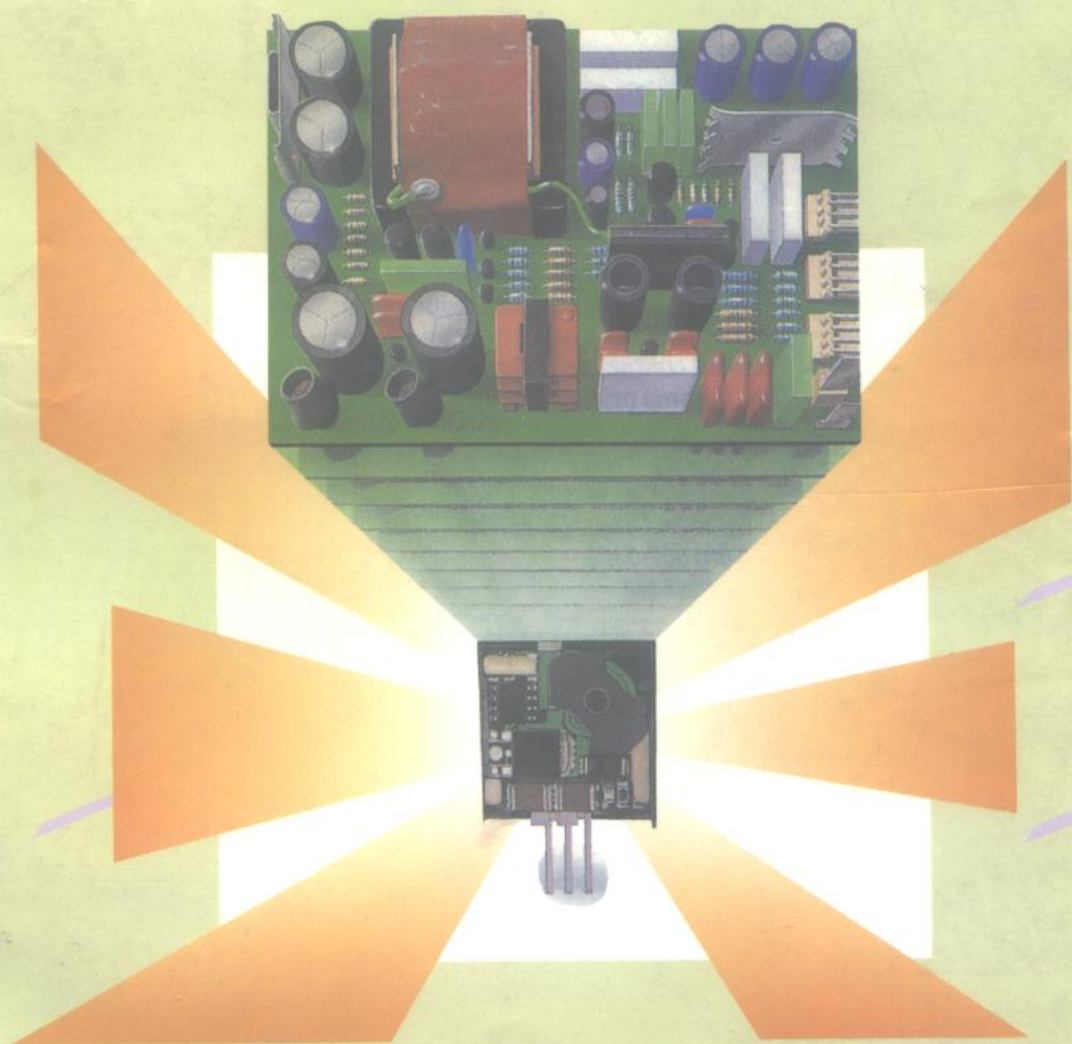


开关电源的 设计与应用

赵效敏 编



上海科学普及出版社

74.86
150

开关电源的设计与应用

赵效敏 编

上海科学普及出版社

内 容 提 要

本书介绍开关电源的设计及应用。内容包括：国内外市场动向，开关电源的发展水平与现状，基本电路与设计，谐振式开关电源的设计，高频化设计，噪声控制，开关电源元器件的特点和应用，以及最新开关电源的应用设计实例等。实例中介绍了开关电源在计算机、彩电、录像机、微波炉、打印机等中的应用。本书各章节都有电路设计图例，并附有大量的国外最新开关电源的技术参数。本书可供在电子技术及计算机领域中从事开关电源开发与应用的专业技术人员阅读、参考，也可供大中专院校师生作为教学参考书。

读者对象：从事计算机技术、电子技术开发和应用的专业技术人员、大中专院校有关师生。

(沪)新登字第 305 号

责任编辑：赵效敏、王瑞莲

开关电源的设计与应用

赵效敏 编

上海科学普及出版社出版
(上海曹杨路 500 号 邮政编码 200063)

新华书店上海发行所发行
上海科学普及出版社电脑照排部排版
常熟市文化印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 21 字数 500000

