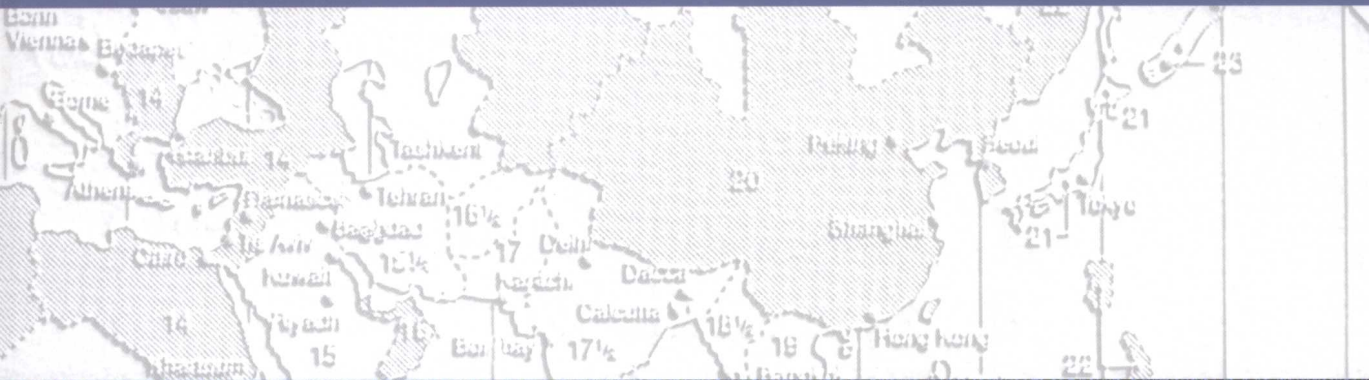




卓越系列·21世纪高职高专精品规划教材



机电传动与控制技术

ELECTROMECHANICAL
TRANSMISSION AND CONTROL
TECHNOLOGY

主 编 姚永刚



天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

卓越系列·21世纪高等职业教育精品规划教材

机电传动与控制技术

Electromechanical Transmission And Control Technology

主 编 姚永刚

副主编 孟昕元 范 峥

参 编 张 雷 徐海刚 杨鸿林

主 审 戚新波

 天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书共分7章。第1章:绪论,介绍机电测量与控制系统的历史、基本含义、有关概念和基本要求;第2章:机电控制系统中的驱动电机,集中介绍了常用电动机的结构、工作原理及运行特性;第3章:机电系统中的检测技术,介绍了检测技术的基础知识以及位移、位置、压力、速度、温度等传感器的原理和应用;第4章:自动控制基础,简述了自动控制的基本原理及控制系统的分析方法;第5章:常用低压电器,介绍了常用的低压电器元件的工作原理、技术指标、图形和文字符号及用途;第6章:机电控制系统,介绍了常规电气线路的基本控制原则和典型生产机械的常规电气控制线路,并结合实例着重分析了直流传动、交流传动控制系统和步进电动机驱动系统;第7章:可编程控制器,介绍了可编程控制器工作原理、西门子S7-200系列可编程控制器程序常用指令及PLC控制系统的设计方法。

本教材可作为高等工科院校机械电子工程以及相关类专业的现代测量控制技术教材,也可作为高职高专教育、成人教育的电气控制与可编程控制器相关课程教材,还可以供机电行业的工程技术人员用作参考书或培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

机电传动与控制技术/姚永刚主编. —天津:天津大学出版社, 2009. 8

ISBN 978-7-5618-3127-4

I. 机… II. 姚… III. 电力传动控制设备 IV. TM921.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第147441号

出版发行 天津大学出版社

出版人 杨欢

地 址 天津市卫津路92号天津大学内(邮编:300072)

电 话 发行部:022-27403647 邮购部:022-27402742

网 址 www.tjup.com

印 刷 昌黎太阳红彩色印刷有限责任公司

经 销 全国各地新华书店

开 本 185mm×260mm

印 张 16.5

字 数 412千

版 次 2009年8月第1版

印 次 2009年8月第1次

印 数 1—3 000

定 价 29.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请向我社发行部门联系调换

版权所有 侵权必究

前 言

为适应高等职业技术教育需要,以培养高等技术应用性专门人才为目标,将机械技术与电子技术有机地结合,用电子技术改造传统产业,促进国民经济的发展,这就需要一批机电一体化的复合型人才。为使机电一体化专业及非电子类专业学生尽快掌握电方面的综合知识,我们编写了这本《机电传动与控制技术》。本书是从机电一体化技术需要出发,集电机、电机拖动、检测技术、自动控制原理、电气控制技术与 PLC 于一体。通过本课程的学习,使学生能掌握电机、电器、拖动控制等必备的基础理论,掌握常用的开环、闭环控制系统的工作原理、特点及应用场所,具备一定的分析及处理机电传动与控制系统的实际能力,并了解最新控制技术在机械设备中的应用。

根据编者多年的实践和教学经验,发现由于课时的限制,机电一体化等相关类专业学生开设的电专业课程较少,而且不系统。本书根据机械电子工程专业的需要独自建立了内容比较全面的体系,以培养高等技术应用性专门人才为目标,在编写中注重内容和体系的改革,针对机电类专业对职业技术人员的知识和能力要求,经过对课程改革方案的认真讨论和研究,最终确定以机电装置原动机驱动系统为主线,着重于机电结合、机电控制,把“电机与电机拖动”、“传感器检测技术”、“自动控制原理”、“可编程控制器应用”、“机电控制系统”等多门课程的内容用一种新的体系组织起来,在讲述了机电测量与控制所需要的最基本、最适用的电学知识的基础上,力图以掌握基本概念、强化实际应用为重点,使学生在规定的学时内掌握机电测量与传动控制等所需要的最基本、最适用的电学知识,以培养学生专业实践适应能力和应变能力。

