



华南理工大学  
South China University of Technology

# 电力电子变换器的EMC

张波 教授

华南理工大学电力学院

# 主要内容

- 一、**EMC**基本概念
- 二、电力电子变换器**EMI**基本类型
- 三、电力电子变换器**EMI**抑制技术
- 四、**EMC**设计

# 引言

- 现代电力电子装置的发展趋势

- ⊕ 体积小、重量轻、效率高和高可靠性



- 电力电子装置**高频化**

- ⊕ 优化滤波器、变压器体积和重量设计
- ⊕ 开关损耗增加，**电磁干扰增大**



- 电磁兼容技术

- ⊕ 功率密度的急剧增大导致装置内部电磁环境越来越复杂
- ⊕ 国际电磁兼容法规日益严格

# 电磁兼容技术的发展

- 从“路”到“场”，从低频到高频，从狭义的电磁骚扰到广义的电磁兼容
- **1881年**，英国科学家希维赛德发表《论干扰》一文，标志着研究干扰问题的开端
- **1888年**，德国物理学家赫兹首创了天线，用实验证实了电磁波的存在，开始了对电磁干扰的实验研究
- **1933年**，国际无线电干扰特别委员会**CISPR**成立，开始对电磁干扰问题的世界性的有组织的研究。
- **20世纪40年代**，提出电磁兼容性概念
- **1964年**，出版**IEEE Transactions on EMC**，标志电磁兼容学科形成。
- **20世纪70年代**，电磁兼容技术成为非常活跃的学科领域
- **1996年**，欧共体**12国**和欧洲自由贸易联盟**6国**共同宣布实行电磁兼容性许可证制度，使电磁兼容性认证与电工电子产品安全性认证同等重要。

# 一、EMC基本概念

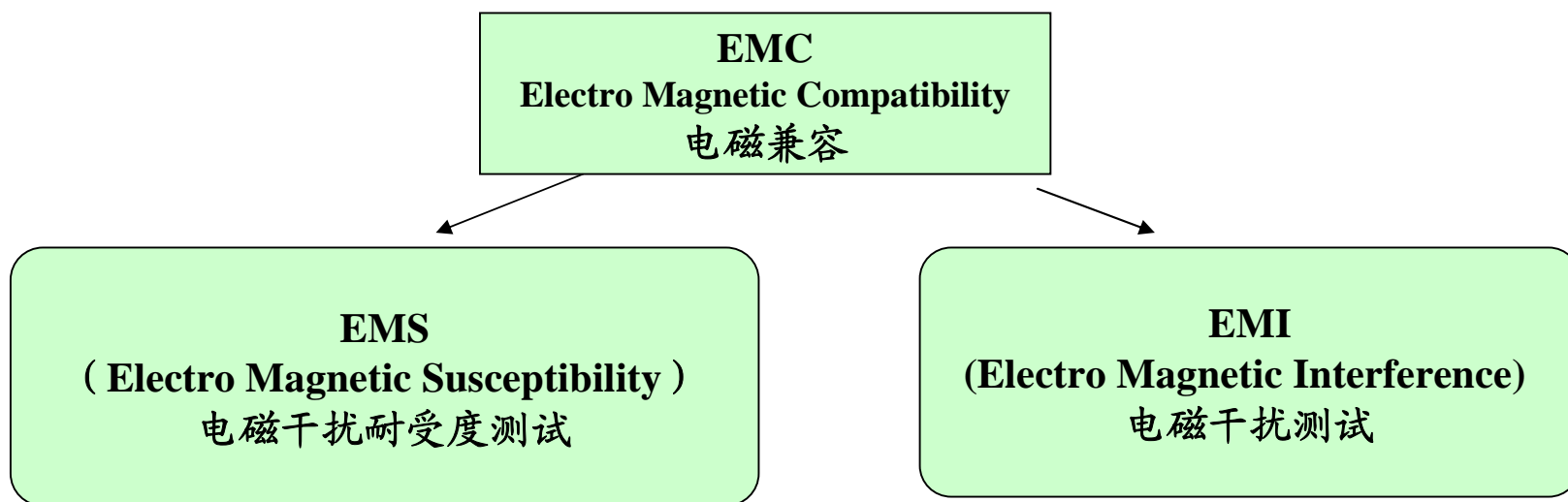
- 什么是EMC
- EMI发生的要素
- 电源线上的干扰类型
- 测试标准
- 电磁噪声传播途径
- 测试方法和测试设备
- 干扰方式

# 一、EMC基本概念

## 1. EMC概念

何谓EMC?

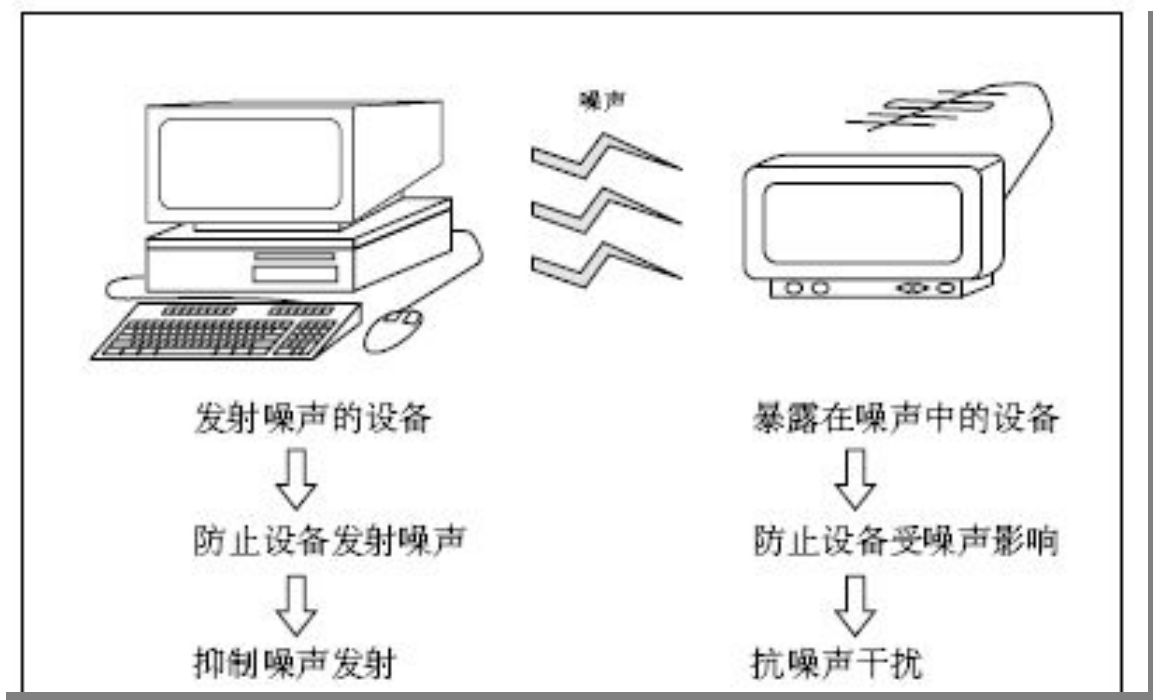
国际电工委员会(IEC)定义：  
设备或系统在其电磁环境中能正常工作，且不对该环境中的任何事物构成不能承受的电磁骚扰的能力。



# 一、EMC基本概念

## 2. EMI发生的要素

- 1) 干扰源;
- 2) 干扰耦合路径;
- 3) 干扰敏感设备。



# 一、EMC基本概念

## 3. 电源线上干扰的类型

主要因素	干扰类型	典型的起因
1	电压跌落	雷击；重载接通；电网电压低下
2	电气噪声	雷达；无线电信号；电力公司和工业设备的电弧；逆变器
3	失压	恶劣气候；变压器故障；
4	频率偏移	发电机不稳定；区域性电网故障
5	浪涌	突然减轻负载；变压器抽头不恰当
6	谐波失真	整流；开关负载；开关电源；调速电机
7	畸变干扰	雷击；功率因数补偿电容的切换；空载电机的断开



# 一、EMC基本概念

## 4. 测试标准

大部分国家的标准都是基于**国际电工委员会（IEC）**所制定的标准。IEC有两个平行的组织负责制定EMC标准，分别是**CISPR**（国际无线电干扰特别委员会）和**TC77**（第77技术委员会）。

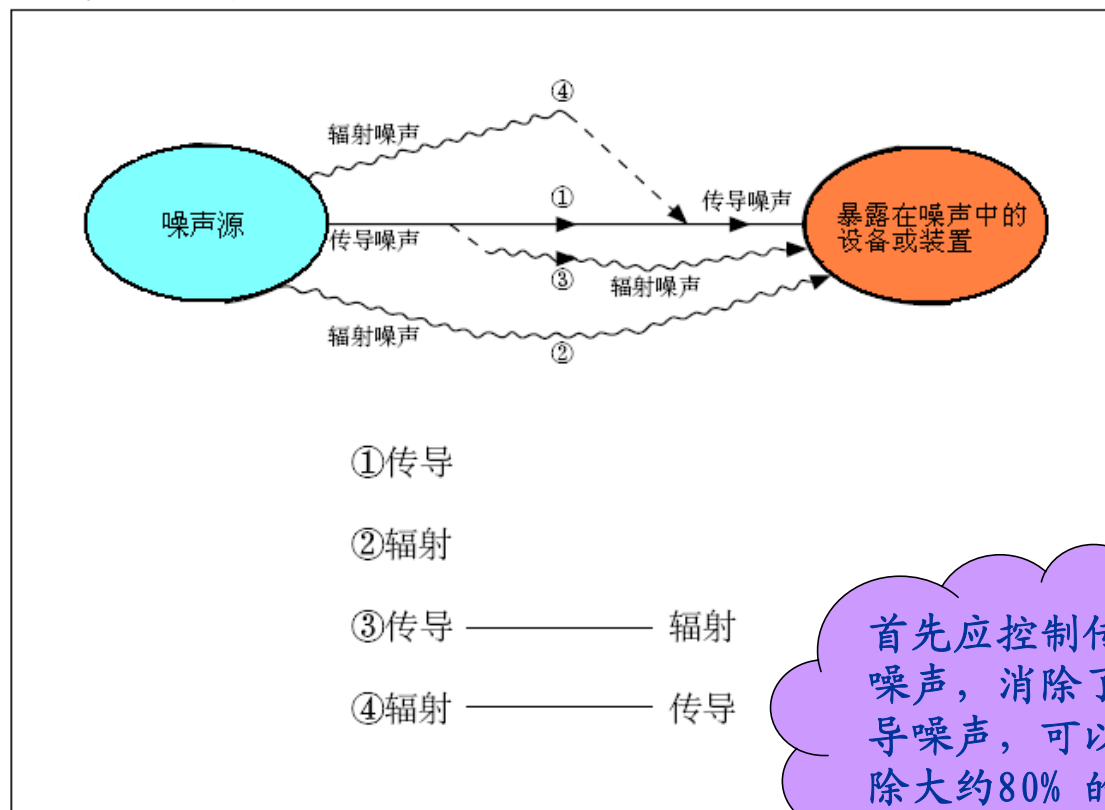
**我国**的民用产品电磁兼容标准是基于CISPR和IEC标准，目前已发布57个，编号为GBXXXX - XX，例如GB 9254-98。

各国EMC标准	
中国CCC	GB9254
欧盟CE	EN55022/24
美加FCC	FCC PART15
台湾BSMI	CNS13438
日本VCCI	CISPR22

# 一、EMC基本概念

## 5. 电磁噪声传播途径

### ■ 噪声传导路径



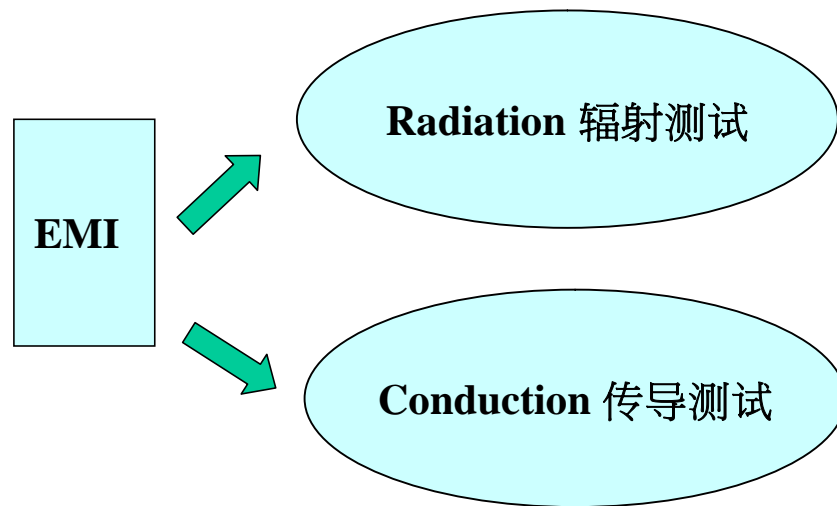
1) **辐射噪声** 由于是辐射干扰源以电磁场的形式在空间传播。频率范围：**30M~1GHz**

2) **传导噪声** 是电磁干扰能量以电压或电流的形式通过金属导线或集总元件耦合至接收器。频率范围：**0.1~30MHz**

首先应控制传导噪声，消除了传导噪声，可以消除大约80%的辐射问题。

# 一、EMC基本概念

## 6. 测试方法和测试设备



# 一、EMC基本概念

## 0.15 ~ 30MHz的交流电源线传导骚扰电压限值

频率范围 (MHz)	A级设备		B级设备	
	准峰值 (dB $\mu$ V)	平均值 (dB $\mu$ V)	准峰值 (dB $\mu$ V)	平均值 (dB $\mu$ V)
0.15~0.50	79	66	66~56	56~46
0.50~5	73	60	56	46
5~30	73	60	60	50

