



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
工程训练系列教材

机械电子工程原理

■ 王孙安 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
工程训练系列教材

机械电子工程原理

主编 王孙安
参编 张进华 邸宏宇
主审 傅水根 林廷圻



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。本书论述了机械电子工程的基本原理及系统设计。在第一篇执行机构与驱动器中,介绍了执行机构的作用,以及电气、液压和气动等驱动方式;在第二篇测量系统中,讲述了系统运行时状态信息的获取、处理和干扰抑制问题;在第三篇嵌入式控制系统中,讲述了接口、通道和控制策略的设计,并介绍了机电系统监控的基本内容,此外,还涉及机械电子系统中机构、结构和人机界面设计的原则;在第四篇系统应用中,介绍了几种典型的机械电子系统设计实例。本书从机械电子系统设计的角度,着眼于物质、能量和信息,阐述了机电系统的机构、驱动与控制的相关内容,最后还给出了若干个机电系统案例剖析。

本书是普通高等学校机电工程或机电一体化专业的高年级本科生或硕士研究生教材,也可供相关领域的工程技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

机械电子工程原理/王孙安主编. —北京:机械工业出版社, 2009. 11
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 978-7-111-28533-5

I. 机… II. 王… 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185228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:王保家 关晓飞 版式设计:霍永明

封面设计:张静 责任校对:陈延翔 责任印制:洪汉军

北京市朝阳展望印刷厂印刷

2010年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·21印张·518千字

标准书号:ISBN 978-7-111-28533-5

定价:36.00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

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者服务部:(010) 68993821 封面无防伪标均为盗版

前 言

物质、能量和信息是推动人类文明发展的强大动力。生产力水平低下时,人类的生存和发展较大程度上依靠物质和能量。随着生产力水平的提高,信息的作用日益突出,尤其是第一台电子计算机诞生,人类步入信息社会后,信息技术因其在应用中所具有的强渗透性和高附加值而成为信息时代的核心技术和发展的中坚力量,影响并决定着现代技术的总体走向。

机械电子工程(Mechatronics)是20世纪70年代日本提出来用于描述机械工程和电子工程一体化的一个技术术语,机械电子成为一门新兴学科也仅仅始于20世纪80年代。近年来,由于以信息处理为核心的人工智能技术的渗透,机械电子工程在传统机械系统动力传递和机构连接基础上,更强调信息的连接和驱动作用,并逐步向智能方向发展,已经成为机械工程的重要研究领域和技术革命的前沿方向。目前,机械电子工程学科已经发展成为一门综合机械、电子、控制、信息、计算机技术为一体的工程技术学科。该学科涉及的技术是现代机械工业最主要的基础技术和核心技术之一,是衡量一个国家机械装备发展水平的重要标志。

在日本提出机械电子工程这一术语后,日、美、英各国先后有一些专著出版。国际自动控制联合会(IFAC)、美国电气和电子工程师协会(IEEE)先后创办了名为《Mechatronics》的期刊。近几年,国内也有相关教科书和期刊问世。这些出版物的论述内容各有侧重,风格迥异。

本书是在参考国内外相关文献的基础上,结合作者从事机械电子工程教学、研究和我国实际情况,按照理论联系实际的原则编写而成的。本书分别从执行机构和驱动、系统信息的测量、嵌入式微处理器以及机械电子系统设计实例等方面详细阐述了机械电子工程的基本思想、系统组成和实际应用。全书分为20章,第1章阐述了机械电子工程的基本概念、发展过程和设计思想;第2章介绍了执行机构与驱动器,以及在不同情况下驱动方式的选择;第3章简要讨论了机械系统中执行机构的功能与作用;第4章和第5章分别介绍了电气驱动装置和液压、气动驱动装置;第6章概述了测量常用的指标、误差的形成和分类、常用测量方法以及测量系统的设计;第7章介绍了常用的传感器,并讨论了传感器和转换器的分类以及传感器技术的发展;第8章给出了常见的信号处理电路,介绍了信号处理的相关内容;第9章探讨了干扰和噪声的形成与抑制;第10章介绍了机械电子中的微处理器系统;第11章从内存、I/O接口电路、过程通道、模拟量输入/输出通道、数/模与模/数转换技术等方面介绍了机械电子系统中的嵌入式微处理器的设计;第12章介绍机电系统的模型建立,第13章主要以PID控制器和模糊控制器为例,探讨了机械电子系统中的微处理器控制;第14章介绍了机械电子系统的网络监控;第15章系统阐述了机械电子系统的总体设计;第16~20章以机械电子工程的观点,分别分析了软盘驱动器、关节式机器人、移动式机器人、机器人视觉导航系统以及飞行动力训练地面模拟系统等几个典型机械电子系统的设计,这几个案例基本能够体现机械电子工程的精要,满足教学的需要。各章后的习题或思考题有的是帮助读者回顾本章的要点,有的则是引导读者进一步思考,不一定能在书中找到现成的回答。



本书自1994年以来作为本科生相关课程的讲义已经使用9年,几经修改后2003年正式出版。经过近几年来教学和科研工作的实践,此次又做了较大的修改与补充,希望更加适合作为机械工程、能源动力工程、电子工程、工业自动化等专业本科生或硕士研究生的教材。作者力求使学生通过本课程的学习,获得必要的机械电子工程的基本知识,掌握机电系统的设计方法和基本技能,为将来从事机械电子工程的设计工作和研究工作打下一定的基础。本书也可供从事机械电子工程等专业的工程技术人员参考。

