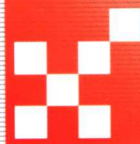




普通高等教育“十一五”国家级规划教材



电工电子技术 ——应用教程

● 殷瑞祥 朱宁西 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



TM/111

:2

2008

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电工电子技术——应用教程

主 编	殷瑞祥	朱宁西
参 编	罗昭智	樊利民
主 审	王道平	谢 云

机械工业出版社

电工电子技术是一门理论性和实践性都比较强的技术基础课程,本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材《电工电子技术》中的应用教程。在电工电子技术基本教程的基础上,介绍各种电工电子技术的应用电路与系统,目的是让学习者掌握电工电子技术的基本应用概念,建立以应用为主要目的的工程思想。本书共7章,主要内容包括直流稳压电源、信号产生与波形变换、数据采集与处理、电力电子技术、可编程序控制器、工业供电与配电、可编程器件及其应用。各部分内容相对独立,分别介绍电工电子技术在一个方面的应用,便于组织教学。

本书兼顾了深度和广度,适合于非电子、电气类各专业本专科学生,也可作为各种成人教育的教材。本书对于相关工程技术人员也是一本实用的参考书。

本书配有电子课件,欢迎选用本书作教材的老师索取。

索取邮箱: EdmondYan@sina.com

EdmondYan@hotmail.com

图书在版编目(CIP)数据

电工电子技术——应用教程/殷瑞祥,朱宁西主编. —北京:机械工业出版社,2008.4

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-111-23714-3

I. 电… II. ①殷…②朱… III. ①电工技术-高等学校-教材②电子技术-高等学校-教材 IV. TM TN

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第033158号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:贡克勤 版式设计:霍永明 责任校对:申春香

封面设计:张静 责任印制:邓博

北京京丰印刷厂印刷

2008年5月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·13印张·318千字

标准书号:ISBN 978-7-111-23714-3

定价:23.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379727

封面无防伪标均为盗版

前 言

电工电子技术(电工学)是高等院校非电类专业重要的技术基础课,由于电工电子技术教学对象的多样化,各个专业在教学中的要求不尽相同,为了规范教学,1992年教育部制定了相应的教学基本要求,对课程的教学内容和教学安排给出了具体的要求。

随着电子电气科学技术的发展,新器件、新方法不断出现,使电工电子技术课程教学内容在不断扩大,而1996年以来高等学校教学改革又对培养计划的课内学时实行了多次大量压缩,造成了内容多与学时少之间矛盾的加剧。教育部电子电气基础课程教学指导分委员会2003年开始重新对电工电子基础课程制定新的教学基本要求,2004年8月提出了教学基本要求(讨论稿)。

科学技术的不断发展进一步加强了各学科之间的相互联系,电工电子技术越来越在其他各学科渗透,据此,电工电子技术课程已不仅限于工科专业,众多理科甚至文科类专业也将其作为必修课程。

针对新的教学基本要求,结合不同专业开设课程时的内容选择,我们将电工电子技术课程按系列编写成三册:《电工电子技术——基本教程》、《电工电子技术——应用教程》和《电工电子技术——实践教程》。

《电工电子技术——基本教程》包括电路基本理论、电机与电器、晶体管电路基础、模拟集成电路及应用、数字集成电路及应用等基础知识,紧扣教学基本要求,使得各类型学校和专业均能使用。

《电工电子技术——应用教程》包括稳压电源、信号产生与波形变换、数据采集与处理、电力电子技术、可编程序控制器、工业供电与配电及可编程器件及应用等。考虑到电工电子技术密切联系实践的特点,根据基本要求中的可选教学模块及提高的要求,既满足教学基本要求,又突出电工电子技术的应用特点,使学习者在学习过程中建立明确的工程意识,从而满足各专业教学组织的需要。

《电工电子技术——实践教程》包括安全用电、电工测量基础、常用电工电子测量仪器以及电工电子基本实验等。电工电子技术实验教学是理论教学不可缺少的一个环节,实验教学是课堂教学的补充和延续,它与课堂教学相辅相成,同时,针对实验教学中容易出现的问题(如实验数据处理、故障分析与处理等)补充相应的内容,弥补一直以来电工电子教材在这方面的欠缺,满足素质教育的需要。

本套电工电子技术教材是在编者多年教学改革实践基础上,经过多年教学实践,集体智慧的结晶。编写过程中学习参考了国内外同类和相关教材和著作,以培养学生分析问题和解决问题能力,提高学生素质为目标,注重基本概念、基本原理、基本方法的论述,使学生既能掌握好基础,又能启发学生思考、开拓视野。文字叙述力求简明扼要,便于自学。经教育部专家评审已列入普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

全书共分7章,每章内容都相对独立,分别介绍电工电子技术在一个方面的应用,便于组织教学。

IV

本册教材由殷瑞祥教授策划组织内容,参加编写的有罗昭智(第3、6章)、樊利民(第1、5章)、朱宁西(第2、4、7章),全书文字最后由朱宁西统稿。

华南理工大学自动化学院王道平教授和广东工业大学自动化学院谢云教授担任本书的主审,两位教授认真审阅了全部书稿,提出了建设性的修改意见,华南师范大学陈厚福副教授也对全部书稿进行了详细审阅,并给出了具体的修改建议,由于审稿专家的良好建议,使本书避免了很多错漏,在此,谨向他们表示衷心的感谢。

感谢华南理工大学电工电子教学实验中心全体老师和实验技术人员对教材编写提供的良好工作条件。

最后,感谢众多使用本书的高校同行教师和读者。由于编者水平有限,书中难免存在缺点和错误,恳请读者给予批评指正。

编 者

目 录

前言

第1章 直流稳压电源 1

- 1.1 概述 1
- 1.2 整流滤波电路 2
- 1.3 稳压管稳压电源 11
- 1.4 串联型线性稳压电源 14
- 1.5 串联开关型稳压电源 18
- 习题 20

