



教育部 高职高专规划教材
Jiaoyubu Gaozhi Gaozhuan Guihua Jiaocai

交直流传动控制系统

钱 平 主编



高等教育出版社

HIGHER EDUCATION PRESS



教育部高职高专规划教材

交直流传动控制系统

钱 平 主编

高等教育出版社

内容提要

本书是教育部高职高专规划教材,是根据教育部制定的高职高专教育电气信息类专业人才培养目标及规格编写的。主要内容有单、双闭环直流调速系统;直流调速系统的工程设计方法;可逆直流调速系统;直流脉宽调速系统;位置随动系统;交流调压、串级调速、变频调速、无换向器电动机调速和矢量变换控制以及交直流电动机的数字控制等现代工厂企业用得比较普遍和先进的技术。基础实验指导书等实践环节也作为正式内容编进了教材。

本书可作为高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院和民办高校的电类专业教材,也可供应用型本科院校从事电气传动技术方面工作的工程技术人员参考和使用。

图书在版编目(CIP)数据

交直流传动控制系统/钱平主编. —北京:高等教育出版社,2001.7

教育部高职高专规划教材

ISBN 7-04-009968-3

I. 交... II. 钱... III. ①交流电传动-控制系统
-高等学校:技术学校-教材 ②直流电传动-控制系统
-高等学校:技术学校-教材 IV. TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 027339 号

交直流传动控制系统

钱平 主编

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号

邮政编码 100009

电 话 010-64054588

传 真 010-64014048

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所

排 版 高等教育出版社照排中心

印 刷 高等教育出版社印刷厂

开 本 787×1092 1/16

版 次 2001 年 7 月第 1 版

印 张 20.25

印 次 2001 年 7 月第 1 次印刷

字 数 480 000

定 价 17.30 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

出版说明

教材建设工作是整个高职高专教育教学工作中的重要组成部分。改革开放以来,在各级教育行政部门、学校和有关出版社的共同努力下,各地已出版了一批高职高专教育教材。但从整体上看,具有高职高专教育特色的教材极其匮乏,不少院校尚在借用本科或中专教材,教材建设仍落后于高职高专教育的发展需要。为此,1999年教育部组织制定了《高职高专教育基础课程教学基本要求》(以下简称《基本要求》)和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》(以下简称《培养规格》),通过推荐、招标及遴选,组织了一批学术水平高、教学经验丰富、实践能力强的教师,成立了“教育部高职高专规划教材”编写队伍,并在有关出版社的积极配合下,推出一批“教育部高职高专规划教材”。

“教育部高职高专规划教材”计划出版500种,用5年左右时间完成。出版后的教材将覆盖高职高专教育的基础课程和主干专业课程。计划先用2~3年的时间,在继承原有高职、高专和成人高等学校教材建设成果的基础上,充分汲取近几年来各类学校在探索培养技术应用型专门人才方面取得的成功经验,解决好新形势下高职高专教育教材的有无问题;然后再用2~3年的时间,在《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》立项研究的基础上,通过研究、改革和建设,推出一大批教育部高职高专教育教材,从而形成优化配套的高职、高专教育教材体系。

“教育部高职高专规划教材”是按照《基本要求》和《培养规格》的要求,充分汲取高职、高专和成人高等学校在探索培养技术应用型专门人才方面取得的成功经验和教学成果编写而成的,适用于高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院和民办高校使用。

教育部高等教育司

2000年4月3日

前 言

本书是为了适应电气传动技术飞速发展的需要,更好地培养 21 世纪的应用性电气传动技术人才,根据“教育部高职高专电类规划教材研讨会”审定的教学大纲编写的。

“交直流传动控制系统”课程是电气技术、工业电气自动化及机电一体化等专业的重要专业课之一。教材内容的选取及编写尽量体现高职高专学校培养工业、工程生产第一线高等工程技术应用性人才的要求,舍弃了现有各类教材中较为陈旧的内容,重点阐述了转速负反馈单闭环直流调速系统;转速、电流双闭环直流调速系统;直流调速系统的工程设计方法;直流脉宽调速系统、位置随动系统、交流变频调速系统以及交直流电动机的数字控制等,并将实验指导书纳入了教材,加强了实践性环节的训练。

本书第 2、3 章由胡春慧编写,第 6、7 章由孙国琴编写,第 10、11 章由袁正明编写,第 5 章由江敏和钱平共同编写,其余各章由钱平编写。钱平任主编,负责全书的统稿和编写组织工作。

