

QUANROUSHUN BINGLIAN JIGOU LILUN

—KONGJIAN WEINA CHIDU CHAOJINGMI DINGWEI XITONG YANJIU

全柔顺并联机构理论

——空间微纳尺度超精密定位系统研究

朱大昌 李培 顾起华 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

014010768

TH112.1

07

江西理工大学优秀学术著作

全柔顺并联机构理论 ——空间微纳尺度超精密定位系统研究

朱大昌 李 培 顾起华 著



北 京

冶金工业出版社

2013



北航

C1697158

TH112.1
07

内 容 提 要

本书针对目前全柔顺并联机构的空间构型综合及智能控制等亟待解决的技术问题,详细阐述了采用空间拓扑优化设计方法、螺旋理论及空间几何约束形式进行新型全柔顺并联机构空间构型设计的原则与方法,并介绍了运用全柔顺并联机构实现空间微纳尺度超精密定位的有关研究工作。

本书可供从事柔顺、并联机构学及空间微纳尺度超精密定位研究工作的人员、大专院校机构学及智能控制专业的师生以及有意于在空间微纳尺度超精密定位技术领域发展的企业的相关人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

全柔顺并联机构理论:空间微纳尺度超精密定位系统研究/朱大昌,李培,顾起华著. —北京:冶金工业出版社, 2013.9

ISBN 978-7-5024-6388-5

I. ①全… II. ①朱… ②李… ③顾… III. ①空间并联机构—研究 IV. ①TH112.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 223426 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 杨 敏 美术编辑 杨 帆 版式设计 杨 帆

责任校对 李 娜 责任印制 张祺鑫

ISBN 978-7-5024-6388-5

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 三河市双峰印刷装订有限公司印刷

2013 年 9 月第 1 版, 2013 年 9 月第 1 次印刷

148mm × 210mm; 5.875 印张; 173 千字; 178 页

22.00 元

冶金工业出版社投稿电话: (010)64027932 投稿邮箱: tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话: (010)64044283 传真: (010)64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号 (100010) 电话: (010)65289081 (兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

本书是国家自然科学基金资助项目“基于全柔顺并联支撑机构的空间微纳尺度超精密定位系统研究”（项目编号：51165009）和“纳米级精度微运动测量与柔顺机构微动平台微位移检测”（项目编号：51105077）以及江西省自然科学基金资助项目“基于全柔顺并联支撑机构的空间微纳尺度超精密定位系统研究”（项目编号：20114BAB206008）的部分研究成果（以上研究项目依托单位为江西理工大学），主要介绍采用空间拓扑优化设计方法、螺旋理论及空间几何约束形式进行全柔顺并联机构空间构型综合，并将全柔顺并联机构作为空间微纳尺度超精密定位平台支撑机构，进而研究其超精密定位特性。

超精密定位技术广泛应用于微电子制造、微机电系统、生物医学工程等尖端领域，是先进制造领域的重要研究方向之一。它的发展是其他尖端技术的基础，是推动整个科技向高层次发展的重要手段。它的各项技术指标是各国高技术水平的重要标志。“微纳尺度精密制造技术”是已列入我国中长期科学和技术发展规划纲要（2006~2020年）的前沿技术之一。

超精密定位技术是包括精密微机械技术、精密测量和精密控制的一门综合学科。超精密定位系统的研究必须满足的

条件有：具有纳米级甚至亚纳米级的高定位分辨率和较高的精度稳定性；具有较高的固有频率，以确保定位平台具有良好的动态特性和抗干扰能力；采用精密控制方法，抑制外界随机性干扰对定位过程的影响，提高其响应速度。目前，限制超精密定位技术发展的关键性技术问题主要集中在两个方面：一是作为定位平台支撑机构的微机构；二是解决外界干扰的精密控制策略。

本书基于空间拓扑优化设计方法、螺旋理论及空间几何约束形式，对组成全柔顺并联机构空间构型进行综合，解决了“积木式”全柔性并联机构构成方式这一技术问题，进而对全柔顺并联机构整体组成刚度进行分析与仿真研究。在此基础上，采用模糊PID 轨迹跟踪控制方法，对空间3-RPS 型全柔顺并联机构进行控制系统设计与仿真研究。

