压气机机匣内表面几何公差故障点定位

赵新通[1]， 连乐乐[1]， 刘欣宇[1]， 王 琦[2]， 汪作心[2]
（1. 哈尔滨理工大学 机械动力工程学院，哈尔滨 150080；2. 中国船舶集团有限公司第七〇三研究所，哈尔滨 150080）

摘 要：运用轮廓仪测量法、三坐标测量法和光学测量法等现有检测方法对压气机机匣进行几何公差测量，能够得到较为详细的测量数据。在已有测量数据的基础上，如何处理数据中的噪声数据及将数据转化为可识别信息是亟待解决的问题。针对此问题，在现有检测方法的基础上提出一种基于点云数据的故障点提取方法。该方法首先通过点云数据的粗提取得到位于机匣中心轴线上的数据点；然后，通过MSAC算法去除点云数据中的异常点，拟合出精度较高的机匣中心轴线；最后，通过计算点云数据到中心轴线的距离判断机匣内表面形位公差是否达标，即定位故障点。仿真验证发现：运用点云数据对测量数据进行处理时，能够有效识别机匣内表面的故障点并给出空间位置坐标，同时能够降低数据中噪点对结果的影响，具有鲁棒性。

关键词：压气机；非接触测量；形位公差；点云数据；轴线拟合

DOI：10.15938/j.jhust.2026.04.002
中图分类号：TH124 **文献标志码**：A **文章编号**：1007-2683(2026)04-0010-08

Localization of Geometric Tolerance Fault Points on the Inner Surface of Compressor Casing

ZHAO Xintong[1]， LIAN Lele[1]， LIU Xinyu[1]， WANG Qi[2]， WANG Zuoxin[2]
（1. School of Mechanical and Power Engineering, Harbin University of Science and technology, Harbin 150080, China;
2. The 703 Research Institute of CSSC, Harbin 150080, China）

Abstract: Using existing detection methods such as profilometer measurement, coordinate measuring machine (CMM), and optical measurement to measure the geometric tolerance of compressor casings can obtain relatively detailed measurement data. Based on the existing measurement data, how to process the noise in the data and convert it into recognizable information is an urgent problem to be solved. Based on the existing detection methods, this paper proposes a method for extracting fault points based on point cloud data. This method first obtains data points located on the central axis of the casing through the rough extraction of point cloud data. Then, it removes outliers from the point cloud data through the MSAC algorithm to fit a higher-precision central axis of the casing. Finally, the distances from point-cloud data points to the fitted central axis are calculated to judge whether the geometric tolerance of the casing inner surface meets specifications, so as to locate fault points. Simulation verification shows that the proposed point-cloud-based data-processing method can effectively identify fault points on the inner surface of the casing and output their spatial coordinates. At the same time, it can reduce the influence of noise in the data on the results, demonstrating a certain degree of robustness.

Keywords: compressor; non-contact measurement; geometric tolerance; point cloud data; axis fitting

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：连乐乐(2001—)，男，硕士研究生；
刘欣宇(1999—)，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.

0　引　言

航空发动机被称为工业皇冠上的明珠,是飞机的心脏,也是制约中国国防工业发展的重要瓶颈之一[1]。压气机是航空发动机的重要组成部分,其性能好坏直接关系到发动机整体寿命及性能优劣[2-3]。叶片端面与机匣内壁之间的叶尖间隙参数是影响发动机工作效率及运行安全性的关键[4-5]。研究表明:压气机的叶尖间隙若增加 0.076 mm,单位耗油量增加约 1%;而叶尖间隙若减少 0.245 mm,效率可提高约 1%。因此,为了提高航空发动机的效率、降低油耗,应减小叶尖间隙[6-8]。当叶尖间隙较小时,若机匣在生产过程中超出公差带范围,则提高了叶片和机匣之间发生碰磨的概率。航空发动机转速高,一旦发生碰磨现象,可能会导致转子系统失稳,造成重大安全事故[9]。因此,压气机机匣的几何公差检测十分重要,但由于压气机叶片组数较多且间隙较小,压气机机匣公差检测存在一定困难。因此,对压气机机匣几何公差检测的研究具有重要意义。本文在现有检测方法的基础上,提出基于点云数据的故障点提取方法,并开展了可行性仿真验证。

