

# 民机试飞遥测实时数据处理软件设计与研发

刘涛, 冯灿, 李成浩

(中国商飞民用飞机试飞中心, 上海 200232)

**摘要:** 为了满足大型民机试飞实时监控的需求, 针对遥测数据设计研发了一套实时处理软件, 软件包含后端解析服务和前端显示软件两大部分; 后端解析服务采用多线程调度技术, 实现在实时处理及数据回放等不同工作模式下 IRIG 106 CH10 遥测数据的接收和 PCM 参数数据、PCM 嵌入式视频流的解析和实时存储; 前端显示软件基于 WPF 框架开发, 包括任务管理、参数配置、算法处理和同步等功能模块; 经实际测试, 软件实现了国产某大型客机超过 15 000 个试飞遥测数据及多路视频的实时解析、计算和转发, 成功驱动了实时监控终端的相关应用, 满足了试飞过程中的实时监控需求, 为试飞任务的安全开展提供了有力保障。

**关键词:** 实时监控; IRIG 106; 遥测; PCM; 多线程; 民机试飞

## Design and Development of Telemetry Real-time Data Processing Software for Civil Aircraft Flight Test

LIU Tao, FENG Can, LI Chenghao

(Flight Test Center of COMAC, Shanghai 200232, China)

**Abstract:** In order to meet the real-time monitoring requirement of large-scale civil aircraft test flight, a set of real-time processing software for telemetry data is designed and developed. This software is composed of the back-end analysis service and front-end display software. The back-end parsing service adopts the multi-thread scheduling technology to realize the reception of IRIG 106 CH10 data and the parsing and real-time storage of Pulse Code Modulation (PCM) parameters and PCM embedded video stream under different working modes such as the real-time processing and data playback. The front-end display software is developed based on the WPF framework, including the functional modules such as task management, parameter configuration, algorithm processing and data synchronization. After the actual testing, the software has realized the real-time analysis, calculation and forwarding of no less than 15, 000 test flights telemetry data and multi-channel video of a domestic large passenger aircraft, it is successfully driven the application of the real-time monitoring terminal, and met the real-time monitoring requirement during the test flight process, which provides a strong guarantee for the development of the flight test mission.

**Keywords:** real-time monitoring; IRIG 106; telemetry; PCM; multi-threading; civil aircraft flight test

## 0 引言

民机试飞是指在真实的环境中, 对飞机进行测试的过程, 以验证其功能和性能是否满足相关适航条款规定, 也是民机投放市场的必由之路<sup>[1]</sup>。用于试飞测试的飞机与航空公司运营的飞机不同, 会抽引机体上各种总线, 并在飞机上安装各种传感器、采集系统和数据处理设备, 用于实时获取反映飞机各个关键系统运行状态的参数和影像数据, 实现试飞过程中的实时监控, 保障飞行安全。试飞实时监控又分为机载监控和遥测地面监控, 其中, 遥测地面监控是指将采集后参数数据和视频流经过 PCM (pulse code modulation, 脉冲编码调制) 编码, 并采用无线传输的方式传递到地面, 利用地面系统进行数据的接收和解析, 为试飞工程师、地面指挥人员、飞机设计人员等提供决策依据<sup>[2-4]</sup>, 是飞行试验开展过程中最重要的监控模式。随着大量先进总线在飞机上的使用以及网

络化测试系统的普及, 试飞测试参数的数量越发繁多, 类型也越发复杂, 以某国产大型客机为例, 其用于遥测地面监控的试飞测试参数就超过了 10 000 个。

遥测数据实时处理软件是地面系统中不可或缺的关键组件, 主要功能是结合机载测试系统的采集格式、参数测试信息、校准信息和 ICD 信息, 完成遥测数据的实时解算、工程量转换和原始数据保存<sup>[5]</sup>。但传统的遥测数据实时处理软件功能单一, 存在以下不足:

- 1) 实时处理参数量有限, 往往不超过 2 000 个, 无法满足当前多参数的实时监控需求;
- 2) 参数和视频流解析一般采用分离模式, 对两者的混合编码无法解析;
- 3) 受制于软件性能, 无法进行较为复杂的参数计算和分析。

因此, 为了满足某大型民机试飞安全监控需求, 需要

收稿日期: 2022-08-15; 修回日期: 2022-09-16。

作者简介: 刘涛 (1987-), 男, 上海人, 硕士, 高级工程师, 主要从事试飞数据处理和分析等方向的研究。

通讯作者: 冯灿 (1984-), 男, 湖北武汉人, 博士, 研究员, 主要从事试飞测试工程方向的研究。

引用格式: 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): 195-202.



