

高等职业教育电气自动化专业“双证课程”培养方案规划教材

The Projected Teaching Materials of “Double-Certificate Curriculum” Training for Electrical Automation Discipline in Higher Vocational Education

电力电子技术

曾方 主编

朱益江 副主编



Power Electronics Technology

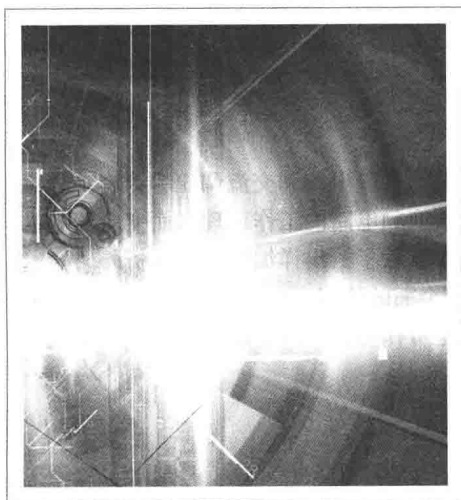
- ◆ 结合实例讲述原理
- ◆ 由浅入深，结构合理
- ◆ 内容精简，重点突出



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

高等职业教育电气自动化专业“双证课程”培养方案规划教材

The Projected Teaching Materials of "Double-Certificate Curriculum" Training for Electrical Automation Discipline in Higher Vocational Education



电力电子技术

曾方 主编

朱益江 副主编

Power Electronics Technology

人民邮电出版社

北京

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术 / 曾方主编. -- 北京: 人民邮电出版社, 2010.10

高等职业教育电气自动化专业“双证课程”培养方案
规划教材

ISBN 978-7-115-22433-0

I. ①电… II. ①曾… III. ①电力电子学—高等学校
: 技术学校—教材 IV. ①TM1

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第054048号

内 容 提 要

本书主要包括单相整流、三相整流、直流变换、有源逆变、变频电路和交流调压等内容。考虑到有些学校安排变频技术课程,因此在变频电路这部分着重介绍了变频电路的工作原理,而变频器的具体应用则可放到后续专门的变频技术课程中去。对于交流调压,本书除了给出详细的电路分析外,还给出一些详细的实例,使学生对交流调压在实际应用中的完整过程有全面的认识。

本书适合作为高职高专院校电气自动化及相关专业的教材,也可作为普通高等院校非电气自动化专业教材使用。

高等职业教育电气自动化专业“双证课程”培养方案规划教材

电力电子技术

◆ 主 编 曾 方

副 主 编 朱益江

责任编辑 潘新文

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号

邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

三河市海波印务有限公司印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 9.5

2010年10月第1版

字数: 225千字

2010年10月河北第1次印刷

ISBN 978-7-115-22433-0

定价: 19.00元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

前言

电力电子技术是高职高专电气自动化专业的核心课程之一,其内容已从过去单一的可控硅整流发展到现在的直流变换、逆变电路、变频技术、交流调压,变化之大、发展之快、应用之广、新技术和知识点之多是该课程的特点。在有限的学时内要全面掌握电力电子技术的知识、技能和新技术十分困难,为此,本书根据高等职业教育的特点,精心设计每一部分内容,由浅到深、循序渐进、重点突出,为教师依据学生情况和学时安排选择教学内容奠定了充分的基础。

本书主要分为整流和逆变两大部分,共6章。整流包括单相整流、三相整流和直流变换3章。在第3章里,融入了除晶闸管以外的一些新型电力电子器件的功能介绍及应用实例。在传统的学科体系中,这部分内容一般会单独作为一个章节来编写,但考虑到职业教育以工作过程为导向的教学理念,我们选用了一些实际的案例作为载体,结合了器件的功能和作用进行讲解。而对于本章重点的直流变换电路,增加了更多的典型应用实例,以助于教学和学生理解。

本书的第2部分主要为有源逆变、变频电路和交流调压3章。考虑到多数学校会在后续课程中安排“变频技术”课程,因此在变频电路这部分着重介绍了工作变频电路的工作原理,而具体的变频器作为一个设备的应用则放到后续的“变频技术”课程中去。

对于交流调压,除了给出详细的电路分析外,还给出了一些详细的实例,使学生对交流调压在实际应用中的完整过程有个全面认识,这也是基于职业教育“以工作过程为导向”的理念而编写的。

除此之外,在本书的编写中还考虑了以下几点。

1. 从应用的角度介绍电力电子器件,对器件的结构和原理以及新型器件仅作简要介绍,着重于器件的外特性和驱动控制。

2. 突出全控型器件电路,缩减半控型和不控型器件电路内容。晶闸管整流器应用很广泛,因此仍以晶闸管电路为主,但增加了PWM整流,其他各章都以全控器件为主。

本书由成都航空职业技术学院曾方副教授任主编,主要承担了第1~3章内容的编写,江苏省连云港职业技术学院朱益江任副主编,负责第4~6章的编写工作。

根据自己对高等职业教育理念的理解,编者在编写模式和内容安排上做了一些初步尝试和探索,限于学识水平有限,书中不足之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

编者

2010年1月

我们实际使用的电能种类有直流(DC)和交流(AC)两大类。直流电用电压幅值和极性来标识其不同,交流电则除电压幅值外,还有频率和相位的差别。在实际应用中,常常需要在这两种电能之间进行转换,或对同种电能的一个或多个参数(如电压、幅值、频率和功率因数等)进行变换,实现电能的这些转换就是电力电子技术要完成的任务。

