

电磁兼容 Advanced EMC

何金良

 清华大学电机系高压研究所
电磁环境技术研究室

 +62784709 , 13601024327

 hejl@tsinghua.edu.cn



清华大学

第1讲 电磁兼容导论

1.1 电磁兼容名词术语及单位

1.2 电磁干扰的危害

1.3 电磁兼容研究内容

1.4 电磁兼容的历史及发展

1.5 电磁兼容性设计的重要性

1.6 国际有关EMC组织

电磁兼容相关书籍

习题



清华大学

第1讲 电磁兼容导论

讲义下载及作业提交网址：

166.111.63.4:1021

登录用户名：**emc**

密码：**303**



清华大学

1.0 引言

- 继水质污染、大气污染、噪声污染之后，电磁污染已被世界公认为第四大污染
- 电磁环境一旦受到严重污染则会带来一系列经济和社会问题，治理恢复则非常困难
- 1975年专家曾预言，随着城市人口的迅速增长，汽车、电子、通信、计算机与电气设备大量进入家庭，空间人为电磁能量每年增长7% - 14%
 - ◆ 25年后环境电磁能量密度最高可增加26倍，50年可增加700倍，21世纪电磁环境恶化已成定局



1.0 引言

- 频率范围：0 ~ 400GHz
- 研究对象：除传统设施外，涉及芯片级，直到各型舰船、航天飞机、洲际导弹，甚至整个地球的电磁环境
- 各国都注重EMC教育和培训及学术交流，以1994年为例，就举办了25次国际性的一流学术交流会和培训班
- 研究的热点已涉及社会许多方面，如计算机安全、电信设备电磁兼容、航空航天、武器系统、电磁场生物效应、地震电磁现象



1.0 引言

- 各国已陆续取得不少成果
- 我国对电磁环境学重要性的认识还很不够，目前仅有少数单位从事相关研究
- 随着现代科学技术的发展，电磁环境日益复杂
- 恶劣的电磁环境还会对人类及生态产生不良的影响
- 电磁兼容学正是为解决这类问题而迅速发展起来的一门新兴学科



1.1 电磁兼容名词术语及单位

- **电磁兼容 Electromagnetic Compatibility**
 - ◆ **Bernhard Keiser**：设备不相互干扰，都能正常工作
 - ◆ **国际电工委员会(IEC)、美国国防部、IEEE**等的名词标准字典都对EMC下了定义
 - ◆ **EMC学科领域范围日益扩大，现已不只限于电子设备本身，还涉及到电磁污染、电磁饥饿等一系列生态效应问题以及其他多方面的问题，“电磁兼容”一词似已不能包含EMC学科的全部内容**



1.1 电磁兼容名词术语及单位

- **电磁兼容** Electromagnetic Compatibility
 - ◆ 日本：EMC是一门独立的学科，随着电磁能量利用的发展，它将研究、预测并控制变化着的地球和天体周围的电磁环境、为了协调环境所采取控制方法、各项电气规程的制定以及电磁环境的协调和电磁能量的合理应用等。
 - ◆ 环境电磁学、电磁环境学



电磁兼容 Electromagnetic Compatibility

- ◆ 对一门学科、一个领域、一个工业或技术范围来讲，应译为“电磁兼容”，反映整整一个领域，而不仅仅是单项技术指标
- ◆ 对于设备、分系统、系统的性能参数来说，则应译为“电磁兼容性”



电磁兼容

- ◆ **GB/T 4365-1995《电磁兼容术语》**：设备或系统在其电磁环境中能正常工作且不对该环境中任何事物构成不能承受的电磁骚扰的能力
 - ✓ 等同采用IEC60050《电磁兼容术语》
- ◆ 电磁兼容是研究在有限的空间、有限的时间、有限的频谱资源条件下，各种用电设备(分系统、系统，广义的还包括生物体)可以共存并不致引起降级的一门科学



电磁兼容

基本要素：空间、时间、频谱

■ 例：航空母舰

- ✓ 空间位置有限：如美国尼米兹(NIMITZ)航空母舰长332.9m，宽48m，甲板上下需装设各种收、发信机数十部、各种天线数十付，还有其他各种用电设备
- ✓ 时间：全天24小时，所有的设备与分系统都需要在这些时间内工作，作战时，几乎所有的设备都进入工作状态
- ✓ 频谱：现在由国际电联(ITU)已经规划的可以利用的无线电频谱在10kHz~400GHz之间，频率再低则进入音频，而再高则进入光波，任何一种无线电业务都脱离不开这一频谱范围



电磁环境

Electromagnetic environment (EME)

- 存在于给定场所的所有电磁现象的总和。“给定场所”即“空间”；“所有电磁现象”包括了全部“时间”与全部“频谱”
- IEEE定义:一个设备、分系统或系统在完成其规定任务时可能遇到的辐射或传导电磁发射电平在各个不同频段内的功率与时间分布。即存在于一个给定位置的电磁现象的总和。电磁环境有时可用场强表示



电磁环境效应EME effects (E3)

- 电磁环境对电子或电气系统、设备或装置的工作性能的影响。包括所有电磁学科：
 - ◆ 电磁兼容；
 - ◆ 电磁干扰；
 - ◆ 电磁易损性；
 - ◆ 电磁脉冲；
 - ◆ 电子系统抗干扰对策；
 - ◆ 电磁辐射对军火及易挥发物的危害



过电压 Overvoltage

- 超过额定电压的电压



(电磁)发射(electromagnetic) emission

- 从源向外发出电磁能的现象
 - ◆ 包含传导发射、辐射发射，是无意的，而通信中的发射主要指辐射发射



噪声(Noise)

- 影响信号并可能使信号携带的信息产生畸变的一种干扰
 - ◆ 电路中除希望信号以外的任何电信号，均定义为噪声
 - ◆ 由电路非线性导致的失真电信号，虽然也不是人们希望的信号，但是它不称为噪声，属于电路设计问题



干扰(Interference)

- 由于一种或多种发射、辐射、感应或其组合所产生的无用能量对电子设备的接收产生的影响，其表现为性能下降，误动或信息丢失，严重时出现设备损坏，如不存在这种无用能量则此后果可以避免
 - ◆ 由噪声导致的不希望的结果称之为干扰
 - ◆ 噪声和干扰的区别：噪声是原因，干扰是后果；噪声是无法消除的，它只能被削弱到一定程度，直到它不产生干扰



敏感度(Susceptibility)

- 一台设备或一个电路承受噪声能量的能力



(性能)降低 degradation (of performance)

- 装置、设备或系统的工作性能与正常性能的非期望偏离
- 此种非期望偏离(指向坏的方向偏离)并不意味着一定会被使用者觉察，但也应视为性能降低。
- 举例
 - ◆ 一个接收灵敏度指标为 1mV 的手机，在可以使天线终端获得 10mV 的有用信号场中工作正常
 - ◆ 若由于某种电磁干扰(例如大干扰信号阻塞)使该手机的灵敏度坏至 5mV ，此时应视为该机工作性能已降低，但使用者并不会觉察到通信质量下降。因其工作地点的场强足够强，使送至接收机的信号($10\mu\text{V}$)仍大于已受干扰的、灵敏度已下降的接收机的要求(5mV)的缘故



电磁骚扰(electromagnetic disturbance)

- 任何可能引起装置、设备或系统性能降低或对有生命或无生命物质产生损害作用的电磁现象
 - ◆ 电磁骚扰可能是电磁噪声、无用信号或传播媒介自身的变化
 - ◆ 进入九十年代，IEC 60050(161) 扩大了电磁骚扰的范畴，过去仅指电磁噪声。现在电磁骚扰还包括了无用信号
 - ◆ 例1：对于受寻呼台干扰的电视频道而言，该寻呼台信号对寻呼系统是有用信号，但对被干扰的电视频道则为无用信号。
 - ◆ 例2：此外电磁骚扰还包括了传播媒介自身的变化，这属于无源骚扰。对短波通信电离层的变化；对微波通信空气中雨、雾的影响等



电磁干扰 electromagnetic interference

- 电磁骚扰引起的设备、传输通道或系统性能的下降
 - ◆ 电磁骚扰仅仅是电磁现象，即指客观存在的一种物理现象；它可能引起降级或损害，但不一定已经形成后果。
 - ◆ 电磁干扰是由电磁骚扰引起的后果
 - ◆ 过去在术语上并未将物理现象与其造成的后果划分明确，统称为干扰(interference)
 - ◆ 进入九十年代，IEC 60050(161)于1990年发布后，才明确引入了disturbance这一术语，为了与过去惯用的干扰一词明确分开，中译文称之为“骚扰”



无用信号 unwanted signal, undesired signal

- 可能损害有用信号接收的信号
- 干扰信号 (interfering signal) : 损害有用信号接收的信号
 - ◆ 无用信号在某些条件下还是有用的无害的
 - ◆ 而干扰信号任何情况下都是有害的
 - ◆ 过去认为“干扰”与“信号”是一个对立面，信号是有用的，干扰是有害的。但根据新的国家标准，信号可以是有用的，也可以是无用的；可以是无害的，也可能是有害的。取决于它的定语



(对骚扰的)抗扰度 immunity (to a disturbance)

- ▶ 装置、设备或系统面临电磁骚扰不降低运行性能的能力
 - ◆ 在GB/T4365-1995中将immunity译为“抗扰性”，根据多数专家意见，认为译为“抗扰度”更合适
- ▶ (电磁)敏感性 (electromagnetic) susceptibility (EMS)：在存在电磁骚扰的情况下，装置、设备或系统不能避免性能降低的能力
 - ◆ 敏感性高，抗扰度低
 - ◆ 二者从不同的角度反应装置、设备或系统的抗干扰的能力
 - ◆ 军用标体系常用敏感性这一术语；而民用标准体系惯用抗扰度一词



(时变量的)电平 level (of time varying quantity)

