

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.01.012

基于混合算法的收放系统设备布局设计及优化研究

夏林¹,葛杨元²,娄兴建²,陆宝春¹

(1. 南京理工大学 机械工程学院,江苏 南京 210094; 2. 南通力威机械有限公司,江苏 南通 226500)

摘要:针对收放系统成套设备布局设计及优化属于带有性能约束的多目标优化问题,分析设备布局中存在的约束条件和优化目标函数,并建立了舱室布局优化的数学模型。为了更好地求解成套设备布局数学模型的优化问题,基于粒子群混合算法和变异蚁群混合算法的特点,提出一种新型混合优化算法。通过仿真试验测试表明:该混合优化算法在求解速度和求解最优值方面具有更优的性能;与传统布局方案相比,基于混合算法的布局方案能够有效降低设备产生的不平衡力矩。根据混合算法的数据结果最终可确定各设备在舱室中的布局方案。

关键词:设备布局;目标优化;混合算法

中图分类号:TP399 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)01-0062-07

Equipment Layout Design and Optimization Resrch of Retraction and Unloading System Based on Hybrid Algorithm

XIA Lin¹, GE Yangyuan², LOU Xingjian², LU Baochun¹

(1. College of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Nantong Liwei Machinery Co., Ltd., Nantong 226500, China)

Abstract: As the design and optimization of the layout of the complete set of equipment of the put-and-take system belong to the multi-objective optimization problem with performance constraints, this paper analyses the constraints and optimization objective function existing in the equipment layout and establishes the mathematical model of the optimization of the layout of the compartment. In order to better solve the optimization problem of the mathematical model of the layout of complete sets of equipment, a new hybrid optimization algorithm is proposed based on the characteristics of particle swarm ant colony hybrid algorithm and variant ant colony hybrid algorithm. The simulation test results show that the proposed hybrid optimization algorithm has better performance in terms of speed and optimal value solving. Compared with the traditional layout scheme, the layout scheme based on the hybrid algorithm can effectively reduce the unbalanced moment generated by the equipment. Based on the data results of the hybrid algorithm, the layout scheme of each device in the chamber is finally determined.

Keywords: device layout; target optimization; hybrid algorithms

0 引言

在收放系统设备布局设计及优化中,需考虑多个优化目标,包括科考船科考作业时行驶的安全性、遇到紧急情况时疏散的及时性以及舱室空间利用率的最大化等。然而,由于舱室内部各设备之间的约束条件较为复杂,并且所求解的优化目标之间相互制约,因此无法快速且精确地对优化模型进行求解^[1]。在设备布局时,设备与设备之间、设备与舱室之间存在复杂的约束关系,同时,存在多种成套设备布局优化模型的目标求解函数。因此,需要利用合适的优化算法来精确求解舱室内各设备的摆放位置。此外,为了有效缩短舱室设备的布局设计时间,保证收放系统设备布置的合理性,并减少设计人员对过往舱室布局

设计的经验依赖,需进一步研究更为有效的智能收放系统装备布局设计方法^[2]。

针对设备布局设计优化问题,韩洋^[3]提出一种利用遗传变异蚁群算法与粒子群算法相结合的混合算法,用于求解机舱布局优化问题。吴张盼^[4]改进了禁忌搜索算法,并将其应用于船舶舱室的设备布局设计中,经实验证明了改进算法的可行性。黄锐^[5]利用混合算法来求解设备布局模型,通过仿真对比,证明了混合算法具有良好的优化求解效果。HU等^[6]应用实例证明了可将粒子群算法运用到机舱布置优化求解问题之中。KIM等^[7]将潜艇中的设备布置问题转化为数学模型,并提出了多级优化算法来实现对潜艇设备布局的优化。李琳^[8]在车间设备布局优化设计中,利用遗传算法有效解决了车间关键设备布局问题。

