

Mechatronics System Design

机电一体化 系统设计

(美) Devdas Shetty 著
Richard A. Kolk
张树生 等译

MECHATRONICS
SYSTEM
DESIGN

DEVDA S SHETTY • RICHARD A. KOLK



机械工业出版社
China Machine Press

Mechatronics System Design

机电一体化 系统设计

(美) Devdas Shetty 著
Richard A. Kolk
张树生 等译



机械工业出版社
China Machine Press

本书将与机电一体化相关的内容综合为一体,系统介绍机电一体化系统的设计过程。主要涵盖机电一体化系统的建模和仿真,传感器的基本理论和操作原理,软硬件要求、控制和设计,以及计算机接口和实时数据采集与控制的理论和实践应用等。包含大量可以用实验室环境迅速组装并试验的研究实例、问题和案例分析,通过系统建模技术将复杂分散的内容用清晰简洁的方式融合起来。章后包含各类习题,方便教学。

本书适合作为机械工程、电子工程和机械电子工程等专业高年级本科生或研究生的教材,同时也可供相关工程技术人员参考。

Devdas Shetty, Richard A. Kolk: *Mechatronics System Design*.

ISBN: 0-534-95285-2

Copyright © 1997 by PWS Publishing Company, a division of Thomson Learning.

Original language published by Thomson Learning (a division of Thomson Learning Asia Pte Ltd). All rights reserved. 本书原版由汤姆森学习出版集团出版。版权所有,盗印必究。

China Machine Press is authorized by Thomson Learning to publish and distribute exclusively this simplified Chinese edition. This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only (excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan). Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

本书中文简体字翻译版由汤姆森学习出版集团授权机械工业出版社独家出版发行。此版本仅限在中华人民共和国境内(不包括中国香港、澳门特别行政区及中国台湾)销售。未经授权的本书出口将被视为违反版权法的行为。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

981-265-755-x

版权所有,侵权必究。

本书法律顾问 北京市展达律师事务所

本书版权登记号:图字:01-2004-1645

图书在版编目(CIP)数据

机电一体化系统设计/(美)谢提(Shetty, D.)等著;张树生等译.-北京:机械工业出版社,2006.1

书名原文:Mechatronics System Design

ISBN 7-111-17164-0

I. 机… II. ①谢… ②张… III. 机电一体化-系统设计 IV. TH-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第099500号

机械工业出版社(北京市西城区百万庄大街22号 邮政编码 100037)

责任编辑:傅志红 梁福军

北京瑞德印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2006年1月第1版第1次印刷

787mm×1092mm 1/16·21.75印张

印数:0 001-4 000册

定价:39.00元

凡购本书,如有倒页、脱页、缺页,由本社发行部调换
本社购书热线:(010) 68326294



华章教育

赤诚奉献

电子与电气工程丛书

VHDL设计、表示和综合 (原书第2版)	Armstrong/李宗伯/65.00 (附光盘)
电磁场与电磁波	Guru/周克定/39.00
数字逻辑: 应用与设计	Yarbrough/李书浩/49.00
数字系统设计基础教程	Uyemura/陈恕兴/32.00
电子电路原理 (第2版) (上册)	Burn/董平/49.00
电子电路原理 (第2版) (下册)	Burn/黄汝激/45.00 (附光盘)
信号、系统与信号处理 (上册)	Amardard/冯博琴/40.00 (附磁盘)
信号、系统与信号处理 (下册)	Amardard/冯博琴/40.00 (附磁盘)
信号处理的小波导引	Mallat/杨力华/55.00
Verilog HDL硬件描述语言	Bhasker/徐振林/19.00
嵌入式微计算机系统——实时接口技术	Valano/李曦/78.00 (附光盘)
无线通信中的智能天线	Liberi/马凉/38.00
光纤通信技术	Mynbaev/吴时霖/78.00
光网络: 第三代传送系统	Black/黄照祥/28.00
DSP算法、应用与设计	Bateman/陈健/79.00 (附光盘)
数字设计: 原理与实践 (原书第3版)	Wakerly/林生/65.00
仿真工程	Ledin/焦宗夏/29.00 (附光盘)
VLSI数字信号处理系统: 设计与实现	Parhi/陈弘毅/65.00
现代数字信号处理	Cristi/徐盛/39.00
信息论基础	Corer/阮吉寿/56.00
通信系统仿真原理与无线应用	Tranter/肖明波/59.00
信号与线性系统分析 (原书第2版)	Carlson/曾朝阳/69.00

经典原版书库

(电子与电气工程部分)

VHDL设计、表示和综合 (第2版)	Armstrong/69.00 (附光盘)
电磁场与电磁波	Guru/68.00
数字逻辑应用与设计	Yarbrough/69.00
DSP算法、应用与设计	Bateman/79.00 (附光盘)
CMOS电路设计、布局与仿真	Baker/89.00
数字逻辑基础与Verilog设计	Brown/79.00 (附光盘)
VLSI数字信号处理系统设计与实现	Parhi/79.00
现代数字信号处理	Cristi/40.00
微机接口技术实验教程	Stephen/59.00
信号处理的小波导引 (第2版)	Mallat/65.00
通信网络基础	Jean/32.00
傅里叶分析与小波分析导论	Pinsky/49.00
逻辑设计基础 (第5版)	Roth/68.00 (附光盘)
数字通信导论	Ziemer/89.00
信号、系统和变换 (第3版)	Phillips/75.00
信号与系统的结构和解释	Edward/59.00
数字通信 (第2版)	Ian/96.00
机械电子系统设计	Shetty/39.00
系统动力学 (第4版)	Ogata/75.00
电力系统分析 (第2版)	Bergen/59.00
机器人学导论 (第3版)	Craig/49.00
CMOS大规模集成电路设计 (第3版)	Weste/125.00
射频电子学: 电路及其应用	Hagen/45.00

