

开关电源设计与应用系列书

开关电源设计

入门与实例解析

沙占友 王彦朋 安国臣 孟志永 著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

开关电源设计与应用系列书

开关电源设计

入门与实例解析

沙占友 王彦朋 安国臣 孟志永 著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 简 介

本书全面、系统地阐述了开关电源的设计入门知识,并对一些典型设计实例做以解析。本书遵循先易后难、化整为零、突出重点和难点的原则,在介绍开关电源基本原理与构成的基础上,首先将开关电源划分成若干基本单元电路,依次阐述开关电源一次侧外围电路的设计、高频变压器的设计、二次侧输出电路及反馈电路的设计,再介绍整机电路设计,最后以图表的形式简明扼要地分析了28种新型开关电源的设计实例。所述内容可帮助读者快速、全面、系统地掌握开关电源的设计与制作知识。

本书融实用性、科学性于一体,内容由浅入深,循序渐进,通俗易懂,图文并茂,是一本开关电源的入门指南,适合开关电源行业中的工程技术人员和初学者阅读。

图书在版编目(CIP)数据

开关电源设计入门与实例解析/沙占友等著. —北京:中国电力出版社,2009

(开关电源设计与应用系列书)

ISBN 978-7-5083-9379-7

I. 开… II. 沙… III. 开关电源—设计 IV. TN86

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第155948号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2009年10月第一版 2009年10月北京第一次印刷

850毫米×1168毫米 32开本 9.25印张 266千字

印数 0001—3000册 定价 19.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

尽管开关电源的电路可以千变万化，其基本构成却大致相同。主要包括一次侧外围电路（含输入端保护电路、输入整流滤波器和钳位保护电路）、主控制芯片（PWM 控制器或单片开关电源集成电路）、高频变压器、二次侧输出电路、反馈电路、偏置电路及其他保护电路。

鉴于目前国内已出版的专门介绍开关电源设计基础的书籍还很少，而广大读者迫切需要能更快速、全面、系统地掌握开关电源的入门知识、从单元电路到整机电路的设计方法、设计实例及注意事项。为此，我们在系统总结从事开关电源研究工作所积累的经验及部分科研成果的基础上，参考国外厂家提供的最新资料后撰成本书，以满足开关电源行业中的工程技术人员和初学者的急需。本书为“开关电源设计与应用系列书”的分册。该丛书还包括《开关电源外围元器件选择与检测》、《开关电源优化设计》和《开关电源制作与调试》。

本书融科学性、先进性、系统性、实用性于一体，主要有以下特点：

第一，题材新颖，编排合理。本书遵循先易后难、化整为零、突出重点和难点的原则，在介绍开关电源基本原理与构成的基础上，将开关电源划分成若干个基本单元电路，依次阐述开关电源一次侧外围电路的设计、高频变压器的设计、二次侧输出电路及反馈电路的设计，然后介绍整机电路设计。

第二，全面、系统地阐述了开关电源的基本设计方法和设计要点。以第三章为例，所介绍开关电源一次侧外围电路的设计，不仅包括输入保护电路、电磁干扰滤波器和输入整流滤波电路，还包括漏极钳位保护电路的设计、功率开关管的选择等内容，给读者以完整、清晰的概念。

第三，深入浅出，通俗易懂，实用性强。例如，第一、二章分别讲述开关电源的基础知识和基本控制电路，作为初学者的人门篇。第六章在阐述开关电源整机电路设计时，还突出介绍了开关电源散热器实用设计方法及设计实例。第七~九章以图表的形式简明扼要地分析了28种新型开关电源的设计实例，这对读者学习设计和制作开关电源具有重要参考价值。

