

电磁兼容设计技术

邱 扬

西安电子科技大学

电磁兼容设计技术

- 电磁兼容基本概念
- 电气与电子设备电磁兼容性的要求
- 电磁耦合机理与干扰发射
- 手机电磁兼容特性分析
- 电磁屏蔽设计理论及技术
- 互连电缆的设计技术
- 印制板设计技术
- EMI滤波技术
- 接地与搭接技术
- 瞬态干扰及抑制技术
- 电磁兼容测量及故障诊断技术 及 故障诊断实例

电磁兼容基本概念

- 电磁兼容大事记
- 电磁兼容案例
- 电磁兼容性的定义及含义
- 系统电磁兼容的研究思路

电磁兼容大事记

- 1865年，国际电报联盟成立，现改为“国际电信联盟”（ITU）；
- 1881年，第一篇讨论电磁兼容问题的文章：由英国科学家希维塞德撰写的《论干扰》；
- 1887年，第一个研究电磁兼容问题的学会组织：德国柏林电气协会成立的“干扰问题委员会”
- 1936年，第一篇讨论电磁屏蔽的文章：美国Bell实验室的Schelkunoff撰写的《A Theory of Shielding》

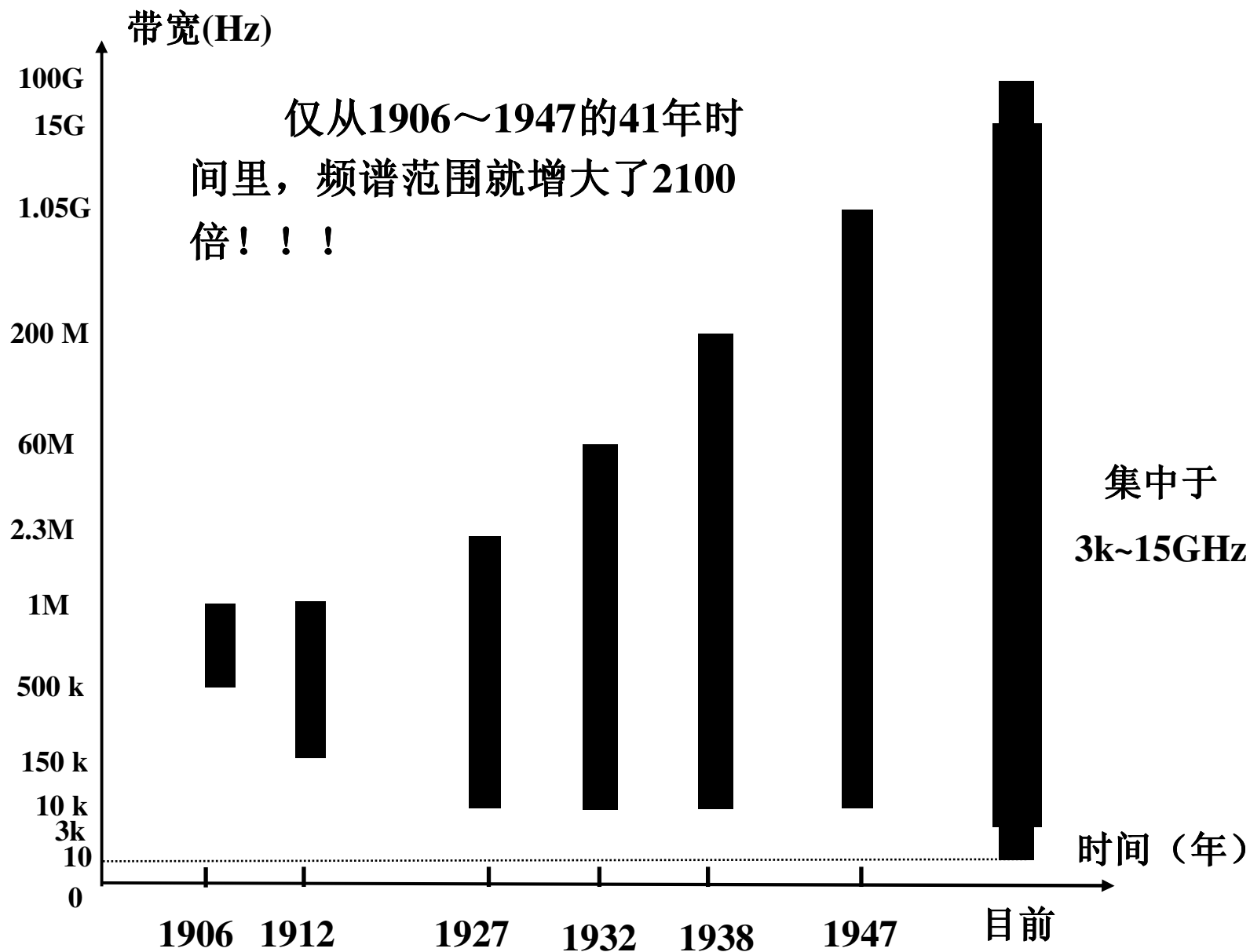
电磁兼容大事记（续）

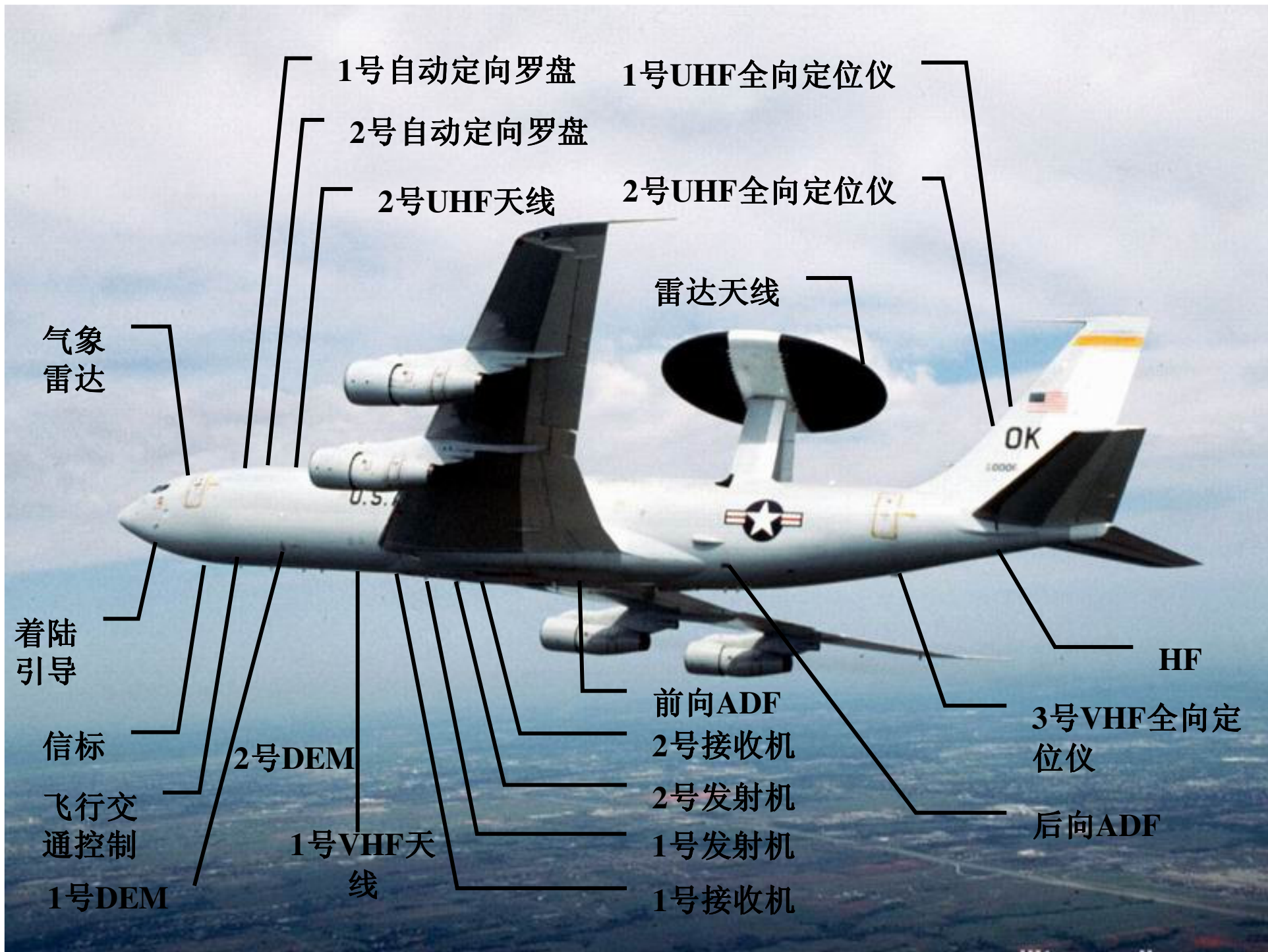
西安电子科技大学

邱扬

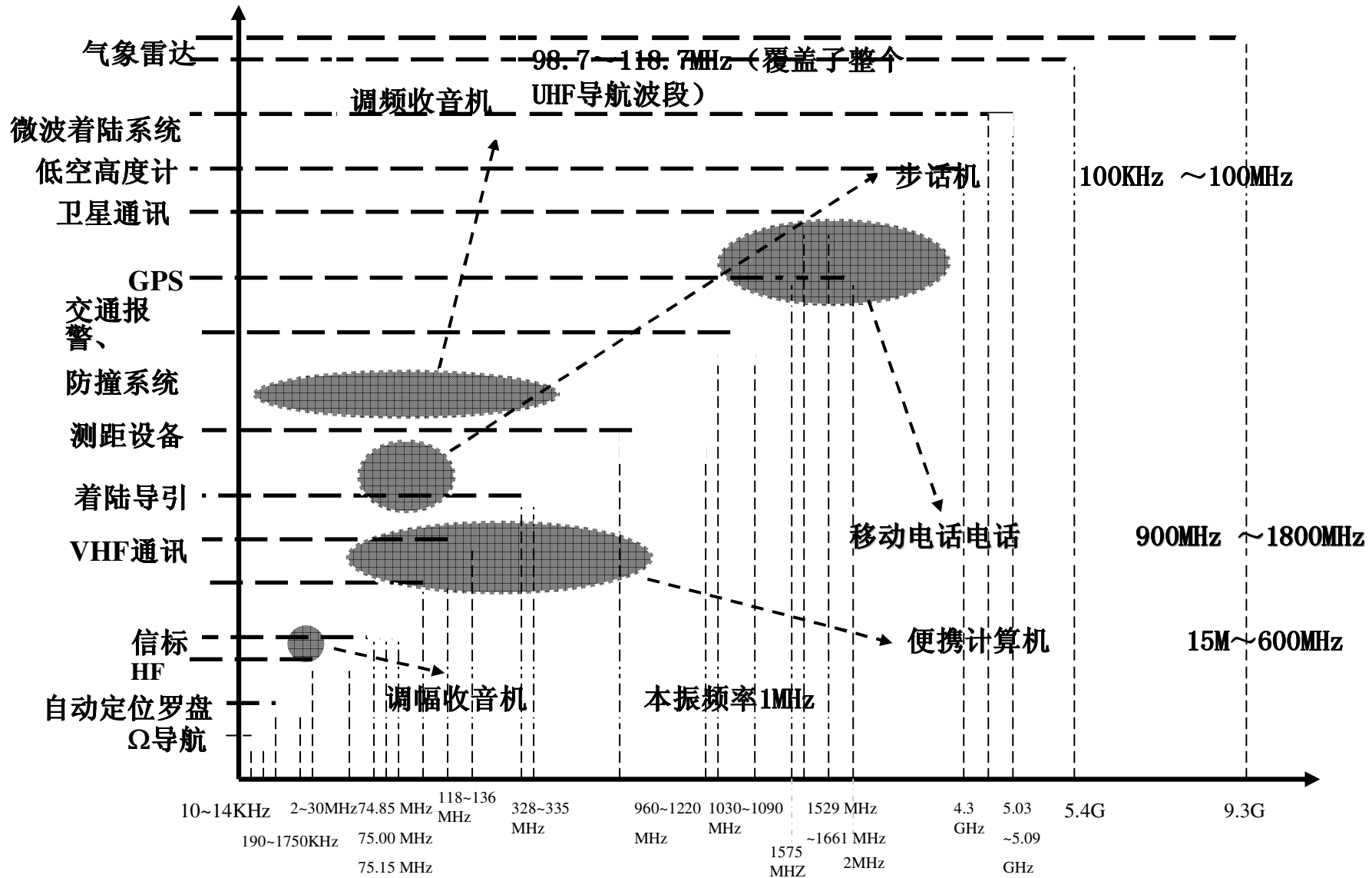
- **1938年，第一篇完整论述电磁屏蔽的文章：Schelkunoff撰写的《The Impedance Concept and its Application to Problems of Reflection, Refraction, shielding and Power Absorption》**
