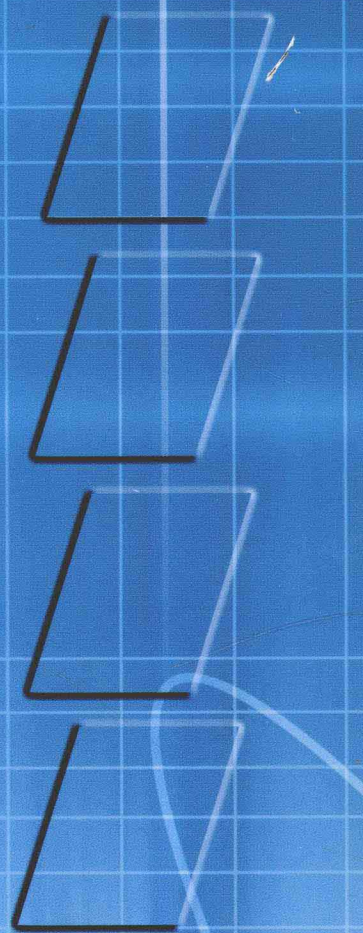


BIANPINQI SHIYONG JISHU

变频器实用技术

程改青 编著



黄河水利出版社

变频器实用技术

程改青 编著

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书主要以世界知名变频器生产厂家的产品为例,讲述了变频器的结构、安装、操作、维修。本书共分三部分:变频器的基本知识、变频器的选择与使用、变频器的应用,首先简述了变频器的工作原理和分类,接着讲述了变频器的选择、安装、操作、参数和功能设置,最后优选了变频器在生活、生产、控制工程中的应用实例。

本书重在实用,引用了大量的图片和接线图,叙述问题力求深入浅出,专业基础起点低的读者也能理解。本书可供机电设备维修技术人员以及相关专业的师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

变频器实用技术/程改青编著. —郑州:黄河水利出版社,2012. 6

ISBN 978 - 7 - 5509 - 0275 - 6

I. ①变… II. ①程… III. ①变频器 IV. ①TN773

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 107969 号

组稿编辑:王文科 电话:0371 - 66028027 E-mail:wwk5257@163.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940,66020550,66028024,66022620(传真)

E-mail:hhsclbs@126.com

承印单位:河南省瑞光印务股份有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:8.75

字数:210 千字

印数:1—4 000

版次:2012 年 6 月第 1 版

印次:2012 年 6 月第 1 次印刷

定价:24.00 元

前 言

变频技术是工业企业和家用电器中普遍使用的一种新技术,也是高科技领域的综合技术。目前中小型低压变频器已经非常普及和成熟,大功率的中压变频器也正在被人们关注和逐步应用。变频器除有卓越的无级调速性能外,还有显著的节电和环保功能,是企业技术改造和产品更新换代的理想调速装置。

变频器按交流环节分为两大类:一类是交—交变频器,另一类是交—直—交变频器。不同类型的变频器内部结构差别很大,制造难度也不同。本书定名为“变频器实用技术”,其目的是让读者一书在手,既可全面地了解变频器的基本原理,又能通过书中的典型应用实例举一反三地对企业的技术改造提出方案。

本书引用了大量的图片和接线图,在内容上深入浅出,精简电力电子器件的讲述,主要叙述了晶闸管、GTR、IGBT、MCT等少数器件;尽量减少公式推导,数学上甚至很少用到微积分,各章的公式极少;概念叙述精准,往往以形象化的图形来阐明问题。因此,本书的读者门槛较低,具备中专以上学历、学习过“电工与电子技术”课程即可。

本书共分三部分:变频器的基本知识、变频器的选择与使用、变频器的应用,从应用的角度介绍了典型厂家新产变频器的技术规格,不限于其中某一功能如何操作的讲解,以帮助读者选型和比较方案。这样,既节省了篇幅,又增大了信息量。希望本书能对电专业甚至非电专业的技术人员、工人以及在校的大学生有所帮助,成为他们掌握变频技术的“实用指南”。

本书由程改青编著,杨一平统稿。在撰写过程中,得到了许继电气集团电控公司和西继电梯公司的多名高级工程师的大力支持,获得了充分的资料;杨一平、宁玉伟在本书写作过程中给予了很大的鼓励和帮助;引用了许多已出版的中外著作和文献,在此一并致谢。

由于作者水平有限,书中错漏之处在所难免,恳请读者不吝指正。

作 者
2012年2月

目 录

前 言

第一部分 变频器的基本知识

- 变频器的分类 (1)
- 变频器的主控器件及保护 (4)
- 变频器内部电路 (26)

第二部分 变频器的选择与使用

- 变频器的选择 (48)
- 变频器的安装 (55)
- 变频器的外形及接线 (59)
- 变频器的操作与参数选择 (83)
- 变频器的调试、维护和保养 (98)

第三部分 变频器的应用

- 变频器在感应式调压器中的应用 (114)
- 变频器在恒压供水中的应用 (115)
- 变频器在中央空调采暖通风系统中的应用 (121)
- 变频器在机床设备上的应用 (126)
- 变频器在生产线上的应用 (127)
- 变频器在工业洗涤机上的应用 (129)
- 变频器在电梯系统控制上的应用 (130)
- 参考文献 (134)

第一部分 变频器的基本知识

变频器通过电力半导体器件的通断作用将工频电源的频率进行变换,是变频技术应用于实际生产的装置。变频器作为运动控制系统中的功率变换器件,能把电信号从一种频率变换成另一种频率。