第四，信息量大，知识面宽，便于读者触类旁通，举一反三，灵活运用。

沙占友教授撰写了第三章、第四章、第五章和第六章，并完成了全书的审阅和统稿工作。王彦朋教授撰写了第一章和第七章，安国臣、孟志永老师合撰了第二章、第八章和第九章。

李学芝、沙江、韩振廷、张文清、宋怀文、陈庆华、王志刚、刘立新、张启明、刘东明、赵伟刚、宋廉波、刘建民、李志清、郑国辉、王金和同志也参加了本书撰写工作。

由于作者水平有限，书中难免存在缺点和不足之处，欢迎广大读者指正。

作 者

前 言

■ 第一章 开关电源的基础知识	1
第一节 开关电源名词解释	1
第二节 集成稳压电源的分类	7
一、集成稳压电源的分类	7
二、开关电源的分类	9
第三节 开关电源与线性电源的比较	10
一、开关电源的主要特点	10
二、开关电源与线性电源的比较	11
第四节 开关电源的基本原理	14
一、开关电源的工作方式	14
二、脉宽调制控制器的基本原理	15
三、单片开关电源的构成与基本原理	18
第五节 开关电源集成电路的产品分类	19
一、PWM 控制器集成电路的产品分类	19
二、单片开关电源集成电路的产品分类	20
三、开关稳压器集成电路的产品分类	22
■ 第二章 开关电源的基本电路	23
第一节 基准电压源电路	23
一、传统基准电压源的基本原理	23
二、带隙基准电压源的基本原理	25
第二节 误差放大器电路	26
第三节 电压控制型开关电源的基本电路	28
第四节 电流控制型开关电源的基本电路	30
第五节 电荷泵式开关电源的基本电路	31

第六节	反馈电路的基本类型	33
第七节	开关电源的过热保护电路	35
■ 第三章	开关电源一次侧外围电路的设计	37
第一节	输入保护电路的设计	37
一、	输入保护电路的基本构成	37
二、	熔丝管	38
三、	熔断电阻器	41
四、	负温度系数功率热敏电阻器	42
五、	压敏电阻器	44
第二节	电磁干扰滤波器的设计	46
一、	电源噪声及其抑制方法	46
二、	简易电磁干扰滤波器的设计	47
三、	复杂电磁干扰滤波器的设计	51
第三节	开关电源输入整流滤波电路的设计	52
一、	输入整流管的选择	52
二、	输入整流桥的选择	52
三、	输入滤波电容器的选择	57
四、	倍压整流及交流输入电压转换电路的设计	58
第四节	开关稳压器输入整流滤波电路的设计	61
一、	输入整流滤波器的选择与设计曲线	61
二、	输入整流滤波器的设计步骤	65
三、	输入整流滤波器的设计实例	66
第五节	功率开关管的选择	68
一、	双极型功率开关管的选择	68
二、	MOSFET 功率开关管的选择	69
第六节	漏极钳位保护电路的设计	72
一、	漏极上各电压参数的电位分布	72
二、	漏极钳位保护电路的设计	73
■ 第四章	高频变压器的设计	76
第一节	高频变压器磁心的选择	76

第二节	高频变压器导线的选择	81
一、	漆包线的选择	81
二、	三层绝缘线的选择	83
第三节	高频变压器设计实例	86
第四节	利用软件设计开关电源及高频变压器的实例	90
一、	PI Expert 7.1 的主要特点	90
二、	利用软件设计开关电源的实例	92
三、	查阅并修改高频变压器参数的方法	96
第五节	利用软件设计高频变压器的基本公式	100
第六节	设计高频变压器的注意事项	105
第七节	防止高频变压器磁饱和的方法	112
一、	磁饱和对开关电源的危害及避免方法	112
二、	检测高频变压器磁饱和的简便方法	112
■ 第五章	开关电源二次侧电路及反馈电路的设计	116
第一节	输出整流管的选择	116
一、	快恢复及超快恢复二极管的选择	116
二、	肖特基二极管的选择	119
三、	几种整流管的性能比较	121
第二节	输出滤波电容器的计算与选择	122
一、	输出滤波电容器的容量计算	122
二、	选用输出滤波电容器的注意事项	126
第三节	磁珠的选择	128
一、	磁珠的性能特点	128
二、	磁珠的选择方法	130
第四节	稳压管的选择	133
第五节	光耦合器的选择	136
一、	光耦合器的工作原理	136
二、	线性光耦合器的选择	138
第六节	可调式精密并联稳压器的选择	140
一、	TL431 型可调式精密并联稳压器	140

