

# 电气传动技术 原理与应用

中国电力出版社



# 《深入浅出自动化技术丛书》

## 编委摇会

主任委员：吴惕华

副主任委员：潘立登

委摇摇摇员：（以姓氏笔画为序）

王均术摇王振臣摇孙晓云摇孙会琴摇吕卫阳

李大字摇李海滨摇刘向东摇刘东辉摇刘朝英

何坚强摇张永德摇张新岭摇张伟勇摇娄国焕

郝摇成摇徐昌荣摇翁维勤摇黄晓华摇蔡满军

薛迎成

# 丛书序

日新月异的自动化技术为传统产业的改造、生产水平的提高和产品更新换代注入了强大活力。微电子技术和计算机、通信、网络技术的崛起，给自动化技术架起了腾飞的双翼，成为当代发展最快、影响最大、最引人注目的高技术之一，在百花争艳的信息化舞台上独领风骚。现在，自动化技术不仅渗透于国民经济各行各业，对社会、经济、文化、军事、科技等各个领域都有着深刻的影响，而且正悄然地改变着人们的生产、工作、生活乃至思维方式。一个无处不在的、方兴未艾的自动化时代正在到来。

为了适应自动化技术蓬勃发展的需要，我们组织编写了这套丛书，旨在进一步对自动化技术的应用和推广起到积极的推动作用。本丛书主要面向从事自动化及其相关技术领域的工程技术人员和在校大学生，为他们提供应用自动化技术或解决应用领域中的疑难问题，提高自动化技术水平的参考用书，同时也是他们学习和掌握当前自动化领域涌现的新技术和新方法、知识更新、提高创新能力的良师和益友。许多非自动化专业的工程技术人员，由于工作中常遇到自动化技术问题，有着拓宽知识面，学习和了解有关自动化技术和基本要求的要求，学习本丛书定有裨益。其他凡是对自动化技术有兴趣的初学者均可将本丛书作为快捷的入门先导。

本丛书编写宗旨是面向读者、面向应用，力求突出实用性、适用性、易用性。在编写中注意不仅既要求内容丰富、覆盖面广，又要技术先进、新颖，而且在内容的组织和表述上要深入浅出、通俗易懂，便于自学，使读者不仅学了就能懂，更要学了就会用。在理论和实际二者兼顾和结合方面，以应用尤其是工程上的实际应用为重点，尽量多采用实例编写；而理论的介绍以应用为目的，注意基本概念，避免面面俱到和“全”而“深”，以“必要”和“够用”为度，尽量减少烦琐的理论推导和公式证明，力求简练实用。在把握先进技术和流行、成熟技术的关系方面，在介绍先进的新技术同时，重点是掌握现阶段的实用的流行技术。

为了保持全套丛书具有科学性、先进性、广泛性和代表性，我们聘请了不同部门和行业各具特长的自动化专家、教授组成了编审委员会。作者均有多年从事自动化专业教学、科研或工程技术工作的经历，具有较丰富的实践经验。为了打造“精品”出好书，本丛书凝聚了作者们的心血和汗水，在此我们致以诚挚的谢意。对丛书中不足之处，还望广大读者批评和指正。

丛书编审委员会  
2007年2月于北京

# 前言

在工业领域中，电气传动系统是基本的动力系统，应用十分广泛。近几年来，电力电子技术和微电子应用技术迅速发展，传动控制技术和设备日臻完善，控制理论也发展得相当成熟，但是，在实际工作中，具有电气专业背景的工程技术人员普遍感到实用的电气传动技术入门很难，因此迫切需要一本能够帮助他们迅速掌握实用传动技术的书籍。

本书力图从几个方面解决这个问题，首先遵循理论和实际相结合的原则，在传动理论的讲述上力求简练、实用；注重概念，避免了烦琐的理论推导和公式证明，突出了应用，尤其是突出了工程上的实用化，打破了过去重理论、轻应用的做法；其次强调了理论和实践的衔接，突出强调了现阶段的实用传动技术；第三，正确把握先进技术和流行技术的关系，在介绍先进技术的同时重点介绍流行技术，从而达到电气技术人员迅速掌握实用传动技术的目的。

全书分上下两篇，共七章。上篇四章介绍直流传动控制，第一、二、三章介绍从开环调速到单闭环、双闭环及可逆调速系统的组成方法和原理、特点以及典型的应用线路。第四章介绍西门子 6RA70 数字直流传动的应用技术。下篇三章介绍交流传动控制，第五章、第六章介绍交流调速系统的基本原理、结构，第七章介绍变频器的应用技术和高压变频器。

