

气象小卫星：拓展天基气象观测的新领域

■ 许小峰

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.03.001

推进小卫星的发展, 需要从标准、法规、政策、机制等方面入手, 调动企业、学校、科研院所等更为广泛的参与, 构建与政府主导的大卫星发展有所不同的模式, 调动全社会的积极性加速推进小卫星的发展。

近年来, 随着小卫星技术的快速发展和应用, 为气象业务的天基观测拓展了新的领域。通过小卫星星座的建立, 与大卫星系统结合, 可以构成能力更强大的多要素、高时空分辨率、满足多样需求的气象卫星观测体系。

1 小卫星的概念

关于小卫星概念, 最初是从重量角度定义的, 具体分法虽有差异, 但大同小异。较流行的一种分类是将重量在1000 kg以上的称为大型卫星 (Large Satellite); 重量在1000 kg以下的统称为小卫星 (Small Satellite)。又进一步将小卫星分为6类: 重量在500~1000 kg的为小卫星 (smallsat); 重量在100~500 kg的为超小卫星 (minisat); 重量在10~100 kg的为微卫星 (microsat); 重量在1~10 kg的为纳卫星 (nanosat); 重量0.1~1 kg的为皮卫星 (picosat); 重量小于0.1 kg的称为飞卫星 (femtosat)。实际上, 从卫星的发展进程看, 星体本身也是一个由简单到复杂、由小到大的过程。如美国1960年4月1日发射的世界第一颗试验性气象卫星“泰罗斯”1号, 重约120 kg, 按现在的标准, 是名副其实的小卫星; 中国于1970年4月24日发射的第一颗人造卫星“东方红一号”重173 kg, 也是一颗小卫星; 1988年9月7日我国发射的首颗气象卫星风云一号A, 重750 kg, 仍属小卫星范畴。而风云三号 and 风云四号

气象卫星系列, 由于增加了大量有效载荷, 探测能力明显提升, 重量增加到了2000~5000 kg, 属于大卫星。

从2017年开始, 全球小卫星的发射数量明显增长。2012年以前, 每年小卫星发射数量在50颗以下; 2013—2016年, 每年发射数量超过100颗; 2017年至今, 每年发射数量超过300颗, 小卫星占有所有航天器的比重也从30%左右增长至70%。2018年全球共发射461个航天器, 其中500 kg以下的小卫星321颗, 占69.6%; 2019年全球航天器发射数量为492个, 500 kg以下小卫星占比80.29%, 份额进一步提升, 小卫星在空间飞行器体系中已占有重要位置。

为了适应小卫星技术发展和发射数量的快速增加, 标准规范的确立也伴随推进, 影响最为广泛的是建立了根据体积和重量两项指标和相关技术要求创造性地划分了不同类型微小卫星标准, 即立方体卫星 (CubeSat)。1999年, 在美国加利福尼亚理工大学州立大学 (Cal Poly) 的Jordi PuigSuari教授、San Luis Obispo教授和斯坦福大学空间系统开发实验室 (SSDL) 的Bob Twiggs教授共同努力下, 启动了CubeSat项目, 目的是为皮卫星的设计提供一个标准, 方便卫星的设计、研制、测试与发射, 以减少成本和开发时间, 为维持微小卫星的频繁发射提供更为便捷有效的方式。CubeSat最终成为包括100多所大学和私人公司共同开发的国际合作

项目, 制定出了规范标准和功能规格要求。CubeSat以“U”为单位进行划分, 1 U即一个标准单元, 体积约为10 cm³, 重量约1.33 kg。对每一标准单元又将重量按一定比例划分给载荷、电池、平台、结构等部分 (图1)。CubeSat按照模块化架构设计, 以“U”为单位, 可在一个轴或多个轴上扩展, 形成2 U、3 U甚至更大的立方星, 但一般不超过12 U, 这种设计方式由于在技术和应用上所带来的便利性, 已成为国际微小卫星发展的实际标准, 得到普遍认可, 一些更大卫星的发展设计也在参照这一做法。



