

Exe - Variant 并联模块静刚度分析

陶兆胜 彭 澎 赵艳芹

(安徽工业大学机械工程学院, 马鞍山 243032)

摘要: 由于良好的刚度和动力学性能, Exechon 并联机构已被应用于加工、制造、航空航天等领域, 但 Exechon 并联模块的转动能力较弱, 导致其工作空间较小。为此, 以机构变异方法设计构型为 2RPU&1RPS 的 Exe - Variant 并联模块。为研究 Exe - Variant 并联模块的刚度性能, 采用子结构综合技术建立了该并联模块的刚度模型。建模时, 将机构划分成若干子系统, 并计入关节和支链弹性对整机刚度的影响。基于所建刚度模型, 研究了 Exe - Variant 并联模块整机刚度在其工作空间内的分布特性, 并进行了机构关键设计参数和机构关节处弹性变形对整机刚度的影响分析。结果表明, 该模块的刚度分布在工作全域内呈现出对称性, 模块关键设计参数和机构关节处弹性变形对整机的刚度性能影响较大。

关键词: Exe - Variant; 并联机构; 静刚度; 子结构综合

中图分类号: TH112 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)04-0377-06

Stiffness Analysis for Exe - Variant Parallel Kinematic Machine

TAO Zhaosheng PENG Peng ZHAO Yanqin

(School of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China)

Abstract: Exechon parallel kinematic machine (PKM) has been applied to machining, assembling and aerospace industries due to its high rigidity and high dynamics. However, its rotational ability is comparatively weak. In order to improve the rotational ability of the Exechon PKM, an Exe - Variant PKM was proposed whose topology was a 2RPU&1RPS parallel mechanism. And the mechanical structure of the proposed Exe - Variant PKM was designed. In order to achieve a thorough understanding of stiffness characteristics of the Exe - Variant PKM, the stiffness model of the parallel module was designed by substructure synthesis technique. According to its structure feature, the Exe - Variant PKM was divided into several subsystems, including a moving platform subsystem, three limb subsystems and a fixed base subsystem. Meanwhile, the elasticity of joints and limbs was considered. Based on the proposed stiffness model, the stiffness distributions throughout the workspace were discussed and the parameters analysis on the stiffness of an Exe - Variant PKM was conducted. Results showed that the stiffness distributions of the Exe - Variant PKM were symmetric about a certain plane throughout the workspace, and the key design parameters had a great influence on the rigidity of the Exe - Variant PKM. Furthermore, the elastic deformation of joints seemed to have a greater influence on stiffness in z direction than those in x and y directions of the Exe - Variant PKM. It was worthy to point out that the analysis conducted can provide theoretical foundation for structure optimization.

Key words: Exe - Variant; parallel kinematic machine; stiffness; substructure synthesis

引言

Exechon 并联模块作为少自由度的 2UPR&1SPR 并联机构, 国内外学者对其运动学、刚度以及动力学开展了大量研究^[1-11]。HUANG

等^[12]借助有限元软件对 Exechon 的工作全域进行了动力学仿真研究。LIAN 等^[13]基于子结构综合结合雅克比矩阵和相互关联转动关节的变形影响考虑机构的刚度映射。在设计阶段, 曲海波等^[14-15]运用半解析模型快速预估工作全域内的刚度特性。LI

等^[16]运用旋量理论和虚功原理建立 ExechonX150 的刚度模型,分析机构特定位姿下的刚度并将其与有限元仿真做了对比。陈修龙等^[17]采用 ADAMS 软件对 5 自由度并联机构的运动学进行了模拟仿真。季晔等^[18]建立了 4-SPxyzS/PxPzUxz 并联机构的位置和姿态工作空间,并提出“点集”近似计算和敏感度概论,利用数值法求解了位置工作空间大小和姿态工作空间范围与机构尺度参数之间的关系。

笔者团队在前期研究中,采用机构变异方法设计 Exe-Variant 并联模块并进行了刚度建模研究^[19-20]。在此基础上,本文研究 Exe-Variant 并联模块在工作全域的静刚度映射,并进行其静刚度参数影响分析,以期改善该并联模块的刚度性能提供一定的理论依据。

1 机构描述

Exe-Variant 动力头主要由 2 自由度串联转头和 Exe-Variant 并联模块组成,如图 1 所示。其中,Exe-Variant 并联模块主要由动平台、静平台和 3 条过约束支链组成。支链 1 和支链 2 的拓扑结构相同,分别通过转动副 R、虎克铰 U 与静平台、动平台连接。支链 3 的结构与支链 1、2 略有不同,其通过球铰 S 副与动平台相连。

