

机械设计手册

单行本

微机电系统设计与激光



闻邦椿 主编

MACHINE DESIGN HANDBOOK



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

机 械 设 计 手 册

第 5 版

单行本

微机电系统设计与激光

主 编 闻邦椿

副主编 张义民 鄂中凯 陈良玉 孙志礼

宋锦春 柳洪义 汪 恺



机 械 工 业 出 版 社

《机械设计手册》第5版 单行本共22分册,内容涵盖机械常规设计、机电一体化设计与机电控制、现代设计方法及其应用等内容,具有系统全面、信息量大、内容现代、凸显创新、实用可靠、简明便查、便于携带和翻阅等特色。各分册分别为:《常用设计资料与零件结构设计工艺性》《机械工程材料》《零部件设计常用基础标准》《连接、紧固与弹簧》《带、链、摩擦轮与螺旋传动》《齿轮传动》《减速器和变速器》《机构、机架与箱体》《轴及其连接件》《轴承》《起重运输机械零部件和操作件》《润滑与密封》《液压传动与控制》《气压传动与控制》《机电系统设计》《工业机器人与数控技术》《微机电系统设计与激光》《创新设计与绿色设计》《机械系统的振动设计及噪声控制》《数字化设计》《疲劳强度与可靠性设计》《机械系统概念设计与综合设计》。

本单行本为《微机电系统设计与激光》,主要介绍微机电系统基本概念与应用领域、微机电系统制造、微机电系统设计、微机电系统实例等;激光加工概论(激光器基础、加工中常用的激光器、激光加工物理基础)、激光打孔、激光切割、激光焊接、激光淬火、激光熔覆与合金化、激光冲击强化、激光在其他机械工程领域的应用、激光加工的安全防护等。

本书可供从事机械设计、制造、维修及有关工程技术人员作为工具书使用,也可供大专院校的有关专业师生使用和参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械设计手册. 微机电系统设计与激光/闻邦椿主编. —5版.
—北京:机械工业出版社,2014.12
ISBN 978-7-111-49150-7

I. ①机… II. ①闻… III. ①机械设计—技术手册②微电机—系统设计—技术手册③激光加工—技术手册 IV. ①TH122-62
②TM380.2-62③TG665-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第002843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:曲彩云 责任印制:刘 岚

北京中兴印刷有限公司印刷

2015年1月第5版第1次印刷

184mm×260mm·17.25印张·421千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-49150-7

定价:38.00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

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

《机械设计手册》第5版 单行本 卷目

常用设计资料与 零件结构设计工艺性	第1篇 常用资料、常用数学公式和常用力学公式 第4篇 零件结构设计工艺性
机械工程材料	第2篇 机械工程材料
零部件设计常用基础标准	第3篇 零部件设计常用基础标准
连接、紧固与弹簧	第5篇 连接与紧固 第16篇 弹簧
带、链、摩擦轮与螺旋传动	第6篇 带传动和链传动 第7篇 摩擦轮传动与螺旋传动
齿轮传动	第8篇 齿轮传动
减速器和变速器	第10篇 减速器和变速器
机构、机架与箱体	第11篇 机构 第18篇 机架与箱体
轴及其连接件	第12篇 轴 第15篇 联轴器、离合器与制动器
轴承	第13篇 滑动轴承 第14篇 滚动轴承
起重运输机械零部件和操作件	第17篇 起重运输机械零部件和操作件
润滑与密封	第20篇 润滑 第21篇 密封
液压传动与控制	第22篇 液压传动与控制
气压传动与控制	第23篇 气压传动与控制
机电系统设计	第25篇 机电一体化技术及设计 第26篇 机电系统控制 第32篇 电动机、电器与常用传感器
工业机器人与数控技术	第27篇 工业机器人技术 第28篇 数控技术
微机电系统设计与激光	第29篇 微机电系统及设计 第31篇 激光及其在机械工程中的应用
创新设计与绿色设计	第35篇 创新设计 第36篇 绿色设计与和谐设计
机械系统的振动设计及噪声控制	第38篇 机械系统的振动设计及噪声控制
数字化设计	第39篇 机械结构的有限元设计 第44篇 优化设计 第47篇 并行设计与协同设计 第48篇 反求设计与快速成形制造技术 第50篇 计算机辅助设计
疲劳强度与可靠性设计	第40篇 疲劳强度设计 第41篇 机械可靠性设计
机械系统概念设计与综合设计	第37篇 机械系统概念设计 第52篇 产品综合设计的理论与方法

《机械设计手册》第5版 单行本 出版说明

《机械设计手册》(6卷本),自1991年面世发行以来,历经四次修订再版。截至2014年,手册累计发行了35万套。二十多年来,作为国家级重点科技图书的《机械设计手册》,深受广大读者的欢迎和好评,在全国具有很大的影响力,曾获得中国出版政府奖,提名奖(2013年)、中国机械工业科学技术奖一等奖(2011年)、全国优秀科技图书奖二等奖(1995年)、机械工业部科技进步奖二等奖(1994年),并多次获得全国优秀畅销书奖等奖项。《机械设计手册》已经成为机械工程领域最具权威和最具影响力的大型工具书。

