

3-UPU 柔顺并联机构构型拓扑优化设计与实验测试

焦凡苇, 梁海龙

(中北大学朔州校区 能源与机械工程管理部, 朔州 036000)

摘要: **目的** 为了设计出具有 x , y 和 z 方向纯平动的微纳级精密定位装置。**方法** 首先, 运用旋量与逆螺旋理论验证所设计的传统 3-UPU 并联机构运动特性; 采用封闭矢量映射原理构建 3-UPU 并联机构的微分 Jacobian, 实现各关节与动平台的空间映射关系。然后, 定义优化问题的目标函数为结构刚度, 约束函数为体积比, 运动特性条件为微分 Jacobian 构造 3-UPU 柔顺并联机构的 SIMP 模型, 并运用优化算法计算。最后, 基于 Osmooth 对优化构型进行 CAD 模型的提取, 完成运动特性的力学仿真分析, 此外, 通过 3D 打印制造处理后的 CAD 模型, 并完成运动特性的实验测试。**结果** 仿真可得, 优化后的构型柔度值从 58.324 mm/N 下降到 25.993 mm/N; 一阶固有频率从 964.64 Hz 提高到 1362.26 Hz; 沿 x , y 和 z 方向的微运动特性分别达到 2.488, 6.512, 9.185 μm ; 3-UPU 柔顺并联机构优化构型的微运动特性与理论解处于同一微米级, 并运用实验测试进行了验证。**结论** 拓扑优化设计的构型具有微米级运动特性和微米定位精度, 实验测试结果验证了该优化技术的可行性。

关键词: 旋量与逆螺旋理论; 微分 Jacobian 矩阵; 拓扑优化技术; 实验测试

中图分类号: TB486; TH12 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)05-0187-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.05.026

Topology Optimization Design and Experimental Test of 3-UPU Compliant Parallel Mechanism

JIAO Fan-wei, LIANG Hai-long

(Department of Energy and Mechanical Engineering Management, Shuozhou Campus of the North University of China, Shuozhou 036000, China)

ABSTRACT: The work aims to design a micro-nano precision positioning device with pure translational motion along x , y and z direction. Firstly, the screw and reciprocal screw theory were used to verify the kinetic characteristic of the designed traditional 3-UPU parallel mechanism. The closed vector mapping principle was adopted to construct the differential Jacobian of 3-UPU parallel mechanism to realize the spatial mapping relation between the joints and the moving platform. Then, the objective function used to optimize problem was defined as structural stiffness and constraint function as the volume ratio. The kinetic characteristic condition was the SIMP model of 3-UPU compliant parallel mechanism built by differential Jacobian and solved by optimization algorithm. Finally, the CAD model was extracted for optimized configuration based on Osmooth, and the mechanical simulation analysis of the kinetic characteristics was completed. Furthermore, the processed CAD model was produced by 3D printing, and the experimental test of kinetic characteristics was completed. Through simulation, the compliance value of the optimized configuration declined from 58.324 mm/N to 25.993 mm/N, the first order natural frequency increased from 964.64 Hz to 1362.26 Hz, the micro kinetic characteristics

收稿日期: 2018-10-29

作者简介: 焦凡苇 (1998—), 女, 中北大学本科生, 主攻机械设计、机器人学。

通信作者: 梁海龙 (1987—), 男, 中北大学讲师, 主要研究方向为机械结构优化设计。

along x , y and z direction reached 2.488, 6.512 and 9.185 μm respectively and the micro kinetic characteristics of the optimal configuration of 3-UPU compliant parallel mechanism was at the same micron level as the theoretical solution, which was verified by experimental test. Configuration of the topological optimization design has micron kinetic characteristics and micron positioning accuracy, and the feasibility of the optimization technique is verified by the experimental results.

KEY WORDS: wrench and reciprocal screw theory; differential Jacobian matrix; topology optimization technology; experimental test

随着科学技术和工业制造水平的提高,设计人员对产品制造精度的要求也大大地提升。目前,精密制造已成为机械制造领域中的研究热点之一,作为精密设备的承载机构被广泛应用于航空技术、微电子操作系统、车辆工程和微创医疗器械等高精尖端技术领域。与一般性支撑机构相比,并联机构因承载能力强、工作空间小、操作末端无累计误差和定位精度高等优点,已在高精度领域中被作为主要的支撑机构,也在机构领域中成为重要的研究热点之一^[1-2]。药物自动化包装生产线上,为了精准地捕捉药物在输送带上的位置状态,常需高精度的定位机构作为工业相机的载体。基于传统设计方法的相机支撑定位平台因精度不高和易抖动现象,常出现较大的反馈信息误差,导致后续需一定的成本进行误差纠正。文中主要以传统的3-UPU 并联机构为研究对象,基于优化技术设计出一款具有较高刚度和抗振动能力的集成式3-UPU 柔顺并联机构,使该构型不仅具备良好的力学性能,还具有微分级别的定位精度。