电力电子技术通过以下四大变换来实现对电能的改变。

第一,交流一直流(AC-DC)变换,将交流电转换为直流电,通常称之为整流。

第二,直流一交流(DC-AC)变换,将直流电转换为交流电。这是与整流相反的变换,称之为逆变。当输出接电网时,称之为有源逆变;当输出接负载时,称之为无源逆变。

第三,交一交(AC-AC)变换,将交流电能的参数(幅值或频率)加以变换。其中,改变交流电压有效值称为交流调压;将工频交流电直接转换成其他频率的交流电,称为交一交变频。

第四,直流一直流(DC-DC)变换,将恒定直流变成断续脉冲输出,以改变其平均值,从而改变大小,有时又称之为斩波器。

上述4种变换就是电力电子技术解决的主要问题。除此以外,电力电子技术在生产实际中还有一些重要的作用。

第一,优化电能使用。通过电力电子技术对电能的处理,使电能的使用达到合理、高效和节约,实现了电能使用最佳化。例如,在节电方面,针对风机水泵、电力牵引、轧机冶炼、轻工造纸、工业窑炉、感应加热、电焊、化工、电解等14个方面的调查,潜在节电总量相当于1990年全国发电量的16%,所以推广应用电力电子技术是节能的一项战略措施,一般节能效果为10%~40%。我国已将许多装置列入节能的推广应用项目。

第二,改造传统产业和发展机电一体化等新兴产业。据预测,今后将有95%的电能要经电力电子技术处理后再使用,即工业和民用的各种机电设备中,有95%与电力电子产业有关。需特别指出的是,电力电子技术是弱电控制强电的媒体,是机电设备与计算机之间的重要接口,它为传统产业和新兴产业采用微电子技术创造了条件,是发挥计算机作用的保证和基础。

第三,电力电子技术高频化和变频技术的发展,将使机电设备突破工频传统,向高频化方向发展。实现最佳工作效率,将使机电设备的体积减小几倍、几十倍,响应速度达到高速化,并能适应任何基准信号,实现无噪声且具有全新的功能和用途。

第四,电力电子智能化的进展,在一定程度上将信息处理与功率处理合一,使微电子技术 with 电力电子技术一体化,其发展有可能引起电子技术的重大改革。有人甚至提出,电子学的下一项革命将发生在以工业设备和电网为对象的电子技术应用领域,电力电子技术将把人们引向第二次电子革命。

目前,当大力开发利用可再生能源,实现能源的可持续发展成为解决当前我国能源短缺的

根本途径时,许多变频、电源、伺服制造商及系统集成商已经着力于风能和太阳能市场,研发、生产相应的变频、伺服、电源等电力电子装置产品。这其中,电力电子器件技术将决定着装置的水平。电力电子在可再生能源中的发展前景广阔。可以说,没有电力电子现在的技术,就没有新能源的今天;没有电力电子技术的进一步发展,就没有新能源的未来。

电力电子技术作为一项新兴的高新技术,经过了 50 多年的发展,从晶闸管到 IGBT、MOSFET,再到 PIC、软开关,已经初具规模。近年来,由于能源短缺问题日益凸显,电力电子技术在可再生能源及太阳能、风力发电行业广泛应用。

这其中,风力发电被认为是 21 世纪我国能源和电力可持续发展战略最现实的选择。有人赞同大力发展风电,以应对能源危机;有人则反对,因为我国风电技术仍不成熟以及风电行业的普遍亏损,此外,风电容量占所接入电网装机容量的比例越来越大,造成风电功率的随机波动给电网安全经济运行造成的不利影响越显突出。

随着能源危机日益凸显,可再生能源必将成为 21 世纪的重大课题。电力电子技术能否持续创新,加快可再生能源的推广应用,以解决能源危机,我们只能拭目以待。正如一些专家所言,电力电子技术的未来预示着新能源的未来,需要的只是行业人更多的探索和努力。

电力电子技术担负有如此重大的技术使命,促使我们一定要学好它、掌握它和用好它。但只有学习热情是不够的,还必须要有好的学习方法。

要学好电力电子技术需要很强的电路分析和较强的抽象思维能力,如果不具备这样的学习能力,初涉电力电子技术内容时会感觉非常困难。这就需要学习者对电路中所涉及的每种变换电路,包括电路结构、控制、驱动与保护等方面逐一进行展开,在学习时,应对这些知识进行系统全面的理解,将其看成一个整体,从中找出规律,力求举一反三,触类旁通,进而逐渐提高电路分析的能力。

当然,一定的专业基础知识和勤奋刻苦的学习精神也是学好电力电子技术的必要条件。本课程是一门实践性较强的课程,学习时一定要勤动手,善动脑,在实践中获得电路的调试、排除电路故障等能力,从而进一步提高分析、解决问题的能力。