《机械设计手册》第5版是一部6卷、共52篇的大型工具书。它与前4版相比,无论在体系上还是在内容方面都有很大的变化。它在前4版的基础上,编入了国内外机械工程领域的新标准、新材料、新工艺、新结构、新技术、新产品、新设计理论与方法,并重点充实了机电一体化系统设计、机电控制与信息技术、现代机械设计理论与方法等现代机械设计的最新内容。本版手册体现了国内外机械设计发展的最新水平,它精心诠释了常规与现代机械设计的内涵、全面提取了常规与现代机械设计的精华,它将引领现代机械设计创新潮流、成就新一代机械设计大师,为我国实现装备制造强国梦做出重大贡献。

《机械设计手册》第5版的主要特色是:体系新颖、系统全面、信息量大、内容现代、突显创新、实用可靠、简明便查。应该特别指出的是第5版手册具有很高的科技含量和大量技术创新性的内容。手册中的许多内容都是编著者多年研究成果的科学总结。这些内容中有不少是国家863、973、985、科研重大专项,国家自然科学基金重大、重点和面上资助项目,有不少成果曾获得国际、国家、部委、省市科技奖励,充分体现了手册内容的重大科学价值与创新性。如闻邦椿院士经过数十年研究创建的振动利用工程新学科,手册中编入了该类机械设计理论和方法。又如产品综合设计理论与方法是闻邦椿院士在国际上首先提出并依据八本专著综合整理后首次编入手册。该方法已经在高铁、动车及离心压缩机等机械工程中成功应用,获得了巨大的社会效益和经济效益。以综合设计方法作为手册的收尾篇是对所有设计内容的系统化综合和运用,并对现代化大型机械产品的设计起到引领作用。闻邦椿院士在国际上首次按系统的观点对现代设计方法进行了分类,并由此选编了21种现代设计方法,构成了科学地论述和编纂现代设计理论与方法的专卷(手册第6卷),可谓是现代设计方法之大全。创新设计是提高机械产品竞争力的重要手段和方法,本版手册编入了29种创新思维方法、30种创新技术、40条发明创造原理,列举了大量的应用实例,为引领机械创新设计做出了示范。

在《机械设计手册》历次修订的过程中,机械工业出版社和作者都广泛征求和听取各方面的意见,广大读者在对《机械设计手册》给予充分肯定的同时,也指出《机械设计手册》版本厚重,不便翻阅和携带,希望能出版篇幅较小、针对性强、便查便携的更加实用的单行本。为满足读者的需要,机械工业出版社于2007年首次推出了《机械设计手册》第4版单行本。该单行本出版后很快受到读者的欢迎和好评。为了使读者能按需要、有针对性地选用《机械设计手册》第5版中的相关内容并降低购书费用,机械工业出版社在总结《机械设计手册》第4版单行本经验的基础上推出了《机械设计手册》第5版单行本。

《机械设计手册》第5版单行本保持了《机械设计手册》第5版(6卷本)的优势和特色,依据机械设计的实际情况和机械设计专业的具体情况以及手册各篇内容的相关性,将原手册拆

分为 22 个分册，分别为：《常用设计资料与零件结构加工工艺性》《机械工程材料》《零部件设计常用基础标准》《连接、紧固与弹簧》《带、链、摩擦轮与螺旋传动》《齿轮传动》《减速器和变速器》《机构、机架与箱体》《轴及其连接件》《轴承》《起重运输机械零部件和操作件》《润滑与密封》《液压传动与控制》《气压传动与控制》《机电系统设计》《工业机器人与数控技术》《微机电系统设计与激光》《创新设计与绿色设计》《机械系统的振动设计及噪声控制》《数字化设计》《疲劳强度与可靠性设计》《机械系统概念设计与综合设计》。各分册内容针对性强、篇幅适中、查阅和携带方便，读者可根据需要灵活选用。

《机械设计手册》第 5 版单行本是为了实现装备制造强国梦和满足广大读者的需要而编辑出版的，它将与《机械设计手册》第 5 版（6 卷本）一起，成为机械设计人员、工程技术人员得心应手的工具书，成为广大读者的良师益友。

由于工作量大、水平有限，书中难免有一些错误和不妥之处，殷切希望广大读者给予指正。

机械工业出版社

第5版前言

人类社会正迈入知识经济时代,以知识为依托的科学技术在当今社会发展过程中正在发挥着越来越重要的作用。科学技术成果的研究与开发及其广泛应用是当今,也是未来推动经济发展和社会进步的至关重要的因素。依靠科技进步振兴装备制造业是使我国由制造大国过渡到制造强国的核心因素和关键。

发展装备制造业离不开产品的研究与开发及设计。机械产品设计正由传统设计模式向现代设计模式转变,现代设计的特点是广泛采用计算机技术,着力应用智能化设计、数字化设计、网络化设计、绿色化设计及系统化设计的综合技术。机械设计手册的编辑与出版,充分地展现了现代设计的特点,是现代设计不可缺少的工具和手段。

本版手册在科学发展观和自主创新设计的理念引领下,进行了较大篇幅的修改和补充,为我国现代机械产品自主创新设计提供了保障。例如,在手册中重点介绍了产品绿色设计、和谐设计与系统化设计,也介绍了产品的创新设计等内容,这有利于产品设计师们采用手册中介绍的内容和方法开展产品开发。

本版手册汇总了大量的原始数据和设计资料,以及在产品设计时必须采用的技术标准,同时还介绍了设计中许多不可缺少的相关设计知识。因此,可以说手册是设计师们在产品过程中所必需的数据库和知识库,目前她已成为产品研究与开发的“利器”及其他设计器具无法取代的重要的设计工具,这不仅在现在,而且在将来也会发挥其积极的作用。

