

基于激光连续扫描的弯曲管路工作变形测试方法

张 弓¹, 臧朝平¹, 张让威², 李 繁¹, 王晓伟¹

(1.南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016; 2.中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

摘要:针对某发动机外部部分弯曲管路的振动测试工作,提出了1种基于激光多普勒连续扫描的高效测试方法。将线段的坐标变换引入激光连续扫描,发展了1种适合弯曲管路的激光连续扫描路径算法,使连续扫描激光振动测试应用于曲线结构,并进行了试验验证。结果表明:对某发动机外部管路中的弯管进行了曲线激光连续扫描测试,获取了1000 Hz 内的2阶模态,与商用激光离散点扫描测试模态振型的相关性在0.9以上,验证了曲线连续扫描激光多普勒振动测试的可行性和准确性。连续扫描激光测试的效率、测点密集,对进一步工程应用具有重要意义。

关键词: 弯曲管路;激光多普勒;工作变形;连续扫描;航空发动机

中图分类号: V216.2+1

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2019.04.014

Test Method for Operational Deflection Shape of Curved Pipeline Based on Laser Continuous Scanning

ZHANG Gong¹, ZANG Chao-ping¹, ZHANG Rang-wei², LI Fan¹, WANG Xiao-wei¹

(1.College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2.AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: An efficient testing method based on laser Doppler continuous scanning was proposed for the vibration test work of an external part of the curved pipeline of an engine. Coordinate transformation of line segment was introduced laser continuous scanning. A laser continuous scanning path algorithm was developed for curved pipeline. The continuous scanning laser vibration test was applied to the curve structure, and the test verification was carried out. The results show that the curve laser continuous scanning test has been carried out on the pipeline in the external part of the engine, and the second order modes in 1000 Hz has been obtained. The correlation between the mode shape and the commercial laser discrete point scanning mode shape is above 0.9. The feasibility and accuracy of the vibration test of the curve continuous scanning laser Doppler are verified. Continuous scanning laser test has high efficiency and dense test points, which is of great significance for further engineering application.

Key words: curved pipeline; laser Doppler; operational deflection shape; continuous scanning; aeroengine

0 引言

航空发动机管路一般用于输送燃油、滑油和空气等介质,是航空发动机的重要零件。长期以来,由于受到转子不平衡力和风扇气动激励等外界激励,发动机管路系统一直存在振动故障问题^[1]。振动因素是发动机导管及导管支架断裂的主要原因,因此,了解发动机管路的动力学特性,对管路的结构优化设计和防止管路故障的发生具有重要意义。管路的动力学特性测

试通常采用传统的接触式加速度传感器或应变片进行。加速度传感器的附加质量会影响测试结果的精度,同时还存在传感器布置测点的数目有限、测点空间分辨率低和测试信息不完备等缺陷;而应变片粘贴工艺复杂,并且难以测试管路振型,多用来分析管路振动频率。近年来,扫描激光多普勒振动测试技术(Scanning Laser Doppler Vibrometry, SLDV)凭借非接触测试和测试便捷等优点得到发展并被广泛使用。SLDV 测试是1种成熟的离散点扫描激光测振技术,

收稿日期:2018-06-11

基金项目:国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院联合基金(NO.U1730129)、江苏省航天动力系统重点实验室基金(NJ20160019)资助

作者简介:张弓(1995),男,在读硕士研究生,研究方向为动力机械振动与测试;E-mail:1070674758@qq.com。

引用格式:张弓,臧朝平,张让威,等.基于激光连续扫描的曲线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. Test method for operational deflection shape of curved pipeline based on laser continuous scanning [J]. Aeroengine, 2019, 45(4): 71-74.

可以有效地测试结构频响函数,准确获取结构固有频率、阻尼比及模态振型^[2-5]。

虽然 SLDV 测试可以在一定程度上提高测点的密集程度,但并未从本质上解决测点分辨率低的问题^[6],且测试时间较长。在此基础上,研究者提出了连续扫描激光多普勒振动测试技术(Continuous Scanning Laser Doppler Vibrometry, CSLDV)。CSLDV 测试通过控制激光点在试验件表面以连续运动的方式采集振动信号,通过相应的数据处理方法得到试验件测点密集的工作变形(Operational Deflection Shape, ODS)。CSLDV 测试在国外起步早,发展较为成熟,已实现了梁^[7]、板、圆盘^[8]、叶片^[9]和圆筒结构^[10-11]的连续扫描测试。国内陈强、宋安平^[12-13]实现了板梁结构的试验测试;覃斌、李晖^[14-15]实现了圆筒结构的激光连续扫描振动测试。但是在工程应用中,实际结构较为复杂,大多不是简单的板梁结构,例如航空发动机外部管路具有复杂的弯曲结构,使得激光连续扫描测振技术实用性不强。

