

Solution and Improvement of Electronic Magnetic Compatibility

Zhaoqian Kai

Zhengzhou Runner Electric Co. Ltd., Zhengzhou Henan
Email: kaizq@hotmail.com, kaizq@sina.com, kaizq@163.com

Received: Dec. 8th, 2015; accepted: Dec. 23rd, 2015; published: Dec. 28th, 2015

Copyright © 2015 by author and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The paper summed up basic EMC knowledge and experience, aggregated EMC conventional method and emergency treatment measures, detailed connecting/landing/power/filter/insulating/shield/ESD-ES-protecting about EMC design improvement, focused on RLC-passive-analog-filtering/RC-analog active filtering/software-digital-filtering and its analog-simulation, summarized EMC-matter about electronic circuit and PCB design, and introduced EMC testing and attestation. So the solution and improvement of EMC have rules to follow and being simple and practical.

Keywords

Electronic Magnetic Compatibility, Electronic Magnetic Interference, Electronic Magnetic Sensibility, Electro-Static Discharge, Electrical Surging, Landing, Shield, Insulating, Filter, Testing and Attestation

电磁兼容应对及其改进技术

怯肇乾

郑州瑞能电气有限公司, 河南 郑州
Email: kaizq@hotmail.com, kaizq@sina.com, kaizq@163.com

收稿日期: 2015年12月8日; 录用日期: 2015年12月23日; 发布日期: 2015年12月28日

摘要

本文概括了EMC的基本知识和运用经验, 汇总了EMC应对的一般方法和紧急处理措施, 详细说明了EMC设计改进的连接、接地、电源、滤波、隔离、屏蔽、ESD/ES防护等环节, 着重阐述了RLC无源模拟滤波、

RC有源模拟滤波和软件数字滤波的实现及其模拟仿真，总结了电子电路及其PCB制板的EMC事项，介绍了EMC测试认证，使EMC应对及其改进既有章可循又简单实用。

关键词

EMC, EMI, EMS, ESD, ES, 接地, 屏蔽, 隔离, 滤波, 测试认证

1. 引言

众多投运的消费、医疗、电力、航空、汽车、列车等的电子产品出现的性能不稳定、环境不适应，甚至不可恢复的毁坏，很多都是由于电磁兼容 EMC (Electronic Magnetic Compatibility)设计考虑不周和经验不足造成的。深入探索 EMC、及时应对并且整体改进，尽可能减少技术支持和交叉重叠的科技研发，是电子产品设备可靠性的根本保证和科技企业产品系统持续扩大发展的基础。

2. EMC 概括描述

电可以生磁，磁又可以生电，电与磁，无处不在。电子产品设备需要承受环境中的各类电磁影响，同时也不能对其它电子产品设备产生电磁影响，这就是电磁兼容 EMC：电子产品设备在其电磁环境中能够正常工作并且不对该环境中的任何电子产品设备构成不能承受的电磁影响的能力。EMC 包括电磁干扰 EMI (Electronic Magnetic Interference)和电磁敏感 EMS (Electronic Magnetic Sensibility)。EMI 是电子产品设备对外部的电磁影响，包括传导、辐射、电流谐波、电压闪烁等。突然变化的电压或电流是形成 EMI 的“温床”。EMS，俗称“电磁免疫力”，是设备抵抗外界干扰的能力。

干扰源、敏感源和耦合路径构成 EMC 三要素。耦合路径有辐射和传导两条，辐射是电磁波形式的空间传播，传导是电流形式的导线传播。辐射形成辐射干扰(Radiated Interference)，又称射频干扰 RFI (Radio Frequency Interfere)，不是任何装置都能辐射电磁波。传导形成传导干扰(Conducted Interference)，在干扰源和接收器之间存在一个完整的电路连接。

静电释放 ESD (Electro-Static Discharge)和浪涌冲击 ES (Electrical Surging)是两种特殊形式的 EMC。ESD 是具有不同静电电位的物体由于接触或感应所引起的物体之间静电电荷的转移，静电场能量达到一定程度会出现击穿其间介质进行放电。ES 简称浪涌，也叫电涌或突波，就是瞬间出现超出稳定值的峰值现象，包括浪涌电压和浪涌电流。外部雷电与内部电气设备的启停和故障等是产生浪涌的根本原因。ESD 和 ES 属于 EMS 范畴，ESD 是“浪涌冲击”的特殊情况。

EMC 的内容与要素形式概括如图 1 所示。

3. EMC 运用应对[1]

3.1. 一般措施

一般 EMC 处理措施概括如图 2 所示，其中，连接处理针对线缆和接口，模拟滤波由硬件电路实现，数字滤波由软件编程实现。模拟滤波有两种：电阻 R、电容 C 和电感 L 组成的无源滤波和 R、C 与运算放大器组成的有源滤波。数字滤波主要有三种：无限数字滤波 IIR、有限数字滤波 FIR 和自适应数字滤波。特殊处理主要是 ESD 处理和浪涌处理。

必须进行 EMC 基础处理和一些针对性的常规性处理，有选择进行所需的特殊处理。

一般 EMC 处理措施贯穿在电子线路设计的每个环节和实验测试阶段，取决于嵌入式硬件工程师的经验积累和研发阅历，实验验证和测试 - 调试结果可以丰富和完善电子电路的原理和印刷电路板 PCB

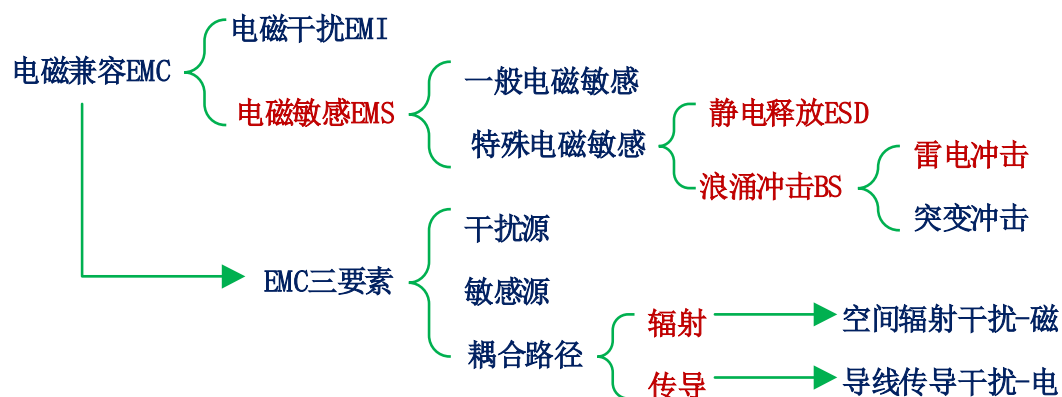


Figure 1. Structural diagram of EMC content and elements

图 1. EMC 的内容与要素构造示意图

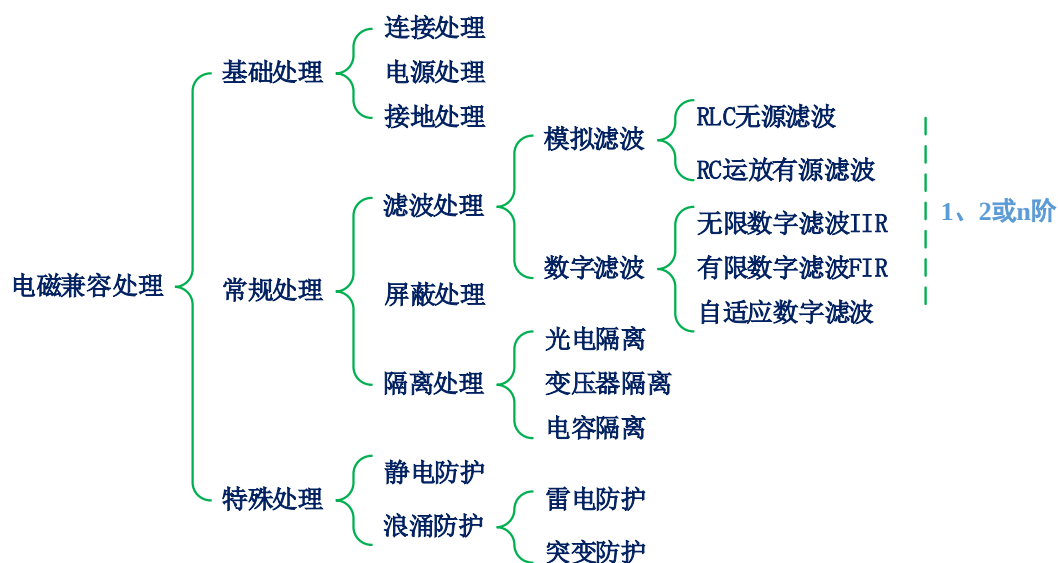


Figure 2. Summarization diagram of EMC treatment measure

图 2. EMC 处理措施概括示意图

(Printed circuit board)设计，包括通用计算机上的模拟运行和仿真分析。

基本 EMC 处理措施有接地、屏蔽、隔离、滤波和 ESD 防护。单纯采用屏蔽不能提供完整的干扰防护，比较可靠的措施是加滤波器，切断干扰源传播路径，与屏蔽共同构成完善的干扰防护。采用滤波技术，可以有效地抑制干扰源、消除耦合、提高接收电路的抵抗能力。

3.2. 紧急应对

紧急应对，是电子产成品系统不能通过各种 EMC 测试认证或者不能适应特殊应用环境，而采取的种种 EMC 方法措施。常用 EMC 紧急应对的措施概括如下：

- 基础处理

首先检查处理接地，尽可能彻底实现静电释放、雷电等突变浪涌防护，保持“静地”。具体作法有并联若干个同规模电阻加大同一线路板各个地之间的单点连接电阻功率，通过补焊增厚“铜箔走线”加大线路板整体地连接金属壳体的通流面积，使电子设备金属外壳接地，增加 ESD 防护器件，等。

