

引文格式: 熊凡, 许燕玲, 王杏华, 等. 基于RANSAC和ICP点云优化算法的机器人相贯线免示教自主焊接方法[J]. 航空制造技术, 2025, 68(20): 100–108.

XIONG Fan, XU Yanling, WANG Xinghua, et al. Teaching-free welding method for intersecting lines based on RANSAC and ICP point cloud optimization algorithm[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(20): 100–108.

基于RANSAC和ICP点云优化算法的机器人相贯线 免示教自主焊接方法*

熊凡¹, 许燕玲^{1,2}, 王杏华³, 马晓阳³, 王强¹, 张华军^{1,2}

(1. 上海交通大学材料科学与工程学院机器人焊接智能化实验室, 上海 200240;

2. 上海交通大学内蒙古研究院, 呼和浩特 010010;

3. 洛阳船舶材料研究所, 洛阳 471000)

[摘要] 针对航空航天领域中空间曲线焊缝示教再现型机器人焊接效率较低的问题, 尤其是复杂的相贯线焊接, 提出了一种基于优化后的RANSAC和ICP点云算法的相贯线机器人免示教自主焊接方法。首先基于相贯线理论模型, 对采集到的工件点云进行预处理, 并采用优化后的RANSAC算法, 选取一定数量的点作为样本点拟合曲面, 计算所有数据点到柱面的距离, 根据预设阈值筛选出落在拟合曲面上的点, 通过筛选出的点重新拟合出实际的圆柱面方程。然后通过ICP算法, 迭代寻找两个点云之间的最近点对, 计算最优的刚性变换, 使源点云在目标点云的坐标系下对齐。最后试验验证了所提出的基于优化后的RANSAC和ICP点云优化算法, 实现复杂空间曲线的机器人免示教自主焊接。

关键词: 机器人焊接; 自动编程; 视觉传感; 空间曲线焊缝; 相贯线焊接

中图分类号: V261.3+4; TP242

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.20.100

Teaching-Free Welding Method for Intersecting Lines Based on RANSAC and ICP Point Cloud Optimization Algorithm

XIONG Fan¹, XU Yanling^{1,2}, WANG Xinghua³, MA Xiaoyang³, WANG Qiang¹, ZHANG Huajun^{1,2}

(1. Intelligentized Robotic Welding Technology Laboratory, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Inner Mongolia Research Institute, Shanghai Jiao Tong University, Hohhot 010010, China;

3. Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471000, China)

[ABSTRACT] In response to the challenges about the low efficiency of welding in the aerospace field, particularly the complex intersection line welding, this paper proposes a teaching-free autonomous welding method for robots based on an optimized RANSAC and ICP point cloud algorithm for intersecting lines. First, based on the intersecting line theoretical model, the point cloud data of the collected workpiece is preprocessed. The optimized RANSAC algorithm is then used to select a set number of points as sample points to fit a surface, calculating the distance from all data points to the cylinder. Points that fall on the fitted surface are selected according to a preset threshold, and a new cylindrical surface equation is fitted using the selected points. Next, the ICP algorithm iteratively searches for the closest point pairs between two point clouds, calculating the optimal rigid transformation to align the source point cloud with the target point cloud in the target coordinate system. Finally, experimental results validate the proposed teaching-free autonomous welding method for

* 基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61973213); 内蒙古自治区-上海交通大学科技合作重点专项(2023XYJG0001-01-01); 中央引导地方科技发展资金(2025ZY0092)。

complex spatial curves, using the optimized RANSAC and ICP point cloud optimization algorithms.

Keywords: Robotic welding; Automatic programming; Visual sensing; Space intersecting lines; Intersection line welding

在航空航天领域,航空导管间存在大量相交接头,形成各种规则的马鞍形相贯线焊缝。这些马鞍形焊缝属于空间曲线,焊接难度较大,严重依赖熟练焊工经验;但是人工效率较低,于是机器人焊接应运而生。传统的机器人焊接主要是示教再现型焊接,适用于重复性高、焊接工艺简单的直线焊缝、圆形焊缝工件^[1]。然而,对于空间曲线焊缝,尤其是空间相贯线的焊接,示教再现型机器人在实际焊接中调试时间过长,导致焊接效率低下,难以满足高效焊接的需求,因此机器人免示教自动焊接势在必行^[2]。为了解决传统机器人自动焊接时工件模型与实际工件的装配误差和位置偏差的问题,多种方法已得到广泛研究与应用。其中,基于视觉传感的技术和应用因能获取丰富的点云信息且精度较高,获得高度关注。

随着线激光、结构光等三维扫描技术的蓬勃发展,三维点云作为一种信息丰富、易于获取的新对象基元的表征,正逐渐被引入到各行业^[3-4],其应用涵盖航空、航天、船舶等领域大型复杂结构的机器人焊接等方面^[5-7]。基于二维(2D)图像处理的激光焊缝跟踪方法,因其在检测焊缝特征方面的高精度和鲁棒性而被接受^[8-9]。Li等^[10]采用线结构激光(LSL)视觉传感器,借助提出的多类型焊缝识别算法(IPEC)能够识别几种常见的焊缝,具有较好的抗飞溅和电弧噪声的能力,提高了焊缝识别的速度和鲁棒性。冯消冰等^[11]利用单激光传感器,开发了具有双向自动跟踪焊缝和焊枪定位功能的爬行机器人控制系统,成功确定了焊枪姿态和机器人末端位置。乔嘉拓^[12]设计了一种基于激光视觉传感的焊接机器人,开展了激光图像处理研究,完成了搭载激光视觉传感系统的焊接机器人的标定工作,实现了焊接机器人对不同环境和坡口的焊接点识别。

随着三维结构光视觉传感技术的发展,研究人员逐渐利用三维结构光视觉提取焊接路径。与激光焊缝跟踪方法相比,三维视觉方法可以避免激光扫描路径的复杂教学工作;同时能够感知全局环境,准确获取焊缝的三维信息^[3,13-15]。

