

基于给定工作空间的球面变胞仿生关节机构优化设计*

金国光¹ 王艳¹ 宋轶民² 畅博彦¹ 梁栋²

(1. 天津工业大学天津市现代机电装备技术重点实验室, 天津 300387; 2. 天津大学机械工程学院, 天津 300072)

摘要: 研究一种由静平台、动平台、3个环形支链和1个中间变胞支链组成的新型球面变胞仿生关节机构, 该机构具有2个构态, 即构态1(正常构态)和构态2(变胞构态)。通过中间支链的结构变换, 可以实现构态切换。首先运用矢量代数法, 建立机构运动学逆解模型, 得到其速度映射模型和雅可比矩阵。其次, 在逆解模型的基础上, 研究机构工作空间与机构尺寸关系, 根据分布规律对工作空间大小进行优化, 确定预设工作空间。最后, 根据承载力和刚度性能评价指标对给定工作空间下的机构进行尺寸优化设计, 分别给出每种性能指标较好的尺寸范围, 综合两种指标, 得到机构最佳设计尺寸。

关键词: 变胞机构 工作空间 承载力 刚度 仿生关节 优化

中图分类号: TH112 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)12-0288-06

Optimum Design of Spherical Metamorphic Mechanism Used for Bionic Joint Based on Prescribed Workspace

Jin Guoguang¹ Wang Yan¹ Song Yimin² Chang Boyan¹ Liang Dong²

(1. Tianjin Key Laboratory of Advanced Mechatronics Equipment Technology, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China 2. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A novel bionic joint spherical metamorphic mechanism was analyzed. It consisted of a base platform, moving platform, three circle legs and one middle metamorphic leg had two configurations named configuration 1 (normal configuration) and configuration 2 (metamorphic configuration). The metamorphic mechanism can transform normal configuration to metamorphic configuration with the change of middle leg. Firstly, kinematic equation was established, and the solutions to inverse kinematic and velocity Jacobian matrix were given. Then the relationship between workspace and links length was discussed based on inverse kinematic solutions. According to regular pattern, the workspace of the mechanism was optimized and the default workspace was determined. Finally, the optimization of links length was given based on the evaluation of payload capacity index and stiffness index for a prescribed workspace. The size ranges of links were respectively obtained when each performance index at a better level. The best design size of the mechanism was obtained based on the comprehensive two indexes.

Key words: Metamorphic mechanism Workspace Payload Stiffness Bionic joint Optimum

引言

机构学^[1] 又称机构和机器理论(简称机械原理), 主要研究机器和机器人中的机构基本组成原理、运动学和动力学等问题。传统的仿生关节常被

设计成球形, 具有3个空间转动自由度, 容易发生结构损伤或破坏^[2]。基于变胞原理^[3-4], 金国光等^[5] 提出一种新型球面变胞仿生关节机构, 具有构态1(正常构态)和构态2(变胞构态)两个构态。机构处于构态1时, 有3个转动自由度, 等效于传统球面

仿生关节机构;机构处于构态 2 时,具有额外的 1 个沿径向移动自由度,可以作为径向缓冲自由度,用于调整机构的多项性能指标。

机器人机构优化设计的基础是性能指标,包括条件数、工作空间、承载力指标和刚度性能指标等^[6-8]。在保证运动学性能前提下,实现机构工作空间最大化是优化设计的目标之一^[6,9-16]。

本文在机构运动学逆解模型的基础上,推导机构速度映射模型和雅可比矩阵,确定机构的工作空间并对工作空间进行优化。在机构工作空间比较大的尺寸范围基础上,根据关节实际应用技术要求,选用机构力雅可比矩阵和柔度矩阵对承载力和刚度指标进行优化设计。

1 机构描述及坐标系的建立

本文所研究的球面变胞仿生关节机构如图 1 所示,它由静平台 n 、动平台 m 以及 3 个结构相同的环形支链 $r_i (i=1,2,3)$ 和 1 个中间变胞支链 r_4 组成。静平台是半径为 a 的圆形导轨,动平台是外接圆半径为 b 的等边三角形 $\triangle B_1 B_2 B_3$,其几何中心为 O_1 。环形支链为 $P_{i1} R_{i2} R_{i3} P_{i4} R_{i5}$,如图 2 所示。移动副 P_{i1} 只有 1 个绕机构中轴线的转动自由度,可以等价于 R_{i1} 。 R_{12} 、 R_{22} 和 R_{32} 的轴线相交于 O 点,其铰链点 A_1 、 A_2 、 A_3 在初始位置时呈等边三角形布局。 P_{i4} 轴线与 R_{i3} 轴线平行,与 R_{i5} 轴线垂直相交于点 B_i 。 R_{i3} 轴线始终与 R_{i2} 轴线垂直相交于 O 点。