- **第一个电磁兼容标准：美国空军的32331—A Suppressor, Electrical Noise, Radio Frequency**
- **第一套统一名词术语、极限值、测量方法的标准：MIL-STD-461、—462（1967年）、—463（1966年）、（军用设备和分系统的电磁发射和敏感度要求）**
- **第一个电磁兼容分析预测软件：麦道公司于1971年推出的IEMCAP（Intrasystem Electromagnetic Compatibility Analysis Program）**

电磁频谱带宽变化示意图

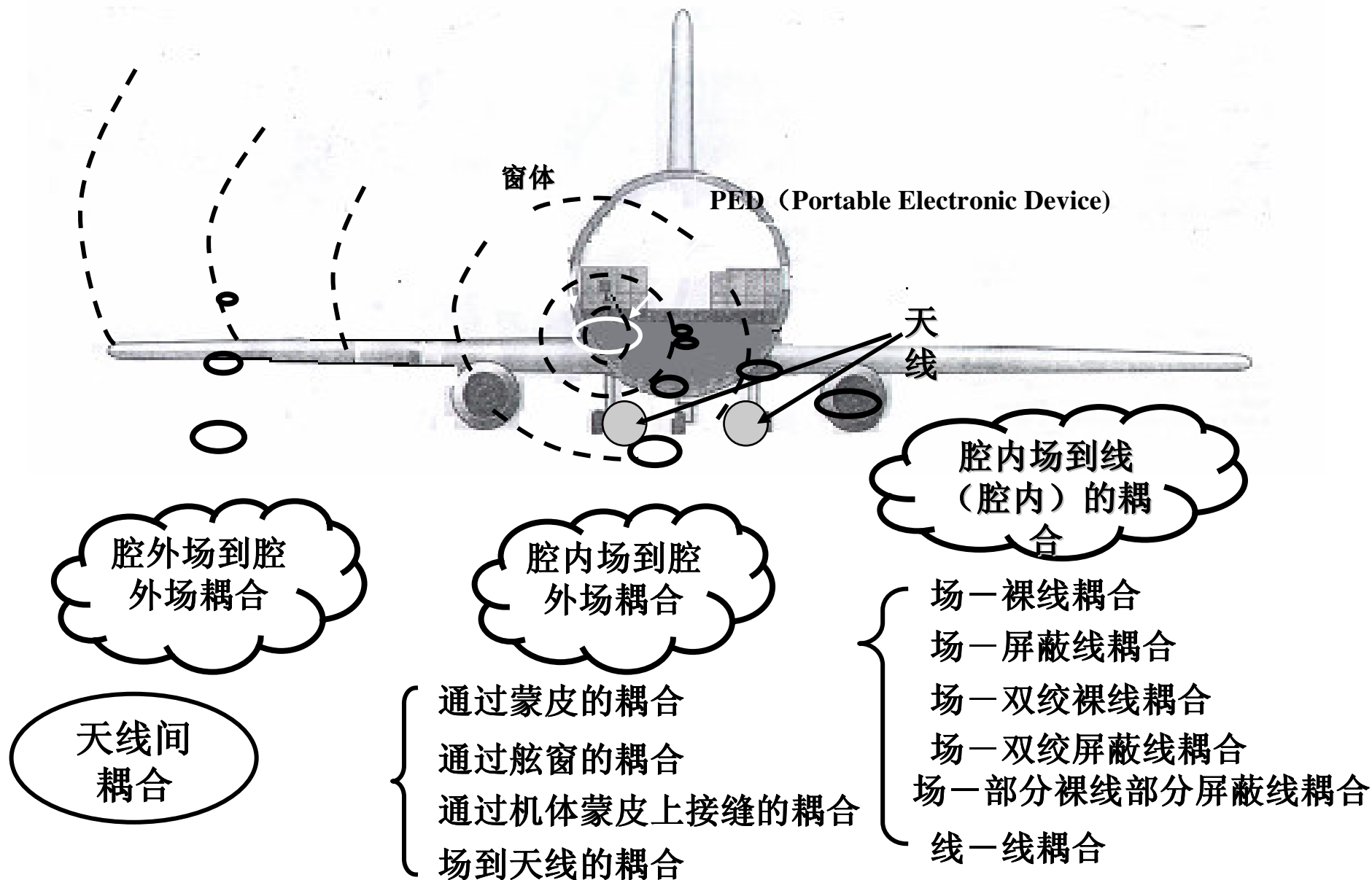




飞机系统的电磁频谱



飞机系统的电磁耦合示意图



耦合途径及最易受到干扰的设备

1. 主要的耦合途径：电缆、天线

因此飞机上的电缆是双绞、双线屏蔽、三线屏蔽、扭绞的，具体情况视设备为数字或模拟而定。

2. 最易受到干扰的是：

- 带有天线的高灵敏设备，因为一般导线均采取了双绞、屏蔽等措施，抗干扰的能力较好，而PED所产生的电磁场会通过飞行舷窗透到飞机外部，对天线
- 时效对于屏蔽电缆接地的影响（接地阻抗应控制 $100\text{m}\Omega$ 之内）

耦合途径及最易受到干扰的设备

3. 飞机舷窗的影响:

- $f < \text{VHF}$ 导航波段, 舷窗的作用相当于天线的相位阵列, PED在不同座位上所产生的场变化非常大;
- $f > \text{VHF}$ 导航波段, 舷窗的衰减作用几乎为零。

总之, PED对飞机导航、通讯的影响非常大, 尤其是在飞机起飞、着陆的时候。

EMC的定义与含义

定义:

