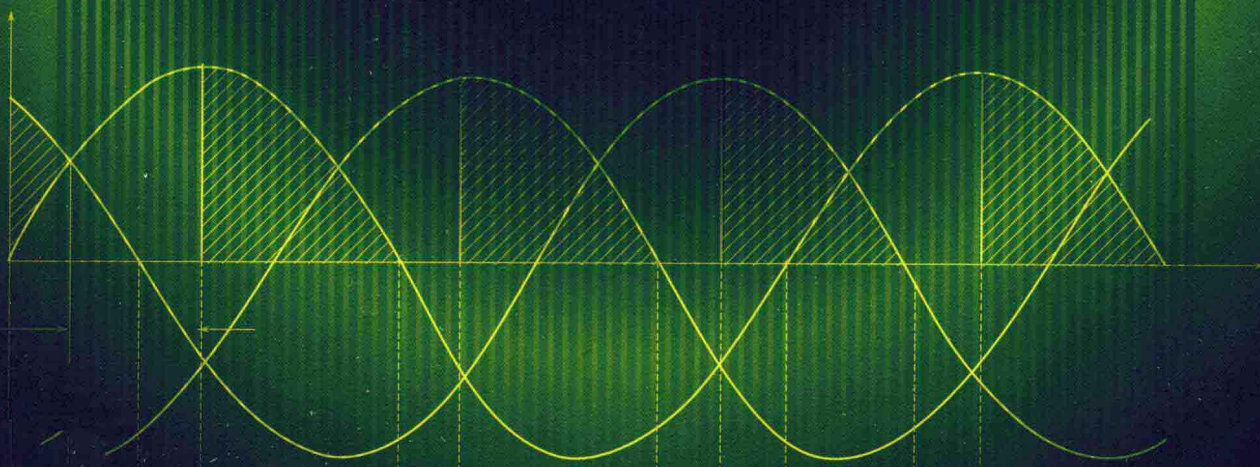


BIANPIN JISHU

变频技术

付兰芳 张 宪 主编



化学工业出版社

变频技术

付兰芳 张 宪 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

变频技术/付兰芳, 张宪主编. —北京: 化学工业出版社,
2011. 8
ISBN 978-7-122-11600-0

I. 变… II. ①付…②张… III. 变频调速 IV. TM921.51

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 122895 号

责任编辑: 刘 哲
责任校对: 战河红

文字编辑: 刘砚哲
装帧设计: 刘丽华

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装: 化学工业出版社印刷厂
787mm×1092mm 1/16 印张 11½ 字数 287 千字 2011 年 10 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888(传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 29.00 元

版权所有 违者必究

前 言

变频技术是将一种频率电源转换成另一种频率电源的技术，是通过改变频率的方式实现交流电控制的技术。自从 20 世纪 60 年代以来，伴随着电力电子技术、微电子技术及现代控制理论的发展，变频技术已广泛应用于工业及生活的各个领域，并对国民经济产生越来越大的影响。

本书主要介绍了变频技术及典型的变频器。编写时，力求简单明确，通俗易懂。通过本书的学习，读者可较全面地掌握变频技术的基本理论和基本分析方法，并了解变频器的特性和应用。

本书内容包括变频调速技术基础、变频技术基础电路、脉宽调制技术、变频器的构成与选定、变频器的控制方式、通用变频器、专用变频器、变频器的应用、变频器与电磁干扰等 9 部分。

本书可供工程技术人员、电气技师和广大维修电工使用，也可供大、中专院校相关专业的师生作参考书使用。

本书由付兰芳、张宪主编，李春卉、宋丽薇、赵慧敏、王冠群副主编，参加本书编写的还有沈虹、余妍、李振军、胡云朋、范毅军、刘卜源、李纪红、何惠英、陈影等，全书由付少波、李良洪、李志勇主审。

在编写本书时，引用了一些成功经验和资料，谨在此向有关杂志和资料的作者表示诚挚的谢意。同时，鉴于笔者实践经验和学识水平所限，书中不妥之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编 者
2011 年 5 月

目 录

第 1 章 变频调速技术基础	1
1.1 电动机的调速	1
1.1.1 三相异步电动机	1
1.1.2 异步电动机的调速	6
1.2 常用电力电子器件	7
1.2.1 晶闸管	7
1.2.2 门极可关断晶闸管	11
1.2.3 双极型功率晶体管 (GTR)	14
1.2.4 电力场效应晶体管	18
1.2.5 绝缘门极双极型晶体管	22
1.2.6 新型电力电子器件	27
第 2 章 变频技术基础电路	30
2.1 整流电路	30
2.1.1 单相整流电路	30
2.1.2 单相桥式整流电路	34
2.1.3 三相整流电路	37
2.2 斩波电路	45
2.2.1 基本斩波电路	45
2.2.2 复合斩波电路和多相多重斩波电路	49
2.3 逆变电路	52
2.3.1 逆变电路的工作原理和分类	52
2.3.2 电压型逆变电路	53
2.3.3 电流型逆变电路	57
2.3.4 复合型逆变电路	59
第 3 章 脉宽调制 (PWM) 技术	62
3.1 PWM 技术的基本原理	62
3.1.1 PWM 技术的基本原理	62
3.1.2 正弦波脉宽调制 (SPWM)	63
3.2 SPWM 的实现	63
3.2.1 调制法	63
3.2.2 规则采样法	66
3.3 SPWM 逆变器及其控制	66
3.3.1 SPWM 逆变器及其控制模式	66
3.3.2 PWM 跟踪控制法	68

