

控制与决策

Control and Decision

基于RBF神经网络补偿的一种绳牵引并联机器人 支撑系统的力/位混合控制

王宇奇, 林麒, 王晓光, 周凡桂, 刘骏

引用本文:

王宇奇, 林麒, 王晓光, 等. 基于RBF神经网络补偿的一种绳牵引并联机器人 支撑系统的力/位混合控制[J]. 控制与决策, 2020, 35(3): 536–546.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0843>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

新型仿生水下水子母机器人系统设计

Design of a novel biomimetic underwater mother-son robot system

控制与决策. 2019, 34(5): 1004–1010 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.1455>

一种基于Dyna-Q学习的旋翼无人机 视觉伺服智能控制方法

A visual servo intelligent control method for rotor UAV based on Dyna-Q learning

控制与决策. 2019, 34(12): 2517–2526 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0342>

基于雅可比预测的机器人无模型视觉伺服定位控制

Jacobian prediction-based for robot model-free visual servoing positioning control

控制与决策. 2018, 33(10): 1813–1819 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0717>

状态观测的未知死区非线性系统的自适应神经网络跟踪控制

Observed-based adaptive neural tracking control for nonlinear systems with unknown dead-zone

控制与决策. 2017, 32(5): 780–788 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.0445>

基于预测控制的时滞多机器人编队脉冲控制

Impulsive control for multi-robot formation with communication delay based on predictive control

控制与决策. 2016, 31(8): 1453–1460 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.0564>

增强耦合的TORA系统镇定控制方法设计

Enhanced coupling stabilization controller design for TORA systems

控制与决策. 2015(6): 1039–1043 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.0631>

基于PNDS的欠驱动AUV编队控制器设计

Formation controller design based on PNDS for underactuated AUV

控制与决策. 2015, 30(12): 2241–2246 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.1157>

独轮机器人的建模与自抗扰控制算法

Modeling and active disturbance rejection control algorithm of single wheel robot

控制与决策. 2015, 30(12): 2253–2258 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.1123>

基于RBF神经网络补偿的一种绳牵引并联机器人 支撑系统的力/位混合控制

王宇奇, 林 麒[†], 王晓光, 周凡桂, 刘 骏

(厦门大学 航空航天学院, 福建 厦门 361005)

摘 要: 为了保证用于风洞试验的绳牵引并联机器人支撑系统(wire-driven parallel robot support system, WDPRSS)的末端执行精度,设计一种采用Hamilton-Jacobi Inequality(HJI)定理并基于RBF神经网络补偿的力/位混合控制.通过对WDPRSS的动力学建模分析,选择以位姿作为变量建立WDPRSS的整体动力学方程,将所设计的力/位混合控制代入到整体动力学方程中得到误差闭环系统,对闭环系统进行稳定性分析,结果表明WDPRSS是趋于渐近稳定特性的.对八绳牵引的并联机器人支撑系统进行Matlab/Simulink仿真实验,仿真结果表明所设计的力/位混合控制是正确有效的,满足控制精度要求,并将所设计的力/位混合控制与PD控制进行对比分析.最后,通过样机实验验证所提出控制方案的有效性.

关键词: WDPRSS; 动力学; HJI定理; RBF神经网络补偿; 力/位混合控制

中图分类号: TP24 **文献标志码:** A

Force/position hybrid control for a wire-driven parallel robot support system based on RBF neural network compensation

WANG Yu-qi, LIN Qi[†], WANG Xiao-guang, ZHOU Fan-gui, LIU Jun

(School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: In order to guarantee the precision of the end effector of a wire-driven parallel robot support system (WDPRSS) used in a wind tunnel test, a force/position hybrid control is proposed based on the Hamilton-Jacobi Inequality (HJI) theorem and RBF neural network compensation. Through dynamic modeling analysis of the WDPRSS, the whole dynamic equation of the WDPRSS is established using the pose as the variable. The proposed force/position hybrid control is substituted into the dynamic equation to obtain the error closed-loop system. The stability analysis of the closed-loop system shows that the WDPRSS tends to be asymptotic stable. A MATLAB/SIMULINK simulation experiment of the WDPRSS is conducted. The simulation results show that the proposed force/position hybrid control strategy is correct and valid, and satisfies control accuracy requirement. And the designed force/position hybrid control and PD control are compared and analyzed. Finally, the effectiveness of the proposed control scheme is verified by prototype experiments.

Keywords: WDPRSS; dynamics; HJI theorem; RBFNN compensation; force/position hybrid control

0 引 言

绳牵引并联机器人支撑系统(WDPRSS)作为机器人中的一种重要形式,在航空、工业、军事等领域起着极其重要的作用^[1-2],尤其在风洞试验中的应用对空气动力学的研究以及新型飞行器的研制和开发有着积极的推动作用^[3-4].随着绳牵引并联机器人技术的提高以及应用领域的扩展延伸,研究人员对其工作的可靠性及控制精度的要求越来越高,因此,提高WDPRSS工作的可靠性及控制精度是本文研究的主

要内容.

WDPRSS在运行过程中,末端执行器(飞机模型)与牵引绳、外界环境之间会产生力的相互作用,即动态耦合.为了使末端执行器能够精确地完成运动轨迹,需要同时对末端执行器进行位姿的控制以及力的控制(即力/位混合控制).基本的力/位混合控制方案最初是由Craig等^[5]于1979年提出的.此后,许多研究人员提出并探索了新的混合控制策略.Vikas等^[6]针对机器人手臂,基于二次优化和滑模方法,提出了

收稿日期: 2018-06-20; 修回日期: 2018-09-26.

基金项目: 国家自然科学基金项目(11472234, 11072207, 11702232).

责任编辑: 易建强.

[†]通讯作者. E-mail: qilin@xmu.edu.cn.

一种力/位混合控制, 仿真结果实现了对椭圆平面约束面的跟踪; Wen等^[7]针对移动机器人, 基于Elman模糊神经网络提出了一种力/位混合控制的在线学习方法, 仿真实例验证了所提出方法的有效性; Yiannis等^[8]针对机械手提出了一种基于神经网络自适应控制的力/位混合跟踪策略, 仿真结果突出了该方案的有效性; Li等^[9]针对约束的可重构机器人, 提出了一种基于自适应神经网络的力/位混合控制, 并通过仿真对该方法的有效性进行了研究; Kazuo等^[10]针对集合未知的机器人, 采用基于模糊神经网络的力/位混合控制, 实现了对未知对象的约束面的方向搜索。

对以上研究进行综合分析发现, 针对多自由度的、以绳为介质的非线性并联机器人基本没有相关力/位混合控制的研究。鉴于此, 本文参考研究人员的设计理论, 针对W DPRSS的任务和性质特点, 提出一种适合W DPRSS的新的力/位混合控制策略。在实际机器人系统中, 对于复杂的多自由度运动, 被控对象(末端执行器)通常都伴随着各种各样的不确定性以及动态耦合, 且由于绳的柔性特征所产生的力的变化也会影响到运动轨迹。因此, 采用传统单一的位置控制或者力控制已经不能满足风洞试验时末端执行器的运动控制精度, 而且传统的力/位混合控制中的力控制环并不适合所研究的W DPRSS。本文的创新点在于根据W DPRSS的任务性质和工作特点, 采用RBF神经网络补偿不确定性以及动态耦合, 并根据HJI定理设计一个新的力反馈控制律。将所设计的力反馈控制律融入到力控制环中, 综合力反馈型阻抗控制与力/位混合控制的优点, 提出一种新的力/位混合控制对W DPRSS进行研究分析。最后, 通过样机实验验证了所提出控制方案的有效性。

1 W DPRSS的动力学

1.1 W DPRSS的描述及动力学建模分析

以用于风洞试验的W DPRSS作为研究对象。W DPRSS的主要构件有: 机架、动平台(飞机模型)、万向滑轮、滚珠丝杠、控制柜和上位机等。风洞试验时, 动平台上的末端执行器(飞机模型)由8根绳进行牵引, 通过绳长的变化, 其位姿能够实现3个平动和3个转动六自由度的灵活变化, 绳系结构如图1所示。

