

串并混联仿生机械腿静力学性能分析

王晓磊^{1,2} 金振林¹ 李晓丹²

(1. 燕山大学机械工程学院, 秦皇岛 066004; 2. 辽宁工业大学机械与自动化学院, 锦州 121001)

摘要: 仿生机器人的腿部结构由一个两自由度平面并联机构和 RPR 机构串联组成, 具有承载能力大、能够实现快速行走的特点。阐述了机械腿的布局形式, 建立了两自由度平面机构的运动学模型。采用虚功原理, 根据运动学模型建立了两自由度并联机构的静力学传递模型; 利用矢量极值法建立了静力学承载能力性能评价指标和力矩输入均衡性能指标, 得到了两项性能指标在工作空间内的分布情况, 并对其在工作空间内的分布规律进行了分析。结果表明, 两自由度平面并联机构的静力学承载能力性能指标和力均衡性能指标总体呈对称分布, 静力学承载能力性能指标在工作空间的底部承载能力最大, 向上逐渐减小, 到达顶部最小; 力均衡性能指标在工作空间中间部位较优, 越趋近于边界, 性能指标越差, 对机构越不利。通过实例与仿真验证了静力学性能分析的正确性, 为该串并混联机械腿承载时的轨迹规划提供了参考。

关键词: 串并混联机械腿; 机器人; 静力学分析; 性能评价指标; 承载能力

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)01-0383-07

Analysis of Static Performance of Serial-parallel Hybrid Bionic Mechanical Leg

WANG Xiaolei^{1,2} JIN Zhenlin¹ LI Xiaodan²

(1. College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

2. College of Mechanical Engineering and Automation, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China)

Abstract: The static performance of a new type of serial-parallel hybrid bionic leg mechanism was analyzed. The bionic mechanical leg structure was composed of a 2-DOF planar parallel mechanism and an RPR mechanism in series, which had the characteristics of large carrying capacity and fast walking. Firstly, the leg structure layout of the bionic robot was introduced, and the kinematics model of 2-DOF planar mechanism was established. According to the kinematic model, the static transfer model of 2-DOF parallel mechanism was established by using the virtual work principle. Secondly, the static bearing capacity performance evaluation index performance evaluation index and the force input equilibrium performance index were established by the vector extremum method, the distribution diagram of these two indexes in the working space was plotted, and the distribution law of these two indexes in the working space was analyzed. The analysis results showed that the static bearing capacity and moment equilibrium performance of 2-DOF parallel plane parallel mechanism were distributed symmetrically. The performance index of mechanical bearing capacity was maximum at the bottom of working space, and was decreased gradually upward, and then it was minimum at the top. The torque balance performance index was better in the middle part of the working space. The worse the performance index was closing to the boundary, the worse it was for the mechanism. Finally, the correctness of the static analysis of performance was verified by some examples and simulations, which provided a reference for the trajectory planning of the serial-parallel hybrid mechanical leg.

Key words: serial-parallel hybrid mechanical leg; robot; kinematics analysis; performance evaluation indicators; carrying capacity

收稿日期: 2018-07-31 修回日期: 2018-10-11

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2011AA040900)、机械系统与振动国家重点实验室项目(MSV201506)和辽宁省高等学校科学技术研究项目(JL201615402)

作者简介: 王晓磊(1979—),男,博士生,辽宁工业大学副教授,主要从事并联机构理论及应用研究,E-mail: wxlgxy@126.com

通信作者: 金振林(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事并联机构理论及应用研究,E-mail: zlj@ysu.edu.cn

0 引言

近年来,仿生机械腿一直是机器人研究领域的热点。文献[1]采用3-RPS为机构原型设计了并联仿生机械腿,并对其进行了结构优化及分析;文献[2]以3-RRR并联机构与摆动关节作为腿部机构研究了一种串并混联四足机器人;文献[3]采用(U+UPR)P+UPS并联机构为机构原型设计了3自由度(DOF)的仿生机械腿;文献[4-5]采用2RUS+RU机构与FD机构的组合设计了一种新型仿生机械腿;文献[6-7]研究了一种6自由度农业机器人的机械仿生腿;文献[8]以3-RPC并联机构作为步行器的机械腿进行了动力学研究;文献[9]采用偏置输出的3-RRR+(S-P)并联机构设计了仿生机器人的踝关节。上述并联仿生机械腿都是由纯并联机构组成,具有承载能力大、移动速度慢的特点,为实现快速行走,需要移动副快速移动很长的距离,这就要求伺服系统具有很高的动态响应特性,一般这种机器人不适合于快速行走。

