

地球轨道航天器编队飞行动力学与控制研究综述¹⁾

孙 俊²⁾ 黄 静 张宪亮 黄庭轩

(上海航天控制技术研究所, 上海 201109)

(上海市空间智能控制技术重点实验室, 上海 201109)



孙俊, 上海航天控制技术研究所研究员, 研发中心主任, 哈尔滨工程大学兼职教授/博导, 2004年毕业于南京航空航天大学电气工程及其自动化专业, 后获得上海航天技术研究院导航制导与控制专业硕士和哈尔滨工业大学航空宇航科学与技术专业博士学位。著有《航天器姿轨一体化动力学与控制技术》等。发表空间飞行器动力学与控制技术方面的SCI、EI论文24篇, 发明专利10余项, 主持国家自然科学基金、科技部重点研发专项、国家863计划、973计划、军委科技委等11项重大/重点课题研究。获上海市学术技术带头人、上海市青年拔尖人才及国家863计划先进个人等荣誉称号。担任全国遥感技术标准化技术委员会委员。

摘要 航天器编队飞行被定义为跟踪或维持航天器之间的期望相对间隔、期望指向和相对位置。本文概括介绍了近年来地球轨道飞行编队的动力学和控制方面研究的发展状况, 包括传统推进系统和新型无推进剂编队系统的动力学建模方法和控制器设计技术等。在传统推进编队系统中, 航天器由使用化学燃料或等离子体的推进器提供推力, 可以实现高精度地相对姿态/位置保持或重构, 控制简单, 灵活性强, 但是需要消耗较多的能源。相比之下, 在新型无推进剂编队系统中, 航天器通过新的推力方式, 如大气阻力作用, 非接触内力, 地磁洛伦兹力, 动量交换等, 将大大延长编队任务的寿命, 并有效地避免羽流污染, 但会带来新的控制问题。本文总结了这些领域中动力学与控制方面的研究方法及取得的成果, 并提出了相关领域值得深入研究的问题和后续发展的方向。

关键词 航天器, 编队飞行, 动力学, 编队控制, 地球轨道

中图分类号: V448.2 文献标识码: A doi: 10.6052/1000-0879-18-409

DYNAMICS AND CONTROL OF SPACECRAFT FORMATION FLYING IN EARTH ORBIT¹⁾

SUN Jun²⁾ HUANG Jing ZHANG Xianliang HUANG Tingxuan

(Shanghai Institute of Spaceflight Control Technology, Shanghai 201109, China)

(Shanghai Key Laboratory of Aerospace Intelligent Control Technology, Shanghai 201109, China)

Abstract The spacecraft formation flying is defined as the tracking or the maintenance of a desired relative separation, orientation or position between or among several spacecraft. This paper reviews the

本文于2018-10-17收到。

1) 国家自然科学基金(61803258)和上海市科技人才计划(16XD1421000, 17YF1408400, 17YF8300)资助项目。

2) 孙俊, 研究员, 主要研究方向为航天器编队动力学与控制。E-mail: sjlovedh@hotmail.com

引用格式: 孙俊, 黄静, 张宪亮等. 地球轨道航天器编队飞行动力学与控制研究综述. 力学与实践, 2019, 41(2): 117-136

Sun Jun, Huang Jing, Zhang Xianliang, et al. Dynamics and control of spacecraft formation flying in Earth orbit.

Mechanics in Engineering, 2019, 41(2): 117-136

dynamics and the control of the spacecraft formation flying in Earth orbit, including the modelling methods and the control design techniques of the conventional propulsion system and the novel propellant-less system. The conventional propulsion system, where the spacecraft is actuated by thrusters using chemical fuels or plasma, can achieve a high accuracy and variable formation constellations with a relatively large power consumption. By contrast, the novel propellant-less system, where the spacecraft is actuated by novel means of actuation such as the atmospheric drag effect, the non-contacting internal forces, the geomagnetic Lorentz force, the momentum exchange, would greatly extend the lifetime of the formation and effectively avoid the plume contamination with new control characteristics. This paper summarizes the research methods and achievements in the dynamics and the control of these fields, and puts forward some issues worthy of further study in related fields and the direction of future development.

Key words spacecraft, formation flying, dynamics, formation control, Earth orbit

航天器编队飞行的概念正在大力推动地球和空间科学的发展,其主要优点是将大型单体航天器的功能分散化。航天器精确编队飞行将带来广泛的新应用,包括分布式天基雷达,高分辨率合成孔径光学干涉仪,电子侦察,间歇导航系统及可以产生高分辨率图像或高保真空间环境模型的三维成像等。与传统的大型单体航天器相比,航天器编队飞行不仅突破了体积和质量的限制,而且提高了整体系统功能、结构灵活性和可替代性。

早在1997年,德国戴姆勒奔驰航空航天公司为和平号空间站开发的X-MIR探测器成功地对和平号空间站进行了检测,并验证了编队飞行的先进视频相对导航技术。该技术的演示和实现为航天器编队飞行奠定了基础^[1]。2000年11月,NASA发射的EO-1卫星成功发射并与LS-7卫星实现了沿航迹编队飞行试验,同时也对EO-1上所搭载的先进的地面观测设备进行了测试^[2]。除了上述两次成功的航天器编队飞行试验外,以美国宇航局和欧空局为代表的航空航天研究机构对航天器编队飞行技术还进行了广泛的研究和试验。这些编队飞行研究计划涵盖了从科学实验、近地勘察到深空探测等多个领域,这些计划有的处于概念设计阶段,有的处于方案论证和理论研究阶段,有的则已经进入关键技术的验证阶段。下面将简要介绍几个具有典型代表意义的航天器编队飞行研究计划。

由美国国家航空航天局的Earth Observing-1和Landsat-7组成的编队携带仪器,为研究地球环境中的气候趋势提供了高分辨率图像^[2]。欧洲航天局于2000年发射的CLUSTER包含4个相同的航天器,发射到地球周围的大椭圆极地轨道。这些卫星以预先设定的相对轨道飞行,以便科学家

能够测量地球与太阳之间相互作用的细微变化^[3]。由ESA/NASA于2002年发射的GRACE任务,由绕地球轨道运行的同一轨道平面上两颗相同的卫星(GRACE A和GRACE B)组成,这两颗卫星采用领航者/跟随者编队的形式。这项任务的目的是建立高精度的地球引力场的模型^[4]。PRISMA是瑞典牵头的卫星项目(如图1),其目标是发展和验证未来编队飞行科学任务所需的新技术^[5]。PROBA-3是ESA编队飞行演示任务,为未来的编队飞行任务做准备,例如XEUS和DARWIN等。PROBA-3任务将验证编队飞行所需的算法、传感器、推进系统和其他技术^[6]。LISA是美国航天局NASA和欧空局ESA联合研制的一项重要编队飞行项目(如图2),

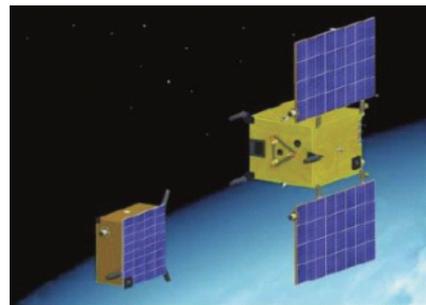


图1 PRISMA 编队

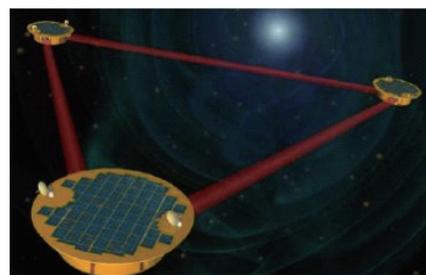


图2 LISA 计划

旨在探测如爱因斯坦的广义相对论所预测的时空中的“波动”^[7-8]。美国航天局还提出了许多编队飞行任务。其中一些任务目前正在开发中，而另一些则处于概念阶段，例如 MMS, NOW, SI, MASSIM, Black Hole Imager。可以看出航天器编队飞行技术具有良好的发展前景。

本文从以下三个方面介绍了飞行器编队飞行的动力学和控制方面的研究进展：

(1) 在传统航天器编队飞行系统的动力学方面，依据是否考虑平移和旋转运动之间的耦合动力学，将相关文献分为如下两类：①相对平动运动动力学模型——动力学建模主要关注于近距离两颗卫星的相对平移运动，与姿态动力学解耦；②相对六自由度耦合动力学模型——考虑平移运动和旋转运动之间的耦合对卫星的相对平移和转动运动动力学进行建模。

(2) 在传统航天器编队飞行系统的控制技术方面，根据控制结构将相关文献划分为如下几类：①主从式(领航者/跟随者)——一个领航航天器被控制到参考轨道，同时控制跟随航天器保持与领航航天器的相对状态；②行为式——将航天器编队中的不同控制目标进行加权组合；③虚拟结构——给编队系统分配一组合适的期望状态，各编队航天器被视为嵌入整个虚拟刚体中的刚体；④多输入多输出——将编队航天器系统视为一个多输入多输出系统；⑤循环方式——各个航天器控制器通过连接形成一个编队控制器，区别于主从式，各编队航天器不分层级的连接；⑥其他形式。

(3) 在无推进剂系统的动力学和控制方面，依据推进方式，将相关文献分为如下 4 类：①非接触内力——航天器上的控制力是通过编队航天器与其他航天器局部电或磁场相互作用产生的；②大气阻力编队飞行——航天器的相对轨道是通过调整卫星上有可扩展的附件横截面积来改变大气阻力进行控制；③动量交换编队飞行——一颗卫星通过弹出一个额外的可分离质量产生动量，另一颗卫星捕获并进行重新定向；④太阳帆编队飞行——通过调节太阳辐射压力对各航天器轨道元素产生影响从而控制各航天器。

本文主要内容后面四部分组成，第 1 节简要介绍了航天器编队飞行的相对运动动力学方面的研究现状。第 2 节阐述了目前传统航天器编队飞行的

控制技术。在第 3 节中，对用无推进剂推进飞行的新型航天器编队的动力学和控制方面的研究进行了综述，最后在第 4 节中对前面的研究现状进行了总结并分析了后续发展的方向。

1 航天器编队星间相对动力学

本文对地球轨道星间相对动力学建模方法及其在航天器编队中的应用进行了详尽的调研，在动力学建模方法分类方面，本节借鉴了 Sullivan 等^[9]学者发表的综述文章，在此基础上，针对高精度航天器编队任务，对六自由度耦合相对建模方法^[10]进行了归纳总结。

1.1 相对轨道动力学

目前，大多数研究集中于近距离的星间相对轨道动力学建模方法研究领域，即描述从星相对于主星的相对轨道运动。

1.1.1 笛卡尔坐标状态表示

笛卡尔坐标相对状态量由惯性系下的星间相对轨道和相对速度两部分组成，基于笛卡尔坐标相对状态量构建动力学模型是研究历史最久、应用最广泛的一种星间相对轨道动力学建模方法^[9]。

1.1.1.1 近圆参考轨道

当航天器编队的参考轨道为近圆轨道，即参考轨道的偏心率不为零但是比较小时，为简化计算，圆轨道假设常用于星间相对轨道动力学模型构建。面向航天器交会对接任务背景，Clohessy^[11]在圆轨道假设下，以笛卡尔坐标系下的相对位置和相对速度为状态量，提出了一种星间相对轨道动力学建模方法，其模型即为 C-W 方程，该方程表现为线性形式，可表示非线性引力项的第一阶泰勒展开项。在此基础上，Alfriend 等^[12]和 Lovell 等^[13]学者通过变换状态量，采用包含曲线信息的状态量构建了新形式的 C-W 方程，提高了模型精度。

上述 C-W 方程推导时，轨道摄动项未考虑在模型中。为描述轨道摄动对航天器编队的星间相对运动影响，Schweighthart 等^[14]和 Izzo 等^[15]学者构建了 J_2 项的摄动模型，并分析了 J_2 摄动项对星间相对轨道运动的影响。Leonard 等^[16]、Humi 等^[17]和 Bevilacqua 等^[18]学者构建了包含大气阻力摄动的星间相对动力学模型，用以描述大气阻力摄动对星

间相对轨道运动的影响。上述模型俱表现为线性形式，仅可描述非线性引力项的一阶泰勒展开。

为提高动力学模型精度，一些学者未在传统的线性动力学模型方面开展研究，而是尝试直接采用非线性的建模方法得到更加精确的星间相对动力学模型。Stringer等^[19]学者基于沃尔泰拉方法，构建了一种包含 J_2 摄动项的星间相对动力学模型新构架。此外，非线性动力学建模方法还包括多尺度建模方法、双重变换建模方法及近似双重变换建模方法^[9]。数值仿真结果表明，基于沃尔泰拉方法构建的动力学模型精度远高于其他三种方法。

