从单星观测到体系协同:风云卫星智慧协同观测体系的技术特征与发展展望

董瑶海
(上海航天技术研究院,上海 201109)

摘　要: 风云卫星是我国民用遥感卫星中应用范围最广泛、成效最为显著的卫星系列之一,在推动国民经济发展和加强装备自主建设等方面发挥了重要作用。面向气象高质量发展、防灾减灾、应对气候变化、生态文明建设和国家安全等多重挑战,风云卫星将坚持创新驱动发展战略,以体系化、智能化为主要发展方向,突破平台和载荷关键技术,构建智慧协同观测体系。本文探讨了风云卫星智慧协同观测体系在气象综合观测效能提升、体系化智能化网络赋能及全方位环境保障等方面的必要性,在分析国内外气象卫星发展历程的基础上,提出了新一代风云气象卫星构建智慧协同观测体系的建设思路和初步方案,并对体系构建中的关键技术进行了分析。最后,展望了风云卫星智慧协同观测体系的应用前景。

关键词: 气象卫星; 体系化; 定量化遥感; 卫星平台; 互联互通; 智慧观测

中图分类号: TN 212.9　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.19328/j.cnki.2096-8655.2024.03.005

引用格式: 董瑶海.从单星观测到体系协同:风云卫星智慧协同观测体系的技术特征与发展展望[J].上海航天(中英文),2024,41(3):37-46.

Technical Characteristics and Development Prospects of the Intelligent Collaborative Observation System of Fengyun Satellite: from Single Satellite Observations to System Collaboration

DONG Yaohai
(Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China)

Abstract: Fengyun satellite is one of the most widely used and effective satellite series in China's civilian remote sensing satellites, and has played an important role in promoting national economic development and strengthening the construction of independent equipment. Facing the challenges such as high-quality development, disaster prevention and mitigation, climate change, ecological civilization construction, and national security, Fengyun satellite will adhere to the innovation-driven development strategy, take systematization and intelligence as the main development directions, break through key technologies, and build an intelligent cooperative observation system. In this paper, the necessity of the intelligent cooperative observation system of Fengyun satellite in multiple aspects, e.g., the systematic development of remote sensing satellites, intelligent network enabling, and all-round environmental protection, is discussed. Based on the analysis of the development history of meteorological satellites at home and abroad, the construction idea and preliminary plan of an intelligent cooperative observation system for the new generation of Fengyun meteorological satellite are put forward, and the key technologies in the system construction are analyzed. Finally, the application prospects of the intelligent cooperative observation system of Fengyun satellite are forecasted.

Key words: meteorological satellite; systematization; quantitative remote sensing; satellite platform; interconnection; intelligent observation

收稿日期: 2024-04-09; **修回日期:** 2024-05-14

作者简介: 董瑶海(1966—),男,研究员,主要研究方向为卫星总体技术、遥感载荷技术。

0 引言

在党中央、国务院的亲切关怀和有关部门的大力支持下,风云气象卫星事业发展迅速。我国至今已成功发射两代四型21颗风云气象卫星,目前9颗在轨运行,持续为全球120多个国家和地区提供数据,实现了长寿命、高可靠、覆全球、高精度、全定量的气象观测,走上了系列化、业务化、独立自主的发展道路。

新时代新阶段,人民群众美好生活对气象服务保障的需求越来越多样化。习近平总书记在新中国气象事业70周年之际作出的重要指示以及党的二十大报告中提出防灾减灾救灾和气候变化全球治理要求,是后续风云气象卫星高质量发展的根本遵循。为贯彻落实党中央、国务院决策部署,适应新形势新要求,近年来,多份重磅文件的印发为气象高质量发展指明了方向、绘就了蓝图。《气象高质量发展纲要(2022—2035年)》指出,面向国家重大战略、人民生产生活、世界科技前沿,推动结构优化、功能先进的监测系统要更加精密,到2035年基本实现以智慧气象为主要特征的气象现代化,提高气象灾害监测预报能力,实施"气象+"赋能行动,逐步形成"五个1"的精准预报能力。我国新一轮气象卫星及其应用发展规划明确了到2035年我国气象卫星及其应用的发展思路、目标和任务,我国气象卫星观测及应用能力将全面进入世界先进行列,全面增强支撑"全球监测、全球预报、全球服务"的能力。

1 必要性分析

1.1 气象综合观测效能提升需求

气象卫星的观测效能是指气象卫星系统在特定时间和空间范围内,对大气和地表进行观测的能力和效率,包括但不限于数据获取的频率、分辨率、准确性,以及数据处理和分发的效率。

我国正在发展的第二代风云气象卫星综合观测能力达到世界先进、局部领先水平。风云三号低轨气象卫星建立了"上午、下午、晨昏、低倾角"4种轨道组网运行的观测系统,具备全天候、多光谱、三维、定量遥感观测能力,其可见和长波红外通道空间分辨率为250 m,光谱分辨率为0.04 nm,微波灵敏度0.2 K,性能指标处于世界先进水平。风云四号高轨气象卫星具备"多光谱二维成像+高光谱三维探测+超窄带闪电成像"观测能力,可见通道空间分辨率达到250 m,国际首次实现静止轨道高光谱探测。风云三号、风云四号气象卫星是空间与重大灾害国际宪章的值班卫星,在国际气象灾害预警和应急救援方面起到了重要作用。然而,由于单颗低轨卫星存在较长的重访间隔,高轨卫星对地球两极地区观测覆盖不足,不同卫星系统之间的数据融合能力有限,影响了气象卫星的综合观测效能。面向"监测精密、预报精准、服务精细"的发展需求,在单星观测能力达到世界先进的基础上,亟须构建由不同轨道、不同种类卫星组成的气象观测体系,发挥体系运行优势,提升对全球和重点区域观测的综合效能[1-4]。

