

## 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

杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

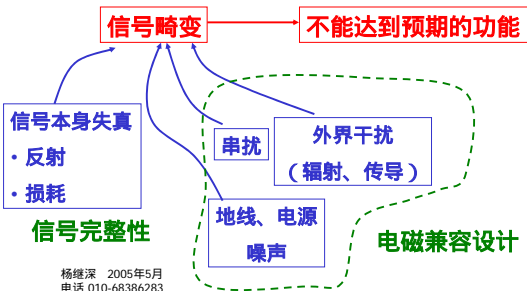
## 系统更加复杂，周期更短—必须掌握EMC

产品



杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 为什么要“调”电路



杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 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）

杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283



## 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
- 电缆设计
- 线路板设计

杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283




## 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

杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283



---

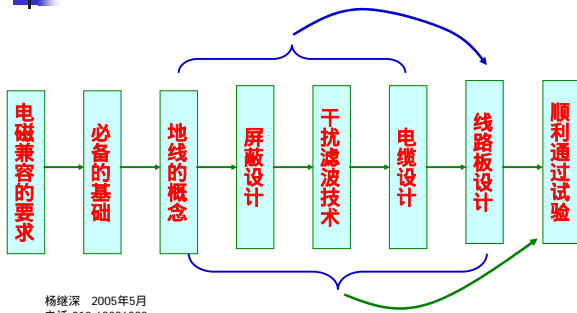
杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283



---

杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 学习的顺序



杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 使用教材



杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 第一章 基础知识

- 电磁兼容的三要素
- 电磁兼容标准
- 频域分析方法
- 电磁兼容试验
- 分贝的概念

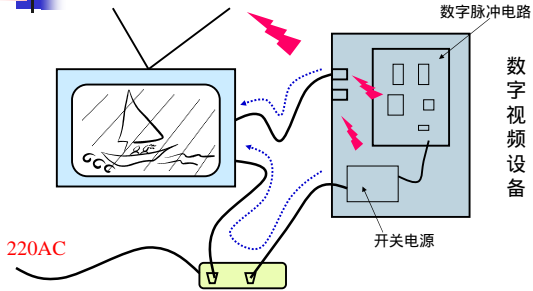
杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 第一章 基础知识

- 电磁兼容的三要素
- 电磁兼容标准
- 频域分析方法
- 电磁兼容试验
- 分贝的概念

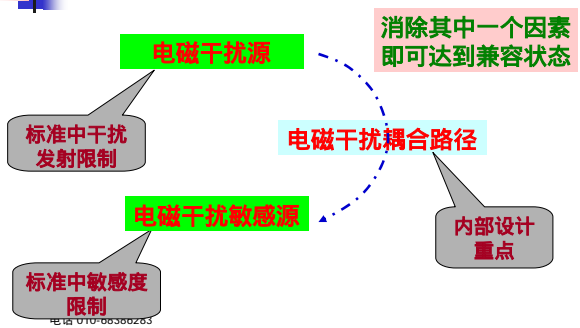
杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 典型的电磁兼容问题



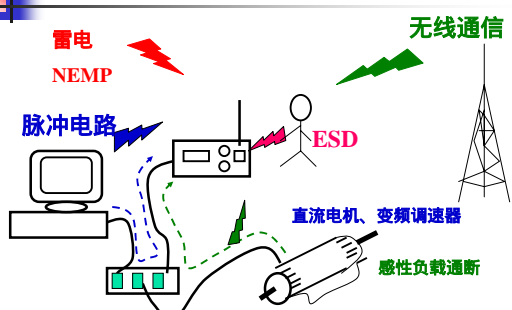
杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 构成电磁干扰的三个要素



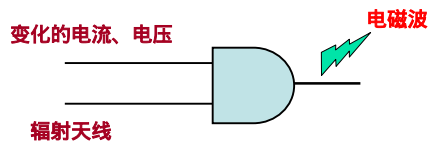
电话 010-68386283

## 常见干扰源



杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 电磁波辐射的两个条件



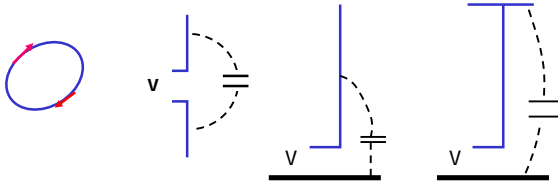
杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 基本天线结构

环天线

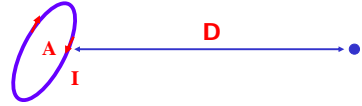
偶极天线

单极天线



杨维深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 环天线产生的辐射

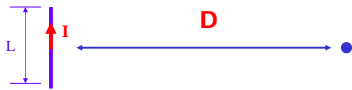


近场区内 ( $D < \lambda/2\pi$ ):  $H = IA / (4\pi D^3)$     A/m  
 $E = Z_0 IA / (2\lambda D^2)$     V/m

远场区内 ( $D > \lambda/2\pi$ ):  $H = \pi IA / (\lambda^2 D)$     A/m  
 $E = Z_0 \pi IA / (\lambda^2 D)$     V/m

