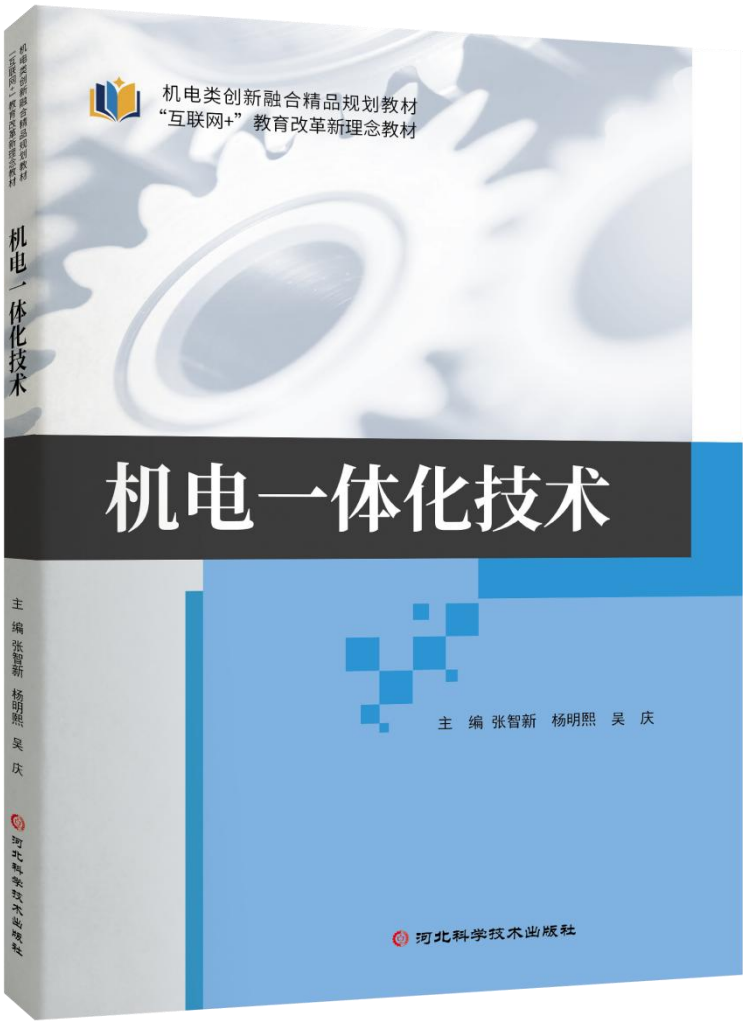
机电一体化技术



类目：机电类
书名：机电一体化技术
主编：张智新 杨明熙 吴庆
出版社：河北科学技术出版社
开本：大 16 开
书号：978-7-5717-2606-5
使用层次：通用
出版时间：2025 年 9 月
定价：48.00 元
印刷方式：双色
是否有资源：有

责任编辑：王　宇
责任校对：李嘉腾
美术编辑：张　帆

机电类创新融合精品规划教材
“互联网+”教育改革新理念教材

机电一体化技术

机电一体化技术

机电一体化技术

主　编　张智新　杨明熙　吴　庆

ISBN 978-7-5717-2604-5
9 787571 726045 >
定价：48.00元

河北科学技术出版社

主　编　张智新　杨明熙　吴　庆

河北科学技术出版社

机电类创新融合精品规划教材
“互联网 +”教育改革新理念教材

机电一体化技术

主　编　张智新　杨明熙　吴　庆
副主编　冉晟铭　李广棵　冯发勇
　　屈　伟　亓晓鹏　英容华
　　宋妮璐　王　锴　渠海峰
　　陈　虹　刘　青

河北科学技术出版社
·石家庄·

图书在版编目(CIP)数据

机电一体化技术 / 张智新，杨明熙，吴庆主编. 石家庄 ：河北科学技术出版社，2025.9. —ISBN 978-7-5717-2606-5

Ⅰ. TH-39

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 2025WC1480 号

机电一体化技术

JIDIAN YITIHUA JISHU

主编　张智新　杨明熙　吴　庆

责任编辑：王　宇

责任校对：李嘉腾

美术编辑：张　帆

出版发行：河北科学技术出版社

地　　址：石家庄市友谊北大街 330 号（邮编：050061）

印　　刷：河北斯博印刷有限公司

开　　本：880 毫米×1230 毫米　1/16

印　　张：11.5

字　　数：320 千字

版　　次：2025 年 9 月第 1 版

印　　次：2025 年 9 月第 1 次印刷

书　　号：ISBN 978-7-5717-2606-5

定　　价：48.00 元

前　言

机电一体化是微电子技术向机械工业渗透过程中逐渐形成并发展起来的一项综合性技术，正日益得到普遍重视和广泛应用，已成为现代工业化生产和经济发展中不可或缺的一项高新技术。机电一体化将机械、电工、电子、信息处理、伺服驱动、传感技术、自动控制等技术进行有机结合，用系统的观点在工程的构思、规划、设计等方面优化组织“物质、能量、信息”现代工业三要素，从而制造出具有多种集成功能、高性能、高可靠性并在市场中具有竞争力的产品。目前机电一体化产品已遍及人们日常生活和国民经济的各个领域。

随着科学技术的发展，机电一体化产品的概念不再局限于某一具体产品的范围，已扩大到控制系统和被控制系统相结合的产品制造和过程控制。为了在当今国际范围内激烈的技术、经济竞争中占据优势，世界各国纷纷将机电一体化的研究和发展作为一项重要内容列入本国的发展计划，而我国也正处于由“制造大国”向“制造强国”的转变过程中，需要能够掌握核心与关键技术的人才进行自主创新，增强核心竞争力。目前，我国很多学校在机械工程类专业中设立了机电一体化技术研究方向；企业及研究院所也有相当多的工程技术人员从事机电一体化技术方面的研究与开发工作。

本书以机电一体化共性关键技术为基础，围绕各种技术的融合与综合应用撰写知识体系，使读者了解和掌握机电一体化的实质、理论和基本方法，从而能够综合运用共性关键技术进行机电一体化产品乃至系统的分析、设计与开发。

由于时间及水平所限，编者虽认真谨慎，但书中纰漏与不当之处在所难免，恳请读者能够谅解并予以指正。

编　者

2025 年 5 月

目　录

第 1 章　总论 …… 1

1.1　机电一体化控制概述 …… 2
1.2　机电一体化控制系统的基本结构 …… 3
1.3　机电一体化控制的技术系统 …… 4
1.4　机电一体化控制的理论 …… 9
1.5　机电一体化控制技术的展望 …… 14
思考题 …… 14

第 2 章　精密机械技术 …… 15

2.1　电磁知识 …… 16
2.2　控制系统 …… 21
2.3　动力学基础 …… 23
2.4　生产机械的机械特性 …… 29
2.5　机电传动系统稳定运行的条件 …… 31
思考题 …… 32

第 3 章　传感技术 …… 33

3.1　传感器概述 …… 34
3.2　传感器的基本特性 …… 37
3.3　传感器的性能指标与要求 …… 43
3.4　传感器的标定与校准 …… 45
3.5　改善传感器性能的主要技术途径 …… 46
思考题 …… 47

第 4 章　伺服控制 …… 48

4.1　步进电机 …… 49
4.2　小型直流电机 …… 61

4.3 螺线管的控制电路 …… 71
4.4 伺服电机驱动 …… 72
4.5 液压执行装置 …… 75
4.6 气动执行装置 …… 77
思考题 …… 80

第 5 章 计算机控制基础 …… 81

5.1 计算机控制概述 …… 82
5.2 计算机控制系统的接口技术 …… 85
5.3 工业控制计算机简介 …… 95
思考题 …… 101

第 6 章 系统总体设计 …… 102

6.1 总体设计的概念及内容 …… 103
6.2 性能指标与优化方法 …… 107
6.3 产品结构优化设计 …… 113
6.4 系统干扰与抑制 …… 119
思考题 …… 126

第 7 章 控制技术的应用 …… 127

7.1 交通信号灯控制系统 …… 128
7.2 自动检票机 …… 134
7.3 A/D 转换的室温控制系统 …… 138
7.4 固体继电器的驱动电路 …… 140
7.5 用气动执行机构的传送装置的控制 …… 142
7.6 简易自动门的控制 …… 147
7.7 气缸的控制 …… 150
思考题 …… 151

第 8 章 机电一体智能化应用 …… 152

8.1 工业机器人 …… 153
8.2 微机电系统 …… 165
8.3 智能农业装备 …… 171
思考题 …… 177

参考文献 …… 178

第1章 总 论

- 1.1 机电一体化控制概述
- 1.2 机电一体化控制系统的基本结构
- 1.3 机电一体化控制的技术系统
- 1.4 机电一体化控制的理论
- 1.5 机电一体化控制技术的展望

1.1 机电一体化控制概述

机电一体化控制就是“利用电子、信息(包括传感器、控制、计算机等)技术使机械柔性化和智能化”的技术。

1.1.1 机电一体化控制技术的基本概念

机电一体化控制技术是机械、电子、计算机和自动控制等技术有机结合的一门复合技术，它是在以大规模集成电路和微型计算机为代表的微电子技术高度发展，并向传统机械工业领域迅速渗透、与机械电子技术深度融合的现代化工业基础上，综合运用机械、微电子、自动控制、信息、传感测试、电力电子、接口、信号变换以及软件编程等技术构成的群体技术。

机电一体化控制技术不是机械与电子的简单组合，而是在信息论、控制论和系统论的基础上把两者有机组合起来的应用技术。由于引进了微电子技术，工业生产从机械自动化跨入了机电一体化阶段，使机械产品的技术结构、产品结构、产品功能和构成、生产方式和管理机制均发生了巨大变化。

机电一体化控制技术还赋予机械产品一些新的功能，如自动检测、自动显示、自动记录、自动处理信息、自动调节控制、自动诊断、自动保护等，从而使机械具有智能化的特征。如果说传统机械可替代和增强人的体力，那机电一体化控制技术则将取代并延伸人的部分智力，当然，这也给机电设备维修与管理人员提出了更高要求，需要具备更高的机电综合技术。

1.1.2 机电一体化控制技术的发展历程

20 世纪 70 年代，机电一体化(mechatronics)一词起源于日本，是由机械和电子的两个英语单词 mechanism 和 electronics 合成的一个新的专用名词。到了 1976 年，机电一体化已在日本得到普遍展开，这一时期通常被称为是机电一体化控制技术的萌芽发展时期。

进入 20 世纪 80 年代，欧美等国也把机电一体化控制技术作为先进技术，机电一体化控制技术和产品如雨后春笋般涌现，现代化的机械将电子技术、自动化技术、计算机技术融为一体，使机电一体化控制技术进入大发展阶段，现在已作为极普通的术语，在各种传播媒体中广泛使用，是机械意义上的机械技术与电子电气技术和电子意义上的电子学技术的有机结合。

我国机电一体化控制技术虽然发展较迟，但近十几年引起国家重视，得以飞速发展。

图 1-1 所示的机械手是机电一体化的典型实例，其机械部分由螺钉、齿轮、弹簧等极为常见的机械零件和连杆机构组成，而作为信息处理的电子装置部分，为了得到更好的控制性能，由集成电路、电阻、电感与电容等电子电路元器件构成。

综上所述，机电一体化控制技术的产生不是孤立的，而是各种技术相互渗透的结果，它代表着正在形成中的新一代生产技术，虽产生的时间不长，但已显示出强大的威力。在世界范围内，机电一体化热潮正在兴起，并已渗透到国民经济、社会生活的各个领域，用更新的技术进行设计、制造与开发，创造出高度机电一体化的机器设备。新型产业的发展促使世界各国在发展机电一体化控制技术上的竞争加剧，更进一步推动机电一体化控制技术在机电设备系统的迅速发展。

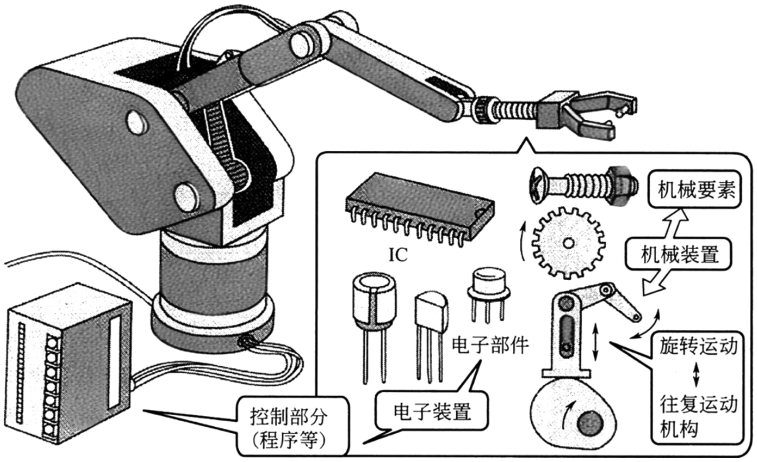


图 1-1　机电一体化示例

1.1.3　机电一体化控制技术的作用

当生产采用机电一体化控制技术后即可产生以下作用：

①使产品具有原来所不具备的新功能。

②增强产品的柔性。

③改善操作性能。

④容易满足多样性的需求。

⑤扩大设计的灵活性。

⑥改善生产的工艺性操作性能。

⑦使产品的体积小、重量轻。

⑧减少产品的零、部件数量。

⑨提高可靠性。

⑩提高品质。

⑪节能省力。

⑫降低成本。

机电一体化控制技术的本质是将电子技术引入机械控制中，利用传感器检测机械运动，将检测信息输入到计算机，经计算得到能够实现预期运动的控制信号，由此来控制执行装置。这项工作就是开发计算机软件，即编制计算机程序的内容，使之具有一定的功能，并通过键盘将程序输入计算机。不需要用螺栓和螺母来重新组装机械，也不需要电烙铁焊接电子线路，只需修改程序就可灵活地改变机械的运动。在计算机上，通过适当的软件进行控制，无论如何复杂的运动都可实现。

