



开关电源设计与制作系列丛书

开关电源的电磁兼容性 设计、测试和典型案例

© 钱振宇 史建华 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

开关电源设计与制作系列丛书

开关电源的电磁兼容性 设计、测试和典型案例

钱振宇 史建华 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书以开关电源的电磁兼容性为主线,介绍了开关电源电磁兼容性的测试要求、与开关电源相关的测试项目和测试方法,着重介绍了开关电源的电磁兼容性设计、相应对策及18个典型案例。本书力求以实用为目的,在讲述中既有根据开关电源线路特点可以采取的骚扰抑制措施,也有根据单个对策器件的性能特点,讲解其在开关电源的使用中应当注意的地方。

本书适合开关电源的线路设计和工艺设计人员,电子设备的系统设计和研究人员,以及电子设备的现场应用和维护人员阅读参考。

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

开关电源的电磁兼容性设计、测试和典型案例 / 钱振宇,史建华编著. —北京:电子工业出版社,2011.7
(开关电源设计与制作系列丛书)

ISBN 978-7-121-13894-2

I. ①开… II ①钱… ②史… III. ①开关电源-电磁兼容性 IV ①TM91

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第120500号

策划编辑:张 榕

责任编辑:刘 凡

印 刷:

装 订: 二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: 787×1092 1/16 印张: 21.5 字数: 550千字

印 次: 2011年7月第1次印刷

印 数: 4000册 定价: 49.00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。

丛 书 序

开关电源是电源“家族”中的重要成员，是发展较快的前沿电源技术。在电源领域还有不间断电源、逆变器、变频器、交流电源、焊接电源、充电器、精密电源、工业电源、医用电源、军用电源、特种电源等，但几乎所有的电源迟早都会向开关电源靠拢。传统的电源技术正在让位于高频开关电源技术，传统应用领域逐渐被新的开关电源升级换代。新能源的开发利用又催生了绿色电能变换这一最能体现开关电源高频逆变核心技术应用的庞大的市场需求。越来越多的电源科技工作者、新电源产品的开发者、各行业传统电源产品面临升级换代的革新者都希望读到最新的有关开关电源的实用设计指导书。这正是编撰“开关电源设计与制作系列丛书”的初衷。丛书内容围绕实用设计展开，为设计者提供实用电路、关键技术、简明实用的设计方法、成功案例，将成为读者得心应手的案头书。

丛书目前包括《开关电源设计与制作基础》、《反激式开关电源原理与设计》、《开关电源设计与制作实践》、《开关电源模块化与数字化技术》、《开关电源的电磁兼容性设计、测试和典型案例》、《开关电源机算机仿真技术》。计划出版的还有《小型风力发电技术及应用》、《家用太阳能发电技术》、《快速充电技术与应用》、《防爆型开关电源设计与应用》、《小型逆变器设计及应用》等。丛书作者均为当今知名的电源技术领域专家。

辽宁工业大学陈永真教授编著的《反激式开关电源原理与设计》和中电公司刘胜利高级工程师编著的《开关电源设计与制作实践》详解了单端变换、双正激变换、半桥变换和全桥变换等常见的几种典型开关电源电路原理、设计和制作要领，均为作者长期工程实践的总结。

开关电源的数字化控制代表了开关电源技术一个重要的发展方向，其发展前景较之传统的模拟、开关模拟混合控制有划时代的突破。上海福基公司庚雷高级工程师、北京半导体器件五厂微电子研究所李龙文高级工程师和中电公司刘胜利高级工程师共同编著的《开关电源模块化与数字化技术》中，提供的是大家较为熟悉、应用较广的 Vicor 电源模块，其他优秀的模块电源存在类似的应用问题，可以相互借鉴。书中提供的资料可将初涉该领域的工程师们引领入门。

电磁兼容工程实用技术在开关电源中的地位极其重要，但往往在设计初期被忽视。中国航天科技集团第 206 研究所杨继深研究员在《开关电源的电磁兼容性设计、测试和典型案例》中，以生动的笔触进行了详尽的具有可操作性的介绍。

开关电源的现代设计离不开计算机仿真，然而借助现有的仿真软件针对开关电源的应用设计，系统而透彻的讲解并不多见。清华大学陈建业教授编著的《开关电源机算机仿真技术》能帮助读者在开关电源的计算机仿真技术方面打下坚实的基础。

