

基于点云数据的发动机管路最小间距 计算方案

樊晶晶^{1,2}, 马骊群¹, 孙安斌¹, 瞿剑苏¹

- (1. 中国航空工业集团有限公司 北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095;
2. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘 要: 为检测整机发动机管路是否满足最小间距的设计要求,提出了一种基于点云数据的发动机管路最小间距计算方案,方案包含5个步骤:①从点云数据中划分出不同管路的数据;②基于管路点云数据的空间分布构造等间隔栅格,计算栅格中心点作为管路的趋势线数据;③在管路各趋势线数据点位置上构造垂直平面,将管路点云数据投影到最近的垂直平面上,获得各个垂直平面上呈圆弧状分布的投影点数据;④对各垂直平面上的投影点数据进行最小二乘圆拟合,得到拟合圆圆心及其半径值,将拟合圆圆心作为管路中心线数据;⑤采用遍历法计算两条管路中心线数据的最小间距,中心线最小间距分别减去两条管路的半径值则得到两条管路的表面最小间距。通过12条管路验证了方案的准确度。实验结果表明:管路最小间距偏差在 $-0.35\sim 0.46\text{ mm}$ 之间,管路半径偏差在 $-0.08\sim 0.22\text{ mm}$ 之间。该方案的实施有助于管路间距数字化检测的实现,且方案的计算结果具有较好的鲁棒性。

关 键 词: 管路最小间距; 点云数据; 垂直平面; 趋势线数据; 中心线数据

中图分类号: V233

文献标志码: A

Strategy of calculating minimal-distance of engine pipelines based on point cloud data

FAN Jingjing^{1,2}, MA Liqun¹, SUN Anbin¹, QU Jiansu¹

(1. Changcheng Institute of Metrology and Measurement,
Aviation Industry Corporation of China, Limited, Beijing 100095, China;

2. School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A strategy of calculating minimal-distance of engine pipelines based on point data was proposed to inspect whether the minimal-distance meets the design requirement. The strategy includes five steps: (1) the points belonging to the same pipeline was picked up and saved in a group. (2) A set of equal-interval grid was built along a coordinate direction in which the pipeline stretched longest. Then the point cloud data were divided into corresponding grid according to the coordinates. The center point of each grid was calculated and the trend-line data of pipeline were constituted. (3) On each trend-line point, a projection plane was built vertically to a straight line connecting the point and its adjacent point. Then point cloud data of pipeline were projected to the nearest projection plane. And a group of

收稿日期: 2019-05-05

基金项目: 工业和信息化部民用飞机专项科研技术研究项目(MJ-2018-J-70)

作者简介: 樊晶晶(1989—),女,博士生,主要从事基于点云数据的评价方法研究。E-mail:1536194673@qq.com

引用格式: 樊晶晶,马骊群,孙安斌,等. 基于点云数据的发动机管路最小间距计算方案[J]. 航空动力学报,2019,34(11):2347-2353. FAN Jingjing, MA Liqun, SUN Anbin, et al. Strategy of calculating minimal-distance of engine pipelines based on point cloud data[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(11): 2347-2353.

projected points in arc distribution were obtained on each projection plane. (4) The projected points on each projection plane were fitted into a circle using least square fitting method. And the center points of all circles constituted the center-line points of a pipeline. And the mean radius of each fitted circle was regarded as pipeline radius. (5) Traversing method was used to calculate minimal-distance between two groups of center-line points. And minimal-distance of two pipeline surfaces was calculated by subtracting radii of two pipelines from the minimal-distance of center-line points. Four groups of pipelines were examined to verify the proposed strategy. The results showed that the deviations of minimal-distance of two pipeline surfaces were within $-0.35 \sim 0.46$ mm. And the deviations of pipeline radius were within $-0.08 \sim 0.22$ mm. The proposed method is more robust than mostly used method and also meaningful for realizing digital inspection of pipeline distance.