1.2　机电一体化控制系统的基本结构

一个较为完善的机电一体化系统，主要是由机械本体、动力部分、测试传感部分、执行机构、驱动部分、控制及信息处理单元和接口等基本结构组成，最后通过接口将各结构部分及环节联系起来。

1.2.1　机械本体

机械本体是系统所有功能元素的机械支持结构，包括机身、机架、机械连接等。根据机电一体

化产品的技术性能、水平和功能，要在结构、材料、加工工艺性及几何尺寸等方面适应产品的高效、多功能、可靠性和节能、小型、轻量、美观等要求。

1.2.2 动力部分

动力部分是按照系统控制要求，为系统提供能量和动力，使系统能够正常运行。用尽可能小的动力输入，获得尽可能大的功能输出，是机电一体化产品的显著特征之一。

1.2.3 测试传感器部分

测试传感器部分是对系统运行中所需要的本身和外界环境的各种参数及状态进行检测，变成可识别信号，传输到信息处理单元，经过分析、处理后产生相应的控制信息。其功能一般由专门的传感器和仪表完成。

1.2.4 执行机构

执行机构是根据控制信息和指令，完成要求的动作。运动部件一般采用机械、电磁、电液等机构。根据机电一体化系统的匹配性要求，需要考虑改善性能，如提高刚性，减轻重量，实现组件化、标准化和系统化，提高系统整体可靠性等。

1.2.5 驱动部分

驱动部分是在控制信息作用下提供动力，驱动各种执行机构完成各种动作和功能。一体化系统一方面要求驱动的高效率和快速响应特征，同时还要求有较高的可靠性和对水、油、温度、尘埃等外部环境有较强的适应性。由于几何尺寸上的限制，要求动作范围狭窄，所以还需考虑维修和标准化的要求。随着电力电子技术的高速发展，高性能步进驱动、直流和交流伺服驱动被大量应用于机电一体化系统。

1.2.6 控制及信息处理单元

控制及信息处理单元是将来自各传感器的检测信息和外部输入命令进行集中存储、分析、加工，根据信息处理结果，按照一定的程序和步骤发出相应的指令，控制整个系统有目的地运行。该单元一般由计算机、可编程控制器(PLC)、变频器、数控装置以及逻辑电路、A/D 与 D/A 转换、I/O 接口和计算机外部设备等组成。机电一体化系统对控制和信息处理单元的基本要求是：提高信息处理速度、可靠性，增强抗干扰能力，完善系统自诊断功能，实现信息处理的智能化和小型化、轻量化、标准化等。

1.2.7 接口

接口是系统中各单元和环节之间进行物质、能量和信息交换的连接界面，具有对信号进行交换、放大及传递的功能。由于接口的作用，使各组成部分连接成为一个有机整体，由控制和信息处理单元的预期信息导引，使各功能环节有目的地协调一致运动，从而形成机电一体化系统工程。

1.3 机电一体化控制的技术系统

1.3.1 机电一体化控制的相关学科

机电一体化控制技术是一门新兴学科，支撑它的学科主要有：

①机械工程学科，包括机械设计、机械制造、机械动力学等。

②电子学，包括数字电路、模拟电路等。

③电工学，包括电机、电器等。

④微电子学，包括微处理机及接口技术、计算机科学、CAD/CAM 技术及软件技术等。

⑤检测与控制学科，包括传感器、执行装置、控制器(PLC、变频器)。

⑥控制论，包括经典控制和现代控制理论。

以上各项构成一棵学科树，如图 1-2 所示。

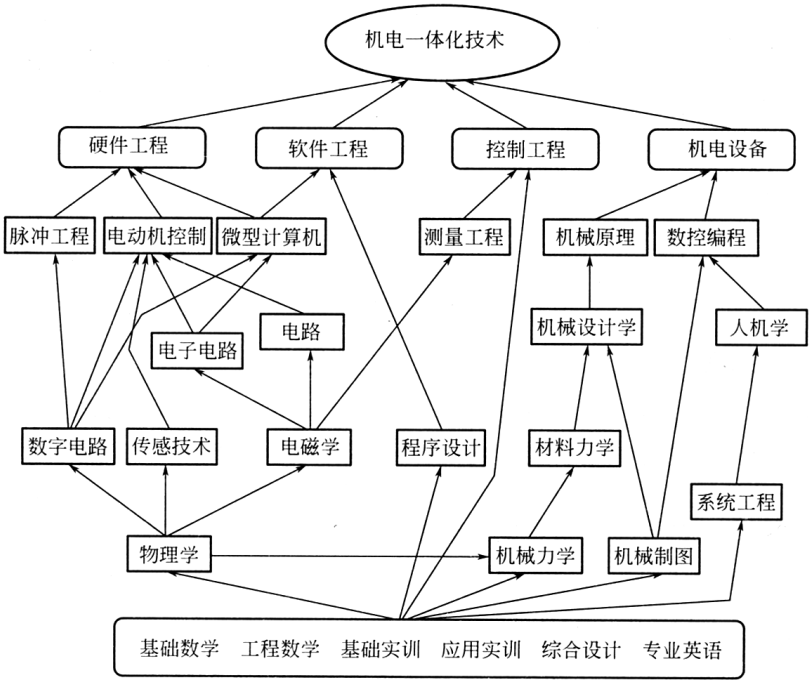


图 1-2　机电一体化的学科树

1.3.2　机电一体化控制的相关技术

机电一体化控制技术是一门正在发展的交叉技术，是在传统技术的基础上，与一些新兴技术相结合而发展起来的。与此相关的技术很多，涉及机械技术、电子技术、控制技术以及信息技术等。机电一体化的共性相关技术可归纳为 6 个方面。

1. 检测传感技术

为提高产品的性能，扩展功能，通常需对机械进行实时控制、监视、安全检查等，以提高其自动化和智能化的程度，这些都需要通过检测传感手段来实现，因此检测传感技术是机电一体化系统安全运行与提高产品质量的有力保障。

传感器是检测部分的核心，相当于人的感官，将被测量变换成系统可识别的、与被测量有确定对应关系的电信号的一种装置。传感器按测试原理和被检测的物理量可分为多种，机械运动主要有位移、速度、加速度、力、角度、角速度、角加速度和距离等，这些物理量可转换成两极板间的电容量、应变引起的电阻变化、磁场强度与磁场频率的变化、光的传播、声音的传播、科里奥利力等其他物理量，最终都转换成电压或频率等电量信号输入到信息处理系统，并作为相应的控制信号。检测精度的高低将直接影响力学性能的好坏，现代工程技术要求传感器能快速、精确地获取信息，并能经受各种严酷环境的考验。传感器还应具有宽的功能范围、准确的工作精度、好的动态响应、高的灵敏度和分辨率、强的抗干扰能力和可靠性。其主要指标是分辨率和精度。

例如，利用半导体传感器对液面进行控制，以改变原浮子进行的沉浮控制实现的阀门开关操作，

如图 1-3 所示。只要把随时间变化的液面高度及变化幅度等物理量信息，变换为电信号提取出来，就能按要求进行控制。

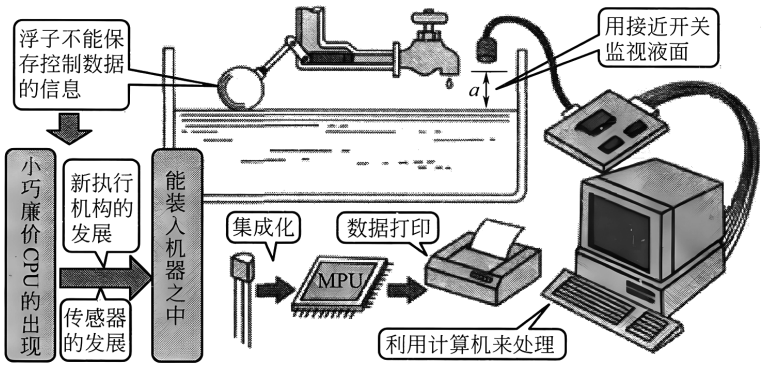


图 1-3　检测传感的液面控制

2. 信息处理技术

信息处理技术通常是指信息的输入、交换、运算、存储和输出等技术，它包括计算机及外围设备、微处理机及可编程控制器(PLC)、变频器、接口技术。在机电一体化系统中，信息处理部分相当于人的大脑，指挥整个系统的运行。由传感器检测的机械运动信号一般都要转换成与机械运动成比例的连续电压信号，这种连续信号是模拟信号，而模拟信号是无法直接输入计算机的，经过 A/D 转换器转换成数字信号后再输入计算机。另外，若要将计算机内的信号输出时，必须采用 D/A 转换器转换成模拟信号。图 1-4 所示的是计算机与传感器和执行机构的连接框图。

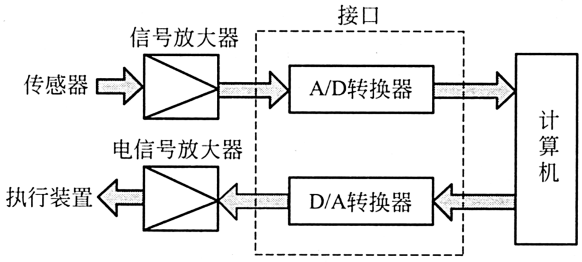


图 1-4　计算机与传感器和执行机构连接框图

3. 自动控制技术

自动控制技术包括精准定位控制、速度控制、自适应控制、自诊断、校正、补偿、示教再现、检索等技术。在机电一体化控制技术中，自动控制主要解决如何提高产品的精度、提高加工效率、提高设备的有效利用率等问题。其主要技术关键在于现代控制理论在机电一体化控制技术中的工程化和实用化、优化控制模型的建立及边界条件的确定等，计算机动态仿真技术的出现和发展为在控制系统的物理模型建立之前就能预见其动态性能，并为正确选择控制系统的有关参数提供了方便。

4. 伺服驱动技术

伺服驱动包括电动、气动、液压等各种类型的传动装置。这部分相当于人的手足，直接执行各种有关的操作。伺服传动技术是直接执行操作的技术，伺服系统是实现电信号到机械动作的转换装置与部件，对系统的动态性能、控制质量和功能具有决定性的影响。常见的伺服驱动由电动机、液压马达、脉冲液压缸、步进电动机、直流伺服电动机和交流伺服电动机完成。由于变频技术的进步，交流伺服驱动技术已取得了突破性进展，可为机电一体化系统提供高质量的伺服驱动单元，极大地促进了机电一体化控制技术的发展。

5. 精密机械技术

机械技术是关于机械的机构及利用这些机构传递运动的技术。与一般的同类型机械相比，机电一体化系统中机械部分的精度要求更高，要有更好的可靠性及维护性，同时要有更新颖的结构，要

求零部件模块化、标准化、规格化等。在机电一体化产品中，对机械本体和机械技术本身都提出了新的要求。这种要求的核心就是精密机械技术，要求机械结构减轻重量，缩小体积，提高精度，改善性能，提高可靠性。

6. 计算机技术

计算机无法直接处理模拟信号，计算机在内部处理数字信号，外部通过传感器进行 A/D(模拟—数字)转换，将模拟信号转换成数字信号。在计算机内部，以传感器信号为基础，采用计算机的程序语言来编制处理程序。计算机的通用程序语言有汇编语言和编译语言(如 C 语言等)，在机电一体化控制设备上一般采用专用的程序语言。

机电一体化控制技术不是几种技术的简单叠加，而是通过系统总体设计使它们形成一个有机整体。系统总体技术是从整体目标出发，用系统的观点和方法，将总体分解成若干功能单元，找出能完成各个功能的技术方案，再将各个功能与技术方案组合成方案组进行分析、评价、优选的综合应用技术。总体技术包括机电一体化机械的优化设计、CAD/CAM 技术、研究和解决各组成部件之间功能上的协调，可靠性设计及价值工程等。这就是说，即使各部分技术都已掌握，性能、可靠性都很好，但整个系统不能很好地协调，那它仍然不可能正常、可靠地运行。

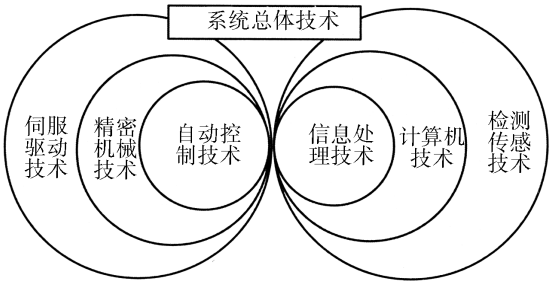


图 1-5　机电一体化控制的相关技术

上述技术的综合，形成了多学科技术领域综合交叉的技术密集型系统工程。机电一体化相关技术之间的关系如图 1-5 所示。

1.3.3　机电一体化控制对技术的影响

1. 提高精度

机电一体化控制技术使机械传动部件减小，从而使机械磨损、配合间隙及受力变形等所引起的误差大大减小，同时由于采用电子技术实现自动检测和控制、补偿、校正，从而减小因各种干扰因素造成的动态误差，达到单纯机械装备所不能实现的工作精度。如采用计算机误差分离技术的电子圆度仪，其测量精度可由原来的 0.025μm 提高到 0.01μm；大型镗床装感应同步器数显装置可将加工精度从 0.06μm 提高到 0.02μm。

2. 增强功能

现代高新技术的引入，极大地改变了机械工业产品的面貌，具有多种复合功能，成为机电一体化产品和应用技术的一个显著特征。如加工中心机床可将多台普通机床上的多道工序在一次装夹中完成，并且还有自动检测工件和刀具的精度、自动显示刀具动态轨迹图形、自动保护和自动故障诊断等极强的应用功能；配有机器人的大型激光加工中心，能完成自动焊接、划线、切割、钻孔、热处理等操作，可加工金属、塑料、陶瓷、木材、橡胶等各种材料。这种极强的复合功能，是传统机械加工所不能比拟的。