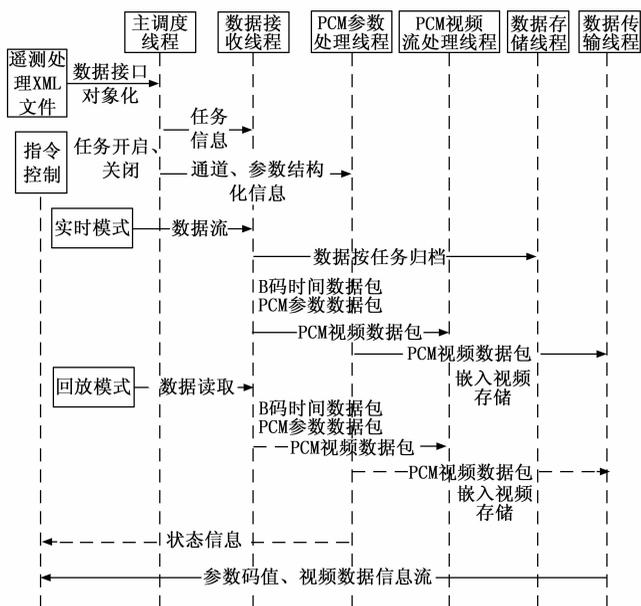


图 3 线程调度示意图

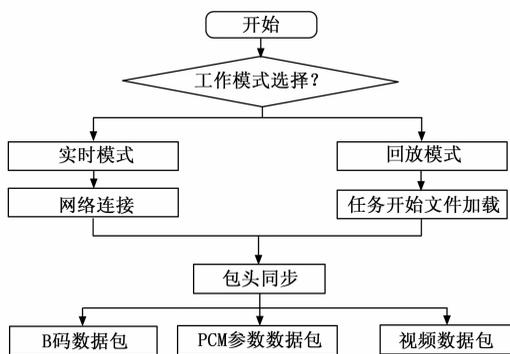


图 4 数据接收模块工作流程

### 2.2 数据解析模块

无论在实时模式下还是回放模式下, 遥测数据的本质均为 IRIG 106 CH10 数据包, 该数据格式由包头、包主体和包尾组成, 其结构如图 5 所示<sup>[8-10]</sup>。

其中, 数据包包头包含通道 ID、数据包同步格式、数据包长度、数据类型等关键要素; 数据包包体可存放 IRIG-B 码数据、PCM 参数数据以及 PCM 视频流数据。

PCM 的一般格式如图 6 所示, 每一行为一个子帧, 多个子帧组成了主帧<sup>[11]</sup>。每个子帧均由 Sync Word (同步字, 一般为 FE6B2840)、SFID (计数器) 以及多个 PCM Word 组成。PCM Word 可负载常用的航空总线数据 (包括 ARINC429、ARINC664、IMB 总线等)、音频数据和视频数据, 总线数据均以消息的形式存放在 PCM 的格式格栅中<sup>[12-14]</sup>。

数据解析模块作为本软件的核心功能模块, 主要负责数据包的格式解析、PCM 帧处理、PCM 参数计算和 PCM 视频流解析。

IRIG 106 CH10 数据包在解析过程中, 主要结合通道 ID 和数据类型进行指定数据包的筛选<sup>[8]</sup>。提取的数据包将

msb		lsb		数据包头
31		0		
通道 ID		数据包同步格式		
数据包长度		数据包长度		
数据类型	数据包标识	序号	时间类型版本	
相对时间计数器		相对时间计数器		
包头校验和		相对时间计数器		
时间 (LSLW)		时间 (MSLW)		
次等包头校验和		预留		
通道指定数据		内数据包时间戳1		
内数据包时间戳1		内数据包包头1		
数据1字2	数据1字1			
数据1字n	...			
内数据包时间戳2		内数据包时间戳2		
内数据包时间戳2		内数据包包头2		
数据2字2	数据2字1			
数据2字n	...			
...		内数据包时间戳n		
内数据包时间戳n		内数据包时间戳n		
数据n字2	数据n字1			
数据n字n	...			
填充				
数据包校验和				数据包包尾

图 5 IRIG 106 CH10 数据包格式

	第一路	第二路	第三路	第一路	第二路	第三路
Sync word	SFID(0)	Word-01	Word-02	Word-03	Word-04	Word-05
Sync word	SFID(1)	Word-11	Word-12	Word-13	Word-14	Word-15
Sync word	SFID(...)	Word-21	Word-22	Word-23	Word-24	Word-25
Sync word	SFID(n)	Word-n1	Word-n2	Word-n3	Word-n4	Word-n5

