

中央广播电视大学出版社

自动控制系统

电力拖动控制

陈伯时 主编

自动控制系统
电力拖动控制
陈伯时 主编

中央广播电视大学出版社出版
新华书店北京发行所发行
一二〇一工厂印装

开本787×1092 1/16 印张18 千字418
1988年8月第1版 1988年12月第1次印刷
印数 1—17,000
定价3.65元

ISBN 7-304-00260-3/TP·14

前 言

现代自动控制系统应用范围极广，几乎遍及国民经济和国防事业的一切部门。但是，从控制对象工艺过程的角度看来，大体可分为两大部类：一类是以机械运动为主要生产方式，以电动机为执行机械的“电力拖动自动控制系统”；另一类是以化学反应或热能转换为主要生产方式，以自动化仪表与装置为检测和执行机构的“电气仪表过程控制系统”。因此，现在就把自动控制系统分成两门课来讲，各写成一本教材：《自动控制系统——电力拖动控制》和《自动控制系统——工业生产过程自动控制系统》。本书是其中的第一本。

仅就电力拖动控制系统而言，它的应用也是很广的。如果在课程讲授中面面俱到，势必形成各种控制系统的罗列，而每种系统只能蜻蜓点水似地叙述一下，这是一般专业课程易犯的通病。为了避免这种弊病，本书的编写将遵循理论和实际相结合的原则，从满足不同的生产工艺要求出发，应用自动控制理论，将电力拖动控制系统归纳成具有不同控制规律的几类系统，由简入繁、由低及高地进行分析，并讲授各种系统的静、动态设计方法。

本书的前身是作者主编的《自动控制系统》（1981年7月机械工业出版社出版），该书的编写就是力图贯彻上述指导思想的。经过全国许多高校多年的教学实践，证明这些想法是正确的，但限于当时的条件，还有一些不足之处。其一是在当时的教学计划中，“自动控制原理”和“自动控制系统”课程是并行的，不可能在“自动控制系统”课一开始就运用控制理论。这一点现在已经不成问题，包括电大在内的各校工业电气自动化专业教学计划已将“自动控制原理”课安排在前面，因此本书从第一章起就可以在学过控制理论的基础上来分析实际控制系统了。其次，限于当时学术发展的条件和作者的水平，81年的书主要只讲了晶闸管（可控硅）供电的直流调速系统，现在这部分仍放在本书第二、三、四章中，同时，由于现代科学技术和工业实践发展的需要，增加了脉宽调速系统（第五章）和交流电机调速系统（第六章），使这门课程更能反映现代的水平。但由于56学时（讲课50、实验6）教学大纲的限制，删去了位置随动系统。

本书除基本内容外，还附有习题和实验指导书。学习本书的先修课程是：电机与拖动、自动控制原理、半导体变流技术。

本书由上海工业大学陈伯时主编，第一、二、三、四、五章由陈伯时编写，第六章由胡慎敏编写，习题由倪国宗编写，实验指导书由夏新顺编写，倪国宗、朱平平、张琳君负责了全书插图的绘制。

本书主要供各地电大学生使用。由于本书在体系和内容上已经作了较大的更新和改进，在全日制高等学校《自动控制系统》教材没有更新以前，也可作为该教材的补充和参考。同时，

可供厂矿和研究设计单位工程技术人员的参考。

限于作者的水平，书中错误或不当之处在所难免，殷切期望广大读者批评指正。

陈 伯 时

1988年5月

目 录

前言	1
第一章 直流拖动控制系统概述	1
§ 1-1 旋转变流机组供电的直流调速系统	2
§ 1-2 静止变流装置供电的直流调速系统	4
§ 1-3 斩波器或脉宽调制装置控制的直流调速系统	5
§ 1-4 电力拖动控制系统的技术指标	7
一、稳态指标	7
二、动态指标	9
§ 1-5 电力拖动控制系统的设计原则和控制规律	11
第二章 单闭环直流调速系统	13
§ 2-1 晶闸管电动机系统的特殊问题	13
一、触发脉冲相位控制	13
二、电流脉动的影响及其抑制措施	14
三、电流波形的连续和断续	15
四、KZ D系统的机械特性	15
§ 2-2 单闭环调速系统的稳态性能	17
一、闭环调速系统的组成及其静特性	17
二、开环系统机械特性和闭环系统静特性的比较	19
三、单闭环调速系统的基本特征	22
四、单闭环调速系统的稳态参数计算	23
五、单闭环调速系统的限流保护——电流截止负反馈	27
§ 2-3 单闭环调速系统的动态数学模型和稳定条件	31
一、单闭环调速系统的动态数学模型	31
二、单闭环调速系统的稳定条件	37
§ 2-4 单闭环调速系统的校正	38
一、控制系统对开环对数频率特性的一般要求	38
二、原始系统的开环对数频率特性	39
三、PI调节器串联校正设计	41
§ 2-5 无静差调速系统	44
一、积分调节器和积分控制规律	45
二、比例积分控制规律	47
三、稳态抗扰误差分析	48
四、无静差调速系统举例及稳态参数计算	51
第三章 多环调速系统	54
§ 3-1 转速、电流双闭环调速系统及其静特性	54
一、问题的提出	54