3. 改善操作性和使用性

机电一体化装置或系统各相关传动机构的动作顺序及功能协调关系，可由程序控制自动实现，并建立良好的人机界面，因而可通过简便的操作得到复杂的功能控制和使用效果。有些机电一体化设备可实现操作全部自动化；有些更高级的机电一体化系统，还可通过被控对象的数学模型和目标函数，以及各种运行参数的变化情况，随机自寻最佳工作过程，协调对内对外关系，以实现自动最

优控制，如电梯全自动控制系统、智能机器人等。

4. 简化结构，减轻重量

由于机电一体化设备系统采用新型电力电子器件和传动技术代替笨重的老式电气控制的复杂机械变速传动，由微处理器和集成电路等微电子元件和逻辑软件完成过去靠机械传动链来实现的关联运动，从而使机电一体化产品体积减小，结构简化，重量减轻。如换向器电动机，将电子控制与相应的电动机电磁结构相结合，取消了传统的换向电刷，简化了电动机结构，提高了电动机寿命和运行特性，并缩小了体积。

5. 增强柔性应用功能

机电一体化系统可根据使用要求的变化，对产品的应用功能和工作过程进行调整修改，满足用户多样化的使用要求。如利用数控加工中心或柔性制造系统，可通过调整系统运行程序适应不同零件的加工工艺。机械工业约有 75％的产品属中小批量，利用柔性生产系统，能够经济、迅速地解决这种中小批量、多品种的自动化生产，对机械工业发展具有划时代的意义。

1.3.4 机电一体化控制对经济的影响

1. 提高生产效率，降低成本

机电一体化生产系统能够减少生产准备和辅助时间，缩短新产品的开发周期，提高产品合格率，减少操作人员，提高生产效率，降低生产成本。如数控机床的生产效率比普通机床高 5～6 倍，柔性制造系统可使生产周期缩短 40％，生产成本降低 50％。

2. 节约能源，降低消耗

机电一体化产品通过采用低能耗的驱动机构、最佳的调节控制和提高设备的能源利用率，来达到显著的节能效果。如工业锅炉，若采用微机精确控制燃料与空气的混合比，可节煤 5％～20％；电弧炉是最大的耗电设备之一，如改用微机实现最佳功率控制，可节电 20％。

3. 提高安全性，可靠性

具有自动检测监控的机电一体化系统，能够对各种故障和危险情况自动采取保护措施，及时修正运行参数，提高系统的安全可靠性。如大型火电设备中，锅炉和汽轮机的协调控制、汽轮机的电液调节系统、自动启停系统、安全保护系统等，不仅提高了机组运行的灵活性和积极性，而且提高了机组运行的安全性和可靠性，使火电设备逐步走向全自动控制。

4. 减轻劳动强度，改善劳动条件

机电一体化控制技术一方面能够将制造和生产过程中极为复杂的人的智力活动和资料数据记忆查找工作改由计算机来完成，另一方面又能由程序控制自动运行，代替人的紧张和单调重复的操作，以及在危险或有害环境下的工作，因而大大减轻了人的脑力和体力劳动，改善了人的工作环境条件。如 CAD 和 CAPP 极大地减轻了设计人员的劳动复杂性，提高了设计效率；搬运、焊接和喷漆机器人取代了人的单调重复劳动；武器弹药装配机器人、深海太空工作机器人、在核反应堆和有毒环境下的自动工作系统，则成为人类谋求解决危险环境中劳动问题的唯一途径。

5. 降低价格

由于结构简单，材料消耗减少，制造成本降低，同时由于微电子技术的高速发展，微电子器件价格迅速下降，因此机电一体化产品价格低廉，而且维修性能得以改善，延长了使用寿命。

1.4 机电一体化控制的理论

1.4.1 反馈控制与顺序控制

1. 术语的来源

英文的反馈一词 feedback 中前缀 feed 的意思是“提供食物，供给燃料等”，将，feed 与 back 连起来就是反向提供信号、信息的意思，是控制领域的专用术语。

英文中 sequence 一词是顺序的意思，当控制过程为按顺序连续控制时，就称为顺序控制。

2. 反馈控制的概念

全自动洗衣机如图 1-6 所示，向洗衣机的水桶内注水的过程只是整个顺序控制过程的一个步骤。首先要给出启动指令，再判断是否满足“水桶内无水”“排水阀已关闭”等条件，当条件满足时，打开进水阀，开始注水。当检测到满水位信号时，发出注水的停止信号(关闭进水阀)，同时发出波盘旋转的启动信号，使波盘电机开关接通。在发出搅动轮电机启动信号的同时，还要发出计时器的置位信号，由计时器的计时终了信号切断波盘电机开关。在漂洗时，洗衣机要一边流水一边搅动，还必须保持一定的水位。对于一般的洗衣机，只要水没有从洗衣机中溢出就可以，所以通常采用溢流的方法来维持水位恒定，但在水位要求十分严格的场合，就需要采用反馈控制。

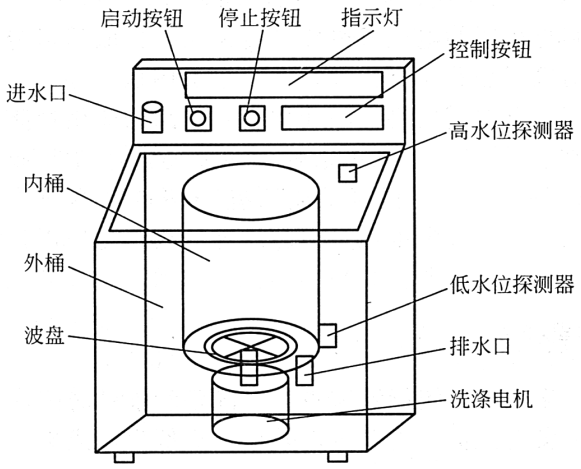


图 1-6　全自动洗衣机示意图

反馈控制是对连续量进行控制，需要有能够确定从桶底到上面任何位置的水位传感器，水阀也必须是能够调节流量的流量控制阀。根据当前水位与设定值之差来控制进水流量，就可以使水位保持不变。当改变水位的设定值，发出从原来平衡状态的水位向新水位变化的指令时，就要调节流量，使水位迅速达到新的平衡状态；当水位由于某种外界原因(干扰)突然发生变化时也要调节流量，使水位返回到原来位置，这些控制过程都是反馈控制。

3. 反馈控制的作用

反馈控制的目的是使被控变量保持一定值，按控制目的可以将反馈控制分为定值控制和跟踪控制两种。

(1)定值控制。控制目标值保持不变的反馈控制称为定值控制。生产实际中常见的液位、流量、

温度、压力和浓度等控制过程都属于定值控制。

(2)跟踪控制。随时间的变化，控制目标值也发生变化的反馈控制称为跟踪控制。在跟踪控制中，目标值呈不规则变化的称为随动控制，目标值的变化规律事先已经确定的称为程序控制。为了与其他类型的控制相区别，通常将对物体的位置或角度等进行随动控制的系统称为伺服系统。

4. 顺序控制的作用

在顺序控制中，已经事先确定了应该控制的顺序，一旦达到了某一状态值就认为该时刻、该阶段的控制结束，开始进入下一个控制阶段的控制。在达到某一状态值并发出控制结束信号后，就不再进行修正，直接转入下一个控制阶段。如在进行移动控制时，只需控制其是否达到某一控制点，而不必连续控制其正确的位移量。这一点是顺序控制与反馈控制的最大区别。

在顺序控制中，人们采用开关或阀门等对执行装置和其他设备依次进行启动和停止控制，所以在某一顺序控制阶段，也可以采用反馈控制来实现混合控制。以数控机床为例，更换刀具时采用顺序控制，实际加工过程则利用伺服装置实现位置控制。加工结束后，再返回到顺序控制的程序，完成退刀、取出工件和安装新的毛坯等操作。

在控制精度要求较低的工艺过程中，可以完全采用顺序控制，而在精度要求较高的环节上可以插入反馈控制，使两者有机地结合起来，分别发挥各自的特点。

1.4.2 反馈控制系统的构成

在反馈控制系统中，由检测控制结果的检测装置和将检测结果与设定值进行比较的比较器构成一个反馈环节，通过反馈环节使控制系统实现了封闭的控制回路，这种控制称为闭环控制。

1. 反馈控制系统框图

如图 1-7 所示，当通过指令信号给出设定值时，在比较器中求出设定值与当前值的差值(偏差)，将该差值作为误差信号，在控制器中作出误差修正，生成执行控制量。将这种控制量输入到执行装置，就可以得到对被控对象的控制输出量。被控对象当前值的变化直接由检测装置检测出来，反馈到比较器上。

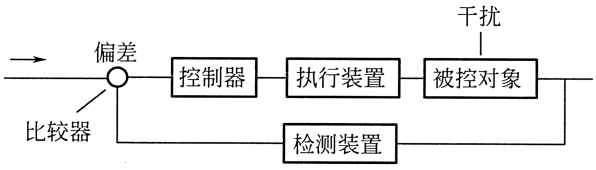


图 1-7 反馈控制系统框图

2. 电动伺服装置的构成

图 1-8 所示是由伺服电机和进给丝杠组成的位置控制机构。

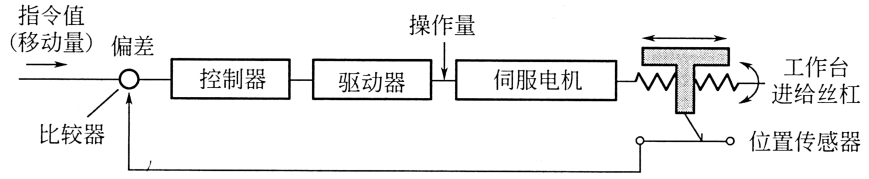


图 1-8 电动伺服机构的构成

首先，将位移量作为指令值给出，在控制器中产生作为执行控制量的速度指令。驱动机构接受

这个速度指令后，经电力放大器提供给伺服电机能量，驱动电机开始旋转，通过与电机相连的进给丝杠带动工作台上的位移传感器，就可以检测出工作台的移动位置，并反馈到比较器。比较器不断地向控制器输出误差信号，直至指令值与移动位置之差减小到 0 为止。当然，如果工作台的位置超过了指令位置，就要产生反方向的速度指令来进行校正。

要检测工作台的坐标值，必须采用位移传感器，一般可以采用电感式位移传感器或磁栅尺等位移传感器。在较为简单的机构中，常在进给丝杠上安装脉冲编码器，通过检测脉冲来实现反馈控制。这时的控制量不是工作台的位移，而是电机的旋转角度。这也是一种常用的控制方式。

3. 液压伺服装置的构成

图 1-9 所示是采用液压伺服控制的仿形加工装置。图中的椭圆凸轮处于平均半径的位置，下面驱动油缸内的活塞也处于中间位置。

驱动凸轮开始旋转，凸轮的长径部分使引导滑阀的阀杆 B 向左移动，阀芯 S_1 相对阀座 A_1 的位置发生偏离，液压油流入工作油缸的左腔 C_1。由于该系统的工作油缸的活塞是固定的，所以工作油缸向左移动。此时，由于工作油缸和引导滑阀为整体结构，引导滑阀也跟着向左移动。结果使阀座 A_1 与阀芯 S_1 之间的间隙变小，这恰好符合反馈控制原理。当间隙变为 0 时，工作油缸也停止移动。当凸轮转到短径位置时，阀杆 B 在弹簧的作用下向右移动。S_2 与 A_2 之间的间隙增大，使液压油流入工作油缸的右腔 C_2，刀具也随着向右移动。

这种机构中，指令值(即设定值)就是由凸轮确定的引导滑阀中阀芯的移动量，控制的结果就是刀具相对工件的左右移动量。引导滑阀的运动为反馈量，阀座 A_1、A_2 相对阀芯 S_1、S_2 的偏移相当于比较器。控制量是通过阀间隙流入油缸腔内的液压油量。该系统的检测装置、比较器、控制器和驱动器全部为一体化结构。

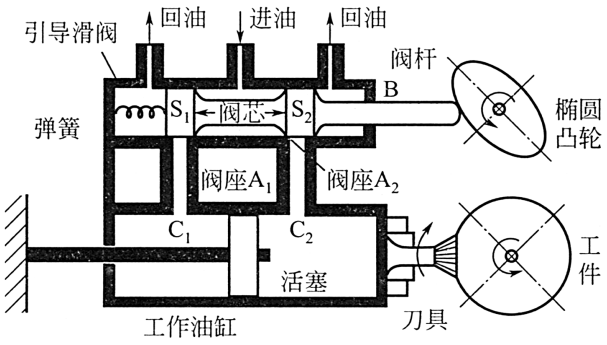


图 1-9　液压伺服控制的仿形加工装置机构

1.4.3　现代控制的理论

反馈控制理论是以线性系统为前提，无法对非线性系统和多变量系统进行控制，因而被称为古典控制理论。

对于线性系统，都是在某一较窄的变化范围内符合线性关系的，因此，大多数情况下都可通过近似的线性模型实现反馈控制。

而现代控制理论是对系统的可控性和稳定性的分析，得到设计最佳控制系统的方法，利用状态变量来表示控制变量，通过评价函数来求得最佳控制量。目前，主要的现代控制理论如下：

(1)模糊控制。模糊控制是近些年发展起来的控制技术之一。模糊控制属于反馈控制的一种方法。模糊控制是将具有控制对象一定性质的样本集合作为模糊集合，利用模糊理论推理并进行定量