图 6 PCM 格式格栅

按照图 7 所示的流程进行解析。

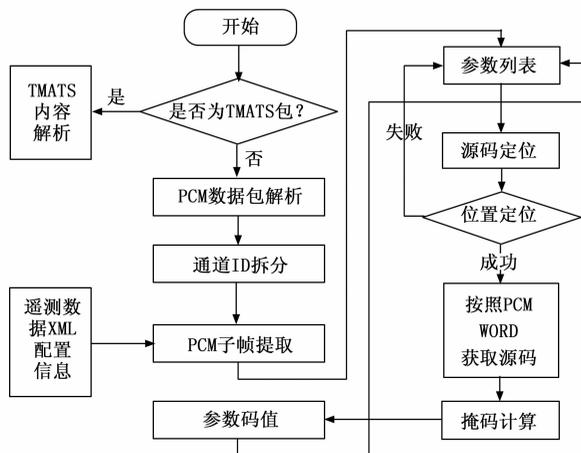


图 7 PCM 参数数据解析流程

本软件集成了 IRIG 106 官方提供的解析库, 首先根据数据类型关键字 (如当数据类型的值为 0x09 时表示为 PCM 数据) 判断数据包类型。当数据包为 PCM 数据包时, 将按照遥测数据 XML 配置文件中参数和视频流的描述信息, 对

数据包体内容进行解析。

遥测数据 XML 配置信息以层级标签进行描述，标签包括<Mission>、<Source>、<Stream>、<Parameter>。其中，<Mission>是任务，可以包含多个<Source>，每个<Source>嵌入一个或多个 PCM<Stream>，可以是参数流也可以是视频流，每个<Stream>中则是多个不同类型的试飞参数<Parameter>，<Parameter>包含参数名称、参数在 PCM 子帧中的位置（SFID、Word）、取位、对应掩码、分辨率、采样率等属性。

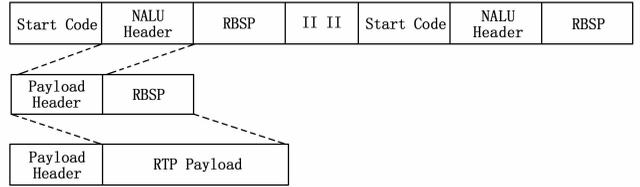
数据解析模块以 PCM 子帧为单位，从数据包体中按照参数的位置和取位提取原码，并将原码与对应掩码进行“与”计算，得到参数码值  $P_0$ ，当该子帧内所有参数信息解析完成后实时转发给数据传输模块。

PCM 视频流的编码与参数不同，往往以“超采”的形式嵌在 PCM 数据帧中，如图 6 所示，该主帧中包括三路嵌入式视频，第一路视频数据即为 Word-01、Word-04、Word-11、Word-14...Word-n1、Word-n4。在试飞领域，视频编码一般采用 H.264 压缩算法，经过 H.264 压缩后的视频流被称为“裸流”由连续的 NALU（NAL Unit）组成，并使用 Start Code（一般为 0x 00 00 00 01）来指示一个 NALU 的起始或者结束<sup>[20]</sup>。从功能层面，每一个 NALU 又可以分为 VCL（视频编码层）和 NAL（网络适配层）。其中 VCL 独立于网络，用于影像数据的高效编码，输出的结果为字节数组；NAL 的功能是将 VCL 生产的字节数组适配至网络（例如将字节数组切分为不超过 MTU 的多个单元）。经过 VCL 处理的数据在传输或者存储之前，被封装到了 NALU 中，每一个 NALU 的结构可以表示为一组原始字节序列负载（RBSP，raw byte sequence payload）和对应视频编码头部信息（NALU Header）的组合。

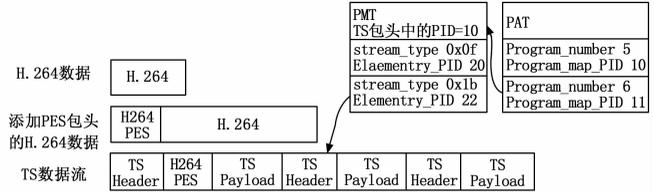
视频在 PCM 的编码中可使用裸流和传输流两种形式，当采用传输流编码时，解析只需要将每个子帧中属于同一路视频流的 PCM Word 按照顺序提取出来，以 UDP/IP 形式发送至 VLC 播放器即可完成解码和播放；当采用 H.264 编码时，软件在完成指定 PCM Word 提取的基础上，以 Start Code 为标准提取完整的影像帧序列，最后封装成 RTP 报文或者传输流。在 RTP 报文的封装过程中，首先去除 Start Code，利用 NALU Header 转换成 Payload Header，加上 RBSP 成为 RTP Payload，配合 RTP Header 完成报文封装<sup>[18]</sup>；传输流的转换过程是在 H.264 裸流基础上添加 PES 数据包头，并将 PES 数据包按照 184 字节进行切分，为每一个切片添加 4 字节 TS 包头转换成传输流<sup>[19]</sup>。过程如图 8 所示。