《开关电源设计与制作基础》是清华大学蔡宣三教授生前遗墨，曾经在《电源世界》期刊由倪本来主编编辑连载。蔡宣三教授的关于开关电源基础原理的叙述是此类文字中的经典之一。蔡宣三教授曾担任中国电源学会理事长，对我国电源技术的发展做出了重大贡献。谨以此书纪念蔡宣三教授。

在能源短缺和环境污染的今天，绿色能源向电能的转换具有重大意义。开关电源及其高频逆变核心技术在绿色能源转换中起着关键性作用。为此，丛书选编了《小型风力发电技术及应用》、《家用太阳能发电技术》、《快速充电技术及应用》、《防爆型开关电源设计与应用》、《小型逆变器设计及应用》等相关图书，已列入出版计划，希望能在改变人们衣食住行的绿色浪潮中推波助澜。

丛书由电能变换专家、中国电源学会副理事长、北京富来电能设备公司倪本来高级工程师担任总策划。参与丛书策划，为丛书提供资料、建议以及帮助审稿的专家还有北京信息职业技术学院路秋生教授，中国矿业大学王聪教授，工业与信息化部华北计算所王其英高级工程师，中国计量科学研究院于百江高级工程师，浙江大学吕征宇教授，北方工业大学张卫平教授，中国航天科技集团张志国研究员、张忠相研究员，中国科学院计算技术研究所张广明研究员，电子工业出版社赵丽松编审和苏颖杰编辑等。

限于水平，书中谬误难免，恳请读者斧正。

“开关电源设计与制作系列丛书”编辑委员会
2011年4月

前 言

电源的供应是任何电子和电气装置都不能回避的大问题。早年的线性稳压电源由于稳定而可靠的工作，获得了技术界广泛的应用。但是随着集成电路的出现，特别是大规模和超大规模集成电路的出现，使得电子装置的测量、控制和执行部分被大大地缩小了，于是电源部分的尺寸和重量问题就凸显出来。开关电源的问世，使得电子装置中的电源部分开始朝高效率（电源自身的损耗被大大降低了）、高功率密度（电源自身的体积和重量都大大减小了）和更高可靠性方向发展。但干扰问题却随之而来。由于开关电源工作在比较高频率下（几十至几百千赫），开关电源本身又是一个很强的功率源，所以开关电源对电网的污染，开关电源向周围空间的辐射骚扰的发射，开关电源对同一电网中其他用电设备的高频传导干扰等电磁兼容方面的问题都成了人们关注的热点，也成了阻碍开关电源进一步推广发展的绊脚石。

自从进入 20 世纪 90 年代中期以来，世界各国从保护环境和保护人民身体健康出发，先后开展了强制性的产品认证，于是电子和电气产品的电磁兼容性问题被提高到前所未有的程度，受到了制造商和消费者的重视，产品的电磁兼容性也成了产品进入世界市场大门的通行证，而开关电源的电磁兼容问题更是首当其冲。

当前，图书市场上介绍开关电源设计的书籍很多，它们分别从开关电源的基本线路、开关电源的集成电路控制芯片、开关电源的最新发展动态（如开关电源的有源滤波技术、有源功率因数控制技术和软开关技术等等）的不同侧面，对各种开关电源的设计给出了详细的叙述，这对于开关电源技术在中国的普及和发展起到了推波助澜的作用。但其中，介绍开关电源电磁兼容性问题的书籍却比较少见。但是开关电源的电磁兼容问题却又不容回避，事实上，也只有提高了开关电源的电磁兼容能力（包括要尽可能减小电磁骚扰的发射，同时还要最大限度地提高其抗干扰的能力），才能使开关电源能在更多场合下获得应用。

为此，在 2005 年年底，作者应电子工业出版社的编辑张榕女士之约，出版了介绍开关电源强制性产品认证和电磁兼容性问题的《开关电源的电磁兼容性设计与测试》一书，受到国内电源行业人士的欢迎，其间还再版过一次，但目前已经脱售多时。

此外，近年来，作者受国内一些专业学会、行业协会和培训机构的邀请，每年都有较多机会参加在国内各地的电磁兼容培训活动，其中不乏专场的开关电源电磁兼容的培训课程，逐年积累了一些新的话题。再有，进入 21 世纪以来，国内有相当多的电磁兼容标准已经修订（或面临修订），不少内容与原先的国家标准有了一定的变化，也值得介绍给读者。