化(含有一定的模糊成分)的计算，最后求得最佳控制量的控制方法。

(2)鲁棒控制。在一般的反馈中，如果控制系统的特性发生变化，就有可能产生较大的偏差，甚至出现突然失控等现象。鲁棒控制是在控制系统即使特性稍有变化时，也不会改变控制性能的一种控制方法，具有较强的矫顽能力。

(3)自适应控制。通过建立理论模型，使其实际使用实现自适应控制和自校正控制。

(4)神经网络控制。构建人工智能(AI)的神经网络，利用神经网络的自学习能力，将控制规则图形化并加以记忆，随着不断的学习来提高控制精度。

1.4.4 反馈控制系统的特性

性能优良的控制系统的标志是能够“准确、快速、稳定”地逼近控制目标值。

(1)响应与特性。由于反馈系统的输入信号只有设定值和外界的干扰两种，所以针对这两种信号来分析系统的特性与响应。图 1-10 所示为某一控制系统当目标值突然发生变化时的输出响应曲线。

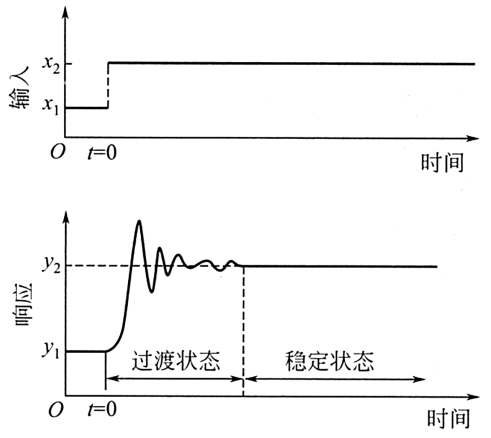


图 1-10 控制系统的响应曲线

曲线左半部分表示的是过渡状态的瞬态响应，右半部分表示的是稳定状态下系统达到平衡时的稳态响应。由于从系统的过渡响应和稳态响应中分别可以得到过渡特性和稳态特性，因此在控制领域认为响应和特性具有同样重要的意义。

系统的特性可按时间进行划分，分为动特性和静特性，稳态特性属静特性，过渡特性属于动特性。在动特性中，除了过渡特性以外，还包括频率响应特性，实际上它们都有相似的特性。

(2)稳态特性。控制系统最终达到的控制值(最终稳态值)与设定值之差称为稳态偏差或静态误差。稳态偏差越小，系统控制精度越高。实际系统的稳态偏差值可以利用传递函数求得。

(3)过渡特性。控制系统在阶跃输入信号的作用下所得到的输出曲线，称为阶跃响应或过渡响应。对于系统的过渡响应，具有决定性的评价指标是响应速度的快慢。如果控制系统是由若干个积分环节和一阶延迟环节组成的，那么这些独立环节的过渡响应综合起来将影响整个控制系统的过渡响应。因此，对于整个系统，要改善其过渡响应特性，必须知道各个环节的过渡响应特性。实际应用的反馈控制系统几乎都是二阶以上的高阶延迟控制系统。

图 1-11 所示的是一个二阶延迟系统的过渡响应曲线。图中曲线的上升阶段反映了系统的响应速度。超调量称为系统的动态误差，它是系统调节强度的标志。调节时间当然也是系统响应速度的指标，同时还是系统稳定性的标志，因为即使上升速度很快，超调量很小，但若振荡的衰减特性很差，那么系统的调节时间也会相对很长。

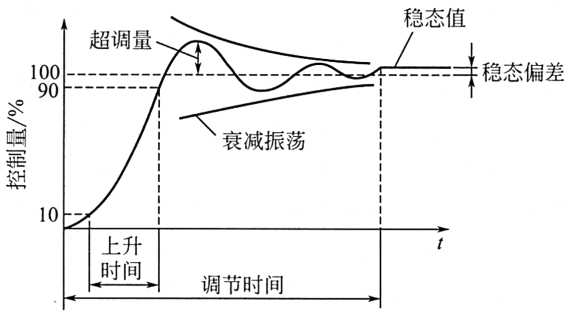


图 1-11 二阶延迟系统的过渡响应

(4)稳定性。稳定性可分为过渡特性中的稳定性和频率响应特性中的稳定性。在过渡响应中，调节时间的长短是稳定性的标志，因为有无调整强度的超调量，以及由于超调而导致的振荡是收敛性的还是发散性的，这是划分稳定和不稳定

的界限。

(5)频率响应。除了从过渡特性来研究系统的稳定性以外，频率响应特性也是判别系统稳定性的一种方法。频率响应就是当给系统输入不同频率的正弦波输入信号时，检测到的系统输出振幅的稳态响应和输出相位的滞后量。由此可判断出系统的跟踪特性，它是控制系统控制精度和稳定性的标志。

利用频率响应判断系统稳定性的方法有奈奎斯特(Nyquist)稳定判别法和波特(Bode)图稳定评价法等。

1.4.5　顺序控制

顺序控制的实质，是对“顺序”及“时间”进行控制。

1. 顺序控制系统的结构

图 1-12 所示为顺序控制系统的结构框图。系统所发出的指令几乎都是启动某项作业的命令。命令处理装置按预先规定的指令执行顺序向各执行装置发出相应的控制命令后，执行装置控制各执行机构实现具体的 ON、OFF 操作，从而使被控对象发生某种状态变化。

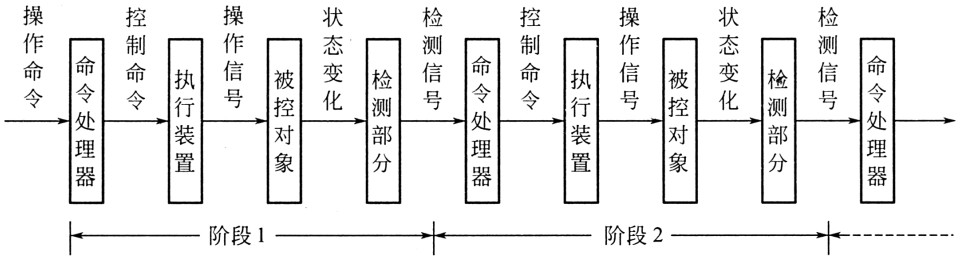


图 1-12　顺序控制系统的结构框图

图示中的检测部分是输出执行机构是否达到预想状态的二值信号。这些二值信号通常表示作业是否结束、移动的位置或定时时间是否到达等指示性信息。在顺序控制系统中，几乎所有的指令都是通过按键输入的，命令处理装置的输出一般多于一个。当有多个输出时，就需要产生输出信号的组合。这种组合在逻辑上是预先设定好的，属于命令处理的一部分。

2. 组合逻辑

在顺序控制系统中，控制指令通常都是指示某项作业的开始信号，由此需要复杂的组合逻辑才能实现上述功能。

在具体的电路中，AND、OR、NOT、NAND、NOR 等是基本逻辑单元，通常利用定时器将这些基本逻辑单元进行组合，构成有时间顺序的逻辑电路。要想由输入信号得到所需要的输出信号，关键是如何组合各逻辑单元。为了能够使用最少的逻辑单元构成电路，常常需要利用布尔代数将逻辑表达式进行某些变换和化简处理。

3. 时序逻辑

时序逻辑就是通过事先确定的控制顺序程序，将各个阶段的控制顺序固定下来。整个顺序控制程序从开始到结束，并不要求各个阶段都是单线顺序控制，可以根据条件设定几个分支，构成多条路径的控制方式。

时序逻辑要明确地表示出控制顺序在时间上的前后关系。为了使各个阶段的前后关系更简洁、准确，通常使用时序图来描述。

4. 条件控制

根据事先规定好的条件进行逻辑判断，确定顺序控制的执行流向。为了能够实现时间上的前后关系、判断和互锁等安全保护措施，可预先设定好条件控制。在具体的电路中，通常由复杂的逻辑电路、锁存器等具有记忆功能的单元电路来实现条件的逻辑判断。

5. 时间控制

在顺序控制系统中，一旦将控制权交给执行装置，检测装置只能检测出操作的结束状态，不能检测出这段时间内的中间状态。为此，还需要采用定时器来进行辅助的时间控制，对执行机构的超时执行等情况进行处理。

1.5 机电一体化控制技术的展望

进入 21 世纪以来，机电一体化控制技术得到了更大的发展。特别是传感器的性能得到进一步提高后，对传感器信号的处理和判断的智能化程度也达到了更高的水平，出现了具有更高柔性和自适应性的机电一体化系统。

(1)传感器性能的提高。高性能传感器包含：

①高精度传感器：自身的检测精度高，对温度变化不敏感，可抗噪声干扰。

②智能传感器：在传感器内部装有微型计算机，可以进行智能化处理。

③组合传感器：将几个传感器组合成一体，形成能够检测单个传感器无法检测的高性能的信息传感器系统。

(2)高智能化处理。高智能化处理就是像人的大脑一样，能够在一些基本知识的基础上对其进行合理的组合和判断。能够进行这种处理的软件称为人工智能软件。智能化处理过程就是将基本知识以知识库的形式存储在计算机的存储器中，自动提取与某一知识相关联的知识数据，再将这些知识进行合理的推理组合。

(3)自适应性。机械启动后，不需要人的干预，就能自动地完成指定的各项任务，并且在整个过程中能够自动适应所处状态和环境的变化。机械一边适应各种变化，一边做出新的判断，以决定下一步的动作。如自适应移动机器人，能够通过自己的眼睛观察所处的状态和环境，自动寻找目标路线移动。

(4)微型机械。随着微细加工技术的发展，也出现了小型的机械结构，如 1μm 大小的电动机。在必须进行微小运动的工作中，需要利用这种超微小型机械来开发机电一体化系统。

思考题

1. 说明机电一体化控制技术的基本概念。
2. 机电一体化控制技术是怎样产生与发展的？
3. 机电一体化系统的基本构成是什么？
4. 机电一体化有哪些相关技术？
5. 为什么机电一体化系统具有柔性而又设计灵活？
6. 要使机械具有自适应性能，机电一体化系统中的哪些要素必须具有何种功能？
7. 机电一体化控制的主要理论有哪些？

第 2 章
精密机械技术

- 2.1　电磁知识
- 2.2　控制系统
- 2.3　动力学基础
- 2.4　生产机械的机械特性
- 2.5　机电传动系统稳定运行的条件

电机的工作原理都是建立在电磁感应定律、电磁力定律、安培环路定律和电路定律等基本定律之上。电机又往往是用来驱动负载的，控制系统、机电传动系统的运动方程式及其相关计算和多轴拖动系统中转矩折算的基本原则与方法、典型生产机械的负载特性、机电传动系统稳定运行的条件，是学习后续章节前先要掌握的基本知识。如果已经有了相关知识，可以跳过本章节或安排自学。

2.1 电磁知识

电机是一种基于电磁感应原理和电磁力定律而实现机电能量转换的机械装置，发电机将机械能转换成电能，电动机将电能转换成机械能。

2.1.1 常用物理量

描述磁场的物理量主要有磁感应强度(或磁通密度)B、磁场强度 H、磁通Φ、磁动势 F、磁阻 R_m、磁导 Λ_m、磁链 ψ 等。

1. 磁感应强度(或磁通密度)B

载流导体周围存在着磁场，描述磁场强弱和方向的物理量是磁感应强度 B，B 是矢量。磁感应强度也称作磁通密度，单位为 T(特)。为了形象地描绘磁场，常采用磁力线。磁力线是闭合的曲线，在磁铁外部由 N 极指向 S 极；在磁铁内部，由 S 极指向 N 极。图 2-1 画出了用磁力线表示的载流长导线、线圈和螺线管周围的磁场分布情况。

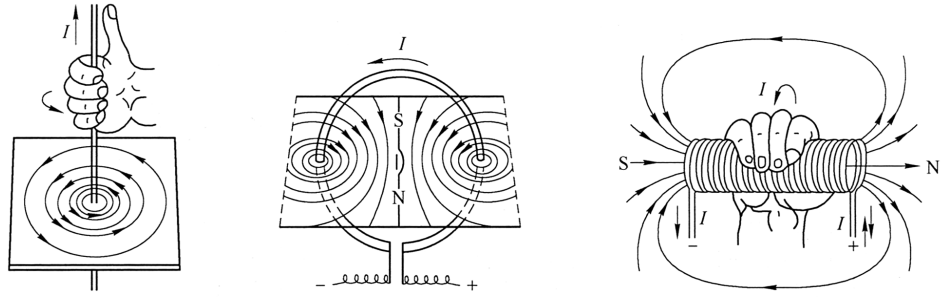


图 2-1 用磁力线表示的载流体周围的磁场分布

磁力线的方向与产生它的电流方向符合右手螺旋定则，如图 2-2 所示。

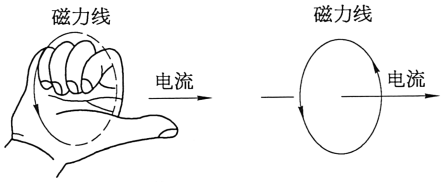


图 2-2 磁力线与电流的右手螺旋关系

2. 磁场强度 H

表征磁场性质的另一个基本物理量是磁场强度 H，H 是矢量，其单位为 A/m。它与磁感应强度 B 的关系为

$$H = B/\mu \qquad (2\text{-}1)$$

式中，μ 为介质的磁导率。电机中所用的介质，主要是铁磁材料和非导磁材料。空气、铜、铝和绝缘材料等为非导磁材料，它们的磁导率可认为等于真空的磁导率 μ_0，$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m。铁磁材料的磁导率远大于真空的磁导率，如铸钢的磁导率约为 μ_0 的 1 000 倍，各种硅钢片的磁导率为 μ_0 的

