

开关电源的骚扰抑制问题

钱振宇

1. 产品认证与开关电源的电磁兼容性测试

尽管开关电源没有作为一个大类产品出现在我国的强制性产品认证目录中，但在目录的信息技术类设备提到的12种产品中，将计算机的内置电源和电源适配器与微型计算机、便携式计算机、与计算机连用的显示设备、与计算机连用的打印设备、多用途打印复印机、扫描仪、充电器、电脑游戏机、学习机、复印机、服务器、金融及贸易结算电子设备等一起列为强制认证的产品。

此外，在需要强制性认证的音视频设备、音视频设备-卫星电视广播接收机、电信终端设备中，虽没有把开关电源列为一种独立产品，但是在这些产品的认证实施细则中却把开关电源作为一种对电磁兼容性能有影响的主要零部件出现在认证产品的零部件清单中。

事实上，还有更多的电子设备，尽管在认证的实施细则中没有直接提到开关电源的问题，但是在它的认证中（这里指的是广义“认证”，尽管有一些产品不需要3C认证，但有“入网”认证要求）都无一例外提到了要做电磁兼容性试验。由于开关电源作为这些设备中与电网连接的关键部件，所以这些试验都和开关电源的电磁兼容性有关。因此，无论开关电源是不是作为一个独立产品参加强制产品认证，但作为电子设备与电网连接的一个首当其冲的部件，只要这个产品需要参加认证，那么开关电源都必须经受电磁兼容性试验。

2. 开关电源的电磁兼容性试验

根据“电磁兼容”的基本定义：“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层意思：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；同时，设备在工作中自身所产生的电磁骚扰应该抑制在一定水平下，不能对同处于一个电磁环境中的任何事物（包括同一电磁环境中的其他设备和系统）构成不能承受的电磁骚扰量。所以，对开关电源的电磁兼容性测量也应当包含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测量。

迄今为止，开关电源电磁兼容性测试的国家标准尚未出台，但是在参加强制性产品认证的信息技术设备类产品，在“机内开关电源的认证试验项目一览表”（国家认证认可监督管理委员会颁布）中列出了3个电磁兼容测试项目，分别是0.15MHz ~ 30MHz电源端传导骚扰电压测试；30MHz ~ 1000MHz辐射骚扰场强测试；暂态谐波电流测试。十分明显，这几项试验都是测试开关电源自身工作中所产生的电磁骚扰，分别是对射频性质的传导骚扰电压和辐射骚扰场强测试；以及对电网污染的谐波电流测试。

此外，在包括音视频设备、音视频设备的部件、卫星电视广播接收机、金融及贸易结算设备、电信终端设备等等产品在内的所有需要认证的电子产品除了有测试产品自身工作中所产生的电磁骚扰的要求外，还有抗扰度测试的要求（包括对静电放电、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抗干扰能力的测试要求）。

根据国内外电子产品的认证情况看，通常电子产品本身的电磁骚扰发射是强制性的测试项目，因为电子产品的电磁骚扰发射对确保世界范围内通讯和广播畅通有决定性的作用，也对保证同一电磁环境内的其他电子设备和系统的正常运行有积极意义。同样，电子产品工作时所产生的暂态谐波电流实际上是对整个公共电网的污染。对谐波电流发射的限制，实际上也就保证了公共电网的供电质量。

相形之下，抗干扰能力是说明电子产品性能高低的重要指标，是评价同类产品好坏的主要指标之一，也是客户选购电子设备的主要依据。

这样看来，电子产品的电磁骚扰发射和谐波电流发射是必须实施强制检查的项目，而电子产品的抗干扰性能则应当根据产品认证与入网的需要进行必须的检查。

因此，对作为信息技术设备类产品参加强制性产品认证的机内开关电源的3个电磁兼容测试项目（即对机内开关电源所作的传导骚扰电压测试、辐射骚扰场强测试，以及谐波电流测试）是适当的，也是必须的。

而对广大电子产品所作的抗干扰性能测试，实际上不全部是针对开关电源的一种试验，从更深的层面来说，是对整个设备和系统的抗干扰性能试验。无数的事实说明，即使一台设备的开关电源通过了全部的抗干扰试验项目，也不等于这台设备也能通过相应的抗干扰试验。这里面有经由开关电源漏过去的干扰信号，设备的其他功能线路在这些干扰下产生了误动作，甚至导致功能线路中的元器件损坏或程序的丢失。此外，设备内部的布局和布线不当也可能将干扰越过开关电源直接进入其他功能线路，导致设备产生误动作等受干扰现象。基于这一原因，这里只讨论开关电源的电磁骚扰的发射问题。

