

光机电一体化 系统及应用

GUANGJIDIAN YITIHUA
XITONG JI YINGYONG

萧泽新 编著



华南理工大学出版社
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

光机电一体化系统及应用

萧泽新 编著

张以谟 主审

华南理工大学出版社

·广州·

图书在版编目 (CIP) 数据

光机电一体化系统及应用/萧泽新编著. —广州: 华南理工大学出版社, 2011.10
ISBN 978 - 7 - 5623 - 3436 - 1

I . ①光… II . ①萧… III . ①光电技术-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 (2011) 第 093259 号

总发行: 华南理工大学出版社 (广州五山华南理工大学 17 号楼, 邮编 510640)
营销部电话: 020-87113487 87110964 87111048 (传真)
E-mail: scutc13@scut.edu.cn **http://www.scutpress.com.cn**

策划编辑: 毛润政

责任编辑: 黄冰莹

印刷者: 湛江日报社印刷厂

开本: 787mm×1092mm 1/16 **印张:** 17 **字数:** 425 千

版次: 2011 年 10 月第 1 版 2011 年 10 月第 1 次印刷

印数: 1~2000 册

定价: 33.00 元

版权所有 盗版必究

序

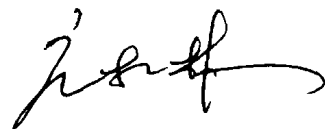
作者于1985年作为梧州光学仪器厂的代表，参加了原机械工业部“生物显微镜生产许可证”的相关工作。因该项工作由“中国光学仪器产品质量监督检验中心”负责具体组织落实，从而认识了作者。不久作者以生产许可实施为契机，积极探索生物显微镜检测手段的现代化，并与清华大学精仪系方仲彦教授合作，于1990年成功地研发出具有国际先进水平的“生物显微镜多功能光电质检仪”，开创了我国应用光电技术于显微镜质检领域的先河。从此作者一直在光机电一体化领域不懈努力，辛勤耕耘，成果丰硕。

作者在20世纪90年代调入高校，从事光学工程和光机电一体化技术的教学科研工作。为提高大学生、研究生的综合工程能力，作者把20多年来在该领域的成果和技术积累总结凝练成书。

《光机电一体化系统及应用》一书融光、机、电、算等多学科、多种高新技术于一体，具有综合性、系统性强的特色；本书另一个鲜明的特色是理论紧密联系实际，穿插选用了绝大部分为作者亲历的16个设计实例和6个产品案例，不仅为读者学习起到很好的启迪和示范作用，也体现了作者为光机电一体化技术与系统集成领域的贡献。

相信本书的出版不仅对高校师生，也对我国的相关产业界的工程技术人员有所帮助。祝贺本书的出版，是以为序。

中国工程院院士
中国仪器仪表学会理事长



前 言

如果从本人于20世纪80年代主持研发的“JX-1型生物显微镜多功能光电质检仪”(国际先进水平,广西梧州光学仪器厂与清华大学校企合作)成果为起点,屈指一算,本人进入光机电一体化技术领域近30年了,在此期间深入地研究过该领域的多个关键共性技术与系统,也把多个研究成果集成或物化于20多个相关的设备、仪器和装置中。有成功的喜悦,更多的却是失败、失误后的苦涩与反思。为了让光机电一体化领域的同道中人,特别是年轻的科技工作者、工程技术人员在工作中少走弯路,很早就想写一本关于光机电一体化技术与系统的书,但一直因忙于工作而搁浅。

桂林电子科技大学研究生院为提高相关专业硕士研究生的工程综合实践能力,计划开一门“光机电一体化技术”的新课,自编一本校内用的教材,并由我来讲授。这就正好给了我一个机会。

本书是我多年来在光机电一体化科研工作中技术积累的提炼和凝结;还吸纳了多次给研究生和高年级本科生授课的实践和经验。本书的特点是以“光”为主线,论述了光机、光电传感、(光)电控制、智能光电等光机电一体化相关共性技术与系统,再通过系统集成成为光机电一体化系统与产品,从而凸现了本书涉及的知识面广,系统性、综合性强等特点;本书另一个特点是理论联系实际、实用性和示范性强,主要体现在16个设计实例和6个产品设计案例贯穿全书(绝大部分实例和案例都是本人及其所带领的桂林电子科技大学机电工程学院光机电一体化研究所科研团队的成果)。此外,本书所涉及的各种概念、术语、定义符号等均依据当今执行的国家、行业等有关标准;也体现了本书与时俱进的时效性特点。