1995 年 9 月第 1 版 1995 年 9 月第 1 次印刷

ISBN 7-5427-0935-6/TN·15 定价：21.00 元



前 言

开关电源作为一种电子设备专用电源，极为当今工程技术人员所关注。它以其轻、薄、小和高效率的特点为人们所熟知，是各种电子设备小型化和低成本化不可缺少的一种电源方式，已成为当今电源的主流。目前，日本、欧美等一些发达的国家和地区已将开关电源广泛应用于各种计算机终端设备、通信设备以至家用电器等几乎所有的电子设备。今后，随着电子信息产业的迅猛发展，其应用范围也必将日益扩大，需求量将与日俱增。

我国虽在开关电源的开发与应用方面起步较晚，但广大科技工作者为使我国开关电源技术赶上世界先进水平，推动我国电子产业飞速发展，目前也都在积极从事这方面的研究开发与应用工作，并渴望能在这方面得到一些较系统的参考资料。

本着这一愿望，我们编了这本《开关电源的设计与应用》。本书着重从开发与应用的角
度，比较系统、详尽地介绍了当前开关电源的市场与技术动向、开关电源的基本电路与设计技术。并在此基础上重点论述了谐振式开关电源的设计技术及其最新动向、开关电源的高频化设计、噪声控制等问题。同时还介绍了部分最新开关电源的应用设计例子和用于开关电源的最新的
主要元器件特性与应用。全书各章节都有电路设计图例，并附有大量的日本最新开关电源及其元器件的技术参数。全书可以说基本上代表了当今世界开关电源的发展水平与现状。因此，可供电子技术领域从事开发与应用开关电源的工程技术人员阅读，也可供大中专院校有关师生教学、学习之参考。

本书在编写过程中承蒙万京林等同志进行了大量技术审阅工作，在此谨表深切谢意。

由于本人水平有限，错误或不妥之处难免，殷切希望读者批评指正，以利今后修改、补充、提高。

编 者

1994年9月

目 录

第一章	开关电源的技术与市场动向	1
第二章	开关电源的基本电路与设计	8
一、	开关电源基本电路的种类与特点	8
二、	开关电源通用技术条件	18
三、	开关电源基本电路的设计	29
四、	开关电源的高频化设计技术	76
五、	开关电源的系统化	83
第三章	谐振式开关电源的设计	88
一、	谐振式开关电源的特点与问题	88
二、	谐振式开关电源的基本电路与工作原理	94
三、	铁磁谐振式开关电源的设计	106
四、	部分电压谐振式开关电源的设计	115
五、	1MHz 电流谐振式开关电源的设计	123
六、	大容量 2.5kW 串联谐振式开关电源的设计	128
第四章	开关电源的噪声 (EMI) 控制	135
一、	噪声 (辐射噪声、传导噪声) 的测定	135
二、	噪声抑制器件及其应用效果	145
三、	噪声标准——FCC、VDE、CISPR	155
第五章	最新开关电源应用设计实例	163
一、	大型彩色电视机	163
二、	打印机	181
三、	膝上式个人计算机	186
四、	磁带录像机 (VTR)	189
五、	不间断电源 (UPS)	192
六、	液晶显示用反光灯	200
七、	笔记本式个人计算机用适配器	207
八、	微波炉	210
九、	电磁灶	214
第六章	最新开关电源元器件的特性与应用	219
一、	输入桥式二极管	219
二、	陶瓷电容器	223
三、	铝电解电容器	227
四、	薄膜电容器	233
五、	开关二极管	242

六、功率 MOS-FET	247
七、功率混合式 IC	254
八、电源用静噪滤波器.....	257
九、非晶磁珠.....	263
十、开关电源用控制 IC	268
十一、IGBT（绝缘栅式双极晶体管）	273
附录 日本部分开关电源装置及其元器件规格表.....	281

第一章 开关电源的技术与市场动向

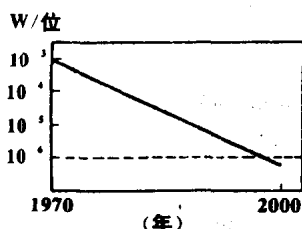
开关电源是一种采用开关方式控制的直流稳定电源。它以小型、轻量和高效率的特点被广泛应用于以电子计算机为主导的各种终端设备、通信设备等几乎所有的电子设备，是当今电子信息产业飞速发展不可缺少的一种电源方式。另一方面，这种电源目前在技术上还有较大问题有待解决，是当今电子工程学中的一个需要攻克的大课题，深为广大工程技术人员所关注。

众所周知，由于集成化技术的普及，电子设备本身已非常小型化和多功能化，成本也在不断降低。而与此同时，一个稳定供电的电源部分却在理论上难以实现集成化，因而跟不上电子设备本身的小型化和低成本化的要求，以致成了硬设备技术上的一个致命弱点。

现概略谈谈这种开关电源当前的技术与市场动向及其存在的主要问题。

1. 轻、薄、小型化技术

图 1-1 是半导体集成电路逐年实现小型化和轻量化的情况。我们知道，缩小设备尺寸，就会因散热面积的减小而导致温度升高，因此要设法降低电耗，或减小工作电流和电压，以减小各个环节上的功率。