目 录

第 1 章 单相可控整流电路.....1	
1.1 单相整流电路.....1	
1.1.1 认识电力二极管.....1	
1.1.2 单相桥式整流电路.....3	
1.1.3 MDQ 型单相整流模块.....5	
1.2 单相可控整流电路.....7	
1.2.1 认识晶闸管.....7	
1.2.2 单相全控桥式整流电路.....13	
1.2.3 单相半控桥式整流电路.....18	
1.2.4 集成单相可控桥式 整流模块.....21	
1.3 单相整流电路应用实例分析.....22	
1.3.1 单结晶体管触发电路.....22	
1.3.2 小容量可控直流电源实例.....24	
思考与练习.....28	
第 2 章 三相可控整流电路.....30	
2.1 三相整流电路.....30	
2.1.1 三相桥式整流电路.....30	
2.1.2 MDS 型三相桥式整流模块.....32	
2.2 三相半波可控整流电路.....33	
2.2.1 电阻性负载.....33	
2.2.2 电感性负载.....37	
2.2.3 反电动势负载.....39	
2.2.4 共阳极整流电路.....39	
2.3 三相全控桥式整流电路.....40	
2.3.1 控制角 $\alpha=0^\circ$ 时的电路分析.....41	
2.3.2 控制角 $\alpha>0^\circ$ 时的电路 分析.....43	
2.3.3 MTS 型三相全控桥式 整流模块.....44	
2.4 三相半控桥式整流电路.....45	
2.4.1 控制角 $\alpha=30^\circ$ 时的 电路分析.....46	
2.4.2 控制角 $\alpha=90^\circ$ 时的 电路分析.....47	
2.5 变压器漏抗对整流电路的 影响.....48	
2.5.1 换相期间的输出电压.....48	
2.5.2 可控整流电路的外特性.....49	
2.6 三相整流电路应用实例分析.....49	
2.6.1 三相半波可控整流电路 组成的直流电源.....49	
2.6.2 三相桥式全控整流电路 组成的直流电源.....53	
思考与练习.....56	
第 3 章 直流电压变换电路.....58	
3.1 全控型电力电子器件.....58	
3.1.1 直流电压变换电路的 工作原理.....58	
3.1.2 门极可关断 晶闸管 (GTO).....59	
3.1.3 大功率晶体管 (GTR).....63	
3.1.4 绝缘栅双极型 晶体管 (IGBT).....69	
3.2 由普通晶闸管构成的 直流电压变换电路.....74	
3.2.1 电路的工作原理.....74	
3.2.2 晶闸管的换流过程.....75	
3.3 单象限直流电压变换电路.....76	
3.3.1 直流降压变换电路.....76	
3.3.2 直流升压变换电路.....79	
3.3.3 库克直流电压变换电路.....81	

3.4 二象限直流电压变换电路	84	5.3 三相桥式变频电路	110
3.4.1 双极性电压开关 PWM		5.3.1 电压源型桥式变频电路	110
控制方式	84	5.3.2 电流源型三相桥式	
3.4.2 单极性电压开关 PWM		变频电路	113
控制方式	86	5.3.3 两种变频电路的特点	114
3.5 直流电压调节的应用		5.4 交—交变频电路	115
实例分析	87	5.4.1 方波型交—交变频电路	115
3.5.1 直流调压电路的控制	87	5.4.2 正弦波型交—交变频电路	117
3.5.2 电力传动中的应用	90	5.5 脉宽调制 (PWM) 型	
3.5.3 有源功率因数校正器	93	变频电路	118
思考与练习	97	5.5.1 脉宽调制变频电路介绍	118
第 4 章 有源逆变电路	98	5.5.2 单相 PWM 变频电路	120
4.1 有源逆变电路	98	5.5.3 三相桥式 PWM 变频电路	122
4.1.1 认识整流与逆变的关系	98	5.5.4 专用大规模集成电路芯片	
4.1.2 有源逆变电路的工作过程	99	形成 SPWM 波	123
4.2 三相逆变电路	100	思考与练习	127
4.2.1 三相半波逆变电路的		第 6 章 交流调压	128
工作过程	100	6.1 单相交流调压电路	129
4.2.2 三相桥式逆变电路	101	6.1.1 电路接电阻性负载时的	
4.3 逆变电路的应用实例分析	102	工作过程	129
思考与练习	103	6.1.2 电路接电感性负载时的	
第 5 章 变频电路	104	工作过程	130
5.1 无源逆变电路	104	6.2 三相交流调压电路	132
5.1.1 无源逆变电路的		6.2.1 三相全波相位控制的	
基本概念	104	Y 连接调压电路	132
5.1.2 变频电路的基本工作		6.2.2 其他三相调压电路形式	135
原理	105	6.3 交流过零调功电路	136
5.2 谐振式变频电路	106	6.3.1 调功器的工作原理	136
5.2.1 谐振式变频电路应用——		6.3.2 调功电路应用实例	137
感应加热炉	106	思考与练习	139
5.2.2 并联谐振式变频电路	107	参考文献	140
5.2.3 串联谐振式变频电路	109		

第1章

单相可控整流电路

1.1

单相整流电路

1.1.1 认识电力二极管

电力二极管又称功率二极管，它属于不可控器件。由于其结构和工作原理简单，工作可靠，目前，凡在将交流电变为直流电且不需要调压的场合，仍广泛地使用电力二极管。

1. 电力二极管的工作原理

电力二极管是以 PN 结为基础，由一个面积较大的 PN 结和两端引线以及封装组成。电力二极管的结构和图形符号如图 1.1 所示。其中，PN 结的 P 区引出二极管的阳极用 A 标识，N 区引出二极管的阴极用 K 标识。

