

基于 LabVIEW 的梁分布动载荷识别系统设计与实现^{*}

马新强 姜金辉 黄丹羽 任小梦

(南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室 南京 210016)

摘 要:分布动载荷识别是结构动力学分析中的难点之一,在工程应用中具有重要的意义。从工程实践需求出发,设计了一款通用的分布动载荷识别系统。分布动载荷识别系统基于 LabVIEW 虚拟仪器平台进行模块化设计和开发,以 Bernoulli-Euler 梁为主要研究对象,利用模态坐标变换的分布动载荷识别技术,设计和实现了可用于工程应用的动载荷识别系统。系统有效利用了虚拟仪器强大的数据处理分析以及动态链接库等能力,具有良好的人机交互界面,通用性以及可扩展性等优点。并通过应用实例,来证明所设计的梁分布动载荷识别系统的可靠性和实用性。

关键词:动载荷识别;模态坐标变换;分布动载荷;LabVIEW;虚拟仪器

中图分类号: TN911 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.20

Design and realization of the software about beam distributed dynamic load identification system based on LabVIEW

Ma Xinqiang Jiang Jinhui Huang Danyu Ren Xiaomeng

(State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Distributed dynamic load identification is one of the difficult points in structural dynamic analysis, and has a great significance in the domain of engineering application. In this paper, we design a general distributed dynamic load identification system from the engineering practice requirement. The system adopts the thought of modular design, based on LabVIEW virtual instrument platform. And the system with the Bernoulli-Euler beam as the main research object is designed to be used in engineering practice, based on distributed dynamic load identification theory of model coordinate transformation. The system can effectively utilize the powerful functions of virtual instrument platform, such as data processing and dynamic link library, and it has a good human-computer interaction interface, generality and extensibility. In the last of this paper, the feasibility and practicability of the distributed dynamic load identification system is proved through an application example.

Keywords: load identification; model coordinate transformation; distributed load; LabVIEW; virtual instruments

1 引 言

随着计算机技术的飞速发展,计算机与传统的仪器仪表结合成为一种主流趋势,其强大的处理分析功能是传统仪器所无法比拟的。LabVIEW(laboratory virtual instrument engineering workbench)作为目前全世界应用最为广泛、发展最快、功能最强的虚拟仪器开发平台,集成了数据采集、仪器控制、测量分析与数据显示等众多开发工具,大大降低应用了系统开发时间与项目成本^[1]。

动载荷识别是结构动力学中重要组成成分,属于第二类

反问题,而分布动载荷识别又是其中的难点之一。典型的连续梁结构在实际工程实践中被广泛应用,所以研究连续梁结构上连续变化的分布动载荷识别问题在工程应用和理论研究上都具有很大的研究价值。动载荷识别经过近 50 多年的发展,已经形成了较为成熟和系统的载荷识别理论。然而分布动载荷识别技术在国内外相关研究却较少,诸多技术问题和难点亟待解决。国内分布动载荷识别问题起步较晚,主要成果有张方等提出基于广义正交多项式理论识别复杂结构上的分布随机动载荷;秦远田^[2]等(2012 年)提出的二维小波-伽辽金法,能够有效识别一维

收稿日期:2016-09

^{*} 基金项目:国家自然科学基金项目(51305197)、江苏高校优势学科建设工程基金项目资助

结构上的分布动载荷;姜金辉^[3-4](2012年)等提出了一种基于固有振型的复杂结构分布动载荷时域识别方法,又在2015年提出了基于模态坐标变换的分布动载荷识别技术,引入Tikhonov正则化算法^[5-6]改善识别精度,具有较高的信噪比和计算效率。本文基于模态坐标变换法的动载荷识别技术设计并开发了一套用于一维连续梁结构的分布动载荷识别系统。

