

基于实测数据的复合材料构件 装配干涉与间隙计算

王琦¹ 张聘¹ 仲钰¹ 衡兴波² 张德伟²

(1 航空工业济南特种结构研究所, 高性能电磁窗航空科技重点实验室, 济南 250023)

(2 南京航空航天大学, 南京 210016)

文 摘 针对因成型误差引起的复合材料构件装配干涉问题, 本文基于激光测量设备获取装配点云数据, 提出一种基于实测数据的复合材料构件装配干涉与间隙的降维求解方法, 将三维装配的干涉与间隙计算转化为二维边界距离计算。以某型飞机雷达罩装配为例, 通过实验验证了本文所提出的方法与算法的可行性, 相较于原有装配工艺, 装配精度与装配效率得到了提升。

关键词 复合材料, 装配, 刚性变换, 边界提取, 干涉计算, 点云

中图分类号: TP391

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2024.03.003

Interference and Gap Calculation for Composite Component Assembly Based on Measured Data

WANG Qi¹ ZHANG Pin¹ ZHONG Yu¹ HENG Xingbo² ZHANG Dewei²

(1 AVIC Research Institute for Special Structures of Aeronautical Composite,

Aviation Key Lab of Science and Technology on High Performance Electromagnetic Windows, Jinan 250023)

(2 Nanjing University of Aeronautics And Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract For the composite component assembly interference problem caused by molding errors, this paper proposed a method of dimensional reduction of composite component assembly interference and clearance based on point cloud data obtained from laser equipment, it converts the interference and clearance calculation of the three-dimensional assembly into the calculation of the two-dimensional boundary distance. Taking a certain type of aircraft random assembly as an example, the feasibility of the proposed method and algorithm is verified through experiments, and the assembly accuracy and efficiency are improved compared with the original assembly process.

Key words Composites, Assembly, Rigid transformation, Boundary extraction, Interference calculation, Point cloud

0 引言

当下飞机设计过程对制造材料的力学性能以及轻量化设计要求的逐步提高, 因此航空复合材料越来越受到航空制造业的青睐^[1]。虽然复合材料制造工艺日益成熟, 但仍不可避免地会产生部分缺陷^[2], 这导致复合材料构件的制造精度难以匹配精度要求, 这一问题在飞机装配方面的主要表现就是复合材料构件在装配时出现装配干涉。目前在复合材料构件

装配过程中, 构件间的协调是通过操作人员的手工对比、修挫来完成的, 并且在协调容许修配量不同的复合材料构件时, 这一过程需要反复进行, 这就导致装配效率较低, 并且装配质量难以保证。

本文以某型雷达罩装配为例, 其主要装配件为复合材料罩体与铝合金环框, 除了复合材料成型误差, 大尺寸复杂铝合金构件的成型效率也较低^[3], 为解决两者耦合产生的装配干涉, 首先利用空间扫描

收稿日期: 2023-10-29

第一作者简介: 王琦, 1991年出生, 工程师, 主要从事雷达罩机加装配工艺技术研究。E-mail: 18053134919@163.com

仪 MetraScan750 获取雷达罩罩体内型面与环框的实测点云数据并利用 T-Probe 测量雷达罩装配端面、左右对称线、对称线中点三个设计基准;然后依据设计基准点坐标求解装配端面方程和装配对称线方程,依此为基础求得使罩体与环框处于装配位置的刚性变换矩阵;再然后对装配区域点云数据进行等距分割及边界特征提取,通过计算两者边界的距离,求得该截面上罩体与环框装配干涉与间隙分布情况,完成三维装配干涉与间隙计算到二维曲线间距计算的转换,在降低计算难度的同时,提高了计算效率与计算准确率;最后将装配干涉与间隙分布情况可视化并通过实验加以验证,流程如图 1 所示。