变频器的分类

一、按交流环节分类

(一) 交—交变频器

交—交变频器通常由三相反并联晶闸管可逆桥式变流器组成。它把电网固定频率的交流功率直接转换成频率可调的交流功率(转换前后的相数相同),具有过载能力强、效率高、输出波形较好等优点,但它输出频率低、使用功率器件多、功率因数低,并且高次谐波对电网影响大。交—交变频器可驱动同步电动机或异步电动机,目前在轧钢机、船舶主传动、矿石粉碎机、电力牵引等容量较大的低速传动设备上使用较多。交—交变频器的结构框图如图 1-1 所示。

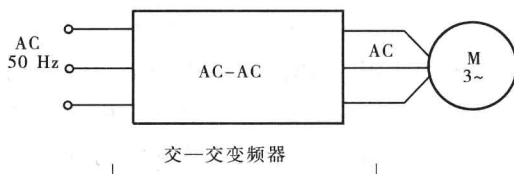


图 1-1 交—交变频器结构框图

(二) 交—直—交变频器

交—直—交变频器先把频率为 50 Hz 的交流电整流成直流电,再把直流电逆变成频率连续可调的交流电。由于把直流电逆变成交流电的环节较易控制,因此在频率的调节范围和改善变频后电动机的运行特性等方面,交—直—交变频都有明显优势,是目前广泛采用的变频方式。交—直—交变频器结构框图如图 1-2 所示。

二、按直流环节的滤波形式分类

(一) 电流型变频器

如图 1-3 所示,电流型变频器电路的中间直流环节采用大电感作为储能元件,无功功率将由该电感来缓冲。在电感的作用下,直流电流 I_d 趋于平稳,电动机端的电流波形为矩形波或阶梯波,电压波形接近于正弦波。该变频器因直流电源的内阻较大,近似于电流源,故称为电流源型变频器或电流型变频器。电流型变频器的突出优点是,容易实现回馈制动,便于四象限运行;直流电压可以迅速改变,故调速系统动态响应比较快。因此,电流型变频器

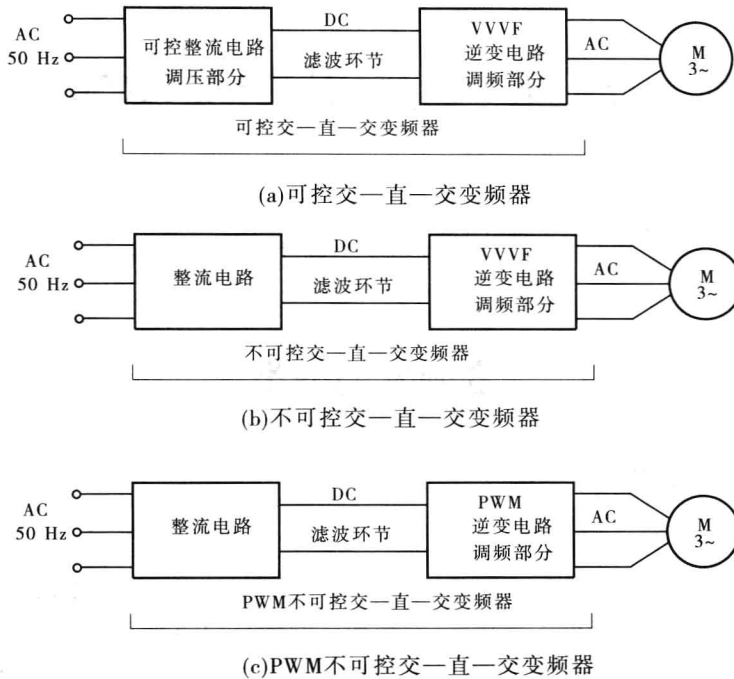


图 1-2 交一直一交变频器结构框图

可用于频繁急加/减速的大容量电动机的传动控制。

(二) 电压型变频器

如图 1-4 所示,电压型变频器电路中,直流环节的储能元件采用大电容,负载的无功功率将由它来缓冲。由于大电容的作用,主电路直流电压 U_d 比较平稳,电动机端的电压波形为矩形波或阶梯波。该变频器因直流电源的内阻比较小,相当于电压源,故称为电压源型变频器或电压型变频器。电压型变频器的优点是:对负载电动机而言,变频器是一个交流电压源,在不超过容量限度的情况下,可以驱动多台电动机并联运行,具有不选择负载的通用性;缺点是:不易实现回馈制动,在必须制动时,只好采用直流环节中并联电阻的能耗制动方式或者采用可逆变流器,因此调速系统动态响应比较慢。

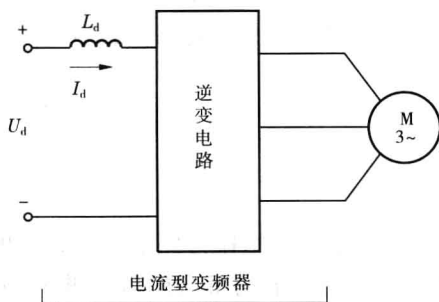


图 1-3 电流型变频器

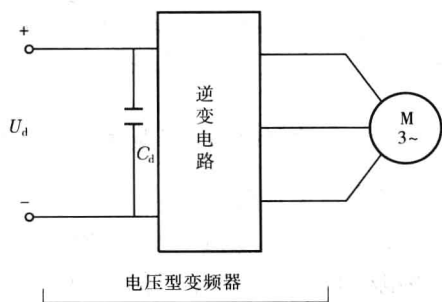


图 1-4 电压型变频器

三、按控制方式分类

(一) 电压频率比控制变频器

电压频率比控制的目的是得到理想的转矩—速度特性,通用型变频器基本上都采用这种控制方式。电压频率比控制变频器无速度传感器,为速度开环控制,负载可以是通用型异步电动机,因此通用性强、经济性好。但开环控制方式不能达到较高的控制性能,而且在低频时必须进行转矩补偿,以改变低频转矩特性,故其常用于速度精度要求不十分严格或负载变动较小的场合。

