

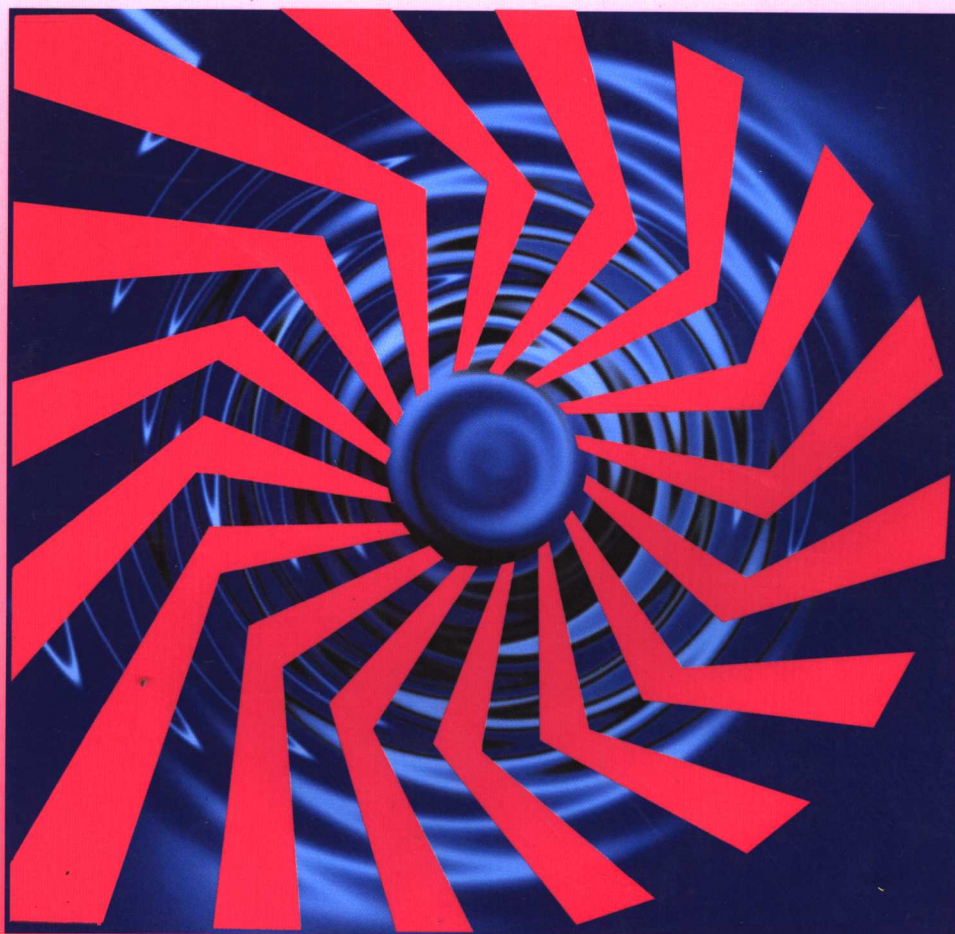


高等学校教材

# 电力电子技术基础

(修订版)

冷增祥 徐以荣



东南大学出版社

高等学校教材

# 电力电子技术基础

(修订版)

冷增祥 徐以荣

东南大学出版社  
· 南 京 ·

## 内 容 提 要

本书介绍了电力半导体器件的原理和特性,以及由这些器件组成的各种电力电子电路。器件除普通晶闸管及派生元件外,着重介绍了全控型器件,包括功率场效应晶体管(P-MOSFET)、电力晶体管(GTR)、可关断晶闸管(GTO)、绝缘栅双极晶体管(IGBT)、集成门极换流晶闸管(IGCT)等;电路则包含 AC/DC、AC/AC、DC/DC 和 DC/AC 四种基本变换;还对软开关技术以及电力电子技术的应用作了介绍。

本书可作为自动控制、自动化、电气工程及其自动化、机电一体化等专业的“电力电子技术”课程的教材,亦可供有关工程技术人员和研究生参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术基础/冷增祥,徐以荣. —2 版. 南京:  
东南大学出版社,2006. 11  
高等学校教材  
ISBN 7—5641—0599—2

I. 电... II. ①冷...②徐... III. 电子电力学—高等学校—教材 IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 045799 号

东南大学出版社出版发行  
(南京四牌楼 2 号 邮编 210096)

出版人:宋增民

江苏省新华书店经销 扬中市印刷有限公司印刷  
开本:787mm×1092mm 1/16 印张:17.25 字数:430 千字  
1999 年 12 月第 1 版 2006 年 11 月第 2 版第 1 次印刷  
印数:1—4000 册 定价:30.00 元

## 修订前言

本书初版《电力电子学基础》于1993年9月出版,1999年12月更名为《电力电子技术基础》,并成为高等学校电子信息类部级规划教材。期间均经多次重印,这次又进行了较大的修改。

