

中国气象局综合气象观测业务运行信息化平台的设计与业务化运行

■ 秦世广 刘健 李巍 邵楠 庞晶 周薇 刘浩 石锐

回顾我国气象观测业务信息系统建设历程,提出了综合气象观测业务运行信息平台设计理念,并阐述了平台整体结构、布局、架构和功能等总体设计思路。基于统一数据源,平台支撑了观测业务管理和质量管理体系运行需求。自2021年1月业务运行以来,平台通过流程控制与信息联动,构建了集约统一、融合互通的气象观测业务智能化信息系统。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2023.06.009

《国务院关于加快气象事业发展的若干意见》指出,综合气象观测系统是国家重要的公共基础设施,是气象和地球相关学科业务与科研的重要基础。“综合”是地基、空基、天基观测的综合,也体现了观测、处理、应用的集成。经过70多年的发展,我国建成了集陆-海-空-天一体的8万余站规模的综合气象观测系统,经历了自动观测取代人工观测,直接观测向遥感观测发展,数据直接用于气象服务产品等转变,并在互联网、大数据背景下,加速向智能、协同观测方向发展。近10多年观测业务信息系统建设也随之快速发展。2010年中国气象局建成综合气象观测系统运行监控平台(Atmospheric Observing System Operation Monitoring, ASOM)并业务运行,初步实现了站网信息管理、运行监控、维护维修、考核评估等功能。2013—2015年,系统升级至ASOM2.0,尝试了国省两级部署并进行了优化改进,但受多方条件限制,在业务运行中出现了数据源不统一、信息不共享、业务数据关联性低等问题。此外,为加强气象装备全生命周期管理,中国气象局启动了气象装备编码标准建设,逐渐形成了规范的编码和校验规则,并在安徽省牵头的气象装备动态管理系统中应用推广,但由于系统省级独立部署等因素,省际间无法保证编码唯一。在计量层面,浙江省牵头建设气象计量检定业务系统,将数据库技术和工业自动化控制相结合,实现了传感器实验室自动化检定。

伴随着我国气象观测业务的发展,国际化理念

也得到了充分体现。2004年和2007年的两次世界气象大会先后决定成立世界气象组织信息系统(WMO Information System, WIS)和世界气象组织综合观测系统(WIGOS),肯定了信息与观测系统在WMO中的核心地位,并推出了一系列指南和技术规范,元数据标准即是其中一个。在管理理念层面,WMO认为气象观测质量保障需要建立贯穿于整个观测系统的管理体系,2017年我国启动气象观测ISO9001质量管理体系建设,将目标质量管理体系与气象观测有机融合,构建起持续改进、自我完善、科学卓越的中国气象观测质量管理体系。以上两点对于我国观测业务系统的底层设计与管理模式提出了更高要求。

综上所述,由于已有观测业务系统分散独立、缺乏统一的接口标准和应用规范,导致无法通过简单方式完成集约化管理。系统间数据的不一致造成业务数据难以有效应用;大数据、智能分析、移动互联等技术手段应用不足,系统架构无法适应气象信息化发展新要求;系统流程不够规范,难以支撑观测质量管理体系要求,亟需构建功能集约、数据统一、架构先进的信息化业务平台,以支撑气象观测业务发展。2018年起,中国气象局启动综合气象观测业务运行信息化平台(以下简称平台)研发工作。平台由中国气象局气象探测中心牵头组织设计和开发,2021年1月1日建成并投入业务运行。本文通过梳理已有业务系统面对现行业务需求的不足,从平台的设计理念和总体设计出发,通过归纳平台对信息的一致性管理、准确性管

收稿日期: 2022年5月6日; 修回日期: 2022年8月11日
第一作者: 秦世广(1976—), Email: qinshg@cma.gov.cn
资助信息: 2018年山洪地质灾害防治气象保障工程

理以及过程控制管理的关键方法及典型应用，全面总结平台对于综合气象观测业务的支撑作用。

1 设计理念

平台以实现观测业务现代化为目标，以质量管理体系为理念，以观测业务全覆盖、业务流程全支撑为建设重点，基于气象大数据云平台（简称“天擎”）数据支撑环境，整合分散独立的业务系统，重构核心功能子系统，实现观测元数据信息全程监管、装备全生命周期信息化管理、观测数据全流程质量控制、产品加工及应用智能化服务，确保各级业务和管理部门信息共享和协同工作。

平台设计充分考虑综合气象观测业务覆盖能力以及对业务过程的管控能力。应用质量管理体系对观测业务工作项及业务过程的成果梳理，完成整体功能架构设计和业务过程功能建设，涵盖了我国主要气象观测任务，形成了集基础数据管理、装备运行监控、装备维护维修、在线技术支持、仓储供应管理、数据质量控制、产品应用服务、综合考核评估、观测业务信息服务、计量信息管理等业务功能于一体的综合业务平台。遵循质量管理体系的PDCA循环理念（Plan-计