本书第五章由娄国焕编写，第四、六、七章由郝成编写，第一、二、三章由王均术编写。由于编者水平有限，书中难免有疏漏和不当之处，恳请读者赐教。

编 者

2006 年 12 月

# 目录

从书序  
前摇言

## 上摇篇摇直流调速系统

第一章摇单闭环控制的直流调速系统.....	1
摇摇第一节摇直流电动机的调速方法和可控直流电源 .....	1
摇摇第二节摇开环调速系统 .....	5
摇摇第三节摇转速负反馈单闭环直流调速系统 .....	11
摇摇第四节摇电压负反馈电流补偿控制的调速系统 .....	28
第二章摇多环控制的直流调速系统 .....	32
摇摇第一节摇双闭环调速系统的组成及其静特性 .....	32
摇摇第二节摇双闭环直流调速系统的数学模型和动态性能分析.....	35
摇摇第三节摇调节器的工程设计方法 .....	38
摇摇第四节摇按工程设计方法设计双闭环调速系统 .....	51
摇摇第五节摇转速超调的抑制——转速微分负反馈 .....	62
摇摇第六节摇弱磁控制的直流调速系统 .....	65
摇摇第七节摇数字控制器的实现及其工程整定 .....	66
第三章摇可逆直流调速系统 .....	73
摇摇第一节摇V—M系统的可逆运行和回馈制动 .....	73
摇摇第二节摇两组晶闸管装置可逆线路中的环流 .....	78
摇摇第三节摇有环流可逆系统 .....	81
摇摇第四节摇无环流可逆调速系统 .....	87
摇摇第五节摇双闭环可逆直流脉宽调速系统 .....	93
摇摇第六节摇电控设备的安装与调试 .....	99
第四章摇实用数字直流调速系统及其应用 .....	112
摇摇第一节摇西门子6RA70数字直流调速装置简介 .....	112
摇摇第二节摇6RA70硬件结构原理分析 .....	113
摇摇第三节摇6RA70软件应用.....	122
摇摇第四节摇6RA70数字直流调速装置应用技术 .....	129
摇摇第五节摇6RA70数字直流调速装置联网技术 .....	137

## 下篇摇交流调速度系统

第五章摇交流调速的基本类型 .....	145
摇摇第一节摇概述 .....	145
摇摇第二节摇交流异步电动机的结构和工作原理 .....	146
摇摇第三节摇异步电动机的机械特性 .....	148
摇摇第四节摇交流调速的基本类型 .....	151
摇摇第五节摇闭环交流调速系统特性分析 .....	154
摇摇第六节摇异步电动机调压调速系统应用举例 .....	158
第六章摇异步电动机变压变频调速系统 .....	168
摇摇第一节摇变频调速的基本控制方式 .....	168
摇摇第二节摇变频器简介 .....	170
摇摇第三节摇正弦波脉宽调制变频器 .....	172
摇摇第四节摇异步电动机变频调速时的机械特性 .....	179
摇摇第五节摇转速开环、电压闭环恒压频比控制的变频调速系统 .....	183
摇摇第六节摇转差频率控制的转速闭环变频调速系统 .....	189
摇摇第七节摇异步电动机矢量控制的变频调速系统 .....	192
第七章摇实用数字交流调速系统及其应用 .....	199
摇摇第一节摇富士变频器结构分析 .....	199
摇摇第二节摇富士变频器应用技术 .....	210
摇摇第三节摇高压变频器的实现及应用技术概述 .....	219
摇摇第四节摇西门子 6SE 系列变频器应用实例 .....	226
参考文献 .....	231

# 上篇摇直流调速系统

直流调速系统是目前电力拖动领域应用最广泛的一种自动调速系统。它可以在一定范围内平滑调速，并且具有良好的静态和动态性能。由于直流电动机具有良好的运行性能和控制特性，长期以来直流调速系统一直占据垄断地位。例如，轧钢机、矿井卷扬机、电梯、金属加工机床、纺织、造纸、海洋钻机、电力机车等要求高性能可控电力拖动的场合，广泛采用直流调速系统。近年来，交流调速系统发展较快。交流电动机以其结构简单、制造和维护方便、价格低廉等优点，足以与直流电动机相抗衡。特别是随着计算机技术、电力电子技术和控制技术的不断完善，为交流调速的发展提供了强有力的技术支撑，这就为交流调速系统取代直流调速系统奠定了基础，但就目前而言，直流调速系统所运用的控制理论和控制技术都是成熟的，它又是交流调速系统的基础，因此本书首先讨论直流调速系统。