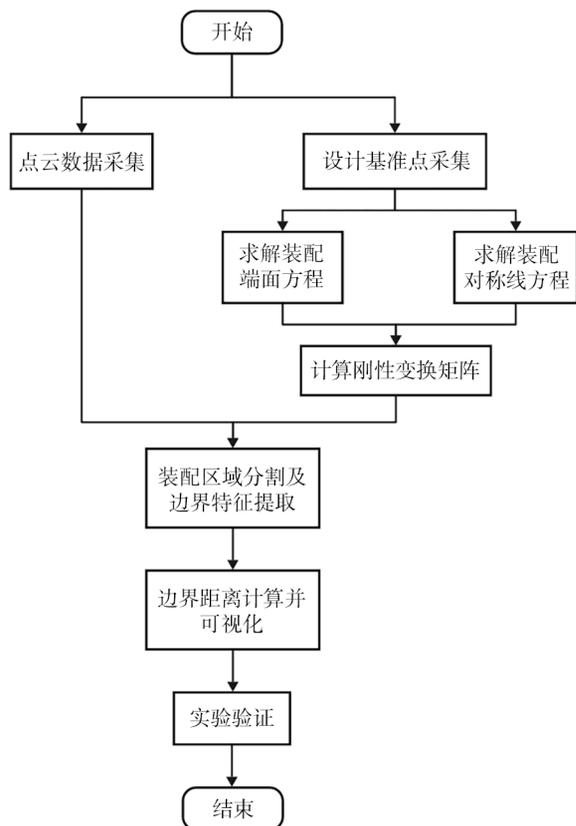


图 1 本文方法流程图

Fig. 1 Flowchart of the methodology of this article

影响本文所提方法计算精度的最大因素为装配区域边界特征的提取精度。当前,点云边界提取算法主要分为微切平面法、三角网格法、划分栅格法和凸包类算法等。微切平面法提取点云边界是先规定一个判别准则,再将可能的边界点及其近邻点投影至微切平面上,最后依次进行边界点的判别。SUN 等人^[4]以各投影点之间的夹角为判别依据,对超过所设阈值的点进行剔除,剩余点即为边界点。与之相似的,CHEN 等人^[5]将微切平面上点之间距离抽象为点与点之间的拉力矢量,并以其合力矢量为边界点判断依据。基于微切平面的方法需要对所有数据点进行投影、判断,在数据量较大的情况下,难以保证

效率。同样,基于三角网格的方法,陈相等人^[6]通过先在点云数据中构建三角网格,设定边长阈值,遍历所有三角形,依据边长判别边界点。林松等人^[7]也利用三角网格进行边界提取,但是这两种方法在庞大数据量下表现均不佳。KE 等人^[8]基于栅格法进行边界提取,虽然计算效率高,但精度较低,且在面对密度不均的点云数据时表现不稳定。凸包类算法中 alphashapes^[9-10]最为经典,这一类算法较为适用于二维点云数据的处理,在三维点云数据中表现均不佳。

吴俊河^[11]等人提出一种层次化的边界提取方法,其主要分为粗提取与精提取两步,首先计算点云数据中各数据点邻域重心与采样点之间的距离,且易知边界点的近邻点应大致集中在邻域的一侧,即边界点邻域重心相较于非边界点距离采样点应更远,因此,以采样点与重心点距离为依据可对点云数据进行粗提取,再使用 SUN 提出剔除投影点夹角超过阈值的方法进行精提取,该方法一定程度上提高了点云边界的提取效率,但是该方法受点云数据密度和邻域半径的影响较大。针对该问题,本文提出一种自适应的层次化点云边界提取方法,以一定的规则计算点云数据的平均密度,并根据平均密度设定邻域半径,提高该算法的自适应性。

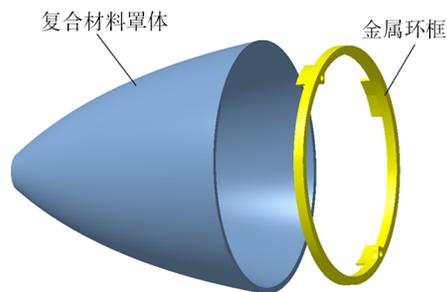


图 2 雷达罩罩体与环框示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the radome body and the ring frame

1 雷达罩环框及装配区域罩体点云数据获取

根据所测零件的结构以及测量场景,采用光学空间扫描仪 MetraScan750 作为数据获取设备,实物如图 3 所示。

由于所测零件体积较大,为避免因遮挡而造成



图 3 MetraScan750 实物图

Fig. 3 Actual image of MetraScan750

数据残缺的情况,首先需要围绕所测零件建立测量场。测量场的建立不仅提高了测量的便利性,还使得所测数据均处于同一坐标系下,一定程度上提高了数据处理的效率。

在建立测量场的过程中,最重要的就是目标点与编码点的贴放,首先目标点与编码点数量要充足,乱序排布;其次利用辅助设备对排布完成的目标点和编码点进行记录,并且将记录数据录入系统中,经过软件的空间位置计算,最终完成整个测量场的建立。

完成测量场建立后,利用空间扫描系统对自由状态下的环框及装配工装上的罩体进行测量,并利用T-Probe分别对环框与罩体的对称线上的基准点以及环框上的拼缝线外侧点进行测量,如图4所示,最终测得数据如图5所示。测得基准点具体坐标信息如表1所示。

