

试飞应急监控系统设计与应用

刘雨溪, 查晓文, 刘涛, 冯灿, 饶韬

(中国商飞试飞中心 测试工程部, 上海 200120)

摘要: 针对飞机研发试飞阶段传统应急监控系统在应急决策、资源支持及流程信息化方面的不足, 对试飞应急监控系统进行了研究与设计; 该系统采用微服务架构与分层设计, 涵盖采集传输、基础设施、平台服务、应用服务和展示层, 集成 ADS-B 数据、遥测数据、音视频流等多源异构数据; 核心功能模块包括数据维护管理、动态信息展示和音视频调度, 支持多模式数据录入、多源视频切换及高效语音通信; 技术上前端采用 Vue3、Electron 框架, 后端基于 Spring Cloud Alibaba 实现微服务管理, 结合 Redis 缓存与 MySQL、InfluxDB、MinIO 混合数据库优化性能; 经测试, 系统可以支持跨区域协同应急演练, 实现多源数据融合与微服务弹性扩展, 数据实时更新延迟 175 ms, 为试飞应急管理提供全局监控平台; 实际应用表明, 该系统提升了试飞安全性与应急响应效率, 其架构和技术方案对高危领域应急监控具有推广价值。

关键词: 试飞数据; 实时监控; 应急监控; 数据融合; 数据集成; 数据分析; 数据可视化

Design and Application of Flight Test Emergency Monitoring System

LIU Yuxi, ZHA Xiaowen, LIU Tao, FENG Can, RAO Tao

(Testing Engineering Department, Shanghai Aircraft Flight Test Engineering Co., Ltd.,
Shanghai 200120, China)

Abstract: To address the shortcomings of traditional emergency monitoring systems in emergency decision-making, resource support, and process informatization during aircraft development and flight testing, a flight testing emergency monitoring system was researched and designed. The system adopts a microservice architecture and hierarchical design, including data acquisition and transmission, infrastructure, platform services, application services, and presentation layers, integrating multi-source heterogeneous data such as ADS-B data, telemetry data, and audio-video streams. Its core functional modules include data maintenance and management, dynamic information display, and audio-video scheduling, supporting multi-mode data entry, multi-source video switching, and efficient voice communication. Technically, the front end uses the Vue3 and Electron frameworks while the back end implements microservice management based on Spring Cloud Alibaba, and optimizes its performance by combining Redis caching with a hybrid database of MySQL, InfluxDB, and MinIO. Tests show that the system can supports cross-regional collaborative emergency exercises, achieves the fusion of multi-source data and variable expansion of microservices, with a real-time data update delay of 175 ms, providing a global monitoring platform for flight test emergency management. Practical applications demonstrate that the system enhances flight test safety and emergency response efficiency, and its architecture and technical solutions have promotion value for emergency monitoring in high-risk fields.

Keywords: flight test data; real-time monitoring; emergency monitoring; data fusion; data integration; data analysis; data visualization

0 引言

在飞机研发过程中, 试飞环节是最为关键且风险极高的阶段。这一过程中, 飞机要在复杂多变的环境中接受各种严苛的测试, 每一个细微的异常都可能引发严重的安全问题^[1-2]。因此试飞应急管理是试飞过程中的重要环节, 其核心目标在于突发紧急情况时能够迅速且有

效地启动应对机制, 最大程度地避免事故发生, 保障试飞人员的生命安全、试飞飞机的完好无损以及相关设施的安全, 同时将事故对人员、财产和环境造成的损失降到最低。

欧美等航空强国较早开展了试飞应急监控技术研究。例如, 波音公司在 787 机型试飞中采用了基于分布式架构的实时数据监控系统, 通过融合 ADS-B 与遥测

收稿日期: 2025-05-28; 修回日期: 2025-06-26。

作者简介: 刘雨溪(1991-), 女, 硕士, 工程师。

通讯作者: 冯 灿(1984-), 男, 博士, 研究员级高级工程师。

引用格式: 刘雨溪, 查晓文, 刘涛, 等. 试飞应急监控系统设计与应用[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(10): 144-150.

