

摘 要

随着微电子技术的迅速发展，设备的小型化和数字化成为技术的发展主流，导致开关电源的应用日趋广泛。但开关电源固有的高频辐射及传导的电磁干扰（EMI）发射对开关电源效率及使用的影响已成为人们关注的热点。EMI问题是一个跨学科的综合研究课题，本文根据电力电子线路电磁干扰的特点，研究了高频开关电源中电磁干扰的产生机理、抑制方法、兼容性测量等三个方面的问题。

1、本文对开关电源电磁干扰各种机理做了详细分析；

2、在分析电磁干扰产生机理的基础之上，提出了相应的抑制措施及需要注意的问题，如软开关、滤波、PCB 设计等技术，指出了一些人们认识的误区，如简单地认为软开关技术就可以降低 EMI 等；

3、关于电磁兼容性的测量，介绍并分析了测量方法、内容、设备、规范以及要求等，对各种干扰源的干扰量、传输特性和敏感器的敏感度等也提出了可供参考的依据。

关键词：开关电源，电磁干扰，元器件，频率，滤波器

Abstract

The rapid development of microelectronics requires miniaturization and compact components or systems. In these systems, more and more switching-mode power supply (SMPS) are used to improve the performance of the system. However, the electron-magnetic interference (EMI) in the system can result in deterioration of the performance. This dissertation focus on the analysis of the EMI mechanism and EMI measurement methodology as well as the EMI suppression.

Based on the analysis of EMI mechanism, this dissertation gives a detailed description of the soft-switch operation, the filter design, and printed-circuit-board (PCB) design. Some misunderstandings about the system setup are corrected as well.

In addition, the equipment specifications and the methods for the measurement of EMI are provided. These include the interference source, the transfer response and the sensitivity of the sensor, etc.

Finally, simulations and experiments are performed, and the results are compared. These results indicate that the method sued in this dissertation are excellent in reducing EMI for high-frequency switching power supply.

Keywords: Switching-Mode Power Supply (SMPS), Electro-Magnetic Interference (EMI), High-Frequency, Suppression

原创性声明

本人郑重声明：本人所呈交的学位论文，是在导师的指导下独立进行研究所取得的成果。学位论文中凡引用他人已经发表或未发表的成果、数据、观点等，均已明确注明出处。除文中已经注明引用的内容外，不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的科研成果。对本文的研究成果做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名：朝颖峰 日期：06.5.18

关于学位论文使用授权的声明

本人在导师指导下所完成的论文及相关的职务作品，知识产权归属兰州大学。本人完全了解兰州大学有关保存、使用学位论文的规定，同意学校保存或向国家有关部门或机构送交论文的纸质版和电子版，允许论文被查阅和借阅；本人授权兰州大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用任何复制手段保存和汇编本学位论文。本人离校后发表、使用学位论文或与该论文直接相关的学术论文或成果时，第一署名单位仍然为兰州大学。

保密论文在解密后应遵守此规定。

论文作者签名：解勤 导师签名：柯建红 日期：06.5.18

第一章 绪论

电磁兼容性(Electro Magnetic Compatibility, EMC)是指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干扰的能力。EMC包括两个方面的含义,即设备或系统产生的电磁发射,不致影响其他设备或系统的功能;本设备或系统的抗干扰能力,又足以使本设备或系统的功能不受其他干扰的影响。这就又引出了另外两个概念—电磁敏感度(Electro—magnetic Susceptibility, EMS)和电磁干扰(Electro—magnetic Interference, EMI)^[1,2]。

电磁干扰(EMI)就是电磁兼容不足,是破坏性电磁能从一个电子设备通过辐射或传导传到另一个电子设备的过程。

开关电源(Switching-Mode Power Supply)本身是一个很大的噪声源(即干扰源),在它不断地向高频化、小型化发展过程中,其噪声影响也在增大。近年来,电子设备的EMI的抑制已成为人们关注的焦点,开关电源是当前市场上一种颇受欢迎的电源,具有体积小,效率高,规格多的优点。在电子产品的研发过程中,开关电源往往被直接利用作为整个电子系统的一部分。然而,由于这种电源高频率的开关动作,将产生大量的传导性电磁干扰(EMI)。这个问题在产品阶段如果处理不好,将对开关电源乃至整个电子系统造成不利的影响。

电磁兼容问题是一门综合性学科,其内容几乎涉及了现代科学的每个领域。下面就一些与电磁兼容相关的背景知识、高频开关电源的电磁干扰特性以及目前国内、外开关电源电磁干扰问题的研究现状进行系统、全面的阐述,进而提出论文的研究目标和取得的成果。

1.1 电磁兼容问题

随着科学技术的进步,人类已步入了信息化社会,当前人类的生存环境已具有了浓厚的电磁环境内涵。计算机、通信产品、家用电器等设备大量涌入家庭,空间人为电磁能量每年以7%~14%的速度递增^[3],21世纪的电磁环境的恶化已刻不容缓。

作为一种有害的电磁效应，EMI的发生需要具备三个条件：第一，要有发出电磁干扰的设备；第二，要有接收电磁干扰的设备；第三，电磁干扰要有传播的途径。这就构成了电磁干扰的三要素：干扰源、敏感体和干扰耦合途径^[4]，如图1-1

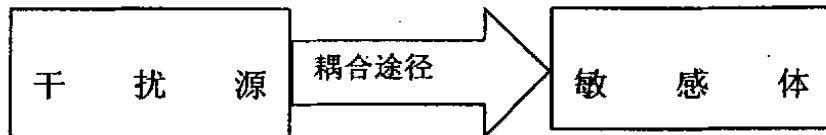


图1-1 电磁干扰的三要素

耦合途径是电磁干扰从干扰源传输到敏感体的各种途径，其基本形式与电磁能量的形式基本相同，分为传导干扰耦合和辐射干扰耦合两类。根据观测点的距离 r 与干扰电磁波长 λ 之比不同，又可将辐射干扰分为近场干扰和远场干扰。一般把 $r < \lambda/2\pi$ 范围内的干扰叫做近场干扰。而把 $r > \lambda/2\pi$ 范围外的干扰叫做远场干扰。根据近场干扰的性质将其分为电场干扰和磁场干扰，也就是我们通常所讲的电容性干扰和电感性干扰。而远场干扰本质上是干扰能量以电磁波的形式在空间传播，即通常所说的辐射干扰。如图1-2所示

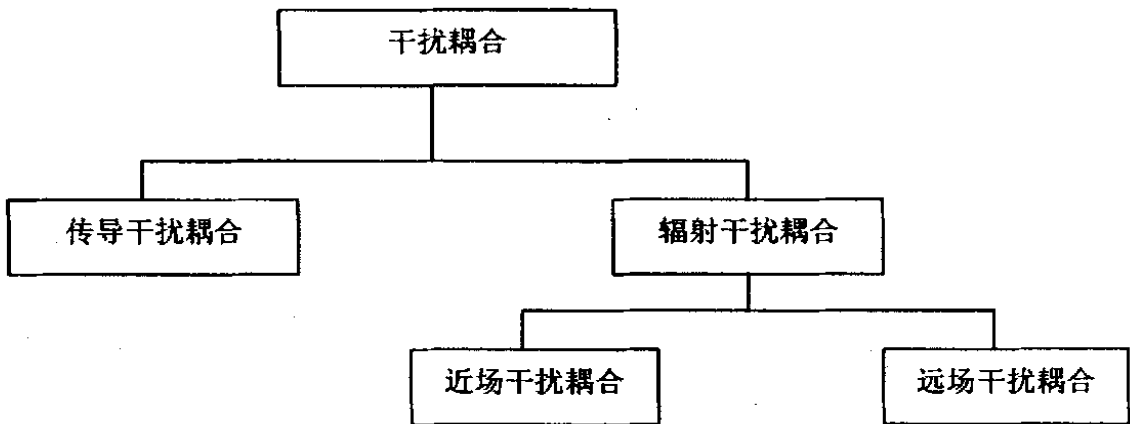


图1-2 干扰耦合途径的示意图

1.2 高频开关电源的EMI特点

(1) 作为工作于开关状态的能量转换装置，开关电源的电压、电流变化率很大，产生的干扰强度大；

(2) 干扰源主要集中在功率开关器件及与之相连的散热器和高频变压器，相对于数字电路干扰源的位置较为清楚；

(3) 开关频率不高（从几千赫兹到数兆赫兹），主要的干扰形式是传导干扰和近场干扰；

(4) 印刷线路板（PCB）走线通常采用手工布置，具有更大的随意性，这增加了PCB分布参数的提取和近场干扰预估的难度。印制电路板布线不当也是引起电磁干扰的主要原因^[5]；

(5) 与信号处理电路中线路阻抗匹配的情形不同，开关电源的干扰源阻抗与网侧阻抗不但不匹配，而且是随阻抗变化的，这给EMI滤波器的设计带来了一定困难。同时EMI滤波器中的L、C元件必须承受很大的无功功率，不但降低了电源的整体效率，也增大了体积^[6]。

1.3 高频开关电源EMI的研究现状及发展

开关电源EMI是一门综合性的学科，涉及的学科包括器件物理、电路理论、电磁场理论、测试技术等，他所需要的课题也相当广泛。目前所研究的问题主要包括以下几个方面：

1) EMI测试技术

传导EMI分为差模和共模两种传播模式，但按照传导EMI测试标准测量得到的干扰电平是两者之和，因此有必要将其分开，为EMI滤波器的设计提供指导。射频电流探头、差模抑制网络、噪声分离网络是诊断差模、共模干扰的三种办法。用射频电流探头是测量差模、共模干扰最简单的方法，但测量结果与标准限值比较要经过较复杂的换算。差模抑制网络结构简单，测量结果可直接与标准限值比较，但只能测量共模干扰。噪声分离网络是最理想的方法，但其关键部件变压器的制作要求很高^[5]。

2) 无源器件和PCB寄生参数的抽取和高频建模

在EMI的频率范围内，常用的无源器件都不能再被认为是理想的，它们的寄生参数严重影响着它们的高频特性。在各种无源器件中，电阻器、电感器和电容器的高频等效寄生参数可用高频阻抗分析仪测得。

对变压器的高频建模非常重要，特别是对共模EMI电平的高低有着显著的影响。遗憾的是，目前许多电路仿真器的模型库中尚未考虑到集肤、邻近效应以及非线性和磁滞问题。特别是变压器的许多寄生参数，例如：漏感，原副边之间的分布电容等，都必须加以考虑^[5]。

3) 高频电源EMI的机理和建模

开关电源EMI产生的机理与建立其仿真分析模型是紧密关联的。开关电源中的EMI按照其成分的来源可以这样划分：

①部分来自于电路原理图；

②部分来自于所选择购买的元器件的寄生参数；

③部分来自于PCB的布线，器件的安装、放置、甚至方位。

因此，研究开关电源EMI的机理并对其进行建模必须综合考虑上述几个因素。

4) 开关电源EMI抑制技术

此内容将在第三章详细讨论

5) 印刷电路板布线的EMC设计

实践证明，印刷电路板的元件布置和布线设计对开关电源的EMC性能有极大的影响。一台开关电源的EMC性能，往往可以在不增加任何元器件和不改变线路的前提下，通过修改印刷电路板的元件布置和布线设计就可以得到明显的改善。

许多文献都提到了一些简单的布线规则。例如，在开关电源中，最典型的规则就是减

少高频电流环路包围的面积和高 du/dt 导体的面积可以降低EMI电平。高频电流环路是由功率半导体器件构成的电流回路，BOOST电路的高频电流环路就是由功率MOSFET，二极管和输出滤波电容构成的回路。

尽管存在一些已知的简单布线规则，但由于有效分析电磁干扰手段的缺乏，人们在布线阶段往往是采用尝试性的设计方法。一旦产品不能通过EMC标准，可能就要重新设计线路板，这个方法不但非常耗时而且提高了设计成本。为此人们十分关注印刷线路板的元件布置和布线的计算机辅助设计。要实现PCB的元件布置和布线的计算机辅助设计，一种方法是以开关电源的EMI建模仿真为基础。首先建立传导EMI模型，然后用仿真软件预估干扰水平，若干扰水平超过规定限值就修改设计。这样的基本设计思想实际上是尝试性的设计方法从硬件平台移植到了软件平台上。但是在目前的建模技术仍不够准确的情况下这种方法是不现实的。

1.4 主要国际 EMC 组织机构以及国际标准

①、国际电工委员会 (IEC)

IEC 主要是各国民间制造商组成的关于电气标准规范的国际组织，有 2 个标准化技术委员会：国际电磁兼容委员会(TC77)，下设 3 个分会：国际无线电干扰特别委员会(CISPR)，下设 7 个分会。另外，IEC 中还有几十个产品委员会关注电磁兼容问题。如 TC65 (工业过程测量和控制技术委员会) 制定了 IEC801《工业过程测量和控制装置的电磁兼容性》(即 IEC61000-4)。截止到 1997 年，IEC / TC77 已发布 27 个标准，其中 23 个是 IEC61000 系列标准。

②、国际无线电干扰特别委员会 (CISPR) [7]

CISPR 下设于国际电工委员会 (IEC) [8]。1934 年 6 月，CISPR 在巴黎召开了第一次会议，参加成员有：IEC、国际广播协会 (UIR)、国际无线电通信咨询委员会 (CCIR)、国际大电网会议 (CIGRE)、国际铁路与电车协会 (IURT)。

CISPR 成立后,首先在 EMI 准峰值检波测试方法、干扰限值标准与抑制技术上进行了长期的研究,在电子设备与电气设备相互之间如何处理电磁兼容与互不干扰方面取得了进展。

③、第 5、第 6 研究组 (ITU / T)

第 5 研究组定期召开会议,它的研究成果为 K 系列建议。到目前为止已出版了 K1~K40,其内容涉及到过电压过电流保护、电信大楼的连接与接地、电信设备电磁环境条件、电信安装中高频 EMC 抑制技术、通信局站的防雷、大型物理系统射频发射 82 测试、人体电磁感应的安全限值、感应杂波等。

④、国际无线电科学联盟 (URSI)

URSI 成立于 1919 年,总部设在比利时的布鲁塞尔。目前有 A~J10 个委员会及 1 个“时域波形测试”联合工作组,平均 3 年左右召开 1 次全会。其中 E 委员会研究电磁噪声与干扰,涉及到 EMC 的各个领域。

⑤、跨国电气电子工程师学会电磁兼容专业委员会 (IEEE-EMC)

美国无线电工程师学会 (IRE) 于 1957 年成立了射频干扰专业学组,1959 年召开了学术讨论会。同年射频干扰学组改名为电磁兼容专业学组并召开了首届电磁兼容学术讨论会。1963 年无线电工程师学会与美国电气工程师学会和美国电子工程师学会 (AIEE) 合并,成立跨国电气电子工程师学会 (IEEE),在全世界发展会员。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 年电磁兼容学组改为电磁兼容专业委员会。自 1959 年以来,每年召开电磁兼容学术讨论会。该专业委员会创办电磁兼容学报,其宗旨包括: a. 维护技术标准; b. 即时发表权威性文章; c. 介绍学会所关心的各个领域的新发展。专栏有 EMC 标准、测量技术、非需求源、电缆与接地、屏蔽与滤波、设备电磁兼容、系统电磁兼容、天线与传播、频谱利用、电磁脉冲、雷电、辐射与危害、沃尔什函数等。

