

并联波浪补偿系统的鲁棒控制方法*

胡永攀,陶利民,吕伟,贾俊

(国防科技大学装备综合保障技术重点实验室,湖南长沙 410073)

摘要:研究了基于绳牵引并联机构的新型波浪补偿系统的鲁棒控制方法。将环境作用力和不可测参数从动力学方程中分离出来,看作系统干扰,然后根据李亚普诺夫稳定性理论推导了控制律。针对绳索冗余的情况,提出了一种基于交互投影的绳索张力分布算法。当存在张力分布的可行解时,该算法能够得到远离张力限制边缘的“安全”最优解;当不存在可行解时,该算法能够得到满足张力限制条件的最佳近似解。为了提高鲁棒控制的实用性,还研究了负载惯性参数辨识方法。仿真结果表明,以上理论与方法对于波浪补偿系统是非常有效的。

关键词:绳牵引并联机构;船用起重机;滑模控制;波浪补偿;张力分布

中图分类号:TP242 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2014)06-171-09

Robust control method of parallel wave compensation system

HU Yongpan, TAO Limin, LYU Wei, JIA Jun

(Laboratory of Science and Technology on Integrated Logistics Support, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A robust control method for new type wave compensation systems that based on cable-driven parallel mechanisms were presented. The environmental forces and immeasurable parameters were separated from the dynamic equations and treated as disturbances. Then a sliding mode control law was derived using Lyapunov stability theory. For redundant mechanisms, a tension distribution algorithm based on alternating projection was proposed. When feasible solutions exist, this algorithm leads to a "safe" optimum solution that is kept away from all the boundaries of the tension constraints. Even if no feasible solution exists, a best approximate solution will be got which satisfies the tension constraints. An identification method was also proposed to enhance the practicability of the robust control method. Simulation results show that the proposed theories and methods are effective for such wave compensation systems.

Key words: cable-driven parallel mechanisms; ship-mounted crane; sliding mode control; wave compensation; tension distribution

海上补给是海上后勤保障的重要内容。在各种补给方式中,以船用起重机为主要补给装备的并靠补给占有重要地位。由于受到海浪和海风的影响,补给船和被补给船之间会产生复杂的相对运动,影响并靠补给的正常进行。因此,要完成高海况下的并靠补给任务,船用起重机必须具备波浪补偿功能。传统的波浪补偿起重机只能补偿升沉方向的相对运动,并且无法控制货物的摆动,在精度、效率和安全性上都无法满足海上补给日益增长的需求。

近年来,绳牵引并联机构受到国内外研究人员的广泛关注。绳牵引并联机构是指使用绳索代替传统刚性支链的并联机构,具有工作空间大、自身惯量低等诸多优点,在大型部件装配^[1-2]、大型结构支撑^[3-4]、运动模拟^[5]等方面具有巨大的应

用潜力。将绳牵引并联机构用于波浪补偿起重机能够有效弥补传统波浪补偿起重机的缺陷。绳牵引并联机构不仅能够补偿补给船和被补给船的六自由度相对运动,而且结构自身具有抗摆能力,能够消除船舶运动引起的货物摆动,从而提高并靠补给的精度和安全性。

目前国内外对绳牵引并联机构的控制问题已经进行了一些研究,提出了速度伺服控制^[6]、计算力矩控制^[2]、前馈控制^[7]、无源控制^[8]、模糊PID控制^[9]、 H_{∞} 控制^[10]以及基于观测器的抗扰控制^[11]等控制方法。这些方法在计算复杂度、稳定性、鲁棒性等方面各有优缺点。海上补给的应用背景对绳牵引并联机构的控制带来了更大的挑战,主要表现在:首先,绳牵引并联机构的基座随着补给船不停地运动,并且基座相对于惯性坐标

* 收稿日期:2014-05-15

基金项目:国家部委资助项目(401040602)

作者简介:胡永攀(1986—),男,山东济宁人,博士研究生,E-mail:huyongpan1986@163.com;

陶利民(通信作者),男,研究员,博士,博士生导师,E-mail:tlim1964@sina.com

系的位移难以精确测量;其次,负载在海风作用下受到比较大的干扰力。目前针对这种具有动态基座、未知参数和强干扰的绳牵引并联机构的控制问题的研究还比较缺乏,是本文研究的重点。

由于绳索只能承受单向力,绳索张力分布也是绳牵引并联机构控制的重要内容。目前国内外已经提出了一些绳索张力分布算法,包括线性规划^[12]、二次规划^[13]、可行域寻心法^[14-15]等。这些算法的共同前提是在张力限制条件内必须具有可行解。然而在实际控制过程中,没有可行解的情况是存在的。此时如何计算张力分布才能达到最高的控制精度,是一个值得关注的问题。

1 动力学模型

绳牵引并联机构的动力学建模方法与传统并联机构类似。研究人员对此问题进行了大量研究,建模所使用的方法和原理包括牛顿-欧拉法^[16]、拉格朗日法^[17]、虚功原理、凯恩方程^[18]等。由于绳索的惯性较小,绳牵引并联机构的动力学模型一般不考虑绳索的动力学特性。本文使用牛顿-欧拉法建立绳牵引并联机构的动力学模型。在建模过程中,忽略了电机的惯性与摩擦力。

1.1 运动学分析

图 1 所示为基于绳牵引并联机构的波浪补偿系统的结构。绳牵引并联机构的基座与起重机的吊臂相连,负载平台与负载相连。8 根绳索将负载平台与基座连接到一起,绳索张力由安装在基座上的 8 个电机来控制。

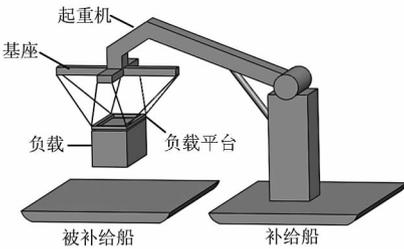


图 1 波浪补偿系统结构

Fig. 1 Structure of the wave compensation system

如图 2 所示,坐标系 \mathcal{B} , \mathcal{P} 和 \mathcal{S} 分别固定在基座、负载和被补给船上,坐标系原点分别与三者的质心重合。 \mathcal{N} 表示惯性坐标系,原点为惯性空间中 1 点。对于机构中的第 i ($i=1, \dots, 8$) 根绳索, B_i 和 P_i 分别表示绳索与基座和负载的连接点, \mathbf{b}_i , \mathbf{p}_i 分别表示 O_B, O_P 到 B_i, P_i 的矢量, \mathbf{l}_i 表示从 B_i 指向 P_i 的矢量, $\mathbf{e}_i = \mathbf{l}_i / \|\mathbf{l}_i\|$ 是 \mathbf{l}_i 的单位矢量。

