



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
工程训练系列教材

工业系统的驱动、 测量、建模与控制

(上册)

■ 王孙安 任华 王娜 栗茂林 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



TB4/16

:1

2007

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
工程训练系列教材

工业系统的驱动、测量、 建模与控制

(上 册)

王孙安 任华 王娜 栗茂林 编著

机 械 工 业 出 版 社

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材，本书上册分为两个部分。第一部分简要叙述工业系统的一般组成及执行器和驱动器的作用，介绍了常见的机械执行机构以及电气、液压、气动驱动元件、执行元件和控制元件。第二部分通过对几种物理量的测量介绍了工业系统测量的基本内容，包括传感器、信号调理电路和显示装置。作为预备知识，叙述了几种通用测量仪器的基本用法和常用元器件的基本特性及应用。书中很多内容有通用器材或自制装置配合使用。

本书是低年级理工科本科生的工程训练教材，也可供高等职业技术学院学生和企员工培训使用，还可供工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

工业系统的驱动、测量、建模与控制. 上册/王孙安等编著. —北京: 机械工业出版社, 2007.5

普通高等教育“十一五”国家级规划教材. 工程训练系列教材
ISBN 978-7-111-21356-7

I. 工... II. 王... III. 工业-系统-高等学校-教材 IV. TB1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 057063 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 王保家 责任编辑: 于苏华 版式设计: 冉晓华

责任校对: 申春香 封面设计: 张 静 责任印制: 杨 曦

北京机工印刷厂印刷 (北京双新装订有限公司装订)

2007 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 13 印张 · 320 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-21356-7

定价: 20.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379727

封面无防伪标均为盗版

前 言

工业革命以后, 采掘、冶炼、制造和建筑一直是工业的支柱, 工程活动主要是支配物质和能量。20 世纪后半叶, 工业的前沿由电子工业引领, 开始以工程的手段大规模处理和利用信息。近些年来, 支配能量和物质的技术与利用信息的技术结合起来, 形成了机械电子工程。20 世纪后半叶以来, 无论是制造过程、产品开发还是系统运行, 大量的技术进步是由机械与电子的一体化带来的。在制造工程中, 主要表现为数字化制造技术和电子信息化生产管理技术; 在工业产品设计开发中, 主要表现为机电一体化。

在未来的产业中, 信息将起到越来越重要的作用, 机电高度融合仍是技术进步的重要趋势。未来的工程科技人员不仅要能认识工业系统的物质和能量, 还应能利用信息控制物质和能量。无论从事工业系统研发、制造, 还是运行、诊断, 科技人员的知识结构必须跨机电两大领域, 不仅要掌握相关的理论、技术, 还要能在系统中应用相关的元器件和设备。这些能力和知识难以纳入传统课程体系中。近年来, 我们尝试了通过工程训练体系传授这些能力和知识。依托自制装置和外购设备, 将机、电两大技术领域的基础知识和基本技能整合在工业系统和现代加工的应用框架内, 形成了以下工程训练系列教材:

- 1) 《工业系统的驱动、测量、建模与控制》(上册)
- 2) 《工业系统的驱动、测量、建模与控制》(下册)
- 3) 《机械电子工程原理》
- 4) 《现代加工基础》

《工业系统的驱动、测量、建模与控制》为一、二年级理工科本科生的工程训练而编写, 上册内容是工业系统的驱动与测量, 分为以下两个部分。

第一部分是工业系统中常用的驱动元件、执行元件和控制元件, 使读者了解: 工业系统是靠各种执行器、驱动器和控制器工作的, 不同系统工作中产生的物理作用各不相同, 但是引起的效应都是系统状态的变化, 实现能量、物质和信息的传递和变换。

第二部分是工业系统测量的基本内容, 包括传感器、信号调理电路和显示装置。通过力、温度、转速、位移等几种常见物理量的测量, 向读者揭示: 工业系统中某些物理量的改变就是系统状态的变化, 对这些物理量进行在线测量, 目的是实时获取系统的状态信息。作为工业系统测量的预备知识, 通用测量仪器的基本用法和几种电子元器件的基本特性及应用也在第二部分中叙述。

本书很多章配有器材和装置上的操作与观察训练。被测量的值均由读者亲手操作而变化, 系统连接和观测也由读者完成, 阅读材料涉及一些相关内容, 以此拓展视野。

本书的立意、材料组织和教学法都体现了作者“面向工业系统”的工程训练教学思想。对于实际工业系统, 无论是研究、开发还是运行、诊断, 往往涉及多学科和专业的知识。本书试图以系统的思维方式将多个学科的知识联系起来, 使学生在入门之初就树立起机电一体、强电弱电一体的观念, 这是本书立意的特点。信息广泛存在于现代工业系统中, 信息技术在现代工程活动和制造业中的地位和作用日显重要。以信息为线索, 将多门课程的知识联



系起来，这成为本书材料组织的特点。以典型系统为背景，选择了几种常见的机构和物理量，制成教学装置，在装置上教，在装置上学，力图缩小工程训练与工程实际的距离，这是本书教学法的特色。

本书介绍的各种技术和元件在当今工业系统中有广泛的应用。随着微电子、计算机技术和产品迅速向各工业技术领域渗透，光、机、电一体的新型工业系统将不断被开发出来，越来越多的传统工业系统将引入检测、控制或诊断技术。在本书中学到的观念、知识和技能有着越来越广阔的应用。

