

文章编号: 2095-2163(2021)04-0088-06

中图分类号: TH11

文献标志码: A

一种三自由度并联机器人运动控制系统性能分析及仿真

路博凡, 张若平, 韩家哺, 钱仲楷

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘要: 针对 3UPS-UP 并联机构实现运动控制, 提出一种有效的控制方法。首先对 3UPS-UP 并联机构的三维建模进行运动学分析利用封闭矢量法算出机器人的逆解, 再把并联机器人用 ANSYS 做固有频率与谐响应分析; 得出刚度性能与稳定性对控制系统的要求。通过 SolidWorks 中的三维模型用插件导入 Simulink 中快速搭建机械控制模型, 然后搭建并改良电机驱动物理模型, 补全整个控制模型; 同时搭建经典 PID 与模糊 PID 两套控制系统并做对比分析, 最后用模糊 PID 配合之前搭建的控制模型进行仿真。

关键词: 并联机器人; 模糊 PID; MATLAB/simulink

Performance analysis and Simulation of a 3-DOF parallel robot motion control system

LU Bofan, ZHANG Ruoping, HAN Jiabu, QIAN Zhongkai

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering and Science, Shanghai 201620, China)

[Abstract] An effective control method for motion control of 3UPS-UP parallel mechanism is proposed. Firstly, the kinematics analysis of 3d modeling of 3UPS-up parallel mechanism is carried out, and the inverse solution of the robot is calculated by using closed vector method. Then, the parallel robot is analyzed with ANSYS for its natural frequency and harmonic response. The requirements of stiffness performance and stability for the control system are obtained. The 3d model in SolidWorks is imported into Simulink by plug-ins to quickly build the mechanical control model, and then the physical model driven by motor is built and improved to complete the whole control model. At the same time, the classical PID and fuzzy PID control systems were built and compared. Finally, the fuzzy PID control model was used to simulate.

[Key words] Parallel robot; Fuzzy PID; MATLAB/simulink

0 引言

随着工业时代的发展, 人们对于并联机器人的研究在不断的深入。并联机器人在对于需要重载工作场合和零部件表面较为复杂的加工场景上都有着无可比拟的优秀表现; 但由于并联机器人的结构较为复杂, 所以控制系统的设计一直是一个难题。首先由赵东亚等学者^[1-2]将并联机器人控制方式划分为基于模型与不基于模型两大类, 针对基于模型的方法有状态反馈法^[3]、鲁棒自适应控制、滑模变结构控制等^[4]。将模糊控制^[5]、神经网络等应用于不基于模型的并联机器人控制; 吴博等学者^[6]采取分散式控制方式来制作控制系统; 陈强等^[7]复合控制采用传统 PID 与智能控制方法的结合。

本文将采用模糊 PID 的控制方法; 并结合并联机器人的 Simscape 物理模型进行改进, 从而得到更好的控制效果。

1 3UPS-UP 并联机器人的运动建模

提出一种冗余驱动 3UPS-UP 并联机构, 该机构可用于各种汽车零部件的加工复杂曲面等工程应用中。如图 1 所示。

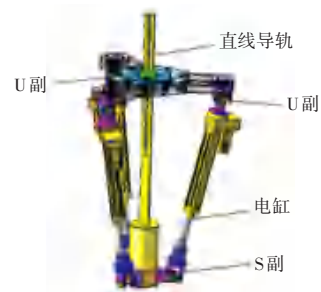


图 1 3UPS-UP 并联机器人结构

Fig. 1 ER20-1700 robot structure

由图 1 所示, 其中该并联机构从上到下分别由定平台、中间恰约束从动支链 UP、3 个完全相同的 UPS 驱动支链和底部定平台部分构成。其中定平

基金项目: 上海市地方高校能力建设计划项目(18030501200)。

作者简介: 路博凡(1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 智能机器人。

收稿日期: 2020-11-16

台和3个驱动支链动是起到驱动机器人正常运动及支撑固定的作用,使整个系统更加稳定,是整个并联机器人的基础。而动平台为末端执行器的安装平台,传递位置和力的信息。其中,(U)为虎克铰;(P)为移动副;(S)为球铰链。UPS支链中球副(S)与动平台相连,另一端通过虎克角与定平台相连接。

