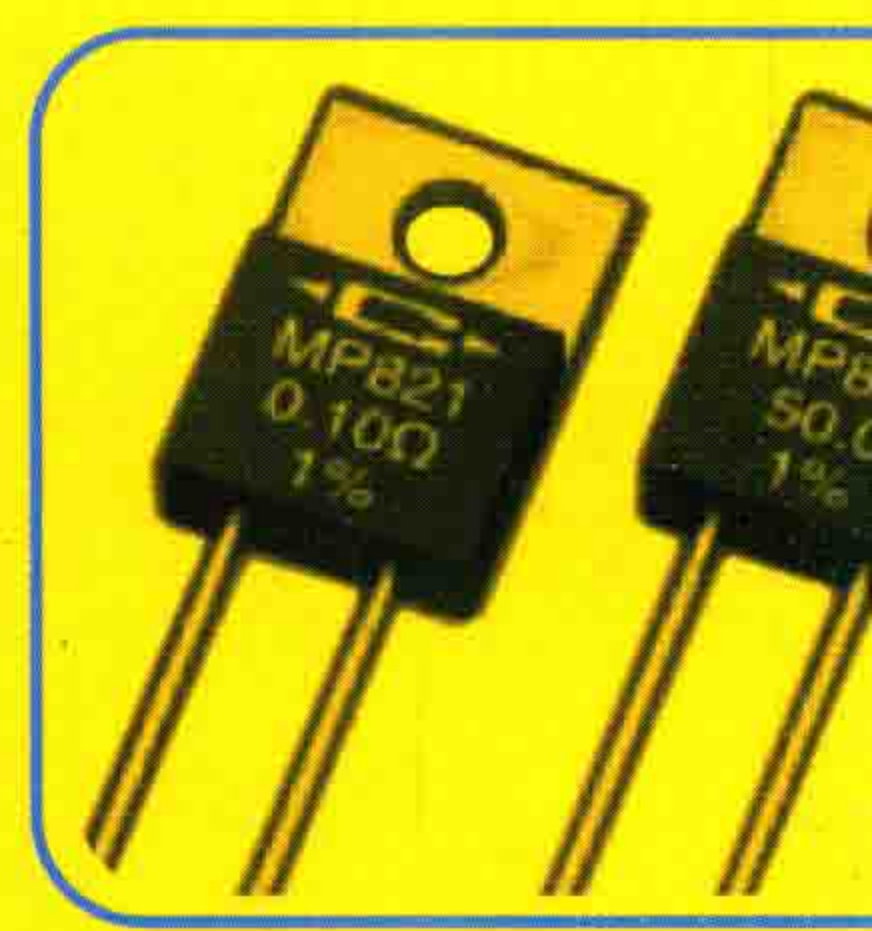
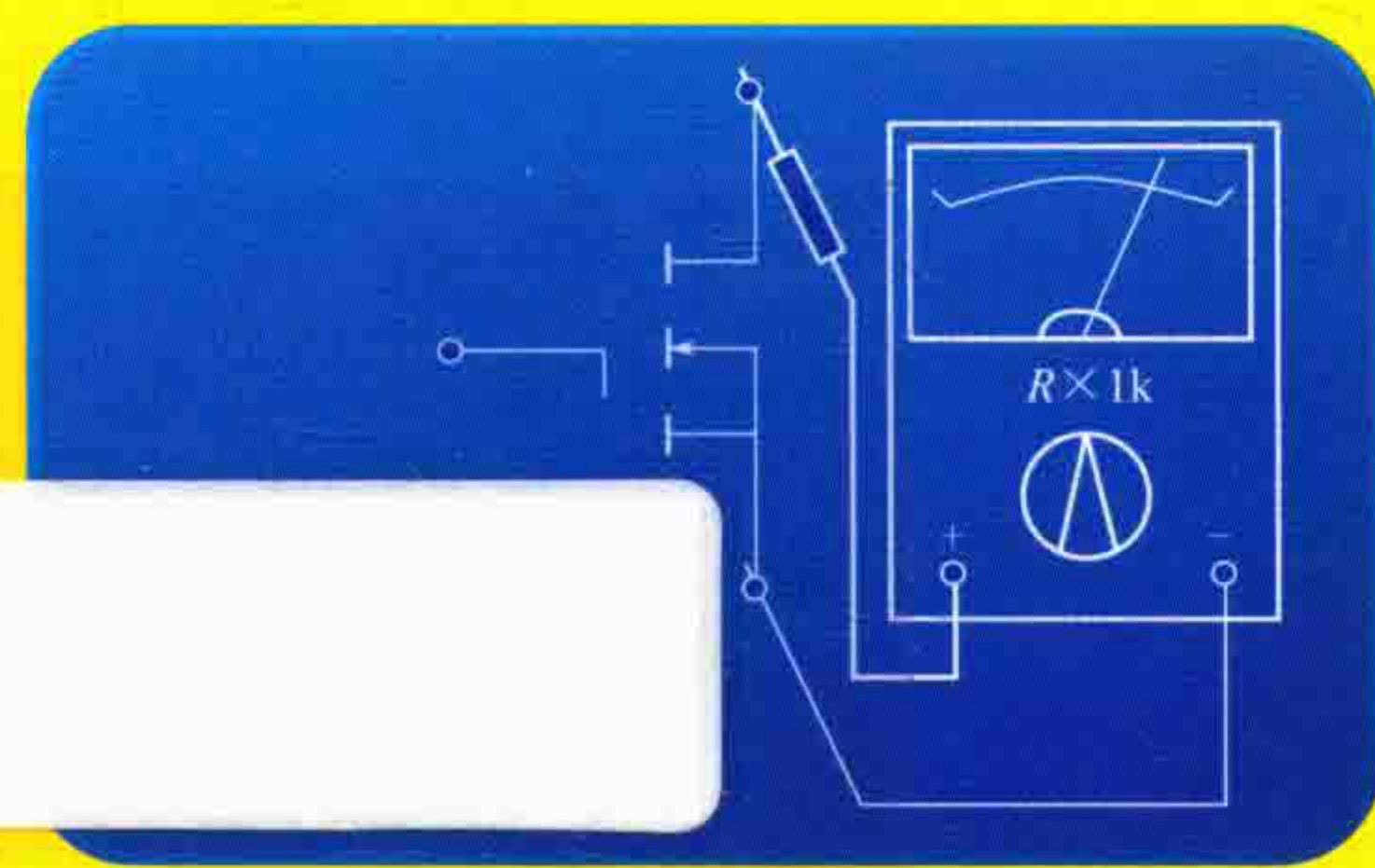
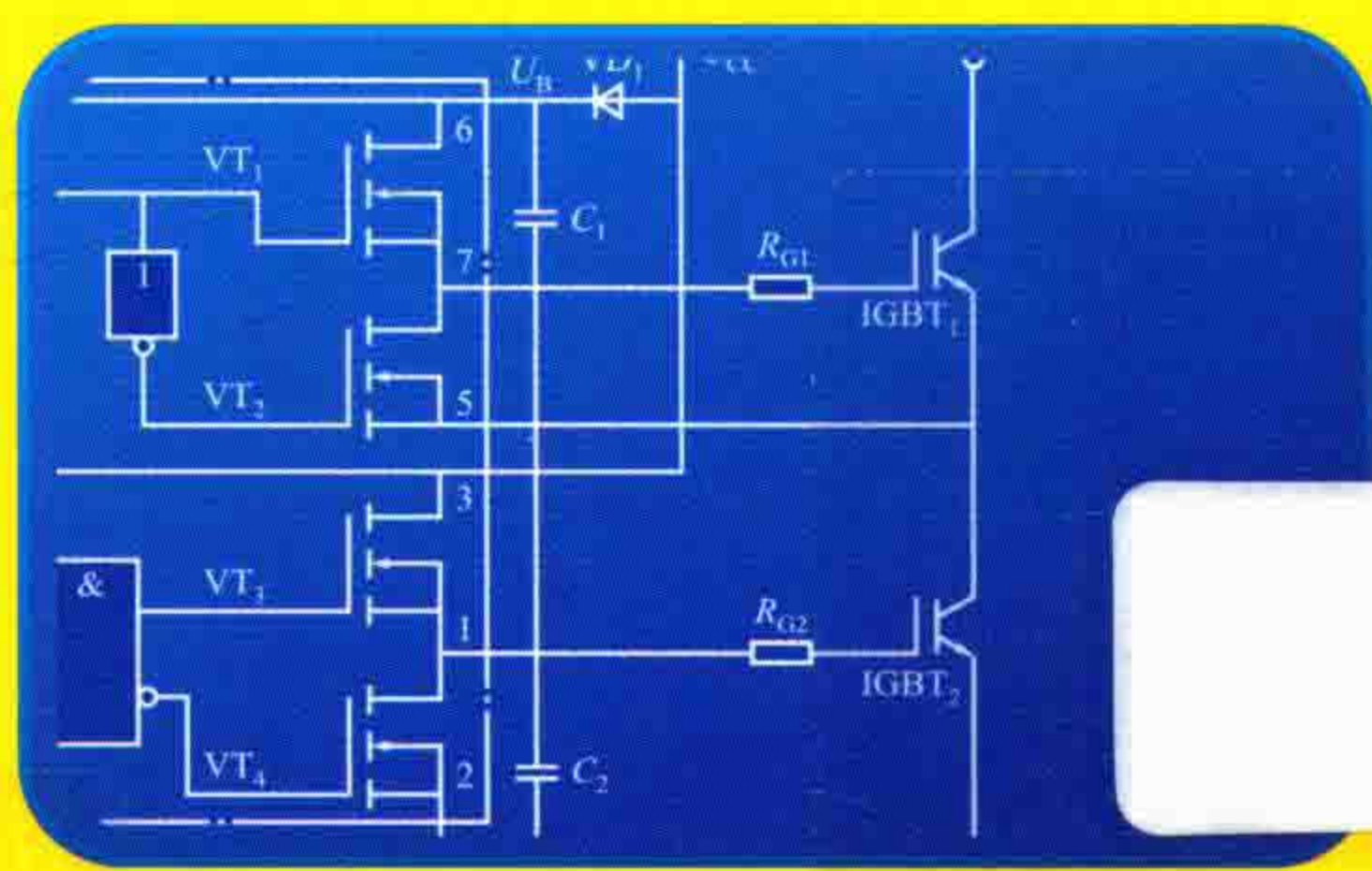


