

Drag-free 卫星编队的发展现状和趋势研究

张锦绣, 曹喜滨, 董晓光, 王继河

(哈尔滨工业大学 卫星技术研究所, 哈尔滨 150080, jinxiu@hit.edu.cn)

摘要: 分析了 Drag-free 卫星编队的发展历程, 就动力学建模与系统控制方法进行了综合调研和分析, 提出了 Drag-free 卫星编队的应用前景和需要解决的关键技术, 为我国未来空间环境与空间天气等超高精密探测奠定一定的基础。

关键词: Drag-free 卫星; 卫星编队; 空间环境探测

中图分类号: V412.2

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)05-0673-05

Development status and tendency of Drag-free satellite formation flying

ZHANG Jin-xiu, CAO Xi-bin, DONG Xiao-guang, WANG Ji-he

(Research Center of Satellite Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China, jinxiu@hit.edu.cn)

Abstract: The development status and tendency of drag-free satellite formation flying are analyzed, and its dynamic modelling and system control are discussed. The application foreground and related key technologies to be solved are addressed, which provide a basis for space environment observation and space weather detection in the future.

Key words: drag-free satellite; formation flying; space environment observation

日地空间环境是人类生存发展的重要活动场所, 航天安全、信息安全、国家安全以及巨大的商业利益前景等都对空间天气、重力场及电离层等的研究提出了紧迫的重大战略需求。不断提升的任务需求已经逐渐超越了传统卫星所能满足的任务范畴, 为此将日地空间环境探测与空间技术领域的新技术相结合, 发展空间环境及天气探测新概念和新方法就成为应对其紧迫战略需求的一项亟待解决的任务。

卫星编队(也称为分布式卫星系统)作为空间技术领域的一个革命性创新概念, 代表了空间系统应用的一个重要方向。由多颗卫星构成的卫星编队与单颗卫星相比, 在功能和性能上得到了提高, 并且具有极大的应用灵活性和安全性。因而, 概念一经提出, 就迅速成为学术研究的热点和各航天大国军方关注的焦点。

从空间环境探测的需求出发, 将 Drag-free 技术的优点与卫星编队的长处相结合, 国外提出了 Drag-free 编队的概念^[1]: 编队卫星数量超过 2 颗, 且至少一颗卫星为 Drag-free 卫星。Drag-free 卫星^[2]包括卫星平台和标准质量块(Proof Mass, 放置于卫星内部舱体, 与外部摄动隔离)。卫星在轨运行时, 标准质量块仅受到内部静电力及热噪声等极微小的干扰, 通过 DFC 系统控制卫星平台跟踪标准质量块, 可有效消除大气阻力、地磁干扰、太阳光压以及太阳风等空间干扰对卫星运行轨道和姿态的影响。以 Drag-free 卫星作为卫星编队的相对测量和控制基准, 可以实现卫星编队的高精度高稳定度控制, 从而为实现编队卫星间相对状态的高精度确定提供了前提和基础。目前诸多空间科学计划, 如以 LISA^[3-4](Laser Interferometer Space Antenna)/BBO^[5](Big Bang Observer)为代表的深空探测任务以及以地球空间电动力学联系探测任务^[6](Geospace Electrodynamics Connection, GEC)为代表的近地探测任务, 均基于 Drag-free 编队的思想。在上述任务和计划中, 卫星平台与标

收稿日期: 2009-02-16。

基金项目: 中国博士后科学基金(20070410265);

国防重点学科实验室资助。

作者简介: 张锦绣(1978—), 男, 副教授;

曹喜滨(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 长江学者。

准质量块相对位置的控制精度在百纳米量级,编队卫星间相对状态测量精度优于百皮米量级,相对姿态控制精度在十纳弧度量级,为实现其空间环境探测任务所需的高精度数据获取及后期数据处理奠定了良好基础.国内目前对该项技术的研究尚处于概念研究阶段.

