

文章编号 1004-924X(2012)06-1233-10

五自由度并联机械腿静力学性能评价与优化设计

荣 誉^{1,2*}, 金振林¹

(1. 燕山大学 机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 河北科技师范学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 为了对一种六足机器人的五自由度并联机械腿进行静力学性能评价和优化设计, 提出了一种同时考虑约束力映射关系和驱动力映射关系的腿部机构静力学分析方法, 并基于此方法对机械腿进行了优化设计。首先, 通过分析腿部机构的驱动、约束映射关系, 分别建立了腿部机构的驱动雅可比矩阵和约束雅可比矩阵; 应用虚功原理建立了腿部机构的驱动静力传递平衡方程, 在定义驱动静力学评价指标的基础上绘制了评价指标分布图, 得出了结构参数与驱动静力评价指标之间的关系曲线。然后, 采用同样的方法建立了腿部机构的约束静力传递平衡方程, 定义了约束静力学性能评价指标, 得出了结构参数与约束静力评价指标之间的关系曲线。最后, 基于驱动、约束静力学性能评价指标, 采用蒙特卡罗法对结构参数进行了优化设计。计算表明, 固定平台结构参数 a 为 200 mm、运动平台结构参数 b 为 80 mm, UPU 支链长度 $l_{1\min}$ 、 $l_{1\max}$ 分别为 500 mm、900 mm 时, 腿部机构的静力学综合性能最好。

关键词: 并联机械腿; 驱动静力传递分析; 约束静力传递分析; 性能评价; 优化设计

中图分类号: TP242.6 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122006.1233

Static performance evaluation and optimal design of 5-DOF parallel mechanical leg

RONG Yu^{1,2*}, JIN Zhen-lin¹

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

2. Hebei Normal University of Science & Technology, Qinhuangdao 066004, China)

* Corresponding author, E-mail: lixiangcg@126.com

Abstract: To evaluate the static performance and design optimally a parallel mechanical leg for the six-legged robot, a static analysis method based on the mapping of both constraint and actuation forces was proposed, and the mechanical leg was designed based on this method. Firstly, the constraint and actuation Jacobian matrixes were established based on the mapping of both constraint and actuation. Then, according to the virtual work principle, the actuation statics transmission equation was established, the performance evaluation indexes of actuation statics were designed, and the relationship curve between the performance evaluation index and structure parameters was calculated. By the same way, the transmission equation and performance evaluation index of constraint statics were obtained, and the relationship curve between the performance evaluation index and structure parameters was also calculated. Finally, based on the performance evaluation indexes both of constraint and actuation

收稿日期: 2012-02-24; 修订日期: 2012-03-10.

基金项目: 机械系统与振动国家重点实验室开放课题基金资助项目(No. MSV-2012-10); 秦皇岛市科技支撑计划资助项目(No. 201101A028)

statics, the structure parameters were optimally designed by Monte Carlo method. Calculations show that when the structure parameters of a fixed platform and a movement platform are 200 mm, and 80 mm and the UPU branched chain lengths $l_{1\min}$, $l_{1\max}$ are 500 mm and 900 mm, the statics comprehensive performance of the parallel mechanical leg is the best. These studies lays the theoretical foundation for further study of the six-legged robot.

Key words: parallel mechanical leg; statics analysis of actuation; statics analysis of constraint; performance evaluation; optimal design

1 引言

在进行地面光学航天测控和天文观测时,光学仪器运载平台的调姿定位能力和崎岖路面适应能力十分关键^[1-3],但专门用于光学观测设备运输和定位的机器人至今仍很少见。根据美国陆军的调查,地球上近一半的地面不能为传统的轮式或履带式车辆到达和通过^[4],而地面光学跟踪活动往往在山地、林地、丘陵等复杂地况中进行,六足式步行机器人十分适合作为这类光学仪器的运载平台^[5]。并联机构具有运动灵活性好、承载能力强、结构紧凑等特点,把并联机构作为光学仪器运载六足机器人的腿部机构,可以使其用于野外航天测控、野外天文观测等工作。在并联多足步行机器人方面,崔冰艳等曾对四足步行器做过深入研究^[6-8],王洪波教授曾对并联四足/两足可重组并联机器人做过深入研究^[9-10]。

机器人的静力学性能评价能够为机器人的参数设计和优化提供可靠依据^[11]。对少自由度并联机构进行静力学分析的研究很多,但大多只研究结构参数与驱动力传递特性之间的关系,而没有考虑结构参数与约束力传递特性之间的关系。对于少自由度并联机构的参数优化设计,仅考虑驱动力的传递特性显然是不足的^[12],因为机构自身约束力的传递特性也影响机构的性能。文献^[13]提出了一种同时建立机构驱动力映射和约束力映射的分析方法。为了更全面地分析机械腿静力学性能,同时研究驱动力和约束力传递特性与结构参数的关系是十分必要的。

本文提出了一种五自由度机械腿,在此基础上,同时考虑驱动力、约束力映射关系,对基于 2-UPS+UPU 机构的五自由度机械腿进行了全面的静力学分析和优化设计。分别建立了腿部机构的驱动雅可比矩阵和约束雅可比矩阵;基于驱动

雅可比矩阵对腿部机构进行了驱动静力学性能分析并定义了性能评价指标;基于约束雅可比矩阵对腿部机构进行了约束静力学性能分析并定义了性能评价指标;揭示了结构参数与腿部机构驱动/约束静力学评价指标的关系。最后,结合性能评价指标,采用蒙特卡罗法对腿部机构进行了结构参数优化,选取了一组性能较好的结构参数。

2 腿部机构结构模型

本文提出的五自由度并联机械腿结构如图 1 所示,其机构原型为 2-UPS+UPU 并联机构。图 2 为 2-UPS+UPU 并联机构结构简图,该机构由机架、运动平台和用于连接二者的一条 UPU 支链和两条 UPS 支链组成。这里,U、P、S 分别表示虎克铰、移动副和球铰。其中,UPU 支链一端通过虎克铰与机架连接,另一端通过虎克铰与动平台连接;UPS 支链一端通过虎克铰与机架连接,另一端通过球铰与动平台连接。3 条支链与机架和动平台的连接点均呈等腰直角三角形布局,且 UPU 支链的连接点位于三角形的直角顶点处,如图 2 所示。在运动副布局方面,UPU 支链连接机架虎克铰靠近机架的回转轴线与一条

