



国际电气工程先进技术译丛

ISTE WILEY

柔性机器人： 多尺度操作应用

**Flexible Robotics: Applications to
Multiscale Manipulations**

马修·格罗萨德 (Mathieu Grossard)

[法]

尼古拉斯·查雷特 (Nicolas Chaillet)

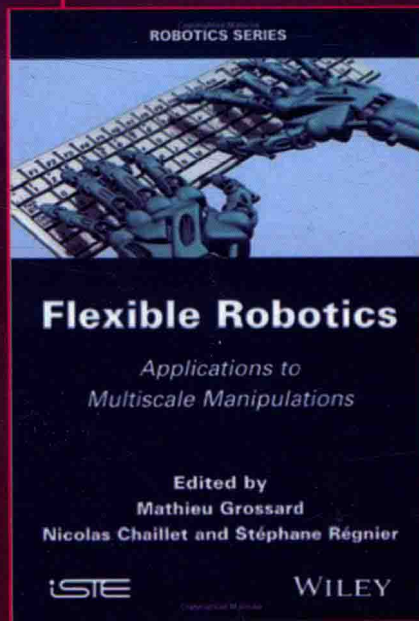
主编

斯蒂芬·雷尼尔 (Stéphane Régnier)

潘峰 连晓峰 等译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

柔性机器人：多尺度 操作应用

马修·格罗萨德 (Mathieu Grossard)

[法] 尼古拉斯·查雷特 (Nicolas Chaillet) 主编

斯蒂芬·雷尼尔 (Stéphane Régnier)

潘 峰 连晓峰 等译



机械工业出版社

Copyright © 2013 ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc.

All Right Reserved. This translation published under license. Authorized translation from English language edition, entitled Flexible Robotics: Applications to Multiscale Manipulations, ISBN: 978-1-84821-520-7, by Mathieu Grossard, Nicolas Chaillet, Stéphane Régnier, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由 Wiley 授权机械工业出版社独家出版, 未经出版者书面允许, 本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有, 翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字: 01-2014-1098 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

柔性机器人: 多尺度操作应用 / (法) 格罗萨德 (Grossard, M.) 等主编; 潘峰等译. —北京: 机械工业出版社, 2016. 4

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Flexible Robotics: Applications to Multiscale Manipulations
ISBN 978-7-111-53352-8

I. ①柔… II. ①格… ②潘… III. ①柔性机器人—研究
IV. ①TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 062730 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: 顾 谦 责任编辑: 顾 谦

责任校对: 樊钟英 封面设计: 马精明

责任印制: 常天培

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2016 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 16.75 印张 · 373 千字

0 001—2 600 册

标准书号: ISBN 978-7-111-53352-8

定价: 79.00 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

本书主要介绍了有关柔性机器人原理、结构与应用等内容。全书内容共计 10 章, 其中第 1 章介绍了集成功能微抓手系统设计的一般概念, 涉及材料科学和拓扑结构优化的自动化先进控制; 第 2 章着重分析了模态能控性和能观性的双重表示, 并介绍了在柔性机械手优化设计中模型降阶和传感器/执行器共定位相关的几个重要特性; 第 3 章介绍了允许同时使用能量和系统结构表示的不同建模工具, 尤其是采用波特-汉密尔顿 (Port-Hamiltonian) 系统的建模工具; 第 4 章讨论了可用于受限或拥挤环境中操作的两种无传感器方法以及如何采用双稳态机械结构来产生微操作功能; 第 5 章分析了应对多功能抓取任务和灵巧手操作所需特定要求的一些适当方法; 第 6 章讨论了基于压阻技术的三轴作用力传感器的发展; 第 7 章分析了机器人操作中亚微米级精度的约束条件, 以及柔性关节的运行学分析方法、机器人的关键部件和高精度机构, 同时还研究了超高精度并联机器人新的模块化设计方法; 第 8 章介绍了具有柔性关节的串联机器人中建模、辨识和控制律分析的基本步骤; 第 9 章对形变体机械手的模型进行了综述; 第 10 章介绍了基于实验数据的柔性机械手辨识和控制方法, 并着重分析了线性变参数 (LPV) 模型以及在线自适应校正器的特性。

