



中国科学院机械工程系列规划教材

机电一体化技术导论

刘杰 宋伟刚 李允公 编著



科学出版社
www.sciencep.com

中国科学院机械工程系列规划教材

机电一体化技术导论

刘 杰 宋伟刚 李允公 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

机电一体化是一个交叉学科,所涉及的内容十分广泛,包括机械技术、电子技术、计算机技术及其有机结合。本书共分8章,主要内容有:机电一体化的分类、相关技术及设计方法;组成机电一体化系统的典型子系统;机电一体化系统的传统控制策略、现代控制策略和智能控制策略;机器人技术;数控技术;微系统技术;故障诊断技术和激光加工技术等。本书力求使读者对机电一体化技术有一个比较全面的了解,开阔视野,扩大知识面。书中介绍了某些机电一体化研究方向的前沿和热点,可为研究生选题提供一定的参考。

本书可作为高等院校相关专业高年级本科生及研究生的教材,也可供从事机电一体化设计的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机电一体化技术导论/刘杰,宋伟刚,李允公编著. —北京:科学出版社, 2006.

(中国科学院机械工程系列规划教材)

ISBN 7-03-017987-0

I. 机… II. ①刘…②宋…③李… III. 机电一体化-研究生-教材
IV. TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 104386 号

责任编辑:段博原 贾瑞娜 / 责任校对:张小霞

责任印制:张克忠 / 封面设计:陈 敬

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>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006 年 10 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2006 年 10 月第一次印刷 印张: 15 3/4

印数: 1—3 000

字数: 306 000

定价: 25.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈路通〉)

中国科学院机械工程系列规划教材

编写委员会

顾 问：闻邦椿

主 编：谢里阳

执行主编：陈良玉

委 员：（以姓氏笔画为序）

马星国 王玉良 王世杰 王淑仁 巩云鹏

巩亚东 刘 杰 孙志礼 李为民 李树军

李景春 宋锦春 柳洪义 黄秋波

序

装备制造业是我国国民经济中的重要基础工业。机械装备为各类产品的物化提供平台和载体,机械装备的技术水平是衡量社会生产力水平的重要标志,机械科学、机械工程技术和机械工业的发展水平对经济建设和社会发展的作用都至关重要。

目前,世界机械工业产值达到了总工业产值的 $1/3$ 以上。我国制造业增加值在国内生产总值所占的比重高达 40% ,我国的财政收入一半也来自制造业。随着我国加入 WTO,经济越来越融入到全球经济体系中,我国的制造业在世界制造业中的地位越来越重要,并正从制造大国迈向制造强国。至少在本世纪的前 20 年,制造业将仍然是我国国民经济增长的主要来源,因此需要大批综合素质高、能力强的机械类专业人才。

另外,我国高等教育从精英型教育阶段进入了大众型教育阶段,实现了高等教育的历史性的跨越式发展,技术的进步和社会的发展也对高等院校机械工程教育的人才培养提出了新的要求。

为此,中国科学院教材建设专家委员会和科学出版社组织我国机械工程领域的中国科学院院士、教育部教学指导委员会成员、教学名师以及经验丰富的专家教授组成编委会,共同组织编写了这套《中国科学院机械工程系列规划教材》,以适应我国高等机械工程教育事业的发展,更好地实现机械工程类专业人才的培养目标,在规模上、素质上更好地满足我国机械科学技术和机械工业发展的需要,为建设创新型国家做出贡献。

本套教材主要有以下几方面的特点:

1. 适应多层次的需要。本套教材依据教育部相关教学指导委员会制定的最新专业规范和机械基础课程最新的教学基本要求,同时吸取不同层次学校教师的意见,进行了教材内容的编排与优化,能够满足各类型高校学生的培养目标。

2. 结构体系完备。各门课程的知识之间相互衔接,以便学生完整掌握学科基本概念、基本理论,了解学科整体发展趋势。本套教材除主教材外,还配有辅导书、多媒体课件、习题集及网络课程等。