1 Drag-free 卫星/编队发展历程

1.1 Drag-free 卫星发展概况

Drag-free 技术在 20 世纪 60 年代由 Lange 首次提出并进行了详细论述(图 1 为 DF 概念示意图).

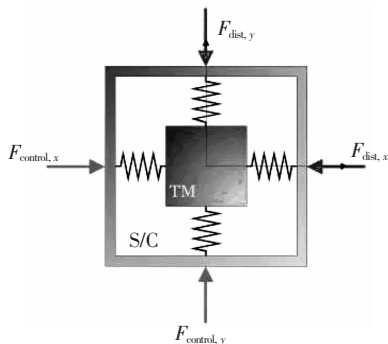


图 1 Drag-free 概念示意图

一般来说,采用 DF 技术的卫星由卫星平台与卫星内部标准质量块构成,在轨运行时,标准质量块仅受到内部静电力等极微小的干扰,基本运行于无摄动标准轨道,在这种情况下使得卫星平台跟踪标准质量块,可以达到有效消除大气阻力、太阳光压以及太阳风等空间环境摄动对卫星轨道与姿态影响的目的.之后,DFC 控制系统飞行试验作为美国海军 TRIAD 任务的一部分在 1972 年得到了在轨验证^[7],其主要目的是通过消除飞行器的外部摄动力来提高导航预报能力.之后,采用 DF 技术的卫星计划被不断提出,主要包括:重力场测量(Gravity Explorer Mission, GOCE^[8-9])、EP 验证(Gravity Probe B 和 STEP^[10])重力波的测量(LISA)以及地球空间电动力学联系^[6](GEC)探测任务等.

ESA 的 GOCE 任务,主要在低轨完成重力梯度测量.包括了 6 个 6 自由度标准质量块.每一对标准质量块沿与另一对标准质量块正交方向自由运动,在轨概念示意图如图 2 所示.

1.2 LISA/BBO 编队

作为深空分布式 Drag-free 航天器系统的代表,LISA^[2-4]深空编队是 ESA-NASA 合作的激光干涉仪空间天线任务,如图 3 所示.由三颗卫星形成三角形编队,测量银河系内致密双星系统、黑洞

分裂和吞噬产生的重力波.系统以空间等边三角形形式圆轨道绕太阳运行,相位滞后地球 20°.其 Y 形臂的长度测量精度可以达到 40 pm,直接决定了望远镜 7 nrad 指向稳定度要求.该任务中每个飞行器均有 2 个 6 自由度标准质量块和一个单自由度铰链(连接标准质量块舱体与望远镜安装点上).

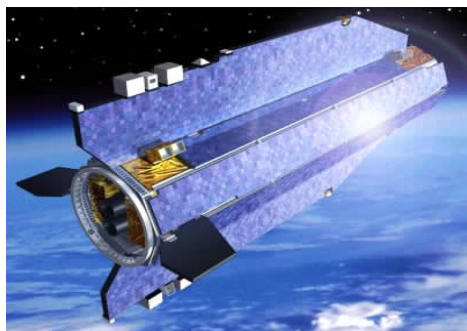


图 2 GOCE 卫星

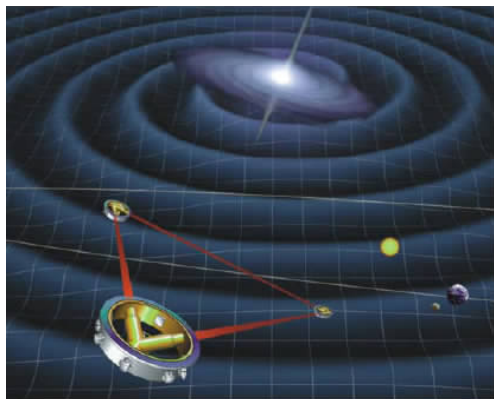


图 3 LISA 深空编队

在 LISA 技术上,衍生出类似于 LISA 任务的 Big Bang Observer^[5](BBO,宇宙大爆炸观测)任务,如图 4 所示.组成该任务的航天器配置以及空间系统构形与 LISA 基本一致.不同点在于 BBO 任务由 4 组与 LISA 类似的空间等边三角形分布式航天器系统组成,其中 2 组构成 David 星座,另外 2 组与 David 星座分别相差 120°相位.系统运行于距太阳中心 1 个天文单位的轨道上,David 星座与 1 组三星系统运行于一条轨道,另 1 组三星系统运行于另一条轨道.