对于仿生机器人来说,其腿部性能对腿式机器人的整体性能起着决定性的作用^[10-11]。大多数并联机构所受的静力是耦合、非线性的,在不同的位置受力不同,静力学性能指标是评估机器人承载能力的一项重要指标^[12]。因此,许多学者对并联机构的静力学性能进行了较为深入的研究^[13-21]。

本文首先阐述串并混联仿生机械腿的结构形式,对机械腿的并联机构进行运动学分析,推导并联机构的静力学传递平衡方程,建立静力学性能评价指标,分析各评价指标在工作空间的分布,为机器人承载时轨迹规划奠定基础。

1 串并联仿生机械腿部机构模型

串并混联四足机器人腿部机构模型如图1所示,由RPR机构和两自由度并联机构组成。两自由度并联机构由伺服液压缸驱动带动五杆机构驱动下方的双菱形机构实现足端的抬起和前后摆动。RPR机构也由伺服液压缸驱动,带动两自由度并联机构足端实现侧摆运动。

2 两自由度并联机构运动学

2.1 位置模型

为了便于分析,建立图2所示的固定坐标系XOZ和动坐标系UIW。O为固定坐标系原点,X轴沿OC方向,Z轴垂直X轴向上。I为动坐标系原点,W轴沿IO方向,U轴垂直W轴。设结构参数 $\|OA\| = l_1$, $\|AB\| = l_2$, $\|BC\| = l_3$, $\|CD\| = l_4$,

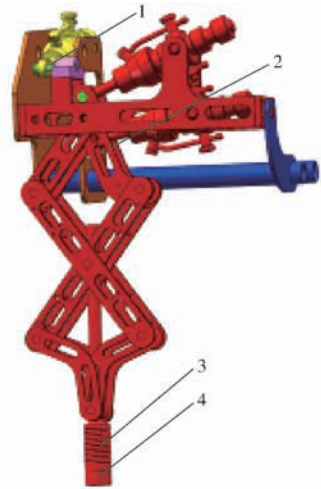


图1 腿部机构模型

Fig. 1 Leg mechanism model

1. RPR机构 2. 两自由度并联机构 3. 缓冲弹簧 4. 足端

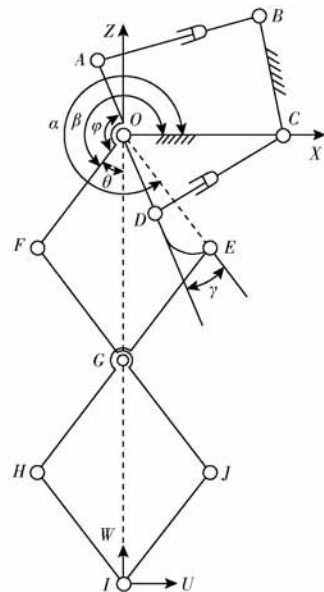


图2 平面并联机构的结构简图

Fig. 2 Structural diagram of planar parallel mechanism

$\|OD\| = l_5$, $\|OC\| = l_6$,各方向单位矢量分别为 w_i ($i=1,2,3,4,5,6$),双菱形OFGE和GHIJ边长均为 l 。AOF为一杆件,其中OF杆与X轴的夹角为 β ,OA与OF夹角为 φ 。OE与X轴夹角为 α ,为了避免结构干涉,OE杆件不是直线,而是使OD与OE线有一夹角为 γ ,OF与OG夹角为 θ 。两自由度并联机构的2个液压缸伸缩协调运动,使该机构的末端可以实现足端具有沿固定坐标系中心O的前后摆动与沿Z方向的移动,设沿中心O的转角为 ϕ 。

结合图2,根据结构约束条件可得到

$$\begin{cases} \phi = \frac{3}{2}\pi - (\beta + \theta) \\ \theta = \frac{\alpha - \beta}{2} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \angle AOC = \beta - \varphi \\ \angle DOC = \alpha - \gamma \end{cases} \quad (2)$$