定义 $\mathbf{X}_{ij}^k, \mathbf{x}_{ij}^k, \boldsymbol{\psi}_{ij}^k$ 和 $\boldsymbol{\omega}_{ij}^k$ 分别为在 k 坐标系中表示的坐标系 i 相对于坐标系 j 的位姿、位置、姿态

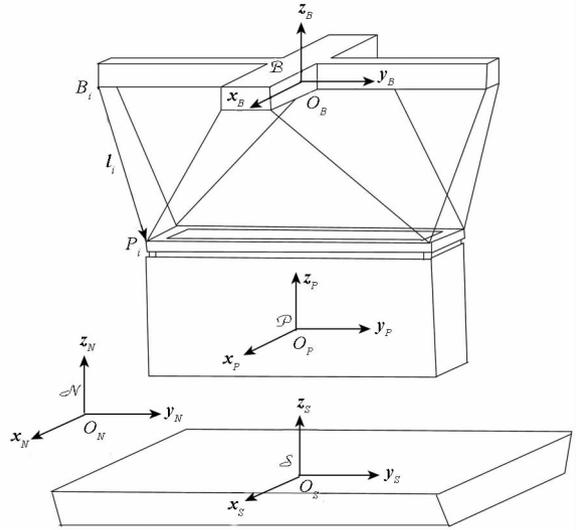


图 2 坐标系示意图

Fig. 2 The coordinate frames

和角速度。为了书写方便, $\mathbf{X}_{BN}^N, \mathbf{X}_{PN}^N, \mathbf{X}_{PB}^B, \mathbf{X}_{SB}^B$ 四个矢量分别用 $\mathbf{X}_B, \mathbf{X}_P, \mathbf{X}_p, \mathbf{X}_s$ 代替。

定义 \mathbf{R}_i^j 为坐标系 i 转换到坐标系 j 的方向余弦矩阵。那么 \mathcal{P} 相对于 \mathcal{N} 的位置为

$$\mathbf{x}_p = \mathbf{R}_B^N \mathbf{x}_p + \mathbf{x}_B \tag{1}$$

对式(1)两边求二阶导数可以得出 \mathcal{P} 相对于 \mathcal{N} 的加速度为

$$\ddot{\mathbf{x}}_p = \mathbf{R}_B^N \ddot{\mathbf{x}}_p + \ddot{\mathbf{x}}_B + \mathbf{R}_B^N [\dot{\boldsymbol{\omega}}_{BN}^B \times] \mathbf{x}_p + \mathbf{R}_B^N [\boldsymbol{\omega}_{BN}^B \times] [\boldsymbol{\omega}_{BN}^B \times] \mathbf{x}_p + 2 \mathbf{R}_B^N [\boldsymbol{\omega}_{BN}^B \times] \dot{\mathbf{x}}_p \tag{2}$$

式中, $[\boldsymbol{\omega}_{BN}^B \times]$ 表示 $\boldsymbol{\omega}_{BN}^B$ 的斜对称矩阵。对于任一矢量 $\boldsymbol{\omega} = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$, 其斜对称矩阵为

$$[\boldsymbol{\omega} \times] = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix}$$

在式(2)的推导过程中,需要用到余弦矩阵的求导公式:

$$\dot{\mathbf{R}}_B^N = \mathbf{R}_B^N [\boldsymbol{\omega}_{BN}^B \times]$$

\mathcal{P} 相对于 \mathcal{N} 的角速度可以表示为

$$\boldsymbol{\omega}_{PN}^N = \mathbf{R}_P^N \boldsymbol{\omega}_{PB}^P + \mathbf{R}_B^N \boldsymbol{\omega}_{BN}^B$$

两边求导可得

$$\dot{\boldsymbol{\omega}}_{PN}^N = \mathbf{R}_P^N \dot{\boldsymbol{\omega}}_{PB}^P + \mathbf{R}_B^N \dot{\boldsymbol{\omega}}_{BN}^B + \mathbf{R}_B^N [\boldsymbol{\omega}_{BN}^B \times] \mathbf{R}_P^N \boldsymbol{\omega}_{PB}^P \tag{3}$$

根据刚体运动学理论有

$$\boldsymbol{\omega}_{PB}^P = \mathbf{H}_p \boldsymbol{\psi}_p \tag{4}$$

$$\mathbf{H}_p = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -S\theta_p \\ 0 & C\phi_p & S\phi_p C\theta_p \\ 0 & -S\phi_p & C\phi_p C\theta_p \end{bmatrix}$$

ϕ, θ 和 ψ 分别表示横摇、纵摇和艏摇三个欧拉角。

对式(4)两边求导可得 \mathcal{P} 相对于 \mathcal{B} 的角加速

度为

$$\dot{\omega}_{PB}^P = H_p \ddot{\psi}_p + \dot{H}_p \dot{\psi}_p \quad (5)$$

1.2 动力学方程

在海洋环境中,基座相对惯性坐标系的位移难以精确测量,将与环境对负载的作用力一起作为干扰处理。为了设计鲁棒控制器,首先必须推导绳牵引并联机构动力学方程,并且把干扰分离出来。

根据牛顿第二定律

$$m \ddot{x}_p - G_l - F_e = -[e_1^N \quad e_2^N \quad \cdots \quad e_8^N]u \quad (6)$$

式中, m 和 G_l 分别表示负载的质量和重力; F_e 表示环境施加到负载上的作用力; u 是绳索张力矢量,它的分量为各绳索的张力。在本文中,向量的上标 N 、 B 和 P 代表了该向量的参考坐标系。

将式(2)代入,得

$$m \ddot{x}_p + C_l - G_l + D_l = -[e_1^B \quad e_2^B \quad \cdots \quad e_8^B]u \quad (7)$$

$$C_l = m \ddot{x}_{BN}^B + m([\dot{\omega}_{BN}^B \times] + [\omega_{BN}^B \times][\omega_{BN}^B \times])x_p + 2m[\omega_{BN}^B \times]\dot{x}_p$$

$$D_l = (I - R_N^B)G_l - R_N^B F_e$$

绳牵引并联机构的力矩平衡方程为

$$R_p^N I R_N^P \dot{\omega}_{PN}^N + [\omega_{PN}^N \times] R_p^N I R_N^P \omega_{PN}^N - M_e = -[a_1^N \times e_1^N \quad \cdots \quad a_8^N \times e_8^N]u \quad (8)$$

