

·测试、试验与仿真·

## 基于三维数字影像的直升机旋翼运动参数测量方法研究

吴国宝, 吴志刚, 易 晖, 刘平安

(中国直升机设计研究所, 江西 景德镇 333000)

**摘 要:**如何方便快捷、精确地测量直升机旋翼桨叶的运动参数对于直升机旋翼设计及性能分析至关重要。针对传统应变片、光栅投影等测量方法存在安装繁琐、测试环境要求高、测量设备影响飞行性能等缺陷,提出了一种基于三维数字影像的非接触式旋翼桨叶运动参数测量方法。该方法具有对测试环境要求低、测量参数多、测试量程大等特性。试验结果表明,使用该方法测量直升机旋翼桨叶运动参数取得了较理想的效果。

**关键词:**直升机;旋翼;运动参数;三维重构

中图分类号:V212.4

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2016)-02-0076-05

## Research on Motion Parameter Measurement of Helicopter Rotor Blade Based on Three-dimensional Digital Image

WU Guo-bao, WU Zhi-gang, YI Hui, LIU Ping-an

(China Helicopter Research and Development Institute, Jingdezhen 333000, China)

**Abstract:** How to measure conveniently and accurately the motion parameters of the rotor blades of a helicopter is very important to the design and performance analysis of rotor helicopter. According to traditional measurement methods such as strain gauge and grating projection with the defects of cumbersome installation, higher requirements for testing environment and flight performance affected by measurement equipments, a non-contact rotor blade motion parameter measurement method based on 3D digital image is proposed. The method has the advantages of low requirement for testing environment, large quantity measurement parameters and large testing range. Experimental results show that the method is effective for measuring the parameters of the rotors blades.

**Key words:** helicopter; rotor; motion parameter; 3D reconstruction

旋翼作为直升机的重要组成部分,为直升机的飞行提供所需的升力和推进力。旋翼桨叶的动力学特性直接影响到直升机的性能等<sup>[1]</sup>。如何对旋翼桨叶的运动参数,如挥舞角、摆振角、总距等进行方便快捷、精确的测量,为直升机性能评价及故障诊断提供可靠依据,已成为近年来国内外直升机领域的重要研究课题。

目前国内外对旋翼桨叶运动参数的测量方法主要有:(1)应变测量法<sup>[2-3]</sup>。该方法技术成熟、试验

设备简单、成本低,但存在静态标定过程复杂,动态测量与静态标定环境一致性对测量结果影像较大等不足;(2)光栅投影法<sup>[4]</sup>。该方法使用设备数量少,无需在桨叶表面上布置大量应变片,是一种非接触式测量方法,但存在对测试环境、光栅投影安装位置精确度要求高,且桨尖测量结果较差等不足;(3)激光动态测量法<sup>[5]</sup>。该方法也是一种非接触式测量方法,具有测试精度高、体积和功耗小、抗干扰能力强等优点,但也存在可测量参数少、三叉件

收稿日期:2016-04-17

**作者简介:**吴国宝(1988-),男,江西鄱阳人,硕士研究生,助理工程师,研究方向为直升机综合试验技术;吴志刚(1978-),男,江西鹰潭人,硕士研究生,高级工程师,研究方向为直升机综合试验技术;易晖(1979-),男,江西赣州人,硕士研究生,高级工程师,研究方向为直升机综合试验技术。

结构对飞行机动性能造成影响等不足。

为此,提出了一种基于三维数字影像的非接触式旋翼桨叶运动参数测量方法。首先通过左、右两台摄像机采集桨叶在不同运动状态下的二维数字影像;然后依据双目立体视觉原理通过反演重构出桨叶表面的三维坐标;最后通过对比不同状态下桨叶表面标记点坐标的变化得到桨叶的各项运动参数。该方法具有对测试环境要求低、测量参数多、测量量大等优势。通过试验分析,验证了该方法在直升机旋翼运动参数测量中的有效性。