### 2.3 数据传输模块

数据传输模块的主要功能是负责通过消息队列和序列化协议对相关消息进行内部和外部交互，包括 PCM 参数和 PCM 视频消息、时间消息、日志消息、交互反馈消息、状态消息、心跳消息等。数据传输模块根据这些消息通过制定相关数据结构，使用 Protobuf 序列化二进制数据，并



(a) H.264封装RTP报文过程



(b) H.264转传输流过程

图 8

通过类型进行相关区分，然后进行打包，使用 ZeroMQ 消息队列将数据发送给前端显示软件。Protobuf 文件中各数据结构定义如表 2 所示。

表 2 Protobuf 数据结构

数据类型	Protobuf 结构定义
PCM 数据	<pre> message PCMDData{ map&lt; string,PCMDDataInfo&gt; map_filed_val= 1; //参数名称 参数具体值} message PCMDDataInfo{ optional bytes ParameterValue=1; //参数值 optional int64 Second=2; //秒计数 optional int64 NanoSecond=3; //纳秒计数 optional string Time=4; //时间字符串}                     </pre>
PCM 视频数据	<pre> message PCMVideo{ optional string Name = 1; //视频名称 optional bytes VideoData = 2; //视频流数据}                     </pre>
IRIG-B 数据	<pre> message IRIGBData{ optional string TimeValue= 1; //B 码时间字符串}                     </pre>

### 2.4 数据存储模块

数据存储模块按照任务信息，以任务名称创建一级目录，并在该目录下创建文件，按照 IRIG 106 CH10 格式实时存储由数据接收模块转发的所有数据，同时该目录还存储了遥测数据 XML 配置文件、日志文件和嵌入式视频流文件，如图 9 所示。视频存储目录作为二级路径以通道 ID 命名，在该目录下，每路视频文件以”通道 ID\_视频通道”命名。

### 2.5 任务控制模块

任务控制模块主要负责后端解析服务和前端显示软件任务开始、结束等指令的交互和执行情况的反馈，并对后端解析服务内部各模块、各线程、各数据流进行调度，是整个端解析服务处理流程的调度枢纽。

在收到任务启动指令时，任务控制模块首先进行报文解析，完成遥测 XML 配置文件的加载，当加载成功后识别工作模式，完成网络初始化和任务信息读取，并启动各功能模

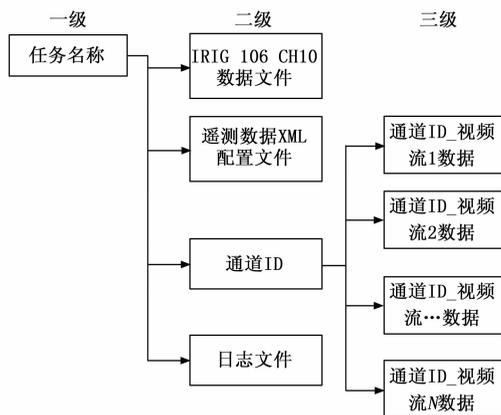


图 9 数据存储目录

块的相关线程,同时完成状态记录;当接收到结束指令时,任务控制模块会停止各个模块的线程,并完成状态记录。

任务控制模块使用了 Redis 数据库,记录任务运行的相关状态,包括任务运行状态,IRIG-B 码处理、PCM 参数处理、PCM 视频流处理状态。各状态消息的主键和数据类型定义如表 3 所示。

### 3 前端显示软件

前端显示软件采用 C# 编程语言和 WPF 框架进行开发,WPF (windows presentation foundation) 是微软推出的基于 Windows 的用户界面框架,做到了界面设计和业务逻辑的分离<sup>[15-17]</sup>。前端显示软件的主要功能是负责任务控制、状态可视化显示以及相关信息的配置,分为任务管理模块、界面显示模块、算法处理模块、数据同步模块、异常告警模块、日志信息模块等 6 个部分。

前端显示软件主要通过数据同步模块与后端解析服务进行数据交互,将同步得到的相关信息提供给各个工作模块进行处理。例如任务管理模块获取到任务状态信息,用以控制任务的进行;算法处理模块捕获传过来的输入参数,调用对应的算法进行解析处理,得到计算结果并派生出对应的参数信息,流程如图 10 所示。

#### 3.1 任务管理模块

任务管理模块主要负责对任务的加载、保存、删除以及进行历史任务的回放。在实时模式下,加载任务主要通过导入遥测 XML 配置文件机载对应的任务信息,并将数据源、数据流、数据参数和分发终端等任务信息结构化后存储于 SQLite 数据库;在回放模式下,主要通过访问 SQLite 数据库,提取相应的任务内容。

