



教育科学“十五”国家规划课题研究成果

运动控制系统

李 宁 陈 桂 编著



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

内容提要

本书是教育科学“十五”国家规划课题研究成果中电类系列教材之一。

本书共分9章,内容包括了交、直流电动机运动控制系统的主要内容,章节内容如下:绪论、电力电子器件、直流电动机速度控制系统、异步电动机变频调速系统、三相异步电动机矢量控制系统、三相永磁同步伺服电机控制系统、三相永磁无刷直流电动机控制系统、位置控制系统、电动机运动控制系统实验。

本书适用于应用型本科院校和高职高专院校自动化、电机、机电一体化、数控等专业的本科生作为教材使用,也可用作短期培训班的教材,同时可供有关技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

运动控制系统/李宁,陈桂编著. —北京:高等教育出版社,2004.7

ISBN 7-04-014563-4

I. 运... II. ①李... ②陈... III. ①交流电机 - 运动控制 - 控制系统 - 高等学校 - 教材 ②直流电机 - 运动控制 - 控制系统 - 高等学校 - 教材 IV. ①TM331.2 ②TM341.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 050919 号

策划编辑 李 慧 责任编辑 李 刚 封面设计 李卫青 责任绘图 朱 静
版式设计 王艳红 责任校对 胡晓琪 责任印制 杨 明

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100011
总 机 010-82028899

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 煤炭工业出版社印刷厂

开 本 787×960 1/16
印 张 16.5
字 数 300 000

版 次 2004年7月第1版
印 次 2004年7月第1次印刷
定 价 20.90元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

前 言

电气传动控制技术是高等工科学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,课程名称也发生了变化,目前普遍倾向于称为“运动控制系统”,内容包括了各种交、直流调速和位置控制。

现代电机运动控制技术是电机技术、电力电子技术、微电子技术、计算机控制技术、自动控制理论等多种学科的有机结合和应用。电机运动控制技术的内容非常丰富,随着技术的发展,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。本书的编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,积累了一些经验和心得。在高等教育出版社的热情关心下,从事了“运动控制系统”教学内容改革的专门的研究,本书就是多年的教学和科研工作以及一年多来的教改研究工作的结晶。

本书共九章,包括绪论、电力电子器件、直流电动机速度控制系统、异步电动机变频调速系统、三相异步电动机矢量控制系统、三相永磁同步伺服电机控制系统、三相永磁无刷直流电动机控制系统、位置控制系统、电动机运动控制系统实验。

本书的内容充实、新颖,理论联系实际,具有前沿性和先进性。

MATLAB 是一种优秀的仿真环境和语言, MATLAB 及其内含的 Simulink 和 SimPowerSystems 已经成为研究和分析电机运动控制系统的重要工具。本书的内容与 MATLAB 紧密结合,书中介绍的各种电机运动控制系统和控制算法都给出了相应的 MATLAB 仿真模型和仿真分析结果。

应该指出,“运动控制系统”的实践性环节的教学内容和教学方法的改革和创新相对于理论教学来说具有更大的难度,编者在多年的教学和科研实践中,对“运动控制系统”这门课程的实验和课程设计的内容进行了长期的思考和逐渐深入的改革,并结合国家的科技攻关课题和教学研究课题自行研制了 KR 系列电机运动控制系统的教学实验仪器设备,已经在本校和一些兄弟院校使用。本书结合 KR 系列电机运动控制系统实验设备,对相关的实验内容进行了比较深入的分析和讨论。

由于篇幅有限,不能将与本书的内容相关的一些资料,例如电子文档、程

序、电路图、仿真模型、数据、表格等都收入书中，这些资料将放入高等教育出版社的网站，读者如需要，可自行参考。

本书第一、四、五、六、七、九章由李宁完成，第二、三、八章由陈桂完成，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，感谢高等教育出版社的热情关心和帮助。