本版手册系统地叙述了机械设计各专业的主要技术内容,归纳和总结了新中国成立以来我国机械领域取得的成就和经验,不少新内容是本手册编者通过研究得到的,此外,还吸取了国外的若干先进科学技术,其内容丰富,实用性强,前4版出版后,受到了社会各界的重视和好评,作为国家级重点科技图书和机械工程方面的最具权威的大型工具书,曾获得全国优秀图书二等奖、机电部科技进步二等奖、全国优秀科技畅销书奖,1994曾在台湾建宏出版社出版发行,她在机械产品设计中起着十分重要的作用,目前已成为各行业,尤其是机械行业各技术部门必备的工具书。

在本版手册的修订过程中,我们努力贯彻了“科学性、先进性、实用性、可靠性”的指导思想。广泛调研了厂矿企业、设计院、科研院所、高等院校等多方面的使用情况和意见。对机械设计的基础内容、经典内容和传统内容,从取材、产品及其零部件的设计方法与计算流程、设计实例等多方面进行了深入系统的整合,同时,还全面总结了当前国内外机械设计的新理论、新方法、新材料、新工艺、新结构、新产品、新技术,特别是在产品的综合设计理论与方法、机电一体化及机械系统自动控制技术等方面作了系统和全面的论述和凝炼。相信本手册会以崭新的面貌展现在广大读者面前,她对提高我国机械产品的设计水平,推进新产品的研究与开发、老产品的改造,以及产品的引进、消化、吸收和再创新,进而促进我国由制造大国向制造强国转变,发挥其积极的作用。

本版手册分6卷52篇。第1卷:常用设计资料;第2卷:机械零部件设计(连接、紧固与传动);第3卷:机械零部件设计(轴系、支承与其他);第4卷:流体传动与控制;第5卷:

机电一体化及控制技术；第6卷：现代设计理论与方法。在撰写过程中，贯彻和采用最新技术标准和国际新标准，最大限度地充实和更新技术内容，凝炼和总结机械设计的最新成就和经验，尽力地吸取国外的先进科学技术，努力反映当代机械设计的最新水平，更好地为现代机械设计服务；在取材和选材过程中，尽量压缩对基本原理的介绍，避免在手册中出现教科书的叙述方式，特别强调要采用手册化、表格化的设计流程。删除一些可要可不要的内容，以及应用面相对较窄和尚未用于实际的研究性内容，力求使各篇章内容构成有机的整体，既考虑到各篇的系统性，又照顾全书的统一性，尽量避免不必要的重复；在各类零部件设计计算中，增加结构图和应用实例。在部件设计选用中，适当提供可选用的产品的结构及其安装尺寸、主要技术参数等，给设计和选用创造方便的条件；所有计算方法和数据都要准确、可靠、无误，重要的要注明来源；对相近标准的数据和表格尽量予以合并、采用双栏排版、摘其所要等形式予以编写，以使该手册采用较少的篇幅而编入较多的内容。

手册的第5版是在前4版的基础上，着力在以下几个方面作了修订：

一、在贯彻落实推广标准化技术方面

手册全部内容贯彻和采用了2010年1月以前颁发的最新国家标准、行业标准和相关的国际新标准，最大限度地充实和更新标准化技术的内容。本次修订为历次修订中标准更新规模最大的一次，例如：机械工程材料部分更新的标准达162个，流体传动与控制部分更新的标准有150多个。更换的标准中有许多是机械行业的重要标准，如GB/T 786.1—2009 流体传动系统及元件图形符号和回路，GB/T 10095.1~2—2008 圆柱齿轮精度制，GB/Z 18620.1~4—2008 圆柱齿轮检验实施规范等。

二、在新的设计计算方法方面

按照GB/T 3480.1~5—1997 渐开线圆柱齿轮承载能力计算方法、GB/T 10300.1~3—2003 锥齿轮承载能力计算方法重新构建了实用、合理的齿轮设计体系。对圆柱齿轮和锥齿轮均按照初步确定尺寸的简化计算、简化疲劳强度校核计算和一般疲劳强度校核计算编排设计计算方法，以满足不同场合不同要求的齿轮设计需求。增加了齿轮齿廓修形和齿顶修缘的内容，给出了修形计算公式和确定修形量的方法。

在滚动螺旋传动中，按最新的国家标准GB/T 17587.4~5—2008 滚珠丝杠副轴向静刚度、轴向静载荷与动载荷，整理更新了滚珠丝杠传动选用和评估计算方法。

根据机构学的最新发展，考虑到近年来并联机器人和并联机床的快速发展和应用，特地另辟一章，编入并联机器人和并联机床的运动学和动力学分析、典型并联机器人和并联机床的类型和应用选型，这是在大型工具书中首次载入。增加了机构系统方案的构思与拟定并例举了典型实例，对机构设计与选用起到综合和运用的作用。

三、在新材料、新元器件、新产品等方面

在新材料方面，编入了新型工程材料——钛及钛合金，该种材料具有低密度、高熔点、高比强度、耐腐蚀性好、高低温特性好、生物相容性好、具有形状记忆特性等优点，在航空航天、海洋开发、化工、冶金、生物技术、汽车工程、食品、轻工等工业技术领域的装备制造中有重要用途。编入了有“21世纪绿色材料”之称的镁及镁合金，该种材料在轻量性、比强度、导热性、减振性、储能性、切削性、尺寸稳定性以及可回收性等方面具有独特的优点。编入了GB/T 20878—2007 不锈钢和耐热钢牌号及化学成分，该标准是一个全新标准，它规定了143个

