

# 项目 1

## 变频器基础知识

### 1.1 变频技术的发展

直流电动机拖动和交流电动机拖动先后诞生于 19 世纪,距今已有 100 多年的历史,并已成为动力机械的主要驱动装置。但是,由于技术上的原因,在很长一段时期内,占整个电力拖动系统 80% 左右的不变速拖动系统中采用的是交流电动机(包括异步电动机和同步电动机),而在需要进行调速控制的拖动系统中则基本上采用的是直流电动机。

但是,由于结构上的原因,直流电动机存在以下缺点。

- (1) 需要定期更换电刷和换向器,维护保养困难,寿命较短。
- (2) 由于直流电动机存在换向火花,难以应用于存在易燃易爆气体的恶劣环境。
- (3) 结构复杂,难以制造大容量、高转速和高电压的直流电动机。

而与直流电动机相比,交流电动机则具有以下优点。

- (1) 结构坚固,工作可靠,易于维护保养。
- (2) 不存在换向火花,可以应用于存在易燃易爆气体的恶劣环境。
- (3) 容易制造出大容量、高转速和高电压的交流电动机。

因此,很久以来,人们希望在许多场合下能够用可调速的交流电动机来代替直流电动机,并在交流电动机的调速控制方面进行了大量的研究开发工作。但是,直至 20 世纪 70 年代,交流调速系统的研究开发方面一直未能得到真正能够令人满意的成果,也因此限制了交流调速系统的推广应用。也正是因为这个原因,在工业生产中大量使用的诸如风机、水泵等需要进行调速控制的电力拖动系统中不得不采用挡板和阀门来调节风速和流量。这种做法不但增加了系统的复杂性,也造成了能源的浪费。

经历了 20 世纪 70 年代中期的第二次石油危机之后,人们充分认识到了节能工作的重要性,并进一步重视和加强了对交流调速技术的研究开发工作,随着同时期电力电子技术的发展,作为交流调速系统核心的变频器技术也得到了显著的发展,并逐渐进入了实用阶段。

虽然发展变频驱动技术最初的目的主要是节能,但是随着电力电子技术、微电子技术和控制理论的发展,电力半导体器件和微处理器的性能不断提高,变频驱动技术也得到了显著发展。

目前变频器不但在传统的电力拖动系统中得到了广泛应用,而且几乎已经扩展到了工业生产的所有领域,并且在空调、洗衣机、电冰箱等家电产品中也得到了广泛应用。随着电力电子技术、计算机技术和自动控制技术的发展,以变频调速为代表的近代交流调速技术有了飞速的发展。交流变频调速传动克服了直流电动机的缺点,发挥了交流电动机本身固有的优点,并且很好地解决了交流电动机调速性能先天不足的问题。交流变频调速技术以其卓越的调速性能、显著的节电效果以及在国民经济各个领域的广泛适用性,而被认为是最有前途的交流调速方式,代表了电气传动发展的主流方向。变频调速技术为节能降耗、改善控制性能、提高产品的产量和质量提供了至关重要的手段。变频调速理论已形成较为完整的科学体系,成为一门相对独立的学科。

## 1.2 变频器的发展

进入 21 世纪,电力电子器件的基片已从 Si(硅)变换为 SiC(碳化硅),使电力电子新元件具有耐高压、低功耗、耐高温的优点,并制造出体积小、容量大的驱动装置,永久磁铁电动机也正在开发研制之中。随着 IT 技术的迅速普及,变频器相关技术的发展迅速,未来主要朝以下两个方面发展。

### 1. 网络智能化

智能化的变频器使用时不必进行很多参数设定,本身具备故障自诊断功能,具有高稳定性、高可靠性及实用性。利用互联网可以实现多台变频器联动,甚至是以工厂为单位的变频器综合管理控制系统。

### 2. 专门化和一体化

变频器的制造专门化,可以使变频器在某一领域的性能更强,如风机、水泵用变频器、电梯专用变频器、起重机械专用变频器、张力控制专用变频器等。除此以外,变频器有与电动机一体化的趋势,使变频器成为电动机的一部分,可以使体积更小,控制更方便。

