

# 基于 SLDV 技术的薄壁机匣三维全场模态测试方法

陈 香<sup>1</sup>, 臧朝平<sup>2</sup>, 朱 靖<sup>1</sup>, 滕光蓉<sup>1</sup>, 董 军<sup>1</sup>

- (1. 中国航空发动机集团有限公司 四川燃气涡轮研究院, 四川 绵阳 621000;  
2. 南京航空航天大学 能源与动力学院 江苏省航空动力系统重点实验室, 南京 210016)

**摘 要:** 提出了基于扫描式激光多普勒测振(SLDV)技术的薄壁机匣模态测试方法,实现了薄壁机匣的三维全场振动测试。基于 LDV(laser Doppler vibrometry)测试原理,建立了机匣结构分片三维激光测量方法和拼接技术,实现了三维激光测试数据的处理,准确识别出了机匣的各阶模态参数,并与传统加速度传感器获取的测试结果进行了相关性分析。分析结果显示:两种测试结果的模态振型 NCO(normalized cross orthogonality)值均在 0.9 左右,频差较小,验证了薄壁机匣扫描式激光多普勒三维全场测试的可行性和优越性。

**关 键 词:** 薄壁机匣; 非接触; 三维振动测试; 扫描式激光多普勒测振 (SLDV); 模态实验

**中图分类号:** V219; TH113.1 **文献标志码:** A

## Three-dimensional full-field modal test method for thin-wall casing based on SLDV technique

CHEN Xiang<sup>1</sup>, ZANG Chaoping<sup>2</sup>, ZHU Jing<sup>1</sup>,  
TENG Guangrong<sup>1</sup>, DONG Jun<sup>1</sup>

- (1. Sichuan Gas Turbine Establishment,  
Aero Engine Corporation of China, Mianyang Sicuan 621000, China;  
2. Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System,  
College of Energy and Power Engineering,  
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** A modal test method of casing was proposed based on scanning laser Doppler vibrometry (SLDV), and the 3D full-field vibration measurements of thin-wall casing were completed by studying laser Doppler vibrometry (LDV) measurement principle. A 3D laser measurement method for measuring each part of casing independently and a modal splicing technique were established, the data measured by 3D laser was processed and the modal parameters of casing were identified accurately. Modal correlation between SLDV measurement modes and conventional acceleration sensor measurement modes was analyzed. Results showed that normalized cross orthogonality (NCO) values were about 0.9 and the frequencies difference was very small, validating the feasibility and advantage of using the SLDV to measure the 3D full-field vibration of thin-wall casing.

**收稿日期:**2018-04-28  
**基金项目:**航空基金(2014ZD24017)  
**作者简介:**陈香(1980—),女,高级工程师,硕士,主要从事航空发动机振动测试技术研究。E-mail:c. zang@nuaa.edu.cn

**引用格式:**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 for thin-wall casing based on SLDV technique[J]. Journal of Aerospace Power,2019,34(2):274-281.

**Key words:** thin-wall casing; non-contact; three-dimensional vibration test; scanning laser Doppler vibrometry (SLDV); modal experiment

现代航空发动机的机匣(特别是风扇机匣)往往设计得较薄,且结构越来越复杂,以便减轻发动机的质量,提高推质比。机匣作为发动机的主要承力部件,由于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,其动力学特性对发动机转子的临界转速以及发动机的整机动力学特性等有十分重要的影响。对机匣进行精确、高效的模态测试与模态参数识别,可为机匣的动力学特性分析、振动故障预报和诊断以及结构动力特性的优化设计提供依据<sup>[1]</sup>。

薄壁机匣动力学特性的模态测试,长期以来采用传统的接触式传感器振动测试<sup>[2-3]</sup>方式进行。由于传感器附加质量而改变薄壁机匣的刚度,使模态测试结果的准确性受到很大影响<sup>[4]</sup>,另外传感器的安装位置和安装个数有限,也使得全面描述机匣的振动模态受到限制。近年,扫描式激光多普勒测振(scanning laser Doppler vibrometry, SLDV)技术作为一种非接触测振技术,无附加质量,不受被测物体的尺寸、温度、位置和振动频率等的限制,通过激光扫描系统对测点进行精准的定位,可以快速获得高准确度、高质量的结构振动响应,已经逐渐被广泛应用于航空、航天及汽车等领域。