1.1.1.2 任意参考轨道

当航天器编队的参考轨道偏心率不可忽略时，近圆假设将不再成立。因此，一些学者开展任意参考轨道的航天器编队星间相对轨道动力学建模方法研究。Tschauner等^[20]构建了一种任意参考轨道的航天器编队星间相对轨道动力学模型，该模型即T-H方程。T-H方程为线性方程，未考虑面内运动和面外运动的耦合效应。Lawden^[21]构建的模型考虑了面内运动的耦合效应，但是该模型在近地点和远地点表现为奇异。Carter^[22]和Yamanaka等^[23]解决了Lawden所建立的模型的奇异问题。文献^[22]利用一种修正积分方法构建面内运动耦合模型，最终得到的状态转换矩阵表现为非奇异特性。文献^[23]利用一种新的积分方法表示Kepler方程，得到的状态转换矩阵非奇异且表达简洁。

上述研究是在T-H方程的基础上展开的，且得到的动力学模型俱表现为线性形式。一些学者针对任意参考轨道的航天器编队任务，开展非线性星间相对轨道动力学建模方法研究。Kechichian^[24]和Theron等^[25]学者构建了一组非线性方程，用以描述航天器编队的星间相对运动。文献^[24]考虑了大气阻力摄动和 J_2 摄动对星间相对运动的影响。在此基础上，文献^[25]基于Lagrange条件重新构建 J_2 摄动模型，简化了编队动力学模型。

1.1.2 轨道要素状态表示

除利用笛卡尔坐标相对状态量构建动力学模型之外，有些学者以轨道要素作为状态量，推导星间相对轨道动力学方程。轨道要素状态量定义为描述主星和从星运动的轨道六要素以线性或非线性组合得到的状态量。

1.1.2.1 基于平均轨道要素差分构建状态量

最早关于轨道要素状态量的探索是由Schaub等^[26]开展的，两位学者旨在求解航天器编队的地球非球形摄动相对轨道常量，其中在求解 J_2 摄动项的哈密尔顿函数时，基于德朗奈根数定义了一个相对轨道状态量。之后，Gim等^[27]利用Brouwer^[28]提出的方法解决受到高阶轨道摄动的航天器运动描述问题，构建了基于轨道要素状态量的星间相对动力学解析模型，该模型同时考虑了轨道偏心率和 J_2 摄动项的影响，但是仅保留了一阶 J_2 摄动模型。Koenig等^[29]提出了一种基于轨道要素状态量的星间相对动力学模型，并且对用于摄动求解的状态转换矩阵的求解方法进行了归纳总结。清华大学的李俊峰等^[30-31]研究了基于相对轨道要素和参照轨道要素的相对运动描述方法。西北工业大学的曹静等^[32]研究了基于相对轨道要素的椭圆轨道非线性相对运动模型的周期解与应用。北京航空航天大学肖业伦等^[33]基于经典轨道要素分析线性化引起的相对运动误差，提出了一种新的相对轨道要素用于卫星编队飞行构型设计方法。

Alfriend等^[34]基于平均轨道要素差分构建的状态量，提出了一种二阶非线性理论，用以构建星间相对轨道动力学方程，即Yan-Alfriend方程，该方程利用针对参考轨道的泰勒展开方法，将平均轨道要素差分的时间导数展开到第二阶。上述研究总体上提供了一种用于任意参考轨道的可表示二阶 J_2 摄动影响的非线性动力学模型构建方法。

1.1.2.2 基于相对偏心率和倾角矢量构建状态量

Soop^[35]和Eckstein等^[36]利用由相对偏心率和倾角矢量组成的状态量，提出了一种星间相对轨道动力学建模方法，之后，两位学者将该建模方法用于描述高轨航天器编队的相对运动。Arbinger等^[37]将该建模方法拓展到低轨空间协作任务。D'Amico^[38]利用包含相对半长轴、相对平均经度、相对偏心率和倾角矢量的状态量，构建了新形式的星间相对轨道动力学模型。上述研究所构建模型中的状态转换矩阵考虑了近圆轨道上的一阶 J_2 摄动影响及时变大气阻力摄动影响。

Gaias等^[39]的研究考虑了大气阻力摄动对航天器编队运动的影响，尽管在某些编队任务中，大气阻力摄动的影响较小，但是对于精密编队任务，其

影响不可忽略,特别是低轨运行的高精度航天器编队任务,如虚拟望远镜验证任务^[40]和分布式天基雷达任务^[41]等。这些高精度航天器编队任务需要毫米级的相对轨道控制精度,构建精确的动力学模型是实现此类编队任务的基础。

1.2 六自由度耦合相对动力学建模

最初的星间相对动力学建模研究集中于近距离航天器编队的相对轨道动力学建模方法研究领域,未考虑相对姿态运动及二者之间的耦合效应。然而,通过最新研究进展调研发现,星间相对轨道和姿态运动耦合效应建模与分析成为新的研究热点。基于上述建立的线性或非线性相对轨道动力学模型,考虑非线性姿轨耦合效应,在相对轨道动力学模型中加入耦合项,用以构建更加精确的动力学模型,此为目前研究的一个方向。同时,部分学者直接提出了一种六自由度建模方法,构建的模型同时包含星间相对轨道动力学方程和相对姿态动力学方程,且考虑了二者之间的耦合效应。在描述高精度航天器编队任务时,为实现高精度的星间相对姿轨保持,耦合效应影响是需要考虑的一个关键因素。

Segal等^[42]学者以交会对接任务为背景,提出了一种星间相对轨道耦合动力学建模方法,在C-W方程的基础上,引入姿轨耦合项,得到了星间相对轨道耦合动力学模型。数值仿真结果表明,对于高精度编队任务,姿轨耦合效应影响是需要考虑的关键因素。Shasti等^[43]学者基于此动力学模型设计了控制律,用以实现高精度编队控制。

在上述研究的基础上,为简化动力学模型表现形式,提高模型解算效率,一些学者探索使用同一种数学工具表示星间相对轨道运动和姿态运动,将六自由度运动描述统一到同一数学框架下,最终得到一种星间姿轨一体化动力学模型。为和基于欧拉参数表示的星间相对姿态动力学模型统一,Gurfil^[44]利用欧拉参数重新推导了星间相对轨道动力学方程,得到了一组相同数学参数表示的星间姿轨一体化动力学模型。考虑到对偶四元数在描述螺旋运动上的优势,Brodsky等^[45]利用对偶四元数数学工具推导得到了刚体间相对位姿一体化动力学及运动学模型。哈尔滨工业大学的王剑颖等^[46]基于对偶四元数分别推导了交会对接最终段和两个航天器编队飞行的六自由度相对运动模型。Zhang等^[47]推导了基于对偶四元数的刚体航天器平动和转动组

合的跟踪误差模型。朱战霞等^[48]针对航天器运动姿轨耦合性问题,对基于螺旋理论得到的航天器运动模型,定性分析了近距离复杂操作过程中的姿轨耦合特性,利用基于对偶四元数获得了航天器相对运动一体化模型。目前,Qiao等^[49],Zhang等^[50]和Huang等^[51]分别针对基于对偶四元数的姿轨一体化动力学模型设计了控制律,文献^[49]以交会对接为背景,对基于对偶四元数的姿轨一体化动力学模型进行了数值仿真验证。上述研究表明,星间六自由度耦合相对动力学建模方法,特别是姿轨耦合一体化动力学建模方法,以其简洁的表达正逐渐获得国内外学者的认可。

2 航天器编队飞行控制

在航天器编队飞行的协同控制方面,目前已经有大量研究。本文从控制系统结构角度对航天器编队飞行的控制策略进行分类。早期,Lawton^[52]将编队飞行控制策略分为三类:主从方式,虚拟结构方式和行为方式。Scharf等^[53]根据后续的研究成果对控制策略进行了总结,并在Lawton分类的基础上又增加了多输入多输出方式和循环方式。而根据现有的关于系统控制的文献,除了上述之外,还有一些其他的控制方式,如参考轨迹规划方式、无源分解方式和基于一致性理论的控制方式等。本节对这些控制策略的研究现状和优缺点进行简要总结。

2.1 主从方式

主从方式(leader/follower, L/F)是研究最多的航天器编队控制结构,采用各航天器控制器的分层式排列,将编队控制简化为各航天器的跟踪问题。在主从式结构^[54-55]中,通常将编队中一个航天器选作主星提供全局参考信息,而其他的航天器作为从星接收该参考信息并跟随其状态而运动。主从方式的基本思想是:主星对预定的轨道和姿态规律进行跟踪控制,而从星对主星的位置和姿态进行跟踪。其中主星与从星的期望状态均可能是时变的,当主星的姿轨状态发生变化时,从星相对主星保持编队构型。主从式的跟踪策略还可以有多种类型,如:(1)具有多颗主星;(2)组成链式或其他构型。主从方式中,一般需要主星与从星进行大量的通信,将主星的加速度前馈给从星,以保证从星对于主星的相对姿态^[55]。Scharf等^[53]根据星间控制依赖关系,从图论角度对主从式结构进行了描述,将其定义为

一种可产生非环式控制依赖有向图的各航天器控制器间的相互关联方式,并在此基础上对主从式结构的一般稳定性条件进行了详细讨论。

在控制算法方面,大部分研究者考虑的是单层主从式结构,其中 $N-1$ 个航天器全部跟踪同一个主航天器。一般情况下,通常假设如果从星控制律是稳定的,那么这些控制器的主从式连接方式会产生渐近Lyapunov稳定的编队。因而,大部分文献的主要贡献在于所设计的不同从星跟踪控制律类型。

关于主从方式编队控制策略的研究,最早开展于机器人编队问题^[56]。Wang等^[54]首先将主从方式策略扩展到了航天器编队问题,设计了编队保持与邻近航天器的姿态协同控制律。之后,主从式策略在航天器编队研究中得到了大量的应用。Wang等^[57]将主从方式应用于编队自主交会对接过程,并讨论了其中的潜在问题。Xu等^[58]针对姿轨耦合六自由度卫星,设计了滑模跟踪控制算法。Stansbery等^[59]采用状态相关Riccati方程设计了全状态反馈非线性控制器,以同时实现平动和转动六自由度控制。Park等^[60]将状态相关Riccati方程用作非线性控制器,研究了编队飞行卫星的最优重构与编队保持问题。Massari等^[61]将SDRE技术应用到编队任务Proba-3的姿轨耦合控制中。Kumar等^[62]学者研究了由线性控制与时间最优bang-bang控制方法组合成的混合线性/非线性控制器,以实现编队航天器的有效机动。由于工程中并不一定满足全状态反馈的条件,很多学者也进行了状态反馈受限下的控制研究。Wong等^[63]设计了一种高通滤波器,可在不需要测量角速度信息的情况下完成存在姿轨耦合协同控制。Bondhus等^[64]针对没有角速度测量信息的双星姿态控制问题,提出了一种主从式输出反馈同步控制策略。针对编队卫星存在故障或扰动等非理想情况,一些学者也开展了鲁棒控制方法的研究。Godard等^[65]针对椭圆轨道的主从式编队,给出了容错控制策略以解决航天器敏感器和推力器的偶发或退化故障,研究了连续滑模控制与非奇异终端滑模控制两种自适应容错控制律,可在存在未知从星质量和外部干扰的情况下保证位置跟踪误差的全局渐近收敛。Godard等^[66]针对欠驱动航天器编队,探讨了无径向或轨迹方向推力情况下进行编队保持和重构的可行性。Ahn等^[67]针对多智能体编队的位置协同控制提出了一种欧几里德距离矩阵方法,以解决距离测量中存在不确定性和扰动的问题。

Zhao等^[68]将模型预测控制方法应用于主从方式编队飞行问题,设计了鲁棒的避撞飞行控制策略。Zou等^[69]设计了一种终端滑模模型控制器,以解决航天器编队协同过程中的外部扰动问题。Bechlioulis等^[70]针对非线性多智能体系统,采用预设性能控制研究了一种间接通信协议下含未知非线性和干扰的编队控制问题。Lee等^[71]基于吸引流形方法,提出了一种基于输出反馈的非确定性等价自适应控制律,以解决存在周期和随机扰动下的主从式编队控制问题。

