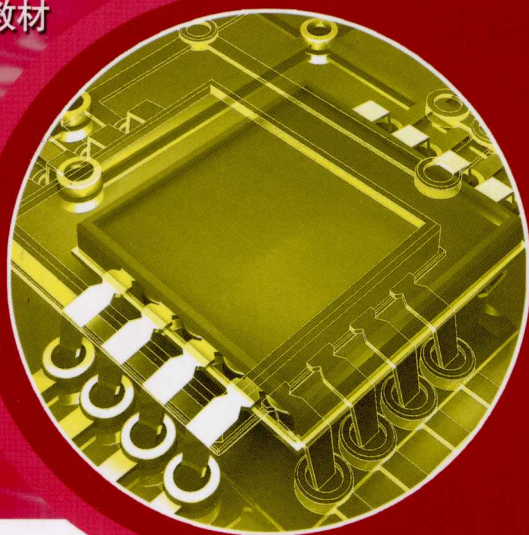




普通高等教育机械类国家级特色专业系列规划教材
北京高等教育精品教材



机电一体化技术

(第二版)

孙卫青 李建勇 主编



科学出版社
www.sciencep.com

普通高等教育机械类国家级特色专业系列规划教材
北京高等教育精品教材

机电一体化技术

(第二版)

孙卫青 李建勇 主编

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书介绍了机电一体化技术所必需的基础、典型知识,论述了机电一体化技术系统层面的知识,强调机电一体化系统应该具有的融合性和集成性。内容包括:机电一体化技术导论和单元技术、计算机控制技术、系统的建模与仿真、接口与电磁兼容技术及其系统设计等。

本书可作为高等院校本科生机械电子工程、机械制造及其自动化、机械设计理论和工业工程等专业的教材,也可供教师和从事机电一体化设计制造的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机电一体化技术/孙卫青,李建勇主编. —2版. —北京:科学出版社,2009
(普通高等教育机械类国家级特色专业系列规划教材·北京高等教育精品教材)

ISBN 978-7-03-024679-0

I. 机… II. ①孙…②李… III. 机电一体化-高等学校-教材 IV. TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 133980 号

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 8 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2009 年 8 月第一次印刷 印张: 19

印数: 1—3 500 字数: 369 000

定价: 32.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

机电一体化是微电子技术和计算机应用技术向机械工业渗透的过程中逐渐形成并发展起来的一门多学科领域交叉的新型综合型学科,它是机械工业的发展方向。机电一体化技术的应用不仅提高和拓展了机电产品的性能和功能,而且使机械工业的技术结构、生产方式及管理体系均发生了巨大变化,极大地提高了生产系统的工作质量。目前机电一体化技术已成为高等院校机械电子类专业的一门重要专业课程。

机电一体化是有机地融合了检测技术、信息处理技术、自动控制技术、伺服驱动技术、精密机械技术、计算机技术和系统总体技术等多种技术于一体,并使这些技术相互不断渗透的技术密集型系统工程。目前,高等院校的相关专业对于机电一体化所涉及的单元性技术大多已设置了相应的课程,因此,本书不拘泥于追求这些技术的完整性和深入的细节,而是本着在机电一体化系统设计和生产时能够“合理选用”的原则,介绍一些机电一体化技术所必需的、典型的、共性的知识,避免机电一体化教材只是机、电、气、液等知识的简单罗列和课程内容大量重复的现象。为此,在组织本书的内容时,将主要的“单元性技术”精简压缩成一章,而用大量篇幅介绍和论述机电一体化技术系统层面上的知识,强调机电一体化系统应该具有的整合性和集成性,着重培养学生系统设计、开发的综合运用能力。

《机电一体化技术》(第一版)自2004年4月出版以来,得到了广大教师、学生和工程技术人员的肯定,2007年3月被评为北京市高等教育精品教材。与此同时,机电一体化技术的迅速发展使得该书部分章节的内容不能满足实际需要,因此,我们在上一版教材的基础上,沿用原有体系结构,在内容上增加了机电一体化的计算机控制技术和接口技术,删除了“基于典型机构的机电一体化系统”一章,同时新增多个典型设计实例,并将作者在科研实践中的成果融入其中,以适应当前本科教学中对学生创新能力和工程实践综合能力培养的要求。