电力二极管主要有螺栓型和平板型两种，其外形特征如图 1.2 所示。

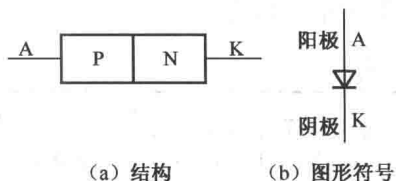


图 1.1 电力二极管的结构和图形符号

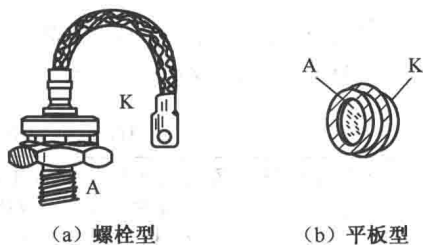


图 1.2 电力二极管的外形

电力二极管和电子电路中的二极管工作原理一样具有单向导电性。当二极管处于正向电压作用下，即阳极接电路中的高电位，阴极接电路中的低电位时，PN 结导通，正向管压降很小；反之，当二极管处于反向电压作用下，即阳极接电路中的低电位，阴极接电路的高电位时，PN 结截止，反向管压降很大，仅有极小的可忽略的漏电流流过二极管。也就是说，电力二极管有两种状态，一

种是导通，一种是截止。相当于一个开关的接通和断开状态，称为电力二极管的开关特性。

在实际应用的电路中，当电力二极管处于导通状态时，其间流过的电流将远大于电子电路中二极管导通时的电流，而截止时所承受的反向电压也较大。所以，其开关的速度将低于电子电路中的二极管。

2. 电力二极管的伏安特性

所谓电力二极管的伏安特性，是指流过电力二极管的电流与它两端电压之间的关系，可以经实验获得。其关系曲线如图 1.3 所示。

由图 1.3 可看出，电力二极管的伏安特性与普通二极管的伏安特性相似。当电力二极管承受正向电压大于一定值时电流突然增大，这是由于电力二极管导通其等效电阻突然减小的原因；而当电力二极管承受反向电压时，由于其等效电阻较大，所以只有较小的电流通过电力二极管。

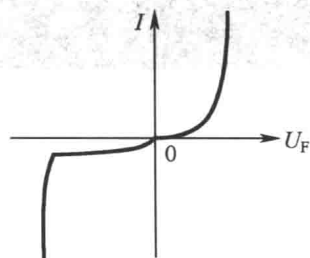


图 1.3 电力二极管的伏安特性曲线

3. 电力二极管的主要参数

① 正向平均电流 I_F 。正向平均电流 I_F 是指在规定的管壳温度和散热条件下，允许通过的最大工频半波电流的平均值。器件标称的额定电流就是这个电流。实际应用中，电力二极管所流过的最大有效电流为 I ，则其额定电流一般选择为

$$I_F \geq (1.5 \sim 2) \frac{I}{1.57} \quad (1-1)$$

式中，系数 $1.5 \sim 2$ 是安全系数。

在实际电路应用中，如果电力二极管处在正向导通状态，那么流过它的正向电流的有效值不能超过式 (1-1) 中的 I 值。

② 正向压降 U_F 。正向压降 U_F 是指在规定温度下，流过某一稳定正向电流时所对应的正向压降。在实际应用中，电力二极管处于正向导通状态时两端的电压值不能超过此值。

③ 反向重复峰值电压 U_{RRM} 。反向重复峰值电压 U_{RRM} 是电力二极管能重复施加的反向最高电压。一般以其在电路中可能承受的反向峰值电压的两倍来选择反向重复峰值电压。

④ 反向恢复时间 t_{rr} 。反向恢复时间 t_{rr} 是指电力二极管从施加反向偏置电流至零起到恢复反向阻断能力为止的时间。这个时间越短，说明电力二极管的关断时间越短，性能越好。

表 1.1 所示是某生产厂家提供的 1N 系列电力二极管的常用参数。

表 1.1 1N 系列电力二极管的常用参数

型号	反向工作峰值电压 U_{RM} (V)	额定正向整流电流 I_F (A)	正向不重复浪涌峰值电流 I_{FSM} (A)	正向压降 U_F (V)	反向电流 I_R (μ A)	工作频率 f (kHz)	外形封装
1N4000	25	1	30	≤ 1	< 5	3	DO-41
1N4001	50						
1N4002	100						
1N4003	200						
1N4004	400						
1N4005	600						
1N4006	800						
1N4007	1 000						

续表

型号	反向工作峰值电压 $U_{RM}(V)$	额定正向整流电流 $I_F(A)$	正向不重复浪涌峰值电流 $I_{FSM}(A)$	正向压降 $U_F(V)$	反向电流 $I_R(\mu A)$	工作频率 $f(kHz)$	外形封装
1N5100	50	1.5	75	≤ 1	< 5	3	DO-15
1N5101	100						
1N5102	200						
1N5103	300						
1N5104	400						
1N5105	500						
1N5106	600						
1N5107	800						
1N5108	1 000						
1N5200	50	2	100	≤ 1	< 10	3	
1N5201	100						
1N5202	200						
1N5203	300						
1N5204	400						
1N5205	500						
1N5206	600						
1N5207	800						
1N5208	1 000						

4. 电力二极管的主要类型

- ① 整流二极管。整流二极管多用于开关频率不高的场合，一般开关频率在 1kHz 以下。其特点是电流定额和电压定额可以达到很高，一般为几千安和几千伏。但反向恢复时间较长。
- ② 快速恢复二极管。其特点是恢复时间短，尤其是反向恢复时间短，一般在 5μs 以内。可用于要求很短反向恢复时间的电路中，如用于与可控开关配合的高频电路中。
- ③ 肖特基二极管。肖特基二极管是以金属和半导体接触形成的势垒为基础的二极管。其反向恢复时间更短，一般为 10~40 ns；正向恢复过程中不会有明显的电压过冲；在反向耐压较低的情况下其正向压降也很小，明显低于快速恢复二极管。因此，其开关损耗和正向导通损耗都很小。不足是，当所承受的反向耐压提高时其正向电压有较大幅度提高。它适用于较低输出电压和要求较低正向管压降的换流器电路中。

