

空间 柔顺机构 综合方法与应用

林 盛 著



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

空间柔顺机构 综合方法与应用

林 盛 著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2019

内 容 提 要

本书系统介绍了空间柔顺机构综合方法及其在椭圆振动切削装置设计中的应用。空间柔顺机构综合方法主要介绍了基于自由度约束互补拓扑综合方法和平面曲梁柔顺机构综合方法,及应用这两种方法设计的三维椭圆振动切削装置。实验验证了柔顺机构综合方法设计三维椭圆振动切削装置的可行性。

本书可供机械及相关专业的技术人员参考,也可供高等高职院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

空间柔顺机构综合方法与应用/林盛著. —北京:冶金工业出版社, 2019. 9

ISBN 978-7-5024-8213-8

I. ①空… II. ①林… III. ①柔性结构—机构综合
IV. ①TH112

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 178920 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

责任编辑 王琪童 美术编辑 郑小利 版式设计 禹蕊

责任校对 王永欣 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-8213-8

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;北京建宏印刷有限公司印刷

2019 年 9 月第 1 版, 2019 年 9 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 7 印张; 138 千字; 103 页

39.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

本书内容主要来源于国家自然科学基金面上项目“高性能大变形空间曲梁柔顺机构综合方法研究”（项目编号：51775078）、国家自然科学基金青年项目“基于混合约束的多自由度并联柔顺微位移工作台综合方法研究”（项目编号：51105050）及辽宁省教育厅项目“考虑多源不确定性的三维椭圆振动切削装置优化设计方法研究”（项目编号：JDL2016027）的部分成果，主要介绍空间柔顺机构的综合方法以及空间柔顺机构在三维椭圆振动切削中的应用。主要内容包括：

(1) 阐述了自由度约束拓扑理论中自由度空间、约束空间的构建过程，给出了并联柔顺机构刚度矩阵的推导过程，并对柔顺机构的各向同性度、力灵敏度等性能指标进行了分析。基于热弹性理论，建立了并联柔顺机构热平衡方程，求解出力等效节点热载荷和力矩等效节点热载荷。分别对圆柱形柔顺单元、正方形柔顺单元和片形柔顺单元建立灵敏度优化模型和各向同性度优化模型，实现了对并联柔顺机构参数的多目标优化。开发出了可视化的多自由度并联柔顺机构设计软件，介绍了3个模块的主要功能和操作，并用此软件设计出三自由度的并联柔顺机构样机。

(2) 详细介绍了圆弧曲梁柔顺单元的刚度矩阵解析解，利用等几何方法对曲梁柔顺单元进行静力学和动力学分析，给出了平面任意曲梁模型的力学方程，建立了以NURBS曲线基函数为形函数的平面任意曲梁等几何模型。应用等几何方法对建立的曲梁模型进行受力分析，将结果与ANSYS仿真结果进行了对比，验证了等几何分析所推导的曲梁刚度矩阵和质量矩阵的正确性和高效性。设计了曲梁平面柔顺机构和曲梁-直梁结合的平面柔顺机构，应用等几何方法对机构进行了分析，为后续任意曲梁柔顺机构的设计、分析与优化提供了思路。

(3) 应用自由度约束拓扑理论设计了用于三维椭圆振动车削装置的柔顺机构,对柔顺机构进行了动力学分析,分析了柔顺机构的空间椭圆输出轨迹,满足其设计要求。对三维椭圆振动车削装置进行了刀位计算、底盘设计、转塔设计以及驱动机构设计。用新型 EVC 装置加工 Q235 试样,得到的工件外圆表面粗糙度比普通车削的外圆表面低 65.2% 左右,车削痕迹更细,证实了该柔顺机构应用于三维椭圆振动切削装置的可行性。

(4) 应用圆弧曲梁柔顺单元综合了曲梁柔顺机构,对其进行了静力学和动力学分析,获得了其整体刚度矩阵、固有频率和振型等性能指标。将该机构应用于三维椭圆振动切削装置,仿真获得的刀尖输出位移为空间椭圆,验证了曲梁柔顺机构应用于三维椭圆振动切削装置的可行性。

本书是作者和几届硕士研究生的成果,参与相关项目的硕士研究生徐剑、孔晰、熊文康、肖聪、邓旭彪、刘从扬、王鹏飞和王凯旋等都为本书的成稿提供了重要材料,在此表示衷心感谢!由于作者水平有限及经验的欠缺,书中不当之处在所难免,还请各位专家学者批评指正!

