

数字孪生环境下飞机装配过程中的激光跟踪仪位置优化

文笑雨¹ 张昊¹ 张玉彦^{1*} 刘思仁² 吉硕¹ 郭伟飞¹ 李浩¹

1. 郑州轻工业大学河南省机械装备智能制造重点实验室, 郑州, 450002

2. 上海飞机制造有限公司, 上海, 20132

摘要:为解决激光跟踪仪在引导装配或下架检验中的位置优化问题,在数字孪生环境下提出一种基于Q学习的改进粒子群算法。首先建立激光跟踪仪的空间位置约束模型及装配车间要素仿真的数字孪生场景;然后构建马尔可夫决策模型来动态调整目标权重;最后以激光跟踪仪所在位置的通视率为评价基准,基于数字孪生环境进行验证并与其他算法进行性能对比。结果表明该算法在优化激光跟踪仪位置及通视率方面具有更好的效果。

关键词:数字孪生;激光跟踪仪;飞机装配;强化学习;粒子群算法

中图分类号:TP301.6;TP391.9

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.07.020

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Optimization of Laser Tracker Positions in Aircraft Assembly Processes under Digital Twin Environments

WEN Xiaoyu¹ ZHANG Hao¹ ZHANG Yuyan^{1*} LIU Siren² JI Shuo¹ GUO Weifei¹ LI Hao¹

1. Henan Provincial Key Laboratory of Intelligent Manufacturing of Mechanical Equipment, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou, 450000

2. Shanghai Aircraft Manufacturing Limited Company, Shanghai, 200436

Abstract: In order to solve the position optimization problems of laser trackers in guided assembly or off-shelf inspection, a Q-learning-based improved particle swarm optimization under digital twin environments was proposed herein. Firstly, a spatial position constraint model of the laser trackers and the digital twin scenario of the assembly shop element simulation were established. Secondly, a Markov decision model was constructed to dynamically adjust the target weight parameters. Finally, using pass-through rate of the laser tracker locations as evaluation benchmark, the algorithm was validated based on the digital twin environment and compared with other algorithms, which show that the algorithm has a better effectiveness in optimizing the laser tracker locations and pass-through rate.

Key words: digital twin; laser tracker; aircraft assembly; reinforcement learning; particle swarm optimization

0 引言

随着航空制造技术的快速发展,飞机装配涉及的精密测量技术逐渐成为影响飞机总装质量及装配效率的关键因素。激光跟踪仪能在大范围及复杂环境下进行精确的测量和定位,已广泛用于飞机装配中的装配检测和对接过程^[1]。飞机部件结构的复杂性和装配场景的多样性使得激光跟踪仪的部署位置逐渐成为提高测量精度、缩短操作

时间的重要因素^[2]。优化激光跟踪仪的位置可最大限度减小转站带来的误差,进而提高整个装配过程中激光跟踪仪的测量精度与数据可靠性^[3],因此,合理选择激光跟踪仪的测量位置对降低测量不确定度和提高装配效率至关重要。

目前,国内外学者在激光跟踪仪位置优化问题上进行了广泛研究。熊涛等^[4]提出一种基于测量约束的站位规划及站位可行性评价方法,通过构建融合激光跟踪仪的测量约束模型得到测量可行性的站位。王斌等^[5]提出一种基于机器人建模的飞机装配测控仿真分析方法,通过仿真分析来动态优化激光跟踪仪等设备的站位。马守东等^[6]分析了激光跟踪仪的误差来源,并基于最小位置

收稿日期:2024-11-09

基金项目:国家自然科学基金(52475543);河南省优秀青年科学基金(252300421101);河南省高校科技创新人才支持计划(24HASTIT048);郑州轻工业大学科技创新团队项目(23XNKJTD010)

精度衰减因子(PDOP)优化激光跟踪仪的站位。朱绪胜等^[7]建立了非均匀温度场下的激光跟踪仪测量模型,并利用蒙特卡洛仿真分析方法建立包含离散点和形位误差的评价模型来优化站位。信赖域半径策略优化 L-M 算法^[8]通过多次迭代调整搜索方向的信赖域参数来优化激光跟踪仪的站位测量精度。江伟鹏等^[9]基于 GJK 碰撞检测算法求解测量光路和障碍物的明可夫斯基差,引入改进混合灰狼算法得到最佳测量站位。张阳洋等^[10]通过遗传算法和 ERS 点布局优化方法优化激光跟踪仪的布局,提高测量精度和覆盖率。LU 等^[11]针对布站优化单一准则的问题,构建基于全局几何精度因子(GDOP)的水下目标布站优化准则,提出一种改进的自适应粒子群优化(APSO)算法对水声定位系统进行优化配置,显著减小了全局 GDOP,提高了定位精度。LI 等^[12]针对城乡交通站点位置优化问题,提出一种 DBSCAN K-means(DK-means)聚类算法,对预约需求进行聚类预处理和站点优化,建立公交调度模型并采用遗传模拟退火算法得到最佳的交通站点位置。JIANG 等^[13]提出一种基于改进粒子群优化(NAPSO)的 SVM 方法,在粒子群优化(PSO)中添加自然选择和模拟退火,得到较好的测量仪器站位及精度。

随着技术的发展,优化方法与数字孪生技术为激光跟踪仪的位置优化提供新的思路,使用优化方法在数字孪生环境中对激光跟踪仪的测量位置进行优化逐渐成为重要的研究问题^[14]。通过创建虚拟的飞机装配环境,数字孪生技术可实现装配过程的实时仿真和优化,为激光跟踪仪的站位选择提供精确的指导。李浩等^[15-16]提出一种用于复杂产品环路设计的数字孪生框架,研究了数字孪生在复杂产品设计与制造开发中的关键技术。李浩等^[17]建立了飞机装配数字孪生环境,并在该环境中应用遗传算法优化激光跟踪仪的位置,提高了激光跟踪仪对测量点的覆盖率和重合率。MANWILLER 等^[18]提出一种基于多站位的测量空间校准程序,通过对仪器在测量过程中的不确定度进行仿真和检测,实现了激光跟踪仪等测量仪器在不同站位的校准。近年来,国内外研究主要集中在激光跟踪仪的测量精度、测量误差分析与测量位置可行性等方面。这些研究对激光跟踪仪的位置优化虽有一定的效果,但在复杂的装配车间环境中,还未将数字孪生与强化学习结合用于激光跟踪仪的测量位置优化,且缺乏快速求解验证激光跟踪仪最佳位置的有效方法,导致