本篇以模拟控制系统为主线，介绍直流调速系统的控制理论和控制方法。以“工程设计方法”为工具，完成对系统的动态设计。在此基础上还将专门论述数字控制的方法与特色。

## 1

## 第一章摇单闭环控制的直流调速系统

### 第一节摇直流电动机的调速方法和可控直流电源

#### 一、直流电动机的调速方法

直流电动机的转速和其他参量之间的稳态关系表达式为

$$n = \frac{U - I_a R_a}{K_e \Phi} \quad (1-1)$$

式中  $n$ ——电动机的转速，转/分；

$U$ ——电枢电压，灾；

$I_a$ ——电枢电流，粤；

$R_a$ ——电枢回路总电阻， $\Omega$ ；

$\Phi$ ——励磁磁通，宰；

$K_e$ ——由电动机结构决定的电动势常数。

## 2 上篇 直流调速系统

由上式可以看出，调节电动机转速的方法有三种：

(1) 调节电枢供电电压  $U$ 。

(2) 改变励磁磁通  $\Phi$ 。

(3) 改变电枢回路电阻。

其中第一种方法可以在一定范围内平滑调速；而改变电阻是一种能耗调速方法而且是有级调速，很少用；弱磁虽然可以平滑调速，但只能和调压调速配合使用，在基速以上范围调速。因此在实践中自动控制直流调速系统以调压调速为主，必要时可结合调压和弱磁两种方法，以扩大调速范围，改变电动机的转速。

### 二、直流调速系统用的可控直流电源

调压调速是直流调速系统采用的主要方法，调节电枢供电电压或者改变励磁磁通都需要专门的可控直流电源。常用的直流电源有两种：

(1) 旋转变流机组。用交流电动机和直流发电机组成机组，以获得可调的直流电压。但因其设备多、体积大、效率低、安装需要打基础、运行有噪音、维护麻烦等，在 20 世纪 50 年代开始已被静止变流装置取代。

(2) 静止变流装置。包括晶闸管可控整流、直流斩波器或脉宽调制变换器及 20 世纪 80 年代已被淘汰的离子拖动变流装置。目前在应用得比较广泛的静止变流装置中，除频率很高（如微波）的大功率高频电源中还使用真空管外，基于半导体材料的电力电子器件已成为电能变换的绝对主力。所以由大功率半导体全控和半控元件组成的变流装置，是对直流电动机供电用的最多的可控直流电源。

按照电力电子器件能够被控制电路信号所控制的程度，可以将电力电子器件归为三类：

(1) 半控型器件——通过控制信号可以控制其导通，而不能控制其关断的电力电子器件，主要是晶闸管及其派生器件，器件的关断完全是由主电路中器件所承受的电压和电流决定的。

(2) 全控型器件——通过控制信号可以控制其导通和关断的电力电子器件。与半控器件相比，因为可以由控制信号关断，所以又称为自关断器件，常用的是绝缘栅双极晶体管（IGBT）和电力场效应管（MOSFET）及 GTO 等。

(3) 不可控器件——不用控制信号控制其通断，因此不用驱动电路，这就是电力二极管（普通二极管）。

下面以电力电子器件构成的静止变流装置为主，介绍可控直流电源及由它供电的直流调速系统。

#### 1. 静止可控整流器

如图 1-1 所示是晶闸管—电动机调速系统（简称“交—直”系统）的原理图。

在图 1-1 中， $U_d$  是晶闸管整流器，通过调节触发装置  $U_{\alpha}$  的控制电压  $U_{\alpha}$  来移动触发脉冲的相位，则可以改变整流电压  $U_d$ ，从而实现平滑调速。晶闸管整流的功率放大倍数大约在 10~100 之间。因为控制功率小，所以有利于微电子技术引入强电领域。在控制的快速性上，晶闸管整流器是毫秒级的，有利于改善系统的动态性能。

晶闸管整流器也有它的缺点，主要表现在四个方面：

(员) 它不允许电流反向, 给系统可逆运行造成困难。如要可逆运行, 则必须组成可逆系统。由半控整流电路构成的灾—酝系统只允许单象限运行, 如图 1-10(葬) 所示, 带位势负载时全控桥式整流电路可以实现有源逆变, 如图 1-10(遵) 所示, 四个象限运行时必须选用可逆系统。