我国青少年在接受初等教育阶段，较少有机会接触工程技术方面的知识和实践，在近期内，高等理工教育得到企业界的支持也不多。因此，在学校里而不是在企业里对低年级本科生进行工程训练，特别是尝试“面向工业系统”的工程训练，无论对教师还是对学生都是一项极具挑战性的工作。我们还须不断探索。请有关专家指正，也请读者提出意见和建议。

郭咏虹、何茹肖、张东瀛、杨姣、邱宏宇、樊庆元、庄健、陈永森、徐敏杰、王斌、李小虎、张育林等同志为本书的编写做了很多工作，在此一并致谢。

编著者

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 工业系统的一般概念	1
1.2 工业系统中的执行器和驱动器	2
1.3 工业系统中的测量	2
1.4 阅读材料	3
第2章 执行机构	7
2.1 基本概念	7
2.2 带轮机构	9
2.3 链轮机构	10
2.4 齿轮机构	10
2.5 螺旋机构	11
2.6 蜗轮蜗杆机构	12
2.7 直线导轨	13
2.8 连杆机构	14
2.9 凸轮、棘轮和槽轮	15
2.10 机架	16
2.11 机构的组合	16
2.12 本章小结	17
第3章 低压配电常识	18
3.1 电能与电力系统	18
3.2 三相交流电源	19
3.3 三相电源的输送方式	21
3.4 单相交流电源	21
3.5 安全用电常识	21
3.6 常用电源装置	24
3.7 电源检测器具和仪表	25
3.8 训练内容	26
3.9 阅读材料	28
第4章 电气、液压、气动执行元件与驱动元件	33
4.1 电气执行元件和驱动元件	33
4.2 流体动力装置	35
4.3 液压、气动执行元件	39
第5章 电气、液压、气动控制元件	42
5.1 电气控制元件	42

5.2 液压控制元件	48
5.3 气动控制元件	54
第6章 常用开关电器	56
6.1 开关电器的基础知识	56
6.2 配电电器	57
6.3 控制电器	58
6.4 主令电器	59
6.5 训练内容	60
第7章 通用测量仪器	67
7.1 示波器	67
7.2 函数信号发生器	80
7.3 直流稳压电源	85
7.4 数字多用表	90
7.5 阅读材料	97
第8章 常用元器件	101
8.1 电阻器	101
8.2 电容器	102
8.3 二极管	111
8.4 稳压管	114
8.5 晶体管	116
8.6 运算放大器	119
8.7 阅读材料	123
第9章 直流稳压电源调试	129
9.1 实现直流稳压的基本过程	129
9.2 训练内容	132
9.3 阅读材料	137
第10章 传感器与信号调理电路	
概述	139
10.1 工业系统中的测量系统	139
10.2 传感器	139
10.3 信号调理电路	142
10.4 通用仪器在工业系统测量中的应用	142
10.5 阅读材料	143
第11章 杠杆机构及力测量	145
11.1 用于力加载的杠杆机构	145



11.2 弹性受力体-电阻应变片构成的力 传感器	145	15.3 二进制码带位移测量的信号调理	172
11.3 差动测量原理	146	15.4 训练内容	173
11.4 训练内容	148	15.5 阅读材料	175
11.5 阅读材料	150	第 16 章 信号的数字显示	176
第 12 章 温度测量	152	16.1 LED 数码管	176
12.1 热力学系统的热惯量	152	16.2 七段 LED 数码管的显示	176
12.2 半导体温度传感器及其信号调理	152	16.3 训练内容	178
12.3 训练内容	154	16.4 阅读材料	181
12.4 阅读材料	156	第 17 章 鼠标——典型机电产品 1	182
第 13 章 带轮传动机构及转速测量	158	17.1 滚球式鼠标	182
13.1 带轮传动机构	158	17.2 光电式鼠标	183
13.2 码盘式转速传感器	158	17.3 各种接口的鼠标	183
13.3 转速测量中的信号调理	159	17.4 中键和拨轮的各种功能	184
13.4 训练内容	162	17.5 鼠标的人机工程学问题	185
13.5 阅读材料	166	第 18 章 磁盘驱动器——典型机电 产品 2	187
第 14 章 螺旋机构及位移测量	167	18.1 软驱的结构和原理	187
14.1 螺旋机构	167	18.2 磁头系统	187
14.2 光电编码式位移传感器	167	18.3 主轴系统	189
14.3 位移辨向原理	167	18.4 磁头系统与主轴系统的协同工作	191
14.4 训练内容	168	18.5 软驱主板	193
14.5 阅读材料	170	18.6 辅助部分	195
第 15 章 蜗轮蜗杆机构及线位移 测量	171	18.7 软驱的主要技术	197
15.1 蜗轮蜗杆机构	171	18.8 阅读材料	198
15.2 二进制码带位移测量原理	171	参考文献	201

第1章 绪 论

1.1 工业系统的一般概念

工业系统是由多种相关装置构成的系统，这些装置工作时，能够产生各种运动来改变系统的物理状态，从而实现能量、物质或信息的传送或变换。一个工业系统一般由执行器、驱动器和控制器组成。能直接产生物理作用的装置称为执行器；向执行器提供动力或能量的装置称为驱动器；执行器要按照指令工作，能够发出指令信号的装置称为控制器。本书上册主要涉及执行和驱动，图 1-1 仅表示出工业系统中的驱动器和执行器。