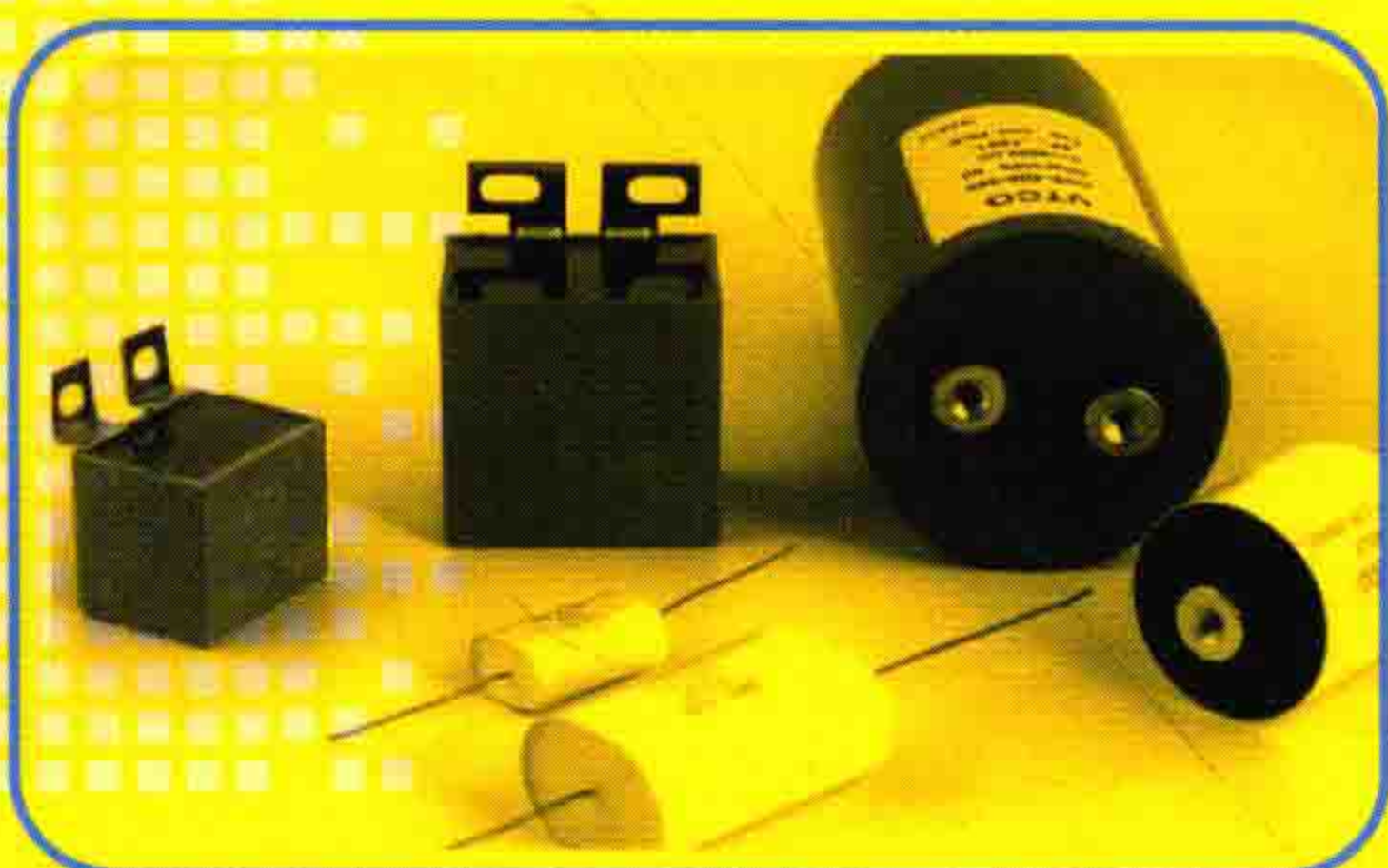
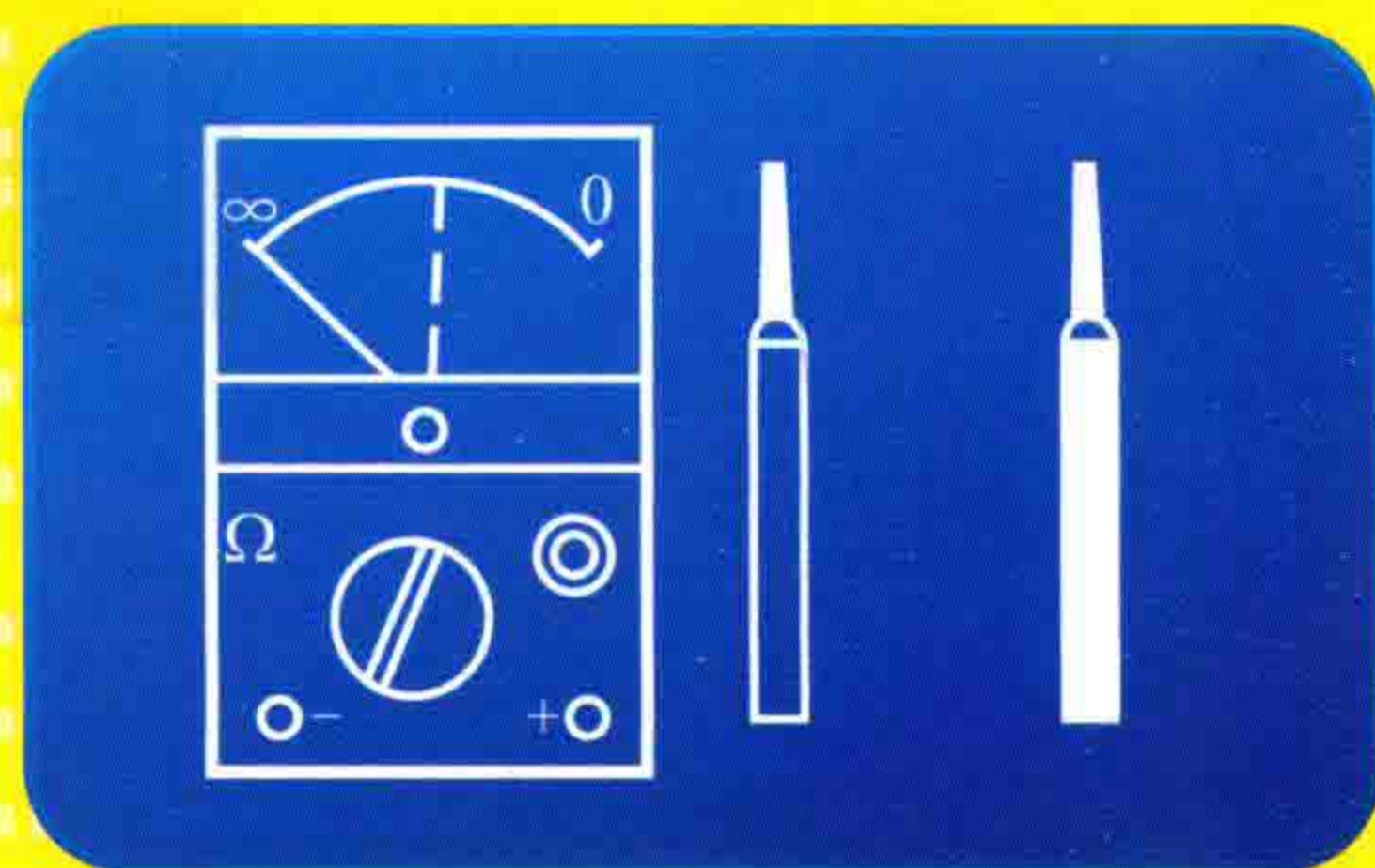
从零学起