本书是在参考了大量现有文献的基础上,结合作者多年来的科研成果与教学实践经验编写而成的。本书一方面注重基础,可作为机电一体化技术入门学习之用;另一方面立足应用和理论联系实际,对实际工作有一定指导意义;并且兼顾机电一体化的发展,介绍了一些新的技术,以开阔视野。此外,本书不仅注意自身内容的有机联系,也考虑到与其他相关课程的合理衔接。

全书共分6章:第1章机电一体化技术导论;第2章机电一体化的单元技术;第3章机电一体化的计算机控制技术;第4章机电一体化系统的建模与仿真;第5

章机电一体化系统的接口与电磁兼容技术；第 6 章机电一体化系统设计。参加本书编写的有李建勇(第 1 章)、孙卫青(第 2、3、5、6 章)、李长春(第 4 章)。由孙卫青、李建勇任主编,孙卫青起草全书大纲,李建勇进行全书统稿。

本书得到北京交通大学教务处、科学出版社有关领导和工作人员的关心和帮助,在此一并表示衷心的感谢。同时也向本书参考和引用的相关资料和文献的作者表示诚挚的谢意。

由于作者水平和经验有限,书中不足之处,敬请读者和专家批评指正。

作 者

2009 年 4 月

目 录

前言

第 1 章 机电一体化技术导论	1
1.1 概述	1
1.2 机电一体化系统的基本组成和分类	3
1.2.1 机电一体化系统的功能组成	3
1.2.2 机电一体化系统的构成要素	6
1.2.3 机电一体化产品和系统的分类	9
1.3 机电一体化的理论基础与关键技术.....	10
1.3.1 理论基础.....	10
1.3.2 关键技术.....	11
1.4 机电一体化的作用.....	16
1.5 机电一体化的发展.....	20
1.5.1 机电一体化的发展状况	20
1.5.2 机电一体化的发展趋势	23
思考题与习题	25
第 2 章 机电一体化的单元技术	26
2.1 概述.....	26
2.2 精密机械技术.....	26
2.2.1 机械系统概述	26
2.2.2 机械传动机构	28
2.2.3 机械导向机构	54
2.2.4 机械执行机构	60
2.2.5 轴系	66
2.3 传感检测技术.....	70
2.3.1 传感器及其组成	71
2.3.2 传感器的分类及其特性	71
2.3.3 机电一体化中常用的传感器	75
2.3.4 传感器的选择和使用	90
2.3.5 传感器的测量电路	91
2.4 伺服驱动技术.....	93

2.4.1	伺服系统概述	93
2.4.2	伺服系统中的执行元件	98
2.4.3	电气伺服驱动系统	100
2.4.4	液压/气压伺服系统	123
	思考题与习题	127
第3章	机电一体化的计算机控制技术	128
3.1	概述	128
3.2	计算机在控制系统中的应用	130
3.3	工业控制计算机	135
3.3.1	工业控制计算机的基本要求	135
3.3.2	工业控制计算机的常用类型	136
3.3.3	单片微型计算机	137
3.3.4	可编程控制器	138
3.3.5	总线工业控制计算机	156
3.4	数字PID控制技术	161
3.4.1	数字PID控制算法	162
3.4.2	PID控制器的参数选择	163
3.5	嵌入式系统技术	168
3.5.1	嵌入式系统概述	168
3.5.2	嵌入式系统的组成	169
3.5.3	嵌入式系统的应用	172
3.5.4	嵌入式系统的设计	173
3.6	计算机控制系统的设计	177
3.6.1	计算机控制系统的选择	177
3.6.2	计算机控制系统的内容和步骤	179
	思考题与习题	185
第4章	机电一体化系统的建模与仿真	186
4.1	概述	186
4.1.1	模型的基本概念	186
4.1.2	系统仿真的基本概念	187
4.2	机电一体化系统的数学模型	188
4.2.1	数学模型的表现形式	189
4.2.2	数学模型的建立方法	192
4.3	仿真理论基础	195
4.4	机电一体化系统的建模与仿真实例	199