划、Do-执行、Check-检查和Act-处理），平台强化气象观测业务流程中各业务环节的追踪引导与校验审批，确保各类业务信息在应用过程中的一致性、准确性以及可控性。

2 总体设计

2.1 结构设计

平台整体结构如图1所示，包含基础设施、数据中心、基础服务、业务服务和展示层五个层次。

基础设施包括硬件环境资源、网络设施服务等基本环境，数据中心主要实现数据的获取存储与服务支撑。按照中国气象局信息化建设总体要求，基础设施和数据中心依托“天擎”运行环境。“天擎”作为以“云+端”为设计思路的“数算一体”平台，可以支撑各应用系统围绕数据、算法和算力集约化运行。

平台的结构设计充分考虑全国8万余个观测站的海量观测数据的存储、分析与处理需求。数据存储采用混合存储模式，根据数据形态和业务属性分别存储在交易型数据存储环境和分析型数据存储环境。交易型数据存储环境通过虚谷集群技术解决事务性强的数据存储，如故障单数据，仓储数据等业务类数据。分

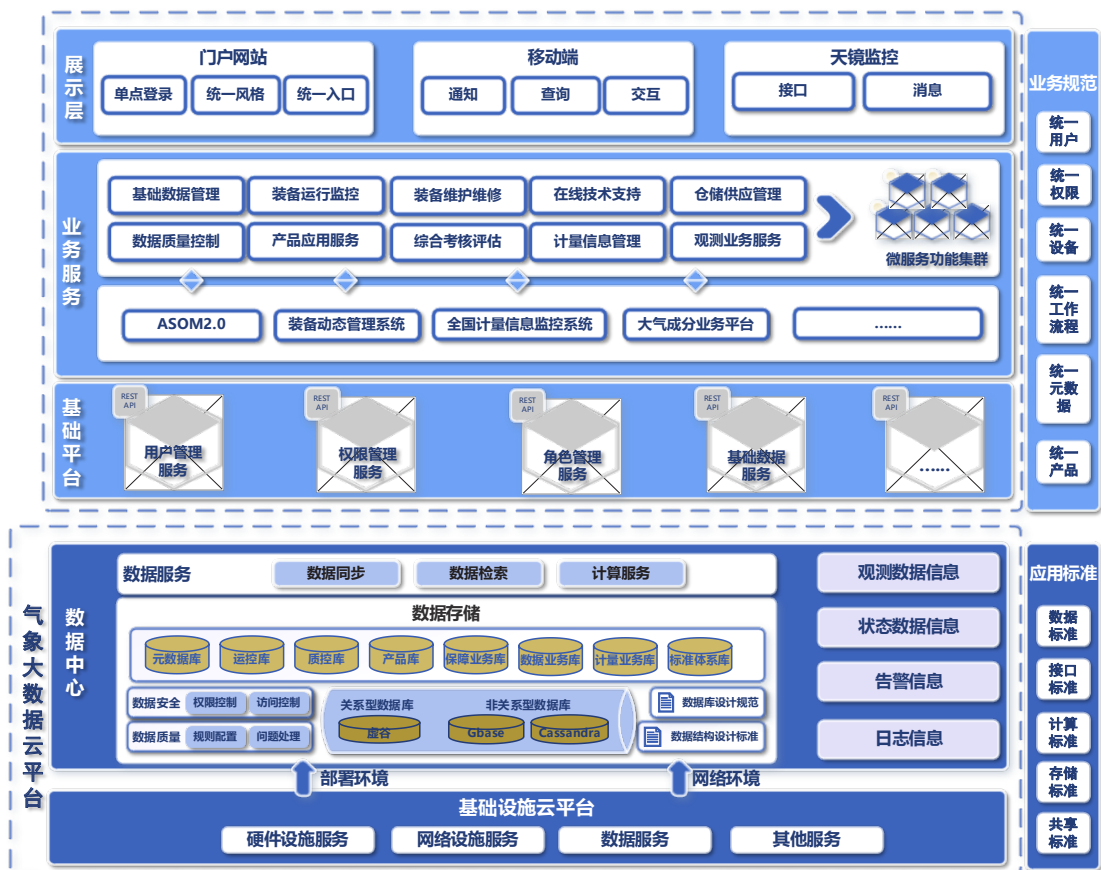


图1 平台系统结构

析型数据存储环境通过分布式表格系统技术解决海量数据存储,如加工后的观测数据、质量控制数据、产品数据等。平台基于“天擎”大数据计算框架提供的数据加工流水线系统,通过动态并行计算,解决系统计算能力瓶颈。数据检索服务通过应用索引数据库和二级索引技术,实现海量数据快速检索,为数据持久化服务提供数据同步功能,保证平台各个逻辑数据库和外部业务系统数据库中数据源的一致性。