第一作者简介:夏林(1999—),男,安徽合肥人,硕士,研究方向为设备布局设计及优化,1257165795@qq.com。

WANG 等^[9]利用改进禁忌搜索遗传算法对机舱设备进行布局设计,实现对机舱设备布局质量的提升。SHOJAIE 等^[10]提出基于模型的优化算法,有效地解决双目标设施布局的最优解问题。吴先哲等^[11]提出基于虚拟现实技术的布局优化方法,对船舶机舱中的主要设备进行布局,进一步提高了设备的生产效率。崔奥等^[12]提出了更具适用性的量子粒子群优化算法,对布局问题进行了求解。罗云等^[13]应用粒子群蚁群混合算法对机舱设备布局优化进行求解,并验证了混合算法的性能优点。孟祥彬^[14]以人因可靠性等为目标函数建立数学模型,通过遗传算法求解舱室中设备的优化模型。BESBES 等^[15]通过比较遗传算法和粒子群算法的优化性能,得出了遗传算法比粒子群算法在总距离约束具有更优的布局效果。王家望^[16]在研究中基于反向学习的人工蜂群算法对舱室布局问题进行求解,得出具有较高参考价值的客舱室内布局方案。鲍萌等^[17]在针对舱室与通道联动优化问题,采用遗传算法与 Dijkstra 算法进行联动优化,算例结果证明优化具有可行性。李浩男^[18]在研究中设计改进型遗传算法和模拟退火算法,对船舶布局优化问题进行优化计算,大大提升了布局方案的性能。杨少明^[19]在研究中基于人机合作的改进遗传算法对各舱室布局问题进行优化求解,得到了若干三维舱室布局方案,并验证了方法的有效性。孙思雨^[20]在研究中针对大规模多目标优化问题,提出改进多目标粒子群优化算法,并验证其具有良好的收敛性与多样性。

本文针对收放系统设备布局优化问题,提出一种联合遗传变异蚁群算法和粒子群算法的新型混合优化算法,并将该算法应用于实际的收放系统装备布局优化实例中。通过使用 MATLAB 对不同的优化算法进行性能测试,实验结果表明,本文提出的混合优化算法在收敛性和求解最优值方面具有更优的性能。该算法为收放系统设备的布局提供了一种有效的解决方案。通过应用所提出混合算法的优化结果,能够有效减小设备对船体产生的不平衡力矩,并缩短工作人员的逃生距离。这对科考船的海上科考作业具有重要的现实意义和应用价值。

1 布局优化模型建立

1.1 设备及布置说明

收放系统成套设备布局设计及优化研究所采

用的科考船船舱舱室大小长度为 12 m,宽度为 8.2 m,舱室中设备具体参数信息如表 1 所示。

表 1 设备信息表

设备	参数		
	长/mm	宽/mm	质量/kg
储缆绞车组 1	3 358.0	3 257.0	5 086.92
储缆绞车组 2	3 358.0	3 257.0	5 086.92
储缆绞车组 3	3 358.0	3 257.0	5 086.92
转向器 1	1 000.0	730.0	694.64
转向器 2	1 000.0	730.0	694.64
转向器 3	1 000.0	730.0	694.64
缆松弛补偿器 1	2 170.0	1 300.0	1 638.96
缆松弛补偿器 2	2 170.0	1 300.0	1 638.96
牵引绞车 1	2 902.0	1 618.5	4 700.41
牵引绞车 2	2 902.0	1 618.5	4 700.41

1) 牵引绞车

牵引绞车为整个收放系统提供缆绳收放牵引能力,模型如图 1 所示。在收放系统工作时,缆绳的收放方向是从科考船尾部方向进行的,即舱室 x 轴正向,因此布置牵引绞车时,尽量使牵引绞车长度方向与舱室 x 方向保持一致,并且将牵引绞车的位置尽量靠近科考船的尾部,使其最大程度地发挥牵引绞车的牵引能力。同时考虑到牵引绞车驱动装置的安装,将驱动装置的长度加到牵引绞车的宽度当中,作为一个整体进行布置。

