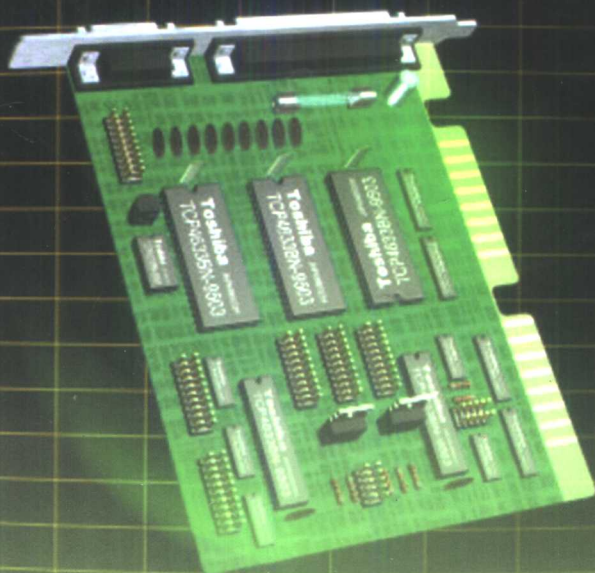


21世纪普通高等教育规划教材

电机自动控制系统

李宁 刘启新 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



011110001010101111

21 世纪普通高等教育规划教材

电机自动控制系统

李 宁 刘启新 编著



机械工业出版社

本书是参照全国工业自动化专业教材指导委员会有关“电力拖动自动控制系统”教学大纲编写的,主要讲授各类电动机自动控制系统的控制规律和设计方法以及有关的实验内容和方法,其特点是取材广泛,内容新颖。

本书可作为高等工科院校工业自动化、电机电器及其控制、电气技术、机电一体化等专业的教材。也可供从事电机、电力拖动自动控制及机电一体化产品开发、设计、研究的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电机自动控制系统/李宁,刘启新编著. —北京:机械工业出版社,2003.7

21世纪普通高等教育规划教材

ISBN 7-111-12340-9

I.电... II.①李...②刘... III.电机—自动控制系统—高等学校—教材 IV.TM301.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第044725号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:贡克勤 版式设计:冉晓华 责任校对:唐海燕

封面设计:张静 责任印制:付方敏

北京铭成印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2003年8月第1版第1次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·8.5印张·207千字

定价:13.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

前 言

19 世纪中叶, 人类发明了电动机, 一百多年来, 电动机作为重要的动力机械, 为人类社会的发展和进步起到了巨大的推动作用。

在人类进入 21 世纪的今天, 电气传动控制技术有了飞跃的发展, 电气传动控制装置在日新月异地更新换代。

电气传动控制技术以电力半导体变流器件的应用为基础, 以电动机为控制对象, 以自动控制理论为指导, 以电子技术和微处理器控制及计算机辅助设计为手段, 并且与检测技术和数据通信技术相结合, 构成一门具有相对独立性的科学技术。在生产设备和过程自动化中, 发挥着日益重要的作用。

电气传动控制技术是高等工科院校自动化类专业的主要专业方向之一。长期以来, “自动控制系统”一直是自动化类专业的主要专业课, 其主要内容是电气传动控制理论和技术。近年来, 随着技术的进步, 课程的内容在相应地变化。在传统的自动化专业, 倾向于称作“运动控制系统”。在属于自动化类的某些新兴专业, 如数控技术应用专业等, 改成了“伺服系统”。

电气传动控制技术的内容非常丰富, 新的内容还在不断地补充进来, 如何在有限的教学时间里把如此丰富的内容组织起来, 易于学生理解, 确实是比较困难的工作, 本书的作者长期从事电力电子和电机控制技术的教学和科研工作, 在多年的工作中, 一直在摸索并积累了一些心得和体会, 先后两次编写了讲义, 供本校学生使用。学院的领导和一些兄弟院校的老师们建议我们把讲义修改、出版, 并提出了宝贵的修改意见。在他们的建议下, 我们和机械工业出版社取得了联系, 得到了热情的支持和帮助, 于是就有了这本教材, 经过反复推敲, 决定书名为《电机自动控制系统》。

本书共九章, 第一章是绪论; 第二、三章介绍直流电动机控制系统; 第四、五章介绍三相异步电动机变频调速系统; 第六章介绍永磁同步电动机交流伺服系统; 第七章介绍无刷直流电动机及其控制系统; 第八章介绍位置控制系统; 第九章介绍相关的实验内容和实验方法。

本书第一、四、五、六、七、八、九章由李宁编写, 第二、三章由刘启新编写, 全书由李宁统稿。

本书可作为高等工科院校工业自动化、电机电器及其控制、电气技术、机电一体化等专业的教材。也可供从事电机、电力拖动自动控制及机电一体化产品开发、设计、研究的工程技术人员参考。