测量效率低下、测量效果较差^[19-20]。

笔者在数字孪生环境下提出一种基于强化学习的改进粒子群优化方法。首先,综合考虑实际车间对激光跟踪仪测量性能的影响因素,建立两个目标(最大化检测目标点数量和最小化激光跟踪仪到机身中心距离)的数学模型。之后,根据实际飞机装配车间工况及激光跟踪仪特点,建立精准仿真的机身对接过程数字孪生模型。然后,将 Q 学习与 PSO 算法结合,基于 Q 学习建立激光跟踪仪位置优化问题的马尔可夫决策模型,并对两个目标的权重进行动态调整。最后,将所提方法应用到数字孪生环境中,对不同数量激光跟踪仪的位置优化进行了实验。实验结果表明,本文方法具有更好的效果,证明了本文方法在激光跟踪仪的位置优化及测量性能提升上的有效性。

1 问题描述与建模

1.1 问题描述

激光跟踪仪的位置优化即通过合理选择测量位置使其确保对装配对象进行全面测量,缩短测量时间,降低操作复杂性,提高测量效率。激光跟踪仪的测量效率、测量精度等问题可转化为激光跟踪仪的位置优化问题,即结合飞机装配过程中复杂的工作环境建立相关约束模型,并为激光跟踪仪部署相应算法,使激光跟踪仪在数字孪生环境中运行,并在空间约束下寻找满足目标覆盖度、距离合理性、操作安全性等条件的合适位置。

因此激光跟踪仪的位置优化问题具有两个目标:①最大化激光跟踪仪能覆盖固定点的数量;②最小化激光跟踪仪与被测物体之间的距离。由于 2 个目标不冲突,故采用权重系数将二者联系起来。

激光跟踪仪位置优化以其扫描检测到的固定点数量 n 的最大化和激光跟踪仪与检测物体(飞机机身)中心点的距离 L 最小化为目标。该优化问题的假设条件描述如下:

1)激光跟踪仪与检测物体(飞机机身)中心的距离和激光跟踪仪与所有固定标点的距离总和可以相互转化。

2)激光跟踪仪所处的飞机装配车间内没有物料资源、其他设备工具等影响激光跟踪仪部署及通视的因素。

3)激光跟踪仪可部署在满足空间约束的任何地方。

1.2 飞机装配车间的数字孪生环境建模

本文以机身装配对接过程为研究对象,通过

建模软件 Unity 3D、SolidWorks 等构建机身对接车间现场的数字孪生模型,包括现场车间、机身筒段、激光跟踪仪、测量靶点等,以反映实际装配车间的状况和形态。具体建模过程如下:①通过 SolidWorks 设计装配车间内各工具的 3D 模型;②通过 3ds Max 渲染装配车间内各工具的 3D 模型,并使用 Unity 3D 进行车间整体的空间设计;③将所有三维模型集成于 Unity 3D 的装配车间孪生环境中,并对整体进行优化。对各个设备模型部署相应的组件功能及脚本算法,最终构成飞机机身对接车间的数字孪生模型。图 1 所示为装配现场的数字孪生车间,车间内有飞机机身筒段、靶标点、地标点、定位器等设备和工具是物理车间在虚拟空间中的数字化映射,反映了机身对接过程设备的运行特点。

本文以图 2 所示的数字孪生环境下的飞机装配激光跟踪仪位置优化研究框架为基础展开数字孪生环境的搭建。以整体框架为指导,进行飞机

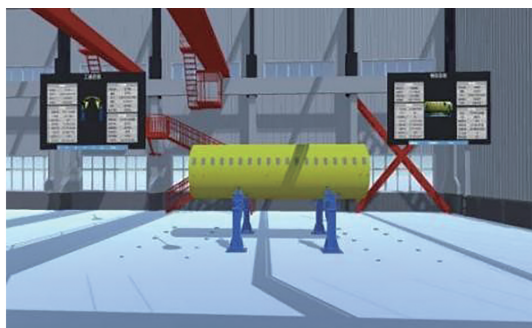


图 1 数字孪生车间

Fig.1 Digital twin workshop

装配工装孪生系统的设计、算法部署及功能添加。在此基础上,融入强化学习算法,通过迭代优化实现激光跟踪仪的位置寻优。强化学习算法通过不断反馈与自我调整,使系统在装配过程中动态学习和优化激光跟踪仪的最佳布站策略。随着布站策略在孪生环境中的迭代优化,强化学习模型能根据实时数据调整激光跟踪仪的位置,逐步优化测量过程。

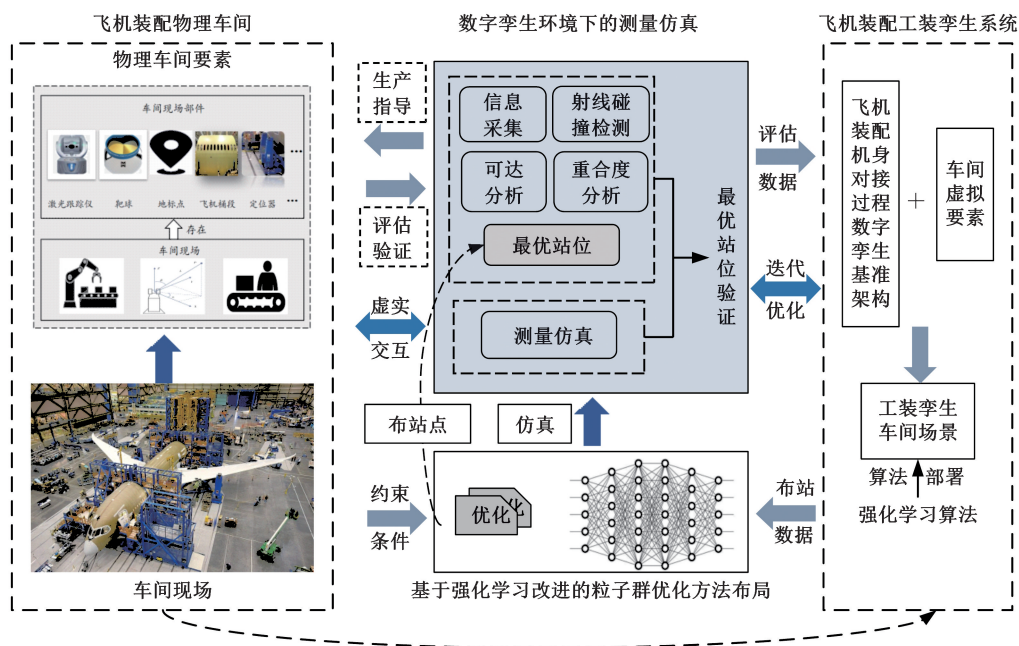


图 2 数字孪生环境下的飞机装配激光跟踪仪位置优化研究框架

Fig.2 A framework for the study of laser tracker position optimization for aircraft assembly in a digital twin environment