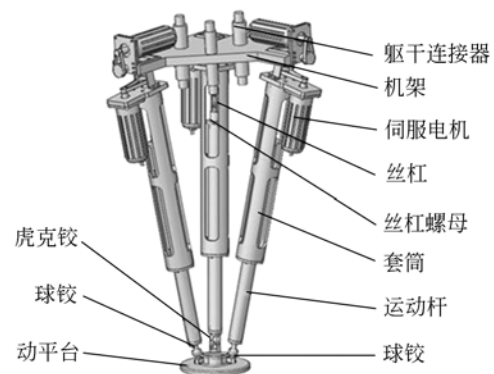


图 1 并联机械腿结构图

Fig. 1 Structure of mechanical leg

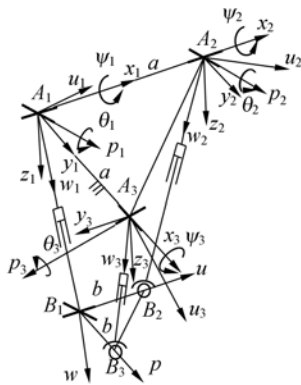


图 2 并联机械腿机构简图

Fig. 2 Structure of 2-UPS+UPU parallel mechanism

UPS 支链连接机架虎克铰靠近机架的回转轴共线,与另一条 UPS 支链连接机架虎克铰靠近机架的回转轴共面垂直;UPU 支链的 2 个虎克铰远离机架和动平台的两条回转轴平行。

根据螺旋理论^[14],该机构是具有 2 个转动、3 个平移自由度的五自由度机构,其约束为 1 个约束力偶。在选择驱动输入运动副时,把 3 个支链的移动副选为移动驱动输入,把两条 UPS 支链虎克铰靠近机架的转动副选为转动驱动输入,伺服电机的布置方式如图 1 所示。

3 腿部机构的驱动、约束映射分析

3.1 坐标系建立与姿态描述

在图 2 中,用 A_1 表示 UPU 支链与机架连接的虎克铰回转中心, $A_i(i=2,3)$ 表示 UPS 支链与机架连接的虎克铰回转中心。 B_1 表示 UPU 支链与动平台连接的虎克铰回转中心, $B_i(i=2,3)$ 表示 UPS 支链与动平台连接的球铰中心。 A_1 、 B_1 分别位于等腰直角三角形 $A_1 A_2 A_3$ 和 $B_1 B_2 B_3$ 的直角顶点。设机构的主要结构参数为 $A_1 A_2 = A_1 A_3 = a$, $B_1 B_2 = B_1 B_3 = b$, UPU 支链长度为 l_1 , UPS 支链长度为 $l_i(i=2,3)$ 。定义动平台平行于机架平面 A 且两平台距离处于其变化范围中间值时的位姿为初始位姿。为了便于分析,首先给定腿部机构初步结构参数: $a=160\text{ mm}$, $b=90\text{ mm}$, $l_1 \in (550, 950)\text{ mm}$, $l_2 \in (550, 950)\text{ mm}$, $l_3 \in (550, 950)\text{ mm}$, $h=750\text{ mm}$ 。

建立固定参考坐标系 $A_1-x_1 y_1 z_1$,其中 x_1 轴与位于 A_1 点的虎克铰靠近机架的回转轴重合; z_1 轴与 A_1 、 A_2 、 A_3 所张成的平面 A 垂直,方

向如图 2 所示; y_1 轴满足右手定则。又以 $A_i(i=2,3)$ 为原点建立辅助参考坐标系 $A_i-x_i y_i z_i(i=2,3)$,其中 x_i 轴与对应支链虎克铰靠近机架的回转轴重合; z_i 轴与 z_1 轴平行; y_i 轴满足右手定则。建立运动坐标系 $B_1-u p w$,其中 w 轴与 B_1 、 B_2 、 B_3 所张成的平面 B 垂直,方向如图 2 所示; u 轴沿 $B_1 B_2$ 方向; p 轴满足右手定则。为了描述各支链的姿态,在各支链上分别建立连体坐标系 $A_i-u_i p_i w_i(i=1,2,3)$,其中, w_i 轴与支链 i 的轴线重合并由点 A_i 指向点 B_i ; p_i 轴与对应支链虎克铰远离机架的回转轴重合,方向如图 2 所示; u_i 轴满足右手定则。

根据前面对坐标系的定义,连体坐标系 $A_i-u_i p_i w_i(i=1,2,3)$ 相对于参考坐标系 $A_i-x_i y_i z_i(i=1,2,3)$ 的姿态可以通过 2 次旋转实现:首先,绕 x_i 轴旋转角度 ψ_i ,然后绕 p_i 轴旋转角度 θ_i 。由此可以得到连体坐标系 $A_i-u_i p_i w_i(i=1,2,3)$ 的旋转矩阵

$$R_i = \text{Rot}(x_i, \psi_i) \text{Rot}(p_i, \theta_i) = [u_i \quad p_i \quad w_i], \quad (1)$$

式中, u_i 、 p_i 和 w_i 分别为轴 u_i 、 p_i 和 w_i 单位主矢量。

经分析可知, $\psi_i(i=2,3)$ 即为各 UPS 支链的转动驱动输入转角。在选取动平台参考点时,由于 $A_1 B_1$ 支链处于机构的对称面上,所以选取 B_1 为动平台参考点。设动平台在固定参考坐标系 $A_1-x_1 y_1 z_1$ 中的姿态等效于先绕 x_1 轴转 γ 角,再绕 y_1 轴转 β 角,再绕 z_1 轴转 α 角获得,则运动坐标系相对于固定坐标系的旋转矩阵为

$$R = \text{Rot}(z_1, \alpha) \text{Rot}(y_1, \beta) \text{Rot}(x_1, \gamma) = [u \quad p \quad w], \quad (2)$$

式中, u 、 p 和 w 分别为轴 u 、 p 和 w 在固定坐标系 $A_1-x_1 y_1 z_1$ 中的单位主矢量。

3.2 驱动雅可比矩阵求解

为了使求解过程的物理意义清晰明确,这里采用矢量法求解驱动雅可比矩阵。在固定参考坐标系 $A_1-x_1 y_1 z_1$ 中,建立位置闭环矢量约束方程

$$l_1 = l_1 w_1, \quad (3)$$

$$l_1 = a_2 + l_2 w_2 - b_2, \quad (4)$$

$$l_1 = a_3 + l_3 w_3 - b_3, \quad (5)$$

式中, l_i 和 $w_i(i=1,2,3)$ 分别表示支链 i 的杆长和单位矢量, l_1 表示矢量 $A_1 B_1$, a_2 表示矢量 $A_1 A_2$, a_3 表示矢量 $A_1 A_3$, b_2 表示矢量 $B_1 B_2$, b_3 表示矢量 $B_1 B_3$ 。

