

引用格式: 林信海, 杨大鹏, 巩常兰, 等. 基于多约束二维排样的舰载机最大密度布列算法 [J]. 中国舰船研究, 2021, 16(6): 27–33.

LIN X H, YANG D P, GONG C L, et al. Aircraft maximum density layout algorithm based on multi-constraint two-dimensional packing[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2021, 16(6): 27–33.

基于多约束二维排样的舰载机最大密度布列算法



林信海^{*1}, 杨大鹏¹, 巩常兰¹, 李文学²

1 中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430064
2 华中科技大学 机械科学与工程学院, 湖北 武汉 430074

摘 要: [目的] 采用多约束条件下的二维排样算法解决舰载机最大密度布列问题。[方法] 梳理出最大密度布列的约束条件, 然后以最低重心 NFP 算法为基础, 提出距离约束的数学模型及处理策略, 并利用启发式靠边定位算法来处理超边界约束, 最后分别形成飞行甲板和机库最大密度布列的算法。[结果] 利用该算法得到“尼米兹”航母可最大密度布列 F/A-18C 或 F-35C 飞机的数量, 以及 F-35C 飞机的布列因子, 与美军相关文献公布的舰载机布列数据基本吻合。[结论] 利用该算法可快速得出舰载机的布列因子, 可指导新研舰载机的布列适配性设计。

关键词: 舰载机; 最大密度布列; 多约束; 二维排样; 超边界

中图分类号: U662.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19693/j.issn.1673-3185.02022

Aircraft maximum density layout algorithm based on multi-constraint two-dimensional packing

LIN Xinhai^{*1}, YANG Dapeng¹, GONG Changlan¹, LI Wenxue²

1 China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China
2 School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

Abstract: [Objectives] A multi-constraint two-dimensional packing algorithm is used to determine the carrier-based aircraft maximum density layout factor. [Methods] First, the constraints are presented. Then, based on a lowest-gravity-center NFP algorithm combined with mathematics modeling for the distance constraints and a heuristic algorithm for the "keep-to-the-boundary" spotting, an entire maximum density layout algorithm for a flight and hanger deck is presented. [Results] Using this algorithm, the maximum layout number of F/A-18C and F-35C aircraft on a Nimitz-class aircraft carrier is determined, as well as the layout factor of F-35C aircraft, and the results are consistent with the known facts. [Conclusions] With this algorithm, the maximum density layout factor of aircraft can be quickly calculated, making it useful for guiding the suitable layout design of newly-built carrier-based aircraft.

Key words: carrier-based aircraft; maximum density layout; multi-constraint; two-dimensional packing; overlapping the boundary

0 引 言

舰载机是航空母舰(简称“航母”)的主要作战力量, 搭载更多数量的舰载机对提升母舰作战

效能具有重要意义^[1]。考虑到航母甲板空间有限, 需在满足作战性能要求的前提下, 对舰载机开展小型化设计, 并优化其外形轮廓, 来提高搭载舰载机的数量和上舰适配性^[2]。为量化评估某

收稿日期: 2020-07-03 修回日期: 2020-12-08 网络首发时间: 2021-12-02 20:28

作者简介: 林信海, 男, 1984 年生, 硕士, 高级工程师
杨大鹏, 男, 1981 年生, 硕士, 高级工程师
李文学, 男, 1989 年生, 硕士, 工程师。研究方向: 机械工程及自动化。E-mail: hustlwx@sina.cn

*通信作者: 林信海

型舰载机在航母飞行甲板和机库占地面积的指标,美海军基于近百年的航母舰载机使用经验,提出了“最大密度布列因子”这一指标^[3-4]。

“最大密度布列因子”简称“布列因子”,是可有效表征停放某型舰载机所需占用飞行甲板和机库空间的一个经验指数,布列因子越大,表明舰载机占用的航母甲板面积越大。舰载机布列因子的计算流程具体如下^[5]:

1) 设定 F/A-18C 飞机为基准舰载机,并规定其布列因子为 1。

2) 按指定规则和约束,用基准舰载机填满“尼米兹”号航母的飞行甲板(不含着舰区)和机库,记录飞行甲板、机库布列飞机数量之和,设其为 a 。

3) 按同样规则布列某型舰载机,记录布列舰载机的总架数,假设为 b 。

4) 基准舰载机布列总架数和某型舰载机布列总架数的比值,即 a/b ,就是某型舰载机的布列因子。

舰载机最大密度布列是布列因子计算的核心,目前国内外舰载机最大密度布列通常由具有经验的人员借助 CAD 软件手工完成,设计周期冗长且要耗费大量人力,导致舰载机布列因子计算效率低下,因此,急需一种可快速自动生成舰载机最大密度布列方案的算法。

舰载机最大密度布列问题可归属于多约束条件下的二维不规则物体排样问题^[6]。由于二维不规则物体排样问题的解空间较大,早期研究人员主要通过拼接和组合方式,将其转化为较易处理的规则多边形排样问题^[7-8],但利用该方法对极不规则物体进行排样时,易造成较大浪费。为此,Adamowicz 等^[9]基于多边形表示法,提出临界多边形(NFP, no fit polygon)算法,通过计算不规则多边形的 NFP 来判定多边形之间是否干涉。张思^[10]采用基于重心 NFP 算法开展了舰载机自动布列软件的设计,但并没有考虑舰载机最大密度布列时的多个约束条件。

基于上述情况,本文将以二维排样算法为基础,重点研究舰载机最大密度布列多个约束条件的数学表达、处理策略及基本计算,并分别提出飞行甲板和机库最大密度布列算法。

1 舰载机最大密度布列约束条件概述

通常来讲,与常规的二维排样算法相比,舰载机在飞行甲板和机库最大密度布列要满足以下约束条件:

1) 距离约束。为满足布列安全要求,舰载机之间、舰载机与母舰边界/船体结构之间要保证一定的安全间距。其中,舰载机与母舰边界/船体结构的距离又包括机与舰外边界(如甲板边界、安全停机线)的距离、机与船体结构(如岛式上层建筑、机库壁、机库防火分隔门等)的距离,根据舰载机布列转运要求,舰载机之间、舰载机和岛式上层建筑等的间距不一样。

2) 超边界约束。舰载机身与船体结构、飞行甲板安全停机线应保持一定安全间距,不可发生干涉。但是,在靠近飞行甲板舷边布列时,在保证舰载机轮与甲板边缘有一定安全间距的前提下,舰载机机身可超出甲板边缘,即在布列时需动态考虑舰载机的外形边界。

2 舰载机最大密度布列的数学表达

2.1 舰载机、飞行甲板和机库的几何表达方法

舰载机、飞行甲板和机库外形轮廓均属不规则图形,其几何表达涉及到图形的存储、判交、平移、旋转等相关操作,直接影响到布列算法的耗时和精度。目前,主要采用以下方法来表达二维不规则形状:原始曲线表达法、多边形表示法和包络法等。本文选用多边形表示法进行舰载机、飞行甲板和机库的几何表达。

多边形表示法是指采用连通多边形的形式表达参与布列的甲板和舰载机图形,若舰载机、甲板轮廓存在曲线边,则根据一定的精度将曲线边近似成直线段来替代,如图 1 所示。

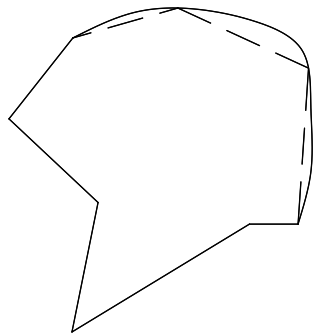


图1 多边形表示法

Fig. 1 The polygon-based representation

连通多边形的定义如下。

定义 1: 平面连通 N 边形 P 是指 N 个矢量端点的有序集合。以上矢量端点头尾相连并按逆时针(顺时针)方向排列,且各矢量之间不发生内点相交。

其数学表达式为 $P = \{P_1(X_1, Y_1), P_2(X_2, Y_2), \dots, P_i(X_i, Y_i), \dots, P_n(X_n, Y_n), i = 1 \dots N\}$ 。

多边形表示法降低了图形之间的操作运算量,提高了排样速度。虽然在一定程度上会导致不规则图形精度的降低,但只要离散精度足够高,就能够满足布列精度需求。

2.2 距离约束数学模型及处理策略

如图 2 所示,将距离约束划分如下: l_1 为舰载机的间距, l_2 为舰载机和母舰外边界的间距, l_3 为舰载机和岛式上层建筑等母舰内边界的间距。

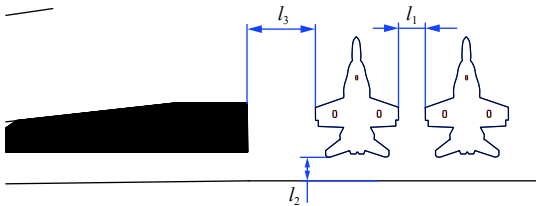


图 2 二维排样中的距离约束
Fig. 2 The distance constraints of two-dimensional shapes nesting

本文采用等距缩放策略来处理该距离约束,即对舰载机、甲板的边界按照一定间距进行放大或者缩小,再开展最大密度布列。设舰载机的实际间距为 l'_1 , 母舰内、外边界的实际间距分别为 l'_3 和 l'_2 , 具体见式(1)。之后舰载机以间距 l'_1 将边界进行放大;甲板以间距 l'_2 将外廓进行等距收缩,以间距 l'_3 将内廓进行放大。

$$\left\{ \begin{array}{l} l'_1 = 0.5l_1 \\ l'_2 = \begin{cases} l_2 - l'_1, & l_2 > l'_1 \\ 0, & l_2 < l'_1 \end{cases} \\ l'_3 = \begin{cases} l_3 - l'_1, & l_3 > l'_1 \\ 0, & l_3 < l'_1 \end{cases} \end{array} \right. \quad (1)$$

之后,利用分段偏移法对舰载机和母舰进行等距处理,具体流程如下:

步骤 1: 将舰载机、母舰边界的每条线段均按等距方向进行等距操作。如图 3 所示,线段的起始端分别为 $P_s(x_s, y_s)$ 和 $P_e(x_e, y_e)$, 法向量为 $\vec{n}$, 间距为 d 。进行等距处理后线段起始点为 P'_s 和 P'_e , P_{se} 为点 P_s 到 P_e 的有向线段, 则

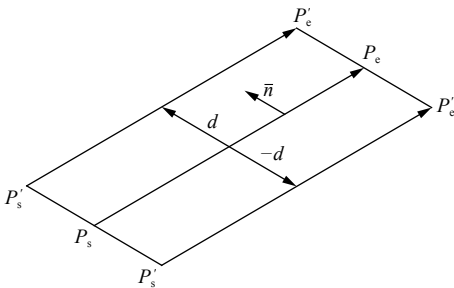


图 3 直线的等距计算
Fig. 3 The offset calculation for lines

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{n} = \left(\frac{y_e - y_s}{|P_{se}|}, \frac{x_e - x_s}{|P_{se}|} \right) \\ P'_s = P_s \pm d \times \vec{n} \\ P'_e = P_e \pm d \times \vec{n} \end{array} \right. \quad (2)$$

步骤 2: 对等距操作后得到的边缘进行封闭处理。等距操作后多边形相邻两边 C_i 与 C_{i+1} 如相交,需对其进行剪裁;如相离,需将其连接至一起,如图 4 所示。

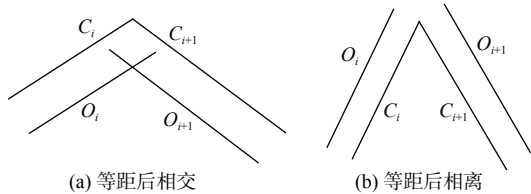


图 4 线段等距后几何关系
Fig. 4 Geometric relation of lines after offsetting operation

本文采用直线延长的方式对相离两线段进行连接(图 5)。

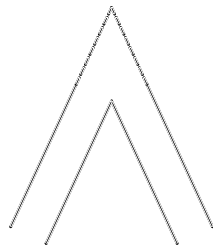


图 5 线段的直线连接方式
Fig. 5 Connecting operation between lines

步骤 3: 对生成的原始等距边界进行检查,删除无效的边界,获得最终有效边界。

2.3 超边界约束数学模型及处理策略

飞行甲板上排样存在超边界的约束条件,二维超边界排样问题可表述为:一组二维不规则外形的零件 $P_1, P_2, \dots, P_n$, 每个零件包含特征点 $\{D_1, D_2, \dots, D_m\}$ 。需基于以下约束条件,在样板 P 中以最大密度排放以上零件 $P_1, P_2, \dots, P_n$, 需满足:

- 1) 任一零件 P_i, P_j 互不干涉。

2) 零件 P_i 的特征点 $\{D_1, D_2, \dots, D_m\}$ 与样板 P 的外边界保持一定间距。

图 6 是舰载机超边界摆放的情况,即舰载机的机身边界可以超出飞行甲板停放,只要舰载机的机轮(通常为 1 个前轮和 2 个主轮)等特征点未超出飞行甲板边界即可。

传统的排样算法无法满足超边界排样计算需求。考虑到可将样板分为飞行甲板边缘处的超边界排样区域和甲板内的常规排样问题,可采用不同的算法对其按先后次序进行计算。如先排布甲板边缘、再排布甲板内部,则为外围收缩次序;如

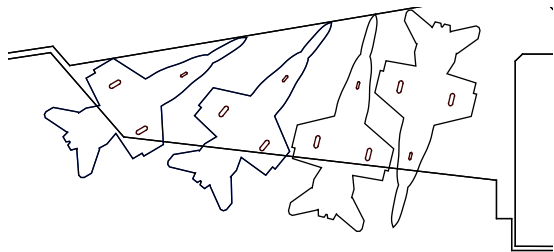


图 6 舰载机超边界布列方案

Fig. 6 Aircraft spotting plan under the constraint of overlapping the boundary

先排布甲板内部,再排布外板,则为中心膨胀次序(图 7)。

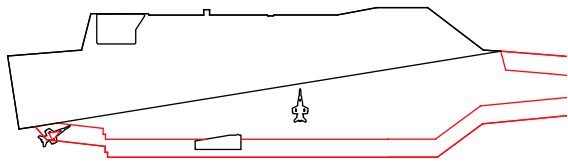


图 7 甲板不同区域情况

Fig. 7 The different regions of flight deck

本文采用的外围收缩排样顺序可概括为:在飞机机轮不超出甲板边界的前提下,将飞机尽可能多地向甲板边缘和最小重心点移动,依次将飞行甲板外边界布满飞机,再开始对甲板内部区域进行飞机排布。

综上所述,超边界布列的定位步骤为:

- 1) 利用某图形格式导入飞机和飞行甲板的外形边界信息,在飞机图形中以不同图层标识飞机的特征点。
- 2) 获取飞机的特征点,根据特征点是否超出甲板区域,判定飞机是否越过边界。
- 3) 基于外围收缩顺序进行排样,即先进行飞行甲板边缘的飞机布列,再进行甲板内部区域的飞机布列。

3 机库舰载机排样算法

舰载机在机库内的最大密度布列可视为非等距约束下的不规则物体二维排样算法,其优化目标就是使机库内舰载机数量最大化。本文拟基于最低重心 NFP 算法^[1]对其进行处理,机库最大密度布列算法流程图如图 8 所示。

机库最大密度布列算法的步骤为:

- 1) 利用.dxf 格式导入飞机和机库外形边界信息,并利用多边形表示法将其转化为离散点。
- 2) 根据最大密度布列准则要求,分别输入飞机之间,飞机与机库防护分隔门、机库壁的间距。
- 3) 基于式(1)和式(2),利用扩展等效策略处理舰载机和机库边界。

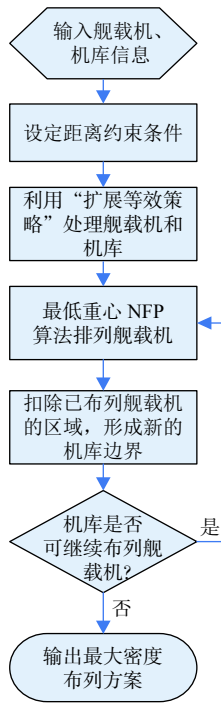


图 8 机库最大密度布列流程图

Fig. 8 The workflow of maximum density spotting plan on the hangar deck

4) 利用最低重心 NFP 算法布列舰载机。最低重心 NFP 算法的排样规则将飞机放在重心最低的位置。其出发点是在不产生干涉的前提下,使布列舰载机的重心最低,为后面布列的舰载机留出更多的布列空间。其步骤为根据飞机外形边界得出其重心;然后以指定的角度间隔(本文为 1°)旋转飞机,求解各旋转角度下的重心 NFP,记录最低重心位置及对应的旋转角度,对飞机进行定位。采用最低重心 NFP 方法,获得最低重心的示意图(图 9)。

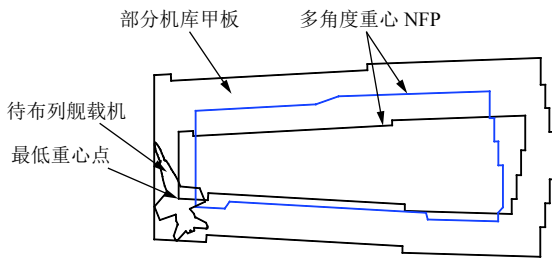


图 9 最低重心 NFP 算法

Fig. 9 Lowest-gravity-center NFP algorithm

- 5) 从机库甲板上除去已布列飞机的面积,获得新的机库轮廓(图 10),再进行下一步布列。
- 6) 重复以上步骤,直至剩余的机库空间不足以容纳 1 架飞机为止。

4 飞行甲板舰载机排样算法

针对飞行甲板舰载机最大密度布列,本文基

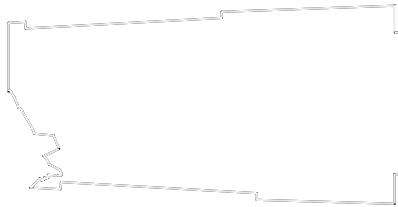


图 10 新机库边界的合成

Fig. 10 Regeneration of the hanger deck contour

于外围收缩顺序^[12], 分别对飞行甲板边缘和内部依次按最大密度排布的方式进行计算。首先利用启发式靠边定位算法对甲板边缘处的飞机进行布列, 直到飞行甲板边缘无法超边界布列飞机; 然后采用机库最大密度布列飞机的 NFP 算法, 对飞行甲板内部的飞机进行排样, 直到甲板内布满飞机。飞行甲板舰载机排样的算法流程如图 11 所示。

启发式靠边定位算法的主要思想为: 对于边 L_1 (图 12), 将甲板的最左最下位置作为“零件局部最优”位置, 沿 L_1 的反方向采用该定位策略逐一布列舰载机, 直至沿该方向无法布列舰载机为止; 之后先后沿 $L_2 \sim L_4$ 的反方向采用类似的方式放置剩下的舰载机, 只不过它们的“零件局部最优位置”则分别更新为最右最下位置、最右最上位置、最左最上位置, 最终完成甲板边缘所有舰载机的布列。

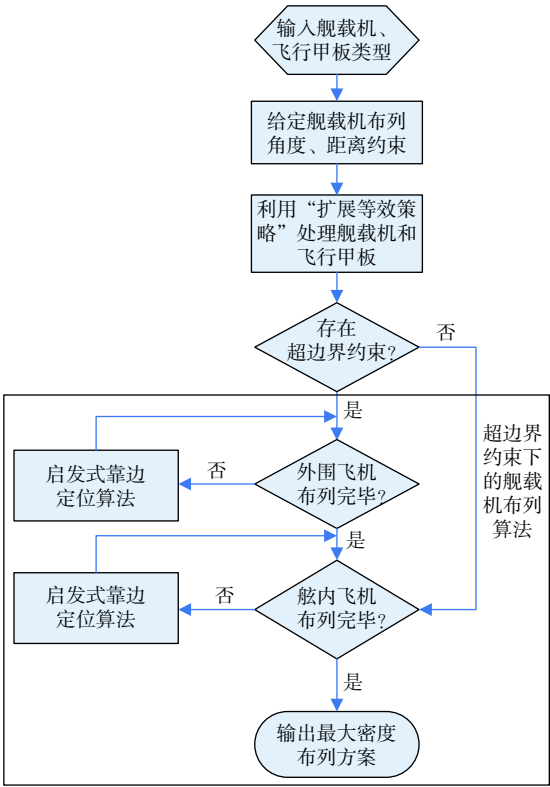


图 11 超边界约束下的舰载机布列算法流程图

Fig. 11 The algorithm workflow for aircraft spotting under the constraint of overlapping the boundary

基于该算法的飞行甲板边缘舰载机最大密度布列的具体步骤如下(图 12):

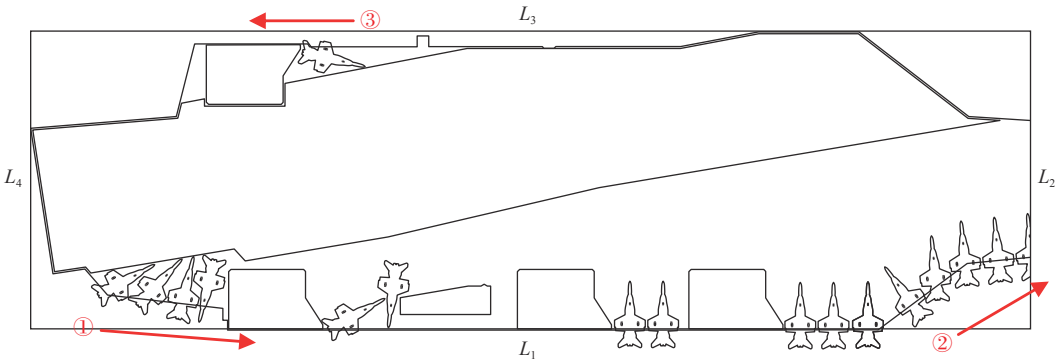


图 12 启发式靠边定位算法流程图

Fig. 12 The workflow of heuristic algorithm for keep-to-the-boundary spotting

- 1) 以飞行甲板的艏部最右侧为起点, 沿着右侧甲板边缘, 按自艏向艉的方向, 基于最艏最右位置为“零件局部最优”位置为原则开始布放飞机, 直到该方向无法布列飞机。
- 2) 沿着艉部、左舷等甲板边缘, 分别基于最艉最右、最艉最左位置为“零件局部最优”位置, 完成飞行甲板边缘舰载机的布列。

5 算法实验结果

利用上述算法对 F/A-18C 飞机进行最大密度

布列(图 13), 其中飞行甲板和机库的外形尺寸及边界根据文献[13]确定, 飞行甲板和机库分别布列了 76 架和 53 架, 总计 129 架飞机, 与美军公布的飞行甲板和机库可最大密度布列 130 架 F/A-18C 飞机^[14]基本吻合。

以 F/A-18C 飞机为基准舰载机, 对 F-35C 飞机进行最大密度布列(图 14), 飞行甲板和机库分别布列了 69 架和 46 架机, 即可最大布列 115 架 F-35C 飞机, 根据定义, 其布列因子为 1.12, 与美军公布的 F-35C 飞机布列因子^[4]为 1.11 基本相当。



图 13 F/A-18C 飞机在飞行甲板和机库的最大布列图

Fig. 13 Maximum spotting pattern of the F/A-18C aircraft on the flight and hangar deck

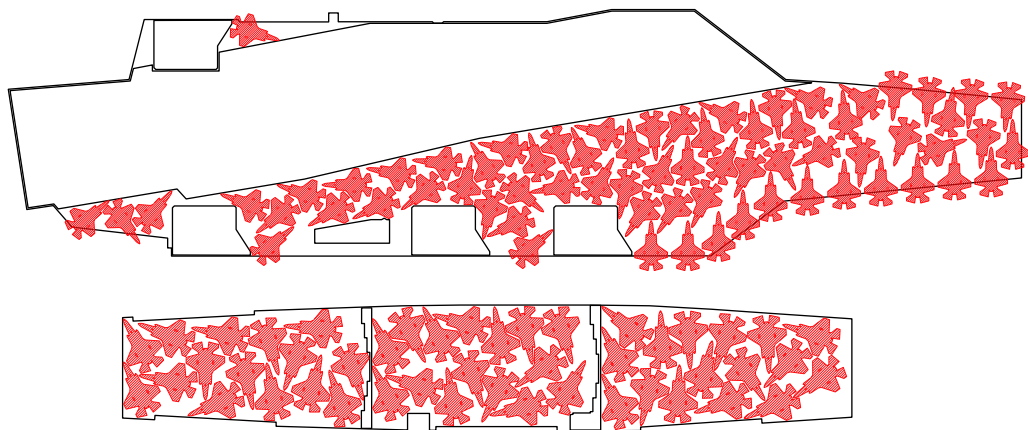


图 14 F-35C 飞机在飞行甲板和机库的最大布列图

Fig. 14 Maximum spotting pattern of the F-35C aircraft on the flight and hangar deck

6 结 语

本文以最低重心 NFP 算法为基础, 针对舰载机最大密度布列的距离和超边界约束进行分析, 提出了距离约束的数学模型及处理策略, 以及利用启发式靠边定位算法来处理超边界约束, 并基于飞行甲板和机库舰载机布列具体约束, 分别提出了飞行甲板和机库最大密度布列的算法。利用该算法得到“尼米兹”航母可最大密度布列 129 架 F/A-18C 或 115 架 F-35C 飞机, 以及 F-35C 飞机布列因子为 1.12 等有意义的结论, 与美军相关文献公布的舰载机布列数据基本吻合, 证明了算法的实用性。

参考文献:

- [1] 朱英富, 熊治国, 胡玉龙. 航空母舰发展的思考 [J]. 中国舰船研究, 2016, 11(1): 1-7.
ZHU Y F, XIONG Z G, HU Y L. On the development trends of aircraft carriers[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2016, 11(1): 1-7 (in Chinese).
- [2] 刘相春. 航空母舰舰机适配性技术体系 [J]. 中国舰船研究, 2016, 11(3): 1-4, 10.
- [3] LIU X C. A technology system for the carrier/air vehicle integration[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2016, 11(3): 1-4, 10 (in Chinese).
- [4] WHITTENBURY J R. Configuration design development of the navy UCAS-D X-47B [C]//AIAA Centennial of Naval Aviation Forum: "100 Years of Achievement and Progress". Virginia Beach, VA: AIAA, 2011: 6-7.
- [5] RYBERG E S. The influence of ship configuration on the design of the joint strike fighter: ADA399988 [R]. Arlington, VA: Joint Strike Fighter Program Office, 2002.
- [6] Maximum density aircraft spotting CV and CVN aircraft carriers, LPH, LHA, and LHD class ships: NAEC-ENG-7604 [S]. Revision U, [S.1.]:[s.n], 1994.
- [7] 李耀宇, 朱一凡, 齐鸣, 等. 舰载机甲板布列调运优化方法研究 [J]. 指挥控制与仿真, 2013, 35(2): 125-131.
LI Y Y, ZHU Y F, QI M, et al. An overview of aircraft allocation and transferring on carrier flight-deck[J]. Command Control & Simulation, 2013, 35(2): 125-131 (in Chinese).
- [8] AGRAWAL P K. Minimising trim loss in cutting rectangular blanks of a single size from a rectangular sheet using orthogonal guillotine cuts[J]. European Journal of Operational Research, 1993, 64(3): 410-422.

[8] 卞大鹏, 栾添添, 宋晔. 基于模拟退火算法的舰载机布列方法研究 [J]. 应用科技, 2015, 42(4): 20–24.
BIAN D P, LUAN T T SONG Y. A layout method of carrier-based aircraft based on simulated annealing[J]. Applied Science and Technology, 2015, 42(4): 20–24 (in Chinese).

[9] ADAMOWICZ M, ALBANO A. Nesting two-dimensional shapes in rectangular modules[J]. [Computer-Aided Design](#), 1976, 8(1): 27–33.

[10] 张思. 舰载机自动布列方法的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
ZHANG S. Research on the automatic layout method of the aircraft [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012. (in Chinese)

[11] 刘胡瑶. 基于临界多边形的二维排样算法研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2007.

LIU H Y. Research of two dimensional nesting algorithm based on no fit polygon [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007. (in Chinese)

[12] 李文学. 多约束二维排样算法研究与应用 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
LI W X. Research and application of polygon's packing optimization with multiple constraints[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)

[13] DARWIN R L, BOWMAN H L, HUNSTAD M, et al. Aircraft carrier flight and hangar deck fire protection: history and current status [R]. California: Naval Air Warfare Center, 2005.

[14] U. S. General Accounting Office (GAO). Navy aircraft carriers: cost-effectiveness of conventionally and nuclear-powered carriers [R]. Washington, DC: GAO, 1998.



(上接第 9 页)

[7] DONG X W, XI J X, SHI Z Y, et al. Practical consensus for high-order linear time-invariant swarm systems with interaction uncertainties, time-varying delays and external disturbances[J]. [International Journal of Systems Science](#), 2013, 44(10): 1843–1856.

[8] DONG X W, HU G Q. Time-varying formation control for general linear multi-agent systems with switching directed topologies[J]. [Automatica](#), 2016, 73: 47–55.

[9] HUA Y Z, DONG X W, LI Q D, et al. Distributed time-varying formation robust tracking for general linear multiagent systems with parameter uncertainties and external disturbances[J]. [IEEE Transactions on Cybernetics](#), 2017, 47(8): 1959–1969.

[10] ANTONELLI G, ARRICHIELLO F, CACCAVALE F, et al. Decentralized time-varying formation control for multi-robot systems[J]. [The International Journal of Robotics Research](#), 2014, 33(7): 1029–1043.

[11] ZHAO S Y, ZELAZO D. Translational and scaling formation maneuver control via a bearing-based approach[J]. [IEEE Transactions on Control of Network Systems](#), 2017, 4(3): 429–438.

[12] ZHANG W L, LIU J C, WANG H H. Ultra-fast formation control of high-order discrete-time multi-agent systems based on multi-step predictive mechanism[J]. [ISA Transactions](#), 2015, 58: 165–172.

[13] XU J, ZHANG G L, ZENG J, et al. Consensus based second order discrete-time multi-agent systems formation control with time-delays[C]//2015 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA). Lijiang: IEEE, 2015: 2626–2631.

[14] REN W, BEARD R W. Consensus seeking in multi-agent systems under dynamically changing interaction topologies[J]. [IEEE Transactions on Automatic Control](#), 2005, 50(5): 655–661.

[15] 何吕龙, 柏鹏, 梁晓龙, 等. 多智能体系统离散时间一致性问题中的参数设计 [J]. 控制与决策, 2018, 33(8): 1455–1460.
HE L L, BAI P, LIANG X L, et al. Parameters design for consensus in multi-agent systems with second-order discrete-time dynamics[J]. Control and Decision, 2018, 33(8): 1455–1460 (in Chinese).

[16] 田磊, 王蒙一, 赵启伦, 等. 拓扑切换的集群系统分布式分组时变编队跟踪控制 [J]. 中国科学: 信息科学, 2020, 50(3): 408–423.
TIAN L, WANG M Y, ZHAO Q L, et al. Distributed time-varying group formation tracking for cluster systems under switching topologies[J]. [Scientia Sinica Informationis](#), 2020, 50(3): 408–423 (in Chinese).