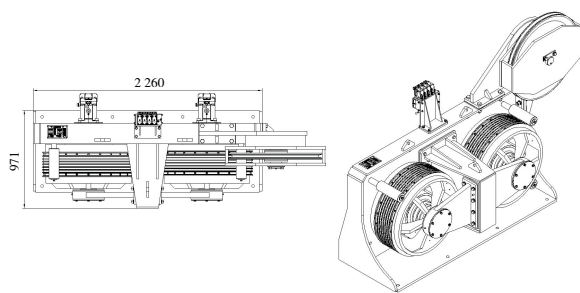


图 1 牵引绞车

2) 储缆绞车

储缆绞车组在收放系统中体积最大,占据着舱室中相应较大的面积,由于需要储存缆绳,储缆绞车组的质量也相应较大。因此,在布局设计时,尽量将储缆绞车布置在舱室中轴线位置,以减少其产生的力矩影响,储缆绞车组模型如图 2 所示。

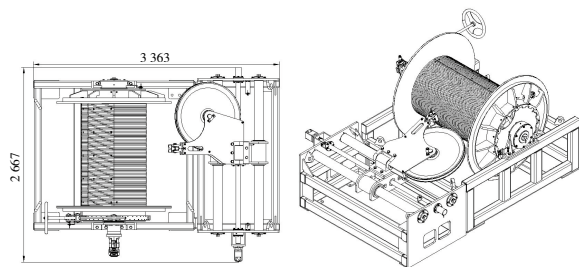


图2 储缆绞车组

3) 辅机设备

在收放系统成套设备中,缆松弛补偿器和转向器是相对灵活布置的设备,主要提供辅助收放工作的功能,缆松弛补偿器模型如图3所示,转向器模型如图4所示。由于缆松弛补偿器及转向器的高度较低,而缆绳的水平高度较高,因此需要为缆松弛补偿器和转向器加装底座,同时在底座的四周需要加装筋板,以提供支撑和稳定。故对缆松弛补偿器和转向器进行布置时,需要将底座与筋板的延伸长度计入布局设计当中。

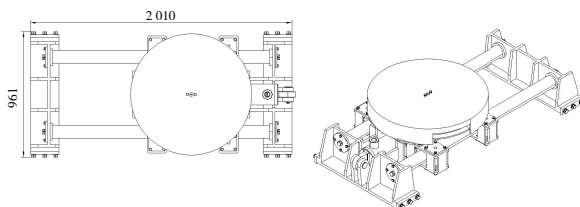


图3 缆松弛补偿器

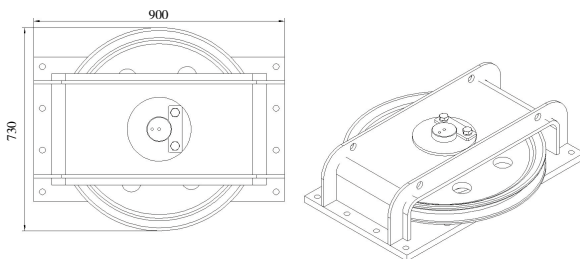


图4 转向器

1.2 数学模型建立

收放系统设备布置需要考虑到舱室的大小规范及每个设备的布置需求。因此,本文中的设备布局设计和优化问题可以看作是一个带有多个复杂约束条件的目标优化问题。对于这个目标优化问题,可以建立如下方程:

$$\begin{cases} \min F(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)) \\ \text{s.t.} \begin{cases} g_i(x) \leq 0, & i=1, 2, \dots, p \\ h_j(x) = 0, & j=1, 2, \dots, q \\ L_b \leq x \leq U_b \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

式中: x 为优化求解的设计变量,包括设备的位置坐标等相关参数; $g_i(x)$ 为舱室布局约束转化的不等式约束; $h_j(x)$ 为转化的等式约束; p 为不等式约束函数的个数; q 为等式约束函数的个数; L_b 和 U_b 则分别为设备在舱室中布局的边界。

