

支撑气象大数据实时预报业务应用的 MICAPS4系统概述

刘盼 高嵩 王若瞳 贺雅楠 曹莉 韩丰
(国家气象中心, 北京 100081)

摘要: 国家气象中心自2013年正式启动了MICAPS4系统的研发, MICAPS4体系采用了客户端/服务器的系统架构, 一方面建立了基于大数据的气象实时预报应用技术体系, 解决了气象大数据处理、存储、分析和显示效率的关键技术难题; 另一方面搭建了多个满足不同复杂预报业务需求的专业化版本预报平台, 基于MICAPS4基础框架的多个专业版客户端系统在中央台和部分省台进行应用推广。MICAPS4服务器系统利用分布式存储与分布式计算技术, 可容纳上百TB气象实时数据, 为数百用户提供并发数据访问服务, 在国内率先实现全部气象实时数据由文件系统到数据库、从集中式系统到分布式系统的迁移。在海量气象数据和大量用户并发访问的环境下, 表现出很高的稳定性和优越的读写性能, 极大减轻了系统维护工作量, 显著提升了数据解析及数据存储访问效率。

关键词: MICAPS4, 海量数据存储, 智能网格预报, SWAN, 台风和海洋预报

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.01.014

MICAPS4 System Overview for Supporting Meteorological Big Data Real-Time Forecasting Business Application

Liu Pan, Gao Song, Wang Ruotong, He Yanan, Cao Li, Han Feng
(National Meteorological Centre, Beijing 100081)

Abstract: The National Meteorological Center has officially launched MICAPS4 system since 2013. The MICAPS4 system uses a client/server system architecture. On the one hand, a real-time forecasting system based on Big Data technology to solve the key technical problems in processing, storage, analysis and display of meteorological big data is established; On the other hand, several specialized forecast platforms to meet the needs of different complex forecasting business is built. Based on MICAPS4 basic framework, a number of professional client have been applied to promote in NMC and part of the province. Utilizing distributed storage and distributed computing technology, the MICAPS4 server system can hold hundreds of TBs meteorological real-time data, providing data service for hundreds of concurrent users. MICAPS4 server system be the first to transits all meteorological real-time data storage from file system to database, from centralized system to distributed system in China. Under the condition of massive meteorological data and concurrent access of many users, MICAPS4 server system shows high stability and excellent read-write performance, it reduces the system maintenance workload greatly, and improves data analysis and data storage access efficiency significantly.

Keywords: MICAPS4, massive data storage, intelligent grid forecasting, SWAN, typhoon and ocean forecasting

0 引言

MICAPS (Meteorological Information Comprehensive Analysis and Processing System) 系统是中国气象局自主研发的现代化人机交互气象信息处理和天气预报制作系统, 已经成为全国气象预报制作的业务平台, 在天气预报及气象服务中发挥了重要的

作用^[1]。

中国气象局自1994年起组织MICAPS项目的研发, 至2007年12月, 先后共发布了3个版本: 1997年发布的MICAPS第一版实现了预报业务流程从纸质到电子版的革命性变革, 预报员可在计算机上实现气象数据的快速检索、预报分析及交互预报制作; 2002年发布的MICAPS第二版提升了系统功能, 扩展了数据显示能力, 增加格点资料的显示和分析功能; 2007年发布的MICAPS第三版改进了绘图引擎实现机制, 提

收稿日期: 2017年8月1日; 修回日期: 2017年12月31日
第一作者: 刘盼(1987—), Email: 1656728459@qq.com

升了气象数据的显示效率和效果，同时首次提供了基于“模块可插拔”的客户端框架设计，提供了界面、功能模块的自定义扩展能力，并先后发布了除基础版本之外的台风、短临、山洪、中尺度分析、海洋、精细化要素预报订正等多个专业版本，并已经成为中国气象局各级气象业务部门的核心系统，在各级预报业务应用中发挥了巨大作用^[2-5]，并在民航、水利、海洋等部门以及多个亚洲国家推广应用。

随着气象数据规模持续高速增长，MICAPS3自2010年起开始面临严峻的性能和存储压力，主要表现在海量气象数据解析、访问缓慢，集合预报产品及新型观测数据难以应用，MICAPS3系统框架难以满足业务发展需求。为解决上述问题，中国气象局联合清华大学，于2013年启动了MICAPS4的开发工作。

1 MICAPS4系统建设背景和目标

1.1 气象大数据的特点与用户行为分析

实时气象数据种类繁多，可以划分为两类：实况观测数据和模式数据。其中，模式数据是由高性能计算机根据当前天气实况数据通过物理方程计算得出的。由于模式物理量多，每天多次起报，预报时效密集，模式种类多，存储时间较长，无论从数据个数还是数据存储量来说，模式数据是比重最大的“大数据”^[6]。

对于任一数据来说，能对该数据进行唯一标识所需的最少属性称为该数据的检索维度。气象数据是典型的非结构化数据，具有多维索引结构，如确定性模式数据，只有在明确其模式名、物理量、层次、起报时间、预报时效后，才能检索到唯一的格点场数据——称其检索维度为5。各类气象数据的检索维度如表1所示。