开关电源设计入门

马洪涛 周芬萍 郭晓剑 编著



CONGLINGXUEQI
KAIGUAN DIANYUAN
SHEJI RUMEN



 化学工业出版社

从零学起

开关电源设计入门

马洪涛 周芬萍 郭晓剑 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

从零学起：开关电源设计入门/马洪涛，周芬萍，郭晓剑编著. —北京：化学工业出版社，2018.5
ISBN 978-7-122-31856-5

I. ①从… II. ①马…②周…③郭… III. ①开关电源-设计 IV. ①TN86

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 061725 号

责任编辑：卢小林
责任校对：吴 静

文字编辑：云 雷
装帧设计：王晓宇

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）

印 装：高教社（天津）印务有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 16 字数 394 千字 2018 年 7 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899

网 址：<http://www.cip.com.cn>

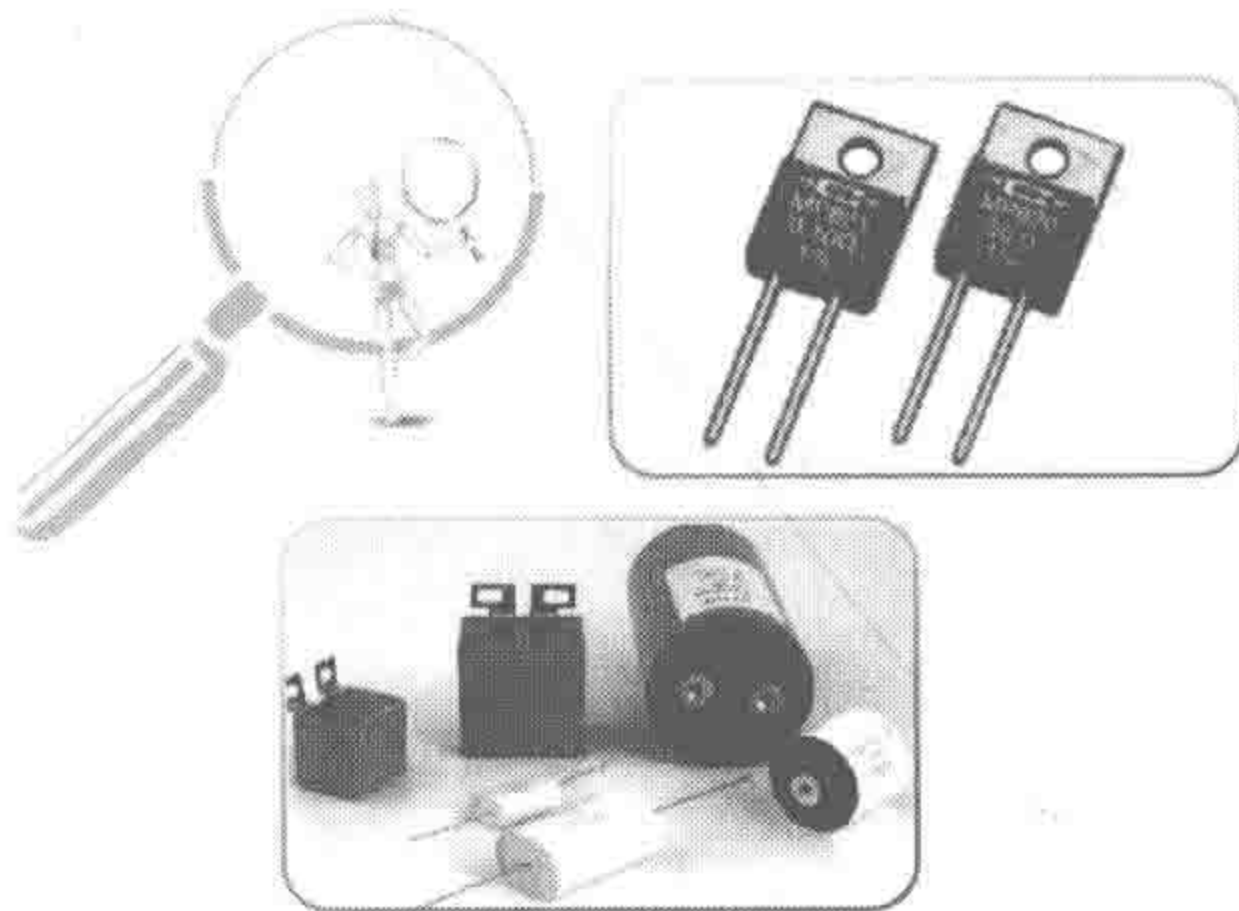
凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：59.00 元

版权所有 违者必究

前言

FOREWORD



开关电源简称 SMPS (Switch Mode Power Supply), 它是基于电感储能的基本原理, 从而实现高效节能的电源变换。开关电源代表了稳压电源的发展方向, 现已成为稳压电源的主流产品。通常所说的开关电源, 一般是指 AC/DC 电源变换器, 以 220V、50Hz 的交流电压转换为一种或多种直流电压最为常见。利用开关电源的基本原理, 也可将一种直流电压转换成另一种或几种直流电压, 这类电源被称作开关稳压器 (Switching Regulator)。本书将开关电源与开关稳压器一并讨论。

开关电源具有高效率、低功耗、体积小、重量轻等显著优点, 其电源效率可达 80% 以上, 比传统的线性稳压电源提高近一倍。开关电源的应用领域十分广泛, 不仅包括仪器仪表、测控系统和计算机内部的供电系统, 还适用于各种消费类电子产品。目前, 开关电源正朝集成化、智能化、模块化的方向发展。

半个多世纪以来, 开关电源集成化大致经历了四个发展阶段: 由分立元件构成的开关电源→由脉宽调制器集成电路构成的开关电源→单片开关式稳压器→单片开关电源集成电路 (简称单片开关电源)。单片开关电源自 20 世纪 90 年代中期问世以来便显示出强大的生命力, 为新型开关电源的普及创造了更好条件。

