

用 NI 产品进行压气机管道声模态及不稳定特性测量的数据采集与分析

Data Acquisition And Analysis On The Sound Mode and The Rotation Instability Measurement In The Transonic Compressor Rig
By Making Use Of The Products Of NI Corporation

作者：吴怀宇

职务：硕士研究生

学校：北京航空航天大学

应用领域：院校

挑战：要求测量和记录完整的发动机非正常失速过程，即各物理量的变化过程及各时间点的状况，包括各个通道的时域、不同时间的频谱、各频谱分量的周向模态。要求多通道、大容量数据的实时测量、采集和存储，高速、多通道的FFT分析和可视化的数据显示。

应用方案：基于 NI 的虚拟仪器平台建立了一套新的测量系统可高速、持续、同步测量管道截面内周向各点声场的时域波形、计算复数频谱及管道的周向声模态。它优于目前由通用仪器、计算机和 GPIB 通讯接口所组成的系统，这使管道声模态测量及跟踪非正常过程的测量可成为一项可常规进行的工作。

使用的产品：NI 公司的两块 PCI 6071E 数据采集卡、LabWindows/CVI

介绍：本文阐述了使用NI公司产品在国家航空发动机气动热力重点实验室高速压气机台架上进行管道声模态及非正常特性测量的数据采集与分析。文中比较了先后所应用的两种测量方案：使用传统仪器（使用多通道磁带记录仪、频谱分析仪（B&K公司3560——PULSE噪声分析系统）、带GPIB接口的计算机）以及应用虚拟仪器（NI公司的两块PCI6071E数据采集卡、LabWindows/CVI开发平台）。在传统仪器较难达到测量要求的情况下，最终改而选择虚拟仪器，成功地完成了试验测量。

1、试验装置

在单级压气机实验台的消声短舱样件实验中样件前后壁面各布放了16个传声器，以获得压气机转子往前传播的声学信号，如图1所示。



图 1 消声短舱样件连接照片

2、试验目的

③ 测量管道内的声模态

管道截面中频率为 ω 的声压可分解成无数模态的叠加：

$$p(\omega, \theta) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} A(m, \omega) e^{-im\theta} \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

把在截面周向测量的声压频域复数信号 $p(\omega, \theta)$ 做傅立叶变换，便得到该截面的空间模态。

$$A(m, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} p(\omega, \theta) e^{-im\theta} d\theta$$

其总的关系如下图所示：



☞ 压气机旋转失速过程及旋转不稳定分量的观测

当压气机在非设计工况下工作时，如果空气流量减小到超过不稳定边界，将会出现这种不稳定流动现象——旋转失速。因为旋转失速是非常危险的工作状况，所以试验要求旋转失速发生的过程应非常短暂。这也就要求了采集系统应在这短暂的时间内将旋转失速各个阶段的所有信息全部捕捉到。

而旋转不稳定性则是旋转失速的先兆，研究旋转不稳定性是压气机稳定性主/被动控制研究的基础。在试验数据处理中，应能进行旋转不稳定性所表现出来的频率成分和模态成分的分析。

3、测量要求

- ☞ 要求对多通道进行同步测量(前后两截面，每个截面16或更多个传声器)
- ☞ 要求测量、记录整个失速的非正常过程。
- ☞ 大量数据的实时存储(多于32个通道，每通道采样频率52KHz，连续存储60秒以上)
- ☞ 快速和可视化的数据选择分析(对每通道作可视化的时间段选择，进行FFT分析，对选定频率作模态分析，并进行显示)

在试验过程中，共使用了两种解决方案。

4、解决方案I——使用多通道磁带记录仪、频谱分析仪(B&K3560—PULSE噪声分析系统)、带GPIB通讯接口的计算机

在使用B&K3560四通道噪声分析系统测量高速压气机旋转不稳定特性的研究工作中，要求对16通道信号同时进行频谱分析，并作模态分析。回放分析中四通道系统每次只能分析4个通道，所以16个通道需分析4次以上；同时还必须解决各次分析的同步触发和相位参考问题。