近日接到电子工业出版社的张榕女士来电，说起电子工业出版社近期打算出版一套开关电源的丛书，由于我上一本介绍开关电源的电磁兼容性设计与测试书籍迄今已逾 5 年，故邀作者重新编写其中的电磁兼容篇。考虑到作者在电磁兼容培训活动中的话题积累，以及国内电磁兼容标准的演变，决定接受张榕女士的邀请，着手编写本书。

本书以开关电源的电磁兼容性为主线，介绍开关电源电磁兼容性的测试要求，然后比较系统地介绍了与开关电源相关的测试项目和测试方法。作为本书的重点，书中着重介绍开关

电源的电磁兼容性设计和对策，包括“开关电源的电磁骚扰问题分析、骚扰的性质和骚扰抑制技术概述”，“开关电源的辐射骚扰及其抑制方法”，“开关电源传导骚扰和电源线输入滤波器”，“开关电源的瞬变干扰抑制问题”，“开关电源的印制电路板设计”，“开关电源中的高频变压器”，“适用于开关电源电磁干扰抑制的片式元件”，“开关电源电磁兼容设计、试验和对策案例分析”和“电磁兼容故障诊断和常用处理方法”等几章。其篇幅占到全书的五分之三以上，有相当一部分内容是首次出现在书本上，所以本书既可看成是我前一本书的重新再版，也可看成是一本新书，希望大家喜欢。

本书力求以实用为目的，在讲述中既有根据开关电源线路特点可以采取的骚扰抑制措施；也有根据单个对策器件的性能特点，介绍其在开关电源中的使用中应当注意的地方；另外在本书的最后两章介绍了开关电源电磁兼容设计、试验和对策的案例分折，以及电磁兼容故障诊断和常用处理方法，较好地全书的内容梳理了一遍，使读者对开关电源的电磁兼容设计、试验和对策有了一个比较“立体”的了解。此外，本书尽量用说理的方式逐个进行叙述，避免了冗长的计算。

丰富的内容、通俗易懂和深入浅出的说明，是本书的一大特点，这一特点对于从事开关电源设计，以及从事电子产品设计和应用方面的工程技术人员都有很好的参考价值。

本书由钱振宇和史建华共同编著。参与本书编写的还有寿建霞、陶雪珍、钱慧洁、钱伟丰、翟晰淳和谢焱。

在本书编写过程中，作者查阅了大量参考文献（其中有相当一部分文献是从网上搜索的，由于文献几经转载，原文作者已经很难查到），作者谨向所有被参考和引用过的文献作者们表示最诚挚的谢意。

此外，作者还要深深地感谢电子工业出版社的张榕女士，没有她的诚挚邀请，也不会有这本书的顺利出版。

钱振宇 史建华

目 录

第 1 章 开关电源的电磁兼容性测试标准	1
1.1 概述	1
1.2 开关电源的电磁兼容性测试要求	1
1.3 信息技术设备类产品机内开关电源电磁兼容性能的基本要求	2
1.3.1 电磁骚扰发射的测试	2
1.3.2 谐波电流发射的测试	3
1.3.3 抗扰度性能的测试	4
1.3.4 机内开关电源电磁兼容性测试要求小结	7
第 2 章 开关电源的电磁骚扰情况测量	9
2.1 交流电源线的传导骚扰测量 (频率范围 0.15 ~ 30MHz)	9
2.1.1 试验布局	9
2.1.2 测量接收机	10
2.1.3 人工电源网络	12
2.1.4 试验方法	13
2.2 辐射骚扰的场强测量 (频率范围 30 ~ 1000MHz)	14
2.2.1 试验布局	14
2.2.2 必要的试验设施	15
2.2.3 试验方法	17
2.3 用吸收钳法测量辐射功率发射 (频率范围为 30 ~ 300MHz)	19
2.3.1 试验方法的提出	19
2.3.2 功率吸收钳	20
2.3.3 测量线路和说明	20
2.3.4 对用吸收钳法测试辐射骚扰发射的点评	21
第 3 章 开关电源的谐波电流发射测量	23
3.1 谐波电流的产生	23
3.2 谐波电流的危害	24
3.3 谐波电流的测量线路与测量方法	26
3.3.1 测量线路	26
3.3.2 测量方法	27
3.3.3 对谐波电流发射试验标准的点评	27
第 4 章 开关电源的抗扰度性能测量	28
4.1 静电放电抗扰度试验	28
4.1.1 静电的产生与危害	28
4.1.2 静电放电试验	29

