

◆ 极光

应用篇

零起点

学开关电源设计

◆ 周志敏 纪爱华 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

零起点学开关电源设计

(应用篇)

周志敏 纪爱华 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书为《零起点学开关电源设计》系列图书的“应用篇”，在内容的编写上以开关电源设计、系统电源设计及单片开关电源设计实例为核心。在写作上结合了国内外开关电源、系统电源及单片开关电源的应用和发展，全面系统地阐述了开关电源、系统电源和单片开关电源的最新应用技术。

全书共 5 章，重点讲述了开关电源的电磁兼容设计技术、开关电源 PCB 设计技术、开关电源典型设计、系统电源设计及解决方案、单片开关电源实用电路设计实例等内容。本书题材新颖实用，内容丰富，深入浅出，文字通俗，具有很高的实用价值。

本书可供电信、信息、航天、军事及家电等领域从事开关电源开发、设计和应用的工程技术人员阅读，也可供高等院校及职业技术学院相关专业的师生参考。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

零起点学开关电源设计. 应用篇/周志敏, 纪爱华编著. —北京: 电子工业出版社, 2014.1
ISBN 978-7-121-22046-3

I. ①零… II. ①周… ②纪… III. ①开关电源—设计 IV. ①TN86

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 284463 号

策划编辑: 富 军

责任编辑: 李 蕊

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 19.75 字数: 505.6 千字

印 次: 2014 年 1 月第 1 次印刷

印 数: 3 000 册 定价: 49.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

随着电子技术的高速发展，电子系统的应用领域越来越广泛，电子设备的种类也越来越多，电子设备与人们的工作、生活关系密切，而电子设备都离不开可靠的电源，其性能的优劣直接关系到整个电子系统的安全性和可靠性。电子设备的小型化和低成本化使电源以轻、薄、小和高效率为主要发展方向，对电源的要求更加灵活多样。

目前，我国通信、信息、家电、国防等领域的电子设备普遍采用开关电源，开关电源现已成为具有发展前景的一项高新技术产品。开关电源具有高集成度、高性能比、低损耗、高效率、电路简洁、工作更加可靠、最佳的性能指标等特点，从而得到广泛应用，开关电源的开发、研制和生产已成为发展前景十分诱人的朝阳产业。

本书结合国内外开关电源技术的发展动向，集开关电源设计、系统电源设计、单片开关电源设计实例于一体，重点介绍了开关电源的电磁兼容设计技术、PCB 设计技术、系统电源的应用及单片开关电源设计实例。本书尽量做到有针对性和实用性，力求做到通俗易懂并结合实际，使本书具有技术前沿、新颖实用等特点，是从事开关电源设计和应用的工程技术人员的必备参考书。

参加本书编写工作的有周志敏、纪爱华、周纪海、纪达奇、刘建秀、顾发娥、刘淑芬、纪达安、纪和平等。本书在写作过程中，无论从资料的收集还是在技术信息交流上，都得到了国内的专业学者和同行及开关电源制造商的大力支持，在此表示衷心的感谢。

由于时间短，水平有限，难免有错误之处，敬请读者批评指正。

编著者

目 录

第 1 章 开关电源的电磁兼容设计技术	1
1.1 开关电源的电磁兼容性	1
1.1.1 电磁兼容研究热点及设计要点	1
1.1.2 开关电源电磁兼容性测试	6
1.2 开关电源可靠性设计	12
1.2.1 开关电源电气可靠性设计	12
1.2.2 开关电源安全性设计	14
1.3 开关电源热设计	18
1.3.1 开关电源热设计原则及功率密度	18
1.3.2 热设计中常用的几种方法	23
1.4 开关电源电磁兼容设计	27
1.4.1 开关电源中的电磁干扰源	27
1.4.2 开关电源中 EMI 的传播方式	34
1.4.3 开关电源 EMI 抑制技术	41
1.4.4 开关电源 EMC 新技术	51
1.4.5 开关电源电路的 EMC 设计	55
第 2 章 开关电源 PCB 设计技术	59
2.1 PCB 技术	59
2.1.1 PCB 的功能与特点	59
2.1.2 PCB 的分类	61
2.2 PCB 设计	62
2.2.1 PCB 设计流程	62
2.2.2 PCB 布局设计	64
2.2.3 飞线与 PCB 布局	67
2.2.4 PCB 布线设计	68
2.2.5 PCB 互连设计	79
2.2.6 PCB 焊盘	80
2.3 PCB 的可靠性设计	90
2.3.1 地线设计	90
2.3.2 PCB 抗干扰设计	93
2.3.3 开关电源 PCB EMC 辅助设计的软件方法	102
2.4 PCB 产品质量和可靠性评价	105