译者序

机电一体化 (mechatronics) 是微电子技术向传统机械工程渗透而形成的融合机械工程、电气工程、计算机科学、信息技术等为一体的新兴交叉学科。

以机电一体化为标志的现代制造技术极大地推进了经济、社会的发展与进步,改变着人们的传统观念。机电一体化技术革命的浪潮席卷全球,已经渗透到世界经济与科技的各个领域,成为当今世界技术竞争的一个至高点,由此形成的机电一体化高新技术产业被列入各国发展之首。

机电一体化技术的全球性竞争归根到底是机电一体化人才竞争,而人才培养的关键在于机电一体化教育。自20世纪80年代以来,许多大专院校相继开设了机械电子工程专业,设立了机械电子工程学士、硕士和博士学位,为此编写出版了不少机电一体化技术与系统的教材,《机电一体化系统设计》则是为机械电子工程和相关专业引进的重要的专业教材。

机电一体化系统设计主要研究如何集成精密机械技术、传感检测技术、信息处理技术、自动控制技术和伺服传动技术,进行总体优化设计。设计所形成的机电一体化系统不是上述共性技术的简单叠加,而是这些共性技术的相互渗透、相互结合,形成某一单项技术无法达到的优势,并将这种优势通过性能优异的机电一体化产品体现和转化为强大的生产力。因此采用清晰简单的方式,把复杂和表面分散的机电一体化共性关键技术融合起来,并提供计划、试验和实现良好机电一体化系统的所需知识的教材显得尤为必要。

本书作者Devdas Shetty 教授是美国康涅狄格州哈特福德大学的制造工程终身教授、哈特福德大学工学院副院长和工程应用中心(EAC)主任。他在机电一体化设计领域的研究成果举世瞩目。《机电一体化系统设计》凝聚了Devdas Shetty 教授从事机电一体化教学科研理论与实践的最新成果,作为教材被美国许多大学广为使用。

本书的独特之处在于涵盖了实际系统的建模和仿真,基于可视化程序框图对机电一体化系统进行物理系统动态建模,建模环境直观、灵活,更易理解。通过系统建模技术将复杂分散的机电一体化技术与内容用清楚和简洁的方式融合起来,进而选择与设计传感器、执行器、控制器、接口硬件以及信息处理系统软件。本书所有案例都可以用I/O板、低价的设备、可视化的仿真软件实现。本书还为读者提供了策划、试验和实现良好机电一体化系统的最新工具。所有这些特点说明,本书在教材编著思路、技术内容和系统协调上有创新,集合系统建模、仿真、传感器、执行器、计算机实时接口和控制等机电一体化相关内容为一体,适合作为高等院校本科生或研究生课程尤其是双语教学的好教材,同时也可供相关专业工程技术人员参考。

本书由中国计量学院机械电子工程研究所张树生、单越康、谢岳、吕进、冯爱明、徐文龙等翻译,全书由张树生统稿。参加翻译工作的还有林敏、冀瑜、韦元、黄宇、张琦、刘辉军、胡亦曼、毛谦敏等。翻译中我们力求忠实于原著,又充分体现中国文化与科技发展的特点。在此要特别感谢浙江大学博士生导师王乐勤教授、杭州电子科技大学陈国金教授等机械电子工程专家的精心指导,衷心感谢机械工业出版社华章分社的编辑为本书出版所做出的辛

勤工作，他们的敬业精神和渊博知识为译者留下了深刻的印象。感谢为本书的翻译和审校工作完成大量繁琐而又十分严谨工作的其他教授、博士和同事们。

由于译者水平有限，加之时间仓促，书中存在错误与疏漏难免，敬请广大读者见谅，并批评指正。

译 者

2005年3月于杭州

前 言

机电一体化是由机械工程、电气工程、计算机科学和信息技术等有机结合而成的学科，包括控制系统以及设计具有内置智能产品的数值方法。

本书适用于机械工程、工业工程、制造工程、土木工程、电气工程和机械电子工程专业的高年级本科生和研究生。本书综合了系统建模、仿真、传感器、执行器、实时计算机接口和控制等机电一体化的相关内容，适合作为大学机电一体化课程的教材。本书还向学生介绍了机电一体化技术的基本原理所涉及的各种专题。

本书的独特之处在于涵盖了物理系统的建模和仿真。传统上，学习本课程需要至少熟练一门计算机语言，如FORTRAN、C或BASIC。有鉴于此，在本书中，我们使用基于可视化编程环境框图来完成所有建模和仿真任务。学生会发现这个环境很直观、灵活，更容易理解。

本书特色

本书是为学生和在职工程师而编写的，既可作为参考书也可用作说明性资料。本书的主要特点如下：

- 从系统建模的角度对机电一体化加以综述和解释。
- 创建物理系统动态模型的修正模拟法。
- 详细描述许多装置中的传感器与执行器的操作和选择。
- 结合现实世界的约束条件全面讨论经典控制。
- 讨论用于实时计算机接口的模拟和数字硬件器件。
- 汇集了许多带零部件表的实例研究，适合于实验练习。
- 概括了机电一体化领域最新的成果和未来的发展趋势。

