

多目标进化算法在卫星姿态控制中的应用

申晓宁¹ 周 端² 郭 毓² 陈庆伟² 胡维礼²

(南京信息工程大学信息与控制学院 南京 210044)¹ (南京理工大学自动化学院 南京 210094)²

摘 要 挠性卫星大角度机动姿态控制要求卫星能够较快地机动到给定位置,同时要求由卫星机动引起的帆板振动强度尽可能地小。基于一种新型的多目标优化进化算法,规划卫星的大角度机动路径,以同时优化卫星姿态机动的快速性和帆板低振动强度两个指标。仿真结果表明,所提方法运行一次便能够有效地搜索到一组多样性较好的非支配路径解,供决策者在不同的工作目标下选择,有效地缓解了两个指标间的矛盾。

关键词 挠性卫星,大角度机动,姿态控制,多目标优化,进化算法

中图分类号 TP18 **文献标识码** A

Attitude Control for Large Angle Maneuver of Flexible Satellite Based on a Multi-objective Evolutionary Algorithm

SHEN Xiao-ning¹ ZHOU Duan² GUO Yu² CHEN Qing-wei² HU Wei-li²

(College of Information and Control, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)¹

(College of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)²

Abstract The attitude control for large angle maneuver of flexible satellite requires the satellite can follow the given angle quickly. Meanwhile, vibration of solar panel caused by maneuver of the satellite is expected to be low. A new multi-objective optimization evolutionary algorithm was applied to the path planning for large angle maneuver of satellite, which can optimize both the rapidity of maneuver and low vibration of solar panel. Simulation results indicate that the proposed approach can search a diverse set of non-dominated path solutions in one run efficiently, from which the decision maker can make a selection under different working requirements. The approach proposed alleviates the conflicts between two criteria.

Keywords Flexible satellite, Large angel maneuver, Attitude control, Multi-objective optimization, Evolutionary algorithms

随着空间技术的发展,卫星的飞行任务呈现出多样化的趋势,系统结构也变得更加复杂,同时对卫星指向精度和姿态稳定度提出了很高的要求。为了减轻发射质量,卫星广泛使用太阳帆板等轻质挠性附件。由于卫星中心刚体和附件间存在强耦合,当卫星做大角度机动时,必然加剧太阳帆板的振动,而附件的振动进一步增加了卫星本体对地定向姿态的控制难度。目前对挠性卫星姿态控制的研究主要集中在动力学建模和控制器的设计方面^[1]。文献[2-5]分别构造了基于Lyapunov函数的自适应滑模控制器、鲁棒变结构控制器、自抗扰控制器、变结构与神经网络自适应控制技术相结合的智能控制器,以在确保控制效果的前提下提高卫星控制系统的鲁棒性;文献[6]研究了一类大角度姿态机动 Lyapunov 控制器模型的参数优化问题。以上方法均研究了卫星姿态的控制律,但未考虑姿态机动的路径对卫星大角度机动时姿态控制的影响。

挠性卫星大角度机动的姿态控制问题本质上是一个具有多个性能指标的复杂多目标优化问题。在挠性卫星的实际运

动过程中,由于对卫星快速性、稳定性等多方面的要求,应保证卫星迅速而精确地机动到指定的姿态角,同时由卫星大角度机动引起的帆板振动要尽可能地小。进化算法(简称 EA)是模拟生物在自然环境中的进化过程而形成的一类自适应全局优化概率搜索算法。EA 同时对整个群体操作,可以在算法的一次运行中并行搜索到多个解,具有很强的通用性,因此 EA 特别适用于求解同时存在多个非支配解的多目标优化问题。本文建立了挠性卫星大角度机动姿态控制问题的多目标优化模型,并基于一种新型保持群体多样性的多目标优化进化算法(简称 KDMOEA)^[7],规划卫星姿态的机动轨线,以兼顾快速性和稳定性的要求。仿真结果表明,所提算法经过一次运算,能够有效地求得一组多样性较好的非支配路径解,供决策者根据工作进行挑选。

