DOI: 10.3901/JME.2014.15.068

空间微重力地面模拟装置基于神经滑模的自适应补偿控制*

张文辉^{1,2} 叶晓平¹ 季晓明¹

(1. 丽水学院工学院 丽水 323000;

2. 哈尔滨工业大学航天学院 哈尔滨 150001)

摘要: 针对目前做复杂运动的大中型飞行器地面微重力环境难以实现的问题, 提出了新颖的模拟装置, 并设计了基于神经滑模的自适应补偿控制方法。该装置采用机械传动、电动机驱动和气悬浮的组合方式来实现做复杂运动的三维模拟。采用气悬浮来被动实现平面二维随动, 采用力反馈的主动控制补偿技术来实现垂直方向升降。在考虑到精确模型无法获得及存在摩擦干扰的情况下, 神经滑模控制策略能够保证控制系统的鲁棒性, 设计的自适应神经网络控制器能够在线学习未知不确定上界, 降低滑模“抖振”。仿真表明了所设计的试验系统能够满足三维运动要求, 达到了较高模拟精度, 对于复杂空间运动的飞行器微重力模拟具有重要工程价值。

关键词: 三维微重力; 地面模拟系统; 神经网络; 滑模控制

中图分类号: TP273

Adaptive Compensation Control for Ground Simulation Equipment of Space Microgravity Environment Base on Neural Sliding-model

ZHANG Wenhui^{1,2} YE Xiaoping¹ JI Xiaoming¹

(1. School of Engineering, Lishui University, Lishui 323000;

2. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract: Difficult problems of simulation the space microgravity environment for big and middle experimental objects with complex move are considered. A novel system is proposed and the adaptive compensation control method based on neural sliding mode is designed. The equipments combine machine transmission、motor drive and air-bearing to realize three-dimension spatial microgravity simulation. Force feedback controller counteracts gravity real timely as controller. The scheme dispenses with accurate dynamical model. Friction non-linearity of machine system and outside disturbance are considered. Controller is designed based on state feedback. Sliding model controller is employed to compensate uncertainty model to guarantee robust. RBF neural network is used to adaptive study uncertainty up bound to reduce “chattering”. The stability is proved based on Lyapunov theory. The simulation shows that the design of test system can achieve higher simulation accuracy, has important engineering value.

Key words: three-dimensional microgravity; ground simulation system; neural network; sliding model control

0 前言

飞行器发射升空后一旦失败就难以维修, 在发射前必须通过地面试验来验证可靠性, 因此在地面上创造近似太空环境来进行性能试验成为当前研究的热点领域^[1-2]。目前国际上通用手段有: 自由落体运动法、抛物飞行法、水浮法、气浮法和悬吊法。

自由落体运动法是在高空或者近真空落塔中

令试验目标物做平抛运动^[3]。抛物飞行法是利用抛物线机动飞行来创造微重力和低重力的方法^[4]。这两种方法模拟精度较高, 安全可靠、可重复利用, 且可以进行复杂三维空间微重力试验。但造价昂贵, 单次试验时间过短, 难以对性能进行充分考核。

水浮法是指利用水的浮力来平衡机械臂自身重力^[5]。该方法可以进行三维空间微重力模拟, 但水浮方案容易受水阻力和紊流影响, 模拟精度较差, 同时要求试验期间密封性好, 试验环境苛刻。

悬吊法是通过吊丝垂直拉力来平衡飞行器自身重力^[6]。该方法可以进行三维模拟, 但吊丝易倾斜晃动, 支撑绳索的桁架机构复杂, 模拟精度较差,

* 国家科技支撑计划(2013BAC16B02)、浙江省自然科学基金(LZ12F02001, Y14F030011)、浙江省公益技术(2013C3110)和浙江省教育厅(Y201330000)资助项目。20130822收到初稿, 20140304收到修改稿

