

文章编号 1004-924X(2019)05-1148-10

2-DOF 并联行程放大机构结构参数优化

王晓磊^{1,2}, 金振林^{1,3*}, 李晓丹²

(1. 燕山大学 机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004;

2. 辽宁工业大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 锦州 121001;

3. 上海交通大学 机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240)

摘要:为研制一种能够实现快速行走、运动灵活性好的仿生四足机器人,对一种能够实现机构末端位置行程放大的 2 自由度并联机构进行运动性能分析与结构参数优化,并将优化结果应用到仿生四足机器人的腿部机构,研制出样机。首先,推导 2 自由度并联行程放大机构位置反解,建立机构的线速度雅克比矩阵,对机构的工作空间进行分析。其次,建立机构运动灵活性评价指标,揭示主要结构参数对灵活性指标的影响规律。然后,采用容限加权法确定一组合理的结构参数,使运动灵活性指标达到最优。最后,根据优化的结构参数设计出仿生四足机器人腿部机构和整体的虚拟样机,并进行虚拟样机运动仿真。仿真结果表明:并联行程放大机构各驱动参数变化平稳,理论速度和仿真速度误差在 $\pm 1.6 \times 10^{-6}$ m/s 范围内,验证仿生四足机器人腿部机构设计方案和结构参数的合理性及理论推导的正确性,为该仿生四足机器人的进一步研究奠定了基础。

关键词:并联行程放大机构;运动灵活性;性能评价指标;结构参数;优化设计

中图分类号:TP242.6 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20192705.1148

Optimization design of structural parameters of 2-DOF parallel stroke amplification mechanism

WANG Xiao-lei^{1,2}, JIN Zhen-lin^{1,3*}, LI Xiao-dan²

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

2. College of Mechanical Engineer and Automation, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China;

3. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

* Corresponding author, E-mail: zljin@ysu.edu.cn

Abstract: The objective of this study was to develop a bionic quadruped robot that can realize fast walking and good mobility. Motion performance analysis and optimization of structural parameters for a 2-DOF parallel mechanism that can realize end-position travel amplification of the mechanism were conducted. Optimization results were then applied to the leg mechanism of a bionic quadruped robot, and a prototype was constructed. First, an inverse solution of the 2-DOF parallel travel amplification mechanism was deduced, the linear velocity Jacobian matrix of the mechanism was established, and

收稿日期:2018-12-27; **修订日期:**2019-01-29.

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(No. 2011AA040900);机械系统与振动国家重点实验室课题资助项目(No. MSV201506);辽宁省高等学校科学技术研究项目资助(No. JL201615402)

the workspace of the mechanism was analyzed. Second, an evaluation index of the flexible performance of the mechanism was established to reveal the influence law of the main structural parameters on the flexible performance index. Then, a set of reasonable structural parameters was determined using the tolerance weighting method to optimize the performance of the kinematic flexibility. Finally, based on the optimized structural parameters, the bionic quadruped robot leg mechanism and a virtual prototype were designed. Motion simulation of the virtual prototype was then conducted. The simulation results show that the driving parameters of the parallel stroke amplification mechanism changed smoothly, and the theoretical and simulation speed errors are within the range of $\pm 1.6 \times 10^{-6}$ m/s, which verified the rationality of the design scheme and the structural parameters of the bionic quadruped leg mechanism and the correctness of theoretical derivation. This study provides a foundation for further research on bionic quadruped robots.

Key words: parallel stroke amplification mechanism; kinematic flexibility; performance evaluation index; structure parameters; optimization design

1 引言

少自由度并联机构因其具有结构简单、控制方便和成本较低等优点,在多种领域内得到了众多学者的广泛关注。国内的上海交通大学高峰教授团队采用 UP+2UPS、2RUS+RU 等少自由度并联机构研究了多种多足步行器^[1-4];燕山大学金振林教授团队采用 UP+UPR+UPS, (U+UPR)P+UPS, 2UPS+UPU 等少自由度并联机构研究了多种多足机器人的仿生机械腿^[5-8];天津大学的黄田教授团队研究了多种基于少自由度并联机构的重大装备^[9-13];李研彪等^[14]采用空间模型技术对运动学进行优化,设计了一种 4-DOF 拟人机械腿部结构;程刚等^[15]采用 3-RPS 机构设计一种并联仿生腿部机构,进行了相关的优化设计及运动学标定;王洪波教授团队等^[16-17]采用四组 UP+2UPS 机构研制了四足/两足步行机器人,可实现两足和四足之间的转换行走;苗志怀等^[18]采用 2UPU+2UU 机构设计了两足步行机器人,进行了步态、运动学及行走稳定性分析;高建设等^[19]采用 3-RRR 球面并联机构为髋关节研究了一种串并混联的腿部机构,进行了运动学分析;荣誉等采用 3-PUPS 并联机构,研制了一种超冗余机械臂,可通过对各分支中驱动电机抱闸锁定,重新对机构进行组合实现 31 种构型机构的转换^[20]。上述文献中的少自由度的并联机构多数在 3 自由度以上,对 2 自由度并联机构研究的较少,多数集中在 2 个转动自由度的并联机构

研究^[21-23]。

基于国家 863 主题项目高性能仿生四足机器人为背景,研究了一种将 2 自由度驱动的五杆并联机构与双菱形放大机构组合,作为其腿部机构的一部分来实现仿生四足机器人的快速行走。文中介绍了仿生四足机器人腿部结构组成;针对实现腿部前后摆动、迈步的 2 自由度并联放大机构进行运动性能及其工作空间分析,建立运动灵活性指标,揭示出运动灵活性指标与各结构尺寸之间的变化规律,采用容限加权方法进行优化,选取一组运动灵活性好的结构参数,进行虚拟样机仿真,最终研制出四足仿生机器人的样机。

