

C919 机载数据实时处理系统设计

吴海东, 聂睿

(中国飞行试验研究院 测试所, 西安 710089)

摘要:适航审定是大飞机研制中的关键环节, 试飞测试是适航审定任务实施的重要基础; 纵观国内外大飞机飞行试验均非常重视机载数据实时处理; 在 C919 型号中对机载数据实时处理系统进行了研究, 以 VXWORKS 嵌入式实时操作系统为平台, 通过对现有机载实时处理系统功能模块进行整合以及软件优化设计来提高 C919 机载数据实时处理系统性能; 经飞行验证, 该系统能够实时完成 110MB/S 网络数据接收、存储、处理、转发和关键参数快速分组处理; 对比传统设计能够更好地确保系统数据处理实时性, 为保障大飞机试飞安全、提高试飞效率提供技术支撑。

关键词:飞行试验; 机载; 实时处理

Design of C919 Airborne Data Real-time Processing System

Wu Haidong, Nie Rui

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

Abstract: Airworthiness certification is a key link in the development of large aircraft. Flight test is an important basis for the implementation of airworthiness certification tasks. Throughout the flight test of large aircraft at home and abroad, real-time processing of airborne data is very important. The real-time processing system of airborne data is studied in C919. Based on VXWORKS embedded real-time operating system, the performance of C919 airborne data real-time processing system is improved by integrating the function modules of the existing airborne real-time processing system and optimizing the software design. Flight validation shows that the system can receive, store, process, forward and process the 110 MB/S network data in real time. Compared with the traditional design, it can better ensure the real-time processing of system data, and provide technical support for ensuring the safety of large aircraft flight test and improving the efficiency of flight test.

Keywords: flight test; airborne; real time processing

0 引言

随着信息化技术与我国民机产业振兴计划的全面开展, 提高我国的民机适航审定能力刻不容缓。纵观欧美大飞机试飞过程, 都非常重视机载实时处理系统在民机适航审定中的作用。未来大飞机采用了大量新技术、新材料, 采用了新的试飞方法与测试技术, 使得大型运输类飞机机上测试参数量骤增, 参数量超一万已成常态^[1-3]。

ARJ21 试验机总的测试参数有 8000 多个, 机载实时数据处理系统中涉及的有 1500 多个, 原始数据传输占用的带宽为 10 Mb/s, 共有两路 PCM 数据和 4 路网络数据。随着测试规模的扩大和其它测试需求的变化, 以前传统的测试系统受到了冲击, PCM 也暴露出了一些自身的不足和缺陷, 如受码速率和板卡通道容量限制的通道容量问题和布线问题^[4]。

C919 大型客机测试参数超过两万个, 试飞过程中留空时间平均四小时以上, 单架次飞行数据超过 100 GB, 同一架次中多科目混合、分时段进行, 传统数据处理模式需 2

小时以上已无法满足型号试飞数据处理任务进度要求。在 C919 大型飞机试飞任务中, 对机载实时数据处理提出了较高的性能要求, 现有机载实时系统架构及设计已没有如此大的性能提升空间, 解决超大量数据实时处理问题的需求极为迫切。

1 国内外现状

欧美大飞机试飞过程中, 非常重视机载实时处理系统的作用, 如空客 A380、波音公司 B747、777 等飞机试飞过程中使用了当时功能强大的“机载实时数据分析与监视系统”, 在试飞过程中可对关键参数实时监控, 同时实时完成 50%~60% 数据的分析处理。从上世纪 80 年代末开始, 我国开始在运 7 飞机定型试飞任务中引入机载实时监控, 由于技术限制无法实现数据同步实时处理, 这就导致在试飞过程中延缓了下一架次飞行决策的时间^[5]。

图 1 所示为某大型运输机机载实时系统结构图, 系统实时接收来自机载采集系统核心交换机发出的网络数据包, 通过实时监控服务器完成数据包解析、数据转发。其中, 数据存储、参数快速处理、振动数据处理分别采用三台嵌入式工控设备完成。系统实时服务器选用 Windows 操作系统, 实时性不能完全保证。系统网络接收速率最高为 50 MB/S, 实时处理参数 2000 个, 数据存储量为 256 GB。

