

# 内切圆弦长法计算空心涡轮叶片蜡模壁厚

徐岳琳, 卜昆\*, 张定华, 黄胜利, 程云勇, 索瑞

西北工业大学 现代设计与集成制造技术教育部重点实验室, 陕西 西安 710072

**摘要:** 针对涡轮叶片精铸蜡模壁厚的快速、低成本测量问题, 提出了基于光学测量的内切圆弦长的壁厚计算方法。以陶芯和蜡模外形的光学扫描测量模型为对象, 将两测量模型进行配准并提取截面数据, 拟合得到蜡模内外截面轮廓线, 提出并研究了两种内外截面轮廓线内切圆弦长计算方法, 进而在 UG 平台上进行二次开发计算得到蜡模壁厚。最后, 通过实验将算法的实例计算壁厚与计算机断层成像(CT)测量壁厚进行了比较分析, 结果表明, 基于光学测量的内切圆弦长法计算壁厚与 CT 测量壁厚具有很好的一致性。

**关键词:** 空心涡轮叶片; 内切圆弦长; 壁厚; 蜡模; 光学扫描测量; 配准

**中图分类号:** V232.4; TP391 **文献标识码:** A

涡轮叶片是航空发动机中的关键零件之一, 其形状和精度直接影响航空发动机的性能<sup>[1]</sup>。叶片的常用铸造方法是熔模精密铸造<sup>[2]</sup>, 受铸造工艺、精铸工装、材料等多种因素的影响, 中国涡轮叶片精铸技术与国外有较大差距, 其研制的精铸叶片精度偏低、质量不稳、废品率很高, 一直是制约中国新型航空发动机研制的瓶颈。统计结果表明: 在涡轮叶片无余量熔模精密铸造工艺过程中, 同批次不合格空心叶片铸件中由于壁厚尺寸漂移引起的形状超差占 50% 左右, 是造成中国空心涡轮叶片合格率偏低的主要问题之一。

涡轮叶片的壁厚主要通过精铸蜡模的壁厚进行保证, 通过检测并剔除产生壁厚偏析漂移的精铸蜡模, 可以有效提高精铸成品率。因此, 蜡模壁厚的检测对于提高涡轮叶片合格率具有重要的意义。

在涡轮叶片蜡模壁厚检测中, 传统的方法为超声波法和电涡流法<sup>[3]</sup>, 其中电涡流法受探头直径和试件几何尺寸的影响, 测量误差大, 而超声波

法测量精度不高, 且存在测量盲区, 其测量下限受到限制, 且两种方法均只能获取某些指定点处的壁厚, 不能做全面的壁厚检测。近年来发展了基于工业计算机断层成像(CT)图像壁厚检测方法<sup>[4-6]</sup>, 其测量精度较高, 但测量时间长、成本高。三坐标测量精度高, 但是由于蜡模本身材质相对较软, 不适合于接触式测量。光学扫描测量方法是一种基于计算机视觉的, 综合运用图像处理、精密测量等技术进行非接触坐标测量的方法, 被认为是三维形状测量中比较好的方法之一<sup>[7]</sup>。其主要优点是测量范围大, 稳定, 速度快, 成本低, 设备携带方便, 受环境影响小, 易于操作。

因此, 基于现有检测方法不能兼顾全面检测和低成本的问题, 本文提出在光学扫描测量蜡模表面数据基础上, 基于 UG 二次开发直接计算蜡模壁厚, 可以获得任意截面的壁厚分布及具体的壁厚数据, 这为叶片蜡模成型精度的低成本全面检测提供重要手段。

收稿日期: 2010-05-24; 退修日期: 2010-07-04; 录用日期: 2010-09-25; 网络出版时间: 2010-11-15 18:34

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20101115.1834.003.html

DOI: CNKI: 11-1929/V.20101115.1834.003

基金项目: 航空科学基金(2008ZE53042); 国家“863”计划(2006BAF04B02)

\* 通讯作者。Tel.: 029-88493232-328 E-mail: pukun89@nwpu.edu.cn

引用格式: 徐岳琳, 卜昆, 张定华, 等. 内切圆弦长法计算空心涡轮叶片蜡模壁厚[J]. 航空学报, 2011, 32(2): 344-350. Xu Yuelin, Bu Kun, Zhang Dinghua, et al. Algorithm for calculation of wall thickness for hollow turbine blade wax-patterns with inscribed circle chord length[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(2): 344-350.