1.2 遥感卫星体系化智能化发展要求

我国遥感卫星正在迈入体系效能型发展新阶段[5],其主要特点为以质量、覆盖、时效、应用等体系效能提升为核心目标,积极采用人工智能、大模型等新一代信息技术,构建布局科学、综合立体、智慧协同的体系效能型遥感卫星体系,全面满足日常应用和应急需求。

在时空分辨率方面,我国风云卫星的高轨和低轨2个卫星系列运行相对独立,从数据获取到产品生成链路较长,不能满足防灾减灾等高时效应用需求。体系观测可以通过多星协同,实现对特定区域的高频次观测,而智能观测则可以根据气象模型预测,动态调整观测计划,以最优的时空分辨率捕捉关键气象事件。

在观测要素方面,不同的气象现象需要不同的观测要素。体系观测能够整合不同卫星搭载的多种传感器,提供更全面的气象数据。智能观测利用机器学习算法,可以自动识别和提取关键观测要素,提高数据的可用性和准确性。

在观测精度方面,体系观测通过多源数据融合,可以显著提高观测数据的精度。智能观测利用先进的数据处理技术,如人工智能(Artificial Intelligence, AI),能够从噪声数据中提取出准确的信息。

AI和大模型技术在气象卫星观测领域的应用将带来重大影响和变革。AI大模型能够快速处理和分析大量气象数据,相比传统数值预报模式,AI模型的运行速度更快,例如,华为盘古气象大模型是传统模式的1万倍,能在几分钟内给出未来7~10 d的预报结果。AI模型通过学习历史气象大数据,能够提高预报的准确性。它们能够捕捉到气象

数据中的复杂关系和模式，从而提供更为精确的预报。AI技术可以帮助提升气象卫星数据的时空分辨率，通过智能算法对数据进行降尺度处理，实现更高分辨率的天气预报[6-7]。

下一代风云卫星肩负着全面实现国际领先的使命，体系化、智能化协同发展是实现该目标的有效途径。通过风云体系内的互联互通、智慧协同，可充分发挥体系效能，实现“1＋1＞2”的效果。

1.3　大气海洋空间环境全方位保障要求

“一带一路”倡议的实施，促进了我国与周边国家的全方位交流合作，我国影响力需从陆地、海洋2大空域向纵深发展，进而辐射全球。大气海洋环境保障要全面适应维护国家安全的需要，保障范围由本土向全域拓展。

空间天气监测与气象业务息息相关，构建基于风云卫星协同观测能力的空间天气监测手段，加强太阳到近地的全因果链监测，是深化空间天气科学研究、提升空间天气预报能力的必要手段。

2　国内外发展现状

气象卫星是对地球大气进行定量化探测的应用卫星，具有如下特点。

1）定量精度要求准。气象卫星探测对象是复杂的地-气耦合系统，为大气物理模型提供参数初值，其探测精度直接影响数值天气预报精度。

2）业务服务要求高。天气系统时刻发生着复杂的变化，数据中断或观测质量下降将使预报精度降低，并且气象数据面向全球服务，可靠性要求高。

3）探测要素谱段多。大气要素（温、湿、压、风、雨、云等）多且时刻变化，气象卫星选取的探测手段主被动结合、探测谱段众多。

4）综合探测能力强。气象卫星一般装载多个甚至十几个高精度定量遥感载荷，并需要在不同的时空状态下构建统一的观测基准。

2.1　国外气象卫星发展现状

自1960年世界上第一颗气象卫星发射成功以来，国外气象卫星先后经历了从试验到业务、从极轨卫星到静止轨道卫星、从单一仪器观测到综合仪器观测、从定性到定量的发展历程。经过几十年的发展，国外气象卫星已形成多轨道、种类较为齐全的卫星系列，组成了全球气象卫星观测网[8-9]。国外典型气象卫星系列见表1。

表1　国外典型气象卫星系列

Tab.1　Typical meteorological satellite series abroad

卫星系列	所属国家或组织	卫星特点	主要载荷	服务时间
NOAA	美国	极轨气象卫星，上、下午星组网观测	甚高分辨率扫描辐射仪（Advanced Very High Resolution Radiometer，AVHRR）	1970—
JPSS	美国	极轨气象卫星	可见红外成像辐射计（Visible Infrared Imaging Radiometer，VIIRS）	2017—
GOES	美国	静止轨道气象卫星	先进基线成像仪（Advanced Baseline Imager，ABI）	2016—
METOP	欧盟	极轨气象卫星	超高光谱分辨率红外大气探测仪（Infrared Atmospheric Sounding Interferometer，IASI）	2006—
MTG	欧盟	静止轨道气象卫星	MTG-I组合成像仪、闪电成像仪等MTG-S红外探测仪	2022—
GMS	日本	静止轨道气象卫星	可见光红外自旋扫描辐射仪（Visible Infrared Spin Scan Radiometer，VISSR）	1995—