2 机器人运动学与性能分析

2.1 确定机器人运动学模型

该冗余驱动3UPS-UP并联机构的原理图如图2所示, A_i 和 B_i 分别为3UPS-UP并联机构第*i*条分支杆与动平台和定平台的铰接点。在定平台中心建立固定坐标系 $\{O-xyz\}$,坐标原点 O 位于正三角形 $B_1B_2B_3$ 外接圆圆心。 x 轴由 O 点指向 B_1 点,与 OB_1 重合, y 轴由右手法则确定,UP支链的 U 副通过 O 点, z 轴朝向 $A_1A_2A_3$ 动平台,并与定平台法线重合 z 轴于定平台法线重合。

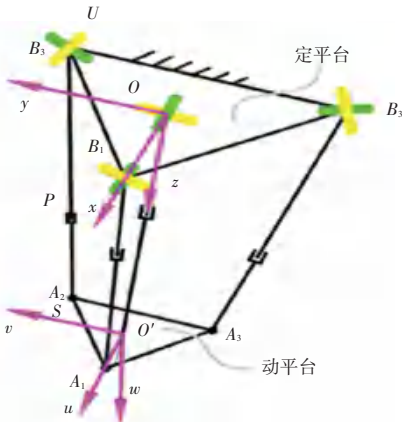


图2 机器人运动模型图

Fig. 2 Robot motion model

2.2 机器人运动学逆解

设 a 为动平台 $A_1A_2A_3$ 外接圆半径, b 为定平台 $B_1B_2B_3$ 外接圆半径, A_i 在动坐标系 $\{O'-xyz\}$ 下的矢量和点 B_i 在定坐标系 $\{O-xyz\}$ 下的矢量分别为:

$$\begin{cases} \vec{a}_1 = a[1 & 0 & 0]^T, \\ \vec{a}_2 = a[-\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0]^T, \\ \vec{a}_3 = a[-\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0]^T, \\ \vec{b}_1 = b[1 & 0 & 0]^T, \\ \vec{b}_2 = b[-\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0]^T, \\ \vec{b}_3 = b[-\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0]^T. \end{cases} \quad (1)$$

动平台外接圆中心在定坐标系 $\{O-xyz\}$ 下的

位置矢量:

$$\mathbf{r} = [x \quad y \quad z]^T. \quad (2)$$

建立矢量方程式(3):

$$\mathbf{L}_i = \mathbf{a}_i + \mathbf{r} - \mathbf{b}_i. \quad (3)$$

其中: $\mathbf{L}_i = L_i \vec{L}_i$; L_i 为第*i*条支链长度系数; \vec{L}_i 为第*i*条支链的单位向量。

则3UPS-UP的位置逆解为:

$$\begin{cases} L_i = \|\mathbf{a}_i + \mathbf{r} - \mathbf{b}_i\|, \\ \vec{L}_i = \frac{\mathbf{a}_i + \mathbf{r} - \mathbf{b}_i}{\|\mathbf{a}_i + \mathbf{r} - \mathbf{b}_i\|}. \end{cases} \quad (4)$$

式(3)对时间求导得:

$$\dot{\mathbf{L}}_i = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{a}_i + \mathbf{v} - L_i \boldsymbol{\omega}_{L_i} \times \vec{L}_i. \quad (5)$$

由于 $\vec{L}_i^T(\boldsymbol{\omega}_{L_i} \times \vec{L}_i) = 0$,对式(5)两端点乘 \vec{L}_i^T 可得:

$$\mathbf{v}_{L_i} = (\mathbf{a}_i \times \vec{L}_i)^T \boldsymbol{\omega} + \vec{L}_i^T \mathbf{v}. \quad (6)$$

将上式写成矩阵形式可得:

$$\mathbf{V}_{L_i} = \mathbf{J}_L \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

$$\mathbf{J}_L = \begin{bmatrix} \vec{e}_1^T L_1^T & (\mathbf{a}_1 \times \vec{L}_1)^T \\ \vec{e}_2^T L_2^T & (\mathbf{a}_2 \times \vec{L}_2)^T \\ \vec{e}_3^T L_3^T & (\mathbf{a}_3 \times \vec{L}_3)^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

