

空间转动4-SPS-1-S型并联机构动力学性能指标分析*

崔国华¹ 李权才² 张艳伟¹ 侯红娟¹

(1. 河北工程大学机电工程学院, 邯郸 056038; 2. 华北水利水电学院机械工程学院, 郑州 450045)

【摘要】 通过建立冗余驱动4-SPS-1-S型并联机构的速度映射解析方程, 求出机构的 Jacobian 矩阵; 引入并定义承载力与驱动性能作为机构的动力学性能评价指标, 建立了衡量并联机构承载能力和驱动性能的解析方程, 结合具体算例仿真分析了该并联机构的两类动力学性能指标在任务空间的分布规律, 对机构进行了动力学性能评价。研究表明, 该机构的承载力与驱动性能指标在运动过程中呈现出较好的各向同性, 在任务空间内具有较好的动力学性能。

关键词: 并联机构 动力学性能指标 承载力性能 驱动性能

中图分类号: TH112 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)07-0214-05

Dynamic Performance Indices Analysis of 4-SPS-1-S Spatial Rotation Parallel Manipulator

Cui Guohua¹ Li Quancai² Zhang Yanwei¹ Hou Hongjuan¹

(1. College of Mechanical Engineering, Hebei Engineering University, Handan 056038, China

2. College of Mechanical Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

Abstract

Dynamic performance indices of a spatial rotation 4-SPS-1-S parallel manipulator has been studied. The 4-SPS-1-S parallel manipulator has spatial three pure rotation degrees of freedom, including four SPS active legs and one passive constraining leg. Based on the velocity mapping equations of the mechanism, Jacobian matrices were built and computed. The dynamic performance indices which include load capacity performance and actuating performance were introduced and defined, and analysis equation for assessing the load capacity and actuating performance of the parallel manipulator mechanism was built. Finally a numerical example was provided for analyzing the dynamic performance indices distribution rules over the entire workspace.

Key words Parallel mechanism, Dynamic performance index, Load capacity performance, Actuating performance

引言

动力学分析是机器人结构设计、驱动器选型与机构控制的基础, 承载能力、速度、驱动性能、动刚度等动力学性能评价指标是动力学分析与设计的主要依据。相对于各种机构运动学性能评价指标研究的深入与成熟, 动力学性能评价指标是一个值得深入探讨的课题^[1]。近年来国内外研究串、并联机构的

学者, 在动力学方面作了大量研究^[2-6]。

为使机构尽量避免奇异位形, 同时具有较高的承载能力、刚度及稳定性, 本文构建一冗余驱动4-SPS-1-S并联机构, 根据该机构的应用需求及结构特点, 引入并定义承载力与驱动性能指标, 作为并联机构的动力学性能评价指标, 对4-SPS-1-S机构进行动力学性能评价及分析。

1 4-SPS-1-S 机构分析

1.1 机构模型描述

在文献[7~8]构建空间三维转动 3-SPS-1-S 并联机构的基础上,通过增加一条与机构中的驱动支链相同的 SPS 支链,构建一冗余驱动 4-SPS-1-S 型并联机构。如图 1 所示,固定平台 B 和运动平台 m 由 4 根可以伸缩的支承杆连接,每个分支由一个移动副 P 和 2 个球铰副 S 按照 S-P-S 的顺序串接而成,其中支点 B_4 位于垂直且固联于平台 B 的立柱上,支链 B_4b_4 位于运动平台所在平面;中间约束分支由 S 副组成, S 副位于 O 点处,约束分支与平台 m 和 B 在其中心处固结。