二、NCP100 型可调式精密并联稳压器	141
第七节 普通光耦反馈电路的设计实例	143
一、待机电源的光耦反馈电路	143
二、通用开关电源的光耦反馈电路	144
三、大功率音频功率放大器电源的光耦反馈电路	145
第八节 精密光耦反馈电路的设计实例	146
一、由 TL431 构成的精密光耦反馈电路	147
二、由 NCP100 构成的精密光耦反馈电路	149
第九节 控制端补偿及偏置电路的设计实例	150
一、控制端补偿电路的设计	150
二、偏置电路的设计	151
■ 第六章 开关电源整机电路的设计	153
第一节 由 UC3842 构成的开关电源	153
一、UC3842 的工作原理	153
二、UC3842 的驱动电路及启动方式	156
三、UC3842 的典型应用	158
第二节 由 SG3524 构成的开关电源	159
一、SG3524 的工作原理	159
二、SG3524 的典型应用	161
第三节 由 TOPSwitch-GX 构成的开关电源	165
一、TOPSwitch-GX 系列的工作原理	165
二、TOPSwitch-GX 的典型应用	167
第四节 由 TinySwitch-III 构成的微型开关电源	171
一、TinySwitch-III 系列产品的工作原理	171
二、TinySwitch-III 系列产品的典型应用	173
第五节 由 PeakSwitch 构成具有峰值输出能力的 开关电源	175
一、PeakSwitch 系列产品的工作原理	176
二、PeakSwitch 系列产品的典型应用	178
第六节 开关电源保护电路的设计	182

一、开关电源保护电路的分类	182
二、开关电源保护电路的设计	184
第七节 开关电源的设计方法与步骤	190
第八节 开关电源印制电路板的设计	199
一、印制板常用参数表	199
二、开关电源印制板的设计要点	201
第九节 开关电源散热器的设计	203
一、散热器的基本知识	203
二、散热器的工作原理	206
三、开关电源散热器实用设计方法	208
四、开关电源散热器的设计实例	211
■ 第七章 开关稳压器及直流开关电源实例解析	214
第一节 降压式开关稳压器实例解析	214
一、降压式开关稳压器的基本原理	214
二、降压式开关稳压器实例解析	216
第二节 升压式开关稳压器实例解析	218
一、升压式开关稳压器的基本原理	218
二、升压式开关稳压器的简化电路解析	219
三、升压式开关稳压器实例解析	219
第三节 降压/升压式开关稳压器实例解析	221
一、降压/升压式开关稳压器的简化电路解析	221
二、降压/升压式开关稳压器实例解析	222
第四节 负压输出式开关稳压器实例解析	223
一、负压输出式开关稳压器实例解析	223
二、正压开关稳压器做负压输出实例解析	225
第五节 大电流输出式开关稳压控制器实例解析	226
第六节 高压开关稳压器实例解析	227
第七节 多路输出式开关稳压器实例解析	229
第八节 复合开关稳压器实例解析	231
第九节 反激式直流开关电源实例解析	234

一、反激式直流开关电源的基本原理及简化电路	234
二、反激式直流开关电源实例解析	237
第十节 正激式同步整流直流开关电源实例解析	238
一、正激式直流开关电源的基本原理	238
二、同步整流的基本原理	239
三、正激式直流开关电源实例解析	240
■ 第八章 AC/DC 式开关电源实例解析	242
第一节 3W 精密开关电源实例解析	242
第二节 5W 精密开关电源实例解析	244
第三节 12W 精密开关电源实例解析	245
第四节 17.7W (峰值功率 29.7W) 多路输出式 开关电源实例解析	246
第五节 30W 精密开关电源实例解析	249
第六节 52W 精密开关电源实例解析	252
第七节 70W 双路输出式精密开关电源实例解析	256
第八节 180W 多路输出式精密开关电源实例解析	258
■ 第九章 特种开关电源实例解析	264
第一节 低压输入式工业控制开关电源实例解析	264
第二节 微型开关电源实例解析	266
第三节 电池充电器实例解析	267
第四节 多路输出式微型开关电源实例解析	269
第五节 精密恒流式 LED 驱动电源实例解析	272
第六节 恒压/恒流式开关电源实例解析	275
第七节 精密恒压/恒流式开关电源实例解析	277
第八节 具有峰值功率输出能力的开关电源 实例解析	280
■ 参考文献	284

