

肖卫青, 薛蕾, 刘振, 等. 地面自动气象站数据流式处理设计与实现. 应用气象学报, 2024, 35(3): 373-384.

DOI: 10.11898/1001-7313.20240310

# 地面自动气象站数据流式处理设计与实现

肖卫青 薛蕾\* 刘振 罗兵 王颖 张来恩  
郭萍 霍庆 韩书丽 何文春

(国家气象信息中心, 北京 100081)

## 摘要

针对观测密度和频次日益增加的海量地面自动气象站数据,在气象大数据云平台(天擎)中设计了基于 Storm 的实时流式处理,利用大规模并行处理的优势提高地面自动气象站数据的处理时效。在流式处理中,设计处理拓扑直接解码标准格式的数据消息;消息确认采用手工确认的方式,将数据解码组件锚定数据接入组件,实现每条数据的可靠处理;数据解码时进行字节校验和时间检查等,过滤异常数据;应用批量加定时的发送策略,解决海量监控信息发送气象综合业务实时监控系统的天镜的问题;集群部署时保留部分剩余资源,有效应对单节点异常。应用效果表明:国家气象站小时数据的服务时效由全国综合气象信息共享系统(CIMISS)的 175 s 提高至天擎的 78 s,约  $6 \times 10^4$  个区域气象站小时数据的服务时效由 CIMISS 的 5 min 提高至天擎的 2 min,实况分析系统将数据源切换至天擎后,相同时间检索可获取的站点数量较 CIMISS 增加 1 倍。2021 年 12 月基于 Storm 的流式处理与天擎一同在国省业务化运行,实现了长期稳定运行,为 MICAPS4、SWAN2.0、实况分析系统等用户提供高效稳定的地面自动气象站数据。

**关键词:** 气象大数据云平台; 地面自动气象站; Storm; RabbitMQ; 流式处理; BUFR

## 引言

气象观测是气象业务和科研工作的基础,地面气象观测是气象观测的重要组成部分,是对地球表面一定范围内气象要素及其变化过程进行系统、连续观测和测定,为天气预报、气候分析、科学研究和气象服务提供重要依据<sup>[1]</sup>。随着现代科学技术的进步,我国地面自动气象站迅速推广,其数量由 2015 年的约  $3 \times 10^4$  个增长至 2021 年的约  $6 \times 10^4$  个,同时地面自动气象站的观测频次也不断提高。国家气象站的观测频次由原来的 5 min 一次提高至 1 min 一次,区域气象站观测频次由原来的 10 min 一次提高至 5 min 一次,部分区域气象站达到 1 min 一次。气象站数量和观测频次的增加使观测数据快速增

长,对数据传输系统和处理系统的压力越来越大;同时,天气预报分析<sup>[2-3]</sup>、强对流预报<sup>[4-5]</sup>、实况产品制作、地质灾害预警<sup>[6]</sup>等气象业务对地面自动气象站数据时效性和稳定性的要求不断提高。为提高数据的传输时效,国家气象站和区域气象站先后采用 RabbitMQ 消息中间件<sup>[7]</sup>进行消息传输<sup>[8-9]</sup>,数据传输时效大幅提升<sup>[10]</sup>。

观测数据到达后,需要对其进行实时处理,以结构化要素的形式存储到数据库中,才能为用户提供服务。在采用 RabbitMQ 消息传输的同时,地面自动气象站数据格式由原来的文本格式改为标准化的 BUFR(binary universal form for the representation of meteorological data)格式编码<sup>[11-12]</sup>,可减少空间占用,但增加了数据处理的复杂度<sup>[13-14]</sup>。国家气象站采用消息传输后,对于 2442 站的国家气象站小时

2023-11-29 收到, 2024-02-29 收到再改稿。

资助项目: 中国气象局气象雷达数据共享平台数据实时传输系统建设项目(ZQC-J19187),中国气象局气象信息化系统工程感知网数据交换平台分系统——数据解码软件项目(ZQC-H22320),中国气象局创新发展专项(CXFZ2021Z007)

\* 通信作者, 邮箱: xuelei@cma.gov.cn

数据和国家气象站分钟数据,由于全国综合气象信息共享系统(China Integrated Meteorological Information Sharing System, CIMISS)原有的简约流程处理方式<sup>[15-16]</sup>各进程间缺乏有效调度,无法发挥多节点处理优势,导致处理速度不理想;同时当单节点出现异常时,其处理任务无法自动迁移,存在稳定性不足的问题。区域气象站采用消息传输后,国家级天擎每日要处理的区域气象站消息数量超过  $3.5 \times 10^7$ , CIMISS 原有处理流程无法处理如此海量的区域气象站消息。如何快速处理采用 RabbitMQ 消息传输的地面自动气象站数据,提升数据处理的时效性和稳定性,成为气象大数据云平台(天擎)亟待解决的重要问题。

本文分析地面自动气象站数据的现状和数据处理面临的问题,给出基于 Storm 的流式处理解决方案,介绍 Storm 中数据处理拓扑、数据接入组件、解码入库组件、监控信息发送组件等模块的设计,结合可配置的模块化设计、内存计算、数据库连接池、异

常处理、业务部署等方面的设计,该方案可有效提高地面自动气象站数据的服务时效,增强数据处理的稳定性,该方案已在国家级天擎和省级天擎实现业务化运行。

## 1 地面自动气象站数据现状

地面自动气象站数据格式标准化以后的编报数据分为国家气象站小时数据、国家气象站分钟数据、区域气象站小时数据和区域气象站分钟数据 4 种。由于大范围内多个地面自动气象站的观测才能反映某一时刻大气的整体状况,因此全部地面自动气象站每日均在同一时刻进行观测,也近乎在同一时刻进行传输,导致地面自动气象站数据在相同时刻集中到达,极大增加了数据处理的压力。图 1 为 2023 年 3 月 1 日 00:50—02:10(世界时,下同)国家级天擎逐分钟收到的地面自动气象站数据的消息数量。

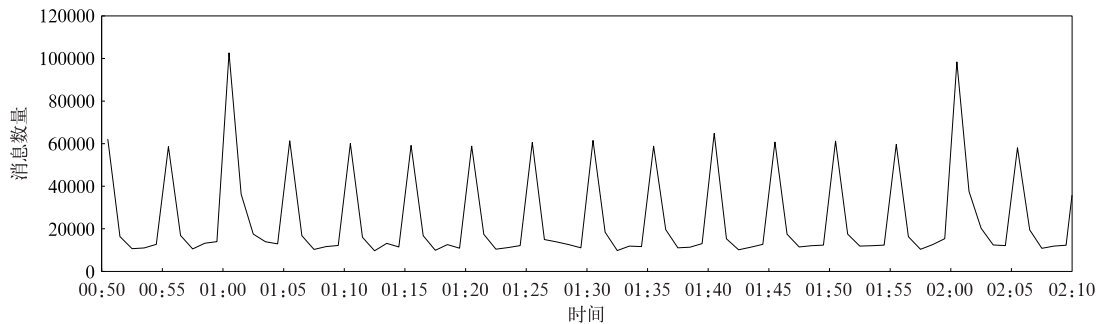


图 1 2023 年 3 月 1 日 00:50—02:10 地面自动气象站数据的逐分钟消息数量

Fig. 1 Message number of observations per minute from ground automatic weather stations from 0050 UTC to 0210 UTC on 1 Mar 2023

