

基于信号时频分析理论识别时变模态参数实验*

杨 凯, 于开平, 白云鹤

(哈尔滨工业大学航天学院 哈尔滨, 150001)

摘要 为研究温度对结构模态参数的影响设计了一套温度可控的实验设备。在这套实验设备提供的可控温度环境中采集悬臂梁结构的加速度响应信号,利用基于信号时频分析的模态参数辨识算法处理实验数据,得到其时变模态参数,包括固有频率和振型,以此研究温度对其模态参数的影响。分析结果显示了基于信号时频分析的模态参数辨识算法在处理非平稳信号以得到结构的时变模态参数上的应用前景,更重要的是实验数据的分析结果较好地反映了温度对结构模态参数的影响,为热环境下结构振动特性分析提供了可靠而且有价值的分析方法和实验依据。

关键词 时变模态参数; 时频分析; 悬臂梁; 温度变化环境

中图分类号 O327; U446

引 言

对于非时变结构系统,模态参数测试分析技术已经发展得比较成熟,但针对时变结构系统的相应研究工作较少^[1-2],而模态参数能够帮助深入理解结构的动态特性。在航空航天领域,飞行器由于高速飞行会引起严重的气动加热作用而承受恶劣的高温工作环境,高温作用必然会引起结构模态参数的变化^[3-5]。由于受制于模态参数辨识算法的研究状况,文献[3-5]中只研究了恒定高温环境中温度对结构模态参数的影响,而忽略了整个温度变化过程中模态参数变化。相比于时域模态参数辨识算法,频域模态参数辨识算法有更好的抗噪声等性能,工程实际中应用更加广泛^[6]。现代信号处理方法中信号时频分析方法的研究已经相对成熟,时频分析方法能够较好地处理非平稳信号且同样有较好的抗噪声能力,相对于频域分析方法能给出信号时域特征信息。鉴于此,信号时频分析方法很自然地引入到模态参数辨识领域中来^[7-13]。文献[8]研究了 Gabor 变换在模态参数辨识中的应用,指出这种算法可以较好地处理平稳和非平稳振动得到时不变模态参数。由材料力学可知,拉伸或者压缩应力的存在会影响结构的固有频率,文献[13]利用小波分析方法处理了杆结构在持续加载过程的振动响应,

分析了结构一阶固有频率的变化情况。上述文献都仅仅关注时频分析方法在时不变模态参数辨识中的应用,而且鲜有文献报道时变结构中模态振型的情况。为此,笔者总结了上述文献^[7-12]中基于时频分析方法的模态参数辨识算法,并利用基于信号时频分析的模态参数辨识算法分析了在温度变化环境中一 TC4 钛合金悬臂梁的前 4 阶模态信息。

1 算法过程简介

基于信号时频分析的模态参数辨识算法^[7-12]可总结如下:

1) 引入一种合适的线性时频变换方法,诸如 Gabor 变换或小波变换,时域信号 $q_i(t)$ ($i=1, 2, \dots, M$) 在时频域内表示为 $q_i(t, f)$, ($i=1, \dots, M$)。不失一般性,笔者选用短时傅里叶变换(short time Fourier transform,简称 STFT)。

2) 对于每一个信号的时频表示 $q_i(t, f)$ ($i=1, \dots, M$),分离得到其时频脊线,表示为 $q_i^j(t, f_j(t))$ ($i=1, 2, \dots, M; j=1, 2, \dots, N$),其中:上标 j 在这里表示模态阶数; $M=3; N=4$ 。

3) 估计结构的模态振型。假设 $q_i^j(t, f_j(t)) \neq 0$,选其作为参考点计算其他测试点位置振型向量。因此,第 i 个传感器测试位置的第 j 阶振型向量的绝

* 国家自然科学基金资助项目(11172078)
收稿日期:2013-09-20;修回日期:2013-10-17

对值为

$$|c_i^j| = \left| \frac{q_i^j(t, f_j(t))}{q_i^i(t, f_j(t))} \right| \quad (1)$$

其中: c_i^j 的正负号由两者间的相位差确定

$$\text{Sign}(c_i^j) = \begin{cases} 1, & |\angle q_i^j(t, f_j(t)) - \angle q_i^i(t, f_j(t))| \approx 0 \\ -1, & |\angle q_i^j(t, f_j(t)) - \angle q_i^i(t, f_j(t))| \approx \pi \end{cases} \quad (2)$$

