

电气自动化新技术丛书

交流调速系统

陈伯时 陈敏逊 编著

机械工业出版社

本书全面系统地介绍了现代交流调速系统的基本原理、数学模型、控制系统和应用性能。其内容基本上是把已售缺的中国自动化学会电气自动化专业委员会出版的《现代电力电子器件与交流调速》中的交流调速部分按照转差功率去向建立起新的体系,尽量收集近年来已获成熟应用的新技术,编写成书。鉴于本丛书中已有一些单独介绍某种具体交流调速控制系统和控制方法的主题,本书的重点放在调速系统原理和自动控制规律方面,对于具体装置只作概述,以免重复。

本书可供从事电气自动化领域工作的工程技术人员和科研人员阅读和参考,也可作为相关专业的大专院校教师、研究生和高等院校本科生的教学参考书,以及工程技术人员继续教育的培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

交流调速系统/陈伯时,陈敏逊编著. —北京:机械工业出版社,1998.4
(电气自动化新技术丛书)
ISBN 7-111-06084-9

I. 交… II. ①陈… ②陈… III. 交流电机:多速电机-调速-技术 IV. TM344.4

中国版本图书馆CIP数据核字(98)第01020号

出版人:马九荣(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
责任编辑:孙流芳 周娟 版式设计:王颖 责任校对:李汝庚
封面设计:姚毅 责任印制:王国光
北京交通印务实业公司印刷·新华书店北京发行所发行
1998年5月第1版·第1次印刷
850mm×1168mm $1/32$ ·8.375印张·215千字
0 001—5 000册
定价:16.00元
凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

前 言

自本世纪 80 年代以来, 交流调速技术及其应用发展很快, 在电气传动领域内, 长期被认为是天经地义的“直流传动调速、交流传动不调速”的分工格局已被彻底打破。交流调速系统在风机、水泵等的节能调速, 轧钢机、机床、电力机车等的高动态性能调速, 石化、纺织、轻工机械等的同步调速和一般性能调速, 矿井卷扬机、厚板轧机等的大容量调速, 高速磨头、离心机等的高转速调速诸方面, 已经获得越来越广泛的应用。在这样的形势下, 迫切需要系统地、理论联系实际地阐述交流调速系统原理和方法的书籍, 以满足广大工程技术人员的需求。

1983 年, 我们主持了昆明“交流调速系统讲习讨论会”, 邀请国内各大学 7 名教授共同讲授, 并编写了讲义, 会后由刘竞成教授主编, 把讲义整理成《交流调速系统》一书, 于 1984 年由上海交通大学出版社出版, 解决了燃眉之急。后由全国高校工业电气自动化专业教学指导委员会定为“推荐教材”。80 年代后期, 在电力电子和微机控制迅速发展的推动下, 交流调速技术又有了很大进展, 我们和刘宗富、王正元等教授一起编写了《现代电力电子器件与交流调速》, 于 1990 年 6 月出版, 并由中国自动化学会电气自动化专业委员会等举办研讨会多次, 进行宣讲与推广。在上述两本书的基础上, 我们又对交流调速系统的规律和体系进行了整理和提高。对于异步电机调速系统, 改变了以往仅罗列调速方法的体系, 从提高能量转换效率的角度看, 归纳成转差功率消耗型、转差功率回馈型和转差功率不变型三种类型, 而同步电机没有转差功率, 所以只能有转差功率不变型, 这样就建立起交流调速系统新的统一体系。按照这一思路, 再把交流调速系统和直流调速系统合在一起, 编写了《电力拖动自动控制系统》

教材，于1992年由机械工业出版社出版。该书出版发行后很受读者欢迎，但受到教材发行政策上的限制，除高等学校预订以外，在市面上不易买到。为此再利用《电气自动化新技术丛书》这块园地，把交流调速系统单独提出来，并吸收近年来技术进步的新内容，重新编写成书，以飨读者。鉴于丛书中已有一些单独介绍某种具体的交流调速的内容，本书把重点放在调速系统的原理和自动控制规律方面，对于具体装置只作概述，以免重复。