国外关于 SLDV 的应用以及研究工作开展得较多<sup>[5-13]</sup>。Siringoringo 等采用两束扫描激光测量了自由激励下多个螺栓连接平板的二维全场振动响应,并基于试验数据开展了结构模态信息不完备情况下的振动故障诊断方法验证研究<sup>[14]</sup>; Macknelly、Reyes 等采用三束激光进行同时测试的方法用于小质量构件振动响应和全场应变的测试<sup>[15-16]</sup>; Martarelli 等通过对激光扫描系统不同标定方式的对比试验,研究了扫描系统的标定精度以及激光定位误差对提取的模态参数可靠性的影响<sup>[17]</sup>。有关 SLDV 技术的应用主要侧重于实现简单结构(平板结构或者曲面结构)的测试,很少涉及针对机匣等较为复杂结构的测试,另外,针对应用 SLDV 技术进行结构振动测试方面的研究,国内鲜有相关文献发表。本文结合薄壁机匣的结构特点,提出了一套使用扫描式激光测振仪测量薄壁机匣的三维全场振动响应的方法,通过机匣结构分片三维激光测量和整体拼接技术,准确识别出了机匣三维非接触测试的各阶模态参数,实

现了薄壁机匣振动模态快速、有效的精确测量,可为结构的动力学结构优化设计提供更加完备的实验数据。

1 三维激光测振原理

激光多普勒测振技术(laser Doppler vibrometry, LDV)利用激光多普勒效应,激光源产生的激光束经分光镜分为测量光束和参考光束,其中测量光束经振动的被测件反射回来后发生了频移,对比分析参考光束与测量光束,便可以计算出频移量,并由此换算出被测件的振动速度。

三维激光测振采用三束不共面的激光对结构某点进行三维振动测量,可以得到该点沿三束激光方向的速度分量,分别记为  $u_t$ 、 $u_l$ 、 $u_r$ 。三维激光测试示意图如图 1 所示。

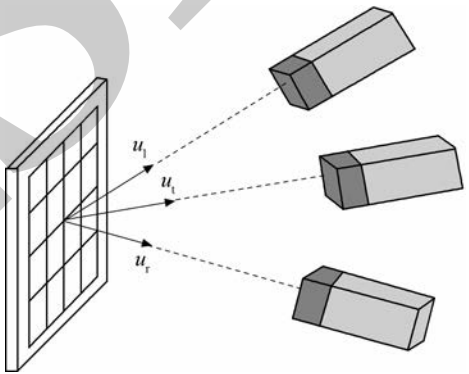


图 1 三维激光测试示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of three-dimensional laser test

设测试点为坐标原点,通过 X、Y 扫描镜片的偏角和测距激光得到的距离,可得到三束激光光束与 X、Y、Z 的夹角分别是  $(\alpha_t, \beta_t, \gamma_t)$ 、 $(\alpha_l, \beta_l, \gamma_l)$  和  $(\alpha_r, \beta_r, \gamma_r)$ 。将 3 个速度表示成以坐标原点为起点的向量

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_t &= (u_t \cos \alpha_t, u_t \cos \beta_t, u_t \cos \gamma_t) = (u_{t1}, u_{t2}, u_{t3}) \\ \mathbf{u}_l &= (u_l \cos \alpha_l, u_l \cos \beta_l, u_l \cos \gamma_l) = (u_{l1}, u_{l2}, u_{l3}) \\ \mathbf{u}_r &= (u_r \cos \alpha_r, u_r \cos \beta_r, u_r \cos \gamma_r) = (u_{r1}, u_{r2}, u_{r3}) \end{aligned} \tag{1}$$

分别经过 3 个速度向量终点的 3 个法平面的交点,即为该点的实际振动速度向量终点。联立 3 个法平面方程

$$\begin{cases} u_{11}(x-u_{11})+u_{12}(y-u_{12})+u_{13}(z-u_{13})=0 \\ u_{21}(x-u_{21})+u_{22}(y-u_{22})+u_{23}(z-u_{23})=0 \\ u_{31}(x-u_{31})+u_{32}(y-u_{32})+u_{33}(z-u_{33})=0 \end{cases} \quad (2)$$

可得方程的解为

$$(x,y,z)=(u_x,u_y,u_z) \quad (3)$$

则该点的实际振动速度为

$$\boldsymbol{u}=(u_x,u_y,u_z) \quad (4)$$

式中  $u_x,u_y,u_z$  分别为该点实际振动速度沿  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴的振动分量。通过坐标分解,可将 3 束激光测得的速度分量转化为直角坐标系下  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  分量。