本书主审华中理工大学万淑云教授对全部书稿进行了认真的审阅,并提出了许多宝贵的意见,在此表示衷心的感谢。

本书在编写过程中参考了许多有关图书和论文资料,并且引用了参考文献中有关章节内容,在此表示感谢。

由于作者水平有限,错误和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 直流传动技术概况	1
1.2 交流传动技术概况	1
1.3 交-直流传动数字控制技术概况	2
1.4 本课程的任务	3
练习题	3
第 2 章 单闭环直流调速系统	4
2.1 概述	4
2.1.1 调速的定义	4
2.1.2 直流电动机的调速方法	4
2.1.3 调速指标	5
2.1.4 可控直流电源供电下的直流电动机开环调速及特性	8
2.2 单闭环直流调速系统的组成及其特性	14
2.2.1 单闭环有静差调速系统	15
2.2.2 单闭环调速系统的稳态特性	16
2.2.3 单闭环调速系统的动态特性	21
2.2.4 单闭环无静差调速系统	27
练习题	35
第 3 章 双闭环直流调速系统及其工程设计	37
3.1 转速、电流双闭环调速系统	37
3.1.1 转速、电流双闭环调速系统的特点	37
3.1.2 转速、电流双闭环调速系统的工作原理	38
3.1.3 转速、电流双闭环调速系统的工程设计法	43
3.2 直流可逆调速系统	64
3.2.1 有环流可逆调速系统	64
3.2.2 数字化逻辑无环流可逆调速系统	71
练习题	81
第 4 章 直流脉宽调速系统	84
4.1 概述	84
4.2 PWM 功率电源及 PWM-M 系统开环机械特性	84

4.2.1 脉宽调制理论	84
4.2.2 不可逆 PWM 变换器	85
4.2.3 可逆 PWM 变换器	89
4.2.4 脉宽调速系统的开环机械特性	92
4.3 脉宽调速系统的控制电路	92
4.3.1 脉宽调制器	92
4.3.2 功率输出级的栅极驱动电路	97
4.4 PWM 调速控制系统的特殊问题	98
练习题	103
第 5 章 位置随动系统	105
5.1 概述	105
5.1.1 定义	105
5.1.2 位置随动系统的应用	105
5.2 位置随动系统的基本原理	105
5.2.1 位置随动系统的主要组成部件及其工作原理	105
5.2.2 位置随动系统与调速系统的比较	106
5.3 位置信号检测装置	107
5.3.1 光栅测量装置	107
5.3.2 旋转变压器(BR)	108
5.3.3 感应同步器(BIS)	110
5.3.4 光电编码器	111
5.3.5 磁尺	113
5.4 位置随动系统	114
5.4.1 转角跟随式位置随动系统	114
5.4.2 脉冲-相位调制式位置随动系统	115
5.4.3 数字式位置随动系统	117
5.4.4 L290/L291/L292 三芯片直流电动机位置随动控制系统	119
5.4.5 基于 DSP 的全数字直流位置随动系统	124
练习题	128
第 6 章 交流调压调速和串级调速	130
6.1 概述	130

6.1.1 交流调速系统的发展	130	8.2.2 无换向器电动机的工作原理	202
6.1.2 交流调速系统的分类	131	8.2.3 无换向器电动机的电磁转矩	204
6.2 闭环控制的异步电动机调压调速系统	131	8.2.4 无换向器电动机逆变器的换流	208
6.2.1 异步电动机改变电压时的机械特性	131	8.2.5 无换向器电动机的机械特性	210
6.2.2 三相交流调压电路	133	8.2.6 过载能力	210
6.2.3 闭环控制的调压调速系统	140	8.3 无换向器电动机的基本特性	211
6.2.4 调压调速的功率损耗	143	8.3.1 调速特性	211
6.3 绕线式异步电动机的串级调速系统	144	8.3.2 内功率因数角	212
6.3.1 串级调速原理及基本类型	144	8.4 无换向器电动机调速系统	213
6.3.2 双闭环控制的串级调速系统	148	8.4.1 无换向器电动机调速系统的基本组成	213
练习题	148	8.4.2 无换向器电动机的转子位置检测器	214
第7章 异步电动机变频调速系统	150	8.4.3 专用集成电路控制的无换向器(无刷直流)电动机传动系统	220
7.1 变频调速基本原理	150	练习题	229
7.1.1 变频调速基本原理	150	第9章 交直流电动机的数字控制	230
7.1.2 变频器简介	152	9.1 概述	230
7.2 正弦波脉宽调制(SPWM)逆变器	156	9.2 交直流传动系统状态量的数字检测	232
7.2.1 SPWM 逆变器的工作原理	156	9.3 交直流传动系统主要控制环节的微机实现	236
7.2.2 SPWM 逆变器的调制方式	159	9.3.1 函数发生器	236
7.2.3 SPWM 波的实现	159	9.3.2 数字控制器	238
7.2.4 SPWM 脉冲的生成方法及专用集成芯片	161	9.3.3 坐标变换器	243
7.3 主回路的换相过程	171	9.3.4 数字滤波器	247
7.3.1 SPWM 变频器输出电压的矢量表示	171	9.4 直流脉宽调制调速系统的微机实现	250
7.3.2 换相过程	172	9.4.1 系统的硬件结构	251
7.3.3 推论	179	9.4.2 系统的软件结构	254
7.4 U/F 变频调速系统	180	9.5 位置随动系统的微机实现	257
7.4.1 U/F 控制方式及其机械特性	180	9.5.1 硬件总体结构	257
7.4.2 U/F 控制系统组成及工作原理	183	9.5.2 控制电路主要结构	258
7.5 矢量变换控制变频调速系统	187	9.5.3 数模变换的特点	258
7.5.1 矢量变换控制的基本概念	187	9.5.4 绝对位置的获取	260
7.5.2 矢量变换规律及其实现	190	9.5.5 位置随动系统的软件设计	260
7.5.3 异步电动机模型	193	9.6 由 8098 单片机实现的 SPWM 变频调速系统	261
7.5.4 矢量变换控制的变频调速系统	196	9.6.1 主电路	261
练习题	199	9.6.2 系统组成框图	262
第8章 无换向器电动机调速系统	200	9.6.3 控制电路	262
8.1 概述	200	9.6.4 8098 生成 SPWM 波	264
8.2 无换向器电动机的基本原理	200	9.6.5 软件框图	264
8.2.1 无换向器电动机的类型	200	第10章 直流调速系统基础实验指导	266