近些年,相关学者对空间型并联机构的构型设计已取得一定的成果,如李仕华等^[3]为综合更多具有连续转轴的并联机构新构型,提出了一种构型综合设计法,设计出具有连续转轴2R1T型的并联机构。李坤全等^[4]依据空间3-DOF 并联机构,采用“铰链替换法”设计出一种柔顺型并联机构,同时还运用“型综合法”得到了一种集成式的柔顺型并联机构。

目前,基于传统方法设计的柔顺并联机构,常存在配合空隙和振动干扰等缺陷。“伪刚体模型”常作为柔顺并联机构构型设计的常用方法^[5-6],也存在蠕变、回程反力、易振动和应力松弛等缺点。上述2种方法设计的柔顺并联机构,各自的缺陷导致对机构的定位精度影响较大,因此亟待设计出一种具有结构性性能优良的并联机构。

文中为了设计出一种具有纯平移的精密定位并联机构,首先,基于机器人相关理论构造UPU支链和3-UPU 并联机构的配置,采用空间旋量和逆螺旋等理论研究和验证该机构的运动性能。基于封闭矢量映射原理对3-UPU 并联机构微动的Jacobian进行推导,定义为优化问题的运动条件。其次,引入拓扑优化技术设计出具有最佳构型的3-UPU 柔顺并联机构,并对构型加工制造和实验测试,验证优化技术应

用的可行性。

1 3-UPU 并联机构运动学分析

文中以某企业药物包装设备为研究对象,因包装过程中对于相机的图像采集要求极高,见图1,以具有微纳米级的定位机构作为相机的载体已被作为研究对象。

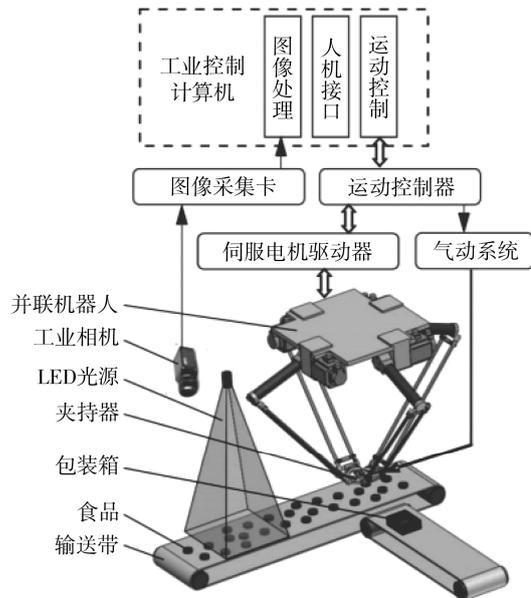


图1 基于并联机构的相机定位装置
Fig.1 Camera positioning device based on parallel mechanism

1.1 UPU 支链的选取

为了提高系统仅沿 x , y 和 z 方向的定位精度,基于支链构造法对支链构型的综合可得沿某一方向平动的支链拓扑形式,见图2。

1.2 3-UPU 并联机构构型

基于第1.1节的配置,可构建出3-UPU 并联机构。它由定、动平台 $U_1U_2U_3$ 和 $V_1V_2V_3$ 及链接两平台的UPU 三支链构造而成,即由虎克副、移动副和虎克副装配联接而成,见图3。

由图3可得,3-UPU 并联机构定、动平台是正三角形,给定内接圆半径 $R=100\text{ mm}$ 与 $r=50\text{ mm}$ 。全局坐标系 $O-XYZ$ 原点 O 依附于定平台中心,动坐标系

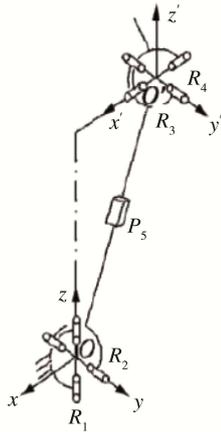


图 2 3-UPU 支链拓扑形式
Fig.2 Topological form of 3-UPU chain

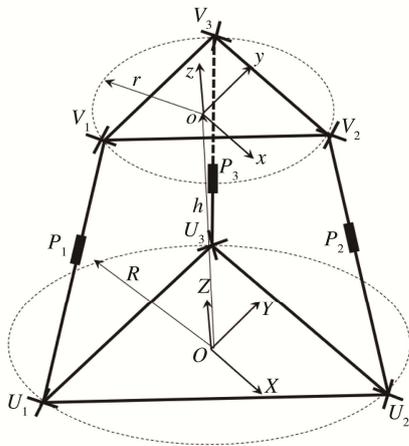


图 3 3-UPU 并联机构
Fig.3 3-UPU parallel mechanism

o - xyz 原点 o 依附于动平台中心。假设该机构初始位置是两平台平行且动平台中心处定平台中心正上方 50 mm，即点 o 初始坐标 $h=(0\ 0\ 50)$ 。

1.3 基于空间旋量的 UPU 支链运动特性

对于机构运动学相关问题，由 R.S.Ball^[7] 在 1900 年最早提出了空间螺旋原理，并成功解释了机构运动学的非线性问题。从图 2 可得，3-UPU 并联机构的 3 条支链均为 UPU 型，即分别按虎克副、移动副和虎克副装配而成。运用运动螺旋表示 UPU 支链的运行螺旋系，见图 4。

