

光机电一体化技术丛书

光机电一体化 系统设计

范宁军 李杰 王正杰 何光林 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

光机电一体化技术丛书

光机电一体化 系统设计

范宁军 李 杰 王正杰 何光林 编著



机械工业出版社

本书从系统的角度,介绍了光机电一体化系统的设计方法、建模方法、传感器与转换器、执行器与驱动器、控制方法与应用举例等内容。内容先进实用,融汇了国内外最新的设计方法和技术。适合于从事光机电系统设计及相关领域的工程技术人员学习参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

光机电一体化系统设计/范宁军等编著. —北京:机械工业出版社, 2010. 1
(光机电一体化技术丛书)
ISBN 978 - 7 - 111 - 29533 - 4

I. 光… II. 范… III. 光电技术 - 机电一体化 - 系统设计 IV. TH - 39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 006711 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: 舒 雯 责任编辑: 舒 雯 版式设计: 张世琴
封面设计: 姚 毅 责任校对: 张莉娟 责任印制: 乔 宇
北京京丰印刷厂印刷

2010 年 3 月第 1 版 · 第 1 次印刷
169mm × 239mm · 12.25 印张 · 236 千字
0 001—3 000 册
标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 29533 - 4
定价: 22.00 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

“光机电一体化技术丛书”编委会

主任：李科杰

委员：（按姓氏笔画排列）

王军政 刘明杰 张文栋 范宁军
罗庆生 郑 链 高学山 黄 强

丛 书 序

随着科学技术的快速发展，光机电一体化技术应运而生。光机电一体化技术是机械技术、光电技术、电子技术以及计算机技术等群体技术的综合运用。光机电一体化技术涉及机械制造、交通、家电、仪器仪表、医疗、玩具娱乐等众多行业，在工业和经济发展中有着重要的地位。信息、生物、空间、海洋、新材料、新能源等高科技领域，国防装备的信息化、现代化及传统产业的改造都离不开光机电一体化技术的发展。

光机电一体化技术发展迅速，其中各项技术正从原来的技术体系分离出来，具有较强的系统特色和相对独立的研究和应用领域。随着微电子技术和微系统技术的发展，光机电一体化技术的应用与发展进入了一个全新的阶段。机电产品和光机电产品成为家电、医疗器材、玩具等产业的主要产品；光机电一体化技术对于工业设备改造、提高制造装备精度和效率起到了重要的作用；光机电一体化技术在航空航天、国防、智能机器人研制等凸现国家综合实力的科研领域中更是地位突出。

相对而言，目前图书市场上光机电一体化技术方面的图书还是比较少的。在机械工业出版社的组织下，由北京理工大学和中北大学（原华北工学院）的老教师们合作编写了这套“光机电一体化技术”丛书，较全面地介绍了国内外光机电一体化技术的发展和應用，以期能够帮助相关工程技术人员学习和更新光机电一体化技术知识，促进光机电一体化技术的发展。

“光机电一体化技术丛书”以光机电一体化领域各项技术的通用原理、具体应用和设计指导为主要内容，分《光机电一体化系统设计》、《光机电一体化系统典型实例》、《控制技术》、《感测技术》、《光机电一体化系统常用机构》、《驱动技术》、《信息识别技术》、《光机电一体化系统仿真与虚拟试验技术》和《微光机电系统技术（MOEMS）》9个分册。

各分册所介绍的技术内容以先进、通用为标准，精心筛选，原理介绍简练准确，具体应用注重结合工程实践经验，使用了大量的图、表和实例，注重加强光机电一体化系统的整体设计和技术协调的理念，各分册均有相应章节深入介绍本技术在系统中的应用和设计实例，以便读者更好地学习、实践和应用，帮助从事单项技术的研发人员快速适应光机电一体化系统的研究开发工作。