10.1	直流调速控制系统参数和环节特性 的性能测试	266
10.1.1	晶闸管(SCR)直流调速系统参数 和环节特性的测定	266
10.1.2	晶闸管(SCR)直流调速系统主要 单元调试	272
10.1.3	单闭环直流调速系统性能的研究	273
10.2	双闭环直流传动控制系统的性能和 测试	275
10.2.1	双闭环晶闸管不可逆直流调速 系统的特性测试	275
10.2.2	逻辑无环流可逆直流调速系统 ...	279
10.3	直流脉宽调速控制系统的性能测试 ...	281
10.3.1	MOSFET 双闭环可逆直流脉宽	

	调速系统	281
10.3.2	微机控制的全数字直流调速装 置的参数设定与运行	286
第 11 章	交流调速基础实验指导	290
11.1	交流调压调速控制系统性能的测试 ...	290
11.1.1	双闭环三相异步电动机调压调速 系统的测试	290
11.2	交流变频调速控制系统性能的测试 ...	293
11.2.1	异步电动机 SPWM 与电压空间 矢量变频调速系统	293
11.2.2	交流变频调速装置参数设定与 运行	297
11.2.3	交流变频调速装置的闭环运行 ...	301
附录		305
参考文献		312

第 1 章

绪 论

1.1 直流传动技术概况

传动控制系统是通过对电动机的控制,将电能转换成机械能,并且控制工作机械按给定的运动规律运行的装置。用直流电动机作为原动机的传动方式称为直流传动。由于直流传动系统具有良好的起动、制动、正反转及调速等性能,目前在传动领域中仍占主要地位。虽然近年来交流电动机的传动控制技术发展很快,但就其闭环控制的机理来说,直流电动机的传动与控制理论和实现都是交流电动机传动控制的基础。从根本上说,由于直流电动机电枢和磁场能独立进行激励,而且转速和输出转矩的描述是对可控电压(或电流)激励的线性函数,因此,容易实现各种直流电动机传动控制系统,也容易实现对控制目标的“最佳化”,这也就是直流电动机长期主导传动领域的原因。晶闸管供电的直流传动系统具有良好的技术经济指标,目前国内较多传动系统还是沿用晶闸管电动机传动结构,由于晶闸管存在着控制的非线性及较低的功率因数等缺点,难于实现高精度、宽范围的速度控制。随着 GTO 晶闸管、GTR、P-MOSFET、IGBT 和 MCT 等全控型功率器件的出现和应用,大大改善了直流传动的面貌。利用这种有自关断能力的器件,取消了原来普通晶闸管系统的必需的换相电路,简化了电路结构,提高了效率,提高了工作频率,降低了噪声,也缩小了电力电子装置的体积和重量。谐波成分大、功率因数差的相控变流器逐步由斩波器或脉冲宽度调制型(PWM)变流器所代替,明显地扩大了电动机控制的调速范围,提高了调速精度,改善了快速性、效率和功率因数。PWM 电源终将取代晶闸管相控式可控功率电源,成为可控直流电源的主流。一种称为软性的 PWM 电源将主宰传动控制领域,成为最理想化的功率电源。

