

DOI:10.11918/201905200

磁铰链约束下的微纳聚合体卫星柔顺变构控制

康国华, 刘奇弦, 吴佳奇, 王 强

(南京航空航天大学 航天学院, 南京 210016)

摘要: 为使磁铰链约束下的微纳聚合体卫星克服磁铰链阻力矩的阻碍作用成功实现变构, 并防止变构过程中磁铰链的脱附, 减小模块再拼接时的碰撞冲击, 设计了一种用于微纳聚合体卫星的柔顺变构控制方法. 首先利用第2类拉格朗日方程建立了磁铰链约束下的多刚体系统的动力学模型, 设计了微纳聚合体卫星变构的模糊控制律; 然后根据柔顺控制的要求设计了一种量化因子 K_e 与 K_c 的模糊调节器, 引入到原模糊控制器中以改进控制方法. 此控制方法具有不依赖系统动力学模型、仅需对参与变构的模块施加控制的优点. 为量化评估变构过程的柔顺程度, 设计了两个柔顺程度评估参数; 最后通过仿真与气浮台物理试验对控制方法进行了验证, 对比了固定量化因子与量化因子在线调节两种控制方法下变构过程的柔顺程度. 数学仿真与气浮台的物理试验结果表明, 改进后的模糊控制相比于固定量化因子的模糊控制, 可使变构过程中模块相对运动角速度变化更加平缓, 模块再拼接时相对角速度更小, 达到了柔顺变构的目标.

关键词: 磁铰链; 微纳聚合体卫星; 构型重构; 柔顺控制; 模糊控制

中图分类号: V448 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2020)12-0066-08

Compliant control for reconfiguration of combination body of micro-nano satellites under constraint of magnetic hinge

KANG Guohua, LIU Qixian, WU Jiaqi, WANG Qiang

(Academy of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: To overcome the obstruction of resistance moment of magnetic hinge so as to realize the reconfiguration of combination body of micro-nano satellites (CBMS), and meanwhile prevent the magnetic hinge from desorbing and reduce the impact when modules re-splicing, a compliant control method was proposed. First, the dynamic model of the multibody system under the constraint of magnetic hinge was established by using the second kind of Lagrangian equation, and the fuzzy control law of reconfiguration was designed. Then, a fuzzy regulator of quantization factors K_e and K_c was introduced into the original controller to improve the proposed control method. The method has two advantages; one is that it does not rely on the dynamic model of the system and the other is that only the module participating in reconfiguration needs to be controlled. In order to evaluate the compliance degree of reconfiguration quantitatively, two parameters were designed. Lastly, the compliance degrees of reconfiguration using the original controller and the improved controller were compared through simulations and physical experiments. The results of mathematical simulations and physical experiments on the air-bearing platform show that compared with the fuzzy controller whose quantization factors are constant, the improved control method could make the angular velocity of the module change more gently during reconfiguration, and the relative angular velocity was smaller when the modules were re-spliced, which indicates that the proposed method can achieve the target of compliant reconfiguration.

Keywords: magnetic hinge; combination body of micro-nano satellites; reconfiguration; compliant control; fuzzy control

微纳聚合体卫星是由多个立方体微纳模块通过磁力铰链机构相互吸附而形成的组合体航天器. 磁力铰链机构分布于各模块的12条棱上, 微纳模块在磁力铰链的约束下以棱为转轴进行转动, 从而实现微纳聚合体卫星的构型重构. 图1为变构过程的原

理示意图.

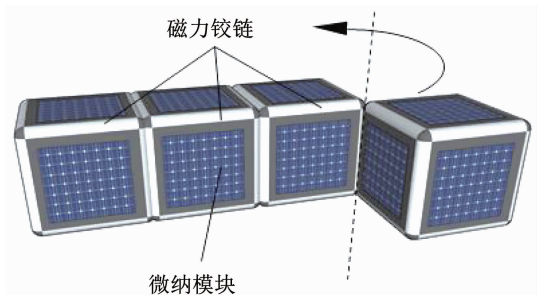


图1 微纳聚合体卫星变构原理

Fig. 1 Principle of reconfiguration of CBMS

收稿日期: 2019-05-27

基金项目: 空间智能控制技术重点实验室开放基金(ZDSYS-2017-01); 上海航天科技创新基金(SAST2018-047)

作者简介: 康国华(1978—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 康国华, kanggh@nuaa.edu.cn

构型可重构的模块化航天器由于具有较强的可扩展性、适应性, 可满足不同的任务需求, 近年来引起了各国研究人员的关注. 日本开展了板块延展卫星 (panel extension satellite, PETSAT) 计划^[1-2], 但卫星面板之间通过机械铰链连接, 连接方式在地面确定, 无法在轨更改, 因而无法实现任意形态的重构. 英国萨里大学的可重构太空望远镜自主拼接 (autonomous assembly of a reconfigurable space telescope, AAReST) 项目, 计划通过多颗卫星模块的分离与再拼接实现不同望远镜构型之间的变换, 以满足不同的成像需求^[3-4]. 但分离后再拼接的策略在控制上面临姿轨耦合问题的挑战, 姿轨耦合控制也会导致相对较多的燃料消耗.

