

文章编号 1004-924X(2012)09-1974-10

## 3-DOF 并联机械腿动力学建模与伺服电机峰值预估

荣 誉<sup>1, 2\*</sup>, 金振林<sup>1</sup>

(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:**提出了一种结构紧凑、承载能力大、转动解耦性好、运动速度和加速度大的 3 自由度并联机械腿。为了对其进行驱动参数分析,对机械腿进行了动力学建模,并基于动力学模型进行了伺服电机峰值预估。首先,分析了腿部机构各构件的运动参数,采用 Lagrange 方程建立了动力学模型,得出了机构驱动力的显式解;接着,在机构动力学模型的基础上,建立了伺服电机驱动转速和驱动力矩的峰值预估模型;最后,通过给定一组结构参数和运动轨迹函数,得出了伺服电机驱动转速和驱动力矩随时间变化曲线,得到了机构的动力学特性,并验证了峰值预估模型的正确性。计算表明,3 个伺服电机驱动转速的峰值分别为  $N_x=19$  r/s、 $N_y=17$  r/s、 $N_w=27$  r/s;3 个伺服电机驱动力矩的峰值分别为  $\epsilon_x=5.8$  N·m、 $\epsilon_y=3.1$  N·m、 $\epsilon_w=4.4$  N·m。

**关键词:**并联机械腿;伺服电机;动力学分析;Lagrange 方程;峰值预估模型

**中图分类号:**TP242.6 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122009.1974

## Dynamic modeling of 3-DOF parallel mechanical leg and peak prediction of servo motor

RONG Yu<sup>1, 2\*</sup>, JIN Zhen-lin<sup>1</sup>

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

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

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

**Abstract:** A 3-DOF mechanical leg with compact structure, strong carrying capacity and the rotational motion in decoupled was proposed. To analyze the drive parameters of the 3-DOF parallel mechanical leg, a dynamic model was established and the peak of a servo motor was predicted based on the dynamic model. Firstly, by analyzing the motion parameters of the leg mechanism, the dynamic model was established based on the Lagrange equation, and the drive force acted on the mechanism was given. Then, based on the dynamic model, a peak prediction model of the servo motor for the drive speed and torque was defined. Finally, for a given motion equation and a set of structural parameters, the time curves of drive speed and torque were obtained, the dynamics of the mechanism was given and the peak prediction model was proved to be correct. Calculations show that the peaks of the drive speeds from three driving motors are 19, 17, 27 r/s for  $N_x$ ,  $N_y$  and  $N_w$ , and the peaks of the drive torque are

收稿日期:2012-03-15;修订日期:2012-04-24.

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)

5.8, 3.1, 4.4 N·m for  $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$  and  $\epsilon_w$  respectively.

**Key words:** parallel mechanical leg; servo motor; dynamic analysis; Lagrange equation; peak prediction model

## 1 引 言

用于地面光学航天测控和天文观测的光学仪器运载平台需要具有良好的调姿定位能力和崎岖路面适应能力<sup>[1-3]</sup>。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<sup>[4]</sup>,六足式步行机器人十分适合在这些地区工作<sup>[5]</sup>。并联机构能够实现高速度和高加速度运动而且结构紧凑,把并联机构作为光学仪器运载六足机器人的腿部机构,可以使其快速灵活机动。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<sup>[6-8]</sup>,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<sup>[9,10]</sup>。

动力学分析主要研究机器人的动态特性,从而为驱动器参数确定和建立伺服控制模型提供依据<sup>[11,12]</sup>。常用的动力学建模方法有 Newton-Euler 法<sup>[13]</sup>、Lagrange 法<sup>[12]</sup>、虚功原理法<sup>[14]</sup>、Kane 方法<sup>[15]</sup>等,对并联机构进行动力学分析的研究很多,但涉及六足机器人的动力学分析还较少。因此,为了更好地进行机械腿驱动器参数选型和伺服控制,深入研究其动力学性能是十分必要的。

本文提出一种 3 自由度机械腿,该机械腿优点在于其转动运动的解耦性和运动灵活性,使机械腿更加容易控制且能够实现高速运动;由于采用并联结构,机械腿的承载能力比传统串联机械腿大很多,因此可以解决已有 3 自由度机械腿要么为实现大载重能力而导致机体和腿都十分庞大,要么为实现结构紧凑而导致机体和腿都脆弱单薄的缺点。在此基础上,采用非保守系统的 Lagrange 方程建立了机构的动力学模型,基于动力学特性对其进行了伺服电机驱动速度和驱动力矩峰值预估,得到了其驱动参数峰值,并通过实例验证了预估数值的正确性。

## 2 腿部机构结构模型

本文提出的 3 自由度并联机械腿结构如图 1

所示,其机构原型为 (U+UPR)P+UPS 并联机构。之所以选择 (U+UPR)P+UPS 并联机构,主要是因为该机构在实现转动运动解耦的同时在机器人主运动方向具有较大的运动速度和加速度,使机械腿在保证承载能力的同时动力学建模及控制都变得相对简单。

图 2 所示为 (U+UPR)P+UPS 并联机构结构简图,该机构由机架、运动平台和连接二者的一条含有闭环 (U+UPR)P 支链和一条 UPS 支链组成。这里,U、P、S 和 R 分别表示虎克铰、移动副、球铰和转动副。其中,(U+UPR)P 支链的主干部分 UP 链一端通过虎克铰与机架连接,另一端通过移动副的末端与运动平台垂直固接;(U+UPR)P 支链闭环部分的 UPR 链一端通过虎克铰与机架连接,另一端的转动副通过中间连接杆  $B_0 B_2$  垂直连接到主干部分 UP 链的虎克铰与移动副中间,且 UPR 链与主干部分 UP 链共面,如图 2 中所示。UPS 支链一端通过虎克铰与机架连接,另一端通过球铰与运动平台连接,且 UPS 支链与 (U+UPR)P 支链主干部分的 UP 链共面。在运动副布局方面,与机架连接的 3 个虎克铰中心呈等腰直角三角形布局,且 (U+UPR)P 支链主干部分 UP 链的虎克铰中心位于直角顶点处;(U+UPR)P 支链与机架连接的 2 个虎克铰靠近机架的回转轴共线,UPS 支链的虎克铰靠近机架的回转轴与上述回转轴平行;UPR 链的转动副回转轴与 (U+UPR)P 支链所在平面垂直。

