



控制理论与应用
Control Theory & Applications
ISSN 1000-8152, CN 44-1240/TP

《控制理论与应用》网络首发论文

题目：基于局部模型逼近的一种绳牵引并联机器人自适应 RBF 神经网络控制
作者：王宇奇，林麒，周磊，施昕昕，杜一君，乔贵方
网络首发日期：2020-10-16
引用格式：王宇奇，林麒，周磊，施昕昕，杜一君，乔贵方. 基于局部模型逼近的一种绳牵引并联机器人自适应 RBF 神经网络控制[J/OL]. 控制理论与应用. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1240.TP.20201015.1443.038.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于局部模型逼近的一种绳牵引并联机器人 自适应RBF神经网络控制

王宇奇^{1†}, 林 麒², 周磊¹, 施昕昕¹, 杜一君¹, 乔贵方¹

(1. 南京工程学院 自动化学院, 江苏 南京 211167;

2. 厦门大学 航空航天学院, 福建 厦门 361005)

摘要: 为了保证风洞试验绳牵引并联机器人(WTT-WDPR)末端执行器的位姿, 提出了一种基于局部模型逼近的自适应RBF神经网络控制。采用牛顿-欧拉法建立了飞机模型的动力学方程, 并基于动态力矩平衡方程建立了驱动系统的动力学方程。采用RBF神经网络进行了局部模型的逼近设计和控制律设计, 并通过构建Lyapunov函数对系统进行了稳定性分析, 结果证明WTT-WDPR是趋于渐进稳定的。对WTT-WDPR进行MATLAB/SIMULINK仿真实验, 仿真结果验证了所设计的自适应RBF神经网络控制的正确性和可行性, 满足系统控制精度的要求, 也为在样机上进行实际应用和技术实现奠定了理论基础。

关键词: 绳牵引并联机器人; 局部模型逼近; RBF神经网络; 自适应控制; Lyapunov函数

引用格式: 王宇奇, 林麒, 周磊, 施昕昕, 杜一君, 乔贵方. 基于局部模型逼近的一种绳牵引并联机器人自适应RBF神经网络控制. 控制理论与应用.

Adaptive RBF Neural Network Control of a Wire-Driven Parallel Robot Based on Local Model Approximation

WANG Yu-qi^{1†}, LIN Qi², ZHOU Lei¹, SHI Xin-xin¹, DU Yi-jun¹, QIAO Gui-fang¹

(1. School of Automation, Nanjing Institute of Technology, Nanjing Jiangsu 211167, China;

2. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen Fujian 361005, China)

Abstract: In order to ensure the pose of the end effector of wind tunnel test wire-driven parallel robot (WTT-WDPR), an adaptive RBF neural network control based on local model approximation is proposed. The dynamic equation of the aircraft model is established by Newton Euler method, and the dynamic equation of the driving system is established based on the dynamic moment balance equation. In this paper, RBF neural network is used to design the approximation of local model and control law, and Lyapunov function is constructed to analyze the stability of the system. The results show that WTT-WDPR tends to be asymptotically stable. The WTT-WDPR is simulated by MATLAB/SIMULINK. The simulation results verify the correctness and feasibility of the designed adaptive RBF neural network control, meet the requirements of system control accuracy, and lay a theoretical foundation for practical application and technical realization on the prototype.

Key words: Wire-driven parallel robot; Local model approximation; RBF neural network; Adaptive control; Lyapunov function

Citation: WANG Yuqi, LIN Qi, ZHOU Lei, SHI Xinxin, DU Yijun, QIAO Guifang. Adaptive RBF Neural Network Control of a Wire-Driven Parallel Robot Based on Local Model Approximation. *Control Theory & Applications*.

1 引言

在新型飞行器的研制过程中, 风洞试验是一个极其重要的、不可或缺的环节, 其是用来测量所需要

的空气动力载荷数据的主要途径^[1], 而绳牵引并联机器人技术则是实现风洞试验的关键技术。绳牵引并联机器人具有结构简单、工作空间大、成本低、响

[†]通信作者. E-mail: 940898628@qq.com; Tel.: 18151007917.

本文责任编辑:

国家自然科学基金项目(11472234), 南京工程学院高层次引进人才科研启动基金(YKJ201917)资助。

Supported by the National Natural Science Foundation of China (11472234) and Research start up fund for high level talents introduction of Nanjing Institute of Technology(YKJ201917)

应速度快、环境适应性强、动态性能好等优点,在应用于风洞试验的模型支撑方式上具有很大的创新性,为风洞试验提供了一种新型的支撑技术^[2]。当前,国内外学者对用于风洞试验的绳牵引并联机器人技术已经展开了广泛的研究,并取得了一些成果。例如,法国宇航局(ONERA)、美国乔治理工大学的Lambert课题组、德国的杜伊斯堡-艾森大学、俄罗斯中央流体研究院(TsAGI)、厦门大学等均对绳牵引并联机器人技术进行了理论研究和试验验证^[3-12]。

绳牵引并联机器人是一种多自由度、多变量、复杂的、非线性、强耦合、多输入多输出系统。在风洞试验的应用中,为了实现该系统的高精度轨迹跟踪控制,绳系结构、动力学建模及所采用的控制方法都是至关重要的。对于绳牵引并联机器人控制方法的研究,由于所应用的场合、工作性质、工作任务等不同,所采用的控制方法也有所不同。因此,研究用于风洞试验的绳牵引并联机器人的控制具有重要的意义以及实用价值。Sana Baklouti等人针对绳索驱动并联机器人(CDPRs)提出了一种基于弹性动力学模型的前馈控制策略,减小了系统的跟踪误差和振动^[13]; Reza Babaghasabha等人针对全约束绳索驱动并联机器人,提出了一种基于不确定性上限自适应的滑模鲁棒控制器,该控制器使机器人整个工作空间内的所有绳索保持张力,而且无抖动^[14]; KHOSRAVI M A等基于奇异摄动理论,对绳牵引并联机器人的动力学进行建模,并提出一种基于PID的复合控制律^[15]; Hamed Jamshidifar等人针对冗余绳索牵引并联机器人(CDPR)提出了一种新的通用动态建模与鲁棒控制结构^[16]; Weiwei Shang等针对CDPR的绳索空间提出了两个同步控制器以实现绳索间的同步运动,提高了动平台的跟踪精度^[17]; Rogier de Rijk等人针对平面绳索驱动并联机器人末端执行器的平面外稳定,提出了一种多输入多输出的滑模鲁棒控制策略^[18]; Zane Zake等人针对CDPR采用一种基于视觉的控制,并讨论了该控制方案在分析模型和试验装置中存在不确定时的稳定性分析^[19]。

通过以上研究(文献13-19)可以发现,近几年来,关于用于风洞试验的绳牵引并联机器人控制方面的研究文献比较罕见,因此本文根据已有的绳牵引并联机器人控制理论,结合风洞试验的特点,进行了动力学建模;考虑在实际工程应用中,某些参数是未知的,采用RBF神经网络进行了局部模型逼近设计;设计出了包含鲁棒项的自适应控制律,并采用李雅普诺夫第二法对系统进行了稳定性分析;通过数值仿真和分析对所提出的控制策略进行了验证。

2 WTT-WDPR描述与动力学建模

2.1 系统描述

用于风洞试验的绳牵引并联机器人(WTT-WDPR)主要由机架、末端执行器(飞机模型)、运动控制卡(PMAC)、电源控制柜、驱动系统、工控机等组成。在进行风洞试验时,通过控制改变八根牵引绳的绳长变化来实现末端执行器的位姿(三个平动和三个转动的六自由度)变化,如图1(a)所示。

