

# 基于 Agent 的分布式卫星自主构形重构技术\*

张 健 戴金海

(国防科技大学 航天与材料工程学院 湖南 长沙 410073)

**摘 要** :自主构形重构是分布式卫星自主运行的典型任务。将构形重构问题分解为底层控制问题和上层规划问题,给出构形重构问题的统一描述,在一种递阶控制结构中探讨基于 Agent 的分布式卫星自主构形重构问题,并介绍基于 ObjectAgent 的实现框架。针对底层控制问题,提出卫星相对运动轨道调整的螺旋控制策略,并对燃料消耗量进行估计;针对上层规划问题,采用拍卖算法完成构形重构位置分配。最后通过一个仿真实例验证基于 Agent 的分布式卫星自主构形重构的可行性。

**关键词** :分布式卫星 ;卫星编队 ;自主构形重构 ;Agent ;ObjectAgent

**中图分类号** :V448.2      **文献标识码** :A

## Agent-based Autonomous Formation Reconfiguration Techniques for Distributed Satellite Systems

ZHANG Jian , DAI Jin-hai

( College of Aerospace and Material Engineering , National Univ. of Defense Technology , Changsha 410073 , China )

**Abstract** :The autonomous formation reconfiguration of Distributed Satellite Systems is one of the typical missions of autonomous control. Formation reconfiguration of distributed satellites was divided into two aspects : relative orbit control and overall planning. Furthermore , a uniform description of formation reconfiguration was presented. Then the problem of Agent-based autonomous formation reconfiguration was discussed in the hierarchical control architecture of distributed satellites , and the implementation framework in ObjectAgent is introduced. A novel spiral control scheme was raised for relative orbit regulation , and the cost budget was estimated. Auctioneering algorithm was adopted for position allocation. Simulation results show the effectiveness of Agent-based autonomous formation reconfiguration.

**Key words** :distributed satellites ; formation flying ; formation configuration ; agent ; ObjectAgent

由多颗微小卫星协同工作组成分布式卫星(Distributed Satellite Systems,简称 DSS)共同完成复杂的航天任务,正日益成为空间技术发展的主流方向<sup>[1-3]</sup>。DSS 在给航天器应用带来深刻变革的同时,也对现有的卫星运营和管理模式提出了严峻的挑战。实现 DSS 自主运行使其逐步摆脱对地面系统的依赖已成为世界航天大国的共同选择。Agent 和多 Agent 系统是研究分布式自治或部分自治实体之间以及实体与环境之间交互关系的有力工具,应用 Agent 技术研究 DSS 自主运行及其相关技术,正成为学术界研究的热点<sup>[4]</sup>。自主构形重构技术是 DSS 研究的一项关键技术,是体现 DSS 优势、实现任务重构的基础。本文在 Agent 技术框架下,从系统构成、控制结构、底层控制和上层规划等多个层面研究 DSS 自主构形重构问题。

### 1 分布式卫星构形重构问题描述

DSS 构形重构问题可分解为两个子问题:一是单颗卫星相对运动轨道调整的底层控制问题;二是多颗卫星燃料优化的整体协调问题。

\* 收稿日期 2006-10-24

基金项目:国家部委重点基金资助项目(9140A20050106KG0168)

作者简介:张健(1978—),女,博士生。

固定相位约束的编队重构问题可分为三类 (1)期望构形中的每一位置由指定的卫星占据 (2)期望构形中的每一位置由指定类型的卫星占据 (3)期望构形中的每一位置由任意卫星占据。由  $N$  颗卫星组成的编队卫星群可用集合  $F$  表示,  $F$  中含有  $p$  种类型的卫星,  $S_m \subset F$  为同类卫星构成的集合, 每一个子集  $S_m$  中包含  $N_m$  颗相同的卫星, 且  $\sum_{m=1}^p N_m = N$ 。于是, 编队卫星群的构形重构问题可以分解为  $p$  个卫星簇  $S_m$  的重构问题 ( $p = N$  对应第一种情形,  $p = 1$  对应第三种情形), 而每一个卫星簇  $S_m$  的编队规划问题可以描述为如下 0-1 规划问题:

$$\begin{aligned} \min_{i,j} J &= \sum_{i=1}^{N_m} \sum_{j=1}^{N_m} D_{ij} y_{ij} \\ \text{s. t. } \sum_{i=1}^{N_m} y_{ij} &= 1 \quad j = 1, 2, \dots, N_m \\ \sum_{j=1}^{N_m} y_{ij} &= 1 \quad i = 1, 2, \dots, N_m \\ y_{ij} &= 0 \text{ 或 } 1 \quad i, j = 1, 2, \dots, N_m \end{aligned} \quad (1)$$

其中  $D_{ij}$  表示卫星  $i$  从当前的初始状态运动到目标状态  $j$  的控制代价; 优化变量  $y_{ij}$  是布尔型变量, 若将期望位置  $j$  分配给环绕卫星  $i$ , 则取值为 1, 否则取值为 0。编队构形重构问题通过  $D_{ij}$  将上层规划与底层控制联系起来。

针对卫星相对运动轨道调整的底层控制问题, 建立参考中心的轨道坐标系: 原点在参考中心质心,  $ox$  轴取为参考中心的径向方向,  $oz$  轴沿参考中心轨道面正法线方向,  $oy$  轴由右手法则确定。在 DSS 中, 环绕卫星与参考中心的距离与轨道半长轴相比为小量, 卫星的相对运动可表示为<sup>[4-5]</sup>

$$\begin{aligned} x &= -A \cos(nt + \varphi) \\ y &= 2A \sin(nt + \varphi) \\ z &= B \cos(nt + \varphi + \Psi) \end{aligned} \quad (2)$$

其中  $n = \sqrt{\mu/a_c^3}$  为参考中心的平均轨道角速度。编队构形可表示为一个四元组, 即

$$C = \langle A, B, \varphi, \Psi \rangle \quad (3)$$

于是, 编队卫星相对运动轨道调整问题可以描述为

$$(C_1 = \langle A_1, B_1, \varphi_1, \Psi_1 \rangle) \Rightarrow (C_2 = \langle A_2, B_2, \varphi_2, \Psi_2 \rangle) \quad (4)$$

## 2 分布式卫星自主构形重构的控制结构与实现框架

### 2.1 分布式卫星的自主控制结构

DSS 自主构形重构的目标是: 使构成 DSS 的多颗卫星在功能和操作上构成一个统一体, 地面站可以像操作一颗卫星一样对其进行控制。用户只需提供期望的目标构形, 甚至任务目标要求, 具体的协同规划与控制由 DSS 自主完成。采用 Agent 技术实现 DSS 自主构形重构, 首先必须确定其控制结构。

本文采用图 1 所示的控制结构。决策 Agent 根据任务要求或环境状态作出系统重构的决策, 其输出  $Y_D$  包括卫星编队的期望状态, 即编队中各卫星的  $\langle A, B, \varphi, \Psi \rangle$ ; 规划 Agent 将卫星编队的目标状态发布给各个卫星, 各卫星的底层规划 Agent 针对各目标状态进行底层路径规划, 计算达到各个目标位置的燃料消耗, 并将规划结果  $F_{L,i}$  反馈给规划 Agent, 规划 Agent 采用一定的算法对各底层 Agent 的规划结果进行综合评价, 完成目标位置的优化分配, 并将最终规划结果  $Y_{P,j}$  传递给底层规划 Agent; 底层规划