式中, I 表示负载惯性矩阵; M_e 表示环境施加到负载上的力矩。

将式(3)、式(4)、式(5)代入式(8),得

$$I H_p \ddot{\psi}_p + C_r + D_r = -[a_1^P \times e_1^P \quad \cdots \quad a_8^P \times e_8^P]u \quad (9)$$

$$C_r = I(\dot{H}_p \dot{\psi}_p + R_p^P[\omega_{BN}^B \times]R_p^B H_p \dot{\psi}_p) + [(R_p^P \omega_{BN}^B + H_p \dot{\psi}_p) \times]I(R_p^P \omega_{BN}^B + H_p \dot{\psi}_p) \\ D_r = I R_p^P R_B^N \dot{\omega}_{BN}^N - R_p^N M_e$$

综合式(7)与式(9),绳牵引并联机构的动力学方程为

$$M \ddot{X}_p + C - G + D = -Ju \quad (10)$$

式中,

$$M = \begin{bmatrix} m E_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & I H_p \end{bmatrix}; \quad C = [C_l^T \quad C_r^T]^T;$$

$$G = [G_l^T \quad \mathbf{0}_{1 \times 3}]^T; \quad D = [D_l^T \quad D_r^T]^T;$$

$$J = \begin{bmatrix} e_1^B & e_2^B & \cdots & e_8^B \\ a_1^P \times e_1^P & a_2^P \times e_2^P & \cdots & a_8^P \times e_8^P \end{bmatrix}。 E 和 \mathbf{0} 分$$

别表示单位矩阵和零矩阵。在式(10)中, D 表示干扰项,包含了基座相对惯性坐标系的姿态以及环境对负载的干扰力。

2 鲁棒控制器

2.1 滑模控制

假设绳索在控制过程中是张紧的,忽略电机的惯性和摩擦力,定义滑模面和李亚普诺夫函数如下

$$S = [s_1 \quad \cdots \quad s_6]^T = \dot{X}_p - \dot{X}_d + \Lambda(X_p - X_d) \quad (11)$$

$$V = \frac{1}{2} S^T S \quad (12)$$

式中, $\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \cdots, \lambda_6)$ 。

式(12)两边求导得

$$\dot{V} = S^T \dot{S} = S^T (\ddot{X}_p - \ddot{X}_d + \Lambda \dot{X}_p) \\ = S^T (M^{-1}(-JT - C + G - D) - \ddot{X}_d + \Lambda \dot{X}_p) \quad (13)$$

式中, $\ddot{X}_p = \ddot{X}_p - \ddot{X}_d$ 。为了使 \dot{V} 为负,反馈控制律为

$$Ju = -M(\ddot{X}_d - \Lambda \dot{X}_p - K \text{sgn}(S)) - C + G \quad (14)$$

式中 $\text{sgn}(S) = [\text{sgn}(s_1) \quad \cdots \quad \text{sgn}(s_6)]^T$, $K = \text{diag}(k_1, \cdots, k_6)$ 。将式(14)代入式(13),得

$$\dot{V} = S^T (-M^{-1}D - K \text{sgn}(S)) \\ \leq \sum_{i=1}^6 |s_i| \left(\sum_{j=1}^6 |(M^{-1})_{ij} (\bar{D}_j - k_i)| \right) \\ = - \sum_{i=1}^6 \eta_i |s_i| \quad (15)$$

式中, $k_i = \sum_{j=1}^6 |(M^{-1})_{ij} \bar{D}_j + \eta_i$, \bar{D} 满足 $|D_i| \leq \bar{D}_i (i=1, \cdots, 6)$ 。在这种情况下, $\dot{V} \leq 0$,系统是全局渐进稳定的。

为了避免颤振,将 $\text{sgn}(\cdot)$ 函数替换为 $\text{sat}(\cdot)$ 函数^[19]

$$\text{sat}\left(\frac{s_i}{\Phi_0}\right) = \begin{cases} \text{sgn}\left(\frac{s_i}{\Phi_0}\right), & |s_i| > \Phi_0 \\ \frac{s_i}{\Phi_0}, & \text{other} \end{cases} \quad (16)$$

此时控制律转化为:

$$Ju = -M\left(\ddot{X}_d - \Lambda \dot{X}_p - K \text{sat}\left(\frac{S}{\Phi_0}\right)\right) - C + G \quad (17)$$

通过设置边界层来减小颤振是以牺牲系统的渐进稳定性为代价的,系统稳态误差不再收敛到 $\mathbf{0}$ ^[20]。但是通过选择合适的 Φ_0 可以将稳态误差控制在一个较小的范围内。

2.2 绳索张力分布

式(17)的通解可以表示为^[15]

$$u = \bar{u} + N(J)h \quad (18)$$

式中 $\bar{u} = J^+ \left\{ -M\left[\ddot{X}_d - \Lambda \dot{X}_p - K \text{sat}\left(\frac{S}{\Phi_0}\right)\right] - C + G \right\}$

表示最小范数解, $J^+ = J^T (J J^T)^{-1}$ 代表矩阵 J 的 Moore-Penrose 广义逆^[21]; $N(J)$ 表示 J 的零空间; h 表示任意的二维向量。

如果没有其他约束, 式(17)的解是无限多的。由于绳索受力的单向性, 以及绳索和电机的负载能力, 绳索张力必须限制在如下范围内:

$$u_{\min} \leq u \leq u_{\max} \quad (19)$$

式中, $u_{\min} > 0$, 是为了防止绳索松弛而设定的最小绳索张力; u_{\max} 表示所允许的最大绳索张力, 是由绳索和电机的最大负载决定的。

在式(17)的所有解中, 满足绳索张力限制的称为可行解。张力分布优化的目的是寻求一组最优张力分布, 在保证控制精度的前提下达到特定目标。当可行解存在时, 绳索张力优化问题可描述为

$$\begin{cases} \text{find} & u \\ \text{min} & \|u_{\text{des}} - u\|_2 \\ \text{s. t.} & Ju = W \\ & u_{\min} \leq u \leq u_{\max} \end{cases} \quad (20)$$

