基于柔性毛刷的自旋卫星的消旋动力学分析

孙晟昕, 吴昊, 魏承*, 赵阳

哈尔滨工业大学航天学院, 哈尔滨 150001

*联系人, E-mail: weicheng@hit.edu.cn

收稿日期: 2018-09-27; 接受日期: 2018-10-12; 网络出版日期: 2018-12-19

微小型航天器技术国防重点学科实验室开放基金(编号: HIT.KLOF.MST.201703)和空间智能控制技术重点实验室开放基金(编号: ZDSYS-2017-07)资助

摘要 随着人类在太空中的不断探索与扩张, 太空的失效卫星不断增多. 在对失效卫星的抓捕过程中, 卫星的翻滚自旋一直是影响抓捕系统稳定的主要问题. 针对上述问题, 本文提出一种柔性减速刷消旋结构, 将其置于七自由度机械臂的末端, 形成消旋空间机器人. 通过末端柔性减速刷与翻滚目标帆板之间的接触碰撞来耗散翻滚目标的动量, 进行自由翻滚目标的角速度消旋. 本文基于绝对节点坐标法(ANCF)大变形索梁单元的绳索单元, 建立柔性减速刷的连续介质模型. 根据Hertz理论, 计算柔性减速刷与翻滚目标帆板之间的接触碰撞力. 针对不同转速状态下的非合作目标, 通过动力学仿真分析柔性减速刷的长度、角度等参数对于消旋效果的影响, 并得到了最优的消旋参数. 运用此参数进行消旋的仿真验证, 结果表明该策略能成功消除初始自旋角速度, 具有可行性和有效性.

关键词 柔性减速刷, 非合作目标, 消旋, 绝对节点坐标方法, 绳索建模

PACS: 47.27.-i, 47.27.Eq, 47.27.Nz, 47.40.Ki, 47.85.Gj

1 引言

随着人类对太空的不断探索, 越来越多的废弃卫星产生, 给今后的太空活动带来了许多弊端^[1-4]. 随着太空垃圾逐步被重视, 对于废弃卫星的抓捕成为人们的重要研究方向, 并且为了减少自旋卫星抓捕过程的复杂性, 自旋卫星的消旋过程变得格外的重要^[5].

近年来, 国外对空间抓取目标的理论及实验已经进行了广泛而深入的研究: 分析了空间抓取目标的碰撞动力学及运动学模型^[6,7]. Aghili^[8]通过建立空间机械臂抓取失稳目标的动力学模型, 对最优接触点及消

旋控制进行研究. Matunaga^[9]将弹性小球作为末端执行器, Kawamoto等人^[10]利用多次接触所产生的脉冲作用力衰减目标章动角和自旋转速的方法, 最终完全衰减目标转速. 另有增阻装置等空间碎片清除系统, 通过增大目标的面质比, 从而增大空气阻力, 以加速目标消旋过程, 方法包括向空间碎片喷射泡沫^[11,12]和为空间碎片安装气囊^[13]. Yoshida等人^[14]研究了长机械臂的碰撞动力学特性, 并因此提出了减小碰撞冲击和支撑结构振动的方法. Cyril^[15]研究了负载与空间机器人之间的碰撞对空间机器人抓捕后状态的影响. Huang^[16]研究了空间机器人抓捕自由飞行目标的碰撞

引用格式: 孙晟昕, 吴昊, 魏承, 等. 基于柔性毛刷的自旋卫星的消旋动力学分析. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49: 024515

Sun S X, Wu H, Wei C, et al. Dynamic analysis of rotating satellite de-spun using flexible brush (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2019, 49: 024515, doi: 10.1360/SSPMA2018-00329

动力学问题, 并且给出了基座速度变化和目標速度变化之间的关系.

国内对自旋卫星的消旋控制的研究比较少, 主要集中在卫星自旋姿态仿真. 文献[17]研究了空间碎片在姿态转矩作用下的稳定性及参数辨识问题, 为了描述不同情况下的参数识别问题, 提出了微分几何的反馈线性化方法的概念. 黄汉文^[18,19]在自旋稳定静止卫星同步技术分析方向上进行研究, 李坤等人^[20,21]对细长体自旋卫星消旋控制动力学解耦的系统实时仿真, 但没有在卫星自旋通过外力消旋上进行更深一步的研究与分析.