## 1 叶片蜡模壁厚相关定义

目前工厂实际叶片蜡模厚度检测中,使用超声波测厚仪沿叶片蜡模外表面测量点处的法线方向到达内表面的距离进行测量,如图1中 $L_2$ 所示。由于光学测量计算中运用法线方法可能出现在某点处因截面线细微的转折而导致法向发生较大偏差等不可预测的程序计算错误,从而导致计算不准确,发生放大壁厚现象。因此为了方便叶片蜡模壁厚检测的自动进行,依据适合光学测量数据的壁厚检测工艺,给出本文讨论的一种约束更强蜡模壁厚定义。

对于叶片蜡模内外截面线之间的任一内切圆 $O$ ,其与内外截面线切点分别为 $P_1$ 与 $P_2$ ,将 $P_1$ 与 $P_2$ 之间的连线段(即内切圆 $O$ 的弦长 $L_1$ )称为蜡模在 $P_1$ 点处壁厚,如图1所示。

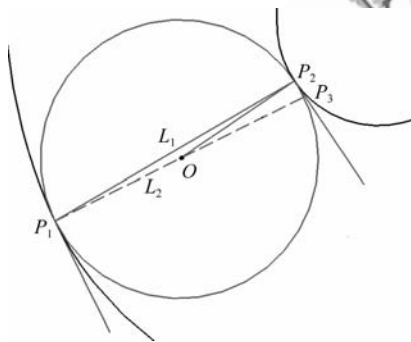


图1 叶片蜡模壁厚示意图

Fig. 1 Definition of wall thickness

## 2 叶片蜡模数据预处理

### 2.1 叶片蜡模数据获取

本文研究空心涡轮叶片蜡模壁厚,即蜡模内外表面间的厚度,但由于蜡模内表面无法直接测量,需转换测量陶芯外表面,蜡模和陶芯数据采用流动式光学扫描仪(ATOS)获取<sup>[8]</sup>。

在光学测量中必须要有参考点,参考点的作用是提供基准定位,在测量过程中必须保证参考点之间的相对位置不变,工件与参考点的相对位置不变。为了不影响叶片数据的获取,本实验将参考点粘贴在自行设计的叶片夹具上,如图2所示,图中黑圆圈即为参考点。

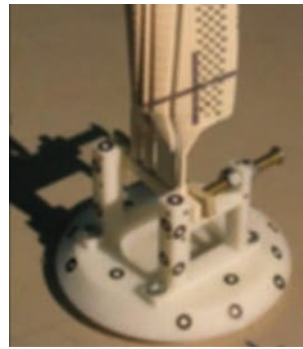


图2 ATOS光学扫描叶片夹具

Fig. 2 Clamp of ATOS optical scanning

本实验先对陶芯进行测量,然后对陶芯加蜡,再测量蜡模,最后导出叶片陶芯和蜡模测量数据,得到如图3所示的陶芯和蜡模的测量数据点云。

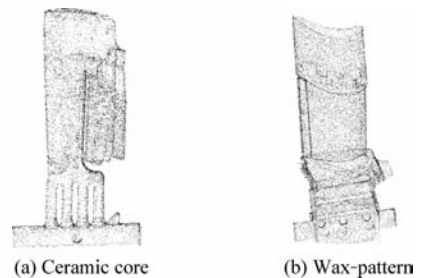


图3 陶芯和蜡模的测量数据点云

Fig. 3 Measurement point cloud of ceramic core and wax-pattern

### 2.2 叶片蜡模测量数据配准

叶片测量数据模型的配准定位是壁厚分析的一个核心环节,只有保证模型配准定位的可靠性,才能保证壁厚分析结果的可靠性。由于陶芯与蜡模为分开测量,因此存在测量坐标系的不统一,重构出的陶芯测量模型与蜡模测量模型之间不可避免存在空间位置差异,因此,需要对二者测量模型进行配准定位。由于陶芯和蜡模为不同测量物体表面,因此不能采用传统的测量模型与设计模型间的整体配准方法。