其中, $\mathbf{J}_L \in R^{3 \times 6}$ 即为刚性驱动链速度雅可比矩阵。

2.3 3UPS-UP并联机器人模态与谐响应分析

根据3UPS-UP并联机构实际工作情况来固定静平台,然后通过ANSYS做结构自由振动分析;得到该机构的前6阶固有频率(见表1)。

表1 3UPS-UP并联机器人固有频率

Tab. 1 Natural frequency of 3UPS-UP parallel robot

阶次	频率/Hz
1	16.561
2	26.446
3	34.102
4	39.785
5	46.319
6	50.187

分析出并联机构在0~60 Hz范围内机构的响应情况。图3~图5为3UPS-UP并联机器人动平台沿 X, Y, Z 的位移响应曲线。

由 X, Y, Z 的位移响应曲线图可以看出在1,2阶固有频率附近,动平台沿 X, Z 方向容易产生影响;3,4阶固有频率附近,动平台沿 X, Y, Z 方向产生的

影响最为明显;表示 17 Hz 和 65 Hz 的频率对 3UPS-UP 并联机器人最容易造成破坏。所以说明该机构在刚度和稳定性方面都达到应用标准。

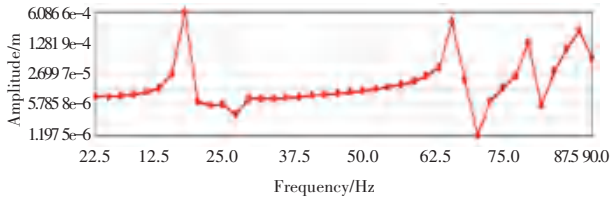


图 3 动平台沿 X 轴方向位移响应曲线

Fig. 3 The displacement response curve of the moving platform along the X axis

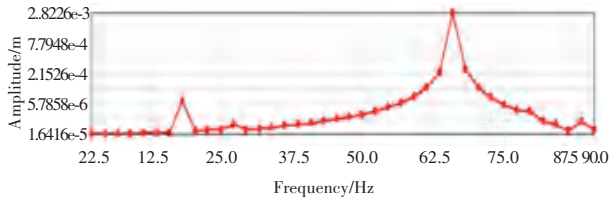


图 4 动平台沿 Y 轴方向位移响应曲线

Fig. 4 The displacement response curve of the moving platform along the Y axis

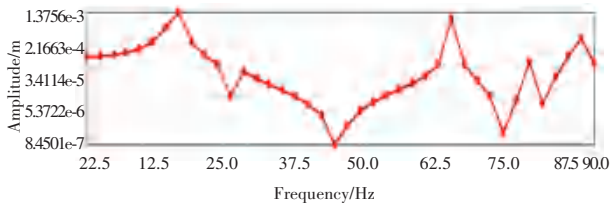


图 5 动平台沿 Z 轴方向位移响应曲线

Fig. 5 The displacement response curve of the moving platform along the Z axis

3 3UPS-UP 并联机器人控制系统设计

3.1 基于 SimMechanic 工具箱的机器人建模

首先打开之前做好的三维建模装配体,对其进行模型的简化,尽量减少不必要的细节同时要注意关节之间的约束关系;改进后的并联机器人物理模型,如图 6 所示。

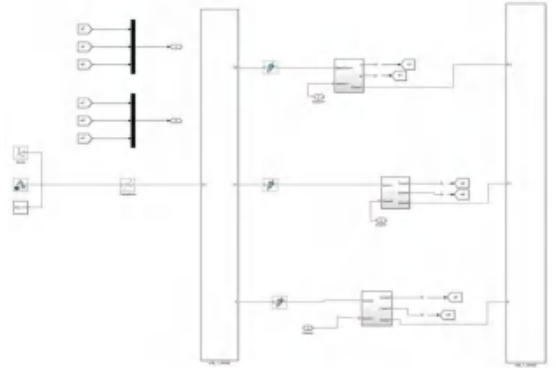


图 6 改进后的并联机器人物理模型

Fig. 6 Improved Parallel robot physical model

3.2 搭建电机驱动 Simscape 物理模型

因为在不需要编码器的前提下,Simulink 里自带的步进电机是可以直接输出位置信号的,所以可以根据并联机器人实际工作场景需求对初始角再进行改良。为了适应不同初始角度状态,在电机的输出后将电机的物理角度信号转换成模拟值,修改后的电机模型如图 7 所示。

