

zidong kongzhi
xitong



高等学校“十五”规划教材

自动控制系统

余发山 郑 征 王清灵 李 辉 王玉中 编著

中国矿业大学出版社

高等学校“十五”规划教材

自动控制系统

余发山 郑 征 王清灵 编著
李 辉 王玉中

中国矿业大学出版社

内容简介

本书以直流、交流电机拖动控制系统为主要研究对象,从系统的组成和工程实践的角度出发,主要讲述电气传动系统的基本控制规律和工程设计方法。

全书共分八章,介绍了直流调速系统的组成、闭环调节的静、动态特性及其工程设计方法、直流数字控制系统;交流调速系统的调压、变频、串级调速以及矢量控制等。内容由浅入深,阐述简明,配有习题,便于自学,具有较强的系统性和实用性。

本书可作为高等学校自动化、电气工程及其自动化等专业的“自动控制系统”、“电力拖动自动控制系统”等课程的教材,亦可供从事工业自动化控制系统设计、开发、维护等工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制系统/余发山等编著. —徐州:中国矿业大学出版社,2005.2

ISBN 7 - 81107 - 044 - 8

I. 自… II. 余… III. 自动控制系统 IV. TP. 273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 002287 号

书 名 自动控制系统

编 著 余发山等

责任编辑 何 戈

责任校对 杜锦芝

出版发行 中国矿业大学出版社

(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)

排 版 中国矿业大学出版社排版中心

印 刷 中国矿业大学印刷厂

经 销 新华书店

开 本 787×960 1/16 印张 16.5 字数 310 千字

版次印次 2005 年 2 月第 1 版 2005 年 2 月第 1 次印刷

定 价 19.50 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

本书是高等学校“十五”规划教材。自动控制系统是一门与生产紧密相关的专业课程。主要讨论为电力拖动机械设备配套电气传动系统及其自动控制装置,并提供符合拖动系统负载特性要求的合理调速方案。近年来,随着电子技术、计算机技术、数字控制技术、变频技术的发展,一些先进的控制理论和方法得以实现,采用微机技术或全数字化的直流、交流调速控制系统已逐步应用到拖动系统中,以微机为核心并具有控制、检测及监视的多功能电气传动系统正在推广應用和不断发展中。

为适应电气传动控制技术的这种新的发展动向,本书根据煤炭电气教材编委会“十五”规划会议制定的编写大纲,考虑到适应专业的课程改革与调整的要求,对内容取舍及讲授重点做了新的安排,主要在选材上采取交、直流系统并重的原则;从认识规律和科学体系上贯穿理论基础、系统结构与组成、工程设计的思想和方法,理论基础与特性分析重点放在直流系统中,数字系统、交流系统主要介绍常规的设计方法与应用,交流系统涉及到调压、变频、串级调速及矢量变换控制等多种方法;受篇幅所限,在书中以讲授基本原理为主,较少涉及专门的技术问题。从当前发展趋势看,工矿企业要求实现电气传动综合自动化,现代控制理论和微机技术等都是实现先进交流、直流调速控制不可或缺的工具,这些内容需要有专门的课程(如“微机控制技术”)去解决,限于篇幅,本书中将不予讨论。

本课程的先修课程有电机与拖动基础、电力电子技术、自动控制原理等,相关课程有现代控制理论、计算机控制技术、计算机仿真等。

本书由河南理工大学余发山教授担任主编,河南理工大学郑征副教授及安徽理工大学王清灵教授担任副主编。第一章由余发山编写;第二章、第三章、第六章由郑征编写;第四章由河南理工大学李辉编写;第七章由焦作大学王玉中编写;第五章、第八章由王清灵编写。在编写过程参阅了兄弟院校不少同志编写的同类教材,在此一并表示衷心的感谢。对本书所用参考文献的作者表示诚挚的谢意。