1.1.2 单相桥式整流电路

电力二极管常用于整流电路中，利用其单向导电性能，通过接成特定的电路可以将交流电转换成直流电，而单相桥式整流电路是最基本的将交流转换为直流的电路。现说明其工作原理。

电路图如图 1.4 所示，3 种画法在实际中都较常用。桥式整流电路的特点是由两个共阴极和两个共阳极的电力二极管构成，共阴极端整流输出直流电的正极，共阳极端整流输出直流电的负极，而交流电源接在桥式电路中两个整流管的阴、阳极间的串联点。

其中图 1.4 (c) 用了一个电力二极管表示桥式整流电路。注意其画法，仍然是电力二极管的阴极输出直流电的正极，阳极输出直流电的负极，而交流电源画法与电力二极管垂直。

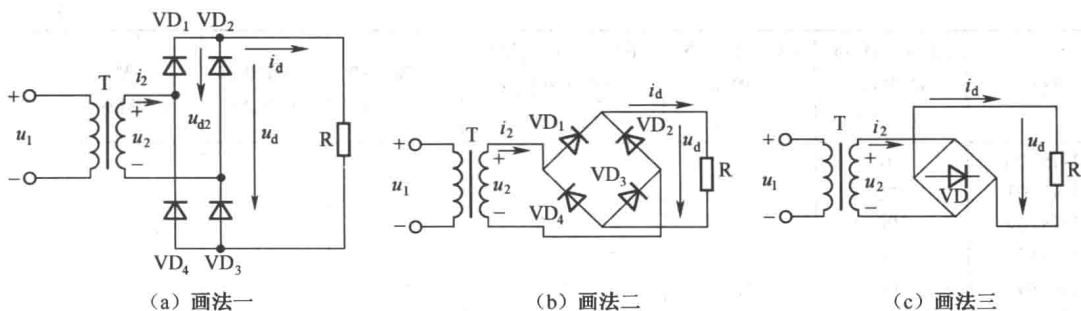


图 1.4 桥式整流电路的几种画法

现以图 1.4 (a) 为例说明线路的工作原理。设变压器二次侧的交流电压为 $u_2 = \sqrt{2}U_2 \sin \omega t$ ， U_2 表示其有效值。当 u_2 为正半周时，电力二极管 VD_1 和 VD_3 因承受正向电压而导通， VD_2 和 VD_4 承受反向电压截止，输出电压 u_d 与电压 u_2 相同，电力二极管 VD_2 和 VD_4 承受的反向电压也为 u_2 。

当 u_2 为负半周时，电力二极管 VD_2 和 VD_4 导通， VD_1 和 VD_3 截止。输出电压 u_d 为 u_2 但方向与之相反，电力二极管 VD_1 和 VD_3 承受的反向电压为 u_2 。输出电压 u_d 的波形如图 1.5 (b) 所示，电力二极管截止时所受反向电压如图 1.5 (c) 所示。

由于 VD_1 、 VD_3 和 VD_2 、 VD_4 两对电力二极管交替导通，致使负载电阻 R 在 u_2 的整个周期内都有电流通过，且方向不变，图 1.5 (d) 所示为输出电流 i_d 的波形，由于在电源的正、负两个半周都有电压输出，所以称为全波整流。

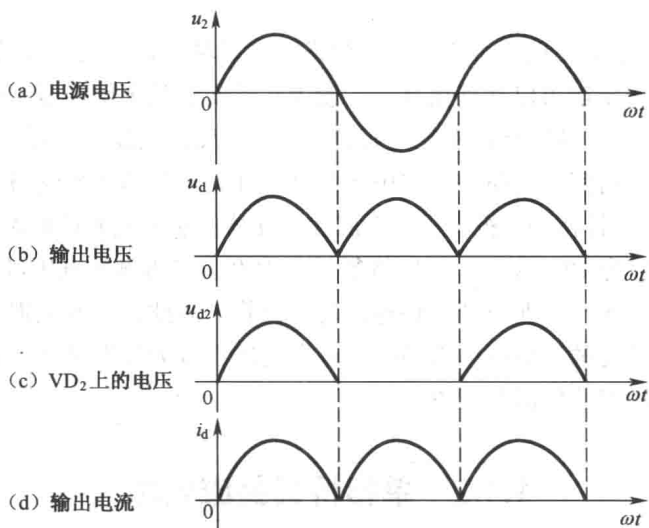


图 1.5 桥式整流电路中的波形

整流输出电压的平均值为

$$U_d = 0.9U_2 \quad (1-2)$$

输出电流的平均值为

$$I_d = \frac{0.9U_2}{R} \quad (1-3)$$

输出电流的有效值为

$$I = \frac{U_2}{R} \quad (1-4)$$

式(1-3)和式(1-4)中 R 为负载电阻值。

单相桥式整流电路的优点是, 输出电压高、变压器利用率高、脉动小。

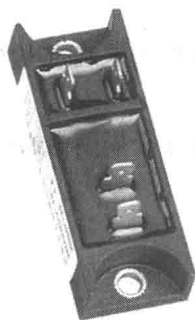
单相桥式整流电路的缺点是, 二极管的数量多, 二极管的正向电阻不为零, 整流电路内阻大, 损耗也较大。