由图2可知, $OABC$ 为一个矢量环, ODC 为另一个矢量环, 闭环矢量方程为

$$l_1 \mathbf{w}_1 + l_2 \mathbf{w}_2 = l_6 \mathbf{w}_6 + l_3 \mathbf{w}_3 \quad (3)$$

$$l_4 \mathbf{w}_4 + l_5 \mathbf{w}_5 = l_6 \mathbf{w}_6 \quad (4)$$

参考点 I 的位置为

$$\begin{cases} I_x = -4l \cos \theta \sin \phi \\ I_z = -4l \cos \theta \cos \phi \end{cases} \quad (5)$$

若已知动平台参考点位置即 I_x, I_z , 通过式(5)可求出 θ, ϕ , 根据式(3)、(4)求出 α 与 β , 根据式(2)可求 $\angle AOC$ 与 $\angle DOC$, 即得到驱动杆长度 l_2, l_4 , 为该并联机构的位置反解。

2.2 速度雅可比矩阵求解

对式(3)和式(4)求导, 可得

$$l_1 \boldsymbol{\omega}_1 \times \mathbf{w}_1 + l_2 \boldsymbol{\omega}_2 \times \mathbf{w}_2 + v_2 \mathbf{w}_2 = 0 \quad (6)$$

$$l_4 \boldsymbol{\omega}_4 \times \mathbf{w}_4 + v_4 \mathbf{w}_4 + l_5 \boldsymbol{\omega}_5 \times \mathbf{w}_5 = 0 \quad (7)$$

对式(6)和式(7)分别点乘 $\mathbf{w}_2, \mathbf{w}_4$ 得

$$l_1 \mathbf{w}_2^T \boldsymbol{\omega}_1 \times \mathbf{w}_1 + l_2 \mathbf{w}_2^T \boldsymbol{\omega}_2 \times \mathbf{w}_2 + v_2 \mathbf{w}_2^T \mathbf{w}_2 = 0 \quad (8)$$

$$l_4 \mathbf{w}_4^T \boldsymbol{\omega}_4 \times \mathbf{w}_4 + v_4 \mathbf{w}_4^T \mathbf{w}_4 + l_5 \mathbf{w}_4^T \boldsymbol{\omega}_5 \times \mathbf{w}_5 = 0 \quad (9)$$

由于 $\mathbf{w}_i^T \boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{w}_i = 0, \mathbf{w}_i^T \mathbf{w}_i = 1$, 式(8)、(9)可化简为

$$l_1 \mathbf{w}_2^T \boldsymbol{\omega}_1 \times \mathbf{w}_1 + v_2 = 0 \quad (10)$$

$$v_4 + l_5 \mathbf{w}_4^T \boldsymbol{\omega}_5 \times \mathbf{w}_5 = 0 \quad (11)$$

其中

$$\boldsymbol{\omega}_1 = (0, \dot{\beta}, 0)^T$$

$$\boldsymbol{\omega}_2 = (\cos(\beta - \gamma), 0, \sin(\beta - \gamma))^T$$

$$\mathbf{w}_1 = (w_{1x}, 0, w_{1z})^T \quad \mathbf{w}_2 = (w_{2x}, 0, w_{2z})^T$$

$$\mathbf{w}_4 = (w_{4x}, 0, w_{4z})^T \quad \boldsymbol{\omega}_5 = (0, \dot{\alpha}, 0)^T$$

$$\mathbf{w}_5 = (w_{5x}, 0, w_{5z})^T$$

整理式(10)和式(11)得

$$\dot{\alpha} = -\frac{v_4}{l_5(w_{4x}w_{5z} - w_{4z}w_{5x})} \quad (12)$$

$$\dot{\beta} = -\frac{v_2}{l_1(w_{2x}w_{1z} - w_{2z}w_{1x})} \quad (13)$$

将式(12)和式(13)写成矩阵形式

$$\begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} = \mathbf{J}_{\alpha\beta} \begin{bmatrix} v_2 \\ v_4 \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中

$$\mathbf{J}_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{l_1(w_{2x}w_{1z} - w_{2z}w_{1x})} \\ -\frac{1}{l_5(w_{4x}w_{5z} - w_{4z}w_{5x})} & 0 \end{bmatrix}$$

同时对式(5)求导, 得

$$\begin{cases} v_x = 4l \dot{\theta} \sin \theta \sin \phi - 4l \dot{\phi} \cos \theta \cos \phi \\ v_z = 4l \dot{\theta} \sin \theta \cos \phi + 4l \dot{\phi} \cos \theta \sin \phi \end{cases} \quad (15)$$

