

电子产品的电磁兼容设计

内容提要:

本文介绍了电磁干扰的基本概念及其危害的严重性和 电磁兼容（EMC）的基本理论，并结合实例讲述了针对不同应用环 境和目的的电磁兼容设计技术。

目录:

- 1、电磁干扰（EMI）基本概念
- 2、电磁干扰的危害
- 3、电磁兼容EMC设计：
 - 3.1 系统电源的干扰-1
 - 3.2 系统电源的干扰-2
 - 3.3 迭加在正弦波曲线上的干扰-1
 - 3.3.1 电磁干扰实例-1
 - 3.4 电源入口的处理
 - 3.5 电源和地线的设计：
 - 3.5.1 采用轨线对方式布置电源线和地线
 - 3.5.2 采用多层板，设计地层和电源层
 - 3.5.3 电源去耦：
 - 3.5.4 匹配与隔离：
 - 电磁干扰实例-2： XGY1011B灯电流共模干扰
 - 3.6 I/O口干扰的滤波与吸收：**祸从口入，祸从口出**
 - 3.6.1 电磁干扰实例-3： FTU继电器干扰
 - 3.6.2 电磁干扰实例-4： 抄表电路故障影响RS-485
 - 3.7 传感器的设计处理
 - 3.7.1 电磁干扰实例-5： 有源屏蔽技术在复电阻率测量系统中的应用
 - 3.7.2 电磁干扰实例-6： 电源控制管理系统受电磁波辐射的干扰
 - 3.8 PCB设计
 - 3.9 器件选择与设计工艺
 - 3.10 时序设计
 - 3.11 总线驱动
 - 3.12 功率分配、热分配
- 4、EMC设计常用的器件和材料
- 5、EMC测试
- 6、电磁干扰的应用

电子产品的电磁兼容设计

工业控制产品工作的现场环境（地理、气候、震动、电磁环境等）是十分恶劣的，确保产品在如此恶劣的环境下正常、可靠性的工作，必须注重以下三个方面的设计：

系统结构：从系统安装稳固、造型美观、操作方便等方面考虑系统的结构设计，从结构上保证系统的稳定性和可靠性；

软件系统：合理设计软件结构，充分发挥硬件功能，利用软件陷阱等技术避免数据处理过程中因溢出而造成的程序崩溃；巧妙利用硬件看门狗实现软件复位和避免程序因干扰进入死循环；

EMC设计：电子硬件的电磁兼容设计是从根本上确保整个系统稳定、可靠、长期运行的最重要的一环。

这里主要从硬件设计的角度讨论电磁兼容设计对产品可靠性的重要性。谈到电磁兼容就必须了解电磁干扰及其危害。

1、EMI基本概念：

什么是电磁干扰EMI（EelectroMagnatic interference）：

常见电磁干扰：雷电、拨打手机、静电放电、电火花等。

电磁干扰的传播方式：

辐射（Emission）：发动机启动、日光灯启动、手机通话、雷电、磁爆等。

传导（Conduction）：电源的波动、电源线/地线耦合，输入/输出口耦合。

2、电磁干扰的危害：

干扰正常的工作和生活，污染电磁环境。

如：打雷时收音机中的卡卡声，电视屏上的雪花；
在电脑前拨打手机时电脑显示屏上的光栅晃动等。
严重时电磁干扰会造成：通信中断、导航失灵、
电力设备自动跳闸，设备毁坏、人物伤害等。

3、什么是电磁兼容EMC设计：

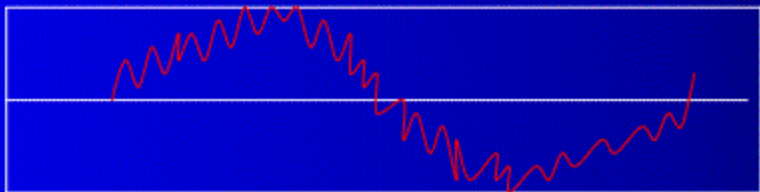
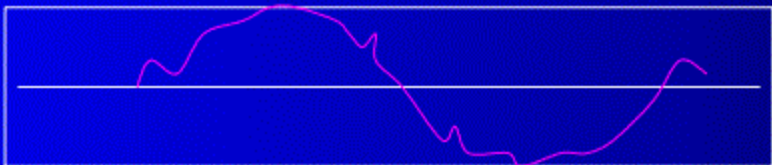
- EMC:
 - 1) 电子产品能够在电磁干扰的环境下正常工作。
 - 2) 在某些强电磁干扰下，工作可以不正常，但是，
 - 产品不会被损害；而且干扰消失后能够恢复正常工作。
 - 3) 不得以任何方式（辐射、传导）干扰其它电子产品的正常工作。