1.2 交流传动技术概况

由于直流电动机存在机械换向问题,其最大供电电压和机械强度受到限制,也限制了转速的进一步提高,结构的影响使其不适于腐蚀性、易爆性和含尘气体的特殊场合。交流电动机一直受到人们的重视。它体积小、重量轻、没有电刷和换向器、转动惯量小、制造简单、结构牢固、工作可靠且易于维修。只是长期以来一直没有理想的调速方案,只被应用于恒速拖动领域。晶闸管元件的出现使交流电动机调速的发展出现了一个飞跃,使得采用半导体变流技术的交流调速得以实现。由于交流电动机调速系统的控制比较复杂和调速性能差、装置价格高、效率低、使交流传动未能推广。自从微处理机出现后,国外在绕线型异步电动机串级调速、无换向器电动机调速、

笼型异步电动机的矢量控制以及 PWM 技术方面,都已获得重大突破与发展,进入工业应用阶段。目前(大功率半导体器件、大规模集成电路)交流电动机传动系统已具备了较宽的调速范围、较高的稳态精度、较快的动态响应、较高的工作效率以及可以四象限运行等优异性能,其静、动态特性均可以与直流电动机传动系统相媲美。可以说,交流传动逐步取代直流传动已成为明显的发展趋势。特别是“节能型”交流传动技术,已得到很快发展。在过去大量应用的所谓不变速拖动系统中,有相当一部分是风机、水泵等拖动系统,这类负载约占工业电力拖动总量的 50%。其中有些并不是真的不需要变速,只是由于过去的交流电动机不能调速,因而不得不依赖挡板和阀门来调节流量,同时也消耗掉大量的电能。如果采用交流电动机调速来改变风量或流量的话,效率将会大大提高。从各方面来看,改造恒速电动机为交流调速电动机,每台约可节能 20% 以上,总起来的节能效益是很可观的。

1.3 交—直流传动数字控制技术概况

电动机及其控制在国民经济中起着重要作用。无论是在工农业生产、交通运输、国防宇航、医疗卫生、商务与办公设备还是日常生活中的家用电器,都大量地使用各种各样的电动机。电机既可作为电能生产的手段,也是电能应用的主要形式。据资料统计,我国生产的电能约 60% 用于电动机。

一般电动机是指常见的交流电动机、直流电动机,还有交直流两用的通用电动机。一般用途电动机将电能转换成机械能,向被驱动的机械提供动力来源。它们除了作为机电能量转换的一个部件外,实际上,相当一部分电动机在应用时还需要对其进行起停、正反转、制动以及速度控制和某些保护等控制,通常将这些控制纳入“电气传动”范畴。

随着电力电子技术的进步,特别是微机技术应用、新型控制策略出现,改变着电动机控制、电气传动的面貌,发展到了“运动控制”新阶段。

运动控制(Motion control)是近 10 年来在国际上流行的一个新的技术术语,通常是指在复杂条件下将预定的控制方案、规划指令转变成期望的机械运动。运动控制系统使被控机械运动实现精确的位置控制、速度控制、加速度控制、转矩或力的控制,以及这些被控机械量的综合控制。按照使用动力源的不同,运动控制可分为气动、液动和电动三大类。电气运动控制更容易实现与微型计算机的接口,以及具有其他明显的优点,因而在中小功率的运动控制系统中,大多为电气控制、电气运动控制体现了控制电机技术、传感器技术、电力电子技术、微电子技术、自动控制技术和微机应用技术的最新发展成就。由于微处理器和传感器的作用,赋予系统以智能,故又称为智能运动控制。运动控制作为一门多学科交叉的技术,每种技术出现的新进展都使它向前迈进一步,其技术进步是日新月异的。

电气传动经历了从恒速到调速、从低性能到高性能、从单机独立传动到多机综合协调传动的发展过程。基于反馈控制理论,由模拟电子电路构成,以直流传动为代表的连续控制系统的发展,改变了电气传动的面貌。然而,连续控制系统中由模拟电路组成的 PID 调节器,由于校正参数不便调整,且一经确定后便不易改变,因而对控制对象的适应能力差,难于实现各种新的控制策略和控制方法。用模拟控制装置对交流电动机进行控制,就更难满足要求。此外,模拟电路对状态量的检测精度不高,使连续控制系统的控制性能不易提高,模拟式元器件集成度不高,也使

硬件结构复杂,影响到控制装置的可靠性。由于上述原因,连续控制系统制约了电气传动特别是交流传动的发展。

随着微电子技术的发展,微型机功能的不断提高以及电力电子技术、计算机控制技术的发展,电气传动领域出现了以微型机为核心的数字控制系统。微型机的采用不仅极大地推动了作为研究热点的交流传动的迅猛发展,也给直流传动的发展注入了新的活力,使电气传动进入了更新的发展阶段。