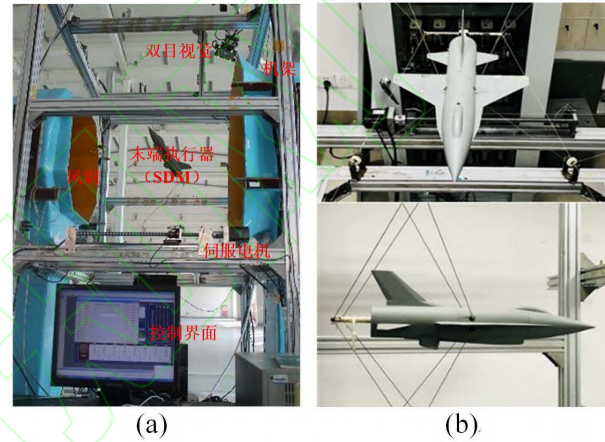


图1 WDPR风洞试验及绳系结构图

Fig. 1 WDPR wind tunnel test and wire structure diagram

由于绳系结构的不同,所获得的工作空间和系统的刚度等也是不同的。在风洞试验中,末端执行器的位姿精度直接影响气动参数的精确度,而末端执行器的位姿精度又受工作空间和系统刚度的影响,因此对系统的绳系结构进行了调整,设计成如图1(b)所示的结构,八根牵引绳两两之间相互交叉,呈对称分布状态,与之前的绳系结构相比(参考文献[20-22]的图1),提高了系统的刚度,扩大了工作空间等。改良后的系统结构原理图如图2所示。

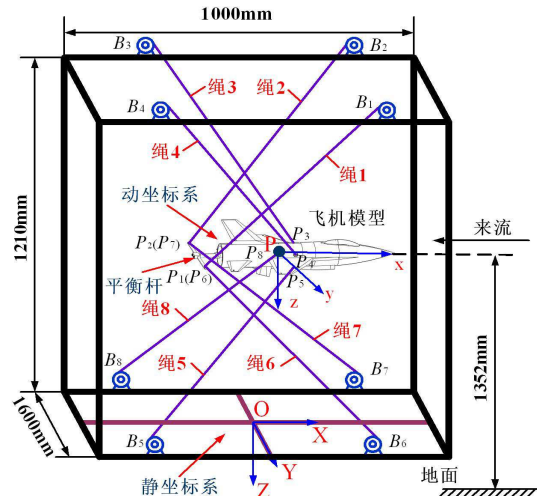


图2 WDPR结构原理图

Fig. 2 WDPR structure schematic diagram

从图2中可以得出, 样机的机架为长方体形状, 高为1210mm, 宽为1000mm, 长为1600mm, 图中定义了两个三维正交并且遵守右手法则的坐标系, 即动坐标系(Pxyz)和静坐标系(OXYZ), 在动、静坐标系中包含了 P_i 点和 B_i 点($i=1\cdots 8$)。P点是飞机模型的质心, P_i 点是飞机模型的牵引点, B_i 点是第 i 根牵引绳与滑轮的铰接点。

2.2 系统动力学建模分析

WTT-WDPR在风洞试验的应用中存在各种各样的不确定性和外界干扰, 如滑轮铰接点位置的不确定性、绳的弹性变形、飞机模型由于来流的作用所产生的气动力不确定性以及绳的振动对飞机模型位姿的影响等, 以上因素均会影响系统的动力学建模以及控制方法的选取, 因此综合上述因素, 结合WTT-WDPR的两个主要模块: 飞机模型和驱动系统来进行动力学建模分析^[23]。

①末端执行器(飞机模型)的动力学建模是运动控制设计的基础。运用Newton-Euler法, 建立了飞机模型的动力学方程:

$$\begin{pmatrix} (mI)_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & A_G H \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{v}} \\ \ddot{\mathbf{Q}} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \mathbf{f}_e \\ \boldsymbol{\tau}_e \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ mg \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ A_G \dot{H} \dot{\mathbf{Q}} + (H \dot{\mathbf{Q}}) \times (A_G H \dot{\mathbf{Q}}) \end{pmatrix} = -J^T \mathbf{T} \quad (1)$$

②驱动系统是保证飞机模型运动的根本动力来源, 且在运动控制中, 驱动系统是作为控制的输入端。因此, 基于交流伺服电机的动态力矩平衡方程, 如式(2)所示, 建立了驱动系统的动力学方程, 如式(3)所示。

$$J_m \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} + f_m \frac{d \theta_m}{dt} + M_c = M_m \quad (2)$$

$$\mathbf{M}_0 \ddot{\boldsymbol{\theta}}_m + \mathbf{C}_0 \dot{\boldsymbol{\theta}}_m + \boldsymbol{\tau}_l = \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}_d \quad (3)$$

③对等式(1)和(3)进行整理, 可得等式(4):

$$\mathbf{M}(X) \ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{N}(X, \dot{\mathbf{X}}) - \mathbf{w}_g - \mathbf{w}_e = -J^T \mathbf{T} \quad (4)$$

式(1)-(4)中, m 是飞机模型的质量, H 是姿态矩阵, $A_G = \mathbf{R} A_G^* \mathbf{R}^T$, A_G^* 是飞机模型关于重心的惯性矩阵, \mathbf{R} 为动坐标系到静坐标系的旋转变换矩阵, $\mathbf{v} = (\dot{X}_P, \dot{Y}_P, \dot{Z}_P)^T$ 为线速度矢量, $\dot{\mathbf{Q}} = (\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi})^T$ 为角速度矢量, \mathbf{f}_e 和 $\boldsymbol{\tau}_e$ 是作用在飞机模型上的空气动力和动力矩, J 为雅可比矩阵, $\mathbf{T} = [T_1 \ T_2 \ \cdots \ T_8]^T$ 为绳拉力矢量, J_m 是电机和负载等效到电机轴上的转动惯量; f_m 是等效到电

机轴上的粘性摩擦系数; θ_m 是电机的转角, M_c 是等效到电机轴上的总负载转矩, M_m 是电机的电磁力矩。 \mathbf{M}_0 为等效到驱动器的惯性矩阵; \mathbf{C}_0 为等效到驱动器的粘性摩擦系数矩阵, $\boldsymbol{\theta}_m$ 为伺服电机的转角, $\boldsymbol{\tau}_l = \mu \mathbf{T}$ 为绳拉力产生的负载力矩, μ 为滚珠丝杠的传动系数, $\boldsymbol{\tau}$ 为驱动器的输出力矩向量, $\boldsymbol{\tau}_d$ 为系统的不确定性和外界干扰。 $\mathbf{M}(X)$ 为飞机模型的惯性矩阵, 是模型的固有属性, $\mathbf{N}(X, \dot{\mathbf{X}})$ 为非线性哥氏离心力矩, 与飞机模型的位姿和速度有关, \mathbf{w}_g 为飞机模型的重力向量, \mathbf{w}_e 为飞机模型所受空气动力载荷, 表示为 $\mathbf{w}_e = [\mathbf{f}_e \ \boldsymbol{\tau}_e]^T$ 。

由于绳长 L 与末端执行器的位姿 X 之间存在直接关系: $\dot{L} = JG\dot{X}$; 绳长 L 与电机转角 $\boldsymbol{\theta}_m$ 之间也存在关系: $\dot{L} = \mu \cdot \dot{\boldsymbol{\theta}}_m$, 因此位姿 X 与电机转角 $\boldsymbol{\theta}_m$ 之间可以建立 $\dot{X} = \mu \cdot G^{-1} J^+ \dot{\boldsymbol{\theta}}_m$ 的关系。位姿 X 在风洞试验的动力学建模及运动控制的过程中是极其重要的, 选择 X 作为动力学方程的变量来求解绳长 L 的变化会使得动力学分析变得相对简单。因此, 将等式(3)代入到等式(4)中, 进行整理可得系统的总体动力学方程:

$$\begin{aligned} & (\mathbf{M}(X) - \frac{1}{\mu^2} \cdot J^T \mathbf{M}_0 J G) \ddot{X} - \\ & \frac{1}{\mu^2} (J^T \mathbf{M}_0 J \dot{G} + J^T \mathbf{M}_0 J \dot{G} + J^T \mathbf{C}_0 J G) \dot{X} \\ & = -\frac{1}{\mu} \cdot J^T (\boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}_d) + \mathbf{w}_g + \mathbf{w}_e - \mathbf{N}(X, \dot{X}) \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)中, $G = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & H \end{bmatrix}$ 是基于姿态角的变换矩阵。

