

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2022.02.022

含矩形缺口的平板结构工作变形的激光连续扫描测试方法

张磊¹, 臧朝平¹, 陈香², 王琦²

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016;

2. 中国航发四川燃气涡轮研究院, 四川 成都 610000)

摘要:设计一种基于扫描路径规划策略的激光连续扫描多普勒测试的方法,以实现含任意矩形缺口的平板结构的工作变形测量。通过规划激光扫描路径设计,实现包含任意矩形缺口的平板结构表面的连续扫描;针对分区域多路径扫描存在的振型错位和节径两侧反向振动问题,进行振型重构的实验数据处理,得到结构的工作变形;将其与逐点式扫描激光测试结果进行对比,MAC值均>0.95,验证了方法的有效性。该方法具有高效率、测点密集等优势,提高了连续扫描激光测试的适用范围。

关键词:矩形缺口;连续扫描;激光多普勒;路径规划;振型重构

中图分类号:TP206+.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)02-0079-04

Continuous Scanning Laser Testing Method for Working Deformation of Flat Plate Structure with Rectangular Hole

ZHANG Lei¹, ZANG Chaoping¹, CHEN Xiang², WANG Qi²

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

2. Sichuan Gas Turbine Research Institute of AVIC, Chengdu 610000, China)

Abstract: A method of laser continuous scanning Doppler measurement based on scanning path planning strategy is proposed to realize the deformation measurement of flat plate structure with arbitrary rectangular holes. By planning the laser scanning path design, the continuous scanning of the flat plate structure surface with arbitrary rectangular holes is realized. To solve the problems of vibration mode dislocation and reverse vibration on both sides of the node diameter in the multi-path scanning, the experimental data of vibration mode reconstruction is processed to obtain the working deformation of the structure, with which the point scanning laser test results is compared. The comparison result shows that the MAC values are greater than 0.95, which verifies the effectiveness of the method. The proposed method improves the application scope of continuous scanning laser testing with high efficiency and dense measuring points.

Keywords: rectangular hole; continuous scanning; laser Doppler; path planning; mode shape reconstruction

0 引言

连续扫描激光多普勒测振技术(continuous scanning Laser doppler vibrometry, CSLDV)作为一种非接触振动测试技术,具有无附加质量、测试精度高、动态测量范围大等优势,且应用灵活性好、可用于远程测量。因此,目前发展比较完善,普遍应用于航空航天等国防和军事工程领域中,如航空发动机的涡轮叶片、外置管路系统等。在国外,已经在板、梁、圆盘、叶片等结构上实现了连续扫描激光测试^[1]。在国内,陈强、宋安平等实现了板、梁的测试^[2-3],包括匀速度连续扫描和正弦速度连续扫描,但仅适用于测试表面形状规则的结构。而当激光用于连续扫描测振时,

扫描路径不能出现间断,即激光不能进行跳跃,否则会对激光测试数据产生难以预估的影响,导致实验结果可信度降低,甚至无法得到结果。

目前 CSLDV 一般只用于规则形状结构的测量,而在实际工程应用中,大部分结构表面均为非规则形状,难以直接使用激光进行连续扫描测振。在国内,张弓等利用线段的坐标转换,实现了发动机外部弯曲管路的振动测试,但仅适用于曲线扫描,无法用于面扫描^[4];李繁等通过调整扫描幅值和利用归一化扫描区域与实际扫描区域的映射关系,实现了大扭转叶片的三维 ODS 测量,但二元二次多项式的拟合关系难以适用于复杂扫描区域^[5]。因此,本文设计了一种针对包含任意矩形缺口的平板结构表面进行连续扫描的激光多普勒测振测试方法。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(12072146)

