

机载网络数据实时处理系统设计

刘语乔, 齐婵颖, 贾雨

(中国飞行试验研究院, 西安 710089)

摘要: 随着 C919 等大型飞机的出现, 测试系统对机载实时处理系统提出了更高的技术要求; 机载网络数据实时处理系统采用实时性较强的 vxWorks 开发环境, 通过合理调配各个功能模块之间的资源, 即合理分配线程来实时的完成所有功能; 经过科研试飞验证, 该系统具备 3 000 个参数的实时处理能力, 系统运行稳定可扩展性强, 满足目前大飞机机上测试系统数据实时处理任务的要求, 对保障大飞机试飞科目的顺利进行具有积极的意义。

关键词: 机载测试; 实时处理; 网络数据; 线程

Design of Real-time Processing System for Airborne Network Data

Liu Yuqiao, Qi Chanying, Jia Yu

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

Abstract: With the arrival of large aircraft such as C919, test system puts forward higher technical requirements for airborne real-time processing system. The real-time processing system of airborne network data adopts vxWorks development environment with strong real-time. Through allocates of resources rationally between the functional modules, that is, allocates of threads rationally to complete all functional modules real-time. Verified by scientific research in flight test, the system has real-time processing capability of 3 000 parameters. The system is stable and extensible, and meets the requirements of real-time data processing tasks for large aircraft airborne test system. It has positive significance for ensuring the smooth going of subjects test for large aircraft.

Keywords: airborne test; real-time processing; network data; thread

0 引言

纵观国内外大飞机试飞情况, 都非常重视机载实时数据处理系统的作用, 如空客 A380、波音 787 等。如波音公司的 B747 等飞机在试飞过程中, 使用了“机载实时数据分析与监视系统”(ADAMS)。在长达 10 多个小时的试飞过程中, 试飞工程师可对试飞科目的执行情况进行实时监控^[1-2]。我国从上世纪 80 年代末也开始研制使用机载实时数据处理系统来执行机上实时监控任务, 判定试验机飞行动作完成质量并为试飞安全提供保障, 典型的有运 7 系列飞机、空警 2000、ARJ21 等军民飞机^[3]。

ARJ21 试验机总的测试参数有 8 000 多个, 机载实时数据处理系统中涉及的有 1 500 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]。

据统计, 现阶段试验机实时数据处理能力要求已普遍提高, 要求测试系统各模块能够接收和处理网络数据的速率达到 110 Mb/s, 能够完成采样率 64 个点/秒的 3 000 个以上参数的实时提取和工程量转化及实时发送等功能, 这些技术要求给机

载实时系统的设计与实现提出了一定的挑战。

机载网络数据实时处理系统实时接收机载数据采集系统核心交换机发出的网络数据, 并根据试飞前定义的采集器配置文件进行网络包解析和监控参数过滤, 将过滤后参数进行工程量转换后分别发送至机上监控端, 在监控端物理量数据以数字、曲线、仪表等可视化方式进行显示, 并可实现数据的 100% 存储。

1 系统结构及原理

机载网络数据实时处理系统采用典型 C/S 架构, 实时接收机载数据采集系统核心网络交换机发出的网络数据包, 并根据试飞前定义的采集器配置文件进行网络数据包解析和监控参数的过滤, 将过滤后的监控参数进行工程量转换后分别发动到各监控终端进行进一步处理及显示。机载网络数据实时处理系统如图 1 所示。

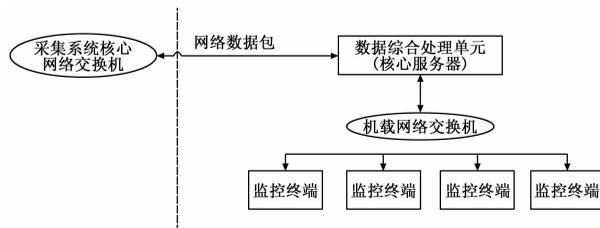


图 1 机载网络数据实时处理系统

收稿日期: 2017-06-21; 修回日期: 2017-07-22。

基金项目: 国防基础科研项目(JCKY2016205B006)。

作者简介: 刘语乔(1984-), 女, 陕西临潼人, 硕士, 工程师, 主要从事试飞数据处理方向的研究。

机载网络数据实时处理系统由数据综合处理单元(也即核心服务器)、监控终端和机载网络交换机组成, 通过千兆以太网实现各个子系统的互连。系统按照适应宽温、抗冲击振

动、电磁兼容性符合国军标等要求进行集成, 电源系统采用 28 V 直流供电。

核心服务器完成配置管理、网络数据接收、工程量转换、数据转发及存储的功能。服务器软件和监控软件均在 Borland C++ Builder 6.0 编程环境下开发。监控软件实时接收从核心服务器转发的网络数据, 实时地以预设的各种形式进行显示。