本书共分6章。第1章绪论，简述交流调速系统的发展和基本类型，并介绍作为现代交流调速系统物质基础的电力电子技术和微机控制技术的最新进展。第2章讨论异步电机转差功率消耗型的调速系统，着重分析闭环控制的变压调速系统和电磁转差离合器调速系统。第3章分析异步电机转差功率回馈型调速系统，即串级调速系统。第4章首先阐明异步电机变压变频调速的基本原理，然后简述静止式电力电子变频器的特点，其中对目前普遍应用的全控型器件SPWM变频器作重点介绍。第5章介绍异步电机转差功率不变型的变压变频调速系统，其中重点阐述矢量控制系统，并扼要地介绍直接转矩控制系统。异步电机的多变量数学模型和坐标变换是分析矢量控制的必要工具，但为了节省篇幅，本书只着重说明其概念与应用，而不作过多的公式推导。最后，在第6章中分析同步电机的调速系统。本书第3章和第4章的4.4节、4.5节由陈敏逊执笔，其余章节由陈伯时执笔，全书由陈伯时统稿。

交流调速技术近年来发展很快，几乎达到日新月异的地步，笔者学识有限，很难把所有新技术都全面完整地反映出来，遗漏和错误在所难免，殷切期望读者批评指正。

陈伯时 陈敏逊

1997年8月

《电气自动化新技术丛书》

序 言

科学技术的发展，对于改变社会的生产面貌，推动人类文明向前发展，具有极其重要的意义。电气自动化技术是多种学科的交叉综合，特别在电力电子、微电子及计算机技术迅速发展的今天，电气自动化技术更是日新月异。毫无疑问，电气自动化技术必将在建设“四化”、提高国民经济水平中发挥重要的作用。

为了帮助在经济建设第一线工作的工程技术人员能够及时熟悉和掌握电气自动化领域中的新技术，中国自动化学会电气自动化专业委员会和中国电工技术学会电控系统与装置专业委员会联合成立了《电气自动化新技术丛书》编辑委员会，负责组织编辑《电气自动化新技术丛书》。丛书将由机械工业出版社出版。

本丛书有如下特色：

一、本丛书是专题论著，选题内容新颖，反映电气自动化新技术的成就和应用经验，适应我国经济建设急需。

二、理论联系实际，重点在于指导如何正确运用理论解决实际问题。

三、内容深入浅出，条理清晰，语言通俗，文笔流畅，便于自学。

本丛书以工程技术人员为主要读者，也可供科研人员及大专院校师生参考。

编写出版《电气自动化新技术丛书》，对于我们是一种尝试，难免存在不少问题和缺点，希广大读者给予支持和帮助，并欢迎大家批评指正。

《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会

目 录

《电气自动化新技术丛书》序言

前言

第1章 绪论

1.1 交流调速系统的发展	1
1.2 交流调速系统的基本类型	2
1.2.1 异步电机调速系统的基本类型	2
1.2.2 同步电机调速系统的基本类型	3
1.3 电力电子和微机控制技术是现代交流调速的物质基础	4
1.3.1 电力电子器件与技术决定着现代交流调速的主要装置	4
1.3.2 微处理器的进步使数字控制成为现代控制器的发展 方向	11

第2章 异步电机转差功率消耗型调速系统

2.1 异步电机变压调速系统	16
2.1.1 异步电机改变电压时的机械特性	19
2.1.2 闭环控制的变压调速系统及其静特性	22
2.1.3 近似的动态结构图	25
2.1.4 转差功率损耗分析	29
2.2 电磁转差离合器调速系统	32

第3章 异步电机转差功率回馈型调速系统——绕线转子 异步电机串级调速系统

3.1 串级调速系统的工作原理	36
3.1.1 异步电机转子附加电动势的作用	36
3.1.2 电气串级调速系统的工作原理	38
3.1.3 串级调速系统的其它类型	40
3.2 异步电机在串级调速工作时的机械特性	42
3.2.1 串级调速时异步电机机械特性的特征	43
3.2.2 异步电机转子整流电路的特点	44

