

面向多遥测数据流的并行实时处理技术研究

郝朝聂睿

(中国飞行试验研究院 西安 710089)

摘要: 在飞行试验中,实时监控是保障试飞安全的重要环节。为了解决多机协同等复杂试飞场景下数据量大、实时性强、风险性高等特点带来的多遥测数据流并行处理与综合监控难题,构建了面向多遥测数据流的试飞监控系统总体架构,设计了基于自适应架构的试飞任务动态规划与资源调度策略,提出了基于流式计算框架的多遥测数据流并行处理方法,针对复杂试飞场景建立了多机遥测参数融合发布/订阅机制。应用效果表明,该系统能够实现监控任务快速重构与资源调度、多遥测数据流的并行处理与按需分发等功能,满足复杂试飞科目的实时数据处理与安全监控需求。

关键词: 遥测数据; 资源调度; 并行处理

中图分类号: TN06 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.40

Research on parallel real-time processing technology for multiple telemetry data streams

Hao Zhao Nie Rui

(Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract: In flight test, real-time monitoring is an important part to ensure flight safety. To address the challenges of parallel processing and comprehensive monitoring of multiple telemetry data streams in complex flight test scenarios like multi-plane collaboration characterized by large data volumes, strong real-time requirements, and high risk levels, an overall architecture for flight monitoring oriented towards multiple telemetry data streams was constructed. An adaptive architecture-based dynamic planning and resource scheduling strategy for flight missions was designed, and a parallel processing method for multi-telemetry data streams based on a stream computing framework was proposed. Additionally, a fused publish/subscribe mechanism for multi-aircraft telemetry parameter in complex flight test scenarios is established. Application results demonstrate that this system can achieve rapid reconstruction of monitoring tasks and resource scheduling, as well as parallel processing and on-demand distribution of multi-telemetry data streams, effectively meeting the real-time data processing and safety monitoring requirements for complex flight test subjects.

Keywords: telemetry data; resource allocation; parallel processing

0 引言

遥测监控是飞行试验的关键环节,是保证试飞安全、缩短试飞周期的重要手段^[1]。在试飞监控中一旦实时监控软件显示有影响飞行安全的故障,试飞工程师及时提醒飞行监控指挥员,并告知飞行员具体系统的故障以及应对故障的措施,因此要求遥测监控系统数据直观且准确的呈现。

侦察干扰^[2]、多机协同^[3]、空中加油^[4]等复杂科目试飞任务具有风险性高、监控需求复杂多变、数据量大、实时性强等特点,对实时监控的多数据流时间同步、系统资源、数据呈现方式等均有较高要求。国内外在遥测监控系统架构

设计方面研究较少,主要针对飞行器安全预测方面进行遥测数据的二次分析与数据挖掘等技术研究^[5-6],宋晓等^[7]提出了将流式计算应用于遥感卫星处理中,为试飞遥测监控系统架构设计提供一种方法。目前遥测与监控主要采用的是“地面接收天线-遥测接收机-实时数据处理服务器-监控终端”的脉冲编码调制(pulse code modulation, PCM)流串行模式,试飞遥测数据处理软件采用单机处理模式^[8-9],一个软件实现单架机-单遥测站-单数据流的接入、处理与转发。每架飞机遥测数据处理链路相互独立,不存在交联,现有监控软件以曲线、文本、仪表等形式对单架试验机关键参数进行实时显示^[10],不具备多试验机数据融合显示能力,

试飞工程师无法在一副监控画面中同时监控多架机的遥测数据,无法满足多遥测数据流试飞需求。另外,多遥测数据流试飞场景下飞行任务需求复杂多变,一个飞行任务可能需要多个分系统软件协同完成,传统的链条式单机保障模式需多人值守,完全由人工调度,无法快速响应飞行任务和监控需求的变化。

因此,为了保障多机试飞安全,开展面向多遥测数据流的试飞数据实时处理技术研究,研制集监控任务自主规划、监控资源集中管理与动态调度、多数据流并行处理等功能于一体的试飞安全监控系统,满足多机试飞安全监控的新需求。

1 总体架构设计

1.1 逻辑架构

面向多遥测数据流的试飞监控系统要求系统能通过一定的策略自动完成从飞行任务需求到系统软硬件协同调用的转换处理。系统逻辑架构如图 1 所示,由感知环节、规划环节和执行环节组成一个环形周期。其中感知环节的目标是获得外部信息(包括飞行任务、监控需求、软硬件环境等)和系统自身状态信息;规划环节是根据所感知到的内容做出任务规划决策;执行环节即系统实时在线动态调度与管理。数据库用于维护系统的实时状态和获取的上下文信息,根据飞行过程以及任务执行结果实时更新;知识库用于描述系统模型知识,包括决策模型、任务编排模型等。