Key words: minimal-distance of pipelines; point cloud data; vertical plane; trend-line data; center-line data

航空发动机管路系统是指通过管路将发动机部件及附件进行连接,并输送发动机运行、控制、操纵等功能所需各种流体的系统^[1]。一台典型的航空发动机通常包含 200 多根管路,所有管路敷设在内机匣与短舱之间的有限回转空间内,同时,管路还需满足力学、振动等多种工程要求,这使得管路层叠交错,形状复杂^[2-3]。HB20123.4-2012 中规定航空发动机管路的敷设要保证管路之间,管路 with 相邻附件之间的最小间距满足设计要求。管路最小间距的保证可以防止发动机运行过程中管路 with 飞机机匣、其他管路、紧固件发生摩擦^[4],同时也避免管路间产生共振^[5-6]。因此,发动机管路最小间距是保证发动机正常运行的重要因素之一。

现阶段,发动机管路最小间距要求不小于某一阈值,通常为 2 mm 或 3 mm。传统的检测方法是工人使用塞尺在管路目视最小间距处测量以判断是否符合最小间距要求,虽然该方法检测效率高且满足准确度要求,但是测量结果易受工人工作经验和工作状态的影响。随着工业 4.0 概念的推进,产品的制造和检测都趋于数字化,而非接触测量原理的成熟和三维扫描测量设备的出现为管路最小间距的计算提供了数字化解决手段。三维扫描测量设备具有测量效率高,非接触不损伤零部件及获取被测表面完整形貌信息的特点,因此可用来检测发动机零部件表面形貌^[7-8]和装配质量,如管路最小间距。现阶段管路间距的计算是将图像特征识别和三维测量原理^[9-12]相结合来实现。首先通过相机拍摄管路二维图像,在对图像进行降噪和二值化处理后,提取管路的边缘像素点和中心线像素点,然后基于三角交汇原理^[13]计算管路边缘及管路中心线的三维点数据,最后通

过对管路边缘数据进行圆柱拟合得到管路直径。该方法计算的管路中心线数据是基于中心线在两台相机中所成像获得的。因此,计算结果受像素提取准确度和图像匹配准确度的影响,而这两个过程都易受到图像噪点^[14]的影响。

本文提出一种基于点云数据的管路最小间距计算方案。该方案首先计算出不同管路的中心线数据,然后计算不同中心线数据的最小间距,中心线数据的最小间距减去管路半径值则得到不同管路的表面最小间距。

1 管路最小间距计算

1.1 管路最小间距计算方案

本文提出的管路最小间距计算方案包含 5 个步骤:①对点云数据进行管路数据划分,得到每根管路的扫描数据;②判断每条管路分别在 x 、 y 、 z 方向上的分布长度,在分布最长的坐标轴方向上构造等间隔栅格,并将管路点云数据划分到对应的栅格中,计算每个栅格的中心点坐标,所有中心点坐标反映管路中心线的空间位姿,称之为趋势线数据;③将趋势线数据中相邻两点连线并在前端点处构造直线段的垂直平面,然后将管路表面点云数据投影到距离最近的垂直平面上,则在每个垂直平面上得到一组按圆弧分布的投影点数据;④对所有垂直平面上的投影点数据进行最小二乘圆拟合,计算拟合圆的圆心和半径;⑤将拟合圆圆心作为管路的中心线数据,并采用遍历法^[15]计算两条管路中心线数据的最小间距,中心线数据的最小间距减去两条管路的半径即可得到 2 条管路表面的最小间距。如图 1 所示。

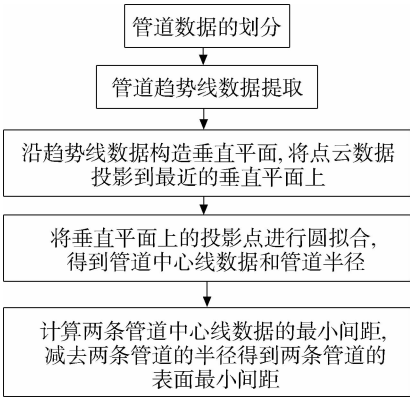


图 1 管路最小间距计算方案

Fig. 1 Strategy of calculating minimal-distance of pipelines

1.2 管路最小间距计算步骤

下面对方案 5 个步骤的计算过程进行说明。

1) 管路数据的划分

扫描仪获得的点云数据包含多条管路及机匣表面的数据,为提取某条管路的中心线数据,需先将该条管路的点云数据提取出来,数据分割方法可采用文献[16]中的区域增长分割算法。而本文借助 GOM inspect 软件完成该工作。图 2 表示一组管路的扫描数据,其中绿色点为原始扫描数据,红色点为划分的一条管路的点云数据。