平台基础服务依托全国气象业务用户全局统一认证系统进行用户数据的交互与共享,包括统一的用户服务、角色服务以及权限服务,解决各业务系统基础数据不一致、用户权限不一致的问题。平台使用“天擎”提供的二次开发的技术组件,包括消息服务、工作流引擎、自动报表以及GIS地图管理服务等。平台业务服务将业务整合重构并重新划分,形成现有业务子系统,基于微服务架构将业务子系统功能拆分,实现多个独立的应用服务群,通过工作流引擎,串联应用服务群中具有衔接需求的功能点,形成一整套功能流程。平台展示层分为门户网站和移动应用,为各级用户提供个性化工作台和移动办公手段,利用可视化技术提供统计、分析以及评估指标的定制展示,观测数据与观测产品的三维立体展示等。平台监控业务依托气象综合业务实时监控系统(简称“天镜”)统一框架,实现监控数据的交互与展示。

2.2 布局方式与技术框架设计

为满足基础数据标准统一、信息资源全局共享等需求,平台布局方式确定为“一级部署,四级应用”,即在国家级“天擎”统一部署,满足国家级、省级、市级以及县级(台站级)的应用需求。该方式会增加平台网络流量、IO、计算等方面的压力,为避免早期ASOM系统采用“一级部署”方式出现的各类响应滞后问题,平台通过引入云平台技术架构,结合虚拟资源池技术、大数据技术、微服务与中间件等技术手段,设计实现了更加高效的技术框架,可满足数据高并发、负载动态均衡以及可扩展需要,以快速适应未来业务的发展与变化。平台基于分布式集群的部署理论,以微服务架构将热点功能拆分为单个服务分别部署,通过负载均衡技术进行协调,在不考虑网络带宽影响情况下满足热点功能对业务用户的并发响应需求。

为满足不同场景的使用需求,平台采用B/S与C/S架构相结合的方式。B/S架构用于实现PC端面向用户的服务体系。C/S架构应用于移动端与应用控件端。“云”的应用使平台从逻辑层面的部署越来越趋近于集

约与统一,避免出现数据不一致、评估结果不一致的情况。

2.3 网络架构设计

平台依托“天擎”进行网络架构部署,服务器等硬件资源由“天擎”统一提供,网络环境依托中国气象局业务局域网。针对移动网络,平台能够根据连接的移动供应商自动适配业务内容,同时提供电信端口与联通端口的切换,南方与北方网络关联。网络架构设计通过多种技术手段解决网络IO瓶颈的制约,包括控制各子系统页面数据请求次数,压缩部署页面的CSS和JS代码以减少传输数据量,应用浏览器缓存技术缓存CSS和JS等静态资源以降低数据传输频率,采用GZIP(GNU.zip,文件压缩程序)格式进行数据压缩传输进而降低网络带宽占用,使用行为追踪算法发现长时间、高频次占用网络带宽的用户并自动进行访问限制等。

平台采用专用网络安全域满足信息系统安全等级保护要求。平台应用的服务器资源基于“天擎”,具备防火墙及相关安全设备实现安全域规划。

2.4 功能设计

平台总体功能设计如图2所示,分为基础功能与业务功能设计。基础功能为整个平台的功能服务框架,提供包括个人工作台、综合信息显示及系统管理等基础功能。业务功能根据主要业务服务方向搭建,形成平台的业务子系统。其中,基础数据管理子系统实现对各类观测任务元数据信息的采集、共享、综合显示、维护管理;装备运行监控系统在继承原业务系统功能的基础上,着重完善技术标准和业务规范,提高发现装备质量问题的能力,建立快速反馈及解决问题的机制;装备维护维修子系统按观测任务建立维护、维修、定标等信息的采集、管理和综合评估平台;在线技术支持子系统通过知识库与专家库建设实现在线技术支持并支撑社会化保障业务;仓储供应链管理子系统实现对观测装备的验收测试、采购、仓储、流转及报废等全寿命追踪过程的管理;计量信息管理子系统实现观测要素仪器信息、计量标准的信息管理与装备业务数据的有机融合;数据质量控制子系统与产品应用服务子系统主要通过内置算法实现对各类观测的数据质量控制以及多源数据的融合展示等;观测业务信息服务子系统实现对探测环境直报信息的管理以及气象观测铁塔台账的管理;综合考核评估子系统综合各子系统信息实现对数据质量、传输质量、运行质量、维护保障质量及探测环境的综合评估。