6 000～7 000 倍。

3. 磁通 Φ

穿过某一截面(面积为 A)的磁感应强度为 B 的通量称作磁通，用符号 Φ 表示，即

$$\Phi=\int_A B\,\mathrm{d}A \tag{2-2}$$

在均匀磁场中，如果截面与磁感线垂直，如图 2-3 所示，则磁通 Φ 和磁感应强度 B 之间的数值关系为

$$\Phi=BA \quad 或 \quad B=\Phi/A \tag{2-3}$$

因此，B 又是单位面积上的磁通，称作磁通密度，简称为磁密。在国际单位制中，磁通 Φ 的单位为 Wb(韦伯)，磁通密度的单位为 T，1T＝1 $\mathrm{Wb/m^2}$。

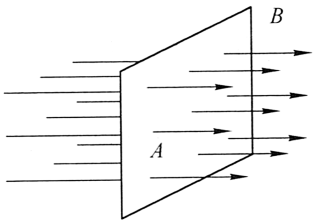


图 2-3　均匀磁场中的磁通

4. 磁动势 F

线圈中通以电流就会产生磁场，若线圈的匝数为 N，电流为 I，则线圈所产生的磁动势 F 为

$$F=NI \tag{2-4}$$

磁动势是产生磁通的“动力”，单位为 A(安)。

5. 磁链 ψ

线圈的匝数 N 与通过线圈的磁通 Φ 的乘积称作磁链，用 ψ 表示，即

$$\psi=N\Phi \tag{2-5}$$

2.1.2　磁路

磁通所通过的路径称作磁路，图 2-4 表示了几种常见的磁路。

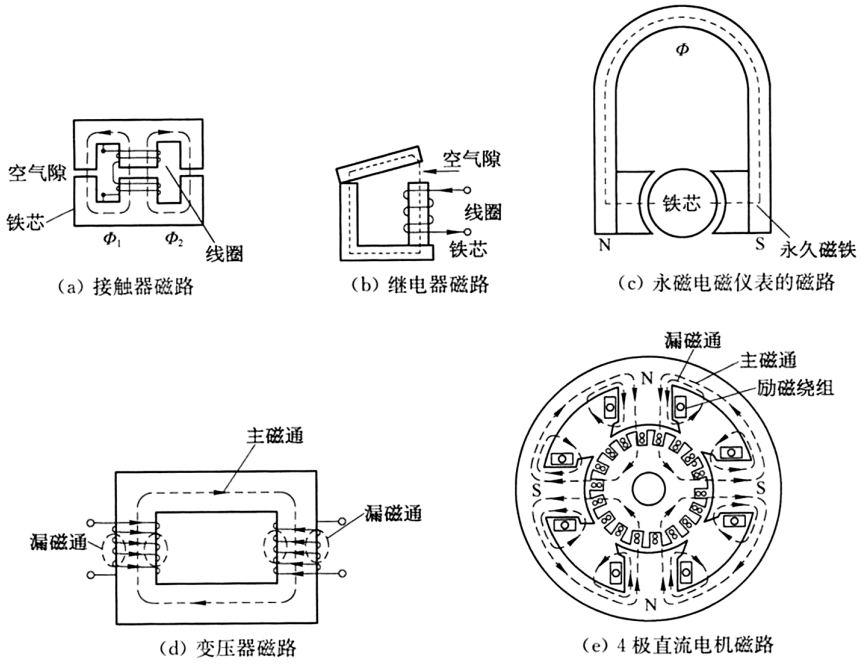


图 2-4　几种常见的磁路

2.1.3 基本定律

1. 安培环路定律

安培环路定律也称作全电流定律。设空间有 N 根载流导体，环绕载流导体任取一磁通的闭合回路，如图 2-5 所示。令 H 表示沿着回路上各点切线方向的磁场强度，则全电流定律的积分形式可表示为

$$\int H\,\mathrm{d}l = NI = \sum I \tag{2-6}$$

式中，N 为磁通回路包围的导体总数；I 为每一根导体中的电流；NI 为该回路所包围的总电流量(代数和)，也就是作用在该磁路上的总磁动势，简称为磁势。

式(2-6)中电流的正负号这样来确定：凡导体电流的方向与积分路径的方向符合右手螺旋关系，则电流为正，反之为负。

同时还可以得到磁场强度沿闭合回路的积分，其结果与积分路径无关，即

$$\int H\,\mathrm{d}l = \int H\,\mathrm{d}l' = NI \tag{2-7}$$

全电流定律在电机中应用很广，它是电机磁路计算的基础。

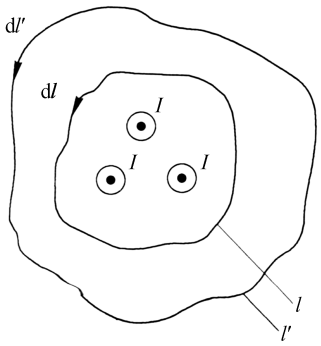


图 2-5 安培环路定律

2. 电磁感应定律(法拉第定律)

随时间变化的磁场会产生感应电动势，此现象称作电磁感应。如图 2-6 所示，若线圈的匝数为 N，所通过的磁通为 Φ，当磁通 Φ 随时间变化时，线圈内将产生感应电动势 e，e 的大小与 N 和磁通的变化率 $\mathrm{d}\Phi/\mathrm{d}t$ 成正比。e 的实际方向由楞次定律判定如下：在图 2-6a 中，当 Φ 增加时，感应电动势的方向为阻止磁通变化的方向，于是 e 的实际方向由 X 指向 A；当 Φ 减小时，e 的实际方向由 A 指向 X。

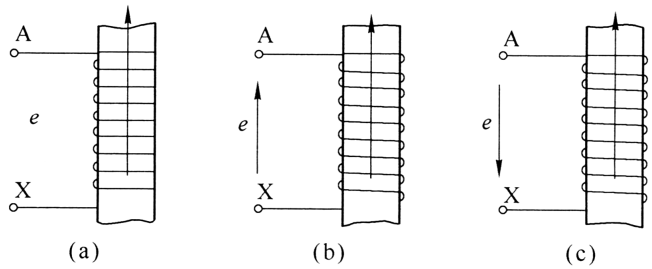


图 2-6 交变磁通及其载流线圈中的感应电动势

感应电动势 e 的数学表达式与 e 的正方向的规定有关。

若规定 e 的正方向从 X 指向 A，如图 2-6b 所示，并认为 $e=N\mathrm{d}\Phi/\mathrm{d}t$，则当 Φ 增加，$\mathrm{d}\Phi/\mathrm{d}t>0$ 时，e 的实际方向与规定的正方向相同；当 Φ 减小，$\mathrm{d}\Phi/\mathrm{d}t<0$ 时，e 的实际方向与规定的正方向相反。可见，两种情况下由 $\mathrm{d}\Phi/\mathrm{d}t$ 所确定的实际方向与由楞次定律确定的实际方向相一致，于是 e 的数学表达式可写成

$$e=N\mathrm{d}\Phi/\mathrm{d}t \tag{2-8}$$

若规定 e 的正方向从 A 指向 X，如图 2-6c 所示，并认为 $e=N\mathrm{d}\Phi/\mathrm{d}t$，则当 Φ 增加，$\mathrm{d}\Phi/\mathrm{d}t>0$ 时，表示 e 的实际方向与规定的正方向相同，从 A 指向 X，这与由楞次定律所确定的实际方向不符；当 Φ 减小，$\mathrm{d}\Phi/\mathrm{d}t<0$ 时，e 的实际方向与规定的正方向相反，由 X 指向 A，这亦与由楞次定律所确定的实际方向不符。于是 e 的数学表达式不能写成 $e=N\mathrm{d}\Phi/\mathrm{d}t$，而应写成

$$e=-N\mathrm{d}\Phi/\mathrm{d}t \tag{2-9}$$

同一物理现象，在不同的正方向规定下，数学表达式的符号不同，但本质相同。两种表达式都说明电动势 e 的大小与 $N\mathrm{d}\Phi/\mathrm{d}t$ 成正比，电动势 e 的方向为阻碍磁通变化的方向。在电机和变压器的分析中，常采用上述第二种规定。

另外，长度为 L 的直导线在均匀磁场中运动时，若导线切割磁力线的速度为 v，导线所在处的磁感应强度为 B，当导线、磁感应强度 B、导线的运动速度 v 三者互相垂直时，导线中感应电动势为

$$e=BLv \tag{2-10}$$

感应电动势 e 的方向用右手定则来确定，即把右手伸开，大拇指与其他四指成 90°，如图 2-7 所示，让磁力线指向手心，大拇指指向导线运动方向，则四指所指方向就是导线中感应电动势 e 的方向。

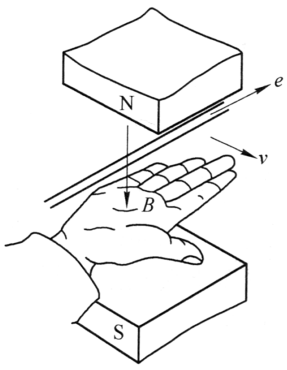


图 2-7　右手定则

3. 电路定律

(1)欧姆定律。一段电路上的电压降 U 等于流过该电路的电流 I 与电路电阻 R 的乘积，即

$$U=RI \tag{2-11}$$

(2)基尔霍夫第一定律(电流定律)。在电路中任一节点上，电流的代数和恒等于零，即

$$\sum I=0 \tag{2-12}$$

(3)基尔霍夫第二定律(电压定律)。在电路中，对任一回路，沿回路环绕一周，回路内所有电动势的代数和应当等于所有电压降的代数和，即

$$\sum E=\sum U \tag{2-13}$$

4. 电磁力定律

载流导体在磁场中受到力的作用，该力称作电磁力。在均匀磁场中，若载流导体与磁感应强度 B 方向垂直，导线长度为 L，流过的电流为 I，则载流导体所受到的电磁力为

$$f=BLI \tag{2-14}$$

电磁力的方向可用左手定则来确定。即把左手伸开，大拇指与其他四指成 90°，如图 2-8 所示，让磁力线指向手心，四指指向导体中电流的方向，则大拇指指向就是导线所受电磁力的方向。

5. 能量守恒定律

电机是机电能量转换的装置，在能量转换过程中，电机自身消耗的功率称作损耗。稳态运行时，

输入功率 P_1 应当等于输出功率 P_2 与所有损耗 $\sum P$ 之和，即

$$P_1 = P_2 + \sum P \tag{2-15}$$

式(2-15)是建立电机功率方程式的依据。

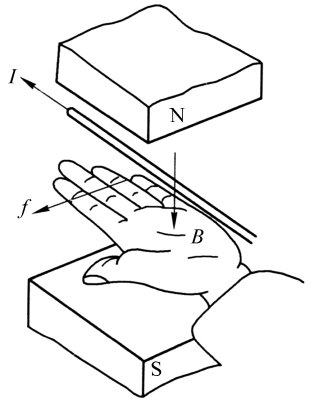


图 2-8　确定受力的左手定则

2.1.4　功率因数

在一定的电压和电流的情况下，电路获得的平均功率取决于电压和电流的有效值以及功率因数 $\cos\varphi$ 的大小，而 $\cos\varphi$ 的大小只决定于负载本身的性质。一般的用电设备，如感应电动机、感应炉、日光灯等都属于电感性负载，因而电路的功率因数往往比较低，都需要提高功率因数。

1. 提高功率因数的意义

(1)提高供电设备利用率。例如，有一台 $U_n=230\text{V}$、$I_n=217\text{A}$ 的变压器向一组负载供电，如果负载总平均功率 $P=25\text{kW}$，$\cos\varphi=0.5$，那么，变压器输出电流 217A。此时，$I=I_n$，变压器已经满载，不可能再向其他负载供电。若将功率因数提高到 $\cos\varphi=0.85$，这台变压器供给该负载同样的功率时，输出电流 128A，这个电流比变压器的额定电流小得多，该变压器还有能力对其他负载供电，这就提高了变压器的利用率。

(2)减少线路上功率损耗和压降。功率损失

$$\Delta P = I^2 r = \left(\frac{P}{U\cos\varphi}\right)^2 r \tag{2-16}$$

发电机的电压 U 和输出功率 P 为一定时，从式(2-16)可知功率损失与负载功率因数的平方成反比，这样，功率因数愈高，线路上的电流愈小，所损失的功率也就愈小，从而提高了输电效率。反之，由于有较大的无功功率往返于电源与负载之间，则在同一电压下要输送同样大小的平均功率，就必须供给较大的电流，这样会增大线路上的功率损耗和压降。

2. 提高功率因数的方法

功率因数低的根本原因，在于供电系统中存在有大量的电感性负载。减少无功功率的方法很多，最常用的方法是在感性负载两端并联大小适当的电容器，利用电感元件和电容元件无功功率互补的性质，来提高功率因数。

2.1.5　导磁材料及其特性

各种电机都是通过磁感应作用而实现能量转换的，磁场是它的媒介。

铁磁材料之所以具有高导磁性能，在于其内部存在着强烈磁化了的自发磁化单元，称作磁畴。在正常情况下，磁畴是杂乱无章地排列着，因而对外不显示磁性。但在外磁场的作用下，磁畴沿着外磁场的方向做出有规则的排列，从而形成了一个附加磁场叠加在外磁场上。

在非铁磁材料中，磁感应强度 $B=\mu_0 H$，B 与磁场强度 H 成正比，它们之间呈线性关系。而铁磁材料 B 与 H 之间是一种非线性关系，即 $B=f(H)$是一条曲线，称作磁化曲线，如图 2-9 所示。在磁化曲线的开始阶段(Ob 段)，由于外磁场较强，随着 H 的增加，B 迅速增加。在 bc 段，外磁场进一步加强时，磁畴大都已转到与外磁场一致的方向，这时它们所产生的附加磁场已接近最大值，即使 H 再增大，B 的增加也很有限。这种现象称作磁饱和现象。