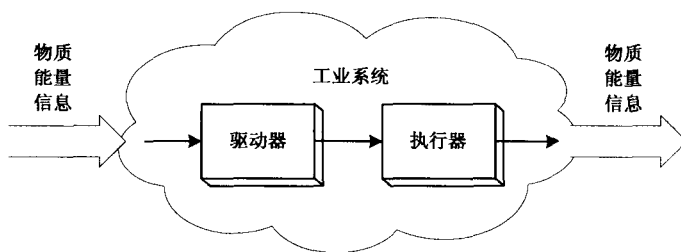


图 1-1 工业系统中的驱动器和执行器

工业系统的例子不胜枚举，我们通过下面几个例子来认识工业系统。这几个例子都是某一大类工业系统的实例，从这几个例子不难看出，工业系统这个术语的含义很宽广。

例 1：电冰箱。电动机驱动压缩机转动，压缩机使冷媒受压缩并在管路里循环，在冰箱内部吸收热量，在冰箱外部释放热量。冰箱里有一个温度测量元件，不断地将测量到的温度信号送到控制器。控制器的工作是：将当前实测温度与设定温度进行比较，根据两者之差发出控制信号，起动或停止电动机，或者调节电动机的转速。在电冰箱这个工业系统中，电动机是驱动器，压缩机是执行器，温度测量元件和控制器是为实现温度控制而引入的。

例 2：电炉。电热器将电能转换成热能，可以用风机使空气对流，将热量传递到炉腔各处，使炉腔升温。送给电热器的电功率由开关或电力电子器件控制。用测温元件测量炉腔内各处的温度，将温度信号送到控制器，控制器将当前温度与设定温度值进行比较，据此发出控制信号，控制开关或电力电子器件工作。电热器、风机是执行器。如果通过管道送热，还可以用阀门改变流量，阀门可以根据控制指令改变开度大小，所以也可看作一个执行器。如果需要降温，排风扇或冷风机也是执行器。

例 3：汽车。汽车发动机是驱动器，车轮可以视为执行器，普通汽车是由人驾驶的。发动机主轴输出的机械能经过离合器、变速器、传动轴传送到驱动桥，然后再经过差速器分配给左右两个半轴驱动车轮。现代汽车中，为提高燃油利用率，发动机的燃油燃烧过程有专门的控制器进行控制，废气排放情况有专门的检测元件进行检测，将有关废气排放的信息送到发动机的控制器。



1.2 工业系统中的执行器和驱动器

1.2.1 执行器

在工业系统中,执行器的作用是实现物理作用,使系统达到或保持某个状态。譬如,执行器工作而输出力、力矩、电功率、热量,结果是诸如位移、速度、加速度、姿态、流量、液位、温度等物理量的改变。执行器的输出动作由控制器决定。执行器是系统的终端操作部件,必须安装在需要施加物理作用的部位,有的执行器可能长年与工作现场的介质直接接触,因此执行器选择不当或维护不善可能使整个系统工作不可靠,严重影响系统的品质。

1.2.2 驱动器

为执行器提供能量或动力的是驱动器。一类驱动器将燃料中的化学能、自然界水力或风力转化成机械运动,自然界的这些能源统称为一次能源,这一类驱动器称为一次原动机,有时简称原动机,比如蒸汽轮机、燃气轮机、内燃机、燃气喷射发动机、水轮机、风车等。另一类驱动器主要是电动机,将电能转换成机械能。电能称为二次能源,这一类驱动器称为二次原动机。

有的工业系统中,执行器与驱动器的划分并不显而易见。譬如,小型制冷压缩机在机壳内封装了电动机,风机、螺旋桨的叶轮往往与原动机轴安装在一起。汽车发动机曲轴有时被视为原动机的输出端,也有人将曲轴视为执行器,而将气缸、活塞和活塞杆视为驱动器。阀、泵、缸、风机、电动机、电热器、固态继电器等都常被视为执行器。有时将电动机-水泵、固态继电器-电热丝、伺服电机-机械臂等密切联系的部件作为一个模块,整体被看作执行器。有时又将电动机看作驱动器,而电动机拖动的部件或机构被视为执行器,称为生产机械,如机床的转动轴、升降机的主轴。电动机、电热器常需要专用电源设备,如整流器、逆变器、变频器等,这些设备有时也和电动机、电热器一并考虑。在液压和气动系统中,常需要提供高压油源和高压气源,液压泵和气泵可视为驱动器,而液压泵和气泵又必须用电动机或内燃机来拖动。

已经发展出了多种多样的执行器和驱动器。最常用的执行器和驱动器有电动、液压、气动、机械等类型,它们有各自的特点和适用场合。电动类元件利用电磁力工作,液压和气动类元件要以流体为介质,机械类执行器则用固态实体工作。本书将简要介绍最常用的一些执行元件和驱动元件。