第2章 信号的产生与波形变换 25

- 2.1 正弦信号发生器 25
- 2.2 非正弦信号发生器 36
- 2.3 波形变换电路 41
- 2.4 555 定时器及其应用 47
- 2.5 集成函数发生器 8038 及其应用 52
- 习题 54

第3章 数据采集与处理 58

- 3.1 概述 58
- 3.2 信号预处理 59
- 3.3 数字信号的采集 64
- 3.4 数据采集系统 67
- 习题 69

第4章 电力电子技术 70

- 4.1 常用电力电子器件 70
- 4.2 电力电子基本电路 77
- 4.3 电力电子应用电路 87
- 习题 89

第5章 可编程序控制器 91

- 5.1 可编程序控制器概述 91
- 5.2 可编程序控制器的编程语言和基本指令 95
- 5.3 可编程序控制器应用的编程基础 114
- 5.4 可编程序控制器应用系统举例 126
- 习题 134

第6章 工业供电与配电 138

- 6.1 概述 138
- 6.2 发电与输电 141
- 6.3 工业供配电系统 148
- 习题 164

第7章 可编程器件及其应用 166

- 7.1 可编程模拟器件及其应用 166
- 7.2 可编程逻辑器件及其应用 177
- 习题 199

参考文献 201

第 1 章 直流稳压电源

1.1 概述

电子设备一般都需要稳定的直流电源供电。直流电可以由直流发电机产生，也可以来自于干电池、蓄电池等其他直流能源，但在大多数情况下，是采用把交流电（市电）转变为直流电的直流稳压电源。常用电子仪器或设备的功率一般小于 1kW，采用单相小功率直流稳压电源供电就可以满足要求，其原理框图如图 1-1 所示，它由电源变压器、整流、滤波和稳压电路 4 部分组成。电网供给的交流电压 u_1 （220V，50Hz）经电源变压器降压后，得到符合电路需要的交流电压 u_2 ，然后由整流电路变换成方向不变、大小随时间变化的脉动电压 u_3 ，再用滤波器滤去其交流分量，就可得到比较平直的直流电压 u_4 。但这样的直流输出电压，还会随交流电网电压的波动或负载的变化而变化。在对直流供电要求较高的场合，还需要使用稳压电路，以保证在电网电压或负载在一定范围变化时，都能输出稳定的直流电压 u_0 。

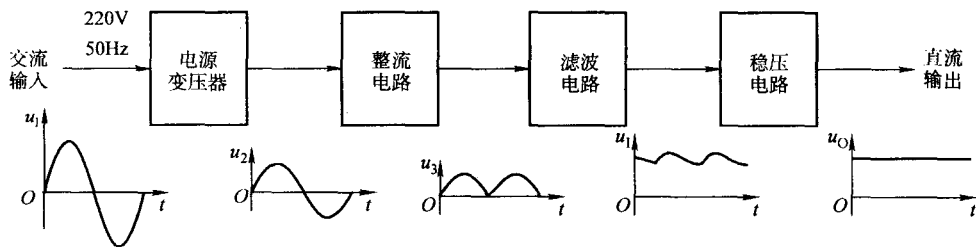


图 1-1 单相小功率直流稳压电源原理框图

对需要大功率直流电源的工业设备，则采用三相直流稳压电源。其工作原理与单相直流稳压电源相似，只是其输入是来自电网的三相交流电压，降压需要三相变压器，要采用三相整流电路。

在直流稳压电源中，降压、整流、滤波这三个环节的电路一般都比较固定，但稳压环节采用的电路形式较多，典型的有稳压管稳压、串联型稳压、集成电路稳压、开关型稳压，如图 1-2 所示。稳压管稳压电路是最简单的一种，但它只能用在输出直流电压固定且负载电流较小的场合，在电子电路中，应用更为广泛的是串联型稳压和开关型稳压电路。这两者来比较，串联型稳压器的调整管工作在线性放大区，通过管子的电流和管子两端的电压都较大，因此管子功耗大，稳压电源的效率低（ $< 50\%$ ）；开关型稳压器的调整管一般以 $10 \sim 100\text{kHz}$ 的频率反复翻转于饱和区和截止区的开关状态工作，因而管子的功耗很低，电源效率可以提高到 $80\% \sim 90\%$ 。但其输出的脉动较大，还会产生尖峰干扰和谐波干扰。集成块稳压是将基于串联型稳压结构的电路都集成在一片集成电路中，外面只有输入、输出、公共端三个引出端，具有体积小、可靠性高、使用灵活、价格低廉等优点。

