

# 变频器案例 解析及应用

陈浩 编著



國防工業出版社  
National Defense Industry Press

# 变频器案例解析及应用

陈浩 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

## 内 容 简 介

本书共分6章。首先,用文字图解等方式介绍了变频器原理;其次,从实用的角度出发,通过变频器的应用案例介绍变频器的应用技术;再次,为了简化读者对变频器应用的学习过程,也对变频器所驱动的设备(如制冷机、塑胶机械和印刷机械)做了一定的介绍,其目的是为了从事变频器应用的工程技术人员在去现场勘察前就能对需进行变频调速的设备有较为具体的认识。

另外,中压(1140V)和高压变频器应用的书籍较为少见(特别是中压,还未见过),本书对该部分做了较为详细的介绍,以拓展加深读者对变频器应用的认识。

本书可供从事自动控制的工程技术人员、管理人员及初学者在实际工作中理解变频器控制技术,快速掌握变频器的应用控制设计的技巧之用。

### 图书在版编目(CIP)数据

变频器案例解析及应用/陈浩编著. —北京:国防工业出版社,2009.9

ISBN 978-7-118-06392-9

I. 变... II. 陈... III. 变频器 IV. TN773

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 090350 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 15½ 字数 354 千字

2009 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 28.00 元

---

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

# 前 言

变频器是一种高智能化的调速设备。目前,变频器在各种领域的应用正处在迅猛发展阶段,它以微处理器为控制核心,以大功率器件(模块)来实现整流、逆变,有机地将微型计算机技术、自动控制技术和电力电子技术融为一体。变频器以其优异的性能为调速领域带来了一场革命,被广泛用于各种调速系统,变频器技术被一些自动化行业专家喻为 21 世纪最重要的技术之一,变频器不仅调速性能稳定,而且对于变转矩(风机泵类)设备还可通过变频器调速实现接近理想化的节能。

本书采用了较多的图解以便使从事变频器及其应用系统设计的工程技术人员能更加深刻地理解变频器的原理及其应用,同时快速掌握。值得注意的是,各种图解类的书籍均从不同角度出发,用生动形象的办法来描述各自的系统及设备,这不仅使读者的阅读处在最佳状态,而且更易留下深刻的记忆,以提高专业能力。

现代变频器所集成的功能越来越多,具体时在很多场合首先要将被驱动设备的工艺弄清楚,这使得从事变频器及其应用系统设计的工作人员不仅仅要深刻地理解变频器的原理及其应用,同时还需掌握一定的被驱动设备的工艺,本书在应用案例部分对被驱动设备的工艺也作了一定篇幅的介绍,以便读者学以致用,快速提高变频器应用的能力。

书中的案例十分具体,类似于具体的设计开发项目,有一定自动控制基础读者可以参照本书中的案例直接设计出变频器控制系统,简化了学习过程。这对于众多的对变频器控制感兴趣的普通读者和从事自动控制设计的工程师和学生们来说是条捷径,同时便于工程技术人员、管理人员及初学者在工作中使用和参考。

本书在编写过程中得到了白德玉、韩公明、高存云、韩兆万、陈坚、韩兆天、方玲、吴曦麟、韩君、韩子阳等人的大力支持和帮助,在此对他们表示由衷的感谢。

陈 浩  
2009 年 6 月

# 目 录

## 第 1 篇 变频器原理及其应用

|                               |    |                                             |    |
|-------------------------------|----|---------------------------------------------|----|
| <b>第 1 章 电力电子基础</b> .....     | 1  | 2.2.2 可控整流电路 .....                          | 49 |
| 1.1 电力电子技术 .....              | 1  | 2.2.3 泛用型变频器的不控整流<br>电路及其工作过程 .....         | 59 |
| 1.1.1 电力电子技术的应用<br>概况 .....   | 1  | <b>2.3 逆变电路</b> .....                       | 60 |
| 1.1.2 电力电子技术的定义 .....         | 2  | 2.3.1 半控型逆变电路 .....                         | 60 |
| <b>1.2 电力电子器件</b> .....       | 2  | 2.3.2 全控型逆变电路 .....                         | 61 |
| 1.2.1 电力电子器件的定义及<br>分类 .....  | 3  | 2.3.3 电压型逆变电路 .....                         | 62 |
| 1.2.2 电力电子器件的工作<br>特性 .....   | 5  | 2.3.4 电流型逆变电路 .....                         | 64 |
| 1.2.3 电力电子器件的发展 .....         | 5  | 2.3.5 图解逆变电路的工作<br>过程 .....                 | 65 |
| 1.2.4 电力电子器件的种类 .....         | 7  | <b>2.4 变频电路</b> .....                       | 67 |
| 1.2.5 电力电子电路 .....            | 26 | 2.4.1 直接变频电路 .....                          | 67 |
| 1.2.6 电力电子装置 .....            | 26 | 2.4.2 间接变频电路 .....                          | 70 |
| 1.2.7 电力电子器件的应用 .....         | 27 | 2.4.3 通用(泛用型)变频器<br>电路 .....                | 71 |
| <b>1.3 电力电子器件的调制</b> .....    | 33 | <b>2.5 变频器的能量回馈</b> .....                   | 75 |
| 1.3.1 调制基础 .....              | 33 | 2.5.1 回馈能量问题 .....                          | 75 |
| 1.3.2 变频器使用的调制 .....          | 36 | 2.5.2 回馈能量的过程 .....                         | 76 |
| <b>第 2 章 变频器原理</b> .....      | 43 | 2.5.3 回馈能量的处理 .....                         | 79 |
| 2.1 变换、触发及控制电路 .....          | 43 | <b>第 3 章 中、高压变频器及共用直流<br/>变频系统的应用</b> ..... | 86 |
| 2.1.1 交流变换电路 .....            | 43 | 3.1 概述 .....                                | 86 |
| 2.1.2 变流器的触发电路与控制<br>电路 ..... | 43 | 3.1.1 工作电压 .....                            | 86 |
| <b>2.2 整流电路</b> .....         | 47 | 3.1.2 系统集成及组态形式的<br>变频器 .....               | 86 |
| 2.2.1 不控整流电路 .....            | 47 | <b>3.2 中压 1140V 变频器</b> .....               | 86 |