牌号的化学成分及部分牌号的物理性能参数与国内外标准牌号的对照,这些在各种手册中未见编入。

在新元件、新产品方面,在减速器和变速器篇中,增加了平面二次包络蜗杆减速器(GB/T 16444—2008)、新型的锥盘环盘式无级变速器、XZW 型行星锥轮无级变速器,在大型工具书中首次编入了用于高档轿车的新型金属带式无级变速器,以及其他相关的设计资料。

流体传动与控制卷在内容和产品方面作了大幅度的更新,编入了液压气动领域中最新开发的各类元器件,为流体传动与控制系统的的设计、运行和维护提供全面的技术支撑。为满足不同层次用户的需要,分别引入了国内主流品牌(含台湾知名品牌 HP)以及国际知名品牌的产品,如液压传动中的德国(Rexroth)、美国(Vickers)、日本(Yuken)、意大利(Atos)等品牌产品;液压控制系统中的德国(Festo)、美国(Moog、Vickers、Dowry)等品牌产品;气压传动中的德国(Festo)、日本(SMC)等品牌产品。

编入了最新出现的具有广泛应用前景的液压元件——螺纹插装阀系列产品,增加了液压伺服油缸等相关新产品,大幅度增加了最新出现的适应性强的各类液压辅件。增加了以气流引射原理制造的真空发生器等气动系统常用的真空元器件。

四、在机电一体化设计与控制技术方面

机械技术与电子技术相结合已经成为当前装备制造业的主流和发展趋向,机电一体化是现代机械和技术的重要典型特征之一,为适应机电一体化技术的应用,本版手册对该方面的内容作了重新编排和大量充实,专辟一卷为机电一体化及控制技术等内容进行较系统和全面的叙述。

在机电一体化技术及设计篇中,以典型机电一体化产品的五大组成部分的技术要点作主线进行编写,并以产品设计为背景组织内容,并编入了多个综合性设计实例。

机器人是机电一体化特征最为显著的现代机械系统,从实用性的角度介绍了工业机器人技术中的本体、驱动、控制、传感等共性技术,结合喷涂、搬运、电焊、冲压、压铸等工艺,介绍了机器人的典型应用。另外对视觉机器人、智能机器人等作了实用性的介绍。

微机电系统(MEMS)是20世纪80年代中后期出现的微电子技术机械技术与生物、物理、化学等学科相交叉的一种新技术,它不仅是机械学科发展的前沿方向之一,也逐渐形成了产业。顺应高新技术发展潮流,设专篇撰写微机电系统,这在大型工具书中尚属首次。本篇重点编入了MEMS制造技术和设计技术。

激光加工目前已经成为一种有效的重要先进制造技术。手册以激光加工技术的最新成果为素材,编写了各种激光加工的原理、工艺及其应用,其中包括在打孔、切割、焊接、淬火、熔覆与合金化中的应用和激光加工中的安全防护等。

同时,对机电系统控制、数控技术、机械状态监测与故障诊断技术和电动机、电器与常用传感器等内容,简化原理、突出应用、扩充实例、引用最新成果作了编写。

五、在凝炼和推广现代设计理论与方法方面

针对现代机械产品设计的新方法和新技术存在的多样性和复杂性问题,本版手册以现代机械产品设计的总目标和建立其设计方法新体系为主旨,从先进性、系统性和实用性的角度,对产品的设计理论与方法作了系统总结和介绍。本版手册按新的分类共编入了21种现代设计方法,可以说是集现代设计方法之大全。

在现代设计理论与方法综述篇中,介绍了机械及机械制造技术发展总趋势,国际上有影响的主要设计理论与方法,产品研究和开发的一般过程和关键问题,现代设计理论的发展和根据不同的设计目标对设计理论与方法的选用。首次采用系统工程的方法对产品设计理论与方法做了分类,克服了目前对产品设计理论与方法的叙述缺乏系统性的不足。

创新设计是现代机电产品提高竞争力的重要技术和方法。该篇在概要介绍创新设计的基本理论、创新思维、创新技法的基础上,基于国际上著名的发明问题解决理论(TRIZ)就情景分析、理想设计、创新设计中的技术进化和技术预测、冲突以及冲突解决原理、物质-场模型方法等介绍了创新设计的系统化方法。介绍了29种创新思维方法,30种创新技术,40条发明创造原理,并通过大量应用实例开拓创新设计思路。

绿色设计是实现低资源消耗、低环境影响、低碳经济的重要手段。该篇系统地论述绿色设计的概念、理论、方法及其关键技术。结合编者多年的研究实践,并参考了大量的国内外文献及其最新研究成果,通过介绍绿色设计的概念、材料选择、拆卸回收产品设计、包装设计、节能设计和绿色设计体系及评价方法,对绿色设计进行系统、简明的论述,并给出了绿色设计在上述几个方面的典型案例。这是在工具书中首次全面和系统地论述绿色设计,为推动工程绿色设计的普遍实施具有指引作用。

本版手册对机械系统的振动设计及噪声控制、机械结构有限元设计、疲劳强度设计、可靠性设计、优化设计、计算机辅助设计等比较成熟的现代设计方法和技术,本着简明化、实用化的原则,做了全面修订和充实,吸收了最新研究成果,增加了系列应用实例。例如,机械系统的振动设计及噪声控制中,增加了非线性系统中的等效线性化和多尺度法;机械可靠性设计篇编入了机构运动可靠性设计理论和方法、可靠性灵敏度分析方法等最新成果;在机械优化设计篇中,增加了模糊优化设计等新内容。

