

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.05.046

基于改进 RRT Star 算法的无人驾驶车辆全局路径优化研究

邓生银

(兰州现代职业学院,甘肃 兰州 730207)

摘要:针对传统 RRT 算法存在平滑度差和避障效果差的问题,设计一种改进 RRT Star 算法的路径优化方法。基于传统 RRT 算法的局限性,加入角度约束采样策略,以限制路径的最大转折角;通过包络圆碰撞检测策略提升路径安全性并生成初始路径;采用梯度下降算法对初始路径进行二次优化,得到车辆行驶的最终路径。优化结果表明:相较于传统 RRT Star 的路径规划,改进的 RRT Star 算法在平均曲率、平均转角和最小距离上都具有明显优势,且避障节点更少,曲线更平滑。改进 RRT Star 算法的路径规划可行。

关键词:车辆;无人驾驶;RRT Star 算法;路径规划

中图分类号:TP392 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)05-0234-06

Research on Global Path Optimization of Unmanned Vehicles Based on Improved RRT Star Algorithm

DENG Shengyin

(Lanzhou Modern Vocational College, Lanzhou 730207, China)

Abstract: An improved path optimization method for the RRT Star algorithm is designed addressing the issues of poor smoothness and obstacle avoidance performance in traditional RRT algorithms. Based on the limitations of traditional RRT algorithms, an angle constrained sampling strategy is added to limit the maximum turning angle of the path. The collision detection strategy using envelope circles is used to enhance path security and generate initial paths. With the gradient descent algorithm, secondary optimization on the initial path is performed, and the final path for the vehicle to travel is obtained. The results show that compared to traditional RRT Star path planning, the improved RRT Star algorithm has significant advantages in average curvature, average rotation angle, and minimum distance, with fewer obstacle avoidance nodes and smoother curves, which verifies the feasibility of improvement on RRT Star algorithm for path planning.

Keywords: vehicles; autonomous driving; RRT Star algorithm; path planning

0 引言

近年来,随着无人驾驶技术的兴起,如何提升无人驾驶的路径规划和避障能力,是当前研究的重点。针对该问题,战琦等^[1]为实现无人驾驶汽车的智能换道避障,提出基于组合赋权的综合评价方法,实现了车辆功能的模糊评价;付靖凯等^[2]以无人驾驶汽车为对象,提出基于改进的 Bi-RRT 算法,实现了 AGV 路径规划,但规划精度还有待提高;方文凯等^[3]提出将 CLAM 模型和微观轨迹数据驱动相结合,并将改进 A* 算法应用到移动机器人全局路径规划中,结果表明此方法可实现移动机器人全局路径显著优化。本研究认为,RRT Star 算法凭借快速有效的搜索空间,被广泛应用于全局路径规划中,但目前的检索策略中没有考

虑车辆形状,以及 RRT 算法生成的路径转折角大的问题,从而降低了驾驶的安全性和舒适性。因此,提出一种改进 RRT 算法,并对全局路径优化的可行性进行分析。

1 快速扩展随机树

RRT 优化快速扩展随机树(rapidly-exploring random trees,RRT)的扩展原理如图 1 所示。从起始点进行扩展,在空间中采用随机函数采样,以获得随机点。通过节点扩展策略获得新的节点^[4-6]。RRT 算法虽可实现路径规划,但规划路径中路径转折点过多,转折角过大,同时主要采用点的形式进行随机树扩展,没有充分考虑车辆形状,从而使车辆避障效果不佳^[7-8]。因此,提出以下改进。

基金项目:教育部科技发展中心项目(ZJXF2022299)