开关电源的基础知识

开关电源被誉为高效、节能型电源，它代表着稳压电源的发展方向。目前，单片开关电源集成电路以其高集成度、高性价比、最简外围电路、最佳性能指标的显著优点，获得广泛应用，已成为设计中、小功率开关电源的优选产品。本章专门阐述开关电源的基础知识。首先介绍了开关电源的名词解释、集成稳压电源的分类、开关电源与线性电源的比较，然后分别阐述开关电源的工作方式、脉宽调制（PWM）控制器和单片开关电源的基本原理，最后介绍开关电源集成电路的产品分类。

第一节 开关电源名词解释

1. 线性稳压电源（Linear Regulated Power Supply，简称 Linear Power Supply）

线性稳压电源简称为线性电源，因其内部调整管工作在线性工作区而得名。线性稳压器调整管与负载相串联，电源的输入电流与输出电流基本相等。其优点是稳压性能好，输出的纹波电压和噪声电压很小，电路简单，成本低廉。主要缺点是调整管的压降较大，功耗高，稳压电源的效率低，一般仅为 35%~45%。

2. 线性稳压器（Linear Voltage Regulator，简称 Linear Regulator）

线性稳压器是线性电源的核心电路，只需配上工频变压器和输入整流滤波电路，即可构成线性电源。

3. 开关电源（Switching Mode Power Supply，简称 SMPS）

开关电源是开关稳压电源的简称，一般指输入为交流电压、输

出为直流电压的 AC/DC 变换器。开关电源内部的功率开关管工作在高频开关状态, 本身消耗的能量很低, 电源效率可达 75%~90%, 比普通线性稳压电源提高近一倍。

4. 单片开关电源 (Single-chip SMPS)

单片开关电源是将开关电源的主要电路都集成在一个芯片中, 能实现脉宽调制、输出隔离及多种保护功能, 具有高集成度、高性价比、最简外围电路、最佳性能指标等优点。单片开关电源一般属于 AC/DC 电源变换器。

5. DC/DC 变换器 (DC-DC Converter)

DC/DC 变换器是通过开关器件将一种直流电压转换成另一种(或几种)直流电压的装置。

6. 开关稳压器 (Switching Voltage Regulator, 简称 Switching Regulator)

开关稳压器一般特指低压 DC/DC 变换器。给开关稳压器配上工频变压器、输入整流滤波器, 即可构成开关电源。

7. 复合式稳压器

由开关电源(或开关稳压器)与线性稳压器构成的一种复合式稳压电源, 它以开关电源作为前级, 线性稳压器(含低压差线性稳压器)作为后级, 兼有开关电源、线性电源之优点, 不仅电源效率较高, 而且稳压性能好, 输出的纹波噪声很小。

8. 电压调整率 (Voltage Regulation 或 Line Regulation)

电压调整率 (S_V) 亦称线性调整率(或线路调整率), 一般用百分数表示, 但有的用 mV 来表示。它表示当输入电压在规定范围内变化时, 输出电压的变化率。测量电压调整率的方法是给开关电源接上额定负载, 首先测出在标称输入电压时的输出电压值 U_0 , 然后连续调节输入电压, 使之从规定的最小值一直变化到最大值, 记下输出电压与标称值的最大偏差 ΔU_0 。(可取绝对值), 最后代入下式计算电压调整率

$$S_V = \frac{\Delta U_0}{U_0} \times 100\% \quad (1-1-1)$$

9. 负载调整率 (Load Regulation)

负载调整率 (S_I) 亦称电流调整率, 一般用百分数表示, 也有

的用 mV 表示。它是衡量开关电源在负载电流发生变化时，使输出电压保持恒定的一种能力。测量负载调整率的方法是将输入电压调至标称值，分别测出开关电源在满载与空载时的输出电压值 U_1 、 U_2 ，再代入下式计算负载调整率

$$S_1 = \frac{U_2 - U_1}{U_0} \times 100\% \quad (1-1-2)$$

需要指出，开关电源的负载调整率通常是在 I_0 从满载的 10% 变化到 100% 情况下测得的，此时应将式 (1-1-2) 中的 U_2 换成 $I_0 = 10\% I_{OM}$ 时的输出电压值。

10. 输出电压精度 (Output Voltage Accuracy)