4.1.3	静电放电的模拟	29
4.1.4	静电放电试验中的放电方式	30
4.1.5	实验室的型式试验	30
4.1.6	静电放电的试验等级	33
4.1.7	试验结果评估	33
4.1.8	试验报告	34
4.1.9	静电放电试验的标准点评	34
4.1.10	新版国家静电放电抗扰度试验标准 (GB/T 17626.2—2006) 简述	34
4.1.11	最新国际静电放电试验标准 IEC 61000—4—2: 2008 简述	37
4.2	射频辐射电磁场抗扰度试验	39
4.2.1	射频辐射电磁场抗扰度试验的由来	39
4.2.2	射频辐射电磁场抗扰度试验	39
4.2.3	射频辐射电磁场的试验等级	40
4.2.4	射频辐射电磁场抗扰度试验的试验方法 (实验室型式试验)	41
4.2.5	射频辐射电磁场抗扰度试验的试验记录	46
4.2.6	用 GTEM 小室做射频辐射电磁场抗扰度试验	46
4.2.7	新版国家射频辐射电磁场抗扰度试验标准 (GB/T 17626.3—2006) 简述	52
4.2.8	射频辐射电磁场试验的标准点评	55
4.3	电快速瞬变脉冲群抗扰度试验	56
4.3.1	电快速瞬变脉冲群的产生和对设备可靠性的影响	56
4.3.2	电快速瞬变脉冲群发生器	56
4.3.3	电快速瞬变脉冲群试验的配置和布局	57
4.3.4	实验室形式试验	60
4.3.5	新版国家电快速瞬变脉冲群抗扰度试验标准 (GB/T 17626.4—2008) 介绍	62
4.3.6	电快速瞬变脉冲群抗扰度试验标准的点评	68
4.4	浪涌抗扰度试验	68
4.4.1	浪涌抗扰度试验问题的提出	69
4.4.2	浪涌发生器	69
4.4.3	浪涌抗扰度试验	71
4.4.4	新版国家浪涌抗扰度试验标准 (GB/T 17626.5—2008) 介绍	72
4.4.5	浪涌抗扰度试验标准的点评	73
4.5	由射频场感应所引起的传导干扰抗扰度试验	74
4.5.1	由射频场感应引起的传导干扰的由来	74
4.5.2	由射频场感应所引起传导干扰抗扰度试验的试验要求和试验等级	75
4.5.3	由射频场感应所引起传导干扰抗扰度试验所必需的试验设备	75
4.5.4	由射频场感应所引起传导干扰抗扰度试验的试验方法	77
4.6	电压跌落、短时中断和电压渐变抗扰度试验	80
4.6.1	电压跌落、短时中断和电压渐变的产生	80
4.6.2	电压暂降和短时中断的试验仪器	81

4.6.3	电压暂降和短时中断的优先选用试验等级及持续时间	82
4.6.4	电压暂降和短时中断的试验方法	84
第5章	开关电源电磁骚扰发射的定性测试	85
5.1	比较“正规”的辐射发射定性测试方案	85
5.2	比较“正规”的传导发射定性测试方案	86
5.3	定性观察的辐射发射测试方案	86
5.3.1	采用频谱分析仪的定性观察方案	86
5.3.2	采用高频示波器的定性观察方案	87
5.4	定性观察的传导骚扰发射测试方案	87
第6章	开关电源的电磁骚扰问题分析、骚扰的性质和骚扰抑制技术概述	89
6.1	开关电源的电磁骚扰发射问题	89
6.2	开关电源的电磁骚扰发射原因分析	89
6.2.1	输入整流回路	89
6.2.2	开关回路	90
6.2.3	次级整流回路	90
6.2.4	控制回路	91
6.2.5	由分布电容引起的骚扰	91
6.3	开关电源电磁骚扰发射的性质分析	92
6.3.1	开关电源的射频性质的电磁骚扰	92
6.3.2	开关电源的谐波电流发射问题	92
6.4	开关电源的电磁骚扰抑制技术概述	94
6.4.1	软开关技术在开关电源中的应用	95
6.4.2	开关频率的调制	96
6.4.3	优化功率开关管驱动电路的设计	97
6.4.4	无源滤波技术	98
6.4.5	共模干扰的有源抑制技术	98
6.4.6	印制电路板的设计	99
6.4.7	元器件的选择	99
第7章	开关电源的辐射骚扰及其抑制方法	100
7.1	开关电源的辐射发射	100
7.1.1	开关电源的辐射骚扰发生	100
7.1.2	由“环天线”引起的电磁辐射	101
7.2	通过减小环路面积来减小开关电源的辐射噪声	102
7.3	通过采用缓冲吸收来降低开关频率中的高次谐波成分	105
7.3.1	对初级高频高压逆变回路的处理	106
7.3.2	对次级整流回路的处理	107
7.4	通过开关电源印制电路板的设计来减小辐射噪声	108
第8章	开关电源传导骚扰和电源线输入滤波器	110
8.1	开关电源传导骚扰测量结果的数值分析	110

