

doi: 10.7690/bgzd.2013.07.018

卫星编队构形重构方案

党常平¹, 蔡远文², 史建伟¹, 解维奇¹, 邢晓辰¹

(1. 装备学院研究生管理大队, 北京 101416; 2. 装备学院航天装备系, 北京 101416)

摘要: 为了满足未来航天任务对卫星编队构形重构的需求, 设计一种卫星编队构形重构总体策略。分析卫星编队的重构需求, 从重构构形、重构控制、重构规划、碰撞避免和优化设计 5 个关键技术进行汇总, 分别制定了总体方案, 并给出地面指控中心或卫星编队中的参考星的操作步骤。该策略对空间任务中重构技术的具体应用具有一定的参考价值。

关键词: 卫星编队; 构形重构; 总体方案

中图分类号: TJ86 **文献标志码:** A

Reconfiguration Scheme of Satellite Formation

Dang Changping¹, Cai Yuanwen², Shi Jianwei¹, Xie Weiqi¹, Xing Xiaochen¹(1. *Administrant Brigade of Postgraduate, The Academy of Equipment, Beijing 101416, China;*2. *Department of Spaceflight Equipment, The Academy of Equipment, Beijing 101416, China*)

Abstract: In order to meet the requirements of future space missions on satellite formation reconfiguration, design an overall scheme of satellite formation reconfiguration. Analyze the demand of satellite formation reconfiguration, summarized 5 key skill, including reconfiguration, reconfiguration control, reconfiguration planning, collision avoidance and optimal design, to establish the overall scheme separately. Put forwards an operational process for ground control center or reference satellite of satellite formation. The proposed scheme can provide a basis for application of reconfiguration in space missions.

Key words: satellite formation; reconfiguration; overall scheme

0 引言

卫星编队技术, 即由 2 颗或多颗卫星组成某种特定形状, 各颗卫星分别在有微小差别(周期相等, 倾角、偏心率、升交点赤经及过升交点时刻等轨道根数略有不同)的轨道上运行, 一方面保持这个形状, 同时又绕地球中心旋转^[1]。

根据空间任务目标的不同需求, 对卫星编队施加控制, 可以使编队构形重构为满足要求的新构形。构形重构充分体现了卫星编队适应性强、功能丰富的特点。国内外对卫星编队构形重构的研究大都集中在重构的具体技术上, 如构形、控制、碰撞避免和优化设计等。构形重构是一个复杂的整体过程, 需要制定涵盖相关技术的总体策略, 才能充分整合利用现有先进技术, 满足未来航天任务对卫星编队构形重构的需求; 因此, 笔者设计了一种卫星编队构形重构总体策略。

1 卫星编队构形重构技术概念

卫星编队构形重构, 即根据实际需要而对卫星编队的一颗或多颗成员卫星进行轨道调整, 改变编

队中卫星之间的相对位置, 使整个编队构成另外一种构形。

2 卫星编队构形重构需求分析

编队中的各颗卫星通过星间链路进行通信联系、协同工作, 共同完成信号的采集、处理, 以及功率合成等任务。在编队设计时, 既可以使每颗卫星具有同样的功能, 又可以使每颗卫星分别承担导航、通信、任务载荷、后勤、备份等不同功能。2 种设计都充分发挥了编队的固有优势, 达到了“相加大于总和”的整体效能。总结目前研究现状, 卫星编队构形重构的典型空间应用主要有以下几类:

1) 调整合成孔径雷达分辨率。

卫星编队的星间距离为百米至千米数量级, 通过紧密的信息互联, 可以实现大范围覆盖、短重访周期的对地观测, 整体对地观测功能可超过大型对地观测卫星, 而成本又远低于后者。如参考射电干涉仪原理开发的干涉合成孔径雷达技术就是一种新的主动微波成像技术, 在需要调整合成孔径系统分辨率时, 可以通过构形重构改变编队构形尺寸实现。

2) 提高任务可靠性。

收稿日期: 2013-01-24; 修回日期: 2013-05-07

作者简介: 党常平(1988—), 男, 陕西人, 硕士, 从事自动化测试与控制、卫星编队技术研究。

小卫星编队执行深空探测任务时，多颗卫星可组成稳定，节能的编队构形。在遇到意外状况发生个别星故障，也可及时改变构形，降级使用，避免影响整个任务。

3) 空间对抗中变换阵型。

多颗小卫星组成编队代替一颗大卫星，具有隐蔽性好、便于发射补充的特点，在执行空间对抗任务时，可在靠近攻击目标前采取不易被敌方发现的隐蔽构形；而在需要对敌攻击，如采取电磁干扰方式时，利用特定构形将编队卫星的功率合成，可突破器件体型的制约，克服单颗卫星功率不足的限制。