收稿日期:2019-01-24; 修回日期:2019-02-15。

基金项目:国防基础科研项目(JCKY2016205B006)。

作者简介:吴海东(1987-), 男, 陕西西安人, 工程师, 主要从事飞行试验数据处理与软件技术方向的研究。

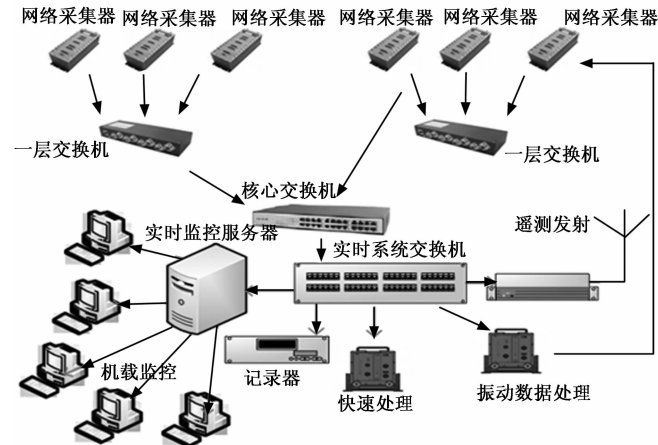


图 1 某大型运输机机载实时系统结构图

2 系统设计

为解决机载超大量数据快速处理难题，同时保障系统处理的实时性，提出 C919 机载实时系统性能指标为：实时数据接收速率 110 MB/S，实时处理参数在采样率为 64 时超过 8000 个，数据读写速率不小于 500 MB/S。超大量数据的实时处理问题是该系统设计的重点，现有实时系统架构及设计已没有如此大的性能提升空间。

2.1 总体设计

为了提高系统实时性、提高系统运行稳定性，在经过分析、论证和前期测试的基础上，本次方案采用基于千兆以太网、VXWORKS 实时操作系统。在对系统架构重新设计，各部分功能整合后，通过软件优化升级并改进数据处理流程来进一步提高系统性能。

C919 机载实时处理系统架构设计如图 2 所示，系统采用 C/S 架构，综合处理单元实时接收机载数据采集系统核心网络交换机发出的 iNET-X 网络数据包，实时完成网络数据包接收、原始数据存盘、网络数据实时处理、监控参数过滤、关键参数快速分组处理及存盘等工作。监控台端实时监控软件对物理量数据以数字、曲线、仪表等可视化方式显示。综合处理单元输出一路数据通过遥测发射至地面，供实时监控用。

不同于现有机载实时系统的分散数据处理模式，C919 机载实时系统核心数据处理功能集中于一台嵌入式计算机——综合处理单元来完成。综合处理单元模块的数据处理性能对于整个系统性能起着决定性作用，该系统是典型的多核多任务系统，根据项目中实时性任务特点选用了基于优先级的可抢占式分级调度策略来提高系统吞吐量，提升整个系统数据实时处理效率。

表 1 现有机载实时系统与 C919 技术指标对比

	现有机载实时系统	C919
网络数据接收速率	50mb/s	110mb/s
实时监控参数数量	2000	6000
数据存储量	256GB	512GB
快速处理参数数量	2000	6000;64 次/秒

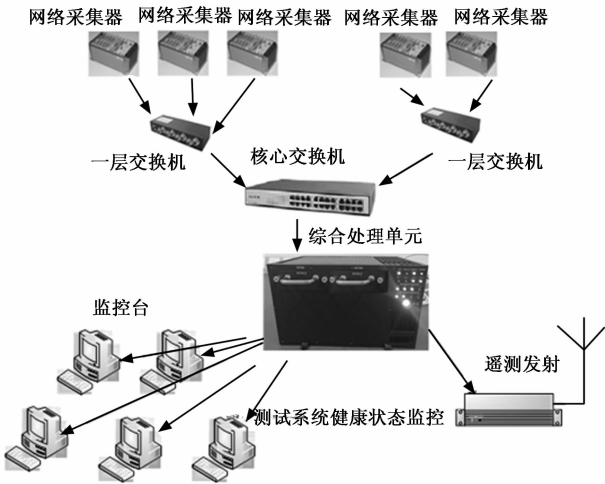


图 2 C919 机载实时处理系统结构

C919 机载实时处理系统较现有机载实时系统提高了数据预处理参数量及监控参数量，能够更好地保障试飞任务的开展；数据预处理效率的提升，缩短了试飞任务进行到试飞数据分析的时间，可快速提供给课题人员分析决策，为提高试飞效率，缩短试飞周期提供了必要的技术支持；开展了一系列关键技术的研究，为未来试飞需求的进一步提升进行了必要的探索。