其次检查处理电源，在电源线输入端串联铁氧体抑制元件，对电源线或线路板电源输入端使用电源噪声滤波器 PNF (Power Noise Filter) 或并联 ESD 防护器件、ES 抑制器件，在线路板电源进入端并联 10~150 μF 铝或钽电解电容、1 nF 瓷片电容或者 1~10 mH 磁芯电感做低 - 高频滤波，对 IC 芯片各种电源供给端并联 10 μF 电解电容/使用 104 瓷片电容或串联 10 μH 电感做高 - 低频滤波，等。

最后检查处理连接，换用屏蔽双绞线传输关键信号特别是差分总线信号，在高速信号线输入输出处加装 ESD 防护器件或串联高频低阻抗铁氧体磁珠。

- 屏蔽隔离

将电子设备置入有可靠接地的高导电率或高导磁率材料制成的盒、环、管、壳、网、槽、屏、板状等形状物体中，或者对电子设备外壳喷涂/贴装石墨等高导电材料。

使用光电耦合器、隔离放大器、隔离直流电源对输入输出信号或电源进行部分或者完全隔离。

- 滤波处理

硬件电路上进行 R-C-L 无源模拟滤波，对模数采集信号增加 RC 有源滤波。在电源端口并联 μF 级大电容或串联 mH 级电感可以滤除几百 KHz 到 5 MHz 之间的低频干扰；在高频数字电路上并联 1 nF 贴片小瓷片电容或使用 50~150 Ω 阻抗@100 MHz 铁氧体磁珠可以去除几十 MHz 到 200 MHz 的高频干扰。

软件设计上增加滑动均值滤波等简单数字滤波技术，如果微处理频率和存储资源许可，还可以考虑在软件上增加无限或有限数字滤波处理。

特殊应用或认证实验场合，随身携带一些 μF 级电解电容、nF 级瓷片电容、mH 级电感、低阻百兆级磁珠，经过测试分析确定了干扰噪声频率范围和强度，用公式 $f_c = \frac{1}{2\pi RC}$ 或 $f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 粗略计算得到滤波电容或电感参数，围绕这些参数，变换试验 R-L-C 无源滤波电容或电感，常能迅速解决 EMC 突发故障或问题。常备随身 EMC 处理器件还包括 PNF、ESD 器件、磁环、磁扣、磁芯电感、屏蔽双绞线，等。

4. EMC 设计改进[1]

4.1. 连接处理

采用双绞线传递信号，特别是差分信号，抵消信号之间和外界的 EMI；尽可能选用带屏蔽层的双绞线，利用增大的导线间杂散电容，间接低通滤波，进一步衰减 EMI；对长传输线串联电阻性磁珠以减小和抑制上冲及振铃现象，还可用高精度电阻排和 MAX5426 等集成运放构成可调增益和共模抑制比的仪表放大器，更进一步消除 EMI。

在电子线路板电源与信号进口处串联磁珠抑制高频噪声干扰；对 CAN、LIN、USB 等总线接口、音视频接口、数据存储卡端口、高速端口等加装 TVS/ESD 防护器件，防止“过冲”误码；有意选择 EMC 能力强的接口器件，如高 ESD 性能的 MAX3232E、带隔离的 RSM485/CTM1050、带低噪放大的 ATR0610 无线接收前端等，以承受高冲击电压等严重 EMI。

4.2. 接地处理

电子设备信号地线为直流电源一极，各种频率电流流过产生电压降在电源电压上叠加反馈到各个电路造成共地阻抗耦合相互干扰；并且地线与各电路构成的众多环路网孔也易遭受电磁感应而造成地网环路干扰，必须设法降低地线阻抗和减小地环路网孔面积。

有单点接地、多点接地和安全接地三种形式。单点接地有串联、并联和串并联多种机制，多应用在信号频率低于 1 mHz 或地线长度小于信号最高频率的 $\lambda/20$ 的电子设备中，串联接地时应将单元间无信号联系的低电平电路单元靠近电源馈电，串并联时应将电平相近电路单元划为一组串联，再将各组电路并

联。多点接地常用在信号频率高于 10 mHz 或地线长度大于信号最低频率的 $\lambda/20$ 的电子设备中,为减小高频电流通过较长地线产生辐射干扰,电路单元都应以最短接入由金属网格或导体板构成的地线中。安全接地是为安全而接入大地的地线,电子电路的地线要连接其金属机壳,由其接入大地实现与大地的等电位,避免因偶然高压泄漏或积累静电荷使机壳电压升高而危及人身/器件安全,应埋设导体板或并联导体棒并在其周围的回填土中加木炭屑、食盐或尿醛等降阻剂,实现可靠大地安全连接。

“地”上的杂波噪音要最小,尽可能实现“静地”,否则再好的滤波电路都不会有效。同一电路板卡,区分模拟地、数字地和射频地,各地单点相连,最后汇入输入电源地,地线连接点使用零电阻尽可能靠近电源地线并具有足够大的功率。注重焊接、装配、测试、转运等过程中的防静电接地,通过佩戴“手腕接地带”、防静电鞋套/橡胶板工作面接地等措施,实现人员、工具、仪器、台椅等的可靠接地。

4.3. 电源处理

主要是电源噪声,由电源线引入和导出,频谱大致为 10~30 mHz,高达 150 mHz,有串模干扰和共模干扰两类,串模干扰是电源线间(线对线)的噪声,共模干扰是电源线对大地(线对地)的噪声。

在电源进入端做简单的 RC 或 LC 滤波,使用铝/钽电容做低频滤波;对 IC 器件电源供给使用瓷片电容做高频滤波。电源变换电路中广泛应用 RC 滤波,为改善效果,常改为 π 型 RC 滤波。表 1 给出了稳压电源中滤波电容容量和输出电流的关系,电容耐压值一般应取变压器次级交流电压的 1.5 倍。

在电源线入口处加装铁氧体抑制元件,以滤除高频干扰,器件的磁导率要低和截面积要大,以避免铁氧体磁饱和,降低插入损耗。对电源进线端使用 PNF 双向滤波器,即可滤掉交流电源线上的外来干扰,又能避免向外界发出噪声,并且对串、共模干扰均有抑制作用,还可以抑制 ES。为使噪声滤波效果更佳,还可采用二级、三级 PNF。普通 PNF 抑制 ES 能力较差,当电压浪涌上升不太陡且脉宽较大时易造成不匹配,甚至使共模扼流圈饱和,要在进线间及进线与地之间各并联压敏电阻(VSR),还需在输入端并联 1 m Ω 释放电阻以消除 PNF 输入端电容上的积累电荷。

4.4. 滤波处理

滤波使有用频率信号通过而抑制或大为衰减无用频率信号,是信号处理、数据传送和抑制干扰的常用基本方法。滤波电子电路或者软件模块库,称为滤波器,前者是模拟滤波器,后者是数字滤波器。滤波器常见类型划分及其典型频谱特性如图 3 所示。简要确切说明滤波器,应该明确其阶数、有无源、带通性能、模拟数字等特征,如二阶 LC 无源模拟带通滤波器、四阶 IIR 数字滤波器。

4.4.1. 模拟滤波

(1) 无源滤波

a) 基本描述

无源滤波,以电阻 R (Resistor)、电感 L (Inductor)和电容 C (Capacitor)等元件组成滤波电路,形式简单,易于实现,一般形式有单电容型(C 型)、单电感型(L 型)、 Γ 型、反 Γ 型、T 型和 π 型,如图 4 所示。T 型滤波适用于信号源内阻和负载电阻比较小(如低于 50 Ω)的情况, π 型滤波器适用于信号源内阻和负载电阻都比较高的情况,当信号源内阻和负载电阻不相等时,可选用 L 型或 C 型滤波电路,对于低信源阻抗和高负载阻抗,可选 L 型滤波器,反之,可选用 C 型滤波器。

实际应用中更多选用一阶 RC 或二阶 LC 构成的“低通”或者“高通”滤波电路,其基本电路形式如图 5 所示。截止频率的计算公式,一阶 RC 滤波是: $f_c = \frac{1}{2\pi RC}$ 。二阶 LC 滤波是: $f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 。

b) LC 滤波运算[2]

Table 1. Table about relation between capacitor content and output current in stabilized voltage supply
表 1. 稳压电源中滤波电容器容量和输出电流的关系表

输出电流	2~3 A	1~1.5 A	0.5~1 A	0.1~0.5 A	50~100 mA	50 mA
电容容量	4700 μF	2200 μF	1000 μF	500 μF	200~470 μF	200 μF