本书分为3个部分(3篇共8章):第1篇是概述,含第1章(光机电一体化技术概述);第2篇是相关共性技术与系统,包括第2章(应用光学基础)、第3章(典型光学系统及其设计)、第4章(精密机械系统及其设计)、第5章(光电传感与智能光电系统)、第6章(伺服控制系统及其设计);第3篇是应用,包括第7章(光机电一体化产品设计)、第8章(现代制造业装备与光电仪器产品设计案例)。

本书由中国仪器仪表学会光机电技术与系统集成分会主任委员、天津大学张以谟教授主审，在此表示感谢。特别感谢中国工程院院士、中国仪器仪表学会理事长庄松林教授为本书作序。感谢桂林电子科技大学教务处、机电综合工程训练中心（国家级实验教学示范中心）、机电工程学院光机电一体化研究所对本书出版的支持。

此外，高兴宇博士，硕士研究生肖冉、周海英、韦喆、廖文哲和王建华在插图制作和书稿录入中做了大量的工作，在此一并致谢。

由于作者水平有限，书中难免存在缺点和不足，恳请读者批评指正。

萧泽新

于桂林电子科技大学

2011年3月

目 录

第 1 篇 概 述

第 1 章 光机电一体化技术概述	(3)
1.1 光机电一体化的概念	(3)
1.2 光机电一体化的特点	(4)
1.2.1 多种技术系统的有机融合	(4)
1.2.2 结构简化,使产品易于实现小型化、轻型化	(4)
1.2.3 精度提高,功能增加	(4)
1.2.4 高可靠性、高稳定性和高使用寿命	(4)
1.2.5 智能化、柔性化程度高	(5)
1.2.6 产品高新技术含量高	(5)
1.3 光机电一体化的相关技术	(5)
1.3.1 机械技术	(5)
1.3.2 光学技术	(5)
1.3.3 计算机与信息处理技术	(6)
1.3.4 检测与传感技术	(6)
1.3.5 自动控制技术	(6)
1.3.6 伺服驱动技术	(6)
1.3.7 系统集成技术	(6)
1.4 光机电一体化技术的发展方向	(7)
1.4.1 微型化	(7)
1.4.2 智能化	(7)
1.4.3 模块化	(7)
1.4.4 数字化	(7)
1.4.5 集成化	(7)
1.4.6 网络化	(8)
1.4.7 人性化	(8)
1.4.8 带源化	(8)
1.4.9 绿色化	(8)

第 2 篇 相关共性技术与系统

第 2 章 应用光学基础	(11)
2.1 光学成像原理.....	(11)
2.1.1 共轴理想光学系统.....	(11)
2.1.2 理想光学系统的物像关系式.....	(15)
2.1.3 光学系统的放大率.....	(18)
2.1.4 理想光学系统的组合.....	(19)
2.2 光学系统像差基本概念.....	(22)
2.2.1 球差.....	(22)
2.2.2 彗差.....	(24)
2.2.3 像散与像场弯曲.....	(25)
2.2.4 畸变.....	(27)
2.2.5 色差.....	(29)
2.3 光学系统中光束的限制.....	(30)
2.3.1 概述.....	(30)
2.3.2 孔径光阑、入瞳、出瞳.....	(31)
2.3.3 视场光阑、入射窗、出射窗.....	(33)
2.3.4 渐晕光阑、消杂光阑、光阑位置及安放原则.....	(35)
2.3.5 平面上空间像的不清晰度、景深.....	(38)
2.3.6 远心光学系统.....	(40)
2.4 光度学基础与光能计算.....	(41)
2.4.1 光源的辐射特性.....	(41)
2.4.2 发光强度、光照度、光出射度和光亮度.....	(43)
2.4.3 光源特性及光源选择.....	(47)
2.4.4 光能计算.....	(50)
第 3 章 典型光学系统及其设计	(54)
3.1 光学设计概述.....	(54)
3.1.1 光学系统、光学部件.....	(54)
3.1.2 光学系统(部件)设计方法概述.....	(54)
3.1.3 光学设计的科技进步与光学设计 CAD.....	(56)
3.2 光学系统像质评价.....	(58)
3.2.1 几何像差公差——像差容限.....	(58)
3.2.2 波像差、瑞利准则和中心亮斑所占能量.....	(60)
3.2.3 点列图和能量集中度评价.....	(61)
3.2.4 分辨率和星点检验.....	(62)
3.2.5 光学传递函数.....	(64)
3.3 望远物镜设计.....	(68)