4) 结构的固有频率可以直接由时频脊线读取; 如果信号不是自由衰减信号且非平稳, 那么对信号时频分解所得的单模态信号进行奇异值分解, 还进一步得到结构的阻尼比^[12]。

2 实验及其结果分析

2.1 实验

实验选用尺寸为 380 mm×38 mm×6 mm 的 TC4 钛合金悬臂梁作为试件, 如图 1 所示。试件通过夹具固定于型号为 DC-2200-26 的电动振动台水平滑台上, 通过振动台提供随机白噪声形式的基础激振, 利用型号为 Endevco® 6327M70d 的 3 个加速度传感器采集试件在整个实验环境温度受控过程中的加速度响应信号(这 3 个加速度传感器在 650 °C 以下温度环境中能稳定工作)。试件直接受热面的温度由布置在试件表面的热电偶采集, 并反馈至可编程式逻辑控制器, 控制器根据预设的升温曲线实时控制红外石英灯阵的加热功率, 由此实现预设的温升环境。整个实验框图如图 2 所示, 图 2 中 3 个传感器从上到下顺序编号为 ①, ②和③, 对应于辨识算法介绍中涉及到时域信号 $q_i(t) (i = 1, \dots, M)$ 。本实验中, 悬臂梁表面温度被控制在 90 s 内由室温(大约 22 °C)线性升高至

400 °C, 然后保持 400 °C 大约 75 s。实际温度变化过程如图 3 所示。3 个热电偶安装于 3 个传感器位置的背面, 中间位置作为温控参考点, 其余两个用于观察。通过理论计算, 试件的第 4 阶固有频率是 1 102 Hz, 由此在本实验中设置采样频率为 2 560 Hz。

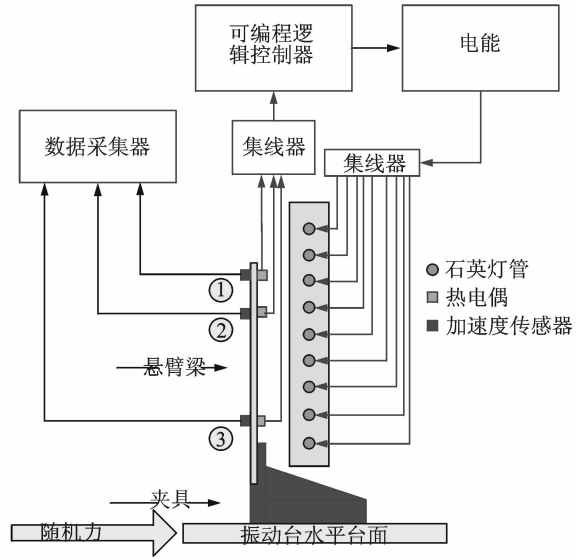


图 2 实验设备框图

Fig. 2 The schematic framework of the laboratory setup

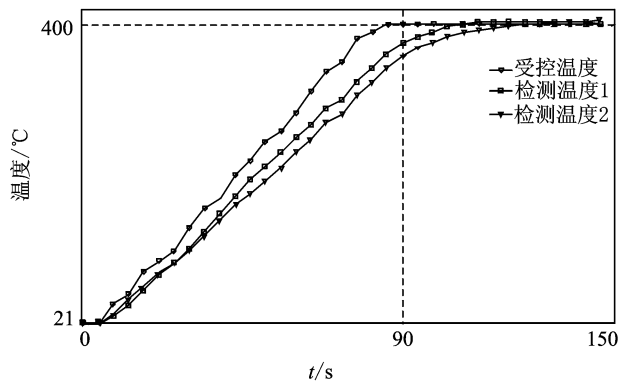


图 3 受控的温度变化曲线

Fig. 3 The controlled temperature curves.



图 1 实验设备图

Fig. 1 The laboratory experimental setup

在该实验进行之前, 在同样夹持条件下, 利用基于信号时频分析的模态参数辨识算法处理此悬臂梁在锤击激励下的加速度响应信号得到其前 4 阶模态信息, 以此作为温度变化环境中实验的模态分析结果的参考值, 频率和振型结果如图 4 所示, 图中蓝色实线是利用 Euler-Bernoulli 梁理论导出的悬臂梁前 4 阶振型; 红色离散点是利用锤击法实验分析得到的悬臂梁振型。