根据螺旋理论<sup>[16]</sup>,该机构是具有 2 个转动、1 个平移自由度的 3 自由度机构,其约束为 2 个约束力和 1 个约束力偶。在机械腿与机器人躯干连接时,让机械腿的 UPR 链位于机器人主运动方向(正前方),UPS 支链位于次运动方向(正侧方)。根据文献[17],机械腿的前后摆动完全由 UPR 链实现;机械腿的左右摆动完全由 UPS 支链实现,从而实现了转动运动的解耦性,机械腿的任意方向摆动均可以由这两个解耦转动的线性组合得出。

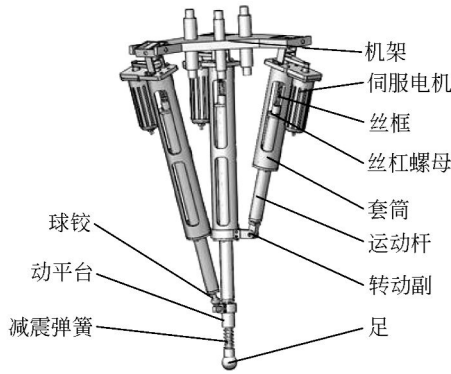


图 1 并联机械腿结构图

Fig. 1 Structure of mechanical leg

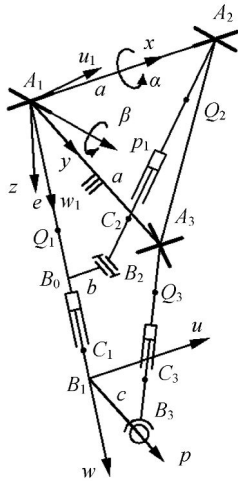


图 2 (U+UPR)P+UPS 机构简图

Fig. 2 Structure of (U+UPR)P+UPS parallel mechanism

### 3 腿部机构运动学分析

#### 3.1 坐标系建立与描述

图 2 为 (U+UPR)P+UPS 并联机构结构简图,  $A_1$  表示 UP 支链虎克铰回转中心,  $A_2$  表示 UPR 支链虎克铰回转中心,  $A_3$  表示 UPS 支链虎克铰回转中心。  $B_0$  表示中间连接杆轴线与 UP 支链轴线的交点,  $B_2$  表示中间连接杆轴线与 UPR 支链轴线的交点,  $B_1$  表示末端连接杆轴线与 UP 支链轴线的交点,  $B_3$  表示末端连接杆与 UPS 支链连接球铰中心。  $Q_1$  表示 UP 链的摆动套筒除电机转子和丝杠外剩余部分的质心,  $Q_2$  表示 UPR 链的摆动套筒除电机转子和丝杠外剩余

部分的质心,  $Q_3$  表示 UPS 支链的摆动套筒除电机转子和丝杠外剩余部分的质心。  $C_1$  表示 UP 链的运动杆质心,  $C_2$  表示 UPR 链的运动杆质心,  $C_3$  表示 UPS 支链的运动杆质心。 设机构的结构参数  $A_1 A_2 = A_1 A_3 = a$ ,  $B_0 B_2 = b$ ,  $B_1 B_3 = c$ ,  $A_1 B_0 = e$ 。

建立固定参考坐标系  $A_1 - xyz$ , 其中  $x$  轴与 UP 支链连接机架虎克铰靠近机架的回转轴重合;  $z$  轴与  $A_1, A_2, A_3$  所张成的平面  $A$  垂直, 方向如图 2 所示;  $y$  轴满足右手定则。 建立运动坐标系  $B_1 - upw$ , 其中  $w$  轴与 UP 支链轴线重合, 方向如图 2 所示;  $p$  轴沿末端连接杆轴线  $B_1 B_3$  方向;  $u$  轴满足右手定则。 为了描述支链的姿态, 在 UP 支链上建立连体坐标系  $A_1 - u_1 p_1 w_1$ , 如图 2 所示, 其中  $w_1$  轴与 UP 支链的轴线重合并由点  $A_1$  指向点  $B_1$ ;  $p_1$  轴与 UP 支链连接机架虎克铰远离机架的回转轴重合, 方向如图 2 所示;  $u_1$  轴满足右手定则。 在选取运动平台参考点时, 由于 UP 支链末端与运动平台固接在一起, 所以选取  $B_1$  为其参考点。

#### 3.2 雅可比矩阵求解

在固定参考坐标系  $A_1 - xyz$  中, 建立位置闭环矢量约束方程:

$$l_1 = l_1 w_1, \quad (1)$$

$$e w_1 = a_2 + l_2 w_2 - b, \quad (2)$$

$$l_1 = a_3 + l_3 w_3 - c, \quad (3)$$

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,  $a_2$  表示矢量  $A_1 A_2$ ,  $a_3$  表示矢量  $A_1 A_3$ ,  $b$  表示矢量  $B_0 B_2$ ,  $c$  表示矢量  $B_1 B_3$ 。

对式(1)~(3)两边关于时间  $t$  求导数, 得:

$$v_1 = \dot{l}_1 \omega_1 \times w_1, \quad (4)$$

$$e \omega_1 \times w_1 = l_2 \dot{w}_2 + l_2 \omega_2 \times w_2 - \omega_1 \times b, \quad (5)$$

$$v_1 = l_3 \dot{w}_3 + l_3 \omega_3 \times w_3 - \omega_1 \times c, \quad (6)$$

式中:  $v_1$  表示点  $B_1$  的速度,  $\omega_i$  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  $w_i \cdot (\omega_i \times w_i) = 0$ , ( $i=1, 2, 3$ )。 因此, 对式(4)两端同时点乘  $w_2$ , 对式(5)两端同时点乘  $w_2$ , 对式(6)两端同时点乘  $w_3$ , 从而得到:

$$\dot{l}_1 = w_1^T v_1, \quad (7)$$

$$e(\mathbf{w}_1 \times \mathbf{w}_2)^3 \dot{\boldsymbol{\omega}}_1 = \dot{l}_2 - (\mathbf{b} \times \mathbf{w}_2)^T \boldsymbol{\omega}_1, \quad (8)$$

$$\mathbf{w}_3^T \dot{\mathbf{v}}_1 = \dot{l}_3 - (\mathbf{c} \times \mathbf{w}_3)^T \boldsymbol{\omega}_1. \quad (9)$$

