



国际机械工程先进技术译丛

精密运动控制： 设计与实现

(原书第2版)

**Precision Motion Control
Design and Implementation**
Second Edition



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国际机械工程先进技术译丛

精密运动控制：设计与实现

(原书第2版)

(新加坡) 陈国强 (Tan Kok Kiong)
李崇兴 (Lee Tong Heng) 著
黄苏南 (Huang Sunan)

韩 兵 宣 安 韩德彰 译



机械工业出版社

原书由新加坡国立大学 Tan Kok Kiong、Lee Tong Heng、Huang Sunan 编写, Tan Kok Kiong 教授是新加坡国立大学电力与计算机工程系智能控制中心主任, 其研究团队在国际精密运动控制技术领域享有很高的声誉。

本书不但介绍了精密运动控制的基本原理, 而且就实现精密运动控制的各环节进行了详细的描述, 特别是每一章都相应地给出了试验结果, 对实际应用精密运动控制技术的人来说是很有帮助的。本书内容涉及精密运动控制装置、各种控制方案、光学测量方法和误差补偿原理, 为了得到精确的测量结果, 还专门介绍了机械控制系统的稳定性和静定问题, 以及现场总线通信技术问题。

本书适合从事机械、电气、测量仪表和自动化领域的研究人员和技术人员阅读参考, 也可作为相关专业的本科生和研究生的课外参考书。

Precision Motion Control: Design and Implementation (2nd Edition) By Tan Kok Kiong, Lee Tong Heng, Huang Sunan.

Copyright©Springer-Verlag London Limited 2008.

Authorized translation from English language edition published by Springer. All right reserved.

China Machine Press is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. This edition is authorized for sale throughout Mainland of China. No part of the 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.

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2010-0489

图书在版编目 (CIP) 数据

精密运动控制: 设计与实现: 原书第 2 版/ (新加坡) 陈国强, (新加坡) 李崇兴, (新加坡) 黄苏南著; 韩兵, 宣安, 韩德彰译. —北京: 机械工业出版社, 2011

(国际机械工程先进技术译丛)

ISBN 978-7-111-35270-9

I. ①精… II. ①陈… ②李… ③黄… ④韩… ⑤宣… ⑥韩… III. ①自动控制系统
IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 132005 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 责任校对: 刘怡丹

封面设计: 鞠 杨 责任印制: 乔 宇

北京瑞德印刷有限公司印刷 (三河市胜利装订厂装订)

2011 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·14 印张·268 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-35270-9

定价: 47.00 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 策划编辑 (010) 88379733

社服务中心: (010) 88361066 网络服务

销售一部: (010) 68326294 门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649 教材网: <http://www.cmpedu.com>

读者购书热线: (010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

译 丛 序 言

一、制造技术长盛永恒

先进制造技术是 20 世纪 80 年代提出的，由机械制造技术发展而来。通常可以认为它是将机械、电子、信息、材料、能源和管理等方面的技术，进行交叉、融合和集成，综合应用于产品全生命周期的制造全过程，包括市场需求、产品设计、工艺设计、加工装配、检测、销售、使用、维修、报废处理、回收利用等，以实现优质、敏捷、高效、低耗、清洁生产，快速响应市场的需求。因此，当前的先进制造技术是以产品为中心，以光机电一体化机械制造技术为主体，以广义制造为手段，具有先进性和时代感。

制造技术是一个永恒的主题，与社会发展密切相关，是设想、概念、科学技术物化的基础和手段，是所有工业的支柱，是国家经济与国防实力的体现，是国家工业化的关键。现代制造技术是当前世界各国研究和发展的主题，特别是在市场经济高度发展的今天，它更占有十分重要的地位。

信息技术的发展并引入到制造技术，使制造技术产生了革命性的变化，出现了制造系统和制造科学。制造系统由物质流、能量流和信息流组成，物质流是本质，能量流是动力，信息流是控制；制造技术与系统论、方法论、信息论、控制论和协同论相结合就形成了新的制造学科。