消旋的研究课题, 在国内外都是对于研究方法进行探讨, 仍停留在理论阶段. 本文通过建立自旋卫星的消旋仿真模型, 针对消旋过程中不同角度和不同长度的减速刷进行消旋仿真, 并分析结果数据, 得到各种因素对自旋卫星的消旋效果影响的定性结论.

2 动力学模型

本文的减速刷消旋过程如图1所示. 图中, 右侧卫星为翻滚失效卫星, 左侧为服务航天器, 该航天器载七自由度机械臂, 末端为柔性减速刷. 柔性减速刷通过与非合作目标帆板之间的接触碰撞, 进行两者动量交换, 以实现翻滚目标的消旋.

空间绳索动力学建模主要在以前质点弹簧方法及有限段等简化动力学模型方法的基础上提出了基于ANCF(绝对节点坐标法)大变形索梁单元的绳索单元, ANCF索梁单元以其精确的大变形描述能力、完备的无小变形及小转动简化假设的连续介质力学模型, 常系数质量矩阵等优势, 已经成为大变形绳索的有效动力学建模方法, 并成功应用在各工程领域.

2.1 单元动能

由于柔索单元的形函数为常数, 柔索上任意一点的速度矢量可写为

图1 (网络版彩图) 柔性减速刷消旋仿真图

Figure 1 (Color online) The simulation of flexible deceleration brush.

$$\dot{\mathbf{r}} = S^j \dot{q}, \quad (1)$$

其中, $\mathbf{r}$ 为位置矢量, S 为形函数, q 为单元节点坐标. 利用方程(1), 柔索单元的动能可写为

$$\begin{aligned} {}^jT &= \frac{1}{2} \int_0^L \rho \int_A {}^j\dot{q}^T S^T S^j \dot{q} dA dx \\ &= \frac{1}{2} {}^j\dot{q}^T \left(\int_0^L \rho (AS^T S) dx \right) {}^j\dot{q} \\ &= \frac{1}{2} {}^j\dot{q}^T {}^j\mathbf{M}^j \dot{q}, \end{aligned} \quad (2)$$

其中, ρ 和 A 分别为柔索单元的密度和横截面积, ${}^j\mathbf{M} = \int_0^L \rho (AS^T S) dx$ 为 ANCF 柔索单元的常值质量矩阵, 具体表达式如下:

$$\begin{aligned} {}^j\mathbf{M} &= \int_0^L \rho (AS^T S) dx \\ &= m \begin{bmatrix} \frac{13}{35}I & \frac{11}{210}LI & \frac{9}{70}I & -\frac{13}{420}LI \\ \frac{1}{105}L^2I & \frac{13}{420}LI & -\frac{1}{140}L^2I & \\ & \frac{13}{35}I & -\frac{11}{210}LI & \\ \text{sym} & & & \frac{1}{105}L^2I \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (3)$$

2.2 单元内能

利用 Bernoulli-Euler Beam 梁方程 (Beam Formulation), 柔索单元的弹性能为

$${}^jU = \frac{1}{2} \int_0^L (EA {}^j\varepsilon_0^2 + EJ {}^j\kappa^2) dx, \quad (4)$$

其中, E 为弹性模量, J 为柔索截面的惯性矩, 轴向应变 ${}^j\varepsilon_0$ 和曲率 ${}^j\kappa$ 可由下面两式得到:

$${}^j\varepsilon_0 = \sqrt{{}^j\mathbf{r}_x^T {}^j\mathbf{r}_x} - 1, \quad (5)$$

$${}^j\kappa = \frac{|{}^j\mathbf{r}_x \times {}^j\mathbf{r}_{xx}|}{|{}^j\mathbf{r}_x|^3}. \quad (6)$$