图1 6个立方星和它们的配置系统

2 小卫星的优势与发展方式

发展小卫星具有研发周期短、成本低、发射方式灵活等优点, 通过多颗星组成星座阵列, 可以提高时空探测密度, 提高关键信息的获取效率。如何发展小卫星, 则有不同的方式选择。一是对需求目标相对单一的探测, 如仅对某一种要素的信息感兴趣, 方案就很简单, 载荷少, 直接发展单一探测目标的小卫星即可; 二是选择将准备在大卫星上试验的一些新

资助信息: 国家自然科学基金重点项目 (91637211)

功能移到小卫星上进行，这样有利于缩短研发周期，加快新技术的应用；三是选择将大卫星上已发展成熟且应用效益明显的单个或几个载荷重新设计，通过小卫星实现新的探测能力，技术上相对成熟，且可以发挥小卫星高时空分辨的优势，通过多颗星构建小卫星星座，满足业务需求，显然是比较现实的做法；还有一种考虑是如何将现有的大卫星做小，如发展了多年的气象卫星，综合探测能力已比较成熟，若能通过技术改进，压缩所有载荷、元器件的体积和重量，使其降至小卫星的阵营，这可以作为一种理想追求，但从技术上显然需要发展过程，短期内不易实现，从成本上考虑则可能更高，包括时间和价格，这显然与小卫星应具备的优势相悖，不可取。从各国小卫星技术发展的实际情况看，以上提到的除最后一种选择外，前三项都有了成功的实践，也说明小卫星的显著特点之一是可以快速实现相对单一或简单的功能。

同以往发射的卫星类似，目前发射小卫星的主要用途仍以通信、定位和遥感监测为主。随着技术上的成熟和成本的下降，无论是国际还是国内，小卫星的发射都呈爆发式增长，这一方面反映了实际需求的牵引，也与一些国家政策支持导向有关。如美国于2010年就由NASA牵头，启动了立方体小卫星发射创新计划（CSLI），通过资金赞助和发射支持等激励政策，鼓励大学、中小学和非盈利组织参与立方星的创新开发，从效果看，无论是对创新实践、实际应用，还是在全社会普及空间科学知识等方面都起到了积极推进作用，并进一步促进了全社会对航天科技发展的认识和支持。

有意愿参与CSLI计划的学校或组织可根据自身的兴趣和能力设计CubeSat方案，然后提交NASA进行评估，确定是否立项。2010年以来，NASA已从来自39个州的97个独立单位提交的项目中，选择了176个CubeSat任务（图2~图3），并对其进行了优先排序。通过27次发射，