## 1.3 变频器的应用

### 1. 变频器在节能方面的应用

风机、泵类负载采用变频调速后,节电可达到 20%~60%,因为风机、泵类负载的实际消耗功率基本与转速的 3 次方成正比。据有关方面统计,我国已经进行变频改造的风机、泵类负载的容量占总容量的 5% 以上,还有很大的改造空间。由于风机、泵类负载在采用变频调速后可以节省大量的电能,所需的投资在较短的时间内就可以收回。目前,应

用较成功的有恒压供水、各类风机、中央空调和液压泵的变频调速。

## 2. 变频器在精度自控系统中的应用

由于控制技术的发展,变频器除了具有基本的调速控制功能之外。更具有多种算术运算和智能控制功能。它还设置有完善的检测、保护环节,因此在自动化系统中得到了广泛应用。例如在印刷、电梯、纺织、机床、生产流水线等领域进行速度控制。

## 3. 变频器在提高工艺水平和产品质量方面的应用

变频器还广泛地应用于传送、起重、挤压和机床等各种机械设备的控制领域,它可以提高工艺水平和产品质量,减少设备冲击和噪声,延长设备使用寿命。采用变频器控制后,可以使机械设备简化,操作和控制更具人性化,有的甚至可以改变原有的工艺规范,从而提高整个设备的功能。

# 1.4 变频器典型全控型器件

利用控制信号控制开通与关断的器件称为全控型器件,通常也称为自关断器件。

全控型器件通常分为电流控制型与电压控制型两大类。电流控制型器件从控制极注入或抽取电流信号来控制器件的开通或关断,如可关断晶闸管(GTO)、大功率晶体管(GTR)、集成门极换流晶闸管(IGCT)等。这类器件的主要特点是控制功率较大、控制电路复杂、工作频率较低。电压控制型器件通过在控制极建立电场——提供电压信号来控制器件的开通与关断,如功率场效应管(简称功率 MOSFET)、绝缘栅双极晶体管(IGBT)等。与电流控制型器件相比,这类器件的主要特点是控制功率小、控制电路简单、工作频率较高。

## 1.4.1 可关断晶闸管

### 1. 可关断晶闸管概述

可关断晶闸管 GTO(Gate Turn-Off Thyristor)也称门控晶闸管,如图 1-1 所示。其主要特点为,当门极加负向触发信号时晶闸管能自行关断。普通晶闸管(SCR)靠门极正信号触发之后,撤掉信号也能维持通态。欲使之关断,必须切断电源,使正向电流低于维持电流  $I_H$ ,或施以反向电压强迫关断。这就需要增加换向电路,不仅使设备的体积和重量增大,而且会降低效率,产生波形失真和噪声。可关断晶闸管克服了上述缺陷,它保留了普通晶闸管耐压高、电流大等优点,具有自关断能力,使用方便,是理想的高压、大电流开关器件。GTO 的容量及使用寿命均超过巨型晶体管(GTR),只是工作频率比 GTR 低。目前,GTO 已达到 3000A、4500V 的容量。大功率可关断晶闸管已广泛用于斩波调速、变频调速、逆变电源等领域,显示出强大的生命力。