铁磁材料中的磁畴，当外磁场停止作用后，磁畴与外磁场方向排列一致，被部分地保留下来，从而形成了磁滞现象和剩磁。

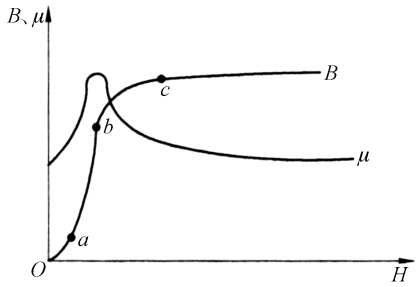


图 2-9　铁磁材料的磁化曲线

2.1.6　电路与磁路的区别

(1)电路中可以有电动势而无电流；磁路中有磁动势必然有磁通。

(2)电路中有电流就有功率损耗；而直流磁路中无损耗。

(3)电路中电流在导体中流过；而磁路中除主磁通外，还有漏磁通。

(4)电路中导体的电导率在一定温度下是恒定不变的；而铁芯磁路中的磁导率随磁感应强度 B 的变化而变化，磁路越饱和，磁阻越大。

2.2　控制系统

2.2.1　系统及控制系统定义

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作系统。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作控制系统。

2.2.2　控制系统分类

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。

1. 开环控制系统

输出量只受输入量控制的系统称作开环控制系统。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 2-10 所示。

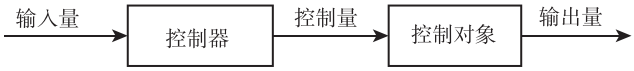


图 2-10　开环控制系统框图

2. 闭环控制系统

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作闭环控制系统。

3. 半闭环控制系统

在数控机床的坐标驱动系统中，只有以坐标位置量为直接输出量，即在工作台上安装光栅等位移测量元件作为反馈元件的系统才称作闭环系统。那些以交、直流伺服电动机的角位移作为输出量，用光栅作为反馈元件的系统则称作半闭环系统。目前使用的数控机床绝大多数为半闭环控制系统。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 2-11～图 2-13 所示。

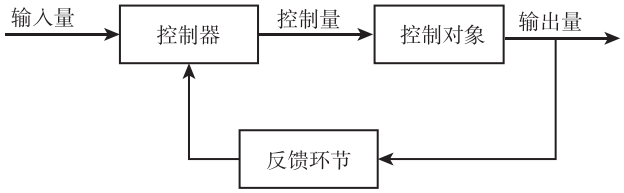


图 2-11　闭环控制系统框图

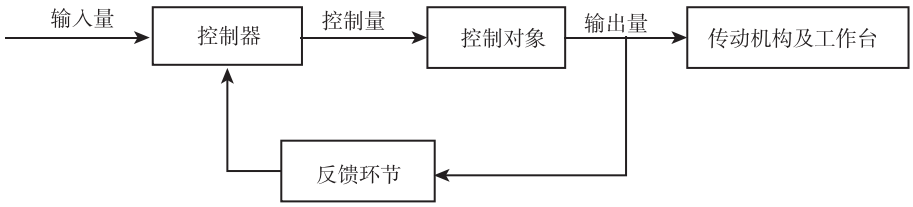


图 2-12　半闭环控制系统框图

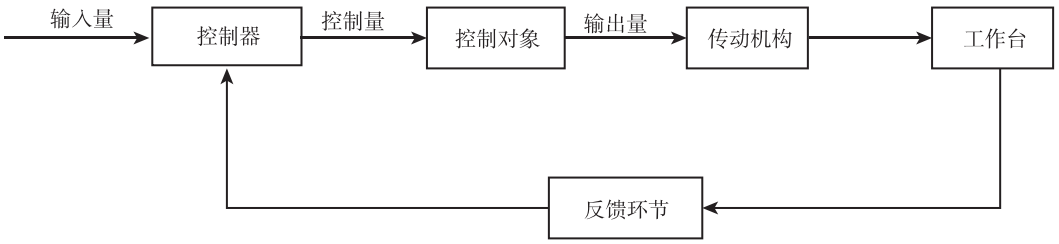


图 2-13　全闭环控制系统框图

2.3 动力学基础

机电传动系统是一个由电动机拖动并通过传动机构带动生产机械运转的机电运动的动力学整体。尽管电动机种类繁多、特性各异，生产机械的负载性质也可以各种各样，但从动力学的角度来分析时，都应服从动力学的统一规律。

2.3.1 运动方程式

图 2-14 所示为一单轴机电传动系统，它是由电动机 M 产生转矩，用来克服负载转矩，以带动生产机械运动，当这两个转矩平衡时，传动系统维持恒速转动，转速 n 或角速度 ω 不变，加速度 $\mathrm{d}n/\mathrm{d}t$ 或角加速度 $\mathrm{d}\omega/\mathrm{d}t$ 等于零，这种运动状态称作静态（相对静止状态）或稳态（稳定运转状态）。当 $T_M \neq T_L$ 时，速度（n 或 ω）就要变化，产生加速或减速，速度变化的大小与传动系统的转动惯量 J 有关，把上述的这些关系用方程式表示，即为

$$T_M = T_L = J\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} \tag{2-17}$$

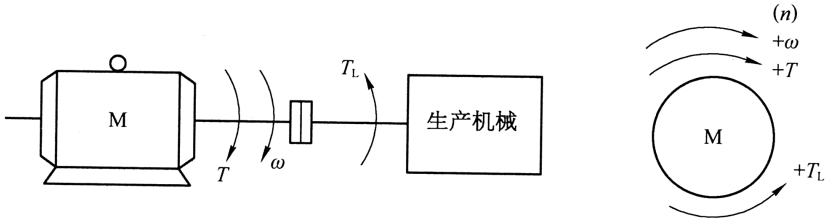


图 2-14　单轴拖动系统

这就是单轴机电传动系统的运动方程式。式中，T_M 为电动机产生的转矩；T_L 为单轴传动系统的负载转矩；J 为单轴传动系统的转动惯量；ω 为单轴传动系统的角速度；t 为时间。

在实际工程计算中，往往用转速 n 代替角速度 ω，用飞轮限量（也称飞轮转矩）代替转动惯量 J，由于，$J = m\rho^2 = MD^2/4$，其中，ρ 和 D 定义为惯性半径和惯性直径，而质量 m 和重力 G 的关系是 $G = mg$，g 为重力加速度，所以可得运动方程式的实用形式为

$$\{T_M\}_{N\cdot m} - \{T_L\}_{N\cdot m} = \frac{\{GD^2\}_{N\cdot m^2}}{375}\frac{\mathrm{d}\{n\}_{r/min}}{\mathrm{d}\{t\}_s} \tag{2-18}$$

式中，常数 375 包含着 $g = 9.81\ \mathrm{m/s^2}$，故它有加速度的量纲，GD^2 是个整体物理量。运动方程式是研究机电传动系统最基本的方程式，它决定着系统运动的特征。当 $T_M > T_L$ 时，加速度 $a = \mathrm{d}n/\mathrm{d}t$ 为正，传动系统为加速运动；当 $T_M < T_L$ 时，$a = \mathrm{d}n/\mathrm{d}t$ 为负，系统为减速运动。系统处于加速或减速的运动状态为动态。处于动态时，系统中必然存在一个动态转矩

$$\{T_d\}_{N\cdot m} = \frac{\{GD^2\}_{N\cdot m^2}}{375}\frac{\mathrm{d}\{n\}_{r/min}}{\mathrm{d}\{t\}_s} \tag{2-19}$$

它使系统的运动状态发生变化。这样，运动方程式(2-18)也可以写成转矩平衡方程式

$$T_M = T_L + T_d \tag{2-20}$$

就是说，电动机所产生的转矩在任何情况下，总是由轴上的负载转矩（即静态转矩）和动态转矩之和所平衡。

当 $T_M=T_L$ 时，$T_d=0$，这表示没有动态转矩，系统恒速运转，即系统处于稳态。稳态时，电动机发出转矩的大小，仅由电动机所带的负载(生产机械)所决定。

值得指出的是图 2-15a 中关于转矩正方向的约定：由于传动系统有各种运动状态，相应的运动方程式中的转速和转矩就有不同的符号。因为电动机和生产机械以共同的转速旋转，所以，一般以转动方向为参考来确定转矩的正负。设电动机某一转动方向的转速 n 为正，则约定电动机转矩 T_M 与 n 一致的方向为正向，负载转矩 T_L 与 n 相反的方向为正向。根据上述约定，就可以从转矩与转速的符号上判定 T_M 与 T_L 的性质：若 T_M 与 n 符号相同(同为正或同为负)，则表示 T_M 的作用方向与 n 相同，T_M 为拖动转矩；若 T_M 与 n 符号相反，则表示 T_M 的作用方向与 n 相反，T_M 为制动转矩。而若 T_L 与 n 符号相同，则表示 T_L 的作用方向与 n 相反，T_L 为制动转矩；若 T_L 与 n 符号相反，则表示 T_L 的作用方向与 n 相同，T_L 为拖动转矩。

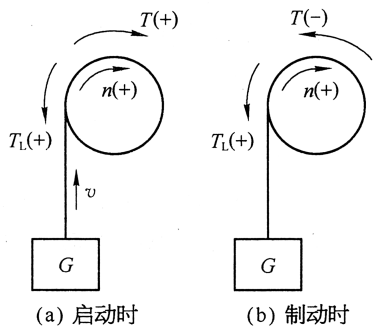


图 2-15　转矩方向的约定

启动时：如图 2-15a 所示，电动机拖动重物上升，T_M 与 n 正方向一致，T_M 取正号；T_L 与 n 方向相反，T_L 亦取正号。

这时的运动方程式为

$$\{T_M\}_{N\cdot m}-\{T_L\}_{N\cdot m}=\frac{\{GD^2\}_{N\cdot m^2}}{375}\frac{\mathrm{d}\{n\}_{r/min}}{\mathrm{d}\{t\}_s} \tag{2-21}$$

要能提升重物，必存在 $T_M>T_L$，即动态转矩 $T_d=T_M-T_L$ 和加速度 $a=\mathrm{d}n/\mathrm{d}t$ 均为正，系统加速运行。

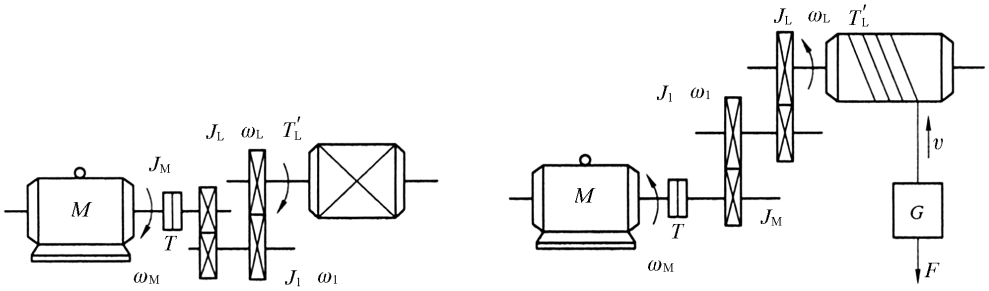
制动时：如图 2-15b 所示，仍是提升过程，n 为正，只是此时要电动机制止系统运动，所以，T_M 与 T_L 方向相反，T_M 取负号，而重物产生的转矩总是向下，和启动过程一样，T_L 取正号，这时运动方程式为

$$-\{T_M\}_{N\cdot m}-\{T_L\}_{N\cdot m}=\frac{\{GD^2\}_{N\cdot m^2}}{375}\frac{\mathrm{d}\{n\}_{r/min}}{\mathrm{d}\{t\}_s} \tag{2-22}$$

可见，此时动态转矩和加速度都是负值，它使重物减速上升，直到停止。制动过程中，系统中动能产生的动态转矩由电动机的制动转矩和负载转矩所平衡。

2.3.2　转矩、转动惯量和飞轮转矩的折算

实际的拖动系统一般常是多轴拖动系统，如图 2-16 所示。在这种情况下，为了列出这个系统的运动方程，必须先将各转动部分的转矩和转动惯量或直线运动部分的质量都折算到某一根轴上，如一般折算到电动机轴上，即折算成图 2-14 所示的最简单的典型单轴系统，折算时的基本原则是折算前的多轴系统同折算后的单轴系统，在能量关系上或功率关系上保持不变。



（a）旋转运动　　（b）直线运动

图 2-16　多轴拖动系统

1. 负载转矩的折算

负载转矩是静态转矩，可根据静态时功率守恒原则进行折算。

对于旋转运动，如图 2-16a 所示，当系统匀速运动时，生产机械的负载功率为

$$P'_L = T'_L\omega_L \tag{2-23}$$

式中，T'_L 和 ω_L 分别为生产机械的负载转矩和旋转角速度。

设 T'_L 折算到电动机轴上的负载转矩为 T_L，则电动机轴上的负载功率为

$$P_M = T_M\omega_M \tag{2-24}$$

式中，ω_M 为电动机转轴的角速度。

考虑到传动机构在传递功率的过程中有损耗，这个损耗可以用传动效率来表示，即

$$\eta'_C = \frac{\text{输出功率}}{\text{输入功率}} = \frac{P'_L}{P_M} = \frac{T'_L\omega_L}{T_M\omega_M} \tag{2-25}$$

于是可得折算到电动机轴上的负载转矩

$$T_L = \frac{T'_L\omega_L}{\eta_C\omega_M} = \frac{T'_L}{\eta_C j} \tag{2-26}$$

式中，η_C 为电动机拖动产生机械运动时的传动效率；$j = \omega_M/\omega_L$ 为传动机构的速比。

对于直线运动，如图 2-16b 所示的卷扬机构就是一例。若生产机械直线运动部件的负载力为 F，运动速度为 v，则所需的机械功率为

$$P'_L = Fv \tag{2-27}$$

它反映在电动机轴上的机械功率为

$$P_M = T'_L\omega_M \tag{2-28}$$

式中，T'_L 为在电动机轴上产生的负载转矩。

如果是电动机拖动生产机械旋转或移动，则传动机构中的损耗应由电动机承担，根据功率平衡关系就有 $T_L\omega_M = Fv/\eta_C$，将 $\{\omega\}_{rad/s} = \frac{2\pi}{60}\{n\}_{r/min}$ 代入式(2-28)可得

$$\{T_L\}_{N\cdot m} = 9.55P\{F\}_N\{v\}_{m/s}/(\eta_C\{n_M\}_{r/min}) \tag{2-29}$$