微电子的发展对电动机控制技术的发展影响也是极大的,为了适应电子机械高性能、小型化、低成本和高可靠性的要求,从20世纪80年代初开始,各国半导体厂商不断开发各种功率集成电路,并已在许多领域得到越来越广泛的应用。功率集成电路是电力电子技术和微电子集成技术的结合,用来控制电动机运动的电子控制驱动系统,包括前级的微功率控制电路部分和末级的功率驱动部分。前级控制电路容易实现集成化,它们通常是模拟-数字混合集成电路。对于小功率系统,末级驱动电路也已集成化,称之为功率集成电路。它将高电压、大电流、大功率的多个半导体开关器件做在同一个芯片上,有些同时还包括逻辑、控制、检测、自诊断和保护电路集成在同一个芯片上或一个混合模块里,从而使功率器件注入了智能,故又称为智能功率集成电路。有一些更大规模的功率集成电路把整个控制器和驱动器都集成在一起,用一片集成电路就能控制一台甚至多台电动机。由分立单元电路向专用集成电路发展,不但给电动机控制带来极大方便,体积缩小、成本降低、性能改善、调整简便,而且可大大提高系统的可靠性和抗干扰能力,从而深受用户的欢迎。

1.4 本课程的任务

本课程的任务是在掌握了交直流传动控制系统的基本组成原理的同时,能结合工程实际,使读者能根据生产设备所提出的技术指标组成,选择控制系统结构的思路和方法,另一方面要掌握在反馈闭环控制思想基础上,能合理正确地选择和整定系统的静、动态参数的方法和手段。在功率可控电源和控制电路的实现上,既要掌握目前的普及应用技术和正在发展的新技术,也要掌握模拟电路、微处理器、智能功率集成电路和目前应用广泛的各类器件及由这些器件组成的系统。能从工程实用的角度提出问题、分析问题和解决问题,通过本课程的学习,能胜任对电气传动控制系统的使用、维护和管理的工作。

练 习 题

- 1-1 电气传动控制系统能解决什么问题?
- 1-2 电气传动控制系统的特性、结构如何?
- 1-3 电气传动控制系统的发展前景怎样?
- 1-4 学习本课程的任务有哪些?

第 2 章

单闭环直流调速系统

2.1 概 述

在电力拖动调速系统中,由于直流电动机具有良好的起动、制动和调速性能,长久以来被广泛应用。早期是由交流电动机拖动直流发电机(G)给直流电动机(M)供电,通过调节发电机的励磁电流以改变其输出电压,达到直流电动机调速目的。这种调速系统简称 G-M 系统,但这种系统需要两台与直流电动机容量相当的发电机,设备多,体积大,费用高,噪声大,维护不方便。为克服这些缺点,开始采用水银整流供电,以静止变流装置替代旋转机组供电。随着半导体技术的发展,更为经济可靠,性能优越的晶闸管变流器出现了,由晶闸管变流器(V)向电动机供电(M)的系统简称 V-M 系统。随着 GTO,GTR,P-MOSFET,IGBT 大功率模块等全控式电力电子器件的功率驱动装置的发展,直流脉冲宽度调制(PWM)型的调速系统的应用越来越广。

2.1.1 调速的定义

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,由晶闸管-直流电动机(V-M)组成的直流调速系统是目前较普遍应用的一种电气传动自动控制系统。它在理论和实践上都比较成熟,而且从闭环控制理论的角度,它又是交流调速系统的基础。

所谓调速,是指在某一具体负载情况下,通过改变电动机或电源参数的方法,使机械特性曲线得以改变,从而使电动机转速发生变化或保持不变。即调速包含两方面,其一、在一定范围内“变速”,如图 2.1.1 所示,当电动机负载不变时,转速可由 n_a 变到 n_b 或 n_c 。其二保持“稳速”,在某一速度下运行的生产机械受到外界干扰(如负载增加),为了保证电动机工作速度不受干扰的影响而下降,需要进行调速,使速度接近或等于原来的转速,如图 2.1.1 中 n_d 即为负载由 T_1 增加至 T_2 后的速度,与 n_a 基本一致。

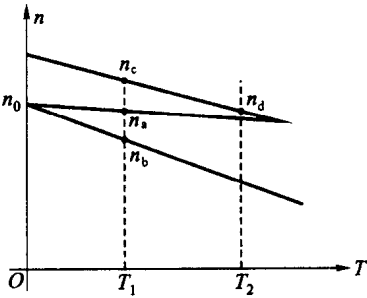


图 2.1.1 调速与 $n = f(T)$ 的关系

2.1.2 直流电动机的调速方法

直流电动机转速表达式为

$$n = \frac{U_a - I_a R_a}{K_e \Phi} \quad (2.1.1)$$

式中, n ——电动机转速(r/min);

