群组运动驱动的舰船舱室空间布局设计与优化

吕培¹⁾, 陈伟超¹⁾, 张权¹⁾, 徐明亮^{1)*}, 黄龙²⁾, 郭晨冰³⁾, 周兵¹⁾

¹⁾ (郑州大学信息工程学院 郑州 450000)

²⁾ (海军装备部驻郑州地区军事代表室 郑州 450000)

³⁾ (中国船舶重工集团公司第七一三研究所 郑州 450000)

(iexumingliang@zzu.edu.cn)

摘 要: 为高效求解舰船舱室的空间布局优化问题, 提出基于群组运动仿真和张量场的交互式布局设计与优化方法. 首先使用基于图像的流动可视化算法(image based flow visualization, IBFV)分析空间布局域中的张量场, 计算特征向量并生成舰船通道网, 得到以该通道网为基础的舱室空间布局; 然后通过群组仿真算法模拟不同人员在舱室空间布局域内的行为活动, 进而评价船员在舱室中的移动性和舒适性. 在得到一系列舰船通道网和群组仿真数据结果之后, 分别建立通道网中通道宽度、通道间距与群组仿真结果中移动性代价值、舒适性代价值之间的映射关系, 并以群组运动仿真评估结果作为评价指标交互迭代调整张量场特征参数, 最终得到舱室空间布局优化结果. 实验结果表明, 文中方法有效地建立了张量场与群组运动仿真之间的映射关系, 对比遗传算法和层次分析评价法, 能够快速、高效地设计出符合人类活动的高质量的舱室空间布局.

关键词: 布局设计; 舰船舱室布局; 张量场; 群组运动仿真

中图法分类号: TP391.41 **DOI:** 10.3724/SP.J.1089.2021.18822

The Design and Optimization of Ship Cabin Space Layout Based on Crowd Simulation

Lyu Pei¹⁾, Chen Weichao¹⁾, Zhang Quan¹⁾, Xu Mingliang^{1)*}, Huang Long²⁾, Guo Chenbing³⁾, and Zhou Bing¹⁾

¹⁾ (School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450000)

²⁾ (Military Representatives Bureau of Naval Equipment Department in Zhengzhou, Zhengzhou 450000)

³⁾ (713 Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Zhengzhou 450000)

Abstract: In order to solve the space layout optimization problem of ship cabin efficiently, an interactive layout design and optimization method based on crowd simulation and tensor field is proposed. Firstly, the image based flow visualization algorithm is used to analyze the tensor field of the space layout domain, which calculates the eigenvector and generates the road network of ship, and obtain the cabin space layout based on the road network. Secondly, the crowd simulation algorithm is used to simulate the behavioral activities of the crowd in the cabin space, and then to evaluate the mobility and coziness of the crowd in the ship cabin space. After obtaining a series of road network of ship and results of crowd simulation, the mapping relationship between road width and road spacing in road network and mobility value and comfort value in crowd simulation results is established respectively. The results of crowd simulation are used as evaluation criterion to interac-

收稿日期: 2020-11-30; 修回日期: 2021-01-07. 基金项目: 国家自然科学基金(61772474, 61822701, 6182324); 河南省高校科技创新人才培养计划(20HASTIT021). 吕培(1986—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, CCF 会员, 主要研究方向为计算机图形学、人工智能、虚拟现实; 陈伟超(1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为计算机图形学; 张权(1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为计算机图形学; 徐明亮(1981—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, CCF 会员, 论文通讯作者, 主要研究方向为计算机图形学、人工智能、虚拟现实、科学可视化; 黄龙(1988—), 男, 学士, 助理工程师, 主要研究方向为装备质量监督; 郭晨冰(1982—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为机械电子工程; 周兵(1964—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, CCF 会员, 主要研究方向为计算机图形学、数字图像处理.

tively and iteratively adjust the characteristic parameters of tensor field. The experimental results show that the proposed method effectively establishes the mapping relationship between tensor field and crowd simulation. Compared with genetic algorithm and analytic hierarchy process, it can quickly and efficiently design high-quality cabin space layout in line with human activities demand.