3.3.3	PWM 专用芯片与微处理器	70
3.4	空间电压矢量 SVPWM	73
第 4 章	变频器的构成与选定	75
4.1	变频器的分类	75
4.2	变频器的主电路	76
4.2.1	交-直-交变频器	76
4.2.2	交-交变频器	81
4.3	变频器控制电路	87
4.3.1	变频器的主控电路	89
4.3.2	变频器的驱动、检测和保护电路	90
4.3.3	操作面板、电源及外部端子	91
4.4	变频器的选定	92
4.4.1	变频器型号的选择	92
4.4.2	变频器容量的选择	94
4.5	变频器的外围设备的选用	94
第 5 章	变频器的控制方式	99
5.1	压频 V/F 控制	99
5.1.1	V/F 控制的基本原理	99
5.1.2	恒转矩调速和恒功率调速	100
5.1.3	变压变频实现方式	101
5.1.4	数字控制 V/F 变压变频调速系统	102
5.2	转差频率 SF 控制	103
5.2.1	转差频率控制的基本原理	103
5.2.2	转差频率控制的变压变频调速系统	104
5.3	矢量 (VC) 控制	105
5.3.1	矢量控制的原理和应用范围	105
5.3.2	基于转差频率控制的矢量控制方式	107
5.3.3	无速度传感器的矢量控制方式	108
5.3.4	矢量控制的特点	109
5.4	直接转矩控制	110
5.4.1	直接转矩控制系统的原理和特点	110
5.4.2	直接转矩控制变频调速系统	113
5.4.3	控制方式的比较	114
第 6 章	通用变频器	117
6.1	通用变频器的标准规格指标	117
6.1.1	通用变频器的型号及公共技术规范	117
6.1.2	额定输入、输出参数	120
6.1.3	通用变频器控制特性	121

6.1.4	通用变频器转矩控制参数	123
6.1.5	运行参数	124
6.1.6	显示功能参数	124
6.1.7	通用变频器的制动转矩、防护及保护	124
6.2	通用变频器端子功能及接线	125
6.2.1	总接线图	125
6.2.2	变频器主电路端子	125
6.2.3	变频器控制电路的端子	125
6.3	常见通用变频器简介	129
6.3.1	西门子通用变频器	129
6.3.2	ABB通用变频器	134
6.3.3	台安通用变频器	139
6.3.4	富士通用变频器	141
第7章	专用变频器	143
7.1	电梯专用变频器	143
7.1.1	电梯拖动系统的基本构成和工作过程	143
7.1.2	电梯变频调速电路	145
7.1.3	富士 FRENIC-LIFT 电梯专用变频器	147
7.2	变频空调专用变频器	150
7.2.1	变频空调的特点	150
7.2.2	家用变频空调结构与控制原理	150
7.2.3	变频空调专用功率模块	151
7.3	水泵专用变频器	152
7.3.1	泵类负载的特性	152
7.3.2	泵类专用变频器选择要点	153
7.3.3	泵专用(二次方递减转矩负载用)变频器富士 FRENIC-VP 系列	154
7.3.4	变频恒压供水	155
7.4	注塑机专用变频器	156
7.4.1	注塑机工作原理	156
7.4.2	注塑机变频器控制应用特点及效果	157
7.4.3	注塑机专用变频器 SB61Z+	157
第8章	变频器的应用	160
8.1	变频器在起重机械中的应用	160
8.1.1	桥式起重机械	160
8.1.2	变频器在起重设备中的应用	160
8.1.3	变频器在起重机中的应用实例分析	165
8.2	变频器在风机控制中的应用	165
8.2.1	风机负载的机械特性	165
8.2.2	变频器的设置	166

8.2.3 风机变频调速系统电路组成	167
第9章 变频器与电磁干扰	169
9.1 电磁干扰源	169
9.1.1 变频器主要电磁干扰的类型	169
9.1.2 谐波和电磁辐射的主要危害	170
9.2 电磁干扰的途径与传导干扰的机理	170
9.2.1 电磁干扰的途径	170
9.2.2 PWM变频器的传导干扰机理	171
9.3 变频器的抗干扰措施	171
9.3.1 抑制干扰源	171
9.3.2 切断干扰途径	172
9.3.3 保护敏感电路	174
主要参考文献	175