写成矩阵形式为

$$\mathbf{v} = \mathbf{J}_{\theta\phi} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix}^T \quad (16)$$

其中

$$\mathbf{J}_{\theta\phi} = \begin{bmatrix} 4l \sin \theta \sin \phi & -4l \cos \theta \cos \phi \\ 4l \sin \theta \cos \phi & 4l \cos \theta \sin \phi \end{bmatrix}$$

对式(1)进行求导, 得

$$\begin{cases} \dot{\theta} = \frac{\dot{\alpha} - \dot{\beta}}{2} \\ \dot{\phi} = -\frac{\dot{\beta} + \dot{\alpha}}{2} \end{cases} \quad (17)$$

整理得

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \mathbf{J}_Z \begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} \quad (18)$$

其中

$$\mathbf{J}_Z = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

将式(16)、(18)、(14)整理得

$$\mathbf{v} = \mathbf{G}_V \begin{bmatrix} v_2 \\ v_4 \end{bmatrix}^T \quad (19)$$

其中

$$\mathbf{G}_V = \mathbf{J}_{\theta\phi} \mathbf{J}_Z \mathbf{J}_{\alpha\beta}$$

式中 \mathbf{G}_V ——机构的速度雅可比矩阵

3 静力学性能

设计机器人时都需考虑它的承载能力, 因此需要该并联机构在平面空间内都具有一个较好的静力学性能、承载能力和静力学传递^[22]。分析静力学在工作空间的分布, 有助于机器人运动空间的轨迹规划^[23], 避免元件过度疲劳遭到破坏。

3.1 静力学传递方程

当两自由度平面机构只受沿 XZ 两个方面的作用时, 该机构中所有构件都处于静力平衡状态。由于仿生机器人腿部机构末端为球弧形, 所以两自由度动平台输出的广义力矢量为 $\mathbf{F} = (F_x, F_z)^T$, 机构输入的广义力矢量为 $\mathbf{Q} = (Q_1, Q_2)^T$ 。设动平台参考点的虚位移为 $\delta \mathbf{P}$, $\delta \mathbf{P} = (\delta I_x, \delta I_z)^T$, 输入驱动杆件的虚位移为 $\delta \mathbf{L} = (\delta l_2, \delta l_4)^T$, 根据虚功原理, 除约束力外, 所有输入驱动力所做的虚功之和等于所有输出力所做虚功之和, 即

$$\mathbf{F}^T \delta \mathbf{P} = \mathbf{Q}^T \delta \mathbf{L} \quad (20)$$

由于该平面并联机构的虚位移并非独立存在, 由机构输入输出位移微分关系得

$$\delta \mathbf{P} = \mathbf{G}_V \delta \mathbf{L} \quad (21)$$

由式(20)、(21)可得

$$\mathbf{F} = \mathbf{N} \mathbf{Q} \quad (22)$$

其中

$$\mathbf{N} = (\mathbf{G}_V^T)^{-1}$$

式中 \mathbf{N} ——驱动力雅可比矩阵

3.2 静力学性能评价指标

从式(22)可以看出,机构在不同位形时,机构输入力与机构输出力关系与驱动力雅可比矩阵有关。根据矩阵范数理论对式(22)取2范数,可得

$$\|F\|^2 = Q^T N^T N Q \quad (23)$$

设输入为单位矢量, $Q^T Q = 1$, 引用拉格朗日算子

$$M_p = Q^T (N^T N) Q - \kappa_\lambda (Q^T Q - I) \quad (24)$$

式中 κ_λ ——拉格朗日乘子

根据式(24)得到输出力的极值条件为

$$\frac{\partial M_p}{\partial Q} = (N^T N) Q - \kappa_\lambda Q = 0 \quad (25)$$

由式(25)可得输出力的极值为

$$\begin{cases} \|F\|_{\max} = \sqrt{\kappa_{\lambda\max}} \\ \|F\|_{\min} = \sqrt{\kappa_{\lambda\min}} \end{cases} \quad (26)$$