U_a ——电枢电压(V);

I_a ——电枢电流(A);

R_a ——电枢回路电阻(Ω);

Φ ——励磁磁通(Wb);

K_e ——电动机结构决定的电势常数。

由式 2.1.1 可知,直流电动机有三种调速方法:

- 1) 调节电枢电压 U_a ;
- 2) 调节励磁磁通 Φ ;
- 3) 改变电枢附加电阻 R 。

三种调速方法的机械特性如图 2.1.2 所示。

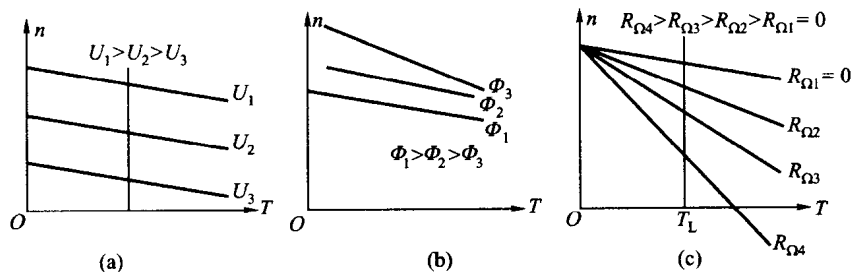


图 2.1.2 直流电动机人为机械特性曲线

改变电枢电压 U_a 所得的机械特性是一组平行变化的曲线[见图 2.1.2(a)],采用此种方法,一般在额定转速以下调速,最低转速取决于电机低速时的稳定性。具有调速范围宽,机械特性硬,动态性能好的特点。在连续改变电枢电压时,能实现无级平滑调速,是目前主要调速方法之一。

直流电动机在额定磁通下运行时,磁路已接近饱和,若降低励磁回路供电电压(电流),可减弱磁通实现升速,特性曲线如图 2.1.2(b)。采用此种方法,一般以额定转速为最低转速,最高速受电动机换向条件和电枢机械强度的限制,所以调速范围较小,需与调压调速方法结合,以扩大调速范围。

改变电枢电阻即在电枢回路串接不同附加电阻,以调节转速。观察图 2.1.2(c)发现,外接电阻越大,电阻功耗越大,特性越软,稳定性越差,是有级调速。此法在实际中已很少应用。

2.1.3 调速指标

不同的生产机械,其工艺要求电气控制系统具有不同的调速性能指标,概括为静态和动态调速指标。

1. 静态调速指标

(1) 调速范围

电动机在额定负载下,运行的最高转速 $n_{\max}$ 与最低转速 $n_{\min}$ 之比称为调速范围,用 D 表示,即

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} \quad (2.1.2)$$

注意:对非弱磁的调速系统,电动机的最高转速 $n_{\max}$ 即为额定转速 n_{nom} 。

(2) 静差率

静差率是指电动机稳定运行时,当负载由理想空载增加至额定负载时,对应的转速降落 Δn_{nom} 与理想空载转速 n_0 之比,用百分数表示为

$$s = \frac{\Delta n_{\text{nom}}}{n_0} \times 100\% = \frac{n_0 - n_{\text{nom}}}{n_0} \times 100\% \quad (2.1.3)$$

静差率反映了电动机转速受负载变化的影响程度,它与机械特性有关,特性越硬,静差率越小,转速的稳定性越好。但并非机械特性一致,静差率相同,还与理想空载转速有关。图 2.1.3 所示, A 点静差率 1%, B 点静差率 10%, 那么能满足最低转速时的静差率,其他转速时也必然能满足。

(3) 调速范围与静差率的关系

在调压调速系统中,额定电压为最高转速,静差率为最低转速时的静差率,则最低转速

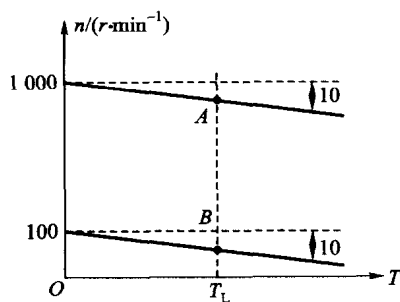


图 2.1.3 不同转速下的静差率

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

则调速范围与静差率满足下列关系式:

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{n_{\text{nom}} s}{(1-s)\Delta n_{\text{nom}}} \quad (2.1.4)$$

由以上公式可知,当一个调速系统机械特性硬度(Δn_{nom})一定时,对静差率要求越高,即静差率越小,允许的调速范围也越小。

例 2.1.1 一个直流电动机调速系统额定转速 $n_{\text{nom}} = 1430 \text{ r/min}$, 额定速降 $\Delta n_{\text{nom}} = 125 \text{ r/min}$, 求: 1) 要求 $s \leq 0.3$, 允许的调速范围?

