



机电一体化 系统设计 (原书第2版)

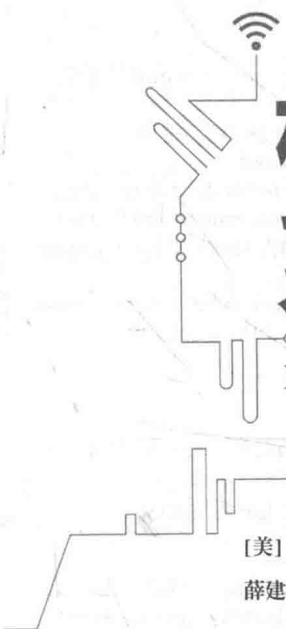
Mechatronics System Design Second Edition

戴夫德斯·谢蒂 (Devdas Shetty)
[美] 理查德 A. 科尔克 (Richard A. Kolk) 著
薛建彬 朱如鹏 译



机械工业出版社
China Machine Press

工业控制
与智能制造
丛书



机电一体化 系统设计

(原书第2版)

Mechatronics System Design Second Edition

戴夫德斯·谢蒂 (Devdas Shetty)
[美] 理查德 A. 科尔克 (Richard A. Kolk) 著
薛建彬 朱如鹏 译



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

机电一体化系统设计 (原书第 2 版) / (美) 谢蒂 (Shetty, D.), (美) 科尔克 (Kolk, R. A.) 著; 薛建彬, 朱如鹏译. —北京: 机械工业出版社, 2016.3
(工业控制与智能制造丛书)
书名原文: Mechatronics System Design, Second Edition

ISBN 978-7-111-52923-1

I. 机… II. ①谢… ②科… ③薛… ④朱… III. 机电一体化—系统设计—研究 IV. TH39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 028779 号

本书版权登记号: 图字: 01-2014-7785

Devdas Shetty, Richard A. Kolk, Mechatronics System Design, Second Edition.
(ISBN: 978-1-4390-6199-2)

Copyright © 2011, 1997 by Cengage Learning.

Original edition published by Cengage Learning. All Rights reserved.

China Machine Press is authorized by Cengage 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.

Cengage Learning Asia Pte. Ltd.

151 Lorong Chuan, #02-08 New Tech Park, Singapore 556741.

本书原版由圣智学习出版公司出版。版权所有, 盗印必究。

本书中文简体字翻译版由圣智学习出版公司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。

本书封面贴有 Cengage Learning 防伪标签, 无标签者不得销售。

本书详细介绍机电一体化系统设计方法, 共分 8 章。第 1 章讨论机电一体化设计过程的关键内容, 探讨其发展方向; 第 2 章重点讲解系统建模和仿真; 第 3 章讲述几种传感器与换能器的基本理论和概念; 第 4 章讨论直流电机、步进电机、流体动力设备等驱动系统; 第 5 章介绍控制和逻辑方法, 包括数字化技术的基本原理、数字化理论以及 PLC 等; 第 6 章介绍机电一体化系统中的控制设计, 并讲述根轨迹法和伯德图设计方法, 以及 PI、PD、PID 等设计过程; 第 7 章讨论实时数据采集的理论和实践; 第 8 章给出几个利用 LabVIEW 和 VisSim 的案例。

本书适合作为机械工程、电子工程、工业工程、生物医学工程、计算机工程, 以及机电一体化工程等学科高年级本科生和研究生的教材, 也可供相关专业人士参考。

出版发行: 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: 谢晓芳

印刷: 北京瑞德印刷有限公司

开本: 186mm × 240mm 1/16

书号: ISBN 978-7-111-52923-1

责任校对: 殷虹

版次: 2016 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

印张: 22.75

定价: 89.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88378991 8836106

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

投稿热线: (010) 88379604

读者信箱: hzjsj@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光 / 邹晓东

机电一体化(mechatronics)是将机械工程、电子工程、控制工程、电气工程、计算机科学以及信息技术协同组合为一体的新兴交叉学科。机电一体化技术极大地推进了经济、社会的发展与进步,不断刷新着人们的观念。不论是大型的航空航天器、轨道交通设施、海工装备、智能机器人,还是小型的智能洗衣机、电饭锅、微波炉、电子表,这些设备都是机电一体化的产品,机电一体化技术对我们的生活产生的影响日新月异。自20世纪80年代以来,许多高等院校开设了机械电子工程专业,讲授机电一体化课程,并为此编写了一些机电一体化技术与系统的教材。本书则是从国外引进的专业教材。

本书作者是美国康涅狄格州哈特福大学的 Devdas Shetty 教授和美国宾夕法尼亚州费城 Pace Controls 公司的 Richard A. Kolk 技术副总裁,他们在机电一体化设计领域积累了丰富的教学和科研成果。本书作为大学教材被美国、加拿大、中国、印度、韩国及许多欧洲国家的大学使用。

本书涵盖了实际系统的建模和仿真,基于可视化的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的机电一体化技术用清楚和简洁的方式组合起来,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。书中所有案例都可用 GPIO 板,必要的设备和可视化的仿真软件来实现。本书的编写思路明晰、技术内容详细,融合了系统建模、仿真、传感器、驱动器、计算机实时接口和控制等机电一体化相关内容,适合作为高校本科生或研究生课程的教材,同时也可供相关专业工程技术人员参考。

