

基于管路几何特征的点云数据采集及偏差测量

项宏伟¹, 金绍峰², 赵越超¹, 杨承振², 齐振超²

1. 中国航发商用航空发动机有限责任公司, 上海 200000

2. 南京航空航天大学, 江苏南京 210000

DOI: 10.61369/TACS.2025050039

摘要: 管路是发动机外部组件, 为了适配机匣等昂贵零部件的装配变形, 成本较低的管路承担起协调偏差的左右, 管路在设计时留有的容差范围较大, 需结合装配现场情况进行修配。因此需要在发动机管路装配现场需要管路扫描测量设备, 通过分析比对扫描得到管路点云数据和理论模型, 从而得到管路的偏差, 为管路校形修配提供依据。结合管路的几何特征, 创新性的提出了三维激光扫描所得管路点云数据的处理方法, 实现影响管路装配的偏差测量。

关键词: 三维激光扫描; 点云处理; 偏差测量

Point Cloud Data Acquisition and Deviation Measurement Based on Pipeline Geometric Features

Xiang Hongwei¹, Jin Shaofeng², Zhao Yuechao¹, Yang Chengzhen², Qi Zhenchao²

1. Commercial Aircraft Engine Co., Ltd., Aero Engine Corporation of China, Shanghai 200000

2. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210000

Abstract: Pipes are external components of the engine. In order to adapt to the assembly deformation of expensive parts such as casings, the lower-cost pipes take on the role of coordinating deviations. Pipes have a relatively large tolerance range in design and need to be repaired and matched according to the on-site assembly conditions. Therefore, pipeline scanning and measurement equipment is required at the engine pipeline assembly site. By analyzing and comparing the pipeline point cloud data obtained by scanning with the theoretical model, the deviation of the pipeline can be obtained, which provides a basis for pipeline shape correction and repair. Combining the geometric features of the pipeline, an innovative method for processing the pipeline point cloud data obtained by 3D laser scanning is proposed to realize the deviation measurement that affects pipeline assembly.

Keywords: 3D laser scanning; point cloud processing; deviation measurement

引言

航空发动机管路具有形状曲折且种类繁多的特点, 需要一种测量效率高且兼容性强的测量手段。三维激光扫描测量具有采集速度快、采样频率高等特点, 满足测量效率和兼容性的需求, 但扫描获取的点云数据具有高冗余、误差分布非线性、不完整等特点^[1], 因此诸多学者对点云数据处理开展了研究。周亚男^[2]提出了基于逆向建模的点云滤波方法, 实现了数据预处理。李照永^[3]提出了一种点云去噪与特征提取方法, 提高了点云处理效率。马智睿^[4]通过改进点云配准算法, 提升了测量精度。金强^[5]提出了点云数据的表面法向计算方法, 实现了点云特征的计算和表达。王巍^[6]通过分析点云提取特征实现了管路形状表达, 但未针对管路装配误差进行数据分析。

目前关于管路点云数据处理的研究尚不充分, 尚未实现管路点云数据到装配偏差的表达, 本研究首创了结合管路的几何特征的点云处理方法, 实现了影响管路装配的偏差测量, 对发动机管路装配生产现场具有指导意义。

一、三维激光扫描场景布置及数据采集

测量的本质是信号的发射与采集分析, 三维激光扫描测量本质上是一种激光与机器视觉相配合的测量方法。通过激光器发射

激光到待测物体表面, 再通过视觉接收从待测物反射回的激光, 基于三角测量原理即可得知待测物表面点的空间坐标, 三角测量原理如图1所示, 将测得的点云组合拼接即可实现待测物点云的获取。

基金项目: 工信部 MJ 专项科研项目 (M**4-2N21)

作者简介: 金绍峰 (1997-), 男, 汉族, 内蒙古包头人, 博士研究生, 单位: 南京航空航天大学, 主要研究方向为航空发动机装配技术, jinshaofeng@nuaa.edu.cn
身份证号: 150203199708022410

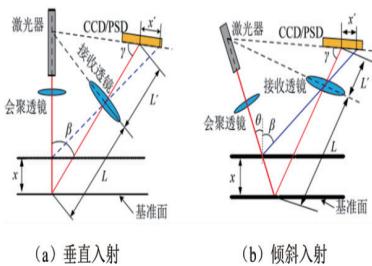


图1 三角测量原理示意图

常规的基于三角测量原理的激光扫描仪受到扫描面幅的限制，在测量过程中难免需要多拼接多测量面幅，以实现待测物体的整体外形感知。面幅拼接通常需要在待测物体表面喷涂散斑或是粘贴特征靶点，以构建拼接时的参考特征。航空发动机管路具有一定的特殊性，无法在表面进行散斑喷涂，若想通过在环境中贴靶标点实现拼接，在自下而上仰视管路时存在靶标点丢失的情况，此时可借助跟踪式三维激光扫描仪，借助双目跟踪仪实现激光扫描仪的实时追踪定位，其原理及效果如图2所示。