# 一、EMC基本概念

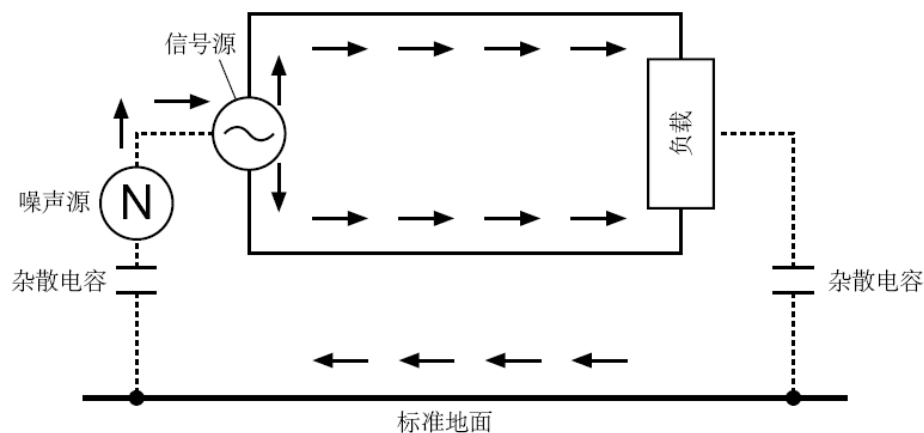
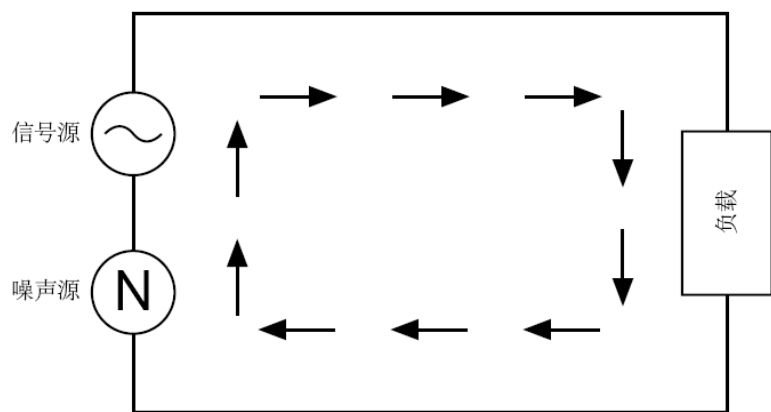
## 30 ~ 1000MHz的辐射骚扰限值 (测试距离10m)

频率范围 (MHz)	A级设备准峰值 (dB $\mu$ V)	B级设备准峰值 (dB $\mu$ V)
30~230	40	30
230~1000	47	37

# 一、EMC基本概念

## 7. 干扰方式

传导型EMI噪声包括**共模噪声**和**差模噪声**两种。



差模EMI是指由相线与中线所构成回路中的干扰信号，

共模EMI则是指由相线或中线与地线所构成回路中的干扰信号。

# 一、EMC基本概念

## 共模和差模噪声比较

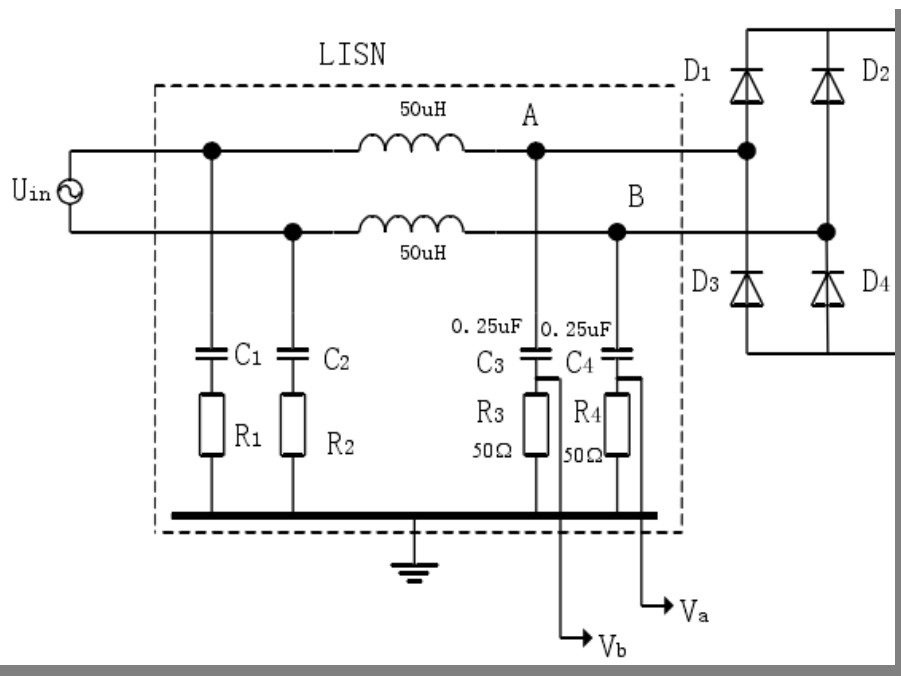
	共模	差模
传输路径	线—地	线—线
频率	高(>1MHz)	低
抑制难易程度	难	易
噪声比重	主要	次要
线路阻抗	大	小

# 一、EMC基本概念

## LISN

输入端接入线性阻抗稳定网络(LISN)，其主要作用是：①减小电网阻抗对测量结果的影响；②隔离来自电网端的干扰。

在150kHz~30MHz频率范围内为相线与地线之间、中线与地线之间提供50Ω的恒定阻抗，为待测设备的传导干扰提供通道。



差模噪声：

$$V_{DM} = (V_a - V_b) / 2$$

共模噪声：

$$V_{CM} = (V_a + V_b) / 2$$



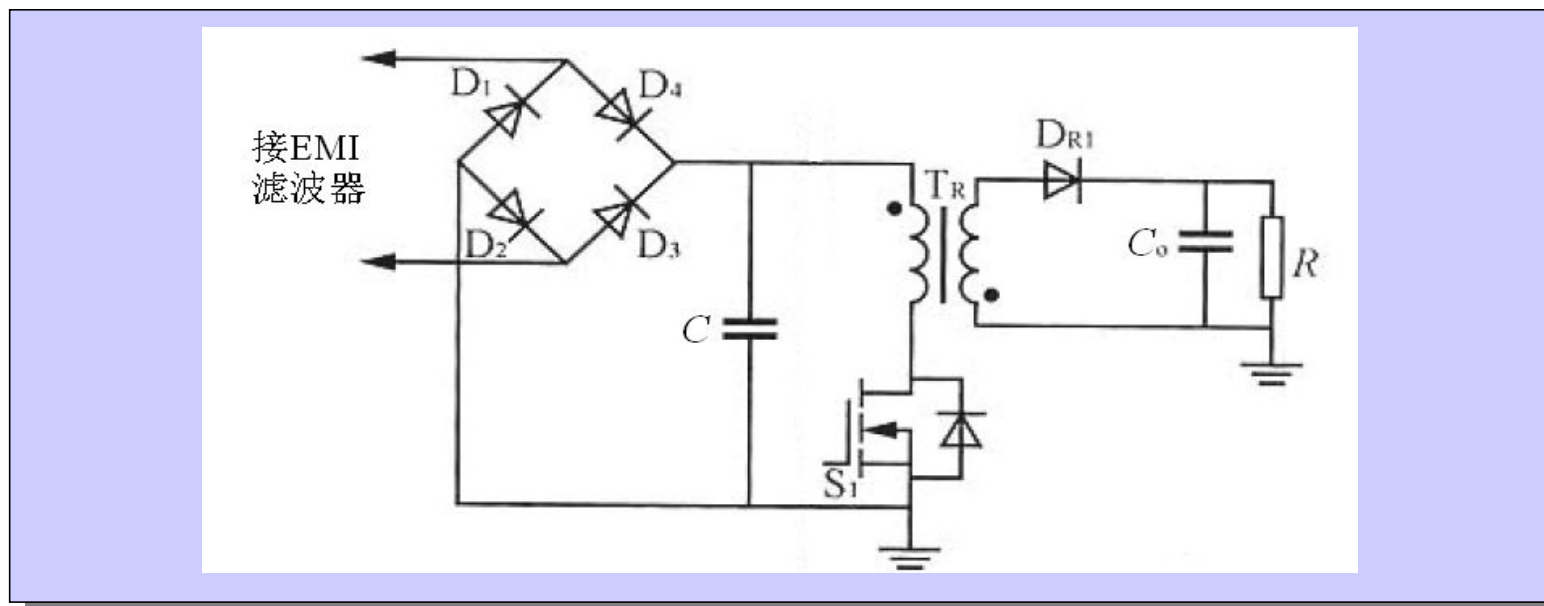
## 二、电力电子变换器EMI类型

### 电力电子变换器EMI鲜明特点：

- a. EMI干扰源的位置比较清楚，主要集中在功率开关器件、二极管以及与之相连的散热器和高频变压器上。
- b. 作为工作于开关状态的能量转换装置，电力电子变换器的电压、电流变化率很高，其产生的EMI噪声信号即具有很宽的频率范围，又有一定的强度。
- c. 差模噪声主要由开关变换器的脉动电流的 $di/dt$ 引起。共模噪声与电压切换相关，主要由较高的 $dv/dt$ 与对地的寄生电容相互作用而产生的高频振荡引起。共模和差模噪声二者可能同时产生。
- d. 印制电路板布线不当也是引起电磁干扰的主要原因。

## 二、电力电子变换器EMI类型

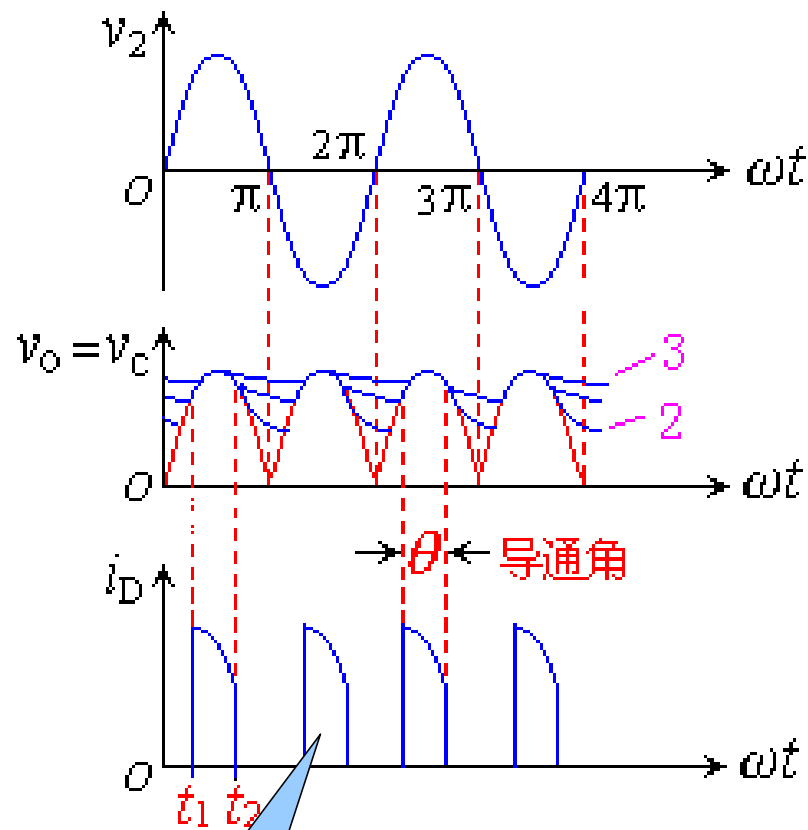
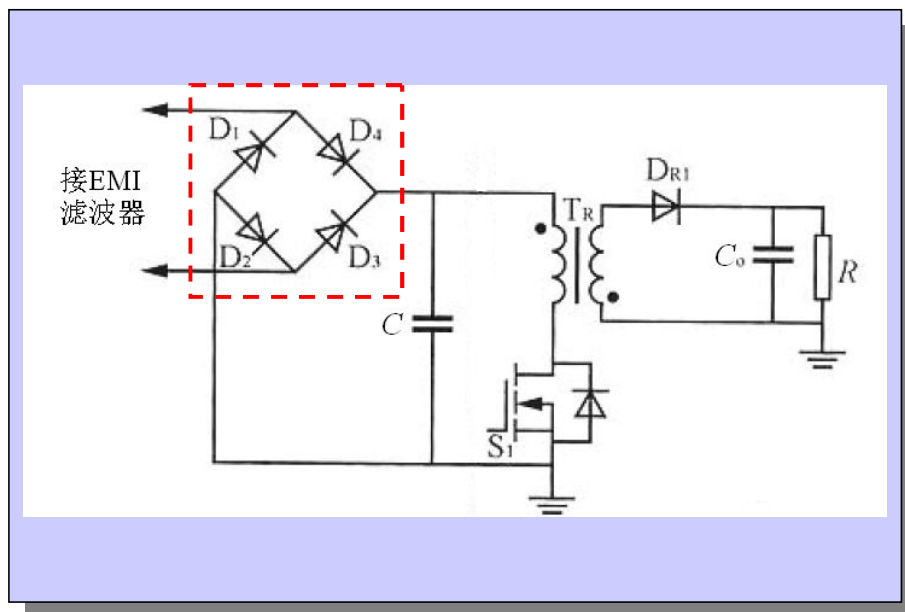
### 例1：单管反激开关电源电磁骚扰的产生和耦合途径



