



高等学校机械设计制造及其自动化国家特色专业规划教材

# 机电一体化系统设计

张发军 编

JIDIAN YITIHUA XITONG SHEJI



华中科技大学出版社  
<http://www.hustp.com>

013071555

高等学校机械设计制造及其自动化国家特色专业规划教材

# 机电一体化 系统设计

JIDIAN YITIHUA XITONG SHEJI

张发军 编



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

## 内 容 简 介

本书是为了适应高校机械类各专业及其他相近专业的“机电一体化系统设计”教学要求而编写。编者在叙述上力求全面体现本课程的机与电主题内容,在内容安排上既注意了基础理论、基本概念的系统性阐述,同时也考虑了工程设计人员的实际需要,在介绍各种设计方法时尽可能具体实用。本书共分为七章,主要内容包括:机电一体化技术导论,机电一体化机械系统设计理论,可编程控制器设计,单片机 AT89C(S)5X 系统技术,机电一体化系统的传感与检测,机电一体化系统的伺服与控制,机电一体化系统设计应用实例。

本书图文并茂、深浅适宜,不仅可作为大学本专科相关专业的专业课教材,也可供从事机电一体化系统设计与制造的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

机电一体化系统设计/张发军 编. —武汉:华中科技大学出版社,2013.9  
ISBN 978-7-5609-9027-9

I. 机… II. 张… III. 机电一体化-系统设计-高等学校-教材 IV. TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 114030 号

机电一体化系统设计

张发军 编

策划编辑:徐正达

责任编辑:周忠强

封面设计:潘 群

责任校对:朱 霞

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)81321915

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:华中理工大学印刷厂

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:10 插页:2

字 数:207千字

版 次:2013年9月第1版第1次印刷

定 价:18.80元



华中出版

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换  
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务  
版权所有 侵权必究

## 序 言

当前,我国机械专业人才培养面临社会需求旺盛的良好机遇和办学质量亟待提高的重大挑战。抓住机遇,迎接挑战,不断提高办学水平,形成鲜明的办学特色,获得社会认同,这是我们义不容辞的责任。

三峡大学机械设计制造及其自动化专业作为国家特色专业建设点,以培养高素质、强能力、应用型的高级工程技术人才为目标,经过长期建设和探索,已形成了具有水电特色、服务行业和地方经济的办学模式。在前期课程体系和教学内容改革的基础上,推进教材建设,编写出一套适合于该专业的系列特色教材,是非常及时的,也是完全必要的。

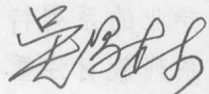
系列教材注重教学内容的科学性与工程性结合,在选材上融入了大量工程应用实例,充分体现与专业相关产业和领域的新发展和新技术,促进高等学校人才培养工作与社会需求的紧密联系。系列教材形成的主要特点,可用“三性”来表达。一是“特殊性”,这个“特殊性”与其他系列教材的不同在于其突出了水电行业特色,其不仅涉及测试技术、控制工程、制造技术基础、机械创新设计等通用基础课程教材,还结合水电行业需求设置了起重机械、金属结构设计、专业英语等专业特色课程教材,为面向行业经济和地方经济培养人才奠定了基础。二是“科学性”,体现在两个方面:其一体现在课程体系层次,适应削减课内学时的教学改革要求,简化推导精练内容;其二体现在学科内容层次,重视学术研究向教育教学的转化,教材的应用部分多选自近十年来的科研成果。三是“工程性”,凸显工程人才培养的功能,一些课程结合专业增加了实验、实践内容,以强化学生实践动手能力的培养;还根据现代工程技术发展现状,突出了计算机和信息技术与本专业的结合。

我相信,通过该系列教材的教学实践,可使本专业的学生较为充分地掌握专业基础理论和专业知识,掌握机械工程领域的新技术并了解其发展趋势,在工程应用和计算机应用能力培养方面形成优势,有利于培养学生的综合素质和创新能力。