国内方面,也有不少学者开展了主从方式编队控制策略的研究。王俊等^[72]针对空间站伴随卫星的相对姿态控制问题,基于相对四元数设计了姿态跟踪控制律。张治国等^[73]由本星和目标星的轨道信息计算出实现姿态调节所需的目标姿态信息,并设计了基于飞轮执行机构的姿态跟踪控制算法。李化义等^[74]针对编队InSAR的相对姿态控制问题,设计了两种非全状态反馈控制器及相应的角速度滤波器:半状态反馈控制器和角速度滤波器,输出反馈控制器和滤波器,进行相对姿态控制。Jin等^[75]基于无源控制理论,设计了基于修正罗德里格参数的姿态协同控制器。胡庆雷等^[76]针对编队卫星的姿态协同跟踪控制问题,采用一阶滤波器设计了含通信时延的输出反馈控制器,并论证了无需角速度信息反馈的闭环系统的有界稳定性。张保群等^[77]分别提出了鲁棒位置和姿态协同控制器,以解决存在通信时延、拓扑结构切换、参数不确定性和外部扰动等情况下的编队卫星协同控制问题。刘付成等^[78]针对近地轨道编队飞行卫星的构型保持控制问题,优化设计了三脉冲编队保持控制方法和相应的控制策略。

主从方式控制策略的优势是将编队协同控制问题转化为了各个航天器的状态跟踪问题,而后者已经得到了充分的研究。因此,可以将目前已有的多种状态跟踪方法直接应用到主从方式的编队协同控制问题中。主从方式的劣势是主星承担了主要的通信和计算负担,存在单点故障问题,难以充分保证系统的可靠性。

2.2 行为方式

行为方式(behavioral)主要用于实现包含多个不同控制行为的组合控制。早期,Balch等^[79]将行为方式用于机器人编队系统,之后McInnes^[80]将其

引入到航天器编队系统中,逐步引起了编队研究者的注意。行为方式控制策略的基本思想是为编队中的每一个航天器规定多个期望行为,再对不同的行为设置不同的权重。通过对加权后控制行为进行综合,使航天器实现每一个控制行为。在航天器编队中,这些行为可能包括避撞、避障、目标状态趋近、编队保持等。但是以上这些行为可能并不一定能够同时达到,甚至有可能是互相冲突的。例如当整个航天器编队去趋近一个期望的目标状态时,由于时延等原因各航天器不能同步开始控制,航天器动作的先后不一致使得趋近目标过程也可能同时是破坏编队队形的过程。因此,行为方式控制策略需要对不同控制行为进行权衡,实际上是一种折中的控制策略。不同的权重选取方式,行为方式也将不同。

McInnes^[80]针对分布式环状结构的多星编队系统,采用行为方式控制策略,基于Lyapunov直接方法设计了一种协同控制算法,可在保持编队构型的同时避免星间碰撞。Balch等^[79]基于行为方式研究了多机器人编队运动的协同控制实验方法,可同时实现移动到目标、避障以及编队保持等多个行为。Lawton等^[81]提出了一种基于行为方式的相对姿态控制方法,并解析证明了系统的局部渐近稳定性。在这种环状信息网络结构中,编队的协同控制通过相邻航天器的状态信息反馈来实现。Lawton等^[82]基于行为方式分别提出了利用速度反馈和无源阻尼的两种姿态协同控制方法,均考虑了机动到目标、编队保持以及绕固定轴旋转航天器等多种行为的整合,并将其应用到了分布式深空干涉仪的姿态协同控制。Dario等^[83]基于行为方式提出了一种传感器信息受限情况下的编队航天器路径规划方法,其中每个航天器的期望速度通过不同控制行为的加权来得到,结合控制策略可实现编队航天器的分布式跟踪控制。VanDyke等^[84]针对目标姿态为时变的编队情况,设计了基于行为方式的分布式姿态协同控制器。

国内学者也对行为方式的编队控制策略展开了研究。韦娟等^[85]针对空间站与伴随卫星的编队控制问题,分别基于主从方式和行为方式设计了两种相对姿态控制律,并给出了稳定性证明。雪丹等^[86]针对多星编队的分布式系统,基于行为方式设计了姿态协同控制器,并用Lyapunov理论证明了算法的稳定性。梁海朝等^[87]和Liang等^[88]在考虑模型不确定性、外界干扰和通信时延等因素的情况下,

基于滑模控制和神经网络方法研究了编队卫星行为方式的姿态协同控制问题。Zhang等^[89]针对全状态反馈、无速度测量、存在外部扰动和不确定性以及执行机构饱和等多种情况,基于一致性算法与行为方式的组合控制策略,设计了编队飞行航天器的分散协同控制器,以同时实现编队机动与编队保持。司君田^[90]采用行为方式控制策略,研究了航天器编队位置和姿态多行为控制问题,并针对分布式深空干涉仪工作模式下的航天器编队系统,给出了位置和姿态目标趋近与编队保持的多行为控制器。王涛等^[91]基于行为策略思想,分析了非合作目标多星编队系统的聚集行为模型,在考虑目标非合作特性和轨道运动的情况下,设计了空间非合作目标编队飞行期望运动场,并以其为基础进行了相对运动轨迹规划。

行为方式中还有一种耦合控制方法,常用于处理编队保持和目标趋近等控制行为,多通过控制编队航天器内的相对误差来实现协同控制^[92-94]。

行为方式相比于其他控制方式,具有如下优势:(1)可以融合相互冲突的多个控制行为。其控制策略的核心在于多种复杂行为的整合,且可以将新的控制行为整合进原有的控制器,以模块化方式进行规划。(2)行为方式控制策略属于非分层式结构,其中各个航天器地位平等,由于没有主星因而不存在单点失败问题。个别航天器的故障或失效问题可通过编队重构等方式来处理,不会造成整体编队任务的失败。行为方式控制策略的劣势是难以用数学语言进行描述,也不易证明其稳定性和收敛性。而且由于行为方式属于一种折中的控制策略,其中的单一控制行为可能不能达到最好的控制效果。

2.3 虚拟结构方式

虚拟结构(virtual structure, VS)方式是主要的编队飞行控制(formation flying control, FFC)方式之一,最早是Lewis等人在机器人编队控制研究中提出的,采用该方式实现了较好的协同控制精度。其后,Beard等人将VS应用在空间干涉仪上,以此定义了编队中卫星的参考轨迹。事实上,在编队飞行控制的早期研究中,主从方式是最主要的方法,由于其易于理解和使用的特点,该方法被广泛采用。事实上,后来提出的VS类似于L/F,都属于集中协同控制类型。不同之处在于,在VS的体系结构中,整个编队被看作一个虚拟刚体,编队中的卫星

跟踪由刚体运动产生的轨迹。VS 设计主要涉及 3 个步骤: (1) 建立整个编队的动态模型, 并根据任务要求设计虚拟控制器; (2) 根据所设计的 VS, 确定编队中卫星的运动路径算法; (3) 通过数学推导, 获得编队中每个卫星的跟踪控制律。因此, 如果是单一 VS 的卫星编队, 则能够跟踪上理想的绝对轨迹, 并为编队中的卫星生成参考轨迹。尽管使用 VS 方法很容易描述编队的控制行为, 但会使机载计算机在执行控制律时, 需要进行更多的计算。

VS 在编队保持, 移动和重构的控制中具有潜在的应用价值。Ren 等^[95] 针对航天器编队干涉测量, 提出了基于 VS 的轨道和姿态同步控制方法。Young 等^[96] 通过将 VS 应用于航天器编队干涉测量, 方便地描述了整个编队的机动任务。Ren 等^[97] 设计了具有反馈的 VS, 实现了更好的机动性能和编队系统的结构稳定性, 提高了跟踪精度。Malla 等^[98] 提出了一种跟踪控制器, 通过使用 VS 方法来获得编队中每个卫星所需的状态轨迹和姿态轨迹, 从而实现了编队机动。Ren 等^[99] 将分布式控制与 VS 相结合, 提出了分布式协同控制的概念, 为编队中的每个航天器设计了一个 VS, 并生成预期的轨迹, 使每个航天器能够跟踪给定的轨迹, 且它们之间的相互通讯构成一种循环流图。基于文献[97], 文献[99-100] 将分布式控制引入 VS, 设计了若干子虚拟结构, 这种多重的 VS 使用灵活, 可用于大规模的卫星编队。文献[101-102] 则基于多层虚拟结构, 提出了一种具有反馈的协同控制, 确保编队系统中卫星的姿态稳定性。Feng 等^[102] 将任务信息引入到编队飞行控制的反馈中, 基于多层虚拟结构分布式控制方法, 获得了多层嵌套 VS 的模型, 从而提高整个编队系统的稳定性和鲁棒性, 并有效地实现了在轨增加或减少编队卫星的数量。

对于编队飞行控制系统中的不利因素, 如质量和转动惯量不确定、外部干扰、传感器噪声、输入饱和等, 相关文献中提出了许多基于 VS 的控制方法。通常将 VS 与其他控制方法结合起来抑制这些不利因素对系统控制性能的影响, 确保系统稳定, 并达到满意的位置和姿态控制要求。例如, Kim 等^[103] 采用基于 VS 的滑模控制来解决编队飞行控制系统中的建模不确定性和外部干扰。Huang 等^[104] 针对具有不确定性和干扰的卫星编队系统, 提出了位置和姿态的自适应控制器, 确保系统稳定; Hassani 等^[105] 针对不确定性和干扰设计了一种鲁棒控制

器, 实现了满意的跟踪控制性能。Chen 等^[106] 采用了分布式的编队控制结构, 针对输入饱和, 提出了一种基于 VS 的反演控制。Shahbazi 等^[107] 同时考虑了多种不利因素, 包括模型不确定性, 外部干扰, 传感器噪声和输入饱和等, 提出了基于 μ 综合的鲁棒控制方法, 以满足位置和姿态的控制要求, 并通过基于 Lyapunov 函数的线性矩阵不等式技术保持控制系统稳定。

国内方面, 何真等^[108] 以虚拟结构为框架, 提出了一种用于编队机动运动控制的分布式编队控制方法, 通过队形反馈及编队控制器之间的通信协调, 可以在完成机动的同时较好地维持编队队形。冯成涛等^[109] 利用虚拟结构解决三星编队机动控制问题, 使卫星在机动过程中保持编队构型, 通过在控制器中引入编队队形反馈, 提升了编队飞行的稳定性和鲁棒性。黄勇等^[110] 针对卫星编队飞行协同控制存在质量、转动惯量不确定性及外部扰动的问题, 提出了一种应用虚拟结构的卫星编队飞行自适应协同控制方法, 可实现对编队卫星质量和转动惯量的自适应估计。

2.4 多输入多输出方式

多输入多输出 (multiple input and multiple output, MIMO) 方式是将编队的动态模型视为一个 MIMO 的系统。从而, 可以采用各种控制方法设计编队飞行控制系统。如, Hadaegh 等^[111] 设计了一种用于编队飞行的线性二次型调节器 (linear quadratic regulator, LQR)。Speyer^[112] 为编队中的每个航天器设计了一个全状态线性二次高斯 (linear quadratic Gaussian, LQG) 估计器, 以解决信息估计问题, 通过使用增强局部估计器来减少航天器之间的传递信息量。Folta 等^[113] 将分布式 LQG 控制算法引入到 MIMO 系统中。代数图论也是 MIMO 编队控制方式中的重要方法, 例如, Ulybyshev^[114] 采用有向图来确定编队的几何形状, 并将几何图形编码为 LQR 公式。在文献[115] 中, Olfati-Saber 等先采用刚体有向图来确定编队的几何形状, 获得整个编队的势场函数, 通过有向图中航天器位置的代数约束构造编队控制器。此外, Dunbar 等^[116] 还将非线性模型预测控制 (model predictive control, MPC) 应用于用于编队飞行的 MIMO 系统, 优化了控制性能。

2.5 循环方式

在循环方式(cyclic)中,各个航天器控制器通过连接形成一个编队控制器。Cyclic和L/F的区别在于前者的控制器连接不是分层的。Scharf等^[117]采用了基于有向图的循环控制,将编队中每个成员的控制器相互连接,构造循环编队飞行控制算法。在文献^[118]中,Luo采用循环追踪算法构造协同控制,同时实现了对编队飞行的轨道和姿态的控制。Hu等^[119]提出了一种用于编队跟踪的有限时间循环控制算法,取得了满意的跟踪精度。循环算法的稳定性在理论上分析较为困难,通常采用仿真手段来验证循环算法有效性^[120]。但基于势场的循环算法,可通过使用基于势函数的Lyapunov函数进行稳定性证明。Wang^[121]提出了多邻域策略,其中每个航天器根据相邻航天器子集的质心来控制本体。文献^[120-121]使用了所谓的质心策略算法。这些循环算法都只能通过仿真进行稳定性分析。而文献^[122-123]提出了一种基于VS的循环算法。一方面,通过给定的目标状态和所设计的编队控制器来生成VS的运动,每个编队成员通过自己的控制器来跟踪VS产生的参考轨迹。另一方面,根据每个成员控制器的跟踪误差,确定VS控制器中的反馈增益,再通过反馈来减少跟踪误差,保持编队构型。Young等^[124]详细给出了该算法的稳定性证明。