8根牵引绳的运动相对独立, 有独立的运动牵引单元, 因此W DPRSS有8套电机和8套滚珠丝杠牵引组件, 结构原理如图2所示。

为了设计合适的力/位混合控制策略, 进一步提高W DPRSS在风洞试验中的控制精度, 首先要对

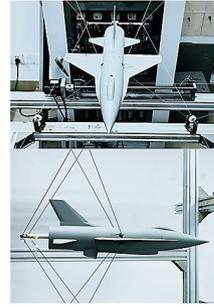


图1 飞机模型绳系结构

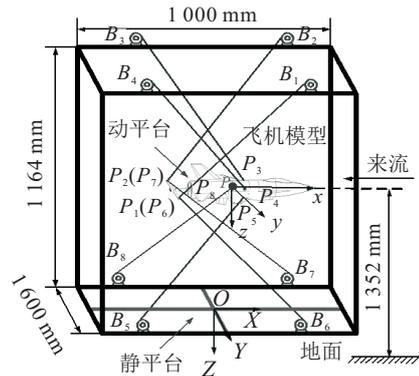


图2 W DPRSS的结构原理

W DPRSS的动力学进行研究分析。W DPRSS的动力学是研究并联机器人运动和作用力之间的关系, 其主要目的是进行运动控制的设计, 以实现并联机器人末端执行器的特定运动, 达到最优控制目标或更好的动态性能。W DPRSS的动力学分析对并联机器人支撑系统的动态特性、系统控制、运动精度等方面的研究具有重要意义。由于W DPRSS主要有动平台(末端执行器)以及驱动系统(电机、驱动器、滚珠丝杠、滑块等)两大模块, 且动平台(末端执行器)的动力学建模是运动控制设计的基础, 主要针对这两个模块进行动力学建模。驱动系统与动平台(末端执行器)的动力学模型^[11]为

$$M_0 \ddot{\theta}_m + C_0 \dot{\theta}_m + \mu T = \tau, \quad (1)$$

$$M(X) \ddot{X} + N(X, \dot{X}) - w_g - w_e = -J^T T. \quad (2)$$

其中: M_0 为等效到驱动器的惯性矩阵; θ_m 为伺服电机的转角矢量; C_0 为等效到驱动器的粘性摩擦系数矩阵; μ 为滚珠丝杠的传动系数; T 为绳拉力矢量; τ 为驱动器的输出力矩向量; $M(X)$ 为末端执行器的惯性矩阵; $X = (X_P, Y_P, Z_P, \phi, \theta, \psi)^T$ 为末端执行器的实际位姿, $(X_P, Y_P, Z_P)^T$ 为相对于静平台的P点的坐标, $(\phi, \theta, \psi)^T$ 为末端执行器的姿态角, ϕ 、 θ 和 ψ 分别为末端执行器的滚转角、俯仰角和偏航角; $N(X, \dot{X})$ 为非线性哥氏离心力矩阵; J 为8行6列的雅可比矩阵; w_g 为末端执行器的重力向量, m 为末端执行器的质量, g 为重力加速度; w_e 为末端执行器所

受外界的空气动力载荷, $w_e = [f_e; \tau_e]$, f_e 和 τ_e 分别为作用在末端执行器上的空气动力和动力矩, 如果在风速为0的条件下进行动力学研究分析, 则 $w_e = 0$; 且有

$$M(\mathbf{X}) = \begin{bmatrix} (mI)_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & A_{G3 \times 3} H \end{bmatrix},$$

$$N(\mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}}) = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 1} \\ A_G \dot{H} \dot{Q} + (H \dot{Q}) \times (A_G H \dot{Q}) \end{bmatrix}_{6 \times 1},$$

$$H = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \cos \theta \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ -\sin \theta & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \dot{Q} = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix},$$

A_G 为末端执行器关于重心的惯性矩阵, \dot{Q} 为姿态角速度矢量.

1.2 W DPRSS 的动力学方程(X-变量)

绳长 L 、位姿 \mathbf{X} 、电机转角 θ_m 三者之间存在逻辑关系, 如下所示:

$$\dot{L} = \mu \dot{\theta}_m = JG \dot{\mathbf{X}}, \quad (3)$$

$$\ddot{L} = \mu \ddot{\theta}_m = JG \ddot{\mathbf{X}} + J\dot{G} \dot{\mathbf{X}} + JG \ddot{\mathbf{X}}. \quad (4)$$

将式(3)和(4)化简后, 得到

$$\dot{\mathbf{X}} = \mu G^{-1} J^+ \dot{\theta}_m, \quad (5)$$

$$\ddot{\mathbf{X}} = G^{-1} J^+ (\mu \ddot{\theta}_m - J\dot{G} \dot{\mathbf{X}} - JG \ddot{\mathbf{X}}) = \mu G^{-1} J^+ \ddot{\theta}_m - \mu G^{-1} J^+ \dot{J} J^+ \dot{\theta}_m - \mu G^{-1} \dot{G} G^{-1} J^+ \dot{\theta}_m. \quad (6)$$

其中: $GG^{-1} = I_{6 \times 6}$, $(G^{-1})G = I_{6 \times 6}$, $G = \begin{bmatrix} I_3 \times 3 & 0_3 \times 3 \\ 0_3 \times 3 & H \end{bmatrix}$ 为基于姿态角的转换矩阵.

针对位姿 \mathbf{X} 与电机转角 θ_m 之间的关系, 以末端执行器的位姿 \mathbf{X} 作为变量, 将式(1)代入(2)中, 求得 W DPRSS 的整体动力学方程为

$$M(\mathbf{X}) \ddot{\mathbf{X}} + N(\mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}}) - w_g - w_e = - (1/\mu) J^T (\tau - (1/\mu) C_0 G \dot{\mathbf{X}} - (1/\mu) M_0 (JG \dot{\mathbf{X}} + J\dot{G} \dot{\mathbf{X}} + JG \ddot{\mathbf{X}})). \quad (7)$$

将式(7)化简, 得到以位姿 \mathbf{X} 为变量的整体动力学方程

$$(M(\mathbf{X}) - (1/\mu^2) J^T M_0 JG) \ddot{\mathbf{X}} - (1/\mu^2) (J^T M_0 JG + J^T M_0 J\dot{G} + J^T C_0 JG) \dot{\mathbf{X}} - (1/\mu) J^T \tau + w_g + w_e - N(\mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}}). \quad (8)$$

令

$$A = -\mu (M(\mathbf{X}) - (1/\mu^2) J^T M_0 JG),$$

$$B = (1/\mu) (J^T M_0 JG + J^T M_0 J\dot{G} + J^T C_0 JG),$$

$$C = J^T,$$

$$D = -\mu w_g - \mu w_e + \mu N(\mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}}).$$

将式(8)化简得到

$$A \ddot{\mathbf{X}} + B \dot{\mathbf{X}} = C \tau + D. \quad (9)$$

通过 Matlab 验证得出, 式(9)中的 A 和 B 均为正定矩阵. 根据风洞试验的要求, 末端执行器的位姿需要进行调整, 而末端执行器位姿的调整是通过绳长的变化实现的, 动力学建模及运动控制也与位姿 \mathbf{X} 、电机转角 θ_m 及绳长 L 紧密相关. 由于 W DPRSS 是非线性并联机器人, 并联机器人的逆解容易, 正解困难, 且存在多解的情况, 以位姿 \mathbf{X} 作为动力学方程的变量, 即已知末端执行器的运动规律求解绳长 L 的变化, 动力学分析便会相对简单化.

2 HJI 定理及 RBF 神经网络设计

2.1 HJI 定理

在实际工程应用中, 机器人系统的状态通常不是完全可测量的. 基于机器人系统不确定的非精确模型, 设计绳牵引并联机器人支撑系统的闭环控制误差系统的模型^[12]为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \boldsymbol{\xi}(\mathbf{x}) + \delta(\mathbf{x}) \vartheta(t), \\ \Lambda = G(\mathbf{x}). \end{cases} \quad (10)$$

其中: $\vartheta(t)$ 为外界干扰, Λ 为非线性系统的评判指标. 对于干扰信号 $\vartheta(t)$, 其 L_2 范数为

$$\|\vartheta(t)\|_2 = \left\{ \int_0^\infty \vartheta^T(t) \vartheta(t) dt \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (11)$$

其中 L_2 范数能够衡量 $\vartheta(t)$ 的能量大小.

为了判断绳牵引并联机器人非线性系统的干扰抑制能力, 设定以下性能指标^[13]:

$$\eta = \sup_{\|\vartheta\| \neq 0} \frac{\|A\|_2}{\|\vartheta(t)\|_2}, \quad (12)$$

其中 η 为机器人非线性系统的 L_2 增益, 表示非线性系统鲁棒性的大小, η 越小表明并联机器人系统的鲁棒性越好. 可见, 通过减小并联机器人系统的 L_2 增益可以抑制干扰 $\vartheta(t)$ 对控制误差的影响^[14].

根据文献[15-16]的理论并结合闭环控制误差系统模型, 给出并联机器人系统具有小于或等于一个正数 λ 的 L_2 增益条件.

定理1 (HJI 定理) 存在一个正数 λ , 如果正定且可微函数 $V(\mathbf{x}) \geq 0$ 且

$$\dot{V}(\mathbf{x}) \leq 1/2 \{ \lambda^2 \|\vartheta\|^2 - \|A\|^2 \}, \quad \forall \vartheta, \quad (13)$$

则此时 $\eta \leq \lambda$, 表明并联机器人系统不仅是 BIBO (bounded input bounded output) 稳定的, 而且是渐近稳定的. HJI 定理是判定系统是否是 BIBO 稳定的重

要条件.