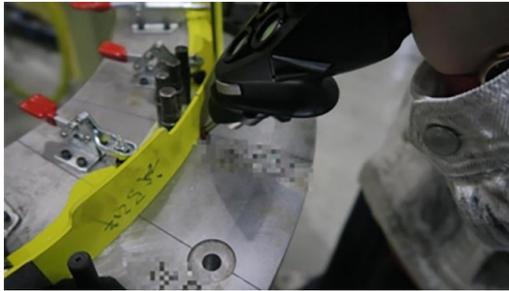


图4 T-Probe测量基准点

Fig. 4 Measure fiducials using the T-Probe

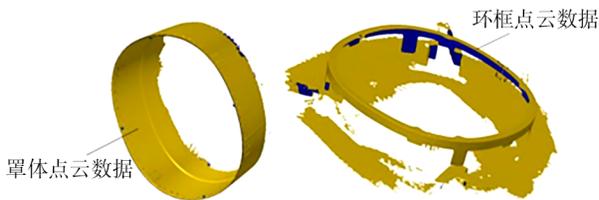


图5 罩体与环框实测数据

Fig. 5 Measured data of the radome body and ring frame

表1 T-Probe测量基准点坐标

Tab. 1 Coordinates of the datum point measured by T-Probe

测量基准点	X	Y	Z
罩体上对称点1	-0.065	395.353	31.230
罩体下对称点2	0.064	-381.364	28.736
罩体左侧基准点	446.490	0.054	23.329
罩体右侧基准点	-446.814	1.674	36.880
环框对称点1	0.533	1411.507	389.554
环框对称点2	-0.217	1416.265	-391.201
环框拼缝点1	443.362	1434.202	-147.153
环框拼缝点2	-352.453	1418.337	68.970
环框拼缝点3	-356.808	1456.777	-454.464

2 基于雷达罩设计基准的点云定位

在雷达罩设计过程中,为雷达罩与机身高质量对接,罩体与环框的装配完成后的端面齐平,两者对称线相重合,且在理论情况下,对称线上的中点也应重合。因此,为保证后续装配干涉计算的准确性,本文以雷达罩面、线、点三个设计基准对实测罩体内面与环框外型面点云数据进行装配定位。

2.1 采用改进的RANSAC算法拟合点云数据

在平面拟合中,常用的方法有最小二乘法与特征值法,其对拟合过程中存在的噪声点做了考虑,但无法对噪声点进行删除,并且在数据量较大的情况下,难以取得理想的拟合效果。

RANSAC(随机抽样一致性)算法,由Fischler和Bolles在1981年提出^[12]。它可以从一组既包含正确数据与错误数据的数据集中,通过一定程度的迭代估计出一个数学模型及其参数,但这一结果可能是合理的,因此该算法具有一定的不确定性,条件允许下,可通过增加迭代次数来提高估计结果的合理性。RANSAC算法在使用较少原始数据的情况下,利用一致性数据集来扩大数据集,本质上是寻找一个合适的模型来拟合数据。

在实测点云数据密度一致的情况下,雷达罩外形类似锥体,即装配端面所包含的点应最多,并且充分考虑数据中可能包含的噪声点,基于特征值法对RANSAC进行改进,为保证所拟合的装配端面的准确性,通过辅助标定,明确雷达罩中轴线矢量方向,并将其设置为所拟合平面的法线方向,具体程序设计思路如下:

(1)在实测点云中选取环框上测得的拼缝点 $p_1(x_1, y_1, z_1)$ 、 $p_2(x_2, y_2, z_2)$ 和 $p_3(x_3, y_3, z_3)$,通过式(1)建立其形如 $Ax + By + Cz + D = 0$ 的平面方程,然后通过式(2)计算任一点 $p'(x', y', z')$ 到该平面的距离;

$$A = y_1(z_2 - z_3) + y_2(z_3 - z_1)$$

$$B = z_1(x_2 - x_3) + z_2(x_3 - x_1) + z_3(x_1 - x_2)$$

$$C = x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1) + x_3(y_1 - y_2)$$

$$D = -x_1(y_2z_3 - y_3z_2) - x_2(y_3z_1 - y_1z_3) - x_3(y_1z_2 - y_2z_1) \quad (1)$$

$$d' = \frac{|Ax' + By' + Cz' + D|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \quad (2)$$

(2)设置距离阈值 t ,如果 $d' \leq t$,则该点为内点,统计拟合所得平面的内点个数 N ;

(3)根据特征值算法以最多的内点重新进行平面拟合,得到最终的拟合平面方程。

在内点判断时,过大的阈值会将不属于该平面的点误判为内点,反之,则会忽略掉应计入的内点,因此,距离阈值的选择应有合适的准则。本文将根据雷达罩装配工艺规范,选择合适的距离阈值。

在数据量较大的情况下,遍历所有的数据点所消耗的计算资源较多,可通过以下几种方式提高计算效率:

(1)为避免无效计算,在同一拟合方向上出现一定次数的拟合平面内点逐渐减少的现象,即判定其为端面远离方向,并向反方向进行拟合;

(2)根据装配要求,设置合适的拟合步长,从而减少拟合次数。

2.2 基于刚性变换的罩体与环框定位

利用测得对称线上的点可求解对称线在空间的直线方程。空间中直线方程的求解有3种方式,分别为两平面相交、点与直线方向及两点坐标求解,其求解公式如下:

(1)一般方程

$$\begin{cases} a_1x + b_1y + c_1z + d_1 = 0 \\ a_2x + b_2y + c_2z + d_2 = 0 \end{cases} \quad (3)$$

(2)点向式

$$\frac{x - x_0}{a} = \frac{y - y_0}{b} = \frac{z - z_0}{c} \quad (4)$$

(3)两点式

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{z - z_1}{z_2 - z_1} \quad (5)$$