二、系统的组成	55
三、静特性	57
四、各变量的稳态工作点和稳态参数计算	58
§ 3-2 双闭环调速系统的动态性能和调节器设计	59
一、双闭环调速系统的动态数学模型	59
二、起动过程	59
三、动态性能和两个调节器的作用	61
四、调节器的设计	63
§ 3-3 调节器的工程设计方法	63
一、基本思路	64
二、典型系统	65
三、典型 I 型系统参数和动态性能指标的关系	66
四、典型 II 型系统参数和动态性能指标的关系	73
五、调节器的选择和传递函数的近似处理——非典型系统的典型化	77
§ 3-4 按工程设计方法设计双闭环系统的电流调节器和转速调节器	82
一、电流调节器的设计	84
二、转速调节器的设计	88
三、转速调节器退饱和时转速超调量的计算	92
四、设计举例	95
§ 3-5 双闭环调速系统转速超调的抑制——转速微分负反馈 ^[22]	100
一、问题的提出	100
二、带转速微分负反馈双闭环系统的基本原理	100
三、退饱和时间和退饱和转速	101
四、转速微分反馈参数的工程设计方法	103
五、带转速微分负反馈时调速系统的抗扰性能	105
六、小结	106
§ 3-6 三环调速系统	107
一、带电流变化率内环的三环调速系统	107
二、带电压内环的三环调速系统	110
第四章 可逆调速系统	113
§ 4-1 晶闸管-电动机系统的可逆线路	113
§ 4-2 晶闸管装置的逆变状态与电动机的回馈制动	115
一、晶闸管装置的整流和逆变状态	115
二、电动机的回馈制动	116
三、如何在 KZ-D 系统中实现回馈制动	117
§ 4-3 环流及其种类	118
一、两组晶闸管可逆线路的环流问题	118
二、配合控制与直流环流	119
三、产生脉动环流的原因及其抑制方法	122
§ 4-4 有环流可逆调速系统	122
一、 $\alpha = \beta$ 工作制配合控制的有环流可逆调速系统	122
二、制动过程分析	124

§ 4-5 无环流可逆调速系统	129
一、逻辑控制的无环流可逆调速系统	129
二、错位控制的无环流可逆调速系统	134
第五章 脉宽调速系统	140
§ 5-1 脉宽调制变换器	140
一、不可逆PWM变换器	140
二、可逆PWM变换器	143
§ 5-2 脉宽调速系统的控制电路	145
§ 5-3 晶体管脉宽调速系统的几个特殊问题	147
一、电流脉动和转速脉动	147
二、晶体管的开关过程和开关损耗	152
三、开关频率	152
第六章 交流电机调速系统	155
§ 6-1 交流异步电动机变频调速的一般问题	156
一、变频调速的原理和特性	156
二、变频方法	163
三、变频器	169
§ 6-2 转速开环变频调速控制系统	197
§ 6-3 转差频率控制的变频调速系统	201
一、转差频率控制的基本概念	201
二、转差频率控制的规律及其实现	201
三、转差频率控制变频调速系统的工作原理	203
四、转差频率控制系统的动态结构及其校正	206
五、计算实例	207
§ 6-4 异步电动机的矢量控制系统	210
一、矢量控制的基本概念	210
二、矢量变换规律及其实现	211
三、矢量变换控制方程式	219
四、磁通观测器	221
五、矢量控制系统举例	223
§ 6-5 串级调速控制系统	224
一、串级调速的工作原理和特性	225
二、串级调速控制系统	233
§ 6-6 无换向器电机调速控制系统	237
一、无换向器电机的工作原理	237
二、无换向器电机调速控制系统	243
习题	245
参考文献	249
附：实验指导书	251

第一章 直流拖动控制系统概述

直流电动机具有良好的起、制动性能，宜于在广范围内平滑调速，历来是电力拖动自动控制系统的主要执行元件，在轧钢机及其辅助机械、矿井卷扬机、挖掘机、海洋钻机、大型起重机、金属切削机床、造纸机、纺织机械等领域中得到了广泛的应用。机械的换向器是直流电机的主要薄弱环节，它使直流电机的单机容量、过载能力、最高电压、最高转速等重要指标都受到限制，也给直流电机的制造和维护添了不少麻烦。因此，长期以来，在应用和完善直流拖动控制系统的同时，人们一直不断在研制性能与价格都赶得上直流系统的交流拖动控制系统，近年来，在微机控制和电力电子变频装置高度发展之后，这个愿望终于有了实现的可能。然而，鉴于直流拖动控制系统的理论和实践都比较成熟，而且从闭环反馈控制的角度上看，它又是交流拖动控制系统的基础，所以本书首先着重讨论直流拖动控制系统。

从生产机械要求控制的参量来看，电力拖动自动控制系统可分为：调速系统、位置随动系统、张力控制系统、多电机同步控制系统等等，各种控制系统往往都是通过控制转速（更本质上是控制电机的转矩）来实现的，因此调速系统是最基本的拖动控制系统。