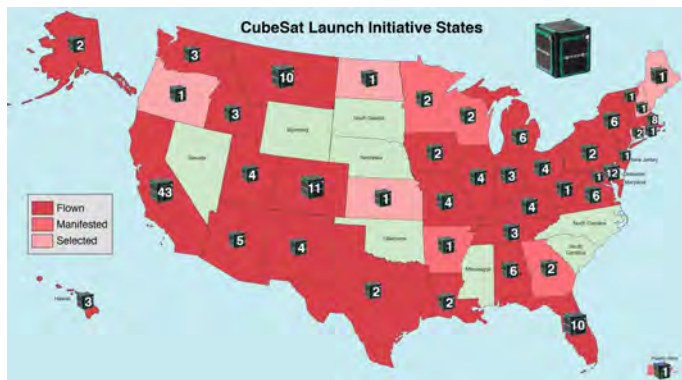


图2 美国各州参与CSLI项目分布图，包括被选中、待发射和已发射小卫星的数量（来自NASA网站）

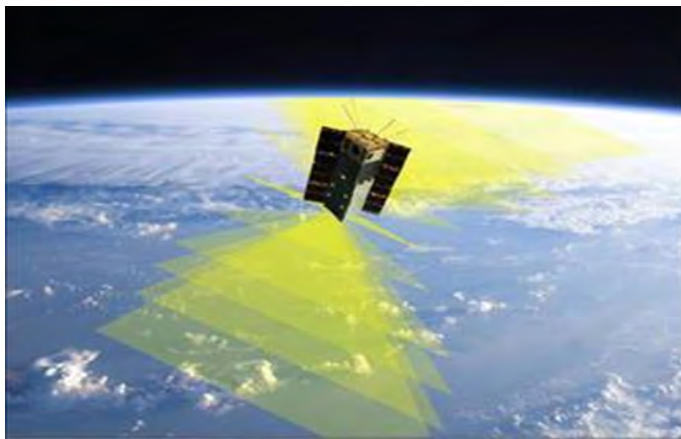


图3 CSLI项目第100个3U-CubeSat-HARP，于2019年11月2日发射，旨在测量大气气溶胶、云水和冰粒的微物理特性（来自NASA网站）

已将101个CubeSat送入太空，还有39个已准备好的星也已具备发射条件，2020年的项目还将继续支持执行这一计划。

除了组织广泛的研发与参与外，在机制设计上通过立法导向也是调动社会力量积极投入参与的有效方式。以气象为例，美国2017年通过了《2017年天气研究与创新法案》，其中明确了允许政府机构向商业公司购买气象数据，且要求NOAA避免在数据提供上出现政府部门与私人企业的非必要重复。这调动了商业机构在大气探测业务上投入的积极性，而不仅是单纯生产装备。特别是在小卫星这一新兴领域，私营企业的灵活机制更具竞争性。

3 几类气象小卫星的发展状况

3.1 GNSS掩星小卫星星座

中国台湾与美方机构合作，

2006年4月15日美国执行了COSMIC（Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate）计划，共发射了6颗小卫星组成GPS掩星探测系统，每颗卫星直径1 m、重62 kg，通过接受GPS导航卫星的信息获取掩星事件，推算大气垂直温湿廓线。这一项目取得了成功，所获取的全球廓线资料已成为应用效果排名靠前的气象卫星资料，被应用到许多国家的数值天气预报的模式及相关的科研和业务中。鉴于COSMIC项目的成功，美国又启动了COSMIC-2计划，已于2019年6月25日，发射了COSMIC-2第一批6个卫星，并计划于2020年投入业务使用，每天可以在全球范围提供4000个掩星廓线。与此同时，商业机构也看到了这一领域卫星数据挖掘的潜力，政府部门的投入远不能满足需求。美国SPIRE公司经过几年来的发展，构建了3U

小卫星星座的方式，迅速扩大了在GNSS无线电掩星观测领域的占有份额。截止到2019年8月，通过20次发射，已拥有了84颗3U CubeSats在不同轨道平面上运行，且还在继续发展，计划达100颗以上，数量上远超过了COSMIC计划（图4）。到2019年底，已在全球范围每天提供6500个温湿垂直廓线，且还在迅速增加，预计2020年将超过10000个/d，且这些数据已纳入到NOAA商业天气数据试点计划中，并正在申请纳入美国空军商业天气数据试验计划。SPIRE公司的小卫星掩星探测星座不但可以接收GPS星的信号，还可以同时处理欧盟的Galileo、俄罗斯的GLONASS和日本的QZSS导航星座信号，其能力更具扩展性。

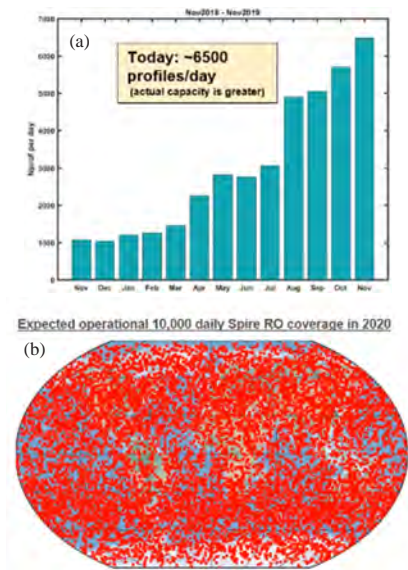


图4 SPIRE公司2019年掩星探测能力快速提升(a)和2020年将进一步拓展(b)

3.2 测风小卫星星座

同样是利用GPS导航信息探测大气信息的另一个小卫星星座是NASA主导的测风小卫星星座计划CYGNSS (Cyclone Global Navigation Satellite System)，于2016年12月15日发射成功，2017年3月开始提供测风数据。CYGNSS小卫星星座由8颗6U-CubeSat星组成，每颗星可以同时接收至少4颗GPS卫星的直接和反射信号，以确保定位的准确性，直接

