

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月异地更新换代。

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大学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 $1 \sim 10$ 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反压晶体管，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。

1. 单管 GTR

单管 GTR 通常采用 NPN 三重扩散台面型结构，其优点是结面积较大、电流分布均匀、易于提高耐压能力、易于耗散热量；缺点是电流增益低。

2. 达林顿 GTR

达林顿管结构是提高电流增益的有效方式，它由两个或多个晶体管复合而成，以达到用最少的元件获得最高增益的作用。图 2-1 (a) 表示两个 NPN 晶体管组成的达林顿结构，图 2-1 (b) 表示由 PNP 和 NPN 晶体管组成的达林顿结构，图中 VT_1 为驱动管， VT_2 为输出管。达林顿 GTR 的性质由驱动管决定。它们的共同特点是：电流增益高、饱和压降较高、开关时间长。图 2-2 为实用的达林顿连接方式。

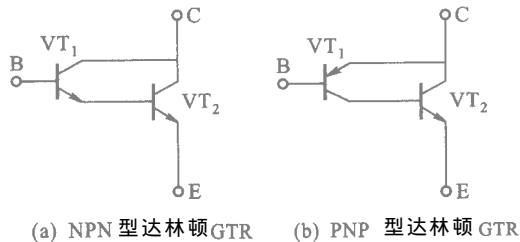


图 2-1 达林顿 GTR

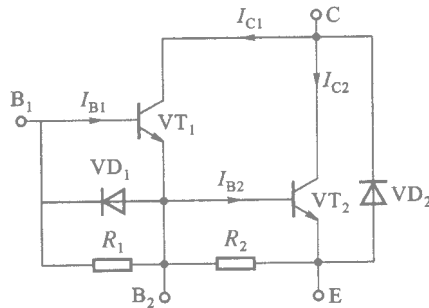


图 2-2 达林顿 GTR 实用电路

3. GTR 模块

目前作为功率开关应用最多的还是 GTR 模块，它是将单个或多个达林顿结构的 GTR 及其辅助电路元件如续流二极管、稳定电阻、加速二极管等组装成一个单元，然后根据不同用途将几个单元电路封装在一个外壳之内构成模块，图 2-3 是含单个基本单元电路的 GTR 模块内部电路，它是三个晶体管复合的达林顿结构。

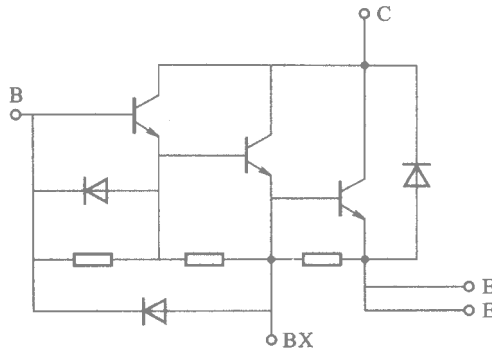


图 2-3 GTR 模块内部电路

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

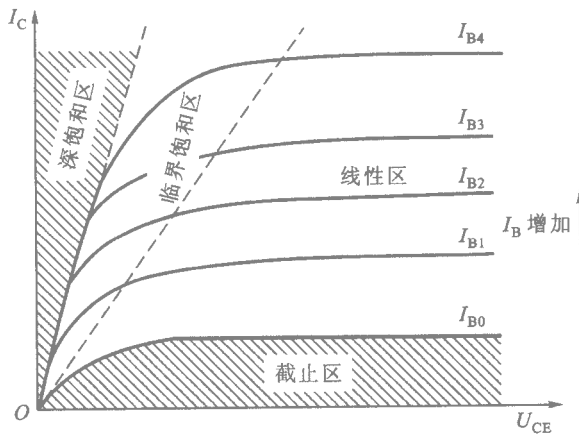


图 2-4 GTR 的输出特性曲线

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。

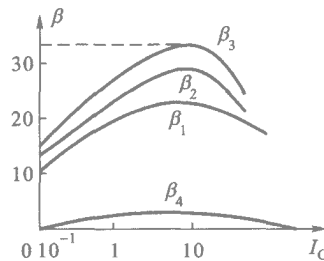


图 2-5 不同温度和不同 U_{CE} 时的 $\beta - I_C$ 关系曲线

(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：

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 $U_{(BR)CBO}$ 、 $U_{(BR)CEO}$ 、 $U_{(BR)EB}$ 。不仅