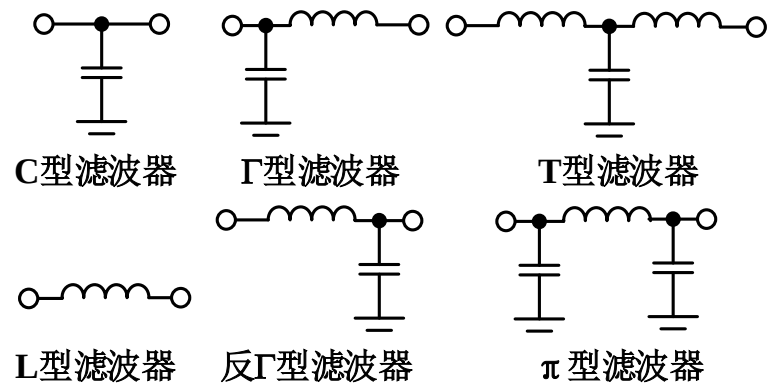
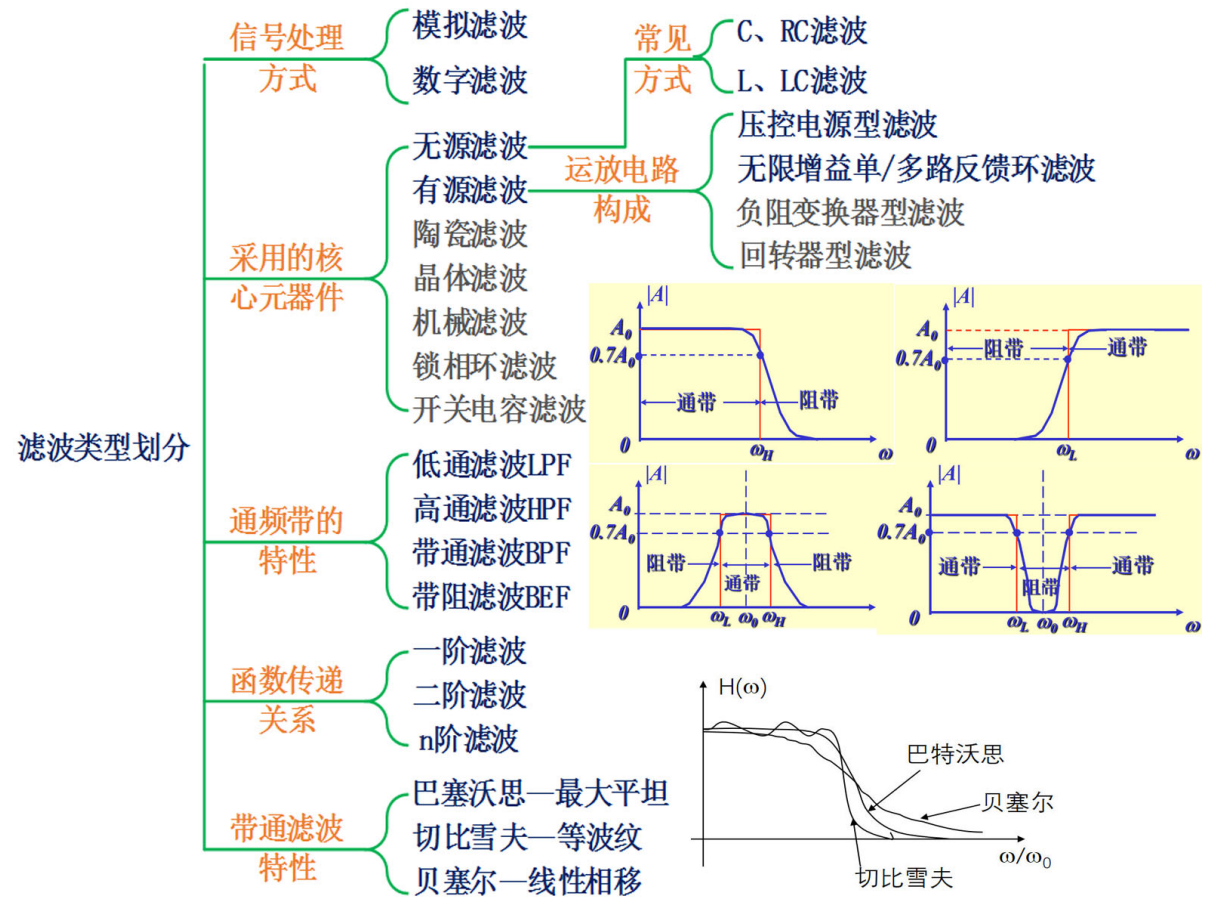


Figure 4. Type diagram about usual passive filter circuitry
图 4. 常见无源滤波电路形式框图

LC 无源滤波, 按电抗元件结构分, 有 T、L、 π 型, 按电特性分有 K 型、M 导出型。常数 K 型滤波串并联电抗积在限定频率范围内为常数 $K = \frac{2\pi fL}{2\pi fC} = \frac{L}{C}$ 。M 导出型由 K 型推演而来, 需对 K 型滤波器元

件参数乘以系数 $m(0 < m < 1)$: $m = f_c/f_\infty$; 低通滤波 $m = \sqrt{1-(f_c/f_\infty)^2}$, 高通滤波 $m = \sqrt{1-(f_\infty/f_c)^2}$, f_∞ 为衰减极限频率。M 导出型滤波比 K 型滤波有较陡峭的截止特性。常用滤波器形式特征如表 2 所示。

c) 磁珠应用[3]

导线穿过铁氧体构成磁珠, 铁氧体对低频信号几乎没有阻抗, 对高频信号却有较大的阻碍衰减, 能把交流高频信号转化为热而散发。磁珠可以等效为串联的电感和电阻, 电感和电阻的值都与磁珠长度成比例, 电阻值和电感值都随频率变化。磁珠参数主要有三项: 阻抗[Z](Ω)@100 MHz、直流电阻(m Ω)和额定电流(mA), 阻抗与频率关系曲线是重要技术指标。100 Ω /100 mHz 是常用规格。常用磁珠有两类: HH 标识开头的电源滤波磁珠和 HB 开头的信号线用磁珠。有的磁珠上有多个孔洞, 用导线穿过可增加元件阻抗(穿过磁珠次数的平方), 不过在高频时所增加的抑制噪声能力不可能如预期的多, 而用多串联几个磁珠的办法会好些。不需要为磁珠设置接地点, 大电流磁珠滤波要注意散热。

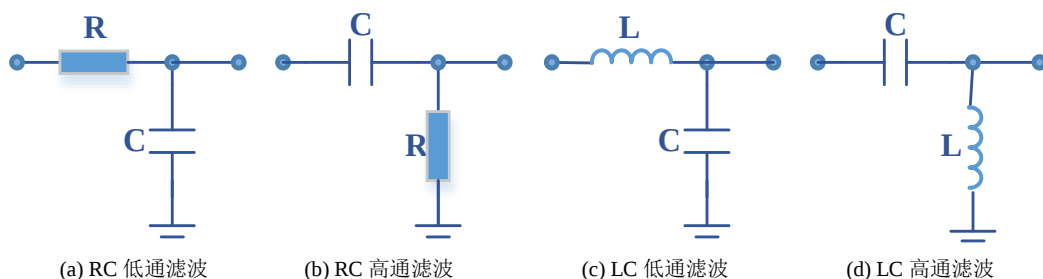


Figure 5. Circuit diagram of basic RLC passive filter

图 5. 基本 RLC 无源滤波电路框图

Table 2. Table about form and feature of usual LC passive filter

表 2. 常用 LC 无源滤波器形式特征表

		K 型滤波器	M 导出型滤波器	
低通滤波	电路形式			
	参数特征	$z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}, f_c = \frac{1}{\pi\sqrt{LC}}, C = \frac{1}{\pi f_c z_0}, L = \frac{z_0}{\pi f_c}$	$L_1 = m \frac{z_0}{2\pi f_c},$ $L_2 = \frac{1-m^2}{4m} \cdot \frac{z_0}{2\pi f_c},$ $C_2 = \frac{1}{\pi f_c z_0}$	$L_1 = m \frac{z_0}{\pi f_c},$ $C_1 = \frac{1-m^2}{4m} \cdot \frac{1}{\pi f_c z_0},$ $C_2 = m \frac{1}{\pi f_c z_0}$
高通滤波	电路形式			
	参数特征	$z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}, f_c = \frac{1}{4\pi\sqrt{LC}}, C = \frac{1}{4\pi f_c z_0}, L = \frac{z_0}{2\pi f_c}$	$C_1 = \frac{1}{4\pi f_c z_0 \cdot m},$ $C_2 = \frac{4m}{1-m^2} \cdot \frac{1}{4\pi f_c z_0},$ $L_2 = \frac{z_0}{4\pi f_c \cdot m}$	$L_1 = \frac{4m}{1-m^2} \cdot \frac{z_0}{4\pi f_c},$ $L_2 = \frac{z_0}{4\pi f_c \cdot m},$ $C_1 = \frac{1}{4\pi f_c z_0 \cdot m}$

磁珠与电感的区别：磁珠是能量转换(消耗)器件，电感是储能元件。电感多用于电源滤波回路，磁珠多用于信号回路，磁珠主要用于抑制辐射干扰，而电感侧重于抑制传导干扰。一些 RF 电路、PLL、振荡电路、超高频存储器电路(DDR SDRAM, RAMBUS 等)都需在电源输入端加磁珠。电感多用在 LC 振荡电路、中低频滤波电路等，其应用频率范围很少超过 50 MHz。地/电源连接用电感，信号线用磁珠。