随着载荷识别理论的不断研究发展和完善,以及工程实践中对载荷识别技术应用与日俱增的需求,因此,开发一套能够用于工程应用的分布动载荷识别系统就显得极为重要。本文从实际需求出发,结合虚拟仪器的成本低、开发周期快等众多优点^[7],以及具有较高计算效率的基于模态坐标变换分布动载荷识别技术,设计分布动载荷识别系统。本文基于LabVIEW虚拟仪器平台,针对Bernoulli-Euler梁结构上的一维分布确定性动载荷,依据模态空间坐标变换的载荷识别理论,编写相应的数据采集模块^[8-9]、数据处理分析模块以及载荷识别模块等。通过理论推导和计算机仿真验证,证明载荷识别系统的可靠性。

2 基于模态坐标变换的梁分布确定动载荷识别理论

对于等截面均质Bernoulli-Euler梁,横截面积 A ,密度 ρ ,材料弹性模量 E ,截面惯性矩 I ,梁的横向振动动力学方程为:

$$\rho A \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 u(x,t)}{\partial x^4} + c_1 EI \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = f(x,t) \quad (1)$$

式中: $f(x,t)$ 为梁时域下所受分布力, u 为梁横向变形。

根据模态理论,引入模态坐标变换:

$$u(x,t) = \sum_{i=1}^n \varphi_i(x) q_i(t) \quad (2)$$

用矩阵表示为:

$$\begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ \vdots \\ u_m(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_1(x_1) & \cdots & \varphi_n(x_1) \\ \varphi_1(x_2) & \cdots & \varphi_n(x_2) \\ \vdots & & \vdots \\ \varphi_1(x_m) & \cdots & \varphi_n(x_m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1(t) \\ q_2(t) \\ \vdots \\ q_n(t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: m 为梁上所取测点数, n 为模态截断数, $u_m(t)$ 表示梁上 x_m 处位移时域响应, $q_n(t)$ 为梁第 n 阶模态坐标时域响应。

对式(3)两边作傅里叶变换,得频域下方程:

$$\mathbf{U}(\omega) = \Phi \mathbf{Q}(\omega) \quad (4)$$

由梁上已知的测点位移频域响应 $\mathbf{U}(\omega)$ 通过式(4)可求出位移模态坐标频域响应 $\mathbf{Q}(\omega)$ 为:

$$\mathbf{Q}(\omega) = \begin{cases} \Phi^{-1} \mathbf{U}(\omega) & (\text{无噪声}, m=n) \\ [\Phi^T \Phi]^{-1} \Phi^T \mathbf{U}(\omega) & (\text{无噪声}, m>n) \\ (\Phi^* \Phi + \alpha I)^{-1} \Phi^* \mathbf{U}(\omega) & (\text{含噪声, Tikhonov 正则化解}) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\alpha \geq 0$ 表示正则化参数,由L-curve准则确定。

在模态空间下,利用固有振型的正交性得到频域下解耦的模态坐标方程:

$$m_r(-\omega^2 + j2\zeta_r \omega_r \omega + \omega_r^2) Q_r(\omega) = F_r(\omega) \quad (6)$$

用矩阵形式表示为:

$$\mathbf{F}(\omega) = \mathbf{B}(\omega) \mathbf{Q}(\omega) \quad (7)$$

式中: $\mathbf{B}(\omega) = \text{diag}(B_1(\omega), B_2(\omega), \dots, B_n(\omega))$, $\mathbf{F}(\omega) = (F_1(\omega), F_2(\omega), \dots, F_n(\omega))^T$, $F_n(\omega)$ 为频域 n 阶模态力。

根据式(7)代入式(5)识别出的模态坐标位移响应 $\mathbf{Q}(\omega)$ 可识别出频域下模态激励 $\mathbf{F}(\omega)$,并对 $\mathbf{F}(\omega)$ 作傅里叶逆变换得到时域下模态激励 $\mathbf{f}(t) = (f_1(t), f_2(t), \dots, f_n(t))^T$ 。

将分布动载荷利用固有振型函数在模态空间进行分解(n 为模态截断数):

$$f(x,t) = \sum_{i=1}^n \varphi_i(x) a_i(t) \quad (8)$$

根据固有振型正交性取: $\varphi_i(x) = \frac{\rho A}{\sqrt{m_i}} \varphi_i(x)$,可得时域模态激励:

$$f_i(t) = \int_0^l f(x,t) \varphi_i(x) dx = \sum_{j=1}^n \int_0^l \varphi_j(x) a_j(t) \varphi_i(x) dx = \sqrt{m_i} a_i(t) \quad (9)$$