本次修订对章节进行了部分调整:从半控器件晶闸管开始,接着讲可控整流电路,即AC/DC、DC/AC变换(第1、2章);接着是触发电路(第3章),在交流调压和交交变频即AC/AC变换(第4章)之后才介绍全控电力电子器件(第5章),因为前4章均用晶闸管作功率开关器件,主要采用相位控制;而从直流变换即DC/DC变换(第6章)起,主要是高频运行要用全控器件;在无源逆变和变频即DC/AC变换(第7章)中增加了PWM控制技术的论述,并增加了(第8章)软开关技术,以反映这一技术的发展趋势;而电力电子技术的应用(第9章)有所充实。我们认为保持器件与电路相配合的特点,既符合电力电子技术的发展过程,又便于器件与变换电路的结合,对各章内容有不同程度的增删,是着眼于基本内容和基本概念,这是掌握电力电子技术的前提和根基。

本书由徐以荣编写第1、2、3、9章,冷增祥编写第4、5、6、7、8章。

上海交通大学陈敏逊教授、谢剑英教授对本书提出过许多宝贵意见,在此表示诚挚的感谢。

作者殷切希望使用本书的教师、学生和有关工程技术人员,对书中不足和错误之处给予批评、指正。

编 者

2005年12月

# 目 录

|                                |      |
|--------------------------------|------|
| <b>0 绪 论</b>                   | (1)  |
| 0.1 电力电子技术的内容                  | (1)  |
| 0.2 电力电子技术的发展                  | (2)  |
| 0.3 电力电子技术的重要作用                | (3)  |
| 0.4 本课程的性质、分析方法和学习要求           | (4)  |
| <b>1 晶闸管及其可控整流电路(AC/DC 变换)</b> | (5)  |
| 1.1 普通晶闸管                      | (5)  |
| 1.1.1 晶闸管结构                    | (5)  |
| 1.1.2 晶闸管的工作原理                 | (5)  |
| 1.1.3 晶闸管特性                    | (8)  |
| 1.1.4 晶闸管主要参数                  | (9)  |
| 1.2 晶闸管器件的串并联                  | (14) |
| 1.2.1 晶闸管器件的串联运行               | (14) |
| 1.2.2 晶闸管器件的并联运行               | (16) |
| 1.3 单相半波可控整流电路                 | (18) |
| 1.3.1 电阻负载                     | (18) |
| 1.3.2 电阻电感负载                   | (20) |
| 1.3.3 带续流二极管的电阻电感负载            | (22) |
| 1.3.4 电容性负载                    | (23) |
| 1.4 单相桥式可控整流电路                 | (25) |
| 1.4.1 单相全控桥式整流电路               | (25) |
| 1.4.2 单相半控桥式整流电路               | (30) |
| 1.5 三相半波可控整流电路                 | (32) |
| 1.5.1 三相半波不可控整流电路              | (32) |
| 1.5.2 三相半波电阻负载可控整流电路           | (33) |
| 1.5.3 三相半波感性负载可控整流电路           | (35) |
| 1.5.4 六相半波可控整流电路               | (37) |
| 1.6 三相桥式可控整流电路                 | (38) |
| 1.6.1 共阴极接法与共阳极接法              | (38) |
| 1.6.2 三相全控桥式整流电路               | (38) |

|                           |      |
|---------------------------|------|
| 1.6.3 三相半控桥式整流电路          | (45) |
| 1.7 反电势负载                 | (50) |
| 1.7.1 晶闸管整流电路反电势负载时的工作情况  | (50) |
| 1.7.2 反电势负载的特点            | (51) |
| 习题和思考题                    | (51) |
| <b>2 变流器运行</b>            | (54) |
| 2.1 换流重叠角                 | (54) |
| 2.1.1 交流侧电感对三相不可控整流的影响    | (54) |
| 2.1.2 三相半波可控整流电路的换流重叠角    | (57) |
| 2.1.3 其他整流电路的换流重叠角        | (58) |
| 2.2 有源逆变                  | (59) |
| 2.2.1 有源逆变产生的条件           | (59) |
| 2.2.2 三相半波可控整流电路的有源逆变     | (61) |
| 2.2.3 三相全控桥式电路的逆变工作状态     | (64) |
| 2.3 变流器外特性                | (65) |
| 2.3.1 整流器外特性              | (65) |
| 2.3.2 有源逆变器外特性            | (66) |
| 2.4 谐波                    | (67) |
| 2.4.1 谐波分析                | (68) |
| 2.4.2 负载谐波的影响             | (71) |
| 2.4.3 电源中谐波的影响            | (73) |
| 2.5 功率因数                  | (75) |
| 2.5.1 功率因数的基本概念           | (75) |
| 2.5.2 整流电路的功率因数           | (76) |
| 2.5.3 提高功率因数的途径           | (78) |
| 习题和思考题                    | (81) |
| <b>3 门极触发电路</b>           | (82) |
| 3.1 概述                    | (82) |
| 3.1.1 门极触发信号的种类           | (82) |
| 3.1.2 晶闸管对门极触发电路的要求       | (83) |
| 3.2 晶体管触发电路               | (84) |
| 3.2.1 正弦波同步、锯齿波移相的晶体管触发电路 | (84) |
| 3.3 集成触发器                 | (87) |
| 3.3.1 集成触发器原理及应用          | (87) |
| 3.3.2 集成触发器类型             | (89) |
| 3.4 数字触发器                 | (90) |
| 3.4.1 由硬件构成的数字触发器         | (91) |

