

# 薄壁圆筒结构工作变形的连续扫描 激光测振方法

张 弓, 臧朝平, 李 繁, 刘翠红

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

**摘 要:** 提出了一种薄壁圆筒结构外表面工作变形(ODS)连续扫描激光多普勒振动测试方法。将旋转平台与电动机控制引入激光连续扫描,发展了一种与激光连续扫描路径相匹配的电动机控制算法,使连续扫描激光振动测试应用于薄壁圆筒结构;对试验件进行了薄壁圆筒结构外表面激光连续扫描测试,获取了 500 Hz 内的前 5 阶模态,结果表明:该测试方法与商用激光离散点扫描测试模态振型的相关性在 0.96 以上,验证了薄壁圆筒连续扫描激光多普勒振动测试的可行性与准确性。连续扫描激光测试的效率高、测点密集,对进一步工程应用具有指导意义和实用价值。

**关 键 词:** 圆筒结构; 振动测试; 连续扫描; 激光多普勒; 工作变形(ODS)

**中图分类号:** V214.3<sup>+</sup>3; TB53; TN249

**文献标志码:** A

## Continuous scanning laser vibration test method for ODS of thin-walled cylindrical structure

ZHANG Gong, ZANG Chaoping, LI Fan, LIU Cuihong

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** A continuous scanning laser Doppler vibration test method for operational deflection shape (ODS) of the thin-walled cylindrical outer surface was proposed and applied to vibration test of a cylinder. The rotating platform and motor control were introduced into the laser continuous scanning, and a motor control algorithm matching the laser continuous scan path was developed. The continuous scanning laser vibration test was applied to cylinder structure. And the cylinder laser continuous scanning test was performed on a cylinder structure and the first five orders mode within 500 Hz were obtained. The correlation with the results from the commercial laser discrete scanning modal test was basically above 0.96, demonstrating the feasibility and accuracy of cylinder laser continuous scanning laser Doppler vibration test. The cylinder continuous scanning laser Doppler vibration test, with advantage of high spatial resolution, efficient and effective test, shows certain guiding significance and practical value for further application in actual structure.

**Key words:** cylinder structure; vibration test; continuous scanning; laser Doppler; operational deflection shape (ODS)

**收稿日期:** 2019-10-23

**作者简介:** 张弓(1995—),男,硕士生,主要从事结构振动与测试方面的研究。E-mail:1070674758@qq.com

**通信作者:** 臧朝平(1963—),男,教授、博士生导师,博士,主要从事结构动力学与测试方面的研究。E-mail:c.zang@nuaa.edu.cn

**引用格式:** 张弓,臧朝平,李繁,等.薄壁圆筒结构工作变形的连续扫描激光测振方法[J].航空动力学报,2020,35(5):938-943.  
ZHANG Gong,ZANG Chaoping, LI Fan, et al. Continuous scanning laser vibration test method for ODS of thin-walled cylindrical structure[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(5): 938-943.

圆柱壳、板等薄壁结构因其良好的力学性能,在航空航天等国防和军事工程领域中被广泛应用,如发动机燃烧室薄壁机匣、火焰筒等,机匣作为发动机的主要承力部件,受到空中随机载荷及发动机在各个转速下的振动载荷作用,而模态试验及分析则是了解结构动力学特性的重要手段,能够获取结构的模态参数,有助于结构的设计优化<sup>[1]</sup>。传统的振动测试试验一般使用电涡流位移或加速度传感器采集振动信号,但是加速度传感器有附加质量,并且这两种传感器的安装位置和安装个数都受到限制,仅能对有限的测试面积内进行空间数据的测量,也使得全面监测机匣的总体变形情况受到极大限制<sup>[2]</sup>。近年来,逐点扫描式激光多普勒振动测试技术(scanning laser Doppler vibrometry, SLDV)使用广泛并且发展迅速。SLDV 测试具有非接触无附加质量、可测量较小结构及可布置较多测点的优点,可以有效、准确地获取结构的模态参数(模态频率、模态振型和阻尼比)<sup>[3-7]</sup>。