式中, u_{des} 表示绳索张力的目标值, 取为

$$u_{i, \text{des}} = \frac{u_{i, \min} + u_{i, \max}}{2}, i = 1, \dots, 8.$$

由于 u_{des} 处于绳索张力限制的中心, 最优解远离边界值, 因此这样得到的结果是“安全”的。

当可行解不存在时, 绳索张力必须位于限制范围内, 且要保证控制精度最高。此时张力分布问题转化为

$$\begin{cases} \text{find} & u_2 \\ \text{min} & \|u_1 - u_2\|_2 \\ \text{s. t.} & Ju_1 = W \\ & u_{\min} \leq u_2 \leq u_{\max} \end{cases} \quad (21)$$

如果采用凸优化的方法求解以上问题, 必须首先判断可行解的存在, 然后针对不同的情况分别计算初始迭代点, 计算量非常大。从几何角度, 式(20)中的约束条件可以看作由超立方体和仿射空间的交集构成的一个凸多面体。

$$u \in \mathcal{C} : \mathcal{C} = \mathcal{G} \cap \mathcal{A} \quad (22)$$

式中, 集合 \mathcal{A} 是二维仿射集,

$$\mathcal{A} = \{u \mid u = \bar{u} + N(J)h; h \in R^2\} \quad (23)$$

集合 \mathcal{G} 是 R^8 中的超立方体,

$$\mathcal{G} = \{u \mid u_{i, \min} \leq u_i \leq u_{i, \max}\}, i = 1, \dots, 8 \quad (24)$$

式(20)实质上是求集合 \mathcal{C} 上距离 u_{des} 距离最近的点; 式(21)是求 \mathcal{G} 到 \mathcal{A} 上距离最近的点。通过交互投影法中的 Dykstra 算法可以同时解决这两个问题。Dykstra 算法可表示为^[22]

$$z^{k+1} = y^k + t^{k, i(k)} \quad (25)$$

$$y^{k+1} = P_{i(k)}(z^{k+1}) \quad (26)$$

$$t^{k+1, i} = \begin{cases} z^{k+1} - y^{k+1}, & \text{if } i = i(k) \\ t^{k, i}, & \text{if } i \neq i(k) \end{cases} \quad (27)$$

式中, k 表示迭代次数; $i = k \bmod m + 1$, 表示控制序列; y^k 表示第 k 次迭代值, $y^0 = u_{\text{des}}$; $t^{k, i(k)}$ 是辅助矢量, $t^{0, i} = 0$ 。当 $\mathcal{C} \neq \emptyset$ 时, 该算法在 \mathcal{A} 和 \mathcal{G} 上的投影收敛到同一点, 也就是集合 \mathcal{C} 上距离 u_{des} 距离最近的点; 当 $\mathcal{C} = \emptyset$ 时, 该算法在 \mathcal{A} 和 \mathcal{G} 上的投影分别收敛到不同的点, 即 \mathcal{G} 和 \mathcal{A} 之间距离最近的点^[23]。矢量 z 在 \mathcal{A} 和 \mathcal{G} 上的投影分别为

$$P_A(z) = \bar{u} + (I - J^+ J)z$$

$$P_G(z) = [\bar{z}_1 \ \dots \ \bar{z}_n]^T$$

$$\bar{z}_i = \begin{cases} u_{i, \min} & z_i \leq u_{i, \min} \\ z_i & u_{i, \min} \leq z_i \leq u_{i, \max} \\ u_{i, \max} & z_i \geq u_{i, \max} \end{cases}$$

不论对于哪种情况, Dykstra 算法在同一集合上的投影子序列一定收敛于一个点^[24]。据此设计中止法则为

$$\|x^k - x^{k-2}\| + \|x^{k-1} - x^{k-3}\| \leq \varepsilon \quad (k \geq 3) \quad (28)$$

式中 ε 为预先设定的容忍度。通过 Dykstra 算法计算绳索张力分布的流程如图 3 所示。

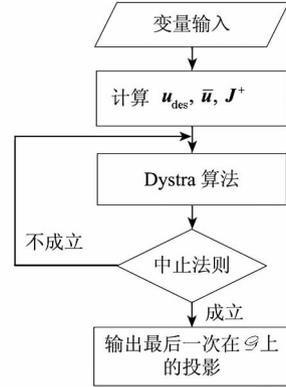


图 3 张力分布计算流程

Fig. 3 Calculation process of tension distribution

2.3 参数测量与辨识

本文所提出的控制方法需要测量负载的惯性参数、负载相对基座的位姿、被补给船相对基座的位姿以及基座的加速度和角速度。在海上实际应用中, 被补给船相对基座的位姿可以通过视觉测量获得^[6]。负载和基座之间通过绳索相连, 如果不考虑绳索变形, 这种连接构成了一套 3D 绳索测量系统。利用编码器测量绳索长度, 然后可以据此解算出负载相对基座的位姿^[25]。负载的惯性参数, 包括负载的质量、质心位置和惯性矩阵, 很难直接测量, 只能通过参数辨识的方法获得。

当负载质心未知时, \mathcal{D} 的原点 O_p 设置为固

定在负载上的某点。用 r 表示质心相对于 O_p 的位置,负载的动力学方程为

$$\begin{bmatrix} m(\ddot{x}_p + \dot{\omega}_p \times r + \omega_p \times (\omega_p \times r)) - G_l - F_e \\ I' \dot{\omega}_p + \omega_p \times I' \omega_p + m r \times \ddot{x}_p - r \times G_l - M_e \end{bmatrix} = -J u \quad (29)$$

$$-\begin{bmatrix} R_B^P & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & E_{3 \times 3} \end{bmatrix} J T = \begin{bmatrix} \ddot{x}_{PN}^P - R_{Bg}^P & [\dot{\omega}_{PN}^P \times] + [\omega_{PN}^P \times][\omega_{PN}^P \times] & 0 \\ 0 & [(R_{Bg}^P - \ddot{x}_{PN}^P) \times] & [\cdot \dot{\omega}_{PN}^P] + [\omega_{PN}^P \times][\cdot \omega_{PN}^P] \end{bmatrix} Q + \rho \quad (31)$$