第 1 章 变频调速技术基础

1.1 电动机的调速

1.1.1 三相异步电动机

在变频调速拖动系统中，使用的电动机大多数是三相异步电动机。为了说明变频技术的功能和应用，有必要先了解三相异步电动机的相关知识。

三相异步电动机结构如图 1-1 所示。其组成成为静止部分（定子）和运转部分（转子）。定子由定子铁芯、定子绕组和机座三部分组成，转子由转子铁芯、转子绕组和转轴、轴承三部分组成。

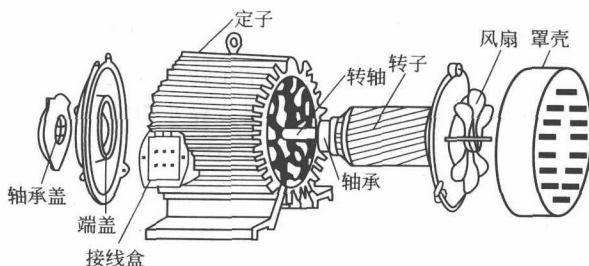


图 1-1 三相异步电动机结构分解图

电机工作过程

当三相异步电动机定子绕组通以三相交流电时，会产生旋转磁场，旋转磁场切割转子绕组导条，在转子中感应电势，产生电流，带电的导体在旋转的磁场中产生力矩，从而转子跟随旋转磁场转动。

(1) 旋转磁场与转差率

① 三相异步电动机的旋转磁场的转速（同步转速 n_1 ）

$$n_1 = 60f_1/p \quad (1-1)$$

式中 n_1 ——旋转磁场转速，又称为同步转速，r/min；

f_1 ——电源的频率，Hz；

p ——旋转磁场的磁极对数。

n_1 的旋转方向由电源的相序决定：若电源为顺相序，同步转速 n_1 为顺时针旋转方向，当将三相电源的任意两相对调（即电源为逆相序）， n_1 则为逆时针方向。

② 转差率 s 旋转磁场的同步转速和电动机转子转速之差与旋转磁场的同步转速之比称为转差率。

a. 转速差 Δn

$$\Delta n = n_1 - n$$

式中 n ——转子的转速；
 n_1 ——旋转磁场的转速。

b. 转差率 s

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (1-2)$$

s 是分析异步电动机运行状态的重要参数。启动瞬间, $n=0$, $s=1$; 额定转速运行时, s 很小, 约为 $0.02 \sim 0.06$; 空载运行时, n 略小于 n_1 , $s \approx 0$ 。

③ 转子转速 n

$$n = (1-s)60f_1/p \quad (1-3)$$

由式(1-3)可以看出, 转子转速 n 与电源频率 f_1 、磁极对数 p 、转差率 s 有关。调节电机转速, 可通过调节电源频率、磁极对数或转差率三种方式来实现。

变极调速就是通过改变电动机的极对数 p , 从而改变异步电动机的转速 n 来达到调速目的的。但电动机极对数是有限的, 故调速范围也有限, 且极对数为整数, 因此为有级调速, 级差较大, 不能获得平滑调速。

变转差调速是改变转差率, 常用绕线式电动机转子串电阻或异步电动机调压来实现调速, 可以实现异步电动机平滑调速, 但调速过程存在转差损耗, 系统效率低。

变频调速是通过平滑调节频率的变频电源, 调节异步电动机的转速, 不但能实现无级调

速, 而且根据负载的特性不同, 通过适当调节电压和频率之间的关系, 可使电动机始终工作在高效区, 并具有良好的动态特性。所以, 变频调速系统是理想的高效率、高效能的调速系统。

(2) 异步电动机的等效电路

异步电动机的转子能量是通过电磁感应而得到的。定子和转子之间在电路上没有任何联系, 其电路可用图 1-2 来

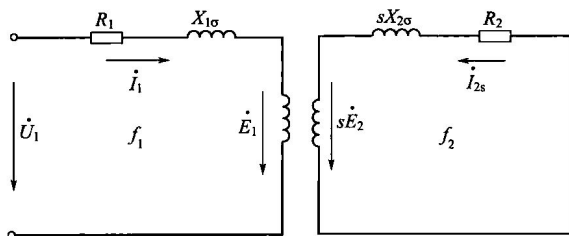


图 1-2 异步电动机等效电路

表示。

图中, \dot{U}_1 为定子的相电压; \dot{I}_1 为定子的相电流; R_1 、 $X_{1\sigma}$ 为定子每相绕组的电阻和漏抗 (漏磁感抗); $s\dot{E}_2$ 、 \dot{I}_{2s} 、 $sX_{2\sigma}$ 分别为转子电路中产生的电动势、电流、漏电抗; \dot{E}_1 为每相定子绕组的反电动势。