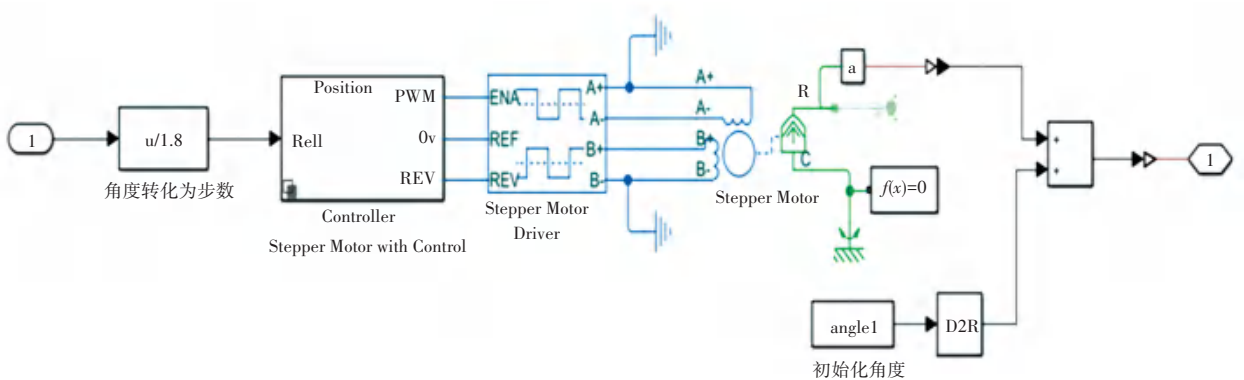


图 7 改进后步进电机模型图

Fig. 7 Improved model of rear stepper motor

4 模糊 PID 的搭建与控制仿真结果

4.1 模糊 PID 控制器的搭建

模糊控制器的设计主要分三步骤,首先定义输

入的隶属度函数使其模糊化;再建立规则库进行模糊推理;最后输出隶属度函数使其清晰化。

通过 MATLAB 的 Fuzzy 工具箱,在经典 PID 的基础上加上模糊控制,使其变成模糊 PID。首先设

置输入、输出以及其论域的相应参数;在 Fuzzy 工具箱中设置输入为误差 E 和误差变化 EC; 输出为 ΔKP 、 ΔKD 、 ΔKI ; 人们使用 Add Variable 指令来增加输入输出, 并定义输入和输出的论域均为 (-6, 6), 如图 8 所示。

其次为输入输出变量选取对应类型、数量的隶属度函数, 在 Fuzzy 工具箱的 Member Function Edit 中完成调试。本文采用部分三角隶属度函数和部分高斯型隶属度函数混合的形式; 定义的隶属度函数, 如图 9 所示。

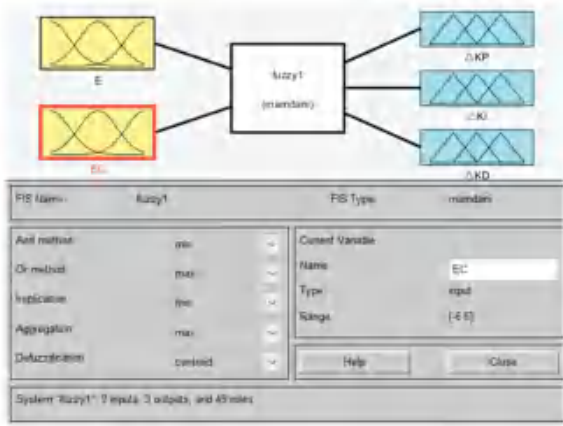
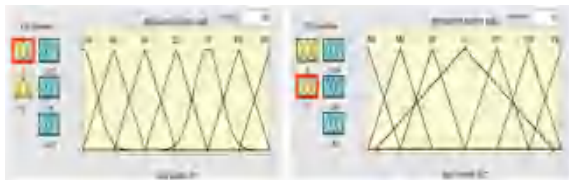
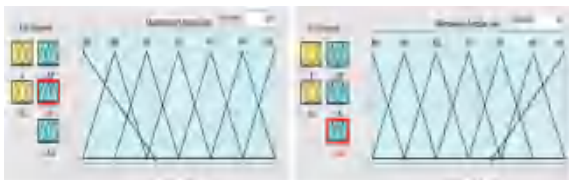