磁力铰链的示意图如图 2 所示, 基于磁力铰链的微纳聚合体卫星利用了铰链约束的特性, 可将微纳模块的转动转化为位置的改变, 磁力铰链分布于微纳模块的 12 条棱上, 通过电流的通断决定铰链的吸附与分离, 这使得微纳模块可实现在 3 个方向的转动. 这意味着通过不同模块的多次运动可实现任意两构型之间的变换. 磁铰链机构在可重构模块化机器人领域已有成功应用^[5-6], 在航天领域有较大潜在应用价值.

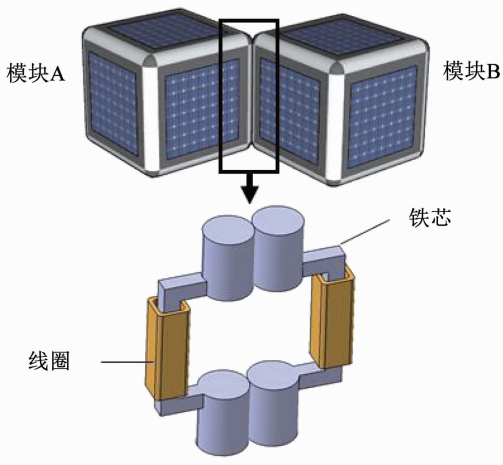


图 2 磁力铰链示意

Fig. 2 Schematic diagram of magnetic hinge

在微纳聚合体卫星变构过程中, 运动中的模块与组合体中其他部分构成了一个漂浮基多刚体系统, 两者在动力学上是耦合的: 当某个模块转动时, 由于角动量守恒, 其余刚体会发生与之方向相反的转动, 即某个刚体位置与姿态的变化会影响其他刚体的位置与姿态, 且磁铰链处除约束内力与力矩外, 还有由磁力导致的主动力与力矩作用于各刚体, 对变构过程造成干扰, 这给变构过程的柔顺控制带来了挑战. 对于漂浮基多刚体系统的控制研究主要集

中在空间漂浮基机械臂的控制、空间站舱段转位控制等方面. 西北工业大学李磊等^[7]针对空间站舱段转位的场景, 设计了全程滑模控制器, 对核心舱、功能舱以及空间机械臂各关节都进行了控制, 实现了功能舱的转位与核心舱的姿态稳定. 但任务需求与控制器特性决定了该控制方法除了对机械臂进行控制外还需为核心舱提供控制力矩. 吉林大学赵永佳^[8]利用神经网络的方法对漂浮基空间机械臂进行控制, 该方法不需要精确的系统动力学模型, 在基座不受控的情况下实现了机械臂的轨迹跟踪, 但控制器设计较为复杂.

因此, 本文采用一种量化因子在线调节的模糊控制器对微纳聚合体卫星变构过程进行控制, 该方法不依赖于系统动力学模型, 只需对参与变构的模块进行控制, 且控制器的设计基于直观的模糊规则, 设计过程简单明了.

1 动力学模型

1.1 运动关系分析

微纳聚合体卫星变构存在多种方式: 串行变构和并行变构, 前者每次只有一个模块参与变构运动, 或者有多个模块同时变构. 本文主要研究串行变构下的控制问题, 因此, 在每一次变构过程中, 整个组合体可看作一个两刚体系统, 即由参与变构运动的模块 (以下称为运动模块) 与组合体中的其他部分 (以下称为本体) 两个刚体组成的系统.

变构时, 立方体运动模块绕磁力铰链做一个自由度的转动, 则在垂直于转轴的平面上建立一个平动坐标系 $O-xy$, 坐标系原点与系统总质心 C 重合, 坐标轴可为平面内任意方向; $O_1-x_1y_1$ 与 $O_2-x_2y_2$ 分别为本体与运动模块的本体系, 与 $O-xy$ 共面, 原点分别与两者质心重合, 坐标轴分别平行于本体与模块的边线, 如图 3 所示. 忽略重力梯度, 在 C 点, 运动引起的惯性力与万有引力平衡, 则系统为不受外力的漂浮基多体系统, $O-xy$ 可视为惯性基^[9].

C_2 为运动模块质心, 其到 C 的距离为 l_2 , 设运动模块质量为 m_2 , 绕惯性主轴 (过质心且垂直于 $O_1-x_2y_2$ 平面) 转动的惯量为 J_2 . 本体可等效为一质心为 C_1 , 质量为 m_1 , 绕惯性主轴 (过质心且垂直于 $O_1-x_1y_1$ 平面) 转动的惯量为 J_1 的长方体刚体, C_1 到 C 的距离为 l_1 . R_1, R_2 分别为 C_1, C_2 到转轴的距离. θ_1 为 x_1 轴相对于 x 轴的逆时针夹角, θ_2 为 x_2 轴相对于 x_1 轴的逆时针夹角, 即运动模块相对于本体转动的角度. θ 为连线 C_1C_2 与 x 轴的夹角, β 为连线 C_1A 与 C_1O 的夹角. 由于变构全过程系统不受外力作用, 则坐标系 $O-xy$ 始终可视为惯性系.