|                                      |              |
|--------------------------------------|--------------|
| 3.4.2 微机数字触发器 .....                  | (92)         |
| 3.5 触发器的定相 .....                     | (95)         |
| 3.5.1 概述 .....                       | (95)         |
| 3.5.2 触发器的定相方法 .....                 | (95)         |
| 习题和思考题 .....                         | (98)         |
| <b>[4] 交流调压和交交变频(AC/AC 变换) .....</b> | <b>(99)</b>  |
| 4.1 交流调压 .....                       | (99)         |
| 4.1.1 单相交流调压 .....                   | (99)         |
| 4.1.2 三相交流调压和软起动器 .....              | (103)        |
| 4.1.3 导步电动机的软起动 .....                | (106)        |
| 4.1.4 晶闸管交流调功器 .....                 | (107)        |
| 4.1.5 双向晶闸管 .....                    | (108)        |
| 4.2 交交变频器 .....                      | (110)        |
| 习题和思考题 .....                         | (117)        |
| <b>[5] 全控型电力半导体器件 .....</b>          | <b>(119)</b> |
| 5.1 门极可关断晶闸管(GTO) .....              | (119)        |
| 5.1.1 结构特点和关断原理 .....                | (119)        |
| 5.1.2 特性和参数 .....                    | (120)        |
| 5.1.3 缓冲电路 .....                     | (121)        |
| 5.1.4 对门极信号的要求 .....                 | (123)        |
| 5.1.5 门极驱动电路 .....                   | (125)        |
| 5.2 电力晶体管(GTR,PTR) .....             | (126)        |
| 5.2.1 特性和参数 .....                    | (126)        |
| 5.2.2 安全工作区 .....                    | (128)        |
| 5.2.3 缓冲电路和续流二极管的影响 .....            | (130)        |
| 5.2.4 开关特性 .....                     | (134)        |
| 5.2.5 驱动电路 .....                     | (137)        |
| 5.3 电力场效应晶体管(P-MOSFET) .....         | (141)        |
| 5.3.1 结构和工作原理 .....                  | (142)        |
| 5.3.2 静态特性和参数 .....                  | (143)        |
| 5.3.3 动态特性和参数 .....                  | (144)        |
| 5.3.4 功率 MOSFET 的特点 .....            | (145)        |
| 5.3.5 功率 MOSFET 的驱动电路 .....          | (147)        |
| 5.4 绝缘栅双极晶体管(IGBT) .....             | (148)        |
| 5.4.1 结构特点 .....                     | (148)        |
| 5.4.2 有关特性 .....                     | (149)        |
| 5.4.3 驱动电路 .....                     | (150)        |

|                                  |              |
|----------------------------------|--------------|
| 5.5 其他全控型电力电子器件 .....            | (151)        |
| 5.5.1 静电感应晶体管(SIT) .....         | (151)        |
| 5.5.2 静电感应晶闸管(SITH) .....        | (152)        |
| 5.5.3 金属氧化物可控晶闸管(MCT) .....      | (153)        |
| 5.5.4 集成门极换流晶闸管(IGCT) .....      | (154)        |
| 5.5.5 注入增强栅晶体管(IEGT) .....       | (156)        |
| 5.6 模块和智能功率模块(IPM) .....         | (156)        |
| 5.6.1 GTR 模块 .....               | (156)        |
| 5.6.2 其他功率模块 .....               | (157)        |
| 5.6.3 智能功率模块(IPM) .....          | (158)        |
| 5.7 电力电子器件发展概貌 .....             | (159)        |
| 5.7.1 现代电力半导体器件的水平 .....         | (159)        |
| 5.7.2 各种装置的容量及频率范围 .....         | (160)        |
| 5.8 电力半导体器件和装置的保护 .....          | (160)        |
| 5.8.1 常规的过压、过流保护 .....           | (161)        |
| 5.8.2 用电子线路实施保护 .....            | (165)        |
| 习题和思考题 .....                     | (168)        |
| <b>[6] 直流变换器(DC/DC 变换) .....</b> | <b>(170)</b> |
| 6.1 斩波原理和控制方式 .....              | (170)        |
| 6.1.1 斩波原理 .....                 | (170)        |
| 6.1.2 控制方式 .....                 | (171)        |
| 6.2 直流变换器的基本电路 .....             | (172)        |
| 6.2.1 降压式(Buck)变换器 .....         | (172)        |
| 6.2.2 升压式(Boost)变换器 .....        | (173)        |
| 6.2.3 升/降压式(Buck-Boost)变换器 ..... | (174)        |
| 6.2.4 其他形式的基本变换电路 .....          | (175)        |
| 6.3 负载为直流电动机时的斩波器结构 .....        | (175)        |
| 6.3.1 单象限斩波器 .....               | (175)        |
| 6.3.2 两象限斩波器 .....               | (176)        |
| 6.3.3 四象限斩波器 .....               | (177)        |
| 6.4 输入与输出隔离的直流变换器 .....          | (179)        |
| 6.4.1 单端反激式 .....                | (179)        |
| 6.4.2 单端正激式 .....                | (181)        |
| 6.4.3 推挽式 .....                  | (183)        |
| 6.4.4 半桥式 .....                  | (184)        |
| 6.4.5 全桥式 .....                  | (184)        |
| 6.4.6 同步整流 .....                 | (184)        |
| 6.5 直流 PWM 的控制 .....             | (185)        |