气象业务的不断发展，对天基气象观测的准确度、时效性、分辨率、观测种类以及全球和全天候观测能力等提出更高的要求，各国都竞相研制新一代气象卫星。美国和欧盟分别发展了低轨系列气象卫星上、下午星，采用光学、微波综合观测手段，实现组网业务观测。美国还通过专用的科研业务星，在观测时间维度上进行补充。欧空局通过“哥白尼计划”约30颗卫星组成的观测系统，进一步提升天气气候综合业务观测能力。日本、韩国和俄罗斯等已成功发射最新一代高轨气象卫星，卫星平台和载荷性能相比上一代大幅提升，可以高频次获取地球圆盘和中小区域气象观测数据，预计服务至2030年前后。

国外气象卫星观测系统主要呈现以下发展特点。

1）卫星系列完备。美国建有完备的气象卫星体系，低轨方面有民用NOAA卫星系列、JPSS极轨卫星系列等，静止轨道有GOES系列等；俄罗斯发展Meteor-3极轨气象卫星；欧空局低轨主要以

METOP专用气象卫星为代表,静止轨道主要以MTG等卫星系列为代表。

2)载荷性能优越。欧美气象卫星有效载荷性能日益提升,极轨气象卫星方面,JPSS卫星主要有效载荷为可见红外成像仪、跨轨红外大气探测器等,探测波段涵盖紫外至微波,VIIRS具有可见至长波红外22个通道、并包含微光通道;静止气象卫星方面,GOES-R卫星装有先进基线成像仪等有效载荷,ABI具有16个通道,近红外分辨率1 km,红外分辨率2 km,每5 min可提供1次全圆盘图。

3)卫星组网观测高效。NOAA卫星系列采取上、下午星组网观测方式,美国"国防气象卫星"(Defense Meteorological Satellite Program,DMSP)为晨昏轨道军事气象卫星,军、民气象卫星轨位互补、提升观测效能。面向与NOAA卫星组网观测,欧洲METOP卫星优化载荷配置。美国NASA积极组织多国参与全球观测,建立地球观测系统(Earth Observing System,EOS),并通过TRMM、GPM低倾角全球降水卫星系列、"A-train"全球气候观测卫星编队等开展组网观测。

4)重视空间天气监测。美国等国家已建立空间天气监测卫星体系,开展空间天气监测与预警。其监测数据不但作为空间天气预报、警报的输入条件,也促进了空间环境模型的完善,有力保障了航天器在轨安全。

2.2 我国气象卫星发展现状

我国同时发展低轨和静止轨道2种气象卫星,可实时准确监测不同时空尺度的天气系统、气候过程和全球变化,获取完整的大气遥感资料。经过50余年的发展,我国研制并发射了两代四型气象卫星,建立了长期、稳定、连续运行的高低轨组网气象卫星观测系统,实现了业务化、系列化的发展目标[10-12]。

风云一号、风云二号系列卫星组成我国第一代风云气象卫星,实现了我国气象卫星的从无到有和业务化运行。风云一号卫星是我国自主研制的第一代太阳同步轨道气象卫星,也是我国第一颗传输型遥感卫星,使我国首次实现了气象、海洋和空间环境的综合探测应用,真正实现了"一星多用",开创了我国气象卫星事业和航天事业的新纪元。风云二号卫星是我国第一代地球静止轨道气象卫星,突破了静止轨道自旋卫星5通道观测、高精度图像质量的卫星设计、星地一体化图像定位与配准、高精度定量产品及应用、星地一体化的业务能力扩展等关键技术,风云二号系列共发射8颗卫星。

风云三号、风云四号系列卫星组成我国第二代风云气象卫星,实现了我国气象卫星的性能大幅提升和定量化应用。风云三号已成功发射了7颗卫星,实现了从紫外、可见光、红外到微波探测的多载荷集成,可实现全球、全天候、多光谱、三维、定量综合对地观测,探测能力达到国际先进水平。世界气象卫星协调组织(Meteorological Satellite Coordination Group,CGMS)已将风云三号卫星纳入新一代世界极轨气象卫星网发展规划。风云四号卫星作为我国第二代静止轨道气象卫星,是目前全球所有静止轨道气象卫星中综合对地观测能力最强的卫星之一。国际首次由一颗卫星实现"高精度二维扫描成像+红外高光谱三维探测",率先实现了静止轨道红外高光谱大气垂直探测,和最高250 m分辨率每分钟2 000 km×2 000 km区域连续跟踪观测,达到世界领先水平;首次实现了我国天基高帧频高灵敏闪电探测。目前正在同步研制多颗风云三号、风云四号卫星,在2025年前将建成完整的第二代风云气象卫星观测系统。