典型反激式开关电源

## 二、电力电子变换器EMI类型

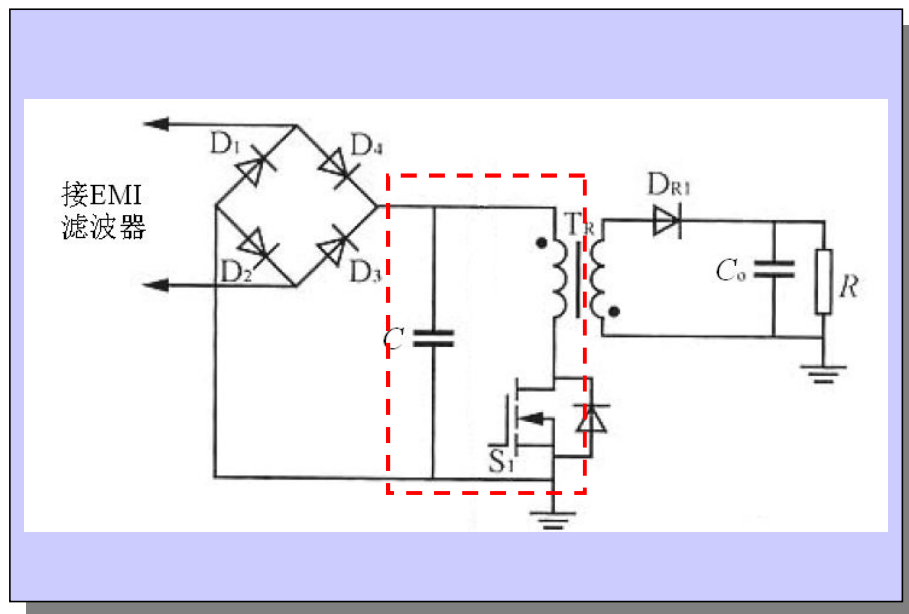
- 输入整流电路



脉动电流

## 二、电力电子变换器EMI类型

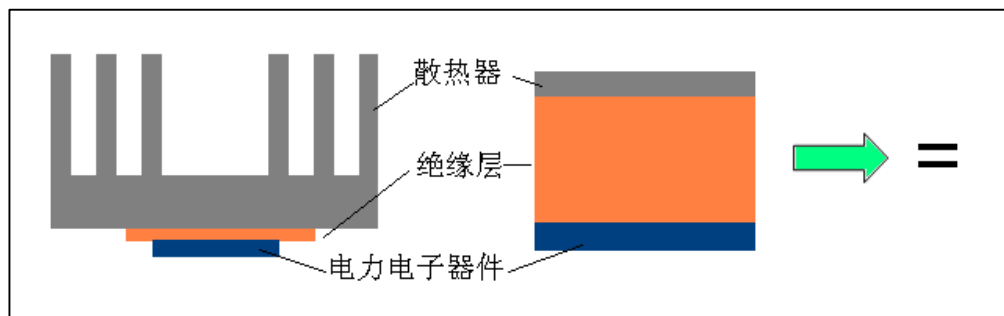
- 开关管和开关回路



1) 开关管及其散热片与外壳和电源内部的引线间存在分布电容，它产生的 $du/dt$ 具有较大幅度的脉冲。

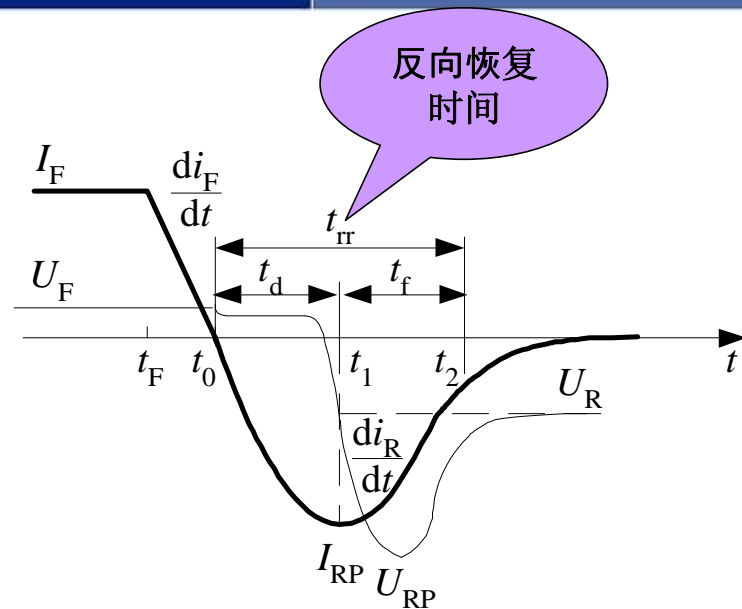
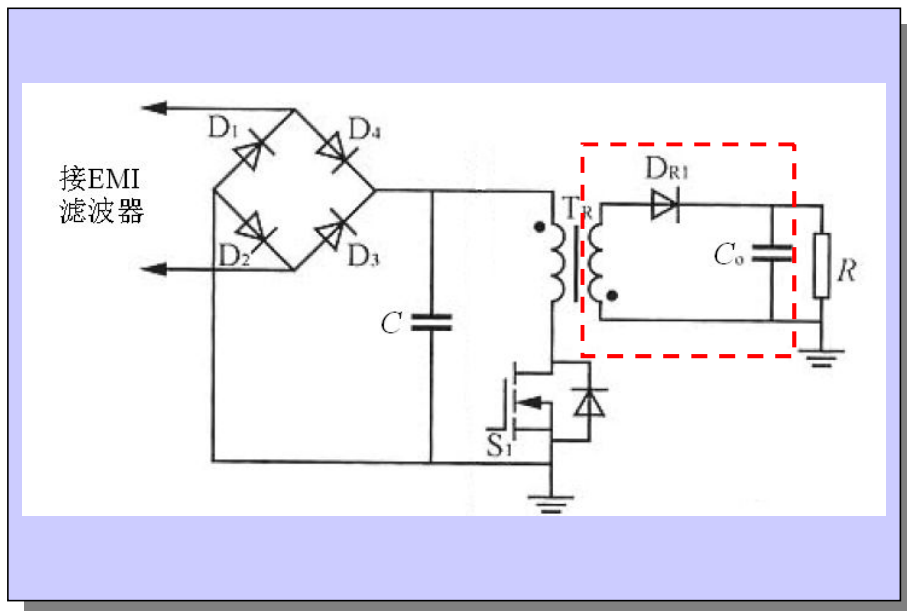
2) 高频变压器漏感产生了 $di/dt$ ，迭加在关断电压上，形成关断电压尖峰，从而形成传导干扰。

3) 高频开关回路可形成电磁辐射，辐射骚扰强度 $\propto IAf^2$



开关器件与散热器间寄生电容示意图

## 二、电力电子变换器EMI类型



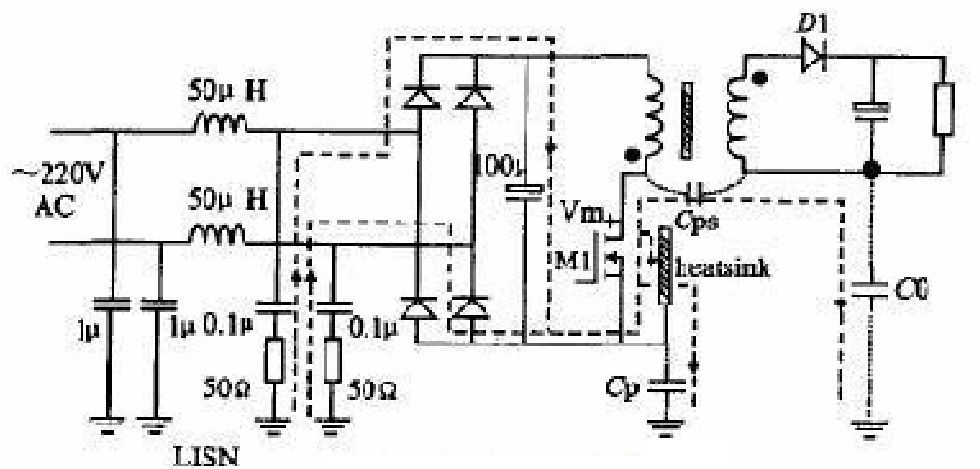
正向偏置转换为反向偏置

- 次级整流回路

输出整流二极管截止时有一个反向电流，它会在变压器漏感和其他分布参数的影响下形成高频衰减振荡，产生较强的高频干扰，频率可达几十兆赫兹。

## 二、电力电子变换器EMI类型

- 由分布电容引起的骚扰

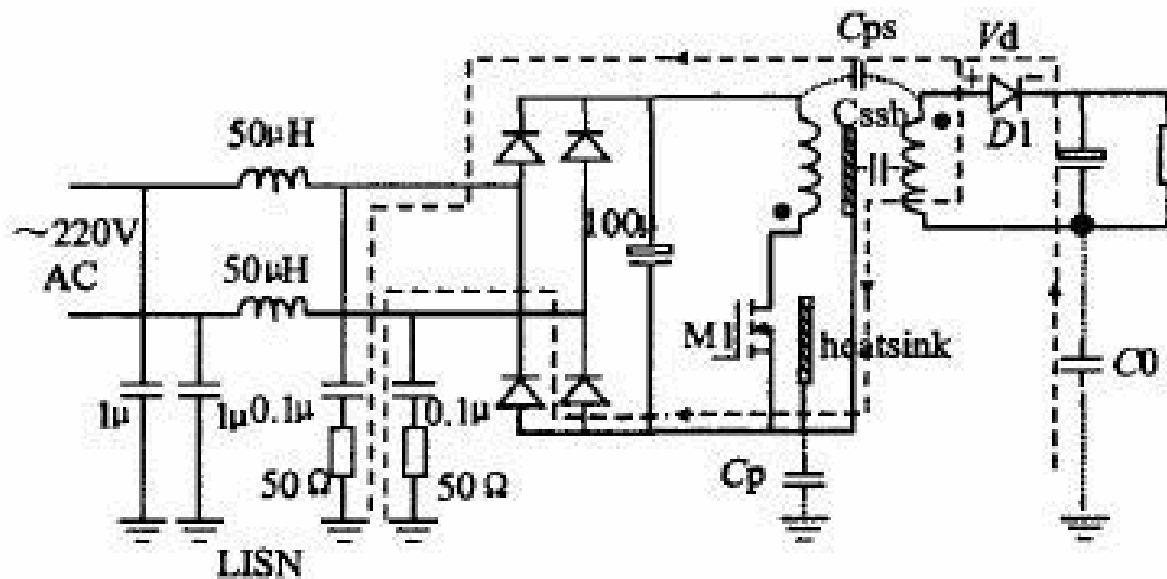


原边共模噪声传输通道

例：整流后直流电源为300V左右，假设开关波形的上升和下降时间做到了100ns即电压变化率达到了300V/100ns或3KV/1us，开关管管壳与散热器之间分布电容约为50pF，因此进入安全地的**共模瞬变电流**可达到：

$$i = C \frac{du}{dt} = 50 \times 10^{-12} \times (3000 / 10^{-6}) = 150 \text{mA}$$

## 二、电力电子变换器EMI类型



副边共模噪声传输通道

# 三、电力电子变换器EMI抑制技术

## 主要方法和技术:

- **EMI滤波器设计技术**
- **优化功率开关管的驱动电路设计**
- **PFC**
- **软开关技术（结论不确定）**
- **开关频率调制技术**