1.1.3 MDQ 型单相整流模块

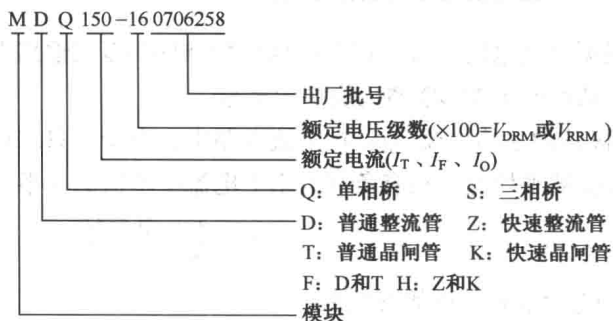
1. MDQ 的基本技术特征

由集成电路构成的桥式整流电路称之为整流桥模块或整流模块。现以某厂家生产的 MDQ 型整流模块来说明这种整流模块。

图 1.6 所示为这种整流模块的外形图和型号说明。



(a) MDQ 型整流模块



(b) 整流模块型号说明

图 1.6 整流模块的外形及型号说明

图 1.7 所示为厂家提供的外型尺寸图和原理图。外型尺寸图有利于用户在使用时的安装。从原理图可以看出, 整流模块的内部电路与桥式整流电路完全相同。对外共有 4 个接线端子, 其中有 2 个输入端接交流电源, 另 2 个端为输出端子, 输出直流电, 在实际接线时, 模块上有显著标识, 用户按图接线即可。

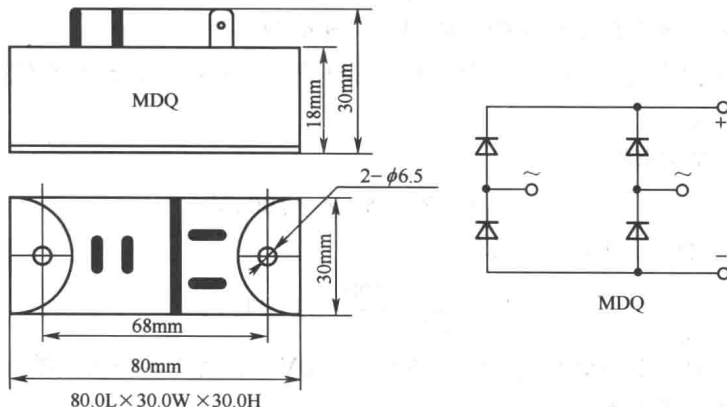


图 1.7 整流模块外观尺寸及原理图

另外,为了便于用户使用,厂家还提供了多种类型 MDQ 的特性参数,如表 1.2 所示。

这种整流模块常用于仪器设备的直流电源, PWM 变频器的输入整流电源,直流电机励磁电源,开关电源的输入整流,软起动电容充电,电气拖动和辅助电流;逆变焊机,电流充电直流电源。

表 1.2 MDQ 整流模块的特性参数

型号	直流输出 电流 $I_d(\text{A})$	单相输入 正向平均 电流 $I_F(\text{A})$	壳温 $T_C(^{\circ}\text{C})$	反向重复 峰值电流 $I_{RRM}(\text{mA})$	反向重复 峰值电压 $V_{RRM}(\text{V})$	通态峰值 电压 $V_{TM}(\text{V})$	通态峰值 电流 $I_{TM}(\text{A})$	最高额定 结温 $T_{JM}(^{\circ}\text{C})$	绝缘电压 V_{ISO} (V(AC))	重量 (g)
MDQ30A	30	15	100	8	600~ 2 000	1.45	45	150	2 500	100
MDQ40A	40	20	100	8	600~ 2 000	1.45	60	150	2 500	100
MDQ50A	50	25	100	8	600~ 2 000	1.45	75	150	2 500	100

2. MDQ 型整流模块的选择

通常根据负载电阻值 R 、所需的直流输出电压 U_d 或输出电流平均值 I_d 来确定电力二极管的技术参数,从而确定 MDQ 整流模块的型号。

① 二极管的平均电流 I_D : 在整流电路中,由于每只二极管只在半个周期内通过电流,所以每只二极管的平均电流只有负载电阻上电流平均值的一半,即

$$I_D = \frac{I_d}{2} = \frac{0.45U_2}{R} \quad (1-5)$$

式中, U_2 为电源电压的有效值。

② 二极管承受的最大反向电压 $U_{R\max}$: 如图 1.5 (c) 所示,二极管承受的最大反向电压值为

$$U_{R\max} = \sqrt{2}U_2 \quad (1-6)$$

③ 最大整流平均电流 $I_{F\max}$ 和最高反向电压 $U_{R\max}$: 考虑到电源电压值波动幅度为 10%, 在选用二极管时,至少有 10% 的裕量,选择最大整流平均电流 $I_{F\max}$ 和最高反向电压 $U_{R\max}$ 分别为