在机械工业出版社编辑王颖的安排下,南京航空航天大学机电学院薛建彬副教授将本书翻译成中文,朱如鹏教授也参与了部分翻译工作,以让更多的读者分享本书的成果。薛建彬副教授长期承担高校研究生课程的双语教学工作,在科技专业语言上积累了丰富的经验和知识。在翻译本书过程中力求语言精炼,语序符合我国的使用习惯,通俗易懂。中文版对原著中的部分图表做了删减,改正了原著中的瑕疵,单位基本上使用国际标准。另外,由于 VisSim 和 LabVIEW 等软件版本的升级,因此实际应用界面有所不同,请读者在阅读本书时注意。

衷心感谢机械工业出版社的编辑为本书出版所做出的辛勤工作,感谢参与本书翻译和审校的同仁,他们完成了大量繁琐而又十分严谨的工作。

由于译者水平有限,书中难免存在错误与疏漏,敬请广大读者批评指正,欢迎大家通过 meejbxue@nuaa.edu.cn 给本书提出宝贵的意见,以让本书再版时进一步提升质量。

薛建彬

第2版前言 | Preface to the Second Edition

全球市场的竞争需要采用现代化技术来生产灵活的、功能丰富的产品，使其比现有的产品更好、更便宜、更智能。我们日常所使用的无数的智能产品，从汽车的导航控制系统到先进的飞行控制系统，从洗衣机到多功能的精密机器，已经证实了机电一体化的重要性。数字工程、仿真与建模、机电运动设施、电力电子、计算机和信息学、MEMS、微处理器以及DSP等技术的发展，给工业界和学术界带来了新的挑战。

机电一体化是机械和电子工程、计算机科学以及信息技术的协同组合，包含采用控制系统、数字方法来设计具有内置智能的产品。

机电一体化领域允许工程师将机械、电子、控制工程和信息技术集成到整个产品设计过程中。建模、仿真、分析、虚拟原型以及可视化等都是开发先进的机电一体化产品的关键因素。机电一体化设计注重系统优化，以保证创造与时俱进的合格产品。为了让机电一体化产品设计一次成功，需要团队合作以及多部门、多工程学科之间的协调。通过引入新的软件仿真工具和系统串接起来工作，促进了系统集成，创造了一条有效的机电一体化工作道路。

本书第1版是面向高年级本科生或研究生的，涵盖的专业包括机械工程、电子工程、工业工程、生物医学工程、计算机工程以及机电一体化工程。本书被广泛应用于美国、加拿大、中国、欧洲、印度和韩国。根据本领域内专家或使用本书的教师的反馈，本书第2版已经进行了大幅扩展和修订，所以本书不仅仍旧适合于原来的用户，而且适应于其他新出现的课程。

当前，有一种趋势是将机电一体化包含进传统的课程体系中，其目的是给即将毕业的工程师们提供一些综合的设计经验。这种经验来自于使用测量原理、传感器、驱动器、电子线路以及耦合了设计、仿真和建模的实时接口。有些课程以案例分析作为结尾，通过一个统一的设计项目，将各种各样的学科集成到一个成功的设计产品中，以便在实验室环境下就能快速地装配和分析这个产品。

本书第2版已经全部升级了。目标是全面覆盖多个领域，从而让读者理解工程学科的范围，将这些学科合在一起形成机电一体化的新领域。本书中所用的跨学科方法为机电一体化产品设计提供了技术背景。

本书第2版可作为如下课程的教材或参考书：

- 独立的机电一体化课程。
- 现代仪器和测量课程。
- 混合电子和机械工程课程，涵盖传感器、驱动器、数据采集和控制。
- 跨学科的工程课程，包括建模、仿真和控制。

本书特色

- 全面覆盖传感器、驱动器、系统建模，并且将经典的控制系统设计与实时计算机接口相结合。

- 工业实际案例分析。
- 深入讨论物理系统的建模和仿真。
- 包含框图、改进的模拟建模方法和最新的可视化仿真软件的使用。
- 展示如何在图形环境下利用可视化表示方法进行交互式建模，其对设计过程非常重要。
- 详细的机电一体化系统设计方法。
- 展示如何实现设计过程的一次性成功。

第2版新增内容

- 众多的设计例子，每一章后面都增加了习题，帮助学生理解基本的机电一体化方法。
- 实现了一个简单的运动控制模型，其贯穿于全书8章内容，逐步地涵盖了机电一体化系统的各个部分。
- 使用 LabVIEW 和 VisSim 软件进行仿真和实时接口。
- 包含当前机电一体化和智能制造的发展趋势。
- 在实施案例分析时，结合框图进行描述，强调广泛应用数学分析、建模仿真、控制和实时接口等工具。
- 包含传感器、实时接口、多输入和多输出系统。
- 从日常生活中碰到的情况中提取设计例子和习题。
- 描述机电一体化的协同性及其对设计的影响。
- 半实物仿真例子以及图解优化设计。
- 对多输入和多输出情况下的控制系统分析。
- 全面展示永磁直流电机与霍尔效应传感器的集成，以及其数学分析和位置控制。
- 机电一体化虚拟原型系统的创建。

