

直升机地面联合试验振动监测系统的开发及应用*

Development and Application of Vibration Monitor System of Helicopter Ground Integrated Test

中航工业直升机设计研究所 白莉 龙贵华 金坤健 秦强 马峰涛
北京瑞风协同科技股份有限公司 颜思森 刘昕

[摘要] 针对直升机地面联合试验的振动监测需求,开发了一种基于PXIe测试总线设备、Exlab数采软件、UDP网络传输模式和LabVIEW虚拟仪器的振动监测系统。本文描述了直升机地面联合试验振动监测系统的设计、开发和实现,并通过前期调试和正式试验验证了系统的可行性和有效性。

关键词: 振动监测 PXIe总线 UDP LabVIEW

[ABSTRACT] According to the vibration monitor request of Helicopter Ground Unite Test, we develop a vibration monitor system based on PXIe test bus instruments, DAQ software “Exlab”, UDP and LabVIEW virtual instruments. Here we describe the design, develop and accomplishment of the system, and prove its feasibility and validity by formal and informal tests.

Keywords: Vibration monitor PXIe bus UDP LabVIEW

直升机振动水平是影响直升机安全性能、舒适性、使用寿命和机载各部件仪表工作环境的主要因素^[1]。振动测量与监视是直升机地面联合试验中的重要组成部分,对各被测部件的振动监测贯穿着整个试验过程。一方面,在试验过程中监测振动可以及时发现试验件的机械故障避免事故的发生;另一方面,试验过程中测量的振动数据经过分析后,可以为直升机部件减振改进提供依据。

市面上有众多成熟的振动采集商业化模块,如Dewetron、LMS等知名测试厂商的振动测量模块,然而直升机地面联合试验中的振动监测具有实时监测参数多、振动监测方式多样化、存储数据海量等特色,商业化模块往往价格昂贵而且有监测功能较难订制的局限性,因此针对直升机地面联合试验,应采用购买通用测试硬件进行二次开发的方式,设计出满足试验需求的高性能高性价比振动监测系统。本文描述了一种基于PXIe测试总线设备、UDP网络传输模式和LabVIEW虚拟仪器

的直升机地面联合试验振动监测系统。

1 系统结构设计

直升机地面联合试验振动监测系统由信号采集、网络传输和振动监视3个功能模块组成,如图1所示。信号采集模块通过测试硬件采集被测部件的振动数据,然后由数据采集软件将试验数据存储于计算机硬盘,同时把数据打包发至网络;网络传输模块采用了UDP网络协议的广播方式,把信号采集模块传出的数据包通过千兆交换机发给每个网络端口,并使用客户端程序接收;振动监视模块则把收到的数据包转化处理,通过用LabVIEW编写的虚拟仪器对处理后的试验数据进行实时的在线分析和监视。

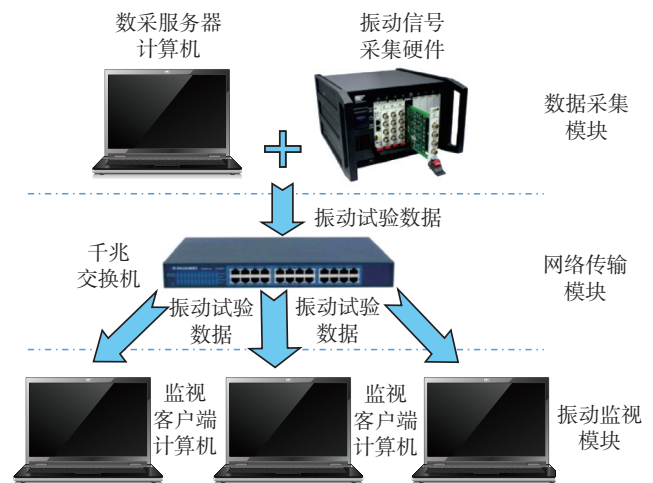


图1 系统总结结构图

Fig.1 Total structure of system

本系统的优势在于,通过网络实时传输试验数据并在线监测,只需要一套振动测试设备作为信号采集模块,就可以让试验人员在多个计算机客户端同时分析和监视振动参数。随着振动监视模块中客户端的增加,以不同方式同时受到分析和监测的被测振动参数可多达上百个,如果采用Dewetron或LMS等厂商的商业化模块作为振动监测系统,且不提特殊的监测需求是否能实