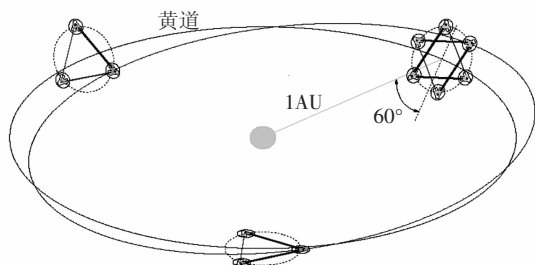


图 4 BBO 深空任务

该任务中每个飞行器均有 2 个 6 自由度标准

质量块和一个单自由度铰链(连接标准质量块舱体与望远镜安装点上).沿Y形臂方向为每个标准质量块的自由方向.系统安装有6台 μN 级发动机完成DFC,从而控制卫星保持在两个立方体标准质量块周围,标准质量块几乎自由运行于飞行器内部,且不受太阳光压之内的非重力场影响.

1.3 GEC 编队

作为近地 Drag-free 卫星编队的代表,地球空间电动力学联系^[6](GEC)探测任务最早由 NASA 在 1997 年提出.基于前期研究,最终在 2004 年确立了科学探测目标.系统卫星采用串行形式,运行于 84° 倾角的地球轨道,如图 5 所示.依据任务要求,可以单独调整编队任一卫星的轨道,近地点高度调整范围覆盖从 200 km 到低于 130 km,甚至更低.

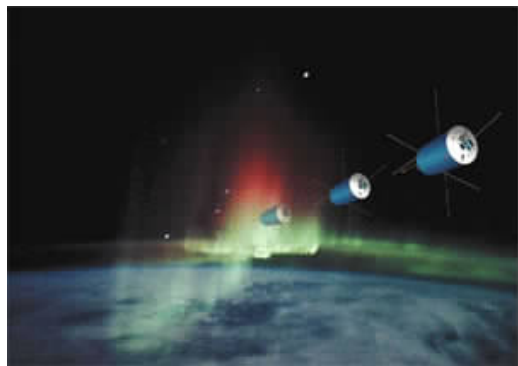


图5 GEC 任务构想图

一般认为,GEC 编队是第一个低轨 Drag-free 编队,编队中至少有一颗 Drag-free 卫星且 Drag-free 卫星也是编队控制体系结构的重要组成部分.在 130 km 甚至更低高度,编队将明显受到气动阻力偏差的影响,在此情况下,GEC 采用 Drag-free 编队形式有两个明显的优势^[2]:1)可以搜集高层大气数据;2)气动阻力可作为编队其它卫星控制的前馈指令,以减少实现高精度相对位置控制的时间和误差.

2 Drag-free 卫星编队动力学建模

为了完成卫星编队的任务分析与设计、在轨运行管理与控制等,针对不同的空间应用环境建立卫星编队长期精确相对动力学模型是非常必要的.就 Drag-free 卫星编队来说,Scott R. Ploen 等^[1]在 2006 年首次将 Drag-free 技术与卫星编队相结合,针对近地轨道 Drag-free 卫星编队提出了初步动力学建模方法,为 Drag-free 卫星编队的进一步发展作出了良好的开端.在此之前,B. Lange^[2,11]在详细分析并建立了卫星本体相对于标准质量块的相对轨道动力学模型,针对 Drag-