1　压气机机匣几何公差检测

1.1　压气机的基本结构

压气机由叶片、轮盘、轴和机匣 4 部分组成,转子通常以很高的转速工作,通过与空气流和燃气流相互作用,为航空发动机提供动力[10],如图 1 所示。在压气机中,旋转叶片尖端与静子机匣内壁之间的微小间隙称为叶尖间隙[11],如图 2 所示。

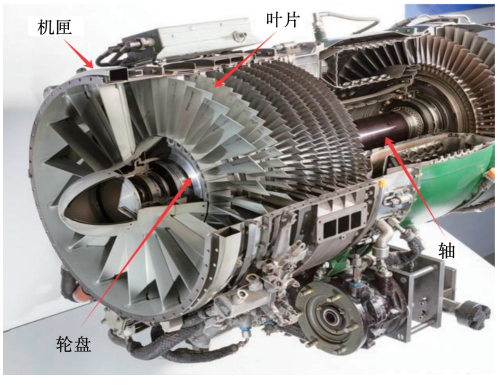


图 1　压气机示意图

Fig. 1　Compressor schematic diagram

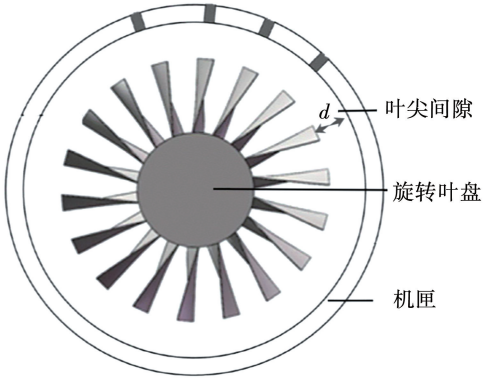


图 2　叶尖间隙示意图

Fig. 2　Diagram of blade tip clearance

1.2　现有检测方法

压气机机匣表面几何形状复杂,因此,几何公差检测方法需要具有高精度、高可靠性和非破坏性等特点。现有的检测方法有轮廓仪测量法、三坐标测量法、光学测量法。其中,轮廓仪测量法是使用高精度的千分表,通过接触机匣内表面测量内表面的轮廓线,记录并分析数据,评估几何公差[12-13];三坐标测量法是利用三坐标测量机的高精度传感器和探针,对机匣内表面进行三维坐标测量,通过软件处理数据评估几何公差[14];光学测量法是利用光干涉原理,通过测量光波在机匣内表面反射和干涉形成的图案评估表面的几何公差[15-16]。

通过上述方法对压气机机匣进行测量,可得到压气机内表面的几何公差数据,但此时的测量数据具有抽象性,不利于加工人员对压气机是否达标进行合理判断。同时,在测量数据中掺杂着噪音数据,会对信息的提取造成一定影响。

1.3　点云处理及其优点

测量完成后,如何提取故障信息及如何避免噪声数据对信息提取的影响是亟待解决的问题。因而针对上述问题,本文提出了基于点云数据的故障点提取方法,即在现有检测方法的基础上结合点云数据对所得到的数据进行处理,旨在将不直观的测量数据转换为直观的故障点坐标。本文方法通过三维激光扫描仪扫描机匣得到点云数据,并对点云数据进行处理,最终得到机匣内表面的实际特征,从而提取得到故障点信息。

测量过程为非接触测量,可有效避免因接触机匣而造成的机匣损伤。在测量过程中仅需通过扫描即可得到点云数据,对测量人员技能要求较低,且测量效率较高。扫描区域可手动调整,能够有效避免测量区域的遗漏。结合点云数据的公差检测方法可