3.3.1	望远物镜光学特性与结构类型	(68)
3.3.2	设计实例 (1): 双胶合、双分离物镜设计	(69)
3.4	显微物镜设计	(71)
3.4.1	显微物镜光学特性与结构类型	(71)
3.4.2	设计实例 (2): 生物显微镜 25×消色差物镜设计	(78)
3.4.3	设计实例 (3): 16×无限远像距长工作距离平场物镜的设计	(80)
3.4.4	设计实例 (4): 生物显微镜多功能光电质检仪远心物镜设计	(83)
3.5	目镜设计	(87)
3.5.1	目镜光学特性与结构类型	(87)
3.5.2	设计实例 (5): 用试验法设计的系列目镜	(89)
3.5.3	显微电视 CCD 摄录接口的设计	(90)
3.6	照相物镜设计	(92)
3.6.1	照相物镜的光学特性和结构形式	(92)
3.6.2	设计实例 (6): 照相机标准镜头设计	(98)
3.7	显微镜光学系统设计	(100)
3.7.1	显微镜光学系统设计方法	(100)
3.7.2	设计实例 (7): 普通生物显微镜成像光学系统设计	(103)
3.7.3	设计实例 (8): 特种显微镜无限远像距光学系统设计	(109)
第 4 章	精密机械系统及其设计	(114)
4.1	概述	(114)
4.1.1	精密机械在光机电一体化产品中的地位与作用	(114)
4.1.2	光机电一体化产品对精密机械系统设计的基本要求	(114)
4.2	机械传动	(115)
4.2.1	同步带传动	(115)
4.2.2	精密齿轮传动	(118)
4.2.3	精密螺旋传动 (I): 滑动螺旋传动设计	(126)
4.2.4	精密螺旋传动 (II): 滚珠丝杠副传动	(135)
4.3	光学机械典型结构 (I): 精密轴系	(138)
4.3.1	标准圆柱形轴系结构和特点	(138)
4.3.2	圆锥形轴系	(140)
4.3.3	运动学和半运动学式圆柱形轴系	(141)
4.3.4	设计实例 (9): 高精度轴系创新结构与配作工艺	(144)
4.4	光学机械典型结构 (II): 光学零件与机械零件的联接	(147)
4.4.1	概述	(147)
4.4.2	圆形光学零件的固定	(147)
4.4.3	非圆形光学零件的固紧	(153)
4.5	光学机械典型结构 (III): 各种镜头的常用结构	(156)
4.5.1	物镜的常用结构	(156)
4.5.2	显微目镜的常用结构	(161)