3.1 系统电源的干扰-1:

- 保证电源的稳定、干净，
- 才有可能使系统稳定、可靠的工作。
- 否则，任何努力都是徒劳的。
- 理想情况下：
 - 交流电力电源的电压、电流 → 光滑的正弦波
 - AC/DC变换后的直流电源电压 → 稳定、干净
- 而实际情况并非如此：
 - 实际应用中交流电源并不是理想的正弦波，而是有
 - 很多干扰信号迭加其上，有时这种干扰的幅度很大，
 - 能量也很强。
 - 如：雷电等。
 -

3.1 迭加干扰的正弦波曲线-1

- 开关电源引起的奇变

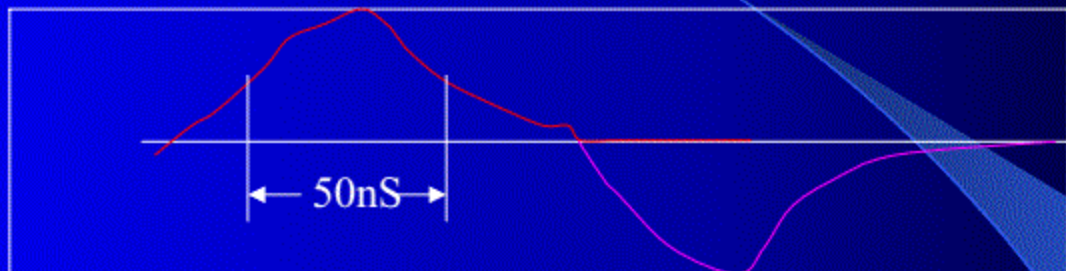


3.2 系统电源的干扰-2

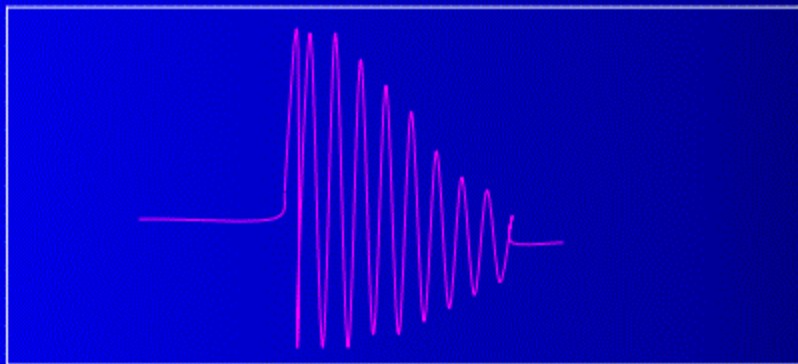
- 大量开关电源、电气焊等设备的使用
 - —————→ 正弦波上迭加干扰、
 - —————→ 正弦波变形失真
- 大型设备的启动 —————→ 交流电源电压短时跌落
- 继电器、接触器等设备 —————→ 快速脉冲干扰
 - 脉冲上升:5ns, 脉冲持续:50ns, 脉冲重复率:2.5—100K, 脉冲幅度:可达数千伏
- 雷电干扰 —————→ 浪涌干扰（可达数千伏）
 - 脉冲上升:2us, 半峰:50-700us, 脉冲幅度:可达数千伏
- 交流电源的跌落、干扰 —————→ 直流电源的波动、
 - —————→ 直流电源跌落、干扰
- 介绍例一、开关电源受电源干扰

3.3 迭加在正弦波曲线上的干扰--1

- 继电器、电磁阀和接触器引起的快速脉冲和电压浪涌干扰



- 继电器、电磁阀和接触器引起的快速脉冲群干扰



3.3.1 电磁干扰实例--1

- AC/DC 开关电源受交流电源线上来的干扰:

- 现象:

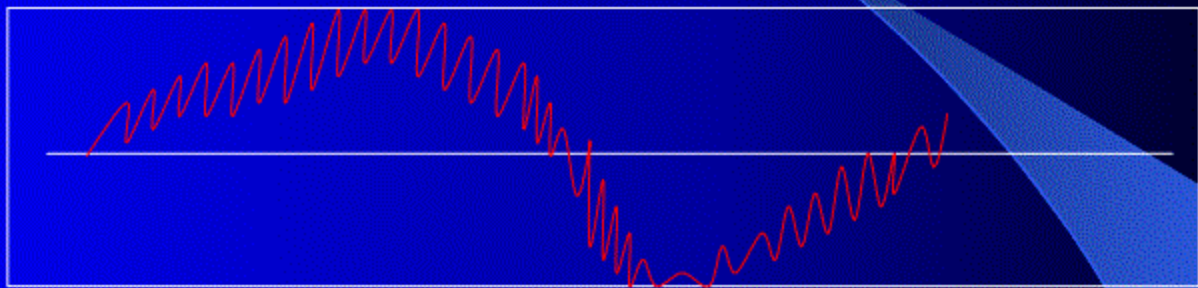
- 输出电压低、负载能力差;
- 噪音大、温度高;
- 最终AC/DC模块内电源滤波器脱落。

- 原因:

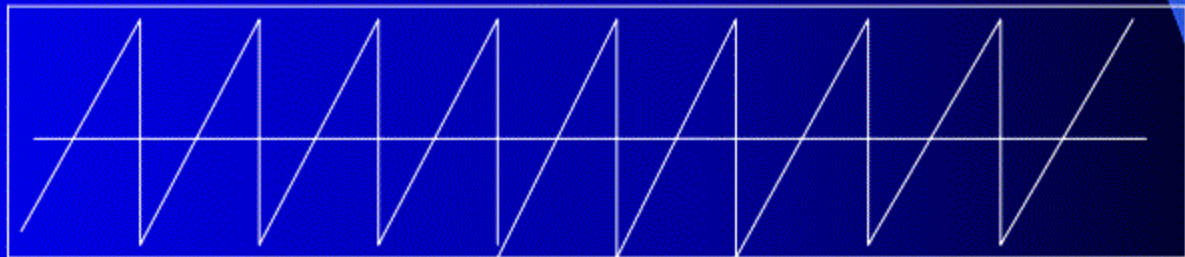
- 交流电源波形: 锯齿状, 幅度 $> 50V$ 。如图所示(上),
- 下图为流过电源滤波器内滤波电容的电流波形。
- 锯齿波形频率约 200 KHz, 经电源滤波器后被滤除。
- 因此, 很大的功率消耗在电源滤波器上, 导致电源滤波器发热而使得电路板上的锡熔化, 电源滤波器脱落。

3.3.2 电磁干扰实例--1

- 送加锯齿波的交流电压波形



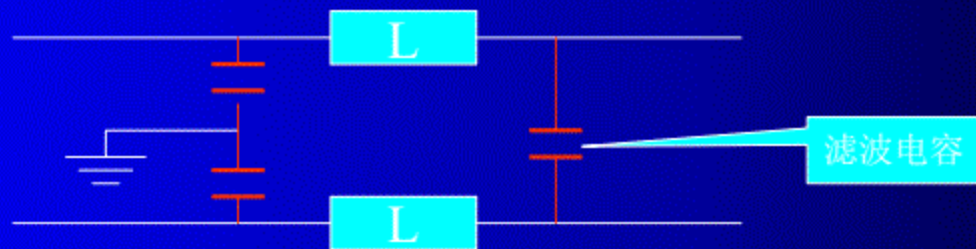
- 流经电源滤波器的滤波电容的电流波形



3.3.3 电磁干扰实例--1

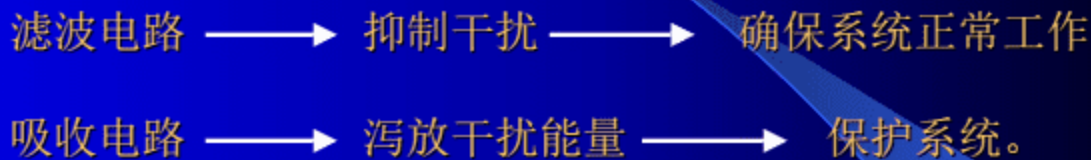
- 电源滤波器结构：

- 交流输入
- 交流输出



- 由于干扰来自电源线路上的，要使自身正常工作只能拆除
- 电路右侧的滤波电容。

3.4 电源入口的处理



3.5 电源和地线的设计:

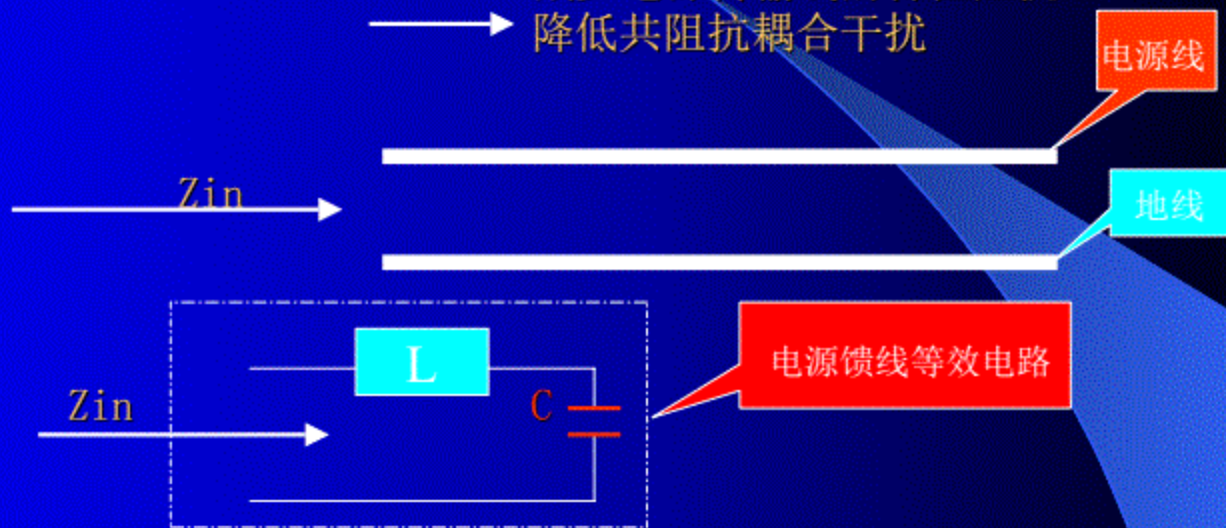
电源线和地是所有信号的公共回路，其信号最为复杂，而且没有规律，特别是引线电感是不可避免的。如设计不当便会形成系统自身的干扰。



3.5.1 采用轨线对方式布置电源线和地线

减少电源传输线的等效电感，增加等效电容

- 减少电源传输线的特征阻抗
- 降低共阻抗耦合干扰



3.5.2 采用多层板，设计地层和电源层

保证电源线和地线各处等电位，电源传输线的特征阻抗最小。
有一定的电屏蔽作用。

3.5.3 电源去耦:

运行时的电流脉冲信号会通过电源回路形成对其他器件的串扰。

每个有源器件的电源端和地端 —————> 电容去耦、

3.5.4 匹配与隔离:

多组电源之间隔离 —————> 消除共模干扰
(介绍例二、XGY1011B 灯电流干扰)

负载——正确的驱动方式 —————> 可靠驱动，减少反射

3.5.5 屏蔽与接地:

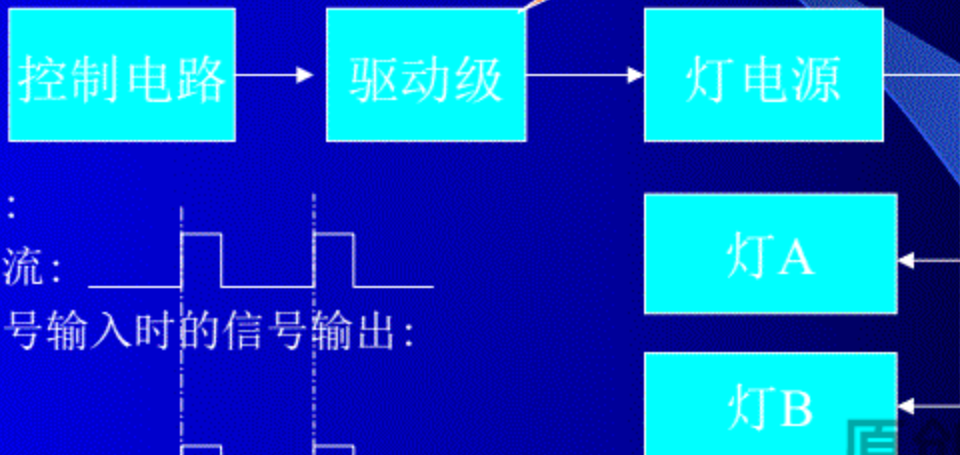
磁屏蔽: 铁氧体的高导磁率短接被屏蔽电路周围的磁场
切断磁场干扰的途径;