第3章 开关电源典型设计	108
3.1 小功率开关电源的设计.....	108
3.1.1 实用小功率开关电源的设计.....	108
3.1.2 120W/24V 开关电源模块的电路设计.....	113
3.1.3 大功率高稳定度开关电源设计.....	115
3.2 VICORDC/DC 模块应用电路设计.....	119
3.2.1 VICORDC/DC 模块.....	119
3.2.2 模块化逆变电源的设计.....	132
3.2.3 机载高可靠性开关电源的设计.....	136
3.2.4 机载三相交流稳压电源的设计.....	143
3.3 卫星用多输出精密直流稳压电源及高速通信电源设计.....	146
3.3.1 卫星用多输出精密直流稳压电源设计.....	146
3.3.2 高速通信电源设计.....	153
第4章 系统电源设计及解决方案	157
4.1 系统电源应用.....	157
4.1.1 系统电源设计.....	157
4.1.2 系统电源合理应用.....	159
4.1.3 电源的测试.....	173
4.2 系统电源解决方案.....	176
4.2.1 笔记本电脑 AC 适配器.....	176
4.2.2 笔记本电脑微处理器电源解决方案.....	179
4.2.3 微处理器内核电源解决方案.....	185
4.2.4 DSP 应用系统电源解决方案.....	192
4.2.5 USB 外部设备电源设计.....	195
4.2.6 通信系统的低电压、大电流电源解决方案.....	198
4.2.7 移动电话低压芯片组电源解决方案.....	202
4.2.8 白光 LED 驱动电源解决方案.....	205
第5章 单片开关电源实用电路设计实例	208
5.1 AC/DC 开关稳压电源实用电路设计实例.....	208
5.1.1 多路输出开关电源实用电路设计实例.....	208
5.1.2 7.5W(峰值 13W) 宽范围多路输出电源实用电路设计实例.....	214
5.1.3 25W(峰值 28W) 多路输出电源实用电路设计实例.....	216
5.1.4 9.65W 双输出电源实用电路设计实例.....	216
5.1.5 57W/230VAC 多输出电源实用电路设计实例.....	219
5.1.6 17.7W(峰值 29.7W) 多路输出电源实用电路设计实例.....	219
5.1.7 1.2W 非隔离双输出电源实用电路设计实例.....	222
5.1.8 35W 反激式开关电源实用电路设计实例.....	223
5.1.9 5V/0.8A 精密开关电源实用电路设计实例.....	225
5.1.10 4W/5V 开关型稳压电源实用电路设计实例.....	226

5.2	电源适配器实用电路设计实例	227
5.2.1	15W/12V 适配器实用电路设计实例	227
5.2.2	4.56W 适配器实用电路设计实例	229
5.2.3	2W 低成本恒压适配器实用电路设计实例	230
5.2.4	12W 通用输入恒压适配器实用电路设计实例	231
5.2.5	2.75W CV/CC 充电器/适配器实用电路设计实例	233
5.2.6	1.5W CV/CC 充电器/适配器实用电路设计实例	234
5.2.7	45W 通用输入的 LCD 显示器外部适配器实用电路设计实例	236
5.2.8	70W/19V 笔记本电脑外部适配器实用电路设计实例	238
5.2.9	10W 便携式音频播放器适配器实用电路设计实例	240
5.2.10	1.5W CV/CC 充电器/适配器实用电路设计实例	240
5.2.11	2.5W 充电器/适配器实用电路设计实例	243
5.2.12	2.5W 稳压充电器/适配器实用电路设计实例	244
5.3	DC/DC 变换器实用电路设计实例	245
5.3.1	MAX1790DC/DC 变换器实用电路设计实例	245
5.3.2	LT3710 DC/DC 变换器实用电路设计实例	249
5.3.3	30W DC/DC 变换器实用电路设计实例	254
5.3.4	30W DC/DC 同步整流变换器实用电路设计实例	256
5.3.5	25W 反激式 DC/DC 变换器实用电路设计实例	258
5.3.6	5V/70W DC/DC 同步整流变换器实用电路设计实例	260
5.3.7	16.5W DC/DC 变换器实用电路设计实例	262
5.3.8	2.5V/20W DC/DC 同步整流变换器实用电路设计实例	262
5.3.9	5W 反激式 DC/DC 变换器实用电路设计实例	265
5.3.10	60W DC/DC 变换器实用电路设计实例	267
5.3.11	50W DC/DC 双输出变换器实用电路设计实例	269
5.3.12	19.2W DC/DC 变换器实用电路设计实例	271
5.3.13	60W DC/DC 变换器实用电路设计实例	273
5.3.14	15W 多输出 DC/DC 变换器实用电路设计实例	273
5.4	充电器实用电路设计实例	276
5.4.1	5W 高效率充电器实用电路设计实例	276
5.4.2	16W 宽电压输入铅酸电池充电器实用电路设计实例	278
5.4.3	1.75W 高效率充电器实用电路设计实例	280
5.4.4	4.56W CV/CC 充电器实用电路设计实例	282
5.4.5	2W 充电器实用电路设计实例	282
5.4.6	2.75W 高效率恒压/恒流输出 USB 充电器实用电路设计实例	285
5.4.7	3W 高效率恒压/恒流充电器实用电路设计实例	287
5.5	LED 驱动电路	288
5.5.1	无源 PFCLD 驱动电路	288
5.5.2	非隔离降压式 LED 驱动电路	290



5.5.3	0.5W 非隔离恒流 LED 驱动电路	292
5.5.4	带 PFC 电路的 20W LED 驱动电路	293
5.5.5	可调光 LED 驱动电路	295
5.5.6	高效 LED 驱动电路	298
5.5.7	14W 高效率 LED 驱动电路	298
5.5.8	隔离式、带功率因数校正（PFC）的 17W LED 驱动电路	301
5.5.9	1.25W 非隔离恒流 LED 驱动电路	303
参考文献		306