和管子本身的特性有关，还取决于外部电路的接法。

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。

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

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 $-55^\circ\text{C} \sim 175^\circ\text{C}$ 。

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 。

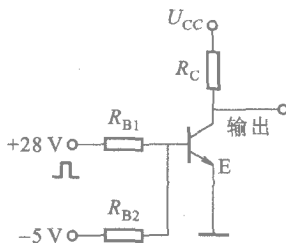


图 2-6 开关特性测试电路

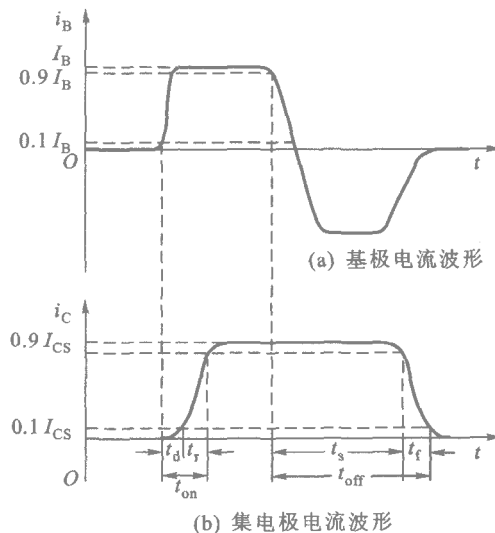


图 2-7 开关电流波形

一般开通时间均为纳秒级，比关断时间小得多，故在产品手册中一般不给出该参数。关断时间的数值都在微秒级。为了缩短关断时间可采取以下措施：选择电流增益小的器件，防止深饱和，增加反向驱动电流。

3. 二次击穿与安全工作区

(1) 二次击穿

前述当反向电压超过 $U_{(BR)CEO}$ 时，会发生击穿现象，这种击穿称为一次击穿，发生一次击穿时反向电流急剧增加，如有外接电阻限制电流的增加，一般不会引起 GTR 特性变坏，若不加限制就会导致破坏性的二次击穿。所谓二次击穿是指 GTR 发生一次击穿后集电极电流继续增加，在某电流电压点产生向低阻抗区高速移动的现象。二次击穿的持续时间极短，一般在纳秒至微秒的数量级，即使如此短暂的时间内也会使 GTR 内部出现明显的电流集中过热点，造成 GTR 永久性破坏，轻则耐压降低，重则集电结和发射结熔断引起短路故障。

凡是对 GTR 电压、电流、导通时间有关系的因素如负载的性质、脉冲宽度、电路参数、材料、工艺以及基极驱动电路的形式等都会影响二次击穿。

(2) 安全工作区

由于 GTR 在运行过程中受到电压、电流、功率损耗以及二次击穿现象等条件的限制，为了保证 GTR 安全可靠地工作，把由这些限制条件构成的区域称为安全工作区，简称 SOA (Safe Operation Area)，它指 GTR 能够安全运行的范围，如图 2-8 所示，是由双对数直角坐标系中 $ABCDE$ 折线所包围的面积。