2.3 气象卫星发展趋势

结合国内外气象卫星发展现状和未来需求,气象卫星的发展趋势主要有如下几点。

1)多星组网观测,发挥不同轨道卫星观测的优势。不同轨道探测具有其独特的观测优势,结合不同轨道气象卫星进行组网观测,能够充分发挥不同轨道卫星的作用、优势互补,实现对天气和气候的高时空分辨率观测、高精度预报和预测。

2)卫星平台能力不断增强,为高精度探测提供保障。欧美气象卫星平台功能不断增强,性能逐步提高,具有高可靠的在轨自主管理、高精度的定位和姿态控制以及灵活高效的业务观测等能力,确保观测数据的高质量和长期有效性。

3)配置多种探测手段进行数据融合处理,发挥不同探测体制的作用。目前,欧美新一代气象卫星均注重星载有效载荷的综合探测技术,配置了光学、主/被动微波、临边、高光谱等多种探测手段,通过对多类型传感器协同观测数据的融合处理,进一

步提高对地球5大圈层（大气圈、水圈、岩石圈、土壤圈、生物圈）的综合探测能力。

此外，根据欧美目前正在发展或者已经公布的下一代气象卫星计划，其思路基本延续了当前气象卫星的发展路线，侧重于轨道与功能互补，但在体系协同观测方面未有明确的发展计划。

3　未来观测需求

3.1　观测要素及精度

聚焦监测精密、预报精准、服务精细，提高天气气候监测预报预警服务能力，筑牢气象“防灾减灾第一道防线”作用。为满足未来天气与气候观测和预报需求，需提升气象要素观测能力[13]。

1）数值天气预报需要精确完整的大气初始状态6大要素—大气温、湿、压、风、云、大气成分。观测要素需支撑未来业务需求，7～10 d的预报准确率达到90%以上、常规发布7 d的降水预报、提前4 d预报洪水、常规发布7 d的强局地风暴预报、台风（飓风）路径/强度预报等，见表2。

2）临近天气预报需要提前6～12 h有效预报雷暴的发生区域（对流扰动）、实时地监测台风和强对流系统的强度和路径变化、提前60 min预报龙卷风、对局地灾害性事件（森林火灾、火山爆发、局地暴风雪等）进行实时监测和发展趋势预测。卫星提供高时空分辨率（高达1 km、几分钟）的对流要素、地表变量的探测数据，并且在时效保障性方面，临近预报为0～2 h，超短期预报为2～12 h，见表3。

表2　数值天气预报对卫星观测的需求

Tab.2　Demand for satellite observations in numerical weather forecasting

序号	要素	需求	现况
1	三维大气温度、湿度	水平分辨率0.5 km 垂直分辨率0.2 km	水平分辨率15～50 km 垂直分辨率～2 km
2	三维大气风场	覆盖从近地面层到平流层所有层面的高精度三维矢量风场	无
3	二维地表气压场	～1 hPa@全球地表	无
4	海洋上层（0～500 m）温度和土壤湿度	±0.02 m^3/m^3@全球	光学成像地表湿度探测，不能进行植被覆盖或者地面浅表层一定土壤深度的湿度探测
5	海冰和雪水当量	高精度海冰和雪水当量覆盖范围和厚度监测	能有效监测海冰和雪水覆盖范围，海冰厚度无法测量
6	气溶胶和痕量气体	高精度探测，优于1%	大气痕量气体探测精度～3%
7	降水估计和云参数	高精度的云雨过程监测	具备一定的降水探测

表3　临近天气预报对卫星观测的需求

Tab.3　Demand for satellite observations in nowcasting

序号	探测要素	需求	现况
1	台风和强对流	台风和强对流系统的结构及环境场信息	被动红外/微波等探测手段能够实现对台风和强对流天气的位置和强度信息的粗观测，不能实现高精度的结构信息观测
2	大气污染气体	探测精度优于1%	探测精度～3%
3	地表短波辐射	数据更新频率1 h@最低，60 s@期望	数据更新频率为12 h
4	雷电	全球高精度成像监测	已具备区域雷电监测，全球不具备
5	沙尘暴和火山爆发监测	成像频次达分钟量级，空间分辨率优于百米量级	静止空间分辨率为250 m 低轨时间分辨率为4 h
6	洪涝、火灾、滑坡泥石流监测		

3）短期气候观测与预报需要高精度海表参数探测能力、高精度海冰和雪水当量监测、高精度大气风场和大气密度信息。

短期气候预测的季节预报模式初始化需要卫星提供长期稳定的大气、海洋表面温度等观测数据，见表4。

表4 短期气候预测对卫星观测的需求

Tab.4 Demand for satellite observations in short-term climate prediction

序号	探测要素	需求	现况
1	海表及以下温度(以下500 m)	高精度垂直廓线探测能力	不具备天基探测能力,主要依靠海洋浮标,空间分辨率和全球覆盖不能满足要求
2	海洋盐度		
3	海洋洋流		
4	海冰(包括海冰覆盖面积和海冰厚度)	高精度探测	能观测海冰覆盖范围,但不能获取海冰厚度
5	土壤湿度	一定厚度探测	目前处于试验观测阶段
6	雪覆盖面积、积雪厚度和雪水当量	高精度海冰和雪水当量覆盖范围和厚度监测	能有效监测海冰和雪水覆盖范围
7	平流层状态	高精度大气风场、大气密度等信息	不具备有效探测手段
8	太阳光谱辐照度	高精度高光谱分辨率的太阳光谱辐照度参数	光谱分辨率不足

