



普通高等教育 机电类规划教材

机械电子学

——机电一体化系统中的 数字化检测与控制

● 罗华 傅波 刁燕 等编著

Mechatronics
-the Digital Measurement and
Control in Electro-mechanics system



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



免费电子课件
www.cmpedu.com

普通高等教育机电类规划教材

机械电子学

——机电一体化系统中的数字化检测与控制

罗 华 傅 波 刁 燕 等编著



机械工业出版社

本书以机械电子学总体理论、方法和应用为基础,着重对数字化算法、装置和系统进行深入讲解和分析,并紧密结合国内外最新成果撰写了7章内容,包括绪论、微处理器及系统和软件、数字式测量与传感器、信号的调节与数字化变换、伺服执行器与数字执行器、总线及接口与通信、数字控制系统与模型设计。本书包含了大量的应用实例,并以MIT两轮自平衡机器人作为设计参考贯穿全书首尾。本书内容丰富、条理清晰,且各章均列出了详细的参考文献方便读者扩展学习。

本书可作为机械制造、自动化、电子电气各专业以及化工、制药、航空航天、生物医学工程等非电类相关专业的本科生和研究生教材,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械电子学:机电一体化系统中的数字化检测与控制
/罗华等编著. —北京:机械工业出版社, 2013. 11

普通高等教育机电类规划教材
ISBN 978-7-111-44198-4

I. ①机… II. ①罗… III. ①机电一体化—高等学校—教材 IV. ①TH-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第230739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:吉玲 责任编辑:吉玲 王寅生 卢若薇
版式设计:霍永明 责任校对:张莉娟
封面设计:张静 责任印制:刘岚
北京京丰印刷厂印刷

2014年6月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·14印张·337千字

标准书号:ISBN 978-7-111-44198-4

定价:29.80元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

随着工业技术的不断发展，机械和电子的紧密结合，促使机械产品发生了革命性的变化，老式的纯机械产品在工业系统中已经逐渐消失，取而代之的是向机电一体化方向发展的趋势。“机电一体化”是指在机械的主功能、动力功能、信息与控制功能的基础上，引进电子技术，并将机械装置与电子设备等有机结合起来而成的系统的总称。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，而且使机械工业在技术结构、生产方式及管理體系方面均发生了巨大的变化，极大地提高了生产系统的工作质量。

“机械电子学”是机电一体化技术的重要基础，它是微处理器技术、软件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新型综合型学科，它介绍以微处理器系统为核心的测量和控制系统以及如何将这些能够实现“智能”的电子系统引进到机械产品的设计中去，以便提高产品性能、增强人机交互性并设计出新型的机电一体化系统。随着机械产品的微电子化、智能化和网络化，机械电子学内容已经在机电一体化技术中逐渐占据了主导地位，这也造成了“机械电子学”与“机电一体化”两个概念之间的界限模糊。

“机械电子学”所涉及的知识领域非常广泛，包括微电子技术、传感器技术、大规模集成电路技术、自动控制技术、信号的分析与处理技术、通信与网络技术、软件技术等多个方面。但是机械电子学绝非是这些相关技术的简单组合，其重要的技术特征突出强调了这些技术的相互渗透和有机融合。随着微处理器系统的兴起，机电系统的数字化成为主流发展趋势，其性能更强、使用更方便、应用性和适应性更好、精度和分辨率更高、可靠性更优秀，所以在众多应用领域中逐步取代了以前的模拟式电子电路和测量、控制方法。机电系统的数字化不仅仅是单一芯片或器件的数字化，它还包括了系统中传感器、信号处理、传输通道和接口、执行器等的数字化，具体的表现就是采用数字式工作原理、数字式测量方法、数字式电子元器件、数字电子电路、数字化接口、数字式执行装置等，也包括了对系统中必须的模拟电路和工作模式进行数字化转换。鉴于机械电子学的繁多内容，本书在讲解机械电子学总体理论和应用时，着重于面向当前和未来的数字化系统进行了重点分析和介绍。

航天飞机、人造卫星、制导火箭、数控机床、柔性制造系统、机器人、自动生产线、精密自动监测仪器、汽车、打印机、数码相机、自动洗衣机、医疗仪器等，这些从尖端机械到家用电器都属于典型的有“智慧”的机电一体化产品，从单一产品、单一组件到完整的生产系统，从设计、制造、包装、运输到管理，都需要大量的机械电子学知识，都需要对机械电子学进行深入学习和掌握，从而系统、有序、前瞻性地完成从设计到具体应用的全部过程。

“机械电子学”既是机电类的基础课程，也是一门专业交叉课程，涉及的内容非常广泛，同时也具备了鲜明的时代特点。为了让机械、机电、自动化专业的学生和相关的工程技术人员深入学习“机械电子学”的基础知识、理论和应用技巧，掌握“机械电子学”的设计思想和关键技术，了解国内外机电技术的最新科技和发展动向，设计出优秀的智能化机电产品，我们总结多年来的教学和科研的经验，在广泛收集国内外相关资料的基础上，结合美、德、日相关专著、教材和美国麻省理工学院（MIT）FIRST 机器人小组开发的 MIT 两轮自平衡机器人实例编写了本书，本书可作为“机电一体化”、“机械电子工程”、“机械电子学”等机

电专业课教材和教学参考书籍，其中第3章和第7章更适合在研究生阶段学习。

本书由四川大学制造科学与工程学院罗华、傅波、刁燕主编。其中罗华负责，魏周玲、钟悦、王文亚、晋毅参与完成了第1~3章的编写；傅波负责，吴应东、吴建顺、付玄参与完成了第4、7章的编写；刁燕负责，兰加标、范启忠参与完成了第5、6章的编写，书中“MIT 两轮自平衡机器人”实例部分翻译和内容补充由罗华完成，高山、王海燕、姚景山担任了部分章节内容的编写和全书的校对工作。