由于编写时间仓促和水平有限,错漏和不妥之处在所难免,诚请各位读者批评指正。

编著者

2004年10月

目 录

绪论	1
第一章 直流单闭环调速系统	4
第一节 晶闸管—电动机(V—M)调速系统的特点	5
第二节 反馈控制闭环调速系统的稳态分析	9
第三节 反馈控制闭环调速系统的动态分析及稳定性分析	27
第四节 积分、比例积分控制规律和无静差调速系统	32
习题	40
第二章 多环控制的直流调速系统	43
第一节 转速、电流双闭环调速系统及其静特性	43
第二节 双闭环调速系统的动态特性	48
第三节 直流电动机的双域控制	53
习题	58
第三章 直流可逆调速系统	60
第一节 V—M 系统的可逆线路及工作状态	60
第二节 有环流可逆系统中的环流及其控制方法	66
第三节 电枢可逆有环流调速系统及其控制方法	72
第四节 逻辑无环流可逆调速系统	82
习题	93
第四章 直流调速系统的工程设计	94
第一节 调节器的工程设计方法	94
第二节 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	119
第三节 Matlab 自动控制系统仿真	136
习题	144
第五章 数字化直流调速系统	145
第一节 数字触发器	148
第二节 数字调节器	154
第三节 输入输出通道	160
第四节 数字直流可逆调速系统	164

习题.....	165
第六章 交流异步电动机变压变频调速系统	
——转差功率不变型调速系统.....	166
第一节 交流调速的基本类型.....	166
第二节 变频调速的构成及基本要求.....	167
第三节 静止式变频装置简介	170
第四节 正弦波脉宽调制(SPWM)变频器.....	178
第五节 异步电动机电压、频率协调控制的稳态机械特性	187
第六节 转速开环、恒压频比控制的变频调速系统	194
第七节 转速闭环转差频率控制的变频调速系统.....	199
习题.....	204
第七章 交流异步电动机的其他调速方法.....	205
第一节 交流调压调速及绕线型转子斩波调速	
——转差功率消耗型调速系统.....	205
第二节 绕线转子异步电动机串级调速系统	
——转差功率回馈型调速系统.....	215
习题.....	238
第八章 交流异步电动机矢量控制.....	239
第一节 电动机空间矢量的基本概念.....	239
第二节 异步电动机按磁通定向的矢量控制原理.....	244
第三节 坐标变换原理.....	247
第四节 异步电动机按磁通定向的矢量控制系统.....	250
第五节 无速度传感器的异步电动机矢量控制系统.....	256
习题.....	257
参考文献.....	258

绪 论

一、交、直流调速系统发展概况

按照拖动电动机的类型划分,自动调速系统包括直流调速系统和交流调速系统两大类。由于直流电动机的电压、电流和磁通之间的耦合较弱,使直流电动机具有良好的机械特性,能够在较大范围内平滑调速,启动、制动性能良好,故其在 20 世纪 70 年代以前一直在高精度、大调速范围的传动领域内占据主导地位。但随着生产技术的不断发展,直流拖动的薄弱环节逐步显示出来。由于换向器的存在,使直流电动机的维护工作量加大,单机容量、最高转速以及使用环境都受到限制。但是由于它的调速性能好,调速系统结构简单,有些部门还把直流电动机用作传动装置。

近年来,以电力电子器件为核心,配合电力电子技术、控制技术、计算机技术等,开创了电力电子技术蓬勃发展的新时代。从 20 世纪 80 年代起,在电气传动自动化领域中出现了一个革命性的变化,这就是交流电机调速技术取得了突破性进展。众所周知,交流感应电动机结构简单,坚固耐用,成本低,制造维修容易,但是由于它的电压、电流和磁通之间具有强耦合,调速性能差,因此以往交流调速系统不受重视。现在,借助于新兴的电力电子技术,特别是变频和矢量控制技术的完善,很好地解决了交流调速存在的问题,使交流调速系统发生了质的飞跃,逐步取代直流调速系统成为主要的传动装置。

促进交流电机调速技术的飞跃发展并不是偶然的。这是由于在 20 世纪 70 年代以后,现代控制理论、新型大功率电力电子器件、新型变频技术以及微型计算机数字控制技术等,均在实际应用中取得了很大的进展,这就为交流调速技术的发展创造了坚实的物质基础。

(一) 现代控制理论的应用促成了矢量控制技术的诞生,为交流电机调速技术奠定了理论基础

交流电机为一多变量、非线性、强耦合的被控对象,采用参数重构和状态重构等现代控制理念,可实现定子电流中励磁分量和转矩分量的解耦,从而使交流电机能像直流电机那样,对励磁分量及转矩分量进行独立控制。这就为高性能交流电机调速技术奠定了理论基础。