第 1 章 开关电源的电磁兼容设计技术



1.1 开关电源的电磁兼容性

1.1.1 电磁兼容研究热点及设计要点

1. 电磁兼容研究热点

电磁兼容学是一门新兴的跨学科的综合应用学科，作为边缘技术，它以电气和无线电技术的基本理论为基础，并涉及许多新的技术领域，如微波技术、微电子技术、计算机技术、通信和网络技术，以及新材料等。电磁兼容技术研究范围很广，几乎所有现代化工业领域，如电力、通信、交通、航天、军工、计算机和医疗等都必须解决电磁兼容问题。研究



研究
热点

的热点内容主要有：

- ① 电磁干扰源的特性及其传输特性。
- ② 电磁干扰的危害效应。
- ③ 电磁干扰的抑制技术。
- ④ 电磁频谱的利用和管理。
- ⑤ 电磁兼容性标准与规范。
- ⑥ 电磁兼容性的测量与试验技术。
- ⑦ 电磁泄漏与静电放电等。

电磁兼容学又是技术与管理并重的实用工程学，开展这样的工程，需要投入大量的人力和财力。国际标准化组织已经制定了 EMC 的有关标准和规范，我国在这方面的起步虽然较晚，但发展很快。随着市场经济的发展，我国要参与世界技术市场的竞争，进出口的电子产品都必须通过 EMC 检验。因此，我国政府和相关部门越来越关注 EMC 问题，不断制定有关的强制性贯彻标准。各部门和军兵种也都开始研究并建立了不同规模的 EMC 实验室和检测中心，促进了 EMC 技术的普及、推广和应用。

我国于 1998 年立法强制对六类进口电子产品（计算机、显示器、打印机、开关电源、电视机和音响）及通信终端产品进行 EMC 检测。1999 年，国家质量监督局发布了《EMC 认证管理办法》。我国电子技术标准化研究所 EMC 测试实验室被美国联邦通信委员会通过了 FCC 认可。从 2000 年 2 月 16 日起，出口美国的信息技术设备和发射及接收设备，由该实验室出具的数据将被美国直接接受。产品的 EMC 检测是实现电磁兼容不可缺少的技术手段，强制贯彻电磁兼容标准，则是保证产品质量和提高市场竞争力的先决条件。

电磁兼容的英文名称为 ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY，简称 EMC。所谓电磁兼容是指设备（分系统、系统）在共同的电磁环境中能一起执行各自功能的共存状态。这里包含两层意思：即电子设备在工作中产生的电磁要限制在一定水平内；另外，电子设备本身要有一定的抗干扰能力，这便是设备研制中所必须解决的兼容问题。电磁兼容技术涉及的频率范围宽达 0~400GHz，研究对象除传统设施外，还涉及芯片级，各类型舰船、航天飞机、洲际导弹，甚至整个地球的电磁环境。

电磁兼容技术又称环境电磁学，在开始的时候它仅考虑无线电广播带来的射频干扰。但当今电子产品的数量越来越多，各种电子设备发射功率越来越大，电子设备系统的灵敏度越来越高，并且接收微弱信号的能力越来越强，同时电子产品的频带也越来越宽，尺寸越来越小，相互影响也越来越大。因此，电磁干扰不再局限于辐射，还要考虑感应、耦合和传导等引起的电磁干扰，如电磁辐射对生物的危害、静电、雷电等都属于电磁兼容性范畴。但本节只讨论电子设备的系统、分系统的电磁兼容性问题。

电磁兼容三要素是：干扰源、耦合通路和敏感体。切断以上任何一项都可解决电磁兼容问题。解决电磁兼容问题常用的方法主要有屏蔽、接地和滤波，但是这三者或者这三者以外的方案有着必然的联系。

开关电源因工作在高电压大电流的工作状态下，其引起电磁兼容性问题的原因是相当复杂的。从整机的电磁性来讲，主要有共阻抗耦合、线间耦合、电场耦合、磁场耦合、电磁波耦合几种。共阻抗耦合主要是干扰源与受干扰体在电气上存在共同的阻抗，通过该阻抗使干扰信号进入受干扰对象。线间耦合主要是产生干扰电压及干扰电流的导线或 PCB 线，因并行布线而产生的相互耦合。电场耦合主要是由于电位差的存在而产生的感应电场对受干扰体产生的耦合。磁场耦合主要是在大电流的脉冲电源线附近产生的低频磁场对干扰对象产生的耦合。而电磁波耦合主要是由于脉动的电压或电流产生的高频电磁波通过空间向外辐射，对相应的受干扰体产生的耦合。实际上，每一种耦合方式是不能严格区分的，只是侧重点不同而已。