丛书力求文字简练、深入浅出、内容精炼、重点突出、实用性强，为光机电

一体化工程实践提供指导。丛书以光机电一体化领域从事应用和科研开发的中、高级工程技术人员为主要读者对象，也可供大专院校相关专业的学生参考。

由于作者的时间和水平有限，不足之处在所难免，欢迎读者批评指正。

“光机电一体化技术丛书”编委会

前 言

20 世纪 70 年代以来，随着微电子技术、计算机技术、精密机械技术和信息技术的迅猛发展，在机械工程领域引发了一场以机电一体化为主要标志的技术革命，极大地促进了社会经济发展和科学技术进步，其设计思想和方法正在改变着人们的传统观念，其科技成果正渗透到人类活动的各个方面——小到数码相机，大至航天飞机。

20 世纪 90 年代以来，光机电一体化技术是在机电一体化技术基础上引入光电子技术，尤其是更多地融入以光电子及其通信网络作为载体的信息技术，而逐渐形成了又一新兴的高新技术领域。光机电一体化系统（产品）是按照控制论、信息论和系统科学思想构建的，集机械工程、电子/电气工程、光学工程、计算机科学、信息技术和自动控制理论等学科的原理、方法和技术，以及新材料、新能源等于一体的多学科交叉融合的人造实体。同机电一体化一样，光机电一体化也是一种人造实体系统（产品）的设计哲学，它包含实现光机电一体化系统的设计思想（即设计观）和设计方法（即方法论）两个方面。因此，本书讨论的光机电一体化系统的设计也同样要遵循这种设计思想和设计方法。

目前，我国高等工科院校大多设有机电一体化（如机械设计及其自动化等）专业或学科，开设机电一体化或光机电一体化课程，培养不同工程技术领域的光机电一体化技术专门人才。本书作为机械工业出版社出版的“光机电一体化技术丛书”中的一本，旨在从系统整体的角度，介绍光机电一体化系统设计的一般规律、主要内容和基本方法。本书可作为高等工科院校光机电一体化及相关专业的教学参考书，也可作为光机电一体化技术领域的工程技术人员的参考资料。

本书共分七章，分别介绍了光机电一体化系统基本概念、光机电一体化系统设计方法、物理系统的建模、传感器与转换器、执行器与驱动器、光机电一体化系统控制和光机电一体化系统设计举例。第 1 章和第 2 章由李杰、范宁军编写，第 3 章和第 6 章由王正杰编写，第 4 章、第 5 章和第 7 章由何光林编写。全书由范宁军统稿。在编写过程中，我们参考引用了许多相关专著和教材，均列于参考文献中，这里不再单独列写作者姓名，一并致谢；还要感谢北京理工大学机电学院微小型系统与测控技术学科组的博士和硕士研究生，他们在文图编排和文档录入方面做了大量的工作。

由于编者水平有限，书中难免有不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者
2009 年 12 月

目 录

丛书序

前言

第 1 章 总论	1
1.1 光机电一体化技术的基本概念	1
1.2 光机电一体化系统的发展历史	2
1.3 光机电一体化系统的组成及分类	4
1.3.1 光机电一体化系统的组成	4
1.3.2 光机电一体化系统的分类	4
1.4 光机电一体化技术的基本功能	5
1.4.1 光机电系统功能与技术转换	5
1.4.2 光机电系统的基本功能	6
1.5 光机电一体化系统的应用	11
第 2 章 光机电一体化系统的设计方法	13
2.1 概述	13
2.2 系统的解耦与耦合	13
2.2.1 光机电系统是复杂系统	13
2.2.2 工程冲突	14
2.2.3 光机电系统中的解耦系统与耦合系统	15
2.3 系统设计公理	15
2.4 单元化设计原理	24
2.5 光机电一体化系统的结构层次	25
2.5.1 MEE	26
2.5.2 MEE 的特点	27
2.5.3 典型的 MEE	28
2.5.4 机电系统设计总体结构图	28
2.6 光机电一体化系统的设计程序	30
2.6.1 需求分析	30
2.6.2 方法分析	33
2.6.3 输入分析	35
2.6.4 输出分析	36
2.6.5 参数种类分析	36

