



机器人
Robot
ISSN 1002-0446, CN 21-1137/TP

《机器人》网络首发论文

题目：空间机械臂地面垂直方向重力补偿控制系统设计
作者：徐永利，李潇男，刘勇，杨明毅，刘明洋
DOI：10.13973/j.cnki.robot.190042
收稿日期：2019-01-28
网络首发日期：2019-09-26
引用格式：徐永利，李潇男，刘勇，杨明毅，刘明洋. 空间机械臂地面垂直方向重力补偿控制系统设计[J/OL]. 机器人. <https://doi.org/10.13973/j.cnki.robot.190042>



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。

空间机械臂地面竖直方向重力补偿控制系统设计

徐永利^{1,2}, 李潇男^{1,2,3}, 刘勇^{1,2}, 杨明毅^{1,2}, 刘明洋^{1,2}

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016; 2. 中国科学院机器人与智能制造创新研究院, 辽宁 沈阳 110169;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为解决大型空间机械臂地面微重力模拟实验问题, 设计了一种 3 维主动悬吊式重力补偿系统. 系统主要由水平 2 维直线运动单元与竖直重力平衡吊挂单元组成, 在竖直方向上通过恒张力控制思想实现微重力模拟, 并给出了带负载的伺服电机的数学模型. 提出一种基于模糊 PID (比例-积分-微分) 参数整定的力/位混合控制方法, 并研究了在未知负载干扰、系统干扰以及机械臂不同运动速度下控制器的控制性能. 仿真实验结果表明, 该控制方法能够将重力补偿精度保持在 0.3%F.S (全量程) 之内, 使得系统具有较强的鲁棒性和动态响应能力.

关键词: 空间机械臂; 微重力模拟; 恒张力控制; 模糊 PID (比例-积分-微分) 控制; 力/位混合控制
中图分类号: V416.5 **文献标识码:** A

Design of the Gravity Compensation Control System in the Vertical Direction on the Ground for Space Manipulator

XU Yongli^{1,2}, LI Xiaonan^{1,2,3}, LIU Yong^{1,2}, YANG Mingyi^{1,2}, LIU Mingyang^{1,2}

(1. *Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;*
2. *Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, China;*
3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: In order to solve the problem of ground microgravity simulation experiment of large space manipulator, a three-dimensional active suspension gravity compensation system is designed. The system is mainly composed of a horizontal two-dimensional linear motion unit and a vertical gravity balance suspension unit. The microgravity simulation is realized by the idea of constant tension control in the vertical direction. The mathematical model of the servo motor with load is given. A hybrid force/position control method based on fuzzy PID (proportional-integral-differential) parameter tuning is proposed. The control performance of the controller with unknown load and system interference under the different motion speeds of the manipulator is studied. The simulation results show that the control method can keep the gravity compensation accuracy within 0.3%F.S (full scale), and the system has strong robustness and dynamic response capability.

Keywords: space manipulator; microgravity simulation; constant tension control; fuzzy PID (proportional-integral-differential) control; hybrid force/position control

1 引言 (Introduction)

随着空间技术的不断发展, 空间机械臂被越来越多地应用到在轨服务中, 例如, 在恶劣的空间环境中协助宇航员完成空间垃圾的清理、航天器的维修与充能以及卫星的回收等空间作业. 为了保证空间机械臂能够在空间中稳定地运行, 需要在地面搭建微重力模拟环境对空间机械臂的各项性能指标进行大量的地面仿真实验验证^[1].

目前, 微重力模拟方法主要分为两大类型. 一类是真实微重力环境模拟, 主要包括落塔法、飞机失重法等, 真实地实现微重力环境; 另一类是等效微重力环境模拟, 主要包含水浮法、气浮法^[2]、悬

吊法^[3]等, 通过平衡重力等效模拟微重力环境. 落塔法和飞机失重法^[4]都是利用物体自由落体的原理实现微重力模拟环境, 但是该方法实验时间很短、造价昂贵, 能够进行实验的物体很少. 水浮法的原理是利用水的浮力来平衡物体重力实现微重力模拟环境, 该方法不仅需要机械臂进行空间密闭处理, 而且容易受水中紊流与水的阻力的影响, 从而导致实验精度较差. 气浮法的原理是利用喷气装置抵消物体的重力实现微重力模拟环境, 已经被成熟地应用到 2 维平台上, 但不适用于 3 维空间机械臂. 悬吊法又分为被动式^[5]与主动式^[6], 被动式悬吊法采用重物配重的方式进行重力平衡, 在机械臂运

动过程中无法控制吊索张力的变化,重力补偿精度低.主动式悬吊法通过控制电机牵引吊索,使吊索张力等于物体重力,相比前者,控制精度高,但技术复杂.针对大型空间机械臂的微重力模拟系统,如何进一步提高重力平衡的模拟精度,增强系统对未知干扰的抗干扰性,提高机械臂快速运动时的力平衡精度成为关键问题.本文设计了一种3维主动式悬吊重力补偿机构,水平方向的2维直线位移跟踪单元已经相对成熟.本文以某航天院所的空间机械臂地面重力补偿系统设计为工程背景,在竖直方向上采用恒张力^[7-8]的控制方式对物体进行重力平衡,使吊索张力恒等于物体重力,重力补偿精度要求达到1%F.S(量程),基于此技术指标,本文提出了一种基于模糊PID参数整定的力/位混合控制方法,实现了高精度、大量程、快速响应的重力平衡系统.

