

欧空局EE10“和谐”卫星： 如何让地球系统观测走向和谐？

■ 贾朋群 关敏 张萌

气象学界长期关注的海气相互作用过程，如果用放大镜审视其中的细节，不难发现，是千米尺度过程在主导这样的交换。实际上，这样的中小尺度过程，已经被一些卫星“看见”，然而这些观测只能给出2D应力分布，和谐卫星的设计者则通过将这些微小尺度过程与环境条件（如风速和云结构等），试图获得更精准信息。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2022.05.001

2022年7月5日，全球地球观测（EO）学界都在关注一次看似普通的会议——欧空局（ESA）在位于荷兰的欧洲空间研究与技术中心（ESTEC）召开的和谐卫星（Harmony）用户研讨会。该卫星作为ESA的地球探索者（Earth Explorer）系列项目的第10项的唯一候选者，能否最终被立项，本次会议会给出风向标。

和谐卫星的设计，瞄准地球系统中的应力，为解析地球多个圈层之间的相关作用，提供新的观测视角和理念。和谐卫星技术概要，在图1中给出。

和谐项目的2颗卫星的重量，均在300 kg以内，按照国际上流行的卫星划分，属于小型卫星。和谐项目的设计特点，一是与在轨的哨兵-1卫星同步飞行、协同观测，更加充分发挥了哨兵-1 SAR设备的功能；二是两颗和谐卫星通过围绕哨兵-1卫星的两种位相工作

方式的转化，生出很多天基探测器观测新视角和新方式。和谐项目正是在这些方面的探索，实践EE项目设计的真谛，值得全球气象界参考和借鉴。

1 海气交换：和谐卫星的主要发力点

和谐卫星的设计，其科学创新和意义，主要是以地球环境中几乎无处不在的应力为抓手，试图解析（次）千米尺度的运动矢量。而这样的目标，在海洋上，涉及低层海洋和对流层低层大气，以及二者界面上发生的热量、气体和动量的垂直传输和混合，而海洋和大气的极端现象的内部结构，也与这样的输送密切相关。这些要素或许早就被气象和海洋学家所重视，但在千米尺度上这些过程的观测，尤其是在垂直方向上缺失有效方法，在很大程度上限制了海气相互作用研究的深入。

1.1 MABL（海洋大气边界层）

气象学界长期关注的海气相互作用过程，如果用放大镜审视其中的细节，不难发现，是千米尺度过程在主导这样的交换。实际上，这样的中小尺度过程，已经被一些卫星“看见”（图2），然而这些观测只能给出2D应力分布，和谐卫星的设计者则通过将这些微小尺度过程与环境条件（如风速和云结构等），试图获得更精准信息。

1.2 云

与MABL中各种千米过程联系最为紧密的可见现象，非云莫属。和谐卫星为了更好地监测MABL中的各种过程，

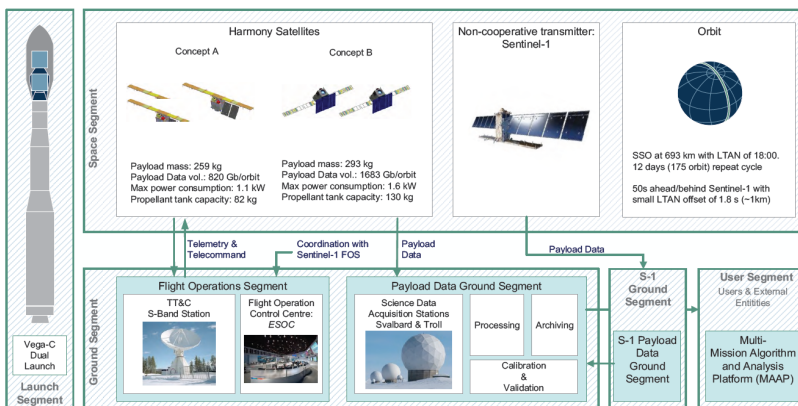


图1 和谐项目2颗卫星（哨兵-1为共同组网卫星）的主要技术指标和地面系统概览（和谐2颗卫星为太阳同步极地轨道，轨道设置与哨兵-1卫星相同，轨道高度693 km，交点地方时18:00；和谐卫星上携带2个有效载荷，分别是SAR和红外热光学载荷；地面系统包括卫星测控和运行中心、数据接收和处理中心，和哨兵-1卫星地面系统协同运行，并共同开展应用）