式中，n_M 为电动机轴的转速。

如果是生产机械拖动电动机旋转，例如卷扬机构下放重物时，电动机处于制动状态，这种情况下传动机构中的损耗则由生产机械的负载来承担，于是有

$$T_L\omega_M = Fv/\eta'_C \tag{2-30}$$

式中，η'_C 为生产机械拖动电动机运动时的传动效率。

2. 转动惯量和飞轮转矩的折算

由于转动惯量和飞轮转矩与运动系统的动能有关，因此，可根据动能守恒原则进行折算。对于旋转运动(如图 2-16b 所示的拖动系统)，折算到电动机轴上的总转动惯量为

$$J_Z = J_M + \frac{J_1}{j_1^2} + \frac{J_L}{j_L^2} \tag{2-31}$$

式中，J_M、J_1、J_L 分别为电动机轴、中间传动轴、生产机械轴上的转动惯量；$j_1 = \omega_M/\omega_1$ 为电动机轴与中间传动轴之间的速比；$j_L = \omega_M/\omega_1$ 为电动机轴与生产机械轴之间的速比；ω_M、ω_1、ω_L 分别为电动机轴、中间传动轴、生产机械轴上的角速度。折算到电动机轴上的总飞轮转矩为

$$GD_Z^2 = GD_M^2 + \frac{GD_1^2}{j_1^2} + \frac{GD_L^2}{j_L^2} \tag{2-32}$$

式中，GD_M^2、GD_1^2、GD_L^2 分别为电动机轴、中间传动轴、生产机械轴上的飞轮转矩。

当速比 j 较大时，中间传动机构的转动惯量 J_1 或飞轮转矩 GD_1^2，在折算后占整个系统的比重不大，实际工程中为了计算方便起见，多用适当加大电动机轴上的转动惯量 J_M 或飞轮转矩 GD_M^2 的方法，来考虑中间传动机构的转动惯量 J_1 或飞轮转矩 GD_1^2 的影响，于是有

$$J_Z = \delta J_M + \frac{J_L}{j_L^2} \tag{2-33}$$

或

$$GD_Z^2 = \delta GD_M^2 + \frac{GD_L^2}{j_L^2} \tag{2-34}$$

一般地，取 $\delta = 1.1 \sim 1.25$。

对于直线运动(如图 2-16b 所示的拖动系统)，设直线运动部件的质量为 m，折算到电动机轴上的总转动惯量或总飞轮转矩分别为

$$J_Z = J_M + \frac{J_1}{j_1^2} + \frac{J_L}{j_L^2} + m\frac{v^2}{\omega_M^2} \tag{2-35}$$

或

$$\{GD_Z^2\}_{N\cdot m^2} = \{GD_M^2\}_{N\cdot m^2} + \frac{\{GD_1^2\}_{N\cdot m^2}}{j_1^2} + \frac{\{GD_L^2\}_{N\cdot m^2}}{j_1^2} + 365\frac{\{G\}_N\{v^2\}_{(m/s)^2}}{\{n_M^2\}_{(r/min)^2}} \tag{2-36}$$

依照上述方法，就可把具有中间传动机构带有旋转运动部件或直线运动部件的多轴拖动系统，折算成等效的单轴拖动系统，将所求得的 T_L、GD_Z^2 代入式(2-18)就可得到多轴拖动系统的运动方程式

$$\{T_M\}_{N\cdot m} - \{T_L\}_{N\cdot m} = \frac{\{GD^2\}_{N\cdot m^2}}{375}\frac{d(n_M)_{r/min}}{d\{t\}_s} \tag{2-37}$$

以此来研究机电传动系统的运动规律。

2.3.3 输出功率

1. 由力和速度确定输出功率

克服 F(N)的力，并使物体以速度为 v(m/s)运动，所需功率

$$P = Fv(W) \tag{2-38}$$

有相当多的负载可以用上式去计算功率。考虑到从负载实际做功部分到电动机之间总有动力传递装置，要产生功率损耗，因此，电动机的输出功率必须比负载的实际有效功率大。假定机械效率为 η_L(效率通常用百分值表示，为使公式简单起见，假定 η_L 表示的是小数值)，则负载轴输入功率

P_L 为

$$P_L=\frac{Fv}{\eta_L}(\mathrm{W}) \tag{2-39}$$

若用 F'(kgf)表示力，用 v'(m/min)表示速度，则负载轴输入功率

$$P_L=\frac{9.8F'v}{\eta_L}=\frac{F'v'}{6.12\eta_L}(\mathrm{W})=\frac{F'v'}{6120\eta_L}(\mathrm{kW}) \tag{2-40}$$

电动机的额定输出功率要比 P_L 留有 10%～20%余量。

(1)垂直提升功率。

卷扬机、起重机、绞车等的速度单位常用 m/min 表示。根据式(2-40)，以速度 v'(m/min)提升重量为 M(kg)的物品所需功率

$$P_L=\frac{Mv'}{6.12\eta_L}(\mathrm{W})=\frac{F'v'}{6120\eta_L}(\mathrm{kW}) \tag{2-41}$$

η_L 通常为 0.8 左右。

(2)水平行走功率。

如图 2-17 所示，负载克服阻力在水平方向移动，假定移动部分的重量为 M(kg)、速度为 v'(m/min)、行走阻力系数(每千克重量的阻力，用 kgf/k 表示)为 λ，于是行走所需力为 λM(kgf)，由式(2-38)得水平行走功率

$$P_L=\frac{9.8\lambda M\dfrac{v'}{60}}{\eta_L}=\frac{\lambda Mv'}{6.12\eta_L}(\mathrm{W})=\frac{\lambda Mv'}{6120\eta_L}(\mathrm{kW}) \tag{2-42}$$

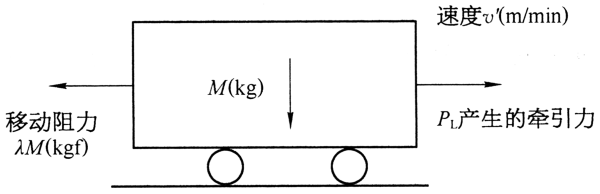


图 2-17　水平行走

当车轮在轨道上或平整路面上行走时 λ 值为 0.01～0.03，当车轮在砂石路面这类不平整的道路上行走时 λ 值为 0.1～0.2，效率 0.7～0.9。

(3)在倾斜面上行驶的功率。

如图 2-18 所示，使重量为 M(kg)的物体在斜面上以速度 v(m/s) 或 v'(m/min)行驶时，要按图中所示将力分解成两个分力。由此可得在斜面上行驶的功率

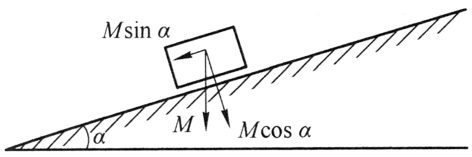


图 2-18　在倾斜面上行驶的物体

$$P_L=\frac{9.8(M\sin\alpha+\lambda M\cos\alpha)v}{\eta_L}(\mathrm{W})=\frac{(M\sin\alpha+\lambda M\cos\alpha)v'}{6.12\eta_L}(\mathrm{W}) \tag{2-43}$$

2. 由转矩和角速度确定输出功率

在式(2-28)中加进效率即可得到克服阻力矩 T(N·m)或 T'(kgf·m)，并以角速度 ω(rad/s)或 n(r/min)旋转时所需的功率。

转矩单位为 N·m，角速度单位为时 rad/s，电动机轴功率

$$P_L = \frac{T\omega}{\eta_L}(\mathrm{W}) \tag{2-44}$$

转矩单位为 kgf·m，转速单位为 r/min 时，电动机轴功率

$$P_L = \frac{1.027T'n}{\eta_L}(\mathrm{W}) = \frac{1.027T'n}{\eta_L} \times 10^{-3}(\mathrm{kW}) \tag{2-45}$$

如图 2-19a 所示，在半径为 r(m)的圆周切线方向上作用大小为 F(N)或 F'(kgf)的力，并以 ω(rad/s)或 n(r/min)旋转时的功率用式(2-46)计算：

$$P_L = \frac{Fr\omega}{\eta_L}(\mathrm{W}) = 1.027\frac{F'r\omega}{\eta_L}(\mathrm{W}) \tag{2-46}$$

在生产机械中，F 相当于切削力。

如图 2-19b 所示，若摩擦系数为 μ，反抗由垂直于圆周的力 F(N)或 F'(kgf)所产生的摩擦力，并以角速度 ω(rad/s)或 n(r/min)旋转时的功率可由下式计算：

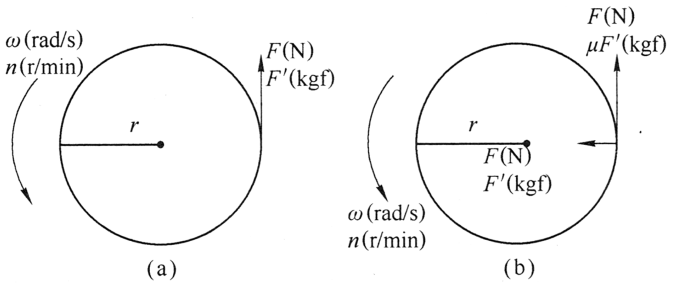


图 2-19　旋转物体的作用力

$$P_L = \frac{\eta Fr\omega}{\eta_L}(\mathrm{W}) = 1.027\frac{F'rn}{\eta_L}(\mathrm{W}) \tag{2-47}$$

当轴由轴承支撑而旋转时，若轴承支撑的重量为 M(kg)，轴承的直径为 d(m)，转速为 n(r/min)，轴承的摩擦系数为 μ，则克服轴承损耗使轴旋转所需功率可由下式计算：

$$P_b = 1.027\eta M\frac{d}{2}n(\mathrm{W}) \tag{2-48}$$

不同种类轴承的摩擦系数见表 2-1。

表 2-1　轴承的摩擦系数

轴承种类	摩擦系数 μ	轴承种类	摩擦系数 μ
单列深槽球轴承	0.001 2～0.001 5	滑动轴承(油润滑)	0.025
滚柱轴承	0.001 2～0.001 5	无油轴承	0.05

3. 输送流体的功率

把质量为 M(kg)的流体升高 h(m)所要做的功为 Mgh，可得在 t(s)时间内要做完这么大的功，

其功率应为

$$P=\frac{Mgh}{t}(\mathrm{W}) \tag{2-49}$$

利用这种方法可以计算泵、送风机等输送流体机械的功率。

(1)泵。

泵的性能用流量 $Q(\mathrm{m^3/min})$与扬程 $H(\mathrm{m})$来表示。它的含义是将 $Q(\mathrm{m^3})$即 $Q\times10^3(\mathrm{kg})$的水用 60s 时间升高 $H(\mathrm{m})$，于是得泵所需轴功率

$$P_{\mathrm{L}}=9.8\mathrm{Q}\times10^3\,\frac{H}{60}\,\frac{1}{\eta_L}=\frac{QH}{6.12\eta_{\mathrm{L}}}\times10^3(\mathrm{W})=\frac{QH}{6.12\eta_{\mathrm{L}}}(\mathrm{kW}) \tag{2-50}$$

泵的效率与流量有关，分别为：流量每分钟数十升的泵为 30%，0.1～0.5 $\mathrm{m^3/min}$ 的泵为 40%～60%，1～5 $\mathrm{m^3/min}$ 的泵为 50%～70%。

若泵输送的不是水，则还要乘以流体的密度 ρ。

(2)送风机。

送风机的性能用风量 $Q(\mathrm{m^3/min})$和风压 $p_{\mathrm{r}}(\mathrm{mmH_2O})$表示。假定气体密度为 ρ，在 60 s 时间内将重量为 $\rho Q\times10^3(\mathrm{kg})$的气体提升 $p_{\mathrm{r}}\times10^{-3}/\rho(\mathrm{m})$，则送风机所需轴功率

$$P_{\mathrm{L}}=\frac{Qp_{\mathrm{r}}}{6.12\eta_{\mathrm{L}}}(\mathrm{W})=\frac{QP_{\mathrm{r}}}{6120\eta_{\mathrm{L}}}(\mathrm{kW}) \tag{2-51}$$

送风机的效率为 45%～55%。

4. 动力传动装置的效率

生产机械中包含有许多动力传动装置，生产机械的效率已经考虑了这些传统装置的损耗。但是，若在生产机械输入轴与电动机轴之间装有皮带、齿轮等传动装置，则还要考虑这部分传动装置的效率。一级传动装置的效率(用小数值表示)见表 2-2。