3. 开关电源的电磁骚扰发射问题

开关电源采取将市电直接整流、滤波成为高压直流，然后通过逆变将高压直流转换成低电压的高频交流，再经过高频整流和滤波变成所需要的直流低电压。其间，通过对直流输出电压的测量，反过来对晶体管的开关时间进行控制，最终可以保持输出电压不变。这种线路的好处是取消了笨重的工频变压器；工作在开关状态下的晶体管的功耗要比线性状态低得多，所以不需要庞大的散热器；再者，逆变器的工作频率较高（几十kHz至200kHz），只要用较小容量的电容器就可获得低压侧的平滑滤波效果。由此可见，开关电源的根本优点是小型化、轻量化和高效化。

但是开关电源也有它固有的问题：例如，输入侧的谐波电流大、功率因数低、电源本身的电磁骚扰发射也大；另外，开关电源输出端的纹波电压大、输出噪声也大。其中，特别是开关电源的电磁骚扰的发射问题对于同一电磁环境的电子设备正常运行构成了潜在的威胁。事实证明，只有提高了开关电源的电磁兼容性能（当然包括要尽可能地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。

下面讨论开关电源的电磁兼容问题由来。

开关电源的种类很多，按电路结构可分为串联式和直流变换式两种；按激励方式可分为自激和他激两种；按开关管的组合可分为单管、全桥、半桥、推挽等等。然而不论何种类型的开关电源，都是利用半导体器件作开关，以开和关的时间比例来控制输出电压的高低。由于开关电源的工作频率都在几十至几百kHz，所以线路里的电流和电压变化率都很大，产生了很大的电磁骚扰，它们会通过电源线以共模和差模的方式向外传导骚扰，同时也会向周围空间辐射骚扰。