1 卫星姿态控制问题的多目标优化模型

本文主要研究了一类带挠性太阳帆板的卫星做大角度机动时的姿态控制问题。在该类控制系统中,卫星姿态机动的

到稿日期:2009-08-20 返修日期:2009-10-25 本文受空间智能控制技术国家重点实验室项目资助。

申晓宁(1981-),女,博士,讲师,主要研究方向为进化算法、多目标优化,E-mail: sxnysyt@sina.com;周 端(1984-),女,博士生,主要研究方向为卫星控制;郭 毓(1964-),女,博士,教授,主要研究方向为学习控制、智能控制、机器人;陈庆伟(1963-),男,博士,教授,主要研究方向为智能控制与智能系统;胡维礼(1941-),男,教授,主要研究方向为智能控制、网络控制系统、字交流伺服系统。

快速性和高精度稳定之间是相互矛盾的。快速性要求卫星对系统输入信号的反应速度快,但这会导致姿态变化剧烈,并对帆板的振动产生较大影响;高精度稳定要求姿态快速到达稳定状态的同时,减小稳态误差,这要求卫星大角度机动引起的帆板振动强度尽可能小。采用多目标优化的方法规划姿态机动路径,能够缓解快速性与高精度稳定两个指标之间的矛盾。

1.1 挠性卫星的动力学建模

带挠性附件卫星动力学的主要特点是,挠性附件的运动要用无限自由度的分布参数描述,而且挠性运动和刚体姿态运动相互耦合,是由常微分方程和偏微分方程共同描述的非线性、时变的混合系统。

设卫星由中心刚体和太阳帆板组成。若只考虑转动而不考虑平动,结合刚体卫星动力学方程和帆板振动方程,可以得到混合坐标下挠性卫星姿态动力学方程为^[8]

$$I_s \dot{\omega} + [\omega \times] I_s \omega + C_0 \ddot{\eta} = T - T_c \quad (1)$$

$$\ddot{\eta} + 2\xi\Lambda\dot{\eta} + \Lambda^2\eta + C_0^T\omega = 0 \quad (2)$$

式中, T 是作用在刚体卫星上的合外力矩; T_c 是作用在星体上的控制力矩; ω 是卫星的角速度; I_s 是卫星的惯量矩阵; $[\omega \times]$ 是斜对称矩阵; $\eta = [\eta_1 \ \eta_2 \ \eta_3 \ \eta_4 \ \eta_5]^T$ 是帆板振动方程的模态坐标; C_0 是帆板振动和主刚体的耦合矩阵; Λ 和 ξ 分别是帆板振动模态频率矩阵和阻尼矩阵。

1.2 挠性卫星的姿态机动轨线

设卫星俯仰轴和偏航轴均阶跃 10° , 取滚动轴姿态机动的轨线为 S 型函数:

$$f(t) = \frac{1}{1 + \exp^{-(t-m)}} \times \text{标称值} \quad (3)$$

式中, m, n 是两个可调参数, 标称值取为滚动轴经机动后期望达到的姿态角 u 。

当参数 m, n 取不同范围的值时, 式(3)中的函数 $f(t)$ 分别对应不同形状和特征的曲线。当 $n \geq 20$ 时, $f(t) \approx \begin{cases} \text{标称值}, & t \geq m \\ 0, & \text{else} \end{cases}$, 即 $f(t)$ 可以近似看作自变量 t 在点 m 处的阶跃函数, 如图 1(a) 所示; 当 $m \leq 10$, 且 n 取较小的值, 如 $0 < n \leq 0.5$ 时, $f(t)$ 可近似看作一条如图 1(b) 所示的曲线, $f(t)$ 在初始时变化率很大, 到达一定的时间后, 稳定在标称值上; 当 $m > 10$, 且 n 取值适中, 如 $0.5 < n < 20$ 时, $f(t)$ 的曲线为 S 型, 如图 1(c) 所示, $f(t)$ 在初始时变化率较小, 到达一定的时间后, 变化率迅速增加, 最后稳定在标称值上。由上述可见, 式(3)中 S 型函数 $f(t)$ 对应的曲线能够随着参数的变化表现出多种不同的形式, 通过选取适当的参数, 即可获得满足系统性能要求的挠性卫星滚动轴姿态机动轨线。