资助信息：国家自然科学基金（42142009）

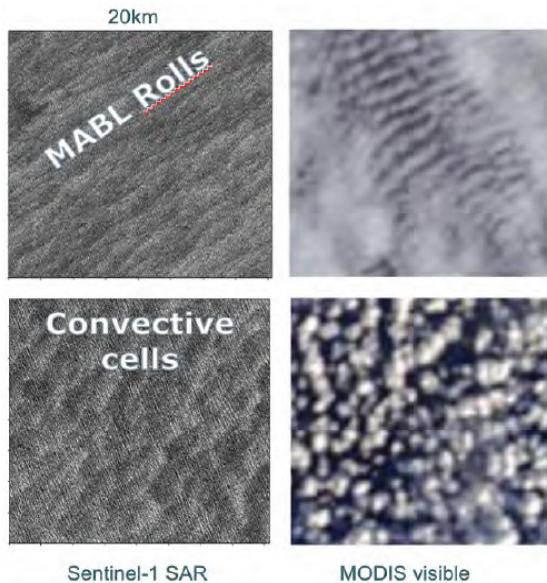


图2 哨兵-1的SAR及MODIS解析的MABL过程

选择云作为指示物：即确定的过程导致不同环境条件下完全不同的云类型，并能强烈影响通量。

云在不同环境条件下演绎的形态变化，实际上反应了边界层中千米尺度过程的综合结果。和谐研发人员认为，如果能够观测到云顶位置和云速，就能获得成云信息和相关的地表特征。如何测量单体尺度并不大的云参数，和谐卫星以双星伴哨兵卫星的配置和选择不同的观测模态，用简单的立体几何原理，反推关键云参数（图3）。

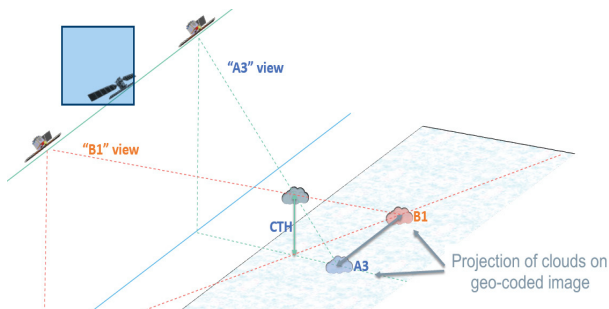


图3 和谐A星和B星的视线因云高(CTH)在地理编码参考图像中留下分离的投影A3和B1

1.3 飓风和中纬度气旋

和谐卫星的一个主要探测方向，是极端天气事件。而海洋和大气“合力”制造的一个重要事件，就是飓风。涉及MABL的多种过程，无疑是飓风和气旋的“发动机”或“刹车器”。

无论是热带气旋还是中纬度涡旋，其结构对于我们认识其演化过程，包括与海洋上层的反馈过程，都是十分重要的。以飓风为例，其垂直方向可以覆盖几乎整个对流层范围，达到15 km的高度，但其重要能

力来源，却更多地与垂直范围在1~2 km的MABL紧密联系在一起。

2 冰雪圈

和谐卫星针对地球冰雪圈的探测，主要发挥星上载荷和双星位置优势，围绕冰雪圈一些关键、变化速度相对慢的要素展开：3个主要任务为3D冰动力、气候变化和快速冰川动力变化，2个二级任务为海冰变形和冻土侵入和沉淀。

冰雪圈中冰雪量的体积变化，是冰川和冰盖物质平衡的结果。其中的变化有相对慢和快的节奏，其中相对慢的变化，是典型的气候变化驱动；而相对快速的变化，则是慢变化累计结果。一个典型的例子是冰川崩溃，能够带来灾难性的后果。