2.2 机器人RBF神经网络设计

在工程实践中,要得到实际系统与外界干扰的精确数学模型是基本不可能的,系统模型的不确定性在实际系统中是普遍存在的,如被控对象的模型误差、未知系统参数以及外部干扰等.为解决以上难题,采用RBF神经网络补偿系统模型的不确定性以及绳与末端执行器之间产生的动态耦合效应.RBF神经网络具有很强的非线性拟合能力、鲁棒性、记忆能力和自学习能力等,对非线性系统的补偿具有良好的效果.本文采用3层神经网络结构,如图3所示.

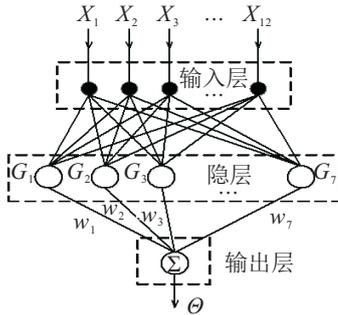


图3 WDRSS的RBF神经网络拓扑结构

图3中,输入为位姿误差和位姿速度误差, $x = [x_1, x_2, \dots, x_{12}]$, 共计12个. 设定网络隐含层的输出是7行1列的列向量 $G = [G_1, G_2, \dots, G_7]$, 隐含层节点中的中心向量是12行7列的矩阵,有

$$\mathfrak{S} = \begin{bmatrix} \mathfrak{S}_{11} & \mathfrak{S}_{12} & \dots & \mathfrak{S}_{1m} \\ \mathfrak{S}_{21} & \mathfrak{S}_{22} & \dots & \mathfrak{S}_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathfrak{S}_{n1} & \mathfrak{S}_{n2} & \dots & \mathfrak{S}_{nm} \end{bmatrix}, n = 12, m = 7.$$

设定网络的权值是7行6列的矩,有

$$W_f = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \dots & w_{16} \\ w_{21} & w_{22} & \dots & w_{26} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{71} & w_{72} & \dots & w_{76} \end{bmatrix},$$

输出是逼近补偿 $\theta = W_f^T G(x)$. 给定一个极小的正数 ∂_0 , 设定模型的不确定性和外界干扰为 $\Upsilon(\cdot)$, 存在一个理想的权值向量 W_f^* , 使RBF逼近补偿 $\hat{\Upsilon}^*(\cdot)$ 且满足 $\max \|\Upsilon(\cdot) - \hat{\Upsilon}^*(\cdot)\| \leq \partial_0$, 其中 $\hat{\Upsilon}^*(\cdot) = W_f^{*T} G(x)$. 定义逼近误差为 $\varkappa = \Upsilon(\cdot) - \hat{\Upsilon}^*(\cdot)$, 设定逼近误差 \varkappa 有界, 即 $\varkappa = \sup \|\Upsilon(\cdot) - \hat{\Upsilon}^*(\cdot)\|$.

3 力/位混合控制设计及稳定性分析

3.1 力/位混合控制设计

为了设计精确的力/位混合控制律,提高风洞试验的控制精度和系统鲁棒性,将HJI理论应用于所设

计的控制律中. 被控对象的动力学方程为式(9). 设定理想的跟踪轨迹(位姿)为 X_d , 定义跟踪误差为 $e = X - X_d$, $\dot{e} = \dot{X} - \dot{X}_d$ 和 $\ddot{e} = \ddot{X} - \ddot{X}_d$, 且 e 、 \dot{e} 和 \ddot{e} 均为6行1列的列向量. 融合文献[13]、[17]和[18]的设计优点,针对WDRSS建立的力/位混合控制原理(图4),设计新的控制为

$$\tau = \gamma_p + \gamma_f, \quad (14)$$

其中非线性并联机器人由位置/速度控制部分和力控制部分产生的力或力矩之和组成. 位置环以末端执行器的理论位姿 X_d 作为输入, 位置反馈由运动学关系计算所得. 设计位置环为简单的PD控制,有

$$\gamma_p = (J^T)^+ (-K_p e - K_d \dot{e}). \quad (15)$$

设定力控制环为

$$\gamma_f = (J^T)^+ (\lambda + A \ddot{X}_d + B \dot{X}_d - \mu N(X, \dot{X})). \quad (16)$$

其中: λ 为力反馈控制律, K_p 、 K_d 分别为比例增益和微分增益.

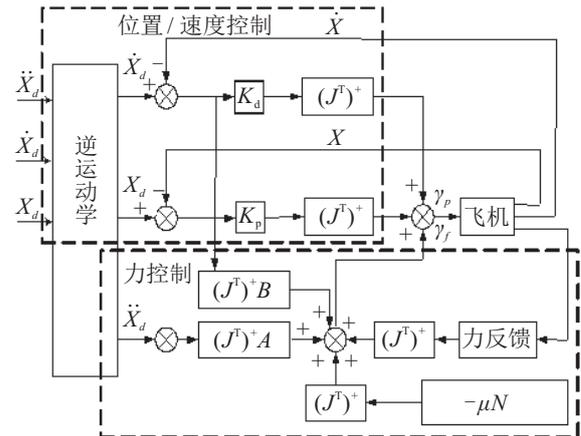


图4 力/位混合控制原理图

将所设计的力/位混合控制律代入到动力学方程(9)中,得到

$$\begin{aligned} A \ddot{X} + B \dot{X} + \mu w_g + \mu w_e - \mu N(X, \dot{X}) = \\ J^T ((J^T)^+ (-K_p e - K_d \dot{e}) + \\ (J^T)^+ (\lambda + A \ddot{X}_d + B \dot{X}_d - \mu N(X, \dot{X}))). \end{aligned} \quad (17)$$

其中: $J^T (J^T)^+ = I_{6 \times 6}$, $(J)^+ J = I_{6 \times 6}$.

化简所得的误差闭环系统

$$A \ddot{e} + (B + K_d) \dot{e} + K_p e = \lambda - \mu w_g - \mu w_e. \quad (18)$$

令 $\Upsilon(\cdot) = \Delta\chi = \mu w_g + \mu w_e$, 且 $\Delta\chi$ 为不确定性、动态耦合和外界干扰, 则式(18)可化简为

$$A \ddot{e} + (B + K_d) \dot{e} + K_p e + \Delta\chi = \lambda. \quad (19)$$

采用RBF神经网络逼近补偿 $\Delta\chi$, 其表达式为

$$\Delta\chi = \mathbf{W}_f^{*\text{T}}\mathbf{G}(\mathbf{x}) + \varepsilon_f, \quad (20)$$

其中 ε_f 为逼近误差.

综合式(19)和(20),可得

$$\mathbf{A}\ddot{\mathbf{e}} + (\mathbf{B} + \mathbf{K}_d)\dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_p\mathbf{e} + \mathbf{W}_f^{*\text{T}}\mathbf{G}(\mathbf{x}) + \varepsilon_f = \lambda. \quad (21)$$

定义状态变量

$$\mathbf{x}_1 = \mathbf{e}, \quad \mathbf{x}_2 = \dot{\mathbf{e}} + \alpha\mathbf{e}, \quad (22)$$

其中 $\alpha > 0$. 则有

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{x}_2 - \alpha\mathbf{x}_1, \\ \mathbf{A}\dot{\mathbf{x}}_2 = -(\mathbf{B} + \mathbf{K}_d)\mathbf{x}_2 - \mathbf{W}_f^{*\text{T}}\mathbf{G}(\mathbf{x}) - \varepsilon_f - \mathbf{K}_p\mathbf{x}_1 + \lambda + \varpi, \end{cases} \quad (23)$$

其中 $\varpi = \mathbf{A}\alpha\dot{\mathbf{e}} + (\mathbf{B} + \mathbf{K}_d)\alpha\mathbf{e}$.

利用第2.1节中的HJI不等式,将式(23)改写为式(10)的形式,其中

$$\boldsymbol{\xi}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_2 - \alpha\mathbf{x}_1 \\ \mathbf{A}^{-1}(-(\mathbf{B} + \mathbf{K}_d)\mathbf{x}_2 - \mathbf{W}_f^{*\text{T}}\mathbf{G}(\mathbf{x}) - \mathbf{K}_p\mathbf{x}_1 + \lambda + \varpi) \end{bmatrix},$$

$$\delta(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ -\mathbf{A}^{-1} \end{bmatrix}, \quad \vartheta(t) = \varepsilon_f.$$

设定并联机器人非线性系统的评判指标为 $\Lambda = \mathbf{x}_2 = \dot{\mathbf{e}} + \alpha\mathbf{e}$,则 L_2 增益为

$$\eta = \sup_{\|\varepsilon_f\| \neq 0} \frac{\|\dot{\mathbf{e}} + \alpha\mathbf{e}\|_2}{\|\varepsilon_f\|_2}. \quad (24)$$

针对误差系统(23),设计系统的自适应控制律为

$$\dot{\tilde{\mathbf{W}}}_f = -\kappa\mathbf{x}_2\mathbf{G}^{\text{T}}(\mathbf{x}). \quad (25)$$

设计的反馈控制律为

$$\begin{aligned} \lambda = & -\varpi + \tilde{\mathbf{W}}_f^{\text{T}}\mathbf{G}(\mathbf{x}) - \beta\mathbf{K}_p\mathbf{x}_1 - \\ & (\lambda^2/2 + \varsigma)\mathbf{x}_2 - \mathbf{K}_p\dot{\mathbf{x}}_1. \end{aligned} \quad (26)$$

其中: $\kappa > 0, \varsigma > 0, \beta > 0$.