## 1 原理与步骤

与人眼成像原理相似,双目立体视觉的基本原理<sup>[6]</sup>是利用左、右两台摄像机从不同方位同时获取空间某一感兴趣区的二维数字影像,然后对这两幅影像进行匹配找出对应点,根据由事先标定得到的两台摄像机的内、外部参数,便可通过反演重构出该点在给定空间坐标系中的三维坐标。图1为双目立体视觉基本原理示意图。

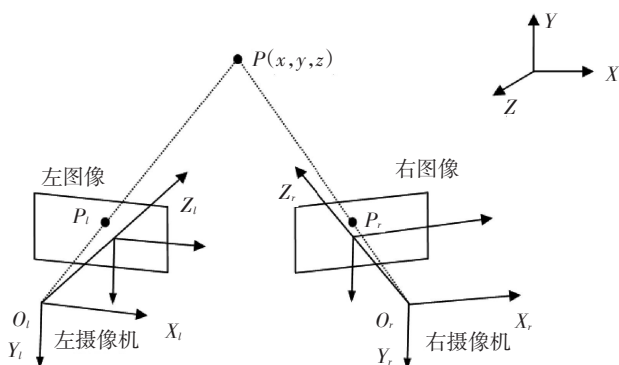


图1 双目立体视觉基本原理示意图

图1中,  $P$  为待测点;  $O_l$  和  $O_r$  分别表示左、右两个摄像机的光圈中心;  $P_l$ 、 $P_r$  分别为  $P$  在左、右影像中的成像点;从图中可以很直观地看到,一台摄像机可以确定一条直线  $O_l P_l$  或  $O_r P_r$ , 由于点  $P$  同时在直线  $O_l P_l$ 、 $O_r P_r$  上,故通过求解这两条直线的交点便可得到  $P$  点三维坐标。

综上所述,要想得到某一状态下旋翼桨叶表面标记点的三维坐标,需要对数字影像采集系统的内、外参数进行标定,以及对采集到的数字影像进行匹配。在通过反演重构出桨叶表面标记点的三

维坐标后,便可通过对比不同状态下桨叶表面标记点的三维坐标变化,对其运动参数进行测量、分析。

### 1.1 数字影像采集系统标定

文中所使用的数字影像采集系统其标定不仅需要分别标定左、右两台摄像机的内部几何、光学特性、镜头畸变等内部参数,还需要标定两个摄像机之间的相对位置和姿态等外部参数。

依据针孔成像模型<sup>[8]</sup>,设空间坐标系中的点  $P(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$  在摄像机采集的二维数字影像中的对应点为  $P'(\omega'_x, \omega'_y)$ ,则在齐次坐标下有如下关系。

$$s \begin{bmatrix} \omega'_x \\ \omega'_y \\ 1 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 1/\Delta x & 0 & a_{x0} \\ 0 & 1/\Delta y & a_{y0} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $A$  为成像矩阵;  $\Delta x$ 、 $\Delta y$  分别为单位像素点在二维影像坐标系中  $x$  轴,  $y$  轴方向上的分量;  $(a_{x0}, a_{y0})$  为摄像机主点坐标;  $f$  为摄像机焦距;  $R$  为  $3 \times 3$  正交旋转矩阵;  $t$  为三维平移向量;  $0^T = [0 \ 0 \ 0]$ ;  $s$  为尺度因子。

由于实际的摄像机成像是一个非常复杂的过程,简单的针孔成像模型并不能准确地反映实际的成像几何关系。对数字影像采集系统来说,干扰成像的因素主要有摄像机镜头的径向畸变、偏心畸变、像平面不平畸变和像平面内比例及正交畸变,这些畸变往往会导致实际的影像坐标偏离理想坐标<sup>[9-10]</sup>。设  $(a_x, a_y)$  为空间中的某点在摄像机上的理想成像点,  $(a'_x, a'_y)$  为实际成像点,则有下式

$$\begin{aligned} a'_x &= a_x + \delta_x \\ a'_y &= a_y + \delta_y \end{aligned} \quad (2)$$

式中,  $\delta_x$  和  $\delta_y$  分别为镜头畸变引起的理想成像点与实际成像点在  $x$  轴和  $y$  轴方向上的位移偏移量。