2.6.6 参数的时变性分析	37
第3章 物理系统的建模	39
3.1 概述	39
3.1.1 模型的基本概念	39
3.1.2 数学模型及其表现形式	40
3.1.3 数学模型的建立方法	40
3.1.4 简化性和精确性	42
3.1.5 线性系统	43
3.1.6 非线性系统	43
3.2 模拟法	45
3.3 机械系统建模	50
3.3.1 机械系统的有关定义、定律	50
3.3.2 机械系统建模举例	54
3.4 电气系统建模	56
3.4.1 电气系统的有关定义、定律	56
3.4.2 电气系统建模举例	58
3.5 机电耦合系统建模	60
3.5.1 洛伦兹定律	61
3.5.2 法拉第定律	61
3.5.3 作用公式	62
3.5.4 机电耦合系统建模举例	62
3.6 小结	64
第4章 传感器与转换器	65
4.1 概述	65
4.1.1 传感器的定义和作用	65
4.1.2 传感器的组成	66
4.1.3 传感器的分类	66
4.2 位移传感器	67
4.3 速度传感器	73
4.4 加速度传感器	77
4.4.1 电容式加速度传感器	77
4.4.2 金属应变式加速度传感器	82
4.4.3 压电式加速度传感器	82
4.4.4 加速度传感器的使用注意事项	82
4.5 力与力矩传感器	83
4.5.1 压磁效应力与力矩传感器	83
4.5.2 磁电式力矩传感器	87

4.6	压力传感器	88
4.6.1	霍尔效应压力传感器	88
4.6.2	应变式压力传感器	91
4.7	振动与谐振传感器	91
4.7.1	工作原理	91
4.7.2	谐振传感器的应用	92
4.7.3	电涡流传感器的振幅测量	94
4.7.4	电感式传感器的振动与加速度测量	94
4.8	光电传感器	95
4.8.1	光电效应	95
4.8.2	光电器件的基本特性	95
4.8.3	固体图像传感器	96
4.8.4	红外传感器	98
4.8.5	光纤传感器	98
4.9	其他传感器	99
4.9.1	声传感器	99
4.9.2	核辐射传感器	101
4.9.3	离子传感器	102
4.9.4	生物传感器	103
4.9.5	气体传感器	104
第5章	执行器与驱动器	105
5.1	概述	105
5.2	直流电动机	105
5.2.1	直流电动机的结构	105
5.2.2	直流电动机的工作原理	107
5.2.3	驱动电路	108
5.2.4	脉宽调制变换电路	111
5.3	步进电动机	116
5.3.1	步进电动机驱动的特点	116
5.3.2	步进电动机的工作原理	117
5.3.3	步进电动机主要技术性能指标	118
5.3.4	步进电动机驱动电路	119
第6章	光机电一体化系统控制	126
6.1	概述	126
6.2	光机电控制系统	126
6.2.1	光机电控制系统的分类	126
6.2.2	光机电系统描述	129

6.2.3 系统性能指标	130
6.3 控制器设计方法	134
6.3.1 控制器设计过程	134
6.3.2 控制器设计方法	134
6.4 小结	148
第7章 光机电一体化系统应用实例	150
7.1 全自动洗衣机	150
7.1.1 全自动洗衣机单片机控制系统结构	150
7.1.2 模糊全自动洗衣机的控制软件	152
7.1.3 洗衣机物理量检测	153
7.2 数码相机	154
7.2.1 数码相机概述	154
7.2.2 数码相机的结构组成	154
7.2.3 数码相机的工作原理	160
7.2.4 数码相机的数据处理流程	161
7.3 自动导引搬运车 (AGV)	163
7.3.1 AGV 概述	163
7.3.2 AGV 的结构组成	164
7.3.3 AGV 的功能模块组成和主要技术参数	166
7.3.4 AGV 的导向方法和技术	170
7.3.5 AGV 的集成控制系统	176
参考文献	181