本书的目的是为从事柔性机器人领域的研究人员提供相关的先进科学和技术, 可作为相关专业高年级师生及研究人员的参考用书。

译者序

本书是由法国著名学者 Mathieu Grossard, Stéphane Régnier 和 Nicolas Chaillet 主编的机器人丛书之一。机器人已是世界各国的重要研究领域,而柔性机器人更具有广阔的应用前景。根据所采用的不同技术以及机器人所执行的任务性质、复杂度等,研究内容包括基于新材料的微机械手、轻质机械臂、高度集成的功能终端肌腱部分或甚至拟人化机械手,而机器人任务操作所需的高水平性能包括机械设计结构及其相应控制器的精度、可控性和带宽要求。本书深入研究了具有高度机械柔性特点的机器人装置中有关设计、建模、辨识和控制的特定问题。

本书主要介绍了集成功能微抓手系统设计的一般概念;着重分析了模态能控性和能观性的双重符号,这对于振动模式控制权限具有重要作用;介绍了允许同时使用能量和系统结构符号的不同建模工具;讨论了可用于密闭或拥挤环境中操作的两种无传感器方法;分析了应对多功能抓取任务和灵巧手操作所需特定要求的一些适当方法;讨论了基于压阻技术的三轴作用力传感器的发展;分析了机器人操作中亚微米级精度的约束条件以及柔性关节的运行学分析方法、机器人的关键部件和高精度机构,着重强调了简单导引的自由度和特性以及超高精度并联机器人的模块化设计新方法;介绍了具有柔性关节的串联机器人中建模、辨识和控制律分析的基本步骤;并对形变体机械手的模型进行了综述,着重介绍了基于“浮动框架”方法的形变体机械手;最后介绍了基于实验数据的柔性机械手辨识和控制方法,尤其是线性变参数(LPV)模型。

全书内容共计10章,其中第1、第2章由连晓峰、潘峰、李昕同翻译,第3、第4章由连晓峰、潘峰、谢槟竹翻译,第5~7章由潘峰、沈岩涛、王琳岩翻译,第8章由潘峰、李岱颖翻译,第9章由臧竞之、曹磊翻译,第10章由李岱颖、马慧茹翻译。另外,林明秀、纪鹏、王晓哲、楚好、贾同、李艳慧、刘禄、安哲、梁婷婷、王伟楠、李林、迟逞、叶璐、侯宝奇等人也参与部分翻译工作,在此表示衷心感谢。全书最后由连晓峰审校和统稿。

鉴于译者的知识和水平有限,书中的纰漏在所难免,恳请专家和读者不吝指正。

译者

原 书 前 言

在非结构化动态环境中的机器人应用需要具有先进功能、多功能且独立机电一体化的系统。在此目标下，机器人抓取装置的设计和应用必须要对应于操作任务的具体要求，这取决于是否需要在微观世界内实现多功能抓取任务或甚至是灵活的大尺度任务。新的方法必须使得更先进的机械手能够胜任自适应完成任务的初始简化机器人抓取装置的性能。

操作性能是机器人系统中最复杂的一项功能。为有效地在复杂环境中执行所需的操作，机器人必须具有一定的行动和感知能力，能够提供对于其他方面相互作用力的关键信息。整个机制必须确保稳定，且保持施加在物体上的抓取力能够抵抗连续反作用力（如在亚毫米对象操作过程中的宏观重力和黏附力）。