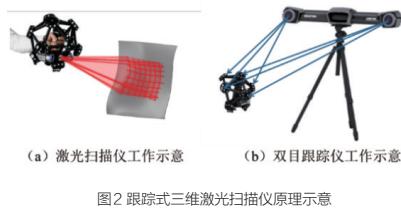


图2 跟踪式三维激光扫描仪原理示意

针对传统激光扫描仪在管路点云数据获取过程中存在的问题，最终选用 MetraSCAN3D 光学跟踪式扫描仪，三维激光扫描系统能够利用 C-Track 摄像头同时采集定位目标点，并基于三角测量法确定待测物表面点，借助双目跟踪仪实现待测管路的扫描点云拼合。依据管路结构特征制定管路的扫描策略：首先，进行整体管件的初步扫描以确定管件的空间大致位置，同时获取管路的大致轮廓信息；然后，对管件弯管、接头等管件特征部位进行局部精细扫描，尽可能完整地获取管路关键特征的坐标数据；最后，在设置扫描路径时需要尽可能避免扫描到过多的放置平面或夹持设备，防止获得的点云数据中含有过多的离群噪点。实际测量过程及所得点云效果如图3所示。

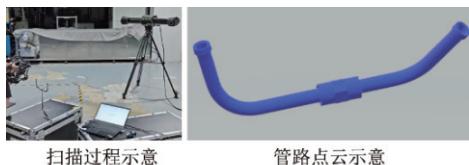


图3 扫描过程及所得点云展示

二、管路点云数据预处理

使用三维激光扫描仪进行扫描时，由于扫描设备、周边环境、人为干扰以及目标的特性等因素的影响，点云数据中会存在噪点，这使得数据无法准确地反映出被扫描对象的外形特征，从而对后续的逆向建模工作造成严重影响，需要对获取的管路点云数据进行去噪处理。针对不同的情况，数据去噪方法的处理方式

也不同。对于有序的点云数据的去噪，常见的是高斯滤波法，通过 KD-tree 算法搜索某点的邻近点，计算点之间的距离，并设置合理阈值去除距离大于该阈值的邻近点，对该过程进行迭代能够达到去除绝大部分离群点的目的，点云去噪结果如图4所示。

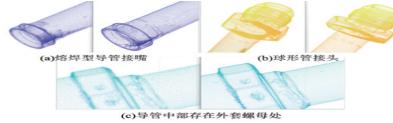


图4 去噪前后点云对比

本测量是管路装配前的最后步骤，管接头拧紧螺母已经套在管路上，管接头已完成焊接组合，因此待测管路上的螺母无法与管体分离，不可避免的会出现遮挡的情况。可通过将螺母移动到管路中央的直管段，测量后通过裁剪和补全的方式实现干扰信息的剔除，裁切补全后的效果如图5所示。

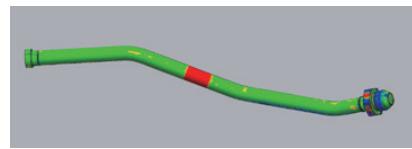


图5 管路裁切补全后效果展示

在进行扫描时为提高扫描精度并为数据处理留有余量，三维激光扫描所生成点云的分辨率设置为 0.1mm，因此获得了大量点，但实际点云数据处理和误差求解的过程，点数过多会影响数据分析计算量，导致点云数据处理效率降低，因此需要借助抽稀算法对点云进行降采样，在保留精度的前提下，提高运算速度、建模效率和模型精度。利用等距抽稀算法对点云数据进行整体初步精简，在原始点云数据中设置采样距离为 n，每间隔 n 个点保留下一个点。该方法的优点是简单快捷，效率较高，但若将采样距离设置过大损失一些微小特征。经过多次试验确定抽稀参数，能够保证不丢失关键特征信息，点云降采样后效果如图所示。

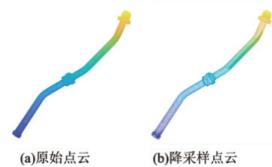
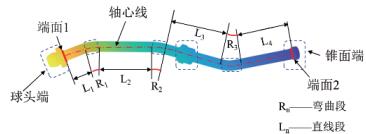