|       |                               |     |       |                         |     |
|-------|-------------------------------|-----|-------|-------------------------|-----|
| 3.2.1 | 中压 1140V 变频器的应用 .....         | 86  | 3.3.3 | 级联型高压变频器 .....          | 102 |
| 3.2.2 | 采煤企业使用的 1140V 大功率四象限防爆变频器 ... | 88  | 3.3.4 | 电流源型高压变频器 ...           | 109 |
| 3.2.3 | 潜油电泵 1140V 专用变频器 .....        | 90  | 3.3.5 | IGBT 直接串联的高压变频器 .....   | 110 |
| 3.2.4 | 采煤机的变频改造 .....                | 93  | 3.3.6 | 三电平 PWM 电压源型高压变频器 ..... | 112 |
| 3.2.5 | 潜油电泵的变频改造(一)(闭环) .....        | 97  | 3.3.7 | 高压变频器应用案例 ...           | 116 |
| 3.2.6 | 潜油电泵的变频—工频双回路装置(二) .....      | 98  | 3.4   | 共用直流母线系统变频器及其应用 .....   | 120 |
| 3.3   | 高压变频器 .....                   | 101 | 3.4.1 | 共用直流母线系统 .....          | 120 |
| 3.3.1 | 概述 .....                      | 101 | 3.4.2 | 共用直流母线的应用 ...           | 122 |
| 3.3.2 | 高压变频器的形式 .....                | 102 | 3.4.3 | 共用直流母线变频器系统的应用领域 .....  | 125 |

## 第 2 篇 变频器的行业应用

### 第 4 章 变频器在制冷机的应用

|                                |     |                                 |     |
|--------------------------------|-----|---------------------------------|-----|
| 案例 .....                       | 129 | 4.3.3 双级蒸汽压缩式制冷机<br>变频改造 .....  | 140 |
| 4.1 制冷机基础 .....                | 129 | 4.3.4 复叠式蒸汽压缩式制冷机<br>变频改造 ..... | 145 |
| 4.1.1 制冷机 .....                | 129 | 4.4 吸收式制冷机基础变频<br>改造 .....      | 146 |
| 4.1.2 制冷方法 .....               | 130 | 4.4.1 吸收式制冷机基础 .....            | 146 |
| 4.1.3 制冷机分类 .....              | 130 | 4.4.2 溴化锂吸收式机组的<br>变频改造 .....   | 150 |
| 4.2 气体压缩式制冷机基础变频<br>改造 .....   | 131 | 4.4.3 冷却水泵变频改造后<br>易担心的问题 ..... | 152 |
| 4.2.1 气体压缩式制冷机<br>基础 .....     | 131 | 4.5 蒸汽喷射式制冷机基础及变频<br>改造 .....   | 154 |
| 4.2.2 气体压缩式制冷机变频<br>改造 .....   | 132 | 4.5.1 蒸汽喷射式制冷机<br>基础 .....      | 154 |
| 4.3 蒸汽压缩式制冷机变频<br>改造 .....     | 134 | 4.5.2 蒸汽喷射式制冷机的变频<br>改造 .....   | 155 |
| 4.3.1 蒸汽压缩式制冷<br>机基础 .....     | 134 |                                 |     |
| 4.3.2 单级蒸汽压缩式制冷机<br>变频改造 ..... | 138 |                                 |     |