表1 气象数据的检索维度
Table 1 Data retrieval dimension of different meteorological data

数据种类	检索维度	维数
确定性模式数据	模式名、物理量、层次、起报时间、预报时效	5
集合预报数据	模式名、成员编号、物理量、层次、起报时间、预报时效	6
地面填图	观测时间、观测方式	2
高空填图	观测时间、层次、观测方式	3
卫星数据	卫星名称、通道、投影方式、观测时间	4
雷达数据	雷达ID、仰角、观测时间、物理量	4

预报员的常用操作，既包括在有序维度上进行高速连续访问，如在预报时效（3 h<->6 h<->9 h...）或层次（500 hPa<->700 hPa<->850 hPa...）上进行双向快速连续翻页，也包括在无序维度上进行高速随机访问，如在相同模式的不同物理量之间进行数据切换，

或者在不同模式之间进行快速切换。这两个用户行为尽管可以通过数据预处理来实现，但预报员希望数据到达即使用，不能够容忍较长时间的预处理和数据延迟。

1.2 MICAPS3系统面临的问题

随着气象观测手段的不断发展以及数值模式预报的精细化水平不断提升，气象资料呈现爆发式增长，使得原有的预报系统已经不能满足数据快速显示与天气分析的需求，具体存在以下问题：

1) MICAPS第三版客户端系统缺乏对海量数据的高效处理能力，无法帮助预报员快速浏览与分析高时空分辨率的模式产品与集合预报产品，也无法提供快捷高效的工具帮助预报员进行产品制作。

2) 传统的MICAPS数据服务器不具备针对大数据量的预处理能力，仅提供简单格式转换与文件储存功能，大量的原始气象数据以原始分辨率的纯文本格式提供给客户端直接调用，增加了网络传输压力以及客户端的资源消耗。

3) 传统的MICAPS数据服务器与客户端之间的数据共享为简单共享，服务器利用Samba/SMB协议通过挂载虚拟磁盘的方式为客户端提供数据服务，在文件个数较多的情况下，数据检索效率骤降。

1.3 MICAPS4系统建设目标

将MICAPS4系统建成适应我国气象预报业务发展的综合性业务平台，需要实现以下几个目标：

1) MICAPS4服务器作为实时数据的高速缓存使用，可以容纳上千万个海量实时数据；几乎所有的数据都是一次性写入，多次读取，MICAPS4客户端不对数据进行删除或修改操作，数据写入后须立即可被快速访问；可以满足MICAPS4客户端最新数据检索、随机数据检索，和按照时间维度和空间维度连续检索数据的要求。

2) 实现面向专业预报服务的数据应用和平台建设，随着预报业务更加趋向于精细化与专业化，预报业务平台与数据应用方式也应针对各专业预报业务特点进行定制，新的数据应用服务器与客户端系统应能提供更加开放的定制与功能扩展能力，为各个专业化应用提供基础性的平台支撑。

3) 实现预报技术方法与人机交互功能的融合，通过移植成熟的客观分析方法与天气概念模型，从而提升系统平台的智能化水平，降低客户端的操作复杂度，减轻大规模数据对客户端以及数据传输过程中带来的压力。

2 MICAPS4客户端和服务端

MICAPS4体系分为“数据处理及存储服务器”与“交互展示客户端”两个子系统，为满足海量气象数据的快速应用需求，提供了数据快速解析与数据高速下载支持；为满足多样异构数据的存储需求，提供了灵活自由的数据库存储方式；为适应各专业方向对数据的快速应用，研发了灵活的客户端配置方式以及开放的二次开发框架。MICAPS4体系结构图与数据处理流程如图1所示。

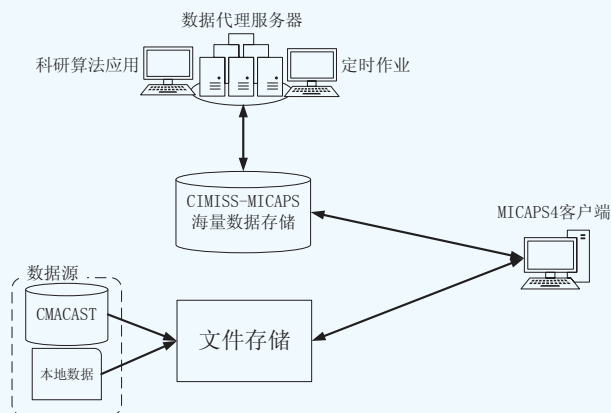


图1 MICAPS4体系结构与数据流程图
Fig. 1 Architecture and data flow of MICAPS4 system

2.1 MICAPS4 客户端系统

MICAPS4客户端是MICAPS4体系中直接参与用户交互的核心，也是海量气象数据集中显示与应用的主体，同时还为用户自定义功能模块、本地数据加载与本地化业务流程提供支撑。

