三维激光测量技术在燃气轮机叶尖间隙测量上的应用

赵新通， 刘欣宇， 连乐乐
（哈尔滨理工大学 机械动力工程学院，哈尔滨 150080）

摘 要：叶尖间隙是影响燃气轮机性能的重要参数，机匣与叶片装配完成后，叶尖间隙测量对保证燃气轮机的工作效率和安全运行至关重要。针对现有测量方法存在的测量范围小、效率低、精度低、智能化程度差等问题，提出了基于三维激光测量技术的叶尖间隙间接测量方法，详细讨论了测量原理、测量系统、测量流程及点云配准算法。针对叶尖点云与机匣点云无重叠区域的特点，提出基于传感器和轴线空间关系的粗配准方法，并结合法向量特征的精配准算法，实现了高精度的点云配准，得到了反映整圈叶尖间隙的几何信息。数值模拟结果表明：该方法具有精度高、非接触、范围广、智能化等优点，能够高效测量叶尖间隙。

关键词：叶尖间隙；三维激光轮廓测量仪；数据融合；点云配准；数值模拟
DOI：10.15938/j.jhust.2026.03.006
中图分类号：TK474.3 **文献标志码**：A **文章编号**：1007-2683(2026)03-0055-08

Application of 3D Laser Measurement Technology in Gas Turbine Tip Clearance Measurement

ZHAO Xintong， LIU Xinyu， LIAN Lele
(School of Mechanical and Power Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: Tip clearance is an important parameter affecting the performance of gas turbines. After the assembly of casings and blades, tip clearance measurement is very important to ensure the working efficiency and operation safety of gas turbines. Aiming at the drawbacks of narrow measurement range, low efficiency, low precision and poor intelligence in the existing measurement methods, an indirect measurement method of tip clearance based on three-dimensional laser measurement technology is proposed. The measurement principle, measurement system, measurement process and point cloud registration algorithm are discussed in detail. In view of the fact that the blade tip point cloud and the casing point cloud have no overlapping area, a coarse registration method based on the spatial relationship between the sensor and the axis is proposed, and a fine registration algorithm based on normal vector features is proposed to achieve high-precision point cloud registration, and the geometric information reflecting the whole circle of blade tip clearance is obtained. Numerical simulation results show that the proposed method has the advantages of high accuracy, non-contact measurement, wide range and intelligence, and can measure tip clearance efficiently.

Keywords: blade tip clearance; 3D laser profile measuring instrument; data fusion; point cloud registration; numerical simulation

0 引 言

燃气轮机在空运、海军、发电等领域有广泛的需求，对社会的发展和科技的进步起到了至关重要的作用[1]。压气机作为燃气轮机的3大部件之一，其性能的优劣直接关系到发动机的整体寿命和性能[2-3]。压气机机匣内壁与叶片转子顶端间的距离

收稿日期：2024-09-09
基金项目：黑龙江省自然科学基金(ZD2024E001).
作者简介：刘欣宇(1999—)，男，硕士研究生；
连乐乐(2001—)，男，硕士研究生.
通信作者：赵新通(1971—)，男，博士，教授，硕士研究生导师，E-mail:5681604@qq.com.

称为叶尖间隙,与燃气轮机的效率、压比、燃油消耗率、稳定性等直接相关[4]。研究表明:燃气轮机叶尖间隙若增大其叶片长度值的 1%,工作效率将下降约 1.5%,同时耗油量增加约 3%[5-6]。然而,缩小叶尖间隙虽能提升效率,却导致成本增加,甚至技术上难以实现,且过小的间隙在运行中易引发叶片刮擦问题[7-9]。因此,寻求叶尖间隙的最优量值,是燃气轮机高效、安全、稳定运行的关键。

压气机含多级叶片,结构紧凑且构成叶尖间隙的两端均为曲面[10],为叶尖间隙的测量带来了挑战。装配完成后常见的叶尖间隙测量方法有橡皮泥法、压铅丝测量法、人为塞尺测量法等[11-12],测量效率和精度较低,智能化程度差。同时,以上方法在测量过程中无法获得整圈的叶尖间隙值,影响压气机性能评估、维护策略制定和技术改进。

针对上述测量方法存在的问题,本文提出了基于三维激光测量技术的叶尖间隙间接测量方法,结合三维激光轮廓测量仪与角度编码器采集叶片和机匣轮廓的数据信息,然后通过数据融合、坐标变换、点云配准等技术得到全轮廓的叶尖间隙值。

1 燃气轮机叶尖间隙的定义

燃气轮机的核心部件包括 3 部分:压气机、燃烧室、涡轮(透平)[13],如图 1 所示。以重型燃气轮机常用的轴流式构型为例,进气道吸入新鲜空气后,压气机里的十几级叶片将会把空气加压成为高压气体。

压气机中转子与静子之间的间隙参数可分为径向间隙和轴向间隙。其中,旋转叶片尖端与静子机匣内壁之间的微小径向间隙称为叶尖间隙[14-16],如图 2 所示,图中 d 为叶尖间隙。