直接提取出故障点的空间坐标,有助于加工人员快速进行故障评定。

2 测量流程与原理

2.1 测量流程

压气机机匣内表面公差检测流程如图 3 所示。首先,通过三维激光扫描仪对被检测压气机机匣进行扫描,得到点云数据;然后,利用扫描所得到的点云数据作为初始数据,提取出点云模型中心轴线上的点(即压气机中心轴线上的点)。同时,以中心轴线点作为初始拟合点,运用 MSAC(M 估计样本一致算法)及加权最小二乘法拟合出模型的中心轴线并保证轴线具有一定的精度;最后,在三维空间中运用插值方法计算出点云数据至中心轴线的距离,将该距离与预先标定的公差带范围进行比较。由此可知某一区域的点云数据是否超出公差带(即压气机机匣内表面是否超出公差带),从而判断压气机机匣的内表面生产加工是否合格。

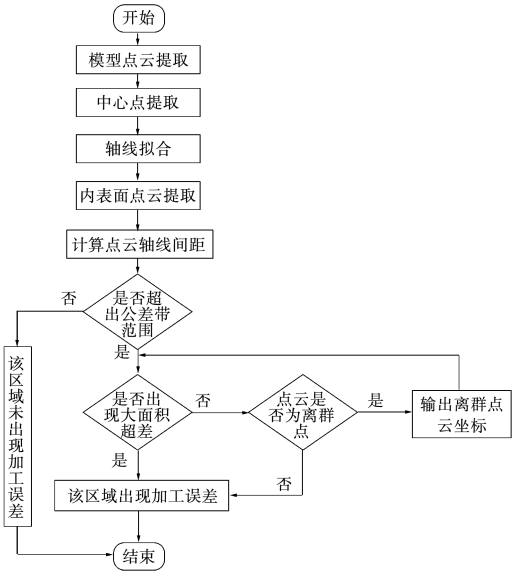


图 3 测量流程图

Fig. 3 Measurement flow chart

通过对所获得的初始点云数据运用 MSAC、加权最小二乘法拟合和插值算法求出所需要的空间几何尺寸,快速准确地实现压气机机匣内表面公差检测。

2.2 中心轴线粗提取

压气机机匣中心轴线的粗提取基本思想是通过切片选取圆截面,以圆截面的圆心坐标为中心轴线点。提取得到的中心轴线点仅作为拟合中心轴线的初始值,其具体作用是为后续进一步拟合中心轴线提供初始数据,为中心轴线拟合精度提供参考依据[17]。

1)根据所得压气机机匣的点云数据,沿中心轴线方向均匀取 N 个切片。

2)在第 i 个切片中,记录 x 轴坐标 x_i 所对应的 y 轴坐标的最大值与最小值($y_{i\max}$、$y_{i\min}$),同时记录 y 轴坐标的最大值与最小值所对应的 z 轴坐标($z_{yi\max}$、$z_{yi\min}$)。由此可以计算出任意 x_i($i=1,2,\cdots,N$)分别对应的 y 轴与 z 轴的粗略中点坐标。

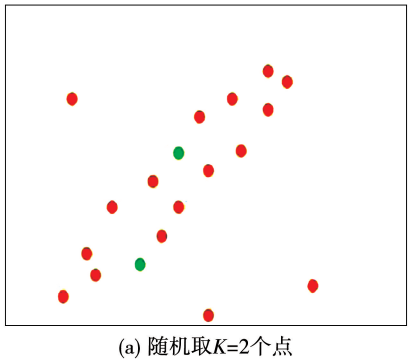
$$\left.\begin{aligned} y_i &= \frac{y_{i\max}+y_{i\min}}{2} \\ z_i &= \frac{z_{yi\max}+z_{yi\min}}{2} \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

3)将上述过程中所得到的所有 y 轴坐标及 z 轴坐标分别采用最小二乘法进行中心轴线拟合,即可得到 y 轴轴线及 z 轴轴线,则压气机机匣中心轴线可表示为

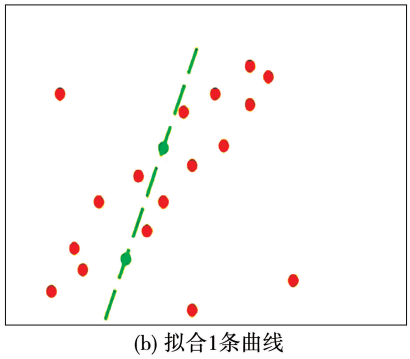
$$\left.\begin{aligned} y &= a_1x+a_0 \\ z &= b_1x+b_0 \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