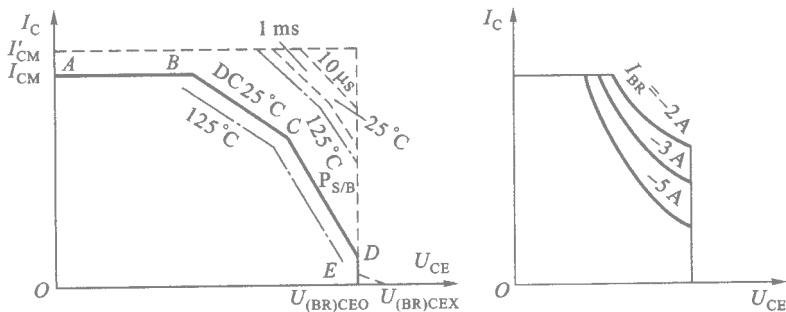


图 2-8 安全工作区

三、驱动与保护

1. 驱动电路的设计原则

GTR 是一种具有自关断能力的全控型电力半导体器件，它的基极驱动方式直接影响着它的工作状况，可使某些特性参数得到改善或受到损害。因此，

驱动电路有无快速保护功能则是决定 GTR 在过压或过流后是否损坏的重要条件，这就使得驱动与保护紧密联系在一起。

GTR 基极驱动电路的设计必须考虑以下三点：最优化驱动特性、驱动方式和自动快速保护功能。

为了确保 GTR 在开通时能迅速达到饱和导通，关断时能迅速截止，基极驱动电路应该能输出如图 2-9 所示的最优驱动电流波形。

根据主电路的结构和工作特点以及它和驱动电路间的连接关系，可以有直接驱动和隔离驱动两种方式。直接驱动方式又分为简单驱动、推挽驱动和抗饱和驱动三种基本类型，图 2-10 所示为其中两种基本类型。

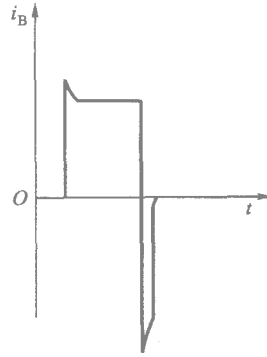


图 2-9 最优基极驱动电流波形

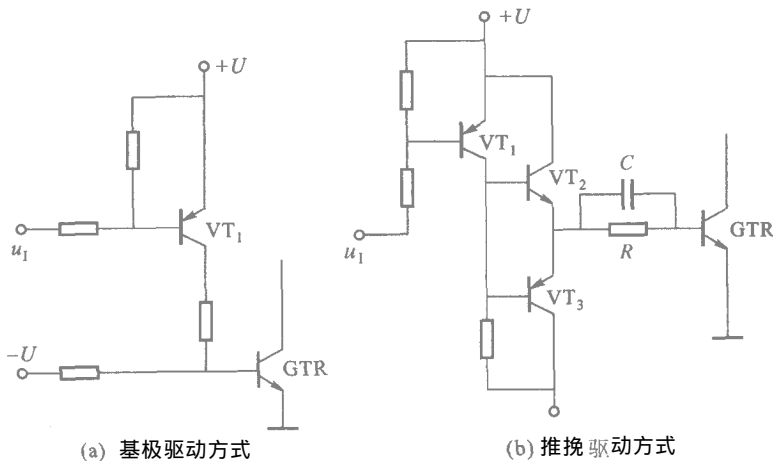


图 2-10 GTR 的两种直接驱动方式

图 2-10 (a) 是最基本的基极驱动方式，其输入信号 u_1 可由 TTL 电路直接控制，采用双电源以建立快速关断反向电流，如果速度要求不高，也可采用单电源，此时只要将负电源接地即可。

图 2-10 (b) 表示推挽驱动方式，当输入信号 u_1 为低电平时， VT_1 导通，从而使 VT_2 导通，经 R 、 C 向 GTR 提供基极驱动电流，使 GTR 导通；当 u_1 为高电平时， VT_1 截止，使 VT_3 导通，经 RC 为 GTR 提供反向基极电流，使 GTR 关断。电容 C 在开关过程中均起加速作用。

在很多场合下主回路和控制回路间必须隔离，以保证电路的安全并提高抗干扰能力。隔离的方式有两种：电磁隔离与光电隔离。光电隔离的缺点是响应时间较长，而电磁隔离的缺点是体积、重量较大。图 2-11 所示为两种隔离驱动方式。

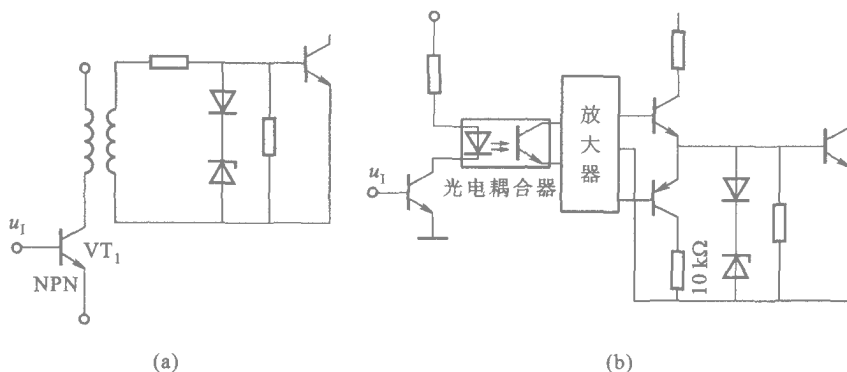


图 2-11 GTR 的隔离驱动方式

同时，GTR 的基极保护电路要有快速自动保护功能，以便在故障状态下能快速自动切除基极驱动信号，避免 GTR 遭到破坏。保护的类型包括抗饱和、退饱和、过流、过压、过热、脉宽限制等。此外，驱动电路还要有在主电路故障后能及时自动切断与主电路联系的自保护能力。