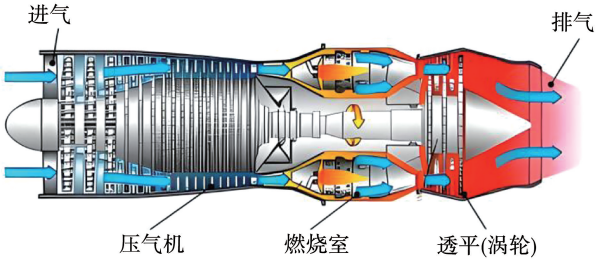

图 1 燃气轮机结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of gas turbine structure

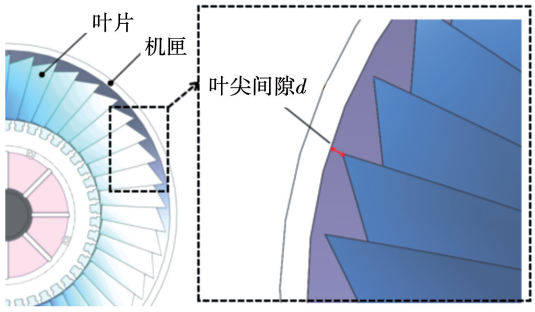

图 2 叶尖间隙示意图

Fig. 2 Schematic of blade tip clearance

根据燃气轮机实际应用情况,叶尖间隙值的大小通常控制在 3 mm 以内[17],测量精度至少达到 0.1 mm。叶尖间隙的测量过程面临着诸多挑战:1)压气机含多级叶片,结构紧凑,在保证精度的同时对传感器尺寸有严格的限制;2)在机匣上开孔会破坏其原有的气动外形,叶尖间隙测量需在不开孔的情况下进行;3)构成叶尖间隙的两端均为曲面,要求测量能够准确捕捉曲面间的微小间隙变化;4)随着叶轮旋转,叶尖间隙是个动态值,而非静态值。

2 叶尖间隙测量方法及测量流程

2.1 基于三维激光测量技术的叶尖间隙测量方法

激光测量技术凭借其非接触性、快速响应及高精度等显著特点,在几何量计量领域得到了广泛而深入的应用。

一维激光测量通常采用点激光作为入射光源。该方法测量精度高,可以达到微米级,但在每次测量中仅能获取单个点的坐标信息,测量信息有限。仅适用于需要确定单一线性距离的场景[18],难以实现叶片、机匣等大曲率变化对象的高精度测量。

二维激光测量常采用线激光作为入射光源。能够同时测量光幕宽度和垂直距离 2 个维度方向上的数据[18-20],但它无法提供第 3 个维度的数据,在叶尖间隙测量中会引起数据的缺失。

三维激光测量常采用线激光或面激光作为入射光源,输出为三维点云形式的测量结果,可以快速地重构被测物体,逆向还原被测物体的空间表面信息。可以实现如机匣、叶片等大曲率复杂表面的重建。

扫描式三维激光轮廓测量仪主要由激光发射器、柱面物镜、接收物镜、内部处理器、相机传感器组成[21]。图 3 为三维激光轮廓测量仪的测量原理:激

光发射器发射激光光束,经过柱面物镜扩散为线状的激光光刀;线激光到达被测物体表面后,产生漫反射;反射光束被接收物镜接收,投影在相机传感器上形成被测物体的图像;内部处理器通过检测位置和形状的变化来测量被测物体的位移和形状。

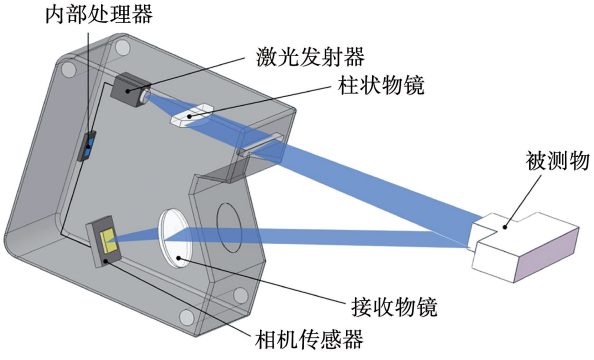

图 3　三维激光轮廓测量仪结构原理图

Fig. 3　Schematic diagram of the structure of the 3D laser measuring instrument

基于三维激光轮廓测量仪的叶尖间隙间接测量方法具有以下优势:

1)三维激光轮廓测量仪采用非接触式测量方法,在测量过程中无需开孔,不会对叶片或机匣造成任何损伤,不会破坏其原有的气动外形,保证了被测对象的完整性。

2)该方法具有较宽的扫描范围,可覆盖整个叶尖间隙区域,在短时间内获取整圈高质量、高精度的叶尖间隙信息,测量效率高。

3)三维激光轮廓测量仪自带照明功能,即使在光线较暗或照明条件不佳的环境中,也能保持稳定的测量性能,确保了测量结果的可靠性。

4)三维激光轮廓测量仪结构紧凑,能够在狭小空间内实现高精度的数据捕捉。

2.2　叶尖间隙测量系统

叶片叶尖轮廓点云扫描系统主要由三维激光轮廓测量仪、测量仪固定夹具、三轴移动平台、角度编码器、控制器及计算机组成,如图 4 所示。三轴移动平台用于调整三维激光轮廓测量仪与叶片叶尖之间的距离。测量时旋转叶轮,三维激光轮廓测量仪扫描叶片叶尖,从而精准获取点云信息。同时,角度编码器实时记录并反馈旋转的角度数据,确保测量结果的精确性与完整性。控制器主要为测量提供获取图像的通讯库和轮廓测量、干扰去除、图像合成等功能的测量库及直观扫描结果的显示库。