葛吉民等^[16]提出了一种能使焊缝点云二次精简的方法,准确重构了焊缝三维形貌并提取出焊缝高度、中心线、宽度等特征信息,提高了算法的计算效率。方伟华^[17]基于3D视觉的工件位姿检测和焊缝拍摄位姿规划及基于3D视觉的焊缝检测,提出了一种融合点云非刚性配准和三维模型离线处理的智能焊接轨迹规划方

法,成功实现了未知三维模型的工件焊接。Wang等^[7]提出了一种自动建立管板密集点云模型并自动检测焊缝的新方法,采用词汇树算法对管片图像进行相似性分析,建立基于EPNP和PMVS算法的点云模型,提高点云算法的鲁棒性。

目前,基于点云的机器人免示教焊接技术多针对平面对接焊缝、搭接焊缝或角焊缝等简单的焊缝,而关于机器人自动焊接空间曲线复杂焊缝的研究尚少。为解决免示教焊接过程中工件模型不一致的问题,提出了一种基于优化后的RANSAC和ICP点云算法的空间曲线机器人焊接方法。该方法描述了相贯线的理论模型,对拍摄得到的工件点云进行预处理;采用RANSAC算法,随机选取一定数量的点云拟合模型,统计符合模型的点云数量,多次迭代之后,找到拟合最优的模型;通过迭代最近点(ICP)的方法求解两组点云之间的旋转矩阵 R 和平移向量 t ,使源点云在目标点云的坐标系下对齐;通过焊接试验,验证了所提方法的适应性与有效性。

1 试验系统和技术框架

1.1 试验系统

硬件系统平台如图1所示,主要包括以三维相机为核心的视觉系统和以机械臂为核心的焊接系统。三维视觉系统由工控机控制,三维相机采用“眼在手上”的方式安装在机器人的焊枪上。图2为具体的部件描述,其中所用的机器人为发那科M-10iD/8L六轴(负载8 kg),三维相机为西安知象Tracer P1。点云采集时,通过移动机器人各轴使相机到达拍摄点位置。

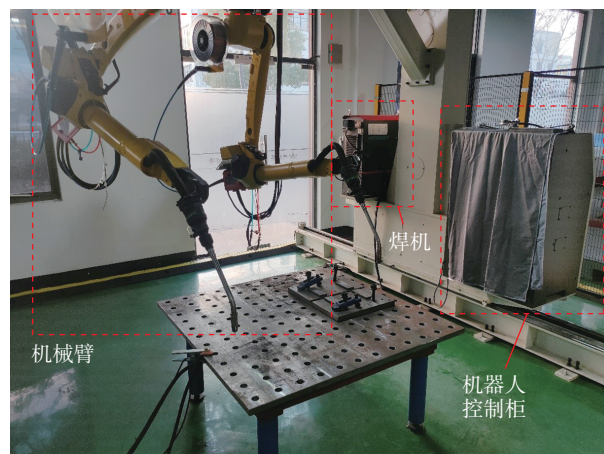


图1 硬件系统平台

Fig.1 Hardware system platform

1.2 技术框架

图3所示为试验方法技术框架。

(1)相贯线理论模型。计算出主管坐标系和支管坐标系之间的变化矩阵,进而推导出一般情况下相贯线的方程。分析支管角度偏差和位置偏差带来的误差影响,将3D视觉作为消除误差的方法。

(2)RANSAC算法处理。首先估算迭代阈值,然后随机选取一定数量的点云拟合模型,并统计符合模型的点云数量以完成迭代;当迭代的次数达到迭代阈值时,即可得到拟合后的局部最优模型。

(3)ICP算法处理。采用多尺度ICP算法,通过特征值分解SVD优化算法,可更快解出两组点云之间的旋转矩阵 R 和平移向量 t ,使源点云在目标点云的坐标系下对齐。

(4)焊接试验。选择合适的焊接工件和焊接参数,对单自由度的偏心相贯线和倾斜相贯线进行焊接,分析焊接后的试验结果以得到最终的结论。

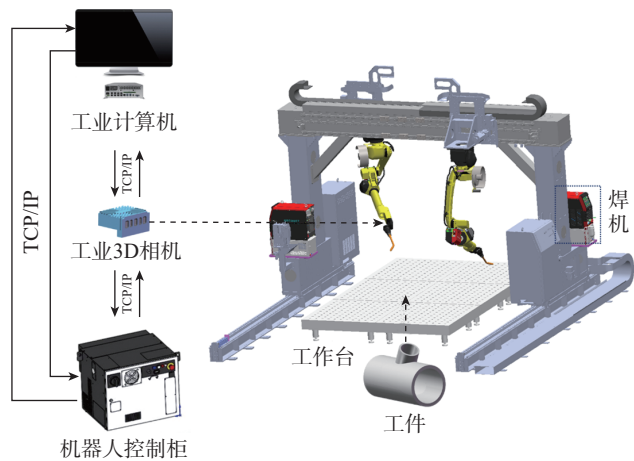


图2 硬件系统平台组成

Fig.2 Composition of hardware system platform

2 相贯线焊缝理论模型与误差分析

2.1 理论模型

工程中较为常见的是正交相贯线,但是在实际生产中由于装配需求或者工程需要,常出现偏心或者斜交这类较为特殊的相贯线。为了探究相贯线理论模型,给出一般情况下的相贯线,即在正交的基础上对支管进行倾斜和偏心。图4是复杂双管相贯模型,其中两根管道分别为主管和支管,主管的半径大于支管的半径,即 $R > r$ 。主管的坐标系为 $X_M Y_M Z_M (M)$,支管的坐标系为 $X_B Y_B Z_B (B)$,支管坐标系可以看作是主管坐标系在 Y_M 轴上平移 L 的距离和绕 Y_M 轴旋转 $(90^\circ - \beta)$ 的角度后得到的。根据坐标变换矩阵的相关定理,主管坐标系到支管坐标系的变换矩阵 ${}^B_M T(L, \beta)$ 公式为

$${}^B_M T(L, \beta) = \begin{bmatrix} \sin \beta & 0 & -\cos \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & L \\ \cos \beta & 0 & \sin \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