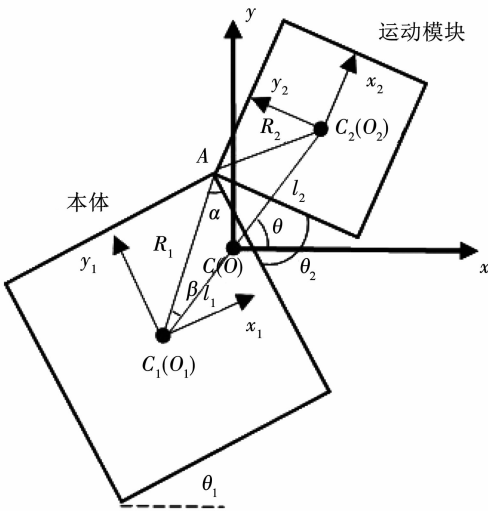


图 3 运动关系示意

Fig. 3 Schematic diagram of motion relation

由此可得到 \$C_1, C_2\$ 位置关系为:

$$x_1 = -\frac{m_2}{m_1 + m_2} l \cos \theta, \tag{1}$$

$$y_1 = -\frac{m_2}{m_1 + m_2} l \sin \theta, \tag{2}$$

$$x_2 = -\frac{m_1}{m_1 + m_2} l \cos \theta, \tag{3}$$

$$y_2 = -\frac{m_1}{m_1 + m_2} l \sin \theta, \tag{4}$$

式中 \$l, \theta\$ 由下式所示的几何关系确定:

$$l = \sqrt{R_1^2 + R_2^2 - 2R_1R_2 \cos(\theta_2 + \alpha + \frac{\pi}{4})}, \tag{5}$$

$$\theta = \frac{\pi}{2} + \theta_1 - \alpha - \beta, \tag{6}$$

$$\frac{R_2}{\sin \beta} = \frac{l}{\sin(\alpha + \theta_2 + \frac{\pi}{4})}. \tag{7}$$

1.2 磁力铰链力学模型

磁力铰链需要提供足够大的磁力以保证变构过程中模块吸附于本体上,因此也会给运动模块的转动带来一定的阻碍,需要在动力学建模和控制中将这一因素纳入考虑.这一阻碍作用表现为一对磁力矩分别作用于运动模块与本体上,如图 4 所示.

该力矩是由磁力铰链接触面相互挤压导致的形变产生的,与滚动摩擦形成的机理类似,故套用摩擦力的建模方式对其建模. \$M_{r1}\$ 与 \$M_{r2}\$ 大小相等,方向相反,该力矩的建模采用静摩擦与库伦摩擦模型的近似建模方法^[10-12],将摩擦力矩在相对运动角速度零点的特性用具有一定斜率的直线线性表示,直线斜率由角速度界限 \$D\$ 与最大静摩擦力矩 \$M_{fs}\$ 决定, \$M_{fc}\$ 为动摩擦力矩,摩擦力矩与相对运动角速度的关系如图 5 所示.

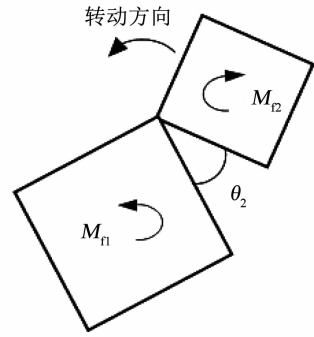


图 4 阻力矩示意

Fig. 4 Schematic diagram of resistance moment

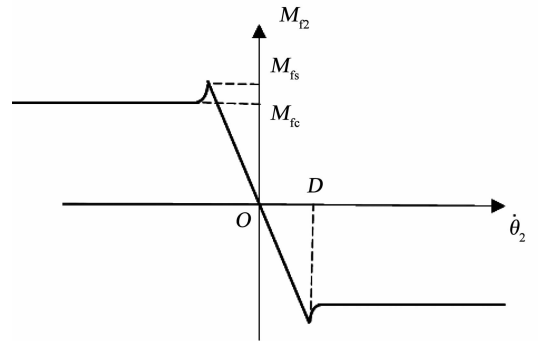


图 5 摩擦力矩与相对角速度的关系

Fig. 5 Relation between friction torque and relative angular velocity

1.3 系统动力学方程

采用第 2 类拉格朗日方程对系统进行动力学建模,由式(1)~(7)可求得本体与运动模块的质心位置,微分可得到两者质心平动速度 \$v_1\$ 与 \$v_2\$,则本体的动能为

$$E_1 = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} J_1 \dot{\theta}_1^2,$$

运动模块的动能为

$$E_2 = \frac{1}{2} m_2 v_2^2 + \frac{1}{2} J_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2.$$

忽略系统重力势能的变化,利用下式拉格朗日方程:

$$L = E_1 + E_2,$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = Q + Q_f,$$

可得到如下形式的系统动力学方程:

$$D(q) \ddot{q} + h(q, \dot{q}) \dot{q} = \tau + M_f. \tag{8}$$

式中, \$q = [\theta_1, \theta_2]^T\$, 为广义坐标; \$\tau\$ 为控制力矩; \$M_f\$ 为铰链摩擦力矩.

当 \$m_1 = m_2 = m, J_1 = J_2 = J, R_1 = R_2 = R, \alpha = \pi/4\$ 时,式(8)可简化为下式:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{2}mR^2(1 + \sin \theta_2) + 2J & \frac{1}{4}mR^2(1 + \sin \theta_2) + J \\ \frac{1}{4}mR^2(1 + \sin \theta_2) + J & \frac{1}{4}mR^2 + J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2}mR^2 \dot{\theta}_2 \cos \theta_2 & \frac{1}{4}mR^2 \dot{\theta}_2 \cos \theta_2 \\ -\frac{1}{4}mR^2 \dot{\theta}_1 \cos \theta_2 & \frac{1}{16}mR^2 \dot{\theta}_2 \cos \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{\theta_1} \\ M_{\theta_2} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

2 控制器设计

2.1 控制方法的选择

由方程(9)可知,运动模块与本体之间动力学高度耦合,作用于运动模块和本体上的力矩都会对两者的姿态同时产生影响.因此,对于在设计过程中依赖于系统动力学模型的控制方法来说,要想实现变构过程的控制,需要同时对本体和模块作用控制力矩,即两者的动量轮均需要工作.对于单纯的变构这一过程,对本体的姿态控制是不必要的,这会带来更多的能量消耗,因此,需要一种不依赖于精确的系统动力学模型,仅在运动模块上作用一个控制力矩

就可以完成变构控制的方法,而模糊控制满足该要求.