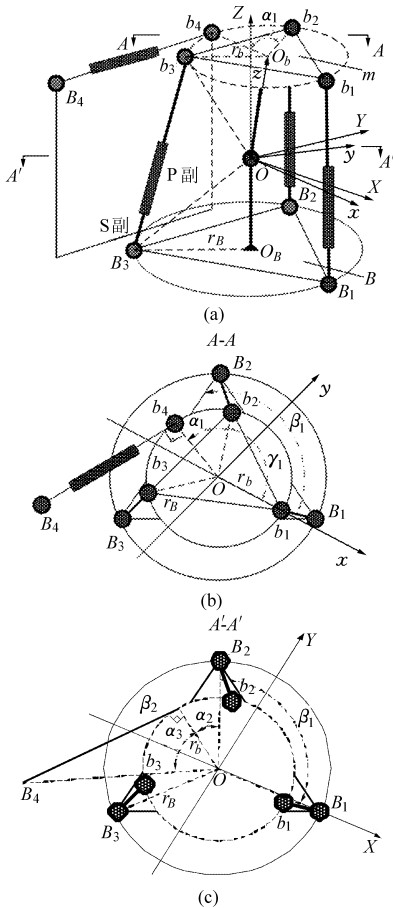


图 1 4-SPS-1-S 并联机构基本构型主、俯视图
Fig.1 Main plot and overhead view of 4-SPS-1-S parallel mechanism
(a)主视图 (b)俯视图 1 (c)俯视图 2

为简化计算,固定坐标系 $B: OXYZ$ 与运动坐标系 $m: Oxyz$ 的原点都位于 O ,其中,固定坐标系 $OXYZ$ 的 X 轴平行于 $O_B B_1$, Z 轴垂直于固定平台方向向上, Y 轴方向按右手法则确定;运动坐标系 $Oxyz$ 的 x 轴平行于 $O_b b_1$, z 轴垂直于运动平台方向向上, y 轴方向按右手法则确定;两平台间第 i 条支路两铰链间矢量 $L_i (i=1,2,3)$ 表示,4 条支承杆长为 l_i ,其作用方向的单位矢量为 q_i , B 、 m 两个平台三角形外接圆的半径为 r_B 、 r_b 。 O 距离 B 、 m 两个平台中心的长度:

$$OO_B = h_B, OO_b = h_b。$$

其他相关参数设置 β_1 、 γ_1 、 α_1 、 α_2 、 α_3 如图 1 所示,则该支链与上、下平台的铰链点 b_i 、 B_i 在各自坐标系中的位置坐标为

$$b_1^m = \begin{bmatrix} r_b \\ 0 \\ h_b \end{bmatrix} \quad b_2^m = \begin{bmatrix} r_b \cos \gamma_1 \\ r_b \sin \gamma_1 \\ h_b \end{bmatrix}$$

$$b_3^m = \begin{bmatrix} r_b \cos(\gamma_1 + \gamma_2) \\ r_b \sin(\gamma_1 + \gamma_2) \\ h_b \end{bmatrix} \quad b_4^m = \begin{bmatrix} r_b \cos(\gamma_1 + \alpha_1) \\ r_b \sin(\gamma_1 + \alpha_1) \\ h_b \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} r_B \\ 0 \\ -h_B \end{bmatrix} \quad B_2 = \begin{bmatrix} r_B \cos \beta_1 \\ r_B \sin \beta_1 \\ -h_B \end{bmatrix}$$

$$B_3 = \begin{bmatrix} r_B \cos(\beta_1 + \beta_2) \\ r_B \sin(\beta_1 + \beta_2) \\ -h_B \end{bmatrix}$$

$$B_4 = \begin{bmatrix} r_b \cos(\beta_1 + \alpha_2 + \alpha_3) / \cos \alpha_3 \\ r_b \sin(\beta_1 + \alpha_2 + \alpha_3) / \cos \alpha_3 \\ h_b \end{bmatrix}$$

1.2 机构自由度计算

根据 Kutzbach Grubler 公式^[3],空间机构自由度为

$$F = \lambda(n - g - 1) + \sum_{i=1}^N f_i - F_p \quad (1)$$

对于图 1 所示的 4-SPS-1-S 型机构,机构的阶数 $\lambda = 6$,构件数 $n = 10$,运动副数 $g = 13$,冗余自由度 $F_p = 4$,球铰链的自由度为 3,移动副的自由度为 1,代入到式(1)解得: $F = 3$ 。

该冗余驱动机构的自由度为 3,能够实现动平台的姿态角 (Ψ, θ, ϕ) ,即实现空间三维转动。其中,驱动支链油缸 $b_2 B_2$ 与 $b_3 B_3$ 交错运动可实现位姿角度 Ψ , $b_2 B_2$ 和 $b_3 B_3$ 同步运动且二者与 $b_1 B_1$ 交错运动可实现位姿角度 θ ,水平驱动油缸 $b_4 B_4$ 伸缩实现位姿角度 ϕ 。为实现上述运动,根据该冗余驱动 4-SPS-1-S 机构的构型与负载特点,提出用变结构控制的方法对其施行控制,以实现各驱动链的协调运动。该机构变结构控制策略的系统控制流程如图 2 所示(q 为动平台输出角位移, q_d 为期望角位移, $e = q - q_d$, \ddot{q}_d 为期望角加速度, p 为油缸压力)。