图6 管路点云降采样效果展示

三、基于管路几何特征的逆向建模与误差表征

首先对航空发动机管路结构进行分析，发动机管件由导管和零部件焊接组装而成。其中导管由数控弯管机通过进给、旋转和弯曲加工而成，构成了直线段和圆弧段交替的结构，因此导管的结构可分为直线段和弯曲段，管路具有等直性特点所以可以通过轴心线配合管路半径的方法对空间管路进行表征，如图7所示。



依托软件 Geomagic Design X 对点云数据进行处理，首先需要依据管路的几何特征对管路进行分段，管路的关键特征信息主要包含球头接头、锥面接头、直管段和弯管段，对于接头仅需保留特征面为后续装配误差的测量做准备，直管段的形状接近于圆柱，可用圆柱进行表达，弯管段的曲率有时会出现变化，因此用多段微小弯管进行表达，点云数据分割后的效果如图8所示

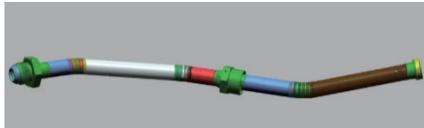


图8 管路特征分割效果示意

在完成点云分割工作后，续继续对点云数据进行逆向建模。对于直管段建立多个与管路轴线相垂直的平面，平面与导管点云模型相交得到一系列点，在理想情况下管路截面形状应为圆形，但由于管路形状偏差的存在，截面形状应表达为椭圆。因此在草图中绘制椭圆来拟合该截面上的数据点，从而得到截面参数，在得到一系列截面的基础上通过放样处理完成管路的逆向建模，建模流程如图9所示。经过逆向建模所得的管路实测模型如图所示。

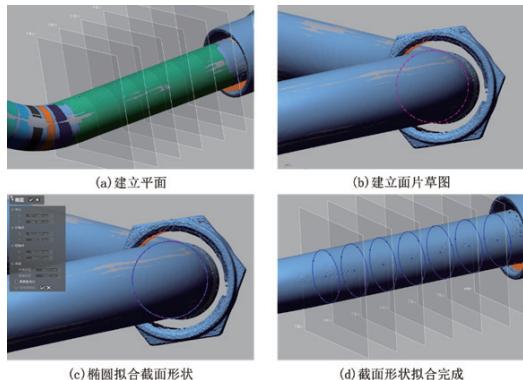


图9 管路逆向建模流程示意



图10 管路实测模型

在得到了管路实测模型后，将理论模型和实测模型进行配准和比对计算，即可求解管路的待测误差。配准大多是两组点云进行的，而管路的模型为 UGNX 软件的 .prt 格式。提取点云主要运用 PCL 库里的工具箱函数 `pcl_obj2pcd` 和 `pcl_mesh_sampling`。该代码的原理是提取网格模型的顶点坐标或者法向量坐标，生成所需要的点云模型。但如果对整个管路模型进行均匀的采样来生成点云模型会使点数量过多，在后续分析过程中不仅会产生不必要的迭代运算，而且会极大程度地降低算法的运行效率。因此，本文仅对管路特征有明显变化处（如弯管、管接头）进行了提取，显著降低了点云模型中采样点的数量，提高了后续步骤的运算效率，理论模型点云提取效果如图所示。



图11 理论模型提取点云

在得到了理论模型点云后可进行实测点云和理论模型的配准，配准主要是指将实测点云数据和理论模型两组点云转换至同一坐标系下，并使得两点云模型的重合度尽可能高，以便于后续的偏差评价。目前应用最广泛的点云精配准算法是迭代最近点算法（ICP），输入理论点云模型 P_t 和实际点云模型 P_r ，输出一个刚性变换矩阵 T 使得经过矩阵 T 变换的 P_r' 与 P_t 有着足够高的重合程度，即视为配准完成。对于 T 是刚性变换的情形，点云配准问题可以描述为：

$$R^*, t^* = \arg \min_{R, t} \frac{1}{|P_r|} \sum_{i=1}^{|P_r|} \|p_r^i - (R \cdot p_t^i + t)\|^2$$

式中： R 为旋转矩阵， t 为平移矩阵。当已知两个点云模型上点的对应关系时，可以使用 Least Squares 来求解参数 R 和 t 。而求解点的对应关系的方法就是采用一个大概近似的参数 R 和 t 对模型进行转换，再直接找距离最近的点作为对应点，从而求得两点云模型上点的对应关系。而 ICP 算法实际上就是交替进行上述两个步骤，迭代计算至收敛，其流程如图12所示。整体来看，ICP 算法将点云配准问题分解为两个子问题：寻找最近邻点和寻找最佳变换。利用初始的 R_0 、 t_0 或上一次迭代得到的 R_{k-1} 、 t_{k-1} 对实际点云 P_r 进行变换，得到一个临时的变换点云，然后用这个点云和理论点云 P_t 进行比较，找出实际点云中每一个点在理论点云中的最近邻点。