在这里, 感谢南京工程学院自动化系领导的一贯支持; 感谢机械工业出版社的宝贵帮助。

由于我们学识有限, 本书中难免有不妥和错误之处, 恳请读者指正。

作 者

目 录

前言		控制策略	72
第一章 绪论	1	第三节 速度反馈信号的检测和处理	76
第二章 直流电动机控制系统	4	第四节 伺服电动机转子初始位置的检测	80
第一节 直流电动机控制基础	4	第五节 交流伺服系统的电子齿轮功能	81
第二节 脉冲宽度调制(PWM)原理	6	第七章 三相永磁无刷直流电动机	
第三节 大功率开关管的特性和驱动		控制系统	85
控制电路	9	第一节 三相永磁无刷直流电动机的组成	
第四节 速度反馈单闭环直流电动机		结构和工作原理	85
控制系统	12	第二节 三相永磁无刷直流电动机的基本	
第三章 直流电动机转速电流双闭环		公式和数学模型	91
控制系统	29	第三节 三相永磁无刷直流电动机的转	
第一节 转速电流双闭环控制的基本		矩的波动	93
组成结构	29	第四节 三相永磁无刷直流电动机的	
第二节 双闭环调速系统的动态性能	31	驱动控制	95
第四章 异步电动机变频调速系统	37	第五节 无位置传感器的无刷直流电动机	
第一节 变频调速的基本原理	37	的驱动控制	102
第二节 变频器的基本结构	38	第六节 无刷直流电动机驱动控制的专用	
第三节 正弦波脉宽调制(SPWM)	41	芯片介绍	104
第四节 消除高次谐波的 PWM 控制	46	第八章 位置伺服系统	106
第五节 空间电压矢量 PWM 控制	48	第一节 位置伺服系统的基本性能指标	106
第六节 开环 VVVF 变频器	53	第二节 位置伺服系统的基本类型	109
第五章 三相异步电动机矢量控制		第三节 位置伺服系统的数学模型和	
系统	55	控制方法	111
第一节 三相异步电动机矢量控制的		第四节 位置伺服系统的软硬件设计	120
基本思想	55	第五节 位置伺服系统的设计实例	124
第二节 三相交流电动机中的坐标变换	56	第九章 电机自动控制系统实验	125
第三节 三相异步电动机的数学模型	59	第一节 直流电动机控制系统实验	125
第四节 磁场定向矢量控制系统	66	第二节 三相异步电动机变频调速实验	127
第六章 三相永磁同步伺服电动机的		第三节 三相异步电动机矢量控制实验	129
控制系统	71	第四节 无刷直流电动机控制系统实验	129
第一节 三相永磁同步伺服电动机及其		第五节 位置控制实验	129
数学模型	71	参考文献	131
第二节 三相永磁同步伺服电动机的			

第一章 绪 论

电动机自动控制系统广泛用于机械、钢铁、矿山、冶金、化工、石油、纺织、军工等行业，这些行业中绝大部分生产机械都采用电动机作原动机。有效地控制电动机，提高其运行性能，对国民经济具有十分重要的现实意义。

人类在 19 世纪中叶就已经发明了电动机，但真正意义上的电动机自动控制系统是在 20 世纪 30 年代出现的，当时的闸流管、引燃管，而后是磁放大器、磁饱和电抗器作为静止变流器，形成了第一代电动机传动控制系统。在二次世界大战中，自动控制理论得到了发展，这有力地促进了电动机传动控制系统理论体系的建立。但是，在很长的一段时间里，在较高控制性能的传动系统中，直流电动机一直占据主导地位，主要原因在于其控制简单、调速平滑、性能良好。然而，直流电动机结构上存在的机械换向器和电刷，它具有一些难以克服的固有缺点，那就是维护困难，寿命短，单机容量和最高电压都受到一定限制等等。而交流电动机(主要是异步电动机)。正好与直流电动机相反，它没有电刷，结构简单，维护容易，但是在当时的技术条件下，很难实现高性能的调速控制。在当时，交流电动机虽然在数量上占绝对的多数，但一般采用电源直接供电，直接拖动负载的方式，没有任何控制。

20 世纪 70 年代初的席卷全球的石油危机促进了交流调速技术的发展，因为当时人们发现，占电动机用电量一半以上的风机、泵类负载的拖动电动机工作在恒速状态，是靠阀门和挡板来调节流量或压力的，因而造成了大量的电能浪费。通过改变电动机转速的方法调节风量或流量，一般可节电 20% ~ 30%，于是在工业化国家，变频器出现了。可以说，交流传动的真正的发展和应用是从使用变频调速技术来改造风机、泵类负载而开始的。

1957 年，美国通用电气公司的 A. R. 约克制成了世界上第一只晶闸管(SCR)，这标志着电力电子时代的开始。从技术角度来说，正是晶闸管的应用才使得交流电动机变频调速成为可能。继晶闸管出现以后，又陆续推出了其他种类的器件，诸如门极可关断晶闸管(GTO)，电力功率晶体管(GTR)，电力场效应晶体管(电力 MOSFET)，绝缘栅双极型晶体管(IGBT)，静态感应晶体管(SIT)，静态感应晶闸管(SITH)，MOS 控制的晶闸管(MCT)等。在这个不断的发展过程中，器件的电压、电流定额以及其他电气特性均得到很大的改善。现代电动机自动控制技术的发展是以电力电子器件的发展和应用为基础的。

微处理器使电气传动控制技术再次发生巨大变革，使用微处理器实现数字化控制不仅可以简化控制硬件，而且可以加入人工智能对系统运行状态进行诊断，这对电气传动控制系统的发展产生了深远的影响。

到了 21 世纪的今天，电动机自动控制系统的技术水平更是提高到了一个新的高度，无论是应用的广泛程度，还是研究工作的深入程度都是过去人们想像不到的。当代电动机传动控制技术包括下面几个方面的内容。

1. 直流电动机传动控制系统

虽然近年来各种交流电动机及其控制系统在很多领域里已经取代了直流电动机及其控制系统，但是，也应该看到，交流电动机的控制理论和方法是在直流电动机的控制理论和方法

的基础上发展起来的,例如,异步电动机矢量控制理论,其实质就是把异步电动机模拟成为直流电动机,用直流电动机的控制思路去控制异步电动机。从理论的上来说,速度闭环反馈控制理论、无静差调速理论、转速电流双闭环控制理论和控制方法是所有电动机传动控制技术重要的理论基础,从教学的角度来看,这是不可或缺的。

2. 三相异步电动机控制系统

三相异步电动机是使用最广泛的一类电动机,其控制技术也是整个电气传动控制技术中一个最活跃的分支,内容十分广泛,传统的内容包括开环 VVVF 控制、基于电动机静态数学模型的转差频率闭环控制、基于矢量控制理论的转子磁场定向控制、转差频率矢量控制等。

近年来,人们在直接转矩控制理论和控制方法上取得了进展,成功应用于三相异步电动机的控制。

随着高性能微处理器在传动控制系统中的应用,提高了实时进行复杂数学模型计算的能力,人们在高性能的调速控制领域里已经实现了最初的“只用三条线控制异步电动机”的设想,无速度传感器矢量型异步电动机控制系统也已经成功应用于生产领域。

从广义上来说,异步电动机的上述各种控制方法都属于变频控制的范畴。实现变频控制的基础是脉宽调制(PWM)技术。人们提出的并且已经得到了应用的 PWM 方案有很多种,主要的有正弦波 PWM、三次谐波注入 PWM、空间矢量 PWM、最优 PWM、预测 PWM、随机 PWM 等,其中最为应用广泛和最为成熟的是正弦波 PWM (SPWM)和空间矢量 PWM (SVPWM)。