数据实现了飞行状态的可视化展示，但该系统在跨区域协同指挥时仍依赖专线网络，数据融合效率有限。空客研发的 FlightLens 系统引入了机器学习算法进行异常检测，但其架构采用单体式设计，在应对多基地并发数据时扩展性不足。最新研究中，NASA 提出的 AeroWatch 平台尝试整合气象数据与视频流，但缺乏对音视频调度的标准化支持，难以满足应急场景下的实时通信需求。

回顾传统的试飞应急监控系统，主要依赖现场监控大厅和试飞应急手册来开展工作。这种模式在一定程度上能够实现应急信息的收集以及为决策提供初步支持。然而，随着现代试飞任务的日益复杂和对高效决策的迫切需求，传统系统的局限性逐渐凸显。受限于配套的软硬件设施，传统系统在应急情况下的决策支持、技术支持以及内外部资源支持能力明显不足。应急处置的实时状态难以被及时、准确地掌握和传递，应急响应流程缺乏信息化和智能化手段的有力支撑，这些问题使得传统系统越来越难以适应现代试飞任务的高标准要求^[3-4]。

本文于开发一套全新的试飞应急监控系统。该系统基于微服务架构进行开发，整合多源异构数据，涵盖 ADS-B 数据、遥测数据、音视频流以及气象信息等关键数据类型，构建起一个高可靠的可视化指挥平台。其核心目标在于显著提升试飞过程的安全性，大幅缩短应急响应时间，同时有效促进跨部门之间的协同合作，为试飞任务提供强有力的保障^[5]。

1 总体架构

为了确保系统具备良好的模块化特性和可扩展性，本系统采用了分层架构设计，系统各部分功能清晰明确，便于开发、维护和扩展，系统架构如图 1 所示。

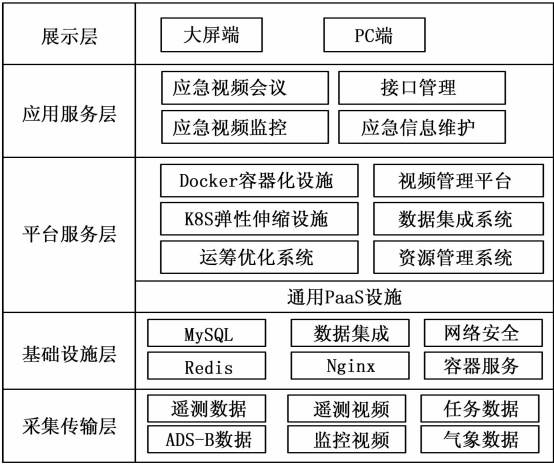


图 1 系统架构图

采集传输层作为系统的数据入口，承担着将应急监控指挥项目所需的各类数据集成到系统中的重要任务。在实际运行中，它能够高效整合 ADS-B 数据、气象数据、遥测数据以及单兵设备数据等多种数据源。为了降

低网络拥塞风险，保障数据传输的稳定性和高效性，该层采用了 ActiveMQ 消息队列技术，实现了异步数据传输，这种异步传输方式能够有效缓解网络压力，确保在高并发数据传输场景下，系统依然能够稳定运行，为后续的数据处理和应用提供了坚实的数据基础。

基础设施层是整个系统运行的底层支撑，涵盖了各种必要的底层基础设施。在数据存储方面，针对不同类型的数据特点，采用了不同的数据库进行存储。对于结构化数据，选择 MySQL 数据库，它具有成熟的技术体系和强大的关系型数据管理能力，能够满足系统对结构化数据存储和查询的需求；对于时序数据，如 ADS-B 数据、遥测等数据，采用 InfluxDB 数据库，其专门针对时序数据设计，能够高效地处理时间序列相关的存储和查询操作；而对于视频与图片等非结构化数据，则使用 MinIO 对象存储，它提供了高可用性和高性能的对象存储服务，适合存储大量的非结构化数据。在系统部署方面，采用容器化部署技术，基于 Docker 实现服务的快速部署与资源隔离。定制化应用以及对应的中间件组件以 Docker 容器的形式运行，通过 Nginx 代理暴露前端访问路径。这种部署方式不仅提高了系统的部署效率，还能够实现资源的灵活分配和管理，提升了系统的可扩展性和容错能力^[6-9]。