4)气候系统监测需要观测整个地球气候系统,实现对地球气候系统的有效预测。大气和陆表温度探测精度0.1 K,大气痕量气体探测精度1%,太阳辐射探测精度0.1%,时间序列大于15年。需要卫星对大气、海洋、陆地表面、冰雪覆盖层、生物圈等地球系统的准确性观测,见表5。

表5 气候系统监测对卫星观测的需求

Tab.5 Demand for satellite observations in long-term climate prediction

序号	探测要素	需求	现况
1	大气和陆表温度/K	0.1	0.2
2	臭氧(O_3)等大气痕量气体	1%	2%~3%
3	太阳辐射	0.1%	~2%
4	时间序列/年	≥15	>5

5)空间天气具有"全因果链"监测需求,需要开展从太阳活动的源头、行星际空间至地球响应的"全因果链"监测,涉及太阳活动、太阳风、地球电离层等观测要素[14],见表6。

表6 空间天气监测对卫星观测的需求

Tab.6 Demand for satellite observations in space weather monitoring

序号	探测要素	需求	现况
1	太阳要素Ca-II成像	空间分辨率≤1″,时间分辨率≤60 s	具备Ca-II观测能力
2	太阳日冕抛射图像	空间分辨率≤1″,时间分辨率≤5 min	空间分辨率1.2″
3	太阳X-EUV波段流量	精度优于5%,时间分辨率≤3″	精度14%
4	太阳磁场监测	空间分辨率≤1″,时间分辨率≤60 s,精度≤5 Gs	空间分辨率1.2″
5	太阳风监测	精度优于5%,时间分辨率≤3″	具备太阳成像、日冕成像,太阳磁场监测和太阳风探测能力
6	中高层大气风速	精度优于10 m/s,垂直分辨率≤20 km	—
7	中高层大气密度	精度优于15%,垂直分辨率≤50 km	大气密度分辨率6×10^{-14} kg•m^{-3} 大气密度分辨率1×10^{-13} kg•m^{-3}
8	中高层大气温度	精度优于15 K,垂直分辨率≤30 km,观测周期≤60 min	水平分辨率32~78 km(FY-3)

3.2 协同观测需求

面向后续发展需求和现有气象卫星体系的差距与不足,从事件协同、要素协同、时空协同等方面,按照"从体系到卫星/仪器"自顶向下地开展后续气象卫星体系论证,实现气象卫星互联互通、智慧协同观测,是新时代气象高质量发展的必然要求。

3.2.1 事件协同需求

我国雷暴、暴雨、大风等中小尺度强对流天气现象频发,需要时间分辨率从小时级到分钟级、空

间分辨率十米量级的卫星资料。数值天气预报所需的温、湿度廓线信息更新率需要小时到半小时级。目前，不同卫星平台的载荷协同观测能力还未达到最优，新一代风云卫星智慧协同观测体系需要提升载荷协同观测能力。

针对气象灾害产生、发展、消亡全过程，研究高低轨卫星协同实现对灾害全链条实时观测的可行性，如台风产生、发展、登陆以及强降水从水汽凝结、增长到降水全过程。由不同轨道、不同卫星上的光学成像仪、微波成像仪、降水雷达等载荷开展灾害全链条监测，由光学、合成孔径雷达（Synthetic Aperture Radar，SAR）等载荷开展灾情评估。

3.2.2　要素协同需求

目前，我国气象卫星的探测要素全面性存在不足，无法获取全球三维大气风场、三维云物理结构、地表气压以及海洋次表层剖面温度、盐度、密度和涡流信息等，在龙卷风、大暴雨、台风强度预报等方面距离应用需求差距较大。新一代风云卫星体系需要研究各类探测要素的时空协同、多体制协同、全链路协同，以加强在短临天气预报、强降雨、台风等方面的观测能力。

1）载荷配置协同。不同探测体制可以获取不同层次的要素信息，有利于气象资料的多元化应用，如针对降水要素，可以配置光学成像、偏振成像、微波辐射计、微波雷达等多体制协同观测，实现不同降水维度多层次观测。针对三维风场，可以配置被动光学测风、激光测风、散射计测风、微波雷达云内风、GNOS-R 测风等多手段协同观测，实现不同高度全球风场探测。以高时空覆盖为基础，同要素开展不同体制探测，分析不同探测体制对数据资料的贡献，丰富同要素探测的物理量。

2）通道设置协同。同一观测要素不同卫星平台的通道设置不健全，通道设置有待优化。通道的设置需要覆盖要素的产生、发展和形成过程，不同平台不同体制的仪器覆盖要素的不同阶段，捕捉要素的全链条过程，增强对天气预报和短临预报的全链路致灾机理研究。以探测要素为基础，从时空覆盖角度，低轨卫星仪器通道设置侧重要素全球覆盖和高精度探测，高轨卫星侧重实时监测和预先发现，分析探测要素的通道设置，需要几个轨道几台仪器可满足探测要素的全链路探测。