4.4.1 电液疲劳试验机控制系统的建模与仿真	199
4.4.2 钢轨探伤车超声波探头自动对中系统的建模与仿真	202
思考题与习题	207
第5章 机电一体化系统的接口与电磁兼容技术	209
5.1 机电一体化系统的接口技术	210
5.1.1 接口技术概述	210
5.1.2 人机接口设计	212
5.1.3 机电接口设计	219
5.2 机电一体化系统的电磁兼容技术	248
5.2.1 电磁兼容技术的有关定义	249
5.2.2 电磁干扰的形式和途径	251
5.2.3 常用的干扰抑制技术	253
思考题与习题	267
第6章 机电一体化系统设计	268
6.1 概述	268
6.1.1 机电一体化系统设计流程	268
6.1.2 设计思想、类型、准则	270
6.2 机电一体化系统的产品规划	271
6.2.1 需求分析	272
6.2.2 需求设计	274
6.3 机电一体化系统的概念设计	274
6.3.1 概念设计的内涵和特征	275
6.3.2 概念设计的过程	277
6.4 机电一体化系统的详细设计	288
6.5 机电一体化系统的评价与决策	288
6.5.1 系统的评价	288
6.5.2 系统的决策	290
思考题与习题	291
参考文献	292

第 1 章 机电一体化技术导论

1.1 概 述

科学技术的发展极大地推动了不同学科间的相互交叉、渗透与融合,导致了工程领域的技术革命与改造。微电子技术和计算机技术的飞速发展及其向机械工业的渗透促进了机电一体化的形成。机电一体化技术的核心是机械技术和微电子技术,而力学、机械学、制造工艺学和控制学构成了机械技术的四个支柱学科,如图 1-1 所示。近年来,伴随着超大规模集成电路技术的发展,计算机技术得到了迅速发展,机械技术的四个支柱学科也随之发生了巨大的变化。例如,计算机辅助工程(CAE)技术依靠着快速、大存储量和高精度的计算机,几乎使任何复杂的力学计算成为可能。机械优化设计、计算机辅助设计(CAD)技术的发展使得原来主要靠人工完成的机械设计任务大部分可以由计算机来完成。数控技术、计算机辅助制造(CAM)技术的出现使得制造工艺产生了一次革命,同时,微电子技术和信息技术成为加工工艺过程的重要技术。变化最明显的是控制技术,它经历了从古老的机械手动控制到继电器逻辑控制、计算机自动控制、智能控制的发展历程,其每一次技术进步都是微电子技术和计算机技术发展的产物,可见机械技术的四个支柱学科无不渗透了电子技术和信息技术。正是由于这些技术的有机融合,使得机械工业的技术结构、产品结构、功能与构成、生产方式及管理體系均发生了巨大变化,继而使工业生产由“机械电气化”迈入以“机电一体化”为特征的发展阶段。机电一体化技术是机械技术向自动化、智能化方向发展的必然产物。

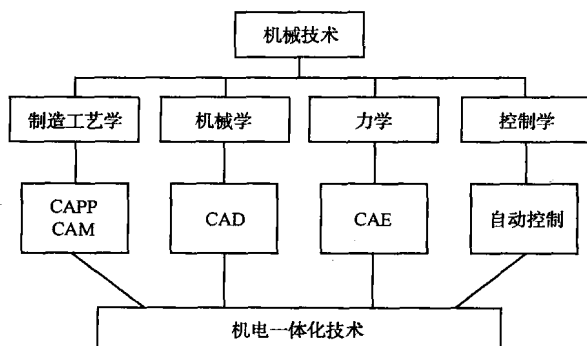


图 1-1 机械技术的发展与机电一体化技术

机电一体化技术正以各种形式渗透到社会的各个角落,社会生产、家庭生活、交通运输、航空航天及海洋开发都在使用机电一体化产品,而这一切都离不开机电一体化技术。

1971年日本《机械设计》杂志副刊提出了“Mechatronics”这一名词。它是由Mechanics(机械学)与Electronics(电子学)组合而成的,即机械电子学或机电一体化。

1996年美国机械工程师学会(ASME)与跨国电气与电子工程师学会(IEEE)将机电一体化定义为:在工业产品和过程的设计与制造中,机械工程与电子和智能计算机控制的协同集成。

1981年日本机械振兴协会经济研究所对机电一体化概念的解释为:“机电一体化是在机械主功能、动力功能、信息功能和控制功能上引进微电子技术,并将机械装置与电子装置用相关软件有机结合而构成系统的总称”,目前该种提法被普遍采用。