本文数字孪生系统的核心理念和实践方式遵循数字孪生技术的理论内涵,主要用于飞机装配产线建设前的预测与评估,目的在于指导新生产线的建设。新产线建设过程中,数字孪生系统能帮助工程师识别影响激光跟踪仪测量精度的部署点,进而有效避免测量过程中可能出现的问题。

1.3 数学建模

1.3.1 决策变量

激光跟踪仪位置优化的决策变量包括激光跟

踪仪的位置 $P(x_i, y_i, z_i)$ 、激光跟踪仪能扫描的固定点数量 n 、激光跟踪仪与所有固定点距离的总和 L 。

1.3.2 目标函数

激光跟踪仪的位置优化以最大化激光跟踪仪能扫描的固定标点数量 n 和最小化激光跟踪仪与所有固定标点距离的总和 L 为总目标,建立目标函数:

$$f = w_1 n - w_2 L \quad (1)$$

式中: w_1 为数量权重; w_2 为距离权重。

真实飞机装配现场中, 激光跟踪仪与被测物体之间的距离是激光跟踪仪与被测物体中心的距离。本文采用距离总和

$$L = \sum_{i=1}^N l_i \quad (2)$$

式中: l_i 为激光跟踪仪与固定点 i 之间的距离即 $P(x_i, y_i, z_i)$ 与 (x_t, y_t, z_t) 的距离。

反映激光跟踪仪的位置优劣。

1) 激光跟踪仪与被测物体的距离约束。激光跟踪仪是光学元件, 在整个测量过程会出现反射误差、几何误差、环境干扰等测量误差。激光跟踪仪与被测物体的实际距离 C 决定了测量误差的大小。激光光束发散程度随距离 C 的增大而增大, 因此 C 越大, 误差越大。为保证与真实车间一样的合理性, 约束定义如下:

$$g = \begin{cases} 1 & 5 \text{ m} \leq C \leq 30 \text{ m} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

其中, $g = 1$ 表示激光跟踪仪位置合理; $g = 0$ 表示不在激光跟踪仪的可测距离内。

2) 激光跟踪仪的位置约束。由于本文在数字孪生环境下进行实验研究, 因此要保证激光跟踪仪的位置必须合理。以图 3 所示的机身中心为基准, 通过距离换算得到激光跟踪仪的相对空间位置 (x, y, z) 约束, 其中, $5 \text{ m} \leq x \leq 30 \text{ m}$, $-20 \text{ m} \leq y \leq 20 \text{ m}$, $z = 0$ 。

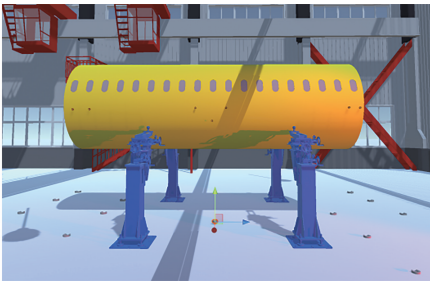


图 3 数字孪生场景的机身模型

Fig.3 Fuselage model in digital twin scenario

3) 激光跟踪仪的激光角度约束。激光跟踪仪主要通过调整激光的水平角 α 和天顶角 β 来控制激光跟踪仪的可测角度。测量过程中, 激光跟踪仪的上下摆角不能超过自身结构约束的角度, 且激光跟踪仪无法测量超出约束角度范围的物体。根据实际车间激光跟踪仪结构, 得到如下约束:

$$k = \begin{cases} 1 & -45^\circ \leq \beta \leq 45^\circ \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $k = 1$ 表示激光跟踪仪角度合理; $k = 0$ 表示不在激光跟踪仪的可测角度内。

4) 激光跟踪仪的激光可达性约束。飞机装

配过程中存在其他设备、工具及物体, 因此激光跟踪仪测量并不是全覆盖的, 只有部分光束扫射到需要检测的固定点, 如图 4 所示。因此建立可达性约束模型, 假设激光跟踪仪的光源位于三维空间中的点 A , 而待测固定点位于点 B , 同时引入光束传递函数 X 。 A 与 B 之间无障碍传递表明激光能从 A 到达 B , 从而检测到固定点。具体约束如下:

$$O(P, D_i) = \begin{cases} 1 & X \text{ 在 } [A, B] \text{ 连续} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

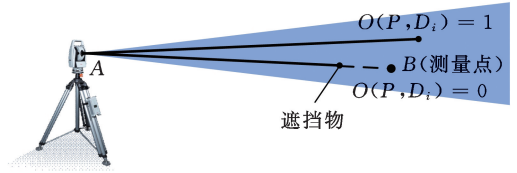


图 4 激光跟踪仪的可达性

Fig.4 Reachability of the laser tracker

2 基于强化学习改进的粒子群算法设计

将粒子群算法作为求解飞机机身对接过程中激光跟踪仪的位置优化问题的基础优化算法。激光跟踪仪位置寻优问题是多目标问题, 因此在适应度计算中使用权重结合 2 个目标。考虑到权重对最终结果的影响, 本文通过基于 Q 学习的动态调整方法不断优化目标权重, 从而获得最优解。

2.1 粒子群算法

2.1.1 初始化、编解码与适应度函数设计

激光跟踪仪永远处于地面即孪生车间的地平面上, 因此初始化粒子时, 激光跟踪仪的三维空间位置 $P(x_i, y_i, z_i)$ 的 z 坐标始终为 0。为更好地处理激光跟踪仪位置优化问题, 编解码采用实数编码。适应度函数通过权重将激光跟踪仪位置优化问题的 2 个目标结合为 1 个综合目标。

2.1.2 粒子速度、位置更新设计

粒子群优化算法中, 粒子的速度和位置的更新主要由惯性权重 e 、认知权重 c_1 、社会权重 c_2 的组合决定, 粒子的运动由个体最佳位置 $p_{\text{best}, i}$ 与全局最佳位置 g_{best} 共同决定。为描述本文算法的粒子状态, 定义第 i 个粒子在搜索空间中的移动步长 v_i 和位置 X_i :

$$v_i = (v_i^{(1)}, v_i^{(2)}, \dots, v_i^{(E)}) \quad (6)$$

$$X_i = (X_i^{(1)}, X_i^{(2)}, \dots, X_i^{(E)}) \quad (7)$$

$$i = 1, 2, \dots, N$$

式中: E 为搜索空间维数。

因此粒子的运动更新公式为

$$v_i(h+1) = ev_i(h) + c_1 r_1 (X_i - P_i) + c_2 r_2 (g_{\text{best}} - P_i) \quad (8)$$