本书的特点是:本着专业技术课程切合工程应用的教学原则,层次清晰地构建了电气控制技术从常规测量控制到可编程控制器控制的完整体系,并把涉及电方面的专业知识用一种新的体系组织起来;注重理论联系实际,突出现代电气测量控制的新技术和新产品;各章均有丰富的设计实例和习题,有利于学生掌握现代机电控制原理和工程设计方法。

本书由姚永刚教授主编,孟昕元、范峥任副主编。参加编写的有:姚永刚(第 1、2 章)、孟昕元(第 6 章)、范峥(第 5 章)、张雷(第 7 章)、徐海刚(第 3 章)和杨鸿林(第 4 章)。

全书由戚新波教授主审,并提出了许多宝贵的修改意见,在此表示衷心的感谢。限于编者知识水平,加之编写时间仓促,书中错误和不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。此外在本书的编写过程中参阅了多种同类教材和著作,特向其编、著者致谢。

编者
2009 年 6 月

目 录

1	绪论	(1)
1.1	机电传动与控制系统的概况	(1)
1.2	控制系统的基本概念	(2)
1.3	本课程的性质与任务	(4)
2	机电传动系统的驱动电动机	(5)
2.1	直流电动机	(5)
2.2	交流异步电动机	(22)
2.3	伺服电动机	(40)
2.4	步进电动机	(45)
	思考题与习题	(51)
3	机电系统的检测技术	(53)
3.1	传感器的基础知识	(53)
3.2	位移与物位的检测	(64)
3.3	速度的检测	(73)
3.4	压力的检测	(76)
3.5	温度的检测	(80)
	思考题与习题	(88)
4	自动控制基础	(90)
4.1	概述	(90)
4.2	自动控制系统性能及评价	(92)
4.3	控制系统的数学模型	(95)
4.4	控制系统的时域分析	(97)
	思考题与习题	(102)
5	常用低压电器	(103)
5.1	主电路中常用的低压电器	(103)
5.2	控制电路中常用的电器元件	(114)
	思考题与习题	(131)
6	机电传动控制系统	(133)
6.1	继电器—接触器控制系统	(133)
6.2	直流电动机控制系统	(149)
6.3	交流电动机控制系统	(169)
6.4	步进电动机控制系统	(180)
	思考题与习题	(190)
7	可编程控制器	(193)
7.1	可编程控制器概述	(193)
7.2	可编程控制器的结构和工作原理	(199)

7.3 S7 系列可编程控制器	(207)
7.4 S7 系列 PLC 的指令系统	(217)
7.5 可编程控制器控制系统设计及应用	(243)
思考题与习题	(255)
参考文献	(258)

1

绪论

本章作为本课程的入门引导,介绍机电传动与控制系统的的历史、基本含义、有关概念和基本要求。

1.1 机电传动与控制系统的概况

原始的机械设备由工作机构、传动机构和原动机组成,控制方式由工作机构和传动机构的机械配合实现。随着以电气元件为主的自动控制系统的广泛应用,设备的性能不断提高,使工作机构、传动机构的结构大为简化。主要由继电器、接触器、按钮、开关等元件组成的机械设备的电气控制系统称为继电器接触器控制系统。其主要控制对象是三相交流异步电动机,对电动机的启动、制动、反转、调速和降压等进行控制。这种控制所用的电器一般不是“接通”就是“断开”,控制是断续的。所以,从控制性质上看,这种继电器—接触器控制属于断续控制或开关控制。因其简单、易掌握、价格低、易维修,许多通用机械设备至今仍采用这种控制系统。但是,它也存在功耗大、体积大、控制方式完全固定和不灵活的缺点。

开关控制不能满足对调速性能要求较高的生产机械,因此出现了直流发电机—电动机调速系统。直流电动机具有启动转矩大、容易进行无级调速的特点。但它需要直流电源,直流电源是由一台交流电动机拖动一台直流发电机提供的。这种直流发电机—电动机调速系统中的电压和电流可以连续变化,属于连续控制。目前龙门刨床、轧钢机和造纸机等仍在应用这种控制方式。但是,这种方式存在所用电机数量多、占地面积大、噪声大和效率低等缺点。20世纪60年代后出现了晶闸管电动机自动调速系统,这种系统中的直流电源由晶闸管组成的可控整流电路提供,具有体积小、重量轻、效率高和控制灵敏等优点,所以得到了普遍应用。

20世纪80年代以后,由于半导体技术的应用与发展,使得交流电动机调速系统有了突破性进展。交流调速有许多优点,单机容量和转速可大大高于直流电动机,交流电动机无电刷与换向器,易于维护,可靠性高,能用于带有腐蚀性、易爆性、含尘气体等特殊环境中。与直流电动机相比,交流电动机还具有体积小、重量轻、制造简单、坚固耐用等优点。交流调速已突破关

键性技术,从实用阶段进入扩大应用、系列化的新阶段。以笼型交流伺服电动机为对象的矢量控制技术是近年来新兴的控制技术,它能使交流调速具有直流调速的优越调速性能。交流变频调速器、矢量控制伺服单元及交流伺服电动机已日益广泛地应用于工业中。