2.3 MSAC 中心轴线精提取

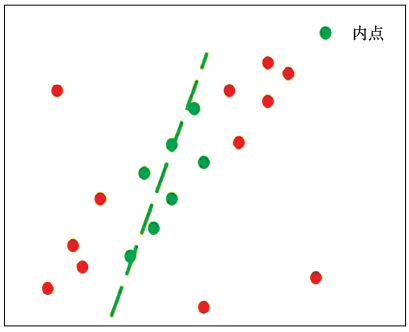
MSAC(M 估计样本一致性算法)的核心思想在于随机采样以构建初始模型,并多次迭代以寻找最优的参数估计。该方法将所有数据点划分为两类:内点与外点。其中,内点是与当前估计模型一致的数据点,而外点则是与当前估计模型不一致的数据点。算法的迭代过程旨在增加内点,同时排除外点[18]。拟合流程如图 4 所示。



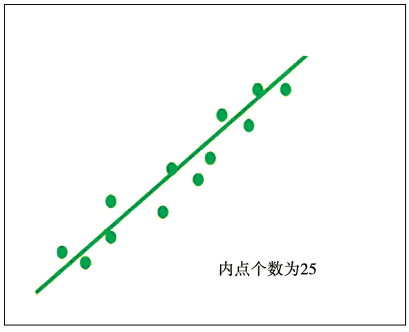
(a) 随机取K=2个点



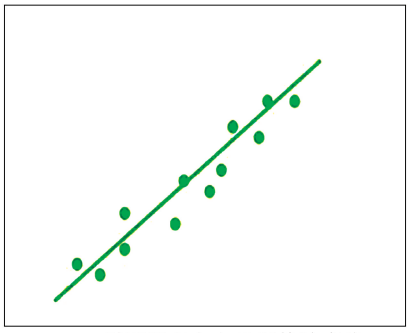
(b) 拟合1条曲线



(c) 统计内点个数



(d) 重复上述过程M次，找到内点数最大的模型



(e) 利用所有内点重新估计直线

图 4　使用 MSAC 算法拟合轴线过程

Fig. 4　The process of fitting the axis using the MSAC algorithm

具体步骤如下:

1)随机选择最小样本集合

选择轴线粗提取所得到的中心点坐标为最大样本集。随机选择 k 个点 $P_1(x_1,y_1,z_1)$、$P_2(x_2,y_2,z_2)$、…、$P_k(x_k,y_k,z_k)$作为最小样本集,判断点是否重复、共线,若重复或共线则重新选取 k 个点作为最小样本集。同时,确定迭代次数 n。

$$P=1-(1-(1-\varepsilon)^k)^n \tag{3}$$

$$n=\frac{\ln(1-P)}{\ln(1-(1-\varepsilon)^k)} \tag{4}$$

式中:P 为良性取样子集出现的概率;ε 为数据的错误率;n 为迭代次数;k 为最小样本集个数。

2)模型构建

利用式(2),以最小样本集合为拟合数据点,运用最小二乘法拟合出最小样本集所构成的轴线。由此得到误差函数:

$$\left.\begin{aligned} e_y&=\sum_{i=1}^{k}(y_i-(a_1x_i-a_0))^2\\ e_z&=\sum_{i=1}^{k}(z_i-(b_1x_i-b_0))^2 \end{aligned}\right\} \tag{5}$$

对误差函数分别求偏导数并取极值即可得到误差最小的 a_1、a_0、b_1、b_0。

3)误差计算

根据中心轴线方程设置点到直线的距离阈值 t,由三维空间中点到直线的距离:

$$d=\frac{|Ax+By+Cz+D|}{\sqrt{A^2+B^2+C^2}} \tag{6}$$

计算所有点云数据到最小样本集拟合直线的距离,记录小于距离阈值的点,得到拟合轴线的内点集。式中:A、B、C、D 为三维空间中直线方程的一般式系数。

4)模型更新

如果第 $i(i=1,2,\cdots,n)$次得到的内点集合中代价函数值的和小于前 $i-1$ 次代价函数值的和,那么就用第 i 次得到的内点集作为最优内点集(即内点数最多的集合)。