直流电机的转速和其它参量的关系可用公式 (1-1) 表达：

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

式中： n ——转速；

U ——电枢供电电压；

I ——电枢电流；

R ——电枢回路总电阻；

Φ ——励磁磁通；

K_e ——由电机结构决定的电势常数。

由此可见，要控制电机的转速可有三种方法：

(1) 调节电枢供电电压 U ；

(2) 减弱励磁磁通 Φ ；

(3) 改变电枢回路电阻 R 。

对于要求有一定范围的无级平滑调速系统来说，以调节电枢供电电压的方式为最好。改变电阻只能有级调速；减弱磁通虽然能够平滑调速，但调节范围不大，往往只是配合调压方案，在基速（即电动机额定转速）以上作小范围的升速。

调节电机电枢的供电电压需要有专门的可控电源，从可控电源的种类上看，又有三种情况：

(1) 机组供电——用交流电动机和直流发机构成的旋转变流机组得到可调的直流电压；

(2) 静止变流供电——用静止的可控变流装置，例如晶闸管整流装置，获得可调的直流电压；

(3) 直流斩波器或脉宽调制供电——用恒定直流电源或不控整流电源供电，利用直流斩波器或脉宽调制装置产生可变的平均电压。

在机组供电的直流调速系统中，控制装置常用电机放大机、磁放大器、以及作为前级放大用的晶体管放大器等等。电机放大机和磁放大器的惯性都比电子装置大得多，采用它们的同时也提高了整个系统动态方程的阶次，给系统的设计和校正带来困难。自从静止可控变流装置问世以来，由于其功率放大倍数比发电机高几个数量级，可以直接用晶体管来控制，这是它能够逐渐取代机组供电的重要原因之一。现在除一些老企业原有的机组供电直流控制系统仍在运行以外，它们已经不再发展了。目前，对于静止变流供电的系统和斩波器或脉宽调制系统来说，主要的控制装置有：

- (1) 由线性集成电路运算放大器和晶体管放大器构成的模拟电子控制装置；
- (2) 由模拟电子电路和数字电子电路构成的混合式电子控制装置；
- (3) 由数字电子电路和（或）微型电子计算机构成的全数字式电子控制装置。

本书前几章将以模拟控制的晶闸管供电调速系统作为基本的分析对象，其它问题将在后续的章节中叙述。下面先分别对三种供电方式的直流拖动控制系统作一概括性的介绍。

§ 1-1 旋转变流机组供电的直流调速系统

该系统的原理图示于图1-1。由交流电动机JD（异步机或同步机）拖动直流发电机F实现变流，由F给需要调速的直流电动机D供电，调节F的励磁电流 i_f 即可改变其输出的电压 U ，从而调节电动机的转速 n 。这样的调速系统简称F-D系统，国际上通称Ward-Leonard系

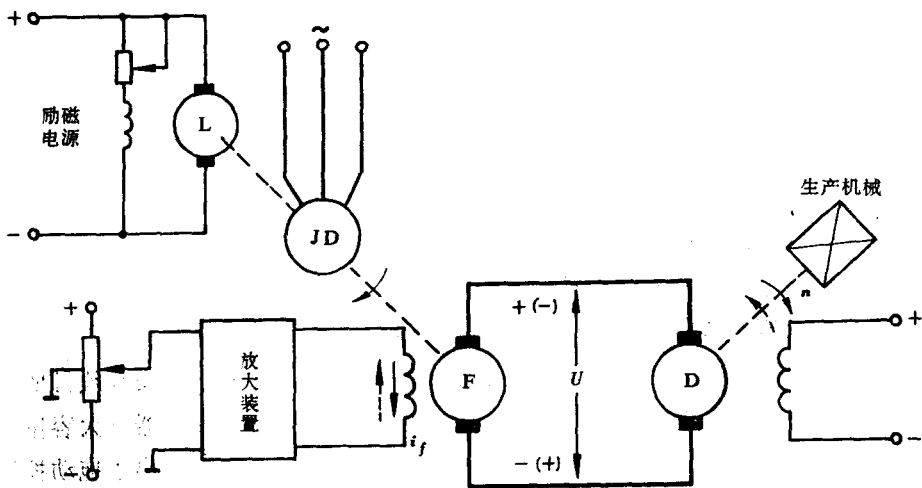


图 1-1 旋转变流机组供电的直流调速系统 (F-D 系统)

统。为了供给F和D的励磁电压，还专门设置一台直流励磁发电机L，可装在变流机组同轴上由JD拖动，也可另外单用一台交流电动机拖动。

对系统的调速性能要求不高时， i_f 可直接由励磁电源供电，要求较高的闭环调速系统一般都应通过放大装置进行控制。F-D系统的放大装置多采用电机型放大器（主要是交磁放大机）和磁放大器，需要进一步提高放大倍数时还可增设电子放大器作为前级放大。如果改变 i_f 的方向， U 的极性和 n 的转向都跟着改变，所以F-D系统的可逆运行是很容易实现的。图1-2绘出了采用变流机组供电时电动机可逆运行的机械特性。由图可见，无论在正转还是反转减速时都能够实现回馈制动，因此F-D系统是在允许转矩范围之内四象限运行的系统。图1-2右上角是表示四象限运行的简单示意图。