信号用来确定CYGNSS卫星自身的位置，反射信号来自海洋表面，通过测量反映风浪运动的粗糙度变化，分析确定风速风向等级（图5）。由8颗小卫星协同观测，可以在南北纬40°之间提供任一观测点每3小时一次的观测数据。由于GPS的微波信号具有穿透云雨的全天候特征，CYGNSS可以及时捕捉到在广阔的海洋上产生的气旋系统从初始生成到消亡的完整海表风场变化，对开展海洋天气气候研究和完善相关业务是非常有价值的，特别是对易造成重大影响的台风，无论是强度还是路径变化，风场都是最重要的信息之一（图6）。在实际应用中，CYGNSS信息还被延伸至分析洪水、土壤湿度、地表热通量等信息，都取得了很好的效果。

3.3 微波小卫星

在目前气象卫星装载的各类探测仪器中，微波温湿度辐射计是最成功的载荷之一，据ECMWF的评估，

卫星微波探测获取的全球垂直温湿度廓线已成为减少数值预报模式误差最有价值的信息，远超过包括传统探空仪在内的其他任何探测资料。因此，在极轨气象卫星上安装了微波仪器已成为各国卫星计划的优先选择。而要弥补大卫星成本高、数量少、时间分辨率低的缺陷，发射多颗微波小卫星组成星座应是优先选择。美国NASA地球系统科学探路者（ESSP）计划赞助的6U级小卫星TEMPEST-D (Temporal Experiment for Storms and Tropical Systems Demonstration) 于2018年5月21日通过国际空间站发射，7月13日成功部署到轨道上，卫星的有效载荷是一个五频段毫米波辐射计（87~181 GHz），能够观测到大气液态水和冰含量的分布变化（图7~图8）。通过将TEMPEST-D与现有的NOAA和欧洲EUMETSAT气象卫星的对应资料进行对比发现，TEMPEST-D辐射计具有很高的