平台服务层基于基础设施层提供的底层支撑，开发了一系列平台类应用，为上层应用提供强大的平台框架能力。例如，通过数据清洗引擎对采集到的数据进行处理，剔除冗余数据，确保数据的准确性和有效性，为后续的数据分析和应用提供高质量的数据；通过流媒体服务，基于 RTSP 协议实现视频的实时推流，保证视频数据能够实时、稳定地传输到展示层，为用户提供实时的视频监控画面。

应用服务层充分利用平台服务层提供的通用能力，结合本项目的具体需求，开发实现了不同的应用模块。这些应用模块紧密围绕试飞应急监控的核心业务，为用户提供了丰富的功能支持，如数据维护管理、动态信息展示、音视频调度等，是系统业务逻辑的核心实现层。

展示层通过 PC 端实现任务信息、应急联系方式、应急事件等数据的维护工作，同时通过显示端将可视化应用内容呈现给用户，使得监控人员能够直观地获取各种关键信息，方便进行决策和操作。

系统前端部分采用了 Vue3 框架进行开发，Vue3 具有高效的响应式设计和组件化开发能力，能够快速构建出灵活、易用的用户界面。结合 ECharts 图表库，实现了动态图表的展示，方便用户直观地查看各种数据的统计和分析结果。同时，采用 Electron 技术开发跨平台桌面应用，使得系统能够在 Windows、Linux 和 macOS 等不同操作系统上运行，提高了系统的兼容性和用户体验。

后端采用 Spring Cloud Alibaba 架构实现微服务管理,通过服务注册与熔断机制,确保了微服务的稳定运行和高可用性。当某个服务出现故障时,熔断机制能够及时切断故障服务的调用,避免故障扩散,保障系统的整体稳定性。同时,使用 Redis 缓存热点数据,减少了对数据库的频繁访问,提高了数据查询效率,提升了系统的性能^[10-12]。

2 系统硬件架构

系统的核心处理服务器部署于主监控指挥场所,需要将各外场基地的遥测、视频、设备状态数据等传输至主基地数据处理平台进行统一的融合和处理,各外场基地分别部署边缘节点进行数据采集。系统硬件架构如图 2 所示。

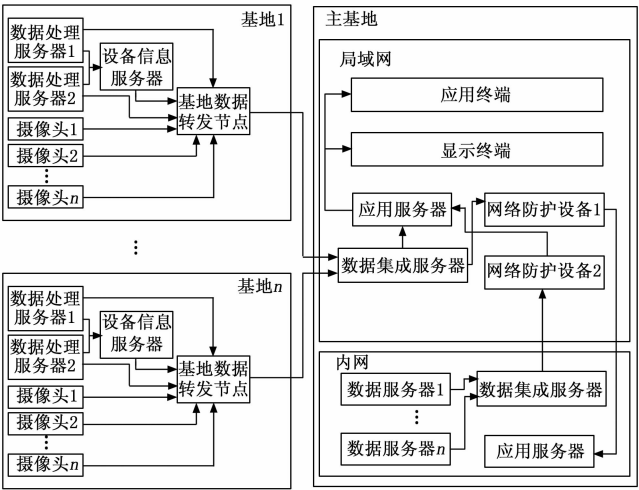


图 2 系统硬件架构图

系统接入的数据来源于互联网、试飞局域网以及试飞内网,根据业务需求需要将数据同一汇聚至试飞局域网中,同时为满足在主基地对各外场基地的实时监控和通信以及应用部署的运行,需要具备各基地间的双向网络传输,系统进行分区分域的网络防护,合理划分安全域,综合采用安全防护措施保证数据安全,系统根据网络安全级别,在防火墙上划分 6 个安全域,分别为移动接入域、外联域、主基地接入域、主基地应用域、主基地数据库域及系统红区域。移动接入域主要针对移动数据采集设备和穿戴式视频监控设备等移动终端,通过 5G+VPDN 方式接入;外联域主要对接各外场试飞基地数据,安全级别要求高于移动接入域;主基地接入域:主要连接主基地内部接入数据代理和负载均衡,安全级别要求高于外联域;主基地应用域主要连接主基地内部应用服务器和监控终端,安全级别要求高于主基地接入域;主基地数据库域只连接本系统中的数据库,安全级别要求高于主基地应用域;系统红区域为公司内网,安全级别最高。系统访问权限如表 1 所示。