式中: $v_i(h)$ 为第 i 个粒子的 h 代速度; r_1, r_2 为 $[0, 1]$ 之间的随机数。

2.1.3 检测机制设计

粒子群算法中的一个粒子代表数字孪生环境中激光跟踪仪的一个位置, 每个位置对应不同的适应度即检测数量与距离。因此, 为提高实验结果的准确性, 为每台激光跟踪仪部署检测停止机制: 当激光跟踪仪移动到新位置时, 它将在该位置停留 10 s, 完成两轮扫描并获取所需数据后, 再进行下一次移动。这种机制不仅确保算法在数字孪生环境中得到更精确的优化结果, 还通过孪生环境验证结果的有效性。

2.1.4 交叉、变异算子设计

交叉算子采用模拟二进制交叉 (simulated binary crossover)。交叉操作中, 随机选择激光跟踪仪的 2 个位置作为父代 $P_1(x_1, y_1, 0)$ 、 $P_2(x_2, y_2, 0)$, 通过下式得到子代 $A_1(x_3, y_3, 0)$ 、 $A_2(x_4, y_4, 0)$:

$$x_3 = [x_1(1 + \eta) + x_2(1 - \eta)]/2 \quad (9)$$

$$y_3 = [y_1(1 - \eta) + y_2(1 + \eta)]/2 \quad (10)$$

$$x_4 = [x_1(1 - \eta) + x_2(1 + \eta)]/2 \quad (11)$$

$$y_4 = [y_1(1 + \eta) + y_2(1 - \eta)]/2 \quad (12)$$

$$\xi = \begin{cases} (2\mu)^{1/(1+b)} & \mu \leq 0.5 \\ (2-2\mu)^{-1/(1+b)} & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

其中, μ 决定子代逼近父代的概率, 为 $[0, 1]$ 之间的随机数; $b = 1$ 。

变异算子采用随机数加减进行变异, 即在个体执行变异操作时, 个体 (x, y, z) 的 x 会增加随机数 $R (-1 \leq R \leq 1)$, y 会减去随机数 R 。

2.2 马尔可夫决策模型设计

马尔可夫决策过程 (Markov decision process, MDP) 是强化学习的核心框架, 能有效建模带有随机性的决策问题。Q 学习是一种基于强化学习的方法, 可求解马尔可夫决策过程中的最优策略问题。具体来说, MDP 为 Q 学习提供一个框架, 定义状态、动作、奖励和状态转移概率等元素, 帮助激光跟踪仪位置优化智能体在孪生环境中做出最优决策。MDP 中, 优化智能体通过与孪生环境交互不断学习策略 π , 其目标是使从初始状态开始执行该策略时获得的累计奖励期望最大化, 具体原理如图 5 所示, 其中, r_{t+1} 为执行动作 a 后获得的奖励, s_{t+1} 表示执行动作 a 的下一个状态。

本文采用基于价值 (value-based) 的 Q 学习算法。Q 学习中, 智能体通过与环境的交互来学习 Q 值函数, 而 Q 值函数表示在给定状态下采取某一动作所能获得的预期回报。通过不断更新 Q

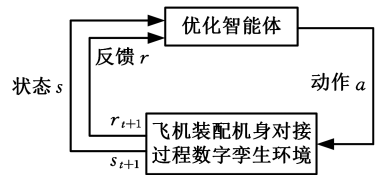


图 5 Q 学习原理

Fig.5 Principle of Q-Learning

值, 智能体逐渐收敛于最优策略, 实现最大化长期回报。因此, Q 学习利用 MDP 的结构和概念, 通过探索和利用策略来寻找最优解。Q 表的更新公式基于贝尔曼方程:

$$Q(s_t, a_t) \leftarrow Q(s_t, a_t) + \xi [r_t + \gamma \max_{a_{t+1}} Q(s_{t+1}, a_{t+1}) - Q(s_t, a_t)] \quad (14)$$

式中: γ 为折现因子; ξ 为学习率。

从式 (14) 可知, 学习率 ξ 越大, 智能体执行动作后 Q 值的更新幅度越大。

2.2.1 状态、动作集设计

为优化算法目标函数的权重 w_1 与 w_2 , 使算法目标权重在迭代过程中能根据粒子的状态进行动态调整, 避免固定取值影响算法性能, 提出基于 Q 学习的改进 PSO 算法。基于种群适应度设计状态、动作和奖励, 并构建 Q 表, 使算法自适应调整权重进行位置寻优, 提高最优解的概率和算法解的质量。

基于 Q 学习的改进粒子群优化 (Q-learning-based improved particle swarm optimization, QIPSO) 算法的种群适应度构建状态集, 将激光跟踪仪检测标点的数量与激光跟踪仪与所有固定点的距离总和分为多种状态。本文在机身对接数字孪生环境中取 27 个关键对接固定点位, 结合孪生环境选取交互点数量的 3 个状态区间 $([0, 17]$ 、 $(17, 22]$ 、 $(22, 27])$) 与距离的 3 个状态区间 $([0, 8]$ 、 $(8, 15]$ 、 $(15, 25])$) 组合的 9 个状态。

动作的构建是通过设置 QIPSO 算法权重 w_1 与 w_2 来指导粒子在当前状态下进行不同范围的搜索。 w_1 大、 w_2 小更利于粒子检测到更多的测量点, 但不利于减小距离总和; 反之, 则更利于最小化距离总和。由于 $w_1 + w_2 = 1$ 且 w_1, w_2 连续, 故设计动作 a_1 (加 0.02)、 a_2 (减 0.02), 动作集合记为 $\{a_1, a_2\}$ 。

2.2.2 动作选择、奖励函数设计

采用 ϵ - 贪心策略即智能体并不是总以最高回报为依据来选择动作, 允许智能体在整个学习过程中进行探索和利用, 其中, 探索以概率 ϵ 随机选择一个动作, 利用以 $1 - \epsilon$ 的概率选择具有最高回报的动作。整个学习过程中, 引入探索衰减率

