

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2019.02.003

基于 Measurement Studio 的民机颤振试飞 数据实时监控分析系统设计与研究

Design and Research of Real-time Monitoring and Analysis System for Civil Aircraft Flutter Data Based on Measurement Studio

毛 为 刘 涛 陈家益 高 祥 梁嘉羿/MAO Wei LIU Tao CHEN Jiayi GAO Xiang LIANG Jiayi
(中国商飞民用飞机试飞中心,上海 201323)
(COMAC Flight Test Center, Shanghai 201323, China)

摘 要:

颤振试飞是风险极高、多学科交叉的复杂试飞科目,其实时监控及分析显得极为重要。以某型国产民机颤振试飞为背景,基于 Measurement Studio 平台,设计开发了颤振试飞数据实时监控分析系统。系统集成半带宽法、快速傅里叶变换、小波转换等算法,实现了颤振数据的时频域分析、阻尼计算,并以文本格式在实时状态下记录了颤振数据,同时以多线程和 DataBinding 模型完成了分析结果的实时显示,为国产民机的安全试飞提供了技术保障。

关键词: 颤振; Measurement Studio; 实时分析; DataBinding

中图分类号: V217

文献标识码: A

OSID:



[**Abstract**] Flutter flight test is highly risky, and it is a complex experiment with multidisciplinary crossover. Its real-time monitoring and analysis is extremely important. Based on the domestic civil aircraft flutter test, this paper designs and develops a real-time monitoring and analysis system using the Measurement Studio platform. The system integrates algorithms such as half-bandwidth method, fast Fourier transform and wavelet transform to realize time-frequency domain analysis and damping calculation of flutter data. In addition, the system records flutter data in real-time with text format. At the same time, the system completes the real-time display of the analysis results with multi-threading and DataBinding model, which can provide technical support for the safe flight test of domestic civil aircraft.

[**Keywords**] flutter; Measurement Studio; real-time analysis; DataBinding

0 引言

颤振是由于结构在空气动力、惯性力和弹性力的耦合作用下而产生的一种具有破坏性的不稳定状态。飞机颤振则是由于机翼、尾翼或操作面等在气动力的作用下产生的振动现象。飞机颤振通常会导致灾难性的结构破坏,甚至几秒钟内导致飞机解体,航空史上曾发生过多起因颤振而导

致的飞机事故^[1-2]。因此,在现代飞机的设计、制造和试飞工作中,颤振的实时监控和分析是十分重要的。

本文以某型国产民机颤振试飞为背景,基于 Measurement Studio 设计开发了颤振试飞数据的实时监控分析系统,实现了颤振数据的时域动态显示、幅频分析、阻尼计算及数据的实时存储,为国产客机的安全试飞提供了技术保障。

[**基金项目**] 大型民机试飞数据高速实时处理及异常状态检测分析平台(17511105000)。

1 系统结构

系统的实现依赖于 Measurement Studio 平台。Measurement Studio 是美国国家仪器公司 (NI) 开发的与 .Net 紧密结合的开发组件,是著名软件 Labview 的“.Net 版”,该平台提供了多种数学运算、信号处理算法。

系统结构如图 1 所示,包括数据转发服务器、数据库、应用服务器和文件服务器等核心设备,分别实现数据接收转发、实时分析、实时存储、实时显示等四大功能。

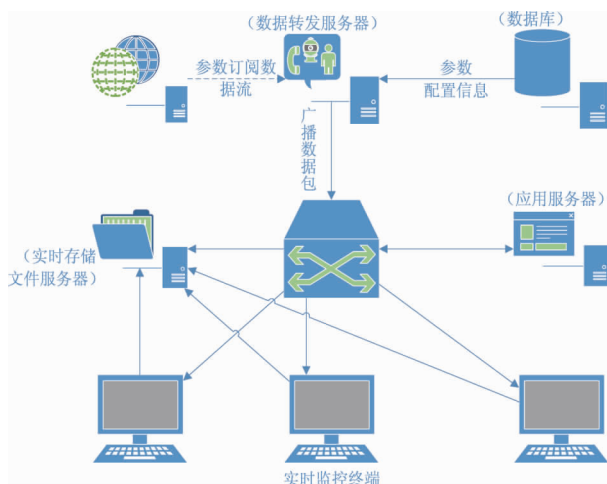


图 1 系统结构

1) 颤振数据的接收和转发由系统中的数据转发服务器实现。数据转发服务器首先访问数据库,提取颤振参数信息,如参数名称、采样率、参数索引等,然后订阅上游系统的相关参数,实时解析后将数据打包成广播数据包通过网络交换机发送至文件服务器、应用服务器和实时监控终端。