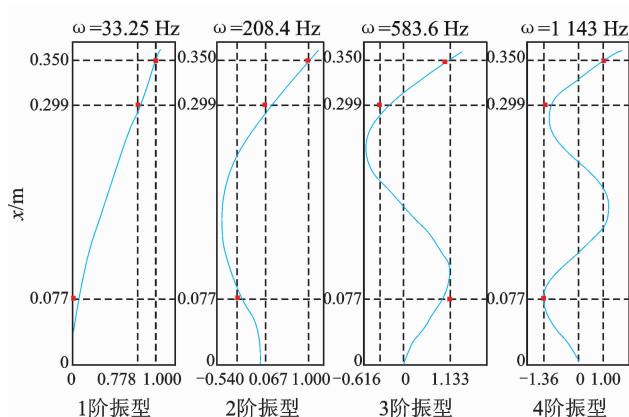


图4 室温下悬臂梁的前4阶模态信息

Fig. 4 The former four-order modes of the cantilever beam

2.2 实验结果分析

文献报道,温度对结构动态特性的影响主要有两个因素:a.温度直接影响结构材料的弹性模量,一般温度升高,弹性模量下降,结构刚度下降,固有频率下降^[3-5];b.温度分布不均匀导致热应力,热应力产生结构附加刚度,固有频率升高^[14]。图5展示了第2个加速度传感器采集到在温度持续变化过程中悬臂梁响应的时频谱。由于第3,4两阶固有频率变化比较明显,故图示于图6。如图5,6所示,温度对此TC4钛合金悬臂梁的前4阶固有频率的影响比较明显:温度升高,前4阶固有频率都下降。由此推断,在这种温度变化的热环境中温度对TC4钛合金的弹性模量的影响是主要的。

利用基于信号时频分析的模态参数辨识算法处

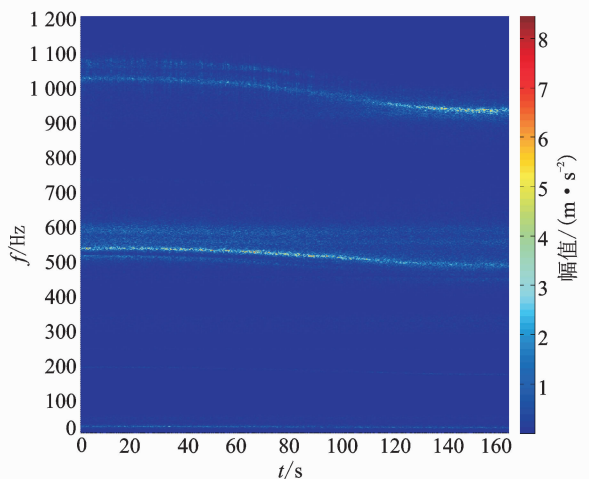
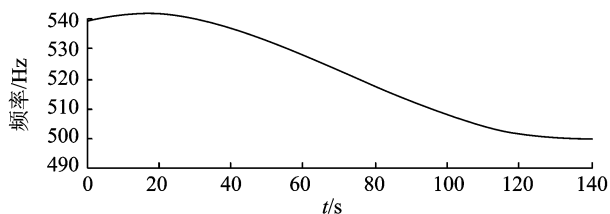


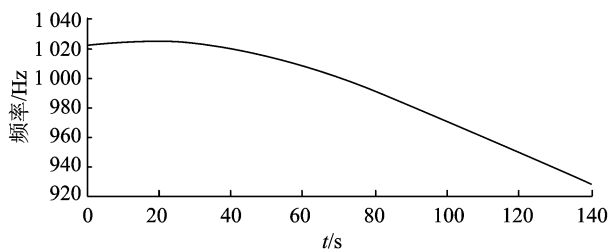
图5 中间传感器采集到信号的时频谱图

Fig. 5 The STFT spectrogram of signal collected by the middle sensor



(a) 悬臂梁的第3阶固有频率

(a) The 3rd order natural frequency of the cantilever beam



(b) 悬臂梁的第4阶固有频率

(b) The 4th order natural frequency of the cantilever beam

图6 温度变化环境中悬臂梁的第3,4阶固有频率

Fig. 6 The third and fourth order natural frequencies of the cantilever beam in the temperature-varying environment

理实验数据并以此分析温度对此TC4钛合金悬臂梁振型的影响,结果如图7所示。图7以第3阶振型为例,说明如何利用基于信号时频分析的模态参数辨识算法估计结构的时变振型。