操作功能的前提是采用高性能的精密机械系统，以避免如摩擦和迟滞等意外现象所产生的局限性。抓手可采用不同技术以及取决于机器人所执行任务的性质、复杂度和规模尺寸等多种形式来构造。因此，可能包括基于活性材料的微机械手、轻质机械臂、高度集成的功能终端肌腱部分或甚至拟人化机械手。在所有情况下，机器人任务操作所需的高水平性能包括机械设计结构及其相应控制器的精度、可控性和带宽要求。

如果工业机器人的刚度作为一种保证高水平精度的优化准则，则可能在一些特定操作条件下不可避免地会产生系统的机械柔性（如负载和高动态运动）。因此，基于制造机器人研究的理想刚度假设可能在一些情况下是无效的。此外，近年来还开发了惯性较小的轻质机械臂。这些结构柔性的机器人不能执行一定内在安全性下的交互式机械臂任务。在这两种情况下，柔性可能突出表现在称为柔性关节机器人的传动或建模为形变体的机械段上。在第二种情况下，结构形变是沿形状足够纤细以至于可看作细梁的机械臂段分布。对于这两类柔性机器人装置，必须采用特定的建模、辨识和控制方法。

上述所提到的示例是有关与机械柔性相关的意外现象，这些可能是由于采用构成机械手系统特定技术组件或特定细长结构的几何形状所自然产生的。导致性能变差的机械结构可能是限制机械手精度的一个关键因素，而通过设备和控制只能部分克服这些局限性。相比之下，若在设计阶段允许，可特意用尺寸合适的柔性结构来代替某些传统结构，以避免出现机械间隙、固体间摩擦所造成的零件磨

损、固体间摩擦所引起的无耗散现象、抓取现象和需要润滑等一些缺点。此外,柔性结构还可作为整体部件进行制造,从而简化制造过程,并减少装配过程中所需的零件个数。一种优化的机械传动设计通常可避免在柔性导轨设计中采用称为局部成形的机械成形时的限制,而采用在超高精度并联机器人控制中可提高控制精度的传统铰链关节。在微操作任务中,与微观世界相关的物理特性主要是用于微抓手设计和机械结构可塑形。结构的机械成形称为分布式形变,可提高定位精度。微观机制的优化拓扑可利用辅助设计方法由设计人员确定。这些研究涉及问题的先验参数(拓扑域、结构几何形状、所用材料等),据此,优化研究可确定最适合的结构设计、材料选择、传感器和执行器的安装位置和物理集成等,以符合应用的特定要求。如果可能,还可在设计最开始时考虑由模态分析和控制所得到的某些数量的信息,以便于后期控制器的合成。最后,微型传感器在机械柔性衬底上的技术创新有利于在诸如灵巧手等某些领域上的应用。其自然特性、几何形状复杂性和配置可使得其集成到指关节远端区域需要特殊集成且需要高性能的触觉感知功能的多指机械手中。

无论柔性来源于何处,这种机械结构都有一定范围的形变,以及取决于拓扑和所用材料特性的约束。质量和柔性相结合使得动能和弹性形变能之间进行能量变换,从而使得振荡动态特性类似于由多个质量能所构成的系统。由此产生的具有一定频率和模态形变特征的谐振取决于质量在整个结构上的分布和机械参数范围。在绝大多数应用中,机械手的机械柔性产生的振动都是影响系统高动态操作的主要原因。例如,这些可能包括压电执行器微机械手或高精度并联机械手。从控制器合成的角度来看,柔性系统动态特性的数学描述更加重要。

结构的机械柔性自然会产生不可忽略的低频机械振动,通常在高精度操作任务中会大大降低操作性能。动态模型的表示往往来自于振动系统的离散机械方程组。值得注意的是,利用能量符号的建模技术本身能够很好地设计在许多高度集成的机械装置中的多物理分布式系统。根据该公式来可推导系统状态的表示来表征其动态特性,并限定模态可执行性和可观测性的双重符号。对于机器人专家而言,这些系统的柔性参数和频域特性辨识的实用方法需要系统控制的发展。在控制方面,防止通常由外部扰动或控制律本身产生的扰动(称为溢出效应的现象)中具有低自然阻尼的模式非常重要。基于系统频率分析的阻尼控制策略可显著降低振荡特性。