由图 1 可见,观测数据每隔 5 min 出现 1 个峰值,这是因为区域气象站观测频次为 5 min;每个整点出现 1 个较大峰值,这是因为地面自动气象站的小时数据和分钟数据在整点同时到达,导致此时数据量是其他时刻的 2 倍。国家级天擎每日收到的地面自动气象站数据总量超过  $3.5 \times 10^7$  条,平均每分钟  $2.5 \times 10^4$  条,整点的数据总量超过每分钟  $1 \times 10^5$  条,是平均水平的 4 倍,这极大增加了数据处理难度。

## 2 Storm 流式处理设计

在大数据批处理领域,Hadoop 的映射/归约计

算模式在气象数据处理领域得到广泛应用<sup>[17-18]</sup>。但是 Hadoop 的实时性处理不足,肖卫青等<sup>[19]</sup>指出 Hadoop 在处理大量小文件组成的气象数据时效率较低,需要将数据进行整合并在后续进行多次处理时才能发挥 Hadoop 的优势。由于实时地面自动气象站数据属于大量小文件类型数据,而且实时处理入库后一般不需要重复处理,因此 Hadoop 不适合用于地面自动气象站数据的实时处理。为应对海量数据实时处理,推特公司设计了分布式的、可靠的实时计算系统 Storm,并在 2011 年开源<sup>[20]</sup>。相对于 Hadoop 的批处理,Storm 实时性更强,适用于处理无限的数据流<sup>[21]</sup>,广泛应用于各行各业的实时数据处理<sup>[22-24]</sup>。地面自动气象站定时观测产生新数据,即为

无限数据流,其数据处理具备高时效、低时延的流式处理特点,因此非常适合采用 Storm 进行流式处理。

### 2.1 Storm 简介

Storm 集群采用主从式结构,由 1 个主节点和多个从节点构成。主节点负责管理、协调、监控集群的运行,记录所有从节点状态,并分配任务;从节点等待主节点分配任务,根据需要启动/关闭具体的工作进程;集群中的状态信息通过分布式应用程序协调服务进行同步。

Storm 计算框架由拓扑、元组、流、喷嘴、螺栓和任务等组成。元组是 Storm 的核心数据结构,包含 1 个或多个键值对的列表;无限的元组组成的序列形成流。喷嘴负责连接外部数据源,将数据转化为元组并发射至后端的螺栓,为 Storm 流的来源。螺栓负责对元组实施运算,计算后可以输出 1 个或者多个数据流。由流、喷嘴、螺栓组成 Storm 的分布式计算结构拓扑,拓扑会一直运行,可避免任务频繁启停导致的资源消耗。

### 2.2 处理拓扑设计

应用 Storm 进行实时数据处理的关键是将处理任务分解成适合高并发处理的子任务,并通过喷嘴和螺栓等组件构成拓扑实时调度运行。地面自动气象站数据的处理步骤包括数据消息获取、属性信息提取、BUFR 字节校验、BUFR 报文解码、时间检查、特征值转换、SQL 生成、数据入库、监控信息生成、监控信息发送等环节。为了减少数据在计算节点间的转发,缩短处理延迟,提高系统的处理效率。本文将每个站次的地面自动气象站数据处理设计为 1 个完整的处理任务,并将数据处理分解为数据接入、解码入库和监控信息发送 3 个组件。

数据接入组件、解码入库组件和监控信息发送组件构成整体的处理拓扑,数据接入组件连接 RabbitMQ 消息队列,获取 BUFR 数据消息,提取属性信息,将相应数据转化为元组后发射至解码入库组件。解码入库组件收到元组后,从中提取 BUFR 报文,通过字节校验后进行解码,提取编报要素值,经过时间检查、特征值转换、SQL 生成,调用数据库连接池实现观测数据入库;根据数据入库的结果生成数据信息(data information, DI),转换成元组发送至监控信息发送组件。监控信息发送组件收到 DI 后,按照发送策略将 DI 发送至气象综合业务实时监控系(天镜),用于数据全流程监视告警的计算<sup>[25]</sup>和天擎加工流水线的数据源感知调度<sup>[26]</sup>。

### 2.3 数据接入组件

数据接入组件是地面自动气象站数据流式处理中的数据源,负责从 RabbitMQ 队列获取 BUFR 数据消息,其获取的每条消息都包含 1 个地面自动气象站的 1 个观测时次数据。数据接入组件获取 RabbitMQ 消息采用手动确认模式,只有在数据接入组件显式回复确认后,RabbitMQ 才会从队列中删除该消息,这可以保证后续的解码入库组件完成每条消息的全部处理逻辑。当某个数据接入组件由于各种原因异常退出时,未确认的消息会重新分配给其他数据接入组件,这可以保证 Storm 处理拓扑重启时不丢失数据。数据接入组件与解码入库组件间采用随机分组模式,所有的处理任务均可随机分配给各解码入库组件,实现数据解码的高并发处理。

### 2.4 数据解码入库组件

数据解码入库组件负责对 BUFR 报文进行解码,实现地面自动气象站数据的处理入库,是 Storm 流式处理中最复杂的组件。解码入库组件收到数据接入组件发射的元组后,从中提取相应的编报数据,进行字节校验、要素解码、时间检查、特征值转换、SQL 生成、数据入库等操作,实现地面自动气象站数据的解码入库处理:

①字节校验。在对 BUFR 报文解码前,先按照字节校验的流程检查报文数据,未通过字节校验的数据将不再进行后续解码,但根据特定的规则将该报文记入原始报告表,用于后续的问题排查。

②要素解码。通过字节校验后,解码入库组件调用相应的解码算法进行要素解码,获取编报的观测时间、站号、经纬度、海拔高度、温度、气压、风向、风速、湿度、降水量等要素值。根据 BUFR 编码规范,当要素描述符规定的比特位全部为 1 时,表示该要素缺测,由于各个要素定义的比特位长度不一,因此 BUFR 编报中各个要素的缺测值不同。为方便用户使用,在解码时需要对缺测值进行统一转换,将比特位全部为 1 的要素值统一转为缺测特征值 999999。

③时间检查。业务实践中会有超出规定时间范围的历史数据和超前数据上传至国家级天擎。大量历史数据会引发入库冲突,降低入库速度,影响实时数据入库。超前数据会导致用户使用困惑,影响观测数据质量。为保证实时数据入库速度和提升数据质量,在数据要素解码后,检查观测时间,超过规定时间范围的数据不进行后续的入库处理,同时以错