2 腿部机构简介及并联机构位置反解分析

2.1 四足机器人腿部机构简介

仿生四足机器人的腿部机构由 RPR 机构和 2 自由度(DOF)并联行程放大机构组成,均由伺服液压缸驱动,如图 1 所示。2-DOF 并联机构带动五杆机构驱动下方的双菱形行程放大机构实现足端的抬起和前后摆动;RPR 机构带动 2-DOF 并联机构足端实现腿部的侧向摆动,实现侧方摆动解耦。该仿生机器人的腿部机构优点是液压缸活塞杆只需移动很小的距离,就能获得很大的工作空间,可实现快速、大步伐行走;同时采用串并混联的腿部结构,较传统的串联机械腿相比,更具有较大的承载能力;采用液压伺服技术,驱动能力较电机驱动更强,使四足仿生机器人的动力及负

载能力更好, 适合用于较高负载的应用场合。由于该腿部机构由串并混联机构组成, 串联机构负责腿部的摆动, 功能单一, 相对简单, 所以对前后摆动、迈步的并联行程放大机构进行重点分析。

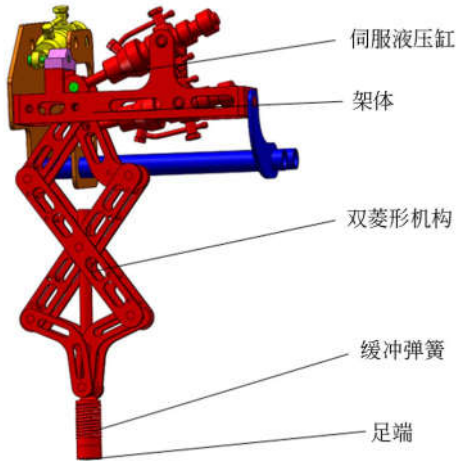


图 1 腿部结构图

Fig. 1 Leg mechanism model

2.2 两自由度并联放大机构位置反解分析

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 A, B, C, D, E, F, G, H, I 分别为机构各转动副的中心点。设主要几何参数为 $\|OA\| = l_1$, $\|AB\| = l_2$, $\|BC\| = l_3$, $\|CD\| = l_4$, $\|OD\| = l_5$, $\|OC\| = l_6$, l 为双菱形 OFGE 和 GHIJ 边长。 α 为 OE 与 X 轴夹角, γ 为 OD 与 OE 线夹角, β 为 OF 杆与 X 轴的夹角, ϕ 为 OA 与 OF 夹角, θ 为 OF 与 OG 夹角, θ_1 为 OA 与 X 轴夹角, θ_2 为 AB 与 X 轴夹角, θ_3 为 BC 与 X 轴夹角, θ_4 为 CD 与 X 轴夹角, θ_5 为 OD 与 X 轴夹角。2-DOF 并联机构的两个液压缸伸缩协调运动, 使该机构的末端实现具有沿固定坐标系中心 O 的前后摆动与沿 Z 方向的移动, 设绕中心 O 的转角为 φ 。

结合图 2 可得到:

$$\begin{cases} \alpha = \theta_5 + \gamma \\ \beta = \theta_1 + \phi \end{cases} \quad (1)$$

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

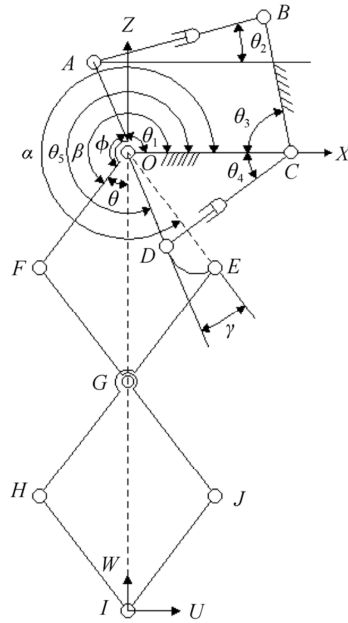


图 2 并联机构简图

Fig. 2 Schematic diagram of parallel mechanism

参考点 I 的位置可以写成:

$$\begin{cases} I_x = -4l \cos \theta \sin \varphi \\ I_z = -4l \cos \theta \cos \varphi \end{cases} \quad (3)$$

其中: I_x 为参考点在 XOZ 坐标系下 X 轴分量的位置; I_z 为参考点在 XOZ 坐标系下 Z 轴分量的位置。

由于 OABC 为一个矢量闭环, 故可写成

$$\begin{cases} l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_2 + l_3 \cos \theta_3 = l_6 \\ l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2 = l_3 \sin \theta_3 \end{cases} \quad (4)$$

同理, ODC 为另一个矢量闭环, 可得:

$$\begin{cases} -l_5 \sin \theta_5 = l_4 \sin \theta_4 \\ l_5 \cos \theta_5 + l_4 \cos \theta_4 = l_4 \end{cases} \quad (5)$$

根据式(2)得:

$$\begin{cases} \alpha = \frac{3}{2}\pi - (\varphi - \theta) \\ \beta = \frac{3}{2}\pi - (\varphi + \theta) \end{cases} \quad (6)$$

将式(1)代入式(6):

$$\begin{cases} \theta_5 = \frac{3}{2}\pi - (\varphi - \theta) - \gamma \\ \theta_1 = \frac{3}{2}\pi - (\varphi + \theta) - \gamma \end{cases} \quad (7)$$

若已知动平台参考点的位置即 I_x, I_z , 通过式(3)可求出 θ, φ , 根据式(6)求出 α 与 β , 根据式(7)可求出即可求出 θ_1 与 θ_5 , 再依据式(4)~式

(5)即得到驱动杆 l_2, l_4 长度,为该并联机构的位置反解。

3 速度雅克比求解

分别对式(1)和式(2)求导并整理得:

$$\begin{cases} \dot{\theta} = \frac{\dot{\theta}_5 - \dot{\theta}_1}{2} \\ \dot{\varphi} = -\frac{\dot{\theta}_5 + \dot{\theta}_1}{2} \end{cases} \quad (8)$$