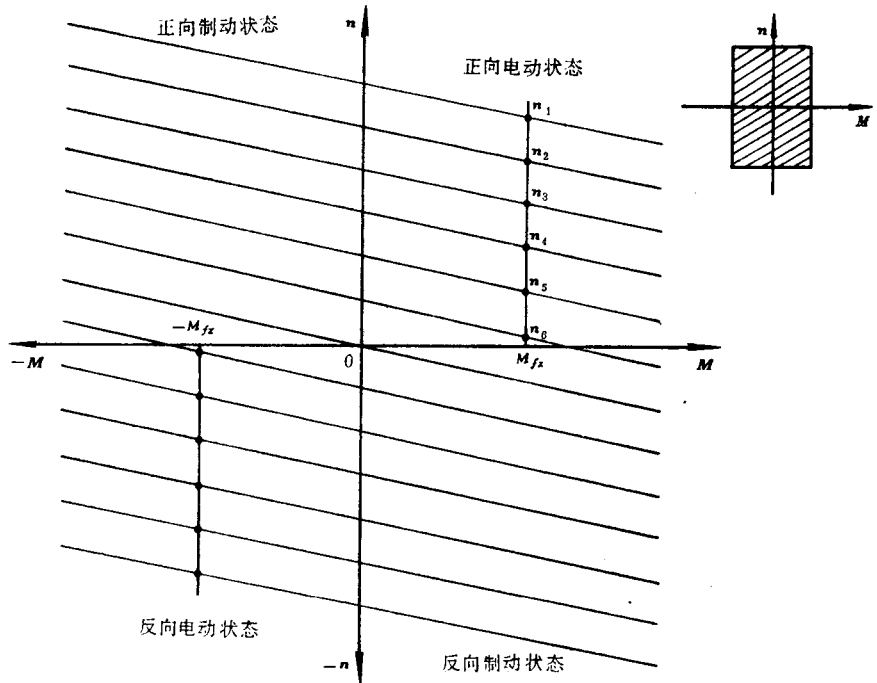


图 1-2 F-D 系统的机械特性

机组供电的直流调速系统在50年代曾广泛地使用着，至今在尚未进行设备改造的地方仍沿用这种系统。由于该系统需要旋转变流机组，至少包含两台与调速电动机容量相当的旋转电机，还要一台励磁发电机，因而设备多、体积大、费用高、效率低、安装须打地基、运行有噪音、维护不方便。为了克服这些缺点，在50年代开始采用水银整流器（大容量时）和闸流管（小容量时）这样的静止变流装置来代替旋转变流机组，形成所谓离子拖动控制系统，到了60年代又让位给更为经济可靠的晶闸管整流装置了。

§ 1-2 静止变流装置供电的直流调速系统

如上所述，离子拖动系统是最早应用的静止变流装置供电的直流调速系统。它虽然克服了旋转变流机组的许多缺点，而且缩短了响应时间，但水银整流器造价较高，维护麻烦，特别是水银如果泄漏，将会污染环境，危害工人健康。

1957年，晶闸管(俗称可控硅整流元件，简称“可控硅”)问世，到了60年代，已生产出成套的晶闸管整流装置，使变流技术产生了根本性的变革，开始进入晶闸管时代。到今天，晶闸管——电动机调速系统(简称KZ-D系统，又称静止的Ward-Leonard系统)已成为直流调速系统的主要形式。图1-3是KZ-D系统的简单原理图，图中KE是晶闸管整流装置，可以是单相、三相或更多相数，半波、全波、半控、全控等类型，通过调节触发装置CF的控制电压来移动触发脉冲的相位，即可改变整流电压，从而实现平滑调速。和旋转变流机组及离子拖动变流装置相比，晶闸管整流装置不仅在经济性和可靠性上都有很大提高，而且在技术性能

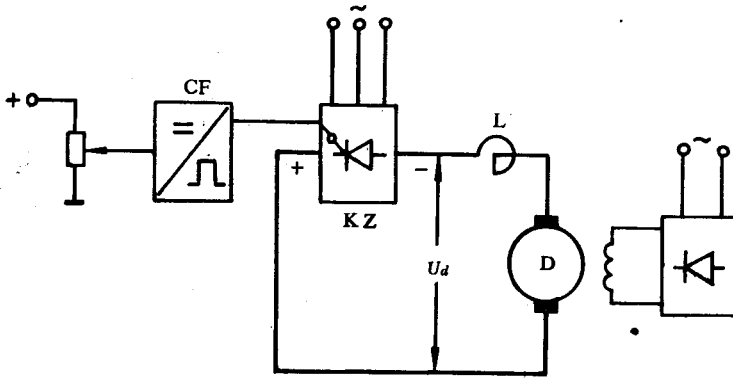


图 1-3 晶闸管整流装置供电的直流调速系统 (KZ-D系统)

上也显示出较大的优越性。在图1-4中可见，晶闸管整流装置的功率放大倍数在 10^4 以上，其门极电流可以直接用晶体三极管来控制，就不象直流发电机那样需要较大功率的放大装置了。在控制作用的快速性方面，机组是秒级，而晶闸管是毫秒级，这将会大大提高系统的动态性能。