B&K3560噪声分析系统使用GPIB数字通讯接口将分析后的频谱传输到计算机内。由于该系统未配备模态分析模块，需通过编程对传输到计算机的频谱分量进行模态分析。

在使用该系统的过程中遇到的问题：

- ☞ 分析周期长，分析工作量大。
- ☞ 各次分析中有同步的困难，且有较大误差。
- ☞ 很难得到我们感兴趣的各量变化过程和感兴趣时间点的状况，包括各通道时域、不同时间的频谱、各频谱分量的模态。

以上这些局限极大阻碍了试验数据处理工作。在进行了近半年的繁杂工作后，我们决定放弃该方案，转而建立一套新的测量系统，这便是方案II：

5、解决方案II——使用虚拟仪器

建立了一套基于NI的虚拟仪器平台的测量系统，可以高效、方便地测量、记录和分析管道声场的时域波形、复数频谱和传播声模态。共包括数据采集与存储、数据处理与分析两部分。

☞ 采集与存储部分

使用两块NI公司的PCI 6071E数据采集卡(12位A/D采集、1.25M/s采样速率，32通道差分输入，DMA传输模式)，实现64通道差分输入；

其次针对大数据量、高存储速度的要求，配置高性能计算机。对于试验的每个工况都将至少有60秒*(1.25*2)MB/秒*2块卡=300MB的海量实时采集数据。

基于LabWindows/CVI编程环境下的Data Acquisition Library开发了DAQ2002数据采集系统。该系统可以实现：

- ✓ 64通道信号的同时采集和存储
- ✓ 可进行幅值的标定，获得灵敏度系数
- ✓ 对所有通道进行自动增益
- ✓ 应用Double Buffer技术可在硬盘容量允许范围内连续采样和存盘
- ✓ 使用RTSI Bus解决两卡同步采集问题
- ☞ 数据处理与分析功能

Thinker2002数据分析系统是基于LabWindows/CVI编程环境下的Advanced Analysis Library开发的，对所存数据可进行：

- ✓ 数据的标定转换，将采集得到的电信号转换成声信号。
- ✓ 对64通道同时进行快速FFT分析
- ✓ 可进行管道声模态分析
- ✓ 各通道时域和频谱显示的快速选择及切换，并可随意选择时域分析范围和频域分析谱线
- ✓ 用户友好的图形界面和可视化前、后处理的数据显示
- ✓ 由于PCI6071E采用多通道分时采集，即各通道并非完全意义上的同步采集，所以在FFT分析中对频谱相位做了合理的修正
- ✓ 在FFT分析前使用了数字低通滤波去除叠混到低频的高频成分。

下面简要介绍整个采集、分析系统。

如图2所示为DAQ2002数据采集系统。在最左边的“通道选择区”选择将参与采集的通道，以及在参与采集的通道中哪些进行信号实时窗口显示。在图的右上方的“信号实时显示窗”中可以查看各通道的时域波形。在图中部的“数据显示区”，设置显示窗的坐标范围，以及是否让程序自动调整坐标范围等。在“数据显示区”右边的“数据存储区”，设置存盘文件名称和存盘路径、以及自动存盘时间等。在图最左下方的“通道参数显示表”中，可以查看程序自动设置的各通道的增益（可对增益进行手动更改）、通道信号的实时数值以及备注信息等。