机电一体化发展至今已经成为一门有着自身体系的新型学科,随着生产和科学技术的发展,它还将不断被赋予新的内容。但其基本的特征可概括为:机电一体化是从系统的观点出发,综合运用机械技术、微电子技术、自动控制技术、计算机技术、信息技术、传感测试技术、电力电子技术、接口技术、信号变换技术以及软件编程技术等群体技术,根据系统功能目标和优化组织结构目标,合理配置与布局各功能单元,在多功能、高质量、高可靠性、低能耗的意义上实现特定功能价值,并使整个系统最优化的系统工程技术。由此而产生的功能系统则成为一个以微电子技术为主导,在现代高新技术支持下的机电一体化系统或机电一体化产品。因此,“机电一体化”涵盖“技术”和“产品”两个方面。

(1) 机电一体化技术是基于上述群体技术有机融合的一种综合性技术,而不是机械技术、微电子技术以及其他新技术的简单组合、拼凑。这是机电一体化与机械加电气所形成的机械电气化在概念上的根本区别。除此以外,其他主要区别为:①电气机械在设计过程中不考虑或很少考虑电器与机械的内在联系,基本上是根据机械的要求,选用相应的驱动电动机或电气传动装置;②机械和电气装置之间界限分明,它们之间的连接以机械连接为主,整个装置是刚性的;③装置所需的控制以基于电磁学原理的各种电器,如接触器、继电器等来实现,属强电范畴,其主要支撑技术是电工技术。机械工程由纯机械发展到机械电气化,仍属传统机械,主要功能依然是代替和放大人的体力。但是发展到机电一体化后,其中的微电子装置除可取代某些机械部件的原有功能外,还能赋予产品许多新的功能,如自动检测、自动处理信息、自动显示记录、自动调节与控制、自动诊断与保护等。即机电一体化产品不仅是人的手与肢体的延伸,还是人的感官与头脑的延伸,具有“智能化”的特征是机电一体化与机械电气化在功能上的本质差别。

(2) 机电一体化产品既不同于传统的机械产品,也不同于普通的电子产品,它

是机械系统和微电子系统的有机结合,从而赋予其新的功能和性能的一种新产品。机电一体化产品的特点是其产品功能的实现是由所有功能单元共同作用的结果,这与传统机电设备中机械与电子系统相对独立、可以分别工作的情况具有本质的区别。图 1-2 所示为典型的机电一体化系统——工业机器人。它是机、电、传感检测和计算机技术相互融合的综合系统。

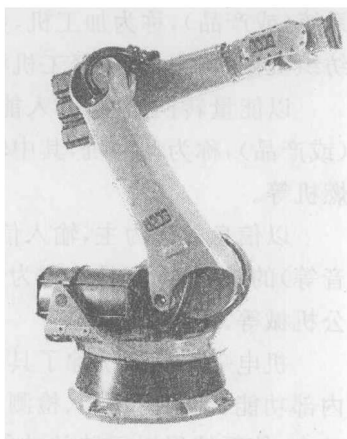


图 1-2 典型的机电一体化系统——工业机器人

机电一体化这一新兴学科有其技术基础、设计理论和研究方法,机电一体化的目的是使系统(产品)高附加值化,即多功能化、高效率化、高可靠化、节能化,不断满足人们生活和生产的多样化需求。所以,一方面,机电一体化既是机械工程发展的继续,同时也是电子技术应用的必然;另一方面,机电一体化的研究方法应该从系统的角度出发,采用现代设计分析方法,充分发挥边缘学科技术的优势。

1.2 机电一体化系统的基本组成和分类

1.2.1 机电一体化系统的功能组成

传统的机械产品主要是解决物质流和能量流的问题,而机电一体化产品除了解决物质流和能量流外,还要解决信息流的问题。如图 1-3 所示,机电一体化系统的主要功能就是对输入的物质、能量与信息(即所谓工业三大要素)按照要求进行处理,输出具有所需特性的物质、能量与信息。

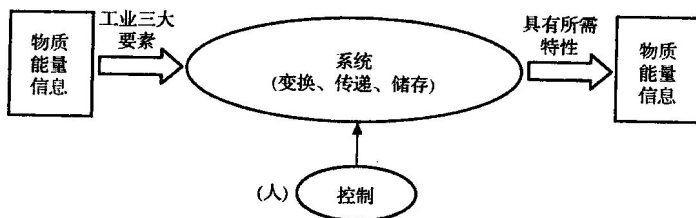


图 1-3 机电一体化系统的主要功能

系统的主功能包括三个目的功能:①变换(加工、处理)功能;②传递(移动、输送)功能;③储存(保持、积蓄、记录)功能。主功能是系统的主要特征部分,是实现系统目的功能直接必需的功能,主要是对物质、能量、信息或其相互结合进行变换、传递和储存。