且只能应用于轻型飞行器试验。

气浮法是利用气浮轴承将飞行器托在平整光滑的平台上,通过喷气悬浮力抵消飞行器重力,是目前空间微重力环境模拟试验最广泛的方法^[7]。但气浮法仅限于在水平面上进行二维仿真试验,由于飞行器姿态运动比较复杂,运动部件很多情况下不仅要完成水平展开,在竖直方向及多自由度旋转方向均要完成相应的展开动作,因此单纯气浮法无法满足要求。针对此类问题,文献[8]提出一种采用气浮与气缸结合的方式用于三维微重力模拟的试验方案,但该方案没有考虑气源本身压力不稳及气缸本身附加重量大的问题,且其采用的神经网络算法需要大量学习样本,应用对象仅限于微型机器人,这些缺点均影响了工程应用价值。

综上所述,现有微重力模拟方法已不能满足地面试验需要,针对此类情况,本文设计了新颖的三维空间微重力地面模拟装置。该装置采用丝杠传动、轴承导向、电动机驱动和气悬浮组合方式来实现复杂运动的微重力环境模拟,通过力反馈控制方式来实时补偿目标重力。所设计的神经滑模控制策略无需精确的动力学模型,且能够保证系统鲁棒性,基于 Lyapunov 理论证明了闭环系统的稳定性。

1 三维空间微重力环境地面模拟系统

1.1 三维空间微重力模拟地面装置结构

由于三维空间复杂运动均可以分解为水平及竖直两方向的运动,因此三维空间微重力环境地面模拟系统如图 1 所示。

图 1 三维空间地面模拟试验设备结构图

1. 气足 2. 气足托板前摆臂 3. 导向杆 4. 直线轴承 5. 轴承套
6. 螺母托板 7. 支撑杆 8. 滚珠丝杠 9. 导杆支撑环 10. 支撑板
11. 力传感器 12. 工作台面 13. 制动器 14. 伺服电动机

所设计的三维空间微重力地面模拟装置的主要工作原理为:气足为整个直推式三维升降气足提供水平零重力模拟环境;伺服电动机接收控制器的控制信号并带动丝杠进行旋转,进而推动螺母进行竖直升降;螺母与丝杠配合,将丝杠的螺旋运动变成螺母的竖直升降运动,导向杆与直线轴承形成微重力模拟装置的竖直导向,支撑杆与将上层托板与螺母托板固连,实现上层托板与螺母托板的竖直升降;压力敏感器用于测量压力信息,实现压力反馈。

1.2 系统动力学模型的建立

将机械传动系统、力传感器、接触试件(空间机器人)都看作是质量、阻尼、刚度模型,则地面模拟设备与环境的接触可以粗略用图 2 表示^[9]。设 F_c 为驱动力, F_s 为传感器输出力。 m_d , m_s 及 m_r 分别为传动系统质量,传感器质量及工件质量。 k_d 和 c_d 分别为传动系统接触刚度及阻尼。 k_s 和 c_s 分别为传感器接触刚度及阻尼。 k_r 和 c_r 分别为环境接触刚度及阻尼。 X_1 、 X_2 及 X_3 分别为 m_d , m_s 及 m_r 的输出位移。

图 2 传动系统力学模型

图 2 给出了试验设备/传感器/环境在一个方向上的模型。据图 2 可建立其输入/输出关系

$$\begin{cases} X_2 / F_c = B_2 / A \\ X_3 / F_c = B_3 / A \end{cases} \quad (1)$$

式中 $B_3 = (c_r s + k_r)(c_s s + k_s)$;
 $B_2 = [m_r s^2 + (c_s + c_r)s + k_s + k_r](c_d s + k_d)$;
 $A = [m_d s^2 + c_d s + k_d][m_d s + (c_d + c_s)s + (k_d + k_s)][m_r s^2 + (c_d + c_r)s + (k_s + k_r)] - [m_r s^2 + (c_r + c_s)s + k_s + k_r]$;
 s ——拉普拉斯算子。

由刚度控制得传感器的测量力 F_s 输出

$$F_s = k_s (X_2 - X_3) \quad (2)$$

将式(1)代入式(2)得

$$\frac{F_s}{F_c} = k_s \frac{[m_r s^2 + c_r s + k_r](c_d s + k_d)}{A} \quad (3)$$