式中,

$$[\cdot \omega] = \begin{bmatrix} \omega_x & \omega_y & \omega_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_x & 0 & \omega_y & \omega_z & 0 \\ 0 & 0 & \omega_x & 0 & \omega_y & \omega_z \end{bmatrix},$$

$$\rho = \begin{bmatrix} R_B^P (E_{3 \times 3} - R_N^B) G_l - F_e^P \\ (R_B^P (E_{3 \times 3} - R_N^B) G_l) \times r - M_e^P \end{bmatrix}$$

为不可测噪声。由于 R_N^B 是周期变化的,且 F_e^P 和 M_e^P 具有一定的随机性,因此 ρ 可以看作零均值随机噪声。

将式(31)简写为

$$Y = A Q + \rho \quad (32)$$

利用最小二乘法求解式(32)可得到惯性参数的估计值

$$\hat{Q} = (A^T A)^{-1} A^T Y \quad (33)$$

在得到负载相对于 O_p 的惯性矩阵 I' 的估计值后,其相对于质心的惯性矩阵 I 可以根据平行轴定理计算出来。

$$\hat{I} = \hat{I}' - \hat{m}(\hat{r}^T \hat{r} E_{3 \times 3} - \hat{r} \hat{r}^T) \quad (34)$$

因此,通过该方法可以辨识出负载质量、质心位置以及相对于质心的惯性矩阵等惯性参数。有了这些参数就可以利用本文提出的鲁棒控制方法对负载进行波浪补偿控制。

惯性参数辨识的流程如图4所示。首先设计合理的激励路径。在参数辨识的过程中,激励路径对辨识精度的影响很大,不同类型的参数需要不同的激励路径。本文要辨识的是惯性参数,激励路径选择高动态运动,以突出惯性现象^[26]。在实际工作过程中,每件货物的补给都包括起升和下放两个阶段。其中只有下放阶段需要进行波浪补偿和精确控制,因此可以在起升阶段使货物沿设定的激励路径运动,并完成参数辨识。

由于每个参数的可辨识性不同,并且激励路径的选取对参数辨识的影响较大,因此将辨识结果用于控制之前必须验证有效性^[27]。根据式(33)得到惯性参数的估计值之后,求出 Y 的估计值

式中, I' 表示负载相对于 O_p 的惯性矩阵, x_p 和 ω_p 分别表示 \mathcal{D} 相对于 N 的位置和角速度。

用 Q 表示待辨识的量,我们有

$$Q = [m \ m r_x \ m r_y \ m r_z \ I'_{xx} \ I'_{xy} \ I'_{xz} \ I'_{yy} \ I'_{yz} \ I'_{zz}]^T \quad (30)$$

将式(29)在 \mathcal{D} 系中展开,可得

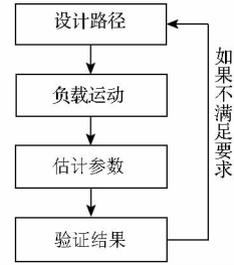


图4 惯性参数辨识的流程

Fig. 4 Process of inertial parameters identification

$$\hat{Y} = A \hat{Q} \quad (35)$$

通过比较 Y 与 \hat{Y} 之间的偏差,并设定合理的阈值,可以判断辨识结果是否有效。

3 仿真与分析

为了验证本文理论与方法的有效性,利用 MATLAB 和 ADAMS 软件对波浪补偿系统进行联合仿真。首先在 ADAMS 中建立绳牵引并联机构的动力学模型,并通过 ADAMS/Controls 将模型转化为 SIMULINK 中的模块。将本文提出的方法编写为 S 函数,并且与上述模块组成完整的联合仿真模型。在 ADAMS 中设置船舶运动以及货物的受力,用来模拟海洋环境。仿真模型的整体结构如图5所示。

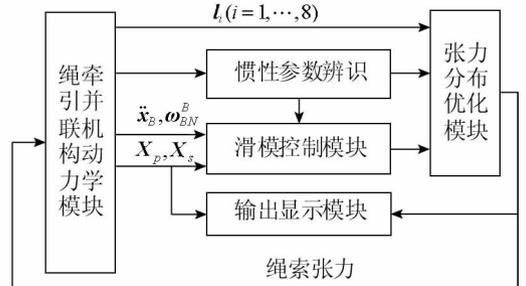


图5 仿真模型结构

Fig. 5 Structure of the simulation model

仿真模型中绳牵引并联机构选用图2所示的结构,基座为十字形的板,轮廓尺寸为 $8\text{m} \times 1\text{m} \times 0.5\text{m}$;货物为长方体,轮廓尺寸为 $5.898\text{m} \times 2.352\text{m} \times 2.391\text{m}$ 。货物和被补给船相对于基座

的初始位置分别为: $(0, -6, 0)$ m 和 $(0, -11.4, 0)$ m。基座的运动轨迹为 $(0.1, 0.1, 0.3, 0.005, 0.01, 0.005)^T \sin 0.5t$, 被补给船为 $(0.2, 0.2, 0.5, 0.05, 0.1, 0.03)^T \sin 0.8t$, 其中位移和角位移的单位分别为 m 和 rad。绳索张力限制范围为 $[100, 10^6]$ N。利用 MATLAB 模拟生成海风对负载的随机干扰力, 方向沿 x_N 作用于负载质心, 风力最大值为 1000N。

首先进行惯性参数辨识的仿真, 根据表 1 设置 ADAMS 模型中的负载惯性参数。为了使激励路径能够包含各个自由度的动态运动, 在参数辨识过程中, 设定仿真模型的绳索张力按照图 6 所示的曲线变化。此时, 负载相对基座的位移沿各个自由度的分量如图 7 所示。设置采样周期为 0.001s, 然后开始仿真, 记录仿真数据, 并使用本文提出的辨识方法对惯性参数进行辨识。辨识结果见表 1 第 2 行, 通过比较真实值与辨识值可以看出, 该方法能够在不可测噪声存在的情况下得到较精确的参数估计值, 大部分参数辨识误差不超过 10%, 只有 I'_{xz} 的辨识性较差, 误差约为 20%。

然后进行控制仿真, 为了验证控制方法的有效性, 将此方法与传统的计算力矩方法进行比较。其中计算力矩法的控制律为:

$$\mathbf{J}u = -\mathbf{M}(\ddot{\mathbf{X}}_d - \mathbf{K}_p \tilde{\mathbf{X}}_p - \mathbf{K}_d \dot{\tilde{\mathbf{X}}}_p) - \mathbf{C} + \mathbf{G} \quad (36)$$