3 卫星编队构形重构相关技术

卫星编队涉及现有航天领域最新理论与技术，包括轨道动力学、空间构形设计、星间测量与状态确定、编队自组网络、编队自主控制、构形初始化、构形的维持控制、空间路径规划等。

卫星编队构形重构与轨道转移不同，轨道转移是个体行为，一般指单颗飞行器从所在轨道向目标轨道的运动过程，在这个过程中，约束条件相对单一。而构形重构指编队中的多颗卫星调整轨道，将原有构形改变为任务需要的新构形。

构形重构是卫星编队技术研究的一个重要问题，除了使编队构形顺利重构为新构形，还必须考虑重构过程中的整体规划、燃料消耗、碰撞避免和脉冲推力限制等。从现有文献来看，关于构形重构的研究主要集中在重构过程中的路径规划、碰撞避免和燃料消耗的优化设计上。

3.1 重构构形

要研究构形重构，就必须掌握卫星编队的构形特点。限于当前技术条件和航天器轨道动力学特性，基于航天器之间相对运动的卫星编队构形研究主要集中在圆和近圆轨道上。为此国内外进行了大量的研究，提出了多种卫星编队飞行构形。总体上，卫星编队按有无相对绕飞，分为绕飞构形和非绕飞构形 2 类编队构形。

考虑到轨道根数特性，在进行重构队形的设计时，主要研究编队卫星轨道是否共面；星间相对几何构形；在绕飞或跟飞时，是否存在参考星或参考点。根据目前研究现状，重构的队形设计主要有以下几种：1) 相对构形不变，只是星间距离的调整(图 1)；2) 相对构形的改变，如从串行改变为三角形(图 2)；3) 编队卫星数目改变，即成员卫星的加入或离开(图 3)。

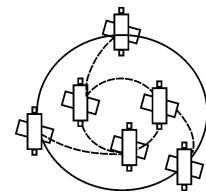


图 1 星间距离调整

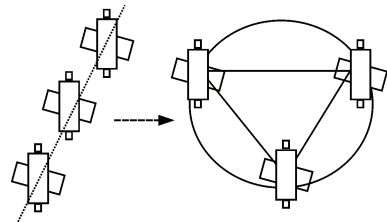


图 2 相对构形变化

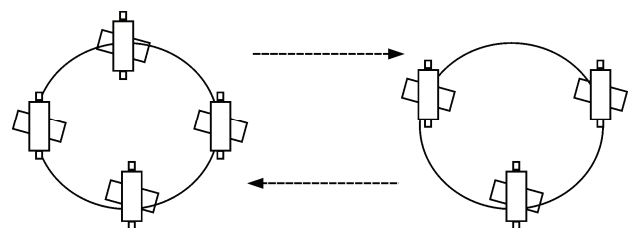
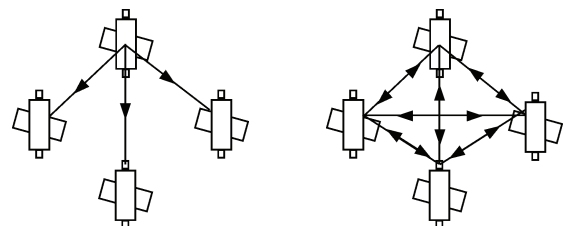


图 3 成员数目改变

3.2 重构控制

编队飞行控制结构总体上可以分为 2 类：集中式和分布式^[2]，如图 4。集中式结构技术简单，对链路要求低，易于实现，但动态响应能力差，主星链路存在瓶颈效应，一旦主星故障，整个编队都会陷入“瘫痪”。分布式结构每个成员卫星独立运算，可靠性高，但结构复杂，并且存在重复计算，总计算量大，浪费系统资源。



(a) 集中式结构 (b) 分布式结构

图 4 编队控制结构

分布集中式结构是综合了集中式与分布式结构的优点后提出的一种扩展结构，在这种结构中，编队中有一颗卫星作为指定的中心节点，如图 5。中心节点可查询并接收分节点卫星的状态信息与测量信息，自主进行整个编队的重构规划，也可接收地面指控中心的规划指令并分发给编队成员，编队成员按照指令执行轨道机动，并即时将自身状态与测量信息反馈到中心节点与其他成员共享信息。这种结构复杂度适中，还可通过一定的规则如令牌环