林 盛

2019 年 6 月 12 日

目 录

1 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 柔顺机构构型方法	1
1.2.1 基于伪刚体模型的柔顺机构	1
1.2.2 基于拓扑优化法的柔顺机构	3
1.2.3 基于自由度约束互补拓扑法的柔顺机构	5
1.2.4 基于平面圆弧曲梁的柔顺机构	6
1.3 椭圆振动切削装置研究现状	8
2 空间直梁柔顺机构综合方法	15
2.1 螺旋理论基础	15
2.2 运动螺旋和力螺旋	15
2.3 并联柔顺机构刚度矩阵	17
2.3.1 并联柔顺机构柔顺单元的刚度矩阵	17
2.3.2 并联柔顺机构的整体刚度矩阵	21
2.4 性能与温度约束条件下的柔顺机构参数优化	21
2.4.1 误差分析	21
2.4.2 柔顺机构各向同性度	24
2.4.3 柔顺机构灵敏度	25
2.5 并联柔顺机构热固耦合分析	26
2.5.1 并联柔顺机构热平衡方程	26
2.5.2 等效节点热载荷求解	28
2.6 并联柔顺机构多目标优化设计	28
2.6.1 多目标优化问题描述	29
2.6.2 多目标优化求解方法	29
2.6.3 空间并联柔顺机构性能指标优化模型	30
2.7 并联柔顺机构可视化软件	31
2.8 并联柔顺机构样机设计	33

2.9	本章小结	36
3	基于平面曲梁柔顺单元的柔顺机构	37
3.1	圆弧曲梁静力学分析	37
3.1.1	圆弧曲梁的局部坐标系与流动坐标系	37
3.1.2	局部坐标系下的内力向量	38
3.1.3	圆弧曲梁柔顺单元的刚度矩阵	40
3.2	B样条与NURBS	42
3.2.1	B样条基函数的定义及性质	42
3.2.2	B样条基函数的导数	43
3.2.3	B样条曲线的定义及性质	44
3.2.4	NURBS曲线的定义及性质	44
3.3	等几何分析过程	46
3.3.1	等参变换	46
3.3.2	网格细化	46
3.4	曲梁的基本力学方程	48
3.5	曲梁柔顺单元的等几何分析	49
3.6	实例分析	52
3.6.1	平面任意圆弧曲梁静力学分析	52
3.6.2	四分之一圆弧曲梁静力学分析	54
3.6.3	两段圆弧组合曲梁静力学分析	57
3.7	平面曲梁柔顺机构的构型设计与分析	59
3.7.1	平面曲梁柔顺机构静力学等几何分析	61
3.7.2	平面曲梁柔顺机构静力学有限元分析	61
3.7.3	平面曲梁柔顺机构的动力学分析	63
3.8	基于等几何分析的平面曲梁柔顺机构的参数优化	64
3.9	直梁与曲梁混合单元柔顺机构的设计与分析	67
3.10	本章小结	68
4	基于直梁柔顺机构的三维椭圆振动车削装置	69
4.1	新型三维椭圆振动切削装置的工作台设计	69
4.2	柔顺机构的三维模型	70
4.3	柔顺机构的刚度矩阵	71
4.3.1	柔顺机构的模态分析	72
4.3.2	柔顺机构的空间椭圆输出轨迹分析	74

4.3.3 新型 EVC 装置的工作台设计	76
4.3.4 新型 EVC 装置的刀位计算	78
4.3.5 新型 EVC 装置的底座设计	80
4.3.6 新型 EVC 装置的转塔设计	81
4.4 新型 EVC 装置的驱动机构设计	83
4.4.1 驱动元件的选择	83
4.4.2 驱动元件的预紧机构设计	84
4.5 加工装配	85
4.6 车削实验	86
4.7 加工试样实验效果对比	86
4.7.1 实验过程	86
4.7.2 新型 EVC 装置加工工件外圆表面	87
4.8 本章小结	91
5 基于曲梁柔顺机构的椭圆振动切削装置设计	92
5.1 曲梁柔顺机构的设计	92
5.2 曲梁柔顺机构刚度矩阵	92
5.3 曲梁微位移工作台的有限元分析	94
5.3.1 曲梁微位移工作台的静力学分析	94
5.3.2 曲梁微位移工作台的动力学分析	95
5.4 三维椭圆振动轨迹分析	97
5.5 本章小结	98
参考文献	99