误信息 (error information, EI) 告警的形式通知天镜。时间检查的范围设计为从配置文件读取, 可以根据业务要求进行快速调整。

④特征值转换。对于部分要素值, 需要根据相应规范进行转换, 将对应的特征值入库。例如当风速不超过  $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 需将风向全部转换为静风特征值 999017; 当降水量编报值为 -1 时, 需将其转换为微量降水特征值 999990。

⑤SQL 生成。全部要素解码并经过时间检查和特征值转换后, 生成入库的要素值, 根据数据类型按照表 1 生成相应的入库语句。生成 SQL 语句时, 除经过转换的要素值外, 还需要添加管理字段, 但这些信息不在报文中编报, 例如行政区划字段。因为每个地面自动气象站的每条观测数据需要访问该信息, 面对每分钟超过  $1 \times 10^5$  次的访问, 普通数据库的查询效率会严重影响数据处理的效率。内存数据库将数据库的全部或大部分数据放在内存中, 使用哈希索引以及 T 树索引组织数据以提高数据查询效率<sup>[27]</sup>。但内存数据库仍然存在节点间网络通信等开销, 处理数据库连接异常使解码入库组件的逻辑更加复杂, 进而降低整个系统的稳定性。将数据直接加载到程序内存, 基于内存进行操作<sup>[28]</sup>, 能够实现更高的查询效率和更可靠的稳定性。因此设计解码入库组件预先将所有地面自动气象站信息加载到内存, 使用哈希映射进行索引存储, 关键字为站号和气象站类型的组合, 值为该站信息。在数据处理时使用站号和气象站类型的组合进行查询, 实现地面自动气象站信息快速查询。

表 1 地面自动气象站数据入库数据表说明

Table 1 Description of data insert tables for ground automatic weather station data

数据名称	天擎入库表名
国家气象站小时数据	中国地面小时原始报告表
	中国地面小时表
	全球地面小时表
	中国地面日值表
	中国地面日照表
	重要天气表
国家气象站分钟数据	中国地面分钟原始报告表
	中国地面分钟降水表
	地面分钟全要素表
区域气象站小时数据	中国地面小时原始报告表
	中国地面小时表
区域气象站分钟数据	中国地面分钟原始报告表
	中国地面分钟降水表
	地面分钟全要素表

⑥数据入库。数据解码入库组件根据入库规则生成 SQL 语句后调用虚谷数据库接口实现数据入库。入库时采用数据连接池技术, 免去每次访问建立和关闭连接的开销, 提升入库效率<sup>[29]</sup>。由于网络抖动、延迟等原因, 入库过程可能会出现连接中断, 造成入库不完整。为解决该问题, 在入库过程中设计每个数据处理任务的多个表按顺序独立入库, 互不影响; 当某个表的入库发生中断时, 解码入库组件会尝试 3 次重新执行, 若仍失败则将该消息重新投递至 RabbitMQ 消息队列再处理。为避免重复入库, 在数据表中设计站号和观测时间作为唯一索引。结合数据库的唯一索引, 通过失败重试和重新投递可以保证数据处理的完整性且避免重复数据入库。

入库语句执行完成后, 数据库接口会返回记录的入库状态码, 解码入库组件根据状态码判断入库结果, 生成相应的 DI 或 EI, 将其转换为元组后发送给监控信息发送组件。

## 2.5 监控信息发送组件

监控信息发送组件负责将数据处理过程中产生的 DI/EI 发送至天镜, 天镜对这些信息进行处理, 综合通信、存储等系统的信息实现全流程、全要素、全过程的监控。为避免监控信息发送异常影响正常的业务处理流程, 为其设计独立组件。DI/EI 通过 RESTful 接口<sup>[30]</sup>发送至本地代理, 再由本地代理发送至天镜。由于 RESTful 接口底层采用超文本传输协议 (hypertext transfer protocol, HTTP) 通信, 所以发送时每次都需要建立 1 个 TCP (transmission control protocol) 连接, 每个 TCP 连接都需要 1 个本地端口, 一般系统默认设置的 TCP 连接可用端口为 32768~60999, 约 28000 个。由于端口在 TCP 连接释放后经过 2 倍的报文最大生存时间才能被重复使用<sup>[31]</sup>, 在整点有约  $6 \times 10^4$  个区域气象站小时数据和区域气象站分钟数据集中到达, 每条数据均入到多个表并生成多条 DI, 短时间内生成的 DI 数量高达几十万条, 可在瞬间将 Storm 集群中所有节点的可用端口占满, 导致 DI 发送失败, 进而影响天镜对数据入库完整性的判断, 产生入库不完整告警。

为避免数据集中到达时 DI 发送失败, 需要减少 TCP 连接数量和端口占用数量。监控信息发送组件采用批量发送模式, 同时为了避免因数据量少而长时间达不到阈值, 影响 DI 发送的及时性, 增加了定时发送模式。监控信息发送组件在收到 DI 元组后, 将其缓存到数据栈, 超过 200 条时进行批量发

送,缓存的大小可通过配置修改;同时在监控信息发送组件中创建定时任务,定时触发 DI 缓存栈发送,清空数据缓存,解决因数量少而长时间无法达到缓存阈值的问题;定时任务默认 3 s 触发 1 次,时间间隔可配置;如果发送失败,监控信息发送组件会重复尝试发送 3 次,以避免由于网络连接异常引起的偶然性失败。

## 2.6 可靠性设计

基于 Storm 地面自动气象站流式处理采用可靠的数据流处理设计,保证 RabbitMQ 队列中每个消息均能得到完整处理。通过 Storm 提供的可靠性应用程序编程接口,数据接入组件发射元组至解码入库组件时均带上消息编号,无论解码入库组件处理成功与否,数据接入组件均会接收到解码入库组件返回的通知。如果处理成功,数据接入组件会确认该编号的消息,并从 RabbitMQ 删除该消息。如果执行失败,根据失败原因确定删除消息或者重新投递。通过元组的可靠确认机制,每条消息经确认才被删除,确保数据不丢失。

## 2.7 稳定性设计

为实现  $7 \times 24$  h 的业务运行,需要 Storm 流式处理在面对普通异常情况时具备自愈能力。数据接入组件、解码入库组件、监控信息发送组件等工作组件在异常退出后会被主节点管理服务重启,可靠性

高。当 Storm 集群内某个节点损坏时,其上运行的处理任务可以自动迁移至其他节点,不影响实时数据处理。

系统设计消息队列和数据库的自动重连机制,解决因网络抖动等因素造成的消息队列和数据库的偶然连接异常,可以从网络闪断中自动恢复。DI/EI 发送失败时会重试 3 次,仍然失败则在记录日志后清空缓存不再发送,避免积压大量待发送数据从而影响实时数据处理。