针对冰雪圈的变化，多颗卫星已经开展的卓有成效的天基遥感观测冰获得了大量冰雪圈变化信息。和谐卫星加入其中，实际上是要在这类观测的时空分辨率上有所突破（图4）。

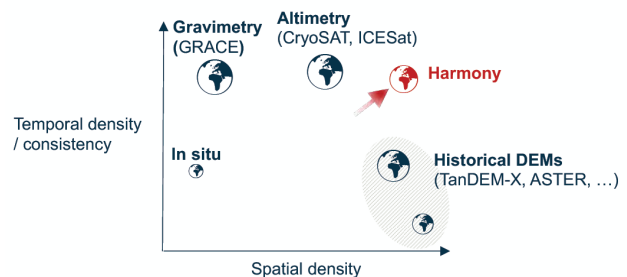


图4 实地和卫星对冰雪圈的探测涉及全球(大图标)和局地(小图标)尺度和不同的时空分辨率(红色标注和谐星的位置)

和谐卫星研发团队认为，冰的垂直流动，是解决冰雪圈质量变化和冰动力学，以及冰川突变的关键所在。为此，和谐卫星瞄准数百米冰雪范围的次冰川(subglacial)过程，先不考虑冰盖变化猜想给出冰川表面3D运动图像。这样的观测和相关的研究，最终能够更加准确地对冰川表面运动给出更加准确和清晰的解析。

3 固体地球

虽然地震和火山等，是塑造地球表面的主要过程，但是这类长时间孕育和短时间爆发的地球物理过程，长时间以来很难被主要关注大气层的气象学界真正考量。实际上，汤加火山喷发，向大气中排放大量水汽等物质，以及各种量级的地震带来的地表特征和过程的改变等，已经被纳入地球系统模拟需要考虑和解析的要素之中。

如前所述，和谐卫星的主要特色之一，就是针对固体地球，开展针对地壳过程和地震灾害的3D速度探测，以及针对地形变化(Topographic Change, TOC)开

展针对火山喷发过程的监测。如前所述，为了对固体地球开展有效探测，和谐卫星设计了“立体声”和XTI(跨轨道干涉)两个观测位相工作方式展开观测(图5)。

3D Velocity (TDV)

> Constrain tectonic processes and seismic hazard



Topographic Change (TOC)

> Constrain eruptive processes at volcanoes

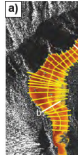


图5 和谐卫星针对不同的固体地球过程，利用“立体声”和XTI模式开展观测

和谐卫星伴随的哨兵-1卫星，也针对固体地球开展了观测，但和谐卫星将在哨兵卫星-1对灾害区域覆盖43%的基础上，达到全球灾害区域的100%覆盖。

4 和谐卫星有望实现“一(组)星”多圈层、千米精度探测

如前所述，两颗和谐卫星携带的多通道、多角度热红外仪器，主要通过两颗卫星与“依附星”哨兵-1号相对位置的编队设计和两个观测模态的转换，实现测量千米尺度云层、海面温度变化乃至固体地球和冰雪圈多变量精密化探测的功能。其中，在海洋表面和海洋一大气边界层之间相互作用探测方面，尝试前所未有的天基观测视角。通过双星编队得到的能力，具有独特的潜力，可以同时测量海面风、波浪和海流，以及海温和云高、云运动矢量，从而提高对海气相互作用的理解。

4.1 和谐卫星两次改变位相工作方式，实现快、慢观测兼顾

和谐卫星将在5年的设计寿命期里，两颗卫星将在两种编队，即位相工作方式之间切换2次，以聚焦不同的科学目标。按照计划，双卫星组合将先以XTI(跨轨道干涉)位相工作方式运行一年。在此期间，两颗和谐卫星近距离编队飞行实现跨轨道干涉观测，可以获得地表高度的时间序列。在XTI方式飞行一年后，和谐卫星组将被重新配置为“立体声”位相工作方式飞行三年。在“立体声”阶段，一颗和谐卫星在“哨兵-1”之前飞行，另一颗卫星尾随“哨兵-1”。两颗和谐星与“哨兵-1”卫星轨道相同，位相前后分别相差50 s，到哨兵卫星的距离将在350~400 km。三颗卫星在相同轨道上的不同位置对同一目标观测，实现多角

