

文章编号: 1001-4888(2017)02-0279-07

# 发动机叶片扭转和弯曲变形同步测量新方法<sup>\*</sup>

苏军, 安中彦, 于云飞, 白琚

(中国航空发动机集团沈阳发动机研究所, 辽宁沈阳 110035)

**摘要:** 扭转和弯曲变形测量可以确定叶片弯扭变形耦合的特征, 为叶片弯扭耦合分析提供可用的试验手段。本文提出了一种发动机叶片扭转和弯曲变形同步测量的新方法, 其中, 扭转角度测量方法能更加灵活地应用于测量叶片类形状不规则构件的扭转变形, 而弯曲变形测量方法解决了叶片变形方向未知且存在弯扭耦合时的叶片变形测量问题, 从而可实现对叶片截面扭转和弯曲变形的同步测量。对上述测量方法进行了专门的验证试验, 结果表明: 与传统方法测量结果相比, 扭转角度测量偏差小于 1%, 挠度测量偏差小于 2%, 满足工程测量精度要求。

**关键词:** 角度; 位移; 叶片; 测量; 弯扭耦合

**中图分类号:** V216.1

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.7520/1001-4888-16-017

## 0 引言

叶片是航空发动机结构的主要构件之一, 在气动或离心力载荷作用下会发生扭转和弯曲变形<sup>[1]</sup>, 对发动机性能、效率等造成重要影响<sup>[2-4]</sup>, 因此需要准确测量其变形<sup>[5,6]</sup>。

通常采用测量叶片转动时产生的线位移来计算扭转角度<sup>[7-9]</sup>。但此方法需要一个基准平面, 而叶片为薄壁不规则结构, 基准平面的选取或构建存在困难。

叶片的薄壁不规则结构导致在工作载荷下产生的弯曲变形方向未知, 需要测量变形平面内两个方向的位移才能确定叶片弯曲变形。但是叶片产生弯曲变形的同时还会扭转而出现角度变形, 存在弯曲和扭转变形耦合<sup>[10-12]</sup>, 因此直接测量得到的两个方向位移不能作为叶片弯曲变形的结果, 这给变形测量带来较大的困难。

基于以上问题, 本文通过理论分析, 提出针对不规则构件存在弯扭耦合时的扭转和弯曲变形测量方法, 可以同时获得叶片扭转和弯曲变形, 并对测量方法进行了试验验证, 确定了其准确性。

## 1 测量方法

发动机的叶片可考虑为固定在轮盘上的悬臂梁, 如图 1 所示, 但由于是薄壁不规则形状, 因此在气动等载荷的作用下, 截面 ABCD 的变形包括绕 Z 向的扭转变形和相对于固定叶片的轮盘产生的悬臂梁弯曲变形。

### 1.1 角度测量方法

通常采用如图 1(a) 和 (b) 所示的方法进行扭转角度测量, 定义试验件的扭转或弯曲变形截面为被侧面, 如图 1 中截面 ABCD。由于扭转过程中仅发生较小的倾斜量<sup>[4]</sup>, 因此假设被侧面仅在二维面内转动。被侧面转动前、后分别表示为 ABCD 和 A'B'C'D', 使用两个位移传感器, 分别在被侧面初始位置

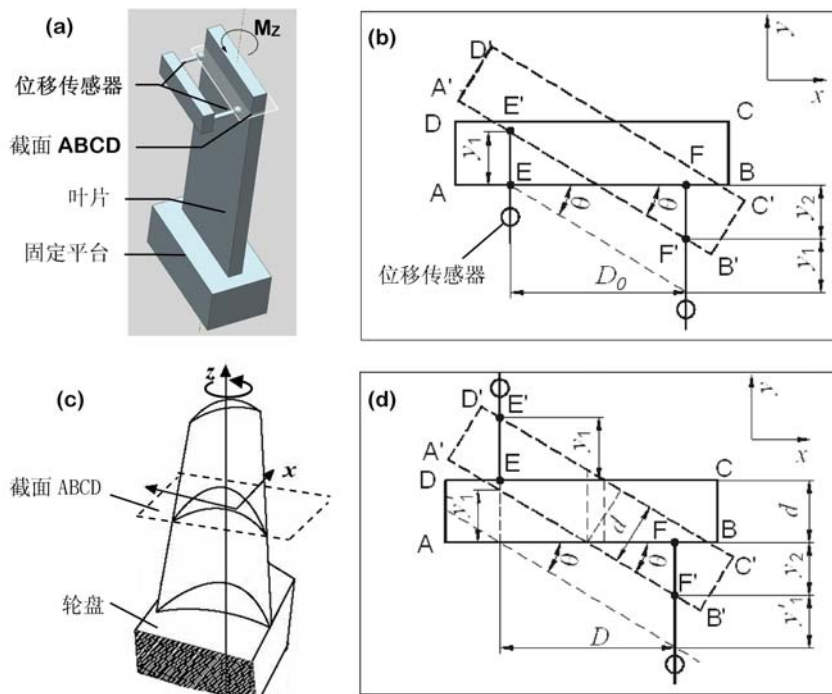
<sup>\*</sup> 收稿日期: 2016-01-26; 修回日期: 2016-05-24

