

未来空间探测中的 航天器集群及集体智能

李勇 中国空间技术研究院 钱学森空间技术实验室



图1 计算机互联网改变了世界

一、前言

近五十年的科技革命以信息科学技术和空间科学技术的突破为特征和代表。在信息科技领域，通过允许计算机利用分布式网络进行通信和操作来增强其应用能力，这一想法导致了互联网的发明，如今互联网对于全球数十亿人的工作和生活已不可或缺（图1），而进一步发展的云计算与云服务使其构成可以集全球智慧的虚拟基础设施造福人类（图2）。由信息科技发展而来的“以网络为中心”的思想目前已推广应用到许多工程领域，如能源领域的智能电网等。近十年来，如何在空间科学技术和工程领域实现多航天器协同组网以形成更高效开放、灵活适用、快速响应、易于重构的空间系统成为航天领域国内外的研究热点。

从发展的观点来看，与计算机体系类似，



图2 云计算与云服务造福人类

空间系统首先发展的是利用单航天器平台完成单任务的系统，例如地球同步通信卫星、中低轨道对地观测卫星等。单任务模式后来发展成多任务（例如干线通信、移动通信和电视广播等）的模式，航天器的规模、质量、能力和复杂性都大幅提升。第一个通过在一个任务中同时使用多个航天器实现其目标的空间系统是GPS全球导航星座（在20世纪70年代后期、80年代早期起步建设），而后发展构建的有面向移动通信应用的全球星（Globalstar）和铱星（Iridium）系统。在铱星系统中，星间链路开始起关键性作用。导航和通信星座系统为航天器集群系统的概念开辟了道路，也就是说，一个由多颗中小型航天器构成集群可以取代较大的航天器，同时可实现单一航天器无法实现的任务目标。

跨入21世纪以来，随着微电子、微机械和人工智能技术的迅猛发展，信息产业发生了翻天覆

地的变化。以相关技术的进步为基础，航天器也逐渐向小型化、低成本的方向发展，随着采用大量高新技术的手机卫星、立方星等新技术的出现，微小卫星功能密度与技术性能高、投资运营成本低、灵活性强、研制周期短、风险小的优势越来越显著，美国、欧盟等已将现代小卫星技术列为航天技术发展重点领域之一。然而，由于规模和资源的限制，在某些应用领域仅用单一微小卫星不可避免地会出现“捉襟见肘”的局面。针对这一问题，在“以网络为中心”的思想启发下，由多颗微小航天器编队或集群

飞行、协同工作而构成的航天器集群的概念被广泛接受。基于航天器集群完成复杂太空探索任务已成为当今国际航天领域的一个前沿课题，在天文观测、深空探测以及空间科学技术试验方面，美国国家航空航天局（NASA）、德国宇航中心、欧洲空间局、日本宇宙航空研究开发机构和中国国家航天局都相继提出并逐渐实施各自的航天器集群计划，航天器集群的应用与开发必将成为未来国际太空发展的战略重点。

本文以美国NASA的“自主纳型航天器集群”（The Autonomous Nano Technology Swarm，简称为ANTS）为例，分析航天器集群的应用模式和运行机理，重点剖析其对智能科学的需求，甄别集体智能与群智能的区别，并对未来空间探测中的集群航天器及集体智能的应用前景进行了展望。

二、自主纳型航天器集群系统

自主纳型航天器集群（ANTS）项目由NASA戈达德太空飞行中心（GSFC）和NASA Langley研究中心（LARC）的联合承担，目的是开发革命性

的任务体系架构，并探索人工智能技术在未来空间探测中的应用。这个项目研究的核心问题是发挥集群智能的优势，使探测飞行器和天体表面漫游器集群能高效协作以完成科学任务。

ANTS项目包括以下几项计划任务：

(1) 超小型化可寻址可重构技术SMART (Super Miniaturized Addressable Reconfigurable Technology)：使用基于四面体的微型机器人，形成成群的可重构配置的机器人探测器集群。