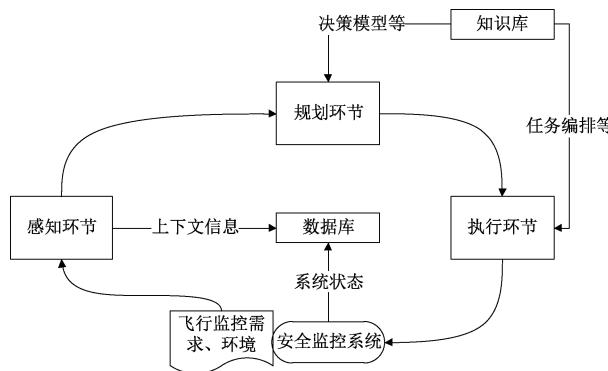


图 1 系统逻辑架构

Fig. 1 System logical architecture

1.2 技术架构

面向多遥测数据流的试飞监控系统组成与技术架构如图 2 所示。基础层作为系统的信息处理、存储与调度中心,负责给上层应用提供分布式文件存储、数据库、分布式计算、应用动态调度及编排等服务;中间件服务层集成了大数据平台的多个底层组件,为应用层提供了分布式文件系统(hadoop distributed file system, HDFS)^[11]、分布式计算(MapReduce)^[12]、协调服务管理(Zookeeper)、数据仓库SQL 服务(Hive)、NoSQL 数据库服务(Hbase)、流处理(Storm、Kafka)等功能和服务;应用服务层根据用户的指

令提供多种不同类型的应用服务,包括单/多流数据实时处理、视频解析/播放、模型训练、准实时分析、数据记录与回放、安全预警监控、多机综合监控、三维态势监控、任务监控和二维多目标综合监控、多种数据源接入等。

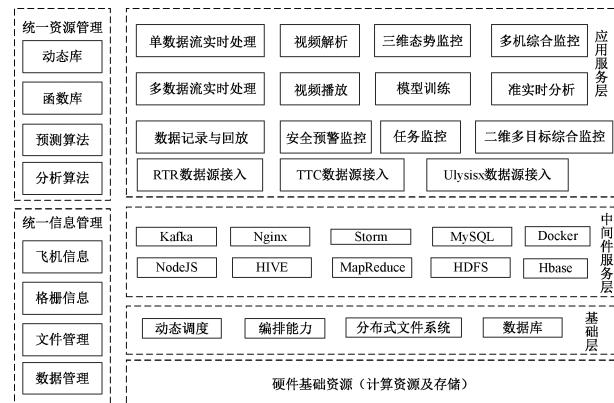


图 2 系统总体技术架构

Fig. 2 Overall technical architecture of the system

2 关键技术

2.1 基于自适应架构的试飞任务动态规划技术

1) 基于环境上下文的监控需求实时感知技术

面向多遥测数据流的试飞监控系统需具备任务自主规划能力,首先需实时获取外部环境和飞行任务监控需求信息,采用环境上下文^[13]的方法来获取。此处上下文特指多遥测数据流试飞需求变化和软硬件运行环境信息,涉及上下文信息建模、上下文获取和上下文聚合几方面。其中建模主要表达上下文信息及其逻辑关系,本系统的监控需求对象模型如图 3 所示。通过人机交互的方式获取飞行任务监控需求信息和运行环境信息统一存储至系统信息数据库中。

监控需求实时感知流程图如图 4 所示。对获取到的原始的、未经处理的底层上下文信息进行汇集、筛选、判断和推导出应用所需的高层上下文信息。

2) 基于策略模型的试飞监控任务自主规划技术

面向多遥测数据流的试飞监控系统需具备任务自主规划使能,即根据任务请求给出合理计划,进而由执行层给出连续控制量。任务自主规划实现任务解析、任务分解和资源调度 3 项功能,是上层任务输入和下层执行层控制器的中间接口,采用基于策略模型的任务自主规划。策略是指导监控系统行为的元层信息,将管理逻辑以策略的形式从系统功能中独立出来可以实现自主规划与系统业务功能的关注点分离,有利于系统自主规划过程中知识和基础设施的重用。根据需求信息本系统共涉及有 10 种策略,设计了面向多种试飞任务的功能构建池,在不同的策略模型下按需调用对应的功能构件实现监控流程的快速重构,如表 1 所示。

