



普通高等院校职业教育教改示范教材

机电传动与控制技术

姚永刚 主编 田效伍 芦家成 副主编

此书着重机电结合、机电控制，把电机与电机拖动、传感器检测技术、自动控制器件、可编程程序控制器应用等多门课程用新的教学体系组织起来。

- 机电传动系统的驱动电动机
- 机电系统的检测技术
- 可编程控制器
- 常用低压电器
- 机电传动控制系统

 中国轻工业出版社

普通高等学校职业教育教改示范教材

机电传动与控制技术

姚永刚 主编

田效伍 芦家成 副主编

张元 主审

 中国轻工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

机电传动与控制技术/姚永刚主编. —北京: 中国轻工业出版社, 2005.4

普通高等学校职业教育教改示范教材

ISBN 7-5019-4801-1

I. 机… II. 姚… III. 电力传动控制设备-高等学校: 技术学校-教材 IV. TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 014991 号

责任编辑: 王 淳

策划编辑: 王 淳

责任终审: 孟寿萱

封面设计: 邱亦刚

版式设计: 丁 夕 马金路

责任校对: 李 靖

责任监印: 吴京一

出版发行: 中国轻工业出版社 (北京东长安街 6 号, 邮编: 100740)

印 刷: 三河市艺苑印刷厂

经 销: 各地新华书店

版 次: 2005 年 4 月第 1 版 2005 年 4 月第 1 次印刷

开 本: 787 × 1092 1/16 印张: 17

字 数: 390 千字

书 号: ISBN 7-5019-4801-1/TP · 073 定价: 25.00 元

读者服务部邮购热线电话: 010-65241695 85111729 传真: 85111730

发行电话: 010-65141375 85119845

网 址: <http://www.chlip.com.cn>

Email: club@chlip.com.cn

如发现图书残缺请直接与我社读者服务部联系调换

40191J4X101ZBW

前 言

根据教育部组织制定的《高职高专教育专门课课程基本要求》和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》，以及《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》等基本精神，在“校本教材”经过两届教学实践与学生就业后的信息反馈，我们认真整理编写了这本《机电传动与控制技术》教材。

为适应两年制普通高等学校职业技术教育需要。以培养高等技术应用型专门人才为目标，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，借以振兴机械工业，进而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。为适应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，本教材从机电一体化技术需要出发，集电机、电力拖动、检测技术、自动控制器件、可编程序控制器应用、自动控制于一体的多门课程内容的结合，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。

在教材编写中我们注重了内容和体系的改革，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”、“自动控制器件”、“可编程序控制器应用”、“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。

本教材可作为高等职业教育工科院校非电类、机电类等相关专业的测量与控制技术教材，也可作为成人教育的电气控制与 PLC 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。

本书由姚永刚主编，田效伍、卢家成副主编。各章撰写分工为：姚永刚（第一、二章），田效伍（第六章及附录），卢家成（第五章），范峥（第三章），孟昕元（第四章）。全书由张元教授主审。

黄冬梅，何利英、吕众，王瑞，浦艳敏等提出了许多宝贵的修改意见。另外在本书的编写过程中，赵斌、黄英、张幸生、杨菁、戴玉振、王莹、诸葛小舟、蒋旻等老师为本书的编写提供了部分资料，并做了仔细的审阅，在此一并表示感谢。

限于编者知识水平，加之急欲将教学改革的成果向各校介绍，书中会有不妥之处，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

目 录

第一章 绪论	1
第一节 机电传动与控制系统的发 展概况.....	1
第二节 控制系统的基本概念.....	3
第三节 本课程的性质与任务.....	4
第二章 机电传动系统的驱动电动机	6
第一节 直流电动机.....	6
第二节 交流异步电动机	24
第三节 伺服电动机	44
第四节 力矩电动机	49
第五节 步进电动机	51
第六节 其他型式的电动机	57
思考题与习题	57
第三章 机电系统的检测技术	60
第一节 检测技术的基础知识	60
第二节 位移、位置与几何尺寸的检测	64
第三节 速度的检测	74
第四节 压力的检测	76
第五节 温度的检测	83
第六节 应用举例	92
思考题与习题	94
第四章 可编程控制器	95
第一节 概述	95
第二节 可编程控制器的结构和工作原理	98
第三节 S7 系列可编程控制器	101
第四节 S7 系列 PLC 的指令系统	112
第五节 应用基本指令编程.....	138
思考题与习题.....	149
第五章 常用低压电器	151
第一节 主电路中常用的低压电器.....	151
第二节 控制电路中常用的电器元件.....	167
思考题与习题.....	185
第六章 机电传动控制系统	188
第一节 继电器-接触器控制系统	188