ϵ_{decay} 来逐步减小 ϵ , 从而实现算法由探索向利用的平稳过度。

本文的奖励函数基于适应度变化设计, 以引导模型在迭代过程中更有效地提高全局最优解的质量。奖励函数的核心思想是通过监测适应度变化趋势, 动态调整奖励值, 从而优化搜索策略与方向。这种设计不仅有效平衡了模型的探索和利用, 也在避免陷入局部最优的同时, 鼓励模型不断向全局最优靠近。基于上述设计思想, 本文设计的奖励函数为

$$r_t = \begin{cases} 1.5F_{avg}(t) - 0.5F_{avg}(t-1) & F_{avg}(t) > F_{avg}(t-1) \\ 1.2F_{avg}(t) - 0.2F_{avg}(t-1) & F_{avg}(t) < F_{avg}(t-1) \\ F_{avg}(t) & F_{avg}(t) = F_{avg}(t-1) \end{cases} \quad (15)$$

式中: r_t 为执行动作 a_t 后获得的奖励; $F_{avg}(t)$ 、 $F_{avg}(t-1)$ 分别为 t 代和 $t-1$ 代的平均适应度。

2.3 算法流程

本文将强化学习算法与改进粒子群算法结合, 提出求解飞机装配激光跟踪仪位置寻优问题的 QIPSO 算法。为平衡检测数量与检测距离两个目标, QIPSO 算法在每一代中动态调整其对应的权重系数, 从而引导粒子群向更优的目标方向搜索。具体算法流程如图 6 所示。

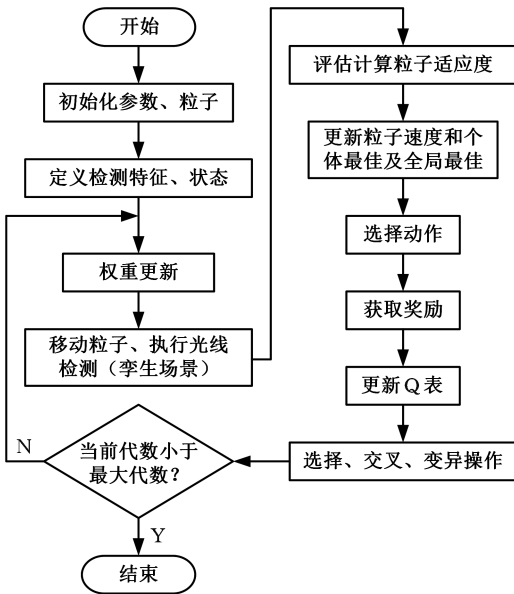


图 6 QIPSO 算法流程

Fig.6 QIPSO algorithm process

3 实验结果分析

通过飞机装配机身对接过程的数字孪生环境实验验证 QIPSO 算法的有效性。算法采用 Visual Studio 2022 编程, 运行的硬件环境为 RTX1650 的 GPU、i7-12700F 的 CPU、16GB

RAM 的计算机。实验围绕适应度变化趋势、收敛速度、多种算法对比等展开分析, 揭示本文方法在激光跟踪仪的位置优化问题上的适用性和鲁棒性。

3.1 参数设置

本文通过正交实验设计确定最佳的算法参数组合。每个参数设置 3 个水平, 如表 1 所示。为评估不同参数组合的优化效果, 将每组参数运行 10 次, 记录每次运行所得的最大适应度, 并将其均值作为该组合的性能指标, 以评估不同参数组合的优化效果, 如表 2 所示。基于表 2 所示数据进行参数的极差分析, 得到参数在不同水平下的均值, 如表 3 所示。依据表 3 所示数据绘制各参数的水平均值图。由图 7 可得最优的算法参数组合: $L=100, P_c=0.8, P_m=0.05, c_1=c_2=1.0$ 。

表 1 QIPSO 参数水平表

Tab.1 QIPSO parameter level table

参数	水平		
	1	2	3
种群数量 L	50	80	100
交叉概率 P_c	0.80	0.85	0.90
变异概率 P_m	0.05	0.10	0.15
认知权重 c_1	1.0	1.5	2.0
社会权重 c_2	1.0	1.5	2.0

表 2 正交实验结果

Tab.2 Orthogonal experimental results

组号	参数					max f 均值
	L	P_c	P_m	c_1	c_2	
1	50	0.80	0.05	1.0	1.0	2.502 142
2	50	0.85	0.10	1.5	1.5	2.380 237
3	50	0.90	0.15	2.0	2.0	2.181 402
4	80	0.80	0.10	1.0	1.5	2.510 976
5	80	0.85	0.15	1.5	2.0	2.287 349
6	80	0.90	0.05	2.0	1.0	2.340 457
7	100	0.80	0.15	1.0	2.0	2.397 623
8	100	0.85	0.05	1.5	1.0	2.683 995
9	100	0.90	0.10	2.0	1.5	2.367 267

表 3 QIPSO 各参数水平平均值

Tab.3 Average values of each parameter level in qiPSO

参数	水平		
	1	2	3
种群数量 L	2.354 594	2.379 594	2.482 962
交叉概率 P_c	2.470 247	2.450 527	2.296 375
变异概率 P_m	2.508 865	2.419 494	2.288 792
认知权重 c_1	2.470 247	2.450 527	2.296 375
社会权重 c_2	2.508 865	2.419 494	2.288 792

3.2 实验结果

为贴合实际车间, 在机身对接的数字孪生场景中部署 27 个固定点位(机身的 7 个靶标点、地面的 20 个地标点)。QIPSO 算法的参数设置如

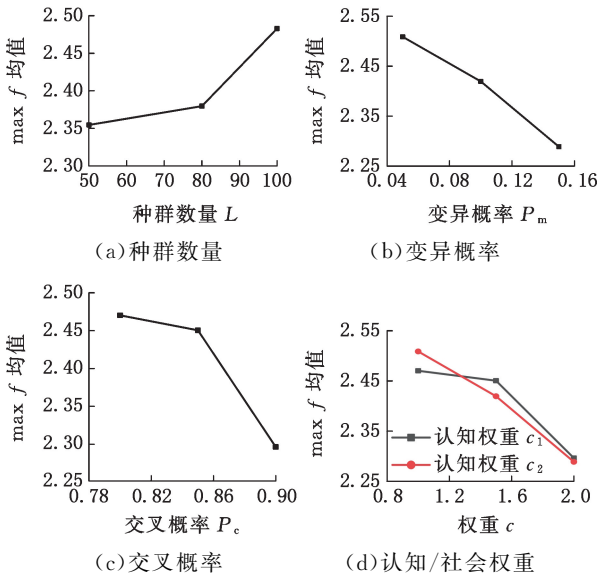


图 7 各参数的水平均值图

Fig.7 Average value plot of each parameter level

表 4 所示,其中,惯性权重随迭代的增加而线性减小;检测数量权重 w_1 与距离权重 w_2 动态调整, w_1 、 w_2 初始值分别为 0.6 和 0.4;Q 表中所有的数据初始值设为 0。