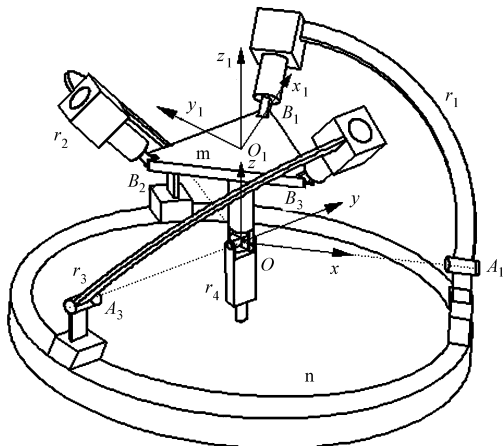


图 1 球面仿生变胞关节机构

Fig. 1 Spherical metamorphic mechanism used for bionic joint

中间变胞支链在遇到外界较大冲击时,可以特定的变胞方式,如力变胞和电磁变胞^[17],实现从构态 1 到构态 2 的切换。机构处于构态 1 时,如图 3a 所示,中间支链为 $R_{41} U_{42}$ 结构,其中 R_{41} 的轴线过 O 点且与环形导轨中轴线重合, U_{42} 由相互垂直的 2 个转动副组成,其交点为 O 点。机构处于构态 2 时,

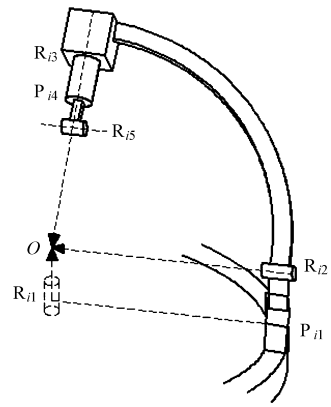


图 2 环形支链

Fig. 2 Circle leg

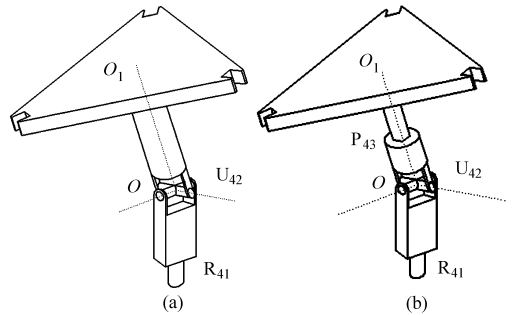


图 3 中间变胞支链

Fig. 3 Middle metamorphic leg

如图 3b 所示,中间支链为 $R_{41} U_{42} P_{43}$ 结构,其中 P_{43} 轴线与动平台垂直,且与动平台交于 O_1 点,与 U_{42} 交于 O 点。

为简化计算,动坐标系 $\{m\}$ 与静坐标系 $\{O\}$ 分别以 O_1 、 O 为坐标原点。其中动坐标系 $\{m\}$ 的 x 轴平行于 $O_1 B_1$, z 轴垂直于动平台向上, y 轴由右手法则确定;静坐标系 $\{O\}$ 的 x 轴方向与 OA_1 的初始位置方向一致, z 轴垂直于环形导轨向上, y 轴由右手法则确定(图 1)。

将动坐标系 $\{m\}$ 视物体坐标系,表示为 $O_1 x_1 y_1 z_1$,静坐标系 $\{O\}$ 视参考坐标系,表示为 $Oxyz$ 。球面变胞仿生关节机构不仅可以实现三维转动,在构态 2 时可以实现沿径向,即 P_{43} 轴线方向的移动,故采用回转角 φ_1 、俯仰角 φ_2 、偏转角 φ_3 来表达旋转和平移,则 $\{m\}$ 相对于 $\{O\}$ 的旋转平移矩阵为

$${}^O R_m = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{3 \times 3} & \mathbf{P}_{3 \times 1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 & k_2 & k_3 & P_x \\ k_5 & k_6 & -k_4 & P_y \\ k_7 & k_8 & k_9 & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 $k_1 = c\varphi_1 c\varphi_3 - s\varphi_1 c\varphi_2 s\varphi_3$ $k_3 = s\varphi_1 s\varphi_2$
 $k_2 = -c\varphi_1 s\varphi_3 - s\varphi_1 c\varphi_2 c\varphi_3$ $k_4 = c\varphi_1 s\varphi_2$
 $k_5 = s\varphi_1 c\varphi_3 + c\varphi_1 c\varphi_2 s\varphi_3$
 $k_6 = -s\varphi_1 s\varphi_3 + c\varphi_1 c\varphi_2 c\varphi_3$
 $k_7 = s\varphi_2 s\varphi_3$ $k_8 = s\varphi_2 c\varphi_3$ $k_9 = c\varphi_2$

$$P_x = ds\varphi_1 s\varphi_2 \quad P_y = -dc\varphi_1 s\varphi_2 \quad P_z = dc\varphi_2$$

$$s\varphi_i = \sin\varphi_i \quad c\varphi_i = \cos\varphi_i \quad (i = 1, 2, 3)$$