采用基于特征面的配准方法,以陶芯和蜡模测量模型的公共面为特征进行基于奇异值的最近点迭代<sup>[9-10]</sup>(SVD-ICP)配准,特征公共面可以进行6个自由度方向的控制,如图4所示。

图4中:1为排气边材料面,用以控制两配准模型 $y$ 、 $z$ 方向的正反性;2为定位台侧面,用以控

制两配准模型的 3 个旋转自由度以及  $y$ 、 $z$  方向的自由度;3 为定位台端面,用以控制两配准模型  $x$  方向的自由度。由此,即可将两模型在不缩小其变形的情况下进行准确配准,配准结果如图 5 所示。

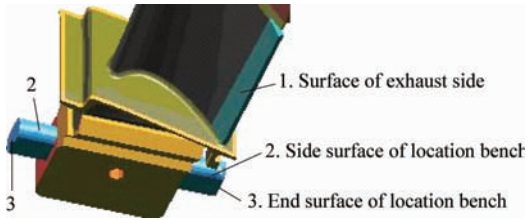


图 4 陶芯和蜡模特征公共面示意图

Fig. 4 Public surfaces of ceramic core and wax-pattern

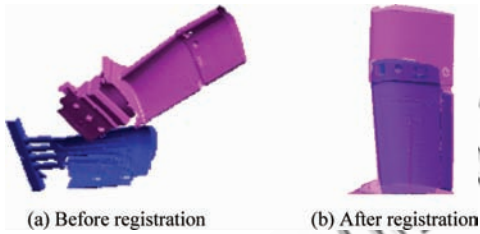


图 5 陶芯和蜡模测量数据配准效果示意图

Fig. 5 Registration of ceramic core and wax-pattern

### 2.3 截面线获取

从叶片的 CAD 模型获取切片数据,本质上是平面与 CAD 模型边界曲面之间求交问题,这也是计算机辅助几何设计(CAGD)中的基本问题。叶片 CAD 模型切片数据的获取直接使用 CAD 造型软件提供的接口函数完成,求交后,得到一系列轮廓线段集合。本文 STL 模型截面数据获取与 CAD 模型类似,通过平面截取获得陶芯和蜡模配准后的外轮廓数据点云,如图 6 所示,其中 4 为陶芯 STL 截面轮廓点云,5 为相应的蜡模 STL 截面轮廓点云。

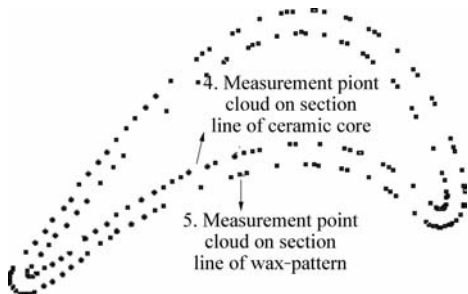


图 6 陶芯和蜡模外轮廓数据点云

Fig. 6 Point cloud on section line of ceramic core and wax-pattern

运用二次提取法<sup>[11]</sup>对截面轮廓数据点云进行处理,得到截面轮廓线,如图 7 所示。

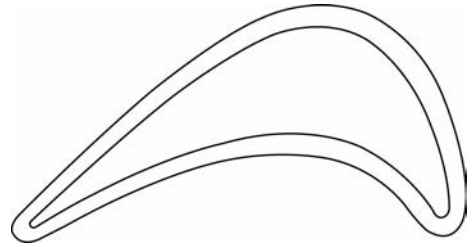


图 7 陶芯和蜡模截面轮廓线

Fig. 7 Section line of ceramic core and wax-pattern

### 3 叶片蜡模壁厚计算

由第 1 节可知叶片蜡模壁厚为内外轮廓线的内切圆弦长,因此为求蜡模壁厚,应求出内切圆圆心和半径,然后求其与内外轮廓线交点,最后算出弦长即壁厚。

本文根据内切圆圆心和半径,分两种方法计算叶片蜡模壁厚,即等距线法和等半径法。

#### 3.1 等距线法

等距线法的核心为:通过调整半径,找出内切圆的圆心,从而计算叶片蜡模壁厚。

由于内切圆到内外轮廓线的距离相等,因此其圆心即为内外轮廓线相等距离等距线交点。等距线法具体步骤如下:

(1) 将叶身外截面线  $C_w(\theta)$  离散为  $n+1$  个插值点,构造  $G^2$  连续分段有理三次 Bezier 样条曲线共  $n$  段,记为  $C_i(u)$  ( $i=0,1,\dots,n$ ),其沿内法线方向的单位法向量记为  $N_i(u)$  ( $i=0,1,\dots,n$ ),则外截面线等距线为

$$C_{i,r}(u) = C_i(u) + rN_i(u) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: $r$  为偏置距离。

(2) 同理将叶身内截面线  $C_n(\theta)$  离散为  $n$  段样条曲线,记为  $I_i(u)$  ( $i=0,1,\dots,n$ ),其沿外法线方向的单位法向量记为  $M_i(u)$  ( $i=0,1,\dots,n$ ),则内截面线等距线为

$$I_{i,r}(u) = I_i(u) + rM_i(u) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

(3) 求解式(3),判断内外截面线等距线是否有交点:

$$\left. \begin{aligned} I_{i,r}(u) &= I_i(u) + rM_i(u) \\ C_{i,r}(u) &= C_i(u) + rN_i(u) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

分以下3种情况分析。

① 当偏置距离  $r$  较小时,无交点,如图8(a)所示。

② 令  $r = r + \Delta r$ ,其中  $\Delta r$  为偏置距离的增大步长,可取为叶片数据测量精度的  $1/10$ 。继续增大偏置距离  $r$  直到两等距线相交,如图8(b)所示,求解式(3)得到交点,该点即为内切圆圆心,此时  $r$  即为内切圆半径。

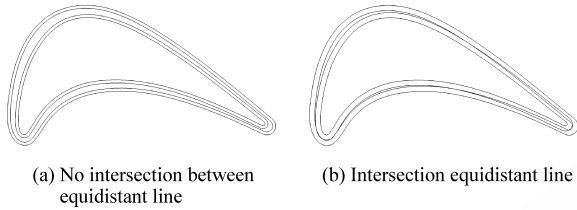


图8 等距线法计算叶片蜡模壁厚示意图

Fig.8 Calculation of wall thickness with equidistant line algorithm

③ 当偏置距离  $r$  增大到一定程度时,等距线又会没有交点。实际生产中叶片厚度不会达到设计厚度的2倍,因此可用叶片设计厚度  $r_{\max}$  作为偏置距离的上限,当  $r \geq r_{\max}$  时,求解结束。

(4) 将求解式(3)得到的所有内切圆圆心记为  $P_j (j=0, 1, \dots, m)$ ,相应内切圆半径记为  $R_j (j=0, 1, \dots, m)$ 。求解式(4)得到内切圆与外截面线  $C_w(\theta)$  切点,记为点  $P_{wj} (x_{wj}, y_{wj}) (j=0, 1, \dots, m)$ 。

$$C_w(\theta) = P_j + R_j A(\theta) \quad (4)$$

式中:  $A(\theta) = [\cos \theta \quad \sin \theta]$ 。

求解式(5)得到内切圆与内截面线  $C_n(\theta)$  切点,记为点  $P_{nj} (x_{nj}, y_{nj}) (j=0, 1, \dots, m)$ 。

$$C_n(\theta) = P_j + R_j A(\theta) \quad (5)$$

(5) 则叶片蜡模壁厚为  $L_j (j=0, 1, \dots, m)$ 。

$$L_j = \sqrt{(x_{wj} - x_{nj})^2 + (y_{wj} - y_{nj})^2} \quad (6)$$

### 3.2 等半径法

等半径法的核心为:通过调整圆心位置,求出内切圆的半径,从而计算叶片蜡模壁厚。

等半径法计算叶片蜡模壁厚示意图如图9所示。

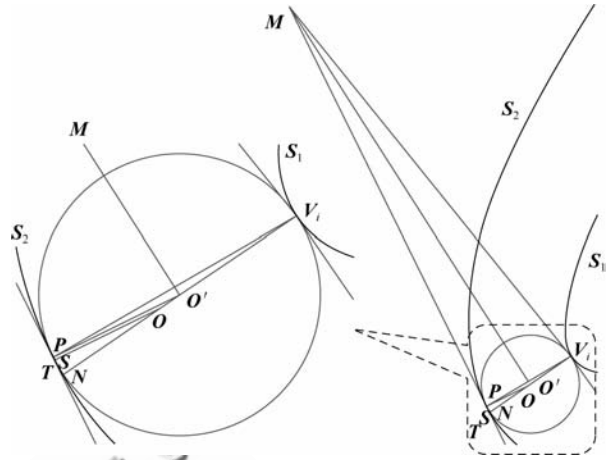


图9 等半径法计算叶片蜡模壁厚示意图

Fig.9 Calculation of wall thickness with equal radius algorithm

其具体步骤如下:

(1) 过叶身内截面线  $S_1$  上点  $V_i(x_i, y_i)$  并沿其法矢方向作一直线,交叶身外截面线  $S_2$  于点  $N$ ,则直线  $V_i N(w)$  方程为

$$V_i N(w) = V_i + wn \quad (7)$$

式中:  $n$  为截面线  $S_1$  在  $V_i$  点的单位法矢。

(2) 取线段  $V_i N$  中点,记为点  $O$ ,找出  $S_2$  上距点  $O$  最近的点,记为点  $P(x_p, y_p)$ 。

(3) 若  $s < \epsilon$  ( $\epsilon$  一般可取工程精度  $10^{-3}$ ),其中

$$s = |V_i O| - |OP| \quad (8)$$

则点  $O$  即为内切圆圆心,其半径为

$$R = |V_i P| / 2 \quad (9)$$

其弦长即壁厚为

$$L = \sqrt{(x_i - x_p)^2 + (y_i - y_p)^2} \quad (10)$$

然后求解下一点,否则,执行步骤(4)。

(4) 截面线  $S_2$  在  $P$  点处的切线方程为

$$L_P(u) = P + uk \quad (11)$$

式中:  $k$  为截面线  $S_2$  在  $P$  点单位切矢。

截面线  $S_1$  在  $V_i$  点处的切线方程为

$$L_V(v) = V_i + vl \quad (12)$$

式中:  $l$  为截面线  $S_1$  在  $V_i$  点单位切矢。

求解式(13)得到切线  $L_P(u)$  和  $L_V(v)$  交点,记为点  $M$ 。



$$\left. \begin{aligned} L_P(u) &= P + uk \\ L_V(v) &= V_i + vl \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$\angle V_iMP$  的角平分线方程为

$$L_M(x) = V_i + x(l + k) \quad (14)$$

求解式(15)得到角平分线  $L_M(x)$  和直线  $V_iN(w)$  交点, 记为点  $O'(x_o, y_o)$ 。

$$L_M(x) = V_i + x(l + k) \quad (15)$$

$$V_iN(w) = V_i + wn$$

过点  $O'$  作垂直于切线  $L_P(u)$  的直线, 分别交切线  $L_P(u)$  和截面线  $S_2$  于点  $S$  和点  $T$ 。

(5) 若  $s < \epsilon$ , 其中

$$s = |PT| \quad (16)$$

则点  $O'$  即为内切圆圆心, 其半径为

$$R = |V_iO'| \quad (17)$$

其弦长即壁厚为

$$L = \sqrt{(x_i - x_o)^2 + (y_i - y_o)^2} \quad (18)$$

然后求解下一点, 否则以  $T$  点作为新  $P$  点, 执行步骤(4)。

#### 4 算法验证与分析

本文在 UG 平台基于 UG Open API 函数分别实现了传统法线方法、等距线法以及等半径法的叶片蜡模壁厚计算。以某空心涡轮叶片蜡模为对象, 分别运用这 3 种算法进行壁厚计算, 得到相

应的蜡模壁厚分布图, 如图 10 所示。

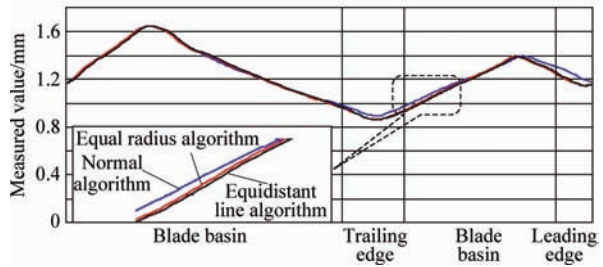


图 10 某空心涡轮叶片蜡模壁厚分布曲线图

Fig. 10 Distribution curve of wall thickness of a hollow turbine blade

由图 10 可知, 叶片蜡模壁厚在前后缘处最小, 在叶背凸峰处最大, 并沿叶背凸峰和叶盆凹峰向前后缘逐渐变小。

为比较 3 种方法计算叶片蜡模壁厚的准确性, 将 3 种方法所得壁厚与叶片蜡模壁厚实测值进行比较, 在目前叶片蜡模壁厚测量方法中 CT 测量精度相对最高, 因此本文采用 CT 校正优化处理后的测量值作为参考标准值, 比较结果如表 1 所示。

