



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电工电子应用技术

(电 工 学 Ⅱ)

■ 朱伟兴 主编
■ 朱承高 主审



高等教育出版社
Higher Education Press



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电工电子应用技术

(电 工 学 Ⅱ)

■ 朱伟兴 主编

■ 朱承高 主审



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS



内容提要

“电工学”是高等学校非电类专业的重要技术基础课。本书是“电工学”课程的应用篇,内容包括直流电源、电力电子技术、磁路与变压器、电动机、继电器接触器控制、可编程序控制器和测量及控制系统设计等。本书尽量精简传统内容,加强工程基础和新技术的引入,使学生感受到所学知识的实用性和系统性,真正体验到“电工电子技术”课程的可用性和有用性。

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,既可作为高等学校非电类专业本、专科学生的“电工学”课程教材,又可作为各类成人教育的教材,也可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电工电子应用技术. 电工学. II/朱伟兴主编. —北京: 高等教育出版社, 2008. 6

ISBN 978-7-04-023946-1

I. 电… II. 朱… III. ①电工技术-高等学校-教材②电子技术-高等学校-教材③电工学-高等学校-教材 IV. TM TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 061546 号

策划编辑 金春英 责任编辑 唐笑慧 封面设计 于文燕 责任绘图 郝林
版式设计 王莹 责任校对 殷然 责任印制 尤静

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京市南方印刷厂

开 本 787×1092 1/16
印 张 11.5
字 数 270 000

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landraco.com>
<http://www.landraco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2008 年 6 月第 1 版
印 次 2008 年 6 月第 1 次印刷
定 价 13.80 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 23946-00



作者简介

朱伟兴,男,江苏省苏州市人。1957年9月生,工学博士,教授,博士生导师。现担任江苏大学京江学院副院长、江苏大学农业电气化与自动化研究所副所长。朱伟兴教授长期承担电工电子技术的教学工作,曾任江苏大学电工学教研室副主任、主任等职,自1995年起连续三届担任教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会委员,曾兼任电工学课程教学指导小组组长,现担任教育部电子与电气基础课程教学指导分委员会委员、中国高等学校电工学研究会常务理事、江苏省电工学研究会理事长、镇江市政协委员。2002年被评为江苏省教育科研先进个人。2004~2005年在美国普渡大学做访问教授,也在美国斯坦福大学、加州大学伯克利分校、伊利诺伊大学等高校进行短期学术访问和交流。近年来,主持江苏省重点和一般教改项目2项,主持或参加江苏省国际合作项目、江苏省“九五”和“十五”重大公关项目、国家自然科学基金项目等20多项,已获教育部、江苏省人民政府等省、部级科技进步一、二等奖3项,市、厅级科技成果二等奖2项,江苏省教学质量二等奖1项。主编、参编教材4本,发表学术论文60余篇,其中10多篇被SCI、EI收录。

朱伟兴教授目前从事智能检测与控制、信号与信息处理、机器视觉、人工智能与模式识别等方面的研究工作,在控制理论与控制工程、农业电气化与自动化两个学科招收博士和硕士研究生。

前 言

“电工学”是高等学校非电类专业的重要技术基础课。随着科学技术的发展,电工电子技术的应用日新月异,日益渗透到其他学科领域,并促进其发展。由于新器件、新方法的不断出现,“电工学”课程教学内容在不断丰富和更新。而近几年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,使内容多与学时少的矛盾更加突出,迫切需要优化课程的体系结构和整合教学内容,编写出注重工程基础、反映新技术和新方法、便于自学的新教材。为此,我们进行了多年的教学改革,在完成“机械类专业电工电子技术课程体系和教学内容改革的研究与实践”和“改革电工电子技术系列课程的教学模式,培养机电复合型创新人才”等多项江苏省重点和一般教学改革项目的基础上,编写这套教材。本套教材在保证电气工程基础内容的前提下,压缩传统内容,增加应用性和新技术内容,强化系统概念,拓宽学生的知识面,培养学生分析问题和解决问题的能力;在每一章的开头,精选引语(格言)和提供导读,启发和勉励学生发奋学习,回报社会,同时为学生了解该章编写思路和学习方法提供指导;对重点和难点问题从不同角度进行分析和解释,增加典型例题,从多角度加深理解所学知识,注重培养学生的优化设计能力和技术经济意识,使课程教学更加贴近工程实际;在每一章的结尾,给出了小结,帮助学生回顾总结,巩固提高,有利于自学和多媒体教学。在全书最后,安排了两个以 PLC 为控制器的测控系统(运动控制和过程控制),强化系统集成能力和知识的综合应用能力,使学生体会到学以致用成就感。

本套教材分成两册:《电路与电子技术》(电工学 I)和《电工电子应用技术》(电工学 II)。《电路与电子技术》(电工学 I)为基础篇,主要介绍电路基础、模拟电子电路、数字电子电路和电工测量原理;《电工电子应用技术》(电工学 II)为应用篇,主要介绍直流电源、电力电子技术、磁路与变压器、电动机、继电器控制、可编程序控制器以及测量与控制系统设计。

本套教材经专家评审已列入普通高等教育“十一五”国家级规划教材和江苏省精品教材建设项目。本书的第 1、2 章由叶雁群副教授编写,第 3 章由朱伟兴教授编写,第 4、5、6 章由李凤祥副教授编写,第 7 章由王东宏高级工程师和马长华讲师编写。本书由朱伟兴教授担任主编,叶雁群副教授担任副主编。在编写过程中得到了所在学校领导和同事的大力支持和帮助,在此表示感谢!