对于工作空间内任一位置,根据式(26)即可得到该位形时的输出力最大值和最小值。在设计过程中,希望机构输入很小的力得到很大的输出力,因此定义输出力最大值为该机构的承载能力性能指标,即

$$K_F = \|F\|_{\max} \quad (27)$$

在工作空间内,两个输入力的差值随位形的变化而变化。当两个输入力的差值变化较大时,机构的使用性能变差。为了合理地判别该机构输入力的情况,定义输入力均衡性能评价指标为

$$K_J = (\|F\|_{\max} - \|F\|_{\min}) / \|F\|_{\max} \quad (28)$$

其中, K_J 是无量纲,表示输入力最大值和最小值的关系,当 K_J 越大,表示 $\|F\|_{\max}$ 与 $\|F\|_{\min}$ 相差越大,机构的使用性能越差,机构的使用寿命会大大降低,所以 K_J 越小越好。

3.3 性能评价指标在工作空间的分布

设定结构参数为 $l_1 = l_5 = 45 \text{ mm}$, $l_6 = 305 \text{ mm}$, $l_3 = 240 \text{ mm}$, $\|OF\| = 260 \text{ mm}$, $\gamma = 15^\circ$, $\angle OCB = 75^\circ$ 。根据式(19)~(28),可以得到在整个运动空间内静力学承载能力性能指标和力均衡性能图谱,如图3、4所示。

从图3可以看出,承载能力分布总体呈轴对称分布,在工作空间的底部承载能力最大,向上逐渐减小,到达顶部最小。

从图4可以看出,力均衡性能指标在工作空间内中间部位性能最优,性能更稳定,机构的使用寿命较长;越趋近于边界,性能指标越差,机构的使用寿命越短。

从上述分析可知,该机构各静力学性能指标在

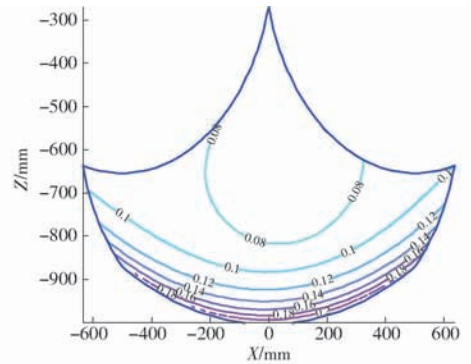


图3 承载能力指标分布

Fig. 3 Distribution of bearing capacity index

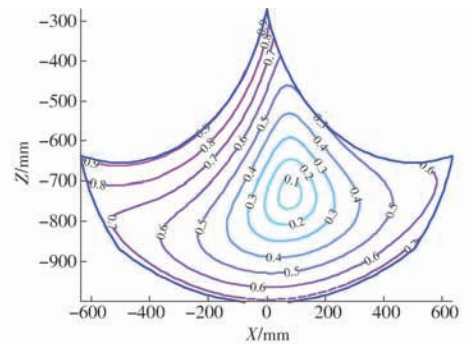


图4 力均衡指标分布

Fig. 4 Distribution of force equilibrium index

工作空间中部较好,所以在承载时,运动轨迹处于中部左右最优,可延长其使用寿命,避免过早疲劳破坏。

4 仿真与实例验证

利用 ANSYS 软件验证承载能力指标理论的正确性。通过式(25)、(26)得出给定位姿点的承载能力指标与对应的输入单位向量,将得到的输入单位向量施加到 ANSYS 环境中的2个液压缸的活塞杆上,在忽略重力情况下,在 ANSYS 环境中测出末端的反力。由于工作空间内的点较多,选取具有代表性的位姿离散点进行验证,选取点的原则为从上到下、中间向右边缘方向取点,点的位置及验证结果如表1所示。

由表1可以看出,二者的承载能力性能指标差值较小,验证了承载能力指标理论的正确性。

同时采用 ANSYS 有限元仿真软件进行静力学分析,验证力均衡指标分布规律的正确性。同样采取上述给定的位姿点,在足端施加垂直向上 500 N 的力,通过 ANSYS 有限元仿真软件得到了给定姿态点的应力与变形量云图,如图5所示。

从图5可以看出,在中部(位姿点2、5)的变形量和应力相对较小,在顶部(位姿点1、4、7)和底

表 1 8 组位姿点承载能力指标验证

Tab. 1 Verification of eight sets of pose and bearing capacity index

序号	转角 $\phi/(\circ)$	矢径 OI 长度/mm	驱动单位向量力		承载能力性能指标	
			液压缸(上)	液压缸(下)	理论计算	ANSYS 仿真
1	-5	-500	-0.392 48	0.919 76	0.065 5	0.066 0
2	-5	-750	-0.184 54	0.982 82	0.075 1	0.072 1
3	-5	-950	-0.684 68	-0.728 84	0.139 5	0.140 6
4	-15	-550	-0.753 02	0.658 00	0.075 8	0.070 3
5	-15	-750	-0.436 87	0.899 53	0.077 3	0.076 1
6	-15	-950	-0.672 05	-0.740 51	0.138 1	0.139 6
7	-25	-750	-0.569 74	0.821 82	0.083 4	0.083 9
8	-25	-950	-0.665 36	-0.746 52	0.137 5	0.138 9