|                            |       |
|----------------------------|-------|
| 习题和思考题                     | (188) |
| <b>7 无源逆变和变频(DC/AC 变换)</b> | (189) |
| 7.1 概 述                    | (189) |
| 7.1.1 逆变与变频的含义             | (189) |
| 7.1.2 逆变和变频的两种类型           | (190) |
| 7.2 负载换流逆变器                | (191) |
| 7.2.1 晶闸管的换流               | (191) |
| 7.2.2 RLC 串联谐振逆变器          | (193) |
| 7.3 强迫换流电压型逆变器             | (197) |
| 7.3.1 串联电感式逆变器             | (197) |
| 7.3.2 串联二极管式逆变器            | (200) |
| 7.4 强迫换流电流型逆变器             | (203) |
| 7.4.1 串联二极管式逆变器            | (203) |
| 7.4.2 辅助晶闸管换流逆变器           | (204) |
| 7.5 逆变器的谐波和调压              | (205) |
| 7.5.1 输出波形中的谐波含量           | (205) |
| 7.5.2 输出电压的调节              | (205) |
| 7.5.3 逆变器的多重化              | (206) |
| 7.6 脉宽调制(PWM)逆变器           | (209) |
| 7.6.1 正弦脉宽调制(SPWM)原理       | (210) |
| 7.6.2 PWM 逆变器及其优点          | (212) |
| 7.7 PWM 控制技术               | (214) |
| 7.7.1 调制法                  | (214) |
| 7.7.2 指定谐波消除法(SHEPWM)      | (220) |
| 7.7.3 跟踪型 PWM(SHBPWM)      | (221) |
| 7.7.4 电压空间矢量 PWM(SVPWM)    | (223) |
| 7.8 中高压变频器                 | (225) |
| 7.8.1 逆变器结构                | (226) |
| 7.8.2 整流装置                 | (229) |
| 习题和思考题                     | (231) |
| <b>8 软开关技术</b>             | (233) |
| 8.1 硬开关与软开关                | (233) |
| 8.1.1 开关高频化的好处             | (233) |
| 8.1.2 硬开关存在的问题             | (233) |
| 8.1.3 问题的解决途径              | (234) |
| 8.2 软开关的种类                 | (235) |
| 8.3 软开关技术的实现               | (236) |

|                               |              |
|-------------------------------|--------------|
| 8.3.1 谐振型变换器(RSC) .....       | (236)        |
| 8.3.2 软开关 PWM 变换器 .....       | (237)        |
| 8.3.3 零转换 PWM 变换器 .....       | (238)        |
| 8.4 软开关电路举例 .....             | (239)        |
| 8.4.1 BUCK ZCS-PWM 变换器 .....  | (239)        |
| 8.4.2 BOOST ZVT-PWM 变换器 ..... | (239)        |
| 8.4.3 谐振直流环(RDCL)逆变器 .....    | (241)        |
| 习题和思考题 .....                  | (242)        |
| <b>[9] 电力电子技术的应用 .....</b>    | <b>(243)</b> |
| 9.1 直流电动机调速及其可逆电路 .....       | (243)        |
| 9.1.1 直流电动机调速 .....           | (243)        |
| 9.1.2 可逆电路 .....              | (243)        |
| 9.2 交流电动机调速 .....             | (245)        |
| 9.2.1 交流电动机的调压调速 .....        | (245)        |
| 9.2.2 串级调速 .....              | (245)        |
| 9.2.3 变频调速 .....              | (247)        |
| 9.3 非电动机方面的一些应用 .....         | (249)        |
| 9.3.1 无触点开关 .....             | (249)        |
| 9.3.2 电加热 .....               | (251)        |
| 9.3.3 电压调节 .....              | (253)        |
| 9.3.4 不间断电源(UPS) .....        | (253)        |
| 9.3.5 电化学 .....               | (255)        |
| 9.3.6 高压直流输电 .....            | (255)        |
| 9.3.7 蓄电池充电机 .....            | (256)        |
| 9.3.8 开关电源 .....              | (257)        |
| 9.3.9 电子镇流器 .....             | (259)        |
| 9.3.10 其他应用领域 .....           | (260)        |
| 习题和思考题 .....                  | (261)        |
| <b>参考文献 .....</b>             | <b>(263)</b> |