随着微电子技术、新材料和控制技术的广泛应用，许多以前外置的处理电路现在通常被内置或集成于产品中。例如，具有线性化和信号修整功能的集成微电子电路的智能传感器做成传感器模块，易于广泛应用。微型传感器和微机电系统在消费品、卫生保健、过程控制、军事/航天和环境工程中有着数不胜数的应用。它们微小的尺寸、优越的性能和广泛的应用能力为工程师们改善系统设计提供了新的可能。

章节编排

基于本书的机电一体化课程，可以通过示例、问题以及在实验室环境迅速组装并试验的研究实例向学生介绍机电一体化的设计过程。

- 第1章介绍机电一体化的基础知识，然后深入探讨机电一体化的设计过程。
- 第2章专门介绍系统建模和仿真。学生将学会用修正模拟法从图表和其他信息资料中创建准确的基于计算机的动态模型。这一独特的方法结合了在许多教材中可以找到的建模的标准模拟法和框图，其主要区别是具有直接包含非线性环节的能力而无需线性化。该章还讨论了许多在机电一体化中碰到的物理系统，包括机械系统、电气系统、热系统、

流体系统和液压元件。这一章中阐述的模型和技术将会在随后的机电一体化设计过程章节中运用到。

- 第3章主要介绍传感器和变换器的基本理论概念和操作原理，还讨论了仪器仪表装置原理、模拟和数字传感原理以及一些运动、力和振动传感器。
- 第4章介绍执行装置，包括直流电动机、步进电动机、流体动力执行器和压电执行器，详细介绍了适用于机电一体化分析的完整的步进电动机/驱动模型。
- 第5章讨论机电一体化系统的软硬件要求，包括布尔逻辑、模拟与数字电路和可编程逻辑控制器。
- 第6章介绍机电一体化的控制和设计，特别注意了现实世界的约束，包括延时和非线性。详细介绍了根轨迹和伯德图设计法，以及PI、PD、滞后、超前、速度反馈和纯增益等常用控制结构的设计过程。
- 第7章讨论计算机接口和实时数据采集与控制的理论和实践应用。用可视化编程方法进行信号处理和数据解释。
- 第8章介绍机电一体化的新概念、未来的发展趋势和最新的发展现状。
- 第9章介绍适合于实验室试验的案例集，还介绍了应用于机器人、机械手、机床、飞行器、热系统和流体过程设备的集成元件和设计思路。所有案例都可以用通用的I/O板、低价的设备、可视化仿真环境和应用软件来实现。作者还为那些对复制案例感兴趣的读者提供了额外信息。

编写本书的真正挑战在于用清晰和简洁的方式把复杂和表面上分散的内容结合起来，这样做对理解机电一体化是至关重要的。本书为读者提供了计划、测试和实现良好机电一体化系统所需的所有工具。

致谢

本书所用材料是作者在哈特福德大学、Cooper联合学院、联合技术研究中心、麦道飞机公司和开利公司的研究与教学工作中积累起来的。

感谢在准备工作中给予帮助的同事和朋友。感谢给本书审稿的教授Chester Dudzik、Bob Loftas和Paul Botosoni。感谢给予建议和鼓励的哈特福德大学的教授Ernest Gardow、Donald Leone、Louis Godbout和Frank Lahey，以及John Cagnetta博士。

特别感谢联合技术研究中心的Fred Cogswell博士、Tom Hardy、Carl Sgamboti和Tim Obee先生参与了多次系统建模的讨论。感谢开利公司电子分部的Steve Defoe和Paul James先生对控制一章的审稿和建议。感谢Visual Solutions公司在实时接口一章中给予的帮助。

目 录

译者序
前言

第1章 绪论	1
1.1 什么是机电一体化	1
1.2 机电一体化集成设计问题	2
1.3 机电一体化关键要素	4
1.3.1 信息系统	4
1.3.2 机械系统	9
1.3.3 电气系统	10
1.3.4 计算机系统	14
1.3.5 传感器和执行器	15
1.3.6 实时接口	16
1.4 机电一体化设计过程	18
1.5 机电一体化中的高级方法	21
1.6 小结	24
参考文献	24
习题	24
第2章 物理系统的建模和仿真	27
2.1 概述	27
2.2 仿真和框图	27
2.2.1 框图	28
2.2.2 仿真	30
2.3 模拟和阻抗框图	31
2.3.1 位势变量PV和流体变量FV	31
2.3.2 阻抗图	32
2.3.3 修正模拟法	37
2.4 电气系统	41
2.4.1 电阻、电容和电感	41
2.4.2 电压源、电流源和变压器	41
2.5 机械平动系统	46
2.5.1 摩擦力	48
2.5.2 弹簧	51
2.6 机械转动系统	60
2.7 机电耦合	64
2.7.1 洛伦兹定律	64
2.7.2 法拉第定律	65