式中 d ——中间支链杆长

2 球面仿生关节机构运动学模型

2.1 位置逆解模型

位置逆解分析过程为已知动平台位姿 $(l, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3)$, 求解各驱动滑块的输入角和中间变胞支链移动输入。对于此机构, 约束方程的建立是将动平台、静平台上的铰链点的坐标在参考坐标系中表示, 然后根据机构特点建立约束方程。

如图 1 所示, 各铰链点在各自坐标系中的位置坐标为: A_1 点坐标为 $[a\cos\theta_1 \quad a\sin\theta_1 \quad 0]^T$, A_2 点坐标为 $[a\cos\theta_2 \quad a\sin\theta_2 \quad 0]^T$, A_3 点坐标为 $[a\cos\theta_3 \quad a\sin\theta_3 \quad 0]^T$, B_1^m 点坐标为 $[b\cos\delta_1 \quad b\sin\delta_1 \quad 0]^T$, B_2^m 点坐标为 $[b\cos\delta_2 \quad b\sin\delta_2 \quad 0]^T$, B_3^m 点坐标为 $[b\cos\delta_3 \quad b\sin\delta_3 \quad 0]^T$ 。

其中, θ_i 为 OA_i 与 x 轴夹角, δ_i 为 OB_i 与轴 x_1 夹角, 逆时针为正, 即

$$\delta_i = (i - 1) \frac{2\pi}{3} \quad (i = 1, 2, 3)$$

在坐标系 $Oxyz$ (图 1) 下的约束方程为

$$\overrightarrow{OA_i} \cdot \overrightarrow{OB_i} = 0 \quad (2)$$

$$B_i = RB_i^m + P \quad (3)$$

$$d = l \quad (4)$$

对上述部分坐标进行代换, 得

$$B_i^{(m)} = [B_{ix}^{(m)} \quad B_{iy}^{(m)} \quad B_{iz}^{(m)}]^T \quad (5)$$

由式 (1) ~ (5) 得到

$$\begin{cases} (B_{ix}^{(m)} k_1 + B_{iy}^{(m)} k_2 + dk_3) \cos\eta_i + \\ (B_{ix}^{(m)} k_5 + B_{iy}^{(m)} k_6 - dk_4) \sin\eta_i = 0 \\ d = l \end{cases} \quad (6)$$

其中 $\eta_i = \theta_i + \frac{\pi}{2} \pm \frac{\pi}{2} \quad (i = 1, 2, 3)$

求解式 (6) 可以得到机构位置逆解

$$\begin{cases} \theta_i = \arctan\left(\frac{B_{ix}^{(m)} k_1 + B_{iy}^{(m)} k_2 + dk_3}{dk_4 - B_{ix}^{(m)} k_5 - B_{iy}^{(m)} k_6}\right) - \frac{\pi}{2} \mp \frac{\pi}{2} \\ d = l \end{cases} \quad (7)$$

对于给定动平台位姿时, 根据式 (7) 可求出球面变胞仿生关节机构的 3 个驱动滑块输入角 $\theta_i (i = 1, 2, 3)$ 和中间变胞支链的移动输入 d , 即可求得机构的位置逆解。

2.2 速度映射模型及雅可比矩阵

以处于构态 2 时的机构为研究对象, 机构驱动关节速度矢量为

$$\dot{h} = [\dot{\theta}_1 \quad \dot{\theta}_2 \quad \dot{\theta}_3 \quad \dot{d}]^T$$

动平台操作空间速度矢量为

$$\omega = [\dot{\varphi}_1 \quad \dot{\varphi}_2 \quad \dot{\varphi}_3 \quad \dot{l}]^T$$