图 8 系统的输入输出设定

Fig. 8 System input and output Settings



(a) 输入 e 的隶属度函数 (b) 输入 ec 的隶属度函数
 (a) Enter the membership function of error (b) Enter the membership function of ec



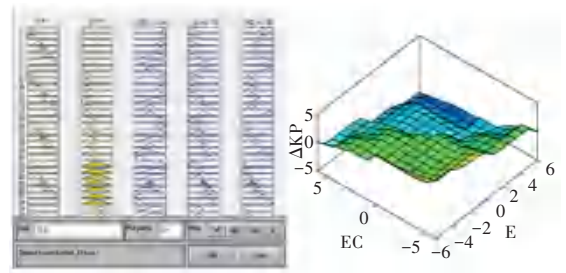
(c) 输出积分增益的隶属度函数 (d) 输出比例增益的隶属度函数
 (c) Membership function of output integral gain (d) Membership function of output proportional gain

图 9 隶属度函数的设定

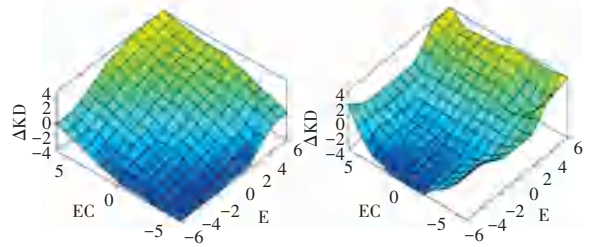
Fig. 9 Set of membership functions

然后按照设计原则设计出模糊规则, 通过 Rule Editor 界面开始逐一输入共 49 条模糊规则成立模糊规则库。模糊规则库建立完成以后, 可以通过 Surface viewer 来直接观测到 3 个输出 ΔKP 、 ΔKD 、 ΔKI 的模糊规则和模糊推理曲面并加以修订和完善规则库。完善之后把模糊数据库另存为 Fuzzy222.

fis 格式的文件, 如图 10 所示。



(a) 可视化 ΔKP 、 ΔKD 、 ΔKI 的模糊规则 (b) 可视化 ΔKP 的模糊推理曲面
 (a) Visualize the fuzzy rules of ΔKP , ΔKD , ΔKI (b) Visualize fuzzy inference surface of ΔKP



(c) 可视化 ΔKI 的模糊推理曲面 (d) 可视化 ΔKD 的模糊推理曲面
 (c) Visualize fuzzy inference surface of ΔKI (d) Visualize fuzzy inference surface of ΔKD

图 10 完善后的模糊规则和模糊推理曲面

Fig. 10 The Improved fuzzy rules and fuzzy inference surfaces

4.2 模糊 PID 与经典 PID 控制效果对比

至此模糊 PID 控制的所有准备工作已经完成, 接下来将在一套系统里同时搭建经典 PID 和模糊 PID, 并进行控制系统各项指标性能测试, 比较二者的控制性能。

由于经典 PID 控制和现代控制理论都需要被控对象的精准模型, 根据给定的模型和性能指标去设计控制器, 但是在大多数实际工程运用中会发现很多时候被控对象的控制模型是存在一定误差的。如果在并联机构底部装有负载的时候调整 PID 的参数, 在机器人变成空载状态下再使用相同参数就很有可能发生超调现象, 因为在输出量保持不变的情况下, 其惯性和质量变小了, 就容易产生超调。

在 Matlab 中用上一小节中做好的模糊数据库搭建一套完整的模糊 PID 控制系统, 同时搭建一套经典 PID 的控制系统; 如图 11 所示。

为了比较仿真的可靠性, 经典 PID 的参数是经过多次测试得出比较优良的参数, 而模糊 PID 的数据搭建更是根据查阅各种文献和几次测试后得出的最佳数据库。开始测试控制系统动态性能非常重要的指标之一的伺服性能, 伺服性能代表着控制系统高频输入信号的跟随能力。在之前控制模型中同时对其加入随机的高频信号模块。将高频信号设置为采样时间为 100 s; 并且变化幅度大。