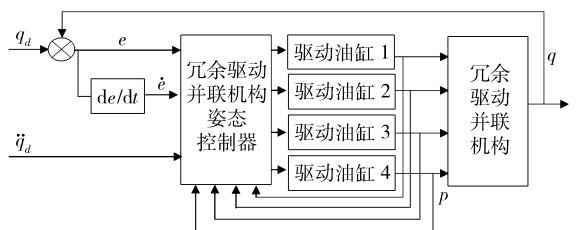


图 2 4-SPS-1-S 并联机构变结构控制流程简图
Fig.2 Variable structure control flow diagram of 4-SPS-1-S parallel mechanism

同文献[7~8]的3-SPS-1-S机构相比,该冗余驱动作为并联机构正常驱动下额外增加的驱动输入,不改变机构动平台的运动自由度,但是可以改善机构的运动性能。

2 机构动力学性能评价指标

动力学性能评价指标是机构动力学分析与设计的主要依据。本文引入承载力性能评价指标与驱动性能评价指标对4-SPS-1-S机构的动力学性能进行评价。

2.1 承载力性能评价指标

承载能力是机构的重要性能指标之一,它决定了机构的工作负荷能力。由于作用在机构末端的广义力与机构的 Jacobian 矩阵有直接的关系,因此该广义力因机构的位形的改变而变化^[9]。定义并联机构驱动副的输入力矢量 \mathbf{f} ,作用运动平台上的力或力矩矢量 \mathbf{F} ,则根据虚功原理可以得到

$$\mathbf{F} = \mathbf{G}\mathbf{f} \quad (2)$$

式中, \mathbf{G} 为力 Jacobian 矩阵。根据机构学中运动传递和力传递之间的对偶关系,存在

$$\mathbf{G} = \mathbf{J}^T \quad (3)$$

因此,并联机构的承载能力指标就定义为输入驱动力矢量 \mathbf{f} 的模为单位 1 时,输出力或力矩矢量 \mathbf{F} 的模的极值。为了求取该极值,构造如下的拉格朗日方程^[10]

$$L_F = \mathbf{f}^T \mathbf{G}^T \mathbf{G} \mathbf{f} - \lambda_F (\mathbf{f}^T \mathbf{f} - 1) \quad (4)$$

式中, λ_F 为拉格朗日乘子。

当 $\|\mathbf{f}\| = 1$ 时,承载力极值为矩阵 $\mathbf{G}^T \mathbf{G}$ 的最大、最小特征值的开方,即

$$\|\mathbf{F}_{\max}\| = \sqrt{\lambda_{F\max}(\mathbf{G}^T \mathbf{G})} = \sigma_{F\max}(\mathbf{G}) \quad (5)$$

$$\|\mathbf{F}_{\min}\| = \sqrt{\lambda_{F\min}(\mathbf{G}^T \mathbf{G})} = \sigma_{F\min}(\mathbf{G}) \quad (6)$$

式中 $\lambda_{F\max}(\mathbf{G}^T \mathbf{G})$ 、 $\lambda_{F\min}(\mathbf{G}^T \mathbf{G})$ ——矩阵 $\mathbf{G}^T \mathbf{G}$ 的最大、最小特征值

$\sigma_{F\max}(\mathbf{G})$ 、 $\sigma_{F\min}(\mathbf{G})$ ——矩阵 \mathbf{G} 的最大、最小奇异值

$\|\mathbf{F}_{\max}\|$ 、 $\|\mathbf{F}_{\min}\|$ 是并联机构在驱动力矢量 \mathbf{f} 的模为单位 1 时的最大、最小承载能力。本文取最大承载能力极值用于评价机构在某参考点的承载能力,原则上该极值越大,机构的承载能力越好。