2.6 一致性控制方式

近年来,研究学者们针对传统编队飞行提出了越来越多的编队控制新方法,其中一致性控制(consensus-based control)引起了广泛关注。事实上,常见的编队控制方式,如主从式,基于行为或虚拟结构的方式,在一定程度上都可以统一为信息一致性问题的框架内,视为其中的特定方法。这意味着基于一致性的编队协同策略相比其他控制更具有一般性。一致性算法易于实现且个体间信息交换量小,常用于大规模网络系统的控制中,因而,也适用于大规模编队飞行系统。一致性算法为编队协作控制提供了新的途径^[125-128]。当编队中每个航天器的姿态被视为受控状态变量时,其状态一致意味着成员的姿态是同步的。通过选择一些合适的信息一致量,可以将带有构形要求的编队协作控制视为一致性问题。如Cong等^[129]使用一致性算法实现了大型航天器编队的编队机动。Hayakawa等^[130]使用一致性理论来解决航天器角速度同步问题。Ren^[131-132]研

究了固定参考状态下航天器编队的姿态同步问题,给出了控制系统的全局渐近稳定的条件。Listmann等^[133]设计了基于反演法和无源理论的协同控制算法,确保闭环系统渐近稳定。Igarashi等^[134]采用无源理论来研究编队的姿态同步问题,仅用包含相关姿态信息的角速度设计控制律,并同时考虑了通信延迟和状态时滞的情况。Sarlette等^[135]则根据相关状态信息研究了姿态自动同步问题,设计了两种基于一致性算法的协同控制器,对其控制效果进行对比分析。Ren^[132]对VS进行了离散化处理,设计了基于VS的离散协同姿态控制器。此外,还有一些研究学者针对包含状态时滞、外部扰动以及模型不确定的编队飞行控制系统,提出了基于一致性的姿态协同控制方法。如Hayakawa^[136]针对模型不确定性提出了改进的自适应同步算法。Jin等^[137]设计了一种变结构姿态同步控制器,并将自适应姿态同步控制算法用于具有时滞,扰动和不确定性的航天器编队。

国内方面,张博等^[138]提出了一种基于信息一致性的分布式协同控制策略,每个航天器均具有局部的分层控制结构,通过编队内的信息拓扑进行分布式估计与协同控制,自主实现了编队的构型建立、保持与整体机动。张凡^[139]利用代数图论工具,研究了基于变权无向图的二阶一致性算法,将其应用于航天器编队初始化防碰撞协同控制和相对方位约束下的航天器编队姿态同步协同控制等问题。周稼康等^[140]针对卫星编队一主多从结构的相对轨迹、姿态的协同控制问题,提出了一种基于Lyapunov方法的编队飞行协同控制策略,并基于一致性算法理论定量分析了通信拓扑结构为有向图情况下控制参数的选择范围。郭耀华^[141]针对卫星编队飞行中存在匹配干扰、匹配噪声和通信时延等问题,以一致性理论为基础,利用滑模和反步控制方法,对卫星编队的姿态轨道协同控制进行了研究。

2.7 参考轨迹规划方式

Kang等^[142]首次提出的参考轨迹规划(reference projection, RP)方法是一种协同控制模式。RP可以视为一类特殊的VS,但比VS更加通用。RP方法可以根据控制要求为卫星编队生成不同的期望轨迹,使编队结构成为集中式,分布式或混合式。在文献^[143]中,Kang等用轨道参数计算理想的参考轨迹,实现分布式合成孔径雷达系统的姿态

协同控制。Kang等^[143-144]针对非线性编队控制系统设计了 H_∞ 鲁棒控制器和LQG滑模控制器,并提出了三种编队飞行控制结构:L/F,广义L/F和虚拟期望姿态的编队飞行控制,通过大量仿真对三种控制结构的性能进行分析和比较。

2.8 无源分解方式

当编队飞行控制中存在多个冲突的目标,通常采用基于行为的方法,可将多个单一目标的控制作用融合在一起,形成最终的控制作用。然而,对于基于行为的编队控制方式的闭环稳定性,严格的闭环稳定性分析是比较困难的。Lee等^[145]则提出了一种基于无源分解(passive decomposition)的协同控制方法,将编队控制分解为固定系统控制和激变系统控制,并分别设计相应的跟踪控制律,最终形成一个完整的编队协同控制算法。从文献中可见,无源分解简化了协同控制器的设计过程和编队控制系统的稳定性分析。此外, Lee等^[146]还将无源化方法用于分布式编队协同控制。

3 新型无推进航天器编队飞行动力学和控制

目前,使用化学燃料或等离子体的化学和电推进已被用于航天器编队飞行的相对运动控制。最近提出了一些新的无推进编队控制概念,如利用大气阻力效应,非接触内力,地磁洛伦兹力,动量交换等进行编队航天器的构型保持和重构。这种新型航天器编队不仅可以大大延长寿命并且可以有效地避免羽流污染,而且由于这些新型推进装置的连续性和可逆性,可以提高编队系统整体的性能。但是,这些新型推进力同时作用于所有成员航天器,因此控制力的任何变化都会影响整个编队系统的稳定性,带来新的控制难题。下面将详细描述这几种常见的新型推进航天器编队的动力学和控制研究现状。

3.1 非接触内力

非接触内力由所有航天器电或磁产生的局部场的相互作用产生。与作为控制力的传统推进方式产生的力相比,非接触内力同时作用于多个航天器,并且在力和力矩的形成中具有几何和机械对称性,更重要的是,这些力不影响编队系统质心的运动,也不改变系统的总动量和角动量。作为无推进剂编队飞行的新型方法,非接触内力通过控制航天器的相对运动给航天器编队系统带来了独特的任务需

求。目前,研究学者已经研究了几种代表性的非接触内力,例如库仑力,电磁力和磁通钉效应。

3.1.1 库仑力

库仑编队控制是一种利用静电力进行控制的航天器编队的新概念,这里静电力指的是相互之间的库仑力,它是通过航天器在高轨道中收集电子而产生,并可以通过发射电流来主动控制航天器的电荷。因此,通过改变航天器的电荷,可以改变作用在航天器上的力,并用于航天器编队控制。与基于推进器的航天器编队控制系统相比,主动电荷控制所需的推进剂要少得多。目前的编队飞行任务受到严格的推进剂要求的限制,这使得库仑编队控制为未来航天器编队任务提供了一种新的控制途径^[147]。King等^[148-149]介绍了库仑力在航天器编队飞行任务中的应用前景,其中每个航天器的电势(或净电荷)可以进行控制,产生所需的航天器间作用力。

根据调研,库仑编队系统动力学与控制存在两个主要挑战。首先是库仑编队系统动力学为非仿射动力学,Wang等^[150]推导了多体库仑编队系统的动力学模型,并基于Branicky^[151]的多Lyapunov函数方法得到了一个切换控制器,其中切换方案设计的输入满足约束条件,并确保切换控制的类Lyapunov函数符合稳定性条件。库仑编队控制的第二个挑战是库仑力仅在航天器之间的连线方向产生作用。因此,两个航天器库仑结构在 R^2 中是欠驱动的。Natarajan等提出,通过辅助环境力,例如轨道中的重力梯度^[152]或辅助推进器^[153],可以增强库仑编队控制的控制能力。进一步,他们将动力学模型线性化来进行小扰动分析。在此基础上,文献^[154]设计了两个共线航天器编队的非线性控制方案,推进器输入被选择为比例微分反馈控制器,类似于Natarajan等^[153]提出的渐近稳定性的中心流形理论。施强^[155]综述了国内外有关库仑力编队问题的发展历程,对库仑编队的动力学建模和系统控制方法和稳定性的研究现状进行了整理和总结,指出在特殊的三星编队动力学与控制多星问题构型以及重构问题还有深空环境的库仑力编队还需要进一步研究。黄静等^[156]研究考虑控制输入饱和与状态约束的深空旋转二体库仑卫星构型控制问题,只采用卫星之间的库仑力作为控制力,提出一种基于反步法的非线性控制方法。王婷等^[157-158]采用粒子

群算法,求解出不等质量4星库仑卫星编队在平面和立体情况下的最优静态构型,并进一步基于模糊最优二次型控制理论研究了库仑卫星编队在碰撞规避过程中的重构控制问题。

3.1.2 磁通钉效应

磁通钉相互作用是另一种非接触内力,可用于编队队形保持,航天器对接和组装等。Shoer等^[159]将磁场和超导体之间的磁通钉效应应用于航天器相对运动,作为保持被动稳定构型的手段。

对比前面所提到的库仑编队飞行,库仑编队飞行的概念一般适用于等离子体环境密度较小的GEO或更高的轨道高度。由于库仑力与相对力的方向是一致的,因此如果要改变库仑编队系统的惯性方向,需要其他推进器进行辅助,从而导致系统设计的复杂性增加^[160]。而对于磁通钉效应,其独特的特性和有限的作用范围使其更适用于在轨模块化航天器组装和构型保持应用^[159]。Shoer等^[161]描述了磁通钉在模块化航天器编队系统的两种简单的重构机制,并在气浮台上进行了磁通钉效应的简单运动学的仿真。Norman等^[162]通过对磁通钉编队模型在平衡点附近进行线性化,研究了磁通钉编队的被动稳定性。高策等^[163]基于冻结镜像理论建立了星间磁通钉扎力模型,进一步建立了双星磁通钉扎编队动力学模型并进行平衡态分析,在此基础上采用LQR控制理论进行了稳定控制。

3.1.3 EMFF

与其他两类非接触航天器之间的力不同,由两个可操纵的三维磁偶极子所产生的电磁力可用于控制航天器编队系统的相对位置,相对姿态和惯性旋转。利用每个卫星上的三个正交线圈和高温超导导线,电磁力的相互作用范围可以扩大到数十或数百米^[164]。这些优点使得近距离电磁编队飞行(electromagnetic formation flight, EMFF)具有潜在的应用前景,如空间孔径阵列^[165],模块化航天器^[166]和近距离探测器系统^[164],以及电磁对接^[167]。

Miller等^[168]提出了电磁编队飞行概念,利用所有航天器产生的局部磁场可以控制航天器相对自由度。在EMFF中,每颗卫星配备有三个正交磁线圈和三个正交反作用轮。作为一种新兴的无推进剂编队飞行方法,EMFF具有更好的可控性,通过控制磁线圈中的电流,可以很容易地产生任何方向的力和力矩。近年来,麻省理工学院的空间系

统实验室已经完成了大量关于EMFF的研究工作。Kwon^[169]研究了EMFF对近距离机动的多颗卫星的姿态和位置控制的适用性。Schweighart等^[170]提出了计算磁偶极强度的近似模型。Elias等^[171]推导了两颗卫星的非线性动力学模型,并提出了一种线性二次调节器控制方法。Ahsun等^[172]针对低地球轨道中EMFF,设计了非线性自适应控制律,使系统实现了稳定。

Hussein等^[173]描述了平面体电磁编队系统的相对平衡条件,并得到了三种特殊的旋转构型是不稳定的结论。Huang等^[174]主要分析了三体电磁编队系统相对平衡的不变构型,描述了具有实常和恒定磁矩的不变构型解族,并对这种编队构型的线性稳定性进行分析。Zeng等^[175]分析了地球磁场对EMFF航天器的影响,并利用有限时间控制技术研究了电磁编队飞行控制问题。冯成涛等^[176]基于编队卫星的磁力模型和相对运动模型,采用饱和函数方法设计了非线性控制律,研究了电磁编队小卫星的相对运动稳定控制问题。

3.2 地磁洛伦兹力

地磁洛伦兹力也是一种电磁力。与由所有航天器电荷产生的磁场相互作用产生的航天器间非接触内力不同,地磁洛伦兹力是通过与地磁场的相互作用产生的。目前,研究学者们已经对地面地磁编队重构^[177],地磁编队稳定性^[178]和地磁编队三维重构^[179]等方面进行了研究。Pollock等^[180]给出了具有恒定电荷的航天器相对运动方程的闭环解,在笛卡尔坐标系中采用Hill-Clohessy-Wiltshire或Tschauner-Hempel方程描述了航天器的相对运动。