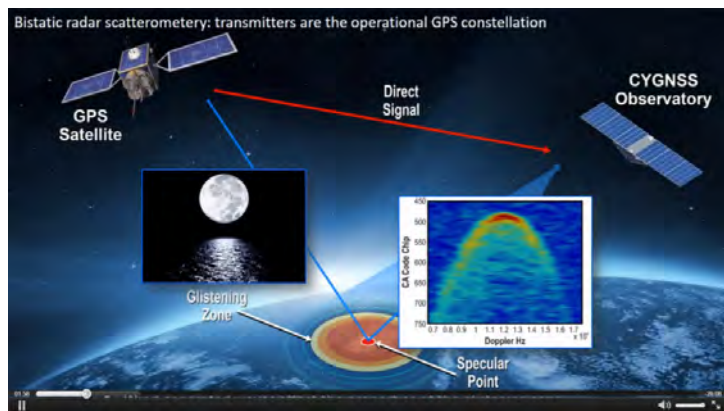


图5 CYGNSS星座工作原理示意图

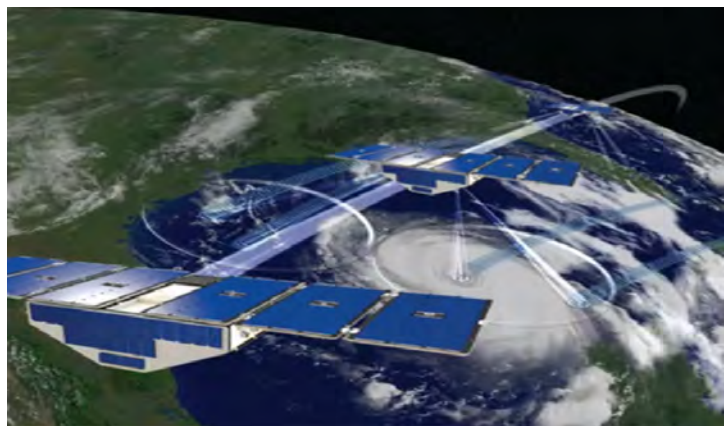


图6 CYGNSS小卫星星座连续监测台风活动示意图

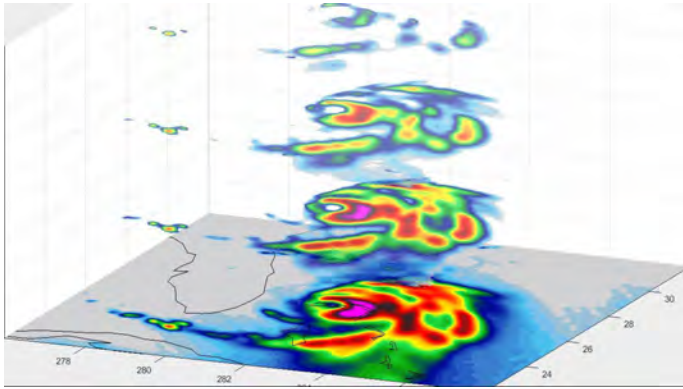


图7 2019年9月30日TEMPEST-D对飓风多莉安(Dorian)观测后形成的三维图像

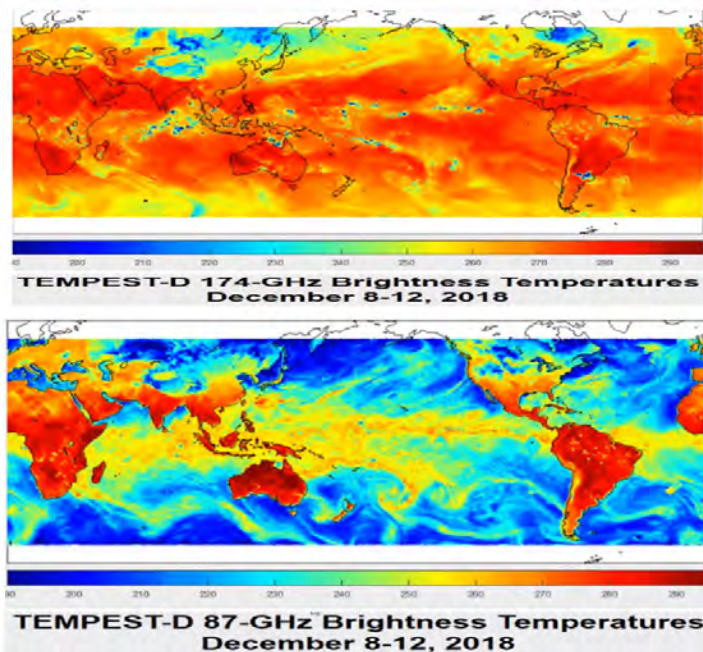


图8 TEMPEST-D两个不同频段获取的2018年8—12日全球亮温分布

准确性和稳定性，与大卫星上仪器保持了一致性。按照初始计划，试验成功后，将部署8颗TEMPEST系列CubeSat星构成星座，形成高时间分辨率小卫星毫米波对地遥感观测系统。

除TEMPEST计划外，NASA的“地球风险仪器(EVI-3)”计划还支持了由6个3U-CubeSats组成的微波星座项目TROPICS，原计划在2019年发射，现已延迟到2021年。该计划的技术实现以麻省理工学院(MIT)林肯实验室(LL)开发的微型微波卫星2(MicroMAS-2)为基础，每颗星上装有一个高性能微波辐射计，类似于美国NOAA-20卫

星上安装的高性能微波探测器ATMS(Advanced Technology Microwave Sounder)，使用91~205 GHz的12个频段通道，重复观测周期约半小时，可以提供几乎全天候的大气三维温度、湿度以及云冰和降水结构的信息。而NOAA也在支持发展类似的观测微波小卫星星座项目(EON-MW The Earth Observing Nanosatellite-Microwave)，同样由林肯实验室承担研制，采用与ATMS类似的四个波段的22个微波频道，是一组由8颗12U级CubeSat立方星构成的观测星座，原计划于2020年发射。正是由于微波探测器在大卫星上取得的成功，使其成为发展小卫