承蒙上海交通大学的朱承高教授在百忙中仔细审阅全书,提出了很多建设性的修改意见。在此,谨向他表示衷心的感谢和敬意。

最后,感谢使用本书的各高等学校同行教师和读者。由于编者水平有限,书中不妥和错误之处在所难免,恳切希望读者给予批评指正。

编者

2008 年 2 月

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话：(010) 58581897/58581896/58581879

反盗版举报传真：(010) 82086060

E-mail: dd@hep.com.cn

通信地址：北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社打击盗版办公室

邮编：100120

购书请拨打电话：(010)58581118

811 用桥式整流器
 整流器滤波电容的计算 8.1.6
 1.1 整流电路
 1.2 滤波电路
 1.3 集成稳压器
 1.4 开关型稳压电源

目 录

第 1 章 直流电源 1
 本章导读 1
 1.1 整流电路 2
 1.1.1 单相桥式整流电路 2
 1.1.2 三相桥式整流电路 4
 1.2 滤波电路 5
 1.2.1 电容滤波电路 6
 1.2.2 电感滤波电路 8
 1.2.3 复合滤波电路 9
 1.3 集成稳压器 10
 1.3.1 串联型稳压电路 10
 1.3.2 集成稳压器 12
 1.3.3 集成稳压器的应用 13
 1.3.4 稳压电路的主要质量指标 15
 1.4 开关型稳压电源 15
 小结 17
 习题 17
第 2 章 电力电子技术 21
 本章导读 21
 2.1 晶闸管可控整流电路 22
 2.1.1 晶闸管 22
 2.1.2 可控整流电路 25
 2.2 晶闸管逆变技术 29
 2.2.1 逆变的概念 29
 2.2.2 单相并联逆变电路 30
 2.3 晶闸管集成触发电路 31
 2.4 晶闸管的其他应用电路 32
 2.4.1 晶闸管开关电路 32
 2.4.2 晶闸管温度控制电路 33
 2.4.3 电池充电电路 34
 2.4.4 电烙铁节电控制电路 34
 2.5 电力电子技术的发展 35
 2.5.1 电力电子器件的发展 35
 2.5.2 电力电子技术的应用 37

1.2 单相桥式整流电路 2
 1.3 三相桥式整流电路 4
 1.4 滤波电路 5
 1.5 集成稳压器 10
 1.6 开关型稳压电源 15
 1.7 小结 17
 1.8 习题 17
第 3 章 磁路与变压器 41
 本章导读 41
 3.1 磁路的基本概念与基本定律 42
 3.1.1 磁路的基本物理量 42
 3.1.2 铁磁物质的磁性能 43
 3.1.3 磁路的基本定律 44
 3.2 直流铁心线圈 47
 3.3 交流铁心线圈 48
 3.3.1 电压、电流和磁通的关系 48
 3.3.2 功率损耗 49
 3.4 电磁铁 50
 3.4.1 直流电磁铁 50
 3.4.2 交流电磁铁 50
 3.5 变压器 51
 3.5.1 变压器的基本结构与工作原理 52
 3.5.2 变压器的运行特性 55
 3.5.3 三相变压器 55
 3.5.4 变压器的额定值 56
 3.5.5 特殊用途的变压器 57
 3.5.6 变压器绕组的极性与正确连接 59
 小结 61
 习题 62

第 4 章 电动机 64
 本章导读 64
 4.1 三相交流异步电动机 65
 4.1.1 基本构造 65
 4.1.2 工作原理 67
 4.1.3 电磁转矩和机械特性 70
 4.1.4 三相异步电动机的起动、反转、调速和制动 75
 4.1.5 三相异步电动机的铭牌数据 81
 4.1.6 三相异步电动机的选择 83