2.2 驱动性能评价指标

并联机构的运动平台工作时,驱动支链的轴向驱动力 \mathbf{f} 与动平台所受外力或力矩矢量 \mathbf{F} 平衡,由式(2)、(3)得到

$$\mathbf{J}^T \mathbf{f} = \mathbf{F} \quad (7)$$

根据矩阵奇异值分解理论^[10],对于任一矩阵 $\mathbf{J} \in \mathbf{R}^{m \times n}$,存在酉矩阵 \mathbf{U} 和 \mathbf{V} 使得

$$\mathbf{U}^H \mathbf{J} \mathbf{V} = \begin{bmatrix} \Sigma & \mathbf{1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (8)$$

成立。

式中, $\Sigma \mathbf{1} = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r)$, $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_r > 0$, $r = \min(m, n)$ 为 Jacobian 矩阵 \mathbf{J} 的秩。由此可以求得 $\sigma_{\max} = \sigma_1$, $\sigma_{\min} = \sigma_r$, 并且可以计算得到

$$(\det(\mathbf{J}^T \mathbf{J}))^{1/2} = \prod_{i=1}^r \sigma_i \quad (9)$$

σ_i 的几何意义可以理解为输出速度到输入速度变换模值的放大倍数。根据式(9),动平台所受外力不变的情况下, $(\det(\mathbf{J}^T \mathbf{J}))^{1/2}$ 较大,要求输入的驱动力较小,有利于动平台驱动。当 $(\det(\mathbf{J}^T \mathbf{J}))^{1/2} = 0$, 驱动力无法与动平台外力平衡,机构处于奇异位形^[10]。因此,定义 $Q = (\det(\mathbf{J}^T \mathbf{J}))^{1/2}$ 作为机构的驱动性能指标,该值越大说明驱动性能越好,该值趋近于零则易发生奇异位形。

3 4-SPS-1-S 机构 Jacobian 矩阵求解

由式(5)、(6)与(9),若求解评价机构的承载力与驱动性能,必须首先求解机构的速度 Jacobian 矩阵。在这里,通过建立机构的速度映射模型可以求解机构的 Jacobian 矩阵。

机构的速度映射方程为

$$\dot{\mathbf{i}} = \mathbf{J}\boldsymbol{\omega} \quad (10)$$

其中 $\dot{\mathbf{i}} = [\dot{i}_1 \quad \dot{i}_2 \quad \dot{i}_3 \quad \dot{i}_4]^T$ $\boldsymbol{\omega} = [\dot{\Psi} \quad \dot{\theta} \quad \dot{\phi}]^T$

式中 $\dot{\mathbf{i}}$ ——驱动链关节速度矢量

$\boldsymbol{\omega}$ ——动平台参考点转动速度矢量

\mathbf{J} ——并联机构 Jacobian 矩阵

对该机构铰链点坐标值进行代换,令

$$\mathbf{b}_i^m = [b_{ix}^m \quad b_{iy}^m \quad b_{iz}^m] \quad \mathbf{B}_i = [B_{ix} \quad B_{iy} \quad B_{iz}]$$

定义 ${}^B \mathbf{R}_m$ 为 $\{m\}$ 相对于 $\{B\}$ 的姿态旋转矩阵。

选择 $(X-Y-Z)$ PRY 角坐标系表示法描述姿态旋转矩阵

$${}^B \mathbf{R}_m = \mathbf{R}_Z(\phi) \mathbf{R}_Y(\theta) \mathbf{R}_X(\Psi) = \begin{bmatrix} \cos\phi\cos\theta & \cos\phi\sin\theta\sin\Psi - \sin\phi\cos\Psi & \cos\phi\sin\theta\cos\Psi + \sin\Psi\sin\phi \\ \sin\phi\cos\theta & \sin\phi\sin\theta\sin\Psi + \cos\phi\cos\Psi & \sin\phi\sin\theta\cos\Psi - \cos\phi\sin\Psi \\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\Psi & \cos\theta\cos\Psi \end{bmatrix} \quad (11)$$

对于该并联机构,由式(10)得到

$$\dot{i}_i = \mathbf{q}_i \cdot (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{b}_i) = (\mathbf{b}_i \times \mathbf{q}_i)^T \cdot \boldsymbol{\omega} \quad (12)$$

则机构的速度 Jacobian 矩阵

$$\mathbf{J} = (\mathbf{b}_i \times \mathbf{q}_i)^T \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (13)$$