3）多体制协同。在台风观测方面，面向台风定位、定强和内部结构监测等难题，通过光学、微波、主动风场、主动降水等多探测体制协同观测，获得台风周边晴空及内部冷暖结构、高精度台风结构数据和高频次台风周边大气数据，可以大幅提升台风路径和强度预报准确性。

4）全链路协同。针对云、雨，尤其是强降水，目前仅具备光学成像仪、降水雷达、微波成像仪等探测手段，通过补全激光三维风场、云雨结构等探测要素，论证从二维云滴、暖云、水云等要素观测到水汽与凝结核、云、雨滴、降水、降雨等全过程三维立体观测的可行性，在探测手段、探测精度、时空分布等方面互为补充，实现对强降水的产生、发展、致灾链的观测能力[15-21]。

3.2.3　时空协同需求

我国低轨气象卫星 4 轨组网，数据更新时效 3 h，对于降水结构等关键要素，目前仅有 1 颗主动降水雷达测量卫星，探测时效存在不足，三维风场等关键要素暂不具备探测能力。高轨气象卫星目前具备被动光学探测手段，无法穿透云层；微波星可实现穿云透雨探测，但在探测内部精细结构、云雨过程高精度监测等方面能力不足。面对短临天气、强降雨预报等需求，开展高低轨时空分辨率协同观测，满足多要素高分辨率、更高观测频次观测需求（1 km、1 min 级，临近预报 0～2 h 时效性）。

4　体系构成与技术特征

4.1　风云卫星智慧协同观测体系构成

新一代风云卫星智慧协同观测体系以地面系统为体系中心，负责数据处理、体系运行规划、任务实时分发；高轨综合卫星为天基枢纽，负责获取遥感信息、数据预处理、实时下传高低轨数据、自主运行规划；低轨综合卫星为天基节点，负责获取遥感信息、数据预处理、自主运行规划。

新一代风云卫星智慧协同观测体系是以高低轨大卫星为骨干、包含各类卫星、星地一体的开放式卫星体系，是天基观测网与地面应用网的一次深度融合，以实现观测、应用和服务一体化发展。通过天地一体的体系协同观测、智能天基资源调度及动态任务规划，实现高轨实时观测与低轨精细观测的有机结合，在探测手段、探测精度、时空分布等方面互为补充，全面提升观测效能，确保全球气象数据接收自主可控。

4.2 风云卫星智慧协同观测体系技术特征

新一代风云卫星智慧协同观测体系呈现以下技术特征。

1）互联。新一代风云卫星智慧协同观测体系中的所有卫星均需具备星间互联、星地互联能力。星间互联方面，需要实现高通量、高可靠、长寿命的星间数据互联，形成紧耦合的卫星体系；星地互联方面需要建设星地一体的体系运行网络，数据广播服务可定制，实现点对点友好服务。

2）智能。新一代风云卫星智慧协同观测体系中的所有卫星均需具备自主运行、智能处理、智能决策、智能响应等自主协同运行能力；具备突发事件快速决策响应、自主规划、自主协同、自主处理、自主重构等能力，提高运行与应用效率。

3）开放。新一代风云卫星智慧协同观测体系需保持开放、包容、多样，支持轨道多类、卫星多型、观测要素多样。轨道类型方面，增加发展椭圆轨道、中轨等；卫星类型方面，综合星、专用星与验证星，大卫星与小卫星均可纳入；观测要素方面，气象、空间天气、极地、海洋等观测要素统筹考虑。

4）标准。新一代风云卫星智慧协同观测体系需建立相关标准，包括数据标准、辐射标准、光谱标准等。基于数据标准，建立数据接口和平台，实现快速接入与按需接入。统一空间辐射、光谱基准，作为纳入体系的必要特征。

新一代风云卫星智慧协同观测体系按试验验证、业务运行、全面协同“三步走”规划进行建设。至2025年左右，将完成星间激光通信和协同观测功能验证，初步具备高低轨在轨协同观测能力，能够开展火点检测与定位，实现台风、强降水天气高频次探测等协同观测任务；至2030年左右，低轨气象卫星升级换代、高轨气象卫星有序更新，初步建成具备智能、开放等特色的高低轨智慧协同观测体系；至2035年左右，完成体系智能通联，全面实现风云卫星体系化、星地观测协同化、业务数据智能化运行。

5 发展方向

5.1 实现高可靠的高低轨互联互通

新一代气象卫星数据传输呈现大吞吐量、多星组网、应急分发等特点，气象卫星组网通信已成为信息快速获取、多星智慧协同观测的必备链路。需突破气象卫星信息网络通信协议、网络管理、大时空跨度低时延立体网络路由等技术，实现星间网络和星地传输网络的互联互通及高效融合[22-26]。

5.2 打造集约高效智慧的星地系统

利用星间互联，集约高效获取全球观测数据，增强风云卫星全球数据获取的时效和保障能力，支撑气象“全球监测、全球预报、全球服务”；发展观测-预报一体化技术，实现风云气象卫星支撑精细预报的“智慧观测”系统；建立星地一体化全自动业务控制系统；突破海量数据智慧处理和服务技术；提升卫星平台性能，解决帆板挠性振动的被动抑制、复杂干扰力矩高精度实时辨识与补偿控制等难题。