本书由电子科技大学自动化学院博士生导师谢永乐教授主审，在此表示特别感谢。

由于编者水平和经验有限，书中难免存在不足和错漏之处，敬请各位读者和专家批评指正。

编 者

目 录

前言

第 1 章 绪论 1

1.1 机械电子学概述 1

1.1.1 机械电子学与机电一体化 1

1.1.2 机械电子学研究的主要内容 2

1.2 机械电子学的应用与发展 4

1.2.1 机械电子学的典型应用 4

1.2.2 机械电子学的发展前景 6

1.3 以微处理器为基础的机械电子产品设计 7

1.3.1 如何开发机械电子产品 7

1.3.2 利用机械电子学进行机电产品系统设计 11

1.3.3 机电系统的数字化 12

1.4 设计实例——MIT 两轮自平衡机器人 14

1.4.1 两轮自平衡机器人的工作原理 14

1.4.2 两轮自平衡机器人的外观和结构 15

1.4.3 两轮自平衡机器人的主要设计步骤 17

参考文献 18

第 2 章 微处理器及系统和软件 19

2.1 微处理器 20

2.1.1 微处理器的内部组成及相关名词解释 21

2.1.2 嵌入式微处理器 24

2.1.3 微控制器 26

2.1.4 数字信号处理器 27

2.1.5 片上系统 27

2.1.6 可编程逻辑器件 28

2.1.7 微处理器编程语言 30

2.2 PLC 32

2.2.1 PLC 的定义和特点 32

2.2.2 PLC 的基本结构和工作原理 34

2.2.3 PLC 的编程语言 36

2.2.4 PLC 控制系统的设计步骤 37

2.3 工业控制计算机 38

2.3.1 工业控制计算机的概念与特点 38

2.3.2 工业控制计算机系统的硬件组成 39

2.3.3 工业控制计算机系统的软件 39

2.4 计算机数控系统 40

2.4.1 计算机数控系统的概念与组成 40

2.4.2 计算机数控系统的软、硬件结构 41

2.5 MIT 两轮自平衡机器人的微处理器 44

参考文献 51

第 3 章 数字式测量与传感器 53

3.1 数字式测量系统的结构与特性 53

3.1.1 数字式测量系统的结构 53

3.1.2 数字式测量的特点与特性 54

3.1.3 数字式测量中的几个重要概念 55

3.2 机械装置中的常用数字传感器 56

3.2.1 光栅传感器 57

3.2.2 激光传感器 62

3.2.3 容栅传感器 67

3.2.4 编码器 69

3.2.5 其他常用传感器 72

3.3 微机电系统传感器 75

3.3.1 MEMS 传感器的原理及特点 75

3.3.2 微型力/力矩传感器 76

3.3.3 微型压力传感器 77

3.3.4 微型陀螺 79

3.3.5 微型加速度计 81

3.3.6 其他常见 MEMS 传感器 82

3.4 图像传感器 83

3.4.1 CCD 与 CMOS 图像传感器 83

3.4.2 线阵 CCD 测量系统的应用 86

3.4.3 图像识别及其应用 88

3.5 MIT 两轮自平衡机器人中应用的传感器	89	5.5 MIT 两轮自平衡机器人中的执行电动机和调速方式	151
参考文献	90	参考文献	153
第4章 信号的调节与数字化变换	92	第6章 总线、接口与通信	154
4.1 前向通道中的信号与特点	92	6.1 数字电路片间总线	155
4.1.1 前向通道的特点	92	6.1.1 I ² C 总线	155
4.1.2 前向通道中的信号与结构	92	6.1.2 SPI 总线	156
4.2 模拟信号的调节和数字化变换	94	6.2 串行通信总线与接口	158
4.2.1 信号的分离	94	6.2.1 串行通信总线简介	158
4.2.2 信号的放大	96	6.2.2 RS-232C 总线	159
4.2.3 模拟信号的数字化变换	99	6.2.3 RS-422 与 RS-485 总线	162
4.2.4 信号的细分	101	6.2.4 通用串行总线	167
4.3 光电隔离和信号传输	106	6.3 工业现场总线	169
4.3.1 信号的光电隔离	106	6.3.1 CAN 总线与接口通信技术	169
4.3.2 电源隔离	106	6.3.2 PROFIBUS 总线与接口通信	174
4.4 数字信号的处理和分析基础	108	6.3.3 工业以太网	176
4.4.1 傅里叶变换与 Z 变换	108	6.4 工业无线通信	179
4.4.2 数字滤波器	112	6.4.1 无线短程网	180
4.4.3 频谱分析	114	6.4.2 无线局域网	182
4.5 后向通道的信号与特点	116	6.5 MIT 两轮自平衡机器人中的总线 和通信	183
4.5.1 后向通道的特点	116	参考文献	185
4.5.2 后向通道的信号与结构	116	第7章 数字控制系统与模型设计	187
4.5.3 后向通道的功率驱动	116	7.1 数字控制系统的组成	187
4.6 MIT 两轮自平衡机器人的传 感器和信号处理	119	7.1.1 硬件部分	187
4.6.1 传感器的信号输入	119	7.1.2 软件部分	188
4.6.2 倾斜角计算原理	120	7.2 数字控制系统的分类及特点	188
4.6.3 信号滤波	120	7.2.1 按控制方式分	188
参考文献	122	7.2.2 按系统的功能分	189
第5章 伺服执行器与数字执行器	124	7.3 数字控制系统的模型设计	193
5.1 执行机构概述	124	7.3.1 数字控制系统的数学描述	193
5.1.1 执行机构的性能要求	124	7.3.2 数字控制系统的模拟化 设计	198
5.1.2 执行机构的种类及原理	124	7.3.3 数字控制系统的离散化设 计方法	202
5.2 直流电动机和交流电动机	126	7.3.4 数字 PID 控制器设计	205
5.2.1 直流电动机	126	7.4 智能控制基础	209
5.2.2 交流电动机	129	7.4.1 模糊控制	209
5.3 伺服执行器	130	7.4.2 人工神经网络	211
5.3.1 步进电动机	130	7.4.3 专家系统	212
5.3.2 直流伺服电动机	136	7.5 MIT 两轮自平衡机器人的平衡 算法	213
5.3.3 交流伺服电动机	141	参考文献	215
5.4 数字执行器	144		
5.4.1 直线电动机	145		
5.4.2 数字液压缸	148		

