

扫描式激光测振仪的姿态控制算法^{*}

刘翠红, 臧朝平

(南京航空航天大学能源与动力学院 南京, 210016)

摘要 双轴振镜系统是扫描式激光多普勒测振仪中控制激光束运动的核心部件。通过双轴振镜系统中 X, Y 振镜的空间位置关系及光学反射原理, 建立了激光束方向与 X, Y 振镜偏转角度之间的关系及其数学模型, 并进一步基于多项式拟合算法实现了激光点从振镜系统坐标系到实测结构坐标系的坐标变换, 从而可高精度控制扫描激光的姿态。同时, 利用高清摄像头将测试坐标系转换到屏幕坐标系, 提高了该方法的实际操作性。最后, 以某型压气机叶片为例对该方法进行了验证, 结果表明本方法对实现激光在实测结构表面任意测点的精确位置控制提供了理论基础, 具有较好的指导作用。

关键词 双轴振镜系统; 姿态控制; 多项式拟合; 坐标系变换

中图分类号 TH744; TN249

引言

激光多普勒测振技术 (laser Doppler vibrometry, 简称 LDV) 是一种新型的非接触式测试。当激光打到被测振动结构的表面, 经表面反射回来的反射光会携带振动的速度信息发生多普勒频移, 通过多普勒频移公式可以实现对结构表面的振动测量。为了提高 LDV 的应用性, 20 世纪 80 年代, 进一步发展了扫描式激光多普勒测振仪 (scan laser Doppler vibrometry, 简称 SLDV)^[1-2]。它是在单点测试的 LDV 的激光束前安置一套相互正交的振镜, 分别由两个电机驱动发生偏转实现激光点的移动, 实现了激光测振技术从单点测试到离散点扫描测试的改进, 其技术核心是实现了激光的姿态控制。SLDV 的测试效率高、测试能力强, 因此得到了广泛应用^[3-7]。目前, 对激光的姿态控制的理论研究较少, 国内主要注重于扫描激光测试的使用。

Zeng 等^[8]开展了 SLDV 姿态 (方向和位置) 的研究, 提出了控制激光姿态的几何算法, 并利用 4 个参考点实际坐标矩阵与振镜系统坐标矩阵的逆的乘积, 求解振镜系统坐标系 (mirrors system coordinate, 简称 MCS) 与实测结构坐标系 (tested structure system, 简称 TCS) 之间的变换矩阵。矩阵求

逆法可以直观的求解变换矩阵, 但是对于三维结构当选取的参考点分布在同一平面上时, 参考点坐标矩阵不可逆, 该方法失效。文献[9-10]以 Y 方向振镜中心为原点建立振镜系统坐标系 (激光坐标系), 通过几何方法计算得到从双轴振镜系统反射出来的激光束方向与两振镜分别的偏转角度关系, 最后利用最小二乘法求解得到振镜系统坐标系到实际坐标系的变换矩阵, 从而可知两振镜的偏转角度对应的激光点在待测结构表面的实际位置。文献[11]对振镜系统坐标系到实际结构坐标系之间的坐标变换方法做出了改进, 采取最小二乘法和奇异值分解方法相结合求解变换矩阵, 克服了矩阵求逆的计算困难, 但是计算过程复杂。矩阵直接求逆法、最小二乘法和奇异值分解等方法, 这几种方法的主要思想一致, 均是求解两种坐标系之间的变换矩阵, 即求解测试结构坐标系与振镜系统坐标系之间的旋转矩阵及平移矩阵。另外, 文献[12-13]利用棱镜平行置于激光前面, 激光透过棱镜投射到待测结构表面, 通过控制棱镜的转动实现激光点在结构表面的运动。利用光学棱镜控制激光点的运动虽然目前还处于仿真研究阶段, 但其为激光的姿态控制提供了另一思路。

笔者提出了 SLDV 姿态控制的向量算法, 从纯向量的角度推导激光方向与 M_1, M_2 两振镜偏转角度的关系, 并基于拟合多项式算法求得双轴

^{*} 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资助项目 (U1730129); 国家自然科学基金资助项目 (11372128)