$$I_{F\max} = 1.1 \frac{\sqrt{2}U_2}{R} \quad (1-7)$$

$$U_{R\max} > 1.1\sqrt{2}U_2 \quad (1-8)$$

通过上述参数即可选择出整流模块的型号,现举例说明。

【例 1】 负载电阻 $R = 4\Omega$, 要求输出电流的平均值 $I_d = 25\text{A}$, 选择整流变压器的变比、容量和整流模块的型号。

解: 输出电压的平均值为

$$U_d = I_d R = 25 \times 4 = 100 (\text{V})$$

① 变压器二次侧电压由式 (1-2) 可得

$$U_2 = \frac{U_d}{0.9} = \frac{100}{0.9} \approx 111.11 (\text{V})$$

单相整流电路中,工频交流电源电压通常为 220V,即变压器一次侧的电压 $U_1 = 220\text{V}$ 。

因此,变压器的变比为

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{220}{111} \approx 2$$

整流电路输出电流的有效值为

$$I = \frac{U_2}{R} = \frac{111.11}{4} = 27.78 \text{ (A)}$$

因在一个周期内都有电流流过变压器, 所以变压器二次侧电流与整流电路的输出电流相同, 即

$$I_2 = I = 27.78 \text{ (A)}$$

变压器的容量为

$$S = I_2 U_2 = 27.78 \times 111.11 = 3\,086.64 \text{ (VA)}$$

由上述变压器的变比及其容量, 就可选择相应型号的单相变压器。

② 二极管的平均电流是输出平均电流的一半, 即

$$I_D = \frac{I_d}{2} = \frac{25}{2} = 12.5 \text{ (A)}$$

二极管承受的最大反向电压为

$$U_{R\max} = \sqrt{2} U_2 = 1.41 \times 111.11 = 157.13 \text{ (V)}$$

整流电路最大整流平均电流为

$$U_{F\max} = 1.1 \frac{\sqrt{2} U_2}{R} = 1.1 \frac{\sqrt{2} \times 111.11}{4} = 43.21 \text{ (A)}$$

整流电路最高反向电压为

$$U_{R\max} > 1.1 \sqrt{2} U_2 = 1.1 \sqrt{2} \times 111.11 = 172.85 \text{ (V)}$$

由上述计算的参数可以选择表 1.2 中 MDQ30A 型整流模块。分析如下。

直流输出电流 $I_d = 30 \text{ A}$, 而题目中要求直流输出电流的平均值为 25 A , 满足要求。

反向重复峰值电压 V_{RRM} 取值为 $600 \sim 2\,000 \text{ V}$, 而二极管承受的最大反向电压 $U_{R\max} = 157.13 \text{ V}$, 满足要求。

通态峰值电流为 45 A , 而整流电路最大整流平均电流为 43.21 A , 满足要求。

1.2

单相可控整流电路

1.2.1 认识晶闸管

由于电力二极管是不可控器件, 因此使用电力二极管整流电路时有很大的局限性: 当输入的交流电压一定时, 其输出的直流电压也是一个固定值, 不能调节, 而在实际使用中有很多情况要求直流电压能够进行调节, 就是具有可控性。1957 年研制出的晶闸管, 又名可控硅, 其导通时刻可控, 满足了这种可控的要求。近 20 年晶闸管的制造和应用技术发展很快, 由于它具有体积小、重量轻、效率高、动作迅速、维护简单、操作方便、寿命长等特点, 在生产实际中获得了广泛的应用。

1. 晶闸管的结构

晶闸管是一种大功率可控半导体变流器件,它具有3个PN结的4层结构,其外形、结构和图形符号如图1.8所示。由最外的 P_1 层和 N_2 层引出两个电极,阳极用A标识、阴极用K标识;由中间的 P_2 层引出的电极是门极,用G标识(也称控制极)。晶闸管的国际通用名称为Thyristor。

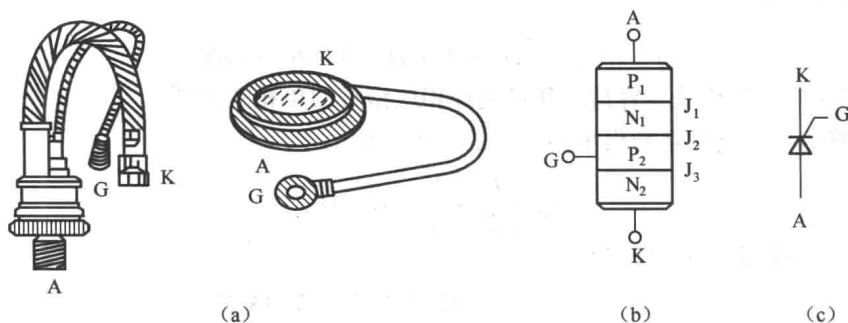


图 1.8 晶闸管的外形、结构和图形符号

常用的晶闸管有螺栓式和平板式,如图1.8(a)所示。晶闸管在工作过程中会因损耗而发热,因此必须安装散热器。螺栓式晶闸管是靠阳极(螺栓)拧紧在铝制散热器上,为自然冷却;平板式晶闸管则由2个相互绝缘的散热器夹紧晶闸管,靠冷风冷却。额定电流大于200A的晶闸管都采用平板式结构。此外还有水冷、油冷等冷却方式。

2. 晶闸管的工作原理

下面通过图1.9所示电路做一个简单的实验,来说明晶闸管的工作原理。由电源 E_a 、白炽灯、晶闸管的阳极、阴极组成晶闸管主电路。电源 E_g 、开关S、晶闸管门极和阴极组成控制电路,也称触发电路。