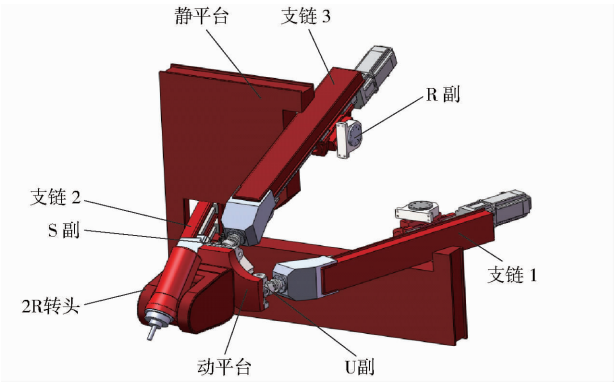


图 1 Exe-Variant 实体模型
Fig. 1 Model of Exe-Variant

从机构学的角度来看,Exe-Variant 并联模块的拓扑结构为 2RPU&1RPS,其机构简图如图 2 所示。图中,△A₁A₂A₃和△B₁B₂B₃分别表示动平台及基座,且设定为等腰直角三角形,其中∠A₁A₃A₂=∠B₁B₃B₂=90°。A₁、A₂分别表示支链 1、2 上虎克铰的几何中心;A₃表示支链 3 上球铰的几何中心;B_i(i=1,2,3)表示支链 i 上转动副的几何中心;C_i(i=1,2,3)表示支链 i 末端^[20]。

2 静刚度预估与分析参数

根据 Exe-Variant 并联模块的结构特点,将系

统划分成动平台子系统、支链子系统和基座子系统。由于动平台和基座的刚度相对较大,故建模时将其视为刚体。为计入支链柔度和复杂结构对系统刚性的影响,采用有限元的思想将支链划分成具体等效截面的空间梁,如图 3 所示。

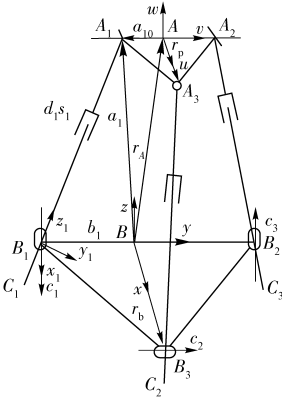


图 2 Exe-Variant 机构简图
Fig. 2 Schematic diagram of Exe-Variant PKM

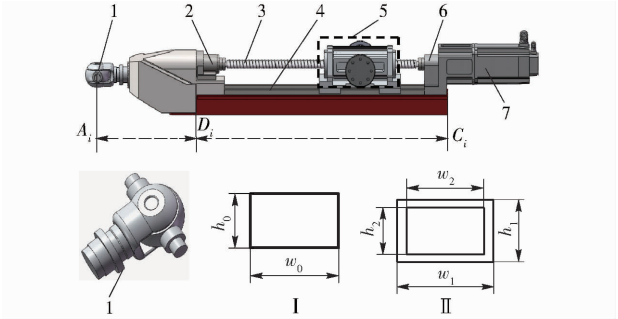


图 3 支链的装配示意图
Fig. 3 Assembling scheme of an individual limb

1. 球铰/虎克铰 2. 前端轴承 3. 滚珠丝杠 4. 导轨 5. 转动副
6. 末端轴承 7. 电动机

根据支链截面的变化情况,将支链的截面处理为如图 3 所示的矩形截面 I 和 II。其中,截面 I 表示 A_iD_i段的等效截面;截面 II 表示 D_iC_i段的等效截面。图中,w₀、h₀分别表示矩形截面 I 的等效宽度和高度;w₁、w₂、h₁、h₂分别表示矩形截面 II 的外部和外部的等效宽度和高度。

计入支链子系统和动平台子系统间的变形协调条件,可得到系统的刚度模型为

$$KU = W \tag{1}$$

式中 U——系统在全局坐标系 Bxyz 下的位移矩阵
K——系统在全局坐标系 Bxyz 下的刚度矩阵
W——系统在全局坐标系 Bxyz 下的载荷矩阵
具体的推导过程可参照文献[20]。

以文献[20]的 Exe-Variant 并联模块为例,对其进行静刚度映射和静刚度参数影响分析。表 1、2 分别给出了该并联模块的几何参数和关节刚度参数^[20]。

表 1 中,s 为动平台的行程;l 为支链的物理长度;ψ_{max}和 θ_{max}分别为偏转角 ψ 和 θ 的最大值。

表 1 Exe - Variant 并联模块几何结构参数

Tab.1 Geometries of Exe - Variant PKM

参数	r_p/mm	r_b/mm	s/mm
数值	220	600	400
参数	l/mm	w_0/mm	w_1/mm
数值	1 460	210	180
参数	w_2/mm	h_0/mm	h_1/mm
数值	160	173	80
参数	h_2/mm	$\psi_{\max}/(^{\circ})$	$\theta_{\max}/(^{\circ})$
数值	60	± 40	± 40