收稿日期: 2018-05-15; 修回日期: 2018-07-17

振镜系统坐标系与实际测试结构坐标系之间的变换关系,实现激光测振仪中双轴振镜系统的自主控制以及对被测结构的任意点的扫描测试。对于复杂曲面测点几何坐标不易获取的结构,利用高清摄像头获取结构表面各测点在屏幕坐标系中的位置,建立双轴振镜系统 M_1, M_2 振镜的偏角与测点在屏幕坐标系之间的关系,从而提高该方法的实际应用性。此外,还可以实现各点振动数据与测点的精确对应,建立更加准确的测试模型。论文最后以某型压气机叶片的激光扫描控制测试路径为例,验证了本算法的可行性。

1 激光姿态控制算法

1.1 激光束方向与 M_1, M_2 振镜偏转角度的向量关系

1.1.1 双轴振镜系统

扫描式激光多普勒测振仪,以 ploytec-psv-400 为例,其双轴振镜系统中相互正交的 M_1, M_2 振镜分别由两个电机驱动发生偏摆,控制激光点在待测结构表面移动,如图 1 所示。其中 M_1, M_2 振镜均为平面反射镜,通过两个伺服电机的控制可以在 $\pm 20^\circ$ 角度范围内转动。

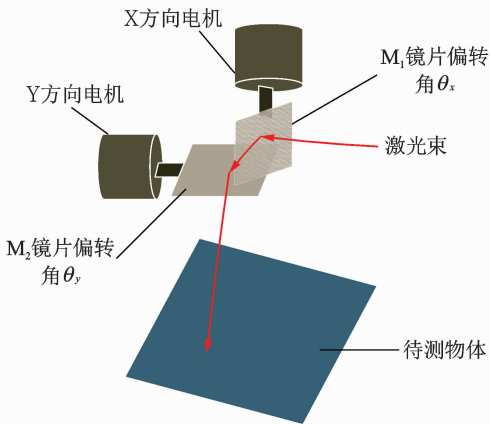


图1 双轴振镜系统

Fig. 1 Dual-axis galvanometer system

镜片的扫描角度由电机的输入电压控制,电压与角度存在以下线性关系

$$\begin{cases} \theta_x = SV_x \\ \theta_y = SV_y \end{cases} \quad (1)$$

其中: θ_x, θ_y 分别为 M_1, M_2 镜片在电机驱动下的偏转角度; V_x, V_y 为 X, Y 方向电机的输入电压;比例系数 $S=4^\circ/\text{V}$ (ploytec-psv-400)。

1.1.2 M_1, M_2 振镜偏转角度与对激光束的方向的控制

以 M_2 振镜的几何中心为原点定义双轴振镜系统的坐标系 (mirror coordinate system, 简称 MCS), 如图 2 所示。

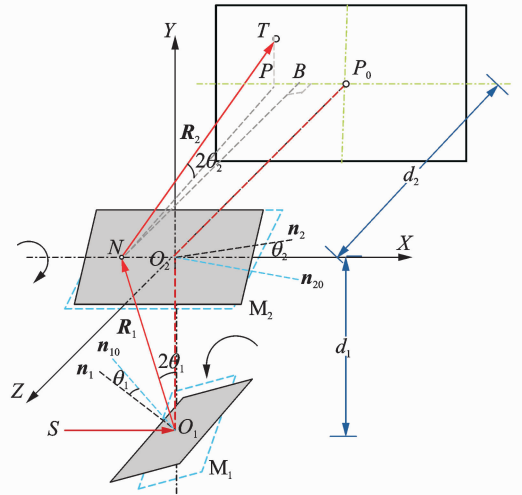


图2 M_1, M_2 振镜偏转角度与激光束方向关系示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the relationship between the angle of M_1, M_2 galvanometer and the direction of the beam

图中: M_1, M_2 振镜的初始状态偏转角度均为 45° ; O_1, O_2 分别为 M_1, M_2 的几何中心,二者间距为 $O_1O_2 = d_1$; $\mathbf{n}_{10}, \mathbf{n}_{20}$ 分别为初始状态 M_1, M_2 的法线向量(下文计算公式中所有向量均为单位向量); SO_1 为激光初始入射方向,与 X 轴方向平行; $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2$ 分别为激光经过 M_1, M_2 的反射光束。

为了计算过程中的统一,定义激光点轨迹在待测表面的第一象限时, M_1 为正向偏转,故定义 M_2 正向偏转遵守右手法则, M_1 反向偏转角度为正。初始入射光束 SO_1 的单位向量 \mathbf{I} 为 $(-1, 0, 0)$ 。 M_1, M_2 均为初始状态,即无角度偏转时,光束以路径 $SO_1 - O_1O_2 - O_2P_0$ 投射在距 M_2 中心点 O_2 距离为 d_2 的待测结构表面 P_0 点。