1.3 布局优化目标函数

本文成套设备的布局优化在满足一般舱室设备基本布局的基础上,从不平衡力矩以及人员在舱室中的流通距离方面出发建立目标函数。

1) 不平衡力矩最小目标函数

考虑到收放系统成套设备中设备质量较大,布局不当可能会对船体产生较大的横倾力,为保证船舶在航行时的稳定性,需要计算布局设备对船体长度方向中轴线产生的力矩,并设计力矩代数和绝对值函数最小。

$$f_1(x) = \left| \sum_{i=1}^n m_i \cdot (y_i - H/2) \right| \quad (2)$$

式中: n 为布局优化模型中设备的数量; m_i 为每个布局设备的质量参数; y_i 为设备形心到船体长度方向上中轴面的距离参数; H 为舱室的宽度。

2) 人员流通距离最小函数

布局优化问题中,人员流通距离是指收放系统布局设备形心位置到安全逃生口的距离,直接关系到当发生意外时,工作人员可安全撤出舱室的可能性,所以需要设定人员流通距离函数最小化。

$$f_2(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^F ((x_i - x_j) + (y_i - y_j)) \quad (3)$$

式中: n 为设备数量; (x_i, y_j) 为安全出口在舱室中的坐标; F 为安全出口的数量。

最后的适应度函数定义为

$$\text{Fit}(x) = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot f_i(x) \quad (4)$$

式中: $f_i(x)$ 为优化求解模型的目标函数; ω_i 为模型中每个目标函数在优化算法中相应的权重。

1.4 布局约束要求

1) 设备不靠近舱壁的安全距离约束

成套设备在舱室的布局过程中,各个设备应当全部布置在舱室区域内部,并且需要与舱室的墙壁之间留有一定的安全距离,故约束为

$$\begin{cases} x_i - l_i/2 \geq a \\ L - (x_i + l_i/2) \geq a \\ y_i - h_i/2 \geq b \\ H - (y_i + h_i/2) \geq b \end{cases} \quad (5)$$

式中: L 为舱室长度; (l_i, h_i) 为设备的尺寸; a 为设备与舱室墙壁之间长度方向上最小距离; b 为设备与舱室墙壁之间宽度方向上最小距离。

2) 设备之间不干涉约束

在舱室布局过程中,考虑设备的运行及检修,设备之间的位置不允许重叠,并且设备之间需要空出保障运行的安全距离,故约束为

$$\begin{cases} |x_i - x_j| \geq (l_i + l_j)/2 + h \\ |y_i - y_j| \geq (h_i + h_j)/2 + h \end{cases} \dots i \neq j \quad (6)$$

式中 h 为两设备之间最小安全距离,其可以保证舱室布局中任意两设备之间不存在干涉的情况。

3) 设备相对位置约束

如图 5 所示,收放系统设备之间通过缆绳建立连接,故缆绳连续通过的设备之间存在相对位置约束。

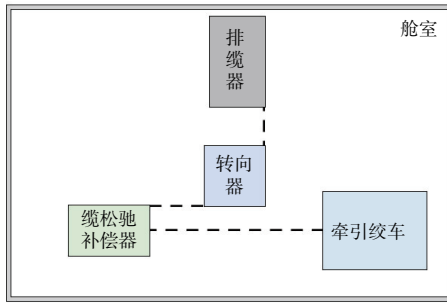


图 5 相对位置约束

以下约束公式中, x, y 分别为设备坐标; l, h 为设备之间安全距离,下标为设备编号,对应表 1 中设备序号。

由于缆绳的约束,将转向器的侧边与排缆器的侧边进行对齐约束,得:

$$\begin{cases} |x_4 - x_1| = (l_1 - l_4)/2 \\ |x_5 - x_2| = (l_2 - l_5)/2 \\ |x_6 - x_3| = (l_3 - l_6)/2 \end{cases} \quad (7)$$