机匣内壁轮廓点云扫描系统主要由三维激光轮廓测量仪、测量仪固定夹具、角度编码器、控制器及计算机组成,如图 5 所示。在机匣与叶轮装配完成后,鉴于空间尺寸的约束,需移除叶轮上的 3 个叶片,为三维激光轮廓测量仪的安装腾出空间。随后,通过特制的测量仪固定夹具,将传感器与叶轮紧密固定。在测量过程中,三维激光轮廓测量仪将随叶轮的旋转动态扫描机匣内壁,从而精准获取点云信息。角度编码器与控制器功能与上述系统一致,确保测量结果的精准与可靠。

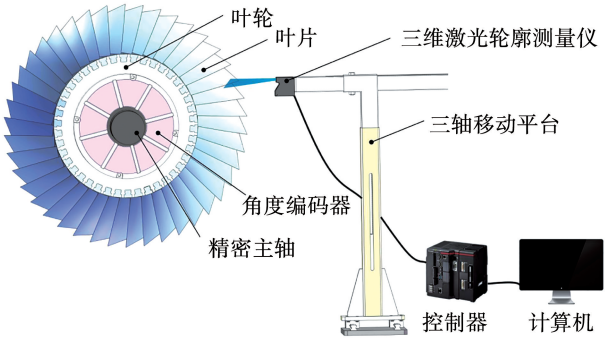

图 4　叶尖轮廓点云扫描系统

Fig. 4　Point cloud scanning system of blade tip profile

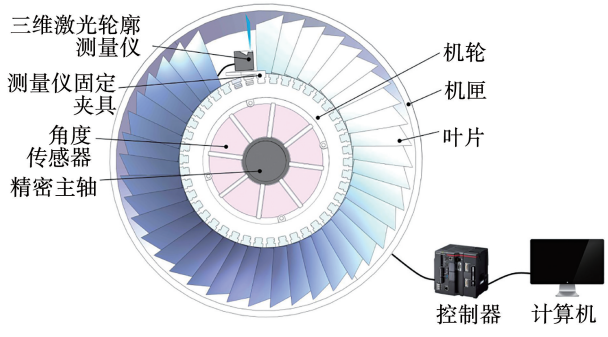

图 5　机匣内壁轮廓点云扫描系统

Fig. 5　Point cloud scanning system of casing inner wall profile

测量仪固定夹具是机匣内壁轮廓测量系统的关键组件之一,其设计充分考虑了燃气轮机压气机的结构特点。夹具采用与叶片相同的榫头结构,能够直接嵌入叶轮的榫槽中,实现与叶片的无缝替换,如图 6 所示。这种设计不仅简化了安装过程,还确保了夹具与叶轮之间的刚性连接,降低了测量过程中因振动或位移导致的误差。

2.3　叶尖间隙测量流程

基于三维激光测量技术的叶尖间隙测量方法主要由安装与测量、数据处理两部分组成。具体的测量流程如图 7 所示。

在机匣上开孔会破坏其原有的气动外形,增加

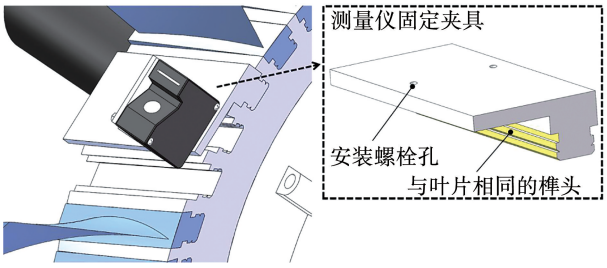

图 6 测量仪固定夹具安装示意图

Fig. 6 Installation diagram of fixed fixture of measuring instrument

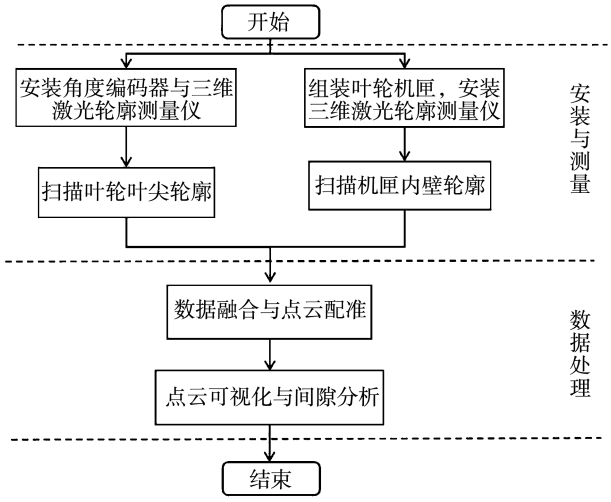

图 7 叶尖间隙测量流程图

Fig. 7 Flow chart of tip clearance measurement

气流的湍流和泄漏，降低压气机的效率和性能。因此，叶尖轮廓的扫描工作必须在叶轮与机匣装配之前完成。

在对多个叶片进行扫描时，单一的三维激光轮廓测量仪不能扫描出叶片之间的角度关系，需引入角度编码器进行配合测量。将得到的角度数据与点云数据进行融合，经坐标变换得到反映多叶片角度关系的点云，将 2 片点云进行配准。整体测量流程如下：