2.2 软件设计与实现

图 3 所示为 C919 机载实时数据处理系统流程图，机载实时数据处理软件首先运行配置加载模块，将所需配置信息和参数组信息存储在缓存中，并对服务器进行初始化配置。创建数据流接收线程，服务器按照配置要求接收来自采集器发送的数据包，实现数据流参数提取、工程量转换，转换结果通过网络发送给客户端。机载实时数据处理软件的关键技术在于合理调配各个功能模块之间的资源，也即合理分配线程来实时的完成所有功能模块。其中，机载数据实时处理为核心模块，该模块功能由综合处理单元完成。

图 4 所示为综合处理单元数据处理流程。综合处理单元实时接收机载网络核心交换机发来的 iNET-X 网络数据，经过实时采集按照 IRIG 标准第十章中网络数据存储格式要求进行原始数据存盘，同时进行网络信息包分包解算，结合带头信息对数据进行实时处理，对照分组快速处理参数列表并按照各科目要求进行结果数据存盘，对照实时监控参数列表对需要实时监控的参数进行转发。综合处理单元可实时完成性能、操稳、发动机、燃油、起落架、电源等多个科目的数据预处理任务，在飞行前通过机载测试信息管理软件可对预处理任务进行调配。

由于网络时延的随机性，在对数据实时处理过程中首先要完成网络数据包的时间对齐，该系统通过分析网络数据包乱序规律，通过设置合理的环形缓存完成数据包的时间对齐。

由于课题人员所需结果参数总数及采样率提高的原因，

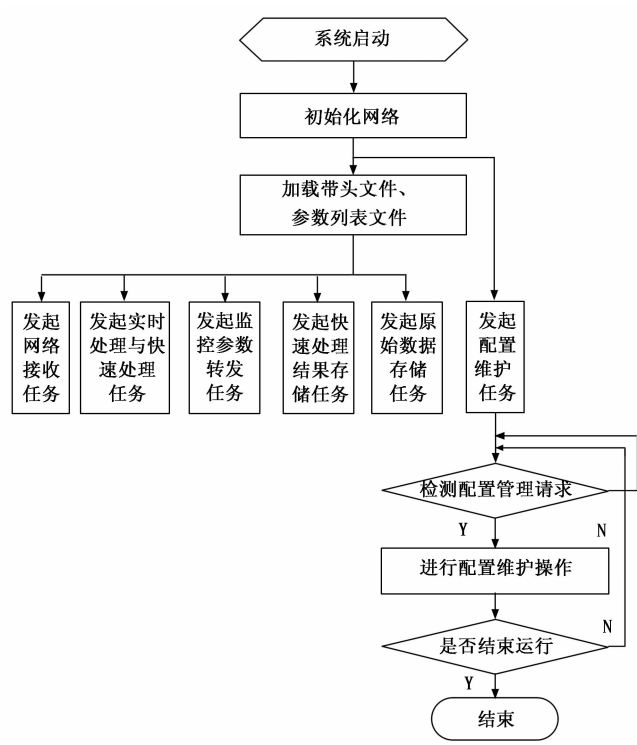


图 3 C919 机载实时数据处理系统流程图

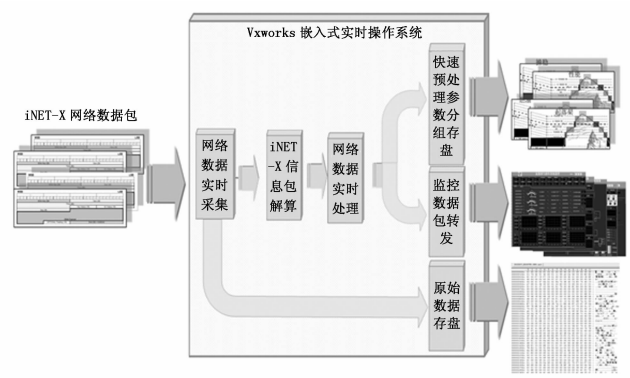


图 4 综合处理单元数据处理流程设计

关键参数分组快速处理结果文件数据量激增,本项目引入了预留缓存的思想和方法来解决试飞预处理结果文件的快速写问题。

2.2.1 多核多任务系统调度设计

多核多任务实时系统应用中,如何将线程分配到多个核,使得处理器资源得到最大程度利用,提高吞吐量,降低响应时间,对调度策略要进行一定的设计。本系统具有多个任务同时进行且都要求实时性极强的特点,对系统 CPU 资源调度存在很大考验。鉴于 C919 机载实时处理系统在运行过程中,线程比较固定,结合该系统具体应用特点决定采用基于优先级的可抢占式分级线程调度策略^[6]。

