

美国大学纳卫星计划

沈海军

(南京航空航天大学航空宇航学院)

摘要 本世纪初,由美国国防部、NASA和工业界投资,旨在验证一系列纳卫星(质量小于10kg)相关重大技术的“美国大学纳卫星计划”全面启动。该计划共包含6个子项目,分别由美国的10所大学和一个研究所承担。文中对该计划的各子项目及其一些相关技术进行了概述。

关键词 纳卫星 美国 大学 计划

纳卫星是指质量为1~10kg的小型卫星。由于纳卫星具有研发周期短、投资小、机动灵活、可靠性高、易形成星群/星座等特点,在通信、遥感、监测、气象、侦察、勘探等民用与军用领域表现出了重大的应用潜力与发展前景。

新世纪来临之际,在美国国防部、NASA以及工业界的大力资助下,美国国内的十所高校全面启动了所谓的“美国大学纳卫星计划”,参加该计划的高校有亚历桑那大学、科罗拉多大学、新墨西哥大学、斯坦福大学、克拉拉大学、犹他大学、弗吉尼亚工学院、华盛顿大学、波士顿大学、卡内基美隆大学共十所高校,期限是两年,研制的卫星数量为每个高校至少1颗。各大学的纳卫星研制成功后,统一交付美国空军研究实验室(AFRL)组装和发射。

美国大学纳卫星计划是一个庞大的工程,可分为6个子项目,即“三星”星群(3-Sat)、电磁辐射与闪光探测(Emerald)、电离层探测纳卫星编队(ION-F)、星群开拓者(CP)、太阳帆(SB)纳卫星,及纳卫星的发射与释放。表1给出了这些子项目的承担者。其中,美国空军研究实验室(AFRL)成为该计划中的唯一一个非高校承担单位。

表1 美国大学纳卫星计划子项目名称及承担单位

项 目	承担单位
“三星”星群(3-Sat)	亚历桑那大学、科罗拉多大学、新墨西哥大学
电磁辐射与闪光探测(Emerald)	斯坦福大学和克拉拉大学
电离层探测纳卫星编队(ION-F)	犹他大学、弗吉尼亚工学院、华盛顿大学
星群开拓者(CP)	波士顿大学
太阳帆(SB)纳卫星	卡内基美隆大学
纳卫星的发射与释放	美国空军研究实验室

美国大学纳卫星计划的主要目的是验证一系列与纳卫星相关的重大关键技术，如纳卫星编队飞行、星群的无线电通信、GPS 闪光、太阳风、地磁场与电离层中离子密度的测量，以及纳卫星的释放等。同时，也给一些大学在自己研制的纳卫星上从事太空试验提供了机会。该计划一旦成功，将给美国国防部、NASA，及美国军方带来不可估量的回报。

下面，笔者将分别对“美国大学纳卫星计划”的 6 个子项目及关键技术进行概述。

一、“三星”星群（3-Sat）

3-Sat 是由亚历桑那大学（ASU）、科罗拉多大学（UCB）、新墨西哥大学（NMSU）三所高校联合承担的。之所以命名为“3-Sat”，是因为项目最终将组建一个由三个相同纳卫星组成的星群。该星群的目的是验证纳卫星的对地三维成像、编队飞行、通信，以及指令与数据处理。3-Sat 中的纳卫星是由管状支撑杆和螺帽安装的六边形柱状结构。卫星四周覆盖的是太阳能电池板，内层是铝蜂窝结构。蜂窝结构通过插入式底座或标准埋头螺钉与主结构连接。卫星的电池组位于蜂窝结构中心，这样可避免苛刻环境中电池的震动。