### 2. 可关断晶闸管的结构与工作原理

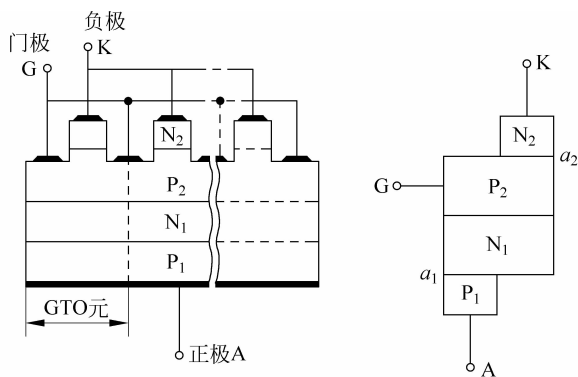
#### (1) 可关断晶闸管(GTO)基本结构

可关断晶闸管(GTO)也是一种三端四层(PNP)、三端引出线(A、K、G)的器件。和

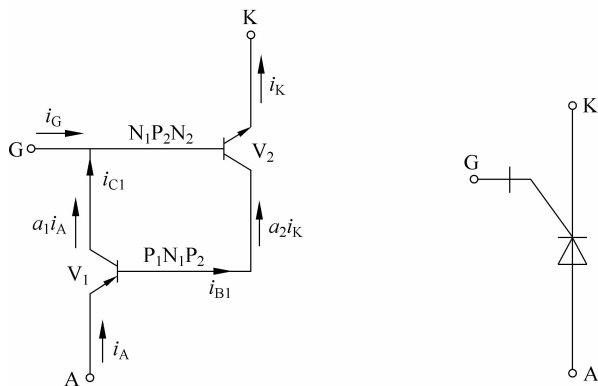


图 1-1 门极可关断晶闸管 GTO

晶闸管不同的是：GTO 在制造上不再是单一的 GTO 元件，GTO 内部由许多四层结构的小晶闸管并联而成，这些晶闸管的门极和阴极并联在一起，成为 GTO 元，GTO 是一种多元的功率集成器件，而普通晶闸管是独立元件结构。图 1-2 是 GTO 的结构示意图、等效电路及电气图形符号。



(a) GTO结构示意图



(b) 等效电路

(c) 电气图形符号

图 1-2 GTO 的结构示意图、等效电路和电气图形符号

## (2) GTO 晶闸管的开通和关断原理

GTO 晶闸管的开通和关断原理如图 1-3 所示。GTO 的开通原理与普通晶闸管相同,只是导通时的饱和程度不高,有利于门极控制关断。GTO 的开通机理:  $S_1$  闭合。

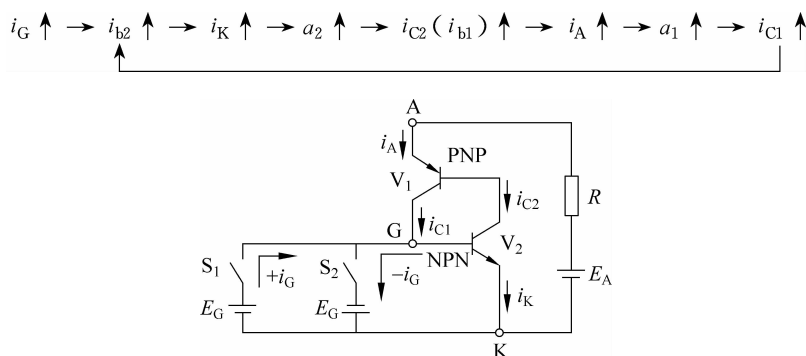
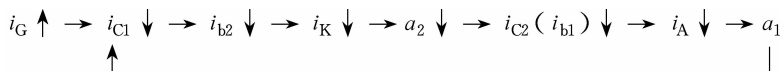


图 1-3 GTO 晶闸管的开通和关断原理图

GTO 的关断原理: 给门极加负脉冲, 从门极抽出电流, 晶体管  $V_2$  的基极电流减小, 使  $i_K$  和  $i_{C2}$  减小,  $i_{C2}$  减小又使  $i_A$  和  $i_{C1}$  减小, 进一步减小  $V_2$  的基极电流, 如此形成强烈的正反馈, 最后使  $V_1$  和  $V_2$  退出饱和而关断。



## 3. GTO 的主要参数

### (1) 开通时间 $t_{on}$

$t_{on}$  是延迟时间与上升时间之和, 延迟时间为  $1 \sim 2\text{ms}$ , 上升时间则随通态阳极电流值的增大而增大。

### (2) 关断时间 $t_{off}$

$t_{off}$  一般是指储存时间和下降时间之和, 不包括尾部时间。GTO 的储存时间随阳极电流的增大而增大, 下降时间一般小于  $2\mu\text{s}$ 。