1 绪 论

1.1 引言

柔顺机构是一种利用柔顺单元的弹性变形来实现传递和转换运动、力或能量的新型机构^[1]。因其用柔顺单元代替运动副，减少了传统机构中的间隙、润滑、摩擦磨损等问题，提高了机构的精度和可靠性。因此，柔顺机构在精密制造、生物工程显微操作、航空航天、机器人和仿生机械等领域得到了广泛的应用。

柔顺机构在精密制造中的一个重要应用为椭圆振动辅助切削装置。在现有的机床上添加以柔顺机构为刀具载体的三维椭圆振动切削装置，可显著提高切削质量，降低切削力。现有的三维椭圆振动切削装置的设计多数靠经验，因此种类不多。作者在两项国家自然科学基金中分别研究了直梁柔顺机构和曲梁柔顺机构的综合方法，若能将其成功应用于三维椭圆振动切削装置的设计，将大量增加三维椭圆振动切削装置的种类，并提高其各项性能指标。

1.2 柔顺机构构型方法

鉴于柔顺机构在精密工程、仿生机械、生物医疗以及航空航天等领域中占有极为重要的地位，国内外学者针对柔顺机构的综合方法和设计理论展开了大量的研究，并取得了丰硕的成果。根据其综合方法可分为：基于伪刚体模型的柔顺机构、基于拓扑方法的柔顺机构、基于自由度约束拓扑的柔顺机构和基于平面圆弧曲梁的柔顺机构。

1.2.1 基于伪刚体模型的柔顺机构

美国 Brigham Young 大学的 Howell^[2] 研究小组首先提出了伪刚体模型，基本思想是将已存在的刚性机构中的运动副替换成柔性铰链，从而可以应用传统机构学理论对该柔顺机构进行建模与分析，如图 1-1 所示。Venkiteswaran^[3] 提出了一种 3 弹簧伪刚体模型，用于设计和分析受伸长率影响的软铰链，不仅可以预测大变形梁的位置和方向，还考虑了软铰链的轴向变形。Liu^[4] 提出了考虑中心转移和载荷刚化非线性影响的修正伪刚体模型，并依据此模型设计出更精确的双并联导向机构。Jin^[5] 将拓扑优化与伪刚体法相结合，提出基于伪刚体模型的拓扑优化方法，并应用该方法设计出简单铰链型柔顺机构。余跃庆^[6] 提出了单拐点大变形梁柔顺机构的伪刚体模型，模拟带拐点柔顺梁，扩展了伪刚体模型的应用范

围。于靖军^[7]对具有集中柔度的全柔顺机构进行了较为系统的研究，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。Gao^[8]基于刚性机构拓扑3-UPU设计了一种用于三自由度加速度传感器的三平动空间柔顺机构，如图1-2a所示。梁济民^[9]基于伪刚体模型设计了一种六自由度空间柔顺机构，并结合有限元的方法对初始设计平台的关键参数进行尺寸优化，得到优化的六自由度柔顺平台，如图1-2b所示。

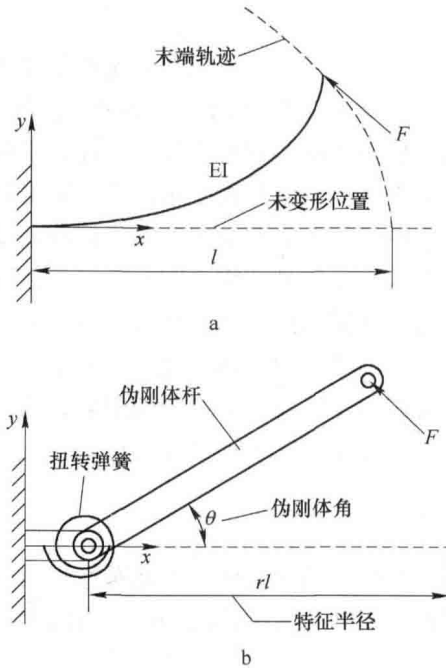
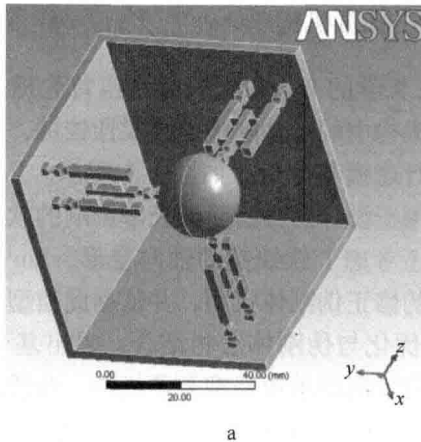