- 用规定方式在规定时间间隔内求得的诸如功率或场参数等时变量的平均值或加权值
 - ◆ 电平可用对数来表示，例如相对某一参考值的分贝数
 - ◆ level一词，在强电领域习惯译为“水平”，如“lightning withstand level”译为“耐雷水平”
- 骚扰限值(允许值) limit of disturbance：对应于规定测量方法的最大电磁骚扰允许电平
 - ◆ 限值是人为制定的一个电平，在规定限值时一定需要规定测量方法。
 - ◆ “允许值”一词是我国过去对limit一词的译法。按国家标准，应首选“限值”这一译名



干扰限值(允许值) limit of interference

- 电磁骚扰使装置、设备或系统最大允许的性能降低
 - ◆ 干扰限值是性能降低的指标，而不是电磁现象的指标
- (电磁)兼容电平(EM) compatibility level：预期加在工作于指定条件的装置、设备或系统上规定的最大电磁骚扰电平
 - ◆ 电磁兼容电平并非绝对最大值，而可能以小概率超出



(骚扰源的)发射电平

emission level (of a disturbance source)

- ▶ 用规定的方法测得的由某一装置、设备或系统发射的某给定电磁骚扰电平
 - ◆ “某给定电磁骚扰”指的是某种电磁场的量，例如，功率、电压、场强、频率



(来自骚扰源的)发射限值

emission limit (from a disturbance source)

- 规定电磁骚扰源的最大发射电平
 - ◆ 此术语应按其解释去理解，也就是说，是人为规定的，而不是骚扰源本身的特性
- **发射裕量**emission margin：装置、设备或系统的电磁兼容电平与发射限值之间的差值



抗扰度电平immunity level

- 将某给定的电磁骚扰施加于某一装置、设备或系统而其仍能正常工作并保持所需性能等级时的最大骚扰电平
 - ◆ 超过此电平，该装置、设备或系统就会出现性能降低。
 - ◆ **敏感性电平**，是指刚刚开始出现性能降低的电平
 - ✓ 所以对某一装置、设备、或系统而言抗抗性电平与敏感性电平是同一个数值



抗扰度限值immunity limit

- 规定的最小抗扰度电平
 - ◆ “限值”是人为规定的参数，而“电平”是装置、设备或系统本身的特性

抗扰度裕量immunity margin :

- 装置、设备或系统的抗扰度限值与电磁兼容电平之间的差值



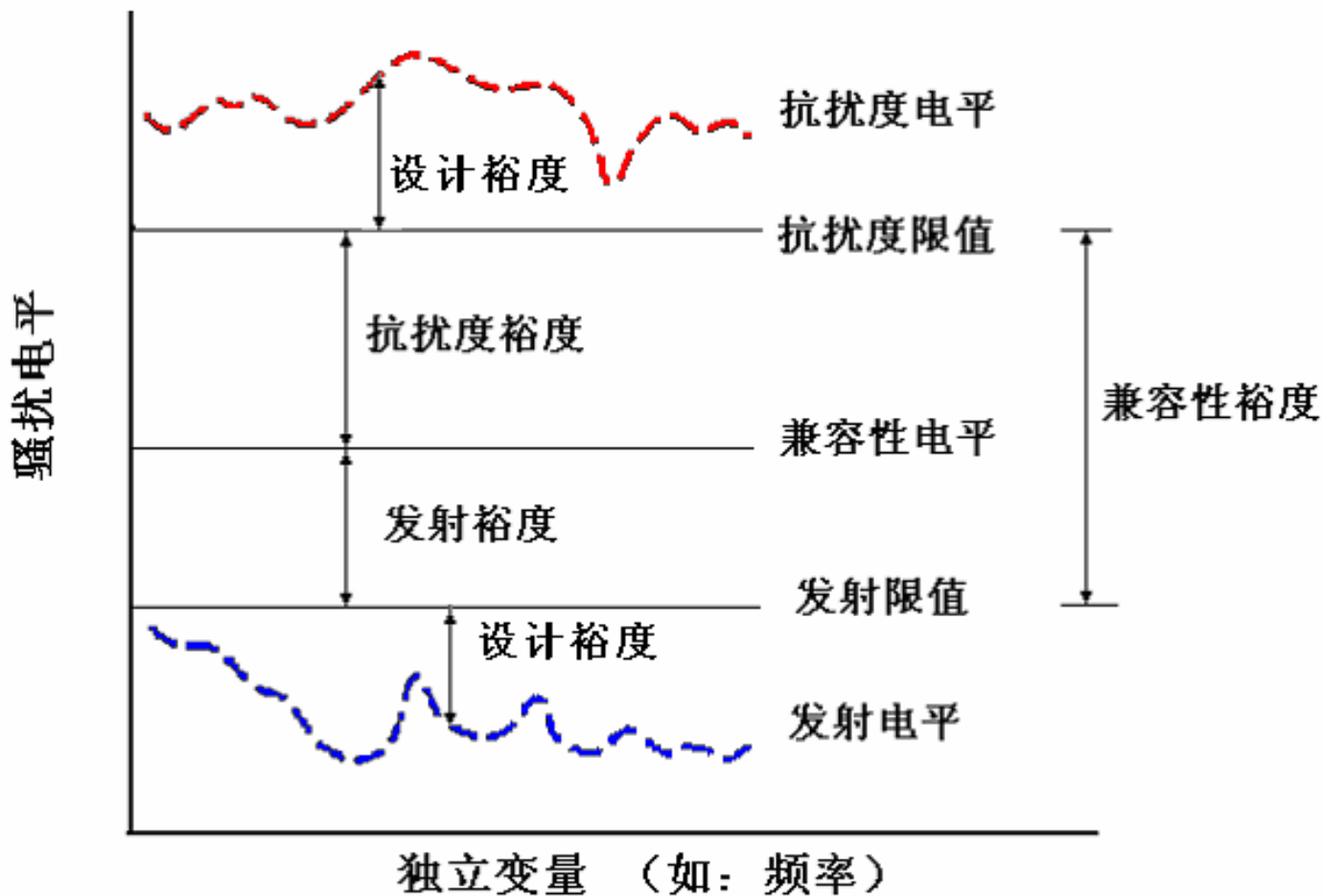
(电磁)兼容裕量

(electromagnetic) compatibility margin

- 装置、设备或系统的抗扰度电平与骚扰源的发射限值之间的差值



发射/抗扰度限值、兼容电平



分贝的概念

$$\text{分贝数} = 10 \lg \frac{P_2}{P_1}$$

$$\text{电压增益分贝数} = 20 \lg \frac{V_2}{V_1}$$

$$\text{电流增益分贝数} = 20 \lg \frac{I_2}{I_1}$$

➤ 用分贝表示功率、电压和电流的绝对值

$$dBmW = 10 \lg \frac{P}{1mW}$$

$$dBmW = 10 \lg \frac{P}{1mW}$$

$$dBW = 10 \lg \frac{P}{1W}$$



分贝的应用

一个设备在进行辐射发射试验时发现在某个频率上有超标发射，经过分析有五个地方可能是泄漏源

- ◆ 去掉一个泄漏源：辐射改善

$$201g[1/(4/5)]=1.9 \text{ dB}$$

- ◆ 去掉两个泄漏源：辐射改善

$$201g[1/(3/5)]=4.4 \text{ dB}$$

- ◆ 去掉三个泄漏源：辐射改善

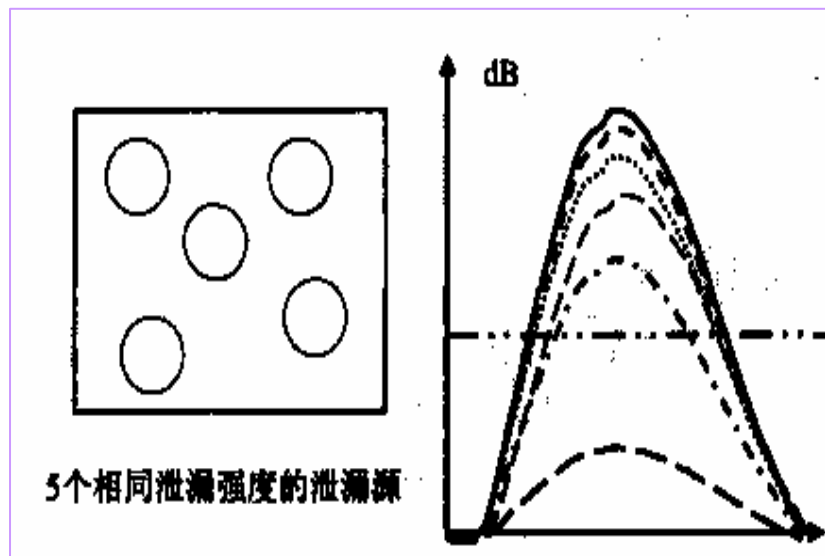
$$201g[1/(2/5)]=7.9 \text{ dB}$$

- ◆ 去掉四个泄漏源：辐射改善

$$201g[1/(1/5)]=13.9 \text{ dB}$$

- ◆ 去掉五个泄漏源：辐射改善

$$201g[1/(0/5)]=\infty \text{ dB}$$



1.2 电磁干扰的危害

- 电子设备对EMC的耐受能力
 - ◆ 与暂态电压有关的绝缘耐受能力
 - ◆ 按照电压、电流和频率，根据信号水平确定的干扰耐受能力
 - ◆ 设备承受信号频率范围以外的干扰频率的耐受能力
- 一般的机电设备、甚至电子设备声称的绝缘耐受能力为2kV
- 耐受能力与频率、耐受时间、波形等有关