本书第1、2、3、4、5、6、7、8、9、10、11、14、15、16、20章由王孙安编写,第12、13章由王孙安、邱宏宇合作编写,第17、18、19章由王孙安、张进华合作编写,全书由王孙安和张进华统一审校和定稿。

作为我国最早倡导建立机械电子工程学科的学者之一,西安交通大学史维祥教授对本书作者给予了很大帮助。北方车辆研究所张相麟教授就一些观点与作者进行了有益的探讨,并为本书提供了资料方面的帮助。王和康、陈巍巍、赵中煜、张文明、李昆鹏、袁明新、陈乃建还参与了资料的收集、翻译和整理工作,何望云、栗茂林、王娜为原教材绘制了大量的图,任华参与了第4、16章的编写,杜海峰参与了第5、14章的编写,在此一并表示感谢。作者感谢清华大学傅水根教授和西安交通大学林廷圻教授审阅了本书。另外,本书还受到西安交通大学“十一五”本科教材建设规划和机械工业出版社对“十一五”国家级规划教材出版的资助。

机械电子工程是发展最为活跃的技术领域之一,正处于快速发展阶段。虽然机械电子工程的思想已经被逐渐接受,并获得了日益广泛的应用,但需要探索和研究的问题还很多,本书中每一章都涉及一个广大的领域。由于编著者水平有限,所做的工作没有也不可能涵盖机械电子工程研究和工程应用的所有方面,挂一漏万之处在所难免,对此恳请有关专家和读者给予批评指正。

编 者

目 录

前言

第1章 绪论	1	1.3 机械电子工程在制造业中的应用	8
1.1 机械电子工程的概念及发展过程	1	1.4 学习机械电子工程的意义与要求	10
1.2 机械电子工程在产品及其设计中的应用	5	思考题	11

第一篇 执行机构与驱动器

第2章 执行与驱动	14	4.1.3 直流电动机调速装置	34
思考题	20	4.2 交流异步电动机	35
第3章 执行机构	21	4.2.1 交流异步电动机的稳态特性	35
3.1 基本概念	21	4.2.2 交流变频调速	37
3.1.1 几个常用术语	21	4.2.3 两相异步执行电动机的电压控制	39
3.1.2 执行机构的基本作用	22	4.3 步进电动机	40
3.1.3 执行机构的分类	22	4.3.1 反应式步进电动机的工作原理	40
3.1.4 执行机构的几个例子	23	4.3.2 步进电动机的起动和运行	41
3.2 带轮机构	23	4.3.3 步进电动机的主要参数与性能指标	41
3.3 链轮机构	24	4.3.4 步进电动机的控制系统及功率驱动电源	42
3.4 齿轮机构	24	4.3.5 步进电动机的选用原则	43
3.5 螺旋机构	26	4.4 直线电动机	45
3.6 蜗轮蜗杆机构	27	4.4.1 直线电动机的基本原理	45
3.7 直线导轨	27	4.4.2 直线电动机的分类	46
3.8 连杆机构	28	4.4.3 直线电动机的特点	46
3.9 凸轮、棘轮和槽轮	29	4.5 电力电子器件	47
3.9.1 凸轮推杆机构	29	思考题	48
3.9.2 棘轮机构	29	第5章 液压与气动执行装置	49
3.9.3 槽轮机构	30	5.1 能源装置	50
3.10 机架	30	5.1.1 液压能源装置	50
3.11 机构的组合	30	5.1.2 气动能源装置	51
思考题	31	5.2 执行元件	52
第4章 电气执行元件	32		
4.1 直流电动机	32		
4.1.1 稳态特性	33		
4.1.2 动态特性	33		



5.2.1 液压执行元件	52	5.4.1 液压系统典型辅助元件	62
5.2.2 气动执行元件	55	5.4.2 气动系统典型辅助元件	63
5.3 控制元件	56	5.5 基本回路	64
5.3.1 液压控制元件	56	5.5.1 液压基本回路	64
5.3.2 气动控制元件	60	5.5.2 气动基本回路	66
5.4 辅助元件	62	思考题	68

第二篇 测量系统

第6章 测量与感知	70	7.4.4 电感式速度传感器	90
6.1 测量系统的基本性能	71	7.5 热电传感器	90
6.1.1 精度	71	7.6 光电传感器	91
6.1.2 稳定性	72	7.6.1 光电探测器	91
6.1.3 输入输出特性	72	7.6.2 光电编码器	95
6.2 测量方法	74	7.7 固体传感器	96
6.2.1 直接法、间接法测量	74	7.7.1 磁场的测量	97
6.2.2 偏差式、零位式、微差式测量法	74	7.7.2 温度的测量	98
6.3 测量误差	75	7.8 压电传感器和超声换能器	99
6.3.1 绝对误差和相对误差	75	7.8.1 压电器件	99
6.3.2 工具误差和方法误差	75	7.8.2 超声系统	101
6.3.3 系统误差、随机误差和粗大误差	76	7.8.3 超声法测流量	101
6.4 信号处理和信息管理	76	7.8.4 超声法测距离	102
6.5 测量系统的设计	77	7.9 传感器的线性化	103
思考题	80	7.9.1 模拟线性化技术	103
第7章 传感器与转换器	81	7.9.2 数字线性化技术	103
7.1 概述	81	思考题	104
7.1.1 传感器和转换器的分类	82	第8章 信号处理	105
7.1.2 传感器技术的发展	82	8.1 运算放大器基本电路	105
7.2 电阻型传感器	83	8.1.1 理想运算放大器	105
7.2.1 电位器	83	8.1.2 反相放大器	106
7.2.2 应变片	84	8.1.3 同相放大器	106
7.2.3 电阻式温度传感器	85	8.1.4 差动放大器	107
7.3 电容式传感器	86	8.1.5 积分器	108
7.4 电感式传感器	88	8.1.6 微分器	108
7.4.1 线性可调差动变压器	88	8.1.7 电荷放大器	108
7.4.2 线性可调电感传感器	89	8.1.8 电流—电压转换器	109
7.4.3 感应同步器	89	8.1.9 电压—电流转换器	109
		8.1.10 对数放大器	110
		8.1.11 比较器	110