第 1 章 总 论

1.1 光机电一体化技术的基本概念

目前,国内外尚未对“光机电一体化技术”形成统一的、严格的定义,不同国家、地区和不同学者给出了不同的定义和解释,归纳起来大致有如下几种定义或描述。

1) 光机电一体化技术是融合了光学技术、机械技术、电工与电子技术及软件技术的综合技术。

2) 光机电一体化技术是在现代光学技术和机电一体化技术基础上发展起来的一门新兴交叉学科,是综合光学、机械学、电子学、信息处理与控制等领域中先进技术的群体技术。

3) 光机电一体化技术是由精密机械技术、激光技术、微电子技术和计算机技术等有机结合而成的新兴技术。

4) 光机电一体化技术是在机电一体化技术基础上引入了光学的传感、变换、执行和控制技术而行成的集成技术。

综上所述,笔者认为光机电一体化可描述为:综合运用光学、机械学、电工/电子学、计算机技术、信息技术、控制技术和系统科学等多学科知识和技术而形成的新的工程技术领域;运用光机电一体化技术形成的具有特定功能的人造实体,可称为光机电一体化系统,也称光机电系统(Optical Mechanical Electric System, OMES)。按系统科学的思想,“一体化”的含义包括两个方面,一是为了实现特定功能将不同学科的知识和技术有序地融合为一个整体;二是形成的系统整体涌现出构成该系统的个体及其总和所不具有的新的属性和特征。

与传统机械技术相比,光机电一体化技术主要有以下特征:

(1) 综合性与系统性 光机电一体化技术是多学科的知识和技术有机结合而成的综合性高新技术,其产品更具有系统性和完整性。光机电一体化系统所涉及的如机械技术、微电子技术、自动控制技术、信息技术、传感技术、电力电子技术、接口技术、模/数与数/模交换技术,以及软件程序技术等,在综合成一个完整的系统时,不仅发挥出各项技术的原有性能,而且还通过结构效应和规模效应涌现出新的整体特性。

(2) 微型化、轻量化、低成本 由于光机电一体化系统大量采用微机械、

微电子、微型光学的器件和技术，使得系统的体积和重量大大降低，成本也大幅度下降，应用范围日益广泛。从家用电器、医疗设备到武器装备、航天仪器，微型光机电系统都发挥着不可替代的作用。

(3) 高精度，多功能，智能化 光机电一体化技术的信息处理能力使系统中的机械传动部件大为减少，从而使机械磨损、受力变形及配合间隙等所引起的动作误差大大减小，同时各种干扰因素造成的误差又可通过自动控制系统的自诊断、自校正、自补偿去达到单纯机械方式所不能实现的工作精度。光机电一体化系统通过改变程序、指令等软件内容而无需改动硬件部分，就可灵活地变换系统的功能，以适应不同的工作环境和变化的功能要求。光机电一体化系统可以很方便地采用人工智能、知识工程、模糊控制、神经网络等先进理论和技术，来实现系统的智能化。

(4) 高可靠性，高稳定性，长寿命 光机电一体化系统可广泛采用光电和电磁等非接触式传感器和驱动器，代替传统机械系统中的敏感装置和运动部件，可有效减小因部件磨损、运动间隙、冲击振动引起的系统工作可靠性、稳定性和使用寿命的降低。若在系统中引入智能故障诊断、排除、修复或代偿技术，则可进一步提高系统的工作可靠性、稳定性和使用寿命。

(5) 知识密集性 光机电一体化技术是一大类高度知识密集型的科学技术群，光机电一体化系统的设计往往要涉及众多学科和专业的知识，如数学、物理学、化学、光学、声学、机械学、(微)电子学、电工学、系统工程学、控制论、信息论和计算机科学等。因此，从事光机电一体化系统设计的人员既要有合理的知识结构和丰富的技术经验，又要有多学科的知识 and 技能，尤其是交叉、边缘学科的知识和技术创新能力。

1.2 光机电一体化系统的发展历史

光机电一体化技术的发展来源于机电一体化技术和光电子技术的发展，图 1-1 是光机电一体化技术的发展历史。

20 世纪六、七十年代，随着半导体集成制造技术的发展和微处理器的发明，给许多技术领域带来了革命性的影响。尤其在硬件和软件技术的相互协同和融合发展中，各种技术与计算机技术，特别是嵌入式微处理器技术相互结合，使机器能够把模拟信号转换为数字信号进行处理，可以通过软件和算法来计算结果，并且能够存储和积累知识、数据和信息，使机器和系统获得了更高的灵活性和适应性。20 世纪 80 年代，微机电系统 (MEMS) 的出现，使得器件和系统的外形尺寸更小，为微光机电系统 (MOEMS) 技术的发展奠定了基础。