表 2 Exe - Variant 关节刚度

Tab.2 Stiffness of Exe - Variant PKM

参数	$k_{ulx0}/(\text{N}\cdot\mu\text{m}^{-1})$	$k_{uliy0}/(\text{N}\cdot\mu\text{m}^{-1})$	$k_{ulz0}/(\text{N}\cdot\mu\text{m}^{-1})$
数值	112	214	100
参数	$k_{uix0}/(\text{MN}\cdot\text{rad}^{-1})$	$k_{uixz0}/(\text{N}\cdot\mu\text{m}^{-1})$	$k_{uizy0}/(\text{N}\cdot\mu\text{m}^{-1})$
数值	24	23	23
参数	$k_{usx0}/(\text{N}\cdot\mu\text{m}^{-1})$	$k_{usyz0}/(\text{MN}\cdot\text{rad}^{-1})$	$k_{usz0}/(\text{N}\cdot\mu\text{m}^{-1})$
数值	623	18	676
参数	$k_{ucy0}/(\text{N}\cdot\mu\text{m}^{-1})$	$k_{ucxz0}/(\text{N}\cdot\mu\text{m}^{-1})$	$k_{ucw0}/(\text{MN}\cdot\text{rad}^{-1})$
数值	446	348	18
参数	$k_{rx0}/(\text{N}\cdot\mu\text{m}^{-1})$	$k_{ry0}/(\text{N}\cdot\mu\text{m}^{-1})$	$k_{rz0}/(\text{N}\cdot\mu\text{m}^{-1})$
数值	380	530	1006
参数	$k_{rx0}/(\text{MN}\cdot\text{rad}^{-1})$	$k_{ry0}/(\text{MN}\cdot\text{rad}^{-1})$	$k_{rz0}/(\text{N}\cdot\mu\text{m}^{-1})$
数值	18	18	112
参数	$k_{slx0}/(\text{N}\cdot\mu\text{m}^{-1})$	$k_{slz0}/(\text{N}\cdot\mu\text{m}^{-1})$	$k_{ssz0}/(\text{N}\cdot\mu\text{m}^{-1})$
数值	214	100	23
参数	$k_{sxy0}/(\text{N}\cdot\mu\text{m}^{-1})$	$k_{ssz0}/(\text{N}\cdot\mu\text{m}^{-1})$	$k_{scz0}/(\text{N}\cdot\mu\text{m}^{-1})$
数值	23	623	676
参数	$k_{scy0}/(\text{N}\cdot\mu\text{m}^{-1})$	$k_{scz0}/(\text{N}\cdot\mu\text{m}^{-1})$	
数值	446	348	

各关节在其连体坐标系下的刚度如表 2 所示。

表 2 中, $k_{uij}(i=l,s,c;j=x,y,z,w)$ 分别为虎克铰长轴 l 、短轴 s 和交叉轴 c 在 3 个正交方向的线刚度和角刚度; k_{rx0} 、 k_{ry0} 和 k_{rz0} 分别为转动副在 3 个正交方向的线刚度; k_{rx0} 和 k_{ry0} 分别为转动副绕其自身坐标系 y 和 z 轴的角刚度; $k_{sij}(i=l,s,c;j=x,y,z)$ 分别为球铰长轴 l 、短轴 s 和交叉轴 c 在 3 个正交方向的线刚度。

3 工作空间内的静刚度映射

为分析 Exe - Variant 并联模块的静刚度映射, 采用“分层切片”思想, 将工作空间离散成若干个工作平面, 再结合运动学逆解获得各工作平面上任一点所对应的机构位姿下的静刚度。本文选取其工作平面为 $z = 1\,200\text{ mm}$, 分析在 u 、 v 和 w 方向的主刚度分布, 如图 4 所示。

由图 4 可知, Exe - Variant 并联模块各方向刚度随位姿变化。其中, u 方向的线刚度 k_{11} 的变化范围为 $[9.75, 73.4]\text{ MN/m}$; v 方向的线刚度 k_{22} 的变化范围为 $[14.2, 57.4]\text{ MN/m}$; w 方向的线刚度 k_{33} 的变化范围为 $[88.5, 169]\text{ MN/m}$; u 方向角刚度 k_{44} 的变化范围为 $[35.1, 44.5]\text{ MN}\cdot\text{m/rad}$; v 方向角刚度 k_{55} 的变化范围为 $[23.9, 29.3]\text{ MN}\cdot\text{m/rad}$; w 方向角刚度 k_{66} 的变化范围为 $[3.4, 20.9]\text{ MN}\cdot\text{m/rad}$ 。Exe - Variant 并联模块各方向刚度关于平面 $\psi = 0^{\circ}$ 对称分布, 这与初始位置时支链 1、2 关于支链 3 对称这一结构特点有关。该并联模块 w 方向的线刚度 k_{33} 较其他 2 个方向的线刚度大得多, 而该方向的角刚度 k_{66} 较其他 2 个方向的角刚度小得多, 表明该模块在轴向具有较强的抵抗外力变形的能力。

由图 4 也可知, Exe - Variant 并联模块同一方向的线刚度和角刚度呈现出开口方向相反的规律。例如, Exe - Variant 并联模块 u 方向的线刚度 k_{11} 在 $\theta = 0^{\circ}$ 两侧随着 θ 绝对值的增大而增大 (开口向上), 而 u 方向的角刚度 k_{44} 在 $\theta = 0^{\circ}$ 两侧随着 θ 绝对值的增大而减小 (开口向下); v 方向的线刚度 k_{22} 在 $\psi = 0^{\circ}$ 两侧随着 ψ 绝对值的增大而增大 (开口向