2.7.3 作用公式	66
2.8 流体系统	68
2.8.1 密度与重度	68
2.8.2 力、压力与压头间的关系	69
2.8.3 体积模量	69
2.8.4 质量守恒	69
2.8.5 能量守恒	70
2.8.6 节流口	71
2.8.7 容器	73
2.8.8 流体类比小结	74
2.9 小结	79
参考文献	79
习题	80
第3章 传感器和变换器	85
3.1 传感器和变换器概述	85
3.1.1 传感器的分类	86
3.1.2 传感器和变换器的参数测量	87
3.1.3 仪表系统的品质参数	88
3.1.4 机电一体化建模参数中的误差和 不确定度	90
3.1.5 应用示例	92
3.2 运动和位置测量传感器	95
3.2.1 电阻式变换器	96
3.2.2 电感式变换器	99
3.2.3 电容式变换器	103
3.2.4 压电式变换器	109
3.2.5 涡流式变换器	116
3.2.6 霍尔效应	117
3.2.7 运动测量用的数字传感器	120
3.2.8 气动式变换器	124
3.3 力、转矩和触觉式传感器	126
3.3.1 应变计	126
3.3.2 触觉式传感器	131
3.4 流量传感器	132
3.4.1 固体流量	132
3.4.2 液体流量	133
3.4.3 差压式传感器	134

3.4.4 流量测量的超声波流量传感器	137	4.3 流体动力执行器	173
3.4.5 靶式流量计	138	4.3.1 流体动力中的控制系统	173
3.4.6 涡轮流量计	139	4.3.2 流体动力执行器	176
3.4.7 转子力矩质量流量计	139	4.4 流体动力设计要素	176
3.4.8 利用激光多普勒效应的流量测量	140	4.4.1 流体动力能量输入装置	177
3.4.9 热线风速计	141	4.4.2 能量调制装置	180
3.4.10 电磁流量计	141	4.4.3 能量输出装置	184
3.5 温度传感器	142	4.4.4 流体动力回路的控制模式	185
3.5.1 基于电阻变化的温度传感器	143	4.4.5 流体动力回路的其他电气元件	186
3.5.2 基于不同金属间接触电压的温度传感器	144	4.5 压电执行器	186
3.5.3 辐射式温度传感器	146	4.6 小结	187
3.5.4 光纤式温度传感器	146	参考文献	187
3.5.5 干涉式温度传感器	146	习题	188
3.6 超声波传感器	147	第5章 机电一体化系统的硬件组成	189
3.6.1 超声波距离测量	147	5.1 机电一体化数字系统	189
3.6.2 超声波应力测量	148	5.2 二进制逻辑	193
3.6.3 超声波流量测量	148	5.2.1 几种逻辑表达的证明与简化	195
3.7 测距传感器	148	5.2.2 真值表	196
3.7.1 测距传感器原理	149	5.3 卡诺图化简	198
3.7.2 点投影测量法	150	5.3.1 二变量卡诺图	198
3.7.3 光条纹测量法	151	5.3.2 三变量卡诺图	199
3.7.4 移动拍照测量法	151	5.3.3 四变量卡诺图	201
3.7.5 飞行时间测量法	151	5.4 变换器信号调节及数据转换装置	201
3.7.6 双目镜测量法	152	5.4.1 运算及检测放大器	201
3.7.7 应用位置敏感检测器的光学测量法	153	5.4.2 数据转换装置	207
3.7.8 其他测距技术	154	5.5 可编程控制器	209
3.8 基于磁致伸缩式传感器的有源振动控制	155	5.5.1 PLC系统概述	210
3.8.1 实时振动控制的执行器	155	5.5.2 可编程控制器特点	211
3.8.2 磁致伸缩式变换器	155	5.5.3 PLC编程基础	213
3.9 机电一体化系统中的光纤器件	157	5.6 小结	215
3.10 小结	159	参考文献	216
参考文献	160	习题	216
习题	161	第6章 信号、系统与控制	219
第4章 执行装置	167	6.1 信号、系统和控制概述	219
4.1 直流电动机	167	6.2 系统描述	221
4.1.1 直流电动机的数学模型	167	6.2.1 传递函数形式	221
4.1.2 无刷直流电动机	168	6.2.2 框图形式	223
4.1.3 交流电动机	169	6.3 非线性系统的线性化	225
4.2 永磁步进电动机	169	6.4 延时	227
4.2.1 建模方法	170	6.5 系统性能指标	229
4.2.2 驱动方程和框图模型	171	6.5.1 稳定性	229
4.2.3 电动机方程和框图模型	171	6.5.2 准确度	229
		6.5.3 瞬态响应	233