表 4 QIPSO 参数表

Tab.4 QIPSO parameter table

初始惯性权重 e_{i0}	0.9	探索率 ϵ_{max}	1.00
最终惯性权重 e_{if}	0.4	学习率 α	0.1
探索衰减率 ϵ_{decay}	0.995	折扣因子 γ	0.85
最小探索率 ϵ_{min}	0.05		

采用 QIPSO 算法分别对单台和两台激光跟踪仪进行位置优化并获取相应的检测数据,最终结果如表 5 所示。位置优化后,单台激光跟踪仪可检测到 26 个固定点,与机身中心的距离为 6.33 m,覆盖率为 96.3%。位置优化且检测数据整合后,2 台激光跟踪仪共检测到 27 个固定点,与机身中心的距离分别为 6.529 m 和 6.380 m。由表 6 可知,优化前,根据经验放置的 2 台激光跟踪仪的位置分别为 $(9.18\text{ m}, -2.48\text{ m}, 0)$ 、 $(8.73\text{ m}, 0.49\text{ m}, 0)$,2 台激光跟踪仪共扫描 29 个点,重合点数为 5,见图 8a。优化后,2 台激光跟踪仪的最佳布站位置为 $(6.25\text{ m}, -1.9\text{ m}, 0)$ 、 $(6.05\text{ m}, 2.03\text{ m}, 0)$,扫描的点有 46 个,重合点数为 18,见图 8b。算法优化后,激光跟踪仪的扫描点数与重合度均得到显著提高。

表 5 实验数据表

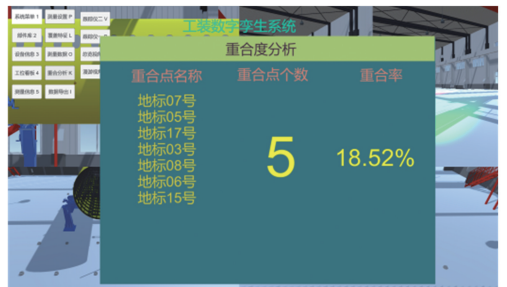
Tab.5 Experimental data table

跟踪仪数量	测点数	距离/m	覆盖率/%
1	26	6.330	96.3
2	27	6.529,6.380	100.0

表 6 QIPSO 算法优化前后 2 台激光跟踪仪的可达情况

Tab.6 Reachability of laser tracker before and after QIPSO algorithm optimization

序号	跟踪仪 1 优化前	跟踪仪 1 优化后	跟踪仪 2 优化前	跟踪仪 2 优化后
1		靶标 01 号	地标 16 号	靶标 01 号
2		靶标 02 号	地标 05 号	靶标 02 号
3		靶标 03 号	靶标 03 号	靶标 03 号
4	靶标 04 号	靶标 04 号		靶标 04 号
5		靶标 05 号		靶标 06 号
6		靶标 06 号		靶标 07 号
7		靶标 07 号	地标 01 号	地标 01 号
8	地标 02 号	地标 01 号		地标 02 号
9	地标 03 号	地标 03 号	地标 03 号	地标 03 号
10	地标 05 号	地标 05 号	地标 04 号	地标 04 号
11	地标 06 号	地标 06 号	地标 06 号	地标 06 号
12	地标 07 号	地标 07 号	地标 07 号	地标 07 号
13	地标 08 号	地标 08 号	地标 08 号	地标 08 号
14		地标 09 号	地标 09 号	地标 09 号
15	地标 10 号	地标 10 号		地标 10 号
16	地标 12 号	地标 11 号	地标 11 号	地标 12 号
17		地标 13 号	地标 13 号	地标 13 号
18		地标 14 号	地标 14 号	地标 14 号
19	地标 15 号	地标 15 号	地标 15 号	地标 15 号
20	地标 17 号	地标 16 号	地标 17 号	地标 17 号
21	地标 18 号	地标 18 号		地标 18 号
22		地标 19 号	地标 19 号	地标 19 号
23		地标 20 号	地标 20 号	地标 20 号



(a) 经验放置的两台跟踪仪重合度



(b) 算法优化后两台跟踪仪重合度

图 8 优化前后的重合情况

Fig.8 Overlap before and after optimization

图 9 展示了优化激光跟踪仪位置时 2 个权重的演化过程。权重变化表明 Q 学习的探索和利用机制在动态环境中的作用,即能在不同阶段通过灵活调整 2 个权重来提高全局适应度,可有效避免算法陷入局部最优,同时加快收敛。

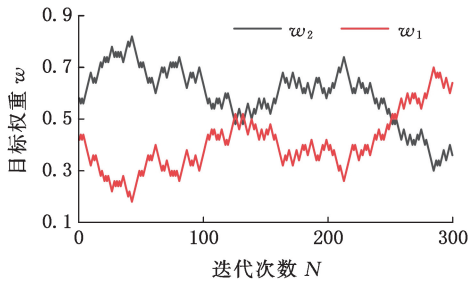


图 9 目标权重参数的演变过程

Fig.9 Evolution process of objective weight parameters

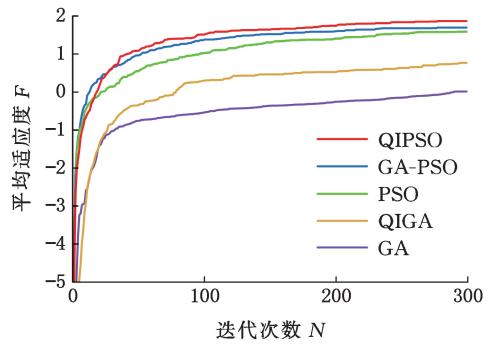


图 10 适应度收敛性对比

Fig.10 Comparison of fitness convergence

3.3 算法对比分析

为进一步验证 QIPSO 算法的性能,采用遗传算法(GA)、Q 学习改进遗传算法(QIGA)、粒子群(PSO)算法、改进粒子群(GA-PSO)算法与本文方法进行实验对比分析。其中,算法的种群数量 K 为 100,交叉概率 P_c 为 0.8,变异概率 P_m 为 0.05。同样选用 27 个固定标点,每个算法在数字孪生环境中运行 10 次,得到 5 种算法的平均最大适应度及优化后的数据,如表 7 所示。单台激光跟踪仪检测数据中,QIPSO 的平均检测固定点最多(26 个)、距离总和最小(6.330 m);2 台激光跟踪仪检测数据中,所有优化算法的检测点数量均达到最大,但 QIPSO 在距离总和优于其他算法。由表 7 可知,单台激光跟踪仪时,QIPSO 算法运行 10 次后得到的平均检测固定点最多,且激光跟踪仪与测量点的距离总和最优,并在合理范围内;2 台激光跟踪仪时,QIPSO 算法在距离总和上的优势较大。