|            |                       |     |            |                     |     |
|------------|-----------------------|-----|------------|---------------------|-----|
| 4.6        | 离心压缩机基础变频改造           | 157 | 5.3.4      | 定量泵注塑机变频改造的综合效益     | 185 |
| 4.6.1      | 离心压缩机基础               | 157 | 5.4        | 变频器在挤出机上的应用         | 186 |
| 4.6.2      | 离心压缩机的变频改造            | 159 | 5.4.1      | 挤出成型基础              | 186 |
| 4.6.3      | 离心压缩机变频改造注意的问题        | 161 | 5.4.2      | 挤出机的变频节能            | 189 |
| 4.7        | 制冷剂                   | 163 | 5.5        | 吹塑机变频调速             | 193 |
| 4.7.1      | 制冷剂基础                 | 163 | 5.5.1      | 吹塑机                 | 193 |
| 4.7.2      | 制冷剂的性质                | 163 | 5.5.2      | 变频器在塑料挤出吹膜机组中的应用    | 196 |
| 4.7.3      | 制冷剂的种类                | 164 | 5.5.3      | 低压聚乙烯吹塑机变频调速改造      | 198 |
| <b>第5章</b> | <b>变频器在塑料机械的应用</b>    |     | 5.6        | 变频器在密炼机等一些设备上的应用    | 200 |
|            | 案例                    | 165 | 5.6.1      | 概述                  | 200 |
| 5.1        | 塑料加工及塑料机械基础           | 165 | 5.6.2      | 密炼机变频改造应用           | 200 |
| 5.1.1      | 塑料加工                  | 165 | 5.6.3      | 其他可考虑进行变频改造的塑胶设备和系统 | 201 |
| 5.1.2      | 塑料机械                  | 165 | 5.7        | 节能计算方法              | 202 |
| 5.2        | 大型四辊压延机的变频改造          | 167 | 5.7.1      | 泵类负载变频的节能原理及计算      | 202 |
| 5.2.1      | 压延机简介                 | 167 | 5.7.2      | 常用注塑机节能的计算方法        | 203 |
| 5.2.2      | 大型四辊压延机的调速            | 169 | <b>第6章</b> | <b>印刷机械的变频调速</b>    | 204 |
| 5.2.3      | 大型四辊压延机较早期的变频改造       | 170 | 6.1        | 印刷机械基础              | 204 |
| 5.2.4      | 大型四辊压延机新型的变频改造        | 172 | 6.1.1      | 概述                  | 204 |
| 5.2.5      | 压延设备进行变频器调速改造的优点及注意事项 | 173 | 6.1.2      | 印刷机械设备的总分类及主要运动特点   | 204 |
| 5.2.6      | 变频器在大型压延机上的应用展望       | 174 | 6.1.3      | 印刷机                 | 207 |
| 5.3        | 变频器在注塑机节能中的应用         | 174 | 6.1.4      | 印刷机的特点              | 208 |
| 5.3.1      | 注塑机基础                 | 174 | 6.2        | 印刷机械的变频调速           | 211 |
| 5.3.2      | 注塑机的变频节能              | 177 | 6.2.1      | 印刷机械设备的调速方式         | 211 |
| 5.3.3      | 改造中常见的问题与解决办法         | 183 | 6.2.2      | 印刷机械设备的变频调速         | 212 |

|       |                              |     |            |                               |     |
|-------|------------------------------|-----|------------|-------------------------------|-----|
| 6.2.3 | 印刷机械使用变频器时<br>制动能量的处理 .....  | 214 | 6.4.5      | 整个复卷设备系统的变频<br>改造方案 .....     | 226 |
| 6.3   | 变频器在卷筒纸平板胶印机上<br>的应用案例 ..... | 215 | 6.5        | 通用型变频器和异步电动机<br>改造双色胶印机 ..... | 227 |
| 6.3.1 | 概述 .....                     | 215 | 6.5.1      | 概述 .....                      | 227 |
| 6.3.2 | 富士变频器在卷筒纸平板<br>胶印机上的应用案例 ... | 216 | 6.5.2      | 用变频器替换滑差调速<br>系统的改造方案和方法 ...  | 229 |
| 6.4   | 变频器在印刷复卷设备中的<br>应用 .....     | 219 | 6.6        | 变频器在印刷包装行业复合机<br>中的应用 .....   | 233 |
| 6.4.1 | 复卷设备 .....                   | 219 | 6.6.1      | 概述 .....                      | 233 |
| 6.4.2 | 磁粉制动器磨损案例 ...                | 222 | 6.6.2      | 变频器在复合机上的<br>应用 .....         | 235 |
| 6.4.3 | 变频器在收卷系统的<br>应用 .....        | 223 | 参考文献 ..... |                               | 239 |
| 6.4.4 | 变频器在放卷系统的<br>应用 .....        | 225 |            |                               |     |





应用电力电子技术还能实现非电能与电能之间的转换,例如,利用太阳电池将太阳辐射能转换成电能。与电子技术不同,电力电子技术变换的电能是作为能源而不是作为信息传感的载体,因此人们关注的是所能转换的电功率。

1.1.2 电力电子技术的定义

利用电力电子器件实现工业规模电能转换的技术称为电力电子技术,有时也称为功率电子技术。电力电子技术是在电子技术、电力-电机技术和自动控制技术发展起来的新技术(图 1-2),也是一种边缘新技术学科。因它本身是大功率的电子技术,又大多数为应用强电的工业服务,故常将它归属于电工类。电力电子技术主要包括电力电子器件、电力电子电路和电力电子装置及其系统。电子技术、电工技术、自动控制技术、信号检测处理等技术常在这些装置及其系统中大量应用。电力电子技术的内容包括三个方面:电力电子器件、变流电路和控制电路。其中,电力电子器件又称开关器件,器件的工作过程是能量过渡过程,其可靠性决定了装置和系统的可靠性。