不少 GTO 都制造成逆导型, 类似于逆导晶闸管, 需承受反压时, 应和电力二极管串联。

### (3) 最大可关断阳极电流 $I_{ATO}$

### (4) 电流关断增益 $\beta_{off}$

最大可关断阳极电流与门极负脉冲电流最大值  $I_{GM}$  之比称为电流关断增益。

$$\beta_{off} = \frac{I_{ATO}}{I_{GM}}$$

$\beta_{off}$  一般很小, 只有 5 左右, 这是 GTO 的一个主要缺点。1000A 的 GTO 关断时门极负脉冲电流峰值要 200A。

### (5) 浪涌电流

浪涌电流是指使结温不超过额定结温时不重复最大通态过载电流, 一般为通态峰值电流的 6 倍。会引起器件性能的变差。

#### (6) 断态不重复峰值电压

当器件阳极电压超过此值时,则不需要门极触发即转折导通,断态不重复峰值电压随转折次数增大而下降。一般只有其中几个 GTO 元首先转折,阳极电流集中,局部电流过高而损坏。

#### (7) 维持电流

GTO 的维持电流是指阳极电流减小到开始出现 GTO 元不能再维持导通时的数值。

#### (8) 擎住电流

GTO 经门极触发后,阳极电流上升到保持所有 GTO 元导通的最低值即擎住电流值。

擎住电流最大的 GTO 元影响最大。当门极电流脉冲宽度不足时,门极脉冲电流下降沿越陡,GTO 的擎住电流值将增大。

### 4. GTO 电极和触发能力检测

#### (1) 判定 GTO 的电极

将万用表拨至  $R \times 1$  挡,测量任意两脚间的电阻,仅当黑表笔接 G 极,红表笔接 K 极时,电阻呈低阻值,对其他情况电阻值均为无穷大。由此可迅速判定 G、K 极,剩下的就是 A 极。

#### (2) 检查触发能力

将万用表的黑表笔接 A 极,红表笔接 K 极,电阻为无穷大;然后用黑表笔尖也同时接触 G 极,加上正向触发信号,表针向右偏转到低阻值即表明 GTO 已经导通;最后脱离 G 极,只要 GTO 维持通态,就说明被测管具有触发能力。

## 1.4.2 电力晶体管 GTR

### 1. 电力晶体管概述

电力晶体管 GTR(Giant Transistor)是一种电流控制的双极双结大功率、高反压电力电子器件,具有自关断能力,产于 20 世纪 70 年代,其额定值已达 1800V/800A/2kHz、1400V/600A/5kHz、600V/3A/100kHz。它既具备晶体管饱和压降低、开关时间短和安全工作区宽等固有特性,又提高了功率容量,因此,由它组成的电路灵活、成熟、开关损耗小、开关时间短,在电源、电动机控制、通用逆变器中等容量、中等频率的电路中应用广泛。GTR 的缺点是驱动电流较大、耐浪涌电流能力差、易受二次击穿而损坏。在开关电源和 UPS 内,GTR 正逐步被功率 MOSFET 和 IGBT 所代替。目前,电力晶体管常用的外形有四种:铁壳封装、塑壳封装、模块封装和集成电路封装。封装的外形如图 1-4 所示。

### 2. 电力晶体管的基本结构和工作原理

电力晶体管为三端三层器件,其基本结构和电气图形符号如图 1-5 所示。电力晶体管有 NPN 和 PNP 两种结构,大功率电力晶体管多为 NPN 型。电力晶体管的基本原理与普通信号晶体管相同,均是用基极电流  $i_b$  控制集电极电流  $i_c$  的电流控制型器件。区别在于它能在大的耗散功率或输出功率下工作。GTR 广泛用于 10kHz 开关频率下的功率变