在发射前以及发射过程中，三个纳卫星被堆叠在一起。这种设计的最大特征是便于拆卸，同时也有利于交互通用电子线路的布置。

卫星发射后，三颗卫星将彼此分离，形成一个有特定间距的直线飞行编队。3-Sat 卫星之间的距离由卫星的对地观察高度、摄像机的视野，以及所选的运载火箭而定。

立体成像是 3-Sat 的首要任务。通过多点成像的方式，3-Sat 不仅可以对山脉、湖泊等静态地形地貌三维成像，而且还可以对大气对流、云团以及沙尘暴等高动态的物体进行立体成像，并准确地得到气流或沙尘暴的形状、浓度和高度等数据。同传统的单卫星成像相比，3-Sat 获得的图像信息量大，且分辨率高，精度可达到 100m 左右。通过对流层中部到平流层底部不稳定气流的成像，3-Sat 不仅可给飞机发布对流源警报，使飞机能够准确地绕过对流源进行飞行，还可以给科学家提供地球大气系统建模所需的关键数据。不仅如此，3-Sat 还可用于对地面悬浮物，如烟雾、沙尘等的实时观测，获得悬浮物的浓度、粒子尺寸、成份，帮助人们了解当地的地理环境信息及悬浮物产生的原因。

3-Sat 要完成的另一个任务是编队飞行与彼此通信。为了完成该任务，提出了一个被称作“虚拟编队”的提议。所谓“虚拟编队”指的是星网中各卫星间的相互协作，即在无须靠近的情况下，通过通信网，实现卫星之间，以及卫星与地面控制中心之间的数据获取与传输。在这种模式下，通信网中的电磁波携带着相应的指令与控制数据，卫星所处的空间位置只需处于别的无线电通信网的“射程”之内即可。图 1 给出了 3-Sat 的“虚拟编队”示意图。图中的无线通信网为美国低轨道（LEO）公司商业卫星通信网。不管 3-Sat 的三颗卫星之间的距离有多远，只要它们处于 LEO 公司的通信网内，3-Sat 卫星之间就存在相互协作的能力。

3-Sat 还要完成的一个任务是实现卫星间的命令与数据处理。3-Sat 的命令与数据处理被设计成一个简单的分布式系统。在每颗卫星上配备一块 CPU 主板，用于数据处理与存储。三颗卫星通过通信网接受 3-Sat 中的一个 CPU 统一控制。它既可以发送指令，同时又可对

三颗卫星传来的科学数据作出响应。

3-Sat 卫星的设计还留有一定的有效载荷余量, 允许各大学安装一定的设备进行自己的空间试验。3-Sat 承担实验为美国学联 (ASU) 设计的微推进系统。该微型推进系统能够协助卫星进行姿态控制、轨道纠正、高度升降、板面偏转以及重返轨道等与编队飞行相关的任务。

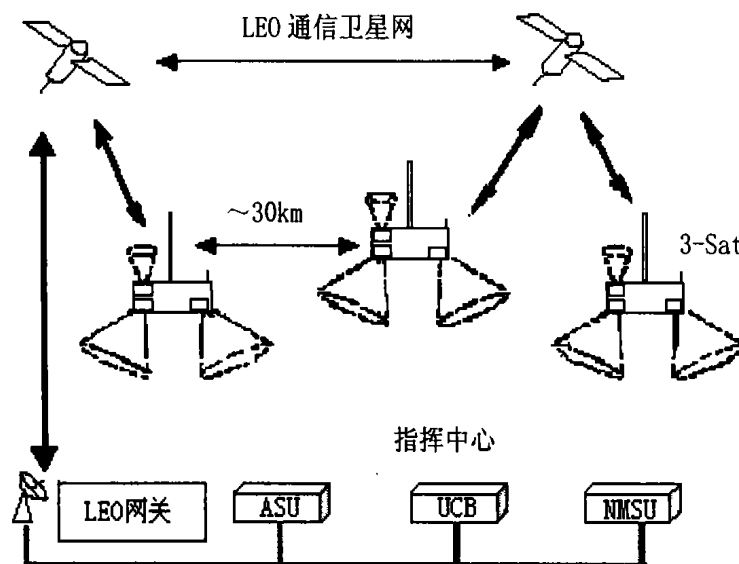


图1 3-Sat 星群虚拟编队示意图

二、电磁辐射与闪光探测 (Emerald) 卫星

卫星编队飞行是一项具有巨大科学、军事与商业价值潜力的发展迅猛的技术。它可以提高任务执行的效率, 同时又可以显著降低运作的成本。作为美国大学纳卫星计划的重要组成部分, 斯坦福大学 (SU) 和克拉拉大学 (CU) 联合承担了这个纳卫星编队飞行的电磁辐射与闪光探测 (Emerald) 项目。Emerald 项目的纳卫星共两颗, 它们由斯坦福大学空间系统实验室和克拉拉大学超精细机构实验室共同设计、建造和最终操控。编队飞行试验在斯坦福大学的空间机器人实验室进行。