作者简介:邓生银(1969—),男,甘肃庆阳人,副教授,本科,研究方向为虚拟仿真和汽修方向,1006822872@qq.com。

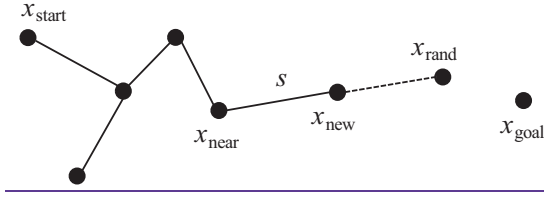


图1 RRT 的扩展原理

1.1 基于车辆转角约束的重采样策略

传统 RRT 算法中,随机树的生长是以空间撒点为临时节点,选择最短距离的点为父节点。生长方向和距离分别为父节点指向临时节点的方向和以单位步长生成新节点^[9-10]。由于每次采样是在可行空间随机采样,可能存在大转角的情况。针对这个问题,在传统 RRT 算法中引入转向约束条件,通过约束新节点生成方向使车辆转向极限控制在一个合理范围内,以此防止这种大转角节点的出现。设车辆的轴距为 l ,最小转向半径为 $R_{\min}$,车辆的前轮最大转向角为

$$\delta_{f\max} = \arctan(l/R_{\min}) \quad (1)$$

式中 $\delta_{f\max}$ 表示车辆前轮的最大转向角^[11-13]。

为进一步评估生成的新节点是否控制在车辆转向的极限约束条件内,设在生成新节点 q_{new} 的过程中,边 $E(q_{\text{nearest}}, q_{\text{new}})$ 和边 $E(q_{\text{nearest-root}}, q_{\text{nearest}})$ 所形成的夹角为 ϕ 。当 RRT 生成节点时,每个扩展的子节点 q_{new} 与父节点的夹角需控制在车辆前轮最大转向角 $\delta_{f\max}$ 下,从而有:

$$\mathbf{V}_{ec1} = (X_{\text{nearest}} - X_{\text{nearest-root}}, Y_{\text{nearest}} - Y_{\text{nearest-root}}) \quad (2)$$

$$\mathbf{V}_{ec2} = (X_{\text{new}} - X_{\text{nearest}}, Y_{\text{new}} - Y_{\text{nearest}}) \quad (3)$$

式中: $\mathbf{V}_{ec1}$ 和 $\mathbf{V}_{ec2}$ 分别表示方向由节点 $q_{\text{nearest-root}}$ 指向节点 q_{nearest} 的向量和方向由 q_{nearest} 指向 q_{new} 的向量^[14-15]。要使生成的新节点 q_{new} 控制在前轮最大转向角 $\delta_{f\max}$ 的约束条件内, q_{new} 需达到以下标准:

$$\cos\phi = \frac{\mathbf{V}_{ec1} \cdot \mathbf{V}_{ec2}}{\|\mathbf{V}_{ec1}\| \cdot \|\mathbf{V}_{ec2}\|} \geq \cos\delta_{f\max} \quad (4)$$

当生成的新节点 q_{new} 没有在前轮最大转向角 $\delta_{f\max}$ 约束条件内,采用下式生成新的节点:

$$\theta = \theta_{\text{nearest}} + \text{rand}(-1, 1) \cdot (\delta_{f\max}) \quad (5)$$

$$q_{\text{new}} = (X_{\text{new}}, Y_{\text{new}}) = (X_{\text{nearest}}, Y_{\text{nearest}}) + (\cos\theta, \sin\theta) \cdot D \quad (6)$$

式中: θ 和 θ_{nearest} 分别表示边 $E(q_{\text{nearest}}, q_{\text{new}})$ 与全局坐标系和边 $E(q_{\text{nearest-root}}, q_{\text{nearest}})$ 与全局坐标系的 X 轴夹角; $\text{rand}(-1, 1)$ 表示 $[-1, 1]$ 范围内的随机数^[16]; $(X_{\text{new}}, Y_{\text{new}})$ 表示新节点 q_{new} 的坐标; $(X_{\text{nearest}}, Y_{\text{nearest}})$ 表示节点 q_{nearest} 的坐标; D 表示随