图 4 中，坐标系 O - XYZ 是以虎克副 U_1 的第 1 转动轴为 X 轴，另一个转动副轴与支链移动副方向与水平面呈 α 度。则支链的运动螺旋方程组为：

$$\begin{aligned} \mathcal{S}^{11} &= (1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0) ; \\ \mathcal{S}^{12} &= (0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0) ; \\ \mathcal{S}^{13} &= (0\ 0\ 0\ 0\ \cos[\alpha]\ \sin[\alpha]) ; \\ \mathcal{S}^{14} &= (0\ 1\ 0\ -1\ 0\ 0) ; \\ \mathcal{S}^{15} &= (1\ 0\ 0\ 0\ \sin[\alpha]\ -\cos[\alpha]) \end{aligned}$$

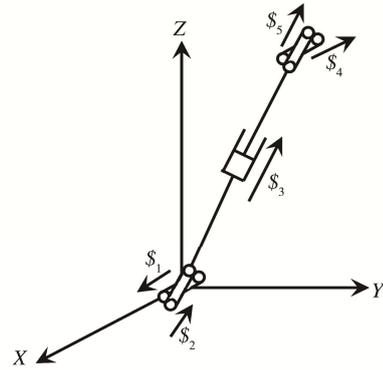


图 4 支链 UPU 的运动螺旋
Fig.4 Kinetic screw of UPU chain

依据螺旋理论，支链运动螺旋的互异积所得运动副的约束情况，结合 UPU 支链旋量系，运用反螺旋理论求得支链的逆螺旋：

$$\mathcal{S}^r = (0\ 0\ 0\ a\ b\ c)$$

依据 UPU 支链逆螺旋 \mathcal{S}^r 得到，每条支链均约束了动平台的一个沿支链方向的力偶，结合高等空间机构学的螺旋最大无关数等理论^[8]，约束了动平台绕三轴向的转动，从而使 3-UPU 并联机构仅可沿 X ， Y ， Z 方向进行移动，实现了纯平移特性。

2 基于空间封闭映射的微分雅各比矩阵

2.1 3-UPU 并联机构微分 Jacobian 矩阵

对于多输入-输出的少自由度并联机构，构造的运动问题常为非线性超越方程组，基于旋量原理的传统方法求得动平台的定位精度较差，输入输出的误差较大。为了克服上述困难，文中引入了适用于多输入多输出的运动学问题的微分位移法^[9]。对此，通过 3-UPU 并联机构的两平台间封闭矢量映射原理分析，可得：

$$\overline{Oo} + \overline{oV_i} = \overline{OU_i} + \overline{U_iV_i} \quad (1)$$

式中： i 为支链数，即 $i=1,2,3$ 。对等式 (1) 两边微分可得：

$$v_o = \dot{l}_i \cdot s_i + l_i \omega_i \times s_i \quad (2)$$

式中： v_o 为动平台中心的线速度； ω_i 为支链的角速度； s_i 为驱动副螺旋方向的单位矢量。对式 (2) 两边点乘 s_i 可得：

$$v_o \cdot s_i = \dot{l}_i \quad (3)$$

可得：

$$J_x \cdot \dot{x} = J_l \cdot \dot{l}_i \quad (4)$$

式中：明显可得 $J_x = [s_1\ s_2\ s_3]$ ， $J_l = I$ ， I 为 3×3 的单位阵。可得：

$$\dot{x} = J \cdot \dot{l}_i \quad (5)$$

式中： $J = J_i^{-1} J_x$ 为 Jacobian 矩阵，表示为动平台与各关节间映射关系。

依据第 1.3 节分析的 3-UPU 并联机构仅实现沿着 x, y, z 方向的纯平动，即当驱动器促使移动副产生微小的移动量 $\Delta l_1, \Delta l_2$ 和 Δl_3 ，使动平台分别产生沿 x, y, z 方向的微位移 dx, dy, dz 。采用旋量理论的 Jacobian 构建法，可得：

$$\begin{pmatrix} \Delta l_1 \\ \Delta l_2 \\ \Delta l_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{(R-r)}{h} & 0 & \sin \varphi_1 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}(R-r)}{2h} & \sin \varphi_2 \\ \frac{(R-r)}{2h} & \frac{\sqrt{3}(r-R)}{2h} & \sin \varphi_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中：记为 $[\Delta l_i]^T = J^{-1} \cdot [dx \ dy \ dz]^T$ ，得 3-UPU 并联机构关于输入到输出连续映射 Jacobian。

2.2 理论计算值

基于封闭矢量映射原理构建 3-UPU 并联机构微分 Jacobian，假设某时态下该构型位姿条件： $\varphi_1=60^\circ, \varphi_2=30^\circ, \varphi_3=15^\circ, h=50 \text{ mm}$ ，依据式 (6) 可以解得 Jacobian 的逆为：

$$J^{-1} = \begin{pmatrix} 1.0000 & 0 & 0.8660 \\ 0 & 0.8660 & 0.5000 \\ 0.5000 & -0.8660 & 0.2588 \end{pmatrix}$$