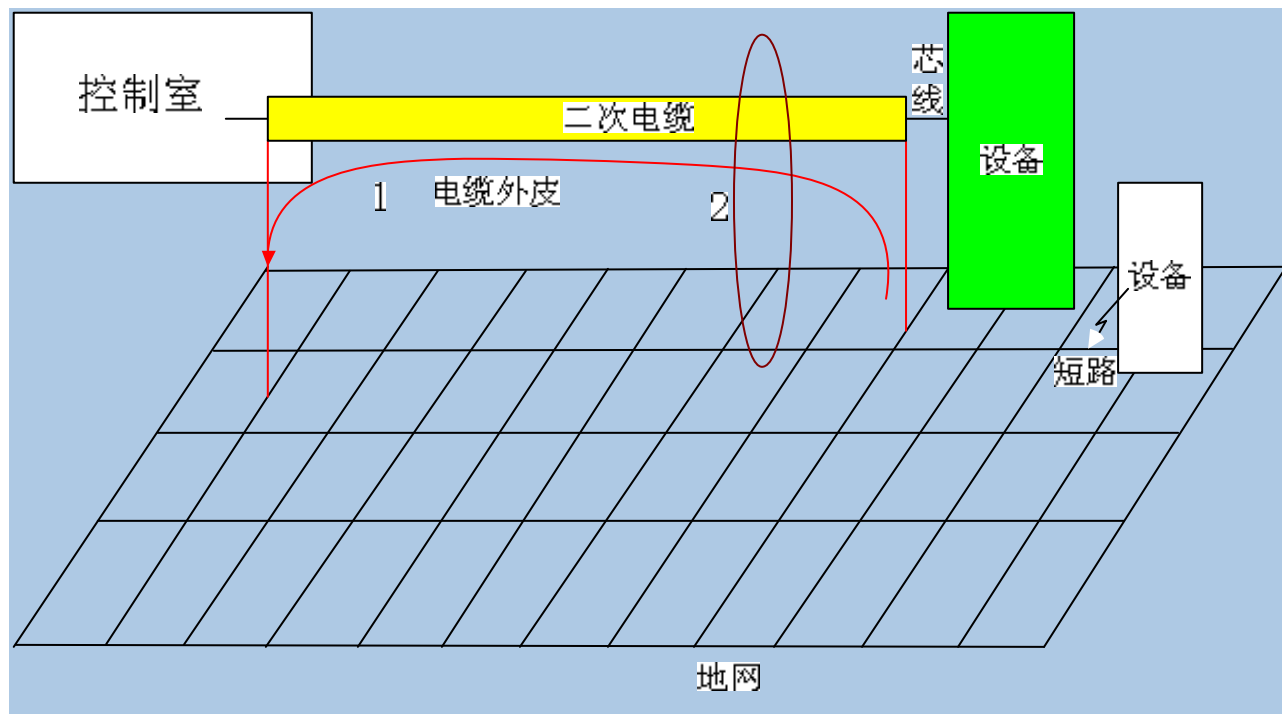


损坏阈值

- 电压损坏阈值、电场损坏阈值、磁场损坏阈值及能量损坏阈值
 - ◆ 当干扰电压超过电压阈值时将引起电子设备的绝缘破坏
 - ◆ 干扰的能量超过能量损坏阈值时，电子设备将由于发热而烧坏
- 计算机对雷电极为敏感，几公里外的高空雷闪或雷对地闪络，都有可能导致计算机控制设备误动作或损坏
 - ◆ 0.03高斯的磁场强度可造成计算机误动作，2.4 高斯即可使元件击穿
 - ◆ 计算机工作条件： $<1\text{V/m}$ 外界电场， $>5\text{V/m}$ 不安全
 - ◆ 存储器在 15V/m 下无法工作
 - ◆ 集成电路在雷电感应2.4高斯的磁场下将被损坏



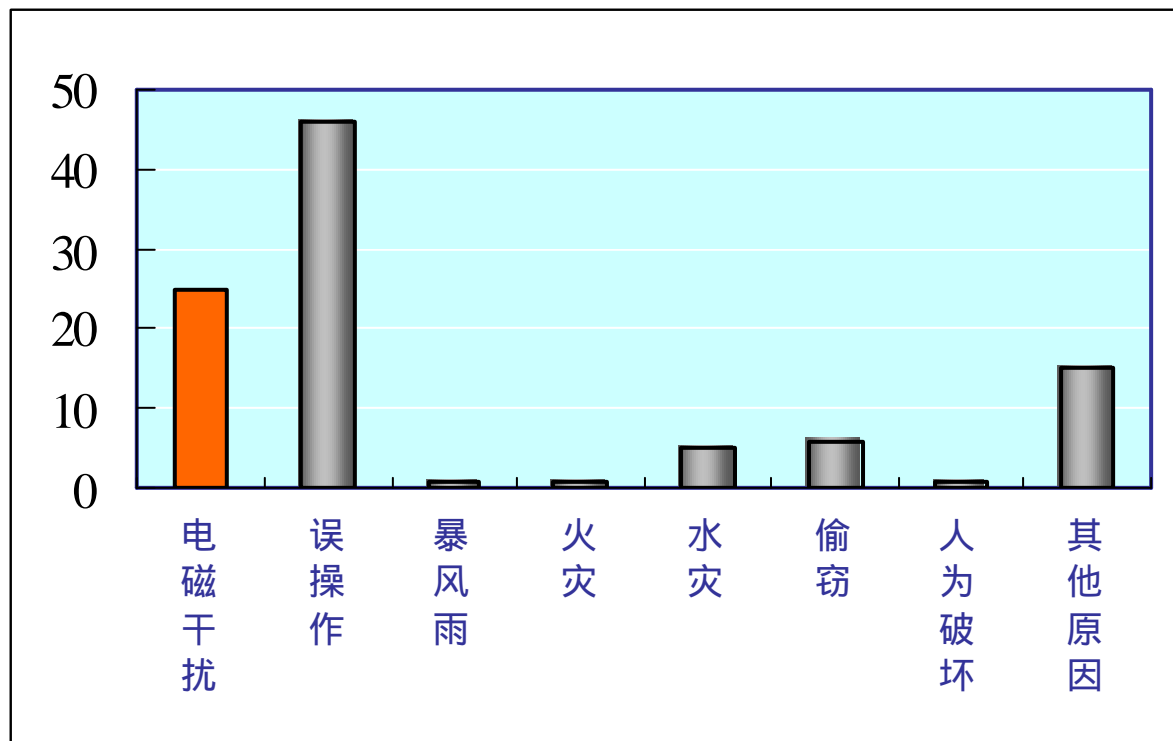
对电力系统的危害



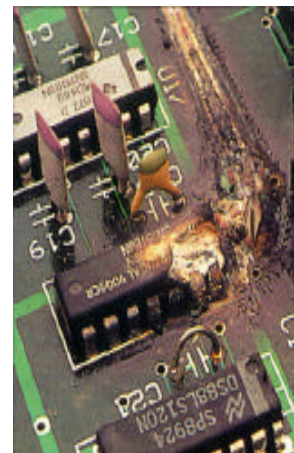
在设计条件相同的情况下，弱电系统的暂态干扰电压与系统运行电压成三次方关系



对电子系统的危害



美国每年因电磁干扰（包括雷害）而导致设备损坏的损失就达260亿美元



对航空的危害

- ◆ 喷气式民航飞机每5000 - 1000小时的飞行平均遭一次雷击
- ◆ 1992年9月16日深圳国际机场因感应雷电过电压导致25套通讯、雷达、导航设备中有5套损坏，几乎使机场停业
- ◆ 1996年广州白云机场由于雷电导致指挥系统故障而被迫关闭机场
- ◆ 美国联邦航空局的调查结果表明，这样的事故时有发生，每次事故都造成几十万到上百上千万元的经济损失



对航空的危害

- ◆ 美国航空无线电委员会RTCA曾在一份文件中提到，由于没有采取对电磁骚扰的防护措施，一位旅客在飞机上使用调频收音机，使导航系统的指示偏离 10° 以上
- ◆ 1993年美国西北航空公司曾发表公告，限制乘客使用移动电话、调频收音机等，以免骚扰导航系统



对计算机网络的危害

- ◆ 1992年，国家气象中心大楼遭雷击，楼内的大型计算机和小型计算机网络中断，整个计算机系统停止工作46小时，气象业务受到严重影响
- ◆ 信息电磁安全



对航天的危害

- ◆ 1961年，意大利发生了一系列的“丘比特”导弹武器系统的雷击事故
- ◆ 1969年11月美国土星“V - 阿波罗12”载人飞船在起飞后出现雷击事故
- ◆ 阿波罗系列登月火箭前后共发生过7次雷击事故



对航天的危害

- ◆ 欧罗巴 火箭故障：欧罗巴 火箭的第一发(代号F-11)于1971年11月5日发射。火箭起飞后105s，高度约27km，制导计算机发生故障，姿态失控。约1min后，火箭炸毁
- ◆ 故障分析与模拟试验的结果表明，火箭在主动段飞行中产生了静电荷。这些电荷逐渐积累并贮存于介质材料的表面。由于气动加热，介质材料温度升高，其电阻值相应减小。对于静电而言，介质材料便从绝缘体变为导体。这样，部分电荷便转移到相邻的未接地的金属体上。当飞行高度增加，气压下降到一定值时，即发生静电放电而引起计算机故障，从而导致飞行失败。



对战争的危害

- ◆ 电子战，在1990年的海湾战争期间，美军采用电子干扰战术来干扰伊拉克的武器系统，使之不能正常工作

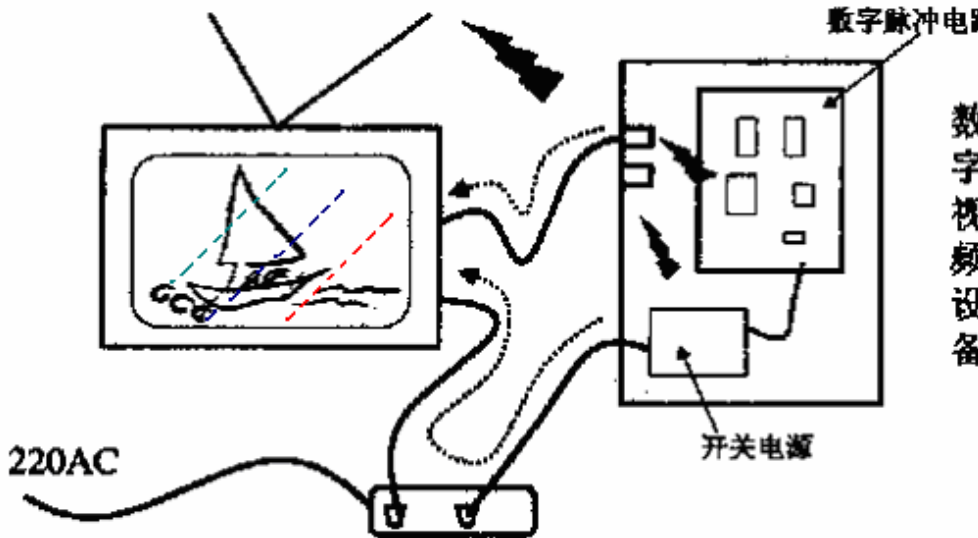
对社会的危害

- ◆ 小偷利用电磁干扰破坏监控系统



数字视频设备与电视接收机间的干扰

- ◆ 电视机是灵敏度很高的电场波接收设备
- ◆ 数字脉冲信号中含有丰富的高次谐波，这些高次谐波的辐射效率很高
- ◆ 条纹来自附近的数字设备，例如计算机、VCD、DVD或其它数字视频设备
- ◆ 电磁理论：导体中变化的电流会产生电磁场辐射，电流变化率(频率)越高，则辐射效率越高