由于编者学识有限，本书中难免有不妥和错误之处，恳请读者指正。

编 者

目 录

第一章 绪论	1
第一节 电机运动控制技术的发展和现状	1
第二节 现代电机运动控制系统的主要类型	3
第三节 电机运动控制技术今后的发展趋势和动向	4
第二章 电力电子器件	6
第一节 电力晶体管 (Giant Transistor)	6
第二节 功率场效晶体管 (Power MOSFET)	16
第三节 绝缘门极双极晶体管 (IGBT)	27
第四节 功率集成电路及其他新型电力电子器件	37
习题与思考题	40
第三章 直流电动机速度控制系统	42
第一节 直流电动机控制基础	42
第二节 直流电动机的 PWM 调速原理	51
第三节 H 型 PWM 变换器控制方法	57
第四节 单闭环直流电动机速度控制系统的组成和结构	61
第五节 单闭环直流电动机速度控制系统的性能分析	64
第六节 转速电流双闭环直流电动机控制系统的组成和结构	83
第七节 转速电流双闭环直流电动机控制系统的性能分析	85
第八节 用 MATLAB 对直流电动机速度控制系统进行仿真分析	91
习题与思考题	94
第四章 异步电动机变频调速系统	96
第一节 变频调速的基本原理	96
第二节 变频器的基本结构	98
第三节 正弦波脉宽调制 (SPWM)	101
第四节 消除高次谐波的 PWM 控制	109
第五节 空间电压矢量 PWM 控制	111

第六节 SVPWM 与 SPWM 的关系	118
第七节 变频调速系统的仿真研究	121
第八节 变频器的应用和参数设置	129
习题与思考题	131
第五章 三相异步电动机矢量控制系统	132
第一节 三相异步电动机矢量控制的基本思想	132
第二节 三相交流电动机中的坐标变换	133
第三节 三相异步电动机的数学模型	137
第四节 磁场定向矢量控制系统	145
第五节 异步电动机矢量控制系统的仿真研究	152
习题与思考题	157
第六章 三相永磁同步伺服电机控制系统	158
第一节 三相永磁同步伺服电机及其数学模型	158
第二节 三相永磁同步伺服电机的控制策略	160
第三节 速度反馈信号的检测和处理	166
第四节 伺服电机转子初始位置的检测	170
第五节 交流伺服系统的电子齿轮功能	173
第六节 三相永磁同步电机控制系统的仿真研究	177
习题与思考题	180
第七章 三相永磁无刷直流电动机控制系统	181
第一节 三相永磁无刷直流电动机的组成结构和工作原理	181
第二节 三相永磁无刷直流电动机的基本公式和数学模型	190
第三节 三相永磁无刷直流电动机的转矩的波动	192
第四节 三相永磁无刷直流电动机的驱动控制	194
第五节 无位置传感器的无刷直流电动机的驱动控制	205
第六节 无刷直流电动机驱动控制的专用芯片介绍	207
习题与思考题	209
第八章 位置控制系统	210
第一节 位置控制系统的组成	210
第二节 位置控制系统的性能指标	213

第三节	位置给定信号的基本形式	216
第四节	位置控制系统的控制环节及控制算法	218
第五节	高分辨率的位置传感器及其信号处理器	222
第六节	位置控制系统的设计	226
第七节	用 MATLAB 对位置控制系统进行仿真研究	232
	习题与思考题	234
第九章	电动机运动控制系统实验	236
第一节	KR 系列电动机运动控制系统的简介	236
第二节	KR - DC 系列直流 PWM 双闭环调速实验系统及相关的实验	237
第三节	KR - VF 系列三相异步电动机变频调速实验系统及相关的实验	240
第四节	KR - LZH 三相异步电动机矢量控制实验系统及相关的实验	243
第五节	KR - BLDC 无刷直流电动机控制实验系统及相应的实验	247
第六节	KR - PMSM 交流伺服实验系统及相应的实验	249
	参考文献	253

第一章 绪 论

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,电机运动控制技术有了飞跃的发展,电气传动控制装置在日新异地更新换代。

电机运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。

电机运动控制技术是高等工科学学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,从而导致课程名称也发生了变化,目前普遍倾向于称为“运动控制系统”,内容包括了各种交、直流调速和位置控制。

第一节 电机运动控制技术的发展 and 现状

真正意义上的电机运动控制系统是在 20 世纪 30 年代出现的,当时是闸流管、引燃管,而后是磁放大器、磁饱和电抗器作为静止变流器,形成了第一代电机运动控制系统。在二次世界大战中,自动控制理论得到了发展,这有力地促进了电机运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,使它具有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，交流传动控制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 (SCR) 出现以后，又陆续推出了其他种类的器件，诸如控制极可关断晶闸管 (GTO)、双极型大功率晶体管 (GTR)、功率 MOS 场效应晶体管 (MOSFET)、绝缘栅极双极型晶体管 (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。现代电机运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。

1964 年，A. Schonung 和 H. Stemmler 提出把通信系统中的调制技术应用到电机控制当中，于是产生了脉冲宽度调制 (PWM) 技术，这是电机运动控制技术发展史上的又一座里程碑。到目前，PWM 技术已经发展演变出了许多不同的分支。当今绝大部分电机运动控制系统都采用了 PWM 技术。