利用各测试点响应数据时频谱中第3阶固有频率脊线提取的结果,依据式(1)得到2号和3号测试点在每一时刻与参考点之间的幅值比,即结构第3阶振型向量的绝对值,及其随时间变化的关系,如图7(a)所示;依据式(2)得到其他两个测试点信号与参考信号之间相位差,如图7(b)所示,用以确定振型向量方向(正负)。综合图7中的这两个子图得到整个实验过程中悬臂梁第3阶模态振型随时间的变化情况。采用同样的办法,依次可以得到其他3阶振型。图8对比了第60s和第120s结构的前4阶振型,从中可以清晰地看出,温度对试件的前4阶振型影响很细微。

在笔者所述的实验条件下,由于结构受热导致膨胀变形,不会受到约束的限制;而且金属材料试件的热导率较大,试件厚度方向上并不会存在非常大的温度梯度,因此结构内部热应力水平处于很低的水平,那么结构刚度矩阵的变化就可以认为只受弹性模量的影响。金属材料弹性模量与温度变化的关系是近似线性的,同时考虑到该结构质量矩阵受温度影响的程度可以忽略不计。根

据模态分析的基本理论,很容易得出结论:在上述情况下,系统广义特征值随刚度阵线性变化,而各特征值对应的特征向量保持不变;即:结构各阶固有频率随温度变化而变化,但模态振型并不会受到温度的影响。

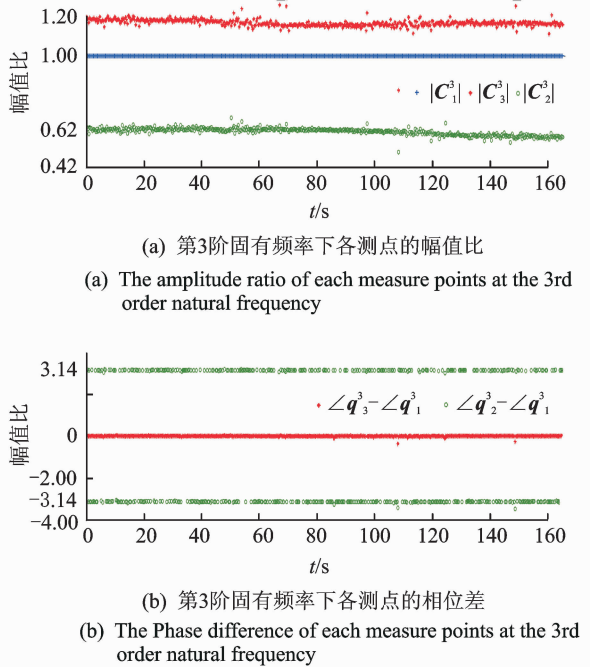


图 7 利用基本信号时频分析的模态参数辨识算法提取第 3 阶振型的过程

Fig. 7 The procedure of extracting the third-order mode shape by the TFR-based modal parameter identification method

3 结束语

笔者利用基于信号时频分析的模态参数辨识算法,处理在温度变化环境中 TC4 钛合金悬臂梁的振动加速度响应信号,得到该结构的前 4 阶时变模态信息。结果显示持续变化的温度对此悬臂梁的前 4 阶固有频率影响比较明显:温度升高,固有频率下降,而温度对笔者所述的温度变化环境中的 TC4 钛合金悬臂梁的固有振型影响几乎可以忽略。另一方面,分析结果也显示,基于信号时频分析的模态参数辨识算法有较好的工程应用前景。

此外,时频脊线的提取过程(即图 7 所用数据)采用了最原始的峰值提取法,执行效率较低并有一定的主观因素,这在实际应用中是不可取的,进一步的工作将在自动提取理论方法方面深入开展。