第二章 高频开关电源的工作原理及电磁干扰的产生机理

本章说明了开关电源的组成及工作原理，并从开关电源的各组成部分出发，分析了电磁干扰产生的机理。

2.1 高频开关电源的工作原理

2.1.1 高频开关电源的组成

高频开关电源的组成框图如图 2-1 所示，它由以下几个部分组成^[9]：

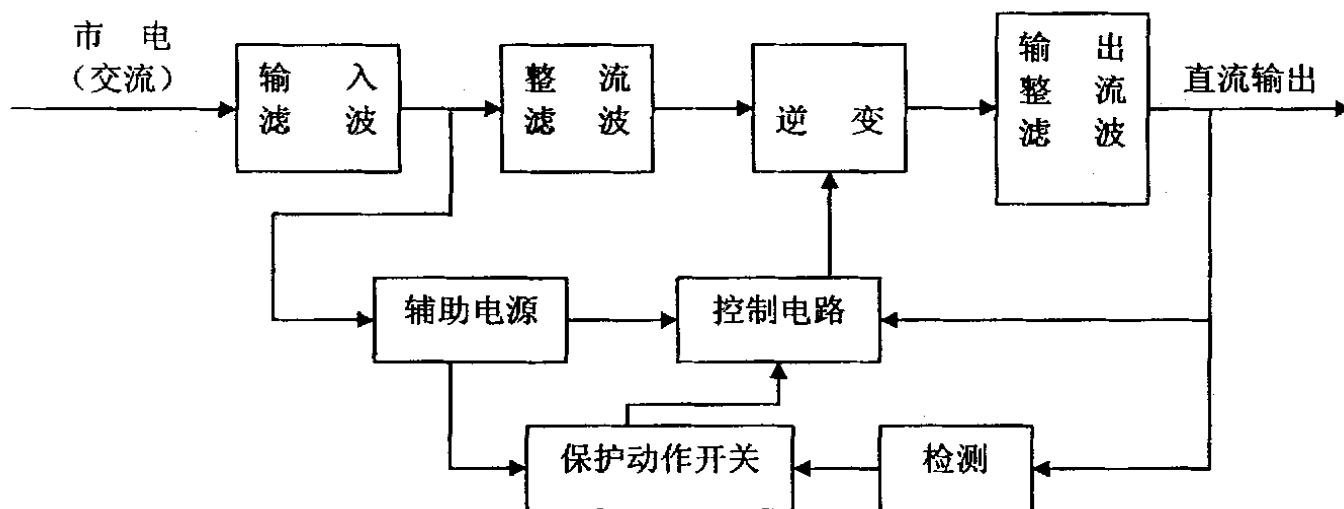


图 2-1 开关电源的组成框图

一、主电路

从交流电网输入、直流输出的全过程，包括：

1、输入滤波器：其作用是将电网存在的杂波过滤，同时也阻碍本机产生的杂波反馈到公共电网。

2、整流与滤波：将电网交流电源直接整流为较平滑的直流电，以供下一级变换。

3、逆变：将整流后的直流电变为高频交流电，这是高频开关电源的核心部分，频率

越高，体积、重量与输出功率之比越小。

4、输出整流与滤波：根据负载需要，提供稳定可靠的直流电源。

二、控制电路

一方面从输出端取样，经与设定标准进行比较，然后去控制逆变器，改变其频率或脉宽，达到输出稳定，另一方面，根据测试电路提供的数据，经保护电路鉴别，提供控制电路对整机进行各种保护措施。

三、检测电路

除了提供保护电路中正在运行中各种参数外，还提供各种显示仪表数据。

四、辅助电源

提供所有单一电路的不同要求电源。

2.1.2 开关控制稳压原理

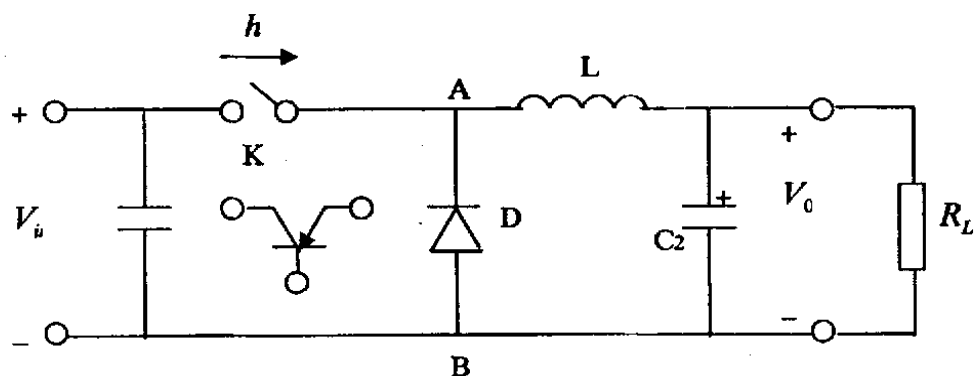


图 2-2 开关稳压电源电路原理图

如图 2-2 所示，开关 K 以一定的时间间隔重复地接通和断开，在开关 K 接通时，输入电源 E 通过开关 K 和滤波电路提供给负载 R_L ，在整个开关接通期间，电源 E 向负载提供能量；当开关 K 断开时，输入电源 E 便中断了能量的提供。可见，输入电源向负载提供能量是断续的，为使负载能得到连续的能量提供，开关稳压电源必须要有一套储能装置，在

开关接通时将一部份能量储存起来，在开关断开时，向负载释放。图中，由电感 L 、电容 C_2 和二极管 D 组成的电路，就具有这种功能。电感 L 用以储存能量，在开关断开时，储存在电感 L 中的能量通过二极管 D 释放给负载，使负载得到连续而稳定的能量，因二极管 D 使负载电流连续不断，所以称为续流二极管。在 AB 间的电压平均值 E_{AB} 可用下式表示：

$$E_{AB} = \frac{T_{on}}{T} \cdot E \quad (2.1)$$

式中 T_{on} 为开关每次接通的时间， T 为开关通断的工作周期（即开关接通时间 T_{on} 和关断时间 T_{off} 之和）。

由式可知，改变开关接通时间和工作周期的比例， AB 间电压的平均值也随之改变，因此，随着负载及输入电源电压的变化自动调整 T_{on} 和 T 的比例便能使输出电压 V_o 维持不变。改变接通时间 T_{on} 和工作周期比例亦即改变脉冲的占空比，这种方法称为“时间比率控制”（Time Ratio Control, 缩写为 TRC）。

按 TRC 控制原理，有三种方式：

一、脉冲宽度调制（Pulse Width Modulation, 缩写为 PWM）

开关周期恒定，通过改变脉冲宽度来改变占空比的方式。

二、脉冲频率调制（Pulse Frequency Modulation, 缩写为 PFM）

导通脉冲宽度恒定，通过改变开关工作频率来改变占空比的方式。

三、混合调制

导通脉冲宽度和开关工作频率均不固定，彼此都能改变的方式，它是以上二种方式的混合。

2.2 电磁干扰的产生原因及机理

2.2.1 开关电源产生电磁干扰的原因

开关电源首先将工频交流整流为直流，再逆变为高频，最后经过整流滤波电路输出，得到稳定的直流电压，因此自身含有大量的谐波干扰，同时，由于变压器的漏感和输出二极管的反向恢复电流造成的尖峰，都形成了潜在的电磁干扰。开关电源中的干扰源主要集中在电压、电流变化大的元器件上，突出表现在开关管、二极管、高频变压器等上^[10]。以下将对电磁干扰的产生方式及机理进行细致讨论。

2.2.2 产生机理

2.2.2.1 开关电路产生的电磁干扰

开关电路产生的电磁干扰是开关电源的主要干扰源之一。开关电路是开关电源的核心，主要由开关管和高频变压器组成。它产生的 $\frac{du}{dt}$ 具有较大幅度的脉冲，频带较宽且谐波丰富。这种脉冲干扰产生的主要原因是：开关管负载为高频变压器初级线圈，是感性负载。在开关管导通瞬间，初级线圈产生很大的涌流，并在初级线圈的两端出现较高的浪涌尖峰电压；在开关管断开瞬间，由于初级线圈的漏磁通，致使一部分能量没有从一次线圈传输到二次线圈。储藏在电感中的这部分能量将和集电极电路中的电容、电阻形成带有尖峰的衰减振荡，叠加在关断电压上，形成关断电压尖峰。电源电压中断会产生与初级线圈接通时一样的磁化冲击电流瞬变，这种瞬变是一种传导型电磁干扰。它既影响变压器初级，还会使传导干扰返回配电系统，造成电网谐波电磁干扰，从而影响其他设备的安全和经济运行^[11]。

2.2.2.2 整流电路产生的电磁干扰

整流电路中，在输出整流二极管截止时有一个反向电流，它恢复到零点的时间与结电容等因素有关。其中能将反向电流迅速恢复到零的二极管称为硬恢复特性二极管，这种二极管在变压器漏感和其他分布参数的影响下将产生较强的高频干扰，其频率可达几十兆赫。高频整流回路中的整流二极管正向导通时有较大的正向电流流过，在其受反偏电压而转向截止时，由于PN结中有较多的载流子积累，因而在载流子消失之前的一段时间里，电

流会反向流动，致使载流子消失的反向恢复电流急剧减少而发生很大的电流变化(di/dt)^[12,13]。

2.2.2.3 高频变压器

高频变压器初级线圈、开关管和滤波电容构成的高频开关电流环路可能会产生较大的空间辐射，形成辐射干扰。如果电容滤波容量不足或高频特性不好，电容上的高频阻抗会使高频电流以差模方式传导到交流电源中形成传导骚扰。需要注意的是，二极管整流电路产生的电磁干扰中，整流二极管反向恢复电流的 $|di/dt|$ 远比续流二极管反向恢复电流的 $|di/dt|$ 大得多。作为电磁干扰源来研究，整流二极管反向恢复电流形成的干扰强度大，频带宽。但是，整流二极管产生的电压跳变远小于功率开关管导通和关断时产生的电压跳变。因此，不计整流二极管产生的 $|dv/dt|$ 和 $|di/dt|$ 的影响，而把整流电路当成电磁干扰耦合通道的一部分来研究也是可以的^[14]。

2.2.2.4 分布电容引起的干扰

开关电源工作在高频状态，因而其分布电容不可忽略。一方面，散热片与开关管的集电极间的绝缘片，由于其接触面积较大，绝缘片较薄，因此两者间的分布电容在高频时不能忽略，高频电流会通过分布电容流到散热片上，再流到机壳地，产生共模干扰；另一方面，脉冲变压器的初次级之间存在着分布电容，可将原边电压直接耦合到副边上，在副边作直流输出的两条电源线上产生共模干扰。

2.2.2.5 杂散参数影响耦合通道的特性

在传导干扰频段 ($<30\text{MHz}$)，多数开关电源干扰的耦合通道是可以用电路网络来描述的。但是，在开关电源中的任何一个实际元器件，如电阻器、电容器、电感器乃至开关管、二极管都包含有杂散参数，且研究的频带愈宽，等值电路的阶次愈高，因此，包括各元器件杂散参数和元器件间的耦合在内的开关电源的等效电路将复杂得多。在高频时，杂散参数对耦合通道的特性影响很大，分布电容的存在成为电磁干扰的通道。另外，在开关管功率较大时，集电极一般都需加上散热片，散热片与开关管之间的分布电容在高频时不能忽

略，它能形成面向空间的辐射干扰和电源线传导的共模干扰^[15]。

第三章 开关电源电磁干扰的抑制措施

从电磁兼容的三要素讲，要解决开关电源的电磁干扰问题，可从3个方面入手：① 减小干扰源产生的干扰信号；② 切断干扰信号的传播途径；③ 增强受干扰体的抗干扰能力。为此，抑制开关电源电磁干扰要采取的主要方法有：电路措施、EMI滤波、元器件选择、屏蔽、印制电路板(Printed Circuit Board, PCB)抗干扰设计等。对于开关电源的传导发射，以成本和实施难易程度为前提，主要从前两个方面考虑^[16]。本章我们将对各种抑制电磁干扰的措施进行细致讨论。

3.1 减少开关电源本身的干扰

减小开关电源本身的干扰是抑制开关电源干扰的根本。

3.1.1 软开关技术

3.1.1.1 软开关技术的基本概念

软开关是在硬开关基础上发展起来的一种基于谐振技术或利用控制技术实现的在零电压/零电流状态下开通/关断的先进开关技术。在现代电力电子装置小型化、轻量化、对效率和电磁兼容性也有更高的要求的发展趋势下，软开关技术降低了开关损耗和开关噪声，进一步提高了开关频率^[17]。

3.1.1.1.1 硬开关和软开关的比较

硬开关：

- 1) 开关过程中电压和电流均不为零，出现了重叠。
- 2) 电压、电流变化很快，波形出现明显得冲，导致开关噪声。

软开关：

1) 在原电路中增加了小电感、电容等谐振元件，在开关过程前后引入谐振，消除电压、电流的重叠。

2) 降低开关损耗和开关噪声

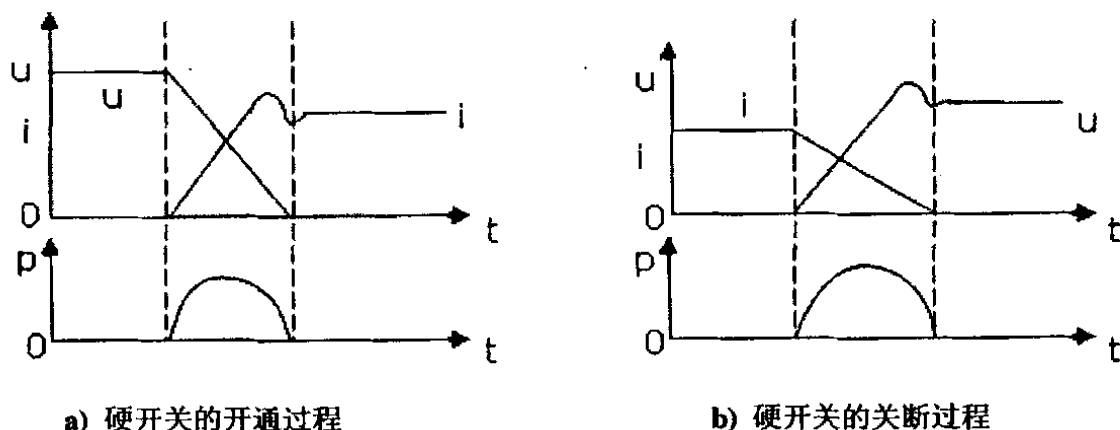


图3-1 硬开关的开关过程

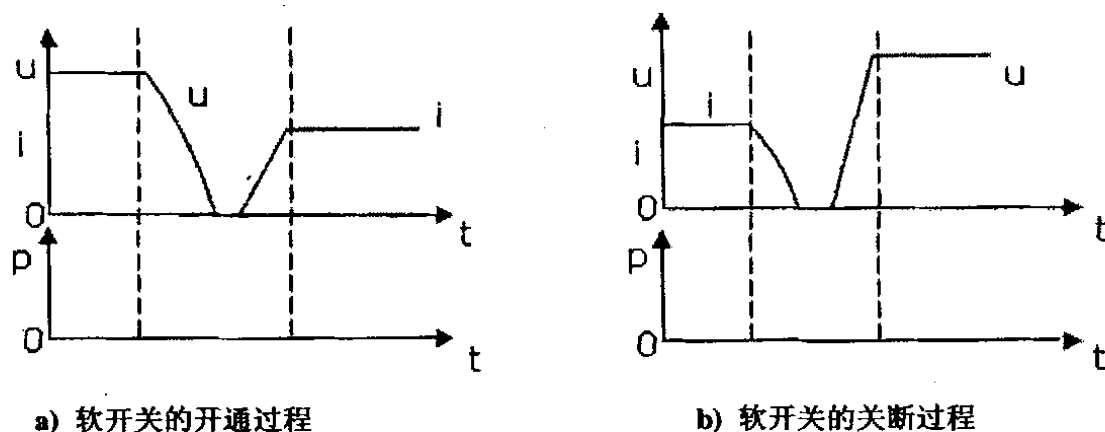


图3-2 软开关的开关过程

3.1.1.1.2 零电压开关和零电流开关

零电压开通：开关开通前其两端电压为零——开通时不会产生损耗和噪声。

零电流关断：开关关断前其电流为零——关断时不会产生损耗和噪声。

零电压关断：与开关并联的电容能延缓开关关断后电压下降的速率，从而降低关断损耗。

零电流开通：与开关串联的电感能延缓开关开通后电流上升的速率，降低了开通损耗。

当不指出是开通或是关断，仅称零电压开关和零电流开关。靠电路中的谐振来实现。

3.1.1.2 软开关电路的分类

- 1) 根据开关开通和关断时电压电流状态，分为零电压电路和零电流电路两大类。
- 2) 根据软开关技术发展的历程可以将软开关电路分成准谐振电路、零开关PWM电路和零转换PWM电路^[18]。
- 3) 每一种软开关电路都可以用于降压型、升压型等不同电路，可以从基本开关单元导出具体电路。