1.3 工业系统中的测量

工业系统运行过程中,会产生各种物理量。譬如,有的工业系统含有运动装置,会产生力、力矩、位移、角位移、速度、角速度、加速度、角加速度的连续变化或断续变化。又如,有的工业系统含有热力学、化学或微生物学过程,会产生温度、湿度、压力、流量、液位、物位、成分、pH值等的连续变化。此外,系统运行中会发生某些事件,譬如某一个部件移动到指定位置、液位达到规定高度、油箱中剩余燃油少于一定量、炉温达到预定的报警



温度、烟尘或有害气体达到报警浓度，或操作者按下了某一个控制按钮，这些事件会引起开关的通、断，导致某一信号的“有”、“无”或电平的“高”、“低”变化。这些量统称为物理量，用它们描述系统的状态。换言之，各种物理量携带着系统状态的信息。而获取这些信息对于及时了解系统的运行状态非常重要。

工业系统运行中，各个部分之间不仅存在能量、物质的传递和转换，更重要的是存在着信息的联系。要使工业系统执行预期的操作，必须对系统进行监测和控制。这一过程中，不但要能支配系统中的物质和能量，更要能够利用系统中的信息。获取系统状态信息，就是对各种物理量进行测量。

为了对工业系统进行监测和控制，必须获取系统运行的状态信息，为此要检测系统中的各种物理量。通常将工业系统中承担测量的那一部分称为测量系统。工业系统中的信息必须用适当形式的信号表示，测量系统的任务是获得工业系统的状态信息，以适当的信号形式将这些信息传送到控制器或显示给操作人员。

测量系统中，有传感器、信号调理电路和显示装置。传感器将各种物理量转换成信号，电信号是最常用的信息表达形式。信号调理电路是测量系统中的重要组成部分，它的作用是对传感器输出的电信号进行初步的处理，使信号适于传输或显示。获得的信号往往要以适当的形式传达给人的感官，譬如指示灯、指针、数字、图形、图像、声响、振动等。

测量系统的设计、调试和维修要用到各种通用电子仪器仪表。传感器、信号调理电路和显示装置大都要用到各种电子元器件。已经发展出了多种多样的测量技术。本书将通过几种物理量的测量介绍测量技术的主要内容。

思 考 题

1. 举例说明什么是工业系统。
2. 工业系统有哪几个基本组成部分？
3. 驱动器的作用是什么？
4. 执行器的作用是什么？

1.4 阅读材料

1.4.1 几个术语

现在还没有一个公认的工业系统的定义，从本书涉及的范围不难看出，我们是在十分广泛的意义上使用这个术语。

驱动器、驱动元件、执行器、执行机构、执行元件、控制元件、测量元件等术语也没有被普遍接受的定义。“驱动器”通常指提供能量或动力的装置，“执行器”通常指能完成预定的操作，使系统达到或维持预期状态的装置。“执行器”常与“执行机构”两个术语交替使用。在航空工业中，“执行器”有时也称为“致动器”或“作动器”(actuator)，“驱动器”有时也称为“原动机”、“动力装置”。在多数机电系统中，继电器、电力电子器件、液压和气动阀被称为控制元件，而工业过程控制领域中的阀被视为执行器。

常将一个部件、单元或器件看作一个元件，或统称为“元器件”，是因为在特定场合下



暂不分析它的内部结构、原理或微观机制，而只是大致了解它的基本原理，更关心它的外部特性或宏观效应，用输入输出特性描述它，利用它的外部特性实现系统的功能，注重它们的性能指标和极限参数。在工程实际中，驱动器、执行器、控制器和传感器等大多由专业厂商制造，很多产品已经系列化。在设计、分析、调试和维修一个系统时，对这类产品通常作为一个整体进行选型、安装、使用和更换，常将它们统称为元件，或分别称为执行元件、驱动元件、控制元件和测量元件。每一种“元件”的研究、开发、制造都涉及基础研究、材料、工艺、设备等多个方面，有复杂交织的学科、产业甚至产业链。

必须指出，在不同的工业系统中，执行器和驱动器的划分并没有完全一致的意见，执行器、驱动器、控制器功能也并不总能对应着不同的部件，有的系统控制作用是由人承担的。当今，越来越多的产品集成了两种或两种以上功能，朝着一体化、模块化的方向发展。当代工业系统的设计、分析、制造、运行和诊断越来越具有综合性，学科之间的界线正变得越来越需要跨学科的思考和设计。

1.4.2 执行和驱动技术的发展

1. 人的双手、人力和畜力

在远古时期，人类在采集、狩猎中只能用自己的双手执行各种动作。人类的双手在长期进化中发展出了某些高度的技巧，但受到生理因素的限制，难以完成现代工业中很多动作，譬如在高精密度和重复性等方面无法胜任。人类逐渐发展出了一些简单工具和机械，如臼、杵、桔槔、辘轳、磨、碾、弓、弩、桨、橹、舵等。古代的车舆、纺车、织机、陶车、抛石机等被后世称为工作机，已是驱动、传动和执行齐备的机器，利用的能量主要来自人力，后来又利用畜力。虽然可以利用技巧提高效率，但是人力、畜力的功率和耐久能力都受到生理极限的限制。

直至今日，某些工业系统中，仍然必须用人的手或手指执行一些特定的操控，用人力完成某些驱动，例如轻兵器、手持工具、运载工具驾驶、遥控机器人，工业机器人也模仿了人类肢体的许多功能。