2. 实用驱动电路举例

实际应用中的基极驱动电路多种多样，难以一一介绍，归纳起来下述三点是共同的：为了提高工作速度，降低开关损耗，多数采用抗饱和措施；为了确保器件使用安全，尽可能采用多种保护措施；为了使电路简化、功能齐全，尽可能使用集成器件。为此，列举三种典型电路由简而繁、由分立到集成、由单一功能到多功能。

(1) 抗饱和电路

抗饱和电路亦称贝克钳位电路，是一种基极驱动最优化电路，其基本形式如图 2-12 所示，其中钳位二极管 VD_1 将过量的基极电流从集电极引出，从而减小了 GTR 的饱和深度。钳位二极管 VD_2 必须是快速恢复二极管且其耐压值必须和 GTR 的耐压相当。

(2) 具有过电流、过电压保护的基极驱动电路

如图 2-13 所示是一个具有过电流、

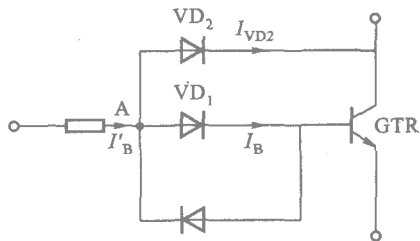


图 2-12 抗饱和电路

过电压保护的基极驱动电路原理图。该电路运用 NE555 集成芯片对驱动脉冲进行整形,以提高脉冲前、后沿的陡度,并利用其封锁电位实现过电流及过电压保护。当流过 GTR 的电流超过规定值时, LEM 模块输出信号使晶闸管 VT 导通, R_A 上的压降变为低电平,通过 555 集成芯片的脚封锁了加到 GTR 上的控制信号,使其关断,实现了过电流的自我保护。过电压的保护原理是:当 GTR 集电结承受电压高于规定值时,二极管 VD_A 截止,使 555 集成芯片的 ⑥脚为高电平,封锁了加到 GTR 上的驱动信号,也使 GTR 关断。

二极管 VD_B 起抗饱和作用,使 GTR 基极驱动电流根据集电极电流自动调节,保证导通过程中 GTR 始终处于准饱和状态。

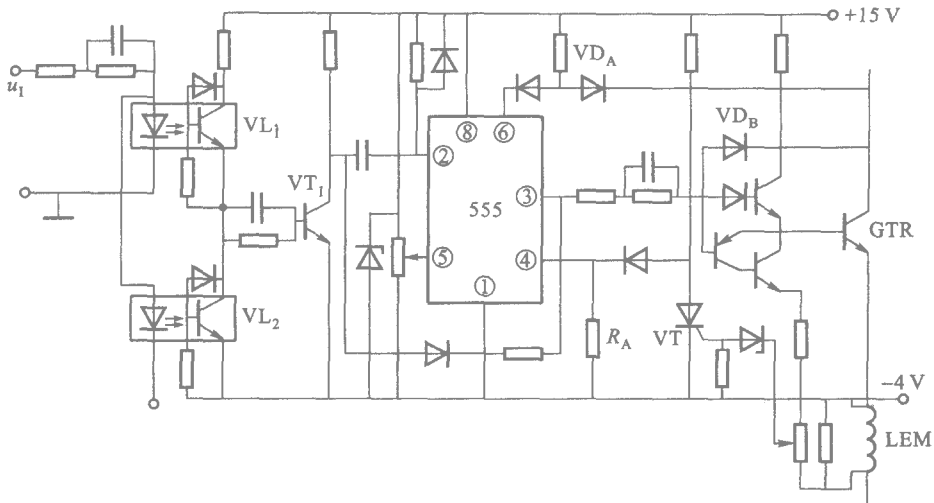


图 2-13 具有过电流过电压保护的基极驱动电路

光电耦合器件 VL_2 能提高电路的抗干扰能力。输入控制信号由 VL_1 引入,使得逻辑电路与功率电路之间隔离。当有干扰信号出现时, VL_1 和 VL_2 同时导通,使加到晶体管 VT_1 基极上的电压为零,从而迫使 555 集成芯片的输出为低电平, GTR 关断,进一步增强了抗干扰能力。