第1章深入讨论机电一体化设计过程的关键内容，并探讨其发展方向。此外，还介绍近年来在智能制造领域机电一体化技术的发展，并讨论利用机电一体化方法对传统设计的改进。

第2章重点讲解系统建模和仿真，学生将学习如何利用改进的类比方法从图形或其他信息中创建精确的计算机动态模型，这里将传递函数变换成框图模型的过程分成了6步，这种方法将标准的模拟方法和框图建模方法相结合，其主要的不同之处在于本方法可以直接处理非线性问题，而不需要引入线性化。第2章还介绍在机电一体化中许多常见的物理系统，这些系统包括机械元件、电子元件、热元件、流体元件和液压元件，该章所开发的模型和技术将按机电一体化设计过程的顺序用于后续章节。

第3章讲述传感器与换能器的基本理论和概念，包括测量仪器的原理、模拟和数字传感器、位置传感器、力传感器、振动传感器，以及温度、流体和距离传感器。

第4章讨论几种类型的驱动设备，包括直流电机、步进电机、流体动力设备和压电驱动器。

第5章介绍系统控制和逻辑方法，包括数字技术和数字理论的基本原理，诸如布尔逻辑运算、模拟和数字电子学以及 PLC。

第6章介绍机电一体化系统中的控制及其设计。重点关注真实环境的约束，包括时滞和非线性。详细介绍根轨迹法和伯德图设计方法，同时还介绍几个通用控制结构的设计过程，

包括 PI、PD、PID、滞后、超前和纯增益。

第 7 章讨论实时数据采集的理论和实践。利用可视化编程方法解决信号处理和数据解释的问题，举了几个利用 LabVIEW 和 VisSim 的例子。还利用案例分析一个永磁 DC 齿轮电机位置控制系统的 PI 控制器输出的脉宽调制功能。

第 8 章列举一系列适合实验室研究的案例。所有案例都通过使用通用的输入/输出板、可视化仿真环境以及应用软件来实施，图形环境的关键因素在于机电一体化应用中参与和交互系统的可视化表示。

结合课堂讨论、仿真实验和实验室的实验设计，向学生展示一个实际的机电一体化平台。编写本书的真正挑战在于将那些复杂的、看上去毫无联系的话题清楚而准确地联系起来，这些都是理解机电一体化所必需的。希望本书的读者能给予反馈意见，让我们进一步提高本书的质量。

对于学生：通过访问本书对学生开放的配套网站，下载 VisSim 试用版的说明，网址：www.cengage.com/engineering/shetty。

对于教师：通过访问本书对教师开放的配套网站，可以获取更多的资源，网址：www.cengage.com/engineering/shetty。

本书单位说明

本书第 2 版在全书中采用国际单位制(SI)。

美国惯用的单位制(USCS)采用 FPS(英尺-磅-秒)单位，也称英制单位。SI 单位主要是 MKS(米-千克-秒)单位。然而 CGS(厘米-克-秒)单位也常被认为是 SI 单位，特别是在教科书中。

本书中既用 MKS 单位，又用 CGS 单位。在本书中，正文和习题中的所有 USCS 单位或 FPS 单位都已经转换成 SI 单位。但是在数据源自手册、政府标准以及产品手册的情况下，如果将所有的数据转换成 SI 单位，不仅非常困难，而且会侵犯数据源的版权问题。因此，图、表和参考文献中的一些数据仍旧采用 FPS 单位。不熟悉 FPS 单位和 SI 单位关系的读者可以参考有关的转换表。

为了解决需要使用源数据的问题，在使用源数据进行计算之前，可以将 FPS 单位转化成 SI 单位。

采用 SI 单位的教师版习题答案手册[⊖]可以通过销售代表或登录本书的网站(www.cengage.com/engineering)来获取。

欢迎读者提出关于本书 SI 版的反馈意见，这将长期帮助我们提高后续版本的质量。

致谢

本书中的内容浓缩了作者在哈特福大学、库珀联盟学院和劳伦斯理工大学多年的教学和研究成果，也展示了和 United Technologies 公司、McDonnell Douglas 公司及其他企业紧密合作的心得体会。

⊖ 关于本书教辅资源，用书教师可向圣智学习出版公司北京代表处申请，电话：010-82862096/95/97，电子邮件：kai.yao@Cengage.com 或 asia.infochina@Cengage.com。——编辑注

很多评阅书稿的同行为本书做出了巨大的贡献。首先感谢上过本课程的几百个学生，在该课程教学过程中，我们测试了教学材料。其次感谢多位教授，他们在本项目的各个阶段提供了评论和建议，帮助我们修改草稿。还要感谢哈特福大学的 Claudio Campana 教授、多伦多大学的 Ridha Ben Mrad 教授、北卡罗里纳州立大学的 M. K. Ramasubramanian 教授，以及劳伦斯理工大学的 George Thomas。

特别感谢哈特福大学的校长 Walter Harrison 博士、劳伦斯理工大学的校长 Lewis Walker 博士、阿尔比恩学院的院长 Donna Randall 博士、劳伦斯理工大学的教务长 Maria Vaz 博士、哈特福大学的 Lou Manzione 主任和 Ivana Milanovic 博士，感谢他们的鼓励。还要感谢 Visual Solutions 公司和 National Instruments 公司，感谢他们为本书的相关部分提供实时接口的帮助。