2. 液压与气动

工作机需要动力才能工作。除人力、畜力外，早期工作机的原动力就是水力和风力。排灌、锯木用的风车和水车、谷物加工用的风磨和水磨、船舶用的风帆等机械都以水力或风力为动力。风车和水轮机可以看作最早的气动马达和液压马达。

自然界的风力和水力是原动力的来源，水和空气还可以作为传递机械能的工作介质。中国在公元前 1000 ~ 900 年就有冶铜用的鼓风器。随着牛顿力学的成熟和普及，近代出现了许多新型的工作机，越来越多地代替手工劳作。这些机械中，有多种泵利用了水或空气作为介质产生或传递机械力。例如，水压抽水机用柱塞造成真空实现抽水，柱塞泵用柱塞造成的压力将气体或液体从泵缸中喷出，有的泵是用叶片或风箱将气体或液体喷射出。泵缸数目从单缸发展到双缸，柱塞运动从单动发展到双动，瓣阀和球阀也开始使用。16 ~ 17 世纪欧洲出现的活塞机利用空气压力产生机械力，用一根管子能在相当远的距离上传送机械力。17 世纪的灭火机用木料以手工制成，能喷射出粗如人臂、扬程如房高的水柱。18 世纪，继飞梭织机和珍妮纺纱机后又发明了水力纺纱机，随后的“骡机”兼备了珍妮纺纱机和水力纺纱机的优点，仍以水为动力，能够带动多达 400 个纱锭。这些利用空气和水的技术成了蒸汽机



发明的基础。

液压装置能够在很小的空间内安装,能够输出很大的力或力矩,并且易于精确控制。1920年后,舰艇、坦克、飞机、机床和锻压机械采用了液压技术。到了当代,在防漏、降噪、减震等方面取得长足进步之后,以流体为工作介质的液压和气动机构广泛使用在执行器和动力源装置中,水力和风力还是“绿色”工业系统的原动力的重要来源。液压与气动技术与电子技术的结合也从简单拼装进步到混合设计、制造,发展出了大量从元件到系统的电、液、气整合产品。

3. 矿物燃料原动机

早期的工作机是用木材制作的,性能低,寿命短。近代开始用金属制造机器,引起了金属的需求大量增加,冶炼业迅速发展。焦炭炼铁需要强有力的鼓风设备,生产锻铁需要锻炼炉,而蒸汽机行程次数的增加提出了对钢的需要,催生了铸钢、转炉炼钢和平炉炼钢。这样,不仅冶炼设备和轧钢设备的制造成为重要的机器制造业分支,而且钢铁冶炼又推动了采煤采矿业的发展,继而需要制造采掘机械。冶炼、轧钢、采掘机械的制造反过来又推动了机械制造技术。工业化必然引来了机械化,工作机的种类、功率都迅猛发展。

许多新型工作机需要的动力远非人力和畜力所能胜任。水力受到季节的影响,要获得大的功率必须建造水利工程设施。风力很不稳定,不仅与地域有关,且难以控制。各种工作机迫切需要更强大的、便于控制的、能稳定输出足够功率且效率更高的动力装置,也称为原动机。

蒸汽机是最早的原动机。在解决了锅炉点火和燃烧技术、气缸的加工精度、气缸的密封和保热、活塞的往复、直线往复运动-旋转运动的转换、蒸汽的冷凝等一系列技术问题之后,旧式蒸汽机不断进步,成为广泛使用的原动机,从而引发了第一次工业革命。

煤炭、铁矿石、钢铁等大宗原料和大型机械的运输需要强大的运输工具。为了给大吨位钢铁船身的船舶提供动力,采用了蒸汽机或内燃机。陆上运输开始采用铁轨后,紧接着也采用了蒸汽机车。汽车能够批量制造后,内燃机成为更加重要的原动机。

当今,内燃机仍然是车辆和船舶的主要动力机,燃煤工业锅炉仍是火力发电的重要装备之一,燃气轮机则是喷气飞机的发动机。今天,使用矿物燃料的动力机械遇到了资源枯竭、环境污染等严峻挑战,使用清洁能源和可再生能源动力机械的研发越来越受到重视。

4. 电气动力装置和执行器

从静电、静磁现象研究到电磁波现象证实麦克斯韦电磁理论,历经了17~19世纪。在电磁理论基础上,从法拉第的实验电机模型到制成电动机,仅用了40余年。

原型电动机是用天然磁铁产生定子磁场的,不仅功率很小,而且无法批量制造。电磁铁出现后不久就被用于电动机,并且采用了换向装置,随后出现了几种励磁方式和几种电枢。1838年进行了直流电动机拖动螺旋桨推进船舶的试验,随后有了直流发电机-直流电动机机组。电气动力进入了实用阶段,引发了第二次工业革命。木工机械、各种金属切削机床、气锤、起重机等都用电气动力。与热能相比,电能较容易传输且容易控制。但是发电机的动力来自矿物燃料、水力等一次能源。

直流输电距离很快遇到铜的电流密度和输电线损耗的制约,提高电压也达到了当时的技术上限。虽然笼型异步交流电机在1885年已被发明出来,但直到三相交流发电机、变压器、汽轮机和水轮机、绝缘材料、开关电器等技术的发展使交流输电电压逐步提高,交流输电距