由式(9)可识别出分布动载荷 $f(x,t)$ 的时间函数系数:

$$a_i(t) = \frac{f_i(t)}{\sqrt{m_i}} \quad (10)$$

从而重构出物理载荷分布 $f(x,t)$:

$$f(x,t) = \sum_{i=1}^n \frac{\rho A}{\sqrt{m_i}} \varphi_i(x) \cdot \frac{f_i(t)}{\sqrt{m_i}} = \sum_{i=1}^n \frac{\rho A}{m_i} \varphi_i(x) f_i(t) \quad (11)$$

这里需要指出的是,对于不同的一维连续结构,其振型函数的加权正交性中的加权函数形式可能不同,对于一维均质等截面连续梁结构,其振型函数的加权函数恰为常数,即对于不同的一维连续结构应用本节中的一维分布动载荷识别方法时,加权函数的选取应视具体结构确定。

3 基于LabVIEW的分布动载荷识别系统

动载荷识别系统基于LabVIEW虚拟仪器平台,利用其强大的各种仪器硬件驱动,以及大量的内置和扩展函数库(例如数据采集、信号处理、数据分析等功能,设计一款通用的针对一维梁结构的分布动载荷识别系统。

3.1 系统主界面设计

一维梁结构的分布动载荷识别系统由前面板和程序框图(后面板)两部分组成。前面板用于设计系统的主界面,主界面采用商业软件主流的布局形式,划分出不同的功能区域。主界面如图1所示,程序框图编写主程序,主程序采用生产者与消费者模式,简化各功能模块之间的数据通信,便于后续进一步优化和扩展。载荷识别系统的设计框架如图2所示,从系统的主界面以及设计框架图可以

看出,系统主要由3大主模块组成,分别为响应信息读取、模态参数读取、载荷识别模块。并编写了常用数据分析模

块、仿真响应模块(根据基于模态坐标变换理论的动载荷识别技术正问题求解简支梁响应)以及动载荷查看模块。

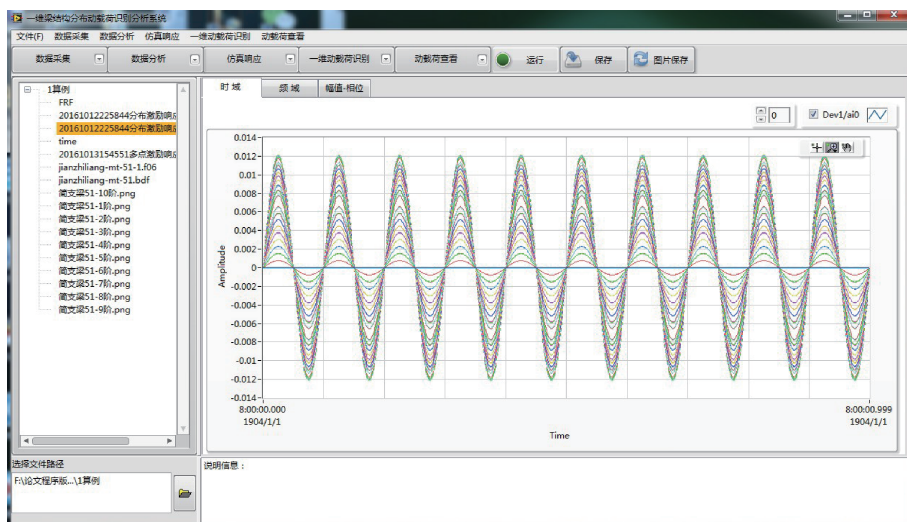


图1 载荷识别系统主界面

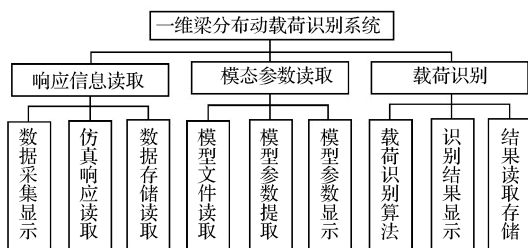


图2 载荷识别系统设计框架

3.2 系统子模块设计

1) 响应信息读取模块。该模块主要负责读取测点响应信息,其中响应信息的来源分为两种,一种为通过仿真响应读取模块读取 MSC-Nastran 软件仿真计算出梁各节点的响应文件(f06 文件)获得;另一种为通过数据采集显示模块采集动载荷试验测得的各测点响应信息文件。