杨维深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 导线的辐射

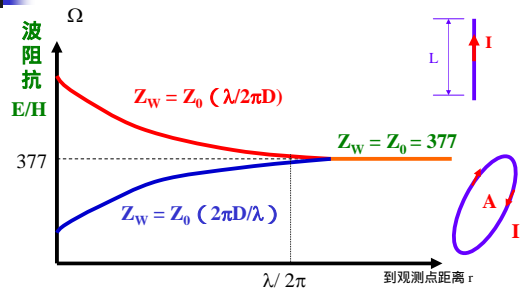


近场区内:  $H = I L / (4\pi D^2)$     A/m  
 $E = Z_0 I L \lambda / (8 \pi^2 D^3)$     V/m

远场区内:  $H = I L / (2\lambda D)$     A/m  
 $E = Z_0 I L / (2\lambda D)$     V/m

杨维深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 波阻抗的概念



杨维深 2005年5月  
电话 010-68386283

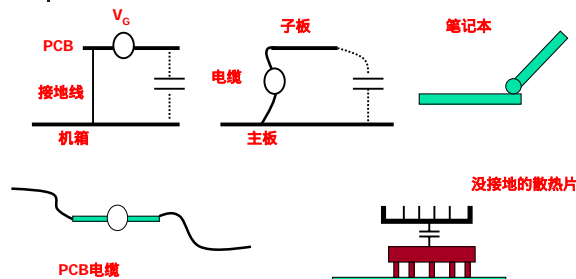
## 寄生天线

偶极天线：只要两个体之间存在电位差，就构成了偶极天线。

环天线：只要存在电流环路，就形成了一个环天线。

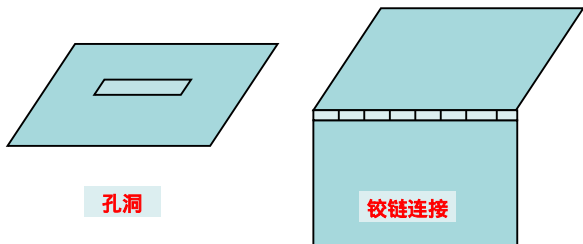
杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 常见等效偶极(单极)天线



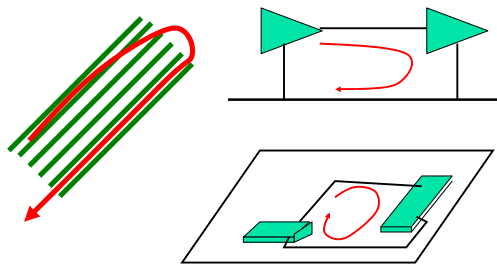
PCB电缆  
杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 结构件上的天线



杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 常见环天线



杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 敏感源

任何电路都可能成为敏感源：

- 数字电路抗干扰性较好
- 音频电路也会对射频信号敏感

## 电磁干扰耦合路径的种类

空间耦合

互感耦合

电容耦合

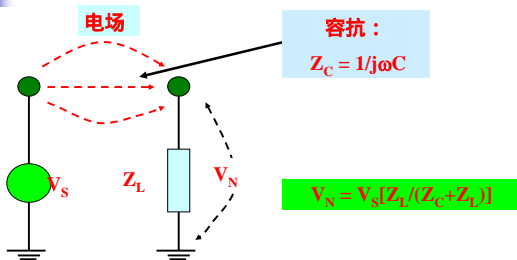
天线辐射

传导性耦合

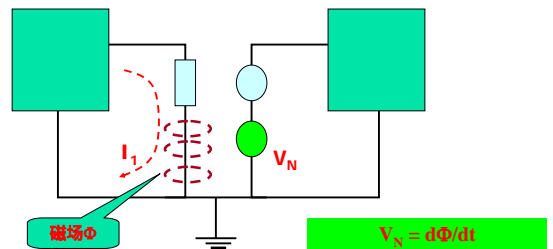
地线

电源

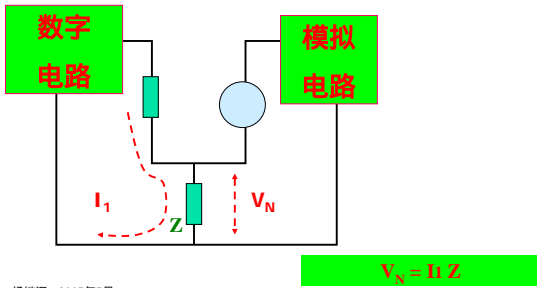
## 电容耦合



## 电感(互感)耦合

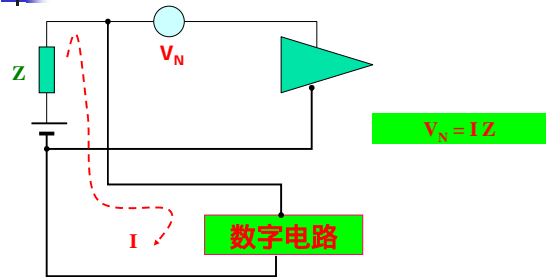


## 地线公共阻抗耦合



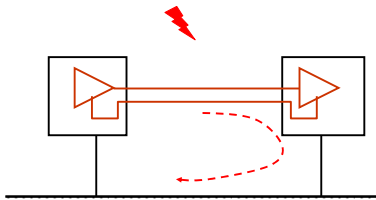
杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 电源线公共阻抗耦合