其中实时业务优先级依次为:网络数据包接收、实时数据处理、原始数据存储、快速分组处理参数存盘、监控参数转发。其中网络数据包接收为最高优先级可抢占任务;

其它线程优先级依次降低,均为不可抢占型任务。网络数据包接收线程与实时数据处理线程要求实时性极强,且数据连续性强,分配于核 2,核 1 运行操作系统中断服务程序,其余线程也运行于核 1。

实验室测试过程中发现系统性能对于网络数据包接收缓存大小较为敏感,分析原因为缓存过小可能会造成 CPU 在两个核之间切换频繁,带来系统性能的下降,但是缓存过大可能会造成数据包丢失,经过实验室测试最终确定网络数据包接收缓存为 8 M。

2.2.2 网络数据包时间对齐方法设计

机载网络采集系统各个子系统采集设备型号多样,数据包在从发送端到目的端时,网络中要经过若干个中间节点,节点与节点之间对包的传输会产生延时,由于包可能经过不同的中间节点到达目的端,以及局域网本身的其它传输不确定性,从而总的延时不同,导致数据包到达的顺序与期望的不同,产生了乱序。同一预处理结果文件中经常包括机上各个系统的采集参数,无时间相关性的数据预处理结果是无意义的,无法供课题人员进行进一步计算、分析,必须根据机上网络数据特点设计针对性的时间对齐方法。

机载实时系统首先应用访问控制列表技术,以匹配 KEY 字的方式将与实时数据处理无关的信息包进行滤除,并将高采和低采数据包彻底分开,为后续快速时间对齐做好准备。

针对在线预处理的原理和实时性要求,考虑时间对齐关键点在于:找到时间乱序的规律,设置合理的处理缓存。分析造成数据包乱序的原因可以看出,乱序是有周期性变化规律的,缓存区大小设定与该规律有关。本项目中考虑首先对失序情况进行量化,然后结合收到数据包的长度来确定缓存区大小。

第一步:量化网络数据包失序情况。

最大失序时间是指一个最大失序周期的时间,假设 1 s 内接收到信息包的个数为 N ,它们的时间标签分别为 T_1, T_2, \dots, T_N ,进行如下计算:

$$\Delta T_i = T_{i+1} - T_i (i = 1, 2, \dots, N-1)$$

比较每个 $\Delta T_i (i = 1, 2, \dots, N-1)$,得到最大值 ΔT_{\max} ,就是最大的逆序时间。乱序的规律就是以此逆序时间为周期,反复的出现的。

第二步:建立环形缓存区。

求出满足如下条件的最小值 T 以确定用于排序的缓冲区大小 L :

- 1) T 为 T_1, T_2, \dots, T_n 的公倍数;
- 2) $T \geq \Delta T_{\max}$;
- 3) $L_i (i = 0, 1, 2, \dots, N-1)$ 为 N 个数据包长度;
 $L = T / T_1 * L_1 + T / T_2 * L_2 + \dots + T / T_n * L_n$ 。

申请环形缓存区 L ,对信息包进行排序,环形缓存是以最大逆序时间为周期来分块的。

数据包在线快速时间对齐示例如下:

假设有 4 种数据包, 采样率均为 64, 环形缓存中依次收到以下数据包, 则可以依次提取处理 A0、B0、C0、D0 和 A1、B1、C1、D1 两组数据包。

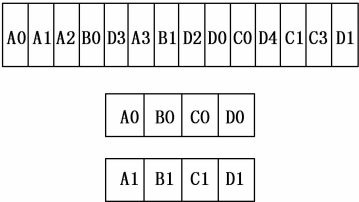


图 5 数据包在线快速时间对齐示例

2.2.3 海量数据快速存储设计

首次将预留缓存的思想和方法引入到海量试飞数据工程量处理中, 期望能够为试飞数据的快速写技术研究提供指导^[7]。

C919 测试参数总量激增, 数据总量超 100 GB, 试飞工程师所需的试验结果参数的采样率增大和总数增多, 分析处理的结果工程量文件也随之增大。如何快速地对海量试验数据进行分析处理, 除了在处理方法进行优化设计外, 在分析处理试验数据时实现快速地将结果工程量文件写入固态硬盘, 是试飞数据处理的关键点和难点。