在开关电源中，开关管在很高的电压下以高频开关方式工作，开关电压及开关电流均接近方波。通过频谱分析可知，方波信号含有丰富的高次谐波，该高次谐波的频谱可达方波频率的 1000 次以上。同时，由于电源变压器的漏电感及分布电容，以及主功率开关器件的工作状态非理想，因此在高频开或关时常产生高频高压的尖峰谐波振荡，该谐波振荡产生的高次谐波，通过开关管与散热器间的分布电容传入内部电路，或通过散热器及变压器向空间辐射。用于整流及续流的开关二极管也是产生高频干扰的一个重要原因。因整流及续流二极管工作在高频开关状态，由于二极管的引线寄生电感、结电容的存在及反向恢复电流的影响，使之工作在很高的电压及电流变化率下，且产生高频振荡。因整流及续流二极管一般离电源输出线较近，其产生的高频干扰最容易通过直流输出线传出。开关电源为了提高功率因数，均采用了有源功率因数校正电路。同时，为了提高电路的效率及可靠性，减小功率器件的电应力，大量地采用了软开关技术。该技术极大地降低了开关器件所产生的电磁干扰。但是，软开关无损吸收电路多数利用 L、C 进行能量转移，利用二极管的单向导电性能实现能量的单向转换，因而，该谐振电路中的二极管成为电磁干扰的一大干扰源。

在开关电源中，一般利用储能电感及电容器组成 L、C 滤波电路，实现对差模及共模干扰信号的滤波。由于电感线圈的分布电容，导致了电感线圈的自谐振频率降低，从而使大量的高频干扰信号穿过电感线圈，沿交流电源线或直流输出线向外传播。滤波电容器随着干扰

信号频率的上升, 由于引线电感的作用, 将导致电容量及滤波效果不断下降, 甚至会导致电容器参数的改变, 这也是产生电磁干扰的一个原因。

开关电源由于功率密度高、智能化程度高, 带 MCU 微处理器, 因而, 从高至近千伏的电压信号到低至几伏的电压信号, 从高频的数字信号至低频的模拟信号, 电源内部的场分布相当复杂。PCB 布线不合理、结构设计不合理、电源线输入滤波不合理、输入/输出电源线布线不合理, 以及 CPU、检测电路的设计不合理, 均会导致系统工作的不稳定或产生静电放电、电快速瞬变脉冲群、雷击、浪涌及传导干扰、辐射干扰和辐射电磁场抗扰性能力的降低。

2. 电磁兼容设计要点

电子、电气产品电磁兼容设计的目的是使产品在预期的电磁环境中能正常工作、无性能降低或故障, 并具有对电磁环境中的任何事物不构成电磁干扰的能力。电磁兼容设计的基本方法是指标分配和功能分块设计。也就是说, 首先要根据有关标准和规范, 把整个产品的电磁兼容性指标要求细分成产品级、模块级、电路级、元器件级的指标要求; 然后, 按照各级需要实现的功能要求和电磁兼容性指标要求, 逐级进行设计, 采取一定的防护措施等。做好产品的电磁兼容设计应注意以下一些问题。

(1) 尽早进行电磁兼容设计

经证明, 如果在产品开发阶段解决兼容性问题所需费用为 1, 那么等到定型后再想办法解决, 费用将增加 10 倍; 若到批量生产后再解决, 费用将增加 100 倍; 若到用户发现问题后再解决, 费用可能到达 1000 倍。这就是说, 如果在产品的开发阶段同时进行电磁兼容设计, 可以把 80%~90% 的电磁兼容性问题在产品定型之前解决。那种不顾电磁兼容性, 只按常规进行产品设计, 然后对样品进行电磁兼容技术测试, 发现问题再进行补救的做法, 不但在技术上会造成很大问题, 而且还会造成人力、财力的极大浪费, 这是一种非常冒险的做法。所以, 对于任何一种产品, 尽早进行电磁兼容设计都是非常必要的。

(2) 有源器件选择与电子电路分析

在完成产品的电路功能设计后, 应对各有源器件和电子电路进行仔细分析, 特别注意分析那些容易产生干扰或容易受到干扰的器件和电路。一般来说, 高速逻辑电路、高速时钟电路、视频电路和一些含有电接点的电器等, 都是潜在的电磁干扰源, 这些电路及微处理器、低电平模拟电路等也很容易被干扰而产生误动作。组合逻辑电路、线性电源及功率放大器等, 则不易受到干扰的影响。

模拟电路具有一定的接收频带宽度, 如果电磁干扰的有效频带全部或部分落在模拟电路的接收带宽内, 则干扰将被接收并叠加在有用信号上, 与之一起进入模拟电路。当干扰与有用信号相比足够大时, 就会影响设备的正常工作。一些频带宽度达几兆赫的视频电路通常还同时成为干扰源; 模拟电路的高频振荡也将成为干扰源, 因此要正确选择相位和反馈, 以避免振荡。

数字电路工作在脉冲状态, 其高频分量可延伸到数百兆赫以上。另一方面, 外来干扰脉冲很容易使数字电路误触发。所以, 数字电路既是干扰源, 又容易受到干扰。选用较低的脉冲重复频率和较慢的上升/下降沿, 将降低数字电路产生的电磁干扰。只有当干扰脉冲的强度超过一定容许程度后, 才能使数字电路误触发, 这种“容许程度”就是敏感度门限, 包括直流噪声容限、交流噪声容限和噪声能量容限。CMOS 和 HTL 电路具有高的噪声容限, 应

优先选择使用。

应对有源器件的电磁干扰发射特性和敏感特性进行筛选，并对电子电路进行改进。还应对干扰源电路、易受干扰影响的电路进行分类和集中，以减小相互影响且便于采取防护措施。

（3）印制电路板设计

数字电路是一种最常见的宽带干扰源，而瞬态地电流和瞬态负载电流是传导干扰和辐射干扰的初始源，必须通过印制电路板设计予以减小。当数字电路工作时，其内部的门电路将发生高、低电压之间的转换，在转换的过程中，随着导通和截止状态的变换，会有电流从电源流入电路，或从电路流入地线，从而使电源线或地线上的电流产生不平衡而发生变化，这就是瞬态地电流，也称 ΔI 噪声电流。