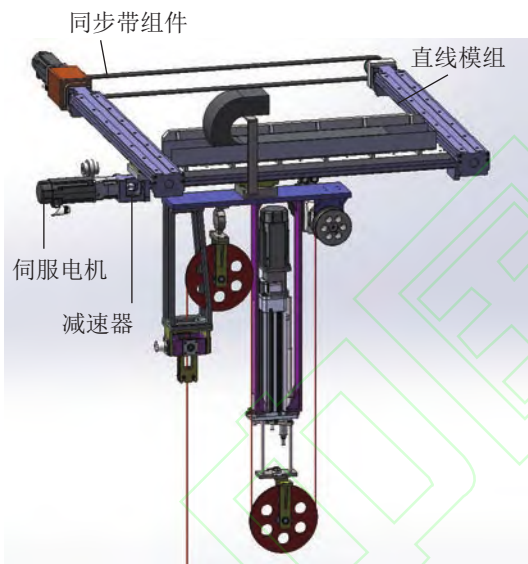


图1 空间机械臂微重力模拟系统

Fig.1 The microgravity simulation system of the space manipulator

2 空间微重力模拟系统设计 (Design of the spatial microgravity simulation system)

2.1 微重力模拟系统机械设计

空间机械臂微重力模拟系统如图1所示,系统由2维直线运动单元和竖直恒张力吊挂单元组成.2维直线运动单元主要由伺服电机、减速器、直线模组和同步带组件组成.通过采集角度传感器反馈的吊索偏转角对水平面内主动2维跟随的伺服电机进行位置控制,实现吊点的位置跟踪,使吊索保持竖直,避免引入水平分力影响模拟精度.恒张力吊挂单元主要由卷扬机构、电动缸、动滑轮、定滑轮

和张力传感器组成,通过张力传感器反馈给控制器控制电动缸的伸缩,从而保证吊索的张力与机械臂重力始终相等,实现恒张力控制.由于电动缸的行程有限,所以增加卷扬机构以扩展电动缸的行程.系统的控制目标是实现吊点在竖直方向的实时位置的快速跟随和重力的平衡,以模拟空间机械臂在空间微重力环境下的运动状态.

2.2 恒张力吊挂单元数学模型的建立

用于空间机械臂竖直方向模拟微重力环境的恒张力吊挂单元如图2所示,机械臂在竖直方向的运动会造成吊索吊点的上下移动,从而造成吊索张力的变化,控制吊索张力恒定是系统的主要作用.恒张力吊挂单元中保持吊索恒张力的核心就是电动缸,通过电动缸的伸缩带动吊索的上下移动,控制吊索张力,所以电动缸模型的建立尤为关键.电动缸由伺服电机与有杆电缸两部分组成,其中伺服电机是三相交流永磁同步伺服电机,有杆电缸是一种采用活塞杆的直线电缸.驱动元件是电驱动的丝杆,将电机的旋转运动转换成活塞杆的直线运动.

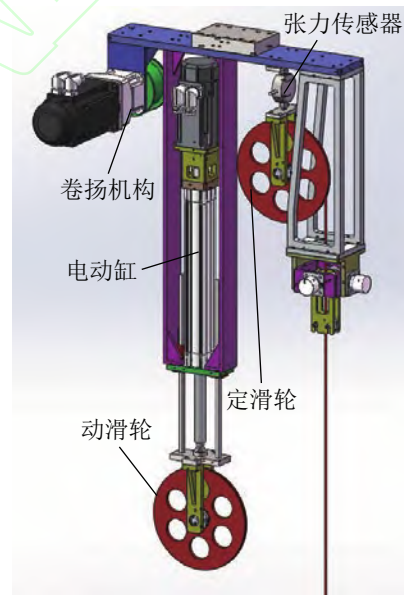


图2 恒张力吊挂单元

Fig.2 The hanging unit with constant tension

首先建立永磁同步伺服电机的模型^[9],在电机三相静止 abc 坐标系下可得电压方程为

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

得磁链方程为

$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_{bb} & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \psi_f \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, u_a 、 u_b 、 u_c 分别为定子 A、B、C 三相绕组的电压, i_a 、 i_b 、 i_c 分别为定子 A、B、C 三相绕组的电流, ψ_a 、 ψ_b 、 ψ_c 分别为定子 A、B、C 三相绕组的磁链, ψ_f 为转子永磁体的等效磁链, R_s 为三相定子绕组的电阻. L_{aa} 、 L_{bb} 、 L_{cc} 分别为定子 A、B、C 三相绕组的自感, $M_{xy} = M_{yx}$ ($x, y = a, b, c$) 为三相定子绕组的互感.

针对静止 abc 坐标系下的方程, 取恒幅值变换到 dq 同步旋转坐标系下, 加上转矩方程和运动方程, 可得完整的交流伺服电机在 dq 同步坐标系下的方程.