晶闸管装置也有它的缺点。首先，由于晶闸管的单向导电性，它不允许电流反向，给系统的可逆运行造成困难。由半控整流电路构成的KZ-D系统只允许单象限运行(图1-5a)，全控整流电路可以实现有源逆变，允许电动机工作在反转制动状态，因而能够获得二象限运行(图1-5b)。必须进行四象限运行时(图1-5c)，只好采用正、反两组全控整流电路，所用变流设备要增多一倍，这种KZ-D可逆调速系统在第四章中将详细讨论。

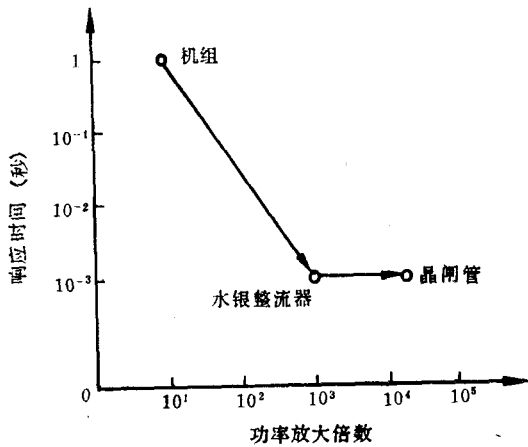


图 1-1 各种变流装置技术性能的比较

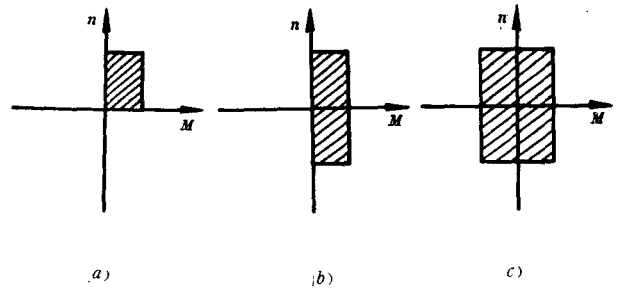


图 1-5 KZ-D系统的运行范围
a) 单象限运行 b) 二象限运行 c) 四象限运行

晶闸管的另一个缺点是，元件对过电压、过电流以及过高的 $\frac{du}{dt}$ 和 $\frac{di}{dt}$ 都十分敏感，其中任一指标超过允许值都可能在很短时间内损坏元件，因此必须有可靠的保护装置和符合要求的散热条件，而且在元件选择时还应留有适当的余量。只要元件质量过关、装置设计合理、保护装置齐备，晶闸管装置的运行是十分可靠的；否则就可能常出事故，给维护运行带来不少麻烦。

最后，当系统处在深调速状态，即在较低速运行时，晶闸管的导通角很小，使得系统的功率因数很低，并产生较大的高次谐波电流成分，引起电网电压波形畸变，殃及附近的用电设备。如果采用晶闸管调速的设备在电网中所占的容量比重较大，就会造成所谓的“电力公害。”在这种情况下，必须采取无功补偿和谐波滤波装置^[10]。

§ 1-3 斩波器或脉宽调制装置控制的直流调速系统

在地铁、电力机车、城市无轨电车、电瓶搬运车等电力牵引设备上，常采用直流电动机，

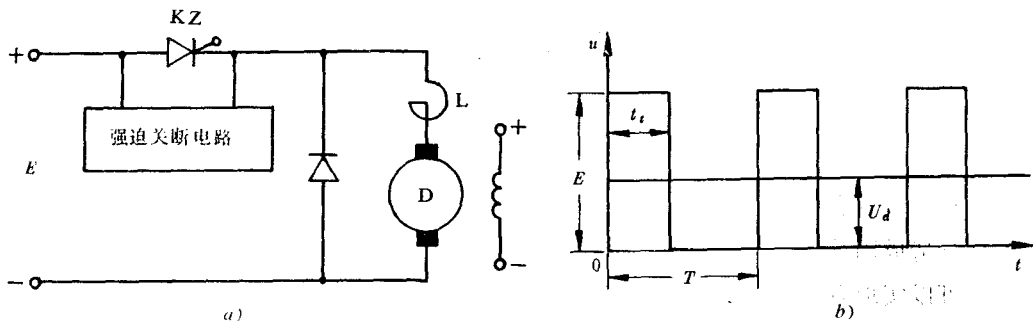


图 1-6 斩波器-电动机系统的原理图和电压波形
a) 原理图 b) 电压波形

目前多由恒定直流电源供电，而且切换电阻来控制其起动、制动和调速，能量损耗甚大。晶闸管也可以用来控制直流电压，这就是直流斩波器，或称直流调压器^[4,10]。

直流斩波器的基本原理示于图1-6 a)。与整流电路不同的是，在这里晶闸管KZ不是受相位控制，而是工作在开关状态。当KZ被触发导通时，直流电源电压 E 加到电动机上；当KZ关断时，直流电源与电机断开，电动机经二极管D续流，两端电压接近于零。如此反复，得电枢端电压波形 $u = f(t)$ 如图1-6 b)，好像是电源电压 E 在一定期间 $(T - t_i)$ 被斩断后形成的，其中 t_i 为KZ开通的时间， T 为开关周期。电动机得到的平均端电压为：

$$U_d = \frac{t_i}{T} E = \rho E \quad (1-2)$$

式中 $\rho = t_i/T = t_i f$ 称作脉冲电压的占空比， f 是开关频率。

晶闸管一旦导通，就不能再用门极来使它关断，若要关断，必须在阳、阴极间施加反压，这就需要一种附加的强迫关断电路^[4, 10]。受到晶闸管关断时间的限制，普通斩波器的开关频率约为100~200Hz。为了缩小装置的体积，可用逆导晶闸管代替普通晶闸管和反向二极管，同时开关频率可以适当提高，例如300Hz。