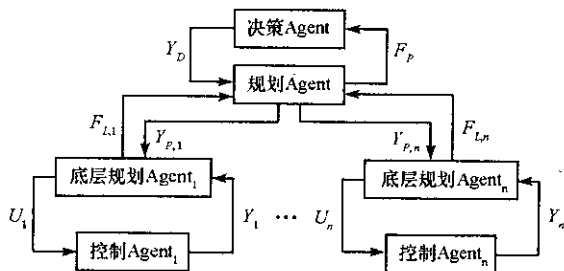


图 1 分布式卫星的递阶控制结构

Fig. 1 Hierarchical control architecture for distributed satellites

Agent 产生控制指令序列  $U_i$  控制 Agent 执行控制指令,并将执行结果  $Y_i$  反馈给底层规划 Agent。在自主运行的 DSS 中,决策 Agent 和规划 Agent 位于具有全局规划能力的卫星上。

## 2.2 基于 ObjectAgent 的系统实现框架

借助现有的 Agent 开发平台完成面向特定领域的系统开发,可以避免大量的底层开发工作,从而更加专注于研究问题本身。ObjectAgent<sup>[6]</sup>是普林斯顿卫星公司(Princeton Satellite Systems)开发的多 Agent 设计与仿真环境,其编程构架分三层,最底层的单元称为 Skill,每个 Skill 是一个独立的线程,处理单一的应用任务。构架的第二层中的逻辑单元称之为 Agent,一个 Agent 组合和动态调度管理一群 Skill。最高层的单元称为 PostOffice,处理全部的网络通信。Agent、Skill 以及 PostOffice 相互之间的通信是通过发送消息完成的。开发人员只要编写 Skill 和 Agent, ObjectAgent 处理其它的一切。ObjectAgent 提供的图形用户界面形式的快速原型工具(OARPT)支持 Agent 的创建,并提供 Skill 开发模板,因此 Skill 的实现成为整个开发工作的核心<sup>[7]</sup>。针对 DSS 的自主构形重构任务,主要是要实现规划 Agent 和底层规划 Agent 的 Skill,也就是设计卫星相对运动轨道调整的控制算法以及 DSS 构形重构的位置分配规划算法。

## 3 卫星相对运动轨道调整的控制算法

### 3.1 控制算法

目前,构形重构底层控制大多采用最优冲量控制实现,计算量大,不能满足自主构形重构的控制需求。若采用连续渐变的方式改变振幅参数  $A$ 、 $B$  和相位参数  $\varphi$  和  $\Psi$ ,则可将构形调整过程中的转移轨道看作一种广义的空间螺旋线,并将相应的控制过程称为螺旋控制,从而形成一种伴随卫星相对运动构形调整的底层控制新思路。

采用加速对数螺旋控制策略实现相对运动轨道的调整,同时不改变  $xy$  平面内两个简谐振动的耦合关系,转移轨道可以表示为

$$\begin{aligned} x &= -A_1 e^{\alpha t^2} \cos(nt + \varphi_1 + \eta t^2) \\ y &= 2A_1 e^{\alpha t^2} \sin(nt + \varphi_1 + \eta t^2) \\ z &= B_1 e^{\beta t^2} \cos((n + \lambda)t + \Psi_1 + \lambda t^2) \end{aligned} \quad (5)$$

对(5)式分别求一阶、二阶导数,代入 Hill 方程,得控制加速度为

$$\begin{aligned} a_x &= A_1(-2\alpha - 4\alpha^2 t^2 - 4n\eta t + 4\eta^2 t^2)e^{\alpha t^2} \cos(nt + \varphi_1 + \eta t^2) \\ &\quad + A_1(-4n\alpha t + 8\alpha t^2 \eta + 2\eta)e^{\alpha t^2} \sin(nt + \varphi_1 + \eta t^2) \\ a_y &= A_1(4n\alpha t + 16\alpha t^2 \eta + 4\eta)e^{\alpha t^2} \cos(nt + \varphi_1) \\ &\quad + A_1(4\alpha + 8\alpha^2 t^2 - 4n\eta t - 8\eta^2 t^2)e^{\alpha t^2} \sin(nt + \varphi_1) \\ a_z &= B_1(2\beta + 4\beta^2 t^2 - (4n\lambda t + 4\lambda^2 t^2))e^{\beta t^2} \cos((n + \lambda)t + \varphi_1 + \Psi_1) \\ &\quad - B_1(4\beta(n + 2\lambda t) + 2\lambda)e^{\beta t^2} \sin((n + \lambda)t + \varphi_1 + \Psi_1) \end{aligned} \quad (6)$$