3. 作者经验丰富。参加本套教材编写的人员不少来自相关国家重点学科、国家机械教学基地的院校,有些还是国家级、省部级教学成果奖完成人,国家级、省级精品课程建设负责人以及相关院校的骨干教师。

4. 理论与实际相结合,加强实践教学。在达到掌握基本理论、基本知识、

基本技能的教学要求前提下,注重例题、设计实践和实验教学,着力于学生分析问题能力、创新能力和实际动手能力的培养。

另外,为了保证本套教材的质量,编委会聘请国内知名的同行专家对教材进行了审定。

我们还将根据机械科学与工程学科发展的战略要求,对本套教材不断补充、更新,以保持本套教材的系统性、先进性和适用性。

我们热忱欢迎全国同行以及关注机械科学与工程教育、教学及教材建设的广大有识之士对我们的工作提出宝贵意见和建议,一起为我国机械工程教育的发展而努力。

中国科学院院士

A stylized, bold Chinese signature in black ink, reading '颜邦强' (Yan Bangqiang).

2006年5月

前 言

机电一体化技术是现代科学技术发展的必然结果。大规模和超大规模集成电路的出现,特别是微型电子计算机技术的空前发展,促进了机械技术和电子技术的相互交叉和相互渗透,并使机械技术和电子技术在系统论、信息论和控制论的基础上有机地结合起来,形成今天的机电一体化技术。这极大地提高了机电产品在国际市场上的竞争能力,并受到世界各发达国家的高度重视;也使生产系统柔性化,机电产品智能化,并从根本上改变了生产(特别是机械制造业)面貌,为人类带来了巨大的经济效益。

为了深入研究机电一体化的原理,发展机电一体化的技术基础,加速机电一体化专门人才的培养,近年来国内外各高等院校纷纷成立了相应的专业,把机电一体化原理、技术及设计方法纳入教学计划并进行研究。由于机电一体化是一个交叉学科,所涉及的内容十分广泛,包括机械技术、电子技术、计算机技术、液体传动与控制技术、机器人技术、数控技术、微系统技术、控制技术、故障诊断技术、现代机械设计与制造技术,等等。为了本科生和研究生的教学需要,我们编写了本书,力求使读者对机电一体化技术有一个比较全面的了解,开阔视野,扩大知识面。书中介绍了某些机电一体化研究方向的前沿和热点,可为研究生选题提供一定的参考。

本书共分8章,第1章介绍了机电一体化的概念、意义、内容、效果、范围以及发展概况,并介绍了机电一体化产品设计的基本方法。第2章对机电一体化系统的基本组成部分机械系统(机构)、信息处理系统(计算机)、传感检测系统(传感器)、执行元件系统(如电动机)等分别进行了介绍。第3章介绍了机电一体化系统的控制策略,其中包括传统控制策略、现代控制策略和智能控制策略。第4章和第5章针对机电一体化的两类典型设备机器人和数控设备(机床)分别进行了介绍。其中包括机械结构、控制系统的硬件和软件。第6章介绍了微系统技术,包括微机电系统的组成、原理及应用。第7章从信息的获取、信号分析与处理、模式识别的理论与方法等方面介绍了故障诊断技术的主要内容及典型应用。第8章介绍了激光的原理、激光器的种类以及激光在机电一体化系统中的应用,特别是在机械加工与测量中的应用。东北大学副教授李永强博士、抚顺石油大学邓子龙副教授和东北大学张希雯参加了部分内容的编写工作。