感谢美国国家科学基金会和机电一体化联合技术基金会为本项目提供的资助。同事们给予的巨大支持和鼓励也是无价的。

——Devdas Shetty
Richard Kolk

目 录 Contents

译者序

第2版前言

第1章 机电一体化系统设计概述 1

- 1.1 机电一体化的概念 2
- 1.2 机电一体化综合设计 3
- 1.3 机电一体化的设计过程 5
- 1.4 机电一体化关键组成 8
- 1.5 机电一体化应用 15
- 1.6 本章小结 28
- 习题 29
- 参考文献 29

第2章 机电一体化系统

建模与仿真 31

- 2.1 算子符号和传递函数 32
- 2.2 框图、操作和仿真 33
- 2.3 框图建模——直接方法 38
- 2.4 框图建模——模拟方法 48
- 2.5 电气系统 55
- 2.6 机械平移系统 59
- 2.7 机械转动系统 65
- 2.8 机电耦合 69
- 2.9 流体系统 73
- 2.10 本章小结 83
- 习题 83
- 参考文献 87
- 第2章附录 87

第3章 传感器和换能器 92

- 3.1 传感器和换能器简介 93

- 3.2 元器件变化的影响——
灵敏度分析 98
- 3.3 运动和位置测量传感器 102
- 3.4 测量运动的数字传感器 114
- 3.5 力、扭矩和触觉传感器 118
- 3.6 振动——加速度传感器 128
- 3.7 流体测量传感器 135
- 3.8 温度传感装置 144
- 3.9 传感器应用 148
- 3.10 本章小结 167
- 习题 168
- 参考文献 173

第4章 驱动装置 174

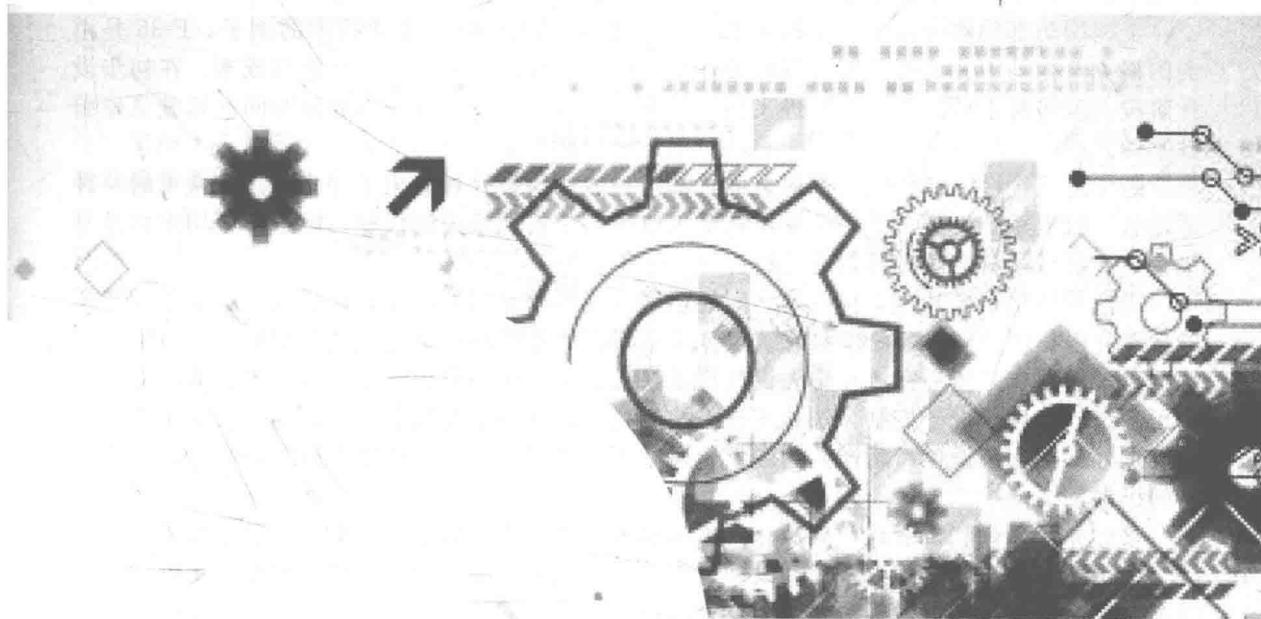
- 4.1 直流电机 175
- 4.2 永磁步进电机 179
- 4.3 流体力驱动 184
- 4.4 流体力系统的组成 187
- 4.5 压电驱动器 197
- 4.6 本章小结 198
- 习题 199
- 参考文献 200

第5章 系统控制——逻辑方法 201

- 5.1 机电一体化中的数字系统 202
- 5.2 二进制逻辑 206
- 5.3 卡诺图最小化 210
- 5.4 PLC 215
- 5.5 本章小结 223
- 习题 223
- 参考文献 226

第6章 信号、系统和控制	227	7.2 数据采集和控制系统的组成	272
6.1 信号、系统和控制简介	228	7.3 传感器和信号调制	276
6.2 常微分方程的拉普拉斯变换	230	7.4 数据转换设备	277
6.3 系统表示	234	7.5 数据转换过程	282
6.4 非线性系统的线性化	238	7.6 应用软件	288
6.5 时间延迟	241	7.7 本章小结	315
6.6 系统性能指标	242	参考文献	316
6.7 根轨迹法	249		
6.8 伯德图	258	第8章 案例分析	317
6.9 采用极点配置法设计控制器	264	8.1 综合案例分析	318
6.10 本章小结	268	8.2 数据采集案例分析	332
习题	268	8.3 数据采集和控制案例分析	339
参考文献	270	8.4 本章小结	349
		习题	349
		参考文献	349
第7章 信号调制和实时接口	271		
7.1 引言	272	附录	350