第 1 章 绪 论

机械电子学 (Mechatronics) 是以机械技术、电子技术、计算机技术、传感器技术、自动化控制技术等为主的多种学科在相互渗透、互相结合的过程中逐渐形成和发展起来的一门新兴技术学科。

1.1 机械电子学概述

1.1.1 机械电子学与机电一体化

机械电子学的英文名称 Mechatronics 是 1969 年由日本 Yaskawa 公司高级工程师 Tetsuro Mori 截取 Mechanics (机械学) 的词首 Mecha, 配合 Electronics (电子学) 的词尾 tronics 组成的新词, 并最早出现在 1971 年日本杂志《机械设计》的副刊上, 目前已在世界范围内得到普遍承认和接受。Mechatronics 这个词在中国也翻译为机电一体化 (Electro-mechanics)、机电整合学 (Mechatronic Integration Engineering)、机械电子工程 (Mechatronic Engineering) 等, 这是由于当前的机电一体化、机械电子学、机械电子工程的研究范围有大量内容相近和交叉, 所以从概念上被国人普遍混用, 甚至英文中也采用了同一个单词。

对于机电一体化, 欧洲经济共同体 (EEC) 的定义是: 机电一体化是指在设计机械产品和生产过程的初始阶段就考虑将精密机械技术和电子控制系统有机地相结合的科学。包括我国在内的相当多国家则认可如下的定义: 机电一体化是指在机械的主功能、动力功能、信息与控制功能上引进了电子技术, 并将机械装置与电子设备等进行有机结合而成系统的总称。对于机械电子学, 美国机械工程师协会 (ASME) 则认为是由计算机信息网络协调与控制的, 用于完成机械力、运动和能量流等动力学任务的机械和 (或) 机电部件相互联系的系统。

机械电子学和机电一体化应该是两个互相联系又有区别的学科。

首先, 机械电子学与机电一体化两个概念出现的时代不同。“机械电子学”这个术语虽然是在 1980 年前后才确定下来, 但是“机电一体化”等相类似的术语, 在这以前就已被人们广泛采用。尽管初看起来这两个术语有相似之处, 研究范围接近, 然而它们产生的时代背景却大不相同, 主体研究内容也有明显的分界, 所以机械电子学作为一个独立术语是有其新意的。机械电子学时代的最大特征是由于出现了微电子学, 开始能够提供功能强大的新的基础元件, 从而使机械电子学能在短期内得到真正的发展。通过微电子技术和机械技术的结合, 将要产生一种崭新的机械, 这种设想看来是很自然的, 但是在微电子学时代以前, 要想在工程上实现这种机械绝非易事。微电子学的核心技术之一, 是高度的电子电路集成技术。例如, 集成电路 (IC), 它是将复杂的逻辑电路集成到一块硅芯片上, 把原来的电子电路的尺寸大幅度减小, 重量大大减轻, 从而可很容易地安装在机械设备内部。这样, 一种远远超越过去的机电一体化水平的组合体就能够实现了。从这种意义上看, 可以说微电子学对于这

种新型机械，即对于所谓机械电子机器的实现起到了决定性作用。所以，跟过去传统的机电一体化所不同的是，微电子学的发展是机械电子学发展的必要前提。

其次，二者的研究范围有所交叉但又不完全相同。在机电一体化中，对机械本体要求尽量采用新结构、新材料和新工艺，以适应机电一体化产品高效、多功能、可靠、节能、小型、轻量、美观等各方面的要求，因而在设计中对机械本体的研究往往占有较大的比重；而机械电子学则更加侧重于研究机电一体化系统中的传感与检测技术、微电子技术、计算机技术、控制技术以及它们如何与机械相结合起来，而把机械本体更多地作为研究和设计的基本条件。

最后，从学科的角度来看，机械电子学和机电一体化可以互为补充。机电一体化系统工程以机为主，机、电、光、气、液相互结合，研究怎样利用系统设计原理和综合集成技巧，将机械、传感器、微机、电机、接口及控制软件等机电一体化要素组成各种性能优良的、可靠的机电一体化产品或系统。机械电子学则深入研究机电一体化系统中的信号、传感器、微机、电机、接口等的具体应用和核心技术，并把这些技术中的前沿科技和最新成果引入到机电一体化系统中去，通过相互之间的有机结合推动其进一步向前发展。

1.1.2 机械电子学研究的主要内容

机械技术与电子技术、包括微处理器（Microprocessor）技术在内的计算机技术等高新技术的有机结合是机械电子学的灵魂。这种结合，不是简单的组合、拼凑，而是相互融合、渗透。在技术上体现为机械技术与电子技术、计算机技术等高新技术的横向交叉、渗透和综合集成，从而产生了一种新的学术思想和技术手段，达到各自单独所不能达到的境界。在产品结构上体现为机械装置与电子设备、微处理器硬件与软件合理配置，形成一个互相联系的有机整体，协调一致地实现其目的功能。这种结合的目的在于设计和开发性能优良、功能完善、效率高、柔性自动化的工程系统，为人类的生产和生活领域的各个方面提供服务。