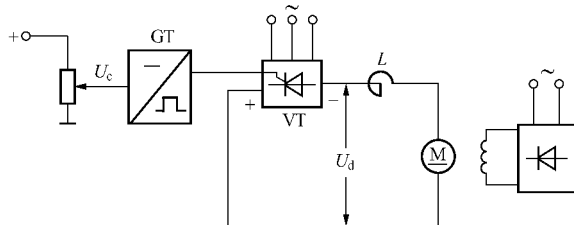


图 1-10 晶闸管—电动机调速系统(灾—酝系统)原理图

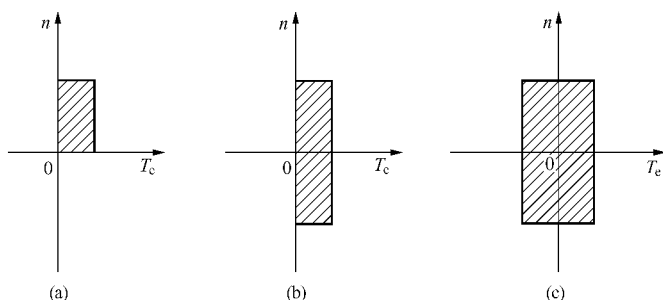


图 1-11 灾—酝系统运行范围

(葬) 单象限运行; (遵) 二象限运行; (槽) 四象限运行

(圆) 晶闸管元件对过电压、过电流及过高的电压、电流变化率十分敏感, 其中任何一项指标超标都可能在短时间内损坏晶闸管, 因此必须有可靠的保护电路和符合要求的散热条件(小功率器件可用散热器, 大功率器件可用风冷或水冷)。同时选择器件容量时必须打出一定余量。现代的晶闸管应用技术已经成熟, 只要选择质量过关的元件, 设计合理, 保护电路齐备, 晶闸管装置的运行是十分可靠的。

(猿) 由于灾—酝系统是感性负载, 当系统处于深调速时, 转速较低, 晶闸管的导通角很小, 整流装置输出电压与电流之间的相位差变大, 使得系统功率因数很低, 并产生较大的谐波电流, 引起电网电压畸变, 造成“电力公害”。在这种情况下必须添置无功补偿和谐波滤波装置。

(源) 在灾—酝系统中, 因为整流电压是从电网电压上截取的片断, 所以是脉动的。当负载较小或平波电抗器电感量不是足够大时, 电流也是脉动的, 可能引起电流断续。所以灾—酝系统的机械特性也有连续和断续两段。电流连续时机械特性为一条直线, 特性较硬。电流断续时特性较软, 呈现明显的非线性。

### 1-12 直流斩波器或脉宽调制变换器

直流斩波又称直流调压, 用在有恒定直流电源的场合。它是利用开关器件的通断实现调压的。通过通断时间的变化改变负载上直流电压的平均值, 将恒定的直流电压变成平均值可调的直流电压, 也叫直流—直流变换器。它具有效率高、体积小、重量轻、成本低的特点, 现在广泛应用在电力机车、无轨电车、电瓶车等电力牵引设备的变速拖动中。

图 1-12(葬) 为直流斩波器—电动机系统的原理图。图中灾为开关器件, 灾为续流二极管。当灾导通时, 灾加到电动机电枢两端。灾断开时, 直流电源与电枢断开。电枢中滞后电

#### 4 上篇 直流调速系统

流经二极管续流，这样电枢两端经续流短接，电压为零，如此反复得到电压波形如图 4-10 所示。

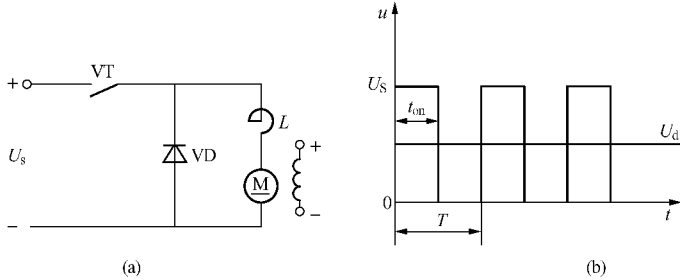


图 4-10 直流斩波器—电动机系统原理图和电压波形  
(a) 原理图；(b) 电压波形

由图 4-10 (b) 可得到电机电枢两端的电压平均值为

$$U_d = U_s \rho \quad (4-10)$$

式中  $T$ ——开关器件的通断周期；

$t_{on}$ ——开关器件的导通时间；

$\rho = \frac{t_{on}}{T}$ ——占空比；

$f = \frac{1}{T}$ ——开关频率。

由式 (4-10) 可知，直流斩波器输出的电压平均值  $U_d$ ，可以通过改变开关器件的通断时间和开关频率调节，即改变占空比可以调节。常用的改变输出电压平均值的调制方法有以下三种：