4.5.3	设计实例 (10): 辊边法固定圆形光学零件的应用——显微物镜光机结构设计	(161)
4.5.4	设计实例 (11): 压圈法固定圆形光学零件的应用——目镜光机结构设计	(161)
4.5.5	设计实例 (12): 非圆光学零件固紧的应用——棱镜组光机结构设计	(164)
第 5 章 光电传感与智能光电系统		(165)
5.1	CCD 与 CMOS 图像传感技术	(165)
5.1.1	CCD 图像传感器	(165)
5.1.2	CCD 图像测量技术	(168)
5.1.3	设计实例 (13): 基于 CMOS 的显微图像采集系统的设计	(172)
5.1.4	CCD 与 CMOS 图像传感技术的最新发展	(179)
5.2	智能光电系统	(182)
5.2.1	智能光电系统的构成与特点	(182)
5.2.2	智能光电系统设计方法与要点	(184)
5.3	设计实例 (14): 智能光机电机器视觉图像采集系统设计	(186)
5.3.1	机器视觉系统概述	(186)
5.3.2	光电检测原理及光学系统初步设计	(186)
5.3.3	光学系统特性及设计要点	(187)
5.3.4	大视场高分辨率机器视觉摄录物镜的设计	(188)
第 6 章 伺服控制系统及其设计		(193)
6.1	机械系统控制	(193)
6.1.1	控制系统及其组成	(193)
6.1.2	控制系统的基本要求	(194)
6.1.3	控制系统的类型	(195)
6.2	伺服系统的基本要求和设计方法	(197)
6.2.1	概述	(197)
6.2.2	伺服系统的基本要求	(198)
6.2.3	伺服系统设计方法	(199)
6.3	开环伺服系统设计	(200)
6.3.1	机械系统设计	(200)
6.3.2	控制系统设计	(204)
6.4	闭环伺服系统设计	(205)
6.4.1	闭环伺服系统的构成	(205)
6.4.2	闭环伺服系统设计	(206)
6.5	设计实例 (15): 步进电机细分技术在高倍显微物镜自动调焦中的应用	(208)
6.5.1	自动显微镜调焦原理	(208)
6.5.2	步进电机细分原理与实现	(209)
6.6	设计实例 (16): 自动倒置显微镜伺服控制系统的研制	(212)

6.6.1	系统的组成及工作原理	(212)
6.6.2	伺服控制系统的硬件设计	(213)
6.6.3	伺服系统的软件设计	(213)
6.6.4	自动调焦系统	(215)
6.6.5	显微工作台重复精度的测量	(216)

第 3 篇 应 用

第 7 章	光机电一体化产品设计	(219)
7.1	光机电一体化产品设计方法	(219)
7.1.1	概述	(219)
7.1.2	产品设计方案的评价与分析方法	(220)
7.2	光电精密仪器的总体设计	(222)
7.2.1	设计任务与信号转换	(222)
7.2.2	精度分析和精度设计	(225)
7.2.3	总体参数的确定方法	(231)
7.2.4	总体设计举例	(231)
第 8 章	现代制造业装备与光电仪器产品设计案例	(233)
8.1	案例 (I): LF-100 型多束激光热轧带钢板形测量仪	(233)
8.1.1	技术内容	(233)
8.1.2	测量原理	(234)
8.2	案例 (II): 半自动生化分析仪	(235)
8.2.1	引言	(235)
8.2.2	生化分析仪基本工作原理	(236)
8.2.3	生化分析仪光学系统的分光比色方法	(236)
8.2.4	生化分析仪光学系统的设计	(237)
8.3	案例 (III): 油污染度光电检测仪	(242)
8.3.1	引言	(242)
8.3.2	系统总体设计	(242)
8.3.3	光学系统的选择与设计	(243)
8.3.4	图像处理	(243)
8.4	案例 (IV): LED 阵列光电检测仪	(245)
8.4.1	引言	(245)
8.4.2	系统的检测原理	(245)
8.4.3	光学系统关键零部件的设计	(246)
8.4.4	结语	(248)
8.5	案例 (V): 硬度微压痕显微图像光电检测装置的设计与实现	(248)
8.5.1	概述	(248)
8.5.2	维氏硬度光电检测关键技术	(248)

8.5.3	设计实例：锚夹片硬度光电检测光学系统	(250)
8.5.4	图像处理	(253)
8.6	案例（VI）：新型金相显微镜系列产品的研发	(253)
8.6.1	金相显微镜的现代化与现代金相显微术概述	(253)
8.6.2	JX—4型自动正置金相显微镜	(254)
8.6.3	自动显微系统多媒体互动实验教学平台	(255)
8.6.4	金相显微光电检测原理	(256)
参考文献	(259)