第一作者简介:张磊(1995—),男,江苏南通人,硕士研究生,研究方向为结构振动与激光测试。

1 多矩形缺口结构的激光连续扫描测试方法

基于多矩形缺口结构的一般化,选择在任意位置包含任意大小、任意个数矩形缺口的结构,进行连续扫描激光测试方法的研究。

1.1 路径规划方法

当激光以恒速直线扫描方式进行 CSLDV 测试时,路径需要始终保持为恒速直线。对于包含任意矩形缺口的平板结构,按照缺口所在位置可以分为所有缺口均在侧边和在中间任意位置存在缺口两种情况,主要思路为将第二类通过一定的步骤变为第一类后再规划路径。将在中间任意位置存在缺口的情况按照缺口的个数进行分类,并分为单个和多个两种。在单个缺口的时候直接沿缺口一侧切割后首尾相连进行拼接即可;在多个缺口的时候,需要在选择合适的切割方向后判断所有缺口之间是否互相干扰。如果矩形缺口相互独立不干扰,即将其中每一个孔沿任意边的方向进行延展,不会与其余孔相交,则直接沿所有缺口的同一侧切割后拼接;如果矩形缺口之间互相干扰,即一个孔沿任意一边的方向延展后会与另一个孔相交,则需要选择一组数量最多且互相不干扰的缺口,保证组外缺口没有独立于组内缺口,然后沿所有组内缺口同一侧切割后拼接。

在将所有情况都切割拼接处理为只有侧边存在矩形缺口之后,按照如下步骤规划路径:

- 1)取幅值不变的方向,利用三角波函数直接生成周期性的路径-时间函数,并且计算得到单程扫过另一方向每一个幅值一致的区域各自需要的时间 $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ 。
- 2)取幅值在变化的方向,根据各区域所需时间 t 和扫描范围,计算得到对应的采样数,便可代入三角波程序生成单程路径函数。
- 3)将 n 组单程路径函数按照扫描对应的顺序进行拼接,得到一个周期的路径函数。基于激光不跳跃原则,为保证每一段路径拼接时首尾不间断连接以及保证激光不会扫描到缺口处,取拼接前后幅值相对大的一段,将其临近拼接的 $1/4$ 个周期或者半个周期进行处理。

上述针对包含任意矩形缺口的平板结构进行路径规划的流程如图 1 所示。

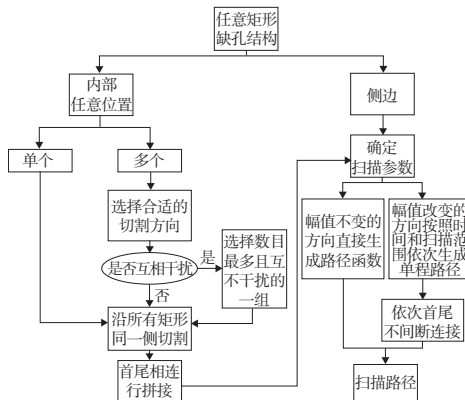


图 1 包含任意矩形缺口的平板结构路径规划流程图

为了满足任意性,选择有两个互相干扰的矩形缺口的平板作为研究对象,如图 2 所示。

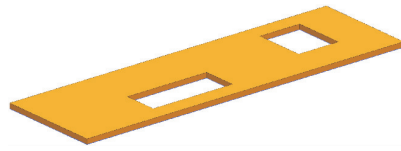


图 2 两个矩形缺口的平板模型

此类结构表面连续扫描路径规划的核心目标是将结构进行假想的分割。为了方便后续的处理,选择按同一方向分割,得到多个只包含侧边矩形缺口的子区域,最后将分割后的各区域按照原有的联系首尾相连。基于所选结构的表面特性,同时为了使实验更加具有一般性,分割线选择在某阶待测振型的一条节线上,因此选择从中轴线切开,将一部分沿底部翻转 180° 后平移得到替代原结构表面的区域,如图 3 所示。



图 3 任意两个矩形缺口结构表面切割拼接后结果

针对此仅在侧边包含矩形缺口的结构,选择长边方向扫描频率 16 Hz,短边方向扫描频率 0.125 Hz。同时为保证多周期采样,设置测试时间 32 s,采样频率 4096 Hz。按照步骤规划路径,得到激光点在两个方向上的位置-时间函数,合成后扫描路径如图 4 所示,很好地实现了扫描区域的选择性,即扫描且仅扫描了结构的所有表面,并且测试分辨率比较高。