以物料搬运、加工为主,输入物质(原料、毛坯等)、能量(电能、液能、气能等)和信息(操作及控制指令等)经过加工处理,主要输出为改变了位置和形态的物质的系统(或产品),称为加工机,如各种机床、交通运输机械、食品加工机械、起重机械、纺织机械、印刷机械、轻工机械等。

以能量转换为主,输入能量(或物质)和信息,输出不同能量(或物质)的系统(或产品),称为动力机,其中输出机械能的动力机为原动机,如电动机、水轮机、内燃机等。

以信息处理为主,输入信息和能量,主要输出某种信息(如数据、图像、文字、声音等)的系统(或产品),称为信息机,如各种仪器、仪表、计算机、传真机以及各种办公机械等。

机电一体化系统除了具备上述必需的主功能外,还应具备图 1-4 所示的其他内部功能,即动力功能、检测功能、控制功能和构造功能。动力功能是向系统提供动力,使系统得以运转的功能;检测功能和控制功能的作用是解决各种信息的获取、传输、处理和利用,从而能够根据系统内部信息和外部信息对整个系统进行控制,使系统正常运转,实施目标功能;而构造功能则是使构成系统的子系统及元、部件维持所定的时间和空间上的相互关系所必需的功能。从系统的输入/输出来看,除有主功能的输入/输出之外,还需要有动力输入和控制信息的输入/输出。此外,还有因外部环境引起的干扰输入以及非目的性输出(如废弃物输出等),这些都是系统设计时应当考虑的。例如,汽车的废气和噪声对外部环境的影响,从系统设计开始就应予以考虑。

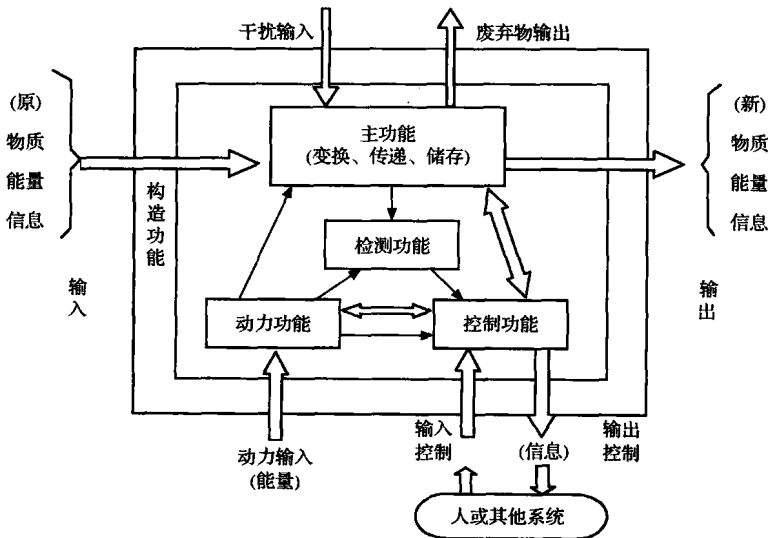


图 1-4 系统的五种内部功能

上述这种抽象的功能构成原理,既有利于设计或分析各种机电一体化系统或产品,又有利于开拓思路,便于创造发明。例如,根据三种不同的主功能及其不同的输入/输出,组合起来可形成 9 大类型的系统或产品,但不一定都是机电一体化的产品,见表 1-1。

表 1-1 不同主功能及输入的组合

序号	主功能	输入/输出	组合实例
1	变换	物质	材料加工或处理机
2	传递	物质	交通运输机
3	储存	物质	自动化仓库、包装机
4	变换	能量	动力机械
5	传递	能量	机械或流体传动装置
6	储存	能量	机械或流体蓄能器
7	变换	信息	电子计算机、仪器
8	传递	信息	通信系统、传真机
9	储存	信息	存储器、录像机