当 M_1 偏转角度 θ_1, M_2 偏转角度 θ_2 时,两振镜的法线向量分别变为

$$\begin{cases} \mathbf{n}_1 = \mathbf{n}_{10} \mathbf{R}_z \\ \mathbf{n}_2 = \mathbf{n}_{20} \mathbf{R}_x \end{cases} \quad (2)$$

其中: $\mathbf{R}_z, \mathbf{R}_x$ 分别为绕 Z 轴和 X 轴的旋转矩阵。

$$\mathbf{R}_z = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & \sin\theta_1 & 0 \\ -\sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_2 & \sin\theta_2 \\ 0 & -\sin\theta_2 & \cos\theta_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

由入射向量 \mathbf{I} 与反射向量 \mathbf{R} 的关系

$$\mathbf{R} = \mathbf{I} - 2(\mathbf{I} \cdot \mathbf{N})\mathbf{N} \quad (4)$$

可知激光束经过 M_1 偏转后的反射向量 \mathbf{R}_1

$$\mathbf{R}_1 = \mathbf{I} - 2(\mathbf{I} \cdot \mathbf{n}_1)\mathbf{n}_1 = [\tan 2\theta_1 \quad 1 \quad 0] \quad (5)$$

M_2 振镜的入射光束向量 $\mathbf{I}_2 = \mathbf{O}_1\mathbf{N} = \mathbf{R}_1$, 因此 M_2 光束经过振镜偏转后的反射向量 \mathbf{R}_2 为

$$\mathbf{R}_2 = \mathbf{I}_2 - 2(\mathbf{I}_2 \cdot \mathbf{n}_2)\mathbf{n}_2 = \cos 2\theta_1 [-\tan 2\theta_2 \quad \sin 2\theta_2 \quad -\cos 2\theta_2] \quad (6)$$

激光束从 M_2 振镜到测试面的反射光线 \mathbf{R}_2 与 \mathbf{NT} 同向, T 为激光束在测试面上的轨迹点。

$$\mathbf{NT} = |\mathbf{NT}| \cdot \mathbf{R}_2 \quad (7)$$

由图 2 可知

$$|\mathbf{NT}| = \frac{|\mathbf{NB}|}{\cos\alpha} \quad (8)$$

其中:

$$\cos\alpha = \frac{|\mathbf{NB}| \cdot |\mathbf{NT}|}{|\mathbf{NB}| \cdot |\mathbf{NT}|} = \frac{|\mathbf{NB}|}{|\mathbf{NB}|} \cdot \mathbf{R}_2 \quad (9)$$

由几何向量关系可知

$$\mathbf{NP}_0 = \mathbf{P}_0 - \mathbf{N} \quad (10)$$

$$\mathbf{P}_0\mathbf{T} = \mathbf{NT} - \mathbf{NP}_0 \quad (11)$$

将式(7)、(10)代入公式(11)计算可得

$$T(x, y, z) = \begin{bmatrix} -\tan 2\theta_1 \left(d_1 + \frac{d_2}{\cos 2\theta_2} \right) \\ d_2 \tan 2\theta_2 \\ -d_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

由式(12)可知,激光束在待测结构平面上的轨迹点 T 坐标为

$$\begin{cases} x = -\tan 2\theta_1 \left(d_1 + \frac{d_2}{\cos 2\theta_2} \right) \\ y = d_2 \tan 2\theta_2 \\ z = -d_2 \end{cases} \quad (13)$$

其中: d_2 为测试平面与 M_2 中心点 O_2 的距离。

若待测平面为三维曲面则 d_2 不再是常量, (x, y) 坐标值与振镜偏转角度的关系不随待测结构的维度而改变。从式(13)可以看出,激光点在 X 方向运动由 θ_1, θ_2 共同控制,在 Y 方向的运动仅受 M_2 偏转角度 θ_2 控制。

1.2 基于多项式拟合算法的坐标变换

上一节中通过几何向量关系推导,若两振镜分别的偏转角度已知,就可以确定待测结构上激光点在 MCS 下的坐标,反之亦然。

对于振镜系统坐标系(MCS)与实测结构坐标系(TCS)之间的坐标变换问题,现有方法均是求解二者之间变换矩阵,对于结构表面选取得标定点 $P_i (i=1, \dots, N)$, 振镜坐标系和测试坐标系之间的关系为