* 4.2 单相交流异步电动机	84	各部分的作用	118
4.2.1 电容分相式单相异步电动机	84	6.1.2 可编程序控制器的主要 技术性能	121
4.2.2 罩极式单相异步电动机	85	6.1.3 可编程序控制器的分类	122
* 4.3 直流电动机	85	6.2 可编程序控制器的工作原理和 主要功能	123
4.3.1 基本构造	86	6.2.1 工作原理	123
4.3.2 工作原理	86	6.2.2 可编程序控制器的主要功能	124
4.3.3 机械特性	87	6.3 可编程序控制器的程序设计 方法	125
4.3.4 他励直流电动机的起动、反转和 调速	87	6.3.1 编程语言	125
* 4.4 控制电动机	88	6.3.2 PLC 的编程元件和编程原则	127
4.4.1 伺服电动机	88	6.4 可编程序控制器的指令系统	128
4.4.2 步进电动机	90	6.4.1 指令的基本概念和约定	128
4.4.3 测速发电机	91	6.4.2 西门子 S7 的指令系统	129
小结	92	6.5 可编程序控制器的通信	140
习题	93	6.5.1 CP430 的工作原理	140
第 5 章 继电器接触器控制	95	6.5.2 CP430 的通信协议	140
本章导读	95	6.6 PLC 的应用	141
5.1 常用低压控制电器	96	6.6.1 PLC 的梯形图绘制和编程训练	141
5.1.1 刀开关和转换开关	96	6.6.2 PLC 控制系统设计	141
5.1.2 空气断路器	97	小结	147
5.1.3 按钮和行程开关	98	习题	148
5.1.4 熔断器	99	* 第 7 章 测量及控制系统设计	150
5.1.5 交流接触器和中间继电器	101	本章导读	150
5.1.6 热继电器	102	7.1 传感器	152
5.1.7 时间继电器	103	7.1.1 热电阻式传感器	152
5.1.8 速度继电器	104	7.1.2 热电偶传感器	154
5.2 笼型三相异步电动机的继电器 接触器控制	105	7.1.3 霍尔传感器	155
5.2.1 起动控制	105	7.2 信号调理	156
5.2.2 正/反转控制和行程控制	108	7.3 控制器	157
5.2.3 多台电动机的顺序联锁控制	111	7.4 执行机构	158
5.2.4 制动控制	111	7.5 测控系统应用实例	159
小结	114	7.5.1 温度控制	159
习题	115	7.5.2 直流电动机的转速控制	164
第 6 章 可编程序控制器	117	小结	168
本章导读	117	习题	169
6.1 可编程序控制器的基本组成和 主要技术性能	118	附录	170
6.1.1 可编程序控制器的硬件组成和		参考文献	175

各种电子设备都需要用直流电源供电,获得直流电源的方法较多,如干电池、蓄电池、直流发电机等。但较为经济实用的方法是利用电网的交流电经过电路的变换而获得,本章讨论的就是这一类直流电源。

小功率直流电源一般由电源变压器、整流电路、滤波电路和稳压电路等四部分组成,如图 1.0.1 所示。

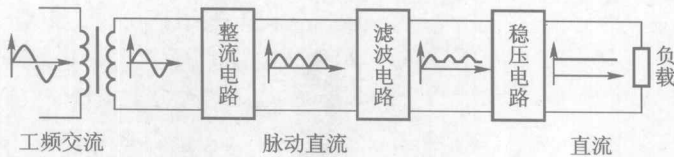


图 1.0.1 直流稳压电源框图

电源变压器将 220 V 的电网电压变换成所需要的交流电压值。整流电路将正、负交替的正弦交流电压变换成脉动的直流电压。由于脉动的直流电压中含有较大的纹波成分,必须通过滤波电路加以滤除,从而获得比较平滑的直流电压。但这样的直流电压还会随电网电压的波动、负载及温度的变化而变化,因此,为了获得稳定的输出电压,还需要有稳压电路。

1.1 整流电路

整流电路是利用二极管的单向导电性,将正、负交替的正弦交流电压变换成单方向的脉动电压。在小功率(1 kW 以下)直流电源中,常采用单相半波、单相全波、单相桥式和倍压整流等形式的整流电路。其中单相桥式整流电路用得最为普遍。由于取用的交流电一般都来自三相交流电网,为了使三相电路平衡用电,在功率较大的直流电源中常采用三相整流电路。

1.1.1 单相桥式整流电路

1. 工作原理

单相桥式整流电路及其简化画法如图 1.1.1(a)所示,图中电源变压器将电网交流电压 u_1 降压为所需电压 $u_2 = \sqrt{2}U_2 \sin \omega t$, 4 个二极管组成整流电桥, R_L 是负载电阻。

在 u_2 的正半周, D_1 和 D_3 上加正向电压而导通, D_2 和 D_4 因承受反向电压而截止,电流的通路是:变压器二次绕组的上端 $\rightarrow D_1 \rightarrow R_L \rightarrow D_3 \rightarrow$ 变压器二次绕组的下端,如图中实线箭头所示。若忽略二极管上的正向导通管压降,负载上得到与 u_2 正半周相同的电压。在 u_2 的负半周, D_2 和 D_4 导通, D_1 和 D_3 截止,电流的通路是:变压器二次绕组的下端 $\rightarrow D_2 \rightarrow R_L \rightarrow D_4 \rightarrow$ 变压器二次绕组的上端,如图中虚线箭头所示,负载上的电压仍与 u_2 正半周相同。电路中各部分电压、电流工作波形如图 1.1.1(b)所示。

由工作波形可见,输出电压 u_o 是脉动波,用傅里叶级数分解,可得

$$u_o = \sqrt{2}U_2 \left(\frac{2}{\pi} - \frac{4}{3\pi} \cos 2\omega t - \frac{4}{15\pi} \cos 4\omega t - \dots \right) \quad (1.1.1)$$