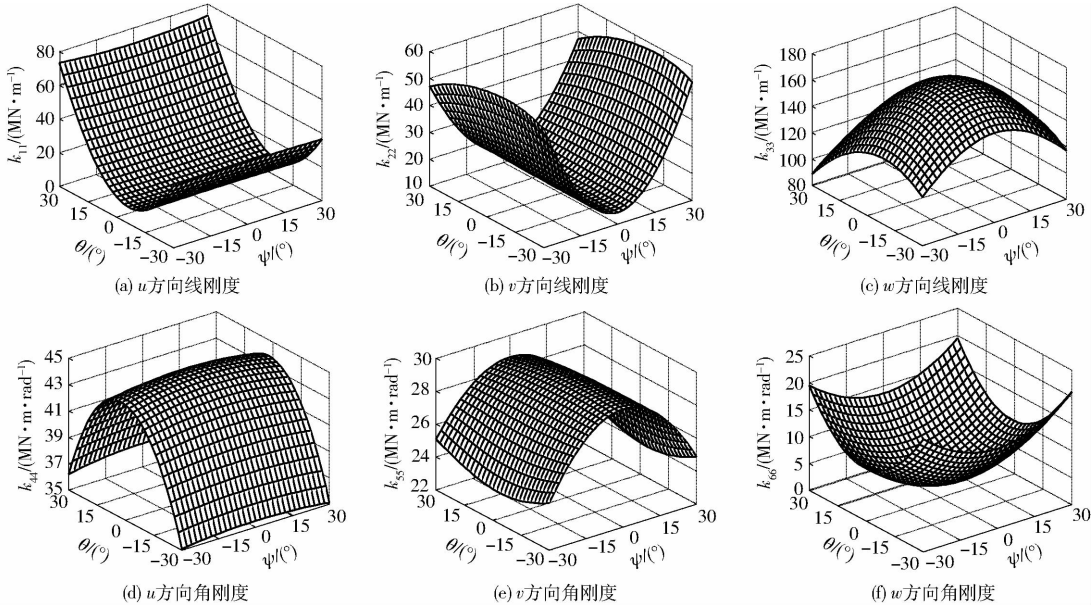


图 4 工作平面 $z = 1\,200\text{ mm}$ 上 Exe - Variant 并联模块的静刚度映射

Fig. 4 Stiffness distributions over work plane of $z = 1\,200\text{ mm}$

上), v 方向的角刚度 k_{55} 的 $\psi=0^\circ$ 两侧随着 ψ 绝对值的增大而减小(开口向下); w 方向的线刚度 k_{33} 开口向下, w 方向的角刚度 k_{66} 开口向上。

4 静刚度参数影响分析

图5所示为Exe-Variant并联模块的静刚度随动平台、基座半径的变化曲面。

图6所示为Exe-Variant并联模块的静刚度随支链机座截面尺寸的变化曲面。图中, δ_h 和 δ_w 分别表示支链的等效高度和等效宽度的增量。

由图5a、5b可知,Exe-Variant并联模块 u 方向的线刚度 k_{11} 以及 v 方向的线刚度 k_{22} 均随着动平台

半径 r_p 的增大而减小,随着基座半径 r_b 的增大而增大。由图5c、5f可知, w 方向的线刚度 k_{33} 以及该方向的角刚度 k_{66} 均随着动平台半径 r_p 的增大而增大,随着基座半径 r_b 的增大而减小。由图5d、5e可知, u 方向的角刚度 k_{44} 以及 v 方向的角刚度 k_{55} 均随着动平台半径 r_p 和基座半径 r_b 的增大而增大。另外,动平台半径 r_p 和基座半径 r_b 对各方向静刚度的影响程度不同。例如,动平台半径 r_p 对 w 方向的线刚度 k_{33} 以及该方向的角刚度 k_{66} 的影响较大,而对其他方向的刚度影响较小;而基座半径 r_b 对 u 方向的线刚度 k_{11} 及该方向的角刚度 k_{44} 、 v 方向的线刚度 k_{22} 及该方向的角刚度 k_{55}