为了适应工业自动化和生产过程变动节奏加快的要求,电气控制逐步采用顺序控制技术。所谓顺序控制,就是对机械设备的动作和生产过程按预先规定的逻辑顺序自动进行的一种控制。20世纪60年代末发展起来的实现顺序控制的一种通用的电气控制装置称为顺序控制器(也称程序控制器),一般具有逻辑运算、顺序操作、定时、计数、程序转移、程序分支和程序循环等功能,有的还具有算术运算和数值比较等功能。它不仅用于单机控制,而且用于多机群控和生产线的自动控制等。其主要特点是:编制程序和改变程序方便,通用性和灵活性强,原理简单易懂,工作比较稳定可靠,使用和维修方便,装置体积小,设计和制造周期短,用它可代替大量的继电器。在机床行业,顺序控制器广泛用于单机、组合机床和自动生产线的控制。

近年来,可编程控制器(PLC)在工业过程自动化系统中的应用日益广泛。可编程控制器从它一问世就是以最基层、第一线的工业自动化环境及任务为前提的。它可用梯形图编程,具有硬件结构简单、安装维修方便、抗强电磁干扰、工作可靠等优点,工程技术人员能很快地熟悉它、使用它。可编程控制器是一种数字运算操作的电子系统,是专门为在工业环境下应用而设计的。它采用一类可编程序的存储器,用来存储执行逻辑运算、顺序控制、定时和算术运算等面向用户的指令,并通过数字式或者模拟式的输入和输出,控制各种类型的机械或生产过程。可编程控制器及其有关外部设备,都按易于工业控制系统连成一体,又易于扩充功能的原则设计。近年来,PLC的一个发展方向是微型、简易、价廉,以图占领一向以继电器系统为主流的(诸如一般机床、包装机、传输带等)控制领域;另一发展方向是向大型高性能方面延伸。PLC很有发展前途。

上述各种控制系统均为电气控制系统。近些年来,许多工业部门和技术领域对高响应、高精度、大功率和低成本控制系统提出的要求,促使液压、气动控制系统的迅速发展。液压、气动控制系统和电气控制系统一样,由于各自的特点,在不同的行业得到应用。

由于现代控制技术、电子技术、计算机技术与液压、气动技术的结合,使液压、气动控制也在不断创新,并大大地提高了它的综合技术指标。

自20世纪70年代以来,单片机发展很快。由于单片机的结构和指令系统都是针对工业控制的要求而设计的,成本低、集成度高,可灵活地组成各种智能控制装置,解决从简单到复杂的各种任务,实现较高的性价比。而且从单片机芯片的设计制造开始,就考虑了工业控制环境的适应性,因而它的抗干扰能力较强,特别适合于在机电一体化产品中应用,在机电传动与控制中也有许多应用。

1.2 控制系统的基本概念

1.1.1 系统及控制系统

系统是由相互制约的各个部分组成的具有一定功能的整体。在机电传动与控制中,将与控制设备的运动、动作等参数有关的部分组成的具有控制功能的整体称为系统。用控制信号(输入量)通过系统诸环节控制被控变量(输出量),使其按规定的方式和要求变化的系统称为控制系统。

1.1.2 控制系统的分类

控制系统的分类方式很多,但机械设备的控制系统常按系统的组成原理,分为开环控制系统、半闭环控制系统和闭环控制系统。

输出量只受输入量控制的系统称为开环控制系统。在任何开环控制系统中,系统的输出量都不与设定输入量进行比较。对应于每个设定输入端,都有一个相应的固定工作状态与之相对应,系统中没有反馈回路(反馈是把一个系统的输出量不断直接或间接变换后,全部或部分地返回到输入端,再输入到系统中去的过程)。用步进电动机作为执行元件的经济简易型数控机床的控制系统就是一个开环系统。因为机床的坐标进给控制信号是直接通过控制装置和驱动装置推动工作台运动到指定位置,坐标信号不再反馈。当控制系统出现扰动时,输出量便会出现偏差,因此开环控制系统缺乏精确性和适应性。但它是最简单经济的一类控制系统,一般使用在对精度要求不高的机械设备中(如旧机床的改造)。开环控制系统组成框图如图 1.1 所示。

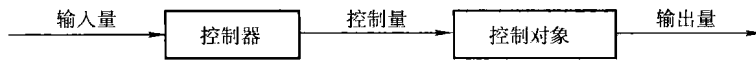


图 1.1 开环控制系统框图

输出量同时受输入量和输出量控制,即输出量对系统有控制作用,这种存在反馈回路的系统称为闭环控制系统。现有的全功能型 CNC 机器人和 CNC 机床的坐标驱动系统等都属于闭环控制系统。但是在 CNC 机床的坐标驱动系统中,只有以坐标位置量为直接输出量,即在工作台上安装长光栅等位移测量元件作为反馈元件的系统才称为闭环系统。那些以交、直流伺服电动机的角位移作为输出量,用圆光栅作为反馈元件的系统则称为半闭环系统。目前使用中的 CNC 机床绝大多数均为半闭环控制系统。采用半闭环控制系统的优点在于没有将伺服电动机与工作台之间的传动机构和工作台本身包括在控制系统内,系统易调整、稳定性好且整体造价低。闭环系统框图如图 1.2、图 1.3 和图 1.4 所示。

