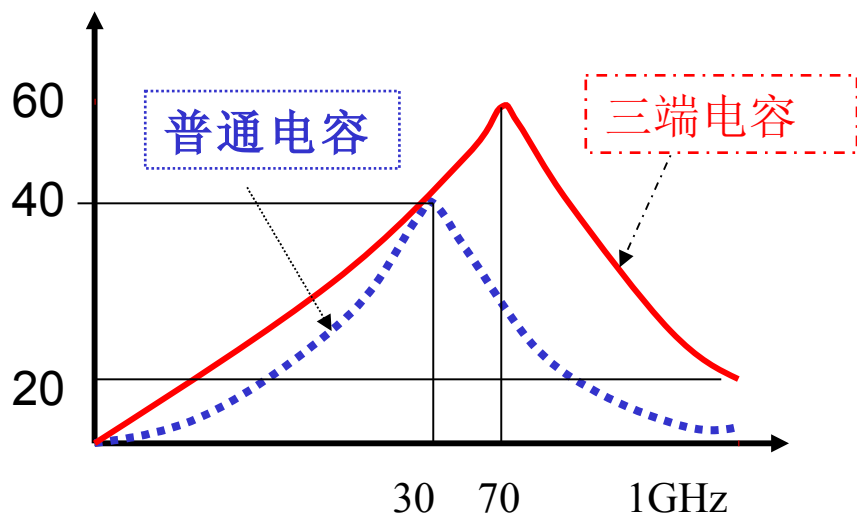
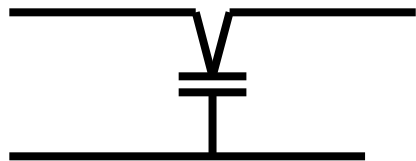
导线与磁芯之间的电容
 C_{TC}

磁芯为导体时， C_{TC} 为主要因素，
磁芯为非导体时， C_{TT} 为主要因素。

克服电容非理想性的方法

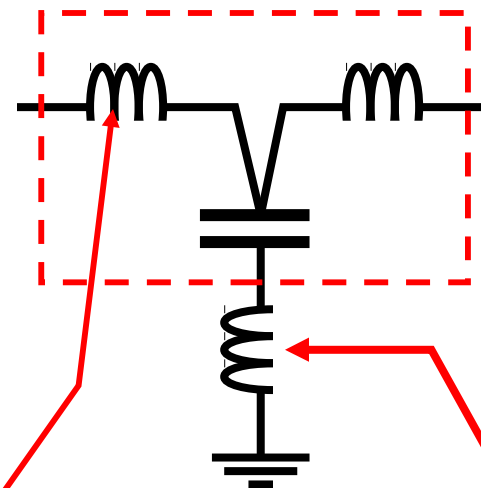


三端电容器的原理



杨继深

2002年4月

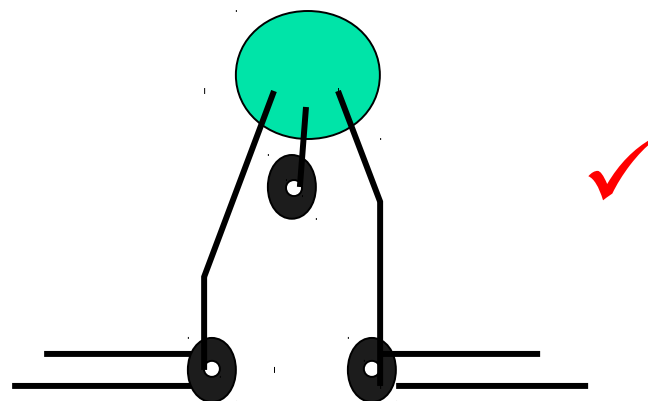
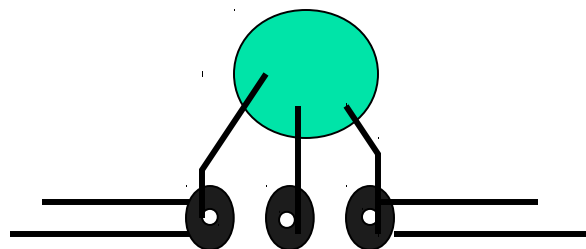


引线电感与电容一起构成了一个T形低通滤波器

在引线上安装两个磁珠滤波效果更好

地线电感起着不良作用

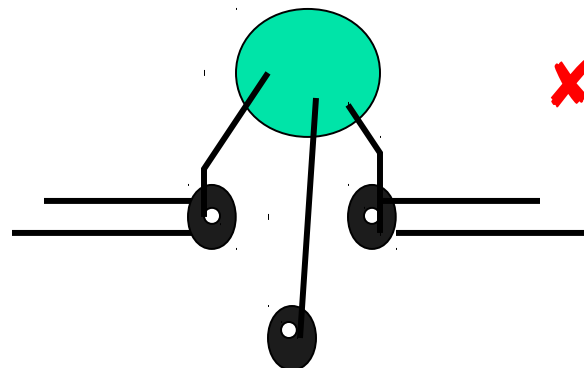
三端电容的正确使用



接地点要求：

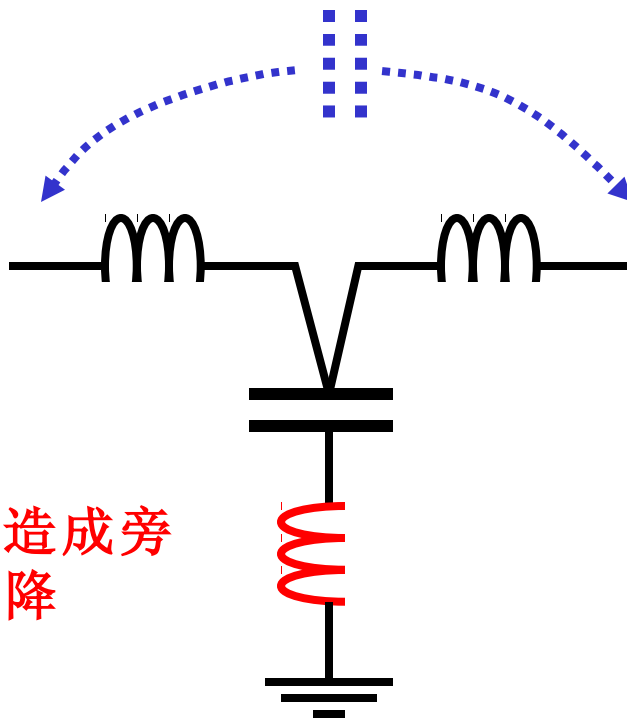
1 干净地

2 与机箱或其它较大



三端电容器的不足

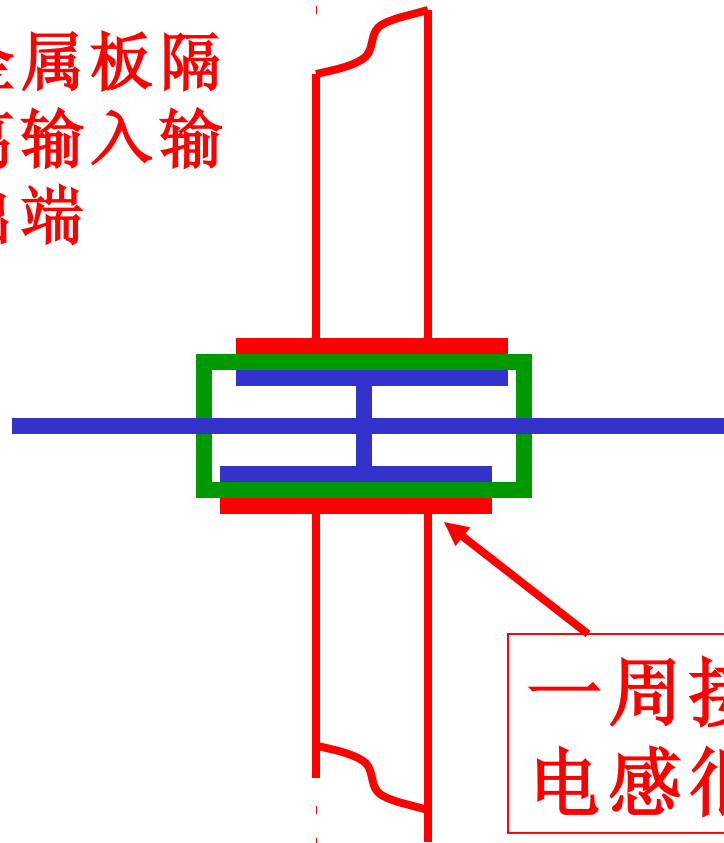
寄生电容造成输入端、输出端耦合



接地电感造成旁路效果下降

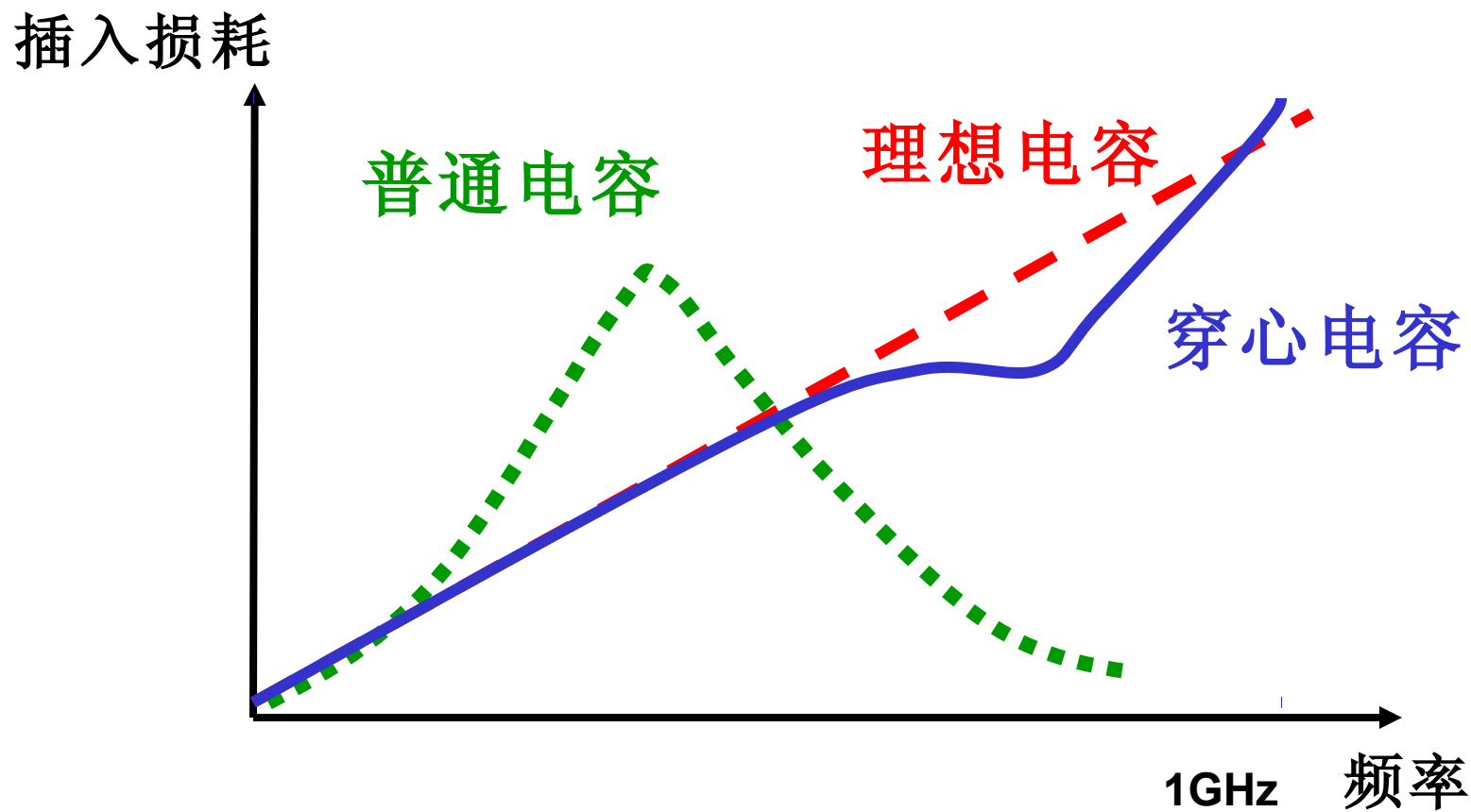
穿心电容更胜一筹

金属板隔
离输入输
出端



一周接地
电感很小

穿心电容的插入损耗



穿心电容、馈通滤波器



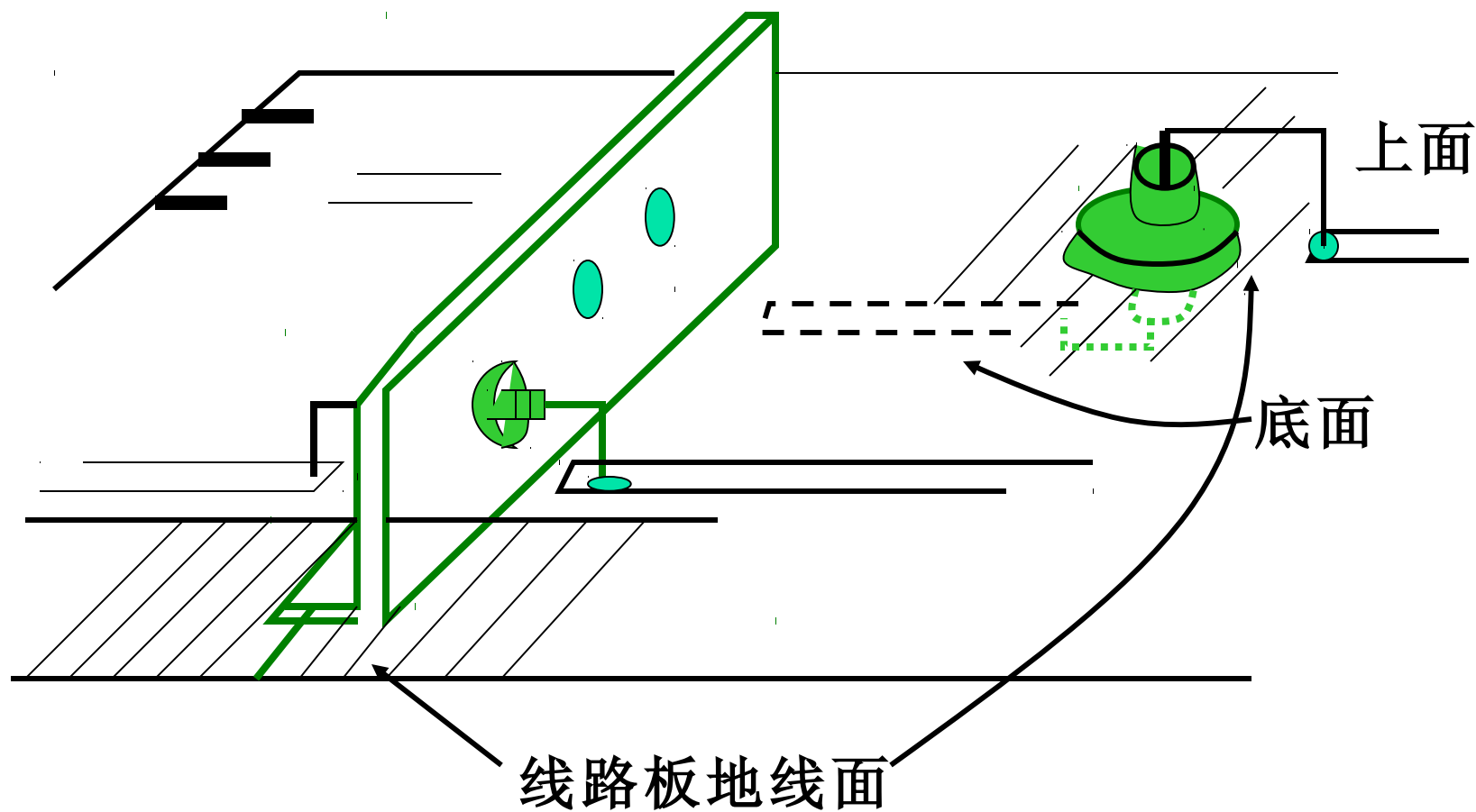
以穿心电容为基础的
馈通滤波器
广泛应用于 **RF**
滤波



馈通滤波器使用注意事项

- 必须安装在金属板上，并在一周接地
- 最好焊接，螺纹安装时要使用带齿垫片
- 焊接时间不能过长
- 上紧螺纹时扭矩不能过大

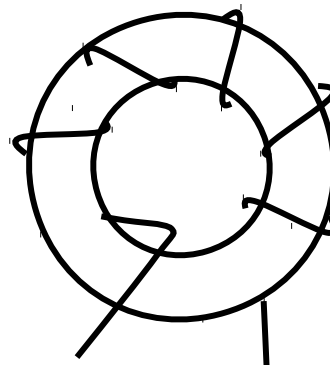
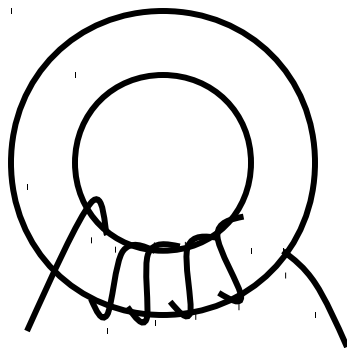
线路板上使用馈通滤波器



杨继深

2002年4月

磁芯对电感寄生电容的影响



铁粉芯
19%

$C = 4.28\text{pf}$

$C = 3.48\text{pf}$

铁氧体（锰锌）

$C = 51\text{pf}$

$C = 49\text{pf}$

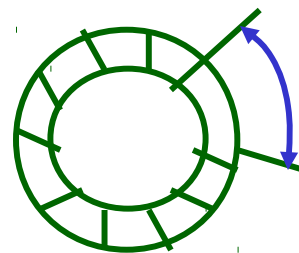
4%

减小电感寄生电容的方法

如果磁芯是导体，首先：

用介电常数低的材料增加绕组导体与磁芯之间的距离

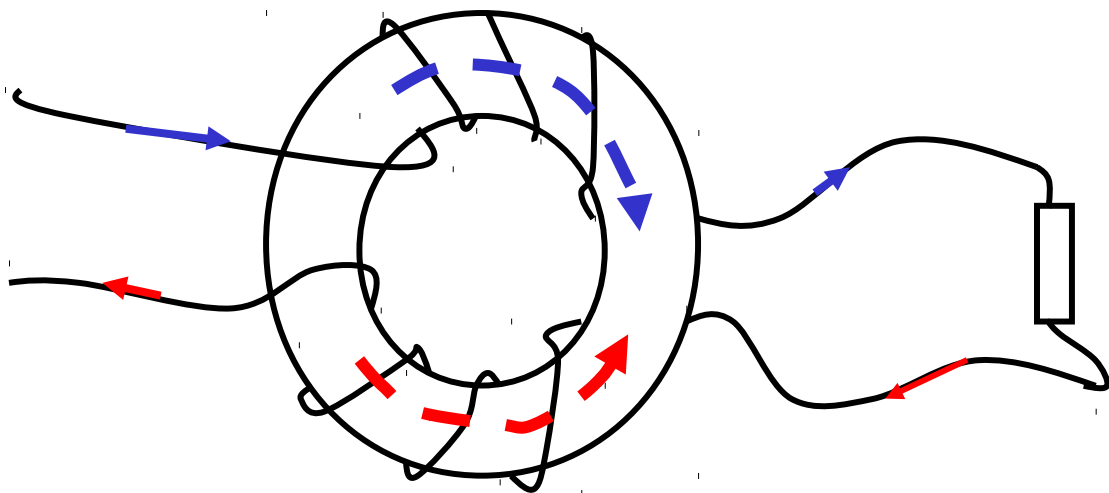
然



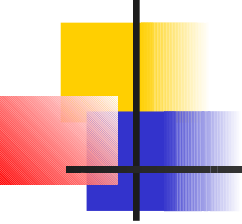
1. 起始端与终止端远离（夹角大于 **40** 度）
2. 尽量单层绕制，并增加匝间距离
3. 多层绕制时， 采用“渐进”方式绕，不要来
4. 分组绕制 2002年1月 要求高时，用大电感和小电感串



共模扼流圈



共模扼流圈中的负载电流产生的磁场相互抵销，因此磁芯不会饱和。



电感磁芯的选用

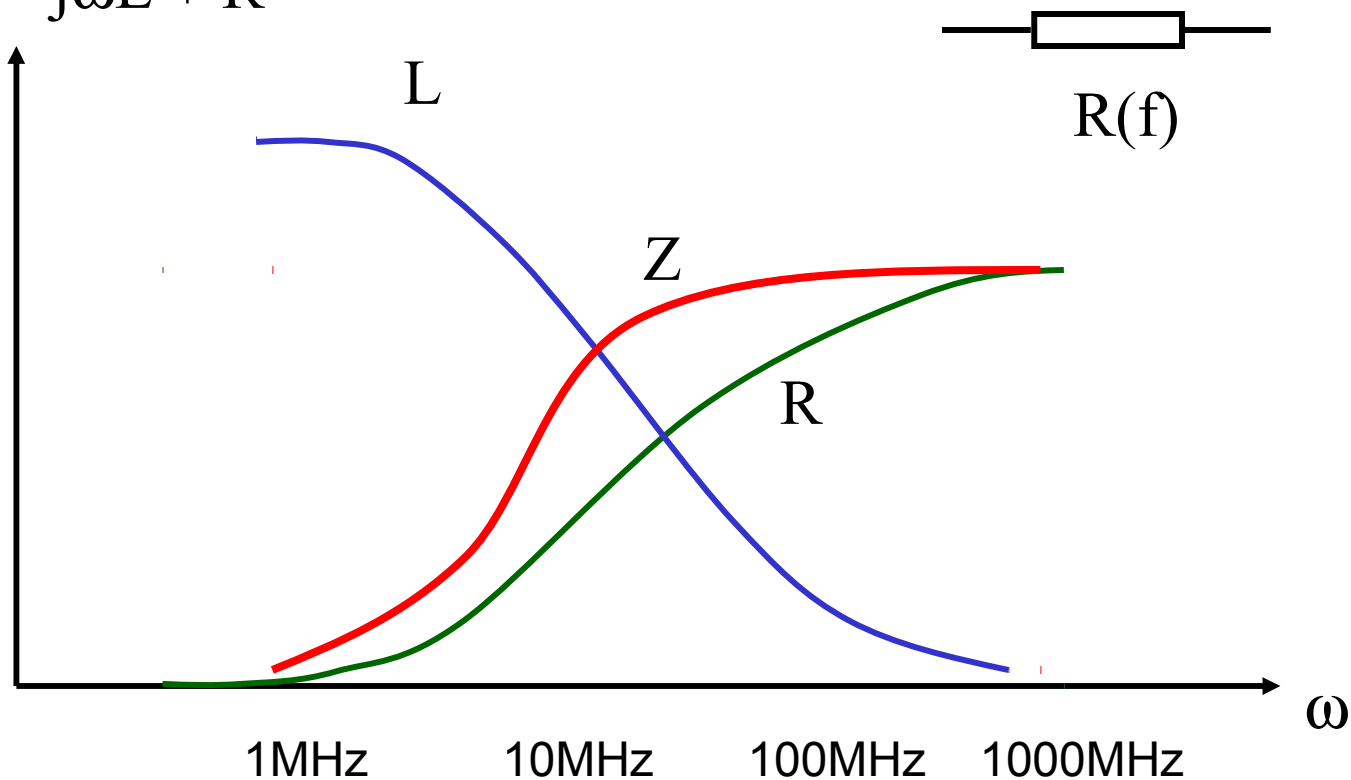
铁粉磁芯：不易饱和、导磁率低，作差模扼流圈的磁芯

铁氧体：最常用 { 锰锌： $r = 500 \sim 10000$, $R = 0.1 \sim 100 \Omega m$
镍锌： $r = 10 \sim 100$, $R = 1k \sim 1M \Omega m$

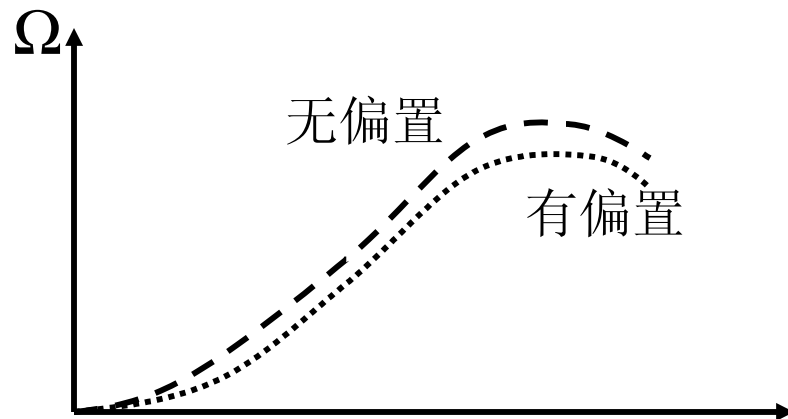
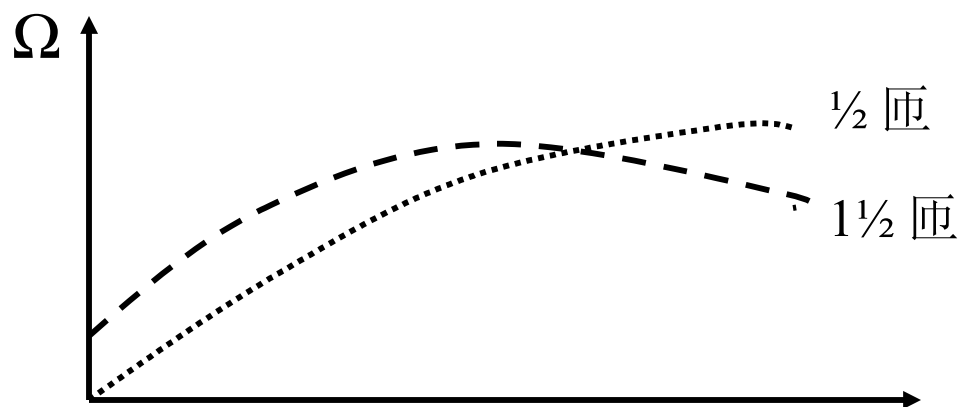
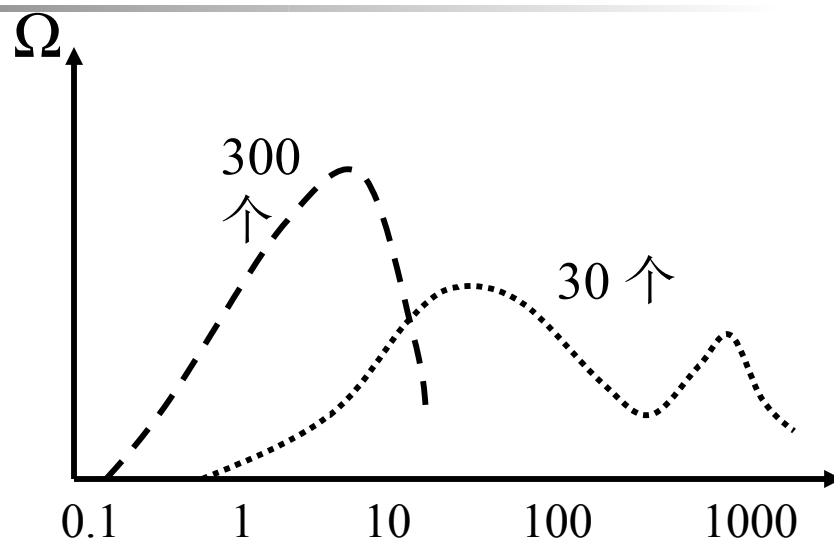
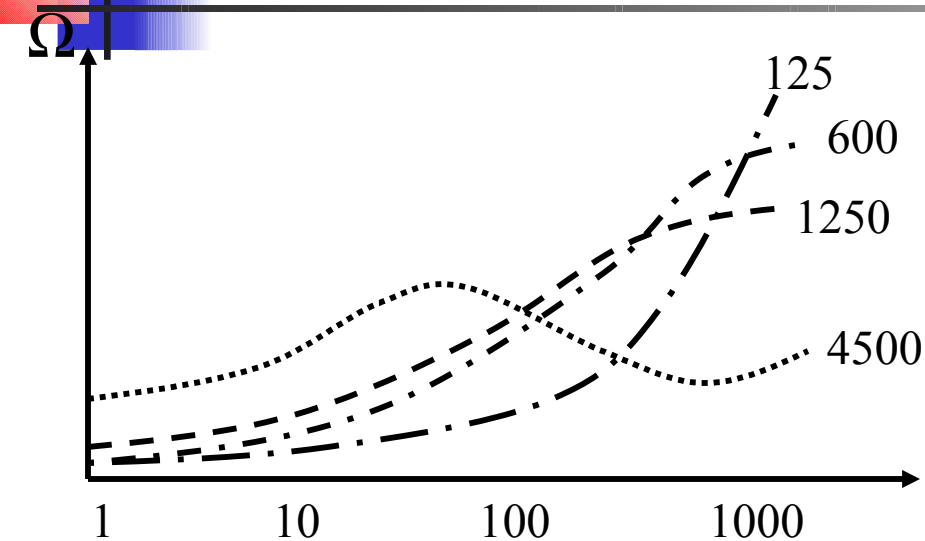
超微晶： $r > 10000$, 做大电感量共模扼流圈的磁心

干扰抑制用铁氧体

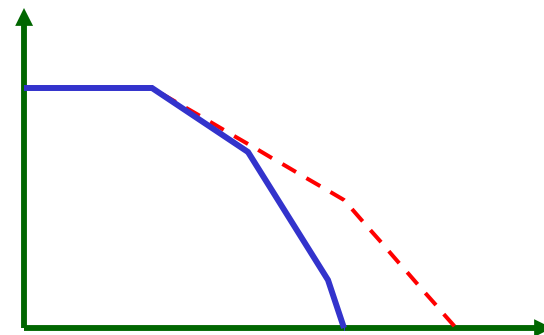
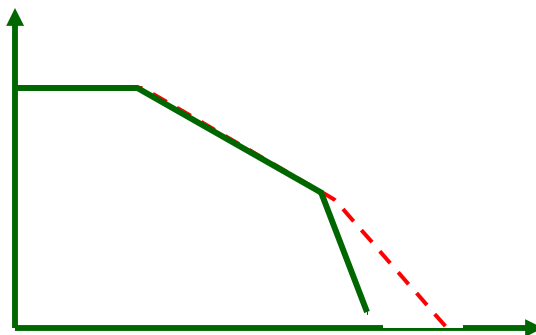
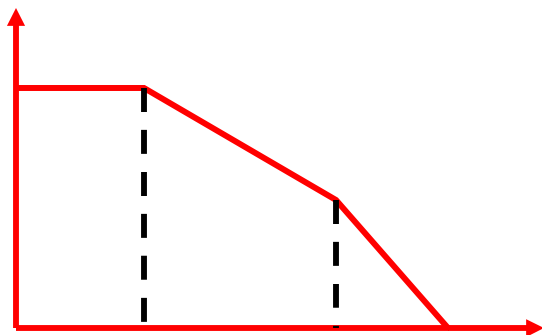
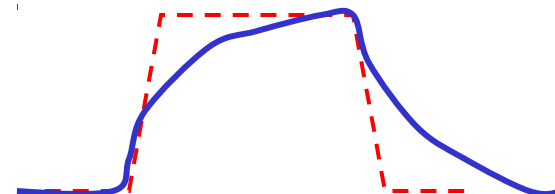
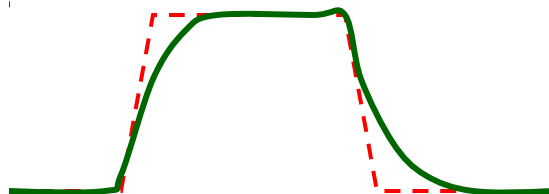
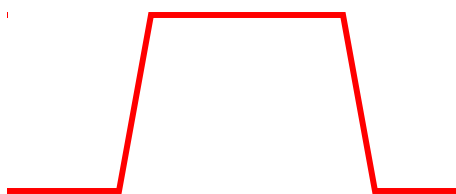
$$Z = j\omega L + R$$