机电一体化系统设计概述



本章概述了机电一体化设计过程以及机电一体化所采用的技术。首先介绍机电一体化系统的关键组成、技术和设计过程,接着给出机电一体化的定义,讨论几个的重要设计问题,然后介绍信息系统、电气系统、机械系统、计算机系统、传感器和驱动器以及实时接口等,从这些基本原理出发,找出和机电一体化相关的特征。虽然这些支撑技术的历史经验非常有帮助,但并不是必需的。最后描述机电一体化的设计过程,并讨论一些关于仿真、建模以及智能制造的发展趋势。

1.1 机电一体化的概念

机电一体化是一种用来优化设计机电产品的方法。

所谓方法是指一个有关于实践、过程以及规则的集合,由工作在某一个特殊的知识领域或学科的人所使用。大家都熟悉的技术学科包括热力学、电气工程、计算机科学以及机械工程等学科。而机电一体化系统是跨学科的,不单是一门学科,包含了四门基础学科:电学、机械学、计算机科学以及信息技术。

美国国防部的联合攻击战斗机 F-35 就是一个实际的机电一体化技术的例子, F-35 是由美国洛克希德马丁公司开发的,其在设计上强调可靠性、可维修性、性能和成本。在初步设计阶段,就将跨学科的功能设计进飞机系统中,包括在飞机上预测零故障时间和驾驶员座舱技术等。

跨学科系统已不是什么时髦的名词,其已被成功地设计和应用了许多年。最常见的一种系统就是机电系统,通常使用计算机算法来改进一个机械系统的性能。电子学则用来在计算机科学和机械学科之间进行信息转换。

机电一体化系统和跨学科系统之间的不同点并不是它们的组成,而是设计这些组成元素的顺序。根据历史经验,跨学科系统设计采用串行的按学科设计的方法。例如,机械电子系统的设计通常在三步内完成,首先设计机械系统。当机械系统设计完成后,再设计电源和微电子系统,然后再设计控制算法并实施。按学科来设计的主要缺点在于,串行设计中的各个不同点处都固化了设计,新产生的约束传递给下一个学科。许多控制系统工程师非常熟悉如下的讥讽话语。

设计并建立好机械系统,然后让油漆工刷漆,最后由控制系统工程师来安装控制器。

由于新产生的额外约束,控制设计通常并不那么有效率。例如,对多数系统来说,降低成本是一个主要因素,在机械和电子设计阶段所要做出的权衡通常会包括对传感器和驱动器的选择。减少传感器和驱动器的数目,采用精度偏低的传感器,或采用功率偏小的驱动器,成了降低成本的某些标准方法。

机电一体化设计方法基于并行方法(而不是串行)来进行学科设计,从而使产品具有更多的协同性。

工程中有一个分支称为系统工程,采用并行方法进行初步设计。在某种程度上,机电一体化就是系统工程方法的一个延伸,但其外加了信息系统来指导设计并应用于所有的设计阶段,不仅仅是初步设计阶段,从而使其更加全面。在设计和制造产品以及工艺过程中,关于机械、电气和计算机系统的集成,存在这样一种协同性。这种协同性来自于正确的组合参数,最终产品会比那些仅将所有零件组合在一起的产品好得多。机电一体化产品表现出了在以前没有协同组合设计时难以实现的性能特征。机电一体化方法的关键元素如图 1-1 所示。

虽然文献中经常采用这一精确的表达方法,一个更清晰但更复杂的表述方法如图 1-2 所示。

机电一体化是将信息系统施加到物理系统的结果。物理系统(图 1-2 中右边虚线框中的部分)由机械、电气和计算机系统组成,还包括驱动器、传感器和实时接口。在某些文献中,这个方框称作机械电子系统。