但是，电源设备为提供负载功率不能减小电压和电流，为使电源轻、薄、小型化，首先就得设法降低电路内的损耗。虽说开关电源以半导体开关的启-闭为基本原理，从理论上说是低损耗的。但是，半导体开关毕竟存在着开、关损耗，而且这种损耗与开关频率成正比关系。

虽说开关电源里的变压器、电抗器等磁性元件和平滑波形的电容器等都可通过提高开关频率使其小型化，但这些元件的损耗也会因此增大。图 1-2 是提高开关频率时所所致影响的示意图。提高开关频率虽可减小磁性元件和平滑电容器的尺寸，但元器件损耗增大会引起温度升高，为避免这种温升又必须增大尺寸，这又会导致可靠性下降。目前日本市场上出售的开关元器件中采用双极性晶体管制成的 100kHz、用 MOS-FET 制成的 500kHz 电源，虽已实用化，但其频率有待于进一步提高。要提高开关频率，就要减少开关损耗，而要减少开关损耗，就需要有高速开关元器件。然而，开关速度提高后，会受电路中分布电感和电容或二极管中存储电荷的影响而产生浪涌或噪声。这样，不仅会影响周围电子设备，而且还会大大降低电源装置本身的可靠性。

其中，为防止随开关启-闭所发生的电压浪涌，可采用 $R-C$ 或 $L-C$ 缓冲器，而对由二极管存储电荷所致的电流浪涌可采用非晶态等磁芯制成的磁缓冲器。不过，对 1MHz 以上的高频，要采用谐振电路，以使开关上的电压或通过开关的电流呈正弦波，这样既可减少开关损耗，同时也可控制浪涌的发生。这种开关方式称为谐振式开关。目前对这种开关电源的研究很活跃，因为采用这种方式不需大幅度提高开关速度就可在理论上把开关损耗降到

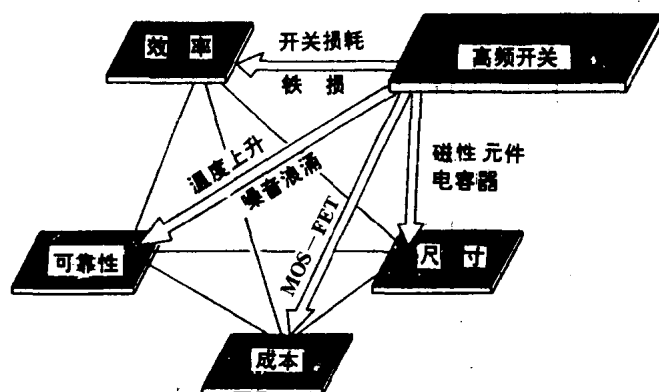
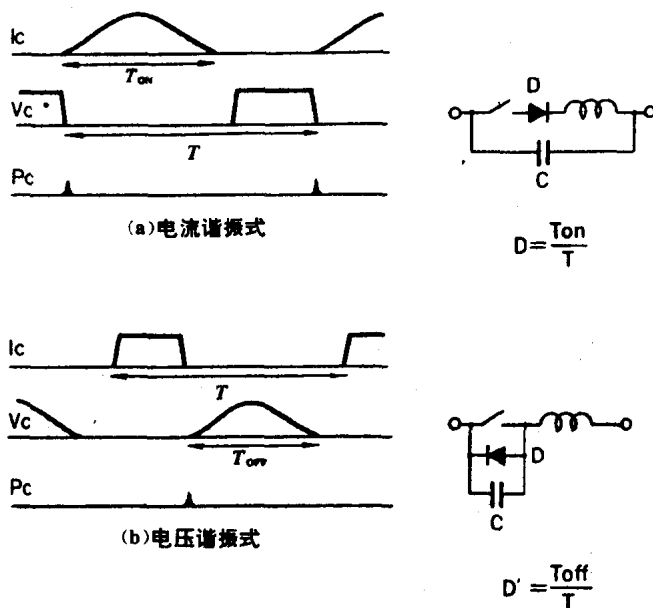


图 1-2 高频化的影响

零，而且噪声也小，可望成为开关电源高频化的一种主要方式。

图 1-3 所示谐振式开关的原理。这种方式可直接应用于目前通用的变换器电路。当前，世界上许多国家都在致力于这种数兆 Hz 的变换器的实用化研究。有报告说，美国的贝尔研究所已试验成功了一种开关频率达 20MHz 以上的变换器。不过，也有报告说已开发出一种不利用谐振现象就能将开关损耗减为零并能排除电压或电流浪涌的电路。



占空比控制 $\Rightarrow$ 频率控制

图 1-3 谐振式开关

图 1-4 是利用双开关断开时的谐振现象设计的零电压开关电路图。

图 1-5 是双开关断开时通过换流用 L 对电容 C 进行充电以排除电压浪涌和电流浪涌的电路图，该方式也称非谐振式开关。数兆 Hz 左右的开关频率是这些方式混合后的适用范围。