式(1.1.1)中既有恒定分量,又有很多不同频率的谐波分量。

2. 桥式整流电路的基本技术指标

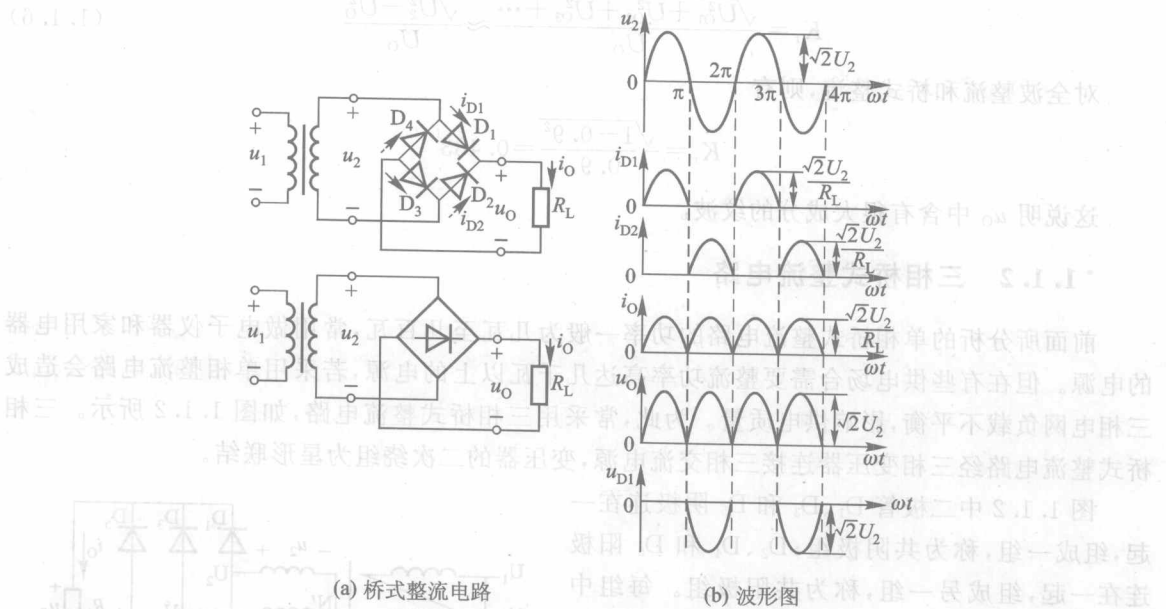


图 1.1.1 单相桥式整流电路

(1) 输出直流电压 U_O 和直流电流 I_O

U_O 、 I_O 是整流输出电压 u_O 、 i_O 在一个周期内的平均值。对全波整流和桥式整流，整流输出电压 u_O 的周期为 π ，则

$$U_O = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} u_O d(\omega t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2}U_2 \sin(\omega t) d(\omega t) \\ = \frac{2\sqrt{2}U_2}{\pi} \approx 0.9U_2 \quad (1.1.2)$$

$$I_O = \frac{0.9U_2}{R_L} \quad (1.1.3)$$

(2) 每个整流管平均整流电流 I_D

在桥式整流电路中，每个管子在一个周期中只有半个周期是导通的（二极管的导通角为 π ），因此

$$I_D = \frac{1}{2} I_O \approx 0.45 \frac{U_O}{R_L} \quad (1.1.4)$$

(3) 每个整流管最大反向峰值电压 U_{RM}

由图 1.1.1(a) 可见，在 u_2 的正半周， D_1 和 D_3 导通， D_2 和 D_4 截止，此时 D_2 、 D_4 所承受的最大反向电压均为 u_2 的最大值，即

$$U_{RM} = \sqrt{2}U_2 \quad (1.1.5)$$

同样，在 u_2 的负半周 D_1 和 D_3 也承受同样大小的最大反向电压。

选管时应选耐压值比 U_{RM} 大的管子。

(4) 纹波系数 K_r

K_r 表示直流输出电压中谐波分量的有效值与直流分量电压之比，详见参考文献[1]。

$$K_r = \frac{\sqrt{U_{O1}^2 + U_{O2}^2 + U_{O3}^2 + \dots}}{U_O} \approx \frac{\sqrt{U_2^2 - U_O^2}}{U_O} \quad (1.1.6)$$

对全波整流和桥式整流,则有

$$K_r = \frac{\sqrt{1 - 0.9^2}}{0.9} = 0.483$$

这说明 u_O 中含有很大成分的纹波。

* 1.1.2 三相桥式整流电路

前面所分析的单相桥式整流电路的功率一般为几瓦至几百瓦,常用做电子仪器和家用电器的电源。但在有些供电场合需要整流功率高达几千瓦以上的电源,若采用单相整流电路会造成三相电网负载不平衡,影响供电质量。为此,常采用三相桥式整流电路,如图 1.1.2 所示。三相桥式整流电路经三相变压器连接三相交流电源,变压器的二次绕组为星形联结。