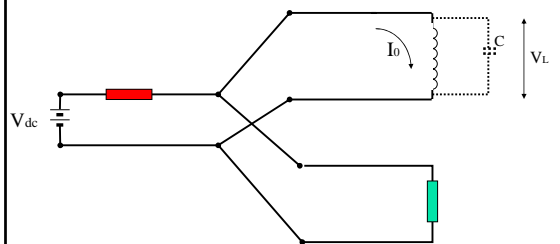
杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 电缆作为天线接收电磁波



杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

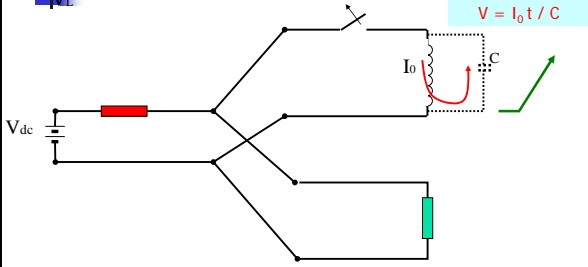
## 干扰实例：感性负载的干扰



杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

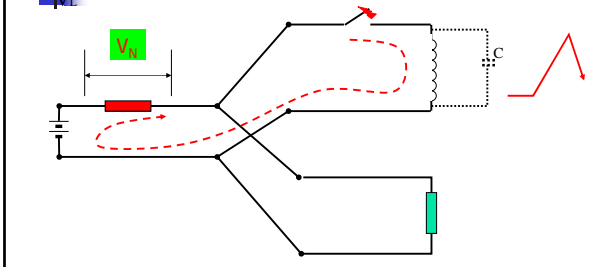


## 感性负载断开时电流流向



杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 开关触点被击穿的情况



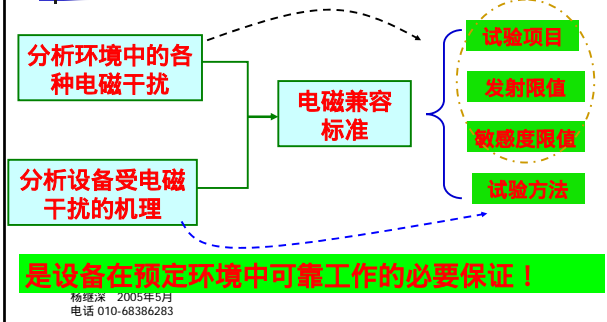
杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 第一章 基础知识

- 电磁兼容的三要素
- 电磁兼容标准
- 频域分析方法
- 电磁兼容试验
- 分贝的概念

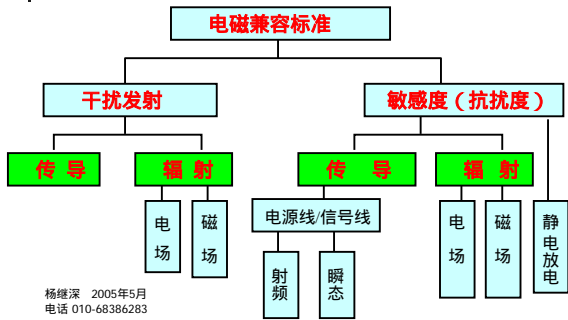
杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 电磁兼容标准的产生



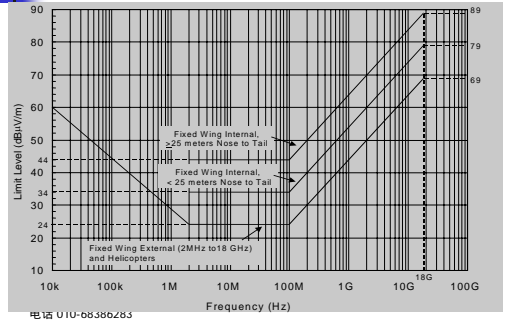
杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

# 电磁兼容标准的内容

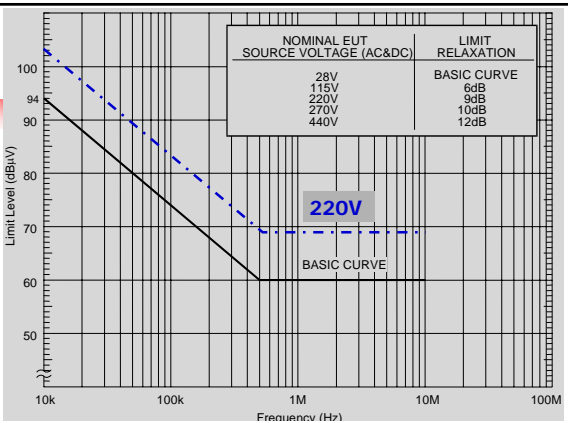


杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

# 频域中表示的辐射发射限值



电话 010-68386283



CE102 limit (EUT power leads, AC and DC) for all applications.