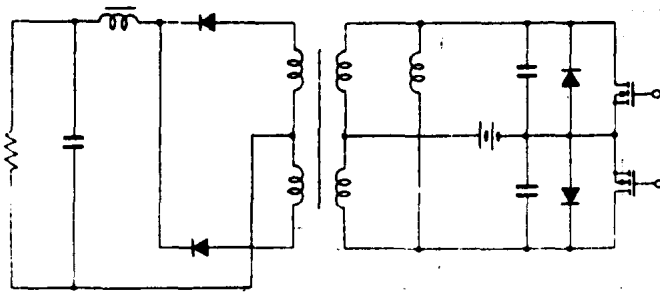


图 1-4 零电压开关电路

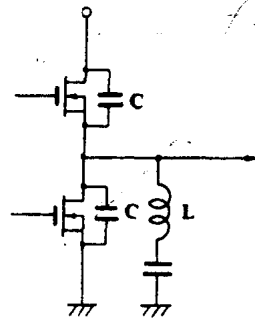


图 1-5 非谐振式变换器

目前，开关电源的小型化主要通过高频化和高密度化来实现。在高频化技术解决了一系列附带问题的同时，也降低了变压器、滤波磁性元件及电容器等元件的尺寸；在提高开关电源的高效率方面，已通过对开关晶体管、二极管等主开关元件和铁氧体磁芯、电解电容器等元件特性的改善及电路的改进，降低了因高频化而增大的损耗。目前 5V 输出已可获得近 80% 的效率，并已有频率达 500kHz 以上的产品投放市场（见图 1-6、1-7、1-8、1-9）。

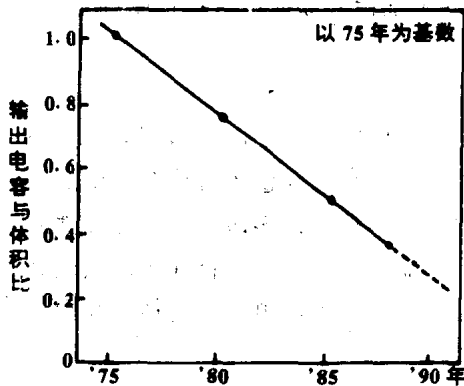


图 1-6 输出电容与体积的变化

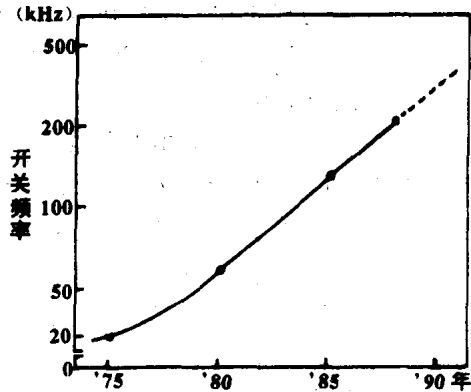


图 1-7 变换频率的变化

其次，通过混合 IC 等高密度安装技术减少了元件数，并缩小了安装空间。近十多年来，除容积减少了 50% 以上（功率安装密度为原来的两倍）外，部分每 cm^3 数百瓦的 DC—DC 电源也已实用化。

总之，开关电源的任何一项技术都是一种高技术。这方面，今后将通过表面安装技术（SMT）提高安装空间系数。同时还将通过开发谐振变换器等技术减小噪声和降低开关损耗，以不断推出更小型、轻量和高效率的开关电源。

2. 开关电源与磁性元件 (Magnetics)

有效利用磁性元件对开发开关电源至关重要。作为高可靠性控制元件的磁放大器的使用已成一项定型技术，钴系非晶态磁芯对此起了主导作用。然而，当开关频率高达 MHz，就需要有膜厚达数微米的非晶态磁芯，目前这方面有待于进一步的研究。

此外，非晶态磁芯（跟磁放大器相同的原理）在磁缓冲器上的应用已成为电源高频化

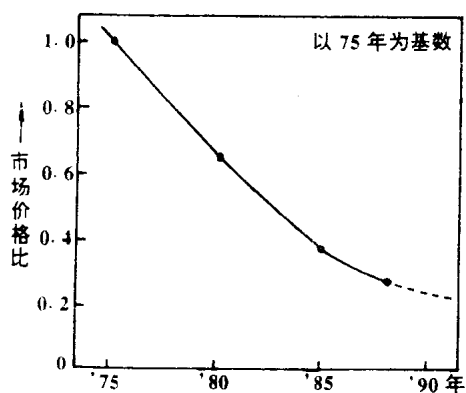


图 1-8 市场价格的变化

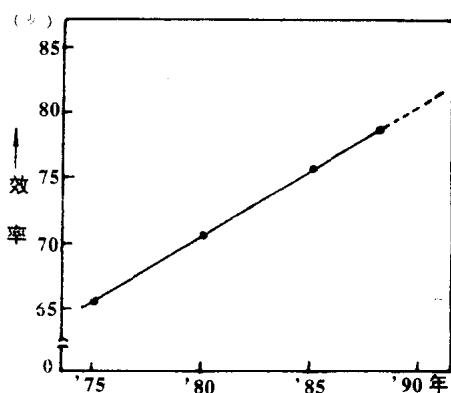


图 1-9 效率的变化

的一项必要技术。同时，作为一种主变压器用磁芯，也不可忽视高频铁氧体和铌晶超急冷磁芯的研究开发工作。

看来，谐振式开关的应用研究和谐振用电感的高频磁性材料的开发工作相对迟缓了一些，期待该领域能有新的突破。包括主变压器在内，一般来说，磁性元件所产生的损耗跟频率的1~2次方成正比，而且并不像在半导体器件中那样容易通过散热片向外有效散热，因此，磁性体的发热也是一个重要问题。