对人类社会的影响

▶ 长期受到电磁辐射影响人体健康并造成电磁污染

- ◆ 高频辐射大于一定限值时，会使人产生失眠、嗜睡等植物神经功能紊乱，以及脱发、白血球下降、视力模糊、晶状体混浊、心电图改变等症状受损有关联
- ◆ 据英国《星期日独立报》网站报道，新的研究显示，手提电话和新的无线电技术可能导致年轻一代未老先衰。瑞典隆德大学索尔福德教授和他的研究小组花了15年来研究手提电话的一种新威胁，辐射可能打开了脑血管障壁，让称为清蛋白的蛋白质进入脑部，该过程跟脑部严重受损有关联。研究仍未证明该过程所造成的长期影响，神经细胞有可能会及时自行修补，但通常在人们60岁时才会“衰老”的神经细胞现在可能在30岁时便会衰老

▶ 生物体的电磁饥饿



对人类社会的影响

➤ 东润枫景

- ◆ 失眠、脱发、乏力、白血球下降、记忆力衰退
- ◆ 北京人民广播电台节目发送塔：每天运转近20小时的中波发射设备，两座塔都有100多米高，东塔距东润260米，发射功率为50千瓦；南塔距东润400米，发射功率为100千瓦，相当于7.5万部手机同时发射信号时的强度（每个手机以2瓦发射功率计）。两座发射塔始建于50年代初并一直使用至今



对人类社会的影响

➤ 东润枫景

- ◆ 《中华人民共和国环境电磁波卫生标准》规定：
 - ✓ 一级标准（小于10伏/米）为安全区，在该环境电磁波强度下长期居住、工作、生活的一切人群（包括婴儿、孕妇和老弱病残者），不会受到任何有害影响的区域；
 - ✓ 二级标准（小于25伏/米）为中间区，在该环境电磁波强度下长期居住、工作和生活的一切人群（包括婴儿、孕妇和老弱病残者）可能引起潜在性不良反应的区域；
 - ✓ 超过二级标准地区，对人体可带来有害影响；在此区内可作绿化或种植农作物，但禁止建造居民住宅及人群经常活动的一切公共设施，如机关、工厂、商店和影剧院等
- ◆ 检测中的42个测量点，30个测量点的电磁辐射超标
- ◆ 2号楼一个人们常去的大阳台上，电磁辐射值竟然达到282-310V/m，超出国家规定标准限值的30多倍

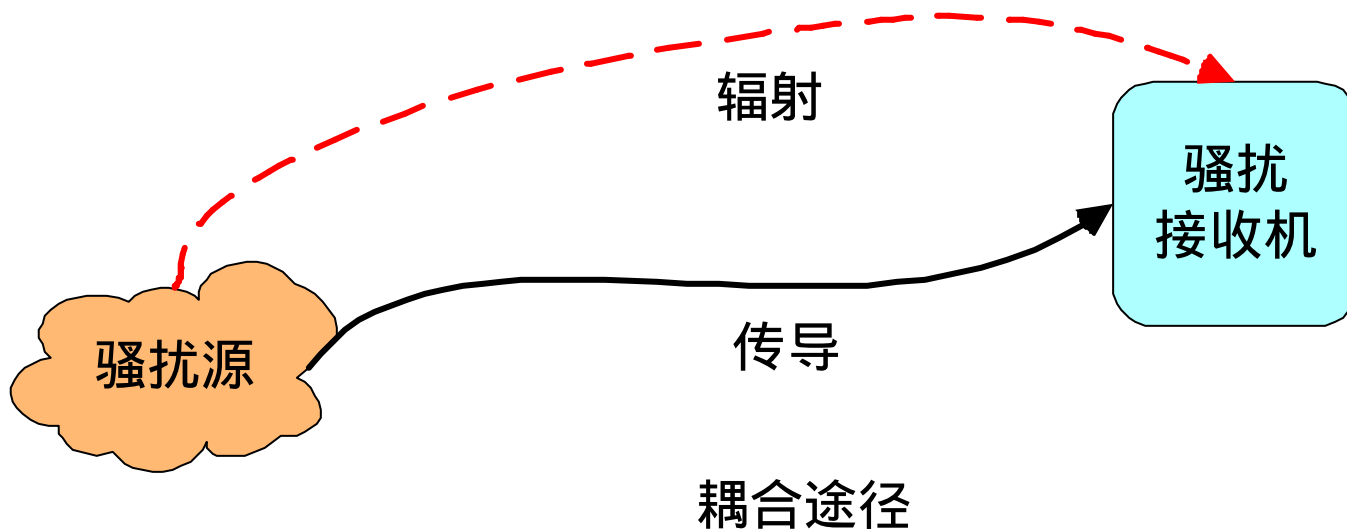


1.3 电磁兼容研究内容

- ▶ **误解**：很长时间以来，人们错误地认为干扰抑制技术是纯经验的实验技巧
- ▶ EMC设计已发展为一门多学科的、综合性的学科分支
- ▶ 电磁兼容是研究在有限的空间、时间和频谱资源等条件下，各种用电设备(广义的还包括生物体)可以共存，并不致引起降级的一门科学
- ▶ **三方面的含义**
 - ◆ 电磁环境应是给定的或可预期的
 - ◆ 设备电磁骚扰发射符合标准要求
 - ◆ 应满足电磁敏感性(EMS)或抗扰度(Immunity)限值要求



EMC的组成部分



电磁骚扰源特性研究

➤ 骚扰源特性

- ◆ 电磁骚扰产生的机理
- ◆ 频域与时域的特性，更关心频域特性
- ◆ 表征其特性的主要参数
- ◆ 抑制其发射强度的方法等

➤ 骚扰源分类

- ◆ 自然干扰源
- ◆ 人为干扰源：系统内和系统外

➤ 电磁骚扰产生的根本原因是网络参数的突变

- ◆ 如：导体中有电压或电流的变化

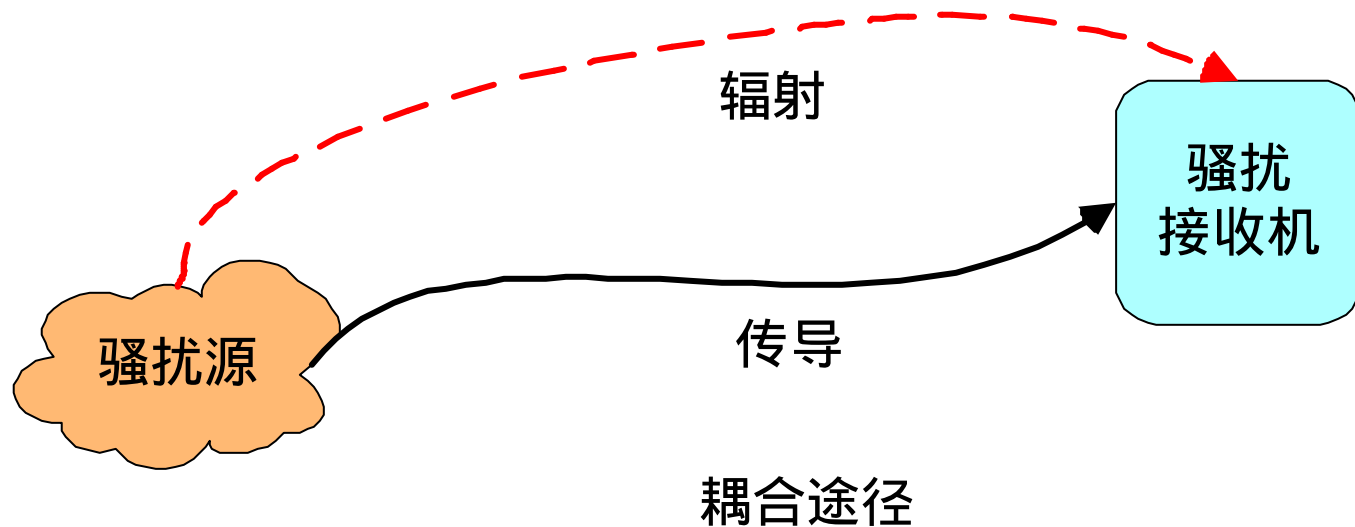


电磁骚扰的传播特性研究

- 电磁骚扰的主要传播途径
 - ◆ 传导耦合、电容耦合、电感耦合和辐射耦合
- 电磁兼容领域中传播特性研究的特点
 - ◆ 源的非理想化(源的频域、时域特性的复杂性以及源的几何参数的复杂性)以及宽的频率范围
 - ◆ 例如，从10kHz至1GHz，包括了17个倍频程，但对于有用信号,从波长上看，10kHz的波长为30km，而1GHz的波长仅0.3m，对于同一距离(例如10m或100m)，对1GHz为远场区，而对于10kHz则为近场区
 - ◆ 电磁兼容领域中的传播特性的研究经常需要同时考虑远场与近场，而且传导与辐射并存。从而使传播问题的研究更加复杂化



改善敏感设备抗干扰性能的研究



- 改善敏感设备抗干扰性能是一项系统工程
- 不能片面地强调某种措施的抗干扰性



电磁兼容测量研究

- 电磁兼容问题的复杂性，理论上的结果往往与实际相距较远，因而使得电磁兼容测量显得更为重要
- 美国肯塔基大学的Dr. C. R. Paul曾说过：“在判定最后结果方面，也许没有任何其他学科像电磁兼容那样更依赖于测量”