## 3 性能测试与业务部署

### 3.1 性能测试

为对地面自动气象站数据流式处理的性能进行测试,在国家级天擎采用 4 个物理节点搭建了测试 Storm 集群,每节点配置 4 路 10 核双线程 CPU 和 376 GB 内存。由于解码入库组件处理逻辑最复杂,是影响处理速度的关键,因此在测试过程中保持数据接入组件和监控信息发送组件的数量不变,通过修改配置调整解码入库组件数量进行处理速度测试。每次测试的数据相同,分别对国家气象站小时数据、国家气象站分钟数据、区域气象站小时数据和区域气象站分钟数据进行独立测试,结果如图 2 所示。

由图 2 可见,国家气象站小时数据、国家气象站

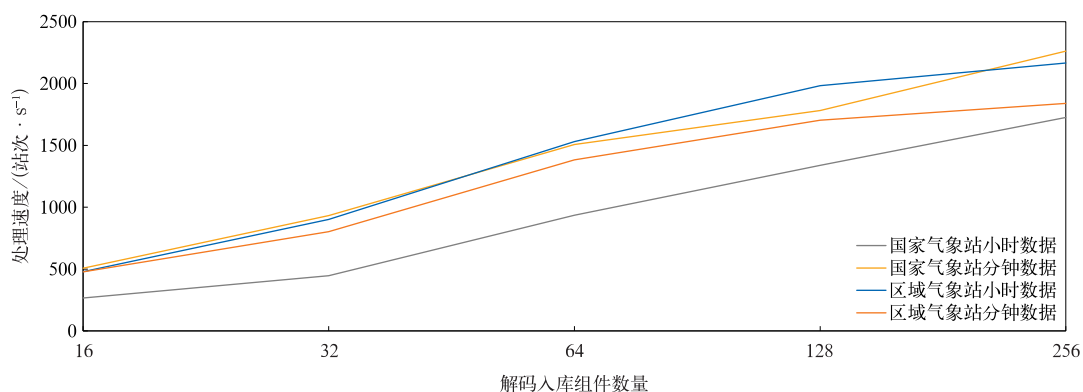


图 2 地面自动气象站数据处理速度与解码入库组件数量关系

Fig. 2 Relationship between processing speed of ground automatic weather station data and bolt quantity

分钟数据、区域气象站小时数据和区域气象站分钟数据的处理速度基本与解码入库组件数量线性相关;处理速度随着解码入库组件数量的增加而增加,但是处理速度不能随着解码入库组件数量加倍而加倍,这是由于存在线程管理和内部数据传输消耗;国家气象站小时数据的处理速度明显低于其他数据,

原因在于国家气象站小时数据包含的要素最多,解码入库逻辑最复杂。

针对地面自动气象站小时数据和分钟数据在整点同时到达的业务场景,用数据量最大的区域气象站小时数据和区域气象站分钟数据进行同时处理性能测试,测试过程保持数据接入组件和监控信息发

送组件的数量不变,每次测试的数据相同,测试结果如图 3 所示。

由图 3 可见,同时处理区域气象站小时数据和区域气象站分钟数据的情况下,当解码入库组件数量小于 128 时,处理速度与组件数量基本线性相关,处理速度随着组件数量的增加而增加,组件数量为 128 时达到最大值;当组件数量为 256 时,处理速度却有所降低。原因在于测试环境 4 个节点的 CPU 线程总数为 320(每台 80 线程),在区域气象站小时

数据和区域气象站分钟数据两个处理拓扑解码入库组件均为 256 的情况下,整个 Storm 集群同时运行的组件总量远超过物理集群 CPU 线程总量,无法实现真正的并行处理;同时,由于存在更多线程切换等开销,导致处理速度有所下降。但区域气象站小时数据和区域气象站分钟数据同时处理速度合计超过  $1.2 \times 10^5$  站次  $\cdot \text{min}^{-1}$ ,测试环境下基本可以满足区域气象站小时数据和区域气象站分钟数据同时处理的业务场景。

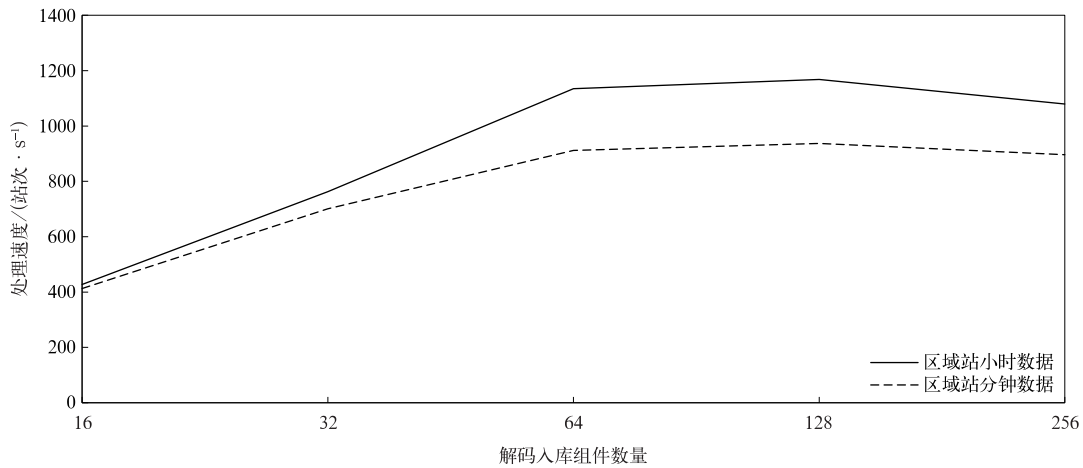


图 3 区域气象站小时数据与区域气象站分钟数据同时处理速度与解码入库组件数量关系  
Fig. 3 Relationship between regional station hourly data and minutely data simultaneous processing speed and bolt quantity

综上所述,通过测试可知,在不超物理集群资源上限的情况下,采用 Storm 流式处理技术可以充分利用大规模并行处理的优势,通过扩大处理资源提升地面自动气象站数据的处理效率,满足业务上对数据处理时效性的需求。

### 3.2 业务部署

为满足业务用户的时效性要求,需要参考测试数据进行合理的业务部署。业务系统部署采用 3 个物理节点,每个节点配置 8 路 16 核双线程 CPU 和 376 GB 内存,因此整个集群总 CPU 线程数为 768。由于国家气象站小时数据、国家气象站分钟数据、区

域气象站小时数据和区域气象站分钟数据采用不同的消息队列传输,因此在国家级天擎设计 4 个 Storm 拓扑用以处理不同的消息队列,各个拓扑处理相互独立,避免相互影响,整体处理拓扑说明见表 2。虽然地面自动气象站小时数据的总量远小于分钟数据的总量,但是由于数据集中到达,在整点时小时数据的处理负载与分钟数据相当,同时小时数据为业务考核数据,为保证小时数据处理时效,因此为小时数据配置的处理资源与分钟数据相当。

地面自动气象站数据处理要求  $7 \times 24$  h 高可靠性运行,处理系统必须能够应对任意单节点的硬件

表 2 国家级天擎地面自动气象站数据处理拓扑说明

Table 2 Topology description of national Tianqing ground automatic weather station processing