将式(7)~(9)写成矩阵形式可得到关节速度与运动平台广义速度  $\mathbf{v} = [\mathbf{v}_1 \quad \boldsymbol{\omega}_1]^T$  的映射关系

$$\begin{bmatrix} \dot{l}_1 \\ \dot{l}_2 \\ \dot{l}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{w}_1^T & \mathbf{O}_{1 \times 3} \\ \mathbf{O}_{1 \times 3} & e(\mathbf{w}_1 \times \mathbf{w}_2)^T + (\mathbf{b} \times \mathbf{w}_2)^T \\ \mathbf{w}_3^T & (\mathbf{c} \times \mathbf{w}_3)^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \boldsymbol{\omega}_1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

或简记为:

$$\dot{\mathbf{l}} = \mathbf{J} [\mathbf{v}_1 \quad \boldsymbol{\omega}_1]^T, \quad (11)$$

式中:  $\dot{\mathbf{l}} = [\dot{l}_1 \quad \dot{l}_2 \quad \dot{l}_3]^T$  为关节速度矢量,  $\mathbf{J}$  为速度雅克比矩阵  $\mathbf{J} \in \mathbf{R}^{3 \times 6}$ ,  $\mathbf{O}_{1 \times 3} = [0 \quad 0 \quad 0]$ .

为分析线速度映射,需要构造  $\boldsymbol{\omega}_1$  与  $\mathbf{v}_1$  的映射关系,对式(7)两端同时叉乘  $\mathbf{w}_1$ ,通过三重向量积公式,有:

$$\mathbf{w}_1 \times \mathbf{v}_1 = l_1 [\boldsymbol{\omega}_1 - (\mathbf{w}_1^T \boldsymbol{\omega}_1) \mathbf{w}_1]. \quad (12)$$

因为 UP 支链绕自身轴线的旋转运动受到约束,故上式中有  $\mathbf{w}_1^T \boldsymbol{\omega}_1 = 0$ ,于是有:

$$\boldsymbol{\omega}_1 = \frac{(\mathbf{w}_1 \times \mathbf{v}_1)}{l_1}. \quad (13)$$

将式(13)带入式(8)、(9),且根据几何关系,有  $\mathbf{b}^T \mathbf{w}_1 = 0, \mathbf{c}^T \mathbf{w}_1 = 0$ ,则式(8)、(9)变为:

$$\dot{l}_2 = -\frac{1}{l_1} \mathbf{w}_2^T \mathbf{w}_1 \mathbf{b}^T \mathbf{v}_1, \quad (14)$$

$$\dot{l}_3 = \mathbf{w}_3^T \mathbf{v}_1 - \frac{1}{l_1} \mathbf{w}_3^T \mathbf{w}_1 \mathbf{c}^T \mathbf{v}_1. \quad (15)$$

将式(7)、(14)、(15)写成矩阵形式,即可得到机构关节速度与运动平台参考点线速度  $\mathbf{v}_1$  的映射关系:

$$\begin{bmatrix} \dot{l}_1 \\ \dot{l}_2 \\ \dot{l}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{w}_1^T \\ \mathbf{O}_{1 \times 3} \\ \mathbf{w}_3^T \end{bmatrix} - \frac{1}{l_1} \begin{bmatrix} \mathbf{O}_{1 \times 3} \\ \mathbf{w}_2^T \mathbf{w}_1 \mathbf{b}^T \\ \mathbf{w}_3^T \mathbf{w}_1 \mathbf{c}^T \end{bmatrix} \mathbf{v}_1, \quad (16)$$

或简记为:

$$\dot{\mathbf{l}} = \mathbf{J}_v \mathbf{v}_1, \quad (17)$$

式中:  $\dot{\mathbf{l}} = [\dot{l}_1 \quad \dot{l}_2 \quad \dot{l}_3]^T$  为关节速度矢量,  $\mathbf{J}_v$  为线速度雅克比矩阵  $\mathbf{J}_v \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ .

### 3.3 支链角速度分析

由式(13)可得:

$$\boldsymbol{\omega}_1 = \frac{1}{l_1} \tilde{\mathbf{w}}_1 \mathbf{v}_1 = \mathbf{J}_{\omega 1} \mathbf{v}_1, \quad (18)$$

$$\text{式中: } \tilde{\mathbf{w}}_1 = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{1z} & \omega_{1y} \\ \omega_{1z} & 0 & -\omega_{1x} \\ -\omega_{1y} & \omega_{1x} & 0 \end{bmatrix} \text{为 } \mathbf{w}_1 \text{ 的三阶反对}$$

称矩阵,  $\mathbf{J}_{\omega 1} = \frac{1}{l_1} \tilde{\mathbf{w}}_1$ .

为了求解 UPR 链的角速度,对式(5)两端同时叉乘  $\mathbf{w}_2$ ,且 UPR 链绕其自身轴线的旋转受到约束,即  $\boldsymbol{\omega}_2^T \mathbf{w}_2 = 0, \mathbf{w}_2^T \mathbf{w}_2 = 1$ ,可得:

$$\boldsymbol{\omega}_2 = \frac{1}{l_2} [\mathbf{w}_2^T (e \mathbf{w}_1 + \mathbf{b}) \boldsymbol{\omega}_1 - (e \mathbf{w}_1 + \mathbf{b}) (\mathbf{w}_2^T \boldsymbol{\omega}_1)]. \quad (19)$$

将式(18)代入式(19),可得:

$$\boldsymbol{\omega}_2 = \mathbf{J}_{\omega 2} \mathbf{v}_1, \quad (20)$$

式中:  $\mathbf{J}_{\omega 2} = \frac{1}{l_2} \begin{bmatrix} \mathbf{w}_2^T (e \mathbf{w}_1 + \mathbf{b}) \mathbf{E}_3 - \\ (e \mathbf{w}_1 + \mathbf{b}) \mathbf{w}_2^T \end{bmatrix} \mathbf{J}_{\omega 1}$ ,  $\mathbf{E}_3$  为三阶单位矩阵。