令主管和支管上的点分别为 ${}^M P = [{}^M P_x, {}^M P_y, {}^M P_z]$ 和 ${}^B P = [{}^B P_x, {}^B P_y, {}^B P_z]$, θ 是支管上的周角,它们在空间曲线上的点满足以下方程式的条件,即

$${}^M P, {}^B P: \begin{cases} {}^M P_y^2 + {}^M P_z^2 = R^2 \\ {}^B P_x^2 + {}^B P_y^2 = r^2 \\ {}^B P = {}^B_M T \times {}^M P \\ {}^B P_x = r \cos \theta \\ {}^B P_y = r \sin \theta \\ L < r < R \\ 0 < \beta < \frac{\pi}{2} \\ 0 < \theta < 2\pi \end{cases} \quad (2)$$

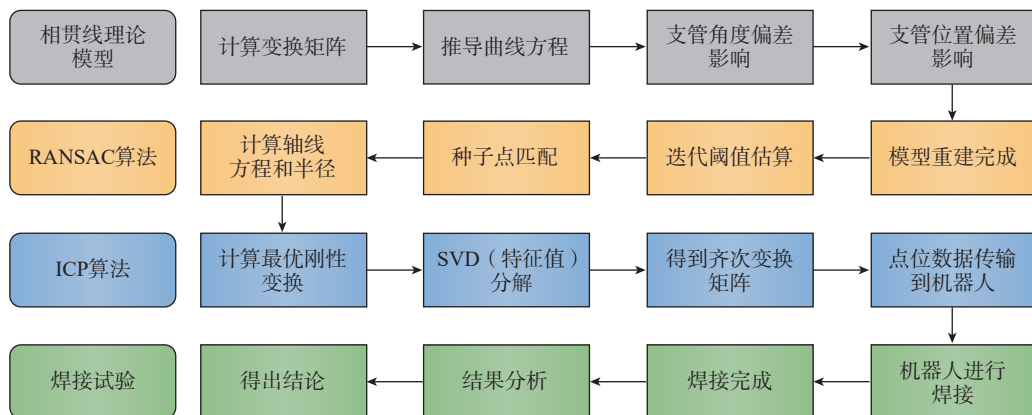


图3 试验方法框架

Fig.3 Experimental method framework

解出式(3),即

$${}^M P(R, r, \beta, \theta) : \begin{cases} M P_x = \frac{\sqrt{R^2 - (r \sin \theta + L)^2}}{\tan \beta} + \frac{r \cos \theta}{\sin \beta} \\ M P_y = r \sin \theta + L \\ M P_z = \sqrt{R^2 - (r \sin \theta + L)^2} \end{cases} \quad (3)$$

在实际生产中,受加工和装配误差影响,理论模型与实际模型会产生偏差,因此实际焊接的空间曲线并不是上述公式求解的完美曲线。这种偏差体现在相交曲线的位置、姿态和形状上,进而影响机器人最终的焊接路径。

2.2 误差分析

图5展示了支管角度偏差的影响。图5(a)是装配侧视图,实线是支管理论的位置,虚线是支管实际的位置,这两个位置之间的夹角为 θ 。图5(b)是将支管去掉后,保留主管的俯视图,主管中容纳支管孔的位置也有 θ 的角度偏差。

图6展示了支管位置偏差的影响。在主管完成后,由于支管中心的实际位置难以准确确定,只能进行简单

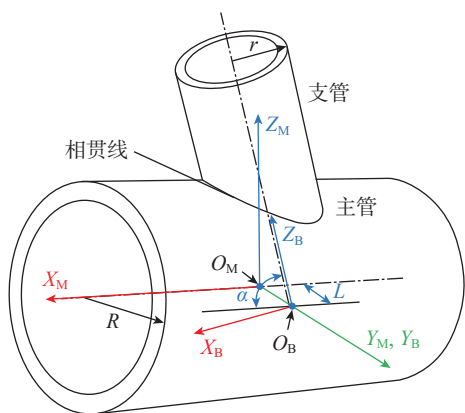


图4 非典型正交相贯模型
Fig.4 Atypical orthogonal intersecting model

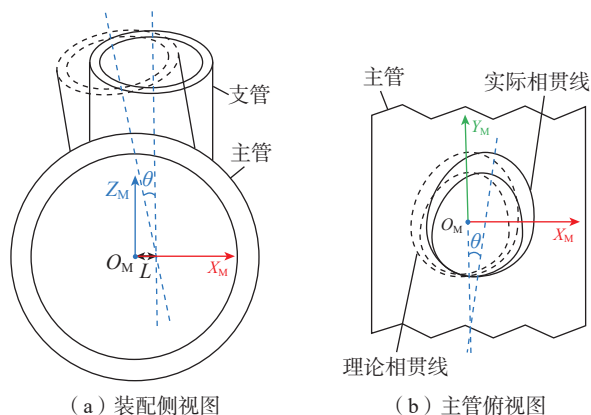


图5 支管角度偏差的影响
Fig.5 Influence of branch pipe angle deviation

的坐标测量,但这种方法不可避免地会产生一定的位置偏差,因此在加工孔的过程中,主管的 Y_M 轴方向不可避免地会产生大小为 H 的加工误差。图6中虚线为理论相贯线位置,实线为实际相贯线位置,两个位置之间的坐标误差为 H ,支管 y 坐标的偏移会使相交曲线在主管表面沿 Y_M 轴方向“移动”,但不会改变相交曲线的形状。

以上两种情况具体偏差的大小取决于系统的精度要求及工作环境,但通常焊接机器人的重复定位精度控制在1.0~2.0 mm,而相贯线焊接要求较高的精度,需要精度控制在0.5~1.0 mm。鉴于模型与实际工件存在误差,采用三维视觉创建工件实际点云的方式消除加工和装配误差。