在缆绳的约束下,转向器的下边缘需要与缆松弛补偿器的上边缘进行对齐约束,得:

$$\begin{cases} |y_7 - y_4| = (h_7 + h_4)/2 \\ |y_8 - y_5| = (h_8 + h_5)/2 \\ |y_8 - y_6| = (h_8 + h_6)/2 \end{cases} \quad (8)$$

为保证缆绳水平方向出缆,将牵引绞车与缆松弛补偿器的形心约束在同一水平线上,有:

$$\begin{cases} y_9 = y_8 \\ y_{10} = y_7 \end{cases} \quad (9)$$

本文中的具体约束信息如表 2 所示。

表 2 设备约束信息表 单位:mm

约束名称	参数	
	x 方向	y 方向
舱室大小	12 000	8 200
设备-舱室壁距离	500(a)	400(b)
设备安全距离	600(l)	600(h)
逃生门位置	400	0

2 混合算法

2.1 混合算法改进策略

运用粒子群蚁群混合算法对数学模型求解,其收敛速度在运算时有性能优势,但由于算法的寻优模式相对单一,容易导致粒子群蚁群混合算法在模型寻优求解时陷入种群的局部最优。相比其他算法,遗传变异蚁群算法能够找到更优的目标函数值,但在处理较大规模的问题时,计算时间显著增加,从而很大程度降低了求解速度。

为了兼顾收敛速度和寻找最优解的优势,本文提出了一种结合遗传变异蚁群算法和粒子群蚁群混合算法的混合优化算法。该算法旨在保持粒子群蚁群混合算法的搜索性能优势的同时,防止混合算法陷入局部最优解的问题。具体的混合算法流程如图 6 所示:

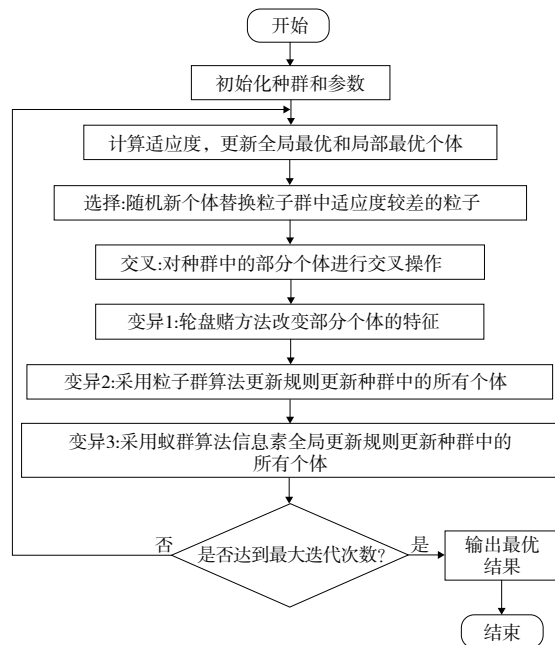


图 6 混合优化算法流程图

具体计算步骤如下:

1) 初始化种群规模 N 、迭代次数 $T_{\max}$ 、惯性权重 ω_i 、学习因子 c_1 和 c_2 、交叉概率 P_c 、变异概率 P_m 、启发函数的相对重要性 β 、信息素的衰减参数 ρ 等;

2) 计算 N 种布局方案的适应度函数值,并进行排序,找出当前种群的全局最优和局部最优个体;

3) 随机生成种群中的新个体,淘汰适应度较差的个体,并对种群进行一系列遗传操作,保持种群的多样性;

4) 采用粒子群算法的更新规则对种群的所有个体进行更新;

5) 采用蚁群算法的信息素全局更新规则更新种群中的所有个体;