对式(3)~(5)两边关于时间 t 求导数,得

$$\mathbf{v} = \dot{l}_1 \mathbf{w}_1 + l_1 \boldsymbol{\omega}_1 \times \mathbf{w}_1, \quad (6)$$

$$\mathbf{v} = \dot{l}_2 \mathbf{w}_2 + l_2 \boldsymbol{\omega}_2 \times \mathbf{w}_2 - \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{b}_2, \quad (7)$$

$$\mathbf{v} = \dot{l}_3 \mathbf{w}_3 + l_3 \boldsymbol{\omega}_3 \times \mathbf{w}_3 - \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{b}_3, \quad (8)$$

式中, \mathbf{v} 表示点 B_1 的线速度, $\boldsymbol{\omega}$ 表示动平台的角速度, $\boldsymbol{\omega}_i$ 和 \dot{l}_i 分别表示支链 i ($i=1, 2, 3$) 整体的角速度及其驱动移动副伸缩速度。

由几何关系有 $\mathbf{w}_i (\boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{w}_i) = 0$, ($i=1, 2, 3$)。因此,对式(6)两端同时点乘 \mathbf{w}_1 ,对式(7)两端同时点乘 \mathbf{w}_2 ,对式(8)两端同时点乘 \mathbf{w}_3 ,从而得到

$$\dot{l}_1 = \mathbf{w}_1^T \mathbf{v}, \quad (9)$$

$$\mathbf{w}_2^T \mathbf{v} = \dot{l}_2 - (\mathbf{b}_2 \times \mathbf{w}_2)^T \boldsymbol{\omega}, \quad (10)$$

$$\mathbf{w}_3^T \mathbf{v} = \dot{l}_3 - (\mathbf{b}_3 \times \mathbf{w}_3)^T \boldsymbol{\omega}, \quad (11)$$

将式(9)~(11)写成矩阵形式可得到机构的关节驱动移动副输入速度 $\dot{\mathbf{l}} = [\dot{l}_1 \quad \dot{l}_2 \quad \dot{l}_3]^T$ 与运动平台广义速度 $\mathbf{V} = [\mathbf{v}^T \quad \boldsymbol{\omega}^T]^T$ 的映射关系

$$\begin{bmatrix} \dot{l}_1 \\ \dot{l}_2 \\ \dot{l}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{w}_1^T & 0 \\ \mathbf{w}_2^T & (\mathbf{b}_2 \times \mathbf{w}_2)^T \\ \mathbf{w}_3^T & (\mathbf{b}_3 \times \mathbf{w}_3)^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v} \\ \boldsymbol{\omega} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

或简记为

$$\dot{\mathbf{l}} = \mathbf{J}_1 [\mathbf{v}^T \quad \boldsymbol{\omega}^T]^T, \quad (13)$$

式中, $\dot{\mathbf{l}} = [\dot{l}_1 \quad \dot{l}_2 \quad \dot{l}_3]^T$ 为驱动移动副输入速度, $\mathbf{J}_1 \in \mathbf{R}^{3 \times 6}$ 。

由角速度叠加原理,可以得到

$$\boldsymbol{\omega}_i = \dot{\psi}_i \mathbf{x}_i + \dot{\theta}_i \mathbf{p}_i, \quad (i=2, 3), \quad (14)$$

式中, $\boldsymbol{\omega}_i$ 表示支链 i ($i=2, 3$) 整体的角速度, \mathbf{x}_i 和 \mathbf{p}_i 分别表示轴 x_i 和 p_i 在固定坐标系 $A_1-x_1 y_1 z_1$ 中的单位主矢量。

由几何关系有 $\mathbf{p}_i \times \mathbf{p}_i = 0$, ($i=2, 3$)。因此,对式(14)两边同时叉乘 \mathbf{p}_i ($i=2, 3$),从而得到

$$\mathbf{p}_i \times \boldsymbol{\omega}_i = \dot{\psi}_i (\mathbf{p}_i \times \mathbf{x}_i), \quad (i=2, 3). \quad (15)$$

由几何关系有

$$\mathbf{p}_i \mathbf{w}_i = 0, \quad (i=2, 3).$$

因此,对式(10)两端同时点乘 \mathbf{p}_2 ,对式(11)两端同时点乘 \mathbf{p}_3 ,从而得到

$$\mathbf{p}_2^T \mathbf{v} = l_2 \mathbf{w}_2^T (\mathbf{p}_2 \times \boldsymbol{\omega}_2) - (\mathbf{b}_2 \times \mathbf{p}_2)^T \boldsymbol{\omega}, \quad (16)$$

$$\mathbf{p}_3^T \mathbf{v} = l_3 \mathbf{w}_3^T (\mathbf{p}_3 \times \boldsymbol{\omega}_3) - (\mathbf{b}_3 \times \mathbf{p}_3)^T \boldsymbol{\omega}, \quad (17)$$

将式(15)中的 $\mathbf{p}_i \times \boldsymbol{\omega}_i$, ($i=2, 3$) 分别代入式(16)、(17),从而得到

$$\mathbf{p}_2^T \mathbf{v} = \dot{\psi}_2 l_2 \mathbf{w}_2^T (\mathbf{p}_2 \times \mathbf{x}_2) - (\mathbf{b}_2 \times \mathbf{p}_2)^T \boldsymbol{\omega}, \quad (18)$$

$$\mathbf{p}_3^T \mathbf{v} = \dot{\psi}_3 l_3 \mathbf{w}_3^T (\mathbf{p}_3 \times \mathbf{x}_3) - (\mathbf{b}_3 \times \mathbf{p}_3)^T \boldsymbol{\omega}. \quad (19)$$

将式(18)、(19)写成矩阵形式可得到机构的

关节驱动输入角速度 $\dot{\boldsymbol{\psi}} = [\dot{\psi}_2 \quad \dot{\psi}_3]^T$ 与运动平台广义速度 $\mathbf{V} = [\mathbf{v}^T \quad \boldsymbol{\omega}^T]^T$ 的映射关系

$$\begin{bmatrix} \dot{\psi}_2 \\ \dot{\psi}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\mathbf{p}_2^T}{l_2 \mathbf{w}_2^T (\mathbf{p}_2 \times \mathbf{x}_2)} & \frac{(\mathbf{b}_2 \times \mathbf{p}_2)^T}{l_2 \mathbf{w}_2^T (\mathbf{p}_2 \times \mathbf{x}_2)} \\ \frac{\mathbf{p}_3^T}{l_3 \mathbf{w}_3^T (\mathbf{p}_3 \times \mathbf{x}_3)} & \frac{(\mathbf{b}_3 \times \mathbf{p}_3)^T}{l_3 \mathbf{w}_3^T (\mathbf{p}_3 \times \mathbf{x}_3)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v} \\ \boldsymbol{\omega} \end{bmatrix}, \quad (20)$$

或简记为

$$\dot{\boldsymbol{\psi}} = \mathbf{J}_2 [\mathbf{v}^T \quad \boldsymbol{\omega}^T]^T, \quad (21)$$