通讯作者: 苏军(1983—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事航空发动机结构静力疲劳试验设计等方向的研究。Email: susoc@163.com

AB 一侧(图 1(b))的 E 和 F 处测量转动后其 y 向的位移  $y_1$ 、 $y_2$ ,通过几何关系,可以确定扭转角度  $\theta^{[6]}$ :

$$\tan\theta = L_y/D_0 = (y_1 - y_2)/D_0 \quad (1)$$

式中,  $\theta$  为被侧面转动角度( $^\circ$ );  $L_y$  为 E、F 处 y 向位移之差(mm);  $y_1$ 、 $y_2$  以图 1(b)中沿 +y 向产生位移为正,反之为负。由公式(1)可见,角度测量仅与 y 向的位移有关。



(a)和(b) 传统角度测量方法示意图; (c)和(d) 本文提出的角度测量方法

图 1 扭转角度测量示意图

(a) and (b) Schematic of conventional angle measurement method;

(c) and (d) Angle measurement method in this study

Fig. 1 Schematic of angle measurement

对于叶片类形状不规则构件,通常不能与规则构件一样在同一平面安装位移传感器进行测量,因此本文提出采用如图 1(c)和(d)所示的扭转角度测量方法。与传统方法不同的是:位移传感器不必在同一侧 AB,而可将一个位移传感器安装在 AB 侧,而另一个位移传感器安装在 CD 一侧。通过几何关系可以确定扭转角度  $\theta$ :

$$\tan\theta = \frac{y_1 - y_2 + d(1 - \frac{1}{\cos\theta})}{D} \quad (2)$$

式中,  $D$  为 E、F 之间测量方向间距(mm);  $d$  为 E、F 之间垂直方向间距(mm);  $y_1$ 、 $y_2$  为被侧面转动后,在 E、F 处 y 方向的位移(mm)。

另外,如果  $d=0$ ,则公式(2)变为公式(1),测量方式则变为传统测量方法。

## 1.2 弯曲变形测量方法

叶片在转动过程中,试验件被侧面的位置会随着载荷的增大而逐渐偏移,叶片产生弯曲变形。小变形情况下,弯曲变形是被侧面形心的挠度,且方向在以扭矩方向为法向的平面内,测量方法见图 2 所示。ABCD 为被侧面,初始转动中心为 O,转动后  $A''B''C''D''$  的中心为  $O''$ 。将转动分解为平动和扭转两个部分,如图 2 中  $A'B'C'D'$  和  $A''B''C''D''$ 。那么  $O''$  相对于 O 在 x、y 方向的挠度为  $d_x$ 、 $d_y$ 。在图 2 中,4 个位移传感器分别测量对称位置上 x、y 方向的位移。可见,初始转动中心 O 由  $x_1$  与  $x_2$ 、 $y_1$  与  $y_2$  分别中心对称得到。