(1) 脉冲宽度调制 (PWM)。保持通断周期  $T$  不变，只改变开关导通时间  $t_{on}$ ，即定频调宽称为脉宽调制。

(2) 脉冲频率调制 (PFM)。保持开关导通时间  $t_{on}$  不变，只改变通断周期  $T$ ，即定宽调频。

(3) 两点式调制。开关通断周期  $T$  与开关导通时间  $t_{on}$  均可改变，即可调宽又可调频，称为混合调制。当负载电流或电压低于某一值时，开关器件导通；当电流或电压高于某一值时，使开关器件关断，导通和关断时间以及通断周期都是不固定的。

构成直流斩波器的开关元件一般都采用全控元件，如晶闸管、IGBT、MOSFET 等，由它们组成的主回路是多种多样的，但基本控制方式是一致的。

图 4-11 (a) 为一种可逆脉宽调速系统的基本原理图，由 VT1~VT4 四个电力电子开关器件构成的桥式（或称 H 型）可逆脉冲宽度调制 (PWM) 变换器。VT1 和 VT2 同时导通或关断。VT3 和 VT4 同时导通或关断。使电动机 M 的电枢两端承受正向电压  $U_d$  或反向电压  $-U_d$ 。改变两组开关器件导通时间，也就改变了电压脉冲宽度，达到调压目的。图 4-11 (b) 所示为电枢两端的电压波形。

如果开关周期为  $T$ ，导通时间为  $t_{on}$ ，电动机电枢两端的电压平均值为

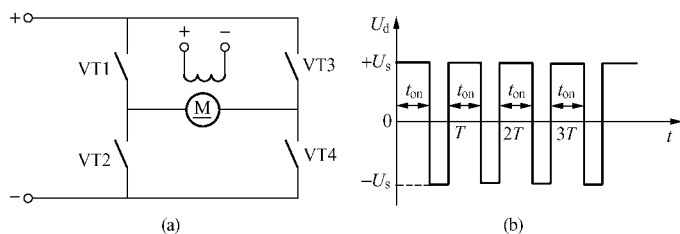


图 1-1 四象限桥式可逆脉宽调速系统基本原理图和电压波形  
(a) 基本原理图；(b) 电压波形

这里定义  $\rho = \frac{t_{on}}{T}$  为占空比

这里定义  $\rho = \frac{t_{on}}{T}$  为占空比

脉宽调速系统适用于中小功率，与晶闸管调速系统相比，脉宽调速系统有以下优点：

(1) 采用全控型器件构成的脉宽调速系统，其脉宽调制电路的开关频率高，一般为几千赫兹。因此系统频带宽，响应速度快，动态抗干扰性强。

(2) 由于开关频率高，仅靠电动机电枢电感，就可以获得脉动很小的直流电流，使得电枢电流容易连续，系统低速性能好，调速范围宽，可达额定转速左右。

(3) 在脉宽调速系统中，主回路的电力电子器件处于开关工作状态，损耗小，装置效率高。如果选用的恒定直流电源是由不可控装置提供的，功率因数将会大大提高。

(4) 主电路所需的功率元件少，线路简单，控制方便。

但因受电力电子器件容量的限制，直流脉宽调速系统目前只用于中小功率。

## 第二节 开环调速系统

### 一、开环调速系统的机械特性

由静止变流装置组成的直流调速系统，无论采用晶闸管调速系统还是脉宽调速系统，在稳态时，电动机所承受的电压都是脉动的。尽管在主回路中串有限制电流变化的电抗器，但流过电动机的电枢电流仍是脉动的，相应转速也是脉动的。在调速系统中所说的稳态是指电动机的电磁平均转矩与负载转矩相平衡。因而机械特性是指平均转速与平均转矩或电流之间的关系。

#### 晶闸管调速系统的机械特性

在如图 1-2 所示的晶闸管调速系统中，调节给定电压  $U_{d0}$ ，可以控制触发装置输出的脉冲的相位，则晶闸管装置输出电压的瞬时值  $u_d$  和平均值  $U_d$  可以改变，如果把晶闸管装置的内阻看成是负载电路电阻的一部分，整流电压便可用理想空载电压  $U_{d0}$  和  $U_{d0}$  来代替，其等效电路如图 1-3 所示。瞬时电压的平衡方程式可写作

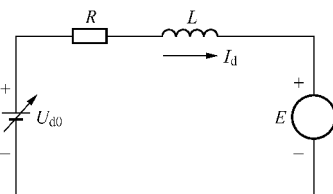


图 1-3 晶闸管调速系统主回路的等效电路

$$U_{d0} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \left[ \cos \alpha - \frac{1}{2} \cos 3\alpha + \frac{1}{4} \cos 5\alpha - \frac{1}{8} \cos 7\alpha + \dots \right] \quad (5.10)$$