其中 $\mathbf{b}_i = {}^B \mathbf{R}_m \mathbf{b}_i^m$ $\mathbf{q}_i = \frac{\mathbf{L}_i}{l_i} = \frac{1}{l_i} \begin{bmatrix} b_{ix} - B_{ix} \\ b_{iy} - B_{iy} \\ b_{iz} - B_{iz} \end{bmatrix}$

4 机构动力学性能分析

对于图 1 的 4-SPS-1-S 型机构,取机构的几何参数如下: $r_B = 0.62 \text{ m}$, $r_m = 0.25 \text{ m}$, $h_b = 1 \text{ m}$, $h_b = 0$, $\beta_1 = \beta_2 = 120^\circ$, $\gamma_1 = \gamma_2 = 120^\circ$, $\alpha_1 = 30^\circ$, $\alpha_2 = 30^\circ$, $\alpha_3 = 60^\circ$ 。

根据式(5)、(6)与(9),求出该机构在其工作空

间内任意工作位置时的承载力与驱动性能指标。根据工作需要, 给定动平台在工作空间的 3 个转动角度为 $\Psi \in [-3^\circ, 3^\circ], \theta \in [-3^\circ, 3^\circ], \phi \in [-5^\circ, 5^\circ]$ 。

利用 Matlab 编制仿真程序, 图 3~5 分别为 $\theta = 0^\circ, -3^\circ, 3^\circ$ 时, 并联机构的最大承载力性能指标与驱动性能指标在工作空间上的分布情况。

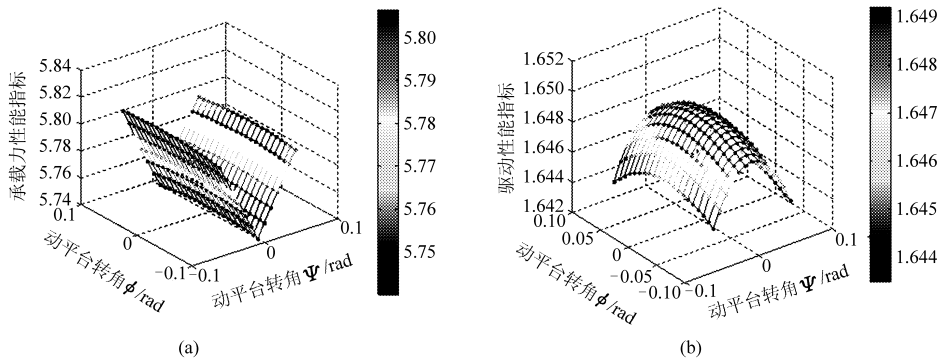


图 3 $\theta = 0^\circ$ 动力性能指标在任务空间的分布

Fig. 3 Dynamic performance index distribution in workspace of $\theta = 0^\circ$

(a) 承载力性能指标 (b) 驱动性能指标

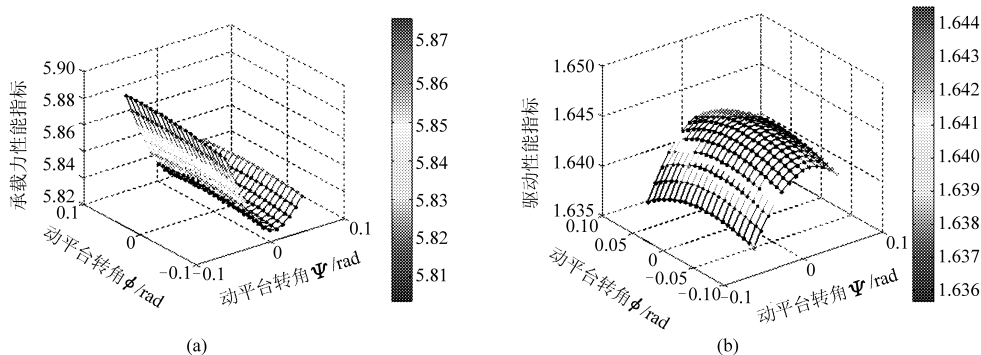


图 4 $\theta = -3^\circ$ 动力性能指标在任务空间的分布

Fig. 4 Dynamic performance index distribution in workspace of $\theta = -3^\circ$