度且同时观测，“立体声”的效果最大限度地提高了对运动中的云层等的观测有效性。最后，该任务将在最后一年回归到XTI方式，可以观察到与第一年相比缓慢的地形变化。

在立体声阶段，和谐卫星利用视线之间的角度多样性，用不同卫星在同一空间轨道不同位置对同一目标多次观测的几何关系，推导得出表面上的速度矢量(应力)。和谐卫星可实现从瞬时(洋流)到年份(冰川运动)不同时间尺度的速度信息。为了观测瞬时运动，和谐双星设计了多孔径SAR天线。来自多孔径的信号可以组合在一起优化SAR图像的辐射质量，也可以对它们进行处理实现沿雷达视线方向的地表瞬时速度测量。通过把两颗卫星获取的沿视线方向速度矢量结合起来，就可以实现海洋表面的二维速度矢量测量。在陆地上，通过比较不同时间拍摄的SAR图像(使用一种称为重复轨迹干涉测量法的技术)，雷达可以用来探测地表沿视线方向的缓慢运动。结合两颗和谐卫星和哨兵-1卫星升轨和降轨信息，可推导出缓慢移动的表面(如冰盖和构造板块)的三维运动矢量。

同样在“立体声”阶段，和谐卫星还使用热红外仪器观测海洋和云，给出高分辨云运动矢量的估计。在无云区域提供海面温度，以辅助SAR对海洋表面的观测。两颗和谐卫星提供的多视图和观测几何结构的独特组合，为进行立体观测和延时观测提供了可能性。在XTI阶段，两颗和谐号卫星将以近距离编队飞行，形成一个所谓的单通干涉仪。由于垂直于视线的星间距离分量，两颗卫星SAR载荷将从略微不同的角度观察地表，这使得两颗卫星干涉测量后即可估计地表高程及其变化。正是这样位相工作方式的变化，使得和谐卫星能够获得跨圈层、多变量，以及千米尺度的信息。

4.2 和谐卫星要实现设计功能面临很多技术挑战

一些挑战有工程上的，如需要发射装置使两颗星能在一个单独发射器单元里被送入既定轨道；卫星上合成孔径雷达天线的设计，要使仪器能够支持项目的科学目标所需的各种观测模式和配置，同时满足严格的星体质量和体积的约束；确保“哨兵-1”的松散编队飞行和两颗“和谐”卫星之间的近距离编队飞行安全等。一些挑战涉及任务的整体性，如需要定义一个任务计划，以便在平台可用资源(最显著的数据量)范围内为所有科学目标服务，并考虑哨兵-1观测的现实情况；还需设计多普勒(地表速度)观测系统，包括弹性变形控制等配合和谐卫星数据处理等。还有一些挑战是技术实现方面的，如克服和谐双星上的SAR时钟

与哨兵-1卫星时钟不同步带来的问题；要实现热红外（TIR）观测所需的性能，要同时保持仪器的低复杂性和使用低成本的微辐射热计探测器等。

此外，因为和谐项目与已经在轨的哨兵-1卫星任务密切相关，还需要考虑在成本和进度限制内拟合任务的方案边界条件。后者的动力来自于使用哨兵-1D飞行的需求。这两种约束使得必须使用成熟的技术来实现和谐运行，以便承担尽可能小的技术风险。SAR和TIR仪器都遵循了这一设计理念。

4.3 和谐卫星技术已经成熟

尽管和谐卫星被送入轨道前面临一些挑战，但该项目的科学准备已经基本成熟，这主要体现在和谐项目在整个a阶段，任务和研究目标基本保持稳定。在专门的科学试验活动中，和谐卫星的一些技术难点和性能等，已经取得了显著改进。

已经确定了一些需要在和谐任务后期进一步发展的领域，如和谐星的观测要允许在时间尺度上进行独特的测量，从几十毫秒（测量洋流）到几年（测量固体地球表面运动）。虽然和谐卫星引入创新的观测技术（多静态SAR、多视角TIR），但该项目依然可以通过成熟的技术实现，并从以前的任务和正在开发的任务中获得大量遗产。目前和谐卫星正在进行的预开发和关键技术包括：1）SAR天线的前端散热器；2）SAR天线的接收模块；3）SAR仪器的静态同步解决方案。