星星座所优先选择的载荷之一。

3.4 高光谱小卫星

在被动遥感的有效载荷中，除微波探测资料外，根据ECMWF的分析，气象卫星中红外高光谱信息对改进数值预报模式性能的作用位列第二，如2002年5月NASA发射的Aqua卫星安装了先进的大气红外探测器AIRS，可以通过2378光谱通道提供高质量的大气温、湿、云、气溶胶、臭氧等大气廓线结构信息，在各国全球数值预报模式发展和遥感资料分析中得到广泛应用，评价很高。而如何将这样的高性能、高造价的设备通过改造安装到小卫星上，通过低成本的替代方案解决时间分辨率的问题，显然是极有价值的发展选项。NASA的JPL已经开始研制这样的6U级小卫星CIRAS(CubeSat Infrared Atmospheric Sounder)，设计指标接近于AIRS且有了初步成果。

3.5 雷达小卫星

2018年5月与TEMPEST-D一起通过国际空间站发射的还有另外一颗6U级立方体试验小卫星RainCube，与TEMPEST-D不同的是这颗星是主动遥感小卫星，有效载荷是NASA喷气动力实验室(JPL)研制的Ka波段(35.75 GHz)测雨雷达。RainCube于6月正式进入轨道，7月28日，超轻、紧凑型Ka频段天线成功展开，8月27日首次对降雨系统进行了观测。RainCubezhu6主要试验任务是在大型卫星(如全球测雨卫星GPM)已实现的测雨雷达系统小型化，安装在小卫星上运行，通过构建星座实现对降雨系统高时频重复观测，解决广大洋面和其他地基雷达无法覆盖区域的主动遥感观测问题。同时，RainCube的试验成功，也为在小卫星上发展更为先进的雷达载荷打下了基础，美国NASA正在研发更为先进的用于小卫星的三频多普勒雷达系统MASTR(Multi-Application Smallsat Tri-band Radar)，同时通过Ku、Ka和W波进行探测，获取更为丰富的云和降水信息(图9)。

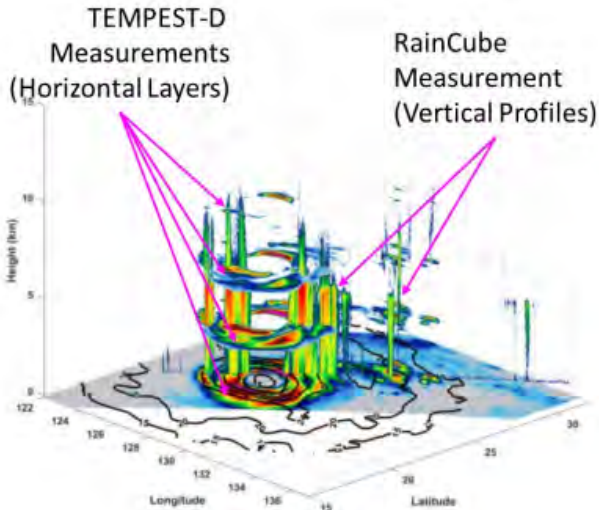


图9 TEMPEST-D与RainCube协同观测台风特拉米 (Trami)

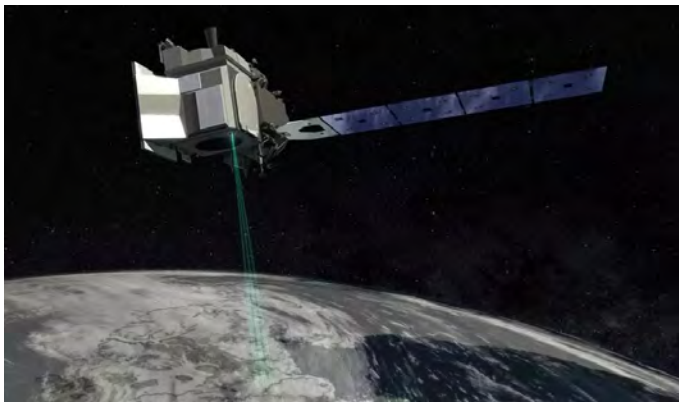


图10 太空中的ICESat-2探测示意图

3.6 激光小卫星

另一类主动遥感小卫星的有效载荷是激光雷达，如美国NASA冰冻圈科学计划支持发展的小卫星ICESat-2 (Ice, Cloud and land Elevation Satellite) 于2018年9月15日成功发射(图10)，搭载了先进地形激光测高仪系统(ATLAS)，是继2003年发射的ICESat-1后第二代激光测高小卫星，重155 kg，通过发射3组6个激光束对地表目标物扫描，设定的4个科学目标为：通过测量冰盖融化情况并研究对海平面上升的影响；测量并研究冰盖和冰川的质量变化；估算和研究海冰厚度；测量全世界森林和其他生态系统中的植被高度。通过这些监测和研究掌握因气候变化对冰冻圈和生态圈造成的影响情况，同时还可以测量云和气溶胶分布结构。2019年6月，NASA已通过网站正式发布