离逐步增大,交流电气动力才逐步普及。有线和无线通信也被发明出来,电信号处理技术发展迅速。

电磁阀、伺服电动机、直线电动机、步进电动机等电气执行器得到了快速发展,有了广泛的应用。20世纪60年代后,半导体技术从弱电领域发展到了强电领域,电力电子技术为电气驱动技术提供了越来越多的大功率控制元件。基于电力电子器件的交流-直流变流装置逐渐取代直流发电机,为直流电动机提供电能,而交流-交流变流装置则为交流电动机提供电能。液压、气动中的泵、阀、缸等元件也越来越多地采用电气部件来改进性能。

1.4.3 测量技术的发展

度量衡有悠久的历史,“度”指计量长短,“量”指计量容积,“衡”指计量轻重。从人类社会开始有商品交换起,就需要对各种商品进行计量。手工业时期,度量衡所用的器具主要是各种尺、规、秤、斗之类。手工业中,几何量测量的目的主要是使尺寸合适,保证一件产品的几个零件能够顺利装配。

工业革命后,蒸汽动力的机床就可以进行零件的批量生产。后来,机械制造业提出了零件互换性的概念,因此对测量精度有了更高的要求,产生了一些专用测量器具,如塞规、螺旋测微装置、游标卡尺和千分尺、量块等。

进入电气化时期后,电工仪表用于测量电压、电流、电功率等电量和电阻、电容、电感等元件参数。电子技术进入实用阶段后,为测量电子电路中电压、频率、波形,发展了电子测量仪器。

人类早期利用热能的形式有金属冶炼、制陶、制瓷、制作玻璃器具、酿造等,蒸汽机时代出现了热力学,热机理论使人类能够更集中、更高效地利用热能。化工、炼油和现代冶金工业发展起来之后,为了监控工业过程,需要连续地测量温度、压力、流量、浓度等物理量。

大量的测量工作必须有共同的度量标准,所用的度量标准必须具有代表性,并可以反复使用。米原器就是度量标准的例子,它使长度测量有了统一的量值标准,这是量具发展史上一次根本性的革命。

传统测量技术往往需要人工操作,测量示数往往需要人来读取,且精度、重复性、实时性、适用场合等都受到局限。

现代工业系统中,为了监控一个工业对象而要求测量的物理量越来越多,如位移、速度、加速度、力、力矩、应变、温度、压力、流量、液位等,有的量变化迅速,有的量需要高度精密测量,有的测量场合环境恶劣,这些测量用传统手段难以进行。电测技术迅速发展了起来,出现了多种传感器和信号调理电路。电测技术具有实时性、自动化等一系列优点,所以工业系统中许多非电量的测量广泛地采用了电测技术。

20世纪70年代中期以来,处理器的性能价格比不断提高,对获取系统状态信息的要求也随之提高,从而导致新型传感器的发展。今天,越来越多地将敏感器件和信号调理电路甚至微处理器集成在一个产品模块上。数字技术已普及,测量技术和仪表都向着数字化方向发展,日益广泛地应用于多种工业对象的监测和控制。

第2章 执行机构

机械类执行器是一大类执行器，也称为执行机构。一个工业系统中往往有一个或若干个执行机构进行着有序的运动，将力或力矩施加到需要的部位，引起物理状态的改变。本章简要介绍这一类执行器。

2.1 基本概念

2.1.1 几个常用术语

在机械工程领域，具备以下三种特征的装置称为机器：第一，由两个以上实体组合而成；第二，实体之间以一定几何形状的表面互相接触，形成可动联接，且各实体之间有确定的相对运动规律；第三，能够实现能量转换并输出机械功。仅仅具有前两种特征的装置称为机构，构成机构的实体称为构件，组成构件的实体称为零件，构件可以是一个零件，也可以是若干个彼此没有相对运动的零件联接而成。

从机械学的立场看，机器的基本功能是通过机械运动来实现物质或能量的传递及变换。机器的基本单位是机构，一台机器由一种或一种以上机构组成。一个机构至少有两个构件，一个构件至少有一个零件，零件是构造或制造的最小单元实体。机械是机器和机构的总称。例如，柴油机是一台机器，活塞杆与曲轴形成机构，一个活塞和活塞杆形成一个构件，一根曲轴、一个螺钉、一个齿轮是零件。

构件在运动时视为一个整体，是运动的最小单元实体，也是机构的最基本元件。凡是能传递运动和力并在运动时可视为一个整体的物理介质都可称为构件。构件可以是刚体，也可以是挠性体，如带、链、绳，也称为中间件。构件还可以是流体，如液压油、水、气体，也称为介质。

机构中的构件分为原动构件和被动构件。原动构件也称为主动构件、输入构件，它的运动由外部输入决定。被动构件也称为从动构件，直接向外输出运动或力、力矩的构件称为输出构件。输出构件的运动应是所需的运动。机构是工业系统中执行器的基本承担者。

为了描述运动的传递和变换关系，必须选定其中一个构件作为参照体，将这个构件视为静止的，称为机架。换言之，必须有一个构件作为机架。同时，要有至少一个构件作为原动构件，至少一个构件作为被动构件。在有些系统中，需要的运动形式与原动构件的运动形式不同，或原动构件不便于直接作用于被动构件，或原动构件输出的力、力矩不符合要求，这些情况下就需要某种机构实现运动变换或传递。