为了求解 UPS 支链的角速度,对式(6)两端同时叉乘  $\mathbf{w}_3$ ,且 UPS 支链绕自身轴线的旋转受到约束,即  $\boldsymbol{\omega}_3^T \mathbf{w}_3 = 0, \mathbf{w}_3^T \mathbf{w}_3 = 1$  可得:

$$\boldsymbol{\omega}_3 = \frac{1}{l_3} [\mathbf{w}_3 \times \mathbf{v}_1 + (\mathbf{w}_3^T \mathbf{c}) \boldsymbol{\omega}_1 - \mathbf{c} (\mathbf{w}_3^T \boldsymbol{\omega}_1)]. \quad (21)$$

将式(18)代入式(21),可得:

$$\boldsymbol{\omega}_3 = \mathbf{J}_{\omega 3} \mathbf{v}_1, \quad (22)$$

式中:  $\mathbf{J}_{\omega 3} = \frac{1}{l_3} [\tilde{\mathbf{w}}_3 + (\mathbf{w}_3^T \mathbf{c} \mathbf{E}_3 - \mathbf{c} \mathbf{w}_3^T) \mathbf{J}_{\omega 1}]$ ,  $\mathbf{E}_3$  为三阶单位矩阵,  $\tilde{\mathbf{w}}_3$  为  $\mathbf{w}_3$  的三阶反对称矩阵。

### 3.4 构件质心的位置、速度分析

由于各支链的摆动套筒仅做绕其虎克铰回转中心的摆动,其质心速度很容易通过所在支链角速度求得:

$$\mathbf{v}_{q_i} = l_{q_i} \mathbf{w}_i \times \boldsymbol{\omega}_i, (i=1, 2, 3) \quad (23)$$

式中:  $l_{q_i}$  为点  $A_i$  到点  $Q_i$  的长度。

各支链的运动杆质心  $C_i (i=1, 2, 3)$  的位置矢量  $\mathbf{p}_{c_i}$  分别为:

$$\mathbf{p}_{c1} = (l_1 - l_{c1}) \mathbf{w}_1, \quad (24)$$

$$\mathbf{p}_{c_i} = \mathbf{a}_i + (l_i - l_{c_i}) \mathbf{w}_i, (i=2, 3) \quad (25)$$

式中:  $l_{c_i} (i=1, 2, 3)$  为点  $B_i$  到点  $C_i$  的长度。

对式(24)、(25)关于时间求导,可以得到点  $C_i (i=1, 2, 3)$  速度为:

$$\mathbf{v}_{c_i} = \mathbf{J}_{v c_i} \mathbf{v}_1, (i=1, 2, 3) \quad (26)$$

式中:  $\mathbf{J}_{v c_i} = \mathbf{w}_i \mathbf{J}_i = (l_{c_i} - l_i) \tilde{\mathbf{w}}_i \mathbf{J}_{\omega i}$ , 且  $\mathbf{J}_1 = \mathbf{w}_1^T, \mathbf{J}_2 = -\frac{1}{l_1} \mathbf{w}_2^T \mathbf{w}_1 \mathbf{b}^T, \mathbf{J}_3 = \mathbf{w}_3^T - \frac{1}{l_1} \mathbf{w}_3^T \mathbf{w}_1 \mathbf{c}^T$ .

## 4 腿部机构动力学分析

为了更好地抽象出腿部机构的动力学模型,在动力学分析之前,对腿部机构进行抽象化假设:由于各支链虎克铰体积和质量相对于机械腿整体而言较小,所以在建模过程中忽略不计其转动惯量;由于中间连接杆和末端连接杆均为近似轴对称结构且质量很小,所以在建模过程中将其视为所在构件的一部分;将机械腿的末端减震弹簧和足视为 UP 链的运动杆的一部分。

### 4.1 广义力

为了便于建立机构的动力学方程,这里选择动平台参考点  $B_1$  在固定坐标系  $A_1-xyz$  中的坐标  $\mathbf{q}=[x \ y \ z]^T$  为广义坐标来描述机构的运动,则对应的广义速度为  $\dot{\mathbf{q}}=\mathbf{v}_1=[v_x \ v_y \ v_z]^T$ ,对应的广义力为  $\mathbf{Q}=[Q_x \ Q_y \ Q_z]^T$ 。设机构的输入移动副驱动力为  $\boldsymbol{\tau}=[\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3]^T$ ,则根据虚功原理,各驱动力的虚功之和等于动平台广义力的虚功之和,即:

$$\boldsymbol{\tau}^T \dot{\mathbf{l}} = \mathbf{Q}^T \dot{\mathbf{v}}_1. \quad (27)$$

将式(17)代入式(27),可以得到:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{J}_v^T \boldsymbol{\tau}. \quad (28)$$

### 4.2 各构件动能和势能分析

腿部机构的运动构件可以划分为三类进行动能分析:第一类,各支链的运动杆;第二类,各支链摆动套筒除电机转子和丝杠以外的部分;第三类,各支链电机转子和丝杠。

各支链的运动杆在固定坐标系中的动能为:

$$T_{\alpha_i} = \frac{1}{2} m_{\alpha_i} v_{\alpha_i}^2 + \frac{1}{2} \boldsymbol{\omega}_{\alpha_i}^T \mathbf{I}_{\alpha_i} \boldsymbol{\omega}_{\alpha_i}, (i=1, 2, 3), \quad (29)$$

式中:  $m_{\alpha_i}$  为运动杆  $i$  的质量,  $\mathbf{I}_{\alpha_i}$  为运动杆  $i$  绕过其质心垂直轴的惯量矩阵,  $v_{\alpha_i}$  和  $\boldsymbol{\omega}_{\alpha_i}$  分别为运动杆  $i$  的质心速度和角速度。

各支链摆动套筒除电机转子和丝杠以外部分的动能为:

$$T_{\beta_i} = \frac{1}{2} \boldsymbol{\omega}_{\beta_i}^T \mathbf{I}_{\beta_i} \boldsymbol{\omega}_{\beta_i}, (i=1, 2, 3), \quad (30)$$

式中:  $\mathbf{I}_{\beta_i}$  为摆动套筒绕过虎克铰回转中心轴的惯量矩阵,  $\boldsymbol{\omega}_{\beta_i}$  为摆动套筒  $i$  的角速度。