3. 无刷直流电动机控制系统

无刷直流电动机属于永磁同步电动机,相对与有刷直流电动机而言,相当于把有刷直流电动机中定子和转子互换了位置,从而可以去除了机械的电刷和换向器,代之以电子换向器。对与三相无刷直流电动机来说,电子换向器的主电路就是三相逆变器,在电动机的定子上装有转子位置传感器,以检测转子的位置,电子换向器在其控制下工作。

由于一般无刷直流电动机的气隙磁场呈现方波形状,所以也把无刷直流电动机称为方波电动机。

当前,无刷直流电动机最主要的应用领域包括各种电动车辆的驱动、自动控制门和窗的驱动、小型一体化水泵的驱动、自动武器的驱动等。

4. 永磁正弦波同步电动机控制系统

全数字交流伺服系统正在广泛应用于运动控制上,包括数控机床、机器人等各类精密机械的驱动等。从技术角度来看,当今主要的全数字交流伺服系统产品基本上都属于永磁正弦波同步电动机控制系统,从本质上说也属于自控式变频系统。这类系统一般采用数字信号处理器(DSP)完成矢量控制运算和 PWM 波形的相关运算。采用光电脉冲编码器或者旋转变压器作为位置和速度检测元件,能够实现对电动机的高精度的位置、速度和转矩的控制。

5. 开关磁阻电动机控制系统

开关磁阻电动机又称为电流调节步进电动机,其结构和感应式步进电动机相类似,只是定子磁极对数和转子磁极对数不相等。定子绕组可以是三相也可以是四相,由于电磁转矩仅由定转子磁阻产生,因此每相绕组只需一个功率器件,即可产生所需转矩。由于结构简单、转矩转动惯量比高,开关磁阻电动机可实现高速驱动,并非常适合运动控制系统。其主要缺点是有转矩脉动和噪声。目前已提出多种方法来解决这些问题。

尽管人们在电动机自动控制技术上已经取得了巨大的成就，但技术是永无止尽的，为了进一步提高电动机自动控制系统的性能，有关研究工作正围绕以下几个方面展开：

1. 采用新型电力电子器件和新型的变频器电路拓扑结构

电力电子器件的不断进步，为交流电动机控制系统的完善提供了物质保证，新的电力电子器件正向高压、大功率、高频化、组合化和智能化方向发展。智能功率模块(IPM)的广泛应用，使得新型电动机自动控制系统的体积更小，可靠性更高。

传统电力电子变频装置有电流型、电压型和交-交型三种。PWM 电压型变频器在中小功率电动机控制系统中占主导地位。目前国外正在加紧研制新型变频器，如矩阵式变频器，串、并联谐振式变频器等也开始进入实用阶段，预示着新一代电动机控制系统即将产生。

2. 应用现代控制理论

在过去，人们感到自动控制理论的研究已经走到了很远，但是在应用方面却远远地落到了后面。但近年来，现代控制理论在电动机控制系统的应用研究方面却出现了蓬勃发展的兴旺景象，这要归功于两方面原因：第一是高性能处理器的应用，使得复杂的运算得以实时完成。第二是在辨识、参数估值以及控制算法鲁棒性方面的理论和方法的成熟，使得应用现代控制理论能够取得更好的控制效果。

3. 采用总线技术

现代电动机自动控制系统在硬件结构上有朝总线化发展的趋势，总线化使得各种电动机的控制系统有可能采用相同的硬件结构。

4. 内含嵌入式操作系统的控制器正在进入电动机控制领域

当今是网络时代，信息化的电动机自动控制系统正在悄悄出现。这种控制系统采用嵌入式控制器，在嵌入式操作系统的软件平台上工作，控制系统自身就具有局域网甚至互联网的上网功能，这样就为远程监控和远程故障诊断及维护提供了方便。目前已经有人研制成功了基于开放式自由软件 Linux 操作系统的数字式交流伺服系统。

可以说，电动机控制技术已进入一个崭新的发展阶段，它以电力半导体变流器件的应用为基础，以电动机为控制对象，以自动控制理论为指导，以电子技术和微处理器控制及计算机辅助设计为手段，并且与检测技术和数据通讯技术相结合，构成一门具有相对独立性的科学技术。在生产设备和过程自动化中，发挥着日益重要的作用。

第二章 直流电动机控制系统

20 世纪 90 年代前的大约 50 年的时间里, 直流电动机几乎是唯一的一种能实现高性能拖动控制的电动机, 直流电动机的定子磁场和转子磁场相互独立并且正交, 从而为控制提供了方便, 使得电动机能够具有优良的起动、制动和调速性能。

尽管近年来直流电动机不断受到交流电动机及其他电动机的挑战, 但至今直流电动机仍然是大多数变速运动控制和闭环位置伺服控制最优先的选择。因为它具有良好的线性特性、优异的控制性能、高效率等优点。特别是在中小功率系统中, 常采用永磁直流电动机, 只需对电枢回路进行控制, 控制电路相对较简单。本章主要介绍单闭环直流电动机控制系统, 在中小功率的场合, 这是最常见的一种控制方式, 同时也是实现双闭环控制的基础。

第一节 直流电动机控制基础

他励直流电动机的控制基础是建立在直流电动机的机械特性之上的。机械特性就是在电枢电压 U 、励磁电流 I_f 、电枢回路电阻 R 都为常数时, 电动机产生的电磁转矩 T_{em} 与转速 n 之间的函数关系, 即 $n = f(T_{em})$ 。机械特性是电动机运行机械性能的具体表现, 反映系统的静态和动态运行性能。