输出电压精度亦称准确度，它主要受开关电源的电压调整率、负载调整率、内部基准电压的温度漂移量（以下简称温漂）、误差放大器的温漂、取样电阻的精度及温度系数的影响。输出电压精度的表达式为

$$\gamma = S_V + S_1 + \frac{\sqrt{\Delta U_{\alpha(REF)}^2 + \Delta U_{\alpha(G)}^2 + \Delta U_{\alpha(\rho)}^2 + \Delta U_{\alpha(TC)}^2}}{U_0} \times 100\% \quad (1-1-3)$$

式中 γ ——输出电压精度；

S_V ——电压调整率（取绝对值）；

S_1 ——负载调整率（取绝对值）；

$\Delta U_{\alpha(REF)}$ ——基准电压的精度所引起输出电压的变化量；

$\Delta U_{\alpha(G)}$ ——增益误差所引起输出电压的变化量；

$\Delta U_{\alpha(\rho)}$ ——取样电阻的精度所引起输出电压的变化量；

$\Delta U_{\alpha(TC)}$ ——当环境温度从最低温度 T_{min} 变化到最高温度 T_{max} 时，对输出电压的影响。

举例说明：某开关稳压器的电压调整率 $S_V = 0.5\%$ ，负载调整率 $S_1 = 1\%$ 。基准电压 $U_{REF} = 1.25V$ ，基准电压的精度为 1%。输出电压的表达式为

$$U_0 = 1.25 \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (1-1-4)$$

取样电阻 R_1 、 R_2 的精度均为 $\pm 0.25\%$ 。当 $R_1 = R_2 = R$ 时， $U_0 = 3.3V$ 。该开关稳压器在 $0 \sim 125^\circ C$ 范围内的温度系数 $\alpha_T = 100 \times 10^{-6} / ^\circ C$ 。增

益误差所引起输出电压的变化量可忽略不计, 即 $\Delta U_{\alpha(G)} \approx 0V$ 。不难算出

$$\Delta U_{\alpha(\text{REF})} = \frac{2R}{R} \times \frac{U_0}{2} \times 1\% = \frac{2R}{R} \times \frac{3.3}{2} \times 1\% = 33\text{mV}$$

$$\begin{aligned} \Delta U_{\alpha(v)} &= [(0.25\%/V)U_0 + (0.25\%/V)U_0]U_{\text{REF}} \\ &= [(0.25\%/V) \times 3.3V + (0.25\%/V) \times 3.3V] \times 1.65V \\ &= 27\text{mV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta U_{\alpha(\text{TC})} &= \alpha_T(T_{\text{max}} - T_{\text{min}})U_0 \\ &= 100 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \times (125^\circ\text{C} - 0) \times 3.3V \\ &= 41.2\text{mV} \end{aligned}$$

利用式 (1-1-3) 计算该开关稳压器输出电压的总精度为

$$\begin{aligned} \gamma &= 0.15\% + 0.3\% + \frac{\sqrt{(33\text{mV})^2 + (27\text{mV})^2 + (41.2\text{mV})^2}}{3.3V} \times 100\% \\ &= 3.0\% \end{aligned}$$

测量输出电压精度的方法是给开关稳压器接上标称输入电压和额定负载, 用直流电压表测出实际输出电压 U'_0 , 再与标称输出电压 U_0 进行比较, 最后用下式计算输出电压的精度

$$\gamma_v = \frac{U'_0 - U_0}{U_0} \times 100\% \quad (1-1-5)$$

11. 电源效率 (η)

电源效率是指开关电源或开关稳压器的转换效率, 即输出功率与输入功率的比值, 通常用百分数表示, 效率愈高, 能量损耗愈小。开关电源的总功率 P 就等于输出功率 P_0 与总功耗 P_D 之和

$$P = P_0 + P_D \quad (1-1-6)$$

因此, 开关电源的转换效率为

$$\eta = \frac{P_0}{P_0 + P_D} = \frac{P_0}{P} \times 100\% \quad (1-1-7)$$

12. 待机电流 (Standby Current)

待机电流是指开关电源被关断时所消耗的电流。此时开关电源处于待机 (备用) 模式。

13. 占空比 (Duty Cycle)

占空比 (D) 表示脉冲宽度 (信号高电平持续时间 t) 与周期

(T) 的百分比, 计算公式为

$$D = \frac{t}{T} \times 100\% \quad (1-1-8)$$

在测试脉宽调制 (PWM) 式开关电源及变频调速系统时, 经常需要测量脉冲信号的占空比。

14. 结温 (Junction Temperature)