(2) 勘探小行星任务PAM (Prospecting Asteroid Mission)：将发射1000个皮级航天器以探测太阳系的小行星带(图3)，并收集有关特定小行星的数据。

(3) 土星自主环探测阵SARA (The Saturn Autonomous Ring Array)：将使用1000个皮级航天器，组织成10个子群，每一个都有专门的仪器，来进行土星环的原位探测，以便了解它们的组成及其形成过程。这一概念任务将需要自行配置核推进装置及其控制系统。此外，在土星环附近机动探测的要求以及航天器之间的避碰需求，使得自主操作是十分必要的。

(4) ANTS在月球基地中的应用 (ANTS Application Lunar Base Activities)：将研究NASA新开发的微型化机器人技术的应用，探索如何在月面漫游车上充分利用新技术，使其能以一种变形虫状的方式在崎岖的月面上移动。



图3 太阳系小行星带示意图

下面以ANTS项目中的PAM任务计划为例阐述航天器集群及其应用模式。PAM任务是向小行星带发射上千个皮级(约1千克)航天器，对感兴趣的科学目标进行探测。图4给出了PAM的概况。在这个任务中，一艘载有皮级航天器集群的运输飞船从地球上发射到日地拉格朗日点，再择机从这一点周围变轨飞向小行星带，然后释放航天器集群。每个皮级航天器都安装有太阳帆，利用来自太阳光线的光子压力形成主要的推进手段，同时配有微型推进器以便于各自独立机动控制。该系统中有几种不同类型的航天器，一类称为“Worker”，它们载有不同的载荷和仪器，如磁强计、X射线仪、质谱仪及可见光和红外相机等，每个“Worker”只能获取一种特定的数据；另一类称为“Ruler”，它们起统领作用，协调各个“Worker”工作，并确定探测目标；还有一类称“Messenger”，仅仅起通信作用，它们是地面测控站、“Worker”和“Ruler”之间的信使，如图4所示。ANTS系统按照不同等级进行管理。航天器集群体系中，等级划分包括“队”和“群”，“群”还包括“子群”等(见图5)。不同航天器