机电一体化系统不是一个机械电子系统,而是一个控制系统,甚至更复杂。

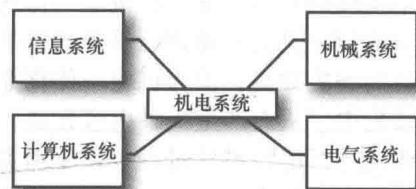


图 1-1 机电一体化组成

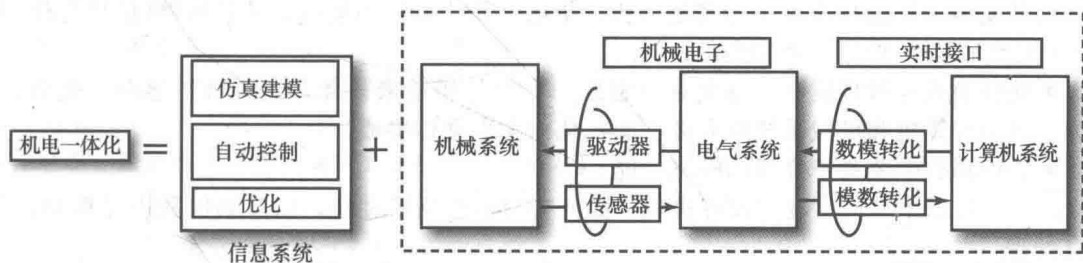


图 1-2 机电一体化关键元素

实际上,机电一体化只是一个良好的设计思想,其基本思路就是应用新的控制使机械装置获得更高水平的性能。传感器和驱动器常常用来将高功率(通常是机械的)的能量转化成低功率(通常是电气和计算机方面的)的能量。标有“机械系统”的方框通常不仅包含机械元件,还可能有流体的、气动的、热的、声学的、化学的以及其他一些学科的元器件。传感技术的最新发展已经融合进对特定监控应用解决方案不断增长的需求。人们开发了微传感器来测量某些物理量、化学物质和生物成分的存在(诸如温度、压力、声音、核辐射和化学成分等)。这些传感器都是以固态形式实施的,因此如果将若干传感器集成在一起,则它们的功能也将组合在一起。

控制是一个通用的术语,可发生在有机生命体内,也可发生在机器里。术语“自动控制”则描述一台机器由另一台机器所控制的情形。不管是什么应用(诸如工业控制、制造、测试或者军事应用),传感技术正在日新月异地发展。

1.2 机电一体化综合设计

机电一体化方法本身具有并行性或者同步性,主要由于从产品设计到原型系统的各个阶段中,机电一体化方法都大量采用系统建模和仿真的方法。因为这些模型要由来自多个学科的工程师们使用或更改,所以将这些模型放在一个可视化的环境中进行编程处理就显得尤为重要。这样的可视环境包括框图、流程图、状态变换图以及键合图。相比于传统的编程语言,如 Fortran、Visual Basic、C++ 和 Pascal,可视化建模环境不需要太多的培训,因为这种环境本来就非常直观。如今,用得最多的可视化编程环境就是框图。这个环境特别灵活、廉价,而且还包含一个编码产生器选项,该选项能将框图转化成高级的 C 语言(或类似的其他语言),以适合目标系统的实施。许多供应商提供基于框图建模和仿真的软件包,如 MATRIXx、Easy5、Simulink、Agilent VEE、DASYLab、VisSim 以及 LabVIEW。

机电一体化是一种设计理念，是一种集成的工程设计方法。贯穿整个设计过程所涉及各个领域的基本因素，在机电一体化设计中都要考虑。通过使用一种跨学科的思想和技术仿真机制，机电一体化提供了理想的环境来提高协同性，从而有助于在技术复杂的情况下得到新的解决方案。因为机电一体化通过将机械和电子工程、实时编程紧密结合，并集成在设计过程中，从而产生一种内置智能，这是机电一体化装置或系统一个非常重要的特征。机电一体化尽可能在设计过程中让驱动器、传感器、控制系统及计算机有机结合在一起。

从基本的设计开始，直至进入制造阶段，在每一阶段，机电一体化设计通过优化参数，在很短的周期内就生产出一个合格的产品。机电一体化利用控制系统提供一个能显示各类元器件之间交互关联的框架来进行系统分析，机电一体化系统的集成是通过软件(信息处理)和硬件(各类元器件)的结合来实现的。

- 硬件集成通过将机电一体化系统看作一个整体系统来设计，并且将传感器、驱动器、微型计算机和机械系统融合在一起，从而实现硬件集成。
- 软件集成主要基于高级的控制功能。

图 1-3 展示了如何实现软硬件集成，如何实现信息反馈过程，以及如何利用过程知识和信息处理。

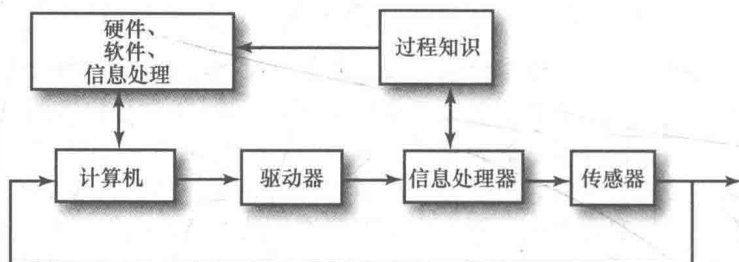


图 1-3 软硬件集成的通用方案

机电一体化系统开发的第一步是分析客户的需求，确定系统集成所需要的技术环境。为了解决某些具体问题，必须设计复杂的系统，这些系统往往需要用数字量或模拟量形式的硬件来组合机械、电气、流体力和热动力各个组成部分，并由复杂的软件来协调。机电一体化系统利用传感器从工作环境中采集和获取数据。下一步就是在集成的方式下使用详尽的建模和描述方法以涵盖系统的所有子任务，这也包括早些时候有效描述各子系统之间的必要接口，然后进行数据处理和解释，最终促使驱动器执行动作完成任务。机电一体化系统的优越之处就在于开发周期较短、费用较低和质量较高。

机电一体化设计支持并行工程的概念。

在机电一体化产品的设计过程中，不同的专家组之间必须进行有关的知识交流和必要的信息交互协调。并行工程是一种设计方法，利用该方法将产品的设计和制造通过某种特殊的方法融合在一起。其想法就是如果人们为了实现一个共同的目标进行合作，那么就可以做得更好。这可能部分地受到了人们的某种认识的影响，人们认识到制造阶段的许多高费用是由产品设计阶段决定的。并行工程的特征如下。