对式(4)进行求导:

$$\begin{cases} -l_1 \dot{\theta}_1 \sin \theta_1 - l_2 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 + \dot{l}_2 \cos \theta_2 = 0 \\ l_1 \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 + l_2 \dot{\theta}_2 \cos \theta_2 + \dot{l}_2 \sin \theta_2 = 0 \end{cases} \quad (9)$$

消去 $\dot{\theta}_2$ 得:

$$\dot{\theta}_1 = \frac{\dot{l}_2}{l_1 \cos(\theta_1 + \theta_2)} \quad (10)$$

对式(5)求导得:

$$\begin{cases} -l_5 \dot{\theta}_5 \cos \theta_5 = \dot{l}_4 \sin \theta_1 + l_4 \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 \\ -l_5 \dot{\theta}_5 \sin \theta_5 + \dot{l}_4 \cos \theta_1 - l_4 \dot{\theta}_1 \sin \theta_1 = 0 \end{cases} \quad (11)$$

消去 $\dot{\theta}_1$ 得:

$$\dot{\theta}_5 = \frac{\dot{l}_4}{l_5 \sin(\theta_5 - \theta_1)} \quad (12)$$

将式(10)和式(12)分别带入式(8):

$$\begin{cases} \dot{\theta} = \frac{\dot{l}_4}{2l_5 \sin(\theta_5 - \theta_1)} - \frac{\dot{l}_2}{2l_1 \cos(\theta_1 + \theta_2)} \\ \dot{\varphi} = -\frac{\dot{l}_4}{2l_5 \sin(\theta_5 - \theta_1)} - \frac{\dot{l}_2}{2l_1 \cos(\theta_1 + \theta_2)} \end{cases} \quad (13)$$

对式(13)求导:

$$v_x = 4\dot{\theta} \sin \theta \sin \varphi - 4l\dot{\varphi} \cos \theta \cos \varphi \quad (14)$$

$$v_z = 4\dot{\theta} \sin \theta \cos \varphi + 4l\dot{\varphi} \cos \theta \sin \varphi \quad (15)$$

将式(13)分别带入式(14)和式(15)得:

$$\mathbf{v} = \mathbf{J}\dot{\mathbf{l}}, \quad (16)$$

式中: $\mathbf{v} = [v_x \quad v_z]^T$, $\dot{\mathbf{l}} = [\dot{l}_2 \quad \dot{l}_4]^T$,

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{2l \cos(\theta + \varphi)}{l_1 \cos(\theta_1 + \theta_2)} & \frac{2l \cos(\theta - \varphi)}{l_5 \sin(\theta_5 - \theta_1)} \\ \frac{2l \sin(\theta + \varphi)}{l_1 \cos(\theta_1 + \theta_2)} & \frac{2l \sin(\theta - \varphi)}{l_5 \sin(\theta_5 - \theta_1)} \end{bmatrix}$$

\mathbf{J} 为该并联机构的速度雅可比。

4 工作空间分析

工作空间是四足仿生机器人的一项重要指标,直接影响机器人的越障性能与运动灵活性,同时根据工作空间的形状来确定该腿部构型是否满足机器人的行走要求。在分析该机构的工作空间前,首先要确定其结构约束条件,然后求解并联行程放大机构的工作空间。设具体结构约束条件为:

(1)驱动杆长要满足下方的双菱形摆动空间,且驱动杆长应满足: $l_{\min} \leq l_i \leq l_{\max}$ ($i=2,4$),式中: l_{\min} 为最小杆长, l_{\max} 为最大杆长。

(2)若要使工作空间完整,避免在运动过程中产生死点,在整个运动工作空间范围内保证 A 点必须处于 OB 线的上方。

(3)在整个工作空间内驱动杆 l_2 和 l_4 不发生干涉,若 l_2 和 l_4 直径为 e ,两杆之间的最小距离为 f ,即满足 $f \geq e$ 。

若不考虑其他结构参数,则该并联行程放大机构的工作空间主要由 θ, ϕ, l 的大小有关。根据国家 863 高性能仿生机器人的项目指标要求,机器人的高度要求不超过 1 000 mm 及考虑越障、装配要求,设 $l=260$ mm, $15^\circ \leq \theta \leq 75^\circ$, $-30^\circ \leq \phi \leq 30^\circ$,通过上述约束条件,采用空间搜索法,借助 Matlab 软件绘制出该机构在 XZ 平面内的工作空间,如图 3 所示。

从图 3 中可以看出,该并联行程放大机构在 XZ 平面内工作空间成冠状对称分布,工作空间

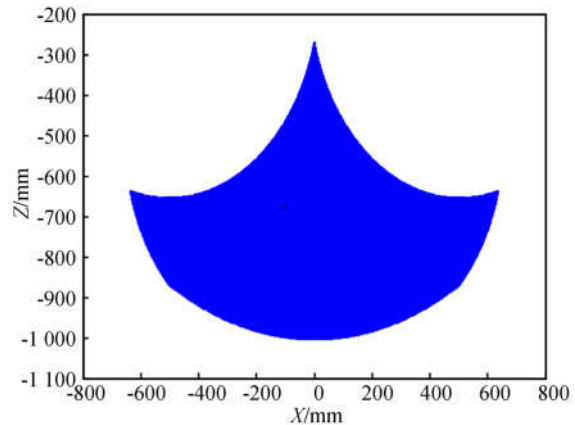


图 3 工作空间图

Fig. 3 Working space

沿 X 轴最大可达 1 200 mm, 沿 Z 向可达 500 mm, 工作空间内部饱满, 没有空心区域, 满足了仿生机器人腿部机构的前后摆腿和迈步要求的工作空间。从图 3 中还可以看出, 该工作空间可满足腿部实现大步长、高抬腿的要求, 越障性能好。根据给定的结构尺寸计算出两个液压缸的行程变化仅在 0~85 mm, 实现了将末端位置行程放大, 且接近工作空间底部放大倍数最大, 能够满足快速行走要求。