1) 减小干扰源发射强度的EMI抑制技术

2) 基于切断传导传播途径的EMI抑制技术

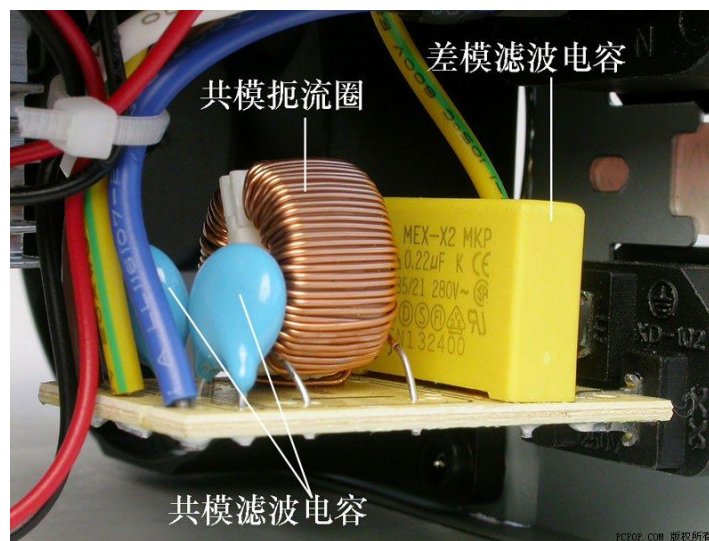


# 三、电力电子变换器EMI抑制技术

## 1. 输入滤波器

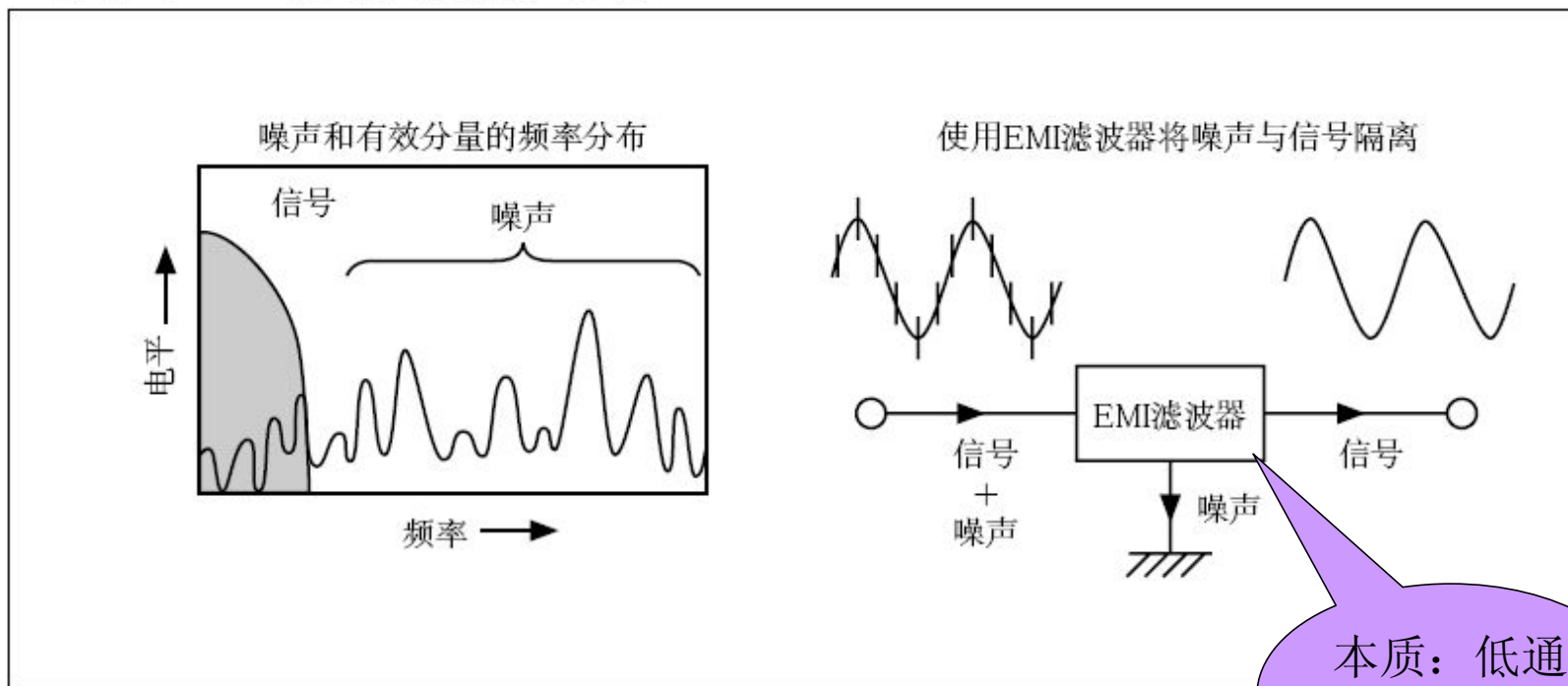
滤波器有两个方面作用：1) 阻止来自于电网的干扰进入设备内部，2) 抑制设备本身产生的干扰污染电网。

目前抑制传导EMI最有效的方法是利用无源滤波技术即EMI滤波技术。



# 三、电力电子变换器EMI抑制技术

## ■ 使用EMI滤波器隔离噪声



# 三、电力电子变换器EMI抑制技术

- EMI滤波器静噪方法

使用EMI滤波器抑制噪声时，可采用以下3种方法：

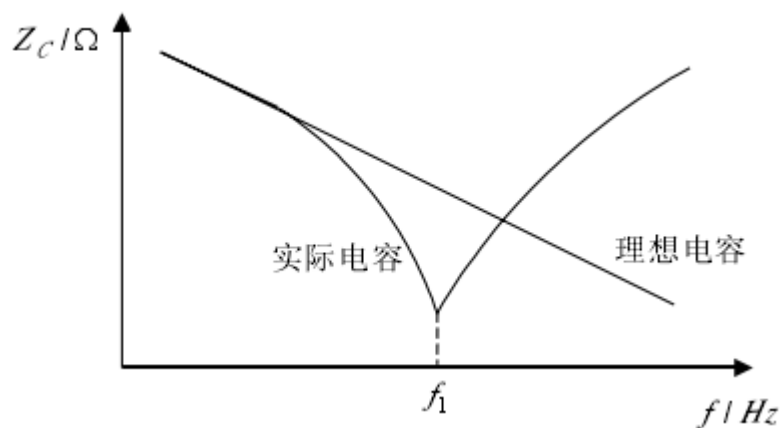
1. 对信号和噪声使用不同的频率
2. 在信号和噪声之间使用不同的传导模式
3. 使用非线性电阻器抑制高压电压浪涌

噪声类型	使用EMI滤波器的静噪方法
高频噪声 (信号的谐波等)	对信号和噪声使用不同的频率
共模噪声 (不论是何种类型线路，比如是信号线或是地线，噪声在所有线路上均以相同的方向传导。)	在信号与噪声之间使用不同的传导模式。
高电压浪涌 (静电放电、浪涌等)	使用非线性电阻器 (变阻器) 抑制高电压浪涌。

# 三、电力电子变换器EMI抑制技术

- 常用滤波元器件

- 1) 滤波电容



电容的频率特性

电容的谐振频率由C和ESL共同决定。

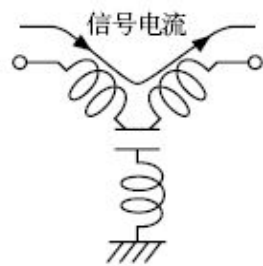
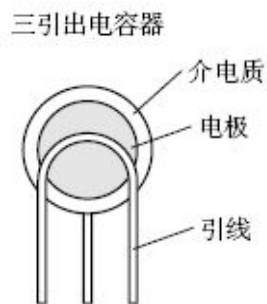
$$f_1 = 1/2\pi\sqrt{LC}$$

提高谐振频率的方法有两个，一是尽量缩短引线的长度，另一个是选用电感较小的种类。

# 三、电力电子变换器EMI抑制技术

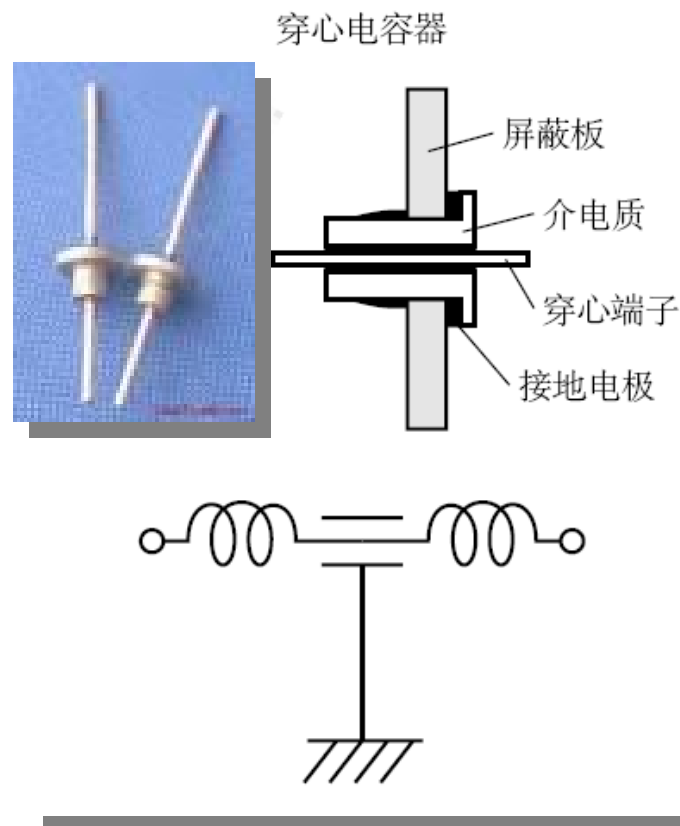
## ※三引出电容器

由于二引出电容器的引线用作电感器，所以残留电感较大。



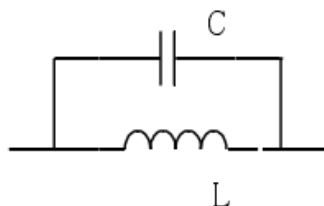
考虑到ESL效应的等效电路

## ※穿心电容器



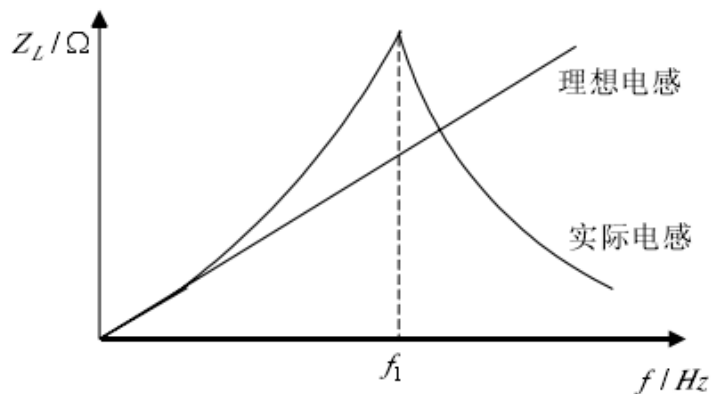
# 三、电力电子变换器EMI抑制技术

## 2) 电感



电感的高频等效电路

当工作频率高于谐振频率 $f_1$ 时，电感器呈容性而失效。



电感的频率特性

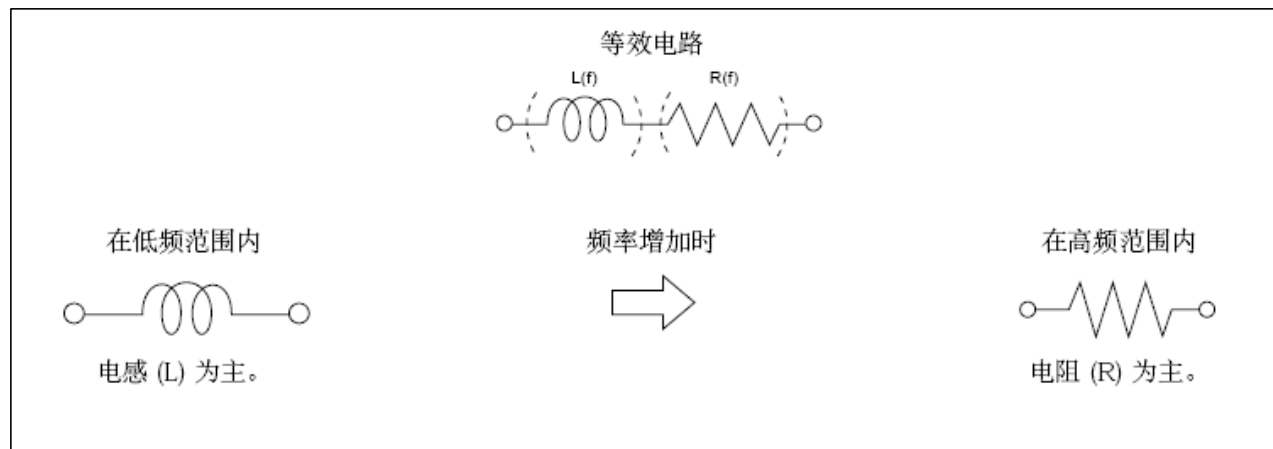
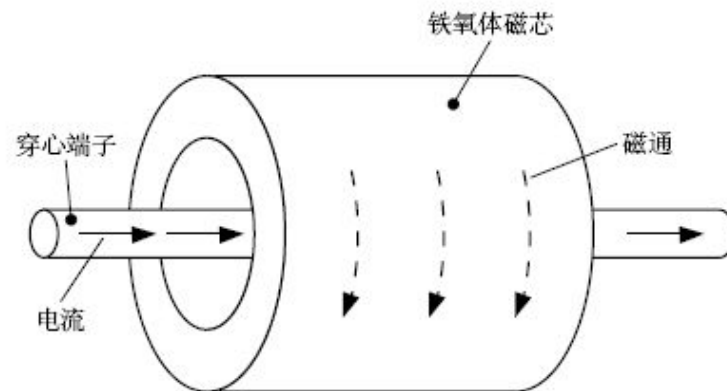
要拓宽电感的工作频率范围，最关键的是减小寄生电容。电感的寄生电容与匝数、磁芯材料，线圈的绕法等因素有关。