表 3 Redis 关键字段

属性项	主键	类型	备注
任务状态	Console-Status	String	为 string 类型(后台软件根据任务指令执行情况更新 Value),前端软件根据 Key-Value 识别后台软件状态
IRIG-B 码解析状态	IRIG-B	String	Key:通道号 Value:是否解析到时间码标识(每两秒更新一次)
PCM 参数解析状态	PCMDData	String	Key:通道号 Value:是否解析到 PCM 帧标识(每两秒更新一次)
PCM 视频流解析状态	PCMDData-Video	putRow-OfHash	Key:通道号-节目 ID Value:是否解析到 PCM 视频帧标识(每两秒更新一次)

#### 3.2 界面显示模块

界面显示模块主要负责针对数据源、数据流、参数信息以及分发监控终端的状态信息进行可视化展示,展示内容包括 IRIG-B 码信息、PCM 数据流同步状态、PCM 参数值、PCM 视频流解析状态等。所有展示信息通过 WPF 框架的数据绑定(DataBinding)进行显示。所谓数据绑定就是在显示控件与其显示的数据之间建立连接的过程,其原理为界面显示模块会将需要显示的信息自动包装成依赖属性,并在其 Set 方法中实现 INotifyPropertyChanged 接口,当该属性被更新(赋值)时将值传递给显示控件。

前端显示软件主界面采用 TapPage 切换模式,包括数据源、IRIG-B 数据流、PCM 数据流、PCM 视频流、数据参数界面和终端状态等 6 个显示页面:

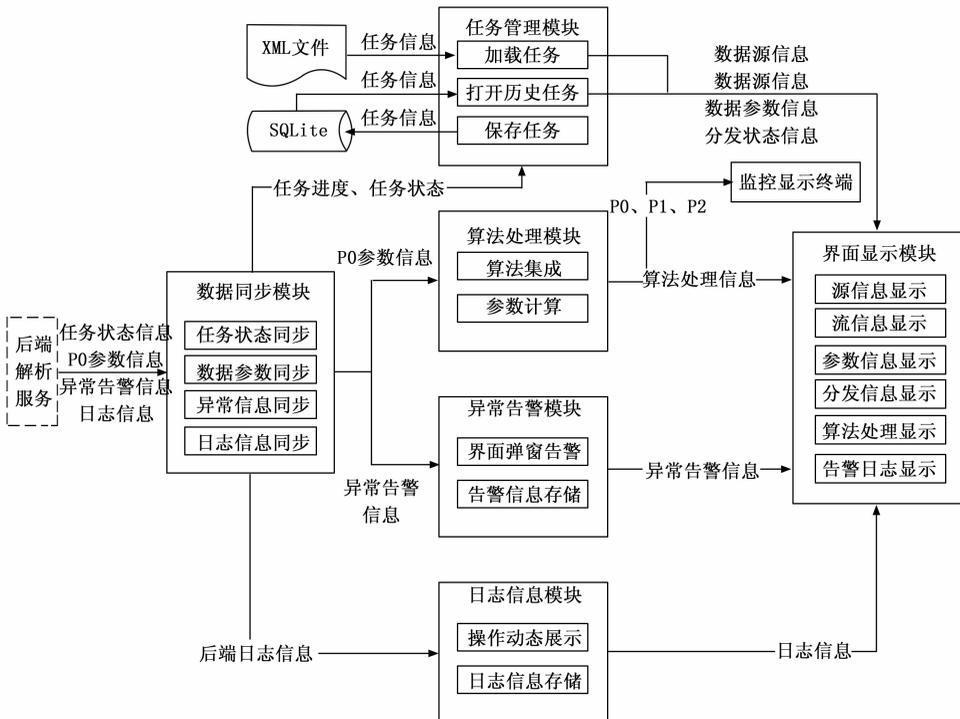


图 10 前端显示软件各功能模块关系图

1) 数据源显示界面主要包括数据源名称、输入详细信息、通道等内容。其中,输入详细信息允许用户在回放模式下输入记录文件的路径和类型;通道信息包括了通道编号、通道类型、数据链路名称和通道 ID。



图 11 数据源显示页

2) 数据流显示界面主要显示 PCM 数据流、PCM 视频流、IRIG-B 时间流的状态和信息。

3) 数据参数界面包括所有参数的列表,当参数被选中时,则显示当前参数的名称、单位和描述,同时结合 PCM 格式格栅地图呈现参数的位置 (SFID、Word)、取位以及算法编辑子窗口。通过算法编辑子窗口,用户可从预定义算法或者自定义算法库中以拖拽方式拉取一个或多个算法进行运算,形成计算链,如图 12 所示。



图 12 数据参数显示页

4) 终端状态显示页主要显示各个监控终端的名称、通信码速率和数据传输状态,当数据传输处于不同状态时,软件会通过不同的颜色进行明显区分。



图 13 终端显示页

### 3.3 数据同步模块

数据同步模块主要通过 ZeroMQ 消息队列的方式,从

后端解析服务中获得任务状态信息、数据参数信息、异常告警信息和操作日志信息。获取以上信息,并分别提供给任务管理模块、算法处理模块、异常告警模块和日志信息模块使用,最终由界面显示模块完成展示。ZeroMQ 通讯协议采用命令码和 Protobuf 数据格式组成,命令码长度为 2 个字节。