模糊控制利用模糊集合理论,模拟人的思维方式对被控对象进行有效控制.因此,该控制方法不依赖于系统动力学模型^[13-14],只需获取误差与误差变化率等信息,并可通过调节量化因子等参数改善控制效果,达到柔顺控制的目的.因此,本文采用模糊控制的方法对变构过程进行控制.

2.2 组合体变构模糊控制器

变构控制采用的模糊控制器的基本框架如图 6 所示.

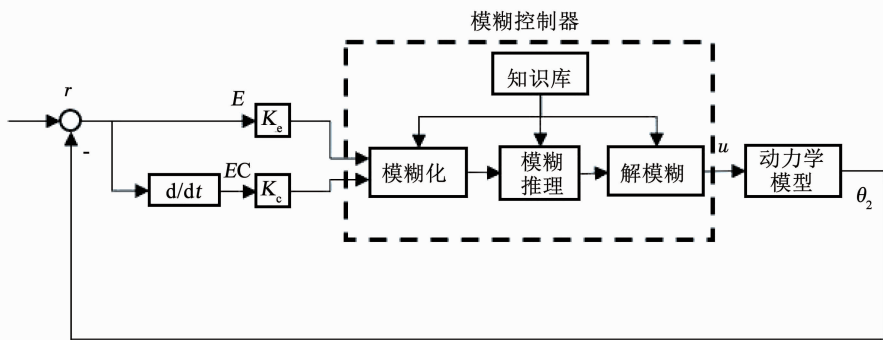


图 6 控制系统

Fig. 6 Control system block diagram

组合体变构时,运动模块转动的角度为 90° 或 180°,故将模块控制器输入量设置为误差 $E = \pi - \theta_2$ 和误差变化率 $EC = -\dot{\theta}_2$,输出量为控制力矩 u ,其语言变量分别用 E, EC 和 U 表示,三者的论域分别为 $[0, \pi]$ (rad), $[-0.16, 0.16]$ (rad/s) 以及 $[-0.08, 0.08]$ (N·m). EC 与 U 论域根据实际情况设定,考虑到变构过程的柔顺以及执行机构的能力, EC 与 U 的论域不应过大. 则模糊语言变量设定

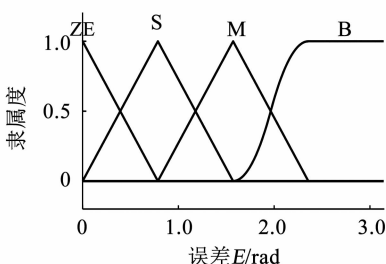
如下:

$$A = \{ZE, S, M, B\},$$

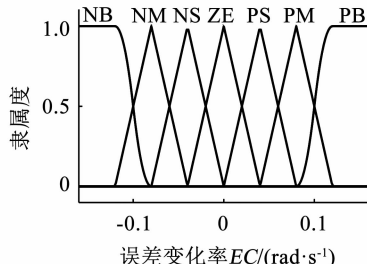
$$B = \{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\},$$

$$C = \{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}.$$

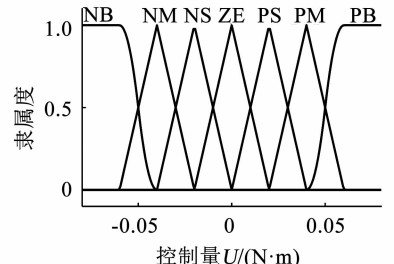
式中: S、M、B 分别为小、中、大; NB、NM、NS、ZE、PS、PM、PB 分别为负大、负中、负小、零、正小、正中、正大. 三者的隶属度函数如图 7(a) ~ 图 7(c) 所示.



(a) E 的隶属度函数图像



(b) EC 的隶属度函数图像



(c) U 的隶属度函数图像

图 7 隶属度函数图像

Fig. 7 Membership function image

模糊控制规则基于以下几条原则进行设计:

1) 误差 E 较大时, 提供较大正向控制力矩或较小负向控制力矩;

2) 误差变化率 EC 为负且较大时, 提供较小的正向控制力矩或较大负向控制力矩, EC 为正且较大时, 提供较大正向控制力矩或较小负向控制力矩;

3) 由于铰链摩擦的阻碍作用, E 极小且 EC 极小时, 适当正向增大控制力矩.

模糊规则表见表 1. 对上述的模糊控制器采用 min-max 模糊推理方法, 并利用重心法实现解模糊.

2.3 量化因子模糊调节器

为改善控制系统的动态特性, 达到柔顺变构的效果, 需要对量化因子 K_e 与 K_c 进行在线的调节. 量化因子 K_e 与 K_c 对系统的动态性能的影响主要表现为: K_e 越大, 系统输出的上升速率越大, 调节时间越长, 会产生更大的超调; K_c 越大, 响应速度越慢, 调节时间越短, 超调量越大^[15].