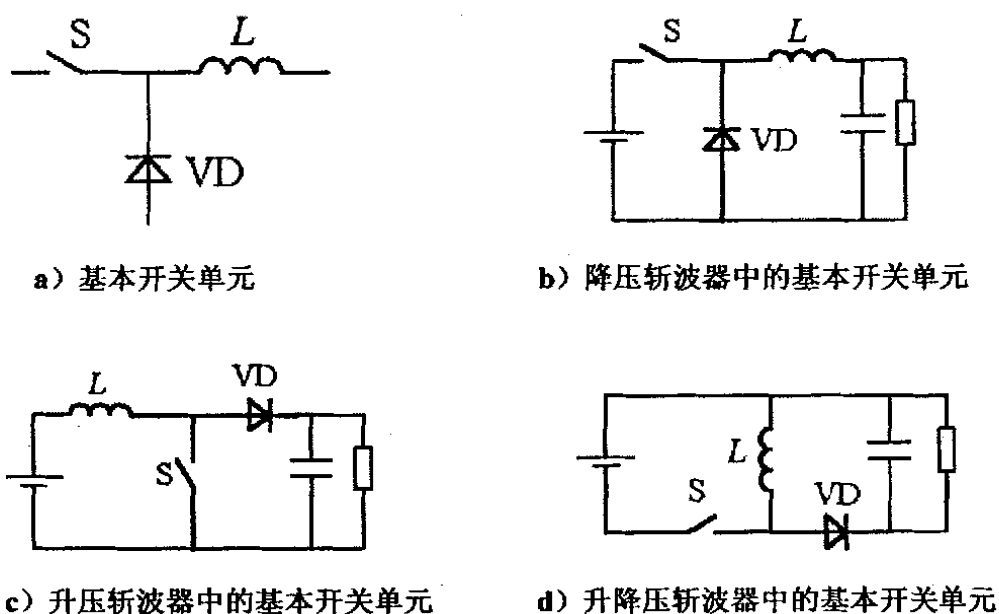


图 3-3 基本开关单元的概念

3.1.1.3 软开关技术在EMC中的应用。

软开关技术的基本思想是在原有的硬开关电路中增加电感和电容元件，利用电感和电容的谐振，降低开关过程中的 du/dt 和 di/dt ，使开关器件开通时电压的下降先于电流的上升，或关断时电流的下降先于电压的上升，来消除电压和电流的重叠。在理想情况下，这

样不仅减小了开关损耗，还可以大大减小EMI电平。研究表明，具有电压箝位的零电压定频开关变换器的EMI电平最低^[19]。此外，软开关电路不同于一般的吸收电路，能够在降低EMI影响的同时减小开关损耗。但是简单地认为软开关技术就可以降低EMI电平是一种比较片面的认识。这是由于为实现主功率开关器件的软开关电路中引入了辅助谐振单元，其谐振会引入高的 du/dt 和 di/dt ，增加电路的EMI。因此，比较软开关和硬开关技术的开关电源，其EMI应综合衡量考虑。文献[20]、[21]、[22]、[23]对这个问题都进行了较为仔细的研究。

3.1.2 开关频率调制技术

3.1.2.1 频率调制的定义

所谓频率调制，是瞬时频率偏移随调制信号 $m(t)$ 成比例变化的调制^[24]，此时瞬时频率偏移可表示为

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = K_{FM}m(t) \quad (3.1)$$

其中 K_{FM} 为频偏常数，或有

$$\theta(t) = \int_{-\infty}^t K_{FM}m(\alpha)d\alpha \quad (3.2)$$

3.1.2.2 开关频率调制技术

固定频率调制脉冲产生的干扰在低频段，主要是调制频率的谐波干扰，低频段的干扰主要集中在各谐波点上。其基本思想是通过调制开关频率 f_c ，把集中在 f_c 及其谐波 $2f_c$ 、 $3f_c$ ……上的能量分散到它们周围的频带上，以降低各个频点上的EMI幅值。该方法不能降低干扰总量，但能量被分散到频点的基带上，从而达到各个频点都不超过EMI规定的限值^[25]。为了达到降低噪声频谱峰值的目的，通常有两种处理方法：随机频率法和调制频率法。

随机频率法是在电路开关间隔中加入一个随机扰动分量，使开关噪声能量分散在一定范围的频带中，研究表明，开关噪声频谱由原来离散的尖峰脉冲噪声变成连续分布噪声，其峰值大大下降。

调制频率法是在锯齿波中加入调制波形(即白噪声),在产生干扰的离散频段周围形成边频带,将噪声的离散频带调制展开成一个分布频带。这样噪声能量就分散到这些分布频段上。这种控制方法可以在不影响变换器工作特性的情况下,很好地抑制开通、关断时的干扰^[26]。

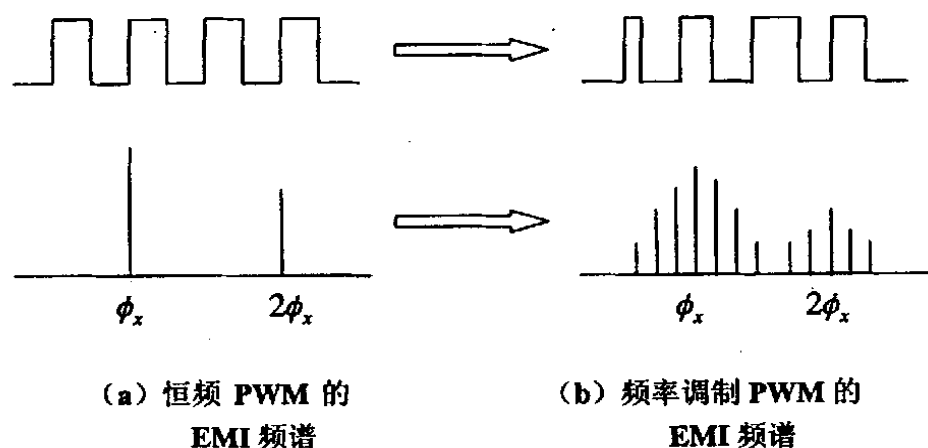


图 3-4 采用频率调制技术降低 EMI 电平

3.1.3 共模干扰的有源抑制技术

共模干扰的特点是干扰的大小和方向一致,存在于电源任何一相对大地、或中线对大地间。共模干扰也称为纵模干扰、不对称干扰或接地干扰。是载流体与大地之间的干扰。其抑制基本思路是设法从主回路中取出一个与导致电磁干扰的主要开关电压波形完全反相的补偿EMI噪声电压,并用它去平衡原开关电压的影响^[27]。我们在了解其产生机理的基础上就发展了共模干扰抑制的方法—共模干扰反向消除技术,它可抑制很宽频段内的共模干扰并且不会对电源的正常工作产生影响。实验研究结果表明,对抑制共模EMI电平产生了十分明显的效果。

3.1.3.1 共模干扰反向消除技术在 Boost 变换器中的实现

在讨论时,有两个概念需要阐明,即“主动式节点”和“被动式节点”两个概念,所谓“主动式节点”是由于高频开关动作引起电位剧烈变化,导致主要向外辐射位移电流的节点;而“被动式节点”则指那些没有被开关动作直接牵引的电路节点。

严格的讲BOOST变换器中有两个主动式节点：功率MOSFET的漏极和门极，这种情况下暂时忽略门极产生的位移电流，认为主动节点仅漏极一个。根据共模干扰反向消除技术的思想，需要增设一个附加的主动式节点，其电位变化必须与漏极的电位变化刚好相位相反，大小相等，最简单的方法莫过于在BOOST电感上增加一个反相绕组，如图3-5(a)的方法连接。图中节点2是原电路中固有的主动式

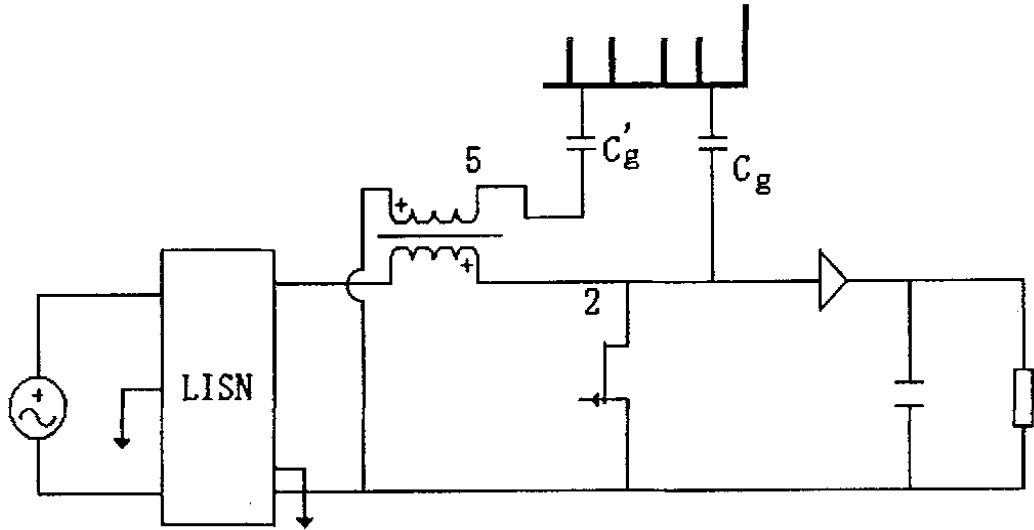


图 3-5(a) Boost 变换器共模干扰反向消除技术

节点，节点5则是增设的反相主动式节点。为了使反相绕组对散热器的杂散电容 c'_g 与功率MOSFET对散热器间的杂散电容 c_g 数值相等，可以采用对称结构，让节

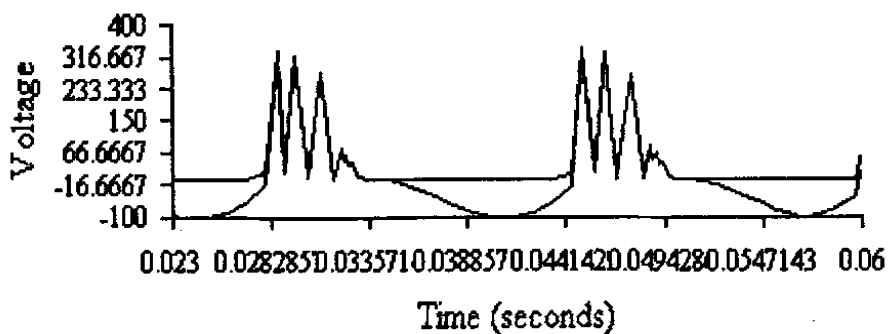


图 3-5(b) 无反向消除技术的 Boost 变换器

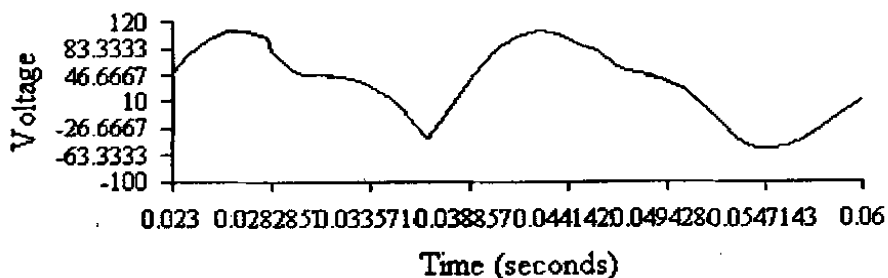


图 3-5(c) 有反向消除技术的 Boost 变换器

点5的引线经另一个功率MOSFET贴在散热器上。因为 c_g 的数值很小，反相绕组相对于开路工作，不会影响到变换器的正常工作^[28]。

用Workbenth对此反向消除技术进行仿真模拟，我们可以清楚的看到其EMI峰值和电压瞬变的改善。具体见图3-5(b)和3-5(c)。

3.1.3.2 共模干扰反向消除技术在BUCK变换器中的实现

同样的方法也可以应用在BUCK变换器中，唯一要引起注意的是BUCK变换器中功率MOSFET的驱动属于高端驱动，门极电位变化幅度与漏极的变化幅度是可比的。因此BUCK变换器中的主动式节点有两个：门极和漏极。显然在BUCK变换器中增设两个附加的主动式节点来抵消它们是复杂的，不如用变化幅度为2倍，相位相反的一个附加主动式节点来代替，虽然有些误差，但复杂度降低了很多，也是值得的。

以上列举了共模干扰反相消除技术在BOOST和BUCK变换器中的应用，仿真实验结果都证明这是一种非常有效的共模干扰抑制技术^[31]。不同于EMI滤波器通过切断耦合途径的方法来降低干扰，干扰反相消除技术是作用于干扰源本身，把干扰消除在发生源处。