2.3 动力学方程

系统总的动能和应变能可写为

$$T = \sum_{j=1}^k {}^jT = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{q}}, \quad (7)$$

$$U = \sum_{j=1}^k {}^jU = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^k \int_0^L (EA {}^j\varepsilon_0^2 + EJ {}^j\kappa^2) dx,$$

其中,

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} {}^1M & & & \\ & {}^2M & & \\ & & \ddots & \\ & & & {}^kM \end{bmatrix} \quad (8)$$

质量矩阵为常值矩阵. 由于采用广义坐标描述单元的力学状态, 刚体和柔性体的动力学可以用一个统一的系统方程描述——受约束离散多体系统的微分代数方程, 即DAE方程:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right)^T - \left(\frac{\partial T}{\partial q} \right)^T + \left(\frac{\partial U}{\partial q} \right)^T + \left(\frac{\partial C}{\partial q} \right)^T \lambda = Q_e, \\ C(q, t) = 0, \end{cases} \quad (9)$$

其中, q 为广义坐标, T 为总动能, U 为总应变能, C 为约束方程, λ 为约束方程对应的拉氏乘子, Q_e 为广义力矢量, q 和 λ 都是未知量.

由动能和应变能的表达式可得:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right)^T - \left(\frac{\partial T}{\partial q} \right)^T = \frac{d}{dt} (\mathbf{M}\dot{q}) - 0 = \mathbf{M}\ddot{q}, \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial U}{\partial q} \right)^T &= \sum_{j=1}^k \int_0^L \left[EA\varepsilon_0 \left(\frac{\partial j_{\varepsilon_0}}{\partial q} \right)^T + EJ_k \kappa \left(\frac{\partial j_{\kappa}}{\partial q} \right)^T \right] dx \\ &= -Q_{\kappa}. \end{aligned} \quad (11)$$

柔索系统的动力学方程可写为

$$\begin{cases} \mathbf{M}\ddot{q} + C_q^T \lambda = Q_k + Q_e, \\ C = 0. \end{cases} \quad (12)$$

2.4 碰撞动力学

根据Hertz理论, 法向接触力的大小为

$$\begin{aligned} F_n &= (F_K + F_C)B(\delta) = (K\delta^n + C\dot{\delta})B(\delta), \\ B(\delta) &= \begin{cases} 0, & \delta \geq 0, \\ 1, & \delta < 0, \end{cases} \end{aligned} \quad (13)$$

式中, K 为接触刚度系数; C 为接触阻尼系数; δ 为两接触物体之间的法向穿透深度; $\dot{\delta}$ 为穿透速度; n 为非线性接触力指数, $n \geq 1$ 一般取 1.5; $B(\delta)$ 为逻辑函数, 根据碰撞体之间的法向穿透量 δ 来判定是否接触.

根据以上公式可知, 法向接触力包括两部分: 法向

弹性分量 F_K 和非线性阻尼分量 F_C .

(1) 法向弹性分量 $F_K = K\delta^n$

法向弹性分量相当于一个非线性弹簧. 物体接触刚度系数与物体的材料属性和接触表面的几何形状有关, 根据Hertz接触理论, 可推导出绳单元与正方体平面碰撞的接触刚度计算式:

$$K = \frac{4}{3} \cdot R^* \cdot E^*, \quad (14)$$

式中, $R^* = \left(\frac{1}{2R} \right)^{-\frac{1}{2}}$, R 为绳单元的廓面在碰撞点处点曲

率半径; $E^* = \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)^{-1}$, ν_1 为柔性绳的泊松比, ν_2 为正方体的泊松比; E_1 为柔性绳的弹性模量, E_2 为正方体的弹性模量.

(2) 非线性阻尼分量 $F_C = C\dot{\delta}$

在阻尼分量 $C\dot{\delta}$ 中, 接触阻尼系数为

$$C = \frac{3K(1-e^2)}{4v_0} \delta^n = \frac{3(1-e^2)}{4v_0} F_K, \quad (15)$$

式中, K 为接触刚度系数; e 为恢复系数; δ 穿透深度; v_0 为绳单元与正方体在碰撞点初始碰撞速度.