1）安装角度编码器与三维激光轮廓测量仪

在叶轮的旋转主轴上安装角度编码器，确保其能够准确记录叶轮的旋转角度。在叶轮一侧的预定位置上安装三维激光轮廓测量仪，使其能够扫描旋转的叶片叶尖，获取整圈叶尖轮廓的三维点云数据。

2）组装叶轮与机匣，安装三维激光轮廓测量仪

在组装好的叶轮上拆卸 3 个叶片，为安装三维激光轮廓测量仪腾出空间。在拆卸的空位上安装三维激光轮廓测量仪，将叶轮与机匣装配在一起，确保二者之间的相对位置固定。低速旋转叶轮，使传感器能够扫描机匣内壁，获取整圈机匣内壁的三维点云数据。

3）数据融合与点云配准

在同一时间节点，将三维激光轮廓测量仪所获取的点云数据与角度编码器所采集的角度数据进行精准融合。根据三维激光轮廓测量仪与精密主轴之间的空间位置关系，将融合后的附带角度信息的数据进行坐标转换，实现叶尖轮廓、机匣内壁在旋转主轴坐标系下的点云配准。

4）点云可视化与间隙分析

将叶尖轮廓点云与机匣内壁点云在同一坐标系下进行可视化展示，直观地显示叶片叶尖与机匣内壁的相对位置。通过分析转换后的上下轮廓，精确计算出叶片叶尖与机匣内壁各处间的间隙值。

3 点云配准

传统的点云配准方法，如 ICP 点云精配准算法通常依赖于点云之间的重叠区域，通过匹配重叠部分的特征来实现对齐。然而，在叶尖间隙测量中，叶尖点云和机匣内壁点云之间没有重叠部分。在该应用环境下，点云配准的目标并不是让 2 片点云完全重合，而是通过配准还原实际的叶尖间隙。因此，本文提出基于传感器和轴线空间关系的粗配准方法，并结合法向量特征的精配准算法，以实现高精度的点云配准。

3.1 基于传感器和轴线空间关系的粗配准

利用传感器和轴线空间位置进行坐标转换实现粗配准，快速对齐点云；再以匹配点对的法向量夹角小于预设阈值为约束条件，完成精配准以提升精度。这种方法不仅解决了 2 片点云无重合部分的问题，还提高了配准的精度和鲁棒性，特别适用于燃气轮机叶尖间隙测量等高精度对齐的复杂场景。

图 8 为测量位置关系，由图可见，叶轮坐标系 $\boldsymbol{\sigma}_o=[O_o;\boldsymbol{x}_o,\boldsymbol{y}_o,\boldsymbol{z}_o]$ 为动坐标系。测量光线坐标系 $\boldsymbol{\sigma}_l=[O_l;\boldsymbol{x}_l,\boldsymbol{y}_l,\boldsymbol{z}_l]$；三维激光轮廓测量仪坐标系 $\boldsymbol{\sigma}_s$ 为固定坐标系，叶轮通过主轴固定连接并随之回转。其中，叶轮坐标系的 x_o 轴与叶轮中心轴线重合，三维激光轮廓测量仪坐标系的原点 O_s 位于出射激光线的中心位置，平面 $X_sO_sY_s$ 与三维激光轮廓测量仪出射光平面共面。

在测量光线坐标系 $\boldsymbol{\sigma}_l$ 下，三维激光轮廓测量仪获取的叶轮点云坐标为 $\boldsymbol{P}_l$，可表示为 $\boldsymbol{P}_l=$

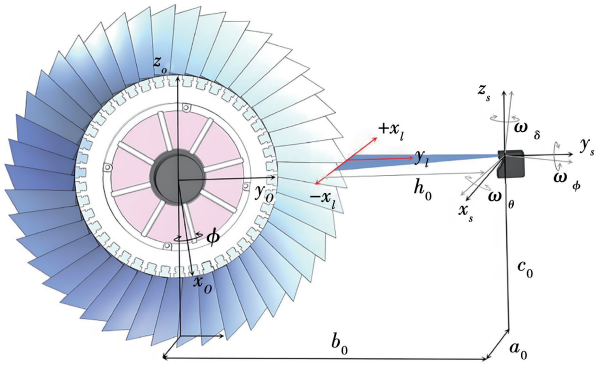

图 8　叶尖轮廓测量位置关系

Fig. 8　Tip profile measurement position relationship

$[x_l, y_l, z_l, 1]^{\mathrm{T}}$。根据测量光线坐标系 σ_l 与三维激光轮廓测量仪 σ_s 的空间位置关系,建立旋转矩阵 $\boldsymbol{R}_{ls}$和平移矩阵 $\boldsymbol{T}_{ls}$,将上述叶轮的点云数据 $\boldsymbol{P}_l$ 转换至坐标系 σ_s 下,叶轮点云坐标可变换为 $\boldsymbol{P}_s$,表示为

$$\boldsymbol{P}_s = \boldsymbol{R}_{ls}\boldsymbol{P}_l + \boldsymbol{T}_{ls} \tag{1}$$