第1篇 概述

第 1 章 光机电一体化技术概述

1.1 光机电一体化化的概念

光机电一体化技术 (Optomechatronic) 是由光学、机械、微电子、信息技术、计算机及其他相关技术交叉与融合而构成的综合性高新技术, 是诸多高新技术产业和高新技术装备的基础。在发达国家, 光机电一体化已逐渐发展形成一项支柱产业, 如激光加工技术、数控系统、工业控制系统、智能制造系统、机器人制造等, 形成了许多边缘学科和新兴产业。

光机电一体化概念的萌芽, 可以追溯到早期德国提出的精密工程技术。1981 年, 在德国工程师协会、德国电气工程技术人员协会及其共同组成的精密工程技术专家组提出的《关于大学精密工程技术专业的建议书》中, 提出将精密工程技术定义为光、机、电一体化的综合技术, 并用图来说明其定义 (图 1-1)。它包括机械 (含液压、气动及微机械)、电工与电子、光学及不同技术之间的组合 (电工与电子机械、光电子技术与光学机械), 其核心为精密工程技术。精密工程技术的定义从某种程度上说明了光机电一体化的涵义。

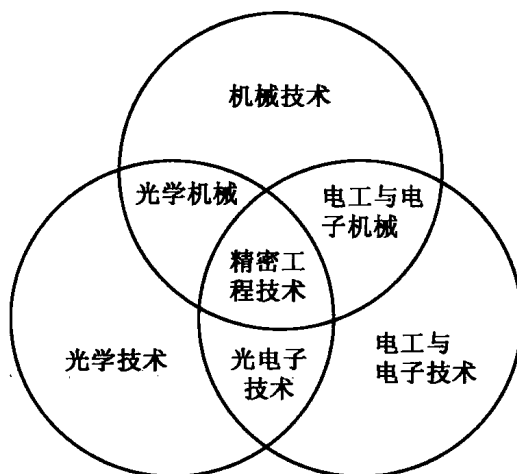


图 1-1 精密工程技术的定义

一般认为, 光机电一体化是由光学、机械学、微电子学、信息处理与控制科学和计算机科学等各种相关学科交叉融合而构成的群体技术。各种新技术的相互渗透和有机融合是光机电一体化技术的灵魂。

科学家指出: 20 世纪是微电子的世纪, 而 21 世纪则是光电子的世纪。近 10 年来, 我国光电子技术研究有了突飞猛进的发展, 信息光电子领域的关键技术有所突破, 在高新技术研究开发方面缩短了与国际水平的差距。国内光电子有关产业基地在光电子器件、部件、子系统等已占领了国内较大的市场份额。“十五”规划以来, 我国相继建立了武汉“中国光谷”、广州“广州光谷”、长春“光电产业基地”、上海“光电子产业发展基地”、浙江“光电产业发展基地”、西安“光电子科技园区”、重庆“光电子园区”、北京“光机电一体化产业基地”等光电产业基地, 为光电产业的发展增添新的动力, 并在工业生产中发挥着越来越大的作用。

1.2 光机电一体化特点

光机电一体化是集光、机、电、算于一身的综合性高新技术，它在工业领域的应用，引发了一场新的变革。它之所以能够迅速发展，源于下述几方面的鲜明特色。

1.2.1 多种技术系统的有机融合

光机电一体化是光学技术、微电子技术、计算机技术、信息技术与机械技术结合而成的综合性技术。各种技术的综合及多个部分的组合，使得光机电一体化技术及产品更具有系统性、完整性和科学性。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、模拟量与数字量交换技术以及软件技术等各个组成部分在综合成一个完整系统中相互配合时有严格的要求，这就需要在原来各种技术的基础上扬长避短，逐步趋于合理，不断向理想化方向发展。

1.2.2 结构简化，使产品易于实现小型化、轻型化

小、巧、轻、薄是具同等功能产品的另一个重要追求。由于微电子学和半导体技术的发展，光机电一体化产品的控制装置、显示部件等都普遍采用大规模集成电路，使得产品的体积小型化、重量轻型化。20世纪90年代，还出现了微光机电系统，使产品向微型化方向发展。同时由于光机电一体化系统采用新型器件和装置，可代替笨重而复杂的机械或电子装置，如光盘驱动器、条形码读出器、图像传感器和激光印刷机等产品都是利用光学读出和读入部件代替了电气和机械的部件。由微处理器控制装置可方便地完成过去靠机械传动链和机构实现的关联运动，使机械结构简化、体积减少、重量减轻，这不仅提高了自动化程度，而且能大大提高产品质量。