铁氧体磁环使用方面的一些问题



低通滤波器对脉冲信号的影响

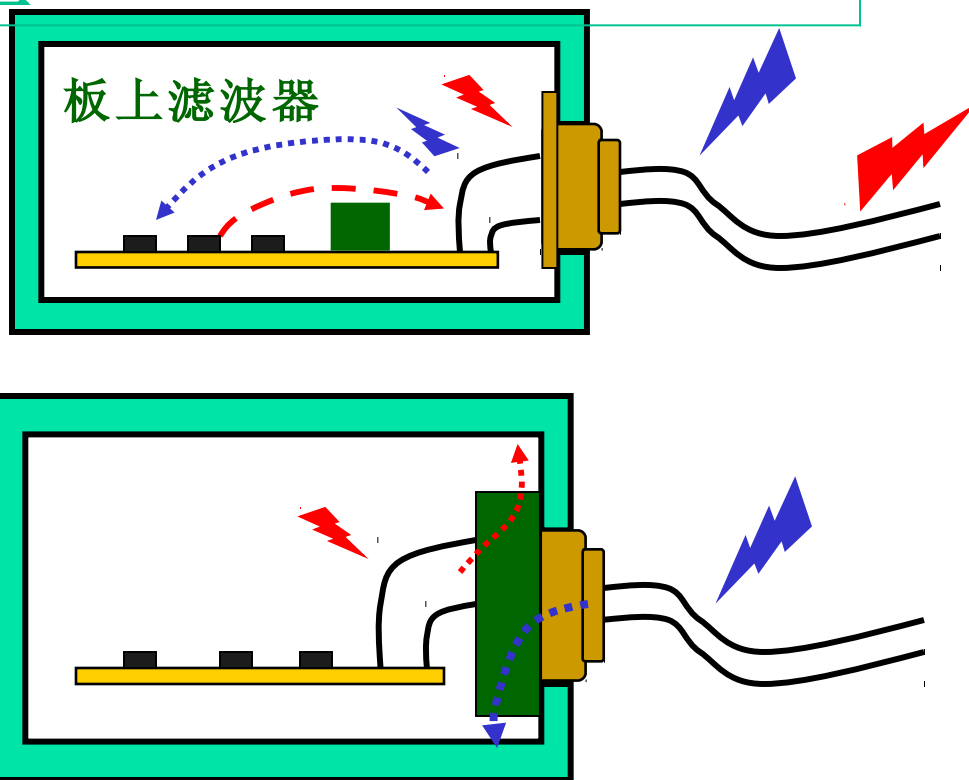


信号滤波器的安装位置

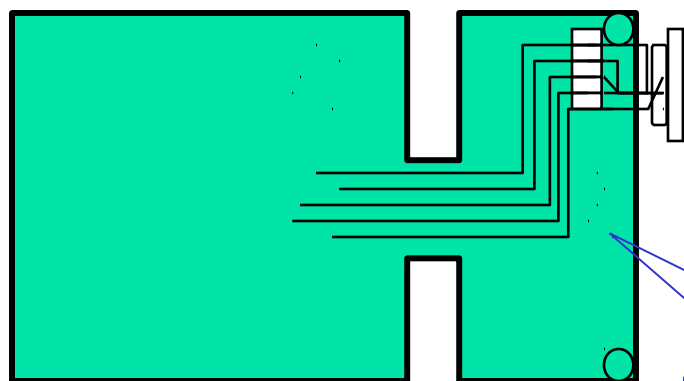
无屏蔽的场合

滤波器靠近被滤波导线的靠近器件或线路板一端。

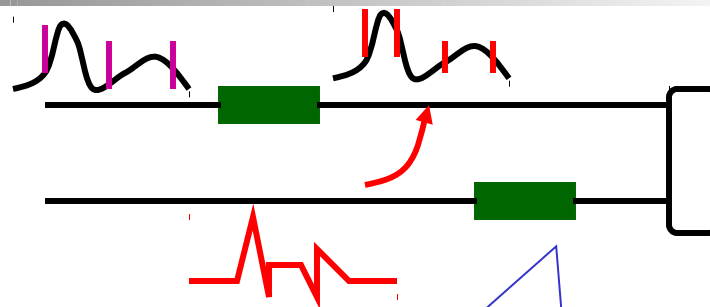
有屏蔽的场合：在屏蔽界面上



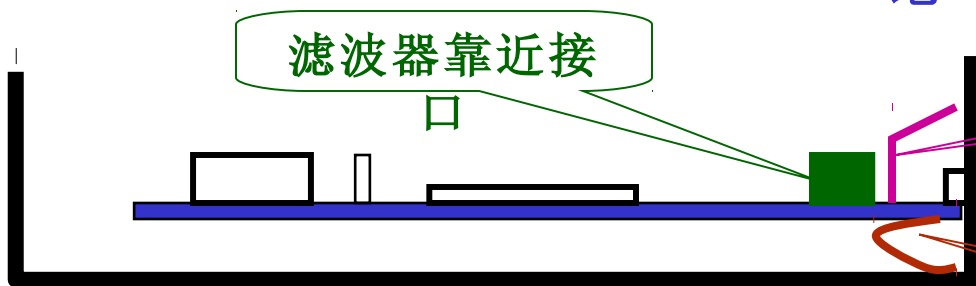
板上滤波器的注意事项



为滤波设置干净地



滤波器要并排安装

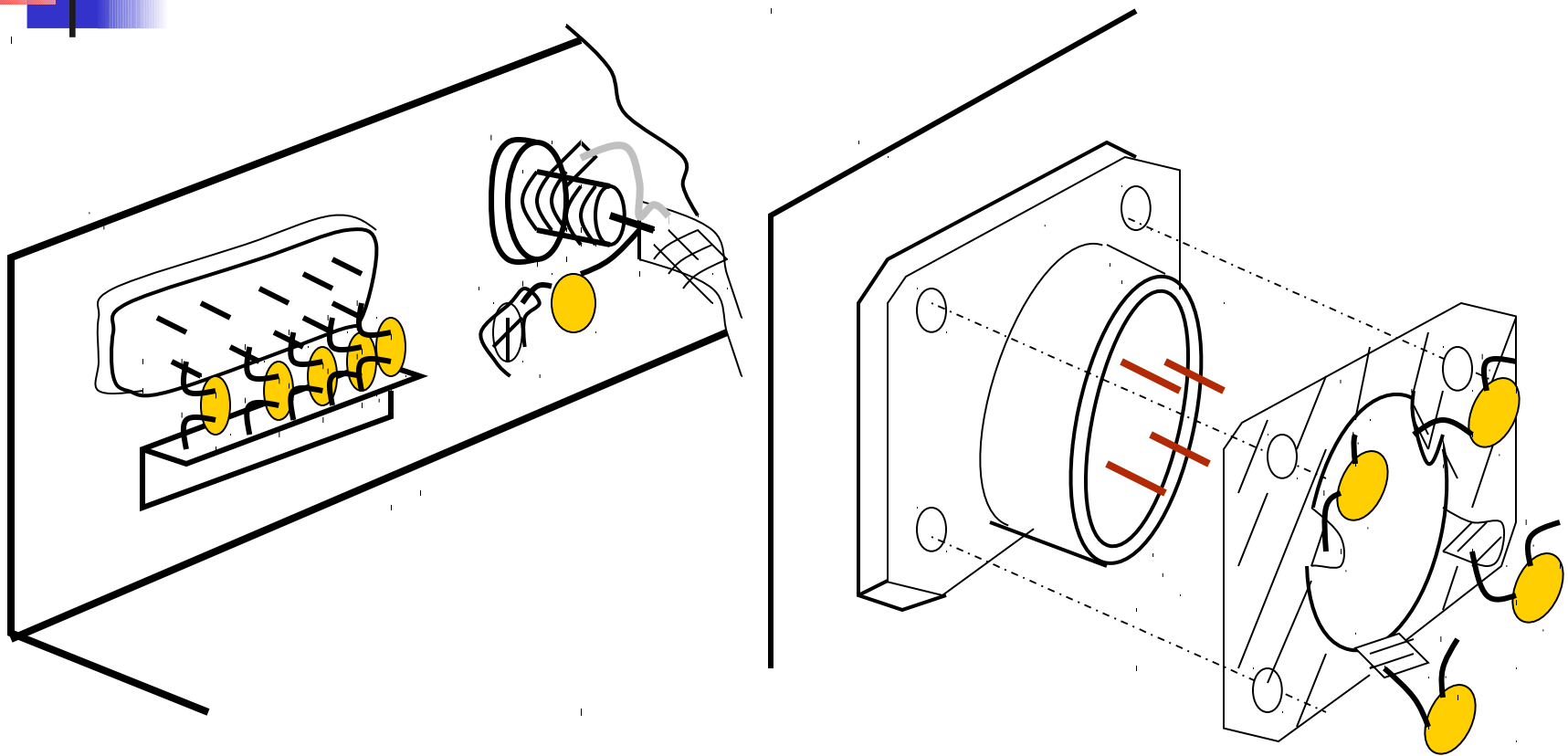


滤波器靠近接口

在接口处设置挡板

线路板的干净地与金属机箱或大金属板紧密搭接

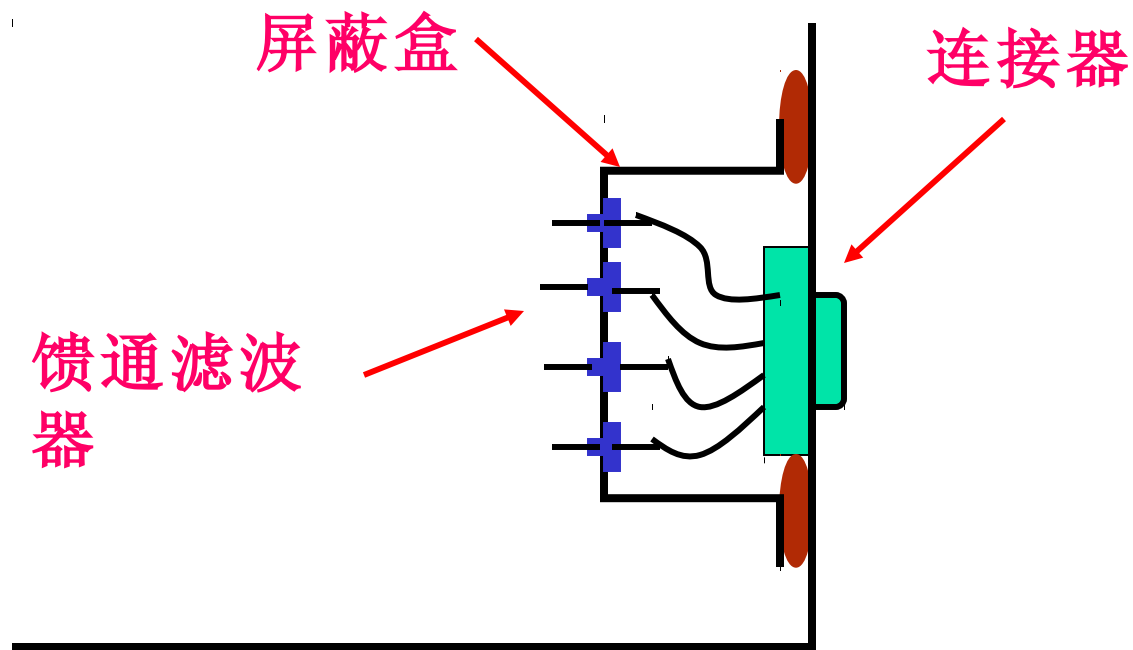
面板上滤波的简易（临时）方法



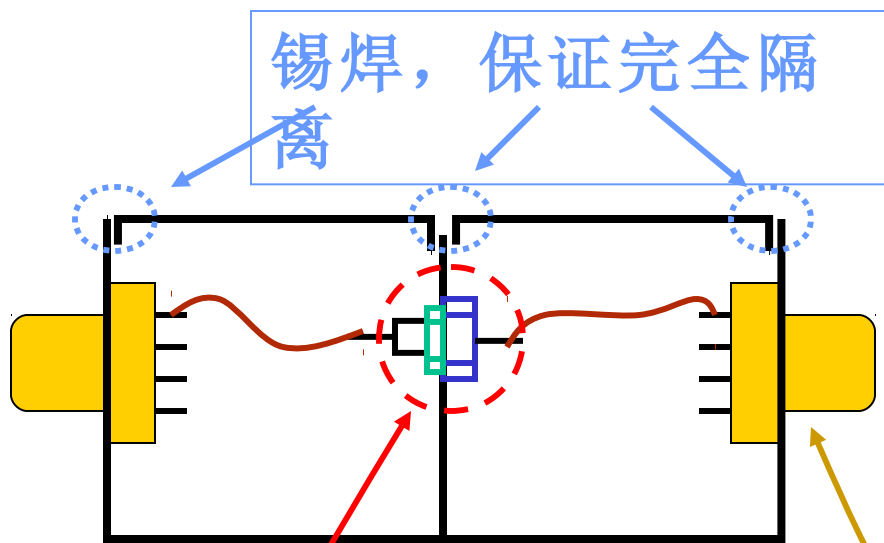
容量适当的瓷片电容或独石电容，引线尽量短

杨继深 2002年4月

电缆滤波的方法



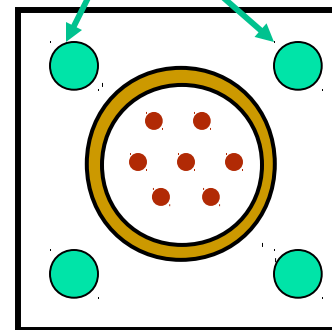
自制面板滤波器



滤波电路可以按照需要设计，但是至少有一级馈通滤波器

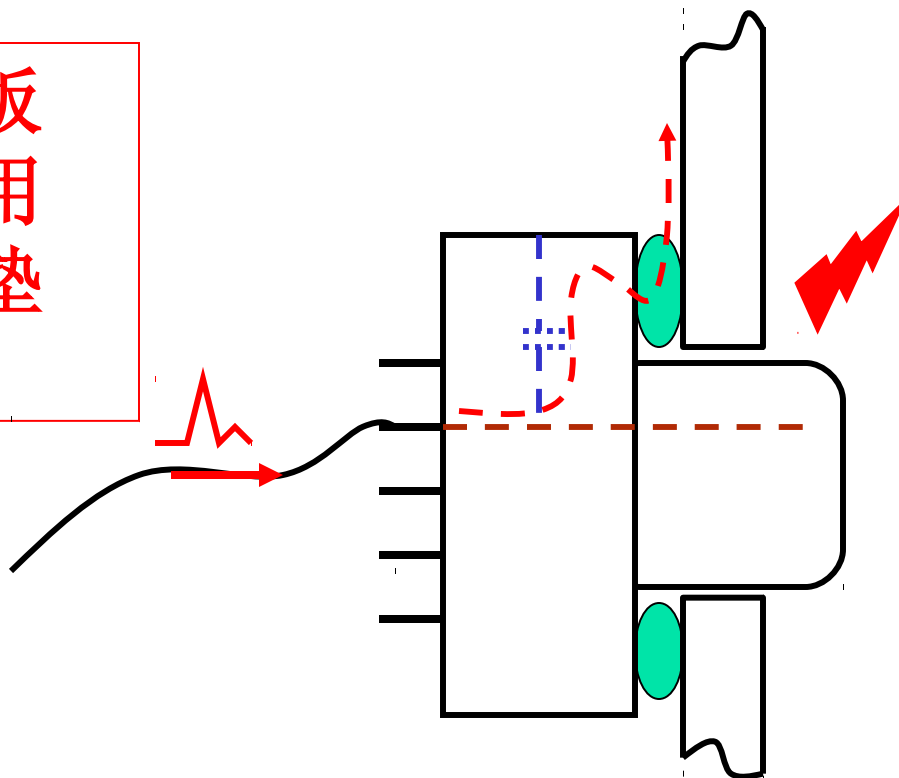
连接器按照需要选择，也可以是引线

螺纹盲孔



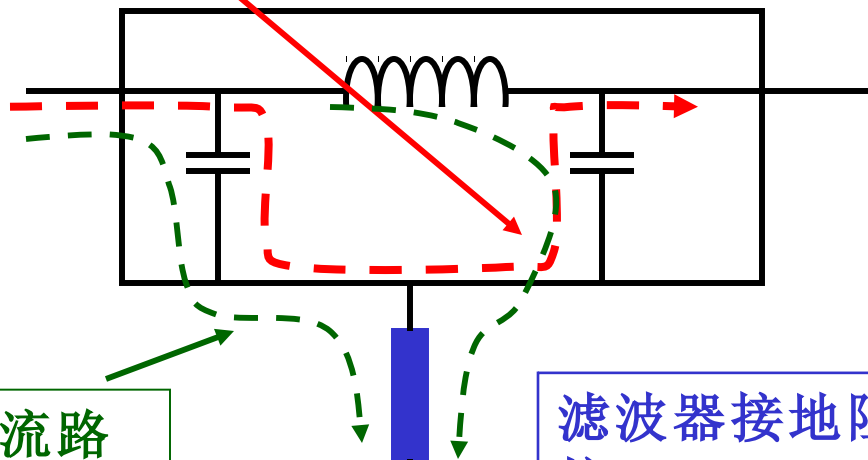
面板安装滤波器注意事项

滤波器与面板
之间必须使用
电磁密封衬垫
！



使用 π 形滤波器的注意事项

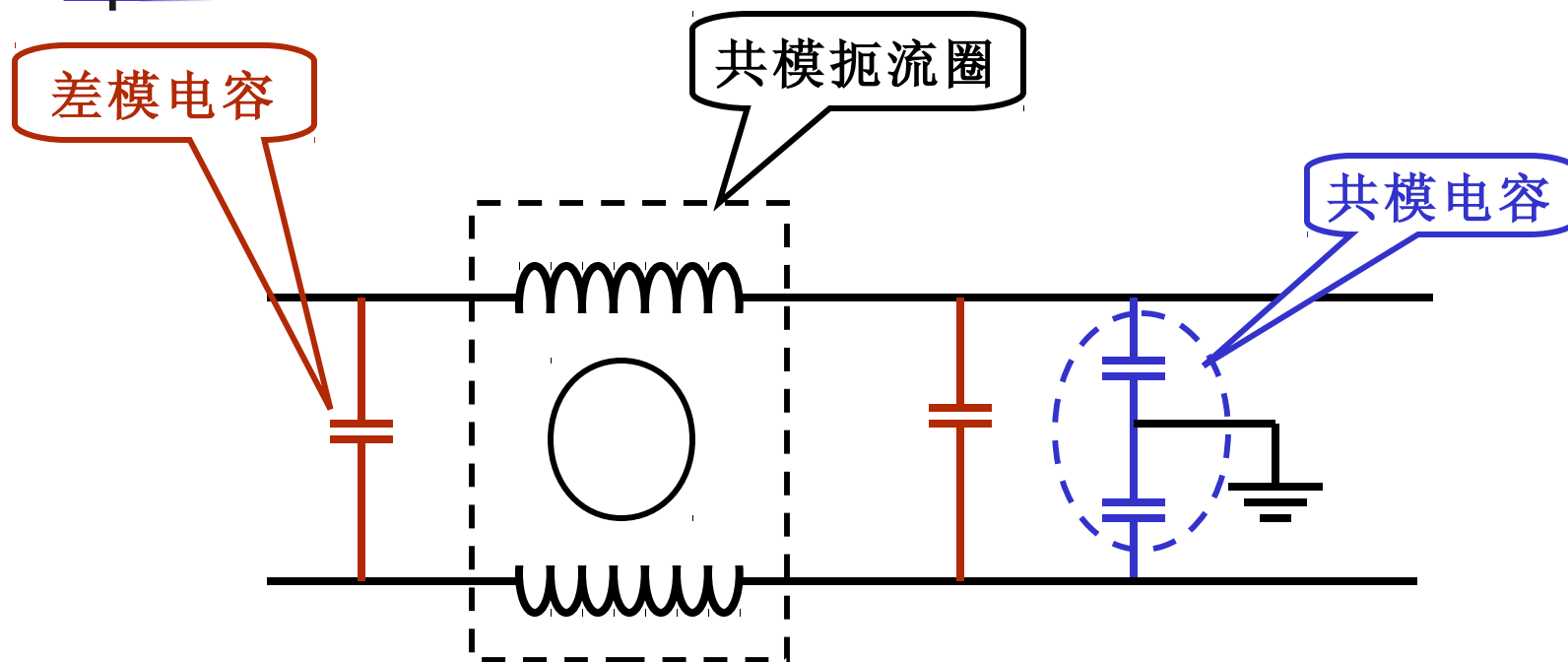
实际干扰电流路径



预期干扰电流路径

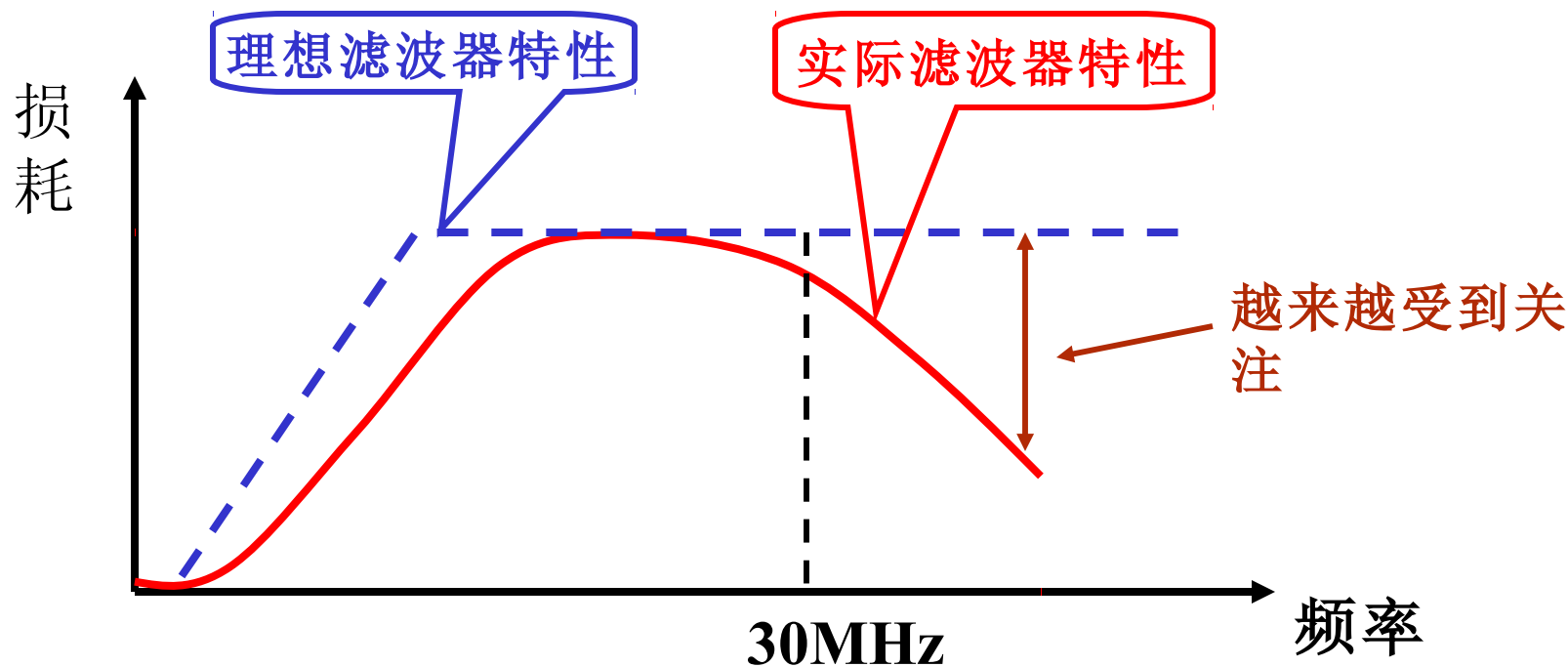
滤波器接地阻抗

电源线滤波器的基本电路



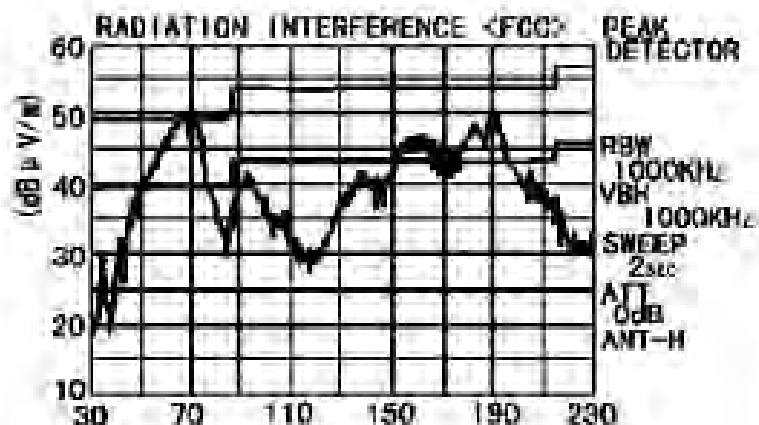
共模滤波电容受到漏电流的限制

电源线滤波器的特性

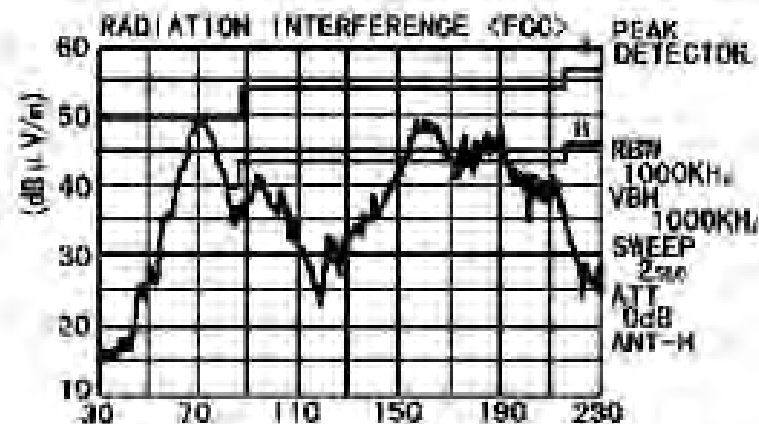


一般产品说明书上给出的数据是 50Ω 条件下的测试结果。

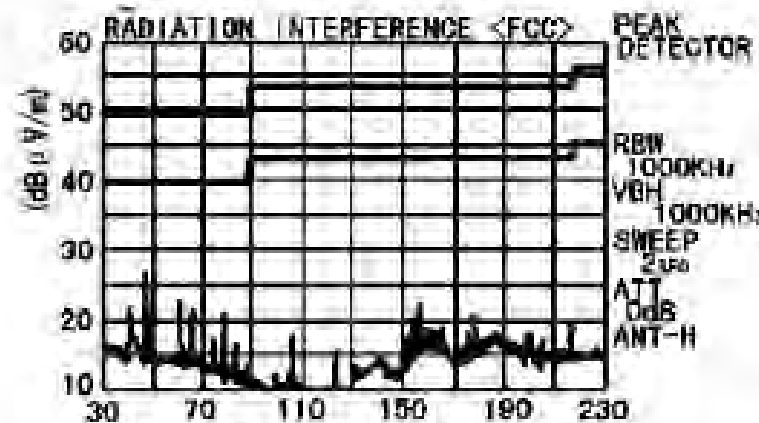
高频滤波性能的重要性



无滤波

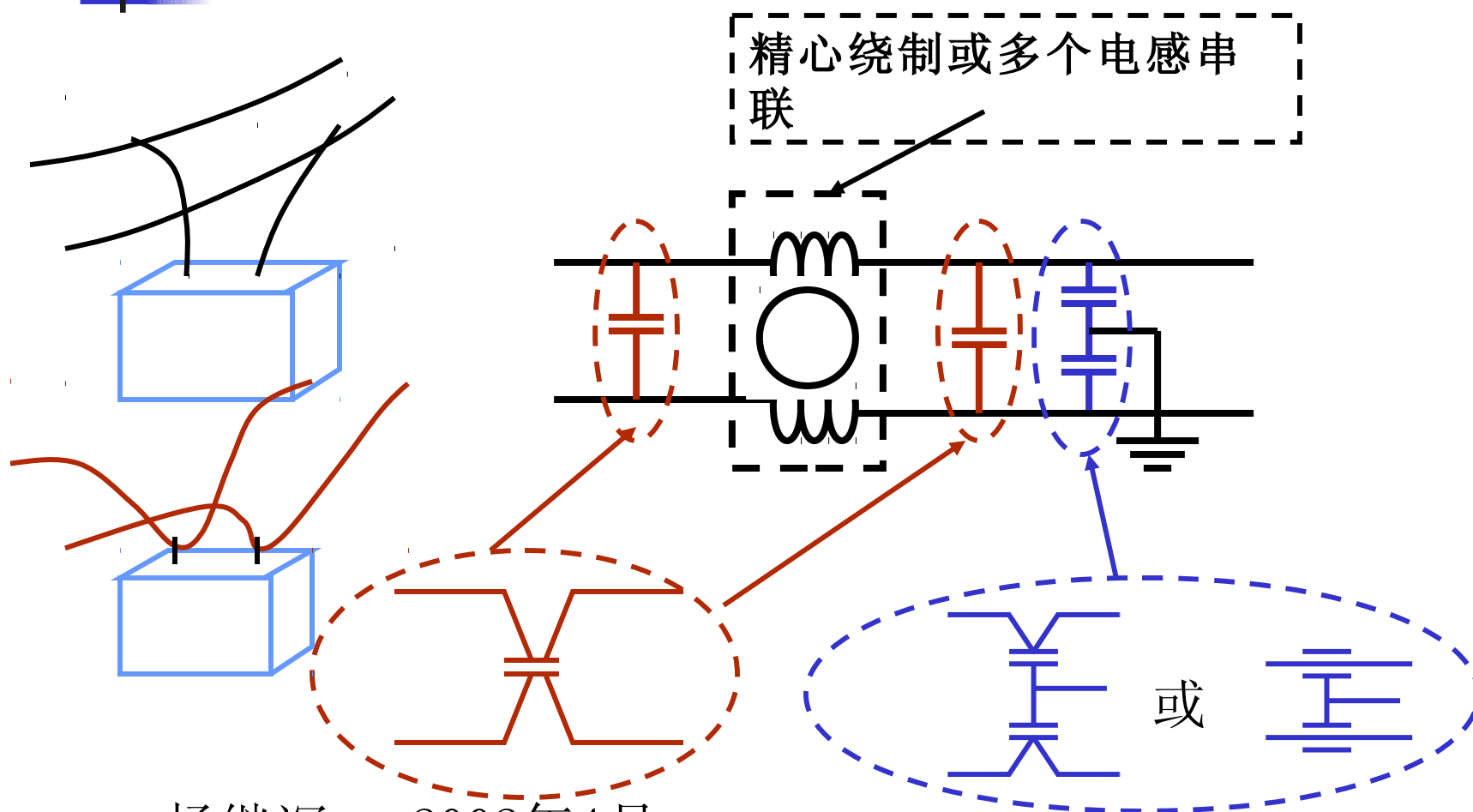


滤波器高频性能差

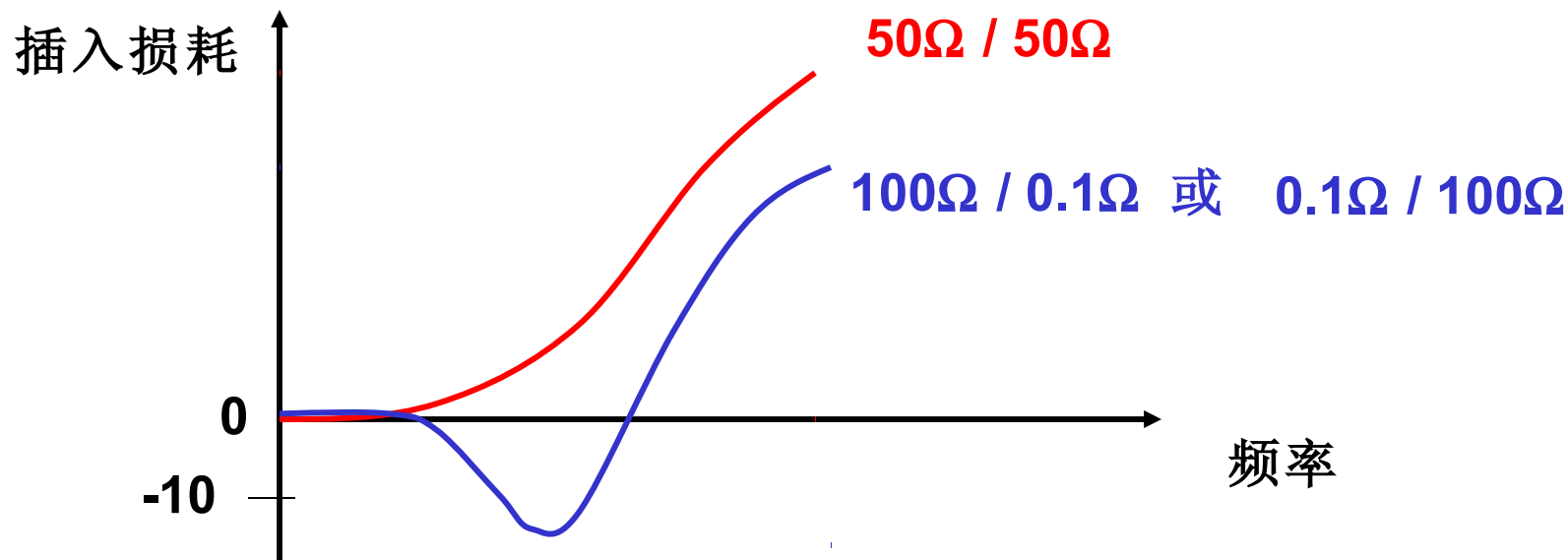


滤波器高频性能好

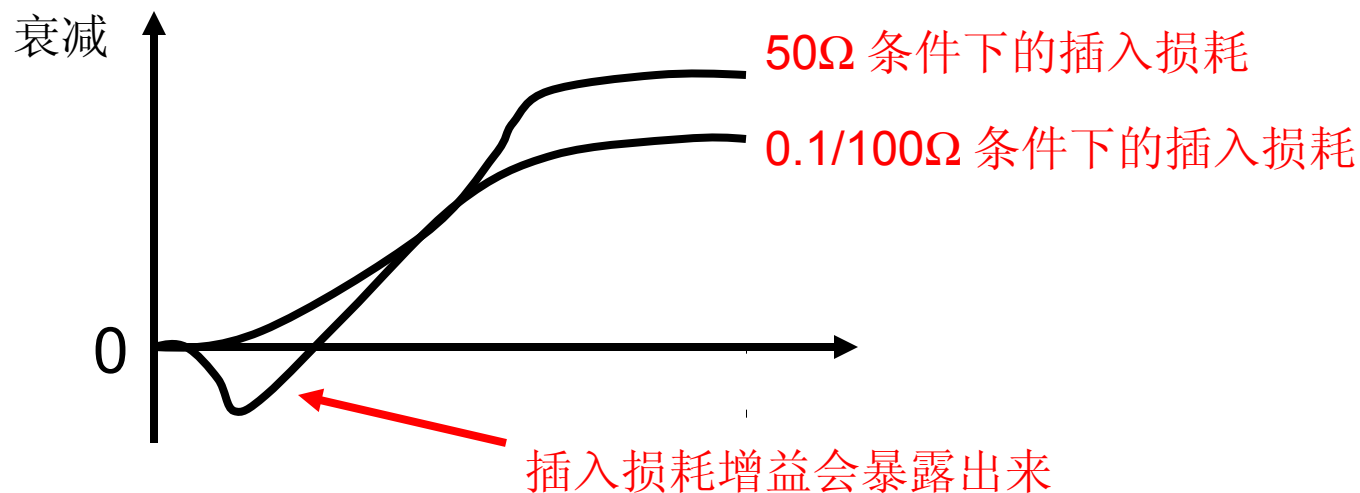
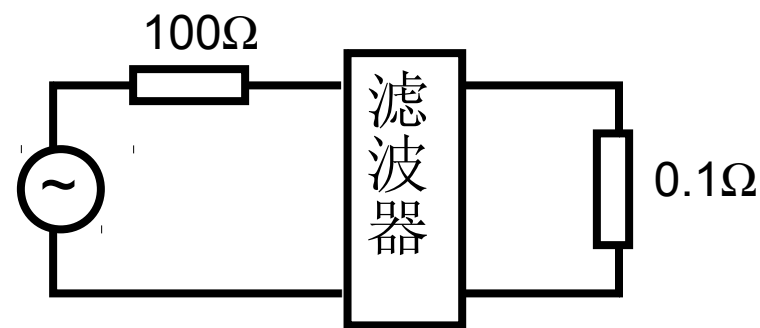
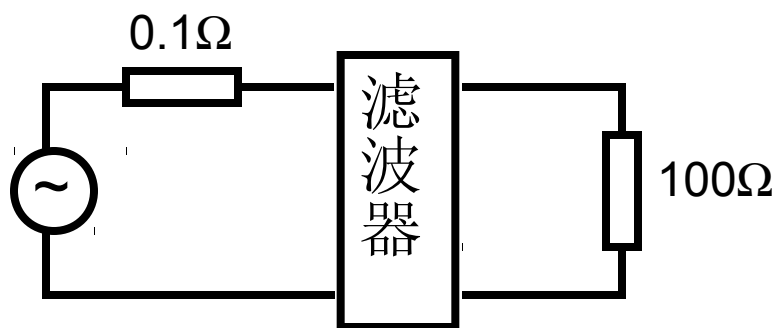
改善滤波器高频特性的方法



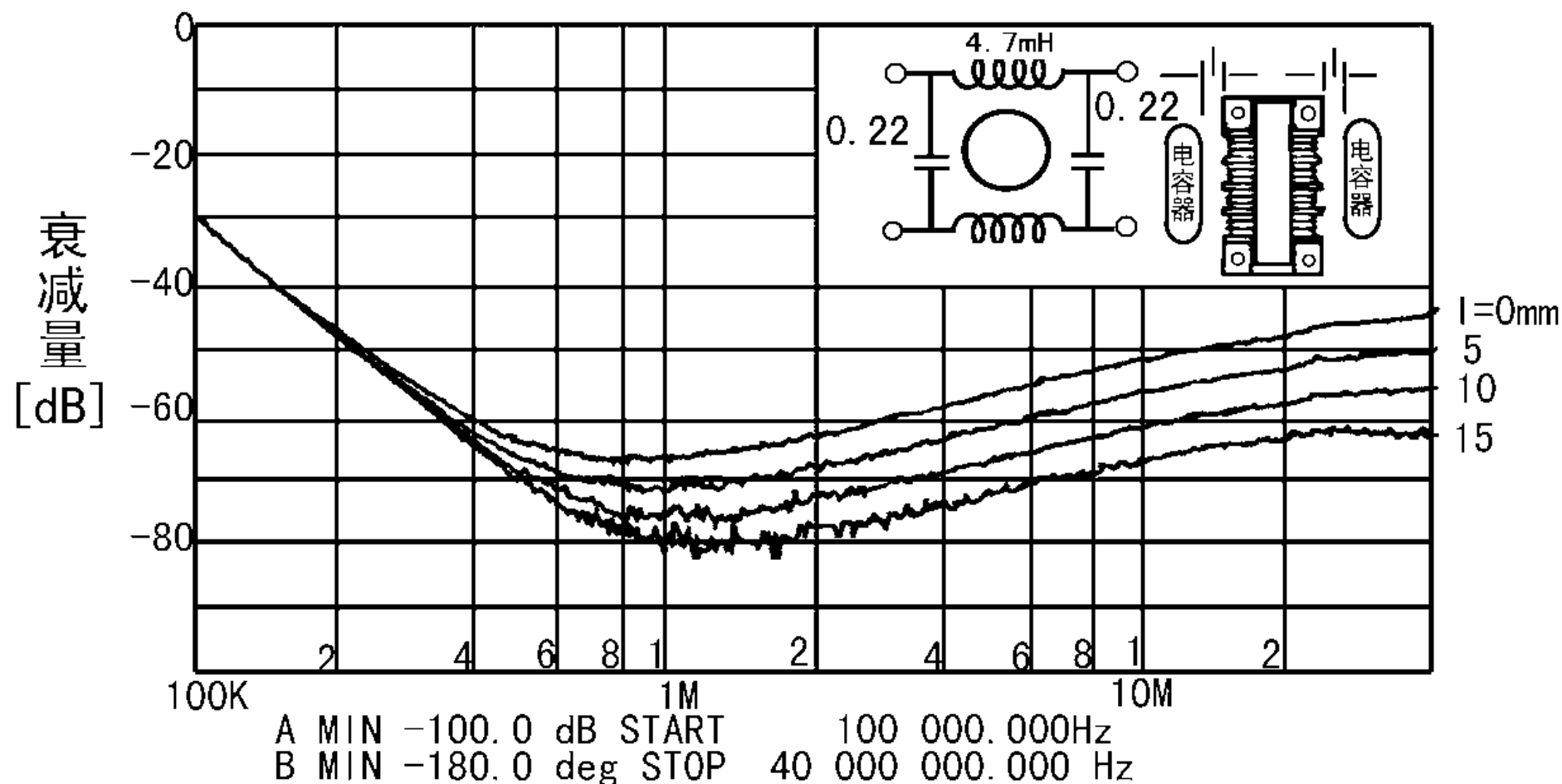
注意插入增益问题



选择滤波器的保险方法

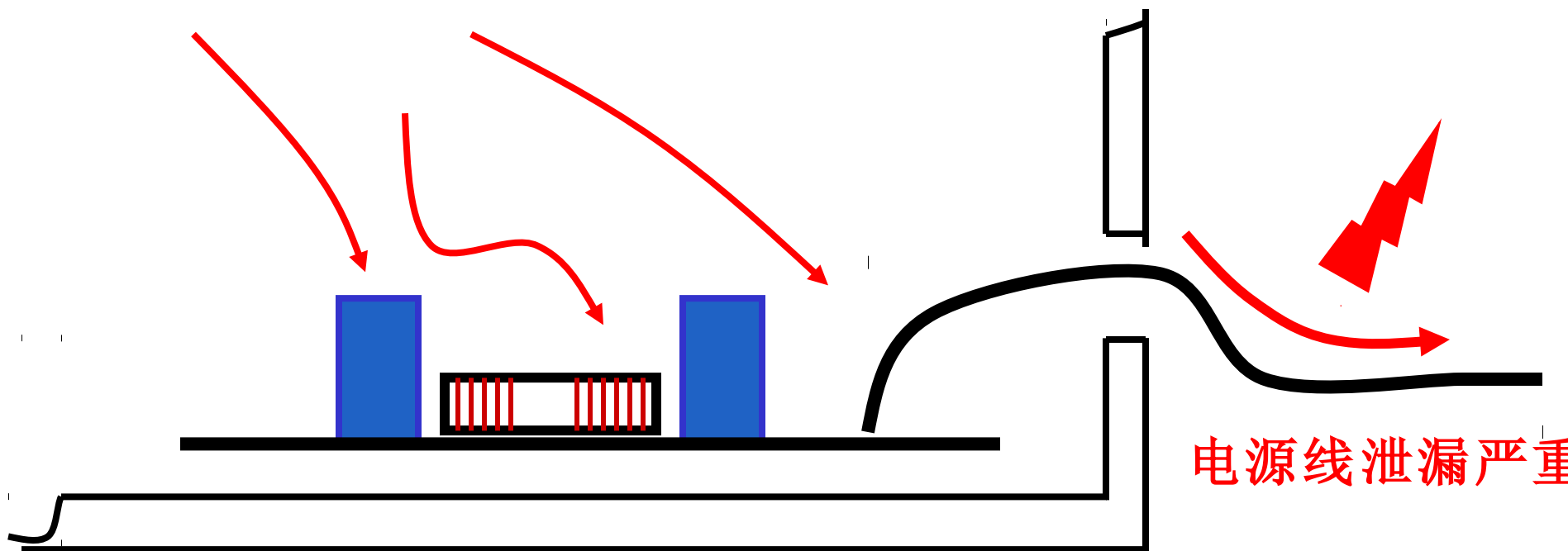


器件距离对高频性能的影响



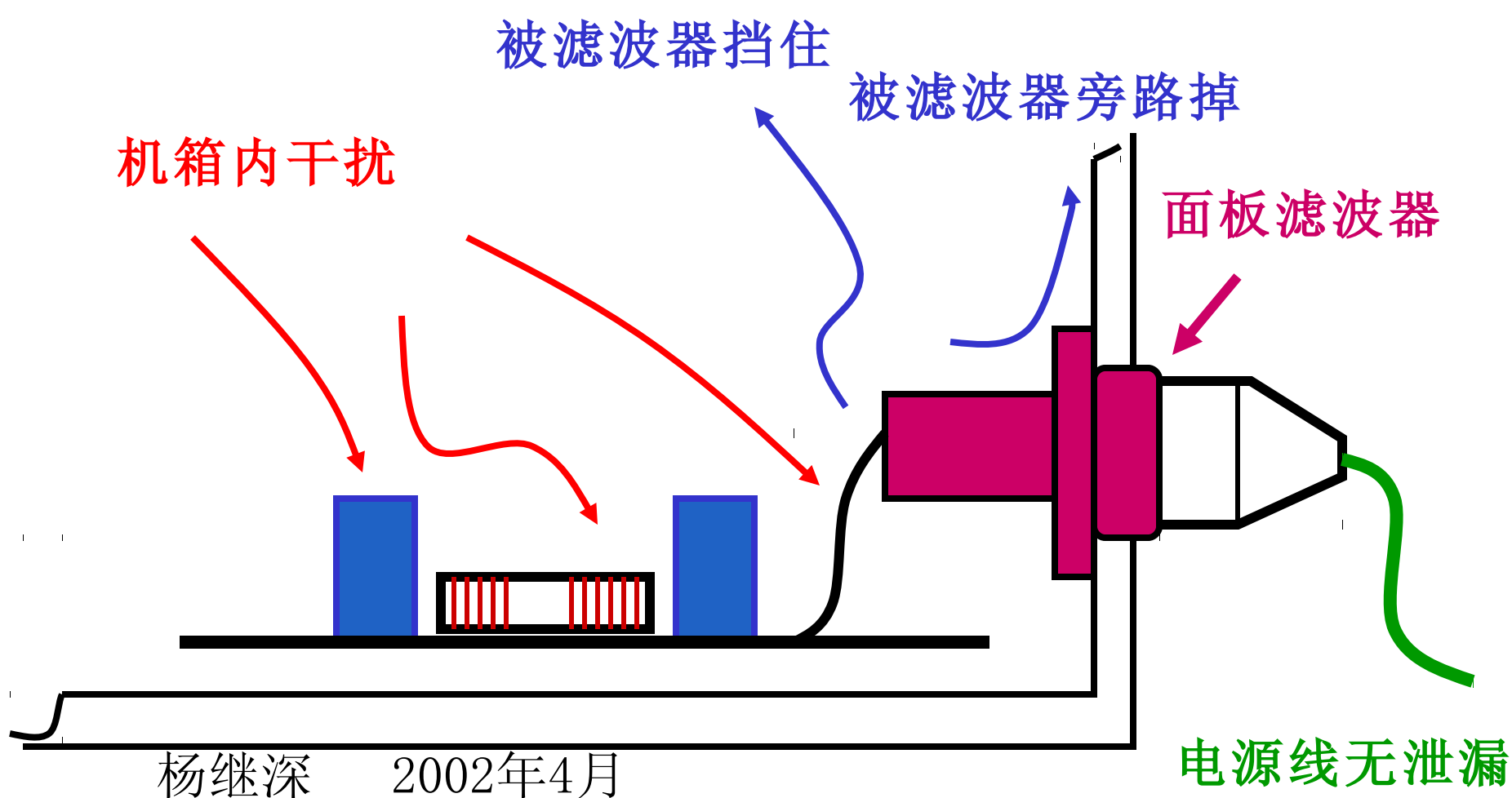
滤波器安装在线路板的问题

机箱内干扰

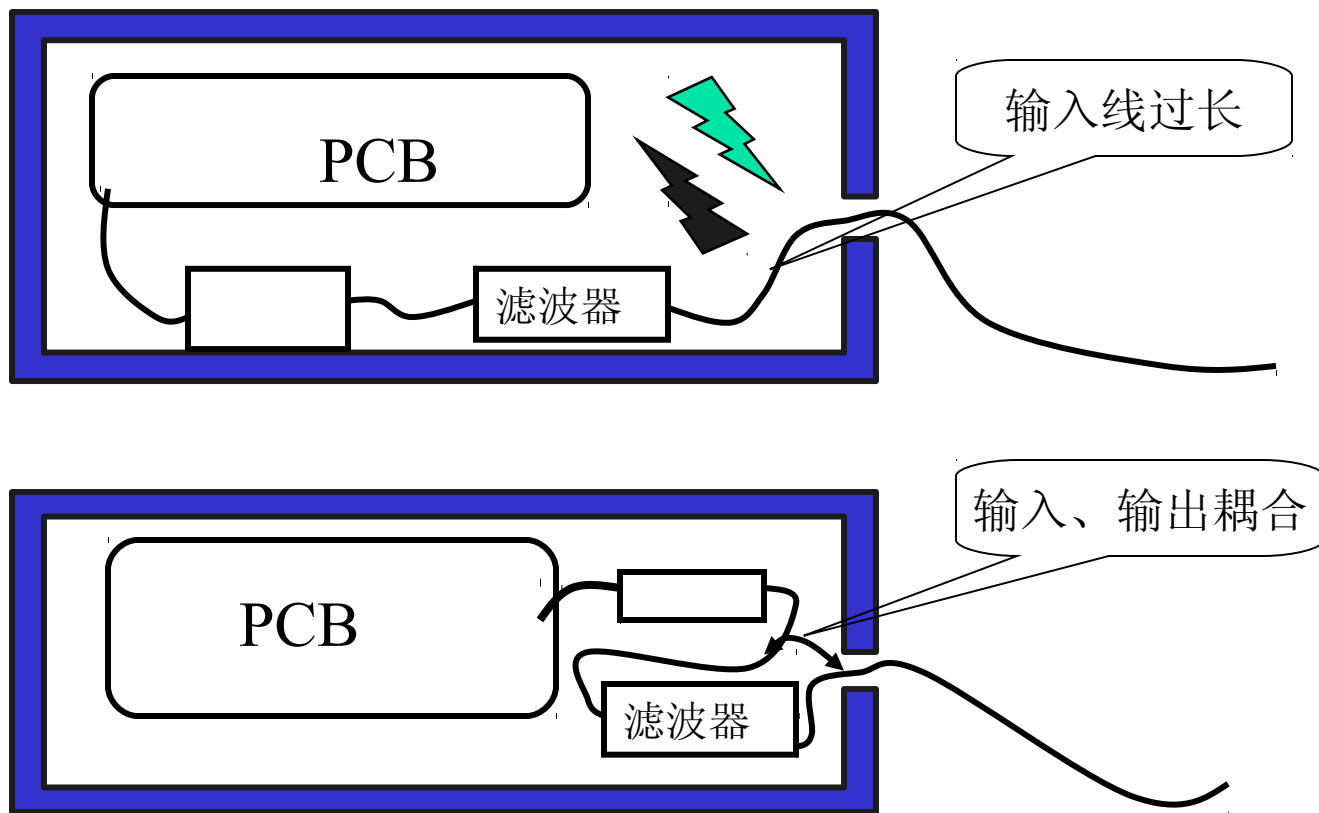


电源线泄漏严重

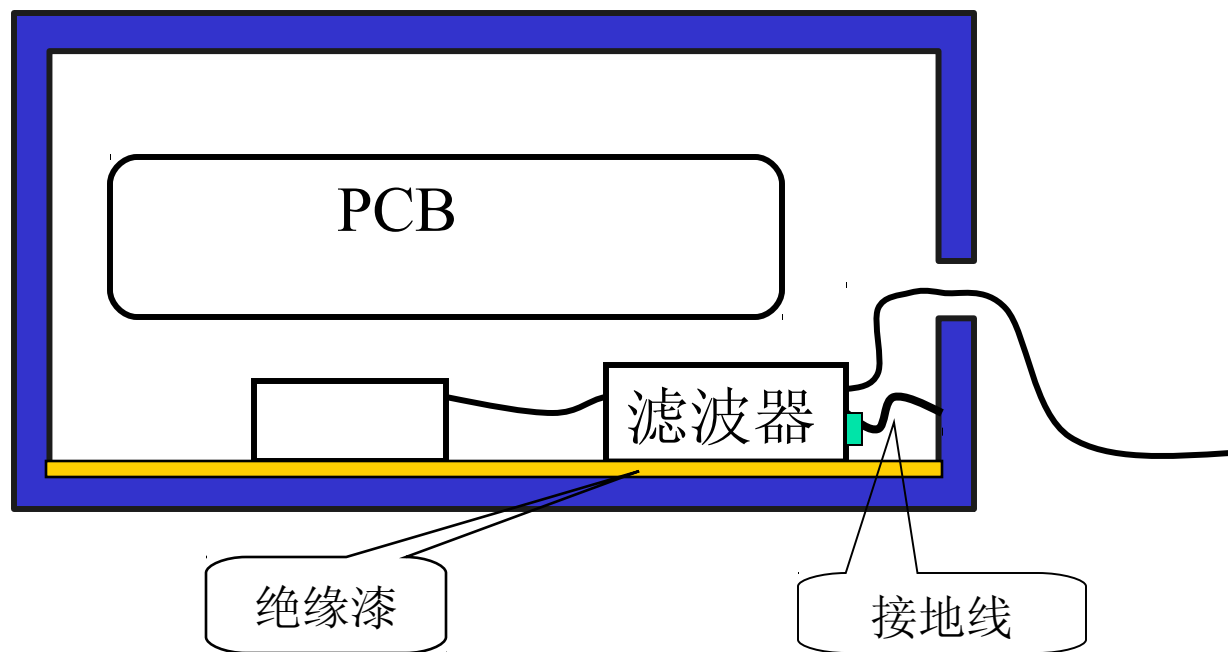
线路板上滤波的改进方法



电源线滤波器的错误安装

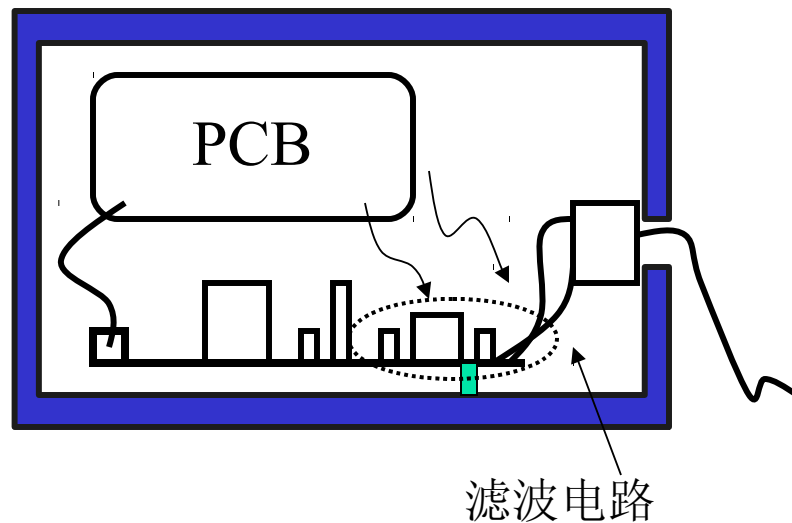
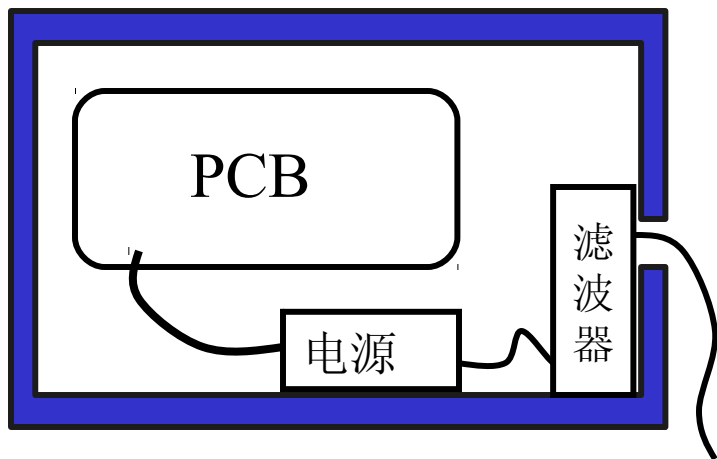


电源线滤波器的错误安装



滤波器通过细线接地，高频效果很差！

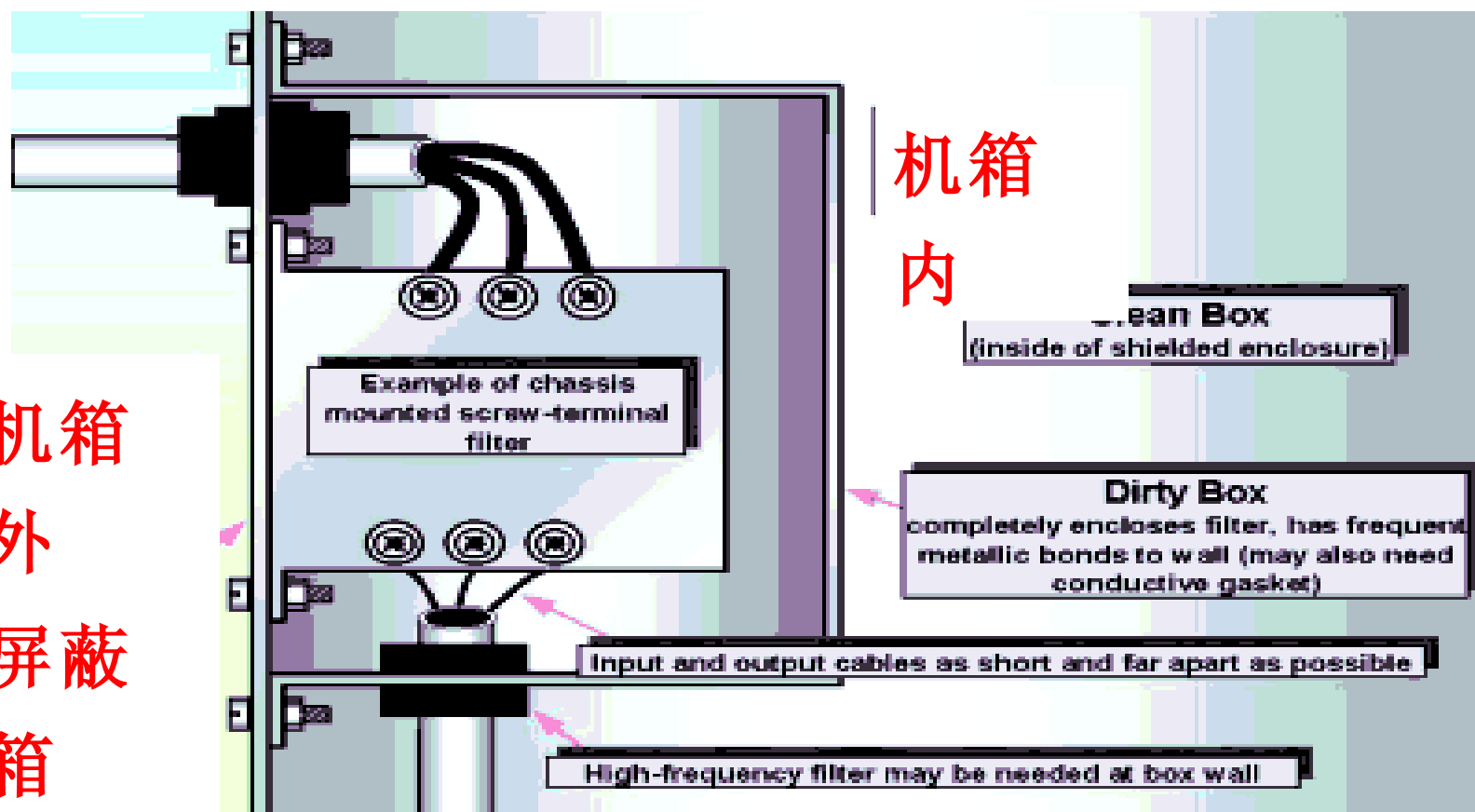
滤波器的正确安装



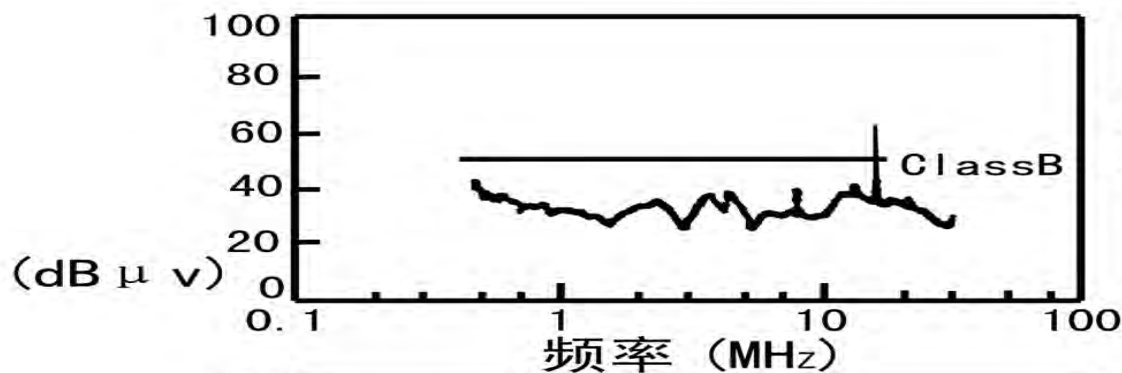
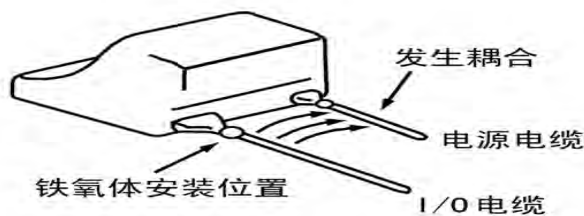
这样试一试

机箱
外
屏蔽
箱

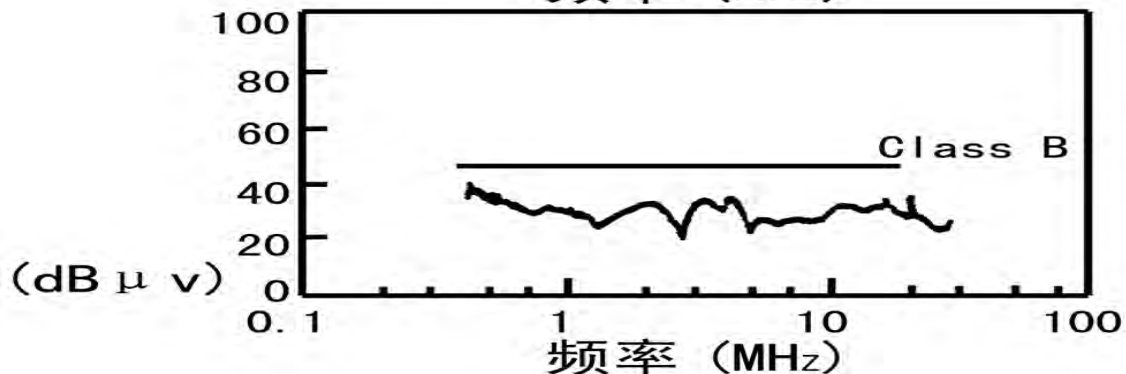
机箱
内



还要注意的一个小问题



(a) I/O 电缆屏蔽时，电源线的噪声电平。

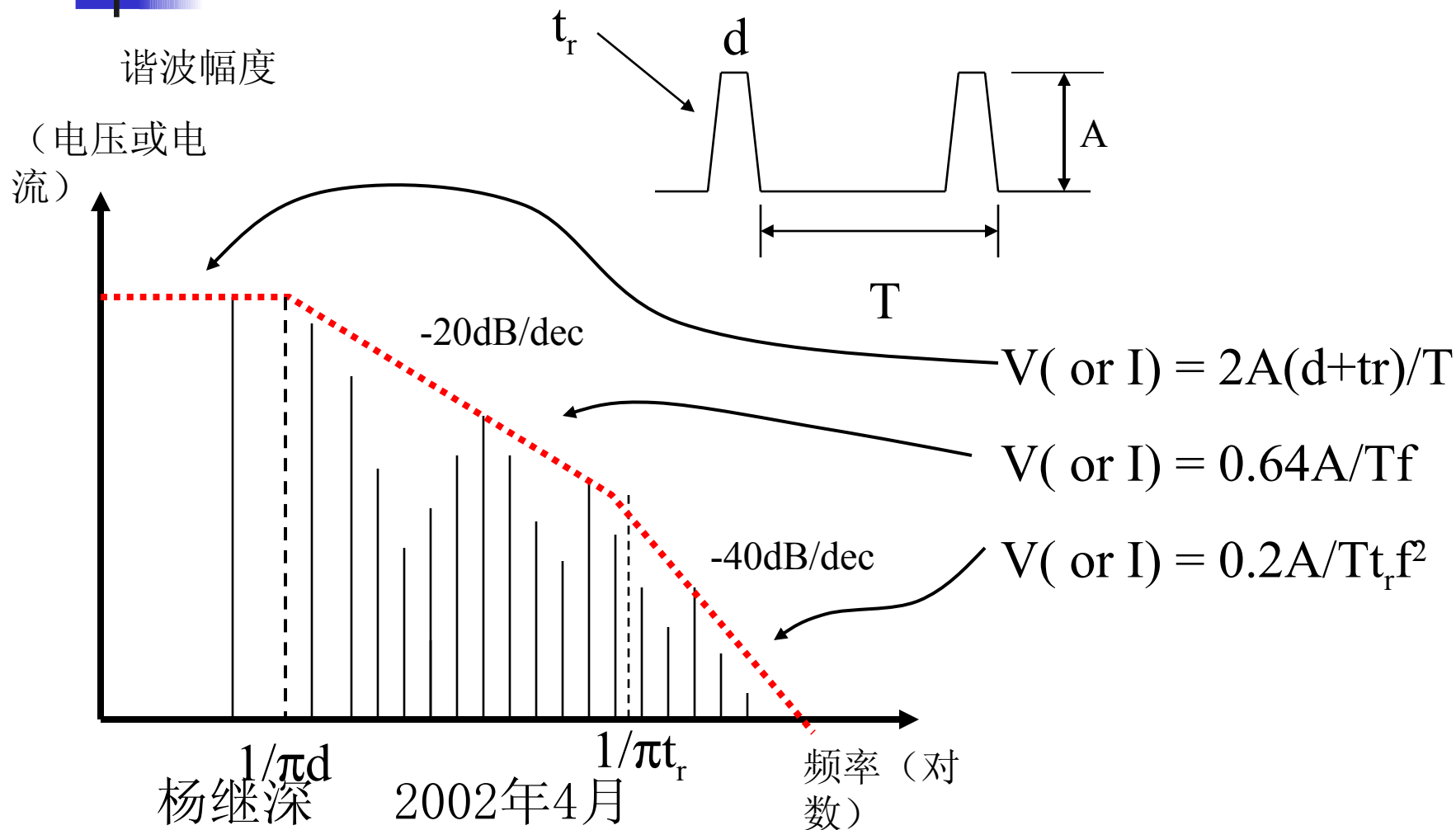


(b) I/O 电缆屏蔽，并且端接处安装铁氧体时，电源电缆的噪声电平。

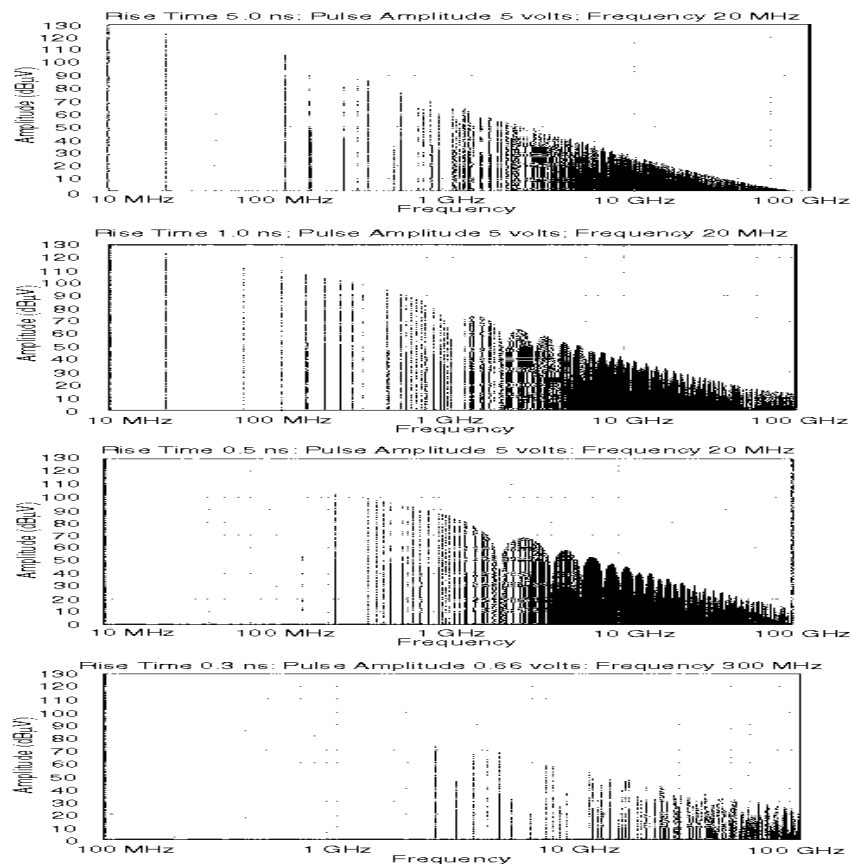
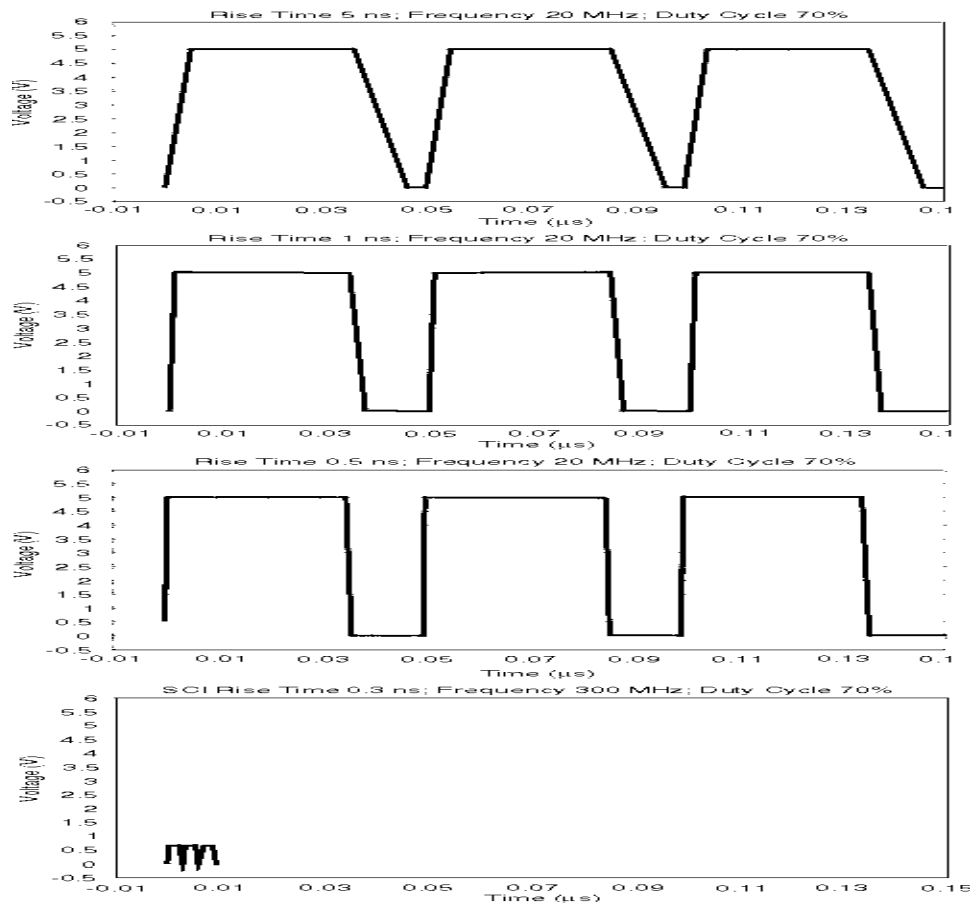