3. 电源的集成化

目前，将主开关和控制电路集成于同一芯片上的一体化研究工作已广泛展开。不过，当负载电流增大时，随高频产生的开关损耗所导致的温升过高的问题还有待今后解决。虽说目前利用薄膜化技术变压器和电抗器的小型精密化问题进行了许多研究，但在以铁氧体作基片的工艺技术上也有不少难题，而且也远非近期能解决。其他如旨在实现低压大电流电源的低耗二极管及应用FET的输出同步整流电路的开发、平滑电容器的精密化等许多重要课题目前都尚未解决。

4. 应用与市场动向

目前，开关电源已应用到所有电子设备上，取代了连续控制式的线性电源。在日本，近年来开关电源的产量平均每年呈两位数增长，年销售额已突破2000亿日元。同时，由于提高了印刷基片功率器件的安装技术，价格也呈现出大幅度下降的趋势（图1-8）。

图1-10所示是日本在1990年前开关电源市场的变化情况。从中可看出信息处理用电源的需求量增长最快，即在计算机和通信方面的应用占压倒多数。从销售额看，开关电源在通信设备上的应用也占了很大的比例。目前在民用设备上，它的市场虽不大，但随着成本的降低将会逐步扩大。尤其随着便携式电话、便携式字处理机及便携式个人计算机等设备的普及，小型、小容量开关电源的需求将有增无减。表1-1是对开关电源用途的分类。

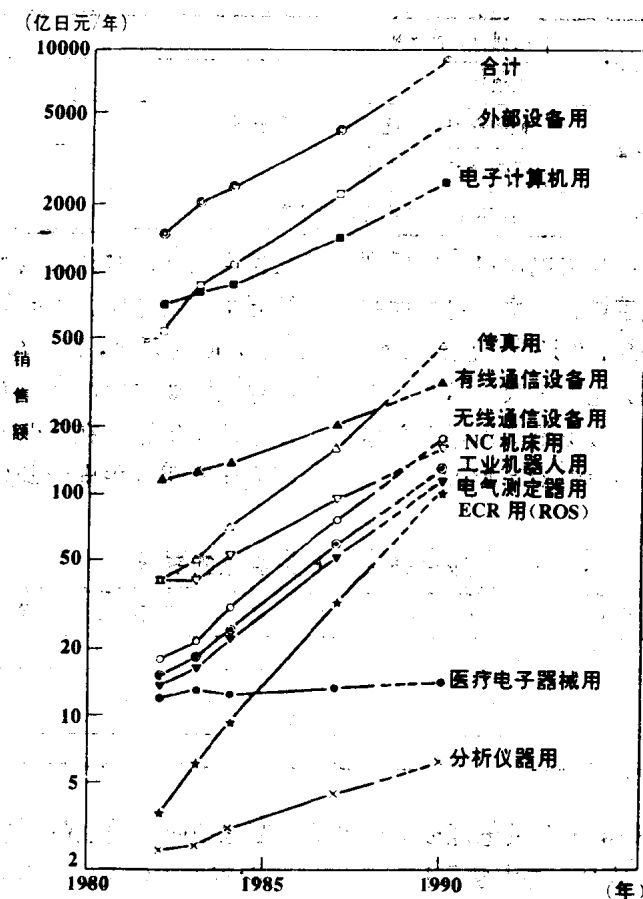


图 1-10 开关电源的市场变化情况

表 1-1 开关电源的用途分类

工业用电子设备	信息设备	各种电子计算机、中央处理装置、存储装置
		外围和终端装置、输入输出装置、显示装置
	通信设备	有线通信设备、电子交换机、传真设备
		无线通信设备、广播设备、汽车电话
	办公设备	字处理机、个人计算机
		复印机、打印机
	控制设备	FA、机器人、NC、电控设备、空调设备
		自动售货机、CD、ATM
	电子测量仪器	示波器、振荡器
	其他	医疗器械、汽车用试验器等

续表

民用电子设备	影像设备	电视机、博弈机
		视频器
	视频设备	数字音频、圆盘唱机、电子乐器
		磁带录音机、立体声机
	其他	附加电源、住宅通信设备等

除工业和民用以外，开关电源也已应用到宇航业和实验室。对开关电源的评估，一般是从其基本性能、尺寸重量、效率、可靠性和价格等五个方面考虑。不同的用途对这些方面的要求也各不相同。表 1-2 是就各应用领域对这五个方面的要求，按 5 分制进行的评估。其中应用于宇航业的开关电源对尺寸重量、效率和可靠性的要求很严格，而对价格却几乎忽略不计。与此相反，一般家庭等民用开关电源，却很注重价格。在工业方面，尤其是计算机和通信设备用的开关电源对可靠性要求很高，而实验室用开关电源却最注重其基本特性。