由于作者的水平有限，书中难免有不足或不妥之处，敬请读者批评指正，对此作者不胜感谢！

作 者

2013年6月

冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	作 者	定价(元)
数控机床操作与维修基础 (本科教材)	宋晓梅	29.00
自动控制系统 (第2版) (本科教材)	刘建昌	15.00
少自由度并联支撑机构动基座自动调平系统 可编程序控制器及常用控制电器 (第2版) (本科教材)	朱大昌	19.00
机电一体化技术基础与产品设计 (第2版) (本科教材)	何友华	30.00
自动控制原理 (第4版) (本科教材)	刘 杰	46.00
自动控制原理习题详解 (本科教材)	王建辉	32.00
机械设计基础 (本科教材)	王建辉	18.00
机械优化设计方法 (第3版) (本科教材)	王健民	40.00
现代机械设计方法 (本科教材)	陈立周	29.00
机械可靠性设计 (本科教材)	臧 勇	22.00
液压传动与气压传动 (本科教材)	孟宪铎	25.00
计算机控制系统 (本科教材)	朱新才	39.00
冶金设备及自动化 (本科教材)	张国范	29.00
机械制造工艺及专用夹具设计指导 (第2版) (本科教材)	王立萍	29.00
机械电子工程实验教程 (本科教材)	孙丽媛	20.00
复杂系统的模糊变结构控制及其应用	宋伟刚	29.00
液压可靠性与故障诊断 (第2版)	米 阳	20.00
液压气动技术与实践 (高职教材)	湛从昌	49.00
机械制图 (高职教材)	胡运林	39.00
机械制图习题集 (高职教材)	阎 霞	30.00
机械制造装备设计	阎 霞	29.00
带式输送机实用技术	王启义	35.00
	金丰民	59.00
	王庆春	45.00
	王国贞	28.00
	柳洪义	23.00



北航

C1697158

备
护

双峰岭

目 录

1 绪论	1
1.1 柔顺机构发展概况	1
1.1.1 柔顺机构设计方法	2
1.1.2 拓扑优化设计方法	5
1.1.3 弹性及柔性机构动力学建模方法	12
1.2 并联机构发展概况	14
1.2.1 并联机器人机构学研究进展	14
1.2.2 并联机器人机构构型综合方法	18
1.3 柔顺并联机构研究进展	19
1.3.1 柔性铰链	20
1.3.2 柔顺并联机构	21
1.4 柔顺并联机构控制系统研究进展	23
1.5 本书的主要内容	23
2 全柔顺并联机构空间构型综合理论基础	25
2.1 基于螺旋理论的空间几何约束	25
2.1.1 螺旋理论	25
2.1.2 力偶约束分析	27
2.1.3 力约束分析	29
2.2 基础结构法的多目标拓扑优化理论	33
2.2.1 基础结构法	33
2.2.2 优化准则法	41
2.2.3 移动近似算法	43
2.3 移动渐进算法中的参数量化	46
2.3.1 悬臂梁结构拓扑优化	47

2.3.2 两单元桁架结构拓扑优化	49
2.4 数值算例	51
2.5 本章小结	52
3 3-RPC 型全柔顺并联机构刚度及定位性能分析	53
3.1 3-RPC 型全柔顺并联机构构型综合	53
3.1.1 3-RPC 型并联机构构型	53
3.1.2 3-RPC 型并联机构几何约束形式	54
3.1.3 3-RPC 型全柔顺并联机构支链构型综合	55
3.2 3-RPC 型全柔顺并联机构刚度分析	56
3.2.1 3-RPC 型全柔顺并联机构刚度计算	56
3.2.2 3-RPC 型全柔顺并联机构刚度仿真	57
3.2.3 3-RPC 型全柔顺并联机构静力学分析	59
3.3 3-RPC 型全柔顺并联机构定位性能分析	69
3.3.1 压电陶瓷驱动器实验测试	69
3.3.2 精密定位平台实验测试	70
3.3.3 精密定位平台定位精度及误差分析	72
3.4 本章小结	73
4 空间 4-CRU 型全柔顺并联机构	75
4.1 空间 4-CRU 型并联机构	75
4.1.1 空间 4-CRU 型并联机构构型	75
4.1.2 空间 4-CRU 型并联机构运动特性	75
4.2 基于空间 4-CRU 型全柔顺并联支撑机 构的精密定位平台	77
4.3 空间 4-CRU 型全柔顺并联机构刚度分析	78
4.3.1 基于动力学的空间 4-CRU 型全柔顺 并联机构支链刚度分析	78
4.3.2 空间 4-CRU 型全柔顺并联机构整体刚度分析	84
4.4 空间 4-CRU 型全柔顺并联机构刚度与弹性变形	87
4.5 空间 4-CRU 型全柔顺并联机构动平台应变仿真	87