3 算法优化和路径姿态规划描述

3.1 优化后的 RANSAC 算法曲面拟合算法

RANSAC (Random sample consensus) 算法是一种用于估计数学模型参数的鲁棒方法,尤其适用于存在大量噪声的数据中。该算法的基本思想是从现有的点云数据集中随机选择一个可能的子集,拟合一个模型,并将其与期望的模型进行比较,以识别一个拟合效果较好的子集。当数据集包含许多异常值和噪声点时,该算法特别有用,因为它通过随机抽样来拟合模型。在点云拼接完成后,为了得到更加完整的工件信息,需要利用 RANSAC 算法识别主管和支管的轴线。

但是存在两个工件相贯的情况,并且特征面是曲面,因此需要对已有的 RANSAC 算法进行优化。首先采用 RANSAC 平面拟合算法从点云中提取一个平面,对于剩余外点,继续循环 RANSAC 平面拟合算法以提取平面,直到提取出所有的平面,循环过程中需注意循环停止条件的设置。采用 RANSAC 方法剔除错误的匹配点后得到一系列的正确匹配点,但是用此方法得到的是稀疏的匹配点,此方法在处理较高精度的曲面图像时有一定局限性。因此,常采用相对稀疏的匹配点来求取相关参数,再通过稠密匹配点对已标定图像完成三维重构。本研究采用 Quasi 稠密匹配,可完成模型表面的三

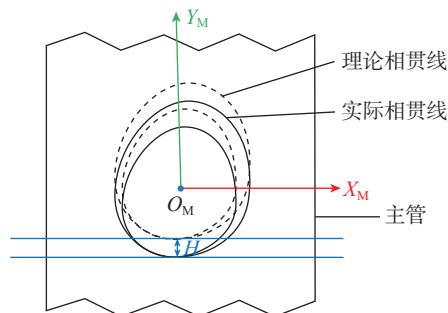


图6 支管位置偏差的影响
Fig.6 Influence of branch pipe position deviation

维重构,并获得像素级的匹配结果。具体的 Quasi 稠密匹配算法的步骤为:

(1) 利用离散的稀疏匹配点,通过对极约束的方法筛选初始匹配种子点;

(2) 采用 RANSAC 方法选取正确的匹配点作为种子点;

(3) 种子点需要满足一定的阈值,将不满足阈值的点从种子列表中剔除;

(4) 剔除完不符合要求的种子点之后,重新寻找新的匹配点,并将其加入种子列表;

(5) 计算各种种子点间的匹配关系,按上述流程持续循环完成;

(6) 当种子列表中的种子点数为 0 时,完成此循环。其中,迭代阈值可以估算出来:假设内点在数据中的占比为 p ,那么每次计算模型使用 k 个点的情况下,选取点为内点的概率为 p^k ,选取点为外点的概率为 $1-p^k$,因此尝试 S 次失败的概率为

$$1-p=(1-p^k)^S \quad (4)$$

通过式(4),得到最终需要尝试的次数 S 为

$$S = \frac{\lg(1-p)}{\lg(1-p^k)} \quad (5)$$

但通常无法预知内点在数据中的占比 p 这个先验,因此可采用自适应迭代次数的方法,即初始设定一个无穷大的迭代次数,然后每次更新模型参数估计时,用当前的内点比值当成 p 来估算迭代次数;又或者设置一个最大的迭代数,但该方法往往难以获得最优解。

图 7 所示为预处理后点云图及主管和支管的轴线拟合图。其中,支管 1 轴的方程为 $\frac{x-0.75334}{-0.24537} = \frac{y+3.22466}{0.67855} = \frac{z-3.40578}{0.52766}$,半径为 24.998 mm;支管 2 轴

的方程为 $\frac{x-0.59856}{-0.74356} = \frac{y+8.2456}{0.23522} = \frac{z-8.49781}{0.78232}$,半径为

24.996 mm;主管轴的方程为 $\frac{x-0.91223}{0.0074389} = \frac{y+2.3434}{0.99877} =$

$\frac{z-0.24655}{0.0035223}$,半径为 50.001 mm。试验结果表明,相较于传统的 RANSAC 算法,采用 Quasi 稠密匹配优化后的

迭代次数 S 减少了约 30%,点云匹配时间提高了 25%,这一改进有效提升了算法在复杂焊接环境下的适应性和稳定性。

3.2 优化后的 ICP 算法点云匹配

ICP 算法是一种用于刚性点云配准的经典算法,其核心思想是通过迭代地寻找两个点云之间的最近点对,并计算最优的刚性变换(包括旋转和平移),使源点云在目标点云的坐标系下对齐。ICP 算法中有两个关键问题:初值的选取和对应点的确定。初值的选取直接影响最后的匹配结果,如果选取不当,算法就有可能达到局部最小,造成迭代不能正确收敛;而对应点的确定方法则在较大程度上影响了迭代速度和配准精度,算法的大部分时间都花费在寻找点对的对应关系上,对应点的准确性则影响最终所得到的配准精度和算法的稳健性。因此采用多尺度 ICP,通过从粗到精的多尺度策略,提高算法的全局收敛性与运行效率,减小异常值对拟合的影响。

假设,通过相机拍摄得到了第一组点云 $P=\{P_1, P_2, P_3, \dots, P_n\}$,相机经过位姿变换(旋转加平移)后又拍摄了第二组点云 $Q=\{Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n\}$ 。这里的 P 和 Q 的坐标分别对应移动前和移动后的坐标系(即坐标原点始终为相机光心,这里有移动前、移动后两个坐标系),并且通过相关算法筛选和调整了点云存储的顺序,使得 P 和 Q 中的点一一对应。