* 国家科技支撑计划课题(2012BAH35F03)资助。

现,仅监测如此多参数所需的模块费用就昂贵得惊人。

2 系统设计实现

2.1 信号采集模块

此模块由 VTI 的 PXIe 总线振动采集设备和 Explab 数据采集软件组成。

2.1.1 信号采集硬件

本系统采用的信号采集硬件是 VTI 的 PXIe 测试总线设备,如图 2 所示,包括 PXIe 机箱 CMX09、千兆以太网控制卡 EMX-2500、动态信号采集卡 EMX-4250 以及对应采集卡的转接盒 EMX-4016。

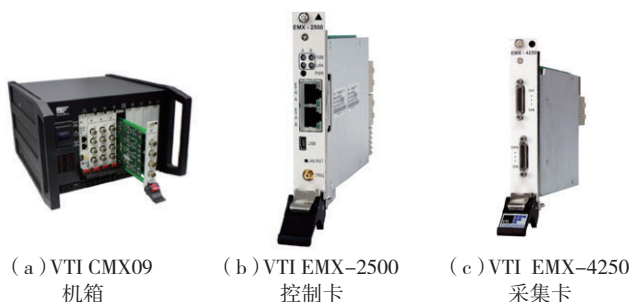


图2 信号采集硬件

Fig.2 Signal acquisition hardwares

CMX09 是一款结构紧凑的 4U 高 9 插槽机箱,系统带宽可达 8GB/s; EMX-2500 是首款基于 PXIe 的千兆以太网控制卡,拥有 100MB/s 的稳定吞吐量,并且支持采集触发总线和 IEEE-1588 时钟同步。把 EMX-2500 插入 CMX09 后, PXIe 机箱就可以如同 LXI 仪器一样通过网络实现远程测控。

EMX-4250 采集卡拥有 16 路模拟输入通道,每通道有 204.8kHz 的最高采样率和 24 位 A/D 转换,采集量程范围从 100mV 到 10V; EMX-4016 是对应 EMX-4250 及其同系列采集卡的 16 通道调理转接盒,它可以为采集卡提供外部触发和外部校准,并支持 IEPE 和电压信号的测量,使用 EMX-4016 转接盒配合 EMX-4250 采集卡,可以满足直升机地面联合试验的所有振动测试需求。

在本系统中,一台 CMX09 可以插入 8 块 EMX-4250 和 1 块 EMX-2500,因此单台 CMX09 机箱可最多拥有 128 个振动采集通道,并且可以通过网络同其他 CMX09 机箱组成同步的振动测试硬件模块,这种振动信号的采集模式不但性价比高,而且具有简易良好的扩展性。

2.1.2 数据采集软件

本系统采用的数据采集软件为同样是 VTI 货架产品、由北京瑞风协同科技有限公司开发的 Explab,图 3 为该软件特色之一的电子表格格式通道配置。Explab 集