4.6 本章小结	90
5 空间 2RPU-2SPS 型全柔顺并联机构	92
5.1 空间 2RPU-2SPS 型并联机构	92
5.1.1 空间 2RPU-2SPS 型并联机构构型	93
5.1.2 空间 2RPU-2SPS 型并联机构运动特性分析	92
5.2 空间 2RPU-2SPS 型全柔顺并联机构构型设计	94
5.3 空间 2RPU-2SPS 型全柔顺并联机构刚度分析	96
5.3.1 基于动力学模型的 RPU 型全柔顺并联机构支链刚度分析	96
5.3.2 基于动力学模型的 SPS 型全柔顺并联机构支链刚度分析	101
5.4 空间 2RPU-2SPS 型全柔顺并联机构刚度分析	105
5.4.1 运动学约束	105
5.4.2 支链 I 刚度的分析	107
5.4.3 全柔顺并联机构整体刚度分析	107
5.5 空间 2RPU-2SPS 型全柔顺并联机构刚度与弹性变形	108
5.6 空间 2RPU-2SPS 型全柔顺并联机构仿真	108
5.7 理论计算与仿真结果对比分析	112
5.8 本章小结	112
6 空间 4-RPUR 型全柔顺并联机构	114
6.1 空间 4-RPUR 型并联机构	114
6.1.1 空间 4-RPUR 型并联机构构型	114
6.1.2 空间 4-RPUR 型并联机构运动特性分析	115
6.2 空间 4-RPUR 型全柔顺支链结构	116
6.3 空间 4-RPUR 型全柔顺并联机构刚度分析	118
6.3.1 基于动力学模型的 RPUR 型全柔顺并联机构支链刚度分析	118
6.3.2 基于动力学模型的空间 4-RPUR 型全	

柔顺并联机构刚度分析	123
6.4 空间 4-RPUR 型全柔顺并联机构弹性变形	126
6.4.1 基于 ANSYS 软件空间 4-RPUR 型全柔顺并联机构弹性变形仿真	127
6.4.2 理论计算与仿真结果对比分析	130
6.5 本章小结	130
7 空间 3-RPS 型全柔顺并联机构模糊 PID 控制	132
7.1 空间 3-RPS 型柔顺并联机构动力学分析	132
7.1.1 位置分析	132
7.1.2 速度与加速度分析	134
7.1.3 动力学方程的建立	136
7.2 轨迹规划	139
7.3 模糊 PID 控制理论	142
7.3.1 常规 PID 控制	142
7.3.2 参数整定法	144
7.3.3 模糊控制	146
7.4 模糊 PID 控制系统设计	151
7.4.1 模糊 PID 控制原理	151
7.4.2 模糊 PID 控制器设计	151
7.5 空间 3-RPS 型全柔顺并联机构轨迹跟踪控制	153
7.5.1 空间 3-RPS 型全柔顺并联机构建模	153
7.5.2 空间 3-RPS 型全柔顺并联机构常规 PID 轨迹跟踪控制	154
7.5.3 空间 3-RPS 型全柔顺并联机构模糊轨迹跟踪控制	157
7.5.4 空间 3-RPS 型全柔顺并联机构模糊 PID 轨迹跟踪控制	159
7.6 本章小结	164
参考文献	165