电路中使用磁珠，能增加高频损耗而又不引入直流损耗，且体积小、易安装在区间引线或导线上，对于 1MHz 以上噪声信号抑制效果十分明显，可用作高频电路的去耦、滤波以及寄生振荡的抑制，特别易于消除电路内部由开关器件电流突变和滤波电源线或其它导线引入的高频噪声。低阻抗供电回路、谐振电路、丙类功率放大器及可控硅开关电路，使用磁珠滤波十分有效。单个磁珠阻抗一般为十至几百欧，一个衰减量不够时可用多个磁珠串联，但三个以上效果就不明显了。电子线路板电源进口加磁珠，可有效抑制衰减数字 IC 电路周期开关产生的高频电流在电源和地之间产生的共模压降造成的共模高频干扰，实现“抑源”，优于使用退耦电容(可短路高频噪声但常引起高频谐振造成新的干扰)。信号线接口上使用磁珠，可有效抑制高频噪声，使如 1 MHz 左右的数据信号顺利得以识别。

d) 铁氧体应用

灰黑色亚铁磁性材料铁氧体器件，广泛应用于电子线路板、电源线和数据线上，抑制高频干扰(特别是尖峰干扰)，也可吸收 ESD 脉冲干扰，其重要性能参数为磁导率 μ 和饱和磁通密度 B_s ，可等效为 L、R 组成的串联电路。低频时 R 小， μ 高，L 大，EMI 被反射而抑制，整个器件相当于一个低损耗、高品质 Q 的电感，但易谐振有时可能引起干扰增强。高频时 R 成分多，L 小， μ 低，总阻抗增加，高频信号通过铁氧体时 EMI 被吸收并以热耗散。不同铁氧体有不同的最佳抑制频率范围。磁导率越高，抑制频率越低。体积越大，抑制效果越好。体积一定时长而细的形状比短而粗的效果好，内径越小抑制效果也越好。但有直流或交流偏流时有饱和问题，抑制元件横截面越大，越不易饱和，承受的偏流越大。

磁环、磁管、磁扣和磁珠是常见的铁氧体抑制器件。开关电源中用于抑制电源高频开关噪声的高磁导率与可饱和性的超小型特殊磁珠，已经成为了固定模块---尖峰抑制器。铁氧体器件把高频成分转为热耗是“吸收滤波”，不同于常规无源滤波将阻带频率反射回信号源。抑制差模干扰时，通过的电流值正比于体积，两者失调造成饱和，会降低元件性能；抑制共模干扰时，将电源的两根线(正负)同时穿过一个磁环，差模有效信号没有任何影响，而共模信号则会表现出较大的电感量。磁环使用中让穿过导线反复绕几下，可增加电感量。存在较大直流偏流时，将电源出线(交流火线、直流中线)与回线(交流中线、直流地线)同时穿入一个磁管，可避免饱和，抑制共模噪声。

铁氧体抑制元件有多种材料和各种形状、尺寸，应根据 EMI 信号的频率和强度、要求抑制的效果即插入损耗值及允许占用的空间包括内径、外径和长度等尺寸，综合选择。尽量选用磁导率低的材料和长、厚和内径尽量小的铁氧体元件。铁氧体元件应安装在尽可能接近干扰源的地方，安装在 I/O 电路、导线或电缆进出屏蔽壳的地方，它穿在电缆上后要用热缩管封好。

e) 电路选用

根据干扰源的特性、频率范围、电压和阻抗等参数及负载特性要求，适当选择滤波器：

- ① 滤波器在相应工作频段范围内要满足负载要求的衰减特性，衰减量不能满足时可用多级联；
- ② 要满足负载电路工作/抑制频率的要求，若二者频率非常接近则需频率特性非常陡峭的滤波器；
- ③ 滤波器阻抗必须与连接的干扰源和负载阻抗匹配，负载高阻抗则滤波器输出低阻抗，电源/干扰源低阻抗则滤波器输出高阻抗，电源/干扰源阻抗未知或变化范围大需为滤波器输入/输出并接固定电阻；
- ④ 滤波器须有一定耐压能力，有足够高的额定电压，以经受输入瞬时高压冲击；
- ⑤ 滤波器允许通过的电流应与电路中连续运行的额定电流要一致；
- ⑥ 滤波器应具有足够的机械强度，结构简单、重量轻、体积小、安装方便，安全可靠。

滤波器的安装:

- ① 滤波器最好安装在干扰源出口处, 将干扰源和滤波器完全屏蔽, 壳体间搭接良好;
- ② 滤波器输入和输出线必须分开, 用隔板或底盘来固定滤波器, 若不能隔离则应采用屏蔽引线;
- ③ 滤波器中电容导线应尽量短, 以防止感抗与容抗在某频率上形成谐振;
- ④ 滤波器接地线上有很大的短路电流, 能辐射电磁干扰, 要进行良好的屏蔽;
- ⑤ 焊接在同一插座上的每根导线必须进行滤波, 否则会使滤波衰减特性完全失去;
- ⑥ 管状滤波器必须完全同轴安装, 使电磁干扰电流成辐射状流过滤波器。

(2) 有源滤波[5]

a) 基本描述

有源滤波即 RC 有源滤波, 以集成运放和电阻 R、电容 C 构成, 不用电感, 体积小, 重量轻, 非线性和损耗小, 还有一定的电压放大缓冲作用, 但因带宽有限而工作频率难以很高, 其滤波频率范围约为 $10^{-3}\text{Hz}\sim 10^6\text{Hz}$, 频率稳定度在 $(10^{-3}\sim 10^{-5})/\text{摄氏度}$, 频率精度为 $+(3\sim 5)\%$, 可用简单的级联来得到高阶滤波器。二阶有源滤波, 典型, 应用普遍, 奇次阶滤波可以由一个单极点 RC 与若干个二阶级联构成, 偶次阶滤波可以若干个二阶级联构成。电路一般由三部分组成: RC 网络、放大器和反馈网络, RC 网络完成滤波, 如图 6(a)所示。常用形式主要是压控电压源有源滤波和无限增益单/多路反馈有源滤波, 典型电路如图 6(b)和图 6(c)所示, 前者运放为同相接法, 输入阻抗高, 输出阻抗低, 相当于电压源, 电路性能稳定, 增益容易调节; 后者为运放反相接法, 因开环增益无限大, 反相输入端可视为虚地, 输出端通过电容和电阻可形成两条反馈支路, 元件较少, 但增益调节不方便; 表 3 是两种电路带通滤波的形式特征。

(b) 开发设计

主要是根据给定的技术指标选定电路形式和确定电路的元器件, 一般考虑原则如下:

- ① 类型选择: 一阶滤波, 电路简单, 但带外传输系数衰减慢, 一般用在带外衰减性要求不高的场合; 无限增益多环反馈型滤波器特性对参数变化比较敏感, 不如压控电压源型滤波器; 要求带通滤波器的通带较宽时, 可用低通滤波器和高通滤波器合成, 比单纯用带通滤波器要好。
- ② 级数选择: 取决于带外衰减特殊性的要求, 每一阶低通或高通电路可获得 $-6\text{ dB}/\text{倍频程}(-20\text{ dB}/\text{十倍频程})$ 的衰减, 多级滤波器串接时传输函数总阶数等于各级阶数之和, 要求的带外衰减特性为 $-m\text{ dB}/\text{倍频程}(\text{或}-m\text{ dB}/\text{十倍频程})$ 时应使级数 $n \geq m/6(\text{或 } n \geq m/20)$ 。
- ③ 运放要求: 一般选用开环增益在 80 dB 以上通用型运放, 运放单位增益带宽应满足: $B \geq (3-5)Ae^{\text{Fh}}$

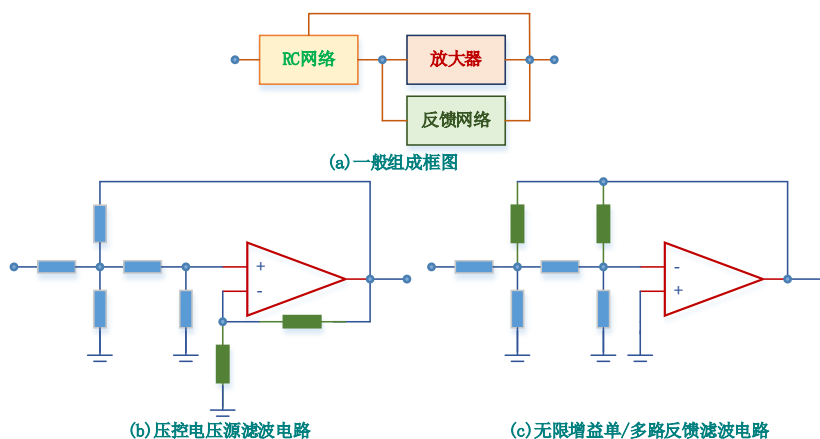
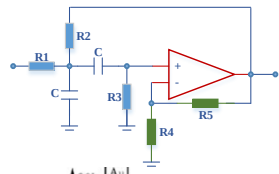
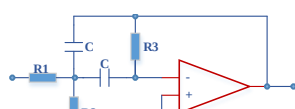
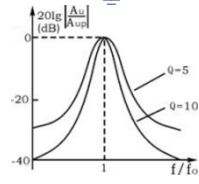
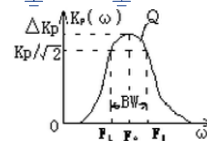


Figure 6. Typical structure diagram about active filter circuitry

图 6. 常用有源滤波电路典型组成框图

Table 3. Table about form and feature of 2nd order active filter
表 3. 二阶有源滤波器形式特征表

	压控电压源滤波	无限增益多路负反馈滤波
典型电路幅频曲线		
带通滤波器 BPF		
电路性能参数	带通增益 $A = \frac{1 + \frac{R_2}{R_1}}{R_1 \left(\frac{1}{R_1} + \frac{R_2}{R_2 R_4} + \frac{1}{R_3} \right)}$ 中心角频率 $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{R_3 C^2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)}$ 带宽/品质因数 $B = \frac{\omega_0}{q} = \frac{1}{C} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{2}{R_3} + \frac{R_3}{R_2 R_4} \right)$	带通增益 $A = -\frac{R_3}{2R_1}$ 中心角频率 $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{R_3 C^2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)}$ 带宽/品质因数 $B = \frac{\omega_0}{q} = \frac{2}{CR_3}$