由于径向畸变是最主要的镜头畸变量,且引入太多的畸变量,反而会影响摄像机标定解的稳定性。故在标定过程中,采取的策略与 Tsai<sup>[11]</sup>在其所提的两步标定法中所使用的策略相同,即只考虑径向畸变的影响,则式(2)中的  $\delta_x$ 、 $\delta_y$  可表示为

$$\begin{aligned}\delta_x &= k_1 \bar{a}_x r^2 + k_2 \bar{a}_x r^4 + k_3 \bar{a}_x r^6 + \dots \\ \delta_y &= k_1 \bar{a}_y r^2 + k_2 \bar{a}_y r^4 + k_3 \bar{a}_y r^6 + \dots\end{aligned}\quad (3)$$

式中,  $\bar{a}_x = (a_x - a_{x0})$ ,  $\bar{a}_y = (a_y - a_{y0})$ ;  $k_1, k_2, k_3$  分别为一阶、二阶和三阶径向畸变系数,在实际运算中只取到二阶;  $r$  为点  $(a_x, a_y)$  到主点  $(a_{x0}, a_{y0})$  的距离,即  $r^2 = \bar{a}_x^2 + \bar{a}_y^2$ 。

设空间中任意点  $P(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$  在左、右摄像机中的成像点坐标分别为  $P^l(\omega_x^l, \omega_y^l)$  和  $P^r(\omega_x^r, \omega_y^r)$ , 则有下式

$$P^l = R_l P + t_l \quad (4)$$

$$P^r = R_r P + t_r$$

从式(4)中消去  $P$  则有

$$P^l = R_l R_r^{-1} P^r + t_l - R_l R_r^{-1} t_r \quad (5)$$

令  $R_{r2l} = R_l R_r^{-1}$ ,  $t_{r2l} = t_l - R_l R_r^{-1} t_r$  则式(5)可等价

$$P^l = R_{r2l} P^r + t_{r2l} \quad (6)$$

综上所述,  $\Delta x^l, \Delta x^r, \Delta y^l, \Delta y^r, a_{x0}^l, a_{x0}^r, a_{y0}^l, a_{y0}^r, f^l, f^r, k_1^l, k_1^r, k_2^l, k_2^r, R_{r2l}, t_{r2l}$  即为数字影像采集系统在标定过程中需要确定的参数。

典型的标定方法主要有,传统标定法、主动视觉标定法、自标定法等。文中对数字影像采集系统各参数的标定方法借鉴了文献[8]所提出的标定方法,具体操作流程可参考文献[8],在此不再赘述。

## 1.2 二维数字影像匹配

在对旋翼桨叶运动参数进行测量分析时,需要对桨叶在不同运动状态下的变化进行分析。所以在进行二维数字影像匹配时,不仅需要同时对桨叶在同一状态下,左、右摄像机采集的影像进行匹配(即立体匹配),同时也需要分别对左、右摄像机采集的不同状态下的影像进行匹配(即序列匹配)。由于影像的立体匹配和序列匹配方法可以通用,故文中仅就桨叶的立体匹配方法进行介绍。

图2为二维数字影像匹配的基本原理图<sup>[12]</sup>。

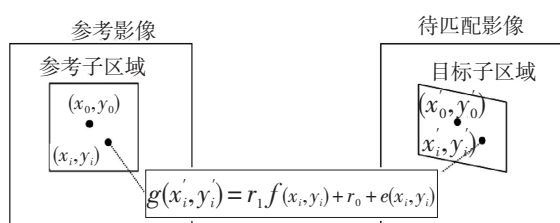


图2 二维数字影像匹配原理图

其中,左图为参考影像,右图为待匹配影像,在参考影像上选取以点  $(x_0, y_0)$  为中心,大小为  $(2n+1) \times (2n+1)$  ( $n=0,1,2,\dots$ ) 的参考子区域,在待匹配影像中,通过一定的搜索策略按照某一相关函数进行相关性计算,找到与参考子区域相关性最大的以  $(x'_0, y'_0)$  为中心的目标子区域,则点  $(x'_0, y'_0)$  即为点  $(x_0, y_0)$  在待匹配影像上的对应目标点。