首先得到定子电压方程为

$$u_d = R_s i_d + p\psi_d - \omega_r \psi_q \quad (3)$$

$$u_q = R_s i_q + p\psi_q + \omega_r \psi_d \quad (4)$$

得磁链方程为

$$\psi_d = L_d i_d + \psi_f \quad (5)$$

$$\psi_q = L_q i_q \quad (6)$$

得电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2} n_p (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (7)$$

得运动方程为

$$T_e - T_m = J_m \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m \quad (8)$$

式中, ψ_d 、 ψ_q 为定子磁链在 d 、 q 轴上的分量, L_d 、 L_q 为定子绕组在 d 、 q 轴上的等效电感, i_d 、 i_q 为定子电流在 d 、 q 轴上的分量, u_d 、 u_q 为定子电压在 d 、 q 轴上的分量, ω_m 为转子机械角速度, T_e 为电磁转矩, T_m 为负载转矩, J_m 为电机转动惯量, B 为黏滞系数, n_p 为磁极对数.

对永磁同步伺服电机采用 d 、 q 轴系转子磁链定向控制, 并使 $i_d = 0$ A, 这种控制方式相对简单、效果良好、使用广泛. 在 $i_d = 0$ A 控制方式下有:

$$T_e = \frac{3}{2} n_p \psi_d i_q = \frac{3}{2} n_p \psi_f i_q \quad (9)$$

可以得到以交轴电压 u_q 为输入, 永磁同步伺服电机的机械角速度 ω_m 为输出的系统框图, 如图 3 所示.

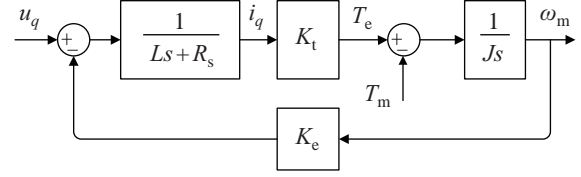


图 3 永磁同步伺服电机模型框图

Fig.3 The model block diagram of the permanent magnet synchronous servo motor

伺服电机的旋转运动通过有杆电缸转换成电动缸的直线伸缩运动, 其中有杆电缸的转动惯量为 J_d , 伺服电机的转动惯量为 J_m , 可计算得电动缸总的转动惯量为电机的转动惯量与有杆电缸的转动惯量之和:

$$J = J_d + J_m \quad (10)$$

当电动缸对机械臂进行重力平衡时, 电动缸的有杆电缸受到的轴向力为机械臂重力的 2 倍 $F = 2mg$, 此时电动缸的伺服电机的负载转矩为

$$T_L = \frac{Fgl}{2\pi\eta} \quad (11)$$

其中, F 为有杆电缸丝杆受到的轴向力, l 为有杆电缸的导程 (电机旋转 1 圈时有杆电缸丝杆直线运动的距离), η 为丝杆传动效率, g 为重力加速度.

系统工作时, 首先通过伺服电机转动带动有杆电缸伸缩直到吊索张紧, 使吊索张力等于目标重力, 根据胡克定律, 此时吊索张力为

$$F_L = kx = mg \quad (12)$$

当目标物体开始向上运动时, 此时吊索张力发生变化, 由吊索的弹力、阻尼力和惯性力组成, 此时吊索张力为

$$F_L = kx + c\dot{x} + m_s\ddot{x} \quad (13)$$

式中, x 为吊索长度的形变量, k 为吊索的刚度系数, c 为阻尼系数, m_s 为吊索质量.

此外, 伺服电机的控制一般配有相应的伺服驱动器, 伺服驱动器中集成了位置控制、速度控制和电流控制. 伺服驱动器接收上层控制器的位置控制指令, 结合编码器的位置反馈, 然后通过速度调节器的调节产生电流指令, 通过电流调节器产生伺服电机的等效电枢驱动电压, 经过永磁同步电机的等效绕组后, 会产生等效电枢电流, 在磁场的作用下产生电磁力矩, 带动负载运动. 最终得到带有负载的伺服驱动器驱动的永磁同步电机的模型框图, 如图 4 所示.

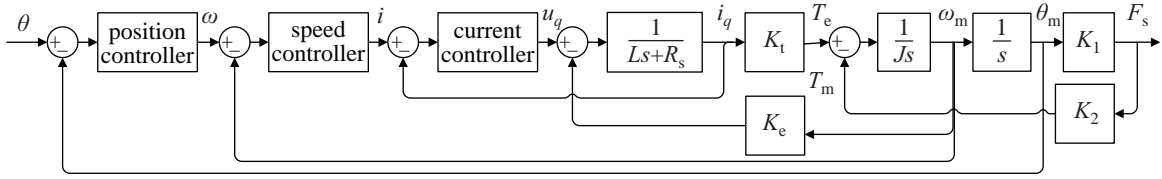


图 4 带伺服驱动器与负载的永磁同步电机模型框图

Fig.4 The block diagram of the permanent magnet synchronous motor with servo drive and loads

若直接采用位置控制算法，很难保证张力的控制精度，对此提出一种力/位混合的控制方案，并采用模糊参数整定算法，实现控制器参数的自动整定。

3 基于模糊 PID 参数整定的力/位混合控制器设计 (Design of the hybrid force /position controller based on fuzzy PID parameter turning)