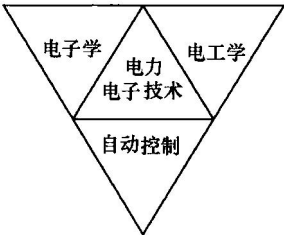


图 1-2 电力电子技术的定义

1.2 电力电子器件

电力电子器件以半导体为基本材料,最常用的材料为单晶硅;它的理论基础为半导体物理学;它的工艺技术为半导体器件工艺。近代新型电力电子器件中大量应用了微电子学的技术,如东芝 SF 系列平板型相控晶闸管(图 1-3)。



图 1-3 东芝 SF 系列平板型相控晶闸管

1902 年出现了第一个玻璃的汞弧整流器,1910 年出现了铁壳汞弧整流器。用汞弧整流器代替机械式开关和换流器,是电力电子技术的发端。1920 年试制出氧化铜整流器,1923 年出现了硒整流器。20 世纪 30 年代,这些整流器开始大量应用于电力整流装置中。40 年代末,出现了晶体管。50 年代初,晶体管向大功率化发展,同时用半导体单晶材料制成的大功率二极管也得到了发展。1954 年,瑞典通用电机公司(ASEA 公司)首先将汞弧管用于高压整流和逆变,并在  $\pm 100\text{kV}$  直流输电线路路上应用,传输 20/MW 的电力。1956 年,美国人 J. 莫尔制成晶闸管雏型。1957 年,美国人 R. A. 约克制成实用的晶闸管。50 年代末晶闸管应用于电力电子装置,60 年代以来得到迅速推广,并开发出一系列派生器

件,拓展了电力电子技术的应用领域。

1.2.1 电力电子器件的定义及分类

1. 电力电子器件定义

用于电能转换和电能控制电路中的大功率(通常指电流为数十安至数千安,电压为数百伏以上)电子器件称为电力电子器件,又称功率电子器件。

2. 电力电子器件分类

1) 根据元件分

(1) 功率二极管(图 1-4):包括功率整流二极管、肖特基二极管、齐纳稳压管和二极管组件,均属二端(阴极和阳极)器件。

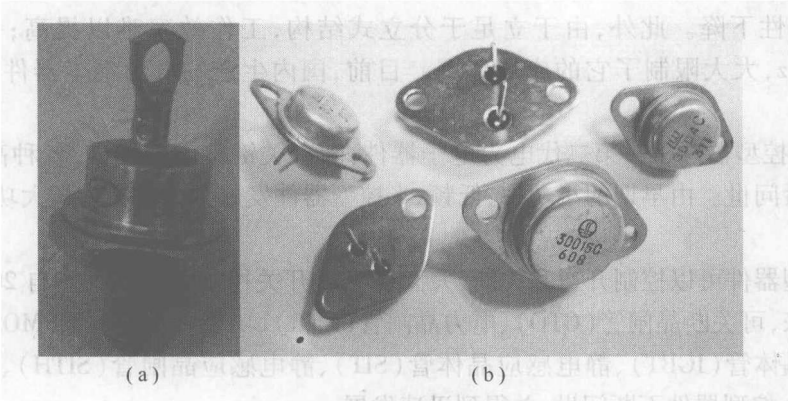


图 1-4 功率二极管

(2) 功率三极管(图 1-5):包括功率达林顿晶体管、MOS 功率场效应晶体管、隔离栅晶体管和功率静电感应晶体管。



图 1-5 大功率三极管

(3) 晶体闸流管(简称晶闸管)系列(图 1-6):主要是晶闸管(SCR)及其派生器件,有普通晶闸管、双向晶闸管、逆导晶闸管、不对称晶闸管、门极辅助关断晶闸管、光控晶闸管、可关断晶闸管和静电感应晶闸管。

## 2) 根据可控程度分

(1) 半控型器件——第一代电力电子器件:1956年普通晶闸管问世,由于其功率处理能力的突破,于是以普通晶闸管为核心的、对电力处理的庞大分支从电子技术中分离出来,形成了电力电子技术。此后,晶闸管的派生器件越来越多,到了20世纪70年代,已经派生了快速晶闸管、逆导晶闸管、双向晶闸管、不对称晶闸管等半控型器件,且功率越来越大,性能日臻完善,技术趋于成熟。但是由于是半控型器件,想关断这些器件必须另用电感、电容和辅助电源组成的强迫换相电路,结果使得整机体积增大、重量增加、效率降低、可靠性下降。此外,由于立足于分立式结构,工作效率难以提高;一般情况下低于400Hz,大大限制了它的应用范围。目前,国内生产的电力电子器件仍以晶闸管为主。



图1-6 晶闸管系列

(2) 全控型器件——第二代电力电子器件:随着关键技术的突破,各种高速、全控型的器件先后问世。由早期的小功率、低频、半控型器件发展到了现在的超大功率、高频、全控型器件。