为了推广开关电源的实用技术, 现将作者近年来在教学与科研工作中积累的经验加以系统总结, 并参考国内外厂家提供的最新资料后撰写成此书, 以满足广大读者的需要。

本书融科学性、技术性、实用性于一体, 主要有以下特点。

第一, 详细阐述开关电源的基本工作原理与设计流程。详细介绍了组成开关电源的各种元器件特性及选择方法, 可满足电子技术人员和电子爱好者的需要。

第二, 重点介绍开关电源的常见结构、相关的控制技术 & 控制原理、调试与测试方法等, 可帮助读者解决在分析、设计及维修中遇到的一些技术问题。

第三, 内容精炼, 具有科学性、先进性及很高的实用价值, 可供电子技术人员、高校师生和电子爱好者参考。

第四, 结构严谨, 深入浅出, 图文并茂, 通俗易懂, 非常适合初学者阅读。

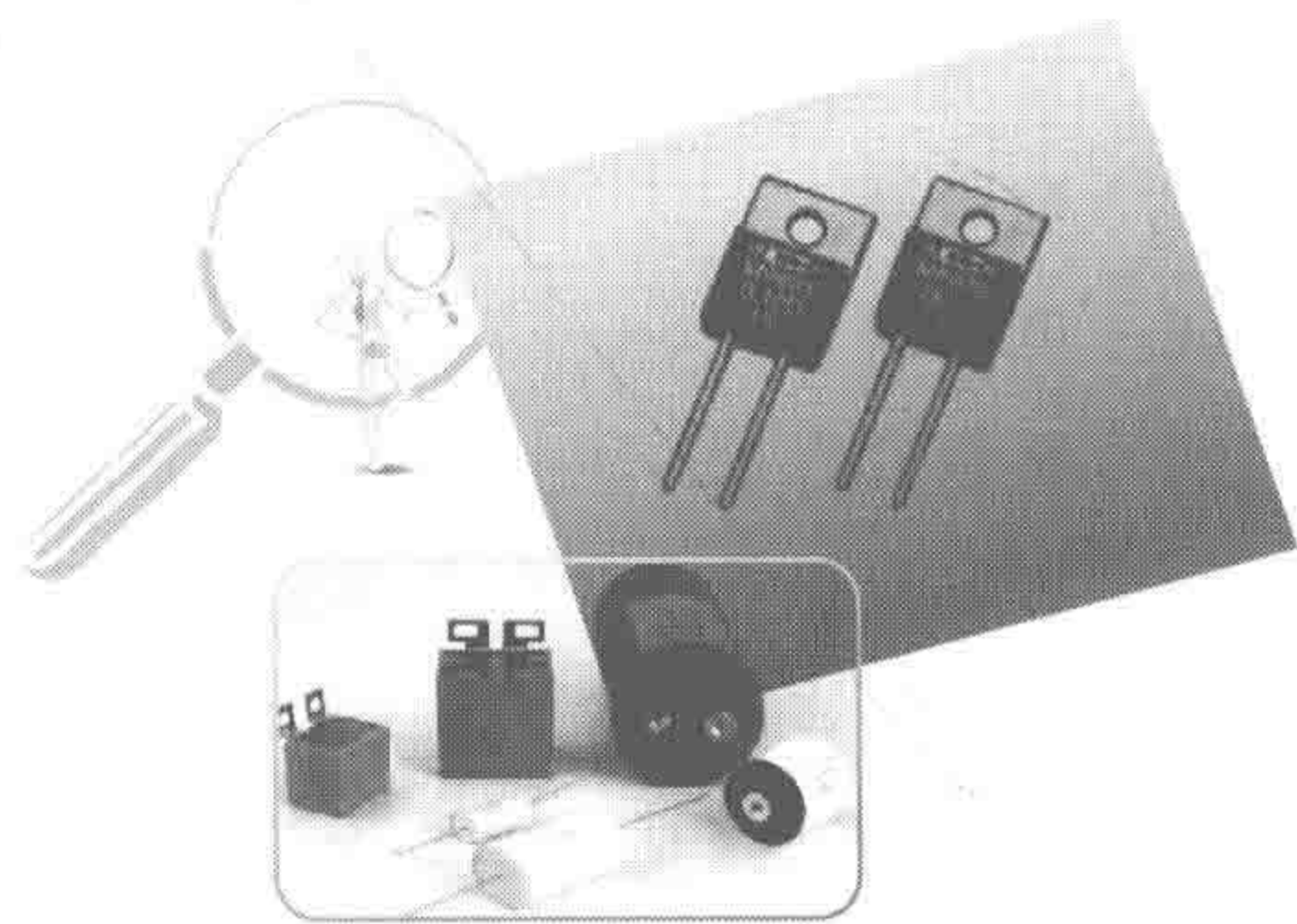
马洪涛撰写了第 1 章~第 6 章、第 9 章, 并完成了全书的审阅和统稿工作。周芬萍和郭晓剑撰写了第 7 章和第 8 章, 并绘制了本书的全部插图, 睢辰萌和睢丙东撰写了第 10 章。在本书撰写工作中还得到于国庆、安国臣、孟志永、刘金龙等同志的帮助, 在此一并致谢。

由于作者水平有限, 书中难免存在不足之处, 欢迎广大读者指正。

编著者

目录

CONTENTS



第1章 Page

开关电源的基础知识 1

- 1.1 线性电源的组成与工作原理 1
- 1.2 开关电源的组成与工作原理 2
- 1.3 开关电源的分类与特点 5
- 1.4 开关电源的主要技术指标 6
- 1.5 开关电源的相关术语 7
- 1.6 开关电源的发展趋势 9

第2章 Page

开关电源的拓扑结构与工作原理 11

- 2.1 降压式变换器的工作原理 11
- 2.2 升压式变换器的工作原理 13
- 2.3 降压/升压式变换器的工作原理 15
- 2.4 反激式变换器的工作原理 17
- 2.5 正激式变换器的工作原理 19
- 2.6 推挽式变换器的工作原理 21
- 2.7 半桥式变换器的工作原理 26
- 2.8 全桥式变换器的工作原理 29

第3章 Page

开关电源的主要元器件 33

- 3.1 PWM 控制器 33
- 3.2 功率开关管 34

3.3	整流二极管	47
3.4	电阻器	53
3.5	电容器	63
3.6	高频变压器	72
3.7	功率电感器	73
3.8	EMI 滤波器	74
3.9	光耦合器与基准电压源	76
3.10	运算放大器与电压比较器	82
3.11	瞬态电压抑制器 (TVS) 与自恢复保险丝	89

第4章

Page

	开关电源的控制电路	96
4.1	开关电源控制电路类型与特点	96
4.2	电压模式 PWM 工作原理	102
4.3	电流模式 PWM 工作原理	111
4.4	输出电压反馈电路原理	118
4.5	输出电流反馈电路原理	122

第5章

Page

	开关电源的辅助电路	124
5.1	尖峰电压吸收电路	124
5.2	尖峰电流抑制电路	127
5.3	过电压保护电路	127
5.4	过电流保护电路	129
5.5	欠电压保护电路	131
5.6	功率开关管驱动电路	131

第6章

Page

	开关电源的设计流程	138
6.1	选择拓扑结构	138
6.2	确定控制电路	140
6.3	选择主电路元件	141
6.4	确定辅助电路	147
6.5	整理电路原理图	148

6.6	制作高频变压器	148
6.7	设计印制电路板	159
6.8	安装与调试	163

第7章	Page
开关电源的调试与测试	164

7.1	调试仪器设备的选择	164
7.2	调试方法与步骤	170
7.3	关键测试点的选择	171
7.4	调试中的注意事项	173
7.5	测试仪器设备的选择	174
7.6	开关电源的性能测试	178
7.7	开关电源的波形测试	182

第8章	Page
单片开关电源的工作原理	186

8.1	LM2576 的工作原理	186
8.2	TOPSwitch 系列的工作原理	189
8.3	TinySwitch 系列的工作原理	193
8.4	VIPer 系列的工作原理	198

第9章	Page
开关电源的设计实例分析	203

9.1	30W 通用输入电压开关电源	203
9.2	手机充电器开关电源	211
9.3	电动车充电器电源	215
9.4	20W 多路输出辅助电源	219

第10章	Page
功率因数校正 (PFC) 电路	222

10.1	功率因数的基本概念	222
10.2	无源功率因数校正电路	226
10.3	有源功率因数校正电路	228

10.4	L6562 型 PFC 控制电路	235
10.5	80W 宽电压 PFC 电路设计	242

		Page
参考文献		246

第1章



开关电源的基础知识

一般来说,稳压电源可以分为线性稳压电源和开关稳压电源两大类,简称线性电源和开关电源。本章简单介绍线性稳压电源的工作原理,重点介绍开关电源的工作原理与相关基础知识。

1.1 线性电源的组成与工作原理

1.1.1 线性稳压电源的组成

线性稳压电源一般由电源变压器、整流电路、滤波电路和稳压电路四部分组成,其结构如图 1-1-1 所示。



图 1-1-1 线性稳压电源的组成框图

电源变压器将来自电网的交流输入电压(例如 220V, 50Hz)变换为较低的交流电压(例如 9V、12V、15V 等)。电源变压器通常有两个或两个以上的绕组,其中接交流电源的绕组叫初级绕组,其余的绕组叫次级绕组。初级绕组和次级绕组在电气上是绝缘的,因此,电源变压器在电压幅度变换的同时,实现了与电网电气隔离的作用。电源变压器也称为工频变压器,其工作频率为 50Hz 或 60Hz,体积较大,比较笨重。

整流电路是通过具有单向导电性能的半导体二极管,将正负交替的正弦交流电压变换为单向的脉动直流电压。整流电路通常选用由 4 只二极管组成的桥式整流器件,简称整流桥。整流电路输出的脉动直流电压含有很大的交流成分,不能直接供电子电路使用。需要在整流电路之后连接滤波电路。

在中小功率线性电源中通常采用电容滤波电路,将滤波电容直接并联在整流电路的输出端即可组成电容滤波电路。滤波电路能够滤除脉动直流电压中大部分的交流成分,使其变成比较平滑的直流电压。虽然滤波后的直流电压比较平滑,但还是有一定的纹波电压。并且,当电网的交流电压或者电源的负载电流变化时,滤波后的直流电压也将发生变化。要想得到恒定的输出电压,还需要加入稳压电路。