本文针对弯曲管路结构,根据曲线激光连续扫描原理,进行了 ODS 测量和分析,并进行了方法验证。

1 曲线激光连续扫描工作变形测试方法

扫描式激光测振仪在激光前端配有 1 套轴线正交的扫描镜片,分别由 2 个电极驱动,作为激光扫描位置的执行机构,如图 1 所示。镜片的扫描角度由电极的输入电压控制,并且存在一定的线性关系

$$\alpha_x = SV_x, \alpha_y = SV_y \quad (1)$$

式中: α_x 和 α_y 为 X 和 Y 方向镜片的偏转角度; V_x 和 V_y 为 X 和 Y 方向电机的输入电压; S 为比例系数。

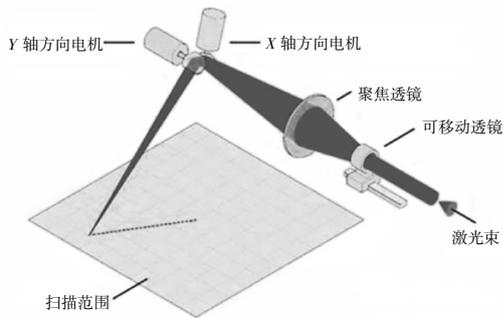


图 1 激光扫描系统

本文使用的扫描式激光测振仪型号为 Polytec-PSV-400-3D,其比例系数 $S=4^\circ/V$ 。扫描镜片偏转角度决定了激光扫描点的位置,并且一一对应。

曲线扫描路径计算的基础是线段的坐标转换。已知水平线段两端坐标分别为 $A(x_1,0)$ 和 $B(x_2,0)$,转换后的端点坐标分别为 $A'(x'_1,y'_1)$ 和 $B'(x'_2,y'_2)$,2 个线段上的点一一对应,点集为映射关系。

转换后的坐标与转换前坐标可表示为线性变换

$$x' = a_1 + a_2x, y' = b_1 + b_2x \quad (2)$$

式中: a_1, a_2, b_1 和 b_2 为转换系数。

将转换前后线段端点坐标带入式(2),得到

$$\begin{cases} x'_1 = a_1 + a_2x_1 \\ x'_2 = a_1 + a_2x_2 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} y'_1 = b_1 + b_2x_1 \\ y'_2 = b_1 + b_2x_2 \end{cases} \quad (4)$$

表示成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} x'_1 \\ x'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 \\ 1 & x_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} y'_1 \\ y'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 \\ 1 & x_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

可求得转换系数为

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 \\ 1 & x_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x'_1 \\ x'_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 \\ 1 & x_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} y'_1 \\ y'_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

求得转换系数,即建立了 2 个点集之间的映射关系。如发动机外部管路中弯管有 3 段直线和 2 段弯曲部分,直线部分可在直线两端标记标定点,弯曲部分则需要选择更多的标记点,用多段线段逼近曲线。在曲线扫描中标定点就是进行坐标变换线段的端点,2 个标定点之间的区域就是进行坐标变换的线段。弯管 UG 模型及其选择的标定点如图 2 所示。



图 2 弯管 UG 模型及其标定点

在激光线扫描测试中,路径被定义在归一化坐标中,即 $x \in [-1,1]$,实际扫描区域为曲线,总的扫描长度为各段扫描线段的总和,记为 l ,根据每段扫描线段的长度和总长度 l ,将标定点转换到归一化坐标中。

在归一化坐标中,标定点和激光扫描点如图 3 所示。激光为正弦速度扫

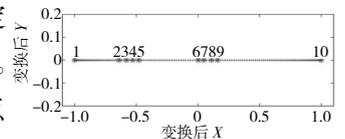


图 3 归一化坐标下标定点和扫描点

描,因此激光点之间的距离呈正弦规律变化。

10 个标定点将弯管分为 9 个区间,通过坐标变换前后端点标定点的坐标,分别将 9 个区间内的归一化坐标激光扫描点变换到实际坐标,得到沿管路的曲线扫描线,如图 4 所示。后期数据处理所得到的管路工作变形也是在归一化坐标下,同样依此法将归一化工作变形转换为实际坐标工作变形。