## 0.1 电力电子技术的内容

电力电子技术是以电力、电能为研究对象的电子技术,又称电力电子学(power electronics)。它主要研究各种电力电子半导体器件,以及由这些电力电子器件来构成各式各样的电路或装置,实现对电能的变换和控制,其功能如图 0.1 所示。它既是电子学在电工或强电(高电压、大电流)领域的一个分支,又是电工学在弱电(低电压、小电流)电子领域的一个分支,或者说是强弱电相结合的新学科。

大家知道,电有直流(DC)和交流(AC)两大类。前者有电压幅值和极性的不同,后者除电压幅值外,还有频率和相位两个要素。而用电设备和负载是各式各样的,实际应用中,常常需要在两种电能之间或对同种电能的一个或多个参数(如电压、电流、频率和相位等)进行变换。不难看出,这些变换共有四种基本类型,它们各可通过相应的变流器或变换器(converter)来实现,这就是:

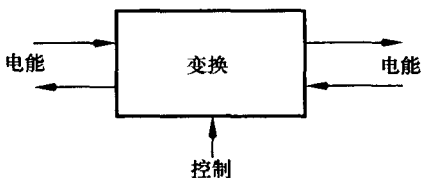


图 0.1 电力电子装置的功能

(1)  $AC \rightarrow DC$ , 即交流电转换为直流电。这种变换称为整流,实现的装置叫整流器(rectifier),用于如充电、电镀、电解和直流电动机的速度调节等。

(2)  $DC \rightarrow AC$ , 即直流电转换为交流电。这是与整流相反的变换,称为逆变。逆变器(inverter)的输出可以是恒频,用于如恒压恒频(CVCF)电源或不间断供电电源(UPS);也可以变频(这时变流器叫变频器),如用于各种变频电源、中频感应加热和交流电动机的变频调速等。

(3)  $AC \rightarrow AC$ , 这是将交流电能的参数(幅值或频率)加以转换。其中:交流电压有效值的调节称为交流电压控制或简称交流调压,用于如调温、调光、交流电动机的调压调速等;而将 50Hz 工频交流电直接转换成其他频率的交流电,称为交交变频,其装置叫做周波变换器(cycloconverter),主要用于交流电动机的变频调速。

(4)  $DC \rightarrow DC$ , 这是将直流电的参数(幅值或极性)加以转换。即将恒定直流变成断续脉冲形状,以改变其平均值。此种变流器称之为斩波器(chopper)或直流变换器,主要用于直流电压变换、开关电源和矿车、电瓶运输车等直流电动机的牵引传动。

可见,电力电子技术在工农业生产、电力系统、交通运输、邮电通信等国民经济各部门以及家用电器各方面都有着广泛的应用。

为了实现上述各种转换,必须对它们进行控制(control)。目前实现电能转换的控制方式主要有“相位控制”、“通断控制”和“脉冲宽度调制(PWM)”。

因此,可以说电力电子学是横跨“电子”、“电力”和“控制”三个领域的一门新兴工程技术

学科。正是依据这一特征,我国电力电子学会设计了如图 0.2 所示的会标。

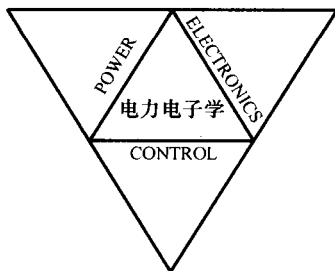


图 0.2 电力电子学会会标

## 0.2 电力电子技术的发展

电子学的发展史表明,一种新器件的出现,将对整个技术领域产生深刻的影响。1946 年晶体管的诞生开始形成固体电子学。电力电子学也正是在 1957 年第一只晶闸管(thyristor)[也称可控硅(SCR)]——一种可控的大功率半导体器件问世后,逐步建立和发展起来的。

在这之前,电能的转换主要依靠旋转机组来实现。例如,将一台交流电动机拖动一台直流发电机可将交流电变换为直流电,调节直流发电机的励磁的大小和极性便可改变直流输出电压的高低和极性;如将一台直流电动机拖动一台交流发电机便可实现相反的转换,只要调节直流电动机的转速便可改变交流电的频率。与这些旋转式的变流机组比较,利用电力半导体器件组成的电能变换器是静止的,具有体积小、重量轻、无机械噪声和磨损、效率高、放大倍数大、易于控制、响应快及使用方便等一系列优点。因此,在变流领域内,自 20 世纪 60 年代开始进入了晶闸管的时代。在这期间,除普通晶闸管本身的电压、电流容量和  $du/dt$ 、 $di/dt$  承受能力及开关特性不断提高外,还发展了一些派生元件,如快速晶闸管、高频晶闸管、双向晶闸管、逆导晶闸管、光控晶闸管等。这些元件均只能控制其开通,而不能控制其关断,称为半控型电力电子器件。半控器件工作频率低,但单个器件容量大。