稳压电路能够在电网电压、负载电流、环境温度等发生变化时,自动调节电路参数,使电源的输出电压保持恒定。并且可以将输出电压的纹波降低到很小的数值。



小贴示

稳压电路才是稳压电源的核心部分。

1.1.2 线性稳压电源的工作原理

线性稳压电源的稳压电路结构与等效电路如图 1-1-2 所示，其中图 (a) 为结构框图，图 (b) 为等效电路。图中，VT 被称为调整管，其作用可等效为可变电阻 R 。VD_Z 为稳压二极管，用于产生基准电压（也称参考电压） U_{REF} 。 R_2 和 R_3 被称为取样电阻，它们用来检测输出电压 U_O ，并分压产生反馈电压 U_F 。EA 为误差放大器，它可将反馈电压 U_F 与基准电压 U_{REF} 进行比较放大，从而控制调整管的导通情况。 R_L 为负载电阻。

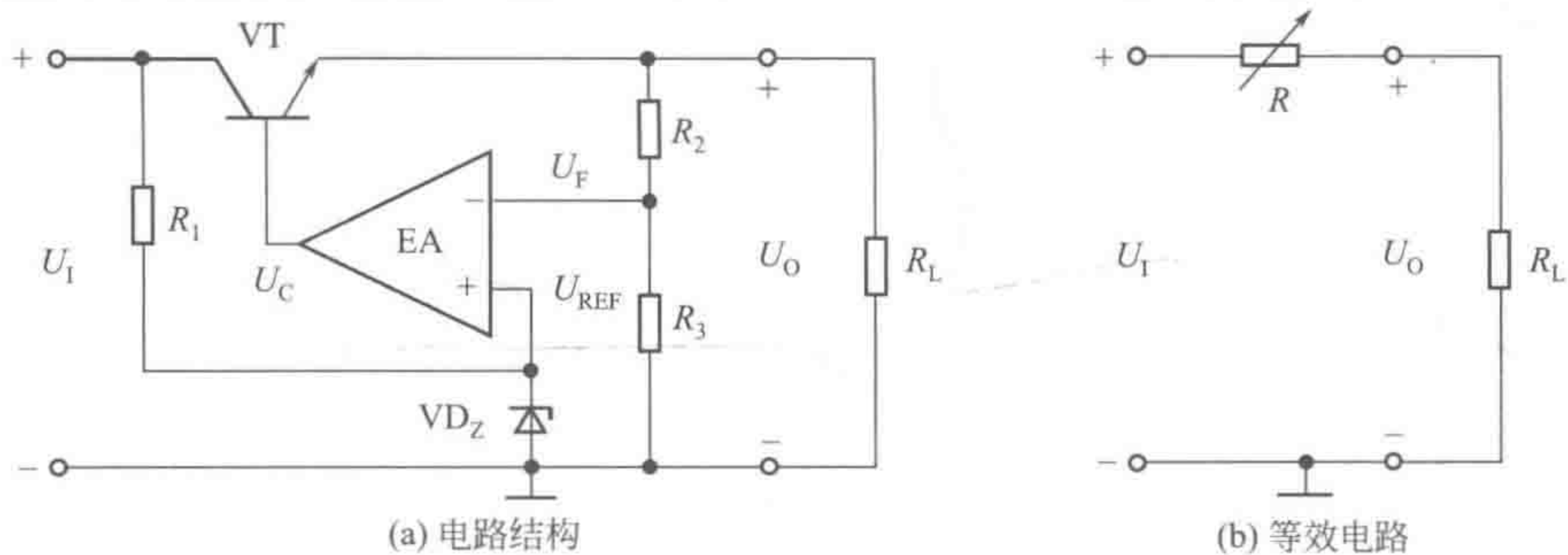


图 1-1-2 线性电源的稳压电路结构框图与等效电路

当某种原因（例如负载电流增加）造成输出电压 U_O 降低时，反馈电压 U_F 也随之降低。误差放大器 EA 将反馈电压 U_F 与基准电压 U_{REF} 进行比较放大，其输出电压 U_C 将升高，这将使调整管 VT 的基极电流增大，等效电阻 R 减小，引起输出电压 U_O 回升，最终使输出电压 U_O 保持稳定值。

通过图 (b) 的等效电路，也可以换一种方法来解释稳压原理。例如某种原因造成输入电压 U_1 升高时，由于 R 与 R_L 串联，如果 R 为固定电阻，必然使输出电压 U_O 也跟着升高。但是，这里的 R 是由调整管 VT 等效的可变电阻，当电路检测到 U_O 升高时，会自动控制调整管 VT 的导通情况，使等效的电阻 R 变大，从而使输出电压 U_O 保持不变。



小贴示

由于调整管 VT 串联在输入电压 U_1 与输出电压 U_O 之间，因此这种稳压电源也称为串联稳压电源。

线性稳压电源的输出电压 U_O 低于输入电压 U_1 ，属于降压式稳压电源。线性稳压电源具有响应速度快、输出纹波小、噪声低的特点，广泛应用于各种电子线路中。但是，由于线性电源的体积较大，效率较低，不利于节能环保，在众多应用领域正在被开关电源取代。

1.2 开关电源的组成与工作原理

1.2.1 开关稳压电源的组成

开关稳压电源通常由电磁干扰 (EMI) 滤波器、整流电路、滤波电路和 DC/DC 变换器

电路组成。其典型结构如图 1-2-1 所示。



图 1-2-1 开关稳压电源的组成框图

交流输入电压（通常是 220V，50Hz）经过 EMI 滤波器进入整流电路。EMI 滤波器用于减小开关电源的噪声干扰，阻止开关电源产生的噪声传输到电网中，避免干扰电网中的其他电器设备（例如通信设备）。

整流电路直接将交流输入电压整流，然后通过滤波电路产生较高的直流电压（通常是 300V 左右），称为直流高压。该直流电压为 DC/DC 变换器的 DC 输入电压。

DC/DC 变换器也称功率变换电路，是开关电源的核心部分，通常由功率开关管、高频变压器和 PWM 控制器等组成。DC/DC 变换器先将 DC 输入电压变为高频交流电压，施加到高频变压器的初级绕组。高频变压器次级绕组感应出的交流电压再经过高频整流与滤波电路，最终转换为 DC 电压输出。因为变压器的初级绕组和次级绕组相互绝缘，所以通过高频变压器实现了 AC 输入和 DC 输出之间的电气隔离。

小贴示

DC/DC 变换器是开关稳压电源的核心电路。

1.2.2 开关稳压电源的工作原理

开关稳压电源的核心电路是 DC/DC 变换器，为了和线性稳压电源对比，下面以降压式 DC/DC 变换器为例，介绍开关稳压电源的基本工作原理。降压式 DC/DC 变换器的电路结构与等效电路如图 1-2-2 所示。其中图(a)为电路结构，图(b)为等效电路。