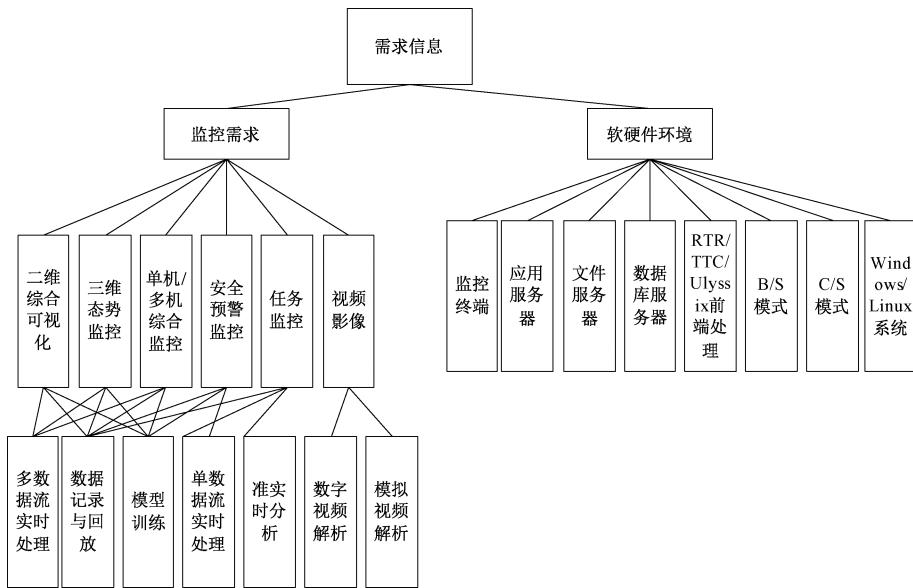


图 3 监控需求对象模型

Fig. 3 Monitoring requirement object model

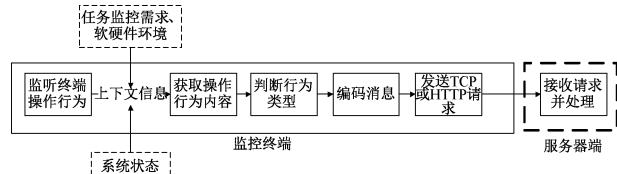


图 4 监控需求感知流程

Fig. 4 Monitoring demand sensing process

某安全预警监控构件调用策略如图 5 所示。在离线过程中通过调用模型训练构件对历史试飞数据进行挖掘形成模型库，在实时场景下调用数据源接入、数据解析、数据分发、模型修正等功能构件形成实时安全预警监控流程。

2.2 试飞监控资源动态调度技术

1) 基于构件的资源集中管理与动态调度技术
面向多遥测数据流的试飞监控系统需具备资源动态

表 1 试飞监控策略模型库

Table 1 Flight test monitoring strategy model library

策略类型	构件调用	构件池
安全预警监控	1、2/3、13、14、15、16、7、5、6、8、17/18	
模拟视频	6、11	1、模型训练；2、单流 PCM 解析；3、多流 PCM 解析；4、准实时分析；5、数据存储；6、数据源接入 (RTR、TTC、Ulyssix)；7、数据转发；8、数据分发；9、视频 1 解析；10、视频 2 解析；11、模拟视频解析；12、三维数据驱动；13、模型加载；14、批量处理；15、模型修正；16、数据评估；17、HTML5 展示；18、桌面程序展示；……
数字视频类型 1	6、9	
数字视频类型 2	6、10	
二维综合可视化	3、5、6、7、8、9/10/11、17	
三维态势监控	1、2/3、5、6、7、8、12、13、14、15、16、17/18	
多机综合监控	1、3、5、6、7、8、13、14、15、16、17/18	
任务监控	1、2/3、4、5、6、7、8、13、14、15、16、17/18	
C/S 客户端模式	1、2/3、4、5、6、7、8、9/10/11、12、13、14、15、16、18	
B/S 客户端模式	1、2/3、4、5、6、7、8、9/10/11、12、13、14、15、16、17	

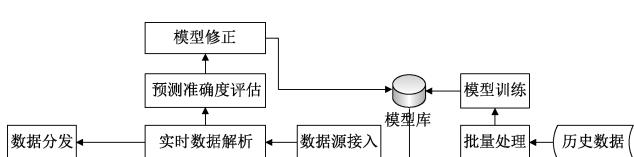


图 5 安全预警监控构件调用策略

Fig. 5 Safety warning monitoring component invocation strategy

调度能力，即根据试飞任务规划执行相应工作模式，关键在于系统结构动态重配置，在系统运行过程中，根据环境和需求的变化而自动进行调整。采用基于构件的动态配置方法，通过标准的数据规范管理系统资源，把应用构件化后进行资源集中管理。