在使用相关函数进行相关性计算时,考虑到参考子区和目标子区间除刚性平移外还存在伸缩、旋转、扭曲等形变。故采用一阶映射函数描述目标子区的变形情况。设  $(x_i, y_i)$  为参考子区域上的任意一点,其在目标子区域上的对应点为  $(x'_i, y'_i)$ , 则有下式

$$x'_i = x_i + u + u_x dx + u_y dy \quad (7)$$

$$y'_i = y_i + v + v_x dx + v_y dy$$

式中,  $dx, dy$  分别为点  $(x_i, y_i)$  相对点  $(x_0, y_0)$  在  $x$  轴、 $y$  轴方向上的位移分量;  $u, v$  分别是点  $(x'_i, y'_i)$  相对于点  $(x_0, y_0)$  在  $x$  轴、 $y$  轴方向上的位移分量;  $u_x, u_y, v_x, v_y$  表示参考子区域的一阶位移梯度。

设  $f(x_i, y_i), g(x'_i, y'_i)$  分别为点  $(x_i, y_i), (x'_i, y'_i)$  的灰度值,则二者存在如下关系

$$g(x'_i, y'_i) = r_1 f(x_i, y_i) + r_0 + e(x_i, y_i) \quad (8)$$

式中,  $r_1$  为补偿因子;  $r_0$  为补偿量,  $r_1, r_0$  用于补偿由光照强度引起的灰度值差异;  $e(x_i, y_i)$  为噪声。由于  $(x'_i, y'_i)$  为非整数像素,因此需要利用插值算法<sup>[9]</sup>来计算它的灰度值。

令参考子区域的像素点总数为  $N$ , 即  $N = (2n+1)^2$  ( $n=0,1,2,\dots$ ), 设参考子区域中各像素点具有相互独立的随机同分布噪声,则通过求取下式的最小值,便可通过下式在待匹配影像中找到与参考子区域具有最大相似度的目标子区域。

$$C_s(p) = \sum_{i=1}^N [g(x'_i, y'_i) - r_1 f(x_i, y_i) - r_0]^2 \quad (9)$$

令  $p = [u, u_x, u_y, v, v_x, v_y, r_0, r_1]$  为相关参数向量,由于式(9)为非线性方程,故在已知相关参数向量初值  $p_0$  的情况下,可利用最小二乘迭代(ILS)算法对其求解。

$$a \times f(x_i, y_i) + b = g(x'_i, y'_i) \quad (10)$$

则将式(7)代入上式可得

$$a \times f(x_i, y_j) + b = g((x_i + u + u_x dx + u_y dy), (y_j + v + v_x dx + v_y dy)) \quad (11)$$

依照泰勒公式展开式(11),只保留一阶部分,得到误差方程为

$$a \times f(x_i, y_j) + b = g(x_i', y_j') + g_{x_i} du + g_{x_i} u_x \Delta x + g_{x_i} u_y \Delta y + g_{y_j} dv + g_{y_j} v_x \Delta x + g_{y_j} v_y \Delta y \quad (12)$$

式中,  $g_{x_i}$ 、 $g_{y_j}$  分别为目标图像点  $(x_i', y_j')$  在  $x$  轴和  $y$  轴方向上的梯度。设  $\Delta t = [du, u_x, u_y, dv, v_x, v_y, a, b]^T$  为迭代参数,偏导数矩阵为  $A$ ,参考子区域与目标子区域像素差值为  $l$ ,则可将误差方程用下式表示。

$$l = A\Delta t \quad (13)$$

则有

$$\Delta t = (A^T P A)^{-1} (A^T P l) \quad (14)$$

上式中,  $P$  为权值矩阵,这里设  $P$  为单位矩阵。通过迭代更新  $\Delta t$  直到得到小于阈值的收敛的结果,即匹配成功。在完成目标子区的匹配后,便可以通过窗平移完成整个待匹配影像的匹配。