# 三、电力电子变换器EMI抑制技术

## 铁氧体磁珠电感

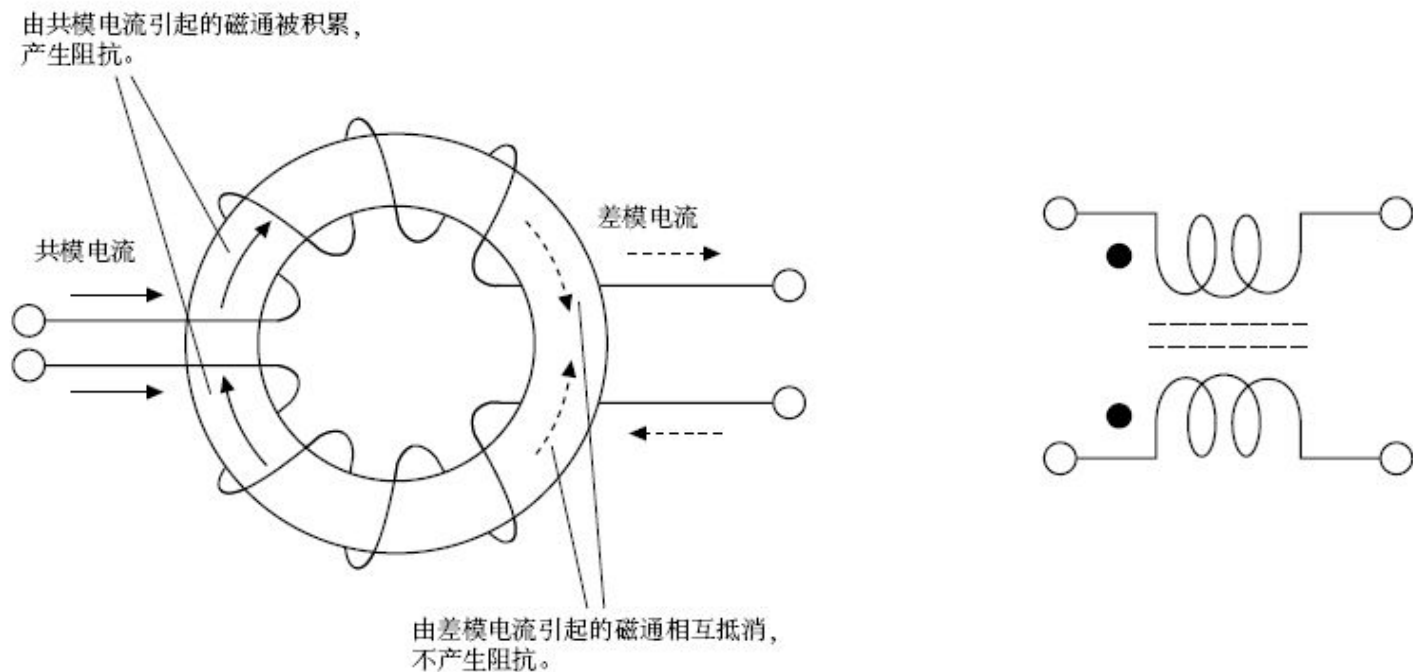
由于杂散电容较小，其自我谐振频率可达1GHz以上。

铁氧体磁珠电感还具有另一个优异性能。在高频时，这种电感器不是用作电感器而是用作电阻器，以热的形式耗散噪声。



# 三、电力电子变换器EMI抑制技术

## 3) 共模扼流线圈

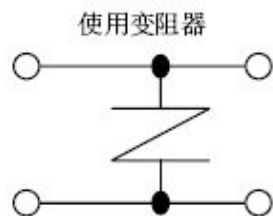


选择磁导率高，频率特性佳的铁氧体磁材料

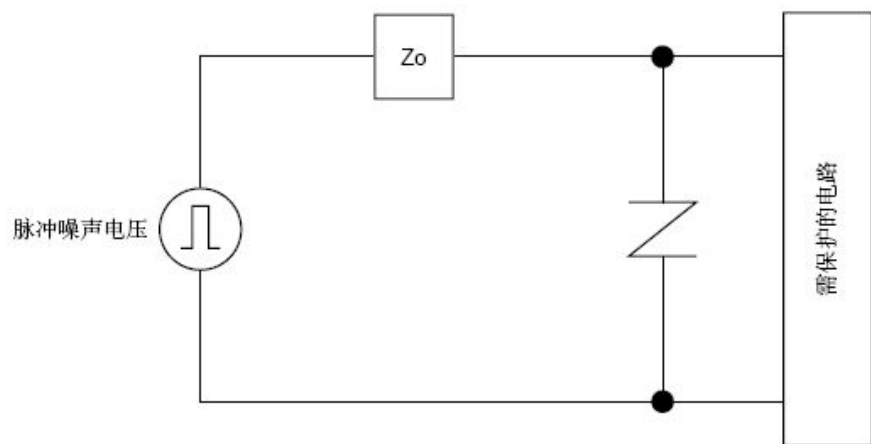


# 三、电力电子变换器EMI抑制技术

## 4) 压敏变阻器

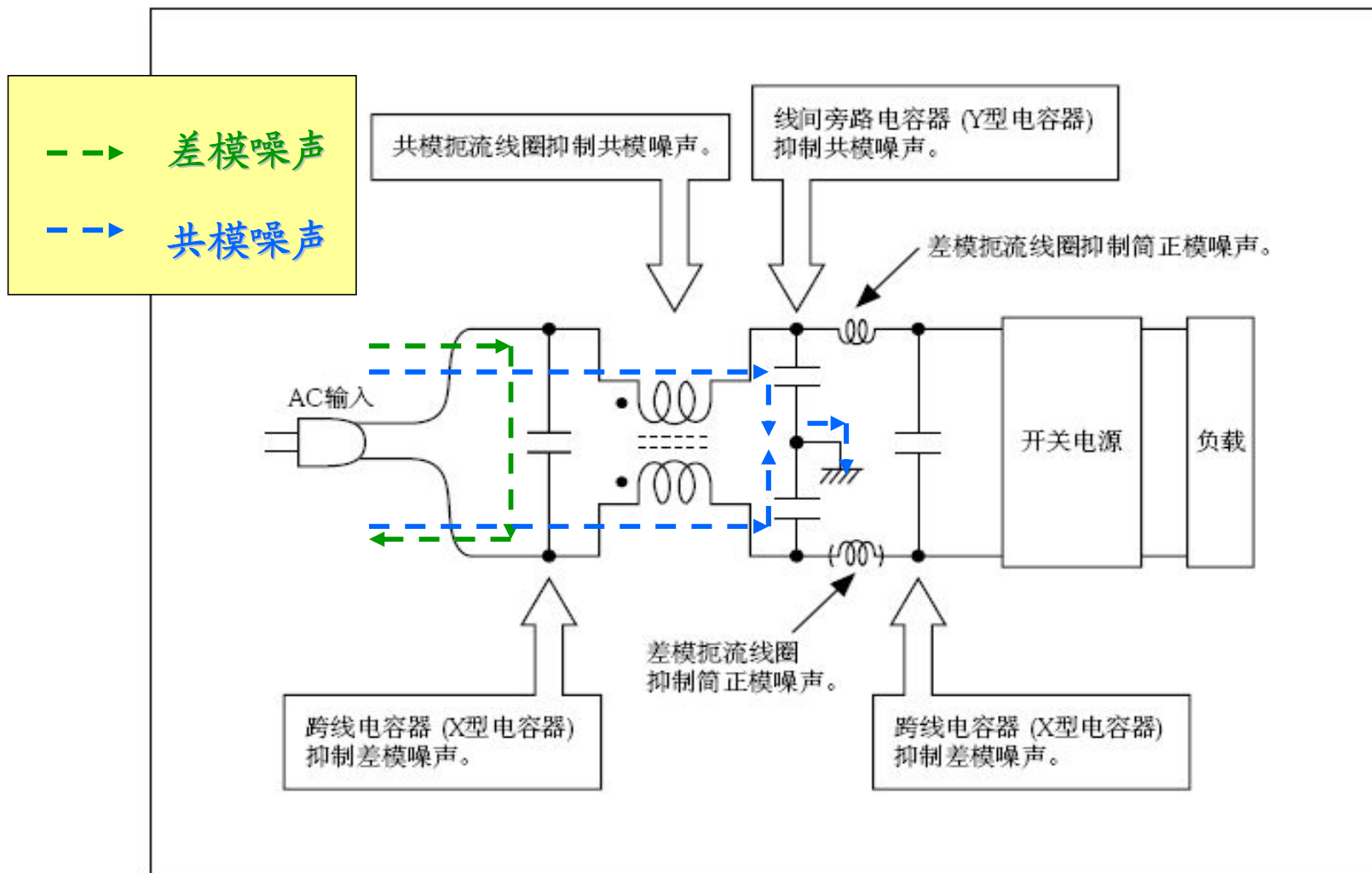


噪声源的内部电阻和线路阻抗



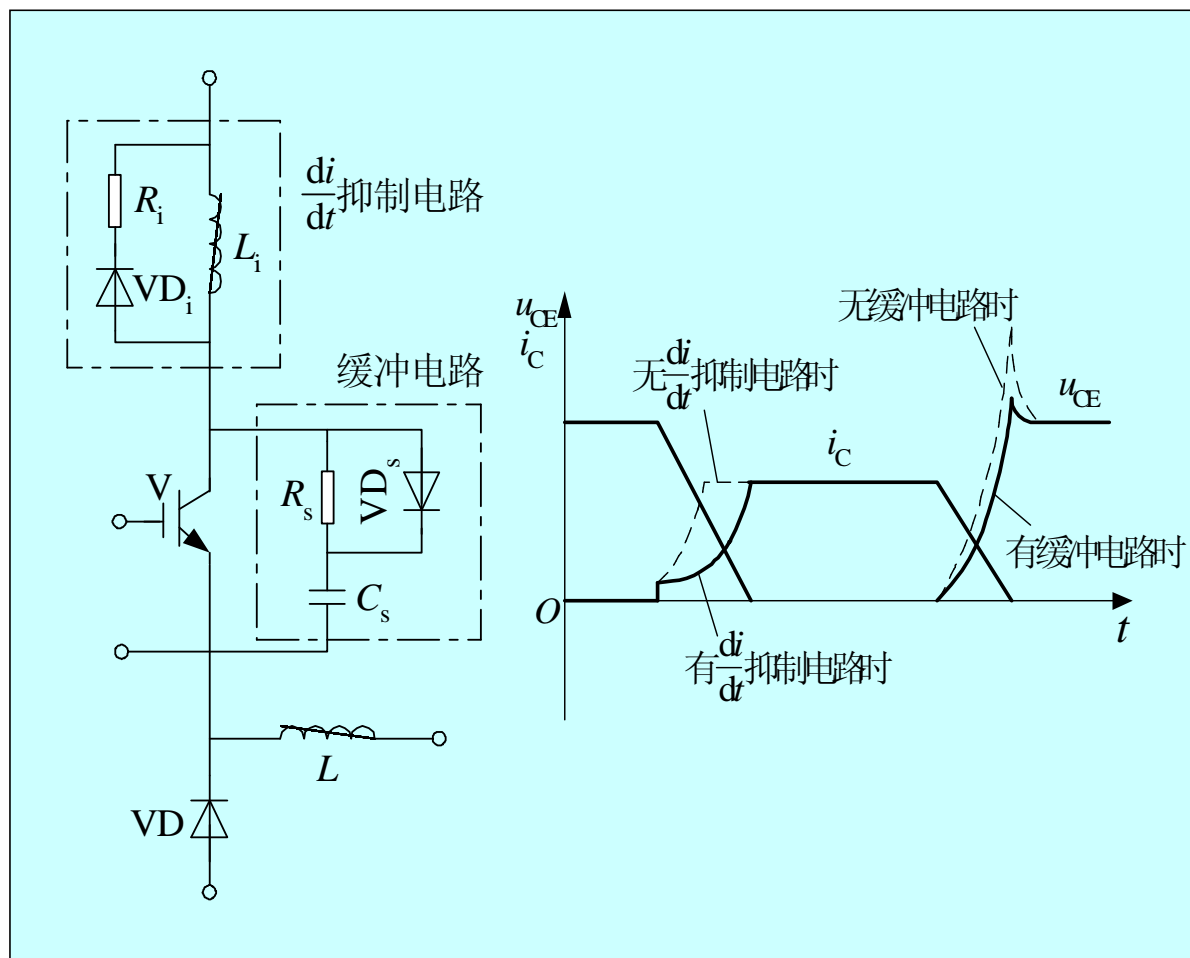
# 三、电力电子变换器EMI抑制技术

## AC电源线上的静噪示例



# 三、电力电子变换器EMI抑制技术

## 2. 缓冲吸收电路



di/dt抑制电路和充放电型RCD缓冲电路及波形

a) 电路 b) 波形

# 三、电力电子变换器EMI抑制技术

## 3. 制造工艺

### 1) 合理PCB布局和布线

- \*地线设计：许多电磁干扰问题是由地线产生的，地线设计的目的是要保证地线电位尽量稳定，从而消除干扰现象。
- \* 线路板设计：目的在于减小线路板上的电路产生的电磁辐射和对外界干扰的敏感性，减小线路板上电路之间的相互影响。

### 2) 屏蔽设计

- \*干扰频谱集中在30MHz以下的频段，主要是近场性质的电磁场，且属低阻抗场。可用导电良好的材料对电场屏蔽，而用导磁率高的材料对磁场屏蔽。

### 3) 高频变压器

- \* 选择高磁导率的磁芯，初级绕组和次级绕组要紧密相连，并且初级与次级交叉并绕，以达到减小漏磁，进而减小因漏感引起的电磁感应噪声。
- \* 在变压器的线包和磁芯外表面包一层薄的铜皮作为屏蔽层也会起到良好的抑制作用。
- \* 在变压器的初次级跨接一个Y 电容，减小初次级分布电容。