力/位混合控制指的是对系统分别采用位置控制回路和力控制回路，通过综合 2 个回路进行恒张力的控制，力/位混合控制器框图如图 5 所示。

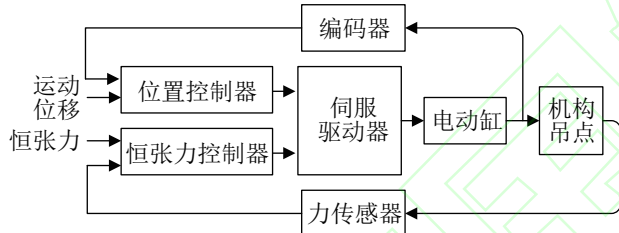


图 5 力/位混合控制器框图

Fig.5 The block diagram of the hybrid force/position controller

在利用恒张力吊挂单元进行重力平衡之前，计算机械臂的重力，控制电动缸的伸出使吊索张紧，直到张力传感器反馈的值等于机械臂的重力，此时吊索的张力就等于机械臂的重力，机械臂处于失重状态，设备处在静平衡状态。达到静平衡状态后，机械臂在竖直方向运动时，机械臂运动控制器向恒张力吊挂单元的位置控制器发送机械臂的运动位移，位置控制器控制吊点跟随机械臂的竖直运动，始终保持吊索的形变量不变，也就是保持吊索的张力恒定不变。仅在位置控制器的控制下，得到的平衡力的误差较大、精度不高。为了进一步提高力控制的精度，在位置控制的基础上又引入了力反馈闭环控制。如图 5 所示，力反馈闭环控制是以力传感器采集的位置闭环控制下的张力值与实际给定的机械臂重力之差作为输入，进一步提高力的控制精度，减小误差范围。

其中，位置控制器采用传统 PID 控制算法，以位置控制器接收到的机械臂实际位置值与电动缸的

实际位置值构成的偏差作为控制器的输入，PID 控制律为

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{K_i} \int_0^t e(t) dt + \frac{K_d de(t)}{dt} \right) \quad (14)$$

其传递函数的形式为

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{K_i s} + K_d s \right) \quad (15)$$

式中， K_p 为比例系数， K_i 为积分时间常数， K_d 为微分时间常数。通过经验试凑法确定位置控制器 PID 的 3 个参数。

恒张力控制器采用模糊 PID 控制算法。模糊控制^[10-11]是以模糊数学为基础，通过输入模糊化，建立模糊规则库，进行模糊推理，输出清晰化，推理出最优的控制参数，达到最优控制的目的。本文设计的模糊 PID 控制系统如图 6 所示。

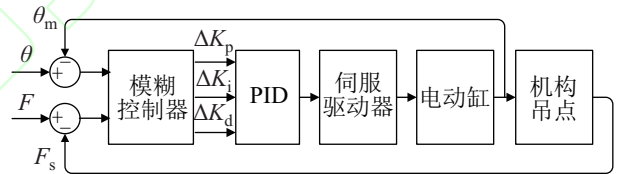


图 6 模糊 PID 控制系统框图

Fig.6 The block diagram of the fuzzy PID control system

选用两输入的模糊控制器，将位置偏差和力误差分别进行模糊化之后作为模糊控制器的输入，模糊控制器的控制量也需要进行模糊化。文中 ΔF 、 $\Delta \theta$ 、 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的模糊集均设为 7 个，分别为 NB (负大)、NM (负中)、NS (负小)、ZE (零)、PS (正小)、PM (正中)、PB (正大)。将输入量和控制量的论域统一设定为 $[-6, 6]$ 。

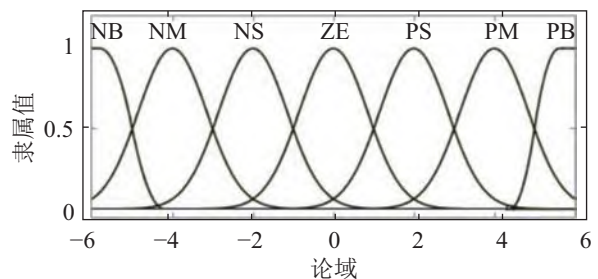
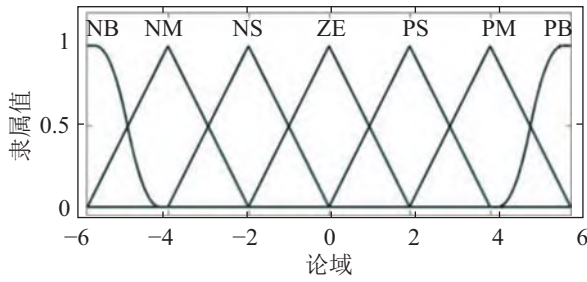


图 7 ΔF 和 $\Delta \theta$ 隶属度函数图

Fig.7 Membership function graph of ΔF and $\Delta \theta$

图8 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 隶属度函数图Fig.8 Membership function graph of ΔK_p , ΔK_i and ΔK_d

隶属度函数和模糊规则的选择是模糊控制器的关键, 本文选择高斯型函数和“Z形”函数作为隶属度函数. ΔF 和 $\Delta\theta$ 的隶属度函数图如图 7 所示, ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 的隶属度函数图如图 8 所示.