表 1 系统网络访问权限表

发起区域/接收区域	移动接入域	外联域	主基地接入域	主基地应用域	主基地数据库域	系统红区域
移动接入域	完全放行	按照白名单开放	禁止	禁止	禁止	禁止
外联域	完全放行	完全放行	按照白名单开放	禁止	禁止	禁止
主基地接入域	禁止	禁止	完全放行	完全放行	按照白名单开放	禁止
主基地应用域	禁止	禁止	完全放行	完全放行	按照白名单开放	禁止
主基地数据库域	禁止	禁止	禁止	完全放行	完全放行	单向网闸同步
系统红区域	禁止	禁止	禁止	禁止	单向网闸同步	依据公司内部规定策略

3 系统软件设计

3.1 数据接入模块

数据接入模块核心功能是实现多源异构数据的标准化处理与可靠传输。该模块支持对任务信息、单兵系统、遥测数据、ADS-B 数据的接入,具备后台文件上传、数据维护功能,支持对系统涉及表单、文件、应急简报、应急等级、流程进展、备降信息、应急联系方式等应急信息的更新,支持对 csv、xls、xlsx 等格式的文件进行上传,并可对上传信息进行增删改,支持对对飞行计划、机组信息、事件简报、响应等级等信息进行维护和实时推送。数据清单如表 2 所示。

表 2 系统数据清单

数据名称	数据类型	接入形式
遥测数据	结构化数据	http
气象数据	结构化数据	http
ADS-B 数据	结构化数据	http
飞行计划	结构化数据	http
机组信息	结构化数据	手工填报
应急联系方式	结构化数据	文件上传/手工填报
事件简报	结构化数据	手工填报
响应等级	结构化数据	手工填报
事件进展	结构化数据	手工填报/HTTP
视频数据	视频(RTSP,RTMP,HLS)	RTSP
应急会议	结构化数据	HTTP

为了满足不同数据的录入需求,该模块提供了多种数据录入方式。对于飞行计划、机组信息等表单化数据,支持手工填报方式,用户可以直接在系统界面中输入相关信息,操作简单直观;对于应急联系方式等数据量较大的信息,支持通过 CSV/XLSX 文件批量导入,大大提高了数据录入效率,减少了人工输入的工作量;

同时,系统还能够从任务系统自动获取任务单号等信息,实现接口同步录入,确保数据的实时性和准确性,避免了数据重复录入和不一致的问题。

为了确保数据的准确性和一致性,模块设置了严格的校验规则,包括字段级校验及业务逻辑校验。字段级校验针对结构化数据(如飞行计划),通过正则表达式验证数据格式(如任务单号遵循 FTC-XXXX-XXXX-XXXX 规则),数值型字段设置阈值范围(如高度值需在 0~20 000 m 之间)。业务逻辑校验采用状态机模型校验数据关联性,例如在维护备降机场信息时,要求必须关联经纬度坐标,并通过经纬度坐标反查机场代码,通过这种规则校验,保证了机场位置信息的完整性和准确性,为后续的地图展示和飞行路径规划等功能提供了可靠的数据支持。

对于接入数据的清洗包括缺失值处理、异常值处理及标准化转换。缺失值处理对于部分时序数据基于时间窗口线性插值,如 1 s 窗口内缺失值按前后均值进行填充,超过 10 min 的缺失段标记为无效;非时序数据(如机组信息)采用人工补录+默认值填充(如性别字段默认“未填写”)。异常值处理中较为常见的为遥测数据受到干扰跳变,系统采用阈值判断数据异常,对于时间窗口内突变的异常值进行线性插值,如 1 秒窗口内出现远大于或小于前后值的情况按前后均值进行填充。标准化转换过程对于时间戳统一转换为 UTC+8 标准格式,支持毫秒级精度,对于坐标数据通过 Proj4js 库实现 WGS84、GCJ-02 等坐标系转换,保证坐标系统一。