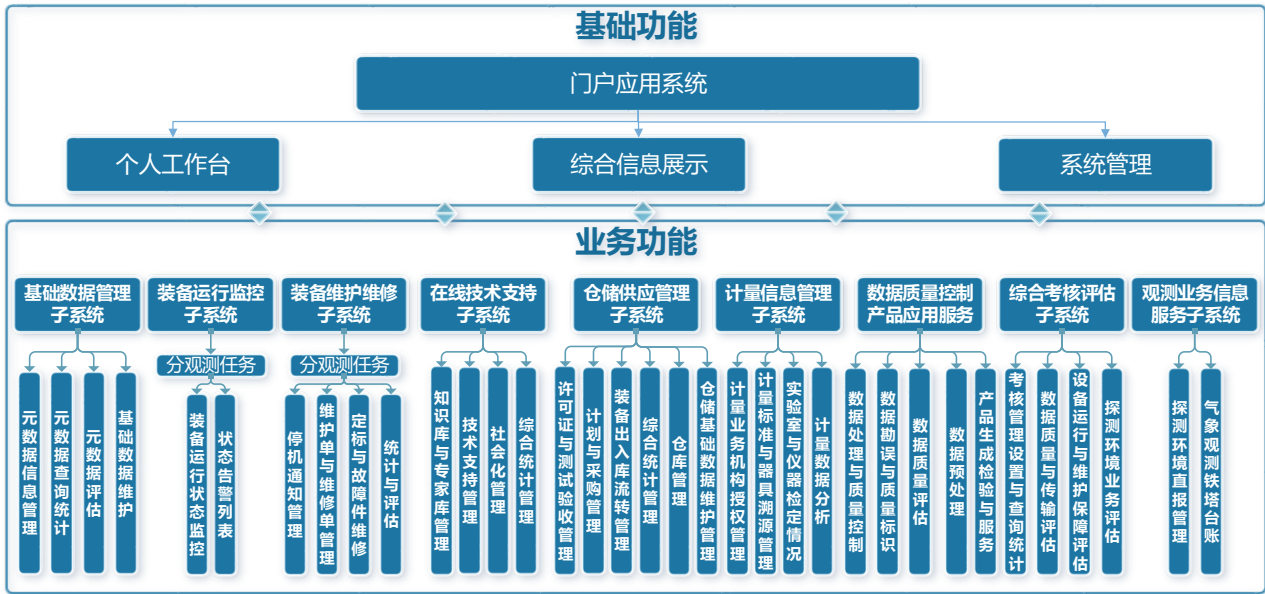


图2 平台系统功能框架图

3 技术特征及典型应用

观测业务信息系统经过近十余年的迭代发展，部分核心业务功能（如运行监控、维护维修等）从算法设计到交互界面已相对固化。为保证业务系统应用的延续性，平台在子系统功能设计和展示方面尽可能延续已有业务系统布局和交互界面风格，以降低业务切换中用户不适应度，因此具体功能并不是平台设计和建设的重点。本文重点介绍平台在业务信息一致性、准确性以及业务管理支撑等方面的技术特征和具体应用。

3.1 业务运行信息一致性管理

业务运行信息的一致性管理即根据业务规范与技术标准，规范业务流程中对信息的采集要求，通过安全、统一、便捷的信息化手段实现信息共享，确保平台信息内部一致性及对外统一发布。

3.1.1 标准规范统一

平台应用气象观测质量管理体系对国省市县四级机构观测业务流程的梳理成果，规范平台中的业务描述、业务职责和业务流程，在统一标准下对观测元数据信息、运行监控信息、维护维修信息以及观测装备的装备编码规则、业务流转规则、计量流程等进行设计。

观测元数据是描述气象观测要素、观测条件、观测方法和数据处理方式等信息的数据。WIGOS元数据标准指出“没有元数据的观测资料用途非常有限：只有在元数据（描述资料的数据）充分的情况下，才能发挥观测资料的最大潜力”。平台在WIGOS元数据

标准规则下，探索并建立符合中国气象观测规范和应用要求的元数据管理方法，以及适应各类观测任务的观测元数据标准模式。该模式以观测元数据标准化信息码表形成，融合基本信息、设备信息、业务运行信息、观测要素、历史沿革、环境基本信息、环境图片信息、人员信息等要素，无缝衔接WIGOS及国内相关元数据标准，具备广泛适用性。在气象装备编码管理层面，平台基于国家标准《气象观测装备编码规则》为观测装备生成编码，其构成包括界定了装备的功能属性和型号信息的装备类别码，标识了装备供应商的厂商识别码，标识了设备生产信息的批次码、日期码和生产序列码，以及用于编码读写过程的校验码。统一的编码规则确保了观测装备的业务特性在编码层面的统一释用，在此基础上整合需求，以规范的准入准出与接口共享机制，逐步形成全局动态更新的装备类别码库、厂商识别码库与装备编码库。

3.1.2 数据源统一

平台以通用的标准规范实现统一的接口管理。各类接口的调用均需通过接口管理模块将接口注册至“天擎”，对可用性、准许请求规则、请求超时时间等属性信息，数据形式、服务调用频次、服务调用方式等业务需求进行统一管理。

观测元数据应用广泛，早期观测元数据缺乏统一的信息化管理，数据源分散、信息不完整、格式不一致。元数据更新时需要在数据生成、采集、质量控制、管理、应用等多系统分别同步信息，工作量大且难以保证时效性与准确性。平台在规范化信息采集