Key words: layout design; ship cabin layout; tensor field; crowd simulation

舰船舱室空间布局对舰员的工作效率和舰船的作战性能有着非常重要的影响,合理的舰船舱室布局能提高人员流动效率、保证区域间的协调性和舰员生活的舒适性.舰船舱室的功能空间布局设计与优化是一个复杂的迭代过程,如何简化过程、提高效率并缩短迭代时间已成为该领域研究的重点.传统的研究方法是,首先在满足设计准则、规范和性能等要求下,依靠不同学科领域设计师的经验确定舰船内通道的位置和宽度,以及划分舱室功能;然后根据评估结果进一步改进舱室空间布局,多次迭代完善相应设计过程.该过程依赖人的主观性,而经验和技能与个人能力有很大关联,不同学科之间有较大差异,使得设计的结果和耗费的时间难以控制,甚至会出现多种方案之间反复沟通协调的情况,尽管耗费了大量时间,但最终仍无法得到客观上的最优舰船空间布局^[1-3].

以往的工作大多是在基于布置准则、设计规范、尺寸和性能要求等基础上,依靠理论算法计算布局设计、分析和优化的最优解.在评估结果时,采用层次分析法^[4]和模糊综合评价法^[5]等,考虑了人均面积、舱室邻接强度和道路流通程度等,但都没有考虑人类活动的因素.由于空间布局设计与人类活动密切相关^[6],因此,以人类活动为评价空间布局质量的主要标准,才能更真实反映空间布局设计质量;否则,最终的空间布局设计结果虽然满足所有的设计准则,但对人类活动而言未必是最优的设计方案.采用群组运动仿真可以模拟人类在空间布局中的活动.在已有的交互式空间布局建模大多使用几何建模^[7-8]方式,根据指定参数生成符合预期的空间布局,但这类方法在优化过程中难以实现快速的交互式修改,无法在迭代过程中按照操作者的意图调整局部空间的布局状态.本文采用张量场算法解决这个问题,以实现交互式操作.此外,如果布局域存在曲线,为了降低时间复杂度,通常做法是简化边界中的曲线为直线.采用张量场算法,由于边界中是否存在曲线对时间复杂度影响不大,因此不需要对曲线简化.

本文解决如下问题: (1) 改进张量场算法,使其适合舰船舱室中等规模布局设计与优化; (2) 建立群组运动仿真算法与张量场设计之间的映射关系,进而改变张量场的特征向量,调整空间布局参数.本文将 2 个问题归纳为: 设计舰船舱室布局中通道网络,评价生成舰船舱室布局.首先,本文使用改进的 IBFV 算法生成舰船内的张量场^[9],并通过分析张量场生成舰船内的通道网络,进而生成舱室布局.其次,本文提出一种群组运动驱动的空间布局设计与优化的评估方法,对舰船舱室内群组运动的特征进行定量描述,模拟群组在空间布局中的运动行为,综合分析空间布局特点,评估空间布局的质量^[10].最后,建立张量场特征向量与群组仿真之间的映射关系,调整空间布局局部区域,设计出更高质量的舰船舱室空间布局.

综上,本文主要从舰船通道网络和群组运动仿真 2 个方面出发,采用张量场算法和群组运动仿真算法相结合的方法设计与优化,构建群组运动仿真与张量场之间的映射关系,综合分析群组运动仿真结果以迭代修改对应的张量场参数,改变张量场特征向量,调整舰船舱室空间布局的局部细节,以获得更真实的布局,生成高质量的舰船舱室空间布局.