无论尺寸规模如何,具有高精度或高动态特征的机器人操作任务会对任务专用的机器人装置的设计或选择施加一定的约束。在绝大多数情况下,无论设计人员是否慎重选择,都会与机械柔性现象表征的机制相关。本书将研究具有高度机

械柔性特点的机器人装置有关设计、建模、辨识和控制的特定问题。本书的结构如下：

—第1章介绍了集成功能微抓手系统设计的一般概念。该方法会产生一种多学科复杂方法，以解决有利于微观尺度下机器人操作的结构柔性问题。分析和设计方法涵盖了材料科学和包括拓扑结构优化的自动化先进控制。

—第2章着重分析了模态能控性和能观性的双重表示，这在对于控制问题非常关键的振动模式控制权限中具有重要作用。并介绍了在柔性机械手优化设计中模型降阶和传感器/执行器共定位相关的几个重要特性。

—第3章介绍了允许同时使用能量和系统结构表示的不同建模工具。尤其是分析了采用波特-汉密尔顿系统的建模，因为这是一种目前结构能量建模中最先进的工具。

—第4章讨论了可用于受限或拥挤环境中操作的两种无传感器方法。最先研究了柔性微执行器的开环控制策略，这是因为在难以集成高性能传感器时这些方法非常关键。本章的第二部分讨论了如何采用双稳态机械结构来产生微操作功能。

—第5章分析了应对多功能抓取任务和灵巧手操作所需特定要求的一些适当方法。无论是机械传动、执行器、运动结构还是功能表面，都会多功能抓手或灵巧机械手设计过程中不可避免地出现机械柔性现象。为帮助机电一体化设计人员完成复杂任务，本章对一些关键要素和判定准则进行了概述，以指导其设计选择。

—在对主要用于灵巧操作的柔性触觉传感器进行分类之后，第6章讨论了基于压阻技术的三轴作用力传感器的发展。其柔性矩阵的变化可允许设想拟人化灵巧机械手的多种可能性。

—第7章分析了机器人操作中亚微米级精度的约束条件。另外还介绍了柔性关节的运行学分析方法、机器人的关键部件和高精度机构，并着重强调了简单导引的自由度和特性。同时还研究了超高精度并联机器人的新型模块化设计方法。

—第8章介绍了具有柔性关节的串联机器人中建模、辨识和控制律分析的基本步骤。着重分析了用于辨识和控制的动态模型的显著特性以及相对于完全刚性模型的其他特性。

—第9章对形变体机械手的模型进行了综述。所采用的方法是在基于“浮点”方法的形变体机械手情况下基于 Newton-Euler 形式的推广。

—最后一章，第10章介绍了在基于实验数据的柔性机械手辨识和控制方法方面所作出的一些贡献。在此介绍的方法考虑了线性变参数 (LPV) 模型，以及在线自适应校正器的特性。