式中:

$$\boldsymbol{R}_{ls} = \begin{bmatrix} q_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{T}_{ls} = [0, h_0, 0, 0]^{\mathrm{T}} \tag{3}$$

式中:q_s 为三维激光轮廓测量仪的安装参数,取值为 +1 或 −1(正装或反装);h_0 为传感器的基准距离。根据坐标系 σ_s 与叶轮坐标系 σ_o 之间的空间位置关系,建立旋转矩阵 $\boldsymbol{R}_{so}$和平移矩阵 $\boldsymbol{T}_{so}$。在测量时叶轮随着主轴回转,设回转角度为 ϕ,ϕ 是根据时间配准得到的角度值。建立测量时的旋转矩阵 $\boldsymbol{R}_1$,将上述点云坐标 $\boldsymbol{P}_s$ 转换至叶轮坐标系 σ_o 下得到叶轮的点云坐标 $\boldsymbol{P}_o$,可表示为

$$\boldsymbol{P}_o = \boldsymbol{R}_1\boldsymbol{R}_{so}\boldsymbol{P}_s + \boldsymbol{T}_{so} \tag{4}$$

其中 $\boldsymbol{R}_{so}$可表示为

$$\boldsymbol{R}_{so} = \begin{bmatrix} C_\varphi C_\delta - S_\varphi S_\delta S_\theta & -S_\delta C_\theta & C_\delta S_\varphi + S_\delta S_\theta C_\varphi & 0 \\ S_\delta C_\varphi + C_\delta S_\theta S_\varphi & C_\delta C_\theta & S_\delta S_\varphi - C_\delta S_\theta C_\varphi & 0 \\ -C_\theta S_\varphi & S_\theta & C_\theta C_\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5}$$

测量时的旋转矩阵 $\boldsymbol{R}_1$ 可表示为

$$\boldsymbol{R}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi & 0 \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$\boldsymbol{T}_{so} = [a_o, b_o, c_o, 0]^{\mathrm{T}} \tag{7}$$

式中:下标 δ、θ、φ 分别对应三维激光轮廓测量仪空间姿态角 ω_δ、ω_θ、ω_φ;C、S 分别为 cos( )、sin( ),如 $S_\varphi C_\delta = \sin(\omega_\varphi)\cos(\omega_\delta)$;$a_o$、$b_o$、$c_o$ 分别为三维激光轮廓测量仪相对被测叶轮的切向、径向、轴向的偏置距离。可以得出:

$$\boldsymbol{P}_o = \boldsymbol{R}_1\boldsymbol{R}_{so}(\boldsymbol{R}_{ls}\boldsymbol{P}_l + \boldsymbol{T}_{ls}) + \boldsymbol{T}_{so} \tag{8}$$

同理,机匣内壁点云测量的转换过程与叶片点云的转换过程在原理上是相同的,如图 9 所示,都是将测量的点云数据转换到叶轮坐标系 σ_o 下。在叶轮坐标系 σ_o 下,机匣内壁的点云坐标为 $\boldsymbol{Q}_o$,可表示为

$$\boldsymbol{Q}_o = \boldsymbol{R}_2\boldsymbol{R}_{so'}(\boldsymbol{R}_{lc}\boldsymbol{Q}_l + \boldsymbol{T}_{lc}) + \boldsymbol{T}_{so'} \tag{9}$$

式中:$\boldsymbol{Q}_l$ 为在 σ_l 坐标系下的机匣内壁点云;$\boldsymbol{R}_{lc}$和 $\boldsymbol{T}_{lc}$为坐标系 σ_l 与 σ_s 空间位置关系下的旋转矩阵和平移矩阵;$\boldsymbol{R}_{so'}$和 $\boldsymbol{T}_{so'}$为坐标系 σ_o 与 σ_s 空间位置关系下的旋转矩阵和平移矩阵;$\boldsymbol{R}_2$ 为测量时的旋转矩阵。