# 三、电力电子变换器EMI抑制技术

上部波形：输入电压      下部波形：输入电流

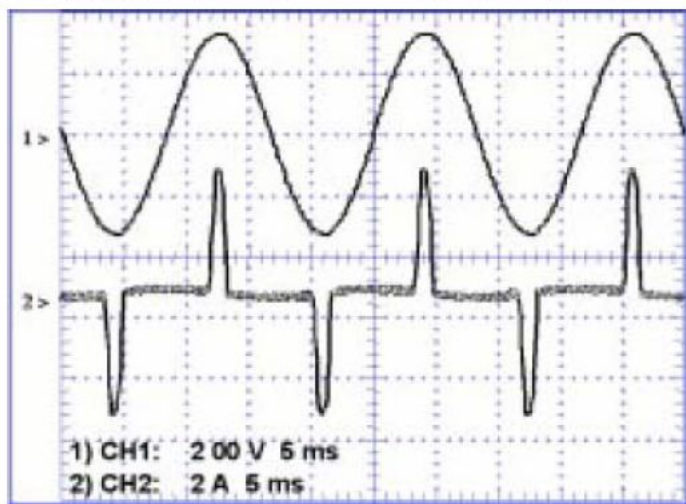
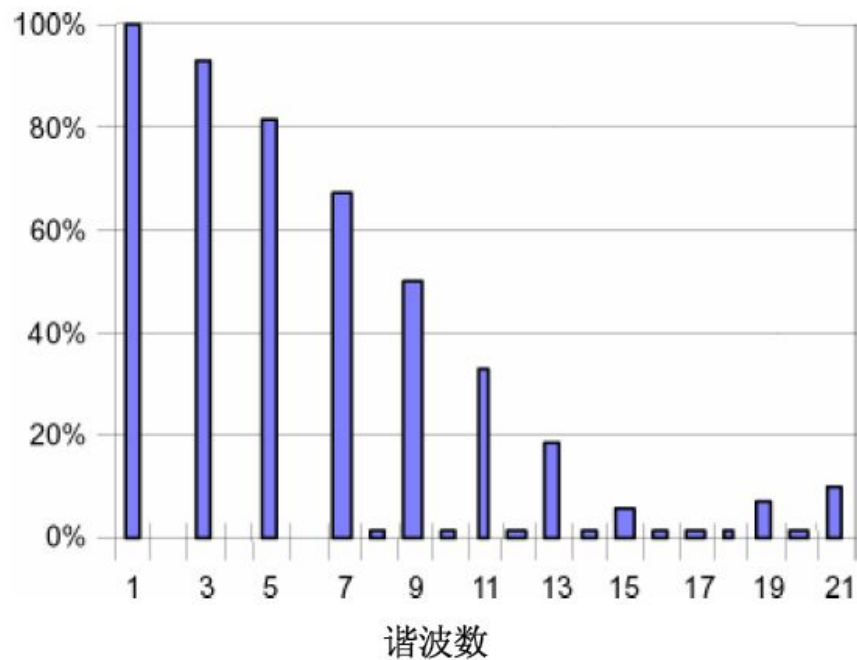
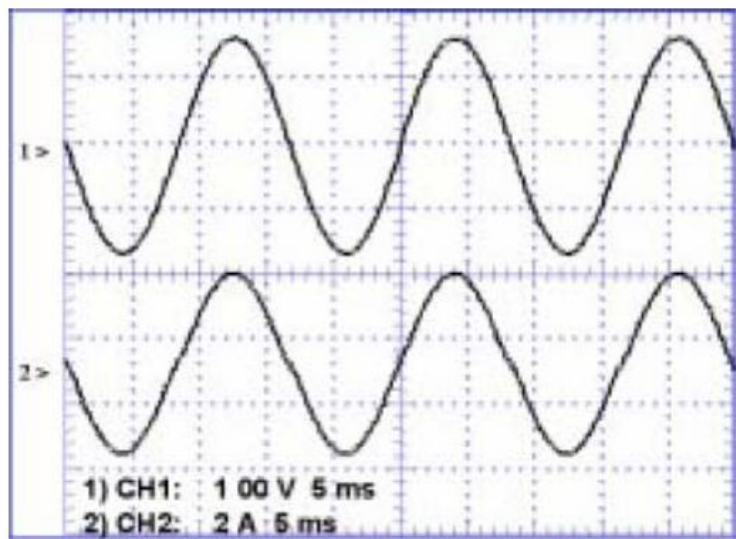


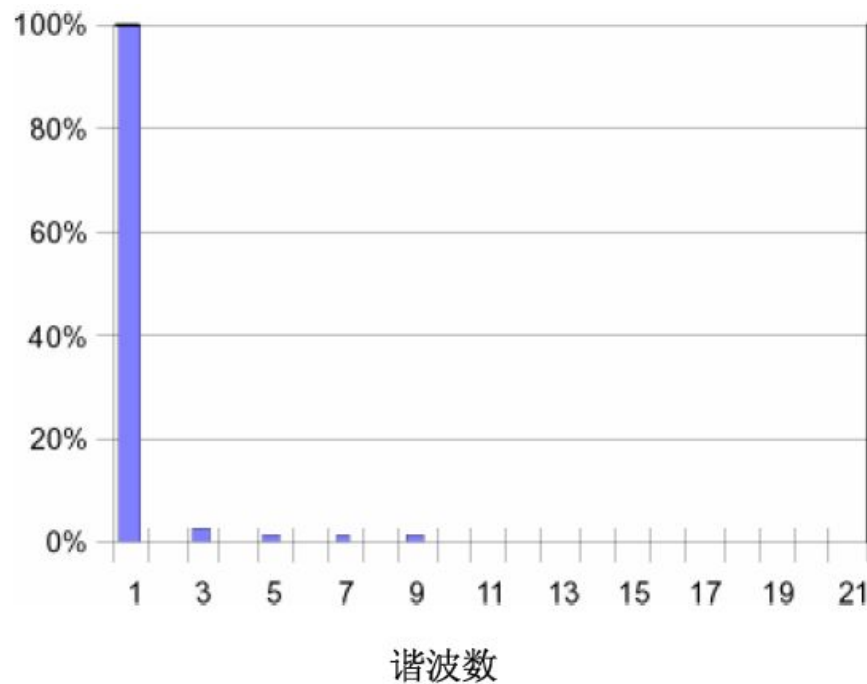
图1. 不带PFC的典型开关模式电源的输入特性



# 三、电力电子变换器EMI抑制技术

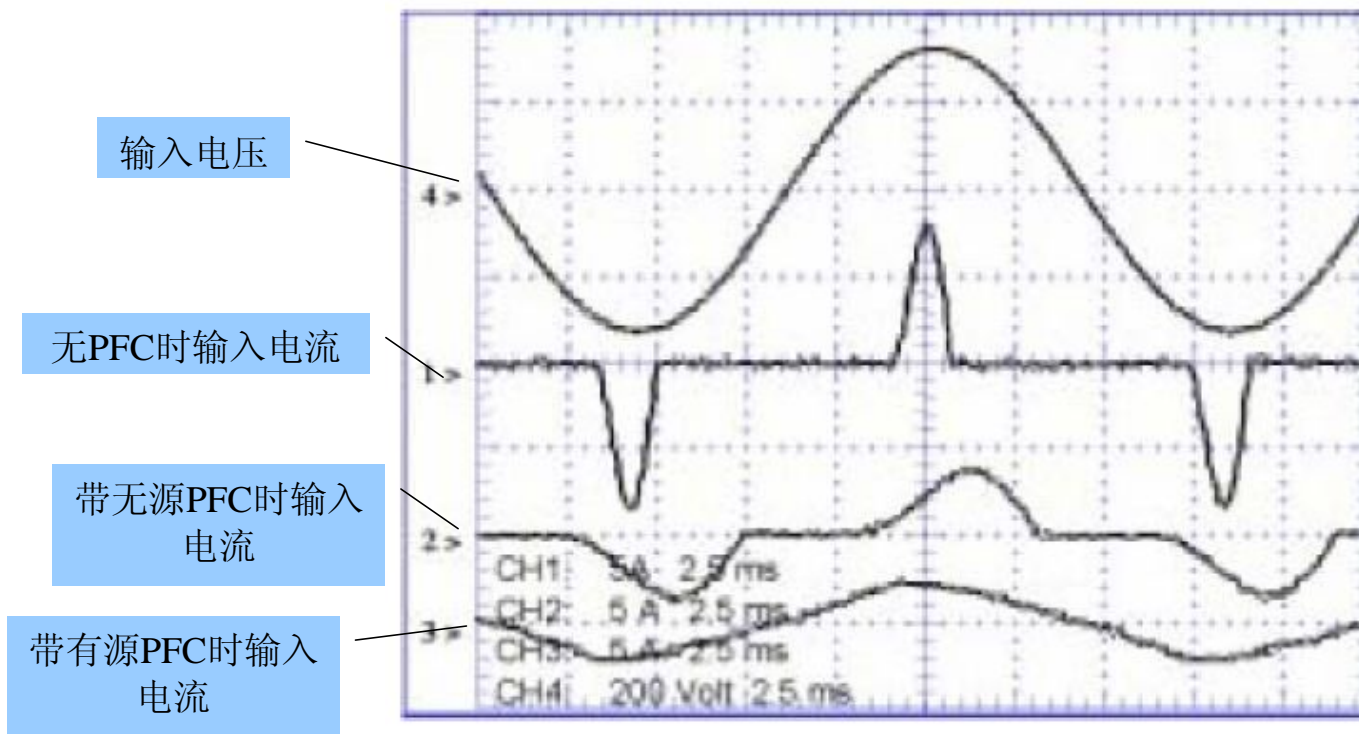


补偿后



通过补偿可有效抑制高次谐波，其功率因数可提高到0.99 以上，基本上实现了无谐波，消除了谐波对电网的污染。

# 三、电力电子变换器EMI抑制技术



带不同类型PFC的电源输入特性

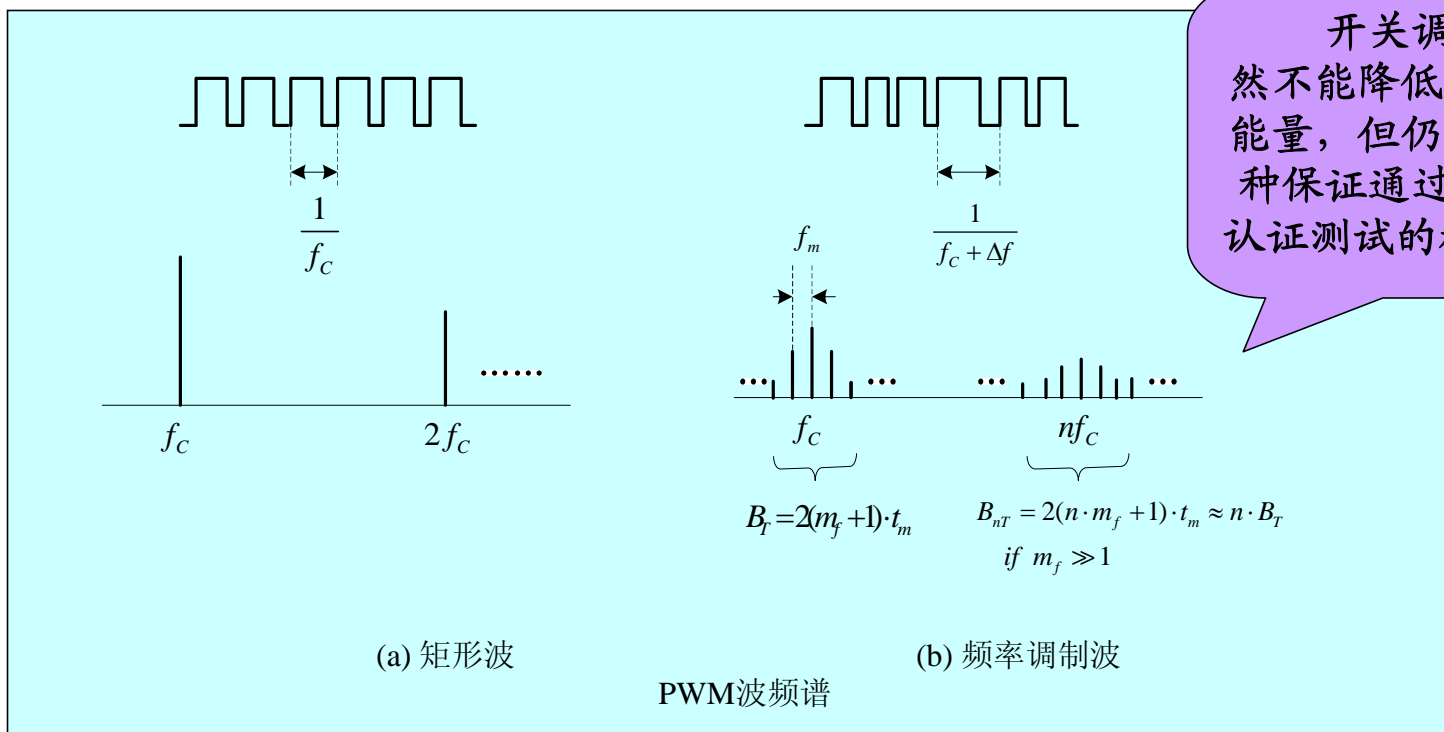


# 三、电力电子变换器EMI抑制技术

## 5. 开关频率调制技术

**基本思想：**通过调制功率器件的开关频率把集中在开关频率及其各次谐波上的能量分散到周围的频带上，由此降低各个频点上的功率谱幅值。

**主要方法：**周期频率调制技术、抖频技术、随机频率调制、混沌频率调制技术。

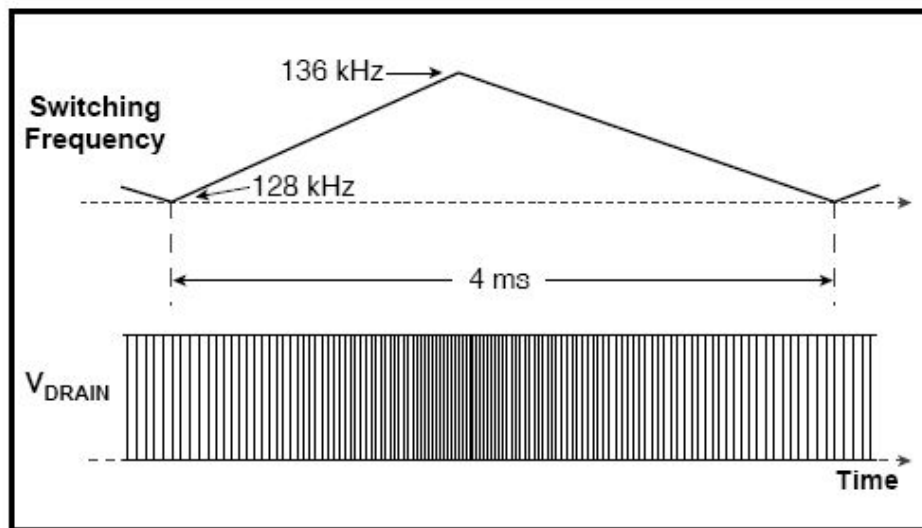


开关调频PWM虽然不能降低总的干扰能量，但仍不失为一种保证通过EMI标准认证测试的权宜方法。

# 三、电力电子变换器EMI抑制技术

**抖频技术(Frequency Jitter)**：载波频率在一定范围内周期地变化，把集中在载波频率及其谐波上的能量分散到它们周围的边频带上。

如：TOPGX系列芯片是一种内部集成了PWM控制电路和MOSFET的功能芯片。工作频率为132kHz，并周期性地以132kHz为中心上下变动4kHz。在4ms周期(频率为250Hz)内，完成一次从128~136 kHz之间的频率抖动。