全控型器件可以控制开通和关断,大大提高了开关控制的灵活性。自20世纪70年代后期以来,可关断晶闸管(GTO)、电力晶闸管(GTR)、功率场控晶体管(MOS-FET)、绝缘栅双极晶体管(IGBT)、静电感应晶体管(SIT)、静电感应晶闸管(SITH)、场控晶闸管(MCT)等全控型器件不断问世,并得到迅速发展。

图1-7 对电力电子器件进行了具体的归类。

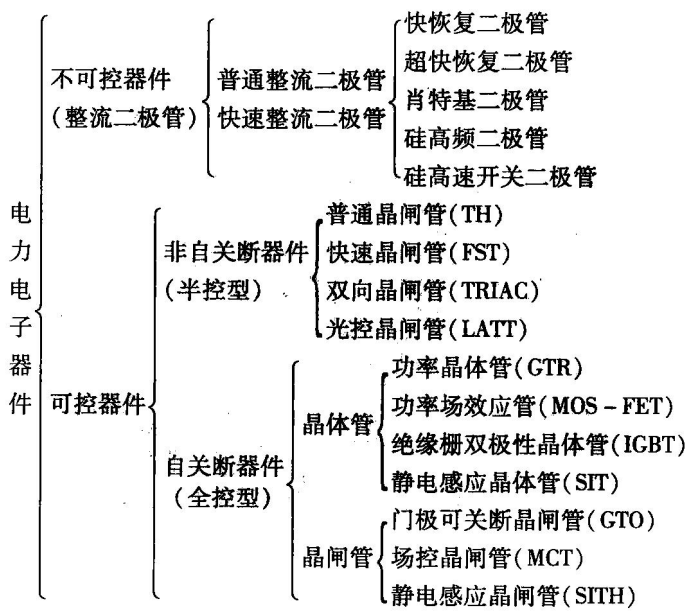


图1-7 电力电子器件的分类

电力电子器件还有其他分类方法,上述只是几种简要的分类方法。

### 1.2.2 电力电子器件的工作特性

综合起来,各种电力电子器件均具有导通和阻断两种工作特性。

功率二极管是二端器件,其器件电流由伏安特性决定,除了改变加在二端间的电压外,无法控制其阳极电流,故称不可控型器件。

普通晶闸管是三端器件,其门极信号能控制元件的导通,但不能控制其关断,故称半控型器件。

可关断晶闸管、功率晶体管等器件,其门极信号既能控制器件的导通,又能控制其关断,故称全控型器件。

半控型和全控型电力电子器件控制灵活,电路简单,开关速度快,广泛应用于整流、逆变、斩波电路中,是电动机调速、发电机励磁、感应加热、电镀、电解、直流输电等电力电子装置中的核心部件。

### 1.2.3 电力电子器件的发展

电力电子技术的发展,不仅要求提高电力电子器件的控制功率容量和工作频率,而且要求降低器件的功率损耗,缩小器件及其控制电路的体积。半导体技术的新成就,为此提供了必要的物质基础。目前,电力电子器件正沿着大功率化、高频化、集成化的方向发展,如西门康的晶闸管模块(图1-8)。

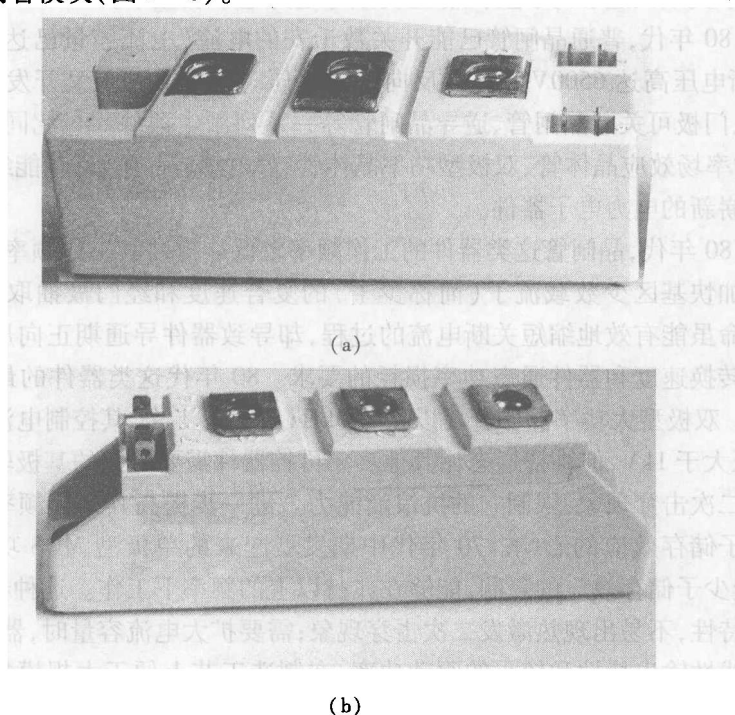


图1-8 西门康的晶闸管模块

1902年出现了第一个玻璃的汞弧整流器,1910年出现了铁壳汞弧整流器。用汞弧整流器代替机械式开关和换流器,这是电力电子技术的发端。1920年试制出氧化铜整流器,1923年出现了硒整流器。30年代,这些整流器开始大量用于电力整流装置中。20世