MSAC 算法代价函数如下:

$$P(e^2)=\begin{cases} e^2, e^2<T^2\\ T^2, e^2\geqslant T^2 \end{cases} \tag{7}$$

$$f_{\mathrm{D}}=\sum_{i=1}^{n}P(e^2) \tag{8}$$

式中:T 为阈值;e 为误差函数;f_{D} 为代价函数。

5)迭代过程

多次重复上述步骤 1)~4),选择代价函数 F_M 最小的内点集合。

6)最佳模型计算

循环若干次后得到代价函数最小的最优内点集作为中心轴线拟合的最优样本集,根据最优样本集的代价函数求得样本点对应的样本权值。然后,利用加权最小二乘法求解轴线对应的特征参数。最后,将特征参数代入拟合直线方程即可得到中心轴线。

第 i 个样本点对应的权重值为

$$W_i=\frac{P(d_i)}{F_M} \tag{9}$$

式中:F_M 为最优样本集的代价函数;d_i 为最优样本集中第 i 点到最小样本集拟合直线的距离。

基于加权最小二乘法得到的误差函数为

$$\left.\begin{aligned} e_y &= \sum_{i=1}^{k} W_i (y_i - (a_3 x_i - a_2))^2 \\ e_z &= \sum_{i=1}^{k} W_i (z_i - (b_3 x_i - b_2))^2 \end{aligned}\right\} \tag{10}$$

对误差函数分别求偏导即可得到误差最小的 a_2、a_3、b_2、b_3，将未知参数回代进直线方程即可得到最优中心轴线。

3 故障点提取可行性仿真验证

为了验证该方法测量压气机机匣内表面几何公差的可行性，本文以轴流式压气机为例，运用三维建模软件生成压气机的整体模型，如图 5 所示。

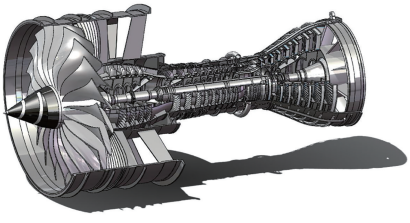


图 5 轴流式压气机整体模型

Fig. 5 Integral model of axial compressor

为简化模型，选取压气机第一级机匣生成如图 6 所示的标准机匣模型，模型截面如图 7 所示。由此可以得到压气机机匣的标准中心轴线为过 $x=0$，$z=0$ 且垂直于 xoz 平面的直线。

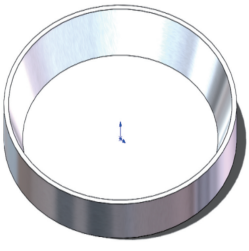


图 6 标准机匣模型

Fig. 6 Standard casing model

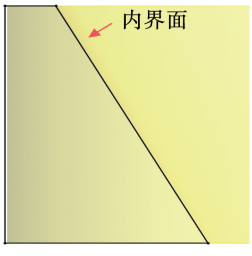


图 7 标准机匣模型截面

Fig. 7 Cross-section of the standard casing model

在标准模型的基础上生成误差模型用以验证测量方法的可行性。文[19]中提到我国航空工业三代机已经将加工偏差降低至 0.05 mm。因此，定义压气机机匣模型的公差带为 ±0.05 mm，同时生成表面误差为 ±0.001 mm 的压气机机匣超差模型，如图 8 所示，超差模型截面如图 9 所示。

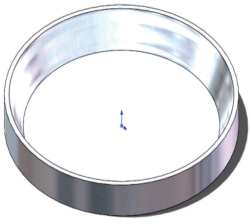


图 8 超差机匣模型

Fig. 8 Out-of-tolerance casing model

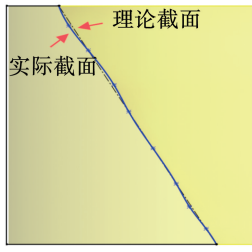


图 9 超差机匣模型截面

Fig. 9 Cross-section of the out-of-tolerance casing model

压气机机匣超差模型作为被测对象，将三维模型进行网格转换，通过 Point Cloud Library 生成超差模型的点云数据，将提取得到的点云数据运用 MATLAB 软件显示，如图 10 所示。