图 1-1 柔性悬臂梁和伪刚体模型
a—自由端受力的悬臂梁；b—伪刚体模型



a

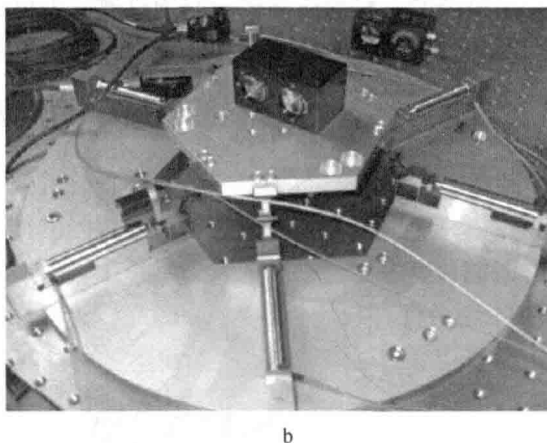


图 1-2 空间柔顺机构

a—三自由度加速度传感器；b—六自由度空间柔顺机构

伪刚体模型继承了现有刚性机构丰富的机构拓扑，同时也继承了其未考虑拓扑性能差别的缺点，不能为具体的设计问题选择出最优拓扑。另外，柔顺机构的结构特性决定了它不能完全移植刚性机构的构型，例如伪刚体法只考虑机构的运动，没有把力与变形统一考虑，造成设计结果不理想。

1.2.2 基于拓扑优化法的柔顺机构

拓扑优化法无须参考现有的刚性机构，直接根据设计问题在设计域内得到柔顺机构最优的拓扑、形状和尺寸，是融合了构型综合与尺度综合的系统化概念设计方法。基本思想是在一块给定的设计域内寻求材料的最佳分布以达到某种性能最优。Ananthasuresh^[10]首次将结构力学中的拓扑优化方法应用于柔顺机构的设计，实现了柔顺机构的构型综合与尺度综合的统一。Jin^[11]提出了一种用于平面并联柔顺机构的新拓扑优化方法，将柔顺机构的分支看成拓扑优化中的分离设计域，该方法可用于发现具有复杂运动学行为的优化拓扑。Gaynor^[12]提出了三相多材料柔顺机构设计与制造方法，通过多相固体各向同性惩罚模型设计出可制造的多材料拓扑柔顺机构。Cao^[13]提出了使用柔顺铰链单元和梁单元的混合网格作为设计域的柔顺机构拓扑优化方法，可对柔顺机构中的梁和铰链的位置和尺寸做合理的优化。Huang^[14]提出了具有期望刚度柔顺机构的拓扑优化方法，通过控制期望结构刚度优化柔顺机构的柔性，如图 1-3 所示。Guo^[15]将传统的机构综合与拓扑优化相结合设计柔顺机构，先采用拓扑优化技术优化柔顺铰链或柔顺单元，再应用传统机构综合法根据优化的柔顺单元或柔顺铰链设计出柔顺机构，如图 1-4 所示。张宪民^[16]对热驱动柔顺机构设计进行了研究，提出了相应的基于并行策