在分别获取雷达罩罩体与环框的装配端面及对称线方程后,为使得罩体与环框依照装配关系进行定位,需对点云数据进行刚性变换,即计算使装配端面与对称线相重合的转换矩阵。

求解原理如下:首先,计算得到拟合平面的法向量,以罩体拟合得到的平面法向量为参考向量,通过两个向量点乘求解得两向量之间的夹角 θ ;然后通过两向量叉乘得到一个同时垂直于两个向量的新向量 α ,再然后以向量 α 为旋转轴,将环框拟合得到的平面旋转 θ 角,即可使得两个平面相平行;最后,计算两个平面之间的距离,并沿着法向量方向进行平移,使得两拟合平面相重合,即雷达罩罩体与环框装配端面齐平。同理对两条对称线及其上中点坐标进行刚性变换,使其在该平面上重合。

点云数据定位完成后,如图6所示。

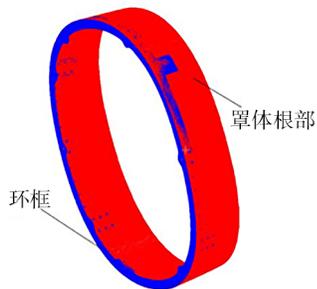


图6 点云数据完成装配定位后

Fig. 6 Point cloud data post assembly positioning

3 配合区域的边界特征提取

在完成装配定位后,对雷达罩罩体与环框的点云数据沿着中轴线进行等距分割,并依次对点云边界特征进行提取。当前常用的点云边界特征提取算法无法在大数据量的情况下兼顾计算效率与点云边界特征提取精度。考虑实测雷达罩点云数据量较大,针对上述算法存在的问题,采用一种层次化点云边界特征提取算法^[11]。

点云边界所包含的点云数量只占整个点云数据的一小部分,在判断边界点时遍历所有点就使得算法效率较低,因此,可以对初始数据进行粗略筛选,以获取粗边界特征点集,再在该点集中数据遍历进行精提取,从而在避免了海量数据带来的繁重计算的同时,保证了提取的点云边界特征的准确度。

本文采用的点云边界特征提取算法大致上分为粗提取和精提取两步。对于边界点,其 R 邻域内的点大体上都分布在空间的同一侧,而非边界点的近邻点相对均匀,因此边界点 R 邻域的采样点与邻域重心的距离总体上应大于非边界点,如图7所示。依据边界点与非边界点的 R 邻域中采样点与重心之间距离的差异性,对实测点云数据边界点集进行粗提取。

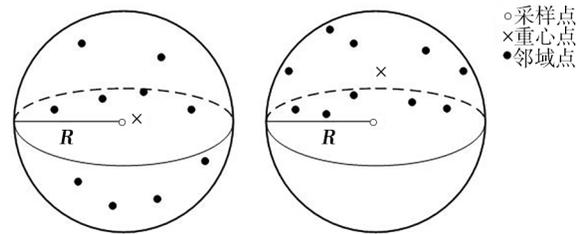


图7 非边界点与边界点邻域重心点与采样点位置示意图

Fig. 7 Location of the center of gravity point and the sampling point in the neighborhood of non-boundary points and boundary points is indicated

3.1 配合区域的边界粗提取

在处理海量数据的情况下,点云密度分布不均往往会对计算效率产生较大的影响,为减小点云密度不均所带来的影响,进一步增强算法的自适应能力,可通过设定一定的规则来选取邻域半径 r 的值^[13]。为提高点云处理效率,本文首先在点云数据中构建KD-Tree,以便快速检索相应的点;其次,计算每个点 p_i 与其最近 K 个点的平均距离 \bar{d}_{ik} ;然后,计算 \bar{d}_{ik} 的平均值,即得点云数据的平均距离 d ;最后,根据公式(6)计算出 \bar{d}_{ik} 的标准差 σ ,其中 \bar{d}_{ik} 与 σ 为高斯分布。设定邻域半径 $r = d + \lambda \cdot \sigma$,一般情况下,认为5%为小概率事件,但考虑点云数据量较大,取 $\lambda = 1.96$ 。

$$\sigma = \frac{1}{n-1} \sqrt{\sum_{i=1}^n (\bar{d}_{ik} - d)^2} \quad (6)$$

粗提取的程序设计思路具体如下:

(1) 构建 KD-Tree, 以便在大量数据下快速检索采样点的邻域点集, 计算每个数据点平均距离 \bar{d}_{ik} 、点云平均距离 d 及标准差 σ , 求得邻域半径 r ;

(2) 通过 KD-Tree 对数据集中各点的 R 邻域进行快速查找, 并根据式(7)计算各邻域点集的重心坐标,

$$C(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}) = \left(\frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}, \frac{\sum_{i=1}^n z_i}{n} \right) \quad (7)$$

式中, n 为邻域内点的个数;