由于电源线和地线存在一定电阻和电感，所以其阻抗是不可忽略的， ΔI 噪声电流将通过阻抗引发电源电压的波动，即 ΔI 噪声电压，严重时将干扰其他电路或芯片的工作。为此，应尽量减小印制电路板地线和电源线的引线电感，如果使用多层板中的一层作为电源层，则应另选合适的一层作为接地层， ΔI 噪声电压将减至最小。例如，当脉冲电流的变化为 30mA，前后沿为 3ns 时，噪声带宽可达 100MHz，对于长为 100mm、宽为 1mm、厚为 0.03mm 的地线，其阻抗可达 72.5Ω ， ΔI 噪声电压为 2.1V；若采用多层板的接地层，阻抗仅为 $3.72m\Omega$ ， ΔI 噪声电压可降至 $100\mu V$ ，对其他电路或芯片的工作几乎不发生影响。当然，如果在印制电路板上安装去耦电容来提供一个电流源，用来补偿数字电路工作时所产生的 ΔI 噪声电流，将会取得更好的效果。

瞬态负载电流是门电路驱动线对地电容和门电路输入电容在数字电路转换时所产生的瞬变电流，驱动线对地电容在单面板条件下为 $0.1\sim 0.3\text{ pF/cm}$ ，多层板为 $0.3\sim 1\text{ pF/cm}$ 。例如，脉冲前后沿为 3ns，电压变化为 3.5V，驱动线对地电容为 0.3 pF ，驱动容器输入端数为 5，单门输入电容为 5 pF ，则瞬态负载电流与瞬态地电流复合后构成传导干扰和辐射干扰，所以应尽量缩短驱动线的长度并选用单门输入电容小的门电路。

为了控制印制电路板的差模辐射，还应将信号和回线紧靠在一起，以减小信号路径形成的环路面积。因为信号环路的作用相当于辐射或接收磁场的环天线。共模辐射是由于接地面存在地电位造成的，这个地电位就是共模电压。当连接外部电缆时，电缆被共模电压激励形成共模辐射。控制共模辐射，首先要减小共模电压，如采用地线网络或接地平面，合理选择接地点；其次可采用板上滤波器或滤波器连接器滤除共模电流；也可以采用屏蔽电缆抑制共模辐射，但注意应使屏蔽层与屏蔽机箱构成完全的屏蔽体，这样才能取得较好的效果。当然，降低信号频率和电平也是减小辐射的重要措施。

为了减小印制电路板导线的辐射，设计时还应满足 $20H$ 准则，这里的 H 是双面板的厚度，即元件面应比接地面缩小 $20H$ 宽度，避免因边缘效应引起的辐射。高频或高速电路还应满足 $2W$ 准则，这里的 W 是印制电路板导线的宽度，即导线间距不小于两倍导线宽度，以减小串扰。此外，导线应短、宽、均匀、直，如遇转弯，应采用 45° 角，导线宽度不要突变，不要突然拐角。

应当注意，单面板虽然制造简单、装配方便，但只适用于一般电路要求，不适用于高组装密度或复杂电路的场合；而双面板适用于只要求中等组装密度的场合。因此，应当优选多层板，并将数字电路和模拟电路分别安排在不同层内，电源层应靠近接地层，干扰源应单独安排一层，并远离敏感电路，高速、高频器件应靠近印制电路板连接器。

有源器件的选择、电子电路分析及印刷电路板设计,是使产品达到电磁兼容性指标要求的关键,必须予以足够的重视。完成印制电路板设计后,应使板上各部分电路都能正常工作,相互之间不会产生干扰,并能减小电磁干扰发射,提高抗扰性。

(4) 地线设计

地线设计是最重要的设计,往往也是难度最大的一项设计。“地线”可以定义为信号流回源的低阻抗路径,它可以是专用的回线,也可以是接地平面,有时还可以是产品的金属外壳。理想的“地”应该是零电阻的实体,各接地点之间没有电位差。但在实际产品中,这种“地”是不存在的,任何“地”或“地线”既有电阻又有干扰,当有电流通过时,必然产生压降,使地线上的电位如同大海中的波浪一样,此起彼伏,而且并不是零电位,两个不同的接地点之间存在地电压。因此,当电路多点接地,并且电路间有信号联系时,将构成地环路干扰电压,并在信号连线中产生共模电流,叠加在有用信号上一起加到负载端。由于电路的不平衡性,每根连线上的电流不同,还会转换成差模干扰电压,对电路造成干扰。为了减小地环路干扰,一般可采用切断地环路的方法。例如,将一电路板的信号地线与机壳地绝缘,形成浮地。但这样做仅在低频时有效,当频率较高时,电路板与机壳之间的分布电容仍有可能构成地环路。此外,可以用平衡电路代替不平衡电路,使电路间信号连线上的共模电流相等,而不会转换成差模干扰电压。也可以在两个电路之间插入隔离变压器、共模扼流圈或光电耦合器等,均可取得一定效果。目前流行的方法是在屏蔽机壳上安装滤波器连接器,由于它的每根插针或每个插孔上都装有一个低通滤波器,因此可以有效地滤除因地环路干扰引起的高频共模电流。此外,在两个电路之间的连线或电缆上套一铁氧体磁环,也可以有效滤除