方法重新指定中心节点，克服了集中式结构对主节点要求较高的缺点。

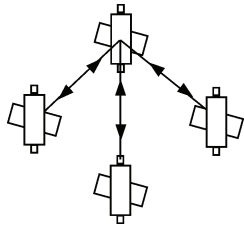


图 5 分布集中式结构

3.3 重构规划

卫星编队构形重构是一个连续的轨道转移和过渡过程，需要根据轨控发动机的推力作用特点，在重构前做好重构轨迹的规划。

构形重构轨迹规划的目的是根据编队当前构形和任务的期望构形，规划重构过程的机动路径和控制序列^[3]。当参考星处于近圆轨道，编队卫星相对参考星做近距离(大约几米至几十千米)的相对运动时，卫星编队飞行的相对运动一般用线性化的 Hill 方程描述：

$$\begin{cases} \ddot{x} - 2n\dot{y} - 3n^2x = f_x \\ \ddot{y} + 2n\dot{x} = f_y \\ \ddot{z} + n^2z = f_z \end{cases} \quad (1)$$

其中： x, y, z 分别为沿地球径向、参考星轨迹路径、垂直轨道方向的相对位置； f_x, f_y, f_z 分别为作用在 x, y, z 方向的力； n 为参考星的角速度。

根据 Hill 方程及其改进方程，就可以将卫星编队的相对运动用矩阵表示，进而可以利用数学方法和计算机软件规划卫星编队的机动过程。具体方法是将重构的连续过程离散化，即划分为若干个时间段，然后分别对每个时间段实施机动控制，最后把同一卫星的多条相对运动轨道光滑的衔接起来，形成整个重构过程的规划轨迹。

重构规划按编队卫星的出发时刻是否一致可分为同步重构和异步重构。同步重构是指编队成员在规划的确定时刻同时出发进行轨道机动；异步重构则是指编队各成员的机动时刻不一致，而是等到了原轨道的最优重构起点才出发。同步重构策略以额外燃料消耗为代价，可以得到最短的重构时间；相反，异步重构策略则具有节省燃料，过程时间长的特点。在进行规划时，需根据卫星剩余燃料情况选择采取同步或异步规划。

3.4 碰撞避免

为了保持一定构形达到任务要求，编队中的卫星间距一般都相对较小，容易发生碰撞问题。在轨

运行的卫星速度一般都很大，一旦发生碰撞，将会对卫星甚至整个编队造成不可修复的毁坏。

造成编队卫星发生碰撞的因素主要有：模型误差因素、测量误差因素、故障因素和意外因素^[4]。在编队构形重构的过程中，为了缩短重构时间，多颗卫星往往按照规划路径进行同步转移，而当 2 颗卫星的转移路径发生交汇时，就有发生碰撞的可能性。当两颗卫星在同一时间处于同一位置时，就会发生碰撞。为了使卫星编队能够按照规划顺利完成重构步骤，必须制定一系列碰撞检测和规避策略。

卫星编队的重构规划结果包含编队内每颗卫星的重构轨迹，在分发机动指令到所有成员卫星之前，应对所规划的路径进行初步的数学仿真与计算，一旦发现规划路径有交点就应进行碰撞概率的计算，如果概率过大，则放弃最优设计结果，放宽约束条件，寻找次优结果进行迭代规划，直到计算出安全的规划路径。

卫星在执行重构指令的过程中，同时利用自身设备测量与其他编队成员的星间距离，一旦发现某两颗星之间的距离小于设定的安全阈值，则需在适当的时刻对其中一颗星进行轨道调整，如施加瞬时的校正速度改变其初始轨道避免碰撞。

3.5 优化设计

空间飞行器的机动控制，需重点考虑燃料消耗问题。在构形重构优化设计中，燃料消耗总量、燃料消耗均衡、或者二者的某种加权关系和通常被作为优化指标^[5]。

燃料消耗总量与燃料消耗均衡加权最优指标：

$$J = \alpha J_{total} + \beta J_{equal} \quad (2)$$

其中约束条件为

$$\begin{cases} 0 \leq \alpha \leq 1 \\ 0 \leq \beta \leq 1 \\ \alpha + \beta = 1 \end{cases} \quad (3)$$

从式 (1) 可看出，当 $\alpha=1, \beta=0$ 时，式 (1) 变为

$$J = J_{total} = \sum_{i=1}^n J_i \quad (4)$$

即燃料消耗总量指标。

当 $\alpha=0, \beta=1$ 时，式 (1) 变为

$$J = J_{equal} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (J_i - \bar{J})^2} \quad (5)$$

即燃料消耗均衡指标，其中

$$\bar{J} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n J_i \quad (6)$$