为了便于说明两个构件接触所形成的关系，引入运动副的概念。运动副是两个构件以一定几何形状和尺寸的表面互相接触所形成的可动联接，如直线导轨副、蜗轮蜗杆副、丝杠螺母副。构件就是通过运动副的两个零件的接触面传递力和运动的。

广义的传动有机械传动、电气传动、流体传动三类，它们的区别是介质不同、输入能量



形式不同，它们的共同点是输出运动、力或力矩。流体传动中的缸、阀、马达等装置常被称为执行元件。“传动机构”一词常指机械传动中的机构。在工程实际的很多场合中，不论机械、电气、液压还是气动传动，一个装置同时承担执行与传动两个作用，传动的目的是执行某种动作，或产生某种运动，或输出力、力矩。本章重点是机构的执行功能，但无法避免使用“传动”这个术语。

2.1.2 执行机构的基本作用

执行机构的作用是输出机械运动、力或力矩。工业系统中，需要执行的运动形式除旋转运动和直线往复运动两大类外，还有摆动往复、各种平面或空间曲线运动。各种运动形式必须用执行机构来实现，不同运动形式之间还需要进行适当的转换，因此执行机构在实现运动时往往还必须完成运动转换和传递。执行机构工作时，实质上是以一定的功率和效率进行机械能的传递。

在工业系统中往往有这种情况：所需的运动形式与原动机的运动形式不同，这就需要执行机构能实现运动的传递和转换。有的系统中，需要施加力、力矩或运动的部位与动力源之间有一定空间距离，就需要在动力源与执行器之间设计专门的运动转换和传递机构，也称为传动机构。

在不同的实际工业系统中，执行机构和传动机构划分可能不同，或者难以划分，常统称为机构。执行与传动常难以分割，执行机构常兼具传动功能，传动机构也常被视为执行机构。本章强调机构的执行作用。

2.1.3 执行机构的分类

执行机构种类繁多，按不同的方法有不同的分类。按各运动构件上各点的运动平面是否相互平行可分为平面机构和空间机构两类，平面机构如圆柱齿轮机构、平面连杆机构等，空间机构如锥齿轮机构、空间连杆机构等。按构件接触的方式可分为摩擦和啮合两类，摩擦传动又分为直接接触的摩擦轮传动和经过中间件的带传动，啮合传动也有直接接触的齿轮、蜗轮蜗杆传动、齿轮齿条传动和经过中间件的同步齿形带传动、链传动。按机构的结构特征可分为连杆机构、斜面机构、凸轮机构、棘轮机构、槽轮机构等。按输出的运动特征可分为匀速机构、非匀速转动机构、往复运动机构、直线运动机构、换向机构、单向机构、间歇运动机构和差动机构等。按实现的功用可分为安全保险机构、联锁机构、定位夹紧机构、擒纵机构和实现某种数学运算的机构等。

工程中，零件或构件又分为通用件和专用件。在各种不同系统中广泛使用的零件或构件称为通用件，如螺钉、轴承之类。只在某一特定类型系统中使用的零件或构件称为专用件，如涡轮机叶片、内燃机活塞、织机的织梭。通用件通常由专业厂商批量制造，很多通用件已经标准化、系列化，查阅它们的技术资料和供货途径十分方便，最常用的机构也越来越多地批量制造。专用构件和专用机构则往往要专门设计、制造。

2.1.4 执行机构的几个例子

执行机构输出运动、力或力矩，可以改变运动方向、速度，可以实现力的放大和反馈、几个零件间的运动同步、物料传送、远距传动等功能。以下给出一些机构应用的例子。不难



看出, 机构常常在完成执行功能的同时完成机械传动。

执行机构可以改变物体的位置或角位置, 如炮管的方向角、方向舵的偏转角、阀门开口大小、机床刀架的进给量、飞机起落架的收放。

执行机构可以改变运动速度和方向, 例如用曲柄摇杆机构实现牛头刨床的直线往复运动, 可以使刨刀的正程速度较慢, 而返程速度较快。

执行机构可以从一个坐标点沿某一轨迹运动到另一坐标点, 如关节式机器人执行点焊工序, 移动机器人执行船壳钢板切割任务。

执行机构可以将力、力矩放大输出, 例如在飞机、船舶、重型汽车的方向操纵、汽车刹车伺服系统中, 又如主从式机械手中, 人不可能直接施加足够大的力, 常采用杠杆机构或液压机构实现力、力矩的放大。

执行机构可以实现运动间的跟随或同步, 譬如仿形车床或仿形铣床用的一类机构, 可以使刀具跟随模板边界形状行走。

执行机构能够完成物料传送, 如传送带、悬挂输送链、传送梁等是专门用来传送物料的。

机构可以在较远距离上传动。当原动力设备体积过于庞大或过重, 不能直接安置于需要运动的部位, 就需要将运动越过一定距离进行传动, 这种传运常用弹性金属绳索、连杆、皮带、链条、液压或气压管道来实现。例如用主从式机械手可以使操作者在装有危险化学品或放射性物质的容器外面处理容器中的物质。