地线设计步骤



在大复杂的产品中,往往包含多种电子电路及各种电机、电器等干扰源,这时地线设计需按以下步骤进行:

- ① 分析产品内各电路单元的工作电平、信号类型等干扰特性和抗干扰能力。
- ② 将地线分类,如分为信号地线、干扰源地线、机壳地线等,信号地线还可分为模拟地线和数字地线等。
- ③ 画出总体布局图和地线系统图。

(5) 综合使用接地、屏蔽、滤波等措施

要有效地抑制电磁干扰,必须综合使用接地、屏蔽、滤波等措施。静电屏蔽的必要条件是屏蔽体接地,为了同时屏蔽磁场和高频电场,也应将屏蔽体接地。而电磁屏蔽则是用屏蔽体阻止电磁波在空间传播的一种措施,为了避免因电磁感应引起屏蔽效能下降,屏蔽体也应接地。同时,为了避免地电压在屏蔽体内造成干扰,还应采用单点接地。

屏蔽电缆是在绝缘导线外面再包一层金属薄膜,即屏蔽层。屏蔽层的屏蔽效能不是因反射和吸收得到的,而是由屏蔽层接地产生的。也就是说,屏蔽电缆的屏蔽层只有在接地以后才能起到屏蔽作用。例如,干扰源电路的导线对敏感电路的单芯屏蔽线的干扰,是通过干扰源导线与单芯屏蔽线屏蔽层间的耦合电容,以及屏蔽层与芯线间的耦合电容实现的。如果把屏蔽层接地,则干扰被短路至地,不能再耦合到芯线上,屏蔽层起到了屏蔽作用。但电缆用于磁场屏蔽时则要求屏蔽层两端接地。对于低频电路,可单端接地。例如,不接地的信号源通过电缆与公共端接地的放大器相连,则电缆屏蔽层应接在该公共端;当信号源公共端接

地，放大器不接地时，屏蔽层应接信号源公共端。对于高频电路，应双端接地，而且当电缆长于 $1/20$ 波长时，应每隔 $1/10$ 波长的距离接一次地。屏蔽层接地的方法是使屏蔽层与连接器屏蔽外壳呈 360° 良好焊接，避免“辫接”；电缆芯线和连接器插针或插孔焊接。同时，将连接器屏蔽外壳与屏蔽机壳严密相连，使屏蔽电缆成为屏蔽机箱的延伸，这样才能取得良好的屏蔽效果。由此可见，屏蔽与接地是有密切关系的。

大家知道，电磁干扰入侵屏蔽体的主要途径是 I/O 接口和电源线输入端。实际上，屏蔽体内部的电磁干扰可以耦合到连接 I/O 接口的导线或电缆及电源线上，并产生干扰电流，传导到屏蔽体外，造成传导干扰和辐射干扰。同样，外界电磁干扰也可以通过连接到 I/O 接口的导线或电缆及电源线传导进入屏蔽体，或通过电磁感应产生干扰电流进入屏蔽体，同时又对屏蔽体内造成辐射干扰。为了抑制干扰电流流入或流出，并使屏蔽体保持较高的屏蔽效能，可以在 I/O 接口和电源线输入端分别采用滤波器连接器或馈通滤波器。此外，屏蔽体上安装的蜂窝状通风板是由截止波导管组成的高通滤波器，当面板上需要穿过可调器件的非金属轴杆时，也可以将轴杆穿过截止波导管。用导电玻璃制成的屏蔽视窗，实质上也是高通滤波器。由此可见，为了保证屏蔽效能，屏蔽与滤波也是密切相关的。

除了特别说明允许不接地的滤波器外，各类滤波器都必须接地。因为滤波器中的共模旁路电容只在接地时才能起作用。特别是 π 形滤波器，当接地不良时，等于将电容和电感并联，完全失去了滤波作用。此外，安装滤波器时还应借助屏蔽将输入端和输出端完全隔离，这样才能发挥滤波器的抑制作用。所以，滤波与接地、屏蔽都有密切的关系。

1.1.2 开关电源电磁兼容性测试

EMC 设计与 EMC 测试是相辅相成的，EMC 设计的好坏是要通过 EMC 测试来衡量的。只有在产品的 EMC 设计和研制的全过程中进行 EMC 的兼容性预测和评估，才能及早发现可能存在的电磁干扰，并采取必要的抑制和防护措施，从而确保系统的电磁兼容性。否则，当产品定型或系统建成后再发现不兼容问题，则需在人力、物力上花很大的代价去修改设计或采用补救的措施。而且，这样往往难以彻底解决问题，会给系统的使用带来许多麻烦。

EMC 测试包括测试方法、测量仪器和试验场所，测试方法以各类标准为依据，测量仪器以频域为基础，试验场地是进行 EMC 测试的先决条件，也是衡量 EMC 工作水平的重要因素。EMC 测试受场地的影响很大，尤其以电磁辐射发射、辐射接收与辐射敏感度的测试对场地的要求最严格。目前，国内外常用的试验场地有开阔场、半电波暗室、屏蔽室和横电磁波小室等。