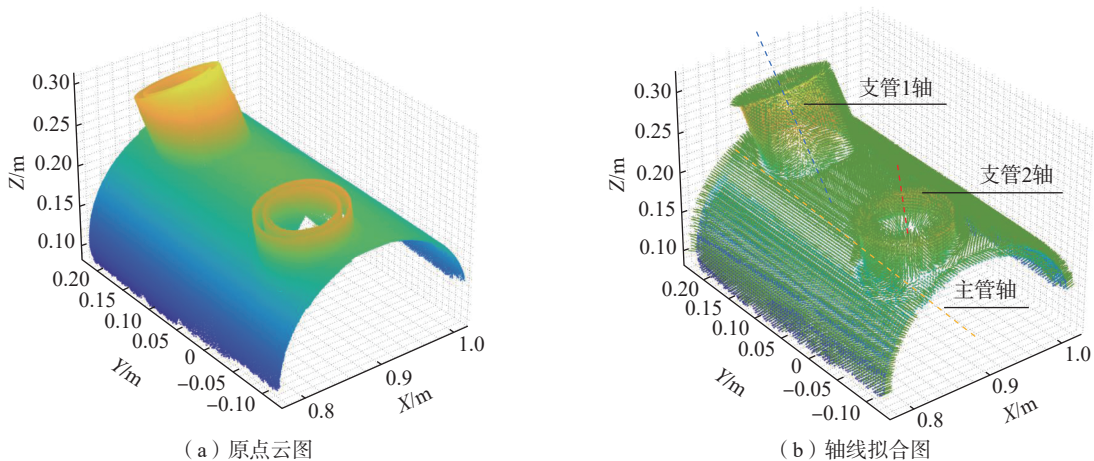


图 7 主管、支管的轴线拟合图

Fig.7 Axis fitting map of main pipe and branch pipe

现在需要解决的问题是：计算相机的旋转 R 和平移 t ，在没有误差的情况下，从 P 坐标系转换到 Q 坐标系的公式为 $q_i = Rp_i + t$ 。

但是由于噪声及错误匹配（如 (P_{99}, Q_{99}) ）其实并不对应空间中同一点，但是特征匹配算法错误地认为二者是同一点，上述等式不总是成立，所以最小化的目标函数为 $T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \|q_i - Rp_i - t\|^2$ ，求解 R 和 t 的常用方法是奇异值分解（SVD）。

定义两组点云的质心为 $\mu_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i, \mu_q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i$ ，并作出如下处理，即

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \|q_i - Rp_i - t\|^2 &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \|q_i - Rp_i - t - (\mu_q - R\mu_p) + (\mu_q - R\mu_p) - t\|^2 \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \|(q_i - \mu_q - R(p_i - \mu_p)) + (\mu_q - R\mu_p - t)\|^2 \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \|(q_i - \mu_q - R(p_i - \mu_p))\|^2 + \|\mu_q - R\mu_p - t\|^2 + 2(q_i - \mu_q - R(p_i - \mu_p))^T (\mu_q - R\mu_p - t) \end{aligned} \quad (6)$$

其中最后一项中

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n (q_i - \mu_q - R(p_i - \mu_p))^T (\mu_q - R\mu_p - t) &= (\mu_q - R\mu_p - t)^T \times \sum_{i=1}^n (q_i - \mu_q - R(p_i - \mu_p)) \\ &= (\mu_q - R\mu_p - t)^T (n\mu_q - n\mu_p - R(n\mu_p - n\mu_p)) = 0 \end{aligned}$$

设 $p'_i = p_i - \mu_p, q'_i = q_i - \mu_q$ ，目标函数简化为

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (\|q'_i - Rp'_i\|^2 + \|\mu_q - R\mu_p - t\|^2)$$

设 R^*, t^* 为最优解， I 为常数，可以将问题优化为

$$R^* = \arg \min_R \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \|q'_i - Rp'_i\|^2$$

将它展开得

$$\begin{aligned} R^* &= \arg \min_R \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (q_i'^T q_i + p_i'^T R^T R p_i' - 2q_i'^T R p_i') \\ &= \arg \min_R \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (q_i'^T q_i + I - 2q_i'^T R p_i') \\ &= \arg \min_R \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n -q_i'^T R p_i' \end{aligned} \quad (7)$$

令 $W = \sum_{i=1}^n -q_i'^T p_i'^T$ ，通过 SVD 分解，有 $W = U\Sigma V^T$ ，

当 W 满秩时有

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中， $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 为 Σ 的特征值，且对应唯一的 U, V 组合，即

$$\begin{cases} R^* = UV^T \\ t^* = \mu_q - R\mu_p \end{cases} \quad (9)$$

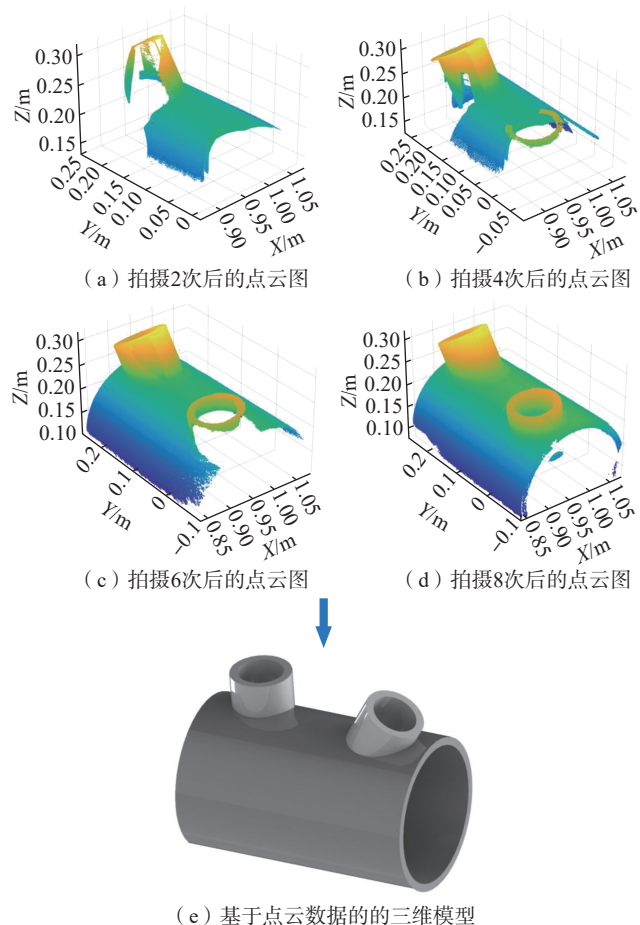
图 8 为点云匹配过程。从机器人坐标系到用户坐标系的齐次变换矩阵为

$$\begin{bmatrix} -0.021579 & 0.999740 & 0.007443 & 1144.9200 \\ -0.999767 & -0.021580 & 0.000000 & -137.2220 \\ 0.000161 & -0.007441 & 0.999972 & 78.5357 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