机树节点的扩展单位步长。

由此,使得生成的节点满足车辆的最大转向角约束,并保持 RRT 算法的随机性。

1.2 基于包络圆的碰撞检测策略

为了解决 RRT 算法在无人驾驶车辆中没有充分考虑车辆形状而导致车辆易发生碰撞的问题,提出一种基于包络圆的碰撞检测策略。具体策略如图 2 所示^[17-18]。

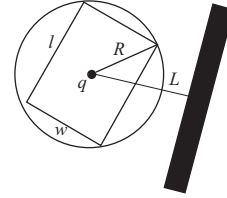


图2 基于包络圆的碰撞检测策略

在图 1 中,当随机树采样生成新节点时,对采样的每个点进行几何约束检测。其中, q 表示每个车辆的采样点,以该点为中心,构建半径为 R 的圆, l 表示车长, w 表示车宽,黑色部分表示碰撞区域。计算圆心 q 到该碰撞区域的距离,若 $R > L$,表示有碰撞风险,此时放弃该点,重新进行采样;若 $R < L$,则表示无碰撞风险,保留该节点,并将该点作为随机数的扩展点。由此,通过这种方式,可保证每个加入的新节点在安全区域内,并根据这些节点,形成初始的规划路径。

1.3 基于梯度下降法的 RRT 算法优化

上述优化虽然能实现无人驾驶车辆的运动学约束和防碰撞,但还是存在生成路径会出现曲率突变和不连续现象,严重影响乘坐的舒适感。基于此,在以上改进的 RRT 算法基础上,参考部分研究者的经验,采用梯度下降算法对生成的初始路径进行再优化。梯度下降算法主要采用迭代求解最小化优化函数,以实现目标值的优化。优化目标函数 P 为

$$P = W_o \cdot P_{\text{obs}} + W_c \cdot P_{\text{cur}} + W_s \cdot P_{\text{smo}} \quad (7)$$

式中: P_{obs} 的作用是对车辆与障碍物的碰撞进行惩罚,以引导车辆远离不可行区域; P_{cur} 负责对每个路径点的最大曲率进行约束,将路径曲率控制在合理范围内; P_{smo} 负责进行路径平滑处理; W_o 、 W_c 、 W_s 分别表示 3 项优化函数的权重^[19]。

1) 路径防碰撞函数设计

采用 P_{obs} 惩罚车辆与障碍物的碰撞,具体表达式为:

$$P_{\text{obs}} = \sum_{i=1}^N \sigma_{\text{obs}}(|x_i - o_i| - d_{\text{obs}}) \quad (8)$$

$$\sigma_{\text{obs}} = (|x_i - o_i| - d_{\text{obs}})^2 \quad (9)$$

式中: x_i 表示路径点的坐标 (x_i, y_i) ; o_i 表示距离路径点 x_i 最近的障碍物点的坐标; d_{obs} 表示最大距离的阈值^[20]。权重 W_o 负责 P_{obs} 对路径变化的影响进行设置, 由此可计算出 P_{obs} 在 x_i 处的梯度。

2) 乘坐舒适性函数设计

乘坐舒适性优化即对每个路径点的最大曲率进行约束, 确保其控制在标准范围内。因此, 加入 P_{cur} 项, 具体表达式为

$$P_{\text{cur}} = \sum_{i=1}^{N-1} \sigma_{\text{cur}}(K_i - K_{\text{max}}) = \sum_{i=1}^{N-1} \sigma_{\text{cur}}\left(\frac{\Delta\phi_i}{|\Delta x_i|} - K_{\text{max}}\right) \quad (10)$$

针对顶点 i_ϕ 处的最大曲率项, 对影响点 i 处曲率的 3 个点 $i-1$ 、 i 和 $i+1$ 进行求导。由此可获得节点 i 处切向角 ϕ_i 的变化公式为

$$\Delta\phi_i = \cos^{-1} \frac{\Delta x_i^T \Delta x_{i+1}}{|\Delta x_i| |\Delta x_{i+1}|} \quad (11)$$