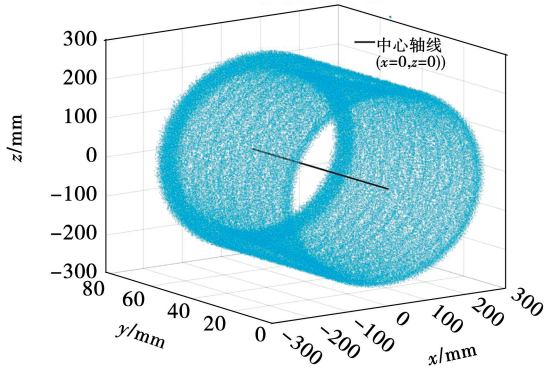


图 10 超差模型点云数据及中心轴线

Fig. 10 Point cloud data and cenral axis of out-of-tolerance model

进行内表面公差检测前，需要得到压气机的中心轴线作为基准，同时还应该保证中轴线具有一定的精

度。根据 2.2 小节所述,通过切片选取圆截面的方式得到如图 11 所示的中心轴线数据点。直接使用最小二乘法进行中心轴线拟合得到粗提取拟合轴线。

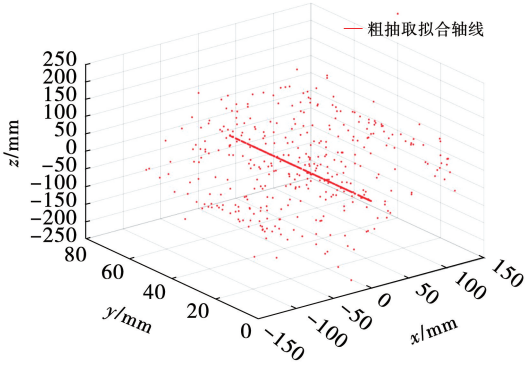


图 11　中心轴线数据点

Fig. 11　Data points of the central axis

将上述中心轴线数据点作为初始数据进行随机采样以构建初始模型,并多次迭代以寻找最优的参数估计。得到代价函数最小的最优内点集作为中心轴线拟合的最优样本集,如图 12 所示。以最优样本集作为数据,通过加权最小二乘法拟合得到最优中心轴线,即 MSAC 拟合轴线。

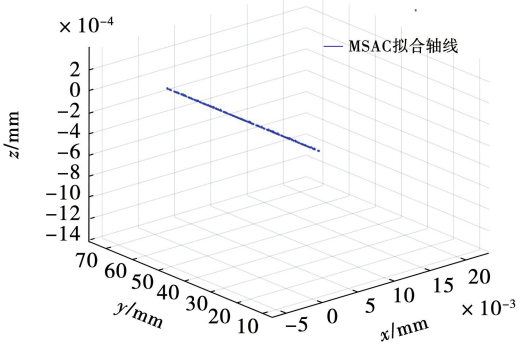


图 12　最优样本集

Fig. 12　Optimal Sample Set

由标准机匣模型可知,标准中心轴线为过 $x=0$, $z=0$ 且垂直于 xoz 平面的直线。将标准中心轴线、粗提取拟合中心轴线与 MSAC 拟合中心轴线进行对比,如图 13 所示,图 14 为局部放大图。由图可知,本文所采用的 MSAC 算法得到的中心轴线与标准轴线之间的误差小于0.000 2 mm,位于 ±0.001 mm 范围内,相较于粗提取拟合得到的中心轴线具有较高的精度。同时,能够较好地处理测量过程中存在的异常值及噪声,具有鲁棒性。

通过 MSAC 拟合轴线提取出机匣内表面点云数据作为检测对象,如图 15 所示。计算内表面点云数据到轴线的距离判断机匣内表面是否超差,误差模型的检测结果如图 16 所示。检测结果表明:本文方法对于误差为 ±0.001 mm 的误差模型能够较为准确地检测出机匣内表面的超差区域,同时可以输出超差区域的三维坐标,如表 1 所示。