从而可求得其微分 Jacobian：

$$J = \begin{pmatrix} 2.3290 & -2.6581 & -2.6581 \\ 0.8861 & -0.6174 & -1.7722 \\ -1.5347 & 3.0694 & 3.0694 \end{pmatrix}$$

采用压电陶瓷作为 3-UPU 并联机构的驱动装置，驱动力作用下输入端的微位移为 $(\Delta l_1 \ \Delta l_2 \ \Delta l_3)^T = (0.002 \ 0.002 \ 0.002)^T$ ，根据 $(dx \ dy \ dz)^T = J \cdot (\Delta l_1 \ \Delta l_2 \ \Delta l_3)^T$ 可得到动平台沿 X, Y 和 Z 轴的微位移为：

$$\begin{pmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -3.3064 \times 10^{-3} \\ -1.2284 \times 10^{-3} \\ 1.1320 \times 10^{-3} \end{pmatrix}$$

3 基于优化技术的 3-UPU 并联机构构型设计

3.1 3-UPU 并联机构有限元前处理

综上所述，可得 3-UPU 并联机构以定平台为基体，以 3 条支链的驱动移动副作为输入，以动平台中心在基坐标系中的空间位置为输出，确定其优化问题中的工况

条件，见图 5。图 5 中，驱动力由压电陶瓷提供，大小为 $F_k=1000 \text{ N}, k=1,2,3$ ，并设置压电陶瓷在该驱动下对 3 条支链输入端产生的位移均为 0.002 mm 。它与定平台的约束作为优化问题的工况条件。

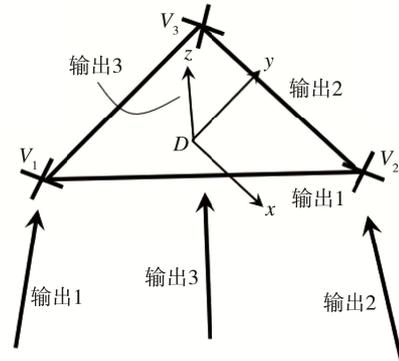


图 5 3-UPU 并联机构工况条件
Fig.5 Loadstep of 3-UPU parallel mechanism

基于 Hypermesh 划分 3-UPU 柔顺并联机构单元网格模型，见图 6。从图 6 中可得，3-UPU 柔顺并联机构有设计与非设计区域之分，在优化过程中非设计区域不参与优化计算。

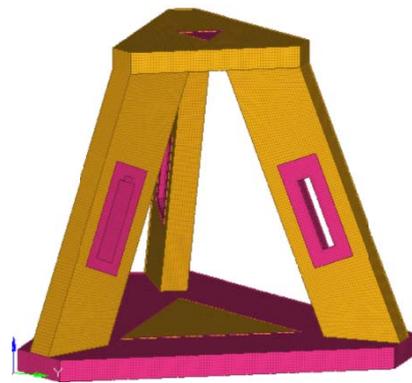


图 6 3-UPU 柔顺并联机构有限元模型
Fig.6 Finite element model of 3-UPU compliant parallel mechanism

依据柔顺机构的材料使用准则^[10]，文中对于 3-UPU 柔顺并联机构所采用的材料为经过特殊热处理后的钢，其材料属性相关参数见表 1。

表 1 3-UPU 柔顺并联机构材料属性
Tab.1 Material property of 3-UPU compliant parallel mechanism

材料	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(g·cm ⁻³)
钢	207	0.3	7.85

3.2 3-UPU 柔顺并联机构优化模型

对于优化技术的 3-UPU 柔顺并联机构，构建合理的结构优化模型是解决优化问题的关键，文中主要运用固体各向同性材料惩罚法 (SIMP)。SIMP 模

型主要将结构的有限单元作为人工材料密度并引入惩罚因子 p ，与材料的弹性模量构建显性非线性的函数关系^[11-12]。SIMP 模型运用惩罚系数 p ，使优化结果能有效地对中间型材料密度二值化处理，即材料中间密度所依附的单元将向 0（无材料）或 1（有材料）聚集。

文中引入拓扑优化技术^[13-16]，其目标函数定义为结构刚度，约束函数定义为材料体积比，运动特性定义为微分 Jacobian 构造 3-UPU 柔顺并联机构 SIMP 模型：

$$\begin{cases} \min C = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \tilde{U}_j^T K U_i = \sum_{e=1}^N \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \tilde{U}_{ej}^T \rho_e^p K_e U_{ei} \\ \text{条件 } K \tilde{U}_j = F_j, K U_i = F_i, F_j = J_D F_i \quad i=1,2,3, j=1,2,3 \\ \int_{\Omega} \rho_e d\Omega \leq V \quad 0 < \rho_{\min} \leq \rho_e \leq 1 \quad e=1,2,\dots,N \end{cases} \quad (6)$$