MICAPS4客户端界面为用户提供了资料检索、图层控制、数据显示、高级操作等功能的统一图形化用户接口，涵盖了MICAPS1-3版客户端的全部功能。对旧版本MICAPS客户端的界面进行了梳理，对用户界面布局以及用户使用习惯进行了保留，整个客户端界面风格以及功能模块操作方式与旧版本基本保持一致。

MICAPS4客户端分为菜单栏、工具栏、交互工具箱、主地图、图层属性设置、图层管理窗口、日志窗口以及状态栏几个部分，客户端的整体界面如图2所示。

MICAPS4客户端的菜单栏保留了传统MICAPS客户端的基本功能，为用户提供系统设置、地图参数设置、综合图加载、MICAPS数据快捷调阅及系统帮助等功能的快速入口，并提供了一些新的便捷性功能，包括综合图和工具栏窗口布局的快速保存、切片地图调用服务、在线自动升级服务。工具栏用于提供系统

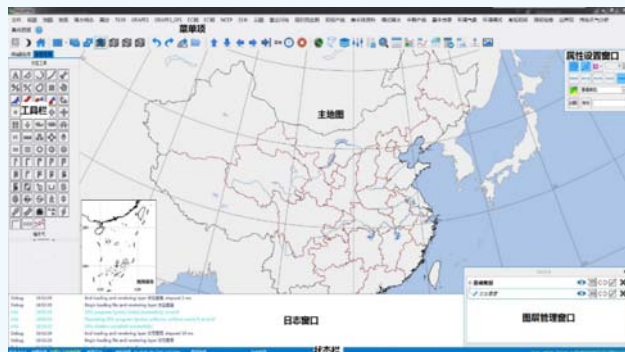


图2 MICAPS4客户端界面布局
Fig. 2 MICAPS4 client layout

工具以及部分高级功能模块调用，在系统工具中，新增了“黑白主题切换功能”和“多屏窗口弹出”功能，增加了“预报产品保存助手”工具；在图层控制部分，新增了设置翻页时间间隔功能；在扩展功能模块部分提供系统以及用户二次开发的功能模块扩展。交互工具箱提供了常规天气交互分析和中尺度交互分析符号。

主地图是数据显示及用户交互区域，该区域以可视化的方式对多种类的气象数据与基础地理信息数据进行叠加显示，用户在此区域内通过鼠标操作完成地图缩放、要素显隐控制、客观分析/统计方法调用以及人机交互绘制等功能。图层管理窗口用于显示各个图层的描述信息以及对图层进行控制操作。日志窗口用来显示当前客户端执行各个操作的执行状况以及记录用户操作中可能出现的错误信息，可协助用户对存在的错误进行简单的排查。状态栏用于为用户提供当前激活地图的投影信息，当前鼠标所在位置的经纬度、海拔高度、处于激活状态的图层相关信息，以及鼠标临近的国家站站点信息。MICAPS4客户端对常用操作提供键盘快捷键支持，用户可通过键盘操作实现图层翻页、地图重置、清空图层、新建交互图层、交互撤销/重做操作、交互图层保存、全屏切换、图片保存等基本功能。

属性设置窗口是MICAPS4客户端改变最大的部分，相对于MICAPS3客户端中无差别的图层属性设置控件，MICAPS4属性设置窗口变成了针对不同种类数据图层进行单独设计的“扁平化”样式（图3）。

MICAPS4客户端除提供基本的气象数据叠加与交互绘制之外，还提供了高级的数据统计与数据分析功能模块。模式资料曲线模块主要对不同客观预报产品在相同经纬度上随时间变化趋势的显示或对比；模式探空模块可利用数值预报模式资料生成任意站点/经纬度在选定预报时间下的温度/对数压力图，并计算相应的物



图3 MICAPS4图层属性设置窗口
Fig. 3 MICAPS4 layer property configure window

理量；模式资料剖面模块可对数值预报模式数据或实况观测的客观分析数据进行分析显示；时间垂直剖模块主要用来展示指定某一站点或任意经纬度位置上空不同层次上的要素随时间的变化情况；空间垂直剖面模块主要用来展示某一范围内各预报要素随层次的变化情况，可以用来协助预报员了解其三维空间分布。

2.2 MICAPS4 服务器系统

MICAPS4服务器系统由分布式存储系统、分布式前处理系统、流式计算^[7-12]系统、站点实况轮询系统、查询服务器系统、监控系统等6个子系统组成（图4）。

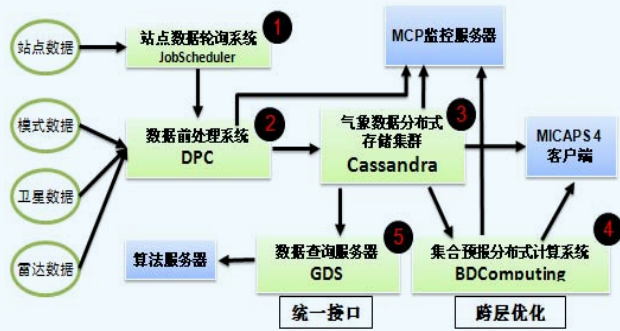


图4 MICAPS4服务器系统架构
Fig. 4 MICAPS4 server system architecture

所有模式原始数据、卫星数据、雷达数据都经CTS通信收发系统实时将数据分发至针对MICAPS4数据处理的DPC集群，地面实况填图、高空填图等站点填图数据则由一个周期性数据加工程序，将原有CIMISS的SOD数据库中的站点数据取出并合并成为对应观测时刻的完整文件，推送至MICAPS4数据处理DPC集群。所有气象数据到达MICAPS4-DPC集群后，立即触发相应的处理程序：对于模式数据，在集