设备接入、参数配置、数据采集、实时显示、数据回放、数据导出、数据分析、传感器管理、算法管理等功能于一体,是一款功能完整的交钥匙数据采集系统软件。

图3 Explab的电子表格格式通道配置

Fig.3 Spreadsheet channel configuration of Explab

Explab 提供 4 个不同功能的版本,分别是:基本版、标准版、专业版和企业版。不同版本的 Explab 支持的 EMX-4250 通道数见表 1。

表1 Explab支持EMX-4250通道数

Explab 版本	基本版	标准版	专业版	企业版
EMX-4250 支持通道数	96	384	1000	无限制

由上可见,标准版以上的 Explab 就可以满足直升地面联合试验振动监测系统的通道需求。

Explab 不仅可以完成试验数据的采集,还可以作为试验数据的服务器软件把数据打包发送至网络,提供给网络上的客户端进行处理和分析。

此外,需要说明的是, Explab 软件为每块采集卡提供了一组时间通道数据,因此 1 块 EMX-4250 在软件中的通道数为 17 通道。

2.2 网络传输模块

本系统使用 UDP (用户数据包协议)作为试验数据的实时网络传输协议,UDP 协议的主要作用是将网络数据流量压缩成数据包的格式。一个典型的数据包就是一个二进制数据的传输单位。每一个数据包的前 8 个字节用来包含包头信息,剩余字节则用来包含具体的传输数据。在本系统中, Explab 把每块 EMX-4250 采集卡采集到的数据按一定的采集遍数打成包,然后传输到网络上。数据包部分信息格式见表 2。

UDP 是一个无连接协议。不同于连接型的 TCP (传输控制协议),UDP 不提供数据传送的保证机制,存在数据丢包的可能性,而且不能确保数据的发送和接收顺序,因此 UDP 通常被称为不可靠的传输协议。但事实上,UDP 数据丢包和数据乱序的现象通常在网络环境较差

表2 实时数据包格式

信息	起始字节	字节长度	类型	含义
包头	0	4	UInt32	每一个数据包的开始标记
包长度	4	4	UInt32	从包头到包尾所占字节数
...
通道数	34	2	UInt16	通道数
数据遍数	36	2	UInt16	每包所含数据采样遍数
采样率	38	8	DOUBLE	每个通道每秒的采样点数
...
通道序号列表	50	2 × 通道数	UInt16	此包所有通道的代号列表
数据	50+2 × 通道数	4 × 通道数 × 数据遍数	SINGLE	此包的测量或计算数据
...

的情况下发生,如果排除了网络环境因素的影响,UDP具有TCP不可匹及的速度优势。

除此以外,由于UDP传输数据不建立连接,因此也就不需要维护连接状态(包括收发状态等),一台服务器可同时向多个客户端传输相同的消息,非常符合直升机地面联合试验振动监测系统中振动监视模块多个客户端同时监视被测参数的需求。

UDP的吞吐量不受拥挤控制算法的调节,只受应用软件生成数据的速率、传输带宽、源端和终端主机性能的限制。为了系统建立良好的UDP网络环境,除了应当提高计算机等硬件的性能外,更需要通过软件建立一套高效可靠的数据包传输方案。

首先,为了保证试验实时监视的有效性,数据发送的吞吐量不能小于数据采集的吞吐量。在Explab中,一块EMX-4250每秒钟采集的数据会被打成10个包发送至网络,EMX-4250在直升机地面联合试验中最常用的采集频率为6400Hz,数据格式为4个字节的单精度浮点型数值,每个数据包的长度约为:

$$6400 \times (16+1) \times 4 \div 10=43520B。$$

理论上,UDP协议中的数据包最大长度为64kB,但是在实际的应用中往往会小于这个值,在本系统中,数据包最大长度限制为56kB,根据上面的计算结果可知数据包的长度不会超出限制,因而数据发送的吞吐量不会低于数据采集的吞吐量。

其次,软件发送数据的流量不能超过硬件的网速限制,如表3所示,本系统的硬件网速理论上限为1.0Gbps,实测可以稳定在50~80MB/s,对于每块EMX-4250大于0.5MB/s的流量而言显得绰绰有余。

表3 计算机等硬件配置

硬件	主要性能
服务器计算机	CPU : Intel e5 3.60GHz 内存:3.42GB 网卡:1.0Gbps
客户端计算机	CPU : Intel i5 3.20GHz 内存:3.47GB 网卡:1.0Gbps
交换机	24 端口、1.0Gbps 流量每端口

最后,为了避免出现网络拥挤的情况,客户端计算机软件的数据包处理频率不能低于服务器计算机数据采集软件发送数据包的频率。本系统客户端计算机的数据包接收程序使用LabVIEW语言编写。由于数据包要经过复杂的运算才能转化成振动监视模块所需要的数据,因此程序里使用了LabVIEW中的队列结构来实现数据包的接收和处理。队列最常见的应用是在多线程和多个虚拟仪器(VI)之间传递数据,在传递数据的同时也调节了各个线程之间的运行速度^[2]。