2 硬件设计

2.1 系统功能设计

机载网络数据实时处理系统设计具备以下主要功能:

1) 配置管理: 配合上位机完成配置管理功能, 上位机可以对核心服务器进行以下配置: 加载处理相关参数配置信息文件, 以 TCP/IP 方式对服务器进行 IP 地址配置等, 监视服务器丢包计数等工作状态, 对工程量数据进行监视^[5]。

2) 网络数据接收和存储: 通过网络交换机接收来自机载采集器的网络数据并进行存储, 速率可达 110 Mbps, 其中实时处理系统参数不少于 3 000 个。

3) 系统状态监控: 可发送服务器状态信息用于实时监控, 监控信息包括接收数据丢包技术、丢包率、位速率、文件大小、磁盘容量等状态信息。

4) 工程量转换: 根据参数配置信息, 将参数按照不同的类型、校准方式等进行工程量转换, 可设置的校准类型包括线性、点对、多项式等。

5) 数据网络转发: 将参数的物理量数据, 以网络包的形式通过网络交换机发送给监控台端。

6) 实时监控: 在监控台端, 可对所有实时监控参数进行显示, 显示形式有数字、文本、图表、仪表等。一般根据试飞工程师预先设计的实时处理任务书中的要求, 对显示内容进行选择和布局。所有专业实时监控软件需保持界面风格统一、时延等性能指标参数满足技术指标。

7) 自动启动: 服务器掉电重启后, 软件自动启动运行。

2.2 硬件设备设计

机载网络数据实时处理系统主要功能实现集中在核心服务器上, 所以核心服务器的硬件设计也是整个系统设计的重点。监控终端主要完成来自于核心服务器转发数据接收及参数测量量的显示。

机载网络数据实时处理系统的硬件设备包括核心服务器、监控终端和机载网络交换机。其中核心服务器是该系统的核心设备, 是系统主要功能的执行者, 实现机载网络包的实时接收与存储、物理量转换与转发等核心功能, 要求设备可靠性高、稳定性强、且满足高低温、振动、电磁兼容性指标的要求, 以适应试飞过程中机上各种恶劣环境。

核心服务器采用了基于双核处理器芯片、千兆以太网口的嵌入式计算机, 配以高性能的内存和大容量的固态硬盘。主机采用了 cPCI 架构, 该体系结构是当前标准化程度最高和实用性最好的体系结构。为了满足高带宽网络数据的实时接收以及多任务处理要求, 操作系统选用实时操作系统, 且该系统支持多核处理器。核心服务器各模块功能如下: 主控制器完成系统的配置加载、初始化、数据包接收, 参数工程量转换和数据转

发; 高速固态存储模块完成原始数据的存储, 同时可存储配置文件; 电源模块将 28 V 电源转换成系统各个模块所需的直流供电; 底板完成各个模块间以及对外接口的互连, 硬件框图如图 2 所示。

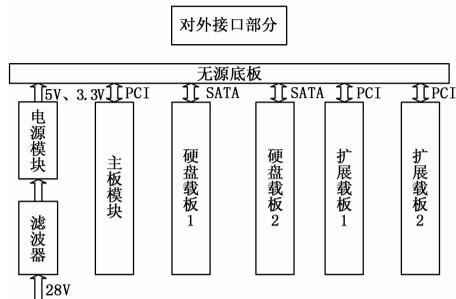


图 2 核心服务器硬件结构图

其中主板模块选用了 HD7703MB 这种高性能、多功能的单槽 CPU 板, 整板主要器件几乎都直接 SMT 表贴, 最大程度减少连接器的不可靠因素, 板载 Inter Core™ I73555LE CPU 四核处理器。