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix}_{\text{MCS}} = \mathbf{Tr} + \mathbf{Ro} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix}_{\text{TCS}} \quad (14)$$

其中: $[x_i \quad y_i \quad z_i]_{\text{MCS}}^T$ 和 $[x_i \quad y_i \quad z_i]_{\text{TCS}}^T$ 分别为 MCS 和 TCS 中的标定点坐标; \mathbf{Tr} 为平移矩阵; \mathbf{Ro} 为旋转矩阵。

文献[9]中以 4 个标定点计算变换矩阵,两坐标系之间的变换矩阵为

$$\mathbf{RT} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ y_1 & y_2 & y_3 & y_4 \\ z_1 & z_2 & z_3 & z_4 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}_{\text{MCS}} \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ y_1 & y_2 & y_3 & y_4 \\ z_1 & z_2 & z_3 & z_4 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}_{\text{TCS}}^{-1} \quad (15)$$

当所有标定点共面时公式(15)中逆矩阵不可直接求解。标定点较多时, TCS 坐标系中的逆矩阵的求解变为广义逆的求解问题,文献[11]中应用了最小二乘法和奇异值分解法改善了变换矩阵的计算。笔者提出了一种多项式拟合算法,不再求解两种坐标系之间的变换矩阵,而是通过二者之间的多项式拟合关系实现振镜系统坐标系到测试坐标系更高精度的变换。

实际测试中布置测点 $T_i (i=1, \dots, n)$ 之后如何确定两振镜的控制偏转角度,则需求解实际各测点坐标在测试坐标系(testing coordinate system, 简称 TCS)与 MCS 之间的变换关系。确定的 θ_x, θ_y 唯一确定一组 MCS 下的坐标点,因此实际各测点坐标在 TCS 与 MCS 之间的变换关系可以转化为求解各测点坐标 (x_i, y_i) 与 $(\theta_{xi}, \theta_{yi})$ 的变换关系。二者之间的变换关系可以选取合适的多项式来描述

$$\begin{cases} \theta_{xi} = \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^n a_{jk} x_i^j y_i^k \\ \theta_{yi} = \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^n b_{jk} x_i^j y_i^k \end{cases} \quad (16)$$

其中: a_{jk} 和 b_{jk} 为多项式系数; m 和 n 为拟合多项式次数。

当式(16)略去高阶项,仅保留到一阶项时即等价于公式(14)的旋转平移矩阵变换,即标定点坐标的一阶精度变换。计算坐标变换关系时,实测结构表面上坐标点(标定点)个数及选取位置视结构形状而定。一般地,为提高多项式系数的计算精度,在待

测表面的边缘选取足够的点来反映结构边界轮廓^[14],另外局部特征变化明显的位置增加标定点数。设选取了 i 个点 (x_i, y_i) 作为标定点,记录激光打到每个标定点上时 M_1, M_2 的偏转角 θ_{xi}, θ_{yi} ,求得多项式系数见式(17)。对于待测结构任意点的测试,只需将其坐标代入此多项式即可分别得到 M_1, M_2 的偏转角度,从而实现对激光点在待测结构表面的轨迹控制。

$$\begin{bmatrix} a_{00} \\ a_{10} \\ a_{01} \\ \vdots \\ a_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_{x1} \\ \theta_{x2} \\ \theta_{x3} \\ \vdots \\ \theta_{xi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & x_1^1 & y_1^1 & \cdots & x_{x1}^m & y_{y1}^n \\ 1 & x_2^1 & y_2^1 & \cdots & x_{x2}^m & y_{y2}^n \\ 1 & x_3^1 & y_3^1 & \cdots & x_{x3}^m & y_{y3}^n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_i^1 & y_i^1 & \cdots & x_{xi}^m & y_{yi}^n \end{bmatrix}^+ \quad (17a)$$

$$\begin{bmatrix} b_{00} \\ b_{10} \\ b_{01} \\ \vdots \\ b_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_{y1} \\ \theta_{y2} \\ \theta_{y3} \\ \vdots \\ \theta_{yi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & x_1^1 & y_1^1 & \cdots & x_{x1}^m & y_{y1}^n \\ 1 & x_2^1 & y_2^1 & \cdots & x_{x2}^m & y_{y2}^n \\ 1 & x_3^1 & y_3^1 & \cdots & x_{x3}^m & y_{y3}^n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_i^1 & y_i^1 & \cdots & x_{xi}^m & y_{yi}^n \end{bmatrix}^+ \quad (17b)$$