表 1 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 部分规则Tab.1 The partial rule table of ΔK_p , ΔK_i and ΔK_d

规则	$\Delta\theta$	ΔF	ΔK_p	ΔK_i	ΔK_d
1	NB	NB	PB	NB	PS
2	NB	NM	PB	NB	NS
3	NB	NS	PM	NM	NB
4	NB	ZE	PM	NM	NB
5	NB	PS	PS	NS	NB
6	NB	PM	ZE	ZE	NM
7	NB	PB	ZE	ZE	PS
8	NM	NB	PB	NB	PS
9	NM	NM	PB	NB	NS
10	NM	NS	PM	NM	NB
11	NM	ZE	PS	NS	NM
12	NM	PS	PS	NS	NM
13	NM	PM	ZE	ZE	NS
14	NM	PB	NS	ZE	ZE
15	NS	NB	PM	NB	ZE
16	NS	NM	PM	NM	NS
17	NS	NS	PM	NS	NM
18	NS	ZE	PS	NS	NM
19	NS	PS	ZE	ZE	NS
20	NS	PM	NS	PS	NS
21	NS	PB	NS	PS	ZE
22	ZE	NB	PM	NM	ZE
23	ZE	NM	PM	NM	NS
24	ZE	NS	PS	NS	NS
25	ZE	ZE	ZE	ZE	NS
26	ZE	PS	NS	PS	NS
27	ZE	PM	NM	PM	NS
28	ZE	PB	NM	PM	ZE

PID 控制器的 K_p 、 K_i 、 K_d 三个参数各有不同作用, 其中 K_p 能够提高响应速度, K_i 能够消除稳态误差, K_d 能够改善系统动态性能, 所以对于 3 个参数建立的规则有所不同, ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的部分规则如表 1 所示.

根据上述建立的模糊规则表对参数 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 进行动态整定, 得出最优控制参数, 然后通过比例因子将控制量进行解模糊处理, 得到精准控制量 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d , 进而得到:

$$\begin{aligned} K_p &= K_{p0} + \Delta K_p \\ K_i &= K_{i0} + \Delta K_i \\ K_d &= K_{d0} + \Delta K_d \end{aligned} \quad (16)$$

其中, K_{p0} 、 K_{i0} 、 K_{d0} 为 PID 控制器的初始参数.

4 仿真实验 (Simulation experiment)

本文仿真实验是在 Matlab/Simulink 环境下, 使用 Simulink 模块及函数分别建立模糊 PID 参数整定力/位混合控制仿真模型和力外环位置内环控制仿真模型, 通过对比实验验证设计的力/位混合控制模型的控制性能. 仿真实验的过程是首先将吊索张紧, 使吊索张力等于机械臂重力, 设备达到静平衡状态. 3 s 后机械臂开始在竖直方向上运动, 在第 6 s 时分别加入常见形式的负载干扰和系统干扰. 在实验中利用正弦函数曲线来模拟空间机械臂的位移曲线, 目标恒张力设定为 980 N. 采用的伺服电机型号为 AKM42E, 查询电机手册可得具体伺服电机的参数为: 额定电流 $I_N = 7.8$ A, 额定扭矩 $T_N = 2.72$ N·m, 转动惯量 $J_m = 1.5$ kg·cm², 磁极对数 $n_p = 5$, 电机阻抗 $R_s = 7.22$ Ω, 电机感抗 $L = 26.8$ mH, 电磁转矩系数 $K_t = 1.26525$, 反电势系数 $K_e = 0.8435$. 有杆电缸的参数为: 行程 $l = 2.54$ mm, 转动惯量 $J_m = 0.52$ kg·cm².

在 Matlab/Simulink 环境下搭建的模糊 PID 参数整定力/位混合控制仿真模型如图 9 所示, 搭建的力外环位置内环控制仿真模型如图 10 所示.

仿真实验 1: 在不考虑负载干扰的情况下, 以频率为 2 rad/s 的正弦曲线模拟机械臂位移曲线, 分别在力外环位置内环控制器和模糊 PID 参数整定力/位混合控制器作用下进行仿真实验, 得到的仿真结果如图 11 所示. 在力外环位置内环控制器作用下得到的力误差一直处在波动状态, 并且误差范围相对较大, 在 6.8 N 左右, 重力补偿精度为 0.7%F.S 左右. 在模糊 PID 参数整定力/位混合控制器作用下得到的力的误差被控制在 1.4 N 左右, 重力补偿精度达到 0.18%F.S 左右.