图 1.1.2 中二极管 D_1 、 D_3 和 D_5 阴极连在一起,组成一组,称为共阴极组; D_2 、 D_4 和 D_6 阳极连在一起,组成另一组,称为共阳极组。每组中的各管轮流导通,且一组中阳极电位最高者和另一组阴极电位最低者同时导通,同一时间有两个管子导通而构成回路。图 1.1.3 给出了对应于变压器二次电压波形的各管导通情况及输出波形。在 $0 \sim t_1$ 期间, W 相电压为正, V 相电压为

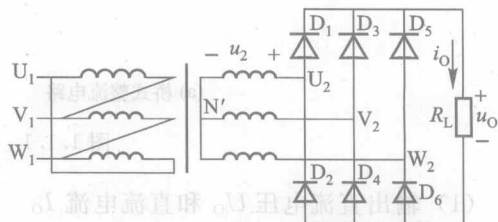


图 1.1.2 三相桥式整流电路

负, U 相电压也为正,但低于 W 相电压。于是 W、V 相的线电压作为电源电压使二极管 D_5 和 D_4 导通。如果忽略二极管导通压降,加在负载上的电压 u_O 就是线电压 u_{wv} 。由于 D_5 导通, D_1 和 D_3 的阴极电位基本上等于 W_2 点的电位(此时该点电位为最高),因此, D_1 、 D_3 管承受反向电压而截止。同理,因 D_4 导通, D_2 、 D_6 管的阳极电位约等于 V_2 点电位(此时该点电位为最低),因此, D_2 、 D_6 管承受反向电压而截止,在这段时间内的电流通路为

$$W_2 \rightarrow D_5 \rightarrow R_L \rightarrow D_4 \rightarrow V_2$$

在 $t_1 \sim t_2$ 期间, U_2 点电位最高, V_2 点电位仍然最低。因此此时电流通路为

$$U_2 \rightarrow D_1 \rightarrow R_L \rightarrow D_4 \rightarrow V_2$$

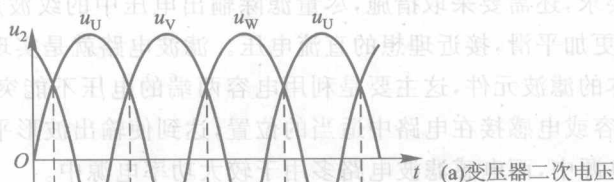
即 D_1 和 D_4 导通,其余 4 个二极管都截止。负载电压为线电压 u_{UV} 。

同理,在 $t_2 \sim t_3$ 期间, U_2 点电位最高, W_2 点电位最低,电流通路为

$$U_2 \rightarrow D_1 \rightarrow R_L \rightarrow D_6 \rightarrow W_2$$

依此类推,就可得出图 1.1.3(b)中的二极管导通次序。共阴极连接的 3 个管子(D_1 、 D_3 、 D_5)在 t_1 、 t_3 、 t_5 等时刻依次轮换导通;共阳极连接的 3 个管子(D_6 、 D_2 、 D_4)在 t_2 、 t_4 、 t_6 等时刻依次轮换导通。负载得到的整流电压 u_O 的大小等于三相相电压的上下包络线间的垂直距离(即每个时刻最大线电压的值),如图 1.1.3(b)所示。它的脉动较小,其平均值为

$$U_O = \frac{1}{3} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{2} U_{UV} \sin(\omega t + 30^\circ) d(\omega t) = 2.34 U_U = 2.34 U_2 \quad (1.1.7)$$



二极管
导通次序

D ₅	D ₁	D ₁	D ₃	D ₃	D ₅	D ₅	D ₁	D ₁	D ₃
D ₄	D ₄	D ₆	D ₆	D ₂	D ₂	D ₄	D ₄	D ₆	D ₆

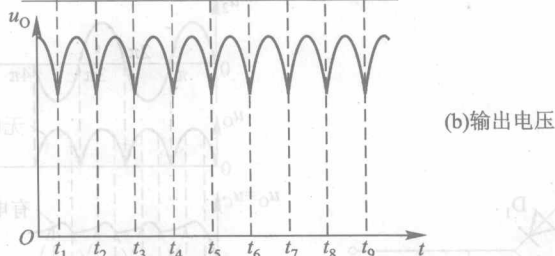


图 1.1.3 三相桥式整流电路的电压波形

式中, 30° 是考虑到线电压 u_{UV} 比相电压 u_U 超前的相位, U_2 为变压器二次绕组相电压的有效值。负载电流 i_O 的平均值为

$$I_O = \frac{U_O}{R_L} = 2.34 \frac{U_2}{R_L} \quad (1.1.8)$$

由于在一个周期中, 每个二极管只有 $\frac{1}{3}$ 的时间导通(二极管的导通角小于 π), 因此流过每管的平均电流为

$$I_D = \frac{1}{3} I_O = 0.78 \frac{U_2}{R_L} \quad (1.1.9)$$

每个二极管所承受的最高反向电压为变压器二次绕组线电压的幅值, 即

$$U_{RM} = \sqrt{3} U_{2m} = \sqrt{3} \times \sqrt{2} U_2 = 2.45 U_2 \quad (1.1.10)$$