70 年代以后,国际上电力半导体技术突飞猛进,其特征是,出现了通和断或开和关都能控制的全控型电力电子器件(亦称自关断型器件),如门极可关断晶闸管(GTO)、大功率或巨型晶体管(GTR)、功率场效应晶体管(P-MOSFET)和绝缘栅双极晶体管(IGBT)等。全控器件工作频率高,单个器件容量不及半控器件,价格也较高。这样,就突破了以晶闸管半控型器件为主体的单一局面,从而形成一个庞大的电力半导体器件家族。

电力电子技术包括器件及其应用,即元件和电路或器件和装置两个方面,它们的发展是相辅相成、互相促进的。装置依赖于器件,新的器件出现能开拓许多新的应用领域,做出新的装置;应用中出现的问题又对器件提出新的要求,推动新器件的研制。例如,只有半控型器件时,它用于整流比较成熟,所制作的整流器性能良好,但用于逆变器便带来技术上的复杂和体积庞大、成本昂贵等问题,而当自关断型器件出现后,这些问题就比较容易解决。而且新的电力电子器件和变换技术仍在不断出现,它们的应用领域也日益广泛。

电力电子技术的发展还与控制技术的发展紧密相关。控制电路经历了由分立元件到集

成电路(IC)的发展阶段。现在已有专为各种控制功能设计的专用集成电路,使电力电子装置的控制电路大为简化。特别是微处理器和微型计算机的引入,且它们的位数成倍增加,运算速度随之提高,功能不断完善,使控制技术发生了根本的变化,即控制不仅依赖硬件电路,而且可利用软件编程,既方便又灵活,可使各种新颖、复杂的控制策略和方案得到实现,并具有自诊断功能,甚至能获得有一定智能的电力电子装置,可以使电路或装置达到更为完善的水平。所以,将新的控制理论和方法在实践中取得应用也是电力电子技术的一个重要内容。

综上所述可以看出,电力电子技术的发展有赖于电力电子器件的发展,电力电子技术发展的每一次飞跃都是以新器件的出现为契机的。电力电子器件是电力电子技术的基础。一代器件孕育着一代装置,一代装置产生一批新的应用领域。而微电子技术、电力电子器件和控制理论则是现代电力电子学缺一不可的发展动力。

### 0.3 电力电子技术的重要作用

电力电子技术在国民经济和科学技术的发展中正在并将要发挥越来越重要的作用。

(1) 提高和改善电能质量。在现代文明社会中电力是主要的动力源。由电厂发出送上电网的交流电(称为市电)一般电压和频率稳定波形为正弦,但用户使用的设备常使电网无功损耗增加;加上一些自然和人为因素,常招致电压跌落闪变、瞬时停电等,大量非线性故障负载的使用,使电网中出现各次有害的谐波波形,使电网发生严重畸变,已成为电网的一种公害,而采用由电力电子器件构成的各种控制器和补偿器则可有效地提高和改善电能质量。近年致力研究的所谓柔性交流输电系统(FACTS)就是为了实现这一目标。至于建造经济性和技术性均优越的直流输电,将交流变为直流远距离输送再变换为交流市电,更是离不开电力电子技术。

(2) 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,一般节能效果可达 10%~40%,国家已将许多装置列入节能的推广应用项目。作为与物质生产息息相关、以功率处理为对象的电力电子技术正成为缓解人类所面临的能源危机、资源危机和环境危机威胁的重要技术手段之一。

(3) 改造传统产业和发展机电一体化等新兴产业。特别是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,并能实现无噪音且具有全新的功能和用途。另外,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,成为发挥计算机作用的保证和基础。

(4) 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二为一,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。

## 0.4 本课程的性质、分析方法和学习要求

电力电子技术对自动化、电气工程及其自动化、机械设计制造及其自动化等专业既是一门技术基础课,又是一门专业课。因为它不仅分析各种基本的变换电路,而且结合生产实际,介绍其在各方面的应用。

在电力电子电路中,各电力电子器件均是工作在开关状态。它们用作可控开关,每导通一次就出现一次过渡过程,对开关型电力电子变换器工作特性的分析较为繁杂。但是鉴于开关更多地是处于周期性工作状态(或者说是相邻两次过渡过程完全一致的稳定工作状态)。因此对这类电路作定量分析时,主要是解微分方程的过渡过程和分析与计算傅立叶级数。此外,波形分析是电力电子电路的重要分析方法。只有依据电路的通断过程分析并画出各种状态下的波形,才能在此基础上对各种量进行定量分析。为了分析简化,在画波形和计算时常对电路某些元件作理想化的假设。

学习本课程的基本要求是:了解各种功率开关器件的特性和参数,能正确选择和使用它们;了解各种变换电路的工作原理,特别是各种基本电路中的电磁过程,掌握其分析方法;了解各种开关器件的控制和保护,以及各种电路的特点、性能指标和使用场合;还要掌握基本实验方法与训练基本实验技能。

在各种电气控制设备中,能够实现弱电控制强电的是电力电子装置。如果说,计算机是现代化生产设备的大脑,电动机和各种电磁执行元件是手足,那么电力电子装置就是支配手足动作的肌肉和神经。作为一种应用技术,电力电子技术的特点是:综合性强、应用涉及面广、与工程实践联系密切。本课程仅是在这方面打一个基础。