图1 是开关电源的主要部分，用于说明电源中电磁骚扰的产生与耦合途径。

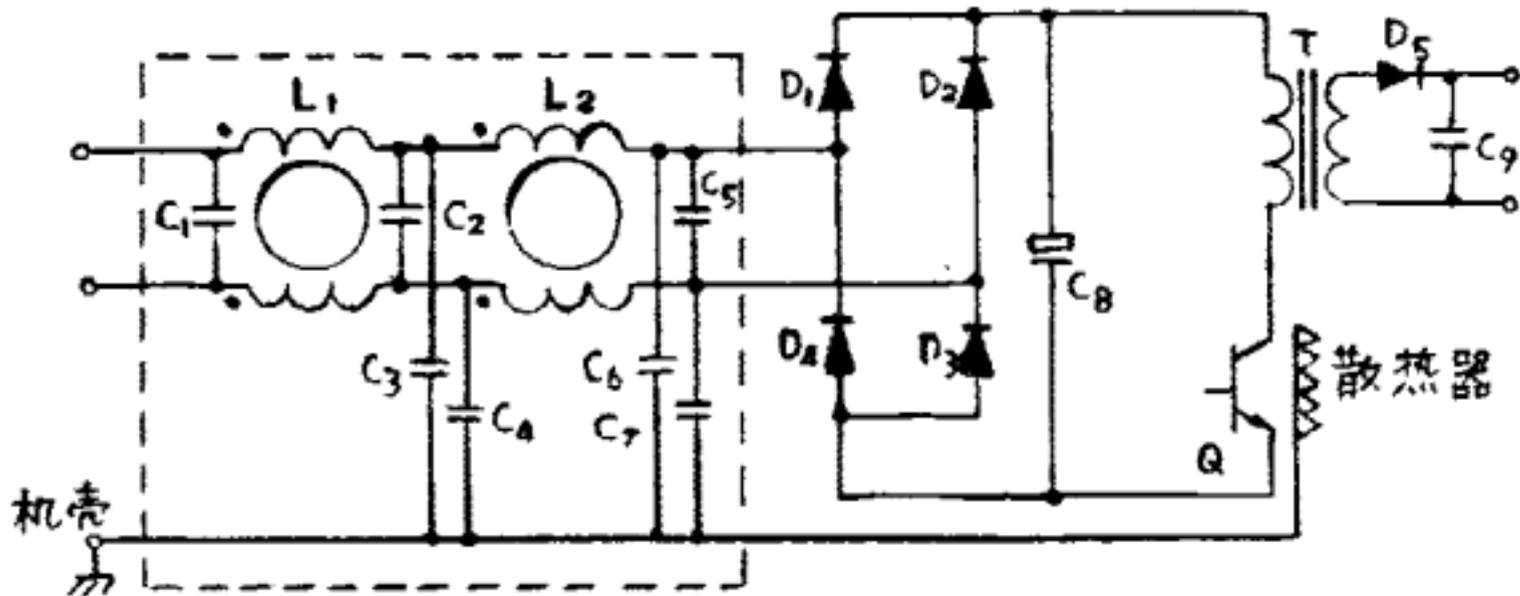


图1 开关电源线路简图

3.1 输入整流回路

在输入整流回路中，整流管 $D_1 \sim D_4$ 只有在脉动电压超过输入滤波电容 C_8 上的电压的时候才能导通，电流才从市电电源输入，并对 C_8 进行充电。一旦 C_8 上的电压高于市电电源的瞬时电压，整流管便截止。所以输入整流回路的电流是脉冲性质的，有着丰富的高次谐波电流。输入电流与市电电源电压的不同步，还导致了开关电源的功率因数低下，一般只在0.65左右。

3.2 开关回路

开关电源工作时，开关管Q处在高频通断状态，经由高频变压器T初级线圈、开关管Q和输入滤波电容 C_8 形成了一个高频电流环路。这个环路的存在，就可能对空间形成电磁辐射。辐射骚扰的强度（包括电场和磁场骚扰）与 $I Af^2$ 的乘积成正比，其中I是高频电流环路中的电流强度；A是环路所包围的面积；f是电流频率。注意，运用上述关系的条件是回路的尺寸远小于频率分量的波长。此外，式中电流是由配套电子设备对电源的要求而定；频率则由电源的重量、滤波要求和系统效率来确定。

输入滤波电容 C_8 对电磁骚扰的形成也有一定影响，如果 C_8 的电容量不够大，则对输入滤波就感不足，这时高频电流还会以差模方式传导到交流电源中去。

此外，开关回路中，开关管驱动的负载是高频变压器的初级线圈，是电感性的。由于高频变压器结构不是完全理想，除了初级电感外，还存在一定的漏电感。所以在开关管关断的瞬间，变压器中贮存的能量不能100%地传送到次级，结果在高频变压器的漏电感上感应了出一个尖峰高电压，如果尖峰有足够高的幅度，那么很有可能会造成开关管Q的击穿。

3.3 次级整流回路

开关电源在工作时，次级整流回路的 D_5 也处于高频通断状态。由高频变压器次级线圈、整流二极管 D_5 和滤波电容 C_9 构成了高频开关电流的环路。由于有这个环路的存在，同样也有可能对空间形成电磁辐射。

次级整流回路中的二极管在正向导通时的PN结被充电；在加反向电压时，积累电荷将被抛散，并因此产生反向电流，这个过过程非常的短暂。所以在有分布电容（如二极管的结电容等）存在的回路里，二极管截止瞬间的电流回路中会产生高频振荡。整流二极管的管击穿，在次级回路中会出现高频振荡现象，也会成为对外的差模辐射。3) 在开关电源输出端的直流滤波电容，由于滤波电容本身的存在，会在输出端出现频率很高的尖峰干扰（衰减振荡）见图2所示。