对式 (6) 位置逆解方程两边关于时间求导, 可以得到机构输入与输出之间的速度约束方程

$$C \dot{h} = D \omega \quad (8)$$

其中

$$C = \begin{bmatrix} e_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} e_1 & f_1 & g_1 & h_1 \\ e_2 & f_2 & g_2 & h_2 \\ e_3 & f_3 & g_3 & h_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} e_i = (-k_5 B_{ix}^{(m)} - k_6 B_{iy}^{(m)} + k_4 l) \cos\theta_i + \\ (k_1 B_{ix}^{(m)} - k_2 B_{iy}^{(m)} + k_3 l) \sin\theta_i \\ f_i = (k_{10} B_{ix}^{(m)} + k_{12} B_{iy}^{(m)} + k_{14} l) \cos\theta_i - \\ (k_{11} B_{ix}^{(m)} - k_{13} B_{iy}^{(m)} + k_{15} l) \sin\theta_i \\ g_i = (k_2 B_{ix}^{(m)} - k_1 B_{iy}^{(m)}) \cos\theta_i + \\ (k_6 B_{ix}^{(m)} - k_5 B_{iy}^{(m)}) \sin\theta_i \\ h_i = k_3 \cos\theta_i - k_4 \sin\theta_i \end{cases} \quad (9)$$

其中

$$k_{10} = s\varphi_1 s\varphi_2 s\varphi_3 \quad k_{11} = c\varphi_1 s\varphi_2 s\varphi_3$$

$$k_{12} = s\varphi_1 s\varphi_2 c\varphi_3 \quad k_{13} = c\varphi_1 s\varphi_2 c\varphi_3$$

$$k_{14} = s\varphi_1 c\varphi_2 \quad k_{15} = c\varphi_1 c\varphi_2$$

由式 (8) 得到球面变胞仿生关节机构关节速度与操作速度的映射模型

$$\dot{h} = C^{-1} D \omega \quad (10)$$

即机构雅可比矩阵为

$$J = C^{-1} D \quad (11)$$

3 机构工作空间研究及性能优化

3.1 工作空间确定

工作空间是机器人操作器的工作区域, 是衡量机器人性能的重要指标。根据操作器工作时的位姿特点, 工作空间又可分为可达工作空间和灵活工作空间。

对于球面变胞仿生关节机构, 取动平台中心 O_1 为动平台位置参考点。 O_1 的位置矢量可以表示为

$$P = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l \sin\varphi_1 \sin\varphi_2 \\ -l \cos\varphi_1 \sin\varphi_2 \\ l \cos\varphi_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

由式 (12) 可以看出, O_1 始终位于半径为 l 的球

面上, l 不同, 球面也不同。考虑到杆件之间的干涉、滑块的行程限制和动静平台的干涉, 球面仿生关节机构的可达工作空间是球面的子集。设静动平台的尺寸为 $a = 50 \text{ mm}$ 、 $b = 15 \text{ mm}$, 3 个欧拉角 φ_1 、 φ_2 、 φ_3 的范围分别为 $0 \sim 360^\circ$ 、 $0 \sim 90^\circ$ 、 $0 \sim 360^\circ$, 中间变胞支链杆长, 即移动副 l 输入范围为 $18 \sim 33 \text{ mm}$ 。给定一个动平台的位姿, 判断是否存在一组输入, 满足这样的输出。

在运动学逆解模型的基础上, 搜索机构的工作空间, 求解其工作空间的流程图如图 4 所示。

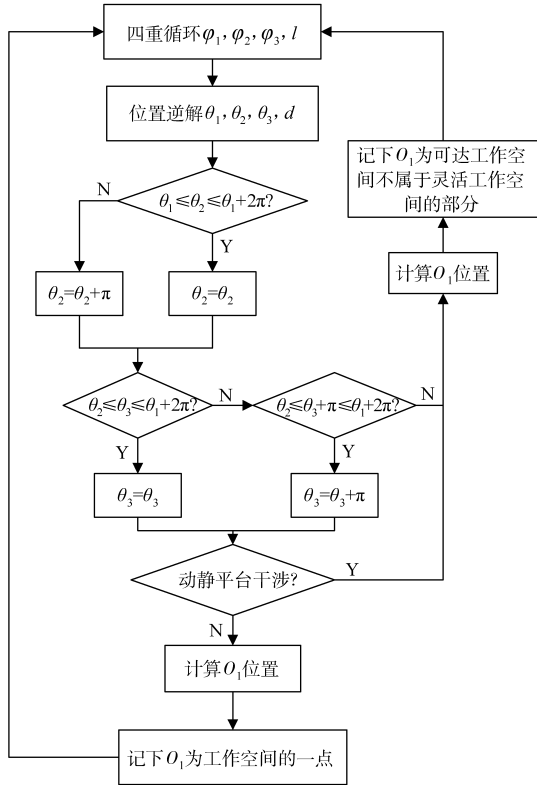


图 4 确定工作空间流程图

Fig. 4 Determine process flow diagram of workspace

球面变胞仿生关节机构的可达工作空间是半径为的球面的子集, 不同的对应不同的球面。为了便于工作空间的观察分析, 将 $l = 33 \text{ mm}$ 时的可达工作空间用三维图谱表示, 如图 5 所示。