了ICESat-2的观测数据。从激光的应用范围看，远不止测高，而高度测量小卫星的成功发射和应用，显然有助于为其他功能的实现提供示范，如NASA已将原准备配备在无人机上的一种紧凑型模块化激光雷达系统设计为可用于小卫星平台，该系统可以测量大气水汽、气溶胶、甲烷等大气成分的垂直分布结构。

4 小结

以上介绍了部分气象小卫星发展情况，包括已经发射成功的和正在研发的小卫星项目，主要反映的是美国的部分情况。实际上，包括中国在内的许多国家都开始在这一领域发力，参与到气象小卫星发展进程中，已发射成功和正在研发的小卫星项目还很多。2018年12月29日，我国成功发射的云海二号卫星，是由6颗小卫星组

成的星座，承担大气掩星探测任务，并于2019年10月部署完毕，可以提供探测资料。2019年6月5日我国在黄海海域成功完成“一箭七星”海上发射技术试验，其中有两颗就是用于气象的捕风小卫星，类似于美国CYGNSS星座的功能，通过对接收到的信息进行分析处理，达到了预期指标。2020年1月15日，由天津宇宙宇航科技有限公司研制的国内首个商业GNSS掩星探测小卫星在太原卫星发射中心发射升空并成功入轨，这一计划的目标是实现由80颗小卫星构成的全球组网星座。

从国内外小卫星的发展态势，不难分析得到以下结论。

1) 根据近年来航天技术的发展趋势和航天器发射数量比例变化情况来看，小卫星的发展显然已占据了重要位置，可以独立构成星座，完成特定任务，也可以与大卫星形成互补，解决大卫星难以解决的问题，要对这一变化趋势予以足够关注。

2) 推进小卫星的发展，需要从标准、法规、政策、机制等方面入手，调动企业、学校、科研院所等更为广泛的参与，构建与政府主导的大卫星发展有所不同的模式，调动全社会的积极性加速推进小卫星的发展，满足更多不同层面的需求，同时也有助于航天科技的普及。

3) 小卫星的制造和发射比大卫星简单，成本低、周期快，但构成星座的小卫星资料处理则要复杂得多，需要在地面资料应用环节组织更多力量，完成质量控制、效果评估、科研应用等重要环节，提升小卫星发展效益，这些工作更应尽早启动。

4) 气象小卫星发展已有许多成功的示范案例，要加强科技引导与投入，注意跟踪国内外在大卫星和小卫星领域的成熟技术发展，积极参与国际技术交流，吸取发达国家已发展多年的经验教训，缩短技术研发与转化环节。

深入阅读

- 李同玉, 彭昆雅, 2019. 中国首次海上发射技术试验综述. 中国航天, (6): 6-12.
- 唐亮, 刘鸿鹏, 何慧东, 2019. 全球小卫星现状及发展. 国际太空, (6): 36-41.
- 童兴, 2001. 小卫星如何按重量分类. 国际太空, (8): 7.
- Abdalati W, Zwally H J, Bindschadler R, et al, 2010. The ICESat-2 laser altimetry mission. Proceedings of the IEEE, 98(5): 735-751.
- Blackwell B, Pereira J, 2015. New small satellite capabilities for microwave atmospheric remote sensing: the earth observing nanosatellite-microwave. (2015-08-08). <https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3292&context=smallsat>
- Blackwell W J. et al, 2019. Microwave atmospheric sounding CubeSats: from MicroMAS-2 to TROPICS and beyond. Ninth Conference on Transition of Research to Operations, Phoenix, January 6-10, 2019. Boston: AMS.
- Carlis D N L, McLean C, Cortinas J V, 2018. Implementation of the weather research and forecasting innovation act of 2017 at NOAA. AGU Fall Meeting 2018, Washington, December 10-14, 2018. Washington: AGU.
- Crusan J, Galica C, 2019. NASA's CubeSat Launch Initiative: enabling broad access to space. Acta Astronautica, 157: 51-60.
- English S, McNally T, Bormann N, et al. Impact of Satellite Data. Reading: ECMWF, 2013.
- Im E, Peral E, Sanchez-Barbety M, et al, 2017. The next generation of spaceborne radars for cloud and precipitation measurements. Pasadena: NASA.
- Irisov V, Nguyen V, Duly T, et al, 2020. Accomplishments and plans of spire's growing constellation of GNSS RO CubeSats. 100th AMS