(二) 转差频率控制变频器

转差频率控制方式是对电压频率比控制方式的一种改进,这种控制需要由安装在电动机上的速度传感器检测出电动机的转速,构成速度闭环,速度调节器的输出为转差频率,而变频器的输出频率则由电动机的实际转速信号与所需的转差频率决定($n = \frac{60f}{p}(1-s)$)。由于转差频率控制方式通过控制转差频率来控制转矩和电流,与电压频率比控制相比,其加减速度特性和限制过电流的能力得到提高。但在控制系统中需要安装速度传感器求取转差角频率,有时还需加电流反馈,针对具体电动机的机械特性调整控制参数,因而这种控制方式的通用性较差。

(三) 矢量控制变频器

矢量控制是一种高性能异步电动机控制方式,是通过矢量坐标电路控制电动机定子电流的大小和相位,以便对电动机的励磁电流和转矩电流分别进行控制,进而达到控制电动机转矩的目的。它将异步电动机的定子电流分为产生磁场的电流分量(励磁电流)和与其垂直的产生转矩的电流分量(转矩电流),并分别加以控制。由于在这种控制方式中必须同时控制异步电动机定子电流的幅值和相位,即定子电流的矢量,因此这种控制方式被称为矢量控制方式。基于转差频率控制的矢量控制方式与转差频率控制方式定常特性一致,但是,矢量控制还要经过坐标变换对电动机定子电流的相位进行控制,使之满足一定的条件,以消除转矩电流过渡过程中的波动。因此,矢量控制方式在输出特性方面能得到很大的改善。但是,这种控制方式属于闭环控制方式,需要在电动机上安装速度传感器,应用范围受到限制。

(四) 直接转矩控制变频器

直接转矩控制是继矢量控制变频调速技术之后的一种新型的交流变频调速技术。它是利用空间电压矢量 PWM(SVPWM)通过磁链、转矩的直接控制,确定逆变器的开关状态来实现的。直接转矩控制还可用于普通的 PWM 控制,实现开环或闭环控制。

四、按功能分类

(一) 恒转矩变频器

恒转矩变频器控制的对象具有恒转矩特性,在转速精度及动态性能等方面要求一般不高。当用变频器实现恒转矩调速时,必须加大电动机和变频器的容量,以提高低速转矩。恒转矩变频器主要应用于挤压机、搅拌机、传送带、提升机等。