8.2	开关电源传导骚扰的一般抑制技术	111
8.2.1	差模滤波的分析	111
8.2.2	共模传导骚扰抑制的分析	112
8.3	电源线滤波器的作用	114
8.3.1	电源线滤波器的种类	115
8.3.2	电源线滤波器的主要型式	115
8.3.3	开关电源的电源线输入滤波器	116
8.4	电源线滤波器插入损耗的测量	118
8.4.1	插入损耗的定义	118
8.4.2	插入损耗的测量	118
8.5	开关电源输入滤波器的设计	119
8.6	开关电源输入滤波器中电感器的设计	119
8.6.1	共模电感的工作原理	120
8.6.2	共模电感的磁芯材料	120
8.6.3	开关电源中采用铁氧体磁芯为材料的共模电感	121
8.6.4	适合于做共模电感的磁芯的形状	122
8.6.5	共模电感器的电感量的选择	122
8.6.6	共模电感的设计	123
8.6.7	共模电感的绕制	123
8.6.8	共模电感器中的寄生差模电感	126
8.6.9	影响共模电感器高频特性的几个因素	126
8.6.10	差模电感和差模电感的磁芯选择	127
8.6.11	常用的差模电感磁芯材料	127
8.6.12	差模电感设计和制作中的其他问题	129
第9章	开关电源的瞬变干扰抑制问题	130
9.1	电磁干扰	130
9.1.1	电磁干扰的存在方式	130
9.1.2	对干扰方式的判断	131
9.1.3	电源线上传扰的类型	132
9.1.4	干扰进入设备的途径	132
9.1.5	干扰对设备工作的影响	133
9.1.6	干扰的抑制技术	133
9.2	瞬变干扰吸收器件	134
9.2.1	气体放电管	135
9.2.2	金属氧化物压敏电阻 (MOV)	141
9.2.3	硅瞬变电压吸收二极管 (TVS管)	148
9.2.4	固体放电管	156
9.2.5	瞬变电压吸收器件使用过程中的几个共性问题	160
9.2.6	组合式保护器	161

9.3	铁氧体抗干扰磁芯	163
9.3.1	铁氧体抗干扰磁芯的工作原理	163
9.3.2	铁氧体抗干扰磁芯的应用	164
9.3.3	铁氧体抗干扰磁芯的材料、形状和尺寸选择	165
9.3.4	铁氧体抗干扰磁芯的使用要点	171
9.3.5	铁氧体抗干扰磁芯使用举例	172
9.4	隔离变压器	173
9.4.1	概述	173
9.4.2	最简单的隔离变压器	173
9.4.3	带屏蔽层的隔离变压器	174
9.4.4	高性能隔离变压器（超级隔离变压器）	175
9.4.5	隔离变压器的安装	178
9.4.6	隔离变压器与滤波器和浪涌抑制器件的配合使用	179
第10章	开关电源的印制电路板设计	180
10.1	概述	180
10.2	印制电路板的常用材料和安装方法	180
10.2.1	印制电路板的常用材料	180
10.2.2	印制电路板的主要电气性能	182
10.2.3	印制电路板的元器件安装方法	183
10.3	印制电路板布局上的一般考虑	183
10.4	印制电路板的地线问题	187
10.5	印制电路板的布线与布局问题	189
10.6	开关电源的印制电路板设计举例	193
10.6.1	TOPSwitch 单片开关电源例	193
10.6.2	降压型开关电源功率电路布线例	195
第11章	开关电源中的高频变压器	198
11.1	开关电源中高频变压器的损耗和导线的线径选择	198
11.1.1	直流损耗	198
11.1.2	交流损耗	198
11.2	高频变压器设计中必须注意的问题	198
11.2.1	初级线圈的泄漏电感	198
11.2.2	线圈本身的分布电容	199
11.2.3	初、次级线圈间的耦合电容	200
11.3	高频变压器的绕制问题	200
11.3.1	初级绕组	201
11.3.2	初级偏压绕组	201
11.3.3	次级绕组	202
11.3.4	对高频变压器绕组绕制顺序的说明	204
11.3.5	小结	204