3.2 稳定性分析

由于WDPRSS是非线性并联机器人,采用李雅普诺夫第二法^[19-22]证明闭环系统的稳定性.定义李雅普诺夫函数为

$$\mathbf{V} = \mathbf{x}_2^{\text{T}}\mathbf{A}\mathbf{x}_2/2 + \mathbf{x}_1^{\text{T}}\mathbf{K}_p\mathbf{x}_1/2 + \text{tr}(\tilde{\mathbf{W}}_f^{\text{T}}\tilde{\mathbf{W}}_f)/2\kappa. \quad (27)$$

其中: $\mathbf{V} > 0$ 是正定的, $\tilde{\mathbf{W}}_f = \hat{\mathbf{W}}_f - \mathbf{W}_f^*$. 对李雅普诺夫函数 \mathbf{V} 求导,可得

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{V}} = & \mathbf{x}_2^{\text{T}}\mathbf{A}\dot{\mathbf{x}}_2 + \mathbf{x}_2^{\text{T}}\dot{\mathbf{A}}\mathbf{x}_2/2 + \mathbf{x}_1^{\text{T}}\mathbf{K}_p\dot{\mathbf{x}}_1 + \text{tr}(\tilde{\mathbf{W}}_f^{\text{T}}\dot{\tilde{\mathbf{W}}}_f)/\kappa = \\ & \mathbf{x}_2^{\text{T}}(-(\mathbf{B} + \mathbf{K}_d)\mathbf{x}_2 - \mathbf{W}_f^{*\text{T}}\mathbf{G}(\mathbf{x}) - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \varepsilon_f - \mathbf{K}_p\mathbf{x}_1 + \lambda + \varpi) + \mathbf{x}_2^{\text{T}}\dot{\mathbf{A}}\mathbf{x}_2/2 + \\ & \mathbf{x}_1^{\text{T}}\mathbf{K}_p\dot{\mathbf{x}}_1 + \text{tr}(\tilde{\mathbf{W}}_f^{\text{T}}\dot{\tilde{\mathbf{W}}}_f)/\kappa = \\ & \mathbf{x}_2^{\text{T}}(-(\mathbf{B} + \mathbf{K}_d)\mathbf{x}_2 - \mathbf{W}_f^{*\text{T}}\mathbf{G}(\mathbf{x}) - \mathbf{K}_p\dot{\mathbf{x}}_1 - \\ & - \varepsilon_f - \mathbf{K}_p\mathbf{x}_1 + \tilde{\mathbf{W}}_f^{\text{T}}\mathbf{G}(\mathbf{x}) - \beta\mathbf{K}_p\mathbf{x}_1 - \\ & - (\lambda^2 + \varsigma)\mathbf{x}_2)/2 + \mathbf{x}_2^{\text{T}}\dot{\mathbf{A}}\mathbf{x}_2/2 + \\ & \mathbf{x}_1^{\text{T}}\mathbf{K}_p\dot{\mathbf{x}}_1 + \text{tr}(\tilde{\mathbf{W}}_f^{\text{T}}\dot{\tilde{\mathbf{W}}}_f)/\kappa. \end{aligned} \quad (28)$$

将式(28)化简得到

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{V}} = & \mathbf{x}_2^{\text{T}}(-\varepsilon_f - (\lambda^2/2 + \varsigma)\mathbf{x}_2 + \tilde{\mathbf{W}}_f^{\text{T}}\mathbf{G}(\mathbf{x})) + \\ & \mathbf{x}_2^{\text{T}}\dot{\mathbf{A}}\mathbf{x}_2/2 - \mathbf{x}_2^{\text{T}}(\mathbf{B} + \mathbf{K}_d)\mathbf{x}_2 + \mathbf{x}_1^{\text{T}}\mathbf{K}_p\dot{\mathbf{x}}_1 + \\ & \text{tr}(\tilde{\mathbf{W}}_f^{\text{T}}\dot{\tilde{\mathbf{W}}}_f)/\kappa - \mathbf{x}_2^{\text{T}}\mathbf{K}_p\dot{\mathbf{x}}_1 - (1 + \beta)\mathbf{x}_2^{\text{T}}\mathbf{K}_p\mathbf{x}_1, \end{aligned} \quad (29)$$

进而有

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{V}} = & -\mathbf{x}_2^{\text{T}}\varepsilon_f + \mathbf{x}_2^{\text{T}}\tilde{\mathbf{W}}_f^{\text{T}}\mathbf{G}(\mathbf{x}) - (1 + \beta)\mathbf{x}_2^{\text{T}}\mathbf{K}_p\mathbf{x}_1 - \\ & (\lambda^2/2 + \varsigma)\mathbf{x}_2^{\text{T}}\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_2^{\text{T}}\mathbf{K}_p\dot{\mathbf{x}}_1 + \\ & \mathbf{x}_2^{\text{T}}(\dot{\mathbf{A}} - 2(\mathbf{B} + \mathbf{K}_d))\mathbf{x}_2/2 + \\ & \mathbf{x}_1^{\text{T}}\mathbf{K}_p\dot{\mathbf{x}}_1 + \text{tr}(\tilde{\mathbf{W}}_f^{\text{T}}\dot{\tilde{\mathbf{W}}}_f)/\kappa. \end{aligned} \quad (30)$$

根据HJI定理,定义

$$\Pi = \dot{\mathbf{V}} - \lambda^2\|\varepsilon_f\|^2/2 + \|\Lambda\|^2/2. \quad (31)$$

将式(30)代入(31)中,有

$$\begin{aligned} \Pi = & -\mathbf{x}_2^{\text{T}}\varepsilon_f + \mathbf{x}_2^{\text{T}}\tilde{\mathbf{W}}_f^{\text{T}}\mathbf{G}(\mathbf{x}) - (\lambda^2/2 + \varsigma)\mathbf{x}_2^{\text{T}}\mathbf{x}_2 - \\ & \mathbf{x}_2^{\text{T}}\mathbf{K}_p\dot{\mathbf{x}}_1 + \mathbf{x}_2^{\text{T}}(\dot{\mathbf{A}} - 2(\mathbf{B} + \mathbf{K}_d))\mathbf{x}_2/2 + \\ & \mathbf{x}_1^{\text{T}}\mathbf{K}_p\dot{\mathbf{x}}_1 + \text{tr}(\tilde{\mathbf{W}}_f^{\text{T}}\dot{\tilde{\mathbf{W}}}_f)/\kappa - \lambda^2\|\varepsilon_f\|^2/2 + \\ & \|\Lambda\|^2/\kappa - (1 + \beta)\mathbf{x}_2^{\text{T}}\mathbf{K}_p\mathbf{x}_1, \end{aligned} \quad (32)$$

进而有

$$\begin{aligned} \Pi = & -\mathbf{x}_2^{\text{T}}\varepsilon_f - \lambda^2\lambda^2\mathbf{x}_2^{\text{T}}\mathbf{x}_2/2 - \lambda^2\|\varepsilon_f\|^2/2 + \\ & \mathbf{x}_2^{\text{T}}\tilde{\mathbf{W}}_f^{\text{T}}\mathbf{G}(\mathbf{x}) + \text{tr}(\tilde{\mathbf{W}}_f^{\text{T}}\dot{\tilde{\mathbf{W}}}_f)/\kappa + \\ & \mathbf{x}_2^{\text{T}}(\dot{\mathbf{A}} - 2(\mathbf{B} + \mathbf{K}_d))\mathbf{x}_2/2 + \\ & \|\Lambda\|^2/2 - \varsigma\mathbf{x}_2^{\text{T}}\mathbf{x}_2 + \mathbf{x}_1^{\text{T}}\mathbf{K}_p\dot{\mathbf{x}}_1 - \\ & (1 + \beta)\mathbf{x}_2^{\text{T}}\mathbf{K}_p\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2^{\text{T}}\mathbf{K}_p\dot{\mathbf{x}}_1. \end{aligned} \quad (33)$$