1.2.3 精度提高，功能增加

光机电一体化技术使机械传动部件减少，因而使机械磨损、配合间隙和受力变形等所引起的动作误差大大减小。由于采用了电子技术，使反馈控制水平提高并能进行高速处理，于是电子自动控制系统可精确地按预设量使相应机构动作；而各种因干扰因素造成的误差，可通过自动控制系统自行诊断、校正、补偿以达到工作要求。可见光机电一体化产品不仅精度提高，且功能也增加。

1.2.4 高可靠性、高稳定性和高使用寿命

传统机械装置的运动一般都伴随着磨损及运动部件配合间隙所引起的动作误差，而发出由于摩擦、撞击、振动等引起的噪声，因而影响装置的寿命、稳定性和可靠性。而光机电一体化技术的应用，使装置的运动部件减少，磨损也大为减少，如集成化接近开关甚至连运动部件也无机械磨损。因此，装置的寿命得到提高，故障率降低，从而提高了产品的可靠性和稳定性。

1.2.5 智能化、柔性化程度高

光机电一体化产品采用高性能的微处理器作为系统的控制器。在产品设计上,尽量采用软件来实现硬件的功能。因此,一旦产品的工作对象发生改变,只要修改相应的软件就可以完成功能的扩展和更换,而不需要增添任何硬件。NC 机床和工业机器人就是有力的例证。光机电一体化产品同时具有自诊断、自动监测功能,碰到过载、失速等事故,能进行自我保护,防止事故发生。因此,产品的可靠性得到进一步的提高。

1.2.6 产品高新技术含量高

光机电一体化产品往往是集光、机、电、算等多种相关高新科技于一身,产品高性能是不言而喻的,因此,研发光机电一体化产品往往要涉及跨学科的专业知识,包括数学、物理学、化学、声学、机械工程学、电力电子学、电工学、系统工程学、光学、控制论、信息论和计算机科学等多门学科的专业知识。如静电复印机、彩色印像机等,就是一种由机、电、光、磁、化学等多种学科和技术复合创新的新型产品。开发这类产品对科研团队的合作以及工程技术人员的知识结构提出很高的要求。而产品一旦实现光机电一体化,便具有很高的功能水平和高附加值,可提升企业的效益和竞争能力。

1.3 光机电一体化相关技术

光机电一体化技术是光学、机械学、电子学、信息处理与控制等多学科相互渗透、相互融合而形成的边缘技术。它所涉及的技术领域极其广泛,概括起来,主要有以下7项共性技术。

1.3.1 机械技术

机械技术是关于机械的机构以及利用这些机构传递运动的技术,它是光机电一体化技术的基础。光机电一体化产品的主要功能和结构功能,往往是以机械技术为主实现的。机械结构的合理性还直接影响到控制的复杂程度以及系统的稳定性和可靠性。光机电一体化产品的小、巧、轻、薄、高精度等特点,对机械设计和制造技术也提出了更高的要求。机械技术只有不断地采用新材料、新工艺、新原理、新机构才能满足光机电一体化技术的要求。

1.3.2 光学技术

光学技术在光机电一体化系统或产品的各个方面都有应用。在传感器方面,利用光子技术制作的传感器具有精密、准确、快速、高效、非接触测量等特点。例如利用 CCD 光电传感器的各种机器视觉系统;各种安全防卫(交通、银行等)用的高清 CCTV(闭路电视)等技术装备对光学镜头提出相当高的要求。于 1960 年诞生的激光具有高相干性、单色性和方向性好的特点,半个世纪以来造福于人类,影响着人们的生产、生活方式。激光在光机电一体化产品中的应用案例不胜枚举:激光加工(切割、打孔、打标、焊接热处理、雕刻、表面清洗、快速成型)、激光通信、精密计量测试(激光测距、激光瞄准、激