电屏蔽: 屏蔽层接地 —————> 消除屏蔽层可能引起的共模干扰

3.5.4 电磁干扰实例--2

- XGY1011B 灯电流共模干扰

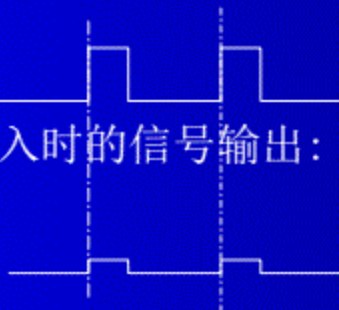
应采用隔离驱动



- 现象:

- 灯电流:

- 无信号输入时的信号输出:



- 原因: 灯电压: 300V, 电流: 30--100mA, 驱动级与灯电路之间没有电隔离, 灯电流通过地线耦合对信号造成共模干扰。

3.6 I/O口干扰的滤波与吸收:

病从口入:

信号的输入馈线也是电磁干扰的接收天线。

滤波	→	抑制干扰。
吸收 (TVS)	→	泄放干扰能量, 保护系统。
隔离	→	抑制共模干扰。

祸从口出:

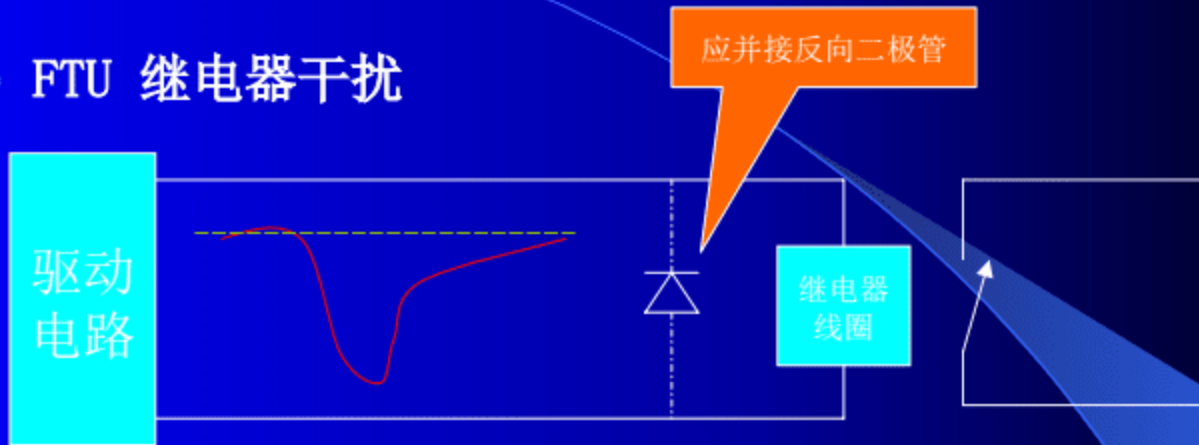
系统受干扰后, 输出控制的I/O信号紊乱 → 控制误动作。

受控设备或部件也会通过输出口将干扰信号反射回系统, 干扰系统的正常运行。

介绍例三、FTU继电器干扰
介绍例四、抄表电路故障影响RS-485

3.6.1 电磁干扰实例--3

- FTU 继电器干扰



- 现象：在控制继电器动作后，CPU 不停的复位，继电器不停的开/合动作。
- 原因：继电器动作时继电器线圈相当于自耦变压器，产生很高（数千伏）的快速脉冲，并通过控制线返回系统，干扰了系统的正常运行，导致系统复位。如此反复。
- 解决办法：继电器线圈两端并接反向二极管。

3.6.2 电磁干扰实例--4

- 电力抄表系统对 RS-485 口的干扰
- 现象：
 - RS-485线上有近 20V_{pp} 的工频干扰脉冲，系统抄表无法进行。
- 原因：
 - RS-485线上有两块表的 CPU 芯片未装，整块表的工作失控，
 - RS-485 的接口芯片变成了一个工频信号接收、放大和整型电路，
 - 并把整型后的信号输出到 RS-485 线上。