基于构件的系统动态重配置如图 6 所示，系统构件池负责维护当前系统所有任务执行需要的处理构件，构件是

以运行效率高、低延迟、灵活可复用为原则,合理拆分数据处理逻辑而划分的。任务流程编排以构件为支撑,以事先定义好的任务执行策略为依据通过配置工具配置构件间的依赖关系、调用逻辑、接口定义等内容。任务调度根据编排^[14]好的任务流程,通过任务执行管理工具控制任务的调度,包括执行、暂停、停止等。

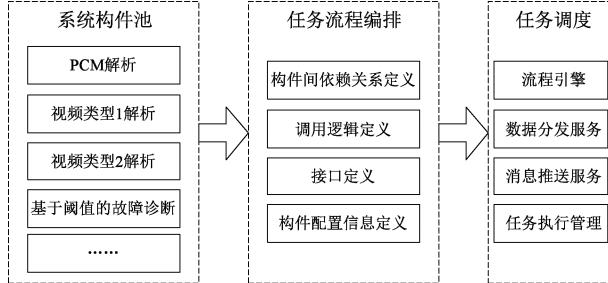


图 6 基于构件的系统结构动态重配置处理流程

Fig. 6 Dynamic reconfiguration process of component-based system architecture

2) 基于任务驱动的多工作流调度技术

多遥测数据流试飞监控平台内各类不同任务组件,如实时计算组件、离线计算组件、抽取-转换-加载(extract-transform-load,ETL)组件、分布式存储组件、数据分发组件等,需要通过合理方式进行管理和调度,保证在完成多项复杂试飞监控任务时各个功能组件能够协调一致工作。通过工作流系统对平台内的各类任务,包括实时计算任务、离线计算任务、内存计算任务等进行统一调度和监控管理,对外提供相应的遥测数据统计分析服务、数据挖掘服务、数据共享服务以及数据交互服务。

(1) 任务调度。为了能够高效、稳定地进行平台的各类任务的管控及调度功能,采用定时任务框架来实现任务调度功能。定时任务框架的触发器可以在运行时重新设置,并且在下次调用时起作用,调度时间策略可存放到数据库,通过数据库数据来设定触发器,这样产生动态调度。

(2) 工作流驱动。系统采用开源工作流引擎^[11]使控制流与数据流分离,使平台具备更大的灵活性,平台的任务可以实现任意的组合,并且数据在平台的组件之间可以方便地流动。系统工作流程如图 7 所示。平台通过服务层接收外部发起的服务请求或指令,经过统一调度服务进行转发和协议解析之后,通过数据驱动的工作流进行任务的组装、调度和管理,向 ETL 平台和数据处理平台发送任务和控制指令。

2.3 多数据流并行处理与实时分发技术

1) 基于 Storm 的多路遥测数据并行处理技术

多遥测数据流试飞安全监控过程中需要实现多架机遥测数据流的实时汇聚、拆分、并行计算等处理策略,同时需要在处理框架上加入预测算法程序。Storm 是一个分布式、高容错的流式数据计算框架^[15],具有低延迟和高性能、可扩展、高可靠性、高容错性等特点。因此采用 Storm 计

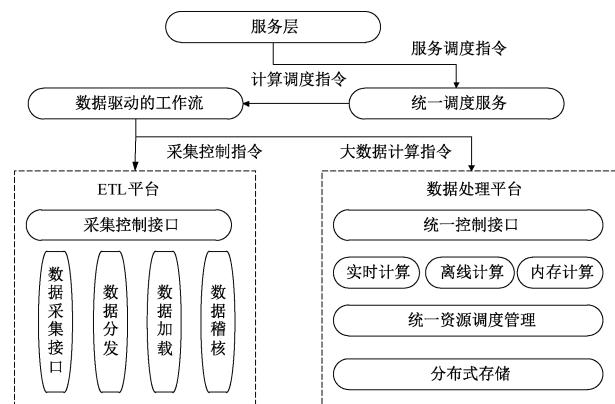


图 7 基于任务驱动的多工作流调度

Fig. 7 Task-driven multi-workflow scheduling

算框架可实现多架飞机遥测数据的实时处理,利用 Storm 的拓扑结构,实现从接收网络数据、预处理、二次处理的整个运算过程。

(1) 多路遥测数据并行处理框架

数据链路是指当试飞任务进行时,从遥测站接收过来的数据进入 Storm 实时计算框架的数据通道。多机遥测数据并行处理框架如图 8 所示,一个试飞任务对应一个数据链路。当多机试飞时,一架飞机对应一个 Storm 计算通道。数据链路中标识每个数据链路对应的飞机信息、算法信息、接收机连接信息等,同时可以通过后台管理端动态启动、停止、重启飞行任务。