当然,任何事情不能一蹴而就。该系列教材也有待于在教学实践中不断锤炼和修改。良好的开端等于成功的一半。我祝愿在作者与读者的共同努力下,该系列教材在特色专业建设工程中能体现专业教学改革的进展,从而得到不断的完善和提高,对机械专业人才培养质量的提高起到积极的促进作用。

谨此为序。

教育部高等学校机械学科教学指导委员会委员、  
机械基础教学指导分委员会副主任  
全国工程认证专家委员会机械类专业认证分委员会副秘书长  
第二届国家级教学名师奖获得者  
华中科技大学机械学院教授,博士生导师

  
2011-7-21

## 前 言

当前,一个机械工程技术人员若仅有机械学方面的知识,将越来越难以胜任本职工作,技术的发展要求机械工程技术人员必须不断地了解和掌握足够的机电一体化方面的综合知识。因此,培养和培训尽可能多的机电一体化技术人员,以满足日益增长的经济需求,将是今后长期和大量的工作。适时推出侧重应用的、综合全面的机电一体化技术基础理论和实例的科技书,以满足目前社会发展需求,可以说是当务之急,本书编写的目的就在于此。

机电一体化系统的优势在于从系统、整体的角度出发,将各相关技术协调综合运用而取得整体优化效果,因此,在机电一体化系统设计开发的过程中,特别强调技术融合和学科交叉的作用。面对机械工业向机电一体化方向的快速发展,作为培养这方面高级技术人才的高等院校,就不仅限于向学生分散地介绍机械技术、微电子技术、计算机技术等机电一体化共性基础知识,还应在此基础上,从系统设计的角度出发,通过“机电一体化系统设计”专业课教学及相应实践教学环节,使学生真正了解和掌握机电一体化的实质及其系统设计的理论和方法。

在编写本书的过程中,硕士研究生刘中、周长、雷祎、朱鑫、熊晓晨等协助编者做了大量的工作,在此深表感谢。

由于编者水平和经验有限,加之时间仓促,书中定有错误之处,敬请读者批评指正。

张发军

2012年6月于三峡大学

# 目 录

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	(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	(5)
1.3 机电一体化系统的分类	(7)
1.4 机电一体化的作用与应用	(8)
1.4.1 生产能力和工作质量提高	(8)
1.4.2 使用安全性和可靠性提高	(8)
1.4.3 调整和维护方便,使用性能改善	(8)
1.4.4 具有复合功能,适用面广	(8)
1.4.5 改善劳动条件,有利于自动化生产	(9)
1.4.6 节约能源,减少耗材	(9)
1.5 机电一体化的理论基础与关键技术	(10)
1.5.1 理论基础	(10)
1.5.2 关键技术	(10)
1.6 机电一体化的发展前景	(13)
1.6.1 机电一体化的发展状况	(13)
1.6.2 机电一体化的发展趋势	(13)
思考题	(14)
第 2 章 机电一体化机械系统设计理论	(16)
2.1 机械系统设计概述	(16)
2.1.1 机电一体化对机械系统的基本要求	(16)
2.1.2 机械系统的组成	(17)
2.1.3 机械系统的设计思想	(17)
2.2 机械传动设计的原则	(18)
2.2.1 机电一体化系统对机械传动的要求	(18)
2.2.2 总传动比的确定	(18)
2.2.3 传动链的级数和各级传动比的分配	(19)