(二) 全控型大功率快速电力电子器件的出现,为变频调速提供了物质保证

20 世纪 70 年代中期以前,交一直一交变频装置的核心部件逆变器是由晶闸管实现的。但因晶闸管关断的不可控性,必须配备一套有效的强迫换流装置才能实现可靠逆变,而复杂的换流装置使变频调速系统的整体效率、可靠性、成本等均无法与同容量直流调速系统相比。20 世纪 80 年代生产出了高效全控型器件,实现了电力电子装置的小型轻量化、高效率、低成本和良好的控制性能等,从而提高了电力电子技术的节能指标。

(三) 微型计算机在性能、速度、价格、体积等方面的优势,为交流调速理论的实现提供了主要保证

以微型计算机作为控制系统的核心部件实现在线控制,已成为目前工业生产过程及调速控制的发展趋势。它能适时采集各种参数,经过比较分析及判断,提供必要的指令,指挥系统中各环节及时动作,使复杂的控制思想成为现实。现代高速计算机已不仅能记录和超限报警,并具有自检、自诊断,甚至自校正和自排除故障等功能。目前,16 位、32 位微机实际应用相当成熟,形成了一系列标准控制单元,以及标准模块化结构,便于工程设计人员选用。

二、电力拖动系统的构成和分类

(一) 电力拖动系统的构成

凡是由电动机作为动力拖动各类生产机械,完成一定的生产工艺要求的系统,都称为电力拖动系统。电力拖动系统一般由电动机、传动机、生产机械、电源和控制装置五部分组成,如图 0-1 所示。工业生产中最典型的电力拖动系统有电

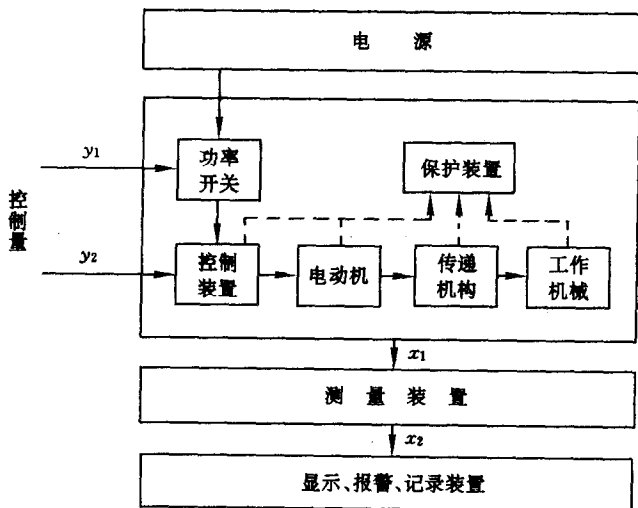


图 0-1 开环电力拖动系统的组成

力机车、起重机、龙门刨床等。

(二) 电力拖动系统的分类

我们按照拖动电动机的类型,将拖动系统划分为直流拖动系统和交流拖动系统两大类。实际上,按照其组成结构,还可分为两类:一类是开环电力拖动系统,用于性能指标要求不高的专用设备上;另一类是闭环电力拖动系统,它具有自动控制和闭环调节的功能,广泛应用于各种工作机械。

1. 开环电力拖动系统

图 0-1 所示就是一开环调速系统,它的核心部件为电动机,其输入端经功率开关和控制元件由电网供电,输出端经传递机构与工作机械连接。系统中可设置保护元件或传感器,当出现故障超限时,令电动机跳闸停机。

这类系统主要用于对启、制动和调速无特殊要求、不要求精确调速的场合,如磨碎机、输送机、电葫芦、泵类等。系统中开关和控制装置通常用于人工手动操作。

2. 闭环电力拖动系统

闭环系统示意图如图 0-2 所示。由图可见,它和前一系统的区别是增设了控制及调节装置,它利用实测的参数作为反馈信息量,与原先设定的指令进行比较,以完成闭环调节作用。调节单元中可装入预先规定的控制或调节算法,调节单元的输出 y 就成为作用于电动机的实际指令,以满足动态性能指标。输入指令可以手动设定,或由上一级自动装置给出。