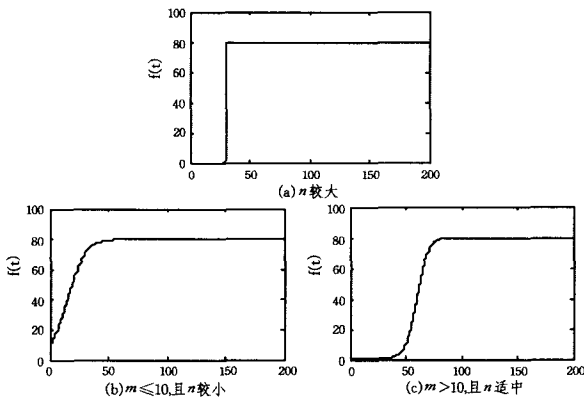


图1 $f(x)$ 在不同参数取值下的曲线变化图

1.3 挠性卫星姿态控制问题的多目标优化模型

设卫星滚动轴姿态机动轨线是 S 型函数 $f(t) =$

$\frac{1}{1 + \exp^{-(t-m)}} \times \text{标称值}$, 则挠性帆板卫星大角度机动姿态控制问题的多目标优化模型可表述为

求取参数向量 $\zeta^* = [m^*, n^*]$, 使得

$$F(\zeta^*) = \min[f_1(\zeta), f_2(\zeta)] \quad (4)$$

且 ζ^* 满足约束 $m^* \in [-20, 100], n^* \in (0, 50]$ 。

式中, $f_1(\zeta)$ 表示挠性卫星滚动轴的调节时间, 衡量卫星姿态机动的快速性; $f_2(\zeta)$ 表示挠性帆板模态振动的幅度, 衡量卫星机动后引起帆板振动的强度。两个目标值均越小越好。当式(3)中的参数 m, n 取值过大或过小时, 对式(3)中 S 型函数 $f(t)$ 的曲线形式影响很小, 因此本文取 $m \in [-20, 100], n \in (0, 50]$ 。

由于上述两个目标之间是相互矛盾的, 因此不存在一个解能够使得它们同时达到最优, 而只能求得问题的一组非支配路径解。

2 基于多目标进化算法求解挠性卫星姿态控制问题

文献[7]提出了一种新型保持群体多样性的多目标优化进化算法 KDMOEA。该算法采用外部存储器保存历代搜索到的精英个体, 并依据外部存储器中个体的多样性测度自适应地调整算法参数, 以指导选择操作和搜索机制, 从而开拓了算法的搜索范围, 提高了进化过程中群体的多样性。把 KDMOEA 应用于挠性卫星大角度机动姿态控制问题。KDMOEA 中的各主要步骤分别介绍如下。

2.1 个体的编码和群体的初始化

在 1.3 节建立的挠性卫星大角度机动姿态控制问题的多目标优化模型中, 问题的优化参数有两个, 即滚动轴姿态机动轨线(式(3))中的 m 和 n 。对参数 m, n 均采用实数编码, 群体的初始化采用随机生成法。在 $m \in [-20, 100], n \in (0, 50]$ 内随机生成 N 个二维向量 $[m, n]$, 组成算法的初始群体。