5 灵活性能指标建立及影响规律分析

根据项目要求, 机器人在直线行走过程中要实现快速行走, 这就需要该机构具有良好的灵活性。普遍认为采用速度雅克比条件数^[24-25]是最适合作为评价机器人灵活性能指标即:

$$\eta = \frac{\rho_{J_{\max}}}{\rho_{J_{\min}}}, \quad (17)$$

其中: $\rho_{J_{\max}}$ 为速度雅克比矩阵 \mathbf{J} 的最大奇异值, $\rho_{J_{\min}}$ 为速度雅克比矩阵 \mathbf{J} 的最小奇异值。

该指标 η 越趋近于 1 最好, 说明沿 X, Z 轴两方向的运动性能越灵活。

根据绘制工作空间的结构参数, 根据式(16)和式(17)可计算出该并联机构灵活性能评价指标, 并采用 Matlab 软件绘制出条件数在工作空间的分布, 如图 4 所示。

从图 4 可知, 该机构的灵活性能指标在中间部位较好, 两侧灵活性能稍差, 在机器人迈步时的着地点优先选择中间部位; 该灵活性能评价指标沿中心轴对称分布, 且变化较为平稳, 不存在奇异区域和突变情况, 说明该机构的运动灵活性整体较好; 而且运动灵活性能指标随机构位姿的不同而变化, 所以只能作为运动灵活局部性能指标。为了更全面评价结构参数与运动灵活性能指标关系, 将机构工作空间内的所有条件数均值定义为全域的一个性能评价指标:

$$\eta_p = \frac{\int \eta dV}{V}. \quad (18)$$

由于条件数均值不能反映条件数在工作空间内的波动变化情况, 所以采用条件数的均值标准差定义为机构灵活的另一个全域性能指标^[25]。

$$\eta_{\text{TC}} = \frac{\sqrt{\int_V (\eta - \eta_p)^2 dV}}{V}. \quad (19)$$

对于全域均值灵活性能评价指标, η_p 越趋近于 1 越好, 代表沿 X, Z 方向的灵活同向性好; 对于全域均值标准差灵活性能评价指标, η_{TC} 越小越好, 说明腿部机构在整个机器人的工作空间的波动越小, 运动灵活性越稳定。

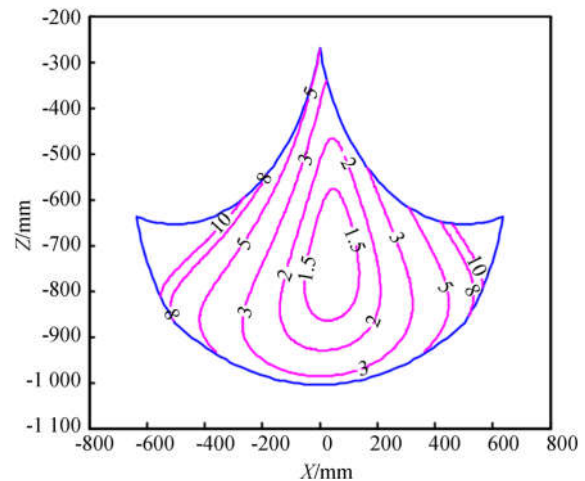


图 4 灵活性能指标空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of flexible performance indicator

Angeles 提出将全域内最小条件数的倒数定义为度量机器人的灵活性能指标^[26], 即:

$$\eta_D = \frac{1}{\eta_{\min}} \times 100\%, \quad (20)$$

其中: η_{\min} 全域内雅克比条件数的最小值, η_D 为机器人的另一种灵活性能指标, 值越大, 代表整个机构越灵活。

由式(20)可知, η_{\min} 越小, 整个机构越灵活。为了与前两个运动灵活性评价指标在数值变化与性能指标变化趋势上保持一致, 即各指标值越小灵活性越好, 故将机器人的灵巧性指标 η_D 改写成:

$$\eta_{DL} = \eta_{\min}, \quad (21)$$

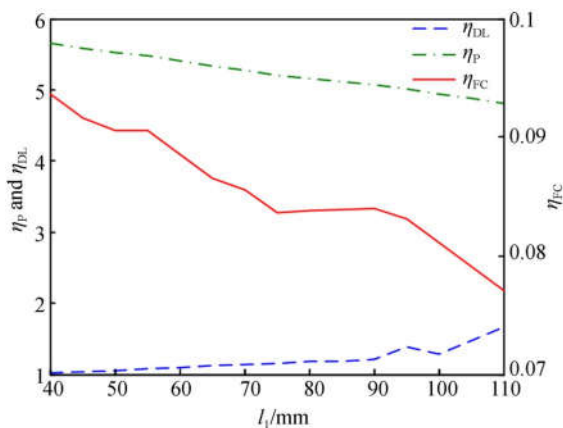
其中 η_{DL} 为灵活性能指标 η_D 的另一种表达形式。

综上所述, 本文采用 3 项全域运动灵活性能指标来全面评价该机构的运动灵活性。然而不同的结构参数, 对这 3 项全域灵活性能评价指标的影响也不同, 因此这 3 项性能指标可看作是结构参数的函数即:

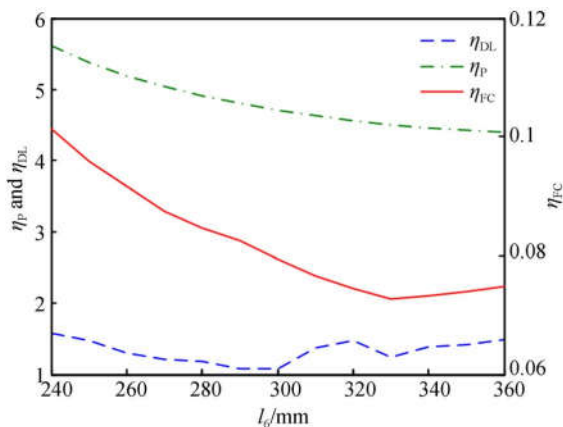
$$M(\eta_P, \eta_{FC}, \eta_{DL}) = f(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6, l, \phi, \theta_3).$$