数据类型	每小时上传数据次数	工作进程数量	数据接入组件数量	解码入库组件数量
国家气象站小时数据	1	12	12	36
国家气象站分钟数据	60	6	6	36
区域气象站小时数据	1	24	24	240
区域气象站分钟数据	12	24	20	300

故障,避免由此导致的业务中断。Storm 可以将异常节点上的任务自动迁移至其他节点<sup>[32]</sup>,但要求整个集群剩余的可用工作进程数量大于任意节点使用的工作进程数量,这样 Storm 集群内任意节点退出集群时,该节点上运行的任务才可以自动迁移至其他节点,不影响整体数据处理。因此在业务部署时,实际使用的工作进程数量仅约占 2/3,剩余 1/3 用于单节点故障时的任务迁移。

### 3.3 运行评估

为便于评估地面自动气象站数据处理入库的数量,本文定义某时刻特定时次的入库率为该时刻已经入库的站数与全部入库站数之比。其中,已入库站数可通过数据库查询获得,全部入库站数采用该时次实际入库总站数。

一旦完成数据入库,用户即可通过服务接口访问。用户可以根据入库率随时间的变化以及自身业务需求决定获取数据的时间。通常情况下,当入库率达到 90% 时,可以满足大多数业务的数据服务需求。因此本文提出服务时效的概念,用于衡量数据处理入库的效率。服务时效定义为入库率达到 90%

的时间与规定观测时间的时差,服务时效反映了从规定的观测时刻开始到用户可以检索到 90% 以上站点数据所需的时间。

对国家级天擎和 CIMISS 并行运行期间的 2021 年 12 月 29 日 24 个时次国家气象站小时数据处理入库情况进行比较,其平均入库率随时间变化如图 4 所示。国家气象站小时数据在天擎和 CIMISS 均采用 BUFR 数据消息传输,由同一路消息复制得到,其数据来源相同,因此可视为同时到达天擎和 CIMISS。由图 4 可见,天擎和 CIMISS 分别处理入库 2442 站。在整点后 36 s 内,由于到报站点数量少,天擎与 CIMISS 的入库率几乎相同;在整点后 36 s 以后,到报站点数大幅增加,天擎处理入库的性能优势突显。36~44 s 天擎处理入库 1604 站,CIMISS 仅处理入库 220 站,天擎处理入库速度约为 CIMISS 的 7 倍。以服务时效衡量,天擎为 78 s,CIMISS 为 175 s,天擎较 CIMISS 提前 97 s;根据前文测试结果,采用 Storm 流式处理最快可在 2 s 内处理完 1 个时次的国家气象站小时数据,实际数据量远未达到系统处理能力上限。

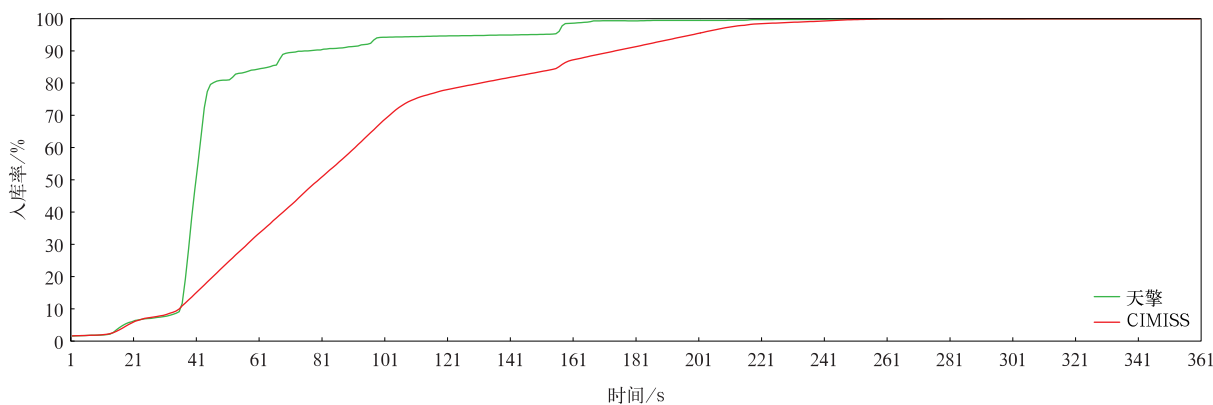


图4 2021年12月29日24个时次平均的国家气象站小时数据天擎和 CIMISS 的入库率随时间变化

Fig. 4 Comparison of data insert rate changes between Tianqing and CIMISS for 24 samples of national station hourly data on 29 Dec 2021

天擎和 CIMISS 并行运行期间的区域气象站小时数据 2021 年 5 月 23 日 24 个时次平均的入库率随时间变化如图 5 所示。由图 5 可见,天擎平均处理入库 61122 站,CIMISS 平均处理入库 60339 站,天擎较 CIMISS 处理入库的站点更多;以服务时效衡量,天擎为 127 s,CIMISS 为 304 s,服务时效由

CIMISS 的 5 min 提升至天擎的 2 min。

综上所述,在国家级天擎采用 Storm 流式处理很好发挥了大规模并行处理的优势,大幅提高了地面自动气象站数据的处理速度和服务时效,并可根据业务量快速调整相应的处理资源,满足不断发展的业务需求。

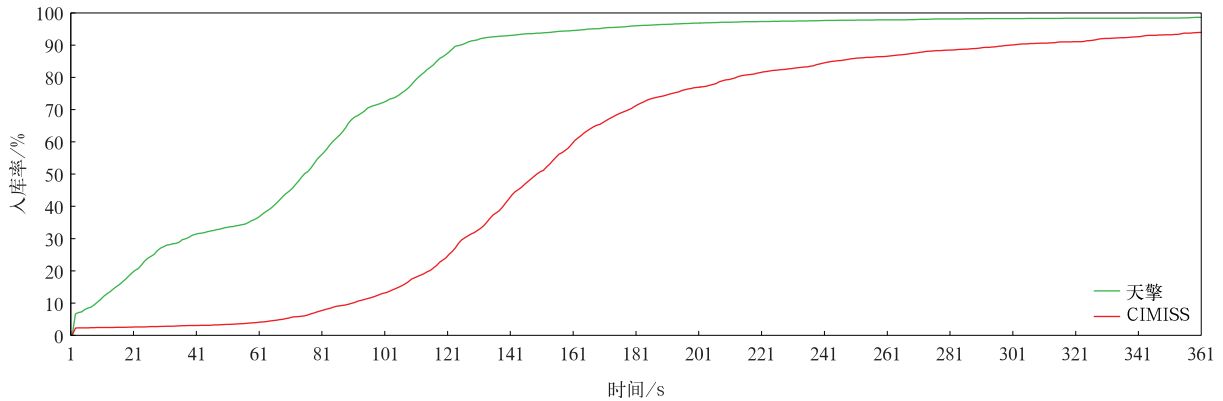


图 5 2021 年 5 月 23 日 24 个时次平均的区域气象站小时数据天擎和 CIMISS 的入库率随时间变化  
 Fig. 5 Comparison of data insert rate changes between Tianqing and CIMISS for 24 samples of regional station hourly data on 23 May 2021