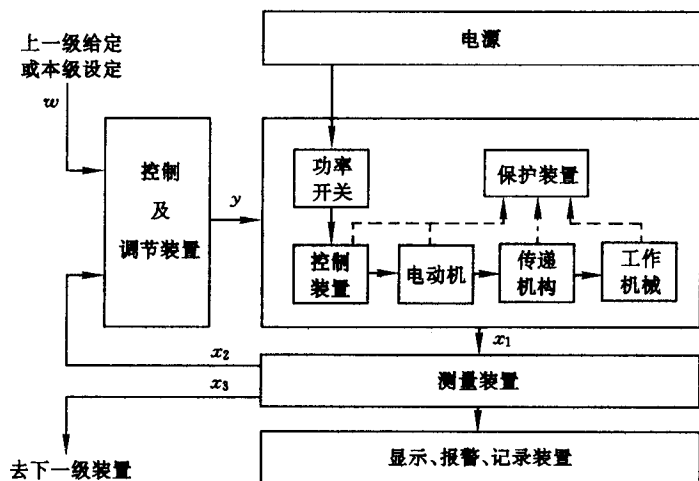


图 0-2 闭环电力拖动系统的组成

第一章 直流单闭环调速系统

本章首先介绍晶闸管供电的直流电动机调速系统的特点;然后讨论单闭环系统的组成、基本性质、静态特性方程、结构图及其分析方法;最后研究闭环调速系统的反馈控制规律,并对无静差调速系统的积分控制规律进行了较详细的论述。

直流电动机具有良好的启、制动性能,宜于在大范围内平滑调速,在轧钢机、矿井卷扬机、挖掘机、金属切削机床、造纸机、高层电梯等需要高性能可控电力拖动的领域中得到了广泛的应用。近年来,交流调速系统发展很快,然而直流调速系统毕竟在理论上和实践上都比较成熟,而且从反馈闭环控制的角度来看,它又是交流拖动控制系统的基础,所以首先应该很好地掌握直流调速系统。

直流电动机转速和其他参量的关系可用下式表达:

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

式中: n 为转速, r/min ; U 为电枢电压, V ; I_a 为电枢电流, A ; R 为电枢回路总电阻, Ω ; K_e 为由电动机结构决定的电动势常数; Φ 为励磁磁通, Wb 。

由式(1-1)可以看出,直流电动机有以下三种方法可以调节其转速:

- (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 。

对于要求在一定范围内无级平滑调速的系统来说,以调节电枢供电电压的方式为最好;改变电枢回路电阻只能有级调速;减弱磁通虽然能够平滑调速,但调速范围不大,往往只是配合调压调速方案,在基速(即电动机额定转速)以上小范围地升速。因此,自动控制的直流调速系统往往以变压调速为主,这种方法是从基速向下调节速度。

第一节 晶闸管—电动机(V—M)调速系统的特点

一、触发脉冲相位控制

在晶闸管—电动机调速系统中(简称 V—M 系统,又称静止的 Ward—Leonard 系统),如图 1-1 所示,调节给定电压 U_n^* ,即可改变触发装置 GT 输出脉冲的相位,从而很方便地调整整流器的输出瞬时电压 u_d 和平均电压 U_d 。如果把整流装置内部的电阻压降、器件正向压降和变压器漏抗引起的换相压降都等效到整流装置外面,当作负载电路压降的一部分,那么整流电压便可用其理想空载值 u_{d0} 和 U_{d0} 来代替,其等效电路图如图 1-2 所示。