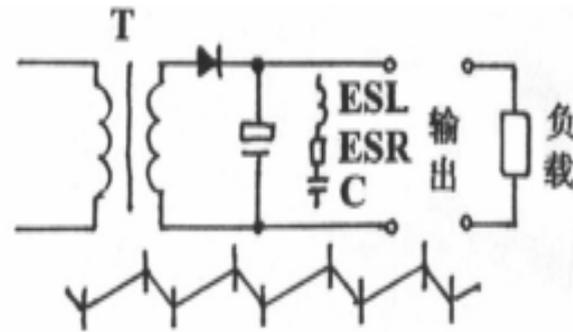


图2 开关电源输出端的噪声

3.4 控制回路

在控制回路中，脉冲控制信号则是主要的骚扰源，只不过与其他各项骚扰信号比较起来，控制回路的这点骚扰也就算不了什么了。

3.5 由分布电容引起的骚扰

· 初级回路开关管外壳与散热器的容性耦合引起的共模传导骚扰

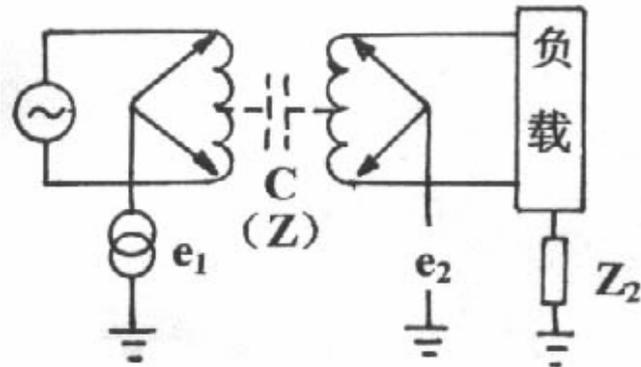
初级回路中开关管外壳与散热器之间的容性耦合会在电源输入端产生传导的共模骚扰。该共模传导的途径形成一个环路，该环路始于高dv/dt的散热器和安全接地线，通过交流电源的高频导纳和输入电源线（相线和中线）返回。

对初级电路来说，经整流后的直流电压为300V左右，直流变换器就在这个电压下工作。对于开关电源中的开关管来说，开关波形上升与下降时间做到100ns的情况并不困难，因此，开关波形的电压变化率实际上达到了300V/100ns或3kV/1μs。当用硅酯涂复的聚酰胺片垫在开关管与散热器之间时，开关晶体管的管壳与散热器之间的分布电容大约与50pF，所以波形瞬变时经过分布电容流到散热器，最后进入安全地的共模瞬变电流要达到

$$I = C \times dv/dt = 50 \times 10^{-12} \times (3000/10^{-6}) = 150\text{mA}$$

高频变压器初次级之间分布电容引起的共模传导骚扰。共模干扰是一种相对大地的干扰，它以它不会通过变压器“电生磁和磁生电”的机理来传递，而必须通过变压器绕组间的耦合电容传递。而在开关电源的高频变压器的初次级之间存在着分布电容是个不争的事实，我们用一个个装置电容（装置对地的分布电容）来与整个开关电源等效，我们就得到了如图3的干扰通路，共模干扰通过变压器的耦合电容，经过装置电容再返回大地的。于是我们就得到一个由变压器耦合电容与装置电容构成的分压器，共模电压就按照分压器中电容量的大小来分压，分到的电压为

$$e_2 = e_1 Z_2 / Z$$



- C：绕组间的分布电容；
 - Z：绕组间的耦合阻抗；
 - e_1 ：初级干扰（共模电压）；
 - e_2 ：次级干扰（共模电压）。
- $$e_2 = e_1 Z_2 / Z$$

图3 普通隔离变压器共模抑制能力分析

至此，我们简略地讨论了开关电源的电磁骚扰起因，由此形成的电磁骚扰有射频辐射性质的，也有射频传导性质的，当然也还有谐波电流的发生问题。

但是从开关电源的工作情况看，电磁骚扰发射的起因主要还是来源于晶体管的逆变工作状态（开关晶体管、高频变压器和输出整流回路在工作时产生的这种 dv/dt 和 di/dt 变化率很大和幅度很大的电压和电流脉冲）。就目前的晶体管开关速度看，逆变器的工作频率大体上都设计在几十kHz至几百kHz范围内，即使考虑了逆变器工作所形成的高次谐波，其谐波的主要高频成分也只有几十MHz，因此是属于“窄频”性质的骚扰，而且骚扰的频率相对偏低。

从电磁骚扰发射的测试标准看，试验方法以30MHz为界，对30MHz以上的频率，由于测试的频率较高，电磁波的波长较短，容易从设备（包括从线路上）逸出，成为电磁辐射进入空间，因此标准对于30MHz以上的电磁骚扰发射采用测试其辐射电磁场场强的方法。对30MHz以下的频率，由于电磁波的波长较长，不容易形成电磁波的空间辐射，而是以传导传输为其主要形式，因此对30MHz以下电磁骚扰采用测试传导骚扰电压的方法。