6) 查看是否达到模型优化求解的终止条件,是则保存并输出最优结果,同时结束模型优化求解,否则转到步骤 2 开始新一轮的求解。

2.2 基于测试函数的仿真试验对比

为验证提出的混合算法相较于粒子群蚁群混合算法及遗传变异蚁群混合算法有着性能优势,采用 Dejong 测试函数在软件中对此三个算法进行仿真试验比较测试,测试函数的最优解为 0,函数表达如式(10)所示。

$$F(x_1, x_2) = 100 \times (x_1 - x_2)^2 + (1 - x_1)^2 \quad (10)$$

基于测试函数的仿真试验对比测试结果如图 7 所示。

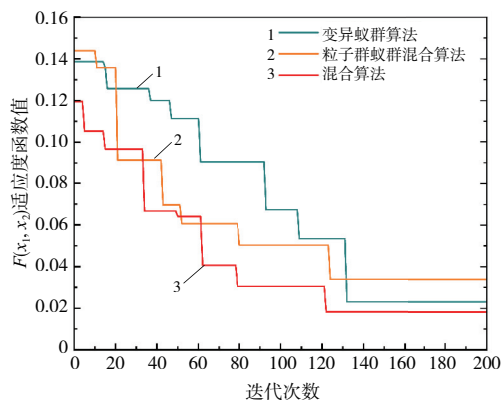


图 7 基于测试函数的仿真对比

通过对比发现混合算法的寻最优值性能要优于粒子群蚁群混合算法以及遗传变异蚁群算法,能够在测试中寻得更小的目标函数值。

2.3 基于算例仿真试验对比

为了进一步验证提出的混合优化算法在本文数学模型优化求解时的性能优势,将粒子群蚁群

混合算法、变异蚁群算法以及混合算法运用到算例中进行仿真测试。

具体的基于算例的仿真优化试验结果如图 8 所示。

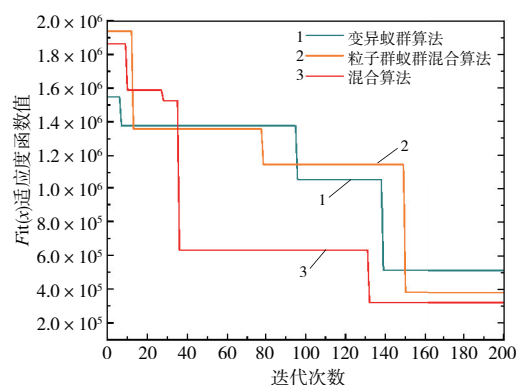


图 8 基于算例仿真测试对比

通过基于算例的仿真优化对比试验可以发现,粒子群蚁群混合算法在收敛效率上优于变异蚁群算法,而变异蚁群算法在寻最优值上优于粒子群蚁群混合算法。因此,本文提出的混合算法结合了这两种算法的优点,在收敛速度以及求解最优值上较于其他算法均具有性能优势,可以在收敛速度较高的同时,寻到更为精确的目标函数值。

3 应用研究

为了证明混合算法在舱室布局问题上的有效性,给出收放系统舱室传统布局方案,传统布局方案如图 9 所示。

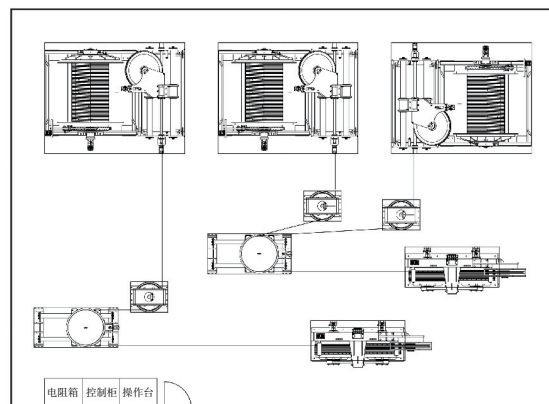


图 9 传统布局方案

将收放系统设备传统布局方案中设备坐标代入适应度函数计算得到适应度函数值为 3 957 265.78,结合传统布局方案图表明传统布局会对舱室产生过大的不平衡力矩。

在 MATLAB 软件应用的运行环境中,设置布局优化模型求解算法的操作参数,在软件中经过多次运算,选出 3 组较优解,3 组优化求解的适应度函数进化曲线如图 10 所示。