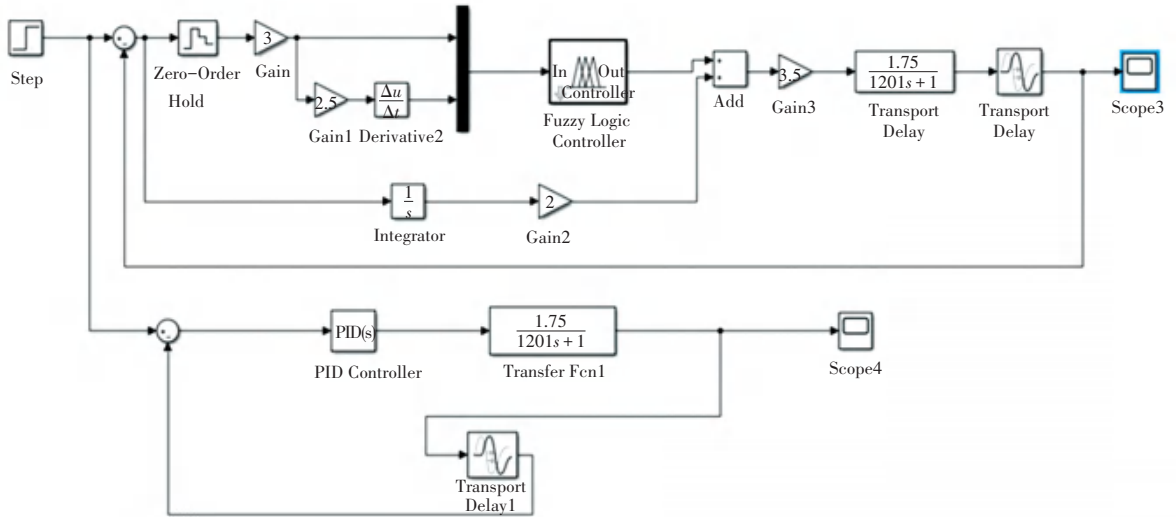


图 11 模糊 PID 与经典 PID 控制模型图

Fig. 11 Fuzzy PID and PID control model

如图 12 所示,黄色的最初输入信号曲线在 1 左右,每隔 100 s 就会有一个较大的随机幅值变化,而传统 PID 的曲线无法很好的跟随原始信号,反应是较慢的。如图 13 所示,模糊 PID 的曲线相较传统 PID 是更能反应原始信号的情况跟随的更好。如果要让并联机器人执行高频且大幅度摆动的任务,模糊 PID 比传统 PID 的效果是更好的。

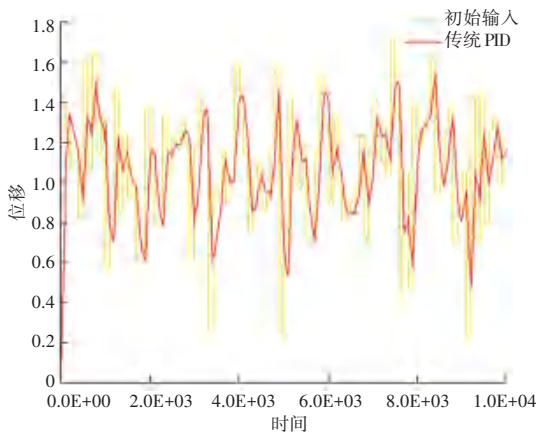


图 12 经典 PID 伺服性能图

Fig. 12 Classic PID servo performance

为了测试控制系统指标的鲁棒性,在上一个实验的基础上不改变 2 种 PID 的控制参数,把传递函数的分子改为 0.1,相当于把机器人从空载状态变为满载;因为传递函数的分子可以理解物理含义的惯性,仿真结果如图 14 所示。

由图 14 可知,在满载情况下让并联机器人高频且大幅度摆动,模糊 PID 虽然不能非常精确的摆动到位,但能表现出正确的摆动趋势;反观传统 PID 则完全无法表现摆动趋势。综合以上 3 个测试表明