中国科学院院士闻邦椿教授、东北大学博士研究生导师柳洪义教授对本书提出了许多宝贵的意见,在此表示衷心的感谢。我们还要感谢东北大学研究生院对

本书出版所给予的大力支持和资助，感谢东北大学机械工程与自动化学院以及所有关心、支持和帮助过我们的同事和朋友们。

由于作者水平有限，并且所涉及的许多技术还处在不断发展之中，书中可能会有不少不妥和错误，敬请广大读者给予批评指正。

作 者

2005 年 3 月

目 录

序

前言

第 1 章 机电一体化概论	1
1.1 机电一体化概述	1
1.1.1 机电一体化的概念	1
1.1.2 机电一体化系统的构成	2
1.1.3 机电一体化技术的发展	3
1.1.4 机电一体化的意义	7
1.1.5 机电一体化的发展方向	8
1.2 机电一体化技术的分类	9
1.2.1 机电一体化技术分类概述	9
1.2.2 机电产品的机电一体化	10
1.3 机电一体化化的相关技术	11
1.4 机电一体化设计方法	13
1.5 基于微控制器的机电一体化产品的设计开发步骤	16
第 2 章 机电一体化产品的组成	20
2.1 机电一体化产品的控制器	21
2.1.1 单片机与单板机	21
2.1.2 可编程序控制器	23
2.1.3 工业计算机的特点及选择	26
2.1.4 嵌入式系统概述	28
2.2 机电一体化产品中的传感器	31
2.2.1 传感器概述	31
2.2.2 传感器的选用原则及注意事项	33
2.2.3 传感器的测量电路	34
2.2.4 智能传感器	36
2.3 驱动器及其控制	38
2.3.1 驱动器的种类和对装置的基本要求	38
2.3.2 直流伺服系统	43
2.3.3 交流伺服系统	47

2.4 机电一体化的机械传动与执行机构	49
2.4.1 传动机构	49
2.4.2 执行机构	50
2.4.3 机械传动与执行机构举例	53
2.4.4 机械传动与执行机构的发展趋势	58
第3章 机电一体化设备的控制策略	62
3.1 传统控制策略	62
3.1.1 比例-积分-微分 (PID) 控制	62
3.1.2 串级控制	63
3.1.3 纯滞后对象的控制	64
3.1.4 解耦控制	66
3.2 现代控制策略	68
3.2.1 自适应控制	68
3.2.2 变结构控制	69
3.2.3 鲁棒控制	70
3.2.4 预测控制	71
3.3 智能控制策略	72
3.3.1 模糊控制	73
3.3.2 专家控制	73
3.3.3 神经网络控制	74
3.3.4 遗传算法	75
3.4 控制策略的渗透和结合	77
第4章 机器人技术	82
4.1 机器人概述	82
4.1.1 机器人的含义及其组成	82
4.1.2 机器人的分类	84
4.2 机器人的机械系统	85
4.2.1 机器人臂的典型机构	85
4.2.2 机器人手腕结构	86
4.2.3 机器人的手部结构	88
4.2.4 仿生多指灵巧手	90
4.3 机器人的控制系统	92
4.3.1 机器人控制系统的作用及结构	92
4.3.2 位置和力控制系统结构	94
4.3.3 刚性控制	95

4.4 智能机器人	97
4.4.1 智能机器人的含义	97
4.4.2 智能机器人的结构体系	98
4.4.3 作业规划	101
4.4.4 行动规划	102
4.4.5 作业知识的获取	107
4.5 多机器人系统	107
4.5.1 多机器人系统概述	107
4.5.2 几个典型多机器人系统	108
4.5.3 多机器人系统体系结构	109
4.5.4 多机器人的队形问题	110
4.5.5 多机器人系统的信息融合与环境构建	111
4.5.6 多机器人的协调	111
第5章 数控技术	112
5.1 数控技术概述	112
5.1.1 数控机床的基本概念	112
5.1.2 计算机数控装置的工作原理	113
5.1.3 数控机床的分类	114
5.2 数控系统的组成	118
5.2.1 数控机床的组成	118
5.2.2 计算机数控装置的硬件结构	122
5.2.3 计算机数控装置的软件结构	123
5.3 数控机床的进给和主轴控制系统	124
5.4 数控机床的编程	129
5.4.1 数控机床程序编制的概念	129
5.4.2 程序编制	130
5.4.3 自动编程	134
5.5 数控技术的发展趋势	135
第6章 微机电系统技术	138
6.1 微机电系统与微加工技术及应用	138
6.1.1 微机电系统	138
6.1.2 微加工技术	139
6.2 MEMS 的组成	143
6.2.1 微型传感器	143
6.2.2 微型驱动(执行)器	147