## 4 业务应用

### 4.1 基础数据支撑

地面自动气象站数据经过流式处理后,将气温、气压、湿度、风、降水等 100 多个要素入库,其中国家气象站还包括地温、能见度、积雪、天气现象等要素,

作为基础数据支撑天气分析、模式预报<sup>[33]</sup>、实况产品生成、灾害管理<sup>[34]</sup>、预报检验<sup>[35]</sup>等各种气象业务和重大活动保障<sup>[36]</sup>,是天擎中下载次数和下载量最多的数据之一。表 3 为 2023 年 3 月中国气象局各直属单位使用地面自动气象站数据最多的业务系统的访问情况。

表 3 2023 年 3 月中国气象局各直属单位通过业务系统获取地面自动气象站小时数据情况汇总  
 Table 3 Summary of ground automatic weather stations hourly data from systems by various institutions of China Meteorological Administration in Mar 2023

单位	系统名称	访问次数	数据量/GB
国家气象信息中心	天擎实况	17844182	22739.5
中国气象科学研究院	东亚区域再分析及智能预报竞赛系统	753707	9400.8
国家气象中心	智能网格预报处理系统	603944	3305.1
气象探测中心	综合气象观测数据质量控制系统_天衡天衍	372840	350.6
气象干部培训学院	短临预警技能与素质综合训练系统	247207	1580.8
人工影响天气中心	人影效果评估系统	113491	1695.5
国家气候中心	气候变化影响评估与服务系统	42591	8.5
国家卫星气象中心	卫星天气应用平台(SWAP)	22425	54.4
公共气象服务中心	国家级交通气象服务业务	13647	229.5
地球系统数值预报中心	GRAPES 数值预报业务系统	5517	44.8

### 4.2 实况应用

多源气象数据融合研究的重点是地面站点观测数据与卫星、雷达等遥感手段获取的面观测数据的融合分析技术,因此地面自动气象站数据的时效性和稳定性对多源气象数据融合实况产品的研制有重要影响<sup>[37]</sup>。2021 年 11 月 25 日实况分析系统将其数据源由 CIMISS 切换至天擎,整点后 2.5 min 检索到地面自动气象站小时数据由原来的约  $3 \times 10^4$  个站增长至约  $6 \times 10^4$  个站,增加近 1 倍,可以有效提升实况产品的质量。同时切换后数据获取的波动

明显减少,天擎的地面自动气象站数据较 CIMISS 更加稳定,有助于提升实况产品的稳定性。后续实况分析系统可根据天擎的入库情况,将获取地面自动气象站数据的启动时间提前,在其他资源不变的情况下,提升实况产品的生成时效。

### 4.3 强对流天气预报预警

强对流天气(短时强降水、雷雨大风、冰雹、龙卷)常导致重大人员伤亡和财产损失,具有突发性和局地性强、尺度小、生命史短、灾害严重等特点。国家防灾减灾、重大社会活动和精细化天气预报的需



要均对强对流天气的短时临近预报业务提出了更高需求<sup>[38]</sup>。时效和精准是强对流天气预报预警的重要考量,直接影响防灾减灾效果。地面自动气象站数据流式处理为解决当前短时临近预报业务面临的“既要时效性强、又要预报精准”的问题<sup>[39]</sup>提供了基础数据支撑。作为强对流天气预报预警中最重要的数据源之一,地面自动气象站数据服务时效的提升,一方面可以使强对流监测系统更快捕捉到超出要素阈值的报警,从而提高预警提前量;另一方面,对于强降水等使用最新地面自动气象站数据进行订正的短时临近预报系统<sup>[40]</sup>,使其获得更多站点数据,从而提高临近预报准确率。

#### 4.4 省级应用

省级天擎中本省和外省地面自动气象站数据接入流程不同,本省地面自动气象站数据由通信系统直接收集的 BUFR 数据消息接入,外省数据则通过国家级下发的 BUFR 文件接入。基于 Storm 的地面自动气象站数据流式处理可直接应用于省级天擎本省数据的处理,提升本省数据处理时效。由于数据的编报规则和处理规则相同,地面自动气象站数据流式处理中增加针对 BUFR 文件的处理拓扑后,同样可应用于外省数据处理,使省级天擎具备处理全国地面自动气象站数据的能力。

以 2023 年 2 月 20—22 日河北、上海、湖北、广东、陕西、黑龙江、四川、新疆等 8 个省级天擎每日 00:00 和 04:00 区域气象站小时数据平均入库为例,其中广东平均入库站数为 70485,新疆平均入库站数为 67818,上海平均入库站数为 67853,3 个省(市)均接入全国近 100% 的区域气象站小时数据;以服务时效衡量,8 省区域气象站小时数据的平均服务时效均小于 4 min。因此即使在接入全国 100% 区域气象站的情况下,省级天擎区域气象站小时数据的平均服务时效也可达到 4 min,具备快速处理全国区域气象站数据的能力。

## 5 小 结

基于 Storm 的地面自动气象站流式处理直接解码 RabbitMQ 传输的 BUFR 数据消息,通过可靠的高并发流式处理,实现地面自动气象站数据的即时处理,得到以下结论:

1) 提升数据服务时效。在国家级天擎,国家气象站小时数据的服务时效由 CIMISS 整点后的 175 s

提高至 78 s;区域气象站小时数据服务时效由 CIMISS 整点后的 5 min 提高至 2 min。实况分析系统数据源从 CIMISS 切换至天擎后,相同时间检索到的站点数量是 CIMISS 的 2 倍,有效提升实况产品质量。

2) 基于 Storm 的地面自动气象站流式处理设计消息队列重连、数据库重连、预留硬件资源的部署方式提高系统的稳定性,使系统具备一定自愈能力。自 2021 年 12 月业务化运行至今,基于 Storm 的地面自动气象站数据流式处理实现了长期无故障稳定运行。

3) 地面自动气象站数据流式处理在增加专门的处理流程后,可有效应对省级天擎本省和外省地面自动气象站数据接入流程不同的业务场景,使省级天擎具备快速处理全国地面自动气象站数据的能力。