表 4 命令码表

序号 数据标志(BID)	数据类型
0x0001	开始任务指令(前端→服务端)
0x0101	开始任务应答(服务端→前端)
0x0002	暂停任务指令(前端→服务端)
0x0102	暂停任务应答(服务端→前端)
0x0003	停止任务指令(前端→服务端)
0x0103	停止任务应答(服务端→前端)
0x0004	发送 IRIG-B 数据(服务端→前端)
0x0005	发送 PCM 数据(服务端→前端)
0x0006	发送 PCM 视频数据(服务端→前端)
0x0007	发送回放模式下的任务进度(服务端→前端)
0x0008	发送操作日志信息(服务端→前端)
0x0009	发送异常告警信息(服务端→前端)

### 3.4 算法处理模块

算法处理模块主要完成遥测 PCM 参数的计算,流程如下:

1) 算法处理模块通过任务管理模块加载的遥测 XML 配置文件,得到参数列表,形成参数集合;

2) 通过数据同步模块从后端解析服务获得  $P_0$  参数后,根据配置信息判断该参数是否有算法绑定,若无,则不作处理,若有,则调用响应的算法链进行计算,得到每一步的计算结果  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $\dots$ 、 $P_n$ ;

3)  $P_0$  以及每一步计算结果  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $\dots$ 、 $P_n$  通过界面显示模块进行显示,同时将结果发送给监控终端。

### 3.5 异常告警模块

异常告警模块主要负责对界面、数据操作时的异常告警信息进行捕获和提示,以警告弹窗、日志输出和告警信息文件的形式进行展示和存储。当软件运行过程中出现告警时,前后端的告警信息会形成异常告警集合,并通过时间进行排序,同时输出到显示界面和日志文件中。告警信息分为普通、警告、严重等三个不同的等级,显示时按照等级不同分别显示为白色、琥珀色和红色。

### 3.6 日志信息模块

软件运行过程中,相关的操作,特别是异常情况、告警信息,在没有运行日志的情形下,很难排查故障原因,因此日志信息模块至关重要。

本软件采用 Log4cplus 框架对调试信息、过程警告信息、执行流程记录信息、内部程序断言信息、内部程序错误信息和用户的基本操作信息进行管理。

### 4 试验结果与分析

为了验证遥测实时数据处理软件的功能和性能, 分别在实时处理和数据回放模式下开展验证试验。

在实时处理模式下(处理流程如如图 14 所示), 利用国产某大型客机的实时遥测数据作为数据源(数据源信息如表 5 所示), 经移动遥测系统接收后, 通过地面帧同步处理工作站完成 PCM 的位帧同步处理, 形成 IRIG 106 CH10 网络数据流, 经网络交换机发送至运行本软件的数据处理服务器进行实时处理, 处理后的结果转发至实时监控终端进行可视化显示; 在回放模式下通过加载记录的 IRIG 106 CH10 文件进行测试(数据源信息如表 5 所示)。

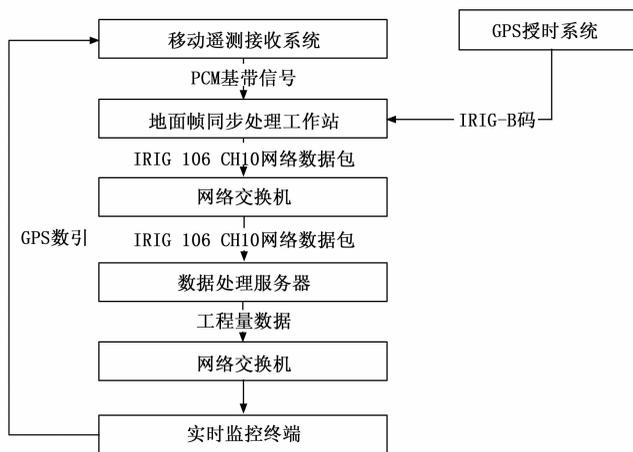


图 14 验证试验流程

表 5 数据源信息

通道 ID	类型	码率	备注
1	PCM 数据流	4.193 04 Mbps	包含参数 15 926 个, 数据刷新率最高 512 Hz
2	PCM 视频流	8.4 Mbps	包含 4 路侵入式 H.264 高清视频
3	IRIG-B 时间流	/	/