本书的目的是为有志于柔性机器人领域的研究人员提供机器人操作实际中一些先进科学和技术的综述。

作者名单

Ayman BELKHIRI
IRCCyN
Ecole des Mines de Nantes
France

Mehdi BOUKALLEL
CEA LIST
Gif-sur-Yvette
France

Frédéric BOYER
IRCCyN
Ecole des Mines de Nantes
France

Nandish R. CALCHAND
FEMTO-ST
Besançon
France

Nicolas CHAILLET
FEMTO-ST
Besançon
France

Vincent CHALVET
FEMTO-ST
Besançon
France

Houssem HALALCHI
ICUBE
INSA Strasbourg
France

Simon HENEIN
CSEM
Neuchâtel
Switzerland

Reymond CLAVEL
EPFL-LSRO
Lausanne
Switzerland

Caroline COUTIER
CEA LETI
Grenoble
France

Loïc CUVILLON
ICUBE
University of Strasbourg
France

Christelle GODIN
CEA LETI
Grenoble
France

Mathieu GROSSARD
CEA LIST
Gif-sur-Yvette
France

Yassine HADDAB
FEMTO-ST
Besançon
France

Guillaume MERCÈRE
LIAS
University of Poitiers
France

Micky RAKOTONDRABE
FEMTO-ST
Besançon
France

Arnaud HUBERT
FEMTO-ST
Besançon
France

Edouard LAROCHE
ICUBE
University of Strasbourg
France

Yann LE GORREC
FEMTO-ST
Besançon
France

Maria MAKAROV
Supélec E3S
Gif-sur-Yvette
France

Javier MARTIN AMEZAGA
ARAID-EU
Zaragoza
Spain

Hector RAMIREZ ESTAY
FEMTO-ST
Besançon
France

Stéphane RÉGNIER
ISIR
UPMC
Paris
France

Murielle RICHARD
EPFL-LSRO
Lausanne
Switzerland

Hanna YOUSEF
CEA LIST
Gif-sur-Yvette
France

目 录

译者序

原书前言

作者名单

第1章 微操作柔性集成结构设计	1
1.1 微操作中柔性结构的设计与控制问题	1
1.1.1 微尺度操作特性	2
1.1.2 可靠性和定位精度	2
1.1.3 微操作站	3
1.1.4 机器人微操作控制相关问题	6
1.2 微机电一体化设计	7
1.2.1 柔性集成结构建模	7
1.2.2 活性传导材料	8
1.2.3 多物理模型	10
1.2.4 微机电结构的优化策略	12
1.3 柔性压电传导结构的综合优化方法示例	15
1.3.1 块方法	15
1.3.2 通用设计方法	16
1.3.3 有限元模型	17
1.3.4 应用示例: 柔性集成微抓手设计	17
1.4 小结	18
参考文献	19
第2章 柔性结构的控制表示和显著特性	23
2.1 柔性结构的状态空间表示	23
2.1.1 动态表示	23
2.1.2 模态基的能量守恒模型	24
2.1.3 阻尼特性	25
2.1.4 方程组求解	26

X 柔性机器人：多尺度操作应用

2.1.5 模态基的状态空间表示	26
2.1.6 模态辨识与控制	27
2.2 模态能控性和能观性概念	28
2.2.1 状态能控性与能观性概述	28
2.2.2 柔性结构下的格拉姆矩阵解释	30
2.2.3 模态基的格拉姆矩阵表示	31
2.3 模型降阶	31
2.3.1 均衡实现	31
2.3.2 Moore 降阶技术	32
2.3.3 柔性结构的模态和均衡实现等效模态	33
2.4 模态分析准则对拓扑优化的作用	33
2.4.1 模型降阶的实际问题	33
2.4.2 执行器/传感器配置	35
2.4.3 拓扑优化中控制传递函数的频率响应	37
2.4.4 结构优化中的模态能观性判据	37
2.4.5 高控制权限 (HAC) / 低控制权限 (LAC) 控制	38
2.5 小结	41
参考文献	42

第3章 柔性结构建模的结构能量法

3.1 简介	45
3.2 有限维系统	46
3.2.1 经典能量模型	46
3.2.2 经典网络模型	48
3.2.3 波特-汉密尔顿公式	55
3.3 无限维系统	59
3.3.1 入门示例	59
3.3.2 系统分类	63
3.3.3 无限维狄拉克结构	64
3.3.4 边界控制系统及其稳定性	67
3.4 小结	70
参考文献	70