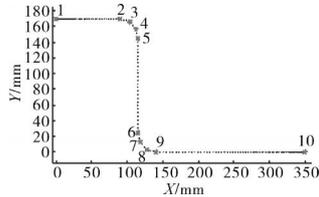


图 4 实际坐标下标定点和扫描点

2 曲线管路测试试验验证

2.1 SLDV测试

为了验证曲线激光连续扫描测试方法的准确性,选择 1 个方向进行激光 SLDV 和 CSLDV 测试,并将 SLDV 测试振型作为评价 CSLDV 测试的基准。

以某发动机外部部分弯曲管路作为研究对象,弯管在模态测试中测点布置如图 5 所示。

测试采用力锤激励,使用橡皮绳悬挂弯管,弯管总长为 0.57 m,模拟自由边界条件,共设置 19 个测点,每个测点测试 3 次并取平均值,分析频率为 2000 Hz,测试时间为 182.4 s,测得第 1、2 阶固有频率分别为 234.4、660.5 Hz。相应的模态振型如图 6 所示。图中黑线为初始模型,蓝线为模态振型。

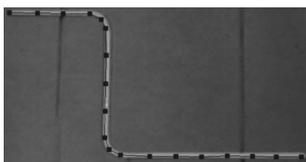


图 5 弯管测点布置

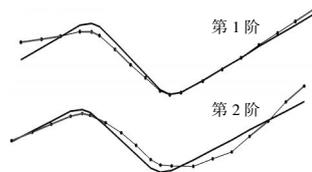


图 6 弯管前 2 阶模态振型

2.2 CSLDV 测试

设置激光曲线激光连续扫描测试距离为 1879.3 mm,测试时间为 2 s,采样率为 8192 Hz,通过测试软件在实际管路相应位置上选取 10 个标定点,根据坐标变换算法计算镜片扫描电压,使激光点以正弦速度在结构表面做往返运动,同时,采集扫描路径上的振动信息。采用力锤激励方法对弯曲管路实施激励,此时激光连续扫描采集的弯曲管路振动速度信号是扫描路径上的工作变形和扫描频率调制的振动响应信号,如图 7 所示,对其时域信号进行解调得到的频谱如图 8 所示。

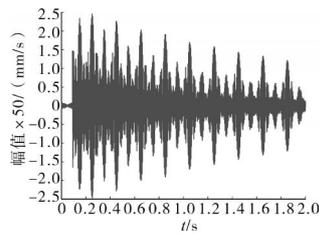


图 7 弯管连续扫描测试时域信号

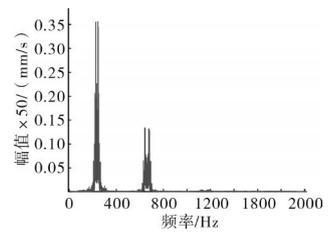


图 8 弯管连续扫描测试频谱

弯曲连续扫描测试的频谱特征是以每阶固有频率为中心、扫描频率为谱线之间的间隔形成的一系列边带谱组成,固有频率即为该中心谱线处的频率。将图 8 测试得到的弯管前 2 阶振动频率及其对应的边带谱进一步分别用如图 9、10 所示。

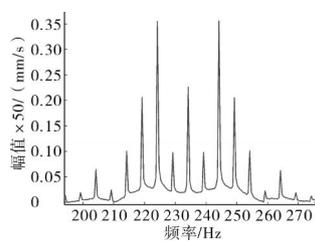


图 9 弯管连续扫描测试第 1 阶边带谱

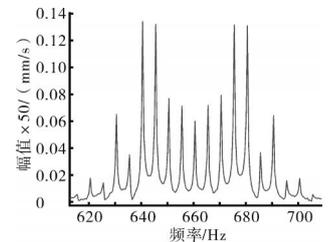


图 10 弯管连续扫描测试第 2 阶边带谱

使用文献[13]中提出的方法对边带谱进行解调获取多项式系数并拟合成对应的归一化坐标下的振型,最后经坐标变换就可获取实际坐标下结构的振型。

2.3 结果对比

弯管连续扫描工作变形分析是在归一化坐标内进行的,参考图 4 的归一化坐标,设置[-1,1]内均匀分布 50 个测点进行解调分析。弯管的第 1、2 阶模态在归一化坐标的工作变形如图 11 所示。