1 绪 论

1.1 柔顺机构发展概况

在精密定位、精密操作系统中,最重要的组成部分是微操作机构,它起着传递或输出运动和力的作用。在传统机构设计中,传递运动或力的机构主要依赖于传动副结构形式。然而传统机械结构中的零部件随着加工制造产品对尺寸小型化、微型化需求的提高,面临的制造、装配和维护中的困难越来越突出。随着机构学、结构力学以及计算机技术的发展,在这些学科交叉领域内,为了达到微机械系统所要求的微型化、轻量化、无间隙等高端加工要求,产生了一类新型机构类型——柔顺机构。1968年, Buens 和 Crossley^[1]提出了柔顺机构的概念, Her^[2]在其博士论文中规范了柔顺机构的概念,率先开展了在柔顺机构设计方面的研究工作。

柔顺机构是一种通过其部分或全部具有柔性的杆件的弹性变形来产生位移并传递运动、力或能量的机构。传统刚性机构和典型的柔顺机构如图 1-1 所示。

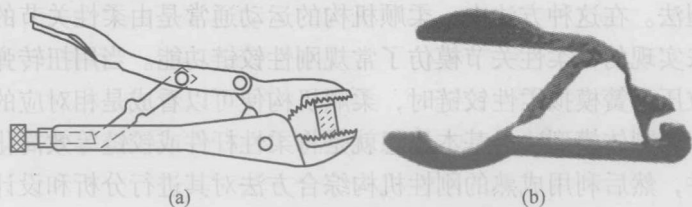


图 1-1 传统刚性机构和典型柔顺机构

(a) 刚性夹钳; (b) 柔顺夹钳

与传统刚性机构不同的是,柔顺机构不仅可以从柔性铰链的微小位移获得机构整体运动性,还可以从柔顺部件的变形获得机构整体运动性。柔顺机构传递运动的优越性主要表现在两个方面:一是降低成本(减少零件数目、减少装配时间、简化制造过程等);二是提高运动学和动力学性能(提高运动精度,增加可靠性,减小磨损,减轻重

量,减少维护等)。因此,柔顺机构已经在微机电系统(MEMS)器件设计、微机电系统(MEMS)产品装配、生物工程显微操作、医学显微外科手术、光纤对接以及航空航天等领域得到了广泛的应用。

1.1.1 柔顺机构设计方法

相对传统刚性机构设计而言,柔顺机构设计是一个比较新的研究领域。由于柔顺机构在弹性变形特性方面的复杂性,通常其设计不像刚性机构那样具有系统性。目前,对于柔顺机构的优化设计主要有两类方法:第一类方法是运动学方法或称为伪刚体模型法,这种方法采用刚体动力学分析方法,在对与柔顺机构相类似的刚性连接机构分析的基础上,进行柔顺机构构型优化设计;第二类方法是结构优化方法或称为拓扑优化方法,这种设计方法采用拓扑优化设计方法对柔顺机构的拓扑形状、尺寸等进行机构构型设计。

1.1.1.1 运动学方法(伪刚体模型法)

Her 和 Midha^[3]最早致力于柔顺机构构型综合运动学方法的研究工作,这种方法建立在传统的刚体运动学基础上,根据运动学理论获得机构基本构型形式,并通过引入柔顺构件将其转化为部分柔顺机构或具有集中柔度的全柔顺机构。1996年,Howell^[4]等进一步提出了著名的、用于设计和分析具有短长度柔性铰链大变形柔顺机构的伪刚体模型法。在这种方法中,柔顺机构的运动通常是由柔性关节的弯曲变形来实现的,柔性关节模仿了常规刚性铰链功能。当用扭转弹簧和直线拉压弹簧模拟柔性铰链时,柔顺机构便可以看成是相对应的刚性机构。伪刚体模型法的基本思想就是将柔性杆件或铰链等效简化为刚性杆件,然后利用成熟的刚性机构综合方法对其进行分析和设计。伪刚体模型法设计思路如图1-2所示。

基于伪刚体模型法,Her 和 Chang^[5]提出了一种柔性铰链式微动平台的线性模型分析方法。该方法适用于分析带有柔性铰链的柔顺机构,通过建立运动链线性方程,结合虚功原理补充能量方程,可求解出平台的位置关系,使微动平台的建模得以简化。余跃庆等^[6]将一般平面柔顺机构等效为由刚性杆件和弹性元件所组成的简单刚性机构,建立相应的伪刚体动力学模型,同时将柔顺机构等效为弹性连杆