图 1-1 是伦斯勒理工学院（Rensselaer Polytechnic Institute）给出的机械电子学跨领域交叉示意图，圆外周表明了机械电子学的典型应用，圆内周则是介绍机械电子学涉及的各学科的交叉组合：计算机技术（Computers）与控制系统（Control Systems）交叉构成数字控制系统（Digital Control Systems），计算机技术与机械系统（Mechanical Systems）交叉构成机械计算机辅助设计技术（Mechanical CAD），机械系统与电子系统（Electronic Systems）交叉构成机电一体化（Electro-mechanics），电子系统与控制系统又交叉构成控制电子学（Control Electronics）。可见，机械电子学包含的内容非常丰富，涉及面众多。

机械电子学研究的主要内容包含了传感器、前向通道、中央处理系统、后向通道、执行机构、接口与通信等六个主要部分。

1. 传感器

传感器（Sensor）可以类比成人的五官，是用来感知外界信息的重要部件。机电一体化系统中常见的传感器主要有位置传感器、位移传感器、速度传感器、加速度传感器、力传感器、温度传感器等，它们分别检测对应的实体参量，采集系统需要获知的原始数据，然后通过数据通道传递到微处理器系统。传感器属于前向通道的一部分，但是其种类繁多，技术复杂，常把它单独列出来专门讲解。

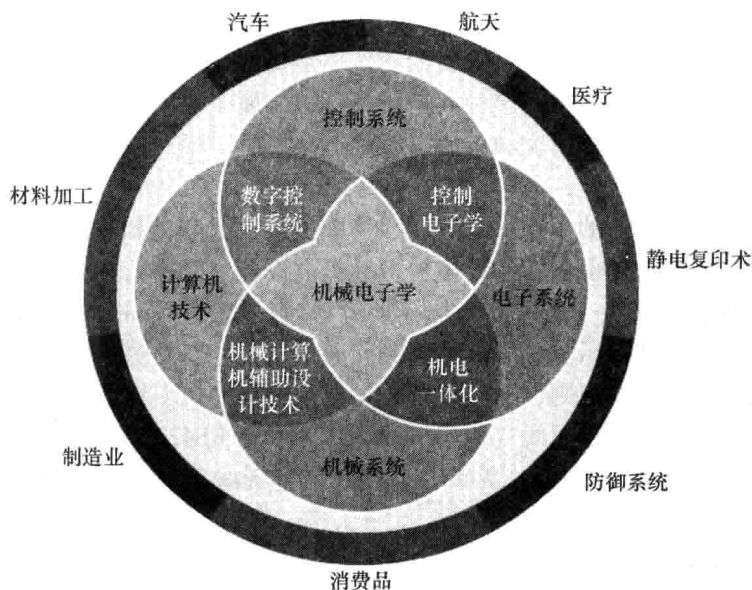


图 1-1 机械电子学跨领域交叉示意图

2. 前向通道

前向通道 (Forward Channel) 体现了被测对象与控制系统互相联系的信号输入通道, 即原始数据输入通道。由于该通道中主要是传感器和与传感器有关的原始信号处理 (包括信号分离、信号放大、信号调节和信号变换), 故也可称为传感器接口通道。前向通道是传感器和微处理器之间的“桥梁”。

3. 中央处理系统

中央处理器通常与协处理器、储存器、驱动器、输入/输出、接口等电路和芯片构成一个功能完整的“中央处理系统” (Central Processing System)。中央处理系统相当于人的大脑, 它将前向通道中送来的数据信息进行分析、处理、判断和储存, 然后按照一定的程序对执行机构发出指令。常见的中央处理系统有基于中央处理器 (CPU) 的个人电脑 (PC) 和工业控制计算机 (Industrial Control Computer)、可编程控制器、单片机系统 (Single Chip Macro-computer System) 以及专用的微处理器如数字信号处理器 (DSP) 组成的系统等。当然, 键盘、鼠标、触摸屏、扫描器等输入设备, 显示屏或显示器、打印机、音箱或报警器等输出设备, 存储卡、存储器、光磁记录仪等存储设备, 也是微处理器系统的重要部件。

4. 后向通道

在机电一体化系统中, 把计算机对执行机构和机械主体的控制部分, 即计算机进行运算处理后对上述控制对象的控制输出部分称为后向通道 (Back Channel)。后向通道的结构和特点与被控制对象以及控制要求密切相关, 是微控制器和执行机构之间的“桥梁”。后向通道和前向通道中的信号通道部分可以类比于人的神经。

5. 执行机构

执行机构 (Acuter) 部分可以类比于人的四肢。接收到信息处理部分发出的指令后, 便去执行指令所要求的动作和功能。执行机构是运动部件, 一般采用机械、液压和电气等传动

形式。机电系统中目前使用最为广泛的执行机构是电动机，电动机通过电磁感应原理把电能转变为机械能，从而实现机电系统所需要的动作。常见的电动机包含了交流电动机、直流电动机、伺服电动机、步进电动机等多种类型。执行机构属于后向通道的一部分，但由于其自成体系，通常也独立出来进行研究和讲解。

6. 接口与通信

为了实时掌握分散各处的生产加工数据、集中进行工况监视和故障报警，需要中央监控系统，为了完成复杂的任务也常常需要多台多种机电设备之间进行相互配合，这些都要求各设备、仪器仪表能够通过统一的接口（Interface）进行通信（Communication），以实现数据传输、共享、集中存储和显示。如同人与人之间通过语言相互交流来获知信息一样，设备相互通信需要共同遵守一定的规则，这些规则就是标准通信接口、协议。常见的通信接口方式有工业标准电流与电压、串行总线（如 RS232、RS485 和 RS422 等）、工业以太网、现场总线（如 PROFIBUS、CAN、FF、LONWORKS 等）、工业无线通信（如无线短程网、无线局域网、蓝牙等）。