直流斩波器的平均输出电压 U_d 可以通过改变主晶闸管的开通和(或)关断时间来控制，图1-7 绘出了几种常用控制方式的电压、电流波形。

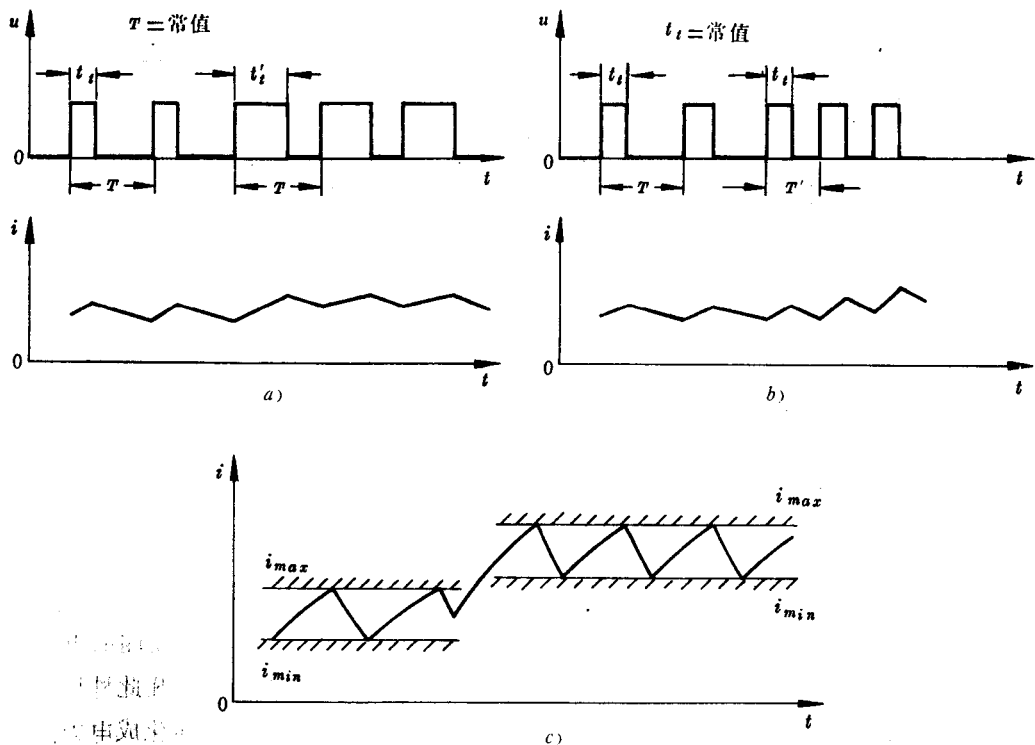


图 1-7 直流斩波器的控制方式
 a) 脉冲宽度调制 b) 脉冲频率调制 c) 两点式调制

(1) 脉冲宽度调制 (Pulse Width Modulation), 简称PWM。脉冲周期 T 不变, 只改变主晶闸管的开通时间 t_1 , 亦即改变脉冲的宽度 (图1-7a)

(2) 脉冲频率调制 (Pulse Frequency Modulation), 简称PFM。开通时间不变, 只改变开关频率 f 或开关周期 T , 也就是只改变晶闸管关断的时间 (图1-7b)。

(3) 两点式控制。当负载电流或电压低于某一最小值时, 使KZ触发导通; 当电流或电压达到某一最大值时, 使KZ关断。开通和关断时间都是不确定的。

由普通晶闸管或逆导晶闸管构成的斩波器开关频率不高, 因而输出电流脉动较大, 调速范围有限。此外, 附加的强迫关断电路也增加了装置的体积和复杂性。为了适应大功率开关电路的要求, 自70年代以来研制了多种既能控制其导通又能控制其关断的“全控式”电力电子元件, 如门极可关断晶闸管(GTO)、大功率晶体管(GTR)、场效应晶闸管(P-MOSFET)等等。全控式元件的关断时间较短, 因而由它们构成的斩波器其工作效率可以提高到1~4kHz, 甚至达到20kHz。采用全控式元件实行开关控制时, 多用脉冲宽度调制的控制方式, 形成近年来应用日广的PWM装置-电动机系统, 简称PWM调速系统, 或脉宽调速系统。

与KZ-D系统相比, PWM调速系统有下列优点:

(1) 由于PWM调速系统的开关频率较高, 仅靠电枢电感的滤波作用可能就足以获得脉动很小的直流电流, 电枢电流容易连续, 系统的低速运行稳定, 调速范围较宽, 可达1:10000左右。又由于电流波形比KZ-D系统好, 在相同的平均电流即相同的输出转矩下, 电机的损耗和发热都较小。

(2) 同样由于开关频率高, 若与快速响应的电机相配合, 系统可以获得很宽的频带, 因此快速响应性能好, 动态抗扰能力强。

(3) 由于电力电子元件只工作在开关状态, 主电路损耗较小, 装置效率较高。

受到元件容量的限制, 直流PWM调速目前只用于中、小功率的系统。

§ 1-4 电力拖动控制系统的技术指标

任何一台需要电力拖动的设备, 其生产工艺对控制系统的性能都有一定要求。例如, 精密机床要求加工精度达到百分之几毫米甚至几微米; 重型铣床的送进机构需要在很宽的范围内调速, 快速移动时最高速达到600mm/min, 而精加工时最低速只有2mm/min; 点位式数控机床要求定位精度达到几微米, 速度跟踪误差低于定位精度的一倍左右。又如, 在轧钢工业中, 巨型的年产数百万吨钢锭的现代化初轧机, 其轧辊电动机容量达到几千kW, 而且操作频繁, 在不到一秒的时间内就得完成从正转到反转的全部过程; 轧制薄钢带的高速冷轧机最高轧速达到37m/s以上, 而成品厚度误差不大于1%。在造纸工业中, 日产新闻纸400吨以上的高速造纸机, 抄纸速度达到1000m/min, 要求稳速误差小于 $\pm 0.01\%$; 凡此种种, 不胜枚举。所有这些要求, 都是生产设备量化的技术指标, 经过一定折算, 可以转化成电力拖动控制系统的稳态或动态性能指标, 作为设计系统的依据。

一、稳态指标

电力拖动控制系统稳定运行时的性能指标称做稳态指标，例如：调速系统稳定运行时的调速范围和静差率，位置随动系统的定位精度和速度跟踪精度，张力控制系统的稳态张力误差等等。鉴于本书将首先着重讨论调速系统，下面先具体分析调速系统的稳态指标。

(一) 调速范围

生产机械要求电动机提供的最高转速 n_{\max} 和最低转速 n_{\min} 之比叫做调速范围，用字母 D 表示，即

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} \quad (1-3)$$

其中 n_{\max} 和 n_{\min} 一般都指电机带额定负载时的最高转速和最低转速，对于少数负载很轻的机械，例如精密磨床，也可用实际负载时的转速。

(二) 静差率

当系统在某一转速下运行时，负载由理想空载增加到满载所对应的转速降落 Δn_{ed} ，与理想空载转速 n_0 之比，称作静差率 s ，即

$$s = \frac{\Delta n_{ed}}{n_0} \quad (1-4)$$

或用百分数表示：

$$s(\%) = \frac{\Delta n_{ed}}{n_0} \times 100\% \quad (1-5)$$

显然，静差率是用来衡量调速系统在负载变化下转速的稳定度的，它和机械特性的硬度有关，特性越硬，静差度越小，转速的稳定度就越高。

然而静差率和机械特性硬度又是有区别的。一般调压调速系统在不同转速下的机械特性是互相平行的，如图 1-8 中的特性①和②，两者的硬度相同，额定速降 $\Delta n_{ed1} = \Delta n_{ed2}$ ；但它们的静差率却不同，因为理想空载转速不一样。根据式 (1-4) 的定义，由于 $n_{01} > n_{02}$ ，所以 $s_1 < s_2$ 。这就是说，对于同样硬度的特性，理想空载转速越低时，静差率越大，转速的相对

稳定度也就越差。在 1000r/min 时降落 10r/min，只占 1%；在 100r/min 时也降落 10r/min，就占 10%；如果 n_0 只有 10r/min，再降落 10r/min 时，电动机就停止转动，转速 100% 地降落光了。由此可见，调速范围和静差率两项指标不是彼此孤立的，必须同时提才有意义。一个系统的调速范围，是指在最低速时还能满足给定静差率要求的转速可调范围。脱离了对静差率的要求，任何调压调速系统都可以得到极高的调速范围；脱离了调速范围，要满足给定的静差率

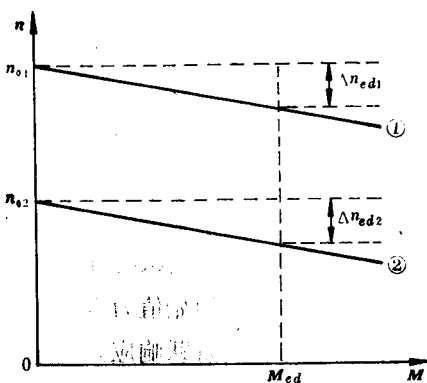


图 1-8 不同转速下的静差率

要求也就容易得多了。

在直流电机变压调速系统中，最高转速 n_{max} 就是电动机的额定转速 n_{ed} ，若带额定负载时的转速降落为 Δn_{ed} ，则按照上述分析的结果，该系统的静差率即最低速时的静差率，它是：

$$s = \frac{\Delta n_{ed}}{n_{min}}$$

于是，

$$n_{min} = n_{0min} - \Delta n_{ed} = \frac{\Delta n_{ed}}{s} - \Delta n_{ed} = \Delta n_{ed} \frac{1-s}{s},$$