\dot{E}_1 是定子绕组切割旋转磁场而产生的, 其有效值可计算如下:

$$E_1 = 4.44 f_1 k_{N1} N_1 \Phi_M \quad (1-4)$$

式中 k_{N1} ——与绕组结构有关的常数;

N_1 ——每相定子绕组的匝数。

由电动机的基础知识可知: 转子回路的频率 $f_2 = sf_1$, 与转差率成正比, 所以转子回路中的各电量也都与转差率成正比。为了方便定量分析定子、转子之间的各种数量关系, 将定子、转子放在一个电路中。由于定子、转子回路的频率、绕组、匝数不同, 故必须进行折算。折算后, 异步电动机的等效电路如图 1-3 所示。

图中, R_m 为励磁电阻, 是表征异步电动机铁芯损耗的等效电阻; X_m 为励磁电抗, 是

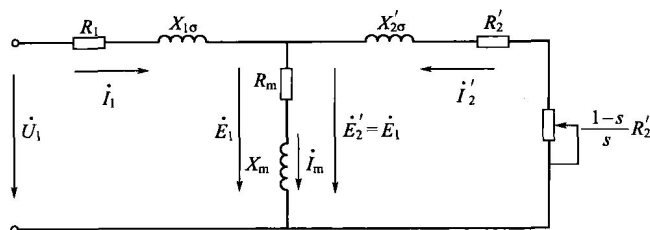


图 1-3 折算后的异步电动机等效电路

表征铁芯磁化能力的一个参数； \dot{I}_m 为励磁电流； $\frac{1-s}{s}R'_2$ 为机械负载的等效电阻，消耗的功率就相当于异步电动机输出的机械功率； $X'_{2\sigma}$ 、 R'_2 、 $\dot{E}'_2 = \dot{E}_1$ 、 \dot{I}'_2 为经过折算后的转子参数。

(3) 异步电动机的功率

从异步电动机的等效电路可以清楚地看到，三相异步电动机的功率传递过程是：由定子向电源吸取电功率，经电磁感应传递到转子，称为电磁功率，该功率使转子产生电磁转矩，从而转换成机械功率，带动负载旋转。

异步电动机在功率传递的过程中，不可避免地会有功率损耗，可用图 1-4 来表示三相异步电动机的功率流程。由于损耗的存在，在功率传递的过程中，要不断地扣除各种损耗，则负载得到的机械功率可用式(1-5)表示：

$$P_2 = P_M - (P_m + P_s) \quad (1-5)$$

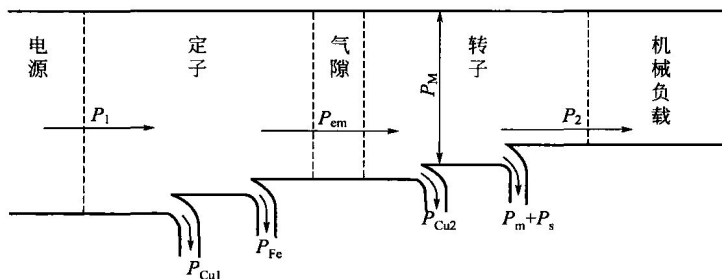


图 1-4 异步电动机功率流程图

P_1 为定子向电源吸取的电功率； P_{em} 为传递到转子的电磁功率； P_M 为电动机轴上的总机械功率； P_2 为传递给负载的机械功率； P_{Cu1} 、 P_{Cu2} 为定子、转子铜损，是在定、转子绕组上的损耗； P_{Fe} 为铁损，是在铁芯上的损耗； P_m 、 P_s 为机械损耗、附加损耗。

$$P_{em} = 3E'_2 I'_2 \cos\varphi_2 = 3I_2'^2 \frac{R'_2}{s} \quad (1-6)$$

由于不断地扣除损耗，负载得到的机械功率 P_2 比电动机向电源吸取电功率 P_1 要小。电动机的效率可用式(1-7)表示：

$$\eta = P_2 / P_1 \quad (1-7)$$

(4) 异步电动机的转矩方程和电磁转矩

① 转矩平衡方程 将式(1-5)两边同除以机械角速度 Ω ，可得到转子的转矩方程

$$\left. \begin{aligned} T_e &= T_0 + T_2 \\ T_e &= \frac{P_M}{\Omega} = \frac{P_{em}}{\Omega_s}, T_0 = \frac{P_s + P_m}{\Omega}, T_2 = \frac{P_2}{\Omega} \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

生产机械运行时常用转矩表示其负载的大小。在电力拖动系统中，存在着两个主要转矩，一个是生产机械的负载转矩 T_L ，一个是电动机的电磁转矩 T_e 。这两个转矩与转速之间的关系分别叫做负载的机械特性和电动机的机械特性。由于电动机和生产机械是紧密相连的，它们的机械特性必须适当配合，才能得到良好的工作状态。负载的机械特性又称负载特性，指折算到电动机轴上的负载转矩和转速之间的函数关系。主要可以分为三大类：恒转矩负载、恒功率负载、平方降转矩负载。下面就各类负载特性进行说明。