(二) 平方转矩变频器

平方转矩变频器控制的对象,在过载能力方面要求较低。由于负载转矩与转速的平方成

正比,所以低速运行时负载较轻,并有节能的效果。平方转矩变频器主要应用于风机、泵类。

五、按用途分类

(一)通用变频器

通用变频器是指能与普通的笼型异步电动机配套使用,能适应各种不同性质的负载,并具有多种可供选择的功能的变频器。

(二)高性能专用变频器

高性能专用变频器主要应用于对电动机的控制要求较高的系统。与通用变频器相比,高性能专用变频器大多数采用矢量控制方式,驱动对象通常是变频器厂家指定的专用电动机。

(三)高频变频器

在超精密加工和高性能机械中,常常要用到高速电动机。为了满足这些高速电动机的驱动要求,出现了采用PAM控制方式的高频变频器,其输出频率可达到3 kHz。

六、按输入电源的相数分类

(一)单相变频器

单相变频器又称为单进三出变频器,变频器的输入侧为200 V或380 V交流电,输出侧是三相交流电。家用电器里的变频器均属于此类,通常容量较小。

单相变频器框图如图1-5所示。

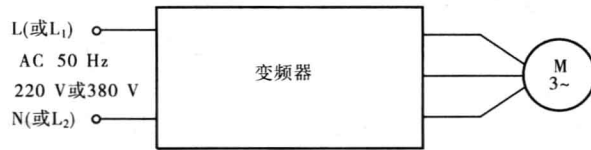


图 1-5 单相变频器

(二)三相变频器

三相变频器又称为三进三出变频器,变频器的输入侧和输出侧都是三相交流电。绝大多数变频器都属于此类。

三相变频器框图如图1-6所示。

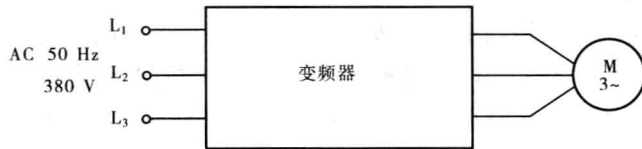


图 1-6 三相变频器

变频器的主控器件及保护

一、变频器的主控器件

电力电子器件是变频器的主控器件,常见的有不可控器件、半控型器件、全控型器件。

电力电子器件分类树如图 1-7 所示。

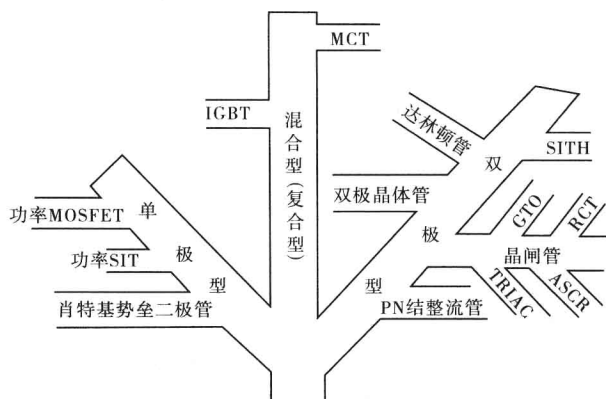


图 1-7 电力电子器件分类树

(一) 晶闸管

晶闸管又称晶体闸流管或可控硅整流器 SCR, 包括普通晶闸管、快速晶闸管、逆导晶闸管、双向晶闸管、可关断晶闸管和光控晶闸管。通常所称晶闸管往往专指晶闸管的一种基本类型——普通晶闸管。

1. 晶闸管的结构

晶闸管的内部结构、外形和电气图形符号如图 1-8 所示。

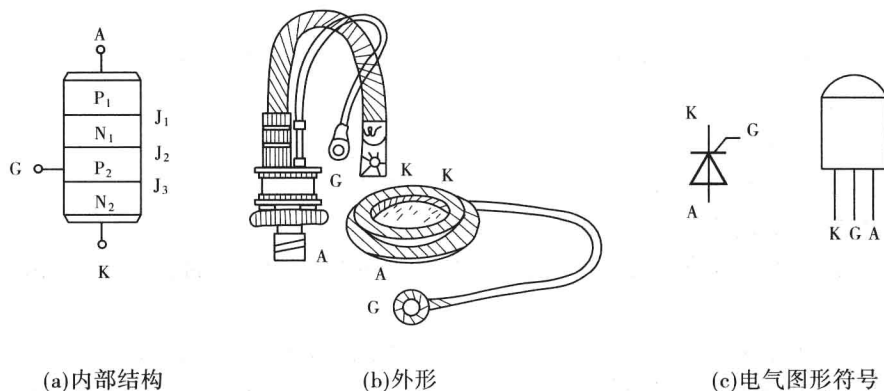


图 1-8 晶闸管的内部结构、外形和电气图形符号

晶闸管的内部结构见图 1-8(a)。它是 PNPN 四层半导体结构, 分别标为 P_1 、 N_1 、 P_2 、 N_2 四个区, 具有 J_1 、 J_2 、 J_3 三个 PN 结。

应用时常见的大功率晶闸管有螺栓型和平板型两种封装。在图 1-8(b) 中, 晶闸管从外形上看有三个引出电极: 阳极 A、阴极 K 和门极(控制端) G。图 1-8(c) 为晶闸管的电气图形符号。

对于螺栓型封装, 通常螺栓是其阳极 A, 能与散热器紧密连接且安装方便, 粗辫子引线是阴极 K, 细辫子引线是门极 G。其一般只适用于额定电流小于 200 A 的晶闸管。

平板型晶闸管又分为凸台形和凹台形。对于凹台形的晶闸管, 夹在两台面中间的金属

引出端为门极,距离门极近的台面是阴极,距离门极远的台面是阳极。平板型封装一般用于额定电流为 200 A 以上的晶闸管。

2. 晶闸管的工作原理

晶闸管的工作原理,可以通过如图 1-9 所示的实验电路进行解释。

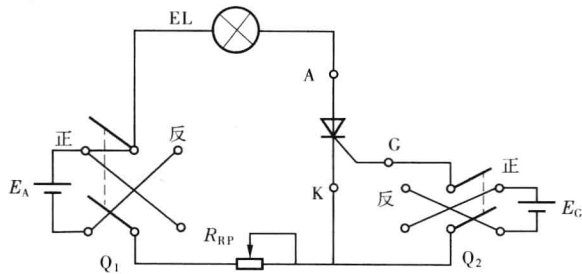


图 1-9 晶闸管导通条件实验电路

当 Q_1 合向左边时,晶闸管阳极经灯泡接直流电源的正极,阴极接电源的负极,此时晶闸管承受正向电压。若门极电路中开关 Q_2 合向左边(门极加反向电压)或断开(不加电压),灯不亮,说明晶闸管不导通;而若 Q_2 合向右边(门极加正向电压),灯亮,说明晶闸管导通。

晶闸管导通后,如果去掉控制极上的电压,即将图 1-9 中的开关 Q_2 断开,灯仍然亮,这表明晶闸管继续导通。即晶闸管一旦导通后,控制极就失去了控制作用。

当 Q_1 合向右边时,晶闸管阳极经灯泡接直流电源的负极,阴极接电源的正极,此时晶闸管的阳极和阴极间加反向电压,无论门极加不加电压、加正向电压还是反向电压,灯都不亮,晶闸管关断。

如果门极加反向电压(开关 Q_2 合向左边),晶闸管阳极回路无论加正向电压还是反向电压,晶闸管都关断。

3. 晶闸管的导通条件

从上述实验可以看出,晶闸管导通必须同时具备两个条件:

- (1) 晶闸管阳极电路加适当的正向电压;
- (2) 门极电路加适当的正向电压(实际工作中,门极加正触发脉冲信号),且晶闸管一旦导通,门极将失去控制作用。

根据实验得出了上述晶闸管的导通条件,下面由晶闸管的等效电路进一步分析其工作原理。晶闸管的 PNP 结构可以等效为 PNP 和 NPN 两个三极管。控制信号从 GK 间加入,形成门极电流 I_G ,而 AK 间的外电路包括负载电阻 R 和直流电源 E_A 。