# 三、电力电子变换器EMI抑制技术

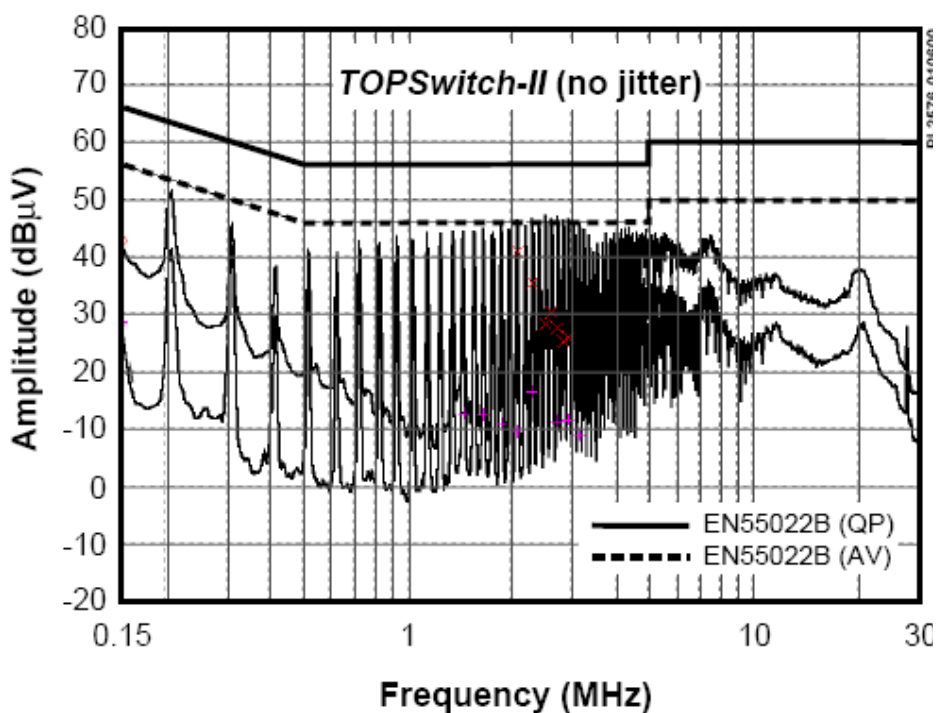


Figure 46a. TOPSwitch-II Full Range EMI Scan (100 kHz, no jitter)

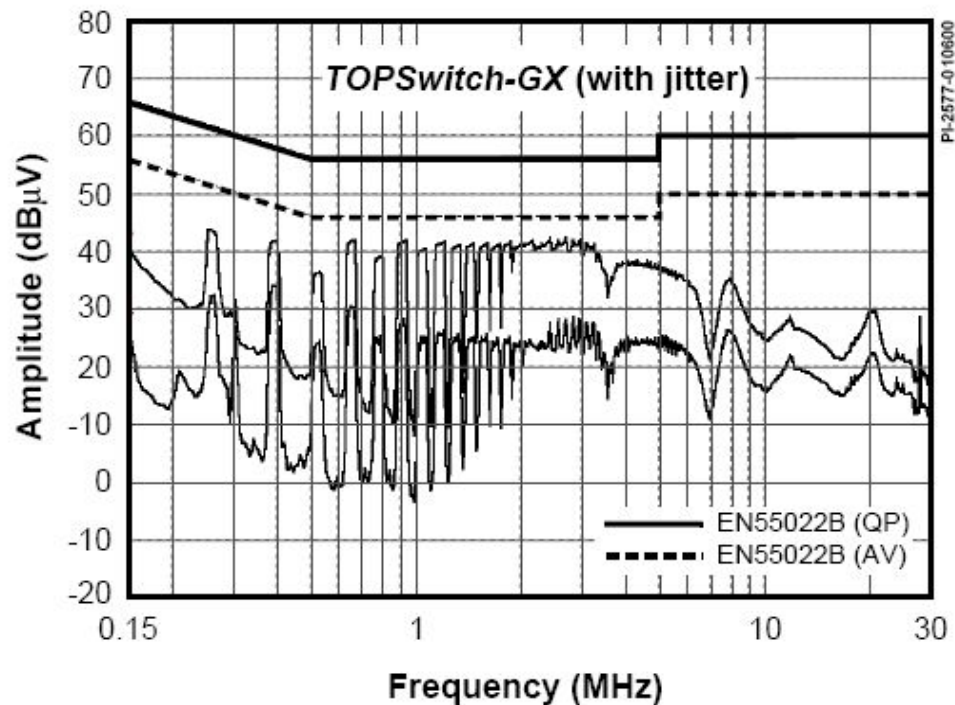


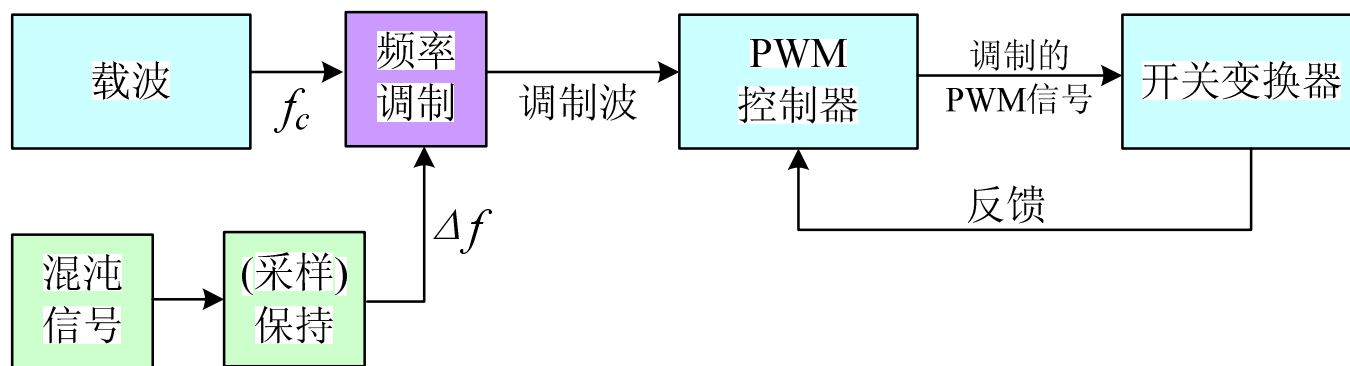
Figure 46b. TOPSwitch-GX Full Range EMI Scan (132 kHz, with jitter) with Identical Circuitry and Conditions.