2.2 目标函数

在本文挠性卫星大角度机动姿态控制问题中, 两个优化目标分别定义如下。

(1) 卫星滚动轴的调节时间 $f_1(\zeta)$: 设滚动轴输入的姿态角为 u , 实际输出的姿态角为 y , 允许的稳态误差区为 $\pm E$, 则 $f_1(\zeta)$ 定义为滚动轴姿态角的实际误差 $e = u - y$ 进入稳态误差区, 即 $\pm E$ 的范围内并不在超越出此范围所经历的时间。

(2) 帆板模态振动的强度 $f_2(\zeta)$: 取挠性帆板振动方程中的模态坐标 η ^[8], $f_2(\zeta)$ 定义为卫星滚动轴的姿态角进入稳态(即经历调节时间 $f_1(\zeta)$)后 η 的平均峰峰值。

2.3 进化算子

采用模拟二进制交叉算子(SBX)和多项式变异算子^[9]。

3 仿真

3.1 本文算法的运行结果

仿真实验采用 Matlab 7.1 软件完成。在三轴姿态角均为零的初始条件下, 卫星姿态采用经典 PID 控制, 俯仰轴和偏航轴均阶跃 10° , 滚动轴姿态机动轨线取式(3)中的 S 型函数, 其中标称值, 即给定姿态角 u 为 80° 。挠性卫星姿态动力

学方程(式(1)、式(2))中的参数取值与文献[8]相同。滚动轴姿态角允许的稳态误差区 $\pm E$ 取为 $\pm 0.3^\circ$ 。

本文算法 KDMOEA 的运行参数为:群体规模 N 与外部存储器的最大容量 M 均取 30,交叉概率为 0.9,变异概率为 0.1,算法的终止条件为进化代数 t 达到最大值 $T=50$ 。

本文算法只需运行一次,便可以求得 2.3 节挠性卫星大角度机动姿态控制问题的一组非支配路径解。从这组解中挑选 4 个具有代表性的解作为示例,表 1 列出了 4 个解在优化目标 f_1 和 f_2 上的值以及相应的优化参数 m 和 n 。图 2—图 5 分别给出了 4 个解对应的卫星滚动轴输入机动轨线、实际输出的姿态角误差及帆板模态坐标分量 η_3 的振动强度随时间的变化曲线。