机构可以实现一些曲线运动。例如用凸轮、偏心轮、曲柄、连杆等组合可以使执行件走出不同的平面或空间曲线。

2.2 带轮机构

带是挠性体, 作为中间件张紧在主动轮和从动轮的轮缘上, 构成带轮机构。带轮有摩擦型和啮合型两类。摩擦型带又有圆形带、平带、V形带和多楔形带等几种。圆形带仅用于小功率、低转速的场合, 如缝纫机、仪器、口腔医疗器械。平带的挠性好, 便于制造。在相同摩擦因数下, V形带的摩擦力比平带的摩擦力大。多楔形带相当于多条平带和V形带间隔并行使用, 兼具两者的优点, 多用于结构紧凑的大功率执行机构。见图2-1。

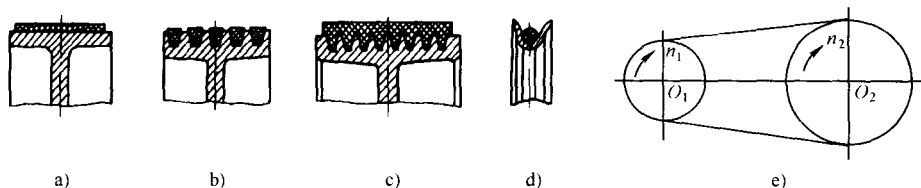


图2-1 摩擦型带轮机构的原理和几种截面形状

a) 平带 b) V形带 c) 多楔形带 d) 圆形带 e) 原理图

由于存在滑动, 摩擦型带轮的传动比精度低, 效率低。为减少滑动, 可以借助张紧轮增大带对轮缘的正压力, 但是这会增大轴和轮的径向力。用V形带或多楔形带可以减少打滑, 但带和轮的制造成本高, 且这两种带挠性较差, 寿命较短。摩擦型带轮机构具有缓冲和吸振



作用, 过载能力较强, 传动平稳, 噪声低, 能够在较大的轴距上传送转矩。工程实际中, 摩擦型带轮机构常用于功率不大且线速度中等的场合, 如 100kW 以下、5 ~ 30m/s。

啮合型带轮也称为同步齿形带轮, 带和轮上都有齿, 两者啮合, 见图 2-2。啮合型带轮机构的传动比较为准确, 有较高的传动效率, 且运动平稳, 振动小, 噪声低。这种机构能胜任上百千瓦的功率和 12 ~ 20 的较大传动比和 50m/s 的带速。啮合带执行机构可用于执行精度较高但功率不大的精密机械中, 如打印机、绘图仪、磁带机、电影放映机等。

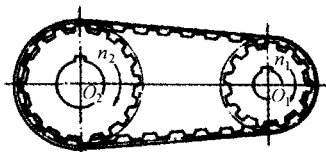


图 2-2 同步齿形带

2.3 链轮机构

链是挠性体, 作为中间件张紧在主动链轮和从动链轮上, 链轮与链啮合, 主动轴与从动轴平行, 见图 2-3。因为不存在打滑现象, 所以链轮机构能保证准确的传动比。链的张紧程度可以比带的张紧程度低, 因此作用于轴的径向力小。链轮机构的效率高, 噪声低, 能够在较大的轴距上传送转矩。

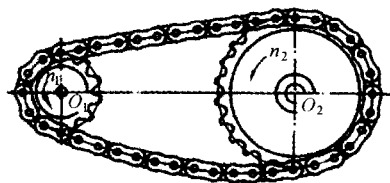


图 2-3 链轮机构

链轮机构不能吸收冲击和振动, 高速传动时平稳性差, 不适于载荷变化大的场合, 不能用于非平行轴传动。链条疲劳、链条铰链磨损等原因能引起断链、脱链, 链轮齿也会疲劳断裂或磨损。

链轮机构适用于功率不大于 100kW、链速不大于 15m/s、传动比不大于 7 的系统, 如医用 X 光机、传送带、摩托车、自行车。链轮机构常用于多尘、油污的场合或轴距无严格要求的场合。

2.4 齿轮机构

齿轮机构以啮合方式在两个轴之间传递运动和动力, 轮齿受力的情况类似悬臂梁, 且应力是交变的。常见的齿轮有圆柱齿轮和锥形齿轮两大类。

圆柱齿轮用于在平行轴之间传递力矩, 也可实现分档的转速变换和转矩传递, 如普通机床、汽车的变速器。圆柱齿轮按齿轮的齿廓形状可分为渐开线、摆线、圆弧等, 按齿轮的齿线形状可分为直齿、斜齿、人字齿、圆弧齿等。斜齿轮适用于高速、重载、要求低噪声的场合, 还可在 90°交错的两轴之间传动, 但存在较大的轴向推力。人字齿轮能够使轴向推力平衡而抵消, 但要有一定的轴向间隙以便安装。图 2-4 为最常见的几种齿轮机构。

锥齿轮能够在相交轴或交错轴之间传递力矩, 主动轴和从动轴的相对位置有正交、斜交、偏置几种。锥齿轮按齿面节线可分为直齿、斜齿、圆弧齿、摆线齿、准双曲面齿。直齿的锥齿轮制造较简单, 但对于安装误差和齿变形较敏感, 振动和噪声较大, 常用于线速度小于 5m/s 的稳定传动, 如车辆的差速器; 圆弧齿的锥齿轮工作平稳, 承载能力较大, 对安装误差和齿变形不敏感, 用于重载旋转执行机构, 速度可大于 5m/s, 如船舶和重型汽车的主