PCB 的电磁兼容设计

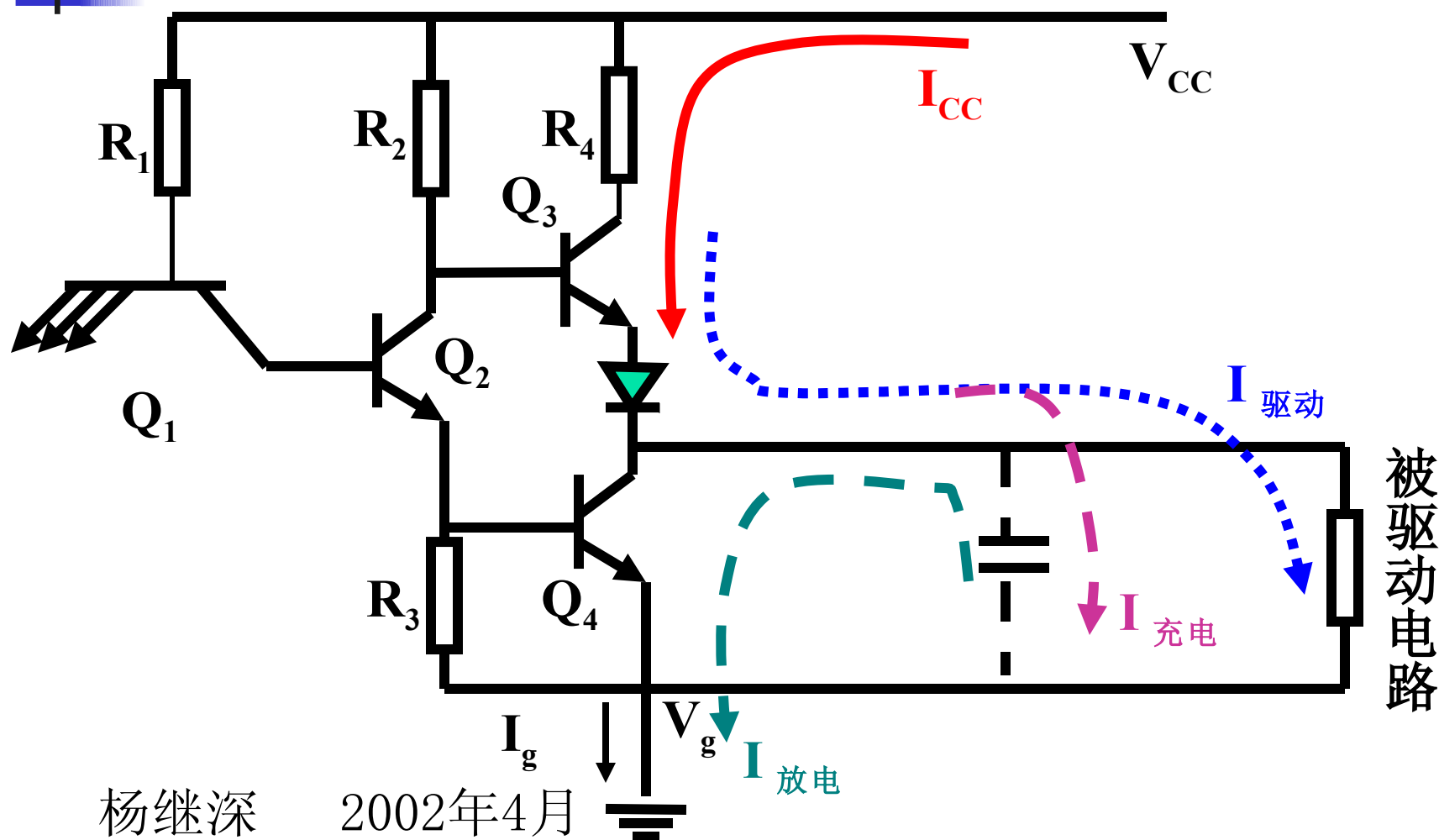
脉冲信号的频谱



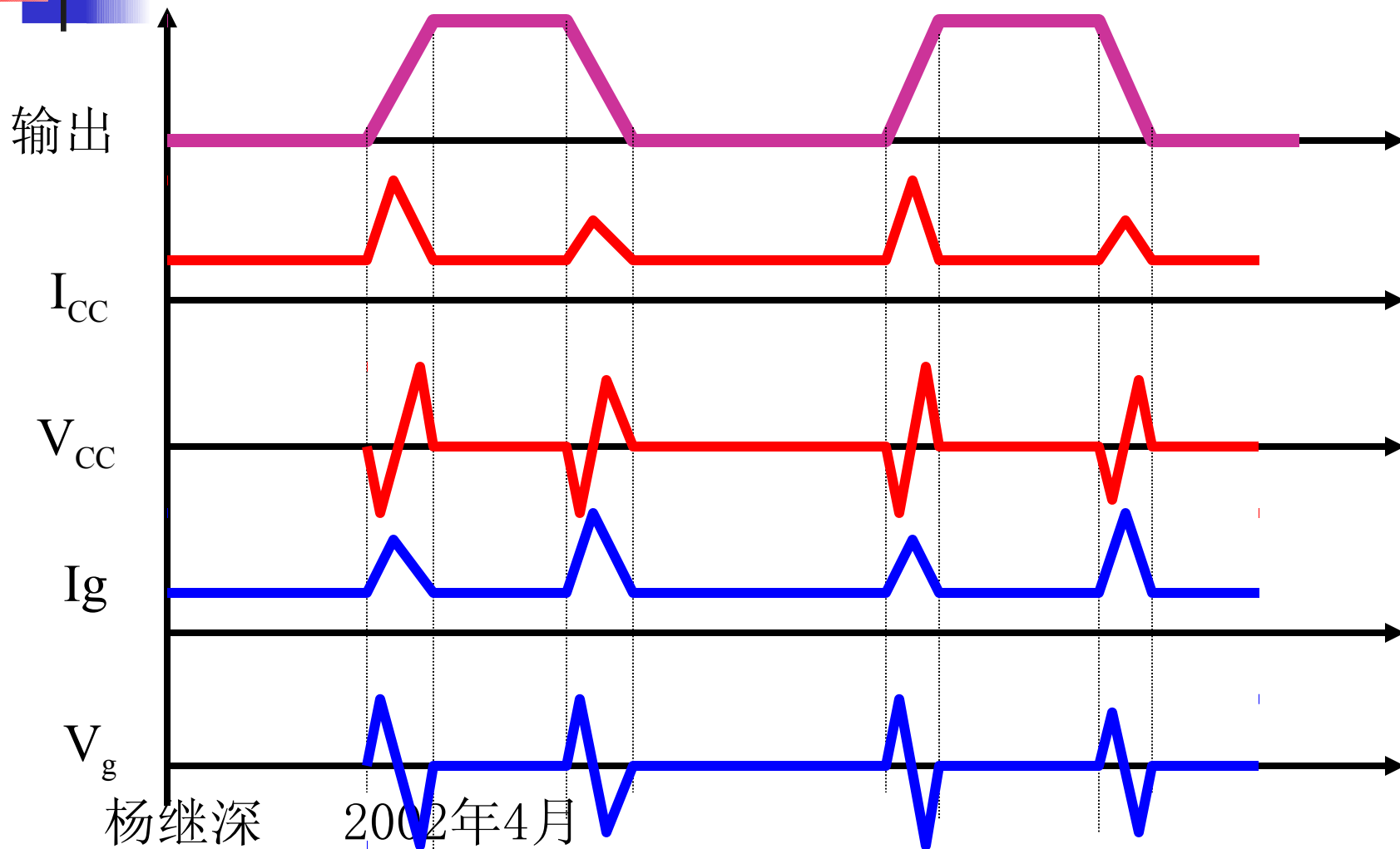
上升沿越陡高频越丰富



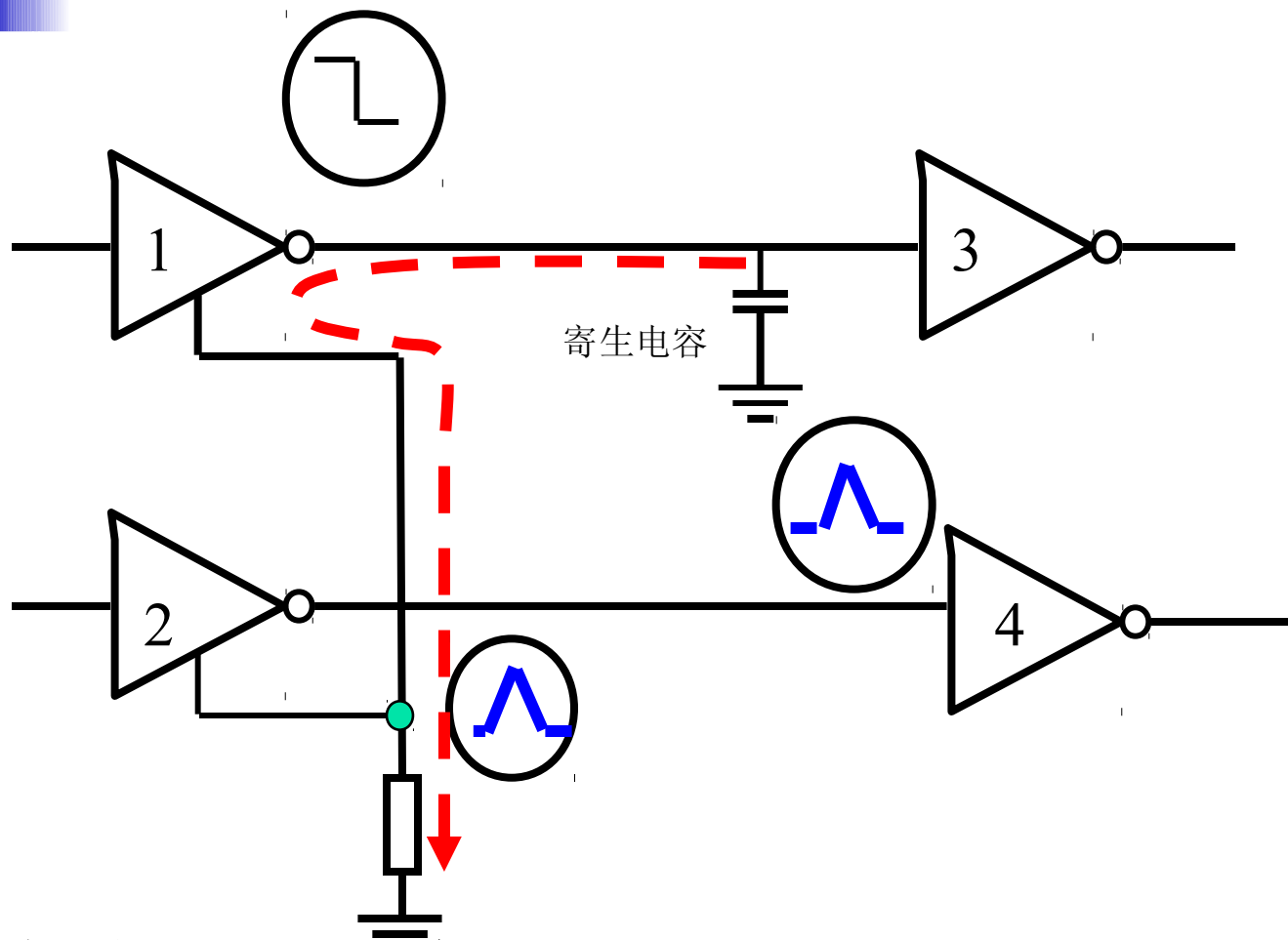
地线和电源线上的噪声



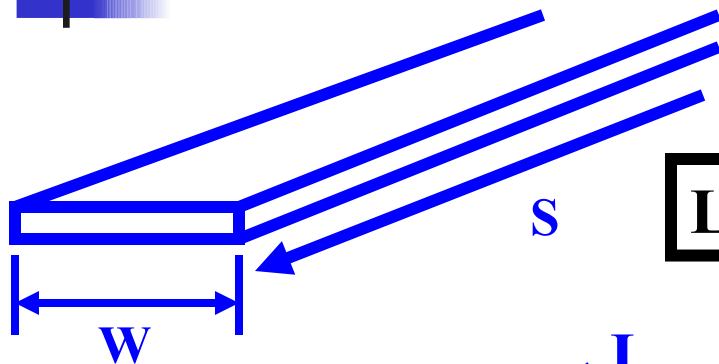
电源线、地线噪声电压波形



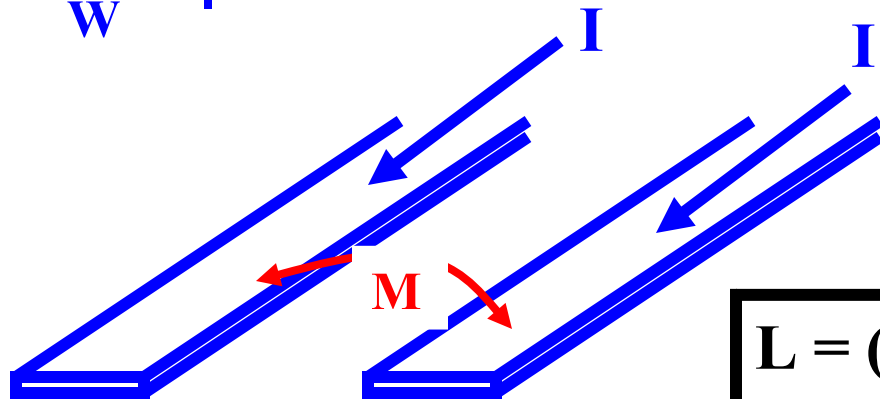
地线干扰对电路的影响



线路板走线的电感



$$L = 0.002S(2.3\lg (2S / W) + 0.5 \quad \mu\text{H}$$

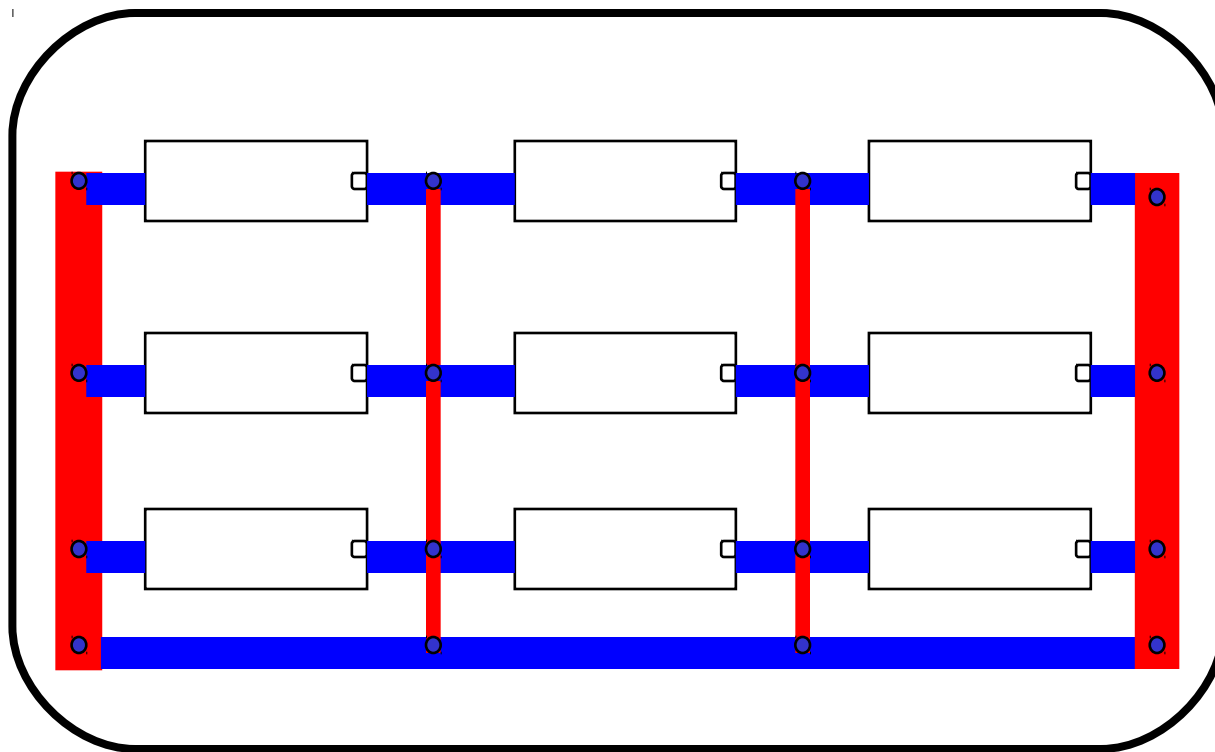


$$L = (L_1 L_2 - M^2) / (L_1 + L_2 - 2M)$$

若： $L_1 = L_2$

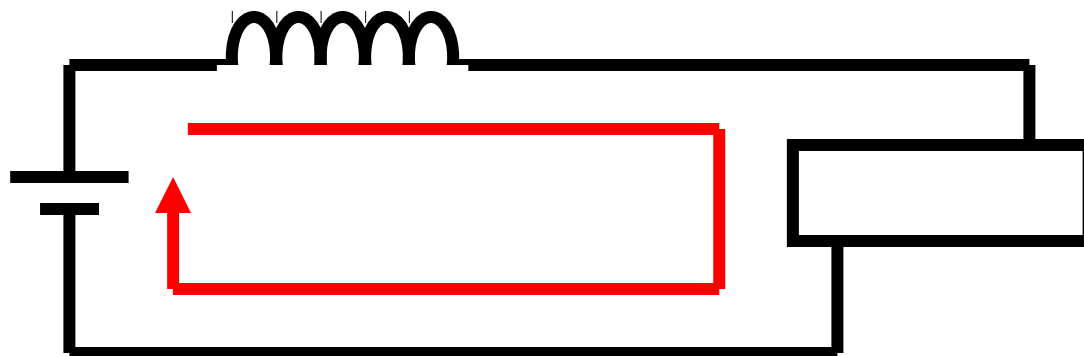
$$L = (L_1 + M) / 2$$

地线网格

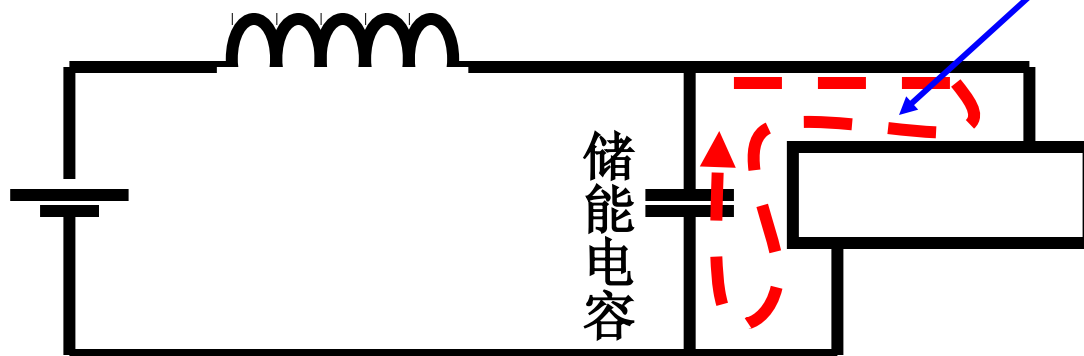


电源线噪声的消除

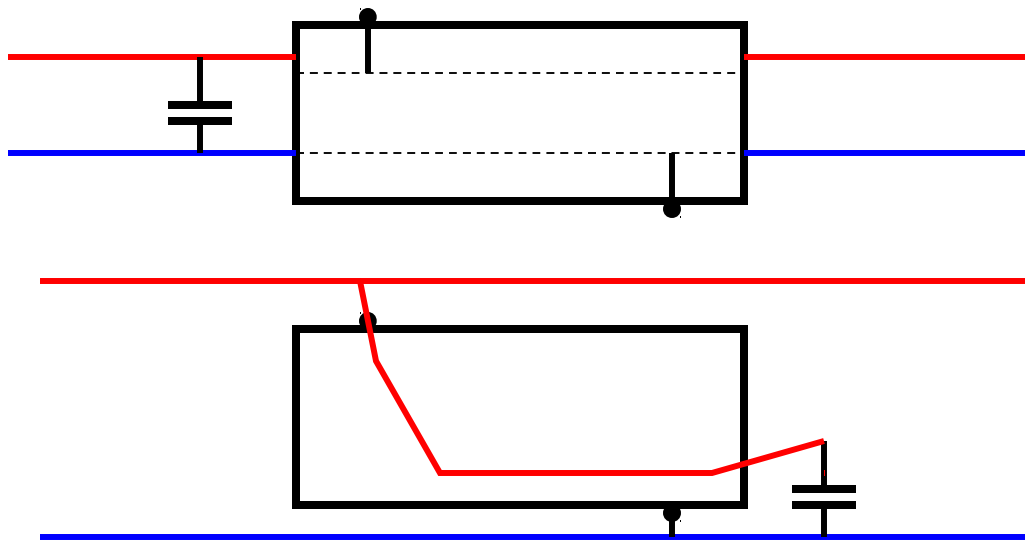
电源线电感



这个环路尽量小



电源解耦电容的正确布置



尽量使电源线与地线靠近

解耦电容的选择

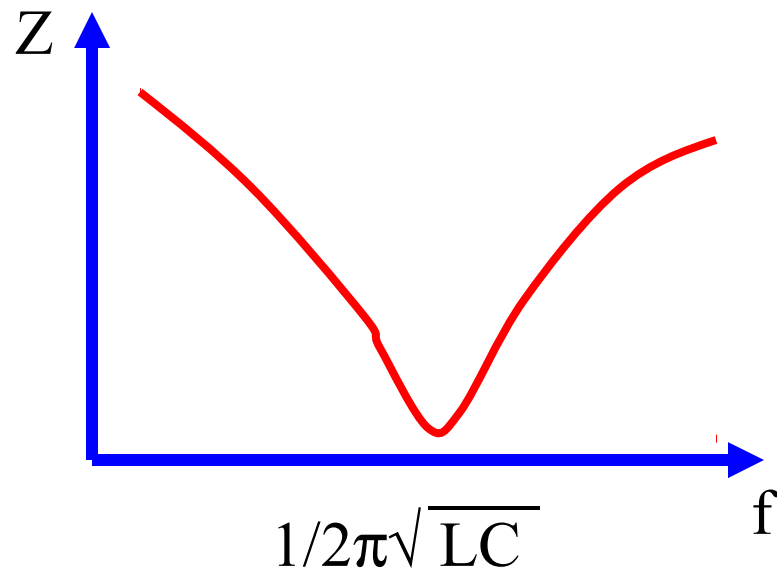
$$C = \frac{dI \, dt}{dV}$$

各参数含义：

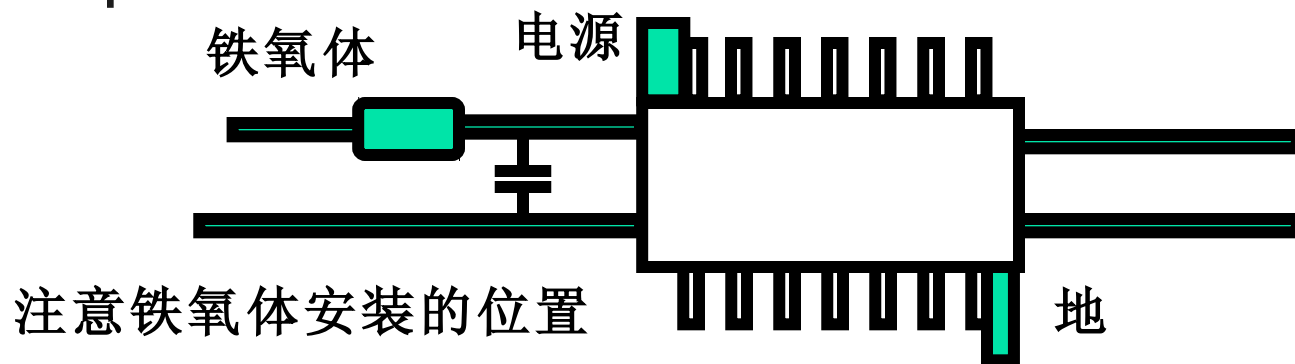
在时间 dt 内，电源线上出现了瞬间电流 dI ， dI 导致了电源线上出现电压跌落 dV 。

杨继深

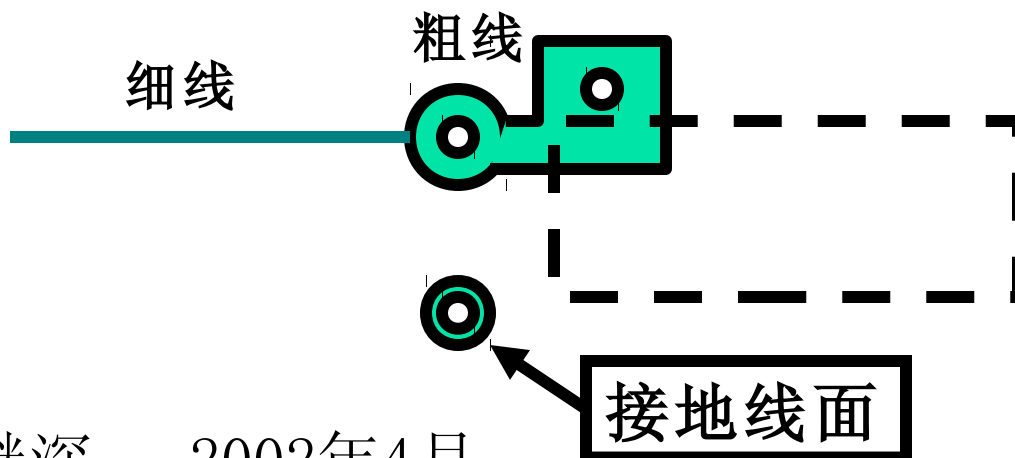
2002年4月



增强解耦效果的方法



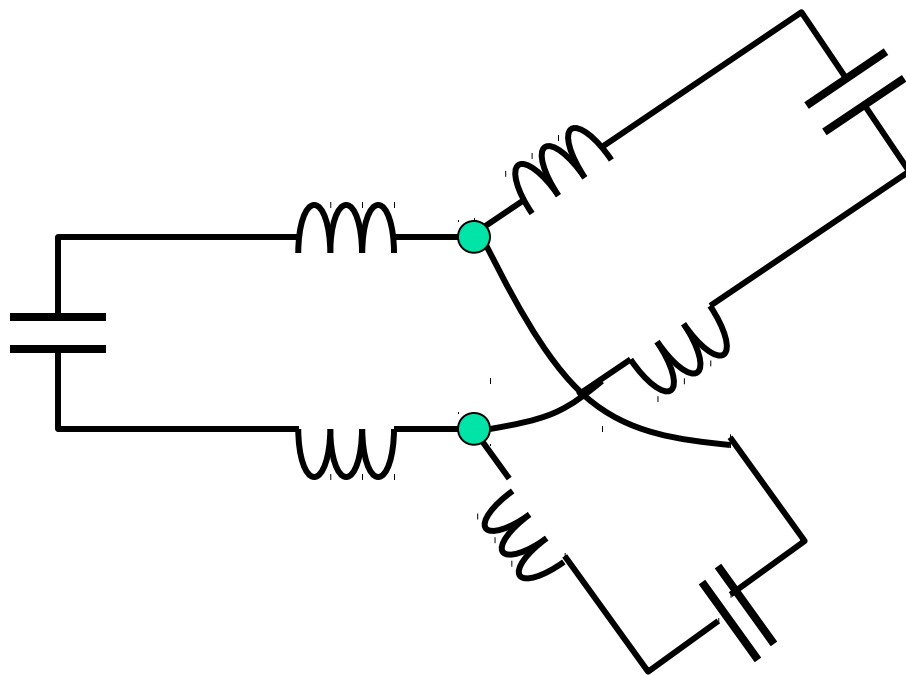
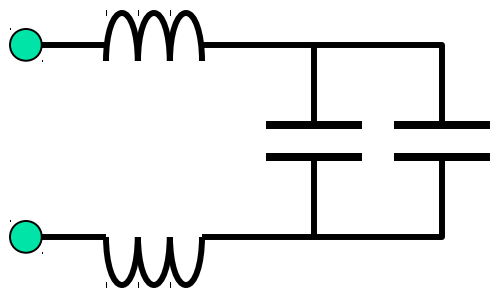
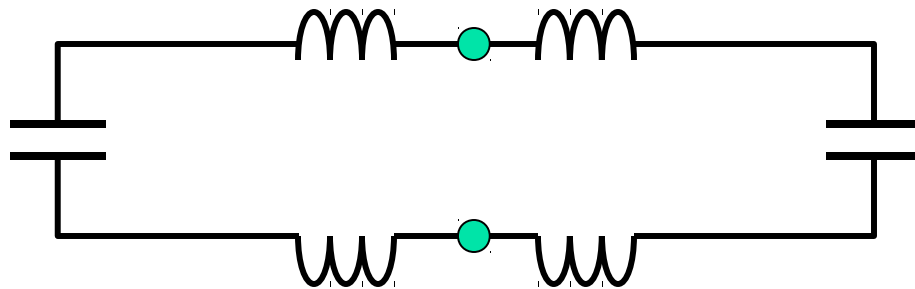
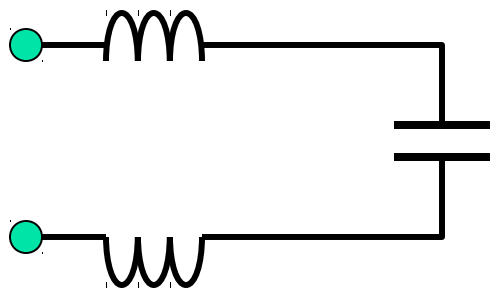
用铁氧体增加电源端阻抗



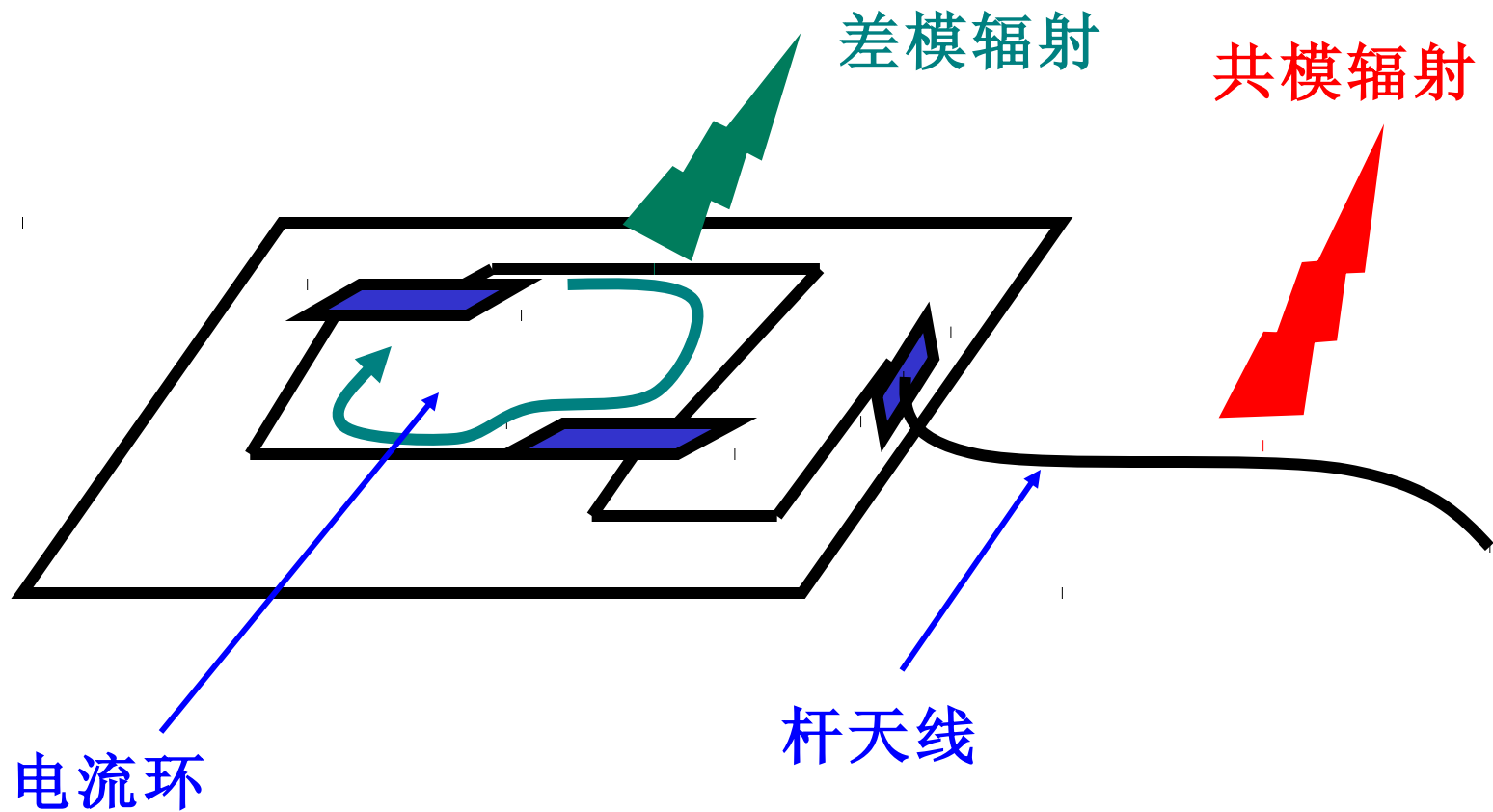
用细线增加电源端阻抗



多个电容并联加强解耦效果



线路板的两种辐射机理

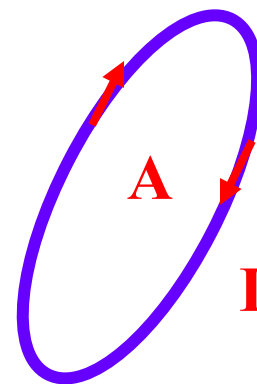


电流环路产生的辐射

近场区内： $H = IA / (4\pi D^3)$ A/m

$E = Z_0 IA / (2\lambda D^2)$ V/m

$Z_w = Z_0 \left(2\pi D / \lambda \right)$

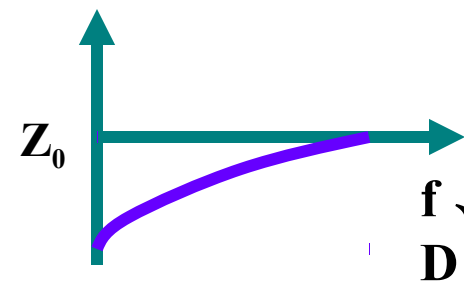


随频率、距离增加而增加

远场区内： $H = \pi IA / (\lambda^2 D)$ A/m

$E = Z_0 \pi IA / (\lambda^2 D)$ V/m

杨继深 $Z_w = Z_0$ Ω

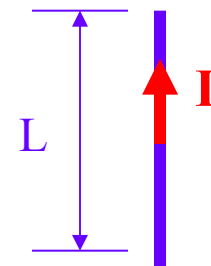


导线的辐射

近场区内： $H = I L / (4\pi D^2)$ A/m

$E = Z_0 I L \lambda / (8 \pi^2 D^3)$ V/m

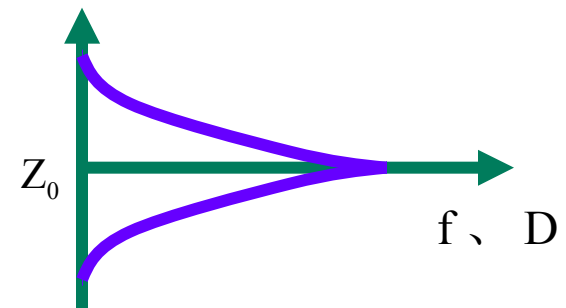
$Z_w = Z_0 \left(\frac{1}{2\pi D} \right)$



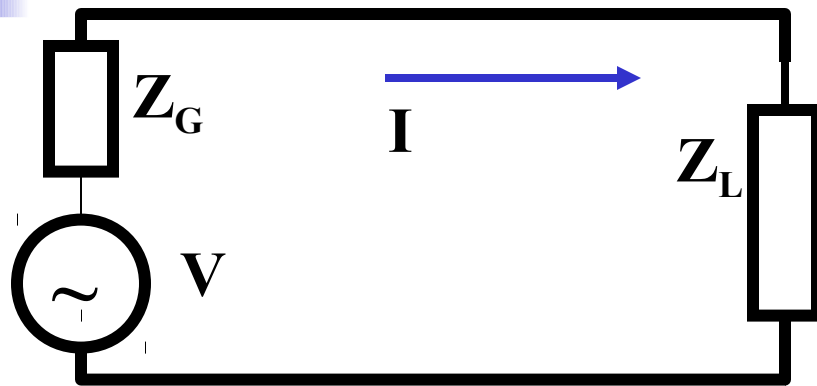
随频率、距离增加而减小

远场区内： $H = I L / (2\lambda D)$ A/m

$E = Z_0 I L / (2\lambda D)$ V/m



实际电路的辐射



$$Z_C = Z_G + Z_L$$

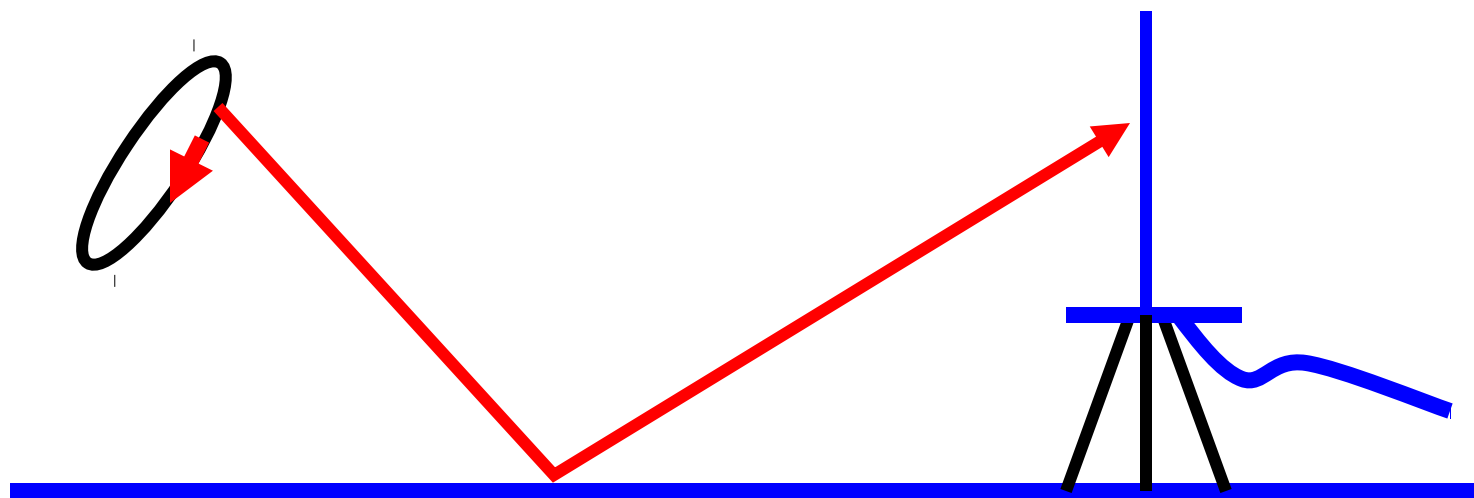
环路面积 = A

近场: $Z_C \geq 7.9 D f$ $E = 7.96 V A / D^3$
 (V/m)

$Z_C \leq 7.9 D f$, $E = 63 I A f / D^2$ (V/m)

$H = 7.96 I A / D^3$ (

常用的差模辐射预测公式



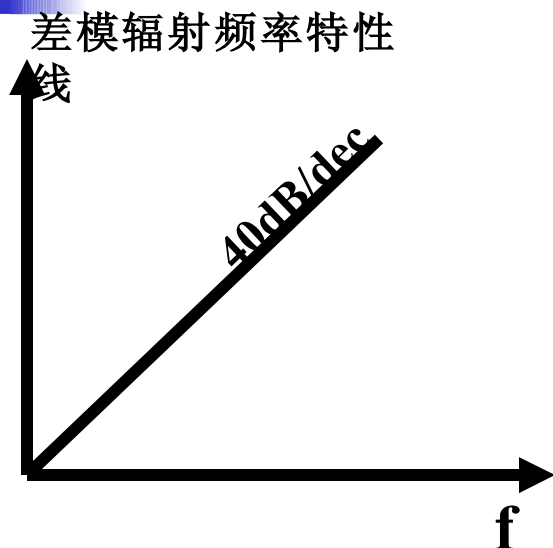
考虑地面反射时：

$$E = 2.6 I A f^2 / D$$

(V/m)

杨继深 2002年4月

脉冲信号差模辐射的频谱

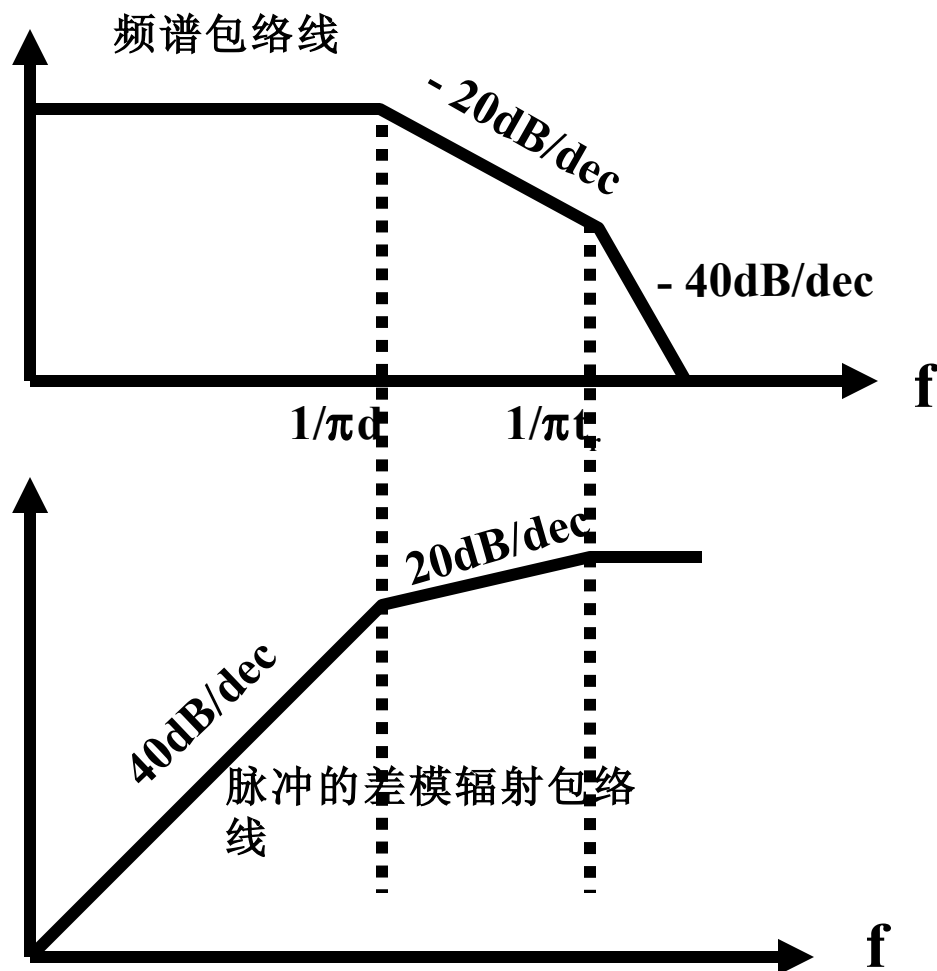


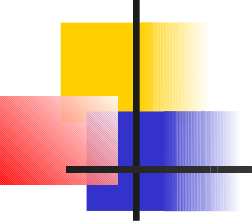
$$E = 2.6 I A f^2 / D$$

$$E_{dB} = 20 \lg (2.6 I A / D)$$

杨继深 2002年4月

+40lg f





不同逻辑电路为了满足EMI指标要求 所允许的环路面积

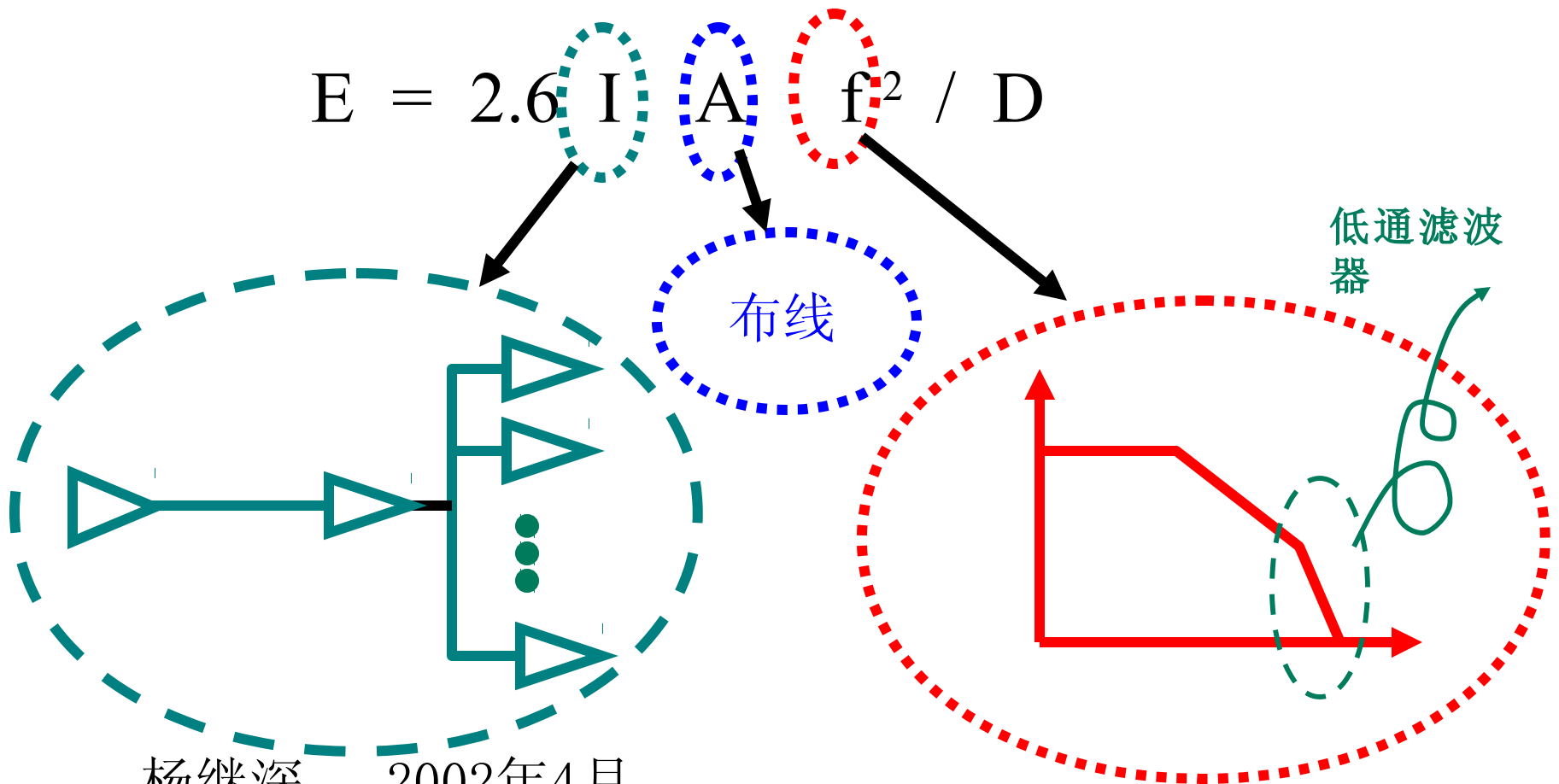
逻辑 系列	上升 时间	电流	不同时钟频率允许的面积 (cm ²)			
			4MHz	10	30	100
4000B	40	6	1000	400		
74HC	6	20	50	45	18	6
74LS	6	50	20	18	7.2	2.4
74AC	3.5	80	5.5	2.2	0.75	0.25
74F	3	80	5.5	2.2	0.75	0.25
74AS	1.4	120	2	0.8	3	0.15

仅代表了一个环路的辐射情况，若有 N 个环路辐射，
乘以 $\frac{1}{N}$ 。因此，可能时，分散时钟频率。

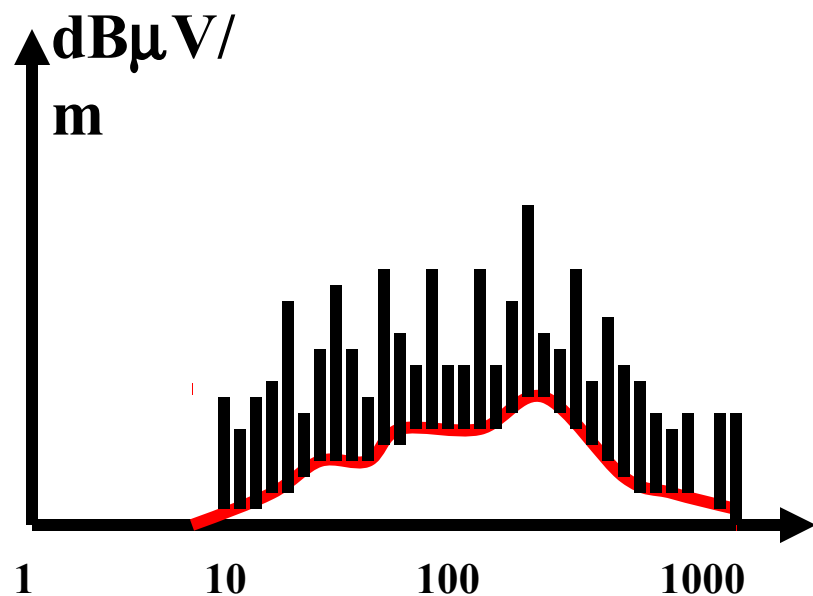
杨继深 2002年4月

如何减小差模辐射？

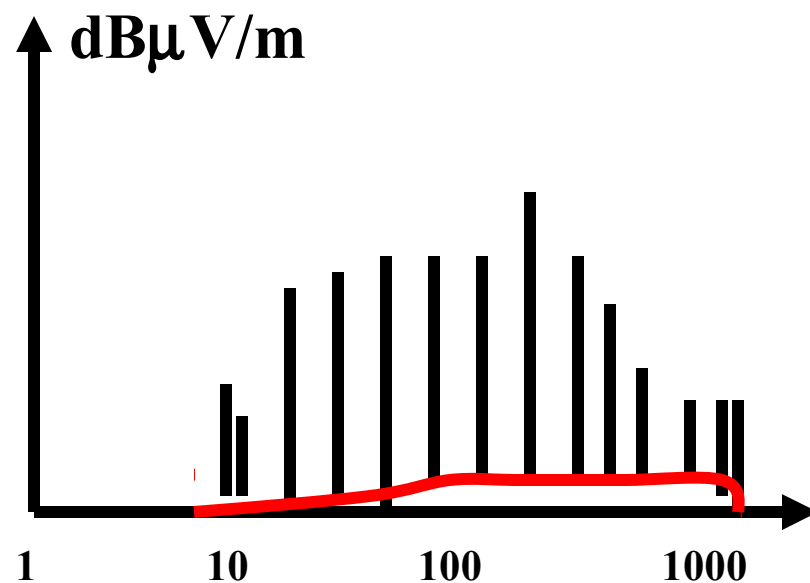
$$E = 2.6 I A f^2 / D$$



电路中的强辐射信号

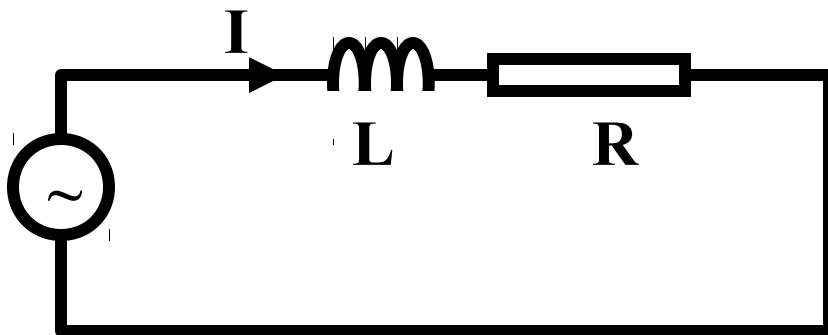


所有电路加电工作



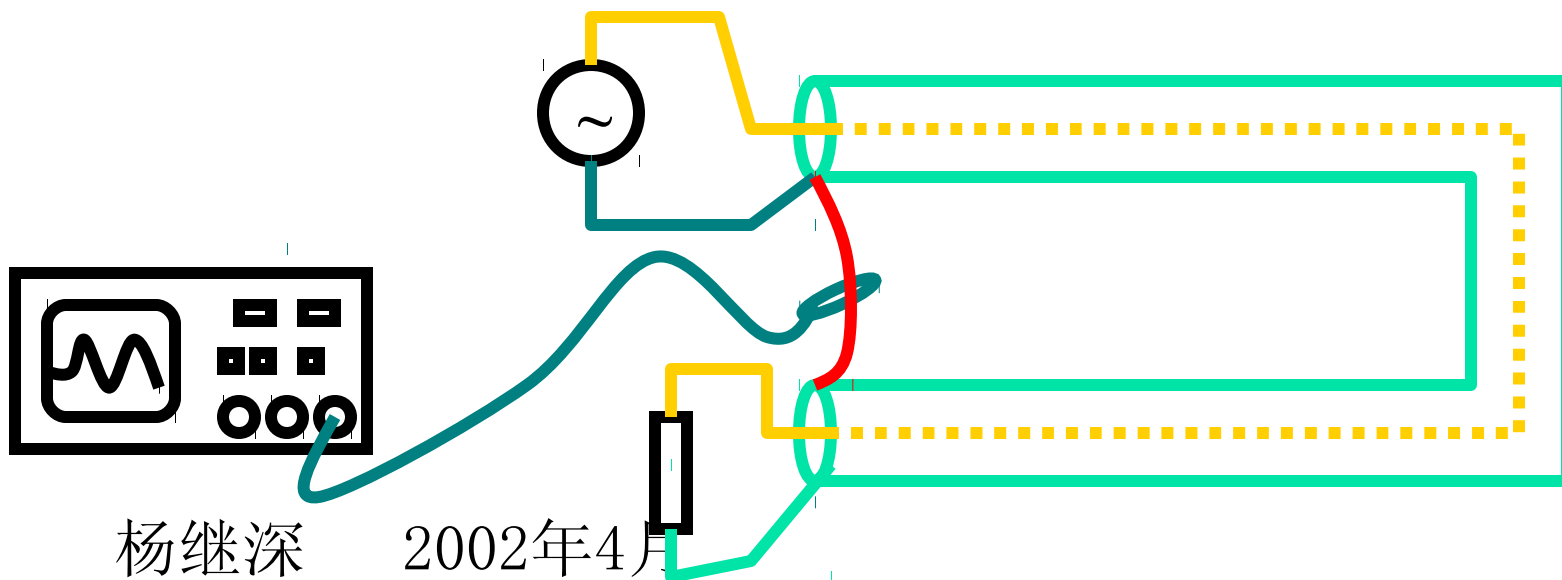
只有时钟电路加电工作

电流回路的阻抗



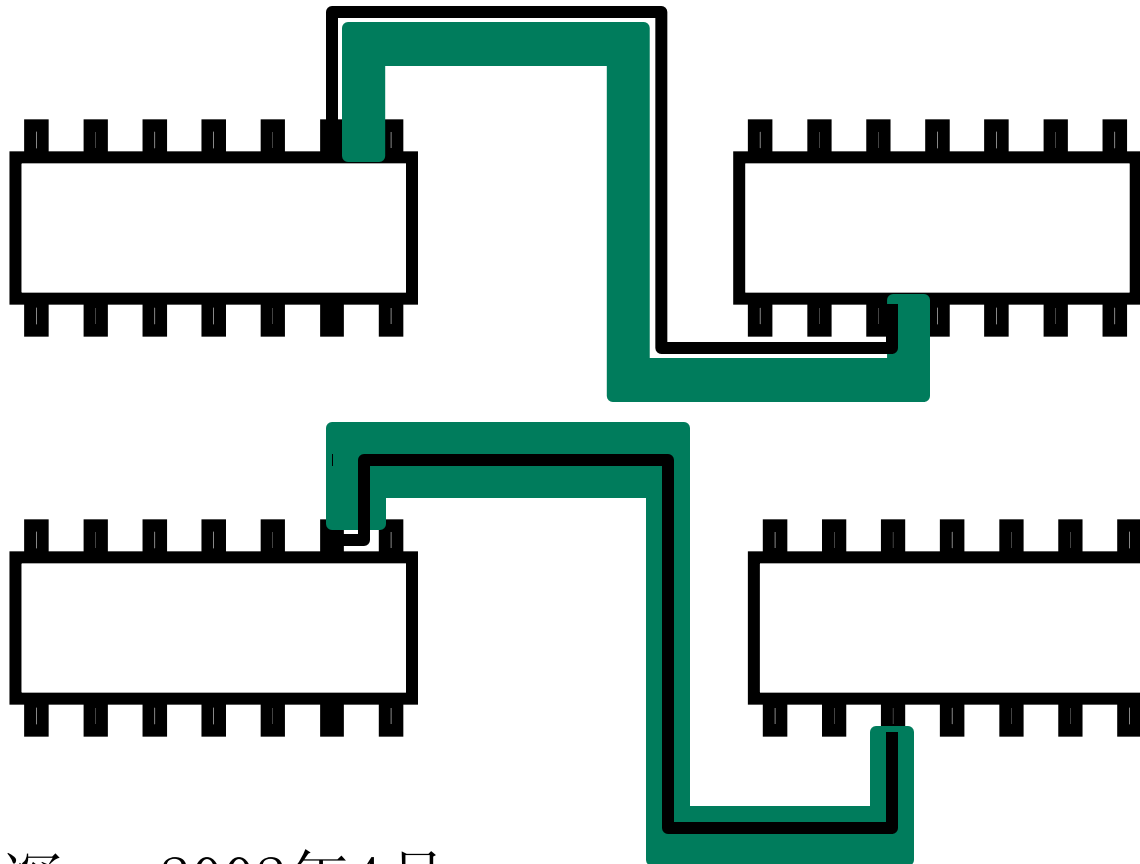
$$Z = R + j\omega L$$

$$L = \Phi / I \quad \Phi \propto A$$

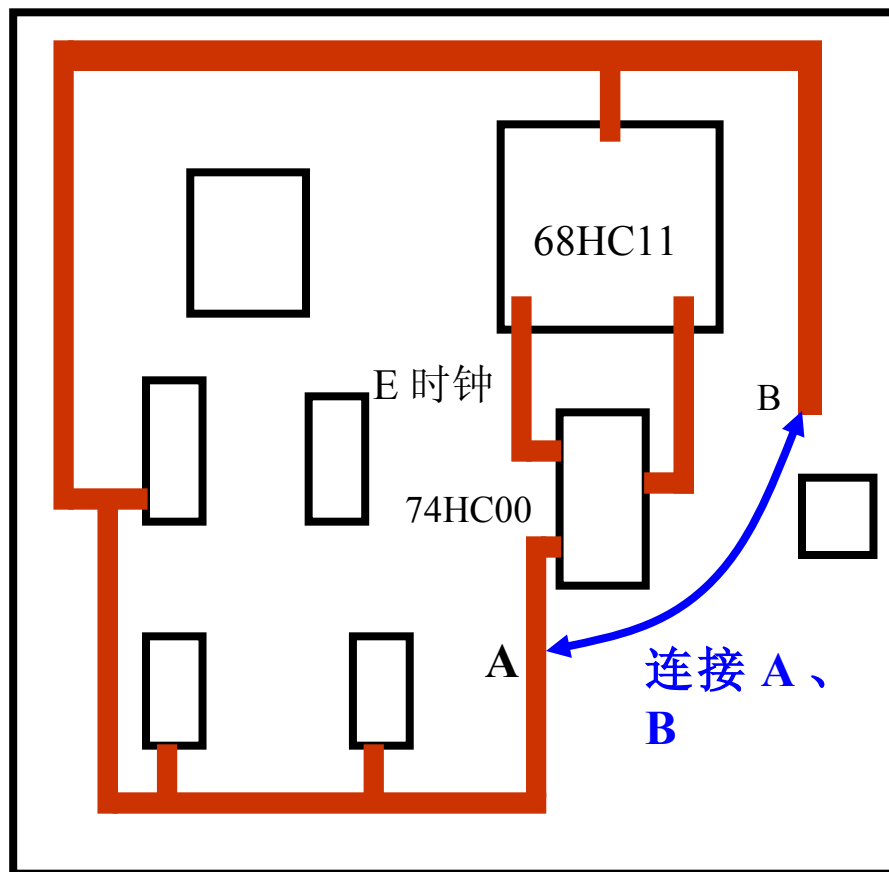
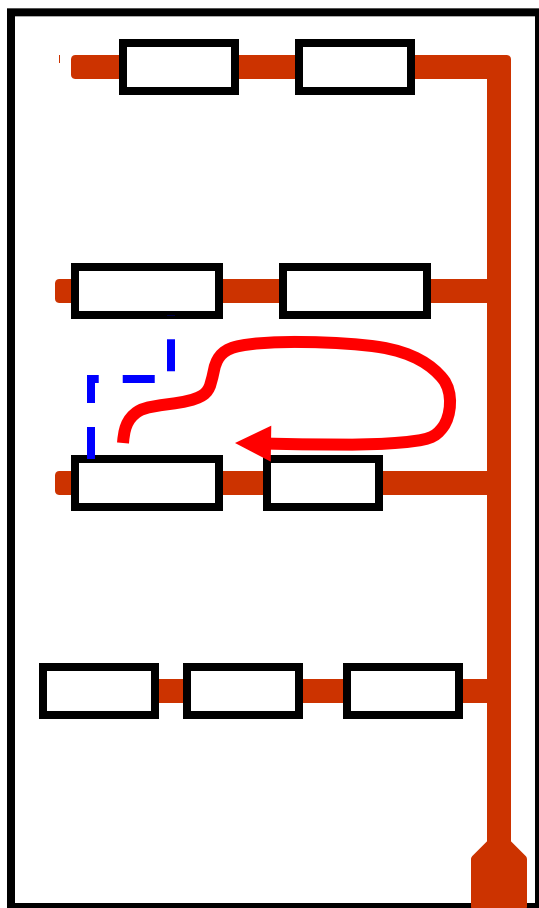