制造技术的覆盖面极广，涉及机械、电子、计算机、冶金、建筑、水利、电子、运载、农业以及化学、物理学、材料学、管理科学等领域。各个行业都需要制造业的支持，制造技术既有普遍性、基础性的一面，又有特殊性、专业性的一面，制造技术具有共性，又有个性。

我国的制造业涉及以下三方面的领域：

- 机械、电子制造业，包括机床、专用设备、交通运输工具、机械设备、电子通信设备、仪器等；
- 资源加工工业，包括石油化工、化学纤维、橡胶、塑料等；
- 轻纺工业，包括服装、纺织、皮革、印刷等。

目前世界先进制造技术沿着全球化、绿色化、高技术化、信息化、个性化和服务化、集群化六个方面发展，在加工技术上主要有超精密加工技术、纳米加工技术、数控加工技术、极限加工技术、绿色加工技术等，在制造模式上主要有自动化、集成化、柔性化、敏捷化、虚拟化、网络化、智能化、协作化和绿色化等。

二、图书交流源远流长

近年来，国际间的交流与合作对制造业领域的发展、技术进步及重大关键技术的突破起到了积极的促进作用，制造业科技人员需要及时了解国外相关技术领域的最新发展状况、成果取得情况及先进技术应用情况等。

必须看到，我国制造业与工业发达国家相比，仍存在较大差距。因此必须加强原始创新，在实践中继承和改造，学习国外的先进制造技术和经验，提高自主创新能力，形成自己的创新体系。

国家、地区间的学术、技术交流已有很长的历史，可以追溯到唐朝甚至更远一些，唐玄奘去印度取经可以说是一段典型的图书交流佳话。图书资料是一种传统、永恒、有效的学术、技术交流方式，早在 20 世纪初期，我国清代学者严复就翻译了英国学者赫胥黎所著的《天演论》，其后学者周建人翻译了英国学者达尔文所著的《物种起源》，对我国自然科学的发展起到了很大的推动作用。

图书是一种信息载体，图书是一个海洋，虽然现在已有网络、光盘、计算机等信息传输和储存手段，但图书更具有广泛性、适应性、系统性、持久性和经济性，看书总比在计算机上看资料要方便，不同层次的要求可以参考不同层次的图书，不同职业的人员可以参考不同类型的技术图书，同时它具有比较长期的参考价值和收藏价值。当然，技术图书的交流具有时间上的滞后性，不够及时，翻译的质量也是个关键问题，需要及时、快速、高质量的出版工作支持。

机械工业出版社能够在先进制造技术的引进、消化、吸收、创新方面为广大读者作出贡献，为我国的制造业科技人员引进、纳新国外先进制造技术的出版资源，翻译出版国际上优秀的制造业先进技术著作，从而能够提升我国制造业的自主创新能力，引导和推进科研与实践水平不断进步。

三、选译严谨质高面广

1) 精品重点高质 本套丛书作为我社的精品重点书，在内容、编辑、装帧设计等方面追求高质量，力求为读者奉献一套高品质的丛书。

2) 专家选译把关 本套丛书的选书、翻译工作均由国内相关专业的专家、教授、工程技术人员承担，充分保证了内容的先进性、适用性和翻译质量。

3) 引纳地区广泛 主要从制造业比较发达的国家引进一系列先进制造技术图书，组成一套“国际机械工程先进技术译丛”。当然其他国家的优秀制造科技图书也在选择之内。

4) 内容先进丰富 在内容上应具有先进性、经典性、广泛性，应能代表相关专业的技术前沿，对生产实践有较强的指导、借鉴作用。本套丛书尽量涵盖制造业各行业，例如机械、材料、能源等，既包括对传统技术的改进，又包括新的设计方法、制造工艺等技术。

5) 读者层次面广 面对的读者对象主要是制造业企业、科研院所的专家、

研究人员和工程技术人员，高等院校的教师和学生，可以按照不同层次和水平要求各取所需。

四、衷心感谢不吝指教

首先要感谢许多积极热心支持出版“国际机械工程先进技术译丛”的专家学者，积极推荐国外相关优秀图书，仔细评审外文原版书，推荐评审和翻译的知名专家，特别要感谢承担翻译工作的译者，对各位专家学者所付出的辛勤劳动表示深切敬意，同时要感谢国外各家出版社版权工作人员的热心支持。