将等式(5)进行化简整理, 可得:

$$\mathbf{K}_1 \ddot{X} + \mathbf{K}_2 \dot{X} = \mathbf{K}_3 \boldsymbol{\tau} + \mathbf{K}_4 \quad (6)$$

其中, $\mathbf{K}_1 = -\mu (\mathbf{M}(X) - \frac{1}{\mu^2} \cdot J^T \mathbf{M}_0 J G)$

$$\mathbf{K}_2 = \frac{1}{\mu} (J^T \mathbf{M}_0 J \dot{G} + J^T \mathbf{M}_0 J \dot{G} + J^T \mathbf{C}_0 J G)$$

$$\mathbf{K}_3 = J^T$$

$$\mathbf{K}_4 = J^T \boldsymbol{\tau}_d - \mu \mathbf{w}_g - \mu \mathbf{w}_e + \mu \mathbf{N}(X, \dot{X})$$

3 局部模型逼近设计

在实际工程应用中, \mathbf{K}_1 、 \mathbf{K}_2 、 \mathbf{K}_4 通常都是未知的, 为了使系统的动力学建模更加精确, 提高飞机模型的控制精度, 因此采用设计三个RBF神经网络来逼近 \mathbf{K}_1 、 \mathbf{K}_2 、 \mathbf{K}_4 。设定RBF神经网络的输出分别为 \mathbf{K}_{S1} 、 \mathbf{K}_{S2} 、 \mathbf{K}_{S4} , 可得:

$$\mathbf{K}_1 = \mathbf{K}_{S1} + \mathbf{E}_{K1} \quad (7)$$

$$\mathbf{K}_2 = \mathbf{K}_{S2} + \mathbf{E}_{K2} \quad (8)$$

$$\mathbf{K}_4 = \mathbf{K}_{S4} + \mathbf{E}_{K4} \quad (9)$$

式(7)-(9)中, \mathbf{E}_{K1} 、 \mathbf{E}_{K2} 、 \mathbf{E}_{K4} 分别是 \mathbf{K}_1 、 \mathbf{K}_2 、 \mathbf{K}_4 的逼近误差。

将等式(7)-(9)代入到等式(6)中, 进行整理可得:

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{K}_1 \ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}_2 \dot{\mathbf{X}} - \mathbf{K}_4 \\
 &= (\mathbf{K}_{S1} + \mathbf{E}_{K1}) \ddot{\mathbf{X}} + (\mathbf{K}_{S2} + \mathbf{E}_{K2}) \dot{\mathbf{X}} - (\mathbf{K}_{S4} + \mathbf{E}_{K4}) \\
 &= \mathbf{K}_{S1} \ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}_{S2} \dot{\mathbf{X}} + \mathbf{E}_{K1} \ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{E}_{K2} \dot{\mathbf{X}} - \mathbf{K}_{S4} - \mathbf{E}_{K4} \\
 &= \left[\{\mathbf{W}_{S1}^*\}^T \cdot \{\Gamma_{S1}\} \right] \ddot{\mathbf{X}} \\
 &\quad + \left[\{\mathbf{W}_{S2}^*\}^T \cdot \{\Gamma_{S2}\} \right] \dot{\mathbf{X}} \\
 &\quad - \left[\{\mathbf{W}_{S4}^*\}^T \cdot \{\Gamma_{S4}(\chi)\} \right] \\
 &\quad + \mathbf{E}_{K1} \ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{E}_{K2} \dot{\mathbf{X}} - \mathbf{E}_{K4}
 \end{aligned} \quad (10)$$

等式(10)中, \mathbf{W}_{S1}^* 、 \mathbf{W}_{S2}^* 和 \mathbf{W}_{S4}^* 分别对应于未知参数的RBF神经网络的理想权值; Γ_{S1} 、 Γ_{S2} 和 Γ_{S3} 分别对应于未知参数的隐含层的输出; 设定 $\mathbf{E}_K = \mathbf{E}_{K1} \ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{E}_{K2} \dot{\mathbf{X}} - \mathbf{E}_{K4}$, 则等式(10) 化简为如下形式:

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{K}_1 \ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}_2 \dot{\mathbf{X}} - \mathbf{K}_4 \\
 &= \left[\{\mathbf{W}_{S1}^*\}^T \cdot \{\Gamma_{S1}\} \right] \ddot{\mathbf{X}} \\
 &\quad + \left[\{\mathbf{W}_{S2}^*\}^T \cdot \{\Gamma_{S2}\} \right] \dot{\mathbf{X}} \\
 &\quad - \left[\{\mathbf{W}_{S4}^*\}^T \cdot \{\Gamma_{S4}(\chi)\} \right] + \mathbf{E}_K
 \end{aligned} \quad (11)$$

针对 \mathbf{K}_{S1} 、 \mathbf{K}_{S2} 、 \mathbf{K}_{S4} , 采用RBF神经网络分别设定其估计值:

$$\hat{\mathbf{K}}_{S1} = \left[\left\{ \hat{\mathbf{W}}_{S1} \right\}^T \cdot \{\Gamma_{S1}\} \right] \quad (12)$$

$$\hat{\mathbf{K}}_{S2} = \left[\left\{ \hat{\mathbf{W}}_{S2} \right\}^T \cdot \{\Gamma_{S2}\} \right] \quad (13)$$

$$\hat{\mathbf{K}}_{S4} = \left[\left\{ \hat{\mathbf{W}}_{S4} \right\}^T \cdot \{\Gamma_{S4}(\chi)\} \right] \quad (14)$$

等式(12)-(14)中, $\left\{ \hat{\mathbf{W}}_{S1} \right\}$ 、 $\left\{ \hat{\mathbf{W}}_{S2} \right\}$ 和 $\left\{ \hat{\mathbf{W}}_{S4} \right\}$ 分别是理想权值 \mathbf{W}_{S1}^* 、 \mathbf{W}_{S2}^* 、 \mathbf{W}_{S4}^* 的估计值, 其中 $\chi = \left[\mathbf{X}^T \dot{\mathbf{X}}^T \right]^T$ 。

4 控制律的设计

由于系统是高度耦合的非线性系统, 且是冗余驱动, 而冗余驱动会带来绳(索)拉力的不确定性。同时, 系统又存在其他不确定性以及外界干扰等问题, 因此为提高飞机模型位姿的运动精度, 进行了自适应控制律的设计。首先, 设定飞机模型理论位姿 $\mathbf{X}_d(t)$ 与实际位姿 $\mathbf{X}(t)$ 之间的误差:

$$\mathbf{e}(t) = \mathbf{X}_d(t) - \mathbf{X}(t) \quad (15)$$

且设定

$$\dot{\mathbf{X}}_r(t) = \mathbf{r}(t) + \dot{\mathbf{X}}(t) \quad (16)$$

$$\ddot{\mathbf{X}}_r(t) = \dot{\mathbf{r}}(t) + \ddot{\mathbf{X}}(t) \quad (17)$$