3.2.3	异步电机转子整流电路的电压与电流	45
3.2.4	异步电机在串级调速时的电磁转矩	49
3.2.5	异步电机串级调速机械特性方程式	55
3.3	双闭环控制的串级调速系统	57
3.3.1	双闭环控制系统的组成	57
3.3.2	串级调速系统的动态数学模型	58
3.3.3	双闭环串级调速系统调节器参数的确定	62
3.4	串级调速系统中的逆变变压器	64
3.5	双馈调速系统	66
3.5.1	双馈调速的工作原理	67
3.5.2	双馈调速系统的再生制动	68
3.5.3	双馈调速系统的优点	69
3.6	串级调速系统的能量指标	70
3.6.1	串级调速系统的效率	70
3.6.2	串级调速系统的功率因数	73
3.7	串级调速系统的起动与停车控制	80
3.7.1	间接起动	81
3.7.2	直接起动	82
第4章	异步电机变压变频调速原理和静止式变压变频装置	
4.1	变压变频调速的基本控制方式	83
4.1.1	基频以下调速	84
4.1.2	基频以上调速	85
4.2	异步电机电压、频率协调控制时的机械特性	86
4.2.1	正弦波恒压恒频供电时异步电机的机械特性	86
4.2.2	基频以下电压、频率协调控制时的机械特性	87
4.2.3	基频以上变频调速时的机械特性	92
4.2.4	正弦波恒流供电时的机械特性	93
4.3	静止式电力电子变压变频装置	95
4.3.1	间接变压变频装置(交-直-交变压变频装置)	95
4.3.2	直接变压变频装置(交-交变压变频装置)	97
4.3.3	电压源型变频器和电流源型变频器	99
4.3.4	180°导通型和120°导通型逆变器	103
4.4	正弦波脉宽调制(SPWM)变压变频器	106

4.4.1	正弦脉宽调制原理	107
4.4.2	SPWM 波形的基波电压	112
4.4.3	对脉宽调制的制约条件	114
4.4.4	同步调制与异步调制	115
4.4.5	变压变频器输出的谐波分析	118
4.4.6	桥臂器件开关死区对 SPWM 变压变频器工作的影响	131
4.5	脉宽调制变压变频器的控制方法	137
4.5.1	SPWM 的模拟控制	137
4.5.2	SPWM 的数字控制	137
4.5.3	消除指定次数谐波的 PWM 控制	143
4.5.4	电流跟踪控制	145
4.5.5	电压空间矢量控制 (磁链跟踪控制)	150
第 5 章 异步电机转差功率不变型调速系统——笼型异步 电机变压变频调速系统		
5.1	转速开环恒压频比控制的调速系统	161
5.1.1	电压源型晶闸管变频器-异步电机调速系统	162
5.1.2	电流源型晶闸管变频器-异步电机调速系统	167
5.1.3	数字控制的 SPWM 变频调速系统	171
5.2	转速闭环转差频率控制的变压变频调速系统	175
5.2.1	转差频率控制的基本概念	175
5.2.2	转差频率控制的规律	176
5.2.3	转差频率控制的变压变频调速系统	179
5.2.4	优点与不足	180
5.3	异步电机的多变量数学模型和坐标变换	182
5.3.1	异步电机动态数学模型的性质	183
5.3.2	三相异步电机的多变量非线性数学模型	184
5.3.3	坐标变换和变换矩阵	190
5.3.4	三相异步电机在两相坐标系上的数学模型	198
5.4	按转子磁场定向的矢量控制系统	206
5.4.1	异步电机的坐标变换结构图和等效直流电机模型	206
5.4.2	矢量控制系统的构想	207
5.4.3	矢量控制的基本方程式及其解耦性质	208
5.4.4	转速、磁链闭环控制的矢量控制系统和转子磁链模型	211

5.4.5 磁链开环转差控制的矢量控制系统	215
5.5 按定子磁场控制的直接转矩控制系统	216
5.5.1 直接转矩控制系统的原理和特点	217
5.5.2 直接转矩控制系统的控制方案和模型算法	218
5.5.3 直接转矩控制系统和矢量控制系统的比较	220
第6章 同步电机变频调速系统	
6.1 他控变频同步电机调速系统	223
6.1.1 转速开环恒压频比控制的同步电机群调速系统	223
6.1.2 由交-交变压变频器供电的大型低速同步电机调速系统	224
6.1.3 按气隙磁场定向的同步电机矢量控制系统	225
6.1.4 同步电机的多变量动态数学模型	230
6.2 自控变频同步电机调速系统	233
6.2.1 大中容量晶闸管自控变频同步电机(无换向器电机)调速 系统	234
6.2.2 小容量永磁同步电机自控变频调速系统	244
参考文献	250