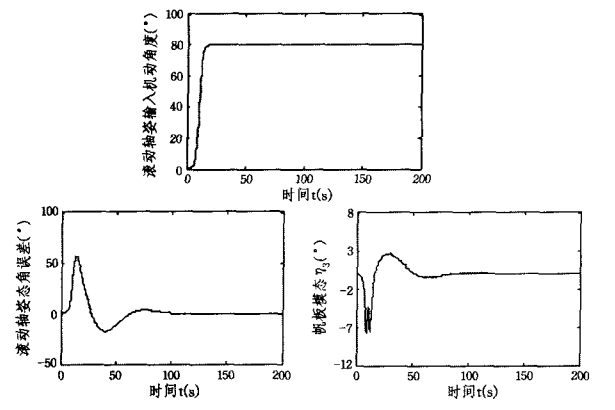


图 2 非支配解 1 的滚动轴输入机动角度、滚动轴姿态角误差和帆板模态坐标 η_3 随时间的变化曲线

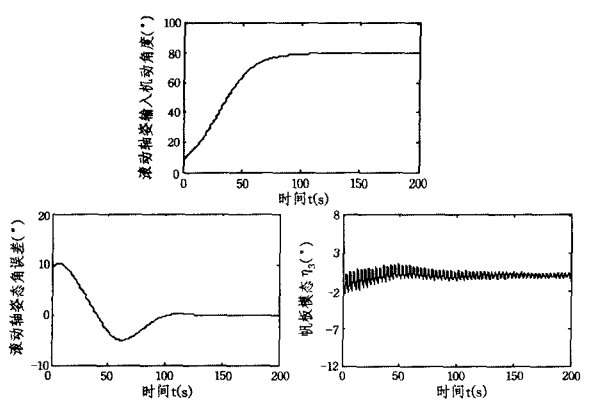


图 3 非支配解 2 的滚动轴输入机动角度、滚动轴姿态角误差和帆板模态坐标 η_3 随时间的变化曲线

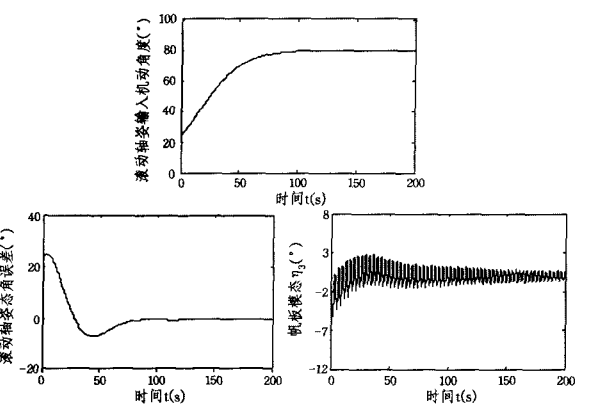


图 4 非支配解 3 的滚动轴输入机动角度、滚动轴姿态角误差和帆板模态坐标 η_3 随时间的变化曲线

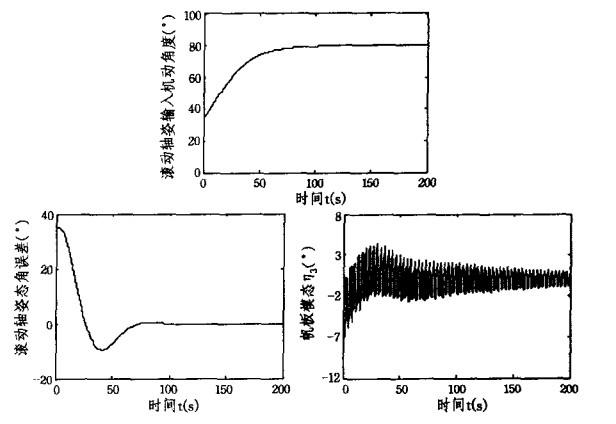


图 5 非支配解 4 的滚动轴输入机动角度、滚动轴姿态角误差和帆板模态坐标 η_3 随时间的变化曲线

表 1 4 个非支配解的目标函数值和优化参数值

	调节时间 f_1 (s)	振动强度 f_2 ($^\circ$)	参数 m	参数 n
非支配解 1	125.6000	0.07368	10.3492	0.7787
非支配解 2	97.5000	0.8767	30.0001	0.07000
非支配解 3	82.3000	1.8489	16.0406	0.05474
非支配解 4	71.4000	2.9369	5.8744	0.05612

从上述图表可以看出,非支配解 1 的调节时间 f_1 较长,但卫星大角度机动所激发的帆板振动强度 f_2 很小;非支配解 2 和非支配解 3 的调节时间比非支配解 1 有所减少,但对应的帆板振动强度指标变差;非支配解 4 的调节时间 f_1 在 4 个解中最短,但帆板振动强度 f_2 却最差。

由此可见,本文方法能够为挠性卫星大角度机动姿态控制问题搜索到一组多样性较好的非支配路径解。这组解在各目标上的性能各有侧重,决策者就可以根据当前的需求,从中挑选一个足够满意的解作为最终解,带入式(3)中的 S 型函数表达式,求得卫星滚动轴的姿态机动路径。一旦工作要求发生变化,决策者可以直接从这组解中挑选出另一个符合要求的满意解,无需重新运行算法。

3.2 与其它算法的比较

如果不采用本文给出的姿态机动路径规划方法,而直接令滚动轴阶跃 80° 、俯仰轴和偏航轴均阶跃 10° ,则卫星滚动轴的输入机动角度、姿态角误差和帆板模态坐标 η_3 随时间的变化曲线如图 6 所示,它的调节时间 f_1 为 135.1000s,帆板振动强度 f_2 为 3.3354° 。由此可见,在调节时间和帆板振动强度两个性能指标上,本文算法搜索到的解均优于未作机动路径规划的情况,说明本文提出的挠性卫星姿态机动路径规划方法是切实可行的。