2) 模态参数读取模块。系统采用 MSC. Patran-Nastran 和 LabVIEW 混合编程,利用 MSC. Patran-Nastran 强大的建模功能和有限元分析功能计算梁结构的模态参数以及节点的响应信息。该模块主要负责读取梁几何节点信息的 BDF 文件和仿真模态参数/节点响应结果的 f06 文件,单击所需要的载荷类型,输入相应文件,即可将模型各节点信息和模态参数信息提取出来,以备后续的载荷识别模块调用。

3) 载荷识别模块。该模块基于第2章中叙述的梁分布确定动载荷识别理论,利用响应信息读取模块获得响应信息,利用固有振型的求逆矩阵拟合得到各阶模态响应(有噪声时利用 Tikhonov 正则化法,消除动载荷识别过程中的不适定性问题);然后结合模态参数读取模块得到结构的各阶模态参数,求解得到频域下的模态激励,从而重

构出物理空间域中作用于梁结构上的动载荷。针对不同的动载荷形式,编写了相应的用于简单梁结构的单点动载荷识别、多点动载荷识别、以及分布确定动载荷识别的子VI。动载荷识别流程如图3所示。

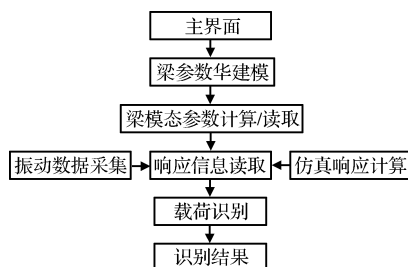


图3 动载荷识别流程

4 分布动载荷识别算例

一维连续梁结构的分布动载荷识别过程将仿真计算的响应信息或数据采集模块采集到的响应信息以及结构的模态参数作为已知量,从而反向识别出加载在结构上的载荷的幅值和相位信息。下文以梁分布动载荷算例作为应用实例加以说明。

受分布动载荷的等截面均质 Bernoulli-Euler 梁模型,梁两端简支梁的长度为 $l=1$ m,矩形横截面长为 $a=0.01$ m,宽为 $b=0.002$ m,材料密度为 $\rho=7\,900$ kg/m³,弹性模量为 $E=2.06\times 10^{11}$ Pa,受垂直于 x 轴方向的分布载荷力 $f(x, t)$ 作用。

假设一维 Bernoulli-Euler 简支梁的分布动载荷作用形式: $f(x, t) = A(x)\sin(\omega_0 t)$,为单一频率简谐分布力。其中,分布力幅值 $A(x) = 6\sin(3.14x)$,简谐分布力频率 $\omega_0=10$ Hz。简支梁的各阶模态阻尼比 $\xi=0.01$,测量点

数 $m=51$, 模态截断数 $n=10$ 。

1) 单击主界面中的一维动载荷识别控件, 在下拉菜单中选择分布动载荷识别, 子面板弹出分布动载荷识别模块的主界面如图 4 所示, 单击读取振型文件, 输入相关参数即可将通过 MSC. Software 计算得到的模态参数读取出来。