8.1.12 施密特触发器	110	9.1.3 按噪声的发生机理分类	124
8.2 实用运算放大器	111	9.1.4 按噪声的频谱特点分类	125
8.2.1 放大器的性能指标	112	9.1.5 噪声因子	125
8.2.2 斩波稳零放大器	113	9.2 干扰的传播途径	125
8.2.3 自动调零放大器	113	9.2.1 干扰通过导线传输到输入 端口	126
8.3 信号隔离	114	9.2.2 干扰通过共阻抗耦合	127
8.3.1 隔离放大器	114	9.2.3 干扰通过空间传播	127
8.3.2 隔离变压器	114	9.3 干扰对敏感设备的影响	128
8.3.3 光隔离器	115	9.3.1 敏感度门限	128
8.4 相敏检波器和锁相环	115	9.3.2 干扰对模拟电路的影响	128
8.4.1 相敏检波器	115	9.3.3 干扰对数字电路的影响	129
8.4.2 锁相环	115	9.4 干扰的抑制和防护技术	129
8.5 多路复用	115	9.4.1 输入端传导防护	130
8.5.1 时分复用	115	9.4.2 滤波	130
8.5.2 频分复用	116	9.4.3 屏蔽与防护	131
8.6 滤波器	116	9.4.4 接地	132
8.6.1 模拟滤波器	116	9.4.5 隔离	133
8.6.2 数字滤波器	118	9.5 系统内部器件产生的干扰及其抑制	133
8.6.3 预处理滤波器和后整理滤 波器	119	9.5.1 晶闸管产生的噪声及其抑制	134
8.7 数字信号的处理和分析	119	9.5.2 电感性负载切断时产生的瞬变 噪声及其抑制	135
8.7.1 数字信号处理	119	9.5.3 负载接通时的冲击电流及其 抑制	136
8.7.2 离散傅里叶分析	120	9.5.4 开关触点的抖动	136
8.8 信号处理技术的发展	120	9.5.5 电源变压器干扰的抑制	137
8.8.1 智能型敏感器件	120	9.6 软件抗干扰技术	137
8.8.2 专家系统、人工智能在测量中 的应用	121	9.6.1 软件陷阱和“看门狗”	137
思考题	121	9.6.2 变采样周期	138
第9章 干扰与噪声	122	9.6.3 数字滤波	138
9.1 电磁干扰和噪声的分类	122	9.6.4 判断剔除干扰	138
9.1.1 按电磁干扰的来源分类	122	思考题	139
9.1.2 按电磁干扰的发生机理分类	123		

第三篇 嵌入式控制系统

第10章 机械电子系统中的微处

理器

10.1 嵌入式微处理器系统

10.1.1 嵌入式微处理器系统的特点

10.1.2 嵌入式系统的发展历史

10.1.3 嵌入式系统的发展趋势

10.2 机械电子系统中微处理器的作用

10.3 嵌入式系统的设计方法



10.3.1 模块化:一种行之有效的嵌入式系统设计方法	148	12.1.2 状态变量的几种类型	183
10.3.2 嵌入式系统标准模块——PC/104总线模块	150	12.1.3 不同类型的变量与不同类型的模型	184
思考题	151	12.1.4 复杂系统的建模方法	184
第11章 嵌入式微处理器系统的应用设计	152	12.2 控制对象的数学模型	185
11.1 微处理器与内存及 I/O 接口电路的连接	152	12.2.1 数学模型	185
11.1.1 存储器与 I/O 端口的编址方式	153	12.2.2 线性与非线性系统	186
11.1.2 微处理器系统中的地址译码技术	156	12.2.3 时域解析模型与时域分析	186
11.1.3 系统总线负载能力的考虑	160	12.2.4 拉普拉斯变换	187
11.2 微处理器与数字式外部设备的接口	161	12.2.5 解析建模的方法	187
11.2.1 键盘的接口	161	12.3 一、二阶线性定常系统的解析建模	188
11.2.2 七段 LED 数码管的接口	165	12.3.1 机械系统建模	188
11.3 过程通道	166	12.3.2 电路系统建模	189
11.3.1 过程通道的分类	166	12.3.3 液位系统建模	190
11.3.2 模拟信号的采样、量化和编码	167	12.4 一、二阶线性常系数齐次微分方程的典型形式	191
11.4 模拟量输入通道	169	12.4.1 一阶线性常系数齐次微分方程的典型形式	191
11.4.1 模拟量输入通道的一般组成	170	12.4.2 二阶线性常系数齐次微分方程的典型形式	191
11.4.2 多路转换器	170	12.5 一、二阶线性定常系统的单位阶跃响应	192
11.4.3 可编程放大器	172	12.5.1 一阶线性定常系统的单位阶跃响应及时域分析	192
11.4.4 采样/保持器	173	12.5.2 二阶线性定常系统的单位阶跃响应及时域分析	193
11.5 D/A 转换与 A/D 转换技术	174	12.6 系统的物理仿真	195
11.5.1 D/A 转换原理	174	12.6.1 相似性原理	195
11.5.2 A/D 转换原理	176	12.6.2 物理仿真	195
11.6 模拟量输出通道	178	思考题	196
11.6.1 多路模拟量输出通道的结构形式	178	第13章 机械电子系统中的微机控制	197
11.6.2 单片 D/A 转换器及其与微处理器的接口	179	13.1 顺序控制和数值控制	197
11.6.3 双极性模拟量输出的实现	180	13.1.1 顺序控制	197
思考题	181	13.1.2 数值控制	198
第12章 机械电子系统的建模	182	13.2 开环控制系统与闭环控制系统	199
12.1 机械电子系统的描述方法	183	13.2.1 开环控制系统	199
12.1.1 机械电子系统的状态信息	183	13.2.2 闭环控制系统	199