6.5.4 灵敏度	235	8.2.5 制造检验中的监督控制	293
6.6 根轨迹	236	8.2.6 异构系统的集成	294
6.6.1 基本原理	237	8.3 机电一体化中的人工智能	296
6.6.2 绘制规则	238	8.3.1 机电一体化中的人工神经网络	296
6.6.3 绘制实例	239	8.3.2 知识库系统	297
6.6.4 控制	240	8.4 机电一体化中的模糊逻辑应用	298
6.7 伯德图	246	8.4.1 模糊逻辑系统	298
6.8 小结	253	8.4.2 何谓模糊控制	299
参考文献	253	8.4.3 模糊专家系统的使用	301
习题	253	8.5 机电一体化中的微型传感器	302
第7章 实时接口	257	8.5.1 微型传感器制造技术	303
7.1 概述	257	8.5.2 微型压力传感器	305
7.2 数据采集与控制系统的基本要素	257	8.5.3 微型加速计传感器	305
7.3 I/O过程的概述	259	8.5.4 微型热传感器	305
7.4 I/O卡与软件的安装	262	8.5.5 微型流量传感器	305
7.5 应用软件的安装	264	8.5.6 微型湿度传感器	305
7.5.1 使用VisSim进行基础建模和仿真	264	8.5.7 微型位移传感器	305
7.5.2 为实时运行设置VisSim	267	8.5.8 微型光学传感器	305
7.6 实例	272	8.6 小结	306
7.6.1 悬臂梁力的测量	272	参考文献	306
7.6.2 控制步进电动机	274	第9章 案例分析	309
7.6.3 数据采集和控制系统	279	9.1 数据采集案例分析	309
7.7 帧溢出	284	9.1.1 运输桥梁表面材料测试	309
7.7.1 识别上限	285	9.1.2 应用在汽车中的传感器标定系统	310
7.7.2 限制视图	285	9.1.3 应变计称重系统	312
7.7.3 延长时间步长	285	9.1.4 螺线管电磁力——位移标定系统	314
7.7.4 使用更简单的积分算法	285	9.1.5 光学旋转编码器	315
7.7.5 关闭隐含的公式运算器	286	9.2 数据采集和控制案例分析	317
7.8 小结	286	9.2.1 陶瓷板的热循环疲劳	318
参考文献	286	9.2.2 pH值控制系统	320
第8章 机电一体化系统的高级应用	287	9.2.3 除冰温度控制系统	321
8.1 状态监测传感器	287	9.2.4 CD播放器的跳读控制	324
8.2 自动化制造中的机电一体化控制	290	9.3 小结	325
8.2.1 制造过程监测	290	9.4 关于其他案例分析的建议	325
8.2.2 在线质量监测	290	附录 国内外电气图形符号对照	328
8.2.3 基于模型的系统	291	索引	329
8.2.4 硬件在环路仿真	292		

第1章 绪 论

本章为学生提供机电一体化系统设计过程的概貌,同时对机电一体化方法中所用到的技术进行了总体的描述。本章一开始介绍了机电一体化系统设计的关键要素、技术和设计过程。在给出机电一体化的定义并讨论了几个重要设计问题之后,介绍了机电一体化的6个关键要素——信息系统、电气系统、机械系统、计算机系统、传感器及执行器和实时接口。有关机电一体化的特征首先是从原理出发的。尽管任何一种支持性技术中的经验是有帮助的,但不是必需的。本章最后叙述了机电一体化系统设计过程,并讨论了当前一些有意义的应用。

1.1 什么是机电一体化

※ 机电一体化是一种用于机电产品最优设计的方法学。

方法学是从事某个知识领域的特定分支或学科的专业人员所运用的实践、程序和规则的一个集合。其中常见的技术学科包括热力学、电气工程、计算机科学和机械工程等等。机电一体化系统是多学科的,它包括4个基本学科:电气、机械、计算机科学和信息技术。

洛克希德和波音公司研制的F-22战斗机是机电一体化技术应用的一个实例。该设计强调可靠性、可维护性、性能和成本。多学科的功能性,包括集成的飞行推动力控制器和二维推力定向引擎喷嘴,在最初的设计阶段就被设计进了战斗机。

1

多学科系统并不是最近才出现的,已成功地设计并应用了很多年。最常见的多学科系统之一就是机电系统,它常常使用计算机算法来改善一个机械系统的特性。电子学是计算机科学和机械学科之间信息转换的桥梁。

机电一体化系统和多学科系统之间的区别不在于它们的组成要素,而在于对这些组成要素设计的次序。一直以来,多学科系统设计使用一种按学科顺序设计的方法。比如,机电系统的设计一般通过以机械设计开始的3个步骤完成。当机械设计完成后,设计电源和微电子系统,接着是控制算法的设计及其实施。按学科顺序设计的方法的最大缺点是对整个过程中各个点的固定设计导致新的限制,这种限制源于对这些点的设计,而且会传递到下一个学科点的设计。很多控制系统工程师对下面的讽刺妙语都很熟悉:

※ 设计并制造机械系统。然后叫来油漆匠进行油漆,叫来控制系统工程师安装控制器。

控制器设计常常因为这些附加的限制而失败。比如,降低成本在许多系统中是一个主要的因素。在机械和电气设计阶段的折衷往往会涉及传感器和执行器。减少传感器、执行器的数目以及使用低精度传感器和低能耗执行器是一些节约成本的标准方法。这些影响对控制系统是附加的,有时候会带来冲突性的限制。

※ 机电一体化系统设计方法论基于一种并行而不是串行的学科设计,导致产品更具协同性。

系统工程学是工程学的一个分支,它使用并行方法进行预先设计。在某种程度上,机电一体化是系统工程学方法的延伸,但是它补充了信息系统以指导设计,这种指导贯穿于设计的各个阶段,而不只是预先设计阶段,从而使之更加综合。在将机械、电气及计算机系统和

信息系统进行集成以设计制造产品和过程时，需要进行协同。这种协同是通过合理组合参数实现的。这就是说，最终产品的功能应大于其各部件的功能之和。如果没有协同组合的话，机电一体化产品具有的性能特征是很难实现的。机电一体化方法的关键要素如图1-1所示。