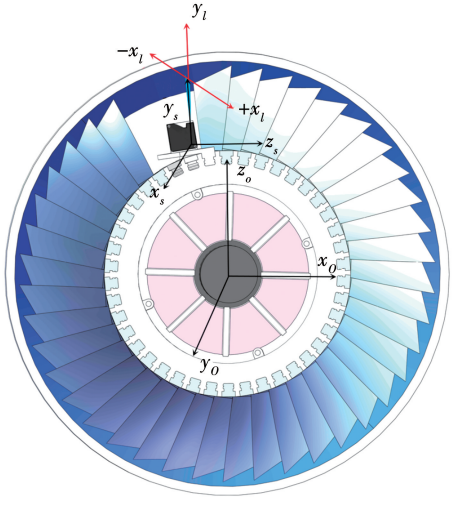

图 9　机匣内壁轮廓测量位置关系

Fig. 9　Measuring position relationship of casing inner wall profile

3.2　法向量特征的精配准

对于粗配准后的点云$\{\boldsymbol{P}_o\}$和$\{\boldsymbol{Q}_o\}$,分别计算每个点的法向量,对于点 $\boldsymbol{p}_i \in \{P_o\}$,在其邻域内拟合 1 个平面,法向量 $\boldsymbol{n}_{pi}$为该平面的最小特征值对应的特征向量。邻域点集为

$$N(\boldsymbol{p}_i) = \{\boldsymbol{p}_j \mid \| \boldsymbol{p}_j - \boldsymbol{p}_i \| < \epsilon\} \tag{10}$$

其中,ϵ 为邻域半径,协方差矩阵为

$$\boldsymbol{C} = \frac{1}{|N(\boldsymbol{p}_i)|}\sum_{\boldsymbol{p}_j \in N(\boldsymbol{p}_i)} (\boldsymbol{p}_j - \boldsymbol{p}_i)(\boldsymbol{p}_j - \boldsymbol{p}_i)^{\mathrm{T}} \tag{11}$$

特征值分解为

$$\boldsymbol{C} = \boldsymbol{U}\boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}} \tag{12}$$

式中：$\boldsymbol{\Lambda}$ 为对角矩阵；$\boldsymbol{U}$ 为特征向量矩阵。最小特征值对应的特征向量即为法向量 $\boldsymbol{n}_{pi}$。对法向量进行归一化处理：

$$\boldsymbol{n}_{pi} = \frac{\boldsymbol{n}_{pi}}{\| \boldsymbol{n}_{pi} \|} \tag{13}$$

机匣内壁轮廓与叶尖轮廓的法向量分布如图 10 ~ 11 所示。

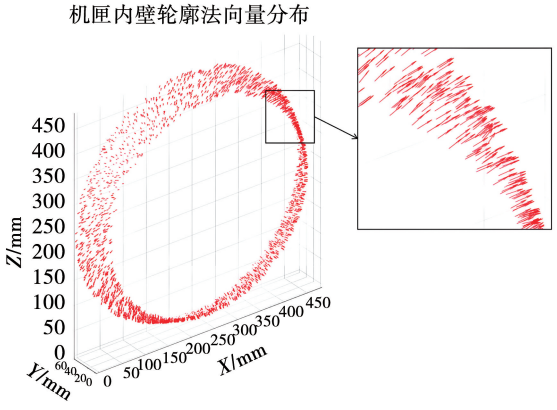

图 10 机匣内壁轮廓法向量分布

Fig. 10 Normal vector distribution of casing inner wall profile

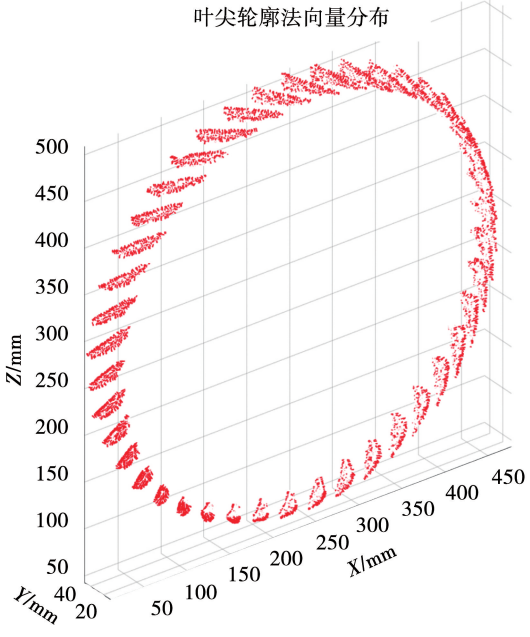

图 11 叶尖轮廓法向量分布

Fig. 11 Normal vector distribution of blade tip profile

对于每一点 $\boldsymbol{p}_i \in \{\boldsymbol{P}_o\}$，在点云 $\{\boldsymbol{Q}_o\}$ 中找到其最近邻点 $\boldsymbol{q}_i$，仅保留法向量夹角小于预设阈值的匹配点对：

$$\theta_i = \arccos(\boldsymbol{n}_{pi} \cdot \boldsymbol{n}_{qi}) < \theta_a \tag{14}$$

式中：θ_a 为预设的法向量夹角阈值。若 θ_i 不小于 θ_a，则重新选择匹配点对。以此为约束条件进行 2 幅点云的精配准。

4 测量过程仿真

为了验证叶尖间隙测量方法的可行性与准确性，本研究采用数值模拟技术进行模拟测量。通过对比模拟测量结果与已知基准值，旨在全面评估测量方法的实际效能与精确性。

在 SolidWorks 中构建包含叶片和机匣内壁的三维模型，并设定 2.25 mm 作为叶尖间隙值基准值。利用 MATLAB 模拟三维激光轮廓测量仪扫描叶尖与机匣内壁，生成三维点云数据。模拟叶尖扫描过程如图 12 所示，根据三维激光轮廓测量仪实际扫描范围，模拟生成激光光束扫描模型表面生成一定密度的点云数据。