13.3 控制系统的品质和性能指标	200	14.2.6 同步方式	233
13.4 闭环控制系统的构成及PID控制 ..	201	14.3 数据通信网络的体系结构	234
13.4.1 常规PID控制	202	14.3.1 资源共享	235
13.4.2 分离式PID控制	204	14.3.2 开放系统互连模型	235
13.5 PID参数整定	205	14.4 局域网	237
13.5.1 采样周期的选择	205	14.4.1 局部网的拓扑结构	237
13.5.2 PID参数整定的方法	205	14.4.2 局域网协议结构	238
13.6 PID控制的改进	206	14.5 工业现场中的通信	240
13.6.1 控制器饱和	206	14.5.1 现场总线的发展	240
13.6.2 防止控制器饱和的基本措施	207	14.5.2 现场总线标准	241
13.6.3 积分项的改进	207	14.5.3 现场总线的典型结构	242
13.6.4 微分项的改进	207	14.5.4 现场总线的特点	243
13.7 智能型自适应PID控制	209	思考题	244
13.8 模糊控制器及其特点	211	第15章 机械电子系统的总体设计 ..	245
13.8.1 经典和现代控制理论的发展及 应用	211	15.1 机械电子系统设计概述	245
13.8.2 模糊控制理论的发展及应用 ..	212	15.1.1 机械电子工程设计方法的 特点	245
13.8.3 模糊量及模糊控制	212	15.1.2 机械电子系统中的控制	248
13.8.4 模糊集合和隶属函数的概念 ..	213	15.1.3 机械电子系统的设计过程	249
13.9 模糊控制器的设计	216	15.2 机械电子系统中的机构	250
13.9.1 精确量的模糊化	216	15.2.1 机构的作用	251
13.9.2 模糊控制规则的构成	216	15.2.2 机构的载荷传递及应力 分布	252
13.9.3 输出信息的模糊判决	220	15.2.3 机构的建模和仿真	254
13.10 模糊控制方法在温度控制系统中的 应用	221	15.3 机械电子系统的结构	255
13.10.1 PID控制系统	221	15.3.1 结构的作用	255
13.10.2 PID控制与模糊控制的实验 比较	223	15.3.2 结构的载荷及应力	256
思考题	226	15.3.3 结构的柔性	256
第14章 机械电子系统的网络监控 ..	227	15.3.4 结构的建模分析	257
14.1 控制系统和通信系统的分层体系 ..	227	15.3.5 机械电子系统的外壳与 封装	257
14.2 数据通信基础	229	15.4 机械电子系统人-机界面的设计	258
14.2.1 信号带宽和信道容量	229	15.4.1 工业设计和人体工程学	258
14.2.2 信道的主要技术指标	229	15.4.2 人-机信息交互	259
14.2.3 通信介质和通信线路的连接 形式	230	15.5 安全性	261
14.2.4 信道的通信方式	231	15.5.1 操作者的安全	261
14.2.5 数据传输方式和调制方式	232	15.5.2 系统的安全	262
		思考题	263



第四篇 系统应用

第16章 软盘驱动器	266	设计	289
16.1 磁头系统	266	18.3.1 机构设计方案的选择	289
16.1.1 磁头小车	267	18.3.2 全方位移动机器人的机构设计	291
16.1.2 磁头小车的运动	267	18.3.3 全方位移动机器人的运动学分析	293
16.2 主轴系统	267	思考题	295
16.2.1 直流无刷电动机	267	第19章 移动式机器人视觉导航系统的设计	296
16.2.2 转子位置传感器	269	19.1 计算机视觉简介	296
16.3 磁头系统与主轴系统的协同工作	269	19.2 立体视觉概述	296
16.3.1 磁道格式	269	19.2.1 生物视觉系统	296
16.3.2 读写操作	270	19.2.2 机器人立体视觉的原理	297
16.3.3 控制器的作用	271	19.3 摄像机标定	298
16.3.4 工作状态检测	271	19.3.1 摄像机模型	298
16.4 磁盘进出机构	272	19.3.2 摄像机标定过程	300
16.5 主板	272	19.4 图像理解	300
16.6 盘片和盘套	274	19.4.1 道路检测	301
16.7 主要技术特性	274	19.4.2 障碍物检测	302
思考题	275	19.5 机器人视觉导航的应用	304
第17章 关节式机器人设计	276	思考题	305
17.1 关节式机器人简介	276	第20章 飞行动力训练地面模拟系统的设计	306
17.2 总体设计	276	20.1 转速控制简介	306
17.2.1 系统分析	276	20.2 初步设计	307
17.2.2 技术设计	277	20.2.1 设计任务的设想	307
17.2.3 仿真分析	280	20.2.2 系统方案的选择	307
17.3 机器人机械本体的设计	284	20.2.3 设计要求	310
17.4 机器人控制系统的设计	285	20.3 具体设计	310
17.4.1 机器人控制系统的组成	285	20.3.1 设计中的问题	311
17.4.2 机器人运动轨迹的控制	285	20.3.2 设计方法	311
思考题	286	20.3.3 模拟驾驶环境	321
第18章 移动式机器人设计	287	20.3.4 安全问题	321
18.1 移动式机器人简介	287	思考题	322
18.2 移动式机器人的行走机构	288	参考文献	323
18.2.1 车轮式	288		
18.2.2 履带式	289		
18.2.3 足式	289		
18.3 一种瑞士轮式全方位移动机器人的			