本套丛书希望能对广大读者的工作提供切实的帮助，欢迎广大读者不吝指教，提出宝贵意见和建议。

机械工业出版社

译者序

《精密运动控制：设计与实现》是新加坡国立大学 Tan Kok Kiong 博士、Lee Tong Heng 博士和 Huang Sunan 博士对精密运动控制系统多年研究和应用成果的总结，特别是第 2 版经过精心选择和修改，使得《精密运动控制：设计与实现》更加全面完善。所译 Springer 出版社出版的《精密运动控制：设计与实现》（原书第 2 版）不但阐述了精密运动控制的基本原理，而且就实现精密运动控制的各个环节做了详细的描述，特别是每一章中对应给出了试验结果，这对实际应用精密运动控制技术的技术人员来说，是非常有益的。本书内容涉及精密运动控制装置、各种控制方案、光学测量方法和误差补偿原理。为了得到精确的测量结果，本书还专门介绍了机械控制系统的稳定性和静定问题，以及现场总线通信技术问题。由此可见，精密运动控制是涉及机械、控制、电子、光学和通信的综合技术，本书对机械、电气、测量仪表和自动化领域的工程技术人员来说既是一本很好的新技术原理图书，也是一本精密运动控制系统应用的简明技术手册。

译者非常高兴有机会将此书介绍给广大的中文读者。译者主要的工作是将此书由英文版译为中文版，在保证原著译文准确的基础上，还考虑了汉语修辞和表达的习惯。译者感谢 Springer 出版社和机械工业出版社对翻译出版本书提供的帮助。在翻译本书的过程中，韩希也做了部分翻译和整理工作，在此表示感谢。

译者

2011 年 3 月于上海

前 言

20 世纪以来,精密制造业从研究、开发和应用到产品创新方面一直保持稳步发展的势头,并引起了广泛关注。这种发展的动力似乎来自于以下要求:越来越高的产品性能、更高的可靠性、使用寿命长、低成本和小型化。这种发展也广泛称为精密工程,精密工程如今通常被定义为公差小于 $10^5:1$ 的加工制造。

可以说精密工程的历史源于钟表领域,涉及计时器、钟表和光学仪器的开发,如反光镜、望远镜和显微镜镜头制造。在 19 世纪末和 20 世纪初,促进精密机床和精密仪器发展的主要技术是量规制造刻度、刻线和光谱衍射光栅。现在,计算机控制下超精密机床可以确定相对于工件的定位,其分辨率和定位精度小于微米。必须指出,可实现的“加工”准确性不仅包括使用机床加工和研磨技术,而且还包括使用能量束加工,如等离子束和电子束加工,以及表面测量的扫描探针系统与取放类操作。

进入 21 世纪,超精密制造保持持续的发展速度,进入了纳米级尺度系统(纳米技术)。不断增加的集成电路封装密度和半导体最小特征尺寸的持续突破加快了超精密工程发展的步伐。新兴技术如微电子机械系统(MEMS),在欧洲也称为微系统技术(MST),进一步扩展了机电部件一体化和小型化的范围。

本书是重大项目“开发先进高速超精密机器人”的成果和论文的汇编,重点是实现精密运动定位系统的应用技术。对这一重点全面和彻底的论述适合从研究者到从业人员等的广大读者群,本书提供的技术内容都经过详细的试验验证。

本书首先介绍了精密工程,并对其发展过程和应用提供了简要的概括。第 2 章介绍了实现运动系统的高精度运动控制的控制系统技术,提出了可以让跟踪精度性能更高的智能控制方案。这些控制方案根据现有的有效信息和操作性质,应用了先进控制理论和人工智能的不同组合。这些方案包括自适应控制、线性 and 非线性控制元件的复合控制方案、自适应波纹补偿方案、干扰观测和补偿方案,以及学习控制策略。提供适当试验结果来比较和核查标准控制器性能及其可实现的改进,清楚论述了使用高等级加速度计直接测量加速度,增加状态反馈可提高实现的跟踪性能。同时本书介绍的技术和器件非常通用,可供广大研究者和从业人员参考。