Emerald 卫星的主要任务是采用超低频 (VLF) 接收器记录高空的电磁辐射与闪光, 以帮助人们理解发生于地球电离层内的自然现象。而卫星编队飞行的分布式传感方式有助于数据质量的提高。

Emerald 项目纳卫星的设计沿用了 SSDL 的传统, 卫星呈一个高 304.8mm、直径 457.2mm 的六边形柱体。这个结构使用了模块化的叠堆式铝蜂窝结构。在内部, 命令和数据操纵由一个基于摩托罗拉的 68332 抗辐射处理器来实现, 连接所有的子系统和实验设备的线路采用串行方式和 I²C 数据总线。地面通信由一个 9.6kbit/s 的信息通信系统来保证。动力系统由硅太阳能电池板和一组镍电池构成。该系统可提供调制电压 5V、功率 7W 的能源。

Emerald 项目的两颗卫星在发射时, 被叠堆在一起作为一个单独的飞行物。这便于卫星的早期检验、校对和开展一些特殊的空间实验。在运载器释放卫星时, 它们开始分开, 但两颗卫星仍由一根中部有一个质量块的几十米长的绳索或柔性杆连接。最后, 绳索将被切断, 每颗卫星将携带一半绳索和半个质量块。此间, 在一个 12 通道的地面全球定位系统指挥下, 通过两个持续时间为 1000s、推力为 0.11mN 的制导微推进器作用, 卫星将在特定时间

各自进入误差仅有2~5m的轨道，实现真正的双星编队飞行。这里，绳索上的质量块是为了增加卫星的稳定性。

三、电离层探测纳卫星编队 (ION-F)

该项目由犹他大学 (USU)、华盛顿大学 (UW) 和弗吉尼亚工学院 (VT) 共同承担。三个大学将在卫星设计、编队飞行、发展任务和科学仪器等方面资源共享。ION-F由三个重10kg的纳卫星组成，用于研究卫星间的协作与操纵技术，以及分布式电离层测量。ION-F还将展示一些如m-脉冲等离子推进器、磁力姿态控制、绳放系统等先进技术。除此以外，地面因特网操作中心也将被首次用于各大学对自己纳卫星的遥控。

ION-F卫星的设计结构初步定为宽203.2mm、高127mm的六边形柱体。这种布局还可以根据发射的环境条件进行调整。该结构由三个六边形铝盘和三个底盖构成。这些盘中的任意一个将作为一颗卫星的底托。能量及其控制系统分别为NICD的商用太阳能电池组和便携式电脑结构。除传感器区域以外，整颗卫星都被太阳能电池板覆盖。

地球的电离层在所有纬度、经度与高度上经常表现出密度的局部变动和波动，与低纬度季风和高纬度气流有关，对通信、航行、GPS系统有很大的影响。ION-F通过每颗卫星上的GPS接收器/发射器，可实现电离层电子密度与等离子体紊乱度的全球多星测量，帮助人们了解静止和受扰动的电离层的等离子结构分布。ION-F卫星是通过自带的两个探测仪来进行电离层探测的，一个是用来确定电子绝对密度的等离子频率探测仪，另一个是用来测量相对电子密度变化的电子饱和度探测仪。这两个仪器体积较小，能耗低，对纳卫星本身的影响也较小。另外，通过GPS接收器/发射器，在各ION-F纳卫星之间发射高频信号，并根据信号在电离层内的衰减，还可对电离层中的闪烁进行测量。