群内完成GRIB解码、风场计算、分段降水量计算、网格裁剪、网格合并等工作；对于卫星、雷达和站点填图类数据，在集群内完成配置信息的添加，时区时间的调整。MICAPS4-DPC集群接收的所有原始数据处理成为MICAPS4数据格式后，立即开始向存储系统的写入操作。分布式数据存储集群系统是一个由15~20台机架服务器组成的物理集群，拥有高达360~480 TB的存储容量，为了提升预报员的数据访问性能，每一个相同的数据都被同时存放在3台不同的节点上，即每个数据有3个副本，因此有效存储量为总存储量的1/3。和传统的文件系统相比，分布式数据存储集群采用非关系型数据库来进行所有数据的物理存储，上万个数据实际上被压缩为一个真正的大文件，极大的减少了物理文件个数，通过数据库内部高效的索引、缓存机制，实现对于预报员数据检索请求的高效查询。除MICAPS4-DPC导入系统外，分布式存储集群系统还有另外两个数据写入接口：一个是产品数据加工接口，用于接收由预报员开发的各种复杂气象产品数据，如雷达外推产品，自动站外推产品等，和MICAPS4-DPC导入接口相比，这个接口大多由定时程序进行写入，而不是由原始数据驱动的实时写入；另外一个写入接口是MICAPS4客户端的产品生成写入接口，将预报员制作的降水落区预报等结果写入分布式存储集群中，和模式、卫星等数据一样，实现数据共享。MICAPS4客户端自身绑定了针对分布式数据存储系统的数据读取接口，可以实现对于存储集群的数据查询。针对浏览器、手机和其他智能终端，数据发布服务器提供了针对这些设备的访问接口，并将数据访问请求传递给分布式存储集群的读取接口，得到数据后，返回给这些客户端。

MICAPS4服务器系统的核心子系统包括分布式存储系统、分布式前处理系统等。

1) 海量气象实时数据分布式存储系统

由前文1.1节分析的气象大数据特点和预报员行为，MICAPS4数据服务器需要的是海量实时数据高速处理缓存系统。同文件系统相比，数据库系统针对小数据一般会设计实现相当完善的读写缓存机制，从而大幅度提升性能。由于气象实时数据单个数据大小通常都小于5MB，因此首选数据库系统作为MICAPS4存储系统。气象数据的使用以读取为主，并且没有强一致性要求，因此分布式物理集群架构的系统将单机机器的存储、计算、网络IO压力分配到多个节点上，从而可以显著提升数据读取的效率。传统关系型数据库并不适合保存气象非结构化实时数据，因此我们的系统选型确定在非关系型分布式数据库上。Cassandra是一个基于Key-Value的P2P分布式系统，适合作为多维数据空间结构的实现^[13]，这同气象数据多维索引键值结构相呼应。通过详细的理论分析和性能对比，由于Cassandra在存储具有多维空间特点的海量小数据方面具有显著的优势，因此采用Cassandra作为实时气象数据存储的实现方案。

采用Cassandra数据库来进行气象实时数据的存储，客观要求MICAPS客户端利用数据库查询接口读取数据后，必须能够在内存中直接解析该数据。因此在MICAPS4分布式存储中，保留了全部的MICAPS文本文件格式，以及AWX卫星和bz单站雷达格式，同时又研制了读写更加高效，通用性、扩展性更强的模式标量/矢量统一的二进制数据格式和站点实况可变量列宽的二进制数据格式，作为MICAPS4模式数据和实况数据的最主要存储格式。

2) 海量气象数据分布式前处理系统

前处理系统数据处理的主流程是：FTP数据接收->数据解析->数据写入。在前处理系统处理数据的

过程中，新数据仍然可以不间断的进行实时接收，即数据处理和数据接收是异步、高效的，这个过程由前处理系统的线程池模块来统一管理。由于所有数据的处理都是到达即处理，避免了传统的定时处理的方法，因此极大的提高了数据处理的性能。除此之外，作为一个功能完善的软件，还需要集成一些其他的必备功能，例如原始数据文件的删除，日志文件的删除，流式计算中间结果文件删除，系统管理员远程命令行交互功能，数据恢复功能等。如果采用不同的进程来实现这些功能的话，会造成系统部署和运维的复杂，同时不便于对前处理系统现有功能的复用以及程序状态的共享。因此，前处理系统的设计采用单一进程，多线程的设计，将嵌入式FTP服务器^[14]、解码线程、文件清除器、管理员交互线程、数据恢复线程同时集成到一个软件进程中，系统的启动和停止各自只需要一条指令即可完成，简化了管理员的操作，同时提高了系统的可靠性。