表 7 五种算法优化后的数据

Tab.7 After optimization data of 5 algorithms

算法	跟踪仪数	测点数	距离/m	覆盖率/%
GA	1	22	6.069	81.5
	2	27	8.745,7.777	100.0
QIGA	1	23	6.424	85.2
	2	27	8.053,6.665	100.0
PSO	1	24	6.541	88.9
	2	27	6.842,6.597	100.0
GA-PSO	1	24	6.458	88.9
	2	27	7.152,6.292	100.0
QIPSO	1	26	6.330	96.3
	2	27	6.529,6.380	100.0

如图 10 所示, QIPSO 的 2 台激光跟踪仪协同测量适应度曲线相对平滑且稳步提升,最终收敛的适应度最优,从侧面表现出 QIPSO 算法在全局最优的探索过程中具有较强的收敛性与稳定性。

4 结论

本文结合数字孪生技术提出一种基于强化学

习的改进粒子群优化方法来求解激光跟踪仪的布站寻优问题。该方法通过强化学习动态调整优化过程中的目标权重,在检测点覆盖数量、激光跟踪仪与目标距离之间实现更好的平衡,从而增强算法的全局寻优能力和稳定性。

为验证本文所提方法的有效性,构建了机身对接过程的数字孪生模型,并在该环境中应用所提优化方法进行实验。结果表明:单台激光跟踪仪的优化布站中,覆盖率达至 96.3%,激光跟踪仪与机身中心的距离为 6.33 m;2 台激光跟踪仪的协同布站优化中,覆盖率达到 100.0%,激光跟踪仪与机身中心的距离分别为 6.529 m 和 6.380 m。优化后得到的最佳布站位置分别为 (6.25 m, -1.90 m, 0) 和 (6.05 m, 2.03 m, 0), 2 台激光跟踪仪覆盖的检测点数增至 46,重合点数增大至 18,重合率从优化前的 18.52% 提高至优化后的 66.67%。与其他算法的对比分析验证了本文方法的优越性。

未来可进一步优化数字孪生模型,考虑激光跟踪仪测量的更多影响因素,同时针对当前模型在实时交互和外部系统集成的局限性,探索更高效的实时数据传输和处理技术,结合边缘计算或云计算突破系统与外部设备间的隔阂,为复杂的装配过程提供更加全面和实时的决策支持。

参考文献:

[1] 李海涛,徐曙磊,王雅雯,等.基于外部实物标准的激光跟踪仪基站标定原理及方法研究[J].中国机械工程,2025,36(1):1-9.
LI Haitao, XU Shulei, WANG Yawen, et al. Research on the Principle and Method of Calibration of Laser Tracker Base Stations Based on External Physical Standards[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(1):1-9.

[2] 范斌,季青松,李明飞,等.iGPS 测量系统与激光跟踪仪在某飞机大部件数字化装配中的对比应用[J].航空制造技术,2019,62(5):57-62.

- FAN Bin, JI Qingsong, LI Mingfei, et al. IGPS and Laser Tracker Applications Comparison in Digital Assembly of Large Aircraft Parts[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2019, 62(5):57-62.
- [3] 蔡骏文,付景丽,冯万喜.基于激光跟踪仪的飞机总装数字化测量场构建方法[J].*测控技术*, 2024, 43(10):66-75.
- CAI Junwen, FU Jingli, FENG Wanxi. Construction Method of Digital Measurement Field for Aircraft Final Assembly Based on Laser Tracker[J]. *Measurement & Control Technology*, 2024, 43(10):66-75.
- [4] 熊涛,李泷泉,李琦,等.基于组合测量的激光跟踪仪站位规划[J].*激光与光电子学进展*, 2021, 58(17):246-255.
- XIONG Tao, LI Longgao, LI Qi, et al. Station Positioning Planning of Laser Tracker Based on Combined Measurement[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(17):246-255.
- [5] 王斌,张继文,吴丹.基于机器人建模的航空装配测控仿真分析方法[J].*清华大学学报(自然科学版)*, 2024, 64(4):724-737.
- WANG Bin, ZHANG Jiwen, WU Dan. Simulation and Analysis Method of Aerospace Assembly Measurement and Control Based on Robot Modeling[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2024, 64(4):724-737.
- [6] 马守东,高栋,路勇.基于最小PDOP的跟踪仪顺次多站测量站位优化[J].*计量学报*, 2023, 44(2):157-164.
- MA Shoudong, GAO Dong, LU Yong. Station Position Optimization for Sequential Multi-Station Measurement of Tracker Based on Minimum PDOP[J]. *Journal of Metrology*, 2023, 44(2):157-164.
- [7] 朱绪胜,刘蕾,陈雪梅.基于蒙特卡洛仿真的车间现场激光跟踪仪测量站位优化[J].*计算机集成制造系统*, 2020, 26(11):3001-3010.
- ZHU Xusheng, LIU Lei, CHEN Xuemei. Workshop Laser Tracker Measurement Station Position Optimization Based on Monte Carlo Simulation[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2020, 26(11):3001-3010.
- [8] 陈洪芳,杨星辰,张澳,等.信赖域半径策略优化L-M算法在激光跟踪仪多站位测量中的应用[J].*中国激光*, 2023, 50(14):133-140.
- CHEN Hongfang, YANG Xingchen, ZHANG Ao, et al. Application of the Trust Region Radius Strategy Optimized L-M Algorithm in Multi-Station Measurements of Laser Trackers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(14):133-140.
- [9] 江伟鹏,朱永国,赵倩,等.基于激光跟踪仪最佳站位的飞机数字化自动测量[J].*国际航空航天科学*, 2024, 12(2):105-119.
- JIANG Weipeng, ZHU Yongguo, ZHAO Qian, et al. Digital Automatic Measurement of Aircraft Based on Optimal Laser Tracker Station Position[J]. *International Journal of Aerospace Science*, 2024, 12(2):105-119.
- [10] 张阳洋,王玉坤,崔凡,等.基于激光跟踪仪的大型薄壁贮箱环缝装焊在位测量技术[J].*机械设计与研究*, 2019, 35(4):144-150.
- ZHANG Yangyang, WANG Yukun, CUI Fan, et al. On-site Measurement Method for Large Thin-wall Tank's Ring Seam Welding Based on Laser Tracker[J]. *Machine Design & Research*, 2019, 35(4):144-150.
- [11] LU Yu, WANG Jiongqi, ZHOU Haiyin, et al. Station Layout Optimization for Underwater Acoustic Positioning System Based on Combined Cone Configuration[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 294:116753.
- [12] LI Peiqing, JIANG Longlong, ZHANG Shunfeng, et al. Demand Response Transit Scheduling Research Based on Urban and Rural Transportation Station Optimization[J]. *Sustainability*, 2022, 14(20):13328.
- [13] JIANG Minlan, JIANG Lan, JIANG Dingde, et al. A Sensor Dynamic Measurement Error Prediction Model Based on NAPS0-SVM[J]. *Sensors*, 2018, 18(1):233.
- [14] WANG Likun, WANG Zi, KENDALL P, et al. Digital-twin Deep Dynamic Camera Position Optimisation for the V-STARS Photogrammetry System Based on 3D Reconstruction[J]. *International Journal of Production Research*, 2024, 62(11):3932-3951.
- [15] 李浩,王昊琪,刘根,等.工业数字孪生系统的概念、系统结构与运行模式[J].*计算机集成制造系统*, 2021, 27(12):3373-3390.
- LI Hao, WANG Haoqi, LIU Gen, et al. Concept, System Structure and Operating Mode of Industrial Digital Twin System[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2021, 27(12):3373-3390.
- [16] 李浩,陶飞,王昊琪,等.基于数字孪生的复杂产品设计制造一体化开发框架与关键技术[J].*计算机集成制造系统*, 2019, 25(6):1320-1336.
- LI Hao, TAO Fei, WANG Haoqi, et al. Integration Framework and Key Technologies of Complex Product Design-manufacturing Based on Digital Twin[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(6):1320-1336. (下转第 1635 页)