由表 1 的对比结果可知:

- ① 传统法线方法所得壁厚与实测值相比在叶片蜡模前后缘处偏差较大, 分别向叶盆和叶背方向逐渐接近实测值;
- ② 等距线法和等半径法所得壁厚与实测值具有很好的一致性。

表 1 壁厚对比结果

Table 1 Contrast of results for wall thickness

Parameter	Normal algorithm		Equidistant line algorithm		Equal radius algorithm		CT measured value/mm
	Measured value/mm	Relative error/%	Measured value/mm	Relative error/%	Measured value/mm	Relative error/%	
Maximum wall thickness of blade back	1.648	0.121	1.647	0.182	1.647	0.182	1.650
Minimum wall thickness of trailing edge	0.896	4.186	0.862	0.233	0.864	0.465	0.860
Maximum wall thickness of blade basin	1.397	0.214	1.396	0.286	1.397	0.214	1.400
Minimum wall thickness of leading edge	1.178	2.435	1.151	0.087	1.145	0.435	1.150

#### 5 结论

(1) 提出叶片蜡模内切圆弦长壁厚定义, 解

决了传统法向壁厚在光学测量计算中的局部位置放大实际壁厚的问题。

(2) 叶片蜡模壁厚在前后缘处最小, 在叶背

凸峰处最大,且在叶背凸峰和叶盆凹峰达峰值,分别向前后缘方向逐渐变小。

(3) 提出两种基于内切圆弦长的壁厚计算方法,其所得壁厚与 CT 测量壁厚具有很好的一致性。

(4) 提出的基于光学测量的内切圆弦长壁厚计算方法可以快速准确计算蜡模壁厚,为实现叶片蜡模壁厚批量快速检测提供依据。

## 参 考 文 献

- [1] 张丹, 张卫红, 万敏. 基于位移场仿真与特征参数提取的精铸模具型面逆向设计方法[J]. 航空学报, 2006, 27(3): 509-514.  
Zhang Dan, Zhang Weihong, Wan Min. Reversing design methodology of the die profile in investment casting based on the simulation of displacement field and identification of featured parameters[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(3): 509-514. (in Chinese)
- [2] 慈铁军, 张刚. 熔模铸造中蜡模制造的方法研究[J]. 煤矿机械, 2007, 28(11): 101-103.  
Ci Tiejun, Zhang Gang. Method study of wax pattern manufacture in melt mold casting[J]. Coal Mine Machinery, 2007, 28(11): 101-103. (in Chinese)
- [3] Le Bihan Y, Joubert P Y, Placko D. Wall thickness evaluation of single crystal hollow blade by eddy current sensor[J]. NDT & E International, 2001, 34(5): 363-368.
- [4] 程云勇, 张定华, 卜昆, 等. 基于工业 CT 测量数据的空心涡轮叶片三维壁厚分析[J]. 机械强度, 2009, 31(5): 791-796.  
Cheng Yunyong, Zhang Dinghua, Bu Kun, et al. Hollow turbine blade 3D wall-thickness analysis based on its ICT measurement data[J]. Journal of Mechanical Strength, 2009, 31(5): 791-796. (in Chinese)
- [5] 傅健, 路宏年, 候涛, 等. 基于 ICT 图像的航空发动机涡轮叶片壁厚尺寸精密测量方法[J]. 航空学报, 2006, 27(2): 325-330.  
Fu Jian, Lu Hongnian, Hou Tao, et al. Parametric design of turbo-jet blades with unequal thickness[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(2): 325-330. (in Chinese)
- [6] 王庆胜, 张定华, 程云勇, 等. 基于 ICT 切片图像的航空发动机涡轮叶片壁厚检测[J]. 计算机工程与应用, 2005(2): 203-204.  
Wang Qingsheng, Zhang Dinghua, Cheng Yunyong, et al. Testing of wall thickness for aero-turbine blade based on ICT image[J]. Computer Engineering and Application, 2005(2): 203-204. (in Chinese)
- [7] 谭勇. 基于结构光图像法的三维曲面重构技术[J]. 湖北

民族学院学报: 自然科学版, 2005, 23(3): 277-279.