第 1 章 绪 论

1.1 机械电子工程的概念及发展过程

Mechatronics（机械电子工程或机械电子学）是 20 世纪 70 年代首先在日本被提出来用于描述机械工程和电子工程有机结合的一个术语，这个词的英文原名是取机械学（Mechanics）的前半部分和电子学（Electronics）的后半部分组合而成的。

在工业系统制造业发达的国家，人们已经认识到，未来的工业系统，尤其是先进的机电系统的设计、制造和运行，将属于那些懂得怎样去优化机械和电子系统之间联系的人。在这些系统中，信息起着至关重要的作用。因此，信息的获取与处理、人工智能和专家系统等，将构成未来机械电子系统的驱动、监测、控制和诊断的主导技术。

有史以来，机械系统就进入了人类社会的每个角落。最简单的机械装置，如齿轮、滑轮、弹簧及车轮组成了工具的基础。18 世纪末第一次技术革命以来，机械工程逐步发展成为重要的基础工业部门，并为其他工业部门提供基本装备。机械工程可分为两大类，即制造类的机械工程和动力类的机械工程。制造类的机械工程可分为毛坯制造、机械加工和装配等三个生产过程；动力类的机械工程主要研究的是各种发动机，如蒸汽发动机、内燃机、燃气轮机和喷气发动机等。

制造类的机械工程发展可划分为四个时期：手工机械时期，蒸汽动力的简单机械时期，电机驱动的精密化和半自动化时期，数控和群控的自动化时期。

手工机械时期主要是用铸造和锻压技术来制造毛坯。我国早在夏代和商代就采用泥型铸造毛坯，在战国时期开始使用金属型。到 20 世纪中期，国际上开始推广可供成批生产和重复使用的合成树脂砂型，而小批量和单件生产则使用水玻璃砂型和流态砂型。锻压是制造可塑性材料毛坯的一种传统技术，很久以来一直采用手工自由锻的方法来进行加工。此外，还有一些以人力为动力的加工机床也被广泛地使用。

蒸汽机的发明标志着人类历史进入工业社会。第一台蒸汽机是手工制成的，而蒸汽机的发明和使用又引起了从手工机械向简单机械的转变。蒸汽机不仅很快地应用于矿井抽水、纺织机、轮船和机车，而且为机械制造业的发展创造了物质条件。19 世纪的蒸汽锤已达百吨，陆续发明的各种锻压设备和各种简单的金属加工机床（如车床、铣床、刨床、钻床、磨床等），可以制造金属零件，并建立起了具有一定规模的机械制造业。

20 世纪上半叶（约 1900 ~ 1920 年间），机床开始采用单独的电动机驱动。在同一时期，汽车和飞机工业发展很快，由于其各种零部件及发动机的生产对精密化机床提出了相当高的要求，在大批加工形状复杂、对精度及表面粗糙度都有很高要求的零件时，迫切需要精密和自动的铣床和磨床。随后，在 1920 ~ 1950 年间，机械制造技术进入半自动化时期，主要表现在液压和电气元件在机床和其他机械上的应用。液压系统的动力装置是由电动机驱动的液压泵，液压泵将水或油输送给液压执行器（液压马达或液压缸），并通过液压阀或电磁液压阀分别进行就地或远程的控制。液压传动首先应用于军舰火炮的控制，飞机起落架的收放和



襟翼、副翼的操纵,并取得了成功,同时也促进了机床和其他机械半自动化的发展。

1950年以后,由于电子计算机的出现,使机床的发展开始走向数控和自动生产线的方向。数控机床是一种运用数控原理,把加工程序、加工要求和更换刀具等操作以数字码或文字码作为信息进行存储,并按其指令进行控制的机床。

1951年麻省理工学院的伺服机构研究所正式制成了第一台电子管数控机床样机“Hydrotel”铣床,成功地解决了多品种小批量复杂零件加工的自动化问题。由于数控机床可以一次装卡定位,加工精度高,并缩短了辅助时间,大大减少了人为误差,减轻了体力劳动,特别适用于中小批量、多工序零件的加工。在加工复杂曲面零件时,其生产效率比普通机床高几十倍,因此发展很快。第一台数控铣床诞生后,麻省理工学院的伺服机构研究所又把数控原理从铣床扩展到镗铣床、钻床和车床等。

从20世纪50年代末以后,数控机床随着计算机硬件的发展,开始从电子管向晶体管过渡。随着小型机和微型机的出现,计算机的性能不断提高,价格一再降低,使数控机床向可以更换刀具和多种工序自动加工的综合性数控加工中心发展,并出现了由数控机床组成的自动生产线。