单层或双层板如何减小环路的面积



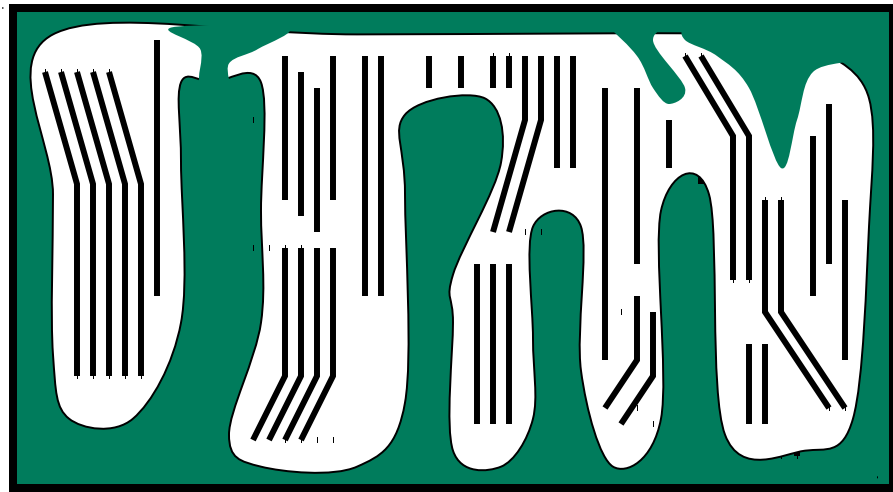
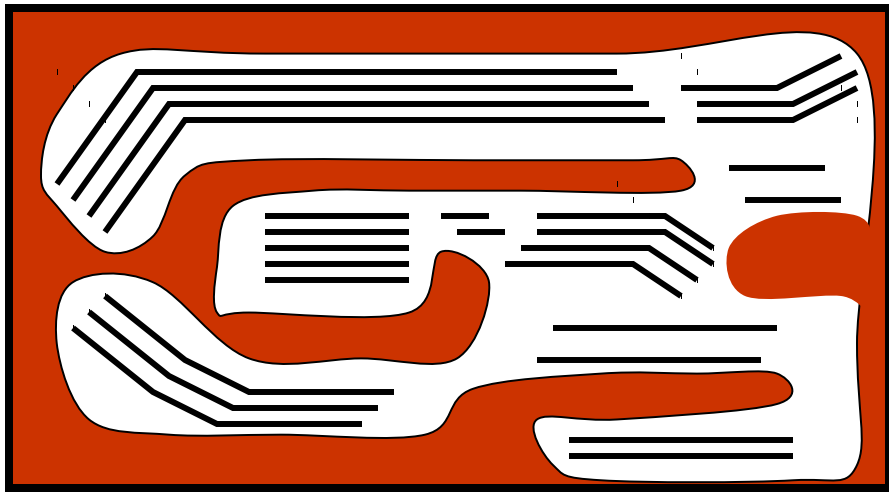
不良布线举例



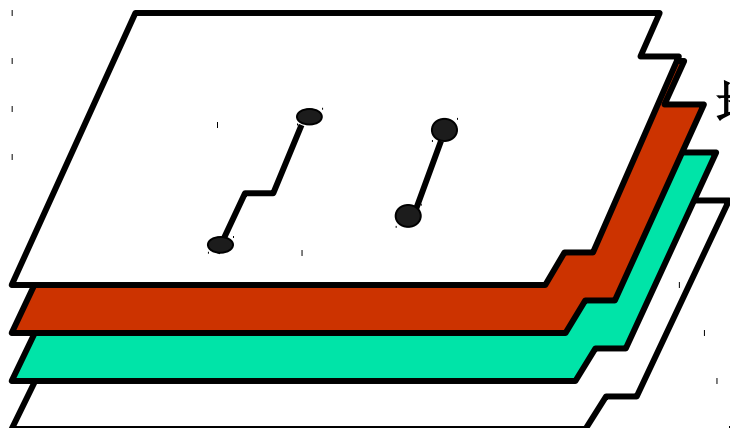
杨继深 2002年4月



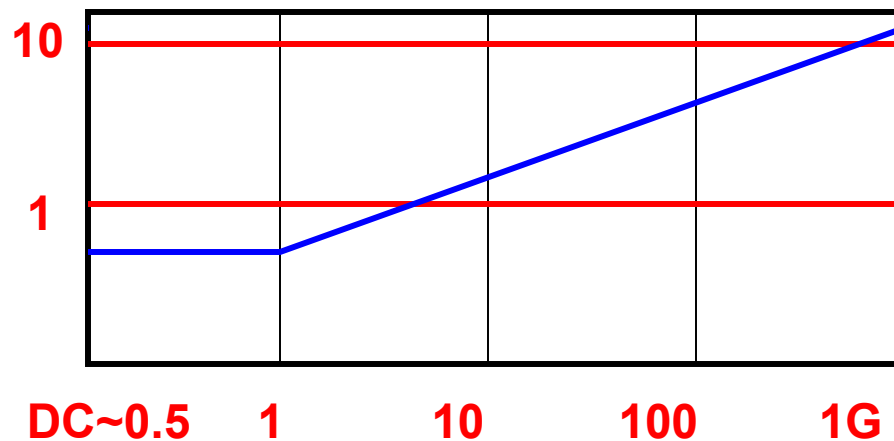
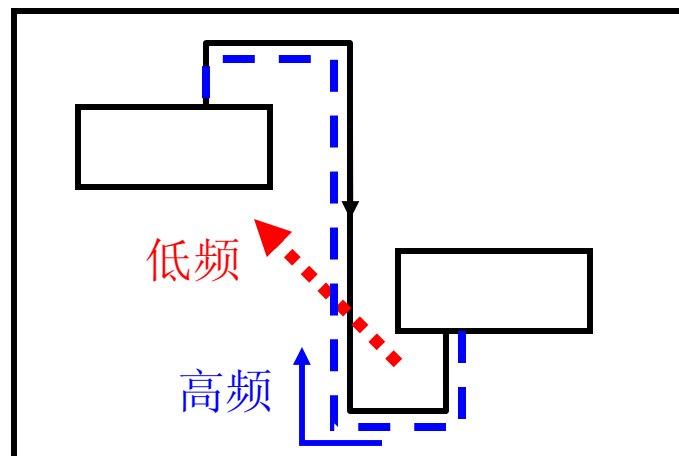
随便设置的地线没有用



多层板能减小辐射



信号 1
电源层
地线层
信号 2

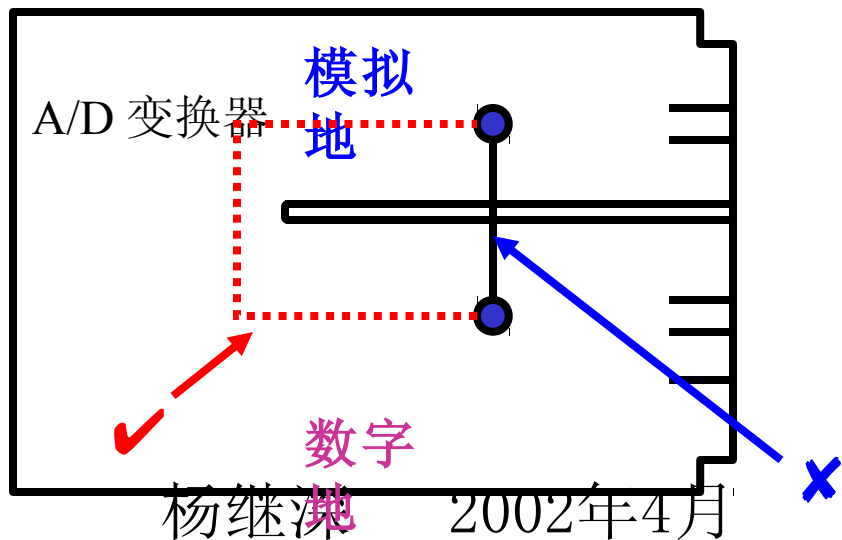
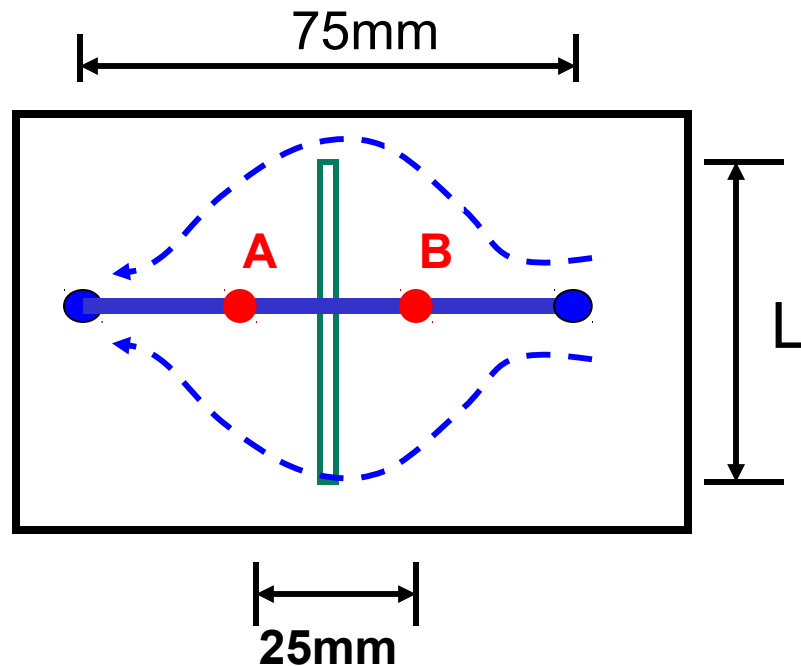
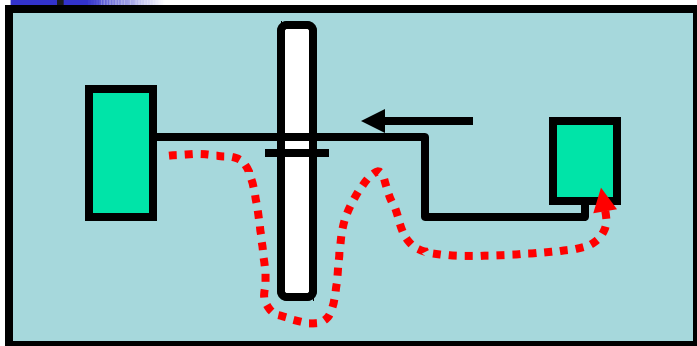


地线面的阻抗, mΩ/ 平方

地线面具有很小的地线阻抗

杨继深 2002年4月

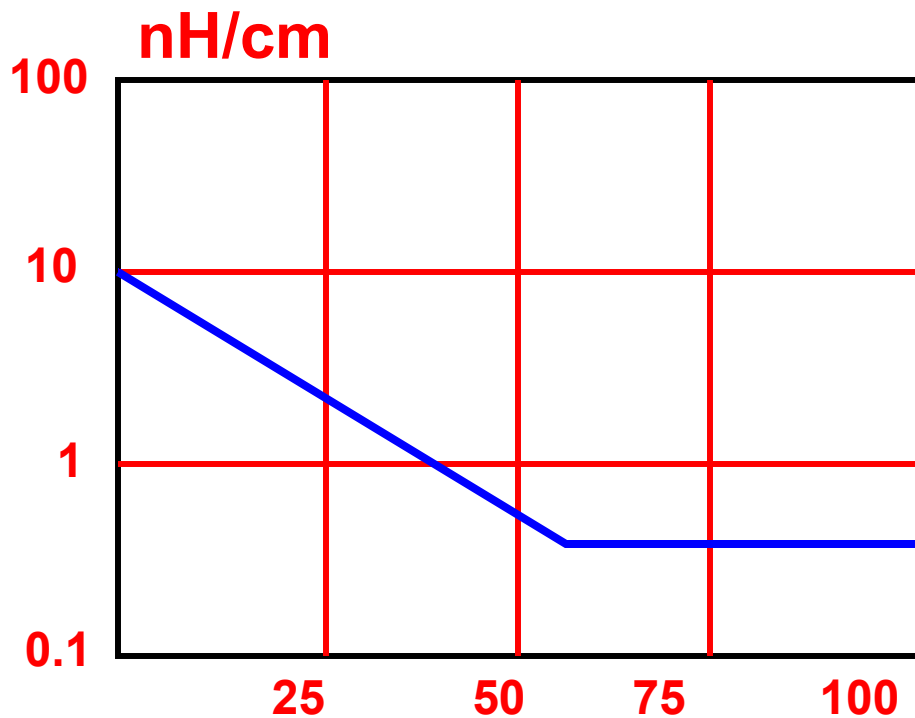
地线面上的缝隙的影响



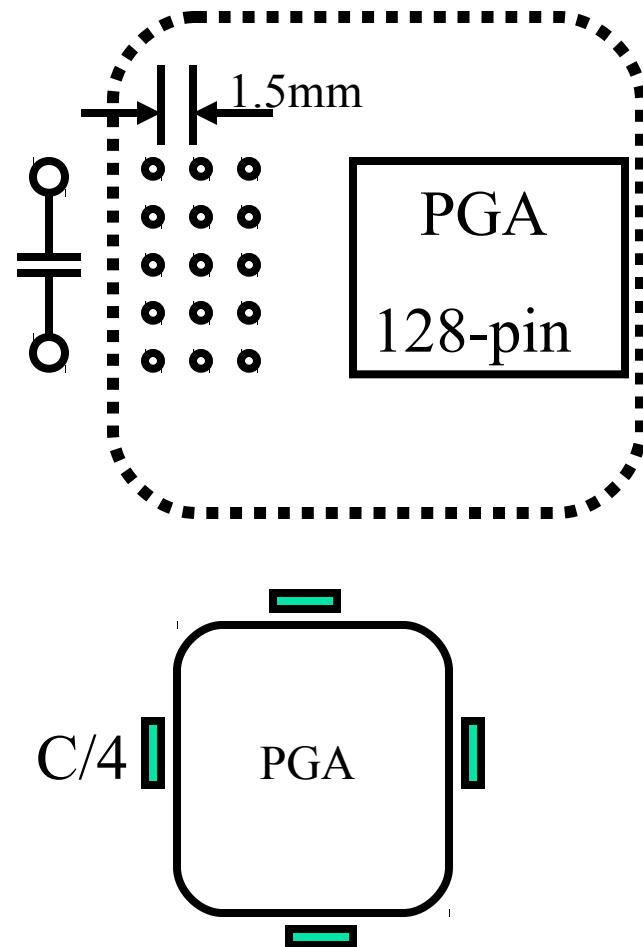
L : 0 ~ 10cm

V_{AB} : 15 ~ 75mV

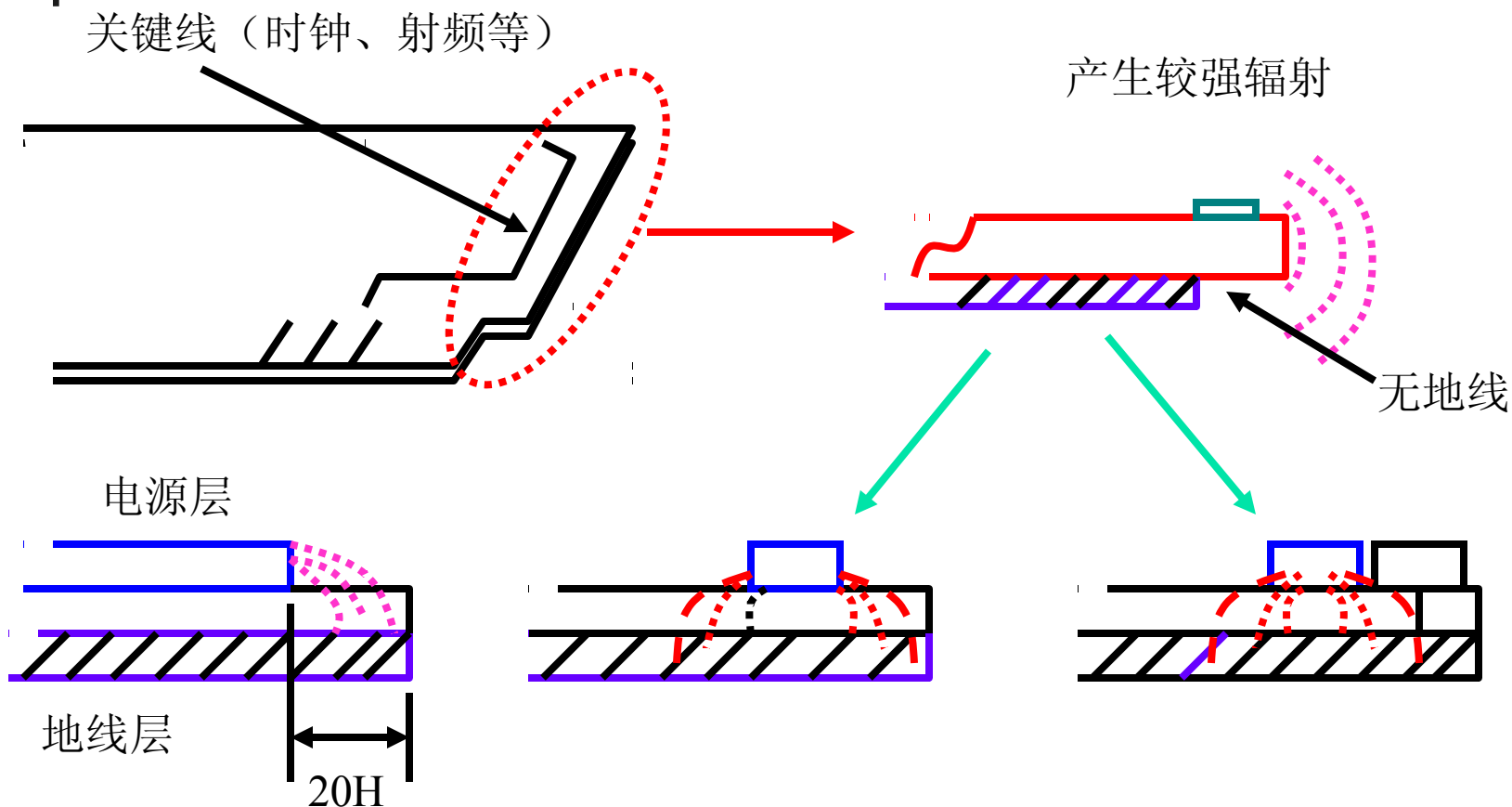
过孔的阻抗



杨继深 2002年4月



线路板边缘的一些问题



扁平电缆的使用

最好



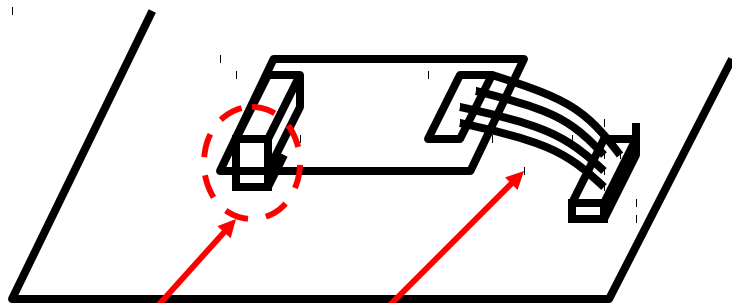
较好



差



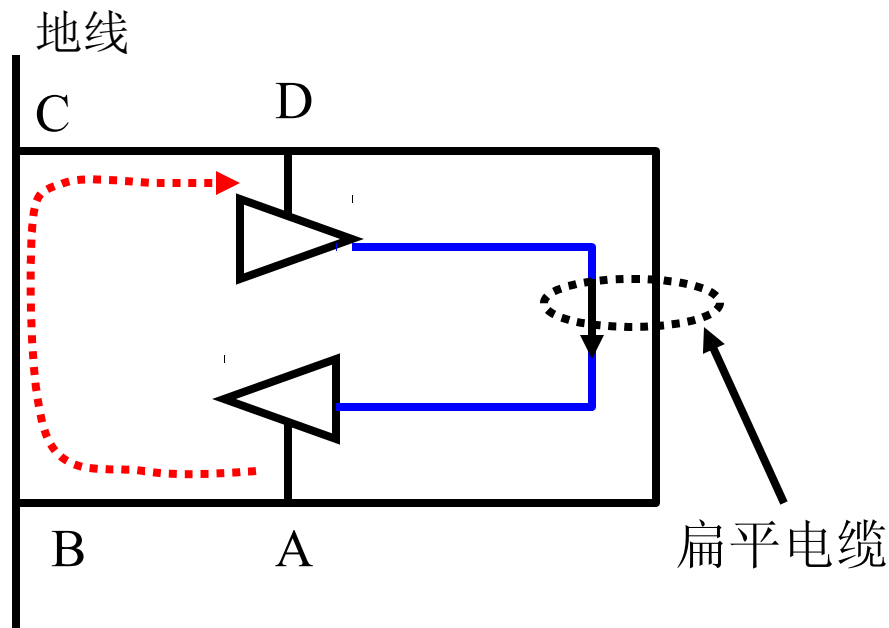
较好，但端接困难



这两处都有地线

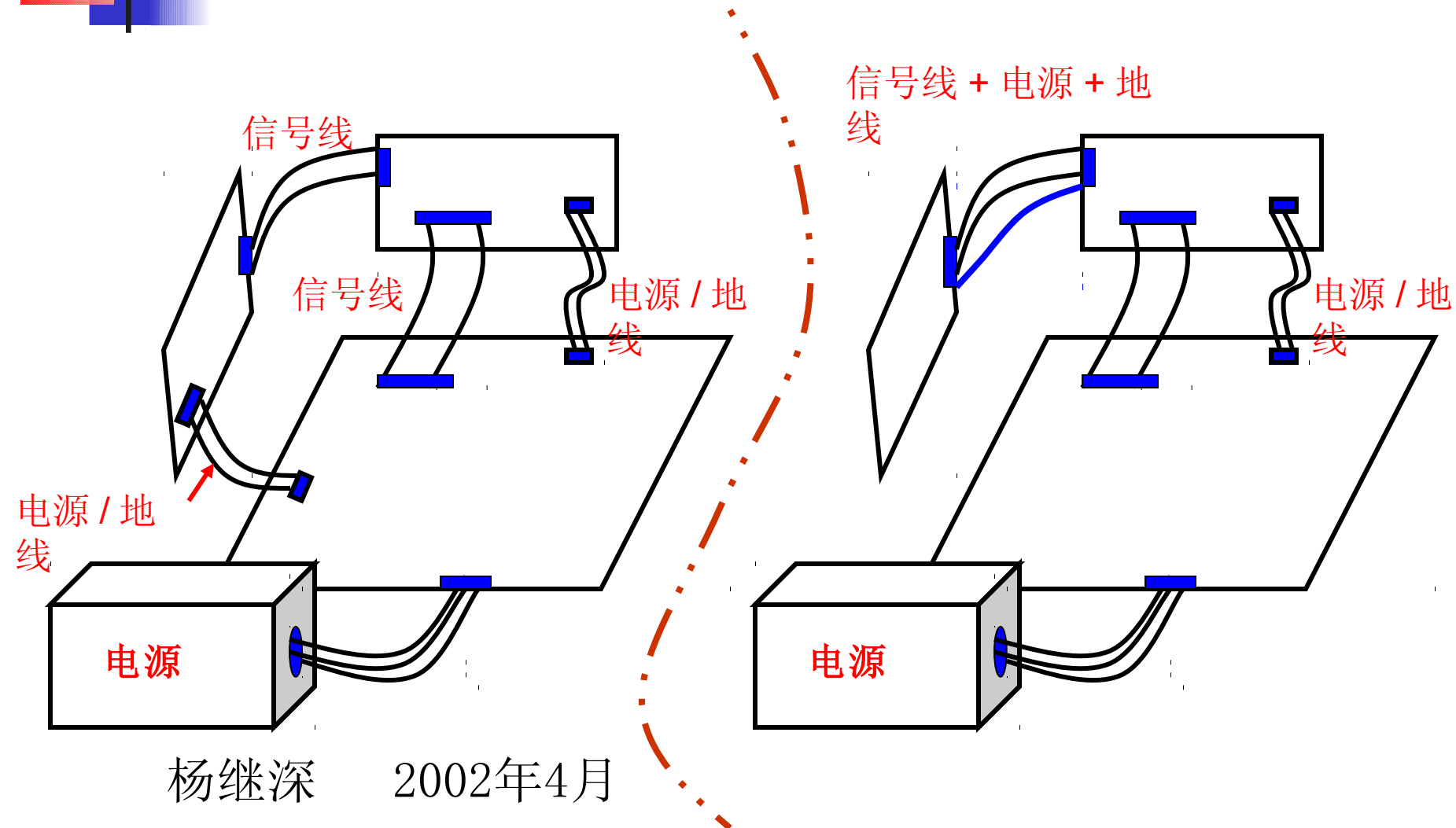
杨继深

2002年4月



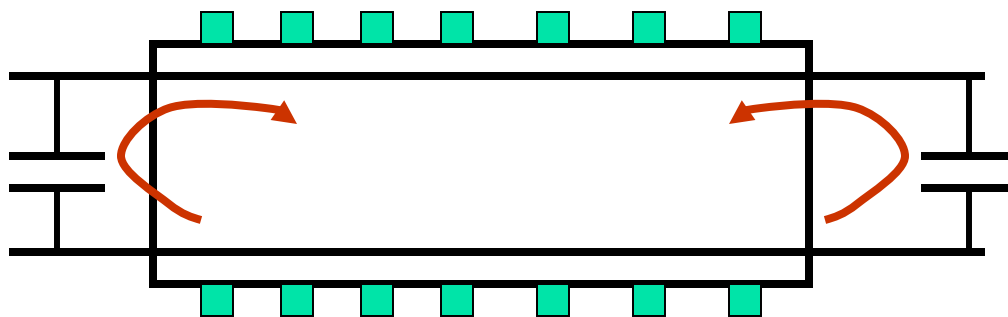
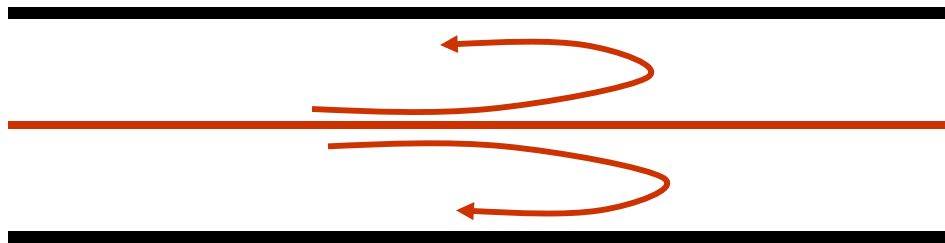
一部分信号回流经过
ABCD

注意隐蔽的辐射环路



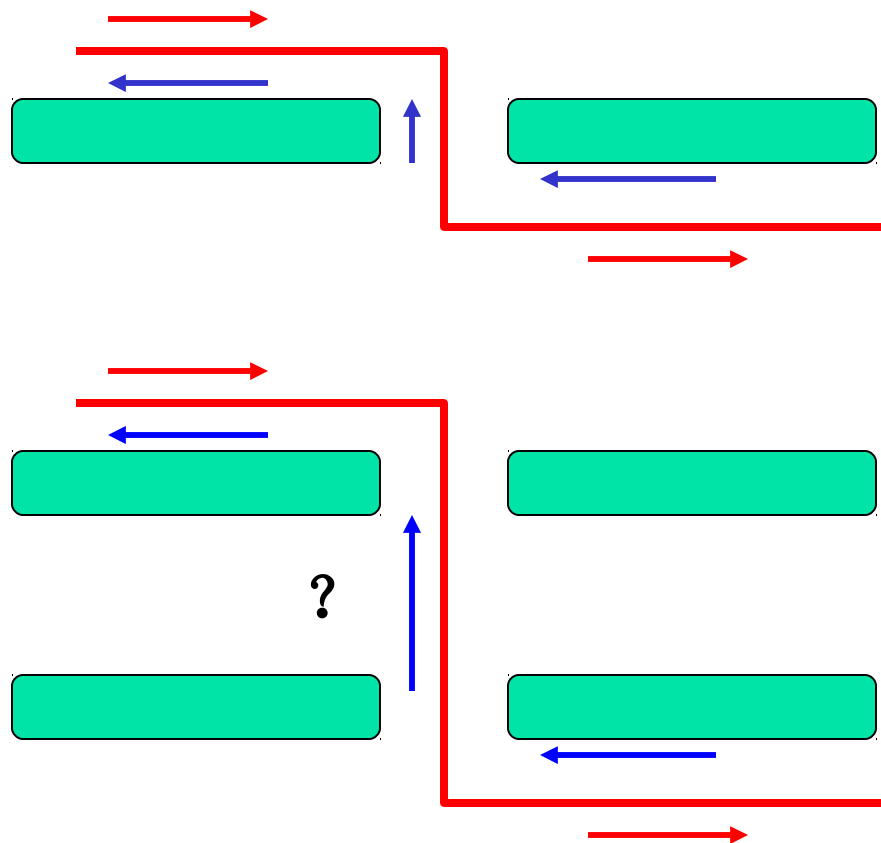


环路对消概念减小辐射

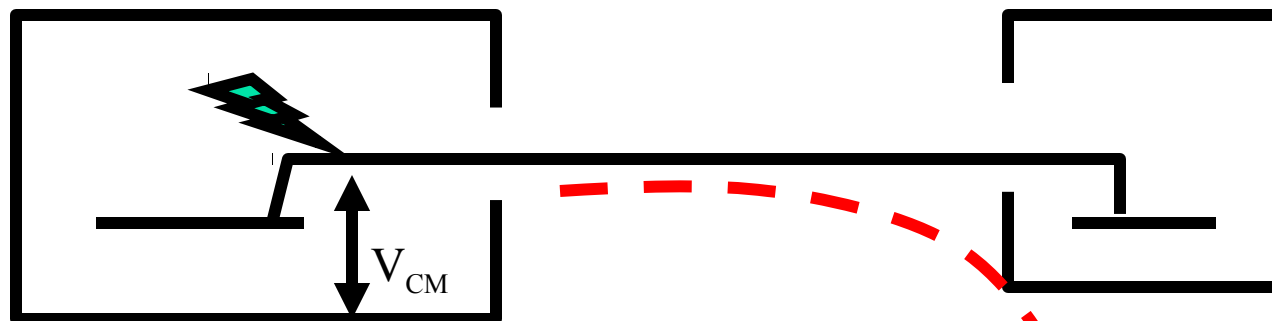
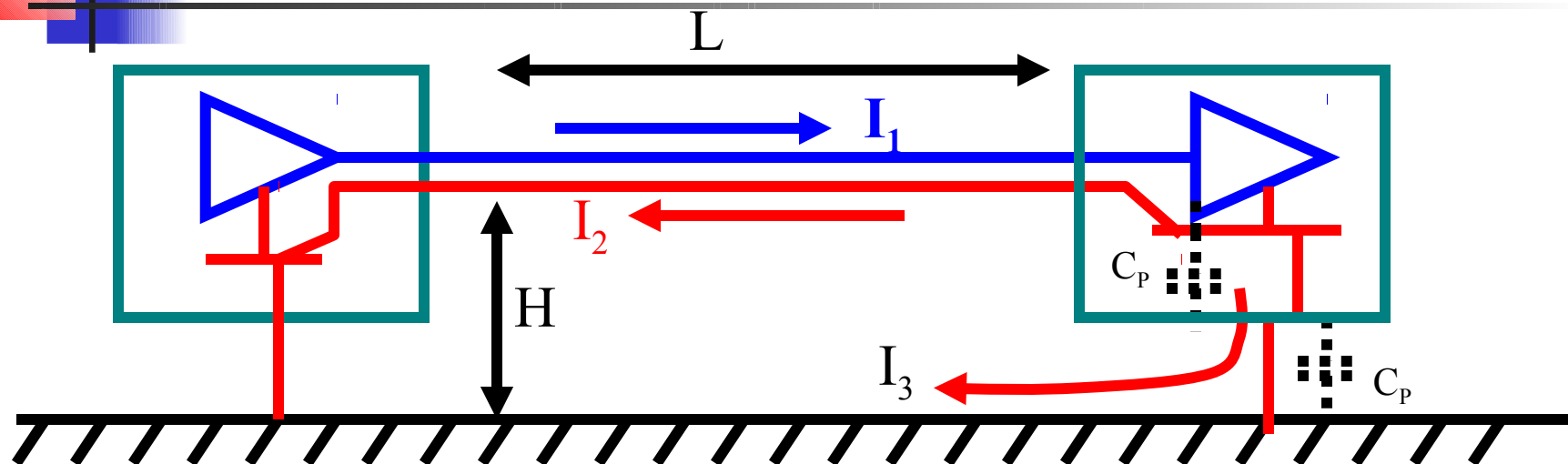




时钟线避免换层

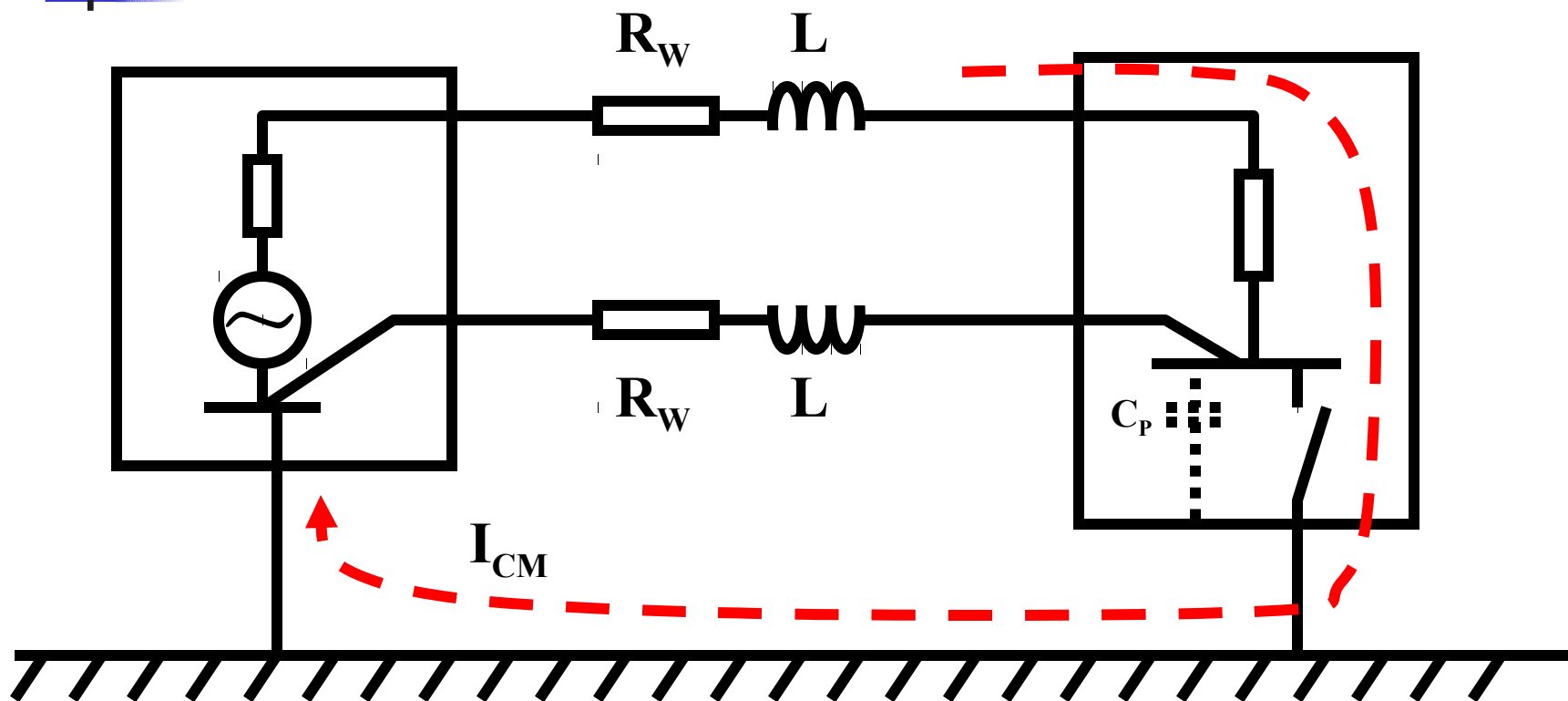


外拖电缆的共模辐射



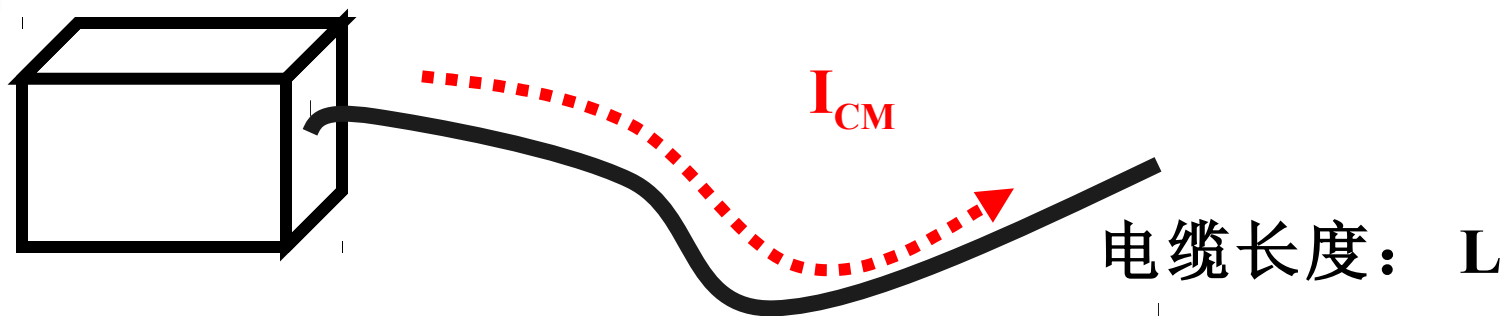
机箱内的
所有信号
都会通过
电缆辐射
！

两端设备都接地的情况



杨继深 $Z_{CM} = R_w + j\omega L + R_L + 1/j\omega C$ 2002年4月

悬浮电缆



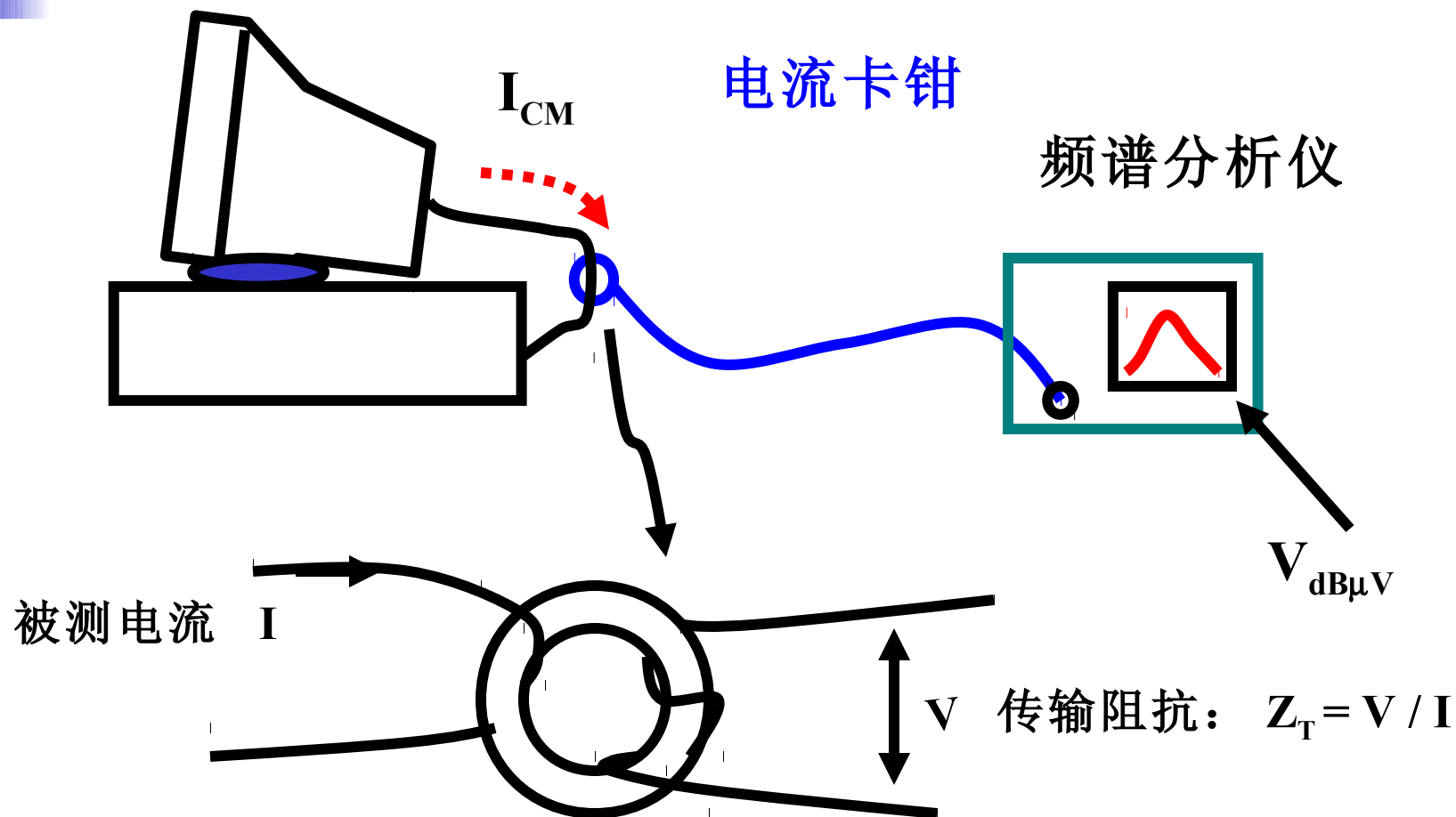
近场区内： $E = 1430 I L / (f D^3)$ $\mu V/m$