第二节 直流电动机控制系统.....	204
第三节 交流电动机控制系统.....	228
第四节 步进电动机控制系统.....	243
思考题与习题.....	254
附录 电气图常用图形与文字符号新旧标准对照表.....	257
参考文献.....	263

第一章 绪 论

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

第一节 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，其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，使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-接触器控制属断续控制或开关量控制。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、控制方式完全固定不灵活的缺点。

开关量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所提供的。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，由于这种方式存在所用的电机数量多、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（即可控硅）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许多优点，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，广泛用于单机、组合机床和自动生产线的控制。

近年来，可编程序逻辑控制器（PLC）在工业过程自动化系统中的应用日益广泛。可编程序控制器从它一问世就是以最基层、最第一线的工业自动化环境及任务为前提的，它具有硬件结构简单、安装维修方便、抗强电磁干扰、梯形图编程、工作可靠等优点，工程技术人员能很快地熟悉它、使用它。可编程序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，用来在其内部存储执行逻辑运算、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。可编程序控制器及其有关外部设备，都按既易于工业控制系统连成一体，又易于扩充其功能的原则设计。近年来，PLC的一个发展方向是向微型、简易、价廉方面发展，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应用广泛，很有发展前途。

上述的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、高功率-重量比、大功率和低成本控制系统提出的要求，促使了液压、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，在不同的行业得到了相应的应用。

液压控制系统与电气控制系统相比，具有下列优点：

① 液压执行机构的功率-重量比和扭矩-惯量大。液压控制系统的加速性好，结构紧凑、尺寸大、重量轻，适用于控制大功率、大惯量负载的场合。

② 液压执行机构响应速度快，系统频带宽。

③ 液压系统的刚度大，抗干扰能力强，误差小，精度高。由于液压压缩性小，液压执行机构泄漏少，因此稳态速度和动态位置刚度都比电气控制系统大。所以液压控制系统具有高精度和快速响应的能力。

④ 液压控制系统低速平稳性好，调速范围宽。

液压控制系统虽然具有上述优点，但也有其缺点：

① 液压元件加工精度要求高、成本高、价格高。

② 液压元件易漏油，污染环境，可能引起火灾。

③ 液压油易受污染，导致液压控制系统产生故障。

④ 液压系统易受环境温度变化的影响。

⑤ 液压能源的获得、储存和输送不如电能方便。

气动控制系统的优点是：

① 工作介质是空气，来源方便，使用后直接排出，不需回气管道，不污染环境。

② 空气黏度很小，压力损失小，节能高效，适用于远距离输送。

③ 气动系统动作迅速、反应快、维护简单、成本低，易于标准化、系列化和通用化。

④ 工作环境适应性好，特别在易燃、易爆、多尘、强振、辐射等恶劣环境中工作安全可靠。

气动控制系统的缺点是：

① 由于空气可压缩性较大，负载变化时系统的动作稳定性较差。

② 因工作压力低，不易获得较大输出力或力矩。

③ 需对气源中杂质和水分进行处理，排气时噪声较大。

④ 因空气无润滑性能，在气路中要设置给油润滑装置。

由于现代控制技术、电子、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，并大大的提高了它的综合技术指标。

电气控制系统和液压、气动控制系统都将充分发挥各自的优势，在相应的行业和技术领域求发展。

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，其成本低、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，实现较佳的性能价格比。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。

第二节 控制系统的基本概念

一、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。对于用控制信号（输入量）通过系统诸环节来控制被控变量（输出量），使其按规定的方式和要求变化，这样的系统称为控制系统。

二、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参考输入量进行比较。对应于每个参考输入量，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量，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，其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、最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。

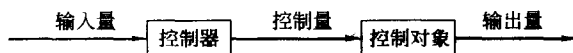


图 1-1 开环控制系统框图

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。闭环控制系统框图如图 1-2、图 1-3 和图 1-4 所示。