定义滑模函数:

$$\mathbf{r}(t) = \dot{\mathbf{e}}(t) + \delta \mathbf{e}(t) \quad (18)$$

根据式(15)-(17), 则可得:

$$\dot{\mathbf{X}}_r(t) = \dot{\mathbf{X}}_d(t) + \delta \mathbf{e}(t) \quad (19)$$

$$\ddot{\mathbf{X}}_r(t) = \ddot{\mathbf{X}}_d(t) + \delta \dot{\mathbf{e}}(t) \quad (20)$$

其中, $\delta > 0$ 。

将等式(16)-(20)代入到等式(6)中, 整理可得:

$$\begin{aligned}
 \boldsymbol{\tau} &= \mathbf{K}_3^+ (\mathbf{K}_1 \ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}_2 \dot{\mathbf{X}} - \mathbf{K}_4) \\
 &= \mathbf{K}_3^+ (\mathbf{K}_1 (\ddot{\mathbf{X}}_r(t) - \dot{\mathbf{r}}(t)) + \\
 &\quad \mathbf{K}_2 (\dot{\mathbf{X}}_r(t) - \mathbf{r}(t)) - \mathbf{K}_4) \\
 &= \mathbf{K}_3^+ (\mathbf{K}_1 \ddot{\mathbf{X}}_r(t) + \mathbf{K}_2 \dot{\mathbf{X}}_r(t) \\
 &\quad - \mathbf{K}_1 \dot{\mathbf{r}}(t) - \mathbf{K}_2 \mathbf{r}(t) - \mathbf{K}_4)
 \end{aligned} \quad (21)$$

其中, \mathbf{K}_3^+ 是雅可比矩阵转置的广义逆矩阵。

将等式(11)代入到等式(21)中, 进一步整理可得:

$$\begin{aligned}
 \boldsymbol{\tau} &= \mathbf{K}_3^+ \left(\left[\{\mathbf{W}_{S1}^*\}^T \cdot \{\Gamma_{S1}\} \right] \ddot{\mathbf{X}}_r(t) \right. \\
 &\quad + \left[\{\mathbf{W}_{S2}^*\}^T \cdot \{\Gamma_{S2}\} \right] \dot{\mathbf{X}}_r(t) \\
 &\quad - \left[\{\mathbf{W}_{S4}^*\}^T \cdot \{\Gamma_{S4}(\chi)\} \right] \\
 &\quad - \left[\{\mathbf{W}_{S1}^*\}^T \cdot \{\Gamma_{S1}\} \right] \dot{\mathbf{r}}(t) \\
 &\quad \left. - \left[\{\mathbf{W}_{S2}^*\}^T \cdot \{\Gamma_{S2}\} \right] \mathbf{r}(t) + \mathbf{E}_K \right)
 \end{aligned} \quad (22)$$

根据上式, 针对六自由度的WTT-WDPR系统, 设计的控制律如下所示:

$$\begin{aligned}
 \boldsymbol{\tau} &= \boldsymbol{\tau}_{\text{nom}} + \mathbf{K}_3^+ (\boldsymbol{\tau}_R + \mathbf{K}_p \mathbf{r}(t) + \mathbf{K}_I \int \mathbf{r}(t) dt) \\
 &= \mathbf{K}_3^+ \left(\left[\left\{ \hat{\mathbf{W}}_{S1} \right\}^T \cdot \{\Gamma_{S1}\} \right] \ddot{\mathbf{X}}_r(t) \right. \\
 &\quad + \left[\left\{ \hat{\mathbf{W}}_{S2} \right\}^T \cdot \{\Gamma_{S2}\} \right] \dot{\mathbf{X}}_r(t) \\
 &\quad - \left[\left\{ \hat{\mathbf{W}}_{S4} \right\}^T \cdot \{\Gamma_{S4}(\chi)\} \right] + \boldsymbol{\tau}_R \\
 &\quad \left. + \mathbf{K}_p \mathbf{r}(t) + \mathbf{K}_I \int \mathbf{r}(t) dt \right)
 \end{aligned} \quad (23)$$

式(23)中, \mathbf{K}_p 和 \mathbf{K}_I 均为比例增益, 且 $\mathbf{K}_p > 0$, $\mathbf{K}_I > 0$ 。

同时, 设计系统的名义模型控制律为:

$$\begin{aligned}
 \boldsymbol{\tau}_{\text{nom}} &= \mathbf{K}_3^+ \left(\left[\left\{ \hat{\mathbf{W}}_{S1} \right\}^T \cdot \{\Gamma_{S1}\} \right] \ddot{\mathbf{X}}_r(t) \right. \\
 &\quad + \left[\left\{ \hat{\mathbf{W}}_{S2} \right\}^T \cdot \{\Gamma_{S2}\} \right] \dot{\mathbf{X}}_r(t) \\
 &\quad \left. - \left[\left\{ \hat{\mathbf{W}}_{S4} \right\}^T \cdot \{\Gamma_{S4}(\chi)\} \right] \right)
 \end{aligned} \quad (24)$$

根据所设计的控制律, 设计了如下式所示的鲁棒项:

$$\boldsymbol{\tau}_R = \mathbf{A}_r \text{sgn}(\mathbf{r}(t)) \quad (25)$$

式(25)中, $\mathbf{A}_r = \text{diag}[\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_6]$, $\lambda_i \geq |E_i|$ ($i = 1, 2, \dots, 6$)。

通过式(22)和式(23), 整理可得:

$$\begin{aligned} & \mathbf{K}_1 \dot{\mathbf{r}}(t) + \mathbf{K}_2 \mathbf{r}(t) \\ & + \mathbf{K}_p \mathbf{r}(t) + \mathbf{K}_I \int_0^t \mathbf{r}(t) dt + \boldsymbol{\tau}_R \\ & = \left(\left[\{\tilde{\mathbf{W}}_{S1}\}^T \cdot \{\Gamma_{S1}\} \right] \ddot{\mathbf{X}}_r(t) \right. \\ & \quad + \left[\{\tilde{\mathbf{W}}_{S2}\}^T \cdot \{\Gamma_{S2}\} \right] \dot{\mathbf{X}}_r(t) \\ & \quad \left. - \left[\{\tilde{\mathbf{W}}_{S4}\}^T \cdot \{\Gamma_{S4}(\chi)\} \right] + \mathbf{E}_K \right) \end{aligned} \quad (26)$$

式(26)中, $\tilde{\mathbf{W}}_{S1} = \mathbf{W}_{S1} - \hat{\mathbf{W}}_{S1}$, $\tilde{\mathbf{W}}_{S2} = \mathbf{W}_{S2} - \hat{\mathbf{W}}_{S2}$, $\tilde{\mathbf{W}}_{S4} = \mathbf{W}_{S4} - \hat{\mathbf{W}}_{S4}$ 。

等式(26)可以进一步化简为:

$$\begin{aligned} & \mathbf{K}_1 \dot{\mathbf{r}}(t) + \mathbf{K}_2 \mathbf{r}(t) + \mathbf{K}_I \int_0^t \mathbf{r}(t) dt \\ & = \left(\left[\{\tilde{\mathbf{W}}_{S1}\}^T \cdot \{\Gamma_{S1}\} \right] \ddot{\mathbf{X}}_r(t) \right. \\ & \quad + \left[\{\tilde{\mathbf{W}}_{S2}\}^T \cdot \{\Gamma_{S2}\} \right] \dot{\mathbf{X}}_r(t) \\ & \quad \left. - \left[\{\tilde{\mathbf{W}}_{S4}\}^T \cdot \{\Gamma_{S4}(\chi)\} \right] + \mathbf{E}_K \right) \\ & \quad - \mathbf{K}_p \mathbf{r}(t) - \mathbf{A}_r \text{sgn}(\mathbf{r}(t)) \end{aligned} \quad (27)$$