略的求解模型，将一个复杂的多材料热固耦合问题离散成为单材料热固耦合子问题，然后对这些子问题并行求解，为热载荷与外力同时作用下多输入柔顺机构设计提供了新思路。

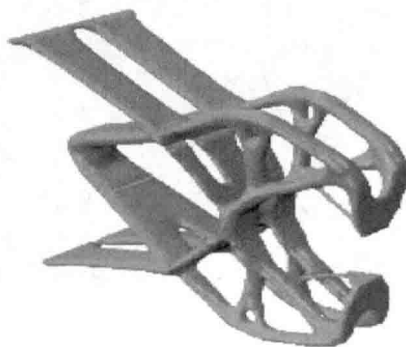


图 1-3 具有期望刚度柔顺机构

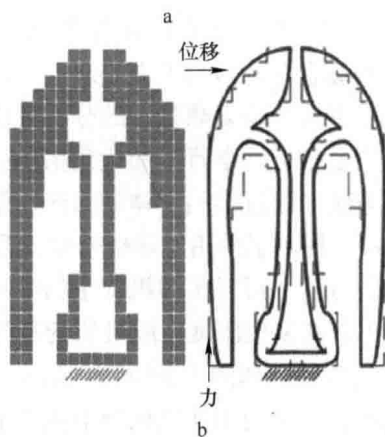
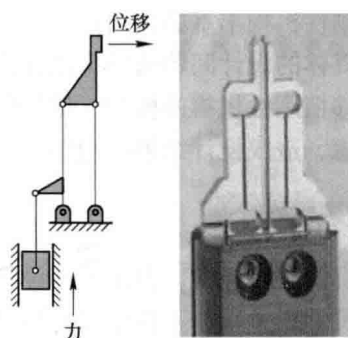


图 1-4 拓扑优化与机构综合相结合的柔顺机构
a—传统机构；b—柔顺机构

通过以上分析可知,拓扑优化方法可系统化地对机构拓扑进行优选,但该方法目前只能设计运动相对简单的柔顺机构,还无法将其应用于运动复杂的空间柔顺机构。

1.2.3 基于自由度约束互补拓扑法的柔顺机构

自由度约束互补拓扑法(FACT方法)是麻省理工学院 Hopkins^[17]提出的可用于设计空间柔顺机构的机构综合方法,FACT方法是在拓扑层面完成构型综合,无须参考现有的刚性机构即可从设计问题综合出所有可能的构型,且方法简单直观易上手。Hopkins^[18]基于FACT方法综合了不同自由度的串并联柔顺机构,图1-5a为其中的一种四自由度空间柔顺机构。Hopkins^[19]还将FACT方法应用于软

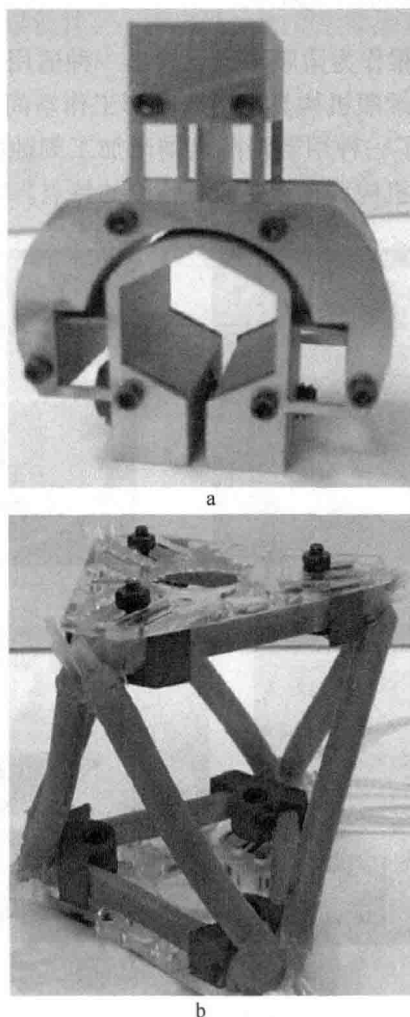


图1-5 基于FACT法设计的柔顺机构

a—FACT法设计的并联柔顺机构; b—FACT法设计的软体机器人

体机器人的设计, 扩展了其应用领域, 如图 1-5b 所示。Su 等^[20]结合螺旋理论从数学上对 FACT 方法进行了深入量化剖析, 使得 FACT 方法更加系统和完整。Yu 等^[21]在 FACT 方法的基础上提出了一种可通用于柔顺机构和刚性机构的综合方法, 该方法结合螺旋理论和模块化方法, 实现了柔顺机构和柔性铰链的构型综合。

虽然自由度约束互补拓扑方法简单方便, 并扩展到多种场合, 但该方法只考虑了柔顺结构末端刚体上的自由度, 并未考虑机构的其他期望性能, 且未考虑大变形产生的几何非线性, 只限于小变形情况的应用。