【练习与思考】

在图 1.1.1 所示的单相桥式整流电路中, 如果①二极管 D_2 接反; ②二极管 D_2 短路; ③二极管 D_2 开路, 说明三种情况下, 其结果如何。

1.2 滤波电路

无论采用哪种整流电路, 整流后输出的电压都是一种单向脉动电压, 都含有较大的纹波成分。在某些设备(如电镀、蓄电池充电设备)中, 这种电压是可以应用的, 但在大多数电子设备中,

这种电压远不能满足要求,还需要采取措施,尽量滤除输出电压中的纹波成分,同时保留其中的直流成分,使输出电压更加平滑,接近理想的直流电压。滤波电路就是实现这一功能的电路。

电容和电感是基本的滤波元件,这主要是利用电容两端的电压不能突变和流过电感的电流不能突变的特性,将电容或电感接在电路中适当的位置,达到使输出波形平滑的目的。电容滤波电路主要用于小功率电源中,而电感滤波电路多用于较大功率电源中。

1.2.1 电容滤波电路

简单的电容滤波是在整流电路的输出端并联一个电容,如图 1.2.1(a)所示。设电容 C 两端初始电压 u_C 为零,在 $\omega t=0$ 时接通电源。

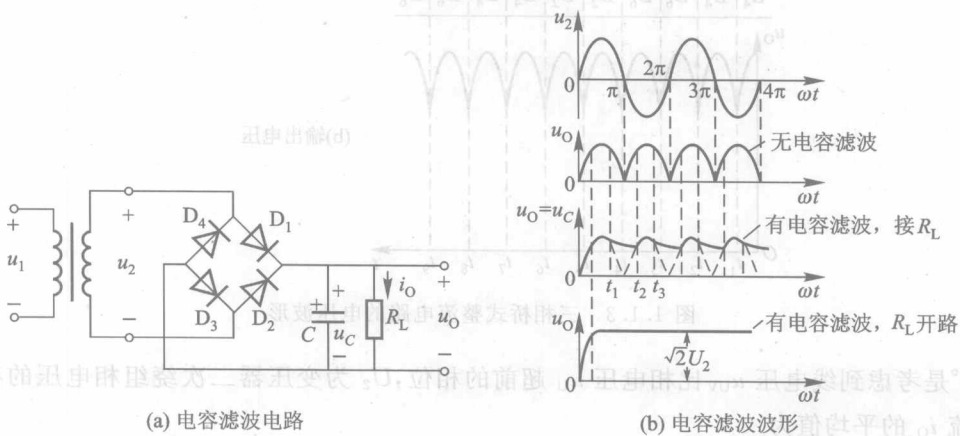


图 1.2.1 电容滤波电路

(1) 空载时($R_L \rightarrow \infty$)

在 $0 < \omega t < \frac{\pi}{2}$ 期间,整流管 D_1 、 D_3 导通, u_2 通过整流管 D_1 和 D_3 向电容 C 充电,充电时间常数为

$$\tau_1 = R_{int} C \quad (1.2.1)$$

R_{int} 为变压器二次绕组直流电阻与导通整流管电阻之和。假设变压器损耗很小,则 R_{int} 很小,此时电容 C 很快随 u_2 充电到 u_2 的最大值 U_{2m} 。此后 $u_2 < u_C$, D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 均截止,因空载 ($R_L \rightarrow \infty$),电容无放电回路,从而电容 C 输出的电压保持不变,理想情况即为恒定值 U_{2m} 。输出端开路时的电路工作波形如图 1.2.1(b)所示。

$$U_{oc} = U_{2m} = \sqrt{2}U_2 \quad (1.2.2)$$

(2) 接负载 R_L 后

因 R_L 较 R_{int} 大得多,在 $0 < \omega t < \frac{\pi}{2}$ 期间,情况与负载开路相同, u_C 通过二极管 D_1 和 D_3 充电到 u_2 的最大值 U_{2m} ,但在 $\omega t > \frac{\pi}{2}$ 后, u_2 按正弦规律下降,先慢后快,而电容电压 u_C 则按指数规律通过负载电阻 R_L 放电,先快后慢。当 $u_C > u_2$ 时,即在 $t = t_1$ 时刻,整流管 D_1 、 D_3 截止,此时,电容电压 u_C 则按指数规律通过负载电阻 R_L 放电,流过 R_L 的电流即为电容 C 的放电电流,放电时

间常数为

$$\tau_2 = R_L C \quad (1.2.3)$$

放电直到 u_2 的负半周,如图 1.2.1(b)中 $t=t_2$ 时刻,此时, $-u_2 > u_C$,整流管 D_2 、 D_4 导通, u_2 再次对电容 C 充电并给负载 R_L 供电,当到达 $t=t_3$ 时,整流管 D_2 、 D_4 截止,电容以指数规律放电。如此周而复始形成周期性的电容充、放电过程。电路工作波形如图 1.2.1(b)所示。