如图4所示,从网络上接收到的UDP数据包写入队列和队列中的数据包取出进行转换处理这两个操作被放入了不同的线程运行。其中,后一个线程加入了2ms的延时,理论上1s可以转换处理近500个数据包,对于Explab软件中每块EMX-4250每秒发送10个数据包的速率而言,本系统的网络传输可以支持20~30块EMX-4250的同步在线监测。

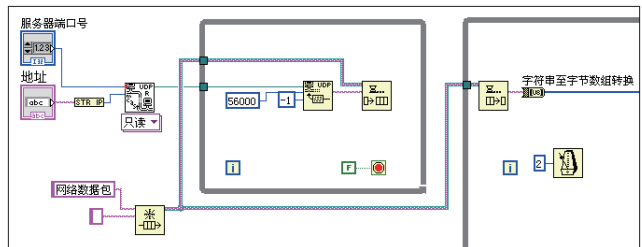


图4 客户端数据包接收

Fig.4 Data pack receiving of client

2.3 振动监视模块

此模块通过LabVIEW虚拟仪器实现了直升机地面联合试验实时的振动分析和监视功能。LabVIEW是美国NI公司推出的基于图形化程序设计的语言,一个LabVIEW程序就被称作一个虚拟仪器(VI)。在这里,虚拟仪器通过软件替代传统仪器完成了数据分析处理、结果显示等工作。

2.3.1 数据包的转换处理

数据包被客户端程序接收以后,要转换处理成可分析和显示的数据格式,才可以实现试验数据的在线监视。转换处理的过程由两个主要步骤完成。

第一步是读取数据包的信息,并把客户端需要的试验通道数据取出。数据包由字符串转换成字节数组后,程序根据表 2 中信息的起始字节和字节长度取出各信息的字节数组,按其类型转换回信息再进行处理,如从第 4 个字节起取 4 个字节转换成 32 位无符号长整型数值,就可以得到数据包长度信息,将该信息与收到的数据包真实长度作对比,就可以判断得到的数据包是否完整。

一个数据包最多可包含 17 个通道的数据,并不是每个客户端都需要用到数据包的所有通道,对此,程序需要读取并转换出数据包中第 50 个字节开始的通道序号列表信息,通道序号列表指的是该数据包中包含的 EMX-4250 采集通道在 Explab 软件中的全部通道编号,每个通道序号在系统中都是唯一的。程序把客户端需求的所有通道序号(通常从客户端计算机的配置文件中读取)逐一与数据包的通道序号列表作对比,把本包中需要用到的通道序号都放入一个数组,然后根据该数组把客户端需要用到的试验通道数据取出。

第二步是把数据包里取出的数据进行拼接。因为 Explab 每秒钟给一块 EMX-4250 发送 10 个数据包,所以一个数据包可以看成一块 EMX-4250 在 0.1s 内的时域数据。在试验的实时监测中,时域数据的刷新时间要大于 0.1s,因此程序需要根据客户端在不同监视需求下的时域数据刷新时间把几个数据包的数据拼接起来,拼接以后的数据才可以用于虚拟仪器的分析处理和结果显示。