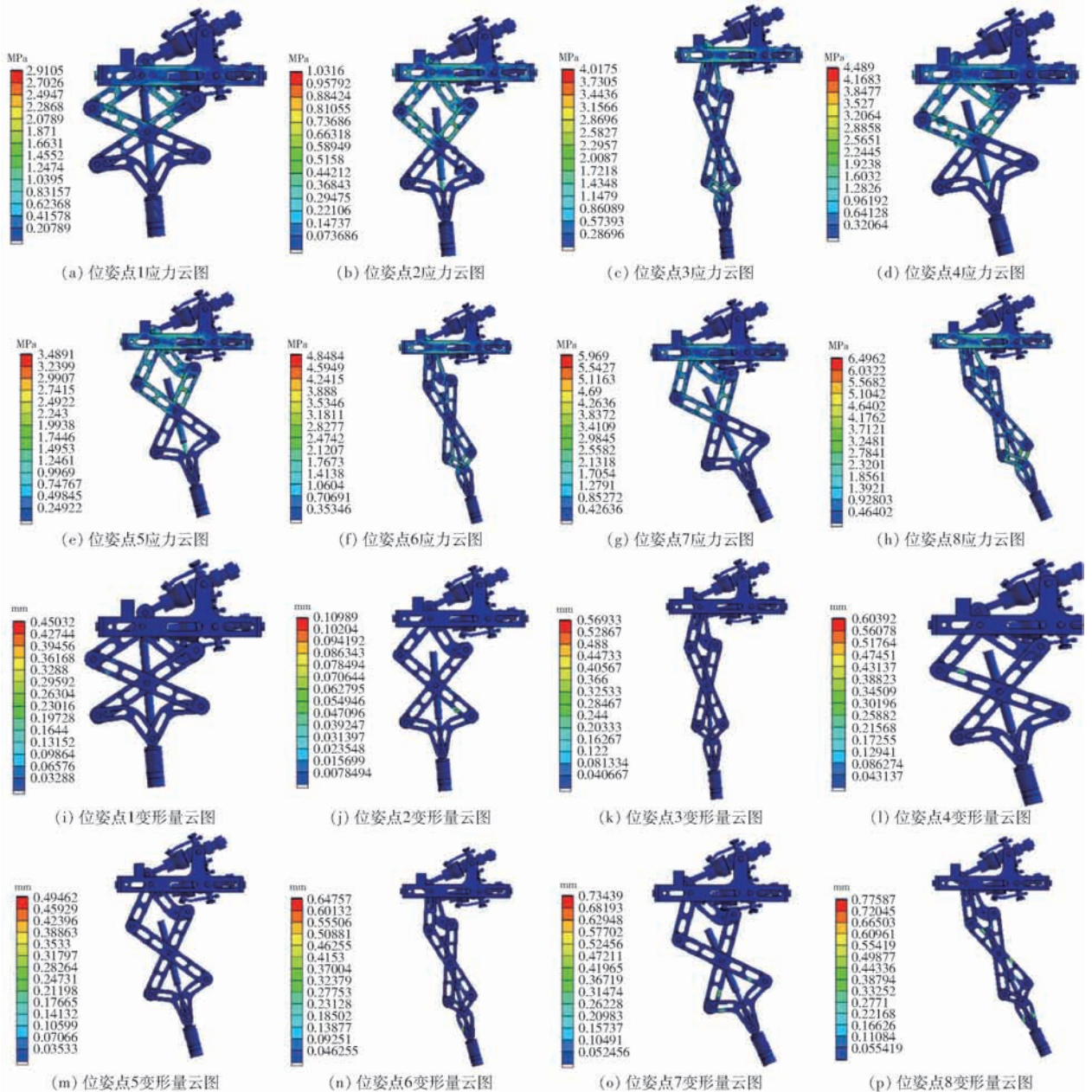


图 5 两自由度平面并联机构应力及变量云图

Fig. 5 Stress and deformation cloud charts of 2-DOF planar parallel mechanism

部(位姿点3、6、8)变形量和应力较大,说明对机构不利,容易疲劳损坏,同时也间接地验证了机构力均衡性能评价指标的正确性。

目前,该腿部结构已应用于上海交通大学开发的四足机器人,已实现快速地上行走,如图6所示。

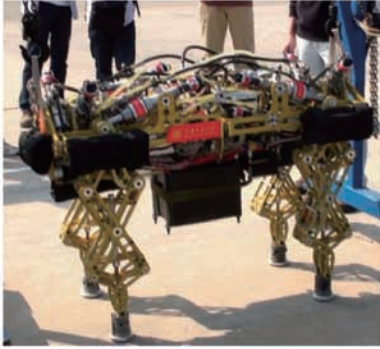


图6 四足机器人实物样机

Fig.6 Prototype of quadruped robot

5 结论

(1)研究了一种两自由度平面并联机构,建立了运动学模型与静力学传递方程,定义了静力学性能评价指标。

(2)揭示了两自由度平面并联机构静力学承载能力性能指标在工作空间的分布规律。结果表明,位于工作空间中下方性能指标较好,承载能力较大,并呈轴对称分布。

(3)揭示了两自由度平面并联机构静力学力均衡性能评价指标在工作空间的分布规律。结果表明,腿部在承受外部载荷时,在工作空间中间部位力均衡性能指标较好,越趋近于边界,性能指标越差,对机构越不利。

(4)通过实例与 ANSYS 软件仿真,验证了静力学性能指标分布规律的正确性。

参 考 文 献

- [1] 程刚. 并联式仿生机械腿结构设计及动力学研究[D]. 北京:中国矿业大学,2008.
CHENG Gang. Study on structure design and dynamic performance of the parallel bionic robot leg [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2008. (in Chinese)
- [2] 高建设,李明祥,侯伯杰,等. 新型四足步行机器人串并混联腿的运动学分析[J]. 光学精密工程, 2015,23(11):3147-3159.
GAO Jianshe, LI Mingxiang, HOU Bojie, et al. Kinematics analysis on the serial-parallel leg of a novel quadruped walking robot [J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(11): 3147-3159. (in Chinese)
- [3] 荣誉,金振林,曲梦可. 六足步行机器人的并联机械腿设计[J]. 光学精密工程, 2012,20(7):1532-1541.
RONG Yu, JIN Zhenlin, QU Mengke. Design of parallel mechanical leg of six-legged robot [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(7): 1532-1541. (in Chinese)
- [4] 张金柱,金振林,陈广广. 六足步行机器人腿部机构运动学分析[J]. 农业工程学报, 2016,32(9):45-52.
ZHANG Jinzhu, JIN Zhenlin, CHEN Guangguang. Kinematic analysis of leg mechanism of six-legged walking robot [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(9): 45-52. (in Chinese)