第4章 柔性微操作机器人的开环控制方法	73
4.1 简介	73
4.2 压电微执行器	73
4.2.1 柔性压电微执行器	73
4.2.2 滞回建模与补偿	75
4.2.3 强阻尼振动系统的建模和补偿	77
4.3 热敏微执行器	81
4.3.1 热敏执行器	81
4.3.2 建模与辨识	83
4.3.3 热执行器的双稳态模块	86
4.3.4 控制	88
4.3.5 数字化微机器人	88
4.4 小结	90
参考文献	90
第5章 多功能灵巧抓手的机械柔性和设计	93
5.1 机器人抓手系统	93
5.1.1 机器人抓手	93
5.1.2 多功能抓取概念	94
5.1.3 灵巧操作概念	95
5.2 驱动架构和弹性元件	98
5.2.1 驱动系统	98
5.2.2 “简单效应”驱动结构中的弹性传动建模	103
5.3 结构柔性	106
5.3.1 柔性关节与精度问题	106
5.3.2 多关节操作的指间关节设计示例	108
5.3.3 可形变接触表面	111
5.4 小结	113
参考文献	113
第6章 多关节灵巧手操作的柔性触觉传感器	116
6.1 简介	116

6.2 作为机器人操作基础的人类灵巧操作 116

6.2.1 人手和手指运动 117

6.2.2 人手的触觉感知 118

6.2.3 机器人灵巧操作触觉感知的功能规范 118

6.3 触觉感知技术 120

6.3.1 电阻式传感器 120

6.3.2 导电聚合物和织物纤维 125

6.3.3 导电弹性体复合材料 127

6.3.4 导电流体 128

6.3.5 电容式传感器 129

6.3.6 压电式传感器 133

6.3.7 光学传感器 134

6.3.8 有机场效应晶体管 136

6.4 传感器解决方案和感知技术的比较 136

6.5 指甲传感器 140

6.5.1 基本描述与工作原理 140

6.5.2 制造过程 141

6.6 从指甲传感器到触觉皮肤 143

6.6.1 柔性指甲传感器阵列 143

6.6.2 尺寸、材料和制造工艺 143

6.6.3 信号寻址管理：大规模阵列和系统集成的挑战 145

6.7 从传感器到人工触摸系统 146

6.7.1 传感器保护和作用力传输 146

6.7.2 基于指甲传感器的纹理分析装置 146

6.8 应用与信号分析 147

6.8.1 表面识别 148

6.8.2 粗糙度估计 150

6.8.3 材料感官分析 150

6.9 小结 151

参考文献 152

第7章 高精度机器手的柔性弯曲 159

7.1 高精度工业机器人应用背景 159

7.1.1 应用	159
7.1.2 高精度与建议解决方案原则之间的约束连接	160
7.1.3 超高精度机器人的几个示例	162
7.2 简单柔性的运动学分析	163
7.2.1 柔性设计	163
7.2.2 基本关节的自由度	163
7.2.3 寄生运动	164
7.2.4 直线挠性和圆形挠性	169
7.3 柔性并行化运动设计方法	170
7.3.1 目的	170
7.3.2 模块化设计方法	171
7.3.3 超高精度概念的应用	172
7.3.4 基于柔性的构件机械设计	172
7.4 Legolas 5 型机器人设计示例	173
7.4.1 基于柔性的机械设计	174
7.4.2 Legolas 5 型机器人原型	177
7.4.3 超高精度模块化并联机器人系列	177
参考文献	179
第 8 章 柔性关节串联机器人的建模与运动控制	181
8.1 简介	181
8.2 建模	181
8.2.1 柔性源	181
8.2.2 动态模型	182
8.2.3 动态简化模型特性	184
8.2.4 简化示例分析	185
8.3 辨识	187
8.3.1 基于附加传感器的辨识	188
8.3.2 仅根据电动机测量值进行辨识	190
8.3.3 讨论与开放问题	193
8.4 运动控制	193
8.4.1 奇异摄动法	194
8.4.2 线性化与补偿	196
8.4.3 特殊控制方法	199