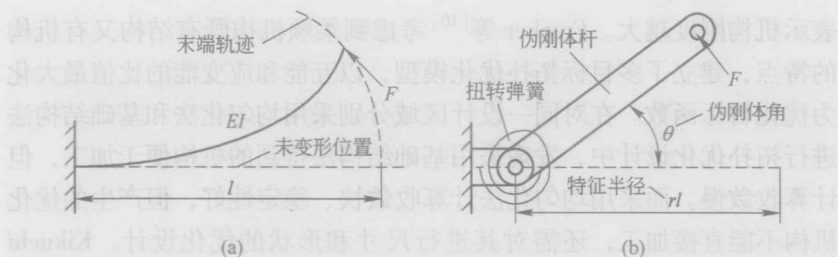


图 1-2 伪刚体模型法设计思路示意图

(a) 一端固定的悬臂梁; (b) 等效的伪刚体模型

机构来建立动力学方程,并把伪刚体动力学模型的计算结果与等效的弹性连杆机构的计算结果进行对比。对比结果表明:采用伪刚体模型法建立的柔顺机构动力学模型具备柔性特性。于靖军等^[7]对集中柔度的全柔顺机构进行了较为系统的研究,包括全柔顺机构的构型综合、柔顺铰链、机构运动学与动力学、机构静刚度以及机构优化设计方法等,并提出扩展伪刚体模型法,以解决空间柔顺机构的设计与分析问题。然而,伪刚体模型法必须事先知道刚性机构的原理才能进行相应的柔顺机构设计,从而导致该方法不能脱离传统刚性机构运动学设计的框架。

1.1.1.2 结构优化方法 (拓扑优化方法)

为减小集中式柔顺机构的应力集中现象,使柔顺机构能通过它的全部或部分部件的弹性变形来获得事先规划的运动轨迹,并克服伪刚体模型法只能在给定刚性机构的基础上进行尺寸优化的局限性,1994年,美国 Pennsylvania 大学的 Ananthasuresh^[8]首先将拓扑优化的均匀方法引入柔顺机构的设计中,并用互能来描述机构的柔性。利用连续力学方法和结构优化技术中的均匀化方法发展了具有分布柔度特点的柔顺机构综合方法论,从而将柔顺机构的拓扑形式、结构尺寸及形状优化统一了起来,为柔顺机构的系统设计提供了新的理论方法,开创了分布式柔顺机构设计的新领域。虽然由于目标函数的选取使设计结果更像刚性机构而非柔顺机构,但这一思想开创了应用拓扑优化方法进行分布式柔顺机构设计的先河。

Shield 和 Prager^[9]提出互能的概念,用互能表征机构柔度,用应变能表征机构刚度。互能越大,表示机构柔度越大,应变能越小,则

表示机构刚度越大。Frecker 等^[10]考虑到柔顺机构既有结构又有机构的特点,建立了多目标拓扑优化模型,以互能和应变能的比值最大化为优化目标函数。在对同一设计区域分别采用均匀化法和基础结构法进行拓扑优化设计中,发现采用基础结构法得到的机构便于加工,但计算收敛慢。而采用均匀化法计算收敛快、稳定性好,但产生的优化机构不能直接加工,还需对其进行尺寸和形状的优化设计。Kikuchi 等^[11]应用均匀化方法进行了柔顺机构设计研究,以多载荷互能和应变能的加权对数和为目标函数,并考虑了位移约束。

Larsen 等^[12]提出了几何增益和机械增益的概念,以机械增益和几何增益误差和作为目标函数研究柔顺机构,得到负泊松比的微型材料结构,设计出力反向机构、夹钳机构和两输入两输出柔顺机构,但其设计是通过把两套单输入单输出机构叠加,且由于其目标函数的选取问题使得机构无法实现可控轨迹输出。Lau 等^[13]研究了柔顺机构目标函数的选取问题,认为柔顺机构优化模型中以几何增益、机械增益或者输入输出功之比作为目标函数比较合适。Sigmund^[14, 15]采用几何增益和机械增益为目标函数,讨论了用输入位移约束代替应力约束的方法,并引入弹簧模型来模拟工件的刚度,使优化结果依赖于弹簧刚度,这样所得到的机构更加合理,并对优化中出现的三个数值问题提出网格独立滤波技术处理方法。数值算例结果表明:柔顺机构的拓扑形状与输入位移约束、设计区域情况、边界条件以及弹簧刚度等有密切关系,而网格独立滤波方法能有效地处理棋盘格式和网格依赖性问题。