式中： \tilde{U} 为伴随位移矢量； K 为整体刚度矩阵； U 为实际载荷下的位移； V 为优化后的体积； F_i 为第 i 个实际载荷； U_{ei} 为第 i 个实际载荷下的单元位移向量； F_j 为第 j 个虚载荷； \tilde{U}_{ej} 为第 j 个虚载荷下的单元位移向量； K_e 为单元刚度矩阵； ρ_e 为单元密度； p 为惩罚因子，取值范围为：

$$p \geq \max \left\{ \frac{2}{1-\nu^0}, \frac{4}{1+\nu^0} \right\} \quad (7)$$

3.3 拓扑优化结果

依据式（6）的 SIMP 优化模型，运用 OptiStruct 进行优计算。通过 16 步计算，可得符合设计要求的 3-UPU 柔顺并联机构概念性构型和迭代步与目标函数关联的曲线，见图 7 和图 8。

对于图 7 中的 3-UPU 柔顺并联机构概念性最佳构型，设计区域内保留的材料即为压电陶瓷驱动力作用下，从输入到输出的应力传递路径。图 8 中的优化迭代曲线，柔度优化目标随着迭代步的增加而趋于平缓，表明该优化问题的收敛可行性。

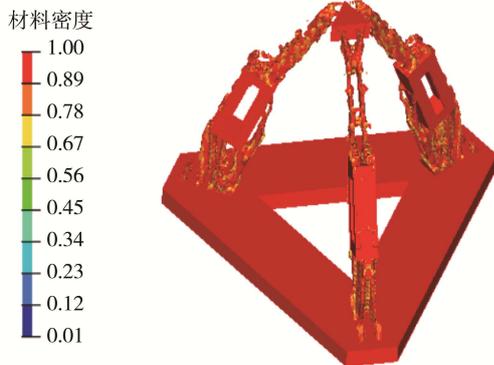


图 7 3-UPU 柔顺并联机构优化结果
Fig.7 Optimization result of 3-UPU compliant parallel mechanism

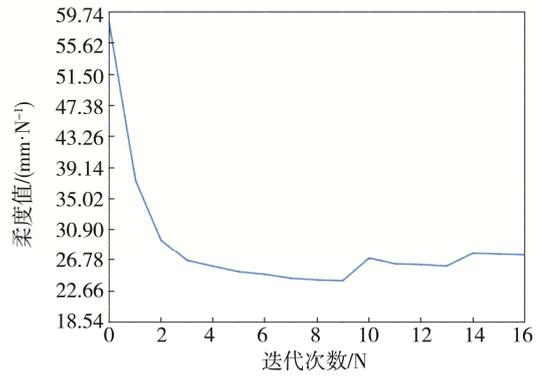


图 8 优化结果的迭代曲线
Fig.8 Iterative curve of the optimized results

4 优化构型的静力学分析

4.1 基于 OSSmooth 的优化模型提取

OSSmooth 是 HyperWorks 将优化结果的有限元模型无缝转换成 CAD 或 CAE 模型的半自动化模块，该模块方便工程师直接对优化结果进行几何形状的修改或二次创建。运用 OSSmooth 提取优化结果的 CAD 模型见图 9，作为参考并采用 SolidWorks 对 CAD 模型进行修整，见图 10。

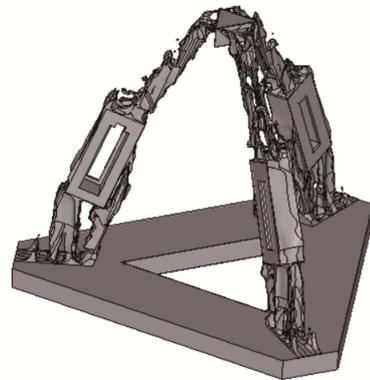


图 9 基于 OSSmooth 提取的 CAD 模型
Fig.9 CAD model extracted by OSSmooth

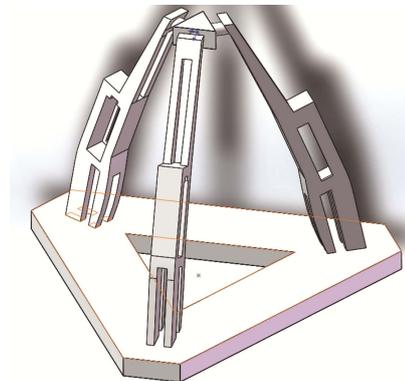


图 10 处理后 3-UPU 柔顺并联机构 CAD 模型
Fig.10 CAD model of 3-UPU compliant parallel mechanism after processing

4.2 优化构型的微运动特性分析

基于 OSSmooth 对 3-UPU 柔顺并联机构优化后的概念模型提取,运用 SolidWorks 详细构建其 CAD 模型,运用 HyperMesh 对优化后详细设计结构进行单元网格划分和前处理,见图 11。

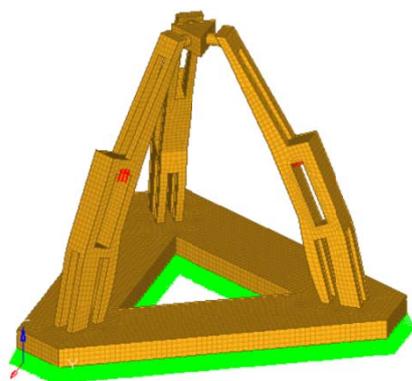


图 11 优化后 3-UPU 柔顺并联机构单元网格模型
Fig.11 Element grid model of 3-UPU compliant parallel mechanism after optimization