只是大多数小功率开关电源由于它的几何尺寸远小于30MHz所对应的波长（10m），所以大多数的开关电源即有辐射骚扰的发射，其表面向外的辐射效率也很低，在开关电源中考虑得更多的也还是传导骚扰的发射。

对于开关电源的谐波电流发射的问题，在GB 17625.1标准中规定对于额定功率达到75W（今后可能会规定为50W）以上的开关电源要测试其谐波电流的发射情况。GB 17625.1标准还专门提出了开关电源的谐波电流发射限值要求。

在开关电源的谐波电流抑制问题上，除了采用无源滤波器外，目前发展迅速，使用也更多的便是开关电源的有源功率因数控制了。目前有大量的文章发布在各种科技刊物上，这里不予讨论。

在余下的篇幅中只讨论开关电源的传导和辐射骚扰测试和对策。

射频和天线设计培训课程推荐

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,致力并专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;我们于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

易迪拓培训推荐课程列表: <http://www.edatop.com/peixun/tuijian/>



射频工程师养成培训课程套装

该套装精选了射频专业基础培训课程、射频仿真设计培训课程和射频电路测量培训课程三个类别共 30 门视频培训课程和 3 本图书教材;旨在引领学员全面学习一个射频工程师需要熟悉、理解和掌握的专业知识和研发设计能力。通过套装的学习,能够让学员完全达到和胜任一个合格的射频工程师的要求...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/110.html>

手机天线设计培训视频课程

该套课程全面讲授了当前手机天线相关设计技术,内容涵盖了早期的外置螺旋手机天线设计,最常用的几种手机内置天线类型——如 monopole 天线、PIFA 天线、Loop 天线和 FICA 天线的设计,以及当前高端智能手机中较常用的金属边框和全金属外壳手机天线的设计;通过该套课程的学习,可以帮助您快速、全面、系统地学习、了解和掌握各种类型的手机天线设计,以及天线及其匹配电路的设计和调试...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/133.html>



WiFi 和蓝牙天线设计培训课程

该套课程是李明洋老师应邀给惠普 (HP)公司工程师讲授的 3 天员工内训课程录像,课程内容是李明洋老师十多年工作经验积累和总结,主要讲解了 WiFi 天线设计、HFSS 天线设计软件的使用,匹配电路设计调试、矢量网络分析仪的使用操作、WiFi 射频电路和 PCB Layout 知识,以及 EMC 问题的分析解决思路等内容。对于正在从事射频设计和天线设计领域工作的您,绝对值得拥有和学习!...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/134.html>



CST 学习培训课程套装

该培训套装由易迪拓培训联合微波 EDA 网共同推出,是最全面、系统、专业的 CST 微波工作室培训课程套装,所有课程都由经验丰富的专家授课,视频教学,可以帮助您从零开始,全面系统地学习 CST 微波工作的各项功能及其在微波射频、天线设计等领域的设计应用。且购买该套装,还可超值赠送 3 个月免费学习答疑...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/24.html>



HFSS 学习培训课程套装

该套课程套装包含了本站全部 HFSS 培训课程,是迄今国内最全面、最专业的 HFSS 培训教程套装,可以帮助您从零开始,全面深入学习 HFSS 的各项功能和在多个方面的工程应用。购买套装,更可超值赠送 3 个月免费学习答疑,随时解答您学习过程中遇到的棘手问题,让您的 HFSS 学习更加轻松顺畅...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/11.html>

ADS 学习培训课程套装

该套装是迄今国内最全面、最权威的 ADS 培训教程,共包含 10 门 ADS 学习培训课程。课程是由具有多年 ADS 使用经验的微波射频与通信系统设计领域资深专家讲解,并多结合设计实例,由浅入深、详细而又全面地讲解了 ADS 在微波射频电路设计、通信系统设计和电磁仿真设计方面的内容。能让您在最短的时间内学会使用 ADS,迅速提升个人技术能力,把 ADS 真正应用到实际研发工作中去,成为 ADS 设计专家...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/ads/13.html>



我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年,10 多年丰富的行业经验,
- ※ 一直致力并专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 经验丰富的一线资深工程师讲授,结合实际工程案例,直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>