2) 当最低允许速度为 500 r/min 时, s 、 D 各为多少?

解: 1) 调速范围

$$D = \frac{n_{\text{nom}} s}{(1-s)\Delta n_{\text{nom}}} = \frac{1430 \times 0.3}{(1-0.3) \times 125} = 4.9$$

2) 当以最低转速运行时,其理想空载转速为

$$n_{0\min} = n_{\min} + \Delta n_{\text{nom}} = (500 + 125) \text{ r/min} = 625 \text{ r/min}$$

静差率

$$s = \frac{\Delta n_{\text{nom}}}{n_{0\min}} = \frac{125}{625} = 0.2$$

调速范围

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{1430}{500} = 2.86$$

2. 动态调速指标

动态调速性能指标包括跟随性能指标和抗干扰性能指标两类。

1) 跟随性能指标

在给定信号(或称参考输入信号) $r(t)$ 的作用下,系统输出量 $c(t)$ 的变化情况可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。通常以输出量的初始值为零、给定信号阶跃变化下的过渡过程作为典型的跟随过程,这时的动态响应又称阶跃响应。一般希望在阶跃响应中输出量 $c(t)$ 与其稳态值 c_{∞} 的偏差越小越好,达到 c_{∞} 的时间越快越好。具体的跟随性能指标有下列各项:

(1) 上升时间 t_r

在典型的阶跃响应跟随过程中,输出量从零起第一次上升到稳态值 c_{∞} 所经过的时间称为上升时间,它表示动态响应的快速性(见图 2.1.4)。在调速系统中采用这个定义就可以了,在一般控制系统中还有更为严格的定义。

(2) 超调量 σ

在典型的阶跃响应跟随过程中,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,称为超调量,即

$$\sigma = \frac{c_{\max} - c_{\infty}}{c_{\infty}} \times 100\% \quad (2.1.5)$$

超调量反映系统的相对稳定性。超调量越小,则相对稳定性越好,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。原则上它应该是从给定量阶跃变化起到输出量完全稳定下来为止的时间。对于线性控制系统来说,理论上要到 $t = \infty$ 才真正稳定,但是实际系统由于存在非线性等因素并不是这样。因此,一般在阶跃响应曲线的稳态值附近,取 $\pm 5\%$ (或 $\pm 2\%$)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短时间,定义为调节时间(见图 2.1.4)。

2) 抗扰性能指标

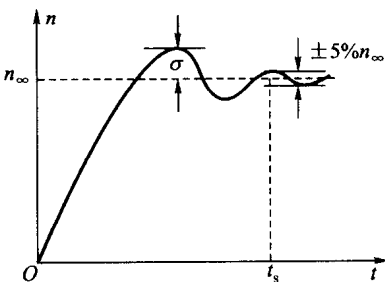


图 2.1.4 典型阶跃响应曲线
和跟随性能指标

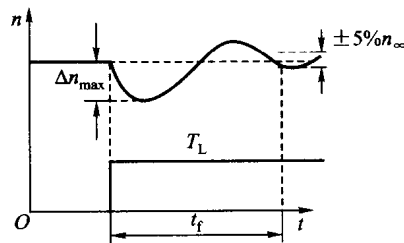


图 2.1.5 突加负载时的动态过程
和抗扰性能指标

一般是以系统稳定运行中,突加负载的阶跃扰动 T_L 后的动态过程作为典型的抗扰过程,并由此定义抗扰性能指标(见图 2.1.5)。

(1) 动态降落 $\Delta c_{\max}$

系统稳定运行时,突加一定数值的扰动后引起转速的最大降落值 $\Delta c_{\max}$ 叫做动态降落,用输出量原稳态值 $c_{\infty 1}$ 的百分数来表示。输出量在动态降落后逐渐恢复,达到新的稳态值 $c_{\infty 2}$, $(c_{\infty 1} - c_{\infty 2})$ 是系统在该扰动作用下的稳态降落。动态降落一般都大于稳态降落(即静差)。调速系统突加额定负载扰动时的动态降落称作动态速降 $\Delta n_{\max}$ 。

(2) 恢复时间 t_f

从阶跃扰动作用开始,到被调量进入离稳态值的 $\pm 5\%$ 或 $\pm 2\%$ 的区域内为止所需要的时间。

(3) 震荡次数 N

震荡次数为在恢复时间内被调量在稳态值上下摆动的次数,它代表系统的稳定性和抗扰能力强弱。

2.1.4 可控直流电源供电下的直流电动机开环调速及特性

一、晶闸管整流器-电动机系统(V-M)的调速特性

改变电枢电压调速是直流调速的主要方法,而采用晶闸管变流器组成的 V-M 直流调速系统又是目前广泛应用的方式,其组成主要包括电力主电路和控制电路两部分。调速系统的主电路由晶闸管变流器及电动机组成,其简单系统原理如图 2.1.6 所示。