从工作空间分析可知,若认为驱动 l_2 和 l_4 长度满足 l_1 杆和 l_5 杆的摆动范围,结构参数一旦确定,工作空间的大小和形状就确定。根据项目要求及结构装配要求,仍然令 $-30^\circ \leq \phi \leq 30^\circ, 15^\circ \leq \theta \leq 75^\circ, l = 260 \text{ mm}$,所以这里主要考虑 $l_1, l_3, l_5, l_6, \phi, \theta_3$ 对运行灵活性能指标的影响。为保证对称性,令 $l_1 = l_5$,采用单变量法通过 Matlab 软件分别绘制了 $l_1, l_3, l_6, \phi, \theta_3$ 对运动灵活性能指标的影响,如图 5 所示。

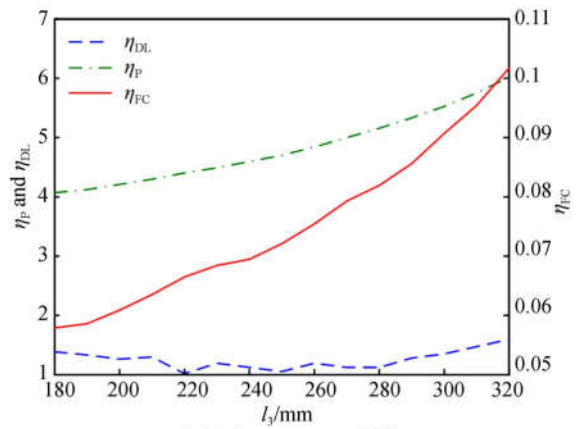
从图 5(a)中可以看出, η_P 随 l_1 的增加 η_P 单调变小, η_P 性能指标越好; η_{FC} 随 l_1 的增加先单调变小,在 $70 \sim 90 \text{ mm}$ 间变平缓,随后下降,总体 η_{FC} 性能指标随尺寸的增大而越来越好;随 l_1 的增加, η_{DL} 先是较为小幅度的增加,在 90 mm 后显著增加,总体 η_{DL} 随着尺寸的增加性能指标变差。



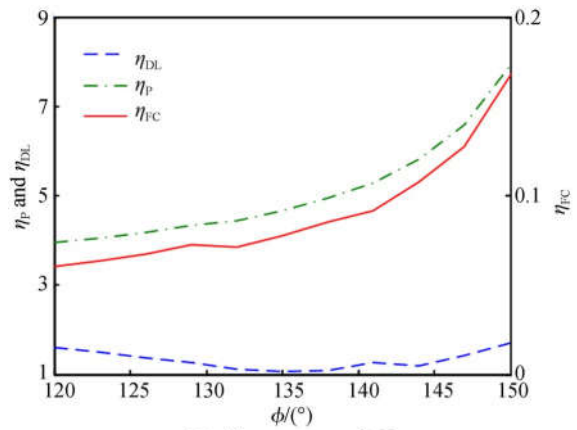
(a) l_1 与 $\eta_P, \eta_{FC}, \eta_{DL}$ 关系
(a) l_1 and $\eta_P, \eta_{FC}, \eta_{DL}$



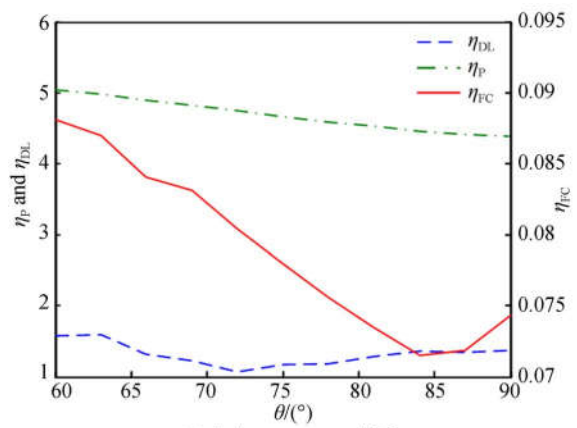
(b) l_6 与 $\eta_P, \eta_{FC}, \eta_{DL}$ 关系
(b) l_6 and $\eta_P, \eta_{FC}, \eta_{DL}$



(c) l_3 与 $\eta_P, \eta_{FC}, \eta_{DL}$ 关系
(c) l_3 and $\eta_P, \eta_{FC}, \eta_{DL}$



(d) ϕ 与 $\eta_P, \eta_{FC}, \eta_{DL}$ 关系
(d) ϕ and $\eta_P, \eta_{FC}, \eta_{DL}$



(e) θ_3 与 $\eta_P, \eta_{FC}, \eta_{DL}$ 关系
(e) θ_3 and $\eta_P, \eta_{FC}, \eta_{DL}$

图 5 结构参数与性能评价指标关系

Fig. 5 Relationship between structural parameters and performance evaluation indexes

从图 5(b)中可以看出, η_p 随 l_6 的增加单调变小, 性能指标越好; η_{FC} 随 l_6 的增加先单调变小, 在 330 mm 达到最小, 性能指标最优, 随之有上升趋势, 性能指标变差; 随 l_6 的增加, η_{DL} 总体先下降而后又再次上升, 性能指标也是先变好, 而后变坏, 性能指标最好的点在 300 mm 附近。

从图 5(c)和图 5(d)中可以看出, η_p , η_{FC} 随 l_3 , ϕ 的增加单调变大, 性能指标总体变坏; η_{DL} 先随着尺寸增加而减小, 且趋于平缓, 然后增大, l_3 尺寸在 220~280 mm 之间存在小幅度波动, ϕ 在 135°~145°之间也存在小幅度波动, 但 η_{DL} 性能指标总体随尺寸及角度的增加先变好, 在中间部位较好, 然后变差。

从图 5(e)中可以看出, η_p , η_{FC} 性能评价指标的变化与图 5(b) 的变化趋势相似, $\theta_3 = 84^\circ$ 时 η_{FC} 最佳; 性能指标 η_{DL} 随 θ_3 角度的增大, 先变小, 后增大, 然后趋于平缓, 但总体性能指标随角度的增加由坏变好, 在中间段较好, 然后再次变差。