晶闸管的双晶体管模型可以用一对互补三极管代替晶闸管的等效电路来解释,如图 1-10 所示。

按照上述等效原则,可将图 1-10(a) 中的结构图改画为图 1-10(b) 中的电路图,并用 V_1 和 V_2 管代替晶闸管。

在晶闸管承受反向阳极电压时, V_1 和 V_2 处于反向状态,是无法工作的,所以无论有没有门极电压,晶闸管都不能导通。只有在晶闸管承受正向电压时, V_1 和 V_2 才能得到正确接法的工作电源,同时为使晶闸管导通必须使承受反向电压的 J_2 结失去阻挡作用。

由图 1-10(b) 可清楚地看出,每个晶体管的集电极电流同时又是另一个晶体管的基极电流,即有 $I_{C2} = I_{B1}$, $I_C + I_{C1} = I_{B2}$ 。在满足上述条件的前提下,再合上开关 S,于是门极就注

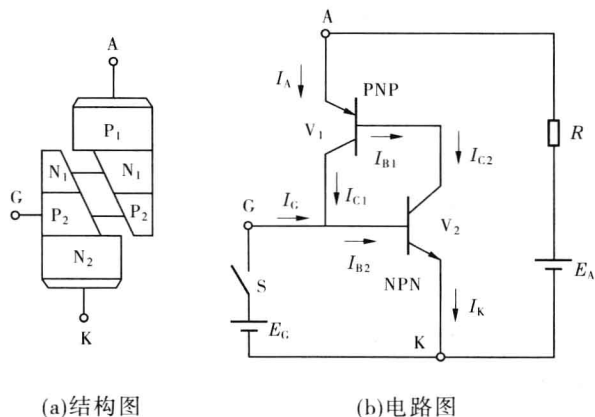


图 1-10 晶闸管的双晶体管模型

入触发电流 I_G , 并在晶体管内部形成了强烈的正反馈过程:

$$I_G \uparrow \rightarrow I_{B2} \uparrow \rightarrow I_{C2} (= \beta_2 I_{B2}) \uparrow \rightarrow I_{B1} \uparrow \rightarrow I_{C1} (= \beta_1 I_{B1}) \uparrow$$

从而使 V_1 、 V_2 迅速饱和, 即晶闸管导通。而对于已导通的晶闸管, 若去掉门极触发电流, 由于晶闸管内部已形成了强烈的正反馈, 所以它仍会维持导通。

若把 V_1 、 V_2 两管看成广义节点, 且设晶闸管的阳极电流为 I_A , 阴极电流为 I_K , 则可根据节点电流方程, 列出如下电流方程

$$I_{C1} = \alpha_1 I_A + I_{CB01} \quad (1-1)$$

$$I_{C2} = \alpha_2 I_K + I_{CB02} \quad (1-2)$$

$$I_K = I_A + I_G \quad (1-3)$$

$$I_A = I_{C1} + I_{C2} \quad (1-4)$$

式中: α_1 和 α_2 分别是晶体三极管 V_1 和 V_2 的共基极电流增益; I_{CB01} 和 I_{CB02} 分别是 V_1 和 V_2 的共基极漏电流。

由式(1-1) ~ 式(1-4)可得

$$I_A = \frac{\alpha_2 I_G + I_{CB01} + I_{CB02}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (1-5)$$

4. 晶闸管的工作状态

晶闸管的特性为: 在低发射极电流下, 电流放大系数 α 很小, 而当发射极电流建立起来之后, α 迅速增大。可以由此来说明晶闸管的几种工作状态:

(1) 正向阻断。在晶闸管加正向电压 E_A , 且其值不超过晶闸管的额定电压, 门极未加电压的情况下, 即 $I_G = 0$ 时, 正向漏电流 I_{CB01} 和 I_{CB02} 很小, 所以 $\alpha_1 + \alpha_2$ 很小, 式(1-5)中的 $I_A \approx I_{CB01} + I_{CB02}$ 。

(2) 触发导通。加正向电压 E_A 的同时加正向门极电压 E_G , 当门极电流 I_G 增大到一定程度, 发射极电流也增大, $\alpha_1 + \alpha_2$ 增大到接近于 1 时, I_A 将急剧增大, 晶闸管处于饱和导通状态, I_A 的值实际由外电路决定。

(3) 晶闸管关断。当流过晶闸管的电流 I_A 降低至小于维持电流 I_H 时, α_1 和 α_2 迅速下

降,使得 $\alpha_1 + \alpha_2$ 很小,式(1-5)中 $I_A \approx I_{CB01} + I_{CB02}$,晶闸管恢复关断状态。

(4) 反向阻断。当晶闸管加反向阳极电压时,由于 V_1 、 V_2 处于反向状态,不能工作,所以无论有无门极电压,晶闸管都不会导通。

其他几种可能导通的情况:

- (1) 阳极电压升高至相当高的数值造成雪崩效应,即硬开通。
- (2) 阳极电压上升率 du/dt 过高。
- (3) 结温较高。
- (4) 光直接照射晶体管硅片,即光触发。

光触发除用于光控晶闸管,可以保证控制电路与主电路之间良好绝缘而应用于高压电力设备中外,其他都因不易控制而难以应用于实践。只有门极触发是最精确、迅速而可靠的控制手段。

(二) 功率晶体管

功率晶体管(简称 GTR)也称为电力晶体管 PTR,是一种具有发射极 E、基极 B、集电极 C 的耐高电压、大电流的双极型晶体管,有 NPN 和 PNP 两种结构,故又称为双结型晶体管(简称 BJT)。它既有晶体管的固有特性,又扩大了功率容量,缺点是耐冲击能力差,易受二次击穿而损坏。