另外,对机械系统概念设计、虚拟设计、智能设计、并行设计与协同设计、反求设计、快速反应设计、公理设计和质量功能展开(QFD)设计、和谐设计等设计领域的前沿方法分别作了实用化介绍,以进一步拓展设计思路。

在本版手册最后一篇,系统介绍了现代机电产品的综合设计方法。该方法是一种基于系统工程的产品深层次的综合设计理论和方法。它以产品功能设计、性能设计和产品质量检验和评估为基本目标,将产品设计过程分为准备阶段、规划阶段、实施阶段和设计质量检验阶段等四个阶段,以准备阶段的3I调研、规划阶段的7D规划、实施阶段的深层次1+3+X综合设计和设计质量检验阶段的3A检验为基本要点构成综合设计法的完整技术体系。本版手册首次对该设计法作了系统论述,并给出了大型综合应用实例。

在本版手册编写中,为便于协调,提高质量,加快编写进度,编审人员以东北大学的教师为主,并组织邀请清华大学、上海交通大学、浙江大学、哈尔滨工业大学、天津大学、华中科技大学、西安交通大学、大连理工大学、东南大学、同济大学、重庆大学、上海大学、合肥工业大学、大连交通大学、苏州大学、西安建筑科技大学、沈阳工业大学、沈阳理工大学、重庆理工大学、机械科学研究总院、中国科学院沈阳自动化研究所、中国科学院长春精密机械及物理研究所、合肥通用机械研究院、沈阳液压件制造有限公司、大连液力传动机械厂、天津工程机械研究所等单位的专家、学者参加。

在本手册第5版出版之际,向著名机械学家、本手册创始人、历次版本的主编徐灏教授致

以崇高的敬意，向历次版本副主编邱宣怀教授、蔡春源教授、严隽琪教授、林忠钦教授、余俊教授、汪恺总工程师、周士昌教授表示崇高的敬意，向参加本手册历次版本的编写单位和人员表示衷心感谢，向在手册编写、出版过程中给予大力支持的单位和社会各界朋友们表示衷心感谢，特别感谢机械科学研究总院、郑州机械研究所、沈阳铝镁设计研究院、北方重工集团沈阳重型机械集团有限责任公司和沈阳矿山机械集团有限责任公司、沈阳机床集团有限责任公司、沈阳鼓风机集团有限责任公司及国家标准馆沈阳分馆等单位的大力支持。

由于水平有限，手册难免有一些不尽人意之处，殷切希望广大读者批评指正。

主编 闻邦椿

目 录

出版说明
第5版前言

第29篇 微机电系统与设计

第1章 微机电系统概述

1 基本概念	29-3
1.1 微传感器	29-3
1.2 微执行器	29-3
1.3 微机电系统的基本特征	29-4
1.4 微机电系统和微电子的比较	29-5
2 微机电系统发展历程	29-5
3 微机电系统及相关技术	29-6
3.1 微机电系统组成	29-6
3.2 微机电系统设计	29-7
3.3 微机电系统制造	29-7
3.4 微机电系统封装	29-8
3.5 微机电系统装配	29-9
3.6 系统封装 (SiP)	29-9
3.7 微机电系统可靠性	29-10
3.8 微机电系统测试	29-11
4 微机电系统应用领域	29-11
4.1 微机电系统在汽车中的应用	29-11
4.2 微机电系统在医疗和生命科学 域的应用	29-12
4.3 微机电系统在航天工业的应用	29-12
4.4 微机电系统在电信领域中的应用	29-12

第2章 微机电系统制造

1 体硅微机械加工技术	29-14
1.1 硅晶体的描述	29-14
1.2 各向同性腐蚀	29-14
1.3 各向异性腐蚀	29-15
1.3.1 不同腐蚀液中的腐蚀速率	29-15
1.3.2 腐蚀速率与温度的关系	29-17
1.3.3 腐蚀速率与腐蚀液含量的关系	29-17
1.3.4 腐蚀速率与衬底掺杂浓度的	

关系	29-17
1.3.5 不同腐蚀液中的腐蚀表面状况	29-18
1.3.6 各向异性腐蚀加工技术中的 凸角补偿方法	29-19
1.4 深反应离子刻蚀	29-19
1.4.1 刻蚀原理	29-19
1.4.2 载片台温度与 SF_6/O_2 配比 的影响	29-21
1.4.3 SF_6 流量与 ICP 功率的影响	29-21
1.4.4 滞后效应和凹缺效应	29-21
1.4.5 深反应离子刻蚀工艺优化	29-23
1.5 硅直接键合技术	29-23
1.5.1 硅直接键合技术的分类	29-23
1.5.2 键合前的清洗	29-25
1.5.3 键合表面的活化	29-25
1.5.4 平整度对键合的影响	29-26
1.5.5 键合后的热处理	29-26
1.5.6 键合质量的表征	29-27
2 表面微机械加工技术	29-28
2.1 表面微机械加工的薄膜材料及其 特性	29-28
2.1.1 多晶硅	29-28
2.1.2 氧化硅	29-31
2.1.3 氮化硅	29-33
2.1.4 其他表面微机械加工材料	29-33
2.2 牺牲层释放腐蚀技术	29-34
2.2.1 氧化硅牺牲层的腐蚀	29-34
2.2.2 粘附问题及其解决方案	29-36
2.3 标准化的表面微机械加工工艺	29-39
2.3.1 MUMPS 加工工艺	29-39
2.3.2 SUMMIT TM -V 加工工艺	29-39
3 玻璃微机械加工技术	29-40
3.1 湿法刻蚀	29-40
3.2 干法刻蚀	29-41