式中  $L$  ——电枢回路总电感；

$R$  ——电枢回路总电阻；

$\Delta U_d$  ——晶闸管正向压降，一般可忽略。

对式 (5.9) 进行积分，则可得到电压平均值方程式为 (忽略管压降  $\Delta U_d$ )

$$U_d = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \left[ \cos \alpha - \frac{1}{2} \cos 3\alpha + \frac{1}{4} \cos 5\alpha - \frac{1}{8} \cos 7\alpha + \dots \right] \quad (5.11)$$

对于整流电压平均值  $U_d$ ，一般在全控式整流电路中，当电流连续时， $U_d$  随  $\alpha$  可用式 (5.11) 表示

$$U_d = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \left[ \cos \alpha - \frac{1}{2} \cos 3\alpha + \frac{1}{4} \cos 5\alpha - \frac{1}{8} \cos 7\alpha + \dots \right] \quad (5.12)$$

式中  $\alpha$  ——从自然换相点算起的触发脉冲控制角；

$U_m$  —— $\alpha = 0$  时整流电压波形峰值；

$m$  ——交流电流一个周期内整流电压的脉波数。

对于不同的整流电路，它们的数值见表 5.1

表 5.1 不同整流电路的整流电压波形峰值及脉波数

整流电路形式	单相全波	三相半波	三相全波	六相半波
$U_m$	$\sqrt{2} U_{2\phi}$	$\sqrt{2} U_{2\phi}$	$\sqrt{2} U_{2\phi}$	$\sqrt{2} U_{2\phi}$
$m$	2	3	6	6
$U_d$	$\frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_{2\phi} \cos \alpha$	$\frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{2\phi} \cos \alpha$	$\frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{2\phi} \cos \alpha$	$\frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{2\phi} \cos \alpha$

注：表中  $U_{2\phi}$  是整流变压器二次侧相电压有效值。

当电流连续时，灾-酝系统的机械特性方程可写成

$$U_d = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \left[ \cos \alpha - \frac{1}{2} \cos 3\alpha + \frac{1}{4} \cos 5\alpha - \frac{1}{8} \cos 7\alpha + \dots \right] = C_e \omega + I_d R \quad (5.13)$$

式中： $C_e$  是电动机在额定磁通下的电势常数。

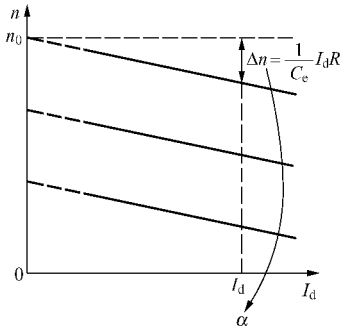


图 5.1 电流连续时灾-酝系统的机械特性 (箭头方向表示  $\alpha$  增大方向)

由式 (5.13) 可见，改变控制角  $\alpha$ ，可得到一组平行直线，如图 5.1 所示。

由以上分析可见，只要电流连续，晶闸管可控整流器就可以看成一个线性的可控电压源。

当灾-酝系统主回路电感量较小或负载较轻时，电感中的最大储能较少，在下一相还没能触发之前即关断，因此要等到下一相触发后才出现  $I_d$ 。在  $I_d$  这一期间内电流中断，这时便产生了电流断续的情况。当电流断续时，由于非线性因素，机械特性方程式要复杂得多。机械特性曲线在电流断续区特性很软，而且是非线性的，理想空载转速翘得很高。电流断续时机械特性方

程式的推导较为繁琐。

完整的 灾—酝系统机械特性曲线如图 员圆所示。

### 圆 直流脉宽调速系统的机械特性

由于采用脉宽调制，即使在稳态情况下，脉宽调速系统的转矩和转速也都是脉动的。所谓稳态也只是平均值的平衡关系。在中小容量的脉宽调速系统中 陨尸载已经得到普遍应用。其开关频率一般在 员圆 左右，这时最大电流脉动量在额定电流的 缘 以下，转速脉动量很小，可以忽略不计。

采用不同控制方式的 孕宰酝变换器组成调速系统，其机械特性表达式不完全相同。对于带制动电流通路的不可逆电路和双极式控制的可逆电路，电流方向是可逆的。无论轻载还是重载电流波形都是连续的，因而机械特性方程式比较简单。而对于受限单极式，电流不能反向，轻载时出现电流断续情况，机械特性方程式要复杂得多，机械特性曲线基本与 灾—酝系统断续时的机械特性曲线类同。