基础上,通过数据接口、服务接口和即时消息实时提供元数据获取与更新服务,最大程度地保证应用端获取元数据信息的一致性。平台构建的标准观测元数据库作为气象行业观测元数据唯一数据源,通过数据接口和即时消息向观测端、数据应用端提供信息共享服务。装备编码的管理方面,平台统一装备类别码与厂商识别码的准入与校验规则。平台内各子系统通过消息中间件调用编码接口服务;平台外提供编码读取接口以满足各类业务对装备信息调用需求,并提供互联网环境下可供供应商使用的装备编码生成与打印控件。平台通过统一类别码库管理,解决原有装备编码省间规则不一致以及编码重复的问题,实现装备编码跨省、跨部门的统一应用。

3.2 准确性管理

平台业务运行过程中会产生大量业务记录,这些数据的准确性直接影响着平台业务效益发挥和拓展功能应用。平台通过综合调度数据校验、电子审批和信息联动等技术手段保证业务数据的准确可靠。

3.2.1 数据校验

平台通过自校验与互校验两种方式形成数据校验方法。自校验是根据填报信息的基础特征,结合相应标准规范,以格式检查、界限检查、时变检查等手

段,在数据采集源头进行控制。自校验在平台中应用广泛,包括观测元数据信息、维护维修业务表单、仓储出入库表单、计量登记表等。互校验是利用一致性检查手段,根据数据间计算关系和关联关系,整合逻辑校验关系,构建数据间的约束。数据互校验主要用于观测元数据,平台开发的元数据“质量检查”功能模块,通过不同维度的逻辑校验,对观测元数据中异常情况实时排查并展示发布。

3.2.2 电子审批

平台的部分数据采集仅依靠逻辑层面的校验方法难以实现准确性验证,因此结合质量管理体系理念,平台引入人为干预设计了电子审批流程。平台对观测元数据申请审批管理流程、地面观测站环境直报汇总流程、维护维修填报管理流程、仓储采购计划与调拨应用流程,通过变更时间的线性关系对流程中关键节点的变更内容追踪记录。平台采用逐级审批与单次审批两种方式审批具备不同特征的业务过程,如图3所示。逐级审批对整条业务过程在组织机构间与功能模块间设定关键审批节点,当最后一级审批节点通过审批后,提交的信息才会正式生效,主要应用于包括站网元数据和装备类别码等重要基础信息的建设与完善过程,以及涉及多部门协作的具体业务过程,具备