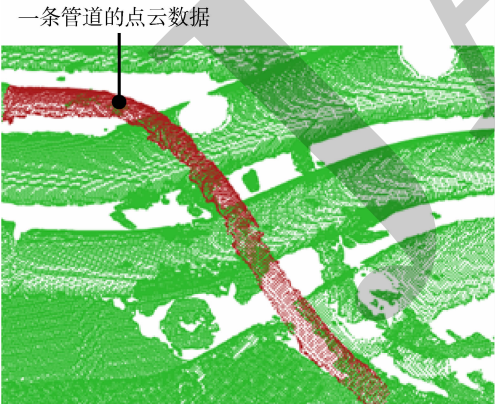


图 2 管路数据的划分

Fig. 2 Segmentation of point cloud data

2) 管路趋势线数据的提取

管路趋势线数据是一组能反映管路中心线空间位姿的离散点集。本文趋势线数据的计算需首先将管路点云数据划分到栅格中,然后通过计算栅格所包含数据中心点的方式实现。以一条管路为例说明管路趋势线数据的计算方法。

设管路点云数据 $p_i(x_i, y_i, z_i)$ ($i=1, 2, \dots, n$)。寻找点云数据在 x, y, z 坐标轴方向上的最

大值和最小值,表示为 $x_{\max}, x_{\min}, y_{\max}, y_{\min}, z_{\max}, z_{\min}$,然后计算该条管路在 x, y, z 坐标轴方向上的长度,并确定最长方向,即计算 $\max\{(x_{\max} - x_{\min}), (y_{\max} - y_{\min}), (z_{\max} - z_{\min})\}$,当 x (或 y 、或 z) 方向长度最大时,确定 x (或 y 、或 z) 方向为栅格的划分方向。然后从 $x_{\min}$ (或 $y_{\min}$ 、或 $z_{\min}$) 到 $x_{\max}$ (或 $y_{\max}$ 、或 $z_{\max}$) 等间隔划分栅格,确定每个栅格的在划分方向上的上下界限;根据栅格上下限,将位于栅格上、下界限的管路点云数据划分到对应的栅格中,并计算每个栅格所包含数据的中心点,所有栅格的中心点构成了管路趋势线数据。因为点云数据中包含噪声点,尤其是在扫描仪视场边缘处,使得计算的管路趋势线数据不光顺,因此,本文采用弦高差法和均匀采样法^[17]对趋势线数据进行光顺。设置的栅格间隔影响趋势线数据的光顺性和携带的管路信息量。栅格间距较大,趋势线数据量少,携带的反映管路中心线空间位姿的信息量少;栅格间距较小,栅格中心点易受扫描噪声点的影响,降低趋势线数据的光顺性,所以,选择合适的栅格间距是提取准确趋势线数据的关键。

根据发动机管路的空间弯曲情况,本文将管路分为“L”形管路和有“U”形管路,“L”形管路是指中心线为开放曲线或直线的管路,“U”形管路是指中心线为半封闭曲线的管路。本文方案在确定栅格划分方向时,仅在 x, y, z 三个坐标轴方向上进行了判断,使得计算的“U”形管路趋势线数据有误。图 3 表示“U”型管路沿 y 轴方向上划分栅格的情况。由于栅格上下界限之间,在管路的左右两个分支上分别包含一组点数据,使得该栅格所包含点云数据的中心点落在了“U”型管路的中间区域,如图中红色标记点,这与真实的管路趋势线数据相差较远。为解决此问题,可在管路数据划分步骤中将一条“U”形管路划分为两条“L”形管路,然后按照本文方法计算管路趋势线。

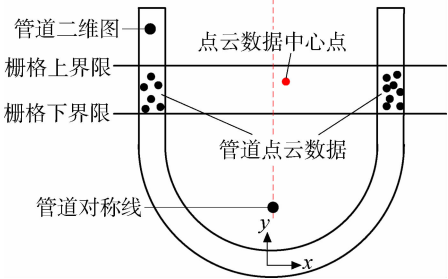


图 3 “U”形管路栅格中心点的位置

Fig. 3 A center point of an U-type pipeline

3) 沿趋势线数据构造垂直平面

如图 4 所示,设一条管路的趋势线数据为 $p_{c,j}(x_{c,j}, y_{c,j}, z_{c,j}) (j=1, 2, \cdots, n)$,用直线连接相邻的两个点,得到直线段 $L_j (j=1, 2, \cdots, n)$,如图中黑色直线段所示。在每个点的位置上构造平分于相邻直线段夹角的平面 $P_{L_j} (j=2, \cdots, n-1)$,如图中蓝色直线段所示,首末端点处的平面垂直于首末直线段。