表 1 模糊控制器的模糊规则表

Tab. 1 Fuzzy rules of fuzzy controller

U	EC						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
ZE	NB	NM	NS	PS	PS	PS	PM
S	NM	NS	ZE	PS	PS	PM	PB
M	NS	ZE	PS	PS	PM	PB	PB
B	ZE	PS	PM	PM	PB	PB	PB

将 θ_2 由 0 变化到 30° 的阶段定义为起动段, 将 θ_2 达到 150° 之后的阶段定义为末段. 柔顺控制主要关注的是这两个阶段, 则变构过程的“柔顺”主要包含以下几点含义:

1) 在起动段与末段, $\dot{\theta}_2$ 变化较平缓, 角速度突变情况较少;

2) 超调量小, 变构完成的瞬间 $\dot{\theta}_2$ 的值尽可能接近于 0, 即减小模块与本体之间的碰撞冲击.

基于以上要求, 量化因子调节器的调节规则如下, 改进后控制系统的框架如图 8 所示.

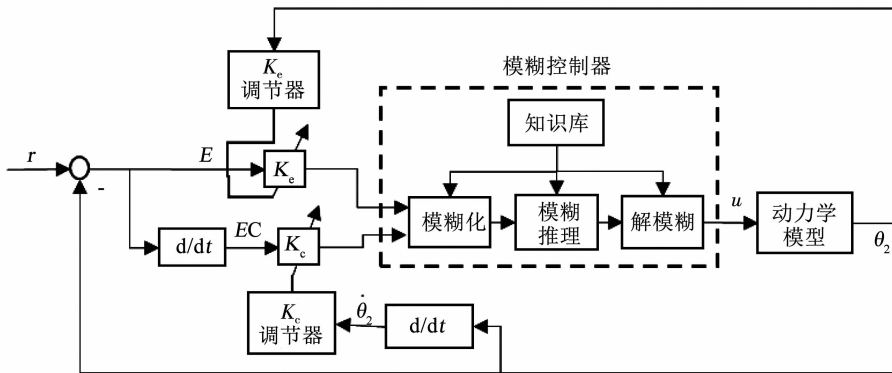


图 8 改进后的控制系统

Fig. 8 Improved control system block diagram

1) 起动段. 随着 θ_2 的增大, K_e 增大, 随着 $|\dot{\theta}_2|$ 的增大, K_c 减小.

2) 末段. 随着 θ_2 的增大, K_e 减小, 随着 $|\dot{\theta}_2|$ 的增大, K_c 减小.

3) 末段的 K_e 相对于起动段的 K_e 较小.

4) 其他阶段. 量化因子为定值.

设 θ_2 、 $|\dot{\theta}_2|$ 、 K_e 、 K_c 的语言变量分别为 THETA、DTHETA、KE、KC, 则:

$$THETA = \{S, M, B\},$$

$$DTHETA = \{ZE, S, M, B\},$$

$$KE = \{S, M, B\},$$

$$KC = \{S, M, B\}.$$

θ_2 在起动段的论域为 $[0, \pi/6]$ (rad), 在末段的论域为 $[5\pi/6, \pi]$ (rad), $|\dot{\theta}_2|$ 的论域为 $[0, 0.1]$ (rad/s), K_e 的论域均为 $(0, 2]$, K_c 在起动段的论域

为 $(0, 4]$, 在末段的论域为 $(0, 3]$. 四者的隶属度函数均为与图 7 类似的三角型隶属度函数. 则起动段与末段的量化因子调节规则见表 2~4.

表 2 起动段 K_e 的调节规则

Tab. 2 Regulatory rule of K_e in starting stage

THETA	S	M	B
K_e	S	M	B

表 3 末段 K_e 的调节规则

Tab. 3 Regulatory rule of K_e in end stage

THETA	S	M	B
K_e	B	M	S

表 4 起动段与末段 K_c 的调节规则

Tab. 4 Regulatory rule of K_c in starting and end stages

DTHETA	ZE	S	M	B
K_c	B	B	M	S

3 数学仿真

图 3 中标注的各几何参数以及其他仿真参数设置见表 5.

模糊推理方法仍为 min-max 方法, 解模糊方法仍为重心法.

首先要验证磁力铰链摩擦对变构的影响, 仿真初始条件为 $\theta_1 = 0 \text{ rad}, \theta_2 = 0 \text{ rad}, \dot{\theta}_1 = 0 \text{ rad/s}, \dot{\theta}_2 =$

$0 \text{ rad/s}, \theta_2$ 目标值为 180° , 且达到 180° 后保持不变. 作用于运动模块的控制力矩 τ_2 为一定值, 由仿真可知: 当其大小与铰链最大静摩擦力矩 M_{fs} 为同一量级 (此处设置为 $0.006 \text{ N} \cdot \text{m}$) 时, 运动模块转动受到阻碍, 本体与运动模块最终以相同角速度同步转动. 运动模块转角 θ_2 随时间变化的曲线以及运动模块所受铰链阻力矩 M_{12} 的变化如图 9 所示.