(2) PCM 并行解析

为了提高遥测数据处理效率,运用 Storm 对流式数据的并行计算能力对 PCM 解析过程进行重写,充分发挥流式并行运算框架的特性实现多流 PCM 数据工程量转换的并行操作,以降低数据流转过程中的运算延时,主要实现接收数据、处理数据和输出数据 3 个部分。从遥测站读取到数据流,生成 Spout 数据单元,实时将数据流读进整个拓扑,为后续计算提供数据源。Storm 拓扑定义如图 9 所示。数据处理分为通用工程量转换和数据分析两个阶段,通用工程量转换实现 PCM 解码的并行运算,数据分析阶段主要包括实时预警和复杂运算两类。在流式运算的各阶段实现数据的并行输出,主要包括原始数据的存储、数据分析结果数据存储和各运算阶段将数据计算结果传输到 Kafka 消息通道供可视化监控。

2) 基于发布/订阅机制的多路遥测数据快速分发与管理技术

为了满足多遥测数据流试飞场景下监控需求的实时动态变化,提高安全监控灵活性,采用发布/订阅机制^[16],即服务端发布任务监控主题,监控软件通过订阅相关主题即可完成相关任务参数配置。数据发布/订阅平台是安全监控系统承上启下的数据传输中间件,逻辑框架如图 10 所示。为支撑多架试验数据并行分发与管理,同时考虑到