1.2.4 基于平面圆弧曲梁的柔顺机构

Telleria^[22]以圆弧曲梁作为柔顺单元设计出一种适用于圆柱形空间的柔顺机构, 如图 1-6a 所示。该柔顺机构具有适合圆形工作空间、稳定性高、结构紧凑等优点。Matloff^[23]设计了一种用于浸蘸笔纳米加工刻蚀的四杆圆弧曲梁柔顺机构, 如图 1-6b 所示。该机构具有大变形高精度的特点。Berselli^[24]比较了直梁和

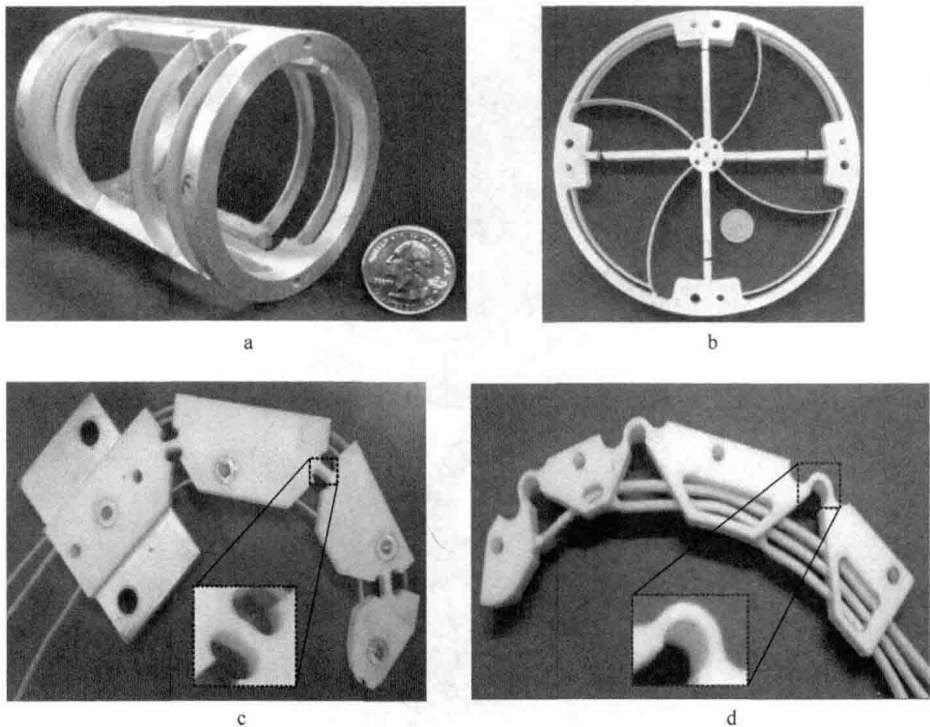


图 1-6 柔顺机构

a—圆柱工作空间的柔顺机构; b—四杆圆弧曲梁柔顺机构;
c—直梁机器人手指柔顺关节; d—曲梁机器人手指柔顺关节

曲梁应用于机器人手指关节的优缺点，曲梁因其变形大可使机器人柔性手指具有更大的工作空间，如图 1-6c、d 所示。Rad^[25,26] 通过将圆弧曲梁串联设计了一种三转动球形柔顺机构，如图 1-7a 所示。该柔顺机构为球形工作空间，且相对于直梁三转动柔顺机构，伴随运动明显减少。Venkiteswaran 等^[3] 提出了平面圆弧曲梁的伪刚体模型，并应用该模型设计了一种圆弧曲梁串联的表面探针，充分利用曲梁应力分布均匀的特点减小最大应力，进而减小疲劳的影响，如图 1-7b 所示。Venkiteswaran 还应用该模型验证了 Cappelleri^[27] 设计的基于圆弧曲梁的微力传感器，如图 1-7c 所示，该方法相对于有限元方法还有一定的误差。Wang^[28] 提出了一种波纹悬臂梁模型，并应用波纹悬臂梁设计了一种大转角高机械强度的柔顺铰链。孙炜^[29] 应用圆弧曲梁设计了一种多簧片大变形柔顺虎克铰，并应用该虎克