第1章 绪 论

1.1 交流调速系统的发展

直流电气传动和交流电气传动在 19 世纪先后诞生。在 20 世纪的大部分年代里，鉴于直流传动具有优越的调速性能，高性能可调速传动都采用直流电动机（以下均简称为直流电机），而约占电气传动总容量 80% 的不变速传动则采用交流电动机（以下均简称为交流电机），这种分工在一段时期内已成为一种举世公认的格局。交流调速系统虽然早已有多种方案问世，并已获得一些实际应用的领域，但其性能却始终无法与直流调速系统相匹敌。直到本世纪 70 年代初叶，席卷世界先进工业国家的石油危机迫使他们投入大量人力和财力去研究高效节能的交流调速系统，经过多年努力，到了 70 年代末，大见成效，一直被认为是天经地义的交直流传动按调速分工的格局终于被打破了。此后，交流调速系统主要沿着下述三个方向发展和应用。

1. 一般性能的节能调速 在过去大量的所谓不变速交流传动中，风机、水泵等机械总容量几乎占工业电气传动总容量的一半，其中有不少场合并不是不需要调速，只是因为过去交流电机本身不调速，不得不依赖挡板和阀门来调节送风和供水的流量，许多电能因而白白地被浪费掉了。如果换成交流调速系统，把消耗在挡板和阀门上的能量节省下来，每台风机、水泵平均约可节能 20%，效果是很可观的。

2. 高性能交流调速系统 许多在工艺上就需要调速的生产机械，过去多用直流传动，鉴于交流电机比直流电机结构简单、成本低廉、工作可靠、维护方便、转动惯量小、效率高，如果改成交流调速传动，显然能够带来不少的效益。但是，由于交流电

机原理上的原因，其电磁转矩难以像直流电机那样直接通过电流施行灵活的即时控制。70年代初发明了矢量控制技术（或称磁场定向控制技术），通过坐标变换，把交流电机的定子电流分解成励磁分量和转矩分量，用来分别控制磁通和转矩，就可以获得和直流电机相仿的高动态性能，从而使交流电机的调速技术取得了突破性的进展。其后，又陆续提出了直接转矩控制、解耦控制等方法，形成了一系列在性能上可以和直流调速系统媲美的高性能交流调速系统。

3. 特大容量、极高转速的交流调速 直流电机换向器的换向能力限制了它的容量和转速，其极限容量与转速的乘积约为 $10^6 \text{ kW} \cdot \text{r/min}$ ，超过这一数值时，直流电机的设计与制造就非常困难了。交流电机则不受这个限制，因此，特大容量的传动，如厚板轧机、矿井卷扬机等，和极高转速的传动，如高速磨头、离心机等，都以采用交流调速为宜。

1.2 交流调速系统的基本类型

交流电机主要分异步电机（本书均指感应电动机）和同步电动机（以下均简称为同步电机）两大类。

1.2.1 异步电机调速系统的基本类型

现有文献中介绍的异步电机调速系统种类繁多，常见的有：①降电压调速；②电磁转差离合器调速；③绕线转子异步电机转子回路串电阻调速；④绕线转子异步电机串级调速；⑤变极对数调速；⑥变压变频调速等等。在研究开发阶段，人们从多方面探索调速的途径，因而种类繁多是很自然的。现在交流调速的发展已经比较成熟，为了深入地掌握其基本原理，就不能满足于这种表面形式上的罗列，而要进一步探讨其本质，从更高的角度去认识交流调速的规律。

按照交流异步电动机的基本原理，从定子传入转子的电磁功率 P_m 可分为两部分：一部分 $P_{\text{mech}} = (1 - s) P_m$ 是拖动负载的有效功率；另一部分是转差功率 $P_s = s P_m$ ，与转差率 s 成正比。