相较于单一尺度 ICP 方法，采用多尺度 ICP 后，算法的全局收敛时间缩短了 20%，且拟合精度提高了 18%。

3.3 路径与姿态规划描述

为了得到相贯线路径，采用原始焊缝点云特征描述信息（即最接近离散路径点的原始数据点的坐标）来估计离散路径点的位置，再根据 NURBS 曲线的定义进行微分计算，得到满足弦误差极限的离散路径点序列。该



(e) 基于点云数据的三维模型

图 8 点云匹配过程

Fig.8 Point cloud matching process

方法可以充分利用三维点云信息,降低算法复杂度,高效率完成相贯线轨迹。

焊枪轴线与焊缝二面角间保持切线关系,焊枪姿态需根据焊接角度做出相应调整。上坡焊接时,焊枪的轴线适当向上倾斜,以确保熔池稳定并获得合适的焊缝形态;下坡焊接时,焊枪则需要适当向后倾斜,防止熔池金属因重力过快流动而导致焊接质量问题。

摆动焊接是指在焊接过程中,焊枪或焊接工具沿焊接路径进行摆动运动的焊接方法。焊接时采用摆弧焊有以下优点:(1)电弧摆动扩大了加热面积,从而增加了焊池宽度;(2)摆弧焊可有效降低热输入,使非零倾角焊缝的熔池不易流动;(3)如果摆动轨迹设置合理,可以抵消部分重力的影响,有利于提高焊接质量。

为确保焊接轨迹的平稳,理论上,摆动曲线应满足至少二阶可导的要求。二阶及以上可导的曲线能够有效避免速度和加速度的突变,从而保证焊接过程平稳过渡和机械系统的安全运行。众所周知,正弦函数具有优良的连续性和可导性,其在各阶导数上都能保持平滑,因此正弦曲线成为设计速度和加速度连续轨迹的理想选择。

从数学角度分析,摆动轨迹是一个周期性函数,其中最典型的周期函数是正弦型函数。依据正弦函数的性质,设定摆动周期为 T ,摆动幅值为 A ,停留时间为 t_0 。根据这些设定设计的摆动轨迹将以分段周期函数的形式呈现,如图 9 所示,前半周期的停留时间 (t_2-t_1) 与后半周期的停留时间 (t_4-t_3) 可以不一致。通过这种分段函数设计,可以精确控制焊枪的轨迹形态,同时确保各个阶段的速度与加速度保持连续变化,从而优化焊接过程的稳定性和精度。

4 验证试验

4.1 理论仿真

为验证所提方法的可行性,在 VS code2019 环境下进行算法编程并生成机器人执行程序,然后分别在自主研发的机器人仿真软件环境和机器人焊接系统中对机器人焊接轨迹进行验证。

拍摄工件的点云时需要根据实际工件的摆放位置提前规划拍照点,因此需要在软件中搭建一个和实际场景相同的虚拟场景,预设工件摆放位置并规划拍照点

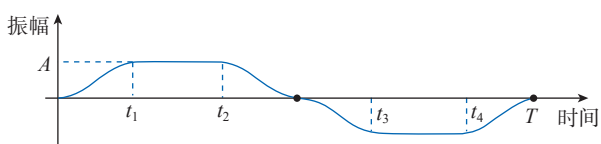


图 9 摆动轨迹示意图

Fig.9 Schematic diagram of swing trajectory

位,便于相机采集点云和机器人焊接,如图 10 (a)所示,软件中搭建出和实际一样的场景。经过算法计算后,得到图 10 (b)所示机器人运动轨迹曲线。

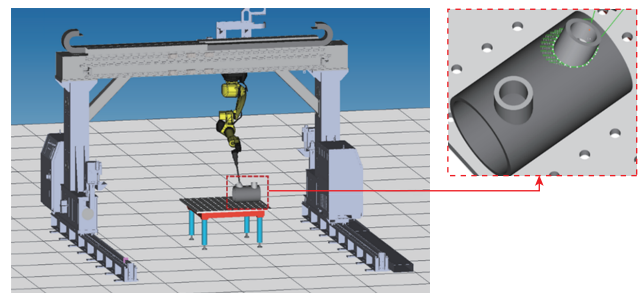
4.2 实际试验

焊接的焊缝为倾斜相贯线和偏心相贯线,焊接方式为一元化焊接,偏心焊缝焊接和倾斜相贯焊接的参数如表 1 所示。其中所选用的 OK Autrod 309LSi 焊条为 EASB 公司生产,这种实芯抗腐蚀铬镍合金焊丝适用于锻钢和铸钢等合金材料。根据厂商提供的资料,直径为 0.9 mm 的焊丝在焊接时的电流为 65~220 A,送丝速度为 3.5~18.0 m/min。图 11 显示了焊接前和焊接后的工件图。可以看出,焊缝的表面质量较好,意味着本文提出的技术路线具有一定的可行性。

4.3 误差对比

目前,非典型正交空间曲线焊接路径的提取方法主要有手工教学和激光焊缝跟踪两种。其中,机器人焊接的“示教”模式需要人工教学焊接路径,耗时较长;相比之下,本文方法的效率得到了显著提高。受试验设备的限制,激光焊缝跟踪方法无法完成相关验证,但通过工艺流程分析可知,该方法需要粗略扫描路径示教,因此其焊接效率低于本文提出的方法。