使用惯性参数的真实值进行控制仿真, 通过

多次仿真实验得到最优控制参数为

$$\Phi_0 = 0.001$$

$$\mathbf{A} = \text{diag}(10, 10, 20, 10, 20, 10)$$

$$\mathbf{K} = \text{diag}(0.3, 0.3, 0.5, 0.3, 0.5, 0.3)$$

$$\mathbf{K}_p = \text{diag}(2000, 2000, 2000, 2000, 2000, 5000)$$

$$\mathbf{K}_d = \text{diag}(200, 200, 200, 100, 200, 500)$$

在仿真过程中分别使用滑模控制和计算力矩控制, 得到负载的实际运动轨迹与目标轨迹的位置误差 e_d 和姿态误差 e_o , 如图 8 所示。由图 8(a) 可以看出, 滑模控制进入边界层后, 3 个方向的位置误差都小于 2.5×10^{-5} m, 姿态误差小于 6×10^{-5} rad, 说明该方法对环境作用力和不可测参数的干扰不敏感, 控制精度比较高。由图 8(b) 可以看出, 这种条件下计算力矩控制的误差与滑模控制差别不大, 说明当采用较大增益时, 计算力矩控制对环境作用力等外界干扰也具有一定鲁棒性。使用滑模控制时各绳索张力变化 $u_i (i = 1 \cdots 8)$ 如图 9 所示。通过分析绳索张力曲线可知, 负载的位置和姿态在开始阶段产生较大误差的主要原因在于绳索张力的限制。此时张力分布没有可行解, 如果采用凸规划方法, 控制器将无法计算绳索张力, 控制过程会中断。本文的张力分布算法避免了控制中断的发生, 在可行解不存在的情况下也能保证尽可能高的控制精度。

表 1 仿真模型惯性参数的真实值与估计值

Tab. 1 Real and estimated values of inertial parameters of simulation model

	m (kg)	I'_{xx}	I'_{yy}	I'_{zz}	I'_{xy}	I'_{xz}	I'_{yz}	r_x (m)	r_y (m)	r_z (m)
真实值	25 800	87 451	24 770	87 849	258	258	258	0.1	0.1	0.1
辨识值	26 339	88 310	24 824	88 759	230	311	274	0.1	0.1	0.1

注: 未标注的单位均为 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$

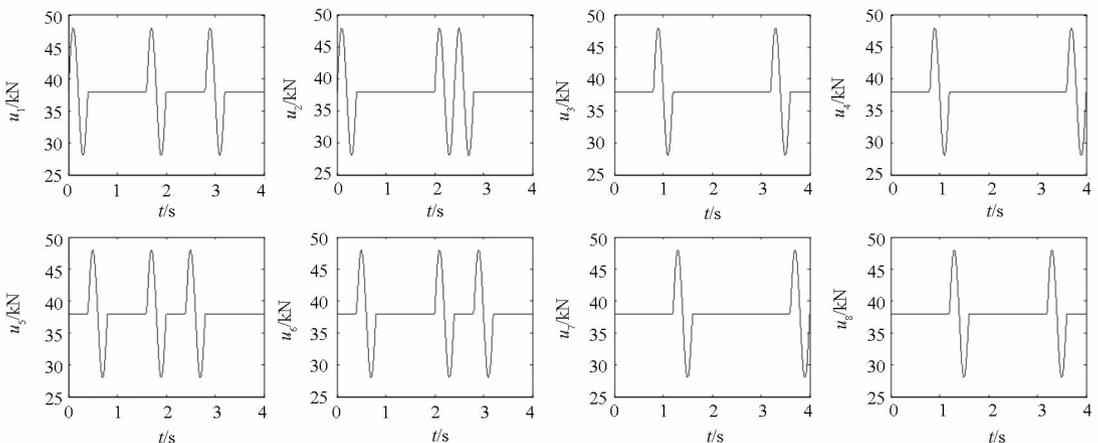


图 6 参数辨识过程中绳索张力变化

Fig. 6 Variations of cable tensions in parameter identification process

为了进一步验证控制方法的鲁棒性, 使用惯

性参数的估计值进行仿真, 结果如图 10 所示。可

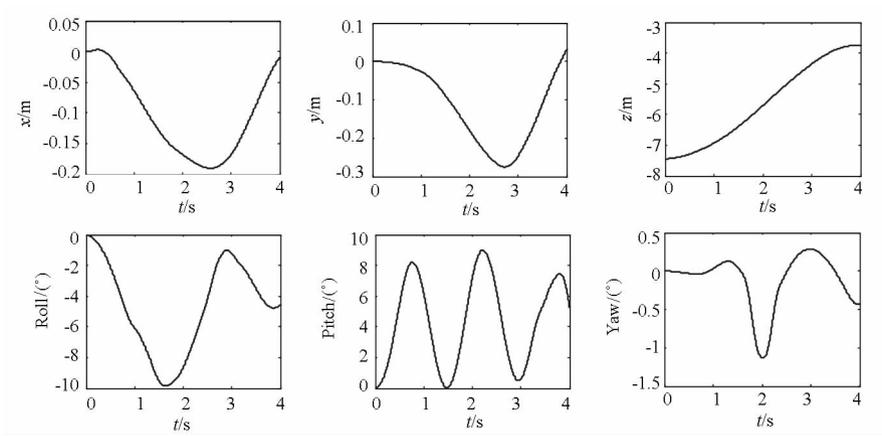
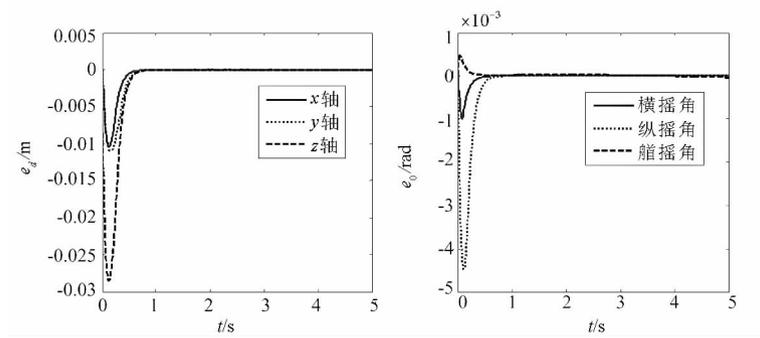
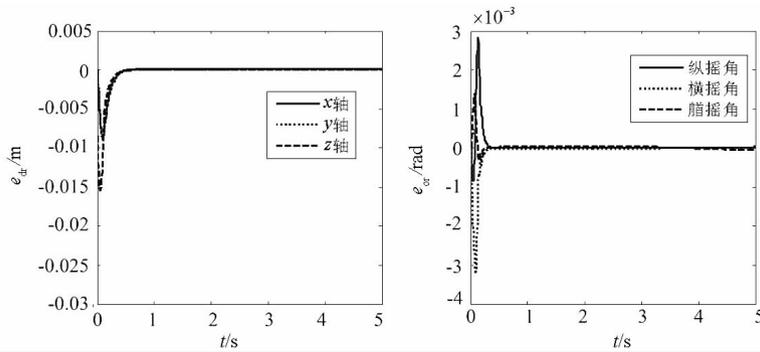