纪 40 年代末出现了晶体管。

20 世纪 50 年代的电力电子器件主要是汞弧闸流管和大功率电子管。20 世纪 50 年代初,晶体管向大功率化发展,同时用半导体单晶材料制成的大功率二极管也得到发展。1954 年,瑞典通用电机公司(ASEA 公司)首先将汞弧管用于高压整流和逆变,并在  $\pm 100\text{kV}$  直流输电线路应用,传输 20MW 的电力。1956 年,美国人 J. 莫尔制成晶闸管雏型。1957 年,美国人 R. A. 约克制成实用的晶闸管。50 年代末晶闸管被用于电力电子装置,60 年代以来得到迅速推广,并开发出一系列派生器件,拓展了电力电子技术的应用领域。60 年代发展起来的晶闸管由于工作可靠、寿命长、体积小、开关速度快,在电力电子电路中得到广泛应用。到 70 年代初期,晶闸管已逐步取代汞弧闸流管。

从 60 年代到 70 年代初期,以半控型普通晶闸管为代表的电力电子器件,主要用于相控电路。这些电路广泛用于电解、电镀、直流电动机传动、发电机励磁等整流装置中,与传统的汞弧整流装置相比,不仅体积小、工作可靠,而且节能效果十分明显(一般可节电 10% ~ 40%,从我国的实际看,因风机和泵类负载约占全国用电量的 1/3,若采用交流电动机调速传动,可平均节电 20% 以上,每年可节电 400 亿  $\text{kW} \cdot \text{h}$ ),因此电力电子技术的发展也越来越受到人们的重视。70 年代中期出现的全控型可关断晶闸管和功率晶体管,开关速度快,控制简单,逆导可关断晶闸管更兼容了可关断晶闸管和快速整流二极管的功能。它们把电力电子技术的应用推进到了以逆变、斩波为中心内容的新领域。这些器件已普遍应用于变频调速、开关电源、静止变频等电力电子装置中。

20 世纪 80 年代,普通晶闸管已能开关数千安的电流(电流容量已达 6000A)和承受数千伏(阻断电压高达 6500V)的正、反向工作电压。在此基础上又开发了双向晶闸管、光控晶闸管、门极可关断晶闸管、逆导晶闸管等一系列派生器件。与此同时,还开拓了单极型 MOS 功率场效应晶体管、双极型功率晶体管、静电感应晶闸管、功能组合模块和功率集成电路等崭新的电力电子器件。

20 世纪 80 年代,晶闸管这类器件的工作频率较低。提高其工作频率,取决于器件关断期间如何加快基区少数载流子(简称少子)的复合速度和经门极抽取更多的载流子。降低少子寿命虽能有效地缩短关断电流的过程,却导致器件导通期正向压降的增加。因此必须兼顾转换速度和器件通态功率损耗的要求。80 年代这类器件的最高工作频率在 10kHz 以下。双极型大功率晶体管可以在 100kHz 频率下工作,其控制电流容量已达数百安,阻断电压大于 1kV,但维持通态比其他功率可控器件需要更大的基极驱动电流。由于存在热激发二次击穿现象,限制它的抗浪涌能力。进一步提高其工作频率仍然受到基区和集电区少子储存效应的影响。70 年代中期发展起来的单极型 MOS 功率场效应晶体管,由于不受少子储存效应的限制,能够在兆赫以上的频率下工作。这种器件的导通电流具有负温度特性,不易出现热激发二次击穿现象;需要扩大电流容量时,器件并联简单,且具有较好的线性输出特性和较小的驱动功率;在制造工艺上便于大规模集成。但它的通态压降较大,制造时对材料和器件工艺的一致性要求较高。到 80 年代中、后期电流容量仅达数十安,阻断电压近千伏。

20 世纪 80 年代发展起来的静电感应晶闸管、隔离栅晶体管,以及各种组合器件,综合了晶闸管、MOS 功率场效应晶体管和功率晶体管各自的优点,在性能上又有新的发展。例如,隔离栅晶体管,既具有 MOS 功率场效应晶体管的栅控特性,又具有双极型功率晶体

管的电流传导性能,它容许的电流密度比双极型功率晶体管高几倍。静电感应晶闸管保留了晶闸管导通压降低的优点,结构上避免了一般晶闸管在门极触发时必须在门极周围先导通然后逐步横向扩展的过程,所以比一般晶闸管有更高的开关速度,而且容许的结温升也比普通晶闸管高。这些新器件,在更高的频率范围内满足了电力电子技术的要求。