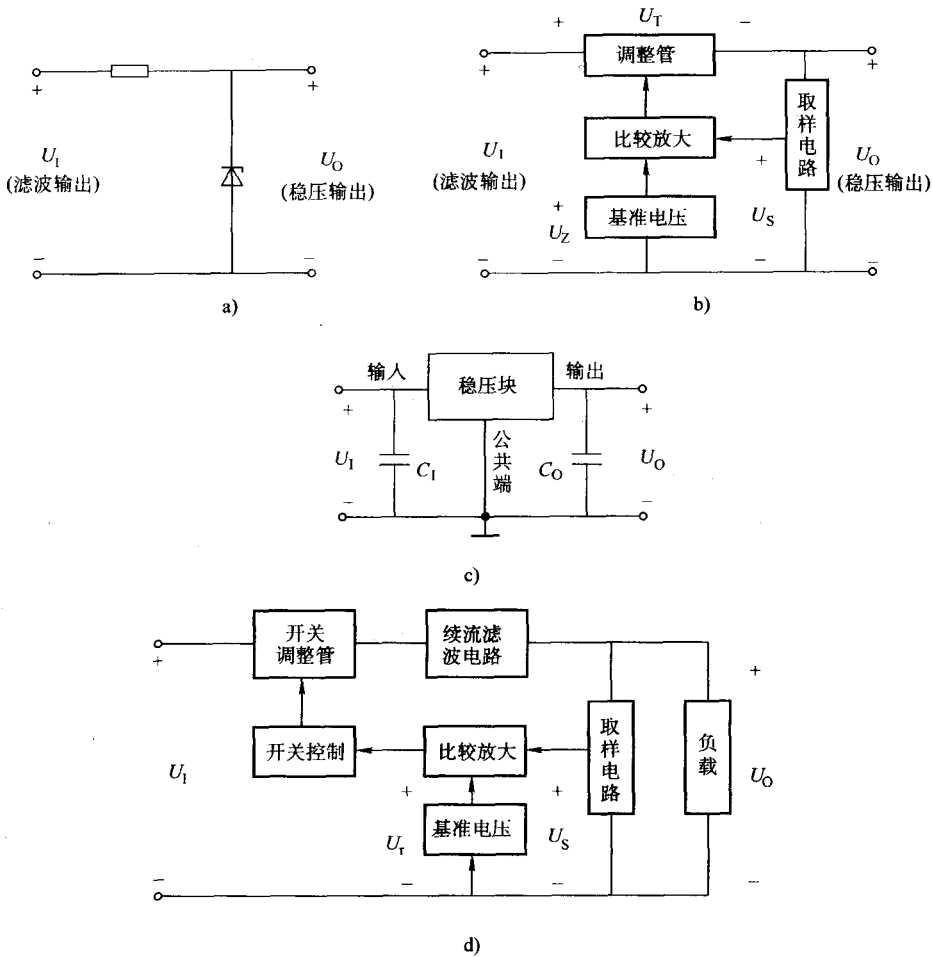


图 1-2 几种典型的稳压电路

a) 稳压管稳压 b) 串联型稳压 c) 稳压块稳压 d) 开关型稳压

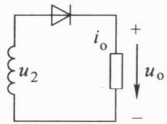
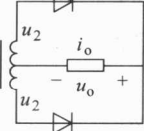
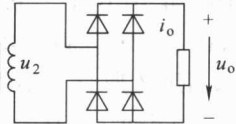
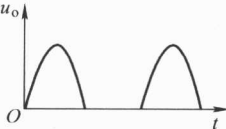
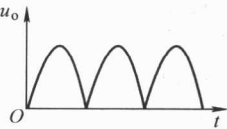
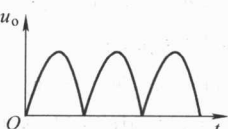
本章将逐一介绍整流滤波电路、稳压管稳压电源、串联型线性稳压电源和开关型稳压电源的工作原理及应用。

1.2 整流滤波电路

1.2.1 整流电路

二极管是构成整流电路的关键器件（常称之为整流管），利用其单向导电性将交流电转换成脉动直流电。在基本教程“二极管的应用电路”中已介绍了两种常见的单相整流电路——半波、桥式整流电路，其性能比较列在表 1-1 中，作为回顾。对表 1-1 中所列的单相全波整流电路，读者可自行分析。

表 1-1 常见的几种单相整流电路

	单相半波	单相全波	单相桥式
电路			
整流电压 uo 波形			
整流电压平均值 Uo	$0.45U_2$	$0.9U_2$	$0.9U_2$
二极管平均电流 ID	I_0	$\frac{I_0}{2}$	$\frac{I_0}{2}$
二极管最高反向电压 UDRM	$\sqrt{2}U_2$	$2\sqrt{2}U_2$	$\sqrt{2}U_2$
变压器二次电流有效值 I	$1.57I_0$	$0.79I_0$	$1.11I_0$

单相半波整流电路的输出电压脉动较大，变压器利用率低。

全波整流电路要求变压器有中间抽头，体积增大，而且在输出相同平均电压的情况下，整流二极管承受的最大反向电压最高。

桥式整流电路优势明显，它的输出平均电压高、脉动小，整流管所承受的最大反向电压低，因此，桥式整流电路得到了颇为广泛的应用。虽然二极管的数量相对较多，但目前已有现成的整流桥产品来代替4个分立元件，它对外只有4个引出端，其中两端为单相交流电压输入端（标“⊖”或“~”符号），另外两端是整流电压输出的正、负极（分别标“⊕”或“+”、标“⊖”或“-”），如图1-3a所示。整流桥堆的出现使得桥式整流电路体积减小，成本降低，可靠性增加。图1-3b是0.5~50A的全系列桥式整流器，它包含：圆桥WOB、2WOB、RB系列；扁桥KBP、KBL、KBU、KBJ、GBU系列；方桥KPBC、BR、DB系列；贴片桥MBS系列。

单相整流电路的功率一般为几瓦到几百瓦，常用在电子仪器中。而对于要求整流功率高达几千瓦以上的供电场合，则需要采用三相整流电路，因为单相整流电路会造成三相电网负载不平衡，影响供电质量。常采用三相桥式整流电路，如图1-4所示。三相交流电源经三相

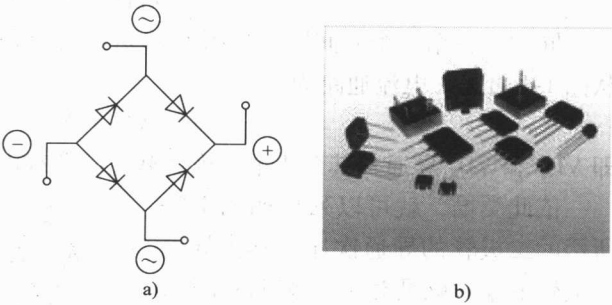


图 1-3 整流桥的端口和各种型号的整流桥堆
a) 整流桥的4个端口 b) 各种型号的整流桥堆

变压器接三相桥式整流电路，整流输出接电阻负载。其中变压器的一次侧为三角形联结、二次侧为星形联结。

图 1-4 中 6 个二极管被分为两组：VD₁、VD₃、VD₅ 组成上面组，接成共阴极形式，共阴极端用 N (negative) 表示；VD₂、VD₄、VD₆ 组成下面组，接成共阳极形式，共阳极端用 P (positive) 表示。按照“优先导通”原则，上面一组（共阴极组）中阳极电位最高者导通，下面一组（共阳极组）中阴极电位最低者导通。在图 1-4 中每一组的 3 个二极管轮流导通，而同一时间只有两个二极管（上下两组中各有一个、但不在同一个桥臂上）导通，下面进行具体分析。