设备在共同的电磁环境中能一起执行各自功能的共存状态。

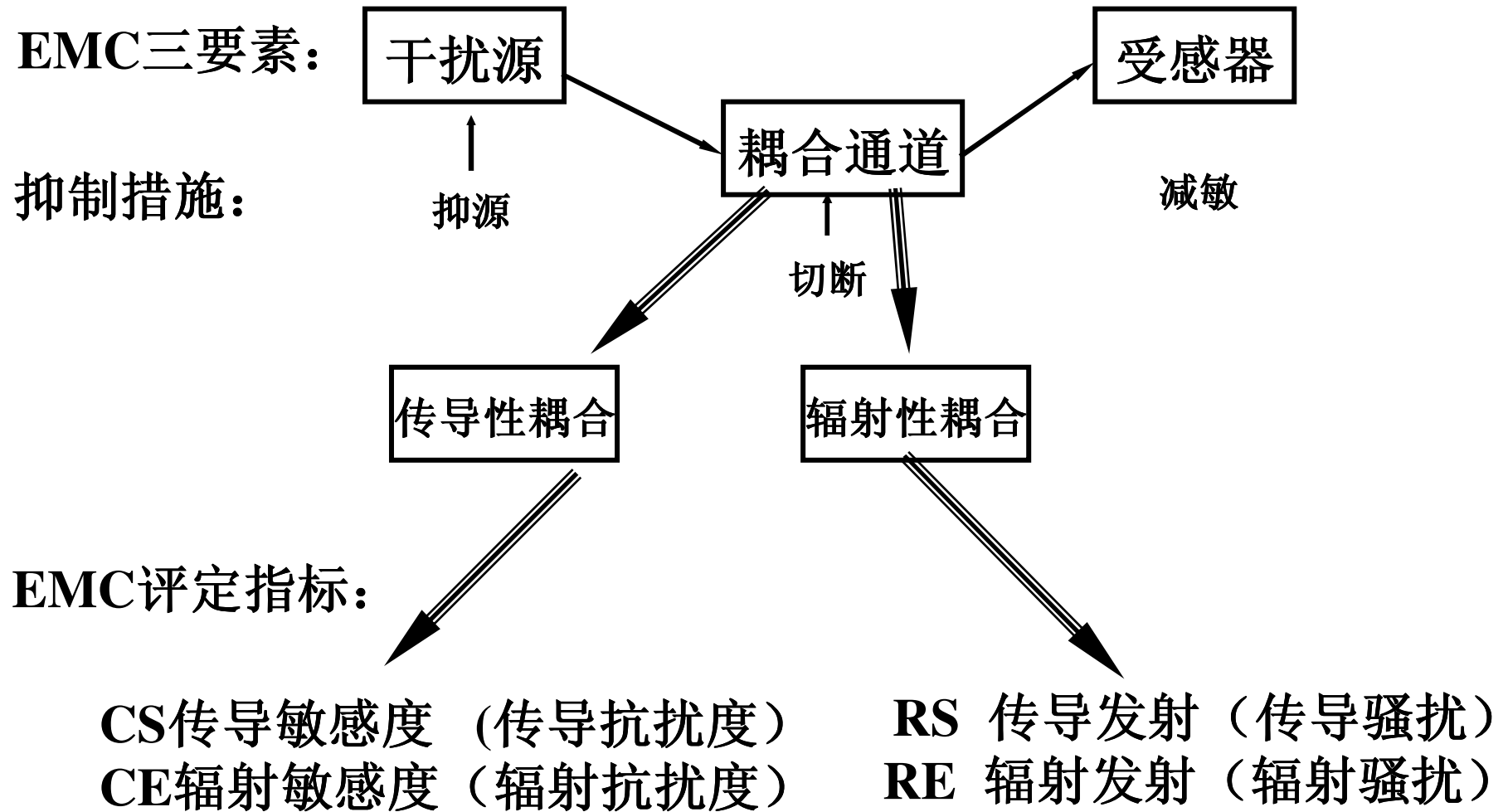
EMC (Electromagnetic Compatibility)

$$\text{EMC} = \text{EMS} + \text{EMI}$$

含义: **EMS (Electromagnetic Susceptibility)**

EMI (Electromagnetic Interference)

EMC三要素及抑制方法

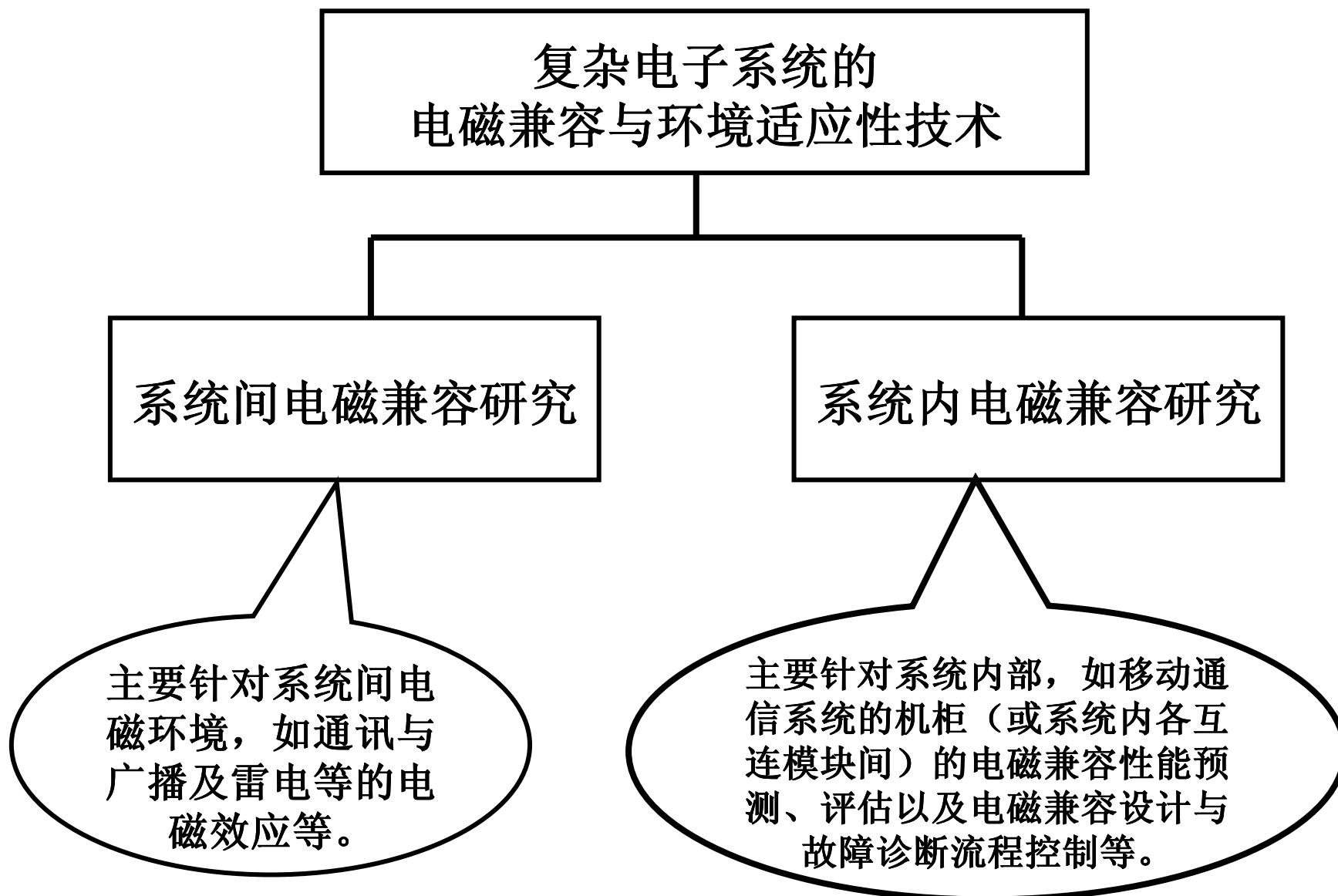


电磁兼容对设备和部件的突出影响

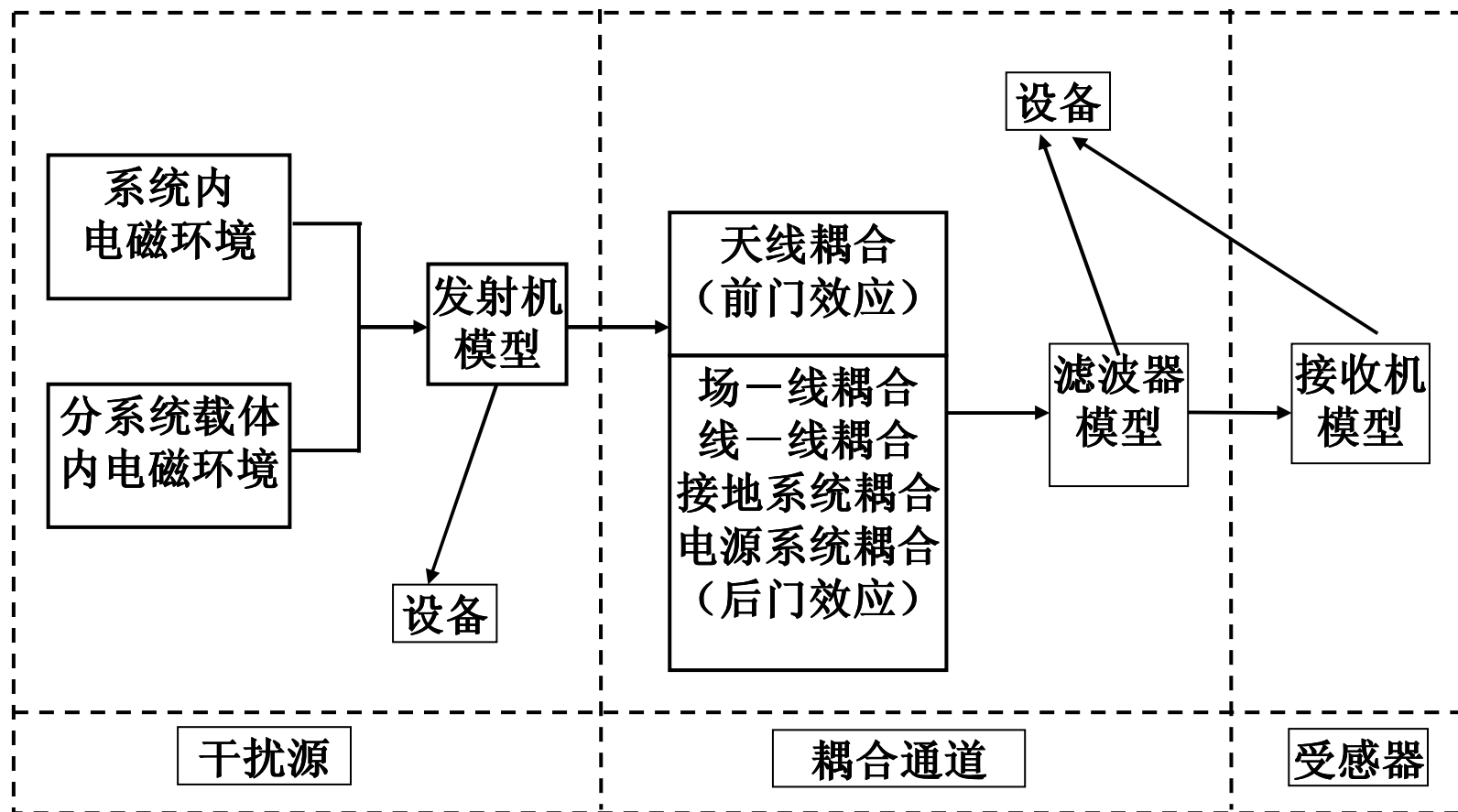
对于民用设备及系统而言，EMC性能的突出影响表现为：

- 系统性能的降低或失效，造成不能完成预定任务
- 引起失效模式，降低设备可靠性
- 影响装备或元器件的工作寿命
- 影响效/费比，增加产品的成本
- 影响设备或人员的生存性和安全性
- 延误生产和使用