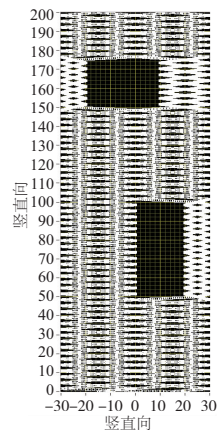


图 4 包含两个矩形缺口结构表面的连续扫描路径规划图

1.2 振型重构方法

在完成主要包括测试延迟处理、延迟点优化、虚部最小化和信号解调等过程的基础处理之后,结构的第 3 阶振型如图 5 所示,其中存在两个典型问题。即:子区域内部的扫描幅值不同导致了扫描时无法保持匀速,因此出现了振型错位;在初步处理时将其当作分割拼接后的形状,因此出现了节径两侧的反向振动。

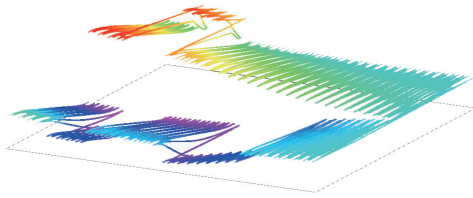


图5 包含任意两块矩形缺孔结构的第3阶处理前振型

第3阶属于扭转模态振型,由于扫描速度变化出现了错位现象,但是速度变化仅仅表现为在不同幅值时的不同速度,扫描路径在划分好的各自区域内部仍然是恒速运动的。因此中间区域的模态振型结果在广义上确实是该区域的振型,只是其 ODS 的振幅和基准面不一样。因此,可以将此部分的实部振型分量代入一次线性函数:

$$f(x(i)) = kx(i) + b \quad (1)$$

式中系数 k 目的在于将区域振型的扭转程度变到与其余区域一致,系数 k 取负值表示将振动方向反向;系数 b 目的在于将该区域振型的基准面变到与其余区域一致。因此,一次线性函数可以很好地解决此问题,此方法关键步骤在于确定系数 k 与系数 b 。

本文提出了用于确定 k 和 b 的两种方法。第一种方法是首先确定 k 和 b 各自必然存在的区间,这一步一般需要人为参与,在数据较少时,也可以任意给一个比较大的区间,然后在各自区间内对系数 k 和 b 进行一个双循环。循环过程中选取最佳结果的判断标准为在振型连接处均匀地取 n 组临近点对,如图6所示,每一组振型幅值的差值取绝对值后求和:

$$\sum_{n=0}^n |\Delta X(n)| \quad (2)$$

当和最小时为最佳结果。

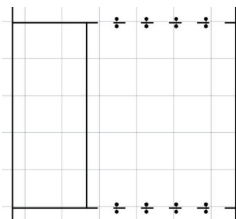


图6 选取临近点对示意图

另一种方法是基于内插法-三次样条插值,首先在中间待调整区域根据振型复杂程序的需求,确定选取点的个数 n 以及选取位置。上文中实例的测试结构选取5个点,选择情况如图7所示。将选择的 n 个点横坐标记作 $X(i)$,纵坐标记作 $Y(i)$,该处振动幅值记作 $Z(i)$,然后以其临近的需衔接区域的振型信息为基础,每个点的 $X(i)$ 与 $Y(i)$ 值作为依据进行三次样条插值得到对应的 $Z'(i)$,寻找最合适的系数 k 与 b ,使其满足

$$Z'(i) = k \times Z(i) + b \quad (3)$$

最后将待处理区域所有的振动幅值均进行此变化,便可以满足表面连续性条件,得到完整的振型。

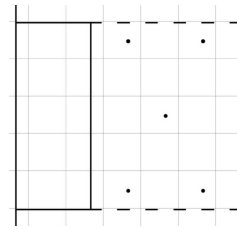


图7 选取振型特征点示意图

针对在节线处反向振动的问题,主要有以下三种方法可以解决:

1) 条件允许可以重新设计并进行实验的前提下,如果结构比较简单且阶次要求比较少,可以综合考虑所有阶次振型上节线出现的位置,尽可能地避开所有节线,重新优化规划扫描路径后进行重新测试;

2) 在结构比较简单且阶次要求比较少的情况时,可以基于表面连续性原则,人为参与修正;