显然, $R_L C$ 越大,放电越慢,输出电压下降越慢,其纹波越小,直流分量 U_O 越大。在工程中,一般取时间常数

$$\tau = R_L C \geq (3 \sim 5) \frac{T}{2} \quad (1.2.4)$$

式(1.2.4)中, T 为交流电的周期, τ 即为 $\tau_2 = R_L C$ 。

在整流电路内阻不大时,可按式估算电容滤波电路的输出电压

$$U_O = U_2 \quad (\text{半波整流}) \quad (1.2.5)$$

$$U_O = 1.2U_2 \quad (\text{全波整流})$$

式(1.2.5)的推导可参阅参考文献[2]。

加大电容滤波后,二极管导通时间短(二极管导通角小于 π),所以流过二极管的瞬时电流(冲击电流)很大,且电容越大,二极管导通时间越短,冲击电流就越大。故选用二极管时,应考虑这种情况,一般选用 I_D 为实际通过二极管的平均电流的两倍左右。

二极管所承受的最大反向电压 U_{RM} 与无滤波电容 C 时相同,仍为 $\sqrt{2}U_2$ 。

负载直流电压随负载电流增加(R_L 减小)而减小。 U_O 随 I_O 的变化关系称输出特性或外特性,如图 1.2.2 所示。图中,当空载时(即 $R_L = \infty$), C 值一定,放电时间常数 $\tau = \infty$,故有 $U_O = U_{2m} = \sqrt{2}U_2$ 。随输出负载电流增加(R_L 减小),则 τ 减小,因此输出电压也减小;而当 $C=0$ (即无电容)时,若 $R_L = \infty$,则 $U_O = 0.9U_2$ 。因变压器及二极管导通电阻都很小,随输出负载电流增加 U_O 略有下降。

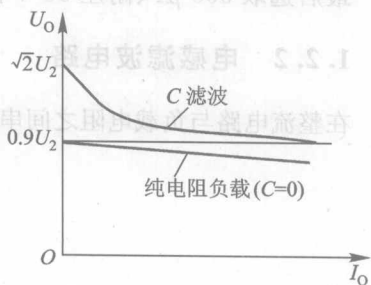


图 1.2.2 桥式整流电容滤波电路的外特性

由上述分析可见:电容滤波的特点是轻载(负载电流小)时输出电压脉动较小,电压也较高。但负载变动对输出影响较大,负载电流增大时脉动变大。因此,电容滤波电路适用于负载电压较高、负载电阻较大且变化不大的场合。

【例 1.2.1】图 1.2.1(a)所示单相桥式整流电容滤波电路中,交流电源频率 $f=50$ Hz,负载电阻 $R_L=100 \Omega$,输出电压平均值 $U_O=30$ V。试确定变压器二次电压有效值 U_2 ,并选用整流二极管和滤波电容。

【解】由式(1.2.5), $U_O = 1.2U_2$

得到变压器二次电压有效值

$$U_2 = \frac{U_O}{1.2} = \frac{30}{1.2} \text{ V} = 25 \text{ V}$$

输出电流平均值

$$I_O = \frac{U_O}{R_L} = \frac{30}{100} \text{ A} = 0.3 \text{ A}$$

流过二极管的电流平均值

$$I_D = \frac{1}{2} I_O = \frac{1}{2} \times 0.3 \text{ A} = 0.15 \text{ A}$$

二极管承受最高反向电压

$$U_{RM} = \sqrt{2} U_2 = \sqrt{2} \times 25 \text{ V} = 35 \text{ V}$$

查手册,选取 4 个型号为 2CP21 的二极管 ($I_D = 0.3 \text{ A}$, $U_{RM} = 100 \text{ V}$)。

根据式(1.2.4), $\tau = R_L C \geq (3 \sim 5) \frac{T}{2}$, 取

$$R_L C \geq 5 \times \frac{T}{2}$$

式中, T 为交流电源周期, 故有

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} \text{ s} = 0.02 \text{ s}$$

由此可求得滤波电容值

$$C = \frac{5 \times \frac{T}{2}}{R_L} = \frac{5 \times 0.01}{100} \text{ F} = 500 \mu\text{F}$$