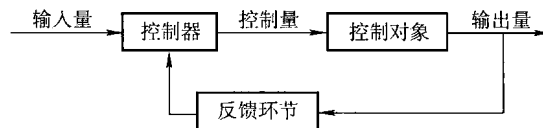


图 1.2 闭环控制系统框图

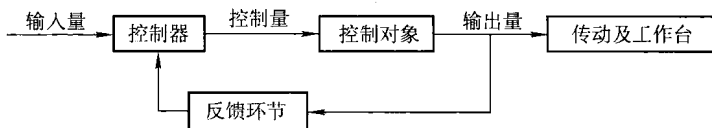


图 1.3 数控机床半闭环控制系统框图

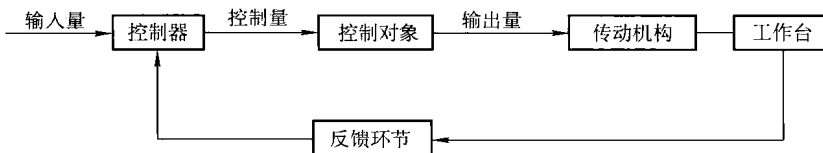


图 1.4 数控机床全闭环控制系统框图

1.3 本课程的性质与任务

机电测量与控制课程是一门实践性较强的专业课。机电测量与控制技术在生产过程、科学研究及其他各个领域的应用十分广泛。本课程的主要内容是以电动机或其他执行电器为控制对象,介绍电气控制的基本原理与电路、机电传动系统中的传感技术、构成机电控制系统的控制器、典型机电传动控制系统等。机电传动与控制技术涉及面很广,各种传动与控制设备种类繁多、功能各异。本课程从应用角度出发,讲授上述几方面内容,以培养学生对机电测量与控制系统的分析、应用和设计的基本能力,并具体提出以下几方面要求。

(1)熟悉常用电动机、控制电器、传感器的结构原理、用途及型号,达到能正确使用和选用的目的。

(2)熟练掌握电气控制线路的基本环节,具有对一般电气控制线路的独立分析能力。

(3)熟悉典型机电控制系统,具有从事机电设备安装调试、运行和维护等技术工作的能力。

(4)具有设计和改进一般生产设备电气控制线路的基本能力。

(5)掌握可编程控制器的基本原理及操作,做到能根据工艺过程和一般开关量顺序控制要求,正确选用可编程控制器编制用户程序,并经调试应用于生产过程控制。

2

机电传动系统的驱动电动机

2.1 直流电动机

电动机可分为交流电动机和直流电动机两大类。直流电动机将直流电能转换为机械能。由于它具有良好的调速性能和启动转矩大等优点,广泛用于对调速要求较高、正反转和启动制动频繁或多单元同步协调运转的生产机械、运输起重机械和自动化武器中作为拖动电动机,如轧钢机、落地龙门铣床、镗床、电力牵引设备和自动火炮传动等设备。

本节在讨论直流电动机的工作原理和基本结构的基础上,讨论直流电动机的机械特性及启动、反转、调速的基本原理。

2.1.1 直流电动机工作原理

直流电动机的工作原理基于电磁定律。如图 2.1 所示,在 A、B 电刷上接入直流电源 U , 电流从正电刷 A 经线圈 ab 、 cd , 由负电刷 B 流出。根据电磁定律,在载流导体与磁力线垂直的条件下,线圈每一个有效边将受到一电磁力的作用。电磁力方向可用左手定则判断,伸开左手,掌心向着 N 极,四指指向电流的方向,与四指垂直的拇指方向就是电磁力的方向。在图示瞬间线圈 ab 与 dc 中所受的电磁力为逆时针方向。在这个电磁力的作用下,转子将逆时针旋转,即图中 n 的方向。随着转子的转动,线圈边相对磁极的位置互换,这时要使转子连续转动,则应使线圈边中的电流方向也要改变,即要换向。由于换向器与静止电刷的相互配合作用,线圈不论转到何处,电刷 A 始终与运动到 N 极下的线圈边相接触,而电刷 B 始终与运动到 S 极下的线圈边相接触,这就保证了电流总是由电刷 A 经 N 极下导体流入,再沿 S 极下导体经电刷

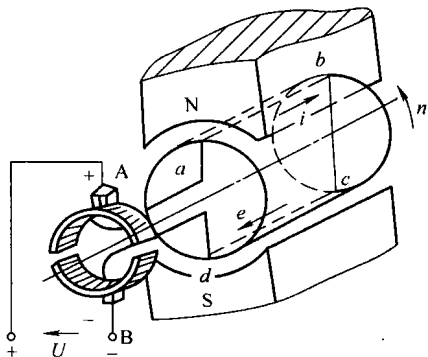


图 2.1 直流电动机工作原理

B 流出。因而电磁力和电磁转矩的方向始终保持不变,使电动机沿逆时针方向连续转动。

在图 2.1 所示电动机中,转子线圈中流过电流时,受电磁力作用而产生的电磁转矩可表示为

$$T = K_T \Phi I_a \quad (2.1)$$

式中, T 为电磁转矩(N·m); I_a 为电枢电流(A); Φ 为主磁通(Wb); K_T 为与电动机结构有关的常数,称为转矩常数, $K_T = 9.55 K_E$, K_E 为与电动机结构有关的常数,称为电动势常数。