令 $\Pi = \Pi_1 + \Pi_2 + \Pi_3 + \Pi_4$,则有

$$\begin{aligned} \Pi_1 = & -\mathbf{x}_2^{\text{T}}\varepsilon_f - \lambda^2\mathbf{x}_2^{\text{T}}\mathbf{x}_2/2 - \lambda^2\|\varepsilon_f\|^2/2 = \\ & -(\mathbf{x}_2^{\text{T}}\mathbf{x}_2/\lambda^2 + 2\mathbf{x}_2^{\text{T}}\varepsilon_f + \lambda^2\|\varepsilon_f\|^2)/2 = \\ & -(\|\mathbf{x}_2\|^2/\lambda^2 + 2\mathbf{x}_2^{\text{T}}\varepsilon_f + \lambda^2\|\varepsilon_f\|^2)/2 = \\ & -\|\mathbf{x}_2/\lambda + \lambda\varepsilon_f\|^2/2 \leq 0, \end{aligned} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} \Pi_2 = & \mathbf{x}_2^{\text{T}}\tilde{\mathbf{W}}_f^{\text{T}}\mathbf{G}(\mathbf{x}) + \text{tr}(\tilde{\mathbf{W}}_f^{\text{T}}\dot{\tilde{\mathbf{W}}}_f)/\kappa = \\ & \mathbf{x}_2^{\text{T}}\tilde{\mathbf{W}}_f^{\text{T}}\mathbf{G}(\mathbf{x}) + \text{tr}(-\tilde{\mathbf{W}}_f^{\text{T}}\kappa\mathbf{x}_2\mathbf{G}^{\text{T}}(\mathbf{x}))/\kappa = 0, \end{aligned} \quad (35)$$

$$\Pi_3 = \|\Lambda\|^2/2 - \varsigma\mathbf{x}_2^{\text{T}}\mathbf{x}_2 = 0, \quad \varsigma = 1/2, \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \Pi_4 = & \mathbf{x}_2^T \dot{\mathbf{A}} \mathbf{x}_2 / 2 + \mathbf{x}_1^T \mathbf{K}_p \dot{\mathbf{x}}_1 - \mathbf{x}_2^T (\mathbf{B} + \mathbf{K}_d) \mathbf{x}_2 - \\ & \mathbf{x}_2^T \mathbf{K}_p \dot{\mathbf{x}}_1 - (1 + \beta) \mathbf{x}_2^T \mathbf{K}_p \mathbf{x}_1 = \\ & \mathbf{x}_2^T \dot{\mathbf{A}} \mathbf{x}_2 / 2 + (\mathbf{x}_2 - \dot{\mathbf{x}}_1 / \alpha)^T \mathbf{K}_p \dot{\mathbf{x}}_1 - \mathbf{x}_2^T (\mathbf{B} + \mathbf{K}_d) \mathbf{x}_2 - \\ & (1 + \beta) \mathbf{x}_2^T \mathbf{K}_p \mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2^T \mathbf{K}_p \dot{\mathbf{x}}_1, \end{aligned} \quad (37)$$

进而有

$$\begin{aligned} \Pi_4 = & \mathbf{x}_2^T \dot{\mathbf{A}} \mathbf{x}_2 / 2 - \mathbf{x}_2^T (\mathbf{B} + \mathbf{K}_d) \mathbf{x}_2 + \\ & (\mathbf{x}_2^T / \alpha - \mathbf{x}_1^T) \mathbf{K}_p (\mathbf{x}_2 - \alpha \mathbf{x}_1) - \\ & \mathbf{x}_1^T \mathbf{K}_p \mathbf{x}_1 / \alpha - (1 + \beta) \mathbf{x}_2^T \mathbf{K}_p \mathbf{x}_1 = \\ & \mathbf{x}_2^T (\dot{\mathbf{A}} / 2 - (1 + \beta) \mathbf{K}_p / 40) \mathbf{x}_2 + \\ & (1 + \beta) \mathbf{x}_2^T (\mathbf{K}_p \alpha / 40 - \mathbf{K}_p) \mathbf{x}_1 - \\ & \mathbf{x}_2^T (\mathbf{B} + \mathbf{K}_d) \mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1^T \mathbf{K}_p \dot{\mathbf{x}}_1 / \alpha. \end{aligned} \quad (38)$$

由于 $\mathbf{B} + \mathbf{K}_d$ 、 \mathbf{K}_p 均为正定矩阵且 $\alpha = 40$, 有

$$\begin{aligned} -\mathbf{x}_2^T (\mathbf{B} + \mathbf{K}_d) \mathbf{x}_2 - \dot{\mathbf{x}}_1^T \mathbf{K}_p \dot{\mathbf{x}}_1 / \alpha < 0, \\ (1 + \beta) \mathbf{x}_2^T (\mathbf{K}_p \alpha / 40 - \mathbf{K}_p) \mathbf{x}_1 = 0, \beta = 38. \end{aligned}$$

通过验证 $(\mathbf{A} / 2 - 39 \mathbf{K}_p / 40)$ 是负定矩阵, 求得 $\Pi_4 \leq 0$.

由于 $\Pi_1 \leq 0, \Pi_2 = 0, \Pi_3 = 0, \Pi_4 \leq 0$, 最终求得 $\Pi \leq 0$. 根据式(31)对 Π 的定义可知, 当 $\Pi = \dot{\mathbf{V}} - \lambda^2 \|\varepsilon_f\|^2 / 2 + \|\mathbf{A}\|^2 / 2 \leq 0$ 时, 有

$$\dot{\mathbf{V}} \leq \lambda^2 \|\varepsilon_f\|^2 / 2 - \|\mathbf{A}\|^2 / 2. \quad (39)$$

由HJI定理可求得 $\eta \leq \lambda$, 从而证明系统是一致最终有界的.

4 仿真实验及结果

为了证明所提出的力/位混合控制策略的有效性, 以WDPRSS为仿真对象, 如图5所示.



图5 WDPRSS平台

通过仿真实验对所设计的控制方法进行可行性验证. 以WDPRSS作6自由度运动进行仿真实验, 末端执行器的理论运动轨迹(位姿)和 \mathbf{K}_p 、 \mathbf{K}_d 分别为

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_d = & [0.2 \times \sin t, 0.2 \times \sin t, 0.2 \times \sin t - 0.582, \\ & \text{pi}/6 \times \sin t, \text{pi}/6 \times \sin t, \text{pi}/6 \times \sin t], \\ \mathbf{K}_p = & \text{diag}([3000 \ 11000 \ 12000 \ 150 \ 120 \ 250]), \\ \mathbf{K}_d = & \text{diag}([150 \ 1900 \ 2100 \ 50 \ 50 \ 35]). \end{aligned}$$

仿真过程中采用的参数如表1所示. WDPRSS的坐标点 P_i 点(飞机模型的连接点)和 B_i 点(滑轮铰接点)($i = 1 \sim 8$)的位置如表2所示.

表1 仿真参数

参数	数值	参数	数值
M_0	$7 * 10^{-5} \mathbf{I}_{8 \times 8}$	α	40
C_0	$5 * 10^{-3} \mathbf{I}_{8 \times 8}$	β	38
m	1.028 kg	κ	20
μ	0.0025/pi	λ	0.1
g	9.82m/s ²	ς	0.5

表2 P_i 点与 B_i 点的位置

符号	坐标点/mm	符号	坐标点/mm
P_1	$(-208, 78, -1)^T$	B_1	$(200, 415, -1280)^T$
P_2	$(-208, -78, -1)^T$	B_2	$(200, -415, -1280)^T$
P_3	$(0, -27.7, -10.1)^T$	B_3	$(-300, -308, -1250)^T$
P_4	$(0, 27.7, -10.1)^T$	B_4	$(-300, 308, -1250)^T$
P_5	$(0, 27.7, 10.1)^T$	B_5	$(-315, 315, -70)^T$
P_6	$(-208, 78, 1)^T$	B_6	$(160, 415, -70)^T$
P_7	$(-208, -78, 1)^T$	B_7	$(160, -415, -70)^T$
P_8	$(0, -27.7, 10.1)^T$	B_8	$(-315, -315, -70)^T$

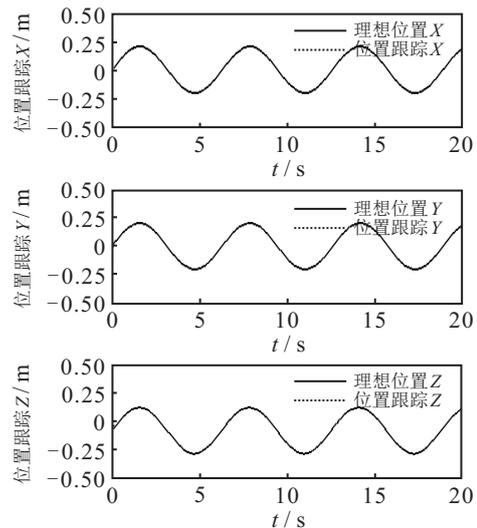


图6 位置跟踪曲线

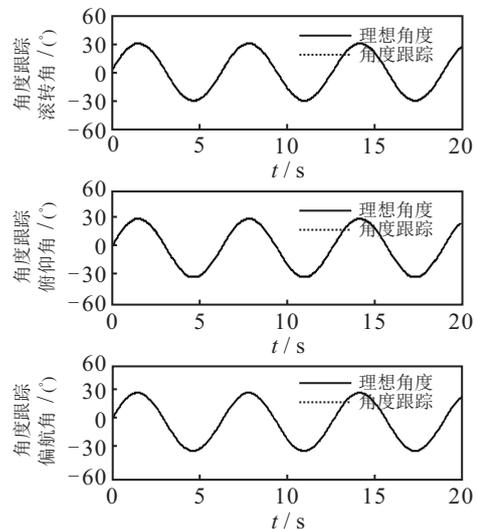


图7 姿态角跟踪曲线

仿真结果如图6~图15所示. 由图6和图7可见, 在连续3个周期内,理论位姿与实际位姿的曲线重合度很高. 由图8可见,位置跟踪误差基本为0,姿态角的跟踪误差在 $\pm 0.05^\circ$ 之间.