首先讨论试验件被侧面 ABCD 在 y 方向的变形。由于分解为平动和扭转,因此平动后,转动中心

$O''$ 不随扭转发生变化。位移传感器的位移  $y_1$  和  $y_2$  可以表示为:

$$y_1 = d_y + y'_1 \quad (3)$$

$$y_2 = d_y + y'_2 \quad (4)$$

假设仅发生  $A'B'C'D'$  到  $A''B''C''D''$  的扭转变形,  $y'_1$  和  $y'_2$  绝对值相同, 符号相反, 则  $d_y = (y_1 + y_2)/2$ 。但是, 由于平动后,  $y_1$  和  $y_2$  对应的位移传感器相对于初始转动中心  $O$  在  $x$  方向产生位移  $d_x$  (如图2所示), 则:

$$y'_1 = y'_{o1} + d_x \tan \theta \quad (5)$$

$$y'_2 = y'_{o2} + d_x \tan \theta \quad (6)$$

式中,  $y'_{o1}$ 、 $y'_{o2}$  为仅发生扭转变形 ( $A'B'C'D'$  到  $A''B''C''D''$ ) 时,  $y_1$ 、 $y_2$  对应的位移值 (mm)。由几何关系可知,  $y'_{o1} = -y'_{o2}$ 。

将公式(5)和(6)代入公式(3)和(4), 得到  $y$  方向挠度:

$$d_y = \frac{y_1 + y_2}{2} - d_x \tan \theta \quad (7)$$

同理可得  $x$  方向挠度:

$$d_x = \frac{x_1 + x_2}{2} - d_y \tan \theta \quad (8)$$

联立公式(7)和(8), 可得:

$$d_x = \frac{x_1 + x_2 - (y_1 + y_2) \tan \theta}{2(1 - \tan \theta)} \quad (9)$$

$$d_y = \frac{y_1 + y_2 - (x_1 + x_2) \tan \theta}{2(1 - \tan \theta)} \quad (10)$$

由公式(9)和(10)可以看出, 挠度的计算需要先得到扭转角度  $\theta$ , 将上述弯曲变形测量方法中记录的  $y_1$ 、 $y_2$  和这两个测点在  $x$  向和  $y$  向的间距  $D$ 、 $d$ , 代入公式(2), 即可计算得到扭转角度。因此, 本文的测量方法可同步测量截面的扭转角度和弯曲变形, 测量步骤是先由公式(2)确定扭转角度  $\theta$ , 然后代入公式(9)和(10), 得到弯曲挠度  $d_x$  和  $d_y$ 。

利用公式(9)和(10)可以确定挠度和扭转角度的关系, 反映了叶片的弯曲和扭转耦合特征, 从而解决了叶片弯扭耦合理论分析的试验验证问题, 也为叶片弯扭耦合分析提供了可用的试验验证手段。

## 2 测量方法验证装置

扭转和弯曲变形测量方法验证装置示意图如图3所示, 验证装置照片见图4。

扭转角度测量步骤为: 将试验件4用螺栓固定到底板7, 并放置在基础平台8。使用固定立柱1和推动杆2推动底板7, 使试验件产生扭转变形。由千分表5和9进行位移测量, 采用公式(2)计算得到本文方法测量的扭转角度; 而由千分表6和11测量的位移, 采用公式(1)计算得到传统角度方法测量的扭转角度。

本验证试验的弯曲变形采用试验件在  $x-y$  平面内的位移进行模拟。弯曲变形测量步骤为: 使用推动杆2推动底板7, 使试验件形心产生  $y$  方向的位移, 该位移可由千分表3、5、9、10测量得到, 并采用公式(9)和(10)计算得到挠度。使用千分表6和11测量  $y$  向的位移, 千分表6和11的位移平均值即为试验件在  $y$  向产生的位移, 称为基准位移, 用此结果与公式(9)和(10)得到的结果进行对比, 验证弯曲变形测量结果的准确性。从图3中可以看出, 公式(9)和(10)得到的挠度的坐标系为  $x'-y'$ , 而基准位移的坐标系为  $x-y$ , 两个坐标系的夹角为  $\theta$ , 本文设计的试验装置的两个坐标系夹角  $\theta$  为  $45^\circ$ 。挠度结果需要进行坐标变换到  $x-y$  坐标系, 便于与基准位移进行对比。坐标变换公式为:

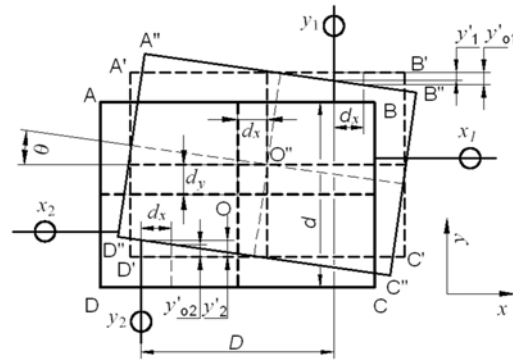
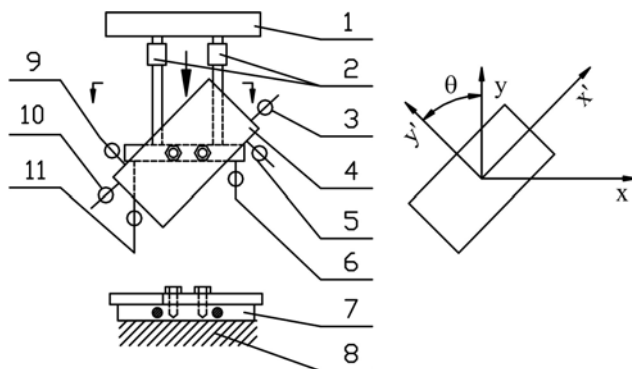


图2 弯曲变形测量示意图

Fig. 2 Schematic of bending displacement measurement

$$x = x' \cos \theta - y' \sin \theta \quad (11)$$

$$y = x' \sin \theta + y' \cos \theta \quad (12)$$



1—固定立柱；2—推动杆；3—千分表④；4—试验件；5—千分表③；6—千分表⑤；  
7—底板；8—基础平台；9—千分表①；10—千分表②；11—千分表⑥

图 3 扭转和弯曲变形测量方法验证装置示意图

Fig. 3 Schematic of experimental verification rig for twist and bending displacement testing method

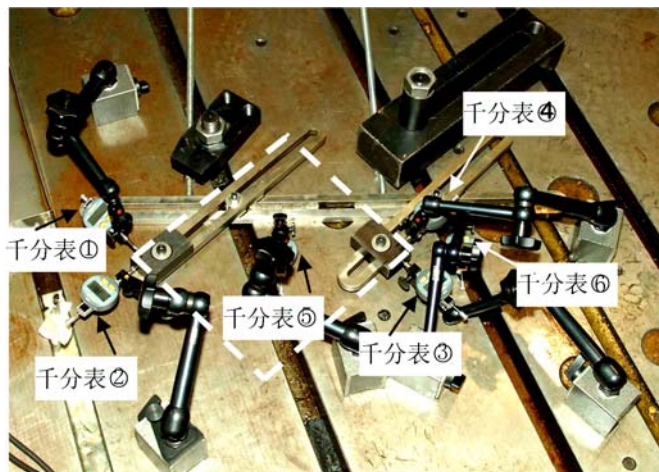


图 4 扭转和弯曲变形测量方法验证装置照片

Fig. 4 Picture of test rig for twist and bending displacement testing method

### 3 结果与讨论

#### 3.1 扭转角度测量结果分析

从公式(2)中可以看出,计算扭转角度需要位移传感器相对位置参数  $D$  和  $d$ ,见图 1(d);传统方法测量扭转角度需要参数  $D_0$ ,见图 1(b),试验中相对位置参数见表 1,扭转角度验证试验中测得的试验数据见表 2。将表 1 和表 2 的数据代入公式(1)和(2),得到传统方法和本文方法的扭转角度测量结果,见表 3。从表 3 可以看出,与传统方法相比较,测量的各个扭转角度偏差均小于 1%,考虑到传统方法也存在一定的误差,因此本文中的扭转

角度测量方法完全能够满足测量结果对误差的要求。

表 1 扭转角度测量千分表相对位置参数  
Tab. 1 Relative position parameters of displacement sensor for twist angle measurement

| $D_0$ (mm) | $D$ (mm) | $d$ (mm) |
|------------|----------|----------|
| 280        | 217      | 241      |

注:  $D_0$  为传统方法参数;  $D$ 、 $d$  为本文方法的参数。

需要说明的是,对于叶片这类不规则形状的构件,传统方法要求的理想测量位置(如图 1(b)所示)通常难以获得。而采用本文的扭转角度测量方法对千分表测量位置的要求更为灵活,可以根据叶片的形状来确定测量位置,本文扭转角度测量方法的适用性更加广泛。