设计的自适应控制律为:

$$\dot{\hat{\mathbf{W}}}_{S1k} = \Pi_{S1k} \cdot \{\Lambda_{S1k}(\mathbf{X})\} \ddot{\mathbf{X}}_r \mathbf{r}_k \quad (28)$$

$$\dot{\hat{\mathbf{W}}}_{S2k} = \Pi_{S2k} \cdot \{\Lambda_{S2k}(\mathbf{X})\} \dot{\mathbf{X}}_r \mathbf{r}_k \quad (29)$$

$$\dot{\hat{\mathbf{W}}}_{S4k} = \Pi_{S4k} \cdot \{\Lambda_{S4k}(\chi)\} \mathbf{r}_k \quad (30)$$

其中, $k=1, 2, \dots, 6$ 。式(28)-(30)是分别对应 $\hat{\mathbf{W}}_{S1}$ 、 $\hat{\mathbf{W}}_{S2}$ 、 $\hat{\mathbf{W}}_{S4}$ 的自适应控制律。

以上就是针对WTT-WDPR所设计的控制器及自适应控制律。

5 稳定性分析

为了验证所设计的控制律是否能够保证WTT-WDPR系统的稳定性, 在控制律的设计过程中, 需要使误差在一定的时间内迅速趋近于零。由于WTT-WDPR系统是非线性并联机器人, 因此采用李雅普诺夫第二法进行稳定性分析^[24]。根据所设计的控制律(式(23)所示), 结合参考文献[24]中的理论, 取一种积分型李雅普诺夫函数:

$$\begin{aligned} V &= \frac{1}{2} \left(\int_0^t \mathbf{r}(t) dt \right)^T \mathbf{K}_I \left(\int_0^t \mathbf{r}(t) dt \right) \\ & \quad + \frac{1}{2} \mathbf{r}(t)^T \mathbf{K}_1 \mathbf{r}(t) \\ & \quad + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^6 \tilde{\boldsymbol{\tau}}_{S1k}^T \Pi_{S1k}^{-1} \tilde{\boldsymbol{\tau}}_{S1k} \\ & \quad + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^6 \tilde{\boldsymbol{\tau}}_{S2k}^T \Pi_{S2k}^{-1} \tilde{\boldsymbol{\tau}}_{S2k} \\ & \quad - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^6 \tilde{\boldsymbol{\tau}}_{S4k}^T \Pi_{S4k}^{-1} \tilde{\boldsymbol{\tau}}_{S4k} \end{aligned} \quad (31)$$

式(31)中, Π_{S1k} 、 Π_{S2k} 和 Π_{S4k} 均是对称正定常矩

阵, $\mathbf{K}_1 > 0$, $\mathbf{K}_I > 0$, 因此, $V > 0$ 。

对等式(31)进行求导, 可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \mathbf{r}(t)^T \mathbf{K}_I \left(\int_0^t \mathbf{r}(t) dt \right) \\ & \quad + \mathbf{r}(t)^T \mathbf{K}_1 \dot{\mathbf{r}}(t) + \frac{1}{2} \mathbf{r}(t)^T \dot{\mathbf{K}}_1 \mathbf{r}(t) \\ & \quad + \sum_{k=1}^6 \dot{\tilde{\boldsymbol{\tau}}}_{S1k}^T \Pi_{S1k}^{-1} \tilde{\boldsymbol{\tau}}_{S1k} \\ & \quad + \sum_{k=1}^6 \dot{\tilde{\boldsymbol{\tau}}}_{S2k}^T \Pi_{S2k}^{-1} \tilde{\boldsymbol{\tau}}_{S2k} \\ & \quad - \sum_{k=1}^6 \dot{\tilde{\boldsymbol{\tau}}}_{S4k}^T \Pi_{S4k}^{-1} \tilde{\boldsymbol{\tau}}_{S4k} \end{aligned} \quad (32)$$

将等式(27)代入到等式(32)中, 进行整理可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -\mathbf{r}(t)^T \mathbf{K}_p \mathbf{r}(t) - \mathbf{r}(t)^T \mathbf{A}_r \text{sgn}(\mathbf{r}(t)) \\ & \quad - \mathbf{r}(t)^T \mathbf{K}_2 \mathbf{r}(t) + \mathbf{r}(t)^T \mathbf{E}_K \\ & \quad + \mathbf{r}(t)^T \left[\{\tilde{\mathbf{W}}_{S1}\}^T \cdot \{\Gamma_{S1}\} \right] \ddot{\mathbf{X}}_r(t) \\ & \quad + \mathbf{r}(t)^T \left[\{\tilde{\mathbf{W}}_{S2}\}^T \cdot \{\Gamma_{S2}\} \right] \dot{\mathbf{X}}_r(t) \\ & \quad - \mathbf{r}(t)^T \left[\{\tilde{\mathbf{W}}_{S4}\}^T \cdot \{\Gamma_{S4}(\chi)\} \right] \\ & \quad + \frac{1}{2} \mathbf{r}(t)^T \dot{\mathbf{K}}_1 \mathbf{r}(t) \\ & \quad + \sum_{k=1}^6 \dot{\tilde{\boldsymbol{\tau}}}_{S1k}^T \Pi_{S1k}^{-1} \tilde{\boldsymbol{\tau}}_{S1k} \\ & \quad + \sum_{k=1}^6 \dot{\tilde{\boldsymbol{\tau}}}_{S2k}^T \Pi_{S2k}^{-1} \tilde{\boldsymbol{\tau}}_{S2k} \\ & \quad - \sum_{k=1}^6 \dot{\tilde{\boldsymbol{\tau}}}_{S4k}^T \Pi_{S4k}^{-1} \tilde{\boldsymbol{\tau}}_{S4k} \end{aligned} \quad (33)$$

由于,

$$\begin{aligned} & \mathbf{r}(t)^T \left[\{\tilde{\mathbf{W}}_{S1}\}^T \cdot \{\Gamma_{S1}\} \right] \ddot{\mathbf{X}}_r(t) \\ &= \begin{bmatrix} \mathbf{r}_1(t) \\ \mathbf{r}_2(t) \\ \vdots \\ \mathbf{r}_6(t) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \{\tilde{\mathbf{W}}_{S11}\}^T \cdot \{\Lambda_{S11}(\mathbf{X})\} \ddot{\mathbf{X}}_r(t) \\ \{\tilde{\mathbf{W}}_{S12}\}^T \cdot \{\Lambda_{S12}(\mathbf{X})\} \ddot{\mathbf{X}}_r(t) \\ \vdots \\ \{\tilde{\mathbf{W}}_{S16}\}^T \cdot \{\Lambda_{S16}(\mathbf{X})\} \ddot{\mathbf{X}}_r(t) \end{bmatrix} \\ &= \sum_{k=1}^6 \{ \tilde{\boldsymbol{\tau}}_{S1k} \}^T \cdot \{ \Lambda_{S1k}(\mathbf{X}) \} \ddot{\mathbf{X}}_r(t) \cdot \mathbf{r}_k(t) \end{aligned} \quad (34)$$

同理,

$$\begin{aligned} & \mathbf{r}(t)^T \left[\{\tilde{\mathbf{W}}_{S2}\}^T \cdot \{\Gamma_{S2}\} \right] \dot{\mathbf{X}}_r(t) \\ &= \sum_{k=1}^6 \{ \tilde{\boldsymbol{\tau}}_{S2k} \}^T \cdot \{ \Lambda_{S2k}(\mathbf{X}) \} \dot{\mathbf{X}}_r(t) \cdot \mathbf{r}_k(t) \end{aligned} \quad (35)$$

$$\begin{aligned} & \mathbf{r}(t)^T \left[\{\tilde{\mathbf{W}}_{S4}\}^T \cdot \{\Gamma_{S4}(\chi)\} \right] \\ &= \sum_{k=1}^6 \{ \tilde{\boldsymbol{\tau}}_{S4k} \}^T \cdot \{ \Lambda_{S4k}(\chi) \} \mathbf{r}_k(t) \end{aligned} \quad (36)$$