表 5 仿真参数设置

Tab. 5 Simulation parameters setting

本体质量 m_1/kg	本体惯量 $J_1/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	运动模块质量 m_2/kg	运动模块惯量 $J_2/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	磁力铰链最大静摩擦力矩 $M_{fs}/(\text{N} \cdot \text{m})$
20	1	20	1	0.006
磁力铰链转动摩擦力矩 $M_{fc}/(\text{N} \cdot \text{m})$	摩擦模型中的 D 值/ $(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	本体质心到转轴距离 R_1/m	运动模块质心到转轴距离 R_2/m	夹角 α/rad
0.005	0.005	0.177	0.177	$\pi/4$

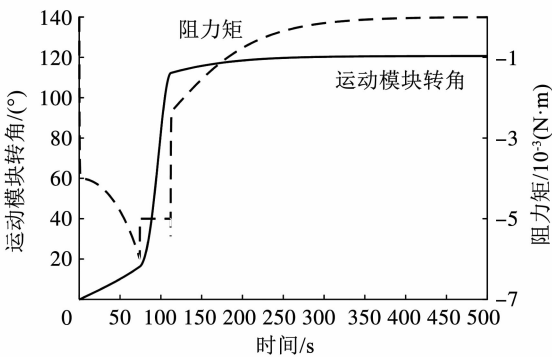


图 9 铰链摩擦对变构的影响

Fig. 9 Influence of hinge friction on reconfiguration

其次验证变构控制方法的有效性, 仿真初始条件同上, 分别对量化因子恒为 1 和量化因子在线调节两种情况下的变构过程进行仿真, 得到的运动模块转角 θ_2 和模块相对于本体角速度 $\dot{\theta}_2$ 随时间的变化曲线如图 10、11 所示.

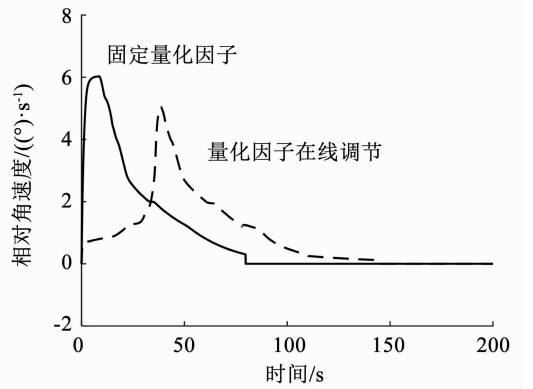


图 11 相对角速度随时间变化的曲线

Fig. 11 Changes in relative angular velocity

量化因子恒为 1 和量化因子在线调节两种情况下本体姿态角 θ_1 变化曲线如图 12 所示.

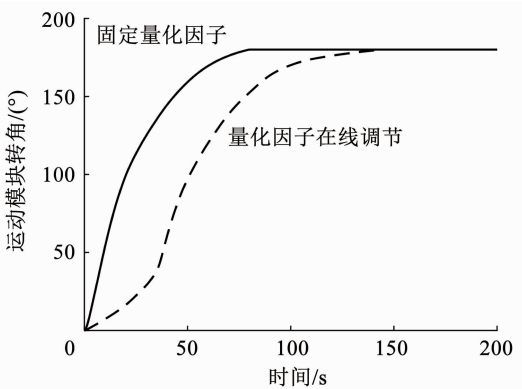


图 10 运动模块转角随时间变化的曲线

Fig. 10 Changes in rotation angle of module

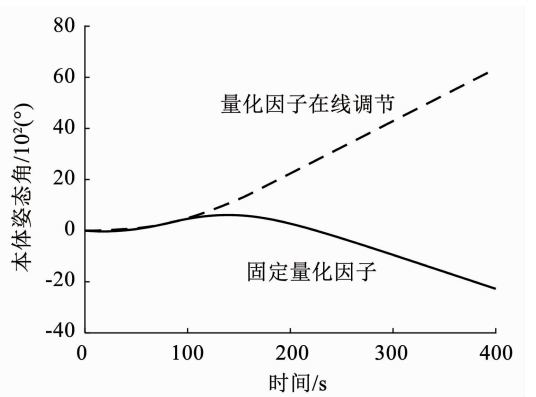


图 12 本体姿态角随时间变化的曲线

Fig. 12 Changes in attitude angle of main body

由图 10、11 仿真结果可知, 所设计的控制器能输出足够大的控制力矩以抵抗磁力矩的阻碍, 且量化因子在线调节的控制中, 相对角速度变化相比于

固定量化因子的控制更平缓. 由图 12 可知, 两种控制方法下, 本体姿态在变构结束后均线性变化, 即本体匀速转动, 但量化因子在线调节情况下, 变构结束前 θ_1 正向增加, 说明本体角速度与模块转动同向, 再次表明两者相对角速度较小, 碰撞冲击较小. 为了量化变构过程的柔顺程度, 引入以下两个评价参数:

1) 起动段模块相对于本体的角加速度绝对值的平均值, 记为 $\bar{\alpha}_{start}$;

2) 变构完成瞬间 (即 θ_2 首次达到 180° 瞬间时刻) 模块相对于本体的角速度大小, 记为 ω_{end} .

变构开始后首次角速度数据采集时刻记为 t_1 , 起动段结束前最后一次角速度数据采集时刻记为 t_M , 变构结束前最后一次角速度数据采集时刻记为 t_N (M, N 为正整数), 采样间隔为 Δt , 则 $\bar{\alpha}_{start}$ 与 ω_{end} 根据以下公式确定:

$$\bar{\alpha}_{start} = \frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^{M-1} \frac{|\dot{\theta}_2(t_{i+1}) - \dot{\theta}_2(t_i)|}{\Delta t}, \quad (10)$$

$$\omega_{end} = \dot{\theta}_2(t_N). \quad (11)$$

式(10)反映了相对角速度变化的平缓程度, 式(11)反映了变构完成时运动模块与本体碰撞的冲击程度. 两个指标在采用固定量化因子和在线调节量化因子两种控制方法下的值见表 6.