2 测试方案与测试实施

2.1 测试平台搭建

测试平台如图 2 所示。由于扫描式激光测振仪位置固定,单次测量只能完成部分曲面的模态测试,针对薄壁机匣结构的特点,为了得到机匣的全场精确测试数据,需要将圆筒结构分解为 SLDV 能够单次测得数据的区域。测试过程中需转动机匣进行测试片区的切换,为保证机匣轴线以及机匣被测片区与激光测头相对位置的固定,设计了由电动机驱动的可旋转圆形实验台,由遥控器控制其旋转角度。机匣支撑方式为海绵垫支撑,用以模拟机匣的自由-自由边界条件。



图 2 实验平台

Fig. 2 Experimental platform

扫描激光多普勒测振仪(SLDV)是由单点激光多普勒测振仪(LDV)与一套扫描系统(包含两个正交的偏转振镜)组成,测振仪型号为德国 Polytec 公司 PSV-400-3D 型。同时采用了 3 个激光头(分别为 top、left 和 right)测试机匣沿  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三个方向的振动分量,从而获取机匣的三维全场振动响应。由于增加扫描系统,使得该测试

系统实现了多点化自动测试。

机匣激励方式为力锤激励,采用的是 PCB (printed circuit board)公司 086C63 型力锤。

2.2 测试参考点选择

为确定机匣测点布局以及测试分析频率范围,首先对机匣的前 10 阶模态振型进行了有限元建模分析,计算结果显示,第 10 阶模态频率为 675.3 Hz,最复杂振型为三节径振动。为确保完整地获取机匣的前 10 阶振型数据,选取的测试频率范围为 0~1000 Hz,机匣轴向均布了 7 个测试截面,在每个截面上均布了 18 个测点,共 126 个测点,测点布置情况见图 3。

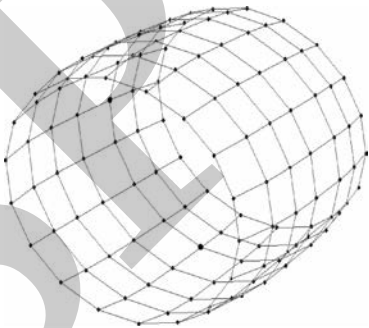


图 3 测点布置

Fig. 3 Collocation of test point

由于机匣为旋转对称结构,模态测试结果中存在重模态现象。传统模态实验区分结构重模态是在被测结构成一定角度的不同方向上采用多个加速度传感器进行振动测试,综合多个传感器的测试数据识别出结构的重模态。对于非接触激光测振仪,虽无法同时对多个点进行测试,但考虑到结构频响函数测试的互易性,可以对结构在不同激励点下分别进行测试,再对测得的频响函数综合分析,即通过不同激励点下的两次非接触测试实验来识别重模态。通过对机匣进行有限元建模,采用有效独立法与平均速度响应结合可得机匣的最佳激励点位置分布,如图 4 所示。

2.3 测试实施

本次机匣三维激光模态测试采用单点激励多点测量的方法,谱线数为 3 200,采样方式为连续采样。为了尽量减小单次测量中噪声的影响,在试验中采用了 3 次稳态平均的方法。将机匣沿周向平均分成了 6 个片区,对每一个片区进行单独的三维激光扫描测振,测试完成后对各个片区的测试数据进行模态拼接。

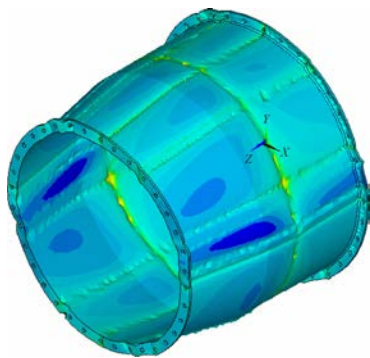


图 4 最佳激励点(蓝色)

Fig. 4 Optimum excitation point (blue)

3 三维激光测试数据处理

3.1 测试数据有效性判断

根据模态分析理论可知,当系统满足线性和时不变假设时,频响函数  $H(\omega)_{ij} = H(\omega)_{ji}$ ,因此,在锤击法模态实验时,可以通过互换激励点和响应点的位置来检验系统是否满足互易性的性质。图 5 给出了互换激励点和响应点前后频响函数曲线,图中纵坐标  $V, F$  分别表示互换激励点和响应点前后的频响函数幅值。红色曲线表示互换激励点和响应点前的频响函数曲线,蓝色曲线表示互换激励点和响应点后的频响函数曲线。从图中可以看出激励点和响应点互换位置前后,频响函数曲线基本保持一致,因此本文中所测数据满足线性和时不变的假设,初步验证了机匣三维激光模态测试的有效性。