因此,

表 1 P_i 点和 B_i 点的位置Table 1 Position of P_i and B_i points

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	$(-315, -315, -70)^T$

仿真结果如图3-9所示。从图3-4中可以得出，理论位姿与实际位姿的跟踪曲线基本重合，位置跟踪误差基本在 $\pm 0.002\text{m}$ 之间，姿态角的跟踪误差在 $\pm 0.05^\circ$ 之间。从图5-6中可以得出，理论位姿速度与实际位姿速度的跟踪曲线也基本趋于一致，位置速度的跟踪误差在 $\pm 0.005\text{m/s}$ 范围内，姿态角速度的跟踪误差在 $\pm 0.075^\circ/\text{s}$ 之间。

由于，

$\dot{\tilde{\tau}}_{S1k} = -\dot{\tilde{\tau}}_{S1k}$, $\dot{\tilde{\tau}}_{S2k} = -\dot{\tilde{\tau}}_{S2k}$, $\dot{\tilde{\tau}}_{S4k} = -\dot{\tilde{\tau}}_{S4k}$,
将所设计的自适应控制律代入式(37)，并结合 $\lambda_i \geq |E_i|$ ($i = 1, 2, \dots, 6$)，整理可得：

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -\mathbf{r}(t)^T \mathbf{K}_p \mathbf{r}(t) - \mathbf{r}(t)^T \mathbf{A}_r \text{sgn}(\mathbf{r}(t)) \\ & - \frac{1}{2} \mathbf{r}(t)^T (2\mathbf{K}_2 - \dot{\mathbf{K}}_1) \mathbf{r}(t) \\ & + \mathbf{r}(t)^T \mathbf{E}_K \end{aligned} \quad (38)$$

式(38)中，由于 $\mathbf{K}_p > 0$, $\mathbf{A}_r > 0$ ，因此， $-\mathbf{r}(t)^T \mathbf{K}_p \mathbf{r}(t) - \mathbf{r}(t)^T \mathbf{A}_r \text{sgn}(\mathbf{r}(t)) + \mathbf{r}(t)^T \mathbf{E}_K \leq 0$ 。通过验证得出，本研究中 \mathbf{K}_1 和 \mathbf{K}_2 均为正定矩阵，且通过MATLAB仿真证明了 $-\frac{1}{2} \mathbf{r}(t)^T (2\mathbf{K}_2 - \dot{\mathbf{K}}_1) \mathbf{r}(t) \leq 0$ ，因此得出 $\dot{V} \leq 0$ 。

由以上可得出， $\mathbf{r}(t)$ 和 $\tilde{\tau}_{S1k}$ 、 $\tilde{\tau}_{S2k}$ 、 $\tilde{\tau}_{S4k}$ 有界。当 $\dot{V} \equiv 0$ 时， $\mathbf{r}(t) = 0$ ，根据LaSalle不变性原理，闭环系统为渐进稳定，当 $t \rightarrow \infty$ 时， $\mathbf{r}(t) \rightarrow 0$ ，此时 $\mathbf{e} \rightarrow 0$ ， $\dot{\mathbf{e}} \rightarrow 0$ 。

6 仿真与分析

以WTT-WDPR为仿真对象来验证所提出的控制策略的有效性和合理性。通过使WTT-WDPR做六自由度运动来进行仿真实验。 P_i 点和 B_i 点的位置如表1所示。根据风洞试验原理，设定 $\mathbf{K}_p = \mathbf{K}_I = 100 \times \mathbf{I}(6)$ ，末端执行器的理论位姿如式(39)所示。

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_d = & [0.1 \times \sin(t); 0.1 \times \sin(t); \\ & 0.1 \times \sin(t) - 0.582; \\ & \pi/6 \times \sin(t); \pi/6 \times \sin(t); \\ & \pi/6 \times \sin(t)] \end{aligned} \quad (39)$$