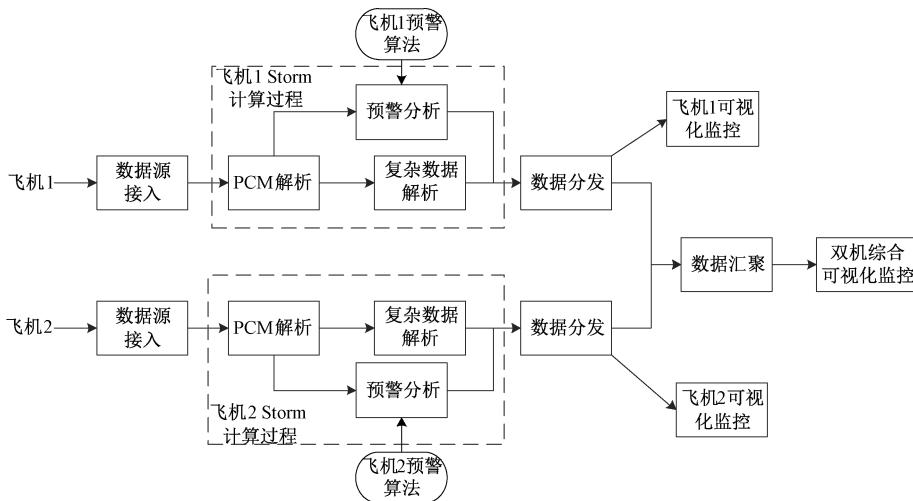


图 8 多机遥测数据并行处理框架

Fig. 8 Multi-plane telemetry data parallel processing framework

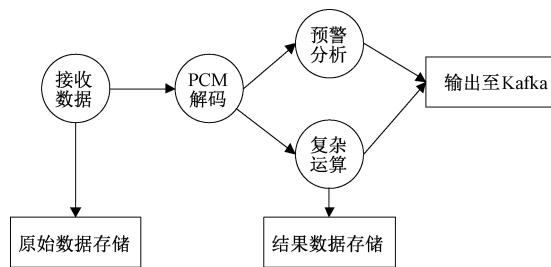


图 9 Storm 拓扑定义

Fig. 9 Storm topology definition

多遥测数据流试飞场景对数据传输速度、低延时的要求,发布/订阅通道需具备数据流高并发传输、数据传输低延时、良好的数据订阅过滤机制等功能。

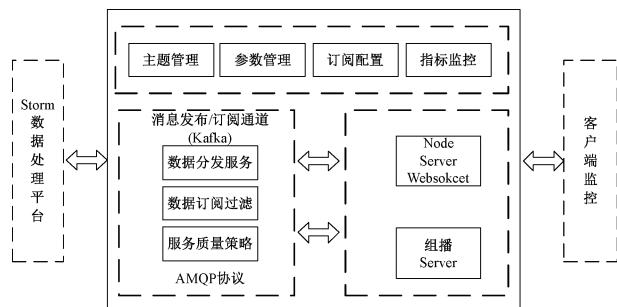


图 10 数据发布/订阅逻辑框架

Fig. 10 Data publishing/subscription logical framework

(1) 主题管理

按照任务-主题-参数三层模式进行任务的灵活主题配置,任务中定义了飞机号、试验配置信息等,即任务定义。当任务定义完成后定义主题,一个主题由单架试验机的测试参数组成。主题试验任务、主题与监控软件的关系如图 11 所示。一个任务可以向多个主题发送不同的参数集合;考虑多遥测数据流场景一个主题也可以接收多个任务

的数据。监控软件与服务端数据集成时使用订阅配置,根据任务需要可实时切换订阅的主题。

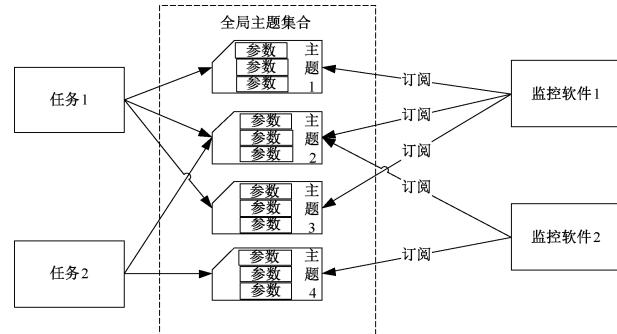


图 11 任务-主题-监控软件的关系应用示意图

Fig. 11 Task-theme-monitoring software relationship application scenario diagram

(2) 数据分发与管理

多遥测数据实时分发与管理逻辑框架如图 12 所示,包括消息的生产者、消费者、代理者(broker)和管理者(zookeeper)4 个主体,生产者和消费者与代理者分别进行消息传输,代理者提供相关的存储介质和存储策略,负责消息的持久化存储和转发。管理者负责协调与分配其他 3 个主体之间的交互消息,保证系统处于平衡状态。

3 应用效果

多遥测数据流并行处理平台基于分布式处理架构采用服务器集群一主两备的方式进行系统部署,主体界面如图 13 所示。在实际试飞过程中,单架试验机包括遥测数据与视频两条独立链路,遥测数据链路实现位速率为 4 Mbps 共 8 000 个参数的实时解析,遥测视频链路实现位速率为 7 Mbps 共 3 路视频的处理解码,系统能够同时支持 10 架试验机的遥测数据流与视频流的并行处理,稳定

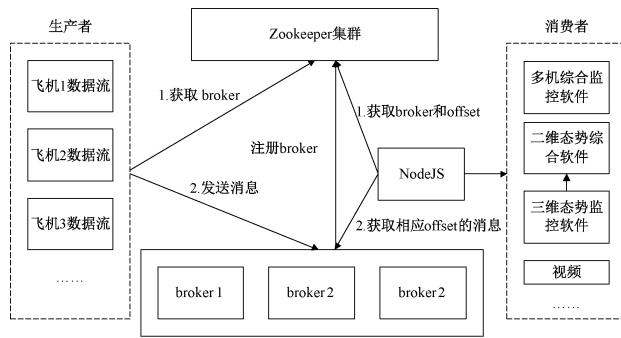


图 12 分发与管理处理逻辑框架

Fig. 12 Distribution and management processing logic framework

运行 8 h, 各路遥测流处理时延平均为 150 ms, 满足实时监控要求, 通过关联试验机、遥测站、机载配置文件等信息快速重构监控任务流程, 实现多个遥测站的试验机遥测数据的实时采集、并行处理与按需分发, 为多遥测数据流复杂科目试飞提供精准的数据源。通过配置多架试验机相关参数组形成监控主题, 实现了多机数据综合监控、多机态势综合呈现等功能, 保障了多机协同等复杂试飞科目的高效完成。