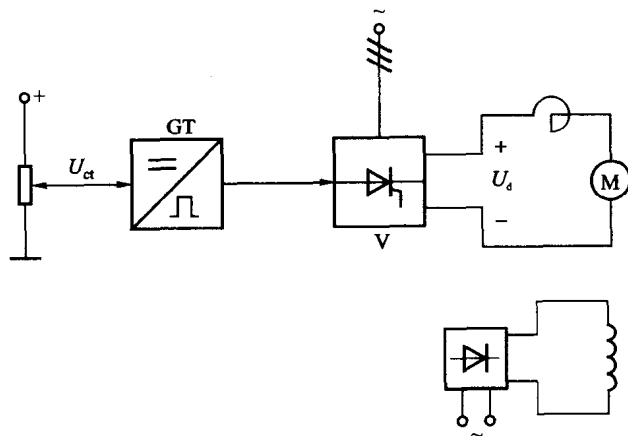


图 2.1.6 系统原理图

图中, V 是晶闸管可控变流器;它可以是单相、三相或更多相,半波、全波半控、全控等类型。通过调节触发装置 GT 的控制电压 U_{ct} 来移动触发脉冲的相位,即可改变变流器输出电压 U_d , 从而实现平滑调速。

由于晶闸管整流装置相位控制的特点, V-M 系统主回路串接足够大电感量的电抗器 L , 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 2.1.7 所示。

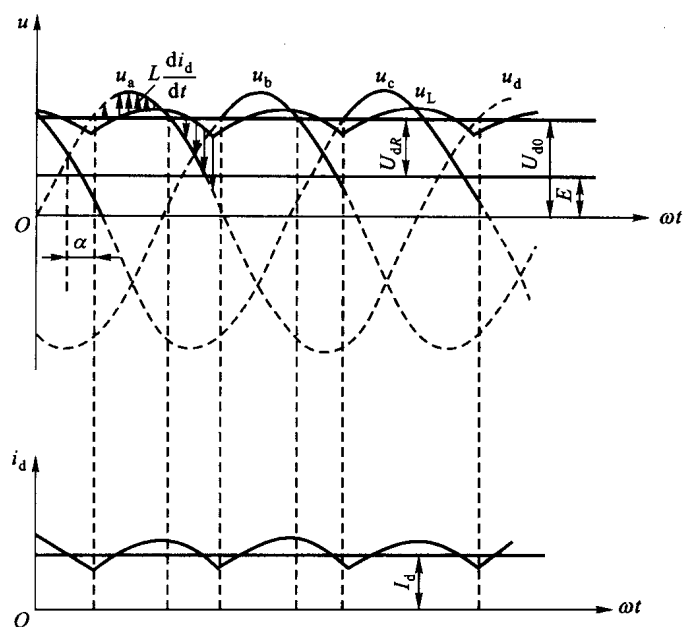


图 2.1.7 V-M 系统电流连续波形

当电感较小且负载较轻时,一相晶闸管导通时的电感储能较少,在下一相未被触发前,电流已衰减到零,电流出现断续情况(见图 2.1.8)。

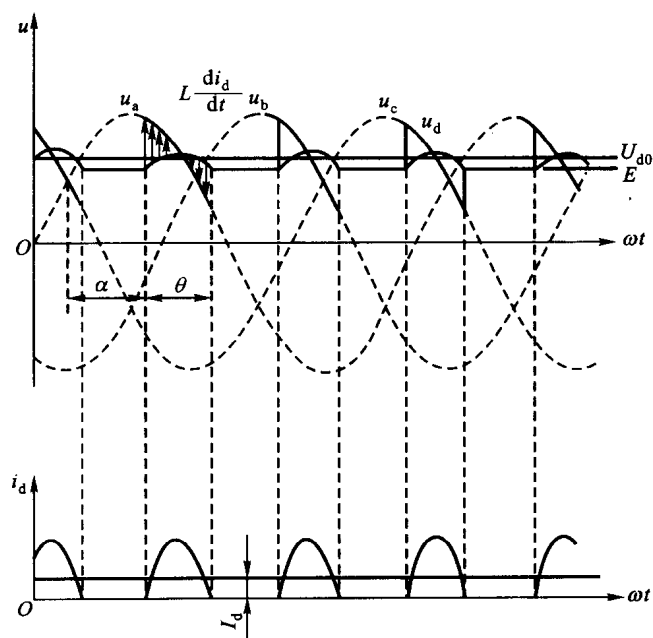


图 2.1.8 M 电流断续时波形