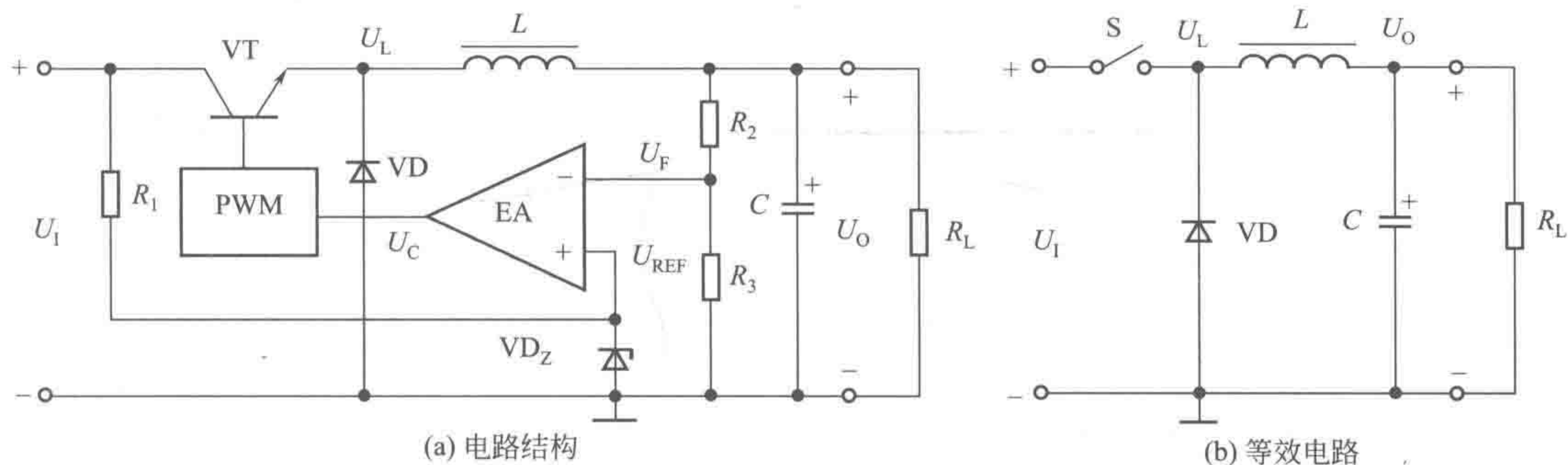


图 1-2-2 降压式 DC/DC 变换器的电路结构与等效电路

图中，VT 被称为功率开关管，其作用可等效为能够高速动作的开关 S。VD_Z 为稳压二极管，用于产生基准电压（也称参考电压） U_{REF} 。R₂ 和 R₃ 被称为取样电阻，它们用来检测输出电压 U_O ，并分压产生反馈电压 U_F 。EA 为误差放大器，它可将反馈电压 U_F 与基准电压 U_{REF} 进行比较放大，从而产生控制电压 U_C 。其中，误差放大器的工作原理与线性稳压电源完全相同。VD 为续流二极管，用于延续电感 L 中的电流。L 为滤波电感，因为流过较大的负载电流，也称功率电感。C 为输出滤波电容。R_L 为负载电阻。

与线性稳压电源不同的是，开关稳压电源具有 PWM 控制器。PWM 控制器将控制电压

U_C 的变化转换为控制信号占空比 D 的变化, 使功率开关管 VT 按照不同的占空比导通与关断, 从而实现输出电压的改变。

DC/DC 变换器的工作原理可以结合图 1-2-2(b) 中的等效电路和图 1-2-3 中波形的占空比变化来解释。当 PWM 控制器使功率开关管 VT 导通时, 相当于开关 S 闭合。此时, 输入电压 U_1 加到了滤波电感 L 左端, 电压 $U_L = U_1$; 经过一段时间 t_{ON} (t_{ON} 称为导通时间) 以后, PWM 控制器使功率开关管 VT 关断, 相当于开关 S 断开。此时, 续流二极管 VD 导通, 使滤波电感 L 左端电压为 $0V$, 即 $U_L = 0V$ 。经过一段时间 t_{OFF} (t_{OFF} 称为关断时间) 以后, PWM 控制器再次使 VT 导通, 进入下一个开关周期, 并一直重复下去。

导通时间 t_{ON} 与关断时间 t_{OFF} 之和为开关周期 T , 即 $T = t_{ON} + t_{OFF}$ 。通常开关周期 T 是固定不变的, 当导通时间 t_{ON} 变长的时候, 关断时间 t_{OFF} 就相应的变短。导通时间 t_{ON} 与开关周期 T 的比值叫做占空比, 用 D 来表示, 即 $D = t_{ON}/T$ 。

图 1-2-3 中给出了 3 种不同占空比时 U_L 点的电压波形, 其中图(a) 是 $D = 0.25$ 时的电压波形, 图(b) 和图(c) 分别是 $D = 0.5$ 和 $D = 0.75$ 时的电压波形。由于电感 L 和电容 C 的滤波作用, U_L 点的电压波形经过 LC 滤波之后, 将变为平滑的直流输出电压 U_O 。

输出电压 U_O 为输入电压 U_1 与占空比 D 的乘积, 即 $U_O = U_1 \times D$ 。改变占空比 D , 就能改变导通时间 t_{ON} , 进而改变输出电压 U_O 。在相同的输入电压下, 占空比越大, 对应的输出电压就越高。在 DC/DC 变换器中, PWM 控制器就是用来改变占空比 D 的。

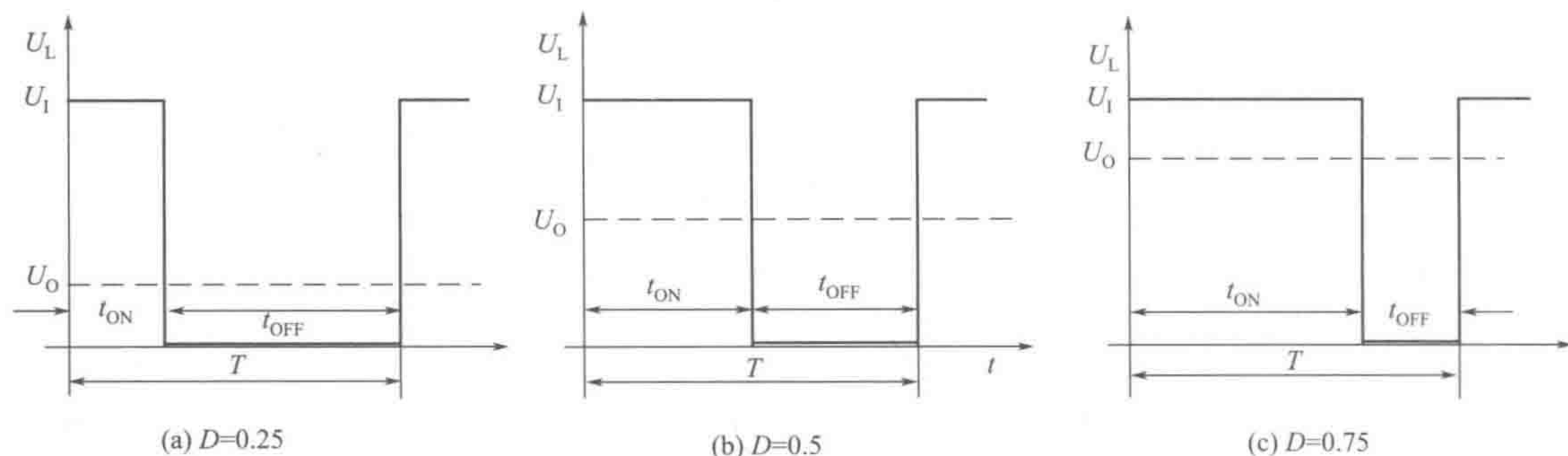


图 1-2-3 降压式 DC/DC 变换器的占空比与输出电压的关系

在图 1-2-2 所示的开关电源中, 当电路检测到 U_O 升高时, 误差放大器 EA 输出电压 U_C 将降低, 通过 PWM 控制器使占空比 D 下降, 从而使输出电压 U_O 保持不变。



小贴士

PWM 控制器是开关稳压电源的控制核心。

与线性稳压电源相比, 开关电源的功率开关管 VT 等效为开关 S 而不是可变电阻 R , 当 VT 导通时, 其压降通常仅为 $1V$ 左右, VT 的导通损耗比线性稳压电源小得多。线性电源调整管 VT 的功率损耗为输入/输出压差与负载电流的乘积, 即 $P_D = (U_1 - U_O) \times I_L$, 通常 $(U_1 - U_O)$ 需要 $3V$ 以上。开关电源功率开关管 VT 的导通损耗为 $P_D = 1 \times I_L$, 而与 $(U_1 - U_O)$ 的大小几乎无关。

例如在 $12V$ 输入, $5V$ 输出的线性电源中, 如果负载电流为 $1A$, 则电源调整管 VT 的功率损耗为 $P_D = (12 - 5) \times 1 = 7W$; 如果是相同参数的开关电源, 功率开关管 VT 的功率损耗仅为 $P_D =$

$1 \times 1 = 1\text{W}$ ，比线性电源损耗小得多，这就是开关电源能够获得高效率的根本原因。

当然，开关电源除了功率开关管 VT 的导通损耗以外，还有 VT 的开关损耗以及续流二极管 VD 的损耗等。尽管如此，开关电源的总体损耗也比线性电源小很多。

1.3 开关电源的分类与特点

1.3.1 开关电源的分类

随着开关电源的普及，开关电源开始广泛应用于各个领域，开关电源的分类也是五花八门。根据应用领域和侧重的点不同，同一个开关电源也可以划分到几个不同的类别。下面对开关电源常见的几种分类做简单的介绍。

(1) AC/DC 电源

AC/DC 开关电源是将交流电压变换为直流电压的开关电源。这类电源通常是将 220V、50Hz 或 60Hz 的交流电网电压转换为较低的直流电压，同时实现交流电网与直流输出之间的电气隔离。AC/DC 开关电源的种类很多，其功率范围可以从几瓦一直覆盖到几千瓦，属于开关电源的第一大类别。