7. 软件（Software）

从产品设计开始，到产品的具体实现，机械电子学中会涉及众多软件（Software）的使用。设计阶段的 CAD/CAM 软件、建模和仿真等软件保证产品能够正确、快速地设计出来并投入生产；而机电产品本身功能需要的数控软件、PLC 软件、微控制器的控制与通信软件、工业自动化的组态软件等软件系统，它们运行于微处理器系统的基础之上，对系统状态进行监控，响应外界的干预和变化，并负责控制和协调，使系统中各个部分有条不紊地工作，使其成为一个有机整体。这些软件不仅仅是实现某个具体功能的需要，更是对机器行为的描述，是在控制理论的基础上，吸收自动控制理论、电子学、人工智能、计算机科学、工程数学、运动学等新思想、新方法，模拟人类智能，使它具有判断推理、逻辑思维、自主决策等能力，以求得到更高的控制目标。所以说，通过机械电子学的软件编程，使得机电一体化系统有了“智能”和“思想”，使得微处理器有了存在的现实意义。

综上所述，从机械电子学的研究内容来说，与人的要素是相似的。五官接受和交流外界的信息（传感器）；手、脚动作作用于外界（执行器）；头脑集中处理和协调全部信息，并对其他要素和它们之间的连接进行有机的统一控制（微处理器系统和软件）；神经系统把身体各部位连接起来，可靠地传递信息（前向通道、后向通道和通信接口）；骨骼和肌肉用来把人体连成一体，并规定其运动（机构）。显然，无论是人还是机电一体化系统，其本身的性能及其融合、协调得越好，则整个系统就会越优化。

1.2 机械电子学的应用与发展

1.2.1 机械电子学的典型应用

在机械电子学指导下设计和制造出的机电一体化系统，不管是以机械装置为主体的机械电子产品或是以电子装置为主体的电子机械产品，所要达到的目的就是要简化机械机构、提高生产效率、提高精度、易于实现多功能、增加可靠性和稳定性，而且产品开发周期短、竞争能力强。而现在，机械电子学的应用领域不仅仅局限于工业、石油化工、农林牧渔、通

信、交通、服务、航空航天、国防军事等各行各业，更是扩大到了人们生产和生活的方方面面，以智能化为代表的机电技术已经应用得如此广泛，以至于没有人能完全列举出来。

机械电子学的典型应用可以主要归纳为以下几个方面：

1. 生产与制造

机械工业中的数控机床、工业机器人、加工中心等用计算机的指令来控制各种操作的自动化加工生产设备，是典型的带有智能的机械电子技术产品，它们综合应用了计算机、自动控制、精密测量等机械电子学的各项技术成果，已经解决了价格、可靠性和编程等问题，在生产企业中大量普及。另外还有自动化仓库、数控锻压机械、数控铸造机械、数控切割机、数控焊接设备、生产线机器人等。

在能源和化工工业中的流量测量、化学成分在线分析、催化裂化过程控制、品质管理、过程在线监控及诊断系统、防爆与泄漏报警等诸多领域，机械电子技术与传统生产工艺紧密结合，不但提高了生产效率和生产质量，而且节省了能源，提高了出险的预警能力，极大地保证了生产的可靠性和安全性。

2. 测试和控制

微处理器与仪器仪表结合，使传统的仪器仪表有了“大脑”。比如可使过程检测控制仪表具有程序控制的功能，能适应被测参数的变化、自动补偿、校准、记录、显示、自诊断故障、自动进行指标判断，还能方便地与其他电子设备进行通信和互连；特别是精密量仪，由于广泛采用微电子、光、计算机和精密机械等技术，其测量范围和效率比传统量仪大为提高，如数控三坐标测量仪、数据记录仪、数位式仪表、自动测试仪、分析仪、调节控制仪表、医疗仪表等。

3. 交通工具和工程机械

飞机、火车、汽车、轮船等交通工具和挖掘机、起重机等工程机械，都用了大量机械电子学技术，高速列车、无人自动驾驶汽车等更是当前研究的热点。以汽车为例，发动机用微处理器系统（车载电脑）和电子技术控制发动机准时点火、燃油喷射、空燃比、废气再循环及排气，使燃烧完全、节约能源并减少污染；微处理器系统还用来控制车辆速度和档位以及发动机转速，使其在不同工况下均处于尽可能经济、合理的运转状态；为了提高车辆的安全性，工程师还以微处理器为核心设计了车辆电子稳定系统（ESP）、防死锁制动车系统（ABS）、安全气囊、防撞车以及防撞行人控制系统等；此外，还有大量用于提供方便性和舒适性的装置，如各种数字显示和调节仪表、导航仪和行车记录仪、倒车雷达、可视自动泊车装置等。

4. 产业机械

产业机械包括微电子控制的农业机械、纺织机械、印刷机械、食品生产、包装机械，制浆造纸、皮革加工、塑胶加工机械及各种监测控制装置等。如微电子控制的纺织机械，对于提高纺织品质量、更新花色品种、提高效率和节能都有明显效益；现代印刷机械中，微机控制已成为保证印刷质量的重要手段，电子照相排字机、电子分色机、雕刻机、电子制版和印刷、自动装订机等早已经成为现代印刷不可或缺的自动化设备；医疗器械目前正向大型、精巧、精密、自动化方向发展，其核心就是智能化、集成化和信息化，比如医学成像设备、放射治疗设备、医用生化分析仪器、医用光学仪器和医疗康复保健器械等。

5. 办公自动化和信息化产业

在当今社会里,办公和信息机械如移动电话、计算机、网络设备、打印机、复印机、传真机、一体机、自动绘图仪、软盘存储器、传真机以及缩微设备等机械电子产品,以及广播电视通信设备、图像处理装置等,是传递、存储、处理文字、图像、多媒体信息的必不可少的工具。计算机、服务器在信息化高速发展的今天越来越普及,需求量越来越大,已经在国民经济中占有重要地位。