电容的耐压应大于 $\sqrt{2} U_2$, 约为 50 V。

最后选取 500 μF 、耐压 50 V 的电解电容。

1.2.2 电感滤波电路

在整流电路与负载电阻之间串联一个电感线圈, 就构成了电感滤波电路, 如图 1.2.3(a) 所示。

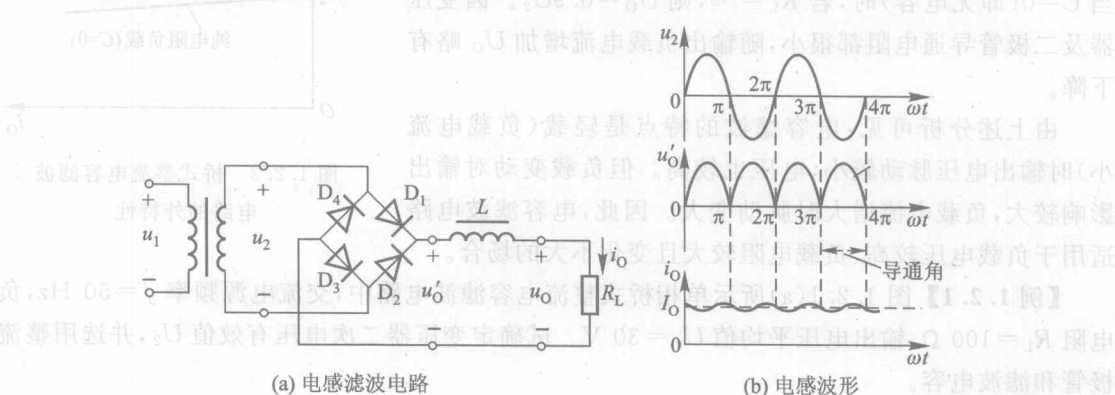


图 1.2.3 电感滤波电路

电感滤波的作用可以从两方面来理解。当电感中流过的电流发生变化时,线圈中产生自感电动势阻碍电流的变化。在电流增大时,自感电动势阻碍电流增加,同时将能量存储起来,使电流增大缓慢;反之,在电流减小时,自感电动势阻碍电流减小,同时释放在电感线圈中的能量,使电流减小缓慢。这是利用了电感的储能作用来减小输出电压和电流的纹波,使输出的电压较为平滑。

从另一个角度也可以这样来理解:交流电压 u_2 经整流后成为脉动电压,在该脉动电压中既含有各次交流谐波分量,又含有直流分量。具有铁心的电感线圈有较大的电感值,交流阻抗大,直流电阻接近于零。因此,整流后的直流分量大部分降落在 R_L 上,而对铁心电感,谐波频率越高,感抗越大,因而交流分量大部分降落在电感上,从而使负载电流和负载电压的脉动大大减小,使负载上得到较平滑的直流输出电压,如图 1.2.3(b)所示。 L 越大,滤波效果越好。

在理想情况下,整流输出电压 U'_0 如式(1.1.2),为

$$U'_0 = \frac{2\sqrt{2}U_2}{\pi} = 0.9U_2 \quad (1.2.6)$$

若忽略电感线圈的电阻时,在电感线圈两端的电压平均值应为零。因此,负载电阻 R_L 上的电压平均值为

$$U_0 = U'_0 = 0.9U_2 \quad (1.2.7)$$

通过负载电阻 R_L 的电流平均值为

$$I_0 = \frac{U_0}{R_L} = 0.9 \frac{U_2}{R_L} \quad (1.2.8)$$

实际电路中,由于整流电路部分及电感线圈中存在一定的直流电阻,电流通过时会产生电压降,因此,输出电压平均值 U_0 会随负载电流 I_0 的增加而下降,但下降不多。当负载增加(即 R_L 减小)时,根据串联电路的分压原理,降落在电感上的交流成分更多,输出电压 u_0 中的交流成分减少,因此脉动随 I_0 增加而减小。可见,电感滤波适用于负载电流较大的场合。

电感滤波的特点是:整流管的导通角较大,无峰值电流,输出特性较平坦,带负载能力强。其缺点是由于铁心的存在,笨重、体积大、易引起电磁干扰,且电感线圈电阻有一定的直流电压降。一般于只适用低电压、大电流的场合。

1.2.3 复合滤波电路

为了提高滤波性能,进一步减少纹波成分,可采用 $RC\pi$ 形滤波电路或 $LC\pi$ 形滤波电路,如图 1.2.4(a)、(b)所示。

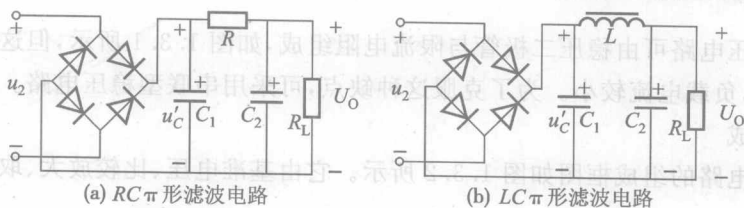


图 1.2.4 复合滤波电路

在图 1.2.4(a)中, C_1 构成整流输出后第一级滤波器,电容 C_1 两端的电压 u_c 含有直流分量 U'_c 和交流分量 u''_c , 它们一起加在 R 和 C_2 组成的分压器上,电容 C_2 对直流与交流所起的作用不同。对于交流, C_2 呈现的阻抗很小,因而 u''_c 的绝大部分降落在电阻 R 上,负载 R_L 两端的交流分量很小。对于直流, C_2 相当于开路,当 $R_L \gg R$ 时,直流分量 U'_c 的绝大部分降落在负载电阻 R_L 上,达到滤波效果。可见,单个电阻对交、直流电流的作用是相同的,没有滤波效果,但若与电容配合恰当,则可起到滤波效果。负载上得到的直流电压由式(1.2.9)决定