(3) 计算采样点与重心点的距离 D , 并设定距离阈值 δ , 如果 $D \geq \delta$, 则该采样点被判断为边界点, 同时将其存入边界点集;

(4) 重复(2)(3)步骤, 遍历点云数据所有点, 完成点云边界特征的粗提取, 获得粗提取边界点集。

如图8所示为粗提取边界点结果图, 可知经粗提取所得点集包含点云边界点、少量噪声点与边缘内部点。可见, 该方法进行粗提取可去除大部分非边界点, 大大减少了后续边界点精提取的计算量。

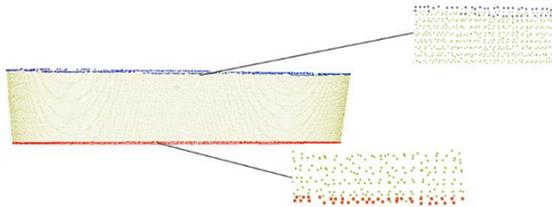


图8 粗提取边界点集

Fig. 8 Coarsely extracted set of boundary points

3.2 配合区域的边界精提取

粗提取所得的点集中不仅包含边界点, 还存在少量靠近边界的非边界点, 因此, 为筛除这些非边界点, 本文采用 SUN 等人^[4]提出的限制投影点最大夹角的方法能够对粗提取的边界点进一步精简。总体思路如下: 首先, 利用最小二乘法拟合微切平面并将采样点及其邻近点投影到微切平面上如图9所示; 其

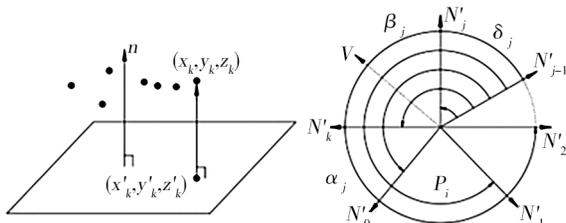


图9 点集到微切平面投影(左)相邻向量夹角计算示意图(右)

Fig. 9 Point-set-to-microtangent planar projection (left) schematic diagram of the calculation of the angle between adjacent vectors (right)

次, 计算采样点与其邻近点连线所构成夹角的最大值 ε_{\max} 并设置角度阈值 τ ; 最后, 若 $\varepsilon_{\max} \geq \tau$, 则认为该点为边界点并将其存入边界点集。

其中, 粗提取边界点集为 $X = \{(x_i, y_i, z_i) | i = 0, 1, \dots, k\}$, 其投影点集为 X' , 计算其中一向量 $P'_i N'_{j-1}$ 与该微切平面法向量的外积 ν , 且将 $P'_i N'_{j-1}$ 和 ν 与其他向量之间的夹角分别为 α_j, β_j 。

投影点几何分布特征分析流程如图10所示。

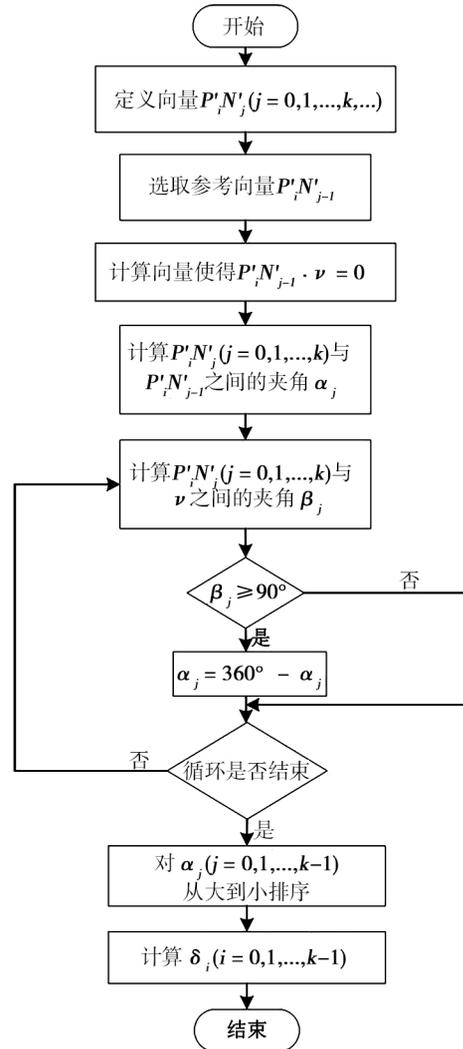


图10 投影点几何分布特征分析流程

Fig. 10 Flow chart of the analysis of the geometric distribution characteristics of the projected points

3.3 雷达罩协调装配误差分析

以同一密度的环框测量数据为例子, 分别运用文献[4]、文献[14]中的算法及本文算法进行边界提取处理, 结果如图11所示。

文献[4]中的提取算法效果如图11(b)所示。本文中算法的粗提取中计算得 $R = 1.25$ mm, 粗提取效果如图11(c)所示, 精提取的角度阈值设为 90° , 最终提取结果如图11(d)所示。文献[14]中的提取算法