在文件解析方面,针对常见的 Excel 数据报表,系统采用 Apache POI 5.2.3 版本构建文件解析引擎,该引擎支持 XLS 与 XLSX 两种格式的智能识别。对于百万级数据量的导入任务,通过并行解析技术将工作线程数动态调整为 CPU 核心数的 2 倍,配合内存分页加载策略(每次加载 5 万条数据至缓冲区),将单文件解析耗时控制在 90 s 以内^[13-15]。异常处理机制采用责任链模式,当遇到单元格格式错误(如日期格式不匹配)时,首先尝试格式自动转换,失败后生成包含行号、列名的错误清单,引导用户在可视化界面中进行批量修正,修正效率较传统手动排查提升 70%。

3.2 数据可视化模块

当某次飞行出现应急情况,应急监控指挥界面会展示包括架机信息、试飞应急联络信息、应急处置信息、环境信息、视频监控等相关信息,帮助监控人员更好地掌握试飞现场的动态情况。

架机信息部分包括飞行信息如飞机的航迹、位置、高度、速度、经纬度、视频、各专业监控画面、告警信息等,以及本次执飞的机组信息,可以快速地让监控人员了解飞机当前状态及机上人员。其效果如图 3 所示。

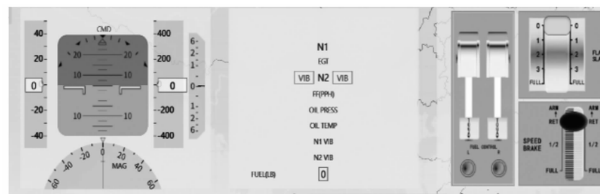


图 3 系统实时数据模型图

试飞应急联络信息集成了当架次相关的人员及机构的联络信息。当架次应急指挥部信息包括应急指挥部人员的岗位、姓名、联系方式、人员状态及处置状态,当人员到岗、完成对应处置任务时会进行实时状态更新;本场及备降场的联络信息包括联络部门、地址及联系方式,同时还提供了属地应急救援机构的联系方式。

应急处置信息显示当前应急事件相关的信息,包含架次信息和应急简报内容,内容包括但不限于事件发生的时间、飞机型号、起降机场、飞行空域、飞行任务、当前应急事件的等级、舆情应急响应等级、启动的应急预案名称,当应急处置流程出现更新时会在页面进行实时推送。

环境信息包括应急场景相关空域的地图信息,包括飞机航迹、指挥基地位置、当前机场位置、备降机场位置,可以进行空域的选择和切换,数据来源可以进行手动切换,数据来源切换后系统可以保存本架次历史飞行航迹便于信息回溯。

视频数据可展示的视频源分为监控视频、遥测视频、单兵视频,按照飞行任务计划信息显示对应的视频信息,可切换不同信号源选择视频,同时可以将所有监控画面全屏展示。

试飞应急联络信息、应急处置信息是通过数据接入模块接入,对外以 HTTP 接口方式供前端调用,试飞过程中的遥测数据由各基地的转发节点通过专线进行数据回传,并提供 WebSocket 接口以便实时展示飞行指标和轨迹,气象数据、ADS-B 数据,地图组件能够实现航迹的动态绘制,在地图上实时显示飞机的飞行轨迹,并且通过符号化标注技术,以不同的图标区分机场位置,使得用户能够清晰地了解飞机的飞行状态和位置信息。此外,地图还能够叠加人员位置、信息,为试飞人员和指挥员提供更全面的信息,辅助决策制定。

对于接入的视频数据,支持固定摄像头(采用 RTSP 协议)、单兵设备(采用 HTTP-FLV 协议)、遥测视频(采用 HLS 协议)等多种视频源的无缝切换。用户可以根据实际需求,灵活选择不同的视频源进行监控。同时,系统支持全屏模式下 16 路画面分屏显示,方便用户同时监控多个场景,提高了监控效率和全面性。

3.3 接口管理模块

接口管理模块提供接口信息可视化界面,能够实时

监控接口状态，支持查看接口最近一次推送数据的时间，可以实时监测、显示接口的可用状态，包括正常、异常或暂停状态等，可以进行异常原因题是及状态报警。

接口监控看板基于 Spring Boot Admin 开发，采用 WebSocket 实现状态实时推送。监控指标涵盖接口响应时间 ($P99 \leq 800\text{ ms}$)、吞吐量 (峰值 $2\,000\text{ req/s}$)、错误率 (阈值 $\leq 0.5\%$) 等关键参数。当检测到连续 5 次 500 错误时，自动触发接口熔断，同时会在接口管理模块进行错误提示，帮助管理人员快速定位接口异常原因，迅速采取措施进行处理，保障数据传输和处理的稳定性。