远场区内： $E = 0.63 I L f / D$ $\mu V/m$

考虑地面反射： $E = 1.26 I L f / D$
 $\mu V/m$

$L > \lambda/2$ 或 $\lambda/4$ 时： $E = 120 I / D$

共模电流的测量





怎样减小共模辐射

$$E = 1.26 I L f / D$$

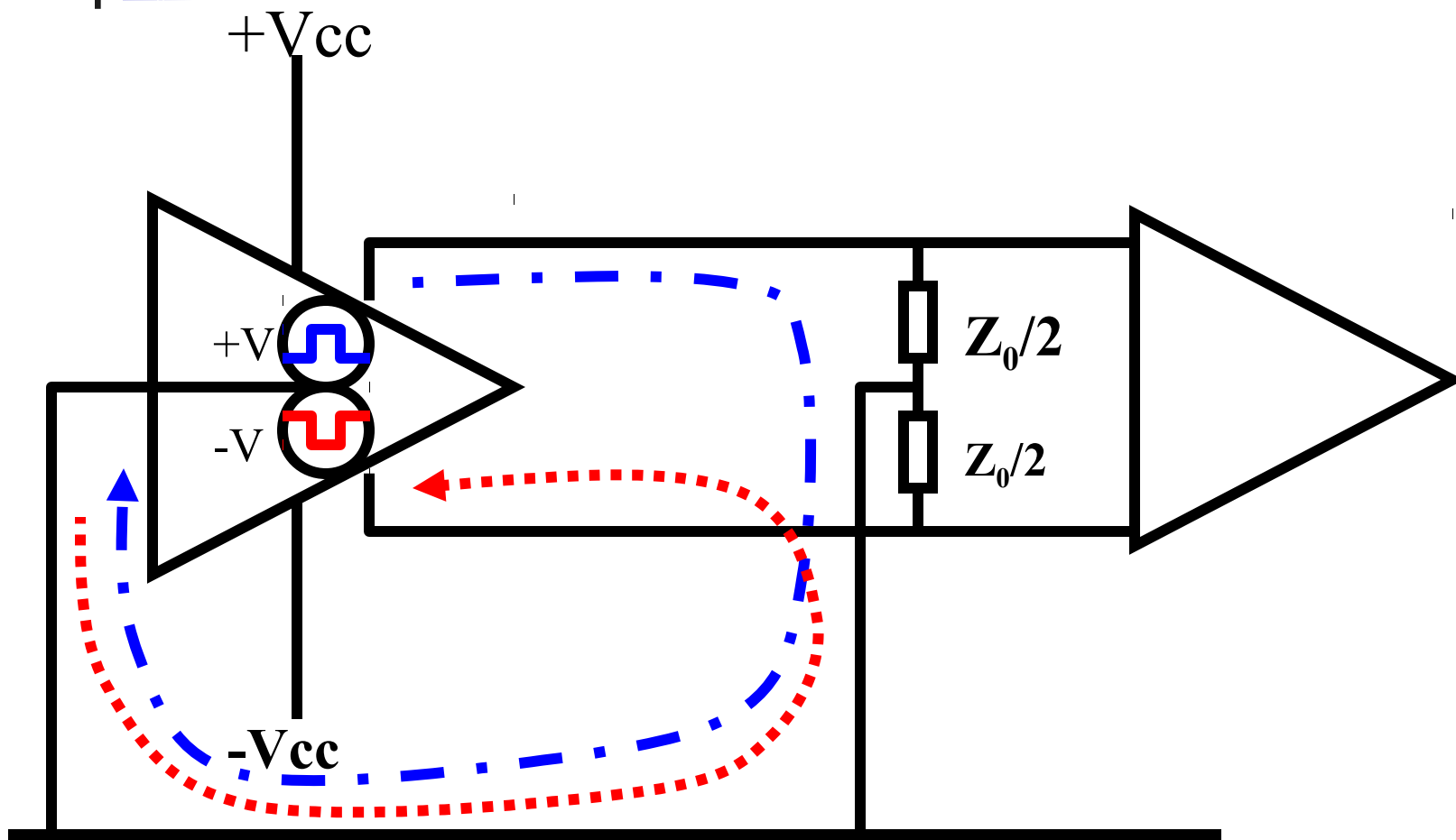
共模滤波
共模扼流圈
减小共模电压

使用尽量
短的电缆

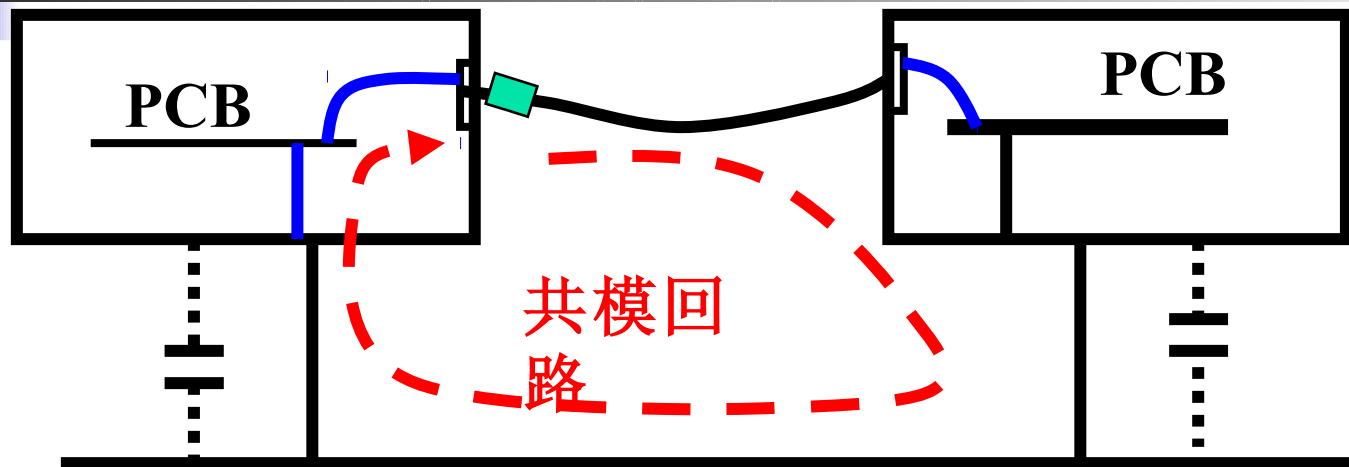
共模滤波

电缆屏蔽

平衡接口电路



增加共模回路的阻抗



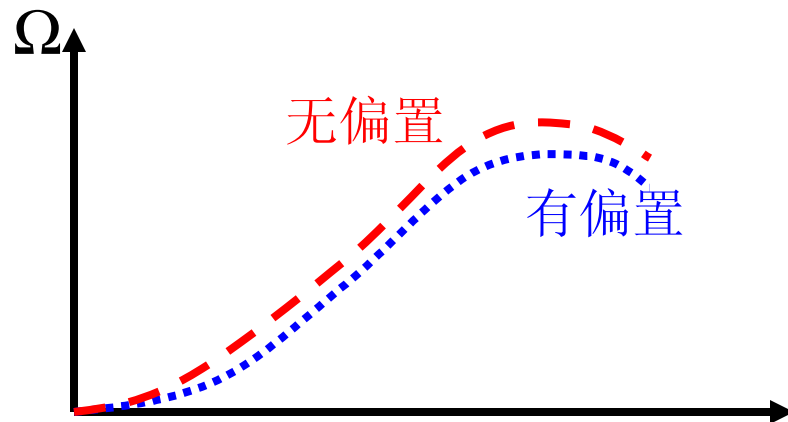
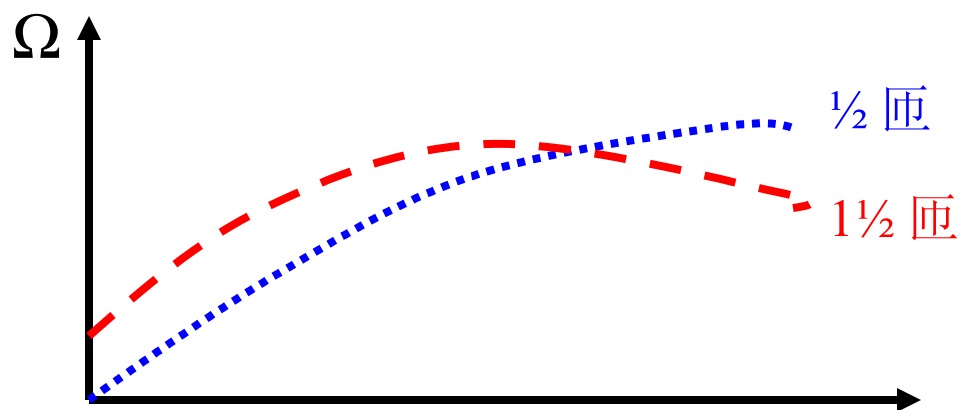
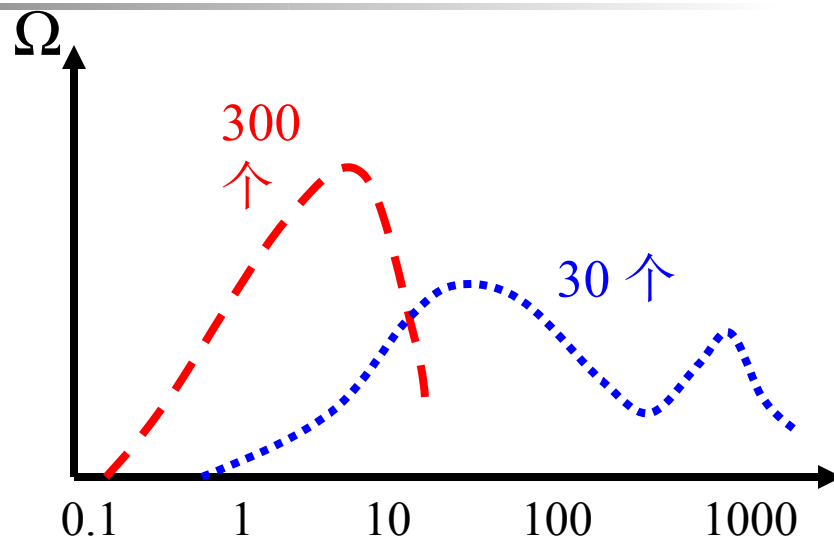
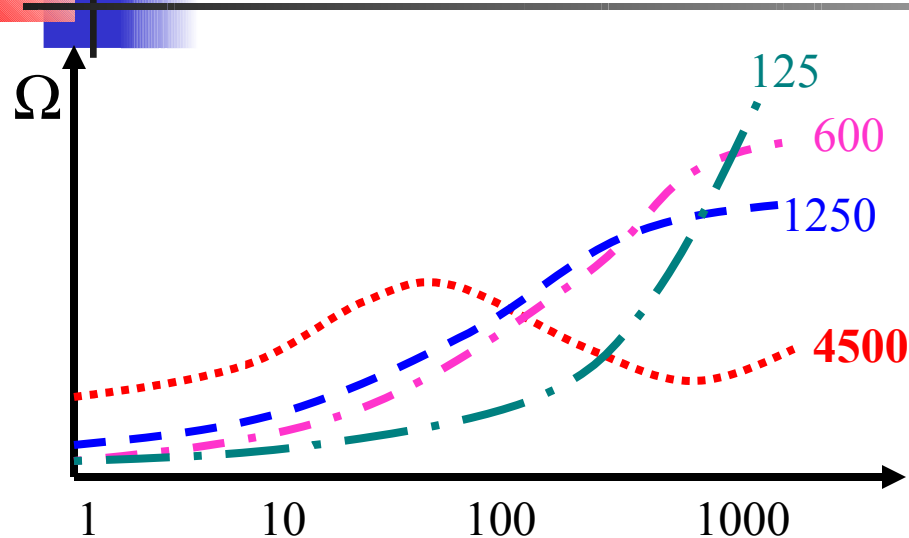
$$\text{改善量} = 20\lg(E_1 / E_2) = 20\lg(I_{CM1} / I_{CM2})$$

$$= 20\lg[(V_{CM} / Z_{CM1}) / (V_{CM} / Z_{CM2})]$$

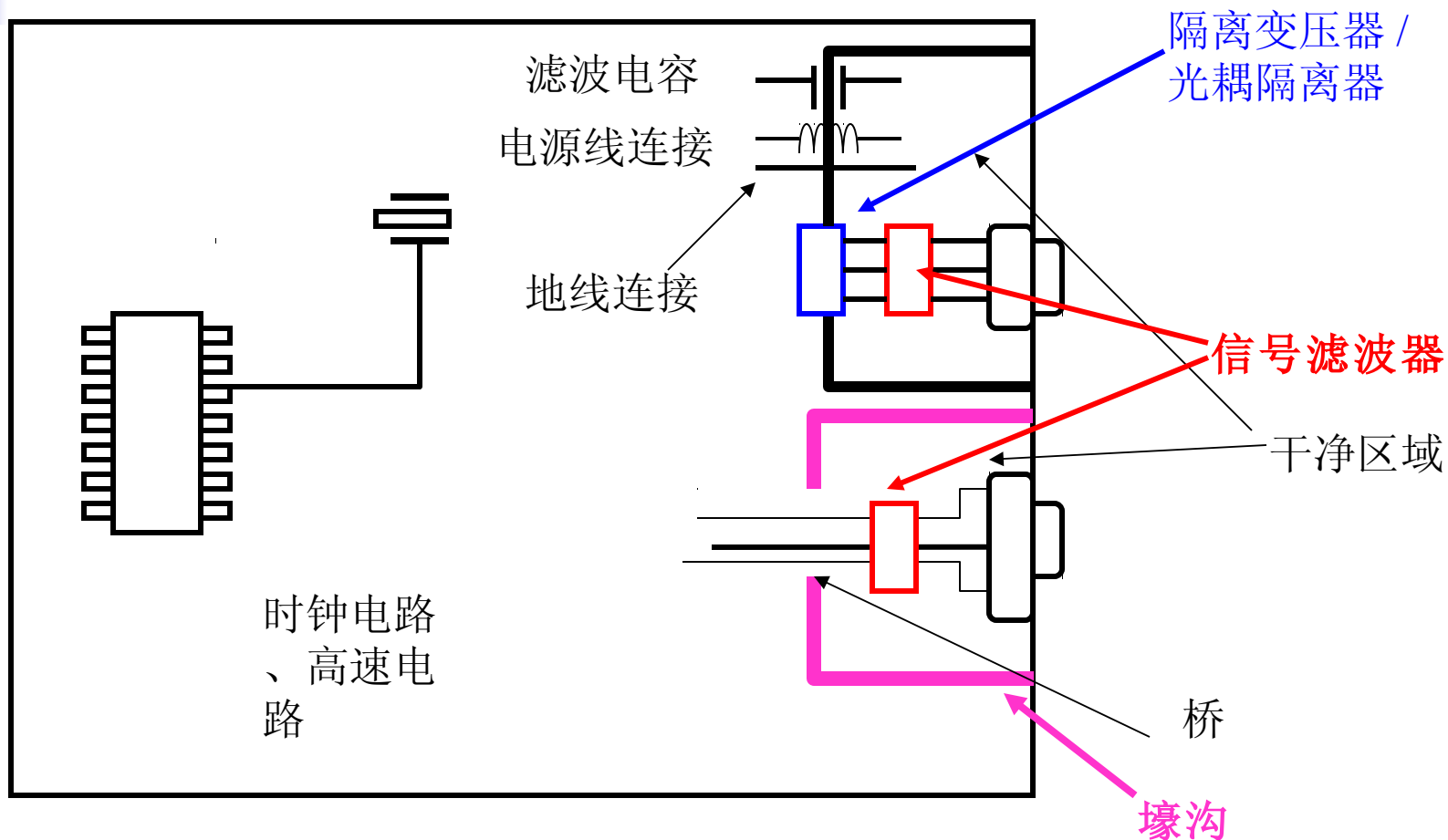
$$= 20\lg(Z_{CM2} / Z_{CM1})$$

$$= 20\lg(1 + Z_L / Z_{CM1}) \quad \text{dB}$$

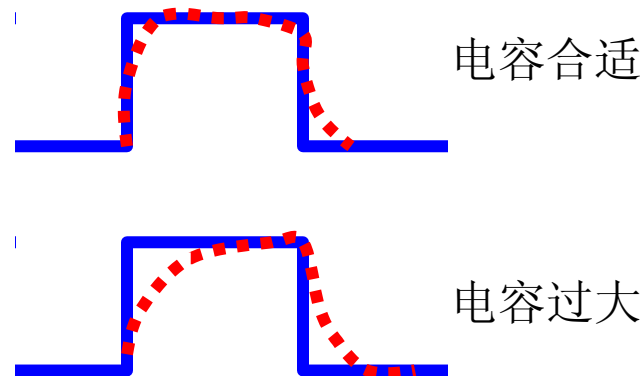
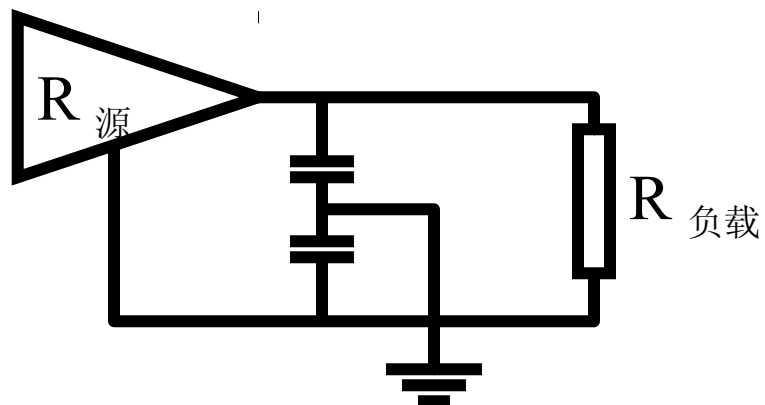
铁氧体磁环使用方面的一些问题



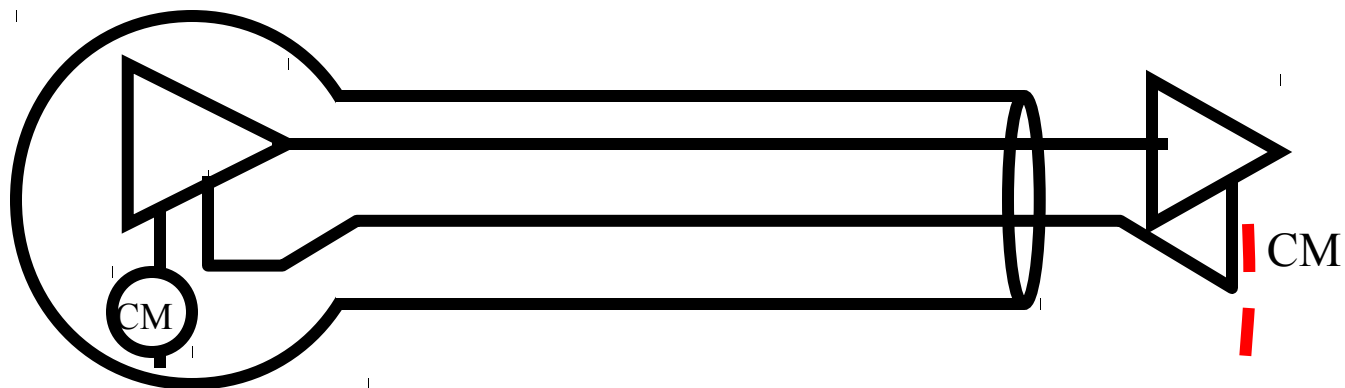
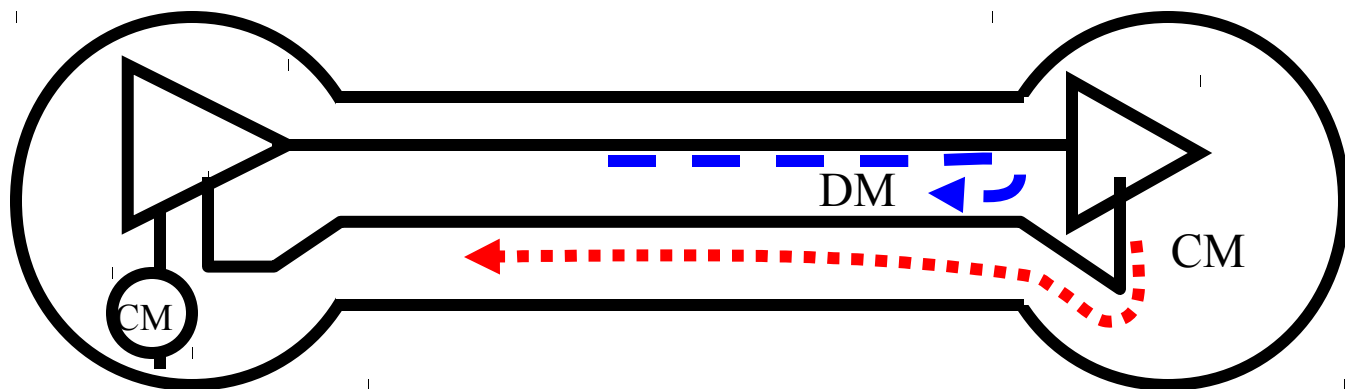
I/O 接口布线的一些要点



滤波器电容量的选择



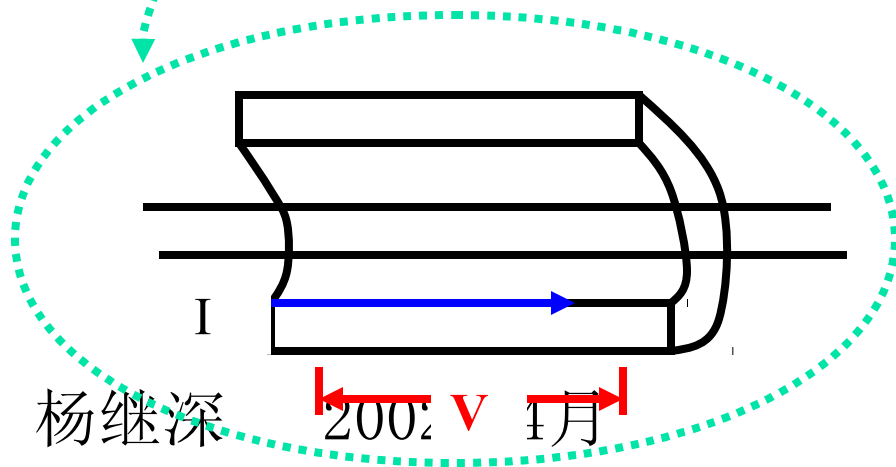
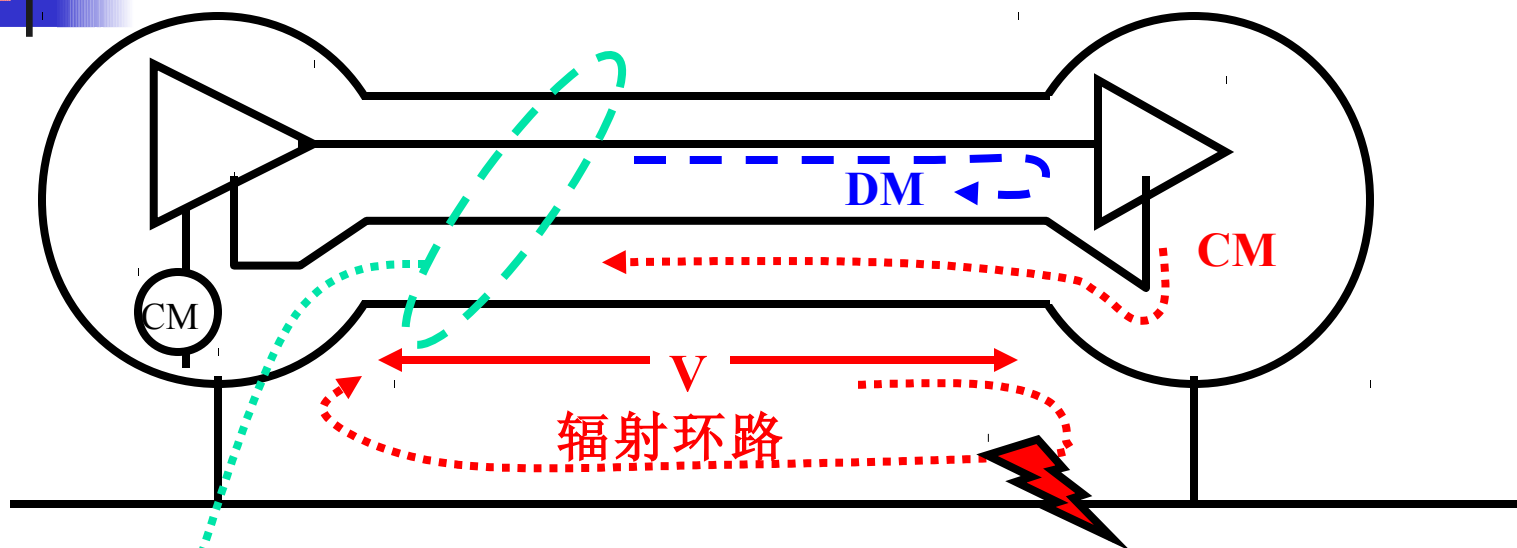
用屏蔽电缆抑制共模辐射



杨继深

2002年4月

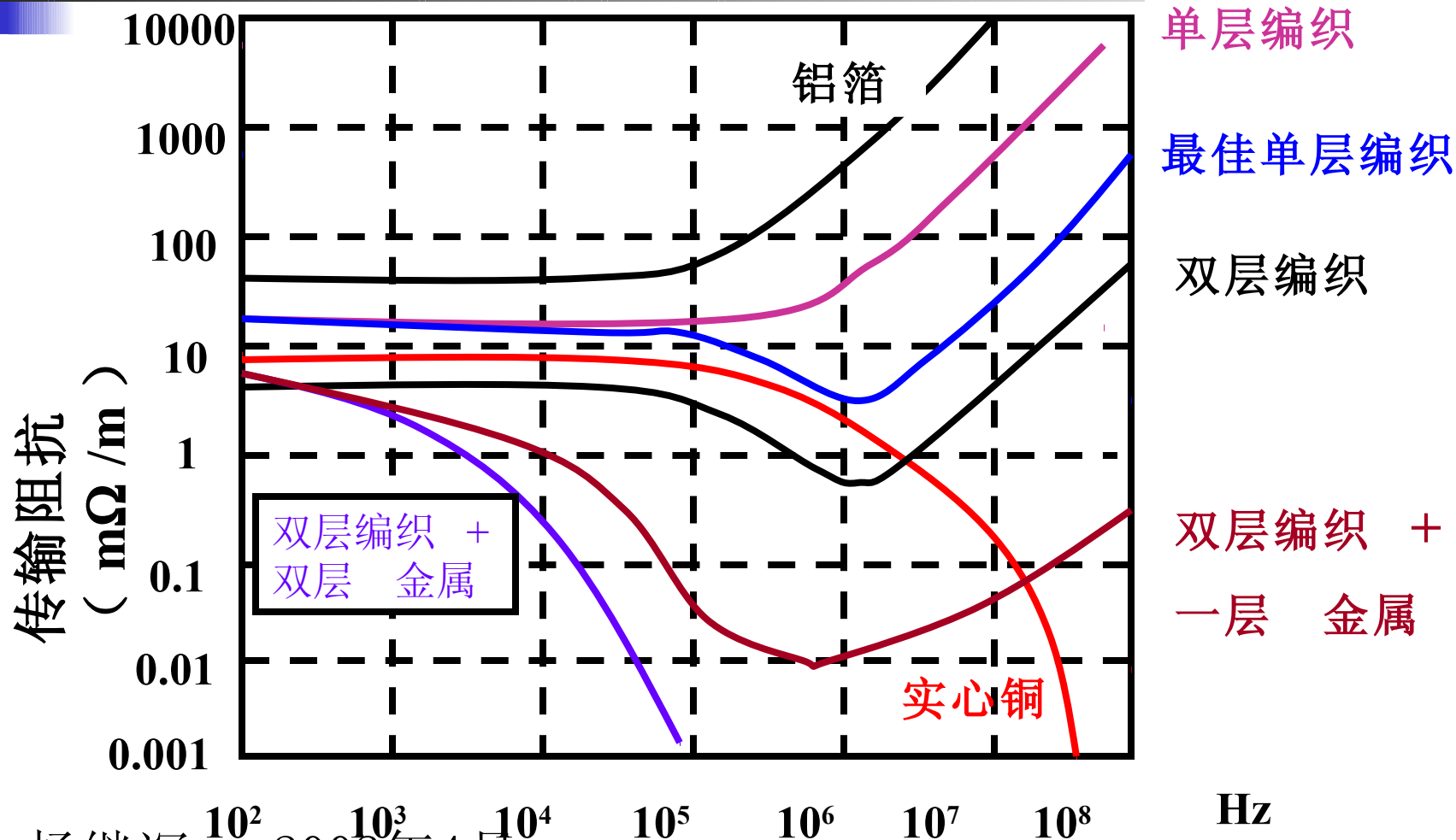
屏蔽电缆的评估



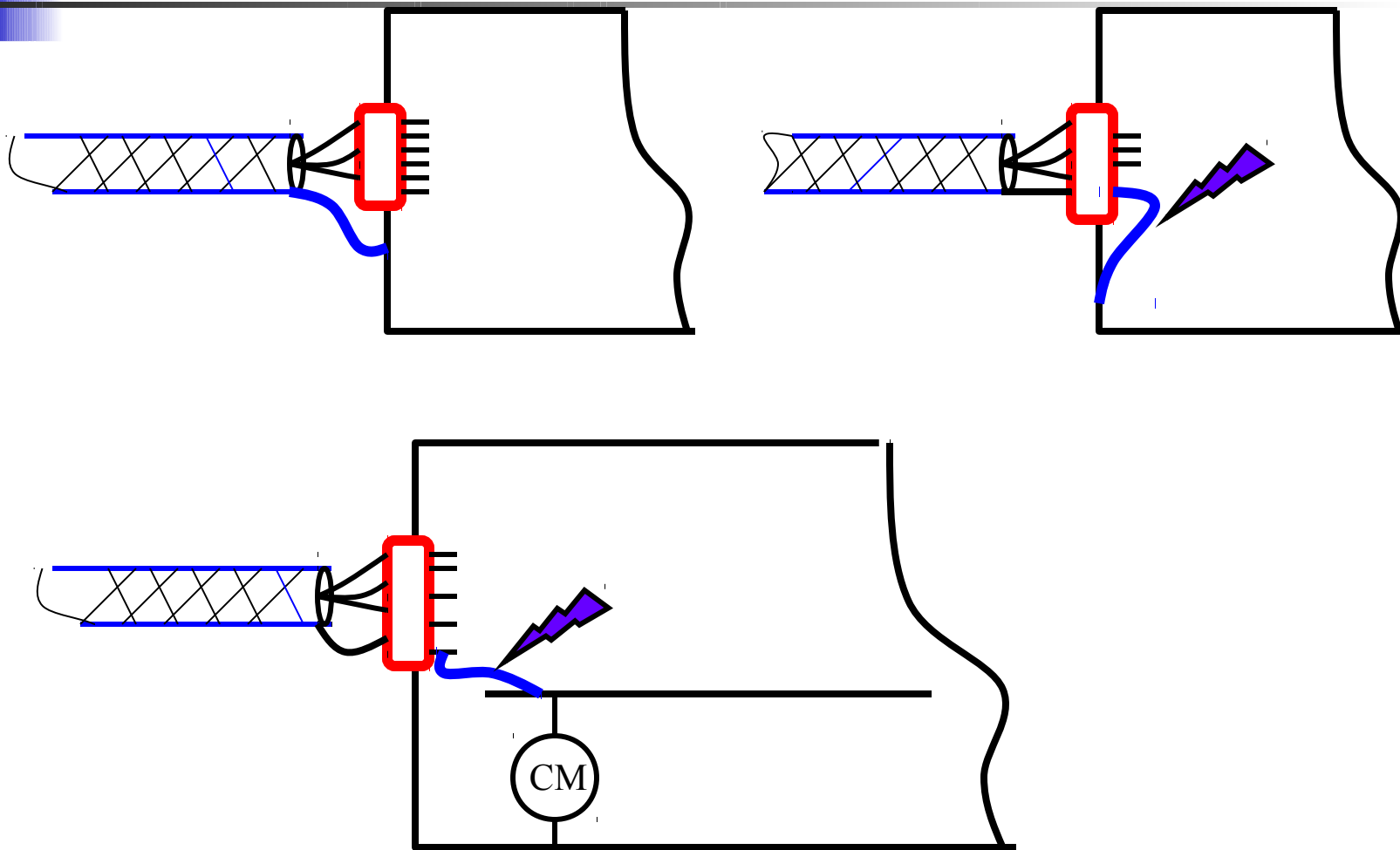
$$Z_T = V / I$$

杨继深

不同屏蔽层的传输阻抗

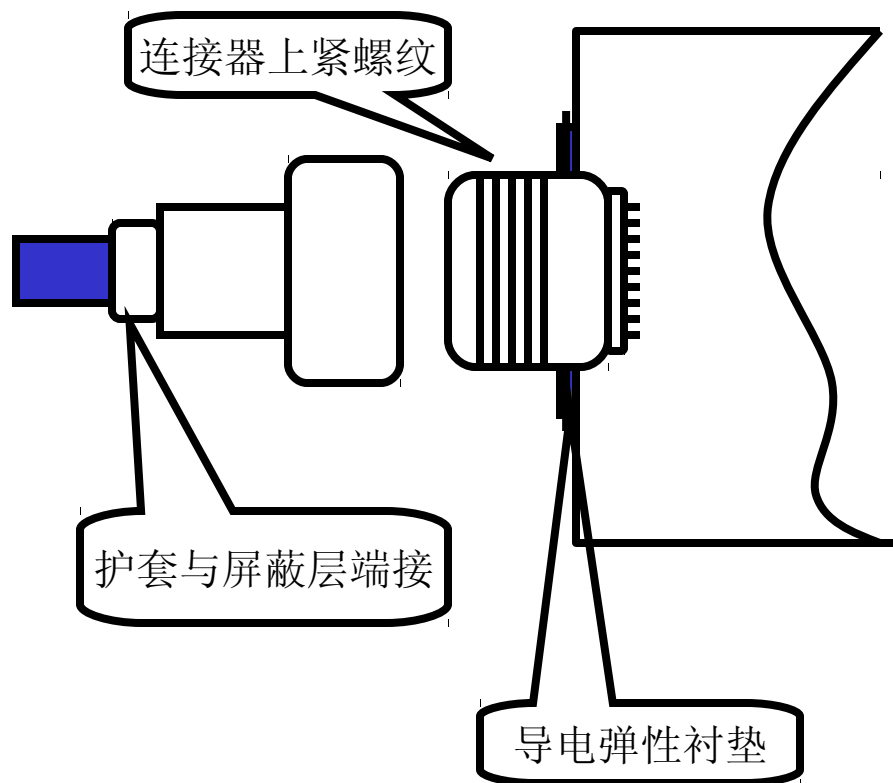


屏蔽层的错误接法

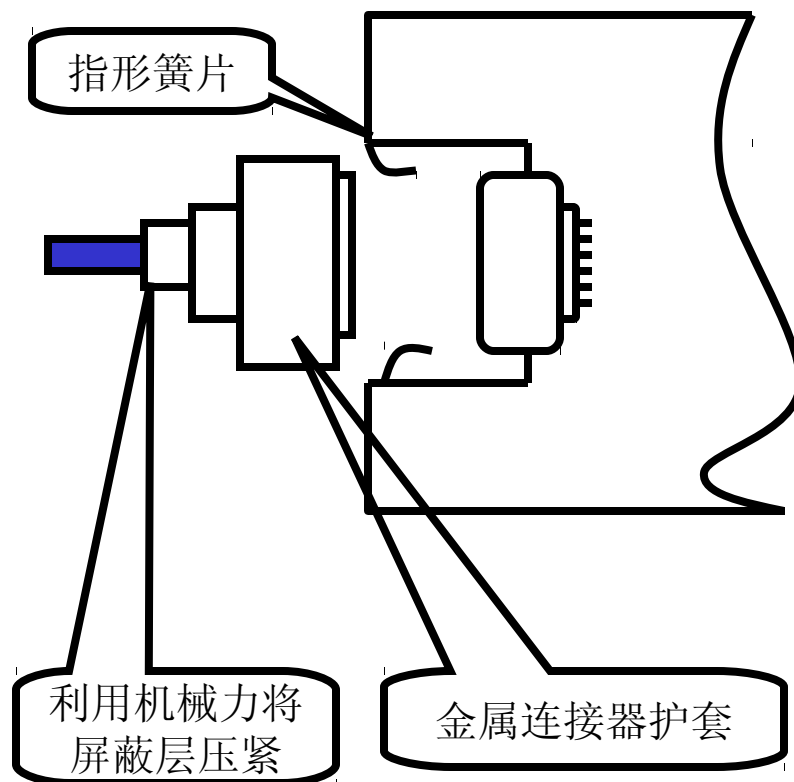


电缆屏蔽层的正确端接

航空连接器



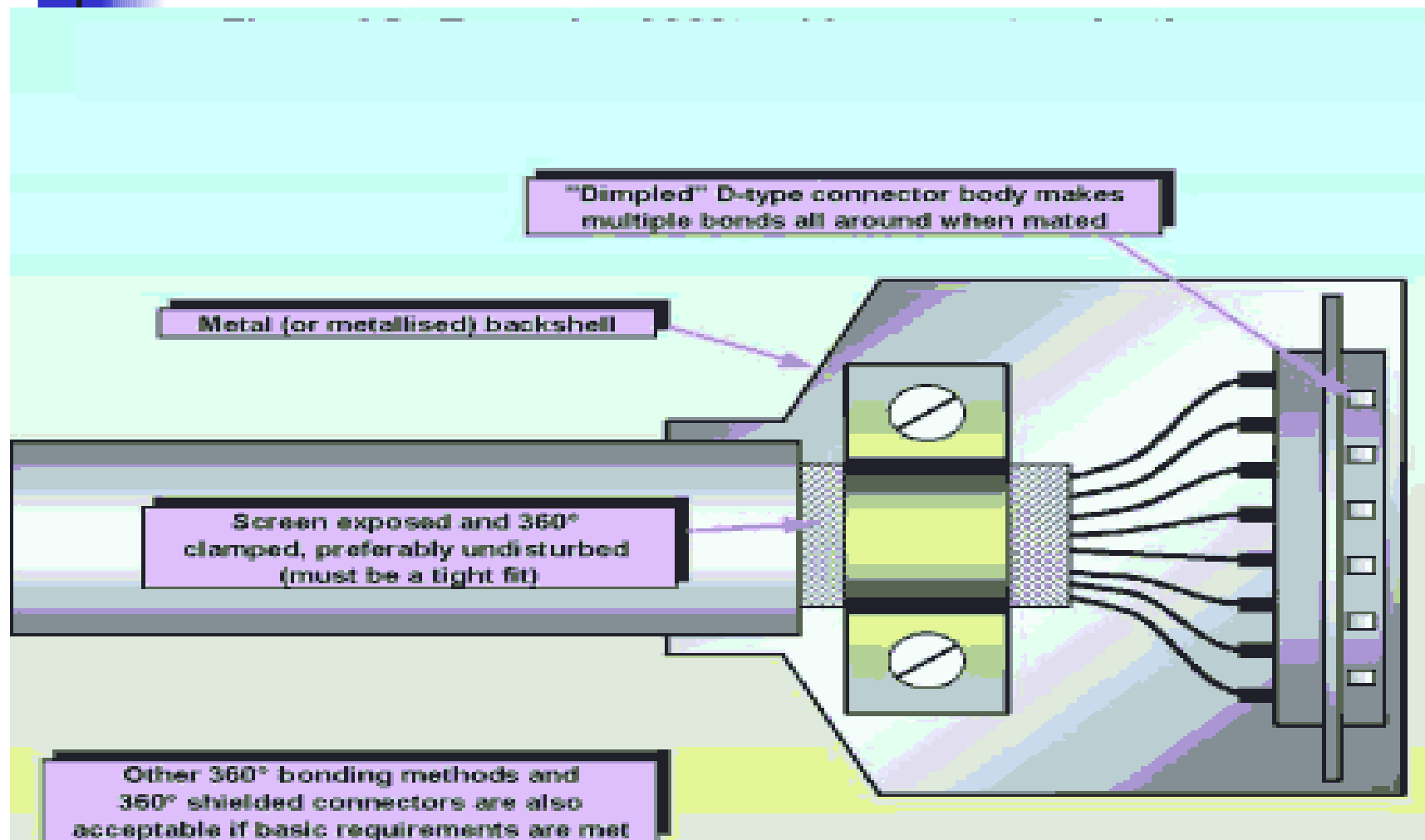
D 形连接器



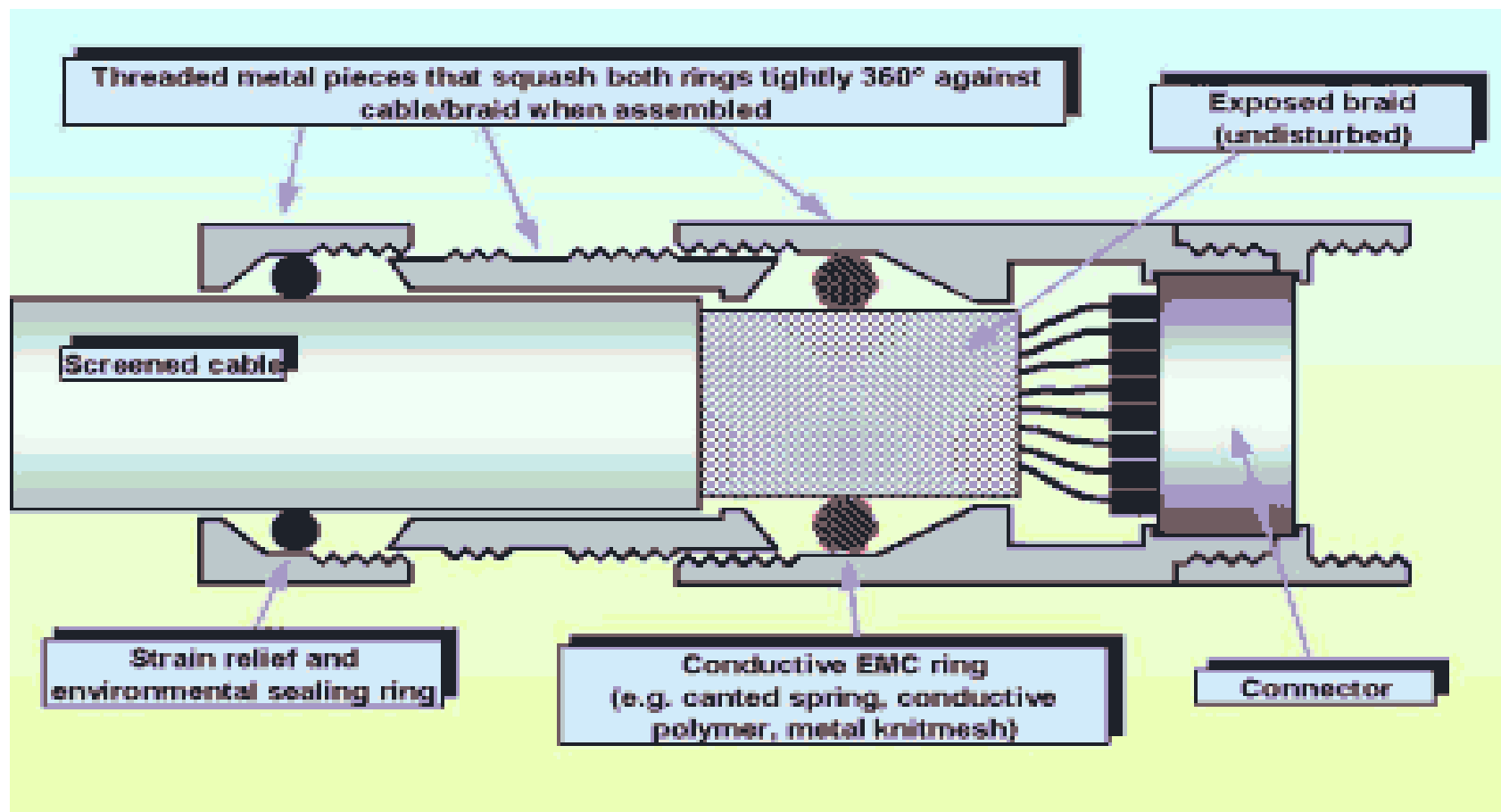
杨继深

2002年4月

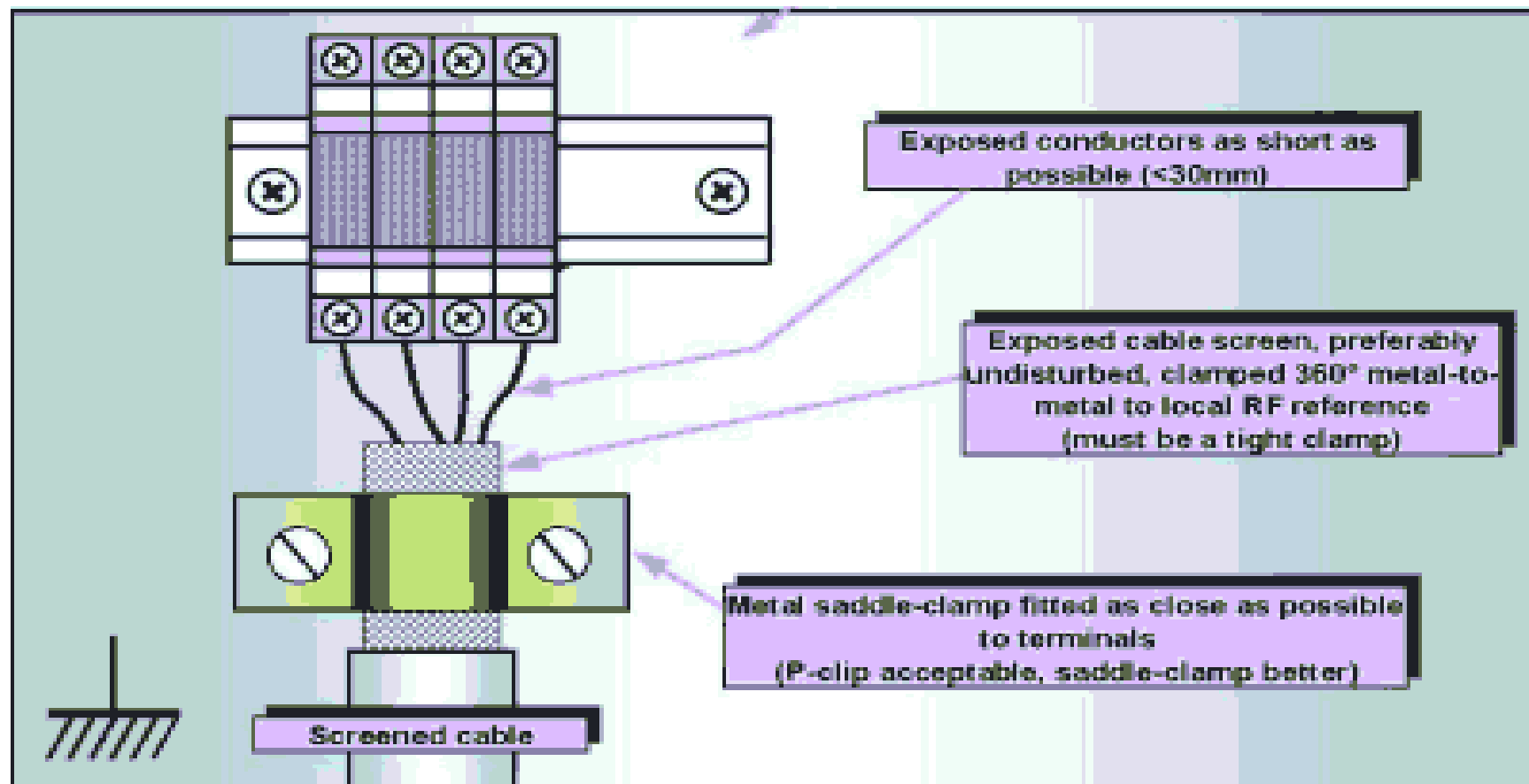
D 型连接器的屏蔽层搭接

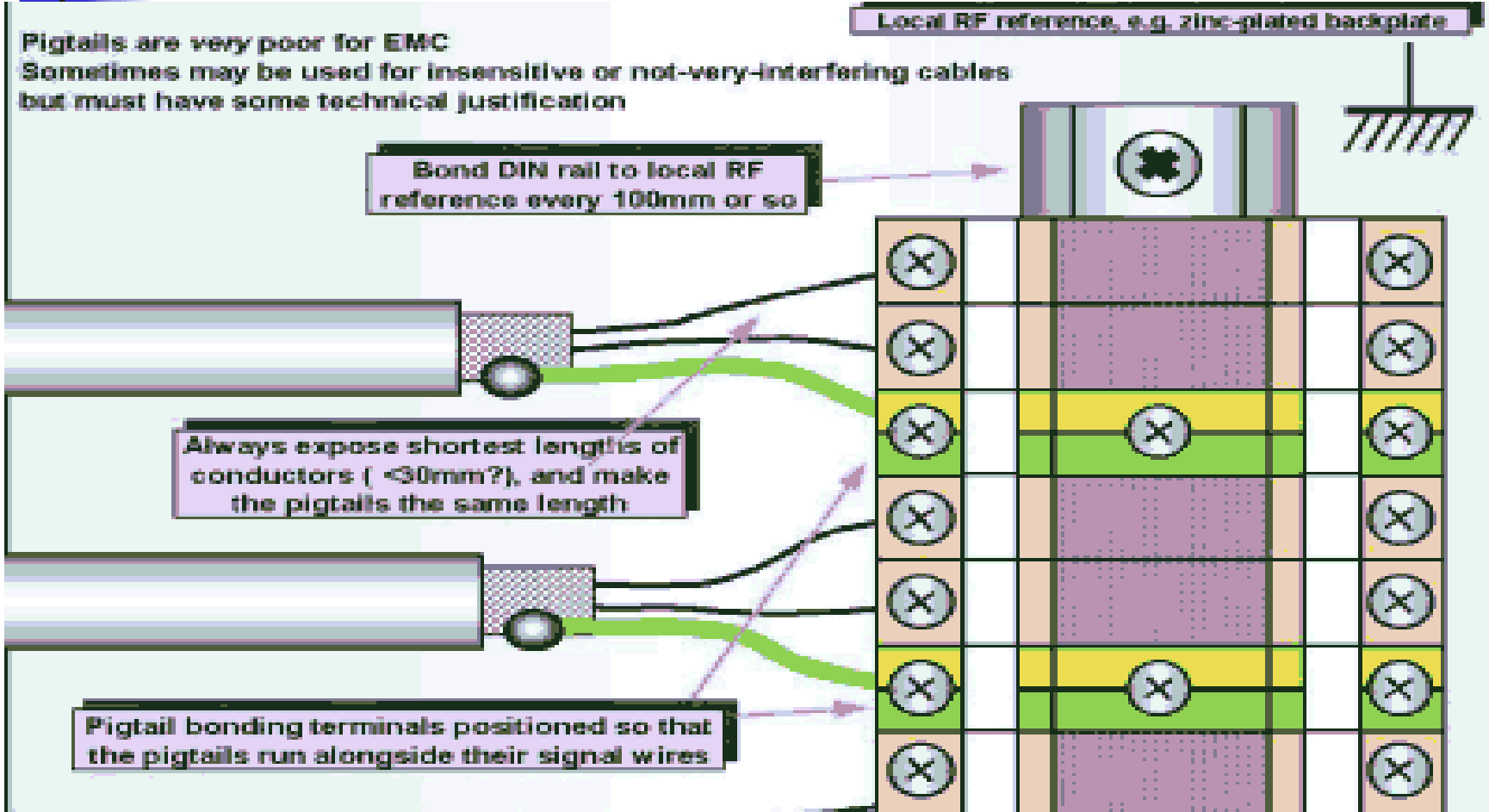


圆形连接器屏蔽层搭接

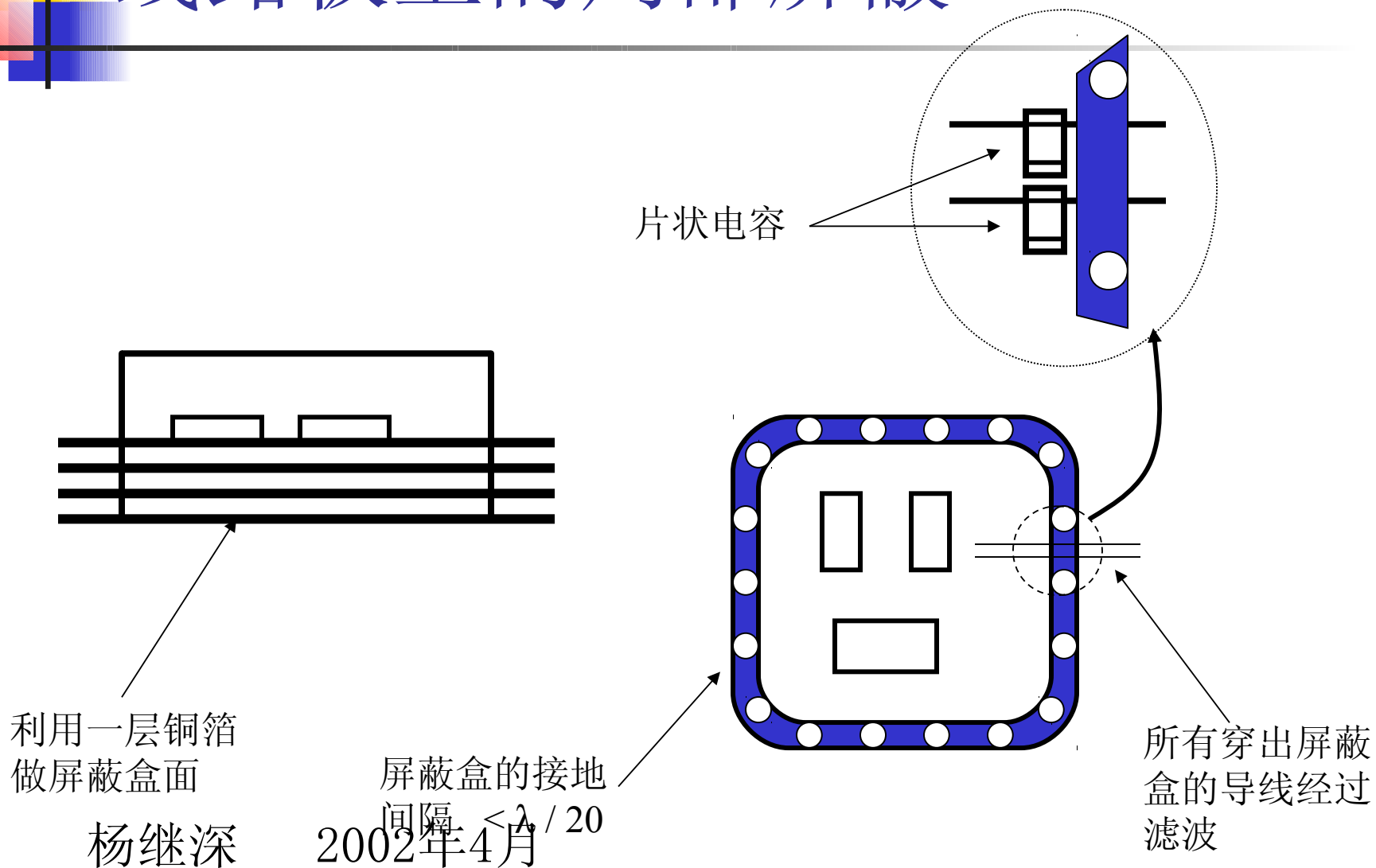


接线端子上的屏蔽电缆





线路板上的局部屏蔽

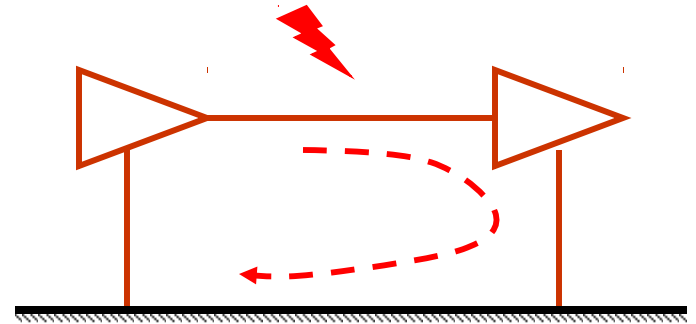
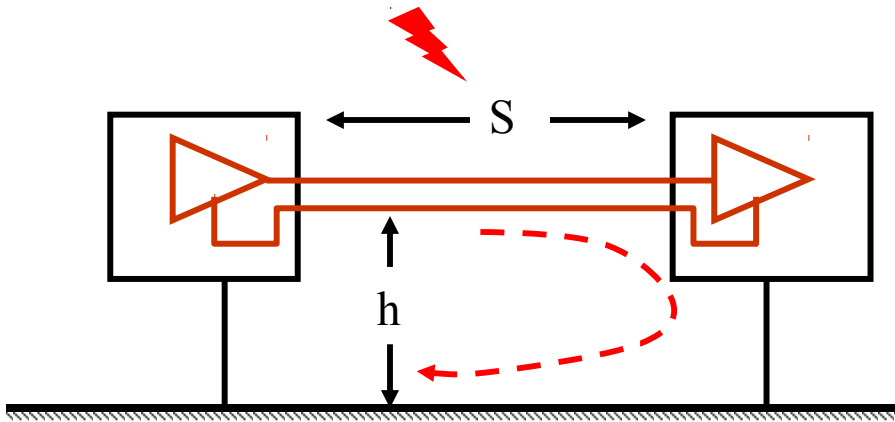