# 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, DOD	FCC Part × ×, MIL-STD. × ×
日本	VCCI	× VCCI
中国	质量技术监督局, 国防部门	GB × × × × - × × × × GJB × × × - × ×

杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 第一章 基础知识

- 电磁兼容的三要素
- 电磁兼容标准
- 频域分析方法
- 电磁兼容试验
- 分贝的概念

杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 频域分析

处理电磁干扰的问题必须熟悉频域分析：

- 电磁兼容标准中大部分指标都是在频域中表示的
- 对电磁干扰的各种措施都与频率有关
- 通过频率特征容易查找干扰源

杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 时域 — 频域变换



时域周期信号

付立叶级数

离散的谱线



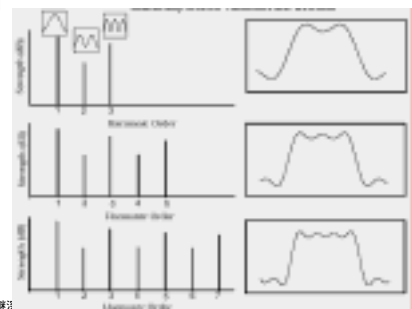
时域非周期信号

付立叶变换

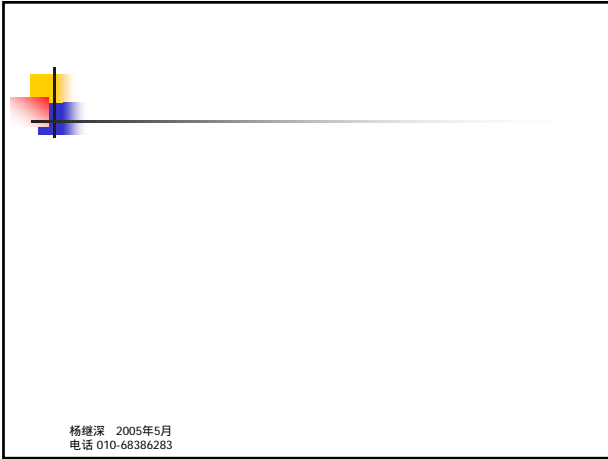
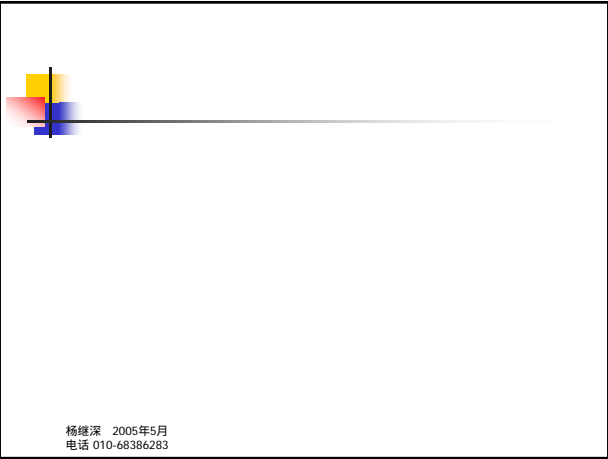
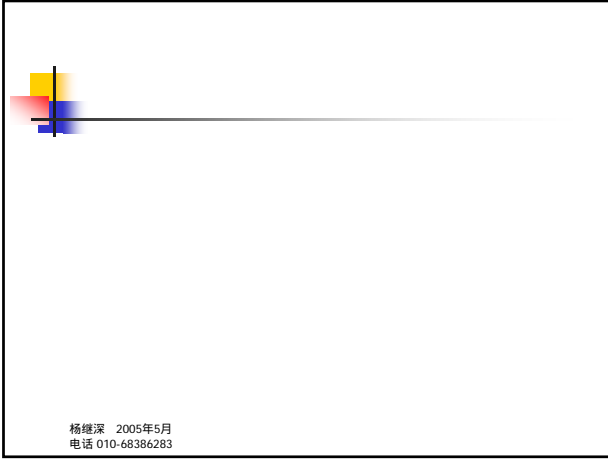
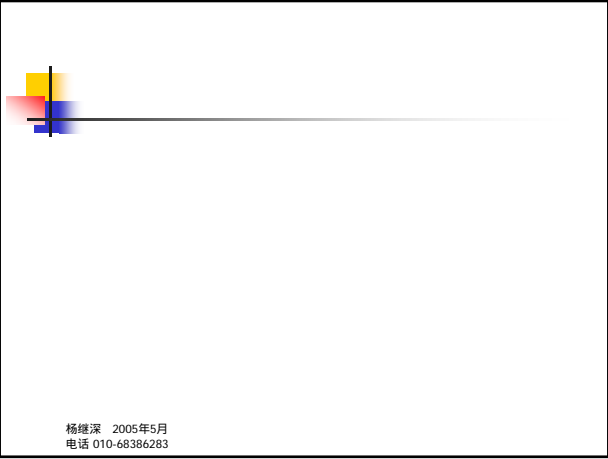
连续频谱

杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

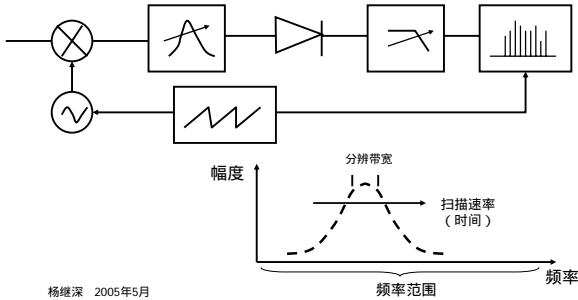
## 脉冲波形由正弦波组成



杨继深  
电话 010-68386283

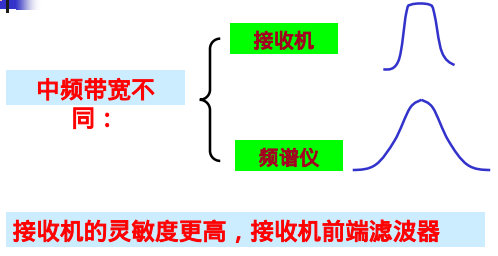


## 频谱分析仪



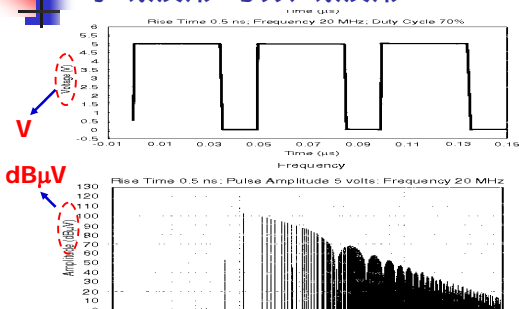
杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 频谱分析仪与电磁干扰接收机



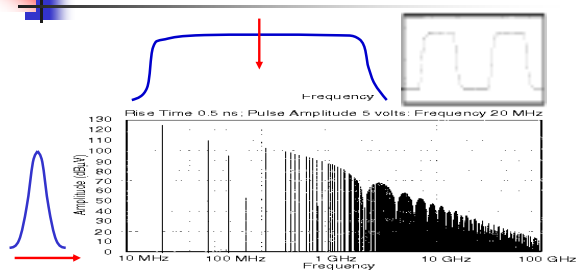
杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 时域波形与频域波形



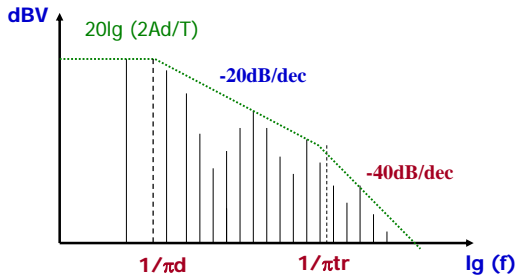
杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 频谱分析仪与示波器



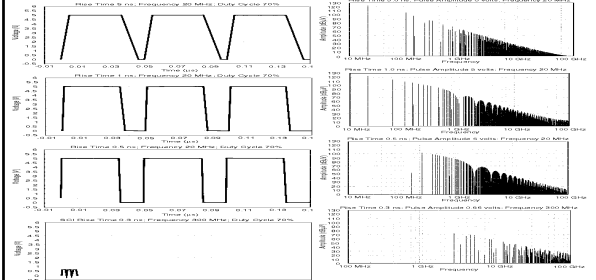
能否用示波器采集的波形作付立亚变换得到频谱, 取代频谱分析仪?  
电话 010-68386283

## 脉冲信号的频谱包络线



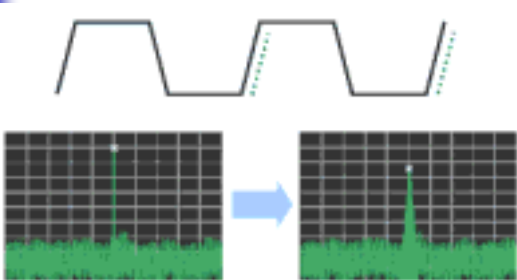
杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 上升沿越陡高频越丰富



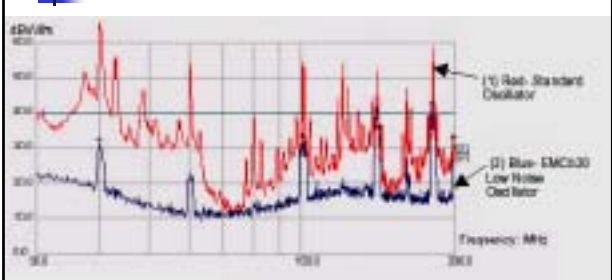
杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 扩谱时钟



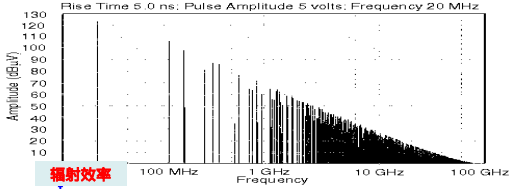
杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 扩频时钟的效果



杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 区分电流的频谱与辐射的频谱



辐射效率

杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 第一章 基础知识

- 电磁兼容的三要素
- 电磁兼容标准
- 频域分析方法
- 电磁兼容试验
- 分贝的概念

杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 电磁兼容试验的目的

了解设备在实际环境中的适应性



试验方法遵守一定的规则

取得相关的认证证书



试验方法比较随意，以容易通过为准则

杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 电磁兼容试验的原则之一

受试设备处于实际使用状态

- 所连接的外围设备
- 电缆的种类、布置、长度等
- 接地状态
- 软硬件的工作状态

杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 电磁兼容试验的原则之二

受试设备处于  
最坏状态

敏感度试验时处于最敏感状态

(例如：做电缆传导敏感度试验时，设备  
读取电缆上的数据)

发射试验时，处于最大发射状态

(例如：测量打印机辐射发射时，  
打印处于打印状态)

杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 电磁兼容试验的原则之三

采用最坏的数据

测量辐射发射时，找最大辐射面

天线极化方向改变，找最大值

杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 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

杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 辐射发射试验

目的：

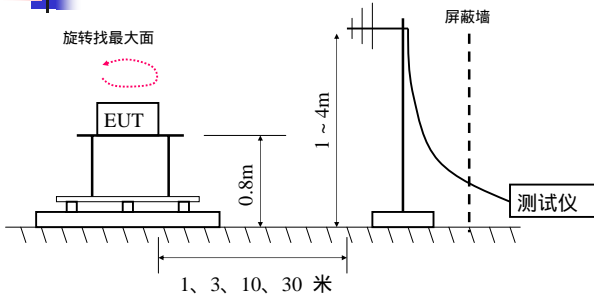
保证设备不会产生过强的辐射干扰，  
这种干扰会干扰邻近的无限接收设备

军标中：RE101, RE102

杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283



## 辐射发射测试



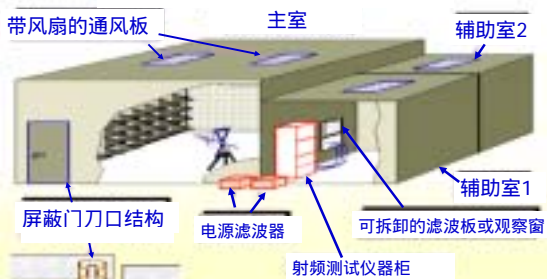
杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 开阔场实景



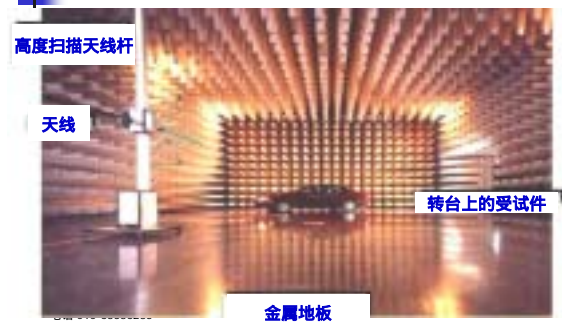
电话 010-68386283

## 电磁兼容试验室的结构



电话 010-68386283

## 半无反射室实景



金属地板

## 测量电磁干扰的天线



杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 辐射敏感度（抗扰度）试验

目的：

检验设备是否会受到空间干扰的影响

军标中：RS106

杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 抗扰度试验



杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 传导发射试验

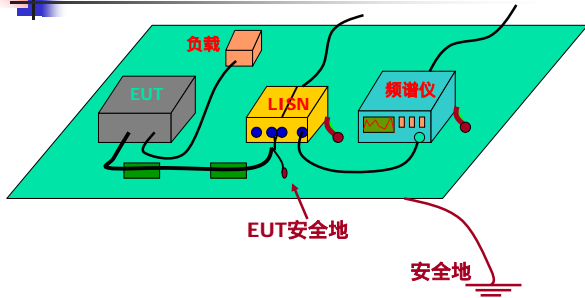
目的：

检验设备是否通过电源线发射过强的干扰

军标中：CE101, CE102

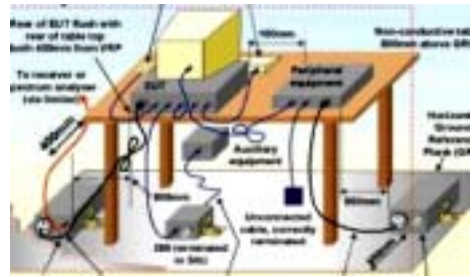
杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 传导发射测量