监控终端和机载网络交换机选用了成熟货架产片。其中监控终端选用了机载加固型工控机, 显示器也采用了能够强化散热、减震、抗冲击和电磁兼容的设计。机载网络交换机是系统中的重要设备, 实现多台采集器网络数据流的汇聚, 同时也可以实现数据流分流功能, 主要满足的技术指标有带宽 4 Gbps, 传输速率 100/1 000 M 自适应, MAC 表容量 16 K, 接口形式为航插, 满足 $-40 \sim +75$ °C 工作温度, 满足 GJB150.16~86 振动范围和 GJB151A-97 电磁兼容的要求。

3 系统详细设计

机载网络数据实时处理系统首先运行模块为配置加载模块, 将所需配置信息和参数组信息存储在缓存中, 并对核心服务器进行初始化配置, 然后创建数据流接收线程, 核心服务器对数据流参数进行提取、工程量转换, 转换结果通过网络发送给客户端。机载网络数据实时处理系统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地完成所有功能模块。其工作流程如图 3 所示。

3.1 配置加载模块

核心服务器上电启动后, 首先加载参数信息文件, 参数配置信息文件, 参数配置信息文件即为机载测试信息管理软件生成的 XML 文件。XML 文件中包含了参数数据包提取信息、校线信息以及监控参数列表等。

3.2 网络数据接收模块

网络数据接收模块需创建 UDP socket, 接收网络包数据。按顺序执行数据接收、系统状态获取和参数提取工程量转换。

数据接收按照环形缓存存储控制过程。首先设置环形缓存新位置, 接收到以太网数据后判断是否满 524 288 个字节, 如果是则建立新数据包, 填写包头信息后放入环形缓存, 如果不是则直接放入环形缓存, 放入环形缓存后再判断是否满 8 M 字节, 如果是则通知数据存储线程后设置环形缓存新位置, 如果不是则直接设置环形缓存新位置。