表 1-2 各应用领域对开关电源的要求

用 途	基本性能	重量尺寸	效 率	可 靠 性	价 格
人造卫星	4	5	5	5	1
工业用	4	4	4	5	4
实验室用	5	2	2	3	2
民 用	2	4	4	3	5

图 1-11 和图 1-12 归纳出开关电源成本和尺寸的变化动向。从世界范围看，这种电源技术的开发工作目前主要是由一些大学承担，如美国的麻省理工学院、加利福尼亚工大、迪克大学、弗吉尼亚工大、日本的九州大学、荷兰的德尔福特大学等，还有贝尔研究所、NTT 研究所、ESA（欧洲宇航局）等一些半官方机构也在进行一些开拓性研究，其成果被各厂商使用，从而形成了一种很有效的开发模式。

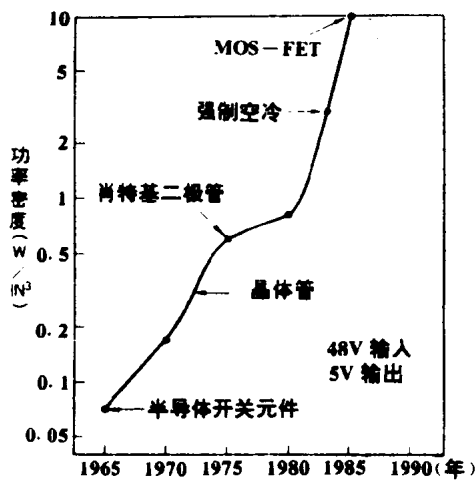


图 1-11 功率密度

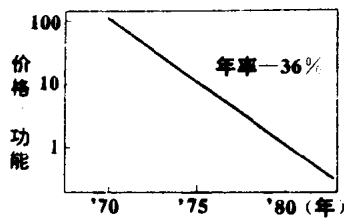


图 1-12 平均功能的价格变化

其次，开关电源生产技术的发展与生产规模的扩大使开关电源日趋小型化，而且器件

的安装和产品检验工艺已随着生产规模的扩大实现了自动化。目前装配在印制板上的 IC、电阻器、电容器等小型电子器件的自动化安装率已达 90% 以上。从开关电源的整体看，由于采用了许多功率晶体管、变压器、电解电容器等功率器件，其自动安装率一般为 60~70%。预计今后随着开关电源的多品种、小批量生产形式的发展，其生产规模将进一步扩大，与之相应的自动化安装率也必将进一步提高。

第二章 开关电源的基本电路与设计

一、开关电源基本电路的种类与特点

开关电源有 AC—DC、DC—AC 和 DC—DC 三种功率变换。现就 DC—DC 变换及其各种形式的基本性能谈谈该电源的分类和特点。

1. 开关电源的电路结构

图 2-1 所示是输入交流时的一般开关电源结构。

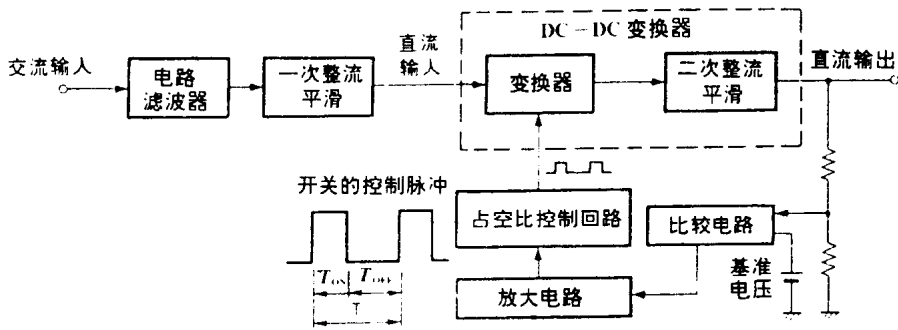


图 2-1 开关电源的电路结构

从图看出，交流输入到电路滤波器，后用二极管和电容器对输入进行整流平滑，并把这种直流电用开关元件变换成脉冲状交流电。为避免噪声，并从有益于实现小型和轻量化考虑，按 20kHz 至数百 kHz 的高频断续通过高频变压器后变换成任意电压，并经平滑整流后变换成直流。