ION-F卫星编队飞行与姿态控制是ION-F的重要使命之一，因此，最少要求其中的一些卫星有推进及姿态控制能力。ION-F的UW纳卫星已决定采用美国航空航天公司的脉冲等离子推进器，USU卫星将尝试使用微拖技术，而VT卫星则正在考虑采用AFRL的基于MEMS的胼微推进器。各卫星的姿态调整均由先进的永磁体磁控电动机来完成。为提高卫星稳定性而在外部增加一定质量的绳索也可提供卫星姿态的微调。

通信网也是ION-F要优先考虑的问题，ION-F卫星将实现卫星彼此之间的通信，以及GPS信息与姿态信息的交换。USU基于网络的地面控制站已被建成。另一个地面站，初步定在VT，也正在筹建之中，即时将为ION-F的遥测、跟踪服务。由于ION-F对纳卫星的性能要求很高，因此，设计过程中没有额外设备功率和质量预算。UW-VT-USU小组有意向采用自己设计的飞行控制与编队方案，并在运作上采用NASA戈达德航天中心提出的协作控制方法。

四、星群开拓者 (CP) 卫星

在太空中布置数百颗纳卫星，可获得详细的地球上空的三维动态图像、电离层与自然

辐射环境等相关信息。探险者计划（CP）将为这一目标的实现迈出第一步。CP项目由波士顿大学（BU）承担，其前期工作是该校的磁测绘任务（MMM）计划。CP将论证同时制造并投入使用1~3个质量小于1kg卫星的可行性。考虑到最终将涉及大量的卫星（大数量卫星可增加可靠性，一些卫星失败了也仅是减少了一些数据源而已，整个任务仍可以照常进行），因此，CP对质量和能耗都提出了严格的要求，制造必须做到装配、集合和校对简单、精确。

CP纳卫星的外形为圆柱体。圆柱体的外表面为GaAs太阳能电池板，圆柱的中心为一组镍电池。RF天线位于圆柱的轴线，卫星高速自转使天线和黄道面夹角始终保持在 $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 。一个磁力仪安放在卫星的底部，它和太阳传感器配合，用于确定卫星的自转方向（图2）。CP卫星将最终由航天飞机发射，卫星发射后，将能够在1~4个月的任务期内收集并向地面发回海量的科学与工程数据。除此之外，CP卫星还将演练卫星间协作、相互通信等具有重大科学与军事意义的任务。

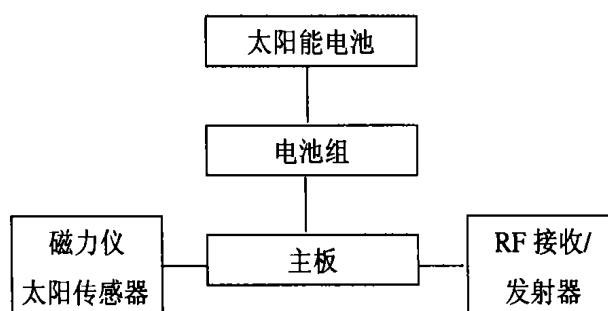


图2 CP纳卫星及其模块布置

五、太阳帆（SB）纳卫星

太阳帆（SB）的概念已经存在数十年，但是要真的实施却并不容易，主要的困难是高的表面/质量比。传统设计的卫星质量常高达数百千克，因而需要数千米长的帆，这是不合理的，也是不可能制造和实施的。纳卫星的质量大为减小，使这种垂直飞行技术成为可能。

卡内基梅隆大学此次研制的SB卫星将以太阳能辐射压力作为电力，使卫星实现高度、姿态、自转速度和轨道位置的调整。卡内基梅隆大学的SB卫星看起来有点像荷兰的风车，卫星质量小于5kg，组装后与灭火器的大小相当，其控制类似于直升机。四个SB从卫星中央辐射状安装并绕辐射轴转动。SB收集来自太阳射线并产生周期性的动力。