3.4 音视频调度模块

音视频调度模块在试飞应急指挥过程中起着至关重要的作用，它确保了指挥中心与试飞现场之间的实时通信和协同工作。

在主监控场所采用主机搭配 7 路客席话筒，为音频指挥提供了稳定的硬件支持。同时，引入降噪算法，能够有效降低背景噪声 20 dB，显著提升语音清晰度 35%，使得在嘈杂的试飞现场环境中，指挥中心与现场人员之间能够进行清晰、顺畅的语音通信，确保指令的准确传达和信息的及时反馈。

模块的应急会议管理支持指挥基地与各外场基地间的点对点通话及视频、组群通话及视频以及现场监听监督等，了解应急准备和救援工作进展，开展资源协调等工作，在需要决策时提供现场指挥支持。系统通过调用会议平台的认证接口获取 token，通过会议列表接口拿到对应会议 ID，通过会议 ID 获取到对应应急会议视频播放地址，将外部视频会议集成至可视化显示模块，在召开应急会议时可以通过列表进行会议选择和显示，模块时序如图 4 所示。

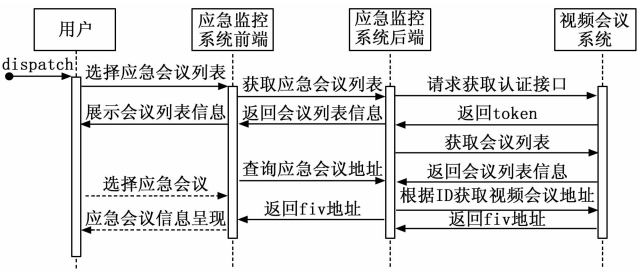


图 4 应急会议模块时序图

3.5 系统管理模块

系统管理模块包括人员管理和数据维护功能，其中人员管理支持对系统人员的增删改查、人员资质管理及系统权限管理，新增人员支持文件批量上传，如图 5 所示。

数据维护模块包括对飞行任务的应急联系方式维护及应急消息推送，如图 6、图 7 所示。



图 5 系统人员管理



图 6 应急联系方式维护



图 7 应急消息推送

3.6 结构化数据表

为满足试飞业务的复杂关联需求，系统数据库设计采用联合索引 (task_no, pilot_id) 优化多表关联查询效率，使 JOIN 操作响应时间从 320 ms 缩短至 80 ms。气象数据表设计为星型模式，事实表存储实时气象数据 (时间戳、风速、风向及能见度等)，维度表包括机场维度、时间维度，通过雪花模型进一步拆分时间维度为年、季、月、日层次，支持复杂的气象数据钻取分析^[16-18]。

索引优化策略采用冷热数据分离机制：对高频访问的飞行计划表建立覆盖索引 (task_no, dep_airport, arr_airport, fly_date)，将查询过程优化为索引扫描，避免回表操作；对低频访问的历史事件表，采用定期重建索引结合页合并技术，将索引碎片率控制在 5% 以内^[19-20]。

气象数据表设计如表 3 所示。

3.7 时序数据库优化

InfluxDB 存储引擎针对试飞数据的高频写入特性，采用基于时间窗口的分片策略：每个分片组对应 24 小时的数据，分片大小设置为 1 GB，既避免分片过小导致的元数据膨胀，又防止分片过大影响查询性能。数据保留策略通过时间聚合及筛选关键参数进行保留，其中 ADS-B 数据保留经度、纬度、地速、高度以及 fly_no 字段，存储成本较全量存储降低 85%。查询优化方面，

表 3 气象数据表设计

列名	数据类型	说明
id	bigint	用户表主键
air_temp	varchar	气温
air_pressure	varchar	气压
wind_speed	varchar	风速
wind_dirction	varchar	风向
visibility	varchar	能见度
clouds	varchar	云层
airspace	varchar	空域

使用 InfluxQL 的时间范围限定（WHERE time > now（）- 1h）结合字段投影（SELECT altitude, speed），将单次查询响应时间控制在 200 ms 以内。