2 神经滑模控制器设计

由于环境刚度远大于传感器刚度,忽略传感器

动力学参数, 则系统被控模型为

$$G_P = \frac{k_r}{m_d s^2 + c_b s + k_r} \quad (4)$$

式中, $c_b = c_d + c_r$ 为综合阻尼系数。考虑干扰 d , 将式(4)转化为状态方程为

$$\ddot{x} = h(x, \dot{x}) + bu + d \quad (5)$$

式中, $h(x, \dot{x}) = -k_r x / m_d - c_b \dot{x} / m_d$, $b = k_r / m_d$, u 为控制输入。

令 $M = b^{-1}$, $H = -b^{-1}h(x, \dot{x})$; $D = -b^{-1}d$, 则式(5)为

$$u = M\ddot{x} + H - D \quad (6)$$

由于在工程实际中, 质量、刚度及阻尼系数均无法准确获知, 且试验目标及外界环境干扰等不确定性也未知。实际系统模型只能获得其估计值, 这里假设模型由估计值及估计误差项组成, 令 $\hat{M}$ 及 $\hat{H}$ 为估计值, ΔM 及 ΔH 为其估计误差项, 则 $M = \hat{M} + \Delta M$; $H = \hat{H} + \Delta H$ 。

设 f 为系统模型不确定部分, 且 $f = \Delta M\ddot{x} + \Delta H - D$, 则式(6)修正为

$$u = \hat{M}\ddot{x} + \hat{H} - f \quad (7)$$

将整个控制系统分为两部分, 一部分为针对估计模型的控制器 u_1 , 另一部分为针对不确定模型的控制器 u_2 。则系统方程式(7)可写为

$$u_1 + u_2 = \hat{M}\ddot{x} + \hat{H} - f \quad (8)$$

由于估计模型的已知性, 这里可以采用状态反馈法来控制; 而对于未知不确定模型, 考虑滑模控制器具有较强的动态特性及非线性控制能力, 采用滑模控制器对不确定模型进行补偿能够保证系统鲁棒性^[10-11]。

设 x_d 为期望力, $e = x_d - x$ 为力跟踪误差, 定义 $e_2 = \dot{e}_1$, $A \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 为正定矩阵。暂不考虑不确定模型 f , 则系统估计模型误差方程为

$$\dot{e}_2 = \hat{M}^{-1}u_1 - \hat{M}^{-1}\hat{H} - \ddot{x}_d \quad (9)$$

令

$$v = \hat{M}^{-1}(u_1 - \hat{H}) - \ddot{x}_d \quad (10)$$

则误差方程的状态方程可写为

$$\dot{E} = RE + Qv \quad (11)$$

$$E = \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \end{pmatrix} \quad R = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad Q = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

设 $v = KE$, $K = (-k_1 \quad -k_2)$, 将其代入到误差状态方程可得

$$\dot{E} = ZE \quad (12)$$

式中 $Z = R + QK$ 。

则由式(10), 针对估计模型的控制律设计为

$$u_1 = \hat{M}(v + \ddot{x}_d) + \hat{H} \quad (13)$$

由式(8)可得系统误差方程为

$$\dot{e}_2 = \hat{M}^{-1}[u_1 - \hat{H}] - \ddot{x}_d + \hat{M}^{-1}[u_2 + f] \quad (14)$$

由式(10), 则式(14)整理可得

$$\dot{e}_2 = v + \hat{M}^{-1}[u_2 + f] \quad (15)$$

定义滑模面为 s , 即

$$s = ce_1 + e_2 \quad (16)$$

对其求微分得

$$\dot{s} = ce_1 + \dot{e}_2 = ce_2 + \dot{e}_2 \quad (17)$$

不确定模型部分的补偿控制器设计为

$$u_2 = -\hat{M}(ce_2 + v) - \frac{1}{s\hat{M}^{-1}}|s\hat{M}^{-1}|f_M \quad (18)$$

这里 $\frac{1}{s\hat{M}^{-1}}|s\hat{M}^{-1}|$ 也可写为 $\text{sgn}(s)\text{sgn}(\hat{M})$, f_M