(3) 集成化基极驱动电路

基极驱动电路的集成化克服了前述电路元件多、电路复杂、稳定性欠佳、使用不便的缺点,同时保护功能更加丰富。目前市场上有很多专用的 GTR 基极驱动集成电路,如图 2-14 所示即为一种代表性的 GTR 基极驱动集成芯片——UAA4002 的原理框图。其输入信号的方式有两种:由设置端 SE (脚) 的电平决定, SE 端为高电平时表示电平输入方式,低电平时表示脉冲输入方式。其输出为 $+0.5\text{ A}$ 、 -3 A 的基极驱动电流。

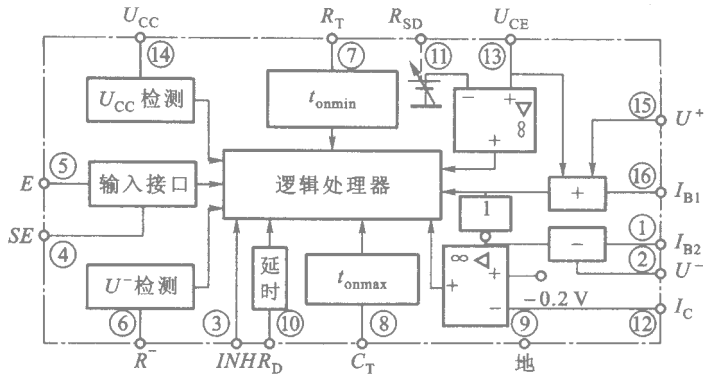


图 2-14 基极驱动集成芯片——UAA4002 的原理框图

图 2-15 就是利用 UAA4002 实现的 8 A、400 V 开关电路实例。它主要能实现的功能如下：

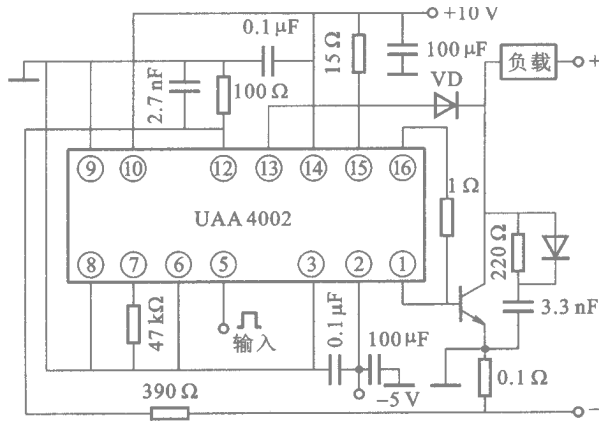


图 2-15 8 A、400 V 开关电路的驱动实例

限流。在 GTR 的发射极上串接 0.1Ω 电阻，用来检测 GTR 的集电极电流，并将该信号引入芯片 I_C 端（⑫脚），当该信号电压低于 -0.2 V 时，比较器状态发生变化，由逻辑处理器检测并发出封锁信号，封锁输出脉冲使 GTR 关断。

防止减饱和。在 GTR 的集电极与芯片的 U_{CE} 端（⑬脚）之间接二极管 VD，用来检测 GTR 的集电极电压。当 GTR 开通时比较器检测 U_{CE} 端的电压，若高于 R_{SD} 端（⑪脚）上设定电压，比较器则向逻辑处理器发出信号，处理器封锁控制输入，从而防止 GTR 因基极电流不足或集电极电流过载引起减饱和的可能性。

③ 导通时间间隔控制。为了确保 GTR 开关辅助网络的电容充分放电，选

辑处理器应保证输出脉冲有一最小脉冲宽度 $t_{on\ min}$ ，其数值由 R_T 端（⑦脚）的电阻 $47\ k\Omega$ 来决定。为了限制斩波电路的输送功率或防止脉冲控制方式因传输信号中断造成持续导通时间 $t_{on\ max}$ ，可通过 C_T 端（⑧脚）的外接电容来调整。