- 更好地定义产品，以免后面更改。
- 在早期设计阶段，采用面向制造和装配的设计。
- 好好地定义产品开发的工艺流程设计。

- 更好地估算费用。
- 减少设计和制造间的障碍。

然而, 由于缺乏通用的交互语言, 在并行工程中的信息交互还存在困难。只有协调足够的信息交互, 处理好跨功能模块间合作的组织障碍, 才有可能成功实施并行工程。

以并行工程原理为指导, 设计出来的产品往往满足如下需求:

- 高质量
- 鲁棒性
- 低成本
- 快速上市时间
- 客户满意度高

由于集成了并行工程管理的策略而产生的益处就是更高的生产效率、更高的产品质量, 以及因为引入了一个智能的、自我校正的传感和反馈系统而获得的可靠性。在一个复杂的系统中将传感器和控制系统集成, 减少了资金投入, 维持了高度的柔性, 并导致了较高的设备利用率。

1.3 机电一体化的设计过程

传统的机电系统设计方法试图在机械产品的开发阶段向系统的机械部分注入更多的性能和可靠性然后再设计系统的控制部分, 两者相加以提供更多的性能或可靠性, 并用来修正设计过程中未发现的错误。因为这些设计步骤是按顺序发生的, 所以传统的方法称为串行工程方法。由 Standish Group 完成的一项有关软件项目的调查发现:

- 软件开发项目的取消率是 31.1%。
- 已完成项目的超时率达 222%。
- 软件项目能及时完成并且在预算范围内的只有 16.2%。
- 对已发布软件的维护费用, 超出初始开发费用的 200%。

总部位于波士顿的技术智囊团 Aberdeen Group 提供了关于机电一体化系统设计的关键信息, 引入正确的设计过程是非常重要的。Aberdeen Group 的研究人员利用 5 个关键的产品开发性能条件, 来区分有关机电一体化设计的顶级公司。这些关键的标准分别是年收入、产品费用、产品上市日期、质量以及开发费用。顶级公司的年收入目标是垃圾公司(最差劲公司)的 2 倍, 产品费用也差不多是 2 倍关系, 而产品上市时间则达到 3 倍关系, 质量也是 2 倍, 开发费用也是 2 倍关系。Aberdeen Group 的研究还揭示出:

- 顶级公司在跨学科间关于设计变化而认真进行的交流, 比垃圾公司多 2.8 倍。
- 对某些特定系统、子系统和零部件所分配的设计需求, 也比垃圾公司多 3.2 倍。
- 采用集成的机械、电子和软件进行仿真来以数字化方式验证系统的性能, 比垃圾公司多 7.2 倍。

在串行设计方法中一个重要的因素就是复杂性, 这是设计一个多学科系统所固有的。从本质上说, 机电一体化设计是对当前现有的冗长而昂贵的设计过程的一种改进。各个学科的工程师们为某一具体的项目而同步合作研究, 这样就省去了由于设计不兼容而带来的问题, 因为几乎没有返工, 所以设计的时间也缩短了。设计时间的缩短也得益于那些强大的计算机仿真软件的广泛使用, 减少了对原型系统的依赖。通过对照可以看出, 越是传统的设计过程, 越是将工程学科分离, 越是没有能力适应设计中间的变化, 从而越是依赖于多个物理原型系统。

机电一体化设计方法不仅关心要生产出高质量的产品，还要维护这些产品，这称为**生命周期设计**(life cycle design)。生命周期设计的几个重要因素如下：

- **可交付性**：时间、费用和交付方式。
- **可靠性**：故障率、材料和公差。
- **可维修性**：模块化设计。
- **可服务性**：在线诊断、预测和模块化设计。
- **可升级性**：未来的设计与当前设计的兼容性。
- **可回收性**：有毒材料的回收和处置。

我们不会详细描述生命周期的各项要素，只是想指出**传统的生命周期设计方法**，它从一个**产品开始**，直至设计与制造出该产品以后。在机电一体化设计中，生命周期的各项要素包含在产品设计的各个阶段，从产品的**概念设计**直至**产品报废**都要考虑这些要素。机电一体化设计过程如图 1-4 所示。