6 样机参数设计及样机仿真

6.1 主要结构参数优化设计

通过前面的分析可知, η_p 趋近 1 时, 灵活性最好, η_{FC} , η_{DL} 越小越好。但从图 5 中可以看出, η_p 始终是大于 3, 因此这 3 项全域运动灵活性能指标均为越小越好。若这项 3 项性能指标 η_p , η_{FC} 和 η_{DL} 的数量级相同, 即可变成求解在这 3 项全域运动性能指标和为最小的优化函数下的结构参数。但从图 5 可以看出, 二者的数量级并不同, 若采用这 3 项性能指标相加为最小优化函数显然不合理。对于这 3 项评价指标数量级不统一的问题, 采用容限加权法优化法可以很好地解决这类问题。依据容限加权优化法, 确定该机构运动灵活性能指标作优化目标函数 λ :

$$\lambda = \sqrt{(\mu_1 \eta_p)^2 + (\mu_2 \eta_{FC})^2 + (\mu_3 \eta_{DL})^2}, \quad (22)$$

其中 μ_1, μ_2, μ_3 为容限权重系数。

$$\mu_1 = \frac{1}{\left(\frac{\eta_{p_{\max}} - \eta_{p_{\min}}}{2}\right)^2}, \quad (23)$$

$$\mu_2 = \frac{1}{\left(\frac{\eta_{FC_{\max}} - \eta_{FC_{\min}}}{2}\right)^2}, \quad (24)$$

$$\mu_3 = \frac{1}{\left(\frac{\eta_{DL_{\max}} - \eta_{DL_{\min}}}{2}\right)^2}, \quad (25)$$

式中: $\eta_{p_{\max}}, \eta_{p_{\min}}$ 分别为 η_p 最大值和最小值; $\eta_{FC_{\max}}, \eta_{FC_{\min}}$ 分别为 η_{FC} 最大值和最小值; $\eta_{DL_{\max}}, \eta_{DL_{\min}}$ 分别为 η_{DL} 最大值和最小值。

从图 5 中, 可以得到 η_p 最大值为 7.932 8, 最小值为 4.054 4, η_{FC} 最大值为 0.167 66, 最小值为 0.071 51, η_{DL} 最大值为 1.701, 最小值为 1.002。根据式(23)~式(25)可求容限权重系数: $\mu_1 = 0.516, \mu_2 = 20.8, \mu_3 = 8.19$

由于 η_p 趋于 1 最好, 根据容限法已确定的权重系数可知, 无论何种情况下 μ_1 与 η_p 的乘积大于 1, 值为越小越好, 且通过前面分析可知 η_{FC}, η_{DL} 值也是越小越好, 因此确定的优化函数的值为越小越好, 因此优化的最终目标:

$$\lambda(\mathbf{x}) \rightarrow \min, \quad (26)$$

其中 $\mathbf{x} = (l_1 \ l_3 \ l_6 \ \phi \ \theta_3)^T$ 。

设各主要结构参数的取值及范围如下: $40 \text{ mm} \leq l_1 \leq 110 \text{ mm}, 240 \text{ mm} \leq l_6 \leq 360 \text{ mm}, 180 \text{ mm} \leq l_3 \leq 320 \text{ mm}, 60^\circ \leq \theta_3 \leq 90^\circ, 120^\circ \leq \phi \leq 160^\circ$ 。根据式(26)优化指标, 采用 Matlab 软件对每组参数按照实际加工工艺及装配要求以一定增量进行全局搜索, 最终得到一组运动灵活性能好的结构参数:

$\mathbf{x} = (75 \text{ mm} \ 240 \text{ mm} \ 305 \text{ mm} \ 135^\circ \ 75^\circ)^T$, 通过优化的结构参数, 确定了两个驱动副的杆长变化范围 $260 \text{ mm} \leq l_2, l_4 \leq 345 \text{ mm}$ 。

6.2 虚拟样机仿真

根据优化得到的结构参数, 在综合考虑四足机器人整体结构与工艺装配要求的前提下, 设计出四足仿生机器人腿部机构及整体虚拟样机模型, 并将整体样机模型导入到 ADAMS 软件进行仿真。由于直线迈步行走对机械腿的运动灵活性要求最高, 因此在仿真时将机器人行走步态设置为直线迈步步态, 从而揭示机械腿并联机构的 2 个液压缸活塞杆的速度变化规律, 验证腿部机构设计方案和优化的结构参数合理性。为了更全面验证腿部机构的灵活性能, 设定仿生四足机器人行走时的步态为对角步态, 即机器人对角线上两条腿同时处于迈步状态或者支撑状态, 来模拟四足动物的行走步态, 如图 6 所示。在 ADAMS 软件中, 将整体的样机模型各约束进行设定, 将对角

步态加载到足端,通过 ADAMS 软件测出同一条机械腿的两个液压缸的驱动线速度如图 7 所示。从图 7 可知,2 个液压缸驱动的线速度随时间变化非常平稳,不存在速度突变和阶跃情况,且 2 个液压缸的驱动速度变化规律较相近,说明机械腿的设计方案和结构参数较为合理。为了验证推导的位置方程、速度雅克比矩阵理论推导的正确性,采用 Matlab 编程得到的速度曲线与仿真得到的速度曲线进行误差对比拟合。在 0~2 s 内,均匀选取 200 个采样点绘制误差曲线如图 8 所示。从误差曲线可以知,误差值较小,在 $\pm 1.6 \times 10^{-6}$ m/s