从能量转换的角度看，转差功率是否增大，是消耗掉还是得到回收，显然是评价调速系统效率高低的一种标志。从这点出发，可以把异步电机的调速系统分成三类：

(1) 转差功率消耗型调速系统——全部转差功率都转换成热能的形式而消耗掉。上述的第①、②、③三种调速方法都属于这一类。在三类异步电机调速系统之中，这类系统的效率最低，而且它是以增加转差功率的消耗来换取转速的降低（恒转矩负载时），越向下调速，效率越低。可是这类系统结构最简单，所以还有一定的应用场合。

(2) 转差功率回馈型调速系统——转差功率的一部分消耗掉，大部分则通过变流装置回馈给电网或者转化为机械能予以利用，转速越低，回收的功率越多，上述第④种调速方法——串级调速属于这一类。这类调速系统的效率显然比第一类要高，但增设的变流装置总要多消耗一部分功率，因此还不及下一类。

(3) 转差功率不变型调速系统——转差功率中转子铜损部分的消耗是不可避免的，但在这类系统中，无论转速高低，转差功率的消耗基本不变，因此效率最高。上述的第⑤、⑥两种调速方法属于此类。其中变极对数只能有级调速，应用场合有限。只有变压变频调速应用最广，可以构成高动态性能的交流调速系统，取代直流调速，是最有发展前途的。

1.2.2 同步电机调速系统的基本类型

同步电机没有转差，也就没有转差功率，所以同步电机调速系统只能是转差功率不变型（恒等于0）的，而同步电机转子极对数又是固定的，因此只能靠变压变频调速，没有别的型式。

从控制频率的方式来分，同步电机调速有他控变频调速和自控变频调速两类，后者也叫做无换向器电机调速。

开关磁阻式电机是一种特殊型式的同步电机，有其独特的比较简单的调速方法。

1.3 电力电子和微机控制技术是现代交流调速的物质基础

从交流调速的发展历史上看,早在半个多世纪以前,对现在常用的诸如变电压、串级、变压变频等交流调速方法的原理就已经研究清楚了,只是由于要用电磁元件和旋转变流机组来实现,而控制性能又赶不上直流调速(矢量控制尚未发明),所以长期得不到推广应用。60~70年代,有了静止的电力电子变流装置以后,逐步解决了调速装置要减少设备、缩小体积、降低成本、提高效率、消除噪声等问题,才使交流调速获得了飞跃的发展。发明矢量控制之后,又提高了交流调速系统的静、动态性能,但是要实现矢量控制规律,需要复杂的模拟电子电路,其设计、制造和调试都很麻烦。采用微机控制以后,用软件实现矢量控制算法,使硬件电路规范化,从而降低了成本,提高了可靠性,而且还有可能进一步实现更复杂的控制技术。由此可见,电力电子和微机控制是现代交流调速系统发展的两项物质基础,电力电子和微机控制技术的迅速进步是推动交流调速系统不断更新的动力。

1.3.1 电力电子器件与技术决定着现代交流调速的主要装置

50年代末,第一个普通晶闸管(SCR)[⊖]在美国通用电气公司的实验室里诞生,标志着电力电子技术的开端,从此“电子”进入到强电领域,电力电子器件成为弱电控制强电的纽带。近40年来,电力电子器件经历了非常迅猛的发展过程,从只能触发导通不能控制关断的半控型器件(如晶闸管),到可以控制导通和关断的全控型器件;从电流控制到电压(电场)控制;从低频功率开关到高频功率开关;从单片元件到模块化、集成化;从小功率(<10kW)到大功率(>1MW)。新一代的器件带出来新一代的变流器,又推动了新一代交流调速装置的组成。