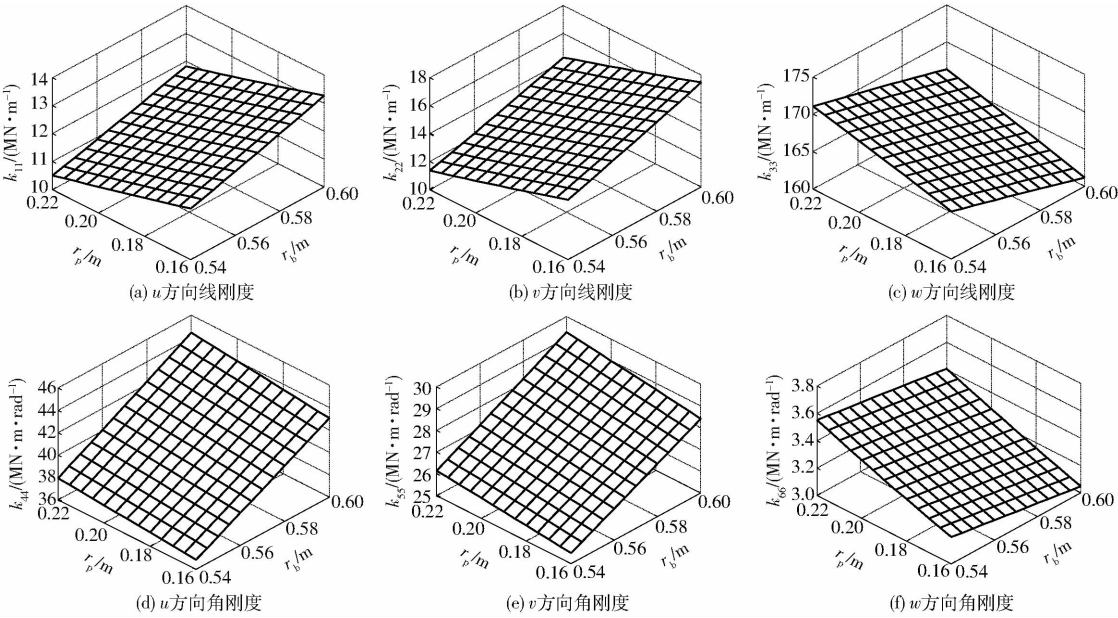


图5 Exe-Variant 并联模块的静刚度随动平台、基座半径的变化曲面
Fig.5 Variations of stiffness with respect to radii of platform and base

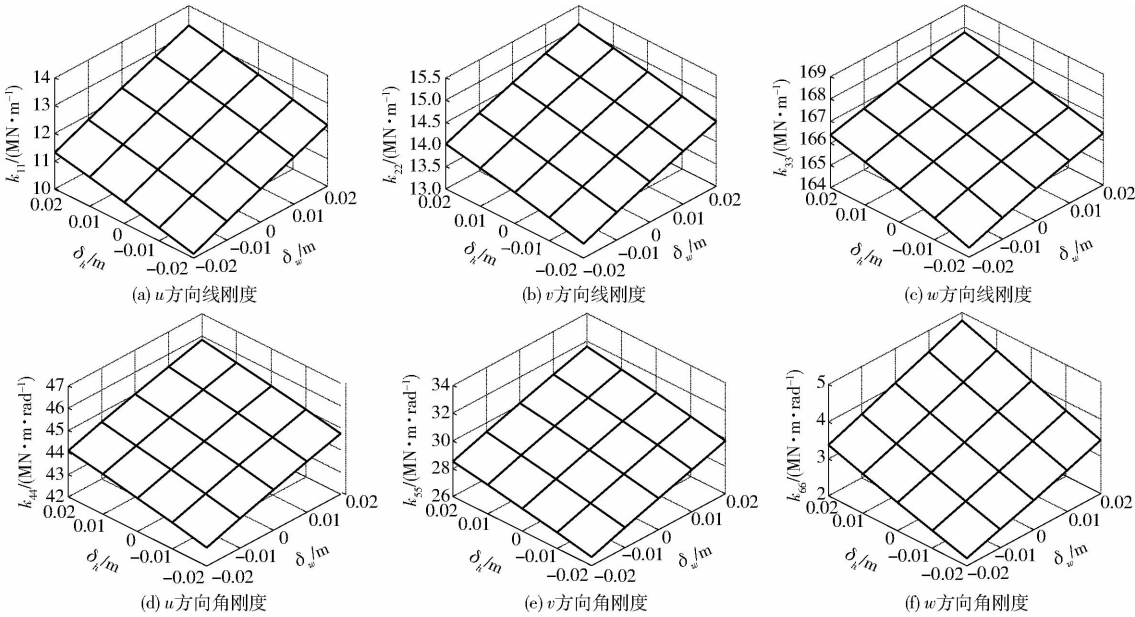


图6 Exe-Variant 并联模块的静刚度随支链截面尺寸的变化曲面
Fig.6 Variations of stiffness with respect to cross-section of limb body

影响较大,对其他方向的刚度影响较小。

由图6各方向静刚度随 δ_h 和 δ_w 的变化曲面可知,随支链机座截面尺寸的增大,整机刚度逐渐增大。

关节处的弹性变形对整机刚度的影响不可忽略,但因篇幅有限,现以虎克铰刚度为实例分析。定义虎克铰长轴 x 方向线刚度的放大因子 λ_{ulx} 和整机刚度的放大因子 k_i 为

$$\lambda_{ulx} = \frac{k_{ulx}}{k_{ulx0}} \quad (2)$$

$$k_i = \frac{k_{ii}}{k_{ii0}} \quad (i = 1, 2, \cdots, 6) \quad (3)$$

式中 k_{ulx0} ——虎克铰长轴 x 方向初始线刚度(表2)
 k_{ulx} ——虎克铰长轴 x 方向的当前线刚度
 k_{ii0} ——模块处于初始位姿 $z = 1\,200\text{ mm}$ 、 $\theta = 0^\circ$ 、 $\psi = 0^\circ$ 时整机的刚度
 k_{ii} ——整机当前刚度