表 2-2　传动装置的效率

传动装置种类	效率	传动装置种类	效率
齿轮(一级)	0.93～0.96	皮带(一级)	0.90～0.97
蜗轮蜗杆(一级)	0.85～0.90		

2.4 生产机械的机械特性

同一转轴上负载转矩和转速之间的函数关系，称作生产机械的机械特性。

2.4.1　恒转矩型

此类机械特性的特点是负载转矩为常数。属于这一类的生产机械有提升机构、提升机的行走机构、皮带运输机以及金属切削机床等。

依据负载转矩与运动方向的关系，可以将恒转矩型的负载转矩分为反抗转矩和位能转矩。负载特性如图 2-20 和图 2-21 所示。

(1)反抗转矩。也称摩擦转矩，是因摩擦、非弹性体的压缩、拉伸与扭转等作用所产生的负载转

矩。反抗转矩的方向恒与运动方向相反，运动方向发生改变时，负载转矩的方向也会随着改变，因而它总是阻碍运动。

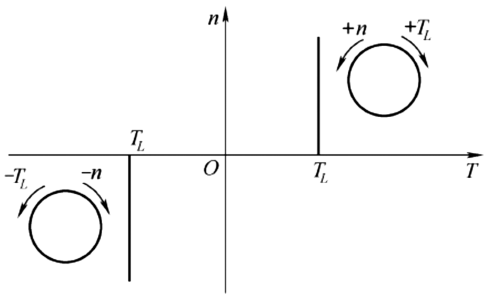


图 2-20　反抗性恒转矩负载特性

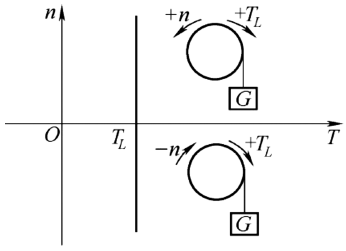


图 2-21　位能性恒转矩负载特性

(2)位能转矩。与摩擦转矩不同，位能转矩是由物体的重力和弹性体的压缩、拉伸与扭转等作用所产生的负载转矩。位能转矩的作用方向恒定，与运动方向无关，它在某方向阻碍运动，而在相反方向便促进运动。

2.4.2　离心式通风机型

此类机械按离心力原理工作，如离心式鼓风机、水泵等，它们的负载转矩 T_L 与 n 的平方成正比，即 $T_L=Cn^2$，C 为常数，如图 2-22 所示。

2.4.3　直线型

此类机械的负载转矩 T_L 是随 n 的增加成正比增大，即 $T_L=Cn$，C 为常数，如图 2-23 所示。实验室中作模拟负载用的他励直流发电机，当励磁电流和电枢电阻固定不变时，其电磁转矩与转速即成正比。

2.4.4　恒功率型

此类机械的负载转矩 T_L 与转速 n 成反比，即 $T_L=K/n$，或 $K=T_Ln\propto P$，K 为常数，如图 2-24 所示。

除了上述几种类型的生产机械外，还有一些生产机械具有各自的转矩特性，如带曲柄连杆机构的生产机械，它们的负载转矩随转角 n 而变化，而球磨机、碎石机等生产机械，其负载转矩则随时间作无规律的随机变化，等等。

还应指出，实际负载可能是单一类型的，也可能是几种典型的综合，例如，实际通风机除了主要是通风机性质的负载特性外，轴上还有一定的摩擦转矩 T_0，所以，实际通风机的机械特性应为 $T_L=T_0+Cn^2$，如图 2-22 中的虚线所示。

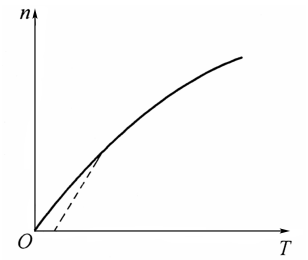


图 2-22　离心式通风机型机械特性

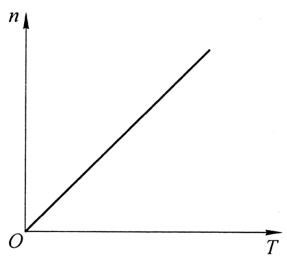


图 2-23　直线型机械特性

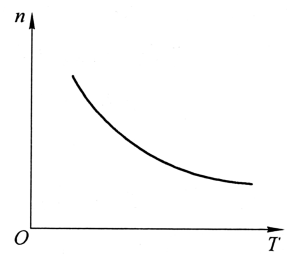


图 2-24　恒功率型机械特性

2.5 机电传动系统稳定运行的条件

机电传动系统里，为了使系统运行合理，就要使电动机的机械特性与生产机械的机械特性尽量相配合。特性配合好的最基本要求是系统能稳定运行。

机电传动系统的稳定运行包含两重含义：一是系统应能以一定速度匀速运转，二是系统受某种外部干扰作用(如电压波动、负载转矩波动等)而使运行速度稍有变化时，应保证在干扰消除后系统能恢复到原来的运行速度。

为保证系统匀速运转，必要条件是电动机轴上的拖动转矩 T_M 和折算到电动机轴上的负载转矩 T_L 大小相等，方向相反，相互平衡。从图 2-25 所示 $T-n$ 坐标平面看，这意味着电动机的机械特性曲线 $n=f(T_M)$和生产机械的机械特性曲线 $n=f(T_L)$必须有交点。

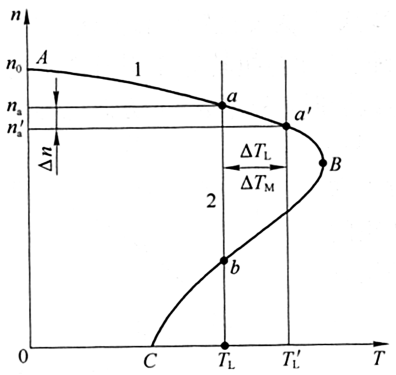


图 2-25　机电传动系统运行特性图

但是机械特性曲线存在交点只是保证系统稳定运行的必要条件，还不是充分条件，实际上只有 a 点才是系统的稳定平衡点，因为在系统出现干扰时，例如负载转矩突然增加了 ΔT_L，则 T_L 变为 T'_L，这时，电动机来不及反应，仍工作在原来的 a 点，其转矩为 T_M，于是 $T_M<T'_L$，由拖动系统运动方程可知，系统要减速，即 n 要下降到 $n'_a=n_a-\Delta n$，从电动机机械特性图的 AB 段可看出，电动机转矩 T_M 将增大为 $T'_M=T_M+\Delta T_M$，电动机的工作点转移到 a'点。当干扰消除($\Delta T_L=0$)后，必有 $T'_M>T_L$ 迫使电动机加速，转速 n 上升，而 T_M 又要随 n 的上升而减小，直到 $\Delta n=0$，$T_M=T_L$，系统重新回到原来的运行点 a；反之，b 点不是系统的稳定平衡点。从以上分析可以总结出机电传动系统稳定运行的必要充分条件是：

(1)电动机的机械特性曲线 $n=f(T_M)$和生产机械的特性曲线 $n=f(T_L)$有交点(即拖动系统的平衡点)。

(2)当转速大于平衡点所对应的转速时，$T_M<T_L$，即若干扰使转速上升，当干扰消除后应有 $T_M-T_L<0$；而当转速小于平衡点所对应的转速时，$T_M>T_L$，即若干扰使转速下降，当干扰消除后应有 $T_M-T_L>0$。

只有满足上述两个条件的平衡点，才是拖动系统的稳定平衡点，即只有这样的特性配合，系统在受到外界干扰后，才具有恢复到原平衡状态的能力而进入稳定运行。

例如，当异步电动机拖动直流他励发电机工作，具有图 2-26 所示的特性时，b 点便符合稳定运行条件，因此，在此情况下，b 点是稳定平衡点。

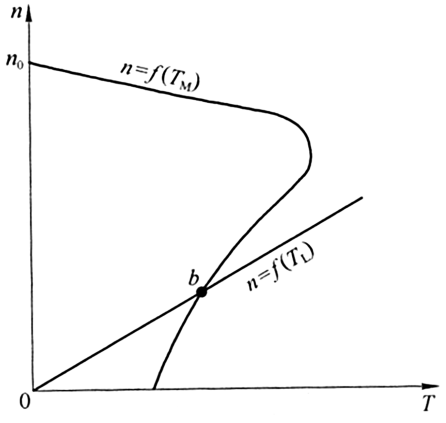


图 2-26　异步电动机拖动直流他励发电机工作时的特性

思考题

1. 说明机电传动系统运动方程式中的拖动转矩、静态转矩和动态转矩的概念。

2. 怎样从运动方程式看出系统是处于加速的、减速的、稳定的和静止的各种工作状态？

3. 试列出以下几种情况下系统的运动方程式，并说明系统的运行状态是加速、减速还是匀速(图中箭头方向表示转矩的实际作用方向)。

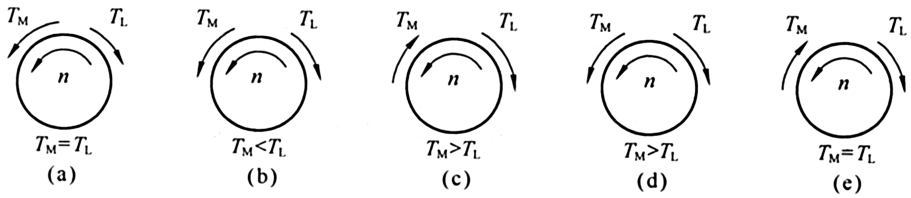


图 2-27

4. 多轴拖动系统为什么要折算成单轴拖动系统？转矩折算为什么依据折算前后功率不变的原则？转动惯量折算为什么依据折算前后动能不变的原则？

5. 为什么低速轴转矩大，高速轴转矩小？

6. 为什么机电传动系统中低速轴的 GD^2 比高速轴的 GD^2 大得多？

7. 在图 2-28 中，已知 $Z_2/Z_1=3$、$Z_4/Z_3=5$，减速机构的效率为 0.92，各齿轮的飞轮惯量分别为 $GD_1^2=29.4\ \text{N}\cdot\text{m}^2$、$GD_2^2=78.4\ \text{N}\cdot\text{m}^2$、$GD_3^2=49\ \text{N}\cdot\text{m}^2$、$GD_4^2=196\ \text{N}\cdot\text{m}^2$，电动机的飞轮惯量 $GD_M^2=294\ \text{N}\cdot\text{m}^2$，负载的飞轮惯量 $GD_L^2=450.8\ \text{N}\cdot\ \text{m}^2$，负载转矩 $T'_L=470.4\ \text{N}\cdot\ \text{m}^2$。

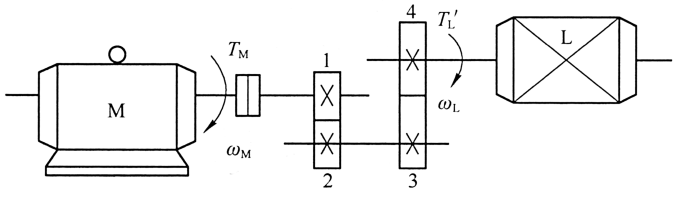


图 2-28

试求：

(1)折算到电动机轴上的负载转矩。

(2)折算到电动机轴上的飞轮惯量。

第 3 章
传感技术

- 3.1 传感器概述
- 3.2 传感器的基本特性
- 3.3 传感器的性能指标与要求
- 3.4 传感器的标定与校准
- 3.5 改善传感器性能的主要技术途径

传感器技术和通讯技术、计算机技术已成为现代信息技术的三大重要支柱，传感器在当代科学技术中占有十分重要的地位，是高新技术竞争的核心技术之一。其开发研究和生产能力与应用水平直接影响到科学技术的发展和应用。随着人类活动领域的扩大和探索过程的深化，传感器技术已经成为基础科学研究与现代信息技术相融合的新领域。传感技术是一门综合性学科，在系统学习各种传感器之前，我们应该掌握传感器的基本概念、组成、分类以及基本特性，测量误差和检测系统，测量电路的作用与要求，这些基本知识的讲解为后续学习和了解各种传感器打下了良好的基础。

3.1 传感器概述

从广泛意义上来说，传感器就是将物理信号和化学信号转化为电信号的设备。传感器在国际上的正式定义是“传感器是测量系统中的一种前置部件，它将输入变量转换成可供测量的信号”。这样的定义更明确了传感器的功能。通过从传感器的组成以及分类的认识，对传感器有进一步的了解。

3.1.1 传感器的概念

关于传感器的概念，国家标准 GB 7665—1987 对传感器下的定义是：“能感受规定的被测量并按照一定的规律转换成可用输出信号的器件或装置，通常由敏感元件和转换元件组成”。传感器是一种检测装置，能感受到被测量的信息，并能将检测感受到的信息，按一定规律变换成为电信号或其他所需形式的信息输出，以满足信息的传输、处理、存储、显示、记录和控制等要求。

传感器定义中“规定的测量量”包括电量和非电量，一般是指非电量信号，主要包括物理量、化学量和生物量等，在工程中常需要测量的非电量信号有力、压力、温度、流量、位移、速度、加速度、转速、浓度等。而“可用信号”是指便于传输、转换及处理的信号，主要包括气、光和电信号，现在一般就是指电信号(如电压、电流、电势及各种电参数等)，因此也可把传感器狭义地定义为能把外界非电信息量转换成电量输出的器件。

传感器在明确定义后可以理解为包括承载体和电路连接的敏感元件，传感器系统则是在获得数字信号后对信号进行某种信息处理的工作系统。传感器是传感器系统中的主要组成部分，也是传感器系统中负责信息采集的窗口。

传感器从外界获得的信号是自然信号，信号幅度可能很小，并且难以避免其他信号和噪声的干扰。传感器在获得这些信号后，为了能方便后续的处理，就要将信号整理成为具有一定特性的波形，或对这些信号做线性化处理，之后形成数字化信号进行传导。

传感器处理后的信号通常是传导给微处理系统，由此完成对传感器测量对象的控制。传感器在整个操作系统中的作用是信息收集，传感器的系统定位决定了传感器必须具备将某种形式的能量转化成另外一种形式能量的能力。

传感器主要可以分为有源传感器和无源传感器两种，其中有源传感器是不需要外接刺激源或电源即可完成能量转换的传感器，而无源传感器则是无法自行完成能量转换，需要外接电源或刺激源的传感器。

传感器是测量和控制系统的第一环节，输出信号和被测量之间应具有明确的因果关系；为了满足信息的传输、转换、处理和显示，输出信号要与控制系统、信号处理系统或光学系统相匹配；对于动态范围、响应特性、分辨率和信号噪声比都有一定的要求；对于被测系统的干扰尽量小以及能