6. 消费性电子产品和家用电器

随着人民生活水平提高,对家用电器的需求与日俱增,人们对产品性能、质量、操作性和品种的要求也越来越高。数字电视、电冰箱、影碟机、家用计算机、数码照相机、个人通信设备、空调设备、自动洗衣机、电子炊具、吸尘器和控温器等家用电器,随着机械电子技术水平的提高,不但越来越简单易用,而且功能也越来越丰富。这类产品与民众日用机电产品密切相关,应用广泛。图 1-2 所示的数码相机即是一个典型代表。

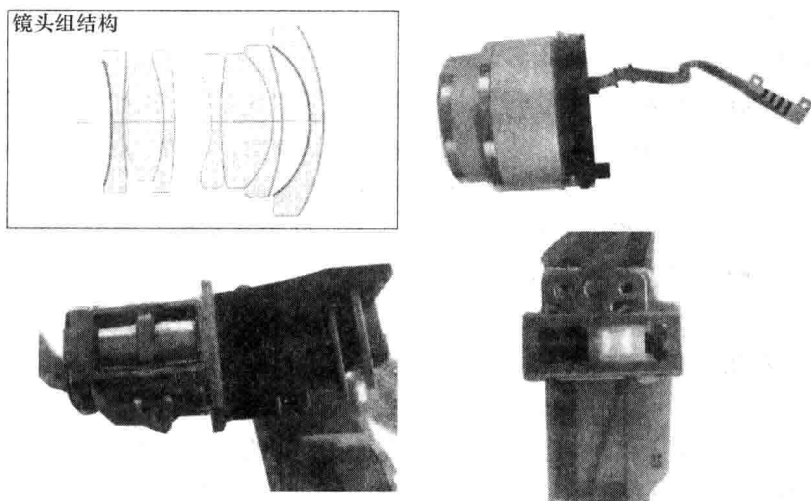


图 1-2 数码相机中驱动镜头焦距调节的微型步进电动机和测量镜头变焦位置传感器

1.2.2 机械电子学的发展前景

与其他科学技术一样,机械电子学也经历了较长时期的自然产生和发展过程。早在机械电子学概念出现之前,世界各国从事机械总体设计、控制功能设计和生产加工的科技工作者,已为机械技术与电子技术的有机结合自觉不自觉地做了许多工作,研究和开发了不少机电一体化产品。人们对机电一体化的长期实践和最新应用成果加以系统地总结,才形成比较完整的机械电子学概念。机械电子学一诞生就显示出强大的影响力,对传统的机械加工技术思想、生产方式以及加工方式产生极大的冲击,使之产生深刻的变革。

当前,机电一体化的发展趋势可以概括为以下三个方面:性能上向高精度、高效率、智能化方向发展;功能上向小型化、轻型化、多功能方向发展;层次上向系统化、复合集成化方向发展。

高精度、高效率、高性能、智能化是性能发展的主要特点。例如 CNC 数控机床，其控制精度能实现 $0.1\mu\text{m}$ 的高精度，其进给速度可达 $24\sim 100\text{m}/\text{min}$ 甚至更高，其联动和控制的轴数能实现 $9\sim 15$ 轴，同时增加了人机对话功能，设置了智能 I/O 通道和智能工艺数据库，给使用、操作和维护带来了极大的方便。今后，随着专用集成电路特别是超大规模集成电路的发展，机电一体化产品会越来越向高性能方向发展。

小型化、轻型化、多功能是功能发展的特点。所谓小型化、轻型化，乃是精细加工技术发展的必然，也是提高效率的需要。通过结构优化设计和精细加工，可使机械设备的重量大大减轻。所谓多功能，也是自动化发展的要求和必然结果。对于一般机电一体化产品，为了适应自动化控制规模的不断扩大和高技术的发展，不仅要求它们具有数据采集、检测、记忆、监控、执行、反馈、自适应、自学习等多种功能，甚至还要求其具有神经系统的功能，以使能实现整个生产系统的最佳化和智能化。

系统化、复合集成化是层次发展的特点。复合集成化既包含各种技术的相互渗透、相互融合和各种产品不同结构的优化与复合，又包含在生产过程中同时处理加工、装配、检测、管理等多种工序。为了实现多品种、小批量生产的自动化与高效率，应使系统具有更广泛的柔性。首先可将系统分解为若干层次，使系统功能分散，并使各部分协调而又安全地运转，然后再通过硬、软件将各个层次有机地联系起来，使其性能最优、功能最强。柔性制造系统 (FMS) 就是这种层次结构的典型。

在当前激烈的国际竞争中，机电一体化具有举足轻重的作用，其发展水平在很大程度上反映了一个国家的技术经济实力，因而各工业国家极其重视。许多先进工业国家将机电一体化的前沿技术，如智能和自动化加工系统等，作为国家高新技术发展战略的一个重要方向。

1.3 以微处理器为基础的机械电子产品设计

1.3.1 如何开发机械电子产品

机械电子产品设计是针对机械一体化类型产品的有计划、有步骤、有目标、有方向的创造性活动。设计的起点是设计原始数据的收集，其过程是各项参数的分析处理，而归宿是科学地、综合地确定所有的参数，得出设计内容。

微处理器的引入使机电产品的复杂程度和智能化程度都相比传统机电产品得到了极大提高，同时也带来了产品设计方式的巨大变革，计算机及建模、仿真、测试等相关专业软件已经得到了普遍应用，并极大地提高了设计效率和节省了成本。此外，现代制造业的信息化集成通过 CAD/CAM 技术把设计与制造融为一体，大型企业甚至通过并行工程来完成复杂设计。如波音公司组成了包括设计、工艺、制造以及供应商和潜在用户在内的 238 个协同工作组共 7000 多人参加波音 777 研制工作，同时采用了并行工程的工作模式，利用 Internet 把三家发动机供应商 GE、惠普和诺依斯·罗尔斯联系在一起进行数据交换和异地设计制造。在航空工业发展史上第一次把飞机研制可能出现的问题解决在制造装配前和试飞前，最终 63m 长的波音 777 装配准误差仅为 0.58mm ，研制周期由过去波音 757 和 767 的 $9\sim 10$ 年时间缩短为 4 年多时间。