- [5] 金振林,张金柱,高峰. 六足消防机器人及其腿部机构运动学分析[J]. 中国机械工程, 2016,27(7):865-871.
JIN Zhenlin, ZHANG Jinzhu, GAO Feng. A firefighting six-legged robot and its kinematics analysis of leg mechanisms [J]. Chinese Mechanical Engineering, 2016, 27(7): 865-871. (in Chinese)
- [6] 崔冰艳,梁霞,李占贤,等. 基于结构参数的农业机器人的设计[J]. 河北农业大学学报, 2014,37(2):128-132.
CUI Bingyan, LIANG Xia, LI Zhanxian, et al. Design of agricultural robot based on structure parameter [J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2014, 37(2): 128-132. (in Chinese)
- [7] 崔冰艳,金振林,陈丽文. 农业机器人腿部运动单元的运动学性能分析与结构参数设计[J]. 河北农业大学学报, 2012, 35(5):118-122.
CUI Bingyan, JIN Zhenlin, CHEN Liwen. Analysis of kinematical performance and design of structure parameters for leg kinematical unit of agricultural robot [J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2012, 35(5): 118-122. (in Chinese)
- [8] 张成军,李艳文. 一种基于3-RPC 并联机构的新型步行机器人[J]. 机械工程学报, 2011,47(15):25-30.
ZHANG Chengjun, LI Yanwen. A new walking robot based on 3-RPC parallel mechanism [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(15): 25-30. (in Chinese)
- [9] 杨龙,邱雪松,侯雨雷,等. 偏置输出的3-RRR+(S-P)仿生关节机构设计与分析[J/OL]. 农业机械学报, 2015,46(3): 366-371. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150353&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.053.
YANG Long, QIU Xuesong, HOU Yulei, et al. Structure design and workspace analysis of 3-RRR+(S-P) bionic joint mechanism with offset output [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 366-371. (in Chinese)
- [10] XU Kun, DING Xilun. Typical gait analysis of a six-legged robot in the context of metamorphic mechanism theory [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26(4): 771-783.