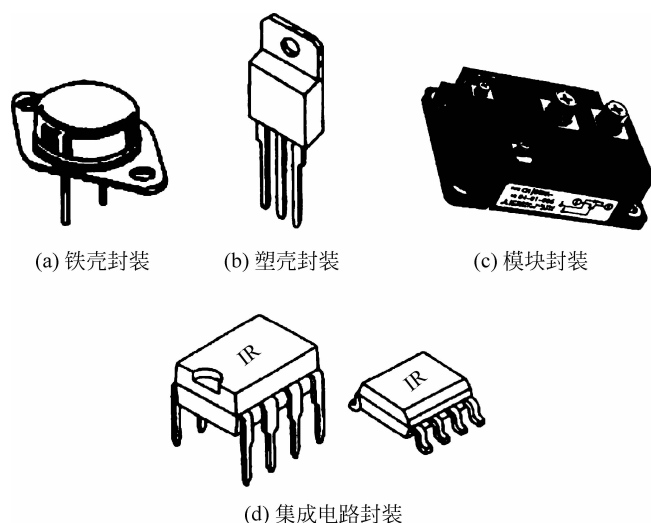


图 1-4 电力晶体管的几种常见封装外形

换场合。GTR 总工作在饱和与截止状态下。GTR 的应用电路一般采用共发射极接法。在基极与发射极之间加上正向电压,形成基极电流;这时发射结正偏,集电结反偏,GTR 开通,进入饱和状态。饱和状态的 GTR 集射极电压非常低,使得发射结与集电结同时处于正偏状态。此时的 GTR 的集电极电流只取决于电路的阻抗,与基极电流大小无关。

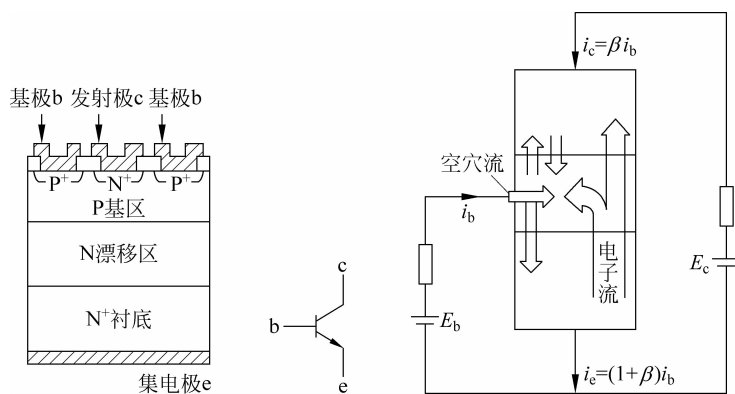


图 1-5 GTR 的结构、电气图形符号和内部载流子的流动示意图

### 3. 电力晶体管的类型

目前常用的电力晶体管有单管电力晶体管、达林顿电力晶体管和电力晶体管模块 3 种类型。

#### (1) 单管电力晶体管

单管电力晶体管可靠性高,能改善器件的二次击穿特性,易于提高耐压能力,并易于散出内部热量。

#### (2) 达林顿电力晶体管

达林顿电力晶体管是由两个或多个晶体管复合而成,可以是 PNP 型,也可以是 NPN

型,其性质取决于驱动管,它与普通复合三极管相似。如图 1-6 所示达林顿电力晶体管的电流放大倍数很大,可以达到几十至几千倍。虽然达林顿电力晶体管大大提高了电流放大倍数,但其饱和管压降却增加了,增大了导通损耗,同时降低了管子的工作速度。

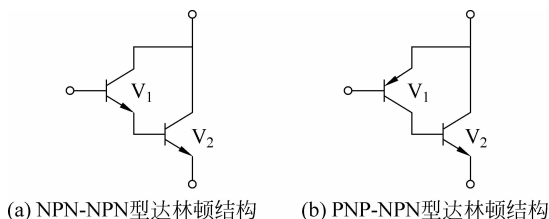


图 1-6 两级达林顿电力晶体管原理图

### (3) 电力晶体管模块

目前,作为大功率的开关应用还是 GTR 模块,它是将 GTR 管芯及为了改善性能的 1 个元件组装成 1 个单元,然后根据不同的用途将几个单元电路构成模块,集成在同一硅片上。这样大大提高了器件的集成度、工作的可靠性和性能价格比,同时也实现了小型轻量化。目前生产的 GTR 模块,可将多达 6 个相互绝缘的单元电路制在同一个模块内,便于组成三相桥电路。