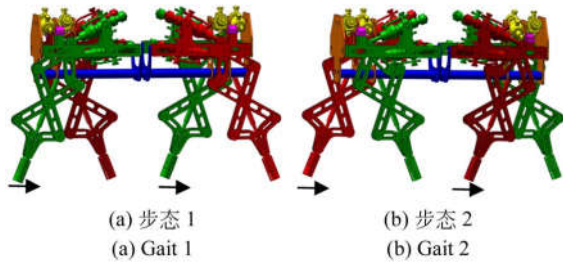


图 6 仿生机器人仿真步态图

Fig. 6 Simulation gait diagram of bionic robot

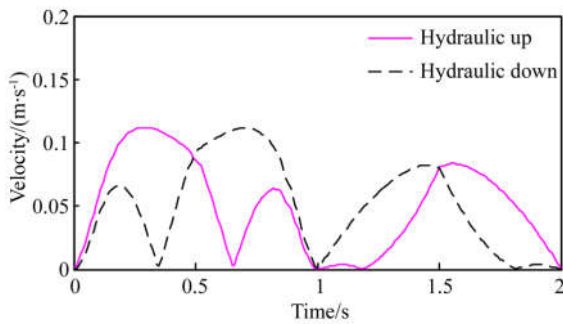


图 7 驱动液压缸线速度

Fig. 7 Linear speed of driving hydraulic cylinder

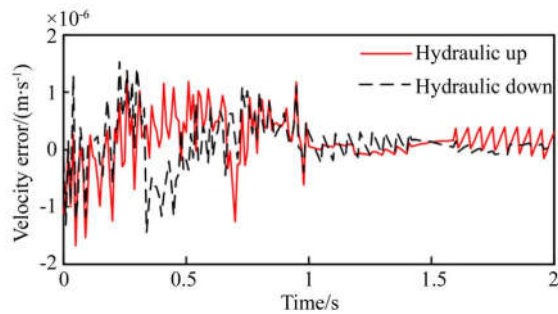


图 8 理论与仿真速度误差曲线

Fig. 8 Curves of theoretical and simulation velocity error

范围内,验证了理论推导的正确性。根据优选的结构参数,最终将此并联放大机构应用到与上海交通大学联合开发研制出四足仿生机器人实际样机,如图 8 所示。

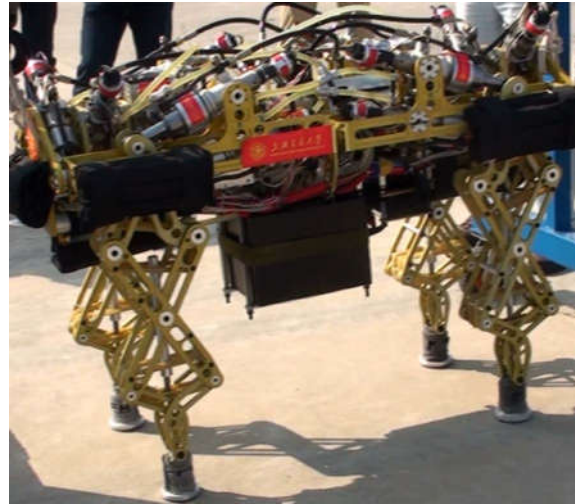


图 9 四足机器人的样机

Fig. 9 Whole structure of quadruped robot

7 结 论

建立了 2-DOF 并联行程放大机构的位置反解方程,推导了速度雅克比矩阵,绘制了其运动空间形状。从工作空间的形状上看,工作空间呈轴对称、冠状分布,可将末端行程位置放大,且接近工作空间底部放大倍数最大。因此该机构非常适合于做快速行走的仿生机器人腿部结构。

建立了评价 2 自由度并联行程放大机构的灵活性能评价指标,揭示出主要结构参数对其灵活性能指标的影响规律。

为权衡 3 种性能指标,使灵活性性能最优,应用容限加权法建立了基于结构参数的优化函数,选取了一组合理的结构参数:当 $l_1 = 75$ mm, $l_3 = 240$ mm, $\theta_3 = 135^\circ$, $l_6 = 305$ mm, $\varphi = 75^\circ$ 时,该机构运动灵活性能最好,并确定两个驱动副的杆长变化范围为 $260 \text{ mm} \leq l_2, l_4 \leq 345$ mm,为样机的制造奠定基础。

通过虚拟样机仿真,验证了优化的结构参数和结构方案设计的合理性及理论推导的正确性,研制出实际样机。

参考文献:

- [1] PAN Y,GAO F. A new six-parallel-legged walking robot for drilling holes on the fuselage[J]. *Journal Mechanical Engineering Science*, 2014, 228(4): 753-764.
- [2] 陈昊,郭为忠,高峰,等. 步行机器人核电封头移动焊接控制任务建模与系统设计[J]. *机械设计与研究*,2018,34(5):102-111.
CHEN H,GUO W ZH,GAO F, *et al.*. Legged mobile robot modeling and control system design based CRDM welding task[J]. *Machine Design and Research*,2018,34(5):102-111. (in Chinese)
- [3] 施志祥,赵现朝,殷汇乐,等. 并联六足飞机制孔机器人的位姿调节[J]. *机械设计与研究*,2016,32(3): 14-18.
SHI ZH X, ZHAO X CH, YIN H L, *et al.*. Research on pose adjustment of parallel hexapod robot for drilling on aircraft surface[J]. *Machine Design and Research*, 2016, 32(3): 14-18. (in Chinese)
- [4] 金振林,张金柱,高峰. 一种消防六足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 ZH L, ZHANG J ZH, GAO F. A firefighting six-legged robot and its kinematics analysis of leg mechanisms[J]. *Chinese Mechanical Engineering*, 2016,27(7):865-871. (in Chinese)
- [5] 张金柱,金振林,张哲. 六足机器人整机运动学分析及构型选择[J]. *光学精密工程*,2017, 25(7): 1832-1842.
ZHANG J ZH, JIN ZH L, ZHANG ZH. Kinematics analysis and configuration selection of whole machine of hexapod robot[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017,25(7): 1832-1842. (in Chinese)
- [6] 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 Y, JIN ZH L, QU M K. Design of parallel mechanical leg of six-legged robot[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012,20(7):1532-1541. (in Chinese)
- [7] 荣誉,金振林. 五自由度并联机械腿静力学性能评价与优化设计[J]. *光学精密工程*,2012,20(6): 1233-1242.
RONG Y, JIN ZH L. Statics performance evaluating and optimal design of 5-DOF parallel mechanical leg[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012,20(6):1233-1242. (in Chinese)
- [8] 荣誉,金振林. 3-DOF 并联机械腿动力学建模与伺服电机峰值预估[J]. *光学精密工程*,2012,20(9): 1974-1983.
RONG Y, JIN ZH L. Dynamic modeling and peak prediction of servo motor for 3-DOF parallel mechanical leg[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012,20(9): 1974-1983. (in Chinese)
- [9] 李祺,马跃,黄田. 一种并联动力头静柔度精确预估方法与灵敏度分析[J]. *机械工程学报*,2016,52(11):1-10.
LI Q, MA Y, HUANG T. Compliance evaluation and sensitivity analysis of a parallel spindle head [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016,52(11):1-10. (in Chinese)
- [10] 汪满新,刘海涛,黄田. 3-SPR 并联机构运动学性能评价[J]. *机械工程学报*,2017,53(5):108-115.
WANG M X, LIU H T, HUANG T. Kinematics performance evaluation of a 3-SPR parallel manipulator [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017,53(5):108-115. (in Chinese)
- [11] 齐明. 一类 2R1T 三自由度并联机构的设计理论与方法研究[D]. 天津:天津大学,2007:54-95.
QI M. *Research on Design Theory and Methodology of a Class of 2R1T 3-DOF Parallel Mechanisms*[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007: 54-95. (in Chinese)
- [12] 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 Y G, SONG Y M, HUANG T, *et al.*. Static force analysis of lower-mobility parallel manipulators [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2007,43(9): 80-83. (in Chinese)
- [13] 王友渔,赵兴玉,黄田,等. 可重构混联机械手 Tri-Variant 与 Tricept 的静动态特性预估与比较[J]. *天津大学学报*,2007,40(6):41-45.
WANG Y Y, ZHAO X Y, H T, *et al.*. Estimation and comparison of static and dynamic performance of two reconfigurable hybrid robots-the trivariant and the tricept[J]. *Journal of Tianjin University*, 2007,40(6): 41-45. (in Chinese)
- [14] 李研彪,刘毅,赵章凤,等. 基于空间模型技术的拟人机械腿的运动学传递性能分析[J]. *农业工程学报*,2013,29(2):17-23.
LI Y B, LIU Y, ZHAO ZH F, *et al.*. Kinematics transmission analysis on anthropopathic mechanical leg based on spatial model technique[J]. *Transac-*

- tions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(2):17-23. (in Chinese)
- [15] 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.
CHEN G. Study on Structure Design and Dynamic Performance of the Parallel Bionic Robot Leg[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2008. (in Chinese)
- [16] 王洪波, 齐政彦, 胡正伟, 等. 并联腿机构在四足/两足可重组步行机器人中的应用[J]. 机械工程学报, 2009, 45(8):24-30.
WANG H B, QI ZH Y, HU ZH W, et al.. Application of parallel leg mechanisms in quadruped/biped reconfigurable walking robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(8):24-30. (in Chinese)
- [17] 王洪波, 徐桂玲, 胡星, 等. 四足并联腿步行机器人动力学[J]. 机械工程学报, 2012, 48(23):76-82.
WANG H B, XU G L, HU X, et al.. Dynamics of quadruped walking robot with parallel leg mechanism[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(23):76-82. (in Chinese)
- [18] MIAO ZH H, YAO Y A, KONG X W. Biped walking robot based on a 2-UPU+2-UU parallel mechanism[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(2): 269-278.
- [19] 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 J SH, LI M X, HOU B J, et al.. Kinematics analysis on the serial-parallel leg of a novel quadruped walking robot[J]. Opt. Precision Eng., 2015, 23(11):3147-3159. (in Chinese)
- [20] 荣誉, 曲梦可. 基于变胞机构的性能可变机械臂研制[J]. 机械工程学报, 2018, 54(15): 41-51, 59.
RONG Y, QU M K. Design of manipulator with variable performances based on metamorphic mechanism[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(15): 41-51, 59. (in Chinese)
- [21] 张立杰, 李永泉. 球面 2-DOF 冗余驱动并联机器人机构误差分析[J]. 机械工程学报, 2013, 49(7): 148-154.
ZHANG L J, LI Y Q. Error analysis of spherical 2-DOF parallel manipulator with actuation redundancy[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(7): 148-154. (in Chinese)
- [22] 崔冰艳, 金振林. 农业机器人新型肘关节的静力学性能分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(03):122-125.
CUI B Y, JIN ZH L. Analysis of statics performance for a novel elbow joint of agricultural robot[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(3): 122-125. (in Chinese)
- [23] 周玉林, 李波, 杨龙, 等. 二自由度球面并联机构 U₂(P+R) 静力学分析[J]. 中国机械工程, 2013, 24(15):2081-2087.
ZHOU Y L, LI B, YANG L, et al.. Statics analysis of a spherical parallel mechanism U₂(P+R) with 2-DOF[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(15):2081-2087. (in Chinese)
- [24] HUANG T, WHITEHOUSE D J, WANG J S. Local dexterity, optimum architecture and design criteria of parallel machine tools[J]. Annals of the CIRP, 1998, 47(1):347-351.
- [25] GOSSELIN C M, ANGELES J. A globe performance index for the kinematic optimization of robotic manipulators[J]. ASME Journal of Mechanical Design, 1991, 113(3):220-226.
- [26] ANGELES J, ROJAS A. Manipulator inverse kinematics via condition number minimization and continuation[J]. International Journal of Robotics and Automation, 1987, 2(2):61-69.

作者简介:



王晓磊(1979—),男,辽宁锦州人,博士研究生,副教授,2007年于沈阳工业大学获得硕士学位,主要从事并联机器人理论与应用方面的研究。E-mail: wxl-gxy@126.com

导师简介:



金振林(1962—),男,辽宁抚顺人,博士研究生,教授,博士生导师,2001年于燕山大学获得博士学位,主要从事并联机器人理论与应用方面的研究。E-mail: zljn@ysu.edu.cn

(本栏目编辑:秦思)