**!!! 任何时候，任何电路的设计，
都要避免任何输入引脚的悬空。**

3.7 传感器的设计处理:

电场传感器、电流传感器、磁场传感器、磁感应传感器、热传感器、光传感器等等。

正确选择、使用传感器 → 减少干扰途经

合理使用屏蔽、滤波技术 → 降低干扰幅度

高频/高源阻抗/长距离传输 → 有源屏蔽

(介绍例五、有源屏蔽技术的应用)

3.8 PCB设计:

缩短PCB板上的走线长度 → 降低共阻抗耦合干扰。

特别是缩短平行走线的长度 → 减少辐射和
→ 相互间的感应耦合。

3.7.1 电磁干扰实例--5

- 有源屏蔽技术在复电阻率测量系统中的应用-1

- 设计要求:

- 工作频率: 0.001 Hz--1000,000Hz
- 双通道幅-频误差: $< 0.1\%$
- 双通道相-频误差: $< 0.5^\circ$
- 最大共模信号: 10 V_{pp}
- 传感器输出阻抗: 100 -- 100k Ω
- 传感器到接收点的距离: $< 1\text{M}$

- 关键技术:

- 屏蔽无线电波的干扰;
- 不能引起高频端(1MHz)的相移和幅度衰减;
- 高频端(1MHz)共模抑制比不低于40db

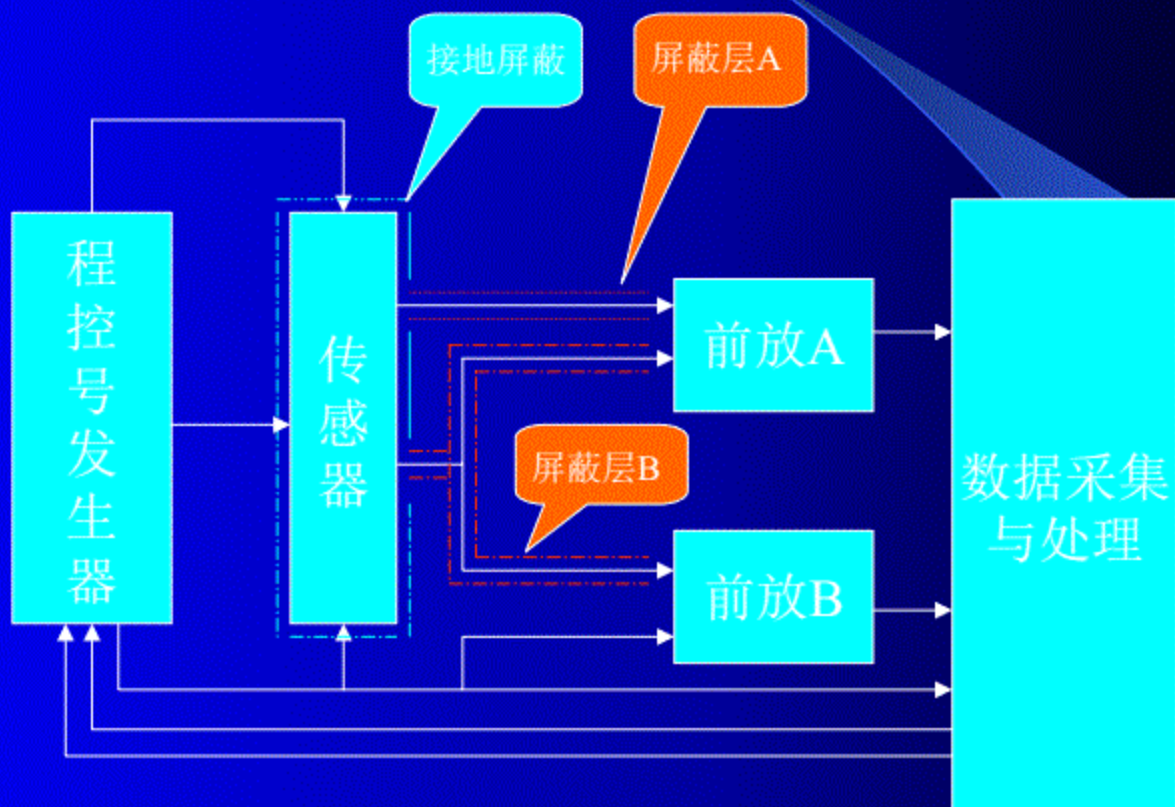
3.7.1 电磁干扰实例--5

- 有源屏蔽技术在复电阻率测量中的应用-2
- 通常的屏蔽措施--屏蔽层接地, 必然产生幅度衰减和相移。不能满足设计要求。而双道间幅度衰减和相移的不同, 也必然引起共模抑制比的下降。
- 有源屏蔽的原理