而调速范围：

$$D = \frac{n_{max}}{n_{min}} = \frac{n_{ed}}{n_{min}}$$

代入上式得：

$$D = \frac{n_{ed} s}{\Delta n_{ed} (1-s)} \quad (1.6)$$

式 (1.6) 表示调速范围和静差率应满足的关系。它表明，当系统的特性硬度一定时， Δn_{ed} 一定，则对静差率的要求越严，即 s 值越小时，允许的调速范围也越小。

举例来说，若某 F-D 系统电动机额定转速为 $n_{ed} = 1430 \text{ r/min}$ ，额定静态速降 $\Delta n_{ed} = 115 \text{ r/min}$ ，当要求静差率 $s \leq 30\%$ 时，允许的调速范围为：

$$D = \frac{1430 \times 0.3}{115 (1-0.3)} = 5.3$$

如果要求 $s \leq 20\%$ ，则调速范围只有：

$$D = \frac{1430 \times 0.2}{115 (1-0.2)} = 3.1$$

可见对静差率有一定要求时，开环的 F-D 系统（以及 KZ-D 系统）所能实现的调速范围是不大的。对于一个实际的系统， D 和 s 已由工艺要求决定，要满足这个要求，就必须减小由负载引起的转速降落 Δn_{ed} ，这就成为设计调速系统的任务。

二、动态指标

电力拖动控制系统在过渡过程中的性能指标称做动态指标。动态指标分跟随性能指标和抗扰性能指标两类。

(一) 跟随性能指标

在给定信号（参考输入信号）变化作用下，系统输出量变化的情况用跟随性能指标来描述。当给定信号变化方式不同时，输出响应也不一样。通常以输出量初始值为零，在给定信号阶跃变化下的过渡过程作为典型的跟随过程，这时的动态过程又称阶跃响应。希望在阶跃响应中输出量与其稳态值 C_w 的偏差越小越好，达到 C_w 的时间越快越好。具体的跟随性能指标如下：

1. 上升时间 t_r

在典型跟随过程中，输出量从零起第一次上升到稳态值 C_w 所经过的时间称为上升时间，它表示动态响应的快速性。关于 t_r 尚有其它定义，参看文献^[2]。

2. 超调量 $\sigma\%$

在典型跟随过程中，输出量超出稳态值的最大偏离量与稳态值之比，用百分数表示，即

$$\sigma\% = \frac{C_{max} - C_w}{C_w} \times 100\% \quad (1-7)$$

超调量反映系统的相对稳定性。超调量越小，说明相对稳定性越好，即动态响应比较平稳。

3. 调节时间 t_s

调节时间又称过渡过程时间，它衡量系统整个调节过程的快慢。原则上它应该是系统从给定量阶跃变化起到完全达到稳态为止的时间，但是对于线性控制系统来说，理论上要到 $t = \infty$ 才完全稳定，实际系统并非如此。因此，一般在阶跃响应曲线的稳态值附近，取 $\pm 5\%$ （或取 $\pm 2\%$ ）的范围作为允许误差带，以响应曲线达到并不再超出该误差带所需的最小时间，定义为调节时间，见图1-9。

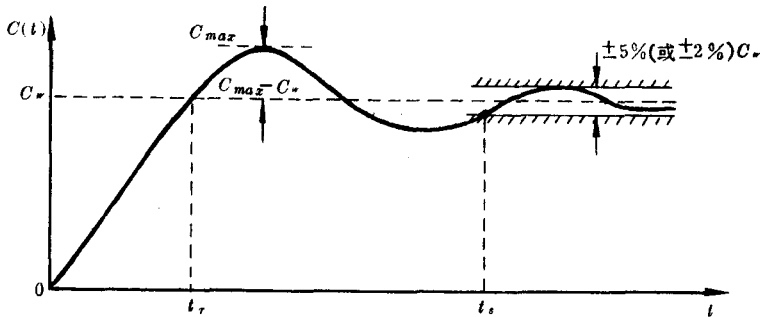


图 1-9 典型阶跃响应曲线和跟随性能指标

(二) 抗扰性能指标

电力拖动控制系统在稳态运行中，由于负载的变化、电源电压的波动等因素都会引起输出量的变化。输出量变化多少？在多么长的时间内能恢复稳定运行？这些问题标志着系统抵抗扰动的能力。一般以系统稳定运行中突加负的阶跃扰动 F 后的动态过程作为典型的抗扰过程，见图1-10。

抗扰性能指标定义如下：

1. 动态降落 $\Delta C_{max}\%$

系统稳定运行时，突加一定数值的扰动（例如额定负载扰动）后所引起的输出量最大降落，用原稳态值 C_{w1} 的百分数表示，叫做动态降落。系统在动态降落后又逐渐恢复稳定，达到新的稳态值 C_{w2} ， $(C_{w1} - C_{w2})$ 就是系统在该扰动作用下的稳态降落。动态降落一般都大