6.3	MEMS 力学问题	156
6.3.1	薄膜材料的力学特性	157
6.3.2	微执行器的尺度效应	158
6.3.3	压电执行器的尺度效应	160
6.3.4	SMA 执行器的尺度效应	160
6.3.5	微机械的尺度效应	161
6.4	微机电系统应用举例	163
6.4.1	微型机器人	163
6.4.2	微型飞行器	165
6.4.3	微型反应器	166
第 7 章	液压控制技术	167
7.1	液压控制系统简介	167
7.1.1	液压伺服系统的工作原理	167
7.1.2	液压伺服系统的组成和分类	168
7.1.3	液压伺服系统的特点及应用	169
7.2	液压控制阀	171
7.2.1	滑阀	171
7.2.2	喷嘴挡板阀	173
7.2.3	射流管阀	174
7.2.4	电液伺服阀	175
7.2.5	电液比例阀	176
7.2.6	插装阀	177
7.2.7	叠加阀	179
7.3	液压伺服系统	180
7.3.1	机液伺服系统	180
7.3.2	电液伺服系统	184
7.4	液压系统计算机控制	186
7.4.1	组合机床液动力滑台的液压系统工作原理	186
7.4.2	液压系统的 PLC 控制	187
第 8 章	机械故障诊断技术	189
8.1	机械故障诊断技术概述	189
8.2	机械故障诊断技术的信息获取	190
8.2.1	振动	190
8.2.2	噪声	191
8.2.3	轴心轨迹	192

8.2.4 声发射	193
8.2.5 温度	193
8.2.6 油样	193
8.2.7 时标脉冲	194
8.3 机械故障诊断中的信号分析方法	194
8.3.1 傅里叶分析	194
8.3.2 倒频谱	196
8.3.3 短时傅里叶变换	196
8.3.4 Wigner-Ville 分布	197
8.3.5 小波变换	197
8.3.6 小波包	198
8.3.7 匹配追踪信号分解	199
8.3.8 时间序列分析	199
8.3.9 包络解调分析	200
8.3.10 相关分析	201
8.3.11 高阶累积量和高阶累积量谱	201
8.3.12 经验模态分解	202
8.3.13 盲源分离	203
8.3.14 时域同步平均和阶比分析	203
8.3.15 时域统计特征	203
8.3.16 分形	204
8.4 机械故障诊断中的模式识别	204
8.4.1 模糊理论	204
8.4.2 人工神经网络	205
8.4.3 专家系统	206
8.4.4 粗糙集理论	207
8.4.5 支持向量机	208
8.5 典型机械故障诊断	208
8.5.1 轴系故障诊断	208
8.5.2 滚动轴承故障诊断	210
8.5.3 滑动轴承故障诊断	210
8.5.4 齿轮故障诊断	210
8.6 机械故障诊断技术展望	211
第9章 激光在机电一体化系统中的应用	213
9.1 概述	213

9.1.1	什么是激光	213
9.1.2	激光的物理基础	213
9.1.3	汤斯和肖洛的光激光器理论	214
9.2	激光的基本原理	214
9.2.1	光子的基本性质	214
9.2.2	光的受激辐射基本概念	215
9.2.3	光的受激辐射放大	217
9.3	激光器的种类	218
9.3.1	激光器概述	218
9.3.2	固体激光器	220
9.3.3	气体激光器	223
9.3.4	半导体激光器	225
9.3.5	液体激光器	226
9.4	激光在机械加工技术中的应用	226
9.4.1	激光打孔	227
9.4.2	激光焊接	227
9.4.3	激光切割	228
9.4.4	激光加工内腔技术	229
9.4.5	激光雕刻	229
9.4.6	激光打标	230
9.4.7	激光成型技术	230
9.4.8	激光成型制造	230
9.4.9	激光加工的现状与发展	232
9.5	激光测试技术在机械工程中的应用	233
9.5.1	激光视觉三维测量技术	233
9.5.2	机械振动的激光测量	233
9.5.3	激光层析成像技术	234
9.5.4	激光无损检测	235
9.5.5	激光测试技术的发展	235
参考文献		236