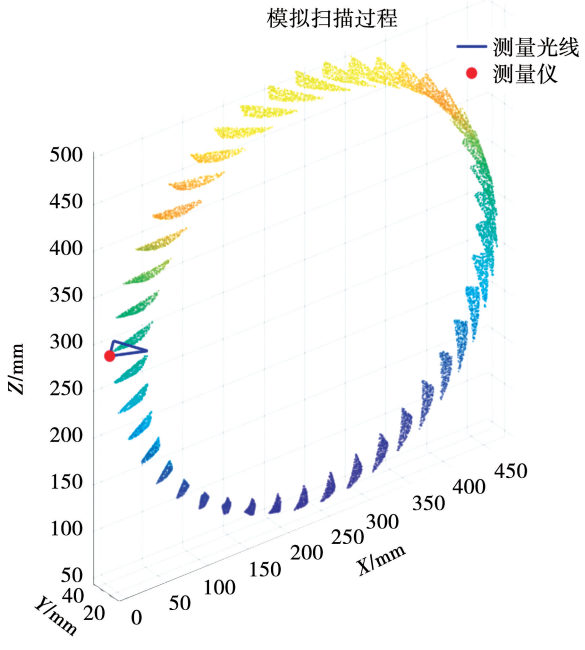

图 12 叶尖模拟扫描过程

Fig. 12 The simulated scanning process of blade tip

在实际测量时，由于测量环境、人为操作、测量仪自身晃动等原因，测量存在一定误差。因此，在模拟测量中添加噪声，其标准差小于 0.1 mm。将模拟扫描得到的点云数据与角度数据进行数据融合，根据传感器和轴线空间关系并结合法向量特征的精配准算法，将叶尖扫描点云与机匣扫描点云配准到同一坐标系下，如图 13 所示。

应用 MATLAB 每隔 0.1 度对叶尖扫描点云与

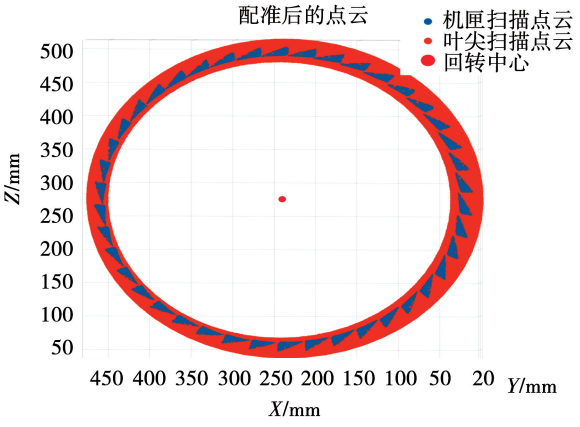

图 13　配准后的点云可视化

Fig. 13　Visualization of the point cloud after registration

机匣扫描点云的最小距离进行计算。整圈的叶尖间隙值如图 14 所示。

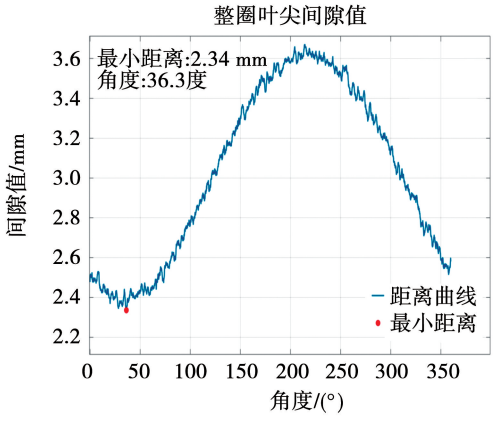

图 14　整圈叶尖间隙值

Fig. 14　Full circle tip clearance value

在 36.3°时,整圈最小间隙为 2.34 mm,由于设置的基准值为 2.25 mm,则计算得到的间隙测量相对误差为 4.0%,满足燃气轮机压气机叶尖间隙测量的技术要求。数值模拟结果表明:该文提出的基于三维激光测量技术的叶尖间隙测量方法,可以实现叶尖间隙的高效测量。

5　结　语

通过分析一维、二维和三维激光测量的特点,明确了三维激光测量在叶尖间隙测量中的优势。采用三维激光轮廓测量仪结合角度编码器的叶尖间隙测量方法,采集叶尖轮廓和机匣轮廓的几何信息,得到了反映整圈叶尖间隙的几何信息,实现了叶尖间隙的高精度测量。

针对叶尖点云与机匣点云无重叠区域的特点,提出了基于传感器和轴线空间关系的粗配准方法,并结合法向量特征的精配准算法,实现了高精度的点云配准。数值模拟结果表明:该叶尖间隙测量方法的相对误差为 4.0%,满足燃气轮机压气机叶尖间隙测量的技术要求。该方法可以实现叶尖间隙的高效测量,具有精度高、非接触、范围广、低侵入等优点。

参 考 文 献:

[1] 段发阶, 牛广越, 周琦, 等. 航空发动机叶尖间隙在线测量技术研究综述[J]. 航空学报, 2022, 43(9): 74.
DUAN Fajie, NIU Guangyue, ZHOU Qi, et al. A Review of Online Blade Tip Clearance Measurement Technologies for Aeroengines[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(9): 74.