11.4	高频变压器的屏蔽问题	204
11.4.1	高频变压器绕组之间的屏蔽	204
11.4.2	高频变压器的磁场屏蔽	205
11.5	高频变压器的绝缘问题	206
11.5.1	加强高频变压器绝缘的方法	206
11.5.2	在高频变压器中采用多重绝缘导线	208
11.6	高频变压器的噪声问题	211
第12章	适用于开关电源电磁干扰抑制的片式元件	213
12.1	片式电磁兼容对策器件的应用例	213
12.2	片式铁氧体磁珠	214
12.2.1	片式铁氧体磁珠的工作原理	214
12.2.2	片式铁氧体磁珠的分类	215
12.3	片式电感和片式共模电感	217
12.3.1	概述	217
12.3.2	片式电感	217
12.3.3	片式电感与片式磁珠的区别	218
12.3.4	片式共模电感器	218
12.3.5	片式共模电感器举例	219
12.4	片式电容器	220
12.4.1	片式叠层陶瓷介质电容器	220
12.4.2	片式电容器在设备电磁干扰抑制中的应用	222
12.4.3	片式电容器的线路形式	223
12.4.4	不同片式电容器的比较	227
12.5	片式高频噪声抑制组件	227
12.5.1	各种不同的片式高频噪声滤波组件	228
12.5.2	高频噪声滤波组件使用中一个应当注意的问题	233
12.6	片式压敏电阻	235
12.6.1	片式叠层压敏电阻的结构和工作原理	235
12.6.2	片式叠层压敏电阻的特点	236
12.6.3	片式叠层压敏电阻例	237
12.7	片式电磁兼容对策器件的应用例	241
12.7.1	片式对策器件的组合使用例(磁珠与三端电容器的结合)	241
12.7.2	电源线的噪声抑制对策例	242
12.7.3	开关电源中采用片式三端电容器与铝电解、钽电解电容器组合改善滤波的高频特性	245
12.7.4	信号线的噪声抑制对策	246
12.7.5	片式电容器的使用问题	248
12.7.6	片式压敏电阻的使用问题	250

第 13 章 开关电源电磁兼容设计、试验和对策案例分析	252
案例 1: 电磁骚扰辐射发射超标的诊断和整改步骤	252
案例 2: 开关电源高频变压器的屏蔽层应用问题	255
案例 3: 由多个开关电源组成的电源系统的电磁兼容性考虑	258
案例 4: 便携式智能温度计开关电源的电磁兼容性设计	263
案例 5: 在电源线上使用铁氧体抗干扰磁芯	265
案例 6: 由通信设备集线器电源引起的辐射发射超标	266
案例 7: 开关电源的电磁兼容性设计、试验和对策例	267
案例 8: 设备内部电源布线不当造成的辐射超标	274
案例 9: 错误接地线引起的辐射超标	277
案例 10: 防雷器件的正确安装	279
案例 11: 在浪涌试验中因为磁珠使用位置不当造成被保护芯片的损坏	281
案例 12: 电源滤波器的安装使用问题	281
案例 13: 同类产品、不同布局引起的传导骚扰超标问题	283
案例 14: 房间电加热器浪涌抗扰度试验不合格问题处理	285
案例 15: 对电子变压器传导发射和浪涌抗扰度试验不合格的整改	286
案例 16: 电容器的容量对集成电路电源去耦效果的影响	289
案例 17: 开关电源输出纹波和噪声的测量和抑制	292
案例 18: 工业自动化设备的结构与电磁兼容试验	297
第 14 章 电磁兼容故障诊断和常用处理方法	300
14.1 设备的辐射发射超标	300
14.2 设备的传导发射超标	311
14.3 设备的静电放电抗扰度试验不合格	313
14.4 设备的射频辐射电磁场抗扰度试验不合格	318
14.5 设备的脉冲群干扰抗扰度试验不合格	320
14.6 设备的浪涌抗扰度试验不合格	324
14.7 设备的射频场感应所引起的传导抗扰度试验不合格	325
14.8 设备的电压跌落、短时中断抗扰度试验不合格	326
14.9 设备在调试过程中的电磁兼容性故障定位	327