[A 为滤波通带传输系数，Fh 为工作频率的上限]；若输入信号较小(10 mV 以下)，则选低漂移运放；若滤波器工作于超低频，以至使 RC 网络中电阻元件值超过 100 kΩ，则应选低漂移高输入阻抗的运放。

④ 器件选择：给定截止频率 fc、带内增益 Av 及品质因数 q (二阶低通或高通一般为 0.707)设计滤波器，经常出现待定值元件数目多于限制元件取值参数数目，有许多个元件均可满足要求，一般从难配的电容器选定入手，根据工作频率范围按照表 4 初选电容值。

模拟有源滤波常用参数运算法和快速查表法进行开发，前者依据电路特征参数公式，后者查找研究得来的相关表格，逐步确定各个元器件，下面举例说明。

1 参数运算法

设计要求：有源二阶带通滤波器，中心频率 $f_0 = 500 \text{ Hz}$ ，通带增益 $A = 10$ ，带宽 $\Delta f = 50 \text{ Hz}$ 。

设计步骤：采用无限增益多路负反馈二阶有源滤波，典型电路及其特征参数公式见表 1，则：

$$A = -\frac{R_3}{2R_1} = 10, \quad \omega_0 = 2\pi f_0 = \sqrt{\frac{1}{R_3 C^2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)}, \quad B = \frac{\omega_0}{q} = \frac{2\pi f_0}{q} = \frac{2}{CR_3}, \quad q = \frac{f_0}{\Delta f} = \frac{500}{50} = 10$$

根据表 4 工作频率与滤波电容的关系范围，取 $C = 0.02 \mu\text{F}$ ，由上述式子可依次解得：

$$R_3 = 838 \Omega, \quad R_1 = 15.92 \text{ k}\Omega, \quad R_2 = 318.5 \text{ k}\Omega.$$

2 快速查表法

设计要求：二阶无限增益多路反馈 1 dB 切比雪夫型低通滤波器，增益 $A = 2$ ，截止频率 $f_c = 5 \text{ KHz}$ 。

设计步骤：根据表 4 工作频率与滤波电容的关系范围，取 $C = 0.01 \mu\text{F}$ ，电阻换标系数 $k = \frac{100}{f_c C} = 2$ ；

查归一化设计用表 5， $A = 2$ ，电容 $C_1 = C = 0.01 \mu\text{F}$ ， $K = 1$ 时的电阻值：

$$R_1 = 2.602 \text{ k}\Omega, \quad R_2 = 5.204 \text{ k}\Omega, \quad R_3 = 8.839 \text{ k}\Omega;$$

将上述电阻值乘以参数 $K = 2$ ，得： $R_1 = 5.204 \text{ k}\Omega$ ，取标称值 $5.1 \text{ k} + 104 \Omega$ ； $R_2 = 10.408 \text{ k}\Omega$ ，取标称

Table 4. Table about relation between filter frequency and capacity**表 4.** 滤波器工作频率与滤波电容取值的对应关系

f	(1~10) Hz	(10~10 ²) Hz	(10 ² ~10 ³) Hz	(1~10) KHz	(10~10 ³) KHz	(10 ² ~10 ³) KHz
C	(20~10) F	(10~0.1) uF	(0.1~0.01) uF	(10 ⁴ ~10 ³) pF	(10 ³ ~10 ²) pF	(10 ² ~10) pF

Table 5. Table in designing about Chebyshev 2nd Order MFB**表 5.** 二阶无限增益多路反馈切比雪夫低通滤波器设计用表

纹波高度	电路元件	归一化电路元件值(KΩ)			
		1	2	3	4
0.5 db	R1	3.374 kΩ	2.530 kΩ	1.673 kΩ	1.608 kΩ
	R2	3.374 kΩ	5.060 kΩ	10.036 kΩ	16.083 kΩ
	R3	3.301 kΩ	3.301 kΩ	5.045 kΩ	4.722 kΩ
	C1	0.15 C	0.1 C	0.033 C	0.022 C
1 db	R1	3.821 kΩ	2.602 kΩ	2.284 kΩ	2.213 kΩ
	R2	3.821 kΩ	5.204 kΩ	13.705 kΩ	22.128 kΩ
	R3	6.013 kΩ	8.839 kΩ	5.588 kΩ	5.191 kΩ
	C1	0.1 C	0.05 C	0.03 C	0.02 C
2 db	R1	4.658 kΩ	3.999 kΩ	3.009 kΩ	3.113 kΩ
	R2	4.658 kΩ	7.997 kΩ	18.053 kΩ	31.133 kΩ
	R3	13.216 kΩ	7.697 kΩ	8.524 kΩ	6.591 kΩ
	C1	0.05 C	0.05 C	0.02 C	0.015 C

值 10 k + 408 Ω; $R_3 = 17.698 \text{ k}\Omega$, 取标称值 15 k + 2.7 kΩ 或 $\approx 18 \text{ K}$ 。

借助于电子设计自动化 EDA (Electronic Design automation)工具, 如 Cadence 的 pSpace、Aligent 的 ADS、Mathworks 的 Matlab-Simulink、NI 的 Multisim 等, 建立电路框图, 设定元器件参数, 加入信号激励, 可取得并对比输入输出的波形曲线, 评估并调整滤波器电路。图 7 给出了采用 Multisim 设计并模拟仿真二阶压控电压源带通滤波器的电路框图、幅频特性和交流分析(AC Analysis)频率特性图。

4.4.2. 数字滤波[6]

(a) 基本描述

数字滤波, 通过一定运算关系改变输入信号所含频率成分的相对比例或滤除某些频率成分, 间接实现 EMC, 是模拟硬件电路滤波的有力补充, 相对模拟滤波精度高、稳定、体积小、重量轻、灵活、不求阻抗匹配, 可避免模拟滤波无法克服的电压漂移和噪声问题。数字滤波形式主要有四种: 简单滤波、无限冲击响应 IIR (Finite Impulse Response)滤波、有限冲击响应 FIR (Infinite Impulse Response)滤波和自适应滤波。简单滤波以简单算法处理适合微控制器简便编程控制的需要。IIR 和 FIR 滤波是从滤波器网络结构或单位脉冲响应类型划分的。作用于线性时不变离散时间系统的数字滤波器的差分方程为:

$$y(n) = h(n) \cdot x(n) = \sum_{k=0}^M b_k x(n-k) - \sum_{k=1}^N a_k y(n-k)$$

其中, $x(n)$ 为输入序列, $y(n)$ 为输出序列, $h(n)$ 为单位脉冲响应序列, a_k 和 b_k 为滤波器系数, N 为滤波器

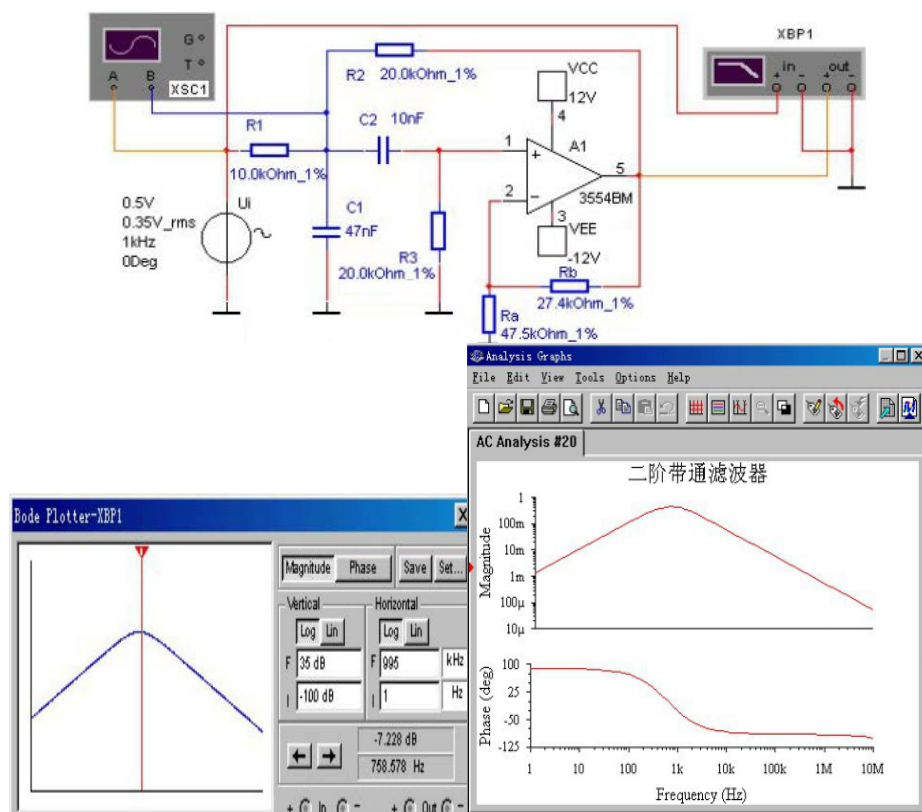


Figure 7. Multisim simulating scheme about Active BPF circuitry

图 7. 有源带通滤波电路的 Multisim 模拟仿真图

阶数， a_k 决定系统的零点， b_k 决定系统的极点； $h(n)$ 的 Z 变换为系统函数，即滤波器传递函数：

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_M z^{-M}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_N z^{-N}} = \frac{\sum_{i=0}^M b_i z^{-i}}{\sum_{i=1}^N a_i z^{-i}}$$

若 $a_i = 0$ ，则 $H(z) = \sum_{i=0}^M b_i z^{-i} = \sum_{n=0}^{N-1} h(n) z^{-n}$ ，系统函数是 z^{-i} 的多项式，单位脉冲响应时间长度有限，即 $N-1$ 阶 FIR 滤波器。若至少一个 a_i 的值不为零，且分母至少存在一个根不为分子所抵消，则有