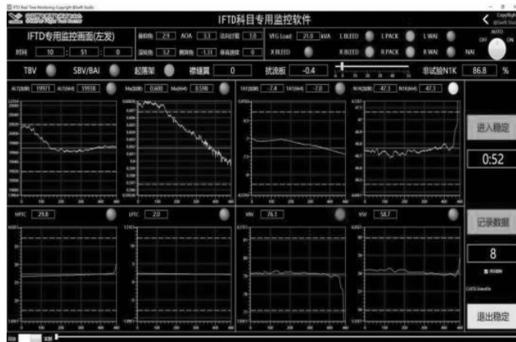
经测试, 结果如表 6 所示, 遥测数据及解析后的视频如图 15 所示。

表 6 数据源信息

序号	项目	测试结果
1	解析参数数量	15 926 个
2	参数解析延时	<75 ms
3	视频解析路数	4 路
4	视频解析延时	<200 ms
5	数据存储	可实时存储为 IRIG 106 CH10 文件, 记录文件可读取回放

### 5 结束语

本文设计研发了一套用于民机试飞遥测数据实时监控的软件, 在实时处理和文件回放两种工作模式下, 实现了



(a) 遥测数据实时监控



(b) 遥测视频实时监控

图 15 监控终端显示结果

国产某大型民机不少于 15 000 个 PCM 参数和 4 路高清嵌入视频的实时处理、计算和分发, 驱动了实时监控终端的监控应用, 为民机试飞的安全监控提供了有力保障。

### 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] 孙健, 霍培锋. 大型飞机试飞测试现状与对策 [J]. 测控技术, 2007, 26 (3): 19-21.

[3] 白效贤, 杨廷梧, 袁炳南. 航空飞行试验遥测技术发展趋势与对策 [J]. 测控技术, 2010, 29 (11): 6-9.

[4] 祁春. 遥测数据实时处理软件系统及其应用 [J]. 科学技术与工程, 2010 (10): 7047-7050.

[5] 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.

[6] 李彦辰, 艾庆忠, 王少非. 基于 Redis 的分布式搜索引擎研究 [J]. 软件导刊, 2018 (3): 25-26.

[7] 秦永刚, 张峰. 基于 ZeroMQ 的仿真时间同步系统设计 [J]. 信息与电脑 (理论版), 2019 (15): 15-16.

[8] 曹阳, 陆乐, 齐犇. 基于 IRIG106 Chapter 10 标准的数据记录系统 [J]. 航空电子技术, 2014, 45 (2): 14-17.

[9] 张娟, 支高飞. IRIG106 第 10 章数据流实时及事后处理时效分析 [J]. 信息系统工程, 2017 (4): 4-5.

[10] 宋政斌, 张芹芹. 基于 IRIG106 第十章标准的 1553B 数据处理技术研究 [J]. 测控技术, 2015, 34 (3): 40-41.

[11] 段宝元, 穆永花, 穆永河. 新飞机测试改装网络数据到 PCM

的转换设计 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (10): 3356 - 3358.

[12] 宁 伟. 通用航空总线实时测试与分析技术研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2006.

[13] 尚 洋. 民用飞机 ARINC429 总线和 ARINC 664 总线应用权衡研究 [J]. 科技视界, 2017 (12): 2.

[14] 杨花卫, 刘诚睿, 杨 博, 等. C919 飞机 IMB 总线信号的仿真方法 [P]. 中国: CN112214364A, 2021.

[15] MACDONALD M. WPF 编程宝典 [M]. 王德才, 译. 北京, 清华大学出版社, 2013.

[16] 刘铁猛. 深入浅出 WPF [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.

(上接第 194 页)

[8] 肖 竹, 王勇超, 田 斌, 等. 超宽带定位研究与应用: 回顾和展望 [J]. 电子学报, 2011, 39 (1): 133 - 141.

[9] 王 杨, 赵红东. 室内定位技术综述及发展前景展望 [J]. 测控技术, 2016, 35 (7): 1 - 3, 8.

[10] 陈伟森, 裴海龙, 夏睿灿. 基于超宽带技术的室内定位系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (11): 179 - 182.

[11] 高思远, 冯秀芳. 基于 RSSI 信号特征的室内分区指纹定位算法 [J]. 计算机工程与设计, 2020, 41 (4): 1093 - 1098.

[12] 李 银, 汪 洋, 陈冬明. 基于 RSSI 的无线传感器网络定位系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (3): 1061 - 1064.

[13] 王佩琦, 李艳萍, 陈相南, 等. 基于 RSSI 距离修正的 WSNs 定位算法 [J]. 传感器与微系统, 2014, 33 (5): 135 - 137, 140.

[14] 邱怡飞, 吕 鹏, 刘晓凯, 等. 基于 RSSI 的预滤波定位算法研究 [J]. 无线电工程, 2021, 51 (5): 367 - 372.

[15] 常华伟, 王福豹, 严国强, 等. 无线传感器网络的 TOF 测距方法研究 [J]. 现代电子技术, 2011, 34 (1): 35 - 38.

[16] 刘金宝. UWB 传感器的室内定位应用 [J]. 传感器世界, 2020, 26 (11): 18 - 25.