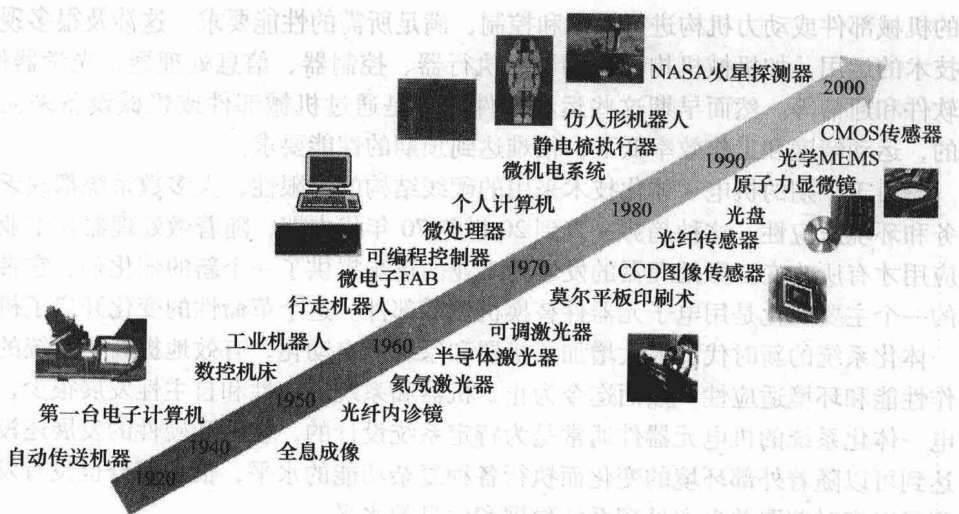


图 1-1 光机电一体化技术的发展历史

光机电一体化技术作为一种技术变革，在过去的近 50 年中得到不断地发展。自 1960 年美国 T·H·梅曼研制成第一台红宝石激光器以来，在先进制造工艺（化学气相沉积技术、分子束外延技术、聚焦离子束显微机械加工技术）的支持下，光机电一体化技术的发展成为可能。这些技术保证了光学、光电和电子元件集成到单个紧凑的系统中。1974 年发明的电荷耦合摄像传感器（CCD）不仅促进了计算机图形技术的发展，也开辟了光学技术和光纤传感器发展的新时代。这些光学元件和设备提供了许多新的实用特性，如元器件相互独立、转换容易、感知范围大、受电噪声影响小、采用分布式的传感和通信方式，并具有很大的带宽。

在机电一体化系统中集成这些光学特性，能够提升系统的性能，拓展系统的功能。用一定的方式将这些光学的、机械的和电子的元器件有序地集成在一起，就形成了光机电一体化系统。

作为一门工程学科，机电一体化技术（在学科上也称机械电子学）主要致力于机械、电子和计算机技术的优化集成，创造新的产品。随着光学和光电技术的发展，光学/光电元器件的高精确性、快速信息处理能力和灵活小巧的电路等特点，使得光学传感器、变换器和执行器的集成化设计方法很快应用到光机电一体化系统中。

最初，光机电一体化的概念是光学机械领域衍生出来的，光学机械设计的主要目的是保持各种精密器部件（如望远镜、显微镜、度量工具和眼镜等光学部件）的准确形状和位置。事实上，光机电一体化系统设计更强调各种技术的集成，有效地利用现有技术，开发质量过硬并满足需求的产品和系统。

目前，多数的工程设备、产品、机器和系统都有运动部件，这就需要对相应

的机械部件或动力机构进行操纵和控制，满足所需的性能要求。这涉及很多现代技术的运用，如机械机构、传感器、执行器、控制器、信息处理器、光学器件、软件和通信等。然而早期这些运动部件大多是通过机械部件或机械设备来完成的，运动精度和工作效率低下，很难达到预期的性能要求。