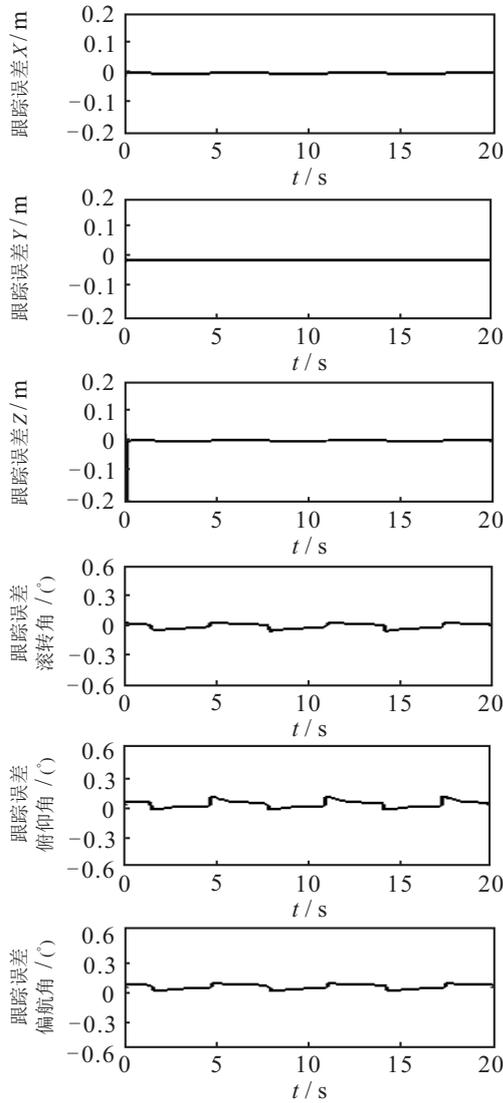


图8 位姿跟踪误差

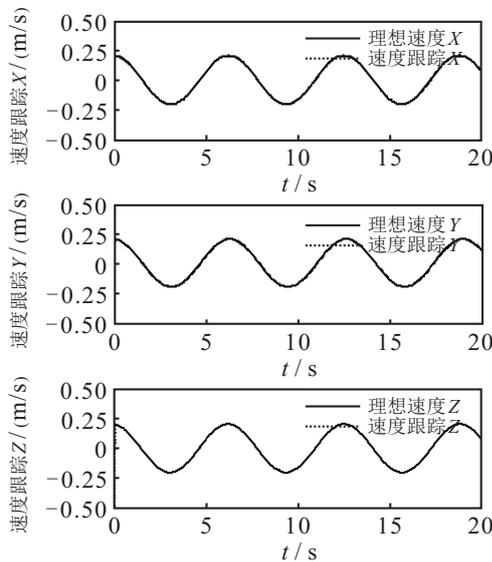


图9 位置速度跟踪曲线

由图9和图10可见,在连续3个周期内,理论位姿速度与实际位姿速度的曲线重合度也趋于一致. 由图11可见,位置速度跟踪误差在 ± 0.002 m/s范围内,姿态角速度跟踪误差在 $\pm 1.8^\circ$ /s之间.

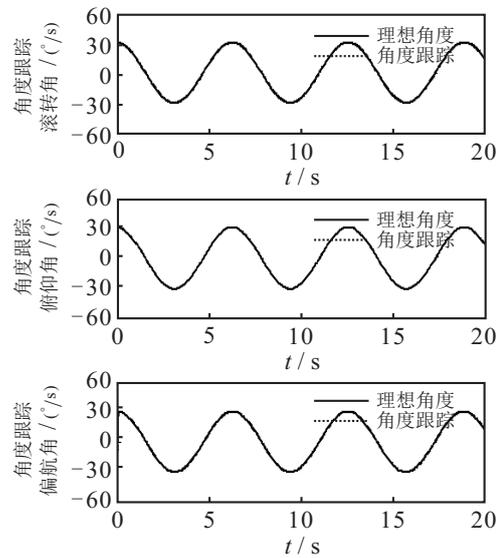


图10 姿态角速度跟踪曲线

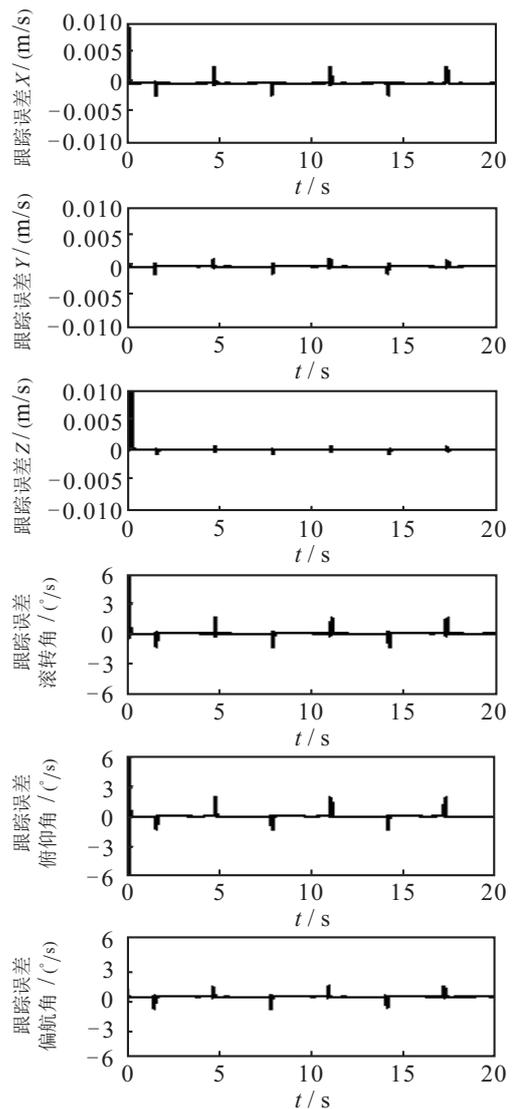


图11 速度误差曲线

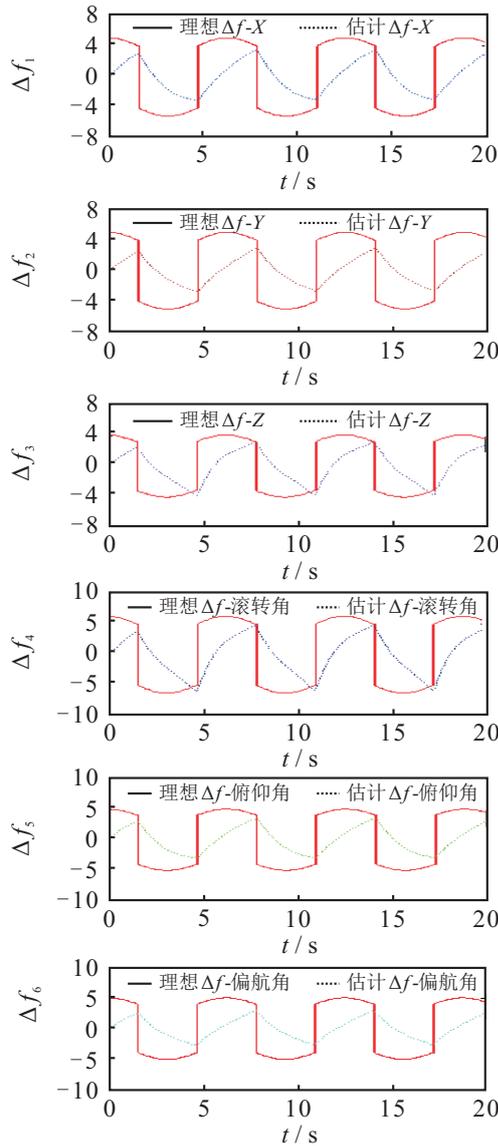


图 12 外界扰动及其逼近曲线

由图 12 可见,RBF神经网络的逼近曲线与外界扰动曲线趋势一致. 由图 13 可见,在连续 3 个周期内,控制输入具有一定的规律性,符合设计的物理意义. 由图 14 和图 15 可见,由于是六自由度运动,绳长变化和绳拉力变化没有一定的规律性,但是 8 根绳长的变化和绳拉力变化均在一定的范围内^[23],绳长变化光滑,绳拉力变化平缓,能减少断绳的危险.