图 1-3 为以微处理器为基础的机械电子产品开发基本过程图。

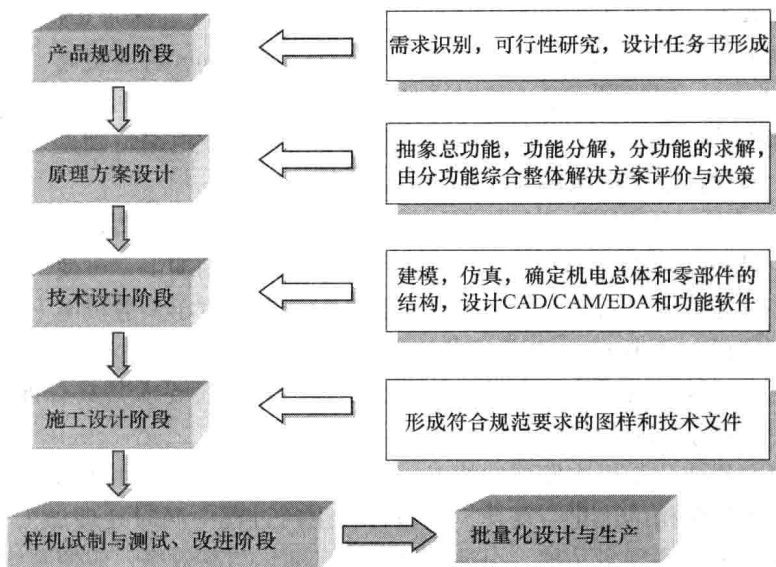


图 1-3 以微处理器为基础的机械电子产品开发基本流程图

在以微处理器为基础的机械电子产品开发过程中，除了传统的设计方法与步骤之外，在技术设计阶段还有以下几个非常值得现代机械电子产品设计者注意的关键点：

1. 建模 (Modeling)

技术设计阶段中，由于机械电子工程系统既是一个交叉、综合的复杂系统，又是一个动态的系统，因此对于该动态系统，可以从系统动力学的角度出发，根据系统行为描述进行建模（即建立系统的动力学方程或动态模型）。模型是由决定系统本质的主要因素及其相互关系构成的，是研究与解决问题的基本框架。建模后，就可以按分析对象和目的的不同，采用合适的系统分析方法对问题进行求解，以便对机电系统进行评估或目标优化，从而保证机电系统的设计更为合理和完善。

机电系统建模的方法大致有两类：机理分析法（又称理论建模）和实验测试法（又称实验建模）。机理分析法是通过分析系统的运动规律，在一些合理假设下，运用一些已知的定理、定律和原则建立起机电系统的数学模型；而实验测试法则是通过合理的实验方法，利用输入输出数据所提供的信息建立系统模型。

2. 仿真 (Simulation)

建立模型后，当所研究的系统结构或参数变化复杂，造价昂贵，实验的危险性大或需要很长的时间才能了解系统参数变化所引起的后果时，利用计算机进行仿真是一种非常有效的研究手段。例如，利用机构建模仿真方法对典型的机电传动系统进行仿真分析，确定传动系统的机构参数对系统性能的影响；又如基于 ANSYS 的受力分析和运动学分析，基于 SimMechanics 的车辆道路振动特性仿真，基于 ADAMS 的机器人仿真和虚拟样机技术，基于 MATLAB 的 Simulink 与 SimMechanics 对 3-RPS 并联机构或 6 自由度串联机构等进行联合仿真等。

机电系统仿真按所用模型的类型（物理模型、数学模型、物理-数学模型）分为物理仿真、计算机仿真（数学仿真）、半实物仿真（Hardware-in-loop Simulation）；根据仿真时钟与实际时钟的比例关系，仿真又分为实时、亚实时和超实时仿真三种。

3. 计算机辅助设计和制造 (CAD/CAM)

现代产品的设计和制造已经离不开计算机的帮助，特别是对于机电一体化产品，充分利用计算机辅助设计和制造工具，可以大大提高工作效率、提高产品性能和保证质量。在产品的设计制造过程的各个阶段中引入计算机技术，便产生了计算机辅助设计 (Computer Aided Design, CAD)、计算机辅助工程 (Computer Aided Engineering, CAE)、计算机辅助工艺过程设计 (Computer Aided Processing Planning, CAPP) 和计算机辅助制造 (Computer Aided Manufacturing, CAM) 等单元技术 (CAX)。由于以有限元分析为特征的商品化软件相对自成体系，故统称为 CAE 软件，但产品设计过程应包含产品的性能分析计算，所以 CAD 一般都涵盖了 CAE 的内容。事实上，设计工艺与制造过程是相互关联的有机整体，因而在单元技术基础上产生了 CAD/CAPP/CAM 一体化技术，国际上习惯简称为 CAD/CAM 技术。为了对设计制造过程和 CAD/CAM 产生的电子信息文档进行有效管理，在 20 世纪 90 年代初期产生了产品数据管理 (Product Data Management, PDM) 技术和相应软件系统。CAD/CAPP/CAM/PDM 在 CIMS 体系结构中被称为技术信息系统 (Technology Information Subsystem, TIS)，如图 1-4 所示。