## 参 考 文 献

- [1] 闫瑛. 地面气象观测. 北京:气象出版社,2014.  
Yan Y. Ground Meteorological Observation. Beijing: China Meteorological Press, 2014.
- [2] 高嵩,毕宝贵,李月安,等. MICAPS4 预报业务系统建设进展与未来发展. 应用气象学报,2017,28(5):513-531.  
Gao S, Bi B G, Li Y A, et al. Implementation and development plan of MICAPS4. *J Appl Meteor Sci*, 2017, 28(5): 513-531.
- [3] 王若瞳,王建民,黄向东,等. MICAPS4 服务端系统架构设计. 应用气象学报,2018,29(1):1-12.  
Wang R T, Wang J M, Huang X D, et al. The architecture design of MICAPS4 server system. *J Appl Meteor Sci*, 2018, 29(1): 1-12.
- [4] 黄丽萍,邓莲堂,王瑞春,等. CMA-MESO 关键技术集成及应用. 应用气象学报,2022,33(6):641-654.  
Huang L P, Deng L T, Wang R C, et al. Key technologies of CMA-MESO and application to operational forecast. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(6): 641-654.
- [5] 韩丰,沃伟峰. SWAN2.0 系统的设计与实现. 应用气象学报,2018,29(1):25-34.  
Han F, Wo W F. Design and Implementation of SWAN2.0 Platform. *J Appl Meteor Sci*, 2018, 29(1): 25-34.
- [6] 刘海知,徐辉,包红军,等. 机器学习分类算法在降雨型滑坡预报中的应用. 应用气象学报,2022,33(3):282-292.  
Liu H Z, Xu H, Bao H J, et al. Application of machine learning classification algorithm to precipitation-induced landslides forecasting. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(3): 282-292.
- [7] Rostanski M, Grochla K, Seman A. Evaluation of highly available and fault-tolerant middleware clustered architectures using RabbitMQ. *IEEE*, 2014: 879-884.
- [8] 张来恩,王鹏,韩鑫强. CTS2.0 消息封装及交换控制策略设

- 计及实践. 气象科技进展, 2018, 8(1): 271-273.
- Zhang L E, Wang P, Han X Q. Design and practice of CTS2. 0 message encapsulation and exchange control strategy. *Adv Meteor Sci Tech*, 2018, 8(1): 271-273.
- [9] 胡英楣, 王甫棣, 谭小华, 等. 有状态消息队列在国内气象通信系统的应用. 计算机系统应用, 2020, 29(3): 121-126.
- Hu Y M, Wang F D, Tan X H, et al. Application of stateful message queue technology in national meteorological communication system. *Comput Syst Appl*, 2020, 29(3): 121-126.
- [10] 邓鑫, 王祝先, 杨英奎, 等. 基于 RabbitMQ 技术的气象标准格式数据传输研究. 自动化技术与应用, 2021, 40(5): 182-185.
- Deng X, Wang Z X, Yang Y K, et al. Research on data transmission in meteorological standard format based on RabbitMQ technology. *Tech Autom Appl*, 2021, 40(5): 182-185.
- [11] 王颖, 薛蕾, 赵芳, 等. 气象数据格式标准化设计和实施进展. 气象科技进展, 2018, 8(1): 252-255.
- Wang Y, Xue L, Zhao F, et al. Progress in standardization design and implementation of meteorological data format. *Adv Meteor Sci Tech*, 2018, 8(1): 252-255.
- [12] WMO. Manual on Codes(2019 Ed). 2021.
- [13] 王素娟, 崔鹏, 郑旭东, 等. 气象卫星风矢量 BUFR 编码. 气象科技, 2011, 39(3): 339-343.
- Wang S J, Cui P, Zheng X D, et al. Representing atmospheric motion vectors of meteorological satellites in BUFR. *Meteor Sci Technol*, 2011, 39(3): 339-343.
- [14] 张恩红, 尹海燕. 基于压缩格式 BUFR 码的气象卫星数据解码解析. 广东气象, 2021, 43(5): 70-74.
- Zhang E H, Yin H Y. Decoding analysis of meteorological satellite data based on compressed format BUFR code. *Guangdong Meteor*, 2021, 43(5): 70-74.
- [15] 熊安元, 赵芳, 王颖, 等. 全国综合气象信息共享系统的设计与实现. 应用气象学报, 2015, 26(4): 500-512.
- Xiong A Y, Zhao F, Wang Y, et al. Design and Implementation of China Integrated Meteorological Information Sharing System(CIMISS). *J Appl Meteor Sci*, 2015, 26(4): 500-512.
- [16] 季永华, 孙超, 刘一鸣, 等. CIMISS 中气象观测资料处理入库效率优化方法. 气象科技, 2017, 45(1): 29-34.
- Ji Y H, Sun C, Liu Y M, et al. A method for optimizing storage efficiency of meteorological data in CIMISS. *Meteor Sci Technol*, 2017, 45(1): 29-34.
- [17] 杨润芝, 沈文海, 肖卫青, 等. 基于 MapReduce 计算模型的气象资料处理调优试验. 应用气象学报, 2014, 25(5): 618-628.
- Yang R Z, Shen W H, Xiao W Q, et al. A set of MapReduce tuning experiments based on meteorological operations. *J Appl Meteor Sci*, 2014, 25(5): 618-628.
- [18] 李永生, 曾沁, 徐美红, 等. 基于 Hadoop 的数值预报产品服务平台设计与实现. 应用气象学报, 2015, 26(1): 122-128.
- Li Y S, Zeng Q, Xu M H, et al. Design and implementation of NWP data service platform based on Hadoop framework. *J Appl Meteor Sci*, 2015, 26(1): 122-128.
- [19] 肖卫青, 杨润芝, 胡开喜, 等. Hadoop 在气象数据密集型处理领域中的应用. 气象科技, 2015, 43(5): 823-828.
- Xiao W Q, Yang R Z, Hu K X, et al. Application of Hadoop in data-intensive processing of meteorological data. *Meteor Sci Technol*, 2015, 43(5): 823-828.
- [20] 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.
- [21] 陈敏敏, 王新春, 黄奉线. Storm 技术内幕与大数据实践. 北京: 人民邮电出版社, 2015.
- Chen M M, Wang X C, Huang F X. Storm Technology Insider and Big Data Practice. Beijing: Posts & Telecom Press, 2015.
- [22] 孙小涓, 石涛, 胡玉新, 等. 基于流式计算的空间科学卫星数据实时处理. 计算机应用, 2019, 39(6): 1563-1568.
- Sun X J, Shi T, Hu Y X, et al. Real-time processing of space science satellite data based on stream computing. *J Comput Appl*, 2019, 39(6): 1563-1568.
- [23] 乔通, 赵卓峰, 丁维龙. 面向套牌甄别的流式计算系统. 计算机应用, 2017, 37(1): 153-158.
- Qiao T, Zhao Z F, Ding W L. Stream computing system for monitoring copy plate vehicles. *J Comput Appl*, 2017, 37(1): 153-158.
- [24] 孙超, 霍庆, 任芝花, 等. 地面气象资料统计处理系统设计与实现. 应用气象学报, 2018, 29(5): 630-640.
- Sun C, Huo Q, Ren Z H, et al. Design and implementation of surface meteorological data statistical processing system. *J Appl Meteor Sci*, 2018, 29(5): 630-640.
- [25] 徐达, 曾乐, 王英杰. “天镜”全流程指标计算功能优化. 计算机技术与发展, 2023, 33(7): 20-26.
- Xu D, Zeng L, Wang Y J. Optimization of calculation function of “the Mirror” whole process index. *Comput Technol Dev*, 2023, 33(7): 20-26.
- [26] 霍庆, 何文春, 何林等. 气象大数据云平台算法集约化环境设计与应用. 应用气象学报, 2024, 35(1): 80-89.
- Huo Q, He W C, He L, et al. Design and application of algorithm intensive environment for CMA big data and cloud platform. *J Appl Meteor Sci*, 2024, 35(1): 80-89.
- [27] 王珊, 肖艳芹, 刘大为, 等. 内存数据库关键技术研究. 计算机应用, 2007, 27(10): 2353-2357.
- Wang S, Xiao Y Q, Liu D W, et al. Research of main memory database. *J Comput Appl*, 2007, 27(10): 2353-2357.
- [28] 杨润芝, 马强, 李德泉, 等. 内存转发模型在 CIMISS 数据收发系统中的应用. 应用气象学报, 2012, 23(3): 377-384.
- Yang R Z, Ma Q, Li D Q, et al. Application of memory forwarding model to data transmission system of CIMISS. *J Appl Meteor Sci*, 2012, 23(3): 377-384.
- [29] 戴长秀. 连接池访问数据库的研究与应用. 计算机时代, 2017(11): 20-22.
- Dai C X. Research and application of connection pool access to database. *Comput Era*, 2017(11): 20-22.
- [30] Richardson L, Ruby S. RESTful Web Services. 徐涵, 李红军, 胡伟, 译. 北京: 电子工业出版社, 2008.