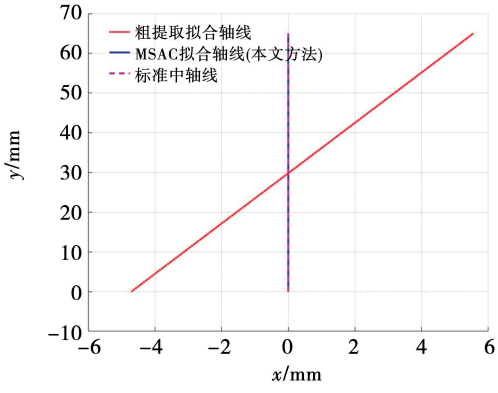


图 13　拟合轴线对比

Fig. 13　Comparison of fitted axis

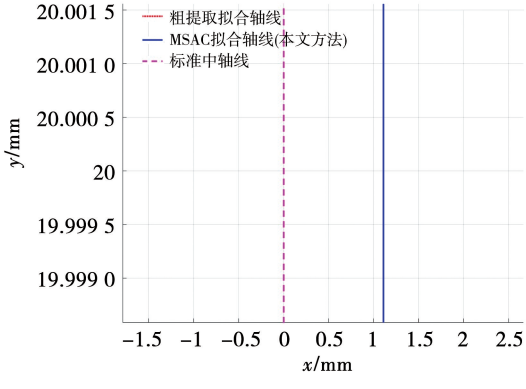


图 14　拟合轴线对比局部放大

Fig. 14　Partial enlarged view of fitted axis comparison

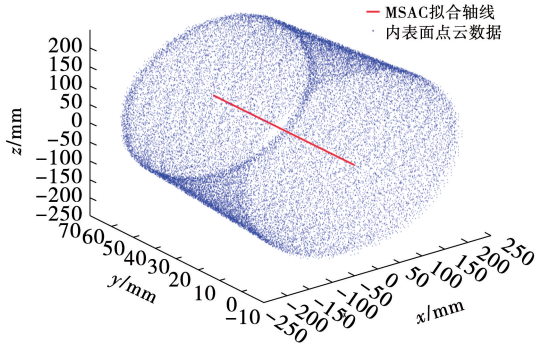


图 15　内表面点云数据

Fig. 15　Inner surface point cloud data

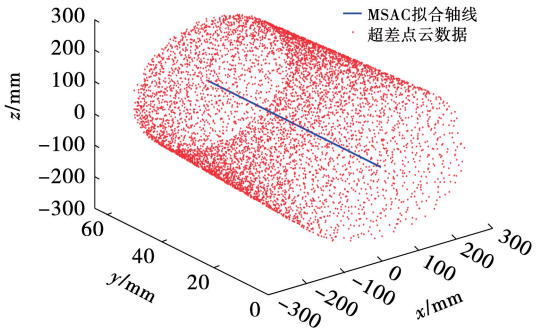


图 16 检测结果

Fig. 16 Test results

表 1 部分故障点坐标

Tab. 1 The coordinates of some fault points

故障点序号	故障点 x 坐标/mm	故障点 y 坐标/mm	故障点 z 坐标/mm
1	205.309 2	56.437 6	11.549 8
2	198.163 5	61.082 8	−45.828 8
3	186.225 3	61.992 1	−78.035 5
4	172.282 5	58.894 8	−108.278 3
5	164.539 4	63.313 6	−115.987 9
6	156.736 7	60.199 3	−129.085 0
7	148.509 4	63.871 8	−135.617 1
8	131.607 3	62.902 3	−153.058 0
9	122.891 2	57.933 6	−163.600 4
10	113.994 3	60.599 2	−168.530 5

4 结 语

为解决如何提取故障信息及如何避免噪声数据对信息提取产生影响这两大问题,本文提出了基于点云数据的故障点提取方法,通过仿真验证了该方法的可行性。

研究结合点云数据的几何公差检测方法,为故障点的定位提供了依据,坐标加工人员通过故障点即可快速定位故障点,进行故障诊断。该方法为几何公差检测领域提供参考,但根据测量设备的不同需要调整对应精度。

为更好地指导压气机加工,提高发动机整体效率,在本文基础上结合其他测量数据,更加实时、完善地表征压气机运行参数将是后续研究的重点。

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] 王志强. 高压压气机低速模拟方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.