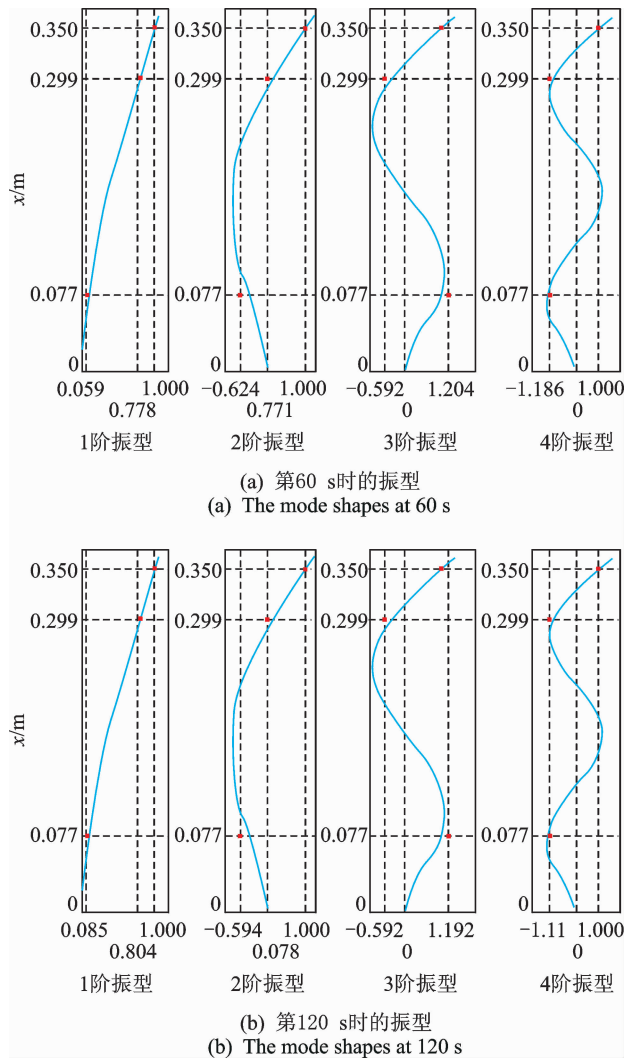


图 8 实验过程中两个时刻对应的悬臂梁振型

Fig. 8 The mode shapes of the cantilever beam at two instant times

参 考 文 献

[1] Poulimenos A G, Fassois S D. Parametric time-domain methods for non-stationary random vibration modeling and analysis—a critical survey and compassion[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20(4): 763-816.

[2] Poulimenos A G, Fassois S D. Output-only stochastic identification of a time-varying structure via functional series TARMA models[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, 23(4): 1180-1120.

[3] Kehoe M W, Deaton V C. Correlation of analytical and experimental hot structure vibration results[R]. California: NASA Technical Memorandum 104269, 1993.

[4] Kehoe M W, Snyder H T. Thermoelastic vibration test techniques[R]. California: NASA Technical Memorandum

- dum 101742, 1991.
- [5] Jeon B H, Kang H W, Lee Y S. Free vibration characteristics of thermally loaded rectangular plates[J]. *Key Engineering Materials*, 2011, 478: 81-86.
- [6] 刘宗政, 陈恳, 郭隆德, 等. 基于环境激励的桥梁模态参数识别[J]. *振动、测试与诊断*, 2010, 30(3): 300-303.
Liu Zongzheng, Chen Ken, Guo Longde, et al. Modal parameter identification of a bridge under ambient excitation[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2010, 30(3): 300-303. (in Chinese)
- [7] Lardies J, Gouttebroze S. Identification of modal parameters using the wavelet transform[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2002, 44(11): 2263-2283.
- [8] Zhang Z Y, Hua H X, Xu X Z, et al. Modal parameter identification through Gabor expansion of response signals[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 266(5): 943-955.
- [9] Le T P, Argoul P. Continuous wavelet transform for modal identification using free decay response [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2004, 277(1): 73-100.
- [10] Yan B F, Miyamoto A, Bruhwiler E. Wavelet transform-based modal parameter identification considering uncertainty[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 291(1): 285-301.
- [11] Li Zhuang, Crocker M J. A study of joint time-frequency analysis-based modal analysis[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2006, 55(6): 2335-2342.
- [12] Le T P, Paultre P. Modal identification based on the time-frequency domain decomposition of unknown-input dynamic tests[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2013, 71: 41-50.
- [13] Wang Chao, Ren Weixin, Wang Zuocai, et al. Instantaneous frequency identification of time-varying structures by continuous wavelet transform[J]. *Engineering Structures*, 2013, 52: 17-25.
- [14] Zhang Deyi, Bao Yuequan, Li Hui, et al. Investigation of temperature effects on modal parameters of the China national aquatics center[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2012, 15(7): 1139-1153.



第一作者简介:杨凯,男,1986年12月生,博士生。主要研究方向为振动信号处理、时变模态参数辨识等。曾发表《Modal parameter extraction based on Hilbert transform and complex independent component analysis with reference》(《Mechanical Systems and Signal Processing》2013, Vol. 40, No. 1)等论文。
E-mail: yg.hit@hotmail.com