Pedersen^[16]对大变形柔顺机构进行了几何非线性拓扑优化设计,以输出点坐标误差作为目标函数,采用伴随矩阵法求解敏度,以移动近似算法作为优化求解器,设计了柔顺机构。数值算例结果表明:非线性有限元模型对大变形柔顺机构的分析设计非常重要。Saxena 等^[17]采用基础结构法进行柔顺机构几何非线性拓扑优化设计,以输出点坐标误差为目标函数,对同一设计问题采用线性拓扑优化模型和几何非线性拓扑优化模型进行设计后,对比分析发现对柔顺机构进行几何非线性拓扑优化设计是非常必要的。Joo^[18]也对柔顺机构进行了几何非线性拓扑优化设计。

Du 等^[19]把无网格伽辽金法引入拓扑优化设计方法中,利用其离散和求解了热固耦合场的控制方程,进行了几何非线性热固耦合柔顺机构的优化设计研究。Yin^[20]对多材料、多物理场柔顺机构的设计问题做了进一步的研究,在设计时应用峰值函数来模拟材料进行拓扑优化设计。Jonmann^[21]用拓扑优化方法进行了微型热传感器方面的研究。Hetrick 和 Kota 等^[22, 23]进行了柔顺机构的应用研究。

在国内,张宪民^[24]分析和比较了基础结构法和均匀化法两种物理模型描述方法,并基于能量法研究了单输入单输出柔顺机构和单输入多输出柔顺机构拓扑优化设计的优化数学模型建立方法,给出了拓扑结构的提取及过滤算法。谢先海等^[25]应用均匀化法,以机械效率为目标函数,采用准则优化方法建立柔顺机构的拓扑优化数学模型,并推导出基于弹簧模型的柔顺机构机械效率计算表达式。孙宝元等^[26, 27]以均匀化法建立物理模型,对单输入单输出柔顺机构进行拓扑优化设计,研制出用于电泳芯片装配的毛细管微夹钳柔顺机构。刘震宇^[28]从偏微分方程反问题的角度出发对优化过程中出现的数值计算不稳定现象做出了一个全新的解释,并提出了窗函数方法来处理三个数值问题:棋盘格式、网格依赖性和局部极小值。数值算例表明采用此方法能解决部分拓扑优化的数值问题。梅玉林^[29]结合多材料结构的向量水平集表示、材料界面追踪的水平集算法、梯度投影方法、非线性映射技术、返回映射算法和平均曲率技术,提出了适用于一般目标函数、多载荷工况、多约束和多材料的结构拓扑优化水平集算法,并采用这种方法进行了刚性机构、柔顺机构和复合材料微结构设计的研究工作。大连理工大学王力鼎院士领导的研究小组一直从事微型电机、微型夹钳等方面的研究工作,目前已研制出纵弯式压电微型电机、端面摇摆式电磁微型电机、静电力驱动的硅微型夹钳、压电陶瓷驱动的具有放大机构的记忆合金微型夹钳等^[30, 31]。

1.1.2 拓扑优化设计方法

拓扑学(Topology)是数学中的一个重要基础分支。Topology 原意为地貌,起初是出于数学分析的需要而产生的一些几何问题,被描述成“橡皮泥上的几何学”,研究几何图形在连续不变形下保持不变

的性质（连续变形，形象地说就是允许伸缩和扭曲等变形，但不允许割断和粘合）。一般地说，对于任意形状的封闭曲面，只要不把曲面撕裂或割破，其变换就是拓扑变换，也就存在拓扑等价。例如，所有多边形和圆周在拓扑意义下是一样的，因为多边形可以通过连续变形变成圆周。因此，在拓扑学家眼中，它们是同一个对象。而圆周和线段则在拓扑意义下含义不同，因为把圆周变成线段会产生断裂（不连续）。