各支链电机转子和丝杠组合体的动能为:

$$T_{\gamma_i} = \frac{1}{2} \boldsymbol{\omega}_{\gamma_i}^T \mathbf{I}_{\gamma_i} \boldsymbol{\omega}_{\gamma_i} + \frac{1}{2} \boldsymbol{\omega}_{s_i}^T \mathbf{I}_{s_i} \boldsymbol{\omega}_{s_i}, (i=1, 2, 3), \quad (31)$$

式中:  $\mathbf{I}_{\gamma_i}$  为丝杠和电机转子组合体绕过虎克铰回转中心轴的惯量矩阵,  $\boldsymbol{\omega}_{\beta_i}$  为摆动套筒  $i$  的角速度,  $\mathbf{I}_{s_i}$  为组合体绕自身轴线的惯量矩阵,  $\boldsymbol{\omega}_{s_i}$  为组合体绕自身轴线的角速度。

综合前面的分析,系统总动能为:

$$T = \sum_{i=1}^3 T_{\alpha_i} + \sum_{i=1}^3 T_{\beta_i} + \sum_{i=1}^3 T_{\gamma_i}. \quad (32)$$

将式(29)~(31)代入式(32),可得:

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \left[ m_{\alpha_i} v_{\alpha_i}^2 + \boldsymbol{\omega}_{\beta_i}^T (\mathbf{I}_{\alpha_i} + \mathbf{I}_{\beta_i} + \mathbf{I}_{\gamma_i}) \boldsymbol{\omega}_{\beta_i} + \boldsymbol{\omega}_{s_i}^T \mathbf{I}_{s_i} \boldsymbol{\omega}_{s_i} \right]. \quad (33)$$

将式(18)、(20)、(22)、(26)代入式(33),可得:

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \left[ \mathbf{v}_1^T (m_{\alpha_i} \mathbf{J}_{\alpha_i}^T \mathbf{J}_{\alpha_i} + \mathbf{J}_{\beta_i}^T (\mathbf{I}_{\alpha_i} + \mathbf{I}_{\beta_i} + \mathbf{I}_{\gamma_i}) \mathbf{J}_{\beta_i} + \mathbf{I}_{s_i}^T \mathbf{I}_{s_i}) \mathbf{v}_1 + \boldsymbol{\omega}_{s_i}^T \mathbf{I}_{s_i} \boldsymbol{\omega}_{s_i} \right]. \quad (34)$$

考虑到  $\dot{\mathbf{v}}_1 = \dot{\mathbf{q}}$ , 则式(34)变为:

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 (\dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{I}_i \dot{\mathbf{q}} + \boldsymbol{\omega}_{s_i}^T \mathbf{I}_{s_i} \boldsymbol{\omega}_{s_i}), \quad (35)$$

式中:  $\mathbf{I}_i = m_{\alpha_i} \mathbf{J}_{\alpha_i}^T \mathbf{J}_{\alpha_i} + \mathbf{J}_{\beta_i}^T (\mathbf{I}_{\alpha_i} + \mathbf{I}_{\beta_i} + \mathbf{I}_{\gamma_i}) \mathbf{J}_{\beta_i}$  为广义等效惯量矩阵。

腿部机构的各运动构件势能分析相对简单,系统总势能为:

$$V = g \sum_{i=1}^3 (m_{\beta_i} p_{\beta_i} + m_{\alpha_i} p_{\alpha_i} + m_{s_i} p_{s_i}), \quad (36)$$

式中:  $m_{\beta_i}$  和  $p_{\beta_i}$  分别为摆动套筒的质量和质心位置矢量,  $m_{\alpha_i}$  和  $p_{\alpha_i}$  分别为运动杆的质量和质心位置矢量,  $m_{s_i}$  和  $p_{s_i}$  分别为丝杠电机转子组件的质量和质心位置矢量。

### 4.3 腿部机构动力学方程

根据前面求得的腿部机构动能和势能,可以得到系统的拉格朗日函数为:

$$L = T - V, \quad (37)$$

式中:  $T$  为系统总动能,  $V$  为系统总势能。

根据非保守系统拉格朗日方程,有:

$$\frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} \right] - \frac{\partial L}{\partial q_k} = Q_k, (k=1, 2, 3) \quad (38)$$

式中:  $\mathbf{q}=[q_1 \ q_2 \ q_3]^T=[x \ y \ z]^T$  为广义坐标,  $\mathbf{Q}=[Q_1 \ Q_2 \ Q_3]^T$  为对应广义坐标的广义力。

将式(37)代入式(38)写成矢量形式,可得:

$$\mathbf{Q} = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right) - \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right) - \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \mathbf{q}} + \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \mathbf{q}} \quad (39)$$

因为势能  $V$  不是广义速度的函数,所以式(39)变为:

$$\mathbf{Q} = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right) - \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \mathbf{q}} + \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \mathbf{q}} \quad (40)$$

将式(35)先后对  $q_k (k=1,2,3)$  和时间  $t$  求导,由于  $\omega_{Si}^T \mathbf{I}_{Si} \omega_{Si}$  与广义速度的关系由丝杠导程确定,所以这里将其简化为非广义速度的函数,可得:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \dot{q}_k} \right) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \left[ \mathbf{I} \left( \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \dot{\mathbf{q}}}{\partial q_k} \right)^T \dot{\mathbf{q}} + \left( \frac{\partial \dot{\mathbf{q}}}{\partial q_k} \right)^T \ddot{\mathbf{q}} + \ddot{\mathbf{q}}^T \left( \frac{\partial \dot{\mathbf{q}}}{\partial q_k} \right) + \dot{\mathbf{q}}^T \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \dot{\mathbf{q}}}{\partial q_k} \right) \right) \right] \quad (41)$$

式中,  $k=1,2,3$ 。

因为  $\frac{\partial \dot{\mathbf{q}}}{\partial q_k} = \frac{\partial \mathbf{q}^{[18]}}{\partial q_k}$ , 可得:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \dot{q}_k} \right) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \left[ \mathbf{I} \left( \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial q_k} \right)^T \dot{\mathbf{q}} + \left( \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial q_k} \right)^T \ddot{\mathbf{q}} + \ddot{\mathbf{q}}^T \left( \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial q_k} \right) + \dot{\mathbf{q}}^T \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial q_k} \right) \right) \right] \quad (42)$$