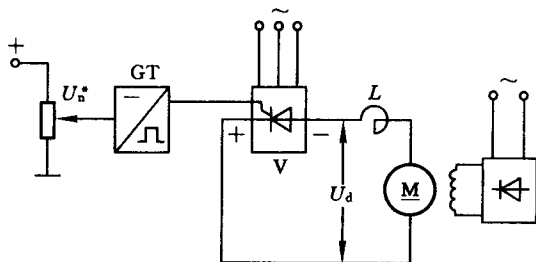


图 1-1 晶闸管可控整流供电的直流调速系统

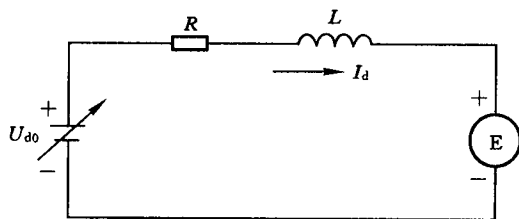


图 1-2 V—M 系统主电路的等效电路图

此时,瞬时电压平衡方程式为:

$$u_{d0} = E + i_d R + L \frac{di_d}{dt} \quad (1-2)$$

式中: L 为主电路总电感; R 为主电路总的等效电阻,包括整流装置内阻、电动机电枢电阻和平波电抗器电阻; E 为电动机反电势; i_d 为整流电流瞬时值。

通过改变触发脉冲的相位来控制整流电压平均值是晶闸管整流器的主要特点。 U_{d0} 与触发脉冲相位 α 的关系因整流电路的形式而异。对于一般全控式整流

电路,当电流波形连续时, $U_{d0}=f(\alpha)$ 可用下式表示:

$$U_{d0} = \frac{m}{\pi} U_m \sin \frac{\pi}{m} \cos \alpha \quad (1-3)$$

式中: α 为触发脉冲控制角; U_m 为 $\alpha=0$ 时的整流电压波形峰值; m 为交流电源一周内的整流电压脉波数。

对于不同的整流电路,它们的数值如表 1-1 所列。

表 1-1 不同的整流电路的整流电压波形峰值、脉波数及平均整流电压

整流电路	单相全波	三相半波	三相全波	六相半波
U_m	$\sqrt{2} U_2^{(1)}$	$\sqrt{2} U_2$	$\sqrt{6} U_2$	$\sqrt{2} U_2$
m	2	3	6	6
U_{d0}	$0.9 U_2 \cos \alpha$	$1.17 U_2 \cos \alpha$	$2.34 U_2 \cos \alpha$	$1.35 U_2 \cos \alpha$

(1) U_2 是整流变压器二次侧额定相电压的有效值。

在 1 000 kW 以上的大功率调速系统中常采用双三相桥构成的十二相整流电路,两组桥的交流电源分别由整流变压器的两套二次绕组提供,一套接成△形,另一套接成 Y 形,使输出电压相位错开 30° ,共同构成 $m=12$ 的整流电路,如图 1-3 所示,以进一步减少输出电流的脉动分量。

由于十二相整流电路结构的特殊性,式(1-3)不再适用。对于图 1-3(a)所示的双桥并联带平衡电抗器电路, $U_{d0}=f(\alpha)$ 表示为:

$$U_{d0} = 2.34 U_2 \cos \alpha$$

对于图 1-3(b)所示的双桥串联电路, $U_{d0}=f(\alpha)$ 表示为:

$$U_{d0} = 4.68 U_2 \cos \alpha$$

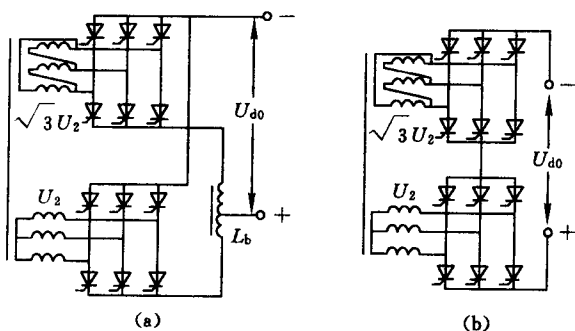


图 1-3 双三相桥组成的十二相整流电路

(a) 双桥并联带平衡电抗器; (b) 双桥串联

二、电流波形的连续与断续

由于晶闸管整流装置的相位控制特性,以及整流电路的脉动波数 $m=2, 3, 6, 12, \dots$, 其数目总是有限的,因此 V—M 系统的电流是脉动的。当 V—M 系统主回路串联足够大电感量的电抗器而且电动机的负载电流也足够大时,整流电流波形是连续的,如图 1-4 所示。当电感较小且负载较轻时,一相导通的电感量储能较少,在下一相未被触发前,电流已衰减到零,负载电流便产生时有时无的断续波形,如图 1-5 所示。