20 世纪 70 年代初期，德国西门子公司的 F. Blaschke 等人提出了“感应电机定子电压的坐标变换原理”，这标志着矢量控制技术的诞生。如今在高性能的电机控制系统中，不仅是感应电机，也包括同步电机和永磁同步电机，都普遍采用了矢量控制技术。

微处理器使电机运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，这对电机运动控制系统的发展产生了深远的影响。如今，应用于电机运动控制的微处理器包括下面几种类型：

(1) 单片机

这是应用于电机运动控制的最基本的微处理器。就其组成而言，可以说一片单片机芯片就是一台计算机，大大缩小了控制器的体积，降低了成本，增强了功能。然而单片机对于大量的数据处理和浮点运算的能力有限，一般只能运用在比较简单的控制场合。

(2) 数字信号处理器 (DSP)

为了提高运算速度，在 20 世纪 80 年代出现了数字信号处理器，其中采取了一系列措施，包括集成硬件乘法器、利用锁相技术提高时钟频率、支持浮点运算等，以提高运算速度。近年来，DSP 器件已经把 PWM 发生器、A/D 转换器等都集成于一个芯片上，成为一种高速的单片机，特别适合于电动机运动控制系统的嵌入式控制。

(3) 精简指令集计算机 (Reduced Instruction Set Computer, RISC)

RISC 是将控制器、PWM、A/D 等归纳为一块芯片, 是计算机体系结构上的一次突破。在 RISC 出现以前, 微处理器的速度的提高往往只靠改进 VLSI 的工艺来提高时钟频率和微处理器的速度。RISC 则从经常使用的基本指令的执行效率上入手, 依靠硬件和软件的优化组合来提高速度。目前的 RISC 的速度已经达到 1 000MIPS (Mega Instructions per second)。

第二节 现代电机运动控制系统的主要类型

到了 21 世纪的今天, 电机运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. 直流电机运动控制系统

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机运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, 从而可以去除机械的电刷和换向器, 代之以电子换向器。对于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。

第三节 电机运动控制技术今后的发展趋势和动向

尽管人们在电机运动控制技术上已经取得了巨大的成就, 但技术是永无止境的, 为了进一步提高电机运动控制系统的性能, 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, 使得新型电机运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运动控制系统即将产生。

2. 应用现代控制理论和控制技术

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。

异步电动机矢量控制系统已经成功应用多年,然而由于参数估计的不准确和参数变化的影响造成的转子磁场坐标偏移的问题,至今并没有真正解决,参数辨识以及针对参数变化的自适应控制是当今研究的一个热点。

近几年来,人工神经网络等智能控制方法开始引入到电机运动控制系统中,并成为了一个新的研究发展方向。

3. 采用总线技术

现代电机运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,信息化的电机运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 Linux 操作系统的数字式交流伺服系统。

可以说,电动机运动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。

第二章 电力电子器件

现代电力电子技术是利用电力电子器件对电能进行变换、控制、开关的技术。现代电力电子技术始于 20 世纪 70 年代,在开关技术的基础上,经过近三十年的飞速发展,现已以大容量、高电压、高频率、高效率、高性能、重量轻、小尺寸的面貌出现在各个工业领域和生活、办公设备中,发挥着巨大的作用。

20 世纪 70 年代,电力电子技术还是以晶闸管为主,而到 80 年代已发展成为自关断器件的时代,以 GTR、GTO 为代表的开关频率达到 $1 \sim 10 \text{ kHz}$, MOSFET、IGBT 等器件相继达到实用化,开关频率跃到十千赫~几百千赫,同时,为适应小型、低成本和市场竞争的需要,电力电子技术向智能化发展了。当前主要表现为电力电子装置采用了两种智能化器件:一种是单片功率智能化器件 (SPIC),即将功率半导体器件和保护、诊断、控制等电路集成在一个硅片上;另一种是智能模块 (IPM),将功率半导体器件、各种保护电路、控制电路、诊断电路等封装成模块。

第一节 电力晶体管 (Giant Transistor)

电力晶体管是一种双极型大功率高压晶体管,由于其功率很大,故又称为巨型晶体管,简称 GTR。其主要特点是:具有自关断能力、开关时间短、安全工作区宽。它不仅适用于高频领域,而且还能够使变流装置大为简化,可靠性提高。