在计算 MCS 与 TCS 之间的坐标变换关系过程中,激光打到某一标定点,两振镜分别的偏转角度可以精确读出,但是该标定点的实际坐标不易确定,尤其是对于非平面结构。文献[11]中以 Polytec 公司提供的标准测试板为测试结构,选取 4 个顶点及其他确定坐标的点作为标定点进行坐标变换,对于实际复杂结构并不适用。对于非平面结构,结构表面标定点的坐标不易测量,因此可以采用一部高清摄像头,将测试结构转换到屏幕中,如图 3 所示。当激光打到某一标定点时,在屏幕上点击记录该点在屏幕中的像素点坐标,以标定点在屏幕中的像素点坐标代替 TCS 中的坐标,通过屏幕坐标系(screen coordinate system,简称 SCS)与 TCS 之间的变换实现激光对待测结构任意测点的扫描测试。另外,保存各测点在屏幕中像素点坐标可以用来建立结构的测试模型(振动数据结合测试模型可得到结构的振型)。

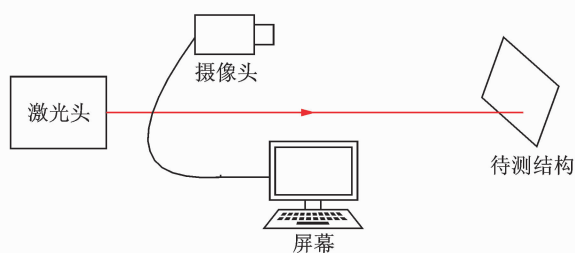


图3 实际结构到屏幕图像的转换

Fig. 3 Conversion of actual structure to screen image

2 实例分析

以某型压气机叶片模态试验中的激光扫描测试路径控制为例,布置测试方案如图 4 所示。在质量块上加工与叶片榫头相匹配的榫槽,将叶片安装在质量块上,并用螺栓固定夹紧来模拟叶片工作边界条件。在叶片表面布置 5×10 的测试网格,共 50 个测点。为避免附加质量的影响,采取声激励的激振方式。然后,对于以上试验方案,利用第 1 节中提出激光扫描路径控制算法实现对每个测点的测试。

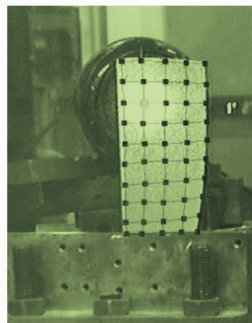


图4 模态测试方案

Fig. 4 Modal testing scheme

2.1 坐标系变换

由于该扭转叶片的曲率变化缓慢且无较大的局部特征变化,故在叶片边缘及中部大致均匀地选取 $r=15$ 个标定点(见图 5 叶片上标记的黑色圆点)用于实现坐标系变换。首先,利用自编 Labview 软件,通过鼠标单击每个标定点获取其在屏幕中的坐标如图 6 所示,并分别记录 M_1, M_2 的偏转角度,标定点的像素点坐标与相应的 M_1, M_2 偏转角度如表 1 所示(标定点的像素点坐标为各点实际坐标在图像中的映射,可视为无量纲);其次,将表 1 中标定点对应的屏幕坐标和振镜偏角度代入式(18)、式(19)得到基于拟合多项式的坐标系变换关系式。

2.2 激光点位置控制精度分析

为了更好地验证基于拟合多项式算法的坐标变换的有效性,下文中与现有的旋转平移矩阵法做出对比分析。任意选取结构表面的 6 个验证点,见图 5 中红色四角星标记,其中红色圆点为 M_1, M_2 位于初始状态(偏转角度均为 0°)时激光点在结构表面的位置,即激光原点。根据 2.1 节中得到的坐标变换关系,可计算得到激光分别射到每个验证点需要控制的 M_1, M_2 偏转角度(计算角度)与激光射到该测点振镜实际所需控制的偏转角度(实际测试角度)如表 2 所示。由于该叶片结构尺寸较小,且测试