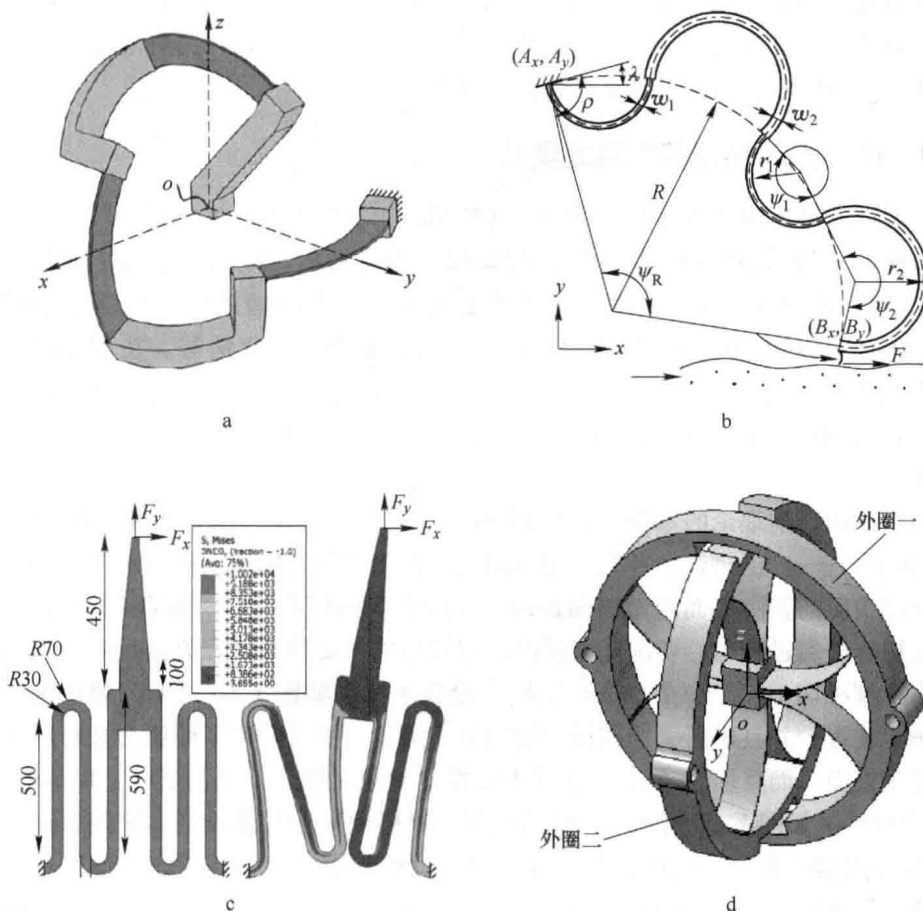


图 1-7 曲梁柔顺机构

- a—曲梁球形柔顺机构；b—圆弧曲梁串联的表面探针；
c—基于曲梁的微力传感器；d—基于曲梁的大变形虎克铰

较设计了一种大工作空间的并联柔顺机构,如图 1-7d 所示。李庚^[30]提出了一种空间大挠度梁非线性变形支配微分方程组及其求解方法,具有较高的效率和精度以及比较好的收敛性,为研究曲梁大变形非线性问题提供了重要参考。

曲梁柔顺机构在各个领域的应用都展现出蓬勃的生命力,但曲梁柔顺机构的综合方法目前还处于萌芽阶段,尤其是空间任意形状曲梁作为柔顺单元的柔顺机构还未见相关报道。然而,Zhang^[31]提出了一种基于等几何方法的三维曲梁分析方法,为空间曲梁作为柔顺机构的柔顺单元提供了一定的理论基础。等几何方法^[32]是一种统一几何模型与分析模型的以样条理论为基础的数值计算方法,利用高阶 NURBS 基函数代替传统的拉格朗日基函数,利用精确 CAD 曲线、曲面或实体直接参与计算,实现 CAD 和 CAE 的无缝连接,其求解精度远高于传统有限元。且等几何方法已成功应用于热传导^[33]和振动^[34]等问题,同时等几何方法应用于优化问题具有高效率、高精确性等优点^[35]。