晶闸管(thyristor)是具有可控开关特性的半导体器件的总称。它包括普通晶闸管(通常称为可控硅)及各种派生元件,如双向晶闸管、逆导晶闸管、快速晶闸管、光控晶闸管、可关断晶闸管、静电感应晶闸管等。在这些器件中出现最早和目前应用得最广泛的是可控硅(Silicon Controlled Rectifier, SCR),因此习惯上不加说明的晶闸管指的就是普通晶闸管,即可控硅。普通晶闸管是半控型器件。

将交流电转换为幅值可调的直流电称为可控整流。它在直流电源、高压直流输电、电池充电机、电化学加工、直流电动机传动系统等方面得到广泛应用。

## 1.1 普通晶闸管

### 1.1.1 晶闸管结构

晶闸管是一种功率半导体器件,如图 1.1(a)所示。它的管芯由半导体材料构成 p-n-p-n 四层结构,在这四层结构间形成三个 p-n 结  $j_1$ 、 $j_2$ 、 $j_3$ ;有三个引出端,其中两个是功率引出端,分别称阳极 A(anode)和阴极 K(cathode),另一个是控制引出端,称门极 G(gate)。图 1.1 中(b)和(c)分别是 P 型门极、阴极侧受控和 N 型门极、阳极侧受控晶闸管的电路符号,当没有必要规定控制极的类型时,可用图(d)符号表示晶闸管。

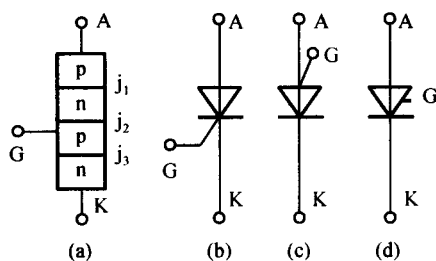


图 1.1 晶闸管结构及电路符号

晶闸管的外壳有螺旋型、模块型和平板型等多种形式,前者多为小容量(200A 以下),后者为大容量。使用时都必须配装合适的散热器或适当的冷却措施,如风冷却或水冷却等。

### 1.1.2 晶闸管的工作原理

晶闸管是一种可控的单向导电开关,其反向始终能承受电压,即具有反向阻断特性;正向则可以有稳定的两个工作状态,即呈高阻抗的阻断工作状态(简称断态)和呈低阻抗的导通工作状态(简称通态)。那么,这两种工作状态在什么条件下成立以及它们在什么条件下相互转换,这是我们首先要讨论的问题。

## 1) p-n 结

p 型半导体材料的多数载流子是空穴；n 型半导体材料的多数载流子是电子，它们的结合面形成 p-n 结，如图 1.2(a) 所示。

当外加一个电压  $E$ ，若其正端接 p，负端接 n（见图 1.2(b)），则在外电压的作用下，空穴和电子流向结  $j$ 。在结  $j$  处，空穴和电子相结合而中和。失去的空穴和电子由电源  $E$  得到补充。这样不断结合和补充的过程形成电流，p-n 结呈低阻导通特性，或者说，p-n 结正向偏置时导通。

当外加电源  $E$  正端接 n，负端接 p 时，在外加电压作用下，p 型的空穴和 n 型的电子均背离结  $j$ ，它们不可能在那里结合，于是 p 型、n 型中的主要载流子被耗尽（见图 1.2(c)），在这种情况下，p-n 结呈高阻阻断状态，或者说 p-n 结反向偏置时阻断，只有很小的漏电流。

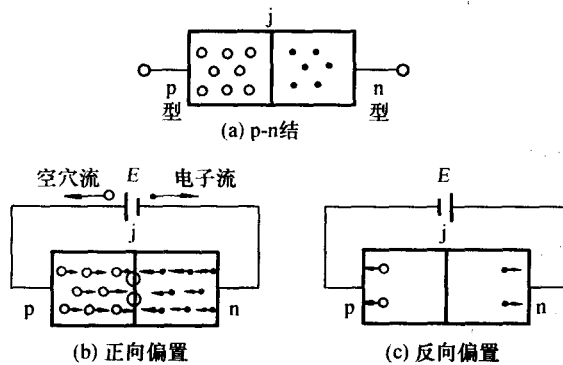


图 1.2 p-n 结

## 2) 晶闸管的阻断工作状态

当晶闸管门极  $G$  与外电路断开时，则晶闸管在它的两个方向上均呈阻断工作状态（见图 1.3(a)、(b)）。图 1.3(a) 晶闸管阳极  $A$  加正电压，阴极  $K$  加负电压（称晶闸管正向偏置）。具有四层结构的晶闸管可以看成是三个二极管的串联，即三个结  $j_1$ 、 $j_2$ 、 $j_3$  可以看成是三个二极管，这时结  $j_1$ 、 $j_3$  正偏，而结  $j_2$  反偏，故晶闸管呈阻断状态。图 1.3(b) 是阳极加负电压，阴极加正电压（称晶闸管反向偏置），这时是结  $j_2$  正偏，而结  $j_1$ 、 $j_3$  是反偏，故晶闸管亦呈阻断状态。