从本质上讲,SLDV 测试仍然存在测试时间较长测点分辨率低的问题<sup>[8]</sup>。因此,连续扫描激光多普勒振动测试技术(continuous scanning laser Doppler vibrometry, CSLDV)应运而生。在国外 CSLDV 技术已经实现了梁<sup>[8]</sup>、板、圆盘<sup>[9]</sup>、叶片<sup>[10]</sup>的测试。国内陈强、宋安平实现了板、梁的测试<sup>[11-12]</sup>,李繁等<sup>[13]</sup>、张弓等<sup>[14]</sup>实现了曲面叶片三维非矩形及弯曲管路结构工作变形连续扫描激光测试;Schwingshackl 和 Zang(臧朝平)等<sup>[15]</sup>提出了轴向步进,然后径向连续扫描的激光测振方法,通过在自由-自由悬挂状态的薄壁圆筒结构的内表面进行连续扫描,再通过数据处理将各个轴向的连续扫描测试数据综合,实现了薄壁圆筒结构的模态测量。国内,陈香、臧朝平等<sup>[16]</sup>基于 SLDV 技术实现了薄壁机匣三维全场模态测试;覃斌<sup>[17]</sup>、李晖等<sup>[18]</sup>实现了圆筒结构的灯塔式激光连续线扫描测振,但仍需手动调整激光测量的位置,过程较为繁琐且效率不高。

本文进一步提出一种薄壁圆筒结构外表面连续扫描激光多普勒振动(cylinder-continuous scanning laser Doppler vibrometry, C-CSLDV)测试方法。通过伺服电动机控制放置薄壁圆筒结构的平台慢速旋转方式,同时将激光在薄壁圆筒结构外表面进行连续面扫描振动测试,从而快捷实现薄壁圆筒结构外表面的工作变形测量。

# 1 薄壁圆筒结构外表面连续扫描激光测振方法

## 1.1 C-CSLDV 基本原理

CSLDV 测试通过控制扫描镜片,使激光点以特定的规律在结构表面连续移动,同时采集扫描路径上的振动信息,最后经过信号解调及曲线拟合获取结构的工作变形(ODS)。当激励频率与结构某阶固有频率一致时可认为此时结构 ODS 为该固有频率下的模态振型。

CSLDV 测试根据激光点运动速度可分为正弦速度和匀速连续扫描,考虑到若采用匀速度连续扫描,旋转平台做往返运动时产生的转矩会超出伺服电动机的最大转矩限制,因此选择以激光正弦速度连续面扫描作为 C-CSLDV 的理论基础。

针对线性结构,若使用其固有频率对其激励,则结构会出现共振现象,其振动状态可表示为

$$v(x,y,t) = V(x,y)\cos(\omega t + \theta) = V_r(x,y)\cos\omega t + V_i(x,y)\sin\omega t \tag{1}$$

其中  $V(x)$  是平面某点  $x$  在某一时刻  $t$  的速度; $V(x)$  是该点的速度振幅; $V_r(x)$  是实部速度工作变形; $V_i(x)$  是虚部速度工作变形; $\omega$  为结构某阶固有频率。

正弦速度面扫描式的 CSLDV 中,扫描位置  $(x,y)$  是时间  $t$  的三角函数,这里将坐标  $x,y$  分别归一化,即可以得到

$$\begin{aligned} x' &= \frac{x - (X_{\max} + X_{\min})/2}{(X_{\max} - X_{\min})/2} \\ y' &= \frac{y - (Y_{\max} + Y_{\min})/2}{(Y_{\max} - Y_{\min})/2} \end{aligned} \tag{2}$$

在归一化坐标系下,激光点路径可表示为

$$\begin{aligned} x' &= \cos(2\pi ft) = \cos(\Omega t) \\ y' &= \sin(2\pi ft) = \sin(\Omega t) \end{aligned} \tag{3}$$

将式(3)带入式(1)中并进行多项式拟合以及积化和差可得到正弦速度面扫描的 CSLDV 时间信号

$$\begin{aligned} v(x',y',t) = & \sum_{m=0}^p \sum_{n=0}^q A_{rm,n} \cos[(\omega \pm m\omega_{sx} \pm n\omega_{sy})t] + \\ & \sum_{m=0}^p \sum_{n=0}^q A_{im,n} \sin[(\omega \pm m\omega_{sx} \pm n\omega_{sy})t] \end{aligned} \tag{4}$$