由于芯片是由半导体 PN 结所构成的, 因此通常将芯片温度简称为结温, 通常用 T_j 表示。

15. 最高结温

单片开关电源或开关稳压器所允许的最高结温用 T_{jm} 表示, 超过此温度时将关闭输出, 以免造成永久性损坏。不同芯片的最高结温也不相同, 常见的最高结温为 125°C 或 150°C 。

16. 过热保护 (Overtemperature Protection)

当温度超过芯片的最高允许工作温度时, 开关电源立即关断输出, 起到保护作用。

17. 过电压保护 (Over Voltage Protection, 简称 OVP)

当输入电压超过最大值时, 开关电源能自动关断输出的功能。

18. 欠电压保护 (Under Voltage Protection, 简称 UVP)

当输入电压低于最小值时, 开关电源能自动将电源关断的功能。

19. 过电流保护 (Over Current Protection, 简称 OCP)

过电流保护亦称限流保护, 它是指当输出电流超过规定电流极限值时, 开关电源能自动限制或关断输出电流的功能。

20. 电池极性反接保护 (Reversed-Battery Protection)

当输入电源的极性接反时, 能保护开关电源不受损坏的一种保护功能。

21. 瞬态响应 (Transient Response)

瞬态响应是指在输出阶跃电流的条件下, 输出电压的最大允许变化量。瞬态响应与输出滤波电容的容量及等效串联电阻 (ESR)、旁路电容、最大允许负载电流等有关。瞬态响应时间越短, 说明开关电源对负载变化的调节速度越快, 这对于某些瞬变负载 (例如高速逻辑电路和射频/微波发射机) 至关重要。

用示波器观察 3A 降压式开关稳压器的瞬态响应波形如图 1-1-1

所示。负载电流 I_O 的刻度为 $1\text{A}/\text{div}$ (div 表示格), 输出电压 U_O 的刻度为 $100\text{mV}/\text{div}$ 。由图可见, 当 I_O 从 0.75A 阶跃到 2.25A 时, 会引起 U_O 的突然跌落, 大约经过 $100\mu\text{s}$ 即可恢复正常。反之, 当 I_O 从 2.25A 阶跃到 0.75A 时, 会使 U_O 突然升高。该开关稳压器的瞬态响应时间约为 $100\mu\text{s}$ 。

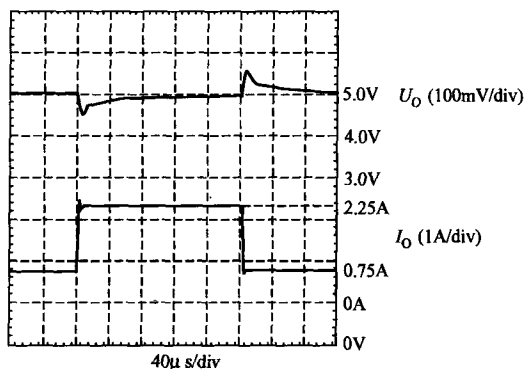


图 1-1-1 3A 降压式开关稳压器的瞬态响应波形

22. 电源抑制比 (Power Supply Rejection Ratio, PSRR)

电源抑制比亦称纹波抑制比 (Ripple Rejection Ratio, 简称 RRR), 它表示输入纹波电压与输出纹波电压的比值, 常用分贝 (dB) 表示。选择大容量、低等效串联电阻的输出滤波电容器, 能改善电源抑制比。

23. 输出噪声电压 (Output Noise Voltage)

输出噪声电压是指在规定频率范围内输出噪声电压的有效值, 一般用电压的峰-峰值来表示。

24. 电磁干扰滤波器 (EMI Filter)

能有效地抑制电网噪声, 提高电子设备抗干扰能力及系统可靠性的一种滤波装置。电磁干扰滤波器属于双向射频滤波器, 一方面要滤除从交流电网引入的外部电磁干扰, 另一方面还能避免本身设备向外部发出噪声干扰, 以免影响同一电磁环境下其他电子设备的正常工作。电磁干扰滤波器对串模干扰和共模干扰都能起到抑制作用。电磁干扰滤波器应接在开关电源的交流进线端。