[2] ZHU W, REN X, LI X, et al. Improvement of Part-Load Performance of Gas Turbine by Adjusting Compressor Inlet Air Temperature and IGV Opening[J]. Frontiers in Energy, 2022, 16(6): 1000.

[3] 周琦. 汽轮机末级带冠叶片叶尖间隙测量关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2020.

[4] WU J, CHEN Y, GUO R, et al. A Dynamic Turbine Tip Clearance Measurement Method Based on Laser Self-mixing Interferometric Ranging Considering Doppler Effect [J]. Measurement Science and Technology, 2024, 35(11): 115012.

[5] LI H, WU S, YANG Z, et al. Measurement Methodology: Blade Tip Timing: A Non-Contact Blade Vibration Measurement Method[J]. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2023, 26(9): 12.

[6] REN R, TAO Y. Test and Analysis on High-pressure Turbine Tip Clearance Measurement of Turbofan Engine [C]//Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2762(1): 65.

[7] DU K, WANG X, HUANG X, et al. Turbine Blade Tip Aerothermal Characteristics Considering the Influences of Cavity Tip Shaping[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2024, 204: 109234.

[8] 李永继. 燃气轮机叶尖间隙监测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.

[9] 王维民, 陈子文, 张旭龙, 等. 基于叶端定时的转子碰摩故障诊断方法[J]. 航空学报, 2022, 43(8): 30.
WANG Weimin, CHEN Ziwen, ZHANG Xulong, et al. Fault Diagnosis Method of Rotor Rub Impact Based on Blade Tip Timing[J]. Acta Aeronautica et Astronautica

Sinica, 2022, 43(8): 30.

[10] 程荣辉, 余华蔚, 汪松柏, 等. 多级压气机转子负荷系数对叶片非同步振动的影响[J]. 航空学报, 2023, 44(14): 24.
CHENG Ronghui, YU Huawei, WANG Songbai, et al. Effect of Aerodynamic Loading Coefficient on Occurrence of Non-synchronous Vibration in a Multi-stage Compressor [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(14): 24.

[11] 范小虎, 朱目成, 聂诗良. 航空发动机叶尖间隙光学影像测量系统[J]. 西南科技大学学报, 2011, 26(4): 57.
FAN Xiaohu, ZHU Mucheng, NIE Shiliang. Optical Image Measuring System of Aero-engine Blade Tip Clearance [J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2011, 26(4): 57.

[12] LI W, XIONG Y, CHEN P, et al. Simultaneous Measurement of Blade Tip Clearance and Blade Tip Timing With Microwave Sensor[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 1.

[13] PASHCHENKO D. Ammonia Fired Gas Turbines: Recent Advances and Future Perspectives[J]. Energy, 2024, 290: 130275.

[14] 王杰. 航空发动机压气机叶片封严涂层碰摩仿真与实验研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.

[15] 李学哲, 李清林, 韩宇, 等. 基于2D激光测量技术的矿用通风机叶尖间隙测量方法研究[J]. 机电工程, 2020, 37(4): 405.
LI Xuezhe, LI Qinglin, HAN Yu, et al. Measurement Method of Tip Clearance of Mine Ventilator Based on 2D Laser Measurement Technology[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2020, 37(4): 405.

[16] 王静. 航空发动机转静子装配叶尖间隙建模研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2021.

[17] XIA K, DENG H, LU S, et al. Experimental Analysis of Performance and Tip Dynamic Pressure in a Compressor Cascade with High-speed Movingendwall[J]. International Journal of Turbo & Jet-Engines, 2024, 41(2): 363.

[18] 李学哲, 李孝平, 何伟, 等. 矿用通风机叶尖间隙在线动态监测与预警方法[J]. 华北科技学院学报, 2020, 18(5): 1.
LI X Z, LI X P, HE W, et al. Online Dynamic Monitoring and Early Warning Method for Blade Tip Clearance of Mine Ventilator[J]. Journal of North China Institute of Science and Technology, 2020, 18(5): 1.

[19] LIU L, CAI H, TIAN M, et al. Research on 3D Reconstruction Technology Based on Laser Measurement[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2023, 45(6): 297.

[20] 伍川辉, 尹纪磊, 郭辉, 等. 基于二维激光位移传感器的通过式轮对测量系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2020(11): 50.
WU C H, YIN J L, GUO H, et al. Design of Passing Wheel-set Measurement System Based on Two-dimensional Laser Displacement Sensor[J]. Instrument Technique and Sensor, 2020(11): 50.

[21] SHI Z, SUN Y. An Overview on Line Laser 3D Measurement of Gears [J]. Precision Engineering, 2024, 88: 823.

(编辑:温泽宇)