整机刚度比例系数随虎克铰刚度的变化曲线如图7所示。其中, λ_{ulx} 、 λ_{uly} 、 λ_{ulz} 和 λ_{ulw} 分别为长轴 x 、

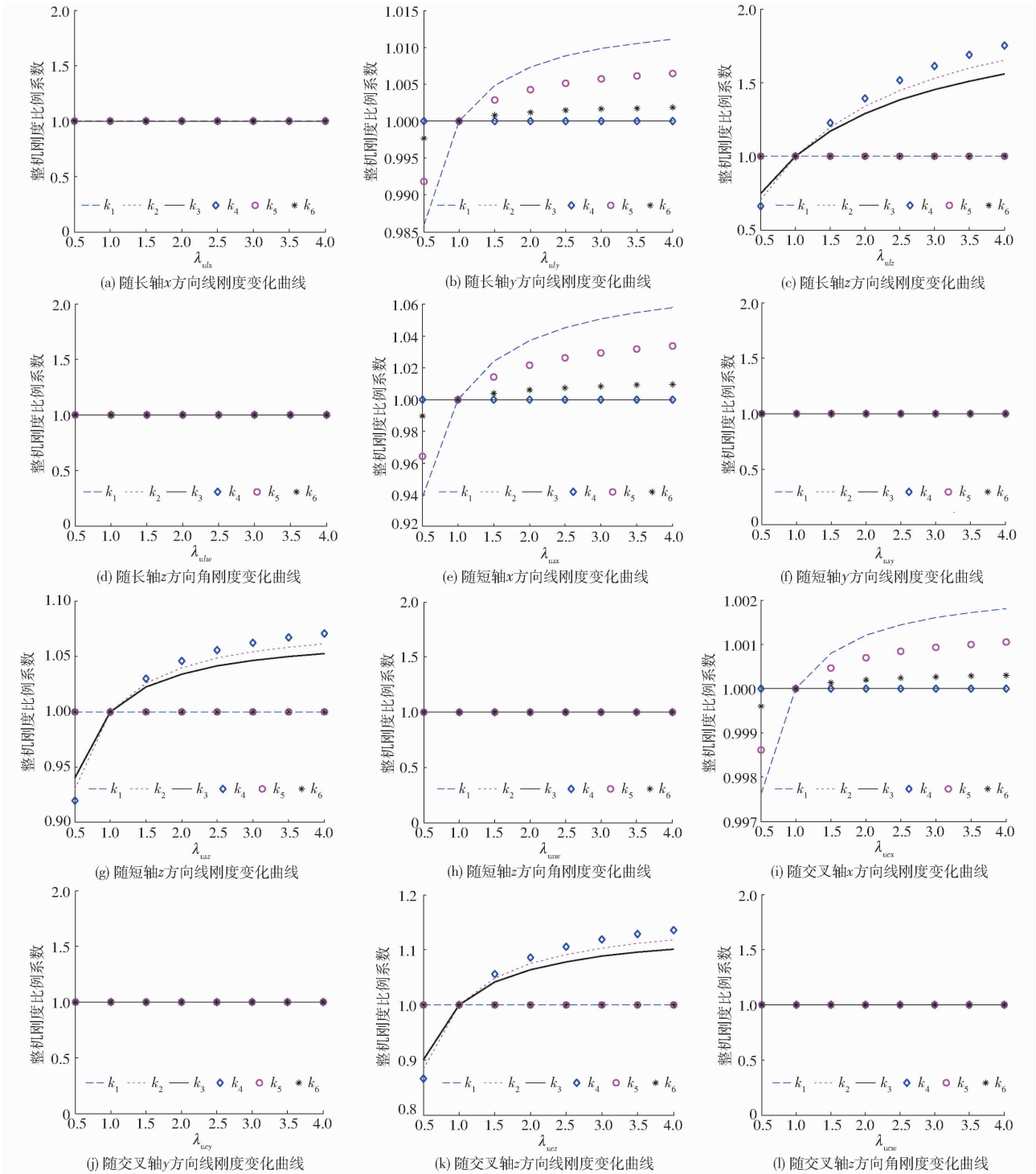


图7 整机刚度比例系数随虎克铰刚度的变化曲线

Fig. 7 Variation curves of stiffness with respect to Hooke-joint stiffness coefficient

y, z 3 个方向的线刚度放大因子以及 z 方向的角刚度放大因子; λ_{usx} 、 λ_{usy} 、 λ_{usz} 和 λ_{usi} 分别为短轴 x, y, z 3 个方向的线刚度放大因子以及 z 方向的角刚度放大因子; λ_{ucx} 、 λ_{ucy} 、 λ_{ucz} 和 λ_{uci} 分别为交叉轴 x, y, z 3 个方向的线刚度放大因子以及 z 方向的角刚度放大因子。上述放大因子数学公式定义类似式(2)。