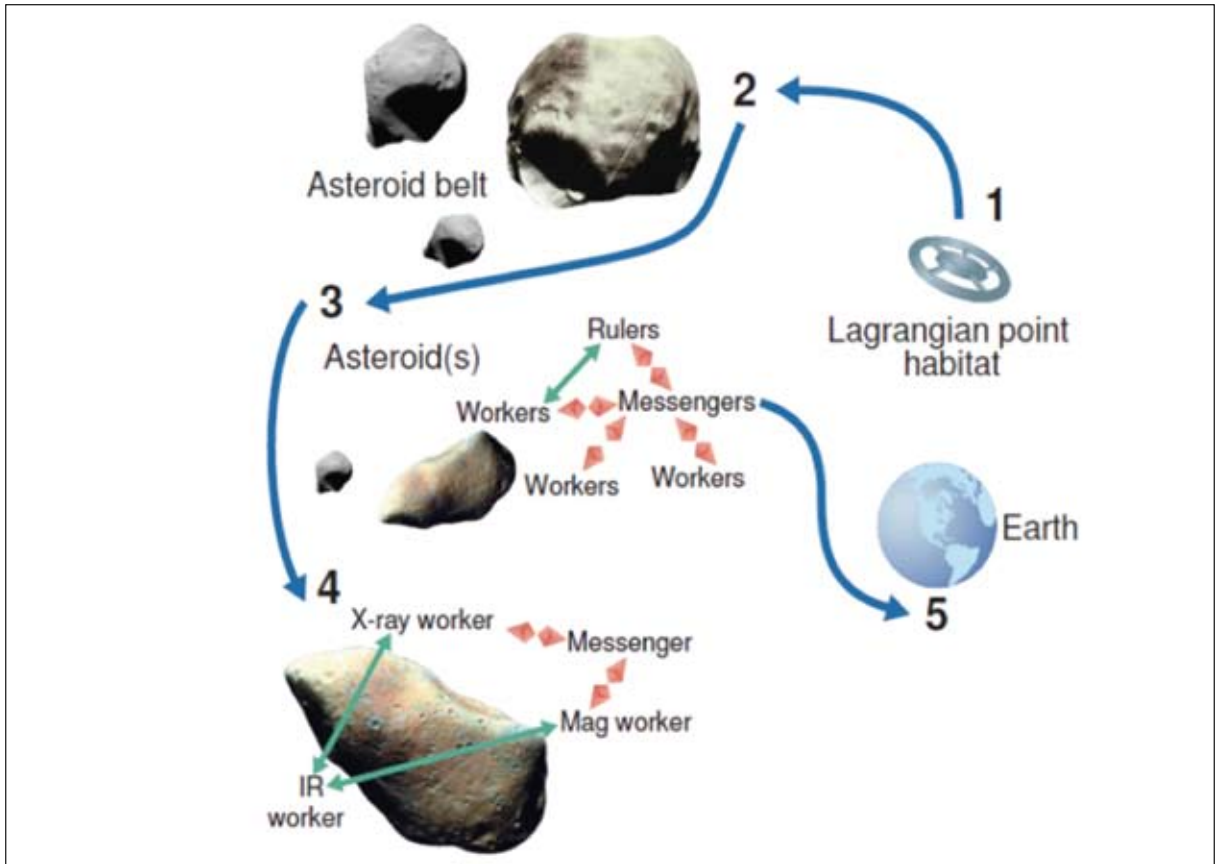


图4 ANTIS项目中PAM计划的示意图（图片来源：NASA）

装载的仪器是不同的，所以需要协同工作和共享信息才能很好地完成任务。

PAM航天器集群的工作过程是双向的。一方面可以由“Ruler”制定一个任务目标，然后把这个任务通过“Messenger”发送给各个“Worker”，“Worker”用它们的仪器探测目标，直到探测到与“Ruler”发送的目标匹配的信息，并把探测到的目标数据通过“Messenger”发送给“Ruler”；另一方面，每个“Worker”也会主动勘测所遇到的小天体，然后把信息通过“Messenger”发送给“Ruler”，由“Ruler”评估这些数据，形成一个合成的探测报告。在

ANTIS系统中，80%的成员航天器是“Worker”，当“Worker”收集到数据时，它们首先把数据发给“Messenger”，同时这些数据也可以判断“Worker”是否正常工作。

ANTIS系统飞越小行星时，需要完成多项工作，如图6所示。它们首先要确定小行星的大小、旋转轴、小行星的伴随卫星（自然的小天体）及其轨道和盘旋点等。随着获取小行星数据量的增大，ANTIS还会发射更多的子群，参与协作搜集更详细和更全面的小行星数据，各个子群的功能和配置如下：