依据表 1 所示,作为优化后构型的材料属性,结合第 3.1 节中的工况条件,运用 OptiStruct 进行力学和微运动特性仿真。得到 3-UPU 柔顺并联机构优化后构型的应力等值情况和前二阶的模式振型,见图 12—13;优化前后的力学特性,见表 2。

从图 12, 13 和表 2 可得,光滑处理后的 3-UPU 柔顺并联机构所受应力最大值为 136.2 MPa,远小于材料许用屈服强度。柔度从 58.324 45 mm/N 降到 27.451 11 mm/N,光滑后柔度降到 25.993 25 mm/N;柔度值下降了 55.43%,表明优化后 3-UPU 柔顺并联机构刚度特性明显提升。一阶固有频率由 964.6355 Hz 增大到 1259.269 Hz,光滑后提高为 1362.259 Hz;优化前后的一阶固有频率提升了 29.19%,表明其优化后动态特性有所改善,抑制外界激励的能力大大提升。

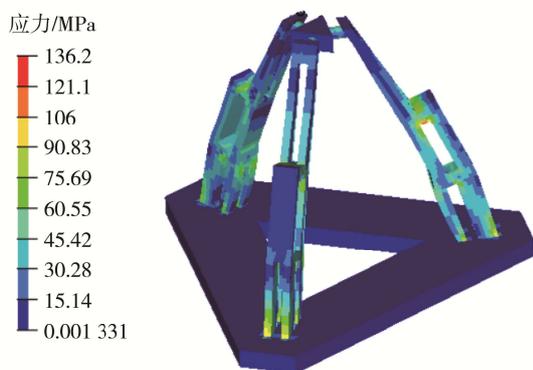


图 12 优化构型的应力分布情况
Fig.12 Stress distribution of the optimized configuration

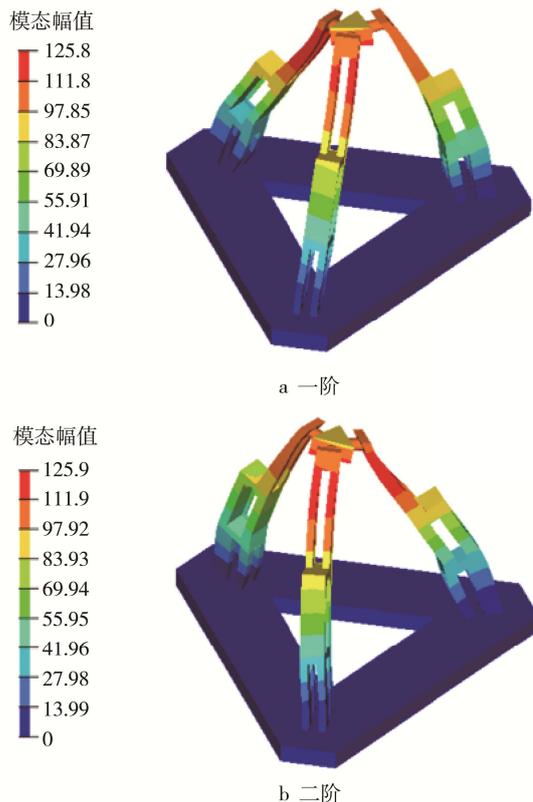


图 13 基于模式的前二阶振型
Fig.13 First-two order vibrant mode based on modal

表 2 3-UPU 柔顺并联机构优化前后力学性能
Tab.2 Mechanical property of 3-UPU compliant parallel mechanism before and after optimization

力学性能	柔度/(mm·N ⁻¹)	固有频率/Hz	
		一阶	二阶
优化前	58.32445	964.6355	1348.646
优化后	27.45111	1259.269	1502.537
光滑后	25.99325	1362.259	1520.250

5 微运动特性

文中依据 OptiStruct 的优化后 3-UPU 柔顺并联机构,通过运动学仿真研究并得到该构型的微运动特性,见图 14。

依据第 2 节中 3-UPU 并联机构运动的特性理论值与 3-UPU 柔顺并联机构微分的运动特性仿真值,见表 3。

从图 13 和表 3 中可得,优化后的 3-UPU 柔顺并联机构在 X,Y 和 Z 方向的微位移分别为 2.488, 6.512, 9.185 μm,与理论值-3.3064, -1.2284, 1.1320 μm 相比,具有一致的微运动特性,表明基于拓扑优化技术的 3-UPU 柔顺并联机构构型的定位精度具有微纳级别,且结构的抑制外界激励能力变强,该设计方法为光学精密设备的研发等提供了一定的理论技术借鉴。