采用抖频技术前后的EMI传导干扰测量

# 三、电力电子变换器EMI抑制技术

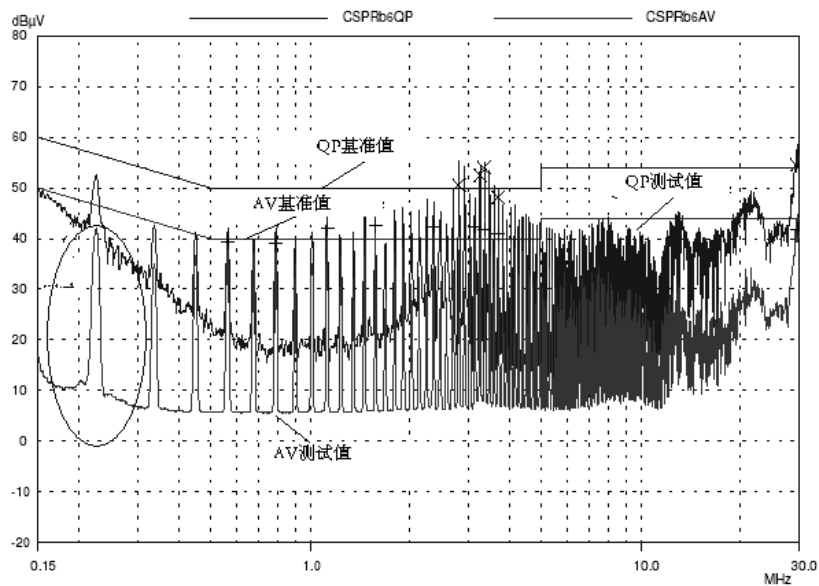
## 混沌扩频技术：

原理：混沌信号具有连续频谱特征，利用混沌信号调制开关频率以实现能量重新分配在较宽的频带内。

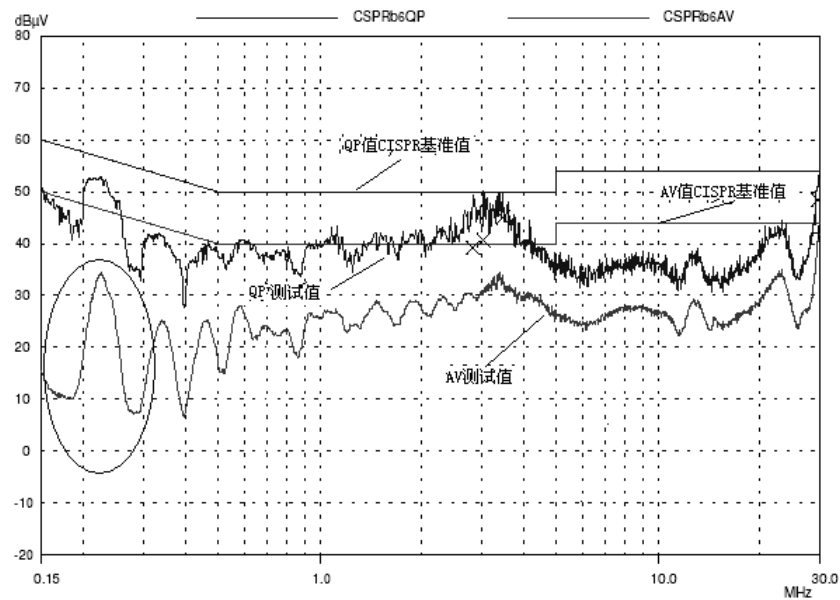


开关变换器混沌调制框图

# 三、电力电子变换器EMI抑制技术



定频PWM信号



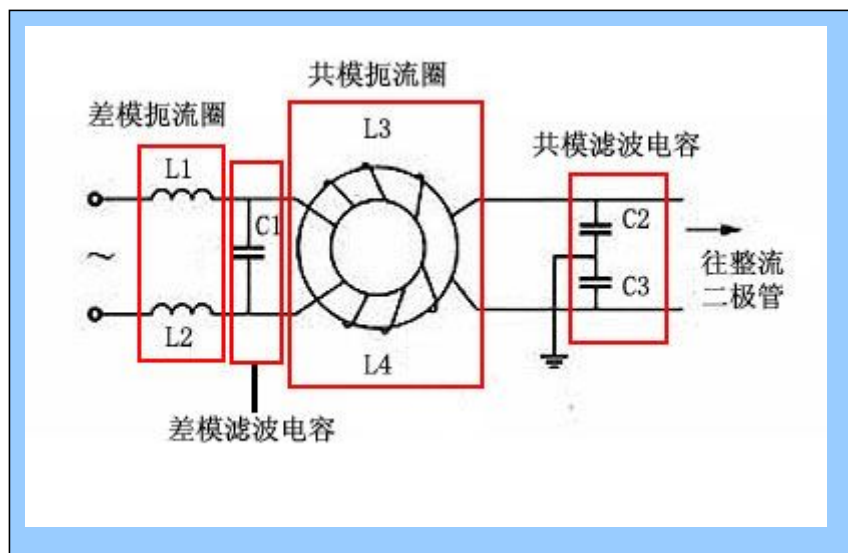
混沌PWM信号

65W DC-AC变换器的传导干扰测试

# 三、电力电子变换器EMI抑制技术

## 例3：单端反激电源的EMI抑制解决方案

### 1. 输入滤波器



# 三、电力电子变换器EMI抑制技术

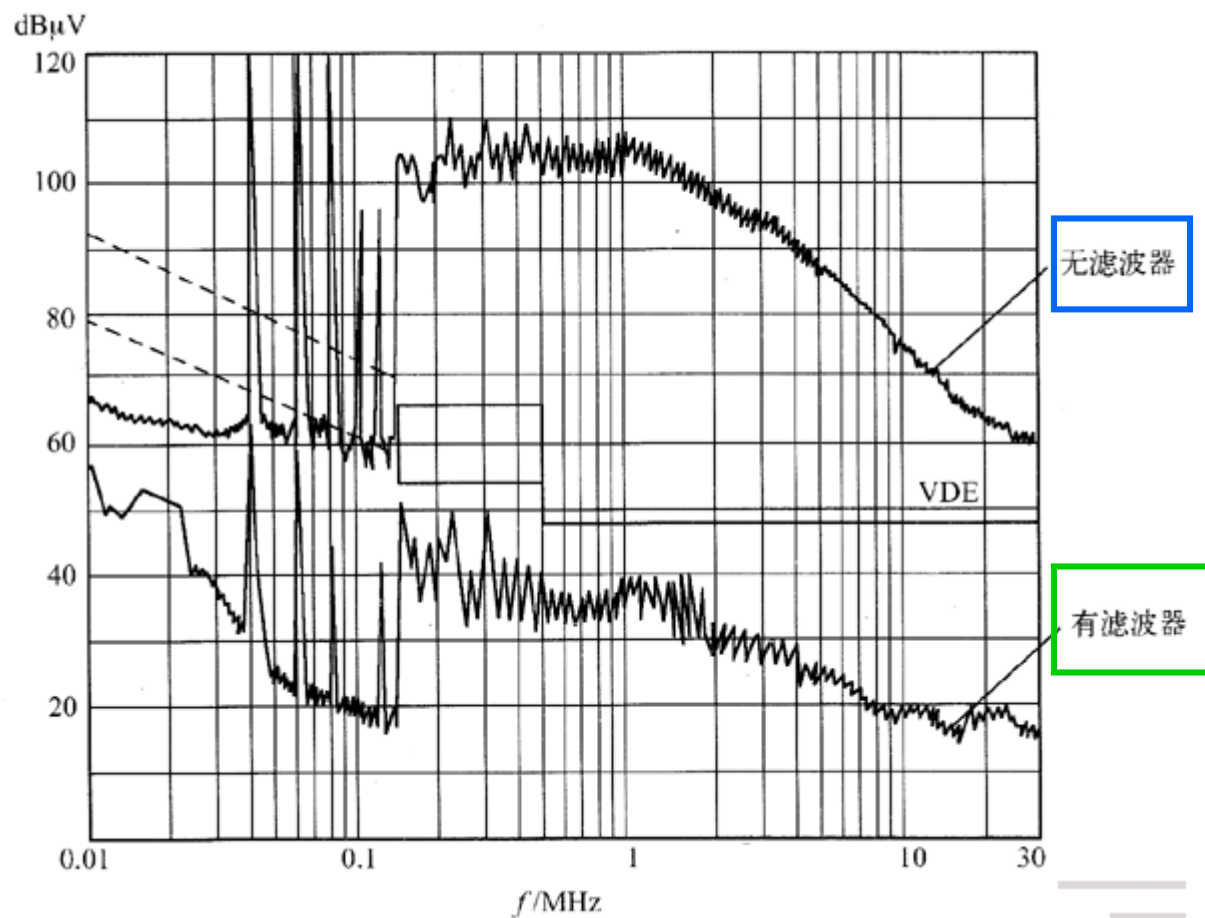
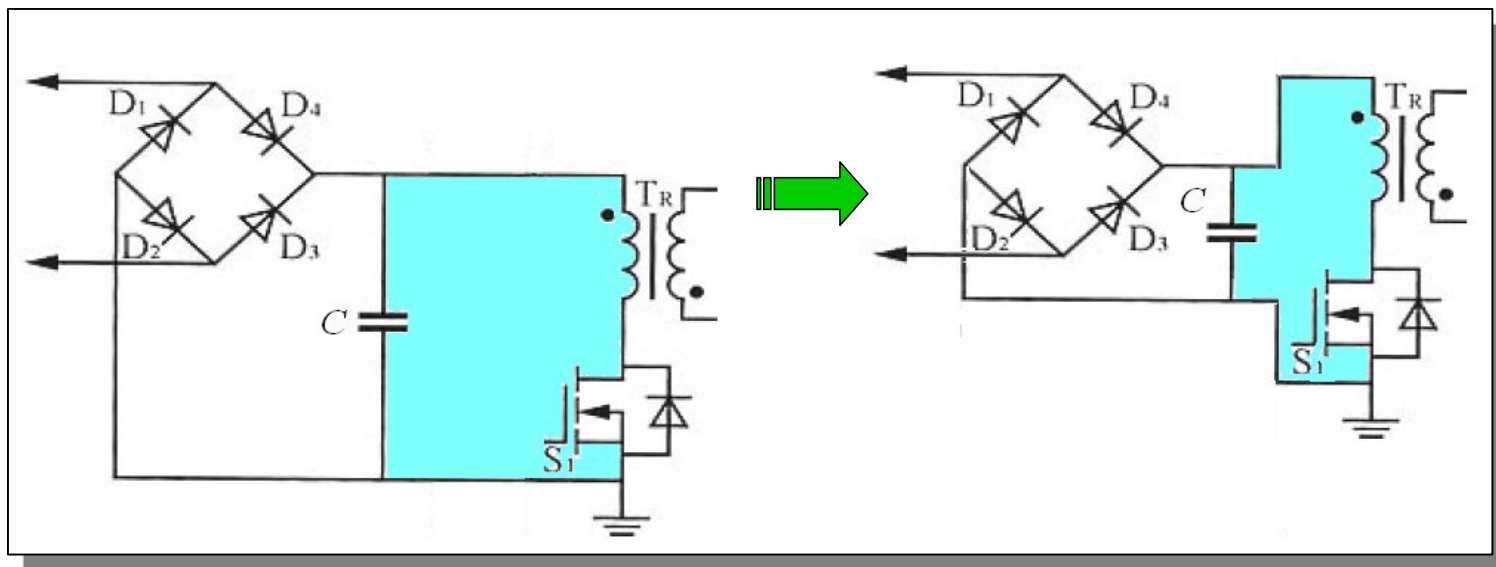


图 有、无输入滤波器对电网干扰的比较

# 三、电力电子变换器EMI抑制技术

2. 减少原边的环路面积和高 $du/dt$ 导体的面积——减少辐射噪声



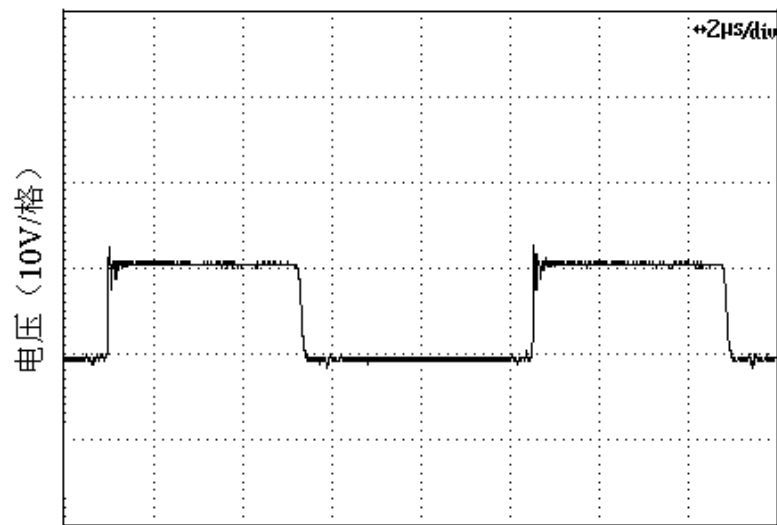
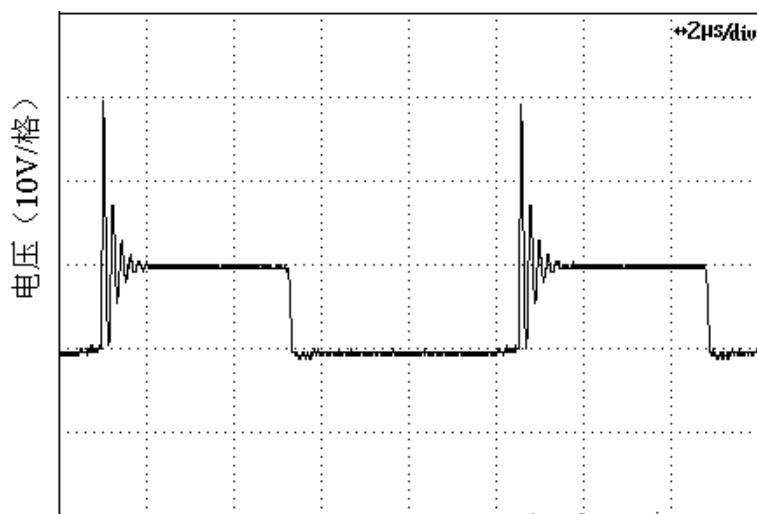


# 三、电力电子变换器EMI抑制技术

## 3. 在变压器原副边间加的屏蔽层

可以大大降低原副边之间的耦合电容，有效地阻断共模干扰的传播。

## 4. 开关管加RCD缓冲吸收电路



时间 (2μs/格)

时间 (2μs/格)

开关管加吸收缓冲电路前后的尖峰抑制效果

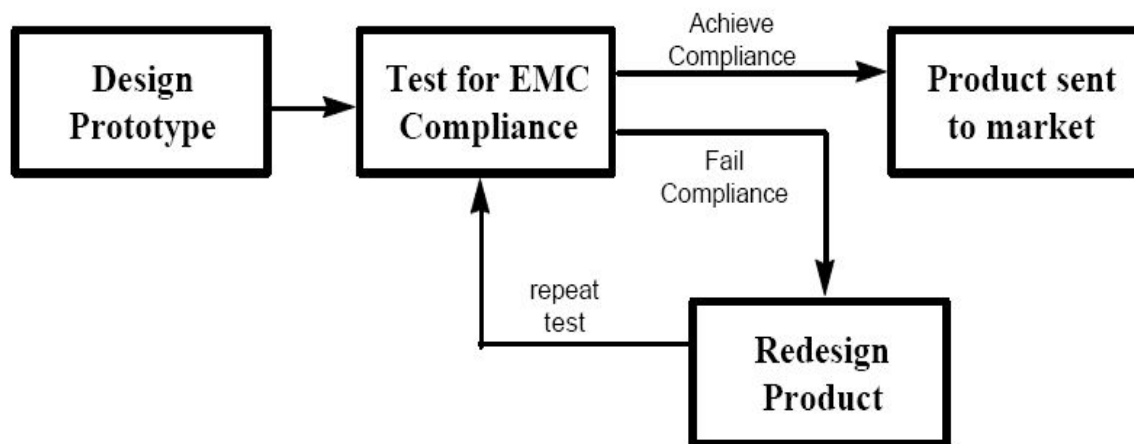
# 三、电力电子变换器EMI抑制技术

## 5. 次级整流回路

- 1) 二极管采用反向恢复时间短的肖特基二极管；
- 2) 二极管的管脚上套上磁珠；
- 3) 高速二极管两端跨接低损耗电容和电阻串联而成的缓冲电路；
- 4) 输出滤波电容（电解电容）上并联一个 $0.01\mu\text{F}$ 的电容。

# 四、电磁兼容设计

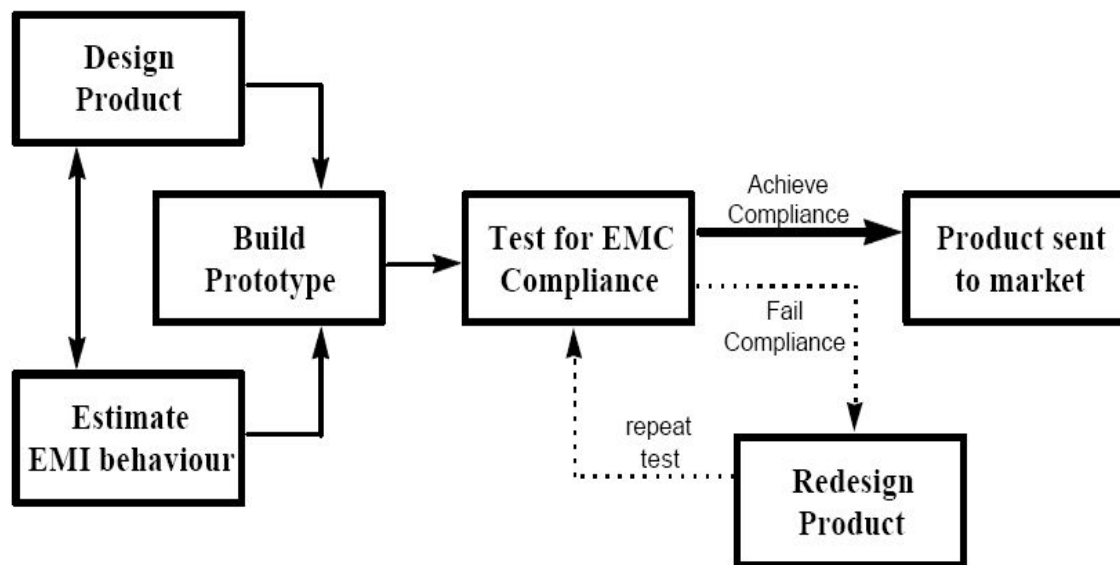
设计过程中遇到问题时



- **product design may require extensive, repetitive modification to achieve EMC compliance**

# 四、电磁兼容设计

## 改进的产品开发进程



# 四、电磁兼容设计

## 电磁兼容设计的效率/费用比

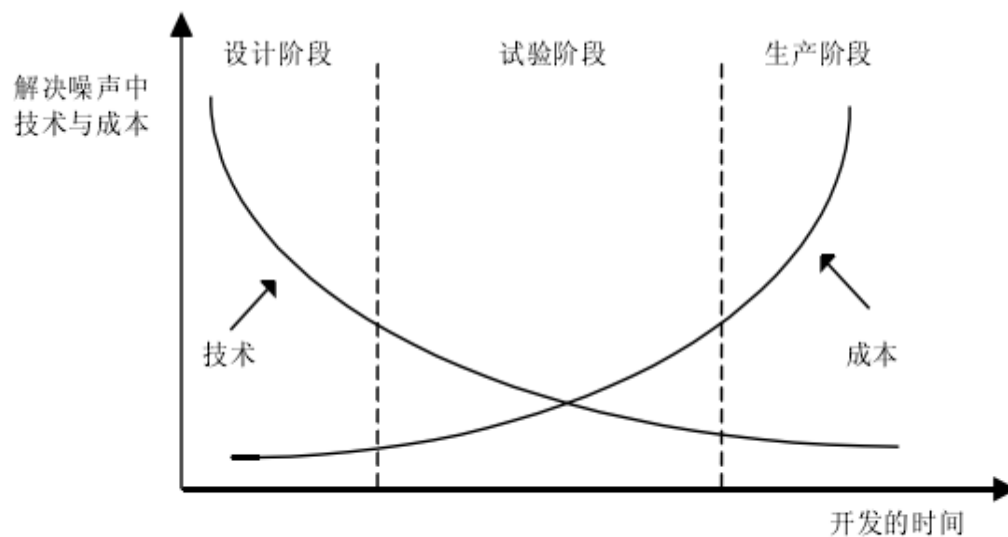


图 2-1 电磁兼容设计成本与可采用的技术在开发各阶段的关系

## 四、电磁兼容设计

开关电源的EMC设计必须放到产品的设计开发阶段来做，其关键问题是要澄清开关电源中EMI产生的机理，建立有效的EMI分析设计模型。

谢谢!