第 3 章介绍了基于闭环诱发持续小幅振荡的继电反馈配置和技术,适合为运动系统建立标称模型。这样,第 2 章提出的控制系统可以自动整定和运行,并仍可以达到令人满意的性能。第 3 章给出了基本配置的多种变化,以方便利用摩擦

效应进行自动建模。这些模型可以用于运行前馈和反馈控制器，对自适应控制初始化也有用处。第3章还提供了从嘈杂的继电器振荡中提取最优特征的方案。

第4章给出了一个精密笛卡儿机器人系统的通用配置——移动龙门台，这是晶片步进机和高分辨率装配机经常采用的配置。除了个别伺服跟踪要求外，有必要使并行伺服系统串联运动，以降低轴间的偏差。第4章中给出了不同的控制配置，并比较了它们的性能，这些配置包括了现有的工业控制系统应用及最近发展的控制方案。

第5章介绍了几何误差校正和补偿问题的综合处理方法，系统论述了：几何误差的来源、测量用的校准设备、控制系统原始数据处理和对最终补偿的建模。第5章也包括几何校正和补偿的最新进展和更新，介绍了几何误差建模使用的人工智能（AI）方法。该章还介绍了可行概率方法，用来减少随机误差对系统误差补偿产生的不利影响。

第6章明确地讨论了测量系统。精密运动控制只有靠精密运动的测量才能实现。编码器插补是一种有效控制成本的方式，用来获得良好的位置测量分辨率。这种技术纠正了编码器信号的缺点，并能从纠正信号中获得更高的分辨率，实现了控制系统对输入信号高分辨率的要求。

第7章涉及振动监测与控制的话题，并提出了三种办法。第一个方法的重点是放在正确的机械设计上，基于机械结构的确定性将机械振动减少到最低限度。第二种方法是基于陷波器及其应用，陷波器作为控制系统的一部分，用来抑制可能激发不良机械共振的频率。用一种基于快速傅里叶变换（FFT）的自适应技术跟踪共振频率，并相应地修改了滤波器。第三种方法使用了传感器融合技术，来监测和分析精密机械振动。DSP 器件用来获取在正常运转情况下的机械振动特征。当机器偏离正常运转状况时，该设备可以检测到异常，并启动适当的故障诊断和维修措施。

最后，第8章对高精密运动控制系统的其他重要的工程方面进行了讨论。这些方面包括组件选择后的考虑、硬件结构、软件开发平台、用户界面设计和评估测试，这些是确定高精密运动控制系统和数字通信协议最终成功与否的关键。本书主要在控制工程和软件计算范畴内，提供了更广泛和更新颖的精密运动控制方法和算法。

与第1版相比，第2版中进行了一系列的修改、更新和扩展。第1版出版约6年后，精密工程一直处在控制工程的重要领域，出现了许多新的成果。

在第1版之基础上，第2版又增加了新内容，包括压电驱动器建模与控制（第2章）、自适应协调控制方案（第4章）、参数模型插值（第6章）、减少振动的机械设计（第7章）和数字通信协议（第8章）。引言章节也进行了大幅度的修订，以反映精密运动控制技术发展的最新状态。

没有以下的同事和朋友的慷慨帮助，就不可能成就这本书，他们是 Lim Ser Yong 博士、Andi Sudjana 硕士、Teo Chek Sing 硕士、Tang Kok Zuea 博士、Zhou Huixing 博士和 Jiang Xi 硕士。衷心感谢他们在本书写作过程中提供的真诚帮助。还要感谢新加坡（新加坡国立大学）和新加坡制造技术研究院联合资助的项目，书中论述的内容大多源自这些项目的信息和成果。也感谢惠普公司（Hewlett Packard）提供了有关激光测量系统的数据和资料。最后，谨以此书献给爱我们和支持我们的家庭成员。