由于前处理系统通常将会运行在服务器集群上，作为生产环境下多线程服务器的首选开发语言，采用Java作为前处理系统的开发语言。同其他语言相比，Java具有类库丰富，运行安全，便于同各种存储系统集成，开发速度快，跨平台运行等特点。目前分布式前处理系统在生产环境的Linux平台上持续稳定运行，不过对于Windows的平台也具有良好的可移植性。

在真实业务环境下，MICAPS4分布式存储系统的性能测量结果如表2所示。相较于传统的文件存储系统进行同样例数据的测试，其欧洲细网格数据获取最新文件需要6.5 s，随机读取需要4.0 s，左右翻页需要8.0 s，MICAPS4分布式存储系统在用户高并发访问时，数据调阅和翻页仍然可以保持在毫秒级别。

以原始数据大小为5.4 G的欧洲细网格资料为例，测试了MICAPS4分布式前处理系统的解码和写入性能，发现传统的文件解码系统对欧洲细网格单

表2 高并发查询性能
Table 2 High concurrency query performance

资料种类	测试用例	查询类别	50并发 (单位: ms)			100并发 (单位: ms)		
			最高	最低	平均	最高	最低	平均
欧洲细网格	ECMWF_HR/TMP/850	获取最新	30.5	1.6	10.4	16.5	1.2	10.4
		随机读取	3.2	2.0	2.45	3.1	2.0	2.32
		左右翻页	8.3	2.5	4.86	8.1	1.0	4.52
T639	T639/WIND/500	获取最新	11.0	2.0	10.2	11.3	2.1	10.5
		随机读取	73.3	18.7	20.14	46.6	16.1	20.3
		左右翻页	87.3	33.4	40.0	67.2	30.7	40.2
FY2E红外3通道等经纬投影	SATELLITE/FY2E/L1/IR3/EQUAL	获取最新(*.AWX)	34.2	1.5	10.72	34.6	2.3	10.74
		随机读取	9.0	3.1	7.76	39.5	7.2	7.56
		左右翻页	60.6	11.3	12.14	38.4	10.6	11.78

个数据解码和写入耗时552 s，速度为10.2 MB/s，而MICAPS4分布式前处理系统相应的解码和写入耗时为5 s，速度为39.8 MB/s，比传统的文件系统提升了两个数量级。

3 MICAPS4专业预报领域应用

随着预报业务更加趋向于精细化与专业化，预报业务平台与数据应用方式也应针对各专业预报业务特点进行定制。MICAPS4提供了灵活开放的底层框架，支持多个专业领域应用，如智能网格预报平台、台风海洋一体化预报平台、灾害性天气短时临近预报系统等多个专业版本。MICAPS4对专业版本的底层支持，使得专业版本除了可以无差别的使用MICAPS4客户端底层框架提供的所有功能服务以及资源服务外，还可以根据实际操作流程对界面布局、用户图形界面进行深度定制。

3.1 智能网格预报平台

智能网格预报平台是我国各省（市、区）气象台预报员通过人机交互方式进行本省辖区范围气象网格预报产品制作与发布的图形化预报制作平台。该平台实现高分辨率模式资料的获取和显示分析，提供基于等值线、网格、关键点等交互预报制作工具供预报员对背景场进行编辑，并对不同要素之间的预报结果进行协同处理，最终输出网格预报产品，进而转化为文字、图形化预报产品^[15-17]。此外，平台集成了降水时间一致性、高低温极值订正等智能化客观预报方法，开发了降水、温度、相对湿度等多要素协同方法，提高了预报员工作效率。目前，该平台已经在业务中应用，为全国智能网格预报业务提供了重要支撑。

目前，我国省级的智能网格预报业务基本流程如图5所示。首先，由数值模式预报数据和自动站实况数据经过最优集成方法生成高分辨率背景场。然后，利用网格预报制作平台对背景场进行编辑生成网格预

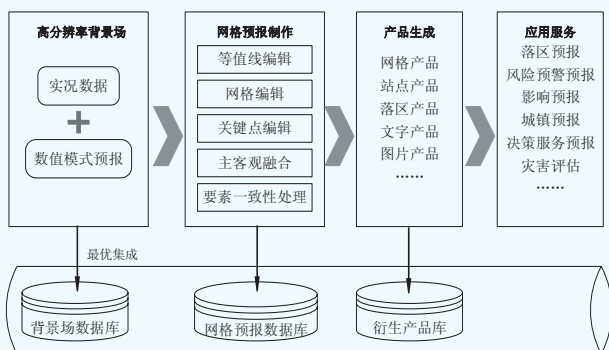


图5 省级智能网格预报基本业务流程

Fig. 5 Provincial intelligent grid forecasting business process

报产品，并基于该网格预报产品加工生成站点、落区、文字、图片等衍生产品。最终，利用生成的衍生产品对公众提供服务。

3.2 台风海洋一体化预报平台

在台风、海洋业务不断发展的过程中，可利用的观测数据和模式数据不断增多，目前台风海洋业务中有多种软件支持日常的预报服务业务，如基于MICAPS3.1 台风预报业务平台、基于MICAPS3.2的海洋预报业务平台、基于GIS的海洋格点分析和产品制作平台等^[3, 18-19]。对原有台风、海洋业务分散在多个平台中的状况需要得到进一步的功能提升，以及对精细化预报及服务提出更高要求，亟需开发能将台风海洋业务整合在一起，满足对台风海洋观测数据与高分辨率数据的高效显示，以及精细化预报制作的台风海洋一体化预报平台。