对于并联机器人来说模糊 PID 的动态控制性能是比传统 PID 要好的,结合前文建立的并联机器人机械物理模型和改进电机模型,在并联模型的支链上;添加模糊 PID、驱动和传感模块等;建立的 SimMechanic 机构模型如图 15 所示。

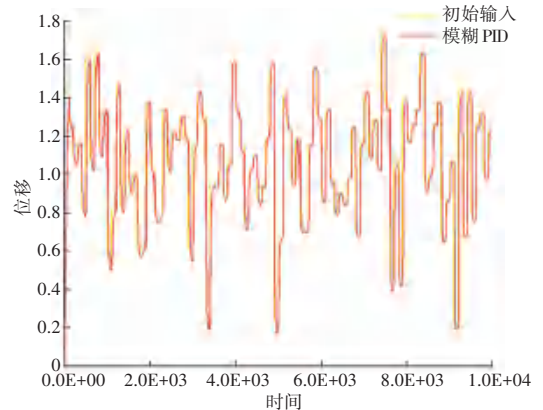


图 13 模糊 PID 伺服性能图

Fig. 13 Fuzzy PID servo performance

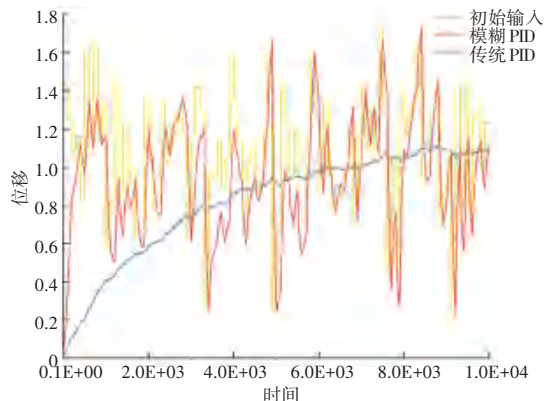


图 14 模糊 PID 和经典 PID 鲁棒性图

Fig. 14 Fuzzy PID and classical PID robustness

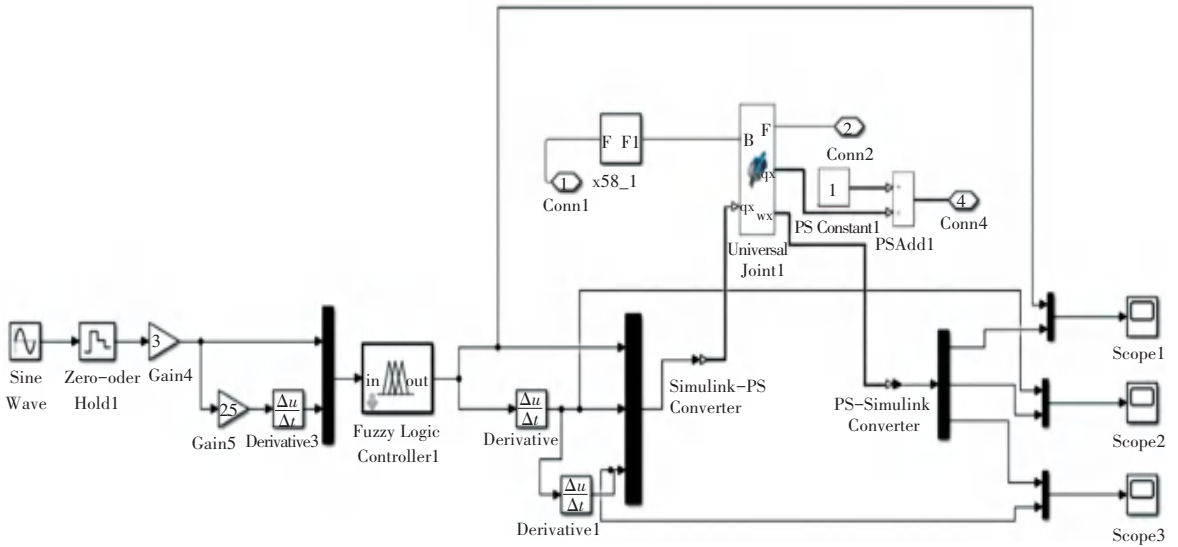


图 15 某一支链驱动器和传感器安装图

Fig. 15 Chain drive and sensor installation drawing

取 3UPS-UP 并联机构 Z 轴方向的位置移动和速度。轨迹跟踪和速度仿真结果如图 16 所示。

0.54 s 时其位移、速度和加速度都趋于稳定。说明通过模糊控制可以很好地反映出运动趋势,稳定性好、调节时间短和控制动态性的优异。

如图 16 所示,蓝色的轨迹跟踪曲线当跟踪至

位置 Displacement