Tan Kok Kiong

Lee Tong Heng

Huang Sunan

2007 年 5 月，新加坡

目 录

译丛序言

译者序

前言

第1章 引言	1
1.1 需要精密控制的领域	1
1.1.1 精密工程	1
1.1.2 微制造	3
1.1.3 生物技术	5
1.1.4 纳米技术	5
1.2 精密机械和工具	6
1.3 精密运动控制系统的应用	7
1.4 本书的范围	8
第2章 精密跟踪运动控制	9
2.1 压电驱动器	9
2.1.1 压电驱动器配置的类型	9
2.1.2 数学模型	10
2.1.3 自适应控制	15
2.2 永磁直线电动机 (PMLM)	20
2.2.1 PMLM 的类型	20
2.2.2 数学模型	22
2.2.3 力的波动	23
2.2.4 摩擦	25
2.2.5 复合控制	25
2.2.6 加速度控制增强	32
2.2.7 波动补偿	38
2.2.8 干扰观测及消除	44
2.2.9 鲁棒自适应控制	51
2.2.10 迭代学习控制	56
第3章 控制参数的自整定	63
3.1 继电器自整定	63
3.1.1 延时继电器	64
3.1.2 双通道继电器整定	65

3.2 摩擦建模使用继电器反馈	65
3.2.1 摩擦辨识方法	66
3.2.2 模拟	68
3.2.3 自适应控制的初始化	69
3.3 继电器振荡的最优特征提取	71
3.4 试验	72
第4章 龙门系统的协调运动控制	75
4.1 协调控制方案	76
4.1.1 经典主/从方法	76
4.1.2 设定点协调控制	77
4.1.3 整体协调控制	78
4.2 仿真研究	79
4.2.1 控制任务	79
4.2.2 结果	80
4.3 试验	82
4.3.1 XY 工作台——配置 I	83
4.3.2 XY 图表——配置 II	86
4.4 自适应协调控制方案	88
4.4.1 龙门台的动态建模	88
4.4.2 基于模型的自适应控制设计	91
4.4.3 稳定性分析	93
4.4.4 软件仿真	93
4.4.5 实施结果	96
第5章 几何误差补偿	98
5.1 激光测量系统概述	99
5.2 激光测量系统的组件	99
5.2.1 激光头	100
5.2.2 干涉仪和反射器	100
5.2.3 测量接收机	101
5.2.4 测量与控制电子电路	102
5.3 激光校准概述	102
5.3.1 线性测量	103
5.3.2 角度测量	103
5.3.3 直线度测量	104
5.3.4 垂直测量	104
5.4 使用水平敏感设备的滚动测量	105
5.5 精度评估	106
5.6 影响测量精度的因素	107

5.6.1 线性测量误差	107
5.6.2 角测量误差	108
5.6.3 直线度测量误差	108
5.6.4 环境条件	109
5.7 总体误差模型	110
5.8 几何误差的查表	111
5.9 几何误差的参数化模型	112
5.9.1 径向基函数与误差建模	113
5.9.2 参数误差逼近	113
5.9.3 试验	118
5.9.4 使用多层神经网络误差建模	121
5.10 随机误差的机械补偿	123
5.10.1 概率方法	123
5.10.2 试验	125
第6章 电子插值误差	131
6.1 海德曼插值法	131
6.1.1 插值界	133
6.1.2 校准和补偿	134
6.2 增强插值法	134
6.2.1 增强插值法的原理	135
6.2.2 构建一个查表	135
6.2.3 试验	140
6.3 插值的参数模型	142
6.3.1 插值方法的原理	142
6.3.2 预补偿阶段	143
6.3.3 插值阶段	145
6.3.4 试验研究	146
第7章 振动监测与控制	149
7.1 机械设计中尽量减少振动	149
7.1.1 机械结构的稳定性和静定性	150
7.1.2 二维结构	150
7.1.3 三维结构	154
7.2 自适应陷波器	159
7.2.1 快速傅里叶变换	161
7.2.2 模拟	161
7.2.3 试验	163
7.3 实时振动分析仪	164
7.3.1 学习模式	165