为验证所提算法有效性,将机器人焊接中常用的“示教”模式与本文算法进行对比。由于试验过程受人工操作、设备硬件配置及采集模型点云点数的细微波动



(a) 虚拟场景

(b) 运动轨迹曲线

图 10 场景仿真

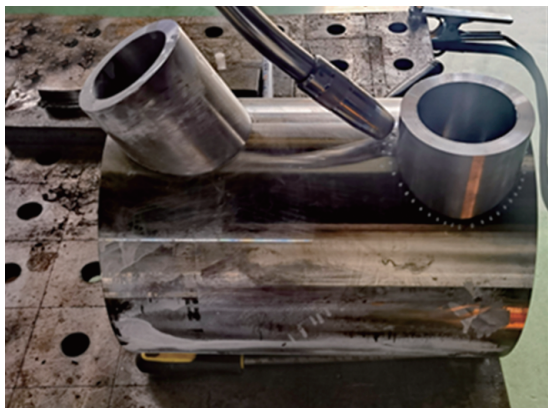
Fig.10 Scene simulation

表 1 焊接参数

Table 1 Welding parameters

参数	偏心相贯线焊接	倾斜相贯线焊接
焊接电流/A	180	180
行走速度/(cm/min)	16	19
摆动幅度/mm	3	3
摆动频率/Hz	1.5	1.5
停留时间/s	0.4, 0.2	0.3, 0.3

的影响,需对点云中获取的焊缝特征点进行细化(分为50个点),再分别测量人工示教与本文方法试验时各特征点的误差。具体误差大小如图12所示。两种方法之间的误差小于0.5 mm,完全满足焊接误差要求,因此本文方法生成的焊接路径完全可以替代人工教学得到的焊接路径。



(a) 焊接前工件



(b) 焊接后工件

图11 焊接前后工件

Fig.11 Workpiece before and after welding

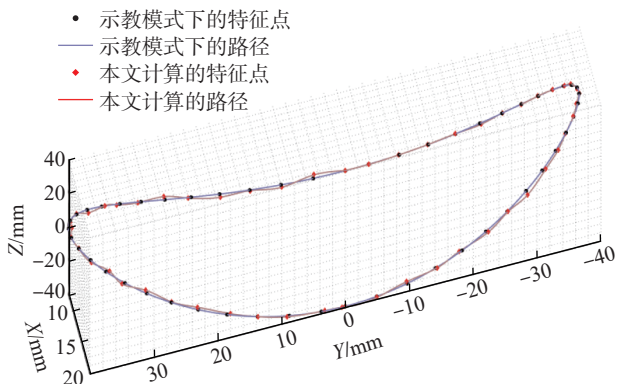


图12 本文算法路径与示教路径误差比较

Fig.12 Comparison of errors between algorithm path and teaching path in this paper

5 结论

针对航空航天领域中空间曲线焊缝传统示教再现型机器人难以焊接的问题,尤其是复杂的相贯线焊接,本文提出了一种基于优化后的RANSAC和ICP点云算法的相贯线机器人焊接方法,研究了拟合出工件曲面的随机抽样一致算法和点云配准的迭代最近点算法,解决了工件点云在免示教焊接过程中存在的相贯线工件模型不一致的问题,并进行了相关试验验证。得出如下结论。

(1)实现了复杂相交曲线的全流程自动化焊接:通过硬件平台采集点云和焊接数据信息;通过软件平台进行算法处理;通过场景还原和实时通信的方式实现软硬件平台的高效交互,完成免示教焊接。

(2)通过Quasi稠密匹配进行RANSAC算法的曲面拟合:通过提前估算迭代阈值并采用自适应迭代次数策略,显著提高了模型匹配效率。试验结果表明,在不同工件的焊接任务中,相较于传统的RANSAC算法,采用此方法的迭代次数减少了约30%,匹配时间缩短25%。这一改进有效提升了算法在复杂焊接环境下的适应性和稳定性。

(3)利用优化后的刚性点云匹配算法,在理论上没有误差的情况下,通过SVD分解求解出多尺度ICP,减少了因异常值造成的拟合偏差。相较于单一尺度ICP方法,采用多尺度ICP后,算法的全局收敛时间缩短了20%,且拟合精度提高了18%。尤其在处理高噪声点云数据时,异常值的影响明显减小,模型的稳定性和鲁棒性得到显著增强。

参考文献

- [1] 王君, 马迪. 工业机器人变导纳自适应主动容错控制方法研究[J]. 航空制造技术, 2024, 67(18): 20-27.
WANG Jun, MA Di. Variable admittance adaptive active fault-tolerant control method for industrial robots[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(18): 20-27.
- [2] LIU Y, LIU J, TIAN X C. An approach to the path planning of intersecting pipes weld seam with the welding robot based on non-ideal models[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 55: 96-108.
- [3] ZHANG Y K, JIANG Y, TIAN X C, et al. A point cloud-based welding trajectory planning method for plane welds[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 125(3): 1645-1659.
- [4] 梁旭峰, 蔡振华, 刘琦, 等. 压气机叶片激光熔化沉积修复的机器人路径自动规划和试验研究[J]. 航空制造技术, 2024, 67(13): 119-126.
LIANG Xufeng, CAI Zhenhua, LIU Qi, et al. Laser melting deposition repair for compressor blades: Robotic path automatic planning and experimental research[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(13): 119-126.
- [5] YANG L, LIU Y H, PENG J Z, et al. A novel system for off-line 3D seam extraction and path planning based on point cloud segmentation

for arc welding robot[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020, 64: 101929.

[6] 党仁俊,李志虎,钱泓宇,等.基于机器人的自动化检测技术在航空制造中的应用进展[J].*航空制造技术*, 2024, 67(5): 66–81.

DANG Renjun, LI Zhihu, QIAN Hongyu, et al. Application of robot-based automated inspection technology in aviation manufacturing[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2024, 67(5): 66–81.

[7] WANG H, HUANG Y, ZHANG G J, et al. A novel method for dense point cloud reconstruction and weld seam detection for tubesheet welding robot[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 163: 109346.

[8] ZHANG G, ZHANG Y H, TUO S H, et al. A novel seam tracking technique with a four-step method and experimental investigation of robotic welding oriented to complex welding seam[J]. *Sensors*, 2021, 21(9): 3067.