作为 EMC 测试的实验室大体有两种类型：一种是经过 EMC 权威机构审定和质量体系认证而且具有法定测试资格的综合性测试实验室，或称检测中心。它有进行传导干扰、传导敏感度及静电放电敏感度测试的屏蔽室，有进行辐射敏感度测试的消声屏蔽室，有用来进行辐射发射测试的开阔场地和配备齐全的测试与控制仪器设备。

另一种类型是根据本单位的实际需要和经费情况而建立的具有一定测试功能的 EMC 实验室。比起检测中心，这类测试实验室规模小，造价低，主要适用于预相容测试和 EMC 评估。

在测试仪器方面，以频谱分析仪为核心的自动检测系统，可以快捷、准确地提供 EMC

有关参数。新型的 EMC 扫描仪与频谱仪相结合, 实现了电磁辐射的可视化, 可对系统的单个元器件、PCB、整机与电缆等进行全方位的三维测试, 显示真实的电磁辐射状况。

EMC 测试必须依据 EMC 标准和规范给出的测试方法进行, 并以标准规定的极限值作为判据。对于预相容测试, 尽管不可能保证产品通过所有项目的标准测试, 但至少可以消除绝大部分的电磁干扰, 从而提高产品的可信度, 而且能够指出如何改进设计、抑制 EMI 发射。

1. 开关电源的无线电干扰特性测试

作为商品化的开关电源是国内首批被指定为需要进行电磁兼容认证的产品之一, 其考核重点是它在工作时对外的干扰发射 (包括传导和辐射两方面), 以及对电网供电质量产生的影响。

根据 GB 4824 标准对干扰源进行分类, 可划分为两组设备: 1 组设备是指为发挥其自身功能需要而包含专门产生或使用传导耦合射频能量的所有工、科、医设备; 2 组设备是指为材料处理、电火花腐蚀等功能需要而包含专门产生或使用电磁辐射能量的所有工、科、医设备。从上述定义看, 开关电源属于 1 组设备。

另外, GB 4824 标准根据设备所使用供电网络的不同, 又将其划分成两类: A 类设备是非家用、不直接连到住宅低压电网的所有设施的工、科、医设备; B 类设备是家用设施内和直接连到住宅低压电网设施的工、科、医设备。从上述分类看, 开关电源分属于这两大类设备。

表 1-1 是试验场内 1 组 A 类和 B 类设备的电源端传导干扰电压限值。表 1-2 则是试验场内 1 组 A 类和 B 类设备的辐射干扰限值。

表 1-1 电源端传导干扰电压限值

频段 MHz	1 组 A 类设备		1 组 B 类设备	
	准峰值 dB (μV)	平均值 dB (μV)	准峰值 dB (μV)	平均值 dB (μV)
0.15~0.5	79	66	66~56	56~46 (按频率对数线性减小)
0.5~5	73	60	56	46
5~30	73	60	60	50

表 1-2 辐射干扰限值

频段 MHz	1 组 A 类设备	1 组 B 类设备
	测量距离 30m dB ($\mu\text{V}/\text{m}$)	
0.15~30	考虑中	考虑中
30~230	30	30
230~1000	37	37

2. 测量仪器和测试场地

(1) 测量仪器

采用带有准峰值和平均值检波器的干扰接收机, 其性能应符合 CISPR16-1 或对应国标 GB/T6113 《无线电骚扰和抗扰度测量设备和测量方法规范》的要求。在标准涉及的频率范围

内一般要用两台不同频段的干扰接收机，频域范围分别是 9kHz~30MHz 和 30~1000MHz。

(2) 人工电源网络

在做电源端传导干扰电压测试时，应采用阻抗为 $50\Omega/50\mu\text{H}$ 的人工电源网络（V 形网络），其特性应符合 CISPR16-1 和 GB/T6113-101 的要求。人工电源网络的主要作用是使试品与电源之间有效间隔，同时又为试品提供稳定的高频阻抗。

(3) 天线

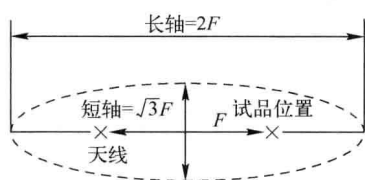
在 9kHz~30MHz 频段内采用具有屏蔽的环形天线。在 30~1000MHz 频段内采用平衡偶极子天线。

(4) 测试场地

① 9kHz~1000MHz 频段的辐射测试场地。辐射测试场地应该是一个空旷、平坦的场地，在其边界范围内无架空线，附近无反射结构物（如钢筋水泥建筑和高大树木等），而且具有足够大的尺寸，使天线、试品和反射结构物之间能充分分开的场地。满足标准的辐射测试场地应该是一个由长轴等于两倍焦距（ F ）、短轴等于 $\sqrt{3}$ 倍焦距的椭圆所包围的场地，如图 1-1 所示。试验时，试品和测量天线将分别处在两个焦点上。