其中  $\omega$  为结构固有频率, $\omega_{sx}$  为  $x$  方向激光扫描频率, $\omega_{sy}$  为  $y$  方向激光扫描频率。通过对 CSLDV 测得的振动信号进行解调和曲线拟合即可得到结构的工作变形<sup>[13]</sup>。在进行正弦速度连续扫描时,

激光点沿  $x$ 、 $y$  方向以正弦扫描速度移动,如果  $\omega_{sx} \neq \omega_{sy}$ ,则激光的扫描路径为李萨如图形,如图 1 所示。

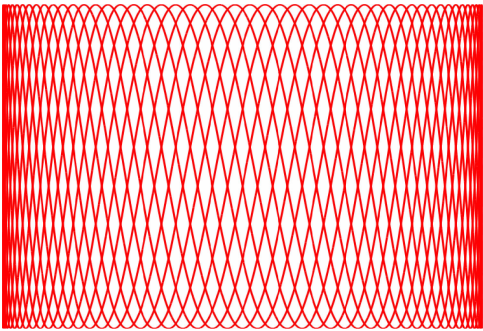


图 1 正弦速度面扫描  
Fig. 1 Sinusoidal velocity surface scanning

基于激光正弦速度连续面扫描测试原理,假设将圆度为零的薄圆筒结构沿周向展开,则可以将其展开成一个平面,激光点在物体表面的  $x$  方向与  $y$  方向做正弦运动,若想要对薄圆筒结构的外表面做连续扫描,则令薄圆筒上的激光在  $x$  方向上以正弦速度运动,同时薄圆筒以正弦速度旋转,并且激光的水平分量与该点的切线相垂直,如图 2 所示。

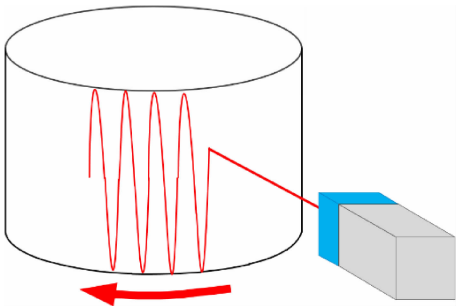


图 2 C-CSLDV 示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of the C-CSLDV

因此,可将薄圆筒放置于旋转平台上,使用伺服电动机驱动平台慢速旋转,将 CSLDV 与伺服电动机控制相结合、路径信号与电动机转速相关联,同时对测试数据进行坐标变换处理,实现激光对薄壁圆筒结构的外表面连续扫描测振。

1.2 伺服电动机控制算法

伺服电动机常用的控制方式为位置控制,即上位装置输出特定的脉冲串指令,控制伺服电动机移动至目标位置,脉冲串指令中的脉冲数用来控制位置,脉冲的频率控制伺服电动机速度,输入高、低电平控制伺服电动机旋转方向。

根据 C-CSLDV 原理,平台旋转角度以正弦

速度随时间变化

$$\theta = \pi \cos(2\pi ft + \pi) + \pi \tag{5}$$

考虑旋转频率受到电动机转矩的限制,设置平台的旋转频率  $f=0.3\text{ Hz}$ ,则在半个周期内角度随时间变化如图 3 所示。

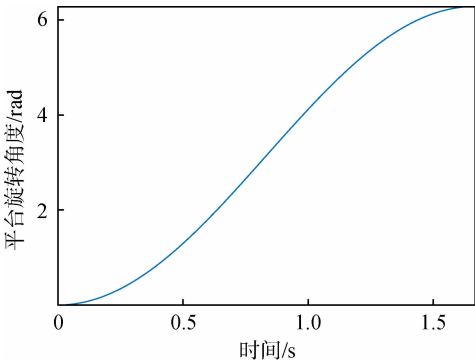


图 3 半个周期平台旋转角度  
Fig. 3 Angle of platform rotation in half cycle

图 3 中曲线任一点的切线斜率即为该时刻平台角速度,若将时间  $t \in (0, 5/3)$  均等分为  $N$  份,则平台角速度可以近似为

$$\omega(t) = -2\pi^2 f \sin(2\pi ft + \pi) \approx \frac{\theta(t_n) - \theta(t_{n-1})}{t_n - t_{n-1}} \tag{6}$$