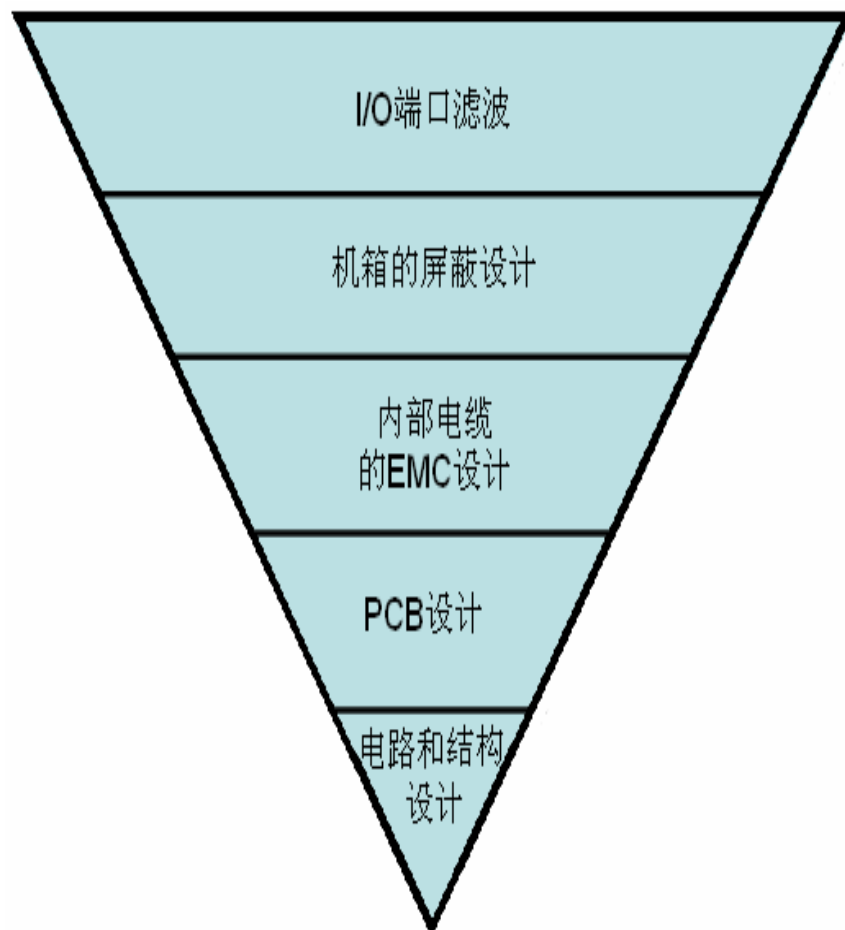
研究范畴



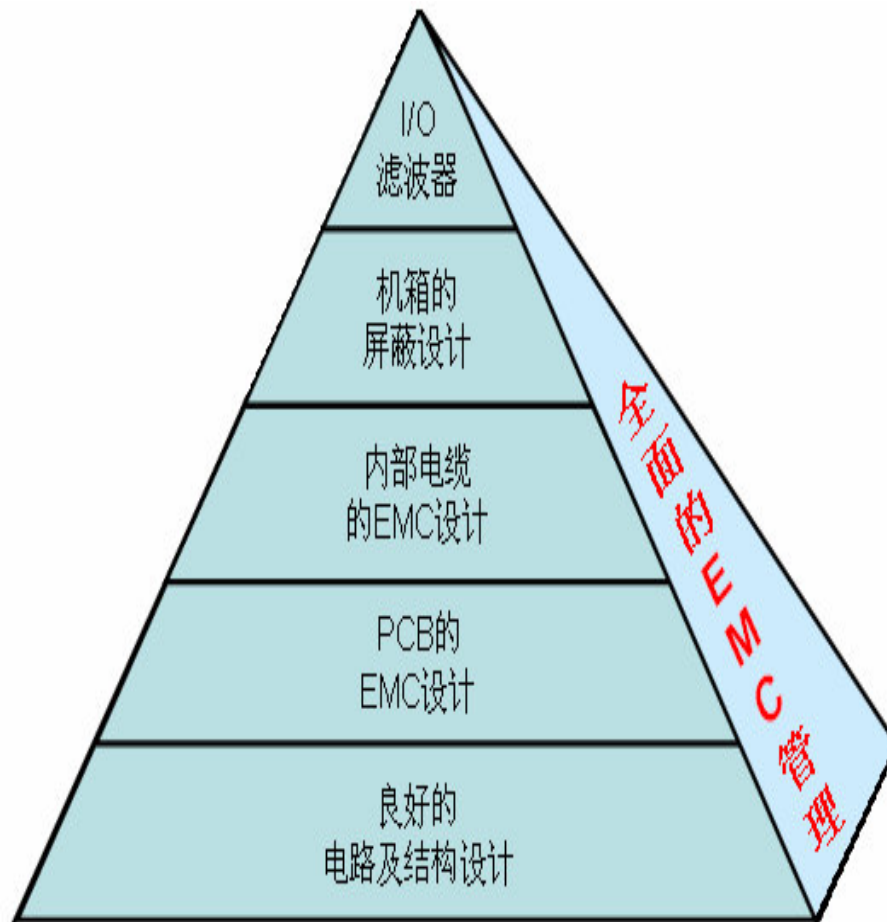
电磁干扰耦合方式与研究思路



EMC对策新理念

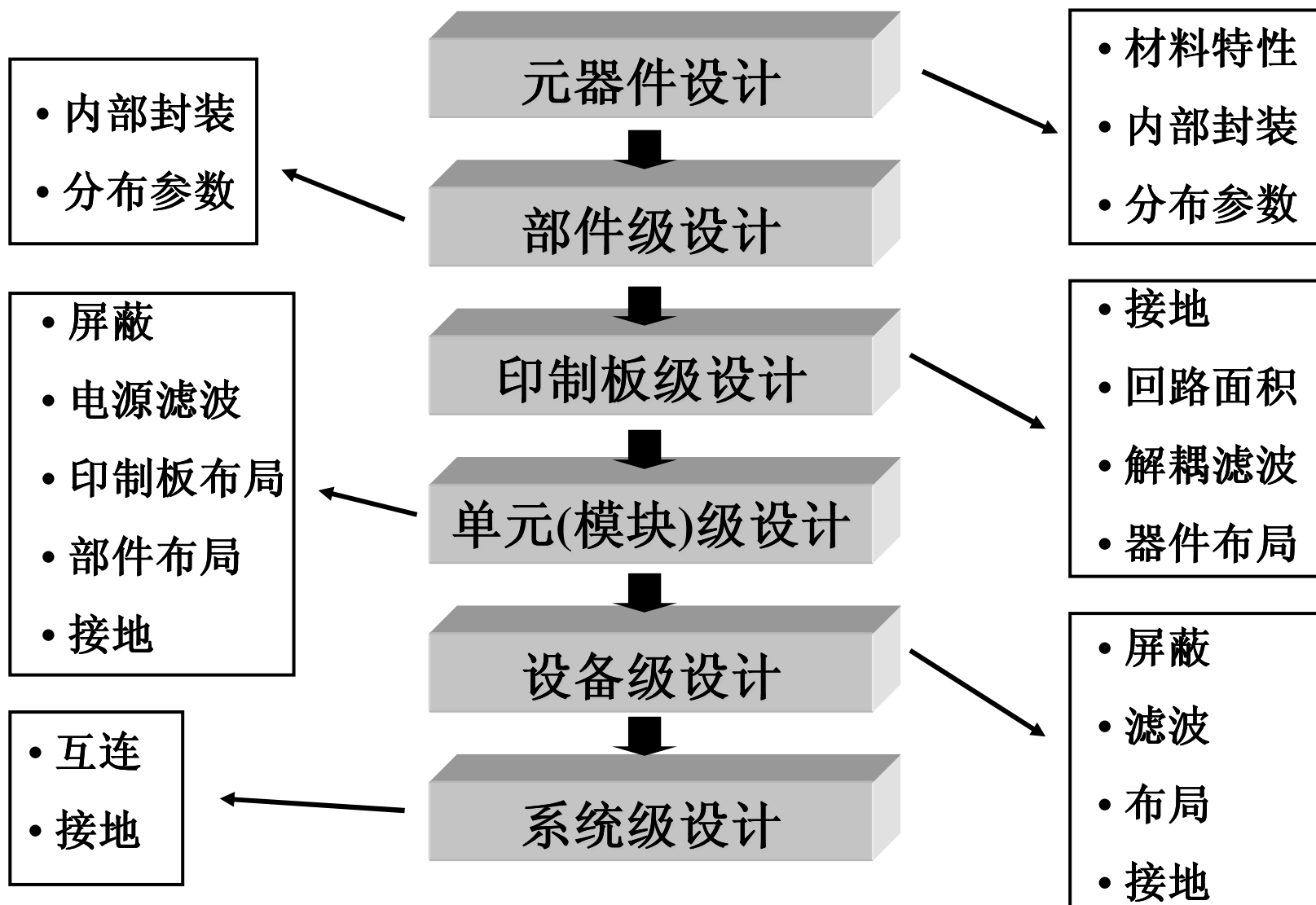


传统对策



新对策

电磁兼容设计的层次及主要工作

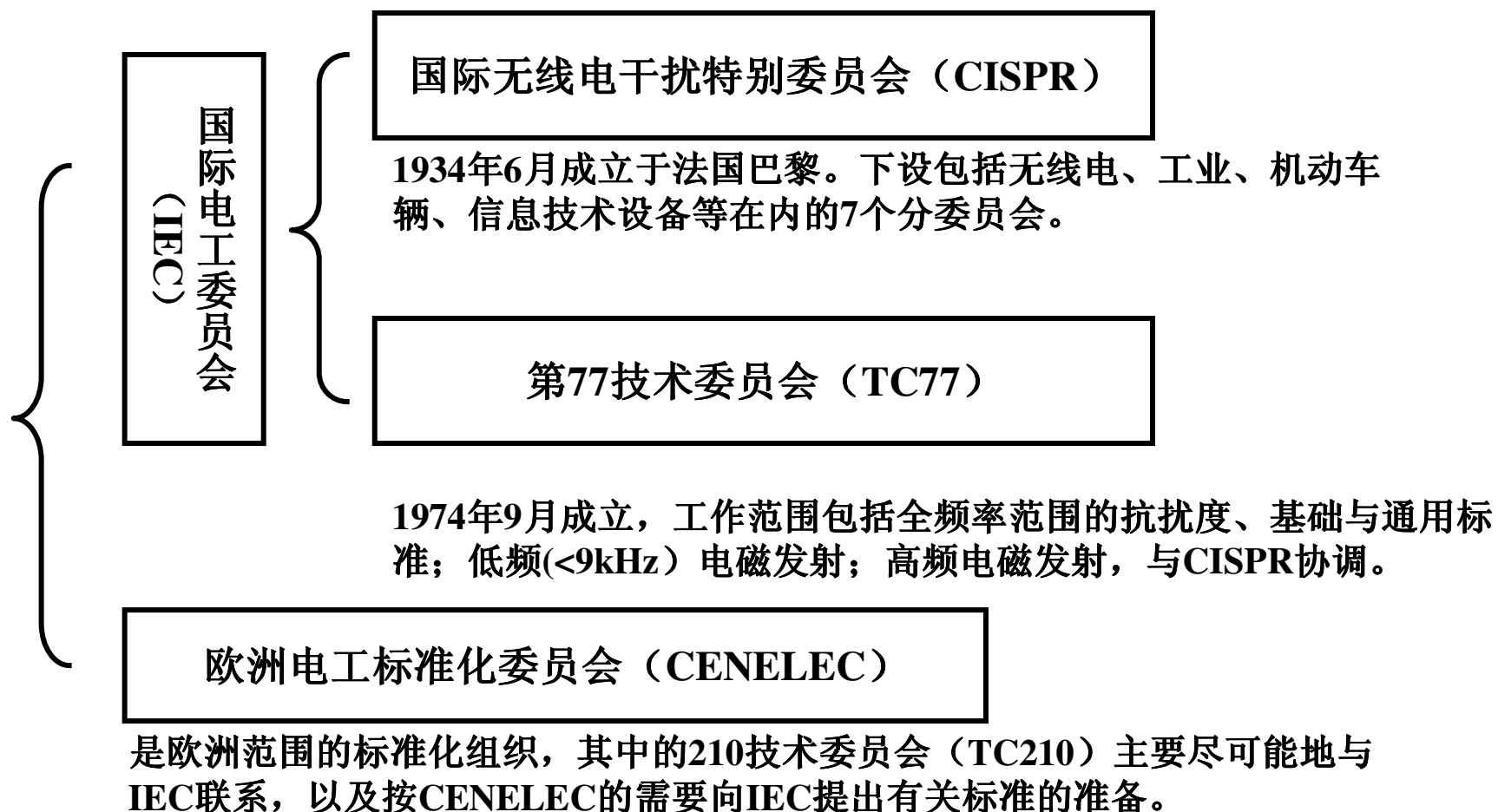


电磁兼容的标准体系与国际组织

国际标准化组织

- 国际电磁兼容标准体系
- 国内电磁兼容标准体系
- 国内外电磁兼容标准比较
- 国内相关民用标准
- 民用标准的关键项目
- 通信产品类电磁兼容标准解析

电磁兼容国际标准化组织



电磁兼容国际标准化组织

IEC对于电磁兼容方面的国际标准化活动有着特殊重要的作用。

承担研究工作的主要是：

1. 电磁兼容咨询委员会（ACEC）
2. 无线电干扰特别委员会（CISPR）
3. 第77技术委员会（TC77）

在IEC中，协调CISPR，TC77及其他TC和国际组织在EMC领域协作关系的机构是ACEC（电磁兼容咨询委员会）。ACEC的单位成员包括TC77、CISPR及其他有关的技术委员会和分技术委员会。

国际电工委员会
(IEC)

电磁兼容国际标准化组织

1934年6月成立于法国巴黎。是世界上最早成立的国际性无线电干扰组织，它的目标是促进国际无线电干扰问题在下列几方面达成一致意见，以利于国际贸易：

(1) 保护无线电接收装置，使其免受以下干扰：

- 所有类型的电子设备
- 点火系统
- 包括电力牵引系统的供电系统
- 工业、科学和医用无线电频率
- 声音和电视广播接收机
- 信息技术设备

电磁兼容国际标准化组织

国际无线电干扰特别委员会 (CISPR)

- (2) 规定干扰测量的设备和方法
- (3) 规定干扰源产生干扰的极限值
- (4) 声音和电视广播接收装置的抗扰度要求及测量方法
- (5) 安全规程对电气设备的干扰抑制的影响
- (6) 为避免重复工作，CISPR要和其他组织共同考虑

电磁兼容国际标准化组织

国际无线电干扰特别委员会 (CISPR)

CISPR负责制定出版物的各分会的分工如下：

- ❑ **CISPR/A:** 无线电干扰测量和统计方法
- ❑ **CISPR/B:** 工业、科学和医疗设备的无线电干扰
- ❑ **CISPR/C:** 架空电力线、高压设备和电力牵引系统的干扰
- ❑ **CISPR/D:** 机动车辆和内燃机的无线电干扰
- ❑ **CISPR/E:** 无线电接收设备的干扰
- ❑ **CISPR/F:** 家用电器、电动工具、照明设备和类似设备的干扰
- ❑ **CISPR/G:** 信息技术设备的干扰
- ❑ **CISPR/H:** 保护无线电业务的发射限值
- ❑ **CISPR/I:** 信息技术设备、多媒体设备和接收机的电磁兼容

注: E分会和G分会现在合并为I分会

电磁兼容国际标准化组织

第77技术委员会 (TC77)

TC77是IEC的电磁兼容技术委员会,成立于74年9月。TC77的组织结构包括SC77A、SC77B、SC77C三个分技术委员会:

- ❑ SC77A: 低频现象
- ❑ SC77B: 高频现象
- ❑ SC77C: 对高空核电磁脉冲的抗扰度

电磁兼容国际标准化组织

第77技术委员会 (TC77)

TC77制定的EMC标准主要是IEC61000系列标准，共分9个部分：

- 总则
- 环境
- 限值
- 试验和测量技术
- 安装和调试导则
- 通用标准
- 电能质量
- 暂缺
- 其他

电磁兼容国际标准化组织

西安电子科技大学

邱扬

CISPR与TC77的关系

CISPR和TC77都是从事EMC研究的技术委员会，这两个委员会分工如下：

- CISPR：负责一定系列产品频率为9kHz以上的发射要求，还负责制定一些产品的抗扰度标准。CISPR已制定了大量的产品抗扰度标准（如收音机、电视机及信息技术设备）。这些产品的通用抗扰度测量程序包括在CISPR16-2内。