因为  $\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial q_k} \right) = \frac{\partial \dot{\mathbf{q}}^{[18]}}{\partial q_k}$ , 可得:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \dot{q}_k} \right) = H_{1k} \ddot{\mathbf{q}} + D_{1k} \dot{\mathbf{q}} + K_{1k}, (k=1,2,3), \quad (43)$$

式中:  $H_{1k} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \left( \mathbf{I} \left( \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial q_k} \right)^T \right)$ ,

$$D_{1k} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \left( \dot{\mathbf{I}} \left( \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial q_k} \right)^T + \mathbf{I} \left( \frac{\partial \dot{\mathbf{q}}}{\partial q_k} \right)^T \right), K_{1k} =$$

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \left( \ddot{\mathbf{I}} \mathbf{q}^T \left( \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial q_k} \right) + \mathbf{I} \left( \ddot{\mathbf{q}}^T \left( \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial q_k} \right) + \dot{\mathbf{q}}^T \left( \frac{\partial \dot{\mathbf{q}}}{\partial q_k} \right) \right) \right).$$

将式(43)写成矢量形式,可得:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right) = \mathbf{H}_1 \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{D}_1 \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}_1, \quad (44)$$

式中:  $\mathbf{H}_1 = [H_{11} \ H_{12} \ H_{13}]^T$ ,  $\mathbf{D}_1 = [D_{11} \ D_{12} \ D_{13}]^T$ ,  $\mathbf{K}_1 = [K_{11} \ K_{12} \ K_{13}]^T$ 。

将式(35)对  $q_k (k=1,2,3)$  求导,可得:

$$\frac{\partial \mathbf{T}}{\partial q_k} = D_{2k} \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}_{2k}, (k=1,2,3), \quad (45)$$

式中:  $D_{2k} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \left( \frac{\partial \mathbf{I}}{\partial q_k} \dot{\mathbf{q}}^T + \mathbf{I} \left( \frac{\partial \dot{\mathbf{q}}}{\partial q_k} \right)^T \right)$ ,

$$\mathbf{K}_{2k} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \left( \mathbf{I} \dot{\mathbf{q}}^T \left( \frac{\partial \dot{\mathbf{q}}}{\partial q_k} \right) + \frac{\partial \mathbf{I}_{Si}}{\partial q_k} \omega_{Si}^T \omega_{Si} + \mathbf{I}_{Si} \left( \left( \frac{\partial \omega_{Si}}{\partial q_k} \right)^T \omega_{Si} + \omega_{Si}^T \left( \frac{\partial \omega_{Si}}{\partial q_k} \right) \right) \right).$$

将式(45)写成矢量形式,可得:

$$\frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \mathbf{q}} = \mathbf{D}_2 \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}_2, \quad (46)$$

式中:  $\mathbf{D}_2 = [D_{21} \ D_{22} \ D_{23}]^T$ ,

$$\mathbf{K}_2 = [K_{21} \ K_{22} \ K_{23}]^T.$$

将式(36)对  $q_k (k=1,2,3)$  求导,可得:

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial q_k} = K_{gk}, k=1,2,3, \quad (47)$$

式中,  $K_{gk} = g \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial q_k} (m_{qi} p_{qi} + m_{ci} p_{ci} + m_{si} p_{si})$ 。

将式(47)写成矢量形式,可得:

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \mathbf{q}} = \mathbf{K}_g, \quad (48)$$

式中:  $\mathbf{K}_g = [K_{g1} \ K_{g2} \ K_{g3}]^T$ 。

将式(44)、(46)、(48)代入式(40),可得

$$\mathbf{Q} = \mathbf{H} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{D} \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}, \quad (49)$$

式中:  $\mathbf{H} = \mathbf{H}_1$ ,  $\mathbf{D} = \mathbf{D}_1 - \mathbf{D}_2$ ,  $\mathbf{K} = \mathbf{K}_1 - \mathbf{K}_2 + \mathbf{K}_g$ 。

在式(49)中,  $\mathbf{H}$  为实对称广义惯性矩阵,  $\mathbf{D}$  表征系统离心力和哥氏力,  $\mathbf{K}$  表征外载荷和重力。将式(49)代入式(28),即可得到腿部机构的刚体逆动力学方程为:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{G}(\mathbf{H} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{D} \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}), \quad (50)$$

式中:  $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3]^T$  为机构的输入驱动力,  $\mathbf{G} = (\mathbf{J}_v^T)^{-1}$ 。

式(50)为腿部机构逆动力学方程的显式表达式,当给定腿部机构运动的位置、速度、加速度参

数,就可以求得其对应的关节驱动力,从而为腿部机构的伺服电机选型提供依据。在不考虑具体算例参数时,可以通过对式(50)取 2 范数后,借用拉格朗日算子求偏导数取极值的方法求得理论输入转速和力矩的最大值。

## 5 腿部机构伺服电机峰值预估

为了实现快速行走,六足机器人的腿部机构需要具有较大的运动速度和加速度,这就对伺服电机的驱动转速、力矩提出了很高要求。分析动平台参考点的运动规律与各关节驱动参数之间的关系,可以为伺服电机参数预估提供依据。通过运动学分析可知,在六足机器人向正前方以最大速度行走过程中,UPR 支链的伺服电机会产生最大瞬时转速;在六足机器人向正侧方以最大速度行走过程中,UPS 支链的伺服电机会产生最大瞬时转速;在腿部机构以最大速度沿 UP 支链轴线方向伸缩时,UP 支链的伺服电机会产生最大瞬时转速。同时,在上述运动过程中,在六足机器人向正前方抬腿启动时,UPR 支链的伺服电机会产生最大瞬时驱动力矩;在六足机器人向正侧方抬腿启动时,UPS 支链的伺服电机会产生最大瞬时驱动力矩;在腿部机构以最大加速度沿 UP 支链轴线方向伸缩时,UP 支链的伺服电机会产生最大瞬时驱动力矩。因此,这里基于以上 3 种运动模式的函数,进行伺服电机峰值参数预估。为了简化计算且便于分析,设以上 3 种情况中腿部机构动平台参考点产生线速度函数均采用余弦函数进行分析,即参考点在空间的运动轨迹为余弦曲线,则其函数分别为  $v_1^x$ 、 $v_1^y(t)$ 、 $v_1^w(t)$ 。