此外,对于同一主功能的加工机构,其运动方式不同,也可构成不同用途的机械。例如,金属切削机床根据工件与刀具相对运动产生切削作用的原理来进行加工,工件与刀具的运动方式不同,就可产生不同用途的机床。

对于现有的机电一体化系统,可以利用功能原理图来进行研究分析。图 1-5 是 CNC 机床的功能原理构成的实例。由于未指明主功能,该加工机构代表了具有相同

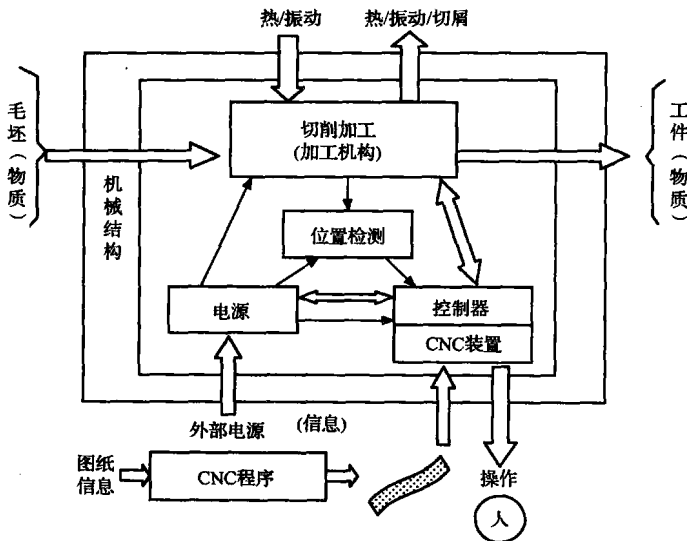


图 1-5 CNC 机床的功能原理构成

主功能及控制功能的一大类的机电一体化系统,如金属切削数控机床、电加工数控机床、激光加工数控机床以及冲压加工数控机床等。显然,由于实现主功能的具体加工机构不同,其他功能的具体装置也会有相应差别,但其本质都是数控加工机床。

1.2.2 机电一体化系统的构成要素

从机电一体化系统的功能看,人体是机电一体化系统理想的参照物。

机电一体化系统正如人的身体一样,各个部分都有不同的分工,它们之间有着密切的联系,只有各个部分分工协作才能完成预期的任务。构成人体的五大要素分别是大脑和神经、感觉器官(眼、耳、鼻、舌、皮肤)、肌肉、内脏及骨骼。相应的功能如图 1-6 所示。人的皮肤和耳、鼻、口、舌等器官相当于机电一体化系统中的传感器,它们把外部信息通过神经系统传递给大脑,为大脑决策提供外部信息;人的大脑相当于机电一体化系统中的控制及信息处理单元,它把感觉器官感知的信息进行采样、存储、分析、处理和判断,根据人的想法指挥肌肉运动,使得各个器官产生相应的动作;人的神经系统相当于机电一体化系统中的信号传输网络系统;内脏提供人体所需要的能量(动力)及各种激素,维持人体活动;人的骨骼相当于机电一体化系统中的机械本体,对人的身体起到支撑、造型和美观的作用。表 1-2 列出了机电一体化系统构成要素与人体构成要素的对应关系。机电一体化系统五大要素实例如图 1-7 所示。

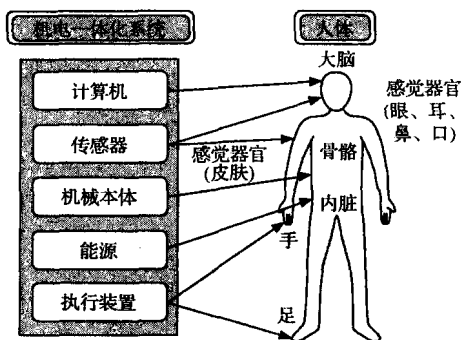


图 1-6 机电一体化系统的构成要素

表 1-2 机电一体化系统构成要素与人体构成要素的对应关系

机电一体化系统构成要素	功能	人体要素
控制器(计算机等)	控制(信息存储、处理、传送)	神经和大脑
传感器	检测(信息收集与变换)	感觉器官
执行装置	驱动(操作)	肌肉
能源	提供动力(能量)	内脏
机械本体	支撑与连接	骨骼