一、原理与结构

电力晶体管主要用作功率开关,工作于高电压大电流的场合,对它的要求主要是足够的容量(高电压、大电流)、适当的电流增益、较高的工作速度和较低的功率损耗等。然而随着电流、电压容量的增加,基区电导调制效应和基区扩展效应将使管子的电流增益下降,发射极电流趋肤(集肤)效应则使电流分布不均,出现电流的局部集中导致热损坏。为了削弱上述三种物理效应的影响,必须在结构上采取适当的措施以保证适合大功率应用的需要。目前常采用的 GTR 器件有单管、达林顿管和 GTR 模块三大系列。

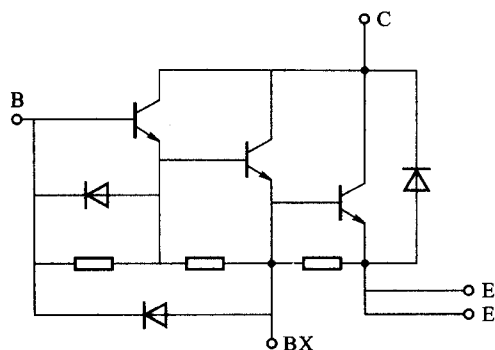


图 2-3 GTR 模块内部电路

二、特性与参数

1. 静态特性与参数

在工程应用中，关心的是 GTR 的输出特性、饱和压降、电流增益以及最大额定值。

(1) 输出特性

GTR 的输出特性是指其共发射极接法的集电极电压 - 电流特性，如图 2-4 所示。GTR 作为电力开关使用时只有两种稳定工作状态，即断态和通态。但从输出特性可以看出电力晶体管的工作状态分为四个区域：截止区、线性区、临界饱和区和深饱和区。截止区对应着 GTR 的关断状态，基极电流 I_B 为零，发射结和集电结均处于反向偏置状态；线性区又称放大区，集电极电流 I_C 与基极电流 I_B 间呈线性关系，集电结处于反向偏置而发射结改为正向偏置状态，对

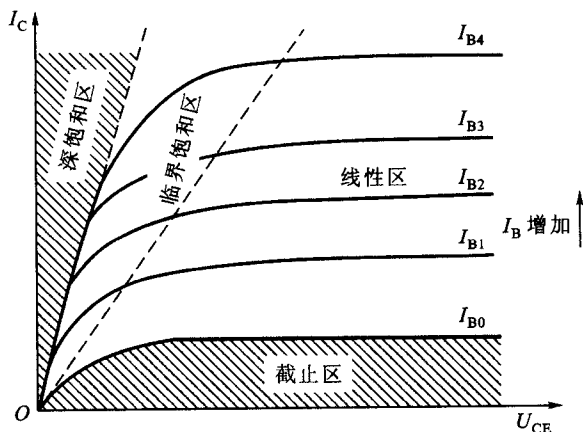


图 2-4 GTR 的输出特性曲线

于工作在开关状态的 GTR 来说,应当尽量避免工作于线性区;深饱和区类似于开关处于接通的情况,在此区域,电流增益与导通电压达到最小值,发射结和集电结均处于正偏置状态;临界饱和区是线性区与深饱和区之间的一段区域,集电极电流 I_c 与基极电流 I_b 间不再呈线性关系,但仍保持着集电结反向偏置而发射结为正向偏置状态。

用 U_{CES} 表示处于深饱和区的 GTR 集电极电压,并称其为饱和压降。此时的基射极电压称为基极正向压降,用 U_{BES} 表示,它们是 GTR 作为开关管应用时很重要的两个参数,直接影响到器件的功耗大小。达林顿结构的 GTR 由于其驱动管的输出并联在输出管的集电结上,使它不可能出现正向偏置的情况,因而也就不可能进入深饱和区,所以饱和压降也就比较大。

(2) 电流增益 β

电流增益 β 是指共射极电路中 GTR 集电极电流 I_c 与基极电流 I_b 的比值,它表示 GTR 的电流放大能力。 β 根据集电极电流 I_c 、管压降 U_{CE} 、管壳温度 T_c 的不同而异。图 2-5 给出了在不同壳温和不同集电极通态电压时共射极电流增益 β 与集电极电流 I_c 的关系曲线 β_1 、 β_2 、 β_3 、 β_4 , 它们分别表示在 $U_{CE} = 2\text{ V}$ 、 $T_c = 25\text{ }^\circ\text{C}$; $U_{CE} = 400\text{ V}$ 、 $T_c = 25\text{ }^\circ\text{C}$; $U_{CE} = 2\text{ V}$ 、 $T_c = 125\text{ }^\circ\text{C}$; $U_{CE} = -2\text{ V}$ 、 $T_c = 25\text{ }^\circ\text{C}$; 从该曲线中可以了解到 β 并不是一个固定的常数,它随着管壳温度 T_c 、集电极电流 I_c 、管压降 U_{CE} 的变化而变化。而且这一变化的规律是:在小电流条件下, β 随着集电极电流 I_c 增大而增大,当 I_c 很大时,则 β 将迅速减小;在壳温和集电极电流都相同的条件下, β 随着集电极电压 U_{CE} 的增加而增加。