位于趋势线两端点之间的垂直平面 $P_{L_j} (j=2, \cdots, n-1)$ 通过点 $p_{c,j}(x_{c,j}, y_{c,j}, z_{c,j})$,且平面法向与向量 $L_{j-1} + L_j$ 平行,其中 $L_{j-1} = \overrightarrow{p_{c,j}p_{c,j-1}}$, $L_j = \overrightarrow{p_{c,j+1}p_{c,j}}$,则垂直平面可表示为式(1),其中 (A, B, C) 表示垂直平面的单位法向量,

$$A = \frac{x_{c,j} - x_{c,j-1}}{N_1} + \frac{x_{c,j+1} - x_{c,j}}{N_2}, \quad B = \frac{y_{c,j} - y_{c,j-1}}{N_1} + \frac{y_{c,j+1} - y_{c,j}}{N_2}, \quad C = \frac{z_{c,j} - z_{c,j-1}}{N_1} + \frac{z_{c,j+1} - z_{c,j}}{N_2},$$
$$N_1 = \sqrt{(x_{c,j} - x_{c,j-1})^2 + (y_{c,j} - y_{c,j-1})^2 + (z_{c,j} - z_{c,j-1})^2},$$
$$N_2 = \sqrt{(x_{c,j+1} - x_{c,j})^2 + (y_{c,j+1} - y_{c,j})^2 + (z_{c,j+1} - z_{c,j})^2},$$

4) 将管路点云数据投影到最近的垂直平面上

以一点为例进行说明,设点 $p_{sm}(x_m, y_m, z_m)$ 到所有垂直平面 $P_{L_j} (j=1, \cdots, n)$ 的垂直距离为 $(D_{m,1}, D_{m,2}, \cdots, D_{m,n})$,计算垂直距离的最小值,即 $\min\{D_{m,1}, D_{m,2}, \cdots, D_{m,n}\}$,当 $D_{m,q} (1 \leq q \leq n)$

N_1, N_2 表示相邻两个趋势线数据点间的欧式距离。

$$A(x - x_{c,j}) + B(y - y_{c,j}) + C(z - z_{c,j}) = 0 \tag{1}$$

其中

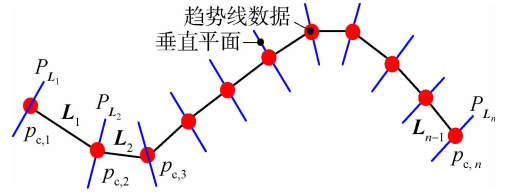


图 4 沿趋势线数据构造垂直平面

Fig. 4 Constructing vertical planes along trend-line data

为最小时,说明点 p_{sm} 到第 q 个垂直平面的距离为最小,则将点 p_{sm} 投影到第 q 个垂直平面上,其投影点 $p'_{sm}(x'_m, y'_m, z'_m)$ 的计算表达式见式(2),其中 $(x_{c,j}, y_{c,j}, z_{c,j})$ 为垂直平面通过的趋势线数据点的坐标。

$$\begin{cases} x'_m = \frac{1}{A^2 + B^2 + C^2} \cdot [x_m, y_m, z_m, x_{c,j}, y_{c,j}, z_{c,j}][B^2 + C^2, -AB, -AC, A^2, AB, AC]^T \\ y'_m = \frac{1}{A^2 + B^2 + C^2} \cdot [x_m, y_m, z_m, x_{c,j}, y_{c,j}, z_{c,j}][AB, A^2 + C^2, -BC, AB, B^2, BC]^T \\ z'_m = \frac{1}{A^2 + B^2 + C^2} \cdot [x_m, y_m, z_m, x_{c,j}, y_{c,j}, z_{c,j}][-AC, -BC, A^2 + B^2, AC, BC, C^2]^T \end{cases} \tag{2}$$