以下为 ADS-B 数据存储示例：

```
CREATE
CONTINUOUS QUERY "cq_adsb" ON "test" RESAMPLE
every 15 m FOR 60 m
BEGIN
SELECT "flight","lat" AS "lat","lon" AS "lon","gh" AS "
gh",last("gs") AS "gs"
INTO "sixty_day"."samp_adsb_1m"
FROM "sixty_day"."adsb"
GROUP BY time(1 m) END
```

3.8 可靠性设计

服务容错机制采用 Hystrix 与 Sentinel 相结合的双重保障。Hystrix 负责处理单个服务的熔断降级，设置 2 s 超时阈值，当错误率连续 10 s 超过 50% 时触发熔断，熔断期间返回预定义的应急响应（如静态应急联系方式页面）。Sentinel 作为分布式流量控制组件，实现全局的并发控制与冷启动保护，对视频流接口设置 QPS 上限（2 000 次/s），防止突发流量导致的服务雪崩。熔断恢复策略采用指数退避算法，每 5 s 尝试半开状态请求，连续 3 次成功则恢复正常调用。

4 系统测试与验证

4.1 系统测试环境配置

4.1.1 硬件环境

主基地部署 4 台华为服务器（鲲鹏 920 64 核，32 GB 内存），各外场基地配置 2 台边缘节点服务器（DELL 9020，16 GB 内存）。

4.1.2 软件环境

容器化部署基于 Kubernetes 1.24，前端采用 Vue3 + Electron 22，后端微服务框架为 Spring Cloud Alibaba 2021.0.1.0，数据库集群包含 MySQL 8.0、InfluxDB 2.6 及 MinIO 布式存储。

4.1.3 网络环境

网络带宽采用专线互联，主基地至各分基地带宽

≥100 Mbps。

4.2 测试场景设计

4.2.1 数据同步测试

主基地向两个试飞基地同时推送 10 路 1 080 P 视频流（码率 2 Mbps）、ADS-B 数据（更新频率 10 Hz）及遥测数据。

4.2.2 应急决策演练

在外场基地模拟启动备降程序，测试跨区域音视频调度、应急事件数据推送。

4.3 性能评估指标及测试数据

在实际应用中，系统成功支持了多基地间的跨区域协同应急演练。在演练过程中，视频管理服务器能够同步传输 10 路高清画面，系统画面可以同步传输至各协同基地，确保各方能够实时观看演练现场的情况，实现了跨区域的信息共享和协同指挥。通过系统提供的音视频调度和数据展示功能，各方能够及时清晰地沟通和协调，有效提升了跨区域协同作战的能力。

数据实时性是试飞应急监控系统的关键性能指标之一。通过测试发现，实时数据更新的平均延迟为 175 ms，标准差 ±20 ms，能够满足实时监控的需求，用户能够及时看到飞机位置的变化。在视频流传输方面，1 080 P 分辨率下帧率稳定在 25 fps，画面流畅，没有出现卡顿和延迟现象，为用户提供了良好的视频监控体验。

系统负载测试主要考察系统在高并发情况下的运行性能。测试结果显示，当视频接入达到 50 路并发时，CPU 占用率≤75%，系统依然能够保持稳定运行，说明系统具备较强的视频处理能力。在数据库吞吐量方面，MySQL 集群的峰值 TPS 达到 2 100，能够满足大量数据的并发读写需求，证明了系统数据库架构的合理性和高效性。

系统性能如表 4 所示。

表 4 系统性能

序号	指标	结果
1	接入数据源数量	11 类共计 154 项
2	数据吞吐量/Mbps	20
3	数据平均延时/ms	175
4	视频流传输延迟	1 080 P/25 fps 下延迟≤300 ms
4	数据正确性	100%

系统实际应用效果如图 8 所示。

5 结束语

本文提出的试飞应急监控系统实现了多源数据融合，在试飞监控中成功集成 ADS-B、气象与音视频流等多种类型的数据，通过对这些数据的综合分析和展示，为用户提供了更全面、更准确的试飞现场信息，大大提升了应急决策的科学性和有效性。其次，采用微服