⊖ SCR为硅可控整流器,是1957年美国通用电气公司命名的,后来IEC将其正式定名为晶闸管,为方便起见,本书仍沿用SCR代表普通晶闸管。

表 1-1 列出了各种类型的电力电子器件。

表 1-1 各种类型的电力电子器件

类 型		代 号	名 称
不可控器件		D	整流二极管 (Diode)
半控器件		Th, SCR	普通晶闸管 (Thyristor), 硅可控整流器 (Silicon-controlled Rectifier)
全 控 器 件	电 流 控 制 器 件	BJT (曾用 GTR)	双极型晶体管 (Bipolar Transistor) 曾用名: 电力晶体管 (Giant Transistor)
		GTO	门极关断晶闸管 (Gate Turn-off Thyristor) ^①
	场 控 器 件	P-MOSFET	电力场效应晶体管 (Power MOS Field-effect Transistor)
		IGBT	绝缘栅双极晶体管 (Insulated-gate Bipolar Transistor)
		MCT	场控晶闸管 (MOS-controlled Thyristor)
		SIT	静电感应晶体管 (Static Induction Transistor)
		SITH	静电感应晶闸管 (Static Induction Thyristor)
	功率集成电路		PIC

① 门极关断晶闸管又称为 GTO 晶闸管, 为方便起见, 往往用“GTO”代表门极关断晶闸管。

1. 二极管与晶闸管 不可控的整流二极管主要用于交流电变直流电的整流器, 也用于直流电变交流电的逆变器中回馈与续流回路。一般的二极管容量可以做得比较大, 但反向恢复特性较慢, 适于充电、电镀、电焊等用途的整流电源。在逆变器的换相、续流等电路中则需要特制的快速恢复二极管。肖特基 (Schottky) 二极管具有低导通电压和短开关时间特性, 适用于开关电路和高频设备等。

晶闸管俗称可控硅整流管, 是构成直传动用可控整流装置和交流变压调速用交流调压装置等的主要器件, 当用于交流变频调速的逆变器时, 由于它不能控制关断, 须配置强迫换相电路, 使装置显得比较复杂。因此, 70 年代以后, 各种全控型器件随着交流调速节能的需要而兴起, 只有特大容量的逆变装置由于全

控器件的功率等级还不够而暂时保留着晶闸管的用武之地。

2. 全控器件 目前, 在交流变频调速中常用的全控器件有 P-MOSFET、BJT、IGBT 和 GTO, 其中, BJT 和 GTO 都是电流控制型的, 而 P-MOSFET 和 IGBT 是场控器件, 即电压控制器件。总的来说, 场控器件的驱动电路比电流控制器件简单得多, 因而场控器件更有发展前途。由于各种器件机理上的特点, 它们的开关功率与开关频率的工作范围是不同的, 图 1-1 绘出了不同器件允许开关功率 P_s 和允许开关频率 f_s 的大致关系。由图可见, P-MOSFET 的允许容量最小而允许频率最高, IGBT 和 BJT 次之, GTO 再次之, 晶闸管的允许容量最大而频率最低。图中点划线表示各器件的允许开关容量和频率大体上呈反比关系, 向上的箭头表示有关器件的允许容量仍在不断增长之中。

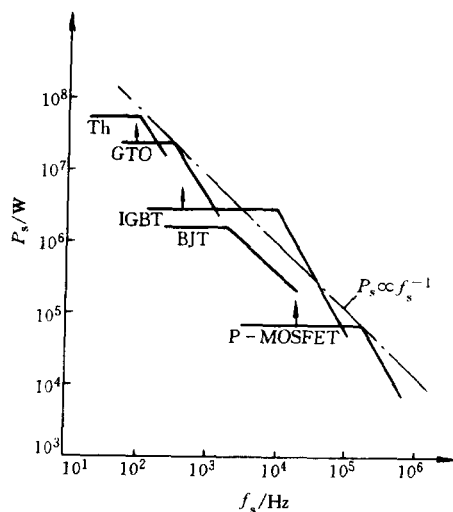


图 1-1 电力电子器件允许开关容量
与允许开关频率的关系

3. BJT 和 P-MOSFET BJT 和 P-MOSFET 分别是电流控制和电压控制的典型器件。P-MOSFET 的优点是驱动功率低、开关时间短、安全工作区宽, 几乎没有二次击穿效应, 因而可靠性

较高；其缺点是不饱和时漏极-源极通态电阻 $R_{DS(on)}$ 恒定，而且随着电压定额的提高而加大，并具有正的温度系数，因而导通压降大，只适于高频小功率的应用场合，在交流调速中的应用范围很窄。BJT 的很多特征恰好与 P-MOSFET 相反，其导通压降小而允许容量较大（和 P-MOSFET 相比），虽属电流控制型，但可以制成多级达林顿模块结构（见图 1-2），总电流增益 h_{FE} 值可达 10000，因而驱动电流也不大，在中、小容量交流调速变频器中获得了普遍应用。BJT 的开关时间比 P-MOSFET 长，用于变频器时的开关频率低于 5kHz，因而噪声较大。BJT 最主要的缺点是在开关期间可能发生局部过热的二次击穿，使器件损坏。^[5]