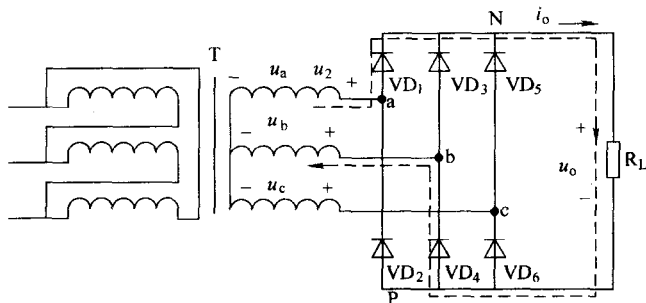


图 1-4 电阻负载的三相桥式整流电路

变压器二次侧三相电压 u_a 、 u_b 、 u_c 的波形如图 1-5a 所示，根据各相波形相交的情况，按相位角 60° 进行时间段的划分，在图 1-5b 的最下方用 1~6 分别表示相位角 $0^\circ \sim 360^\circ$ 的各时间段。在第一个时间段，a 相电压为正，b 相电压为负，c 相电压有正有负，但 c 相电压为正时低于 a 相电压、为负时高于 b 相电压。因此，在这段时间内，图 1-4 电路中 a 点电位最高、b 点电位最低。于是二极管 VD₁ 和 VD₄ 导通。若忽略二极管正向导通压降，加在负载 R_L 上的电压 u_o 就是线电压 u_{ab} 。由于 VD₁ 导通，VD₃ 和 VD₅ 阴极电位基本就等于 a 点的电位，因此这两管截止。而 VD₄ 导通，又使 VD₂ 和 VD₆ 的阳极电位接近 b 点的电位，故 VD₂ 和 VD₆ 也截止。在这段时间内的电流通路如图 1-4 电路中虚线箭头所示，即为

$$a \rightarrow \text{VD}_1 \rightarrow R_L \rightarrow \text{VD}_4 \rightarrow b$$

同理，在第二个时间段，从图 1-5a 可以看出，a 点电位仍然最高、c 点电位最低。因此从图 1-4 可见，电流通路为

$$a \rightarrow \text{VD}_1 \rightarrow R_L \rightarrow \text{VD}_6 \rightarrow c$$

即 VD₁ 和 VD₆ 导通，其余 4 个二极管截止。负载电压 u_o 即为线电压 u_{ac} 。

依此类推，就可以列出如图 1-5b 所示的二极管的导通次序。其中导电二极管的编号就是对应二极管的下标，如在第三个时间段，导电二极管的编号为 3 和 6，就是指在这个时间段 VD₃ 和 VD₆ 导通、而其余 4 个二极管截止。同理，第四时间段，VD₃ 和 VD₂ 导通、其余 4 个二极管截止；在第五个时间段，VD₅ 和 VD₂ 导通、其余 4 个二极管截止；在第六个时间段，VD₅ 和 VD₄ 导通、其余 4 个二极管截止。下一周期重复以上过程。也就是

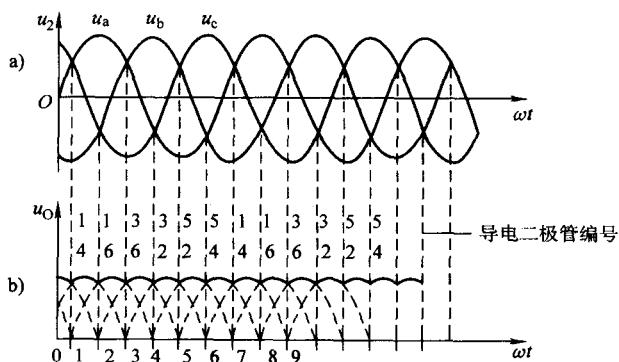


图 1-5 三相桥式整流电路的电压波形

a) 三相电压波形 b) 整流电压波形

说,共阴极连接的3个二极管(VD_1 、 VD_3 、 VD_5)在第一、三、五等时间段轮流导通;共阳极连接的3个二极管(VD_2 、 VD_4 、 VD_6)在第二、四、六等时间段轮流导通;同一时间,上面一组和下面一组管子中都只有一个导通,而且这导通的两个二极管不在一个桥臂上(即 VD_1 和 VD_2 、 VD_3 和 VD_4 、 VD_5 和 VD_6 不会同时导通),否则将造成变压器二次侧短路。

由图1-5b可见,负载所得整流电压 u_o 的大小等于三相相电压的上下包络线间的垂直距离(也就是每个时刻最大的一个线电压的值),而相比单相桥式整流电路而言,三相桥式整流电路输出电压的脉动程度大大减小,其平均值为

$$\begin{aligned} U_o &= \frac{1}{\pi} \int_{\pi/6}^{\pi/2} u_{ab} d(\omega t) = \frac{1}{\pi} \int_{\pi/6}^{\pi/2} \sqrt{2} U_{ab} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) d(\omega t) \\ &= \frac{3}{\pi} \int_{\pi/6}^{\pi/2} \sqrt{2} \times \sqrt{3} U_a \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) d(\omega t) = 2.34 U_a = 2.34 U_2 \end{aligned}$$

式中, U_{ab} 为变压器二次线电压的有效值; U_a (U_2)为变压器二次相电压的有效值;另注意: u_{ab} 超前 u_a 30°。

可见,相对于单相桥式整流电路而言,三相桥式整流电路的优点明显,即不但输出电压脉动小、而且电压平均值高。

$$\text{负载电流 } i_o \text{ 的平均值为 } I_o = 2.34 \frac{U_2}{R_L}$$

由于在一个周期 $T(360^\circ)$ 中,每个二极管导通的时间只有 $T/3$ (即导通角 120°),因此流过每管的平均电流为 $I_D = \frac{1}{3} I_o = 0.78 \frac{U_2}{R_L}$,每个二极管所承受的最高反向电压为变压器二