free 卫星不同的空间环境,M. Wiegand 等^[12]分析了相对应的特定形式的相对轨道动力学.在近地应用方面,David Prieto^[13]在 GOCE 卫星 Drag-free 控制应用中采用了 Hill 方程形式的相对轨道动力学模型.以 LISA/BBO 任务为代表的深空 Drag-free 卫星编队,在编队动力学建模方面将 DFAC (Drag-free and Attitude Control) 动力学与编队相对姿态及相对轨道分别进行处理,在项目研究过程中发展来的 LTP 软件包(LISA Technology Package)为 Drag-free 控制规律的设计提供了丰富可靠的动力学模型^[14-15].一般来说,采用改进型 Hill 方程描述限制性三体问题情况下卫星编队相对运动,以四元数形式表述编队卫星间相对姿态运动,同时详细分析太阳光压、太阳风、日月引力、相对论效应等对相对运动的影响^[16-17].

除此之外,在常规卫星编队相对动力学方面,Hill 方程及其修正形式建立在很多假设条件之上,导致卫星编队在长期运动中出现不可接受的误差^[18].为解决 Hill 方程及其改进形式的不足,国内外学者提出了以开普勒轨道运动为基础,利用编队卫星的轨道根数经适当坐标转换,在主星质心轨道坐标系下描述编队卫星相对运动的解析方程^[18-20].

3 Drag-free 卫星编队协同控制研究

对于单颗 Drag-free 卫星的控制来说,R. Haines^[21]采用了 PID 控制方法实现了 Drag-free 卫星的控制,Peter F. Gath^[22]利用线性化的方法将 Drag-free 卫星多输入多输出的问题解耦为单输入单输出的问题.近年来,控制领域先进控制理论和算法陆续应用于 Drag-free 的控制,出现了基于 H_∞/H_2 ^[23] 以及 EMC 的控制算法,同时 David Prieto^[13]与 E. Canuto 等^[24]采用模型预测控制实现了 GOCE 卫星的 Drag-free 控制,提高了 Drag-free 控制系统的鲁棒性和稳定性.

自卫星编队提出以来,用于解决卫星编队控制的策略概括起来主要有 5 种,分别为多输入多输出方式、主从方式、虚拟结构方式、循环方式和行为方式.此外还包括参考轨迹规划方式和无源分解方式以及基于一致理论的控制方式.针对 LISA/TPF/Darwin 等空间干涉仪任务,P. K. C. Wang 等^[25]为编队设计了期望的轨道和姿态参考轨迹,提出了轨道和姿态跟踪控制律.H. Pan 等^[26]研究了存在轨道和姿态的耦合的情况下从星对主星轨迹的跟踪控制问题.J. R. Lawton 等^[27]提出了虚拟结构协同策略实现轨道和姿态

同步控制, W. Ren 等^[28]给虚拟结构引入反馈, 将各卫星的信息融入到虚拟结构的控制中, 形成带反馈的协同结构. D. J. Lee 等^[29]提出的基于无源分解方式的协同控制方法, 将编队的控制分解成编队的机动控制和星间相对状态保持控制. 随着系统控制在编队中的应用, P. M. Bainum^[30]提出了多卫星系统的协同控制结构, 将非线性自适应控制等方法应用于多卫星编队的构形控制, 实现了编队的长期构形控制. W. Ren^[31]采用系统反馈控制实现了基于虚拟结构的空飞行器编队控制, I. Berker 等^[32]将 Agent 概念引入了多卫星编队的控制体系结构中, 以提高系统的稳定性. J. R. Carpenter 等^[33]对卫星编队队形的分布式协同控制问题进行了研究.