2.3	机械系统性能分析	(24)
2.3.1	数学模型的建立	(24)
2.3.2	机械性能参数对系统性能的影响	(29)
2.3.3	传动间隙对系统性能的影响	(32)
2.4	机械系统的运动控制	(33)
2.4.1	机械传动系统的动力学原理	(33)
2.4.2	机械系统的制动控制	(34)
2.4.3	机械系统的加速控制	(37)
	思考题	(39)
第3章	可编程控制器设计	(40)
3.1	PLC的硬件结构及基本配置	(40)
3.1.1	CPU的构成	(41)
3.1.2	I/O模块	(41)
3.1.3	电源模块	(41)
3.1.4	底板或机架	(42)
3.1.5	PLC的外部设备	(42)
3.1.6	PLC的通信联网	(42)
3.2	PLC的软件组成	(42)
3.3	PLC的工作原理	(47)
3.3.1	输入采样阶段	(48)
3.3.2	程序执行阶段	(49)
3.3.3	输出刷新阶段	(49)
3.3.4	PLC在输入/输出的处理方面必须遵循的原则	(49)
3.4	PLC的编程语言	(49)
3.4.1	梯形图编程	(49)
3.4.2	功能图编程	(50)
3.4.3	布尔逻辑编程	(51)
3.5	PLC控制与微型计算机控制、继电器控制的区别	(51)
3.5.1	PLC控制与微机控制的区别	(51)
3.5.2	PLC控制与继电器控制的区别	(52)
3.6	PLC的型号说明	(52)
3.7	PLC的仿真软件说明	(53)
3.7.1	几种PLC仿真软件	(53)
3.7.2	WinCC简介	(54)



3.7.3	WinCC Flexible	(55)
3.7.4	S系列西门子 PLC	(55)
	思考题	(58)
<b>第4章</b>	<b>单片机 AT89C(S)5X 系统技术</b>	<b>(59)</b>
4.1	AT89C51 单片机的结构	(59)
4.1.1	中央处理器	(59)
4.1.2	存储器	(61)
4.1.3	I/O 端口	(62)
4.1.4	定时器/计数器	(62)
4.1.5	中断系统	(62)
4.1.6	内部总线	(63)
4.2	AT89C51 单片机引脚及其功能	(63)
4.2.1	I/O 端口功能	(63)
4.2.2	电源线	(66)
4.2.3	外接晶体引脚	(66)
4.2.4	控制线	(67)
4.3	AT89C51 存储器	(67)
4.3.1	程序存储器	(67)
4.3.2	数据存储器	(67)
4.4	AT89C51 单片机工作方式	(70)
4.4.1	复位方式	(70)
4.4.2	程序执行方式	(70)
4.4.3	省电方式	(71)
4.4.4	EPROM 编程和校验方式	(71)
4.5	AT89C51 时钟电路与时序	(73)
4.5.1	振荡器与时钟电路	(73)
4.5.2	时序	(74)
	思考题	(75)
<b>第5章</b>	<b>机电一体化系统的传感与检测</b>	<b>(76)</b>
5.1	检测系统的功用与特性	(76)
5.1.1	检测系统的基本功能	(76)
5.1.2	检测系统的基本特性	(76)
5.2	常用传感器	(78)
5.2.1	线位移传感器	(79)

5.2.2	角位移传感器及转速传感器	(81)
5.2.3	加速度与速度传感器	(83)
5.2.4	力传感器	(85)
5.2.5	接近传感器与距离传感器	(85)
5.2.6	温度、流量传感器	(87)
5.3	检测系统组成及检测原理	(89)
5.3.1	模拟量检测系统的组成及工作原理	(89)
5.3.2	数字信号检测系统(脉冲信号的检测系统)	(94)
5.3.3	通用数据采集卡	(95)
5.4	数字信号的预处理	(99)
5.4.1	传感器的非线性补偿	(100)
5.4.2	零位误差和增益误差的补偿	(101)
	思考题	(102)
第6章	机电一体化系统的伺服与控制	(103)
6.1	伺服系统的基本结构形式及特点	(103)
6.1.1	伺服系统的基本概念	(103)
6.1.2	伺服系统的基本要求	(103)
6.1.3	伺服系统的基本结构形式	(105)
6.1.4	(广义)伺服系统的分类	(106)
6.2	伺服系统的执行元件	(106)
6.2.1	执行元件的种类及特点	(106)
6.2.2	直流伺服电动机	(107)
6.2.3	交流伺服电动机	(110)
6.2.4	步进电动机	(111)
6.2.5	其他种类执行元件	(113)
6.3	执行元件的控制与驱动	(114)
6.3.1	步进电动机的控制与驱动	(114)
6.3.2	直流伺服电动机的控制与驱动	(116)
6.4	伺服系统设计	(118)
6.4.1	伺服系统设计方案	(118)
6.4.2	机械系统设计计算	(121)
6.4.3	系统误差分析	(124)
	思考题	(126)
第7章	机电一体化系统设计应用实例	(127)