8.5 小结	202
参考文献	203
第9章 可形变机械臂的动力学建模	212
9.1 简介	212
9.2 弹性体的 Newton-Euler 模型	213
9.2.1 应用于刚体的 Poincaré 方程组：Newton-Euler 模型	214
9.2.2 应用于浮动框架下弹性体的 Poincaré 方程组	217
9.2.3 形变参数化	220
9.3 可形变机械臂的运动学模型	222
9.4 可形变机械臂的动力学模型	224
9.5 示例	225
9.5.1 问题描述	225
9.5.2 受力运动定义	226
9.6 小结	227
参考文献	228
第10章 柔性结构机械手的鲁棒控制	230
10.1 简介	230
10.2 LTI 方法论	230
10.2.1 医疗机器人	230
10.2.2 建模与辨识	231
10.2.3 H_∞ 控制	233
10.2.4 线性控制评价	236
10.3 LPV 方法论	236
10.3.1 具有两个柔性段的机械手	236
10.3.2 LPV 模型辨识	238
10.3.3 LPV 系统的分析和综合方法	242
10.3.4 柔性机械手控制应用	246
10.4 小结	250
参考文献	250

第 1 章 微操作柔性集成结构设计

Mathieu Grossard、Mehdi Boukallel、Stéphane Régnier 和 Nicolas Chaillet

微操作机器人的设计取决于柔性机械结构。由于执行器与测量功能的集成，这将得到越来越多的广泛应用。根据这些集成系统的总体设计，产生了一种复杂且多学科交叉的问题解决方案。在这种设计中，利用柔性结构来应对微观世界维度下机器人操作的挑战。这种设计分析方法可应用于从材料科学到先进自动控制以及拓扑结构优化等各个领域。在本章，将明确强调上述系统中优化设计辅助工具的必要性，并讨论现有的一系列优化策略。最后，通过一个着重于柔性整体结构优化设计的软件工具开发典型示例来对本章内容进行小结。利用压电材料，这些结构能够保证执行器与传感器在功能上的分布式和集中式形式。

1.1 微操作中柔性结构的设计与控制问题

20 世纪 90 年代初，日本和美国在系统小型化和集成化方面所做的研究产生了微型这一概念。无论是用于普通大众或微型计算机的电子设备，还是微创手术中的先进仪器，所有这些系统都集成了多个功能模块（机械、光学、电子等），在或多或少的受限空间中创建一个微系统，也称为微机电系统（MEMS），如果具有光学功能，就称为微光机电系统（MOEMS）。微机器人的概念正是微系统与机器人相结合的产物。微机器人的原理在于产生操作一种或多种工具的必要运动来完成微观世界中的特定任务，即微米级的对象。

微系统实现了不同种类的技术功能，不论是机械、热力学、电学还是光学，这涵盖了许多领域的应用（生物医学、汽车、光学、微操作等）。作为机器人，微机器人是一种可编程且能够在特定环境中动作甚至交互的现场可控的机电系统，包括感知、环境行为和信息处理等功能。此外，还限定了微系统的尺寸和分辨率规格。从严格意义上来说，微前缀是指微米级（ 10^{-6}m ），尽管物体维度通常在毫米级与厘米级之间 [BOU 02]。如果不严格限制尺寸为微米级，当至少具有以下一种特性时，就可认为是微机器人 [REG 10]：

- 采用微米级部件（微传感器、微执行器等）；
- 利用微米级物体，或更一般情况下，在微米尺度下（即微观物体世界）完成任务；
- 具有小于 $1\mu\text{m}$ 的高定位分辨率（根据构造原理，研究和创建 100nm 或更小级别的高分辨率机器人，往往会使得机器人具有小尺寸的特性，并可减小最终尺寸）。

因此，微机器人或更广泛地说是微系统的定义赋予了广阔的应用领域。本章的核心内容就是设计与控制微机器人装置来完成专门的微操作任务。

微操作任务是利用外力来实现诸如抓取/放置、推动、切割和组装大小在微米级到