### 1.3 桨叶三维形貌重构

由第1.1节可知,在对影像采集系统完成标定后,不仅获得了它们的内、外参数,同时也建立了一个基于标定模板的三维坐标系,这时就可将匹配好的影像利用双目立体视觉原理重构其对应的三维坐标。

设空间中任意点  $q(x_w, y_w, z_w)$  其在左、右摄像机采集的二维数字影像上的对应点为  $q^L(x^L, y^L)$ ,  $q^R(x^R, y^R)$ ,则存在以下关系

$$s^L \begin{bmatrix} x^L \\ y^L \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11}^L & m_{12}^L & m_{13}^L & m_{14}^L \\ m_{21}^L & m_{22}^L & m_{23}^L & m_{24}^L \\ m_{31}^L & m_{32}^L & m_{33}^L & m_{34}^L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$s^R \begin{bmatrix} x^R \\ y^R \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11}^R & m_{12}^R & m_{13}^R & m_{14}^R \\ m_{21}^R & m_{22}^R & m_{23}^R & m_{24}^R \\ m_{31}^R & m_{32}^R & m_{33}^R & m_{34}^R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix}$$

式中,  $m_{ij}^k (i=j=1,2,3,4; k=L,R)$  为投影矩阵的第  $i$  行、第  $j$  列元素。式(14)消去  $s^L$  和  $s^R$ ,得到如下关于空间坐标  $q(x_w, y_w, z_w)$  的4个线性方程为

$$\begin{aligned} (x^L m_{31}^L - m_{11}^L) x_w + (x^L m_{32}^L - m_{12}^L) y_w + (x^L m_{33}^L - m_{13}^L) z_w &= m_{14}^L - x^L m_{34}^L \\ (y^L m_{31}^L - m_{21}^L) x_w + (y^L m_{32}^L - m_{22}^L) y_w + (y^L m_{33}^L - m_{23}^L) z_w &= m_{24}^L - y^L m_{34}^L \\ (x^R m_{31}^R - m_{11}^R) x_w + (x^R m_{32}^R - m_{12}^R) y_w + (x^R m_{33}^R - m_{13}^R) z_w &= m_{14}^R - x^R m_{34}^R \\ (y^R m_{31}^R - m_{21}^R) x_w + (y^R m_{32}^R - m_{22}^R) y_w + (y^R m_{33}^R - m_{23}^R) z_w &= m_{24}^R - y^R m_{34}^R \end{aligned} \quad (16)$$

式(16)是一个超静定方程,可用最小二乘法对其进行求解。对影像中的各点重复上述过程,便可重构出桨叶表面的三维坐标。在重构出不同状态下桨叶三维坐标后,便可根据桨叶上标记点在不同状态下三维坐标的变化计算求得桨叶各运动参数。

### 1.4 试验步骤

综上所述,文中所提直升机旋翼桨叶运动参数测量方法步骤为:

步骤(1)利用印有编码环的标定板,对数字影像采集系统进行内、外部参数标定,确定投影矩阵;

步骤(2)选取旋翼的某一片桨叶,使用黑、白哑光漆在桨叶表面喷上黑白相间的标记点;

步骤(3)对在不同运动状态下,左、右摄像机采集的旋翼桨叶的二维数字影像进行精确匹配;

步骤(4)利用式(15)完成不同状态下桨叶的三维形貌重构;

步骤(5)通过对比不同状态下桨叶上标记点三维坐标的变化,计算得到桨叶各运动参数。

## 2 试验及分析

为了验证文中所提方法在测量直升机旋翼桨叶运动参数方面的有效性,验证试验选择在直升机所全消声实验室进行,该实验室所提供的封闭环境可以很好的抑制环境因素对桨叶运动的干扰,提高测量结果的可靠性。