需要指出的是, 机械特性方程式中的转矩是电磁转矩 T_{em} , 与电动机的输出转矩 T_2 相差一个空载转矩 T_0 , 当电动机工作在电动状态时:

$$T_{em} = T_2 + T_0$$

在工程实际中, 空载转矩很小, 所以一般可忽略不计。当励磁电流为常数时, 电磁转矩与电枢电流成正比, 因此可用转速特性方程式代替机械特性方程式。

一、直流电动机的转速特性方程

根据直流电动机的工作原理可知, 在直流电动机的电枢绕组加上直流电压, 电枢绕组中就有电流流过, 则电动机的转子就产生电磁转矩, 电磁转矩的大小为:

$$T_{em} = C_T I_a$$

式中 T_{em} ——电动机转子产生的电磁转矩, 单位为 $N \cdot m$;

C_T ——转矩系数, 单位为 $N \cdot m/A$;

I_a ——电动机的电枢电流, 单位为 A 。

当电动机旋转后, 转子导体在磁场中切割磁力线, 产生感应电动势, 电动势的大小为:

$$E_a = C_e n$$

式中 E_a ——转子反电动势, 单位为 V ;

C_e ——电动势系数, 单位为 $V \cdot \min/r$;

n ——转子旋转速度, 单位为 $r/\min$ 。

由图 2-1 可知, 直流电动机的电压平衡方程式为:

$$U = E_a + I_a R$$

式中 U ——转子绕组端电压, 单位为 V;

R ——转子绕组总电阻, 包括附加电阻, 单位为 Ω 。

由电压平衡方程和感应电动势公式, 就可得到直流电动机的机械特性方程式为:

$$n = \frac{U}{C_e} - \frac{RI_a}{C_e} \quad (2-1)$$

二、直流电动机的调速方法

由转速公式可知, 直流电动机的调速方法有两种:

①改变电枢电压; ②减弱每极磁通。

下面分别介绍两种调速方法的特点。

(一) 改变电枢电压调速

保持磁通 Φ 不变, 改变电动机的电枢电压 U , 理想空载转速 n_0 随电枢电压变化, 特性曲线的斜率不变, 因而得到一族平行线, 见图 2-2。该调速方法可以实现额定转速以下大范围平滑调速, 是目前直流调速系统采用的主要调速方案, 对于永磁直流伺服电动机, 这是唯一的调速方式。在调速过程中, 若保持电枢电流 I_a 不变, 则电动机的输出转矩 T_2 保持不变, 故改变电枢电压调速为恒转矩调速, 一般用于恒转矩负载的调速。

(二) 弱磁调速

保持电枢电压 U 不变, 减弱磁通 Φ , 理想空载转速 n_0 增加, 特性曲线的斜率也增加, 见图 2-3。弱磁调速对普通电动机的调速范围很小, 不能超过 2 倍; 特殊设计的调磁电动机, 其调速范围较大。一般只在额定转速以上调速时才采用此方案。若调速过程电枢电流 I_a 不变, 则电动机的输出功率 P_2 不变, 因此弱磁调速为恒功率调速, 一般用于恒功率负载。

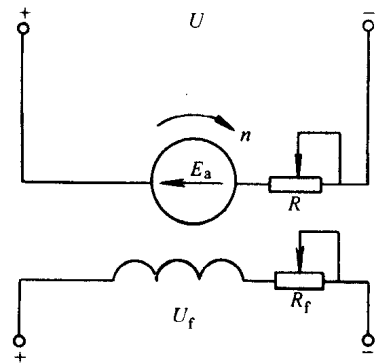


图 2-1 他励直流电动机电路原理图

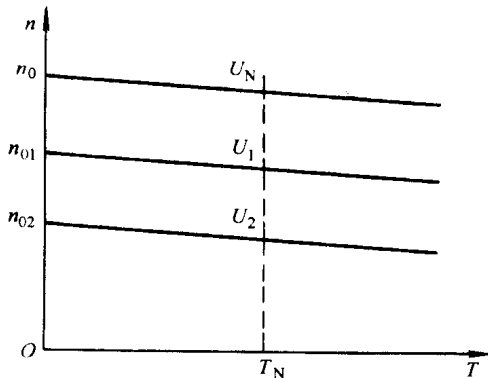


图 2-2 改变电枢电压的机械特性

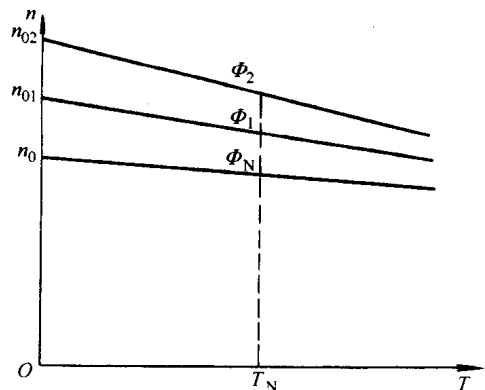


图 2-3 弱磁机械特性

实际调速过程中, 可将两种调速方法结合起来使用, 扩大调速范围。

对于普通系统的电动机, 可在电枢回路串电阻调速, 理想空载转速不变, 特性曲线斜率增加, 电枢电阻越大, 特性越软, 因此, 不能实现平滑调速, 并且调速过程能量损耗特别大, 目前的调速系统基本不用。

第二节 脉冲宽度调制(PWM)原理

调节电枢电压调速是直流调速系统中应用最广泛的一种调速方法。为了获得可调的直流电压,利用电力电子元件的可控性,采用脉宽调制(PWM)技术,将恒定的直流电压转变为脉动电压,实现直流电动机电枢电压平滑调节,构成直流脉宽调速系统。也就是将一恒定的直流电压斩切成幅值恒定、周期恒定而脉宽可变的脉冲序列,这个脉冲序列简称 PWM 电压波。当采用电力晶体管(GTR)作为可控电子元件时,就称为晶体管直流脉宽调速系统,即 GTR-PWM 直流调速系统。

一、T 形不可逆驱动器

图 2-4 是不可逆 PWM 变换器向电枢供电的主电路图。它是由两个晶体管 V_1 和 V_2 , 两个二极管 VD_1 和 VD_2 组成的, V_1 和 V_2 的输入信号 U_{b1} 和 U_{b2} 方向相反,保证 V_1 和 V_2 不同时导通。晶体管 V_1 是主控管,起调制作用; V_2 是辅助管,用于构成电动机的制动电路。图 2-4 上箭头方向表示电枢电流 I_a 的正向电流,这电路可以构成 4 条通路。