台风海洋一体化预报平台基于MICAP4系统框架，采用C/S（客户机/服务器）结构的设计方式，采用了面向服务架构（SOA, Service-Oriented Architecture）和多层的体系结构，是针对台风和海洋业务的预报预警服务的专业平台，集台风、海洋数据的显示，预报及服务产品制作，精细化预报制作及发布等功能为一体的业务应用系统，主要功能特点是加强对台风实况路径数据、海洋观测数据、模式资料、常规观测资料等的应用和分析，在应用服务器端主要对台风海洋数据进行转换处理，分别存储到台风实时库、海洋产品库，通过预处理，形成海洋产品，提供客户端使用。在客户端，利用服务器端处理的数据，结合台风、海洋预报流程，实现台风、海洋数据显示，预报及服务产品制作，精细化预报制作及发布等功能。

3.3 灾害性天气短时临近预报系统

灾害天气短时临近预报系统（Severe Weather Automatic Nowcasting System, SWAN）是面向短临监测、分析、预报、预警制作等功能为一体的业务平台。SWAN系统以雷达观测和自动站资料为基础，提供三维雷达拼图、自动站实况、降水估测等监测产品以及基于交叉相关法（COTREC）运动矢量和风暴识别技术的临近预报产品。SWAN系统历时8年发展，已经在全国绝大多数的省级气象台投入了业务应用，并在上海世博会和第十一届全运会的气象保障工作中发挥了重要作用^[20-23]。

SWAN2.0是SWAN系统的最新版本，采用C/S架构，服务器部署在省级，负责收集数据，运算SWAN短临产品；客户端部署在气象台站，以MICAPS4二次

开发框架为基础进行开发，形成算法二次开发接口。

图6给出的是SWAN2.0的主要算法结构图。目前SWAN2.0的数据源（点画线）主要有雷达基数据、自动站报文、闪电资料、PUP产品和探空资料，产品种类分为实况监测产品（圆角矩形）、临近预报产品

（虚线）和报警产品（矩形）。SWAN2.0主要技术方法包括三维变分风场反演、基于分雨团技术的雷达降水估测、冰雹识别等，发展的主要业务功能包括短临算法管理、产品生成、分析处理、资料检索显示、实时监控报警、预警产品制作等。