表 2 传统方法和改进方法的扭转角度测量位移数据  
Tab. 2 Displacement data of twist angle measurement from traditional and improved methods

| 传统方法(mm) |       | 改进方法(mm) |        |
|----------|-------|----------|--------|
| 千分表⑤     | 千分表⑥  | 千分表①     | 千分表③   |
| 0.000    | 0.000 | 0.000    | 0.000  |
| 4.001    | 0.460 | −1.072   | −1.666 |
| 8.000    | 0.828 | −2.305   | −3.206 |
| 11.998   | 1.282 | −3.262   | −4.897 |
| 16.001   | 1.617 | −4.625   | −6.187 |
| 20.003   | 1.971 | −5.812   | −7.600 |

表 3 传统方法和改进方法的扭转角度测量结果对比  
Tab. 3 Results of twist angle measurement from traditional and improved methods

| 传统方法(°) | 改进方法(°) | 偏差(%) |
|---------|---------|-------|
| 0.725   | 0.728   | 0.48  |
| 1.467   | 1.476   | 0.59  |
| 2.192   | 2.200   | 0.38  |
| 2.941   | 2.936   | −0.17 |
| 3.685   | 3.667   | −0.49 |

3.2 弯曲变形测量结果分析

表 4 是基准位移和挠度测量数据,利用公式(9)和(10)可以得到在试验坐标系  $x'-y'$  下的挠度  $d_x$  和  $d_y$ ,采用公式(11)和(12)将  $d_x$  和  $d_y$  转换到基准位移方向,便可以与基准位移进行对比,基准位移和转换为  $x-y$  坐标系后的挠度结果见表 5。

表 4 基准位移和挠度测量数据

Tab. 4 Displacement data for reference displacement and bending displacement testing

| 基准位移(mm) |       |        | 挠度(mm) |       |        |
|----------|-------|--------|--------|-------|--------|
| ⑤        | ⑥     | ①      | ②      | ③     | ④      |
| 0.000    | 0.000 | 0.000  | 0.000  | 0.000 | 0.000  |
| 0.487    | 0.502 | −0.429 | 0.296  | 0.429 | −0.269 |
| 1.010    | 1.015 | −0.793 | 0.648  | 0.829 | −0.610 |
| 2.014    | 2.028 | −1.634 | 1.214  | 1.679 | −1.128 |
| 3.012    | 3.026 | −2.504 | 1.748  | 2.570 | −1.601 |
| 3.991    | 4.002 | −3.361 | 2.225  | 3.462 | −2.043 |
| 5.995    | 6.011 | −5.299 | 3.143  | 5.438 | −2.847 |

从表 5 可以看出,挠度与基准位移的偏差小于 1.9%。试验中,由于试验件安装角度,千分表安装位置均存在一定的偏差,由此会引入部分误差,因此试验结果与基准位移虽然有一定的偏差,但小于 2%的偏差是可以接受的。因此试验结果证明了弯曲变形测量方法的准确性。

表 5 基础位移和弯曲变形测量结果对比

Tab. 5 Results of reference displacement and bending displacement

| 基准位移(mm) | 挠度(mm) | 偏差(%) |
|----------|--------|-------|
| 0.495    | 0.503  | 1.7   |
| 1.013    | 1.018  | 0.5   |
| 2.021    | 1.999  | −1.1  |
| 3.019    | 2.977  | −1.4  |
| 3.997    | 3.920  | −1.9  |
| 6.003    | 5.912  | −1.5  |

## 4 结 论

提出叶片的扭转和弯曲变形同步测量方法,可以同步获得试验件的扭转和弯曲变形,测量方法灵活,特别适合对不规则薄壁叶片的扭转和弯曲变形的测量,从而弥补传统方法只能获得扭转角度,而无法同时获取叶片弯曲变形的缺陷。