(a) 承载力性能指标 (b) 驱动性能指标

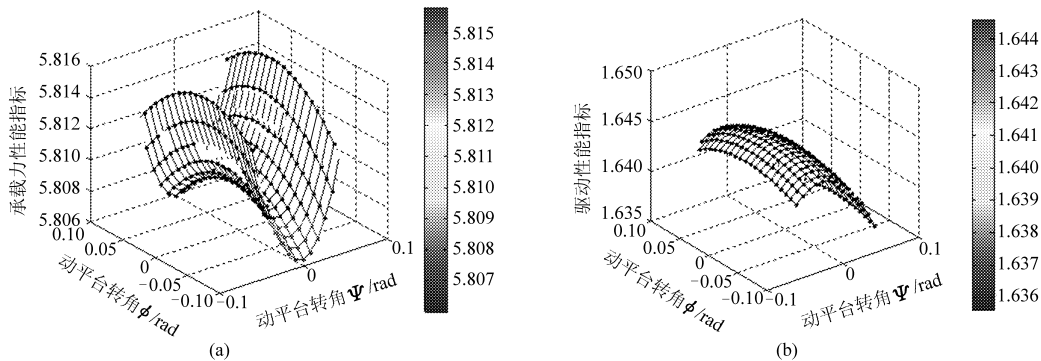


图 5 $\theta = 3^\circ$ 动力性能指标在任务空间的分布

Fig. 5 Dynamic performance index distribution in workspace of $\theta = 3^\circ$

(a) 承载力性能指标 (b) 驱动性能指标

由图 3~5 可得到 $\Psi \in [-3^\circ, 3^\circ], \phi \in [-5^\circ, 5^\circ], \theta = 0^\circ, -3^\circ, 3^\circ$ 时动力性能指标的取值, 如表 1 所示。

同理, 可以得到 $\theta \in [-3^\circ, 3^\circ], \phi \in [-5^\circ, 5^\circ], \Psi = 0^\circ, -3^\circ, 3^\circ$ 时动力性能指标的取值范围, 表 2 所示; 以及可以得到 $\Psi \in [-3^\circ, 3^\circ], \theta \in [-3^\circ, 3^\circ], \phi = 0^\circ, -5^\circ, 5^\circ$ 时动力性能指标的取值范围, 表 3 所示。

表 1 动力性能指标 ($\Psi \in [-3^\circ, 3^\circ], \phi \in [-5^\circ, 5^\circ]$)

Tab. 1 Dynamic performance index value

($\Psi \in [-3^\circ, 3^\circ], \phi \in [-5^\circ, 5^\circ]$)

姿态角度 $\theta / (^\circ)$	最大承载力性能指标	驱动性能指标
-3	5.81 ~ 5.87	1.636 ~ 1.644
0	5.75 ~ 5.80	1.644 ~ 1.649
3	5.807 ~ 5.815	1.636 ~ 1.644

表2 动力性能指标 ($\theta \in [-3^\circ, 3^\circ], \phi \in [-5^\circ, 5^\circ]$)Tab.2 Dynamic performance index value
($\theta \in [-3^\circ, 3^\circ], \phi \in [-5^\circ, 5^\circ]$)

位姿角度 $\Psi/(\circ)$	最大承载力性能指标	驱动性能指标
-3	5.80 ~ 5.87	1.636 ~ 1.645
0	5.75 ~ 5.81	1.643 ~ 1.649
3	5.795 ~ 5.825	1.636 ~ 1.645

表3 动力性能指标 ($\Psi \in [-3^\circ, 3^\circ], \theta \in [-3^\circ, 3^\circ]$)Tab.3 Dynamic performance index value
($\Psi \in [-3^\circ, 3^\circ], \theta \in [-3^\circ, 3^\circ]$)

位姿角度 $\phi/(\circ)$	最大承载力性能指标	驱动性能指标
-5	5.76 ~ 5.86	1.638 ~ 1.648
0	5.76 ~ 5.86	1.644 ~ 1.646
5	5.76 ~ 5.86	1.636 ~ 1.646

由上述图表分析可以得到:

(1) 两种动力性能指标在任务空间变化幅度较小,分布均匀,随着机构位形的改变动力性能并没有发生大的变化,说明机构的稳定性较好。

(2) 呈现出较好的对称性;尤其是位姿角度 $\phi \in [-5^\circ, 5^\circ]$ 变化时,承载力性能指标与驱动性能指标基本没有发生变化,这与机构的对称性是相对应的。