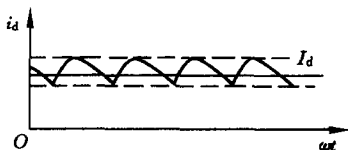


图 1-4 V—M 系统电流连续波形

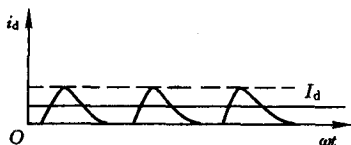


图 1-5 V—M 系统电流断续波形

三、V—M 系统的机械特性

(一) 电流连续时 V—M 系统的机械特性

由“电力电子技术”课程可知:V—M 系统在电流连续时,其机械特性为一簇平行的直线。但当电流断续时,机械特性便呈非线性。

当电流连续时,V—M 系统的机械特性方程式为:

$$n = \frac{1}{C_e} (U_{d0} - I_d R) = \frac{1}{C_e} \left(\frac{m}{\pi} U_m \sin \frac{\pi}{m} \cos \alpha - I_d R \right) \quad (1-4)$$

式中: $C_e = K_e \Phi_{nom}$ 为电动机在额定磁通下的电动势转速比。

式(1-4)等号右边 U_{d0} 表达式的适用范围如本节“触发脉冲相位控制”中所述。

由式(1-4)可知,当控制角一定时,转速 n 与电流 I_d 成线性关系。这样可方便地调节电动机的转速。改变控制角 α , 得一簇彼此平行的直线,如图 1-6 所示。机械特性上平均电流较小的部分画成虚线,因为这时电流波形可能断续,式(1-4)就不适用了,实线部分为电流连续时的机械特性。上述结论表明,只要电流

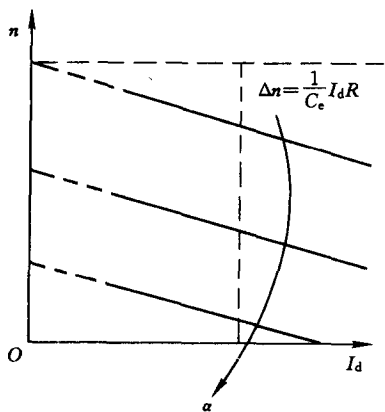


图 1-6 V—M 系统电流连续时的机械特性
(箭头表示 α 增大的效果)

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。

(二) 电流断续时 V—M 系统的机械特性

由于负载电流较小或回路电感量小而使电动机电枢电流断续,此时机械特性方程要复杂得多。以三相半波电路为例,电流断续时机械特性要用下列方程表示:

$$n = \frac{\sqrt{2} U_2 \cos \varphi \left[\sin \left(\frac{\pi}{6} + \alpha + \theta - \varphi \right) - \sin \left(\frac{\pi}{6} + \alpha - \varphi \right) e^{-\theta \cot \varphi} \right]}{C_e (1 - e^{-\theta \cot \varphi})} \quad (1-5)$$

$$I_d = \frac{3 \sqrt{2} U_2}{2\pi R} \left[\cos \left(\frac{\pi}{6} + \alpha \right) - \cos \left(\frac{\pi}{6} + \alpha + \theta \right) - \frac{C_e \theta n}{\sqrt{2} U_2} \right] \quad (1-6)$$

式中: $\varphi = \arctan \frac{\omega L}{R}$; θ 为一个电流脉波的导通角。

当阻抗角 φ 已知时,对于不同的控制角 α ,可用数值解法求出一簇电流断续机械特性(应注意,当 $\alpha < \frac{\pi}{3}$ 时特性略有差异)。这样的求解计算到 $\theta = \frac{2\pi}{3}$ 为止,因为 θ 角再大电流便连续了。对应于 $\theta = \frac{2\pi}{3}$ 的曲线是电流断续与连续区的分界线。

图 1-7 绘出了 V—M 系统完整的机械特性,其中包含了整流状态和逆变状态、连续区和断续区。由图可见,当电流连续时,特性比较硬;断续段特性则很软,而且呈显著的非线性,理想空载转速翘得较高。一般分析调速系统时,只要主电路电感足够大,就可以近似地只考虑连续段,即用连续段特性及其延长线(图中虚线)作为系统的特性。对于断续段特性比较显著的情况,这样做离实际较远,可