表 6 柔顺程度指标对比

Tab. 6 Contrast between indexes of compliance degree

控制方法	参数	
	$\bar{\alpha}_{start}/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-2})$	$\omega_{end}/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$
固定量化因子	0.017 2	0.005 3
在线调节量化因子	0.002 3	0.002 1

由表 6 可知, 量化因子在线调节的控制方法中两个指标均低于固定量化因子的方法, 说明量化因子在线调节的方法能有效增加变构控制的柔顺程度, 达到了控制目标.

4 物理试验验证

为进一步验证控制方法的有效性, 在三自由度平面气浮台上进行了物理仿真试验. 试验所用的平面气浮台如图 13 所示.

如图 13 所示, 用两个平面气浮台分别模拟变构过程中的本体与运动模块, 两者之间由销钉机构的铰链替代磁铰链进行连接. 销钉铰链阻力矩来源滑动摩擦, 与磁铰链的滚动摩擦在动力学模型形式上相同, 均可由图 5 所示曲线进行描述.

气浮台 2 上的单轴偏置动量轮提供变构控制所需的力矩, 最大输出力矩为 $0.1 \text{ N} \cdot \text{m}$. 两个气浮台

的姿态信息由动作捕捉系统测量. 物理试验方案如图 14 所示.

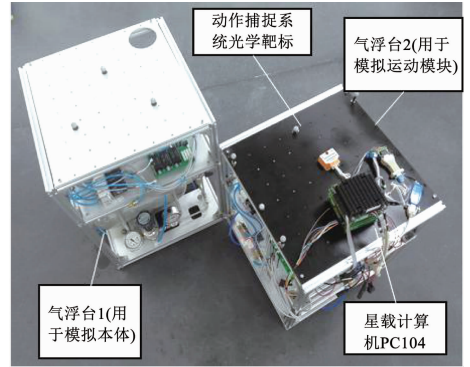


图 13 物理试验平台

Fig. 13 Physical experiment platform

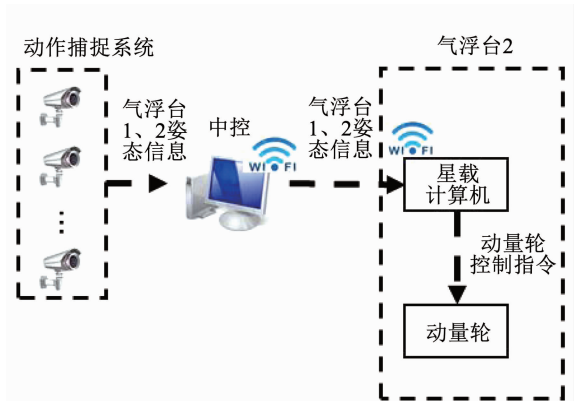


图 14 物理试验方案

Fig. 14 Physical experiment scheme

分别对固定量化因子和量化因子在线调节两种方法进行试验, 得到的实验结果如图 15、16 所示.

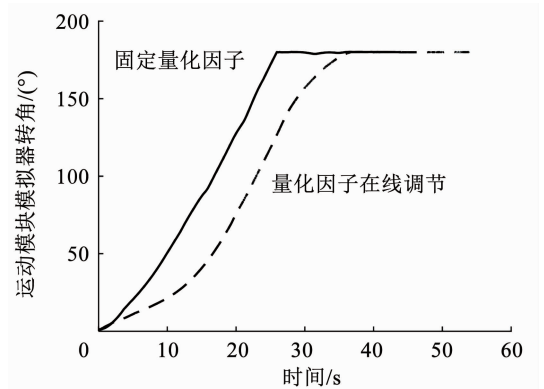


图 15 运动模块模拟器转角随时间变化的曲线

Fig. 15 Changes in rotation angle of module simulator

仍采用上述的柔顺程度评价参数对实验结果进行评估, 则两个指标在两种控制方法下的值见表 7.

由实验结果可知, 量化因子在线调节的模糊控制器相比于固定量化因子的模糊控制器, 柔顺指标均更优, 相对角速度变化更平缓, 变构控制的柔顺程度更高, 证明了控制算法在柔顺控制上的有效性.

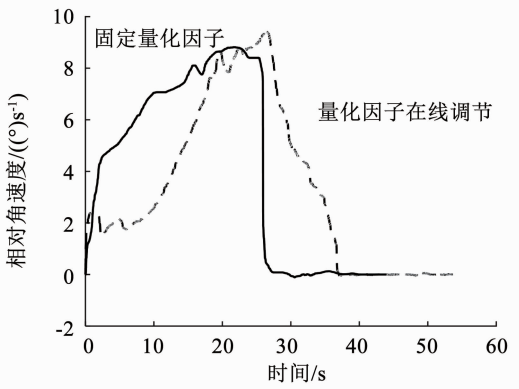


图 16 相对角速度随时间变化的曲线

Fig. 16 Changes in relative angular velocity

表 7 柔顺程度指标对比

Tab. 7 Contrast between indexes of compliance degree

控制方法	参数	
	$\bar{\alpha}_{start}/((^{\circ}) \cdot s^{-2})$	$\omega_{end}/((^{\circ}) \cdot s^{-1})$
固定量化因子	0.850 2	8.390 0
在线调节量化因子	0.561 7	1.172 0