3.3 阳极键合	29-44
3.4 模具成型	29-45
3.5 其他加工方法	29-46
4 UV-LIGA 技术	29-46
4.1 工艺流程	29-48
4.2 去胶工艺	29-50
4.3 SU-8 胶光学特性	29-52
4.4 SU-8 胶其他特性	29-53
5 其他微机械加工技术	29-53
5.1 激光微加工技术	29-54
5.2 电火花微加工技术	29-55
5.3 热压微成型技术	29-55
5.4 注射微成型技术	29-57
6 微机电系统制造工艺优化	29-59
6.1 常用材料的刻蚀特性	29-59
6.2 微机电系统加工技术比较	29-67
6.3 工艺设计及优化	29-67

第3章 微机电系统设计

1 设计工具	29-70
1.1 CoventorWare 简介	29-70
1.2 CoventorWare 设计实例	29-71
1.3 IntelliSuite 简介	29-72
1.4 IntelliSuite 设计实例	29-74
2 微机械润滑	29-77
2.1 比例尺度基础知识	29-77
2.1.1 立方定律	29-77
2.1.2 连续介质假设	29-78
2.1.3 表面粗糙度	29-78
2.2 润滑的基本方程	29-78
2.3 Couette 流阻尼	29-79
2.4 压膜阻尼	29-79
2.4.1 基本方程	29-79
2.4.2 通气孔效应	29-80
2.5 摩擦和磨损	29-80
3 静电执行器	29-80
3.1 面内运动执行器	29-80
3.2 离面运动执行器	29-81
3.3 性能参数	29-81
3.4 材料参数	29-81
3.5 材料选择优化	29-82
3.6 多层材料的选择	29-84
4 压电执行器	29-84
4.1 执行器性能设计	29-85
4.2 材料选择	29-86
4.3 性能综合	29-90

5 热执行器	29-91
5.1 双层材料热执行器基本原理	29-91
5.2 性能设计	29-92
5.3 性能指标的优化	29-93
5.4 双层材料执行器材料选择	29-94
5.5 执行器设计的其他因素	29-99
6 热气动和相变执行器	29-99
6.1 热气动执行器的原理	29-99
6.2 隔膜结构的机械设计	29-100
6.3 热气动执行器的热学性能	29-103
6.4 热气动执行器的材料选择	29-104
6.5 相变执行器	29-105
6.6 设计综合	29-105
7 磁执行器	29-105
7.1 按比例缩小规则	29-106
7.2 永磁体和线圈间的等效	29-107
7.3 微线圈中的电流密度	29-108
7.4 磁相互作用的优点	29-108
8 执行器比较	29-109
8.1 微执行器分类	29-109
8.2 MEMS 执行器和宏观执行器的性能图	29-109
8.2.1 最大力和最大位移	29-110
8.2.2 位移分辨率与最大位移	29-111
8.2.3 最大频率与最大位移	29-111

第4章 微机电系统实例

1 微机械压力传感器	29-112
1.1 器件结构与性能参数	29-112
1.2 压阻式压力传感器	29-113
1.3 电容式压力传感器	29-116
1.3.1 设计改进	29-118
1.3.2 电路集成和器件补偿	29-118
1.4 其他类型压力传感器	29-120
1.4.1 谐振式压力传感器	29-120
1.4.2 伺服控制式压力传感器	29-121
1.4.3 隧道压力传感器	29-121
1.4.4 光学拾取式压力传感器	29-122
1.4.5 热型压力式传感器	29-122
1.5 压力传感器性能比较	29-123
2 微机械惯性传感器	29-123
2.1 惯性测量原理	29-123
2.2 设计参数	29-124
2.2.1 质量块与弹簧	29-124
2.2.2 阻尼器	29-125
2.2.3 动态冲击	29-126

2.2.4 传感方式	29 - 127	5.1.3 屈曲	29 - 144
2.3 惯性传感器的系统问题	29 - 127	5.2 失效机制	29 - 144
2.3.1 单片集成或多芯片集成	29 - 128	5.2.1 离面结构的垂直浮动和机械 干扰	29 - 144
2.3.2 开环或闭环控制	29 - 128	5.2.2 电学短路	29 - 145
2.4 系统实例	29 - 128	5.2.3 光刻误差	29 - 145
2.4.1 Motorola 双片集成横向加速 度计	29 - 128	5.2.4 提高机械装置可靠性的方法	29 - 145
2.4.2 ADI 单片集成陀螺仪	29 - 128	5.3 应用实例	29 - 145
3 微滴发生器	29 - 130	5.3.1 微马达	29 - 145
3.1 微滴发生器的工作原理	29 - 130	5.3.2 抗干扰齿轮鉴别器	29 - 146
3.2 物理及设计问题	29 - 130	5.3.3 柔性微镜	29 - 146
3.2.1 频率响应	29 - 132	6 微机器人	29 - 147
3.2.2 热/水压串扰和溢出	29 - 133	6.1 微机器人定义	29 - 147
3.2.3 附属液滴	29 - 134	6.2 微机器人应用领域	29 - 148
3.2.4 水坑形成	29 - 134	6.2.1 基于 MEMS 技术的微机器人 应用	29 - 148
3.2.5 材料问题	29 - 134	6.2.2 微组装应用	29 - 148
3.3 应用	29 - 134	6.3 微机器人制造方法	29 - 149
4 微流控芯片	29 - 136	6.3.1 微执行器阵列	29 - 149
4.1 微流控芯片制造及材料	29 - 136	6.3.2 微执行器的选择	29 - 149
4.2 微流体驱动与控制技术	29 - 138	6.3.3 基于微执行器阵列的移动微 机器人	29 - 150
4.3 微流控系统	29 - 140	6.4 微机器人器件	29 - 150
4.3.1 微流控大规模集成芯片	29 - 140	6.4.1 微夹子和其他微型工具	29 - 150
4.3.2 自调节治疗微系统(智能 药丸)	29 - 140	6.4.2 微运输器	29 - 150
5 微机械装置	29 - 141	6.4.3 行走 MEMS 微机器人	29 - 152
5.1 机械设计	29 - 141	6.5 微工厂或桌面工厂	29 - 153
5.1.1 柔性单元	29 - 141	参考文献	29 - 153
5.1.2 应力集中	29 - 143		