对管路所有点云数据进行上述操作,则在各垂直平面上得到呈圆弧状分布的投影点数据。

5) 对投影点数据进行圆拟合,计算管路中心线数据,并采用遍历法计算管路表面最小间距。

对每张垂直平面上的投影点数据进行最小二乘圆拟合,得到拟合圆圆心坐标和拟合半径值。所有拟合圆的圆心为管路中心线上的点,称之为管路中心线数据。

由于管路中心线数据的数据量有限,所以采用遍历法计算两组中心线数据的最小间距。设第 1 条管路的中心线数据为 $p_{c1,j} (j=1, 2, \cdots, n_1)$,第 2 条管路的中心线数据为 $p_{c2,j} (j=1, 2, \cdots, n_2)$,计算 2 组管路中心线数据的欧氏距离,则得到 $n_1 \times n_2$ 个距离值,计算 $n_1 \times n_2$ 个距离值的最小值作为两条管路的最小间距位置。图 5

表示采用遍历法计算第 1 条管路中心线数据点 $p_{c1,j}$ 到另一条管路所有中心线数据的距离,确定最小距离 D_i 为点 $p_{c1,j}$ 到第 2 条管路中心线数据的距离。

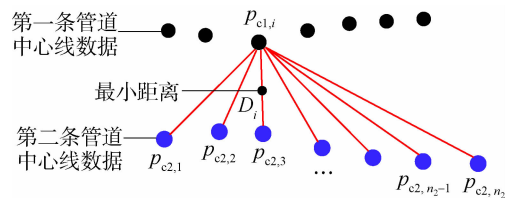


图 5 遍历法计算一条管路中心线上的一点到另一条管路中心线的最小距离

Fig. 5 Calculating minimal-distance of a point to another group of center point data using traversing method

在两条管路的最小间距位置处,进行一次插值判断,提高管路最小间距计算准确度。当点 $p_{c1,k}$ 到点 $p_{c2,q}$ 距离最小时,再分别计算点 $p_{c1,k-1}$ 与点 $p_{c2,q-1}$ 、点 $p_{c1,k+1}$ 与点 $p_{c2,q+1}$ 、点 $p_{c1,k-1}$ 与点 $p_{c2,q+1}$ 、点 $p_{c1,k+1}$ 与点 $p_{c2,q-1}$ 之间的距离,用四个距离中的最小值 $D_{\min}$ 与点 $p_{c1,k}$ 到点 $p_{c2,q}$ 的距离值比较,取较小的值作为管路中心线数据的最小间距。

不同管路中心线数据间的最小距离减去两条管路在最小间距位置处的半径值则可得到两条管

路的表面最小间距,该间距即为设计阶段所要求的其取值不能小于某一阈值。

本方案计算的管路中心线数据是垂直平面上多个投影点的拟合圆心,与现阶段常用的图像特征识别结合三维测量的方法相比,可减小噪声点和单点测量不确定度对计算结果的影响,具有较好的鲁棒性。图 6 表示采用本文方案提取一条管路中心线数据的流程,从图 6(a)~图 6(e)依次对应本文方案中的 5 个步骤。