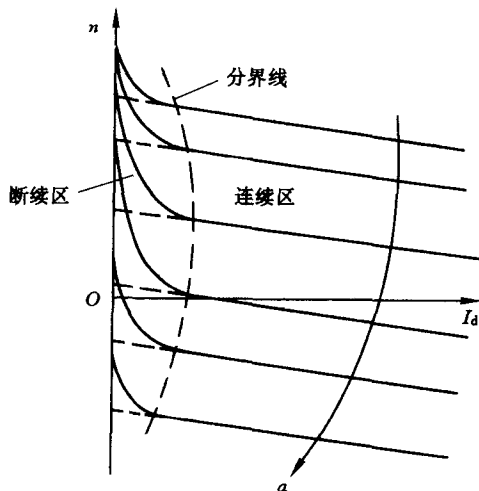


图 1-7 V—M 系统完整的机械特性

以改用另一段较陡的直线来逼近断续段特性(图 1-8),这相当于把总电阻 R 换成一个更大的等效的电阻 R' ,其数值可以从实测特性上计算出来。严重时 R' 可达实际电阻 R 的几十倍。因此在实际系统中主回路应串入较大的平波电抗器或避免负载在轻载下运行,以保证晶闸管整流电路电流连续,使系统的调速性能得到改善。

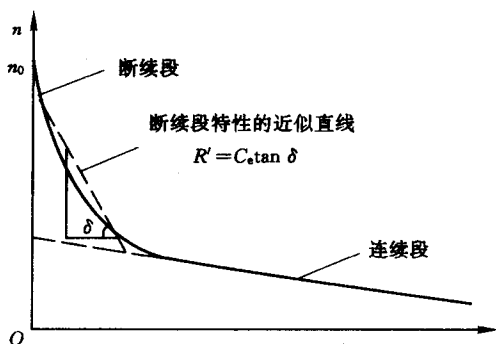


图 1-8 断续段特性的近似处理

V—M 直流调速系统和应用旋转变流机组的直流调速系统相比,在经济性和可靠性上都有很大提高,而且在技术上性能优越。晶闸管可控整流器的功率放大倍数在 10^4 以上,在控制快速性方面达到了毫秒级。但是,由于晶闸管的单向导电性,通过它的电流不能反向,可逆系统必须要有两组晶闸管变流器。另外,当系统处在深调速状态时,晶闸管的导通角很小,系统的功率因数低,谐波电流大。

第二节 反馈控制闭环调速系统的稳态分析

一、调速性能指标

对于调速系统转速控制的要求也是各式各样的,归纳起来,主要有以下三个方面:

(1) 调速——在一定的最高转速和最低转速范围内,分档(有级)地或平滑(无级)地调节转速;

(2) 稳速——以一定的精度在所需转速上稳定运行,在各种可能的干扰下不允许有过大的转速波动,以确保产品质量;

(3) 加、减速——频繁启、制动的设备要求尽量快地加、减速以提高生产率;不宜经受剧烈速度变化的机械则要求启、制动尽量平稳。

以上三个方面有时都须具备,有时只要求其中一项或两项,而对于调速和稳

速两项,若都要实现,常相互矛盾。为了保证产品质量,要求系统在各级转速下工作时,不允许有过大的速度波动,这一点往往十分重要。因此,为了进行定量分析,针对这两项要求规定了以下两个调速指标,即调速范围和静差率,来衡量调速系统稳态性能的好坏。前者是生产机械的要求,后者是对拖动电动机特性提出的配合条件。这两项指标合在一起又称为调速系统的稳态(静态)性能指标,它们也是设计调速系统的重要依据。

调速指标包括静态和动态两种,这里只叙述静态指标,动态指标将在第四章中讲述。

(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 D ,即:

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} \quad (1-7)$$

式中: $n_{\max}$ 、 $n_{\min}$ 分别为电动机额定负载时的最高、最低转速。

不同类型工作机械所要求的调速范围不同,一般车床的调速范围为几到几十,而程序控制和随动系统可达到几百至几千。在直流电动机调压调速系统中,常以电动机的额定转速为最高转速。