1 相关工作

在空间布局优化与设计方面,国内外学者进行了广泛深入的研究,并取得了一系列的成果. L-System 分形算法^[11]是最早采用计算机实现大规模城市布局算法,其思想是像树的分支一样扩展道路网,快速生成大规模、不同类型的城市道路网.之后又出现了基于规则的生成系统,利用二维图像作为输入地图,生成不同模式的道路图^[12].此外研究者又以高级功能规范为出发点,采用整数规划算法设计满足所有约束的布局^[13].对于小规模布局,如房间布局,研究者通过输入高级用户约束来生成住宅平面图^[14];针对家具布局问题,研

究者结合用户设计指南,设计出交互式家具布局系统,指导用户合理地摆放室内家具^[15]。

对于舰船舱室空间布局而言,设计者尝试从多个方面优化,如通道和舱室等;还通过改进多种不同算法以缩短设计周期,如遗传算法和蚁群算法等,都获得了很好的效果。在舰船通道优化方面,王文全等^[16]采用改进的粒子群优化算法,得到了舰船通道的位置布局优化结果,并通过例子验证了模型的合理性,该算法无论是在收敛速度上还是精度上都有所提高。在舰船舱室布局优化方面,王运龙等^[17]采用改进的遗传算法,在综合考虑多方面因素的基础上,通过建立舰船居住舱室房间布局优化模型,求解出最优的舱室布局,缩短了设计周期。胡耀等^[18]综合运用系统布局规划(systematic layout planning, SLP)和遗传算法求解生活舱室位置布局优化问题,大大降低了对设计人员经验的依赖程度,且准确度更高。他们在另外的工作中^[19]通过借鉴二维设施布局问题(facility layout problem, FLP)的理论和方法,采用改进的遗传算法求解舰船生活舱室布局划分与优化问题。针对舱室布局方案的评估问题,以生活舱室为实例,赵楠等^[20]提出了基于层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)和模糊综合评价法(fuzzy comprehensive evaluation method, FCA)的综合分析评价方法。除了遗传算法,姜文英等^[21]还利用粒子群和蚁群算法求解船舶机舱内设备和管路等的布局规划问题。王宇等^[22]将改进的引力搜索算法应用到由效用函数理论建立的舰船多层甲板内舱室布局数学模型,解决了舱室布局自动优化问题。王运龙等^[23]采用禁忌搜索算法建立多目标优化数

学模型,优化舰船生活舱室布局,缩短了传统的设计周期。

以上方法大多是基于已分配的舰船固定区域,进一步划分舱室空间并分配舱室功能,或者是改进评价舱室的算法,均缺乏对空间布局优化算法和空间布局评价算法之间相互关系的综合考虑。本文通过张量场算法直接划分出舰船舱室空间布局,并综合考虑人与空间布局之间的相互依存关系,以人类活动作为评价空间布局质量的主要因素,设计与优化更高质量的舰船舱室空间布局。

2 本文方法

舰船舱室空间布局与普通布局的不同之处在于空间范围、设计风格和精度要求等方面。舰船舱室的空间布局域范围形状较为固定,布局分布风格以矩形为主,较为单一,但对精度要求更高。为了使设计出来的空间布局更符合设计要求,需要在设计时重点关注空间布局的风格变化。图1所示为本文方法的整体流程,主要分为2个部分:基于张量场的舰船舱室空间布局生成,群组运动驱动的舰船空间布局评价。其中张量场是一个连续的函数,局部张量的变化会影响其他相邻位置张量的变化。在之前的工作中,张量场应用于大规模城市布局,本文通过缩小其适用布局的规模,使其适合中等规模的舰船舱室空间布局设计。群组运动仿真实验中的结果作为评价布局质量的指标,指导张量场参数的梯度变化方向,作为设计更高质量舰船舱室空间布局的基础。张量场与人群仿真之间迭代计算,可快速地提高空间布局的质量。

图1 本文方法的整体流程

本文将张量场的创建与修改限制在布局域内,根据布局域的边界特点改变其内部张量场的流线方向,步骤如下:

Step1. 输入舰船布局域,只在布局域内生成、调整张量场。

Step2. 在布局域范围内生成栅格型基础张量场,

布局域范围外的张量场不受影响,其输出作为下一步的输入。可手动调整张量场局部细节,也可以使用旋转对称场来修正张量场^[24],以得到更规则的布局。

Step3. 在基础张量场上,生成栅格型通道网络,可根据不同通道间距生成密集或者稀疏的通道网络。

Step4. 根据前面得到的张量场生成空间布局,布

局由舰船通道网络和若干舱室组成.