(3) 在任务空间内,承载力指标的范围 5.75 ~ 5.87 之间,具有较好的承载能力;且不存在为零的

情况,说明该机构承载能力是各项同性的,机构在运动过程中不会发生奇异位形;同时,该机构驱动性能指标的范围始终在 1.636 ~ 1.649 之间,不存在为零的情况,说明机构在运动过程中不会发生奇异位形,具有较好的驱动性能与各向同性。

(4) 改变运动平台位姿角度 (Ψ, θ, ϕ) 的转动范围,得到与上述相同的结论:该机构的承载力与驱动性能在在运动过程中呈现出较好的各向同性,机构在任务空间内具有较好的动力学性能。

5 结论

(1) 建立了空间转动三自由度冗余驱动 4 - SPS - 1 - S 型并联机构的机构模型,该机构能够实现空间偏转、仰俯、横摇三轴转动,具有较高的承载能力、刚度及稳定性,并通过建立机构的速度映射解析方程求出了机构的 Jacobian 矩阵。

(2) 根据 4 - SPS - 1 - S 型并联机构的应用需求及结构特点,引入并定义了机构承载力与驱动性能两类动力学性能评价指标,分别建立了衡量并联机构承载能力和驱动性能的解析方程,结合具体算例仿真分析了该并联机构的两类动力学性能指标在任务空间的分布规律。

(3) 研究表明,该机构的承载力与驱动性能在在运动过程中呈现出较好的各向同性,机构在任务空间内具有较好的动力学性能。

参 考 文 献

- Yoshikawa T. Dynamic manipulability of robot manipulators [J]. Journal of Robotic Systems, 1985, 2(1):113 ~ 124.
- Ma O, Angeles J. The concept of dynamics isotropy and its applications to inverse kinematics and trajectory planning [C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Cincinnati, USA, 1990:481 ~ 486.
- 张微微,郭希娟. Stanford 机器人动力学性能分析与仿真 [J]. 计算机仿真, 2007, 24 (5):138 ~ 141.
Zhang Weiwei, Guo Xijuan. Dynamic performance analysis and simulation of Stanford robot [J]. Computer Simulation, 2007, 24 (5):138 ~ 141. (in Chinese)
- Xi F F, Sinatra R, Han W. Effect of leg inertia on dynamics of sliding-leg hexapods [J]. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 2001, 123(2):265 ~ 271.
- Xi F F, Zhang D, Mechefske C, et al. Global kinetostatic modeling of tripod-based parallel kinematic machine [J]. Mechanism and Machine Theory, 2004, 39(4):357 ~ 377.
- Geng Q J, Guo X J. Research on acceleration performance indices for serial mechanism [C] // 2007 IEEE International Conference on Automation and Logistics, ICAL 2007, Jinan, China. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society Press, 2007:2160 ~ 2164.
- 崔国华,张艳伟,张英爽,等. 空间转动型 3 - SPS/S 并联机器人的构型设计分析 [J]. 吉林大学学报:工学版, 2009, 39(增刊1):200 ~ 205.
Cui Guohua, Zhang Yanwei, Zhang Yingshuang, et al. Configuration design and analysis of a new 3 - SPS/ S spatial rotation parallel manipulator [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2009, 39(Supp. 1):200 ~ 205. (in Chinese)
- 张艳伟,崔国华,孙振军,等. 空间转动 3 - SPS - 1 - S 型并联机构的奇异位形研究 [J]. 农业机械学报, 2010, 41(4):199 ~ 203.
Zhang Yanwei, Cui Guohua, Sun Zhenjun, et al. Singular loci analysis of a new 3 - SPS - 1 - S spatial rotation parallel manipulator [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4):199 ~ 203. (in Chinese)
- 金振林,高峰,刘辛军. 一种新颖的并联微动机器人结构的承载能力和速度指标分析 [J]. 机械设计, 2000(9):4 ~ 6.
Jin Zhenlin, Gao Feng, Liu Xinjun. The analysis of load-bearing capacity and velocity indices for a novel structure of parallel jogging robot [J]. Mechanical Design, 2000(9):4 ~ 6. (in Chinese)
- 刘溯. 1T3R 并联机器人设计及其实验装置研制 [D]. 重庆:重庆大学, 2006.