[17] 卢靖宇, 余文涛, 赵 新, 等. 基于超宽带的移动机器人室内定位系统设计 [J]. 电子技术应用, 2017, 43 (5): 25 - 28.

[18] 李奇越, 吴 忠, 黎 洁, 等. 基于改进卡尔曼滤波的 NLOS 误差消除算法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29 (10): 1513 - 1519.

[19] 李 威, 叶 焱, 谢晋雄, 等. UWB 高精度室内定位系统及实现 [J]. 数据通信, 2018 (5): 13 - 18.

[20] 梁玉琴, 曾庆化, 刘建业. 基于 UKF 滤波的 WSN 节点定位研究 [J]. 传感技术学报, 2010, 23 (6): 878 - 882.

[21] 赵 飞. 基于 TOF/RSSI 的公交车载节点组合定位算法研究 [J]. 电子技术应用, 2012, 38 (2): 8 - 10, 13.

[22] 史小红. 基于 TDOA 的无线定位方法及其性能分析 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2013, 43 (2): 252 - 257.

[23] 孟令军, 贾至江, 严 帅, 等. TDOA 和广义互相关相混合的无线传感器网络定位技术 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (7): 1798 - 1800.

[24] 王 鼎, 尹洁昕, 刘瑞瑞, 等. 同步时钟偏差存在下的时差定位性能分析及改进的定位方法 [J]. 电子学报, 2018, 46 2010.

[17] 山 寿, 郝明哲, 孙 伟. 基于 DDS 和 WPF 技术的试飞实时监控系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (3): 119 - 122.

[18] 李 波, 杨 辉, 谢 昕, 等. 基于 RTP/RTCP 的塔机远程实时监控系统设计及实现 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (11): 3609 - 3611.

[19] 王占杰, 邱中彬. 基于传输流的多路数据传输教学平台建设 [J]. 实验室科学, 2013, 16 (2): 122 - 126.

[20] 马 军, 王红亮. 基于 FPGA 的 H.264 码流实时传输系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (5): 225 - 229.

(6): 1281 - 1288.

[25] 杨 伟, 何 杰, 万亚东, 等. 基于 IEEE802.15.4e 标准的工业物联网安全时间同步策略 [J]. 计算机研究与发展, 2017, 54 (9): 2032 - 2043.

[26] 冯 帆, 王 军, 陈小磊, 等. 超宽带室内定位无线时钟同步设计与实现 [J]. 电子技术应用, 2021, 47 (9): 105 - 110.

[27] 诸燕平, 黄大庆, 李 勃. 基于 AOA 的无线传感器网络节点定位算法 [J]. 传感器与微系统, 2010, 29 (1): 98 - 101, 104.

[28] 马方立, 徐 扬, 徐 鹏. 基于多种方位角计算方法的超短波 AOA 定位比较 [J]. 西南交通大学学报, 2021, 56 (4): 713 - 719.

[29] 熊 健, 熊 杰. 一种改进的多站 AOA/TDOA 联合无源定位闭合形式算法 [J]. 电讯技术, 2019, 59 (6): 672 - 677.

[30] 江 歌, 李志华. 非视距环境下的超宽带室内定位算法 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (11): 203 - 207.

[31] 王长强, 徐爱功, 隋 心. UWB 测距的 NLOS 误差削弱方法 [J]. 导航定位学报, 2017, 5 (3): 24 - 27, 32.

[32] 刘正波, 朱 亮. LOS/NLOS 混合环境下的基于 TOA 测距的定位算法 [J]. 弹箭与制导学报, 2021, 41 (2): 78 - 81.

[33] 刘晓霞, 李 芳. 基于特征矢量的 NLOS 误差检测的定位算法 [J]. 雷达科学与技术, 2019, 17 (2): 168 - 172, 183.

[34] 李荣冰, 王念曾, 刘建业, 等. 面向相对导航的 UWB 测距误差估计与补偿方法 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40 (5): 28 - 35.

[35] 周傲英, 杨 彬, 金澈清, 等. 基于位置的服务: 架构与进展 [J]. 计算机学报, 2011, 34 (7): 1155 - 1171.

[36] HAN G, JIANG J, ZHANG C, et al. A survey on mobile anchor node assisted localization in wireless sensor networks [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18 (3): 2220 - 2243.

[37] CHAN Y T, HO K C. A simple and efficient estimator for hyperbolic location [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994, 42 (8): 1905 - 1915.

[38] 李 洁, 高新波, 焦李成. 基于特征加权的模糊聚类新算法 [J]. 电子学报, 2006, 34 (1): 89 - 92.

[39] 安计勇, 闫子骥, 翟靖轩. 基于距离阈值及样本加权的 K-means 聚类算法 [J]. 微电子学与计算机, 2015 (8): 135 - 138.