图 1-4 产品生产过程与相应的技术信息系统

常见的著名机电产品设计软件 CAD/CAE/CAM，机械方面有基于 3D 的 Solidworks、Inventor、Pro/E、Catia、UG 等以及专精 CAE 仿真与分析的 Ansys、Adams 等，软件数学建模的有 Matlab、Mathematica 等，电子方面有 Protel，测试与控制的有 LabVIEW 等。对于机电产品设计，这些建模与仿真技术是非常有价值的工具，因为它们允许设计师去研究组件和生产前的设计参数的变化之间的相互作用，并且通过这类软件快速的仿真可以提早发现产品的缺陷，使得产品在性能上达到应有的水平，避免批量生产后的补救过程，加速产品进入市场。

4. 电子设计自动化 (Electronic Design Automation, EDA)

EDA 以计算机为工具，设计者在 EDA 软件平台上，用硬件描述语言 (VHDL) 完成设计文件，然后由计算机自动地完成逻辑编译、化简、分割、综合、优化、布局、布线和仿真，直至对于特定目标芯片的适配编译、逻辑映射和编程下载等工作。利用 EDA 工具，电子设计师可以从概念、算法、协议等开始设计电子系统，大量工作可以通过计算机完成，并将电子产品从电路设计、性能分析到设计出 IC 版图或 PCB 版图的整个过程在计算机上自动处理完成。EDA 技术的出现，极大地提高了电路设计的效率和可操作性，减轻了设计者的劳动强度。

具有广泛影响的 EDA 软件是系统设计软件辅助类和可编程芯片辅助设计软件，如 OrCAD、Protel99se、Altium Designer、PSPICE、Multisim12、LSILogic、MicroSim、ISE、ModelSim、等。这些工具都有较强的功能，一般可用于几个方面，例如很多软件都可以进行电路

设计与仿真，同时还可以进行 PCB 自动布局布线，可输出多种网表文件与第三方软件接口。图 1-5 所示为安捷伦 Genesys EDA 软件。

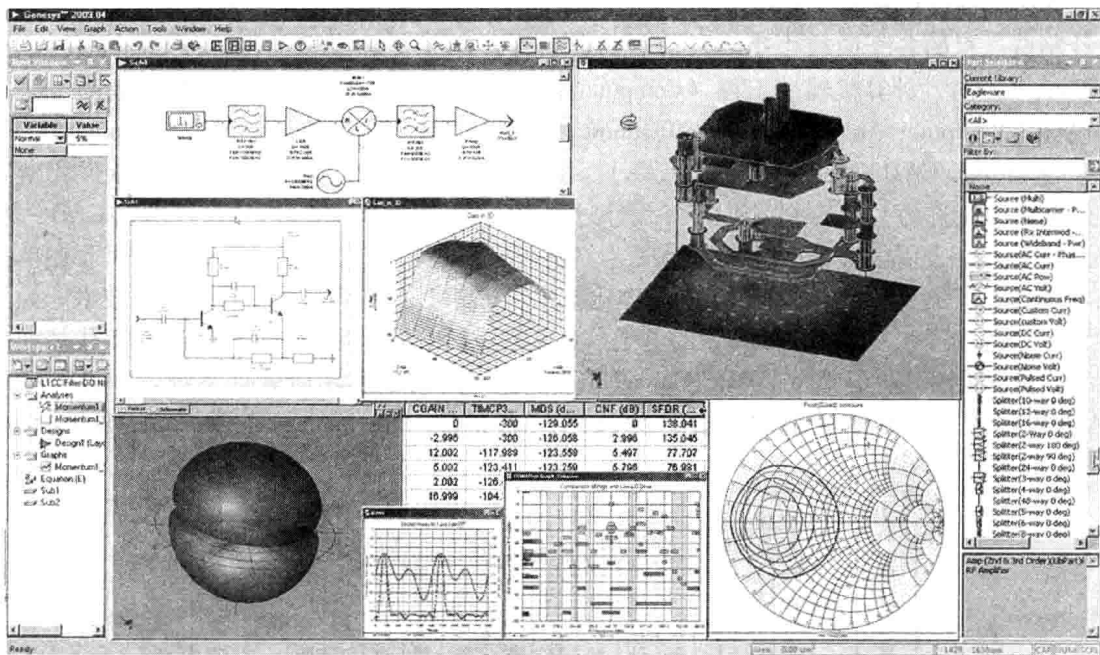


图 1-5 安捷伦 Genesys EDA 软件

5. 其他关键注意点

(1) 人机界面 (the Man-Machine Interface)

在开发新一代的机电产品时，人机界面的设计和开发已成为国际计算机界和机电产品设计界最为活跃的研究方向。现代的机电一体化产品更注重产品与人的关系，更加关注人的生理、心理限度，人机功能的合理分配，人的可靠性及安全性问题，更强调人在系统中的重要性。人机界面必须为系统操作提供双向的交互信息，它从人体工程学出发，一方面综合考虑人体接受信息的途径（视觉显示、声音信号、触觉信号等），注意环境的因素和安全，另外一方面也极大的重视产品本身的美感、易用性和方便性，也就是人对机器的感觉——用户体验 (User Experience)。

(2) 干扰 (Interference)

在机电装置中，由于供电电网的瞬间断电、接地不当、电磁场的辐射等原因，都会产生干扰信号，造成系统的元器件失效或数据传输、处理失误等，进而影响系统的可靠性。针对这些干扰源，产品设计中必须充分考虑抗干扰的方法，如：①针对交流供电网络干扰源采取稳压（增加电子交流稳压器）、滤波（增加低通滤波）、隔离（增加隔离变压器）；②针对接口电路采用光电隔离防止驱动接口中的强电干扰、RC 电路或者二极管和稳压二极管吸收在电感负载断开时产生的过电压以及其他干扰信号进入控制器；③接地系统采用断地环路，通常做法是信号地线采用单点接地，电路工作频率较高，电感分量较大，各地线间的互感耦合会增加干扰，故常用多点接地。由于机电系统的实际情况比较复杂，常采用单点和多点组成