7.1	机电一体化系统设计要点	(127)
7.1.1	基本开发思路	(127)
7.1.2	用户要求	(128)
7.1.3	功能要素和功能模块	(129)
7.1.4	接口设计要点	(129)
7.1.5	系统整体方案拟定和评价	(130)
7.1.6	制作与调试	(131)
7.2	电动机变频控制应用技术	(131)
7.2.1	常用分类	(131)
7.2.2	工作原理	(131)
7.2.3	调节方法	(134)
7.3	视觉传感式变量施药机器人	(135)
7.3.1	系统的组成	(135)
7.3.2	工作原理	(136)
7.3.3	设计模块	(137)
7.4	步进电动机单片机控制	(137)
7.4.1	步进电动机的工作原理	(138)
7.4.2	基于 AT89C2051 步进电动机驱动器系统电路原理	(139)
7.4.3	软件设计	(140)
7.5	基于单片机的流水灯控制	(143)
7.5.1	基本功能	(143)
7.5.2	硬件设计	(143)
7.5.3	硬件最小系统	(143)
7.5.4	软件设计	(146)
7.6	空气压缩机变频控制系统	(148)
7.6.1	技术要求	(148)
7.6.2	变频控制系统方案设计	(148)
7.6.3	系统电路图及控制方式	(148)
7.6.4	系统设备配置清单	(150)
7.6.5	控制系统数据采集功能	(150)
7.6.6	控制系统的监控和保护功能	(151)
	思考题	(151)
	参考文献	(152)

# 第1章 机电一体化技术导论

**【本章导读】** 机电一体化作为一门综合性学科,涉及的知识领域非常广泛。本章首先介绍机电一体化的概念、发展过程及其与机械电气化的根本区别,进而阐释其内涵和本质,并通过典型实例归纳出其优越性。其次,通过机电一体化系统与人体各部位的对比,剖析系统的构成,从而指出分析机电一体化系统的基本途径。再次,重点介绍机电一体化的理论基础与关键技术,明确系统论、信息论、控制论是机电一体化技术的理论基础和方法论;提出发展机电一体化技术共同面临的关键技术,并分析它们在系统中所起的作用及其发展对机电一体化技术的影响等。最后,通过回顾机电一体化技术的发展历程,展望机电一体化技术的主要发展方向和趋势。

## 1.1 概述

机电一体化又称机械电子学,英文称为 Mechatronics,它是由英文机械学 Mechanics 的前半部分与电子学 Electronics 的后半部分组合而成。机电一体化最早出现在 1971 年日本《机械设计》杂志的副刊上,随着机电一体化技术的快速发展,机电一体化的概念被人们广泛接受和普遍使用。1996 年出版的《WEBSTER 大词典》收录了这个日本造的英文单词,这不仅意味着“Mechatronics”这个单词得到了世界各国学术界和企业界的认可,而且还意味着“机电一体化”的哲理和思想已为世人所接受。

那么,什么是机电一体化呢?

到目前为止,对于机电一体化这一概念的内涵,国内外学术界还没有一个完全统一的表述。较普遍的提法是日本机械振兴协会经济研究所于 1981 年的解释:“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”。机电一体化是以机械学、电子学和信息学为主的多门技术学科在机电产品发展过程中相互交叉、相互渗透而形成的一门新兴边缘性技术学科。这里面包含了以下三重含义。首先,机电一体化是机械学、电子学与信息学等学科相互融合而形成的学科。图 1-1 形象地表达了机电一体化与机械学、电子学和信息学之间的相互关系。其次,机电一体化是一个发展中的概念,早期的机电一体化就像其字面所表述的那样,主要强调机械与电子的结合,即将电子技术“融入”机械技术中而形成新的技术与产品。随着机电一体化技术的发展,以计算机技术、通信技术和控制技术为特征的信息技术(即所谓的“3C”技术:Computer、Communication 和 Control Technology)“渗透”到机械技术中,丰富了