(3) 摩擦力计算

接触碰撞的两物体之间的摩擦力随两体的相对运动方式而不断变化, 具有非线性的迟滞特征, 由于接触面之间是相互滑动的, 因此, 把切向接触力定义为库仑摩擦模型. 根据库仑摩擦, 摩擦力 F_t 为

$$F_t = \mu(|\mathbf{v}_t|)F_n, \quad (16)$$

其中, 摩擦系数 μ 由切向相对速度 $\mathbf{v}_t$ 决定

$$\mu(v) = \begin{cases} \text{step}(v, -v_s, -\mu_s, v_s, \mu_s), & -v_s < v < v_s, \\ -\text{sign}(v) \text{step}(|v|, v_d, \mu_d, v_s, \mu_s), & v_s \leq |v| \leq v_d, \\ -\text{sign}(v) \cdot \mu_d, & |v| > v_d, \end{cases} \quad (17)$$

其中, v_s 和 v_d 分别为静、动摩擦的临界速度, μ_s 和 μ_d 分别为静、动摩擦系数, 这些系数一般都由实验来测得. 上式中函数 $\text{step}()$ 是利用三次多项式逼近海赛(Heaviside)阶跃函数, 具有连续的一阶导数, 但在起始点处二阶导数不连续, 其表达式为

$$\text{step}(x, x_0, h_0, x_1, h_1) = \begin{cases} h_0, & x \leq x_0, \\ h_0 + a \cdot \Delta^2(3 - 2\Delta), & x_0 < x < x_1, \\ h_1, & x \geq x_1, \end{cases} \quad (18)$$

其中, $a = h_1 - h_0$, $\Delta = (x - x_0) / (x_1 - x_0)$.

碰撞发生在柔性减速刷与消旋目标之间, 可看作是绳索与体之间的碰撞. 将绳单元等效为圆柱体, 因此绳与体的碰撞可以等效为圆柱体与平面的碰撞. 将柔性绳与体之间的碰撞过程等效为非线性弹簧阻尼模型. 非线性弹簧阻尼模型利用接触理论中的弹性接触力来反映碰撞过程中的恢复力, 用非线性阻尼力来反映碰撞过程中的能量损失. 弹性接触力的方向与碰撞体相互嵌入的方向相反, 且始终是压力; 非线性阻尼力的方向与碰撞体相对运动速度的方向相反.

3 动力学仿真分析

本文采用减速刷对于处于自旋状态的非合作目标进行消旋. 针对不同转速状态下的非合作目标, 分析减速刷的长度、角度等参数对于消旋效果的影响.

3.1 动力学参数

为验证柔性减速刷的消旋效果, 本文将柔性减速刷装配于七自由度冗余机械臂末端. 其中, 七自由度机械臂各关节均锁紧, 以控制变量, 仅观察减速刷的效果. 整体效果如图2所示.

柔性减速刷通过与非合作目标帆板之间的接触碰撞, 进行两者之间的动量交换, 以实现翻滚目标的消旋. 其中, 非合作目标的参数主要有: 质量为2784 kg, 基体体积为1 m×1 m×1 m, 帆板体积为1 m×1.3 m×0.03 m, 翻滚速度为 π rad/s.

图2 柔性减速刷消旋

Figure 2 The racemization of flexible deceleration brush.

非合作目标初始旋转角速度为 π rad/s, 经过帆板与柔性毛刷之间的接触碰撞, 非合作目标的旋转角速度将会下降. 柔性减速刷的绳索动力学参数: 半径为0.03 m, 密度为100 kg/m³, 杨性模量 1×10^7 Pa, 泊松比0.3.

在消旋过程中, 翻滚目标动量耗散, 旋转方向角速度阶段性下降, 实现消旋. 减速刷消旋过程如图3所示.

3.2 减速刷长度对于消旋效果的影响

分别取定减速刷长度 $L = 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 0.45, 0.5, 0.55, 0.6, 0.65$ m, 仿真不同长度减速刷对于初始旋转角速度为 π rad/s的翻滚目标的消旋效果的影响.