由图 7a、7e、7i 可知,随着长轴、短轴、交叉轴 x 方向线刚度的增大, u 方向线刚度 k_{11} 和 v 方向角刚度 k_{55} 以及 w 方向角刚度 k_{66} 单调递增;由图 7c、7g、7k 可知,随着长轴、短轴、交叉轴 z 方向线刚度的增大, v 方向线刚度 k_{22} 、 w 方向线刚度 k_{33} 和 v 方向角刚度 k_{44} 逐渐增大。从以上分析可知,整机刚度随虎克铰 x 方向线刚度和 z 方向线刚度的增大而增大。而图 7b、7d、7f、7h、7j、7l 反映整机刚度不随长轴、短轴、交叉轴 y 方向线刚度和 z 方向角刚度的变化而变化,即球铰 y 方向线刚度和 z 方向角刚度对系统

刚度无影响。从数值上进行考虑,虎克铰 z 方向线刚度对整机刚度的影响与 x 方向线刚度相比较,故在进行虎克铰的结构设计时,需适当考虑长轴、短轴和交叉轴的 z 方向线刚度。

5 结论

(1) Exe-variant 并联模块在工作空间内的刚度映射表明:该机构各方向刚度关于平面电动机对称分布。

(2) 为剖析 Exe-variant 并联模块的关键设计参数对整机刚度性能的作用规律,进行了静刚度的参数影响分析。分析表明:动平台半径、支链的截面尺寸和关节处的弹性变形会对整机的刚度性能产生重大影响。在进行该类少自由度并联机构的结构设计时,可适当调整该类关键设计参数以满足整机对刚度的要求。

参 考 文 献

- HU B. Kinematically identical manipulators for the Exechon parallel manipulator and their comparison study[J]. Mechanism & Machine Theory, 2016, 103: 117-137.
- JIN Z, SHI J, SARAF A, et al. Elastodynamic modeling and analysis for an Exechon parallel kinematic machine[J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2016, 138(3): 7190-7200.
- 王飞博, 陈巧红, 武传宇, 等. 2-UPR-SPR 并联机构尺度综合[J]. 机械工程学报, 2015, 51(21): 24-32.
WANG F B, CHEN Q H, WU C Y, et al. Dimensional synthesis of a 2-UPR-SPR parallel manipulator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(21): 24-32. (in Chinese)
- XIE F, LIU X J, LI T. A comparison study on the orientation capability and parasitic motions of two novel articulated tool heads with parallel kinematics[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2013, 5(4): 249103-249103.
- CARBONARI L, CALLEGARI M, PALMIERI G, et al. A new class of reconfigurable parallel kinematic machines[J]. Mechanism & Machine Theory, 2014, 79: 173-183.
- BI Z M. Kinetostatic modeling of Exechon parallel kinematic machine for stiffness analysis[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 71(1-4): 325-335.
- SHANG M, BUTTERFIELD J, ARMSTRONG C, et al. A flexible fixture for aircraft wing assembly based on a parallel kinematic machine (Exechon)[J]. SAE International Journal of Aerospace, 2011, 4(2): 839-849.
- PORTMAN V T, CHAPSKY V S, SHNEOR Y. Evaluation and optimization of dynamic stiffness values of the PKMs: collinear stiffness value approach[J]. Mechanism & Machine Theory, 2014, 74(6): 216-244.
- GANESH S S, RAO A B K. Inverse dynamics of a 3-DOF translational parallel kinematic machine[J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2015, 29(11): 4583-4591.
- XIE F G, LIU X J, WANG C. Design of a novel 3-DOF parallel kinematic mechanism: type synthesis and kinematic optimization[J]. Robotica, 2014, 33(3): 622-637.
- TYAPIN I, HOVELAND G. The Gantry-Tau parallel kinematic machine-kinematic and elastodynamic design optimization[J]. Meccanica, 2011, 46(1): 113-129.
- HUANG T, WANG P F, ZHAO X M, et al. Design of a 4-DOF hybrid PKM module for large structural component assembly[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2010, 59(1): 159-162.
- LIAN B B, SUN T, SONG Y M, et al. Stiffness analysis and experiment of a novel 5-DOF parallel kinematic machine considering gravitational effects[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 95: 82-96.
- 曲海波, 梁艺瀚, 方跃法, 等. 4-RRS 冗余球面并联机构的静力学与刚度分析[J]. 机械工程学报, 2015, 51(11): 8-15.
QU H B, LIANG Y H, FANG Y F, et al. Static stiffness analysis of 4-RRS redundant spherical parallel mechanism[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(11): 8-15. (in Chinese)
- 汪满新, 王攀峰, 宋铁民, 等. 4 自由度混联机器人静刚度分析[J]. 机械工程学报, 2011, 47(15): 9-16.
WANG M X, WANG P F, SONG Y M, et al. Stiffness analysis of a 4-DOF hybrid robot [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(15): 9-16. (in Chinese)