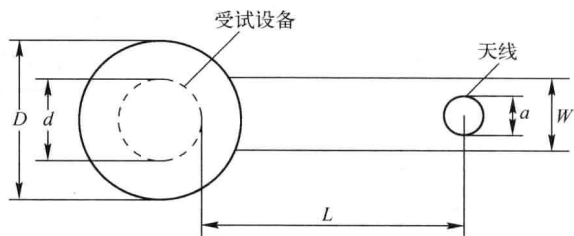
为了获得稳定的电波传输特性，必须有一个固定的、相当大的反射地面（或称接地平板）。反射面由金属材料制成，如钢板（包括镀锌钢板）和金属丝网等。板与板之间要用电焊连接，无大的漏缝或孔洞。金属网孔径的最大尺寸必须小于波长的 1/10（1000MHz 时，孔径应小于 3cm）。另外，场地表面必须平整，同时要考虑排水设施。图 1-2 是金属接地的最小尺寸。

② 传导干扰电压测试场地。传导干扰电压的测试可以在辐射试验场地内进行，也可以在屏蔽室内进行。



由椭圆决定的场地周界内的地面上不能有反射体

图 1-1 满足标准的辐射测试场地



$D=(d+2)m$, d 是试品最大尺寸; $W=(a+2)$, a 是天线最大尺寸; $L=10\text{m}$

图 1-2 金属接地的最小尺寸 D

3. 测试方法

(1) 环境电平

试品接入测量线路，但在未通电运行时，要用测量环境噪声电平的方法来决定试验环境的适用性，环境电平应至少比规定的限值低 6dB。如果环境电平和试品的辐射叠加后仍不超出规定限值，则试品被认为已满足规定限值。

在测量电源端传导干扰电压时，可在人工电源网络和供电电网之间接入一个适当的射频滤波器，以降低环境电平。但接入射频滤波器后，测量频率时人工电源网络的阻抗仍应满足规定要求。

在测量辐射干扰时，如果环境电平无法满足要求，则将测量天线向试品移近后再进行测试。

量,但限值不变,这实际上是对试品的要求更加严格了。

(2) 对试品布置的一般要求

试品的干扰电平是指试品在各种典型使用情况下,所取不同配置和试验布置时干扰值的最大值。在试验报告中应详细说明试验时试品的配置和试验布置。当试品由几个互连设备组成时,互连电缆的型号和长度应与试品技术要求中规定的相一致。如果电缆长度是可以改变的,则取在辐射试验中能产生最大辐射的长度。

(3) 9kHz~1MHz 的辐射测试

当试品放在试验转台上时,应使设备的辐射中心尽可能地接近转台的转动中心。试品和测量天线的距离是指转台转动轴线和测量天线之间的水平距离。

试验的转台如果是高出接地平板平面的转台,则一般不应高出该平面 0.5m;如果是与接地平板处在同一平面的转台,则转台平面一定是金属平面,且和接地平板有良好的电气连接。不管是哪一种转台,非落地式试品放在转台上时,离接地平板的高度应为 0.8m。当试品不放在转台上时,试品和测量天线之间的距离为试品边界和测量天线之间的最近水平距离。

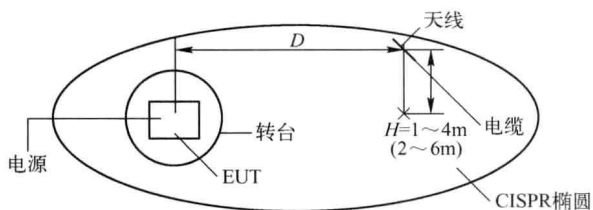
对于试品放在转台上的情况,测量天线处在水平和垂直两种极化状态,转台都应在所有角度上旋转,应在每个测量频率上记录其辐射干扰的最高电平。

当试品不放在转台上时,测量天线在水平和垂直两种极化状态下都应在地平面的各方位上选取不同测量位置。测量应在其最大辐射方向上进行,并在每个测量频率上记录其辐射干扰的最高电平。

测量中对天线的要求:在 30~80MHz 频段内,天线长度应等于 80MHz 的谐振长度;在 80~1000MHz 频段内,天线长度应等于测量频率的谐振长度。另外,应该用一个适当的变换装置使天线与馈线相匹配。还要配置一个平衡/不平衡变换器,实现与测量接收机的连接。

天线应能任意取向,分别测量其垂直极化和水平极化波分量。天线中心高度应能在 1~4m 内调节。天线离地的最近点不应小于 0.2m,以测出其最大值。

如果使用其他形式天线的测量结果与平衡偶极子天线的测量结果差值在 $\pm 2\text{dB}$ 以内,则也可用其他形式的天线。实用中常用的宽带天线是双锥天线(30~300MHz)和对数周期天线(300~1000MHz)。图 1-3 是辐射骚扰测量的典型布置。



D 表示转台几何中心与天线几何中心投影距离,

试品的几何中心要与转台轴心重合

图 1-3 辐射骚扰测量的典型布置

(4) 电源端传导干扰电压的测量

① 在辐射试验场上测量时,试品应处于和辐射测量相同的状态,且试品应处在比其边界至少扩展 0.5m 或最小尺寸为 $2\text{m} \times 2\text{m}$ 的金属接地平板上。

② 在屏蔽室内测量时,可用地面屏蔽层或任意一壁的屏蔽层作为接地平板。试验时,对于非落地试品应放在离地平板 0.4m 高的绝缘支架或台子上。落地试品则放在接地平板上,其接触处应相互绝缘或与正常使用时一致。所有试品离其他金属物体表面的距离应大于 0.8m。

人工电源网络的外表面和试品边界之间的最近距离应小于 0.8m,网络的



干扰电压测量