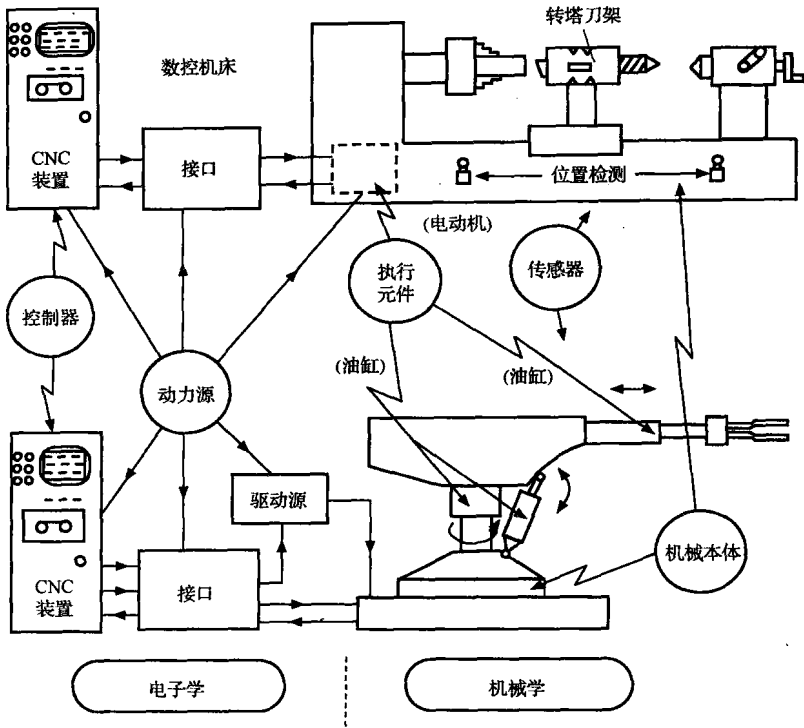


图 1-7 机电一体化系统五大要素实例

因此，一个较完善的机电一体化系统，应包括以下几个基本要素：机械本体、动力系统、传感与检测系统、信息处理及控制系统、执行装置，各要素和环节之间通过接口有机地联系在一起。

1. 机械本体

机械本体用于支撑和连接其他要素，并把这些要素合理地结合起来，形成有机的整体。机电一体化技术应用范围很广，其产品及装置的种类繁多，但都离不开机械本体。例如，机器人和数控机床的本体是机身和床身；指针式电子手表的本体是表壳。因此，机械本体是机电一体化系统必要的组成部分。没有它，系统的各部件就支离破碎，无法构成具有特定功能的机电一体化产品或装置。

2. 动力系统

按照系统控制要求，动力系统为机电一体化产品提供能量和动力功能，驱动执行机构工作以完成预定的主功能。动力系统包括电、液、气等多种动力源。

3. 传感与检测系统

传感与检测系统将机电一体化产品在运行过程中所需要的自身和外界环境的各种参数及状态转换成可以测定的物理量,同时利用检测系统的功能对这些物理量进行测定,为机电一体化产品提供运行控制所需的各种信息。传感与检测系统的功能一般由传感器或仪表来实现,对其要求是体积小、便于安装与连接、检测精度高、抗干扰等。

4. 信息处理及控制系统

根据机电一体化产品的功能和性能要求,信息处理及控制系统接收传感与检测系统反馈的信息,并对其进行相应的处理、运算和决策,以对产品的运行施以按照要求的控制,实现控制功能。机电一体化产品中,信息处理及控制系统主要是由计算机的软件和硬件以及相应的接口所组成。机电一体化产品要求信息处理速度快, A/D(模/数)和 D/A(数/模)转换及分时处理时的输入/输出可靠,系统的抗干扰能力强。

5. 执行装置

执行装置在控制信息的作用下完成要求的动作,实现产品的主功能。执行装置一般是运动部件,常采用机械、电、液、气动等机构。执行装置因机电一体化产品的种类和作业对象不同而有较大的差异。执行装置是实现产品目的功能的直接执行者,其性能好决定着整个产品的性能,因而是机电一体化产品中重要的组成部分。

机电一体化产品的五个组成部分在工作时相互协调,共同完成所规定的目的功能。在结构上,各组成部分通过各种接口及其相应的软件有机地结合在一起,构成一个内部匹配合理、外部效能最佳的完整产品。