其中  $t = \frac{t_n - t_{n-1}}{2}, n=1, 2, 3, \dots, N$ 。

假设输出  $M$  个脉冲使平台旋转  $2\pi$ ,即半个周期,因为脉冲串为离散数据,那么角速度可以近似为

$$\omega_m(t) = -2\pi^2 f \sin(2\pi ft + \pi) \approx \frac{2\pi/M}{t_m - t_{m-1}} \tag{7}$$

其中  $t = \frac{t_m - t_{m-1}}{2}, m=1, 2, 3, \dots, M, t_m$  为第  $m$  个脉冲发出的时刻。

当  $N \gg M$  时,设一组数列  $A$  数据个数为  $N$ ,将  $M$  个脉冲按  $t_m \rightarrow t_n$  的规律置于其中,即可得到按正弦规律输出的脉冲信号。

2 薄壁圆筒结构测试实验验证

2.1 SLDV 测试

逐点扫描激光多普勒测振技术已经是一套较为成熟的技术,因此本文将 SLDV 测试获得的模态振型作为评价 CSLDV 测试是否准确的基准,同时也为 C-CSLDV 测试提供薄壁圆筒的固有频率。薄壁圆筒的材料与几何参数如表 1 所示。

表 1 薄壁圆筒参数  
Table 1 Parameters of thin-walled cylinder

| 参数                               | 数值    |
|----------------------------------|-------|
| 弹性模量 $E/\text{GPa}$              | 199   |
| 密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$ | 7 930 |
| 半径 $r/\text{mm}$                 | 200   |
| 高度 $h/\text{mm}$                 | 250   |
| 厚度 $\delta/\text{mm}$            | 5     |

薄壁圆筒放置于海绵上,模拟圆筒无约束自由状态,测试时实验装置如图 4 所示。



图 4 薄壁圆筒结构实验装置

Fig. 4 Thin-walled cylinder experimental device

SLDV 测试采用力锤激励,测试中对圆筒布置 120 个测点,分析频率为 1 000 Hz,采用单输入多输出模态分析方法,测得薄壁圆筒前 5 阶固有频率如表 2 所示。

表 2 薄壁圆筒前 5 阶固有频率  
Table 2 First 5 orders modal frequencies of thin-walled cylinder

| 阶次 | 固有频率/Hz |
|----|---------|
| 1  | 82.25   |
| 2  | 134.38  |
| 3  | 231.73  |
| 4  | 323.66  |
| 5  | 435.00  |

2.2 C-CSLDV 测试

在进行 C-CSLDV 测试时,平台的旋转频率

受到伺服电动机转矩限制,因此设置平台旋转频率为 0.3 Hz,同时保证多周期采样,设置测试时间为 20 s,此外设置激光扫描频率为 5 Hz,采样频率为 20 480 Hz,利用 SLDV 测试获得的固有频率,通过激振器实现对薄壁圆筒的单频激励,依次测试各个固有频率下圆筒工作变形。激振器放置于圆筒内部与圆筒一起旋转,电源线从圆筒上方接入激振器,在旋转时不触碰圆筒且 not 阻碍激光测振。

设置脉冲个数  $M=120,N=36\,000$ ,得到脉冲信号如图 5 所示。

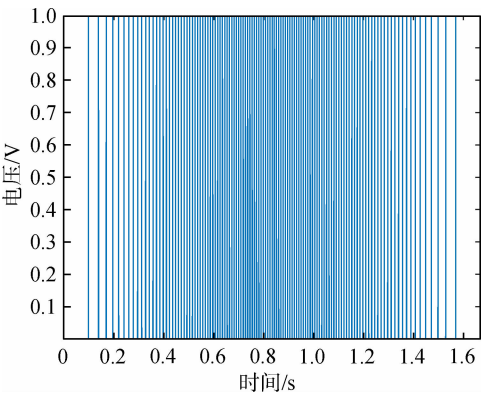
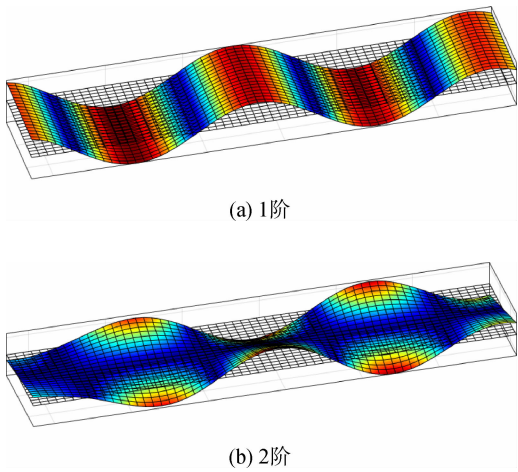