 采用与输入信号完全同步的有源信号驱动屏蔽层, 使得屏蔽层和其芯线(信号线)间始终保持等电位。由此消除了屏蔽层和其芯线间的分布电容充放电造成的幅度衰减和相移。
-
-
-
-

3.7.1 电磁干扰实例--5

- 采用有源屏蔽的复电阻率测量系统

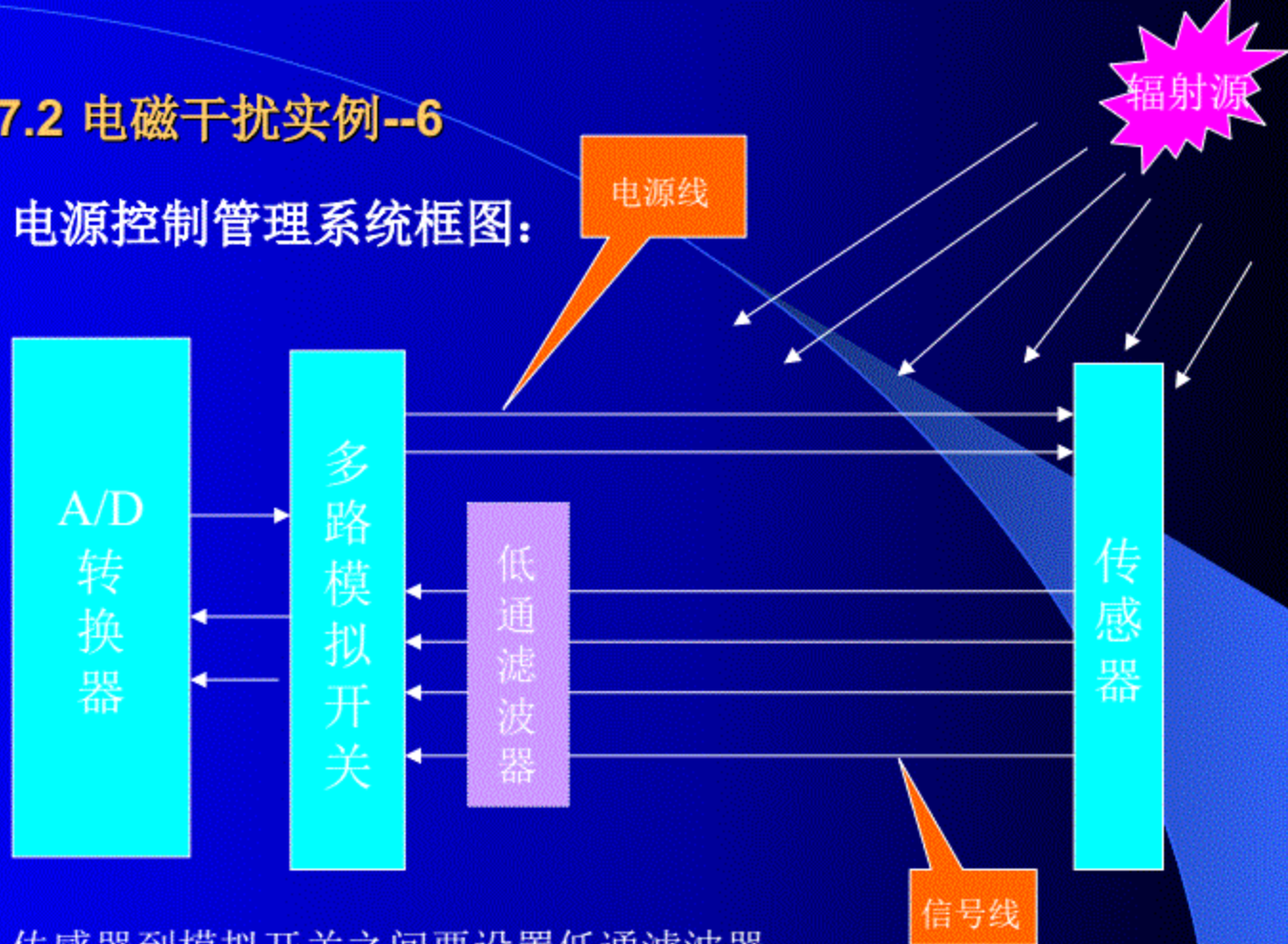


3.7.2 电磁干扰实例--6

- 电源控制管理系统受电磁波辐射的干扰
- 工作环境：
 - 福州一大厦二层，四层为无线广播电台。
- 现象：交流电压、交流电流测量显示值超过设计量程。
- 原因：四层为无线广播电台，强大的无线电磁辐射通过传感器和其馈线感应进测量通道。而馈线和传感器没有屏蔽，通道也未设置低通滤波器，干扰信号直接进入CMOS模拟通道选择开关。当干扰信号幅度超过CMOS模拟通道选择开关的电源电压时，就把该器件的所有通道堵塞。该器件的所有通道输出都为电源电压值。

3.7.2 电磁干扰实例--6

- 电源控制管理系统框图：



- 传感器到模拟开关之间要设置低通滤波器；
- 传感器、信号线和电源线要加屏蔽。

3.9 器件选择与设计工艺:

3.9.1 贴封技术

- 减少引线电感,
- 降低共阻抗耦合干扰,
- 减少辐射

3.9.2 CPLD技术

- 片内集成缩短引线, 减少外引脚,
- 提高抗干扰能力,
- 减少对外辐射。

3.9.3 低功耗、大规模IC

- 减少引线电感 $L \downarrow$,
- 降低脉冲电流 $I \downarrow$,

$L \downarrow + I \downarrow$

- 降低共阻抗耦合干扰。
- 减少对外辐射。

3.10 时序设计

- 电路设计的时序是数字电路设计中必须注意的问题。特别是高速电路，时序设计尤为重要。
- 实际设计中，因时序设计不当而引发的问题举不胜举。
- 时序设计不对，有时电路也能工作。但是，

!!! 能工作 ~~≡~~ 能可靠工作。

- 在设计控制译码电路时，切记两个原则：
 - **1、写时序：**