为达到控制变量的效果, 仅取单层毛刷, 如图4所示, 且仅对于第一次接触碰撞后的消旋效果进行评估.

减速刷长度对于消旋效果的影响如图5所示. 毛刷长度在0.15–0.65 m之间取值, 消旋效果先升后降. 当毛刷长度达到0.25 m时, 消旋效果达到最佳.

选取消旋过程中所产生的最大碰撞力. 毛刷长度与碰撞力的关系如图6所示. 碰撞力趋势与图5消旋效果趋势基本相同, 因此可知, 减速刷消旋主要通过减

图3 (网络版彩图)翻滚目标消旋过程

Figure 3 (Color online) The spinning process of tumbling target.

图 4 (网络版彩图)单层减速刷示意图

Figure 4 (Color online) Schematic diagram of single brush.

图 5 减速刷长度对于消旋效果的影响

Figure 5 The effect of brush length on racemization.

图 6 毛刷长度与碰撞力的关系

Figure 6 The relationship between brush length and impact force.

速刷与帆板之间的接触碰撞来实现。

3.3 减速刷倾斜角对于消旋效果的影响

分别取定减速刷倾斜角 $\beta = -60^\circ, -45^\circ, -30^\circ, -15^\circ, 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$, 仿真不同倾斜角的减速刷对于初始旋转角速度为 $\pi \text{ rad/s}$ 的翻滚目标的消旋效果

的影响。

为达到控制变量的效果, 仅取单层毛刷, 具有一定的初始角度, 如图7和8所示, 且仅对于第一次接触碰撞后的消旋效果进行评估。

当减速刷取不同倾斜角时, 翻滚目标消旋前后旋转角速度的差值如图9所示。减速刷的倾斜角范围为 -60° – 60° 之间, 间隔 15° 取值。消旋效果随减速刷倾斜角的增加而逐渐增加, 直到倾斜角达到 60° 时达到最优值。

取具有代表性的倾斜角为 $-60^\circ, 0^\circ, 60^\circ$ 时, 减速刷与翻滚目标帆板之间的碰撞力作用关系, 如图10所示。

图 7 倾斜角示意图

Figure 7 Schematic diagram of inclination angle.

图 8 (网络版彩图)减速刷倾斜角实际效果

Figure 8 (Color online) Actual effect of deceleration brush inclination angle.

图 9 不同倾斜角下角速度差值

Figure 9 Angular velocity difference with inclination angles.

当倾斜角为 -60° 时, 虽然碰撞力峰值为三者中最大, 但碰撞力作用时间较短, 因此消旋效果不明显. 当倾斜角为 0° 时, 碰撞力峰值有所下降, 但碰撞力成上升趋势, 且作用时间较长, 因此消旋效果有一定提升. 当倾斜角为 60° 时, 碰撞力峰值持续时间最长. 帆板与减速刷之间的持续碰撞, 使得动量交换增加, 因此消旋效果最佳.

3.4 长度和倾斜角对于消旋效果的混合影响

分别取定减速刷倾斜角 $\beta = -60^\circ, -45^\circ, -30^\circ, -15^\circ, 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 和 $L = 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$ m, 仿真不同长度和倾斜角的减速刷对于初始旋转角速度为 π rad/s的翻滚目标的消旋效果的影响.

长度、倾斜角和消旋效果的关系如图11所示. 在

图 10 (网络版彩图) 倾斜角与碰撞力关系

Figure 10 (Color online) Relationship between inclination angle and force.

图 11 (网络版彩图) 长度、倾斜角和消旋效果的关系

Figure 11 (Color online) Relationship between length, inclination angle and racemization effect.

第一次减速刷与帆板之间的接触碰撞后, 长度对于消旋效果的影响较小, 减速刷倾斜度对于消旋效果的影响较大. 且当倾斜角达到 60° 时, 长度对于翻滚卫星的消旋效果的影响较小.