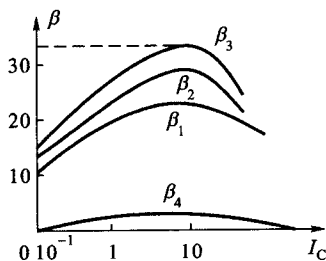


图 2-5 不同温度和不同 U_{CE} 时的 $\beta - I_c$ 关系曲线

(3) 最大额定值

最大额定值是指允许施加于 GTR 上的电压、电流、耗散功率以及结温等的极限数值。它们是由 GTR 的材料性能、结构方式、设计水平和制造工艺等因素所决定的,在使用中绝对不允许超过这些极限参数,它们分别是:

① 最高工作电压 $U_{(BR)CBO}$ 、 $U_{(BR)CEO}$ 、 $U_{(BR)EBO}$ 。如果 GTR 的反向电压超过此规定值,会发生击穿,而 GTR 的击穿电压 $U_{(BR)CBO}$ 、 $U_{(BR)CEO}$ 、 $U_{(BR)EBO}$ 不仅

和管子本身的特性有关，还取决于外部电路的接法。

② 集电极最大允许电流 I_{CM} 是指 GTR 稳定工作时所允许的最大集电极电流。该极限值为了保证 GTR 工作正常不致引起大电流效应，避免造成晶体管的电性能变差，甚至使管子破坏。

③ 最高工作结温 T_{JM} 。指 GTR 能正常工作的 PN 结的最高温度。

④ 最大耗散功率 P_{CM} 。表示 GTR 在最高允许结温时所对应的耗散功率，它受结温的限制，其值主要由集电极工作电压和集电极电流的乘积决定。这些能量将转化成热能使 GTR 发热。

作为实例，下面给出 3DF20 型 GTR 的各最大额定值参数， $U_{(BR)CBO}$ 为 450 V、 $U_{(BR)CEO}$ 为 300 V、 $U_{(BR)EBO}$ 为 6 V， I_{CEO} 为 1 mA， U_{CES} 为 2.3 V， P_{CM} 为 200 W ($T_c = 75^\circ\text{C}$)， I_c 为 20 A， T_j 为 $-55^\circ\text{C} \sim 175^\circ\text{C}$ 。

2. 动态特性与参数

动态特性是描述 GTR 开关过程的瞬态性能，又称开关特性。下面以 GTR 管共发射极电路为例进行分析，测试电路如图 2-6 所示。当基极加以图 2-7 (a) 所示的基极驱动电流波形时，集电极输出电流波形如图 2-7 (b) 所示。整个过程分为开通过程、导通状态、关断过程、阻断状态四个不同阶段。GTR 由截止到饱和的过程称为开通过程，其对应的开通时间 t_{on} 包括延迟时间 t_d 和上升时间 t_r ；GTR 由饱和到截止的过程称为关断过程，其对应的关断时间 t_{off} 包括存储时间 t_s 和下降时间 t_f 。

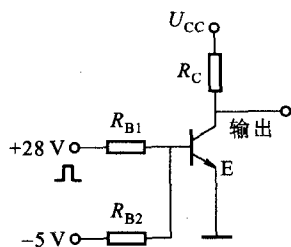


图 2-6 开关特性测试电路

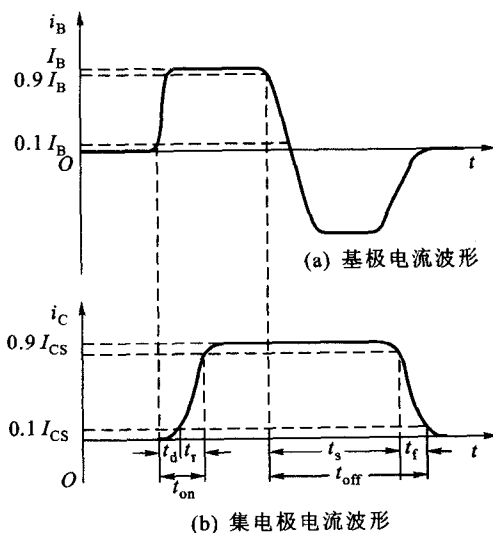


图 2-7 开关电流波形