## 4. GTR 的基本特性

### (1) 静态特性

静态特性可分为输入特性和输出特性。输入特性与二极管的伏安特性相似。GTR 共射极电路的输出特性曲线,如图 1-7 所示。由图 1-7 可以看出,静态特性分为 3 个区域,即截止区、放大区及饱和区。当集电结和发射结处于反偏状态,或集电结处于反偏状态,发射结处于零偏状态时,管子工作在截止区,当发射结处于正偏、集电结处于反偏状态时,管子工作在放大区。当发射和集电结都处于正偏状态时,管子工作在饱和区。GTR 在电力电路中,需要工作在开关状态,因此它在饱和和截止区之间交替工作。

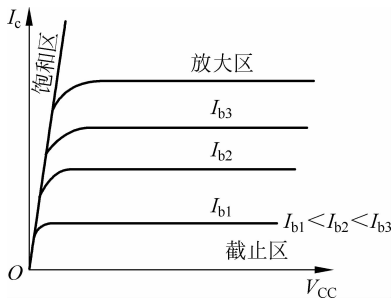


图 1-7 GTR 共发射极电路输出特性曲线

### (2) 动态特性

动态特性主要描述开关过程的瞬态性能,其优劣常用开关时间表征。GTR 是用基极电流来控制集电极电流的,GTR 的开通时间  $t_{on}$  是延迟时间  $t_d$  和上升时间  $t_r$  之和,关断时间  $t_{off}$  是存储时间  $t_s$  和下降时间  $t_f$  之和。延迟时间主要是由发射结势垒电容充电产生的。增大基极驱动电流的幅值并增大,可以缩短延迟时间,同时也可以缩短上升时间,从而加快开通过程,但不宜过大,否则将增加存储时间。存储时间是用来除去饱和导通时储存在基区的载流子的,是关断时间的主要部分。减小导通时的饱和深度以减小存储的载流子,或增大基极抽取负电流的幅值和负偏压,可以缩短存储时间,从而加快关断速度。GTR

的动态特性曲线如图 1-8 所示。

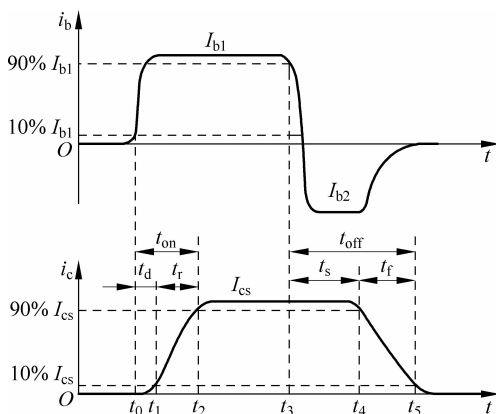


图 1-8 GTR 的动态特性曲线

## 5. GTR 的主要参数

### (1) 最高集电极电压额定值

最高集电极电压额定值是指集电极的击穿电压值,它不仅因器件不同而不同,而且会因外电路接法不同而不同。

### (2) 集电极最大允许电流 $I_{CM}$

通常规定为  $H_{FE}$  下降到规定值的  $1/3 \sim 1/2$  时所对应的  $I_c$ ,实际使用时要留有裕量,只能用到  $I_{CM}$  的一半或稍多一点。

### (3) 集电极最大耗散功率 $P_{CM}$

最高工作温度下允许的耗散功率,大小主要由集电结工作电压和集电极电流乘积决定。一般是在环境温度为  $25^\circ\text{C}$  时测定,如果环境温度高于  $25^\circ\text{C}$ ,允许的  $P_{CM}$  值应当减小。

### (4) 最高结温 $T_{JM}$

最高结温是指在正常工作时不损坏器件所允许的最高温度。它由器件所用的半导体材料、制造工艺、封装方式及可靠性要求来决定。塑封器件一般为  $120 \sim 150^\circ\text{C}$ ,金属封装为  $150 \sim 170^\circ\text{C}$ 。为了充分利用器件功率又不超过允许结温,GTR 使用时必须选配合适的散热器。