① 恒转矩负载 恒转矩负载是指那些负载转矩的大小仅仅取决于负载的轻重，而和转速大小无关的负载。必须注意：这里所说的转矩大小是否变化，是相对于转速变化而言的，不能和负载轻重变化时，转矩大小的变化相混淆。或者说，“恒转矩”负载的特点是：负载转矩的大小，仅仅取决于负载的轻重，而和转速大小无关。其特性如图 1-6 所示。

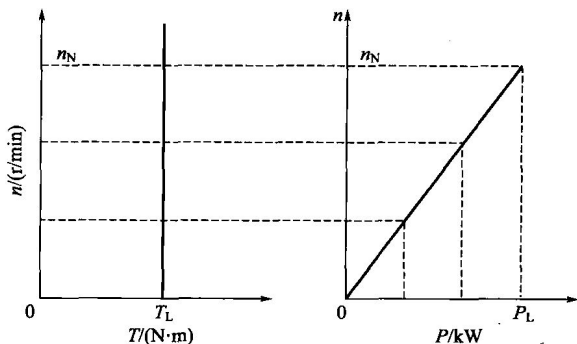


图 1-6 恒转矩负载特性曲线

对于传送带、搅拌机、挤压成形机等摩擦负载，吊车或升降机等重力负载，无论其速度变化与否，负载所需要的转矩基本上是一个定值。例如吊车吊起重物，

无论升降速度大小，其重量在地球吸引力的作用下而产生的重力是永远不变的，即为恒转矩负载。电动机的功率可用 $P = Tn/9550$ 表达，其中 T 为转矩， n 为转速，转速和转矩的积是功率，由此，恒转矩特点是负载消耗的能量与转速成正比。即 $T = \text{常数}$ ， $P \propto n$ 。

② 恒功率负载 恒功率负载是指负载转矩 T_L 的大小与转速 n 成反比，而其功率基本维持不变的负载。必须指出：这里所说的恒功率，是指在转速变化过程中，功率基本不变，不能和负载轻重的变化相混淆。即负载功率的大小与转速的高低无关，根据负载的机械功率 P (kW) 和转矩 T (N·m)、转速 n (r/s) 之间的关系，有 $T = 9550P/n$ ，负载阻转矩的大小与转速成反比，其转矩和功率特性曲线如图 1-7 所示。

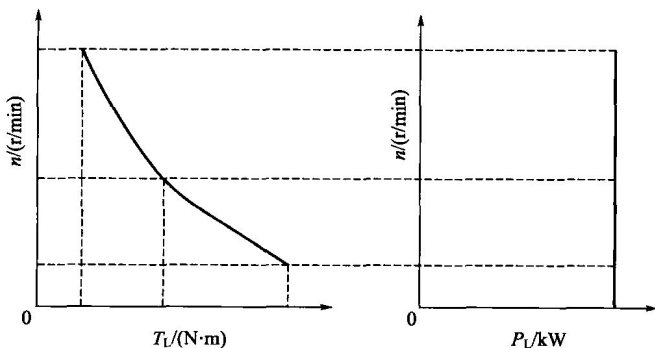


图 1-7 恒功率负载特性曲线

对于机床的主轴驱动，纸机、塑料胶片生产机械的中央传动部分、卷扬机等输出功率恒定，与转速无关，这样的负载特性称之为恒功率负载。例如薄膜在卷取过程中，要求被卷物的张力 F 必须保持恒定，其基本手段是使线速度 v 保持恒定。所以，在不同的转速下，负载的功率基本恒定。恒功率负载的特点即 $P = \text{常数}$ ， T 反比 n 。

③ 平方降转矩负载 负载的转矩 T 基本上与转速 n 的平方成正比。负载特性为一条抛物线。负载转矩 T 和功率 P 可用下式表示:

$$T = T_0 + K_T n^2$$

$$P = P_0 + K_P n^3$$

式中 T_0, P_0 ——分别为电动机轴上的转矩损耗和功率损耗;

K_T, K_P ——分别为二次方负载的转矩常数和功率常数。

对于风扇、风机、泵等流体机械,在低速时由于流体的流速低,所以负载只需很小的转矩,而随着电动机转速的增加,流速加快,所需转矩越来越大,其转矩大小以速度的平方增减,这样的负载特性称之为平方降转矩负载。在这种场合下,因为负载所消耗的能量正比于速度的三次方,所以通过变频调速控制流体机械的转速可以得到显著的节能效果。此种转矩负载如图 1-8 所示。