2.3.2 数据的分析和显示

直升机地面联合试验的振动信号监测需要对在线数据进行各种形式的分析和结果显示,主要包括数据的时域分析、频域分析和计算试验参数在各频段下的振动总量。

(1) 数据的时域分析:把数据转换成波形,并计算出波形的平均值、峰峰值、最大值、最小值等信息,将波形和其他信息显示在虚拟仪器的控件上,图 5 为其软件实现。

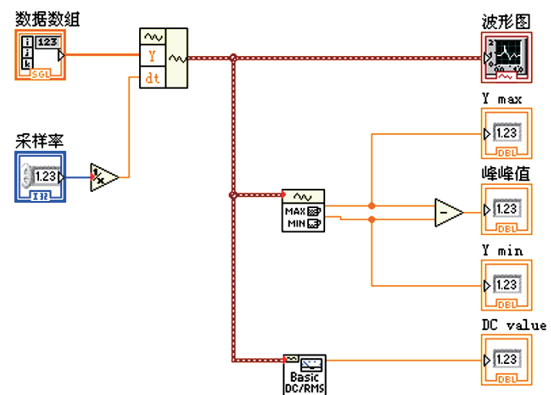


图5 数据时域分析
Fig.5 Time domain data analyzation

(2) 数据的频域分析:数据进行加窗处理后转换成波形,波形做 FFT 后可以得到频域信号数据。对频域信号的幅值进行峰值检测,可以得到振动信号的主要峰值,并通过反向检索获得主要峰值对应的频率值。数据的频域分析是常用的振动信号监视方式,除了把分析后的结果显示于虚拟仪器的控件上面,监视振动信号的使用者也可以通过配置文件或者操作界面上的控件延长做 FFT 的数据时长,提高其频率分辨率,使频域分析更加精确,图 6 为其软件实现。

(3) 最大单幅峰值振动速度总量计算:发动机部件的最大单幅峰值振动速度总量是地面联合试验中监测的重要参数,除了用于监视被测部件的机械故障,它们还用于计算发动机部件的疲劳损伤,并且是发动机部件减振改型的重要试验依据。

测量振动的总振级,通常是测量振动的有效值^[3]。

设周期振动 $x = x(x + T)$ 可以分解为:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n x_i \sin(i\omega t + \phi_i),$$

那么,它的有效值为:

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [\sum_{i=1}^n x_i \sin(i\omega t + \phi_i)]^2 dt}.$$

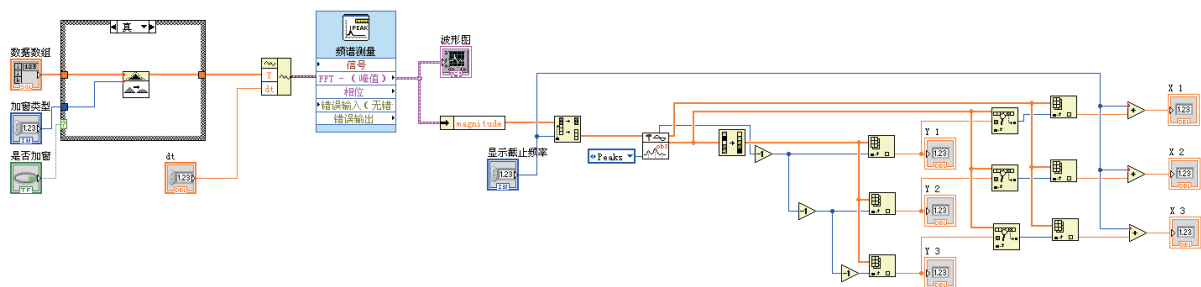


图6 数据频域分析
Fig.6 Frequency domain data analyzation

由上式可知,把直升机地面联合试验中被测部件的时域振动速度信号取有效值就可获得其振动速度总量,再按正弦信号的有效值和半峰值的关系转换,可以把振动速度总量转换成最大单幅峰值振动速度总量。此外,试验中需要对被测对象的多个频段的最大单幅峰值振动速度总量进行监测,因此,振动速度信号的时域数据在转换之前,应当进行滤波,如图7所示。

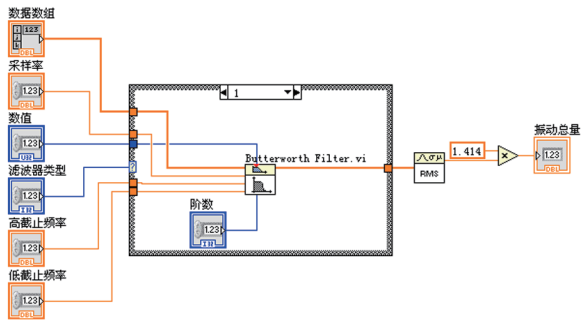


图7 最大单幅峰值振动速度总量计算

Fig.7 Total vibration calculation of single speed peak

3 系统功能验证

振动监测系统在直升机地面联合试验之前进行了功能验证的调试,给 EMX-4250 的全部通道加上标准振动源信号,通过客户端的虚拟仪器逐一检查振动信号,所有通道均可以正确监测到标准信号,系统功能得以初步验证。进入试验阶段后,系统可以正确地监测试验被监测振动信号,如图8、9所示,证实了系统功能的有效性。