第 1 章 开关电源的电磁兼容性测试标准

1.1 概述

开关电源因为体积小、质量小、效率高、可靠性好而被广泛应用。但不同的应用场合对开关电源有着不同的要求。

例如，边远的农村常常因为用户用电量变化和发电设备工作的不稳定，造成电网波形失真严重、电压波动范围大，再加上配电系统接线的不规范，于是对开关电源构成了严重考验。

而在电气化铁路的沿线，当电力机车经过时，有着很强的电磁感应，会对附近的开关电源造成很强的电磁场干扰。

对于野外，特别是安装在较高建筑物或山顶上的开关电源设备，遭受雷击破坏的机会较多。

因此，就开关电源来说，内部的控制电路很容易受外界的电磁干扰，导致开关电源不能正常工作。这样看来，开关电源必须具有很强的抗电磁干扰的能力（包括对雷击浪涌、电网电压波动、静电、电场、磁场及电磁场等的抗干扰能力），以确保其自身工作正常以及与之配套设备的工作稳定性。

与此同时，在开关电源内部含有开关三极管、整流及续流二极管、功率变压器，这些器件均工作在高电压、大电流和很高频率的情况下。由于工作的电压和电流波形多数是方波，所以造成了很强的开关噪声。它们会在开关电源的输入和输出端形成很强的共模和差模传导骚扰；还能进一步通过电源的输入和输出线路以及外壳向空中形成辐射，产生辐射电磁场骚扰。这一切都能对周围的敏感设备造成干扰，引起它们工作异常。

事实上，开关电源工作时产生的电磁骚扰还会危害处在同一台设备里的其他线路的工作，造成设备本身工作的不稳定；甚至是开关电源自身工作的不稳定。

由此可见，对开关电源的电磁兼容性性能的要求，除了有开关电源自身的抗干扰问题外，还有它的电磁骚扰的发射问题，甚至还包括谐波电流对电网造成的污染问题。上述情况对于有多个独立电源共存的电源系统表现得尤为复杂。所以，开关电源的电磁兼容问题是包含了对多方面要求的复杂问题。

1.2 开关电源的电磁兼容性测试要求

“电磁兼容”的定义：“设备或系统在其电磁环境中能正常工作，且不对该环境中的任何事物构成不能承受的电磁骚扰的能力”。可以看出，设备的电磁兼容性包含两方面的意思：① 设备要有一定的抗干扰能力，使其在电磁环境中能够正常工作；② 设备在工作中因



自身产生的电磁骚扰应抑制在一定水平下，不能对处于同一电磁环境中的任何事物构成不能承受的电磁骚扰。

这样看来，对开关电源的电磁兼容性测量也包含了对开关电源的抗干扰能力和对开关电源自身骚扰抑制这两方面的要求。

迄今为止，测试开关电源电磁兼容性的国家标准尚未出台，但在国家颁布的强制性产品认证的产品目录中，信息技术设备类产品中列有“机内开关电源”。

此外，在音视频设备及其部件、卫星电视广播接收机、金融及贸易结算设备、电信终端设备等大类产品中虽没有把开关电源作为一种专门的产品来对待，但在它们的强制性认证实施细则中也把开关电源作为对电磁兼容性能有重要影响的零部件来对待。

作为信息技术设备类产品的机内开关电源，引用的电磁兼容性测试标准有如下几种。

(1) 对于设备工作时自身所产生的电磁骚扰：采用 GB 9254—2008《信息技术设备的无线电骚扰限值和测量方法》，测试设备的电源端子骚扰的电压和辐射骚扰的场强。