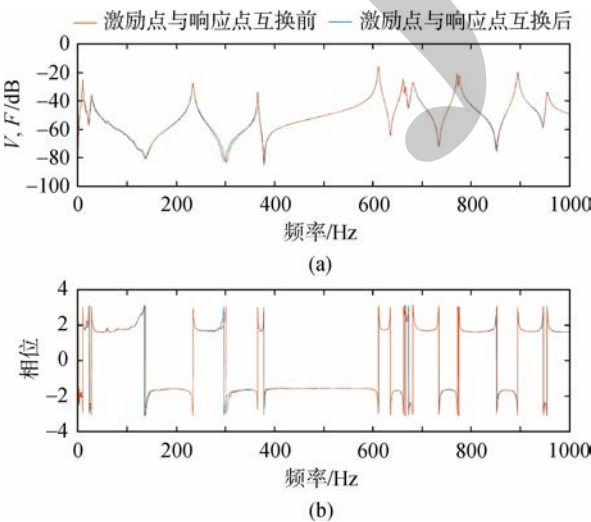


图 5 互换激励点和响应点前后的频响函数曲线

Fig. 5 Frequency response function (FRF) curves interchanging excite point and response point

3.2 模态拼接

采用扫描式三维激光振动测试方法对机匣 6 个相同的片区进行测试后,需要根据各个片区的位置关系将所有测点的坐标信息和振动信息等拼接到同一坐标系下,即完成模态拼接。通常采用相对坐标传递法,即通过计算各个片区与第一片区的相对位置关系而确定各个片区的位置。所获得的模态拼接结果如图 6(图 6(a)、图 6(c))所示。由图可看出,各片区之间产生了比较严重的错位,拼接效果并不理想,所获得的测试数据难以保存和进一步处理,故此方法不能满足测试需要。

通过模态拼接方法改进,确定采用物理坐标法。与坐标传递法不同的是,物理坐标法的特点是各个片区之间的测点坐标不存在相对关系,每个片区均使用独立的物理坐标来确定测点位置,由于在坐标计算过程中不存在累计误差,因此坐标标定精度较高,可以更准确地获得各个测试点的物理坐标,从而获得很好的拼接效果。首先基于  $X, Y$  扫描镜片的偏角和测距激光所测得的距离这两个参数,采用三角测量法获得单个片区内所有测试点的相对位置关系或相对坐标,接着根据片区内任意 3 个测试点的物理坐标,换算出片区内所有测点的物理坐标。对 6 个独立片区分别进行激光扫描振动测试,测试完成后根据各个片区的位置关系将所有测点的坐标信息和振动信息

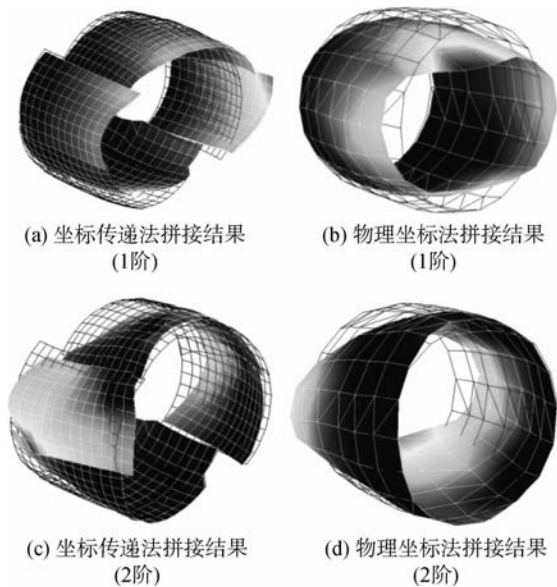


图 6 坐标传递法及物理坐标法拼接效果对比

Fig. 6 Contrast of splicing between coordinate transferring method and physical coordinate method

等拼接到同一坐标系下,拼接效果如图 6(图 6(b)、图 6(d))所示,由图可知,该方法获得了很好的拼接效果。模态拼接效果的改进为薄壁机匣模态数据的高精度测量提供了保证。