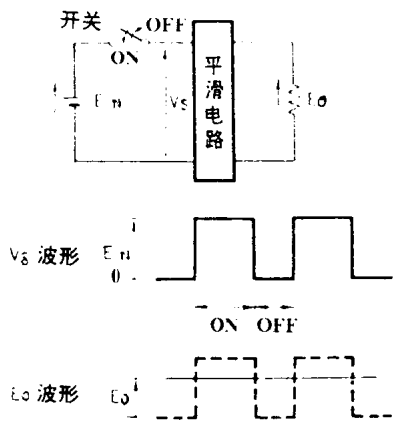


图 2-2 开关原理

这种电源方式先将部分直流输出电压通过比较电路和基准电压进行比较，其误差电压经占空比控制电路反馈，然后再通过控制开关元件的占空比调整输出电压。

另外，作为电源电路结构的一部分，还须有防止外加输入电压时的冲击电流和过流保护等各种功能，这些功能都要跟主电路变换方式（控制方式）协调。

2. 开关方式

(1) 开关原理

作为开关电源的主要部分，DC—DC 变换器的基本原理如图 2-2 所示。通过控制开关的占空比和由对断续电压起均匀化作用的电感器和电容器等能量储备元件构成的平滑功能，可以有效地调整电压的变

化。应用这种 DC—DC 变换器时要根据输出容量、性能、结构和成本等各个方面进行考虑。

(2) DC—DC 变换器的分类

DC—DC 变换方式如表 2-1 所示，分为非绝缘式和绝缘式，按开关驱动条件可分成自激式、他激式和脉冲幅度控制式及频率控制、振幅控制等各种电路方式。

表 2-1 DC—DC 变换方式的分类

绝缘方式	振荡方式	变换器电路方式		控制方式	备注
非绝缘式	他激式	降压形斩波器	单管式	脉冲宽度 或频率	Buck 式
		升压形斩波器			Boost 式
		反转型斩波器			Buck · boost 式
绝缘式		回扫式	多管式		ON/OFF 式
		正向式			ON/ON 式
		推挽式			推挽式
	半桥式				
	全桥式				
自激式	冲击线圈式	单管式	频率	RCC 式	
	洛埃耶式、井森式	多管式	振幅		

非绝缘式是直流输入和直流输出呈部分相交的连接式，绝缘式为可分离式。

自激式是一种在主开关部位产生振荡的工作方式。他激式则在主开关不同的部位产生振荡，且主开关元件跟该信号同步进行 ON、OFF 操作。

占空比控制方式如图 2-3 所示，其脉冲宽度控制是在固定开关工作频率的情况下，直接通过改变 ON 宽度控制输出的一种方式。频率控制是在大致固定 ON 或 OFF 宽度后，通过改变工作频率（改变单位时间的脉冲数）而达到控制输出的一种方式。

此外，还有控制脉冲峰高，即通过改变开关的输入电压而控制输出电压的振幅控制等方式，但要配以滑动调节器。

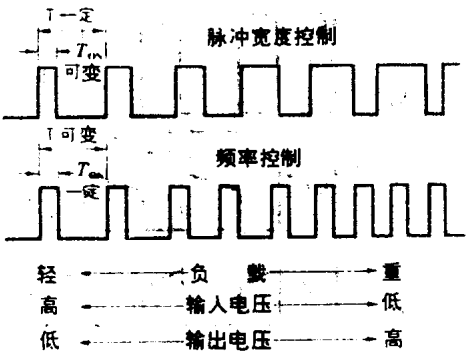


图 2-3 控制方式和基本原理

为简便起见，用理想式开关表示开关元件，并设定电抗器、二极管等所有电路元件的损耗都为零的理想状态，则各种 DC—DC 变换方式的基本原理如下所述。这里设：

E_{IN} ：输入直流电压

E_O ：输出直流电压

T ：开关周期

T_{ON} ：接通时间

T_{OFF} ：断开时间

D ：占空比 T_{ON}/T

I_O ：输出电流

P_O ：输出功率

并设开关元件和二次整流二极管的电压、电流分别为 V_{CE} 、 V_D 和 I_C 、 I_D 。

3. 各种方式的基本电路和特点

(1) 降压式斩波电路 (Buck 式)

本电路代表了开关电源的基本原理。图 2-4 所示的是其基本电路和各部工作波形。本电路这样配置开关元件 Q 和电感 L ，输出电压 E_O 就必然要低于输入电压 E_{IN} 。即