1) “立体测绘群”由载有成像光谱仪和增强

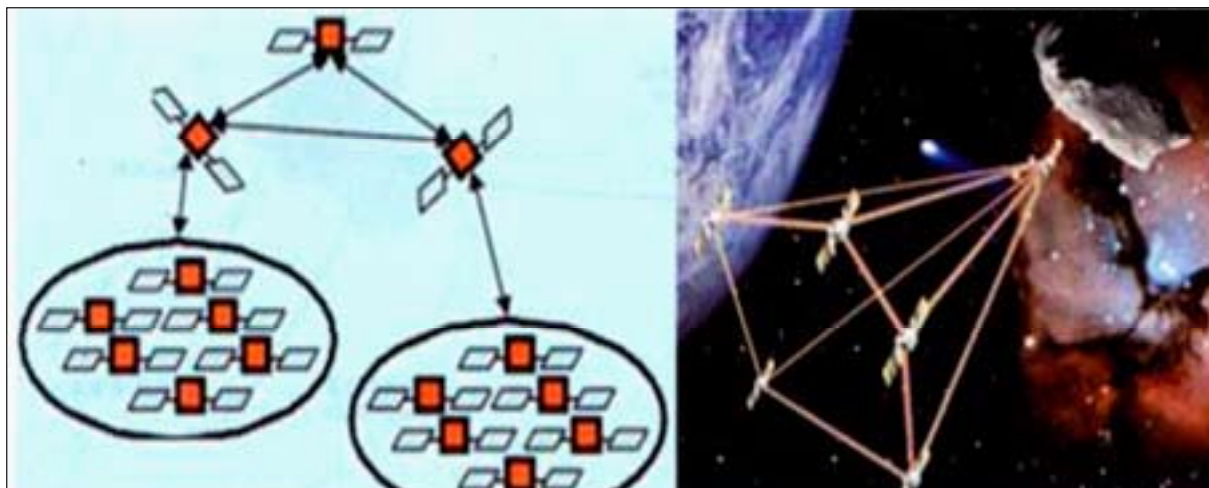


图5 PAM航天器集群的等级划分示意图（图片来源：NASA）

无线电仪器等的航天器组成，主要任务是探测小行星的一些运动和质量特性，如旋转、密度和质量分布等。

2) “岩石群”由载有X射线、红外成像仪和宽视场成像仪等的航天器组成，主要任务是探测元素、矿物质和岩石。

3) “摄影地质群”由载有窄视场成像仪、宽视场成像仪和测高仪等的航天器组成，主要任务是基于纹理、反射率、颜色和底层中的岩石组分测量小行星自然和地质分布。

4) “探勘群”由载有高度计、磁强计、近红外仪和远红外仪、X射线光谱仪等的航天器组成，主要任务是测量小行星的资源分布。

从上述的ANTS项目中PAM计划的应用场景中可以看出，无论对单个皮级成员航天器，还是对组成探测小行星的集群，都需要智能技术作为支撑。

三、智能与集体智能

对于ANTS集群中的单个航天器来说，需要智能技术以保障其完成角色任务。“Ruler”需要

一定程度的智能来了解感兴趣的小行星的属性，并避免重复探测同类型的天体。“Worker”需要一定程度的智能来在小行星带中进出时自主导航以寻找新的小行星。由于可利用所携带的太阳能帆等推进装置，许多飞行规划要求航天器进行机动，为此每个成员首先必须要有自主运行能力，以保证它不会与其他航天器及小行星相撞；其次要有自我优化能力，以保证它能高效完成事先不知道的新任务；再有要有自我配置能力，以保证它能满足在飞往小行星带的过程中定型的要求。

ANTS项目中的PAM计划需要大量的皮级航天器相互自主协同完成科学探测任务，这就需要其具备一个集合体的智能特性。我们知道，群一般指的是由分布的个体组成的群体，如自然界中的蜂群、蚁群等。而集体是群的一种，集合的整体公共目标和个体个性化目标并存的群称为一个集体，我们可以用整体效用函数和个体效用函数分别刻画这两个目标。