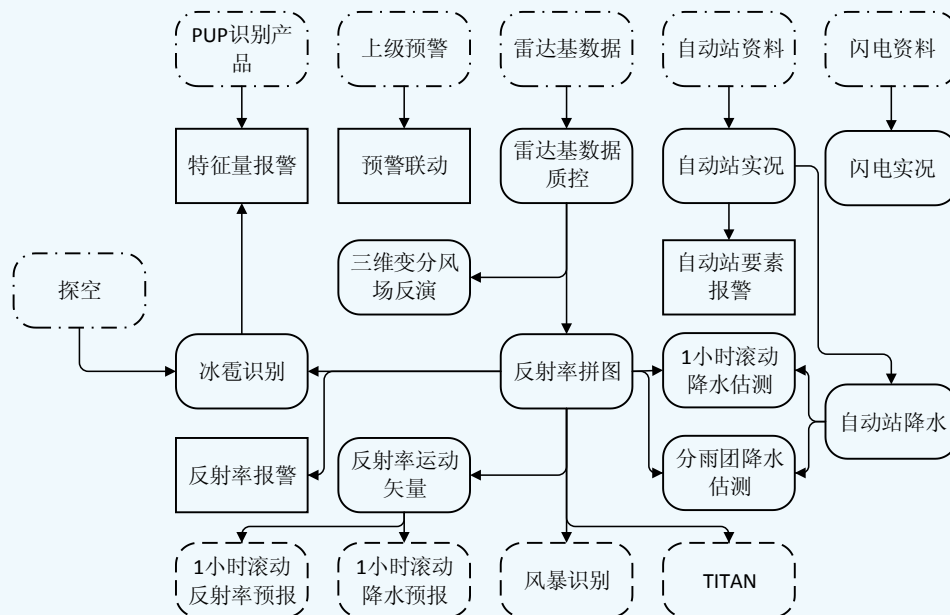


图6 SWAN2.0算法结构
Fig. 6 The algorithm structure of SWAN 2.0

4 小结与展望

MICAPS作为实时气象预报业务系统，包含了完整的原始数据采集与预处理服务，异构数据的存储与检索服务，以及前端的预报员交互操作与数据分析服务。并且实现了与CIMISS数据环境的无缝对接，并利用大数据技术将CIMISS数据的应用延伸到实时预报业务场景中，采用微内核开放式系统架构、高级绘图引擎等技术，显著提升了系统对高分辨、多维度气象数据的应用能力和访问效率；根据气象数据传输特点设计的流式解析技术可将数据解析时间压缩到毫秒量级，并将EC细网格数据入库时间提前1.5 h；利用气象数据的复杂检索维度特点设计的分布式数据存储技术可存储上亿条记录，并将数据的检索命中时间缩短了两个数量级；利用现代软件编程思路设计的客户端框架降低了模块与框架间的耦合度，并支持各个专业版本的深度定制开发；利用高级绘图技术设计了高质量的渲染引擎，可显著提升高分辨率数据的显示效率与效果，实现了将先进信息技术与现代天气预报技术的紧密结合，同时，整个MICAPS4系统的设计与开发还考虑到后期维护与工程实施的便捷性，无论是后端数

据处理与存储，还是前端客户端应用，都试图将无法避免的系统灾难（如断电、硬件故障等）带来的影响降到最低。

MICAPS4服务器和客户端系统目前已在国家局和25个省份部署，至今7×24 h稳定运行。随着系统在各级气象部门的持续推广与应用，MICAPS4系统也会逐渐满足各级预报环境与预报业务发展需求。MICAPS4体系也正从传统的综合气象数据显示分析系统向开放、众创并支持智能化运算的现代天气预报平台演变，通过与“气象云”的协同发展，MICAPS系统将来会吸引越来越多的成熟功能模块与算法进行集成，利用MICAPS体系的数据服务与交互分析及数据显示服务，可为气象预报方法、科研算法、成熟产品提供研发、发布、交流、推广的一体化渠道，从而搭建集约化的、健壮的MICAPS应用环境，为各级气象部门提供更加丰富、更加实用的预报业务应用平台。

参考文献

- [1] 李月安, 曹莉, 高嵩, 等. MICAPS业务平台现状与发展. 气象, 2010, 36(7): 50-55.
- [2] 于连庆, 胡争光. MICAPS中天气图交互制作子系统. 应用气象学报, 2011, 22(3): 375-384.
- [3] 高嵩, 代刊, 薛峰. 基于MICAPS3.2平台的格点编辑平台设计与

- 开发. 气象, 2014, 40(9): 1152-1158.
- [4] 吴林林, 刘黎平, 徐海军, 等. 基于MICAPS3核心的人影业务平台设计与开发. 气象, 2013, 39(3): 383-388.
- [5] 孙卓, 李江波, 曾健刚. 基于MICAPS3.2的灾害性天气个例库与预报训练系统的设计与应用. 干旱气象, 2017, 35(3): 522-527.
- [6] 王若瞳, 黄向东. 海量气象数据实时解析与存储系统的设计与实现. 计算机工程与科学, 2015, 37(11): 58-64.
- [7] Kreps J, Narkhede N, Rao J. A distributed messaging system for log processing // Proceedings of the NetDB. 2011: 1-7.
- [8] Toshniwal A, Taneja S, Shukla A, et al. Storm@ twitter // Proceedings of the 2014 ACM SIGMOD international conference on Management of data. ACM, 2014: 147-156.
- [9] Zaharia M, Chowdhury M, Das T, et al. Fast and interactive analytics over Hadoop data with Spark. USENIX Login, 2012, 37(4): 45-51.
- [10] Carbone P, Katsifodimos A, Ewen S, et al. Apache flink: Stream and batch processing in a single engine. Bulletin of the IEEE Computer Society Technical Committee on Data Engineering, 2015, 36(4): 28-38.
- [11] Ranjan R. Streaming big data processing in datacenter clouds. IEEE Cloud Computing, 2014, 1(1): 78-83.
- [12] Zaharia M, Chowdhury M, Das T, et al. Resilient distributed datasets: A fault-tolerant abstraction for in-memory cluster computing // Proceedings of the 9th USENIX conference on Networked Systems Design and Implementation. USENIX Association, 2012: 2-2.
- [13] 黄向东, 王建民, 葛斯函, 等. 一种海量多维文件集合的存储模型 // 第 31 届中国数据库学术会议, 2014: 1.
- [14] 郝浩. FTP原理解析. 计算机与网络, 2016(14): 40-41.
- [15] 朱小祥, 刘震坤, 罗兵, 等. 美国AWIPS II系统开发进展及业务应用. 气象科技合作动态, 2014(F06): 1-30.
- [16] Hansen T, Mathewson B M, LeFebvre T J, et al. Forecast methodology using the GFE suite. 17th International Conference on Interactive Information and Processing Systems (IIPS) for Meteorology, 2001.
- [17] H Gerapetritis, LG Lee. Intelligent use of a lapse rate smart tool in the graphical forecast editor. Eastern Region Technical Attachment, 2003(1): 1-9.
- [18] Yu L, Cao L, Li Y, et al. Introduce on Typhoon Forecast Operational System // Proceedings of 27th IIPS for Meteorology, Oceanography, and Hydrology. 2011.
- [19] 郑卫江, 吴焕萍, 罗兵, 等. GIS技术在台风预报服务产品制作系统中的应用. 应用气象学报, 2010, 21(2): 250-255.
- [20] 郑永光, 张小玲, 周庆亮, 等. 强对流天气短时临近预报业务技术进展与挑战. 气象, 2010, 36(7): 33-42.
- [21] 赵栋, 郭煜, 寿绍文, 等. SWAN 系统在一次暴雨天气过程分析中的应用. 气象科技, 2013, 41(2): 326-333.
- [22] 吕晓娜, 牛淑贞, 袁春风, 等. SWAN 中定量降水估测和预报产品的检验与误差分析. 暴雨灾害, 2013, 32(2): 142-150.
- [23] 李俊, 支树林, 郭艳, 等. SWAN 系统雷达定量降水估测产品在江西的应用. 气象与减灾研究, 2012, 35(2): 61-66.