机电一体化的含义,现代的机电一体化不仅仅指机械、电子与信息技术的结合,还包括光(光学)机电一体化、机电气(气压)一体化、机电液(液压)一体化、机电仪(仪器仪表)一体化等。最后,机电一体化表达了技术之间相互结合的学术思想,强调各种技术在机电产品中的相互协调,以达到系统总体最优。

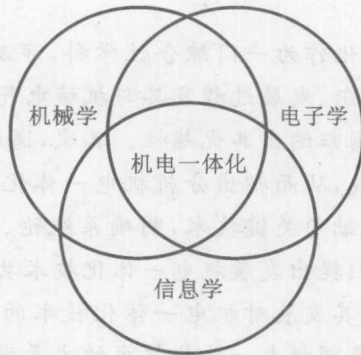


图 1-1 机电一体化与其他学科的关系

因此,机电一体化是多种技术学科有机结合的产物,而不是它们简单的叠加。机电一体化与机械电气化的主要区别有:①电气机械在设计过程中不考虑或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电气机械中,装置所需的控制是基于电磁学原理的各种电器来实现的,属强电范畴,其主要支撑技术是电工技术。

机械工程技术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,机电一体化产品不仅是人的肢体的延伸,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。

从概念的外延来看,机电一体化包括机电一体化技术和机电一体化产品两个方面。机电一体化技术是从系统的观点出发,将机械、电子和信息等有关技术有机结合起来,以实现系统或产品整体最优的综合性技术。机电一体化技术主要包括技术原理和使机电一体化产品(或系统)得以实现、使用和发展发展的技术。机电一体化技术是一个技术群(族)的总称,包括检测传感技术、信息处理技术、伺服驱动技术、自动控制技术、机械技术及系统总体技术等。

机电一体化产品有时也称为机电一体化系统,它们是两个相近的概念,通常机电一体化产品指独立存在的机电结合产品,而机电一体化系统主要是指依附于主产品的部件系统,这样的系统实际上也是机电一体化产品。机电一体化产品是由机械系统(或部件)与电子系统(或部件)及信息处理单元(硬件和软件)有机结合且赋予了新功能和性能的高科技产品。由于在机械本体中“融入”了电子技术和信息技术,与纯粹的机械产品相比,机电一体化产品的性能得到了根本的提高,具有满足人们使用

要求的最佳功能。

现实生活中的机电一体化产品比比皆是。我们日常生活中使用的全自动洗衣机、空调及全自动照相机,都是典型的机电一体化产品;在机械制造领域中广泛使用的各种数控机床、工业机器人、三坐标测量仪及全自动仓储,也是典型的机电一体化产品;而汽车更是机电一体化技术成功应用的典范,汽车上成功应用和正在开发的机电一体化系统达数十种之多,特别是发动机电子控制系统、汽车防抱死制动系统、全主动和半主动悬架等机电一体化系统在汽车上的应用,使得现代汽车的乘坐舒适性、行驶安全性及环保性能都得到了很大的改善;在农业工程领域,机电一体化技术也在一定范围内得到了应用,如拖拉机自动驾驶系统、悬挂式农具的自动调节系统、联合收获机工作部件(如脱粒清选装置)的监控系统、温室环境自动控制系统等。如今,机电一体化已从原来以机械为主的领域拓展到汽车、电站、仪表、化工、通信、冶金等领域。而且机电一体化产品的概念不再局限在某一具体产品的范围,如数控机床、机器人等,现在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的大系统,如柔性制造系统(FMS)、计算机集成制造系统(CIMS)及各种工业过程控制系统等。

## 1.2 机电一体化系统的基本组成

### 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问题外,还要解决信息流的问题。如图 1-2 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 1-2 机电一体化系统的主功能