图3所示为所采用的数字影像采集系统。包括:左、右两台摄像机,三个补光灯,一个光电传感器(用于控制摄像机的快门),以及一台数据存储设备。



图3 数字影像采集系统

由第二节可知,在采集桨叶的二维数字影像前,需要先对数字影像采集系统进行标定。通过使用印有编码环的十字标定板对数字影像采集系统

进行内、外部参数的标定如图4所示。使用黑、白亚光漆在旋翼桨叶上喷涂黑白相间的标记点如图5所示(本次试验选用的是直径为2 m的4旋翼桨叶)。



图4 十字标定板



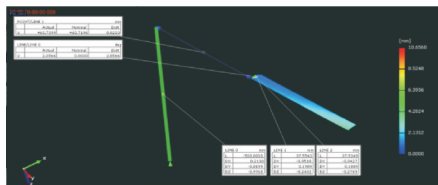
图5 喷有标记点的桨叶

试验过程中左、右摄像机分别采集的旋翼桨叶在不同状态下的二维数字影像如表1所示。

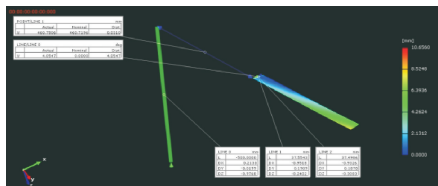
表1 各状态采集的数字影像

转速/r/min	总距/(°)	左摄像机/帧	右摄像机/帧
300	0	100	100
	2	100	100
	4	100	100
	6	100	100

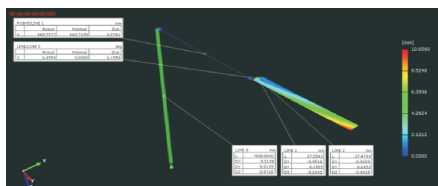
获得桨叶在各状态下的二维数字影像后,经过匹配和三维重构便能得到桨叶表面标记点在各个状态下的三维坐标,图6为以旋翼轴上的标记点为三维坐标原点重构出的桨叶表面标记点在不同总距下的三维坐标及全场变形结果。



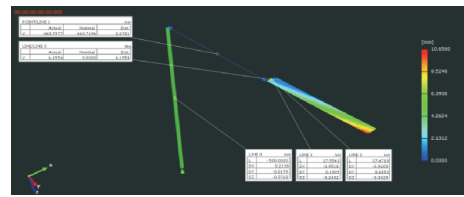
(a)总距为0°



(b)总距为2°



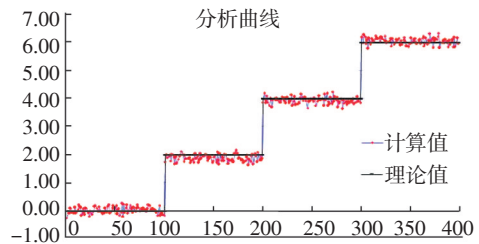
(c)总距为4°



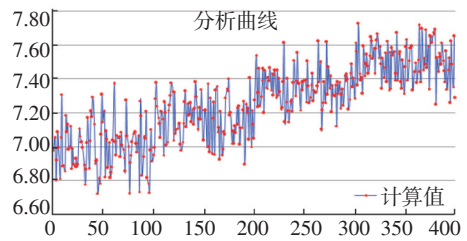
(d)总距为6°

图6 不同总距下桨叶表面标记点三维坐标

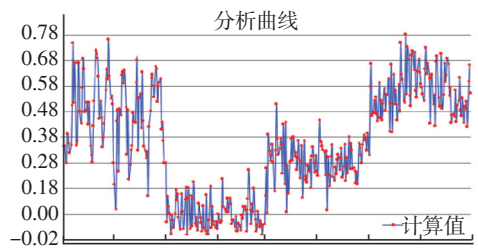
在重构出桨叶的三维形貌之后,便可通过计算得到桨叶的各运动参数,由于受试验条件所限,本次试验只对旋翼桨叶运动参数中的总距、扭矩、挥舞角、摆振角进行了测量,结果如图7所示。



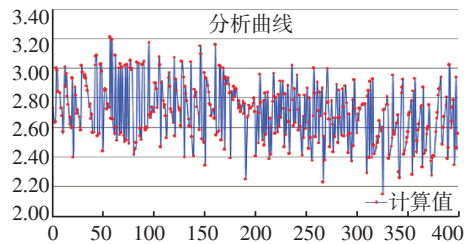
(a)总距



(b)扭转



(c)挥舞角



(d)摆振角

图7 旋翼桨叶部分运动参数测量结果

(下转第86页)