CSLDV 与 SLDV 弯曲管路测试时间及测点分辨率对比见表 1。从表中可见,与 SLDV 测试相比,CSLDV 测试时间短、效率高,且测点分辨率高,可通过增加信号解调时设置的测点提高测点分辨率。

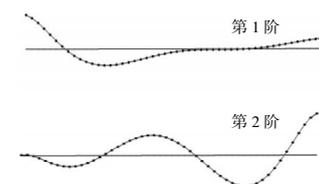


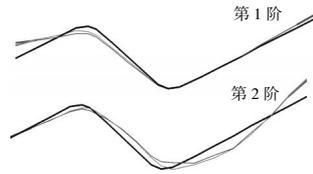
图 11 弯管第 1、2 阶归一化工作变形

表 1 CSLDV 与 SLDV 测试时间及测点分辨率对比

	CSLDV	SLDV
测试时间/s	2	182.4
测点分辨率	0.0114	0.03

从图 4 可见,通过坐标变换将归一化工作变形转换到实际坐标下,并与 SLDV 测试振型的对比如图

12所示。图中黑线为初始模型,蓝线为SLDV测得振型,红线为CSLDV测得振型。



CSLDV测试与SLDV测试相关分析见表2。从表中可见,2种测试方法测试频率一致,振型相关性较高,验证了曲线连续扫描测试方法的有效性。

表2 弯管CSLDV测试与SLDV测试相关分析

阶次	频率/Hz		频差/%	MAC
	CSLDV	SLDV		
1	234.2	234.4	-0.07	0.97
2	660.6	660.5	0.01	0.91

3 结束语

本文研究了弯曲管路工作变形激光连续扫描测试方法,用多线段逼近曲线,研究了曲线连续扫描路径的坐标转换方法,并将冲击激励应用于弯管的曲线连续扫描测试,有效获得了弯管的前2阶工作变形,与SLDV测试振型具有很高的一致性,验证了激光曲线连续扫描测试方法的有效性。本方法具有测点密集、精度高、测试效率高的特点,是激光连续扫描测试工程应用的突破。

参考文献:

- [1] 林君哲,周恩涛,杜林森,等. 航空发动机管路系统振动机制及故障诊断研究综述[J]. 机床与液压, 2013,41(1):163-164.
LIN Junzhe,ZHOU Entao,DU Linsen. Literature review on vibration mechanism and fault diagnosis of the pipe system of aero-engine[J]. Machine tool & Hydraulics,2013,41(1):163-164.(in Chinese)
- [2] Stanbridge A B, Ewins D J. Modal testing using a scanning laser Doppler vibrometer [J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 1999,13(2):255-270.
- [3] 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.
- [4] Stanbridge A B,Martarelli M,Ewins D J. The scanning laser Doppler vibrometer applied to impact modal testing [C]// In 17th International Modal Analysis Conference - IMAC XVII. vol. 1 Kissimmee, FL, USA: SEM, Bethel, CT, USA, 1999:986-991.
- [5] Martarelli M,Revel G M,Santolini C. On the use of laser Doppler vibrometry for modal analysis[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 1998,2(2):1750-1757.
- [6] Castellini P,Revel G M,Tomasini E P. Laser Doppler vibrometry: a review of advances and applications [J]. Shock & Vibration Digest, 1998,30(6):443-456.
- [7] 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.
- [8] Martarelli M. Exploiting the laser scanning facility for vibration measurements[D]. London:University of London,2001.
- [9] 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 & Signal Processing, 2010,24(8):3013-3036.
- [10] 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 [C]//Proceedings of SPIE on the 8th International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advances and Applications. Bellingham,Washington: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers,2008:7098-7103.
- [11] Schwingshackl C W,Massei L,Zang C,et al. A constant scanning LDV technique for cylindrical structures: simulation and measurement [J]. Mechanical Systems & Signal Processing,2010,24(2):394-405.
- [12] 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 vibrometry method with uniform rate raster continuous scanning[J].Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,2017,49(4):511-517. (in Chinese)
- [13] 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. On the laser Doppler vibrometry technique based on continuous scanning LDV with sinusoidal rate[J]. Journal of Experimental Mechanics,2015,30(5):613-620. (in Chinese)
- [14] 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. Research on experimental modal testing method for thin-walled parts using single point laser continuous scanning vibration measurement [D]. Changsha:Hunan University of Science and Technology,2013. (in Chinese)
- [15] 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. A experimental method of laser rotating scanning to measure mode shape of constrained thin cylindrical shell[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014,33(16):155-159. (in Chinese)

(编辑:刘亮)