次线电压的幅值,即 $U_{DRM} = \sqrt{3} U_{2m} = \sqrt{3} \times \sqrt{2} U_2 = 2.45 U_2$ 。

可以证明,变压器二次电流的有效值为 $I = 0.82 I_o$ 。

1.2.2 滤波电路

整流电路虽然都可以把交流电变换为直流电,但输出的是单向脉动电压,含有较大的交流成分。全波整流输出 u_o 的傅里叶级数为

$$u_o = \frac{2\sqrt{2}U_2}{\pi} \left(1 - \frac{2}{3} \cos 2\omega t - \frac{2}{15} \cos 4\omega t - \dots \right)$$

式中第一项是波形的直流分量,即整流电压平均值($U_o = 0.9 U_2$),其他是各次交流谐波分量。交流分量引起的脉动对某些设备(如电镀、蓄电池充电等)是允许的,但在大多数电子设备中,都需要加接滤波电路用于滤去整流输出电压中的交流谐波成分。滤波电路中需要用到电容和(或)电感元件。事实上,要滤除整流电压中的交流谐波信号,电感应与负载 R_L 串联,电容应与负载 R_L 并联。电容 C 与电感 L 之所以具有滤波的作用,可以从两个方面来理解。从暂态响应角度分析,电容 C 与电感 L 是储能元件,电容电压 u_c 和电感电流 i_L 不能跃变,因而,电容与负载并联能使负载电压的变化趋于平滑,电感与负载串联使负载电流的脉动大为减小。另一方面,电容 C 与电感 L 是电抗元件,其电抗值随信号的频率不同而改变,频率越高,电容的容抗越小,因此与负载并联的电容成为频率高的信号流

通的“捷径”，从而减少了负载电压上的高频脉动成分；而电感的感抗与频率成正比，频率越高、感抗越大，所以与负载 R_L 串联的电感“阻碍”高频信号通过，即同样达到了减弱负载电压上的高频脉动成分的目的。

滤波电路的形式很多，常见的结构如图 1-6 所示，分为电容滤波电路、电感滤波电路、 LC 滤波电路和 π 形滤波电路， π 形滤波电路又有 LC 、 RC 两种之分。在小功率直流电源中，应用较多的是电容滤波电路，如图 1-6a 所示，后面将对其作重点分析。

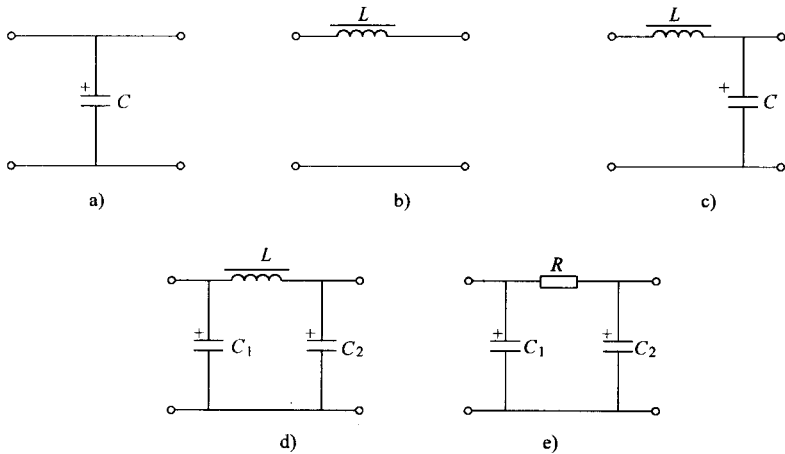


图 1-6 常见的各种滤波电路

a) 电容滤波电路 b) 电感滤波电路 c) LC 滤波电路
d) $LC\pi$ 形滤波电路 e) $RC\pi$ 形滤波电路

滤波电路的结构不同，滤波效果等性能也有一定差异，表 1-2 给出了图 1-6 中 5 种滤波电路的简单比较。这可以通过分析下面所讲述的整流滤波电路来进一步加深理解。

表 1-2 常用平滑（低通）滤波器的性能比较

类型	滤波效果	对整流管的冲击电流	带负载能力
电容滤波电路	对小电流输出较好	大	差
电感滤波电路	对大电流输出较好	小	强
LC 形滤波电路	适应性较强	小	强
$RC\pi$ 形滤波电路	对小电流输出较好	大	差
$LC\pi$ 形滤波电路	适应性较强	大	较差

1.2.3 单相桥式整流电容滤波电路

图 1-7 为单相桥式整流电容滤波电路。下面对其工作原理、特点等进行分析。

1. 工作原理

设电容器初始电压为零，在开关 S 断开、空载工作状态下接入交流电源。当 u_2 为正半周时， u_2 通过 VD_1 、 VD_3 向电容 C 充电； u_2 为负半周时，经 VD_2 、 VD_4 向电容 C 充电，电容很快就充电到交流电压 u_2 的最大值 $\sqrt{2}U_2$ ，极性如图 1-7 中标示。由于 R_L 断开、电容器无

放电回路, 故输出电压 $u_o = u_c = \sqrt{2}U_2$, 即输出为恒定直流电压, 如图 1-8 中纵坐标左侧 ($t < 0$) 所示波形。在 $t = 0$ 时合上开关 S, 接入负载 R_L , 电路工作于有载状态。电容器在负载未接入前已充电, $u_o(0_-) = u_c(0_+) = \sqrt{2}U_2$, 必然是 $u_2 < u_c$, 二极管截止, 电容 C 经 R_L 放电, 放电时间常数为 $\tau = R_L C$ 。