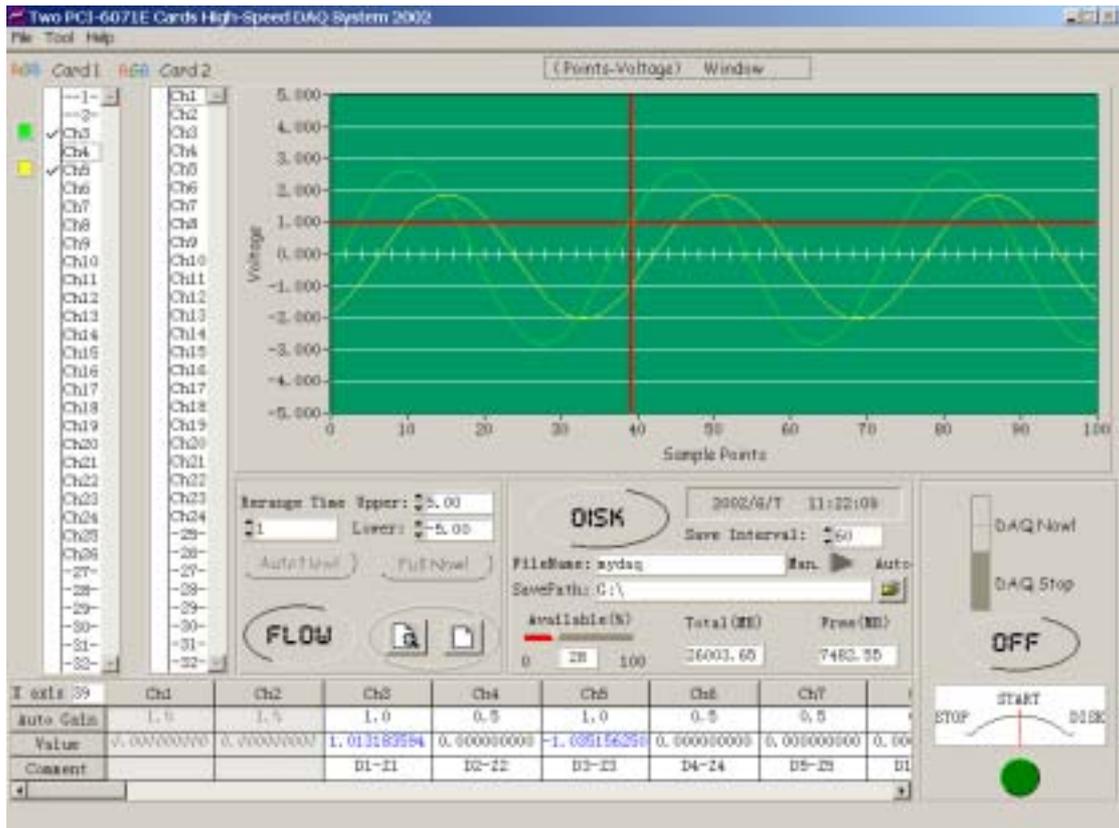


图2 DAQ2002 数据采集系统主界面

如图3所示为标定面板，可以获得每个通道电/声信号转换所对应的灵敏度系数。



图3 通道标定面板

如图4所示为Thinker2002数据分析系统。首先载入试验中所采集的数据文件，然后在最左边的“通道选择区”选取将参与频谱和模态分析的通道。在图右上方的“时域信号显示窗”查看通道的时域波形。在其下方的“频域信号显示窗”查看指定时间段的频谱信号。在频谱分析前还可以在图右下方的“加窗区”对时域信号进行加窗处理（如：海宁窗）。