当线圈在磁场中转动时,线圈的有效边也切割磁力线。根据电磁感应原理,在有效边中产生感应电动势。它的方向用右手法则确定,总是与其中的电流方向相反,故该感应电动势又常称为电枢反电动势,可表示为

$$E_a = K_E \Phi n \quad (2.2)$$

式中, E_a 为电枢反电动势(V); n 为电枢转速(r/min)。

这时电动机将电能转换成了从轴上输出的机械能,向外输出机械功率,电动机运行在电动状态。

2.1.2 直流电动机运行特性

从原理上讲,一台直流电机在某种条件下作为发电机运行,而在另一种条件下作为电动机运行,且两种运行状态可以相互转换,这就是所谓电机的可逆原理。直流电动机按励磁方式可分为他励、并励、串励和复励四类,其中以他励电动机和复励电动机在传动控制系统中最为常用,所以下面以他励直流电动机为例介绍直流电动机运行特性。

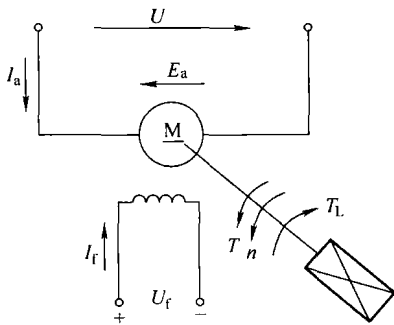


图 2.2 他励直流电动机

2.1.2.1 他励直流电动机稳态运行

他励直流电动机稳态运行的基本方程是指电磁系统中的电动势平衡方程式、机械系统中的转矩平衡方程式以及能量转换过程中的功率平衡方程式。

1. 电动势平衡方程

按照图 2.2 标注的电压、电流及电动势的正方向,根据基尔霍夫第二定律,电枢回路的电动势平衡方程式为

$$E_a = U - I_a R_a \quad (2.3)$$

或

$$U = E_a + I_a R_a, I_a = \frac{U - E_a}{R_a} \quad (2.4)$$

励磁回路方程为

$$I_f = U_f / R_f$$

相关量

$$\Phi = f(I_f, I_a) \quad (2.5)$$

以上各式中, U 为电动机外加直流电压; E_a 为反电动势; I_a 为电枢电流; U_f 为励磁电压; I_f 为励磁电流; R_f 为励磁电阻; Φ 为主磁通。

2. 转矩平衡方程

直流电动机稳态运行时,作用于电动机轴上的转矩共有三个:起驱动作用的电磁转矩 T ; 生产机械的阻转矩 T_2 (即电动机轴上输出转矩)和空载转矩 T_0 。空载转矩也是阻转矩。按图

2.2 标注转矩与转速的正方向,根据牛顿定律,驱动转矩应与负载转矩 $T_L = T_2 + T_0$ 平衡,即

$$T = T_2 + T_0 = T_L \quad (2.6)$$

式中, $T = K_T \Phi I_a$ 。

3. 功率平衡方程

将式(2.3)两边都乘以电枢电流 I_a 得到

$$UI_a = E_a I_a + I_a^2 R_a$$

可改写成

$$P_1 = P_e + P_{Cua} \quad (2.7)$$

式中, $P_1 = UI_a$ 为电源对电动机输入的功率; $P_e = E_a I_a$ 为电动机向机械负载转换的电功率,即电枢反电动势从电源吸收的电功率; $P_{Cua} = I_a^2 R_a$, 为电枢回路总的铜损耗。

将式(2.6)两边同乘以机械角速度 ω , 得

$$T\omega = T_2\omega + T_0\omega$$

改写成

$$P_e = P_2 + P_0 \quad (2.8)$$

式中, $P_e = T\omega$ 为电磁功率; $P_2 = T_2\omega$ 为转轴输出的机械功率; $P_0 = T_0\omega$ 为包括机械摩擦损耗 P_m 和铁损耗 P_{Fe} 在内的空载损耗。

他励直流电动机稳态运行时的功率关系如图 2.3 的流程图所示。图中, P_{Cuf} 为励磁回路损耗, 由同一直流电源供给。他励时总损耗为

$$P_\Sigma = P_{Cua} + P_0 + P_s = P_{Cua} + P_m + P_{Fe} + P_s \quad (2.9)$$

如为并励电动机, 总损耗中还应包括励磁损耗 P_{Cuf} , 式中 P_s 为附加损耗。电动机效率为

$$\eta = 1 - \frac{P_\Sigma}{P_2 + P_\Sigma} \quad (2.10)$$

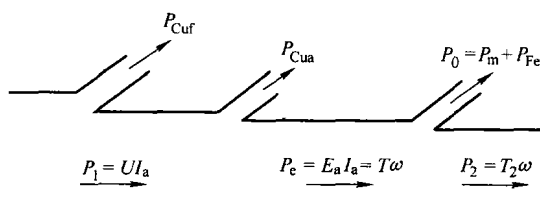


图 2.3 他励直流电动机的功率流程图

2.1.2.2 直流电动机的工作特性

直流电动机的工作特性是指 $U = U_N = \text{常值}$ 、电枢回路不串入附加电阻且励磁电流 $I_f = I_{fN}$ 时, 电动机的转速 n 、电磁转矩 T 和效率 η 与输出功率 P_2 之间的关系, 即 $n = f(P_2)$, $T = f(P_2)$, $\eta = f(P_2)$ 。在实际运行中由于 I_a 较易测到, 且 I_a 随着 P_2 的增加而增大, 故亦可将工作特性表示为 $n = f(I_a)$, $T = f(I_a)$, $\eta = f(I_a)$ 。