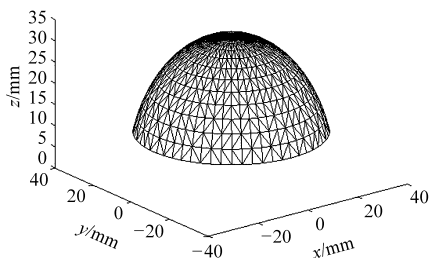


图 5 工作空间
Fig. 5 Workspace

3.2 工作空间优化

上述工作空间的确定只考虑了球面变胞仿生关

节机构尺寸中的中间变胞支链杆长 l 的变化, 下面将综合考虑动静平台的结构尺寸及中间变胞支链杆长 l 对工作空间的影响。

由式(12)分析可以得出, 球面变胞仿生关节机构的可达工作空间由运动学逆解确定的 φ_1 、 φ_2 的范围来确定。由于机构可以实现绕 z 轴的整周转动, 所以球面变胞仿生关节机构的可达工作空间可以更直观地表现为 φ_2 的取值范围。 φ_2 的取值范围即为 OO_1 偏离 z 轴的角度范围。因此在对机构进行工作空间优化时, 采用该方法表达。

对于不同的机构尺寸, φ_2 的取值范围显然是 $[0, \varphi_{2\max}]$, 在进行工作空间优化时, 衡量指标就是 $\varphi_{2\max}$ 。机构尺寸包括静平台半径 a 、动平台外接圆半径 b 和中间变胞支链的杆长, 即移动输入 l 。取 b/a 与 l 两个独立变量, 计算机机构可达工作空间的大小, 所得结果如图 6 所示。

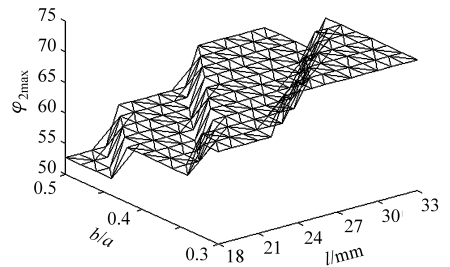


图 6 工作空间性能图谱

Fig. 6 Performance indicator diagram of workspace

图 6 为取 b/a 和 l 两个独立变量时, 机构工作空间的性能图谱。由图 6 可知: 随着 l 的增大和 b/a 的减小, 机构可达工作空间增大; 机构在约束条件下可达最大工作空间为 $\varphi_{2\max} = 71.38^\circ$; 当 $b/a = 0.3$ 时, 机构达到最大工作空间所对应的 l 取值范围最大, 为 $l \in [23, 33] \text{ mm}$ 。因此确定机构参数为 $b/a = 0.3, l \in [23, 33] \text{ mm}$ 。

4 给定工作空间下性能指标分析

4.1 承载力指标

机器人的承载能力决定机器人的工作负荷能力。在机器人工作空间内的不同位形, 末端执行件所能够承受的外力矢的大小和方向是不同的, 同时与机器人的机构尺寸有关。对于机构的某一位姿, 当输入驱动力矢的模为单位 1 时, 可以计算出机构在此点输出力矢的模的极大值和极小值。输出力矢分布在以极大值为长径以极小值为短径的椭圆上, 当作用在机器人末端执行件上的外力矢分布在该椭圆上, 机器人是安全的。因此将承载能力极大值和极小值作为机器人在此点的承载能力评价性能指标。

球面变胞仿生关节机构输出广义力矢量 F 与输入广义力矢量 τ 的关系为

$$F = G\tau \quad (13)$$

其中 $G = [J^T]^{-1}$
式中 G ——机器人静力雅可比矩阵

机器人在某一位姿的承载力极值为矩阵 $G^T G$ 最大、最小特征值的平方根

$$\begin{cases} \|F_{\max}\| = \sqrt{\lambda_{F_{\max}}} \\ \|F_{\min}\| = \sqrt{\lambda_{F_{\min}}} \end{cases} \quad (14)$$

由于机器人的承载力与物理位形有关,根据文献[18]定义了机器人的承载力评价指标

$$\begin{cases} \zeta_{F_{\max}} = \frac{\int_S \|F_{\max}\| dS}{\int_S dS} \\ \zeta_{F_{\min}} = \frac{\int_S \|F_{\min}\| dS}{\int_S dS} \end{cases} \quad (15)$$