3.5 减速刷消旋效果

分析长度和倾斜角对于消旋效果的混合影响, 取定倾斜角为 60° , 减速刷长度为0.25 m的减速刷, 仿真其对于初始旋转角速度为 π rad/s的翻滚目标的消旋效果的影响.

在30 s的时间内, 减速刷与翻滚目标接触碰撞3次. 处于自由漂浮状态下的翻滚目标受到碰撞力的影响, 其位置及线速度均发生一定的变化.

翻滚卫星线速度趋势如图12所示. 翻滚卫星角速

图 12 (网络版彩图) 翻滚卫星线速度

Figure 12 (Color online) The speed of rolling satellite.

图 13 (网络版彩图) 翻滚目标角速度

Figure 13 (Color online) Angular velocity of rolling target.

度变化趋势如图13所示. 在30 s的时间内, 减速刷与翻滚目标接触碰撞多次, 非合作目标的角速度呈阶段性下降, 最终消旋效率达到65.2%, 成功实现消旋.

4 结论

为探究柔性减速刷对于高速翻滚非合作目标的消旋效果, 本文建立了柔性减速刷的力学模型, 讨论减速刷长度和倾斜角对于消旋效果的影响. 最后选取一组最佳的参数, 进行减速刷消旋仿真验证. 分析所得数

据, 得到如下结论.

(1) 减速刷消旋效果随其长度的增加, 呈现先增加后减少的趋势, 在所取定的数值中, 消旋效果在长度达到0.25 m时最佳.

(2) 减速刷消旋效果随其倾斜角的增加而增大, 在所取定的数值中, 消旋效果在倾斜角达到60°时最佳. 且倾斜角消旋效果优于长度消旋效果.

(3) 在30 s的时间内, 经过多次接触碰撞, 高速翻滚非合作目标的角速度呈阶段性下降, 消旋效率达到65.2%, 成功实现消旋.

参考文献

- Anderson P V, Schaub H. Local orbital debris flux study in the geostationary ring. *Adv Space Res*, 2013, 51: 2195–2206
- Klinkrad H, Bendisch J, Bunte K D, et al. The MASTER-99 space debris and meteoroid environment model. *Adv Space Res*, 2001, 28: 1355–1366
- Yates J M, Spanbauer B W, Black J T. Geostationary orbit development and evaluation for space situational awareness. *Acta Astronaut*, 2012, 81: 256–272
- Schaub H, Moorer D F. Geosynchronous large debris reorbiter: Challenges and prospects. *J Astronaut Sci*, 2012, 59: 161–176
- Zhou X H. The simulation analysis of active debris removal of multiple targets in a single task (in Chinese). Dissertation for Master Degree. Beijing: The University of Chinese Academy of Sciences, 2017. 3–8 [周秀华. 单次任务中多块空间碎片主动移除的仿真分析. 硕士学位论文. 北京: 中国科学院大学, 2017. 3–8]
- Awrejcewicz J, Olejnik P. Analysis of dynamic systems with various friction laws. *Appl Mech Rev*, 2005, 58: 389–411
- Mahler J, Patil S, Kehoe B, et al. GP-GPIS-OPT: Grasp planning with shape uncertainty using gaussian process implicit surfaces and sequential convex programming. In: 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Seattle, 2015. 4919–4926
- Aghili F. Optimal control for robotic capturing and passivation of a tumbling satellite with unknown dynamics. AIAA-2008-7274, 2008
- Matunaga S, Kanzawa T, Ohkami Y. Rotational motion-damper for the capture of an uncontrolled floating satellite. *Control Eng Practice*, 2001, 9: 199–205
- Kawamoto S, Matsumoto K, Wakabayashi S. Ground experiment of mechanical impulse method for uncontrollable satellite capturing. In: Proceeding of the 6th International Symposium on Artificial Intelligence and Robotics & Automation in Space (i-SAIRAS). St-Hubert, 2001
- Pigliaru L, Borriello C, Piergentili F, et al. Expanded polyurethane foam for active debris removal. In: 65th International Astronautical Congress 2014: Our World Needs Space. IAC 2014, 2014
- Andrenucci M, Pergola P, Ruggiero A. Active Removal of Space Debris—Expanding foam application for active debris removal. Technical Report. ESA, 2011
- Sinn T, Thakore T, Maier P. Space debris removal using self-inflating adaptive membrane. In: Proceedings of the 63rd International Astronautical Congress. 2012
- Yoshida K, Mavroidis C, Dubowsky S. Impact dynamics of space long reach manipulators. In: 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Minneapolis, 1996. 1909–1916
- Cyril X, Jaar G J, Misra A K. The effect of payload impact on the dynamics of a space robot. In: Proceedings of the 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Yokohama, 1993. 2070–2075
- Huang P, Xu Y, Liang B. Contact and impact dynamics of space manipulator and free-flying target. In: 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Edmonton, 2005. 1181–1186
- Zhang T, Yue X, Ning X, et al. Stabilization and parameter identification of tumbling space debris with bounded torque in postcapture. *Acta Astronaut*, 2016, 123: 301–309