式中顶点 x_i 和 x_{i+1} 处的位移向量表示为 Δx_i 和 Δx_{i+1} 。其中 $\Delta x_i = x_i - x_{i-1}$, $\Delta x_{i+1} = x_{i+1} - x_i$ 。最大允许曲率表示为 K_{max} 。当 $\frac{\Delta\phi_i}{|\Delta x_i|} \geq K_{\text{max}}$ 时, 采用惩罚函数 σ_{cur} 对最大允许曲率的偏差进行惩罚。权重 W_c 的作用是设置 P_{cur} 对路径变化的影响, 从而求出 P_{cur} 在点 x_i 处的梯度。

3) 路径平滑性函数设计

为提升驾驶路径的平滑性, 采用优化函数 P_{smo} 项约束间距不均匀、方向变化大的路径间的位移向量, 从而增加路径平滑性^[21]。 P_{smo} 的具体表达式为

$$P_{\text{smo}} = \sum_{i=1}^{N-1} (\Delta x_{i+1} - \Delta x_i)^2 \quad (12)$$

权重 W_s 负责设置 P_{smo} 对路径变化的影响, 由此计算出 P_{smo} 项在顶点 x_i 处的梯度可表示为

$$\frac{\partial P_{\text{smo}}}{\partial x_i} = 2(x_{i+2} - 4x_{i+1} + 6x_i - 4x_{i-1} + x_{i-2}) \quad (13)$$

2 实验验证

2.1 算法仿真验证

1) 仿真环境

为验证改进 RRT 算法的有效性, 在 CPU 为 Intel 主频 2.5 GHz, 内存 4 GB 的计算机上进行。操作系统 Windows7, 仿真软件为 MATLAB 2019a。

仿真区域为 50×50 , 起始点坐标 $(10, 20)$, 目标点的坐标为 $(40, 45)$, 最大转弯角为 30° , 步长设置为 3。行驶场景的栅格地图如图 3 所示。



图 3 路径规划仿真地图

2) 改进前后 RRT 的结果对比

a) 车辆转角约束对比

采用车辆转角约束的重采样策略进行转折点处理, 得到采用和未采用车辆转角约束的路径规划结果, 具体如图 4、图 5 所示。



图 4 未采用车辆转角约束的规划路径



图 5 采用车辆转角约束的规划路径

由图 4 和图 5 可知, 采用车辆转角约束的重采样策略后, 该算法可去除大于车辆最大转弯角的节点, 并生成符合车辆最大转弯角条件的节点, 从而使得规划的路径平滑度更高, 明显优于传统的 RRT 算法。

b) 碰撞约束对比

基于图 4、图 5 规划路径, 采用包络圆的碰撞检测方法对该路径进行对比分析, 结果如图 6、图 7 所示。



图 6 未采用碰撞约束

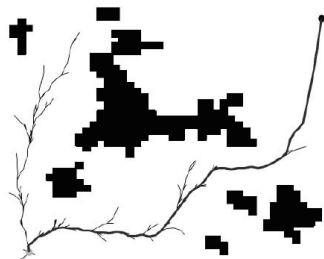


图 7 采用碰撞约束

由图 7 可知,在规划路径中加入包络圆碰撞检测方法后,生成的路径与障碍物的距离较远,说明其发生碰撞的概率显著降低,从而提升了无人驾驶车辆的安全性。

c) 基于梯度下降的路径优化对比

为验证提出 RRT 二次优化效果,实验将对梯度下降优化前后的规划路径进行对比分析,由此得到对比结果如图 8 所示。



图 8 基于梯度下降优化前后的路径对比

由图 8 可知,二次优化后的规划路径曲率平滑度更高,且无明显突变。由此说明,采用梯度下降算法对改进的 RRT 算法进行二次优化后,能够增强规划路径的平滑度,降低曲率突变概率,从而提升了路径规划效果。

3) 与其他算法对比

为了进一步验证提出的改进算法的性能,实验将增加对比 RRT 算法、RRT-connect 算法、RRT* 算法 3 种算法,分别采用 4 种算法进行 10 次路径规划,由此得到 4 种算法性能如表 1 所示。