$H(z) = \frac{\sum_{i=0}^M b_i z^{-i}}{\sum_{i=1}^N a_i z^{-i}}$ ，说明该滤波器的单位冲激响应有无限多个，时间长度持续到无限长，即 N 阶 IIR 滤波器。

FIR 滤波只与输入有关，IIR 滤波不但有关输入，还有关之前的输出。

IIR 滤波较易实现通带与阻带衰减特性，滤波器阶次低，计算速度快，但相位线性不易实现。

FIR 滤波器具有精确的线性相位和稳定性，除数多，运算时间长，需要 FFT 提高运算速度。

常用数字滤波一般属于选频滤波器。若滤波器传输函数表示为： $H(e^{j\omega}) = |H(e^{j\omega})| e^{jQ(\omega)}$ 。式中，幅频特性 $|H(e^{j\omega})|$ 表示信号通过滤波器后各频率成分的衰减情况，相频特性 $Q(\omega)$ 反映各频率通过滤波器后在时间上的延时情况。IIR 滤波，相频特性不作要求。有线性相位要求的滤波一般用 FIR。

(b) 简单滤波实现[4]

简单滤波，针对速度和存储资源有限的微控制器应用，实现快速简单的滤波算法：

① 限幅滤波：比较相邻采样值和 Y_n 和 Y_{n-1} 与经验确定的采样允许最大偏差值 A ，在每次检测到新值时判断：若 Y_n 与 Y_{n-1} 之差 $\leq A$ ，则本次值有效；否则本次值无效，用 Y_{n-1} 值代替 Y_n 。

② 中值滤波：连续采样 N 次(N 取奇数)把 N 次采样值按大小排列取中间值为本次有效值。

③ 算术平均滤波： $Y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i$ 。对一点数据多次采样，将其平均值作为该点的采样结果。有利于周期性干扰信号滤波，也可减少系统随机干扰影响。但是尖峰脉冲或持续时间较长的电源干扰，效果差。

④ 滑动平均滤波：将本次采样与之前 $N-1$ 次采样之和的平均值，作为本次滤波结果，如 $N=3$ 。

⑤ 中位值平均滤波：即“中值滤波法”+“算术平均滤波法”，连续采样 N 个数据，去掉最大值和最小值再算出 $N-2$ 个数据的算术平均值。 N 取值范围：3~14。能有效防止尖峰脉冲干扰，采样数据能平滑过渡。但对脉冲宽度较大的信号不理想，对于信号数据变化快的系统会产生幅值失真。

⑥ 一阶递推滤波：即用算法来代替硬件 RC 低通滤波，递推公式为 $Y_n = QX_n + (1-Q)Y_{n-1}$ ， Q 为时间常数， X_n 为第 n 次采样输入， Y_n 为第 n 次采样输出。适用于高频及低频干扰信号，对于变化较慢的系统能有效跟踪；不适用于中频干扰信号和变化快、实时性要求高的系统。

⑦ 曲线拟合法：先将数据采集进来存在数组里，然后按照一定步长抽取数据作曲线拟合，能较精确反映采集数据变化趋势，去尖峰脉冲干扰，对持续时间长的干扰脉冲也有较好效果，但对单片机存储空间有要求，二次抛物线或更高次曲线拟合会影响单片机速度，不适合实时性要求较高的系统。

(c) IIR 滤波实现

IIR 滤波器有直接 I 型、直接 II 型、级联型、并联型等基本结构，各有相应设计步骤，典型设计法和直接设计法是常用方法。典型设计法借用成熟的模拟滤波器模型，将数字滤波技术指标转换为模拟低通滤波指标，然后将模拟低通滤波转换成模拟低通、高通、带通滤波器，再将模拟滤波转换成数字滤波器；这种方法相对成熟，不仅有完整的公式，也有完整查阅图表，更可调用 Matlab 函数快速设计。直接设计法，以计算机作辅助，用 Matlab 工具箱自带函数设计数字低通、高通、带通和带阻滤波器。

用 Matlab 进行典型数字滤波器设计的具体步骤如下：

① 按一定规则将给出的数字滤波器技术指标转换成模拟低通滤波器的技术指标；

② 根据转换技术指标用滤波器阶数选择函数，确定最小阶数 N 和固有频率 W_n ，可用函数有 buttord、cheb1ord、cheb2ord、ellipord 等；

③ 用最小阶数 N 产生模拟滤波器原型，可用创建函数有 buttap、cheb1ap、cheb2ap 等；

④ 用固有频率 W_n 把模拟低通滤波器原型转换成模拟低通、高通、带通、带阻滤波器，可用函数有 lp2lp、lp2hp、lp2bp、lp2bs；

⑤ 用冲激响应不变法或双线性变换法把模拟滤波器转换成数字滤波器，分别用函数 iminvar 和 bilinear 实现。

Matlab 信号处理工具箱提供了几个直接设计 IIR 数字滤波器的函数，直接调用就可设计滤波器：

① Butterworth 滤波器——函数 butter()：可设计低通、高通、带通和带阻的数字和模拟滤波器，其特性是通带内的幅度响应最大限度的平滑，但损失了截止频率处的下降斜度。

② Chebyshev I 型滤波器——函数 cheby1()：可设计低通、高通、带通和带阻的数字/模拟滤波器，通带内等波纹，阻带内单调，Chebyshev I 型滤波器的下降斜度比 II 型大，代价是通带内波纹较大。

③ Chebyshev II 型滤波器——函数 cheby2()：可以设计低通、高通、带通和带阻的数字/模拟滤波器，通带内单调，阻带内等波纹，Chebyshev II 型滤波器的下降斜度比 I 型小，但其阻带内波纹较大。

④ 椭圆滤波器用函数 ellip()，与 cheby1、cheby2 类似，可以设计低通、高通、带通和带阻的数字/模拟滤波器。与 Butterworth 和 chebyshev 滤波器相比，ellip 函数可得到下降斜度更大的滤波器，通带和阻带均为等波纹。椭圆滤波器能以最低的阶实现指定的性能指标。

Matlab 提供 yulewalk 函数直接设计 IIR 滤波器，以最小二乘拟和逼近给定的频率特性，用法如下：

$[b, a] = \text{yulewalk}(n, f, m)$ ，返回一个 Yule-Walk 滤波器的系数矩阵 $[b, a]$ ，其中矩阵 f 和 m 是已知的频率响应和滤波器阶数， f 必须在 0~1，且升序，以 0 开始，以 1 结束，允许出现相同的频率值。

(d) FIR 滤波实现

FIR 滤波有直接型、级联型、快速卷积型、线性相位型、频率取样型等基本结构，基本方法有窗函数法、频率抽样法和等波纹逼近法等。常用的窗函数设计法描述如下：理想低通滤波器的传输函数 $H(e^{j\omega})$

$$H(e^{j\omega}) = \begin{cases} e^{-j\omega a}, & |\omega| \leq \omega_c \\ 0, & \omega_c < \omega \leq \pi \end{cases}, \text{ 相应的单位取样响应 } h(n) \text{ 为 } h(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_c}^{\omega_c} e^{-j\omega a} e^{j\omega n} d\omega = \frac{\sin(\omega_c(n-a))}{\pi(n-a)},$$

$H(e^{j\omega})$ 是一个以 2π 为周期的函数，可展为傅氏级数，即 $H(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} h(n)e^{j\omega n}$ ；设计 FIR 滤波器就是根据要求找到有限个傅氏级数系数来代替并近似无限项傅氏级数，会产生截断效应和频率泄漏，需改变突然截断方式，改善泄漏；选择适当的窗函数，对所取样本函数进行不等权处理是一种有效措施。

Matlab 中函数 fir1 和 fir2 就是基于窗函数方法的。firl 函数实现了加窗线性相位 FIR 数字滤波，主要用于标准通带滤波器设计，包括低通、带通、高通和带阻数字滤波器：

- $b = \text{fir1}(n, Wn)$ 可得到 n 阶低通 FIR 滤波器，这是一个截止频率为 Wn 的加汉明窗的线性相位 FIR 滤波器。如果 Wn 是一个包含两个元素的向量， $Wn = [W1, W2]$ ，firl 返回一个 n 阶的带通滤波器，其通带为 $W1 < W < W2$ 。
- $b = \text{fir1}(n, Wn, 'high')$ 设计一个高通滤波器。
- $b = \text{fir1}(n, Wn, 'stop')$ 设计一个带阻滤波器。如果 Wn 是一个多元素的向量， $W = [W1, W2, W3, \dots, Wn]$ ，函数将返回一个 n 阶的多通带的滤波器。 $B = \text{firl}(n, Wn, 'DC-1')$ ，使第一频带为通带； $b = \text{fir1}(n, Wn, 'DC-0')$ 使第一频带为阻带。

对于在频率 $Fs/2$ 附近为通带的滤波器如高通或带阻滤波器， n 必须是偶数。缺省情况下 firl() 使用 Hamming 窗，可在参数 window 中指定其它窗，包括矩形窗、Hanning 窗、Bartlett 窗等。

fir2() 函数也设计加窗的 FIR 滤波器，但它针对任意形状的分段线性频率响应(在 fir1 中受限制)。 $B = \text{fir2}(n, F, M)$ 设计 n 阶的 FIR 数字滤波器，频率响应由 F 和 M 指定，滤波器系数返回在向量 B 中，向量 F 和 M 指定滤波器采样点频率及幅值， F 在 0~1，1 对应 1/2 采样频率。