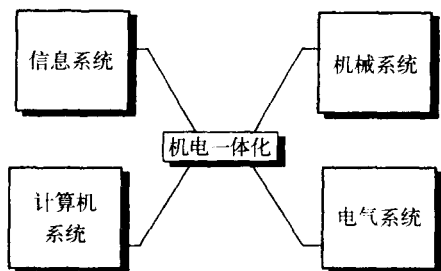


图1-1 机电一体化的组成部分

2

即使文献常使用这种简明的表达，但是还有一种更清楚也更复杂的表达方法，如图1-2所示。

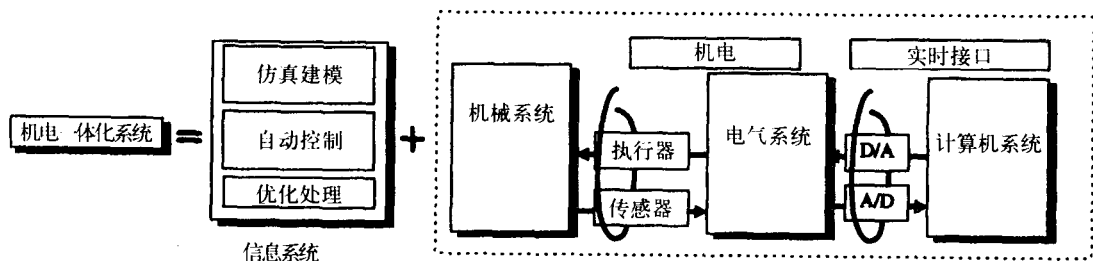


图1-2 机电一体化系统关键要素

机电一体化系统是在物理系统中使用信息系统的结果。物理系统，即最右边的虚线框，包括机械系统、电气系统、计算机系统、执行器、传感器和实时接口。在有些文献中，将这个框称为机电系统。

※ 机电一体化系统不只是一个机电系统，而是大于一个控制系统。

传感器和执行器用来把能量从动力大的一边——通常是机械的一边，转换到动力小的一边——通常是电气和计算机的一边。框中标记为机械系统的部分常常不仅包括机械零部件，还可能包括流体、气动、热、声、化学以及其他学科。传感技术已经出现了新的发展以适应对特殊监测应用解决方案的不断增长的需求。已经生产出更快、更灵敏、更精确的测量装置。传感器正在被小型化并被做成固态形式以使几个传感器能被集成到一起实现功能的组合。

控制是一个总称，它能出现在生物和机器中。自动控制这个术语用来描述一台机器被另一台机器控制的情形。

除了如工业控制、制造、测试或军事上的应用，传感技术也在不断出现新的发展。

1.2 机电一体化集成设计问题

机电一体化方法内在的并行性，或同时性工程，非常依赖于贯穿设计和样机试制阶段的系统建模和仿真。因为模型将由来自多学科工程师们所使用 and 修改，所以在一个可视化直观环境中进行编程就非常重要。这样的环境包括框图、流程图、状态转换图和波特图。与传统的设计语言如FORTRAN、BASIC、C和Pascal相比，这些可视化建模环境由于其直观性，

3

不需要进行太多培训。目前应用最广泛的可视编程环境是框图。这种环境功能强大、开发费用低并且常常包括一个代码生成器选项可以将框图转化成适于目标系统使用的C或类似C的高级语言。很多供应商都提供基于框图的建模和仿真包,包括Matrixx、Easy5、SimuLink、VisSim和LabView。

机电一体化是一种设计哲学,一种工程设计的集成方法。机电一体化的主要因素是在设计过程中涉及这些领域。通过仿真交叉学科思想和技术的机制,机电一体化提供理想的条件以提高协同水平,从而为在技术复杂条件下的新解决办法提供推动作用。机电一体化设备和系统的一个重要特点是它们的内置智能,这是通过组合精密机械和电气工程并在设计过程中集成实时编程实现的。机电一体化使设计过程中组合执行器、传感器、控制系统和计算机成为可能。

从基本设计开始到制造阶段,在每一个阶段机电一体化设计对参数进行优化以便在较短的周期内生产出合格的产品。机电一体化使用控制系统提供一个各部件协调的框架进行系统分析。机电一体化系统的集成是通过硬件(部件)和软件(信息处理)的联合实现的。硬件集成源于将机电一体化系统看作一个整体系统来设计,将传感器、执行器和微处理器融入到机械系统中。软件集成主要是基于高级控制功能。图1-3阐明硬件和软件集成是如何发生的。它也显示了除了反馈过程外,过程知识和信息处理是如何包含在其中的。

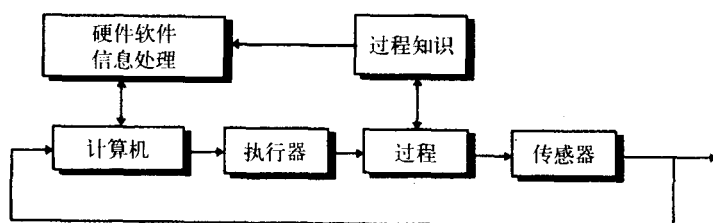


图1-3 软硬件集成总体图解

机电一体化系统开发过程的第一步就是分析客户需求以及系统集成技术环境。解决问题的复杂技术系统往往是一个具有数字或模拟形式并由复杂软件支持其硬件的机械、电子、液压和热动力部件的结合体。典型机电一体化系统使用传感器从其技术环境中收集数据和信息。接下来的一步就是使用建模和描述方法的完善形式,以一种集成的方式来涵盖这个系统的所有子任务。这包括在初始阶段对子系统间必要接口的有效描述。数据经过处理和解释,转化为执行器的动作。机电一体化系统能够缩短开发周期,降低成本,提高质量。它还可以通过从过程中获取信息来产生附加的影响。