第六部分

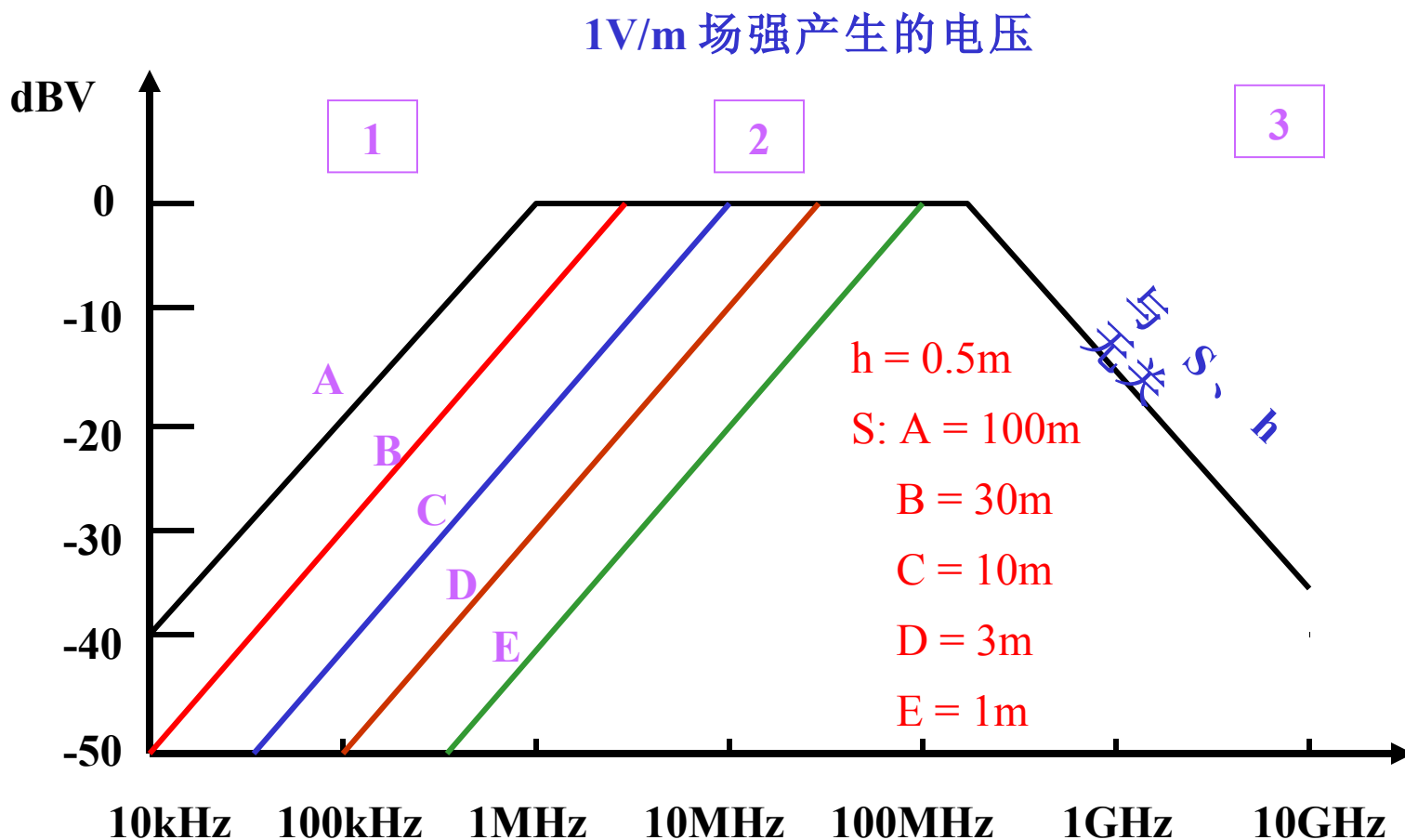
电缆的 EMC 设计

- 场在导线中感应的噪声
- 电缆之间的串扰

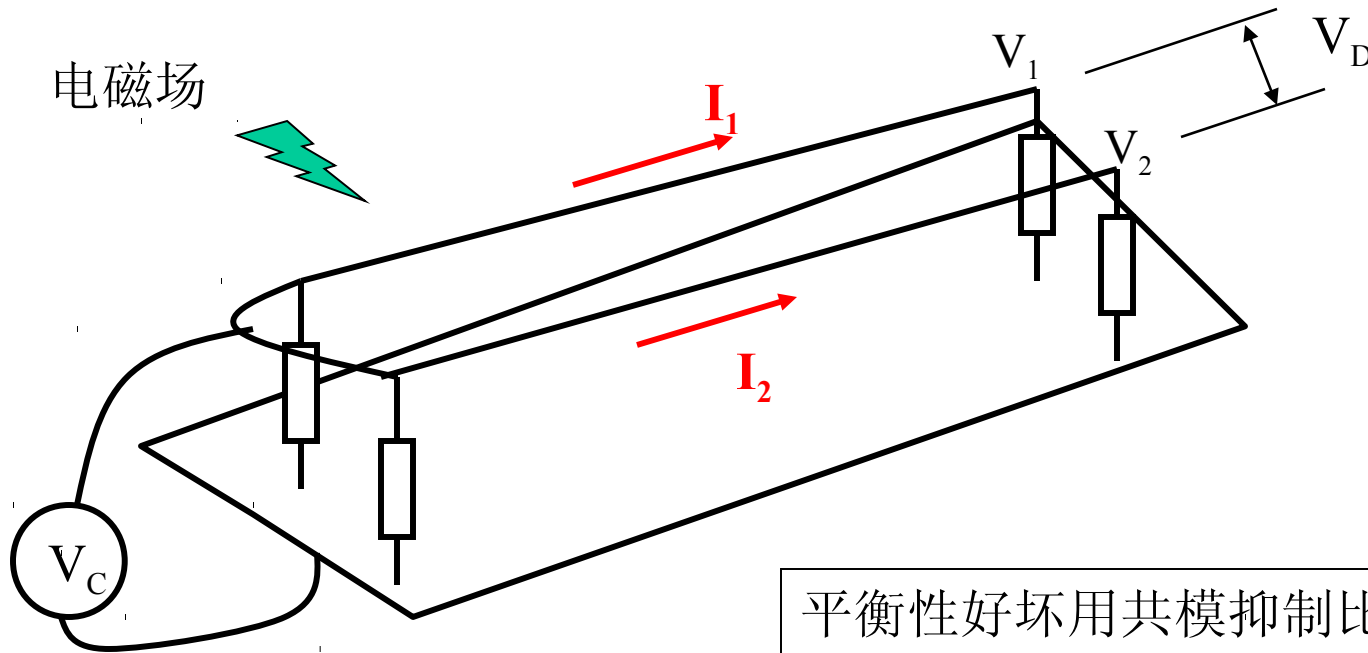
处于电磁场中的电缆



电磁场在电缆上的感应电压



平衡电路的抗干扰特性

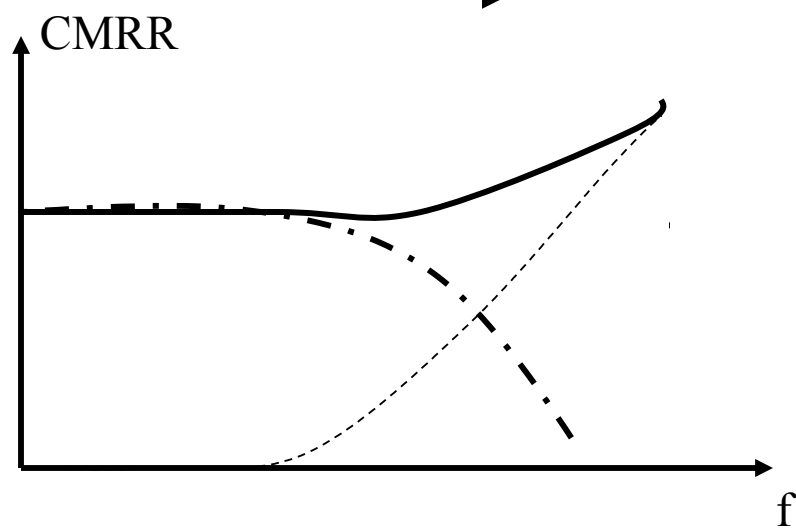
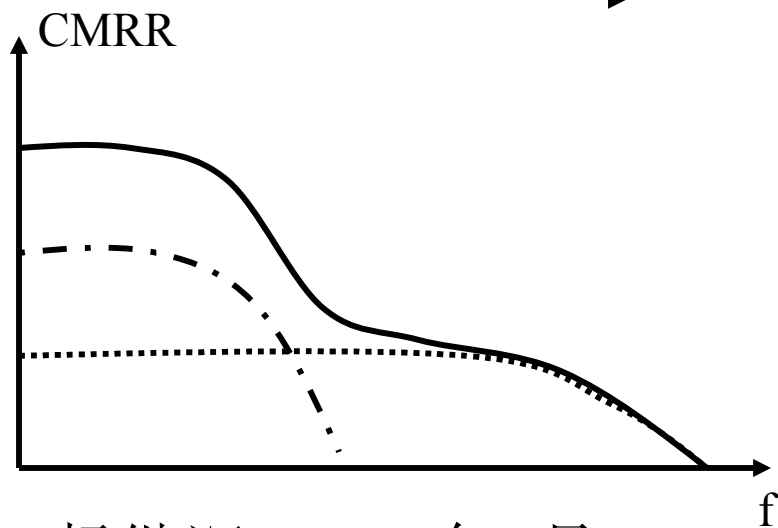
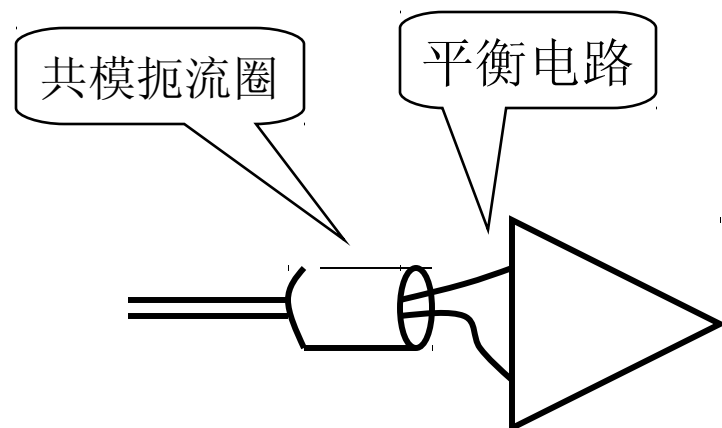
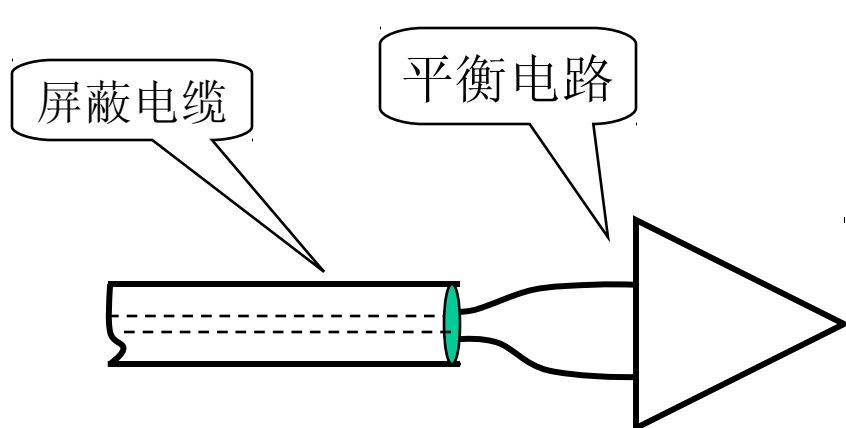


平衡性好坏用共模抑制比表示：

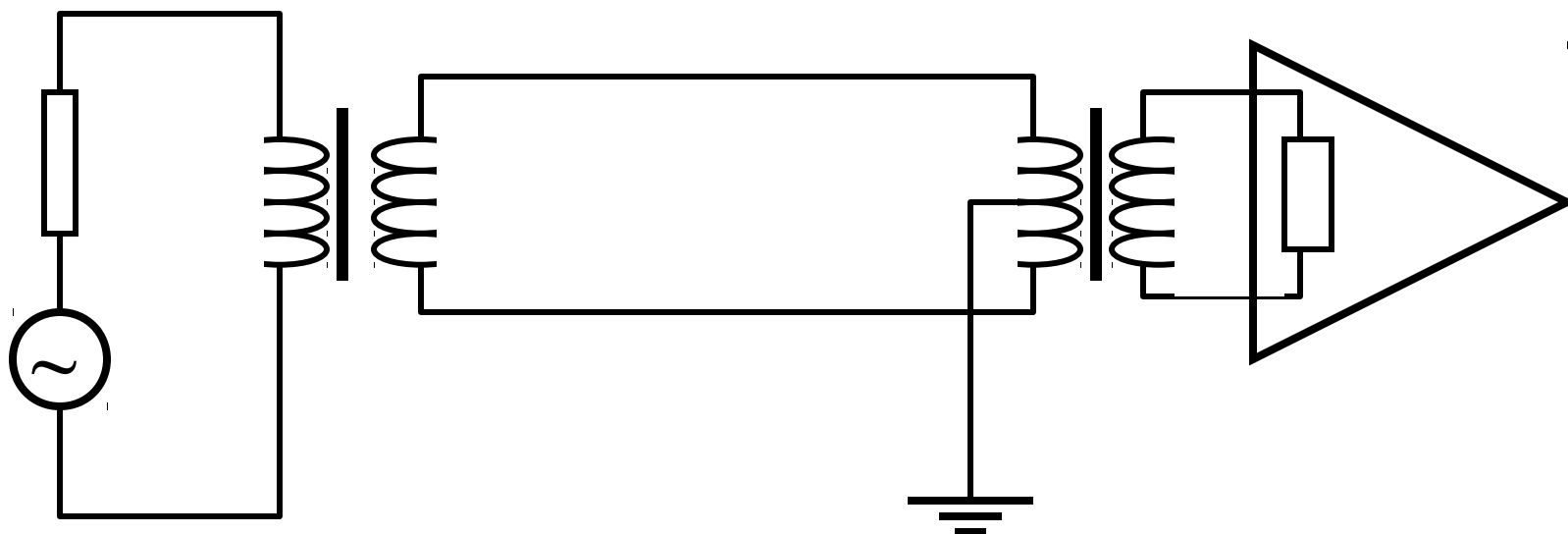
$$\text{CMRR} = 20\lg (V_C / V_D)$$

高频时，由于寄生参数的影响，平衡性会降低

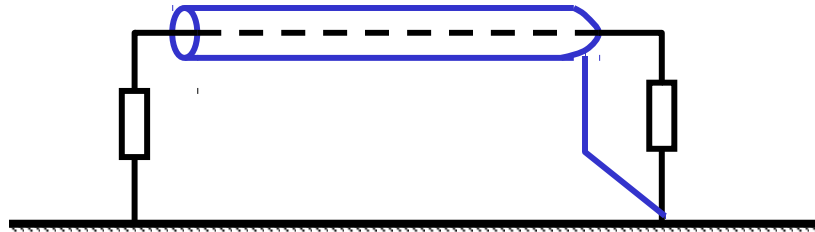
提高共模干扰抑制的方法



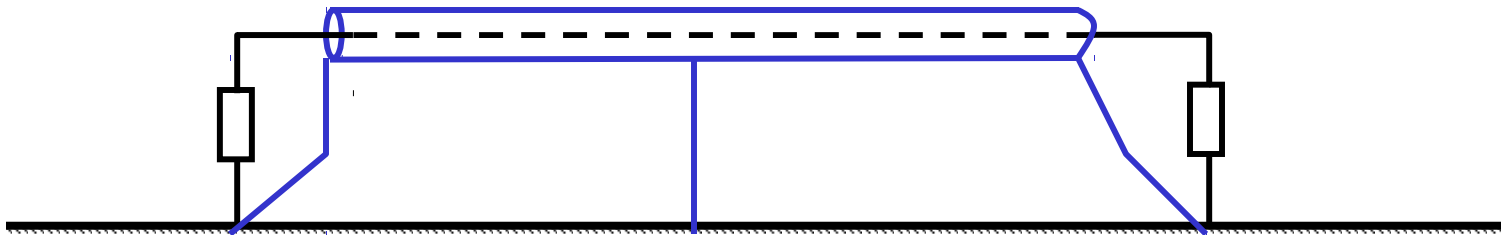
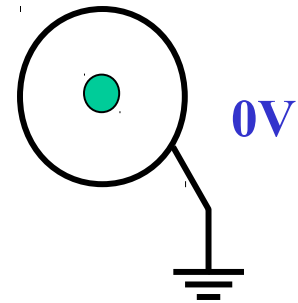
非平衡转换为平衡



屏蔽电场

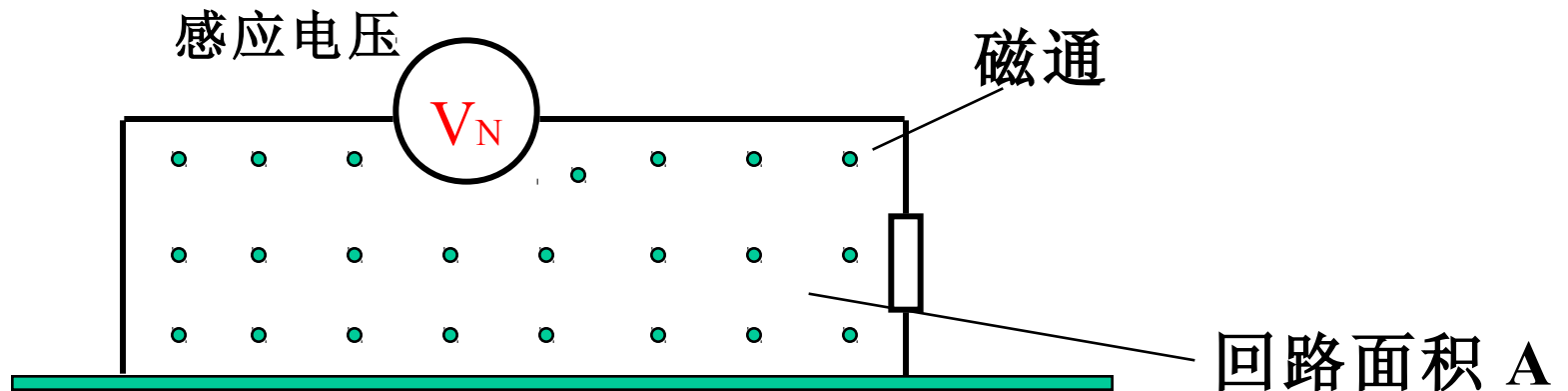


电缆长度 $< \lambda/20$ ，单点接地



电缆长度 $> \lambda/20$ ，多点接地

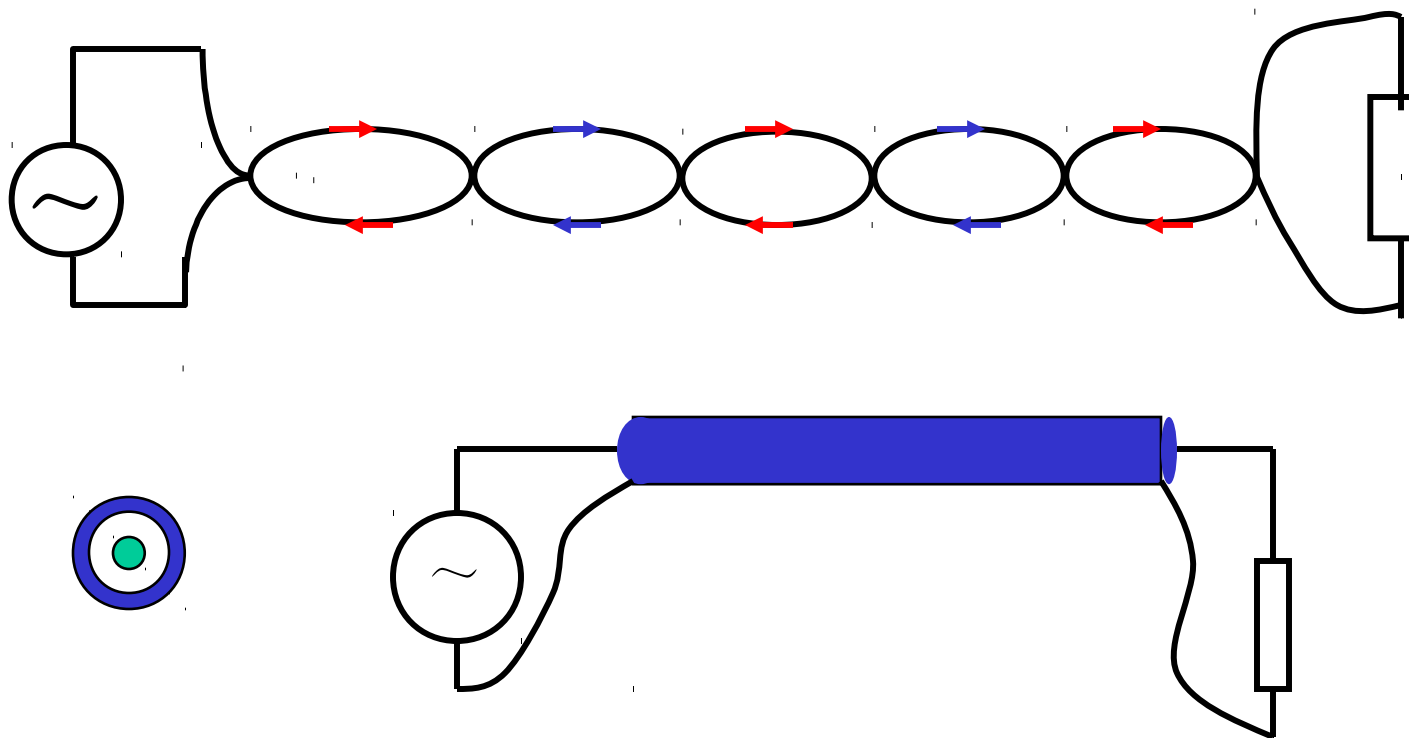
磁场对电缆的干扰



$$V_N = (d\phi / dt) = A (dB / dt)$$

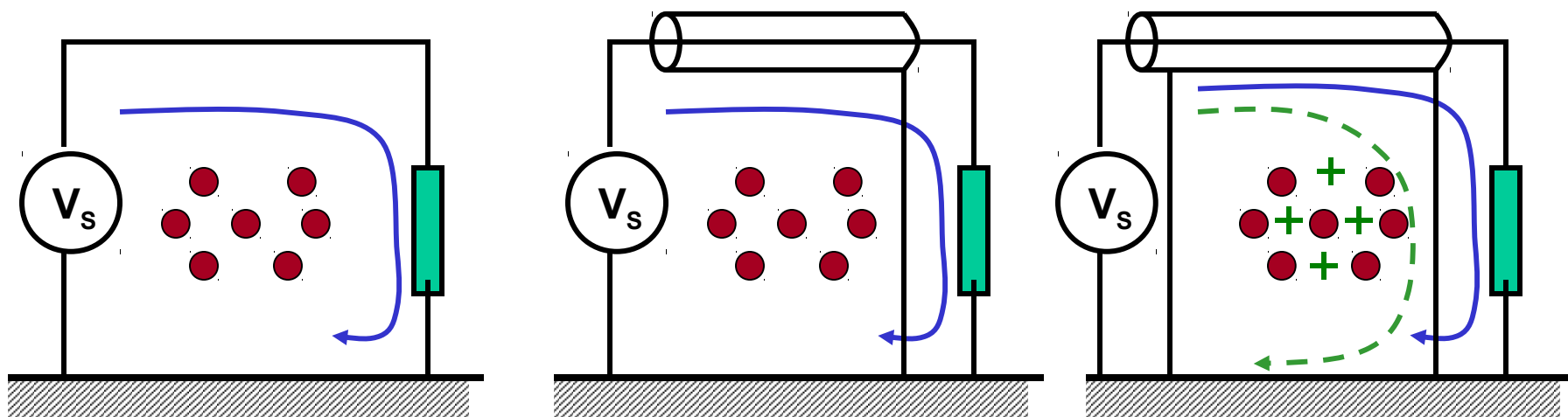
当面积一定时

减小感应回路的面积



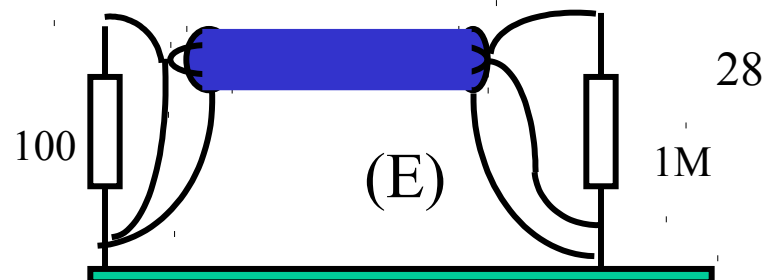
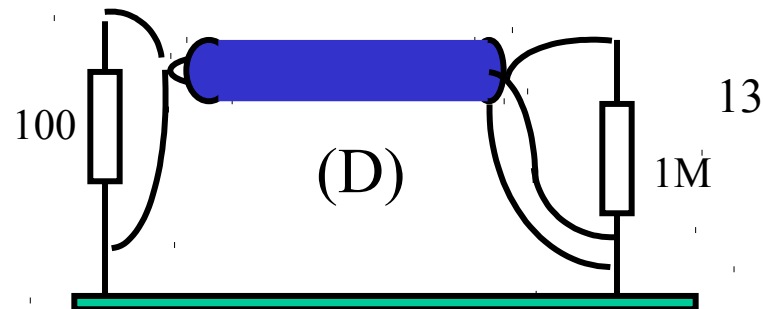
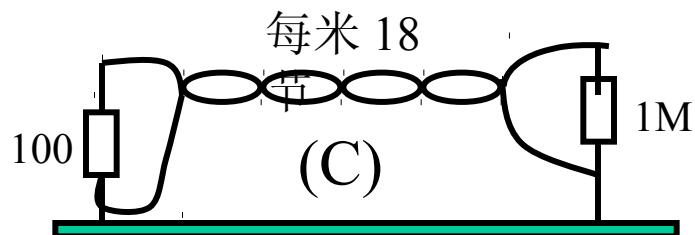
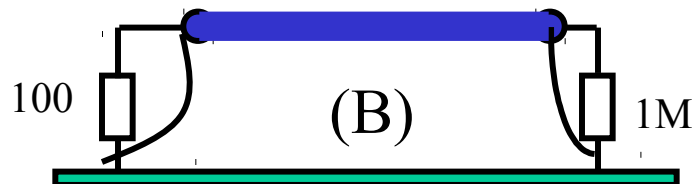
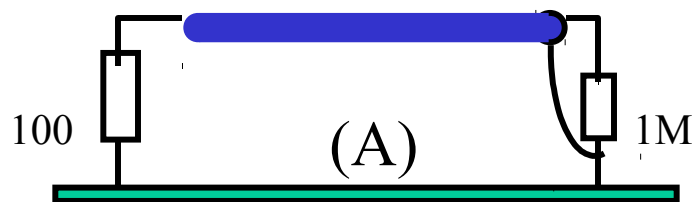
理想同轴线的信号电流与回流等效为在几何上重合，因此电缆上的回路面积为 0，整个回路面积仅有两端的部分

屏蔽电缆减小磁场影响

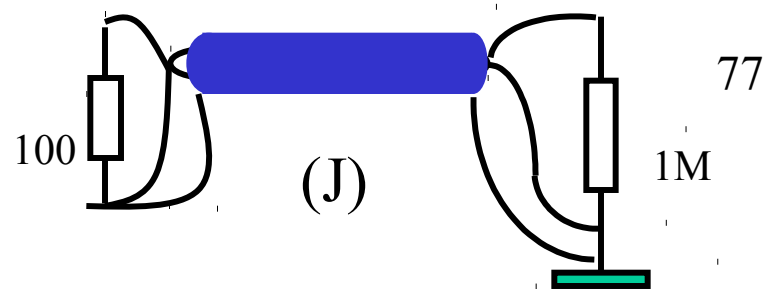
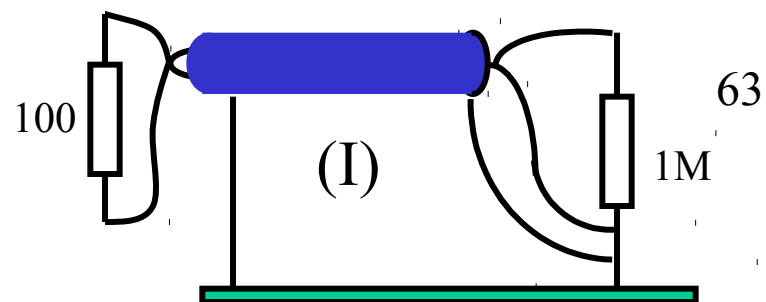
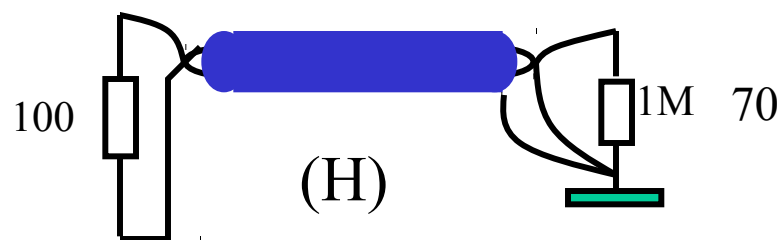
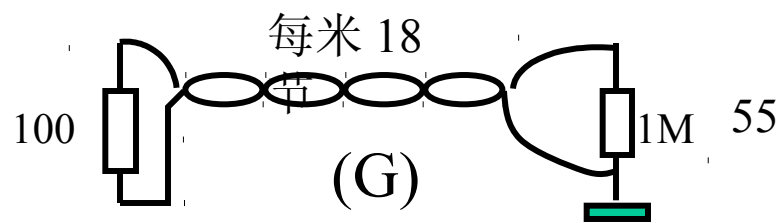
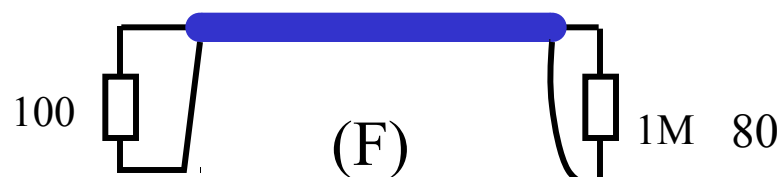


只有两端接地的屏蔽层才能 屏蔽磁场

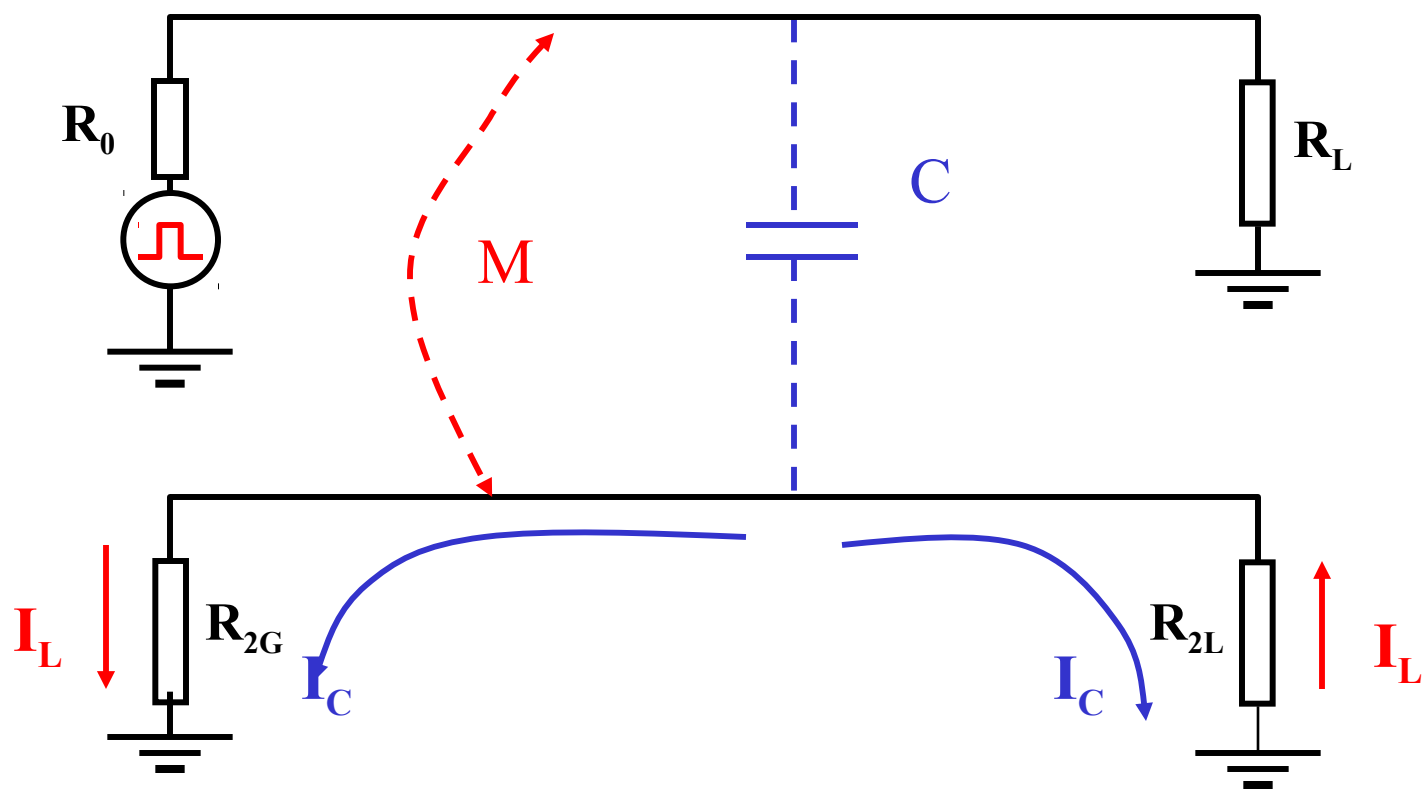
抑制磁场干扰的试验数据



抑制磁场干扰的实验数据



导线之间两种串扰机理



耦合方式的粗略判断

$Z_S Z_L < 300^2$:
主

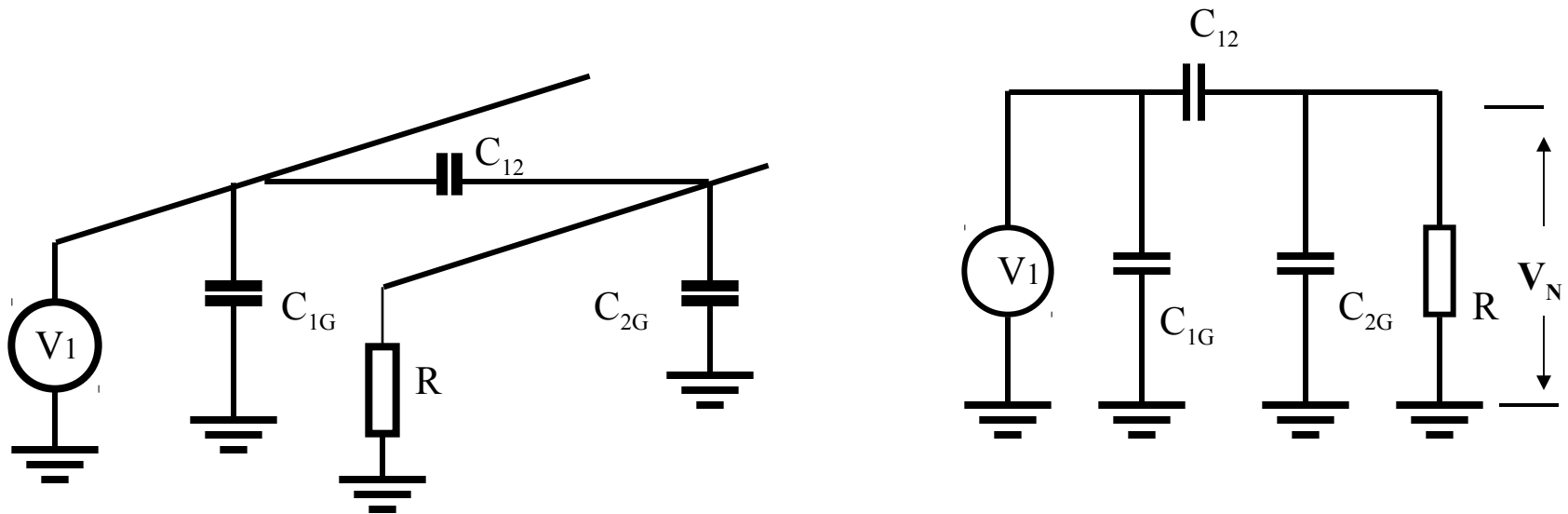
磁场耦合为

$Z_S Z_L > 1000^2$:

电场耦合为主

$300^2 < Z_S Z_L < 1000^2$: 取决于几何结构和频率

电容耦合模型



$$V_N = \frac{j \omega [C_{12} / (C_{12} + C_{2G})]}{j \omega + 1 / R (C_{12} + C_{2G})} V_1$$

耦合公式化简

$$V_N = \frac{j \omega [C_{12} / (C_{12} + C_{2G})]}{j \omega + 1 / R (C_{12} + C_{2G})} V_1$$

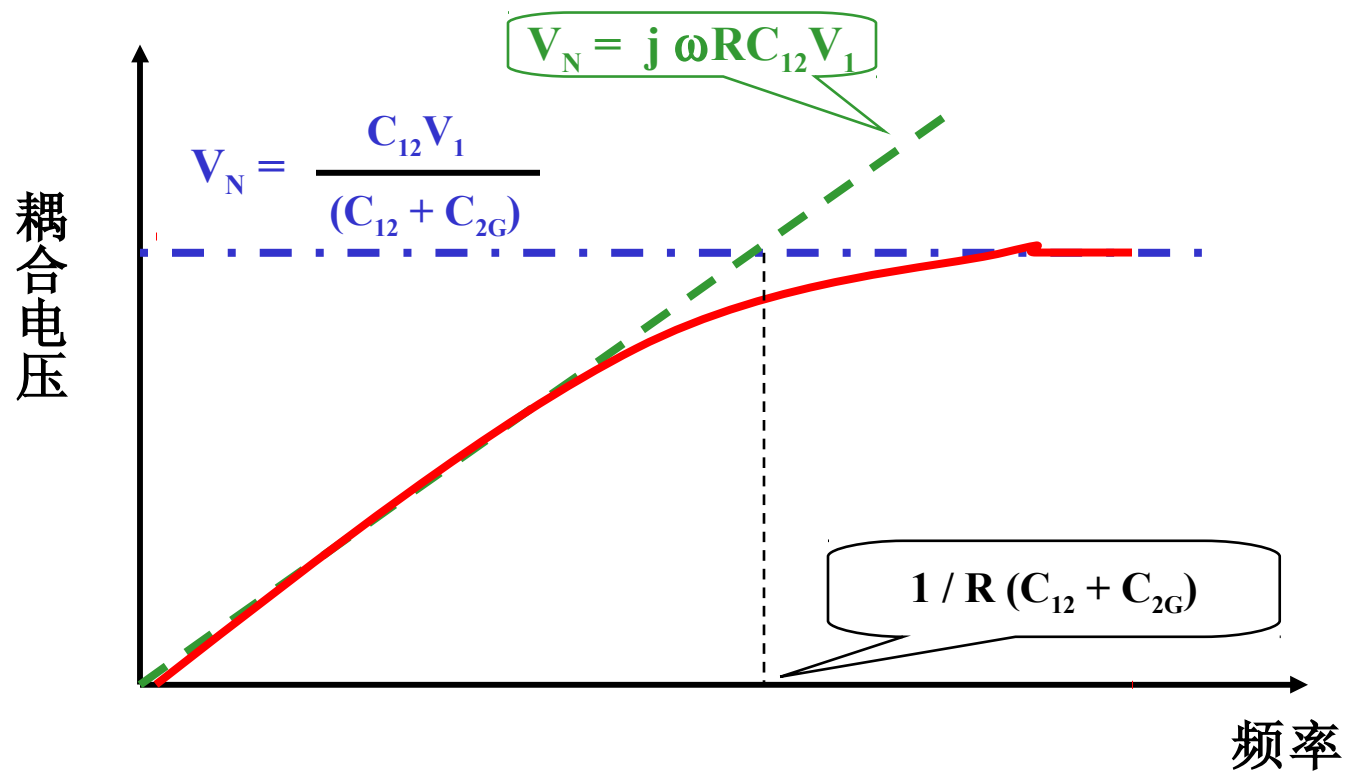
$$R \ll 1 / [j \omega (C_{12} + C_{2G})]$$

$$R \gg 1 / [j \omega (C_{12} + C_{2G})]$$

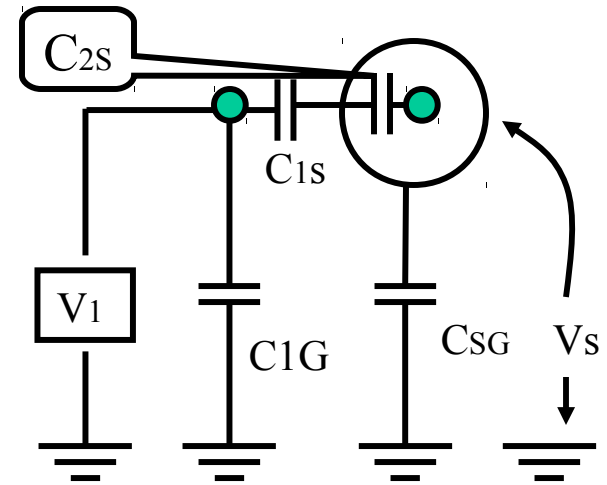
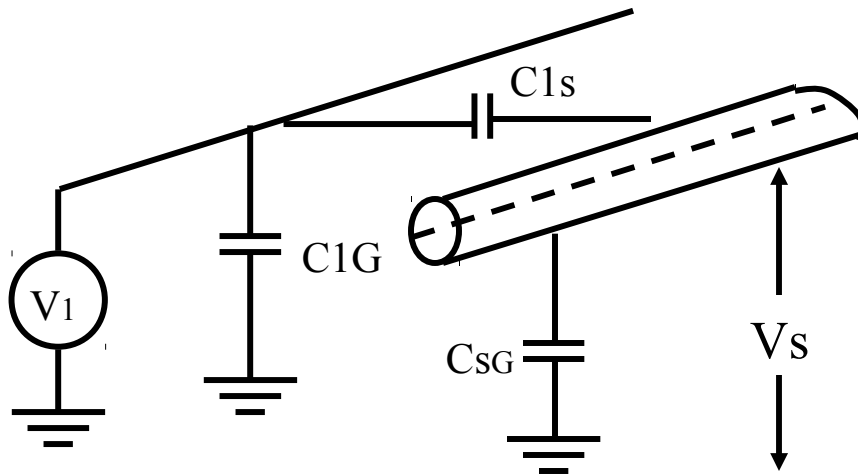
$$V_N = j \omega R C_{12} V_1$$

$$V_N = V_1 [C_{12} / (C_{12} + C_{2G})]$$

电容耦合与频率的关系



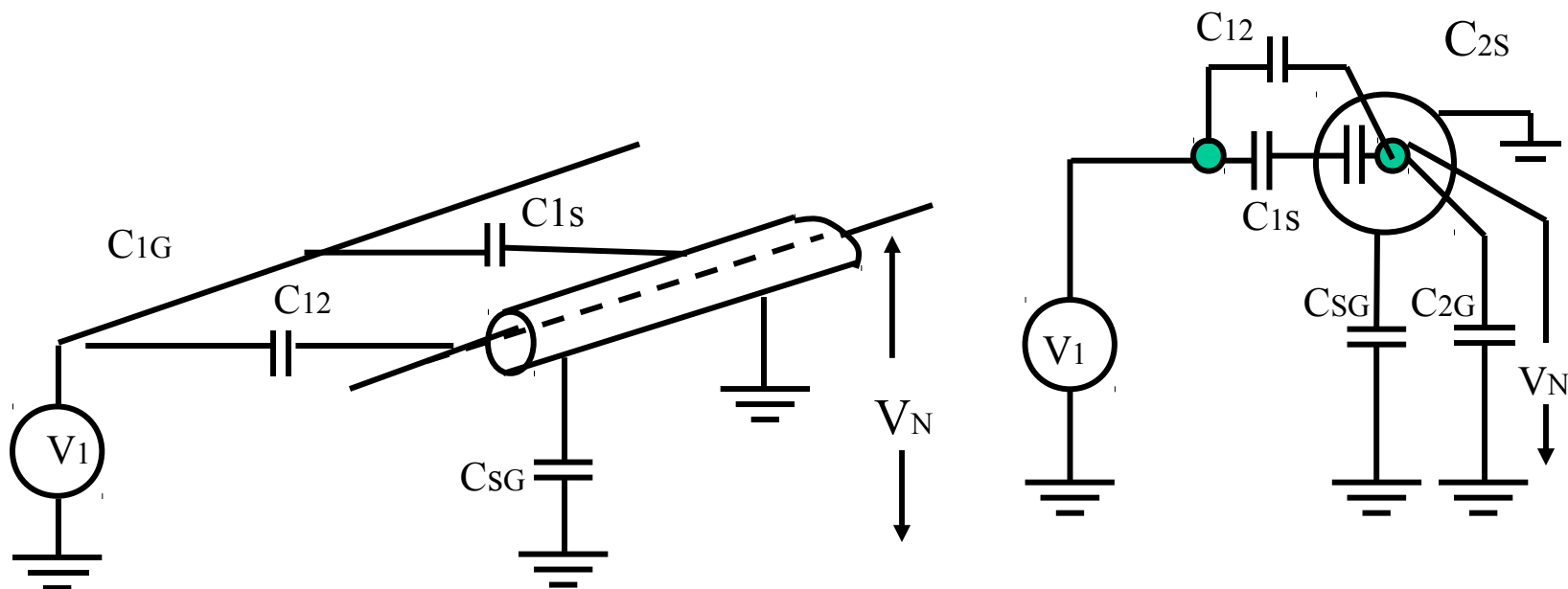
屏蔽对电容耦合的影响—全屏蔽



屏蔽层不接地： $V_N = V_S = V_1 [C_{1S} / (C_{1S} + C_{SG})]$ ，与无屏蔽相同

屏蔽层接地时： $V_N = V_S = 0$ ，具有理想的屏蔽效果

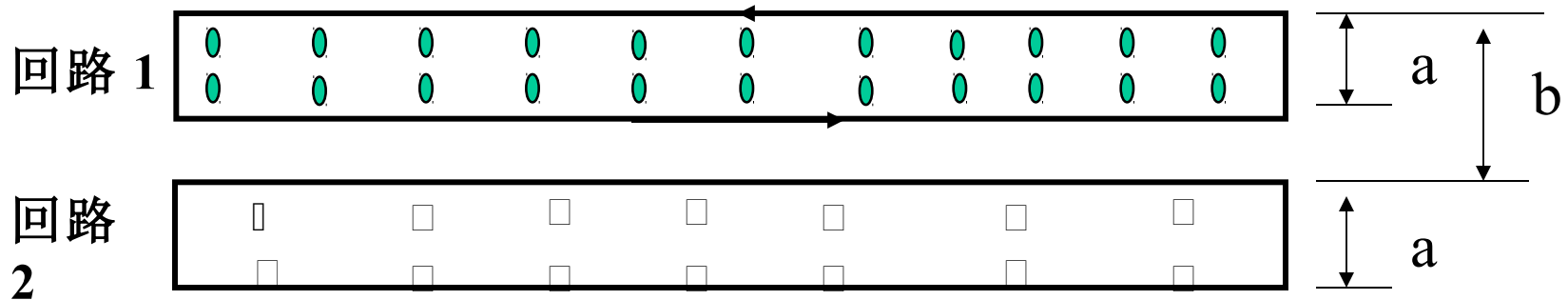
部分屏蔽对电容耦合的效果



R 很大时: $V_N = V_1 [C_{12} / (C_{12} + C_{2G} + C_{2S})]$

R 很小时: $V_N = j\omega RC_{12}$

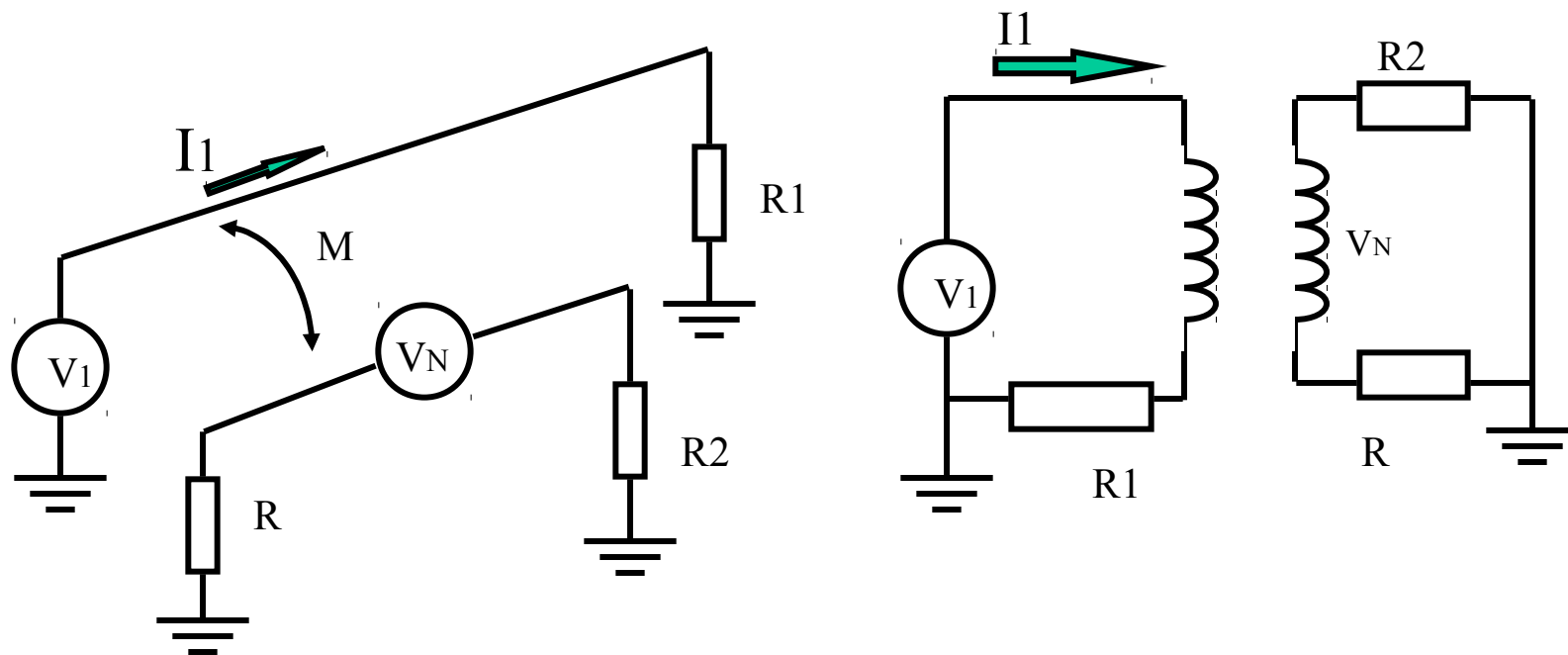
互电感定义与计算



定义： 自感 $L = \Phi_1 / I_1$ ， 互感 $M = \Phi_{12} / I_1$ 是电流 I_1 在回路 1 中产生的磁通， Φ_{12} 是电流 I_1 在回路 2 中产生的磁通

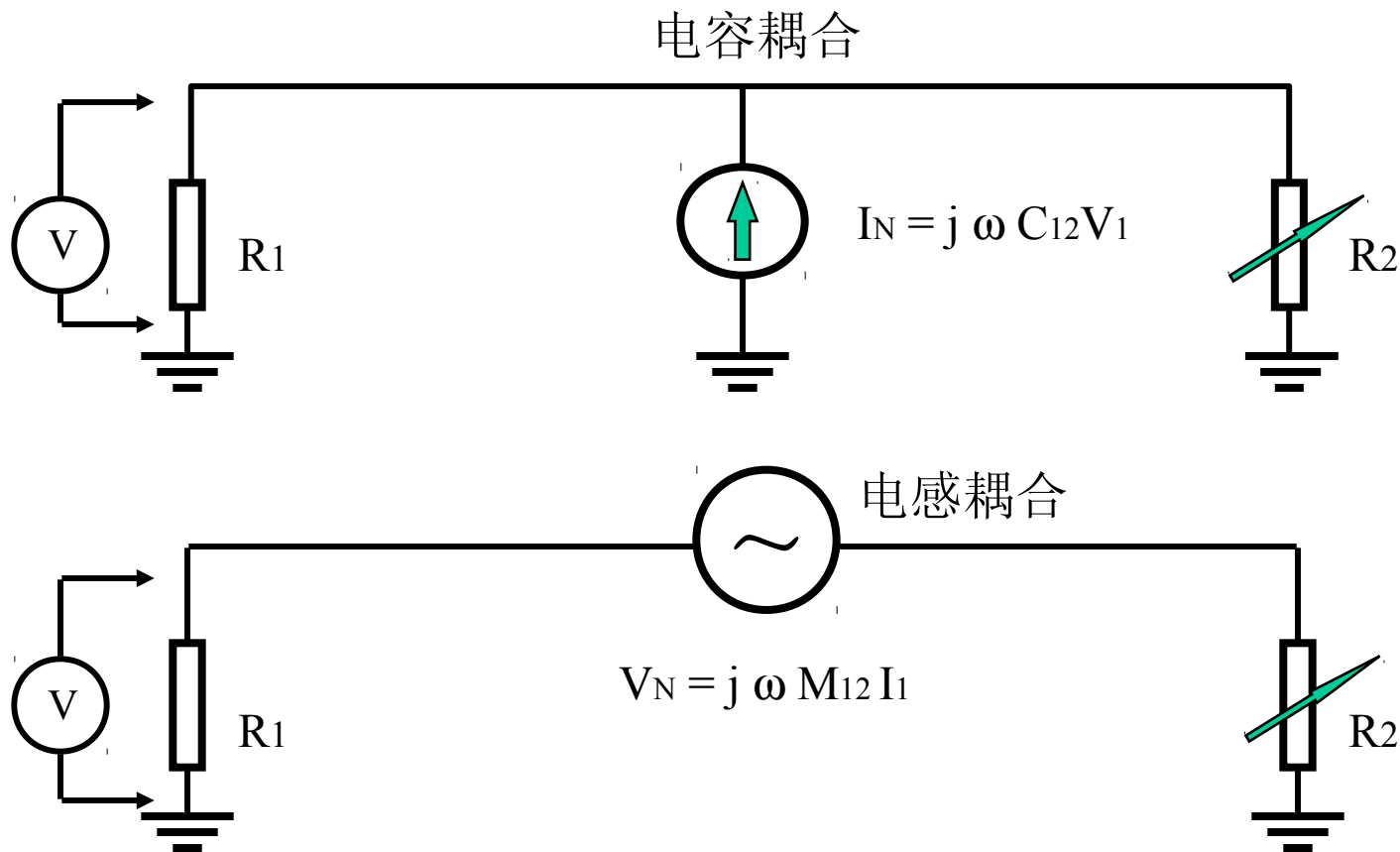
$$M = \left(\frac{\mu_0 I_1}{2 \pi} \right) \ln \left[\frac{b^2}{(b^2 - a^2)} \right]$$