3.1.4 抑制电磁干扰的缓冲电路设计

3.1.4.1 具有缓冲电路的开关电源组成与工作原理

图3-6为50kHz开关控制电源的组成方框图。其中线性阻抗稳定网络的作用是为了消除在供电电力线内潜在的干扰，包括电力线干扰、电快速瞬变，电涌，电压高低变化和电力

线谐波等。这些干扰对一般稳压电源来说，影响不是很大，但对高频开关电源来说，则影响显著。

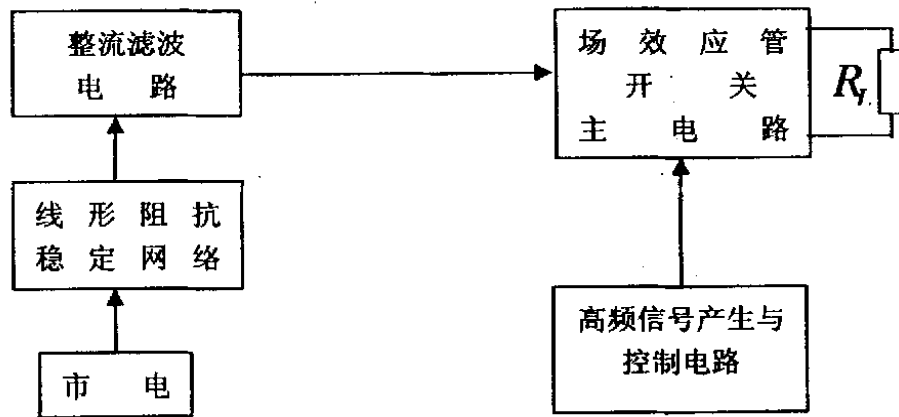


图3-6 开关电源组成方框图

开关元件一般在电压波形的波峰消耗能量，这样，当外界电压有干扰或变化时，将使开关电源产生较多谐波成分而使波形失真，且EMI会比较严重，影响到开关电源和整个电子设备的安全工作。线性阻抗稳定网络还可以有效抑制供电线内的共模干扰，利用其对称结构和适当的去耦处理与设计来解决。

整流滤波电路由一般桥式整流电路和一个大电容组成。高频信号产生与控制电路的作用有两个：一个是产生触发开关元件通断的高频矩形脉冲，这些矩形脉冲的占空比决定了输出直流电压的高低；另一个是稳压反馈作用，即从输出端取样的电压经过与整流，与基准直流电压比较后形成误差电压，该电压经过放大控制高频信号产生电路中高频信号的占空比，从而达到稳定输出电压的目的。

场效应管开关主电路为开关电源的核心电路，也是产生EMI的主要电路。因此，在场效应管开关传统主电路的基础上，设计增加一个缓冲电路来抑制EMI。在这部分电路设计时，要着重注意共模电流和串扰的影响。共模辐射是由于电路设计之处的电压降造成的，这种电压降致使电路的一些接地部分的电压比真实的参考地电压高，这样与受影响的接地系统相连的电缆或器件就成了天线，在空中辐射共模电磁能，并通过电缆或导线感应来传播^[29]。差模辐射很容易利用电路的设计来减弱，但共模辐射相当难解决，通常利用灵敏接地来解决。

3.1.4.2 具有缓冲电路开关主电路设计与仿真

图3-7为开关主电路仿真电路。缓冲电路的仿真参数设置为：仿真区间0~30ms，迭代步长 $0.01\mu\text{s}$ ，开关控制信号50kHz。缓冲电路器件参数为D1—MUR460，R2— 500Ω ，Cs— 5nF ，Ls— 34mH ，Rs— 150Ω 。

在图中，为了便于仿真，将 C_{ss} 等效成Cs、Ls、Rs串联的形式，由于器件连接结构的原因，由场效应开关管M1的漏极通过C2接机壳来等效M1。仿真电路中缓冲电路由R2、D1、Cs、Ls、Rs组成，M1在高频信号产生与控制电路Vs信号的作用下，完成高速开关动作，并经L和C3滤波，在负载RL上得到直流电压。

为了将有缓冲电路和没有缓冲电路的开关电路EMI进行对比，分别对其进行

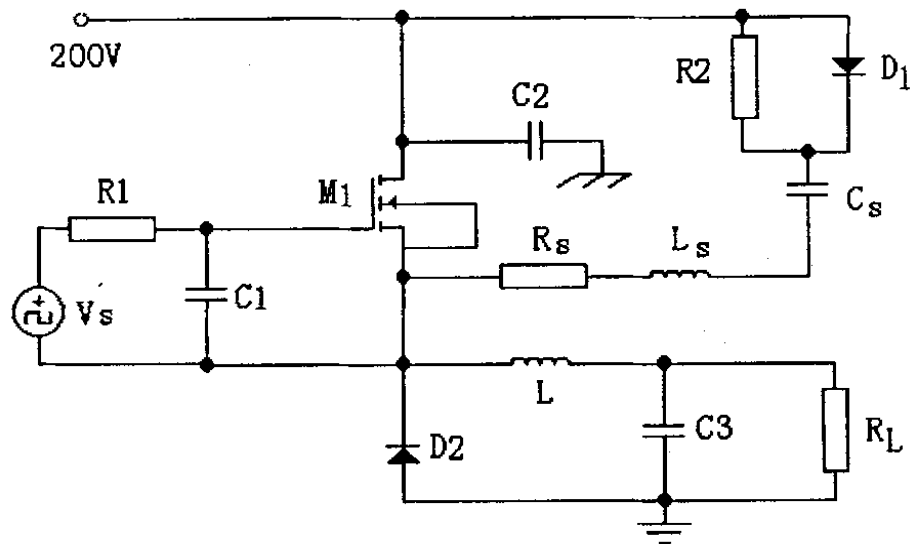


图 3-7 开关主电路仿真电路

仿真分析。图3-8为带有缓冲电路开关元件电压电流和功率波形，从功率波形上可以发现开关器件仍然存在小幅射频振荡。为了有利于观察有缓冲电路和没有缓冲电路的开关电路产生射频振荡的情况，将二者的电压电流功率波形进行放大，得到图3-9有缓冲电路开关元件电压电流和功率放大波形和图3-10没有缓冲电路开关元件电压电流和功率放大波形。

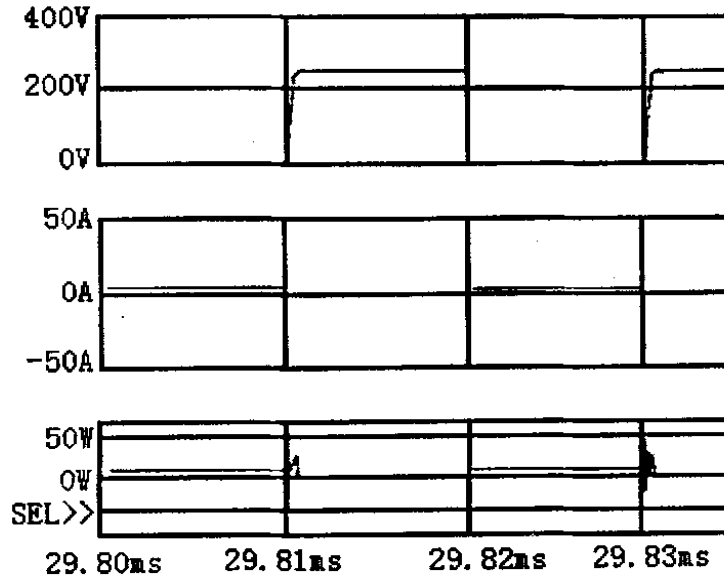


图3-8 带有缓冲电路开关元件电压电流和功率波形

从图3-9和图3-10中可以看出，两种电路都有一些射频振荡，这些振荡会带来EMI辐射，并对系统的性能产生不利影响。仔细观察不难发现，二者在振荡幅度上差别很大。通过仿真游标读出，有缓冲电路开关电流的振荡幅度最大为4A，功率振荡幅度最大为50W；而无缓冲电路开关电流的振荡幅度最大为60A，功率振荡幅度最大约为10kW。

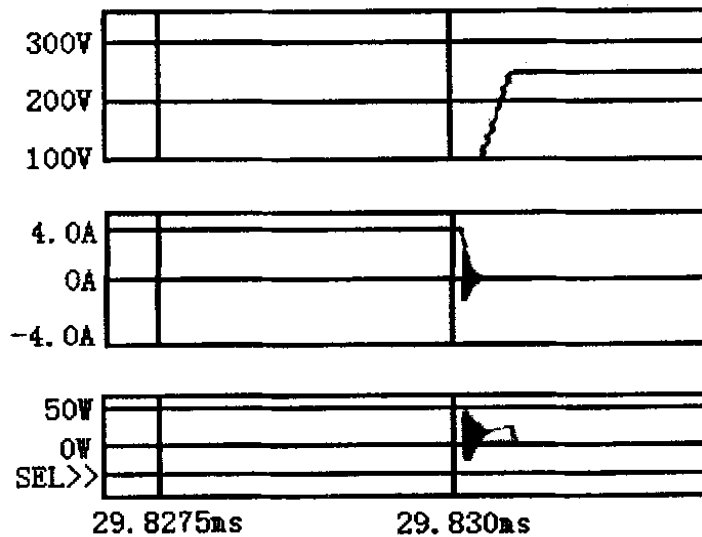


图3-9 有缓冲电路开关元件电压电流和功率放大波形

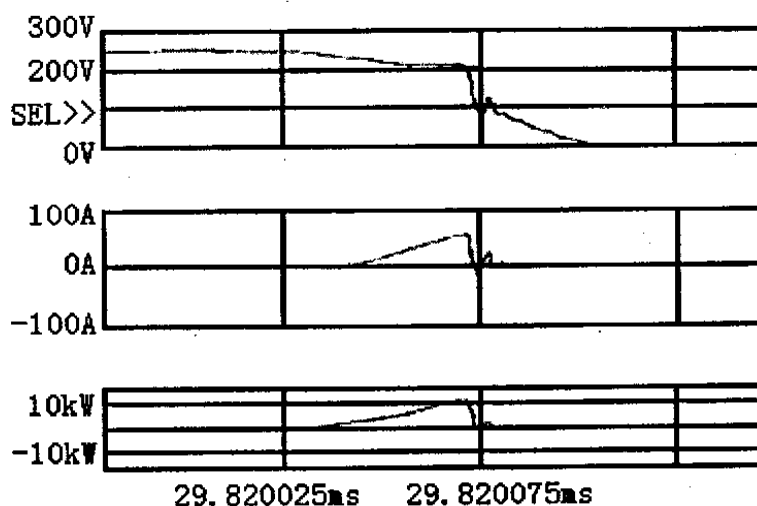


图3-10 没有缓冲电路开关元件电压电流和功率放大波形

3.1.5 滤波

EMI滤波其实是目前使用最广泛，也是相当有效的一种高频电磁干扰抑制手段。当然就EMI滤波器本身而言，无论是在设计还是使用上都存在一些问题，以至于在功率、体积甚至滤波性能等方面都不能做到令人满意的程度。

3.1.5.1 EMI滤波器的基本原理

插入损耗 (Insertion Loss) A_u 是描述滤波性能的基本参数。其定义为：

$$A_u = 20 \log \frac{v_{01}}{v_{02}} \quad (3.3)$$

其中 v_{01} 是不接滤波器时负载两端的输出电压， v_{02} 是接入滤波器后负载两端的输出电压。 A_u 是频率 ω 的函数，数值越大表示滤波器对该频率干扰信号的抑制能力越强。设计EMI滤波器的主要目的之一，就是要在150k-30MHz的频段范围获得较高的插入损耗。但对频率为50Hz工频信号不产生衰减，使额定电压、电流顺利通过，同时还必须满足一定的尺寸要求。

任何电源线上的传导干扰信号，均可用差模和共模信号来表示。在一般情况下，差模干扰幅度小，频率低，所造成的干扰较小；共模干扰幅度大，频率高，还可以通过导线产

生辐射，所造成的干扰较大。因此，欲削弱传导干扰，把EMI信号控制在有关EMC标准规定的极限电平以下，最有效的方法就是在开关电源输入和输出电路中加装电磁干扰滤波器^[30]。

3.1.5.2 电磁干扰滤波器的设计

一、电磁干扰滤波器的设计与选择

电磁干扰滤波器的设计与选择，应根据干扰源的特性、频率范围、电压、阻抗等参数及负载特性的要求综合考虑，通常要考虑以下几方面的问题^[31]：

1) 要求电磁干扰滤波器在相应工作频段范围内，能满足负载要求的衰减特性，若一种滤波器衰减量不能满足要求的时候，则可采用多级联，可以获得比单级更高的衰减，不同的滤波器级联，可以获得在宽频带内良好的衰减特性。

2) 要满足负载电路工作频率和所需抑制频率的要求，如果遇到要抑制的频率和有用信号频率非常接近，则需要频率特性非常陡峭的EMI滤波器。

3) 在所要求的频率上，滤波器的阻抗必须与它连接的干扰源阻抗和负载阻抗相匹配，如果负载是高阻抗，则EMI滤波器的输出阻抗应为低阻；如果电源或干扰源阻抗是低阻抗，则EMI滤波器的输出阻抗应为高阻；如果电源阻抗或干扰源阻抗是未知的或者是在一个很大的范围内变化，很难得到稳定的滤波特性，为了使EMI滤波器获得良好的滤波特性，应在其输入和输出端，同时并接一个固定电阻。

4) 电磁干扰滤波器必须具有一定耐压能力，要根据电源和干扰源的额定电压来选择滤波器，使它具有足够高的额定电压，以保证在所有预期工作的条件下都能可靠地工作，能够经受输入瞬时高压的冲击。

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一致。电流定高了，会加大滤波器的体积和重量；电流定低了，又会降低滤波器的可靠性。

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。

二、电磁干扰滤波器的电路结构与参数选择

图3-11是开关电源EMI滤波器的电路。其中 L_1 、 L_2 为共模扼流圈，其结构见图3-12。

由于它的两个线圈匝数相等，这两个电感对于差模电流和主电流所产生的磁通是方向相反、互相抵消的，因而不起作用；而对于共模干扰信号，能够得到一个大的电感量呈现高阻抗，以获得最大的滤波效果，因此对其有良好的抑制作用。但是，由于种种原因，如磁环的材料不可能做到绝对均匀，两个线圈的绕制也不可能完全对称等，使得电感量是不相等的，于是 (L_1-L_2) 形成差模电感，它和 L_3 与 L_4 形成的独立差模抑制电感与 C_x 电容器又组成L—N独立端口间的一个低通滤波器，用来抑制电源线上存在的差模干扰信号。

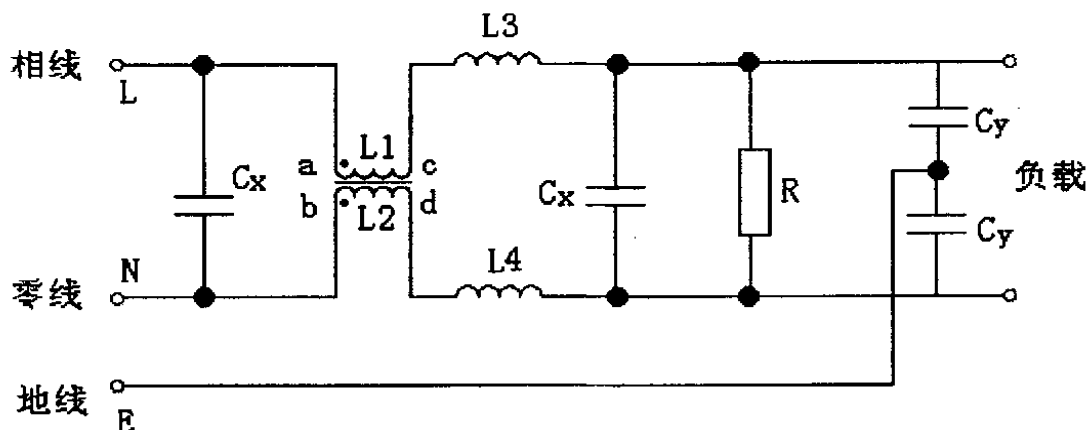


图3-11 开关电源EMI滤波器电路

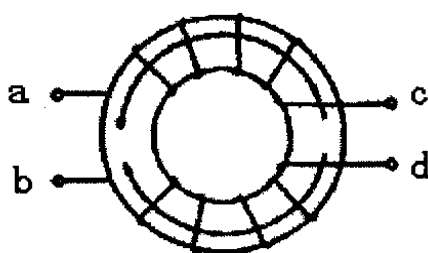


图3-12 共模扼流圈结构

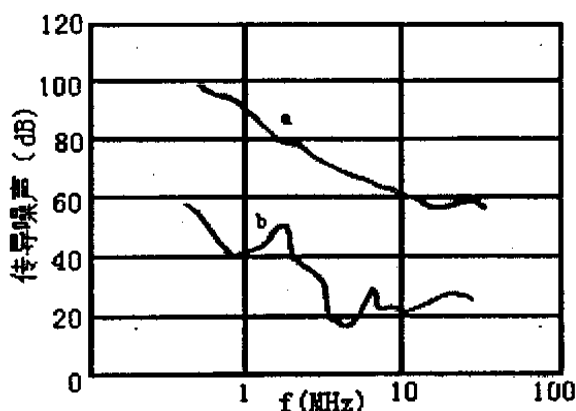


图3-13 加EMI滤波器前、后干扰波形的比较

在选择滤波元件时，一定要保证输入滤波器谐振频率低于开关电源的工作频率。由于随着电源工作频率的升高，滤波器对运行噪声将更容易抑制，所以设计中要注意滤波器在工作频率低时的抑制效果^[32]。