动力类的机械工程发展始于蒸汽发动机(包括蒸汽机和蒸汽轮机)。蒸汽发动机为舰船、机车和纺织机等各种机械提供动力,从而使人类历史进入了工业社会。内燃机在20世纪20年代初发展起来,并很快成为大功率的动力装置,如船舶、飞机、坦克、重型汽车、建筑机械和筑路机械的主要动力源。燃气轮机和喷气发动机的特点是推力大,是军用飞机最普通的动力装置。蒸汽机已经完成了它们的使命,其他各种发动机在发展过程中按各自的特点,在有关的领域内成为重要的动力装置,在核动力和氢燃料成为主要能源之前,这种局面将维持下去。

随着科学和技术的发展,机械系统变得越来越复杂,对动力或动作控制的要求也越来越高,因此,机械工程越来越紧密地和电子技术尤其是计算机技术联系在一起。尽管控制理论和计算机技术早期主要运用于数控机床,但现在无论是制造类还是动力类都越来越多地使用计算机控制理论,而且这个趋势还会不断地、进一步地快速发展。

电子学的发展才经历了一百多年。1831年法拉第发现了电磁感应现象;1864年麦克斯韦提出了电磁场理论;1888年赫兹用实验证实了麦克斯韦的预言;1897年汤姆逊发现了电子。在物理学这些伟大的成就和19世纪电工技术的基础上,1895年成功地进行了无线电波传递的试验,一般就把这一年作为电子学诞生的年代。

电子学开始只是研究自由电子在真空、空气、液体和固体中的运动规律,并取得了许多成果。1906年,三极管的发明是电子学发展史上一个重要的里程碑,它使人们掌握了对电信号放大的能力。1923年出现的光电摄像管是电子技术史上另一个关键发明,它使得人们能够对图像进行扫描,并把图像的像素转换成相应的电流。这两种器件很快在通信(电报、电话、广播)、电视和雷达等领域得到了广泛应用。电子器件本身经历了电子管、晶体管、集成电路的发展过程,模拟电路、数字电路及微波电路得到不断改进,电路理论也随之发展。在集成电路发展的同时,电子设备另一个引人注目的变化是数字化。信息数字化有很多优点,如精度高、抗干扰能力强等。此外,数字化电路易于集成也是促使电子设备数字化的原因。

电子技术完全是属于20世纪的。迄今为止,电子技术一直被用来提高机械系统的性能,



但重点仍放在机械系统上,从来没有如何实现机电一体化的主导计划。过去,机械和电子一体化是通过相互没有直接联系的“块和块”之间的结合来完成的。然而,最近由于电子学和用它来简化机械结构方面引人注目的进展,技术界和学术界开始重新评价机械和电子这两种原理的有机结合。

人类所发明的机械和动力装置,在很大程度上使人的体能得到了延伸;由电子技术的发展而带来的电报、电话、广播、电视和雷达,使人感官的功能得到了延伸;而电子计算机的出现,则使人脑的功能得以延伸,所以也有人将计算机称为“电脑”。

人类某些机械性的智力活动是由反应、计算、判断和记忆这四种基本功能组成的。在电子计算机中,各种门电路以及由门电路构成的运算电路、逻辑电路以及存储电路,可以将上述四种智能物化,并通过复杂而巧妙的方式组合起来。由于这些电路反应、计算、判断的速度都比人要快得多,存储器的存取速度也很快,且存储容量非常大,所以计算机实际上实现了对人类智能的某种放大。

1944年8月到1945年6月,在冯·诺依曼的领导下,制定了一个“离散变量自动电子计算机”(Electronic Discrete Variable Automatic Computer)方案,它由计算器(CA)、逻辑控制装置(CC)、存储器(M)、输入(I)和输出(O)五个部分组成,这个被称为EDVAC的方案是目前所有计算机设计的基础,按这个方案制成的计算机通称为冯·诺依曼机。

计算机由硬件和软件两大部分组成,所谓硬件指的是构成计算机的各种电路及其他的一些物理器件,而软件指的是能够完成各种智能活动的程序。

如果以硬件划分,计算机的发展大致经历了以下四个时期:第一代(1946—1957)计算机以电子管作为逻辑单元,其主存容量为1KB(存取时间为 $500\mu\text{s}$)、计算速度只有每秒几千次;第二代(1958—1964)以晶体管电路作为逻辑单元,主存100KB,速度提高到每秒几十万次,并且采用了体系结构,为向第三代计算机过渡作好了准备;第三代(1965—1973)的硬件使用了集成电路,主存为几百KB,速度达每秒千万次,体系结构最重要的特点是系列兼容;第四代(1974至20世纪80年代)与第三代没有明显的区别,硬件使用了大规模集成电路,它最突出的特点是向运算巨型化和体积微型化发展。

巨型机的运算速度快、体积小,如格雷-1(Gray-1)巨型机的最高运算速度为每秒2.5亿次,而这台当时世界上最大的计算机占地仅 7m^2 。计算机发展史上最重大的事件就是20世纪70年代微型机的诞生和发展,而且其性能不断地提高,价格则不断地下降。

最初编制程序使用的是机器指令,因此程序很难阅读和交流。计算机软件发展的一个突破是出现了符号语言和汇编程序。符号语言增加了程序的可读性,而汇编程序能够把用符号语言所编写的程序自动转换成机器能识别的代码。但符号语言只是一种低级语言,它是与具体的机器联系在一起的,为了程序能在不同的机器上应用和交流,又发展出了高级语言。高级语言的使用扩大了计算机应用的范围,提高了程序设计的能力,使大型程序开始出现。