GTR 是一种双极型半导体器件,即其内部电流由电子和空穴两种载流子形成。在电力电子电路中主要采用 NPN 结构。为了提高 GTR 的耐压性,一般采用 NP ν N 三重扩散结构,如图 1-11 所示。

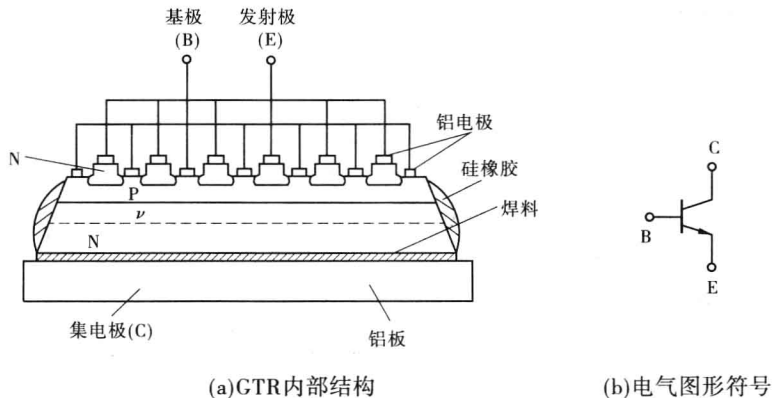


图 1-11 GTR 内部结构与电气图形符号

(三) 功率场效应晶体管

功率场效应晶体管(简称功率 MOSFET),与小功率场效应晶体管(简称 FET)一样,也分为结型和绝缘栅型两种,但通常主要指绝缘栅型中的 MOS 型。结型场效应晶体管一般称为静电感应晶体管(简称 SIT)。功率 MOSFET 是一种单极型电压控制器件,用栅极电压来控制漏极电流,驱动电路简单,需要的驱动功率小,开关速度快,工作频率高,热稳定性优于 GTR,但电流容量小、耐压低,一般只适用于功率不超过 10 kW 的电力电子装置。

功率 MOSFET 按导电沟道可分为 P 沟道型和 N 沟道型,每一类又可分为增强型和耗尽型两种。N 沟道型中主要载流子是电子,P 沟道型中主要载流子是空穴。

功率 MOSFET 的漏极 D、栅极 G 和源极 S 分别类似于晶体管中的集电极、基极和发射极。几种常用的功率 MOSFET 的外形如图 1-12 所示。

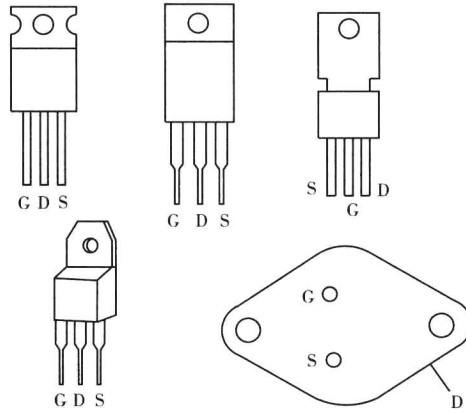
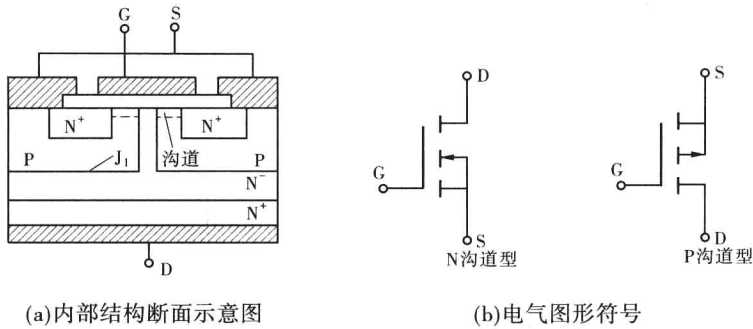


图 1-12 几种功率 MOSFET 的外形

功率 MOSFET 的结构和电气图形符号如图 1-13 所示。



(a) 内部结构断面示意图

(b) 电气图形符号

图 1-13 功率 MOSFET 的结构和电气图形符号

功率 MOSFET 主要利用栅源电压的大小来改变半导体表面感生电荷的大小,从而控制漏极电流的大小。其工作过程可分为如下两个阶段。

1. 关断

在漏源极间加正向电压(漏极为正,源极为负), $U_{GS} = 0$ 时,P 基区与 N 漂移区之间形成的 PN 结 J_1 反偏,漏源极之间无电流流过。

2. 导通

在栅源极间加正向电压 U_{GS} ,由于栅极是绝缘的,所以不会有栅极电流流过,但栅极的正电压会将其下面 P 区中的空穴推开,而将 P 区中的少数载流子——电子吸引到栅极下面的 P 区表面。当 U_{GS} 大于 U_T (开启电压或阈值电压) 时,栅极下 P 区表面的电子浓度将超过空穴浓度,使原本空穴多的 P 型半导体反型成电子多的 N 型半导体而成为反型层,该反型层形成电子浓度很高的导电沟道——N 沟道,而使 PN 结 J_1 消失,漏极和源极导电。 U_{GS} 超过 U_T 越多,导电能力越强,漏极电流越大。