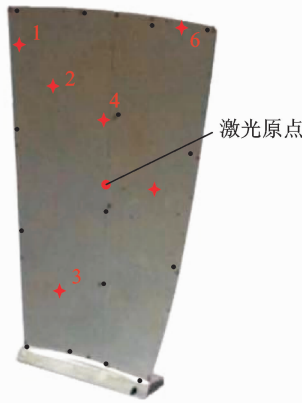


图 5 标定点及验证点(黑色圆点为标定点,红色编号点为验证点)

Fig. 5 Fixed-point and validation point (black dots are the fixed points, and the red numbering points are validation points)

距离较远(约 0.84 m),振镜的偏转角度均不超过 5°且大都在 2°以内。计算角度与实际测试角度之间的相对误差如表 3 所示。



图 6 获取标定点在屏幕图像中的坐标

Fig. 6 Get the coordinates of the fixed point in the screen image

表 1 标定点的坐标与相应的 M_1, M_2 振镜偏转角度

Tab. 1 The coordinates of the fixed point and the corresponding angle of the M_1, M_2 galvanometer

标定点	M_1, M_2 偏转角度		屏幕坐标(SCS)		标定点	M_1, M_2 偏转角度		屏幕坐标(SCS)	
	$\theta_x / (^\circ)$	$\theta_y / (^\circ)$	x	y		$\theta_x / (^\circ)$	$\theta_y / (^\circ)$	x	y
1	-1.887	4.634	95	9	9	-1.125	-5.036	130	173
2	-0.282	4.622	126	10	10	-2.491	-5.052	112	172
3	1.152	4.483	154	15	11	-2.273	-2.087	107	126
4	2.554	4.254	181	19	12	-2.090	1.119	101	73
5	2.481	1.091	180	75	13	0.284	2.216	140	55
6	2.243	-2.062	176	130	14	0.125	0.048	142	92
7	1.732	-4.995	166	177	15	0.001	-2.366	142	133
8	0.407	-4.999	150	175					

表 2 计算角度与实际测试角度对比

Tab. 2 Comparison between calculation angle and actual test angle

(°)

验证点	实际测试角度		计算角度			
			旋转平移矩阵法		多项式拟合法	
	θ_x	θ_y	θ_x	θ_y	θ_x	θ_y
1	-1.893	3.599	-2.229	3.518	-1.902	3.567
2	-0.899	2.336	-1.005	2.290	-0.871	2.346
3	-1.071	-2.086	-0.954	-2.175	-1.064	-2.100
4	0.205	1.229	0.158	1.059	0.157	1.171
5	1.273	0.049	1.266	-0.115	1.247	0.027
6	1.682	4.430	1.885	4.443	1.673	4.401

表 3 计算角度与实际测试角度之间的误差

Tab. 3 The error between calculation angle and actual test angle

测点	旋转平移矩阵法				多项式拟合法			
	绝对误差/(°)		相对误差/%		绝对误差/(°)		相对误差/%	
	M_1	M_2	M_1	M_2	M_1	M_2	M_1	M_2
1	0.336	0.081	17.752	2.241	0.008 7	0.031 7	0.460	0.882
2	0.106	0.046	11.817	1.962	-0.028 1	-0.010 4	3.126	0.445
3	-0.117	0.089	10.933	4.272	-0.007 3	0.014 0	0.684	0.672
4	0.047	0.170	22.897	13.850	0.048 3	0.058 2	23.581	4.739
5	0.007	0.166	0.572	338.332	0.026 5	0.021 6	2.078	44.029
6	-0.203	-0.013	12.075	0.294	0.009 0	0.029 5	0.537	0.667

从表2和表3中可以看出,除4号验证点 θ_x 和5号验证点 θ_y 外,旋转平移矩阵法计算得到的控制角度与实际所需控制角度之间的相对误差超过17%,而文中基于多项式拟合变换算法的计算角度与实际测试角度之间的相对误差基本在5%以内。表3中4号验证点的 M_1 偏角 θ_x 和5号验证点的 M_2 偏角 θ_y 的相对误差较大,这是由于4号点和5号点分别位于激光原点的垂直方向和水平方向附近(见图5),因此激光射到4号点所需控制的 M_1 偏转角度和激光到达5号点所需控制 M_2 的偏转角度量级较小(接近 0°),导致这两点计算与实际振镜偏角之间的相对误差较大,但其绝对误差(拟合多项式算法)均不超过 0.05° 不影响总体计算精度。与旋转平移矩阵法相比,两种计算方法分别对4号验证点 θ_x 的计算角度与实际角度相对误差影响不大,对于5号验证点文中基于拟合多项式变换算法对 θ_y 的计算相对误差从338%降低到44%。从表3可以明显看出,基于多项式拟合算法的屏幕坐标系到实测坐标系变换与旋转平移矩阵法相比具有更高的激光点位置控制精度。