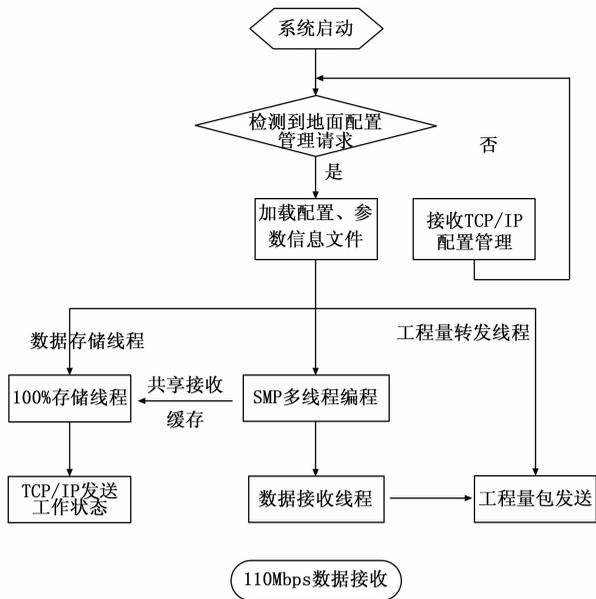


图 3 机载网络数据实时处理系统工作流程图

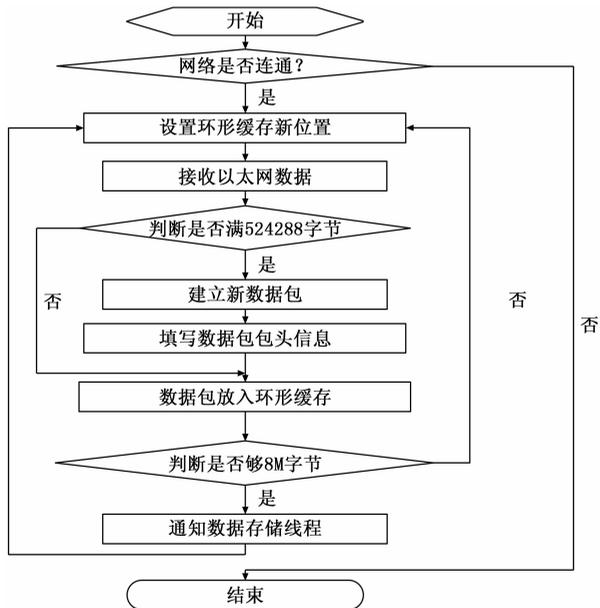


图 4 网络数据接收模块流程图

系统工作状态获取包括两个部分：丢包计数和接收位速率计算。

根据每个数据包中的 SeqNum 值可对丢包情况进行统计。接收位速率的计算方法为：5 秒钟内收到数据的字节数 * 8/5。

参数提取环节要重点关注课题要求的参数采样率和主帧频率，在参数配置信息文件中会给出监控要求的参数个数、监控参数列表和监控参数采样率信息。以监控参数要求采样率为 32 次/秒为例（监控参数采样率和主帧频率一般情况均为 2 的幂次方），当主帧频率为 32 时则每一帧提取一次数据；当主帧频率 > 监控参数要求频率时，主帧频率/监控参数要求频率 ≥ N（N 为大于 0 的整数），每隔 N-1 帧提取一次数据；当主帧频率 < 监控参数要求频率时，监控参数要求频率

/主帧频率 ≥ M（M 为大于 0 的整数），每个主帧数据提取 M+1 次。

软件上电后即加载参数配置信息文件，形成存放参数信息的结构体，将结构体带入参数提取和工程量转换软件进行处理，参数提取环节还需关注参数在主帧中的位置信息，即子帧号和字号，工程量转换环节则需关注参数的校准类型、取位、符号、系数等信息。

3.3 网络数据发送模块

网络数据发送模块与客户端监控软件通过 TCP 协议建立通信，监控参数名列表和经过转换的物理量以 UDP 通信方式发送到客户端监控软件。监控参数名列表中包含工程量转发要求的频率。工程量发送线程用看门狗定时器来控制，如果 1 秒内未接到用来控制发送频率的数据包，则选择新的数据包来控制。如果没有任何数据包到达，则不转发工程量包。

3.4 实时监控模块

在实时监控模块中，客户端实时接收从核心服务器发送的网络数据，从中挑选实时监控画面中所需的参数，实时进行显示，显示形式一般有曲线显示、数字显示、文本显示、仪表显示和信号灯显示。实时接收的网络数据包的格式如下：

```

Struct DataPacket{
int paraNum;
float hour;
float minute;
float second;
float ms;
float data[1020];
}

```

实时监控软件在 Borland C++ Builder6.0 编程环境下开发，主要完成开关量的取位判决并显示，多字节参数的合并计算等。其中，用动态链接库规范了参数的取位和合并等计算过程。实时监控模块配置了多个监控界面，各个监控界面根据专业课题进行了划分，界面之间可任意切换。

3.5 数据存储模块

数据存储模块主要完成数据记录文件的打开、存储、读取、检索和关闭等操作。按照整个系统的工作流程，首先软件需要结合地面配置管理软件工作，然后才能进行数据的 100% 存储。

地面配置管理的内容包括：服务器 IP 地址；接收参数信息文件；核心服务器控制与维护。

机载网络数据实时处理系统中使用两块固态硬盘对数据进行 100% 存储，两块固态硬盘互为备份。以磁盘操作的方式数据 100% 的存储在在第一块固态硬盘上，存储格式符合 IRIGB 第十章格式。在数据接收线程中，网络原始数据首先排列放置在 64 Mbytes 的环形缓存中，每满 8 Mbytes 设置数据准备好标志位真，数据存储线程检测到数据准备好标志为真时，从环形缓存中将 8 Mbytes 数据存储存储在磁盘上，并每隔 5 分钟关闭打开一次。

为了便于事后回放，按照固定长度将数据进行了分块存放。核心服务器每次上电重启时均会新建一个数据文件，中间

箱的设计，体积由原先的 32 U 同样减小为 14 U。

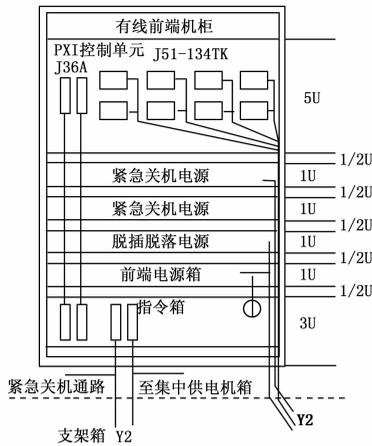


图 8 有线前端机柜集成示意图

3 试验结果与分析

3.1 集成化小型化程度高

采用基于通用模块化方案的大型空间飞行器地面供配电系统设计在实现功能需求翻倍的同时较大的缩减了系统体积，减少了接插件及设备间电缆的规模，简化了系统设计，且通过软件可实现所有硬件操控及测量功能，集成化程度高，易于运输。其与现有供配电系统的对比情况见表 1。