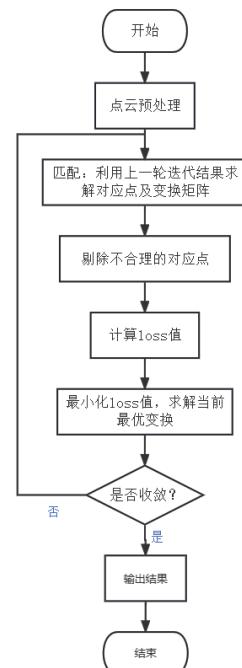


图12 ICP 算法流程

求解最优变换的步骤为：计算实际点云与理论点云的质心，将实际点云与理论点云转换到质心坐标系下，计算矩阵并对矩阵

求 SVD 分解, 根据公式求得最优旋转矩阵 R^* , 根据公式计算最优平移矩阵 t^* 。

通过迭代实现坐标变换最优参数的求解, 每次迭代循环中, 都会得到当前的最优变换参数 Rk 、 tk , 这些参数会被应用于当前的实际点云。整个优化过程包括了“寻找最近的匹配点”和“求解最优变换参数”的不断迭代, 直至达到指定的终止条件, 通常的终止条件包括: Rk 、 tk 的变化幅度小于预设值; loss 的变化幅度小于预设值; 达到最大迭代次数。

实测点云与理论模型点云配准结果如图 13 所示。

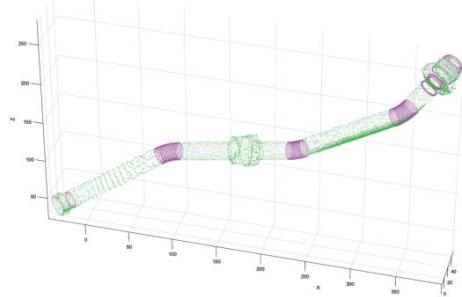


图 13 精配准结果

将管路的实际点云模型与理论模型进行配准后, 借助 MATLAB 中的 boundary 函数分别提取端面数据点进行拟合, 所求解的偏差主要包含五种, 角度偏差、径向偏差、轴向偏差、圆度误差和直径误差。角度偏差即法矢间的夹角, 径向偏差即形心间距离在圆面上的投影, 轴向偏差即形心间距离在法矢上的投

影, 圆度误差即为椭形最大半径与最小半径的差值, 直径误差即为椭形的平均半径与圆半径的差值。同时我们也自动生成了报表和截图, 汇总并展示计算结果和分析结论。报告生成模块通过调用计算模块和显示模块提供的数据和图表, 自动生成包含文字描述、图形展示和数据表格的综合报告, 边界提取效果及所求偏差报表如图 14 所示。



图 14 边界提取效果及所求偏差报表

四、结论

本文对管路点云数据采集的过程和偏差测量进行了系统性研究, 搭建了管路扫描测量环境, 获取了管路点云数据。在此基础上对管路实测点云进行了去噪、裁切补全和降采样等一些列预处理。创新性的基于管路几何特征对管路点云进行逆向建模, 得到了管路实测模型。在管路实测数据和理论模型配准和特征提取等几何计算下, 完成了管路偏差的求解, 实现了基于三维激光扫描技术的管路非接触测量。

参考文献

- [1] 杨必胜, 梁福逊, 黄荣刚. 三维激光扫描点云数据处理研究进展、挑战与趋势 [J]. 测绘学报, 2017, 46(10):1509–1516.
- [2] 周亚男, 乔勋. 基于逆向工程的三维激光扫描点云数据滤波方法 [J]. 激光杂志, 2021, 42(09):170–174.DOI:10.14016/j.cnki.jgzz.2021.09.170.
- [3] 李照永, 侯至群, 周四海, 等. 一种三维点云精细去噪与特征拾取方法 [J]. 测绘通报, 2021,(S2):31–34+38.DOI:10.13474/j.cnki.11-2246.2021.0580.
- [4] 马智睿, 朱金薇, 耿婧源, 等. 基于三维激光点云的固体火箭发动机喷管零部件尺寸测量方法研究 [J]. 固体火箭技术, 2024, 47(02):278–284.
- [5] 金强, 董志刚, 杨国林, 等. 基于点云数据的大曲率工件表面法向计算方法研究 [J]. 航空制造技术, 2024, 67(Z1):124–130. DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2024.01/02.124.
- [6] 王巍, 金文瀚. 基于激光扫描的航空管件检测技术研究 [J]. 航空制造技术, 2020, 63(19):41–46+72.DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.19.041.