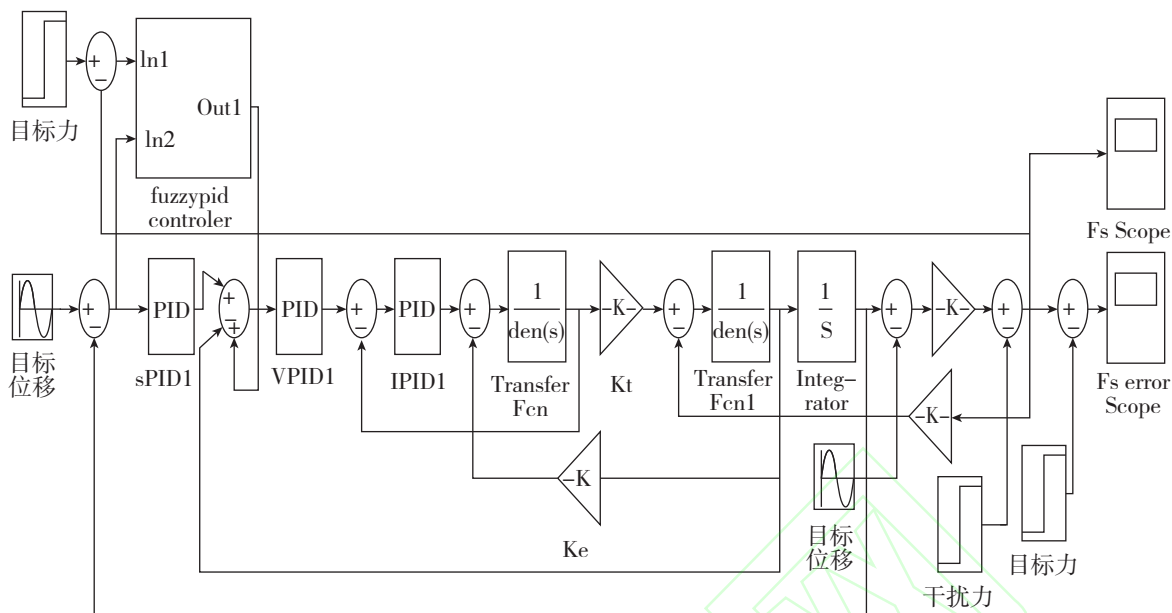


图9 力/位混合控制仿真模型框图

Fig.9 The simulation model block diagram of the hybrid force/position control

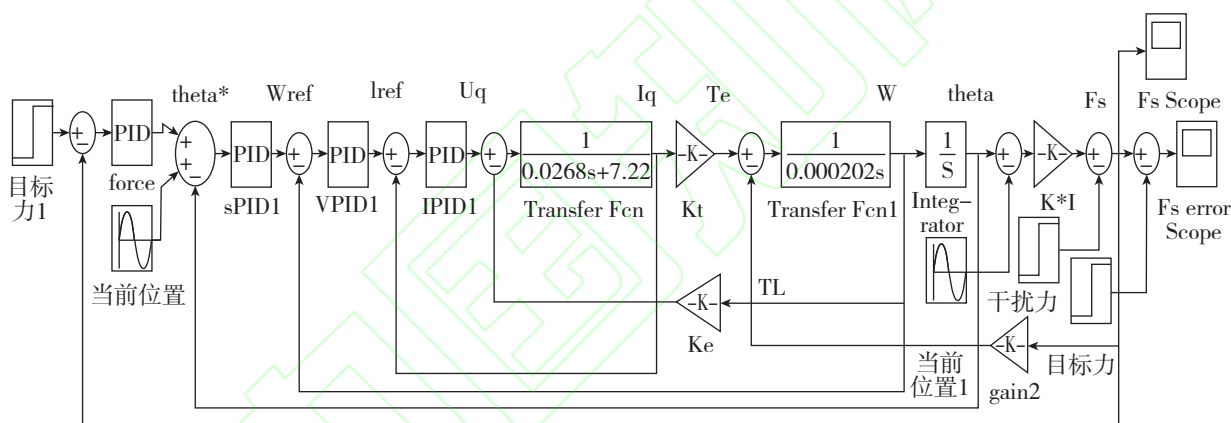


图10 力外环位置内环控制仿真模型框图

Fig.10 The simulation model block diagram of the force outer loop position inner loop control

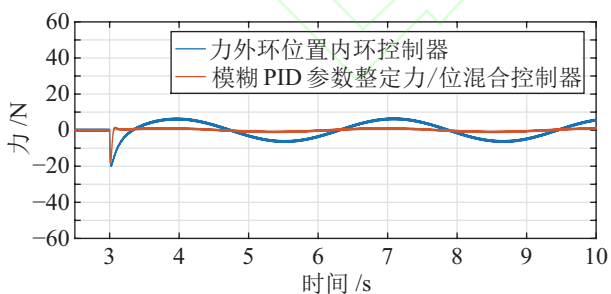


图11 无负载干扰的仿真结果

Fig.11 The simulation results without load interferences

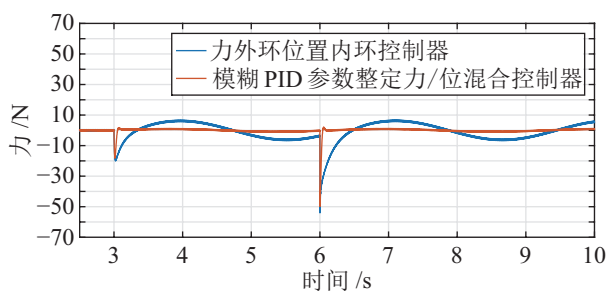


图12 阶跃干扰的仿真结果

Fig.12 The simulation results with step interferences

仿真实验 2: 加入 50 N 阶跃形式的负载干扰力, 在 2 种控制器作用下的仿真结果如图 12 所示。基于模糊 PID 参数整定力/位混合控制器相比于力外环位置内环控制器, 力误差调整时间更短、波动范围更小。

仿真实验 3: 加入 50 N 正弦形式的负载干扰力, 在 2 种控制器作用下的仿真结果如图 13 所示。在力外环位置内环控制器作用下得到的力误差范围相比无负载干扰力时的力误差范围增大, 误差在 10 N 左右, 重力补偿精度在 1%F.S 左右, 而本文设

设计的控制器相对于力外环位置内环控制器对此类干扰力的抗干扰能力较强, 重力补偿精度在 0.2%F.S 左右.