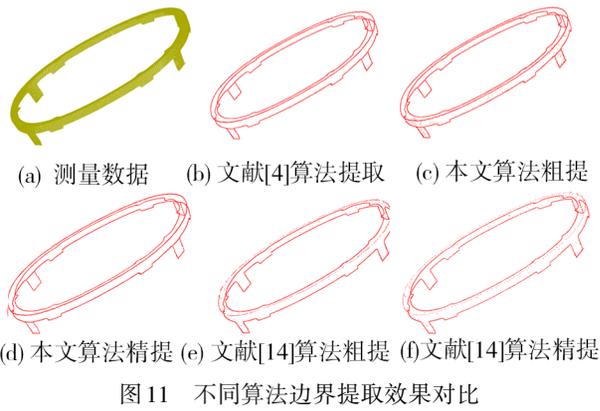


图 11 不同算法边界提取效果对比
Fig. 11 Comparison of boundary extraction effects of different algorithms

也是采用先粗后精的提取步骤,其效果如图 11(e)(f)所示。由实验结果可知,本文的算法效果相较于文献[14]中的更能获得完整的边界点集,验证了本文算法的可行性。

表 2 对 3 种算法的结果进行了对比,文献[4]中的算法无需进行粗提取,直接对测得数据进行精提取,能够得到较为精确的边界点集,但计算用时较长;文献[14]中算法的粗提取所得边界点数量多于本文算法的粗提取所得,但精提取点数却少于本文算法所得,可知本文粗提取所得边界点集精度更高,从而降低了精提取步骤中的计算量,提取时间减少了 22.90%。本文算法的计算总时间对比文献[4]减少了 28.36%,相较于文献[14]减少了 22.22%。

表 2 不同边界提取算法计算效率对比
Tab. 2 Comparison of the computational efficiency of different boundary extraction algorithms

提取方法	粗提取点数	时间/s	精提取点数	时间/s	总时间/s
文献[4]	0	0	1763	136.73	136.73
文献[14]	2272	112.29	1306	13.67	125.96
本文	1963	87.42	1428	10.54	97.96

本文与文献[14]中的精提取方法与文献[4]中的方法相同,并且该方法能够准确有效地从实测数据中提取出边界点集,因此,可以假定文献[4]中算法提取所得为准确且完整的边界点集,通过将本文算法所得及文献[14]中算法所得边界点集与之进行同名点检索,若存在这样的点,则标记为正确边界点,反之,则标记为错误边界点。根据表 3 中正确边界点所占比例以及算法计算时间,本文算法相较于文献[14]中的算法,计算效率更高,提取边界更为准确,如表 3 所示。

图 12(a)(b)(c)分别为本文算法在处理不同密度点云时的效果,图 12(d)(e)(f)分别为非自适应算法处理不同密度点云时的效果。针对不同密度的点

云数据的边界提取,本文算法相较于不改变搜索邻域半径的方法,具有更高的稳定性。

表 3 不同边界提取算法正确率对比
Tab. 3 Comparison of the accuracy of different boundary extraction algorithms

提取方法	总时长/s	用时占比/%	边界点数	正确点数	正确率/%
文献[4]	136.73	100	1763	1763	100
文献[14]	125.96	92.12	1306	1288	73.06
本文	97.96	71.74	1428	1402	79.52

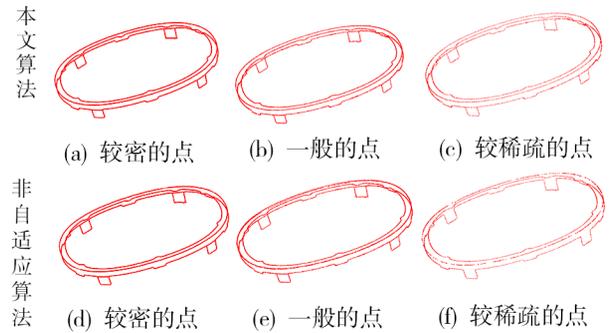


图 12 不同点云密度算法稳定性对比

Fig. 12 Comparison of the stability of different point cloud density algorithms

4 雷达罩装配干涉与间隙计算及验证

在获取雷达罩罩体与环框装配区域的边界点云后,为进一步计算出装配干涉与间隙的大小与位置分布,提出一种基于矢量的干涉与间隙计算方法。根据雷达罩中轴线所在位置,在获取的边界点云所在面选取一点 O ,以 O 点为射点, X 轴正方向为初始方向,构建一条射线,分别与环框、罩体边界点云交于点 A 、 B ,构建矢量 AO 与 AB ,将两个向量进行点乘,若两个向量同向,则点乘之积大于 0,即为干涉;若两个向量反向,则点乘之积小于 0,即为间隙。完成一次计算后,以 O 点为旋转点,旋转步长为 0.1° ,旋转射线 360° ,具体值即为 A 、 B 点之间的距离,最终完成装配边界的干涉与间隙的计算。上述两种情况的简化示意如图 13 所示。