3.3 数据处理结果

3.3.1 三维响应测试结果

利用模态参数识别频域分析方法中的正交多项式曲线拟合方法,获取各阶模态的固有频率、振型和阻尼比等模态参数,分析软件为 CATS 软件。

传统加速度传感器只能测试机匣径向振动,再将其分解到正交坐标系,由此得到机匣的模态,但不能得到机匣的轴向模态。三维激光测试使用 3 束不同方向的激光测试一点振动信息,通过数据处理最终可得到机匣 X、Y、Z 三个方向的模态振型,因此三维激光测试使得机匣模态测试信息更加完备,该测试优势为提高模型修正的分析精度提供了进一步保证,这也是三维激光测试优于

加速度传感器测试的一个重要体现。图 7 为采用三维激光测试所获得的机匣 X、Y 和 Z 方向测试频响函数,图中给出了机匣表面 126 个测点的频响函数曲线,同一种颜色的曲线对应为同一个测点的频响函数曲线。由图可见,与 Z 方向相比, X、Y 方向的频响函数的峰值更为明显,该现象与机匣本身 X、Y 方向振动量比 Z 方向振动量大的特性相吻合。

图 8 为采用扫描式三维激光测试所获得的薄壁机匣前 10 阶振型和频率  $\omega_i(i=1,2,\cdots,10)$ ,由图可看出,测试结果中出现了 4 对重模态,第 1 阶与第 2 阶、第 3 阶与第 4 阶、第 5 阶与第 6 阶以及第 9 阶与第 10 阶互为重模态。图 9 为前 10 阶振型的自相关图,图中 S 表示相关系数, S 越大表明相关性越好, 1 表示相关性最好, 0 表示无相关性。由图可知,各阶自相关系数接近 1,重模态对之间的互相关系数较小(小于 0.4),表明三维激光测试方法获取到的薄壁机匣模态振型是有效的,且