式中, $\dot{\boldsymbol{\psi}} = [\dot{\psi}_2 \quad \dot{\psi}_3]^T$ 为驱动输入角速度, $\mathbf{J}_2 \in \mathbf{R}^{2 \times 6}$ 。

综合式(13)、(21)可知本机构的驱动映射关系为

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}_q \mathbf{V}, \quad (22)$$

式中, $\mathbf{J}_q = [\mathbf{J}_1^T \quad \mathbf{J}_2^T]^T$ 为驱动雅可比矩阵且 $\mathbf{J}_q \in \mathbf{R}^{5 \times 6}$, $\dot{\mathbf{q}} = [\dot{\mathbf{l}}^T \quad \dot{\boldsymbol{\psi}}^T]^T$ 为驱动输入速度, $\mathbf{V} = [\mathbf{v}^T \quad \boldsymbol{\omega}^T]^T$ 为输出广义速度。

3.3 约束雅可比矩阵求解

约束雅可比矩阵表示的是机构输入与输出端之间约束力映射关系^[15]。本文基于螺旋理论求解约束雅可比矩阵,各运动螺旋的方向如图3中所示。

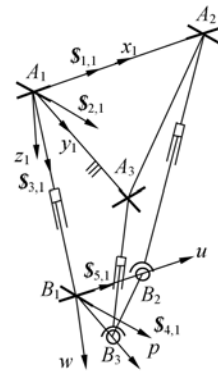


图3 腿部机构运动螺旋系图

Fig. 3 Map of screw theory

根据文献[16]提出的少自由度并联机构动平台运动螺旋分析方法,可知腿部机构的动平台运动螺旋系与UPU支链的运动螺旋系相同,所以腿部机构动平台瞬时运动螺旋系在运动坐标系中可以表示为

$$\mathcal{S}_p = \dot{\theta}_{1,1} \mathcal{S}_{1,1} + \dot{\theta}_{2,1} \mathcal{S}_{2,1} + \dot{l}_{3,1} \mathcal{S}_{3,1} + \dot{\theta}_{4,1} \mathcal{S}_{4,1} + \dot{\theta}_{5,1} \mathcal{S}_{5,1}, \quad (23)$$

式中, $\mathcal{S}_p = [\mathbf{v}^T \quad \boldsymbol{\omega}^T]^T$, $\mathcal{S}_{1,1} = (\mathbf{s}_{1,1}; l_1 \mathbf{w}_1 \times \mathbf{s}_{1,1})$, $\mathcal{S}_{2,1} = (\mathbf{s}_{2,1}; l_1 \mathbf{w}_1 \times \mathbf{s}_{2,1})$, $\mathcal{S}_{3,1} = (0; \mathbf{s}_{3,1})$, $\mathcal{S}_{4,1} =$

$(s_{4,1}; 0)$, $\$_{5,1} = (s_{5,1}; 0)$, $\dot{\theta}_{1,1}$, $\dot{\theta}_{2,1}$, $\dot{\theta}_{4,1}$, $\dot{\theta}_{5,1}$ 分别为 UPU 支链两个虎克铰转动副角速度, $\dot{l}_{3,1}$ 为 UPU 支链移动副线速度, $s_{1,1}$, $s_{2,1}$, $s_{3,1}$, $s_{4,1}$, $s_{5,1}$ 方向如图 3 所示。

根据螺旋系的对偶性,可以求得动平台的约束螺旋为

$$\$_{3,1}^r = (0; s_{3,1}). \quad (24)$$

对式(23)、(24)求互易积,可得

$$\$_{3,1}^r \circ \$_p = 0, \quad (25)$$

式中,“ \circ ”为两个螺旋的互易积运算符号。

将式(25)写成矩阵形式有

$$\mathbf{J}_r \circ \$_p = 0, \quad (26)$$

式中, $\mathbf{J}_r \in \mathbf{R}^{1 \times 6}$ 为腿部机构的约束雅可比矩阵,且

$$\mathbf{J}_r = [0 \quad s_{3,1}^T]. \quad (27)$$

\mathbf{J}_r 为一个六维行向量代表动平台的一个约束力矩螺旋,因为动平台处于五自由度状态,所以 \mathbf{J}_r 的秩为 1。

4 腿部机构驱动静力学性能分析

六足机器人的设计目的是作为光学观测仪器的运载平台,因此,机器人在各种姿态都需要有较好的静力学性能,这就要求腿部机构具有较好的静力学承载和传递特性。分析结构参数和腿部机构驱动静力传递特性之间的关系可以为机械腿的优化设计提供依据。

4.1 驱动静力学传递方程

由于 2-UPS+UPU 并联机构存在一个内部约束力矩,因此,只有与机构自由度方向相同的力/力矩需要驱动力/力矩来平衡,而剩余的一个力矩由机构自身约束力矩平衡^[14]。如果设动平台输出的广义力矢量为 $\mathbf{F}_q = [\mathbf{F}^T \quad \mathbf{M}^T]^T$, 机构的输入驱动广义力为 $\boldsymbol{\tau}_q = [\tau_{q1} \quad \tau_{q2} \quad \tau_{q3} \quad \tau_{q4} \quad \tau_{q5}]^T$, 则根据虚功原理^[15],各驱动力的虚功之和等于动平台广义力的虚功之和,即

$$\boldsymbol{\tau}_q^T \dot{\mathbf{l}} = \mathbf{F}_q^T \mathbf{V}, \quad (28)$$

将式(22)代入式(28),可以得到腿部机构的驱动静力传递方程为

$$\mathbf{F}_q = \mathbf{G}_q \boldsymbol{\tau}_q, \quad (29)$$

式中, $\mathbf{G}_q = \mathbf{J}_q^T$ 为驱动力雅可比矩阵 $\mathbf{G}_q \in \mathbf{R}^{6 \times 5}$ 。

4.2 驱动静力学性能评价指标

设腿部机构驱动力雅可比矩阵的结构为 $\mathbf{G}_q = [\mathbf{G}_{qF}^T \quad \mathbf{G}_{qM}^T]^T$, 则式(29)变为

$$\mathbf{F}_q = [\mathbf{F}^T \quad \mathbf{M}^T]^T = [\mathbf{G}_{qF}^T \quad \mathbf{G}_{qM}^T]^T \boldsymbol{\tau}_q, \quad (30)$$

式中, $\mathbf{G}_{qF} \in \mathbf{R}^{3 \times 5}$, $\mathbf{G}_{qM} \in \mathbf{R}^{3 \times 5}$ 分别为驱动力雅可比矩阵的力、力矩传递子矩阵。