拓扑优化是结构优化的一种。结构优化可分为尺寸优化、形状优化和拓扑优化^[32]。其中尺寸优化以结构设计参数为优化对象，例如板厚，梁的截面宽、长度和厚度等；形状优化以结构件外形或孔洞形状为优化对象，例如凸台过渡倒角的形状等；拓扑优化以材料分布为优化对象，通过拓扑优化可以在均匀分布材料的设计空间中找到最佳分布方案。拓扑优化相对于尺寸优化和形状优化具有更多的设计自由度，能够获得更大的设计空间，是结构优化最具发展前景的优化设计手段。尺寸优化、形状优化和拓扑优化在设计圆孔时的对比示意图如图1-3所示。

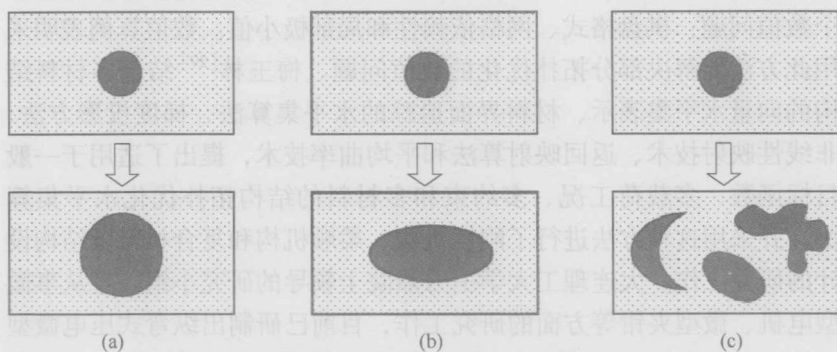


图1-3 孔的结构优化对比示意图

(a) 尺寸优化；(b) 形状优化；(c) 拓扑优化

从图1-3的描述中可以发现，拓扑优化主要探讨结构中各个组元的相互连接方式、结构内有无孔洞、孔洞的数量以及它们的位置等拓扑形式。通俗地讲，拓扑优化就是在产品结构上通过合理的“打孔”来实现给定的优化目标。这里的“打孔”首先是建立在有限元模型

的基础上, 拓扑优化软件按照各种算法去除设计变量中所包含的单元来完成“打孔”工作。如果“打孔”后的模型可在约束条件下满足目标函数要求则完成计算, 如果不能达到则继续迭代分析。目前, 拓扑优化分析所支持的目标函数主要包括结构强度最大、结构变形最小(通常用应变能表示)、结构散热速度最快、结构中某一关键部位应力集中最小、结构频率响应最高等^[33~35]。

1.1.2.1 拓扑优化模型

在介绍拓扑优化模型之前, 首先必须要了解结构优化三要素的概念^[36]。在结构优化算法中, 三要素是设计变量、目标函数和约束条件。设计变量是产品结构中所需要调整的参数; 目标函数是要求产品所达到的性能指标; 约束条件则是在作调整时的限制条件。有时约束条件也可作为目标函数用于完成多目标优化。例如, 同时要求一件产品结构重量极轻而刚度极大, 在这种情况下, 就可以把“刚度极大”设定为目标函数, 再给定一个减轻结构重量的约束条件, 这样则可以同时完成这两个目标的拓扑优化设计。

材料最优化分布模型在结构拓扑优化定义中就是确定材料在设计空间中何处应该有实体材料, 何处没有实体材料的问题。在数学上定义如下特征方程:

$$x_e = \begin{cases} 1 & \text{if } x_e \in \Omega_s \\ 0 & \text{if } x_e \in \Omega/\Omega_s \end{cases} \quad (1-1)$$

式中, Ω 是初始给定设计区域; Ω_s 是实体材料所占的区域; Ω/Ω_s 是孔洞所占的区域。设计域及其边界条件如图 1-4 所示。

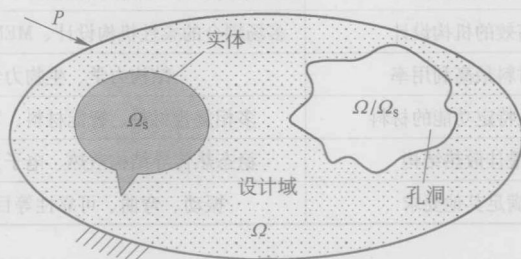


图 1-4 设计域及其边界条件