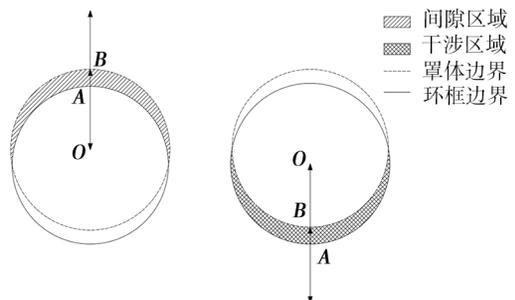


图 13 干涉与间隙计算方法简化示意

Fig. 13 Simplified schematic diagram of the interference and clearance calculation method

4.1 雷达罩装配干涉与间隙的单次提取

用上述方法对单次提取边界进行装配干涉与间隙计算,并将其可视化,如图14所示。

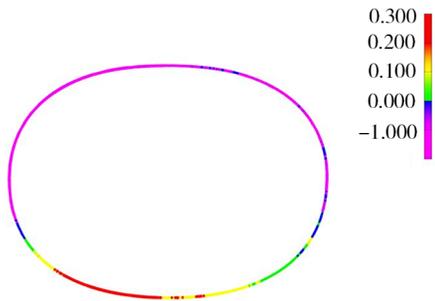


图14 单次提取边界上装配干涉与间隙分布情况示意
Fig. 14 Schematic representation of assembly interference and gap distribution on a single extraction boundary

当以X轴为初始计算方向,逆时针为计算顺序,则图14中具体干涉与间隙值如图15所示,其中正值为干涉,负值为间隙。

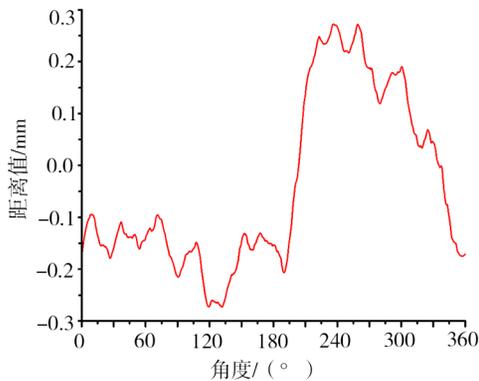


图15 一次截取边界上干涉与间隙值
Fig. 15 Intercept the interference and clearance values on the boundary at a time

4.2 雷达罩装配干涉与间隙的多次提取

雷达罩装配区域为带状圆环,为进一步计算出环框在装配过程中与罩体的干涉与间隙在空间中的具体分布情况,以雷达罩装配端面为起始面,沿着雷达罩中轴线向雷达罩尖端,以一定步长进行等距分割,再依此对所得平面进行边界提取及干涉、间隙计算,具体分割示意图如图16所示。

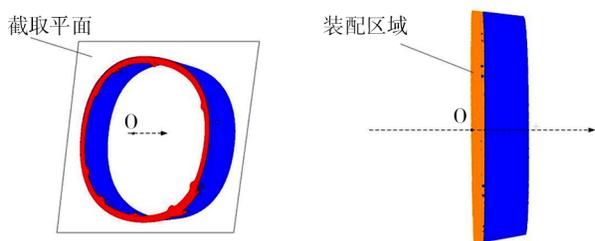
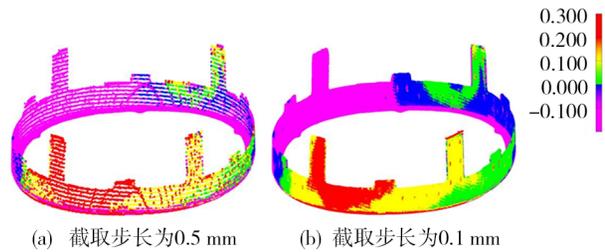


图16 空间分割示意

Fig. 16 Schematic representation of the division of space

当截取步长分别为0.5、0.1 mm时,所得整个装配区域装配干涉与间隙分布如图17所示。



(a) 截取步长为0.5 mm (b) 截取步长为0.1 mm

图17 不同截取步长干涉与间隙分布彩图

Fig. 17 Color map of interference and gap distribution with different interception step sizes

4.3 雷达罩修整加工与装配

以上述结果为修配指导,对钣金环框进行修配,如图18所示。



图18 干涉区域局部去除示意

Fig. 18 Schematic illustration of local removal of the interference area

干涉去除后,利用本文提出的方法,对修配后的环框再次进行扫描、数据处理及计算,结果如图19所示。

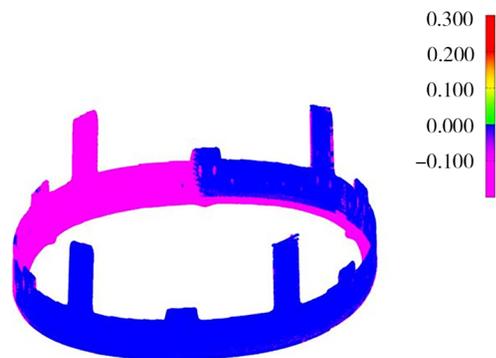


图19 修配后装配干涉与间隙分布彩图

Fig. 19 Coloring map of assembly interference and gap distribution after repair

从实验结果看,以本文所提方法的计算结果为指导,去除干涉后的雷达罩环框与罩体已不存在装配干涉,并且与传统协调修配方式相比,时间上大大缩短,如表4所示。

表4 传统协调修配方法与本文方法时间对比
(多次试验平均时长)