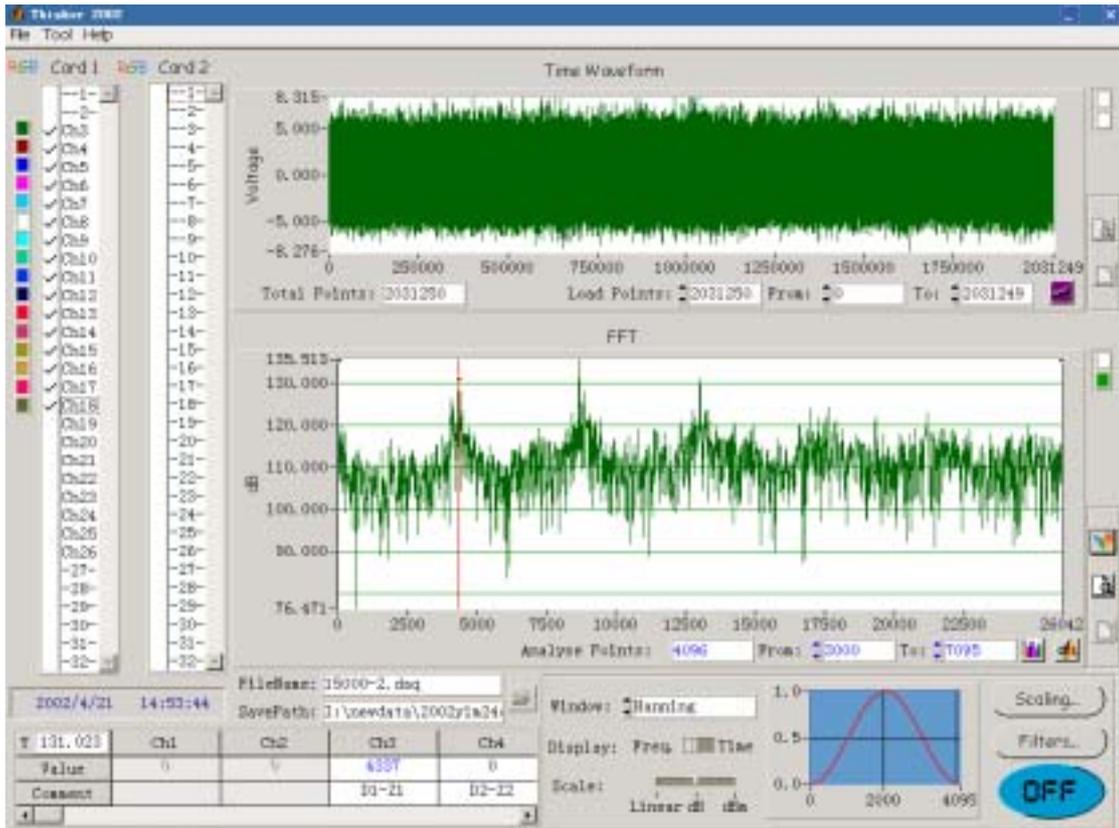


图4 Thinker2002 数据分析系统主界面

考虑到叠混到低频的高频成分，可选取合适的数字滤波器将其从频谱中滤除，如图5所示。

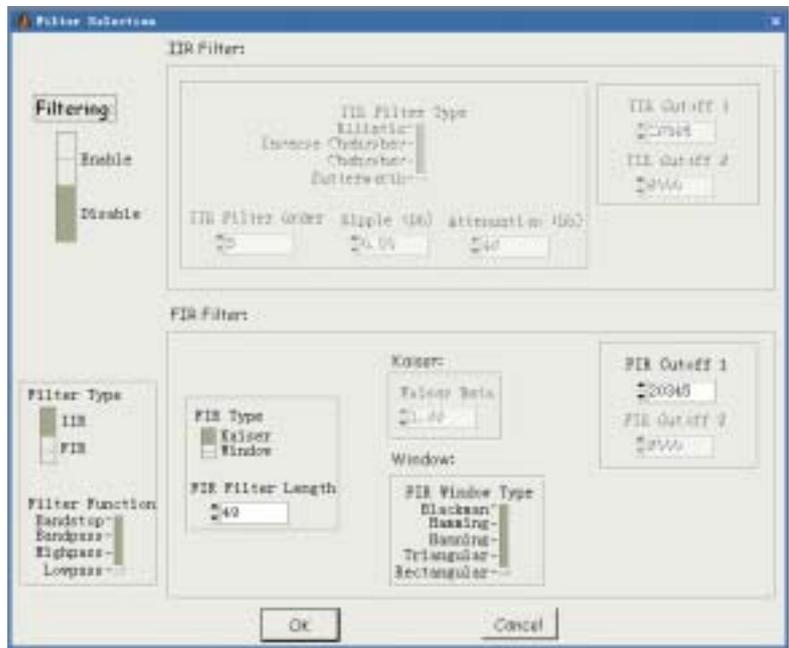


图5 数字滤波器

Thinker2002数据分析系统配备了模态分析模块，可方便地进行谱线可视化选取，并作模态分析，如图6所示。



图6 模态显示窗

6、试验目标的实现

该系统的连续采集和存储功能使得记录旋转失速的全过程成为可能，并可以任意跟踪失速前后的各个阶段，如图7所示。

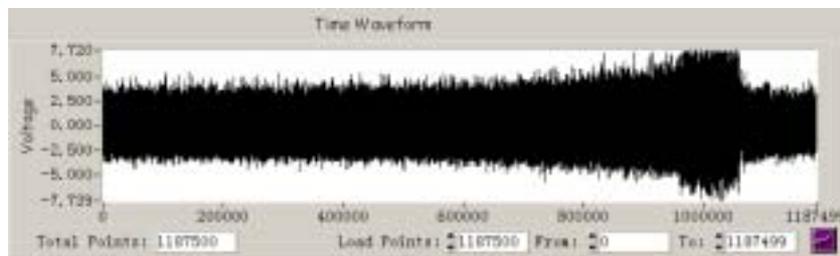


图7 15000转/分转速失速工况第14个传声器所记录声压时间变化历程

快速的频谱分析能力，得以顺利提取旋转不稳定分量，如图8所示为不稳定分量的频率成分。

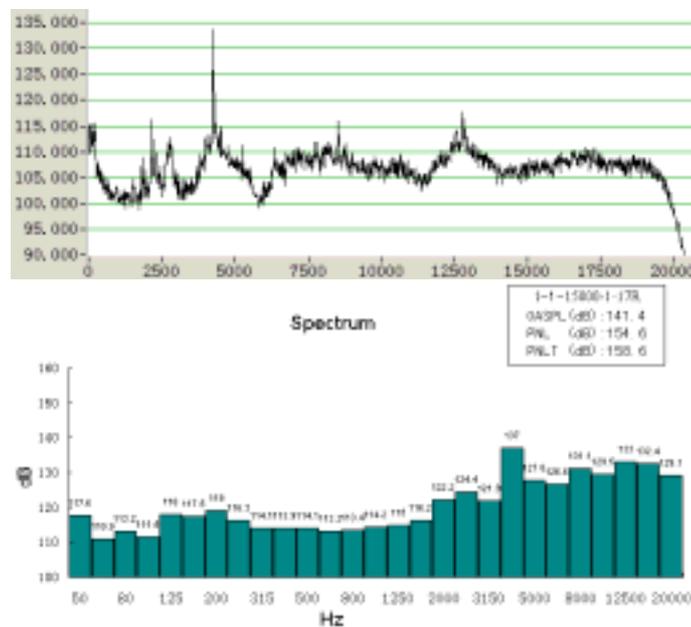