- Journal of Mechanical Design, 2007, 129(6): 595 – 601.
- 13 KONG X. Type synthesis of 3-DOF parallel mechanisms with both a planar operation mode and a spatial translational operation mode [J]. ASME Journal of Mechanisms and Robotics, 2013, 5(4): 041015 – 041015 – 12.
- 14 KONG X. Reconfiguration analysis of a 3-DOF parallel mechanism using Euler parameter quaternions and algebraic geometry method [J]. Mechanism and Machine Theory, 2014, 74(1): 188 – 201.
- 15 KONG X, YAN J. Type synthesis of 3-DOF multi-mode translational/spherical parallel mechanisms with lockable joints [J]. Mechanism and Machine Theory, 2016, 96(1): 323 – 333.
- 16 李秦川,陈巧红,武传宇,等. 变自由度 $4-P^*R^*R^*R^*R_N$ 并联机构[J]. 机械工程学报, 2009, 45(1): 83 – 87.
LI Qinchuan, CHEN Qiaohong, WU Chuanyu, et al. $4-P^*R^*R^*R^*R_N$ parallel mechanism with variable mobility [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(1): 83 – 87. (in Chinese)
- 17 LI Q, HERVÉ J M. Parallel mechanisms with bifurcation of schoenflies motion [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2009, 25(1): 158 – 164.
- 18 叶伟,方跃法,郭盛,等. 一种新型并联机构的运动分岔特性及运动学分析[J]. 机械工程学报, 2013, 49(13): 8 – 15.
YE Wei, FANG Yuefa, GUO Sheng, et al. Bifurcated motion and kinematics of novel parallel mechanism [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(13): 8 – 15. (in Chinese)
- 19 LATIFAH N, STEPHANE C, PHILEPPE W, et al. Reconfiguration analysis of a 4 – RUU parallel manipulator [J]. Mechanism and Machine Theory, 2016, 96(1): 269 – 289.
- 20 杨廷力,刘安心,罗玉峰,等. 机器人机构拓扑结构设计[M]. 北京:科学出版社, 2012.
- 21 杨廷力,沈惠平,刘安心,等. 机构自由度公式的基本形式、自由度分析及其物理内涵[J]. 机械工程学报, 2015, 51(13): 69 – 80.
YANG Tingli, SHEN Huiping, LIU Anxin, et al. Review of the formulas for degrees of freedom in the past ten years [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(13): 69 – 80. (in Chinese)
- 22 沈惠平,尹洪波,李菊,等. 基于方位特征方法的范例并联机构的拓扑特征分析及其启示与应用[J]. 机械工程学报, 2015, 51(13): 101 – 115.
SHEN Huiping, YIN Hongbo, LI Ju, et al. Position and orientation characteristic based method and enlightenment for topology characteristic analysis of typical parallel mechanisms and its application [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(13): 101 – 115. (in Chinese)
- 23 石志新,叶梅燕,毛志伟,等. 5 – 5 型并联机器人位置正解的简单算法[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(3): 314 – 319.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140351&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.03.051.
SHI Zhixin, YE Meiyang, MAO Zhiwei, et al. Simple method for forward displacement analysis of a 5 – 5 in-parallel robot[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(3): 314 – 319. (in Chinese)

(上接第 382 页)

- 16 LI X, ZLATANOV D, ZOPPI M, et al. Stiffness estimation and experiments for the Exechon parallel self-reconfiguring fixture mechanism[C] // Proceedings of the ASME 2012 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, 2012: 637 – 645.
- 17 陈修龙,孙先洋,邓昱. 4 – UPS – RPS 空间 5 自由度并联机构运动学分析[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(8): 257 – 261. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130844&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.08.044.
CHEN X L, SUN X Y, DENG Y. Kinematics analysis of 4 – UPS – RPS spatial 5-DOF parallel mechanism [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 257 – 261. (in Chinese)
- 18 季晔,刘宏昭,原大宁. 4 – SPS/PPU 型并联机构工作空间与尺度分析[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 322 – 328. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20131154&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.11.054.
JI Y, LIU H Z, YUAN D N. Workspace and scale analysis of 4 – SPS/PPU parallel mechanism[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 322 – 328. (in Chinese)
- 19 TANG T F, ZHAO Y Q, ZHANG J, et al. Conceptual design and workspace analysis of an Exechon-inspired parallel kinematic machine[C] // The 3rd ASME/IFTOMM International Conference on Reconfigurable Mechanisms and Robotics, 2015: 445 – 453.
- 20 路曼,赵艳芹. 类 Exechon 并联模块的结构设计与刚度建模[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 367 – 388. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160352&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.052.
LU M, ZHAO Y Q. Structural design and stiffness modeling for Exe – Variant parallel kinematic machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 367 – 388. (in Chinese)