7.3.2 监测模式	165
7.3.3 诊断模式	167
7.3.4 试验	168
7.3.5 远程监控	174
7.3.6 实现	176
第8章 其他工程方面	179
8.1 规格	179
8.2 选择电动机和驱动器	179
8.3 选择光学编码器	180
8.4 控制平台	180
8.4.1 硬件结构	180
8.4.2 软件开发平台	182
8.4.3 用户界面	185
8.5 精度测量	186
8.6 数字通信协议	187
8.6.1 现场总线协议栈	188
8.6.2 常见的现场总线	190
附录 激光校准光学仪器、附件和配置	196
参考文献	202

第 1 章 引 言

精密控制是超精密机械技术的核心。精心选择的控制策略将使机械系统实现全面完整的控制和补偿,进而获得系统的精确定位。当前,高精密运动控制领域是一个令人十分感兴趣的研究课题。本书讨论的精密控制技术已经广泛应用于下列领域:

- 1) 精密工程。
- 2) 微制造。
- 3) 生物技术。
- 4) 纳米技术。

1.1 需要精密控制的领域

1.1.1 精密工程

加工是制造业中使用机械工具去除多余或不想要物质的一个主要过程,例如,切割、研磨和精加工。常规加工通过车床、钻床、铣床等机器执行。尽管这些机器仍然在使用,但是加工工艺的发展为生产高精度零部件提供了新的和非传统加工方法,例如,采用激光切割和化学物质等。当前加工技术的发展趋势是采用非接触式加工,而不是接触式加工。

1. 超精密主轴

超精密主轴以高速、中或低的扭矩来驱动负载。超精密主轴可制造高精度设备(如高速车床和铣床),以及非制造业设备(如高性能磁记忆磁盘文件系统、高清晰大型投影仪)。这些应用要求定位高度精确,同时还要实现高速,因此构成了挑战。

为实现系统的要求特别应用了空气轴承。空气轴承的特点是低误差异步运动,使其有可能实现高精度旋转。它的缺点是低刚度和低阻尼力。图 1.1 所示为空气轴承的工作框图,压缩空气用来充满机器旋转部件(如主轴)和静态部件之间的间隙。

为实现高刚度,已开发出集空气轴承与传统轴承(润滑油润滑的)为一体的混合解决方案。

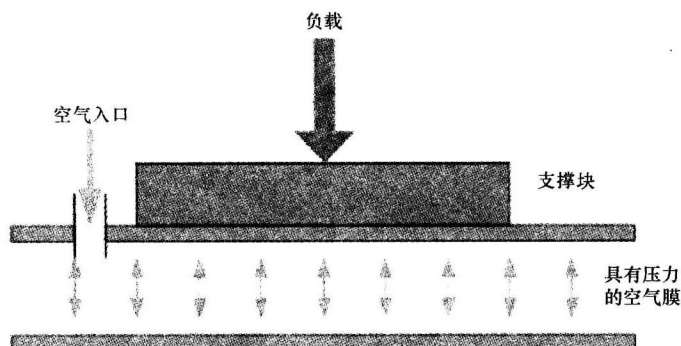


图 1.1 空气轴承

2. 准分子激光微加工

激光器，特别是准分子激光器，由于其独特的脉冲紫外线（UV）放射，如今已经广泛应用于不同种类材料的微加工中。1977 年以来，准分子激光器一直用于试验室的研究。大约 10 年后，它们已成功引入了工业加工和制造业。准分子激光器已用于玻璃（如眼镜）和陶瓷高精度标记，尤其是在表面贴装系统（SMD）。在微电子生产线方面，印制线路板钻孔可以借此技术完成。在半导体加工方面，它可以作为直接写入工具取代照相掩模，或作为一个处理多层芯片的微型钻，并可作为进行半导体工艺的非化学蚀刻和修理的消融工具。

激发准分子激光靠的是稀有气体卤化物或稀有气体金属蒸气，通常采用惰性气体是由于它们的稳定性好。为了保持精度，控制气体的流动和压力是必要的。准分子激光控制包括控制排气滤清器、真空泵和气体混合器。