- TC77：TC77最初的工作范围是制定产品电磁兼容标准，负责提出低于9kHz频率的发射要求，并负责整个频率范围内的抗扰度测试的基础标准。在ACEC的协调下，也可应IEC其他产品委员会的要求，制定产品的抗扰度标准。

电磁兼容国际标准化组织

欧洲电工标准化委员会 CENELEC

欧洲电工技术标准化委员会成立于1973年，总部设在比利时的布鲁塞尔。CENELEC得到欧共体的正式认可，是在电工领域而且是按照欧共体83/189/EEC指令开展标准化活动的组织。

CENELEC从事电磁兼容工作的技术委员会为TC210，它负责EMC标准制定或转化工作。TC210将现有的IEC的相关技术委员会和CISPR等的EMC标准转化为欧洲EMC标准。TC210的组织结构包括5个工作组。各工作组职责范围为：

- **WG1:** 通用标准
- **WG2:** 基础标准
- **WG3:** 电力设施对电话线的影响
- **WG4:** 电波暗室
- **WG5:** 用于民用的军用设备

欧盟电磁兼容指令

欧盟 (European Union——EU) 过去称为欧共体 (The European Communities-EC) 包括德国、法国、意大利、荷兰、比利时、卢森堡、英国、丹麦、爱尔兰、希腊、西班牙、葡萄牙以及1995年1月1日加入的奥地利、芬兰、瑞典等15个国家。下面提到的CE标记也适用于欧洲自由贸易联盟 (EFTA) 国家, 包括: 列支敦士登、挪威、冰岛。共18个国家, 涉及3亿6千多万人口。

由于欧盟是上述15个国家的区域性经济联盟, 为了协调各成员国对工业产品的不同安全规范, 决定以CE标记 (CE Marking) 作为确认产品是否达到协调后的基本安全要求 (Essential Safety Requirement-ESR)。如果产品符合有关指令的要求, 即表示该产品可在上述18个国家的范围内流通。

值得注意的是, 电磁兼容指令89/336/EEC从发布到过渡期结束长达6年零7个月, 这说明电磁兼容涉及的技术与涉及的领域都是十分复杂的。

欧盟电磁兼容指令

电磁兼容指令89/336/EEC是刊载于1989年5月3日欧共体官方公报No. L 139, P. 19上。其标题为：《各成员国就有关电磁兼容性的法律达成的共识》(On the approximation of the laws of the Member States relating to electromagnetic compatibility)。

此后，该指令又被两次修订：即刊载于1992年4月28日欧共体官方公报No. L126, P. 11的理事会指令92/31/EEC以及刊载于1993年8月30日欧共体官方公报No. L20, P. 7的理事会指令93/68/EEC。

该指令的保护对象为：

- (1) 民用无线电与电视接收机；
- (2) 工业制造设备；
- (3) 移动无线电设备；
- (4) 移动无线民和商用无线电话设备；
- (5) 医用和科学装置；
- (6) 信息技术设备；
- (7) 民用器具和家用电器设备；
- (8) 航空或航海无线电装置；
- (9) 教育电子设备；
- (10) 电信网络和装置；
- (11) 无线电和电视广播发射机；
- (12) 照明和荧光灯具。

该指令的适用范围包括:

- 在欧盟领域中出售或使用的产品
- 在欧盟内生产的新的产品或由第三国进口的新的产品或二手货

从产品类型看包括所有电子或电器的产品，包括含有电子、电气零件的仪器及装备以及直接上市卖给最终使用的复合者的复合部件或附件 (Complex Components, Subassemblies)，例如，电子电路板，热敏开关等。也包括所有易于产生电磁骚扰的设备或本身功能易受电磁干扰的设备。此外，部分适用的产品有按指令90/384/EEC管理的非自动衡器以及按指令75/332/EEC管理的农林牵引机。由此可见，欧盟电磁兼容指令89/336/EEC的适用范围是十分广阔的。