(四) 绝缘栅双极晶体管

GTR 是双极型电流驱动器件,有电导调制效应、通流能力很强等特点,但开关速度较

低、所需驱动功率大、驱动电路复杂。MOSFET 是单极型电压驱动器件,优点是开关速度快、输入阻抗高、热稳定性好、所需驱动功率小且驱动电路简单。这两类器件取长补短复合而成的器件即绝缘栅双极晶体管(简称 IGBT)。IGBT 结合了二者的优点,既具有输入阻抗高、速度快、热稳定性好和驱动电路简单的优点,又具有输入通态电压低、耐压高和承受电流大的优点,驱动功率小而饱和压降低,具有良好的特性。

1. IGBT 的结构

IGBT 也是三端器件,它的三个极分别为栅极 G、集电极 C 和发射极 E。IGBT 内部结构断面示意如图 1-14 所示。

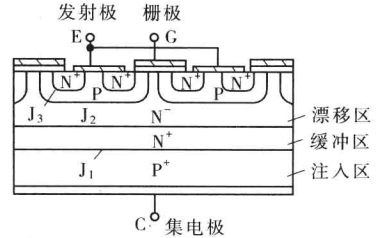


图 1-14 IGBT 内部结构断面示意

IGBT 也是多元集成结构,简化等效电路和电气图形符号如图 1-15 所示。IGBT 比功率 MOSFET 多一层 P⁺注入区,形成了一个大面积的 P⁺N⁺结 J₁,使 IGBT 导通时由 P⁺注入区向 N 基区发射少数载流子,从而对漂移区电导率进行调制,使得 IGBT 具有很强的通流能力。简化等效电路表明,IGBT 是 GTR 与 MOSFET 组成的达林顿结构,见图 1-15(a),主要是一个由 MOSFET 驱动的厚基区 PNP 复合管,其中 R_N 为晶体管基区内的调制电阻。

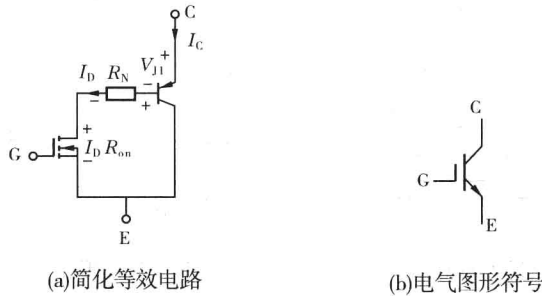


图 1-15 IGBT 的简化等效电路和电气图形符号

2. IGBT 的工作原理

IGBT 的驱动原理与功率 MOSFET 基本相同,它是场控器件,通断由栅射极电压 u_{GE} 决定。给栅极施加正向电压后,MOSFET 导通,从而给 PNP 晶体管提供了基极电流,使其导通。给栅极施加反向电压后,MOSFET 关断,使 PNP 晶体管基极电流为零而截止。其具体工作过程如下:

(1) 导通。 u_{GE} 大于开启电压 $U_{GE(th)}$ 时,MOSFET 内形成沟道,为晶体管提供基极电流,IGBT 导通。此时由于电导调制效应,电阻 R_N 减小,使高耐压的 IGBT 也有低的通态压降。

(2) 关断。栅射极间施加反向电压或不加电压时,MOSFET 内的沟道消失,晶体管的基极电流被切断,IGBT 关断。

(五) MOS 控制晶闸管

MOS 控制晶闸管(简称 MCT),是将 MOSFET 与晶闸管复合而得到的器件,即在晶闸管结构中引进一对 MOSFET 管,通过这一对 MOSFET 管来控制晶闸管的导通和关断。MCT 把 MOSFET 的高输入阻抗、低驱动功率、快速的开关过程与晶闸管的高电压大电流、低导通压降的特点相结合,构成大功率、快速的全控型电力电子器件。

1. MCT 的结构与工作原理

MCT 的结构如图 1-16 所示。

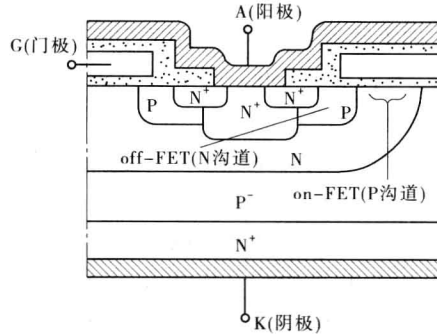


图 1-16 MCT 的结构

MCT 是采用集成电路工艺制成的,一个 MCT 器件由数以万计的 MCT 元组成,每个 MCT 元的组成为:一个 PNPN 晶闸管,一个控制该晶闸管导通的 MOSFET 和一个控制该晶闸管关断的 MOSFET。MCT 是在 PNPN 四层晶闸管(SCR)结构中集成了一对 MOSFET 开关,通过 MOSFET 来控制 SCR 的导通和关断。

IGBT 是 MOSFET 与双极结型晶体三极管的复合结构,由前级 MOS 管控制双极结型晶体三极管,而 MCT 是在晶闸管结构中引进一对 MOSFET 管构成的,通过这一对 MOSFET 管来控制晶闸管的导通和关断。