2) 应用服务器是系统的计算核心,集成了傅里叶变换、小波、阻尼计算等分析算法。完成相关分析后,应用服务器将计算结果传输至各个实时监控终端进行显示。

3) 文件服务器的主要作用是响应实时监控终端的用户指令,将制定时间段的颤振数据以文本文件格式进行实时存储,以使用户进行二次分析。

4) 监控程序运行在实时监控终端上,直接面向于试飞工程师、飞机设计人员、指挥人员,是颤振数据时、频域结果呈现的载体。

数据在整个系统中的流转依靠事件的多播委托模型实现^[3-4],如图 2 所示。工作流程为:转发服务器解

析数据后封装成字典并通过委托“Action <T,U>”发布成事件“OnReceiveDataChanged”;运行于应用服务器上的“ApplicationServer”对象订阅“OnReceiveDataChanged”事件,获取数据后分别完成快速傅里叶变换、小波分析、阻尼计算等时频域运算,同时发布事件;实时监控终端订阅转发服务器、应用服务器上的各个事件,完成计算结果的提取,通过控件实时进行显示。

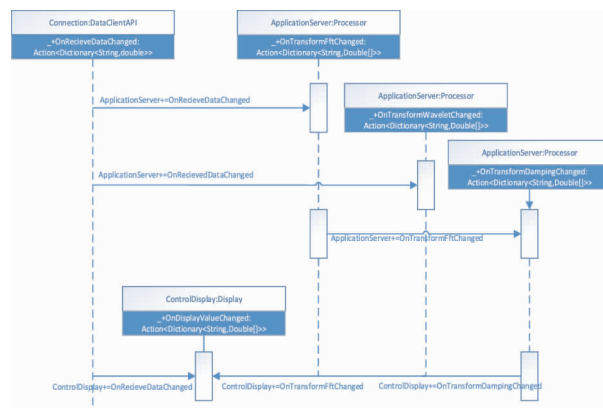


图 2 试飞数据事件多播委托模型

2 数据库及转发服务器

本系统使用 MongoDB 维护试飞参数的相关信息,数据库 FlightTest 中包括高频的颤振参数以及低频的常规参数。不同采样率的试飞参数被保存在 Flutter_Parameters 与 Flight_Test_Parameters 两个不同的集合中,集合结构如图 3 所示。

```
Flutter_Parameters:
{
  "ParameterName": "P1",
  "SensorUpperLimit": -250,
  "SensorLowerLimit": 250,
  "SamplingRate": 512,
  "ParameterIndex": 0
}
Flight_Test_Parameters:
{
  "ParameterName": "P2",
  "ParameterIndex": 0
}
```

图 3 MongoDB 集合结构

数据转发服务器利用 mongoVcsharp-driver 驱动进行参数配置信息的访问和提取,实现代码如图 4

所示。

```

Algorithm: Query configuration information
Initialization: strconn←mongodb://127.0.0.1:27017",
dbName←"FlightTest",
server←MongoDB.Driver.MongoServer.Create(strconn),
db←server.GetDatabase(dbName),
col←db.GetCollection("Flutter_Parameters");
query←new QueryDocument {
    { "ParameterName","P1"}
};
Return result←col.FindAs<Flutter_Parameters>(query);

```

图4 Mongo 信息提取过程

数据转发服务器根据图4返回的配置信息解析出相关参数后形成以参数名称为主键的字典,随后发布事件对象,等待应用服务器等设备的订阅。整个过程的伪代码如图5所示。

```

Algorithm: Data broadcast
Initialization: recieveData←udpclient.recieve(remote),
Dictionary_Params←recieveData.ConvertToDictionary()
OnRecieveDataChanged←EventHandle <EventArgs>
If Dictionary_Params.Count > 0 then:
    If OnRecieveDataChanged != null then:
        OnRecieveDataChanged.invoke(Dictionary_Params)
    End If
End If

```

图5 数据广播过程

3 应用服务器

应用服务器是系统的核心设备,是颤振参数的计算中心。计算过程包括幅频分析以及阻尼计算。

3.1 幅频分析

幅频分析是颤振试飞监控中的重要手段,应用服务器通过调用 Measurement Studio 中 Analysis 命名空间下的 Dsp. Transforms. RealFft 方法实现快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform,缩写为FFT),计算过程可以描述为“ComplexDouble[] fft_result = NationalInstruments. Analysis. Dsp. Transforms. RealFft (dataSource. ToArray(), false, fft_size)”。

其中:

- (1) dataSource: 颤振信号的时间序列;
- (2) fft_size: 进行FFT运算的数据量;
- (3) fft_result: FFT的结果,是一个长度为fft_

size的复数数组;

(4)根据FFT算法的映射关系,变换后的振动幅值与fft_size的关系是 $|fft_result[0:N]| * 2/fft_size$ 。

FFT功能模块的测试使用平稳正弦周期信号作为输入,复合信号的幅值和频率分别为:50和50 HZ,40和15 HZ以及30和10 HZ,信号采样率为512,加Hanning窗,计算结果如图6所示。

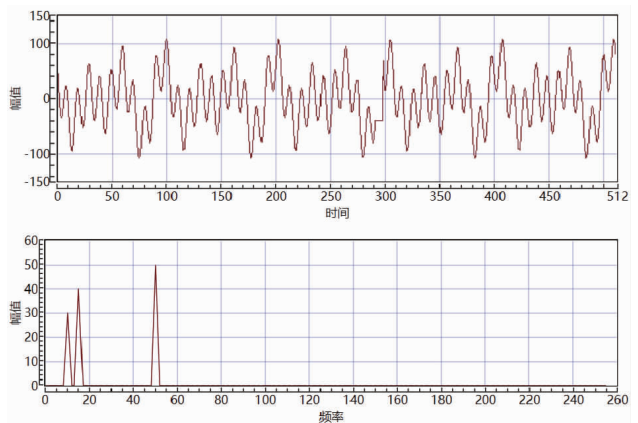


图6 基于平稳信号的FFT测试结果

3.2 阻尼计算

系统在完成FFT计算后,利用幅频结果计算阻尼。阻尼的计算采用半带宽法,计算过程如图7所示。

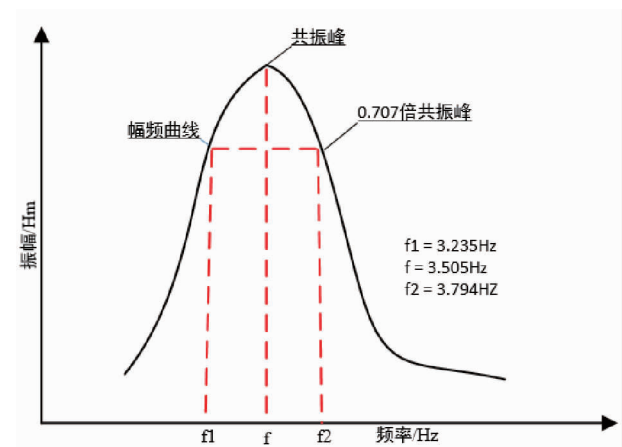


图7 半带宽计算阻尼系统示意图

根据图7的计算过程,阻尼系数运算步骤为:

- (1)找到频谱中的各个共振峰,记录共振峰峰值max以及对应的中心频率 f ;
 - (2)0.707倍共振峰峰值与共振峰上升沿、下降沿的交点,记录交点对应的频率 f_1, f_2 ;
 - (3)根据公式 $\xi = (f_2 - f_1) / f$ 计算阻尼系数。
- 可见计算阻尼系统的关键在于找到共振峰所对

应的中心频率。实现策略如下：

(1) 对 FFT 后的幅频结果求离散二阶导数, 提取 $f''(\omega) = 0$ 时的索引形成结果集合 Stagnation-Point, 即为所有波峰、波谷点对应的频率;

(2) 对 FFT 后的幅频结果求解离散一阶导数 (当一阶导数大于 0 时单调递增), 当 $f'(\omega_n) > 0$ 且 $f'(\omega_{n+1}) < 0$, 提取共振峰频率 ω_n , 对应的峰值为 $\text{fft_result}[\omega_n]$, 形成点 $C(\omega_n, \text{fft_result}[\omega_n])$;

(3) 轮训集合 StagnationPoint, 找到距离 ω_n 前后最近的两个点 ω_a 和 ω_b , 并构建从 ω_a 到 ω_n 、 ω_n 到 ω_b 的频率集合和幅值集合;

(4) 调用 NationalInstruments. Analysis 命名空间下的 PolynomialFit 方法对共振峰两侧的上升及下降沿进行二次拟合, 求解拟合后二次函数值为 $0.707 * \text{fft_result}[\omega_n]$ 的根, 即为对应的 f_1 和 f_2 ;