其中  $\alpha = (\ln A_2 - \ln A_1)/T_d^2$ ,  $\beta = (\ln B_2 - \ln B_1)/T_d^2$ ,  $\lambda = (\Psi_2 - \Psi_1)/T_d^2$ ,  $T_d$  为调整过程时间。

螺旋控制的优势体现于通过施加较小推力作用,使相对运动轨道实现渐进、稳定的调整,同时有效地保证各个航天器的燃料平衡,能较好满足自主构形重构的控制需求。

### 3.2 控制实现与燃料估算

在具体的控制实现中,沿卫星体坐标系三个坐标轴正、负两向分别安装常推力发动机,通过参考系到卫星体坐标系的坐标变换,可以得到所需发动机推力的变化规律,进一步通过姿态控制和脉冲宽度调节可实现变推力控制。为研究问题方便,设发动机在参考系中三轴方向的推力大小为  $a_c$ ,每隔  $\tau$  时间施加一次控制,则整个构形调整过程被分割成  $T_d/\tau$  个区间,在每个区间  $k$  中点处计算控制律(6)中的  $a_{kx}$ 、

$a_{ky}, a_{kz}$  则三个方向的发动机工作时间分别为

$$t_{ki} = a_{ki}\tau/a_c \quad \dot{\mathbf{i}} = x \quad \dot{\mathbf{y}} \quad \dot{\mathbf{z}} \quad (7)$$

于是整个轨道调整过程的燃料消耗量为

$$\Delta V = \sum_{k=1}^{T_d/\tau} \sum_{i=x,y,z} (|a_c| \cdot t_{ki}) = \sum_{k=1}^{T_d/\tau} \sum_{i=x,y,z} (|a_{ki}| \cdot \tau) \quad (8)$$

## 4 分布式卫星构形重构位置分配规划

蚁群算法、匈牙利算法以及拍卖算法等多种优化算法已被用于 DSS 构形重构位置分配。其中拍卖算法计算量小,可以有效保证编队中各卫星的燃料均衡,可较好解决自主构形重构的位置分配规划问题<sup>[8-9]</sup>。算法流程如下:

```
{
  while( n ≠ 0 ) do
    {for 对每一个目标位置 j
      {寻找最小控制代价  $d_{\min}(j) = \min_{1 \leq i \leq n} (d_{ij})$ ;}
      在所有的  $d_{\min}(j)$  中, 寻找  $d_{\max} = \max_{1 \leq j \leq n} (d_{\min}(j)) = \max_{1 \leq j \leq n} (\min_{1 \leq i \leq n} (d_{ij}))$ ;
      if  $d_{ij} = d_{\max}$ 
        {将目标位置  $D_j$  分配给航天器  $S_i$   $y_{ij} = 1$   $n = n - 1$ ;}
    }
}
```

## 5 分布式卫星自主构形重构仿真实例

考虑一个八星编队的构形重构问题。参考卫星运行于半径为 7135km 的圆轨道,初始构形参数和目标构形参数分别如表 1、表 2 所示。设定构形重构时间  $T_d = T$ ,  $T$  为参考卫星的轨道周期。

表 1 分布式卫星初始构形参数

Tab. 1 Initial formation parameters of distributed satellites

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
A	300	300	300	300	250	250	250	250
B	300	300	300	300	500	500	500	500
$\varphi/\pi$	0	1/2	1	3/2	1/2	3/2	0	1
$\psi/\pi$	1/2	1/2	1/2	1/2	3/2	3/2	1/4	1/4