如图 1-17 所示为 MCT 的等效电路和电气图形符号, T_1 、 T_2 为构成晶闸管的两个三极管。

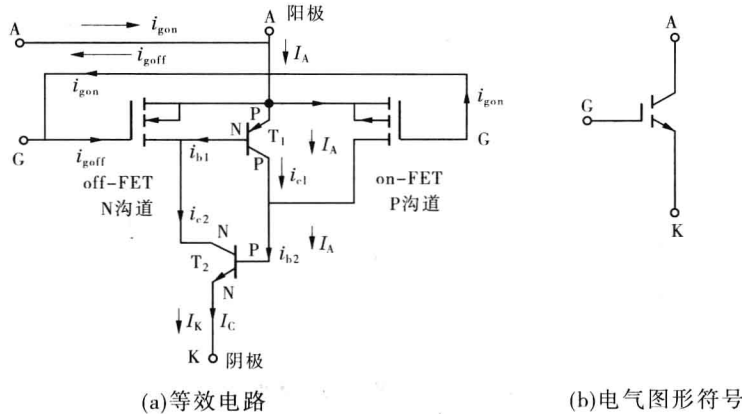


图 1-17 MCT 的等效电路和电气图形符号

2. MCT 的工作原理

在图 1-17(a)中,当正电压加在 MCT 阳极 A、阴极 K 之间时,如果门极 G 相对于阳极 A 加负脉冲电压驱动信号, $u_{AG} > 0$,则 i_{gon} 向 P 沟道 MOS 管提供驱动信号,P 沟道的 on-FET 管导通,为 T_2 提供基极电流,从而引发 T_1 、 T_2 管内部的正反馈机制: u_{AG} 使 $i_{b2} \uparrow \rightarrow i_{c2} \uparrow \rightarrow I_K \approx I_A \uparrow \rightarrow i_{b1} \uparrow \rightarrow i_{c1} \uparrow \rightarrow i_{b2} \uparrow$ 。随着 I_A 的增大,电流放大系数越来越大,最终导致 MCT 从断态转入通态。MCT 中晶闸管部分一旦导通,其通道电阻(T_1 的等效电阻)要比 on-FET

的导通电阻小得多,因此主电流由晶闸管 T_1 、 T_2 承担, on - FET 管只起最初引发晶闸管电流正反馈机制的作用。一旦晶闸管导通后,撤除 on - FET 的外加门极控制电压 u_{AG} , MCT 仍继续导通。

当门极 G 相对于阳极 A 加上正脉冲电压驱动信号时, $u_{AG} < 0$, i_{goff} 向 N 沟道 MOS 管提供驱动信号,使 N 沟道的 off - FET 管导通, off - FET 管导通后其端电压变小,使 T_1 管基极电流减小,从而引发 T_1 、 T_2 管内部正反馈控制: $i_{b1} \downarrow \rightarrow i_{c1} \downarrow \rightarrow i_{b2} \downarrow \rightarrow I_K \approx I_A \downarrow \rightarrow i_{c2} \downarrow \rightarrow i_{b1} \downarrow$ 。随着 I_A 、 I_C 的不断减小, T_1 、 T_2 的电流放大系数 α_1 、 α_2 越来越小,最终导致 MCT 从通态转入断态。

由上述分析可知, MCT 是通过激发 P 沟道 MOS 管的 on - FET 来导通晶闸管的,通过激发 N 沟道 MOS 管的 off - FET 来关断晶闸管。这种 MCT 被称为 P - MCT。对于 P - MCT,一般 $-5 \sim -15$ V 的脉冲电压 u_{AG} 可使 MCT 开通, $+10$ V 脉冲电压 u_{AG} 可使 MCT 关断。MCT 的静态特性与晶闸管一样,但它是一种新型的场控器件,其触发驱动电路要比可关断晶闸管 GTO 简单得多。此外,其通态压降低(与晶闸管相同,比 GTR、IGBT 小),开关速度比 GTO 快(比 IGBT 慢),且结温可高达 200 $^{\circ}\text{C}$ 。

(六) 功率集成电路

将多个器件封装在一个模块中,称为功率模块。功率集成电路(简称 PIC),是将输出的功率器件及其驱动电路、保护电路和接口电路等外围电路集成在一个或几个芯片上形成的。功率集成电路是电力半导体技术与微电子技术结合的产物,实现了电能和信息的集成,成为机电一体化的理想接口。

应用 PIC 技术可缩小装置体积、降低成本、提高可靠性。对工作频率高的电路,可大大减小线路电感,从而简化对保护和缓冲电路的要求。PIC 的功率一般必须大于 1 W (或 2 W)。

如图 1-18 所示为 PIC 的典型构成框图。其中核心部分是处理大电流和高电压的功率器件模块。

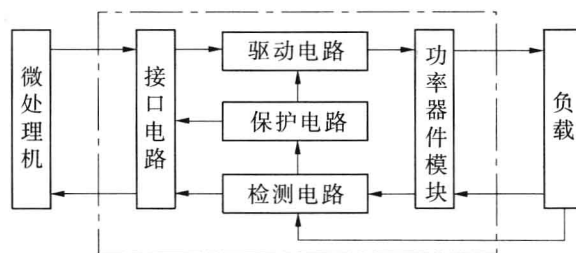


图 1-18 PIC 的典型构成框图

PIC 的智能化是指其控制功能、接口功能以及对故障的诊断、处理和自保护功能,具备这些功能的 PIC 称为智能功率集成电路 (SPIC)。由于智能功率集成电路都包含在单一的封装中,因此具有体积小、可靠性高、使用方便等优点。

功率控制功能、传感与保护功能和接口功能是 SPIC 的三个基本功能。SPIC 的构成框图如图 1-19 所示。

SPIC 的功率控制部分具有处理高电压、大电流的能力。其驱动电路一般被设计成能在直流 30 V 下工作,这样才能对 MOS 器件的栅极提供足够的电压,且必须能使控制信号传递