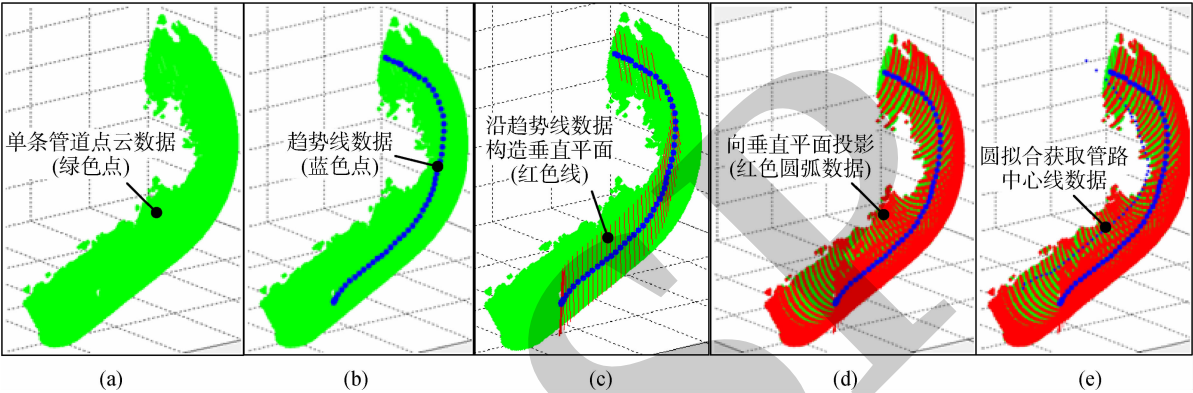


图 6 计算管路中心线数据流程
Fig. 6 Process of calculating center point data of a pipeline

2 验证实验

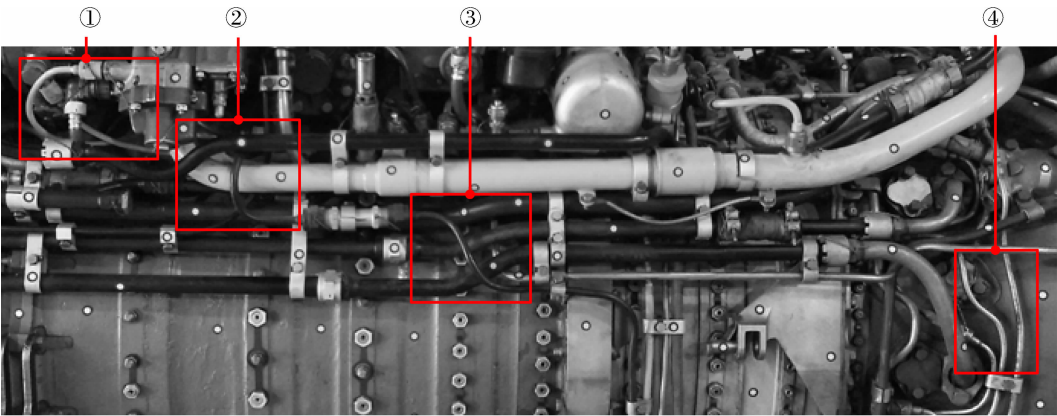
2.1 实验条件

为验证本文所述方案的准确度,采用某民用发动机维修间上的 4 组管路进行实验,管路如图 7 所示,图 7(a)表示 4 组管路在整台发动机上的位置,图 7(b)表示了 4 组管路中需提取的管路,共计 12 根。

本次实验采用 Creaform 公司的 HandyScan 手持式线激光扫描仪获取发动机表面的点云数据。扫描仪通过随机粘贴在被测表面的光学反射

靶实现不同测站数据的拼接^[18],如图 7 中发动机表面粘贴的高亮点。该设备的扫描精度为 0.04 mm,分辨率为 0.1 mm,测量速度 205 000 次/s,单幅测量区域为 225 mm×225 mm,景深为 250 mm。

在计算出 12 根管路中心线数据和半径值的基础上,需计算出每组管路任意两条管路间的最小距离,共计 14 个。在第 1 组管路中,计算管路 1 和管路 2 的最小间距;第 2 组管路中,计算管路 3~管路 6 中任意两条管路的最小间距,共 6 个;第 3 组管路中,需计算管路 7~管路 10 中任意两条管路的最小间距,共 6 个;第 4 组管路中,计算



(a) 实验用4组管路

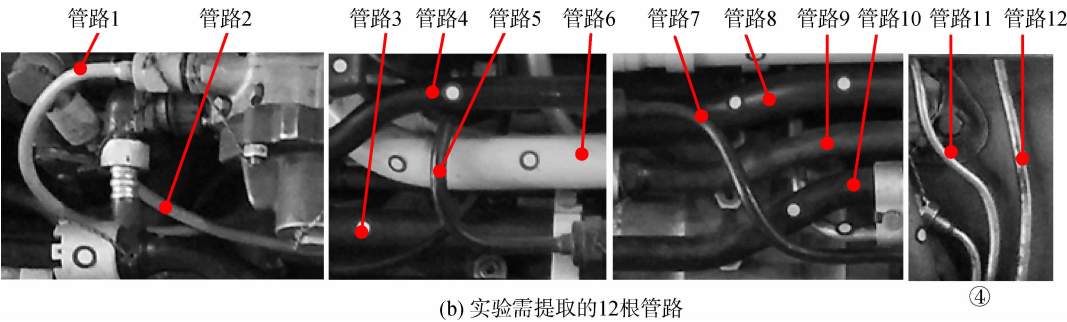


图 7 实验用 4 组管路实物图
Fig. 7 Four groups of pipeline to-be-examined

管路 11 到管路 12 的最小间距。

2.2 实验结果

按照本文所述方案计算图 7 中 12 根管路的半径值和中心线数据。实验中设置的栅格间距为 1 mm。采用游标卡尺测量管路的真实半径和最小间距,并以此作为标准值评价本方案的准确度。管路半径和管路间距的偏差统计结果分别见表 1 及表 2。