电感耦合

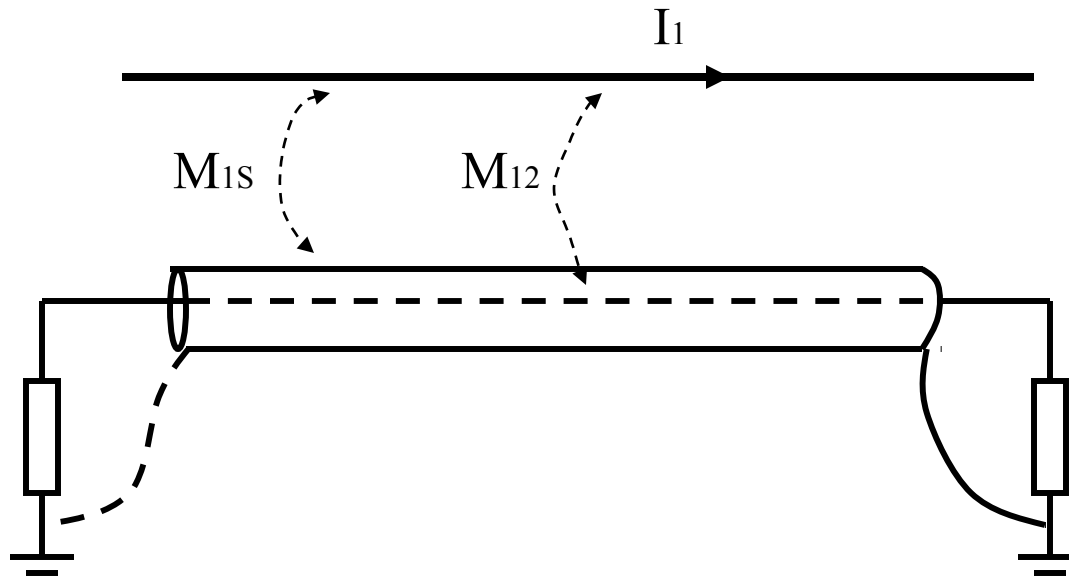


$$V_N = \frac{d\Phi_{12}}{dt} = \frac{d(MI_1)}{dt} = M \frac{dI_1}{dt}$$

电感耦合与电容耦合的判别

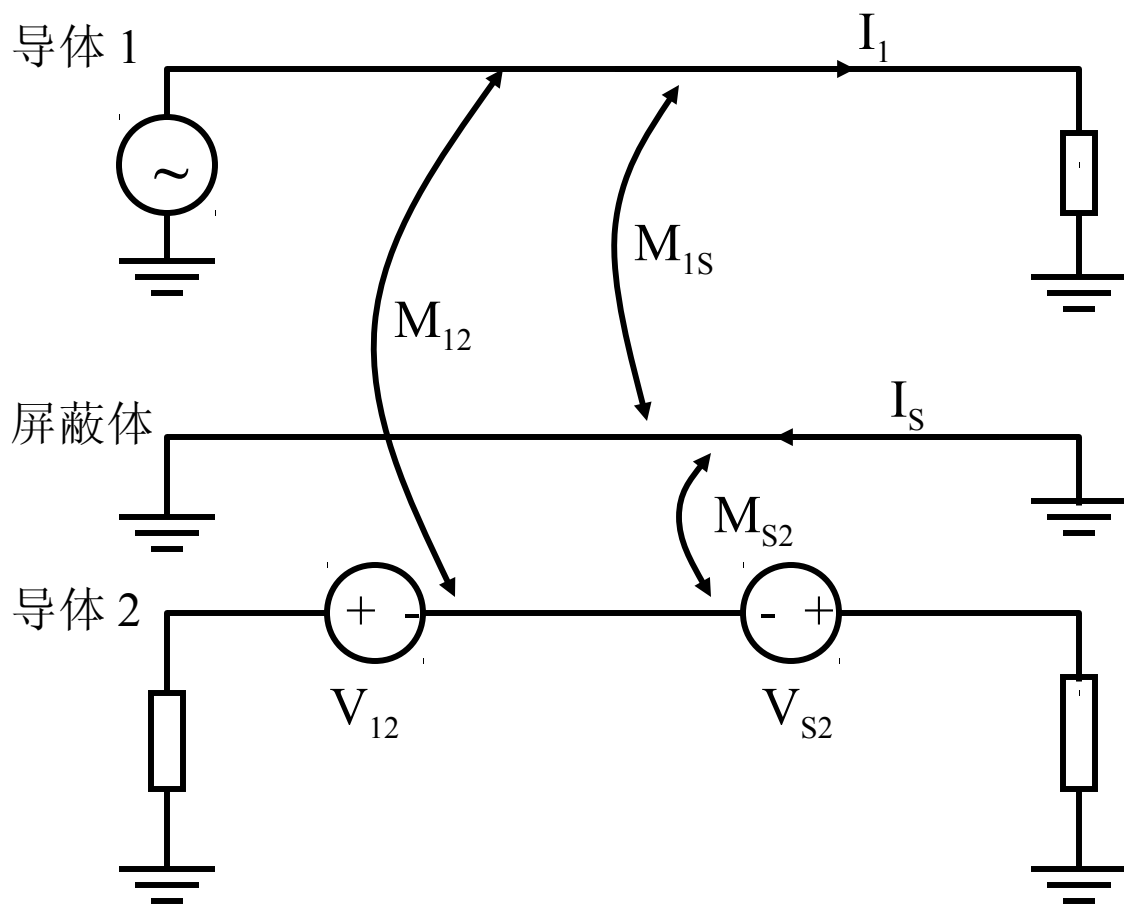


非磁性屏蔽对电感耦合的影响



关键看互感是否由于屏蔽措施而发生了改变

双端接地屏蔽层的分析



$$V_{12} = j \omega M_{12} I_1$$

$$V_{s2} = j \omega M_{s2} I_s$$

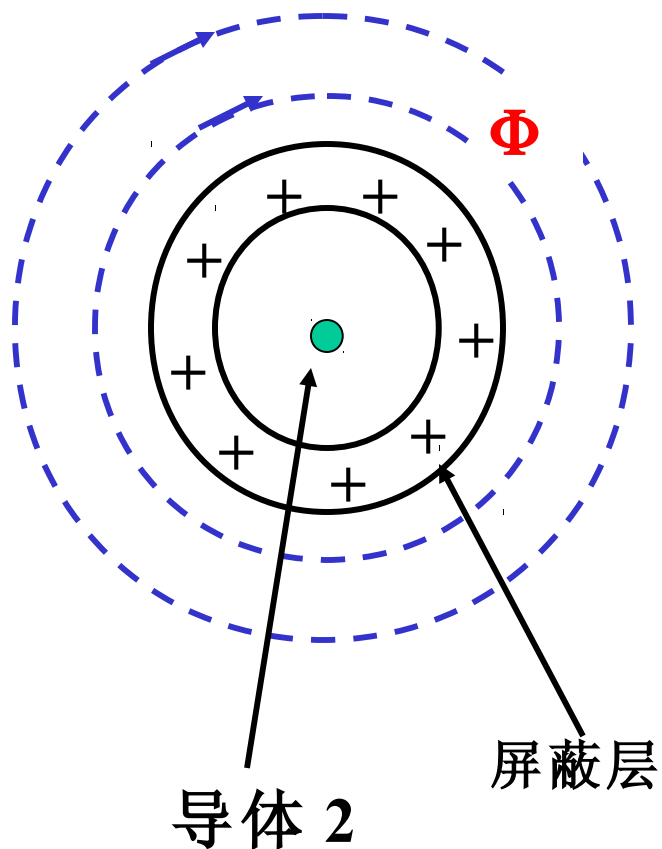
$$V_N = V_{12} + V_{s2}$$

求解这项

V_{s2} 项求解

$$L_s = \Phi / I_s \quad M_{s2} = \Phi / I_s$$

因此: $L_s = M_{s2}$



$$\begin{aligned} V_{s2} &= j\omega M_{s2} I_s \\ &= j\omega M_{s2} (V_s / Z_s) \\ &= j\omega L_s [V_s / (j\omega L_s + R_s)] \\ &= V_s [j\omega / (j\omega + R_s / L_s)] \end{aligned}$$

屏蔽后的耦合电压

$$V_N = V_{12} + V_{S2}$$

$$V_{12} = j\omega M_{12} I_1$$

$$V_S = j\omega M_{1S} I_1$$

因为： $M_{12} = M_{1S}$

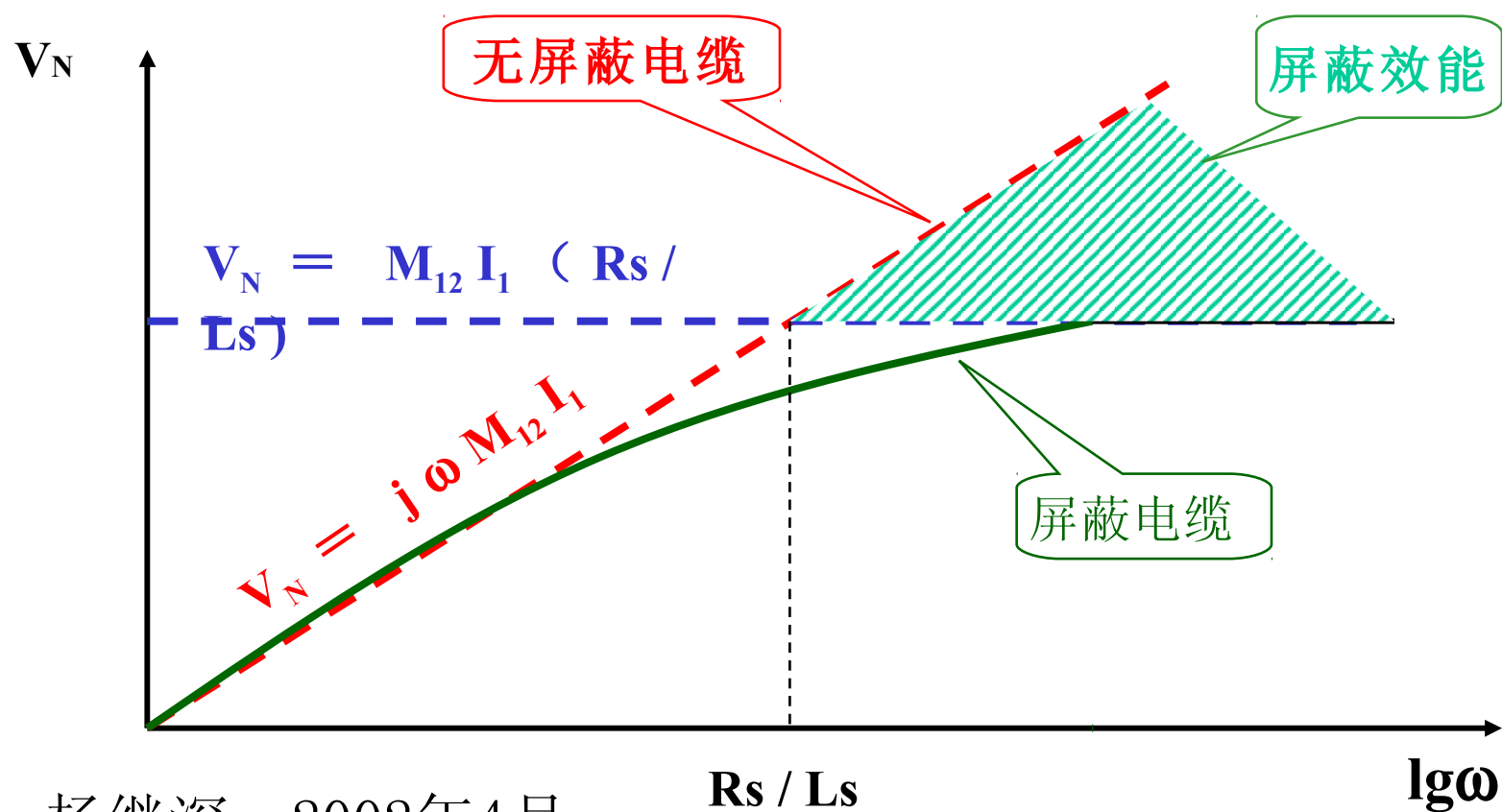
所以： $V_S = j\omega M_{12} I_1$ 

所以： $V_{S2} = j\omega M_{12} I_1 [j\omega / (j\omega + R_S / L_S)]$

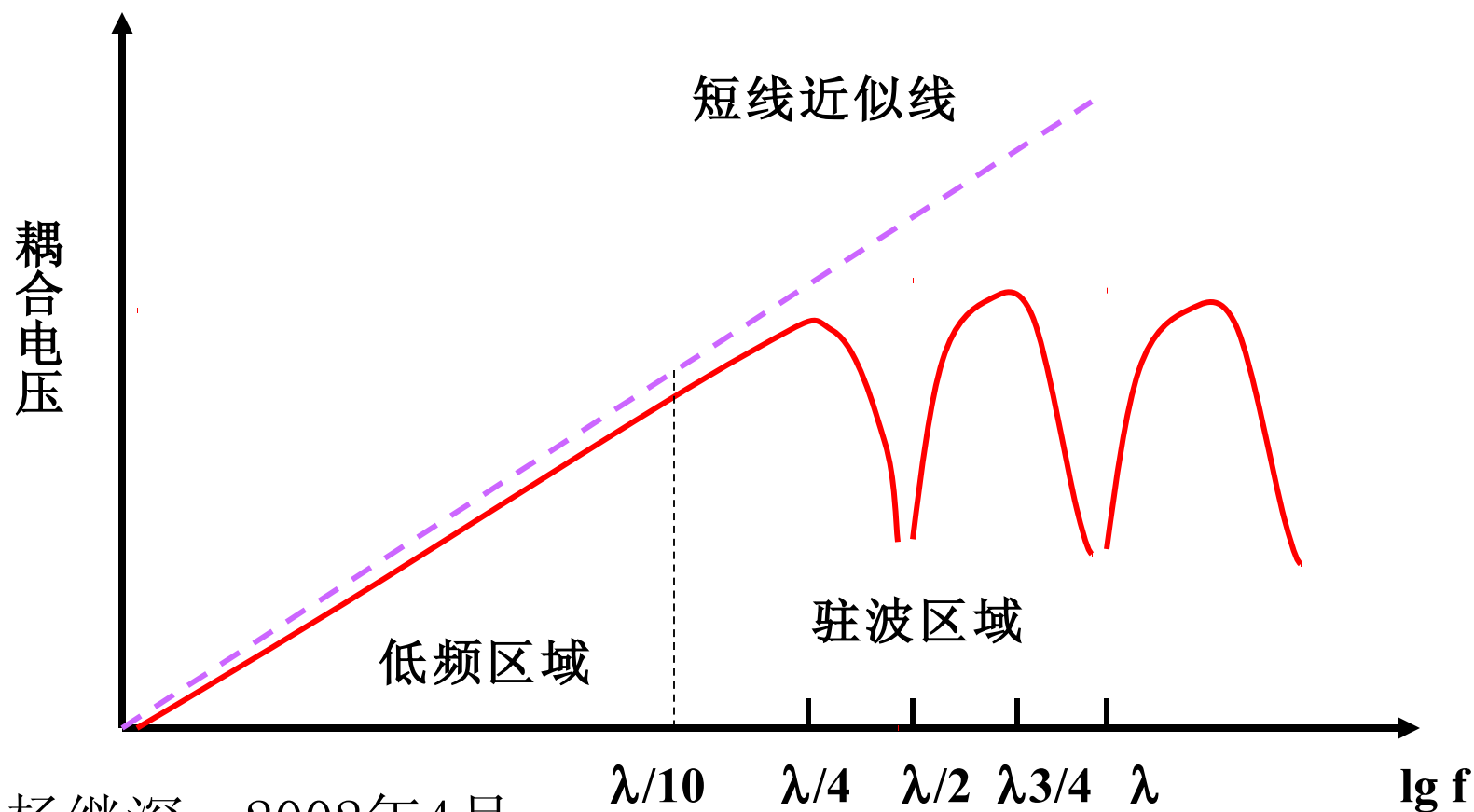
$$V_N = V_{12} - V_{12} [j\omega / (j\omega + R_S / L_S)]$$

$$= V_{12} [(R_S / L_S) / (j\omega + R_S / L_S)]$$

屏蔽层的磁场耦合屏蔽效果



长线上的耦合电压

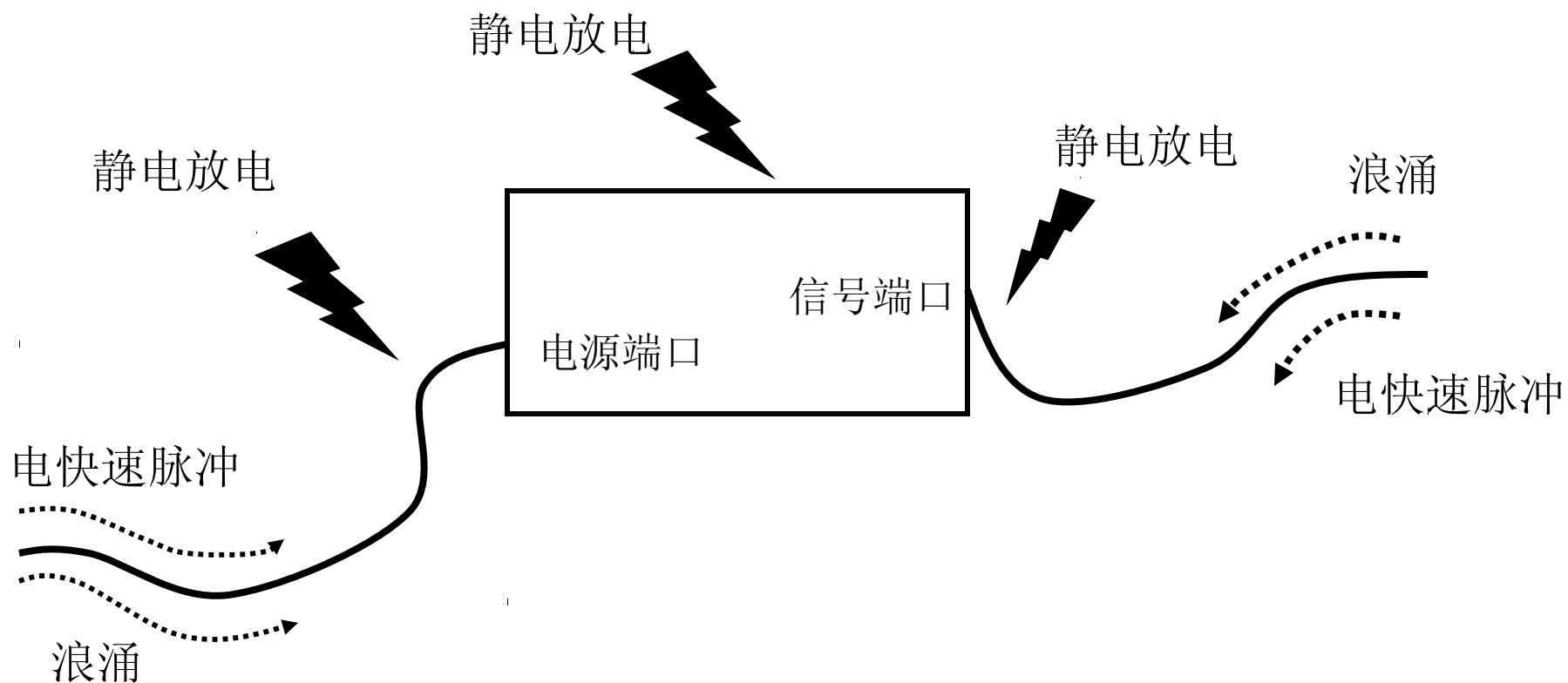


第七部分

瞬态脉冲干扰的抑制

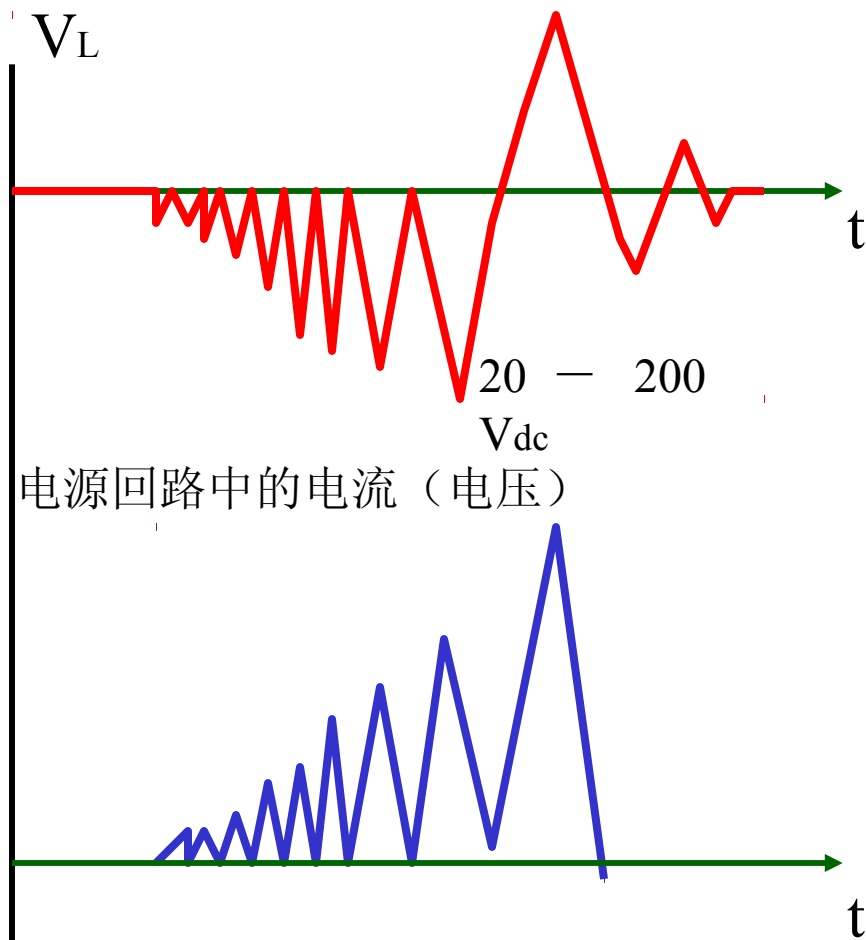
2002年4月

瞬态干扰对设备的威胁

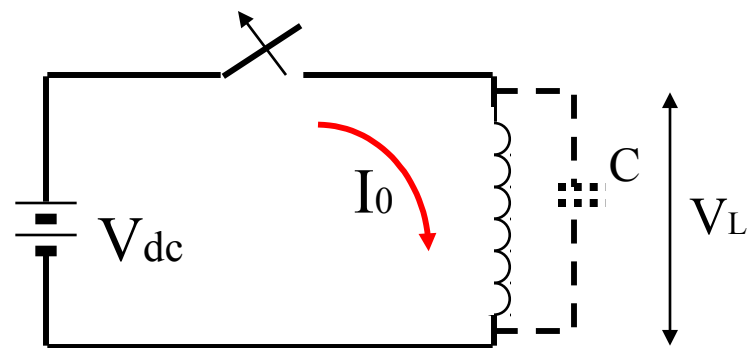


2002年4月

感性负载断开时产生的干扰



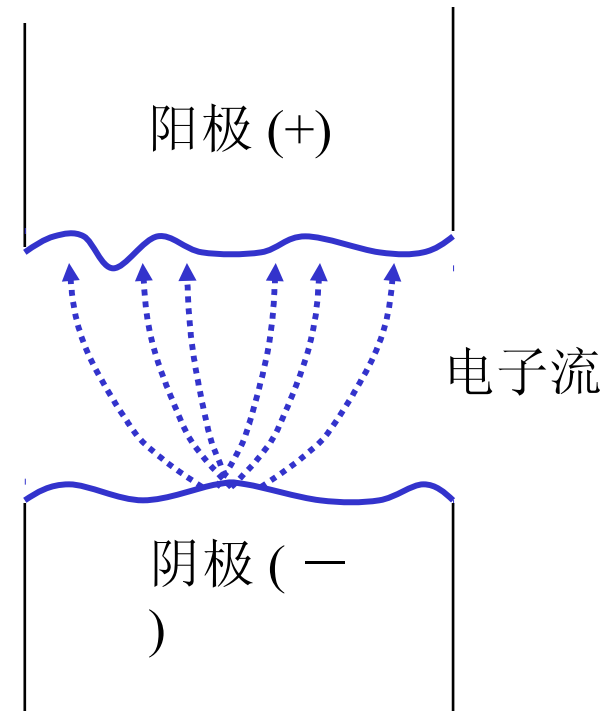
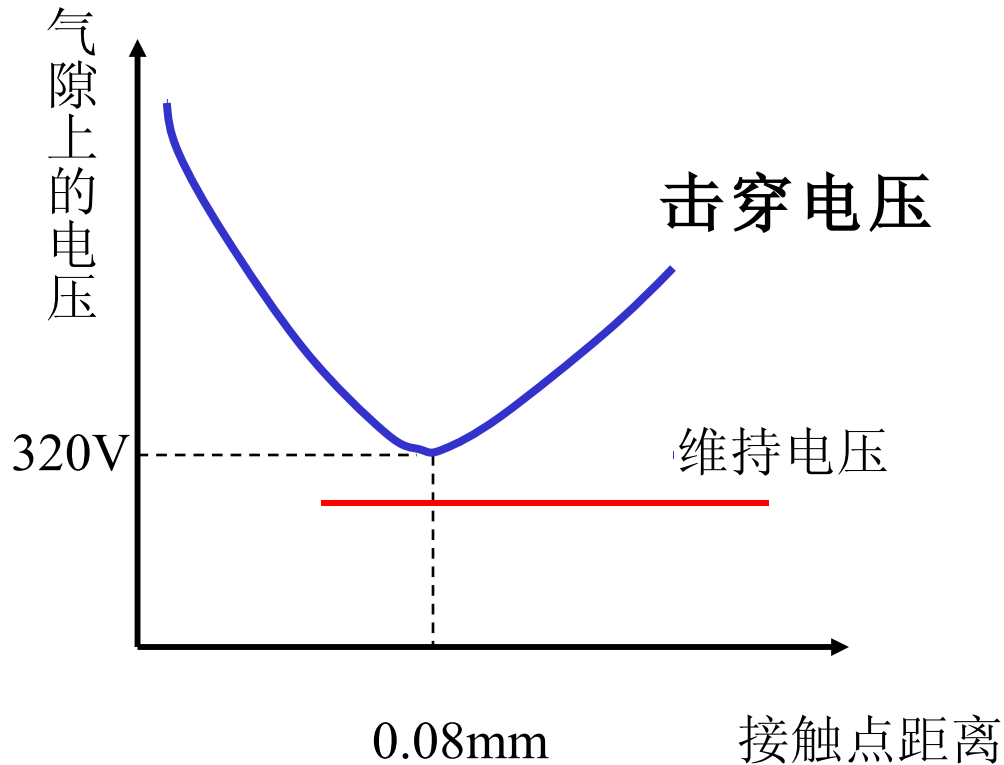
对应的 EMC 实验: EFT



特点: 脉冲串

2002年4月

两种触点击穿导通机理



辉光放电

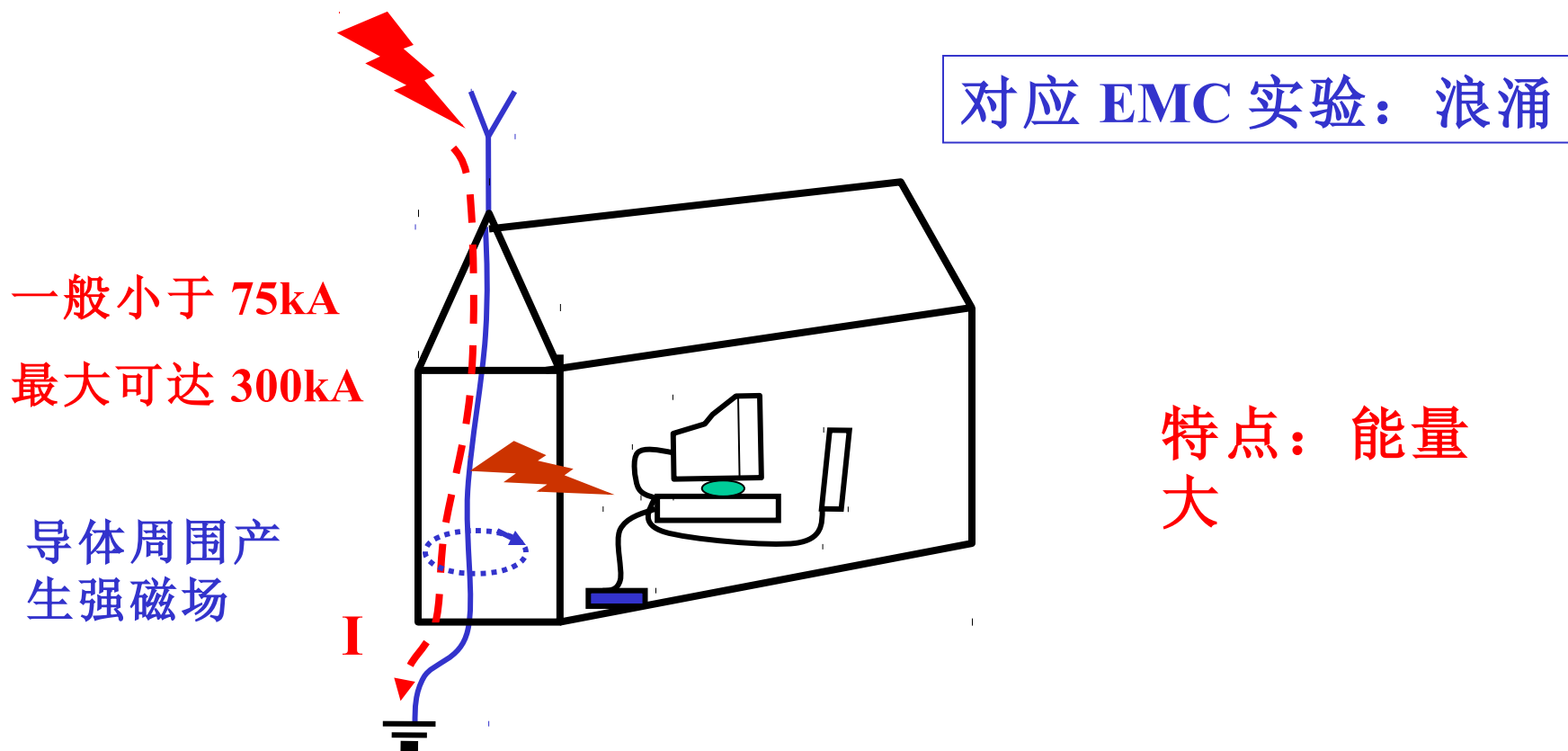
气体电

弧光放电
化

金属气

2009年4月

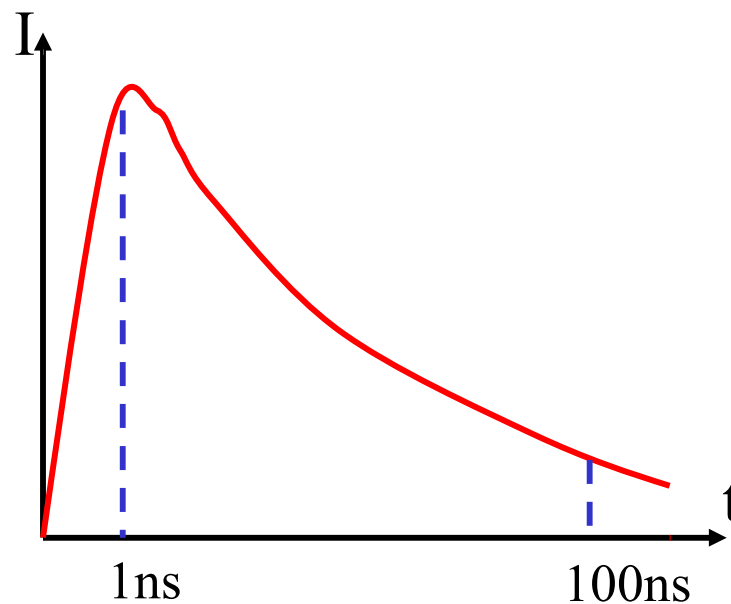
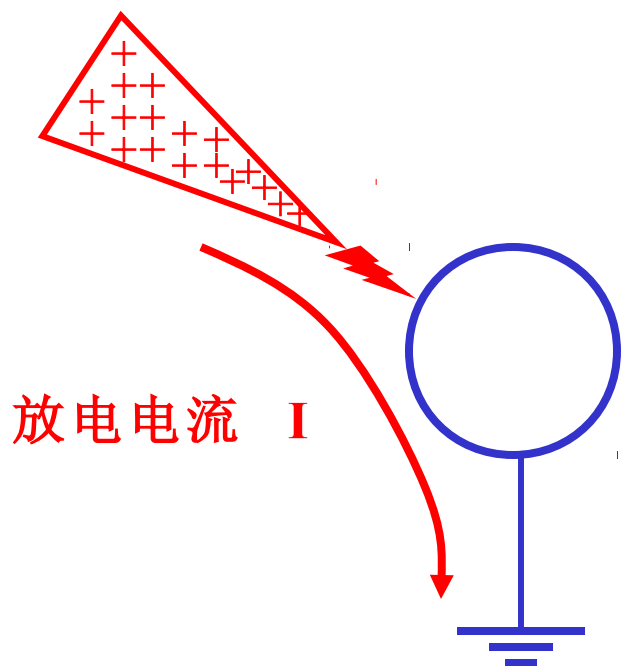
浪涌产生的原因



2002年4月

静电放电现象

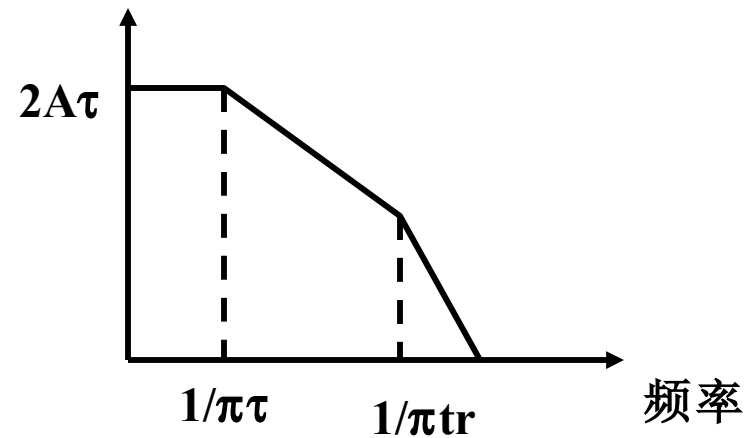
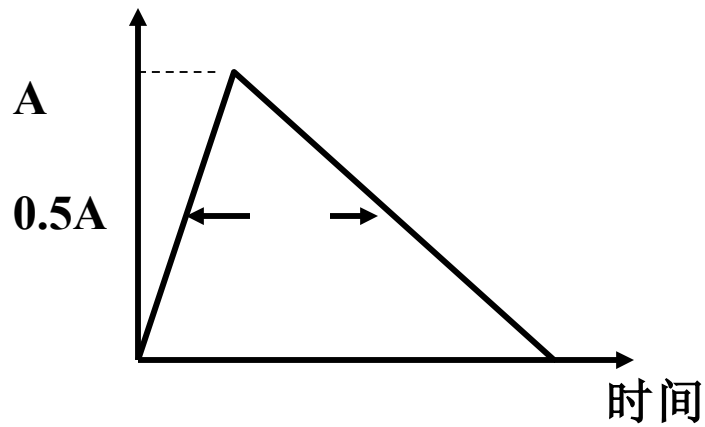
对应 EMC 实验： ESD



2002年4月

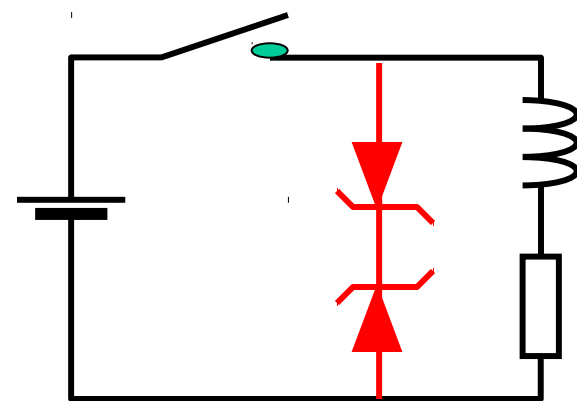
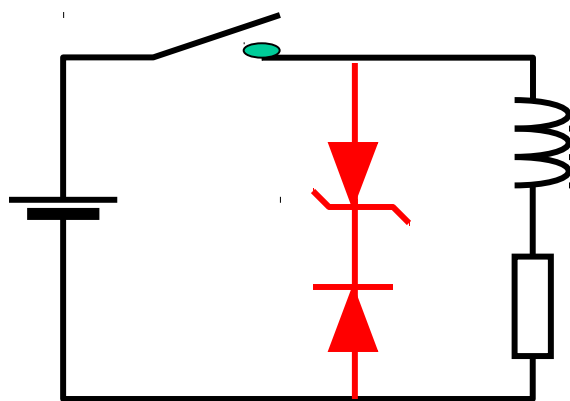
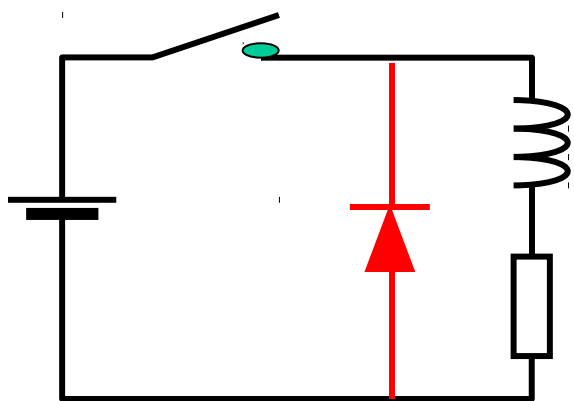
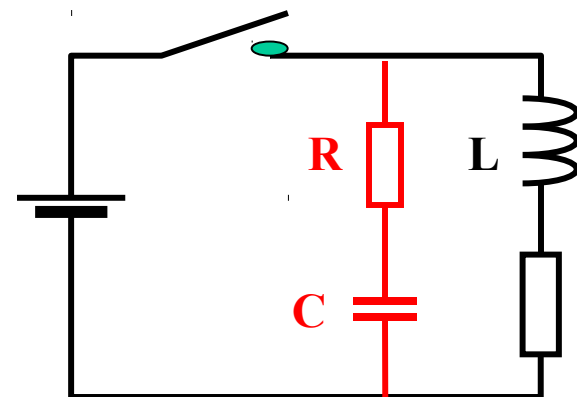
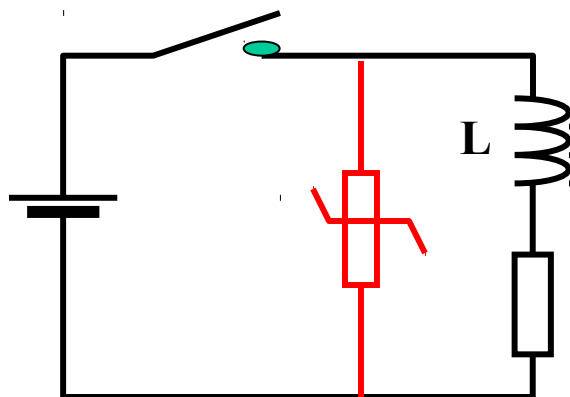
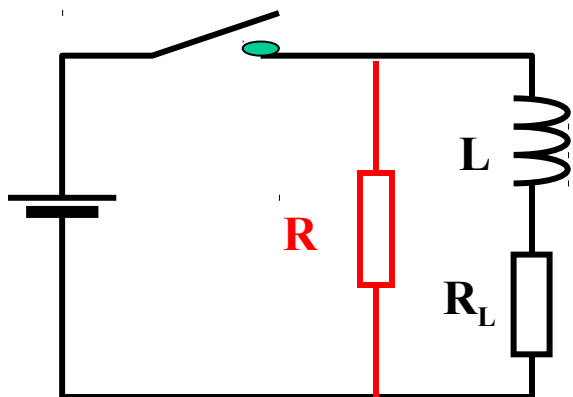
特点：频率范围
宽

瞬态干扰的频谱



瞬态类型	tr	τ	$1/\pi\tau$	$1/\pi tr$	A
EFT	5ns	50ns	6.4MHz	64MHz	4kV
ESD	1ns	30ns	10MHz	320MHz	30A
浪涌	2002年4月	1.2μs	50μs	6.3kHz	265kHz

消除感性负载干扰



2002年4月

阻尼电路参数确定

R: { 越大, 开关闭合时限流作用越好
越小, 开关断开时反充电压越小 }

折衷 $\rightarrow V / I_a < R < R_L$

C: 由于没有弧光, L 中的能量全部进入 C, $V_c = I (L/C)^{1/2}$

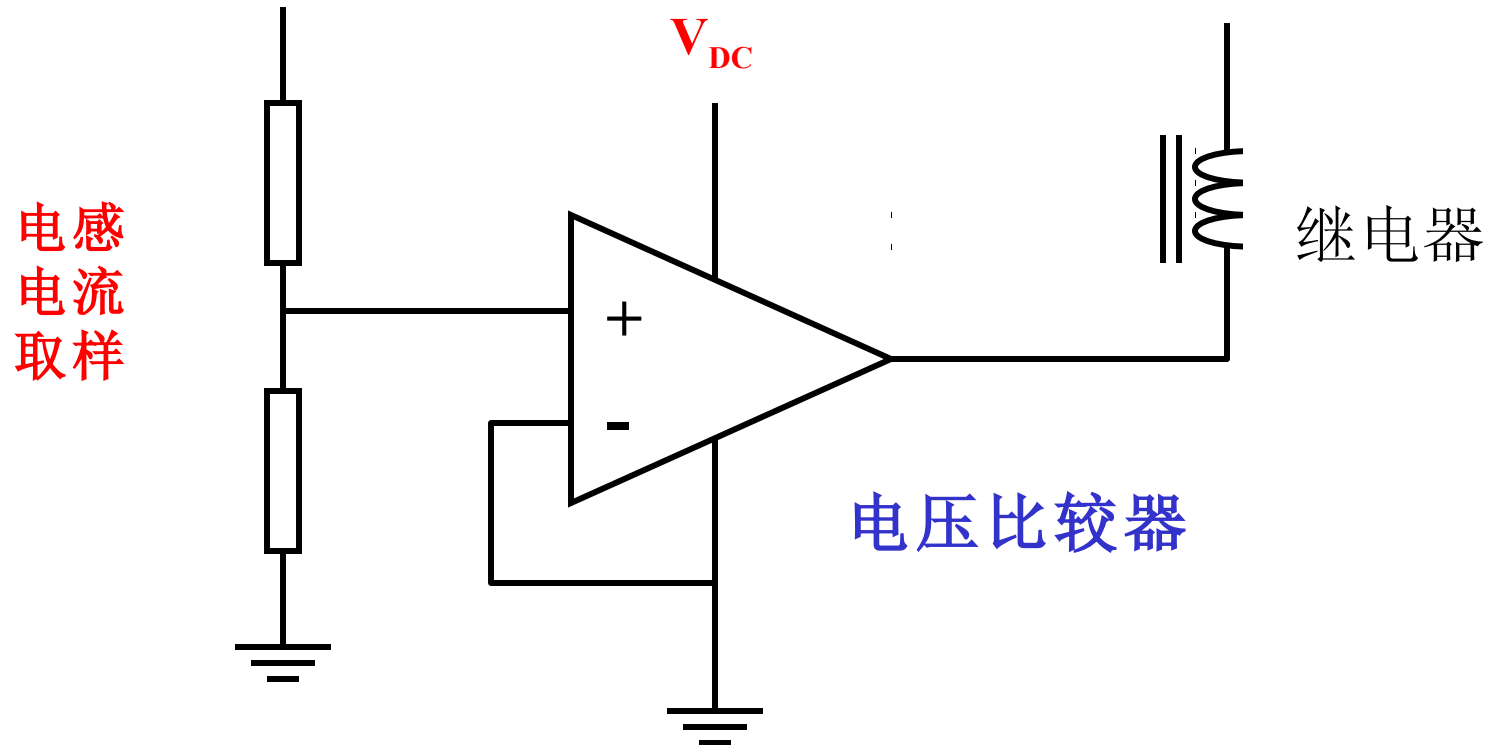
为了防止发生辉光, $V_c < 300V$

$C > (I / 300)^2 L$

为了防止发生弧光, 电容充电速率要小于 $1V/\mu s$,

$C > 10^{-6} I$

过零开关消除干扰



瞬态干扰抑制原理

分压法

:

正温度系数电阻

电 阻

电 感

电 容



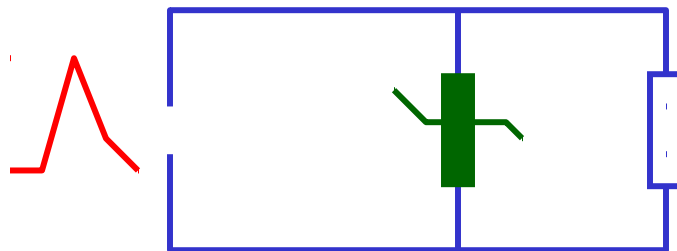
分流法

:

负温度系数电阻
(压敏电阻)

瞬态抑制二极管

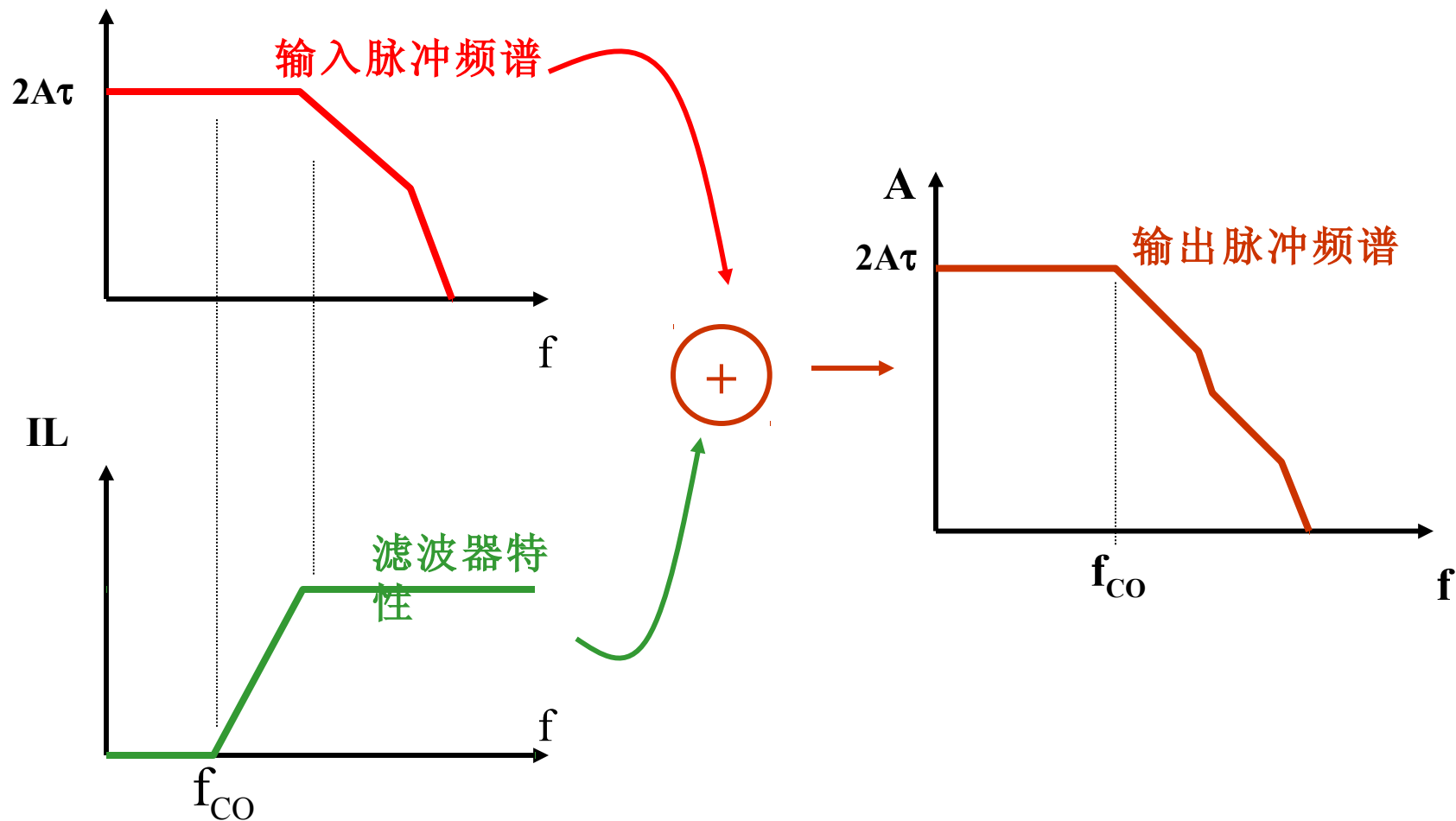
气体放电管



低通滤波器：截止频率小于 $1 / \pi \tau$

2002年4月

低通滤波器对瞬态干扰的作用

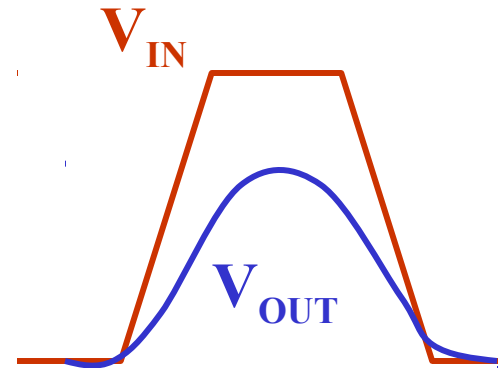
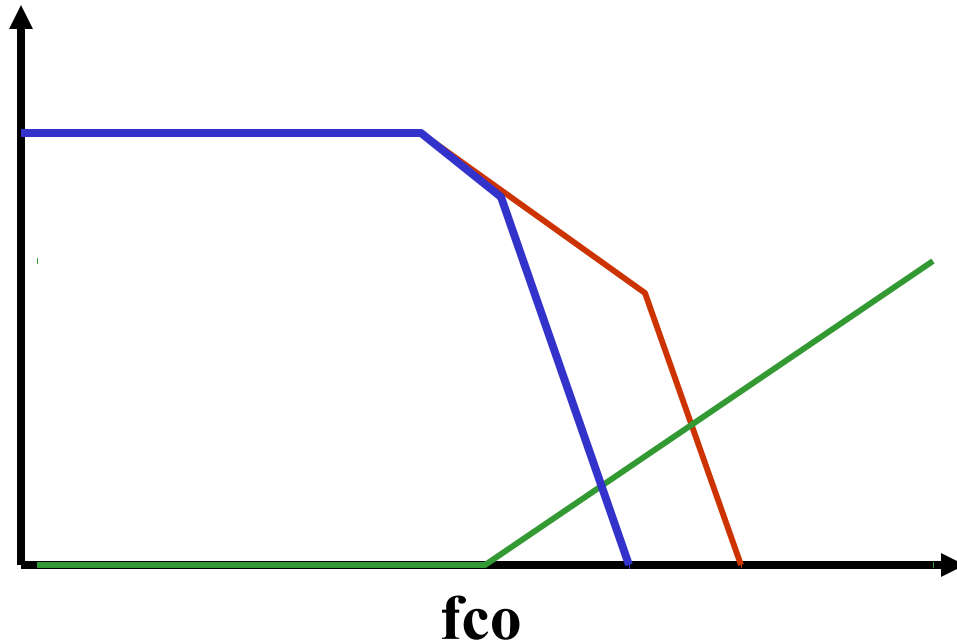


2002年4月

$$f_{co} > 1 / \pi \tau$$

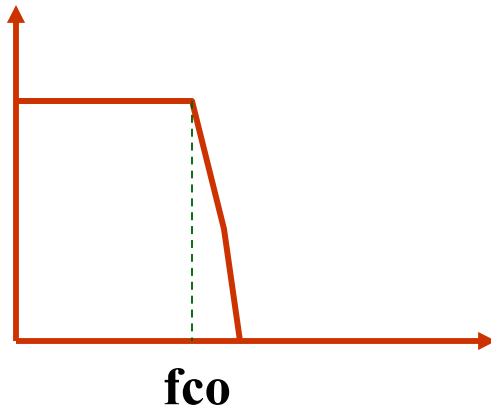
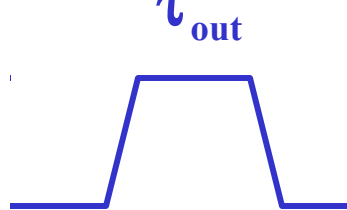
$$V_{OUT} = V_P(f) f_1 = 2V_{IN} \tau / \pi \tau = 2V_{IN} / \pi$$