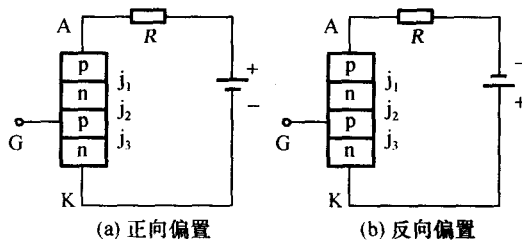


图 1.3 晶闸管阻断工作状态

由此可见，当晶闸管门极没有控制信号时（无注入电流），不论晶闸管是加正向偏置还是反向偏置，晶闸管均呈阻断工作状态，相当于开关断开。

### 3) 晶闸管的导通工作状态

对晶闸管正向导通工作状态的解释,可用晶闸管的双晶体三极管模型分析。图 1.4(a)为晶闸管结构,若将其中间部分分为两部分并用导体连接起来,则变为图 1.4(b)。图 1.4(b)可视为两只复合晶体三极管,即 p-n-p 型晶体三极管 VT1 和 n-p-n 型晶体三极管 VT2,见图 1.4(c)。在正向偏置下,由图可得电流方程

$$I_A = I_{C1} + I_{C2} + I_{CO} = \alpha_1 I_A + \alpha_2 I_K + I_{CO} \quad (1.1)$$

$$I_K = I_A + I_G \quad (1.2)$$

式中:  $\alpha_1$ ——VT1 的共基极电流放大系数( $\alpha_1 = I_{C1}/I_A$ );

$\alpha_2$ ——VT2 的共基极电流放大系数( $\alpha_2 = I_{C2}/I_K$ );

$I_G$ ——门极电流。

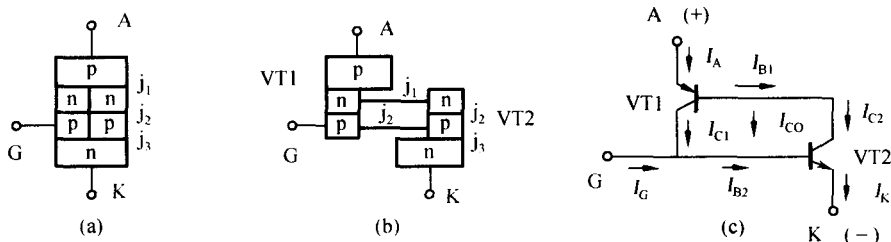


图 1.4 晶闸管等效电路

$I_{CO}$ 为 VT1、VT2 的漏电流;  $I_{C1}$ 、 $I_A$  分别为 VT1 的集电极和发射极电流,  $I_{C2}$ 、 $I_K$  分别为 VT2 的集电极和发射极电流。将式(1.2)代入式(1.1)可得

$$I_A = \frac{I_{CO} + \alpha_2 I_G}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (1.3)$$

$\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 由晶闸管制造工艺所决定,并随  $I_A$ 、 $I_K$  变化,其关系曲线如图 1.5 所示。从式(1.3)可见,当门极电流为零时,则

$$I_A = \frac{I_{CO}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}$$

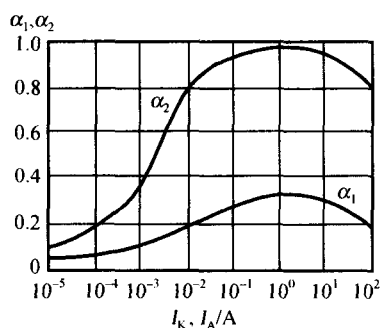


图 1.5  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 与发射极电流变化关系

由于  $I_{CO}$  很小,在很小漏电流情况下,  $(\alpha_1 + \alpha_2) \ll 1$ , 则  $I_A \approx I_{CO}$ , 电路处于阻断状态,这与前述载流子运动的原理一致。

当存在门极电流  $I_G$  时,从图 1.4(c)可看出,  $I_G$  注入将使  $I_K$  增加,从而使  $I_{C2}$  增加;  $I_{C2}$  的增加则相继引起  $I_A$  和  $I_{C1}$  的增加,而  $I_{C1}$  的增加又使  $I_{B2}$  和  $I_K$  增加,这是一个强烈的正反馈过程。在电流增加的同时,  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  也随之增加,当  $(\alpha_1 + \alpha_2) \approx 1$ , 则两晶体三极管处于饱和导通,即晶闸管由阻断转为导通。晶闸管导通以后,由于两晶体三极管间的正反馈作用,仍然保持导通,且处于深度饱和状态( $\alpha_1 + \alpha_2 \approx 1.15$ ),而与门极电流  $I_G$  是否继续提供无关。即门极信号只需控制晶闸管的正向导通时刻,而一旦导通,门极信号即使失去了,晶闸管仍然保持导通。

当晶闸管加反向偏置时,由于晶体管 VT1、VT2 在反偏时的电流放大系数很小,即使存在门极电流  $I_G$  也不能使其导通。