扭转和弯曲变形测量方法可以确定叶片弯扭变形耦合特征,为叶片弯扭耦合分析提供可用的试验手段。

试验验证结果表明,扭转和弯曲变形测量结果与传统方法测量结果的偏差分别小于 1% 和 2%,测量结果的偏差较小,扭转和弯曲变形测量方法的准确性得到了验证。

## 参考文献:

- [1] 宋兆泓,熊昌炳,郑光华. 航空燃气涡轮发动机强度设计[M]. 北京航空学院出版社,1988 (SONG Zhaohong, XIONG Changbing, ZHEN Guanghua. Strength design of Aero gas turbine engine[M]. Beijing Aeronautical Institute Press, 1988 (in Chinese))
- [2] 杨强,邵闯,方可强. 航空发动机复合材料叶片振动疲劳特性研究[J]. 实验力学,2014,29(3):361—367 (YANG Qiang, SHAO Chuang, FANG Keqiang. Vibration fatigue characteristic study of aeroengine composite blade[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(3):361—367 (in Chinese))
- [3] Kallesoe B S, Hansen M H. Some effects of large blade deflections on aeroelastic stability[R]. AIAA 2009-839, 2009.
- [4] Dossena V, D'Ippolito G, Pesatori E. Stagger angle and pitch chord ratio effects on secondary flows down-stream of a turbine cascade at several off-design conditions[R]. ASME GT2004-54083, 2004.
- [5] 郑赞,王彪,杨慧,等. 跨声速风扇叶片反扭影响因素研究[J]. 燃气涡轮试验与研究,2013,26(5):7—11 (ZHENG Yun, WANG Biao, YANG Hui, et al. Blade untwist influencing factors of a transonic fan[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2013, 26(5):7—11 (in Chinese))
- [6] 郑赞,王彪,杨慧. 跨声速风扇叶片的反扭设计研究[J]. 机械工程学报,2013,49(5):147—153 (ZHENG Yun, WANG Biao, YANG Hui. Numerical study on blade un-running design of a transonic fan[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(5):147—153 (in Chinese))
- [7] Andries J Du Plessis. Modeling and experimental testing of twist actuated single cell composite beams for helicopter blade control[D]. Cambridge, MIT, 1996.
- [8] Sang Joon Shin. Design, manufacturing and testing of an active twist rotor[D]. Cambridge, MIT, 1999.
- [9] 闻雪友. 叶片弹性扭角的试验研究[J]. 透平锅炉,1982(5):1—4 (WEN Xueyou. Experimental study on the elastic twist angle of blade[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 1982(5):1—4 (in Chinese))
- [10] 金鑫,何玉林,刘桦,等. 风力发电机耦合振动分析[J]. 振动与冲击,2007,26(8):144—147,153,177 (JING Xin, HE Yulin, LIU Hua, et al. Coupled vibration analysis of wind turbine[J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(8):144—147,153,177 (in Chinese))
- [11] 李录平,曲汉霞,黄文俊,等. 汽轮机长叶片扭转恢复特性研究[J]. 汽轮机技术,2008,50(2):85—88 (LI Luping, QU Hangxia, HUANG Wenjun, et al. Research on twist-back features of long blade in steam turbine[J]. Turbine Technology, 2008, 50(2):85—88 (in Chinese))
- [12] 任勇生,张明辉. 水平轴风力机叶片的弯扭耦合气弹稳定性研究[J]. 振动与冲击,2010,29(7):1—5 (REN Yongsheng, ZHANG Minghui. Aeroelastic stability of a horizontal axis wind turbine blade with bending-torsion coupled[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(7):1—5 (in Chinese))

## A New Synchronous Measurement Method for Torsion and Bending Deformation of Engine Blade

SU Jun, AN Zhong-yan, YU Yun-fei, BAI Jun

(AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

**Abstract:** Torsion and bending deformation measurement can determine the characteristics of blade bending-torsion coupling deformation, and then provide available experimental means for analysis of blade bending-torsion coupling. In this paper, a new method for synchronous measurement of torsion angle and bending displacement for an engine blade is presented. Thereinto, the method for torsion angle measurement can more flexibly measure the torsion deformation of blade component with irregular shape; while the method for bending deformation measurement has solved the deformation measurement of blade with unknown deformation direction and torsion-bending coupling; thus the torsion and bending deformation synchronous measurement for blade section is realized. A special verification experiment was carried out for above-mentioned measurement method. Results show that compared with the results obtained from conventional measurement method, the deviation of torsion angle is less than 1%, and the deviation of deflection measurement is less than 2%, which meet the requirements of engineering measurement accuracy.

**Keywords:** angle; displacement; blade; measurement; torsion-bending coupling