图 5 半个周期脉冲信号  
Fig. 5 Half cycle pulse signal

2.3 结果对比

在周向设置 60 个点,轴向设置 20 个点,共 1 200 个振型数据点。对测试数据进行信号解调及曲线拟合<sup>[13]</sup>获取圆筒展开的平面振型,如图 6 所示。

对平面振型进行坐标变换获得实际坐标下的前 5 阶薄壁圆筒 ODS,SLDV 与 C-CSLDV 测试振型结果对比如图 7 所示。



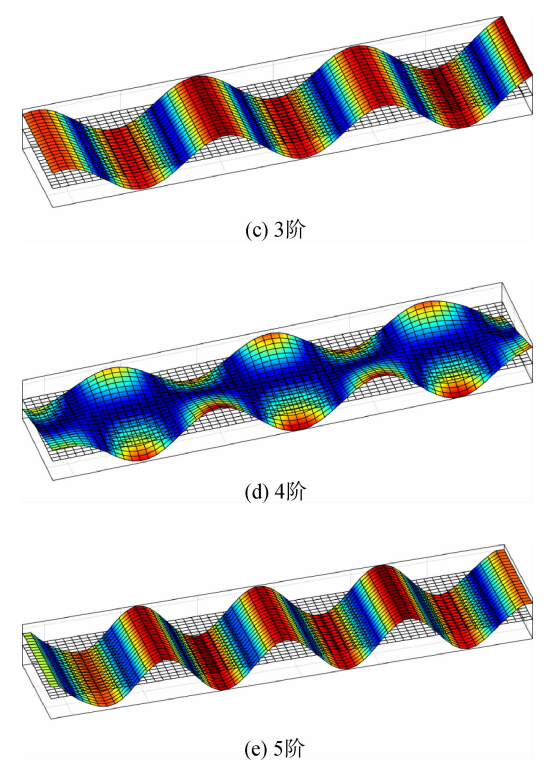


图 6 薄壁圆筒展开的平面振型

Fig. 6 Plane vibration modes of expanded thin-walled cylinder

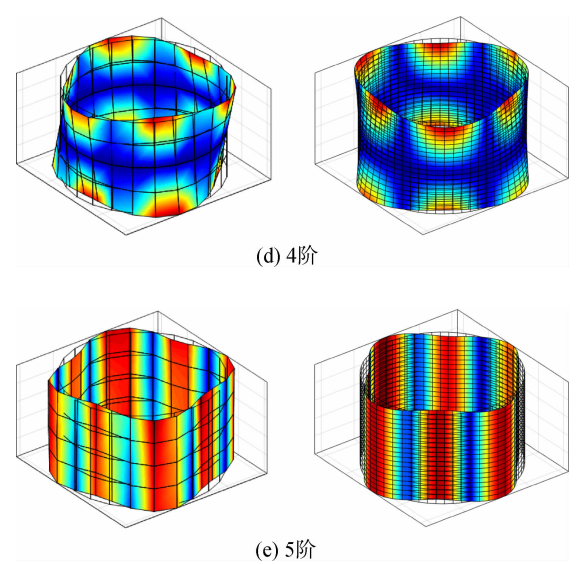


图 7 SLDV 和 C-CSLDV 测试振型对比

Fig. 7 Vibration modes comparison between SLDV and C-CSLDV tests

C-CSLDV 测试与 SLDV 测试相关分析如表 3、图 8 所示,前 5 阶模态置信准则 MAC(modal assurance criterion, 量符号记为  $C_{ma}$ ) 均在 0.96