表 1 应用效果对比

项目	现有系统	通用模块化系统
状态量规模	几十路	几百路
设备种类	11	7
通用化设备比例	27.3%	57.1%
系统体积	3 个机柜共计 116U	三个机柜共计 70U
设备间电缆数量	60	35
接插件数量	120	75

(上接第 242 页)

不打开或新建数据文件，文件在新建时并不知道其大小，每隔 5 分钟关闭、打开一次，并将内存中数据转存到磁盘上，这时再计算文件大小，并写入目录头文件大小信息中。数据中的绝对时间是从网络数据中提取出来的，并打入数据包中，包括文件头的时间数据包和每个数据包中的时间标志。

4 系统应用效果

机载网络数据实时处理系统可直接与机载测试采集网络连接，完成机载网络数据包的解包，支持不低于 64 个点/秒 3000 个以上参数的实时提取和工程量转化以及参数实时转发等功能。工程量转换功能可完成多种类型参数信息校准，包括 ARINC429、1553B、422、664 等总线类型参数和加装传感器参数，可完成线性、多项式、双曲线、抛物线、点对等多种工程量转换算法。

机载网络数据实时处理系统已经过多个架次科研试飞验证，验证表明：系统稳定可靠，数据实时处理能力完全达到了现阶段试验机载测试系统数据处理性能的要求。解决了当前大客等型号机型体积大、测试参数多、测试参数分布散、系统

3.2 鲁棒性替代性效果好

基于通用模块化方案，供配电系统设备间的连接关系更加简单，容易维护，稳定性提高、鲁棒性增强，且可替代性及可扩展性比原有系统有较大提升。如现有通用化设备的比例由 27.3% 提高到了 57.1%，且专用设备之间采用的模块化设计思路，保证了专用设备间的可替代性及模块级相互备份，从而进一步提高了系统的鲁棒性。

4 结束语

采用通用模块化的设计方案可以减少系统重复性开发工作、提高型号间不同设备相同功能的模块级互换和重用，同时可以减少设备备份数量，提高系统的鲁棒性。本文所阐述的通用模块化设计思路已经在大型空间飞行器供配电系统中得到了应用，在实现功能的同时系统体积大幅减少、稳定性增强、效果显著。

参考文献：

- [1] 金星, 洪延姬, 王旭, 等. 发射场供配电系统可靠性分析 [J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25 (1): 119-120.
- [2] 赵岩, 杨友超, 张翔, 等. 航天器高可靠智能供配电系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (8): 2776-2781.
- [3] 管学兰. 卫星供配电测试设备设计与实现 [D]. 西安: 西安电子科技大学.
- [4] 张翔, 徐海运, 陈春燕, 等. 飞行器供配电系统通用测试方案设计 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (10): 3126-3128.
- [5] 李立. 卫星供配电测试设备接口设计技术 [J]. 航天器工程, 2002, 11 (1): 66-72.
- [6] 张洪光. 航天器供配电测试设备硬件模块化、软件配置化设计思路 [J]. 航天器工程, 2010, 19 (1): 72-76.
- [7] 张黎明, 孙宁, 于慧亮, 等. 基于 PXI 的卫星综合测试系统的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 16 (1): 27-29.
- [8] 陈锡辉, 张银鸿. LabVIEW8.2 程序设计从入门到精通 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.

实时性要求更高等问题。

5 结语

经科研试飞验证，机载网络数据实时处理系统性能稳定，并具有良好的扩展性，在大客等大型飞机试飞中必将发挥重要的作用。

参考文献：

- [1] 程佩青. 数字信号处理教程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [2] Lyons R G. Understanding digital signal processing [M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2004.
- [3] 袁炳南, 张建琳. PCM 与网络数据采集系统技术分析 [J]. 测控技术, 2009, 28 (4): 29-31.
- [4] 段宝元, 穆永花, 穆永河. 以太网在新支线飞机试飞测试中的应用 [J]. 测控技术, 2011 (30): 91-93.
- [5] Stevens W R. UNIX 网络编程: 套接口 API [M]. 杨继张, 译. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [6] Richter J. Windows NT 高级编程技术 [M]. 郑全战, 等译. 北京: 清华大学出版社, 1995.