4

机电一体化系统设计支持并行工程的概念。在机电一体化产品的设计中,有必要在不同的专家组之间协调知识和需要的信息。并行工程是产品的设计和制造以特殊方式融合的一种设计方法。传统设计和制造间的障碍被排除。它在一定程度上受了这种认识的影响,即制造阶段的高额成本源于产品设计阶段。甚至在设计阶段,它涉及了解客户、市场分析、优化性能、生命周期性能、质量、可靠性和销售。产品设计和过程规划同时进行。在组织中,并行工程总的观点很适于面向团队的项目管理,它强调集体决定。通过协调足够的信息交换,把组织的障碍变成不同功能间的协作,并行工程就有可能得到成功实施。由于并行工程的影响,传统的设计和制造之间的障碍已经减少。然而,由于缺乏一种通用的接口语言,并行工程中的信息交换并不容易。

如果机电一体化产品可以有效地整合进并行工程的管理思想,所能达到的效果将是令人振奋的。智能、自矫正传感器和反馈系统的结合产生的结果是更高的生产率、更好的质量和更高的产品可靠性。在复杂系统中,传感器和控制系统的结合会减少开支,保持高度柔性,提高机器的利用率。要完成一个能实现以上目标的机电一体化并行工程系统,在开始时就必须有一个长期的计划,该计划能考虑到今后在过程、数据功能、控制和集成工具等方面的变化需要。

1.3 机电一体化关键要素

1.3.1 信息系统

信息系统包括信息传输的所有方面,从信号处理到控制系统到分析技术。信息系统结合了以下4种学科:通信系统、信号处理、控制系统和数值计算方法。在机电一体化应用中,我们最关心的是建模、仿真、自动控制和用于优化的数字方法。

1. 建模和仿真

建模是用一个数学方程和逻辑的集合来描述真实系统行为的过程。术语真实系统与物理系统是同义词,也就是指其行为依赖于物质和能量的系统。模型可以粗略地分为静态和动态。在静态模型中不存在能量的传递。静态系统不产生运动,没有热量传递,没有流体流动,没有传播的波,任何会改变的东西都不存在。而另一方面,动态模型有能量传递而引起功率通量。功率,或者说能量的变化率引起运动、热量传递或其他随时间改变的现象。将被观察到现象作为信号,因为时间是独立变化的,所以多数信号是通过时间来表征的。

模型是一种因果结构,它接受外部信息,并使用逻辑式和方程处理,产生一个或多个输出。外来的或是外部产生的提供给模型的信息可以是固定的值,也可以是变化的值。固定值的外部信息单元称为参数,而变化值的外部信息单元称为输入信号。传统理论假定所有的模型输出信息都是变化的,称为输出信号。

因为模型是数学和逻辑表达式的集合,因此它可由一些基于文本的编程语言比如C、BASIC或FORTRAN来直接描述。不幸的是,一旦利用程序化语言来建模,为了理解这个模型我们就必须熟悉这种特殊的语言。因为大多数工程师不熟悉多种编程语言,基于文本的建模被证明对于机电一体化系统是一种不好的候选方法。理想的候选方法应该是基于图像的,或者是可视化的,不以文本为基础,具有直观的特点。可视化建模环境并不是没有问题,其中最严重的问题就是模糊。如果使一幅图像相当于1 000个文字,那么可能使图像更加难以解释。如果使可视化建模环境更直观,模糊程度就可以降低。

早在1978年,适合物理系统建模的可视化编程语言就已经出现。比如K3LA、Digicon、Easy5和Problock等几种语言被开发出来并最初用于航空工业,但并没有应用到其他领域。20世纪80年代初期,集成系统引入基于框图的Matrixx编程环境。最初,软件需要在小型机上运行;然而,随着PC机的功能日益强大,框图技术能够在微机上得以运行。今天,很多好的基于框图的建模应用程序是基于PC的,包括Matrixx、Easy5、SimuLink、VisSim和LabView。

仿真是在计算机上获得模型解的过程。尽管仿真可以在模拟计算机上进行,但大多数是在数字计算机上进行的。仿真的过程可分为3部分:初始化、迭代和终止。如果起始点是用框图描述模型的,那么在初始化部分,必须通过框之间的连接模式解出每个框的方程。比如,一个模型由三个框组成:A、B和C,彼此串联连接(外部输入进入A,A的输出是B的输入,

B的输出是C的输入), 应该先解框A的方程, 接下来是框B的方程, 然后是框C的方程。

迭代部分通过数值积分和/或微分来解在模型中出现的微分方程。

常微分方程一般是非线性方程, 它包含一个或多个作为单个独立变量函数的导数项。在大多数仿真中, 这个独立变量是时间。常微分方程的阶等同于导数的最高阶数。求常微分方程的数值解时所使用的多数方法都是使用已舍项的常微分方程的泰勒级数展开式的近似多项式, 这需要3个步骤:

(1) 写出关于初始条件的常微分方程解的函数形式的泰勒级数展开式。考虑到独立变量是时间, 级数中所有的导数项都是关于时间的导数。

(2) 在某一个导数项上进行泰勒级数的舍项, 舍项后的结果就是一个近似多项式。

(3) 依据初始条件值计算所有常量和每个导数项, 求出近似多项式。

仿真的显示部分用来显示和传递输出量。输出可以保存在一个文件中, 可以以数字读数、或者是图形化的图表、列表、仪表读数甚至动画的形式显示。除了一些如Visio、Rflow和ABC Flowcharter的流程图环境以外, 所有的可视化建模环境都包括仿真功能。最常用的环境是Matrixx/System Build (Integrated Systems)、Easy5 (Boeing)、Matlab/Simulink (Mathworks)、LabView (National Instruments) 和VisSim (Visual Solutions)。