杨维深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 传导发射测试



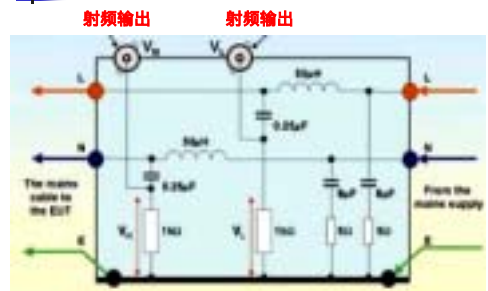
杨维深 2005年5月  
电话 010-68386283

## LISN或AMN



杨维深 2005年5月  
电话 010-68386283

## LISN的电路



杨维深 2005年5月  
电话 010-68386283

注意避免高压损坏仪器

## 浪涌抗扰度试验

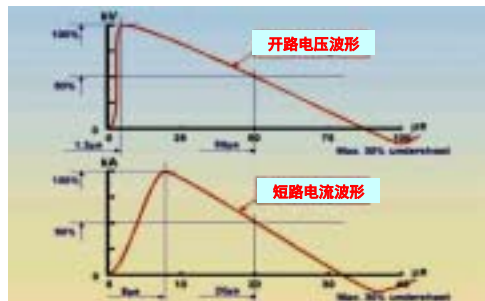
目的：

检验设备在雷电环境中能否正常工作

军标中：CS106, CS116

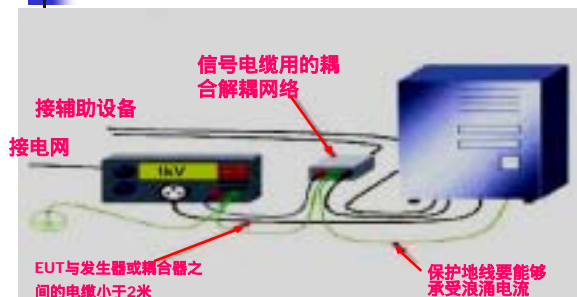
杨维深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 浪涌（模拟雷电干扰）试验波形



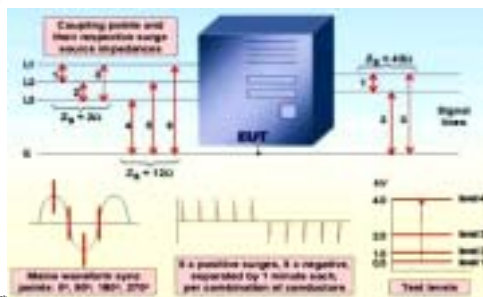
杨维深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 浪涌试验装置



杨维深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 浪涌试验内容



杨维深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 电快速脉冲试验

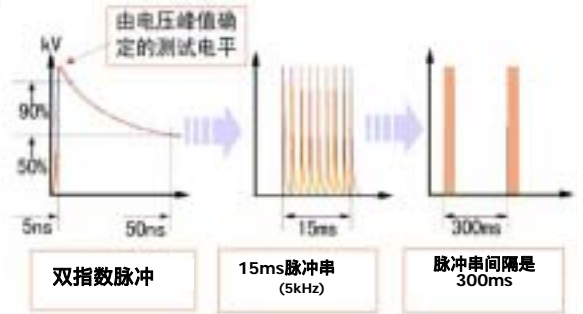
目的：

检验设备是否能抵抗临近电感性负载  
断开时产生的干扰

军标中：CS114

杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

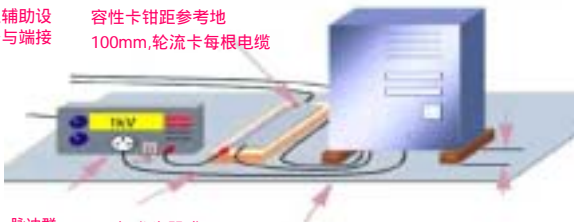
## 电快速脉冲（EFT或FTB）试验波形



## 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

参考地平面的每个边  
要超出EUT100mm并  
与大地相连

EUT与参考地平面  
之间的距离大于  
100mm

杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

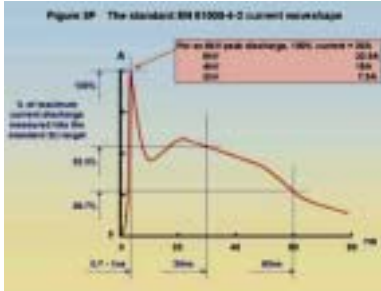
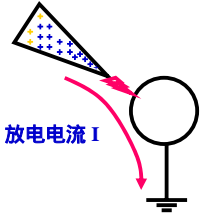
## 静电放电试验

目的：

检验设备是否能抵抗静电放电产生的  
干扰

杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

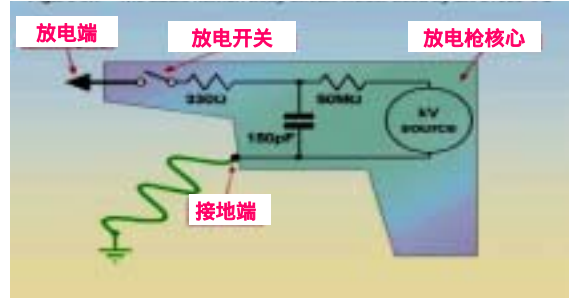
## 静电放电



杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 静电枪电原理路

人体模型电路



## 静电放电试验装置



对于落地设备, 水平耦合板=垂直耦合板, EUT放在100mm厚的绝缘板上

## 第一章 基础知识

- 电磁兼容的三要素
- 电磁兼容标准
- 频域分析方法
- 电磁兼容试验
- 分贝的概念

杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 分贝(dB) 的概念

分贝的定义：分贝数 =  $10\lg \frac{P_2}{P_1}$

$P_1$ 、 $P_2$  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 =  $20\lg \frac{V_2}{V_1}$