### 5.1 峰值驱动速度分析

为了分析各驱动输入速度与动平台参考点速度的关系,将式(17)中的线速度雅可比矩阵写成行向量形式,可得:

$$\begin{bmatrix} \dot{l}_1 \\ \dot{l}_2 \\ \dot{l}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1 \\ \mathbf{J}_2 \\ \mathbf{J}_3 \end{bmatrix} \mathbf{v}_1, \quad (51)$$

式中:  $\mathbf{J}_i \in \mathbf{R}^{1 \times 3}$  为驱动分支  $i(i=1,2,3)$  的速度传递子向量。

对于分支  $i(i=1,2,3)$  而言,其驱动电机转速  $n_i(i=1,2,3)$ (单位 rpm)与驱动移动副的输入线速度  $\dot{l}_i(i=1,2,3)$  之间的关系为:

$$n_i = \delta_i \dot{l}_i, (i=1,2,3) \quad (52)$$

式中:  $\delta_i(i=1,2,3)$  为传动比系数,其数值由丝杠导程和传动带传动比共同决定。

将式(51)代入式(52),即可得到伺服电机驱动速度与动平台参考点速度之间的关系:

$$n_i = \delta_i \mathbf{J}_i \mathbf{v}_1, (i=1,2,3). \quad (53)$$

将运动函数  $v_1^x(t)$ 、 $v_1^y(t)$ 、 $v_1^w(t)$  代入,可得对应的伺服电机转速函数为:

$$n_i^x(t) = \delta_i \mathbf{J}_i v_1^x(t), (i=1,2,3) \quad (54)$$

$$n_i^y(t) = \delta_i \mathbf{J}_i v_1^y(t), (i=1,2,3). \quad (55)$$

$$n_i^w(t) = \delta_i \mathbf{J}_i v_1^w(t), (i=1,2,3) \quad (56)$$

通过求解式(54)~(56)各自的最大奇异值,即可得出其理论最大转速值分别为  $n_{\max}^x = 19$ 、 $n_{\max}^y = 17$ 、 $n_{\max}^w = 27$ (单位 r/s)。

### 5.2 峰值驱动力矩分析

对于分支  $i(i=1,2,3)$  而言,其驱动电机力矩  $\epsilon_i(i=1,2,3)$ (单位 Nm)与驱动移动副的输入力  $\tau_i(i=1,2,3)$  之间的关系为:

$$\epsilon_i = \lambda_i \tau_i, (i=1,2,3), \quad (57)$$

式中:  $\lambda_i(i=1,2,3)$  为驱动力传递系数,其数值由丝杠螺旋角和传动带传动比共同决定。

由于驱动力矩分析考虑的是伺服电机快速启动的工况,因此分析时可以略去式(50)中的离心力、哥氏力,从而得到驱动电机力矩与动平台参考点加速度的关系为:

$$\boldsymbol{\epsilon} = \boldsymbol{\lambda}(\mathbf{GH}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}, \quad (58)$$

式中:  $\boldsymbol{\epsilon} = [\epsilon_1 \quad \epsilon_2 \quad \epsilon_3]^T$  为驱动电机力矩,  $\boldsymbol{\lambda} = [\lambda_1 \quad \lambda_2 \quad \lambda_3]^T$  为驱动力传递系数,  $\ddot{\mathbf{q}}$  为动平台参考点加速度。

根据文献[6],伺服电机的峰值预估模型为:

$$\|\boldsymbol{\epsilon}\|_{\max} \leq \lambda \left\{ \begin{array}{l} \|\mathbf{G}\|_{\max} \|\mathbf{H}\|_{\max} \|\ddot{\mathbf{q}}\|_{\max} + \\ \|\mathbf{G}\|_{\max} \|\mathbf{K}\|_{\max} \end{array} \right\}. \quad (59)$$

通过式(59)即可得出其理论最大力矩分别为  $\epsilon_{\max}^x = 5.8$ 、 $\epsilon_{\max}^y = 3.1$ 、 $\epsilon_{\max}^w = 4.4$ (单位 N·m)。

5.3 实例分析

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 $a/\text{mm}$	200
中间连接杆参数 $b/\text{mm}$	70
运动平台结构参数 $c/\text{mm}$	50
(U+UPR)P 支链参数 $e/\text{mm}$	450
丝杠长度×公称直径×导程	360 mm×10 mm×14 mm
1,3 链套筒长×直径×壁厚	360 mm×65 mm×5 mm
1,3 链从动杆长×直径×壁厚	360 mm×30 mm×3 mm
2 链套筒长×直径×壁厚	360 mm×65 mm×5 mm
2 链从动杆长×直径×壁厚	360 mm×30 mm×3 mm
电机型号	F2260 817

基于表 1 中给出的腿部机构基本参数,其中套筒和运动杆都采用均质铝合金(密度为  $2.88 \text{ kg/m}^3$ )材料,滚珠丝杠采用均质高碳铬轴承钢(密度为  $7.81 \text{ kg/m}^3$ ),其余构件材料按照 40Cr 钢(密度为  $7.8 \text{ kg/m}^3$ )计算。在以上参数确定后,各构件惯量矩阵可以通过工程计算软件得出。

以上 3 种快速行走方式在平稳运行阶段腿部机构的运动函数分别为:

$$v_1^x(t) \begin{cases} x(t) = 300t \\ z(t) = -[700 + 200\cos(\pi t/2)] \end{cases}, \quad (60)$$

$$v_1^y(t) \begin{cases} x(t) = 200t \\ z(t) = -[700 + 200\cos(\pi t/2)] \end{cases}, \quad (61)$$

$$v_1^w(t) \{ \omega(t) = 200t. \quad (62)$$

通过式(54)~(56),利用 matlab 软件绘制出在给定运动函数时腿部机构伺服电机驱动速度变化曲线,这里仅给出每种行走方式驱动速度最大的电机曲线,且 3 种行走方式各自最大驱动速度曲线绘制在一个图中,如图 3 所示。