第 1 章 机电一体化概论

1.1 机电一体化概述

1.1.1 机电一体化的概念

机电一体化系统的英文译名“mechatronics”最早于 1971 年在日本《机械设计》副刊特集中提出，它是用英语的 mechanics 的前半部分和 electronics 的后半部分结合在一起构成的新词，到了 1976 年前后被日本各界所接受。对机电一体化的定义，日本、美国、德国并不一致。日本认为是“将机械装置与电子设备以及软件等有机结合而成的系统”；美国认为是“由计算机信息网络协调与控制的，用于完成包括机械力、运动和能量流等多动力学任务的机械和（或）机电部件相互联系的系统”；德国则认为是“包括机械（含液压、气动及微机械）、电工与电子、光学及其他不同技术的组合”。

机械技术是一门古老的学科，它的发展经历了漫长的过程。机械是现代工业的基础，种类繁多、功能各异，国民经济各个部门都离不开机械。不论哪一种机械，从诞生以来都经历了使用—改进—再使用—再改进的不断革新和逐步完善的过程。一般来说，某一种形式的机械都有一定的局限性（一定的适用范围），存在着某些固有的缺点，因而需要人们寻求新的工作原理，发明新型机械。机械的发展是永无止境的，但这种发展却是缓慢的。各种机械发展到今天，单纯从机械角度对它们进行改进是越来越不容易了。

随着科学技术的发展，特别是电子技术的发展，从分离的电子元件到集成电路（IC），到大规模集成电路（LSI）和超大规模集成电路（VLSI），以及微型计算机的出现，电子技术与信息技术相结合并向其他学科渗透。信息技术的主体包括计算技术（computerization）、测量与控制技术（control）和通信技术（communication）（3C 技术）。电子技术与信息技术同机械技术相互交叉、相互渗透，使古老的机械技术焕发了青春。

从机械产品发展到机电一体化产品可划分为 4 个阶段，见图 1-1。第一阶段，产品为纯机械结构。第二阶段，在机械产品上添加电机、开关和其他电气元件形成机电产品。第三阶段，产品集成了电子技术以致软件而变得有“智能”，此外，还可与上级控制和调节系统的信息流和通信流相集成。尽管在此阶段，机械

和电子（同时又作为软件的载体）构成一个功能单元，但它们在空间上是各自分离的。第四阶段，进一步将机械、电子和软件在空间上集成而形成机电一体化产品。机电一体化已不是机械装置与电子装置的简单组合，而是机械、电子、控制、光学、信息技术和计算机技术的有机结合。近年来，微电子机械系统 MEMS (micro-electro-mechanical system) 作为机电一体化的一个发展方向受到了特别的重视和研究。