1.2.4 电力电子器件的种类

1. 大功率电子管

大功率电子管为第一代电力电子器件,用于高频电能转换电路,一般为真空三极管。大功率电子管如图 1-9 所示。

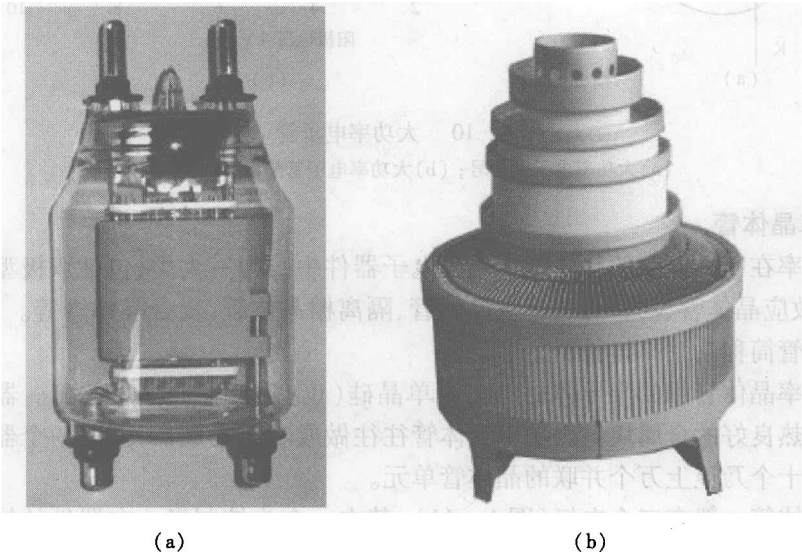


图 1-9 大功率电子管

大功率电子管器件符号如图 1-10(a) 所示。三极管的三个电极中,栅极靠近阴极且处于阴极与阳极之间。工作时,阳极加正向电压。当阴极被加热(直热式,预热约 1min),产生的热电子可被阳极收集,形成阳极电流,改变栅极电位可以控制阳极电流的大小。图 1-10(b) 是大功率电子管阳极特性。其与功率场效应晶体管的输出特性对比,有相同之处,但三极管的通态阳极电压要高得多。

三极管为电压控制型器件,用以构成放大器或振荡器。应用于高频感应加热电源的大功率电子管额定阳极电压为 5kV ~ 15kV,额定电流为几安至上百安,耗散功率为几千瓦至几百千瓦,工作频率一般为 1MHz ~ 5MHz(上限可达 100MHz),可连续工作约数千小时。电子管高频电源的频率下限约为 100kHz。50kHz 以下的电源一般采用电力半导体器件(如晶闸管)。

在电子管高频电源中,电子管处于振荡工作状态,器件上会同时出现很高的阳极电压与电流,所产生的大量热量由水冷装置或风冷装置散逸。电子管高频电源的效率一般不到 50%,而晶闸管中频(1kHz)电源的效率则高达 92% 以上。20 世纪 80 年代,由于能控制几十千瓦以上功率的电力电子器件,其开关频率(约几十千赫)还远未达到同容量的大功率电子管水平,电子管在高频大功率领域仍占据主要地位。

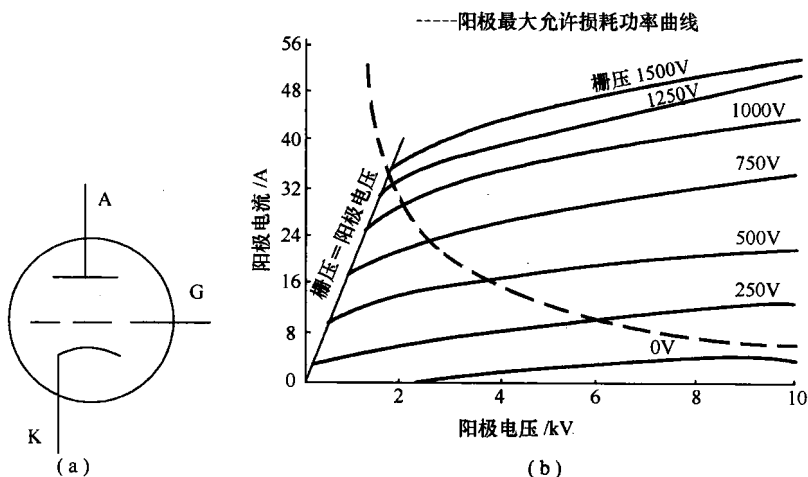


图 1-10 大功率电子管  
(a) 大功率电子管符号; (b) 大功率电子管阳极特性曲线。

## 2. 功率晶体管

耗散功率在 1W 以上的晶体管在电力电子器件中归为一大类,包括双极型功率晶体管、功率场效应晶体管、功率静电感应晶体管、隔离栅晶体管、复合晶体管等。通常,双极型功率晶体管简称功率晶体管。

制造功率晶体管用的半导体材料多为单晶硅(也有的用锗或砷化镓)。器件的芯片通常装在散热良好的金属块上。功率晶体管往往做功率集成器件,其一个器件的芯片上就含有数十个乃至上万个并联的晶体管单元。

功率晶体管一般有三个电极(图 1-11),其中一个为控制极。在器件的控制极上施加电流( $i_i$ )或电压信号( $V_i$ ),便能控制输出极流过电流( $i_o$ )的大小。