[3] 李海宁, 赵赟, 史耀耀, 等. 航空发动机风扇/压气机叶片制造关键技术[J]. 航空制造技术, 2013, 56(16): 34.
LI Haining, ZHAO Yun, SHI Yaoyao, et al. Key Technology of NC Machining for Aeroengine Fan/Compressor Blade[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(16): 34.

[4] 曹素芝. 发动机叶片叶尖间隙非接触检测技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.

[5] 易亮, 薛志飞, 郑芳芳, 等. 航空发动机碳纤维复合材料风扇叶片叶尖间隙测量研究[J]. 传感技术学报, 2023, 36(5): 673.
YI Liang, XUE Zhifei, ZHENG Fangfang, et al. Research on Tip Clearance Measurement of Carbon Fibre Reinforced Plastics Fan Blades of Aero-engine[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2023, 36(5): 673.

[6] 曲琳. 旋转叶片: 涂层机匣碰摩动力学特性研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2021.

[7] 熊宇飞. 航空发动机转子叶尖间隙测量[J]. 测控技术, 2004, 23(1): 5.
XIONG Yufei. Rotor Tip-clearance Measurement in Aeroengine[J]. Measurement & Control Technology, 2004, 23(1): 5.

[8] 张济龙. 基于微波传感的叶尖间隙及叶尖定时测量方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.

[9] 赵洋, 华一雄, 张执南, 等. 基于 Hertz 接触理论的叶片-机匣碰摩模型[J]. 上海交通大学学报, 2019, 53(6): 660.
ZHAO Yang, HUA Yixiong, ZHANG Zhinan, et al. A New Blade-casing Rubbing Model Based on Hertz Contact Theory[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2019, 53(6): 660.

[10] 马玉真. 旋转叶片叶尖间隙测量的关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.

[11] LIU Y, TAN L, WANG B. A Review of Tip Clearance in Propeller, Pump and Turbine[J]. Energies, 2018, 11(9): 2202.

[12] 陈祥春. 轮廓仪测量螺纹中径结果的不确定度评估[J]. 计量与测试技术, 2023, 50(1): 115.
CHEN Xiangchun. Evaluation of Uncertainty in Pitch Diameter Measurement of Thread Gauge Using Contour Measuring System[J]. Metrology & Measurement Technique, 2023, 50(1): 115.

[13] 赖涛. 光学复杂曲面轮廓的坐标测量技术[D]. 长沙: 国防科技大学, 2021.

[14] 徐欣. 航空航天飞行器零部件检测中三坐标测量机的应用研究[J]. 自动化应用, 2024, 65(21): 121.
XU Xin. Research on the Application of Coordinate Measuring Machines in Aerospace Vehicle Component Inspection [J]. Automation Application, 2024, 65(21): 121.

[15] 陆国强. 基于图像处理的光学测量方法及其应用探究[J]. 数字技术与应用, 2021, 39(4): 92.
LU Guoqiang. Research on Optical Measurement Method and Its Application Based on Image Processing[J]. Digital Technology and Application, 2021, 39(4): 92.

[16] 许欧阳, 童杏林. 航空发动机叶尖间隙测量技术研究进展[J]. 半导体光电, 2020, 41(6): 774.
XU Ouyang, TONG Xinglin. Research Progress of Aeroengine Blade Tip Clearance Measurement Technology [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2020, 41(6): 774.

[17] 冯阳, 陈长军, 闫利, 等. 一种基于半圆柱模型的隧道点云中轴线提取与滤波方法[J]. 测绘地理信息, 2021, 46(3): 55.
FENG Yang, CHEN Changjun, YAN Li, et al. A Method of Central Axis Extraction and Tunnel Point Cloud Filtering by a Semi-cylindrical Model[J]. Journal of Geomatics, 2021, 46(3): 55.

[18] 张皓宇. 含噪点云的平面识别与拟合方法研究[D]. 桂林: 广西师范大学, 2023.

[19] 鲁庆. 加工偏差对轴流压气机气动工作范围影响研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2023.

(编辑:温泽宇)