$$\frac{E_O}{E_{IN}} = \frac{T_{ON}}{T} = D$$

因通常都是根据

$$T \leq 2\pi \sqrt{LC}, R_L \leq \frac{2L}{T - T_{ON}}$$

确定元件常数，所以纹波电压 V_{rip} 即为

$$V_{rip} = \frac{T_{ON} (T - T_{ON}) E_O}{2LC}$$

电感 L 的电流变化部分 ΔI_L 为：

$$\Delta I_L = \frac{(E_{IN} - E_O) T_{ON}}{L}$$

自激式时变化范围达 $0 \sim \Delta I_L$ 。

由于开关元件的外加电压不会超过输入电压，且电流大致是跟输出电流相等的峰值电流，所以该电路不适宜大电流，但由于电路简单且效率高，所以多被用于多输出电源的动

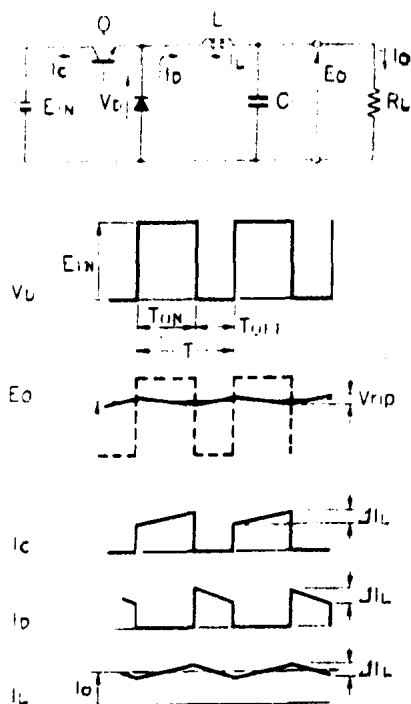


图 2-4 降压式斩波电路和各部分波形

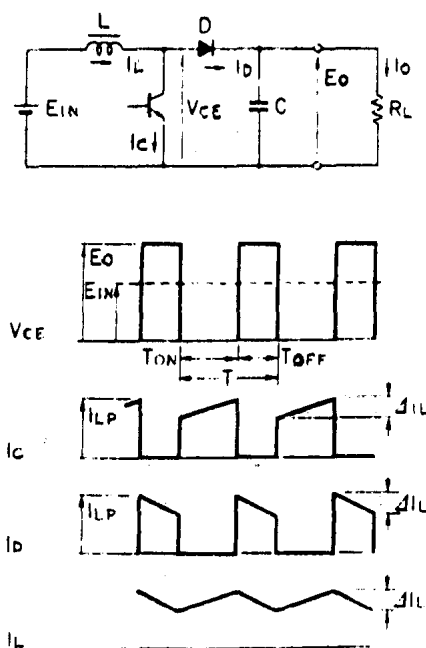


图 2-5 升压式斩波电路和各部分波形

(2) 升压式斩波电路 (Boost 式)

基本电路和各部分波形如图 2-5 所示。当开关元件 Q 为 ON 时, 即把能量 $W = LI_{LP}^2/2$ 储存到电感 L 里, 在开关元件 Q 为 OFF 时, 则通过二极管供给输出。输出电压 E_O 不能低于输入电压 E_{IN} 。同降压式斩波器一样, 也是

$$\frac{E_O}{E_{IN}} = \frac{1}{1-D}$$

$$\Delta I_L = \frac{E_{IN} T_{ON}}{L}$$

输出电流和纹波电压可分别由下式表示:

$$I_O = \frac{T_{OFF}}{T} \cdot \frac{E_O - E_{IN}}{2L}$$

$$V_{rp} = \frac{T_{ON} E_O}{CR_L}$$

其它特点同降压式斩波器一样, 不过升压式尤其易于大范围控制并能使输入电流连续。从这些特点看, 也可用于改善功率因数和用作变换器的动作调节器。

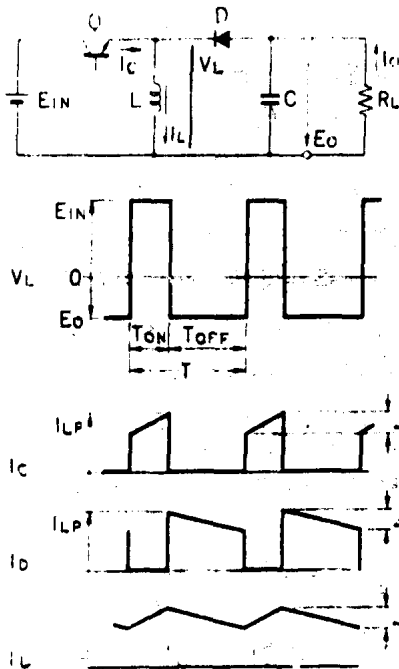


图 2-6 反转式斩波电路及其各部分波形

(3) 反转式斩波电路 (Buck · Boost 式)

反转式斩波器属于一种输入电压和输出电压的极性反转的形式, 其基本电路和各部波形如图 2-6 所示。该电路的基本原理跟升压式的一样, 也是当 Q 为 ON 时把能量储存到电感 L 里,

$$W = \frac{LI_{LP}^2}{2} = \frac{E_O^2 T_{ON}^2}{2LT}$$

而在 OFF 时作为输出供给。输出电压 E_O 和输入电压 E_{IN} 的关系是:

$$\frac{E_O}{E_{IN}} = \frac{D}{1-D}$$

电压极性发生了反转, 电压从比输入电压 E_{IN} 小的到比 E_{IN} 大的, 均可通过占空比进行大范围的控制。

输入电流 I_C 和输出电流 I_O 虽说都是断续式, 但却跟升压式一样, 也是

$$\Delta I_L = \frac{E_{IN} T_{ON}}{L}$$

$$I_O = \frac{T_{OFF}}{T} \cdot \frac{E_O}{2L}$$

所以 I_{LP} 大, 且平滑电容器的纹波电流值也大。

表 2-2 和图 2-7 是对各断续方式的比较, 都是在电感 L 很大、电流连续状态下的一种比较。