5.3 构建开放的风云协同生态

面向高质量发展需求，风云卫星将提供精准高效的气象服务、主动融入智慧型经济发展浪潮，发挥风云卫星全球覆盖观测、全链条应用、一站式服务优势，形成“风云＋”与“＋风云”双向互动的融合发展新业态。小卫星星座与风云卫星系统有机结合，对风云气象卫星观测要素数据形成有益补充。通过与应急、水文、生态环境、自然资源、交通、农业等多部门、跨行业数据互通互融，打造风云卫星跨域协同应用场景[27]。集合科研院所、高校，建立数据、算法、产品开发的公用资源平台，促进风云卫星数据在社会各行业更广泛的应用。

5.4 实现空间高精度基准传递

瞄准支撑实现国际首次空间辐射测量基准溯源的目标，面向新体制的空间辐射测量基准载荷和复杂的辐射基准传递模式，需突破服务全球高低轨卫星遥感仪器高精度基准传递系统指标体系构建，面向长时间序列气候观测的大尺度平台与载荷一体化高精高稳控制、面向多星交叉定标场景实时智能自寻优和调度管理等关键技术，实现直接向国际单位(Système International d'Unités，SI)溯源[28-30]。

6 预期效能

风云卫星智慧协同观测体系建成后，可以根据体系内不同卫星不同观测手段的特点进行任务规划，从而实现高效能观测。针对激光测风、红外高光谱、大气化学探测等晴空区探测载荷，规划其非云区观测任务，依托新一代低轨、静止气象卫星，高

低轨气象卫星通过主被动手段，联合开展三维风场、大气温湿度廓线、大气运动矢量、大气成分等要素的高时效、高精度动态监测。风云卫星智慧协同观测体系建成后将开展高效率灾害应急响应协同观测，进一步增强对台风、强对流、林火等灾害的应对能力。

1）台风连续跟踪。高轨卫星可实时观测地球全圆盘大气及地球气象信息，通过星上预处理系统，可在台风形成的第一时间实时获取台风区域、路径和强度信息，并通过高低轨星间信息网络将台风事件信息及时传递给低轨卫星；体系内所有低轨卫星将接收到的台风事件信息进行实时判别，并利用低轨卫星机动侧摆功能，对台风事件进行高频次加密观测。

2）火点联合观测。高低轨卫星均可利用自身配置的星上预处理系统，实时获取火点位置和范围等信息，并将火点信息在高低轨星间信息网络中传递；同时可利用高轨卫星实时性和低轨卫星高分辨率观测的优势，将高空间分辨率与连续性相结合，开展高低轨卫星联合观测。

3）强对流区加密观测。由于闪电的发生与强对流的发生、发展密切相关，可利用高轨卫星配置的闪电成像仪，实时获取大气闪电信息，通过高低轨星间信息网络将闪电信息传递给所有低轨卫星，低轨卫星根据闪电预警信息，对闪电区域进行加密成像观测，获取强对流天气从形成、发展到减弱全过程的精准信息。

7　结束语

经过50余年坚持不懈的努力奋斗和自主创新，我国成功研制并发射了两代四型共21颗风云气象卫星，突破了一批定量遥感核心技术，推动了相关基础工业的发展[31]，牵引了高精度遥感卫星研制能力的提升，实现了我国气象卫星业务化运行和定量化应用，已成为国家基础性战略资源。

面向新时代、新需求，风云卫星将坚持创新驱动、自主发展的原则，推动气象事业高质量发展，实现体系智能化、天地一体化发展，构建风云卫星智慧协同观测体系。2035年前，我国将建设第三代风云气象卫星，如图1所示，全面实现风云气象卫星观测能力和应用水平国际领先，充分发挥气象防灾减灾第一道防线作用，全方位保障生命安全、生产发展、生活富裕、生态良好，更好地满足人民日益增长的美好生活需要。

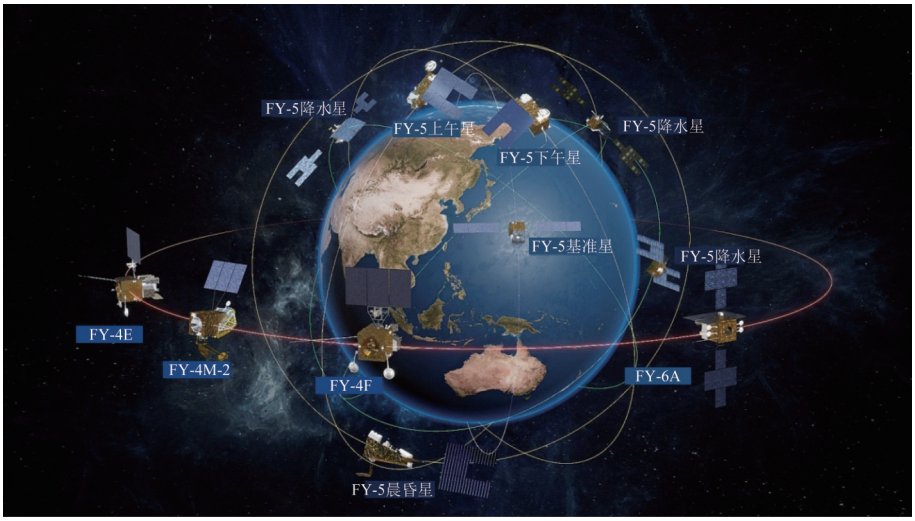

图 1　2035年风云气象卫星体系发展设想

Fig.1　Development prospects of the Fengyun meteorological satellite system in 2035

参考文献

[1] 董瑶海.我国风云卫星体系的发展思考[J].上海航天(中英文),2021,38(3):76-84.