- resonators with flowing saturable gain 2: fast Fourier transform method [J]. *Appl Opt*, 1975, 14(8):1874-1889.
- [4] (美)古德曼. 傅里叶光学导论[M]. 秦克诚, 刘培森, 陈家璧, 等译. 北京:电子工业出版社, 2011:40-45.
- [5] Sherman G C. Application of the convolution theorem to Rayleigh's integral formulas[J]. *Opt. Soc. Am.*, 1967, 57: 546.
- [6] Siegman A E, Sziklas E A. Mode calculations in unstable resonator with flowing saturable gain1: Hermite-Gaussian expansion[J]. *Appl Opt*, 1974, 13(12): 2775-2792.
- [7] 王泰春, 付汉清. COIL非稳腔实验的数值模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2000, 12(s0):5-9.
- [8] Dubrov V D, Grishaev R V, Homenko M D, et al. Estimation of output beam characteristics of laser with unstable resonator and turbulent active medium[J]. *Laser Phys*, 2009, 19(5):1131-1135.
- [9] 张骁, 刘文. 基于亥姆霍兹方程的有源非稳腔模式计算方法[J]. *光电技术应用*, 2011, 26(3):1-3.
- [10] 牛志峰, 郭建增, 任晓明, 等. 大长宽比矩形有源非稳腔模式的数值模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(7): 1721-1725.

(上接第80页)

### 3 结论

相比传统利用应变片、光栅等测量方法,文中提出的基于三维数字影像的非接触式旋翼桨叶运动参数测量方法,具有测试环境要求低、测量参数多、测试量程大等优势。由图7a可知,利用文中所提方法测得的不同状态下的总距与静态标定值非常吻合,各状态下总距的平均值分别为 $0.001^\circ$ ,  $1.865^\circ$ ,  $3.922^\circ$ ,  $6.043^\circ$ 。当然本次试验也存在一些不足,由于桨叶的扭转、挥舞角、摆阵角等运动参数的测试结果还缺乏对比数据,故只能做定性的趋势分析。如何设计对比试验,对测量结果做进一步的定量分析。如何将所提方法更好地运用到全尺寸直升机旋翼桨叶运动参数的测量上,都将是下一阶段研究工作的重点。

### 参考文献

- [1] 约翰逊, 如林. 直升机理论[M]. 北京:航空工业出版社, 1991.
- [2] Gaukroger D R, Hassal G J W. Measurement of vibratory displacement of a rotating blade[J]. *Vertica*, 1978, 2(2): 111-120.
- [3] Tourjansky N, Szechenyi E. The Measurement of Blade Deflections A New Implementation of the Strain Pattern Analysis[C]//Association Aeronautique et Astronautique de France, 1992.
- [4] Reinert H G, Pengel M K, Wall B G. Blade Deflection Measurement at the Low Noise ERATO Rotor [C]//26th European Rotorcraft Forum, 2000:104.
- [5] 李岩, 孟祥旺. 直升机旋翼挥舞、摆振的激光动态测试系统[J]. *光学技术*, 2001, 27(3):214-216.
- [6] 马颂德, 张正友. 计算机视觉: 计算理论与算法基础[M]. 北京:科学出版社, 1998.
- [7] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11):1330-1334.
- [8] 唐正宗, 梁晋, 肖振中, 等. 用于三维变形测量的数字图像相关系统 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(10): 2244-2253.
- [8] WENG Ju-yang, Paul Cohen. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(10):965-980.
- [9] 潘兵, 谢惠民, 李艳杰. 用于物体表面形貌和变形测量的三维数字图像相关方法[J]. *试验力学*, 2007, 22(6): 556-567.
- [10] Tsai R Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[J]. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 1987, 3(4):323-344.
- [11] 孙涛, 梁晋, 郭翔, 等. 基于DIC的预应变下铜/铝复层板各向异性性能检测与研究[J]. *材料工程*, 2014(5): 78-85.