机电一体化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、传递和存储。

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、传真机及各种办公机械等。

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 1-3 所示的其他内部功能,即动力功能、检测功能、控制功能、构造功能。动力功能是向系统提供动力、让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,实施目的功能。而构造功能则是使构成系统的子系统及元、部件维持所设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(如废弃物等)。例如汽车的废气和噪声对外部环境影响,从系统设计开始就应予以考虑。

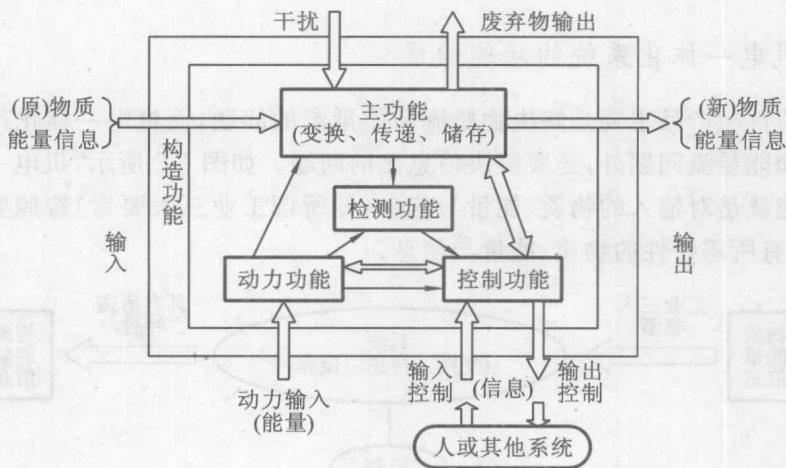


图 1-3 系统的五种内部功能

图 1-4 所示为 CNC 机床的功能原理构成实例。由于未指明主功能的加工机构,它代表了具有相同主功能及控制功能的一大类型的机电一体化系统,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,由于主功能的具体加工机构不同,其他功能的具体装置也会有差别,但其本质是数控加工机床。

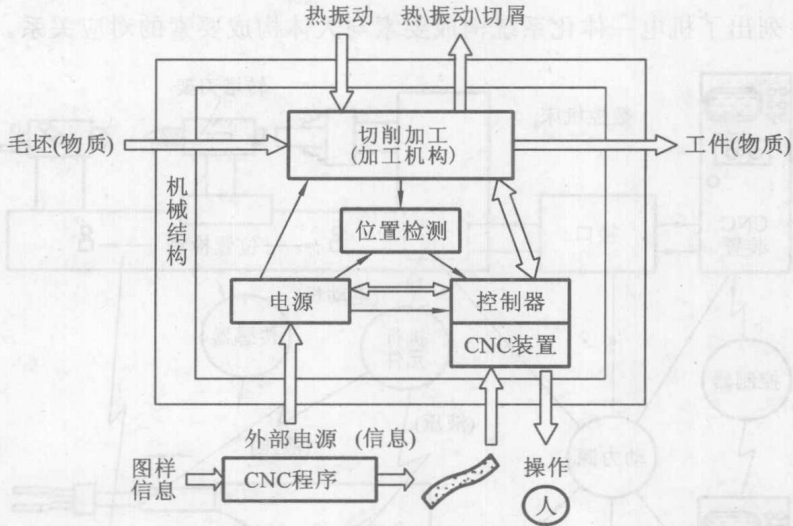


图 1-4 CNC 机床的功能原理构成实例

### 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。如图 1-5 (a)所示,构成人体的五大要素分别是头脑、感官(眼、耳、鼻、舌、皮肤)、四肢、内脏及躯干。相应的功能如图 1-5 (b)所示,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;头脑处理各种信息并对其他要素实施控制;感官获取外界信息;四肢执行动作;躯干的功能是把人体各要素有机地联系为一体。通过类比就可发现,机电一体化系统内部的五大功能与人体的上述功能几乎是一样的,而实现各功能的相