- Richardson L, Ruby S. RESTful Web Services. Xu H, Li H J, Hu W, Trans. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008.
- [31] Stevens W R. TCP/IP 详解卷 1: 协议. 范建华, 译. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- Stevens W R. TCP/IP Illustrated. Fan J H, Trans. Beijing: China Machine Press, 2000.
- [32] 鲁亮, 于炯, 卞琛, 等. 大数据流式计算框架 Storm 的任务迁移策略. 计算机研究与发展, 2018, 55(1): 71-92.
- Lu L, Yu J, Bian C, et al. Task migration strategy of Storm, a big data streaming computing framework. *J Comput Res Dev*, 2018, 55(1): 71-92.
- [33] 邢楠, 仲跻芹, 雷蕾等. 基于 CMA-BJ 的北京地区短时强降水预报试验. 应用气象学报, 2023, 34(6): 641-654.
- Xing N, Zhong J Q, Lei L, et al. A probabilistic forecast experiment of short-duration heavy rainfall in Beijing based on CMA-BJ. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(6): 641-654.
- [34] 李莹, 王国复. 气象灾害风险管理系统设计与应用. 应用气象学报, 2022, 33(5): 628-640.
- Li Y, Wang G F. Design and implementation of Meteorological Disaster Risk Management System. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(5): 628-640.
- [35] 常煜, 温建伟, 杨雪峰, 等. 基于 CMA-TYM 和 SCMOC 的嫩江流域暴雨检验. 应用气象学报, 2023, 34(2): 154-165.
- Chang Y, Wen J W, Yang X F, et al. Rainstorm inspection in Nenjiang River Basin based on CMA-TYM and SCMOC. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(2): 154-165.
- [36] 杨和平, 张强, 罗兵, 等. 气象综合指挥平台建设与应用. 应用气象学报, 2023, 34(1): 117-128.
- Yang H P, Zhang Q, Luo B, et al. Construction and application of Meteorological Integrated Command Platform. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(1): 117-128.
- [37] 师春香, 潘畅, 谷军霞, 等. 多源气象数据融合格点实况产品研制进展. 气象学报, 2019, 77(4): 774-783.
- Shi C X, Pan Y, Gu J X, et al. A review of multi-source meteorological data fusion products. *Acta Meteor Sinica*, 2019, 77(4): 774-783.
- [38] 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.
- Zheng Y G, Zhang X L, Zhou Q L, et al. Review on severe convective weather short-term forecasting and nowcasting. *Meteor Mon*, 2010, 36(7): 33-42.
- [39] 张明禄. 国家气象中心牵头改造短临预报业务流程. 中国气象报, 2023-03-29(003).
- Zhang M L. The National Meteorological Center Takes the Lead in Transforming the Short-term Forecasting and Nowcasting Business Process. *China Meteorological News*, 2023-03-29(003).
- [40] 韩丰, 唐文苑, 周楚炫, 等. 基于 SWAN 系统的降水临近预报算法改进和应用评估. 气象学报, 2023, 81(2): 304-315.
- Han F, Tang W Y, Zhou C X, et al. Improving a precipitation nowcasting algorithm based on the SWAN system and related application assessment. *Acta Meteor Sinica*, 2023, 81(2): 304-315.

## The Design and Implementation of Stream Processing for Data of Ground Automatic Weather Stations

Xiao Weiqing Xue Lei Liu Zhen Luo Bing Wang Ying Zhang Laien  
Guo Ping Huo Qing Han Shuli He Wenchun

(National Meteorological Information Center, Beijing 100081)

### Abstract

To process the high-density and high-frequency mass data generated by ground automatic weather stations, a real-time stream processing system based on Storm is designed and implemented in the Meteorological Big Data Cloud Platform (Tianqing). It leverages the advantages of large-scale parallel computing to enhance processing speed. For BUFR messages, a Storm topology is designed to process the standardized BUFR format data transmitted by RabbitMQ directly on the service, reducing the intermediate steps from transmission to processing of observations. In the spout design, the manual confirmation mode of RabbitMQ messages is adopted to ensure that each message is effectively processed. In the decoding process, bolt is anchored to the spout using message identification (ID) to ensure reliable processing of each message. Format and time checks are performed during data decoding to filter out abnormal data. A batch timing monitoring strategy is applied to address the issue of data ingestion loss caused by port occupancy during extensive monitoring data transmission. A startup strategy with a configurable number of spout and bolt is designed for quick optimization and adjustment based on system resources. During cluster deployment, some resources are reserved to enable automatic task migration without disrupting business operations in case of node corruption within the cluster. System design involves automatically reconnecting message queues and databases to enhance system stability and enable self-healing capabilities. Application results show that the service efficiency of 2442 national stations has decreased from 175 s with CIMISS to 78 s with Tianqing. Additionally, the service efficiency of hourly data from over 60000 regional stations has decreased from 5 min with CIMISS to 2 min with Tianqing. After switching the data source of the ART (analysis of real time) system to Tianqing, the number of stations that can be retrieved simultaneously is doubled compared to CIMISS. It can effectively improve the quality of ART live products while keeping other conditions unchanged. By implementing specialized stream processing, it can effectively handle various business scenarios where data access process of the provincial Tianqing ground automatic weather stations differ from that of other provinces. It enables the provincial Tianqing to quickly process nationwide data from ground automatic weather stations. In December 2021, Storm-based stream processing is implemented in the national and provincial meteorological information departments alongside Tianqing. It has been running smoothly over two years, delivering reliable ground automatic weather station data to users, including MICAPS4, SWAN2.0, ART systems and others.

**Key words:** meteorological big data cloud platform; ground automatic weather station; Storm; RabbitMQ; stream processing; BUFR