τ 值通常较大, u_c 按指数规律下降, 输出电压 $u_o = u_c$ 的波形如图 1-8 的 ab 段所示。与此同时, 交流电压 u_2 按正弦规律上升。当 $u_2 > u_c$ 时, 二极管 VD_1 、 VD_3 导通, u_2 经二极管 VD_1 、 VD_3 一方面向负载 R_L 提供电流, 另一方面向电容 C 充电, u_c 随着交流电压 u_2 升高到接近最大值 $\sqrt{2}U_2$, 输出电压 u_o 的波形如图 1-8 的 bc 段所示。注意: 在某些教材或教学参考书中, 忽略了电容 C 的充电时间常数 τ_d , 则输出电压 $u_o = u_2$ 。

接下来, u_2 按正弦规律下降, 当 $u_2 < u_c$ 时, 二极管反偏截止, 电容 C 又经 R_L 放电, u_c 波形如图中的 cd 段。电容 C 如此周而复始地进行充放电, 负载上便得到如图 1-8 所示的一个近似锯齿波的电压 u_o , 负载电压的脉动大为减小。

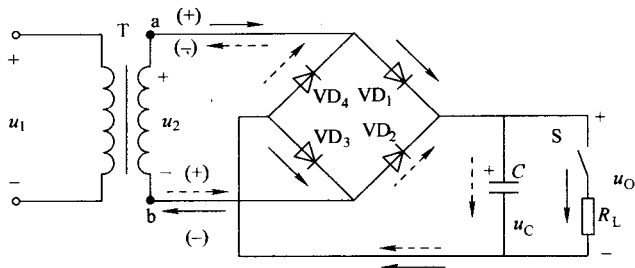


图 1-7 单相桥式整流电容滤波电路

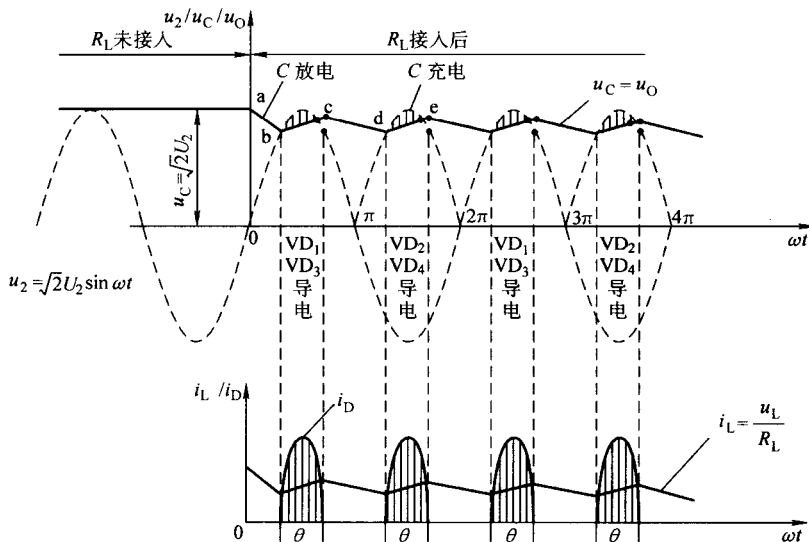


图 1-8 单相桥式整流滤波电路工作波形

2. 电路的特点

1) 电路简单, 输出电压平均值 U_o 较高, 脉动较小。且 $R_L C$ 越大, 电容放电速度越慢, 则负载电压中的脉动越小, 滤波效果越明显。

为了得到平滑的负载电压, 一般取 $\tau = R_L C \geq (3 \sim 5) \frac{T}{2}$ 。其中, T 为工频交流电压的周

期。

2) 外特性差, 且有电流冲击。输出平均电压 U_0 与输出电流 I_0 的关系称为输出特性或外特性, 如图 1-9 所示, U_0 随负载电流的增加而减小, 因而外特性差。从图 1-8 中 i_D 的波形来看, 二极管的导通时间短, 但在一个周期内电容的充电电荷等于放电电荷, 即通过电容的电流平均值为零, 可见在二极管导通期间其电流的平均值 ($T/2$ 区间内) 近似等于负载电流的平均值。因此, i_D 的峰值必然较大, 产生电流冲击, 容易损坏二极管, 对二极管的性能要求有所提高, 在选择二极管时要考虑到这点。

电流的有效值和平均值的关系与波形有关, 在平均值相同的情况下, 波形越尖, 有效值越大。对纯电阻负载, 无电容滤波时变压器二次电流的有效值 $I = 1.11I_0$, 而有电容滤波时 $I = (1.5 \sim 2)I_0$ 。

3. 参数计算

(1) 输出平均电压 U_0 有电容滤波、空载 ($R_L = \infty$) 时,

$$U_0 = \sqrt{2}U_2 \approx 1.4U_2$$

无电容滤波、有载 ($R_L \neq \infty$) 时, $U_0 = 0.9U_2$

有电容滤波、有载时, 不计整流电路的内阻 (约几

欧), 则当放电时间常数满足式 $\tau = R_L C \geq (3 \sim 5) \frac{T}{2}$, 近似估算取 $U_0 = 1.2U_2$ (桥式或全波整流电容滤波)。

说明: 若是单相半波整流电容滤波电路如图 1-10 所示, 则有电容滤波、有载时, 近似估算取 $U_0 = 1.0U_2$ (半波整流电容滤波)。

要注意: 半波整流滤波电路的输出电压平均值并非全波或桥式整流滤波电路的一半。详细分析可参见其他教材或有关参考书。

(2) 滤波电容的选择 常用的滤波电容有电解电容、涤纶电容和独石电容等。电解电容 (即极性电容) 的容量大、体积大、耐压较高、稳压范围宽, 当要求整流输出电流大时, 多采用电解电容进行滤波。涤纶电容和独石电容的体积小、耐压高, 但容量小, 滤波效果略差, 多用于整流输出电流较小的场合。

总之, 电容滤波电路简单, 负载直流电压 U_0 较高, 纹波也较小。缺点是负载特性较差, 即输出电压受负载变化的影响较大。因此电容滤波适合于要求输出电压较高、负载电流较小且负载变化较小的场合。