使用差分轨道元素建模的相对动力学有助于深入了解洛伦兹力地磁编队相对动力学。Streetman等^[181]描述了洛伦兹力对部分经典轨道元素的影响,建立了新的 J_2 不变和地面轨迹重复轨道。进一步,Gangestad等^[182]描述了洛伦兹力对全部经典轨道元素的影响。Sobiesiak等^[183-184]研究了平均差分轨道元素编队控制,得出了仅使用洛伦兹力不能完全控制相对航天器动力学的结论,并进一步提出了将洛伦兹力与连续或脉冲推进器相结合的优化策略,实现了地磁航天器编队相对运动的完全控制。Ludwik等^[185]描述了洛伦兹力平均差分轨道动力学的可控和不可控子空间,仅利用洛伦兹力设计了相对动力学的可控子空间的控制算法。

3.3 大气阻力编队飞行

大气阻力通常被视为一个不利因素,但它也为航天器编队飞行任务带来了无推进剂的一种新的解决途径。大气阻力编队飞行的控制主要有两种方法,即相平面法和横截面积调整法。相平面方法是大气阻力调节最常用的方法,Leonard等^[186]通过对大气阻力差分将大气编队动力学解耦为一个长期双积分系统和一个周期谐振动。Reid等^[187]分析了大气阻力对编队系统相对轨道的影响,得出了 J_2 扰动下的递归状态空间矩阵。Lambert等^[188]研究了几种动力学分析方法,得到了大气阻力编队分型平均相对运动状态。Pérez等^[189]设计了一种自适应Lyapunov控制器,通过改变连接在航天器上的几个可旋转面板来调整它们的相对轨道。

在横截面积调整中,Varma等^[190]提出了一种滑模控制方法,实现了多体航天器编队飞行稳定控制,通过对称安装在航天器上的可旋转太阳能电池板调整横截面积。Pérez等^[189]设计了一个闭环反馈Lyapunov控制律来实现航天器编队重构,综合考虑了太阳活动对大气热层的影响,并通过固定在航天器尾部的可扩展阻力帆调整横截面积。Horsley等^[191]使用连接到航天器尾部的大面板,通过调整面板的角度将大气阻力分解到轨道平面法线方向,从而实现轨道平面的调整。结合多维非线性约束规划策略和非线性PD控制方法,Deng等^[192]设计了一种用于低地球轨道立方星的综合控制策略,通过大气阻力实现所需的轨道内编队保持与重构控制。

3.4 动量交换编队飞行

近年来,出现了一种基于动量交换的新型编队控制概念。主要思想为一个航天器通过弹出一个额外的可分离质量来产生动量,另一个航天器随后捕获并进行重定向。Bae^[193]研究了通过利用来自激光的动量来控制航天器相对运动。他提出使用镜子在两个航天器之间来回发射激光束,来自光子束的动量转移产生排斥力。Tragesser^[194]进一步对Bae提出的概念进行了研究,他提出使用在航天器之间传递的连续质量流来产生排斥力。Joslyn等^[195]最早提出了利用液滴流实现动量交换的方法,基于液滴流来产生力。每个航天器都会生成液滴流并将其投射至太空中。接收航天器收集液滴流并产生到投射航天器的返回流。Ketsdever等^[196]研究了通过质

量传递的动量交换技术的应用,实现了可持续的串联航天器编队。

在以上动量交换编队飞行研究中,均假设质量流量与航天器的质量相比较小,并且在远小于轨道周期的时间尺度上考虑航天器之间的距离。此外,要求所产生的力相等,相反并连续作用于两个航天器。为了解决这个问题,学者们又提出了另一种没有这些限制的动量交换概念,只有一个固体传递动量。Ivanov等^[197]首次提出并研究了这种方法。结果表明,在 J_2 扰动作用下,质量交换可以应用于编队重构,漂移停止,以及相对运动轨迹保持。在此基础上,Shestakov等^[198]表明了质量交换控制在编队飞行机动中的可行性,通过求解几个优化问题得到了质量交换参数时间和质量喷射的速度矢量,在停止相对漂移的条件下使特定性能指标函数最小化。

3.5 太阳帆编队飞行

自20世纪初以来,太阳帆一直被认为是一种很有前景的航天技术,但一直局限于理论研究,直到近20年,随着材料研究的进步,它的应用才得以实现。目前,学者们对太阳帆动力学与控制技术进行了相关研究,并提出了其广泛的应用前景^[199-200]。

太阳帆编队飞行是太阳帆应用的新主题,关于太阳帆编队动力学与控制的研究,目前多数研究是关于太阳帆编队在深空飞行方面的应用^[201-204]。由于近地轨道中,与太阳辐射压力相比,地球的引力占主导地位,因此在地球轨道飞行的太阳帆编队较为困难。一个潜在的应用是Geo Sail编队飞行,在推进剂消耗和地球磁尾的持续时间方面优于普通航天器编队飞行任务^[205]。McInnes^[200]提出了使用单帆在黄道面上运行的Geo Sail任务,并认为在立体成像和阴影区域中,在倾斜轨道上的多太阳帆编队飞行比单一太阳帆任务更加有优势。Mu等^[206]讨论了反射率调制技术的广泛使用,提出了太阳帆的联合轨道和姿态控制方法,并研究了它在GeoSail编队飞行中的应用。Smirnov等^[207]研究了利用太阳辐射压力分别在日心轨道和地球高轨道进行航天器编队队形重构和保持控制,在航天器上面安装太阳帆以产生推进力。Gong等^[205]研究在倾斜的地球轨道上飞行的太阳帆编队,利用太阳辐射压力使航天器编队轨道平面产生进动以跟踪地磁尾部的年旋转,并设计了典型的LQR控制器作为主动控制保

持了太阳帆编队非周期性相对运动。曾志峰等^[208]基于行为控制技术,在有限的感知信息条件下,设计了自动的分布式控制律,将同质的各太阳帆导引至目标构型。

4 结论和后续发展方向

本文从三个方面总结了航天飞行动力学和控制的研究进展。随着航天器任务的发展,目前航天器编队的结构和功能越来越复杂,并且正在向航天器编队的复杂任务发展,考虑到灵活的航天器编队和新型航天器编队与无推进剂推进。因此,深入研究了航天器在各个领域的飞行动力学和控制,包括编队相对姿态动力学,相对轨道动力学,编队控制结构策略,编队重构控制和编队保持控制等研究领域。随着研究的深入,出现了以下新的研究重点和主要发展方向。

首先是相对姿态-相对轨道-结构振动耦合动力学和航天器编队飞行的控制,随着航天任务的发展,为了适应更多的航天观测任务,航天器编队的成员可能会携带柔性载荷,称之为柔性编队航天器。为了实现高精度的编队控制,需要考虑相对位姿耦合效应和刚柔耦合效应的影响,建立柔性航天器编队相对位姿-结构振动耦合动力学建模分析体系框架;同时,空间摄动是精确相对动力学建模需要考虑的关键因素,例如大气阻力摄动、地球非球形摄动和太阳光压摄动。因此,后续需要研究柔性航天器编队空间摄动力的精确数学模型构建方法。在此基础上,根据柔性航天器构型建立和构型保持的高精度编队控制要求,后续需研究编队航天器间相对位姿-结构振动抑制的高精度协同控制方法。并进一步考虑建模、干扰等不确定性的影响,以及在有限时间、防碰撞等状态约束条件下,研究兼顾稳态和暂态控制要求的鲁棒控制方法。

第二是对传统推进刚体航天器编队飞行的控制,编队飞行控制的研究还有待进一步深入和拓展,需要解决问题有:(1)寻求更好的稳定性分析方法。对于循环方式和基于行为的方式,需要进一步研究严格的稳定性条件,以形成更一般的控制设计方法;对于混合式的编队飞行控制,目前还缺乏足够多的稳定性分析方法,适用于采用不同的混合控制方式的大规模编队飞行系统,以满足更高的控制要求;(2)改进控制算法,减少编队飞行控制过程中信息处理和通讯的需求。为了满足大规模多任务的

卫星编队,有必要减少在编队飞行控制过程中的信息需求,从而减少处理和传递信息时所占用的时间和系统资源。目前,通过一些改进的控制算法可以有效地降低信息需求。例如,近年来在多智能体控制研究中受到广泛关注的事件触发控制,对于卫星编队飞行系统实现降低信息需求,具有潜在的应用价值。(3)提高编队飞行控制的控制性能,如鲁棒性,自主性。对于编队飞行控制来说,首要的是通过设计合适的控制算法,保证系统的稳定和可靠。进一步考虑到鲁棒性能,则通过设计合适控制方法可以使系统在存在多种不利因素的情况下,如外部干扰,模型不确定,甚至执行器故障等,保持稳定运行。此外,未来编队飞行控制还需要具备自主功能,以便在遇到一些非常规突发的事件时,编队控制器能够自主决策,调整控制作用,应对系统结构或参数的变化,确保稳定。可以预见,自主控制将会使编队飞行系统更加智能和强大,具有广阔的发展前景。

第三个是用无推进剂推进飞行的新型航天器编队的动力学和控制,如利用大气阻力效应、非接触内力,地磁洛伦兹力、动量交换等无推进力飞行的新型航天器编队。由于这些新颖的致动装置的连续性和可逆性,不仅大大延长了航天器寿命,还可以有效地避免羽流污染,并且还可以改善编队控制的性能。然而,这些新颖的无推进剂力同时作用于所有成员航天器,因此力的任何变化都会影响整个编队系统。因此,编队系统在运动过程中具有很强的非线性和复杂的场耦合问题,有时为了满足某些任务的要求还需要与其他执行机构相结合。因此,建立精确的动力学模型并设计控制律更加困难,需要进一步研究多场耦合下航天器编队飞行的精确动态建模以及精确、简单、可靠的控制系统设计。此外,对于非仿射系统或欠驱动系统的鲁棒控制方法的设计,应考虑外部干扰的影响。为了将新颖的编队控制理论应用于实际任务,需要对系统设计,动态建模与控制,地面演示实验与研究,系统可行性的提高以及性能的最优控制等方面进行深入研究。

参 考 文 献

- 1 Ariotti C. X-MIR inspector mission. <http://www.ik1sld.org/inspector.htm>, June, 24, 2003
- 2 Johnson T, Allen L. EO-1 baseline mission history. <http://eo1.gsfc.nasa.gov/>, June, 25, 2003