式中 $\zeta_{F_{\max}}、\zeta_{F_{\min}}$ ——机构承载力最大、最小承载力评价指标

S ——工作空间面积

由式(14)和(15)可以计算出在不同的 l 下,机构承载力的极值,如图7所示。

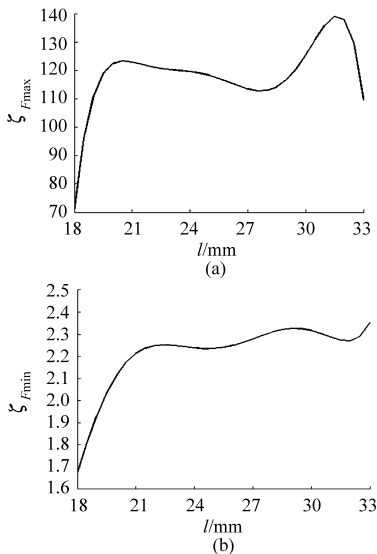


图7 承载力性能指标图

Fig.7 Performance indicator diagram of payload index

图7为当 $b/a = 0.3$ 时,机构在不同的 l 下承载力极大值和极小值性能图谱,由图谱可知:承载力最大值指标 $\zeta_{F_{\max}}$ 与最小值指标 $\zeta_{F_{\min}}$ 的变化趋势基本一致。随 l 的增大,承载能力性能指标 $\zeta_{F_{\max}}$ 和 $\zeta_{F_{\min}}$ 的值先增大后慢慢趋于平稳。承载能力性能指标值较大的区域主要集中在 $28 \text{ mm} \leq l \leq 32 \text{ mm}$ 范围内,承

载能力最好的机构尺寸为 $l = 31 \text{ mm}$ 。

4.2 刚度指标

在外力的作用下,机构末端执行件会产生变形,变形的大小与机构的尺寸、位形和作用力的大小、方向有关。当作用力的模为单位1时,在不同的 l 下,可以求出某一位形机构末端执行件变形的极大值和极小值。机构沿变形极大值的方向刚度最差,沿变形极小值的方向刚度最好。沿不同的方向,机构变形不同,但变形均分布在以极大值为长径以极小值为短径的椭圆上。在某一位姿,变形极大值和极小值可以作为刚度的评价性能指标。对于本文研究的球面变胞仿生关节机构,构态1向构态2切换的瞬间,即确定构态1的 l ,尽可能的将变形降到最低,变形极大值和极小值越小越好。

球面仿生关节机构末端执行件与广义外力关系为

$$H = MF \quad (16)$$

其中 $M = JJ^T$

式中 M ——柔度矩阵

机器人末端执行器的位置变形的极值为矩阵 $M^T M$ 最大、最小特征值的平方根

$$\begin{cases} \|H_{\max}\| = \sqrt{\lambda_{H_{\max}}} \\ \|H_{\min}\| = \sqrt{\lambda_{H_{\min}}} \end{cases} \quad (17)$$

由于机构的刚度性能与机器人的物理位形有关,根据文献[18]定义了在不同 l 输入下,机构在相应工作空间的刚度性能评价指标

$$\begin{cases} \zeta_{H_{\max}} = \frac{\int_S \|H_{\max}\| dS}{\int_S dS} \\ \zeta_{H_{\min}} = \frac{\int_S \|H_{\min}\| dS}{\int_S dS} \end{cases} \quad (18)$$

式中 $\zeta_{H_{\max}}、\zeta_{H_{\min}}$ ——机构变形最大、最小值,是评价机器人的刚度性能指标

由式(17)和(18)可以计算出在不同 l 输入下,机构在工作空间的某一位形的变形极值,如图8所示。图8为当 $b/a = 0.3$ 时,机构在不同的 l 下变形极大值和极小值图谱,可知:变形极大值指标 $\zeta_{H_{\max}}$ 与变形极小值指标 $\zeta_{H_{\min}}$ 随着 l 的增大而减小;刚度性能指标较好的区域集中在 $28 \text{ mm} \leq l \leq 33 \text{ mm}$ 输入范围内,刚度性能最好的机构尺寸为 $l = 31 \text{ mm}$ 。

根据机构工作空间优化结果可知,当球面变胞仿生关节机构外形尺寸 $b/a = 0.3$ 时,机构达到最大工作空间且对应的 l 取值范围最大。在此基础上,综合承载力指标和刚度指标,当 $l = 31 \text{ mm}$ 时,上述