图8 一段声衬第一次试验15000转/分第一流量点声衬后第右17传声器（上为窄带谱，下为组合谱）

可同时进行64个通道的频谱分析和方便的谱线选择，使模态测量得以顺利进行。如图9所示为2518 Hz分量谱线的频谱图和模态图。

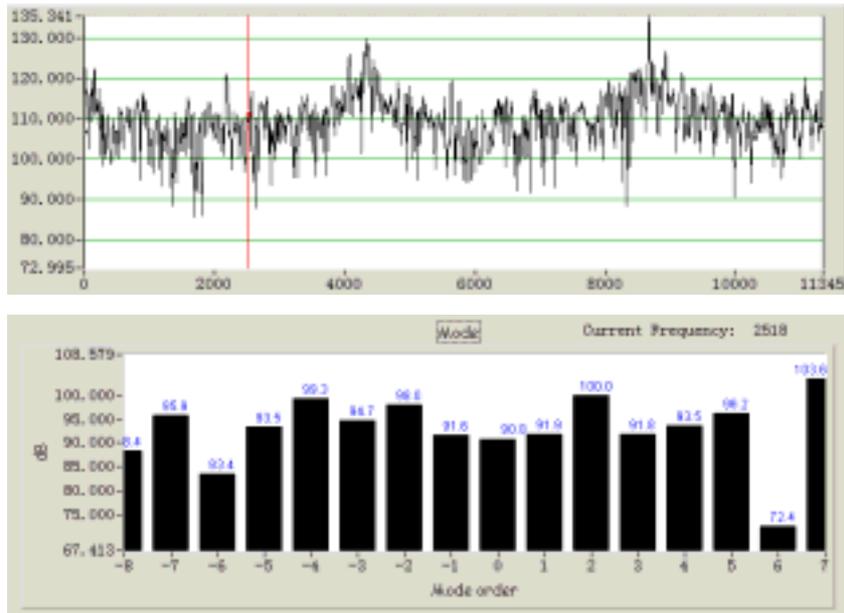


图9 上图为标出 2518 Hz 分量谱线的频谱图，下图为其模态图，峰值模态阶数 7 或 23

7、结论

在先后应用两种解决方案的过程中，我们感到：

- (1) 使用虚拟仪器可实现比专用仪器更加灵活、强大的功能。
- (2) NI 公司的 PCI 6071E 数据采集卡为本试验的顺利进行提供了可靠的保证。
- (3) 直接调用 LabWindows/CVI 开发环境的 Data Acquisition Library 和 Advanced Analysis Library，开发周期短，功能强大。为本试验的实施提供了快捷的解决方案。