例 1-1 整流滤波电路如图 1-7 所示, 已知 u_1 是 220V、频率 50Hz 的交流电源, 要求直流电压 $U_0 = 30V$, 负载电流 $I_0 = 50mA$ 。试求电源变压器二次电压 u_2 的有效值 U_2 , 并选择整流二极管及滤波电容。

解 (1) 变压器二次电压的有效值

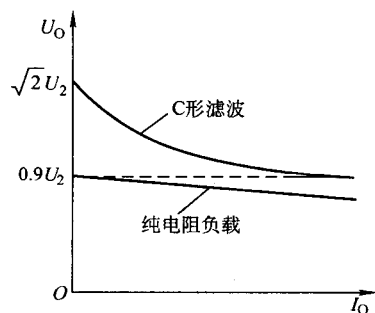


图 1-9 单相桥式整流电容滤波电路的外特性

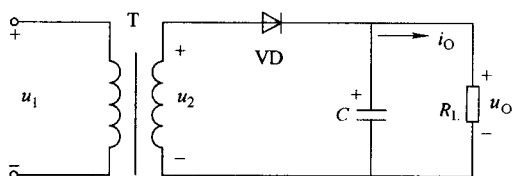


图 1-10 单相半波整流电容滤波电路

取 $U_o = 1.2U_2$, 则 $U_2 = \frac{U_o}{1.2} = \frac{30}{1.2} \text{V} = 25 \text{V}$

(2) 选择整流二极管

流经整流二极管的平均电流为

$$I_D = \frac{I_o}{2} = \frac{50}{2} \text{mA} = 25 \text{mA}$$

二极管承受的最大反向电压为

$$U_{\text{DRM}} = \sqrt{2}U_2 = 35 \text{V}$$

可选用 2CP12 整流二极管 (最大整流电流为 100mA, 最大反向工作电压为 100V)。

(3) 选择滤波电容

因为负载电阻 $R_L = \frac{U_o}{I_o} = \frac{30}{50} \text{k}\Omega = 0.6 \text{k}\Omega$

根据 $R_L C \geq (3 \sim 5) \frac{T}{2}$, 取 $R_L C = 4 \times \frac{T}{2} = 4 \times 0.01 \text{s} = 0.04 \text{s}$

由此得滤波电容 $C = \frac{0.04 \text{s}}{R_L} = \frac{0.04}{600} \text{F} = 66.6 \mu\text{F}$

考虑到电网电压波动 $\pm 10\%$, 则电容所承受的最高电压为

$$U_{\text{CM}} = \sqrt{2}U_2(1 + 10\%) = 38.5 \text{V}$$

因此, 选用标称值为 $68 \mu\text{F}/50 \text{V}$ 的电解电容。

1.2.4 单相桥式整流电感滤波电路

在桥式整流电路和负载电阻 R_L 之间串入一个电感 L , 即电感滤波电路, 如图 1-11a 所示。利用电感的储能作用减小输出电压的纹波, 从而得到比较平滑的直流。

工作原理: 在 u_2 的正半周时, VD_1 、 VD_3 导电, 电感 $i_L = i_o$ 电流将滞后 u_2 。在 u_2 的负半周时, 电感电流将经由 VD_2 、 VD_4 提供。根据桥式电路的对称性和电感电流的连续性, 滤波电路的波形图如图 1-11b 所示。

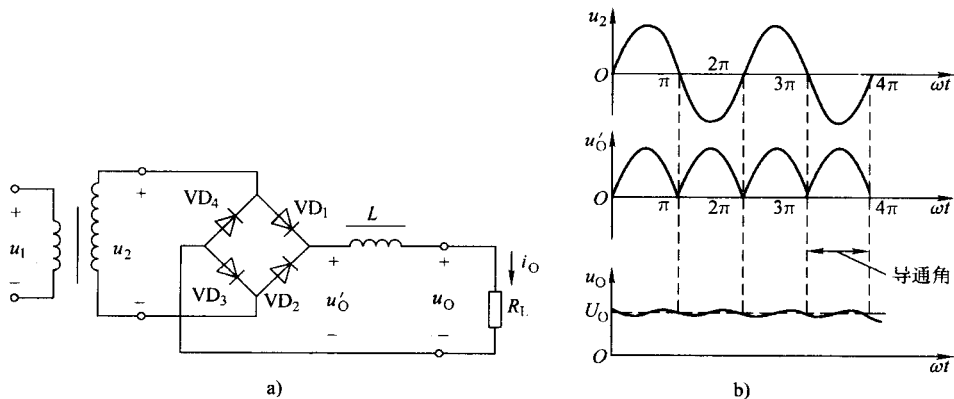


图 1-11 单相桥式整流电感滤波电路

a) 滤波电路结构 b) 滤波电路的波形图

电感滤波的优点：电感 L 的反电动势使整流管的导通时间延长，因而整流管的导通角增大，峰值电流较小，输出特性比较平坦。频率越高，电感越大，滤波效果越好。其缺点是：①由于铁心的存在，电感笨重、体积大，易引起电磁干扰；②通常线圈的电感量较大（通常几亨到几十亨），直流电阻也较大，因而电感上也有一定的直流压降，会造成输出电压的下降。因此，电感滤波电路通常适用于电流较大、负载变动较大、并对输出电压的脉动程度要求不太高（例如晶闸管电源）的场合。

1.2.5 单相桥式整流 LC 滤波电路

只用电容滤波或电感滤波，往往不能满足要求。为进一步减少输出电压的脉动成分，可采用电感电容（ LC ）复式滤波电路。

图 1-12 是单相桥式整流 LC 滤波电路。整流输出电压的各次谐波分量大部分降落在电感线圈上，频率越高，降落得越多，少量各次谐波分量的残余又大多降落在电容 C 上，只有直流分量能顺利通过电感线圈，而电容对直流分量相当于开路，所以直流分量几乎全部降落在负载电阻 R_L 上。 LC 滤波电路是