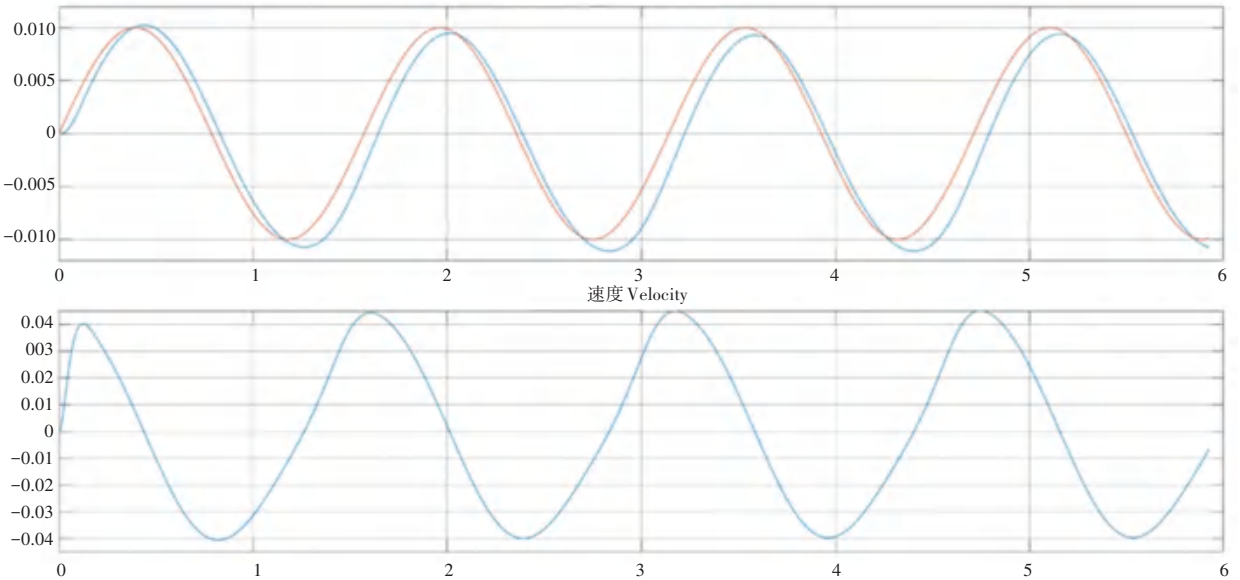


图 16 Z 轴方向位移与速度

Fig. 16 The Z axis displacement

5 结束语

从零搭建 3UPS-UP 并联机器人的控制系统,先在 MATLAB / SIMULINK 中搭建仿真模型;然后同时搭建经典 PID 和模糊 PID 两套控制模型进行比较分析;最后用较优的模糊 PID 配合之前的物理模型进行仿真实验。仿真结果表明控制系统的动态性能良好达到控制效果。

参考文献

[1] 赵东亚, 邹涛. 并联机器人控制方法研究 [J]. 组合机床与自

动化加工技术, 2010(5):8-12.
 [2] 钱承. 六自由度隔振平台实验系统主被动耦合减振控制方法研究 [D]. 长沙:湖南大学, 2015.
 [3] 胡盛斌, 陆敏恂. 多关节机器人反馈线性化双模糊滑模控制 [J]. 机械科学与技术, 2013(1):105-110.
 [4] 张昌凡. 滑模变结构控制研究综述 [J]. 株洲工学院学报, 2004, 18(2):1-5.
 [5] 王立新. 模糊系统与模糊控制教程 [M]. 清华大学出版社, 2003.
 [6] 吴博, 吴盛林, 赵克定. 并联机器人控制策略的现状和发展趋势 [J]. 机床与液压, 2005(10):5-8.
 [7] 陈强, 黄勇, 胡晓娟. 并联机器人控制方法研究现状 [J]. 机械工程师, 2010(2):45-46.