3. 精密计量与测试

坐标测量仪（CMM）的测量精度每年都在持续提高。坐标测量仪安装了精密工具，如探针、视觉装置和显微镜，这些机器在计量和测试领域可以进行一些特殊的应用，扫描探针显微镜（SPM）就是其中一种。

第一代扫描探针显微镜是电子束聚焦在目标物的一个小点上，并且电磁光栅横向扫描的电子显微镜（SEM）。通过收集冲击电子束碰撞产生的二次电子生成图像，或者通过检测背散射电子生成图像，或者通过检测产生的 X 射线生成图像。通过这种方式，显微镜就可以描述目标物体几个不同方面的特征，包括形态、平均原子数目和成分。

在扫描隧道显微镜（STM）技术中，瞬逝波是一个固有波长约 1nm 的电子波函数，延伸超过尖锐的金属探针表面。如果探针接近导体表面在约 1nm 的范围内，并且两者之间作用有电位差，随后将产生感应隧道电流。这个电流的大小是一个按指数衰减的距离函数，并且还取决于两个材料性能的差异。于是可以得到被测材料表面形状和其化学成分的信息。STM 技术的局限性是它只可以在

导体表面使用。

力扫描显微镜 (SFM) 通常称为原子力显微镜 (AFM)，目前已经可以克服 STM 的局限。仪器使用金箔架上的钻石针轻轻扫描整个样本表面，检测作用在针尖上的斥力。当针尖接近样本表面时，受到范德华 (Vander Waals) 引力影响，可以感知悬臂共振频率的变化。这类显微技术广泛应用于表面特征描述，包括影像和形状。

1.1.2 微制造

20 世纪的重大发明之一是微电子学、微装置科学。微装置科学可以设计和制作出亚微米大小的集成电路。微制造涵盖一系列的制造过程，这些制造过程产生材料的图案和层次形成微观结构。光刻技术和微机电系统 (或微系统) 是微制造过程常见的应用。微组装则是精密工程的另一个重要的过程。

1. 光刻技术

半导体和微电子行业的发展及应用产生了电子束光刻技术，电子束光刻技术在未来大规模生产中将成为产品持续小型化的主要技术基础。使用电子束光刻技术将性能和尺寸都印在硅芯片上称为光刻法，其中从汞蒸气灯照射紫外线光通过包含芯片特征的掩模投影到机器硅晶片的表面，机器被称为光刻“步进器”。之所以被称为“步进器”，是因为它在芯片上印图像后，晶片“步进”到下一个位置，印下一个图像。对于尺寸小于 0.1mm 的特征，可使用更短形式波长的电子束或 X 射线辐射。

超大规模集成电路 (ULSI) 芯片是精密光刻的结果。这些芯片正在迅速向更小、更快、更便宜、配备更多的内存的方向发展。科学家们期待它们给微处理器和计算机的性能带来进一步的、巨大的改进。图 1.2 所示为光刻工艺过

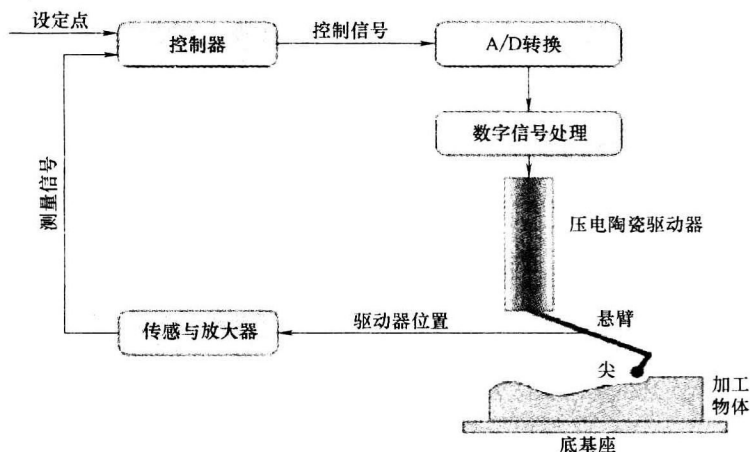


图 1.2 光刻工艺过程