通过仿真结果可以看出,采用 RBF 神经网络对外界干扰、动态耦合及不确定性进行有效的逼近,HJI 定理合理地应用到了闭环系统中,增强了系统的鲁棒性,WDPRSS 的跟踪效果良好. 同时表明了所设计的力/位混合控制策略是可行的、可靠的,满足 WDPRSS 运动跟踪轨迹.

为了验证所设计力/位混合控制的先进性、有效性和高精度的特点,对 WDPRSS 同样进行 6 自由度运动的 PD 控制,并与所设计的力/位混合控制的结果进行对比分析. PD 控制仿真结果如图 16 所示.

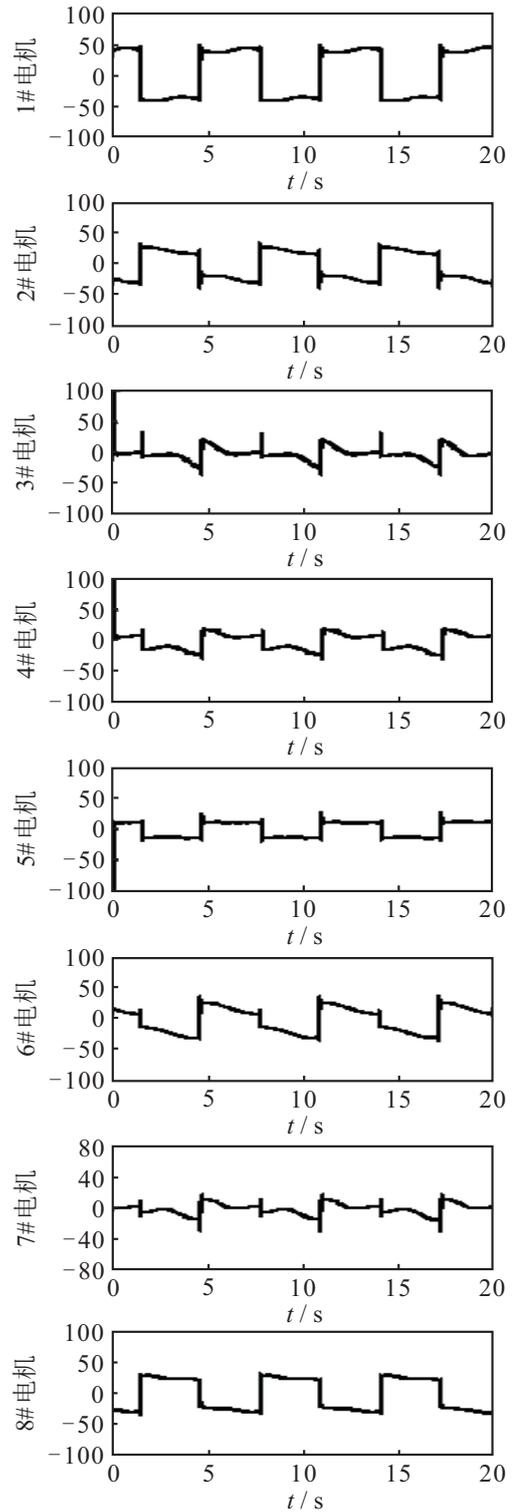


图 13 控制输入曲线

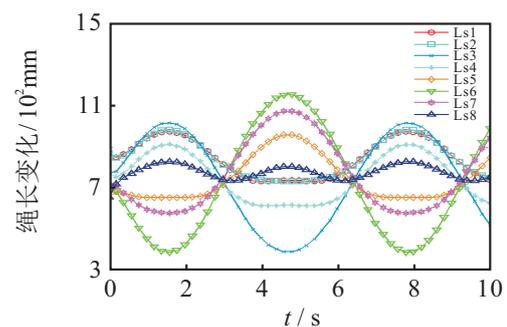


图 14 绳长变化曲线

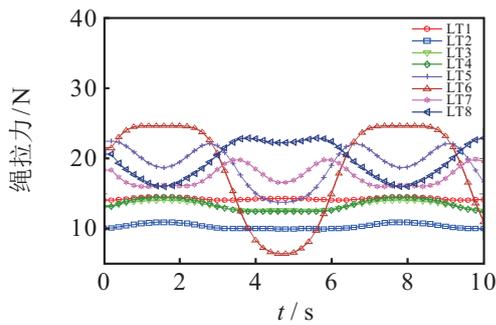


图 15 绳拉力曲线

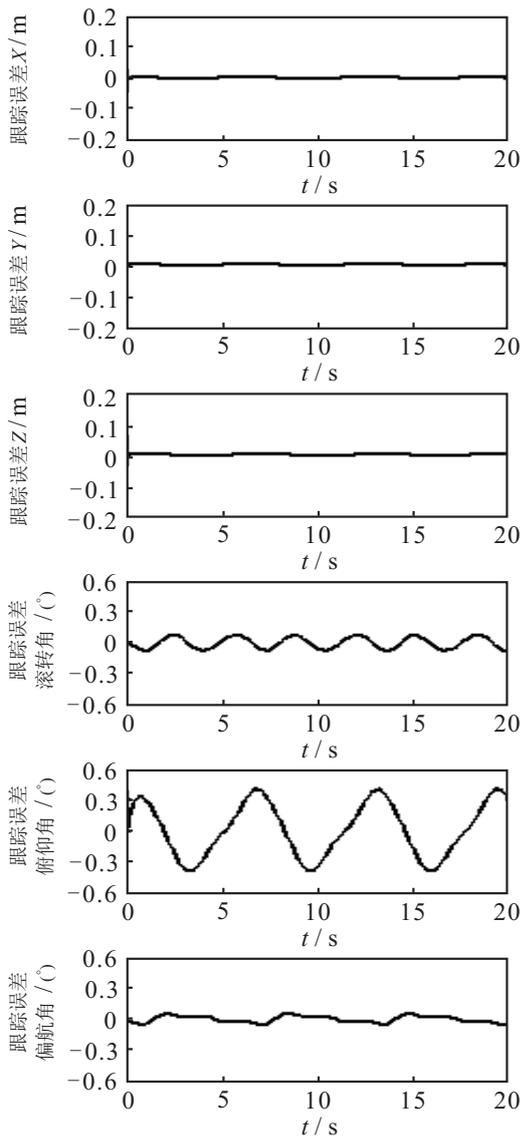


图 16 PD控制的位姿跟踪误差曲线

由于WDPRSS进行风洞试验的关注点在于姿态角,由图16可见,与所设计的力/位混合控制的位姿跟踪误差(图8)相比,PD控制的位姿跟踪误差尤其是姿态角误差明显较大,可以得出力/位混合控制的精度更高,控制效果更好,使得位姿的整体跟踪误差更小。

5 样机实验

为了进一步验证所设计的力/位混合控制的正确性和有效性,在WDPRSS样机平台上进行实验验证,

平台如图5所示.实验平台主要包含两部分:上层软件和底层硬件.上层软件在Visual Studio上基于C++语言进行编程实现;底层硬件主要包括工控机、运动控制器、伺服系统、机械结构等.其中,运动控制器为IMAC-HX,型号为Turbo PMAC2 integrated Controller,并采用型号为DRP-240-24的直流稳压电源为其供电,如图17所示.



图 17 IMAC控制器

为了进行控制方法的验证,将伺服驱动器设置为转矩模式,并完成硬件设备的连接配置及软件环境的配置.基于所建立的动力学模型以及力/位混合控制,设计动力学控制软件,以完成WDPRSS样机平台的控制实验,控制软件中主要包括控制主程序、轨迹规划、逆运动学模型、动力学模型等模块.由于动力学控制软件中涉及大量的建模和控制的矩阵运算,采用Eigen数学函数库来处理矩阵向量的运算操作.动力学控制软件调用类库MFC设计程序的可视化界面,采用类库MFC设计的样机实验平台的软件界面如图18所示.



图 18 实验平台的软件界面

由于控制过程中雅可比矩阵 J 、雅可比矩阵转置后的伪逆 $(J^T)^+$ 、RBF神经网络的补偿运算等涉及大量的矩阵运算,计算速度慢以至于无法实现实时的在线运算,通过Matlab仿真,离线计算出雅可比矩阵 J 及其伪逆矩阵 $(J^T)^+$ 等,并对神经网络的补偿进行采样,在控制时进行实时调用,以提高WDPRSS样机平台的控制效率。

WDPRSS样机是一个复杂的非线性系统,现有的硬件设备性能无法达到复杂运动实验的要求.因此,通过一个单自由度运动实验来验证所设计控制律的可行性和控制性能.设定末端执行器的理论位姿为

$$\mathbf{X}_d = [0 \ 0 \ -0.582 \ 0 \ (\pi/6) \times \sin t \ 0]^T.$$

WDPRSS的样机实验结果如图19~图21所示.由图19和图20可见,末端执行器的实验位姿变化曲线光滑连续,且理论位姿与实验位姿的误差大约在 $\pm 0.07^\circ$ 之间.以1#电机为例,由图21可得电机的输出转矩在额定转矩1.27 N.m的范围内,以上实验结果是满足要求的.