表 1 4 种算法的对比结果

算法	平均曲率/ (m^{-1})	曲率均方差/ (m^{-1})	最小距离/m	平均转角/ ($^{\circ}$)	转角均方差/ ($^{\circ}$)
RRT	0.027	0.024	4.129	9.275	8.446
RRT-connect	0.036	0.028	4.008	8.035	8.249
RRT*	0.038	0.022	5.827	7.149	5.863
本文算法	0.005	0.007	9.125	5.013	3.886

由表 1 可知,本算法的平均曲率和曲率均方差分别取值为 0.005 m^{-1} 和 0.007 m^{-1} ,明显低于另外 3 种算法。而算法最小距离为 9.125 m ,均高于另外 3 种算法。平均转角和转角均方差分别取值为 5.013° 和 3.886° ,相较于 RRT 算法、RRT-connect 算法和 RRT* 算法更低。

综合分析可知,本算法的波动较小,稳定性更强,其规划的路径平滑度更高,曲率变化和路径转向平缓度更高,规划路径点间无明显转向突变,从而可有效提升车辆的舒适性。

2.2 算法实际应用验证

1) 实物搭建

为了验证所提改进 RRT 算法的有效性,基于自主搭建的无人车平台进行测试。该平台上位机为国云 minii7 工控机,配置 ROS 操作系统,并安装有摄像头和激光雷达,同时通过航迹推演算法求解底盘的里程计信息。

设置无人车正常行驶速度为 1.5 m/s ,在 $100 \text{ m} \times 75 \text{ m}$ 随机摆放障碍物的场地内进行测试,障碍物包括两种尺寸,分别为 $3.00 \text{ m} \times 0.75 \text{ m}$ 和 $1.00 \text{ m} \times 1.00 \text{ m}$ 。同时还放置直径为 0.6 m 的圆柱形立柱。

首先,确定无人车初始位置与目标位置,并利用其安装的激光雷达对测试环境进行扫描。然后基于 ROS 操作系统中的 amcl 和 Gmapping 模块构建二维地图,基于 global planner 和 local planner 模块规划局部与全局路径,得到如图 9 所示的地图模型。图 9 中,浅色和深色区域分别表示无人车可自由运动和不能达到的区域。

基于图 9 的地图模型,利用改进 RRT 对路径进行规划,并将其规划结果与改进前标准 RRT 的规划结果进行对比,结果如图 10 所示。由图 10 可知,标准 RRT 算法规划生成的路径存在折线段多和路线弯曲程度大的问题,其原因是标准 RRT 算法在规划路径时节点通过随机采样获取,且存在寻址精度低、收敛速度较缓慢的问题。而改进的 RRT 算法规划的路径未出现多余无效拐点,且

路径较为光滑,明显优于标准 RRT 算法规划的路径。分析其原因是,改进 RRT 算法通过采用动态步长和转弯角限制,删除了冗余节点,进而增强了对目标的指向性。由此可见,改进 RRT 算法具有一定的实际应用效果,且对路径的规划效果优于标准 RRT 算法。



图9 地图模型



(a) 标准RRT算法的输出结果



(b) 改进 RRT算法的输出结果

图10 改进前后 RRT 算法路径规划结果对比

3 结语

综上所述,本文所提出的基于改进的双重优化 RRT Star 算法的车辆避障方法具备可行性和有效性。该算法可有效提升传统 RRT 算法在车辆全局路径规划中的平滑度,从而进一步增强了

无人驾驶车辆的避障效果和安全性。实验发现,在传统 RRT 算法的基础上,引入的角度约束采样策略、包络圆碰撞检测方法和梯度下降二次优化算法后,可有效降低传统 RRT 算法搜索路径的盲目性,减少了路径规划时的转折点和潜在碰撞危险,最终可生成一条安全性强的全局优化路径。通过仿真验证分析可知,对比于传统的 RRT 算法、RRT-connect 算法和 RRT* 算法,本文算法的路径平均曲率、曲率均方差、平均转角和转角均方差明显更低,路径规划的最小距离更大。由此,该算法可在无人驾驶中进行应用,具有一定的价值。