Tab. 4 Comparison of the time of the traditional coordinated repair method and the method in this paper (average duration of multiple trials) s

方法	比对	点云采集	计算	修配	总时长
传统	1325			672	1997
本文		134	69	693	896

5 结论

本文针对复合材料构件装配干涉问题,以三维点云为手段,提出一种三维转二维的干涉计算方法,并对受点云密度影响较大的边界提取算法做了自适应改进。以某型飞机雷达罩装配为例,通过与多种算法对比以及多次实验结果分析,最终验证了本文方法的可行性。本文所提出的方法在各类结构件协调修配装配方面均具有一定的参考价值。

参考文献

[1] 杜娟. 飞机装配不协调问题的原因分析及解决方法[J]. 中国高新技术企业, 2011(21):114-116.

DU Juan. Analysis of the causes and solutions of aircraft assembly uncoordinated problems [J]. China High-Tech Enterprises, 2011(21):114-116.

[2] 叶梯, 曾昭炜, 马铭泽. 褶皱对碳纤维复合材料层合板压缩性能的影响[J]. 宇航材料工艺, 2022, 52(05):48-53.

YE Ti, ZENG Zhao Wei, MA Ming Ze. Effect of wrinkle on compression properties of carbon fiber composite laminates [J]. Aerospace Materials & Technology, 2022, 52(05):48-53.

[3] 蔡晶琦, 王悦, 陈桂才, 等. 高强铝合金热冲压冷模具复合成型[J]. 宇航材料工艺, 2014, 44(06):85-87+90.

CAI Jing Qi, WANG Yue, CHEN Gui Cai, et al. Hybrid forming of aluminum alloys [J]. Aerospace Materials & Technology, 2014, 44(06):85-87, 90.

[4] SUN Dianzhu. Automatic extraction of boundary characteristic from scattered data [J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology, 2008(08):82-84.

[5] CHEN Yiren, WANG Yibin, PENG Zhangjie. Improved algorithm for extraction of boundary characteristic point from scattered point cloud [J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(23):177-181.

[6] 陈相, 童小华. 基于三角格网的点云空洞修补算法及

精度研究[J]. 测绘通报, 2013(04):1-3.

CHEN Xiang, TONG Xiaohua. Research on points cloud hole filling algorithm and accuracy in triangle mesh [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2013(04):1-3.

[7] 林松, 田林亚, 毕继鑫, 等. 三维激光扫描数据的单木树冠体积精确计算[J]. 测绘科学, 2020, 45(08):115-122.

LIN Song, TIAN Lin Ya, BI Ji Xin, et al. Accurate calculation of single-tree crown volume based on 3D laser scanning data [J]. Science of Surveying and Mapping, 2020, 45(08):115-122.

[8] KE Y L, FAN Sh Q. Research on direct extraction of boundary from point clouds [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(9):116-120(in Chinese).

[9] 王宗越, 马洪超, 徐宏根, 等. 海量点云的边缘快速提取算法[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(36):213-215.

WANG Zong Yue, MA Hong Chao, XU Hong Gen, et al. Novel algorithm for fast extracting edges from massive point clouds [J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(36):213-215.

[10] HE Hua, LI Zongchun, LI Guojun, et al. Surface reconstruction for scattered point clouds with adaptive α -shape [J]. Journal of Computer Applications, 2016, 36(12):3394-3397, 3401.

[11] 吴俊河, 林松, 施向丰. 层次化点云边界快速精确提取方法研究[J]. 激光技术, 2021, 45(05):571-575.

WU Junhe, LIN Song, SHI Xiangfeng. Research on the method of rapid and accurate extraction of boundary points by hierarchy [J]. Laser Technology, 2021, 45(05):571-575.

[12] 戴金波. 基于视觉信息的图像特征提取算法研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2013.

DAI Jin Bo. Algorithms of image feature extraction based on visual information [D]. Jilin: Jilin University, 2013.

[13] 焦亚男. 基于双边滤波器的三维点云数据去噪算法研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2020.

JIAO Ya Nan. Research on 3D point cloud denoising algorithm based on bilateral filter [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2020.

[14] 蒋陈纯, 刘科, 舒敏. 点云边界快速精确提取算法[J]. 光电子·激光, 2020, 31(05):531-538.

JIANG Chenchun, LIU Ke, SHU Min. Algorithm for fast and accurate boundary points extraction [J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2020, 31(05):531-538.