图 员圆所示为 孕宰酝系统主回路原理图。其中图 员圆(葬) 为采用 陨尸载元件构成的带制动不可逆 孕宰酝电路，图 员圆(遭) 为 匀型可逆 孕宰酝电路。

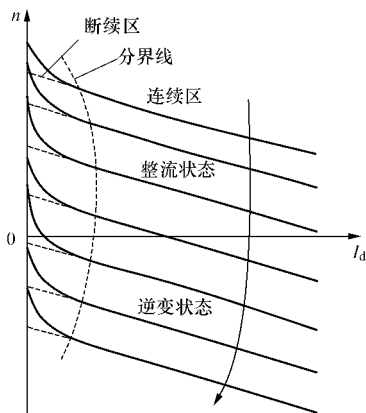


图 员圆 灾—酝系统的机械特性曲线

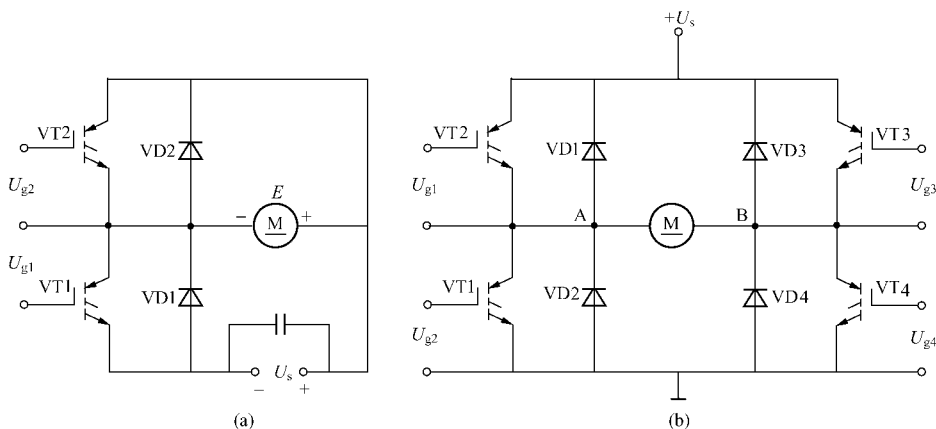


图 员圆 孕宰酝调速系统主回路

(葬) 有制动电流通路的不可逆 孕宰酝电路；(遭) 匀型可逆 孕宰酝电路

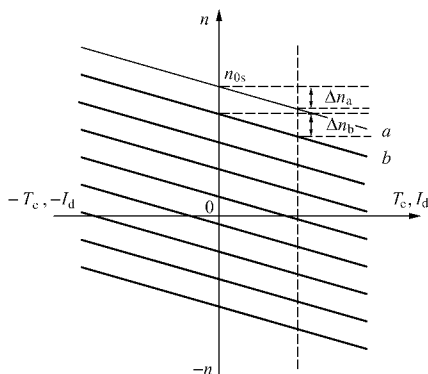
图 员圆所示为脉宽调速系统在电流连续时的机械特性曲线。

由图 员圆可以看出，带制动不可逆调速系统的机械特性曲线在第一、二两个象限。双极式可逆系统的机械特性曲线可扩展到第三、四象限。

对于电动机在同一方向旋转时电流不能反向的电路（如受限单极式），轻载时出现电流断续现象，当 陨越远 时，其理想空载转速上升到 灶越远 越况。

## 二、转速控制的要求和调速指标

任何一台需要控制转速的设备，生产工艺对拖动系统的调速性都有一定的要求。例如，最高转速和最低转速的调节范围、是平滑调速还是有级调速、稳态时允许的静态速降、扰动发生时克服的能力、动态变化时的系统控制能力等，所有这些要求都可以归纳为生产设备要求的技术指标。经过一定折算，可以转换为电力拖动自动控制系统的稳态和动态性能指标，作为设计调速系统时的依据。



**调速控制要求**

各种生产机械对调速系统提出不同的转速控制要求，归纳起来有以下三个方面：

(1) 调速。在一定的最高转速范围和最低转速范围内，有级（分档）或无级（平滑）地调节转速。

(2) 稳速。以一定精度在所需转速上稳定运行，不因各种可能发生的外来干扰（如负载变化、电网电压波动等）而产生过大的转速波动，以保证产品质量。

(3) 加减速控制。对频繁启动、制动的设备，要求尽快地完成加减速，缩短启动、制动时间以提高效率。对不宜经受剧烈速度变化的生产机械，则要求启动、制动平稳。

以上三方面有时都要求具备，有时只需要一、两项，有些方面的要求可能还会有矛盾。为了定量地分析，一般规定几种性能指标以便衡量系统的调速性能。

### 稳态指标

运动控制系统稳态运行时的指标称为稳态指标或静态指标。为了分析方便，根据调速要求，定义具有普遍意义的两个调速指标，那就是“调速范围”和“静差率”。这是衡量系统稳态性能的指标。