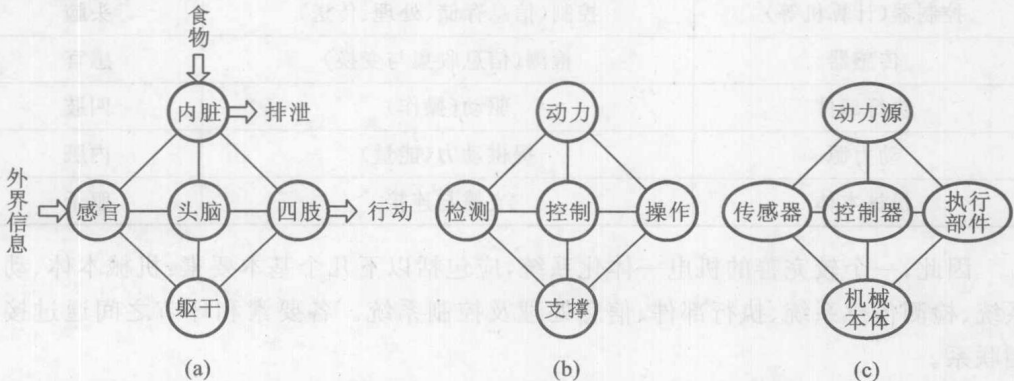


图 1-5 组成人体与机电一体化系统的对应要素及相应功能关系

(a) 人体系统; (b) 人体系统的功能; (c) 机电一体化系统



应构成要素如图 1-5(c)所示。机电一体化系统五大要素实例如图 1-6 所示。

表 1-1 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。

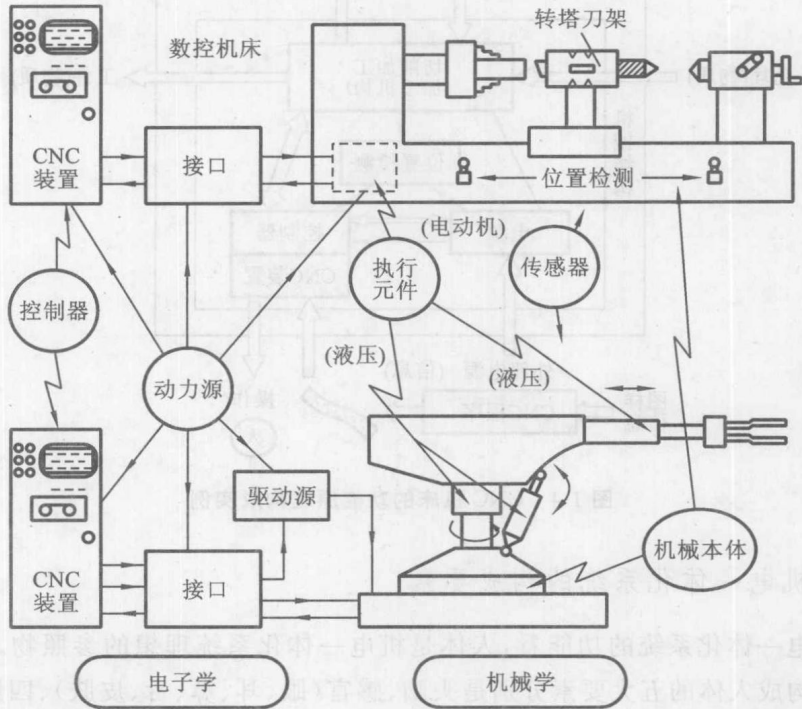


图 1-6 机电一体化系统五大要素实例

表 1-1 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)	头脑
传感器	检测(信息收集与变换)	感官
执行部件	驱动(操作)	四肢
动力源	提供动力(能量)	内脏
机械本体	支撑与连接	躯干

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、检测传感系统、执行部件、信息处理及控制系统。各要素和环节之间通过接口相联系。

机电一体化系统中机械部分是主体，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。如电子计算机、非指针式电子表等，其主要功能已由电子器件和电路等完成，