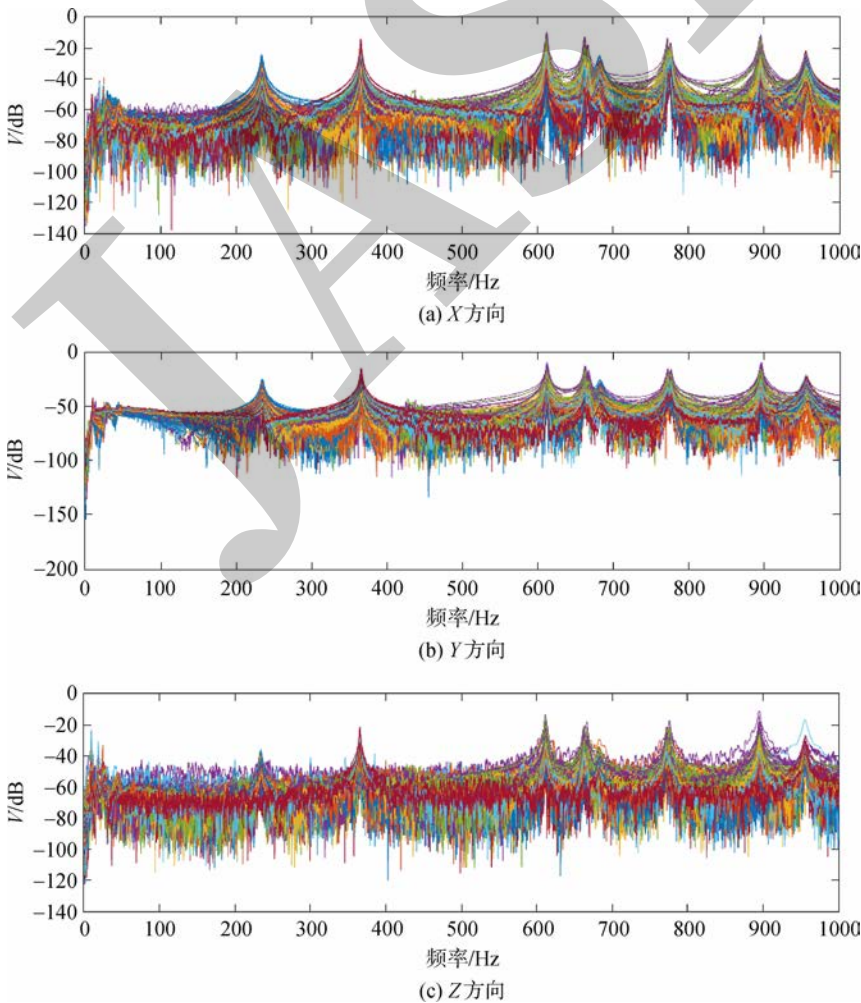


图 7 X、Y 和 Z 方向测试频响函数  
Fig. 7 Test FRF in the direction of X、Y、Z

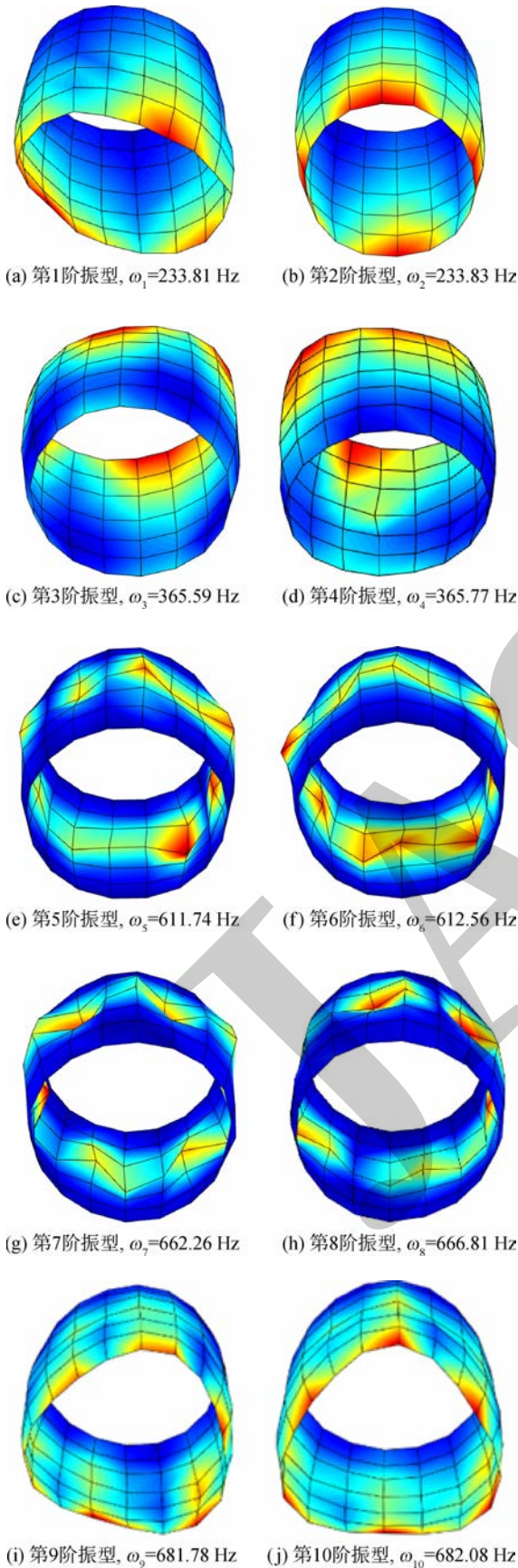


图 8 薄壁机匣的三维激光测试结果

Fig. 8 Three-dimensional laser test result of thin-wall casing

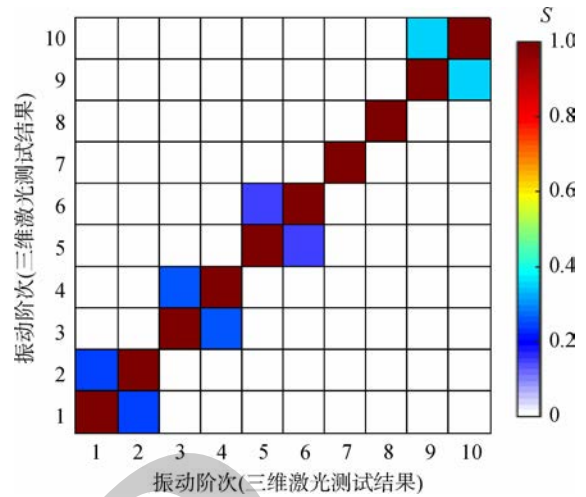


图 9 三维激光测试振型(前 10 阶)自相关

Fig. 9 Self-correlation of three-dimensional laser test result (the first ten orders)