2) 单击读取响应信息, 显示界面如图 5 所示, 输入响应信息文件和其他必要参数即可显示各节点的响应时域

信息。其中选择是否有噪声控件表示是否对响应信息进行正则化(Tikhonov 法)处理, 提高识别精度。

3) 单击保存按钮, 选择保存识别结果文件; 单击识别按钮, 进行分布动载荷识别, 显示识别结果各节点时域图以及动载荷分布图, 如图 6 所示。

通过识别结果计算识别误差, 识别误差如图 7 所示, 最大误差 0.024 8。由误差图可知该识别系统具有较高的识别精度, 能够用于工程实践应用。

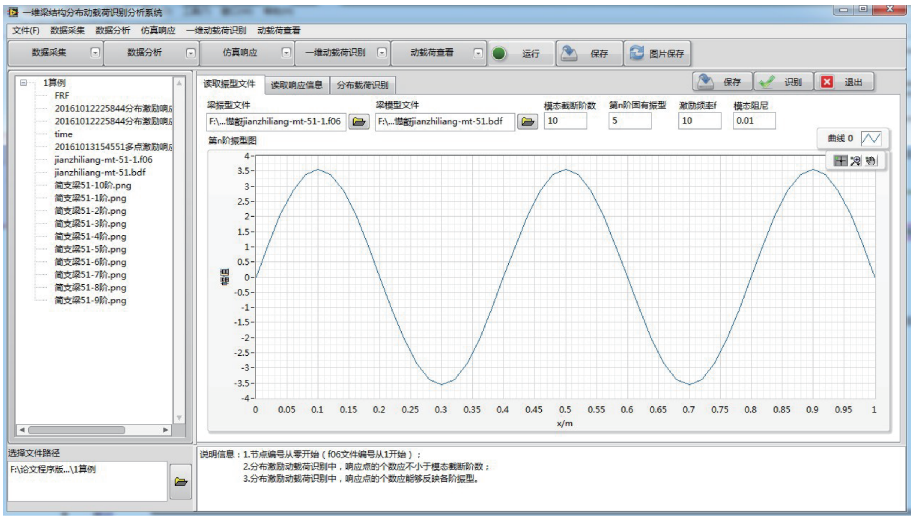


图 4 分布载荷识别响应信息读取

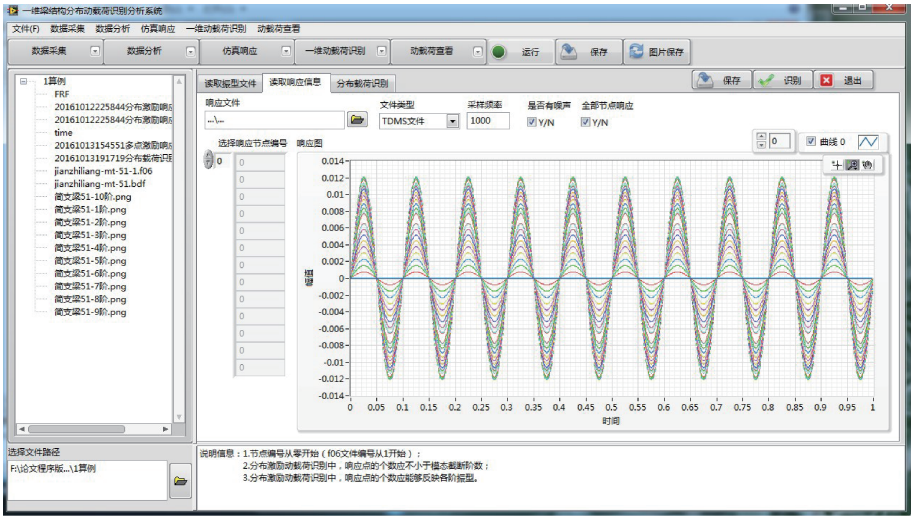


图 5 分布载荷识别结果时域图

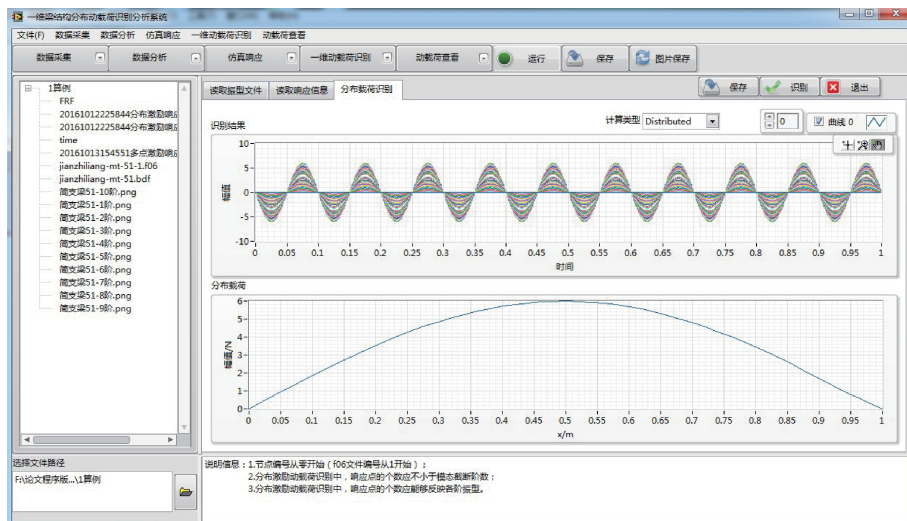


图6 分布载荷识别结果时域图

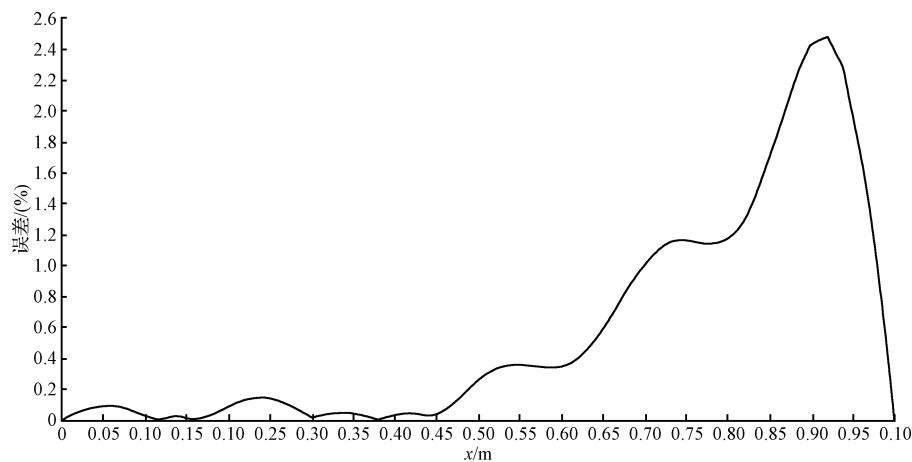


图7 识别分布载荷误差分布

5 结 论