电磁兼容测量研究

- 内容：测量设备、测量方法、数据处理方法以及测量结果的评价
- 测试分类：
 - ◆ 传导发射测试、传导抗扰度测试
 - ◆ 辐射发射测试、辐射抗扰度测试
 - ◆ 传导型沿线电磁环境监测
 - ◆ 辐射型空间电磁环境监测



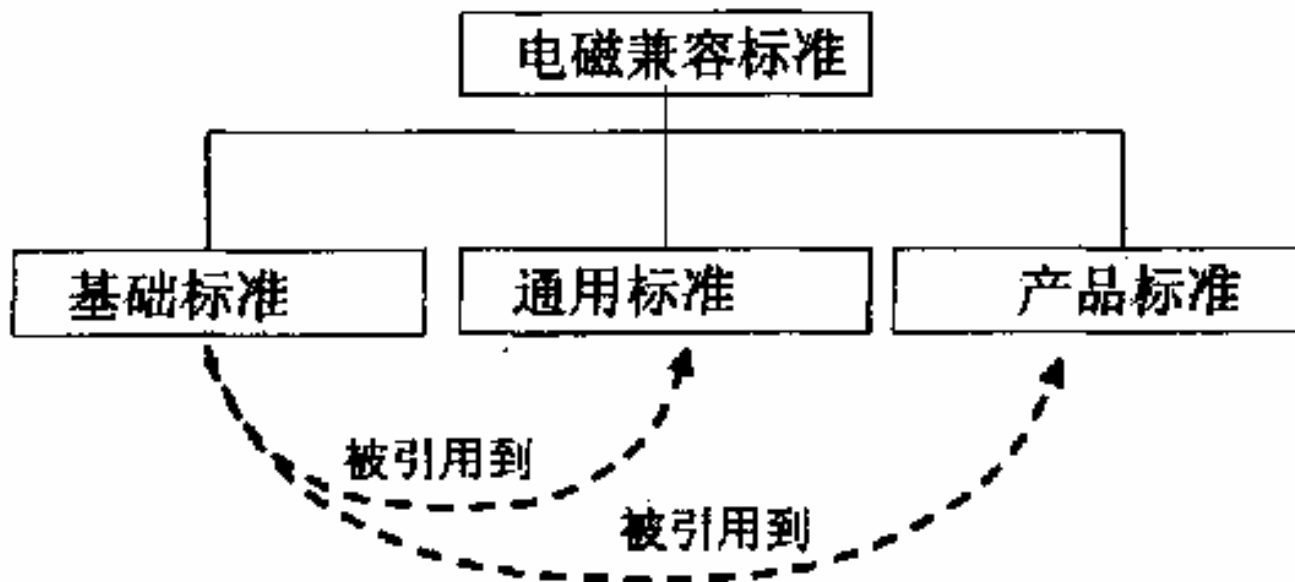
电磁兼容标准化研究

- 衡量产品电磁兼容性的好坏，需要通过标准制定相关的指标
- 如何判断产品是否满足要求，达到了规范要求，则需要制定测试标准
- 目前国际上的IEC、ITU、IEEE等制定了系列的电磁兼容标准
- 标准的制定可以提高产品的技术壁垒，达到保护民族工业的作用



电磁兼容标准化研究

- 标准分类：基础标准、通用标准、产品类标准和专用产品标准



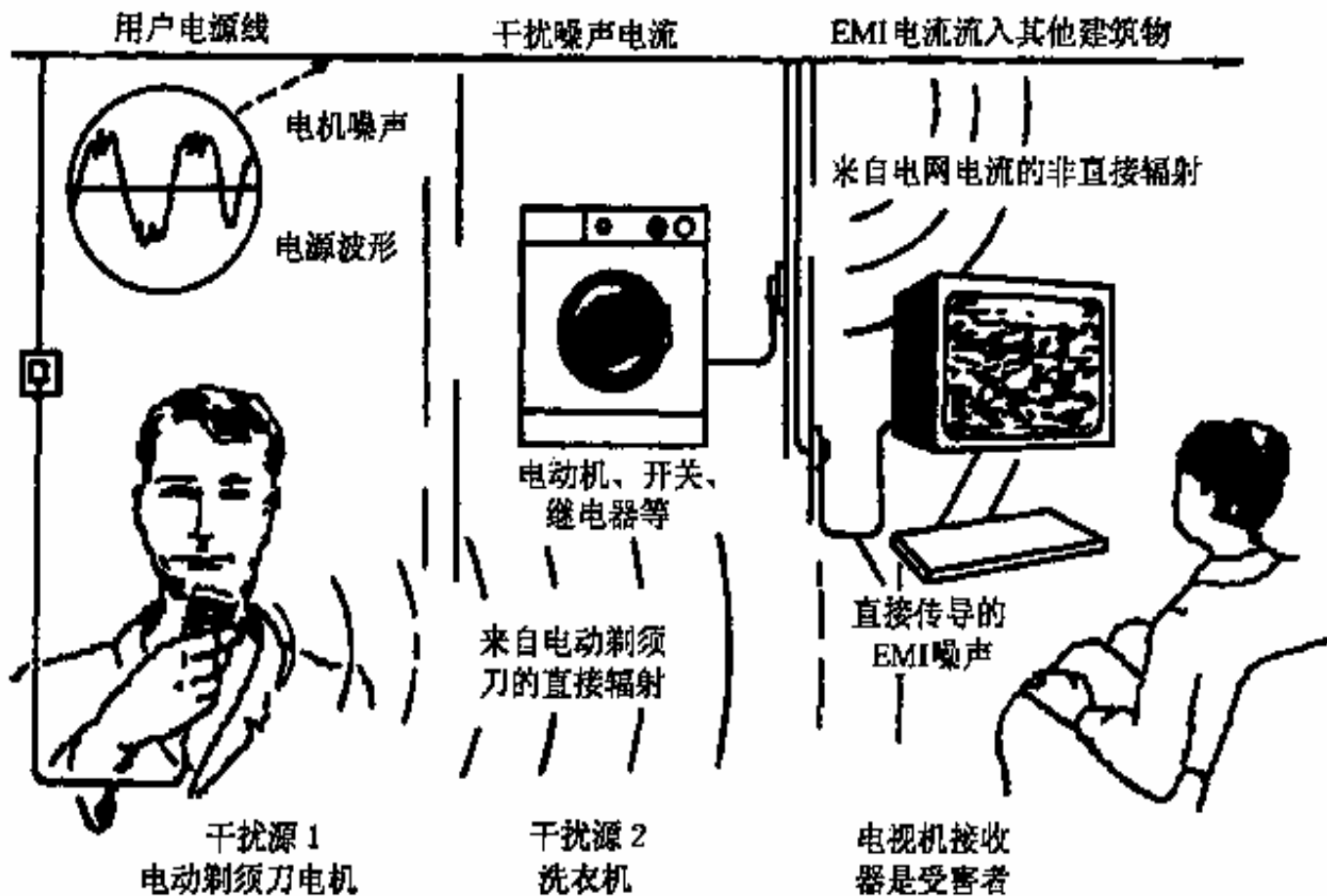
系统内和系统间的电磁兼容性研究

➤ 特点：

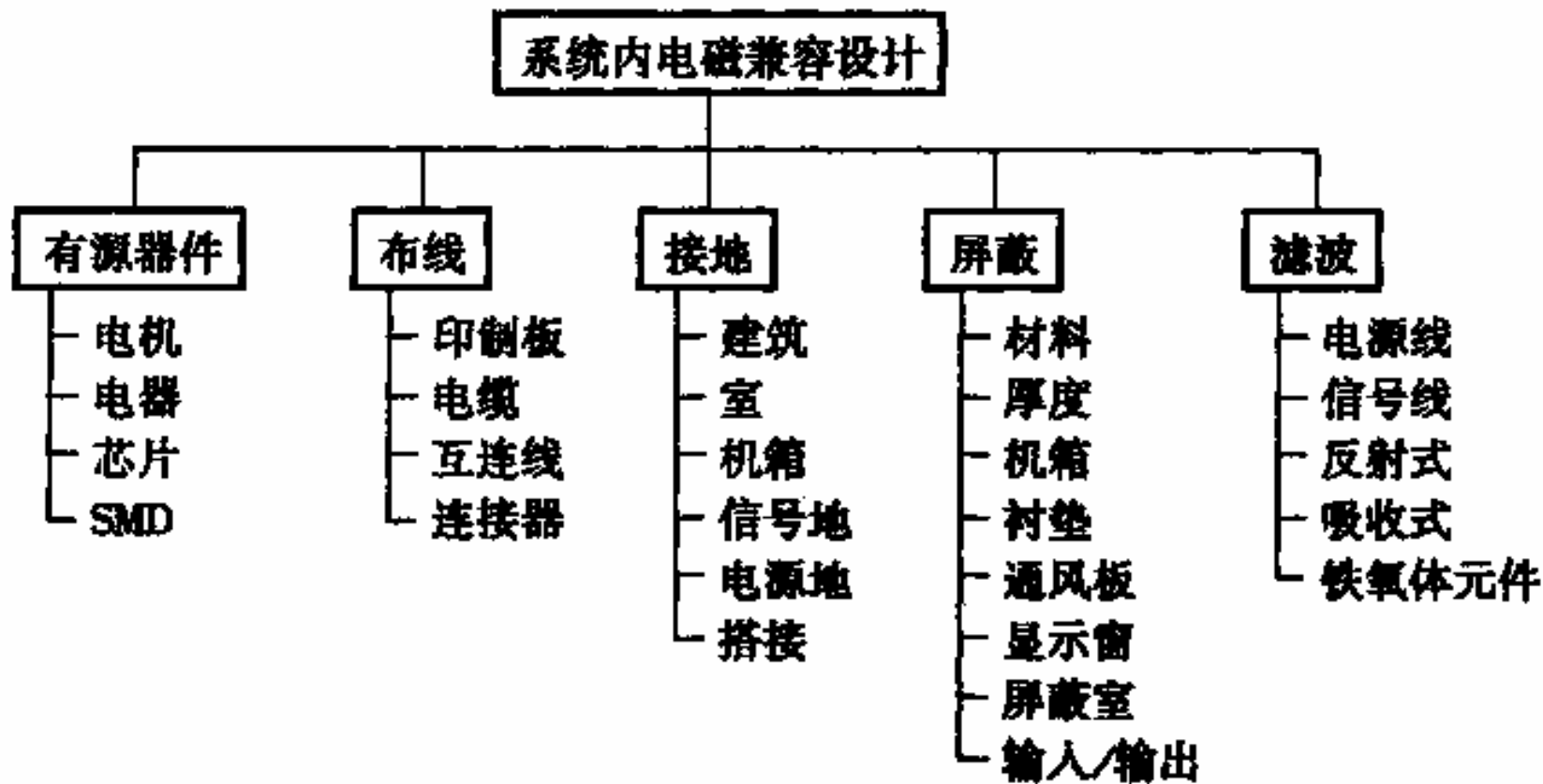
- ◆ 干扰源可能同时也是敏感设备
 - ◆ 传播的途径往往是多通道的
 - ◆ 干扰源与敏感设备不只一个
- 在分析骚扰的迭加和出现概率时，还需按最不利的情况考虑，即所谓“最不利原则”，这些都比研究设备或系统的工作性能复杂得多。
- 近年来，对系统内与系统间的电磁兼容问题的研究，除了“分析”以外，已开始研究“综合”