(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额定值所对应的转速降落 Δn_{nom} 与理想空载转速 n_0 之比,称为静差率 s ,即转速变化的相对值:

$$s = \frac{\Delta n_{\text{nom}}}{n_0} \quad (1-8)$$

或用百分数表示:

$$s = \frac{\Delta n_{\text{nom}}}{n_0} \times 100\% \quad (1-9)$$

显然,静差率是用来衡量调速系统在负载变化时转速的稳定度的。如果电动机机械特性很软,转速降落大,则静差率大,表示系统对转矩变化太敏感,即转速的稳定性差。它和机械特性的硬度有关,特性越硬,静差率越小,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相互平行的,如图 1-9 中的 a 和 b ,两者硬度相同,额定速降 $\Delta n_{\text{oma}} = \Delta n_{\text{omb}}$;但由于它们的理想空载转速不一样,所以它们的静差率不同。根据式(1-9)的定义,由于 $n_{0a} > n_{0b}$,所以 $s_a < s_b$ 。由此可知,对于同样硬度的机械特性,高速特性的静差率小,转速的相对稳定度高;而低速特性的静差率大,转速的

相对稳定度低。在工程设计时应以最低速特性所对应的静差率为依据,因为此时为电动机最困难的工作条件。

由此可见,调速范围和静差率这两项指标并不是彼此孤立的,必须同时考虑才有意义。一个调速系统的调速范围,是指在最低速时还能满足静差率要求的转速可调范围。脱离了对静差率的要求,任何调速系统都可以得到极高的调速范围;反之,脱离了调速范围,要满足规定的静差率也就容易多了。

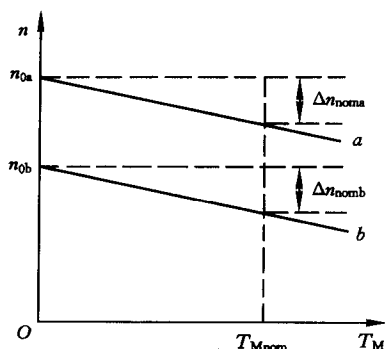


图 1-9 不同转速下的静差率

(三) 调速范围、静差率和额定速降之间的关系

生产机械有时从不同角度提出对调速系统的要求,因此有必要推导调速范围 D 、静差率 s 以及转速降落 Δn 之间的关系。在直流电动机调压调速系统中,由于电动机正常运行时不应超过其铭牌规定的额定转速 n_{nom} ,故常以电动机的额定转速 n_{nom} 为最高转速。若带额定负载时的转速降落为 Δn_{nom} ,按照上述分析结果,该系统的静差率为:

$$s = \frac{\Delta n_{\text{nom}}}{n_{0\text{min}}}$$

故得:

$$n_{\text{min}} = n_{0\text{min}} - \Delta n_{\text{nom}} = \frac{\Delta n_{\text{nom}}}{s} - \Delta n_{\text{nom}} = \frac{(1-s)\Delta n_{\text{nom}}}{s}$$

而调速范围为:

$$D = \frac{n_{\text{max}}}{n_{\text{min}}} = \frac{n_{\text{nom}}}{n_{\text{min}}}$$

将 n_{min} 的表达式代入上式,得:

$$D = \frac{n_{\text{nom}} s}{\Delta n_{\text{nom}} (1-s)} \quad (1-10)$$

式(1-10)表明调速范围、静差率和额定速降之间所应满足的关系。对于同一个调速系统,它的特性硬度或 Δn_{nom} 值是一定的,因此,由式(1-10)可见,如果对静差率的要求越高,也就是说,要求 s 越小时,系统能够允许的调速范围也越小。

例如:某调速系统的额定转速 $n_{\text{nom}} = 1430 \text{ r/min}$,额定速降 $\Delta n_{\text{nom}} = 115 \text{ r/min}$,当要求静差率 $s \leq 30\%$ 时,允许的调速范围是 $D_1 = 5.3$;如果要求 $s \leq 20\%$,则调速范围下降为 $D_2 = 3.1$ 。

几种典型生产机械的调速指标如表 1-2 所列。