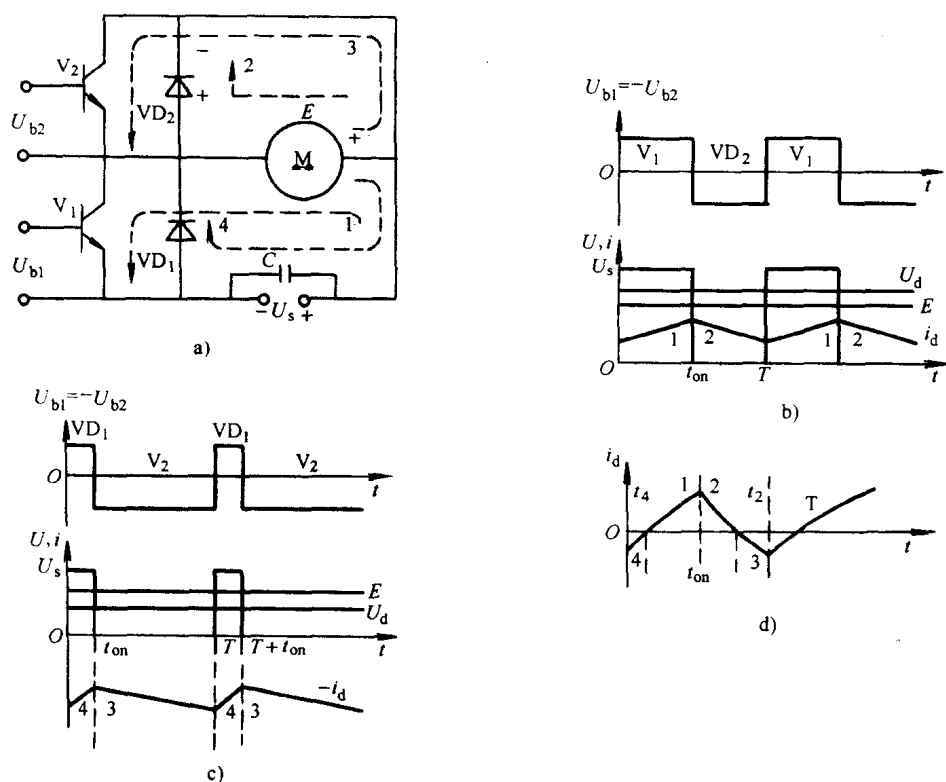


图 2-4 不可逆 PWM 变换器主电路

a) 原理图 b) 电动状态的电压、电流波形 c) 制动状态的电压、电流波形
d) 轻载状态的电流波形

1 号通路: $+U_s$ 经电枢和 V_1 到 $-U_s$, 电流方向为“+”, 电动机工作于电动状态。

2 号通路: 电枢经 VD_2 构成回路, 电流方向为“+”, 由电枢自成闭合回路, 电动机工作于能耗制动状态。

3号通路：电枢经 V_2 自成闭合回路，电动机工作于能耗制动状态，电流方向为“-”。

4号通路：电枢经 $+U_s \rightarrow -U_s$ 经过 VD_1 构成回路，电流为“-”方向，电动机工作于回馈制动状态。

1. 电动状态

当电动机在电动状态运行时，平均电流应为正值，见图 2-4b。在 $0 \leq t < t_{on}$ 期间， U_{b1} 为正， V_1 饱和导通； U_{b2} 为负， V_2 截止，电动机的平均电枢电压 $U_a > E_a$ ，电动机运行在电动状态，电流沿图 2-4a 中回路 1 流通。在 $t_{on} \leq t < T$ 期间， U_{b1} 和 U_{b2} 都变换极性， V_1 截止，关断加在电动机上的电源电压 U_s 。由于电枢电感的作用，维持电流 I_a 的方向不变，电枢电流沿回路 2 经二极管 VD_2 续流。虽然 U_{b2} 为正，但二极管 VD_2 的正向压降给 V_2 施加反压，使它不能导通。在电动状态时， V_2 不起作用。由于 V_1 在一个周期内具有开和关两种状态，电动机得到的平均端电压为：

$$U_a = \frac{t_{on}}{T} U_s = \rho U_s \quad (2-2)$$

式中 ρ ——PWM 电压的占空比。改变 ρ ($0 \leq \rho \leq 1$) 即可调速。

2. 制动状态

当电动机减速或停车时， V_1 的控制电压 U_{b1} 的正脉冲变窄，占空比减小， U_a 降低。但由于惯性，电动机的转速和反电动势来不及立刻变化， $E_a > U_a$ 。在 $t_{on} \leq t < T$ 期间，由于 U_{b2} 为正， V_2 导通， $E_a - U_a$ 产生反向电流，电枢电流沿图 2-4a 回路 3 流通，电动机进入能耗制动状态。在 $T \leq t < T + t_{on}$ (即 $0 \leq t < t_{on}$) 期间， V_2 截止，电枢电流沿回路 4 通过 VD_1 续流，对电源回馈制动。其电压电流波形见图 2-4c。

二、H 形可逆驱动器

可逆 PWM 变换器主电路的结构形式为 H 形。它由四个晶体管和四个续流二极管组成桥式电路。H 形变换器在控制上分双极性和单极性两种方式。

图 2-5 是 H 形驱动器原理图，四个晶体管的基极驱动电压分为两组。 V_1 和 V_4 同时导通和关断，其驱动电压 $U_{b1} = U_{b4}$ ； V_2 和 V_3 同时动作，其驱动电压 $U_{b2} = U_{b3} = -U_{b1}$ ，它们的波形见图 2-6。电枢电流 I_a 按图上箭头为正向电流，这电路可以构成 8 条通路。