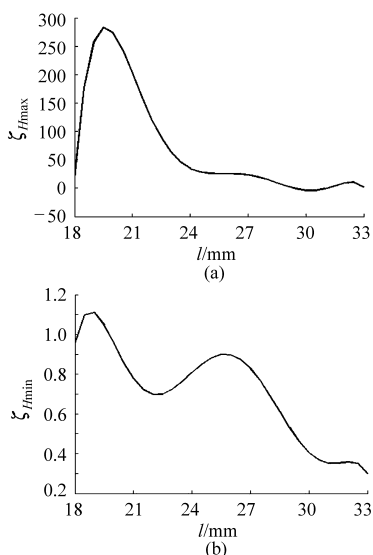


图 8 刚度性能指标图

Fig. 8 Performance indicator diagram of stiffness index

两项指标是最优的,可以将其确定为机构由构态 1 向构态 2 切换时中间变胞支链杆长的初值。此外,当 $28 \text{ mm} \leq l \leq 31 \text{ mm}$ 时,机构承载力、刚度性能都处于较好范围,可以将其确定为机构中间变胞支链杆

长在构态 2 下的变化范围。上述结构尺寸可保证机构在工作空间最大的前提下,同时具有较好的承载能力和抵抗变形能力。

5 结论

(1) 研究了一种新型球面变胞仿生关节机构,有 2 种工作形式,即构态 1 和构态 2。运用矢量代数法构建了机构的运动学模型,建立了机构位置逆解与速度映射解析方程,并求解出了机构雅可比矩阵。

(2) 基于运动学逆解模型,搜索机构工作空间,研究了机构工作空间与机构尺寸的关系,并确定了预设工作空间。

(3) 在给定工作空间下,根据承载能力和刚度性能评价指标,确定了机构在不同构态下的最佳设计尺寸:静动平台尺寸分别为 $a = 50 \text{ mm}$, $b = 15 \text{ mm}$; 机构处于构态 1 时,中间变胞支链杆长为 31 mm ,机构处于构态 2 时,中间变胞支链杆长范围为 $28 \text{ mm} \leq l \leq 31 \text{ mm}$ 。

参 考 文 献

- 1 邹慧君,高峰. 现代机构学进展[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- 2 Dai Jiansheng, Zhao Tieshi. Sprained ankle physiotherapy based mechanism synthesis and stiffness analysis of robotic rehabilitation device[J]. *Autonomous Robots*, 2004, 16(2): 207 ~ 218.
- 3 Dai Jiansheng, Zhang Qixian. Metamorphic mechanisms and their configuration models[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2000, 13(3): 212 ~ 218.
- 4 戴建生,丁希仑,邹慧君. 变胞原理和变胞机构类型[J]. *机械工程学报*, 2005, 41(6): 7 ~ 12.
Dai Jiansheng, Ding Xilun, Zou Huijun. Fundamentals and categorization of metamorphic mechanisms[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(6): 7 ~ 12. (in Chinese)
- 5 Jin Guoguang, Chang Boyan. Configuration change and mobility analysis of a new metamorphic parallel mechanism used for bionic joint[C] // 2nd ASME/IFTOMM International Conference on Reconfigurable Mechanisms and Robots, ReMAR2012, 2012: 333 ~ 342.
- 6 Gosselin C M, Lavoie E. On the kinematic design of spherical three-degree-of-freedom parallel manipulators[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 1993, 12(4): 394 ~ 402.
- 7 Gosselin C M, Jean M. Determination of the workspace of planar parallel manipulators with joint limits[J]. *Robotics and Autonomous System*, 1996, 17(3): 129 ~ 138.
- 8 Gao Feng, Liu Xinjun, Gruver W. Performance evaluation of two degree of freedom planar parallel robots[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 1998, 33(6): 661 ~ 668.
- 9 Gosselin C M, Angeles J. The optimum kinematic design of a spherical three- degree-of-freedom parallel manipulators[J]. *ASME Journal of Mechanical Design*, 1989, 111(2): 202 ~ 207.
- 10 Miller K. Maximization of workspace volume of 3-DOF spatial parallel manipulators[J]. *J. Mech. Des.*, 2002, 124(2): 347 ~ 350.
- 11 Liu X J, Jin Z L, Gao F. Optimum design of 3-DOF spherical parallel manipulators with respect to the condition and stiffness indices[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2000, 35(9): 1 257 ~ 1 267.
- 12 李树平,谢少荣,程军,等. 基于差分进化的球面并联机构仿生眼参数优化[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(11): 189 ~ 194.
Li Shuping, Xie Shaorong, Cheng Jun, et al. Parameter optimization for spherical parallel mechanism bionic eye based on differential evolution[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(11): 189 ~ 194. (in Chinese)
- 13 Bai S P. Optimum design of spherical parallel manipulators for a prescribed workspace[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2010, 45(2): 200 ~ 211.