(2) DC/DC 电源

DC/DC 开关电源是将一种直流电压变换为另一种直流电压的开关电源。同时实现直流输入电源与直流输出电压之间的电气隔离。其功率范围通常在几瓦到几百瓦，属于开关电源的另一大类别。

(3) 开关稳压器

开关稳压器 (Switching Regulator) 是一种简易的 DC/DC 开关电源，这种电源的输入电压与输出电压没有电气隔离，但电源效率可达 95% 以上，多用在电气设备内部的电压变换。例如笔记本电脑主板上的各种电压变换器等。

(4) 模块电源

这类开关电源通常做成模块形式，既有 AC/DC 模块，也有 DC/DC 模块，其输入电压和输出电压都有很多规格，以使用户选择使用。模块电源的功率范围较小，一般只有几瓦到几十瓦。

(5) 电源适配器

电源适配器是目前最常见的开关电源之一，广泛用于我们的日常生活中。例如手机、数码相机和平板电脑充电适配器，路由器电源适配器等。

(6) 特种电源

特种电源是具有特定用途的开关电源。电动自行车充电器就是其中的一种，这类开关电源是针对特定负载设计的，通常具有恒压、恒流输出特性，以及电池反接保护等功能。

1.3.2 开关电源的特点

同线性电源对比，开关电源有以下优点。

① 功耗小，效率高，节能效果显著。开关电源的功率损耗较低，其效率通常在 80% 以上，而线性电源一般只有 40% 左右。开关电源具有显著的节能效果。

② 体积小，重量轻。开关电源没有笨重的工频变压器，又不需要很大的散热片。从而

减小了电源的体积和重量。其体积和重量通常只有线性电源的30%左右。

③ 输入电压范围宽。开关电源的输入电压范围可以做得很宽，例如90~260V，称为通用输入电压，可以在全球任何国家的民用电网中使用，不必考虑电压匹配的问题。

任何事情都具有两面性，同线性电源对比，开关电源也有以下缺点。

① 电磁干扰较大。开关电源中的功率开关管在开关过程中产生的尖峰电压和尖峰电流会造成较大的电磁干扰和电磁辐射。这些干扰会传入工频电网，对其附近的其他电子设备（例如通信设备）产生较为严重的干扰。

② 输出纹波较大。开关电源中的电压/电流多为矩形波，滤波难度较大，使输出电压/电流中含有较大的纹波及噪声成分。

③ 生产工艺复杂，故障率高，维修麻烦。开关电源中的元器件较多，对电路板的布局与布线也有更高的要求，任何元器件的损坏都可能造成电源故障，给生产、调试和维修带来很多的不便。

1.4 开关电源的主要技术指标

开关电源的技术指标多达几十种，其主要技术指标体现在以下几个方面。

(1) 额定输入电压

额定输入电压是开关电源正常工作的输入电压范围，一般分为固定电压和通用电压两种情况。固定电压是针对特定电网电压设计的，允许电压变化范围较小，例如 $220V \pm 20\%$ 。有些电源设有选择开关，可以适用于两种不同的电网电压，例如110V/220V。通用电压是针对全球各种电网电压设计的，允许电压变化范围很大，能够覆盖所有国家的电压规范。在全球范围内，日本的电网电压最低，为100V、50/60Hz；印度和科威特等国的电网电压最高，为240V、50Hz。通用电压范围需要覆盖100~240V，为了留有安全余量，通常选择为90~260V或者85~265V。

(2) 额定输入电流

额定输入电流是开关电源满载工作时的输入电流，通常给出的是额定输入电压范围内可能出现的输入电流最大值。

(3) 额定输出电压

额定输出电压是开关电源正常工作时输出电压的标称值，有些开关电源可能有两组及两组以上的输出端，可以有不同的输出电压标称值。例如24V、12V、5V等。

(4) 额定输出电流

额定输出电流是开关电源满载工作时输出电流的标称值，有些开关电源可能有两组及两组以上的输出端，可以有不同的输出电流标称值。例如12V/3A、5V/1A等。

(5) 电压调整率（线路调整率）

电压调整率（Line Regulation）也称线路调整率，是指输入电压变化时，输出电压变化量与额定输出电压的比值，通常用百分数表示，例如0.2%。该数值越小，表明输出电压的稳定度越高。

(6) 电流调整率（负载调整率）

电流调整率（Load Regulation）也称负载调整率，是指在额定输入电压时，由于负载电流变化引起的输出电压变化量与额定输出电压的比值，通常用百分数表示，例如1.0%。

该数值越小，表明输出电压的稳定度越高。

(7) 输出纹波（噪声）电压

输出纹波电压是指开关电源输出端子间的电压纹波，纹波频率成分主要由输入电网频率和电源开关频率组成，通常用峰-峰值（ V_{p-p} ）表示。

此外，电源开关频率的高次谐波叠加到开关电源输出端子间形成纹波电压以外的另一种高频噪声成分，称为噪声电压，也用峰-峰值（ V_{p-p} ）表示。

纹波电压和噪声电压一般不能明显区分，大多数电源产品将其统一按纹波（或噪声）电压来对待。该电压值多在几十至几百 mV_{p-p} 。

(8) 电源效率

开关电源的效率是指输出功率与输入有功功率的比值，通常用百分数表示，例如 80%。该数值越大，表明输出电源的效率越高。现代开关电源的效率已经可以做到 90% 以上了。

(9) 功率因数（PF）

开关电源的功率因数（Power Factor, PF）是指输出功率与输入视在功率的比值。输入视在功率为输入电压有效值与输入电流有效值的乘积。传统的 AC/DC 开关电源输入部分采用桥式整流加电容滤波的方式，因此输入电流的波形为窄脉冲而不是正弦波，其功率因数只有 0.6 左右，会造成电网资源的浪费。现代开关电源通常采用功率因数补偿（也称校正）技术，功率因数可达 0.95 以上。美国和欧盟等国家对开关电源的功率因数有强制性要求。例如，大于 75W 的开关电源，功率因数必须达到 0.90 以上。

1.5 开关电源的相关术语

开关电源相关的术语很多，用来描述开关电源的工作原理、技术参数与相关技术等，下面介绍一些最基本的术语，供读者参考。

(1) 拓扑结构

开关电源的拓扑结构（Topology）是指功率变换器的电路结构，也就是 DC/DC 变换器的结构。拓扑结构不同，与之配套的 PWM 控制器类型和输出整流/滤波电路也有差异。拓扑结构也基本决定了开关电源的工作原理及输出特性。常见的拓扑结构有降压式、升压式、正激式、反激式、推挽式、半桥式和全桥式等十几种。

(2) 正激型/反激型

从能量传输的角度来说，凡是在功率开关管导通期间向负载传输能量的 DC/DC 变换器统称为正激型变换器。除了典型的单端正激式变换器以外，降压式、推挽式、半桥式和全桥式 DC/DC 变换器也属于正激型变换器。

反激式 DC/DC 变换器（Flyback Converter），也称回扫式变换器。这类 DC/DC 变换器是在功率开关管截止期间向负载传输能量的。除了典型的单端反激式变换器以外，升压式 DC/DC 变换器和极性反转式 DC/DC 变换器也属于反激型变换器。

(3) 连续模式/不连续模式

连续模式（Continuous Conducting Mode, CCM）也称连续导电模式。这种模式下，在一个开关周期（ T ）内，电感电流（或电感存储的磁场能量）始终大于零，其电感的电流波形如图 1-5-1(a) 所示。由图可见，在开关管导通（ t_{ON} ）期间，电感电流 I_L 是沿斜坡上升的；在开关管关断（ t_{OFF} ）期间，电感电流沿斜坡下降。如果在开关管关断期间电感的电流

没有下降到零，下个周期开关管导通时，电感电流就会重新上升，电感中的电流是连续的，不会中断，因此称之为连续模式。

不连续模式（Discontinuous Conducting Mode, DCM）也称不连续导电模式或断续模式。这种模式下，在一个开关周期（ T ）内，电感电流（或电感存储的磁场能量）会下降到零，其电感的电流波形如图 1-5-1(b) 所示。由图可见，在开关管关断（ t_{OFF} ）期间电感电流已经下降到零，在下一个开关周期开关管再次导通（ t_{ON} ）时，电感电流就会从零开始上升，电感中的电流是断断续续的，因此称之为不连续模式或者断续模式。