表 3 C-CSLDV 和 SLDV 振型测试 MAC 值

Table 3 MAC value between SLDV and C-CSLDV vibration mode tests

| 阶次 | $C_{ma}$ |
|----|----------|
| 1  | 0.97     |
| 2  | 0.97     |
| 3  | 0.99     |
| 4  | 0.96     |
| 5  | 0.97     |

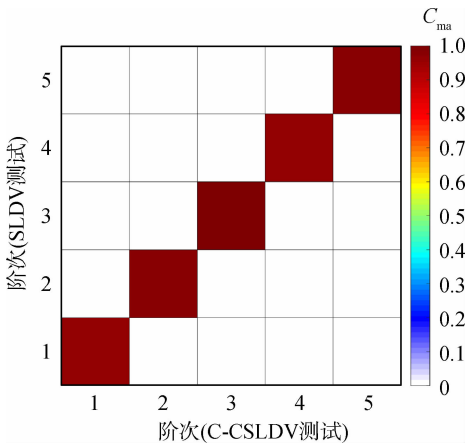
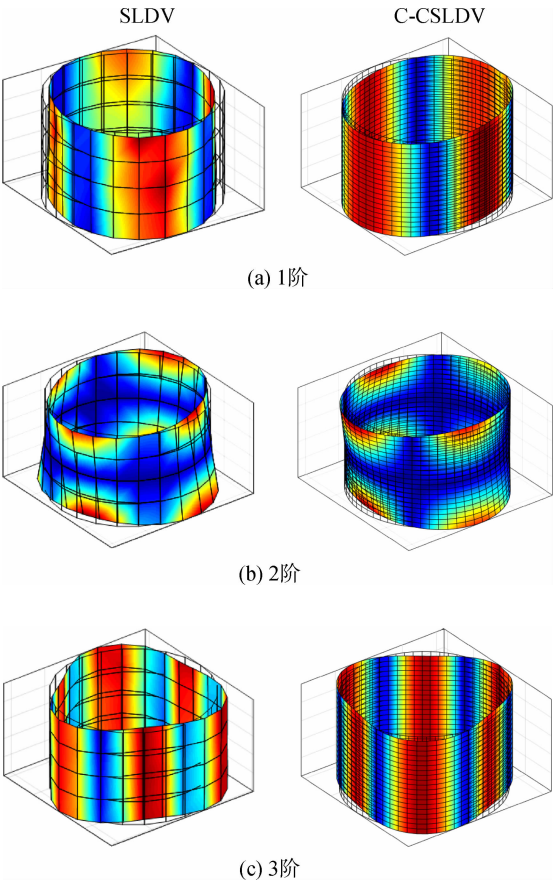


图 8 C-CSLDV 和 SLDV 振型测试相关性 MAC 值

Fig. 8 MAC value of vibration mode between C-CSLDV and SLDV tests

以上,证明伺服电动机控制模式为位置控制时 C-CSLDV 测试具有很高的准确性。

3 结 论

本文将电动机控制平台旋转与激光连续面扫描测振方法相结合,实现圆筒结构以正弦速度旋转,有效获取了薄壁圆筒结构前 5 阶的工作变形。C-CSLDV 与 SLDV 测试的振型有很好的—致性,其 MAC 值都达到了 0.96 以上,验证了 C-CSLDV 测试方法的准确性与可行性。本方法拓宽了激光连续扫描测试的应用范围,使其能够应用于圆筒结构的振动测量,并且具有测点密集、精度高,测试效率高的特点,对于进一步应用于实际结构例如航空发动机机匣等具有一定的指导意义和实用价值。

参考文献:

[ 1 ] 傅志方,振动模态分析与参数辨识[M]:北京:机械工业出版社,1990.

[ 2 ] ALLEN M S,SRACIC M W. A new method for processing impact excited continuous-scan laser Doppler vibrometer measurements[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2010,24(3):721-735.

[ 3 ] 姚欣. 激光多普勒振动检测技术的研究[D]. 天津:天津大学,2004.

YAO Xin. Research on laser Doppler vibration detection technology[D]. Tianjin:Tianjin University,2004. (in Chinese)

[ 4 ] STANBRIDGE A B,EWINS D J. Modal testing using a scanning laser doppler vibrometer[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,1999,13(2):255-270.