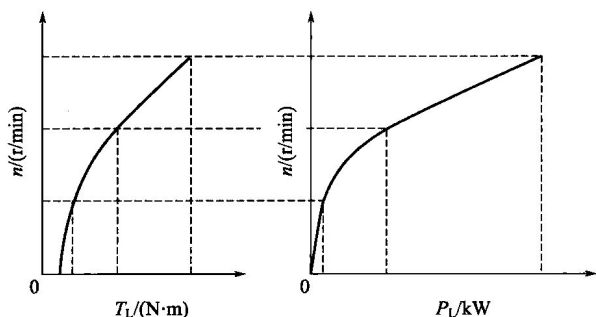


图 1-8 平方降转矩负载特性曲线

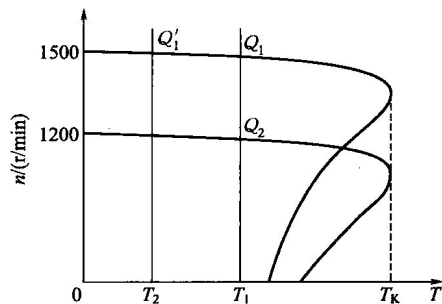


图 1-9 异步电动机调速

1.1.2 异步电动机的调速

(1) 调速与速度变化

① 调速 是在负载没有改变的情况下,根据生产过程需要,人为地强制性地改变拖动系统的转速。如将电源频率 50Hz 调至 30Hz,电动机的工作点从 Q_1 移至 Q_2 ,其转速也从 1460r/min 调至 1168r/min,如图 1-9 所示。可见调速时转速的改变是从不同的机械特性上得到的。将调速时得到的机械特性簇称为调速特性。

② 速度变化 速度变化是由于负载的变化而引起拖动系统的转速改变。如若原系统工作在 Q_1 点,此时负载转矩由 T_1 减小到 T_2 引起系统加速,最后稳定运行在 Q'_1 点上。可见速度改变时转速的变化是从同一根机械特性上得到的。

(2) 调速指标

电动机的调速性能常用调速范围、调速的平滑性、调速的经济型和调速后的工作特性等指标衡量。

① 调速范围 指电动机在额定负载时所能达到的最高转速 n_{Lmax} 与最低转速 n_{Lmin} 之比,即:

$$\alpha = \frac{n_{Lmax}}{n_{Lmin}} \quad (1-12)$$

不同的生产机械对调速范围的要求不同。一般变频器的最低工作频率可达到 0.5Hz,即在额定频率 50Hz 以下,调速范围为 100。

② 调速的平滑性 指相邻两级转速的接近程度。两挡转速差越小,调速的平滑性越好。在变频调速时,若给定为模拟信号,多数变频器输出频率的分辨率(相邻两级频率)为 0.05Hz。以 4 极电动机为例,则相邻两挡的转速差为 1.5r/min,其平滑性是很高的。

③ 调速的经济性 调速的经济性主要从两个方面来衡量：调速设备的投资和运行维修费用；电动机调速时引起的能量损耗。总的来说，以上两方面需考虑求得最佳的性能价格比。变频调速装置的价格一般较高，但其故障率较低，在很多的场合节能效果显著，因此和直流调速系统比较，变频调速系统的优势是很明显的。

④ 调速后工作特性 一种调速方案是否优良，调速后的工作特性能否满足负载的要求，常通过下面两点来衡量。

a. 静态特性。主要是指调速后机械特性的硬度。工程上常用静差度来表示：

$$\delta = \frac{n_0 - n_N}{n_0} \times 100\% \quad (1-13)$$

b. 动态特性。指过渡过程中的性能，如加减速过程是否快捷、平稳；遇到冲击性负载时，系统的转速能否迅速恢复等。对大多数的生产机械来说，希望调速后的机械特性能硬一些，负载变动时，速度变化较小，工作比较稳定。但也有的负载希望调速后的机械特性较软，如电梯，负载较重时，为安全起见，要求速度明显地慢下来。

1.2 常用电力电子器件

1.2.1 晶闸管

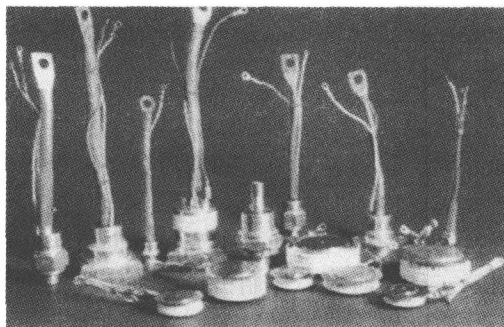
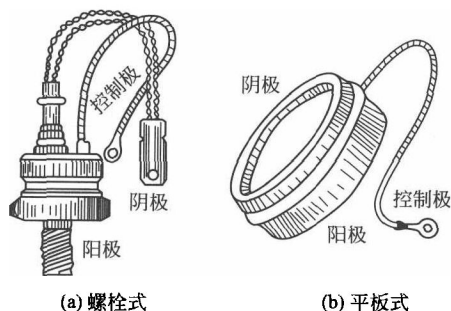
二极管整流电路在输入交流电压一定时，输出的直流电压也是一个固定值，一般不能任意调节。但在某些情况下，要求直流电压能够进行调节，即具有可控的特点。晶闸管(Thyristor)是晶体闸流管的简称，又称可控硅，常用SCR(Silicon Controlled Rectifier)表示。晶闸管自1957年问世以来，极大地发展了弱电对强电的控制技术，它不仅可以在低电压、小电流的条件下工作，而且可以在高电压(可达几千伏)、大电流(可达几千安)的条件下工作，所以它的出现使半导体器件从弱电领域进入了强电领域。