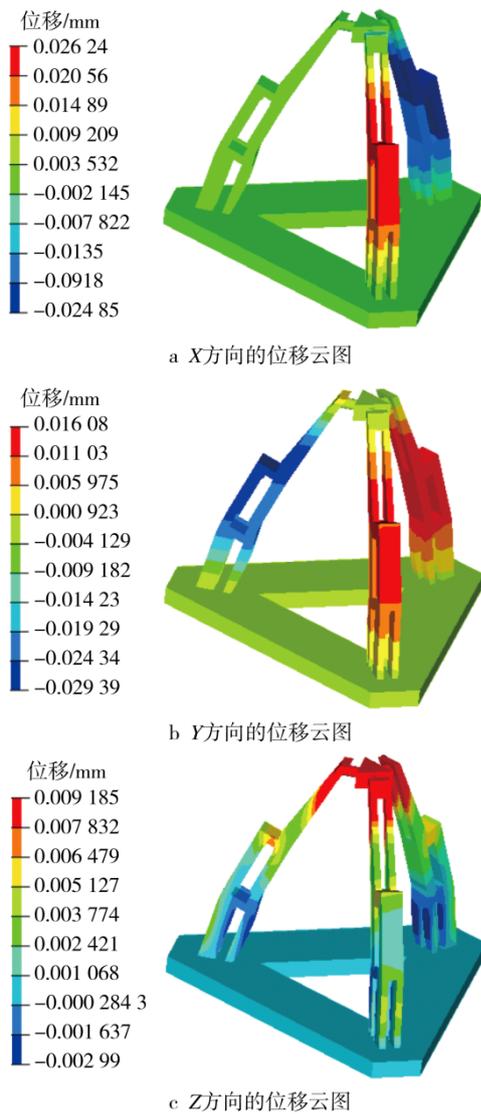


图 14 优化构型的微运动特性

Fig.14 Differential kinetic characteristic of optimized configuration

表 3 3-UPU 柔顺并联机构微分的运动性能
Tab.3 Differential kinetic characteristic of 3-UPU compliant parallel mechanism

数值	微位移/ μm		
	X方向	Y方向	Z方向
理论值	-3.3064	-1.2284	1.1320
仿真值	2.488	6.512	9.185

6 实验测试

文中运用 3D 打印技术对优化后的 3-UPU 柔顺并联机构加工制造, 以压电陶瓷作为其输入端的驱动源, 见图 15—16。

如图 17 所示, 通过 10 s 内持续测试, 可得 3-UPU 柔顺并联机构的微运动特性, 见表 4。

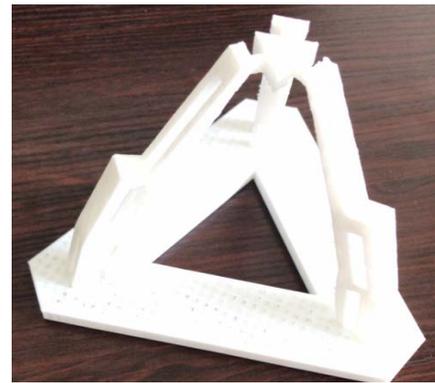


图 15 3-UPU 柔顺并联机构的 3D 模型

Fig.15 3D model of 3-UPU compliant parallel mechanism



图 16 压电陶瓷

Fig.16 Piezoelectric ceramics

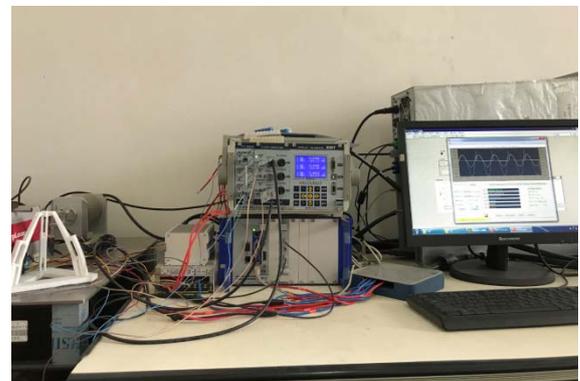


图 17 微运动特性的测试

Fig.17 Testing of differential motion characteristics

表 4 微位移测试结果
Tab.4 Testing result of differential displacement

时间/s	微位移/ μm		
	X方向	Y方向	Z方向
2	1.002	1.270	1.947
4	2.013	1.460	3.056
6	2.213	1.493	4.541
8	4.800	2.512	4.660
10	6.011	1.760	5.643

采用激光追踪仪对 3-UPU 柔顺并联机构测试所得的动平台微运动特性见表 4。表 4 中的测量数据与表 3 中的理论值和仿真值进行对比,在合理的误差范围内,实现了微位移运动特性,它也表明该优化设计在 3-UPU 柔顺并联机构构型设计具有可行性。为后续空间型柔顺并联机构的研究乃至后续的优化改进设计提供重要的理论借鉴。

7 结语

首先,采用旋量及逆螺旋原理,算出了 3-UPU 并联机构的运动特性,并基于封闭矢量环路法求出其驱动副与各关节映射关系的微分 Jacobian。其次,以微分 Jacobian 为机构的运动性能条件并结合结构优化理论,构建优化问题的 SIMP 模型。然后,对优化求解和光滑处理,运用 3D 打印技术对其加工制造,并进行实验测试。最后,对于测试结果与相应的仿真值和理论值相比,可得结论如下所述。