(上接108页)

算资源和存储资源的情况下, 将对土壤温度、积雪深度、感热潜热通量、径流等要素进行评估分析, 提供更多更全面的陆面要素变量供科研和业务使用。

致谢: 本文是对HRCLDAS-V1.0系统研发和业务化工作的综述, 是整个研发团队的一项集体性工作的总结。在研发过程中, 团队成员精诚团结、奋发向上的精神感人至深。限于篇幅, 不能将所有参与工作的人员列入, 在表示谢意的同时也致以歉意。另外, 在CLDAS发展过程中, 多年来一直得到谢元富、杨宗良、夏友龙、詹习武、谢平平等多位海外专家以及国内谢正辉、田向军、戴永久、阳坤等专家的支持与帮助, 在这里一并表示感谢!

参考文献

- [1] Jacoc M J, Moors E J, Ter M H W, et al. Evaluation of European Land Data Assimilation System (ELDAS) products using in site observations. Tellus A, 2010, 60(5): 1023-1037.
- [2] Tian X, Xie Z. A global land data assimilation system: preliminary evaluations // AGU Fall Meeting. AGU Fall Meeting Abstracts, 2009.
- [3] Mitchell K E, Lohmann D, Houser P R, et al. The multi-institution North American Land Data Assimilation System (NLDAS): Utilizing multiple GCIP products and partners in a continental distributed hydrological modeling system. J Geophys Res, 2004, 109(D7): 585-587.
- [4] Chen F, Manning K W, LeMone M A, et al. Description and evaluation of the characteristics of the NCAR High-Resolution Land Data Assimilation System. J Appl Meteor Climatol, 2007, 46: 694-713.
- [5] Chen F, Manning K W, Barlage M, et al. NCAR High-resolution Land Data Assimilation System and its recent applications. American Geophysical Union, Spring Meeting 2008.
- [6] Lim Y J, Lee T Y, Byun K Y. Korea Land Data Assimilation System (KLDAS) and its application using WRF. In 22nd Conference on Hydrology, 88th American Meteorological Society Annual Meeting, New Orleans, LA, January 20-24, 2008.
- [7] Xie Y, Koch S, Mcginley J, et al. A space-time multiscale analysis system: A sequential variational analysis approach. Monthly Weather Review, 2011, 139(4): 1224-1240.
- [8] 张涛, 苗春生, 王新. LAPS与STMAS地面气温融合效果对比试验. 高原气象, 2014, 33(3): 743-752.
- [9] 谭晓光, 罗兵. 天气预报分析型数据模型及生成. 应用气象学报, 2014(1): 120-128.
- [10] Yang K, Huang G W, Tamai N. A hybrid model for estimating global solar radiation. Solar Energy, 2001, 70: 13-22.
- [11] Xu B, Xie P, Xu M, et al. A validation of passive microwave rain-rate retrievals from the Chinese FengYun-3B satellite. Journal of Hydrometeorology, 2015, 16: 1886-1905.
- [12] 徐宾, 师春香, 姜立鹏, 等. 东亚多卫星集成降水业务系统. 气象科技, 2015, 43(6): 1007-1014.
- [13] 冉有华, 李新, 卢玲. 四种常用的全球1km土地覆盖数据中国区域的精度评价. 冰川冻土, 2009, 31(3): 490-500.
- [14] Shangquan W, Dai Y, Liu B, et al. A China data set of soil properties for land surface modeling. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2013, 5(2): 212-224.
- [15] 韩帅, 师春香, 林泓锦, 等. CLDAS土壤湿度业务产品的干旱监测应用. 冰川冻土, 2015, 37(2): 446-453.
- [16] 韩帅, 师春香, 姜立鹏, 等. CLDAS土壤湿度模拟结果及评估. 应用气象学报, 2017, 28(3): 369-378.
- [17] 杨霏云, 高学浩, 钟琦, 等. 作物模型、遥感和地理信息系统在国内外农业气象服务中的应用进展及启示. 气象科技进展, 2012, 2(3): 34-38.