实际上,机电一体化系统是比较复杂的,有时某些构成要素是复合在一起的。应该指出的是,构成机电一体化系统的几个部分并不是并列的。

首先,机械部分是主体,这不仅是由于机械本体是系统重要的组成部分,而且系统的主要功能必须由机械装置来完成,否则就不能称其为机电一体化产品。例如,电子计算机、非指针式电子表等,其主要功能由电子器件和电路等完成,机械已退居次要地位,这类产品应归属于电子产品,而不是机电一体化产品。因此,机械系统是实现机电一体化产品功能的基础,因而对其提出了更高的要求,需在结构、材料、工艺加工及几何尺寸等方面满足机电一体化产品高效、可靠、节能、多功能、小型轻量 and 美观等要求。除一般性的机械强度、刚度、精度、体积和重量等指标外,机械系统技术开发的重点是模块化、标准化和系列化,以便于机械系统的快速组合和更换。

其次,机电一体化的核心是电子技术,电子技术包括微电子技术和电力电子技

术,但重点是微电子技术,特别是微型计算机(简称微机)或微处理器。机电一体化需要多种新技术的结合,但首要的是微电子技术,不和微电子结合的机电产品不能称为机电一体化产品。例如,非数控机床,一般均有电动机驱动,但它不是机电一体化产品。除了微电子技术以外,在机电一体化产品中,其他技术则根据需要进行结合,可以是一种,也可以是多种。

综上所述,可以概括出以下结论:

- (1) 机电一体化是一种以产品和过程为基础的技术;
- (2) 机电一体化以机械为主体;
- (3) 机电一体化以微电子技术,特别是计算机控制技术为核心;
- (4) 机电一体化将工业产品和过程都作为一个完整的系统看待,因此强调各种技术的协同和集成,不是将各个单元或部件简单拼凑到一起;
- (5) 机电一体化贯穿于设计和制造的全过程中。

1.2.3 机电一体化产品和系统的分类

机电一体化产品和系统种类繁多,按其用途分类如图 1-8 所示;按机械和电子的功能和含量分类有以机械装置为主体的机械电子产品和以电子装置为主体的机械电子产品;按机电结合的程度分类有功能附加型、功能替代型和机电融合型。

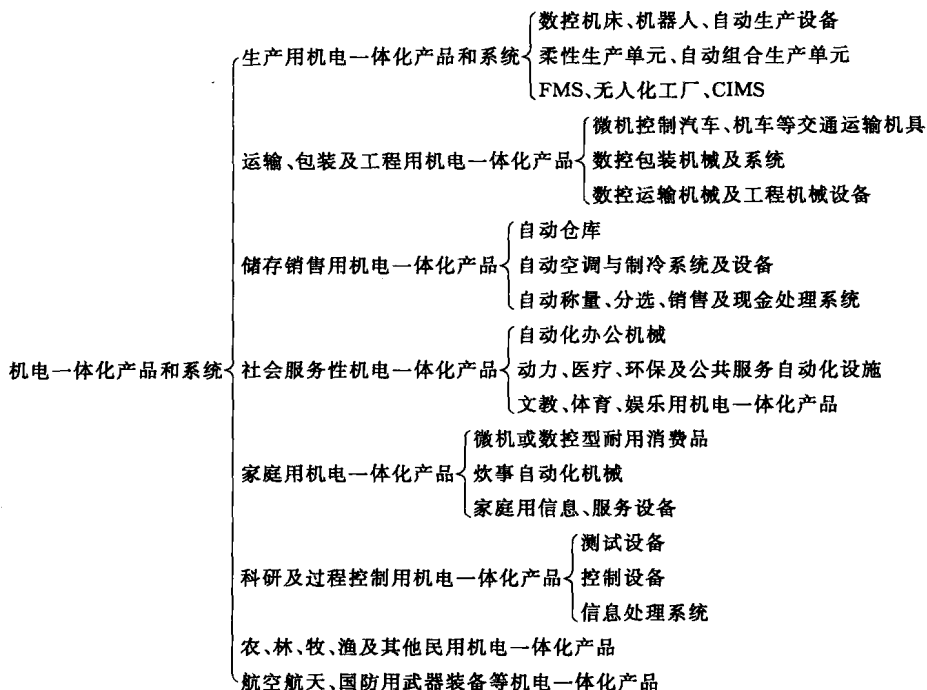


图 1-8 机电一体化产品和系统分类