基于虚拟仪器的一维梁结构分布动载荷识别系统达到了设计的要求,操作简单,只需按照从左到右的顺序操作即可,具有良好的人机交互界面以及较高的扩展性。通过应用实例计算验证,识别结果精度较高,验证了系统设计的正确性,识别结果的可靠性和准确性,能够用于工程实践中振动信号采集和简单梁结构的载荷识别。系统充分利用虚拟仪器强大的数据采集、数据分析、模块调用、界面修饰等功能,操作简便,能够有效避免工程实践中的硬件损坏。载荷识别系统具有较好的可移植性和扩展性,便于后续二维结构以及复杂结构的载荷识别系统开发,也可作为其他虚拟仪器的子VI使用。

参 考 文 献

- [1] 叶敦范,李星.基于LabVIEW的多重相关法测量相位差研究[J].中国测试,2014,40(6):95-98.
- [2] 秦远田.分布动载荷识别的二维小波-伽辽金方法[J].振动测试与诊断,2012,32(6):1005-1009.
- [3] 姜金辉,张方,陈寅.基于固有振型的复杂结构分布动载荷时域识别[J].振动、测试与诊断,2012,32(4):581-585.
- [4] 姜鑫,张方,姜金辉.基于模态坐标变换梁分布动载荷识别技术[J].国外电子测量技术,2016,35(2):90-93.
- [5] 姜洲,丁华平,沈庆宏.具有瞬时较大波动的信号降噪方法研究[J].电子测量技术,2015,38(3):116-119.

(下转第92页)