[ 5 ] STANBRIDGE A B,EWINS D J,KHAN A Z. Modal testing using impact excitation and a scanning LDV[J]. Shock and Vibration,2000,7(2):91-100.

[ 6 ] STANBRIDGE A B,MARTARELLI M,EWINS D J. The scanning laser Doppler vibrometer applied to impact modal testing[C]// Proceedings of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers ( SPIE). Orlando, US: SPIE, 1999:986-991.

[ 7 ] MARTARELLI M,REVEL G M,SANTOLINI C. On the use of laser Doppler vibrometry for modal analysis[R]. Santa Barbara,US;the 16th International Model Analysis Conference,1998.

[ 8 ] MAIO D D,EWINS D J. Continuous scan,a method for performing modal testing using meaningful measurement parameters;Part I [J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2011,25(8):3027-3042.

[ 9 ] STANBRIDGE A B,EWINS D J. Measurement of translational and angular vibration using a scanning laser Doppler vibrometer[J]. Shock and Vibration,1996,3(2):141-152.

[10] MAIO D D,EWINS D J. Applications of continuous tracking SLDV measurement methods to axially symmetric rotating structures using different excitation methods[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2010,24(8):3013-3036.

[11] 宋安平,臧朝平,张忠. 恒速直线连续面扫描激光多普勒测振方法[J]. 南京航空航天大学学报,2017,49(4):511-517.

SONG Anping,ZANG Chaoping,ZHANG Zhong. Laser Doppler vibration measurement method of constant-speed linear continuous surface scanning[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2017,49(4): 511-517. (in Chinese)

[12] 陈强,臧朝平. 基于连续正弦速度扫描方式的激光多普勒测振技术[J]. 实验力学,2015,30(5):613-620.

CHEN Qiang,ZANG Chaoping. Laser Doppler vibration measurement technology based on continuous sinusoidal velocity scanning method [J]. Experimental Mechanics, 2015,30(5):613-620. (in Chinese)

[13] 李繁,臧朝平. 曲面叶片三维工作变形连续扫描激光测试[J]. 航空动力学报,2018,33(12):2991-2998.

LI Fan,ZANG Chaoping. Continuous scanning laser test for 3D working deformation of curved blades[J]. Journal of Aerospace Power,2018,33(12):2991-2998. (in Chinese)

[14] 张弓,臧朝平,张让威,等. 基于激光连续扫描的弯曲管路工作变形测试方法[J]. 航空发动机,2019,45(4):71-74.

ZHANG Gong,ZANG Chaoping,ZHANG Rangwei,et al. Testing method for working deformation of curved pipelines based on continuous laser scanning[J]. Aeroengine, 2019,45(4):71-74. (in Chinese)

[15] SCHWINGSHACKL C W,ZANG C,MASSEI L,et al. The simulation of a full-field vibration measurement of cylindrical structures using a continuous scanning LDV technique[R]. Ancona,Italy;the 8th International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques,2008.

[16] 陈香,臧朝平,朱靖,等. 基于 SLDV 技术的薄壁机匣三维全场模态测试方法[J]. 航空动力学报,2019,34(2):274-281.

CHEN Xiang,ZANG Chaoping,ZHU Jing,et al. Three-dimensional full-field modal test method of thin-walled case based on SLDV technology[J]. Journal of Aerospace Power,2019,34(2):274-281. (in Chinese)

[17] 覃斌. 单点激光连续扫描测振的薄壁件实验模态测试方法研究[D]. 长沙:湖南科技大学,2013.

QIN Bin. Experimental modal test method of thin-walled parts with single-point laser continuous scanning vibration measurement[D]. Changsha:Hunan University of Science and Technology,2013. (in Chinese)

[18] 李晖,孙伟,许卓,等. 基于激光旋转扫描的约束态薄壁圆柱壳模态振型测试新方法[J]. 振动与冲击,2014,33(16): 155-159.

LI Hui,SUN Wei,XU Zhuo,et al. New method for testing modal shapes of constrained thin-walled cylindrical shells based on laser rotation scanning[J]. Journal of Vibration and Shock,2014,33(16):155-159. (in Chinese)