图 8 系统实际应用效果

务弹性扩展架构,通过容器化部署技术,实现了服务的快速扩容和资源的灵活分配,能够有效应对突发流量,提高了系统的可扩展性和容错能力。

在应用价值方面,系统取得了显著的成效。在效率提升方面,为应急监控指挥提供了全局监控平台,能够在紧急情况下迅速做出反应,有效整合内外部资源,最大限度地减少损失。在技术复用性方面,系统的架构和技术方案为其他高危作业领域,如核电巡检、化工生产等,提供了可参考的架构和经验,具有良好的推广应用价值。

综上所述,本试飞应急监控系统通过先进的技术架构和功能设计,有效解决了传统系统的不足,提升了试飞应急管理的水平和效率,具有重要的理论意义和实际应用价值。未来,将继续根据用户反馈和技术发展趋势,对系统进行优化和升级,不断提升系统的性能和功能,为飞机试飞安全和其他高危作业领域提供更强大的技术支持。

参考文献:

- [1] 黄涛,王 伟. 大型民机试飞测试发展与挑战 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (9): 5-7.
- [2] 韩广志. 业务连续性应急管理系统的设计与实现 [D]. 济南: 山东大学, 2017.
- [3] 李懿祥. 基于大数据的 S 航空公司运行风险管理体系优化研究 [D]. 荆州: 长江大学, 2023.
- [4] 曹宏伟,周前飞,张莉君,等. 典型特种设备质控分布式云平台设计及应用 [J]. 网络安全与数据治理, 2025, 44 (2): 81-87.
- [5] VILLAMIZAR M, GARCÉS O, CASTRO H, et al. Evaluating the monolithic and the microservice architecture pattern to deploy web applications in the cloud [C] //10th International Conference on Cloud Computing (CLOUD), 2017: 738-745.
- [6] KREPS J, NARKHEDE N, RAO J. Kafka: A distributed messaging system for log processing [C] //Proceedings of the 6th International Workshop on Networking Meets Databases (NetDB), 2011: 1-7.
- [7] CATTELL R. Scalable sql and nosql data stores [J]. ACM SIGMOD Record, 2011, 39 (4): 12-27.

- [8] HECHT R, JABLONSKI S. NoSQL evaluation: A use case oriented survey [C] // International Conference on Cloud and Service Computing (CSC), 2011: 336-341.
- [9] TILKOV S, VINOSKI S. Node.js: using javascript to build high-performance network programs [J]. IEEE Internet Computing, 2010, 14 (6): 80-83.
- [10] BROER A A R, BENEDICTUS R, ZAROUCHAS D. The need for multi-sensor data fusion in structural health monitoring of composite aircraft structures [J]. Aerospace, 2022, 9 (4): 183.
- [11] SMITH J, BROWN R. Real-time data fusion techniques in aerospace monitoring systems [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2022, 58 (3): 1234-1245.
- [12] WANG Q, ZHANG Y. A distributed framework for multi-source data integration in flight test scenarios [C] //Proceedings of the International Conference on Distributed Computing Systems, 2020: 456-463.
- [13] CHEN H, GUPTA S. Enhancing aviation safety through intelligent video analytics [J]. AI in Engineering, 2019, 15 (2): 89-104.
- [14] PATEL R, KIM J. Time-series database optimization for high-frequency flight data [J]. ACM SIGMOD Record, 2017, 46 (3): 45-56.
- [15] GARCIA M, RODRIGUEZ P. Fault-tolerant design in mission-critical aerospace systems [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2016, 155: 112-125.
- [16] FERNÁNDEZ A, LÓPEZ J. Performance evaluation of message brokers in high-throughput scenarios [J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2019, 132: 234-245.
- [17] CHEN Z, WU W. Research on optimization strategies of load balancing algorithms based on spring cloud alibaba [C] //2024 4th International Conference on Electronic Information Engineering and Computer Communication (EIECC), 2024: 848-851.
- [18] GUO H, PANG J, HAN L, et al. Flight data visualization for simulation & evaluation: a general framework [C] //2012 Fifth International Symposium on Computational Intelligence and Design, 2012: 497-502.
- [19] YAN H, WANG J, XIA C. Research and application of the test data visualization [C] //2017 IEEE Second International Conference on Data Science in Cyberspace (DSC), 2017: 661-665.
- [20] XI L, LI J, AN R. Research on flight test evaluation techniques for unmanned aircraft in complex environments [C] //2023 7th International Symposium on Computer Science and Intelligent Control (ISCSIC), 2023: 302-305.