1. 转速特性

当 $U = U_N$ 、 $I_f = I_{fN}$ 时, $n = f(I_a)$ 的关系曲线叫做转速特性。出现 I_{fN} 的条件是: 当电动机加额定电压 U_N , 拖动额定负载, 使 $I_a = I_{aN}$, 转速也为 n_N 时的励磁电流。

将式(2.2)代入式(2.3), 整理后得

$$n = \frac{U_N}{K_E \Phi_N} - \frac{R_a}{K_E \Phi_N} I_a \quad (2.11)$$

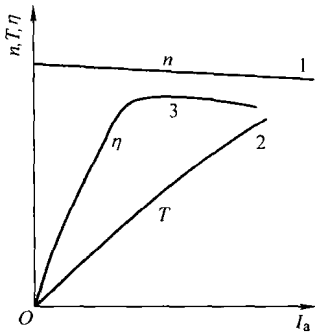


图 2.4 他励直流电动机工作特性

式(2.11)即为他励直流电动机的转速特性公式。公式表明：当 I_a 增加时，转速 n 要下降，但因 R_a 较小，转速 n 下降不多。随着电枢电流的增加，电枢反应的去磁作用又使每极下的气隙磁通减小，反而使转速增加。一般情况下，电枢电阻压降 $I_a R_a$ 的影响大于电枢反应的去磁作用的影响。因此，转速特性是一条略有下倾的直线，如图 2.4 中的曲线 1 所示。

2. 转矩特性

当 $U=U_N$ 、 $I_f=I_{fN}$ 时， $T=f(I_a)$ 的关系曲线称为转矩特性。转矩特性就是直流电动机的电磁转矩基本关系式，即

$$T = K_T \Phi I_a \quad (2.12)$$

当每极气隙磁通 $\Phi = \Phi_N$ 时，电磁转矩与电枢电流成正比。考虑到电枢反应的去磁作用，当 I_a 增大时， T 略有减小，如图 2.4 中曲线 2 所示。

3. 效率特性

当 $U=U_N$ 、 $I_f=I_{fN}$ 时， $\eta=f(I_a)$ 的关系曲线称为效率特性。电动机总损耗 P_Σ 中，大致可分为不变损耗和可变损耗两部分。不变损耗为 $P_{Fe} + P_m = P_0$ (空载损耗)， P_0 基本不随 I_a 变化；而可变损耗，主要是电枢回路的总损耗 $P_{Cu} = I_a^2 R_a$ ，它随 I_a^2 成正比变化，所以 $\eta=f(I_a)$ 曲线如图 2.4 中的曲线 3 所示。当 I_a 从零开始增大时，效率 η 逐渐增大，但当 I_a 增大到一定程度后，效率 η 又逐渐减小。直流电动机效率一般在 0.75~0.94 之间。电动机容量大，效率高。当电动机的可变损耗等于不变损耗时，效率最高。

2.1.3 他励直流电动机的机械特性

机械特性是指当电源电压 $U=$ 常数、励磁电流 $I_f=$ 常数以及电动机电枢回路电阻也为常数时，电动机的电磁转矩 T 与转速 n 之间的关系，即 $n=f(T)$ 。机械特性是直流电动机的重要特性，它描述直流电动机有载时的运行性能。

2.1.3.1 固有机械特性

当 $U=U_N$ 、 $\Phi=\Phi_N$ 、电枢回路没有串联电阻 R 时的机械特性，称为固有机械特性。其表达式为

$$n = \frac{U_N}{K_E \Phi_N} - \frac{R_a}{K_E K_T \Phi_N^2} T = n_0 - \beta_N T \quad (2.13)$$

用图形表示如图 2.5 所示。

固有机械特性的特点如下。

(1) $T=0$ 时， $n=n_0=U_N/(K_E \Phi_N)$ 为理想空载转速。此时 $I_a=0$ ， $E_a=U_N$ 。

(2) $T=T_N$ 时， $n=n_N=n_0 - \Delta n_N$ 为额定转速，其中 $\Delta n_N = R_a T_N / (K_E K_T \Phi_N^2)$ 为额定转速降，一般 n_N 约为 $0.95n_0$ ，那么 $n_N = 0.05n_0$ 。

(3) 特性斜率为 $\beta_N = R_a / (K_E K_T \Phi_N^2)$ 。由于 R_a 很小，因此 β_N 较小，特性较平，习惯上称为硬特性，转矩变化时，转速变化小。斜率 β_N 大时的特性则称为软特性。

(4) 电磁转矩 T 越大，转速 n 越低，其特性是一条向下倾斜的直线。

(5) $n=0$ 时, 即电动机启动时, $E_a = K_E \Phi n = 0$, 此时电枢电流 $I_a = U_N / R_a = I_{st}$, 称为启动电流。启动时刻的电磁转矩 $T = K_T \Phi_N I_{st}$, 称为启动转矩。由于电枢电阻 R_a 很小, 所以 I_{st} 比额定值大得多。若 $\Delta n_N = 0.05 n_0$, 则启动电流 $I_{st} = 20 I_N$, 启动转矩 $T_{st} = 20 T_N$ 。这样大的启动电流和启动转矩会烧坏换向器。因此, 一般中、大功率直流电动机不能在额定电压和额定输出功率下直接启动。