与传统的单机遥测数据实时处理模式相比, 本系统将遥测监控全流程进行构件化功能分解形成构件资源库, 采用流式并行计算框架与分布式存储策略, 扩展性与鲁棒性

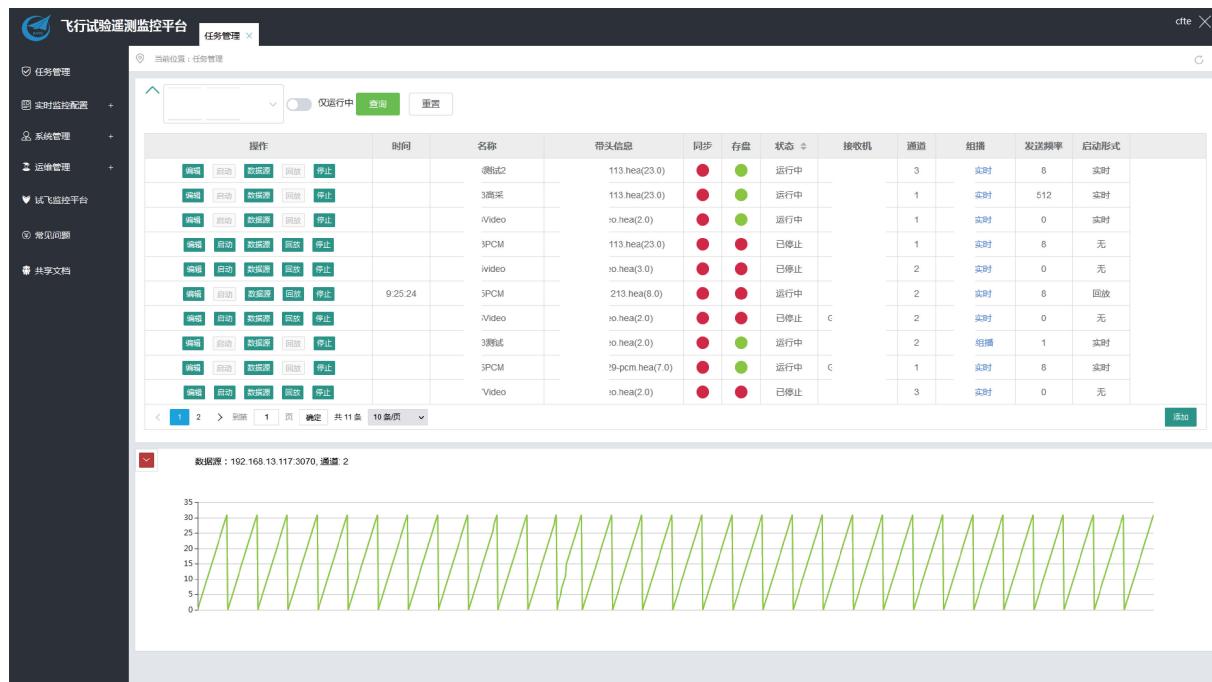


图 13 多遥测数据流并行处理平台

Fig. 13 Multi-telemetry data streams parallel processing platform

更强, 根据试飞需求调用相应功能构件快速重构遥测业务处理流程, 在面对新的处理需求时只需要开发新的功能构件无需更改系统框架, 需求响应时间缩短 60 倍以上, 能够按需关联分析多机相关参数而无需更改监控软件, 更好更高效响应监控需求。

4 结 论

本文针对多遥测数据流试飞监控需求设计了多遥测数据流试飞监控系统架构, 能够根据试飞任务自主规划与调度监控资源组件, 完成试飞监控任务流程的自动编排与快速重构, 采用流式计算框架与发布/订阅机制实现多架试验机遥测数据流的并行实时处理与按需分发, 满足多机参数融合监控的需求, 为多遥测数据流试飞提供数据分析与监控手段, 实现了监控模式由“单机定制化监控”向“多

机组合化监控”的转变, 有效提升了试飞监控系统的数据供给能力。

参考文献

- [1] 叶锡涛. 飞行试验遥测监控语音播报软件设计与实现[J]. 机电信息, 2023(9):41-43.
- [2] YE X T. Design and implementation of flight test telemetry monitoring voice broadcast software [J]. Mechanical and Electrical Information, 2023 (9): 41-43.
- [3] 柳始良, 高晓腾, 刘冀川, 等. 基于改进鱼群算法的群体化协同侦察干扰方法 [J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(8):87-90.
- [4] LIU SH L, GAO X T, LIU J CH, et al. Method of swarm cooperative reconnaissance and jamming based