系统内和系统间的电磁兼容性研究



系统内和系统间的电磁兼容性研究



电磁兼容分析建模技术研究

- 电磁兼容分析问题一般都非常复杂，其基本出发点都是麦克斯韦方程，一般不可能得到其解析解
- 描述和分析电磁波与它们和物体的相互作用的Maxwell物理方程式构成了真正理解EMI问题和寻求解决方案的基础
- 必须针对具体的问题采用合理的数值计算方法，常用的数学知识包括泛复变函数、有限元方法、边界元方法、矩量法、差分法及时域有限差分法、数值积分、数学物理方程等
- 建立骚扰源、耦合特性、设备受扰特性等模型



电磁兼容分析建模技术研究

- 国际上已开发了多种分析软件包用于电磁环境及电磁干扰的分析和预测，如
 - ◆ HFSS (频域FEM)
 - ◆ XFD-TD/Fidelity (时域FD-TD)
 - ◆ Ensemble (频域MOM)
 - ◆ NEC2 (频域MOM)
 - ◆ MAFIA (频域FIM)
 - ◆ EMTP (TLM法)
 - ◆ ANSYS (FEM)
 - ◆ ANSOFT
 - ◆ CDEGS (TLM法)



电磁兼容预测

- 如果一个设备或系统在制造之前就能对它的工作状态进行预测，改进不合理的设计，进行优化设计，远比把设备制造出来之后发现问题再加以改进经济得多
- 电磁兼容预测经历了三个发展阶段
 - ◆ 问题解决阶段
 - ◆ 规范设计阶段：严格按照规范进行设计和测试
 - ◆ 电磁兼容分析预测阶段

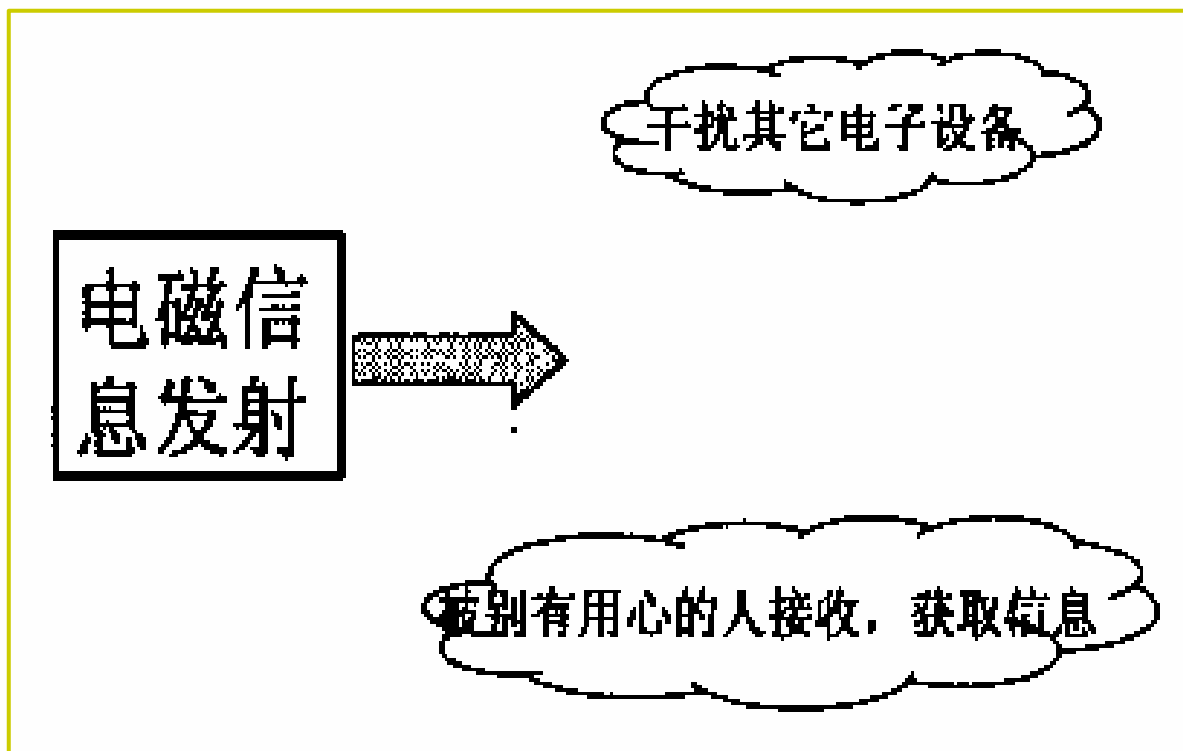


特殊的电磁兼容问题-地震电磁学

- 近十年来为了探索地震短临预报而迅速发展起来的一门新的边缘尖端学科
- 从直流直到超高频整个频段都有人进行观测研究
- 从地下几米深直至几千米深
- 地震电信号(Seismic Electric Signal, 简称SES)与震级、震中距及局部电性质的不均匀性密切相关,人们可在东西(EW)及南北(SN)两个相互垂直方向测出SES的两个分量。每个地震前电信号中有用的是SES变化的最大值
 - ◆ 日本:海底电磁波观测
 - ◆ 俄罗斯:对电离层进行了大量观测,他们认为地震前电离层会出现不同层的扰动
 - ◆ 我国学者:在500km以内可进行较准确的地震预报



特殊的电磁兼容问题-电磁信息发射



特殊的电磁兼容问题-电磁信息发射

- **TEMPEST**：代表信息以电磁发射的形式泄漏的问题及其对策
- 信息设备的**TEMPEST**技术发展至今已有近**40**年的历史
- 它是在电磁兼容(EMC)领域发展起来的一个新的研究方向

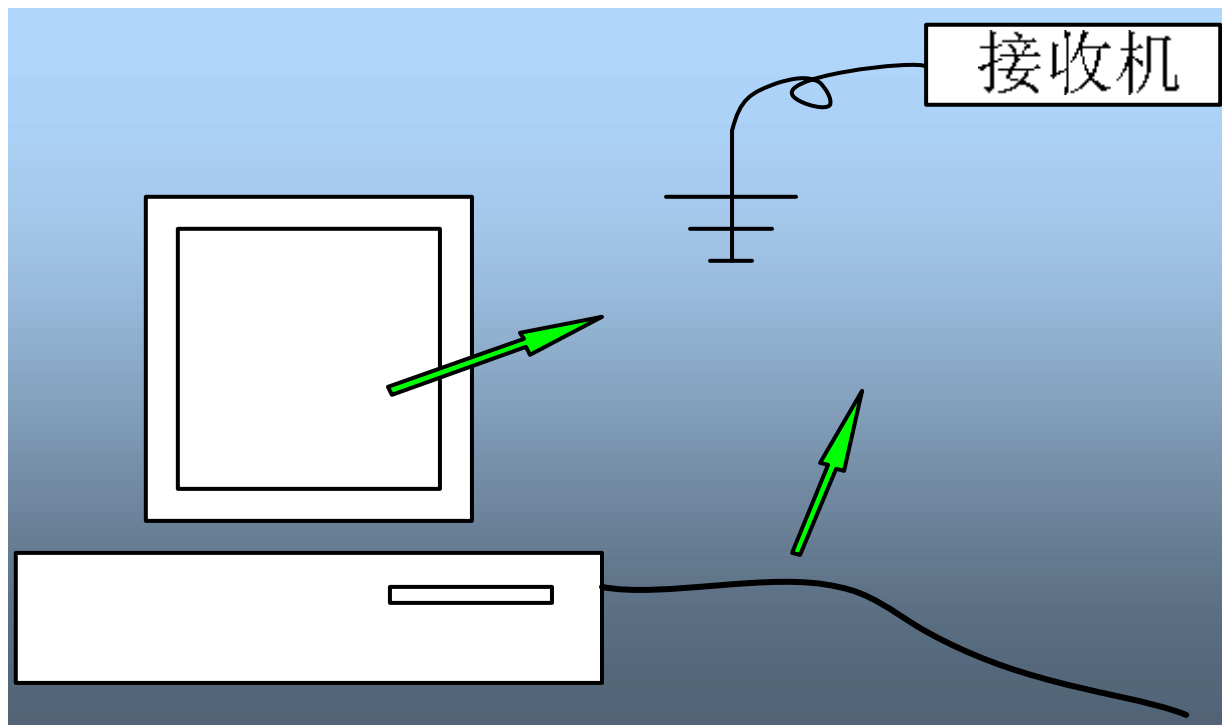


特殊的电磁兼容问题-电磁信息发射

- ◆ 具体内容：针对信息设备的电磁辐射与信息泄漏问题，从信息接收和防护两个方面展开的一系列研究和研制工作
 - ◆ 计算机中的任何串行数据都是容易被接收和复现的，只是CRT显示信号是重复发送的，因此更容易截获，同时利用信号的重复特性，很容易去除其中的随机噪声，增加接收距离
 - ◆ 包括信息接收、破译水平、防泄漏能力与技术，相关规范标准及管理手段等
 - ◆ 属于信息对抗的范畴，各国政府都将相关的标准和技术定为机密