4.5. 隔离处理

隔离是非常有效的 EMC 措施，常见形式有光电隔离、电容隔离、变压器隔离等，常用隔离器件有光电耦合器、隔离放大器、隔离 DC-DC 变换器等。数字输入/输出信号大多利用光电隔离器，也有一些输入用脉冲变压器隔离和运算放大器隔离。模拟量输入信号多用调制-解调隔离放大器、运算放大器等，输出信号隔离多用直流电压隔离法及变换隔离法。

光电耦合器 OC(Optical Coupler) 亦称光电隔离器，简称光耦，一般由三部分组成：光发射、光接收及信号放大，收发端为发光管和光敏管。OC 种类很多，主要有通用型(分无基极引线 and 基极引线两种)、达林顿型、施密特型、高速型、光集成电路、光纤维、光敏晶闸管型(分单向晶闸管、双向晶闸管)、光敏场效应管型，还有双通道式(内部两套对管)、高增益型、交-直流输入型等。常用集成光电耦合器件，如 NEC 的无基极引线单晶体管输出的 1/2/4 路通用型光耦 PS2801-1/4、PS2501(L)-1/2/4(高隔离电压能力)，ISOCOM 的高隔离电压无基极引线单晶体管输出的 1/2/4 路通用型光耦 TLP521(GB)-1/2/4，Vishey 的有基极引线带光敏晶体管输出的通用型光耦 4N25~28，Sharp 的可控高速型光耦 6N137，等。

隔离放大器用于防止数据采集器件免受远程传感器出现的潜在破坏性电压影响，并放大低电平信号，也可消除接地环路引起的测量误差。所用隔离技术主要有三种：变压器隔离、电容隔离和光电耦合器隔

离, 变压器隔离因体积庞大已让位于电容隔离和光耦隔离。应用隔离放大器, 需在输入/输出端使用相互隔离、不共地的隔离 DC-DC 转换电源。也有一些带有隔离 DC-DC 的隔离放大器。实际应用中常用的是 ISO 系列集成隔离放大器, 有“有源(含隔离电源)型”和无源型两大类, 四大产品体系: ISO 4~20 mA 系列 - 两线无源 4~20 mA 信号隔离调理 IC、ISO-Ax-Px-Ox 系列 - 直流电流(I/V、I/I)隔离放大 IC、ISO-Ux-Px-Ox 系列 - 直流电压(V/I、V/V)隔离放大 IC、ISO1001/1002 系列 - 直流双向或交流隔离放大 IC。

微型隔离式直流 DC-DC 转换器用于实现电路完全隔离, 为光耦、隔离放大器配置隔离电源, 在额定隔离电压为 1000、1500 或 3000VDC 下能提供稳定电压输出, 转换效率高达 85%, 一些产品还有过热/短路保护以内部滤波功能。DC-DC 可实现单一电源的正负压变换、正负压转换, 可以串联或并联使用。C&D Technologies、德州仪器(TI)与 Wall Industries 等提供有微型隔离 DC-DC, 输出电流为 20 mA 至 500 mA, 输入电压为 5 V、12 V、15 V 或 24 V, 单输出电压 3.3 V~24 VDC, 双输出电压 $\pm 3.3 \sim \pm 24$ VDC。常用 DC/DC, 如 5~5 V 的 DCR010505、5~12 V 的 DCP050512B 与 DY05D12、5~ ± 12 的 DCP011212D 等。

4.6. 屏蔽处理

屏蔽是消除和抑制各种 EMI、保证电子设备可靠工作的最有效方法, 它利用导电率或导磁率较高的材料制成的盒、环、管、壳、网、槽、屏、板状等形状物体, 接于容易产生电、磁场干扰的电子设备、电子线路中, 隔断外来 EMI 并局限制自发的 EMI。屏蔽效果以屏蔽物对场强衰减的倍数来评定, 线性电路中屏蔽效果等于加屏蔽前后电路中的电压比, 一般以分贝计。屏蔽有三种: 电场屏蔽、磁场屏蔽和电磁场屏蔽。电源变压器的静电屏蔽层就是典型的电场屏蔽, 电场屏蔽应做到多点、一体接地。磁场屏蔽所用材料一定要是高导磁率(远大于 1)的铁、镍、钴, 金属壳罩着的电源变压器能封闭漏磁通在屏蔽罩内, 磁场屏蔽时屏蔽体是否接地对屏蔽效果没有影响, 用铁磁性材料作为屏蔽体限于 100 kHz 以下。电磁场屏蔽是对高频电/磁场的同时屏蔽, 屏蔽时对高频和低频电磁场的屏蔽体材料不同, 高频电磁场屏蔽体选用导电率较高的金属铜、银, 如电视机的中频、高频电路和各类放大器等所用屏蔽罩/板, 屏蔽体需良好接地; 低频电磁场屏蔽体一般是导磁率较高的顺磁性材料。电磁场屏蔽体是否接地与屏蔽效果关系不大, 但为避免电路中因分布电容而引起寄生的耦合现象, 电磁场屏蔽体一般总是接地的。

信号引线可采取双地线并行屏蔽的方法, 让信号线夹在两条平行地线中间, 相当于双回路, 干扰信号会互相抵消, 屏蔽效果非常显著。可用屏蔽导体将双绞线包裹起来, 起到静电屏蔽作用。机器或敏感器件采用金属外壳是最好的屏蔽方法, 非金属外壳也可以喷涂导电材料(如石墨)实现电磁干扰屏蔽。散热片也可以对电磁干扰进行局部屏蔽。

5. 静电释放处理[1] [7]

静电是物体间接触、分离、摩擦或感应等因素形成表面电荷积累达到一定电压的现象, 该电压可高达几千伏甚至上万伏。高压静电一旦释放, 将形成很大的瞬间电流, 严重影响期间物体, 特别是 IC 芯片等敏感器件, 将使其瞬间或永久不能工作, 甚至引起击毁。高电压、低电量、小电流和作用时间短是静电的本质特点。ESD 危害巨大, 必须设法防护。

决定 ESD 电阻特性是表面电阻率(单位面积电阻值)或体电阻率(材料厚度电阻值 $\Omega \cdot \text{cm}$)。导电材料表面/体电阻率小于 $10^6 \Omega/10^6 \Omega \cdot \text{cm}$, 耗散材料小于 $10^{12} \Omega/10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ 。防静电材料以材料制造中添加或者局部加入某种物质而抑制电荷累积。导电添加剂和薄膜的使用可以改善材料静电特性, 获得所需的导电/耗散性。常以承受最大 ESD 电压的能力作为电子器件 ESD 能力指标, 单位是 kV, 主要有接触放电电压和空气放电电压。常见 ESD 检测与防护仪表仪器有: 静电测试仪、手腕带/脚带/防静电鞋综合检测仪、除静电离子风机检测仪、静电场探测仪、表面电阻测量仪, 等。

一般静电防护措施有: 接地、屏蔽、中和、ESD 保护网络。接地最直接最有效, 可用接地产品有防

静电手腕带、手表、鞋、台垫、橡胶板、蜡、油漆等。屏蔽通过使用导电材料、消散材料和防静电材料实现，贯穿于生产、存储和运输各个环节，如静电屏蔽袋、周转箱、IC 料条托盘等。中和即离子中和，以离子风机、风枪等消除接地无效的绝缘体静电。ESD 保护网络，如 MOS 器件保护电路改善(增大二极管尺寸，用双极性三极管，加串联电阻和分布网络电路)，在给定最大电压和最小脉冲宽度内保护器件，降低器件的 ESD 敏感性，但不能彻底消除，还可能降低器件速度/增大体积/提高能耗。

ESD 防护更多采用专用器件，主要有两类：传统的瞬态电压抑制器 TVS (Transient Voltage Suppressor) 和现代的 ESD 防护器件。TVS 有单/双向和电压箝位/消弧之分，单向 TVS 适合于保护电压极性始终相同的电路节点，如 0~5 伏单极性电压；双向 TVS 适合保护电压基于零伏对称或双向的电路节点；主要有三种 TVS 技术：金属氧化物压敏电阻 MOV (Metal Oxide Varistor)、聚合物浪涌抑制器和硅二极管，硅二极管是主流，通常 TVS 就是指硅二极管；响应时间快、瞬态功率大、电容低、漏电流低、击穿电压偏差小、箝位电压易控、无损坏极限、体积小、易于安装是 TVS 器件的优势；VTVS 等提供有各类常用 TVS 器件。现代 ESD 防护器件，常称为 ESD，立足于 TVS 器件，性能优于 TVS，还有滤波等很多特点，它通过对静电的吸收和耗散，以充放电过程实现 ESD 防护，所以 ESD 器件都不易老化损坏，同时其工作时表现的电容值很低(不超过 5pf)，几乎不对通过信号造成影响；不同于电源输入保护的压敏电阻，压敏电阻穿后多不可恢复(少数特殊类型例外)，而且由于其高的电容值(一般不小于 100 μ f)，不能用于信号传输；NXP、TI、ONS 等半导体厂商提供有各类常用 ESD 器件。

应据 ESD 类型选择不同防护措施，空气放电主要从结构等方面选用屏蔽，传导防护主要是吸收，只要在需保护的端口前增加 ESD 即可；一些总线(USB、CAN/LINmbds 等)、音视频(RGB/VGA、DVI/HDMI、LVDS、S-Video/Audio 等)、IEEE1284、IEEE1394、SD/MMC/SIM 卡座、SCART、高速端口，等，注意采用特定厂家特定的 ESD 器件，如 NXP、TI、ONS 等的 ESD 器件。