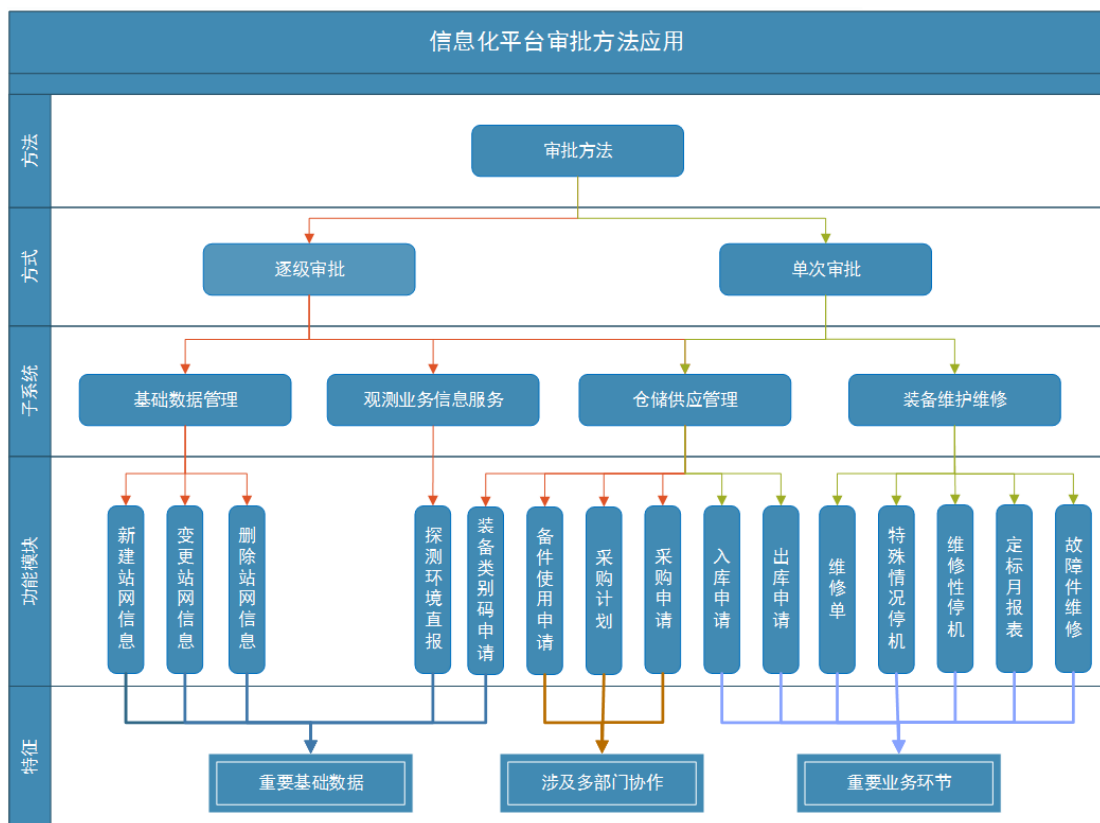


图3 平台审批方法应用

双向流程处理能力。单次审批则是对已提交的信息样本，一次审批通过即可生效，多应用于业务流程的重要环节。审批流程以“审批通过”或“撤销申请”两种形式结束。

电子审批应用本质是一种行为约束，与管理方法间彼此制约。平台作为全国业务系统，需要考虑各省业务环境，故对审批方法提供了适应省级需求的自定义空间，例如：对于观测元数据信息填报，可以在基本审批流程中增加审批环节；对于维修单，可以对每类观测任务选择是否开启单次审批；对于部分仓储类业务，可以自定义审批流程等。

3.2.3 信息联动

信息联动是在平台各子系统的多级约束关系下进行的，平台中典型应用是观测装备的全寿命追踪过程，以装备编码为媒介，记录关键设备组件在各业务环节流转中动态交互的行为痕迹。装备编码在仓储供应子系统中实现创建、流转与报废，建立与机构、属性（业务特性、采购信息、状态等）的关系；在计量信息管理子系统中建立与计量标准、计量记录等的关系；在基础数据管理子系统中建立与观测元数据的关系。平台通过装备维护维修子系统中维护、维修、巡检业务过程的“更换件”操作，记录装备组件在站网与仓库间的流转事件，通过装备编码信息联动，实现观测站中具体装备信息的同步，保证了观测装备关键信息在不同子系统间的一致性。上述关键信息又与各子系统的其他信息间存在制约关系，在彼此间的校验下，解决观测装备追踪过程的信息孤岛等问题。

3.3 综合业务管理支撑

在一致性管理、准确性管理等技术手段支撑下，平台可以有效保证各业务数据汇交的可靠性，这也为观测业务管理的信息化建设提供了更全面、可信的数据支撑。目前平台已管理全国8万余个站点信息，支持正式发布的国家级气象观测站名录，实现了地面气象观测站探测环境变化情况等业务管理信息化，保证业务管理人员实时了解全网观测业务运行状况。更为重要的是，平台可以为观测业务运行质量评估提供有效数据。平台实现了包括观测元数据质量、观测数据质量、装备运行质量、维护保障和探测环境等5个方向上14个评估指标的统计。随着业务应用的广泛开展以及大数据技术应用，平台将继续深度挖掘各业务功能模块数据相关性，为观测业务科学管理和准确决策提供依据。此外，平台业务功能与业务流程构建过程继承了质量管理体系对业务工作项和业务过程的梳理成果，对各类观测业务和流程关键节点操作进行留痕记录，这也为质量管理体系运行提供了重要的数据支撑。

3.4 新技术应用

3.4.1 可视化 WebGL 技术在监控中的应用

部分气象观测产品具备多维属性，平台在地理信息系统基础上，利用WebGL的三维引擎技术，应用剖面方式进行交互，通过三维剖面立体展示雷达回波垂直结构特征等（图4），可以通过不同角度查看数据形态，使用户直观应用相关数据或产品。