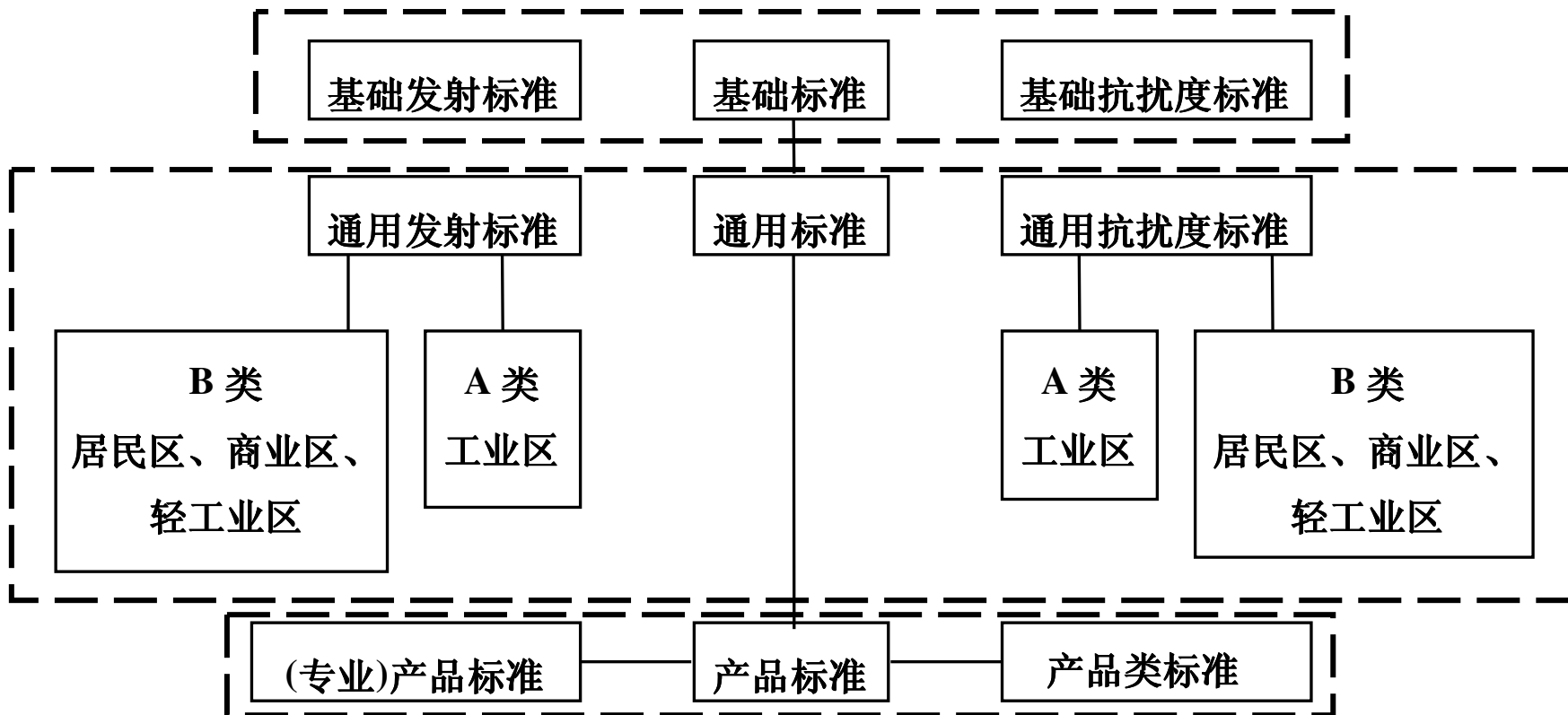
欧洲电磁兼容标准与IEC标准的关系

欧洲标准冠以字头“EN”，其编号规则见表8-6。自1997年1月开始，IEC采用了新的编号规则：其标准号为以6字开始的5位数。例如：原来的IEC34-1改为IEC60034-1。这样IEC的标准号与来自IEC的欧洲标准编号完全相同了。

表 欧洲标准编号规则

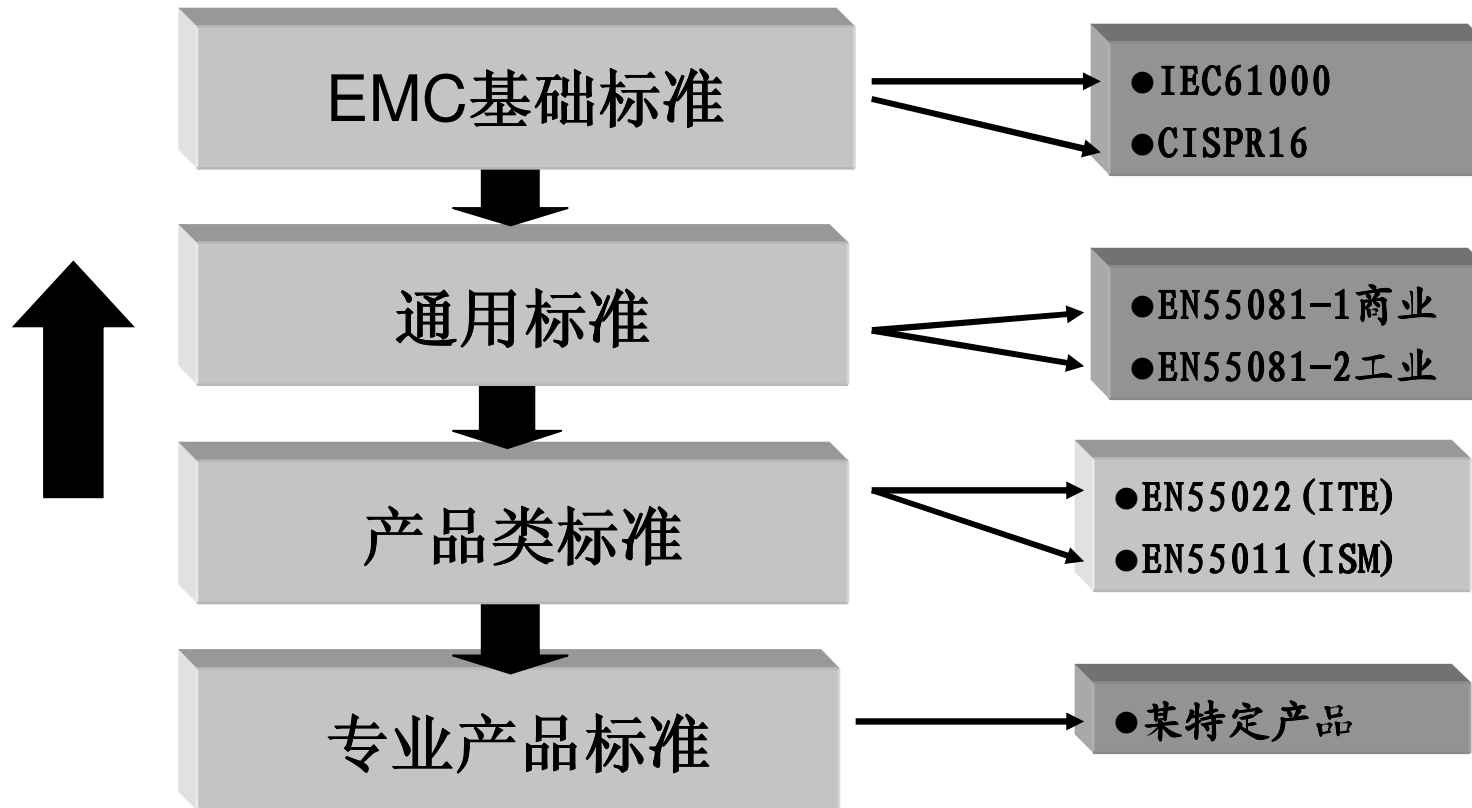
| 引用标准/性质 | 标准编号 | 举 例 |
|-----------|-----------|---------------------|
| 引自CENELEC | EN50××× | EN50801 |
| 引自CISPR | EN55××× | EN55013（源于CISPR13） |
| 引自IEC | EN60××× | EN61000（源于IEC61000） |
| 预备草案 | prEN××××× | ENV50204 |
| 临时标准 | ENV××××× | |

电磁兼容国际标准体系



国际电磁兼容标准体系

——相关标准与相互关系



EMC基础标准

西安电子科技大学

邱扬

基础标准(Basic Standards)是其他电磁兼容标准的基础，一般不涉及具体的产品。它规定了现象、环境特征、试验和测量方法、试验仪器和基本试验装置，也可以规定不同的试验电平范围。

基础标准如：

IEC 50 (161)

电磁兼容术语

CISPR 16-1

无线电干扰与抗扰度测量设备

CISPR 16-2

无线电干扰与抗扰度测量方法

CISPR 16-3

报告

基础发射标准如：

IEC 61000-4-7

供电系统及所连设备谐波的谐间波的测量和

测量仪器导则

基础抗扰度标准包括了IEC 61000-4中(除IEC 61000-4-7以外)的全部标准。如：IEC 61000-4-2静电放电抗扰度实验。

通用标准

通用标准(General Standards)规定了一系列的标准化实验方法与要求(限值),并给出这些方法要求适用于什么环境。如果某种产品没有产品类标准或产品标准,也可以使用通过标准。通用标准将环境分为两类:

A类(工业环境):例如,有工业及医疗射频设备的环境;频繁切断大感性负载或大容性负载的环境;大电流并伴有强磁场环境等。

B类(居民区、商业区及轻工业环境):例如:居民楼群、商业零售网点、商业大楼、公共娱乐场所、户外场所(如加油站、停车场、游乐场、公园、体育场)等。

通过标准举例如下:

| | | |
|-------------------|-----------------|------------|
| EN 50081-1 | (通用发射标准 | B类) |
| EN 50081-2 | (通用发射标准 | A类) |
| EN 50082-0 | (通用抗扰度标准 | B类) |
| EN 50082-2 | (通用抗扰度标准 | A类) |