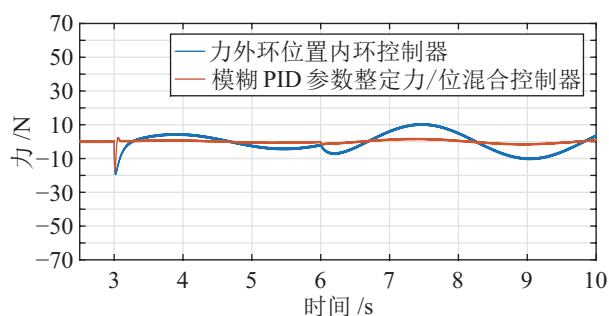


图 13 正弦干扰的仿真结果

Fig.13 The simulation results with sinusoidal interferences

仿真实验 4: 验证算法的动态响应性能, 增大空间机械臂垂直方向的运动速度. 在仿真中通过正弦函数来模拟吊点的位移, 增加位移速度即增大正弦函数的频率. 当正弦位移函数频率为 2 rad/s 时, 在 2 种控制器作用下得到的仿真结果如图 14 所示. 当正弦位移函数频率为 5 rad/s 时, 在 2 种控制器作用下得到的仿真结果如图 15 所示. 在力外环位置内环控制器作用下, 随着机械臂运动速度的增加, 力误差波动频率增大, 误差范围增大. 在模糊 PID 参数整定力/位混合控制器作用下力误差仍然要小于力外环位置内环控制器, 补偿精度高且误差波动范围较小, 符合空间机械臂微重力环境模拟要求.

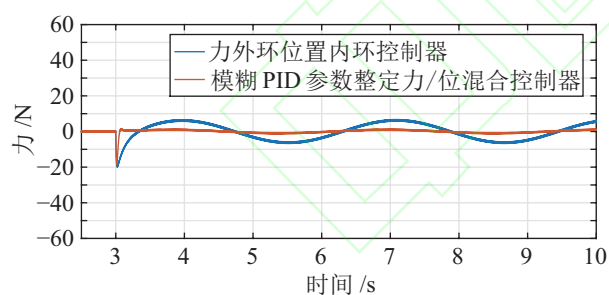


图 14 低速运动下的仿真结果

Fig.14 The simulation results under low speed motion

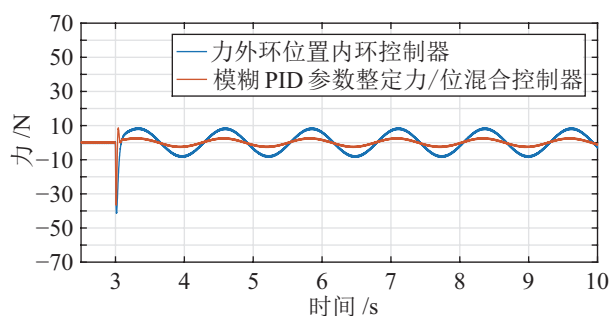


图 15 高速运动下的仿真结果

Fig.15 The simulation results under high speed motion

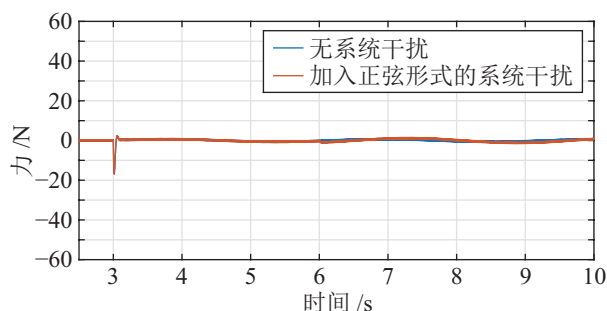


图 16 频率为 2 rad/s 正弦系统干扰的仿真结果

Fig.16 The simulation results under the sinusoidal system interference with 2 rad/s frequency

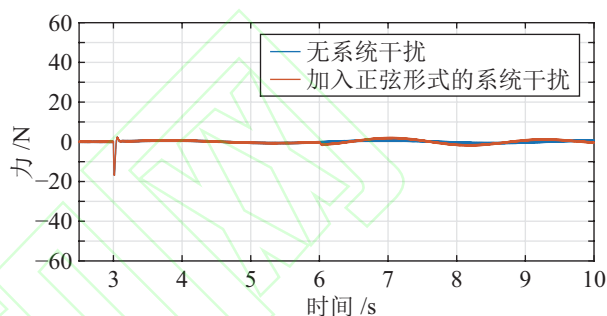


图 17 频率为 3 rad/s 正弦系统干扰的仿真结果

Fig.17 The simulation results under the sinusoidal system interference with 3 rad/s frequency