2.3 测试应用

利用自编labview软件可以从屏幕中通过鼠标单击自动获取并保存50个测点的屏幕坐标(激光打到某测点时就在屏幕上点击该激光点,从而获取该测点的屏幕坐标)。根据坐标变换的拟合多项式关系,已知测点的屏幕坐标即可得到激光分别打到每个测点需要控制的 M_1, M_2 偏转角度,从而实现激光的离散点扫描测试。

另外,利用测点在屏幕中坐标建立测试模型并结合每个测点振动数据即可得到该叶片模态振型。以测点屏幕坐标建立的测试模型是测点实际坐标建立的测试模型(以某一比例缩放的模型)。以测点屏幕坐标建立测试模型方便易行,尤其是对于复杂曲面结构,该方法可以快速建立从而获得实际测点与测试模型更匹配的模式振型。利用屏幕坐标建立的测试模型与振动数据相结合得到的前6阶模态振型与有限元计算振型如图7所示。其中,图7(a)~(f)为实验测试振型,模态频率表示为 f_i^e ,图7(g)~(l)为有限元计算振型,模态频率表示为 $f_i^f, i=1, 2, \dots, 6$ 为模态阶次。二者之间的振型相关性通过模态置信因子(modal assurance criteria,简称MAC)描述,各阶模态对的MAC值均在0.8以上。

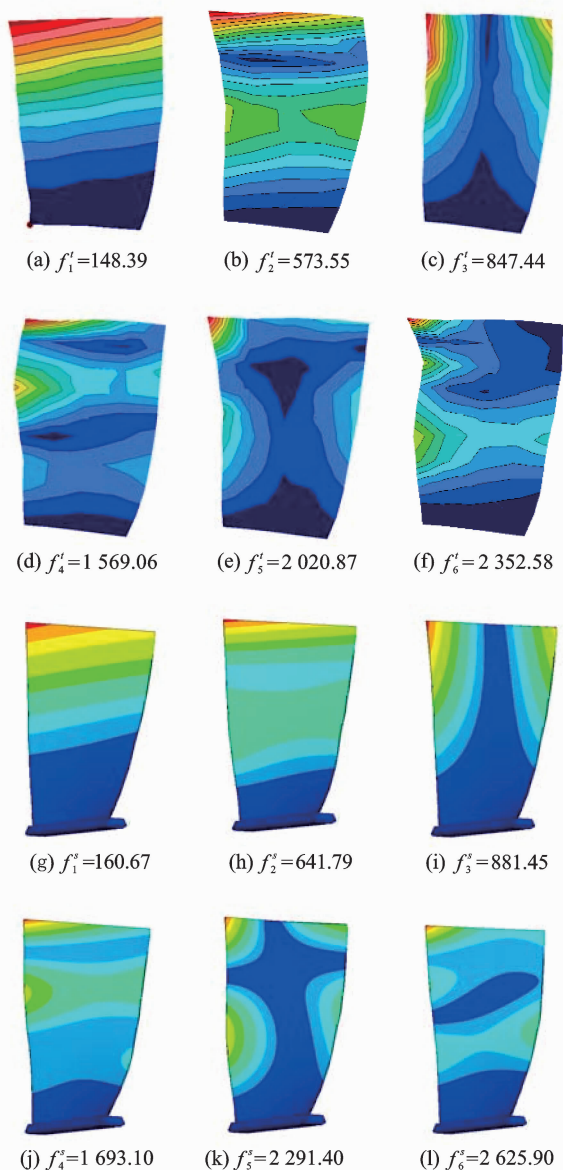


图7 叶片模态振型(单位:Hz)

Fig. 7 Modal shapes of blade (unit: Hz)