术语“集体智能（collective intelligence）”专指满足下面两个条件的集体形成的一种解决问题

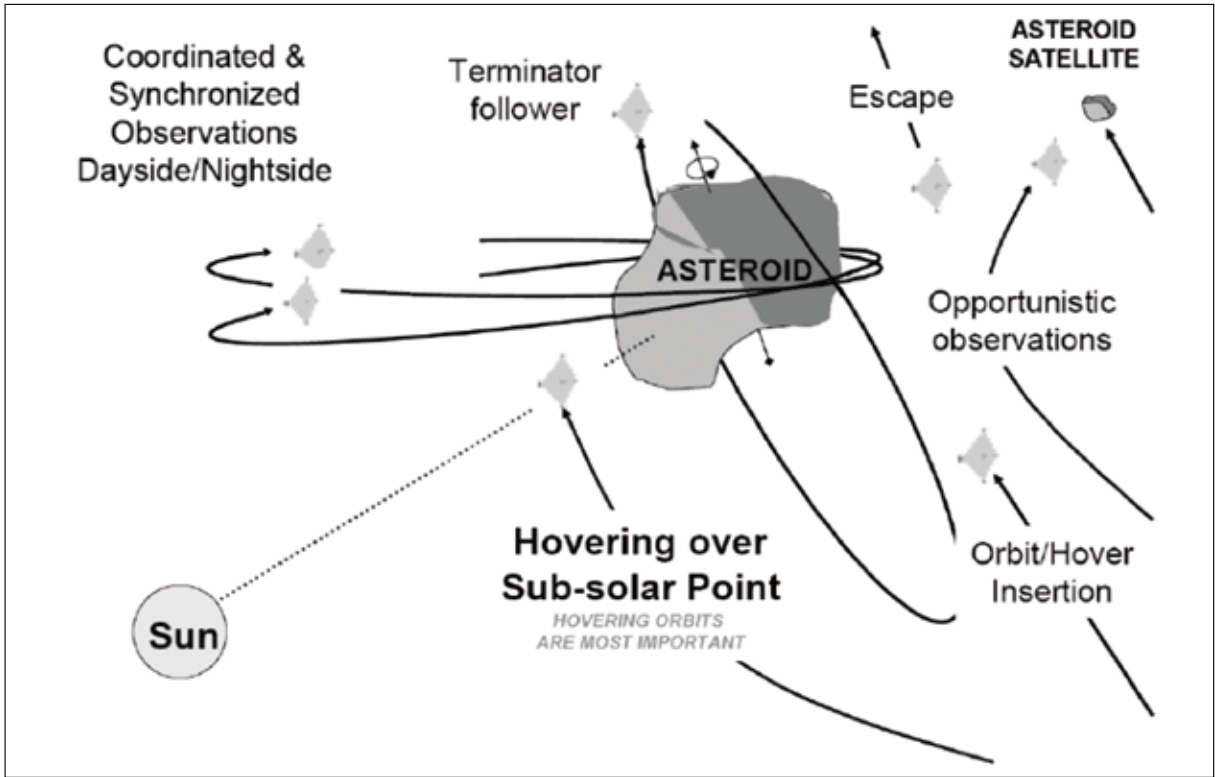


图6 PAM航天器集群协同探测小行星的示意图 (图片来源: NASA)

的能力:

1) 在几乎没有集中通信和集中控制的情况下, 成员间互动计算过程可大规模分布式地汇集;

2) 整体效用函数可以评估此汇集过程的动态性能。

集体智能是从大量成员个体的合作与竞争中涌现出来的。集体智能在动物、人类以及计算机网络中形成, 并以多种形式的协商一致的决策模式出现。需要注意, 有几个英文单词都有“群”的含义, 目前我国科技论文中, 一般“群体智能”、“群智能”对应另外一个英文术语“swarm intelligence”, 其含义与本文所讲的集体智能有所不同, 群智能通常并不要求成员个体事

先了解集合的整体公共目标。

对于单智能体系统, 机器学习方法(例如强化学习)已成功使用, 并可推广应用于单航天器任务。然而, 直接将这样的解决方案应用到多智能体系统往往是有问题的, 这是因为成员个体个性化目标可能是相互冲突的, 或者很难评估它们各自对实现集合整体公共目标所做的贡献。基于多智能体系统设计的航天器集群自主运行系统也遇到了类似的挑战, 而应用集体智能的概念有望解决这一难题, 即通过设计个体成员的新的个性化目标, 使它们与集合整体公共目标达到某种意义上的“一致”, 并且设计使个体“可学习”以看到其行为如何影响整体效用函数, 有望解决那些无法事先预见的问题。

在ANTS项目的PAM计划中，集体智能将是必要的，它可使航天器集群高效探测并形成集体的分布式知识库，例如承担绘制小行星地图任务的航天器要与其他成员分享其获取的数据，以使承担科学勘探任务的航天器开展轨道计算并形成导航和控制程序，保障探测活动有序开展；反过来，科学勘探航天器获取的信息及成员间的相对测量数据，通过星间通信链路传送给绘制小行星地图的航天器也有助于其完成工作使命。没有集体智能将使系统运行混乱，若成员个体都不顾及整体公共目标必然会造成相互干扰，甚至出现相撞等严重后果。