(2) 对于设备工作时在电网中造成的污染：采用 GB 17625.1—2003《电磁兼容 限值 谐波电流发射限值（设备每相输入电流 $\leq 16\text{A}$ ）》，测试设备对于电网的污染（谐波电流发射）。

(3) 对于设备的抗扰性：采用 GB/T 17618—1998《信息技术设备抗扰度限值和测量方法》，主要测试设备对于静电放电、射频辐射电磁场、电快速瞬变脉冲群、雷击浪涌、由射频场感应所引起的传导注入、电压暂降与短时中断等干扰的抗干扰能力。

除了信息技术设备类产品外，通信设备是另一个开关电源使用的大类产品，鉴于通信设备的重要性和特殊性，除了部分采用与信息技术设备类产品相同的技术标准外（如下述标准①），部分还有符合本身产品技术特点的行业和国家标准，例如：

① GB 9254—2008《信息技术设备的无线电骚扰限值和测量方法》；

② YD/T 983—1998《通信电源设备电磁兼容性限值及测量方法》；

③ GB 7260.2—2003《不间断电源设备（UPS）第2部分：电磁兼容性（EMC）要求》（目前正在修订，新标准等同于 IEC 62040—2：2005）。

1.3 信息技术设备类产品机内开关电源电磁兼容性能的基本要求

1.3.1 电磁骚扰发射的测试

实施对开关电源所产生的电磁骚扰发射测试，并对其发射值有所限制，其主要目的是对现时的无线电广播和通信给予必要的保护。

在 GB 9254—2008《信息技术设备无线电骚扰限值和测量方法》标准中，将设备（信息技术类设备）分为 A、B 两类，其中 B 类是平时在生活环境中使用的设备。属于 B 类的环境有住宅区、商业区、商务区、公共娱乐区、户外场所和轻工业区，基本上都是由低压电网直接供电的设备。

标准将不属于 B 类环境使用的信息技术类设备认定是 A 类环境的设备，通常是工业环



境中使用的设备。

下面是对 A 类和 B 类设备所产生的骚扰限值要求：

- ① 标准要求要求在 0.15 ~ 30MHz 范围内作传导骚扰的测试；
- ② 在 30 ~ 1000MHz 范围内进行辐射骚扰的测试。

1) 在电源端口的传导骚扰的限值

当使用带有准峰值检波器和平均值检波器的接收机在进行测量时，被试设备应当同时满足表 1.1 中的准峰值和平均值的限值要求。

表 1.1 电源端子的传导骚扰电压限值

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

注：(1) 在过渡频率处应采用较低的限值；

(2) B 类设备在 0.15 ~ 0.50MHz 范围内随频率对数线性递减。

2) 辐射骚扰的限值

被试设备应当满足表 1.2 所示的规定距离内的辐射骚扰限值。

表 1.2 设备的辐射骚扰限值（测量点距被试设备距离为 10m 处）

频率范围 MHz	A 类设备的准峰值限值 dB (μ V/m)	B 类设备的准峰值限值 dB (μ V/m)
30 ~ 230	40	30
230 ~ 1000	47	37

注：在频率转换点上用较低的限值。

3) 试验中的注意事项

(1) 试验应在产品（这里指开关电源）的正常使用情况下，以能产生最大电磁骚扰发射的工作方式进行。试验中还要适当地改变试品（开关电源）的布局，以便使骚扰发射为最大。

(2) 试验应将试验中用到的试验仪器、试验方法、试验配置和试验布局（如果有负载，应当包括负载的布局）等明确记录在案，以备试验能重复进行、试验结果可以追溯。

(3) 除非另有说明，试验应在试品（开关电源）额定电压和规定工作条件下进行。

1.3.2 谐波电流发射的测试

电力系统中的谐波是指那些为供电系统额定频率整数倍的正弦电压或正弦电流。它是由非线性电压（或电流）特性的设备（如开关电源）引起的，这些设备可以看成谐波电流的来源，来自不同谐波源的谐波电流在电力网络的阻抗上产生谐波电压。电网中的谐波会使敏感设备产生性能降级、误动作，甚至发生故障。

测试被试设备谐波电流发射的标准（GB 17625.1—2003《电磁兼容 限值 谐波电流发射限值（设备每相输入电流 \leq 16A）》）把设备分成如下四类。