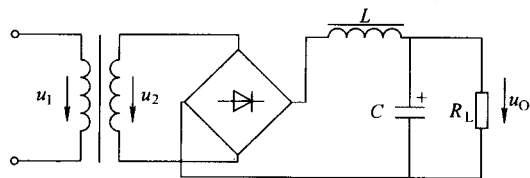


图 1-12 单相桥式整流 LC 滤波电路

在电感滤波的基础上，又经过电容器滤波，再次滤掉高频分量，实质上相当进行了两次滤波，因此可以得到甚为平直的直流输出电压。适用于电流较大、要求输出电压脉动很小的场合，用于高频时更为合适。

1.2.6 单相桥式整流 π 形滤波电路

为了进一步减小负载电压的脉动，使滤波效果更好，可采用更复杂的 π 形滤波电路，例如图 1-13a 中的 $LC\pi$ 形滤波电路，或图 1-13b 中的 $RC\pi$ 形滤波电路。

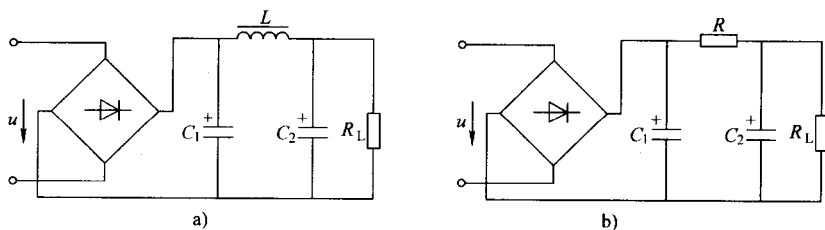


图 1-13 单相桥式整流 π 形滤波电路

a) 单相桥式整流 $LC\pi$ 形滤波电路 b) 单相桥式整流 $RC\pi$ 形滤波电路

$LC\pi$ 形滤波电路，就是在 LC 滤波电路的前面再并联一个滤波电容。因此它的滤波效果比 LC 滤波电路更好，输出电压更平直，但二极管的冲击电流较大。

由于电感线圈体积大、笨重、成本又高，所以有时候用电阻 R 代替 $LC\pi$ 形滤波电路中的电感 L ，这样便构成了 $RC\pi$ 形滤波电路。电阻对交直流电流具有同样的降压作用，但当它与电容配合后，就使脉动电压的交流分量较多地降落在电阻两端（因电容 C_2 的交流阻抗非常小），而较少地降落在负载上，从而起到了滤波作用。 R 越大， C_2 越大，滤波效果越

好。但 R 太大，将使直流压降增加，所以这种滤波电路主要适用于负载电流较小而又要求输出电压脉动很小的场合。

1.3 稳压管稳压电源

经整流和滤波后的电压还有一定的脉动，不过基本可以满足充电器、电解电镀、直流输电这些要求不太高的电子设备的需要。但存在的另一问题是：交流电源电压的波动和负载的变化会引起输出电压不稳定。电压不稳定会产生测量和计算的误差，引起控制装置的工作不稳定，尤其是要求有非常稳定的直流电源供电的精密电子电路等。所以需要在整流和滤波的基础上，再增加稳压电路部分，使得在电网电压波动或负载变化时，都能为负载提供稳定的输出电压。

实际上，电压源的内阻越小，其稳压性能越好。理想的稳压电源是输出阻抗为零的恒压源，输出电压基本与电网电压、负载及环境温度的变化无关。下面介绍一种最基本的直流稳压电源——采用稳压管稳压电路的直流稳压电源。

1.3.1 电路结构

电路如图 1-14 所示，点画线框内是稳压管稳压电路。 R 是限流电阻，与稳压管串联，使稳压管工作在稳压区（即反向击穿区）内，这样当其电流 I_Z 在一定范围内（ $I_{Zmin} \sim I_{Zmax}$ ）变化时能保证其上电压 U_Z 基本稳定，而输出电压 $U_O = U_Z$ 。稳压管稳压原理参见其特性曲线，如图 1-15 所示。

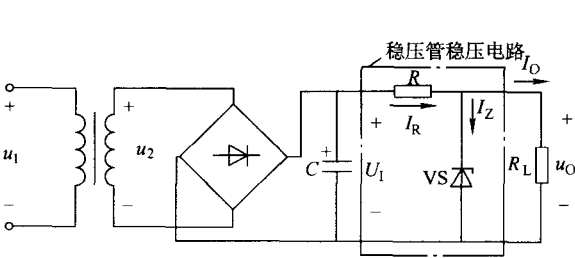


图 1-14 采用稳压管稳压的直流稳压电源

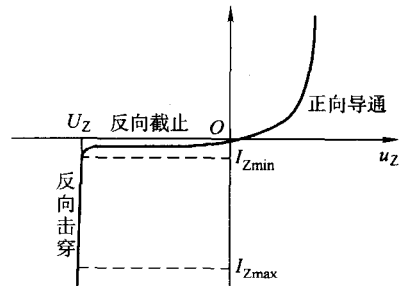


图 1-15 稳压管的特性曲线

1.3.2 工作原理

引起输出电压不稳定的原因是交流电源（或电网）电压的波动和负载（电流）变化的影响。下面分别讨论这两个因素影响下稳压电路的稳压原理。

当电网电压 u_1 (u_2) 升高时，整流滤波输出 U_1 随之升高，引起输出电压 U_O 升高， U_O 即 U_Z ，由图 1-15 可见，当稳压管的反向电压 U_Z 稍有增加，则稳压管电流 I_Z 就显著增加，引起电阻 R 上的电流 I_R 和电压降 $I_R R$ 也增大。这部分增量抵消了电网电压升高而引起的 U_1 的增量，从而使输出电压保持基本不变，稳压原理如图 1-16a 所示。当电网电压 u_1 (u_2) 降低时，调节过程与上述相反，读者可自行分析。