电流增益的分贝数 =  $20\lg \frac{I_2}{I_1}$

杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 用分贝表示的物理量

**电压**：用1V、1mV、1 $\mu$ V为参考（例如：1 $\mu$ V = 0dB $\mu$ V）  
则单位为：dBV、dBmV、dB $\mu$ V等，

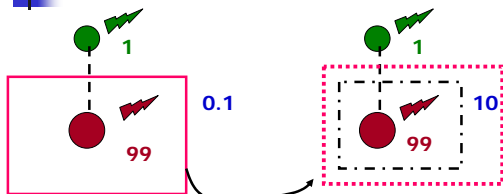
**电流**：用1A、1mA、1 $\mu$ A为参考，则：dBA、dBmA、dB $\mu$ A

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

**功率**：用1W、1mW为参考，则：dBW、dBm等，

杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

## “分贝”仅表示相对概念



$SE = 20\lg(100/1.1) \approx 40\text{dB}$

$SE = ?$

如果把绿色辐射体去掉，屏蔽体的屏蔽效能是多少？

杨继深 2005年5月  
电话 010-68386283

## 射频和天线设计培训课程推荐

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,致力并专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;我们于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

易迪拓培训推荐课程列表: <http://www.edatop.com/peixun/tuijian/>



### 射频工程师养成培训课程套装

该套装精选了射频专业基础培训课程、射频仿真设计培训课程和射频电路测量培训课程三个类别共 30 门视频培训课程和 3 本图书教材;旨在引领学员全面学习一个射频工程师需要熟悉、理解和掌握的专业知识和研发设计能力。通过套装的学习,能够让学员完全达到和胜任一个合格的射频工程师的要求...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/110.html>

### 手机天线设计培训视频课程

该套课程全面讲授了当前手机天线相关设计技术,内容涵盖了早期的外置螺旋手机天线设计,最常用的几种手机内置天线类型——如 monopole 天线、PIFA 天线、Loop 天线和 FICA 天线的设计,以及当前高端智能手机中较常用的金属边框和全金属外壳手机天线的设计;通过该套课程的学习,可以帮助您快速、全面、系统地学习、了解和掌握各种类型的手机天线设计,以及天线及其匹配电路的设计和调试...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/133.html>



### WiFi 和蓝牙天线设计培训课程

该套课程是李明洋老师应邀给惠普 (HP) 公司工程师讲授的 3 天员工内训课程录像,课程内容是李明洋老师十多年工作经验积累和总结,主要讲解了 WiFi 天线设计、HFSS 天线设计软件的使用,匹配电路设计调试、矢量网络分析仪的使用操作、WiFi 射频电路和 PCB Layout 知识,以及 EMC 问题的分析解决思路等内容。对于正在从事射频设计和天线设计领域工作的您,绝对值得拥有和学习! ...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/134.html>





## CST 学习培训课程套装

该培训套装由易迪拓培训联合微波 EDA 网共同推出,是最全面、系统、专业的 CST 微波工作室培训课程套装,所有课程都由经验丰富的专家授课,视频教学,可以帮助您从零开始,全面系统地学习 CST 微波工作的各项功能及其在微波射频、天线设计等领域的设计应用。且购买该套装,还可超值赠送 3 个月免费学习答疑...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/24.html>



## HFSS 学习培训课程套装

该套课程套装包含了本站全部 HFSS 培训课程,是迄今国内最全面、最专业的 HFSS 培训教程套装,可以帮助您从零开始,全面深入学习 HFSS 的各项功能和在多个方面的工程应用。购买套装,更可超值赠送 3 个月免费学习答疑,随时解答您学习过程中遇到的棘手问题,让您的 HFSS 学习更加轻松顺畅...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/11.html>

## ADS 学习培训课程套装

该套装是迄今国内最全面、最权威的 ADS 培训教程,共包含 10 门 ADS 学习培训课程。课程是由具有多年 ADS 使用经验的微波射频与通信系统设计领域资深专家讲解,并多结合设计实例,由浅入深、详细而又全面地讲解了 ADS 在微波射频电路设计、通信系统设计和电磁仿真设计方面的内容。能让您在最短的时间内学会使用 ADS,迅速提升个人技术能力,把 ADS 真正应用到实际研发工作中去,成为 ADS 设计专家...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/ads/13.html>



### 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年,10 多年丰富的行业经验,
- ※ 一直致力并专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 经验丰富的一线资深工程师讲授,结合实际工程案例,直观、实用、易学

### 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>