准确识别出了机匣的重模态。

### 3.3.2 测试结果及结果比对

为评价两组振型的接近程度,需要进行模态匹配,一般采用 MAC(modal assurance criterion, MAC,量符号记为  $C_{ma}$ )值来评判两组振型的相关分析,但该准则针对重模态的描述存在局限性,无法很准确的评价其相关程度。引入了 NCO<sup>[18]</sup> (normalized cross orthogonality, 量符号记为  $O_{nc}$ )值,该准则能够有效评价重模态振型的相关性。

$$O_{nc,lm} = \frac{|\Psi_l^T M_{serep} \Phi_m|^2}{(\Psi_l^T M_{serep} \Psi_l)(\Phi_m^T M_{serep} \Phi_m)} \quad (5)$$

式中  $M_{serep}$  是使用 SEREP(system equivalent reduction expansion process)简化的质量矩阵。

$$M_{serep} = (\Psi^{-1})^T \Psi^{-1} \quad (6)$$

其中  $\Psi$  和  $\Phi$  为两个振型向量(特征向量),  $\Psi^{-1}$  为  $\Psi$  的广义逆矩阵。

为进一步验证三维激光测试结果的有效性和准确性,将三维激光测试结果与接触式传感器(加速度传感器)测试结果进行了相关性分析,分析结果见表 1。由表 1 可知,两种测试结果的频差较小,最大为 0.239%;图 10 和图 11 分别为三维激光测试振型与接触式传感器测试振型的 MAC 图和 NCO 图,对比两图可得,由于重模态的存在使得 MAC 值不高( $0.63 < C_{ma} < 0.9$ ),但是 NCO 值较高,在 0.9 左右,表明两种测试方法获得的振型匹配效果良好,由此进一步确认薄壁机匣三维激光测试数据是准确、有效的。

表 1 激光实验与加速度传感器实验相关性分析

Table 1 Correlation analysis about laser experiment and acceleration sensor experiment

| 阶次 | 激光实验频率/Hz | 加速度传感器实验频率/Hz | 相对频差/% | $C_{ma}$ | $O_{nc}$ |
|----|-----------|---------------|--------|----------|----------|
| 1  | 233.8123  | 233.9479      | 0.058  | 0.70     | 0.76     |
| 2  | 233.8343  | 234.3935      | 0.239  | 0.78     | 0.99     |
| 3  | 365.5976  | 365.3279      | -0.074 | 0.75     | 0.85     |
| 4  | 365.7716  | 366.0172      | 0.067  | 0.63     | 0.96     |
| 5  | 611.7370  | 611.1916      | -0.089 | 0.77     | 0.80     |
| 6  | 612.5641  | 609.1592      | -0.556 | 0.68     | 0.79     |
| 7  | 662.2620  | 660.8066      | -0.220 | 0.90     | 0.94     |
| 8  | 666.8109  | 666.7344      | -0.011 | 0.67     | 0.91     |
| 9  | 681.7827  | 681.9431      | 0.024  | 0.82     | 0.98     |
| 10 | 682.0841  | 681.9510      | -0.020 | 0.84     | 0.95     |