Tan Yong. 3D surface reconstruction based on structure light and image processing[J]. Journal of Hubei Institute for Nationalities: Natural Science Edition, 2005, 23(3): 277-279. (in Chinese)

- [8] 龚正国. 叶片多源测量数据的融合处理与误差分析[D]. 西安: 西北工业大学, 2009.  
Gong Zhengguo. Research of blade multi-measurement data integration and deviation analysis[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2009. (in Chinese)
- [9] 戴静兰, 陈志杨, 叶修梓. ICP 算法在点云配准中的作用[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(3): 517-521.  
Dai Jinglan, Chen Zhiyang, Ye Xiuzi. The application of ICP algorithm in point cloud alignment[J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 12(3): 517-521. (in Chinese)
- [10] Jiang J, Cheng J, Chen X L. Registration for 3-D point cloud using angular-invariant feature[J]. Neurocomputing, 2009, 72(16-18): 3839-3844.
- [11] 刘晶. 叶片数字化检测中的模型配准技术及应用研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.  
Liu Jing. Research on model registration method and its application in digital measurement[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006. (in Chinese)

## 作者简介:

徐岳琳(1986—) 女, 硕士研究生。主要研究方向: 计算机辅助技术、现代集成制造技术。

Tel: 029-88493232-229

E-mail: xuyuelinnwpu@126.com

卜昆(1965—) 女, 博士, 教授。主要研究方向: 计算机辅助技术、现代集成制造技术。

Tel: 029-88493232-328

E-mail: pukun89@nwpu.edu.cn

张定华(1958—) 男, 博士, 教授。主要研究方向: 计算机辅助技术、现代集成制造技术。

Tel: 029-88493232

E-mail: dhzhang@nwpu.edu.cn

黄胜利(1985—) 男, 硕士研究生。主要研究方向: 计算机辅助技术、现代集成制造技术。

Tel: 029-88493232

E-mail: victory288@163.com

程云勇(1976—) 男, 博士, 副教授。主要研究方向: 计算机辅助技术、现代集成制造技术。

Tel: 029-88493232

E-mail: chengyunyong@126.com

索瑞(1985—) 男, 硕士研究生。主要研究方向: 计算机辅助技术、现代集成制造技术。

Tel: 029-88493232

E-mail: suorui-521@163.com

## Algorithm for Calculation of Wall Thickness for Hollow Turbine Blade Wax-patterns with Inscribed Circle Chord Length

XU Yuelin, BU Kun<sup>\*</sup>, ZHANG Dinghua, HUANG Shengli, CHENG Yunyong, SUO Rui

*The Key Laboratory of Contemporary Design & Integrated Manufacturing Technology, Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China*

**Abstract:** To realize the high speed and low cost measurement of the wall thickness of the wax pattern of a turbine blade, a novel wall thickness calculation method is proposed based on the inscribed circle chord length between the inside and outside contour lines of the wax pattern wall. First, the optical scanning data registration of the wax-pattern and the ceramic core is studied, and the contour lines are extracted from the registration model. Then, two different computing models for the inscribed circle chord length of the contour lines are built. Finally, a sample application is presented for demonstration by comparing the method in this article with the computer tomography (CT) measured data. The result shows that the wall thickness calculated by the inscribed circle chord length method agrees well with the CT measured data.

**Key words:** hollow turbine blade; inscribed circle chord length; wall thickness; wax-pattern; optical scanning measurement; registration

**Received:** 2010-05-24; **Revised:** 2010-07-04; **Accepted:** 2010-09-25; **Published online:** 2010-11-15 18:34

**URL:** www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20101115.1834.003.html **DOI:** CNKI:11-1929/V.20101115.1834.003

**Foundation items:** Aeronautical Science Foundation of China(2008ZE53042); National High-tech Research and Development Program of China (2006BAF04B02)

<sup>\*</sup> **Corresponding author.** Tel.: 029-88493232-328 E-mail: pukun89@nwpu.edu.cn