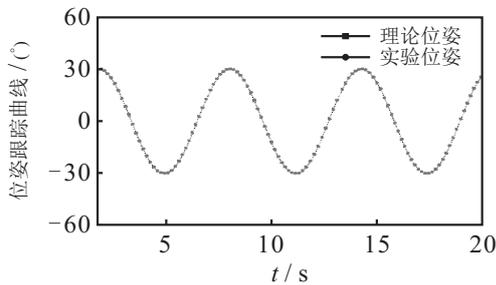


图19 位姿跟踪曲线

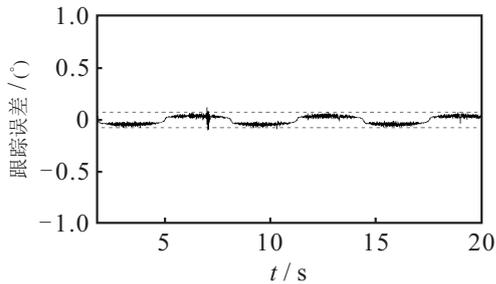


图20 实验误差曲线

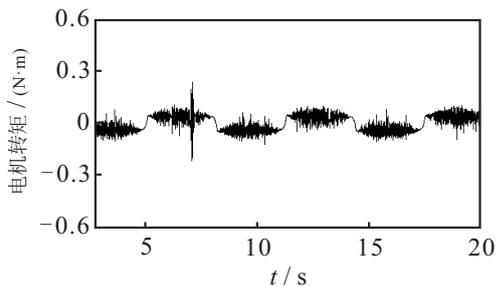


图21 1#电机的输出转矩

6 结论

本文针对用于风洞试验的WDPRSS,设计了一种采用HJI定理并基于RBF神经网络补偿的力/位混合控制策略.在模型不确定性和外部约束条件下,建立以位姿作为变量的WDPRSS动力学方程.采用HJI定理和RBF神经网络补偿,设计了一种新的力/位混合控制.采用李雅普诺夫第二法证明了所设计控制策略的正确性,并证明了WDPRSS闭环系统的稳定

性.仿真结果显示,结合HJI定理及RBF神经网络的力/位混合控制策略的控制精度很高,同时也充分验证了所设计控制方案的可行性.最后,通过样机实验进一步表明了所设计控制方案的有效性.所设计的力/位混合控制策略对WDPRSS应用于样机具有一定的创新性和指导性.

参考文献(References)

- [1] Saeed Behzadipour, Amir Khajepour. Design of reduced DOF parallel cable based robots[J]. Mechanism and Machine Theory, 2004, 39(10): 1051-1065.
- [2] Cong B P, Song H Y, Guilin Y, et al. Force-closure workspace analysis of cable-driven parallel mechanisms[J]. Mechanism and Machine Theory, 2006, 41(1): 53-69.
- [3] 刘欣, 仇原鹰, 盛英. 风洞试验绳牵引冗余并联机器人的刚度增强与运动控制[J]. 航空学报, 2009, 30(6): 1156-1164.
(Liu X, Qiu Y Y, Sheng Y. Stiffness enhancement and motion control of a 6-DOF wire-driven parallel manipulator with redundant actuations for wind tunnels[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(6): 1156-1164.)
- [4] 冀洋锋, 林麒, 胡正红, 等. 基于绳系并联机器人支撑系统的SDM动导数试验可行性研究[J]. 航空学报, 2017, 38(11): 1-13.
(Ji Y F, Lin Q, Hu Z H, et al. Research on feasibility of dynamic stability derivatives test of SDM with wire-driven parallel robot suspension system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(11): 1-13.)
- [5] Craig J J, Raibert M H. A systematic method of hybrid position/force control of a manipulator[C]. The IEEE Computer Society's Third International Computer Software and Applications. Chicago: IEEE, 1979: 446-451.
- [6] Vikas Panwar, Sukavanam N. Design of optimal hybrid position/force controller for a robot manipulator using neural networks[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2007: 1-23.
- [7] Wen Shuhuan, Zheng Wei, Zhu Jinghai, et al. Elman fuzzy adaptive control for obstacle avoidance of mobile robots using hybrid force/position incorporation[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part C: Applications and Reviews, 2012, 42(4): 603-608.
- [8] Yiannis Karayiannidis, George Rovithakis, Zoe Doulgeri. Force/position tracking for a robotic manipulator in compliant contact with a surface using neuro-adaptive control[J]. Automatica, 2007, 43(7): 1281-1288.
- [9] Li Yuanchun, Wang Guogang, Dong Bo, et al. Hybrid

- position-force control for constrained reconfigurable manipulators based on adaptive neural network[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2015, 7(9): 1-10.
- [10] Kazuo Kiguchi, Toshio Fukuda. Position/force control of robot manipulators for geometrically unknown objects using fuzzy neural networks[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2000, 47(3): 641-649.
- [11] 岳遂录. WDPSS-8 并联机构的关键理论问题及其风洞试验应用研究[D]. 厦门: 厦门大学航空航天学院, 2013.
(Yue S L. Key theoretical issue analysis and applied research on wind tunnel tests of WDPSS-8[D]. Xiamen: School of Aero Space Engineering, Xiamen University, 2013.)
- [12] 申铁龙. H_∞ 控制理论及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996: 116-231.
(Shen T L. H_∞ control theory and applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996: 116-231.)
- [13] 刘金琨. RBF神经网络自适应控制Matlab仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014: 116-131.
(Liu J K. RBF neural network control for mechanical systems design, analysis and Matlab simulation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2014: 116-131.)
- [14] 伏玉笋. 非线性控制系统设计—HJI法和Backstepping法研究[D]. 上海: 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 2000.
(Fu Y S. Control design for nonlinear systems: A HJI approach and a back stepping approach[D]. Shanghai: School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, 2000.)
- [15] Scgafi van der A J. L2-gain analysis of nonlinear systems and nonlinear state-feedback H_∞ control[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1992, 37(6): 770-784.
- [16] 杜贞斌, 胡寿松. 非线性系统的模糊混合 H_2/H_∞ 采样控制[J]. *控制与决策*, 2017, 32(5): 930-934.
(Du Z B, Hu S S. Fuzzy mixed H_2/H_∞ sampled-data control for nonlinear systems[J]. *Control and Decision*, 2017, 32(5): 930-934.)
- [17] Wen Shuhuan, Yuan Junying, Zhu Jinghai. Radial basis functional link network and hamilton Jacobi issacs for force/position control in robotic manipulation[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2012(2012): 1-10.
- [18] 常健, 王亚珍, 李斌. 基于力/位混合算法的7自由度机械臂精细操控方法[J]. *机器人*, 2016, 38(5): 531-539.
(Chang J, Wang Y Z, Li B. Accurate operation control method based on hybrid force/position algorithm for 7-DOF manipulator[J]. *Robot*, 2016, 38(5): 531-539.)
- [19] Zhao Dongya, Spurgeon S K, Liang Hao, et al. A new terminal converging adaptive control for 6-degree-of-freedom parallel robotic manipulators with bounded control inputs[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2017, 231(4): 271-281.
- [20] Korayem M H, Yousefzadeh M, Beyranvand B. Dynamics and control of a 6-dof cable-driven parallel robot with visco-elastic cables in presence of measurement noise[J]. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2017, 88(1): 73-95.
- [21] Zhao Xingwei, Zi Bin, Qian Lu. Design, analysis, and control of a cable-driven parallel platform with a pneumatic muscle active support[J]. *Robotic*, 2017, 35(4): 744-765.
- [22] Singla F Rohit, Agarwal S Vijyant, Parthasarathy T H. Statistical analysis of tracking and parametric estimation errors in a 2-link robot based on Lyapunov function[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2015, 82(1/2): 217-238.
- [23] Chen Y X, Yue S L, Yin Chunping, et al. Optimization for wire tensions in wire-driven parallel manipulators[C]. *Automatic Control and Artificial Intelligence*. London: IET, 2012: 1496-1499.

作者简介

王宇奇(1983—), 女, 博士生, 从事机电一体化控制的研究, E-mail: 94089828@qq.com;

林麒(1954—), 女, 教授, 博士生导师, 从事机电工程、并联机器人的研究, E-mail: qilin@xmu.edu.cn;

王晓光(1984—), 男, 副教授, 博士, 从事机器人控制、机器视觉等研究, E-mail: xgwang@xmu.edu.cn;

周凡桂(1992—), 男, 硕士生, 从事机器视觉的研究, E-mail: 392861585@qq.com;

刘骏(1993—), 男, 硕士生, 从事绳牵引并联机器人控制的研究, E-mail: 454600560@qq.com.

(责任编辑: 郑晓蕾)