1号通路： $+U_s$ 经 V_1 到电枢，经 V_4 到地，电流方向为“+”，电枢电流上升，电动机工作于电动状态。

2号通路：电枢经 VD_3 向 $+U_s$ 馈电，返至 VD_2 到电枢，电流方向为“+”，电动机工作于回馈制动状态，电枢电流减小。

3号通路：电枢反向电流经 VD_1 、 VD_4 向电源馈电，电流方向为“-”，电枢电流绝对值减小。

4号通路： U_s 反方向向电枢加电压， $+U_s$ 经 V_3 到电枢，经 V_2 到地，电流方向为“-”，电枢电流上升，电动机工作于反电动状态。

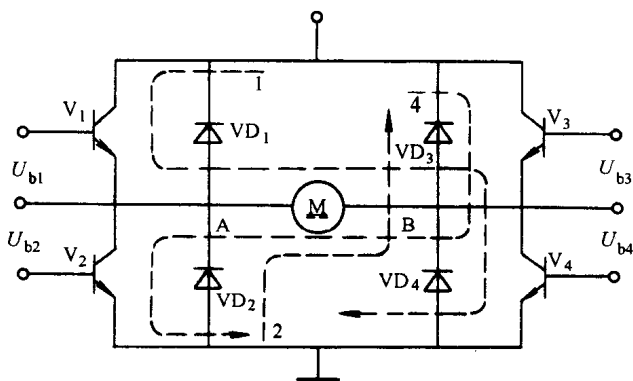


图 2-5 H 形 PWM 变换器

5号通路：电枢电流经 VD_3 和 V_1 续流，这时电机电枢两端的电压为零。

6号通路：电枢电流经 VD_4 和 V_2 续流，这时电机电枢两端的电压为零。

7号通路：电枢电流经 VD_1 和 V_3 续流，这时电机电枢两端的电压为零。

8号通路：电枢电流经 VD_2 和 V_4 续流，这时电机电枢两端的电压为零。

显然， $U_{b1} \sim U_{b4}$ 的逻辑关系，决定了 H 形回路的控制方式，下面讨论两种典型的控制方式。

1. 双极性 H 形可逆控制方式

在一个开关周期内，当 $0 \leq t < t_{on}$ 时， U_{b1} 和 U_{b4} 为正，晶体管 V_1 和 V_4 饱和导通；而 U_{b2} 和 U_{b3} 为负， V_2 和 V_3 截止。这时 U_s 加在电枢绕组两端， $U_a = U_s$ ， $U_a > E_a$ ，电枢电流沿回路 1 流通。在 $t_{on} \leq t < T$ 期间， U_{b1} 和 U_{b4} 变负， V_1 和 V_4 截止； U_{b2} 和 U_{b3} 变正，但 V_2 和 V_3 不能立即导通，因为在电枢电感释放储能的作用下，电枢电流沿回路 2 经二极管 VD_2 、 VD_3 续流，在 VD_2 、 VD_3 上的压降使 V_2 、 V_3 承受反压。这时电枢电压 $U_a = -U_s$ 。 U_a 在一个周期内正负相间，这是双极性 PWM 变换器的特征。其电压波形见图 2-6。

由于电枢电压 U_a 的正负变化，使电流波形存在两种情况，见图 2-6 中的 I_{a1} 和 I_{a2} 。 I_{a1} 相当于电动机负载较重的情况，这时平均负载电流大，在续流阶段电流仍维持正方向，电动机始终工作在电动状态； I_{a2} 相当于负载很轻的情况，平均电流小，在续流阶段电流很快衰减到零，于是 V_2 、 V_3 的两端失去电压，在负电源电压和反电动势的合成作用下 V_2 、 V_3 导通，电枢电流反向，沿回路 3 流通，电动机处于制动状态。与此相仿，在 $0 \leq t < t_{on}$ 期间，当负载很轻时，电流也有一个反向过程。

2. 单极性倍频可逆控制方式

以 PWM 驱动器供电的电动机中的电流，除直流分量外还有脉动分量，在上面的电路中脉动电流的频率与开关频率一致，脉动电流是有害的附加干扰，它通过电动机后，产生铁耗，使电动机发热。电流脉动分量随开关频率而变，开关频率越大，脉动电流分量越小，效率越高。可是开关频率受晶体管的开关速度限制，晶体管的开关功耗随开关频率增大而升高。