- Applied Mechanics and Materials, 2013, 459:297-303.
- [27] WANG Guojun. A Sub-pixel Circle Detection Algorithm Combined with Improved RHT and Fitting [J]. Multimedia Tools and Applications, 2020, 79(39):29825-29843.
- [28] JIANG Lianyuan. A Fast and Accurate Circle Detection Algorithm Based on Random Sampling[J]. Future Generation Computer Systems, 2021, 123:245-256.
- [29] 肖敏, 庄春刚, 熊振华. 基于机器视觉的液晶显示屏装配尺寸检测算法的研究[J]. 中国机械工程, 2014, 25(1):7-11.
- XIAO Min, ZHUANG Chungang, XIONG Zhenhua. Measurement Algorithm of LCD Mounting Dimension Based on Machine Vision [J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(1):7-11.
- [30] 祝振敏, 曲兴华, 梁海昱, 等. 基于发光二极管环形阵列与漫反射表面的均匀照明光源研究[J]. 光学学报, 2011, 31(1):186-191.
- ZHU Zhenmin, QU Xinghua, LIANG Haiyu, et al. Uniform Illumination Study by Light-Emitting Diode Ring Array and Diffuse Reflection Surface [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(1):186-191.
- [31] 巢渊, 徐鹏, 唐寒冰, 等. 视觉检测系统 LED 光源照度优化方法[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(12):357-368.
- CHAO Yuan, XU Peng, TANG Hanbing, et al. Illumination Optimization Method of LED Light Source for Visual Inspection System[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(12):357-368.
- [32] 李云峰, 李晟阳. 基于梯度方向信息熵的印刷电路板缺陷检测[J]. 中国机械工程, 2017, 28(6):695-701.
- LI Yunfeng, LI Shengyang. Defect Detection for PCBs Based on Gradient Direction Information Entropy[J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(6):695-701.
- (编辑 张 洋)
-
- 作者简介:**王瑞洲*, 男, 1990 年生, 副教授。研究方向为柔顺机构、微纳定位与运动控制、微视觉。发表论文 30 余篇。E-mail: wangrz@gdut.edu.cn.
- 本文引用格式:**
王瑞洲, 张宇龙, 王华, 等. 激光直接成像机靶标识识别算法的设计及抗扰性能测试[J]. 中国机械工程, 2025, 36(7):1624-1635.
- WANG Ruizhou, ZHANG Yulong, WANG Hua, et al. Design and Anti-disturbance Performance Tests of Target Recognition Algorithm for LDI Machines[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(7):1624-1635.
-
- (上接第 1581 页)
- [17] 李浩, 焦彦超, 张玉彦, 等. 基于数字孪生的飞机装配激光跟踪仪站位优化研究[J]. 中国机械工程, 2024, 35(11):1986-1994.
- LI Hao, JIAO Yanchao, ZHANG Yuyan, et al. Research on Station Optimization of Laser Tracker for Aircraft Assembly Based on Digital Twin[J]. China Industrial Economics, 2024, 35(11):1986-1994.
- [18] MANWILLER P E. A New Modeling Approach for a Priori Uncertainties of Laser Tracker Angle Measurements[J]. Journal of Surveying Engineering, 2023, 149(4):04023009.[LinkOut]
- [19] 班建华, 汪西, 刘思仁, 等. 组合式测量技术在飞机部件形位检测中的应用[J]. 现代制造工程, 2019(2):100-104.
- BAN Jianhua, WANG Xi, LIU Siren, et al. Application of Combinatorial Measurement Technology in Shape Measurement of Aircraft Parts [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2019(2):100-104.
- [20] 马一心, 范百兴, 黄剑. 多台激光跟踪仪联合动态位姿测量精度评定方法研究[J]. 测绘工程, 2021, 30(2):55-59.
- MA Yixin, FAN Baixing, HUANG Jian. Research on the Evaluation Method of the Accuracy of Combined Dynamic Position and Attitude Measurement of Multiple Laser Trackers[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2021, 30(2):55-59.
- (编辑 张 洋)
-
- 作者简介:**文笑雨, 女, 1988 年生, 博士, 副教授。研究方向为车间调度、数字孪生、制造系统运行优化。发表论文 60 余篇。E-mail: wenxiaoyu@zzuli.edu.cn. 张玉彦* (通信作者), 男, 1989 年生, 博士, 副教授。研究方向为智能制造、深度学习、设备状态监测、信号分析。发表论文 13 篇。E-mail: 2020022@zzuli.edu.cn.
- 本文引用格式:**
文笑雨, 张昊, 张玉彦, 等. 数字孪生环境下飞机装配过程中的激光跟踪仪位置优化[J]. 中国机械工程, 2025, 36(7):1573-1581.
- WEN Xiaoyu, ZHANG Hao, ZHANG Yuyan, et al. Optimization of Laser Tracker Positions in Aircraft Assembly Processes under Digital Twin Environments [J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(7):1573-1581.