从式(30)可以看出,驱动力雅可比矩阵决定了输入力与输出力的大小关系,根据矩阵理论中的范数内容,对式(30)取 2 范数,可得

$$\begin{cases} \|\mathbf{F}\|^2 = \boldsymbol{\tau}_q^T \mathbf{G}_{qF}^T \mathbf{G}_{qF} \boldsymbol{\tau}_q \\ \|\mathbf{M}\|^2 = \boldsymbol{\tau}_q^T \mathbf{G}_{qM}^T \mathbf{G}_{qM} \boldsymbol{\tau}_q \end{cases}, \quad (31)$$

设输入量为单位量 $\|\boldsymbol{\tau}_q\| = \boldsymbol{\tau}_q^T \boldsymbol{\tau}_q = 1$, 并引用拉格朗日算子

$$\begin{cases} \mathbf{L}_F = \boldsymbol{\tau}_q^T \mathbf{G}_{qF}^T \mathbf{G}_{qF} \boldsymbol{\tau}_q - \lambda_F (\boldsymbol{\tau}_q^T \boldsymbol{\tau}_q - 1) \\ \mathbf{L}_M = \boldsymbol{\tau}_q^T \mathbf{G}_{qM}^T \mathbf{G}_{qM} \boldsymbol{\tau}_q - \lambda_M (\boldsymbol{\tau}_q^T \boldsymbol{\tau}_q - 1) \end{cases}, \quad (32)$$

式中, λ_F, λ_M 为拉格朗日乘子。

根据式(32),输出驱动力/力矩的极值条件为

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathbf{L}_F}{\partial \boldsymbol{\tau}_q} = 0: \mathbf{G}_{qF}^T \mathbf{G}_{qF} \boldsymbol{\tau}_q - \lambda_F \boldsymbol{\tau}_q = 0 \\ \frac{\partial \mathbf{L}_M}{\partial \boldsymbol{\tau}_q} = 0: \mathbf{G}_{qM}^T \mathbf{G}_{qM} \boldsymbol{\tau}_q - \lambda_M \boldsymbol{\tau}_q = 0 \end{cases}, \quad (33)$$

式中, λ_F, λ_M 为 $\mathbf{G}_{qF}^T \mathbf{G}_{qF}$ 和 $\mathbf{G}_{qM}^T \mathbf{G}_{qM}$ 的特征值。

由式(33)推导出输出驱动力、力矩的极值为

$$\begin{cases} \|\mathbf{F}\|_{\max} = \sqrt{\lambda_{F\max}}, \quad \|\mathbf{F}\|_{\min} = \sqrt{\lambda_{F\min}} \\ \|\mathbf{M}\|_{\max} = \sqrt{\lambda_{M\max}}, \quad \|\mathbf{M}\|_{\min} = \sqrt{\lambda_{M\min}} \end{cases}, \quad (34)$$

式中, $\lambda_{F\max}, \lambda_{F\min}, \lambda_{M\max}, \lambda_{M\min}$ 分别为 $\mathbf{G}_{qF}, \mathbf{G}_{qM}$ 的最大、最小奇异值。

由式(34)可知, $\|\mathbf{F}\|_{\max}, \|\mathbf{F}\|_{\min}, \|\mathbf{M}\|_{\max}, \|\mathbf{M}\|_{\min}$ 分别为腿部机构输出驱动力/力矩的最大和最小承载能力。在实际设计时,总是希望腿部机构能通过较小的力/力矩输入获得较大的力/力矩输出,因此,定义腿部机构的一组驱动承载性能指标为

$$\begin{cases} \eta_F = \|\mathbf{F}\|_{\max} \\ \eta_M = \|\mathbf{M}\|_{\max} \end{cases}, \quad (35)$$

显然, η_F, η_M 值越大,说明腿部机构的驱动静力承载能力越强; η_F, η_M 的值在工作空间内的变化越平缓,说明腿部机构的驱动静力承载能力越稳定。

基于前文给定的初步结构参数,用网格划分法对工作空间进行网格划分,然后编程计算 η_F, η_M 在工作空间内的分布情况,如图 4、5 所示。

由图 4、5 可以看出, η_F, η_M 在工作空间的中间位置分布较好,说明腿部机构的驱动静力承载能力在工作空间的中间区域较好,越接近工作空间的边界,其驱动静力承载能力越差。

由式(22)可以看出雅可比矩阵与机构所处的

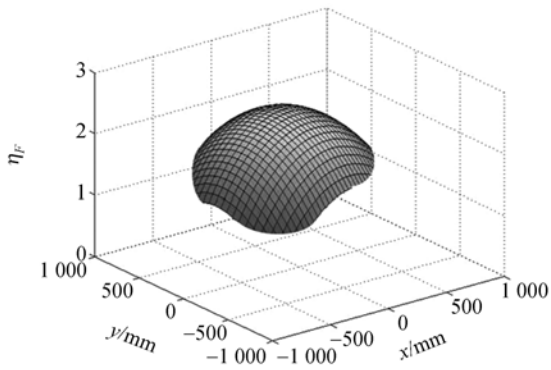


图 4 η_F 在工作空间内分布图

Fig. 4 3D map of η_F

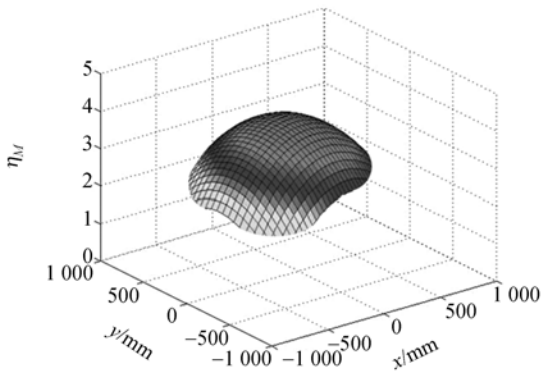


图 5 η_M 在工作空间内分布图

Fig. 5 3D map of η_M

瞬时位形有关,导致 η_F 、 η_M 会随着机构位形的变化而变化,成为局部评价指标。为了更全面彻底的分析结构参数与驱动承载性的关系,定义腿部机构的另一组驱动承载性能指标为

$$\begin{cases} \bar{\eta}_F = \frac{\int_S \eta_F dS}{S} \\ \bar{\eta}_M = \frac{\int_S \eta_M dS}{S} \end{cases}, \quad (36)$$

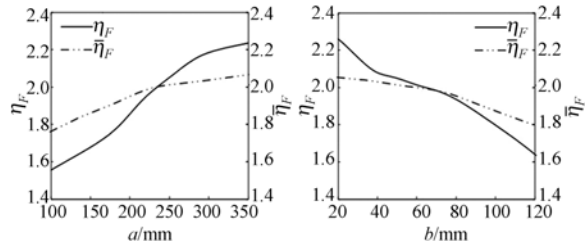
式中, $\bar{\eta}_F$ 和 $\bar{\eta}_M$ 为 η_F 、 η_M 在工作空间 S 内的全域均值。