为不确定部分 f 的上界值。

通过选择 Lyapunov 函数为 $L = s^2/2$, 能够证明系统的稳定性。

然而在实际工程中, 对于不确定上界值 f_M 是无法得到的, f_M 选得过大, 会加大系统抖振, 且浪费力矩, 过小则不能保证系统的稳定性。

采用 RBF 神经网络来补偿未知非线性, 设 x 为输入, $\hat{f}_M$ 为神经网络的对 f_M 的估计输出, 则

$$\hat{f}_M = \hat{\theta}^T \varphi(x) \quad (19)$$

式中, $\hat{\theta}$ 为实际权值矩阵, $\varphi(x)$ 为高斯型函数。

假设 1: 对任意给定的小正数 ε_M , 总能找到最优的权矢量 θ^* , 使得网络的逼近误差 ε 满足 $|\varepsilon| = |\theta^{*T} \varphi(x) - f_M| < \varepsilon_M$ 。

假设 2: 对于不确定模型的上界值 f_M , 使下式成立, 即 $f_M - |f| > \varepsilon_f > \varepsilon_M$ 。

RBF 神经网络权值矩阵的自适应学习算法为

$$\dot{\tilde{\theta}} = -\beta |s\hat{M}^{-1}| \varphi \quad (20)$$

式中, 增益 $\beta = |s\hat{M}^{-1}|(\varepsilon_f - \varepsilon_M)$, $\tilde{\theta} = \theta^* - \hat{\theta}$ 为权值估计误差。

定义如下 Lyapunov 函数来证明微重力模拟装置闭环系统的稳定性

$$L = \frac{1}{2}s^2 + \frac{1}{2}\tilde{\theta}^T \beta^{-1} \tilde{\theta}$$

对其进行微分

$$\dot{L} = s\dot{s} + \tilde{\theta}^T \beta^{-1} \dot{\tilde{\theta}} \quad (21)$$

将式(17)及式(14)代入式(21)整理得

$$\dot{L} = s(ce_2 + v + \hat{M}^{-1}[u_2 + f]) + \tilde{\theta}^T \beta^{-1} \dot{\tilde{\theta}}$$

将控制律式(18)及式(19)代入得

$$\dot{L} = -|s\hat{M}^{-1}|\hat{\theta}^T \varphi(x) + s\hat{M}^{-1}f + \tilde{\theta}^T \beta^{-1} \dot{\tilde{\theta}} \leq$$

$$-|s\hat{M}^{-1}|[(\hat{\theta}^T\varphi(x)-f_M)+(f_M-|f|)]+ \\ \tilde{\theta}^T\beta^{-1}\dot{\tilde{\theta}}$$

由假设 2 可得

$$\dot{L} \leq -|s\hat{M}^{-1}|[(\hat{\theta}^T\varphi-\theta^{*T}\varphi+\varepsilon)+\varepsilon_f]+\tilde{\theta}^T\beta^{-1}\dot{\tilde{\theta}} \quad (22)$$

将式(20)代入式(22)并整理得

$$\dot{L} = -|s\hat{M}^{-1}|[\hat{\theta}^T\varphi-\theta^{*T}\varphi+\varepsilon+\varepsilon_f+(\theta^*-\hat{\theta})\varphi] \leq \\ |s\hat{M}^{-1}||\varepsilon|-|s\hat{M}^{-1}|\varepsilon_f \leq \\ |s\hat{M}^{-1}|(|\varepsilon|-\varepsilon_f) \quad (23)$$

根据假设 1, 由于 $|\varepsilon| < \varepsilon_M$, 则式(23)整理得

$$\dot{L} \leq -|s\hat{M}^{-1}|(\varepsilon_f - \varepsilon_M) = -\beta|s| \leq 0$$

3 试验验证

任何复杂的空间运动, 均能分解为水平二维与竖直一维的三维运动。这里假设重量为 2 500 N 空间飞行器需要完成空间旋转及抓取两个动作, 零重力模拟时间为 10 s。在 0~5 s 为本体旋转关节旋转, 带动飞行器旋转, 完成平移和升降, 其旋转驱动力在竖直方向的分力为 $d_1 = 20.0\sin(2\pi t)$ 。在 5 s 时, 飞行器抓捕一重量为 500 N 的物体, 其总重量变为 3 000 N。整个过程受到 $d_2 = 8\sin(\pi t)$ 的干扰影响。

神经网络网络学习律取 $\beta = 0.50$ 。网络初始值及高斯值均在 $(-1 \sim 1)$ 之间随机选取。 $K_r = 8$, $m_d = 5$, $D_b = 2$ 。仿真结果如图 3~6 所示。