6. 浪涌冲击处理

浪涌是由雷电过压、操作过压和静电释放引发的，可见现象有飞弧、电晕、控制电路 IC 等元件损坏、整流/稳压元件损坏、接地故障造成设备带电(单相接地)，等。常以电涌保护器 PSD(Surge Protection Device)进行浪涌冲击处理，旧称“避雷器”或“过电压保护器”。用于电涌保护器的基本元器件有：放电间隙(又称保护间隙)、充气放电管、压敏电阻、抑制二极管、扼流线圈、1/4 波长短路器，等。知名浪涌保护器品牌有：公牛电器抗电涌插座，雷科星 LKX 浪涌保护器，美国 ECS 浪涌保护器，法国 Soule 浪涌保护器，英国 ESP furse 浪涌保护器，德国 OBO 浪涌保护器，DEHN 浪涌保护器，等。

7. 电路及其制板考虑[1]

7.1. 一般 EMC 措施

- ① 电源线设计：尽量加粗线宽，减少环路电阻，同时使电源线、地线走向和数据传递方向一致；
- ② 地线设计：数字地与模拟地分开，低频电路的地尽量单点并联接地，高频电路尽量多点串联接地，地线应短而粗，高频元件周围尽量用大面积栅格状铜箔；接地线应尽量加粗，要能通过三倍 PCB 允许电流，线宽尽可能应在 2~3 mm 以上；接地线尽可能构成闭环路，特别是数字电路；
- ③ 退藕电容配置：电源输入端跨接 10~150 μ f 的电解电容器；每个 IC 芯片布置一个 0.01 pF 的瓷片电容，如空隙不够可每 4~8 个芯片布置一个 1~10 pF 的钽电容；抗噪声能力弱、关断时电源变化大的器件，如 RAM、ROM 存储器件，应在电源线和地线间直接接入退藕电容；电容引线不能太长，高频旁路电容不能有引线，接触器、继电器、按钮等元件须采用 RC 电路(R 取 1~2 k Ω /C 取 2.2~47 μ F)来吸收放电电流防止电弧；CMOS 器件使用时不要使其 I/O 管脚直接接地或接正电源；

- ④ 挡阻的使用：排阻阻值要慎选，公共端接线或电源线要粗，最好有退耦电容；
- ⑤ 覆铜填充：顶/底层电源或地信号、高频器件或模块周围，适当进行大面积横纵交织网形铺铜；
- ⑥ 各个信号层走线，一层水平，另一层垂直，以增强走线 EMC 能力；
- (7) 电路原理设计后 PCB 制板前，尽可能采用一些工具软件进行电路仿真/信号完整分析/ EMC 分析，如 Mentor-PADS 的 Hyper LynxEMC 分析、AD 的 Simulator 噪声分析，等；
- ⑧ ESD 器件布线时应遵循：接地距离尽量短、地线面积尽量大、靠近导入口远离受保护器件、ESD 器件两端布线坚持走成锐角并保持唯一通道。

7.2. 高频线路布线

- ① 高频电路集成度较高，布线密度大，宜采用多层板布线。多层板布线，能充分利用中间层设置屏蔽，更好实现就近接地，有效降低寄生电感，缩短信号传输长度，大幅度降低信号间的交叉干扰。
- ② 高速电路器件管脚间的引线弯折越少越好，引线越短越好，引线最好采用全直线，需要转折时用 45 度折线或圆弧以减少高频信号对外的发射和相互间的耦合。
- ③ 高频电路器件管脚间的引线层间交替越少越好，即元件连接所用的过孔(Via)越少越好。
- ④ 注意信号线近距离平行走线所引入的“交叉干扰”，若无法避免平行分布，可在平行信号线的反面布置大面积“地”来大幅度减少干扰；同层内平行走线几乎无法避免，但相邻层走线的方向务必相互垂直。
- ⑤ 特别重要的信号线或局部单元实施地线包围，特别要对时钟等单元局部进行包地处理。
- ⑥ 各类信号走线不能形成环路，地线也不能形成电流环路，菊花状走线能有效避免布线时形成环路。
- ⑦ 模拟/数字地接往公共地时要用中心孔穿有导线的高频铁氧体磁珠并布置靠近汇合点。
- ⑧ 高频连线尽可能短，易受干扰器件不挨太近，输入和输出元件应尽量远离，输入输出端用的导线应尽量避免相邻平行，最好加线间地线，以免发生反馈耦合。

8. EMC 测试认证

EMI 分为 A 和 B 两个等级，A 为工业级，B 为民用级；民用级比工业级严格，“工业级”允许的辐射稍大。在 EMI 测试条件下无需操作人员介入、设备能按预期持续正常工作、不出现低于规定的性能等级的性能降低或功能损失，就是 A 级。EMI 在工作频率的“奇数倍”是最不好通过测过的。

EMS 分为 A、B、C、D 四个等级，电子产品设备在 EMI 下能正常工作或不出现超过标准规定的性能下降为 A 级，能自动重启且重启后不出现超过标准规定的性能下降为 B 级，不能自动重启需人为重启为 C 级，挂掉(设备损坏无法启动)为 D 级。国标有 D 级的规定，欧标 EN 没有。

严格程度：EMI 是 B > A，EMS 是 A > B > C > D。

EMC 标准分为基础标准、通用标准、产品类标准和专用产品标准。基础标准，描述 EMC 现象、规定测试方法和设备，定义 EMC 等级和性能判据，不涉及具体产品。通用标准依使用环境划分，没有特定产品类标准时，使用通用标准，即使设备功能完全正常，也要满足 IIR 滤波要求。针对某种产品系列，往往引用基础标准，但根据产品的特殊性提出更详细的规定，即产品类标准。

美联邦通讯委员会在 1990 年、欧盟在 1992 提出了对商业数码产品的有关规章，要求各个企业确保产品符合严格的磁化系数和发射准则。全球各地基本都有 EMC 市场准入认证，以保护本地区的电磁环境和本土产品的竞争优势。如：美国 FCC 认证、北美 NEBC 认证、欧盟的 CE 认证、日本的 VCCEI 认证、澳洲的 C-tick 人证、台湾的 BSMI 认证、中国的 3C 认证等都是进入这些市场的“通行证”。

EMC 测试/认证的主检项目及其标准有空间辐射[EN55011,13,22]、传导干扰[EN55011,13,14/EN55014-1]、功率辐射[EN55013,14-1]、磁场辐射[EN55011,15]、低频干扰[EN50091-2]、静电放电[IEC61000-4-2/EN61000-

4-2/GB-T17626.2]、辐射抗扰度[IEC61000-4-3/EN61000-4-3/GB-T17626.3]、脉冲群抗扰度[IEC61000-4-4/EN61000-4-4/GB-T17626.4]、浪涌抗扰度[IEC61000-4-5/EN61000-4-5/GB-T17626.5]、传导骚扰抗扰度[IEC61000-4-6/EN61000-4-6/GB-T17626.6]、工频磁场抗扰度[IEC61000-4-8/EN61000-4-8/GB-T17626.8]、电压跌落[IEC61000-4-11/EN61000-4-11/GB-T17626.11]、谐波电流[IEC61000-3-2/EN61000-3-2]、电压闪烁[IEC61000-3-3/EN61000-3-3]等。

常见安全认证是 CB 和 CE。CB(电工产品合格测试与认证)体系是 IEC 运作的国际体系，成员国认证机构以 IEC 标准进行测试，其测试结果即 CB 测试报告和证书，用于衡量进口产品是否达到国际公认标准。“CE”是欧盟法律对产品提出的强制性要求，贴有“CE”标志的产品才可在欧各成员国销售。

9. 结束语

EMC 是电子产品系统必须面对的现实。对于应用中存在的 EMC 缺陷，改善接地、电源、连接，增加 RC、LC 简易无源滤波，添加屏蔽、ESD 防护、隔离，可尽快增强 EMC 能力，适应未曾的特殊环境，通过 EMC 测试或认证。对于即将展开的设计，充分考虑各种运行环境，全面运用 EMC 理论算法经验，不仅是接地、屏蔽、隔离、滤波、防护等基本方法，还有纵深的有源模拟滤波、数字软件滤波及其仿真优化等先进措施，可将 EMC 危害消灭在萌芽状态，使产品设备一经产生就具备优良的 EMC 免疫能力。了解、学习、总结和积累 EMC 方法措施，促进 EMC 现场积极应对和硬软件设计改进，意义重大。

参考文献 (References)

- [1] 怯肇乾. 嵌入式系统硬件体系设计[M]. 北京: 航空航天大学出版社, 2007.
- [2] 梁杰. LC 滤波器元件参数的计算[J]. 电子制作, 1999(2): 46-47.
- [3] 电子发烧友. 磁珠的原理及应用[EB/OL]. <http://www.elecfans.com/soft/69/2008/200807305688.html>
- [4] 牛余朋, 等. 单片机数字滤波算法研究[J]. 中国测试技术, 2005, 31(6): 97-99.
- [5] 百度文库. 有源滤波器的分析计算与实际设计[EB/OL].
http://wenku.baidu.com/link?url=YQ99DQS6SisHQerqzflwMBjo5WrI92aHPa2TAvK4uZMcfl84AIsbHFZA7E0G0M9kHr0X4D7MR8ot6g2ZneS7OiKfsspy37EaEk8AYc3_x5m
- [6] 百度文库. 数字滤波器 Matlab 实现[EB/OL].
http://wenku.baidu.com/link?url=Gog0COvt2zBD6tOUg28JPedblw6B2R3f7OKFp4AGw1szJ_rX7yy9CMfof1uOVt4MrbRoLaxIefHgLOQ7WTVnHphlWpMHKaAL-N1CCebSCFK
- [7] 深圳美可达科技公司. 静电阻抗器 ESD 应用技巧: Rev1.0.03 [Z]. 2010.