显然, $\bar{\eta}_F$ 和 $\bar{\eta}_M$ 的值越大,说明腿部机构在整个工作空间内的驱动静力承载能力越强。

4.3 结构参数对驱动承载能力的影响

为设计出驱动静力承载性能较好的腿部机构,就要找出结构参数对驱动静力承载能力影响规律。逐一分析结构参数的影响不仅工作量大而且目标不明确,这里把 a 、 b 作为关键参数,采用单变量分析法进行分析,分别绘制了结构参数 a 、 b

与 η_F 、 $\bar{\eta}_F$ 、 η_M 、 $\bar{\eta}_M$ 的关系的采样拟合曲线,如图 6 所示。

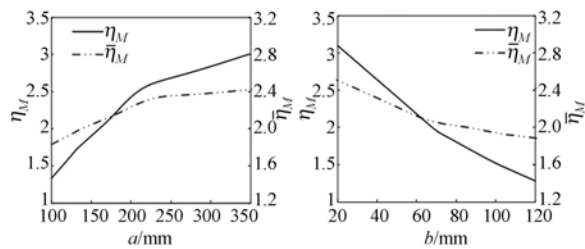


(a) a 与 η_F 、 $\bar{\eta}_F$ 关系

(b) b 与 η_F 、 $\bar{\eta}_F$ 关系

(a) a and η_F 、 $\bar{\eta}_F$

(b) b and η_F 、 $\bar{\eta}_F$



(c) a 与 η_M 、 $\bar{\eta}_M$ 关系

(d) b 与 η_M 、 $\bar{\eta}_M$ 关系

(c) a and η_M 、 $\bar{\eta}_M$

(d) b and η_M 、 $\bar{\eta}_M$

图 6 结构参数与 η_F 、 $\bar{\eta}_F$ 、 η_M 、 $\bar{\eta}_M$ 关系图

Fig. 6 Relationship of parameters and η_F 、 $\bar{\eta}_F$ 、 η_M 、 $\bar{\eta}_M$

由图 6 可以看出,在给定的取值范围内, η_F 、 $\bar{\eta}_F$ 值随 a 值增大而增大,由于运动副约束在特定状态产生的效应不同,导致变化曲线非线性; η_F 、 $\bar{\eta}_F$ 值随 b 值的增大而减小,而且变化越来越快; η_M 、 $\bar{\eta}_M$ 值同样随 a 值增大而增大; η_M 、 $\bar{\eta}_M$ 值随 b 值的增大而减小。从而可以得出结论, a/b 的值在一定的范围内越大,腿部机构的驱动静力学性能越好。

5 腿部机构约束静力学性能分析

少自由度并联机构存在内部约束力/力矩,而且除了驱动力/力矩之外的力/力矩由机构自身约束力/力矩平衡^[14]。约束静力学传递特性表征的是机构自身输入与输出力/力矩的变化特性,如果设计不合理会使机构承受较大的内部载荷,从而损坏结构。所以分析结构参数和腿部机构约束静力承载性能之间的关系可以为机械腿的优化设计提供依据。

5.1 约束静力学传递方程

参照文献[17]的做法,设动平台输出的广义约束力矢量为 $\mathbf{F}_r = [\mathbf{f}^T \quad \mathbf{m}^T]^T$, 因为本文提出的腿部机构只受到一个约束力矩, 所以设机构的输入广义约束力矩为 $\boldsymbol{\tau}_r = [\boldsymbol{\tau}_r]$, 则根据虚功原理^[15], 输入广义约束力矩的虚功等于输出广义约束力的虚功, 即可以得到腿部机构的约束静力传递方程为

$$\mathbf{F}_r = \mathbf{G}_r \boldsymbol{\tau}_r, \quad (37)$$

式中, $\mathbf{G}_r = \mathbf{J}_r^T$ 为约束力雅可比矩阵 $\mathbf{G}_r \in \mathbf{R}^{6 \times 1}$ 。

5.2 约束静力学性能评价指标

通过分析式(27)、(37)可知, 腿部机构约束力雅可比矩阵实际是一个六维列向量, 且其前 3 行为 0 元素。这说明, 约束力雅可比矩阵只把一个输入约束力矩传递到动平台输出, 所以动平台的输出广义力可以简化为

$$\mathbf{F}_r = [0 \quad \mathbf{m}^T]^T.$$

根据矩阵理论中的范数内容, 对式(37)取 2 范数, 可得

$$\|\mathbf{m}\|^2 = \boldsymbol{\tau}_r^T \mathbf{G}_{rM}^T \mathbf{G}_{rM} \boldsymbol{\tau}_r, \quad (38)$$

式中, \mathbf{G}_{rM} 为约束力雅可比矩阵力矩传递子向量。

设输入约束力矩为单位量, 则

$$\|\boldsymbol{\tau}_r\| = \boldsymbol{\tau}_r^T \boldsymbol{\tau}_r = 1. \quad (39)$$

采用类似驱动静力学分析的方法, 定义约束力矩传递性能指标为

$$\boldsymbol{\eta}_{rm} = \|\mathbf{m}\|_{\max}, \quad (40)$$

式中, $\|\mathbf{m}\|_{\max}$ 为腿部机构在单位约束力矩输入时输出力矩的最大值。

为了更全面彻底的分析结构参数与约束力矩承载性的关系, 定义腿部机构的另一个约束承载性能指标为

$$\bar{\boldsymbol{\eta}}_{rm} = \frac{\int_S \boldsymbol{\eta}_{rm} dS}{S}. \quad (41)$$

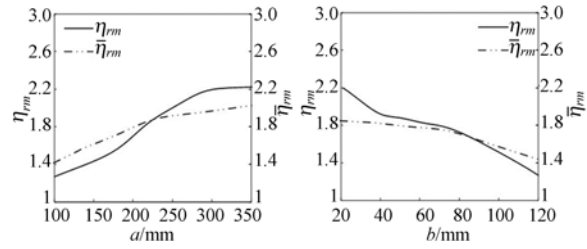
式中, $\bar{\boldsymbol{\eta}}_{rm}$ 为 $\boldsymbol{\eta}_{rm}$ 在工作空间 S 内的全域均值。

显然, $\boldsymbol{\eta}_{rm}$ 和 $\bar{\boldsymbol{\eta}}_{rm}$ 的值越大, 说明腿部机构在工作空间内的约束力矩承载能力越强。