(1) 调速范围。将生产机械要求拖动系统能达到的最高转速  $n_{\max}$  和最低转速  $n_{\min}$  之比称为调速范围，用字母  $D$  表示，即

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} \quad (1-1)$$

其中  $n_{\max}$  和  $n_{\min}$  一般指额定负载时的转速，对少数负载轻的机械也可以用实际负载时的转速。一般在设计调压调速系统时常令  $n_{\max} = n_n$ 。

(2) 静差率。当系统在某一转速下稳定运行时，将负载由理想空载到额定负载时所对应的转速降落  $\Delta n$  与理想空载转速  $n_0$  之比称为静差率，即

$$s = \frac{\Delta n}{n_0} \quad (1-2)$$

或用百分数表示

$$\Delta n_{\text{静}} \propto \frac{\Delta U_{\text{d}}}{U_{\text{d}}^*} \quad (1.1.10)$$

静差率表征负载变化引起调速系统的转速偏离原定转速的程度，它和机械特性的硬度有关，特性越硬，静差率越小，说明系统稳态性能好。

然而，静差率和硬度又有区别。一般变压调速时在不同电压下的机械特性是互相平行的，如图 1.1.9 所示。图中曲线 1 和 2 平行且  $\Delta n_{\text{静}1} < \Delta n_{\text{静}2}$ ，这时说两条曲线表示的机械特性硬度相同，但它们的静差率却不同，原因是理想空载转速不同。对于同样硬度的机械特性，理想空载转速较低时静差率能满足要求，高速时一定满足要求。因此调速系统静差率指标应以最低转速能达到的数值为准，所以

$$\Delta n_{\text{静}} \propto \frac{\Delta U_{\text{d}}}{U_{\text{d}}^*} \quad (1.1.11)$$

在  $\Delta n_{\text{静}}$  越小时，速降  $\Delta n_{\text{降}}$  越大，杂越优。如果  $\Delta n_{\text{静}}$  越大，在相同的速降下，杂越优；如果  $\Delta n_{\text{静}}$  降到 0 仍然是  $\Delta n_{\text{静}}$  越大，这时电机已停转。

由此可见，阅和杂这两项指标并非完全孤立，必须同时考虑才有意义。因此静差率制约调速范围，反过来调速范围又影响了静差率。

(猿) 调压调速系统中阅和  $\Delta n_{\text{静}}$  之间的关系

$$\Delta n_{\text{静}} \propto \frac{\Delta U_{\text{d}}}{U_{\text{d}}^*} \quad (1.1.12)$$

式 (1.1.12) 表达了调速范围阅、静差率杂、额定速降  $\Delta n_{\text{降}}$  之间应满足的关系。对于同一调速系统，其特性硬度一样，如果对静差率杂要求严格，则调速范围一定受到影响。

### 1.1.2 动态指标

直流调速系统在过渡过程中的性能指标称为动态指标。动态指标包括跟随性能指标和抗扰性能指标两类。

(员) 跟随性能指标。典型的跟随性能过程是指在零初始条件下，系统输出量对给定输入量（或称参考输入信号）的响应过程。可以把系统输出量对给定信号的动态响应过程用跟随性能指标描述。当给定信号的变化方式不同时，输出响应也不一样。一般以系统对单位阶跃输入信号的输出响应为依据。如图 1.1.10 所示，单位阶跃响应跟随过程。常用的单位阶跃响应跟随性能指标有上升时间、超调量和调节时间。

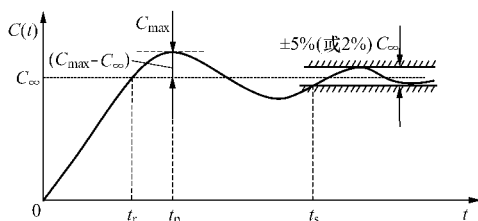


图 1.1.10 典型的阶跃响应过程和跟随性能指标

① 上升时间  $t_r$ : 单位阶跃响应曲线从零开始第一次达到稳态值所用时间称为上升时间，它表示动态响应的快速性。

② 超调量  $\sigma$  与峰值时间  $t_p$ : 在阶跃响应过程中，输出量达到稳态值，再上升，达到峰值  $C_{\text{max}}$  后再回落。达到  $C_{\text{max}}$  时所用的时间  $t_p$  为峰值时间。超过稳态值  $C_{\text{max}}$  的部分与稳态值  $C_{\text{∞}}$  之比叫做超调量，即