由于大型程序规模太大、复杂性不断地增加,带来的错误越来越多,性质也越来越严重,终于出现了软件危机。人们对软件危机的反省对计算机技术产生了深刻的影响。首先,改变了设计思想,以往的设计是软件支持硬件,而现在则要求硬件支持软件;其次,对软件的复杂性有了认识,提出了软件工程的概念。

展望计算机发展的未来,在硬件方面,正如阿姆达尔(G. M. Amdahl)1982年预言的那样,硅的时代就要过去,计算机器件将有新的突破;在软件方面,软件的作用将越来越重



要, 计算机更新换代的标志不再是硬件方面, 而是软件方面的变化。它将具备处理自然语言的能力, 有具备学习和归纳能力的专家系统, 用户只需说明要程序做什么, 而不必规定怎样做等特点, 计算机将走上以软件为主的发展道路。

现在对机械电子系统的看法是: 除了“块与块”之间的动力(肌肉)联系之外, 还有信息(神经)之间的相互联系, 并由具有数值运算和逻辑推理能力的计算机来对机械电子系统的所有信息进行智能处理。

可以从汽车工业的发展过程中观察到机械和电子一体化改革最明显的趋势。在很长一段时间内, 汽车是一项机械方面的奇迹, 它只有少量的电子附件。最初是起动电机, 后来是发电机, 每种附件都使原先产品的性能比过去提高一点, 随着半导体和微电子学的出现, 今天的汽车由微处理器控制, 机器人来制造, 并可通过计算机进行故障分析, 从而使机械奇迹突然变成了机械电子奇迹。

机械电子工程的本质是: 机械与电子技术的规划应用和有效的结合, 以构成一个最优的产品或系统。

在当今的世界市场中, 产品制造和销售的成功, 越来越多地取决于将电子技术和计算机技术与产品及其生产过程结合的能力。当前许多产品(汽车、机器人、洗衣机)的性能及其制造都依靠工业领域内技术开发的能力, 并且在设计初期就要考虑产品的性能及工艺过程。其结果是, 与先前的制造系统相比, 现在的系统更经济、简单、可靠, 且在操作方面具有更大的灵活性。在激烈竞争的形势下, 以往机械工程和电子工程的划分逐渐被两者的交叉学科——机械电子工程所代替。

在激烈竞争的环境中, 只有用电子学和机械工程有效结合生产出来的产品才有可能取胜。一般说来, 在这种结合过程中, 一个易犯的错误是: 电子学在工业中的应用受到遏制。在许多产品的革新中, 人们总是先从机械部分(硬件)着手, 但实际上最好的方法应该是在设计初期用电子学、控制工程和计算机等技术进行设计。这种打破传统束缚的机械和电子工程结合的核心在于采用机械电子工程的方法进行设计, 并且这也是对当今发展深刻领会的关键。

如图 1-1 和图 1-2 所示, 产品开发和工程设计是包含许多技术和学科在内的相互作用的复杂过程。机械电子工程并不是一门有严格界线并且独立的工程学科, 而是在设计过程中一个综合的思想。在完成这种综合的过程中, 机械电子工程把它的核心部分——机械工程、电子工程、计算机技术, 与许多种不同的领域, 如制造技术、管理技术和生产加工实践等, 结合在一起。图 1-3 为机械电子工程的组成示意图。

机械电子方法在工程设计中的基础是信息和控制。有些人可能对“机械电子学”产生反感, 认为它“仅仅是控制工程的改头换面”, 这种观点没有认识到采用与结合电子技术和计算机技术对机械系统设计方法产生的直接影响。事实上, 用机械电子工程的设计方法设计出来的机械系统

比全部采用机械装置的方法更简单, 所包含的元件和运动部件较少。例如, 在以机电方法设计的一台缝纫机内, 利用一块单片集成电路控制针脚花样, 可以代替老式缝纫机约 350 个部件。由于将复杂的功能(如机械系统的精确定位)转化为由电子来实现, 因此带来了很方便。