第 31 篇 激光及其在机械工程中的应用

第 1 章 激光加工概论

1 激光器基础	31 - 3
1.1 激光特性	31 - 3
1.2 激光器基本构成	31 - 3
2 加工中常用的激光器	31 - 4
3 激光加工物理基础	31 - 5
3.1 材料对激光吸收的一般规律	31 - 5
3.2 金属的激光加热	31 - 6
3.3 激光辐射下金属的蒸发及小孔 效应	31 - 6

第 2 章 激光打孔

1 激光打孔的特点与分类	31 - 8
2 激光打孔的原理及物理过程	31 - 8
3 激光打孔工艺参数	31 - 9
3.1 影响打孔质量的主要参数	31 - 9
3.2 激光打孔的辅助工艺	31 - 12
4 激光打孔的质量检验	31 - 12

第 3 章 激光切割

1 激光切割机理	31 - 14
1.1 激光切割原理	31 - 14
1.2 激光切割主要方式	31 - 15

2 激光切割质量	31 - 15
2.1 激光切割质量评价	31 - 15
2.2 切割质量实例	31 - 16
3 影响激光切割质量的因素	31 - 16
3.1 激光光源的影响	31 - 16
3.1.1 激光光束质量	31 - 16
3.1.2 激光工作模式和功率	31 - 18
3.2 辅助气体	31 - 19
3.3 喷嘴	31 - 20
3.4 焦点位置	31 - 20
3.5 切割速度	31 - 22
3.6 计算机辅助工艺设计影响因素	31 - 24
4 常用工程材料的激光切割	31 - 24
4.1 金属材料的激光切割	31 - 24
4.1.1 碳钢	31 - 24
4.1.2 不锈钢	31 - 25
4.1.3 铝合金	31 - 26
4.1.4 钛及合金	31 - 26
4.1.5 铜合金与镍基合金	31 - 27
4.2 非金属材料的激光切割	31 - 27

第4章 激光焊接

1 激光焊接原理与分类	31 - 29
1.1 激光焊接特点与分类	31 - 29
1.2 激光焊接与传统焊接工艺的比较	31 - 29
2 激光热传导焊接	31 - 30
2.1 焊接接头设计	31 - 30
2.2 激光热传导焊接工艺参数的选择	31 - 31
3 激光深熔焊接	31 - 32
3.1 激光深熔焊接的原理及特征	31 - 32
3.2 激光深熔焊接工艺参数的选择	31 - 33
3.3 激光深熔焊接时常见的几种效应	31 - 34
4 激光焊接中常出现的问题	31 - 35
4.1 等离子体云	31 - 35
4.2 表面成形	31 - 36
4.3 气孔	31 - 36
5 典型材料的激光焊接	31 - 36
5.1 材料激光焊接的焊接性	31 - 36
5.2 金属材料的激光焊接	31 - 37
5.2.1 铝及铝合金的激光焊接	31 - 37
5.2.2 钢的激光焊接	31 - 37
5.2.3 铜及铜合金的焊接	31 - 37
5.2.4 耐热合金的激光焊接	31 - 38
5.2.5 异种金属的激光焊接	31 - 38

第5章 激光淬火

1 激光淬火原理与特点	31 - 40
1.1 激光淬火机理	31 - 40
1.2 激光淬火的特点	31 - 40
1.3 激光淬火工艺适用范围	31 - 40
2 激光淬火质量	31 - 41
2.1 质量指标	31 - 41
2.2 激光淬火质量指标的影响因素	31 - 41
3 激光淬火工艺及参数	31 - 42
3.1 工件预处理	31 - 42
3.2 激光扫描基本工艺	31 - 44
3.2.1 激光束焦点与扫描表面的相对位置	31 - 44
3.2.2 激光扫描基本工艺	31 - 45
3.2.3 基本工艺参数	31 - 45
3.2.4 脉冲激光硬化工艺	31 - 48
3.3 原始组织对激光硬化组织性能的影响	31 - 50
3.4 含碳量及合金元素的影响	31 - 51
3.4.1 含碳量的影响	31 - 51
3.4.2 合金元素的影响	31 - 52
3.5 激光淬火后金属材料的组织结构和性能	31 - 53
3.6 激光淬火后材料残余应力及形变	31 - 54
3.6.1 残余应力	31 - 54
3.6.2 变形	31 - 56