特殊的电磁兼容问题-电磁信息发射



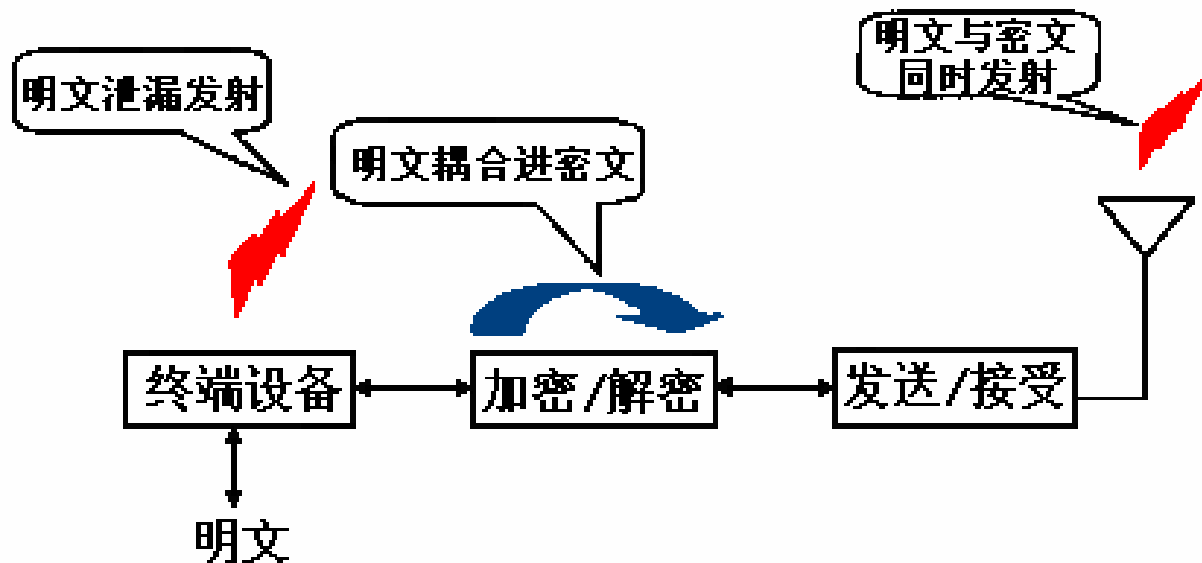
特殊的电磁兼容问题-电磁信息发射

- 信息泄漏的途径
 - ◆ 电磁波辐射，通过空间泄漏
 - ◆ 通过电源线以传导发射的方式泄漏
- 信息泄漏的频率范围
 - ◆ 取决于计算机的种类，一般在10MHz~1GHz
 - ◆ 对于视频信号而言，200MHz~500MHz范围内最强
- 保密通信不仅是密码技术
 - ◆ 保密通信中的关键性技术除了密码技术以外，还有TEMPEST技术
 - ◆ 没有采用TEMPEST技术，保密系统会发生明码的泄漏，造成信息泄漏



特殊的电磁兼容问题-电磁信息发射

保密通信系统中的TEMPEST



特殊的电磁兼容问题-电磁信息发射

◆ 红信号与黑信号：

- ◆ 红信号指涉及保密信息的明码信号，一旦泄漏会造成保密信息的泄漏
- ◆ 黑信号指加过密的，或不涉及保密信息的信号，即使泄漏也不会造成保密信息泄漏

◆ 红黑电路与界面：

- ◆ 设备中处理红信号的电路称为红电路，处理黑信号的电路称为黑电路。
- ◆ 要求红黑电路不能混合，两者之间必须有明确的分界面，这称为红黑界面。红黑界面上要有可靠的隔离措施，保证红信号不会串入黑电路



特殊的电磁兼容问题-电磁信息发射

■ 发展阶段

- ◆ 认识阶段(50年代初、中期)
- ◆ EMPEST技术发展阶段(50年代后期至70年代末)：制定了发展方案
- ◆ 技术标准化、专业化、市场化(80年代后期至今)

■ TEMPEST与一般EMC的同异之处在于：

- ◆ 理论与技术仍以EMC为主要基础, 目标也是降低和抑制无意的电磁发射
- ◆ 与一般EMC有所不同的是, TEMPEST更注重解决信息处理设备通过无意电磁发射而导致的信息泄漏
- ◆ 除了一般EMC的抑制技术外, 还可以采用乱真发射的方法施加干扰, 避免有意窃收



特殊的电磁兼容问题-电磁信息发射

- 怎样进行TEMPEST设计?
 - ◆ 基础是电磁兼容设计技术
 - ◆ 电磁兼容中的发射抑制、耦合抑制等技术都可应用到TEMPEST设计中
 - ◆ TEMPEST的要求比电磁兼容的要求严格得多



特殊的电磁兼容问题-频谱管理

- ◆ 无线电频谱资源是一种有限的自然资源，但同时也是一种比较独特的资源
- ◆ 无线电频谱是不可见的，它虽是有限的，但不是消耗性的
- ◆ 无线电频谱各频段传播特性的不同会因使用不当而造成本身利用率的下降或干扰影响其他信道而再次造成资源的浪费
- ◆ 既要科学地管理，又要达到最有效的应用
- ◆ 各国建立专门机构进行科学的频谱分配与管理
- ◆ 对产生无线电干扰的设备所辐射的杂波加以严格限制，以确保无线电的良好环境



特殊的电磁兼容问题-频谱管理

- ◆ 无线电频谱具有空间、时间、频率三维特性，并且三者密切相关
- ◆ 无线电频谱易受污染，易受噪声或干扰的影响
- ◆ 频谱规划：在宏观上划分频谱，使频谱资源的利用更合理、更有效



特殊的电磁兼容问题-频谱管理

- ◆ **频谱分配**：应遵循国际电信公约，在国际大频谱规划的基础上对具体的每一段频谱做细微的划分。包括将频谱分成几大块，以供不同类型的业务之用，即国际分配表
 - **无线电频率划分范围为9kHz至275GHz共划分287项(段)**
 - **在这些大块内做出详细规划，即自上而下的国家性分配**



电磁兼容性管理

- ◆ 对全寿命期间的各个阶段实施EMC管理
- ◆ 包括论证阶段、方案阶段、工程研制阶段、定型阶段、生产和使用阶段



1.4 电磁兼容的历史及发展

- ◆ EMC的发展经历了从“路”到“场”，从低频到高频，从狭义的电磁干扰到广义的电磁兼容的过程
- ◆ 电磁兼容可以说是一门既古老又年轻的学科
 - ◆ 说它古老，是对于电磁干扰的研究可以追溯到19世纪，从无线电波作为通信媒质开始就存在
 - ◆ 说它年轻，是指电磁兼容只是到了近30年，随着数值计算技术的发展，该学科才得到快速的发展



1.4 电磁兼容的历史及发展

- ◆ 西维赛德于1881年写了一篇“论干扰”的文章，被认为是最重要的早期文献
- ◆ 1883年法拉第发现电磁感应定律，指出变化的磁场在导线中将产生感应电动势
- ◆ 1884年麦克斯韦引入位移电流的概念，指出变化的电场将激发变化的磁场，并由此预言电磁波的存在
- ◆ 1887年柏林电气协会成立了全国干扰问题委员会
- ◆ 1920年左右关于无线电干扰的论文在各种刊物发表
- ◆ 1933年有关国际组织在巴黎举行了一次特别会议，研究如何处理国际性无线电骚扰问题



1.4 电磁兼容的历史及发展

- ◆ 1930年，从电机、电力设备及电气化铁道等产生的射频干扰很快成为了电磁干扰的主要问题
- ◆ 1934年6月28日至30日在巴黎举行了国际无线电干扰特别委员会(CISPR)第一次正式会议，从此开始了对电磁骚扰及其控制技术的世界性的有组织的研究
- ◆ 美国自1945年开始，颁布了一系列电磁兼容方面的军用标准和设计规范，并不断地加以充实和完善，使得电磁兼容技术进入新的阶段
- ◆ 直到20世纪20年代以后各个工业先进国家都日益重视电磁兼容的研究，于是相应的国际组织纷纷成立
- ◆ 信息时代，EMC飞速发展



1.4 电磁兼容的历史及发展

- ◆ 美俄等国正在加紧研究对付核电磁脉冲影响的方法
- ◆ 最近十年，美国科研部门集中力量研究保护通信网和某些军用飞机不受高空核爆炸影响的方法
- ◆ 美国前总统里根1982年在宣布美国战略部队现代化计划时说，五角大楼将大力加强它的通信系统。为此拨款近200亿美元，其中大部分用以对付“电磁脉冲(EMP)”的作用
- ◆ 欧美还有一些国家也已投入力量从事这类科研工作



1.5 电磁兼容性设计的重要性

- 电磁兼容设计的目的
 - ◆ 电子设备达到预期的功能
 - ◆ 系统内各设备之间相互不干扰
 - ◆ 对外界电磁环境不构成污染
 - ◆ 满足电磁兼容标准的要求



电磁兼容设计的方法

- ◆ 测试修改法
- ◆ 系统设计法：电磁兼容系统设计的基本方法是指标分配和功能分块设计，也就是首先要根据有关的标准(国际、国家、企业、特殊标准等等)把整体电磁兼容指标逐级分配到各功能块上，细化成系统级的、设备级的、电路级的和元件级的指标
 - 优点：成功率高，节省开发时间，使设计达到最优化
 - 缺点：对设计人员电磁兼容水平的要求高，有时需要专门的电磁兼容技术支持，增加设计成本