5 结 论

1) 为解决磁铰链机构约束下的微纳聚合体卫星变构过程的柔顺控制问题,设计了变构过程的模糊控制器,并在控制器中引入量化因子在线模糊调节器用于改进原控制器以达到更柔顺的控制效果。

2) 变构过程的动力学仿真结果表明,由于磁铰链处阻力矩的存在以及空间多体系统各部分间的动力学耦合,变构过程会受到一定阻碍。

3) 通过数学仿真与气浮台物理仿真实验对控制方法进行验证。验证结果表明:改进后的控制器可抵抗磁铰链阻力矩的影响,成功实现变构;相比于未改进控制器,控制效果柔顺程度明显增强,可减小变构过程中磁铰链脱附的可能性与模块间的碰撞冲击。

参考文献

- [1] NAKASUKA S, SUGAWARA Y, SAHARA H, et al. System design and control aspect of a novel satellite concept "Panel Extension Satellite (PETSAT)" [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2008, 41(2): 14048. DOI: 10.3182/20080706-5-KR-1001.02378
- [2] SUGAWARA Y, NAKASUKA S, HIGASHI K, et al. Structure and thermal control of panel extension satellite (PETSAT) [J]. Acta Astronautica, 2009, 65(7/8): 958. DOI: 10.1016/j.actaastro.2009.01.027
- [3] UNDERWOOD C, PELLEGRINO S. Autonomous assembly of a reconfigurable space telescope (AAReST) for astronomy and Earth observation [C]// Proceedings of the 8th IAA Symposium on Small Satellites for Earth Observation. Berlin: [s. n.], 2011
- [4] UNDERWOOD C, PELLEGRINO S, LAPPAS V J, et al. Using CubeSat/micro-satellite technology to demonstrate the Autonomous

- Assembly of a Reconfigurable Space Telescope (AAReST) [J]. Acta Astronautica, 2015, 114: 112. DOI: 10.1016/j.actaastro.2015.04.008
- [5] ROMANISHIN J W, GILPIN K, CLAICI S, et al. 3D M-Blocks: Self-reconfiguring robots capable of locomotion via pivoting in three dimensions [C]// Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Seattle, WA: IEEE, 2015. DOI: 10.1109/ICRA.2015.7139450
- [6] ROMANISHIN J W, GILPIN K, RUS D. M-blocks: Momentum-driven, magnetic modular robots [C]// Proceedings of 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Tokyo: IEEE, 2013. DOI: 10.1109/IROS.2013.6696971
- [7] 李磊, 周军, 黄河, 等. 组合体航天器变拓扑过程中姿态稳定控制研究 [J]. 计算机仿真, 2015, 32(6): 80
LI Lei, ZHOU Jun, HUANG He, et al. Attitude stabilization control of compound spacecraft in the process of changing topologies [J]. Computer Simulation, 2015, 32(6): 80. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9348.2015.06.019
- [8] 赵永佳. 漂浮基空间机械臂轨迹跟踪的神经网络控制方法研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2016
ZHAO Yongjia. Studies on neural network control algorithm of trajectory tracking of space manipulators on free-floating base [D]. Changchun: Jilin University, 2016
- [9] 陈力, 刘延柱. 浮动基座空间机械臂系统的动力学建模与惯性轨迹跟踪的滑模控制 [J]. 力学季刊, 2000, 21(4): 482
CHEN Li, LIU Yanzhu. Dynamic and variable structure control for space manipulator to track desired trajectory in workspace [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2000, 21(4): 482. DOI: 10.3969/j.issn.0254-0053.2000.04.014
- [10] BONA B, INDRI M. Friction compensation in robotics: An overview [C]// Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control. Seville, Spain: IEEE, 2005. DOI: 10.1109/CDC.2005.1582848
- [11] 杨世文, 郑慕侨. 摩擦力非线性建模与仿真 [J]. 系统仿真学报, 2002, 14(10): 1365
YANG Shiwen, ZHENG Muqiao. Simulation of nonlinear friction with modeling methodology [J]. Journal of System Simulation, 2002, 14(10): 1365. DOI: 10.3969/j.issn.1004-731X.2002.10.027
- [12] 丁千, 翟红梅. 机械系统摩擦动力学研究进展 [J]. 力学进展, 2013, 43(1): 112
DING Qian, ZHAI Hongmei. The advance in researches of friction dynamics in mechanics system [J]. Advances in Mechanics, 2013, 43(1): 112. DOI: 10.6052/1000-0992-12-039
- [13] XU Bin, SHI Zhongke, YANG Chenguang. Composite fuzzy control of a class of uncertain nonlinear systems with disturbance observer [J]. Nonlinear Dynamics, 2015, 80(1/2): 341. DOI: 10.1007/s11071-014-1872-5
- [14] 秦绪平, 谭国俊. 模糊控制理论的发展应用与展望 [J]. 控制工程, 2005, 12(S2): 141
QIN Xuping, TAN Guojun. Development and prospect of fuzzy control theory [J]. Control Engineering of China, 2005, 12(S2): 141
- [15] 刘代军, 崔颖. 自修正量化因子和比例因子的复合模糊控制器设计 [J]. 弹箭与制导学报, 2001, 21(1): 25
LIU Daijun, CUI Hao. The composite fuzzy controller design with self-correcting quantizing factors and proportional factor [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2001, 21(1): 25. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9728.2001.01.007