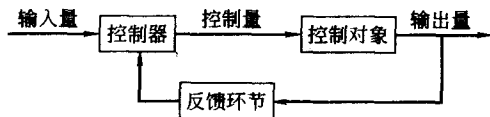


图 1-2 闭环控制系统框图

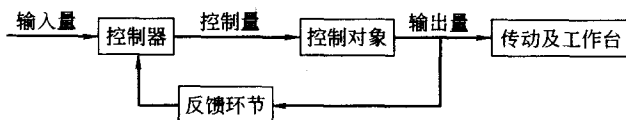


图 1-3 数控机床半闭环控制系统框图

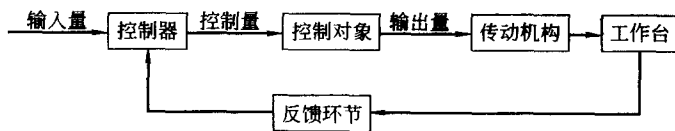


图 1-4 数控机床全闭环控制系统框图

第三节 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，以培养对机电测量与控制系统的分析、应用和设计的基本能力。

本课程的基本任务是：

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 熟悉典型机电传动控制系统，具有从事机电传动设备的安装调试、运行和维护等技术工作能力。

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 掌握可编程序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序控制器，编制用户程序，经调试应用于生产过程控制。

第二章 机电传动系统的驱动电动机

第一节 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，多数仍采用直流电动机拖动。

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。

一、直流电动机工作原理

直流电动机的工作原理是基于电磁力定律。如图 2-1 所示，在 A、B 电刷上接入直

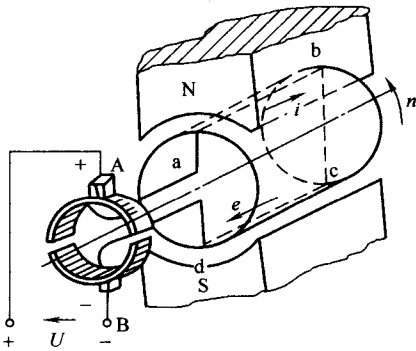


图 2-1 直流电动机工作原理

流电源 U ，电流从正电刷 A 经线圈 ab 、 cd ，由负电刷 B 流出。根据电磁力定律，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。在图示瞬间导线 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

向也加以改变，即要进行换向。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 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 所示的电动机中，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

$$T = K_T \Phi I_a$$

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

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

$$E_a = K_E \Phi n$$

式中 E_a 为电枢电动势 (V)； Φ 为主磁通 (Wb)； n 为电枢转速 (r/min)； K_E 为与电动机结构有关的常数，称为电动势常数。

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

二、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更为常用，所以下面以他励直流电动机为例介绍其运行特性。

(一) 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 所标注的电压、电流及电动势的方向。根据基尔霍夫第二定律，电枢回路的电动势平衡方程式为

$$E_a = U - I_a R_a \quad (2-1)$$

或

$$U = E_a + I_a R_a, \quad I_a = \frac{U - E_a}{R_a}, \quad E_a = K_E \Phi n \quad (2-2)$$

励磁回路方程

$$I_f = U_f / R_f$$

相关量

$$\Phi = f(I_f, I_a) \quad (2-3)$$

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； 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 ，它也是阻转矩。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

$$T = T_2 + T_0 = T_L \quad (2-4)$$

式中 $T = K_T \Phi I_a$

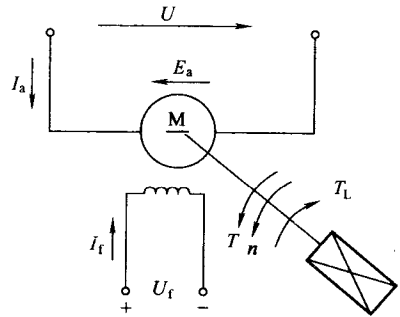


图 2-2 他励直流电动机

3. 功率平衡方程

将式 (2-2) 两边都乘以电枢电流 I_a 得到

$$UI_a = E_a I_a + I_a^2 R_a \quad (2-5)$$

可改写成

$$P_1 = P_e + P_{Cua}$$

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 (2-4) 两边同乘以机械角速度 Ω , 得

$$T\Omega = T_2\Omega + T_0\Omega$$

改写成

$$P_e = P_2 + P_0 \quad (2-6)$$

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。

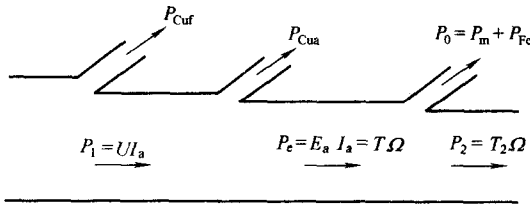


图 2-3 他励直流电动机的功率流程图

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

$$P_{\Sigma} = P_{Cua} + P_0 + P_s = P_{Cua} + P_m + P_{Fe} + P_s$$

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

$$\eta = 1 - \frac{P_{\Sigma}}{P_2 + P_{\Sigma}}$$

(二) 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, 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。 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 (2-1), 整理后得