固有机械特性是反映电动机本身能力的重要特性。在固有机械特性的基础上, 很容易得到电动机的其他的机械特性。

2.1.3.2 人为机械特性

如果人为地改变电枢回路串接的电阻 R 、电枢电压 U 和励磁电流 I_f 中的任意一个量, 而保持其余的量不变, 这时得到的机械特性称为人为机械特性。

1. 电枢回路串接电阻 R 时的人为机械特性

保持 $U = U_N$ 、 $\Phi = \Phi_N$, 电枢回路串联电阻 R , 此时电动机的人为机械特性方程式为

$$n = \frac{U_N}{K_E \Phi_N} - \frac{R_a + R}{K_E K_T \Phi_N^2} T \quad (2.14)$$

电枢回路串接电阻 R 时的人为机械特性与固有机械特性相比较, 有如下特点。

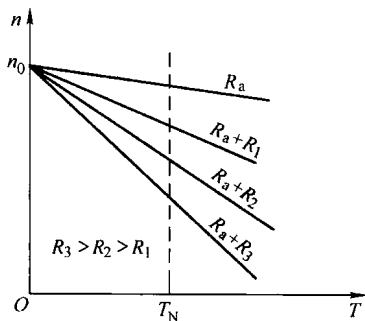


图 2.6 串接 R 的人为机械特性

(1) 理想空载转速 $n_0 = U_N / (K_E \Phi_N)$ 保持不变。

(2) 如果机械特性斜率 $\beta = (R_a + R) / (K_E K_T \Phi_N^2)$ 中增加了 R , 则 β 随着 R 的增大而增大。不同的 R 值可得到不同斜率的人为机械特性。它是一簇过 n_0 点且随 R 增加斜率变大的直线, 如图 2.6 所示。

(3) 当 $T = T_N$ 时, $n < n_N$, 电动机随 R 增大, 转速降 Δn 增大, 机械特性变软。

2. 改变电枢电压时的人为机械特性

当励磁电流一定, $I_f = I_{fN}$, (即 $\Phi = \Phi_N$) 时, 电枢回路不串联电阻 R , 改变电枢电压 U 时的人为机械特性方程为

$$n = \frac{U}{K_E \Phi_N} - \frac{R_a}{K_E K_T \Phi_N^2} T \quad (2.15)$$

电动机运行时, 通常以额定工作电压 $U = U_N$ 为上限。因此, 电枢电压 U 只能在 $U < U_N$ 的范围内改变。所以改变电枢电压 U 的人为机械特性与固有特性比较有如下特点:

(1) 理想空载转速 $n_0 = U / (K_E \Phi_N)$ 与电枢电压成正比, 且 $n_0 < U_N / (K_E \Phi_N)$;

(2) 特性斜率 $\beta = R_a / (K_E K_T \Phi_N^2)$ 与固有特性相同, 是一簇低于固有机械特性并与之平行的直线, 如图 2.7 所示;

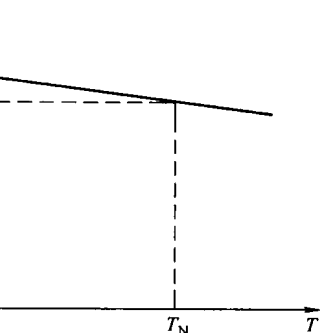


图 2.5 固有机械特性

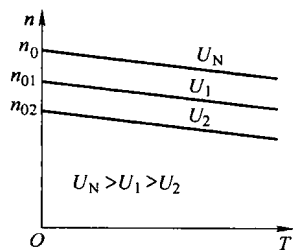


图 2.7 改变电枢电压的人为机械特性

(3)当负载转矩保持不变且降低电枢电压时,电动机的稳定转速随之降低。

3. 减小励磁磁通时的人为机械特性

保持电枢电压 $U=U_N$ 不变,电枢回路不串接电阻 $R(R=0)$,改变励磁电路中的电流 I_f (一般是增大励磁电路中的串联调节电阻 R_f 以减小 I_f ,可使磁通 Φ 减弱),并在 $I_f < I_N$,也就是在 $\Phi < \Phi_N$ 范围内调节,这时人为机械特性方程式为

$$n = \frac{U_N}{K_E \Phi_N} - \frac{R_a}{K_E K_T \Phi_N^2} T \quad (2.16)$$

与固有机机械特性比较,减小 Φ 时的人为机械特性的特点如下:

(1)理想空载转速 $n_0 = U_N / (K_E \Phi)$ 与 Φ 成反比, Φ 减小, n_0 升高;

(2)特性斜率 $\beta = R_a / (K_E K_T \Phi^2)$ 与 Φ^2 成反比, Φ 减弱, β 增大;

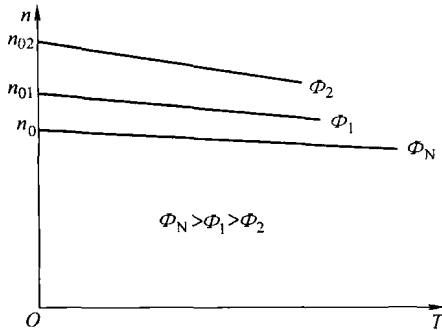


图 2.8 改变励磁磁通的人为机械特性

(3)减小 Φ 的人为机械特性是一簇随 Φ 减小理想空载转速升高同时特性斜率也变大的直线,如图 2.8 所示。

应注意,在设计时,为了节省铁磁材料,电机在正常运行时磁路已接近饱和,所以要改变磁通,只能是减弱磁通,因此对应的人为机械特性在固有特性的上方。当磁通过分削弱后,在输出转矩一定的条件下,电动机电流将大大增加而会严重过载。另外,若处于严重弱磁状态,则电动机的速度会上升到机械强度不允许的数值,俗称“飞车”。因此,直流他励电动机