电源电压监测。可利用 U_{CC} 端（⑭脚）检测正电源电压的大小，当电源小于 $7\ V$ 时，确保芯片无输出信号。负电压的检测可在 U^- 端（②脚）与 R^- 端（⑥脚）之间外接电阻来实现。

时延功能。可以通过在 R_D 端（⑩脚）接电阻来调整，使控制电压前、后沿能保持 $1\sim 2\ \mu s$ 的固定时间延迟。

⑥ 热保护。UAA4002 芯片在温度超过 $150\ ^\circ C$ 时能自动切断输出脉冲，而当芯片温度降至极限值以下时恢复输出。

⑦ 删除功能。利用 INH 端（脚）加高电平使 GTR 停止开通或使开通时间缩短。

第二节 功率场效晶体管（Power MOSFET）

一、结构与工作原理

功率场效晶体管简称功率 MOSFET，它是一种单极型的电压控制器件，不但具有自关断能力，而且有驱动功率小、工作速度快、无二次击穿问题、安全工作区宽等优点。

为了说明功率 MOSFET 的结构与工作原理，首先要简单说明 MOSFET 的结构特点。MOSFET 根据载流子的性质可分为 N 沟道和 P 沟道两大类，它们的图形符号如图 2-16 所示；按零栅压时器件的导电状态又可分为耗尽型和增强型两类。图 2-17 所示为 N 沟道 MOSFET 的结构示意图。由于输出电流是由栅极（G）通过金属（Metal）-氧化物（Oxide）-半导体（Semiconductor）系统进行控制的，所以这种结构称为 MOS 结构。在 MOSFET 中只有一种载流子（N 沟道时是电子，P 沟道时是空穴）从源极（S）出发经漏极（D）流出。

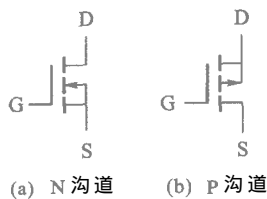


图 2-16 MOSFET 的图形符号

早期的 MOSFET 是平面水平沟道结构，由于其导通电阻大、频率特性差

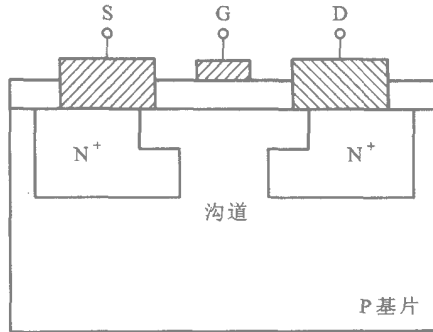


图 2-17 N 沟道 MOSFET 的结构示意图

等缺点，一直未能推广使用，直至 1975 年产生了由垂直导电结构组成的场效晶体管（简称 VMOSFET），使 MOS 器件从小功率范围跨入大功率范围。功率 MOSFET 主要是解决 MOSFET 器件大电流、高电压的问题，以提高其功率。功率 MOSFET 采用多元集成结构，由成千上万个 VMOSFET 元件并联。这样的结构可以降低通态电阻，提高通态电流，提高工作频率。

另外，要说明的是，功率 MOSFET 的图形符号与 MOSFET 的图形符号是一样的。

二、特性与参数

1. 静态特性与参数

静态特性主要指功率 MOSFET 的输出特性、饱和特性、转移特性，与静态特性有关的参数主要有通态电阻、开启电压、跨导、最大电压额定值、最大电流额定值。

(1) 输出特性

N 沟道增强型 VMOSFET 的漏极电流 I_D 受栅源电压 U_{GS} 的控制，以栅源电压 U_{GS} 为参变量反映漏极电流 I_D 与漏极电压 U_{DS} 间的关系曲线族称为 VMOSFET 的输出特性，如图 2-18 (a) 所示。输出特性分为三个区域：可调电阻区、饱和区、雪崩区。

(2) 饱和特性

功率 MOSFET 的饱和特性如图 2-18 (b) 所示。通常规定在确定的栅源电压 U_{GS} 下，功率 MOSFET 由可调电阻区进入饱和区时的直流电阻为通态电阻 R_{on} 。通态电阻是功率 MOSFET 的重要参数，它与输出特性和饱和特性密切相关，直接影响最大输出功率。由于 MOSFET 的通态电阻较大，所以饱和压降也大。

(3) 转移特性