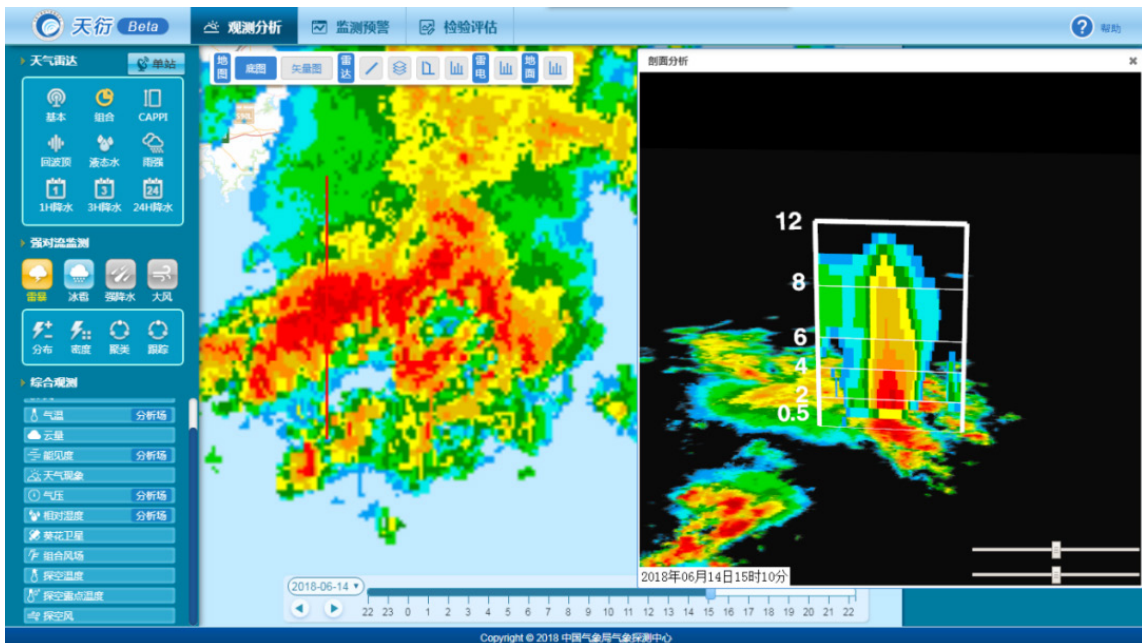


图4 综合监控信息三维视图

3.4.2 AR/VR 技术在远程技术支持中的应用

相较于常规手段，增强现实技术（AR）与虚拟现实技术（VR）的有效结合在远程技术支持领域更加直观高效。平台运用Vuforia SDK、ARKit和ARCore等主流的AR软件框架搭建虚拟雷达实景，集机房实景监控、运行状态交互于一体，呈现裸眼可视交互实景。在远程技术支持应用场景中，维修工具说明书虚拟运行，技术人员现场跟随操作，通过AR标记与工具标记等手段，在多端音视频通话中获取远程专家指导。平台支持多人在线模式，操作同一虚拟雷达部件进行演练，完成交流学习。

3.4.3 机器学习在智能故障诊断中的应用

目前装备保障领域大部分故障或告警信息处理为

事后响应，且主要依靠人工经验进行判别和排除，缺少智能化预测、判别和处理问题的能力，平台引入机器学习和人工智能领域模型和算法，通过历史运行数据和实时监测数据特征进行故障识别模型的训练和完善，实现装备故障的智能化预测和诊断。在系统运行过程中，平台不断通过获取的各类设备正常运行参数和故障信息进行训练和自适应学习，通过数据驱动模型和智能算法对雷达正常运行特征和各类故障特征进行识别，并对故障处理知识和业务应用场景进行提炼，自动完善和扩充系统知识库，形成数据驱动与知识图谱结合的诊断模型，进而结合实时监测参数进行分析计算（具体应用实例如图5），实现装备的健康度监测、故障早期识别预警和故障类型辅助诊断。



图5 天气雷达单站故障预测诊断实例

4 结语

平台自2021年1月正式业务运行以来，年访问量达300万人次，单日最高访问量3万人次。平台数据接口共享服务47个，覆盖基础数据管理、运行监控、维护维修、仓储计量等多个业务方向。平台管理8万余个站的各类观测站点信息，各类装备维护记录413万余条，维修记录10万余条，管理气象观测装备81万余件。

平台的建设兼顾了WIGOS的数据规范要求与我国综合观测业务现状，凝聚了各界气象同仁的智慧与贡献。经过近几年的设计开发与应用，平台在系统建设和信息联动方面做出了大量创新性、实践性的尝试：创建了一套气象观测元数据维护、追踪与共享方案，实现了全国业务运行信息的统筹管理；通过信息联动，

实现了装备信息在全国范围内、全业务链条下的寿命追踪管控；实现了全国气象装备计量检定业务信息统一管理；实现了数据质量控制、产品应用服务、质量管理体系等子系统的集约化接入。伴随着功能的不断优化，平台正逐步趋向于更加完整系统、互联互通、有机融合的整体。

平台在应用过程中依然暴露出一些不足，如站网元数据部分信息的真实性校验存在困难、装备供应商难以协同参与观测装备的全寿命跟踪管理、一级部署环境下省级各类本地化需求的实现等。对照国务院印发的《气象高质量发展纲要（2022—2035年）》，未来平台仍需增强气象科技自主创新能力，提高平台智能化、智慧化程度，推进气象观测质量管理与业务管理的有机融合。平台将引入多重技术手段持续提高观测

元数据可用性, 优化完善社会化保障业务支撑能力, 以试点带动省级本地化需求与平台的功能融合, 通过智能告警算法建立覆盖全面、投放精准的监控告警与业务引导策略等。在倡导国家级业务系统规范化、集

约化建设的大背景下, 平台持续升级优化功能、改善体验, 为我国综合气象观测业务的信息化建设提供可靠支撑。

深入阅读

杜建苹, 任杰, 2014. 气象装备全寿命自动跟踪编码设计. 气象科技, 42(5): 759-763.
方海涛, 钱毅, 窦炜明, 2015. 省级气象装备动态管理系统设计与实现. 中国管理信息化, 18(7): 73-76.
李峰, 秦世广, 周薇, 等, 2014. 综合气象观测运行监控业务及系统升级设计. 气象科技, 42(4): 539-544.
梁海河, 孟昭林, 张春晖, 等, 2011. 综合气象观测运行监控系统. 气象, 37(10): 1292-1300.
刘媛媛, 何文春, 王妍, 等, 2021. 气象大数据云平台归档系统设计及实现. 气象科技, 49(5): 697-706.
裴翀, 宋连春, 吴可军, 等, 2011. 我国综合气象观测运行监控系统的设计与实践. 气象, 37(2): 213-218.
气象观测装备编码规则 (GB/T 40215-2021). 北京: 国家市场监