3) 在结构复杂或者阶次要求比较多的情况时,需要通过相位识别,来确认每个区域边界之间的振动相位,然后基于相位进行修正。

本节中包含两个任意矩形缺孔的平板结构简单,划分区域数量很少,而且只需要测量前5阶模态振型。因此,选择第二种方法进行振型修正。

2 多矩形缺孔平板结构的实验验证

2.1 与 SLDV 的对比测试

本次实验所使用的包含两个矩形缺孔的平板结构长200 mm,宽60 mm,厚3 mm,中间有两处矩形缺孔,分别为30 mm×25 mm和20 mm×50 mm,材料为304不锈钢。矩形板通过四对螺栓螺母和一个夹板固定于支架上,模拟一端固支状态,测试时实验装置如图8所示。



图8 两个缺孔平板实验装置

SLDV 测试采用声激励,测试中对平板共布置7×21-4-3=140个测点,分析频率1500 Hz,采用单输入多输出模态分析方法,测得矩形平板前5阶模态的固有频率如表1所示。

表 1 两个缺孔平板前 5 阶固有频率

阶次	固有频率/Hz
1	52.73
2	313.28
3	355.47
4	832.81
5	1 122.66

保持测试装置不变,测试环境不变,分别利用 SLDV 测取的各阶固有频率作为激振频率,通过喇叭实现对平板的单频激励,采集时域速度信号后处理即得到各阶振型,其中第 3 阶和第 5 阶因切割线与节径重合,出现了沿切割线反向振动的问题,依据结构表面连续,将任意一侧反向后振型即正常。

2.2 结果对比

SLDV 测试振型结果与连续扫描测试结果进行对比如图 9 所示,振型结果均选择右下为底侧固支端,左上为顶侧自由端。

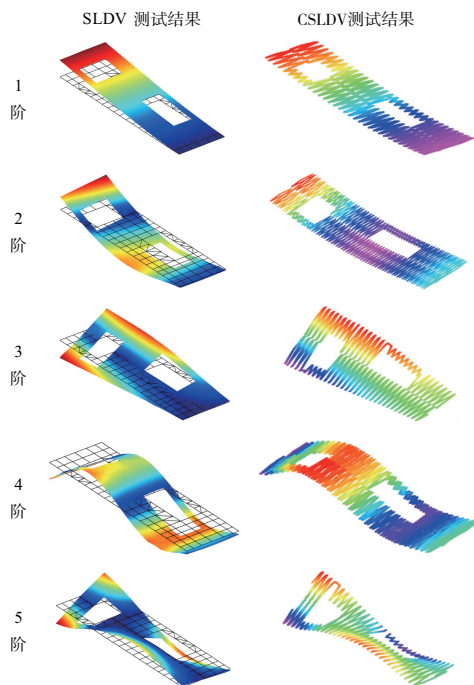


图 9 SLDV 和 CSLDV 测试振型对比

SLDV 测试与 CSLDV 测试相关分析如表 2 所示,前 5

阶 MAC 值均在 0.95 以上,证明该种连续扫描测试具有很高的准确性。

表 2 SLDV 和 CSLDV 振型测试 MAC 值

阶次	MAC 值
1	0.97
2	0.97
3	0.99
4	0.96
5	0.97

3 结语

本文将扫描路径规划与振型重构相结合,实现了包含任意矩形缺孔结构的激光连续扫描测振,获取了结构前 5 阶的工作变形,与 SLDV 测试的振型有很好的 consistency,其 MAC 值都达到了 0.95 以上,验证了该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,使其能够应用于在任意位置包含任意大小、任意个数矩形缺孔结构的振动测量,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含缺孔结构具有一定的指导意义和实用价值。本文仅研究含有矩形缺孔的结构,针对其余形状的缺孔,例如圆形缺孔以及其他任意形状缺孔有待于以后继续研究。

参考文献:

- [1] DI MAIO 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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): 182-189.
- [6] EWINS D J, SAUNDERS H. Modal testing: theory and practice [J]. Journal of Vibration and Acoustics, 1986, 108(1): 109-110.

收稿日期: 2021-01-21