参考文献:

- [1] 战琦,周炜,李文亮,等. 基于组合赋权的车辆智能换道避障功能模糊综合评价[J]. 公路交通科技, 2023, 40(1): 236-244.
- [2] 付靖凯,慕丽,邸雪阳,等. 基于改进 RRT 算法机械臂复杂避障路径规划研究[J]. 现代电子技术, 2025, 48(6): 180-186.
- [3] 方文凯,廖志高. 基于改进 A* 算法的移动机器人全局路径优化研究[J]. 广西科技大学学报, 2023, 34(1): 73-78, 84.
- [4] 王勤,魏利胜. 基于改进 HLO 和动态窗口的 AGV 动态避障路径规划算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2025, 39(2): 213-221.
- [5] 王力,赵全海,黄石磊. 面向物流机器人的改进 Q-Learning 动态避障算法研究[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(3): 267-274.
- [6] 金将,王小平,臧铁钢,等. 基于改进蚁群算法的机器人避障路径规划[J]. 计算机工程与设计, 2025, 46(4): 950-958.
- [7] 刘思默. 基于视觉感知+蚁群算法的管道检测机器人避障研究[J]. 兰州石化职业技术大学学报, 2025, 25(1): 37-42.
- [8] 王玉有,余红云,吴海江. 基于 RBF 神经网络的无人驾驶电机车避障控制[J]. 机械与电子, 2025, 43(1): 47-52.
- [9] 赵广元,韩雪松,黄楠. 基于 RRT 的机械臂路径规划改进算法[J]. 西安邮电大学学报, 2024, 29(3): 65-74.
- [10] 魏合瑜,徐建. 最小二乘法分段拟合下的无人驾驶汽车下坡空电联合制动方法[J]. 液压气动与密封, 2025, 45(2): 79-85.
- [11] 王洁,蒋晓蓓. 基于 Smith 预估补偿算法的无人驾驶汽车环境智能自感知方法[J]. 机械设计与研究, 2025, 41(1): 234-238.
- [12] 万淑敏,孙长超,袁培康,等. 中空连续体机械臂的设计与主从任务转换避障控制[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2025, 58(1): 24-35.
- [13] 王萍,潘树国,蔚保国,等. 基于 RSS_GN RRT 算法的狭长空间路径规划[J]. 电子测量与仪器学报,

- 2024,38(1):72-85.
- [14] 武斌,金春洁. 基于小波神经网络与遗传算法的机器人全局路径和局部路径优化[J]. 自动化与仪表, 2023,38(7):33-37.
- [15] 盛峰,沈拓,谢远翔,等. 全自动无人驾驶列车障碍物检测的轨道区域检测算法[J]. 同济大学学报(自然科学版),2025,53(3):402-409.
- [16] 王胜源,王珍. 基于改进遗传算法的冷鲜肉配送路径优化研究[J]. 物流科技,2025,48(7):15-19.
- [17] 胡碟,胡志华,李姚娜. 基于两阶段算法的多无人机船舶排放监测选址与路径优化[J]. 中国航海, 2025,48(1):165-173.
- [18] 陈颖,姜建满,杨磊. 基于改进遗传算法的冷链配送路径优化方案[J]. 延边大学学报(自然科学版), 2025,51(1):66-70.
- [19] 戴萍. 基于 FWA 及 ABC 的冷链物流配送路径优化模型[J]. 贵阳学院学报(自然科学版), 2025, 20(1):53-58.
- [20] 张玉建,杨坤,何超,等. 基于改进模拟退火算法的单层网壳结构拆除施工路径优化方法[J]. 建筑结构, 2025,55(5):107-116.
- [21] 张萌,孙璐璐,苏兵,等. 考虑空载损失的非集中式共同配送订单分派及路径优化研究[J]. 工业工程, 2024,27(2):107-118,137.