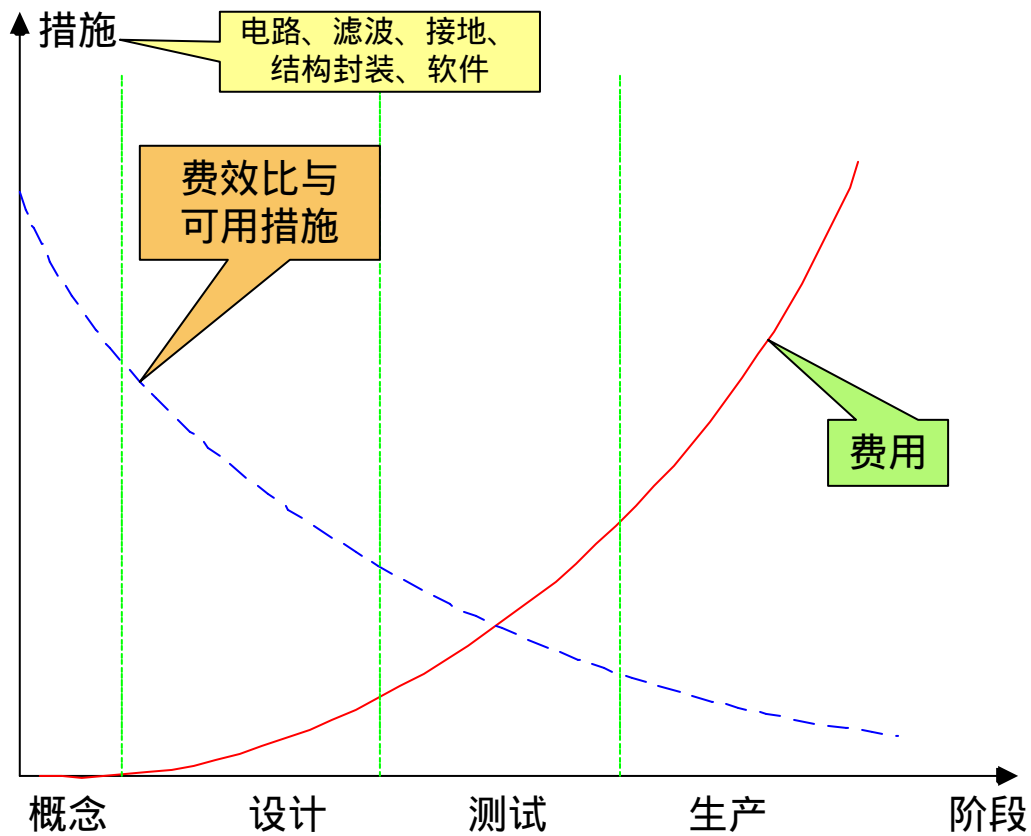
电磁兼容设计的效费比与方法

◆ 分层与综合设计法：

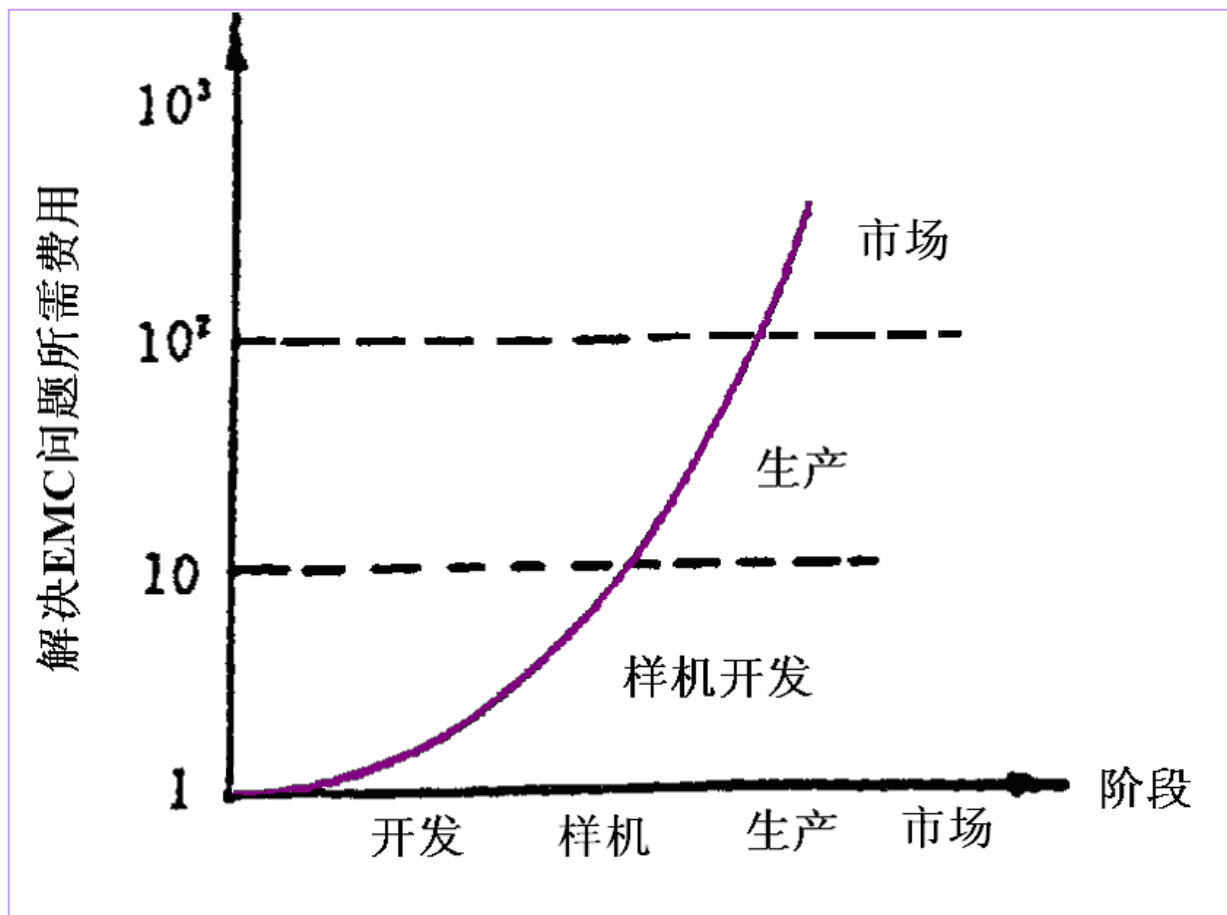
- 可根据防护措施在实现电磁兼容时的重要性，分层依次进行设计。例如，第一层为有源器件的选择和印制板设计，第二层为接地设计，第三层为屏蔽设计，第四层为滤波设计，然后进行综合设计



电磁兼容设计的效费比与方法



电磁兼容设计的效费比与方法



1.6 国际有关EMC组织

◆ 国际电工技术委员会(IEC) 1906

- 任何独立国家都可以成为该委员会成员。这个国家应该建立一个国家委员会或者指定一个适当的研究机构来代表它

◆ 国际无线电干扰特别委员会(CISPR) 1933

- CISPR是IEC的下属机构，但是这个委员会是IEC用字母符号表示而不用数字表示的唯一委员会

◆ 国际电信联盟(ITU)

- 1865年20个国家在巴黎召开第一次会议，产生了第一个电信方面的公约和第一个电报规则
- 1947年该联盟已成为联合国的一个专门机构



1.6 国际有关EMC组织

- ◆ **国际无线电咨询委员会(CCIR) 1929**
 - 国际电信联盟的下属机构，其职责是研究与无线电通信有关的技术和运营问题，并在这方面拟定建议
- ◆ **国际无线电科学联盟(URSI) 1919**
 - 国际科学联合会(ISCU)的组织机构
- ◆ **IEEE电磁兼容专业学会(IEEE EMC-S) 1964**
 - 1964年跨国电气电子工程师学会将无线电工程师学会的射频干扰学报改名为跨国电气电子工程师学会电磁兼容学报
 - 1978年电磁兼容学组改名为电磁兼容专业学会



1.6 国际有关EMC组织

◆ 国内有关EMC的学术组织

- 欧共体宣布自1996年起所有电工、电子产品均需通过电磁兼容检测，达不到指标要求的产品一律不得投入市场以来，我国对电磁兼容技术已引起重视，加速了研究步伐
- 全国无线电干扰标准化技术委员会、中国电工技术学会电磁兼容委员会、中国电机工程学术电磁干扰专业委员会、中国电源学会电磁兼容委员会、中国通信学会电磁兼容委员会、中国电子学会电磁兼容分会、中国铁道学会电气化专业委员会防干扰学组、中国造船学会电磁兼容学组、各省电磁兼容学会等
- 国内EMC试验室建设



课程内容

- ◆ 干扰源及特性
- ◆ 电磁干扰传播特性
- ◆ EMC的模拟与预测
- ◆ 电磁干扰滤波技术
- ◆ 电磁屏蔽技术
- ◆ 接地与搭接技术
- ◆ 电磁干扰抑制
- ◆ 信号回路的电磁干扰抑制
- ◆ 系统的电磁兼容和天线耦合
- ◆ 印刷电路板的电磁兼容问题
- ◆ 电磁兼容测试技术



成绩构成

- ◆ 听课、平时作业 30%
- ◆ 课程考试 40%
- ◆ 研究报告 30%



参考书：

- 何金良：电磁兼容导论讲义
- Weston, David A. , “Electromagnetic compatibility: principles and applications” , New York: Marcel Dekker, 2001
- Pierre Degauque and Joel Hamelin, “Electromagnetic compatibility”, New York: Oxford University Press, 1993
- M. I. Montrose, 电磁兼容何印刷电路板：理论、设计何布线。人民邮电出版社，2002-12
- 高攸纲编著. 电磁兼容总论. 北京：北京邮电大学出版社，2001
- 白同云，吕晓德．电磁兼容设计．北京: 北京邮电大学出版社, 2001



作业：

- [1] 比较电磁交互作用和电磁耦合的含义。
- [2] 你希望通过这门科学到那些知识？
- [3] 描述一个你所见到的电磁兼容问题。
- [4] 举例说明某种设备产生的电磁骚扰对其自身产生电磁干扰。
- [5] 上网浏览一个电磁兼容网站，介绍其主要内容。



谢谢！！

何金良

☎ +62784709, ✉ hejl@tsinghua.edu.cn

电机工程与应用电子技术系

电磁环境技术研究室