[9] 刘静,关凯楠,杜亮,等.轨道机车三维可视化焊接工艺平台研发与应用[J].*焊接*, 2023(4): 45–48, 54.

LIU Jing, GUAN Kainan, DU Liang, et al. Development and application of 3D visualization welding process platform for railway locomotives[J]. *Welding & Joining*, 2023(4): 45–48, 54.

[10] LI W M, MEI F, HU Z, et al. Multiple weld seam laser vision recognition method based on the IPCE algorithm[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 155: 108388.

[11] 冯消冰,郑军,杨尚贤,等.面向大型结构件焊接的爬行机器人视觉跟踪控制[J/OL].*清华大学学报(自然科学版)*, [2025–05–30]. <https://doi.org/10.16511/j.cnki.qhdxxb.2024.22.047>.

FENG Xiaobing, ZHENG Jun, YANG Shangxian, et al. Visual tracking control of crawling robots for welding large structural components[J/OL]. *Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition)*, [2025–05–30]. <https://doi.org/10.16511/j.cnki.qhdxxb.2024.22.047>.

[12] 乔嘉拓.基于线扫立体视觉结合的免示教焊接机器人焊缝检测与路径规划[D].西安:西安理工大学, 2024.

QIAO Jiatao. Welding seam detection and path planning of teaching-free welding robot based on line structured light and stereo vision[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2024.

[13] LIU Y, TANG Q, TIAN X C. A discrete method of sphere-pipe intersecting curve for robot welding by offline programming[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2019, 57: 404–411.

[14] LI M Y, DU Z J, MA X X, et al. A robot hand-eye calibration method of line laser sensor based on 3D reconstruction[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2021, 71: 102136.

[15] FANG H, ONG S, NEE A. Robot path planning optimization for welding complex joints[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 90(9): 3829–3839.

[16] 葛吉民,邓朝晖,王水仙,等.基于点云的机器人焊缝自动化磨削系统与方法[J].*中国机械工程*, 2024, 35(7): 1253–1262, 1268.

GE Jimin, DENG Zhaohui, WANG Shuixian, et al. Automated grinding system and method for robotic weld seams based on point cloud[J]. *China Mechanical Engineering*, 2024, 35(7): 1253–1262, 1268.

[17] 方伟华.基于3D视觉的机器人焊接智能轨迹规划关键技术研究[D].济南:山东大学, 2023.

FANG Weihua. Research on key technology of intelligent trajectory planning for robot welding based on 3D vision[D]. Jinan: Shandong University, 2023.

(上接第 99 页)

[13] PETUKHOVA M V, LUPULEAC S V, SHINDER Y K, et al. Numerical approach for airframe assembly simulation[J]. *Journal of Mathematics in Industry*, 2014, 4(1): 8.

[14] 唐伟.一类蒙皮/长桁壁板结构预连接工艺优化方法研究[D].杭州:浙江大学, 2017.

TANG Wei. Study on optimization methods of pre-joining processes for a class of skin-stringer panel structures[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.

[15] LIU G, TANG W, KE Y L, et al. Modeling of fast pre-joining processes optimization for skin-stringer panels[J]. *Assembly Automation*, 2014, 34(4): 323–332.

[16] 杨迪.飞机壁板自动钻铆中预连接工艺和铆接变形研究[D].杭州:浙江大学, 2019.

YANG Di. Study on pre-joining process and riveting deformation in automated drilling-riveting of aircraft panel[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.

[17] POGARSKAIA T, LUPULEAC S, BONHOMME E. Novel approach to optimization of fastener pattern for airframe assembly process[J]. *Procedia CIRP*, 2020, 93: 1151–1157.

[18] POGARSKAIA T, CHURILOVA M, BONHOMME E. Application of a novel approach based on geodesic distance and pressure distribution to optimization of automated airframe assembly process[C]// *Supercomputing*. Cham: Springer, 2020: 162–173.

[19] 张秋月,安鲁陵,岳烜德,等.基于遗传算法的飞机复合材料结构装配压紧力大小与布局的优化[J].*复合材料学报*, 2019, 36(6): 1546–1557.

ZHANG Qiuyue, AN Luling, YUE Xuande, et al. Optimization of size and layout of pressing force for composite airframe structure assembly based on genetic algorithm[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(6): 1546–1557.

[20] 张秋月.飞机复合材料结构装配压紧力大小与布局的优化[D].南京:南京航空航天大学, 2019.

ZHANG Qiuyue. Optimization of magnitude and layout of pressing force for composite aerostructure assembly[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.

[21] 黎雪婷,安鲁陵,岳烜德,等.飞机复合材料壁板装配中临时紧固件数量与布局优化方法[J].*复合材料学报*, 2022, 39(8): 4102–4116.

LI Xueting, AN Luling, YUE Xuande, et al. Optimization method of the number and layout of temporary fasteners in composite panel assembly of aircraft[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(8): 4102–4116.

[22] 黎雪婷.飞机复合材料壁板装配中临时紧固件数量与布局优化[D].南京:南京航空航天大学, 2022.

LI Xueting. Optimization of the number and layout of temporary fasteners in aircraft composite panel assembly[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2022.

[23] 朱伯芳.有限单元法原理与应用[M].4版.北京:中国水利水电出版社, 2018.

ZHU Bofang. Finite element method theory and applications[M]. 4th ed. Beijing: China Water & Power Press, 2018.

[24] BARBERO E J. Finite Element Analysis of Composite Materials using Abaqus™[M]. Boca Raton: CRC Press, 2013.

[25] YE J X, YAN Y, LI J, et al. 3D explicit finite element analysis of tensile failure behavior in adhesive-bonded composite single-lap joints[J]. *Composite Structures*, 2018, 201: 261–275.

通信作者: 许燕玲,副教授,博士生导师,研究方向为机器人焊接智能化及多信息智能传感方向。

(责编 阳光)

通信作者: 赵聪,副教授,博士,研究方向为复合材料结构自动化制造技术、飞机装配技术。

(责编 阳光)