- 18 Huang H W. Synchronization analysis of spin stabilized stationary satellites (in Chinese). *Spacecraft Eng*, 1998, 7: 19–24 [黄汉文. 自旋稳定静止卫星同步技术分析. *航天器工程*, 1998, 7: 19–24]
- 19 Wei W S, Jing W X, Gao C S. Research on autonomous stabilization of spacecraft after capturing non-cooperative targets (in Chinese). *J Aeronaut*, 2013, 34: 1520–1530 [韦文书, 荆武兴, 高长生. 捕获非合作目标后航天器的自主稳定技术研究. *航空学报*, 2013, 34: 1520–1530]
- 20 Li K, Wang Z. Dynamic decoupling system simulation of racemic active nutation control for slender dual-spin satellite (in Chinese). *Space Control*, 1994, 43: 47–52 [李坤, 王钊. 细长体双自旋卫星消旋主动章动控制动力学解耦的系统仿真. *航天控制*, 1994, 43: 47–52]
- 21 Cao X B, Li F, Zhang J X. Development status and trend of space debris active removal technology (in Chinese). *J National Univ Defense Sci Tech*, 2015, 37: 117–120 [曹喜滨, 李峰, 张锦绣. 空间碎片天基主动清除技术发展现状及趋势. *国防科技大学学报*, 2015, 37: 117–120]

Dynamic analysis of rotating satellite de-spun using flexible brush

SUN ShengXin, WU Hao, WEI Cheng^{*} & ZHAO Yang

Department of Aerospace Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

With the continuous exploration and expansion of human beings in space, the number of satellites in space is gradually increasing. In the process of catching the failed satellites, the rolling spin of the satellite has always been the main problem which is affecting the stability of the catching system between targets and servers. The derotation mechanism, a flexible deceleration brush, is proposed, which is placed at the end of a seven-degree-of-freedom manipulator to form a racemable space robot. The momentum of the rolling target is dissipated by the contact collision between the end flexible deceleration brush and the rolling target windsurfing board. The angular velocity deceleration of the freely rolling target is carried out. Based on the rope element of the large deformation cable beam element of the absolute nodal coordinate method (ANCF), the continuum model of the flexible deceleration brush is established. According to the Hertz theory, contact collision force between the flexible deceleration brush and the rolling target windsurfing board are calculated. For the non-cooperative target of free rolling in different speeds, the effects of the length, angle and other parameters of the flexible deceleration brush on the racemization effect are analyzed by dynamics simulation, and the optimal racemization parameters are obtained in the process of the dynamics simulation. Using these parameters to verify the simulation of the racemization, the results show that the strategy, which is using flexible deceleration brush to rack non-cooperative targets, can successfully eliminate the initial spin angular velocity and it is feasible and effective.

flexible deceleration brush, non-cooperative target, de-spun, absolute nodal coordinate formulation, cable dynamics

PACS: 47.27.-i, 47.27.Eq, 47.27.Nz, 47.40.Ki, 47.85.Gj

doi: [10.1360/SSPMA2018-00329](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00329)