图7 参数辨识过程中负载的轨迹

Fig.7 Trajectories of the payloads in parameter identification process



(a)滑模控制



(b)计算力矩控制

图8 使用惯性参数真实值的控制误差

Fig.8 Control errors with real values of inertial parameters

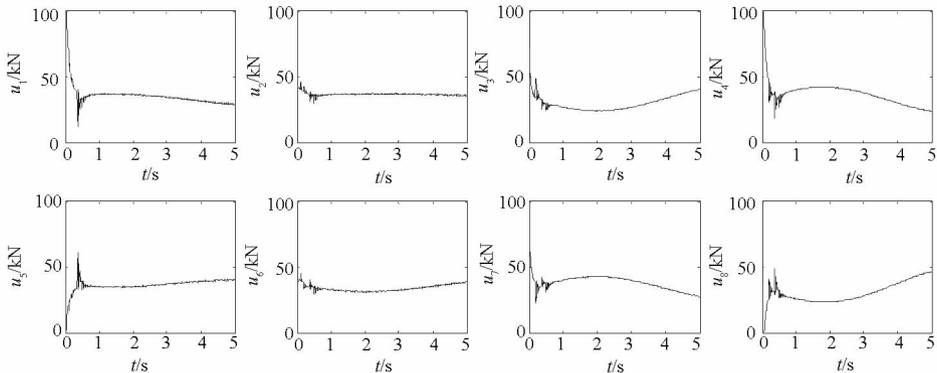


图9 滑模控制的各绳索张力

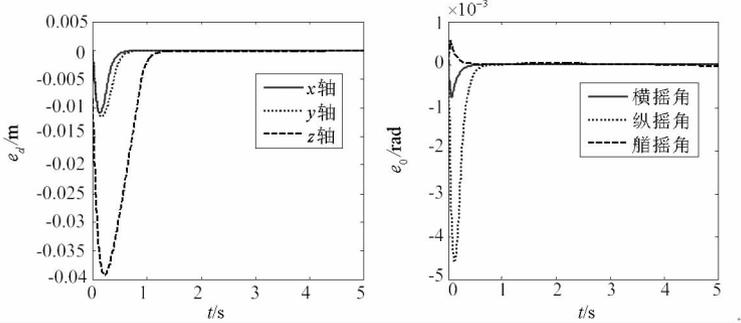
Fig.9 Cable tensions in sliding mode control

以看出,当惯性参数存在误差时,滑模控制只有进入边界层前的 y 轴位置误差及其调整时间有所增

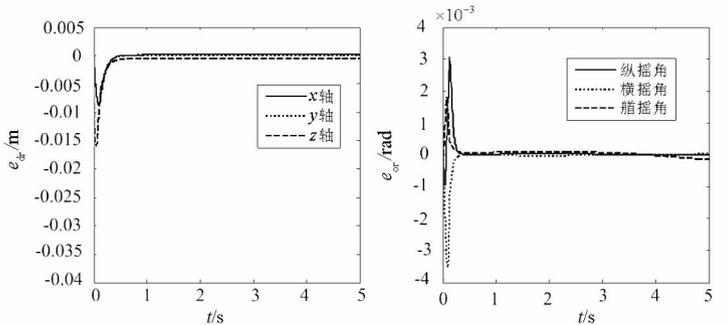
加,进入边界层后的控制误差基本不变,而计算力矩控制出现了较大的控制误差。说明计算力矩控

制对惯性参数的不确定性比较敏感,而滑模控制方法对惯性参数误差的鲁棒性比较强,能够达到更高的精度。图 11 所示为 $\Phi_0 = 0.001$, $\Phi_0 = 0.00075$ 和 $\Phi_0 = 0.0005$ 对应的滑态位置误差。在一定范围内, Φ_0 越小控制精度越高。然而如果 Φ_0 太小,控制状态将在滑模区间附近抖动,控制

精度反而降低。另外,由图 9 可以看出,进入滑模区间后,各绳索张力都在限制范围中心变化,说明了本文提出的绳索张力优化算法是“安全的”。在整个控制过程中,每一步控制算法平均执行时间为 0.6ms,满足实时控制的要求。



(a)滑模控制



(b)计算力矩控制

图 10 使用惯性参数估计值的控制误差

Fig. 10 Control errors with estimated values of inertial parameters

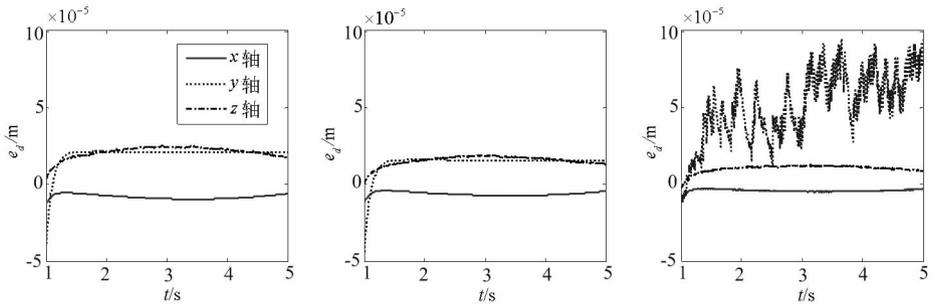


图 11 不同 Φ_0 值对应的位置误差

Fig. 11 Position errors of different Φ_0

4 结论

针对基于绳牵引并联机构的波浪补偿系统,提出了一种鲁棒控制方法。该方法包含滑模控制律和张力分布算法,能够在具有不可测参数和环境干扰的情况下达到较高的控制精度。但是由于绳索张力限制,当干扰非常大时,控制精度会受到影响。基于交互投影的绳索张力分布算法在可行解存在的情况下能够得到连续、“安全”的最优张力分布。当可行解不存在时,该算法能得到最佳

近似解,以保证系统具有尽量高的控制精度。该方法需要知道负载的惯性参数,这些参数在实际应用中可以通过辨识来获得。

参考文献 (References)

[1] Dagalakis N G, Albus J S, Wang B L, et al. Stiffness study of a parallel link robot crane for shipbuilding applications [J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1989, 111(3): 183 - 193.