晶闸管可以承受的电压、电流在功率半导体中均为最高，具有价格便宜、工作可靠的优点。尽管其开关频率较低，但在大功率、低频电力电子装置中仍占主导地位。

晶闸管主要用来组成整流、逆变、斩波、交流调压、变频等变流装置和交流开关以及家用电器实用电路等，由于上述装置，特别是变流装置是静止型的，具有体积小、重量轻、效率高、动作迅速、寿命长等优点，并且无毒、无噪声、造价低、维修方便，因此近来在各个工业部门和民用领域都得到广泛的应用。

(1) 基本结构

晶闸管的种类很多，有普通型、双向型、可关断型和快速型等。普通型晶闸管的外形有螺栓式和平板式，如图1-10所示。它们都有3个电极：阳极A、阴极K、控制极



(c) 实物图

图 1-10 晶闸管的外形

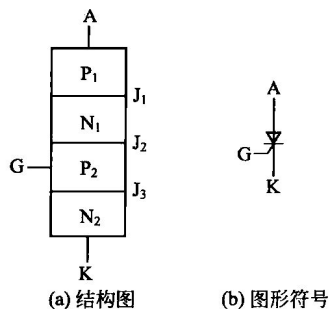


图 1-11 晶闸管的结构
及图形符号

G。螺栓式晶闸管有螺栓的一端是阳极，使用时可将螺栓固定在散热器上，另一端的粗引线是阴极，细引线是控制极。平板式晶闸管中间金属环的引出线是控制极，离控制极较远的端面是阳极，离控制极较近的端面是阴极，使用时可把晶闸管夹在两个散热器中间，散热效果好。

晶闸管的内部结构如图 1-11(a) 所示，它由 4 层半导体 P_1 、 N_1 、 P_2 、 N_2 重叠构成，从而形成 J_1 、 J_2 、 J_3 三个 PN 结。由端面 P_1 层半导体引出阳极 A，由端面 N_2 层半导体引出阴极 K，由中间 P_2 层半导体引出控制极 G。图 1-11(b) 为晶闸管的图形符号。

(2) 工作原理

为便于理解，下面以实验电路来说明晶闸管的工作原理。

① 晶闸管的反向阻断 将晶闸管的阴极接电源的正极，阳极接电源的负极，使晶闸管承受反向电压，如图 1-12(a) 所示，这时不管开关 S 闭合与否，灯泡不会发光。这说明晶闸管加反向电压时不导通，处于反向阻断状态。其原因是：在反向电压作用下，PN 结 J_1 、 J_3 均处于反向偏置，故晶闸管不导通。

② 晶闸管的正向阻断 在晶闸管的阳极和阴极之间加正向电压，开关 S 不闭合，如图 1-12(b) 所示，灯泡也不亮，晶闸管处于正向阻断状态。形成正向阻断的原因是：当晶闸管只加正向电压而控制极未加电压时，PN 结 J_2 处于反向偏置，故晶闸管也不会导通。

③ 晶闸管的导通 在晶闸管阳极加正向电压的同时，将开关 S 闭合，使控制极也加正向电压，如图 1-12(c) 所示，此时灯泡发出亮光，说明晶闸管处于导通状态。

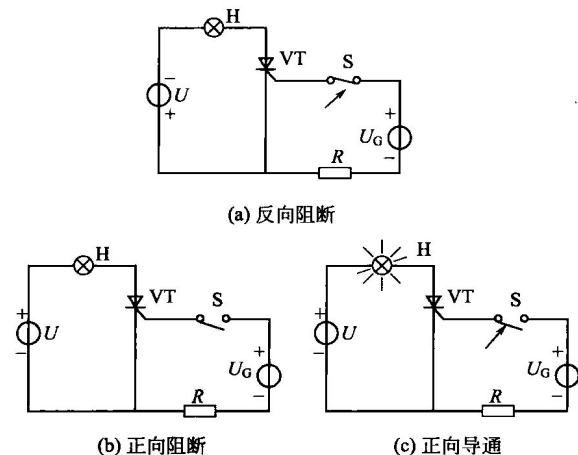


图 1-12 晶闸管工作原理实验电路

可见，晶闸管导通必须同时具备两个条件：晶闸管阳极与阴极之间加正向电压；控制极与阴极间也加正向电压。

晶闸管导通后，如果把开关 S 断开，灯泡仍然发光，即晶闸管仍处于导通状态，这说明晶闸管一旦导通后，控制极便失去了控制作用。因此，在实际应用中，控制极只需施加一定的正脉冲电压，便可触发晶闸管导通。