表 1 12 根管路半径偏差计算结果

Table 1 Calculated radii deviation of twelve pipelines			
序号	计算值/mm	参考值/mm	偏差/mm
1	3.10	2.97	0.13
2	3.16	3.06	0.10
3	6.14	6.075	0.07
4	8.02	8.055	-0.04
5	4.03	4.04	-0.01
6	13.65	13.515	0.13
7	4.21	4.03	0.18
8	9.24	9.02	0.22
9	7.86	7.94	-0.08
10	10.95	11.04	-0.09
11	3.09	2.98	0.11
12	3.03	2.98	0.05

表 2 管路最小间距偏差计算结果

Tables 2 Calculated minimal-distance deviation of different pipelines			
序号	计算值/mm	参考值/mm	偏差/mm
1~2	2.28	2.21	0.07
3~4	29.67	29.61	0.06
3~5	35.97	35.69	0.28
3~6	2.12	2.02	0.10

续表

序号	计算值/mm	参考值/mm	偏差/mm
4~5	4.73	4.82	-0.09
4~6	7.61	7.30	0.31
5~6	3.71	3.86	-0.15
7~8	3.08	3.30	-0.22
7~9	13.63	13.50	0.13
7~10	12.17	11.71	0.46
8~9	5.95	6.21	-0.26
8~10	28.34	28.69	-0.35
9~10	8.96	8.54	0.42
11~12	9.06	9.02	0.04

从表 1、表 2 中可知,管路半径计算结果的偏差在 -0.08~0.22 mm 之间,管路最小间距计算结果的偏差在 -0.35~0.46 mm 之间。

3 结 论

本文提出了一套基于点云数据的发动机管路最小间距计算方案,该方案首先计算反映管路中心线空间位姿的趋势线数据,然后沿趋势线数据构造垂直平面,将管路点云数据投影到垂直平面后得到每个平面上呈圆弧分布的投影点数据,对投影点数据进行最小二乘圆拟合,得到发动机管路的中心线数据,然后采用遍历法计算两条管路中心线数据的最小间距,用该最小间距减去管路半径值得到两条管路的表面最小间距。本文提出的发动机管路中心线数据提取方法与现阶段常用图像特征识别结合三维测量的方法相比,就有较好的抗噪能力。

以游标卡尺测量的管路半径值和管路最小间距作为参考值,对 4 组管路共 12 根管路进行实验。实验结果表明:根据本方案计算的管路最小

间距偏差在 $-0.35\sim 0.46\text{ mm}$ 之间,管路半径值偏差在 $-0.08\sim 0.22\text{ mm}$ 之间。本文所述方案对发动机上的“L”形管路有和“U”形管路均有效,准确度满足现阶段管路最小间距检测准确度的要求。

参考文献:

[1] 刘元明,陈良骥,冯宪章,等. 基于特征的航空发动机管路反求建模方法研究[J]. 机床与液压,2008,36(5):22-25.
LIU Yuanming, CHEN Liangji, FENG Xianzhang, et al. Research on feature-based reverse engineering system for modeling of aeroengine pipeline[J]. Machine Tool and Hydraulics, 2008, 36(5): 22-25. (in Chinese)

[2] 罗敏. 航空发动机外部管路工装数字化设计[J]. 数字化设计与制造, 2015, 58(15): 18-21.
LUO Min. Tooling digital design of aeroengine external pipeline[J]. Digital Design and Manufacturing, 2015, 58(15): 18-21. (in Chinese)

[3] 陈艳秋,朱梓根. 基于遗传算法的航空发动机管路优化设计[J]. 航空动力学报, 2002, 17(4): 421-425.
CHEN Yanqiu, ZHU Zigen. Pipe system design of aero-engine using genetical gorithms[J]. Journal of Aerospace Power, 2002, 17(4): 421-425. (in Chinese)

[4] 刘德刚,王澍,朱德轩. 民用飞机燃油系统管路设计研究[J]. 装备制造技术, 2014, 42(8): 223-225.
LIU Degang, WANG Shu, ZHU Dexuan. Civil aircraft fuel system conveyance design research[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2014, 42(8): 223-225. (in Chinese)