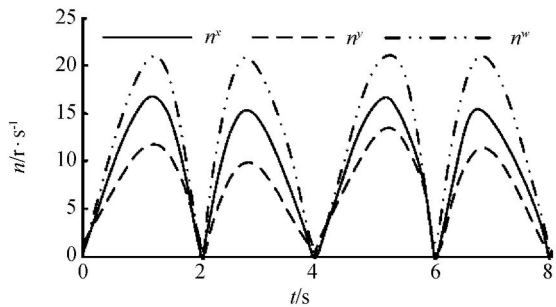


图 3 伺服电机驱动速度变化曲线图

Fig.3 Drive velocity curves of servo motor

通过分析图 3 可知,3 种行走状态的最大驱动速度分别为  $n_{\text{max}}^x = 17.1$ 、 $n_{\text{max}}^y = 14.3$ 、 $n_{\text{max}}^w = 22.7$ (单位  $\text{r/s}$ ),它们都小于伺服电机的理论最大转速,证明了理论峰值预估的正确性。

通过式(58),利用 matlab 软件绘制出在给定运动函数和启动加速度时腿部机构伺服电机驱动力矩变化曲线,这里仅给出每种行走方式驱动力矩最大的电机曲线,且 3 种行走方式各自最大驱动力矩曲线绘制在一个图中,如图 4 所示。

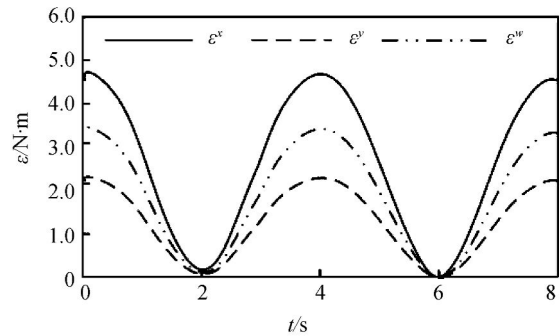


图 4 伺服电机驱动力矩变化曲线图

Fig.4 Drive torque curves of servo motor

通过分析图 4 可知,3 种行走状态的最大驱动力矩分别为  $\epsilon_{\text{max}}^x = 4.7$ 、 $\epsilon_{\text{max}}^y = 2.2$ 、 $\epsilon_{\text{max}}^w = 3.4$ (单位  $\text{N} \cdot \text{m}$ ),它们都小于伺服电机的理论最大力矩,证明了理论峰值预估的正确性。

7 结 论

首先用 Lagrange 方程对一种三自由度并联机械腿进行了动力学建模,得到了其驱动力与运动参数之间的显式表达式,其表达式各项物理意义清晰。然后,基于动力学模型,建立了伺服电机驱动转速和驱动力矩的峰值预估模型,得到了伺服电机驱动转速的峰值分别为  $N^x = 19$ 、 $N^y = 17$ 、 $N^w = 27$ (单位  $\text{r/s}$ );伺服电机驱动力矩的峰值分别为  $\epsilon^x = 5.8$ 、 $\epsilon^y = 3.1$ 、 $\epsilon^w = 4.4$ (单位  $\text{N} \cdot \text{m}$ )。最后,分析了在给定结构参数和运动函数时,伺服电机驱动转速和驱动力矩的变化规律,得到了其随时间变化曲线,并验证了峰值预估模型的正确性。

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。

## 参考文献:

- [1] 韩雪冰,张景旭,赵金宇,等. 水平式光电望远镜目标定位误差的预测[J]. 光学精密工程, 2010, 18(7): 1595-1604.  
HAN X B, ZHANG J X, ZHAO J Y, *et al.*. Forecast 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 CH, *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] 李娟,刘延杰,孙立宁,等. 新型 2-DOF 高加速定位平台的动态性能[J]. 光学精密工程, 2008, 16(5): 851-856.  
LI J, LIU Y J, SUN L N, *et al.*. Dynamic characteristics of a novel 2-DOF high acceleration positioning mechanism [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(5): 851-856. (in Chinese)
- [12] 王跃灵,金振林,李研彪. 球面 3-RRR 并联机构动力学建模与鲁棒-自适应迭代学习控制 [J]. 机械工程学报, 2010, 46(1): 68-73.  
WANG Y L, JIN ZH L, LI Y B. Dynamic modeling and robust-adaptive iterative learning control of 3-RRR spherical parallel mechanism [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(1): 68-73. (in Chinese)
- [13] STAMPER R E. *A Three Degree of Freedom Parallel Manipulator with Only Translational Degrees of Freedom* [D]. Maryland: The University of Maryland, 1997: 83-97.
- [14] TSAI L W. Solving the inverse dynamics of a Stewart-Gough manipulator by the principle of virtual work [J]. *ASME Journal of Mechanical Design*, 2000(122): 3-9.
- [15] SAMAK S M, GUPTA K C. Parametric uncertainty on manipulators dynamics [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 1998, 33(7): 945-956.
- [16] 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)
- [17] 曾达幸,黄真. 基于螺旋理论的转动解耦并联机构型综合[J]. 中国科学(E辑), 2011, 41(5): 585-591.
- ZENG D X, HUANG ZH. Type synthesis of the rotationaldecoupledparallel mechanism based on screwtheory [J]. *Sci China Tech Sci*, 2011, 41(5): 585-591.
- [18] 王振发. 分析力学[M]. 北京:科学出版社, 2002: 46-47.
- WANG ZH F. *Analytical mechanics* [M]. Beijing: Science Press, 2002: 46-47. (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

## 旋转粗糙圆柱的激光散射功率谱分析

武颖丽,吴振森

(西安电子科技大学理学院,陕西西安710071)

为了实现粗糙目标的光学无损测量,建立了圆柱旋转激光散斑功率谱的理论模型。方法:首先,根据粗糙面激光散射特征,研究了平行光束照射匀速旋转的圆柱表面,其反射空间形成的动态散斑特性,给出了接收场散斑强度起伏互相关函数及其功率谱密度函数的理论模型,以及动态散斑场的相干长度和接收信号带宽。接着,分析了旋转引起的散斑平移和散斑沸腾对接收信号带宽的影响,最后,测量了旋转圆柱准镜向及漫射部分的散斑图像。结果:结果表明:当入射光波长0.633 μm照射半径1mm圆柱时,频率为10 Hz的旋转圆柱自相关函数的相关时间约为4 ms,而20 Hz对应的相关时间2 ms左右;结论:在动态散斑场中,多普勒效应和散斑平移效应引起的带宽约同一个量级,而散斑沸腾效应可以忽略。