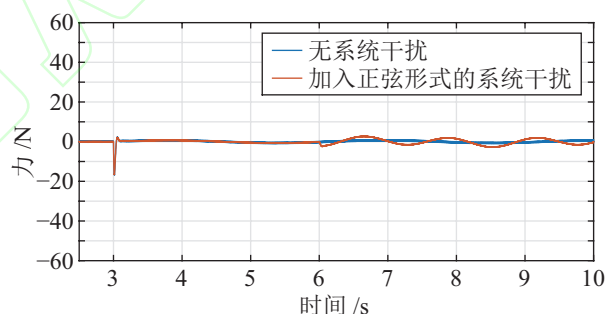


图 18 频率为 5 rad/s 正弦系统干扰的仿真结果

Fig.18 The simulation results under the sinusoidal system interference with 5 rad/s frequency

仿真实验 5: 一般系统干扰形式为典型的正弦波, 在控制器后和伺服电机模型之前分别加入幅值 50 N、频率为 2 rad/s, 幅值 50 N、频率为 3 rad/s, 以及幅值为 100 N、频率为 5 rad/s 的正弦形式的系统干扰, 对应的模糊 PID 参数整定力/位混合控制器的仿真结果如图 16~图 18 所示. 随着加入的正弦形式系统干扰的频率增加, 对控制效果产生了一定的干扰, 使得力误差有所波动, 且频率越高波动越大. 随着正弦形式系统干扰的幅值增加, 力误差的范围也会越来越大. 但由于模糊 PID 参数整定力/位混合控制可以对控制器参数进行在线调整, 所以对系统干扰有着一定的抗干扰能力. 从仿真结果中曲线的趋势可以看出, 本文设计的力/位混合

控制策略在一定范围内能够使得系统具有较强的抗干扰能力, 并且使得力误差的波动控制在重力补偿精度允许的范围之内, 能够满足系统的重力补偿精度要求.

5 结论 (Conclusion)

由以上仿真结果可知, 利用力外环位置内环控制算法进行重力平衡的控制导致平衡力的精度有待进一步提高. 在加入模糊参数整定的力闭环反馈控制构成力/位混合控制结构之后, 大大提高了力的控制精度. 通过参数自整定的方法使得力/位混合控制器对不同形式的负载干扰和典型形式的系统干扰都表现出一定的抗干扰性, 而且能够将高速度运动下平衡力误差控制在系统允许的范围之内. 仿真实验结果表明, 本文设计的基于模糊 PID 参数整定的力/位混合控制策略能够满足空间机械臂微重力环境模拟的要求, 并且系统具有较强的动态响应能力、抗干扰性和鲁棒性.

参考文献 (References)

- [1] 徐文福, 梁斌, 李成, 等. 空间机器人微重力模拟实验系统研究综述 [J]. 机器人, 2009, 31(1): 88-96.
Xu W F, Liang B, Li C, et al. A review on simulated microgravity experiment systems of space robot[J]. Robot, 2009, 31(1): 88-96.
- [2] 陈三凤, 梅涛, 张涛, 等. 空间微重力环境地面模拟系统的控制器设计 [J]. 机器人, 2008, 30(3): 201-204.
Chen S F, Mei T, Zhang T, et al. Design of the controller for a ground simulation system of spatial microgravity environment [J]. Robot, 2008, 30(3): 201-204.
- [3] 林旭梅, 梅涛. 地面失重实验系统的控制器设计 [J]. 中国科学技术大学学报, 2008, 38(5): 542-548.
Lin X M, Mei T. Controller design of ground weightlessness experiment system[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2008, 38(5): 542-548.
- [4] Sawada H, Ui K, Mori M, et al. Micro-gravity experiment of a space robotic arm using parabolic flight[J]. Advanced Robotics, 2004, 18(3): 247-267.
- [5] White G C, Xu Y. An active vertical-direction gravity compensation system[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1994, 43(6): 786-792.
- [6] Yang M Y, Xu Z G, He Y, et al. Zero gravity tracking system using constant tension suspension for a multidimensional framed structure space antenna[C]//7th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering. Piscataway, USA: IEEE, 2016: 614-621.
- [7] Xu Y, Yao T Z. Simulation and implement of traditional Chinese finger-kneading based on hybrid force position control[C]//2nd International Conference on Information Science and Engineering. Piscataway, USA: IEEE, 2010: 5384-5387.
- [8] Bu W H, Liu G J, Liu C J. Rate-position-point hybrid control mode for teleoperation with force feedback[C]//2016 International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics. Piscataway, USA: IEEE, 2016: 420-425.
- [9] 张钊, 陈涛, 周勇. 永磁同步电机伺服控制系统建模与仿真 [J]. 兵工自动化, 2014, 33(4): 75-78.
Zhang Z, Chen T, Zhou Y. Modeling and simulation of permanent magnet synchronous motor servo control system[J]. Ordnance Industry Automation, 2014, 33(4): 75-78.
- [10] Xu J W, Feng X. Design of adaptive fuzzy PID tuner using optimization method[C]//5th World Congress on Intelligent Control and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2004: 454-458.
- [11] Huang Y, Yasunobu S. A general practical design method for fuzzy PID control from conventional PID control[C]//9th IEEE International Conference on Fuzzy Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2000: 969-972.

作者简介:

- 徐永利 (1978-), 男, 博士, 副研究员. 研究领域: 工业机器人与自动化, 机器人化成套智能设备.
- 李潇男 (1994-), 男, 硕士生. 研究领域: 工业机器人与自动化, 机器人化成套智能设备.