在电力电子电路中,功率晶体管主要用做开关(有时也用做功率放大器)。它是一个性能优良的大功率快速固体开关。如一种双极型大功率晶体管在通态时可通过 600A 电流,其管压降仅约 2V。又如,高耐压的功率晶体管在断态时能承受 1kV 的电压而几乎不导电。20 世纪 80 年代,单个大容量的双极型功率晶体管就能控制近 50kW 的电功率。双极型功率晶体管的开关频率一般可达 10kHz,最高达 100kHz。容量相对较小的功率场效应晶体管,其开关频率上限可达 100MHz。

在几十千瓦以下的中小型逆变器、变频器、斩波式调压器等电力电子装置的主回路上采用功率晶体管比较有利。因为功率晶体管无须配置换流回路,其工作频率也可比晶闸管高 10 倍以上,使其装置具有线路简单、能耗低、体积小、重量轻、噪声低,以及工作较可靠等一系列优点。因此,在上述装置中,功率晶体管将取代晶闸管。

与晶闸管相比,功率晶体管的工作容量较小,耐过载能力差,制造工艺也较复杂。此外,能直接用在工业电网上(线电压为 380V)的大功率高压器件还不多。今后,功率晶体管将进一步朝大容量、高反压、高频率、易控制,以及组件模块化方向发展。

### 1) 双极型功率晶体管(GTR)

双极型功率晶体管通常简称功率晶体管,是最普及的一种功率晶体管。其中大容量型又称巨型晶体管(GTR)。功率晶体管一般为功率集成器件,内含数十至数百个晶体管



单元。

图 1-12 是功率晶体管的符号,其上 e、b、c 分别代表发射极、基极和集电极。按半导体的类型,器件被分成 NPN 型和 PNP 型两种,硅功率晶体管多为前者。

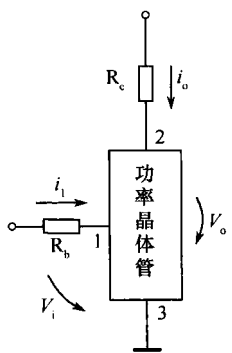


图 1-11 功率晶体管的结构

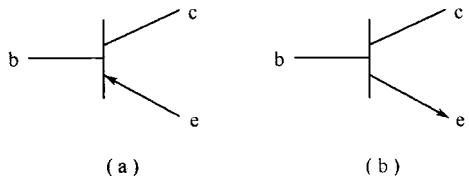


图 1-12 功率晶体管符号  
(a)PNP 型; (b)NPN 型。

2) 功率晶体管的结构和工作原理

图 1-13(a)为 NPN 型功率晶体管结构。图中 1 为发射区,2 为基区,3 为集电区,4 为发射结,5 为集电结。

图 1-13(b)为 NPN 型功率晶体管工作原理(对于 PNP 型器件,则需要将两组电源极性反接),其中基极加 0.6V 左右的正向偏压,集电极加高得多的反向偏压(数十伏至数百伏)。发射结通过的电流,是由发射区注入到基区的电子形成的,这些电子的小部分在基区与空穴复合成为基极电流  $I_b$ ,其余大部分均能扩散到集电结而被其电场收集到集电区,形成集电极电流  $I_c$ 。

图 1-13(c)为  $N^+PN^-N^+$  型功率晶体管共发射极输出特性曲线,它反映了器件的基极控制作用及不同的  $I_b$  下,  $I_c$  与  $V_{ce}$  之间的关系。从图 1-13(c)中看出,特性曲线明显分成三个区。在线性区,  $I_c$  与  $I_b$  成比例并受其控制,器件具有放大作用(倍数  $\beta = I_c/I_b$ );在截止区,器件几乎不导电;在饱和区,器件的饱和压降仅为 1V ~ 2V(因饱和区  $V_{ce}$  太小,集电结电子收集效率很低,器件失去放大作用)。

3) 功率晶体管的进展和应用

20 世纪 50 年代至 60 年代,功率晶体管主要是锗合金管。它制作简单,但耐压不高(几十伏),开关频率也较低(十几千赫)。80 年代的大功率高压器件大都为硅平面管,用二次扩散法制得。其中 GTR 的容量是所有功率晶体管中最大的,80 年代中期已有 600A/150V、400A/550V、50A/1000V 等几种。GTR 的开关频率上限大约为 100kHz。

功率晶体管广泛应用于各种中小型电力电子电路作开关使用。GTR 可用在如变频器、逆变器、斩波器等装置的主回路上。由于 GTR 无须换流回路,工作频率也可比晶闸管至少高 10 倍,因此它能简化线路,提高效率,在几十千瓦的上述装置中可以取代晶闸管。但 GTR 的过载能力较差,耐压也不易提高,容量较小。未采用复合晶体管结构时,GTR 的放大倍数较低(约 10 倍)。和容量较低的功率场效应晶体管相比,GTR 的开关频率较低(采用复合结构时,频率仅为 1kHz 左右)。所以,功率晶体管的应用受到一些限制。

自 20 世纪 80 年代中期以来,GTR 正向大容量、复合管及模块组件化等方向发展,将