## 6. 电力晶体管的驱动与保护

### (1) 驱动电路

GTR 的基极驱动电路有恒流驱动电路、抗饱和驱动电路、固定反偏互补驱动电路、比例驱动电路、集成化驱动电路等多种形式。

### (2) 集成化驱动

集成化驱动电路克服了一般电路元件多、电路复杂、稳定性差和使用不便的缺点,还增加了保护功能。

### (3) GTR 的保护电路

GTR 的开关频率较高,采用快速熔断保护是无效的,一般采用缓冲电路。主要有  $RC$

缓冲电路、充放电型  $R$ 、 $C$ 、 $VD$  缓冲电路和阻止放电型  $R$ 、 $C$ 、 $VD$  缓冲电路三种形式。

### 1.4.3 电力场效应晶体管

电力场效应晶体管(Power Mosfet)是一种单极型的电压控制器件,不但有自关断能力,而且有驱动功率小、开关速度高、无二次击穿、安全工作区宽等特点。由于其易于驱动和开关频率可高达 500kHz,特别适于高频化电力电子装置,如应用于 DC/DC 变换、开关电源、便携式电子设备、航空航天以及汽车等电子电器设备中。因为其电流、热容量小,耐压低,一般只适用于小功率电力电子装置。

#### 1. 电力场效应晶体管的结构和工作原理

电力场效应晶体管种类和结构有许多种,按导电沟道可分为 P 沟道和 N 沟道,同时又有耗尽型和增强型之分。在电力电子装置中,主要是应用 N 沟道增强型。电力场效应晶体管导电机理与小功率绝缘栅 MOS 管相同,但结构有很大区别。小功率绝缘栅 MOS 管是一次扩散形成的器件,导电沟道平行于芯片表面,横向导电。电力场效应晶体管大多采用垂直导电结构,提高了器件的耐电压和耐电流的能力。按垂直导电结构的不同,又可分为两种:V 形槽 VVMOSFET 和双扩散 VDMOSFET。电力场效应晶体管采用多单元集成结构,一个器件由成千上万个小的 MOSFET 组成。N 沟道增强型电力场效应晶体管的结构和电气符号如图 1-9 所示。

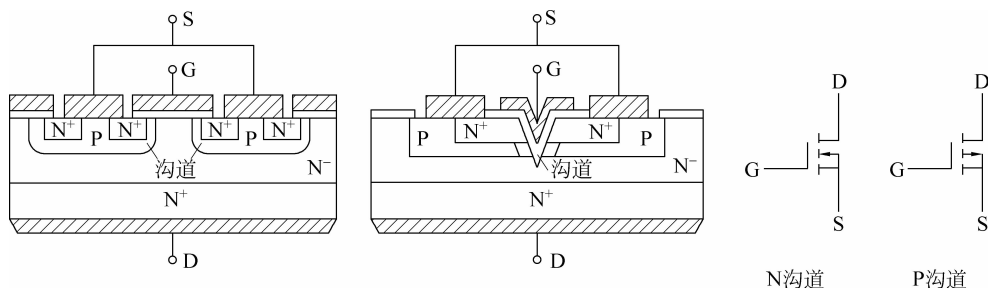


图 1-9 Power Mosfet 的结构和电气符号

电力场效应晶体管有 3 个端子:漏极 D、源极 S 和栅极 G。当漏极接电源正极,源极接电源负极时,栅极和源极之间电压为 0,沟道不导电,管子处于截止。如果在栅极和源极之间加一正向电压  $U_{GS}$ ,并且使  $U_{GS}$  大于或等于管子的开启电压  $U_T$ ,则管子开通,在漏、源极间流过电流  $I_D$ 。 $U_{GS}$  超过  $U_T$  越大,导电能力越强,漏极电流越大。

#### 2. 电力场效应晶体管的静态特性和主要参数

电力场效应晶体管静态特性主要是指输出特性和转移特性,与静态特性对应的主要参数有漏极击穿电压、漏极额定电压、漏极额定电流和栅极开启电压等。

##### (1) 静态特性

##### ① 转移特性

转移特性表示漏极电流  $I_D$  与栅源之间电压  $U_{GS}$  的转移特性关系曲线,如图 1-10(a)所示。转移特性可表示出器件的放大能力,并且与 GTR 中的电流增益  $\beta$  相似。由于电力场