SPEA2^[10]是一种高效的多目标进化算法,需要为每个个体分配一个适应值,然后对群体进行选择操作;它利用适应值分配策略中体现的“小生境”思想保持群体的多样性;设置一个外部存储器保留精英个体。为了把本文方法 KDMOEA 与 SPEA2 算法进行比较,定义了 3 种衡量非支配解集性能的测度。

(1) C 测度^[11]:设 X_1, X_2 为问题的两个解集, C 测度把有序对 (X_1, X_2) 映射到区间 $[0, 1]$ 上:

$$C(X_1, X_2) := \frac{|\{x_2 | x_2 \in X_2; \exists x_1 \in X_1, x_1 \leq x_2\}|}{|X_2|} \quad (5)$$

式中, $|\cdot|$ 表示集合中元素的个数, $x_1 \leq x_2$ 表示解 x_1 支配或

(下转第 263 页)

- [5] 林金杰, 王伟, 杨育彬. 面向内容的三维模型数据库设计及其检索系统的实现[J]. 计算机科学, 2008(10)
- [6] 崔晨昶. 三维模型检索中关键技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005
- [7] 贾骥, 覃征, 卢江, 等. 圆环射线分解投影轮廓的三维模型检索方法[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(10): 2847-2851
- [8] 周明全, 耿国华, 韦娜. 基于内容的三维模型检索[M]. 北京: 清

华大学出版社, 2007

- [9] 高波涌, 莫国良, 张三元. 基于混合形状特征的三维模型检索研究与实现[J]. 计算机应用研究, 2007, 24(3): 221-223
- [10] Saiful A, Josef K, Roland W. Multi-feature Intergration With Relevance Feedback On 3D Model Similarity Retrieval[A]// 8th International Conference on Information Integration and Web-based Application & Services 2006[C]. Indonesia, 2006

(上接第 250 页)

等于 x_2 。C 测度度量了一个集合中元素被另一个集合覆盖的程度(从一定程度上反映了集合的收敛性能)。C(X_1, X_2) > C(X_2, X_1) 说明集合 X_1 在 C 测度上的性能优于 X_2 。

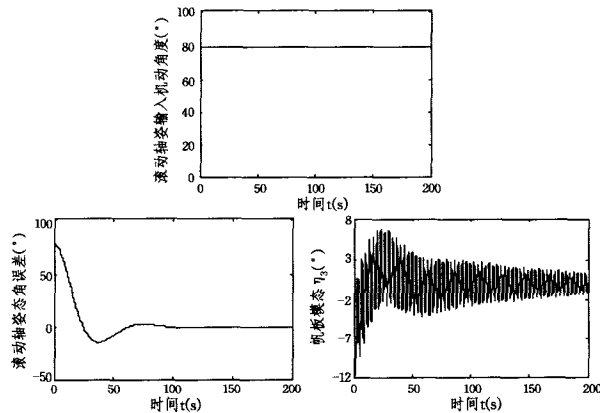


图 6 未作机动路径规划的滚动轴输入机动角度、滚动轴姿态角误差和帆板模式坐标 η_3 随时间的变化曲线

(2) 分布测度(sd):

$$sd = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^Q (d_i - \bar{d})^2}{Q}} \quad (6)$$

式中, Q 为非支配解集中解的个数, d_i 为解 x_i 到集合中其余解的最短距离, $\bar{d}$ 为所有 d_i 的平均值。sd 越小, 说明非支配解集中解的分布越均匀。

(3) 宽广度(extent)^[11]:

$$extent = \sqrt{\sum_{i=1}^m |f_{imax} - f_{imin}|} \quad (7)$$

式中, m 为目标个数, f_{imax} 和 f_{imin} 为非支配解集在目标 f_i 上的最大值和最小值。extent 越大, 说明非支配解集在目标空间上的分布范围越广。