5.3 结构参数对约束承载能力的影响

在定义了约束承载性能评价指标之后, 可以

通过分析结构参数与评价指标之间的关系, 为机械腿的设计提供依据。逐一分析结构参数的影响不仅工作量大而且目标不明确, 这里把 a 、 b 作为关键参数, 采用单变量分析法进行分析, 分别绘制了结构参数 a 、 b 与 $\boldsymbol{\eta}_{rm}$ 、 $\bar{\boldsymbol{\eta}}_{rm}$ 的关系的采样拟合曲线, 如图 7 所示。



(a) a 与 $\boldsymbol{\eta}_{rm}$ 、 $\bar{\boldsymbol{\eta}}_{rm}$ 关系 (b) b 与 $\boldsymbol{\eta}_{rm}$ 、 $\bar{\boldsymbol{\eta}}_{rm}$ 关系
(a) a and $\boldsymbol{\eta}_{rm}$ 、 $\bar{\boldsymbol{\eta}}_{rm}$ (b) b and $\boldsymbol{\eta}_{rm}$ 、 $\bar{\boldsymbol{\eta}}_{rm}$

图 7 结构参数与 $\boldsymbol{\eta}_{rm}$ 、 $\bar{\boldsymbol{\eta}}_{rm}$ 关系图

Fig. 7 Relationship curve of parameters and $\boldsymbol{\eta}_{rm}$ 、 $\bar{\boldsymbol{\eta}}_{rm}$

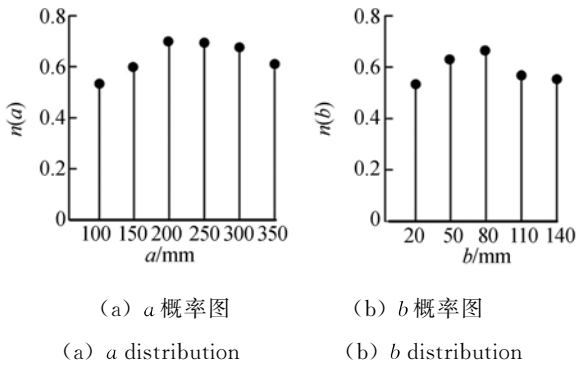
由图 7 可以看出, $\boldsymbol{\eta}_{rm}$ 、 $\bar{\boldsymbol{\eta}}_{rm}$ 值随 a 值增大而增大, 且变化越来越慢; $\boldsymbol{\eta}_{rm}$ 、 $\bar{\boldsymbol{\eta}}_{rm}$ 值随 b 值增大而减小, 且变化规律不稳定, 呈非线性。

6 腿部机构优化设计

腿部机构的结构参数主要包括: 机架参数 a 、动平台参数 b 、各支链的最大杆长 l_{\max} 和最小杆长 l_{\min} , 其余参数均可通过上述参数求得。基于约束/驱动静力学分析产生的优化设计依据主要包括: 驱动静力承载性能评价指标 $\boldsymbol{\eta}_F$ 、 $\bar{\boldsymbol{\eta}}_F$ 、 $\boldsymbol{\eta}_M$ 、 $\bar{\boldsymbol{\eta}}_M$ 以及约束静力承载性能评价指标 $\boldsymbol{\eta}_{rm}$ 、 $\bar{\boldsymbol{\eta}}_{rm}$ 。因此, 腿部机构的结构参数设计属于多变量因素的复杂推理函数, 最终的结构参数不可能使每项性能指标都达到最优。对于并联机构多参数多性能指标综合优化设计问题, 文献[6]采用基于性能图谱的蒙特卡罗法进行结构参数选择。

本文采用基于性能指标 $\boldsymbol{\eta}_F$ 、 $\bar{\boldsymbol{\eta}}_F$ 、 $\boldsymbol{\eta}_M$ 、 $\bar{\boldsymbol{\eta}}_M$ 和 $\boldsymbol{\eta}_{rm}$ 、 $\bar{\boldsymbol{\eta}}_{rm}$ 的蒙特卡罗法进行优化设计。根据前面的结构参数与性能指标关系分析, 规定主要参数取值范围为: $a \in (100, 350)$ mm、 $b \in (20, 150)$ mm。考虑工程实际, 以各项性能指标的中间值构建结

构参数概率模型为： $\eta_F = 1.8$ 、 $\bar{\eta}_F = 1.9$ 、 $\eta_M = 2.4$ 、 $\bar{\eta}_M = 2.2$ 、 $\eta_m = 1.7$ 、 $\bar{\eta}_m = 1.6$ ，当 $\eta_F \geq 1.8$ 、 $\bar{\eta}_F \geq 1.9$ 、 $\eta_M \geq 2.4$ 、 $\bar{\eta}_M \geq 2.2$ 、 $\eta_m \geq 1.7$ 、 $\bar{\eta}_m \geq 1.6$ 时，各项性能指标均较好。在各主要参数取值范围内进行抽样，在满足腿部机构参数选型的概率模型前提下，统计各参数抽样值的分布规律，绘制出概率离散柱状图，如图 8 所示。



(a) a 概率图

(b) b 概率图

(a) a distribution

(b) b distribution

图 8 结构参数概率离散柱状图

Fig. 8 Probability distribution of structure parameters

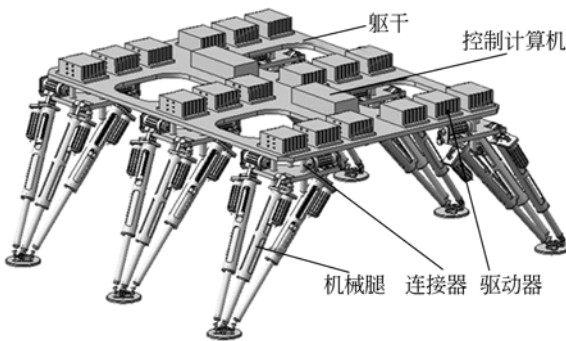


图 9 六足步行机器人整体结构图

Fig. 9 Structure of six-legged robot

通过分析图 8，结合机械腿机械加工工艺因素，确定腿部机构主要参数为： $a=200\text{ mm}$ 、 $b=80\text{ mm}$ 。基于以上主要参数，确定腿部机构次要参数为： $l_{\min}=500\text{ mm}$ ($i=1,2,3$)、 $l_{\max}=900\text{ mm}$ ($i=1,2,3$)。结合选取的结构参数，在综合考虑机器人整体要求的前提下，优化后的六足步行机器人整体结构，如图 9 所示。主要技术参数如表 1 所示。

参考文献：

[1] 韩雪冰,张景旭,赵金宇,等. 水平式光电望远镜目

表 1 并联机械腿技术参数

Tab. 1 Structure parameters of mechanical leg

名称	尺寸/型号
固定平台结构参数 a/mm	200
运动平台结构参数 b/mm	80
套筒长×直径×壁厚	500 mm×65 mm×5 mm
从动杆长×直径×壁厚	500 mm×30 mm×3 mm
电机型号	F2260 817
联轴器型号	GP62A 110505
编码器型号	Encoder HEDS 5540