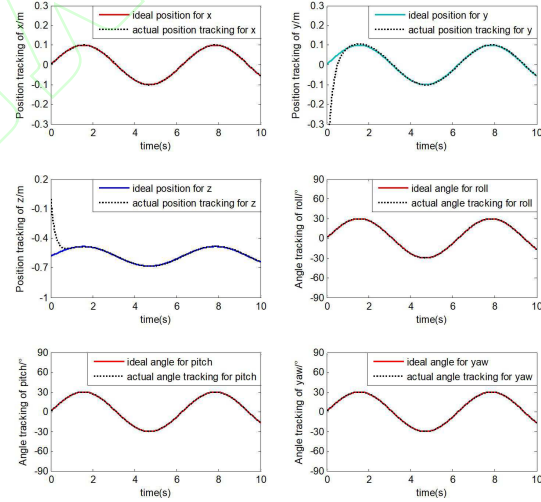


图3 位姿跟踪曲线

Fig. 3 Pose tracking curve

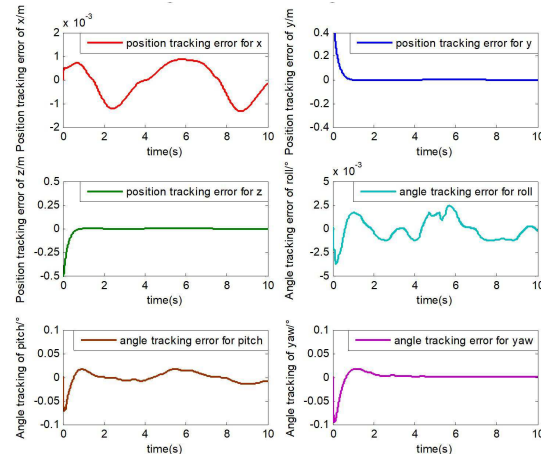


图4 位姿误差曲线

Fig. 4 Pose error curve

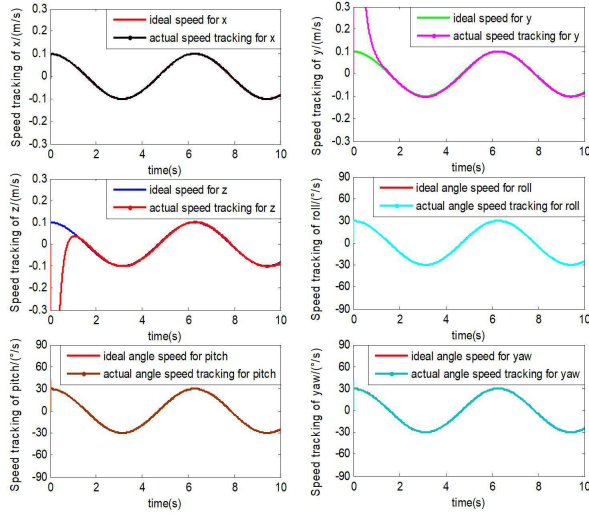


图5 位姿速度跟踪曲线

Fig. 5 Pose velocity tracking curve

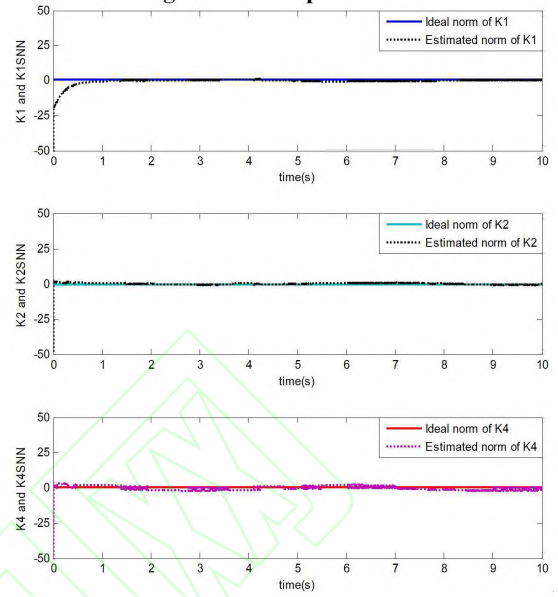
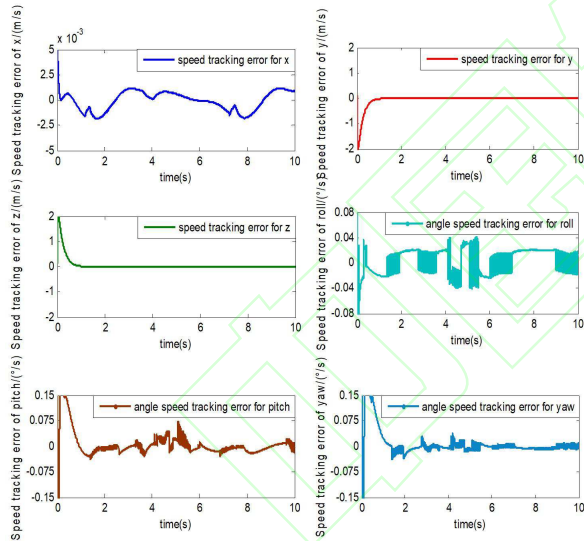
图8 K_1 、 K_2 、 K_4 的逼近曲线Fig. 8 Approximation curves of K_1 、 K_2 and K_4 

图6 位姿速度误差曲线

Fig. 6 Pose velocity error curve

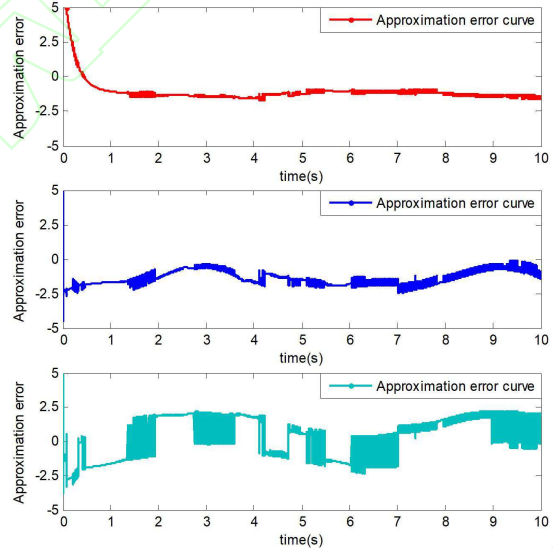
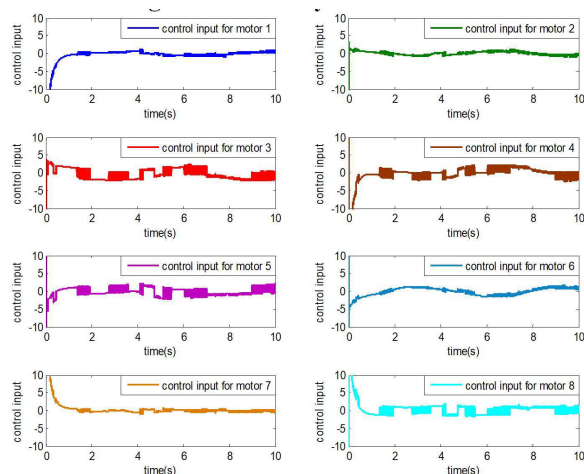
图9 K_1 、 K_2 、 K_4 的逼近误差曲线Fig. 9 Approximation error curves of K_1 、 K_2 and K_4 

图7 控制输入曲线

Fig. 7 Control input curve

从图7中可以得出, 控制输入均在一定的范围内(± 5 之间), 具有一定的规律性, 符合设计的物理意义; 从图8-9中可以得出, 采用RBF神经网络对部分未知参数进行了有效的逼近, 逼近误差在 ± 2.5 之间。

以上仿真结果均满足风洞试验条件的数据需求, 仿真结果是合理的。同时, 也证明了所设计的自适应RBF神经网络控制策略是可行的、可靠的, 满足WTT-WDPR末端执行器的运动跟踪轨迹。

为了验证所设计控制律的先进性和优越性, 以PD控制的六自由度运动仿真为例, $K_p = \text{diag}([3000 \ 11000 \ 12000 \ 95 \ 80 \ 180])$, $K_d = \text{diag}([150 \ 1900 \ 2100 \ 25 \ 22 \ 40])$, 仿真结果如图10-11所示:

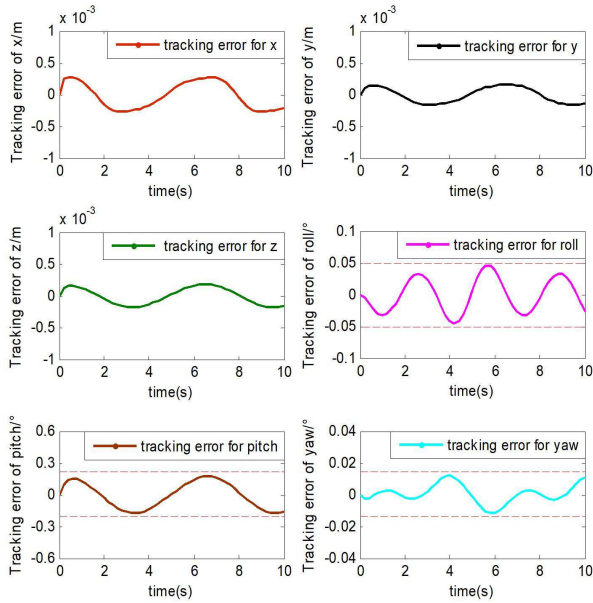


图 10 位姿误差曲线-PD控制

Fig. 10 Pose error curve-PD control

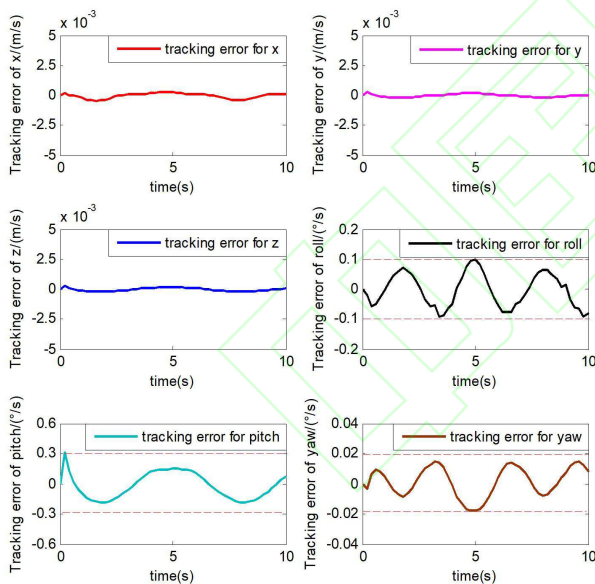


图 11 位姿速度误差曲线-PD控制

Fig. 11 Pose velocity error curve-PD control

姿态角是进行风洞试验的核心,因此对比图4与图10,图6与图11中的姿态角误差及姿态角速度误差,可以得出:与PD控制相比,所设计的自适应RBF神经网络控制使得姿态角误差及姿态角速度误差较小,控制精度更高,控制效果更好。

7 结论

本文针对用于风洞试验的绳牵引并联机器人,考虑所建立的数学模型的部分参数通常是未知的,设计了一种基于局部模型逼近的自适应RBF神经网络控制来提高末端执行器的运动控制精度,相关结论如下:

(1)考虑分析了动力学模型的部分未知参数,采用RBF神经网络进行了局部模型的逼近设计。

(2)针对绳牵引并联机器人动力学模型的特点,设计了一种自适应控制律,并通过构建了一种积分型Lyapunov函数对系统进行了稳定性分析,证明了所设计的控制律能够保证闭环系统的渐近稳定。

(3)仿真结果表明所设计的控制律能够有效的控制绳牵引并联机器人,确保末端执行器的位姿精度,与PD控制相比,控制精度更高,提高了末端执行器的控制性能,为后续绳牵引并联机器人在风洞试验的实际应用中提供理论基础和技术支持。

参考文献:

- [1] S.Melber-Wilkending, A.Heidebrecht, G.Wichmann. A new approach in CFD supported wind tunnel testing. *25th International Congress of the Aeronautical Sciences*.Hamburg:ICAS,2006,pp:1-10.
- [2] WANG Xiaoguang, LIN Qi. Progress in wire-driven parallel suspension technologies in wind tunnel tests. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2018, 39(10):(022064-1)-(022064-20). (王晓光,林麒. 风洞试验绳牵引并联支撑技术进展. 航空学报, 2018, 39(10):(022064-1)-(022064-20).)
- [3] LAFOURCADE P,LLIBRE M,REBOULET C. Design of a parallel wire-driven manipulator for wind tunnels. *Proceedings of the Workshop on Fundamental Issues and Future Research Directions for Parallel Mechanisms and Manipulators*.Quebec,2002,pp:187-194.
- [4] LAFOURCADE P,LLIBRE M. First steps toward a sketch-based design methodology for wire-driven manipulators. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*.Piscataway,NJ: IEEE Press,2003,pp:143-148.
- [5] LAFOURCADE P. *Study of parallel manipulators with cables, design of an active suspension for wind tunnel*.Paris:ENSAE,2004.
- [6] LAMBERT T J, VUKASINOVIC B, GLEZER A. A six degrees of freedom dynamic wire-driven traverse. *Aerospace*, 2016, 3(2):1-16.
- [7] LAMBERT T J. *Aerodynamic control of flow dynamics coupled to a free-flight axisymmetric body*. Georgia: Georgia Institute of Technology,2016.
- [8] LAMBERT T J,VUKASINOVIC B,GLEZER A. Aero-dynamic flow control of wake dynamics coupled to a moving bluff body. *8th AIAA Flow Control Conference*.Reston,VA:AIAA,2016.
- [9] BRUCKMANN T,HILLER M,SCHRAMM D. *An active suspension system for simulation of ship maneuvers in wind tunnels*.Berlin:Springer Netherlands Press,2010.
- [10] Test facilities[EB/OL].(2013-12-31)[2018-01-10].http://tsagi.com/experimental_base/.
- [11] WANG X G, PENG M, HU Z, et al. Feasibility investigation robot in hypersonic wind tunnel test. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2017,231(13):2375-2383.
- [12] HU Z H, PENG M J, JI Y F, et al. Feasibility analysis of WDPR support cone model in hypersonic wind tunnel. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2017, 43(11):2293-2301. (胡正红,彭苗娇,冀洋锋等. 高超声速风洞WDPR支撑尖锥模型应用可行性分析. 北京航空航天大学学报, 2017,43(11):2293-2301.)
- [13] Sana Baklouti, Eric Courteille, Philippe Lemoine, Stéphane Caro.Vibration reduction of Cable-Driven Parallel Robots through elasto-dynamic model-based control. *Mechanism and Machine Theory*,2019,139:329-345.

- [14] Reza Babaghasabha, Mohammad A.Khosravi, Hamid D.Taghirad. Adaptive robust control of fully-constrained cable driven parallel robots. *Mechatronics*,2015,25:27-36.
- [15] KHOSRAVI M A, TAGHIRAD H D. Dynamic modeling and control of parallel robots with elastic cables: singular perturbation approach. *IEEE Transactions on Robotics*, 2017,30(3):694-704.
- [16] Hamed Jamshidifar, Saeid Khosravani, Baris Fidan and Amir Khajepour. Vibration Decoupled Modeling and Robust Control of Redundant Cable-Driven Parallel Robots. *IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS*,2018,23(2):690-701.
- [17] Weiwei Shang, Bingyuan Zhang, Bin Zhang, Fei Zhang and Shuang Cong. Synchronization Control in the Cable Space for Cable-Driven Parallel Robots. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, 2019, 66(6):4544-4554.
- [18] Rogier de Rijk, Mitchell Rushton and Amir Khajepour. Out-of-Plane Vibration Control of a Planar Cable-Driven Parallel Robot. *IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS*,2018,23(4):1684-1692.
- [19] Zane Zake, Francois Chaumette, Nicol' o Pedemonte and St' ephane Caro. Vision-Based Control and Stability Analysis of a Cable-Driven Parallel Robot. *IEEE ROBOTICS AND AUTOMATION LETTERS*,2019,4(2):1029-1036.
- [20] Wang Xiaoguang, Wang Yilong, Lin Qi, Yue Suilu. HIGH PRECISION CONTROL OF WIRE-DRIVEN PARALLEL ROBOT IN WIND TUNNEL TEST. *JOURNAL OF DYNAMICS AND CONTROL*,2016,14(5):475-480.
(王晓光,王义龙,林麒,岳遂录.风洞试验绳牵引并联机器人高精度控制仿真.动力学与控制学报,2016,14(5):475-480.)
- [21] LIU Jun, WANG Xiaoguang, WANG Yuqi, LIN Qi. Adaptive sliding mode control of wire-driven parallel suspension system in wind tunnel tests. *Control Theory & Applications*,2019,36(9):1477-1485.
(刘骏,王晓光,王宇奇,林麒.风洞试验绳牵引并联支撑系统自适应滑模控制.控制理论与应用,2019,36(9):1477-1485.)
- [22] ZHOU Fangui, WANG Xiaoguang, GAO Zhongxin, LIN Qi. Binocular Vision-Based Measurement of Dynamic Motion for Aircraft Model Suspended by Wire System. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*,2020,41(2):(123059-1)-(123059-10).
(周凡桂,王晓光,高忠信,林麒.双目视觉绳系支撑飞行器模型位姿动态测量.航空学报,2020,41(2):(123059-1)-(123059-10).)
- [23] LIU J, WANG X G, WANG Y Q, et al. Continuous terminal sliding mode control of a 6-dof wire-driven parallel robot. *Proceedings of IEEE International Conference on Robot and Biomimetics*. Piscataway, NJ, USA: IEEE,2017,pp:1757-1762.
- [24] Liu Jinkun. *RBF neural network control for mechanical systems: Design, Analysis and MATLAB simulation. Second Edition*. Beijing: Tsinghua University Press, 2018.
(刘金琨.RBF神经网络自适应控制及MATLAB仿真(第2版).北京:清华大学出版社,2018.)

附录

附录内容.

作者简介:

王宇奇 作者简历, 目前研究方向为绳牵引并联机器人控制技术、动力学控制以及智能控制等, E-mail: 940898628@qq.com;

林麒 作者简历, 目前研究方向为风洞实验技术, E-mail: lin-students@126.com;

周磊 作者简历, 目前研究方向为非线性控制、伺服系统控制技术研究与应用等, E-mail: 445315201@qq.com;

施昕昕 作者简历, 目前研究方向为电机控制、运动控制、机电一体化系统研究, E-mail: 260166787@qq.com;

杜一君 作者简历, 目前研究方向为人脸识别、模糊理论、图像处理 and 智能优化算法, E-mail: 619024785@qq.com;

乔贵方 作者简历, 目前研究方向为机器人仿生控制与工业机器人检测与标定技术, E-mail: 361182805@qq.com.