表 2 分布式卫星目标构形参数

Tab. 2 Final formation parameters of distributed satellites

	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8
A	125	125	125	125	125	125	125	125
B	250	250	250	250	250	250	250	250
$\varphi/\pi$	0	1/2	1	3/2	1/4	3/4	5/4	7/4
$\psi/\pi$	0	0	0	0	1	1	1	1

假设系统中包含异质卫星,按照卫星的异同分为两组: $S_I = (S_1, S_2, S_3, S_4)$ ,  $S_{II} = (S_5, S_6, S_7, S_8)$ ,目标构形中  $\psi = 0$  的位置只能由  $S_{II}$  中的卫星占据, $\psi = \pi$  的位置只能由  $S_I$  中的卫星占据。各卫星剩余燃料水平不同, $r_{f_{S_1}} = r_{f_{S_2}} = r_{f_{S_5}} = r_{f_{S_7}} = 0.80$ , $r_{f_{S_3}} = r_{f_{S_4}} = r_{f_{S_6}} = r_{f_{S_8}} = 0.70$ ,规划中取控制代价  $D_{ij} = \Delta V_{ij}/r_{f_{S_i}}$ 。编队中各卫星到达各目标位置的控制代价如表 3 所示,规划结果如表 4 所示。

表 3 编队中各卫星到达各目标位置所需的控制代价(速度冲量/剩余燃料)

Tab. 3 Control costs to final positions ( $\Delta V/rf$ )

	D5	D6	D7	D8		D1	D2	D3	D4
S1	1.6408	3.0587	1.6654	0.7598	S5	1.6231	0.9854	1.7923	2.3100
S2	0.7834	1.4929	3.0147	1.0528	S6	2.0482	2.6400	1.8550	1.1261
S3	1.9033	0.8683	1.8751	2.3397	S7	0.6384	1.2361	2.6658	1.5891
S4	3.4453	1.2031	0.8953	1.7061	S8	3.0466	1.8161	0.7296	1.4127

表 4 规划结果

Tab. 4 Planning results

Initial	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
Final	D8	D5	D6	D7	D2	D4	D1	D3

## 6 结论

DSS 构形重构是分布式卫星进行工作模式切换和任务重构的关键支撑技术,自主构形重构是自主运行的一项重要研究内容。基于 Agent 技术研究 DSS 构形重构,探讨底层控制算法、上层规划算法以及控制结构,并在 ObjectAgent 环境下进行了系统实现。仿真结果表明基于 Agent 的 DSS 自主构形重构技术的可行性。基于 Agent 的 DSS 自主构形重构技术的研究,是对 DSS 自主运行技术的有益探索。下一步将针对无相位约束的构形重构问题,展开进一步的研究。

## 参考文献:

- [1] Rouff C. Autonomy in Future Space Missions[R]. Papers from AAAI Workshop Technical Report WS-02-03, 2000.
- [2] Henry H, Rino F C. Autonomy, Delegation and Control: From Inter-Agent to Groups[R]. Papers from AAAI Workshop Technical Report WS-02-03, 2000, 57-63.
- [3] Ketts C, Swartwout M. Autonomous Operations Experiments for the Distributed Emerald Nanosatellite Missions[C]. SSC00-IX-5, 2000.
- [4] Schetter T, Campell M, Surka D. Multiple Agent-based Autonomy for Satellite Constellations[J]. Artificial Intelligence, 2003, 145: 147-180.
- [5] 张玉锲. 卫星编队飞行的动力学与控制技术研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2002.
- [6] Princeton Satellite Systems, Inc. Princeton-satellite Systems Web Page[EB/OL]. Available: <http://www.psatellite.com/>
- [7] 朱彦伟. 基于多 Agent 技术的卫星星座设计分析[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(9): 2006-2008.
- [8] Morton B, Weininger N. Collective Management of Satellite Clusters[C]. //Proceedings of the AIAA Conference on Guidance, Navigation and Control (Portland, OR), 1999, 1576-1584.
- [9] 张健. 分布式卫星自主构形重构技术研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2006.