$$n = \frac{U_N}{K_E \Phi_N} - \frac{R_a}{K_E \Phi_N} I_a \quad (2-7)$$

式 (2-7) 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, 由于电枢反应的去磁作用又将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

$$T=K_T\Phi I_a \quad (2-8)$$

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。直流电动机效率约在 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，其效率最高。

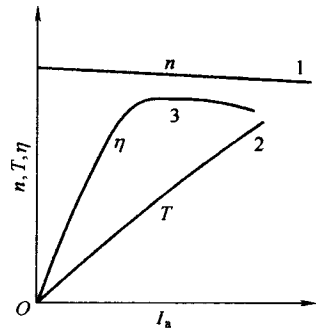


图 2-4 他励直流电动机工作特性

三、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。

(一) 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

$$n = \frac{U_N}{K_E\Phi_N} - \frac{R_a}{K_E K_T \Phi_N^2} T = n_0 - \beta_N T \quad (2-9)$$

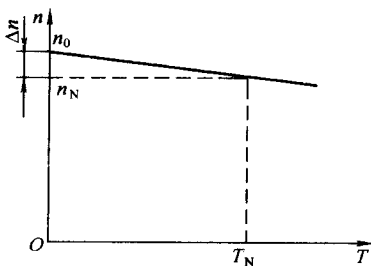


图 2-5 固有机械特性

用图形表示如图 2-5 所示。

固有机械特性的特点：

(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 $\Delta n_N=0.05n_0$ 。

(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 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 $T = K_T \Phi_N I_{st} = T_{st}$, 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。

(二) 人为机械特性

如果人为地改变电枢回路串入的电阻、电枢电压 U 和励磁电流 I_f 中的任意一个量的大小, 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

$$n = \frac{U_N}{K_E \Phi_N} - \frac{R_a + R}{K_E K_T \Phi_N^2} T \quad (2-10)$$

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:

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

(2) 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 点的随 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 $\Phi = \Phi_N$ 。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

$$n = \frac{U}{K_E \Phi_N} - \frac{R_a}{K_E K_T \Phi_N^2} T \quad (2-11)$$

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 $n < n_0 = U_N / (K_E \Phi_N)$ 。

(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。

(3) 当负载转矩保持不变, 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

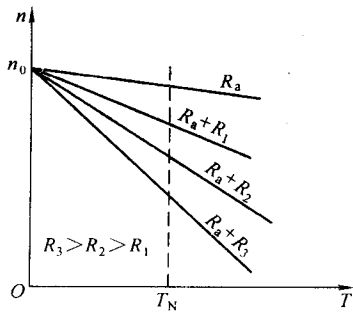


图 2-6 串 R 的人为机械特性

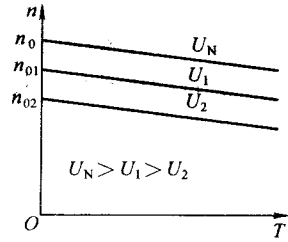


图 2-7 改变电枢电压的人为机械特性

保持电枢电压 $U=U_N$ 不变, 电枢回路不串接电阻 ($R=0$), 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

$$n = \frac{U_N}{K_E \Phi_N} - \frac{R_a}{K_E K_T \Phi_N^2} T \quad (2-12)$$

与固有机机械特性比较, 减小 Φ 时的人为机械特性的特点为:

- (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。

(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。

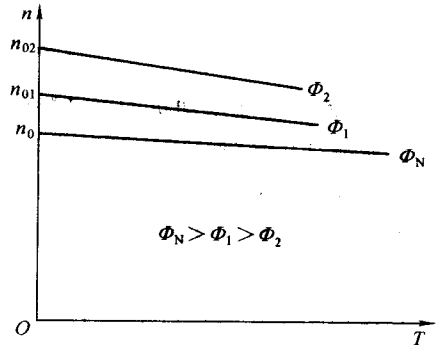


图 2-8 改变励磁磁通的人为机械特性

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。

(三) 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