一般试飞数据处理软件的结构如图 6 所示, 首先读入校线文件和分析需处理参数列表, 随后循环进行读入原始数据、分析原始数据、结果工程量写入固态硬盘, 直到飞行结束, 这个过程是机载数据实时处理系统中关键参数快速分组处理的核心部分。

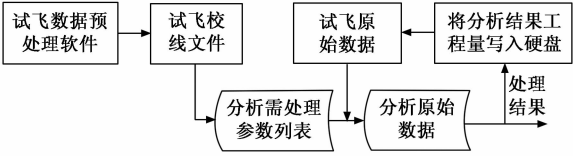


图 6 关键参数快速分组处理软件结构图

对于机载数据实时处理系统而言, 最理想的缓存情况当然就是采用部分缓存技术^[8], 结合数据分析模块, 应用部分缓存设计预留机制, 即利用试飞数据相关信息, 预知未来的数据处理结果的存放地址, 对工程量存盘情况进行预测, 达到一个尽可能好的缓存性能。

如图 7 所示, 为了提高关键参数快速分组处理效率, 采用多线程并行计算方式^[9]。如果不采用可以预测结果工程量写的地址的话, 那么线程“结果工程量文件写 0”必须是第一个被写入固态硬盘的数据, 在这种情况下, 即使线程“结果工程量文件写 2”或者“结果工程量文件写 1”先来, 也必须得到“结果工程量文件写 1”写完才可以进行写操作, 这样每个线程必须要等到上一个线程结束才可以进行, 他们之间是串行关系, 这样就增加了线程的等待时间, 致使整个进程的效率降低。而采用预留缓存机制, “结果工程量文件写 2”的写操作, 不需要等待“结果工程量文件写 0”或者“结果工程量文件写 1”结束, 他们之间是并行关系,

没有必然的联系, 消除了线程的等待时间, 提高了关键参数快速分组处理的效率^[10]。

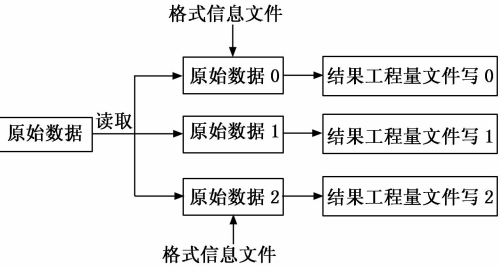


图 7 预留缓存机制实现

3 系统性能测试及应用验证

C919 综合处理单元的研制为该系统设计的一个难点, 既要解决速率为 110 MB/S 网络数据的实时接收、处理, 同时要实现 6000 个采样率为 64 的关键参数快速预处理, 并将处理结果进行存储, 繁重的处理任务对综合处理单元的软件设计要求都非常高。该项目采用了基于优先级的可抢占式分级调度策略对多线程任务进行调度, 数据接收速率、实时处理参数能力、核 2 使用率及丢包率是该系统的重要考察指标, 其中该系统对丢包率容忍度为 0, 以下是实验室测试结果。

表 2 C919 机载数据实时处理系统性能测试

编号	数据带宽 /Mbps	参数 采样率	参数 个数	核 2 使 用率	丢包 情况
1	≈45	64~512	10509	72%	无
2	≈90	64~1024	7970	92%	无
3	≈90	64~1024	8454	93%	丢
4	≈140	64	11056	53%	无
5	≈45	64	17907	69%	无
6	≈45	64	19834	——	——

从实验数据可以看出, 在参数采样率变化情况下, 会导致核 2 使用率迅速恶化。为了保证系统稳定工作, 建议在统一采样率 64 次/秒情况下, 快速处理参数不超过 11 000 个; 在不同采样 32~1 024 情况下, 快速处理参数个数不超过 5 000 个, 且高采参数 (512 次/秒, 1 024 次/秒) 不宜超过 250 个。

通过匹配 KEY 过滤了部分无用网络数据包, 解决了高速数据流丢包问题。通过网络数据包在线快速时间对齐技术, 在飞行过程中边飞行边处理, 为 C919 飞机关键测试参数快速分组处理做好前期数据准备, 保障了飞行过程中多个科目数据的实时预处理。实验室验证采样率为 64 时, 实时处理参数可过万, 在参数采样率不同时 (32~1 024), 处理参数量可达 5 000 个。目前实际应用中, 快速分组预处理参数为 2 200 个, 软件运行中 CPU 占用率不高, 实时处理任务性能还有部分提升空间。