第6章 激光熔覆与合金化

1 激光熔覆与合金化的基础	31 - 57
1.1 激光熔池的温度场及其影响因素	31 - 57
1.2 激光熔池的对流及其影响	31 - 57
1.2.1 激光熔池的对流机制	31 - 57
1.2.2 熔池的对流模型	31 - 57
1.2.3 影响熔池对流特征的因素	31 - 58
2 激光熔覆	31 - 60
2.1 常用的激光熔覆材料	31 - 60
2.2 激光熔覆的工艺方法	31 - 60
2.2.1 熔覆材料的供给方式	31 - 61
2.2.2 基材表面预处理	31 - 61
2.2.3 预热与后热处理	31 - 62
2.3 激光工艺参数的影响	31 - 62
2.3.1 激光工艺参数对熔覆层形状特征的影响	31 - 62
2.3.2 激光工艺参数对稀释率的影响	31 - 64

3 激光合金化	31-65
3.1 激光合金化基础	31-65
3.2 激光合金化工艺	31-66
3.2.1 合金元素选择	31-66
3.2.2 激光合金成分设计	31-66
3.2.3 后续处理	31-66
3.3 常见的合金化	31-67
3.3.1 铁系激光合金化	31-67
3.3.2 有色金属激光表面合金化	31-69
3.3.3 气体激光合金化	31-69
4 激光熔覆与合金化的质量控制	31-70
4.1 激光熔覆与合金化的表面形貌及其控制	31-70
4.1.1 表面形貌类型及成因	31-70
4.1.2 表面形貌的影响因素及控制	31-70
4.2 激光熔覆与合金化的成分均匀性及其控制	31-71
4.3 激光熔覆与合金化层的应力状态、裂纹与变形	31-72
4.3.1 激光熔凝层的应力状态	31-72
4.3.2 激光熔凝层的裂纹	31-72
4.3.3 激光熔凝引起基材变形	31-72
4.4 激光熔覆与合金化层的气孔及其控制	31-73

第7章 激光冲击强化

1 概述	31-74
2 激光冲击过程机理	31-74
2.1 材料对激光的吸收	31-74
2.2 材料在激光冲击下的传热	31-75
2.3 金属在激光冲击下汽化	31-75
2.4 激光冲击产生冲击波	31-75
3 激光冲击的两种模型	31-76
4 涂层和约束涂层技术	31-77
4.1 能量吸收涂层	31-77
4.2 约束层	31-78
5 激光冲击设备	31-79
6 典型材料的激光冲击强化效果	31-79

第8章 激光在其他机械工程领域的应用

1 激光板料成形	31-81
1.1 概述	31-81
1.2 激光热应力成形	31-81
1.3 激光热应力成形机理	31-82
1.4 激光热应力成形的影响因素	31-82
1.5 激光冲击成形	31-82

1.6 冲击成形的工艺过程	31-83
1.7 冲击成形的影响因素	31-83
2 激光毛化	31-83
2.1 毛化原理	31-83
2.2 激光毛化系统	31-84
2.3 毛化参数的影响	31-85
3 激光标记	31-86
3.1 概述	31-86
3.2 打标方式	31-86
3.3 激光打标的应用	31-87
4 激光表面非晶化	31-87
4.1 概述	31-87
4.2 激光脉冲沉积	31-87
4.3 激光化学气相沉积	31-88
4.4 激光熔覆与激光重熔	31-88
4.5 表面非晶化实例	31-88
5 激光清洗	31-88
5.1 概述	31-88
5.2 激光表面处理原理	31-89
5.3 激光清洗系统	31-90
5.4 激光清洗的应用	31-91
6 激光全息干涉无损检测技术	31-91
6.1 全息干涉无损检测原理	31-91
6.2 全息干涉无损检测的加载方法	31-92
6.3 应用实例	31-92
6.3.1 航空雷达罩胶接质量检测	31-92
6.3.2 复合材料检测	31-93
6.3.3 轮胎检测	31-93

第9章 激光加工的安全防护

1 激光辐射的危害	31-94
1.1 激光损伤组织的因素	31-94
1.2 激光对眼睛的危害	31-94
1.3 激光对皮肤的危害	31-94
2 使用激光时伴随的危害	31-95
3 激光安全防护标准	31-95
4 激光危害分类	31-96
4.1 决定激光危害分类的因素	31-97
4.2 可达发射极限和激光危害分类	31-97
5 激光危害的工程控制	31-97
5.1 激光加工系统危害的工程控制	31-98
5.1.1 一般要求	31-98
5.1.2 防护罩	31-98
5.1.3 安全联锁	31-98
5.1.4 遥控联锁连接器	31-98
5.1.5 钥匙开关	31-99

5.1.6 激光辐射发射警告	31 - 99	尺寸	31 - 100
5.1.7 光路	31 - 99	5.2.2 标志的颜色和文字说明	31 - 100
5.1.8 镜反射	31 - 99	5.2.3 设置与使用警告标志的要求 ...	31 - 101
5.1.9 光束的终止	31 - 99	5.3 个人防护用品	31 - 101
5.1.10 光学观察器	31 - 99	5.3.1 激光防护眼镜	31 - 101
5.1.11 防止意外触发	31 - 99	5.3.2 激光防护面罩	31 - 102
5.1.12 应急断电开关	31 - 99	5.3.3 激光防护手套	31 - 102
5.2 激光安全标志	31 - 100	5.3.4 激光防护服	31 - 102
5.2.1 激光辐射警告标志的图形和		参考文献	31 - 102