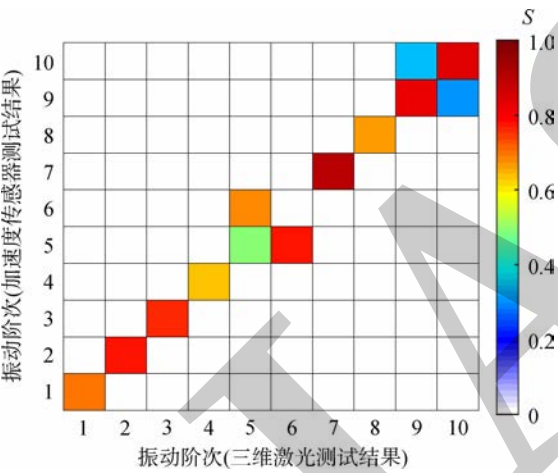


图 10 MAC 图

Fig. 10 Diagram of MAC

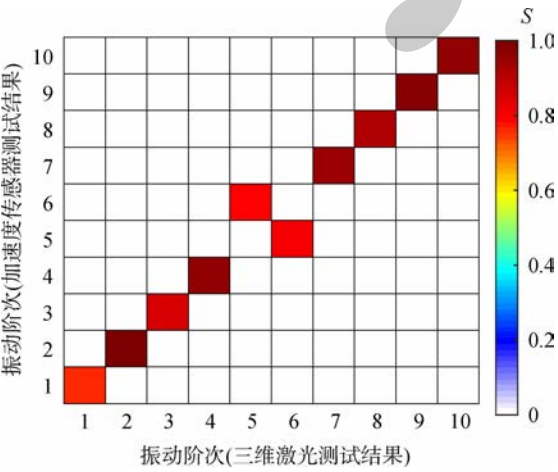


图 11 NCO 图

Fig. 11 Diagram of NCO

4 结 论

本文基于三维激光多普勒测试技术,建立了一套适用于薄壁机匣的 SLDV 测试方法,实现了旋转结构三维全场振动响应的快速测量以及模态参数的准确识别,并传统加速度传感器测试结果进行相关性分析,验证了薄壁机匣 SLDV 测试方法的可行性以及三维激光测试数据的准确性。薄壁机匣的 SLDV 测试方法由于无附加质量、可同时获得机匣表面 3 个方向的振动响应,另外通过改进机匣模态拼接方法获得了更好的模态拼接效果,从而保证了薄壁机匣振动测试数据的完备性以及更高的测试精度。

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] 马双超,臧朝平,兰海波. 某航空发动机机匣的动力学模型修正[J]. 航空动力学报,2013,28(4):878-884.  
MA Shuangchao,ZANG Chaoping,LAN Haibo. Dynamic modal updating of an aero-engine casing[J]. Journal of Aerospace Power,2013,28(4):878-884. (in Chinese)

[3] 廖庆斌,李舜酩,朱丽娟. 基于随机激励的某机匣模态实验与分析[J]. 航空动力学报,2005,20(6):932-936.  
LIAO Qingbin,LI Shunming,ZHU Lijuan. Modal experiment and analysis of an engine casing based on stochastic excitation[J]. Journal of Aerospace Power,2005,20(6):932-936. (in Chinese)

[4] 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.

[ 5 ] SRIRAM P, CRAIG J, HANAGUD S. A scanning laser Doppler vibrometer for modal testing [J]. International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis, 1990, 5(3):155-167.

[ 6 ] SRIRAM P, CRAIG J, HANAGUD S. Scanning laser Doppler techniques for vibration testing[J]. Experimental Techniques, 1992, 16(6):21-26.

[ 7 ] SRIRAM P, HANAGUD S, CRAIG J. Mode shape measurement using a scanning laser Doppler vibrometer[J]. International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis, 1992, 7(3):168-178.

[ 8 ] TIRABASSI M, ROTHBERG S J. Scanning LDV using wedge prisms[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47(3):454-460.

[ 9 ] STANBRIDGE A B, MARTARELLI M, EWINS D J. Measuring area mode shapes with a scanning laser Doppler vibrometer[R]. Bethel, Connecticut, USA; the 17th International Modal Analysis Conference, 1999.

[10] PAUWELS S, BOUCART N, DIERCKX B, et al. Validation of a new non-iterative method for accurate position determination of a scanning laser vibrometer[R]. Ancona, Italy; the 4th International Conference on Vibration Measurement by Laser Techniques, 2000.

[11] WARREN C, NIEZRECKI C, AVITABILE P, et al. Comparison of FRF measurement and mode shapes determined using optically image based, laser and accelerometer[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011, 25(6):2191-2202.

[12] SEVER I A, STANBRIDGE A B, EWINS D J. Turbomachinery blade vibration measurements with tracking LDV under rotation[R]. Ancona, Italy; the 7th International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques; Advances and Applications, 2006.

[13] STANBRIDGE A B, MARTARELLI M, EWINS D J. Analysis of close mode shapes using a scanning LDV[R]. Kissimmee, Florida, USA: IMAC-XIX Conference on Structural Dynamics, 2001.

[14] SIRINGORINGO D M, FUJINO Y. Experiment study of laser Doppler vibrometer and ambient vibration for vibration-based damage detection[J]. Engineering Structure, 2006, 28(13):1803-1815.

[15] MACKNELLY D J, IND P R. Component qualification using 3D laser vibrometry and transmissibility models[J]. Experimental Techniques, Rotating Machinery, and Acoustics, 2015, 8:197-210.

[16] REYES J M, AVITABILE P. Use of 3D scanning laser vibrometer for full field strain measurements[J]. Experimental Techniques, Rotating Machinery, and Acoustics, 2015, 8:181-188.

[17] MARTARELLI M, REVEL G M, SANTOLINI C. Automated modal analysis by scanning laser vibrometry; problems and uncertainties associated with the scanning system calibration[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2001, 15(3):581-601.

[18] SAIRAJAN K K, AGLIETTI G S, WALKER S J I. Correlation of finite element models of multi-physics systems [J]. Journal of Sound and Vibration, 2014, 333(17):4051-4070.

(编辑:王碧珺)