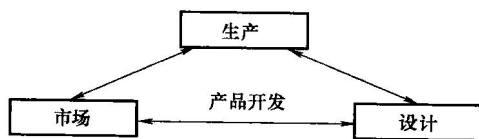


图 1-1 产品开发过程

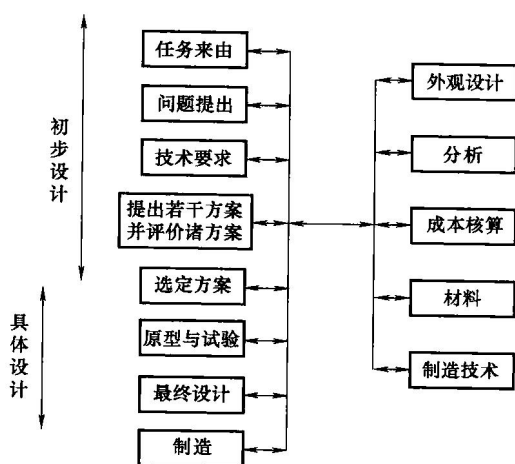


图 1-2 工程设计过程

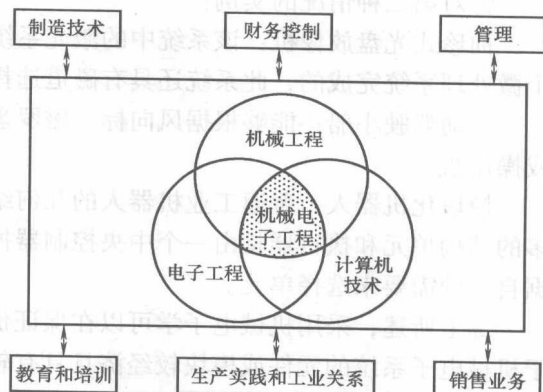


图 1-3 机械电子工程的组成示意图

成功的机械电子工程设计方法，应在理论设计阶段初期就树立机械电子的设计思想，这样在具体设计阶段，就有较多方案可供选择。

在机械电子工程的一些早期应用中，机械电子系统显得有些笨拙，性能也较差，且缺乏适应能力，但在数控机床（CNC）和大规模自动加工过程（如化工厂和轧钢厂）中还是很成功的。遗憾的是，大多数机械电子系统的设计并没有因为电控系统的加入而显著改变。事实上，正是由于许多设计者认为控制系统带有神秘和令人怀疑的色彩，因而限制了他们（尤其是机械工程师）在机械系统中应用电子技术的能力。

1.2 机械电子工程在产品及其设计中的应用

从目前情况来看，许多产品都是由机械零部件和电子元器件组成的，但这并不意味着它们都是机电产品，例如电话、手机、频率计或示波器这样的产品，此类产品的主要功能是信息处理，事实上它们是电子类的产品。本书所讨论的机电系统，是以完成动作的传递、变换，以及机械能的利用为其主要功能的。

早期的机电一体化产品主要强调的是物理上和动力上的连接，而 20 世纪 80 年代末以来，机电产品越来越强调基于传感器信息的驱动，这样可以实现更加精准的动作。因此，对目前已有的机电产品，有必要把它们区分为以下两类情况：

- 1) 用机械电子技术对现有产品进行改造以提高其性能。
- 2) 用机械电子方法设计开发全新的产品。

对第一种情况，举例如下：

照像机：增加自动调焦、调光圈和快门系统，因此，拍照时只需找到被摄物体的位置而不需要掌握任何专门摄影技术。

加工设备：动力装置（如钻孔机床）具有速度和转矩控制，正/反转和加速度控制等特点。

发动机和传动装置：发动机和动力控制系统可以减少排放物、提高燃料效率、防止在低



速状态下注入过多的燃料而引起驱动装置误动作，并且具有反锁制动和换档等特点。

针对第二种情况的实例：

袖珍式光盘放像机：该系统中的激光系统用来从盘上读取数字编码信号，其控制是由一个微处理系统完成的，此系统还具有磁道选择、扫描和预检等功能。

自动驾驶小船：能够根据风向标、磁罗盘或全向无线电信标机的输出信号来控制操作杆或操作盘。

模块化机器人：普通工业机器人的几何结构限制了其功能，而模块化机器人，由于其众多的结构单元和执行器是由一个中央控制器控制的，克服了普通机器人的缺点，用户可以根据自己的需要来选择单元。

综上所述，采用机械电子学可以在保证价格不变或降低的前提下提高产品性能。这是由于机械电子系统的元件或模块较经济且具有较强的功能所致。

在第一类产品中，由于在最初的设计中只考虑了动力之间的联系，而没有考虑“信息驱动”，因此传感器和控制器是在后来的改造中加上去的，某些时候就有可能因为零部件或元器件的性能或者安装空间不能满足要求而使改造失败。而对第二类产品，由于在一开始设计的时候就同时考虑了动力和信息之间的联系，特别是强调了通过“嵌入式”设计来实现“机电一体化”，产品性能得到了极大的提高。在今天，一些典型的现代机电产品，如磁悬浮轴承、喷气式战斗机等，离开了电子工程的机械根本就无法工作。

在工程设计中，机械电子方法能将系统的大量材料和信息集中起来，使系统具有更高的性能、更强的灵活性。因此，要做到万无一失，机械电子工程的设计必须包括初步设计和具体设计两个阶段。

在制造工业中，需要使整个系统及其组成部分具有高度的可控性，因此要对各个单元的功能及它们在整个系统中的作用作全面了解。

对产品来说，用户关心的是产品性能的提高、操作程序的简化，而并不关心用什么样的方法来达到此目的，因此许多产品都装有用以提高产品性能的微控制器。微控制器对用户是开放的，用户可以通过界面来选择适当的控制功能。

当前，许多部门都在用机械电子方法从事产品和系统的开发，开发过程的技术交接通常由某一个部门负责，而该部门又往往不从事系统的总体设计，它的任务仅仅是将一个部门的工作转交给另一个部门，大部分是事务性的工作。在真正的机械电子设计方法中，这种协调工作应该由设计中心完成。这个事实已逐渐被认识，尤其是在日本。

因此，用机械电子方法进行工程设计的核心是将电子技术和计算机技术与机械系统有机地结合起来。对现有产品或系统，也常用机械电子方法来改善其性能。

工程设计中的机械电子方法与系统结构的配置有关，在这种方法中，可以实现各种技术的集成，并对其进行评估。为达到这个目的，通常采用一种基于信息的自顶向下的策略，就可以将系统分解成一些模块。

在此需要说明的是，在机械电子系统中，其机械结构（Structure）指的是机架（起支撑作用）、封装（各种界面）、外壳（起外观和隔离作用）及工具库（存储刀具或零件）等多方面的功能，事实上，这也就是下面所谈及的装配模块（Assembly module）的作用。

如图 1-4 所示，每个模块的功能如下：

装配模块表示系统的机械部分和结构部分的物理实现，它主要与材料特性、结构特点