[5] 盛世伟. 管路支撑参数对液压管路系统振动特性影响研究[D]. 河北 秦皇岛:燕山大学, 2015.
SHENG Shiwei. Numerical analysis on the fluid-solid coupling vibration of hydraulic pipeline with elastic support [D]. Qinhuangdao Hebei: Yanshan University, 2015. (in Chinese)

[6] 李占营,王建军,邱明星,等. 航空发动机空间管路系统的流固耦合振动特性[J]. 航空动力学报, 2016, 31(10): 2346-2352.
LI Zhanying, WANG Jianjun, QIU Mingxing, et al. Dynamic characteristics of aero-engine pipe system considering fluid-structure coupling[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(10): 2346-2352. (in Chinese)

[7] 张桁维,梁晋,孟繁昌,等. 基于点云融合的管路精确测量方法[J]. 航空制造技术, 2018, 61(5): 51-55.
ZHANG Hengwei, LIANG Jin, MENG Fanchang, et al. Point cloud fusing-based measuring method for curved pipes[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(5): 51-55. (in Chinese)

[8] 李繁,臧朝平. 曲面叶片三维工作变形连续扫描激光测试[J]. 航空动力学报, 2018, 33(12): 2291-2298.
LI Fan, ZANG Chaoping. Curved blade three-dimensional operational deflection shape continuous scanning laser

measurement[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(12): 2291-2298. (in Chinese)

[9] 牛平月,郑联语,杨启龙. 基于双目视觉的管路快速检测技术研究[实现[J]. 航空精密制造技术, 2014, 50(2): 16-19.
NIU Pingyue, ZHENG Lianyu, YANG Qilong. Research and implementation of pipeline rapid detection based on stereo vision technology[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2014, 50(2): 16-19. (in Chinese)

[10] 张天,唐承统,刘检华. 基于多目视觉的弯管空间参数测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(2): 260-267.
ZHANG Tian, TANG Chengtong, LIU Jianhua. Bend tube spatial parameter measurement method based on multi-vision[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(2): 260-267. (in Chinese)

[11] 李玉龙,郭翔,索海. 一种复杂多管路系统检测方法[与流程: 201710332014. 7[P]. 2017-09-29.

[12] 刘检华,刘少丽,宁汝新,等. 管路数字化布局设计与制造及检测集成技术[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(4): 1-19.
LIU Jianhua, LIU Shaoli, NING Ruxin, et al. Integrated technology digital pipeline routing[J]. Manufacturing and Inspection, 2015, 21(4): 1-19. (in Chinese)

[13] 张海波. 基于双目立体视觉的图像匹配和三维重建[D]. 西安:西安工业大学, 2012.
ZHANG Haibo. Stereo matching and 3D reconstruction based on binocular stereo vision[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2012. (in Chinese)

[14] 袁伟鹏,黄祖广,张承瑞,等. 机器人点位控制速度规划算法选择策略[J]. 制造技术与机床, 2018(12): 143-149.
YUAN Jipeng, HUANG Zuguang, ZHANG Chengrui, et al. Selection strategy of federate planning algorithm for robot point-to-point control[J]. Technology and Test, 2018(12): 143-149. (in Chinese)

[15] 刘元明,陈良骥,李明,等. 航空发动机管路测量数据分割方法[J]. 航空学报, 2008, 29(2): 285-291.
LIU Yuanming, CHEN Liangji, LI Ming, et al. Segmentation method for point cloud of aeroengine pipelines[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(2): 285-291. (in Chinese)

[16] 程效军,贾东峰. 海量点云数据处理理论与技术[M]. 上海:同济大学出版社, 2014.

[17] 马开峰. 高低温环境卫星天线型面变形的近景摄影测量与数据处理[D]. 北京:中国矿业大学, 2016.
MA Kaifeng. Close-range photogrammetry and data processing of shape-surface of satellite antenna under high-low temperature environments[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2016. (in Chinese)

[18] 郭晶晶,贺赛先. 手持式激光扫描仪激光点云数据拼接方法[J]. 光电与控制, 2018, 25(1): 88-91.
GUO Jingjing, HE Saixian. A laser point cloud data splicing method for hand-held laser scanners[J]. Electronics Optics and Control, 2018, 25(1): 88-91. (in Chinese)