[2] Alp A B, Agrawal S K. Cable suspended robots: feedback controllers with positive inputs [C] // Proceedings of the 2002

- American Control Conference, Anchorage, AK, 2002.
- [3] 杜敬利, 保宏. 索支撑系统的动力学分析与跟踪控制[J]. 振动工程学报, 2009, 22(4): 335-339.
DU Jingli, BAO Hong. Dynamic analysis and tracking control of cable supporting structure [J]. Journal of Vibration Engineering, 2009, 22(4): 335-339. (in Chinese)
- [4] Zi B, Zhu Z C, Du J L. Analysis and control of the cable-supporting system including actuator dynamics [J]. Control Engineering Practice, 2011, 19(5): 491-501.
- [5] Usher K, Winstanley G, Corke P, et al. Air vehicle simulator; an application for a cable array robot [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ: IEEE, 2005: 2241-2246.
- [6] Schulz W E, Musatow M, Jiang C, et al. Skin-to-skin replenishment [C]//Proceedings of the ASNE Symposium on Expeditionary Force Projection, 2008.
- [7] Lamaury J, Gouttfarde M. Control of a large redundantly actuated cable - suspended parallel robot [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ: IEEE, 2013: 4659-4664.
- [8] Zarebidoki M, Lotfavar A, Fahham H R. Effectiveness of adaptive passivity-based trajectory tracking control of a cable-suspended robot [C]//Proceedings of the International Conference on Trends in Mechanical and Industrial Engineering, 2011.
- [9] Zi B, Duan B Y, Du J L, et al. Dynamic modeling and active control of a cable suspended parallel robot [J]. Mechatronics, 2008, 18(1): 1-12.
- [10] Laroche E, Chellal R, Cuvillon L, et al. A preliminary study for H_∞ control of parallel cable - driven manipulators [M]//Bruckmann T, Pott A. Cable - Driven Parallel Robots. Berlin: Springer, 2013: 353-369.
- [11] 刘欣, 仇原鹰, 盛英. 绳牵引并联机器人工作空间的判定条件与解析表达 [J]. 机械工程学报, 2011, 47(3): 28-35.
LIU Xin, QIU Yuanying, SHENG Ying. Criteria conditions and analytic expression of workspace of wire - driven parallel manipulators [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(3): 28-35. (in Chinese)
- [12] Borgstrom P H, Jordan B L, Sukhatme G S, et al. Rapid computation of optimally safe tension distributions for parallel cable - driven robots [J]. IEEE Transaction on Robotics, 2009, 25(6): 1271-1281.
- [13] Bruckmann T, Pott A, Hiller M. Calculating force distributions for redundantly actuated tendon-based Stewart platforms [M]//Lenarcic J, Roth B. Advances in Robot Kinematics. Netherlands: Springer, 2006: 403-412.
- [14] Mikelsons L, Bruckmann T, Hiller M, et al. A real-time capable force calculation algorithm for redundant tendon - based parallel manipulators [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ: IEEE, 2008: 3869-3874.
- [15] Lamaury J, Gouttfarde M. A tension distribution method with improved computational efficiency [M]//Bruckmann T, Pott A. Cable-Driven Parallel Robots. Berlin: Springer, 2013: 71-85.
- [16] Guo H B, Li H R. Dynamic analysis and simulation of a six degree of freedom Stewart platform manipulator [J]. Proceedings of IMechE, Part C, Journal of Mechanical Engineering Science, 2006, 220: 61-72.
- [17] Ting Y, Chen Y S, Jar H C. Modelling and control for a gough-stewart platform CNC machine [J]. Journal of Robotic Systems, 2004, 21(11): 609-623.
- [18] Liu M J, Li C X, Li C N. Dynamics analysis of the gough-stewart platform manipulator [J]. IEEE Transaction on Robotics and Automation, 2000, 16(1): 94-98.
- [19] 李安梁, 蔡洪, 白锡斌. 浮球式惯导平台的自适应模糊滑模稳定控制 [J]. 国防科技大学学报, 2013, 35(6): 41-45.
LI Anliang, CAI Hong, BAI Xibin. Adaptive fuzzy sliding mode stabilization control for floated inertia platform [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2013, 35(6): 41-45. (in Chinese)
- [20] Lewis F L, Dawson D M, Abdallah C T. Robot manipulator control theory and practice [M]. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, Inc. 2004.
- [21] 吴宇列, 吴学忠, 李圣怡. 冗余并联机构的 PD 控制 [J]. 国防科技大学学报, 2001, 23(3): 111-114.
WU Yulie, WU Xuezhong, LI Shengyi. PD control of redundant parallel manipulators [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2001, 23(3): 111-114. (in Chinese)
- [22] Censor Y. Computational acceleration of projection algorithms for the linear best approximation problem [J]. Linear Algebra and its Applications, 2006, 416(1): 111-123.
- [23] Hassan M, Khajepour A. Analysis of bounded cable tensions in cable-actuated parallel manipulators [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2011, 27(5): 891-900.
- [24] Birgin E G, Raydan M. Robust stopping criteria for Dykstra's algorithm [J]. SIAM Journal on Scientific Computing, 2005, 26(4): 1405-1414.
- [25] Williams II R L, Albus J S, Bostelman R V. 3D cable-based cartesian metrology system [J]. Journal of Robotic Systems, 2004, 21(5): 237-257.
- [26] Vivas A, Poignet P, Marquet F, et al. Experimental dynamic identification of a fully parallel robot [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics & Automation. Piscataway, NJ: IEEE, 2003.
- [27] Khalil W, Dombre E. Modeling, identification and control of robots [M]. London: Hermes Penton Science, 2002.