选出的 3 组较优解运算结果数据如表 3 所示。布局方案列中数字 1 到 10 表示各设备编号,对应关系同表 1 中序号与设备名称所对应关系,编号排列的顺序表示各设备依次在舱室坐标系中从左上向右下进行排列;布局方案列中设备编号下方括号中数字表示优化求解出的各设备在舱室中的布局位置。

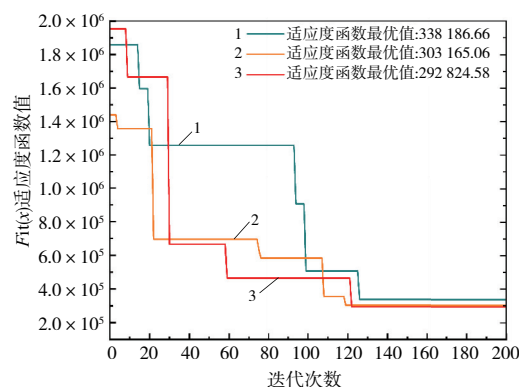


图 10 混合算法实例计算结果

表 3 运算结果数据表

方案号	Fit(x) 适应度函数值	设备布局(方案)				
1	338 186.66	8	6	5	3	4
		7	9	1	2	10
		(159,765)	(368,793)	(518,793)	(786,667)	(1 054,793)
		(426,641)	(196,445)	(559,291)	(945,291)	(196,233)
2	303 165.06	4	1	6	8	3
		2	9	5	7	10
		(100,793)	(368,667)	(636,793)	(845,765)	(754,487)
		(218,291)	(581,193)	(1 066,805)	(1 081,588)	(922,196)
3	292 824.58	8	5	10	2	1
		3	6	7	4	9
		(159,689)	(367,733)	(621,689)	(1 021,607)	(249,411)
		(635,395)	(903,328)	(159,115)	(397,118)	(672,131)

基于混合算法求解得到的布局方案,其适应度函数值均小于传统布局的适应度函数值,证明混合算法可以为舱室设备提供布局方案。

在表 3 的数据表中取目标函数值较小的 3 号布局方案。布局优化模型求解方案种群迭代到第 122 代时,求解的目标函数值逐渐趋于稳定并且达到种群最优,即在优化求解中获得最优的布局方案,此时 $Fit(x)$ 适应度函数值为 292 824.58。基于混合算法的设备布局如图 11 所示。

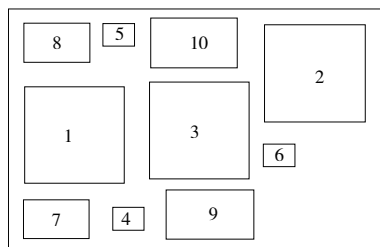


图 11 布局示意图

最后基于混合算法优化求解的数据结果,并结合收放系统成套装备的实际工作场景,在 AutoCAD 中添加缆绳连接,从而得到舱室内最终的设备布局方案,如图 12 所示。

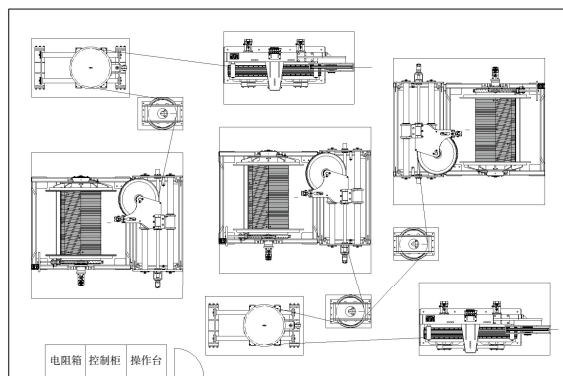


图 12 最终设备布局方案

图 12 中,设备沿舱室中轴线对称布局,使得

质量能够相对于中轴线均匀分布,从而降低了设备产生的不平衡力矩。同时,为了更充分地利用布置空间,且方便管理和维护,将电阻箱、控制柜和操作台并排布置在门后一侧的舱室墙壁处。