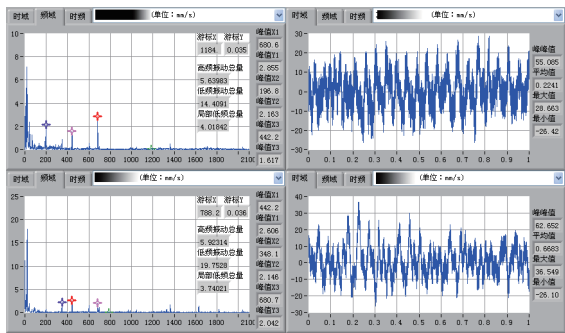


图8 在线试验数据的客户端监视界面(局部)

Fig.8 Online data monitor client interface (partial)

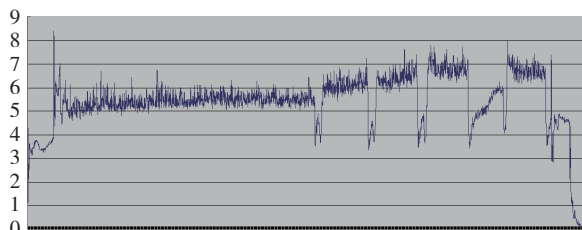


图9 客户端记录的最大单幅峰值振动速度总量数据

Fig.9 Single speed peak total vibration data saved by client

4 结束语

通过振动监测系统在直升机地面联合试验中的应用,进一步说明系统可以满足试验的振动信号监测需求;基于PXIe总线的测试设备和Explab软件组成了高性能高性价比的数据采集系统;UDP网络协议提供了多个客户端同时监视试验被测参数的模式;LabVIEW虚拟仪器通过软件替代传统仪器完成了数据分析处理、结果显示等工作。本系统较于商业化振动采集系统,不但降低了开发成本,还具有实时监测参数多、振动监测方式多样化等多方面的优势,本系统的开发模式对今后的试验台振动测试系统设计都具有可参照性。

参考文献

- [1] 尹春望,童国荣.直升机振动水平控制技术途径探讨.直升机技术,2009(4):28-32.
- [2] 陈树学,刘莹.LabVIEW宝典.北京:电子工业出版社,2011.
- [3] 李德葆,陆秋海.工程振动试验分析.北京:清华大学出版社,2004.

(责编 深蓝)

(上接第87页)

5 结论

单台份航空发动机IETM数据量庞大,为实现生命周期的闭环管理,本文重点针对动态信息建立单台份IETM的数据模型,在S1000D标准描述的数据模块的基础上扩充数据模块关系段,建立独立于任何数据模块的XML文档和关系数据库映射,从而实现IETM开发中所有数据模块与数据模型的转换关系,并讨论查询指定时间段给定物料信息节点维修信息的搜索算法。对于整个IETM系统,数据模型的建立以及独立于模式的映射关系尤为重要。

参考文献

- [1] 王旭,李文川.制造业新理念——闭环产品生命周期管理.中国机械工程,2010,21(14):1687-1693.
- [2] 梁伟杰,杜晓明.面向产品生命周期管理的交互式电子技术手册建模.计算机集成制造系统,2008,14(11):2268-2276.
- [3] Jun H B. Product life-cycle metadata modeling and its application with RDF//IEEE transactions on knowledge and data engineering,2007,19(12):1680-1693.
- [4] 姜莉莉,彭和平.XML文档和关系数据库在IETM开发中的应用.微计算机信息,2009,25(10):28-30.
- [5] ASD S1000D:International specification for technical publications utilizing a common source database Issue 4.0 [S].
- [6] 钟诗胜,付旭云.面向航空公司的发动机维修数据管理模型.计算机集成制造系统,2010,16(15):1096-1102.

(责编 谷雨)