图3 张力跟踪曲线

图4 张力跟踪误差曲线

图5 神经网络的不确定上界估计

图6 控制器输出

由图 3 中可以看出所设计的控制系统能够在极短时间内达到较好控制精度, 其初始误差不到 10 N, 模拟精度小于 0.5%。由图 4 中可以看出在大约 1 s 内就能达到精确的张力跟踪, 且初始误差不大, 约为 5 N, 占总重力的 0.5%, 其微重力模拟精度是较高的。在抓取一 500 N 物体后, 其误差最大值约为 60 N, 约占总重力的 2%, 支撑张力能够在极短时间内达到很好的重力抵消, 并达到了理想的零重力控制效果, 且整个过程神经网络能够较好地对不确定上界值进行估计, 降低了滑模控制器的抖振, 且总的控制力矩并不大。

4 结论

- (1) 设计了能够完成复杂三维运动的空间微重力模型装置, 具有附加重量轻, 易于实现的优点。
- (2) 设计了神经滑模控制器, 在无需精确数学模型及存在干扰情况下, 保证了系统鲁棒性。
- (3) 试验验证了空间微重力模型装置的有效性, 具有重要工程价值。

参 考 文 献

- [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 Wenfu, LIANG Bin, LI Cheng, et al. A review on simulated micro-gravity experiment systems of space robot[J]. Robot, 2009, 31(1): 88-96.
- [2] 史士财, 吴剑威, 崔平远, 等. 空间机械臂全局反作用优化及地面试验研究[J]. 机器人, 2009, 31(3): 242-248.
- SHI Shicai, WU Jianwei, CUI Pinyuan, et al. Global reaction optimization of space manipulator and its ground test[J]. Robot, 2009, 31(3): 242-248.
- [3] 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.
- [4] 屈斌, 王启, 王海平, 等. 失重飞机飞行方法研究[J]. 飞行力学, 2007, 25(2): 65-67.
- QU Bin, WANG Qi, WANG Haiping, et al. Zero-g aircraft flight method research [J]. Flight Dynamics, 2007, 25(2): 65-67.
- [5] GEFKE G, CARIGNAN C R, ROBERTS B J, et al. Ranger telerobotic shuttle experiment: Status report[C]// Proceeding of SPIE, Bellingham, WA, USA: SPIE, 2001: 123-132.
- [6] NECHYBA M C, XU Y S. Human-robot cooperation in space: SM2 for new space station structure[J]. IEEE Robotics and Automation Magazine, 1995, 2(24): 4-11.
- [7] RUSSAKOW J, ROCK S M, KHATIB O. An operation space formulation for a free-flying, multi-arm space robot [C]// Proceedings of the Fourth International Symposium on Experimental Robotics, Berlin, Germany: Springer, 1997: 448-457.
- [8] 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, 37(3): 201-204.
- CHEN Sanfeng, MEI Tao, ZHANG Tao, et al. Design of the controller for a ground simulation system of spatial microgravity environment [J]. Robot, 2008, 37(3): 201-204.
- [9] 邱志成, 谈大龙. 基于加速度反馈的柔性关节机械臂接触力控制[J]. 机械工程学报, 2002, 38(10): 37-41.
- QIU Zhicheng, TAN Dalong. On acceleration sensor-based feedback control for contact force of the flexible joint manipulator [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(10): 37-41.
- [10] LIN C K. Non-singular terminal sliding model control of robot manipulators using fuzzy wavelet networks [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2009, 160(12): 1765-1786.
- [11] 张文辉, 叶晓平, 王超. 漂浮基空间机械臂的三维零重力环境模拟方法探讨[J]. 空军工程大学学报, 2014, 15(2): 15-20.
- ZHANG Wenhui, YE Xiaoping, WANG Chao. Discussion of three-dimensional zero-gravity simulation methods for free-floating space manipulators [J]. Journal of Air Force Engineering University, 2014, 15(2): 15-20.
-
- 作者简介: 张文辉, 男, 1980 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为机器人动力学与控制, 空间微重力环境模拟系统设计。
E-mail: hit_zwh@126.com
- 叶晓平, 男, 1965 年出生, 教授。主要研究方向为机电控制。
E-mail: mj_zwh@126.com