1) 基于封闭矢量映射法构建 3-UPU 并联机构的微分 Jacobian,将其作为 3-UPU 柔顺并联机构优化问题的运动条件,实现机构构型的优化设计。该方法为空间柔顺并联机构的优化设计,提供了重要的参考。

2) 基于拓扑优化设计并经光滑处理后的 3-UPU 柔顺并联机构,仿真可得:沿 X , Y 和 Z 轴的平动微位移为 2.488, 6.512, 9.185 μm ,通过理论解检验,优化后的构型在各方向的微位移均处于同一个微分数量级别。

3) 通过对 3-UPU 柔顺并联机构的微运动特性测试,证明了拓扑优化技术在该机构构型设计中的可行性。

参考文献:

- [1] 高峰. 机构学研究现状与发展趋势的思考[J]. 机械工程学报, 2005, 41(8): 3—17.
GAO Feng. Reflection on The Current Status and Development Strategy of Mechanism Research[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(8): 3—17.
- [2] 李瑞琴, 王英, 王明亚, 等. 混合驱动机构研究进展与发展趋势[J]. 机械工程学报, 2016, 52(13): 1—9.
LI Rui-qin, WANG Ying, WANG Ming-ya, et al. Development and Application of Parallel Mechanism[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(13): 1—9.
- [3] 李仕华, 田志立, 王子义, 等. 具有连续转轴的对称 2R1T 三自由度并联机构型综合[J]. 机械工程学报, 2017, 53(23): 74—82.
LI Shi-hua, TIAN Zhi-li, WANG Zi-yi, et al. Type Synthesis of 2R1T Symmetrical Parallel Mechanism with Continuous Rotation Axes[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(23): 74—82.
- [4] 李坤全, 文睿. 空间三平移全柔性并联机构构型设计[J]. 机械传动, 2018, 42(6): 86—89.
LI Kun-quan, WEN Rui. Configuration Design for The Spatial 3-DOF Translation Fully Compliant Parallel Mechanism[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2018, 42(6): 86—89.
- [5] 余跃庆, 徐齐平. 柔顺机构 PR 伪刚体动力学建模与特性分析[J]. 农业机械学报, 2013, 44(3): 225—229.
YU Yue-qing, XU Qi-ping. Dynamic Modeling and Characteristic Analysis of Compliant Mechanisms Based on PR Pseudo-rigid-body Model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(3): 225—229.
- [6] MIDHA A, NORTON T W, HOWELL L L. On Nomenclature, Classification and Abstraction of Compliant Mechanism[J]. Trans ASME Mech Design, 1994, 116(1): 270—279.
- [7] BALL R S. A Treatise on The Theory of Screws[M]. Cambridge University Press, Cambridge, 1990.
- [8] 黄真, 赵永生, 赵铁石. 高等空间机构学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
HUANG Zhen, ZHAO Yong-sheng, ZHAO Tie-shi. Higher Spatial Institutions[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [9] SAMEER A, JOSHI, LUNG W T. Jacobian Analysis of Limited-DOF Parallel Manipulators[J]. Journal of Mechanical Design, 2002, 124: 254—258.
- [10] HOWELL L L. Compliant Mechanisms[M]. New York: John Wiley & Sons, 2001.
- [11] BENDSOE M P, SIGMUND O. Material Interpolation Schemes in Topology Optimization[J]. Archives of Applied Mechanics, 1999, 69(9/10): 635—654.
- [12] 朱大昌, 宋马军. 平面整体式三自由度全柔顺并联机构拓扑优化构型设计及振动频率分析[J]. 振动与冲击, 2016, 35(3): 27—33.
ZHU Da-chang, SONG Ma-jun. Configuration Design with Topology Optimization and Vibration Frequency Analysis for 3-DOF Planar Integrated Fully Compliant Parallel Mechanism[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(3): 27—33.
- [13] WANG M Y, WANG X, GGUO D. A Level-Set Method for Structural Topology Optimization[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2013, 192(1/2): 227—246.
- [14] 朱大昌, 宋马军. 基于多目标拓扑优化的全柔顺并联机构固有振动频率研究[J]. 中国机械工程, 2015, 26(13): 1794—1800.
ZHU Da-chang, SONG Ma-jun. Research on Natural

- Vibration Frequency of Fully Compliant Parallel Mechanism Configuration Based on Multi-objective Topology Optimization[J]. *China Mechanical Engineering*, 2015, 26(13): 1794—1800.
- [15] SIGMUND O, MAUTE K. Topology Optimization Approaches: A Comparative Review[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2013, 48: 1031—1055.
- [16] 李超鹏, 付旭. 基于拓扑优化理论的 3-PRR 型全柔顺并联机构构型设计及实验测试[J]. *中国水运*, 2017, 17(6): 150—157.
- LI Chao-peng, FU Xun. Configuration Design and Experimental Measurement of 3-PRR Fully Compliant Parallel Manipulator Based on Topology Optimization Theory[J]. *China Water Transport*, 2017, 17(6): 150—157.