由于早期的机电一体化技术采用的硬线结构的局限性，大多数系统都缺乏任务和环境适应性。这种趋势一直到 20 世纪 70 年代中期，随着微处理器在工业的应用才有所改变。微处理器的发展为工业的进步提供了一个新的催化剂，它带来的一个主要变化是用电子元器件替换机械零部件。这个革命性的变化开启了机电一体化系统的新时代，大大增加了机器和系统的自动化，有效地提高了系统的工作性能和环境适应性。然而迄今为止，机器和系统适应性和自主性发展很少，机电一体化系统的机电元器件通常是特定系统设计的，软件和硬件的发展还没有达到可以随着外部环境的变化而执行各种复杂功能的水平，信息部分也没有发展到可以实时获取并自主处理系统数据和信息的水平。

近些年来，光学技术和机电一体化系统的融合速度越来越快，大批带有光学元件的机电产品已经投放市场。随着光学技术的发展，光学元件与机电元件组成系统，很好地解决了许多技术难题，极大地提升了系统的性能和性价比，实现了许多传统技术所无法独自实现的新功能。

1.3 光机电一体化系统的组成及分类

1.3.1 光机电一体化系统的组成

与机电一体化系统类似，光机电一体化系统一般由五大相互关联的子系统组成：机械本体系统，信息感知系统，信息处理与控制系统，驱动传动系统，任务执行系统，如图 1-2 所示。

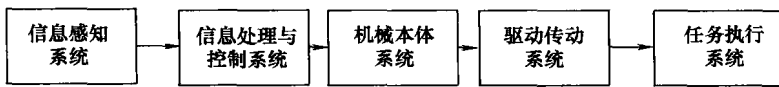


图 1-2 光机电一体化系统组成示意图

1.3.2 光机电一体化系统的分类

通常可根据光学元件与机械元件和电子元件的集成方式的不同，将光机电一体化系统分成三大类。

(1) 光机电一体化系统 在这类系统中, 光学和机电元件在功能上是不能分离的, 若将组成系统的光学或机电元件移走, 那么系统就不能正常工作。这表明这两种元件是在功能和结构上密切关联的, 以达到理想的系统性能。这样的系统有自适应镜、可调谐激光器、光驱激光头、光学压力传感器等。

(2) 光学嵌入式机电系统 这类系统基本上是由光学、机械和电子元件组成的机电系统。在这类系统中, 光学元件嵌入到机电系统中, 也可以从系统中分离出来, 但是系统的性能就会下降。大多数工程上带有光学元件的机电一体化系统都属于这种类型: 洗衣机、真空清洁器、制造工艺监测和控制系统、机器人、汽车、伺服电动机等。

(3) 机电嵌入式光学系统 这类系统基本上是光学系统, 它集成了机械和电子的一些元件。很多光学系统都需要定位伺服机构来操作, 以便控制光束的排列和光的极化作用。机电嵌入式光学系统如照相机、光学放映机、检流计、串并联扫描仪、光学开关、光纤挤压式偏振控制器等。

1.4 光机电一体化技术的基本功能

1.4.1 光机电系统功能与技术转换

从光机电系统的分类可以看出, 光学元件、机械元件和电子元件的不同组合方式形成了不同的系统功能, 而不同的系统类型和技术状态转换将产生不同的基本作用, 进而形成不同的基本功能。表 1-1 给出了不同系统功能所对应的不同系统类型及其技术转换状态 (路线)。

表 1-1 系统功能分类和技术转换状态

系统功能	技术/方法	系统类型	技术状态转换
检测	基于光纤的传感器: 如压力、温度、位移、加速度传感器	MO/OPME	ME→O→O
	光学传感器: 三维成像、光位移获取、共焦传感器、自适应反射器		
	纳米探测系统		
光学扫描	光学扫描仪: 检流计、共振扫描器、声光扫描器、多边形反射器、盘式倾斜机构	MO/OPME	OE→ME→O
	光学/视觉扫描系统: 导航/监视遥控设备、图像识别系统、PCB 检查系统、晶片检查系统		
光学执行器	超敏感光驱动设备	OPME	OE→ME