四、发展展望

由中国科学院完成的《2016-2030空间科学规划研究报告》，提出了至2030年我国空间科学发展战略目标及路线图。报告提出，至2030年，中国空间科学要在宇宙的形成和演化、系外行星和地外生命的探索、太阳系的形成和演化、超越现有基本物理理论的新物理规律、空间环境下的物质运动规律和生命活动规律等热点科学领域，通过系列科学卫星计划与任务以及“载人航天工程”相关科学计划，取得重大科学发展与创新突破，推动航天和相关高技术的跨越式发展。为了实现这一战略目标，报告提出了2020年、2025年、2030年的分阶段目标，并提出了一系列空间科学计划。如黑洞探针计划，目标是研究宇宙天体的高能过程和黑洞物理；天体号脉计划，旨在理解各种天体的内部结构和剧烈活动过程，主要项目包括中国引力波计划等；系外行星探测计划，拟探索太阳系外类地行星等，初步回答“宇宙中是否存在另一个地球”这一基本问题；火星探测计划，拟以全球遥感、区域巡视和取样返回等方式探测火星；“腾云”计划，研究空间特殊环境下的生命活动规律等；“桃源”计划，旨在

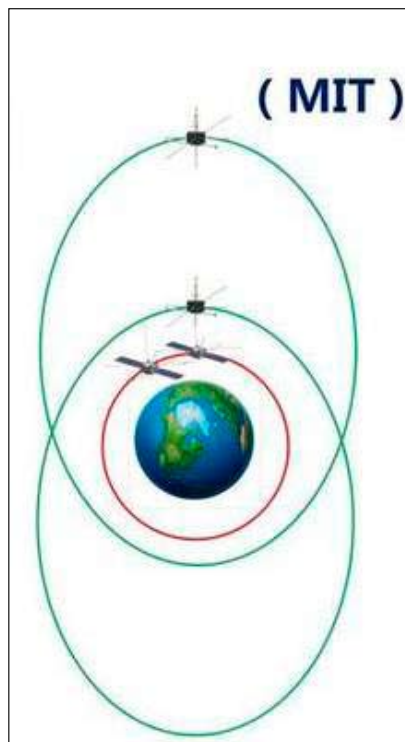


图7 中国计划发展的磁层-电离层-热层耦合小卫星星座(MIT)示意图

探索地外生命和智慧生命，研究普适的生命起源、演化与基本规律等。

为达到上述计划的科学目标，发展航天器集群并掌握其自主运行技术是十分必要的，2020年后我国将实施的磁层-电离层-热层耦合小卫星星座探测计划(MIT)就将发射多个航天器协同工作(图7)。未来我国空间探测计划也将需要与美国ANTS计划类似的大规模集群探测技术，其中集体智能理论和技术是有待突破的关键之一。集体智能技术方兴未艾，它与控制科学、人工智能、机器学习、博弈论有着极为特殊的联系，将成为越来越多应用领域的关注焦点。美国NASA正利用集体智能的最新成果，开发未来的空间探测系统。

目前人工智能发展进入新阶段。经过60多年的演进，特别是在移动互联网、大数据、超级计算、传感网、脑科学等新理论新技术以及经济社会发展需求的共同驱动下，人工智能加速发展，呈现出深度学习、跨界融合、人机协同、群智开放、自主操控等新特征。大数据驱动知识学习、协同处理、人机协同增强智能、群体集成智能、自主飞行操控系统成为人工智能的发展重点，我国新一代人工智能相关学科发展、理论建模、技术创新、软硬件升级等整体推进，必将引发集体智能在理论和航天工程应用方面的链式突破，为我国未来在空间探测领域取得国际领先地位提供坚实的技术基础。



【作者简介】李勇，中国空间技术研究院研究员，钱学森空间技术实验室首席研究员，国家国防科技工业“511人才工程”学术技术带头人，中国航天科技集团公司学术带头人，控制理论与控制工程专业博士生导师。社会兼职有中国仿真学会理事、中国自动化学会空间运动体控制委员会委员。曾获国家国防科学技术二等奖（排名1）、三等奖（排名2），在国内外核心学术刊物和国际学术会议上发表论文70余篇。近期研究兴趣为分布式航天器集群自主导航与控制。