 - 总线控制的结束沿要晚于写器件的写控制结束沿；
 - **2、读时序：**
 - 读器件的读控制结束沿要晚于总线控制的结束沿；

3.11 总线驱动:

总线连接是系统中经常采用的连接方式，为了提高总线驱动能力，通常在总线的数据和地址线上接上拉电阻。

总线的驱动能力提高了，在驱动总线时，就会对总线造成冲击而形成反射干扰。这在高速应用中表现的很明显。

通常在驱动器件输出到总线之间：

串接小电阻（几十ohm）



吸收反射

3.12 干扰泻放:

EMC设计也象治病一样，不能一味的采用攻的手段，必要时需要设计一些泻放回路把干扰从旁路泻放掉，以免其进入主回路干扰主电路的正常工作。

3.13 功率分配、热分配:

功率器件的布局要均匀；

同一器件不同输出引脚的功率分配要尽可能均匀；

热器件布局要均匀，间距要大一些。

4、EMC 设计常用的器件和材料：

滤波：电容、电感

吸收：压敏电阻、固体放电管、二极管、TVS管，铁氧体

屏蔽：金属屏蔽层

电磁屏蔽：铁氧体等

5、EMC 测试：

温湿度测试；

电源电压瞬时跌落、短时中断和渐变测试；

静电抗干扰测试；

射频辐射抗干扰测试；

绝缘测试；

抗雷击浪涌测试；

快速瞬态脉冲群抗干扰测试；

6、电磁干扰的应用：

地学研究： 平面波应用（MT等）：磁爆、远方雷电等。

作者自叙述

本人多年来一直致力于电子产品的开发设计与生产工作，在电磁兼容设计方面略获心得，今将其整理成文，奉献给读者。

本文无意于教读者如何去作电磁兼容设计，电磁兼容是一个很复杂的问题，绝非几句话几篇文章就可以讲述明白的。各位读者读了本文以后能够从中领会到电磁干扰的严重性和进行电磁兼容设计的必要性也就达到本文的目的了。

本文第一稿是本人在2001年10月北京第一届嵌入式产品展览会专题演讲稿，后以题为“工控产品的可靠性设计”的论文发表于《微机应用》月刊上。2002年“工控产品的可靠性设计”一文被中国科技报整理编入《中国科技发展精典文库》。

陈有欣

2004年8月12日