SB纳卫星的核心部件包括：计算机、通信系统和姿态调整等部件。四个C形梁连在核心部件上并向四周伸展，太阳能电池被嵌在C形梁中，可提供28W的电力。四个SB桨叶分别通过一个连接件同这些梁联接，并由一个微型的无刷电机带动。每块SB叶片长20m、宽1m、厚 $8\mu\text{m}$ ，材料为铝合金。SB叶片边缘用 $80\mu\text{m}$ 厚的增强纤维来改善叶片的硬度和耐磨性。

SB卫星内部还有通信系统和地面站联络传感器，它们通过椭圆形截面的细梁同卫星的主结构连接。连接太阳能电池和其它子系统的线路采用薄柔性印刷电路。

卡内基梅隆大学的SB卫星的任务不仅在于论证SB卫星的姿态、速度与轨道调整，还将演示这种超轻型卫星与地面之间的通信、指令、轨道和姿态信息的传递。

（下转第50页）

TSAT 的经费削减了 1 亿美元。军方抱怨这会导致研制进度推迟 9 个月。TSAT 到 2016 年的总经费需求为 180 亿美元, 包括卫星、地面控制设备、卫星运行中心, 以及运行和维护费用。

2004 年 11 月, 美国防部将在 AEHF 和 TSAT 之间做出取舍。如果进展顺利, 就继续研制 TSAT; 否则就再追加 2~3 颗 AEHF 卫星的采购合同, 并于 2007 年开始发射。

根据美国相关资料对 TSAT 的描述, 我们可以获得如下几点结论。

第一, 美军的作战体系和指挥体系已经发生了深刻变化, 多兵种合成已经获得深度发展, 美军目前有“军事星”、“国防通信系统”(DSCS)、“UHF 后继星”等多个卫星通信系统, 还租用了“铱”系统。这些系统之间不但协议不同, 频率不同, 而且终端不同。在阿富汗山区执行任务的美军特种兵分队往往由来自陆军、空军、海军和军事情报部门的军人组成, 他们为了和各自的上级通信, 要携带不同的卫星终端, 往往一个小分队要带 6~7 个终端, 官兵深有怨言。而且在可预见的未来, 美军将大量进行这种多兵种深度合成的作战行动。卫星通信终端的通用化是必要的。

第二, 互联网经过 20 多年的发展, 特别是近几年的爆炸性成长, 已经取得了长足的进步, 人类几乎所有的通信工具都在逐步具备上网的功能, 包括计算机、手机、掌上电脑等, 接入方法已经覆盖了有线电话、计算机网络、蜂窝式无线通信、卫星等。任何人在任何地点, 以任何方式, 只要能接入网络, 就可以同网上的任何人通信。这正是美军方想要的通信形式, 更重要的是提供了成熟可靠的技术思路。采用互联网上已经成熟的技术和方法, 设计全新的军用通信系统, 这是近年来美军的一个明显倾向。在 GBS 的设计中, 美军就采用了商用电视直播的技术。以民强军, 借鉴商用系统的理念和技术, 甚至直接采用商用产品, 这是美军在信息通信领域的一个发展趋势。

第三, 核心技术仍然有待攻关。在美国总审计署的报告中, 指出有几大关键技术没有成熟。空间激光通信技术已经研究多年, 仍然不能顺利运用。尤其是天对空激光通信技术更是难度极大, 恐怕会成为整个 TCA 发展的“拦路虎”。□

////////////////////////////////////

(上接第 32 页)

六、结 论

微型化是当代卫星技术的发展趋势, 纳卫星/星群将在未来的经济、通信、航空航天、军事等领域中发挥无法估量的作用。近年来, 我国哈尔滨工业大学、清华大学等已开始了小卫星的研发工作, 已取得可喜的成就, 但不管是从规模, 还是从研究的深度、广度上都和美国的大学纳卫星计划具有巨大的差距。美国的大学纳卫星计划的这种模式值得学习和借鉴, 其发展思路值得思考。现在, 世界各发达国家的纳卫星的研究发展如此迅猛。不前进或发展缓慢就等于退步, 要快速发展我国的纳卫星技术, 高校应成为其中流砥柱。□