产品类标准

产品类标准(Product-Family Standards): 针对某类产品规定了特殊的电磁兼容要求(发射或抗扰度)以及详细的测量程序。产品类标准不需要像基础标准那样规定一般的测试方法。产品类标准比通用标准包含更多的特殊与详细的性能规范。其测试与限值必需与通用标准协调,如存在偏离,应说明必要性与合理性,并可增加测试项目与测试电平。

专业产品标准

(专用)产品标准 (Dedicated Product Standards):通常专用的产品EMC标准包含在某种特定产品的一般用途标准之中，而不形成单独的EMC标准。对于电磁发射，当一个产品包含于某一产品类中时，很少需要考虑专用的产品EMC标准。只有在极特殊的情况下，TC210在其协调作用范围内考虑提出某些改变。当决定产品的抗扰度时，可能因其特殊的功能在需要考虑其抗扰度要求，为此专用的产品标准或相应的条款应给出清楚的性能准则。

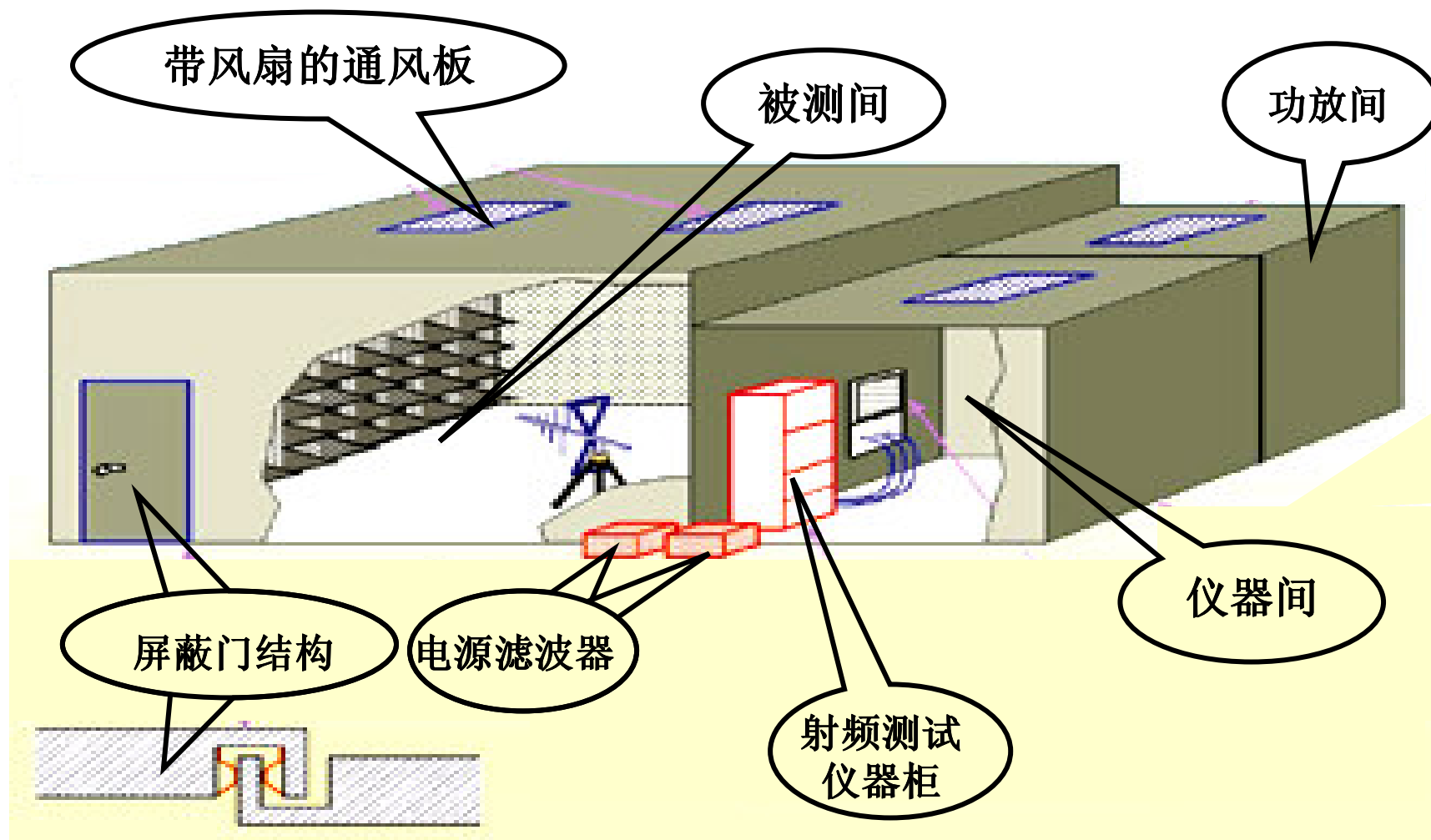
民用电子设备电磁抗扰度标准

| 标准名称 | IEC 标准号 | 相应国内标准号 |
|------------------|---------------|---------------|
| 抗扰度试验总论 | IEC61000-4-1 | GB/T 17626.1 |
| 静电放电试验 | IEC61000-4-2 | GB/T 17626.2 |
| 辐射干扰试验 | IEC61000-4-3 | GB/T 17626.3 |
| 电快速瞬变脉冲群试验 | IEC61000-4-4 | GB/T 17626.4 |
| 浪涌抗扰度试验 | IEC61000-4-5 | GB/T 17626.5 |
| 射频场感应传导干扰试验 | IEC61000-4-6 | GB/T 17626.6 |
| 谐波试验 | IEC61000-4-7 | GB 17625.1 |
| 对电源频率的磁场干扰试验 | IEC61000-4-8 | |
| 对脉冲磁场的干扰试验 | IEC61000-4-9 | |
| 对减幅振荡磁场的干扰试验 | IEC61000-4-10 | |
| 对电压扰动、短时中断和波动的试验 | IEC61000-4-11 | GB/T 17626.11 |

典型民用电子产品所需满足电磁抗扰度标准

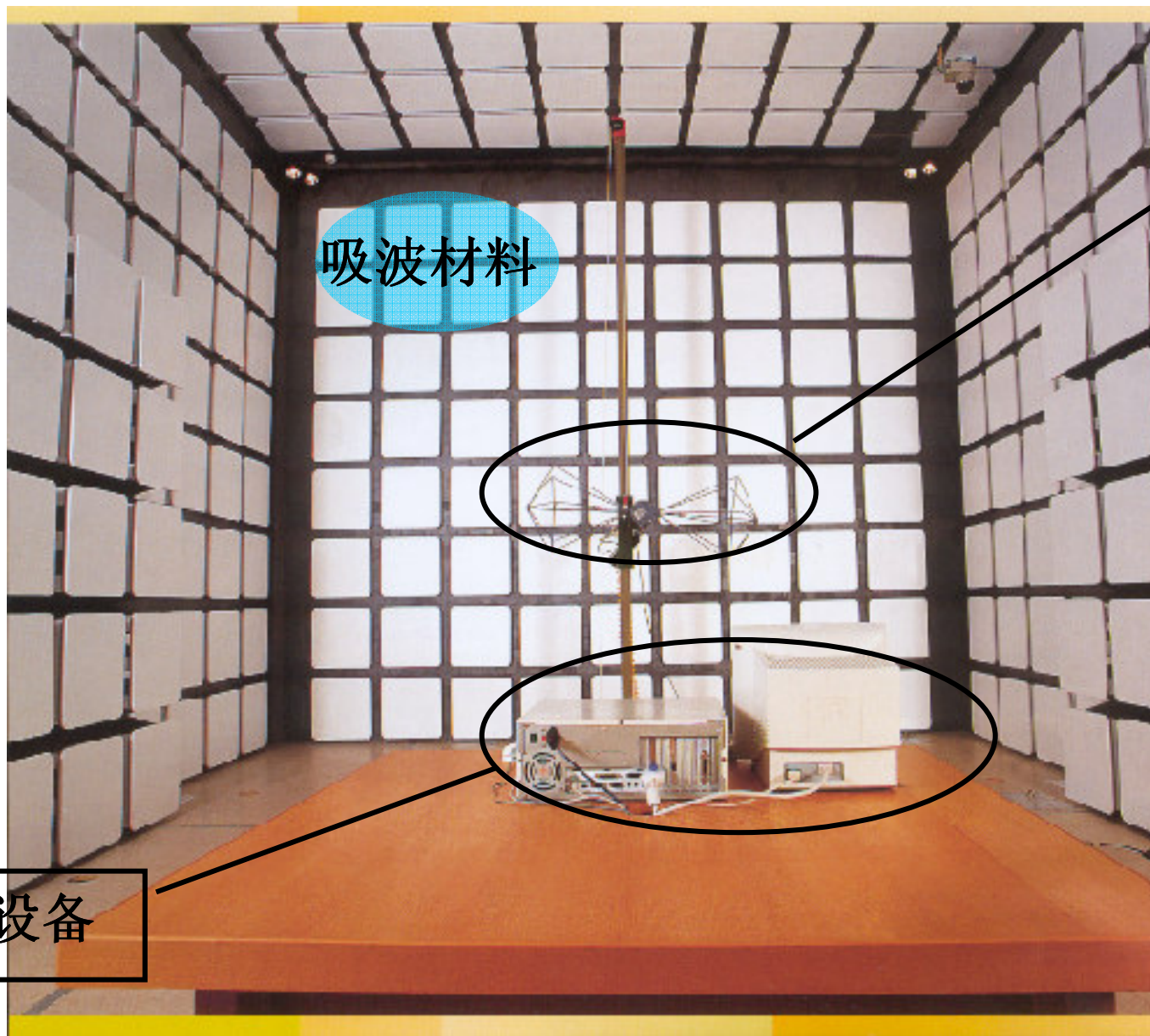
| 标准 | 火灾报警器 | 计算机 | 程控交换机 | GSM 基站 | 显示器 |
|---------------|-------|-----|-------|--------|-----|
| IEC61000-4-2 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| IEC61000-4-3 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| IEC61000-4-4 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| IEC61000-4-5 | — | — | — | ✓ | ✓ |
| IEC61000-4-6 | — | — | — | ✓ | — |
| IEC61000-4-8 | — | — | — | — | ✓ |
| IEC61000-4-11 | — | — | — | ✓ | — |