- 3 Masson A, Escoubet CP, Laakso H. Cluster science archive: the ESA long term archive of the Cluster mission. EGU General Assembly Conference, 2014
- 4 Tapley BD, Reigber C, Ries JC. The GRACE mission: status, early results. *American Astronomical Society*, 2004, 35: 1040
- 5 Persson S, Veldman S, Bodin P. PRISMA-A formation flying project in implementation phase. *Acta Astronautica*, 2009, 65(9-10): 1360-1374
- 6 Borde J, Teston F, Santandrea S, et al. Feasibility of the PROBA-3 formation flying demonstration mission as a pair of microsats in GTO. *55th International Astronautical Congress*, 2004, 12: 7719-7728
- 7 Giulicchi L, Wu SF, Fenal T. Attitude and orbit control systems for the LISA Pathfinder mission. *Aerospace Science and Technology*, 2013, 24(1): 283-294
- 8 Racca GD, McNamara PW. The LISA pathfinder mission tracing Einstein's geodesics in space. *Space Science Reviews*, 2010, 151(1-3): 159-181
- 9 Sullivan J, Grimberg S, D'Amico S. Comprehensive survey and assessment of spacecraft relative motion dynamics models. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2017, 40(8): 1837-1859
- 10 Sun H, Li S, Fei S. A composite control scheme for 6DOF spacecraft formation control. *Acta Astronautica*, 2011, 69(7): 595-611
- 11 Clohessy WH. Terminal guidance system for satellite rendezvous. *Journal of the Aerospace Sciences*, 1960, 27(9): 653-658
- 12 Alfriend KT, Vadali SR, Gurfil P, et al. Spacecraft Formation Flying: Dynamics, Control and Navigation. Heineemann: Butterworth, 2009: 1-382
- 13 Lovell TA, Tragesser S. Guidance for relative motion of low earth orbit spacecraft based on relative orbit elements. AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference and Exhibit, Providence, USA, 2004
- 14 Schweighart SA, Sedwick RJ. High-fidelity linearized J model for satellite formation flight. *Journal of Guidance Control, and Dynamics*, 2002, 25(6): 1073-1080
- 15 Izzo D, Sabatini M, Valente C. A new linear model describing formation flying dynamics under J_2 effects. *Proceedings of the 17th AIDAA National Congress*, 2003, 1: 15-19
- 16 Leonard CL, Hollister WM, Bergmann EV. Orbital formation keeping with differential drag. *Journal of Guidance Control, and Dynamics*, 2012, 10(10): 755-765
- 17 Humi M, Carter T. Rendezvous equations in a central-force field with linear drag. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2002, 25(1): 74-79
- 18 Bevilacqua R, Romano M. Rendezvous maneuvers of multiple spacecraft using differential drag under J_2 perturbation. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2008, 31(6): 1595-1607
- 19 Stringer MT, Newman B, Lovell TA, et al. Analysis of a new nonlinear solution of relative orbital motion. The 23rd International Symposium on Space Flight Dynamics, Pasadena, CA, 2012
- 20 Tschauner J, Hempel P. Optimale beschleunigungsprogramme fur das rendezvous-manover. *Astronautica Acta*, 1964, 10(5-6): 296
- 21 Lawden DF. Optimal Trajectories for Space Navigation. London: Butterworths, 1963
- 22 Carter TE. State transition matrices for terminal rendezvous studies: brief survey and new example. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1998, 21(1): 148-155
- 23 Yamanaka K, Ankersen F. New state transition matrix for relative motion on an arbitrary elliptical orbit. *Journal of Guidance Control, and Dynamics*, 2002, 25(1): 60-66
- 24 Kechichian JA. Motion in general elliptic orbit with respect to a dragging and precessing coordinate frame. *Journal of the Astronautical Sciences*, 1998, 46(1): 25-45
- 25 Theron A, Karai-Zaitri M, Arzelier D, et al. Nonlinear and linear local Cartesian relative motion state models for J2 perturbed elliptical orbits. 21st International Symposium on Space Flight Dynamics, Toulouse, France, 2009
- 26 Schaub H, Alfriend KT. J_2 Invariant relative orbits for spacecraft formations. *Celestial Mechanics, and Dynamical Astronomy*, 2001, 79(2): 77-95
- 27 Gim DW, Alfriend KT. State transition matrix of relative motion for the perturbed noncircular reference orbit. *Journal of Guidance Control, and Dynamics*, 2003, 26(6): 956-971
- 28 Brouwer D. Solution of the problem of artificial satellite theory without drag. *Astronomical Journal*, 1959, 64(64): 378
- 29 Koenig AW, Guffanti T, D'Amico S. New state transition matrices for relative motion of spacecraft formations in perturbed orbits. AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference, Long Beach, California, 2016
- 30 孟鑫, 李俊峰, 高云峰. 卫星编队飞行相对轨道的摄动研究综述. *宇航学报*, 2009, 25(4): 473-478
Meng Xin, Li Junfeng, Gao Yunfeng. Study on perturbations in the relative orbit of satellite formation flying. *Journal of Astronautics*, 2009, 25(4): 473-478 (in Chinese)
- 31 李俊峰, 高云峰. 卫星编队飞行动力学与控制研究. *力学与实践*, 2002, 24(2): 1-6
Li Junfeng, Gao Yunfeng. Study on satellite formation flying dynamics and control. *Mechanics in Engineering*, 2002, 24(2): 1-6 (in Chinese)
- 32 曹静, 袁建平, 罗建军. 椭圆轨道非线性相对运动模型的周期解与应用. *中国空间科学技术*, 2013, 33(3): 37-45
Cao Jing, Yuan Jianping, Luo Jianjun. Periodic solution to elliptical orbit nonlinear relative motion model and the application. *Chinese Space Science and Technology*, 2013, 33(3): 37-45 (in Chinese)
- 33 肖业伦, 张晓敏. 编队飞行卫星群的轨道动力学特性与构形设计. *宇航学报*, 2001, 22(4): 7-12
Xiao Yelun, Zhang Xiaomin. Orbital dynamical characteristics and configuration design of formation flying satellites. *Journal of Astronautics*, 2001, 22(4): 7-12 (in Chinese)
- 34 Alfriend K, Yan H. An orbital elements based approach to the nonlinear formation flying problem. The International

- Formation Flying Conference: Missions and Technologies, Toulouse, France, 2002
- 35 Soop EM. Handbook of geostationary orbits. Springer Science and Business Media, 1994
- 36 Eckstein MC, Rajasingh CK, Blumer P. Colocation strategy and collision avoidance for the geostationary satellites at 19 degrees west. International Symposium on Space Flight Dynamics, Toulouse, 1989
- 37 Arbing C, D'Amico S, Eineder M. Precise Ground-in-the-loop orbit control for low Earth observation satellites. The 18th International Symposium on Space Flight Dynamics, Munich, Germany, 2004
- 38 D'Amico S. Autonomous formation flying in low Earth orbit. [PhD Thesis]. Delft: Delft University of Technology, 2010
- 39 Gaias G, Ardaens JS, Montenbruck O. Model of J_2 perturbed satellite relative motion with time-varying differential drag. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 2015, 123(4): 1-23
- 40 Thanh V, Amir R. Analysis of a distributed estimation and control scheme for formation flying spacecraft. *Aerospace Science and Technology*, 2018, 73: 232-238
- 41 Chung S, Bandyopadhyay S, Foust R, et al. Review of formation flying and constellation missions using nanosatellites. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2017, 53(3): 567-578
- 42 Segal S, Gurfil P. Effect of kinematic rotation-translation coupling on relative spacecraft translational dynamics. *Journal of Guidance Control, and Dynamics*, 2012, 32(3): 1045-1050
- 43 Shasti B, Alasty A, Assadian N. Robust distributed control of spacecraft formation flying with adaptive network topology. *Acta Astronautica*, 2017, 136C: 281-296
- 44 Gurfil P. Euler parameters as nonsingular orbital elements in near-equatorial orbits. *Journal of Guidance Control, and Dynamics*, 2005, 28(5): 1079-1084
- 45 Brodsky V, Shoham M. Dual numbers representation of rigid body dynamics. *Mechanism and Machine Theory*, 1999, 34(5): 693-718
- 46 王剑颖, 梁海朝, 孙兆伟. 基于对偶数的相对耦合动力学与控制. 宇航学报, 2010, 31(7): 1711-1717
Wang Jianying, Liang Haizhao, Sun Zhaowei. Dual number-based relative coupled dynamics and control. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(7): 1711-1717 (in Chinese)
- 47 Zhang F, Duan GR. Robust integrated translation and rotation finite-time maneuver of a rigid spacecraft based on dual quaternion. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Portland, 2011
- 48 朱战霞, 马家瑁, 樊瑞山. 航天器相对运动姿轨耦合特性研究. 西北工业大学学报, 2015, 33(6): 887-891
Zhu Zhanxia, Ma Jiajin, Fan Ruishan. Coupling analysis on relative motion of spacecraft attitude and orbit model based on dual quaternion. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2015, 33(6): 887-891 (in Chinese)
- 49 Qiao B, Tang S, Ma K, et al. Relative position and attitude estimation of spacecrafts based on dual quaternion for rendezvous and docking. *Acta Astronautica*, 2013, 91(10): 237-244
- 50 Zhang F, Duan G. Robust integrated translation and rotation finite-time maneuver of a rigid spacecraft based on dual quaternion. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Portland, Oregon, 2011
- 51 Huang X, Yan Y, Zhou Y, et al. Dual-quaternion based distributed coordination control of six-DOF spacecraft formation with collision avoidance. *Aerospace Science and Technology*, 2017, 67: 443-455
- 52 Lawton JR. A behavior-based approach to multiple spacecraft formation flying. [PhD Thesis]. Brigham: Brigham Young University, 2000
- 53 Scharf DP, Hadaegh FY, Ploen SR. A Survey of spacecraft formation flying guidance and control, part II: control. The American Control Conference, Boston, Massachusetts, USA, 2004
- 54 Wang PKC, Hadaegh FY. Coordination and control of multiple micro-spacecraft moving in formation. *The Journal of the Astronautical Sciences*, 1996, 44(3): 315-355
- 55 Wang PKC, Hadaegh FY. Optimal formation-reconfiguration for multiple spacecraft. The American Institute of Aeronautics and Astronautics Guidance and Control Conference, Boston, 1998
- 56 Wang PKC. Navigation strategies for multiple autonomous mobile robots moving in formation. *Journal of Robotic Systems*, 1991, 8(2): 177-195
- 57 Wang PKC, Hadaegh FY. Formation flying of multiple spacecraft with autonomous rendezvous and docking capability. *IET Control Theory and Application*, 2007, 1(2): 494-504
- 58 Xu YJ, Tatsch A, Fitz-coy NG. Chattering free sliding model control for a 6DOF formation flying mission. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, San Francisco, California, 2005
- 59 Stansbery DT, Cloutier JR. Nonlinear control of satellite formation flight. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Denver, CO, 2000
- 60 Park HE, Park SY, Choi KH. Satellite formation reconfiguration and station-keeping using state-dependent Riccati equation technique. *Aerospace Science and Technology*, 2011, 15(6): 440-452
- 61 Massari M, Zamaro M. Application of SDRE technique to orbital and attitude control of spacecraft formation flying. *Acta Astronautica*, 2014, 94(1): 409-420
- 62 Kumar BS, Ng A. Time-optimal low-thrust formation maneuvering using a hybrid linear/nonlinear controller. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2009, 32(1): 343-347
- 63 Wong H, Pan HZ, Kapila V. Output feedback control for spacecraft formation flying with coupled translation and attitude dynamics. The American Control Conference, Portland, USA, 2005
- 64 Bondhus AK, Pettersen KY, Gravdahl JT. Leader/follower synchronization of satellite attitude without angular velocity measurements. The IEEE Conference on Decision and