在启动和运行过程中,决不允许励磁电路断开或励磁电流为零,为此,直流他励电动机通常设有“失磁”保护。

上面讨论了机械特性位于直角坐标系第一象限的情况(通常称该直角坐标系为 $n-T$ 平面),它是指转速与电磁转矩均为正的情况。倘若电动机反转,电磁转矩也随 n 的方向一同变化,机械特性曲线的形状仍是相同的,只是位于 $n-T$ 平面的第三象限,称为反转电动状态。

2.1.3.3 机械特性的计算与绘制

在设计电动机及拖动系统时,首先应知道所选择的电动机的机械特性 $n=f(T)$ 。但电动机产品目录及铭牌中并没有直接给出机械特性的数据,要利用电动机铭牌上提供的额定功率 P_N 、额定电压 U_N 、额定电流 I_N 、额定转速 n_N 等来进行机械特性曲线的计算与绘制。从前面所述,固有机机械特性是一条斜直线。如果能知道两个特殊点,即理想空载点 $(n_0, 0)$ 和额定工作点 (n_N, T_N) ,将两点连成直线即为固有机机械特性。

计算步骤为:首先根据已知数据估算电枢回路等效电阻 R_a 。估算的依据是,对于在额定条件下运行的电动机,电枢铜耗等于全部损耗的 $1/2 \sim 2/3$,即

$$R_a = \left(\frac{1}{2} \sim \frac{1}{3} \right) \frac{U_N I_N - P_N}{I_N^2}$$

再计算 $K_E \Phi_N$ 为

$$K_E \Phi_N = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N}$$

求空载点 (n_0, T_0) 为

$$n_0 = \frac{U_N}{K_E \Phi_N}, T_0 = 0$$

求额定点 (n_N, T_N) 为

$$n_N, T_N = 9.55 K_E \Phi_N I_N$$

根据求出的 (n_0, T_0) 、 (n_N, T_N) 绘制固有特性曲线。

应注意,直流电动机轴上输出转矩 $T_{2N} = 9.55 P_N / n_N$ 与这里求得的 T_N 不相等,相差 T_0 。式中 P_N 的单位用kW, n_N 为额定转速,由铭牌提供,单位为r/min, T_N 的单位为N·m。

2.1.4 他励直流电动机的启动、调速、制动运行特性

2.1.4.1 他励直流电动机的启动特性

直流电动机从静止状态到稳定运行状态的过程称为直流电动机启动过程或启动。启动中最重要的是启动电流 I_{st} 和启动转矩 T_{st} 。他励直流电动机启动方法有直接启动、电枢串电阻启动和降压启动三种。

1. 直接启动

直接启动是在电动机电枢上直接施加额定电压的启动方式。启动前先接通励磁回路,然后接通电枢回路。启动开始瞬间,由于机械惯性,电动机转速 $n=0$,反电动势 $E_a=0$,启动电流 $I_{st} = U_N / R_a$ 。由于电枢电阻 R_a 的数值很小, I_{st} 很大, I_{st} 可达 $(10 \sim 20) I_N$ 。这样大的启动电流对电动机绕组的冲击和对电网的影响均很大。因而,除了小容量的直流电动机可采用直接启动外,中、大容量电动机不能直接启动。他励和并励直流电动机直接启动电路如图2.9所示。

2. 降压启动

降压启动是启动瞬间把加于电枢两端的电源电压降低,以减小启动电流 I_{st} 的启动方法。为了获得足够的启动转矩 T_{st} ,一般将启动电流限制在 $(2 \sim 2.5) I_N$ 以内。因此,在启动时,把电源电压降低到 $U = (2 \sim 2.5) I_N R_a$ 。随着转速 n 的上升,电枢电动势 E_a 逐渐增大,电枢电流 I_a 相应减小。此时,再将电源电压逐步升高,直至电压升到 $U = U_N$,电动机进入稳定运行状态。降压启动特性如图2.10所示,其中负载阻转矩 T_L 作为已知,最后到达稳定运行点A。平滑地增加电源电压,使电枢电流始终在最大值上,电动机将以最大加速度启动,故该启动方法可恒加速启动,使启动过程处于最优运行状态。但此种方式需要一套调节直流电源设备,故投资较大。

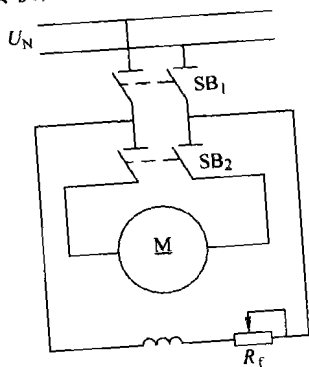


图 2.9 直接启动

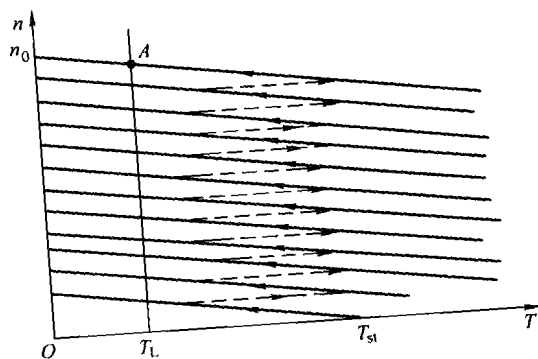


图 2.10 降压启动