4.4 和谐卫星带来更多启示

欧空局以着眼于应用的天基遥感基础科学研究为出发点，设计了地球探索者（EE）系列项目并从2009年开始实施。EE大约以每3年左右的时间确定一个项目的速度，通过线索征集、多轮筛选和论证，最后确定项目，并大约在经过5年以上的时间实施。这一看似缓慢的研发节奏，实际上是一个让最新科学理念与最新空间技术充分碰撞，滋生出瞄准业务能力更新的最佳节奏。这些可以从已经完成、正在实施和将要发射的EE1-EE9项目中得到验证。

过去十年中，EO发生了重大变化，借助EE项目，ESA继续扮演了推动欧洲乃至全球EO卓越和创新，带来了有益于科学和社会的新发现和机遇。ESA的前沿EE项目与欧洲哥白尼计划一道，完成了很多突破性的地球科学成就，使得欧洲在大数据分析和人工智能驱动的数字革命中走在了前端，成为不可小觑的力量。从EE10和谐卫星理念的新意和一些细节，可以得到很多启发。

首先，一颗“神设计”卫星或改变交叉学科面貌。和谐卫星的设计理念，是找寻控制地球系统的应力并

将其变化规律全面展示出来。例如，在海气耦合领域，和谐卫星的观测集中在千米尺度和垂直方向上，因关注圈层间的应力带来各类高空间分辨率的“通量”的大量结果，或许能从构造模式最佳参数化方案以及数据驱动两个方面，改进天气、气候和海洋动力模拟技术，更多高质量的分析预报产品则是突破后的收获。

此外，和谐卫星的设计是用类同揭露本质。地球是一个高度动力化的系统，能量和物质的运输和交换受多种过程和反馈机制的调节。如果不充分考虑小规模过程，就无法理解或模拟地球系统。和谐卫星探测包括了陆地（如陆地表面形状的微小变化）和海洋（如首次提供风、波、表面流、海面温差和云运动矢量的同时测量）类似过程，从而实现动力过程细节的揭露。

最后，和谐星具有灯塔意义。和谐卫星的设计思想和观测思路、能力展示，征服了与会专家乃至全球卫星遥感界。其中，与“主卫星”协同观测，实现放大主卫星载荷的价值；“双星”观测的2种位相工作方式，瞄准不同观测对象；以及和谐卫星与其他观测协同（如计划中的ESA与NASA合作，研发团队参与与后者开展的亚中尺度海洋动力学和垂直传输试验（S-MODE）和EUREC4A-OA在内的外场试验）都令人印象深刻，为以后类似项目设计带来了样板。

5 结语

本次会议以及最新的评估报告一致认为，和谐项目已达到A阶段结束时所需的科学和技术准备水平，并有能力提供符合任务目标所需质量的科学产品。和谐项目在技术上被认可，且已经足够成熟。

本文与读者见面时，欧空局已最终确定和谐项目为地球探索者（EE）第十个旗舰任务。

深入阅读

- ESA, 2015. Earth Observation Science Strategy for ESA: A New Era for Scientific Advances and Societal Benefits. Noordwijk: European Space Agency.
- ESA, 2015. Scientific Readiness Levels (SRL) Handbook. Noordwijk: European Space Agency.
- ESA, 2017. The Earth Observation Envelope Programme: Call for Earth Explorer-10 Mission Ideas. Noordwijk: European Space Agency.
- ESA, 2020. Report for Assessment: Earth Explorer 10 Candidate Mission Harmony. Noordwijk: European Space Agency.
- ESA, 2021. Independent Science Review Report 2021. Noordwijk: European Space Agency.
- EAS, 2022. Harmony User Consultation Meeting. https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Sets/Earth_Explorer_10_User_Consultation_Meeting/. 2022-07-05.
- ESA, 2022. Report for Mission Selection: Earth Explorer 10 Candidate Mission Harmony. Noordwijk: European Space Agency.