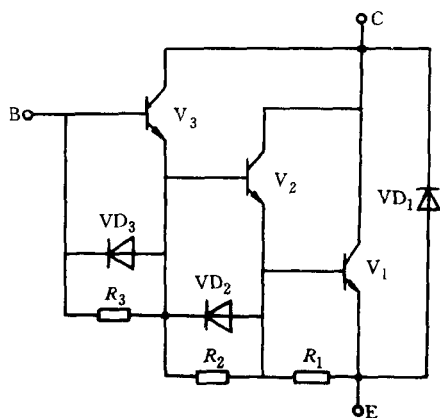


图 1-2 BJT 的三重达林顿复合模块

4. IGBT IGBT 是在 P-MOSFET 和 BJT 之间取长补短的 PNP 四层器件，它相当于一个用 MOSFET 驱动的双极型晶体管，其通用图形符号就体现出这一特征（见图 1-3），因而兼有 MOSFET 的高输入阻抗（驱动功率小）和 BJT 的低导通压降两方面的优点，而且安全工作区宽、开关时间短（与 BJT 相比），由 IGBT 组成的变频器噪声低，获得了“静音式”的美称。目前，IGBT 的容量已经覆盖了 BJT 的功率范围，加以驱动简单、

保护容易，而且成本已逐渐降低到接近 BJT 的水平，因此在中、小容量的装置中用 IGBT 取代 BJT 的趋势已成定局。世界各大电力电子器件公司的 IGBT 产品多采用模块的形式，有一单元（一个 IGBT 与一个续流二极管反向并联）、二单元（两个一单元串联构成一个桥臂）、四单元、六单元等模块，只有少量器件采用单片封装^[3]。国内西安电力电子技术研究所、北京电力电子新技术研究开发中心等也已有 IGBT 产品问世。

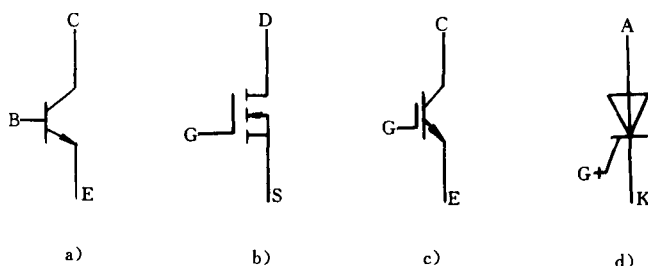


图 1-3 几种全控型电力电子器件的电气图形符号

a) BJT b) P-MOSFET c) IGBT d) GTO

在开发初期，通态压降 $U_{CE(sat)}$ 和下降时间 t_f 的矛盾是 IGBT 的主要问题。第一代 IGBT 器件，当 $t_f = 0.3\mu s$ 时 $U_{CE(sat)} = 4 \sim 5V$ ，若把 $U_{CE(sat)}$ 压低到 $2.5V$ ，则 t_f 将长达 $1.2\mu s$ ；现在各主要公司已把 IGBT 发展到第三、四代，可以做到 $U_{CE(sat)} = 1.5 \sim 2.0V$ ， $t_f = 0.2 \sim 0.3\mu s$ 。为了拓宽 IGBT 的应用范围，其额定电压和电流的等级也在不断提高，日本三菱公司已能提供 $2000V$ 、 $1200A$ 的器件，德国 eupec 公司更宣布推出了 $3300V$ 、 $1200A$ 的 IGBT。

5. GTO 对于数千 kVA 的大容量变频器，需要更大功率的全控器件，目前还得指望 GTO。交流传动机车、地铁车辆、大型轧钢机、矿井卷扬机等都使用着 GTO 交流变频调速装置。为了开发这样的国产设备，近年来，国产的 GTO 已经做到