GJB151A的试验场地



电辐射骚扰测试环境（IT设备）

西安电子科技大学
邱扬



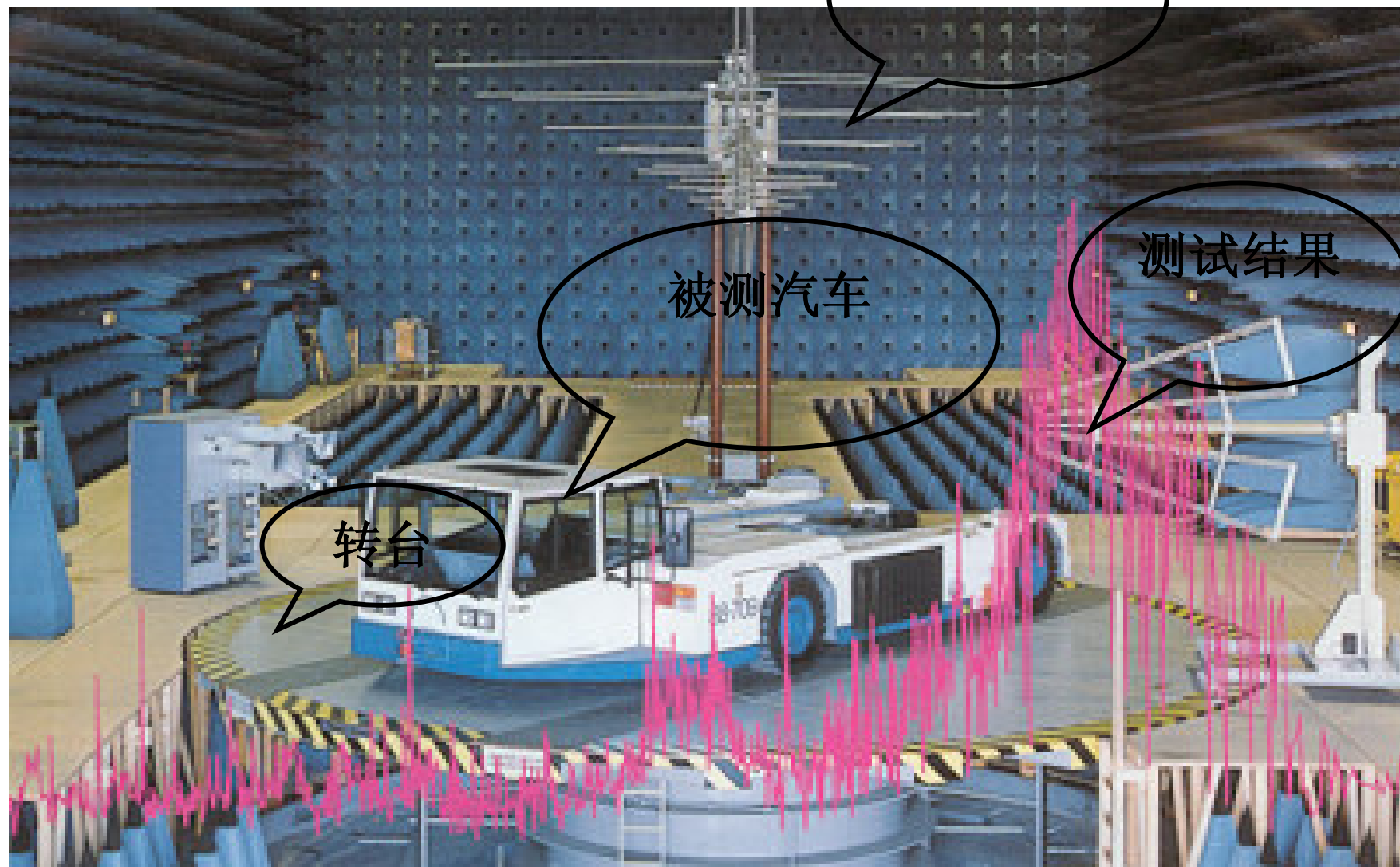
吸波材料

天线

被测设备

辐射骚扰试验（汽车设备）

西安电子科技大学
邱扬



民用电子设备电磁骚扰标准

| 标准名称 | 标准号 |
|--------|---------------------------------|
| 辐射骚扰试验 | EN55022-R (GB9254, FCC Part 15) |
| 传导骚扰试验 | EN55022-C (GB9254, FCC Part 15) |
| 辐射杂散发射 | GSM11.20R |
| 传导杂散发射 | GSM11.20C |

典型民用电子产品需满足的电磁骚扰标准

| 产品 标准 | 火灾报警器 | 计算机 | 显示器 | 程控交换 机 | GSM 基站 | GSM 附 属设备 |
|------------|-------|-----|-----|-----------|-----------|--------------|
| EN55022-R | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| EN55022-C | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| GSM11.20-R | — | — | — | — | ✓ | — |
| GSM11.20-C | — | — | — | — | ✓ | — |

国内电磁兼容标准体系

- 基础标准** 如GB4365术语：GB/66113主要规定测量设备；GB/T15658关于环境等等。
- 通用标准** 其中GB8702主要涉及在强电磁场环境下对人体的防护要求；GB/T14431主要涉及无线电业务要求的信号/干扰保护比。
- 产品标准** 如GB4343、GB4824等。在我国的电磁兼容国家标准中尚无(专用)产品标准。

系统间电磁兼容性标准

协调不同系统之间的电磁兼容性要求。我国现行的电磁兼容国家标准中属于系统间的有13个。例如：GB6364以及GB13613至GB13618等。在这些标准中，大都根据多年的研究结果规定了不同系统之间防护距离。如机场中的通信导航设备为防护广播电台、短波通信发射台、高压电力系统、电气化铁道等强电系统所需的保护距离。

国内外电磁兼容标准比较

根据国家质量技术监督局的尽量采用国际标准或先进国家标准来制定我国国家标准的指导思想，我国的电磁兼容标准绝大多数引自国际标准。其来源包括：

1. 引自国际无线电干扰特别委员会(CISPR)出版物。例如：GB/T 6113, GB14023, GB15707, GB16607等等。在附件一中，此类标准名称后的括号内标明其相应的CISPR出版物号及其版本。
2. 引自国际电工委员会(IEC)标准。例如：GB4365, GB/T17626系列。
3. 部分引自美国军用标准(MIL-STD-×××)，例如：GB15540。
4. 部分引自国际电信联盟(ITU)有关文件，例如GB/T15658。
5. 引自国外先进标准。例如：GB6833系列。

国内目前已经制定并颁布的相关民用标准

西安电子科技大学

邱扬

| 标准代号 | 基础类标准 | 对应国际标准 |
|--------------------|---------------------------|----------------------|
| GB/T 17626.1-1998 | 抗扰度试验总论 | IEC 61000-4-1: 1992 |
| GB/T 17626.2-1998 | 静电放电抗扰度试验 | IEC 61000-4-2: 1995 |
| GB/T 17626.3-1998 | 射频电磁场辐射抗扰度试验 | IEC 61000-4-3: 1995 |
| GB/T 17626.4-1998 | 电快速瞬变脉冲群抗扰度试验 | IEC 61000-4-4: 1995 |
| GB/T 17626.5-1999 | 浪涌（冲击）抗扰度试验 | IEC 61000-4-5: 1995 |
| GB/T 17626.6-1998 | 射频场感应的传导骚扰抗扰度 | IEC 61000-4-6: 1996 |
| GB/T 17626.7-1998 | 供电系统及所连设备谐波的谐间波的测量和测量仪器导则 | IEC 61000-4-7: 1996 |
| GB/T 17626.8-1998 | 工频磁场抗扰度试验 | IEC 61000-4-8: 1993 |
| GB/T 17626.9-1998 | 脉冲磁场抗扰度试验 | IEC 61000-4-9: 1993 |
| GB/T 17626.10-1998 | 阻尼振荡磁场抗扰度试验 | IEC 61000-4-10: 1993 |
| GB/T 17626.11-1998 | 电压暂降短时中断和电压变化的抗扰度试验 | IEC 1000-4-11: 1994 |
| GB/T 17626.12-1998 | 振荡波抗扰度试验 | IEC 61000-4-12: 1995 |

国内目前已经制定并颁布的相关民用标准

西安电子科技大学

邱扬

| 标准代号 | 通信类标准 |
|----------------|--|
| GB 15540-1995 | 陆地移动通信设备电磁兼容技术要求和测量方法 |
| YD/T 968-1998 | 电信终端设备电磁兼容性限值及测量方法 |
| YD/T 983-1998 | 通信电源设备电磁兼容性限值及测量方法 |
| YD/T 1003-1999 | 卫星通信VSAT地球站电磁干扰的测量方法 |
| YD/T 1103-2001 | 无绳电话的电磁兼容性要求及测量方法 |
| YD 1138-2001 | 固定无线链路设备及其辅助设备 电磁兼容性要求和测量方法 |
| YD 1032-2000 | 900/1800MHz TDMA数字蜂窝移动通信系统电磁兼容性限值和测量方法第一部分：移动台及其辅助设备 |
| YD 1139-2001 | 900/1800MHz TDMA 数字蜂窝通信系统的电磁兼容性要求及测量方法第二部分：基站及其辅助设备 |

国内目前已经制定并颁布的相关民用标准

| 标准代号 | 信息技术设备类标准 |
|---------------|---------------------|
| GB 9254-1998 | 信息技术设备的无线电骚扰限值和测量方法 |
| GB 17618-1998 | 信息技术设备抗扰度限值和测量方法 |

| 标准代号 | 广播电视产品类标准 |
|----------------|------------------------------------|
| GB/T 9383-1999 | 声音和电视广播接收机及有关设备抗扰度限值和测量方法 |
| GB 13836-2000 | 电视和声音信号电缆分配系统 第2部分:设备的电磁兼容 |
| GB 13837-1997 | 声音和电视广播接收机及有关设备无线电干扰特性限值和测量方法 |
| GB 16787-1997 | 30MHz~1GHz 声音和电视信号的电缆分配系统辐射测量方法和限值 |
| GB 16788-1997 | 30MHz~1GHz 声音和电视信号电缆分配系统抗扰度测量方法和限值 |