为了说明晶闸管导通的原理，可以把晶闸管看成是由 PNP 型和 NPN 型两个三极管连接而成，如图 1-13 所示。其中 N_1 、 P_2 为两管共有，即一个三极管的基极与另一个三极管的

集电极相连。阳极 A 相当 PNP 型管 VT_1 的发射极，阴极 K 相当于 NPN 型管 T_2 的发射极。

如果晶闸管阳极加正向电压，控制极也加正向电压，两个等效三极管的各个 PN 结的偏置均符合放大工作的条件，其电路如图 1-14 所示。在控制极正向电压 U_G 的作用下，产生的控制极电流 I_G 就是 VT_2 管的基极电流 I_{B2} ， VT_2 的集电极电流 $I_{C2} = \beta_2 I_{B2} = \beta_2 I_G$ 又是 VT_1 管的基极电流， VT_1 管的集电极电流 $I_{C1} = \beta_1 I_{C2} = \beta_1 \beta_2 I_G$ ，其中 β_1 、 β_2 分别是 VT_1 、 VT_2 的电流放大系数。 I_{C1} 又流入 VT_2 的基极再一次放大。反复放大在电路中形成强烈的正反馈，使两个三极管迅速达到饱和导通，晶闸管便进入了完全导通的状态。晶闸管导通后的工作状态可完全依靠管子本身的正反馈来维持，即使控制电流消失，晶闸管仍处于导通状态。

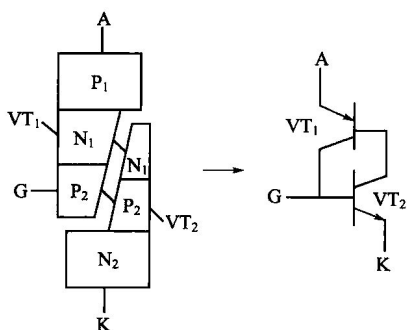


图 1-13 晶闸管的等效电路

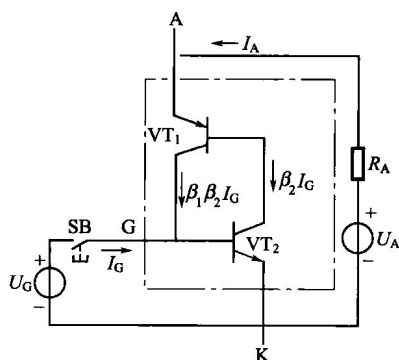


图 1-14 晶闸管导通原理图

晶闸管导通后，其正向压降很小，大约 1V 左右，电源电压几乎全部加在负载上。所以，晶闸管导通后电流的大小取决于外电路参数。

④ 晶闸管导通后的关断 晶闸管导通后，若将外电路的负载电阻加大，使晶闸管的阳极电流降低到不能维持正反馈的数值，则晶闸管便自行关断，恢复到阻断状态。对应于关断瞬间的阳极电流称为维持电流，用 I_H 表示，它是维持晶闸管导通的最小电流。

如果将晶闸管的阳极电压降低到零，或断开阳极电源，或在阳极与阴极间加反向电压，导通的晶闸管都能自行关断。

综上所述，晶闸管阻断的条件：阳极电流 I_A 小于维持电流 I_H ，或在阳极与阴极间加反向电压。

晶闸管是一个可控的单向导电开关。与二极管相比，它具有可控性，能正向阻断；与三极管相比，其差别在于晶闸管对控制电流没有放大作用。

(3) 伏安特性

晶闸管的伏安特性是阳极电流 I_A 与阳、阴极间电压 U_{AK} 的关系，其特性曲线如图 1-15 所示。

当 $U_{AK} > 0$ 、控制极未加电压，即 $I_G = 0$ 时，晶闸管处于正向阻断状态。由于管内 PN 结 J_2 处于反向偏置，所以只有很小的漏电流，对应于特性曲线的 OA 段。当 U_{AK} 增大到 A 点电压 U_{BO} 时，漏电流突然增

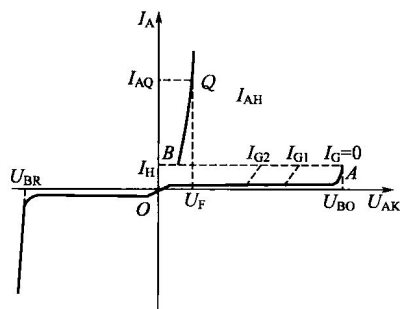


图 1-15 晶闸管的伏安特性