(5) 利用 $|f_2 - f_1| / \omega_n$ 计算阻尼系统。

4 文件服务器

文件服务器的主要作用是响应用户操作对所有的颤振数据进行实时存储, 工作流程如图 8 所示。

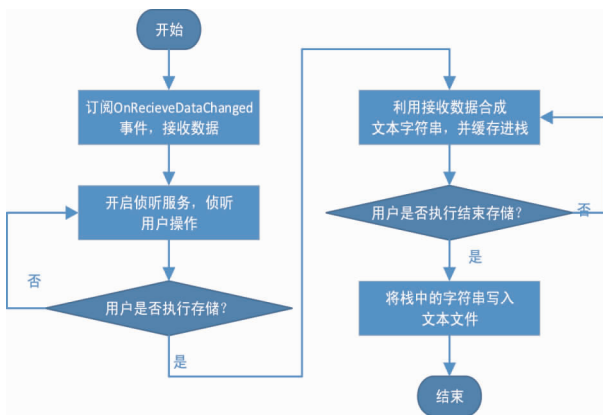


图 8 文件服务器工作流程

按照图 8 的流程, 文件服务器侦听所有监控终端的数据存储请求, 通过线程池为每一个监控终端分配存储线程, 当用户触发存储请求时开始缓存数据字符串, 直到用户停止存储。缓存后的数据通过属于各个终端的独立线程写入指定的文件。

5 结果显示

颤振数据的时域、频域结果通过监控画面的形式实时显示。作为直接面向试飞工程师、指挥人员的应用, 监控画面的设计尤为重要。本系统立足于

WPF 框架, 采用 Measurement Studio 组件中的 Graph 控件作为时域曲线、频谱结果的显示载体, 画面布局如图 9 所示。

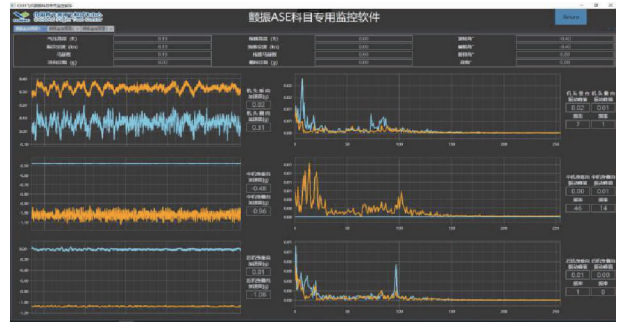


图 9 颤振参数实时监控画面布局

整个系统的数据传播和流转依靠“发布-订阅”事件模型, “存在”于辅助线程的数据或结果则利用“DataBinding”和“Action < T, U >”委托传递给主线程上的 Graph 等控件, 实现伪代码如图 10 所示。

Algorithm: Result display

```

Initialization: result, action ← Action() => graph.datasource = result
If SamplingRate > 60 then:
    this.Graph.invoke(action)
Else:
    this.Graph.SetBinding(DataSourceProperty, new Binding(){
        Source = result})
End If
  
```

图 10 显示控件的数据驱动

6 结论

颤振试飞数据实时监控系統通过试验验证, 相关测试结果见表 1。

表 1 系统测试结果

| 测试项目 | 测试结果 |
|---------|---------|
| 参数刷新率 | 512HZ |
| 系统延时 | ≤ 150ms |
| 驱动终端数量 | 20 |
| 数据存储完整率 | 100% |

本文设计的颤振试飞参数实时监控系統实现了: 颤振参数时域状态的实时监控, 颤振信号的频域分析和阻尼系统计算, 颤振试飞数据的实时存储。

参考文献:

- [1] 陈奎孚,焦群英. 某型飞机颤振试飞数据的模态参数识别[J]. 航空学报,2003,24(6):526-530.
- [2] 卢晓东,霍幸莉,梁海州. 民用飞机颤振试飞技术研究[J]. 航空工程进展,2014,5(1):80-84.
- [3] 刘铁猛. 深入浅出 WPF[M]. 北京:中国水利水电出版社,2010: 35-50.
- [4] Matthew MacDonald. WPF 编程宝典[M]. 王德才,译. 北京,清华大学出版社,2013: 17-25.

作者简介

毛 为 男,副总工程师。主要研究方向:试飞测试。
SE-mail:maowei@comac.cc

刘 涛 男,硕士,工程师。主要研究方向:试飞数据实时处理。E-mail:liutao2@comac.cc

陈家益 男,硕士,助理工程师。主要研究方向:试飞数据管理。E-mail:chenjiayi@comac.cc

高 祥 男,硕士,助理工程师。主要研究方向:试飞数据管理。E-mail:gaoxiang@comac.cc

梁嘉羿 男,硕士,助理工程师。主要研究方向:试飞数据实时处理。E-mail:liangjiayi@comac.cc