- Control, Spain, 2005
- 65 Godard, Kumar KD. Fault tolerant reconfigurable satellite formations using adaptive variable structure techniques. *Journal of Guidance Control, and Dynamics*, 2010, 33(3): 969-984
- 66 Godard, Kumar KD, Zou AM. Robust stationkeeping and reconfiguration of underactuated spacecraft formations. *Acta Astronautica*, 2014, 105: 495-510
- 67 Ahn HS, Oh KK. Command coordination in multi-agent formation: euclidean distance matrix approaches. International Conference on Control Automation and Systems, Gyeonggi-do, South Korea, 2010
- 68 Zhao WH, Go TH. Robust cooperative leader-follower formation flight control. 2010 11th International Conference on Control Automation Robotics & Vision, Singapore, 2010
- 69 Zou AM, Kumar KD. Distributed attitude coordination control for spacecraft formation flying. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2012, 48(2): 1329-1346
- 70 Bechlioulis CP, Kyriakopoulos KJ. Robust model-free formation control with prescribed performance for nonlinear multi-agent systems. 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Seattle, Washington, 2015
- 71 Lee KW, Singh SN. Attractive manifold-based noncertainty-equivalence adaptive spacecraft formation flying using output feedback. 2018 AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Kissimmee, USA, 2018
- 72 王俊, 袁建平. 四元数在伴随卫星姿态控制中的应用. *飞行力学*, 2000, 18(1): 36-38
Wang Jun, Yuan Jianping. Application of quaternion to the attitude control of an accompanying satellite of space station. *Fight Dynamics*, 2000, 18(1): 36-38 (in Chinese)
- 73 张治国, 李俊峰, 宝音贺西. 卫星编队飞行指向跟踪姿态控制. *清华大学学报(自然科学版)*, 2006, 46(11): 1914-1917
Zhang Zhiguo, Li Junfeng, Baoyin Hexi. Attitude tracking control for satellite formation flying. *Journal of Tsinghua University (Sci & Tech)*, 2006, 46(11): 1914-1917 (in Chinese)
- 74 李化义, 张迎春, 强文义等. 编队 InSAR 相对姿态控制. *宇航学报*, 2007, 28(2): 338-343
Li Huayi, Zhang Yingchun, Qiang Wenyi, et al. Relative attitude control for spacecraft formation InSAR. *Journal of Astronautics*, 2007, 28(2): 338-343 (in Chinese)
- 75 Jin ED, Sun ZW. Passivity-based control for a flexible spacecraft in presence of disturbances. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2010, 45(4): 348-356
- 76 胡庆雷, 周稼康, 马广富. 无需角速度的含通信时延卫星编队飞行自适应姿态协同跟踪控制. *自动化学报*, 2012, 38(3): 462-468
Hu Qinglei, Zhou Jiakang, Ma Guangfu. Angle velocity free attitude synchronization adaptive tracking control for satellite formation flying with time-varying delays. *Acta Automatica Sinica*, 2012, 38(3): 462-468 (in Chinese)
- 77 张保群, 宋申民, 陈兴林. 带时延和拓扑切换的卫星编队鲁棒协同控制. *宇航学报*, 2012, 33(7): 910-919
Zhang Baoqun, Song Shenmin, Chen Xinglin. Robust coordinated control for formation flying satellites with time delays and switching topologies. *Journal of Astronautics*, 2012, 33(7): 910-919 (in Chinese)
- 78 刘付成, 完备, 杜耀珂等. 近地轨道编队飞行卫星构形保持控制方法研究. *上海航天*, 2014, 31(4): 6-10
Liu Fucheng, Wan Bei, Du Yaoke, et al. Research on satellites formation-keeping control in low earth orbit. *Aerospace Shanghai*, 2014, 31(4): 6-10 (in Chinese)
- 79 Balch T, Arkin RC. Behavior-based formation control for multi-robot teams. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1988, 14(6): 926-939
- 80 McInnes CR. Autonomous ring formation for a planar constellation satellites. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1995, 18(5): 1215-1217
- 81 Lawton J, Beard RW, Hadaegh FY. Elementary attitude formation maneuvers via leader-following and behavior-based control. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Denver, Colorado, 2000
- 82 Lawton J, Yong B, Beard RW. Synchronized multiple spacecraft rotation. *Automatica*, 2002, 38(8): 1359-1364
- 83 Dario I, Lorenzo P. Autonomous and distributed motion planning for satellite swarm. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2007, 30(2): 449-459
- 84 VanDyke MC, Hall CD. Decentralized coordinated attitude control within a formation of spacecraft. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2006, 29(5): 1101-1109
- 85 韦娟, 袁建平. 编队飞行小卫星相对姿态控制研究. *航天控制*, 2002(4): 16-20, 32
Wei Juan, Yuan Jianping. The Research of relative attitude control on small satellite formation flying. *Aerospace Control*, 2002(4): 16-20, 32 (in Chinese)
- 86 雪丹, 曹喜滨. 大型卫星编队的分布式协同姿态控制. *航天控制*, 2005, 23(1): 27-50
Xue Dan, Cao Xibin. Decentralized coordinated attitude control for large satellite formation. *Aerospace Control*, 2005, 23(1): 27-50 (in Chinese)
- 87 梁海朝. 编队卫星的姿态协同控制与输入时延的补偿方法研究. [硕士论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010
Liang Haizhao. Research on coordinated attitude control approach of satellite formation flying and compensation of input delay. [Master Thesis]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010 (in Chinese)
- 88 Liang HZ, Wang JY, Sun ZW. Robust decentralized coordinated attitude control of spacecraft formation. *Acta Astronautica*, 2011, 69: 280-288
- 89 Zhang BQ, Song SM. Decentralized coordinated control for multiple spacecraft formation maneuvers. *Acta Astronautica*, 2012, 74: 79-97
- 90 司君田. 基于行为方式的航天器编队多行为控制研究. [硕士论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012
Si Juntian. Research on behavior-based multi-behavior control of spacecraft formation. [Master Thesis]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012 (in Chinese)

- 91 王涛, 许永生, 张迎春等. 基于行为的非合作目标多航天器编队轨迹规划. *中国空间科学技术*, 2017, 37(1): 19-25
Wang Tao, Xu Yongsheng, Zhang Yingchun, et al. Trajectory planning for non-cooperative target multi-spacecraft formation based on behavior strategy. *Chinese Space Science and Technology*, 2017, 37(1): 19-25 (in Chinese)
- 92 Liu HT, Shan JJ, Sun D. Adaptive synchronization control of multiple spacecraft formation. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2007, 129: 337-342
- 93 Shan JJ, Liu HT. Close-formation flight control with motion synchronization. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2005, 28(6): 1316-1320
- 94 Shan JJ. 6-DOF synchronization control for multiple spacecraft formation flying. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, Hawaii, 2008
- 95 Ren W, Beard R. Virtual structure based spacecraft formation control with formation feedback. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Monterey, California, 2002
- 96 Young BJ, Beard RW, Kelsey JM. A control scheme for improving multi-vehicle formation maneuvers. The 2001 American Control Conference, Arlington, USA, 2001
- 97 Ren W, Beard R. Decentralized scheme for spacecraft formation flying via the virtual structure approach. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2004, 27(1): 73-82
- 98 Malla R, Watkins J, Piper G. Study of pointing maneuvers for a spacecraft virtual structure formation. The Thirty-Eighth Southeastern Symposium on System Theory, Cookeville, USA, 2006
- 99 Ren W, Beard R. Decentralized scheme for spacecraft formation flying via the virtual structure approach. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2004, 27(1): 73-82
- 100 Cong B, Liu X, Chen Z. Distributed attitude synchronization of formation flying via consensus-based virtual structure. *Acta Astronautica*, 2011, 68(11-12): 1973-1986
- 101 Ren W, Beard RW. Formation feedback control for multiple spacecraft via virtual structures. *IEEE Proceedings-Control Theory and Applications*, 2004, 151(3): 357-368
- 102 Feng C, Wang H, Liu H. Maneuver control of satellite formation based on virtual structure. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(1): 143-145
- 103 Kim Y, Ahn C. Point targeting of multisatellites via a virtual structure formation flight scheme. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2009, 32(4): 1330-1344
- 104 Huang Y, Li X, Li L, et al. Adaptive cooperative control for satellites formation flying based on virtual structure. The 33rd Chinese Control Conference, Nanjing, China, 2014
- 105 Hassani A, Saghafi F, Pasand M. H_∞ and μ synthesis control of virtual structure satellites formation flying. *International Journal of Dynamics and Control*, 2016: 1-5
- 106 Chen YY, Tian YP. A backstepping design for directed formation control of three-coleader agents in the plane. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2009, 19(7): 729-745
- 107 Shahbazi B, Malekzadeh M, Koofgar HR. Robust constrained attitude control of spacecraft formation flying in the presence of disturbances. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2017, 53(5): 2534-2543
- 108 何真, 陆宇平, 刘燕斌. 基于虚拟结构的分布式编队控制方法. *应用科学学报*, 2007, 25(4): 387-391
He Zhen, Lu Yuping, Liu Yanbin. Distributed control of formation maneuvers based on virtual structures. *Journal of Applied Sciences*, 2007, 25(4): 387-391 (in Chinese)
- 109 冯成涛, 王惠南, 刘海颖. 基于虚拟结构的卫星编队机动控制. *系统工程与电子技术*, 2011, 33(1): 143-145,156
Feng Chengtao, Wang Huinan, Liu Haiying. Maneuver control of satellite formation based on virtual structure, *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(1): 143-145,156 (in Chinese)
- 110 黄勇, 李小将, 杨业伟等. 应用虚拟结构的卫星编队飞行自适应协同控制. *中国空间科学技术*, 2015, 6(3): 75-83
Huang Yong, Li Xiaojiao, Yang Yewei, et al. Adaptive cooperative control for satellite formation flying using virtual structure. *Chinese Space Science and Technology*, 2015, 6(3): 75-83 (in Chinese)
- 111 Hadaegh FY, Ghavimi AR, Singh G, et al. A centralized optimal controller for formation flying spacecraft. International Conference Intelligent Technology, Bangkok, Thailand, 2000
- 112 Speyer JL. Computation and transmission requirements for a decentralized linear-quadratic-gaussian control problem. *IEEE Trans Automatic Control*, 1979, 24(2): 266-269
- 113 Folta D, Carpenter JR, Wagner C. Formation flying with decentralized control in libration point orbits. Int symp Space Flight Dyn, Biarritz, France, 2000
- 114 Ulybyshev Y. Long-term formation keeping of satellite constellation using linear-quadratic controller. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1998, 21(1): 109-115
- 115 Olfati-Saber R, Murray RM. Distributed cooperative control of multiple vehicle formations using structural potential functions. *IFAC Proceedings*, 2002, 35(1): 495-500
- 116 Dunbar WB, Murray RM. Model predictive control of coordinated multi-vehicle formations. The 41st IEEE Conference on Decision and Control, Las Vegas, USA, 2002
- 117 Scharf DP, Hadaegh FY, Ploen SR. A survey of spacecraft formation flying guidance and control, part II: control. The 2004 American Control Conference, Boston, USA, 2004
- 118 Luo J, Zhou L, Jiang Q, et al. 6 DOF coordinated control using cyclic pursuit for spacecraft formation. *Journal of Astronautics*, 2017, 38(2): 166-175
- 119 Hu M, Zeng G. Autonomous decentralized coordination control for fractionated spacecraft formation reconfiguration based on cyclic pursuit strategy. *Advances in the Astronautical Sciences*, 2012, 145: 563-575
- 120 Anderson M, Robbins A. Formation flight as a cooperative game. Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Boston, USA, 1998
- 121 Wang PKC. Navigation strategies for multiple autonomous mobile robots moving in formation. *Journal of Robotic Systems*, 1991, 8(2): 177-195
- 122 Balch T, Arkin RC. Behavior-based formation control for multirobot teams. *IEEE Transactions on Robotics and Au-*

- tomation, 1998, 14(6): 926-939
- 123 Young BJ. Mobile robots: coordinating and control. [Master Thesis]. Provo: Brigham Young Univ, 2000
- 124 Young BJ, Beard RW, Kelsey JM. A control scheme for improving multi-vehicle formation maneuvers. The 2001 American Control Conference, Arlington, USA, 2001
- 125 Bi P, Luo JJ, Zhang B. Cooperate control algorithm for spacecraft formation flying based on consensus theory. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(1): 70-74
- 126 Chen Z, Wang H, Liu H. Research on distributed satellite attitude synchronization based on information on information consensus. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(10): 2283-2288
- 127 Zhang H, Hu Q, Ma G. Robust adaptive cooperative tracking control for multi-spacecraft formation flight based on directed graph. *Journal of Astronautics*, 2012, 33(8): 1072-1079
- 128 Liu F, Mei J, Ma G. Adaptive distributed consensus for relative orbit of modular spacecraft under a directed graph. *Control Theory and Applications*, 2014, 31(2): 223-229
- 129 Cong BL, Liu XD, Chen Z. Distributed attitude synchronization of formation flying via consensus-based virtual structure. *Acta Astronautica*, 2011, 68(11-12): 1973-1986
- 130 Hayakawa T, Mohanarajah G. Attitude consensus with fixed rotational axis via energy dissipation. 47th IEEE Conference on Decision and Control, Cancun, Mexico, 2008
- 131 Ren W. Distributed attitude alignment in spacecraft formation flying. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2007, 21(2-3): 95-113
- 132 Ren W. Distributed cooperative attitude synchronization and tracking for multiple rigid bodies. *IEEE Trans Control Systems Technology*, 2010, 18(2): 383-392
- 133 Listmann KD, Woolsey CA, Adamy J. Passivity-based coordination of multi-agent systems: a backstepping approach. 2009 European Control Conference, Budapest, Hungary, 2009
- 134 Igarashi Y, Hatanaka T, Fujita M, et al. Passivity-based attitude synchronization in SE (3). *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2009, 17(5): 1119-1134
- 135 Sarlette A, Sepulchre R, Leonard NE. Autonomous rigid body attitude synchronization. *Automatica*, 2009, 45(2): 572-577
- 136 Hayakawa T. Adaptive synchronization control of spacecraft with fixed rotational axis. 2009 ICCAS-SICE, Fukuoda, Japan, 2009
- 137 Jin ED, Jiang XL, Sun ZW. Robust decentralized attitude coordination control of spacecraft formation. *Systems and Control Letters*, 2008, 57(7): 567-577
- 138 张博, 罗建军, 袁建平. 一种基于信息一致性的卫星编队协同控制策略. *航空学报*, 2010, 31(5): 1004-1013
Zhang Bo, Luo Jianjun, Yuan Jianping. A satellite formation cooperative control strategy based on information consensus. *Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica*, 2010, 31(5): 1004-1013 (in Chinese)
- 139 张凡. 基于一致性理论的航天器编队协同控制方法研究. [硕士论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010
- Zhang Fan. Research on consensus-based cooperative control of spacecraft formation. [Master Thesis]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010 (in Chinese)
- 140 周稼康, 胡庆雷, 马广富等. 基于一致性算法的卫星编队姿轨耦合的协同控制. *系统工程与电子技术*, 2011, 33(4): 825-832
Zhou Jiakang, Hu Qinglei, Ma Guangfu, et al. Cooperative attitude and translation control of satellite formation flying using consensus algorithm. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(4): 825-832 (in Chinese)
- 141 郭耀华. 基于一致性理论的卫星编队滑模/反步协同控制研究. [硕士论文]. 北京: 北京理工大学, 2015
Guo Yaohua. Sliding mode/backstepping coordinated control of satellite formation based on consensus theory. [Master Thesis]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015 (in Chinese)
- 142 Kang W, Yeh HH, Sparks A. Coordinated control of relative attitude for satellite formation. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Montreal, Canada, 2001
- 143 Kang W, Sparks A. Coordinated attitude and formation control of multi-satellite systems. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Monterey, California, 2002
- 144 Kang W, Yeh HH. Coordinated attitude control of multi-satellite systems. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2002, 12(2-3): 185-205
- 145 Lee D, Li PY. Passive decomposition of multiple mechanical systems under coordination requirements. 43rd IEEE Conference on Decision and Control (CDC), Nassau, Bahamas, 2004
- 146 Lee D, Li PY. Passive decomposition approach to formation and maneuver control of multiple rigid bodies. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2007, 129(5): 662-677
- 147 Schaub H, Parker GG, King LB. Challenges and prospects of coulomb spacecraft formation control. *Journal of the Astronautical Sciences*, 2004, 52(1-2): 169-193
- 148 King LB, Parker GG, Deshmukh S, et al. Spacecraft formation-flying using inter-vehicle coulomb forces. NIAC Phase I Final Report, 2002
- 149 King L, Parker G, Deshmukh S, et al. A Study of inter-spacecraft coulomb forces and implications for formation flying. *Journal of Propulsion and Power*, 2003, 19(3): 497-505
- 150 Wang S, Schaub H. Coulomb control of nonequilibrium fixed shape triangular three-vehicle cluster. *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 2015, 34(1): 259-270
- 151 Branicky MS. Multiple Lyapunov functions and other analysis tools for switched and hybrid systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1998, 43(4): 475-482
- 152 Natarajan A, Schaub H. Linear dynamics and stability analysis of a two-craft coulomb tether formation. *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 2006, 29(4): 831-839
- 153 Natarajan A, Schaub H. Hybrid control of orbit normal and along-track two-craft coulomb tethers. *Aerospace Science*