收稿日期:2023-10-20

(上接第 162 页)

4 结语

某型飞机修理的总装车间,采用精益的脉动生产理念,同时将自动化、传感器、数字化技术与具体装配业务相结合,在网络信息系统支持下,构建基于数据驱动的总装生产线。实现了装配全过程的透明化,改变了传统飞机维修的总装作业模式,将总装生产周期缩短了 30%,提升了飞机总装交付能力和整体生产管理水平。

数字化总装修理线建设是当前形势下航空修理企业转型升级的必然趋势,也是提升管理和运营水平的一项重大变革,涉及数字化技术、物流系统和精益管理理念等,是一项复杂的系统工程。随着数字孪生、数据中台、5G 等技术的成熟和应用,持续研究和改善数字化飞机总装修理线对于飞机批量修理能力的提升具有重要意义。

参考文献:

- [1] 裴书梅,杨根军,陈军. 飞机总装脉动生产线智能制造技术研究与应用[J]. 航空制造技术, 2016, 59(16):41-47.
- [2] 宋利康,郑堂介,朱永国,等. 飞机脉动总装智能生产线构建技术[J]. 航空制造技术,2018,61(增刊1):28-32.
- [3] 方水良,刘猛男,鲜果,等. 飞机移动装配线:脉动与续动[J]. 航空制造技术,2021,64(16):40-50.
- [4] 李金龙,杜宝瑞,王碧玲,等. 脉动装配生产线的应用与发展[J]. 航空制造技术,2013,56(17):58-60.
- [5] 李西宁,支劭伟,蒋博,等. 飞机总装数字化脉动生产线技术[J]. 航空制造技术,2016,59(10):48-51.
- [6] 黄江,杨海,史小强,等. 面向智能制造的航空发动机数字化总装生产线建设研究[J]. 航空制造技术, 2020,63(6):34-42.
- [7] 彭文华,王茜,周勇,等. 数字孪生驱动的航空制造车间智能柔性生产线设计与实践探索[J]. 数字化转型,2025(4):100-109.
- [8] 杨锋,穆志国,范军华,等. 大型飞机总装集成脉动生产线技术研究[J]. 航空制造技术, 2022, 65(12): 48-55,62.
- [9] 关宇际,侯张艳,王兆清. 装备制造企业数字化生产线的建设与应用[C]//2024 中国航空工业技术装备工程协会年会论文集. 北京:中国航空工业技术装备工程协会,2024:126-130.
- [10] 严金凤. 飞机总装脉动生产线数字化仿真与优化关键技术[J]. 航空制造技术,2020,63(20):54-60.
- [11] 董玉龙,陈璐,鲍中凯. 基于博弈论的飞机总装物流配送系统资源配置[J]. 浙江大学学报(工学版), 2025,59(1):120-129.
- [12] 孙孝飞,郭捷,魏灿名,等. 3C 智能制造工厂的 AGV 智慧物料传输与调度综述[J]. 中南大学学报(自然科学版),2025,56(2):514-535.
- [13] 田亚丽,陈建勋,王雷,等. 面向数字化制造的船舶生产线群控方法[J]. 制造业自动化, 2024, 46(10): 136-141,195.
- [14] 杜纪柱,李帅,徐洪森,等. 智能物流 AGV 在机械制造产线中的应用[J]. 智能制造,2025(2):80-85.
- [15] 张礼武. 浅谈 PDM 与 MES 系统集成[J]. 智能制造, 2017(5):59-61.
- [16] 胡振宇,窦耀,邵长野,等. 基于 B/S 架构的智能制造产线 MES 系统的设计与开发[J]. 农业装备与车辆工程,2025,63(3):122-126.
- [17] 任秀丽,陈敬,周宇,等. 数字化装配生产线中的工艺装备管理[J]. 机械工程与自动化, 2025(1): 206-209.
- [18] 郑杜,唐敦兵,王旭,等. 个性化定制生产模式下的云制造系统设计研究[J]. 机械制造与自动化,2020, 49(1):33-36.

收稿日期:2024-03-26