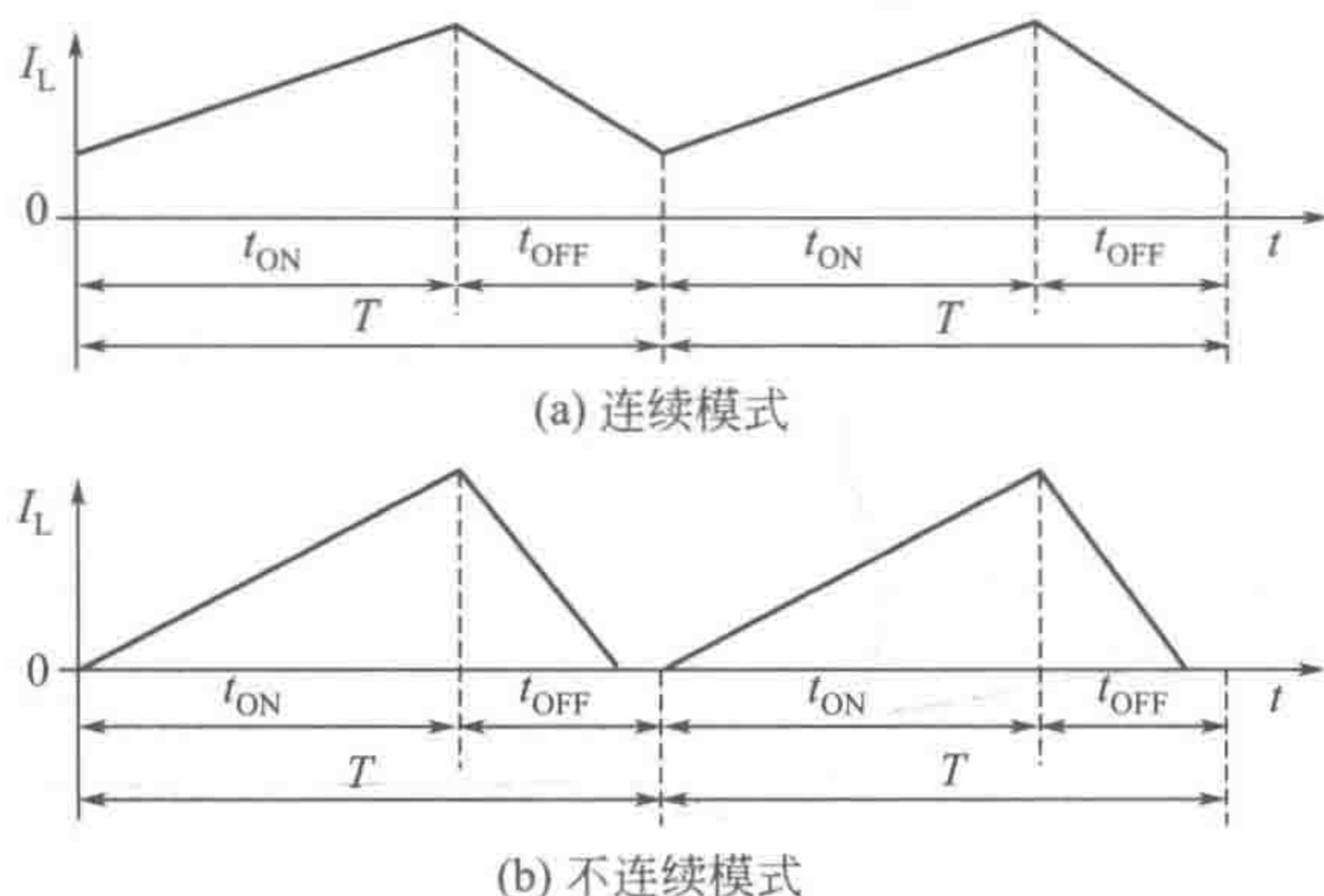


图 1-5-1 连续模式/不连续模式电感电流波形对比

(4) PWM（脉宽调制）

脉冲宽度调制（Pulse Width Modulation, PWM），简称脉宽调制，是开关电源中常用的一种调制控制方式。其特点是开关频率 f 固定（即开关周期 T 不变），通过改变脉冲宽度，使开关电源的输出电压发生变化。

(5) 占空比

占空比（Duty Cycle Ratio，符号为“ D ”）是描述脉冲宽度的一项参数，通常用百分数表示。在开关电源中，如果开关周期为 T ，功率开关管导通时间为 t_{ON} ，其占空比则为 $D = t_{ON} / T$ 。根据开关电源的拓扑结构，占空比 D 的变化范围通常为 $0 \sim 50\%$ 或者 $0 \sim 100\%$ 。

(6) 基准电压

基准电压也称参考电压（Reference Voltage），是由基准电压源产生的稳定不变的电压，通常用 U_{REF} 表示。开关电源的输出电压是基准电压的固定倍数，因为基准电压是稳定的，所以输出电压也是稳定不变的。

(7) 取样/反馈电路

取样电路是开关电源输出电压的检测电路。取样电路的作用是将输出电压的变化检测出来，生成反馈电压，送到误差放大器，以便稳定输出电压。因此取样电路也称反馈电路。

(8) 误差放大器

误差放大器（Error Amplifier）通常由运算放大器组成。误差放大器将反馈电压和基准电压进行比较放大，最终通过 PWM 控制器改变功率开关管的占空比，使输出电压保持稳定不变。

(9) 电压模式/电流模式

电压模式和电流模式是两种 PWM 的控制模式。电压模式只有一个控制环路，仅能通过输出电压的变化来控制 PWM 的占空比；电流模式除了电压控制环路以外，还增加了一个电

流控制环路，通过检测功率开关管的电流变化来控制 PWM 的占空比。电流模式响应速度快，具有逐个脉冲电流限制功能，在中小功率开关电源中广泛使用。

(10) 吸收（缓冲）电路

开关电源在工作过程中，会产生很高的尖峰电压，为了降低尖峰电压造成的危害，需要加入阻容元件及超快恢复二极管组成的保护电路，以便将尖峰电压的能量吸收掉。这类电路被称为吸收电路，也称缓冲电路。

(11) EMI 滤波器

EMI 是英文 Electro Magnetic Interference（电磁干扰）的缩写。EMI 滤波电路由电感和电容组成，主要是对开关电源的电磁噪声进行抑制，防止电源本身产生的高频噪声干扰电网中的其他电气设备，同时也防止电网中的高频杂波干扰电源本身。因此称之为电磁干扰滤波器，即 EMI 滤波器。

(12) 安全（安规）电容

安全电容（也称安规电容）是指电容器失效后，不会导致短路，不危及人身安全的电容，主要包括 X 电容和 Y 电容两种类型，在 EMI 滤波器中应用最多。安全电容一般选用金属薄膜电容，其中 X 电容是跨接在电力线（火线 L 和零线 N）之间的电容；Y 电容是分别跨接在电力线和保护地（火线 L 和保护地 E，零线 N 和保护地 E）之间的电容，一般是成对出现的。X 电容用于抑制差模干扰，Y 电容用于抑制共模干扰。

(13) 通用输入电压

通用输入电压是指开关电源的输入电压能够覆盖全球最低 100V、最高 240V 的民用电源电压范围。为了留有安全余量，通常规定为 90~260V 或者 85~265V。

(14) 功率因数校正

功率因数校正（Power Factor Correction, PFC），是指通过附加电路元器件的方法，将开关电源输入电流的窄脉冲波形转化为与输入电压同频、同相位的正弦波波形的技术，以便减小电网中的电流有效值，提高相关电力设备的利用率。其中包括无源 PFC 电路和有源 PFC 电路。无源 PFC 电路一般只能将功率因数提高到 0.8 左右，有源 PFC 电路可将功率因数提高到 0.99。

1.6 开关电源的发展趋势

开关电源因具有体积小、重量轻、效率高等优点，逐渐取代传统技术制造的线性电源，并广泛应用于各种电子设备中。开关电源技术因应用需求不断向前发展，新技术的出现又使许多产品更新换代。开关电源的发展趋势可以概括为以下几个方面。

(1) 体积减小，效率提高

开关电源的体积、重量主要由磁性元件和电容决定，工作频率和效率与半导体器件的发展休戚相关。随着高频低损磁性材料的发展，功率 MOSFET 等器件的性能提高，加上软开关以及同步整流技术应用，开关电源的体积不断减小，效率不断提高，功率密度越来越大。例如某公司的 DC/DC 变换器模块，效率高达 90%，功率密度为 100W/立方英寸^①。即一立方英寸体积大小的电源模块，可以输出 100W 的功率。

① 1 立方英寸=2.54cm×2.54cm×2.54cm。