- Annual Meeting, Boston, January 12-16, 2020. Boston, AMS.
- Mehrpourvar A, Pignatelli D, Carnahan J, et al, 2014. Cubesat Design Specification Rev 13. California: The CubeSat Program, California Polytechnic State University.
- Nehrir A R, Rory A, Kooi S A, et al. Airborne lidar observations of water vapor profiles and planetary boundary layer heights-prospects for future SmallSat missions. 100th AMS Annual Meeting, Boston, January 12-16, 2020. Boston: AMS.
- Pagano T S. Technology advancements and concepts for IR grating spectrometer sounders for CubeSats and SmallSats at NASA JPL. 100th AMS Annual Meeting, Boston, January 12-16, 2020. Boston: AMS.
- Peral E, Tanelli S, Statham S, et al, 2019. RainCube, the first spaceborne precipitation radar in a 6U CubeSat. <https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4377&context=smallsat>.
- Reising S, Gaier T C, Kummerow C, et al, 2017. Temporal Experiment for Storms and Tropical Systems Technology Demonstration (TEMPEST-D) Mission: Enabling time-resolved cloud and precipitation observations from 6U-class satellite constellations. 31st Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, Logan, August 5-10, 2017. <https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3609&context=smallsat>.
- The CYGNSS Team. Cyclone Global Navigation Satellite System (CYGNSS). (2018-04-11). https://essp.nasa.gov/essp/files/2018/04/17790-LL-01-R0-C1_CYGNSS-Lessons-Learned_4-11-18.pdf.

(作者单位: 中国气象局)

2030年的气象界是什么样子——《国际气象技术》为你描述

■ 贾朋群 编辑

2010年创刊的气象技术类期刊《国际气象技术》，在其十周年纪念刊中，邀请了来自多个国家的10位专家，就10年后世界气象界的模样，以及支撑这些改变的技术做出预测。这些专家既有美国气象局长、ECMWF技术团队这样的政府官员和研发人员，更多的是来自企业和组织具体实施气象研发的人员。在他们的回答中，除了地球系统、AI和最新卫星技术等多人提及的内容之外，本文就其他颇有新意的观点进行介绍。

(1) 一方面，全球气象界(GWE)之间的合作从未如此密切并且正在加速发展，公私合作伙伴关系正在上升期，并正在以多种不同的形式进行尝试；另一方面，随着私营部门能力提升，在某些领域，私营部门将成为国家气象水文部门目前正在开展的某些业务的对手。政府组织正在深层次上向私企开放，不仅仅是硬件和技术的提供者，而且还包括服务和数据。数值天气预报系统在走向开放，计算机代码开源分享。许多服务甚至跨越政治边界，在全球范围内提供。

(2) 公共-私营在气象发展中扮演的角色及其转化的一个极好的例子，是NOAA目前的执行局长尼尔·雅各

布斯。执掌NOAA前他在松下任职，利用TAMDAR飞机探测数据做出的一些出色预测。在一项名为国家中尺度网计划的支持下，松下继续向NOAA提供先进的全球飞机气象数据，以改善美国国家气象局的预报。随着装载TAMDAR的飞机在北美近300个机场起飞和降落，风、温度和湿度便可实现每五秒钟观测一次。学术界与政府合作的一个例子是业内熟知的WRF-Hydro模式已

(下转42页)