图 2-7 是单极性倍频 H 形驱动器的波形图。

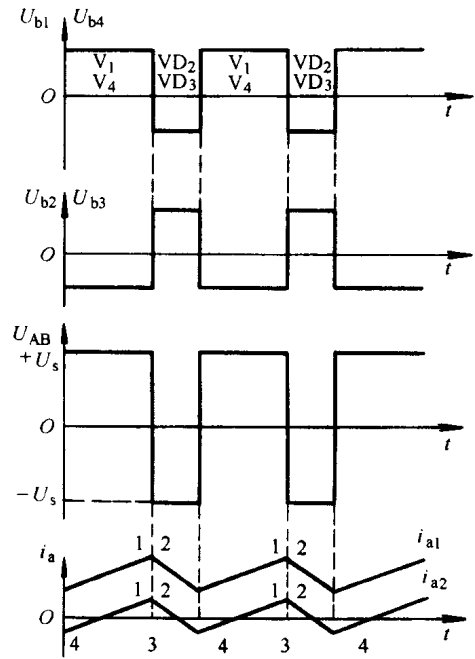


图 2-6 H 形 PWM 变换器电压和电流波形

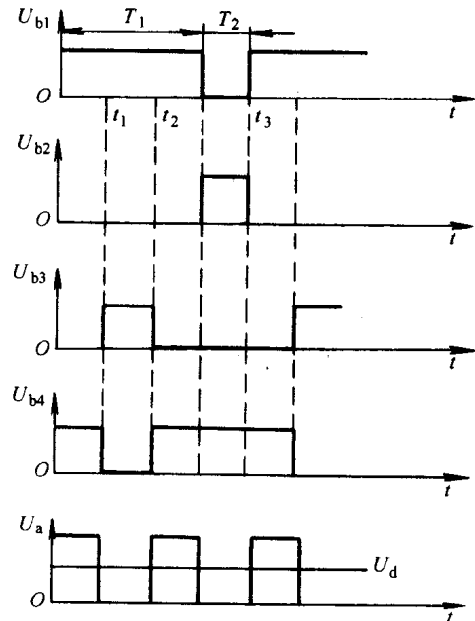


图 2-7 单极性倍频 H 形驱动器的波形

$U_{b1} \sim U_{b4}$ 是四个晶体管的控制电压, 而 U_a 是电枢电压。 $U_{b1} \sim U_{b4}$ 由倍频电路发出, 从图上可以看出, V_1 与 V_4 并不时时导通, 时间 t 从 0 到 t_1 , U_{b1} 与 U_{b4} 同为高电平, V_1 与 V_4 同时导通, $U_a = +U_s$ 。电流为“+”上升; 从 $t_1 \sim t_2$, U_{b1} 与 U_{b3} 同为高电平, 但此时 V_3 不能直接导通, 而是处于“假导通”状态, 原因在于, 此时电枢电流通过 VD_3 和 V_1 续流, 从而使 V_3 承受反向的集电极—发射极电压。从 $t_2 \sim t_3$, U_{b1} 与 U_{b4} 同为高电平, V_1 还导通, V_4 又导通, $U_a = +U_s$; 从 $t_3 \sim t_4$, U_{b2} 与 U_{b4} 同为高电平, 但 V_2 不能导通, 电枢反电动势使 VD_2 导通, 电流流经 V_4 和 VD_2 , 电流下降。一个周期内, 电流两次上升, 两次下降。在每一周期中共有四个脉冲。

第三节 大功率开关管的特性和驱动控制电路

电动机的调速控制技术是以大功率开关器件为基础的, 近 30 年来, 大功率开关器件在电机控制领域里的应用取得了长足的发展, 经历了晶闸管、电力功率晶体管(GTR)、电力场效应晶体管(MOSFET)、绝缘栅双极型晶体管(IGBT)等阶段。目前除了在特大功率的场合还使用晶闸管(包括可关断晶闸管), 在一般的调速控制系统中, 主要使用的是 GTR、MOSFET 和 IGBT, 下面分别加以介绍。

一、大功率开关管的特性

(一) 电力晶体管(GTR)的结构和特性

电力晶体管通常用 GTR 表示, GTR 是巨型晶体管 Giant Transistor 的缩写。电力晶体管广泛用于数百千瓦以下的低压电力电子装置中。

电力晶体管的结构和工作原理与小功率晶体管非常类似。电力晶体管由三层硅半导体、两个 PN 结构成, 具有 PNP 和 NPN 两种结构。但 NPN 比 PNP 晶体管性能优越, 因此大功率电力晶体管多用 NPN 结构。

晶体管电路有共发射极、共基极、共集电极三种接法, 电力晶体管常用共发射极接法。在共发射极接法时, 电力晶管的典型输出特性如图 2-8 所示。电力晶体管可分为三个工作区, 但一般工作在截止区和饱和区。

(1) 截止区 在截止区内, $I_b \leq 0$, $U_b \leq 0$, $U_{bc} < 0$, 集电极只有漏电流流过。

(2) 放大区 $I_b > 0$, $U_{be} > 0$, $U_{bc} < 0$, $I_c = \beta I_b$ 。

(3) 饱和区 $I_b > I_{ces}/\beta$, $U_{be} > 0$, $U_{bc} > 0$ 。 I_{ces} 是集电极饱和电流, 其值由外电路决定。饱和时集电极和发射极间的管压降 U_{ces} 很小, 因此电流很大, 损耗也不大。晶体管刚进入饱和区称为临界饱和, 如果再增大 I_b , 则进入过饱和, 可以降低 U_{ces} , 减少导通期间的损耗。

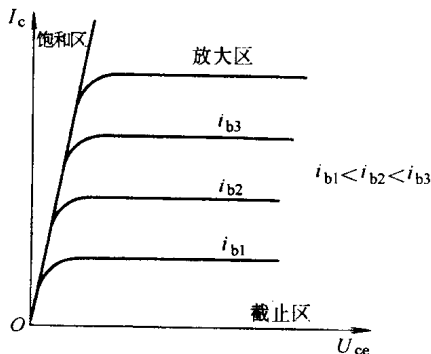


图 2-8 电力晶体管共发射极接法的输出特性

电力晶体管在电路中通常工作在频繁开关状态。了解其开关特性对正确使用电力晶体管非常重要。电力晶体管是用基极电流来控制集电极电流的。图 2-9 给出了基极电流波形和集电极电流波形的关系。从图中可以看出, 欲使电力晶体管关断, 通常给基极加一个负的电脉冲。但这时

集电极电流不能立即减小,而是要延时一段时间才开始减小,再逐渐降为0。要缩短晶体管的关断时间有两种方法,一是减小饱和深度,最好使晶体管导通时工作在临界饱和状态;二是增加基极负电流的幅值和负偏压,这样就可以加快关断速度。

电力晶体管的开关时间在几微秒以内,可用于工作频率较高的场合。

(二) 电力场效应晶体管(MOSFET)

小功率场效应晶体管有结型和绝缘栅型两种类型。电力场效应晶体管也有这两种类型,但通常主要指绝缘栅型中的 MOS 型。电力场效应晶体管是用栅极电压来控制漏极电流的,因此它的显著特点是驱动电路简单,驱动功率小,开关速度快,工作频率高,电力 MOSFET 的工作频率是所有电力电子器件中最高的。

电力场效应晶体管的图形符号见图 2-10a。图 2-10b 是大功率场效应晶体管的输出特性。输出特性分为三个区域:可调电阻区 I,饱和区 II,雪崩区 III。大功率场效应晶体管栅源间静态电阻极大,静态时栅极驱动电流几乎为 0,但由于栅极存在输入电容,栅极在开通和关断的动态驱动时仍需一定的驱动电流。不同功率的大功率场效应晶体管有不同的极间电容量,一般来说,开关频率越高,极间电容也越大,在开通和关断驱动时所需的驱动电流也越大。根据大功率场效应晶体管的型号,可以查得栅源极间电容和栅漏极间电容,估算栅极驱动电流值,以正确选择驱动元件。