1.3 椭圆振动切削装置研究现状

振动辅助切削是指在刀具切削工件的同时,在刀尖处附加小幅高频振动,从而提高刀具的切削质量。振动切削能够抑制刀具磨损,减小切削力,降低切削热^[36-38],使得加工的工件表面粗糙度更低。由于振动辅助切削能够减小切削力,因此可以用于难加工材料的切削,例如钛合金、氧化锆等。在刀具的刀尖处附加小幅振动,使刀具在切削过程中只有一部分时间参与切削,可以有效地减少积屑瘤的产生,有利于断屑^[39,40],同时可提高工件表面质量,改善加工效果。

在振动切削理论的基础上,Shamoto E. 等人^[41]提出了共振型椭圆振动切削(Oblique Type)的理论,并且利用不同模态振型的组合输出共振运动,刀尖在垂直已加工面的正交平面内做椭圆运动。在一个椭圆周期里,刀具间断参与切削,在与切屑分离过程中,切削速度反向,切屑与前刀面的摩擦力方向反转,大幅度减小了摩擦阻力^[42,43]。Rahman 等人^[44]设计了一种如图 1-8a 所示的超声椭圆振动切削装置,并且进行了椭圆振动辅助加工实验,不仅研究了硬质合金材料的脆塑转变模型,而且研究了 EVC 装置工作性能参数对加工效果的影响。Ehmann 等人^[45]设计了如图 1-8b 所示的一种共振型二维椭圆振动切削装置,该装置利用呈 60° 夹角安装的两个压电换能器直接实现刀具在其法线和切线方向上的高频椭圆振动,但装置生成椭圆的运动参数、振动方向和相位差都是固定不可调的,故其应用的灵活性受到了极大的限制。Tan^[46]提出了一种基于夹层对称结构的超声椭圆振动切削装置,该装置工作模态为纵向振动的第三共振模式和弯曲振动的第六共振模式,优化后的装置在超精密机床上应用取得了良好的效果。

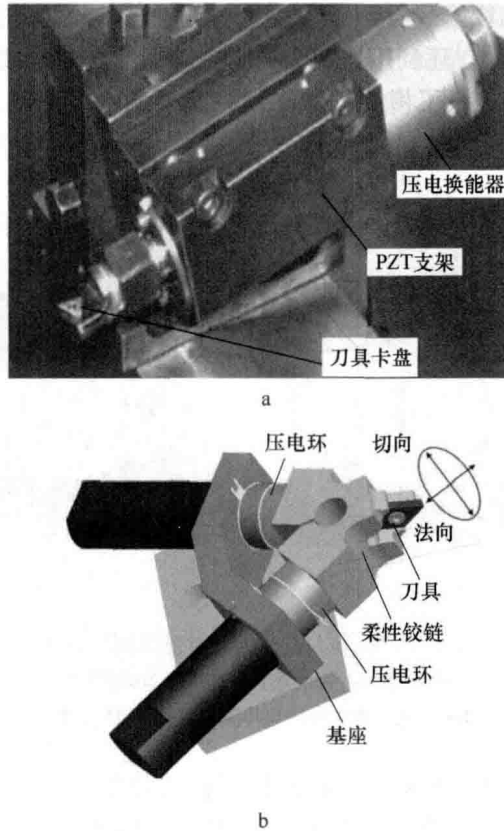


图 1-8 共振型二维椭圆振动切削装置

a—超声椭圆振动切削装置；b—共振型二维椭圆振动切削装置

上述的共振型椭圆振动切削装置普遍存在如下两个方面的局限性：（1）工作频率固定、椭圆运动参数不可调、需强制散热、闭环控制难和运动精度差等缺陷；（2）共振型 EVC 装置的设计严重依赖于变幅杆或振动杆的动力学特性，设计过程存在一定的偶然性，且其设计方法的通用性不强，整体的设计难度较大^[47]。

为了克服共振型 EVC 装置存在的不足，研究人员致力于非共振 EVC 装置的研制，例如 Kim G. D. 等人^[48,49]先后设计了两种非共振型的 EVC 装置，如图 1-9 所示。其中，图 1-9a 将两个压电叠堆并联组成一个非共振椭圆振动切削装置，安装单晶金刚石刀具，对铝、黄铜等韧性材料进行微沟槽切削试验，发现切削力明显降低，加工边界处的毛边明显得到抑制。图 1-9b 为压电叠堆正交组合的非共振椭圆振动切削装置，该装置通过改变幅值和相位来改变椭圆轨迹，获得了表