输出脉冲的幅度略有降低



$$F_{co} < 1 / \pi \tau$$

Parseval 定律：时域中的能量等于频域中的能量：



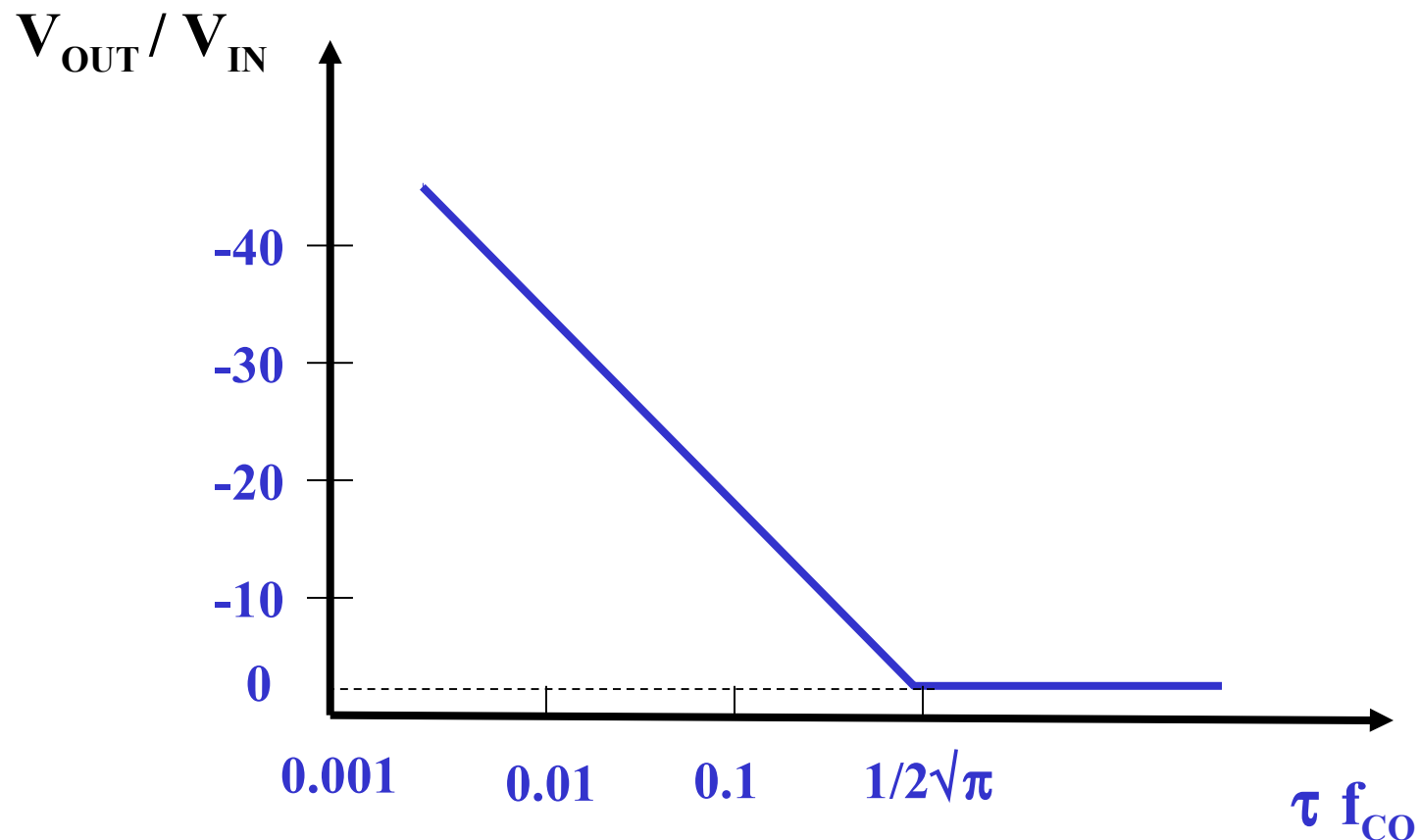
$$\int_0^{f_{co}} V^2(f) df = \int_0^{\tau_{out}} V^2(t) dt = 1 / \pi f_{co}$$

$$\int_0^{f_{co}} (2V_{IN}\tau)^2 df = \int_0^{\tau_{out}} V_{OUT}^2 dt$$

$$(2V_{IN}\tau)^2 f_{co} = V_{OUT}^2 / \pi f_{co}$$

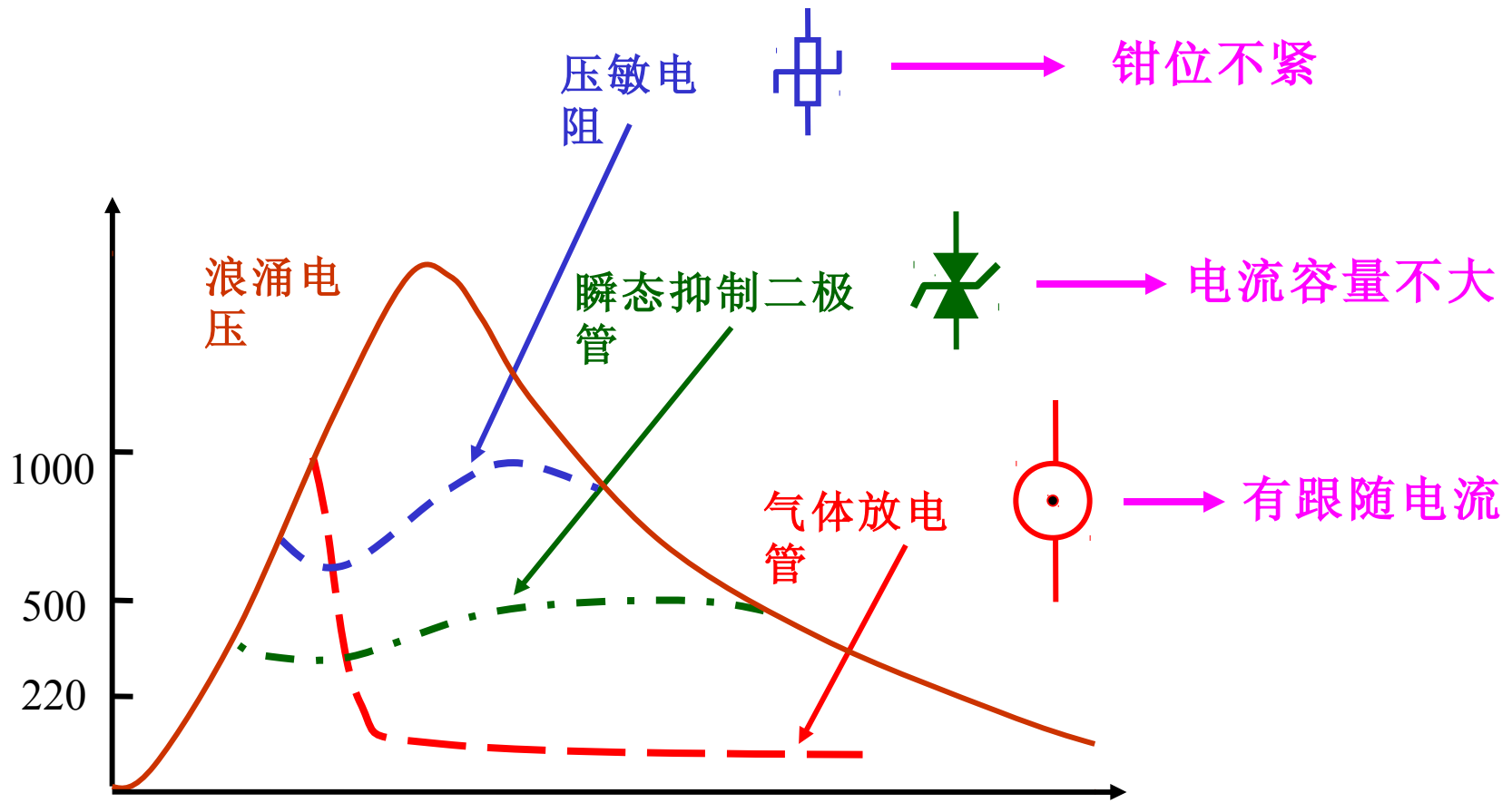
$$V / V_{OUT} = 2 \sqrt{\pi f_{co} \tau}$$

低通滤波器对瞬态干扰的抑制



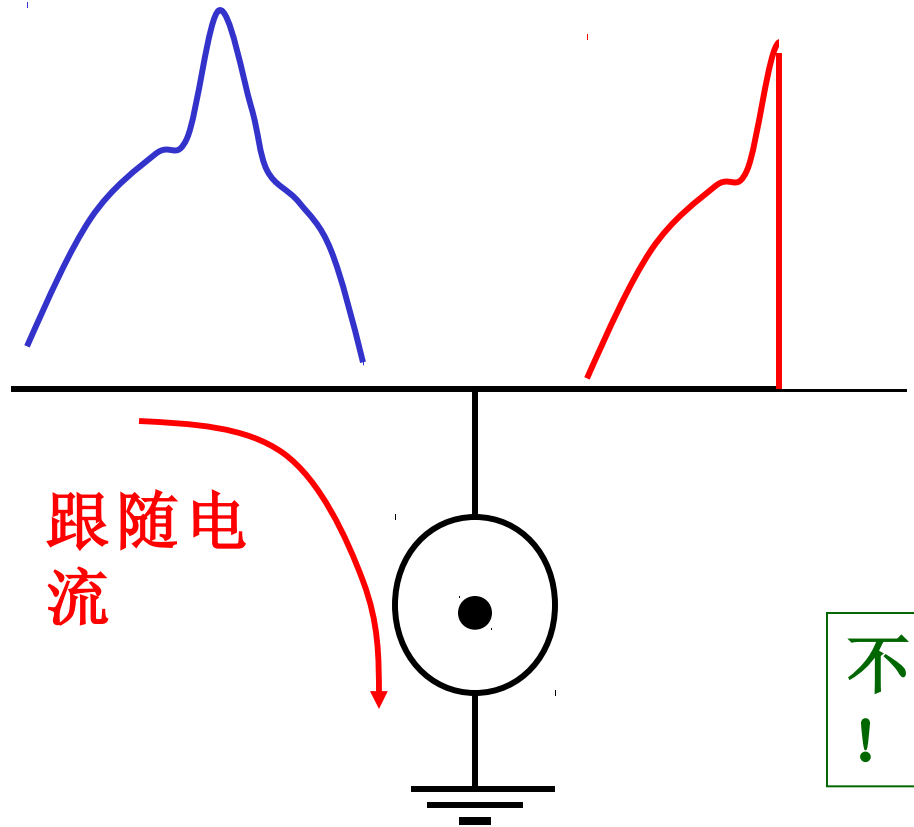
2002年4月

瞬态干扰抑制器件



2002年4月

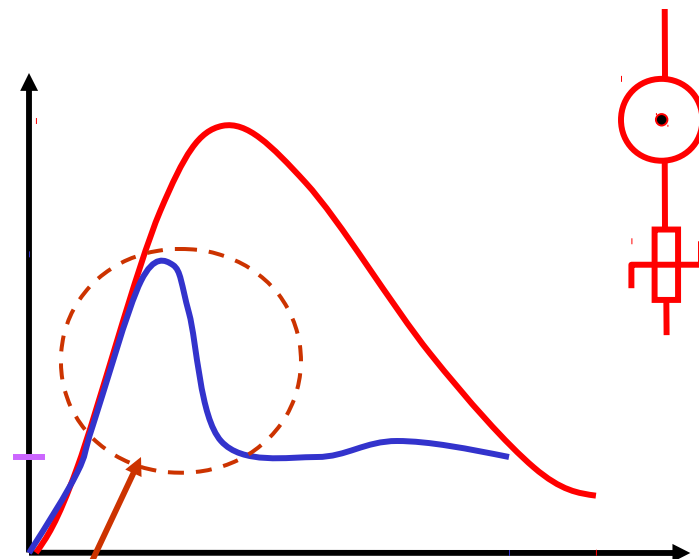
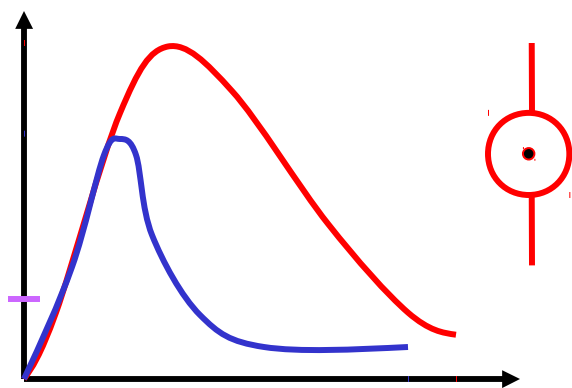
气体放电管的跟随电流



- 寄生电容小
- 电流容量大

不可用在直流的场合
!

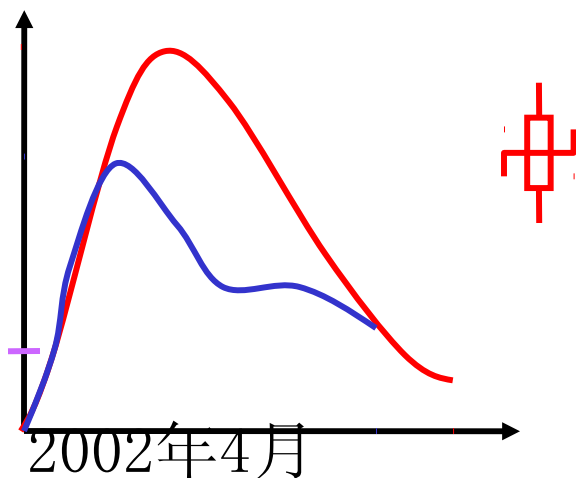
放电管与压敏电阻组合



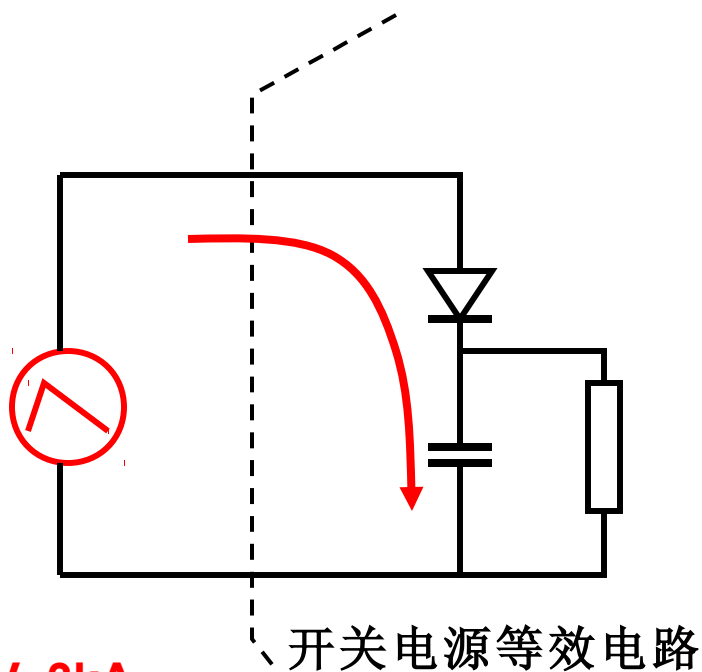
优点:

- 没有跟随电流
- 没有漏电流
- 钳位电压低

用低通
滤波器
消除



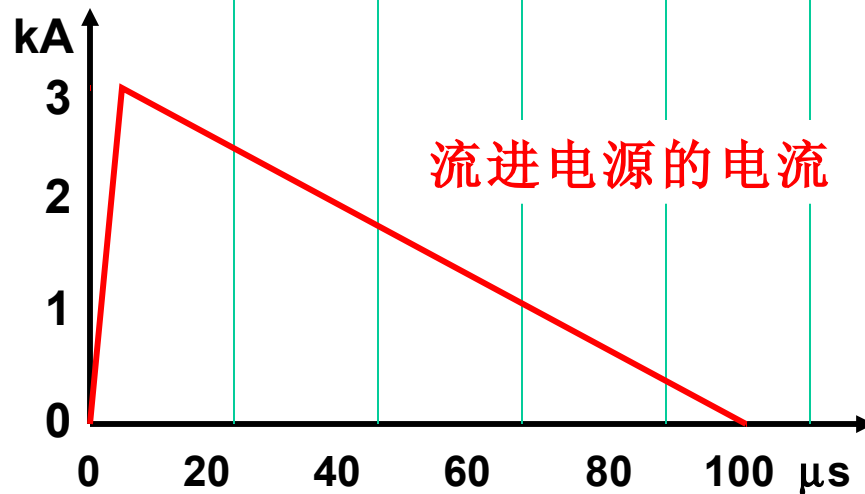
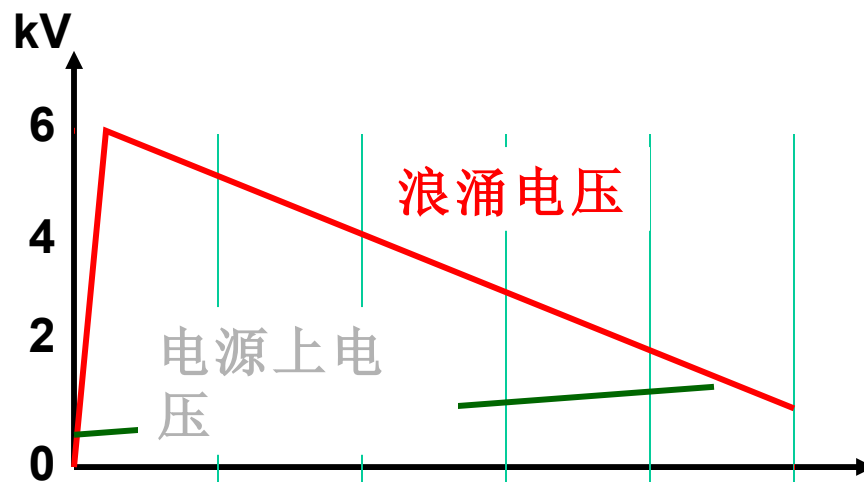
作用在开关电源上的浪涌



6kV, 3kA

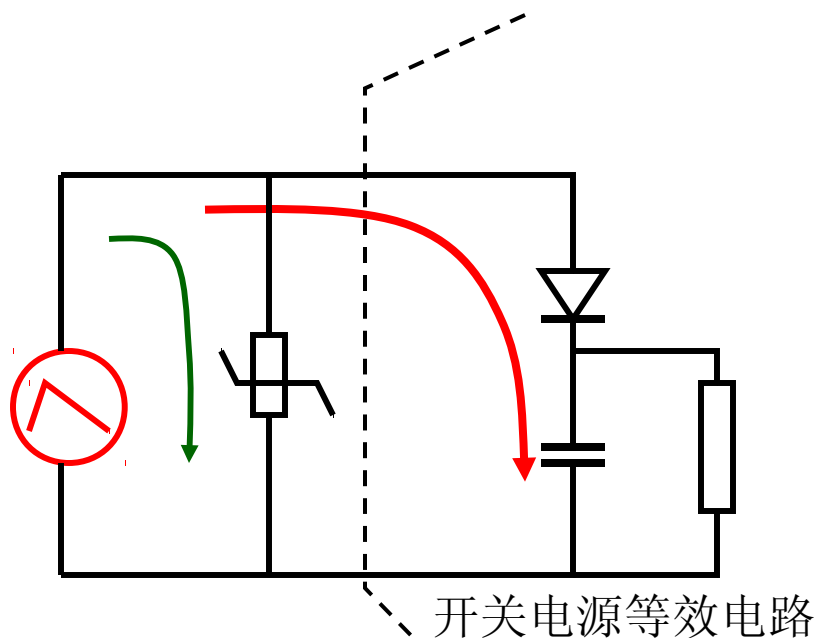
$1.2 \times 50 \mu\text{s}$

浪涌波形



2002年4月

浪涌抑制器件的保护作用



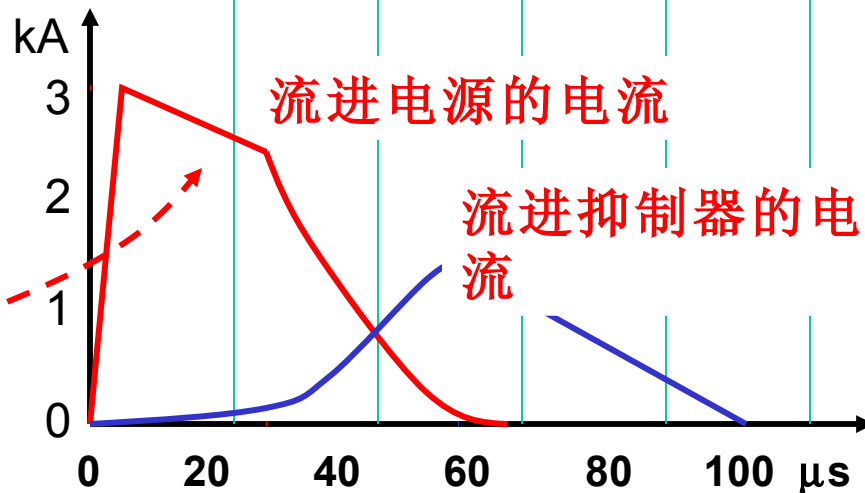
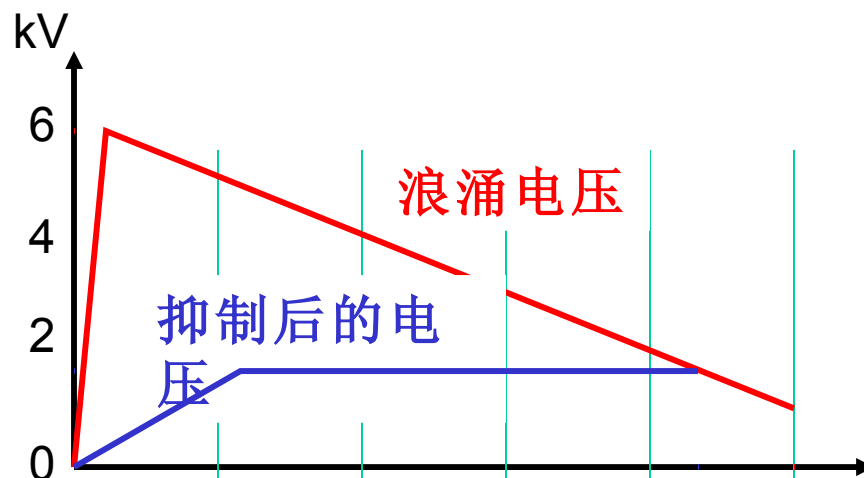
6kV, 3kA

$1.2 \times 50 \mu\text{s}$

浪涌波形

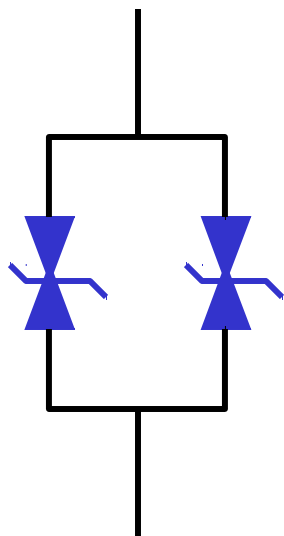
大部分电流

流进了电源

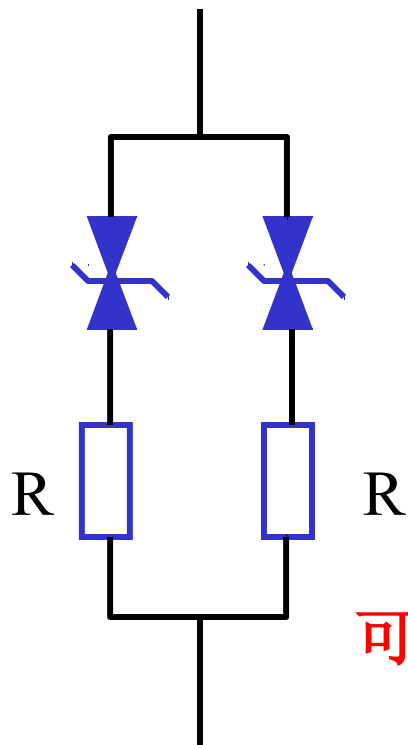


2002年4月

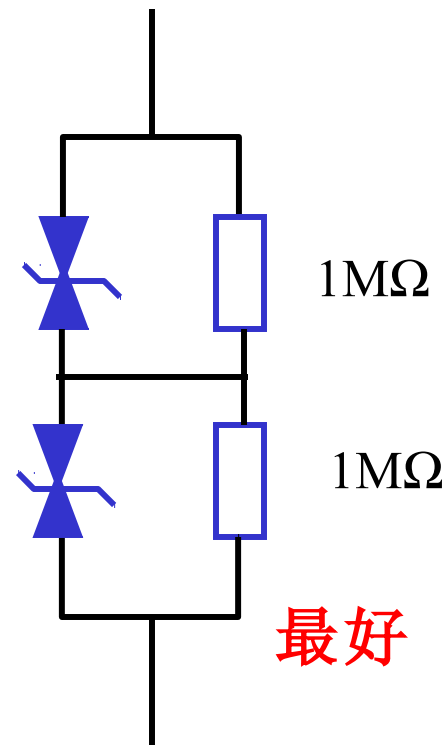
TVS 增容问题



不行



可以



最好

多级浪涌抑制电路

V_1 、 V_2 = 额定工作电压

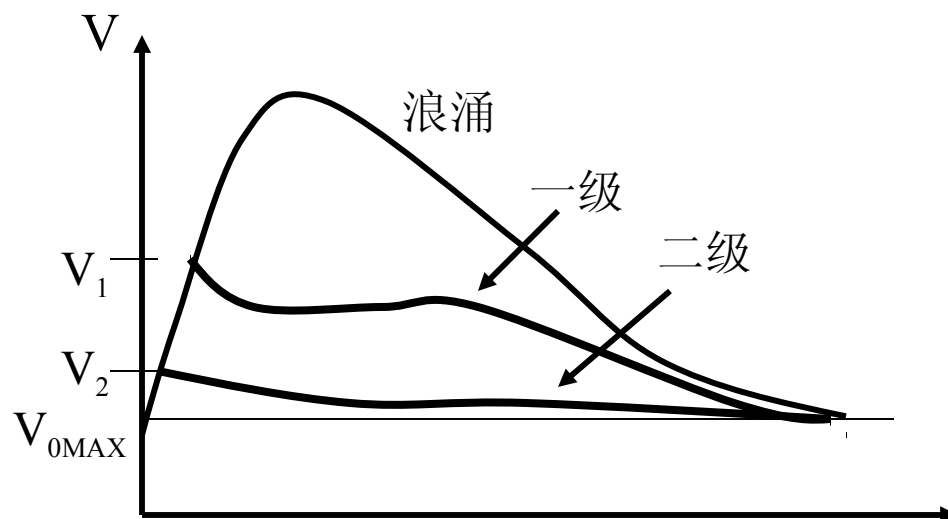
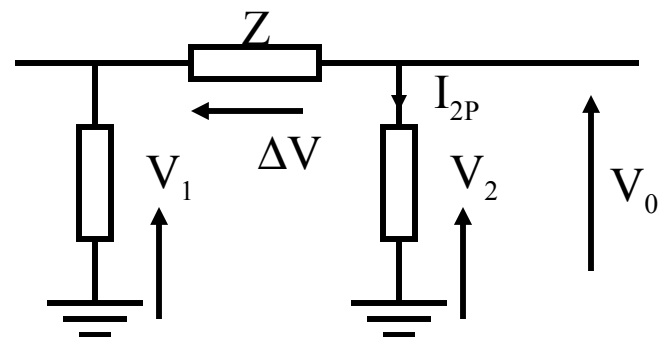
I_2 = 第二级额定峰值电流

$V_2 \geq V_0 +$ 电压偏差 2

$V_1 \geq V_2 +$ 电压偏差 1 + 电压偏差 2

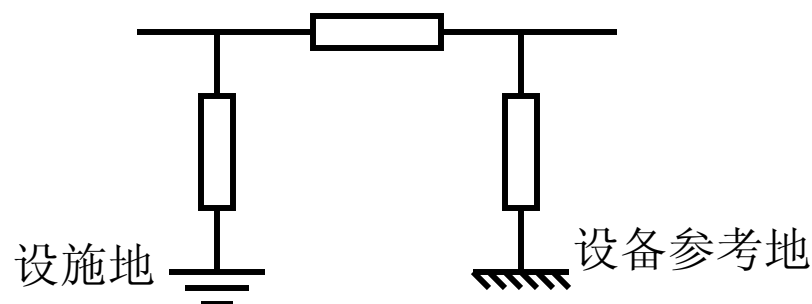
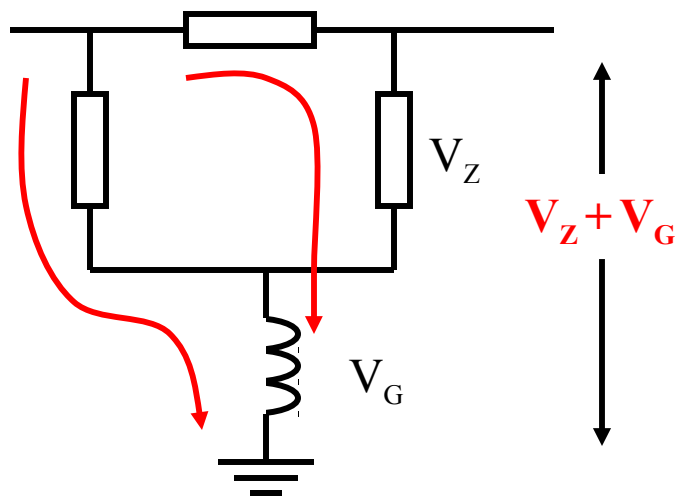
$\Delta V = V_{1MAX} - V_{2MIN}$

$Z \geq \Delta V / I_{2P}$



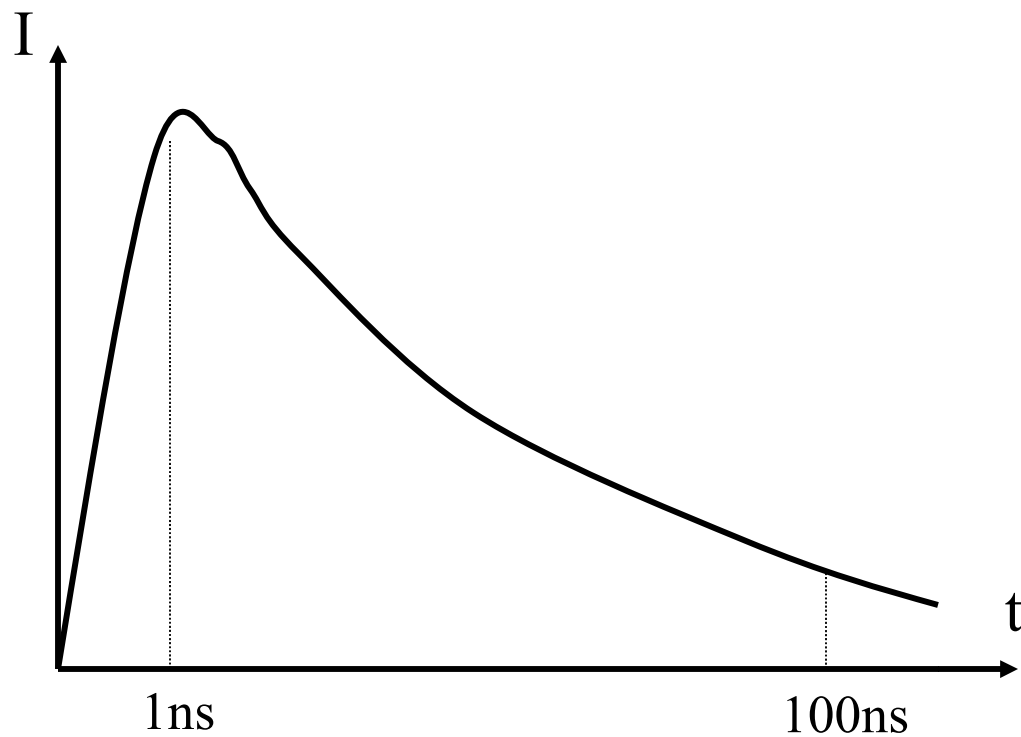
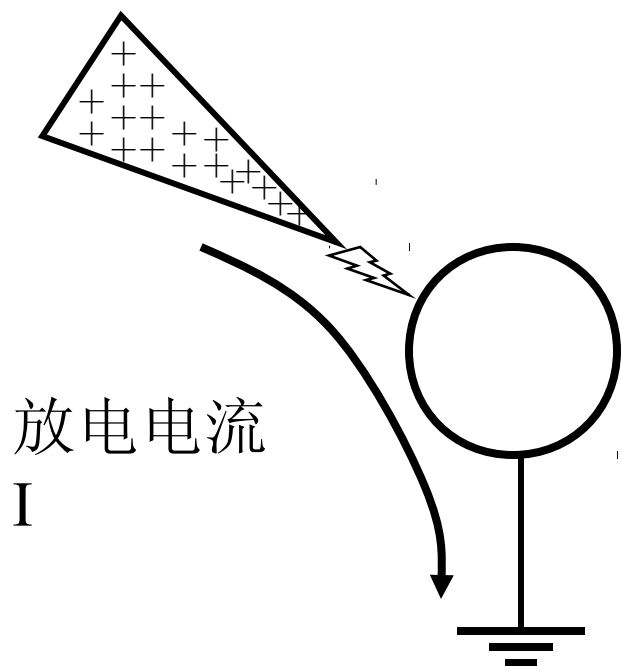
2002年4月

地线反弹与对策



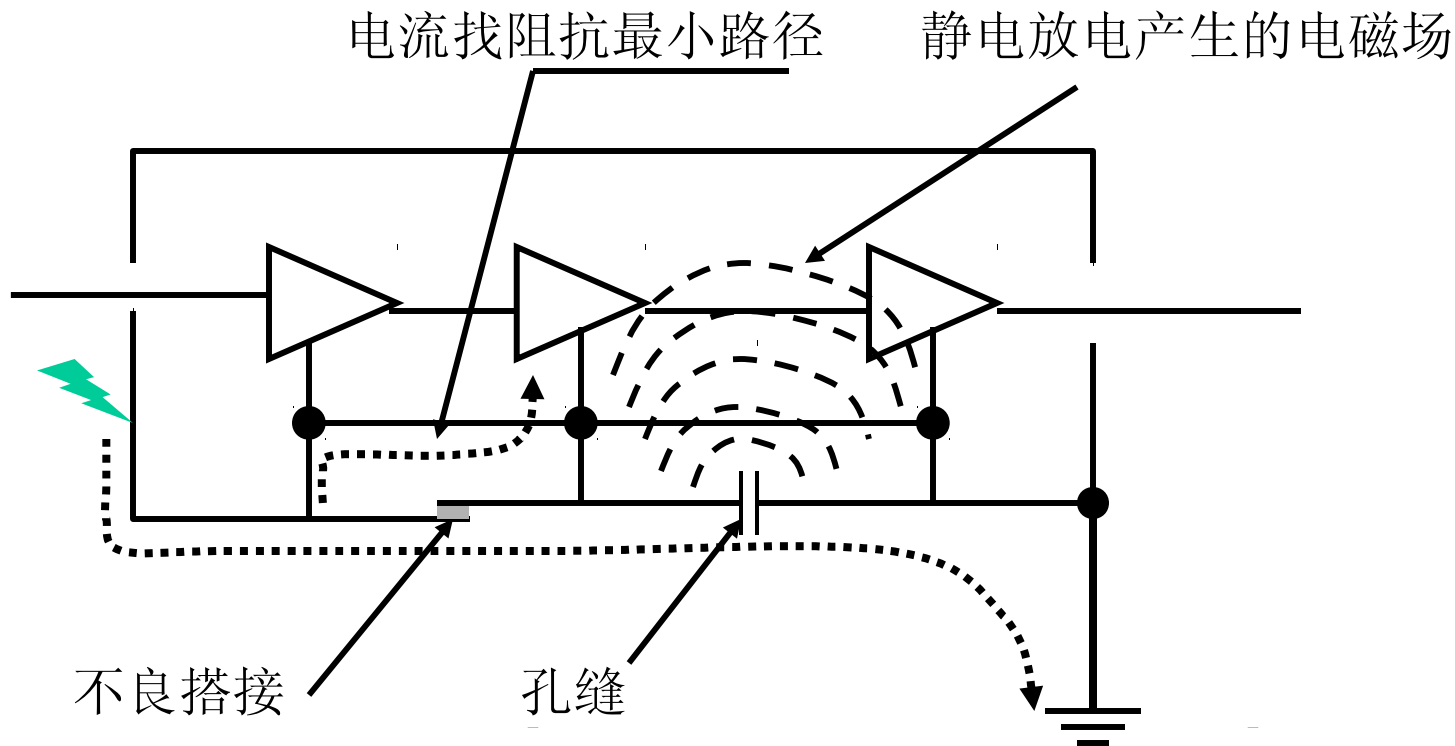
若电流为 5kA ，地线阻抗为 0.5Ω ，则反弹电压达到 2500V ！

静电放电现象

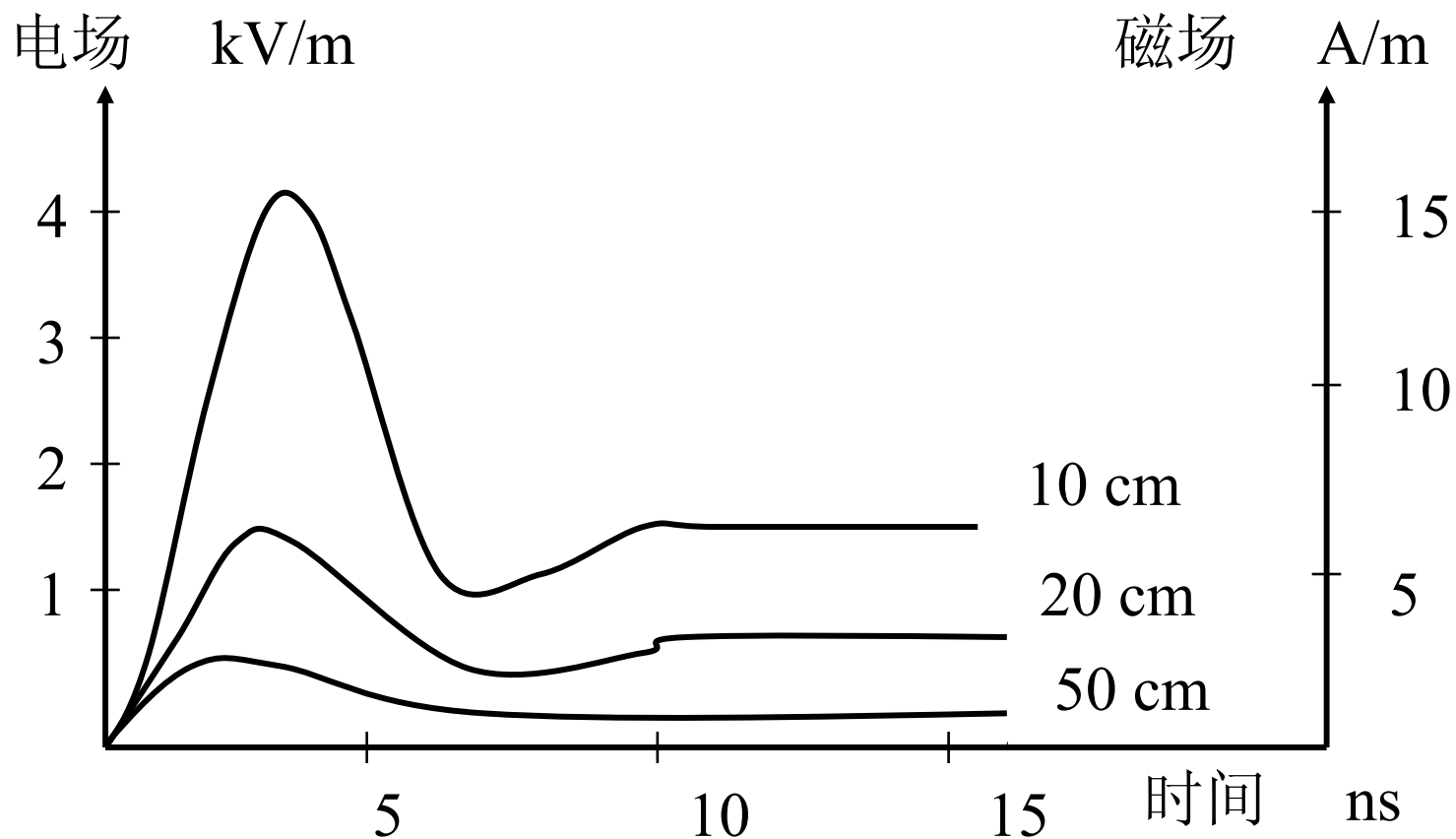


2002年4月

ESD 对电路工作影响的机理

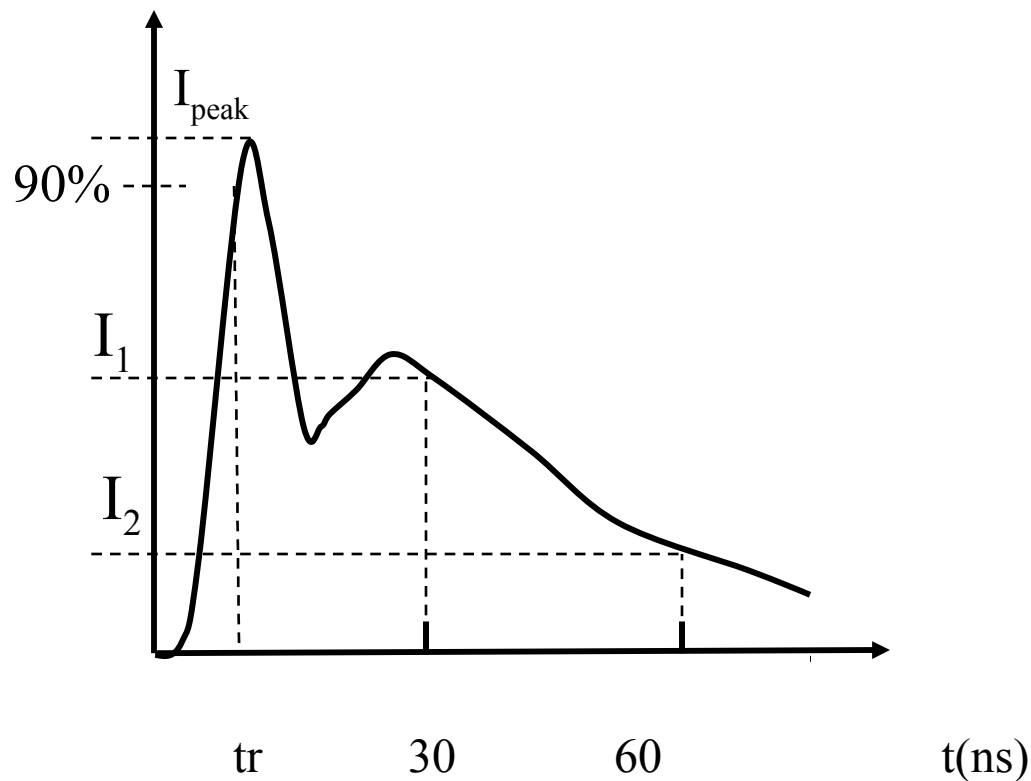
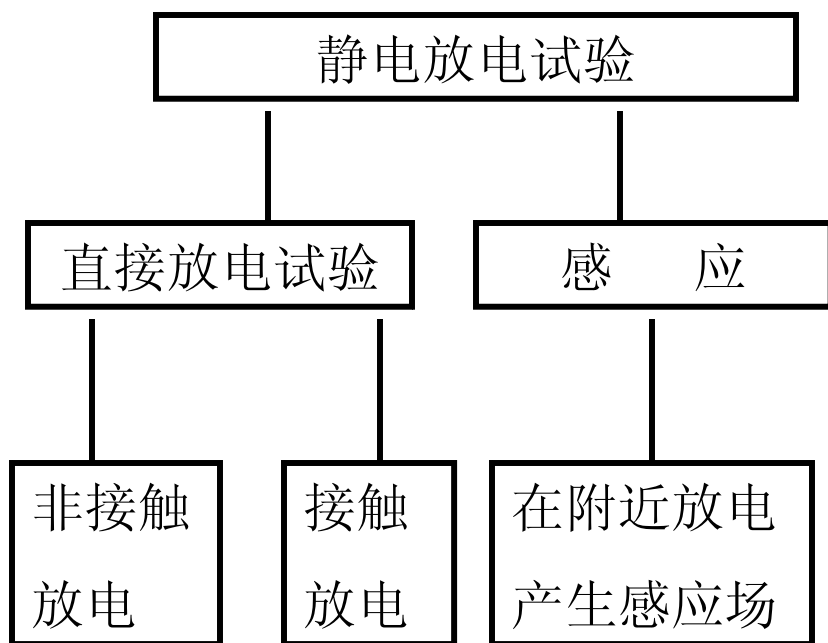


ESD 产生的电磁场



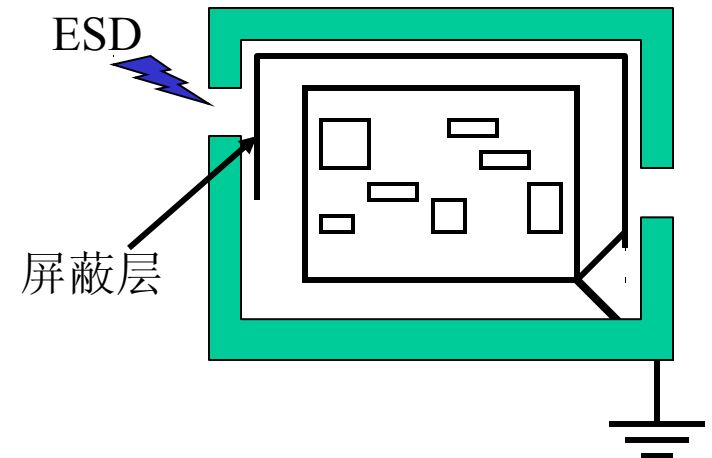
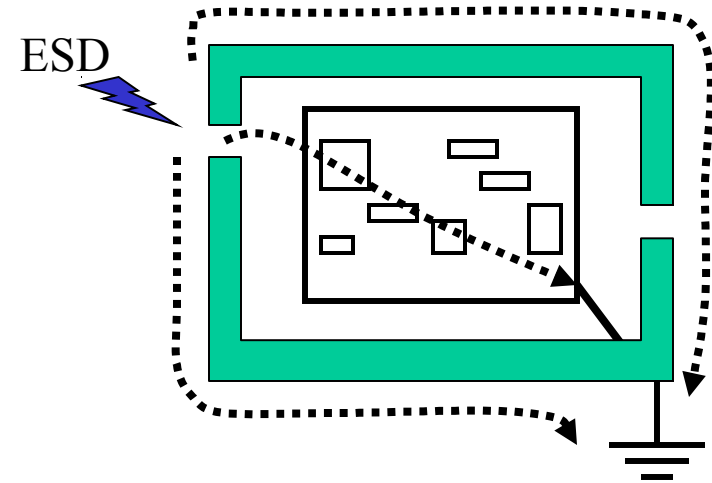
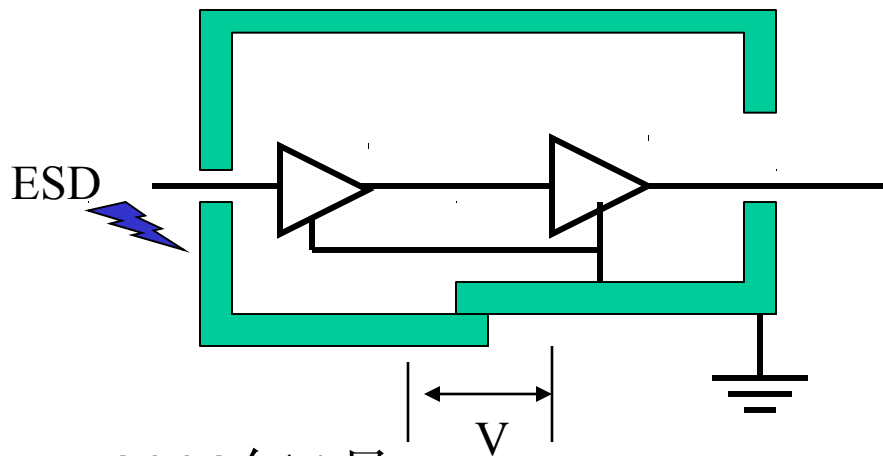
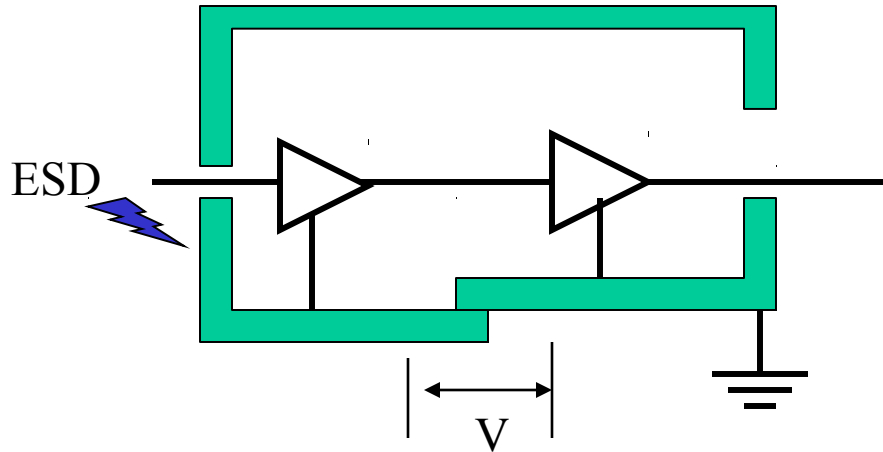
2002年4月

静电试验的方法



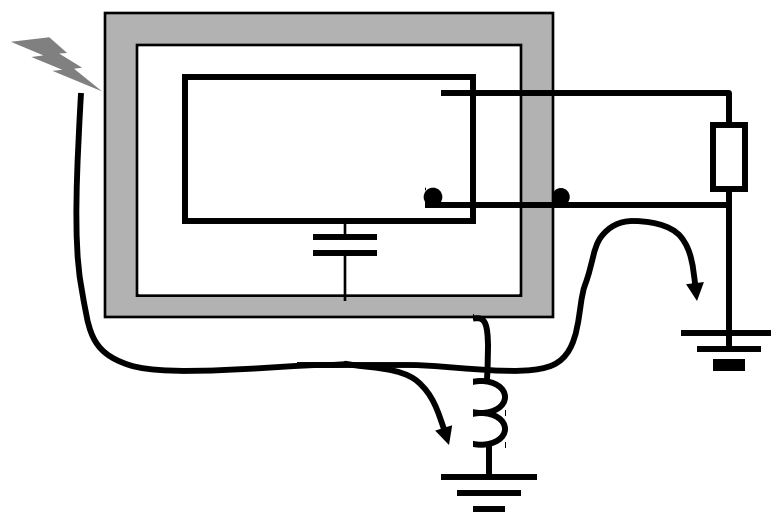
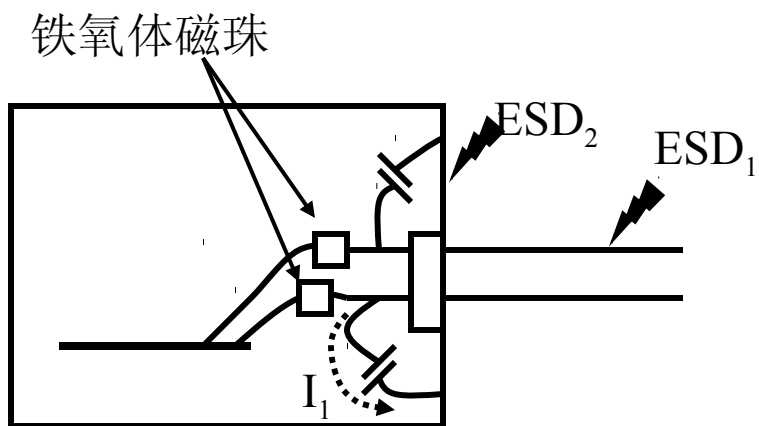
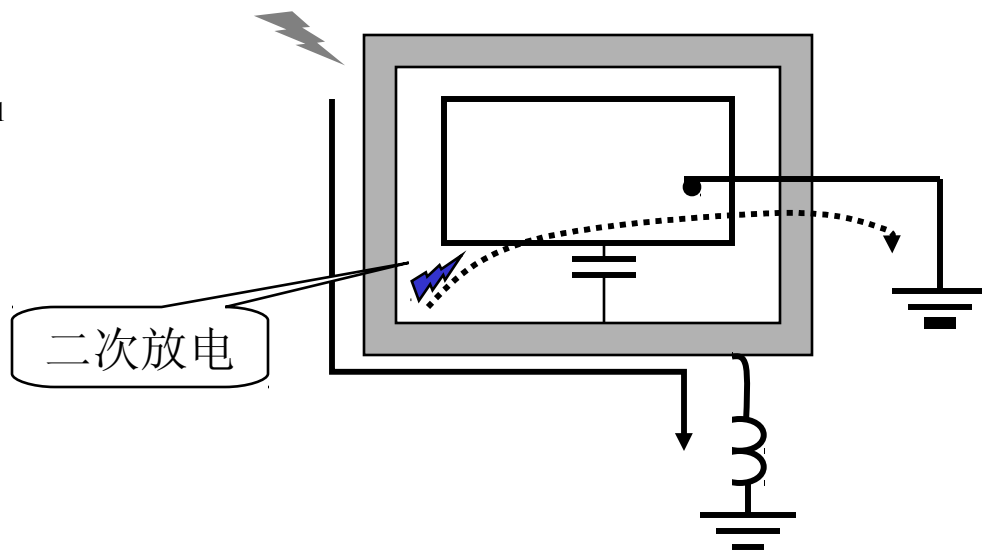
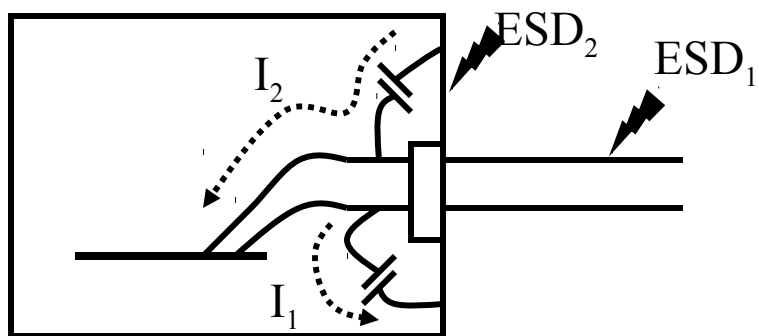
2002年4月

ESD 常见问题与改进



2002年4月

ESD 常见问题与改进



2002年4月

电缆上的 ESD 防护