2. 自动控制

控制系统工程是在19世纪晚期Maxwell的重大发现之后产生的一门学科, 该发现认为低阶系统(3阶或3阶以下)的稳定性依赖于特征方程的根和劳思(Routh)判据, 劳思判据给工程师提供利用高阶特征方程来判断系统稳定性的分析“工具”。直到20世纪中叶, 大部分控制应用是基于运动(机械式的), 基于温度运动(热力机械), 基于流体运动(流体机械)。直到1927年贝尔实验室的H. S. Black发明电子反馈放大器, 才使运动和电子学的结合成为可能, 这个结合的结果产生了机电系统。

在1927~1975年这段时期内, 使用电子器件修正机械系统的动作得到迅速发展, 特别是在晶体管和微处理器引入后。机电系统的设计并没有惯例的程序, 一般是依据经验。

※ 设计并建立机械系统, 然后喷漆并安装控制器。

关于这方面比你能相信的多。事实是在很多控制系统的应用中, 都是先设计和建立“其他系统”, 然后形成一些约束条件。这些约束条件连同“期望的特性”约束条件加入到控制系统学科。

※ 机电一体化系统看上去只不过是控制系统工程。它们有何区别?

区别就在于设计步骤的顺序。在机电控制应用中, 机械系统首先被设计和建立, 接着才是电气(控制)系统。这种方法将那些额外的、不必要的约束引入控制系统设计, 特别是由机械系统设计带来的约束。在机电一体化系统中, 使用并行的设计方法而不是串行设计步骤。

为完整正确地评价控制器, 我们应该熟悉用到的一些基本术语和概念。因为控制涉及对系统行为的修正, 因此用一种精确的方法来描述系统及其行为很关键。

在动态系统中一种很重要的助记符号叫做算子记号。这种简写的记号简化了微分方程和积分方程的表达。在本书中将要用到的算子 D 定义为

$$\frac{1}{D}(\cdot) = \int(\cdot) d\tau \text{ 和 } D(\cdot) = \frac{d}{dt}(\cdot)$$

一些使用 D 算子的例子如下:

例1: $\dot{x}(t) = -4x(t) + r(t) \Rightarrow Dx(t) = -4x(t) + r(t)$

例2: $\ddot{x}(t) + \dot{x}(t) - x(t) = r(t) \Rightarrow D^2x(t) + Dx(t) - x(t) = r(t)$

例3: $\dot{x}(t) = 2x(t) + \int r(\tau)d\tau \Rightarrow Dx(t) = 2x(t) + \frac{1}{D}r(t)$

很多系统的因果关系可以用一个线性常微分方程组来近似。为简化讨论,考虑具有一个输入和一个输出的系统。具有这种结构的系统称为单输入单输出系统,或称SISO系统。进一步假设输入用变量 $r(t)$ 表示,输出用变量 $y(t)$ 表示,系统的微分方程是

$$\ddot{y}(t) - 2\dot{y}(t) + 7y(t) = \dot{r}(t) - 6r(t)$$

传递函数提供与微分方程等价但更有意义的系统描述方法。传递函数是输出变量和输入变量的比,用两个以 D 算子表达多项式的比来表示。上面的常微分方程可以通过3个步骤转化为传递函数:

(1) 使用算子符号重写方程;

$$D^2y(t) - 2Dy(t) + 7y(t) = Dr(t) - 6r(t)$$

(2) 移项并对左侧所有输出项和右侧输入项提取因子;

$$y(t) \cdot (D^2 - 2D + 7) = r(t) \cdot (D - 6)$$

(3) 解出输出信号和输入信号的比,得到传递函数。

$$\frac{y(t)}{r(t)} = \frac{(D-6)}{(D^2-2D+7)} = \text{传递函数}$$

传递函数可以使用任何算子,包括 s 、 w 或是 z 来表示,但是不管使用什么算子,传递函数的计算步骤是不会改变的。

首一(mononic)多项式 D 的最高次幂项系数为1。为使传递函数系数的数目最少,分子和分母多项式一般处理成首一形式,此时两个多项式前会分解出增益因子。下面的例子显示了首一形式的因子分解过程。

$$\frac{16D-4}{5D^2+3D+1} \xrightarrow{\text{首一形式}} \frac{16}{5} \cdot \left(\frac{D - \frac{4}{16}}{D^2 + \frac{3}{5}D + \frac{1}{5}} \right)$$

8

16/5就是分解出的增益。

自动控制的关键要素之一是反馈。它减弱参数变化和扰动带来的影响,增强动态跟踪能力。为了说明什么是反馈,我们考虑图1-4所示的基本反馈系统(BFS)。

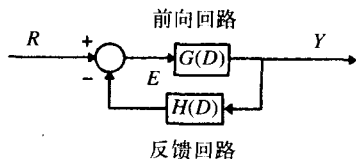


图1-4 基本反馈系统(BFS)

变量 R 是BFS的外部输入, E 是控制变量, Y 是受控变量。BFS的闭环传递函数是通过解包含3个变量 R 、 E 和 Y 的两个方程计算出的,联立方程消去 E ,解出 Y/R 的比值。步骤如下: