

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2024.02.008

基于蚁群算法的民用飞机 设备架智能布置设计研究

腾杨刚^{1,2*} 张海洋³ 葛桂林³ 侯严庭³

(1. 上海飞机设计研究院, 上海 201210; 2. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 150001; 3. 上海飞机制造有限公司, 上海 200443)

摘要: 传统的基于流程的民用飞机设备架总体设计工作, 需要设计师借助结构和系统数字样机经过反复协调迭代形成设备架布置方案, 严重依赖于设计师的工程经验, 方案迭代速度慢且方案的优劣评价较难量化, 这对飞机研制周期和整机经济性都有较大的影响。本文对蚁群算法状态转移规则、搜索路径优化、信息素更新等开展研究, 完成设备架智能位置规划算法设计; 并基于 React 组件化优势, 完成设备架智能布置可视化开发; 最后将设备架智能布置算法和前端 UI 结合, 完成民用飞机设备架智能布置系统 V1 版本的研究设计, 设计师可在操作页面一键运行算法, 设备架布置方案计算完成后自动在页面展示, 也可根据设计需要将计算结果导入 CATIA 开展数字样机设计。

关键词: 民用飞机; 设备架; 智能布置; 蚁群算法; 组件化

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

OSID:



0 引言

民用飞机电子电气设备架上通常布置几十个不同系统的电气设备, 设备布置在设备架上需要考虑间隔距离、通风需求、安装维护等多种约束, 一般涉及系统设备多、约束复杂, 传统的设备架布置需要飞机工程师综合考虑设备设计要求反复迭代, 最终得到布置方案。该布置工作存在着耗时长、迭代慢、方案无法保证综合最优的问题。本文开展的民用飞机设备架智能布置研究, 通过知识工程方法, 将行业规范、民用飞机设备数据、布置规则、现有机型经验数据等设备布置约束、设备架布置方法固化并转化成计算机可识别的机器语言, 根据行业设计规范, 确定设备架布置方案的评价指标, 采用蚁群算法将设备架布置问题转化为多目标综合优化问题, 通过智能设计算法自动计算求解飞机设备架总体布置方案, 达到综合最优, 并且缩短布置方案迭代周期, 加快型号研制进程。通过数据驱动的智能

布置, 基于系统工程的正向设计, 使得布置方法更科学; 通过智能算法自动化设计, 使得飞机设计更高效; 通过数据驱动综合最优, 使得飞机布置更合理。

1 国内外蚁群算法研究现状

Dorigo 等通过研究蚂蚁觅食找路行为, 发现蚁群在搜索食物时, 蚂蚁会在遍历后的路途中标记信息素, 给同伴传达走过的路径信息, 并将蚁群的觅食找路反馈方法总结为蚁群算法 (ant colony algorithm, 简称 ACO)。蚁群觅食途中找到最优前进路径的过程如图 1 至图 4 所示: 图 1 中, 蚁群在没有障碍的情况下正常前行寻找食物, 图 2 表示在蚁群的行进路线中出现了设置的障碍, 图 3 表示在觅食的初始过程中, 蚂蚁对于最优路线和其他路线的选择是具有相同可能性的, 但随着蚁群不断觅食并回到巢穴, 蚁群在最短路径散发的信息素会越来越多, 最后蚁群会集中在最短的觅食回

* 通信作者. E-mail: haw_k_teng@163.com

引用格式: 腾杨刚, 张海洋, 葛桂林, 等. 基于蚁群算法的民用飞机设备架智能布置设计研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2024(2): 51-57. TENG Y G, ZHANG H Y, GE G L, et al. Research on intelligent layout design of civil aircraft equipment rack based on ant colony algorithm[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2024(2): 51-57 (in Chinese).

巢途径上,如图 4 所示。

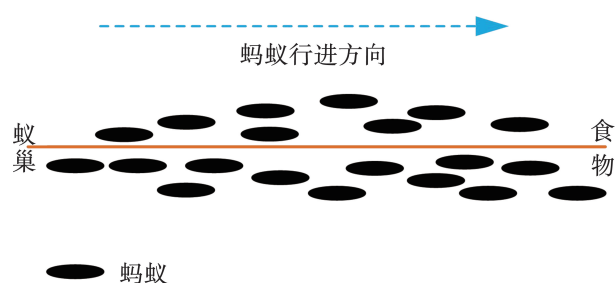


图 1 蚁群无障碍觅食

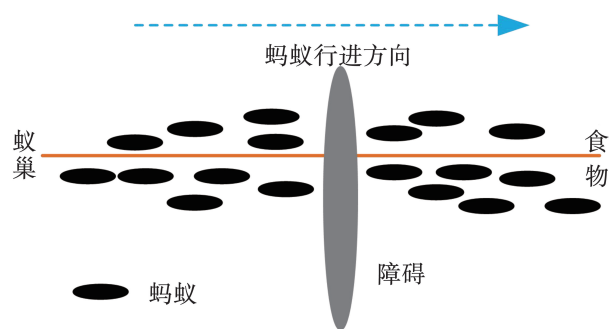


图 2 蚁群觅食途中出现障碍

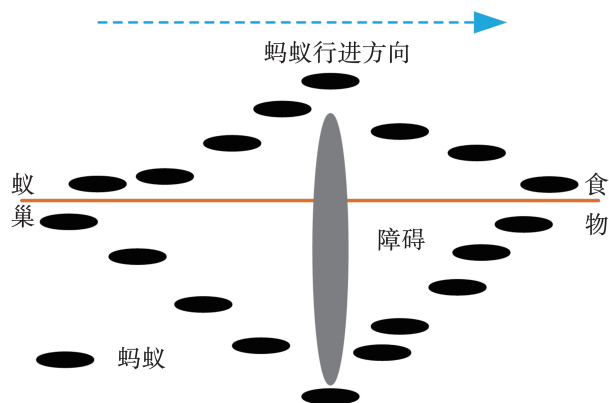


图 3 蚁群觅食途中避开障碍

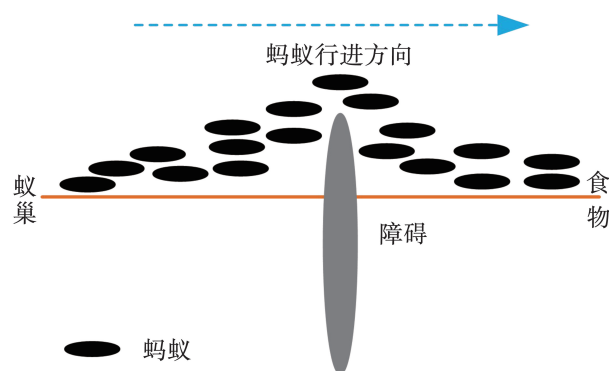


图 4 蚁群觅食途中找到避开障碍最短路径

ACO 被发现后,许多学者对 ACO 进行了深入的研究和改进,张玮等^[1]使用优化的烟花-HACO 用于智能动态路径规划,使用“镜面映射”和“先锋火花”规则进行算法改进,最终,APFWA-ACA 算法取得 77.15 的最优路径;刘朝华等^[2]使用混沌扰动提高蚁群的变异性,使 ACA-LA 算法在 St70 问题取得 677.11 最优路径;Danchuk Viktor 等^[3]使用修正蚁群算法,使得蚁群可以同步或异步遍历交通路径,在特定路线改变交通流的速度,并取得耗时 12 780 s,最优路径为 157 m 的结果;范厚明等^[4]根据模型具有多中心和时效限制等多种要求,对蚁群算法进行了适应性调整,取得使用 5 辆车送货,最优路径为 1 437.9 的较好结果,并且实现综合降低货物在途损耗和物流配送成本;张召远等^[5]将 ACO 根据欧式距离进行分支选取,在实验中证明使用蚁群算法具有较好的多维操控性能和连通性能,且降低了多余边界噪声和分支骨架;吕游等^[6]建立在敌人打击条件下的车辆路径模型,改变信息素更新方式,有效解决了 VRPTW 问题,并在 0~15 个作战单元的送货路径规划中,得到 2 245.38 的结果;郑炜等^[7]建立了可靠性强、功耗低、时间短的双层蚁群算法优化目标模型,将蚁群第一次搜索和第二次搜索对应制造场景的可执行加工顺序和候选云服务,从符合工艺要求、物流条件、收敛速度验证算法的有效性;REN Yaping 等^[8]则采用 MCDM 方法,建立模糊三角函数,综合考虑经济、环境和装卸效率,并用标准检查程序检查算法的合理性;王磊等^[9]将蚁群算法的第一个寻优维度设定为订单的制造顺序,第二个寻优维度设定为该工序制造的优先级,从而达到两个维度的启发式搜索,并以某企业的实际订单任务资源配置协调进行算法有效性验证;LIU Yi-han 等^[10]将多样的 DVRP (dynamic VRP) 优化要求设定为以最低成本服务最大数量的客户,在必须服务的且有时间窗要求的客户中插入可选择的无时间窗要求的客户,并且高效完成了送货;YU Bin 等^[11]将 DMDVRP (dynamic multi-depot VRP) 动态多中心路径求解作为 DVRP 的扩展进行求解,并且使用改进的蚁群算法和距离聚类算法等综合来进行 DMDVRP 的求解;ZHANG Jingling 等学者^[12]在 DRMVRP (dynamic requests MVRP) 动态请求多配送中心路径规划中,考虑客户变化和在途补货问题,让 DRMVRP 分化为 MERP 和数学图论规划进行

求解。

综上,蚁群算法被专家学者们探索后,被全面地用于不同场景、方式、需求、目标的车辆旅途路线设计和路径优化。此外,ACO 还被用于车间生产线和机电产品的排产装卸优化,进行大规模集成电路线路规划,电力系统的负载和故障检测,复杂大型装备内部布置路径规划等^[13-17] 各种重要问题的解决。因此,蚁群算法及其改进的各种群算法必将得到更广泛的研究,本文研究设计蚁群算法用于民用飞机设备架智能布置。

2 蚁群算法模型设计

蚁群算法主要通过模仿蚂蚁在往返蚁巢和食物途径上释放信息素(τ_{ij})来搜索出最短路径,本文在此基础上对蚁群算法状态转移规则、局部交叉路径优化(2-Opt)、更新信息素的方法等开展研究,最终将算法用于设备架布置位置规划中。

2.1 状态转移规则

在本文的 ACO 算法中,蚂蚁种群的数量设为 m ,蚁群通过访问每个设备架框格生成路径,直到所有的设备架框格都被 ACO 遍历一遍。已经遍历的设备架框格会被移出候选表,候选表使得蚁群不再访问已遍历的设备架框格。为加快蚁群算法的路径遍历效率,每次被选择的设备架框格应被限制在合适的候选表内,这种方法被称为候选集合策略(candidate set strategies),且使用候选表 $Allowed_k$ 可以避免搜索已遍历的设备架框格。本文采用动态候选表策略, $Allowed_k$ 在搜索过程中不断更新,使用动态候选表方法能够提高解的质量和运行效率, $Allowed_k$ 更新规则如下:

- 1) 运行蚁群算法开始搜索设备架框格, $Allowed_k$ 为全部候选设备架框格;
- 2) 设备架框格 i 完成蚁群算法遍历后,候选表中对应的设备架框格删除;
- 3) $Allowed_k$ 内的设备架框格必须全部完成遍历才能进行候选表更新。

第 k 只蚂蚁选择下个设备架框格 j 作为设备架框格 i 之后遍历的概率遵循以下公式:

$$P_{ij}(k) = \begin{cases} \frac{(\tau_{ij}(t))^\alpha \times (\eta_{ij}(t))^\beta}{\sum_{\mu \in Allowed_k} (\tau_{i\mu}(t))^\alpha \times (\eta_{i\mu}(t))^\beta} & j \in Allowed_k \\ 0 & j \notin Allowed_k \end{cases} \quad (1)$$

$$Cost(i, j, k) = \xi_1 D(i, j, k) + \xi_2 Q \quad (2)$$

其中, α 指信息素; β 指启发权重; $\tau_{ij}(t)$ 指在 t 时刻; $D(i, j, k)$ 指第 k 只蚂蚁遍历的 i 到 j 的长度; Q 为层格数; ξ_1, ξ_2 为常数;蚂蚁寻路过程中在边 (i, j) 的数据量, $\eta_{ij}(t)$ 是启发函数,为 $Cost(i, j, k)$ 路径机会成本的倒数; $Allowed_k$ 表示第 k 只蚂蚁可选择的设备架框格的集合。

2.2 局部交叉搜索路径优化

2-Opt(2-Optimization) 优化算法也称两交换算法,是一种局部路径优化搜索方法,也是处理复杂叠加问题的较好方法,最早由 Croes 发表在运筹研究上的经典启发式算法,主要思想是将相邻两位置的路径进行交换,求出模型的最优解,避免了算法求解陷入停滞。

Glover 在优化搜索算法的研究基础上,总结出禁忌搜索算法(prohibit search),现已被大范围地用于求解叠加优化问题。在设备架布置位置规划时,引入 2-Opt 思想,交换设备架框格的遍历顺序,从而产生新的可行解,最终使算法得到满足要求的较优解,如图 5 所示,将 N1 中 A-B-C-D-E-F-G-H-I 顺序的相邻设备架框格 G、H 进行遍历顺序交换,得到 N2 中的 A-B-C-D-E-F-H-G-I 的求解顺序,将 2-Opt 方法加入到 ACO 中,可以提升 ACO 的求解速度和效率。

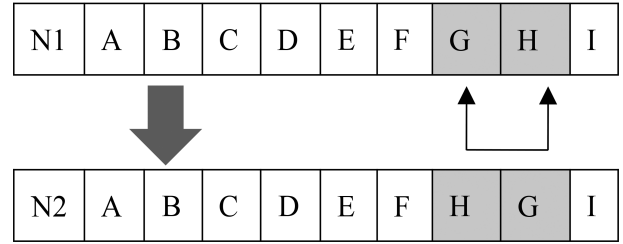


图5 2-Opt 示意图

2.3 信息素更新

蚂蚁找到食物后,会在路径中标记信息素,信息素浓度越大,蚂蚁选择该路径的可能性越大,目标点在第 i 只蚂蚁经过后对信息素更新,在 ACO 运行前,信息素平均分布即每条路径的选择概率均等。在 ACO 运行后,信息素聚集在最优路径上。本文设计的信息素由局部与全局更新两部分构成,当蚂蚁经过设备架框格 i 时,通过局部更新将设备架框格 i 的信息素减少,以提高蚂蚁选择未搜索过设备架框格的可能性,并防止提前陷入局部最优,局部信息素按式(3)更新。

$$\tau_{ij}(t) = (1-\gamma)\tau_{ij}(t) \quad (3)$$

其中, γ 指信息素蒸发率。

全局更新是在蚂蚁完成路径搜索时, 提高寻优路线中最佳路线的信息素数值, 全局信息素如式(4)进行更新。

$$\tau_{ij}(t) = (1-\delta)\tau_{ij}(t) + \delta\Delta\tau_{ij}(t) \quad (4)$$

$$\Delta\tau_{ij}(t) = \begin{cases} \frac{Q}{k \times L_k} \times \frac{D^k - D_{ij}}{P^k \times D^k}, & (i, j) \in \text{全局最优} \\ 0, & (i, j) \notin \text{全局最优} \end{cases} \quad (5)$$

在式(4)至式(5)中, δ 为信息素的挥发度, 值为(0, 1); $\Delta\tau_{ij}(t)$ 的公式如式(5), $L_k = \sum_1^k D^k$, D^k 是第 k 条路的长度; D_{ij} 是设备架框格 i, j 之间的距离; P^k 表示第 k 条路径设备架框格数量。从式(5)可知, 信息素的变量 $\Delta\tau_{ij}(t)$ 与距离 $L(i)$ 成反比, 即短途对蚁群更有吸引力。因更新信息素时, 可能会使部分边的数据量远超其它边, 蚂蚁重复选择该边, 停止探索新路径, 陷入局部最优解。但通过限制信息素轨迹最值 $\tau_{\min}, \tau_{\max}$ 能防止信息素轨迹产生较大差别, 信息素轨迹最值设定如式(6)和式(7)所示。

$$\tau_{\min} = \frac{Q}{\sum_1^i 2D_{li}}, (1 < i \leq 18) \quad (6)$$

$$\tau_{\max} = \frac{Q}{\sum_1^i D_{li}}, (1 < i \leq 18) \quad (7)$$

其中, D_{li} 表示第 i 个设备架框格到中心的距离, Q 是常数。

3 民用飞机设备架智能布置系统

3.1 React 组件化开发

React 由于特殊的架构和清晰的编程思路, 已成为主流的 Web 开发工具, 其主要有高效虚拟 DOM 和跨浏览器兼容、组件化、灵活性强、移动端 PC 端切换便捷等特殊优势, 其中 React 最主要的特点和优势即为组件化, 可以实现组件反复使用, 有效降低编程的工作量。在图 6 中, 可以发现在 React 组件的全生命周期内^[18], React 的存续阶段由 Mounting 实例化、Updating 重新渲染和 Unmounting 销毁等组成, 当 Component 的 props 产生改变时, DOM 也随之改变。在初始化周期中, GetDefaultProps 初始化时会被使用一次, 之后将不会再被使用, GetDefault 中的返回值一般可被用来定义 Props; ComponentWillMount 进行使用之前, 存在 PC 端, 是

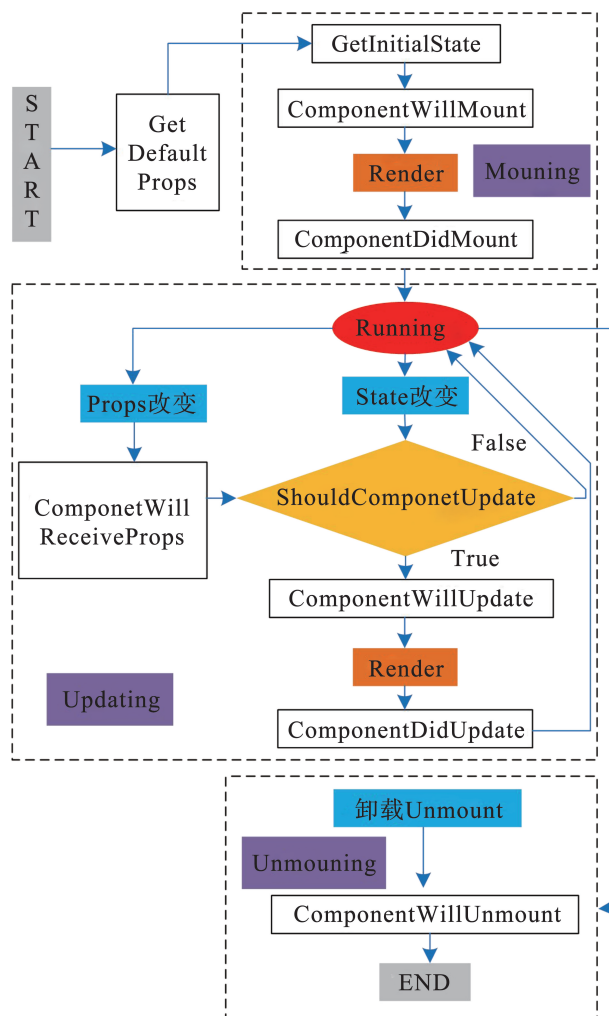


图 6 React 组件存、取、毁的流程

执行 Render 前编辑状态的最后机会; Render 是被用来创建虚拟 DOM 的必须方式, 常常被用来表示组件的输出; ComponentDidMount 在首次被使用后, 仅存在于 PC 端并产生相应的 DOM, 能够通过 this.getDOMNode() 完成使用; 在 React 组件再次被更新的过程中, 改变 Props 能够使用父组件进行相应地改变的形式, 使用 ComponentWillReceiveProps 进行 State 更新, 并可以使得 Render 再次更新相应组件; ShouldComponentUpdate 在 Props 或 State 产生变化时, 给出 True/False 的布尔值, 并被用来判断是否进行对应的组件更新; ComponentWillUpdate 在 State 未被 Render 使用或 Props 的新状态时使用, 且在组件的初始阶段不能被用来更新 Props 和 State; ComponentDidUpdate 在上一个组件给出 True 的值后, 实现更新并被再次使用; 在组件 Unmounting 周期中, React 在完成组件的使用后, 执行 Compo-

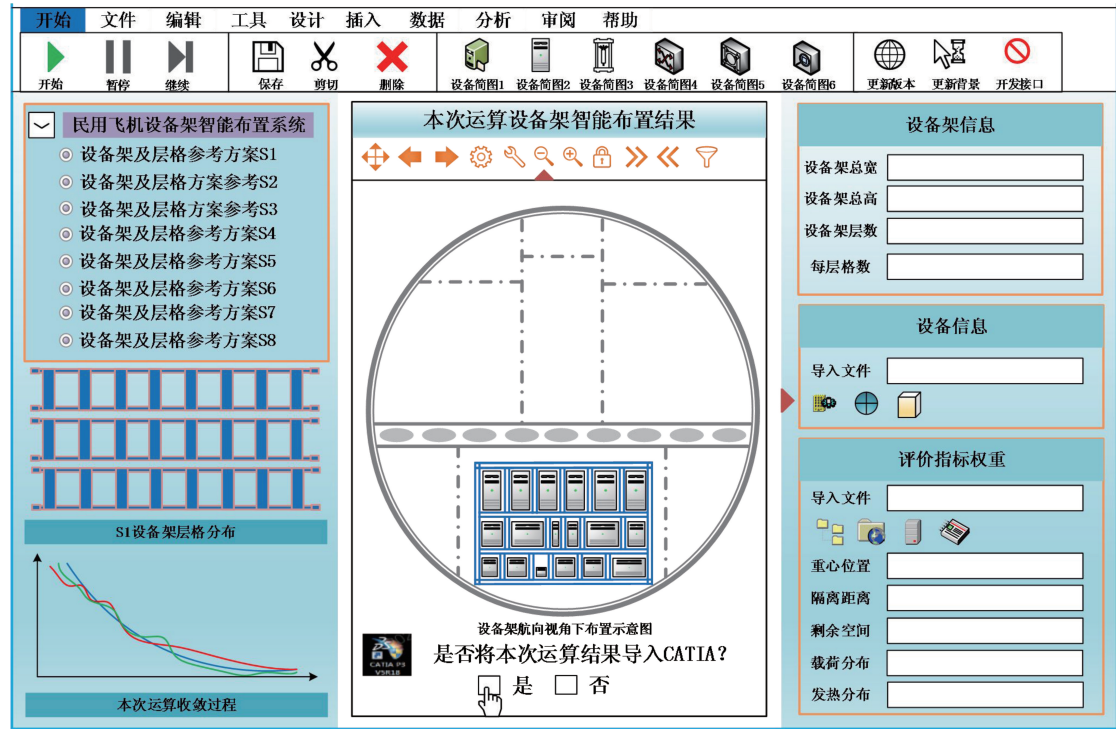


图 7 民用飞机设备架智能布置系统

mentWillUnmount 将组件从 DOM 中销毁,结束组件。

3.2 民用飞机设备架智能布置系统

如图 7 所示,将本文设计的蚁群算法和基于 React 开发的民用飞机设备架智能布置前端操作页面进行结合,工程师可以在前端页面一键导入设备 Excel 或 Word 等格式数据表,并根据实际设计需要选择设备架框格宽度、高度、个数等参数,工程师在页面操作选择开始计算设备架布置方案,后台自动调取本文设计的蚁群算法,在计算完成后,页面将展示设备架本轮求解的布置方案示意结果,同时,工程师可以根据需要将计算结果导入 CATIA 中,开展下一步设计。

4 结论

民用飞机设备架是空调、电源、防火、飞控、液压、燃油、气源、导航等多个系统关键设备的集成布置区域,其布置方案能否满足系统设备设计安装等要求,将对全机经济性、安全性、维修性产生重要影响,本文基于蚁群算法,实现设备架多目标综合最优布置方案的智能推荐,可以在前端页面输出优化求解后的布置方案,并给出布置方案示意图及可导入 CATIA,将设备架的初步布置周期由 8 小时缩短为 1 小时,实现飞机设备架布置方案的快速求解和

数字样机的快速迭代。

参考文献:

[1] 张玮,马焱,赵捍东,等. 基于改进烟花-蚁群混合算法的智能移动体避障路径规划[J]. 控制与决策,2019, 34(2):335-343.

[2] 刘朝华,张英杰,章兢,等. 蚁群算法与免疫算法的融合及其在 TSP 中的应用[J]. 控制与决策,2010, 25(5):695-700,705.

[3] DANCHUK V, BAKULICH O, SVATKO V. An improvement in ant algorithm method for optimizing a transport route with regard to traffic flow[C]//Transbaltica: Transportation Science and Technology Conference. [S.l.: s. n.],2017.

[4] 范厚明,杨翔,李荡,等. 基于生鲜品多中心联合配送的半开放式车辆路径问题[J]. 计算机集成制造系统, 2019,25(1):256-266.

[5] 张召远,戴宁,刘浩,等. 基于距离变换的蚁群搜索骨架提取方法[J]. 系统仿真学报,2017, 29(11): 2918-2926.

[6] 吕游,袁杰红,孙杨,等. 战时物流配送车辆路径优化问题[J]. 控制与决策,2019,34(1):121-128.

[7] 郑炜,王时龙,康玲,等. 基于双层蚁群算法的云制造服务组合研究[J]. 计算机集成制造系统,2017, 23(10):2269-2278.

- [8] REN Y P, ZHANG C Y, ZHAO F, et al. Disassembly line balancing problem using interdependent weights-based multi-criteria decision making and 2-Optimal algorithm[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 174: 1475-1486.
- [9] 王磊,郭顺生,李西兴,等. 基于改进蚁群算法的多主体制造资源配置冲突协调方法[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(12) : 2561-2570.
- [10] LIU Y H, KHALIFA I H, KAMEL A E. The multi-period and multi-depot dynamic vehicle routing problem with time windows[C]// 2016 3rd International Conference on Logistics Operations Management (GOL). [S. l.]: IEEE, 2016.
- [11] YU B, MA N, CAI W J, et al. Improved ant colony optimisation for the dynamic multi-depot vehicle routing problem[J]. International Journal of Logistics Research and Applications, 2013, 16(2) : 144-157.
- [12] ZHANG J L, WANG W L, ZHAO Y W. Modeling and optimization for dynamic requests multi-depot vehicle routing problem with replenishment on the way [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems (CIMS), 2013, 19(4) : 869-878.
- [13] 程传奇,郝向阳,李建胜,等. 融合改进 A * 算法和动态窗口法的全局动态路径规划[J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(11) : 137-143.
- [14] 刘二辉,姚锡凡,蓝宏宇,等. 基于改进遗传算法的自动导引小车动态路径规划及其实现[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(6) : 1455-1467.
- [15] 薛晗,邵哲平,潘家财,等. 基于文化萤火虫算法的足球机器人动态路径规划[J]. 控制与决策, 2018, 33(11) : 2015-2020.
- [16] 董小帅,毛政元. 基于改进遗传算法的动态路径规划研[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(19) : 49-55.
- [17] 陆亮. 三维空间移动机器人路径规划技术的研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2017.
- [18] 邬文怀. 基于 React 的超级账号教学支持系统前端的设计与实现[D]. 南京:南京大学, 2018.

作者简介

腾杨刚 男,博士,工程师。主要研究方向:民用飞机总体设计。E-mail:hawk_teng@163.com

张海洋 男,本科,工程师。主要研究方向:民用飞机可制造性。E-mail:zhanghaiyang@comac.cc

葛桂林 男,硕士,工程师。主要研究方向:民用飞机可制造性。E-mail:geguilin@comac.cc

侯严庭 男,硕士,工程师。主要研究方向:民用飞机可制造性。E-mail:houyanting@comac.cc

Research on intelligent layout design of civil aircraft equipment rack based on ant colony algorithm

TENG Yanggang^{1,2*} ZHANG Haiyang³ GE Guilin³ HOU Yanting³

(1. Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China;

2. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

3. Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 200443, China)

Abstract: The traditional process based overall design of civil aircraft equipment racks requires designers to use structural and system digital prototypes to repeatedly coordinate and iterate to form equipment rack layout schemes, which heavily relies on the designer's engineering experience, the iteration speed of the plan is slow, and the evaluation of the advantages and disadvantages of the schemes are difficult to quantify, which have significant impact on the aircraft development cycle and overall economy. This article conducts research on ant colony algorithm state transition rules, search path optimization, pheromone updates, etc., and completes the design of intelligent location planning algorithm for equipment racks. Based on the advantages of react componentization, visual development of intelligent equipment rack layout is completed. Finally, the intelligent algorithm of the equipment racks and the Web UI are combined to complete the research and design of the V1 version of the intelligent layout system for civil aircraft equipment racks. The designer can run the algorithm with one click on the operation page, and the equipment racks layout scheme calculation is automatically displayed on the Web page, the calculation results can also be imported into CATIA for digital prototype design according to design needs.

Keywords: civil aircraft; equipment racks; intelligent layout; ant colony algorithm; componentization

* Corresponding author. E-mail: hawk_teng@163.com