（作者单位：贾朋群，中国气象局气象发展与规划院、中国气象局气象干部培训学院；关敏，国家卫星气象中心；张萌，中国气象局气象干部培训学院）

深度学习研究现状及在延伸期预报上的潜在应用初探

游立军^{1,2} 翁彬³ 高建芸⁴

(1 福建省灾害天气重点实验室, 福州 350007; 2 福建省气象信息中心, 福州 350007; 3 福建师范大学, 福州 350004; 4 福建省气象科学研究所, 福州 350007)

摘要: 分别从深度学习技术和延伸期预报业务应用两个方向展开, 一方面简要说明时间序列数据处理和局部特征提取采用的主要深度学习模型, 以及为克服单模型局限而发展的集合学习采用的主要策略, 同时介绍了深度学习在信号搜索和气象预测中的最新成果; 另一方面搜集延伸期动力模式的预报水平和国内在延伸期预报业务中采用的主要技术路线; 最后讨论了深度学习技术在延伸期预报上的潜在应用方向, 以期为国内延伸期预报业务的发展提供一个有益的思路。

关键词: 深度学习, 持续性强降水过程, 延伸期预报

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2022.05.002

Research Status and Potential Application of Deep Learning in Extended Range Forecast

You Lijun^{1,2}, Weng Bin³, Gao Jianyun⁴

(1 Fujian Key Laboratory of Severe Weather, Fuzhou 350007 2 Fujian Meteorological Information Center, Fuzhou 350007 3 Fujian Normal University, Fuzhou 350004 4 Fujian Institute of Meteorological Sciences, Fuzhou 350007)

Abstract: The application of major deep learning models in time series data processing and local feature extraction is introduced. And some strategies for ensemble learning are also put forward so as to overcome the limitations of single models. In addition, the latest progress of deep learning in the fields of signal search and weather forecast is discussed. On the other hand, an overview of the forecast capacity of seasonal to sub-seasonal dynamic models as well as the technological routes employed in operational extended-range weather forecast in China is presented. And the potential application of deep learning technology in extended-range forecast is discussed in a bid to offer some enlightenment for the development of extended-range forecast in China.

Keywords: deep learning, persistent heavy rainfall events, extended range forecast

0 引言

与相对成熟的天气预报和气候预测相比, 延伸期预报尚处于起步阶段, 尤其强降水过程的延伸期预报非常困难^[1]。大量研究表明我国汛期雨带存在次季节变化进程, 伴随雨带停滞的持续性强降水往往导致严重经济损失, 提高延伸期的预报能力意味着可以为决策部门的提前部署提供更有价值的参考, 据2015年美国波士顿咨询集团的报告, 仅在能源行业其预先部署的投入产出比就在1:1.6至1:2.0。同时, 随着机器学习技术的快速发展, 其在模式降尺度、厄尔尼诺南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)预测和

延伸期集合预报等方面均表现出较强的能力。本报告重点关注深度学习技术、国内延伸期预报的现状, 讨论结合深度学习和现有气象资料产品开展延伸期预报的潜在研究方向。

1 深度学习的研究现状

1.1 深度学习的主要技术

深度学习是机器学习的一个重要分支, 其以几乎可以逼近任何函数的能力而闻名, 在众多研究领域都取得了突破。虽然传统的神经网络和深度学习之间的最大区别在于网络深度不同, 但后者学习复杂数据表示的能力是经典模型所做不到的^[2]。深度学习的根基是人工神经网络^[3], 它的最基本架构是深度神经网络(Deep Neural Networks)。卷积神经网络(Convolutional Neural Network, CNN)通过每一层上的滤波器提取输入的各种局部特征^[4]; 残差神经网络(ResNet)通过提高网络中反向传播的有效性, 从而让

收稿日期: 2021年9月15日; 修回日期: 2022年2月17日
第一作者: 游立军(1974—), Email: ylj16003@163.com
资助信息: 福建省科技厅社会发展引导性(重点)项目(2021Y0057, 2022Y0008); 国家重点研发计划(2018YFC1505805)