SPEA2 采用与 KDMOEA 相同的群体初始化方法、进化算子和终止条件, 种群规模取为 30, 外部存储器的大小固定为 30, 交配选择中的联赛规模取为 2。为了克服随机性带来的影响, 将 KDMOEA 和 SPEA2 在 1.3 节挠性卫星大角度机动姿态控制问题中各运行 20 次。表 2 给出了两种算法在 sd, extent 测度上 20 次运行结果的平均值。如表 2 所列, 本文算法求得的非支配解集在 sd, extent 测度上的性能均优于 SPEA2。两算法在 C 测度上的平均值分别为 C(KDMOEA, SPEA2) = 0.1000, C(SPEA2, KDMOEA) = 0.1333, 即它们相互覆盖的程度(收敛性能)接近。由此表明, 本文方法能够搜索到一组与 SPEA2 的收敛性能相当, 而分布更均匀、范围更宽广的非支配解集, 即本文算法具有更高的求解效率。

表 2 两种算法在测度 sd, extent 上的比较

	sd	extent
KDMOEA	0.5311	7.5530
SPEA2	0.9863	6.2176

结束语 本文基于卫星姿态机动快速性和高精度稳定性的要求, 建立了带挠性帆板卫星大角度机动姿态控制问题的多目标优化模型, 并基于一种保持群体多样性的多目标进化算法, 设计了卫星姿态机动路径的规划方案。仿真结果表明, 所提算法运行一次便能够有效地搜索到一组多样性较好的非支配路径解, 供决策者在不同的工作目标下选择, 有效地缓解了快速性与高精度指标之间的矛盾。与未作机动路径规划的情况相比, 本文算法同时优化了卫星调节时间和帆板振动强度两个性能; 与另一种经典的多目标进化算法相比, 它具有更高的求解效率。

参考文献

- [1] 刘国汉, 王长龙, 高益军. 卫星姿态动力学与控制(2)[M]. 北京: 宇航出版社, 2005
- [2] 靳永强, 刘向东, 侯朝桢. 航天器大角度姿态机动的自适应滑模控制[J]. 北京理工大学学报, 2007, 27(5): 422-426
- [3] Boskovic J D, Li S M, Mehra R K. Robust adaptive variable structure control of spacecraft under control input saturation[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2001, 24(1): 14-22
- [4] 周黎妮, 唐国金, 李海阳. 航天器姿态机动的自抗扰控制器设计[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(12): 2122-2126
- [5] 朱良宽, 马广富, 胡庆雷. 带有死区非线性输入的挠性航天器姿态机动智能控制[J]. 吉林大学学报, 2008, 38(2): 195-200
- [6] 靳瑾, 张景瑞, 刘藻珍. 航天器大角度姿态快速机动控制器参数优化设计[J]. 清华大学学报, 2009, 49(2): 289-292
- [7] 申晓宁, 郭毓, 陈庆伟, 等. 一种保持群体多样性的多目标遗传算法[J]. 控制与决策, 2008, 23(12): 1435-1440
- [8] 李英波. 挠性充液卫星动力学分析与姿态控制研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2001
- [9] Deb K, Agrawal R B. Simulated binary crossover for continuous search space[J]. Complex Systems, 1995, 9: 115-148
- [10] Zitzler E, Laumanns M, Thiele L. SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm[R]. Technical Report 103, Computer Engineering and Networks Laboratory (TIK), Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich, Gloriastrasse 35, CH-8092 Zurich, Switzerland, May 2001
- [11] Zitzler E, Thiele L. Multiobjective Evolutionary Algorithms: A Comparative Case Study and the Strength Pareto Approach[J]. IEEE Transaction on Evolutionary Computation, 1999, 3(4): 257-271