- [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2003, 50(5): 944 ~ 952.
- 12 Canudas de Wit C, Olsson H, Astrom K J, et al. A new model for control of systems with friction [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1995, 40(3): 419 ~ 425.
- 13 Amthor A, Zschaeck S, Ament C. High precision position control using an adaptive friction compensation approach [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2010, 55(1): 274 ~ 278.
- 14 San P P, Ren B, Ge S S, et al. Adaptive neural network control of hard disk drives with hysteresis friction nonlinearity [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2011, 19(2): 351 ~ 358.
- 15 Davis T A, Shin Y C, Yao B. Observer-based adaptive robust control of friction stir welding axial force [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2011, 16(6): 1 032 ~ 1 039.
- 16 刘丽兰, 刘宏昭, 原大宁, 等. 考虑粘滑摩擦的时变振动系统模态参数辨识[J]. 农业机械学报, 2010, 41(1): 177 ~ 181.
- Liu Lilan, Liu Hongzhao, Yuan Daning, et al. Modal parameter identification of time varying vibration systems subjected to stick slip friction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1): 177 ~ 181. (in Chinese)

(上接第 287 页)

- 14 Clerc M. The swarm and the queen: towards a deterministic and adaptive particle swarm optimization [C] // Evolutionary Computation, CEC 99, 1999.
- 15 Nebro A J, Durillo J J, García-Nieto J, et al. SMPSO: A new PSO-based metaheuristic for multiobjective optimization [C] // IEEE Symposium on Computational Intelligence in Multi-criteria Decision-making, Nashville, TN, 2009: 66 ~ 73.
- 16 Durillo Juan J, Nebro Antonio J. A java framework for multi-objective optimization [J]. Advances in Engineering Software, 2011, 42(10): 760 ~ 771.
- 17 Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA - II [J]. IEEE Transactions on, Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182 ~ 197.
- 18 Zitzler E, Thiele L. Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength Pareto approach [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1999, 3(4): 257 ~ 271.
- 19 Deb K, Agrawal R B. Simulated binary crossover for continuous search space [J]. Complex Systems, 1995, 9(2): 115 ~ 148.
- 20 Gong Wenyin, Cai Zhihua, Zhu Li. An efficient multiobjective differential evolution algorithm for engineering design [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2009, 38(2): 137 ~ 157.
- 21 Tapabrata Ray, Liew K M. A swarm metaphor for multiobjective design optimization [J]. Engineering Optimization, 2002, 34(2): 141 ~ 153.

(上接第 293 页)

- 14 崔国华, 王国强, 赵春江, 等. 空间转动 3 自由度并联微调机构设计与运动学分析[J]. 农业机械学报, 2008, 39(9): 144 ~ 148.
- Cui Guohua, Wang Guoqiang, Zhao Chunjiang, et al. Mechanism design and kinematic analysis on a three degree-of-freedom spatial manipulator [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(9): 144 ~ 148. (in Chinese)
- 15 崔国华, 李权才, 张艳伟, 等. 空间转动 4 - SPS - 1 - S 型并联机构动力学性能指标分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 214 ~ 218.
- Cui Guohua, Li Quancai, Zhang Yanwei, et al. Dynamic performance indices analysis of 4 - SPS - 1 - S spatial rotation parallel manipulator [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 214 ~ 218. (in Chinese)
- 16 张艳伟, 韦斌, 王南, 等. 空间转动 3 - SPS - S 并联机构运动学性能分析[J]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 212 ~ 215.
- Zhang Yanwei, Wei Bin, Wang Nan, et al. Kinematic performance analysis of 3 - SPS - S spatial rotation parallel mechanism [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 212 ~ 215. (in Chinese)
- 17 王德伦, 戴建生. 变胞机构及其综合的理论基础[J]. 机械工程学报, 2007, 43(8): 32 ~ 42.
- Wang Delun, Dai Jiansheng. Theoretical foundation of metamorphic mechanism and its synthesis [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(8): 32 ~ 42. (in Chinese)
- 18 刘辛军. 并联机器人机构尺寸与性能关系分析及其设计理论[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 1999.
- Liu Xinjun. The relationships between the performance criteria and link lengths of the parallel manipulators and their design theory [D]. Qinghuangdao: Yanshan University, 1999. (in Chinese)