不同的坐标变换算法对激光的控制精度有影响,但对测试结构的模态振型影响不大。研究表明基于多项式拟合的坐标变换算法比旋转平移变换矩阵法的计算精度更高,因此利用该算法控制激光测振仪的扫描路径,可以使得激光点与被测结构表面测点更高精度的重合,实现激光测振仪的精准测试。

3 结束语

笔者推导了扫描式激光多普勒测振仪中双轴振镜系统控制的激光束方向与振镜偏转角度关系,并建立其数学模型。基于拟合多项式算法,实现振镜系统坐标系到实际结构坐标系的坐标变换。采用实

际压气机叶片对该方法进行了验证,结果表明,该方法较现有基于旋转平移矩阵的坐标变换方法具有更高的精度。利用高清摄像头将被测结构转换到屏幕中,以测点在图像中的位置代替实际结构表面测点位置。摄像头的使用大大提高了该方法的操作性。利用自编软件获取测点在屏幕中的坐标来建立几何测试模型,因此可以获得实际测点与测试模型更加匹配的模态振型。

通过对激光姿态控制算法的研究,实现了对激光在实测结构表面任意测点的精确位置控制,为激光测试应用中激光的自主控制提供了理论基础。

参 考 文 献

- [1] DURST F, LEHMANN B, TROPEA C. Laser-Doppler system for rapid scanning of flow fields[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1981, 52(11):1676-1681.
- [2] CHEHROUDI B, SIMPSON R L. A rapidly scanning laser Doppler anemometer[J]. *Journal of Physics E Scientific Instruments*, 1984, 17(2):131.
- [3] SRIRAM P, CRAIG J I, HANAGUD S. A scanning laser Doppler vibrometer for modal testing[J]. *Institute for Mathematics & Its Applications*, 1990, 5:155-167.
- [4] SRIRIAM P, HANAGUD S, CRAIG J I. Mode shape measurement using a scanning laser Doppler vibrometer[J]. *International Journal of Analytical & Experimental Modal Analysis*, 1991, 7(3):169-178.
- [5] STANBRIDGE A B, EWINS D J. Modal testing using a scanning laser Doppler vibrometer[J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 1999, 13(2):255-270.
- [6] KIM K, PARK K. Continuous scanning laser Doppler vibrometer for mode shape analysis[J]. *Optical Engineering*, 2003, 42(42):730-737.
- [7] ALLEN M S, SRACIC M W. A new method for processing impact excited continuous-scan laser Doppler vibrometer measurements[J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2010, 24(3):721-735.
- [8] ZENG X, MITCHELL L D, AGEE B L. Laser position determination algorithm for an automated mechanical mobility measurement system[C]// *Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering Proceedings of SPIE*. [S. l.]: International Society for Optical Engineering, 1993:1-12.
- [9] XU Y C, MILES R N. An identification algorithm for directing the measurement point of scanning laser vibrometers[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 1995, 22(2):105-120.
- [10] ZENG X, WICKS A L, MITCHELL L D. Geometrical method for the determination of the position and orientation of a scanning laser dopplervibrometer[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 1996, 25(4):247-264.
- [11] CHEN D M, ZHU W D. Investigation of three-dimensional vibration measurement by a single scanning laser Doppler vibrometer[J]. *Journal of Sound & Vibration*, 2016, 387:36-52.
- [12] TIRABASSI M, ROTHBERG S J. Advanced modeling of tracking LDV systems incorporating rotating optical wedges [C] // *Proceedings of SPIE, 7098 (Eighth International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advances and Applications)*. Ancona Italy: International Society for Optics and Photonics, 2008:709806.
- [13] TIRABASSI M, ROTHBERG S J. Scanning LDV using wedge prisms[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2009, 47(3/4):454-460.
- [14] 王学平. 遥感图像几何校正原理及效果分析[J]. *计算机应用与软件*, 2008, 25(9):102-105.
WANG Xueping. Geometric rectification and effect analysis of remote sensing image[J]. *Computer Applications and Software*, 2008, 25(9):102-105. (in Chinese)



第一作者简介:刘翠红,女,1990年3月生,博士生。主要研究方向为结构振动测试及模态分析。曾发表《转子系统不平衡响应的逆向分析》(《沈阳航空航天大学学报》2016年第33卷第4期)等论文。

E-mail:liuch@nuaa.edu.cn

通信作者简介:臧朝平,男,1963年5月生,教授、博士生导师。主要研究方向为结构动力学与测试。

E-mail:c.zang@nuaa.edu.cn