- and Technology*, 2009, 13(4): 183-191
- 154 Tahir AM, Narang-Siddarth A. Constructive nonlinear approach to coulomb formation control. 2018 AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Kissimmee, Florida, 2018
- 155 施强. 卫星库仑力编队飞行及控制发展研究综述. 科学技术创新, 2017(32): 158-159
Shi Qiang. Research on satellite coulomb formation flying and control development. *Scientific and Technological Innovation*, 2017(32): 158-159 (in Chinese)
- 156 黄静, 李传江, 马广富等. 考虑状态约束的二体旋转库仑卫星系统重构控制. 宇航学报, 2015, 36(5): 557-565
Huang Jing, Li Chuanjiang, Ma Guangfu, et al. Nonlinear control for reconfiguration of a spinning two-body coulomb satellite system with state constraints. *Journal of Astronautics*, 2015, 36(5): 557-565 (in Chinese)
- 157 王婷, 夏广庆, 兰聪超. 粒子群算法求解不等质量库仑卫星编队最优构型. 系统工程与电子技术, 2010, 38(2): 305-313
Wang Ting, Xia Guangqing, Lan Congchao. Optimal static configurataion of non-equal mass coulomb formation satellites by PSO. *Systems Engineering and Electronics*, 2010, 38(2): 305-313 (in Chinese)
- 158 王婷. 采用混合推进下的库仑卫星编队重构控制研究. 航天控制, 2017(2): 20-24
Wang Ting. Study of coulomb satellites formation reconfiguration by hybrid propulsion. *Aerospace Control*, 2017(2): 20-24
- 159 Shoer JP, Peck MA. A flux-pinned magnetic-super conductor pair for close-proximity station keeping and self-assembly of spacecraft. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Hilton Head, South Carolina, 2007
- 160 Inampudi R, Schaub H. Two-craft tether formation relative equilibria about circular orbits and libration points. *Acta Astronautica*, 2011, 68(11): 1761-1773
- 161 Shoer J, Peck M. Reconfigurable spacecraft as kinematic mechanisms based on flux-pinning interactions. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2009, 46(2): 466-469
- 162 Norman MC, Peck MA. Simplified model of a flux-pinned spacecraft formation. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2010, 33(3): 814-822
- 163 高策, 杨乐平, 朱彦伟等. 双星磁通钉扎编队平衡态稳定性与控制. 第 36 届中国控制会议, 大连, 2017
Gao Ce, Yang Leping, Zhu Yanwei, et al. Stability and control of flux-pinned two-craft formation equilibrium. The 36th Chinese Control Conference, Dalian, China, 2017 (in Chinese)
- 164 Kwon DW. Propellantless formation flight applications using electromagnetic satellite formations. *Acta Astronautica*, 2010, 67(9): 1189-1201
- 165 Kwon DW. Electromagnetic formation flight of satellite arrays. [Master Thesis]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2005
- 166 Sakaguchi A. Micro-electromagnetic formation flight of satellite systems. [Master Thesis]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2013
- 167 Zhang YW, Yang LP, Zhu YW, et al. Self-docking capability and control strategy of electromagnetic docking technology. *Acta Astronautica*, 2011, 69(11): 1073-1081
- 168 Miller DW, Ahsun U, Ramirezriberos JL. Control of electromagnetic satellite formations in near-Earth orbits. *Journal of Guidance Control, and Dynamics*, 2012, 33(6): 1883-1891
- 169 Kwon DW. Propellantless formation flight applications using electromagnetic satellite formations. *Acta Astronautica*, 2010, 67(9): 1189-1201
- 170 Schweighart SA, Sedwick RJ. Explicit dipole trajectory solution for electromagnetically controlled spacecraft clusters. *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 2012, 33(4): 1225-1235
- 171 Elias LM, Kwon DW, Sedwick RJ, et al. Electromagnetic formation flight dynamics including reaction wheel gyroscopic stiffening effects. *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 2007, 30(2): 499-511
- 172 Ahsun U, Rodgers L, Miller DW. Comparison between structurally connected propellant formation flying and electromagnetic formation flying spacecraft configurations for Gen-X mission. Optics and Photonics 2005, San Diego, USA, 2005
- 173 Hussein I, Bloch A. Stability and control of relative equilibria of three-spacecraft magnetically tethered systems. AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference and Exhibit, Honolulu, Hawaii, 2008
- 174 Huang H, Zhu YW, Yang LP, et al. Stability and shape analysis of relative equilibrium for three-spacecraft electromagnetic formation. *Acta Astronautica*, 2014, 94(1): 116-131
- 175 Zeng G, Hu M. Finite-time control for electromagnetic satellite formations. *Acta Astronautica*, 2012, 74(3): 120-130
- 176 冯成涛, 王惠南, 刘海颖. 磁控小卫星编队飞行的非线性控制. 传感器与微系统, 2009, 28(3): 54-57
Feng Chengtao, Wang Huinan, Liu Haiying, et al. Non-linear control for electromagnetic formation flight of multi-satellites. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2009, 28(3): 54-57 (in Chinese)
- 177 Peck MA, Streetman B, Saaaj CM, et al. Spacecraft formation flying using Lorentz forces. *Journal of the British Interplanetary Society*, 2007, 60(7): 263-267
- 178 Yamakawa H, Mai B, Yano K, et al. Spacecraft relative dynamics under the influence of geomagnetic Lorentz force. AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference, Toronto, Canada, 2013
- 179 Shu T, Mai B, Yamakawa H. Spacecraft formation flying dynamics and control using the geomagnetic Lorentz force. *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 2015, 36(36): 136-148
- 180 Pollock GE, Gangestad JW, Longuski JM. Analytical solutions for the relative motion of spacecraft subject to Lorentz-force perturbations. *Acta Astronautica*, 2011, 68(1): 204-217
- 181 Streetman B, Peck MA. New synchronous orbits using the

- geomagnetic Lorentz force. *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 2007, 30(30): 1677-1690
- 182 Gangestad JW, Pollock GE, Longuski JM. Lagrange's planetary equations for the motion of electrostatically charged spacecraft. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 2010, 108(2): 125-145
- 183 Sobiesiak L, Damaren C. Hybrid periodic differential element control using the geomagnetic Lorentz force. AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference, Minneapolis, Minnesota, 2013
- 184 Sobiesiak LA, Damaren CJ. Optimal continuous/impulsive control for Lorentz-augmented spacecraft formations. *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 2015, 38(1): 151-157
- 185 Ludwik AS, Christopher JD. Controllability of Lorentz-augmented spacecraft formations. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2015, 38(11): 2188-2195
- 186 Leonard CL, Hollister WM, Bergmann EV. Orbital formation keeping with differential drag. *Journal of Guidance Control, and Dynamics*, 2012, 10(10): 755-765
- 187 Reid T, Misra AK. Formation flight of satellites in the presence of atmospheric drag. *Journal of Aerospace Engineering*, 2011, 3(1): 64-91
- 188 Lambert C, Kumar BS, Hamel JF, et al. Implementation and performance of formation flying using differential drag. *Acta Astronautica*, 2012, 71: 68-82
- 189 Pérez D, Bevilacqua R. Differential drag spacecraft rendezvous using an adaptive Lyapunov control strategy. *Acta Astronautica*, 2013, 83: 196-207
- 190 Varma S, Kumar KD. Multiple satellite formation flying using differential aerodynamic drag. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2015, 49(2): 325-336
- 191 Horsley M, Nikolaev S, Pertica A. Small satellite rendezvous using differential lift and drag. *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 2013, 36(2): 445-453
- 192 Deng S, Meng T, Jin Z, et al. Nonlinear programming control using differential aerodynamic drag for CubeSat formation flying. *Front Inform Technol Electron Eng*, 2017, 18(7): 867-881
- 193 Bae YK. A contamination-free ultrahigh precision formation flying method for micro-, nano-, and pico-satellites with nanometer accuracy. Space Technology and Applications International Forum, 2006
- 194 Tragesser SG. Static formations using momentum exchange between satellites. *Journal of Guidance Control, and Dynamics*, 2009, 32(4): 1277-1286
- 195 Joslyn TB, Ketsdever A. Constant momentum exchange between microspacecraft using liquid droplet thrusters. 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Nashville, USA, 2010
- 196 Ketsdever A, Schonig JA. Constant momentum exchange to maintain spacecraft formations. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2015, 49(1): 69-75
- 197 Ivanov D, Ovchinnikov M, Shestakov S. Satellite formation flying control by mass exchange. *Acta Astronautica*, 2014, 102: 392-401
- 198 Shestakov S, Ivanov D, Ovchinnikov M. Formation-flying momentum exchange control by separate mass. *Journal of Guidance Control, and Dynamics*, 2015, 38(8): 1-10
- 199 Macdonald M, Innes CMC. Solar sail science mission applications and advancement. *Advances in Space Research*, 2011, 48(11): 1702-1716
- 200 McInnes CR. Solar Sailing: Technology, Dynamics And Mission Applications. Berlin: Springer-Verlag, 1999
- 201 Biggs JD, McInnes C. Solar sail formation flying for deep-space remote sensing. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2009, 46(3): 670-678
- 202 Gong S, Baoyin H, Li J. Solar sail formation flying around displaced solar orbits. *Journal of Guidance Control, and Dynamics*, 2012, 30(30): 1148-1152
- 203 Gong S, Li J, Baoyin H. Formation flying solar-sail gravity tractors in displaced orbit for towing near-Earth asteroids. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 2009, 105(1-3): 159-177
- 204 Gong SP, Li JF, Baoyin HX. Formation around planetary displaced orbit. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2007, 28(6): 759-767
- 205 Gong S, Ge YF, Li J. Solar sail formation flying on an inclined Earth orbit. *Acta Astronautica*, 2011, 68(1): 226-239
- 206 Mu J, Gong S, Li J. Coupled control of reflectivity modulated solar sail for geosail formation flying. *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 2014, 38(4): 740-751
- 207 Smirnov GV, Ovchinnikov M, Guerman A. Use of solar radiation pressure to maintain a spatial satellite formation. *Acta Astronautica*, 2007, 61(7): 724-728
- 208 曾志峰, 汤一华, 陈士槽等. 基于行为的太阳帆群编队方法. 西北工业大学学报, 2012, 30(1): 44-49
Zeng Zhifeng, Tang Yihua, Chen Shilu, et al. A better formation planning algorithm of solar sail swarm based on behavior. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2012, 30(1): 44-49 (in Chinese)