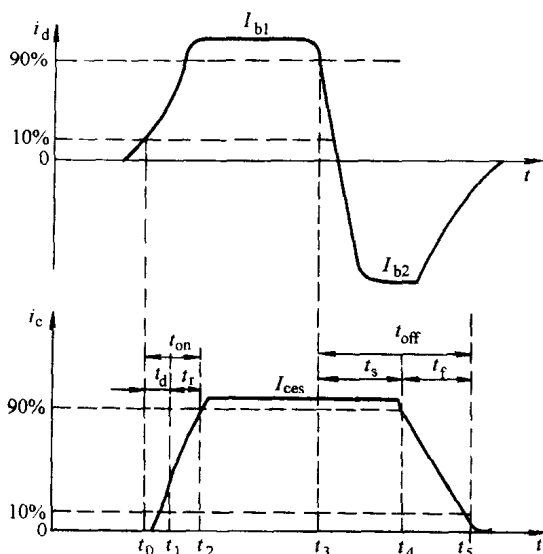


图 2-9 电力晶体管开关过程中 i_b 和 i_c 的波形

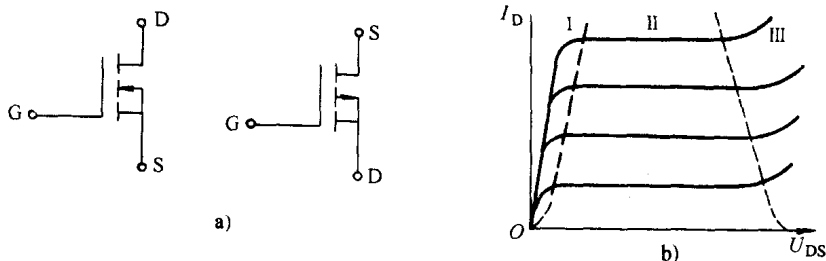


图 2-10 电力场效应晶体管的电气符号和输出特性

a) 电气符号 b) 输出特性

(三) 绝缘栅双极型晶体管(IGBT)

绝缘栅双极型晶体管 IGBT 是 Insulated Gate Bipolar Transistor 的缩写,是由双极型电力晶体管和电力场效应晶体管复合而成。其饱和压降低,载流密度大,但驱动电流较大。绝缘栅双极型晶体管驱动功率很小,开关速度快,但导通压降大,载流密度小。IGBT 综合了以上两种器件的优点,驱动功率小而饱和压降低。

IGBT 的简化等效电路见图 2-11a,它由一个电力场效应晶体管和一个 PNP 晶体管构成,给栅极施加正偏信号后,电力场效应晶体管导通,从而给 PNP 晶体管提供了基极电流使其

导通。给栅极施加反偏信号后，电力场效应晶体管关断，使 PNP 晶体管基极电流为 0 而截止。图 2-11b 是 IGBT 的电气符号，而 2-11c 是其输出特性。

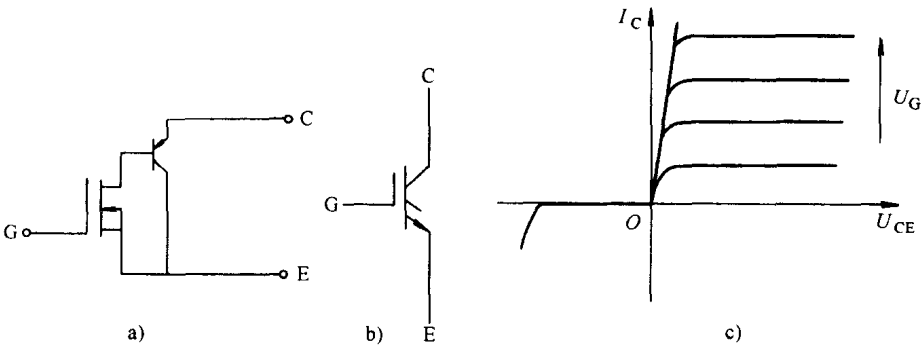


图 2-11 IGBT 的等效电路、电气符号和输出特性

a) 等效电路 b) 电气符号 c) 输出特性

IGBT 的开关速度低于电力场效应晶体管，但明显高于电力晶体管。IGBT 在关断时不需要负栅压来减少关断时间。IGBT 的开启电压约 3~4V，和电力场效应晶体管相当。IGBT 导通时的饱和压降比电力场效应晶体管低，和电力晶体管接近，饱和压降随栅极电压的增加而降低。IGBT 的电压、电流等级已接近电力晶体管的水平，也已实现了模块化，是目前使用的主要的功率开关器件。

二、大功率开关管的驱动控制电路

驱动电路是电力电子主电路和控制电路之间的接口，驱动电路的性能在很大程度上影响着整个系统的工作性能。采用性能良好的驱动电路，可使电力电子器件工作在较理想的开关状态，缩短开关时间，减少开关损耗，对系统可靠、安全工作有着重要的意义。

1. 光电隔离元件——光耦合器

电力电子主电路和控制电路之间在电位上没有公共点，因此主电路与控制电路之间通常采用光耦合器实现信号的传递与隔离。

光耦合器由发光二极管和光敏晶体管组成，封装在一个外壳内，有普通、高速和高电流三种类型，其电路形式和基本接法见图 2-12a、b、c。普通型光耦合器的输出特性与普通晶体管相似，只不过电流传输比 I_C/I_D 较小，一般 $I_C/I_D = 0.1 \sim 0.3$ 。高速型和高电流传输比

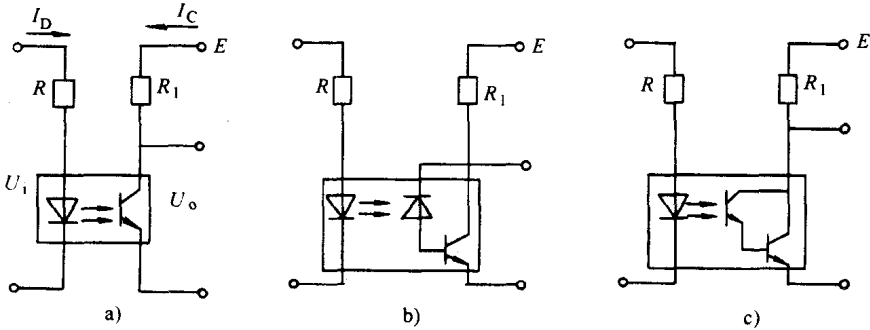


图 2-12 光耦合器的电路形式和基本接法