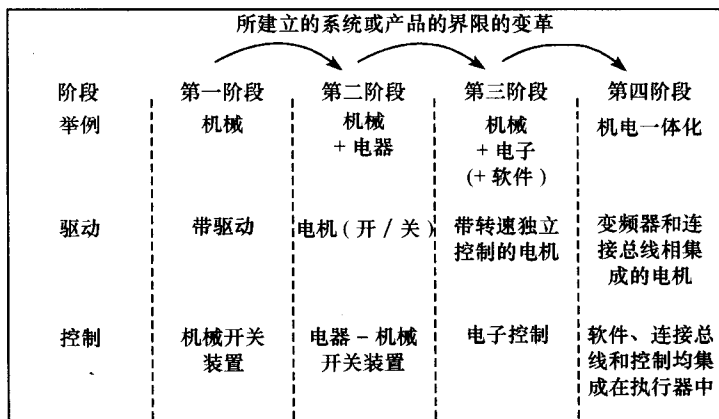


图 1-1 从机械产品到机电一体化产品的 4 个阶段

机电一体化技术的应用在增强了产品在可靠性、系统动态特性、电磁兼容性和柔性等方面的技术优势的同时，在经济方面降低了项目设计、投产、故障诊断和能量消耗等方面的费用，提高了产品的经济效益和竞争能力。

1.1.2 机电一体化系统的构成

对机电一体化系统的构成有三种看法：

1) 五块论

德国 Darmstadt 大学的 Rolf Isermann 提出机电一体化系统是由控制功能、动力功能、传感检测功能、操作功能、结构功能五大功能模块组成。将机电一体化系统通俗地类比于人的大脑、内脏、五官、四肢及躯体。

2) 三环论

丹麦理工大学的 Jacob Baur 等人提出机械、电子、软件三个相关圆环，以此表示了机电一体化系统的组成和相互关联。三环论中电子含义比较含糊；软件是指实现信息处理和控制的程序。

3) 两个系统

挪威科技大学的 Bassam A. Hussein 提出将机电一体化系统划分为物理系统

与控制系统两大子系统。物理系统包括各种驱动装置、执行机构、传感器等；控制系统包括软、硬件。

所谓机电一体化，就是要以系统的、整体的思想来考虑复杂机电系统许多综合性的技术问题。例如，一台多关节机器人，存在着各运动部件之间的力耦合；各运动轴伺服系统的干扰和相互影响；系统动力学与控制规律和运动精度之间的关系；机器人与外围设备的连接；机器人各部分之间的协调运动和机器人防护安全连锁等问题。这些问题即构成了机器人的系统技术问题，必须通过系统工程和系统设计的理论来解决。

系统设计的特点首先是具有综合性，它把系统内部和外部综合起来考虑。要设计一个复杂的系统，首先就要把系统分解成许多分系统，建立各个分系统的数学模型，最后再进行最优设计。系统设计的另一个重要特征是系统的均衡设计，均衡设计就是要恰当地选择元件，以构成性能优异的系统。如果设计者只注重元件设计而忽视优化组合过程，则即使是经过精心筛选的元件也可能组成性能低劣的系统。

机电一体化产品或系统就是通过信息技术将机械技术与电子技术融为一体构成的最佳系统，而不是机械技术与电子技术的简单叠加。机电一体化系统通常由五大要素构成，即动力源、传感器、机械结构、执行元件和电子计算机。机电一体化系统的性能在很大程度上取决于控制系统。控制系统不仅与计算机及其输入输出通道有关，更与所采用的控制技术密切相关。控制技术必须从系统工程的角度出发，探讨那些能够使各功能要素构成最佳组合的柔性技术和一体化技术，有机地和灵活地运用现有的机械技术、电子技术和信息技术，采用系统工程的方法，使整个系统达到最优化，即设计最优化、加工最优化、管理最优化和运行方式最优化。

1.1.3 机电一体化技术的发展

机电一体化技术是现代科学技术发展的必然结果。由于大规模集成电路和超大规模集成电路的出现，特别是微型电子计算机的空前发展，促进了机械技术和电子技术相互交叉和相互渗透，并使机械技术和电子技术在系统论、信息论和控制论的基础上有机地结合起来，形成今天的机电一体化技术。可以说电子技术在机电一体化的形成和发展过程中起到了关键性的作用。

1. 微电子器件的发展

集成电路是机电一体化的基础。近年来，集成电路的集成度越来越高，目前单片集成已达1.4亿个元器件以上，能够用 $0.1\sim 0.25\mu\text{m}$ 工艺制成1000MB的DRAM。

在机电一体化产品中，大量采用专用集成电路ASIC (application specific