4 结语

本文针对收放系统成套设备布局中的约束和优化目标函数,建立了一个布局优化模型,以优化各设备在舱室内的摆放位置。通过分析粒子群蚁群混合算法和变异蚁群混合算法的性能特点,提出了一种混合优化算法。使用 MATLAB 软件对布局实例进行仿真测试后,试验结果显示,与其他优化算法相比,混合优化算法在收敛速度和求解最优值方面具有明显的性能优势。同时,与传统布局方案相比,混合算法能够大幅降低设备产生的不平衡力矩。因此,该混合算法能够为舱室内收放系统设备优化布局提供更为有效的可行性解决方案。

参考文献:

- [1] 李治远,张道建,王海员,等. 海洋综合科考船调查装备的布局与优化[J]. 船舶,2017,28(S1):92-100.
- [2] 董增财. 船舶舱室智能布局优化方法研究[D]. 大连:大连海事大学,2021.
- [3] 韩洋. 船舶机舱智能布局优化设计方法研究[D]. 大连:大连理工大学,2016.
- [4] 吴张盼. 船舶居住舱室智能布局设计方法研究[D]. 大连:大连理工大学,2018.
- [5] 黄锐. 基于人工智能技术的船舶机舱设备布局系统的设计[J]. 自动化应用,2023(17):4-6.
- [6] HU B Q, YANG B. A particle swarm optimization algorithm for multi-row facility layout problem in semiconductor fabrication[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2019, 10(8): 3201-3210.
- [7] KIM K S, ROH M I. A submarine arrangement design program based on the expert system and the multistage optimization[J]. Advances in Engineering Software, 2016, 98:97-111.
- [8] 李琳. 基于遗传算法的车间设备布局优化[J]. 物流技术,2021,40(2):67-74.
- [9] WANG Y L, WU Z P, GUAN G, et al. Research on intelligent design method of ship multi-deck compartment layout based on improved taboo search genetic algorithm[J]. Ocean Engineering, 2021, 225:108823.
- [10] SHOJAIE A A, BARIRAN S E S. Comparison of two modified meta-heuristic soft algorithms for solving a bi-objective facility layout problem[J]. International Journal of Mathematics in Operational Research, 2020, 16(3):435-454.
- [11] 吴先哲,徐轶群. 船舶机舱设备建模与虚拟装配应用研究[J]. 造船技术,2016,44(1):97-100.
- [12] 崔奥,黄金娥,黄祥兵,等. 基于量子粒子群算法的船舶机舱布局方法[J]. 舰船科学技术,2022,44(18):51-56.
- [13] 罗云,唐丽晴. 粒子群蚁群混合优化算法在船舶机舱布局优化上的应用[J]. 舰船电子工程,2019,39(10):156-161.
- [14] 孟祥彬. 基于人因可靠性分析的机舱设备布局优化设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2021.
- [15] BESBES M, ZOLGHADRI M, COSTA AFFONSO R, et al. Performance comparison of particle swarm optimization and genetic algorithm combined with A* search for solving facility layout problem[J]. Journal of Integrated Design and Process Science, 24(3/4):121-137.
- [16] 王家望. 基于启发式算法的客船舱室布局优化方法[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2022.
- [17] 鲍萌,侯远杭,陈伟,等. 基于遗传算法的船舶舱室通道布局联动优化[J]. 大连海事大学学报,2021,47(3):23-30.
- [18] 李浩男. 面向多任务状态的舱室布局不确定性优化设计研究[D]. 大连:大连海事大学,2022.
- [19] 杨少明. 基于知识工程 and 智能算法的船舶舱室智能布局方法研究[D]. 大连:大连理工大学,2022.
- [20] 孙思雨. 基于粒子群算法的大规模多目标优化问题求解方法[D]. 徐州:中国矿业大学,2023.

收稿日期:2023-12-11