督管理总局, 中国国家标准化管理委员会.
宋智, 徐晓莉, 张常亮, 等, 2019. 应用分布式存储技术优化省级CIMISS数据服务能力. 气象科技, 47(3): 433-438.
辛园园, 钮俊, 谢志军, 等, 2018. 微服务体系结构实现框架综述. 计算机工程与应用, 54(19): 10-17.
杨紫超, 孙文博, 袁文辉, 2014. 3MS省级气象计量检定业务系统简介. 气象灾害防御, 21(3): 43-44.
张文建, 2010. 世界气象组织综合观测系统 (WIGOS). 气象, 36(3): 1-8.
质量管理体系GB/T 19001-2016应用指南 (GB/T 19002-2018). 北京: 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会.
WMO, 2019. WIGOS metadata standard (WMO-No.1192).

(作者单位: 秦世广、刘健、李巍、邵楠、周薇、刘洁、石锐, 中国气象局气象探测中心; 刘健, 内蒙古自治区赤峰市气象局; 庞晶, 中国气象局)

(上接40页)

- Weather and Forecasting, 2016, 31(4): 1215-1246.
- [55] Squitieri B, Gallus W. WRF Forecasts of Great Plains nocturnal low-level jet-driven MCSs. Part I: Correlation between low-level jet forecast accuracy and MCS precipitation forecast skill. Weather and Forecasting, 2016, 31(4): 1301-1323.
- [56] Pytharoulis I, Kotsopoulos S, Tegoulis I, et al. Numerical modeling of an intense precipitation event and its associated lightning activity over northern Greece. Atmospheric Research, 2016, 169: 523-538.
- [57] Ebert E. Neighborhood verification: A strategy for rewarding close forecasts. Weather and Forecasting, 2009, 24(6): 1498-1510.
- [58] Hardy J, Gourley J, Kirstetter P, et al. A method for probabilistic flash flood forecasting. Journal of Hydrology, 2016, 541: 480-494.
- [59] Sobash R, Kain J, Bright D, et al. Probabilistic forecast guidance for severe thunderstorms based on the identification of extreme phenomena in convection-allowing model forecasts. Weather and Forecasting, 2011, 26(5): 714-728.
- [60] Ebert E. Fuzzy verification of high-resolution gridded forecasts: A review and proposed framework. Meteorological Applications, 2008, 15(1): 51-64.
- [61] Azorin-Molina C, Tijm S, Ebert E, et al. Sea breeze thunderstorms in the eastern Iberian Peninsula. Neighborhood verification of HIRLAM and HARMONIE precipitation forecasts. Atmospheric Research, 2014, 139: 101-115.
- [62] 罗聪, 时洋, 吴乃庚, 等. 基于邻域最优概率的GRAPES快速更新循环同化预报系统逐时降水订正方法. 热带气象学报, 2021, 37(4): 569-578.
- [63] 马申佳, 陈超辉, 智协飞, 等. 基于时空不确定性的对流尺度集合预报效果评估检验. 气象学报, 2018, 76(4): 578-589.
- [64] 刘雪晴, 陈静, 陈法敬, 等. 降水邻域集合概率方法尺度敏感性试验. 大气科学, 2020, 44(2): 282-296.
- [65] 张小雯, 唐文苑, 郑永光, 等. GRAPES_3km数值模式对流风暴预报能力的多方法综合评估. 气象, 2020, 46(3): 367-380.
- [66] Skok G, Roberts N. Analysis of fractions skill score properties for random precipitation fields and ECMWF forecasts. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2016, 142(700): 2599-2610.
- [67] Mittermaier M, Roberts N. Intercomparison of spatial forecast verification methods: Identifying skillful spatial scales using the fractions skill score. Weather and Forecasting, 2010, 25(1): 343-354.
- [68] Wolff J, Harrold M, Fowler T, et al. Beyond the basics: Evaluating model-based precipitation forecasts using traditional, spatial, and object-based methods. Weather and Forecasting, 2014, 29(6): 1451-1472.
- [69] Gilleland E, Ahijevych D, Brown B, et al. Verifying forecasts spatially. Bulletin of the American Meteorological Society, 2010, 91(10): 1365-1373.
- [70] 吴瑞姣, 邱学兴, 周昆, 等. 安徽省WRF模式短时强降水的预报检验. 气象科技, 2020, 48(2): 254-262.
- [71] Lockhoff M, Zolina O, Simmer C, et al. Evaluation of satellite-retrieved extreme precipitation over Europe using gauge observations. Journal of Climate, 2013, 27(2): 607-623.