7 结 论

本文提出了一种应用于六足机器人的五自由度并联机械腿，并提出了同时考虑驱动、约束力映射关系的五自由度并联机械腿静力学性能评价方法。分别采用矢量法和螺旋理论建立了腿部机构的驱动、约束雅可比矩阵，得到了其驱动、约束映射关系。

基于驱动雅可比矩阵对腿部机构进行了驱动静力学性能分析，定义了驱动静力学评价指标并分析了结构参数与驱动静力学评价指标的关系，揭示了结构参数对驱动静力学承载能力的影响规律；基于约束雅可比矩阵对腿部机构进行了约束静力学性能分析，定义了约束静力学评价指标并分析了结构参数与约束静力学评价指标的关系，揭示了结构参数对约束静力学承载能力的影响规律。分析表明， a/b 的值在一定的范围内值越大，腿部机构的驱动静力学性能越好。

基于驱动、约束静力学性能评价指标，采用蒙特卡罗法进行了腿部机构的结构参数优化设计。计算表明，结构参数为 $a=200\text{ mm}$ 、 $b=80\text{ mm}$ 、 $l_{\min}=500\text{ mm}$ 、 $l_{\max}=900\text{ mm}$ 时腿部机构的静力学综合性能最好。

本文的研究成果为并联腿部机构六足步行机器人的进一步研究奠定了理论基础，对开拓并联机器人研究领域和扩大六足步行机器人应用范围具有重要的意义。

标定位误差的预测[J]. 光学 精密工程, 2010, 18 (7):1595-1604.

HAN X B, ZHANG J X, ZHAO J Y, et al.. Fore-

- cast for orientation errors of alt-alt photoelectric telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(7): 1595-1604. (in Chinese)
- [2] 赵飞, 王森, 邓超, 等. 兴隆 1 m 光学望远镜消杂散光系统[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(3): 514-520. ZHAO F, WANG S, DENG C, *et al.*. Stray light control lens for Xing Long 1-meter optical telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(3): 514-520. (in Chinese)
- [3] 吕文华, 贺晓雷, 于贺军, 等. 全自动太阳跟踪器的研制和应用[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(12): 2544-2550. LV W H, HE X L, YU H J, *et al.*. Development of full-automatic solar tracker and its applications [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(12): 2544-2550. (in Chinese)
- [4] WALDRON K J. Configuration design of the ASV. int [J]. *J. of Robotics Research*, 1984, 3(2): 37-48.
- [5] ELENA G, MARIA A J. The evolution of robotics research [J]. *Robotics and Automation*, 2007, 3(10): 90-102.
- [6] 崔冰艳. 仿生机器人并联关节/运动单元的性能分析与设计[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2011: 83-125. CUI B Y. *Performance analysis and design for parallel joint/kinematical unit of bionic robot* [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2011: 83-125. (in Chinese)
- [7] 王炳一. 一种新型四足仿生机器人性能分析与仿真[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2011: 55-70. WANG B Y. *Simulation and performance analysis on new type of bionic quadruped robot* [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2011: 55-70. (in Chinese)
- [8] 倪森. 基于 2-UPS&UP 并联结构腿的四足步行器设计[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2011: 35-70. NI S. *The design of quadruped robot based on 2-UPS&UP parallel mechanism leg* [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2011: 35-70. (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] 王洪波, 徐桂玲, 张典范, 等. 助老助残四足/两足可重构并联腿步行机器人运动学建模与仿真[J]. *燕山大学学报*, 2010, 34(6): 508-515. WANG H B, XU G L, ZHANG D F, *et al.*. Kinematics modeling and simulation of quadruped/biped walking robot with parallel leg mechanism for the elderly and the disabled [J]. *Journal of Yanshan University*, 2010, 34(6): 508-515. (in Chinese)
- [11] TSAI L W. *Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators* [M]. New York: John Wiley and Sons, 1999.
- [12] MERLET J P. Jacobian, manipulability, condition number, and accuracy of parallel robots [J]. *ASME Journal of Mechanical Design*, 2006, 128(1): 199-206.
- [13] 李永刚, 宋轶民, 黄田, 等. 少自由度并联机器人机构的静力分析[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)
- [14] 黄真, 赵永生, 赵铁石. 高等空间机构学[M]. 北京:高等教育出版社, 2006: 277-283. HUANG ZH, ZHAO Y SH, ZHAO T SH. *Advanced Spatial Mechanism* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 277-283. (in Chinese)
- [15] JOSHI S A, TSAI L W. Jacobian analysis of limited-DOF parallel manipulators [J]. *ASME Journal of Mechanical Design*, 2002(124): 254-258.
- [16] 李秦川. 对称少自由度并联机器人型综合理论及新机型综合[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2003: 51-55. LI Q C. *Type synthesis theory of lower-mobility parallel mechanisms and synthesis of new architectures* [D]. Qinhuangdao: Yanshan University,

2011: 51-55. (in Chinese)

[17] 郭希娟. 机构性能指标理论与仿真[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 110-113.

GUO X J. *Theory and Simulation of Performance index* [M]. Beijing: Science Press, 2010: 110-113. (in Chinese)

作者简介:



荣 誉(1981—),男,吉林通化人,博士研究生,讲师,2007年于燕山大学获得硕士学位,主要从事并联机器人理论与应用方面的研究。E-mail: lixiangcg@126.com

导师简介:



金振林(1962—),男,辽宁抚顺人,博士,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: zenlinjin@126.com

●下期预告

氙灯和 LEDs 积分球太阳光谱模拟器的设计

刘洪兴^{1,2},任建伟¹,刘则洵¹,李葆勇¹,孙景旭¹,叶 钊^{1,2},任建岳¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院,北京 100039)

为了提高太阳光谱的光谱匹配精度,设计了一种由氙灯和 LEDs 作为光源的积分球太阳光谱模拟器。引进模拟退火算法研究光谱匹配技术,设计了氙灯模块以及 LEDs 模块的结构和控制系统。LEDs 采用环带摆放和恒流驱动方式,并通过多机通信系统控制。氙灯模块上安装截止滤光片和程控的衰减器,滤光片用来滤去氙灯红外波段的尖峰,衰减器则用来调整氙灯入射到积分球的辐射通量。仿真实验表明: Epitex 公司的 53 种单色 LEDs 和氙灯完全可以模拟 380~1000 nm 波段的 AM 1.5 标准太阳光谱,光谱的平均相对误差为 5.67%。分析讨论了该太阳光谱模拟器的光谱失配误差、出光面的辐照非均匀度和辐照不稳定性,三者均可以控制在±3%以内。