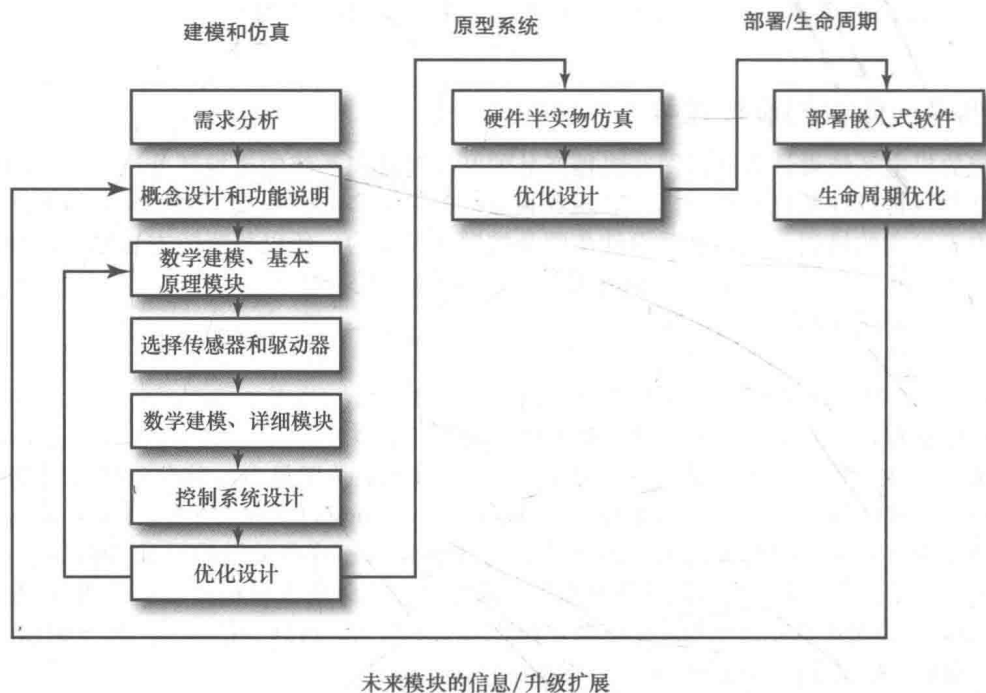


图 1-4 机电一体化设计过程

机电一体化设计过程包括建模和仿真、样机原型系统和部署三个阶段。所有的建模，不论是基于原理的(基本方程)，还是更详细的物理原理，其在结构上都必须模块化。一个基于原理的模型是反映某子系统的一些基本行为的简单模型。一个详细模型是基本原理模型的扩充，比基本原理模型提供更多的功能和精度。将各个模块(或方框)连在一起，就会形成复杂的模型。每一方框表示一个子系统，每一子系统对应一些物理上或功能上可实现的操作，还能封装成一个带输入/输出的模块，该模块的输入端仅限于输入信号、参数，输出端则限于输出信号。当然，这种限制不可能每次都是可行的或者所想要的，但这种限制的使用能生成模块化的子系统模块，而这些子系统模块便易维护、独立运用，还可以相互替代(基本原理模块可以替代详细

的模块,反之亦然),并且还可以重用于其他的应用中。

因为机电一体化系统的模块化,它们非常适合用于一些需要重构的应用。这些产品可以在设计阶段通过替换各种子系统模块实现重构,也可以在产品的生命周期内进行重构。由于机电一体化设计过程的许多环节依赖于基于计算机的任务(如信息融合、管理、设计测试等),因此一个高效的计算机辅助原型开发环境就显得非常重要。

重要特征

- **建立模型**: 利用框图或者可视化界面来创建一些物理现象或抽象现象的模型,这些模型是直观的、易于理解的,并且能表现为性能。那种封装复杂性和保持几级子系统复杂性的能力非常有用。
- **仿真**: 求解模型的数字方法包含微分方程、离散化方程、混合方程、偏微分方程及隐式的非线性(或线性)方程。仿真必须要有一个执行实时操作的锁存器,以便能够让仿真比实时更快地执行。
- **项目管理**: 维护项目信息和子系统模型的数据库,以供最终的重用。
- **设计**: 基于模型参数和信号对性能函数进行约束优化的数字方法。类似于蒙特卡罗的计算方法也是所期望的。
- **分析**: 关于频域、时域和复数域的设计。
- **实时接口**: 用一种插入式的实际硬件卡来代替部分模型,使用驱动器和传感器来与之交互,常称为**硬件半实物仿真**,或**快速原型**,必须实时运行。
- **编码生成器**: 从框图或可视化建模界面生成有效的高级源代码。编译控制代码,并用于嵌入式处理器。通常使用C语言。
- **嵌入式处理器接口**: 嵌入式处理器安装在最终产品之中。本特征提供处理器和计算机辅助样机原型环境之间的通信,这个通常称为**完整的系统原型**。

因为没有模型能够完全无误地复制现实,所以在产品模型和实际产品的性能之间总存在一些误差,这些误差称为**未建模误差**,这正是许多基于模型的设计被部署到实际产品时失败的原因。机电一体化设计方法也使用基于模型的设计方法,因此建模和仿真非常关键。然而,在**样机原型系统阶段**考虑**未建模误差**,将它们的影响纳入设计阶段,这样就大大地提高了成功部署产品的概率。

硬件半实物仿真 在样机原型系统阶段,模型中许多非计算机子系统用实际硬件来代替,而传感器和驱动器提供必要的接口信号来连接硬件子系统和模型。这样的模型一部分是数学模型,一部分是实物。因为模型中的实物那一部分本来就是实时运行的,而数学模型中的那一部分是基于仿真时间运行的,所以两部分的同步就显得尤为重要。将数学模型、传感器和驱动器信息进行同步和融合的过程称为**实时接口**或**硬件半实物仿真**,这是建模和仿真环境的重要组成部分。

至此已经讨论了硬件半实物仿真的一种配置。本模型和其他可能的模型都归纳在表1-1中。表1-1假设有如下6种功能。

表 1-1 硬件半实物仿真的不同配置

实际硬件元件	数学模型中的元件	描述
● 传感器 ● 驱动器 ● 处理过程	● 控制算法	面向未建模的传感器、驱动器和机械误差,修改控制系统设计