C_x 电容被用来衰减差模干扰， C_y 用来衰减共模干扰， R 用于消除可能在滤波器中出现的静电积累。若电容的容量大于 $0.1\mu F$ 时，该放电电阻的阻值应为

$$R = t / 2.21C \quad (3.4)$$

式中， $t=1S$ ； C 为2个 C_x 的总和值。在图11所示电路中各元件参数在下列范围内选择： C_x 为 $0.1\sim 2\mu F$ ； C_y 为 $2200pF\sim 0.033\mu F$ ； L_1 、 L_2 为几至几十毫亨；随工作电流的不同而选择不同参数。

共模扼流圈使用的磁芯有环形、E形和U形等，一般采用铁氧体材料。环形磁芯适用于大电流小电感量，它的磁路比E形和U形长，没有间隙，用较少的圈数可获得较大的电感量，由于这些特点，它具有较佳的频率特性。E形磁芯的线圈泄漏磁通小，故当电感漏磁有可能影响其他电路或其他电路与共模电感有磁耦合，而不能获得所需要的噪声衰减效果时，应考虑采用E形磁芯作共模电感。

L_3 、 L_4 一般采用金属粉压磁芯，由于粉压磁芯适用频率范围较低，在几十千赫~几兆赫，其直流重叠特性好，在大电流应用时电感量也不会大幅度下降，最适合作差模电感。

差模电容 C_x 接在交流进线两端，它上面除加有额定交流电压外，还会叠加交流进线之间存在的各种EMI峰值电压，所以该电容的耐压及耐瞬态峰值电压的性能要求较高；同时要求该电容失效后，不能危及后面电路及人身安全。 C_x 电容器的安全等级又分为X1和X2两类，X1类适用于一般场合，X2类适用于会出现高的噪声峰值电压的应用场合。因此，要根据EMI滤波器的应用场合和可能存在的EMI信号的峰值，正确选用适合安全等级的电容。

共模电容 C_y 接在交流电进线与机壳地之间，要求它们在电气和机械性能上，应有足够大的安全余量，万一它们发生击穿短路，将使设备机壳带上交流电，如设备的绝缘或接地保护失效，可能使操作人员遭受电击，甚至危及人身安全。因此 C_y 电容器的容量要进行限制，使其在额定频率的电压下漏电流小于安全规范值。另外还要求有足够的耐压及耐瞬态高电压的余量，并且万一发生电压击穿它应处于开路状态，而不会使设备机壳带电。

由于滤波器工作在高电压、大电流、恶劣的电磁干扰环境中，因此在设计和选择滤波器时，必须考虑所用电感器和电容器的安全性能，对于电感线圈，其磁芯、绕线的材料，绝缘材料和绝缘距离、线圈温度升高等都应予以重视。对于电容，其电容种类、耐压、安全等级、容量和漏电等都应优先考虑，特别要求选择经过国际安全机构安全认证的产品。

3.1.6 PCB设计

PCB抗干扰设计主要包括PCB布局、布线及接地，其目的是减小PCB的电磁辐射和PCB上电路之间的串扰。

开关电源布局的最佳方法与其电气设计类似，最佳设计流程如图3-14所示。设计PCB前应首先考虑PCB的尺寸与形状。PCB尺寸过大时，印制线条长，阻抗增加，抗噪声能力下降，成本也增加；若尺寸过小，则散热不好，且邻近线条易受干扰。电路板的最佳形状为矩形，长宽比为3:2或4:3。电路板面积尺寸大于 $200\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 时，应考虑电路板所受的机械强度。在确定PCB的尺寸形状后，再确定特殊元器件(如各种发生器、晶振等)的位置。各种发生器、晶振等都易产生噪声，要相互靠近一些。最后，根据电路的功能单元，对电路的全部元器件进行布局。布局时应以每个功能电路的核心元件为中心，围绕它来进行布局。同时，在高频情况下，要考虑元器件之间的分布参数。元器件应均匀、整齐、紧凑地排列在PCB上，尽量减小和缩短各元器件之间的引线和连接^[33]。

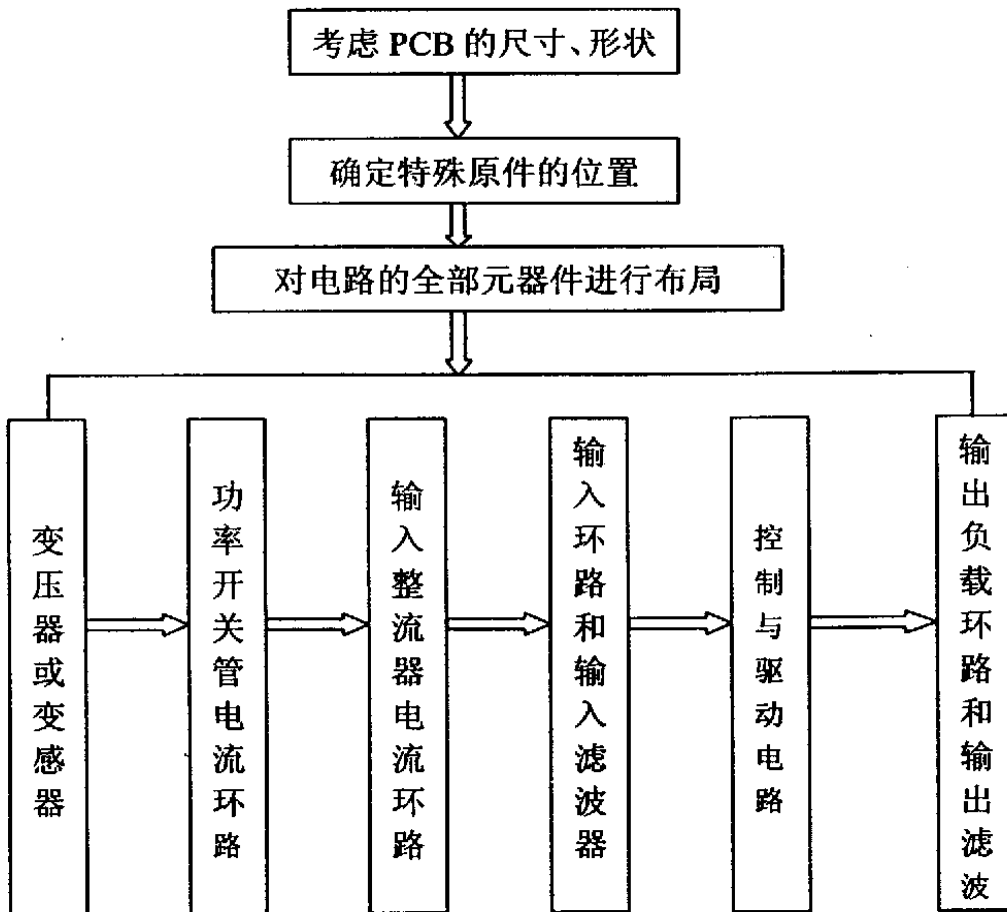


图3-14 PCB布局最佳流程

关于PCB布线技术，有关文献中都提出了一些简单的布线规则。例如在开关电源中，最典型的规则就是减小高频电流环路包围的面积和 du/dt 导体的面积，这样可以降低EMI电平。但是，由于缺少有效的分析电磁干扰手段，基本上是一种依赖于经验的尝试性设计过程。新的采用计算机辅助设计的方法是：① 使用Ansoft软件提取变压器印制导线的寄生电阻、电感、电容等寄生参数，然后将这些参数代入Pspice软件进行电路仿真，最后得出对EMC影响最重要的参数^[34]；② 用电磁场计算软件Inca提取PCB的杂散参数，用高频阻抗分析仪测量无源元件的高频寄生参数，建立完整的开关电源传导EMI模型，再利用仿真软件进行EMI预测^[35]；③ 采用EMC扫描仪直接得到开关电源PCB的表面电场干扰分布情况，作为布线时的主要依据，开发了辅助设计软件，初步解决了PCB电磁兼容性设计的部分问题^[36]。

3.1.7 元器件的选择

选择不易产生噪声的元器件也是减少开关电源电磁干扰的重要途径之一。基本原则是选择不易产生噪声的元器件、不易传导和辐射噪声的元器件。通常特别值得注意的是二极管和变压器等绕组类元器件的选用。一般二极管都存在反向恢复过程，如图3-15所示。因为在执行关断操作前，二极管内有正向导通电流，故串联的电感内所存储的能量为 $LI^2/2$ 。一旦执行关断操作后，其冲击电压即为噪声。反向恢复时间 t_{RR} 通常定义为从电流下降为零至反向流衰减至反向恢复电流峰值25%的时间。电流下降时间 t_f 与延迟时间 t_d 的比值称为恢复特性的软度或称恢复

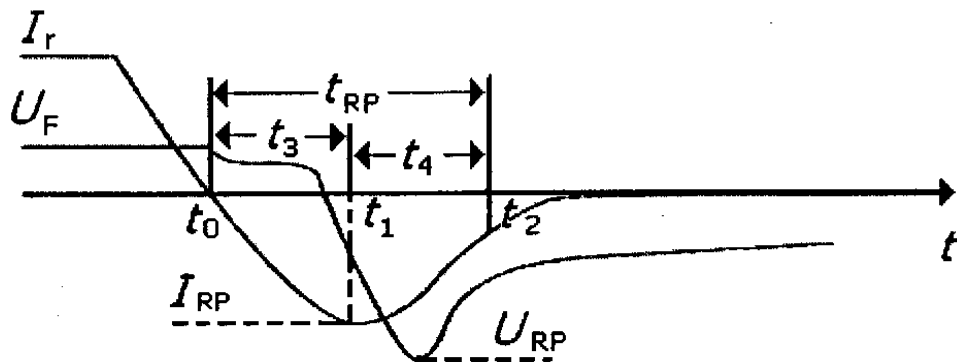
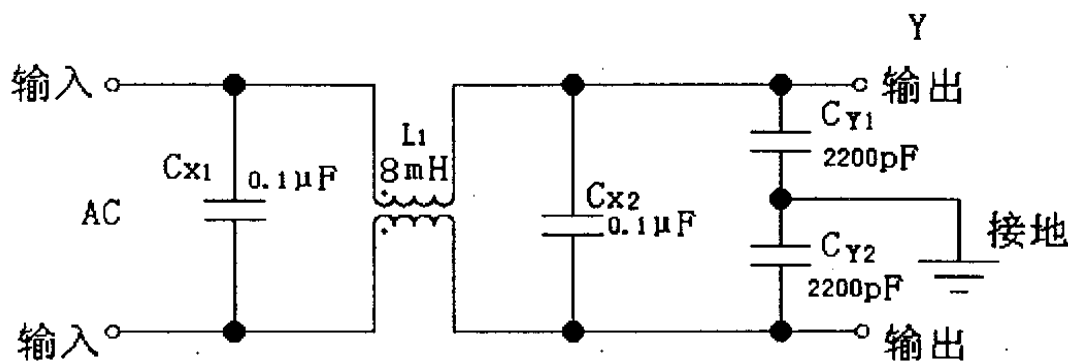


图3-15 二极管的反向恢复过程

系数。恢复系数越大，在同样的外电路条件下造成的反向电压过冲 U_{RP} 越小，执行关断操作时的振荡较少，而且是衰减性的振荡，故其噪声不致向外释放。反向恢复电流小、恢复时间短的快速恢复二极管是开关电源高频整流部分的理想器件^[37]。

3.2 切断干扰信号的传播途径——共模、差模电源线滤波器设计

电源线干扰可以使用电源线滤波器滤除，开关电源EMI滤波器基本电路如图3-16所示。一个合理有效的开关电源EMI滤波器应该对电源线上差模干扰和共模干扰都有较强的抑制作用。在图3-16中 C_{X1} 和 C_{X2} 叫做差模电容， L_1 叫做共模电感， C_{Y1} 和 C_{Y2} 叫做共模电容。差模滤波元件和共模滤波元件分别对差模和共模干扰有较强的衰减作用。

图3-16 开关电源EMI滤波器^[38]

共模电感 L_1 是在同一个磁环上由绕向相反、匝数相同的两个绕组构成。通常使用环形磁芯，漏磁小，效率高，但是绕线困难。当市网工频电流在两个绕组中流过时为一进一出，产生的磁场恰好抵消，使得共模电感对市网工频电流不起任何阻碍作用，可以无损耗地传输。如果市网中含有共模噪声电流通过共模电感，实际使用中共模电感两个电感绕组由于绕制工艺的问题会存在电感差值，不过这种差值正好被利用作差模电感。所以，一般电路中不必再设置独立的差模电感了。共模电感的差值电感与电容 C_{x1} 与 C_{x2} 构成了一个 Π 型滤波器。这种滤波器对差模干扰有较好的衰减。

表 1 电感量范围与额定电流的关系^[39]

额定电流 I/A	电感量 L/mH
1	8~23
3	2~4
6	0.4~0.8
10	0.2~0.3
12	0.1~0.15
15	0.0~0.08

除了共模电感以外，图3-16中的电容 C_{Y1} 及 C_{Y2} 也是用来滤除共模干扰的。共模滤波的衰减在低频时主要由电感器起作用，而在高频时大部分由电容 C_{Y1} 及 C_{Y2} 起作用。电容 C_Y 的选择要根据实际情况来定，由于电容 C_Y 接在电源线和地线之间，承受的电压比较高，所以，需要具有高耐压、低漏电流特性。计算电容 C_Y 漏电流的公式是

$$I_D = 2\pi f C_Y V_{CY} \quad (3.5)$$

式中： I_D 为漏电流； f 为电网频率。

一般装设在可移动设备上的滤波器，其交流漏电流应 $<1\text{mA}$ ；若为装设在固定位置且接地的设备上的电源滤波器，其交流漏电流应 $<3.5\text{mA}$ ，医疗器材规定的漏电流更小。由于考虑到漏电流的安全规范，电容 C_Y 的大小受到了限制，一般为 $2.2\sim 33\text{nF}$ 。电容类型一般为瓷片电容，使用中应注意在高频工作时电容器 C_Y 与引线电感的谐振效应。

差模干扰抑制器通常使用低通滤波元件构成，最简单的就是一只滤波电容接在两根电源线之间而形成的输入滤波电路（如图3-16中电容 C_{X1} ），只要电容选择适当，就能对高频干扰起到抑制作用。该电容的选择主要考虑耐压值，只要满足功率线路的耐压等级，并能承受可预料的电压冲击即可。为了避免放电电流引起的冲击危害， C_X 电容容量不宜过大，一般在 $0.01\sim 0.1\mu\text{F}$ 之间。电容类型为陶瓷电容或聚酯薄膜电容。

3.3 增强敏感电路的抗干扰能力

3.3.1 屏蔽

近年来，随着电磁兼容工作的开展，电磁屏蔽技术应用的越来越广泛。为了对电磁屏蔽技术有更深入的理解，应当对屏蔽材料的性能和应用场合、屏蔽技术的注意事项、屏蔽效能的检测以及特殊部位的屏蔽措施等进行更深入的探讨^[40]。

3.3.1.1 电磁屏蔽的技术原理

电磁屏蔽是电磁兼容技术的主要措施之一。即用金属屏蔽材料将电磁干扰源封闭起来，使其外部电磁场强度低于允许值的一种措施；或用金属屏蔽材料将电磁敏感电路封闭起来，使其内部电磁场强度低于允许值的一种措施^[41]。

1) 静电屏蔽

用完整的金属屏蔽体将带正电的导体包围起来，在屏蔽体的内侧将感应出与带电导体等量的负电荷，外侧出现与带电导体等量的正荷，如果将金属屏蔽体接地，则外侧的正电荷将流入大地，外侧将不会有电场存在，即带正电导体的电场被屏蔽在金属屏蔽体内。

2) 交变电场屏蔽

为降低交变电场对敏感电路的耦合干扰电压，可以在干扰源和敏感电路之间设置导电性好的金属屏蔽体，并将金属屏蔽体接地。交变电场对敏感电路的耦合干扰电压大小取决于交变电场电压、耦合电容和金属屏蔽体接地电阻之积。只要设法使金属屏蔽体良好接地，就能使交变电场对敏感电路的耦合干扰电压变得很小。电场屏蔽以反射为主，因此屏蔽体的厚度不必过大，而以结构强度为主要考虑因素。

3) 交变磁场屏蔽

交变磁场屏蔽有高频和低频之分。低频磁场屏蔽是利用高磁导率的材料构成低磁阻通路，使大部分磁场被集中在屏蔽体内。屏蔽体的磁导率越高，厚度越大，磁阻越小，磁场屏蔽的效果越好。当然要与设备的重量相协调。高频磁场的屏蔽是利用高电导率的材料产生的涡流的反向磁场来抵消干扰磁场而实现的。

4) 交变电磁场屏蔽

一般采用电导率高的材料作屏蔽体，并将屏蔽体接地。它是利用屏蔽体在高频磁场的作用下产生反方向的涡流磁场与原磁场抵消而削弱高频磁场的干扰，又因屏蔽体接地而实现电场屏蔽。屏蔽体的厚度不必过大，而以趋肤深度和结构强度为主要考虑因素。

3.3.1.2 屏蔽效能计算

屏蔽效能 (SE) 的定义是：在电磁场中同一地点无屏蔽时的电磁场强度与加屏蔽体后的电磁场强度之比。常用分贝数(dB)表示。

$$SE=A+R+B \quad (3.6)$$

式中：A 为吸收损耗；R 为反射损耗；B 为多次反射损耗。

一、电磁波反射损耗

由于空气和屏蔽金属的电磁波阻抗不同，使入射电磁波产生反射作用。而空气的电磁波阻抗在不同场源和场区中是不一样的，分别计算如下。

磁场源近场中的反射损耗 R (dB)为

$$R = 20 \log_{10} \{ [1.173(\mu_r / f\sigma_r)^{1/2} / D] + 0.0535D(f\sigma_r / \mu_r)^{1/2} + 0.354 \} \quad (3.7)$$

式中： μ_r 为相对磁导率； σ_r 为相对电导率； f 为电磁波频率 (Hz)； D 为辐射源到屏蔽体的距离 (cm)。

电场源近场中的反射损耗 R (dB)为

$$R = 362 - 20 \log_{10} [(\mu_r f / \sigma_r)^{1/2} D] \quad (3.8)$$

电磁场源远场中的反射损耗 R (dB)为

$$R = 168 - 10 \log_{10} (\mu_r f / \sigma_r) \quad (3.9)$$

二、电磁波吸收损耗

当进入金属屏蔽内的电磁波在屏蔽金属内传播时，由于衰减而产生吸收作用。吸收损耗 A (dB)为

$$A = 0.1314d(\mu_r f\sigma_r)^{1/2} \quad (3.10)$$

式中： d 为屏蔽材料厚度 (mm)。

三、多次反射损耗

电磁波在屏蔽层间的多次反射损耗 B (dB)为

$$B = 20 \log_{10} \{1 - [(Z_m - Z_w)/(Z_m + Z_w)]^2 10^{-0.1A} (\cos 0.23A - j \sin 0.23A)\} \quad (3.11)$$

式中： Z_m 为屏蔽金属的电磁波阻抗； Z_w 为空气的电磁波阻抗。当 $A > 10\text{dB}$ 时，一般可以不计多次反射损耗。

3.3.1.3 印刷电路板的屏蔽

- 1) 在电磁干扰源和对电磁干扰敏感接收电路之间设置导线屏蔽，并接到电路板的基准电位上。
- 2) 将导电线条之间的涂覆层尽量多地保留，并接到电路板的基准电位上。
- 3) 在印刷电路板的三个周边（电连接器边除外）设置地线。
- 4) 对电磁干扰源和对电磁干扰敏感接收电路分别设置屏蔽罩，并接到电路板的基准电位上。
- 5) 在印刷电路板之间设置屏蔽板，并接到电路板的基准电位上。

3.3.2 接地

接地有设备内部的信号地和设备接大地，两者概念不同，目的也不同。

3.3.2.1 设备接大地

电子电气设备有许多需要接地的部位，由于电路的性质和接地的目的不同，必须加以严格的区分，需要分成若干独立的子系统，然后连接在一起进行总接地^[42]。设备接大地的目的主要有：

- (1) 设备的安全接地，对设备操作人员实现安全保护。
- (2) 泄放机箱上所积聚的电荷，避免因电荷积聚使机箱电位升高，造成电路工作不稳定。

(3)避免设备在外界电磁环境的作用下使设备对大地的电位发生变化,造成设备工作的不稳定。由此可见,接地也是抑制干扰的重要手段,在实际应用中,将接地与屏蔽、滤波等技术配合使用,对抑制干扰能起到事半功倍的作用。

3.3.2.2 设备信号地

设备的信号接地,可能是以设备中的某一点或一块金属薄板作为信号接地的接地参考点,他为设备中的所有信号提供一个公共参考电位。实用中接地方式有:浮地、单点接地、多点接地。主要介绍浮地和混合接地

(1)浮地

采用浮地的目的是使电路的某一部分与“大地线”完全隔离,从而抑制来自接地线的干扰。由于没有电器上的联系,因而也就不能形成地环路电流而产生地阻抗的耦合干扰。实现电路或设备浮地的方法有电磁隔离和光电隔离。浮地的最大优点是抗干扰性能好。电磁隔离采用变压器实现。通过变压器传递电信号,阻止电路耦合产生的电磁干扰。光电隔离采用光耦合器实现。通过半导体发光二极管和光敏半导体(光敏电阻、光敏二极管、光敏三极管等)的光接收,来实现信号的传递。浮地的缺点是由于设备不与公共地相连,容易在两者之间产生静电积累,当电荷积累到一定程度后,在设备地与公共地之间的电位差可能引起剧烈的静电放电,而成为破坏性很强的干扰源。一个折衷的方法是在浮地与公共地之间跨接一个阻值很大的泄放电阻,用以释放所积累的电荷。注意控制泄放电阻的阻值,太低的电阻值会影响设备泄漏电流的合格性^[43]。

(2)混合接地

混合接地即包含了单点接地的特性,又包含了多点接地的特性。接地原则为:所有的电源地线都接到电源总地线上,所有的屏蔽地线都要接到屏蔽总地线上,所有的信号地线都要接到信号总地线上,3根总地线最后汇总到公共的参考地。

第四章 电磁兼容性测量

电子设备电磁兼容性的定量设计为提高电子设备的电磁兼容性能提供了良好的保证，为了确保定量设计的正确性和可靠性，科学地评价设备的电磁兼容性能，就必须在研制的整个过程中，对各种干扰源的干扰量、传输特性和敏感器（受扰设备或元器件）的敏感度进行定量测定，验证设备是否符合电磁兼容性标准和规范；找出设备设计及生产过程中在电磁兼容性方面的薄弱环节，为用户安装和使用设备提供有效的数据，因而电磁兼容性试验是电磁兼容性设计所必不可少的重要内容。

由于电磁兼容分析与设计的复杂性，以及各种乱真发射千差万别，很难控制。因此，对于电磁兼容技术来说，其理论计算结果更加需要实际测量来检验，正如国内外一些专家所指出的“对于最后的成功验证，也许没有任何其他领域像电磁兼容领域那样强烈地依赖于测量。”由此可见测量对电磁兼容领域的重要性。

电磁兼容测量对测量结果的可比性要求甚高，其测量内容、测量方法、测量设备和测量要求均在有关标准和规范中予以明确规定。本章将对电磁兼容性测量从概念上作简单地介绍。

4.1 电磁兼容性测量的内容与要求

4.1.1 电磁兼容性测量的主要内容

由于任一电子设备既可能是一个干扰源，又可能是受感器，因而电磁兼容性试验分为电磁干扰发射（EMI）测量和电磁敏感度（EMS）测量两大类；

1、干扰发射测量（干扰发射表征设备作为干扰源的量度），主要内容有：

（1）电子元器件和设备在各种电磁环境中的传导和辐射发射量的测量，如电子设备的交流供电电源中的脉冲干扰和持续干扰测量等；

（2）各种信号传输方式下干扰传递特性的测量，如各种传输线的传输特性和屏蔽效果等的测量。

2、敏感度测量（敏感度表征设备作为受感器的量度），主要内容有：

- (1) 电源线、信号线、地线等注入干扰的传导敏感度测量；
- (2) 对电场、磁场辐射干扰的辐射敏感度测量；
- (3) 对静电放电干扰的敏感度测量。

干扰发射、敏感度测量根据相应的电磁兼容性标准和规范，在不同频率范围内，采用不同方法进行。图 4-1 汇总了几个典型试验标准和规范中的测量项目。图中 RE 表示辐射发射（Radiated Emission），RS 表示辐射敏感度（Radiated Susceptibility）CE 表示传导发射（Conducted Emission），CS 表示传导敏感度（Conducted Susceptibility）。

4.1.2 对测量场地的要求

为了保证测试结果的准确性和可靠性，电磁兼容性测量对测试环境有较高的要求，测量场地有室外开阔场地、屏蔽室及电波暗室等。

1、开阔场地

开阔场地通常用于精确测定受试设备辐射发射极限值，它要求平坦开阔，远离建筑物、电线、树林、地下电缆和金属管道，环境电磁干扰电平很小（如军标 GJB152-86 要求至少低于允许的极限值 6dB），场地尺寸在不同的 EMC 标准规范中要求不尽相同。

2、屏蔽室

屏蔽室的作用一方面是对外来电磁干扰加以屏蔽，从而保证室内电磁环境电平满足要求。另一方面是对内部发射源（如天线等）进行屏蔽，不对外界形成干扰。GJB152—86 及其它电磁兼容性标准规定，许多试验项目必须在屏蔽室内进行。屏蔽室为一个由金属材料制成的六面体，其形式为：

- a) 按材料分：铜网式、钢板或镀锌钢板式、电解铜箔式、铜板式、钢丝网架夹心板式；

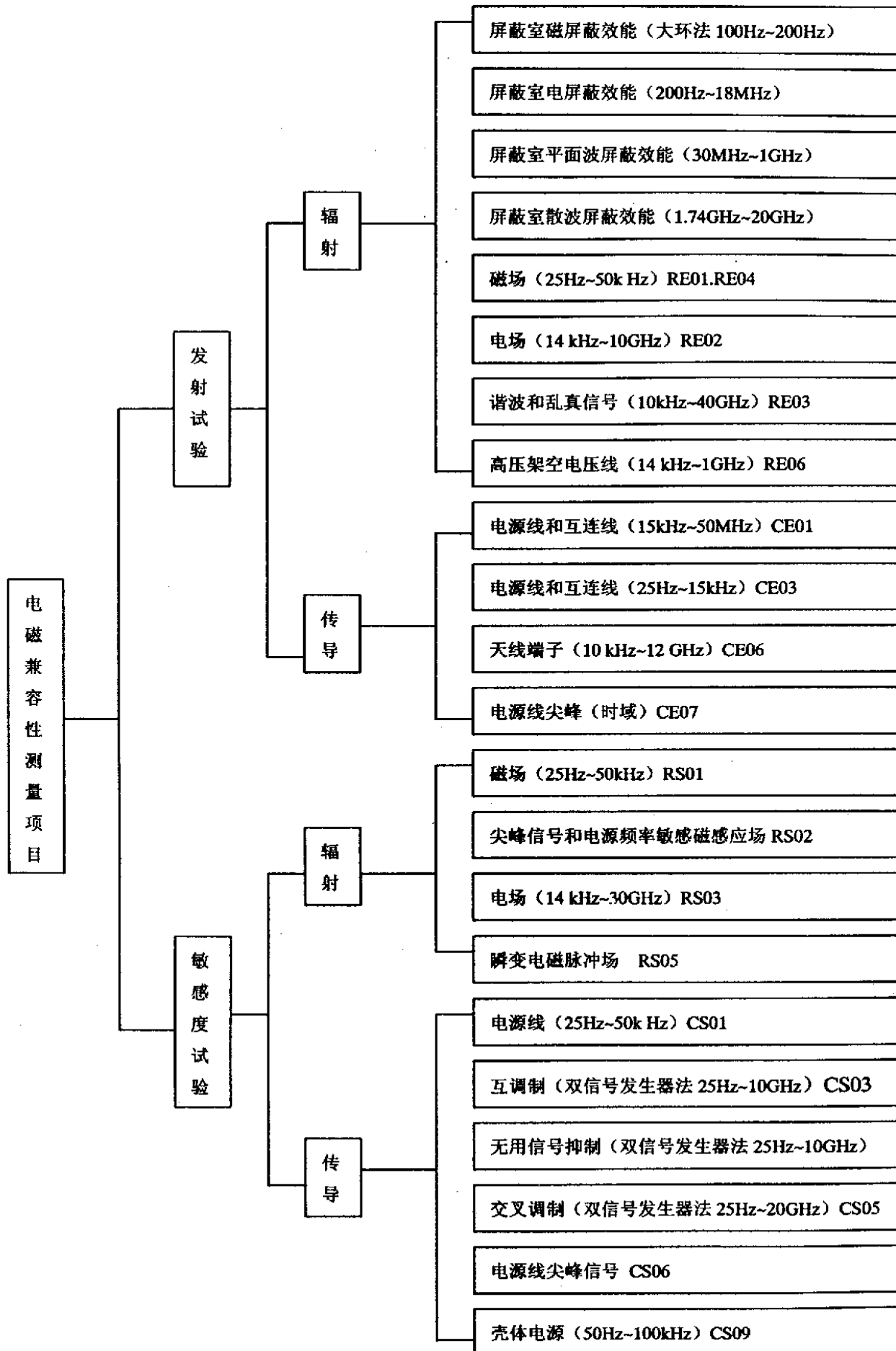


图 4-1 电磁兼容性测量项目

b) 按结构分：单层、双层铜网式，单、双层钢板式，多层复合金属板式，单双层钢丝网架夹心板式；

c) 按安装形式分。固定焊接式，拼装式。

影响屏蔽室性能的主要因素有：屏蔽门，屏蔽材料，电源滤波器，通风波导，拼装及焊接接缝、接地等。

屏蔽室的屏蔽效能可以采用第三章屏蔽理论中的公式进行计算。

从屏蔽效能来看，固定焊接钢板式最好，拼装钢板式次之，焊接铜板式、拼装钢丝网架夹心板式再次之，拼装铜网式最差。其中固定焊接钢板式，拼装钢板式均可满足国军标的要求，在 10kHz—20GHz 频率范围内前者可达到 110—120dB，后者可达 70—110dB。

在使用屏蔽室进行电磁兼容性测量时，要注意屏蔽室的谐振及反射。

(1) 屏蔽室的谐振特性。

根据电磁理论，屏蔽室是一个大型矩形波导谐振腔，具有一系列的谐振频率，当屏蔽室发生谐振时，将会影响屏蔽效能及测量结果。谐振频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \sqrt{\left(\frac{p}{l}\right)^2 + \left(\frac{m}{w}\right)^2 + \left(\frac{n}{h}\right)^2} \quad (4.1)$$

式中， f_0 为谐振频率 (Hz)， $\mu_0 (4\pi \times 10^{-7} H/m)$ 为室内空气介质的磁导率， $\epsilon_0 (8.85 \times 10^{-12} F/m)$ 为室内空气的介电常数， l, m, h 为屏蔽室的长，宽，高 (m) p, m, n 为 0, 1, 2, ... 等整数，三者中最多只能有一个为零，对于 TE 波 p 不能为零。

由式 (4.1) 可见，屏蔽室有许多个谐振频率，当屏蔽室谐振时，其屏蔽效能大大下降，并且会造成很大的测量误差，因此在进行电磁兼容性测量时应避开这些谐振频率。

(2) 屏蔽室的反射

屏蔽室内部天线等发射源将会在屏蔽室壁面上产生反射，从而影响测量结果。为此需采用以下措施：

a) 在条件许可的情况下，尽量在体积大的屏蔽室内进行测量，同时使受试物体在保证入射波为平面波的前提下，缩短受试物体与接收天线的距离。

b) 对于最近的反射路径，针对反射点局部加以吸收材料，尽量减少反射波的幅度。

3、电波暗室

电波暗室是针对一般屏蔽室内壁面反射影响测试结果而在六个壁面上加装吸波材料（对于模拟开阔场地测试，地板上不加吸波材料）而形成的。吸波材料一般采用介质损耗型（如聚氨脂类的泡沫塑料），为了确保其阻燃特性，需在碳胶溶液中渗透。吸波材料通常做成棱椎状、圆锥状及楔形状，以保证阻抗的连续渐变。为了保证室内场的均匀，吸收体的长度相对于暗室工作频率下限所对应的波长要足够长（ $1/4$ 波长效果较好），因而吸收体的体积制约了吸波材料的有效工作频率（一般在 200MHz 以上），减小了屏蔽室的有效空间，电波暗室的屏蔽效能要求与屏蔽室相同。

4.2 常用的测量仪器和设备

电磁兼容性试验除了通用测量仪器外，还需许多专用仪器和设备，下面介绍一些主要仪器、设备的工作原理和使用特点。

4.2.1 测量接收机

测量接收机（电磁干扰测量仪）是电磁兼容性试验中应用最广、最基本的测量仪器，是一种选频测量仪，它能将输入信号中预先设定的频率分量，以一定的通频带选择出来，予以显示和记录，连续改变设定频率便能得到该信号的频谱。

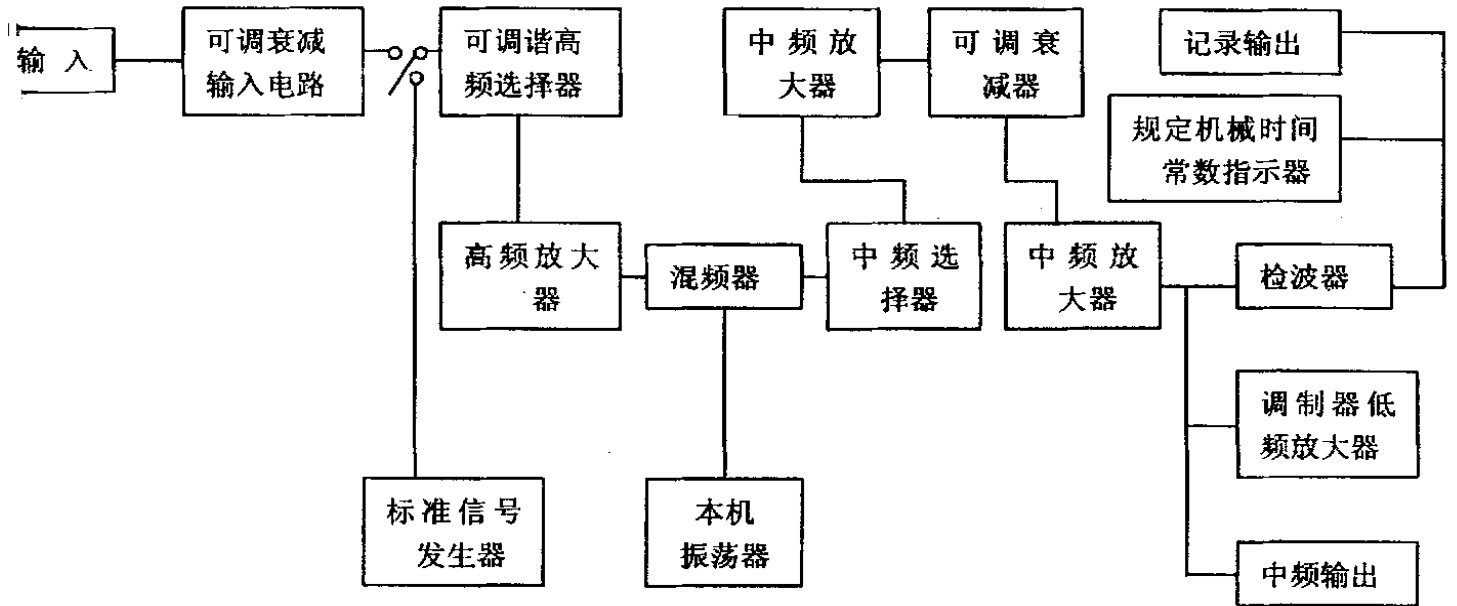


图 4-2 测量接收机框图

从图 4-2 可以看出，测量接收机实际上是带高频选频放大的超外差接收机，其灵敏度可通过输入回路的可调衰减器来调节，保证仪器工作在正常范围。由于输入常常是宽频谱信号，用可调谐高频选择器对输入信号进行预选，可以改善混频器的工作状况。中频放大器和中频选择器用来确定仪器的通频带，并对信号进行功率放大。

按 CISPR 规定，测量接收机应有四种基本检波方式：峰值检波，准峰值检波（这两种检波方式主要用于脉冲干扰测量），平均值检波（主要用于连续波测量），有效值检波（用于随机干扰测量）。

1、准峰值检波

由于大多数电磁干扰都是脉冲干扰，它们对听觉影响的客观效果是随着重复频率的增高而增大的，具有特定时间常数的准峰值检波器的输出特性，可以近似反映这种影响，因此在无线电广播业务的保护中，具有准峰值检波器的电磁干扰测量仪器应用最广。而 CISPR 的宗旨之一是保护无线电广播。所以 CISPR 推荐的电磁兼容性规范采用准峰值检波，并延续至今。由于准峰值检波既要反映干扰信号的幅度，又要反映它的时间分布，因此其充电时间常数比峰值检波器大，而放电时间常数比峰值检波器小，对不同频段应有不同的充、放电时间常数。在脉冲重复频率大于 10KHz，其测量结果与峰值测量相近。

2、峰值检波

随着科学技术的发展，瞬变及重复频率很低的脉冲已成为主要的干扰源之一。现在，对这种干扰源有响应的敏感设备（如计算机、电视、雷达等）的应用愈来愈广泛，仅用准峰值检波器已不能客观评价上述干扰的特性。对于孤立脉冲或重复频率很低的脉冲进行检测，峰值检波是很理想的一种方式。由于峰值检波是要测量出干扰信号包络的最大值，故它只取决于信号的幅度，与时间无关，其输出不能反映干扰脉冲重复频率的变化，其充电时间常数 T_E 要足够小，放电时间常数 T_0 要足够大，通常 T_E/T_0 为百万分之一。

3、平均值检波

主要用来测量窄带的连续波、调谐波干扰。它取包络在一段时间内的平均值，其充电时间常数相同，并取决于按中频放大带宽所容许的包络变化。

4、有效值检波（又称均方根值检波）

在环境探测中，干扰经常由许多独立的脉冲源产生，而且往往是随机的，如果干扰源的频谱是均匀带宽的，产生的时间响应在中频放大器中重叠，则测得的有效值和平均值电平近似地随带宽平方根的变化而变化。如果时间响应不重叠，则平均值不受带宽影响，而有效值指示仍然随带宽的平方根变化，所以在测量电磁干扰对通讯的影响时，最好使用均方根检波器。

综上所述，选用哪种检波器取决于被测干扰源的性质及所要保护的对象，对于同一干扰用不同检波器测得的值是不同的，但将测量数据通过转换后，仍可得出一致的结果。有些测量接收机只有峰值或准峰值接收机，此时只需通过准峰值或峰值转换器转换，就能满足不同的测量要求。

由于各种干扰测量的周期、强度、波形等差异很大，所以各种测量接收机的通频带、线性度、检波回路的充放电时间常数，指示电表的机械时间常数的差异对指示读数有很大影响。由于各国规定的测量接收机规格不一，测量结果无法比较。为此 CISPR 对上述基本特性做了明确规定。表 4-1 为 GB6113《电磁干扰测量仪》规定的准峰值电磁干扰测量仪的

基本特性，因此在进行电磁兼容性试验之前，应选用合乎规范的仪器，否则处理测量结果时将增加很多换算程序。

表 4-1 准峰值电磁干扰测量仪基本特性

基本特性	频率范围		
	9~150kHz	0.15~30MHz	30~1000MHz
准峰值电压表的充电时间常数	45ms	1ms	1ms
准峰值电压表的放电时间常数	500ms	160ms	550ms
临界阻尼指示器的机械时间常数	160ms	160ms	100ms
检波器前电路的过载系数	24dB	30dB	43.5dB
检波器与指数器之间直流放大电路的过载系数	6dB	12dB	6dB

4.2.2 频谱分析仪

频谱分析仪能够非常直观而迅速地对被测信号进行频谱分析和幅值测量，在电磁兼容性试验中获得了广泛应用。

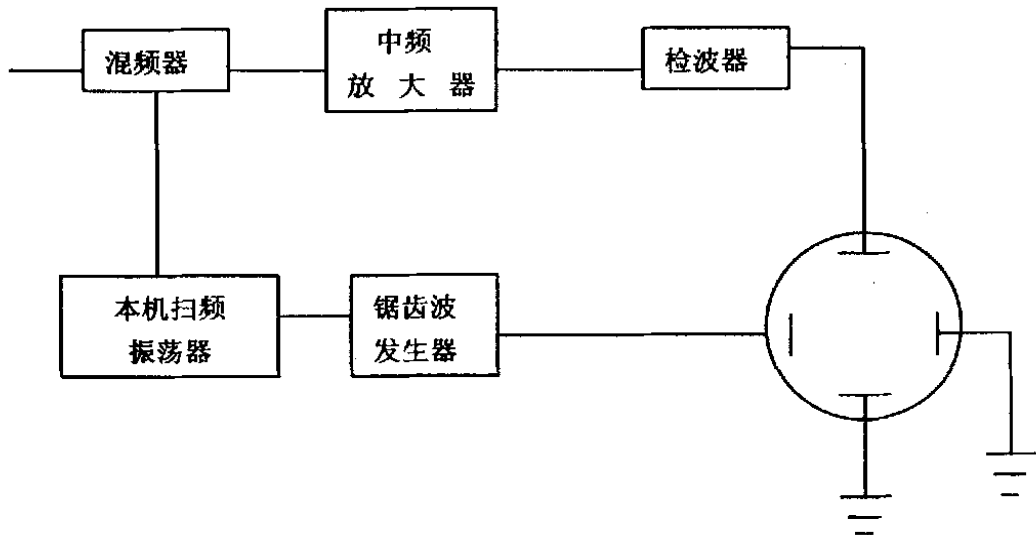


图 4-3 频谱分析仪框图

图 4-3 是频谱分析仪的框图，它是一种自动调谐的外差式波形分析仪，它的本机扫频

图 4-3 是频谱分析仪的框图，它是一种自动调谐的外差式波形分析仪，它的本机扫频振荡器是电压调谐振荡器，由控制扫描用的锯齿波电压来控制其振荡频率，对于本机振荡器的每一个谐振频率，经过混频和中频放大器的选通作用，在检波器的输出端得到输入信号中该对应频率的分量，这样就可连续得到输入信号中与本振扫频范围内各频率相对应的谐波分量值，并通过示波器显示出被测信号在扫频范围内的频谱图。

由于测量时，电磁干扰信号电平强弱差别很大，容易使频谱仪的输入级过载，而且由于频谱仪的检波方式为峰值检波，因而满足军标要求，但不满足 CISPR 及我国有关电磁兼容性国家标准规定的极限值测量。为此需要在输入端配置射频预选器以防止混频器饱和，改善频谱分析仪的信噪比，提高整机的灵敏度；在中频输出端配置准峰值转换器或检波器，适应非军标要求的标准所规定的极限值测量(图 4-4)将系统配上计算机及相应的软件，可进行自动测量，从而大大提高了测试速度、精度及测量结果的复现性。



图 4-4 频谱分析仪/电磁干扰接收机组成

4.2.3 亥姆霍兹线圈

在进行设备的敏感度测试和屏蔽体的磁屏蔽效能测试时，鉴于实际环境磁场的复杂性，一般将设备及屏蔽体置于模拟场中进行测量，亥姆霍兹线圈是一种较为理想的低频模拟磁场装置，其特点是可在较大区域内产生均匀磁场，测量时便于操作观察。

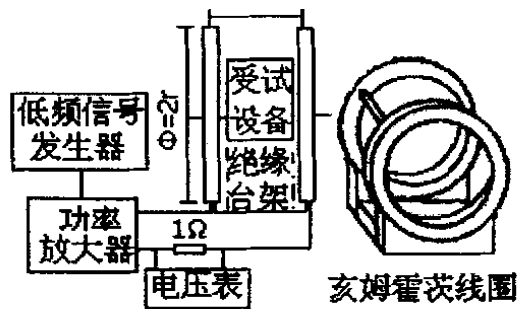


图 4-5 亥姆霍兹线圈

亥姆霍兹线圈由一对同轴放置的线圈组成，见图 4-5 两圆形线圈间距为 r （圆形线圈的半径），对于方形线圈，其间距取 $L/2$ （ L 为方形线圈的边长）。两线圈产生的磁场同向叠加，就在中央形成一个相当均匀的磁场。根据毕奥—沙伐定理，圆形和方形亥姆霍兹线圈中心（同轴线上间距的一半处）的感应强度分别为

$$B = \frac{9In}{r} \times 10^5 \text{ pT} \quad (4.2)$$

式中， n 为单个线圈的匝数， I 为单个线圈中通过的电流（A）， r 为圆形线圈的半径（m）。

和

$$B = \frac{17.06nI}{l} \times 10^5 \text{ pT} \quad (4.3)$$

式中， n 为单个线圈的匝数， I 为单个线圈中通过的电流（A）， l 为方形线圈的边长（m）。

由于亥姆霍兹线圈在其同轴线附近所产生的磁场均匀度较好，因而要求线圈的尺寸（边长或直径）比受试设备最大轮廓尺寸至少大 2~3 倍，所以受线圈尺寸的限制，受试设备一般尺寸比较小。

4.2.4 平行线板

在进行设备的电场辐射敏感度试验时，需要均匀横电磁波的测量环境。利用平行板线，在其一端接相应的功率信号源，另一端接匹配负载，可在两平行板间产生横电磁波的行波状态（见图 4-6）。当两板间距为 d ，所加电压为 U 时，平行板间的电场强度为

$$E = \frac{U}{d} \quad (4.4)$$

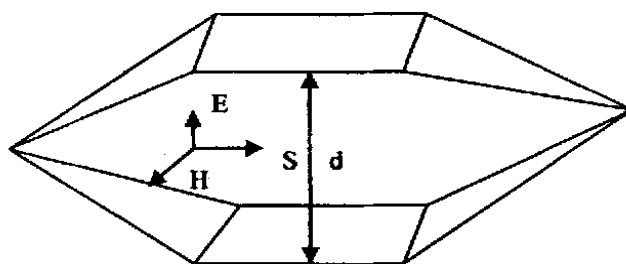


图 4-6 平行线板

平行线板的上限工作频率不仅与终端负载的匹配情况有关，而且取决于平行板之间的距离 d 。距离越大，上限工作频率越低。随频率上升，传输信号的 $\lambda/4$ 达到平板间距 d 时，平行板在其敞开的侧面将产生强烈辐射，以至于影响周围其它测量设备的工作，甚至危害试验人员的健康。因此，当其内部电场较强时，应将其放在电磁屏蔽室内。当频率进一步提高时，板间将出现高次模，使板间电磁场发生畸变，一般把出现高次模的频率定为平行线板的上限频率。

当受试设备置于平行板间时，原来的均匀电场将发生畸变，为此通常规定受试设备的体积应小于板间容积的 $1/3$ 。

与一般采用辐射天线对受试设备进行电场辐射敏感度试验相比，平行线板有下列优点：第一，可在宽频段范围内产生平面波场；第二，所有能量集中在平行板间，因而电磁能量利用率高，不需很大的激励功率源就可在板间产生高于 10^4V/m 的场强；第三，平行线板的造价与其它产生强场用以进行电磁敏感试验的方法和装置相比，造价较低。其主要缺点是：只适用于小型设备的试验，对周围的辐射较为严重，影响监测仪器的工作及操作人员的健康。这些缺点限制了应用，从80年代起，平行线板已逐渐被横电磁波室所取代，但在电磁脉冲研究中，仍将其作为场模拟装置。

4.2.5 横电磁波室

横电磁波室是一种由同轴线演变而来，内部能传输均匀横电磁波的矩形箱体。它是电子设备电场辐射敏感度试验的理想装置，除了可进行射频连续波敏感度、脉冲波敏感度试验外，还可用于测量电子设备所产生的辐射发射及作为对各种近场测量探头进行标定和校准的校准场源装置。

图4-7为横电磁波室的侧视图和俯视图。如图所示，横电磁波室由矩形外导体和平板中心导体（芯板）所构成，两端通过四棱锥过渡与精密 50Ω 的N型同轴连接器连接，芯板用绝缘支架固定，将横电磁波室分成两部分。受试设备的供电系统通过电源滤波器进入。

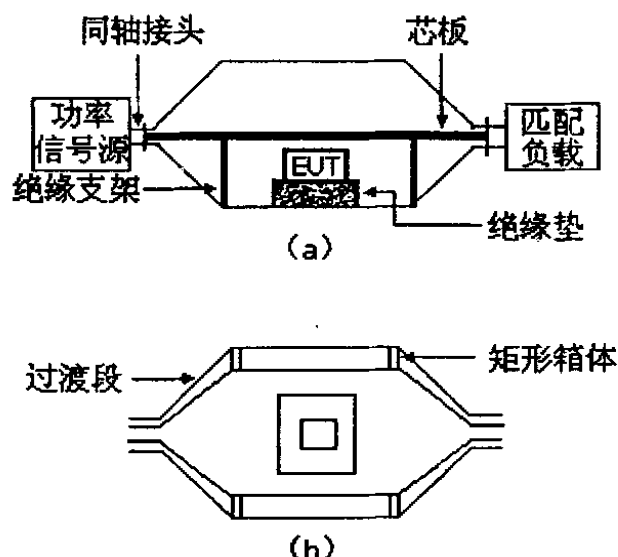


图 4-7 (a) 横电磁波室的侧视图 (b) 横电磁波室的俯视图

横电磁波室分为对称型和不对称型两类。不对称的芯板偏向一侧，这样在相同外形尺寸条件下，室内可利用的有效空间增大。对称型横磁波室有两种形式：正方形截面和矩形截面。两者相比，正方形横电磁波室的优点是在相同可用空间条件下，工作频率范围较宽，用料省，占地少。矩形横电磁波室的优点是腔体内的场强比较均匀。

与平行线板相类似，受试设备在横电磁波室内占有的空间一般不超过芯板到底板间距的三分之一和前后壁板间距的三分之一。

横电磁波室的上限频率依赖于小室的尺寸，如欲进一步增加小室的可用空间，其最高频率将有所下降（由于同轴线内形成的高次模与其结构尺寸有关）。

4.2.6 试验用天线

用电磁干扰测量仪、测量接收机或频谱分析仪测量场强时，必须借助各种探测天线把被测场强转换成电压。

电磁兼容性试验频率从几十赫兹直到几十千兆赫，在这么宽的频率范围内作辐射发射试验，所用天线种类繁多。另一方面，电磁兼容性试验中关心的是各种场强所造成的电磁效应，对其绝对值并不如场强计量或天线理论研究那么注重，干扰场的测量精度有 3dB 误差就已足够。

第五章 工作总结及展望

EMC 问题是一个跨学科的综合性研究课题，本文根据电力电子线路电磁干扰的特点，研究了高频开关电源中电磁干扰的产生机理、抑制方法、兼容性测量等三个方面的问题。

1、随着微电子技术的迅速发展，设备的小型化和数字化成为技术的发展主流，导致开关电源的应用日趋广泛。但开关电源固有的高频辐射及传导的电磁干扰发射对开关电源效率及使用的影响已成为人们关注的热点。本文对开关电源电磁干扰各种机理做了详细分析：

2、在分析电磁干扰产生机理的基础之上，提出了相应的抑制措施及需要注意的问题，如软开关、滤波、PCB 设计等技术，指出了一些人们认识的误区，如简单地认为软开关技术就可以降低 EMI 等；

3、关于电磁兼容性的测量，介绍了测量方法、内容、设备、规范以及要求等，对各种干扰源的干扰量、传输特性和敏感器的敏感度等也提出了可供参考的依据。

开关电源是当前市场上一种颇受欢迎的电源，具有体积小，效率高，规格多的优点。遗憾的是，目前许多电路仿真器的模型库中尚未考虑到集肤、邻近效应以及非线性和磁滞问题，且高频建模技术还不成熟，在设计上不能够完全实现从硬件平台到软件平台得转化。这都是今后工作应重点解决的问题。这个问题在产品阶段如果处理不好，将对开关电源乃至整个电子系统造成不利的影

参考文献

- [1] 区健昌。电子设备的电磁兼容性设计，北京：电子工业出版社，2003
- [2] 周志敏，周纪海。开关电源实用技术与应用。北京：人民邮电出版社，2003
- [3] 高攸刚。展望 21 世纪的环境电磁学及电场兼容技术，第五届全国电磁兼容会议，北京，1999 年 3 月
- [4] 刘鹏程 邱扬。电磁兼容原理及技术，北京：高等教育出版社，1993 年 9 月，p10~p11
- [5] 钱照明，袁义生。开关电源 EMI 设计研究现状及发展，电源技术，2003 年 4 月
- [6] 吴昕。高频开关电源电磁干扰及其抑制方法的研究，浙江大学出版社，1999 年 8 月
- [7] CISPR22 International Electromagnetic Commission,Limics and methods of measurement of radio disturbance characteristics of information technology equipment,1993
- [8] A.I.Maddocks,Recent Development in European EMC Standards,Proceeding of 9th Internation Conference on Electronmagnetic Compatibility,1994,pp.168~173
- [9] 邓重一。高频开关电源设计中的电磁兼容性问题研究，电源开关技术，2005 年 11 月
- [10] 刘胜利。现在高频开关电源实用技术，高等教育出版社，2001 年 9 月
- [11] 王会立。开关电源的电磁兼容设计，电源技术应用，2003 年 4 月，P20~P23
- [12] 原田耕介。开关电源手册。耿文学译。北京：机械工业出版社，2004
- [13] Leopoldo R,Simone B,Giorgio S.Conducted EMI Issues in A 600 W Single-Phase Boost PFC Design.IEEE Trans.on Power Electronics,2000,p578~p585
- [14] 杨旭。开关电源技术，北京：机械工业出版社，2003 年 11 月
- [15] 邢岩。高频功率开关变换技术，北京：机械工业出版社，2005 年 5 月
- [16] 王剑乔等，抑制开关电源传到发射的滤波措施研究，电力科学与工程，2004 年 3 月
- [17] 王兆安，黄俊。电子电力技术，机械工业出版社，2003 年 2 月
- [18] 胡学芝。软开关技术综述，电工技术，2002 年 5 月
- [19] 王英剑，常慧敏，新型开关电源实用技术，北京：电子工业出版社，1999 年
- [20] D.B.Zhang, D.Y.Chen and EC Lee,An Experimental Comparison of Conducted EMI Emissions between a Zero-Voltage Transition Circuit and a Hard Switching Circuit,IEEE PESC'96,pp1992~1997
- [21] P.Calceira,R.Liu,D.Dai and W.J.Gu,Comperision of EMI Performance of PWM and Resonant Power Converters,IEEE PESC'93,pp134~140
- [22] L.Hsiu,M.Goldman and A.F.Wituoski ect,aj,Characterization and Comparision of Noise Generation for

Quasi-Resonant and Pulse Width Modulated Converts,IEEE trans,On Power Eletronics,Vol,9,No,4,July 1994,pp425~431

- [23] Y.Tang,H,Zhu,B.Song and C.Chen,EMI Experimental Comparison of PWM inverters between Hard and Soft-Switching Techniques,16 Annual VPEC Seminar,pp247~253. September.1998
- [24] 樊昌信等,通信原理,国防工业出版社,1995
- [25] 孙慧闲,王群.开关电源电磁干扰的抑制措施,低压电器.2005年8月
- [26] 李意等,开关电源电磁干扰抑制的频率控制方法比较,电工技术,2004年4月
- [27] 钱照明,袁义生,开关电源EMI设计研究现状及发展,电源技术,2003年4月
- [28] 吴昕,高频开关电源电磁干扰及其抑制方法的研究,浙江大学出版社,1999年8月
- [29] 茹东生,姜茂仁.开关电源抑制传导性电磁干扰的设计与仿真,中国测试技术,2005年7月
- [30] 沙占有.EMI滤波器的设计原理,电子技术应用,2005年5月
- [31] 李云.电源噪声滤波器的基本原理与应用方法,电源技术,2002年6月
- [32] 赵渝青.开关电源电磁干扰滤波器,电气时代,2005年1月
- [33] 璩克旺.陶生桂.开关电源的抗干扰技术.电工技术杂志,2003年10月
- [34] Ning,D, Lee F C.Characterization and Analysis of Parameters and Their Effects in Power Electronics Circuit.IEEE PESC'1996.1370~1375.
- [35] Zhang W,Zhang M T, Lee F C.Conducted EMI Analysis of A Boost PFC Circuit.IEEE PESC'1997.1997.223~229
- [36] 吴昕,钱照明.开关电源印刷电路板电磁兼容问题的研究.电子与信息学报,2001年2月
- [37] 孙慧闲,王群.开关电源电磁干扰的抑制措施,低压电器.2005年8月
- [38] Brown Marty.Power Supply Cookbook.2001
- [39] 沙占有.EMI滤波器的设计原理,电子技术应用,2001年5月
- [40] 姚淳,郭祥玉.电磁屏蔽技术探讨,电源技术应用,2004年1月
- [41] 郭银景.电磁兼容原理及应用教程,清华大学出版社,2004年4月
- [42] 阎秀生.电磁兼容的概念及设计方法.电源技术应用,2003年4月
- [43] 田界荣.开关电源电磁干扰的抑制,现代电子技术,2005年8月
- [44] 刘鹏程 邱扬.电磁兼容原理及技术,北京:高等教育出版社,1993年9月
- [45] 朱满座、刘鹏程等,电磁兼容测量方法分析,天线及电磁兼容测量会议论文集,1992年
- [46] 刘鹏程, Tempest 技术的发展与应用,《电子科技杂志》,1993年

[47] 刘鹏程, 电磁兼容学科发展及研究内容, 《西部电子》, 1993 年

[48] 刘鹏程、金元松, “加强 E M C 教育是我国科技发展的需要”, 《电子高等教育》, 1993 年第二期

[49] 刘鹏程, “电磁干扰与电磁环境”, 《西部电子》, 1993 年

致 谢

在我的毕业论文完成之际，我要衷心感谢我的导师杨建红教授。本文的研究始终得到了杨建红教授的精心指导，从选题到顺利完成与导师的悉心指导是密不可分的。且在我攻读研究生学位的二年里，杨老师严谨求实的治学风格、深邃独到的见解和精深渊博的专业知识，给我极大的启迪。他不仅为指导我的学习和科研工作倾注了大量的心血，还对我的生活给予了极大的关心，对我的工作给予极大的理解，对我的困难给予了极大的帮助。他对事业孜孜以求的精神、对科学一丝不苟的执著，对生活积极进取的态度深深的感染着我，使我的人格受到了极大的洗礼。在此，谨向恩师表示深深的敬意和衷心的感谢！

在此还要感谢李思渊教授、张福甲教授、何山虎高级工程师、刘肃教授平日的督促和关心。

在完成论文的过程中对汪再兴、吴节险、闫锐、孙硕等同学的帮助表示感谢。

非常感谢我的父母、哥哥以及单位的领导对我学业的理解、支持，以及生活上无微不至的关心。

最后，对参加本论文评审和答辩的各位老师和专家们致以诚挚的谢意！