4 Drag-free 卫星编队的技术优势

作为在下一代超高精密空间科学探测任务中有潜在应用价值的 Drag-free 卫星编队有着诸多超越当前卫星编队的独特之处: 1) 严格运行于纯重力场轨道, 消除了外部非保守力的影响, 降低了导航不确定性, 实现卫星编队的超稳定与超精密相对状态确定与控制; 2) 与低频周期性脉冲轨道修正策略相比较而言, 采用 μN 级推力器实现连续 DF 补偿控制, 降低卫星编队的燃料消耗; 3) 减小维持系统的时间间隔和所需要的燃料消耗以及降低对复杂碰撞规避算法的依赖, 从而简化卫星编队的状态维持要求; 4) 减小甚至消除由于执行遥控指令造成的科学任务间歇期, 提高系统的自主运行能力.

5 应用前景及发展思路

目前来看, 仅地球空间电动力学联系 (GEC) 探测任务为了减轻气动阻力偏差对低轨编队飞行的影响, 首先将 Drag-free 技术与编队飞行进行了初步结合. 进行 Drag-free 应用于对地编队探讨的主要目的是突出编队控制理论应用于与复杂多体系统的优点, 从而促使编队与 Drag-free 技术进行融合, 探讨其在对地成像编队, 如 InSAR 等方面进行应用的可能性, 通过精确编队控制建立虚拟 Drag-free 结构 (如分布式天线) 的可行性, 进一步提高对地成像系统的性能.

随着空间环境探测领域的不断拓展, 对卫星及卫星编队的测量和控制提出了超精度超稳定的需求. 为满足上述需求, 有必要在跟踪国外卫星编队发展的先进理念基础上, 开展 Drag-free 卫星编队相关理论的研究, 探求超稳定 Drag-free 卫星编

队工作机理、关键技术、关键敏感器件和执行机构以及实现超稳定控制的控制体系和控制方法, 为我国下一代超高精密科学探测奠定良好的理论基础.

参考文献:

- [1] PLOEN S R, QUADRELLI M B. Dynamics of Drag-free formations for earth imaging applications [C]//AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference and Exhibit. Keystone, Colorado: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2006.
- [2] LANGE B. The Drag-free satellite[J]. AIAA Journal. 1964, 9(2):1590-1606.
- [3] GATH P F, SCHULTE H R. Drag free and attitude control system design for the LISA science mode [C]//AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit. Hilton Head, South Carolina: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2007.
- [4] FICHTER W, SCHLEICHER A. Closed loop performance and limitations of the LISA pathfinder Drag-free control system [C]//AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit. Hilton Head, South Carolina: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2007.
- [5] THORNE K S. Future gravitational wave detectors and numerical relativity [EB/OL]. (2006-4-17) http://www.phys.cwru.edu/events/grav_ws/Thorne_StThomas.pdf.
- [6] National Aeronautics and Space Administration. Geospace Electro-dynamic Connections (GEC) mission [EB/OL]. (2007-12-3) <http://stp.gsfc.nasa.gov/missions/gec/gec.htm>.
- [7] LEITNER J. Investigation of Drag-free control technology for earth science constellation missions [R]. [S. L.]: NASA Earth Science Technology Office Study, 2003.
- [8] BAE Y K. A contamination-free ultrahigh precision formation flying method for Micro-, Nano-, and Pico-satellites with nanometer accuracy [C]//Space Technology and Applications International Forum-STAIT 2006. Albuquerque, N. M.: Iop Institute of Physics Publishing Ltd., 2006: 1213-1223.
- [9] DRINKWATER M R, FLOBERGHAGEN R. GOCE: ESA's first explorer core mission [J]. Space Science Reviews, 2003, 108(1-2):419-432.
- [10] SUMNER T J, ANDERSON J, BLASER J P. STEP (satellite test of the equivalence principle) [J]. Advances in Space Research, 2007(39):254-258.
- [11] LANGE B. Drag-free performance in a LISA mission with spherical proof masses [J]. Classical and quantum