- on the improved fish swam algorithm [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(8): 87-90.
- [3] 熊威, 张栋, 任智, 等. 面向有人/无人机协同打击的智能决策方法研究 [J]. 系统工程与电子技术, 2025, 47(4): 1285-1299.
- XIONG W, ZHANG D, REN ZH, et al. Research on intelligent decision-making methods for coordinated attack by manned aerial vehicles and unmanned aerial vehicles [J]. Systems Engineering and Electronics, 2025, 47(4): 1285-1299.
- [4] 张西林, 何亚坤, 张恪易, 等. 面向自主空中加油任务的目标检测技术研究 [J]. 航空科学技术, 2023, 34(2): 64-70.
- ZHANG X L, HE Y K, ZHANG K Y, et al. Object detection technology for autonomous air to air refueling [J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(2): 64-70.
- [5] FEJJARI A, DELAVALU A, CAMILLERI R, et al. A review of anomaly detection in spacecraft telemetry data [J]. Applied Sciences, 2025, 15(10): 5653.
- [6] SONG B, GUO B Y, HU W, et al. Transformer-based time-series forecasting for telemetry data in an environmental control and life support system of spacecraft [J]. Electronics, 2025, 14(3): 459.
- [7] 宋晓, 孙小涓, 胡玉新, 等. 基于流式计算的遥感卫星数据快视处理方法 [J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(10): 77-82.
- SONG Y, SUN X J, HU Y X, et al. Quick-view processing method for remote sensing data based on stream computing [J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(10): 77-82.
- [8] 刘涛, 冯灿, 李成浩. 民机试飞遥测实时数据处理软件设计与研发 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(12): 195-201.
- LIU T, FENG C, LI CH H. Design and development of telemetry real-time data processing software for civil aircraft flight test [J]. Computer Measurement & Control, 2022, 30(12): 195-201.
- [9] 杨哲, 王鹏, 徐茜. 基于 RTR 的遥测数据实时处理软件的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(1): 165-167.
- YANG ZH, WANG P, XU Q. Design and realization of telemetry data real-time processing software based on RTR [J]. Computer Measurement & Control, 2016, 24(1): 165-167.
- [10] 陈家益, 刘涛, 冯灿, 等. 基于卫星通信的民机试飞数据实时监控系统设计与研发 [J]. 民用飞机设计与研究, 2024(4): 76-83.
- CHEN J Y, LIU T, FENG C, et al. Design and development of real-time monitoring system for civil aircraft flight test data based on satellite communication [J]. Civil Aircraft Design & Research, 2024(4): 76-83.
- [11] 刘晓宇, 夏立斌, 姜晓巍, 等. HDFS 分级存储系统元数据管理方法的研究 [J]. 计算机工程与应用, 2023, 59(17): 257-260.
- LIU X Y, XIA L B, JIANG X W, et al. Research of metadata management method of hierarchical storage system based on HDFS [J]. Computer Engineering and Applications, 2023, 59(17): 257-260.
- [12] 王立俊, 杜建华, 刘骥超, 等. 基于决策树挖掘算法的气象大数据云平台设计 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(11): 142-144.
- WANG L J, DU J H, LIU J CH, et al. Design of meteorological big data cloud platform based on classification and regression trees mining algorithm [J]. Computer Measurement & Control, 2022, 30(11): 142-144.
- [13] 李平, 张路遥, 曹霞, 等. 基于潜在主题的混合上下文推荐算法 [J]. 电子与信息学报, 2018, 40(4): 958-962.
- LI P, ZHANG L Y, CAO X, et al. Hybrid context recommendation algorithm based on latent topic [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2018, 40(4): 958-962.
- [14] 廖芳芳, 雷雨桐, 苏永恒, 等. 遥感影像在线处理流程编排与算法调度技术研究 [J]. 电子设计工程, 2022, 30(18): 166-169.
- LIAO F F, LEI Y T, SU Y H, et al. Research on online processing process orchestration and algorithm scheduling technology of remote sensing image [J]. Electronic Design Engineering, 2022, 30 (18): 166-169.
- [15] 陈木斌. 基于 Storm 与 Kafka 集群的火电厂分布式流式数据建模与分析系统 [J]. 工业控制计算机, 2021, 34(5): 33-36.
- CHEN M B. Distributed streaming data modeling and analysis system in thermal power plants based on Storm and Kafka cluster [J]. Industrial Control Computer, 2021, 34(5): 33-36.
- [16] 代江涛, 高博, 万嘉骏. 面向资源有限设备的 DDS 通信中间件设计 [J]. 电子科技, 2022, 35(5): 47-50.
- DAI J T, GAO B, WAN J J. Design of DDS communication middleware for resource limited devices [J]. Electronic Science and Technology, 2022, 35 (5): 47-50.

作者简介

郝朝(通信作者), 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为遥测数据实时处理与可视化技术等。

E-mail: bhhaoz@126.com