- [11] PAN Yang, GAO Feng. A new six-parallel-legged walking robot for drilling holes on the fuselage[J]. *Journal Mechanical Engineering Science*, 2014, 228(4): 753 – 764.
- [12] TSAI L W. *Robot analysis; the mechanics of serial and parallel manipulators*[M]. New York: John Wiley and Sons, 1999.
- [13] 杨龙, 周玉林, 马秋明. 新型球面并联人形机器人踝关节机构静力学性能分析[J]. *中国机械工程*, 2017, 28(7): 835 – 841.
YANG Long, ZHOU Yulin, MA Qiuming. Static property analyses of a novel spherical parallel humanoid robotic ankle mechanism[J]. *China Mechanical Engineering*, 2017, 28(7): 835 – 841. (in Chinese)
- [14] 荣誉, 金振林, 曲梦可. 三自由度并联机械腿静力学分析与优化[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(20): 41 – 49.
RONG Yu, JIN Zhenlin, QU Mengke. Statics analysis and optimal design of 3-DOF parallel mechanical leg[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(20): 41 – 49. (in Chinese)
- [15] PAN Yang, GAO Feng. Kinematic performance analysis for hexapod robot using parallel mechanism[C]//*Proceedings of the ASME 2014 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, 2014: 1 – 9.
- [16] 崔冰艳, 金振林. 基于正交机构的机器人肩关节静力学分析与结构参数设计[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(1): 77 – 82.
CUI Bingyan, JIN Zhenlin. Statics analysis and structure parameter design of robot shoulder joint based on orthogonal mechanism[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(1): 77 – 82. (in Chinese)
- [17] 金波, 陈诚, 李伟. 基于能耗优化的六足步行机器人力矩分配[J]. *浙江大学学报*, 2012, 46(7): 1168 – 1174.
JIN Bo, CHEN Cheng, LI Wei. Optimization energy-efficient torque distribution for hexapod walking robot[J]. *Journal of Zhejiang University*, 2012, 46(7): 1168 – 1174. (in Chinese)
- [18] 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 Haibo, LIANG Yihan, FANG Yuefa, et al. Statics and stiffness analysis of 4-RRS redundant spherical parallel mechanism [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(11): 8 – 15. (in Chinese)
- [19] 张金柱, 金振林, 张天浩. 并联驱动机械腿运动学静力学性能评价及几何参数设计[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(21): 61 – 69.
ZHANG Jinzhu, JIN Zhenlin, ZHANG Tianhao. Kinematic/static performance evaluation and geometric parameter design of parallel-driving leg mechanism[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(21): 61 – 69. (in Chinese)
- [20] 陈修龙, 王涛, 梁小夏, 等. 空间 4-UPS/RPS 并联机构动态静力分析[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(7): 398 – 406.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160754&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.054.
CHEN Xiulong, WANG Tao, LIANG Xiaoxia, et al. Kinetostatics analysis of spatial 4-UPS/RPS parallel mechanism[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(7): 398 – 406. (in Chinese)
- [21] 陶兆胜, 彭澎, 赵艳芹. Exe - Variant 并联模块静刚度分析[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(4): 377 – 382, 389. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170450&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.050.
TAO Zhaosheng, PENG Peng, ZHAO Yanqin. Stiffness analysis for Exe - Variant parallel kinematic machine [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(4): 377 – 382, 389. (in Chinese)
- [22] 李永刚, 宋轶民, 黄田, 等. 少自由度并联机器人机构静力分析[J]. *机械工程学报*, 2007, 43(9): 80 – 83.
LI Yonggang, SONG Yimin, HUANG Tian, et al. Static force analysis of lower-mobility parallel manipulators [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(9): 80 – 83. (in Chinese)
- [23] CHEN Gang, JIN Bo, CHEN Ying. Tripod gait-based turning gait of a six-legged walking robot[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2017, 31(3): 1401 – 1411.