- gravity, 2002, 19(7): 1739 – 1743.
- [12] WIEGAD M, SCHEITHAUER S, THEIL S. Step proof mass dynamics[J]. Acta Astronautica, 2004(54): 631 – 638.
- [13] PRIETO D, AHMAD Z. A drag free control based on model predictive technics[C]//2005 American Control Conference. Portland, OR, USA:[s. n.], 2005.
- [14] BORTOLUZZI D, DA LIO M. The LISA technology package dynamics and control[J]. Class. Quantum Grav. 2003, 20: S227 – S238.
- [15] BORTOLUZZI D, DA LIO M, VITALE S. LTP dynamics mathematical model[R]. Progetto di riferimento: LISA Technology Package Architect, ESA, 2002.
- [16] MARCHETTI P J, BLANDINO J J, DEMETRIOU M A. Electric propulsion and controller design for Drag-free spacecraft operation in low earth orbit[C]//42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Sacramento, California:[s. n.], 2006.
- [17] DEBRAY D B. Drag-free spacecraft as platforms for space missions and fundamental physics[J]. Classical and Quantum Gravity. 1997, 14(6): 1549 – 1555.
- [18] 高云峰, 宝音贺西, 李俊峰. 卫星编队飞行中 C – W 方程与轨道根数法的比较[J]. 应用数学与力学, 2003, 24(8): 799 – 804.
- [19] ALFRIEND K T, SCHAUB H. Dynamics and control of spacecraft formations: Challenges and some solutions[J]. Journal of the Astronautical Sciences, 2000, 48(2): 249 – 267.
- [20] SCHAUB H. Relative orbit geometry through classical orbit element differences[J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 2004, 27(5): 839 – 848.
- [21] HAINES R. Development of a Drag – free control system[C]//14th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites. Gloyer, Goldstein:[s. n.], 2000.
- [22] GATH P F, FICHTER W, KERSTEN M. Drag free and attitude control system design for LISA pathfinder mission[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Rhode Island:[s. n.], 2004.
- [23] PRIETO D, BONA B. A modern approach to drag attenuation in a H_∞ robust orbit control[C]//Proceedings of IEEE International Conference in Information and Communication Technologies. Damascus, Syria:[s. n.], 2004.
- [24] CANUTO E, BONA B, INDRI M. Drag free control for the european satellite GOCE. part ii: Digital control [C]//Proceedings of the 41st IEEE conference on Decision and Control Conference. Las Vegas, USA:[s. n.], 2002: 4072 – 4077.
- [25] WANG P K C, HADAEGH F Y, LAU K. Synchronized formation rotation and attitude control of multiple free-flying spacecraft[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1999, 22(1): 28 – 35.
- [26] PAN H, KAPILA V. Adaptive nonlinear control for spacecraft formation flying with coupled translational and attitude dynamics[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control. Orlando, Florida:[s. n.], 2001: 2057 – 2062.
- [27] LAWTON J R, YOUNG B J, BEARD R W. A decentralized approach to elementary formation maneuvers [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. San Francisco, California:[s. n.], 2000.
- [28] REN W, BEARD R W. Virtual structure based spacecraft formation control with formation feedback [C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Monterey, California, USA:[s. n.], 2002.
- [29] LEE D J, LI P Y. Passive decomposition of multiple mechanical systems under coordination requirements [C]//Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control. Paradise Island, Bahamas:[s. n.], 2004: 1240 – 1245.
- [30] BAINUM P M, TAN Z Z, DUAN Xiaodong. Review of station keeping strategies for elliptically orbiting constellations in along-track formation[J]. International Journal of Solids and Structures, 2005, 42(21 – 22): 5683 – 5691.
- [31] REN W, BEARD R W. Virtual structure based spacecraft formation control with formation feedback [C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Monterey, California, USA:[s. n.], 2002.
- [32] BERKER I, BROWN D C. Conflict and negotiations in single function agent based design systems[J]. SAGE Journal, 1996, 4(1): 17 – 33.
- [33] CARPENTER J R. A preliminary investigation of decentralized control for satellite formations[C]//Proceedings of the IEEE Aerospace Conference. Big Sky, Montana:[s. n.], 2000: 63 – 74.

(编辑 张 宏)