[2] ZHANG P,CHEN L,XIAN D,et al.Recent Progress of fengyun meteorology satellites[J].Chinese Journal of Space Science,2020,40(5):788-796.

[3] ZHANG P,LU Q F,HU X Q,et al.Latest progress of the chinese meteorological satellite program and core data processing technologies[J].Advances in Atmospheric Science,2019,36(9):1027-1045.

[4] 许健民,杨军,张志清,等.我国气象卫星的发展与应用[J].气象,2010,36(7):94-100.
[5] 赵文波,李帅,李博,等.新一代体系效能型对地观测体系发展战略研究[J].中国工程科学,2021,23(6):128-138.
[6] 郭亚楠,曹小群,周梦鸽,等.大数据时代:数值天气预报的机遇与挑战[J].网络安全与数据治理,2024,43(1):28-32.
[7] 孙健,曹卓,李恒,等.人工智能技术在数值天气预报中的应用[J].应用气象学报,2021,32(1):1-11.
[8] 何兴伟,冯小虎.韩琦,等.世界各国静止气象卫星发展综述[J].气象科技进展,2020,1(5):22-29.
[9] 高浩,唐世浩,韩秀珍.风云气象卫星发展及其应用[J].科技导报,2021,39(15):9-22.
[10] 何杰颖,张升伟,王振占,等.风云气象卫星微波大气探测回顾与展望[J].空间科学学报,2023,43(6):1025-1035.
[11] 咸迪,李雪,朱杰,等.风云气象卫星"一带一路"应用现状与发展对策[J].科技导报,20213,39(15):46-53.
[12] 成伟玲,咸迪.风云气象卫星在产品应用中前行[J].气象科技进展,2015,5(5):63-65.
[13] 李蓉,全林,李泠,等.空间天气服务现状及发展综述[J].地球物理学进展,2023,38(6):2417-2429.
[14] 张鹏,杨军,关敏,等.WMO空间计划与风云气象卫星的国际化发展趋势[J].气象科技进展,2022,12(5):56-63.
[15] 谷松岩,张鹏,陈林,等.中国首颗降水测量卫星(风云三号G星)的探测能力概述与展望[J].暴雨灾害,2023,42(5):489-498.
[16] 谭仲辉.基于新一代静止轨道气象卫星的云垂直结构反演与应用研究[D].长沙:国防科技大学,2019.
[17] 郑伟,王新,张晔萍,等.风云气象卫星在防灾减灾中的应用[J].科技导报,2021,39(15):31-38.
[18] 翟盘茂,刘静.气候变暖背景下的极端天气气候事件与防灾减灾[J].中国工程科学,2012,14(9):55-63.
[19] 张兴赢,郑伟,高玲.风云气象卫星在自然灾害监测中的应用[J].城市与减灾,2018,123(6):36-42.
[20] 李俊,闵敏,李博,等.基于风云四号静止气象卫星的局地对流智能化预警模型及应用[J].气象科技,2023,51(6):71-784.
[21] SHAO J L, GAO H, WANG X, et al. Application of Fengyun-4 satellite in flood disaster monitoring through rapid multi-temporal synthesis approach[J]. Journal of Meteorological Research, 2020, 34(4): 1-12.
[22] 孙晨华.天基传输网络和天地一体化信息网络发展现状与问题思考[J].无线电工程,2017,47(1):1-6.
[23] 崔高峰,李鹏绪,张尚宏,等.天地一体化信息网络中卫星通信关键技术初探[J].电信网技术,2017,23(10):1-6.
[24] 郭强,韩琦,冯小虎.新一代风云四号气象卫星任务规划研究与应用[J].电子测量技术,2020,43(23):40-45.
[25] 陈占胜.未来智能化网络化多功能卫星系统技术发展思考[J].上海航天(中英版),2021,38(3):63-67.
[26] 张路,燕锋,章跃跃,等.基于星间链路状态的低轨卫星网络路由算法[J].上海航天(中英版),2021,38(4):92-100.
[27] 卢乃锰,丁雷,郑小兵,等.中国空间辐射测量基准技术[J].遥感学报,2020(6):672-680.
[28] 吴铎,王凯,叶新,等.空间低温绝对辐射计研究[J].发光学报,2019,40(8):1015-1021.
[29] 汤琪,李健军,李琛,等.基于参量下转换自校准辐射基准源原理样机的光机设计[J].光子学报,2019,9(1):1-11.
[30] 何杰颖,董晓龙,卢乃锰.空间微波辐射基准传递溯源展望[J].空间科学学报,2023,43(6):1016-1024.
[31] 乔辉,王妮丽,贾嘉,等.碲镉汞光导器件在风云气象卫星中的应用[J].激光与红外,2023,53(10):1534-1544.