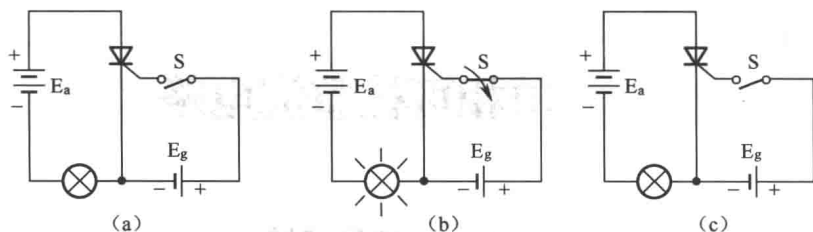


图 1.9 晶闸管导通试验电路图

当晶闸管的阳极A接电源 E_a 的正端,阴极K经白炽灯接电源的负端时,如图1.9(a)所示,此时晶闸管承受正向电压,当控制电路中开关S断开时,白炽灯不亮,说明晶闸管不导通。

当晶闸管的阳极和阴极承受正向电压,控制电路中开关S闭合时,如图1.9(b)所示,使控制极也加正向电压(控制极高电位,阴极低电位),这时白炽灯亮,说明晶闸管导通。

当晶闸管导通后,将控制极上的电压去掉(即将开关S断开),白炽灯依然亮,说明一旦晶闸管导通后,控制极就失去控制作用。

当晶闸管的阳极和阴极间加反向电压时,如图 1.9 (c) 所示,不管控制极加不加电压,灯都不亮,晶闸管截止。如果控制极加反向电压,无论晶闸管主电路加正向电压还是反向电压,晶闸管都不导通。

通过上述实验结果得出,晶闸管导通必须同时具备两个条件。

- ① 晶闸管主电路加正向电压。即阳极接高电位,阴极接低电位;
- ② 晶闸管控制电路加合适的正向电压。即控制极接高电位,阴极接低电位。

为了进一步说明晶闸管的工作原理,可把晶闸管看成是由一个 PNP 型和一个 NPN 型晶体管连接而成的,连接形式如图 1.10 所示。阳极 A 相当于 PNP 型晶体管 V_1 的发射极,阴极 K 相当于 NPN 型晶体管 V_2 的发射极。

当晶闸管阳极承受正向电压,控制极也加正向电压时,晶体管 V_2 处于正向偏置, E_C 产生的控制极电流 I_G 就是 V_2 的基极电流 I_{B2} , V_2 的集电极电流 $I_{C2} = \beta_2 I_{G0}$ 。而 I_{C2} 又是晶体管 V_1 的基极电流, V_1 的集电极电流 $I_{C1} = \beta_1 I_{C2} = \beta_1 \beta_2 I_G$ (β_1 和 β_2 分别是 V_1 和 V_2 的电流放大系数)。 V_1 的集电极

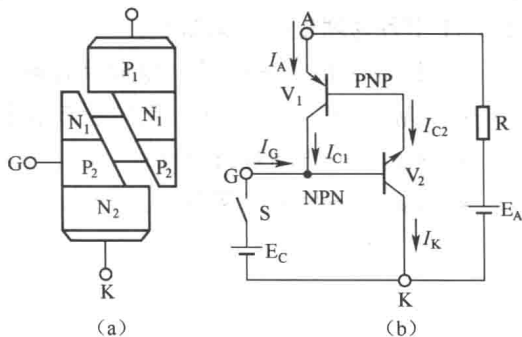


图 1.10 晶闸管工作原理等效电路

电流又流入 V_2 的基极,再一次放大。这样循环下去,形成了强烈的正反馈,使两个晶体管很快达到饱和导通。这就是晶闸管的导通过程。导通后,其压降很小,电源电压几乎全部加在负载上,晶闸管中就流过负载电流。

在晶闸管导通之后,它的导通状态完全依靠晶闸管本身的正反馈作用来维持,即使控制极电流消失,晶闸管仍将处于导通状态。所以,控制极的作用仅是触发晶闸管使其导通,导通之后,控制极就失去控制作用了。要想关断晶闸管,最根本就是必须将阳极电流减小到使之不能维持正反馈的程度,也就是将晶闸管的阳极电流减小到小于维持电流。可采用的方法有:将阳极电源断开;改变晶闸管的阳极电压的方向,即在阳极和阴极间加反向电压。

由上述分析可以得出以下重要结论。

① 晶闸管导通的必要条件是,阳极、阴极间承受正向电压(阳极接高电位,阴极接低电位),同时控制极与阴极间承受正向电压(控制极接高电位,阴极接低电位)。当晶闸管一旦导通后,就可拆除控制极电压信号,晶闸管将继续导通。

② 晶闸管由导通变为截止(关断)的条件是将阳极电流减小到小于维持电流,方法为断开晶闸管阳极电源,或在晶闸管的阳极和阴极间加反向电压。

3. 晶闸管的伏安特性

晶闸管阳极与阴极间的电压 U_A 和阳极电流 I_A 的关系,称为晶闸管的阳极伏安特性。要正确使用晶闸管必须了解其伏安特性,如图 1.11 所示,包括正向特性(第一象限)和反向特性(第三象限)两部分。

晶闸管的正向特性又有阻断状态和导通状态之分。在正向阻断状态时,晶闸管的伏安特性是一组随门极电流 I_G 的增加而不同的曲线簇。当 $I_G = 0$ 时,逐渐增大阳极电压 U_A ,只有很小的正向漏电流,晶闸管正向阻断;随着阳极电压的增加,当达到正向转折电压 U_{BO} 时,漏电流突然剧增,晶闸管由正向阻断突变为正向导通状态。这种在 $I_G = 0$ 时,依靠增大阳极电压而强迫