其中, Step2 和 Step3 是一个迭代的过程, 在 Step3 生成的空间布局的基础上进行群组运动仿真评估; 得到评估结果后, 如果达不到相应的要求, 再返回 Step2 继续调整张量场参数.

2.1 张量场

张量场是基于一定的用户约束生成的, 其基本类型有横向的栅格型和径向的放射型等. 在不同类型张量场的基础上进行编辑、混合和平滑^[25]等操作, 能够得到不同类型的张量场, 它们最终生成风格各异的空间布局.

生成张量场的方法是根据相邻点的张量计算布局域内每一个点 $p=(x, y)$ 的张量 $T(p)$, 相邻点的张量具有关联性; 所有点的张量组成了张量场, 点与点之间相互影响, 修改其中一个点的参数可以影响相邻的其他若干点的参数, 这为交互式操作提供了方便. 图 2 所示为 2 种不同类型的空间布局, 栅格型张量场和放射型张量场, 以及对应的空间布局. 虽然张量场有多种风格, 可以生成不同类型的空间布局, 但受到舰船布局的限制, 本文只针对栅格型空间布局做详细论述.

图 2 不同类型张量场及其布局

2.1.1 栅格型基础张量场

在舰船舱室空间布局中以规则的矩形舱室为主, 该类型布局中的路口分布基本为+型和 T 型, 由 2 组垂直交叉的通道组成, 本文期望在张量场设计中也可以生成类似的通道网络. 在张量场实际应用中, 可以通过 2 组垂直的特征向量(主特征向量和次特征向量)划分出矩形区域来实现. 在布局

域中, 沿着点 $p=(x, y)$ 可由公式

$$T(p) = \sqrt{\mu_x^2 + \mu_y^2} \begin{pmatrix} \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & -\cos 2\theta \end{pmatrix} \quad (1)$$

生成栅格型的张量场. 其中, μ_x, μ_y 表示点 p 处 2 个相互垂直的方向, 且 $\theta = \arctan(\mu_y / \mu_x)$.

2.1.2 生成通道网络

本文以栅格型张量场为基础生成网格类型的张量场, 进而得到舰船舱室布局的通道网络. 对称性在空间布局质量的评价中占据重要的位置, 如何识别分析物体的对称性是一个值得探讨的研究课题^[26], 本文在生成通道网络时也考虑了对称性的影响. 具体地, 采用超流线布局算法^[27]在密集的张量场中生成合适的通道网络, 用旋转对称场来描述布局^[24]. 为了追踪张量场中的流线, 从一组种子点开始, 沿着流线生长的方向, 在迭代过程中根据队列中的顶部元素生成流线, 同时将新种子添加到队列中, 直到满足一定条件才停止.

图 3 所示为张量场及其对应道路网的例子, 图 3a 中, 其流线的方向受 3 条蓝色线段所示 3 个约束的影响, 流线在约束处的方向一定和蓝色线段的方向一致; 图 3b 中绿色和橙色为 2 个不同方向的通道, 且在交点处相互垂直. 另外, 道路网还受到相邻 2 条道路之间距离约束的影响, 在道路中任意一点 $p=(x, y)$ 垂直于道路的 2 个方向的距离约束可表示为

$$d_{\min} < L(p)_x, L(p)_y < d_{\max} \quad (2)$$

其中, $d_{\min}, d_{\max}$ 分别表示道路之间设置的最短距离和最长距离, 本文取 $d_{\max} = 2d_{\min}$.

图 3 张量场生成道路网

2.2 群组运动仿真

2.2.1 空间布局建模

空间布局建模工作可分为以建筑为基础的建模^[28-30]和以道路网络为基础的建模^[11,31]. 前者认为空间布局由建筑组成, 在设计时更关注建筑的属性, 如位置、形状、类型和面积等; 后者认为空

间布局由道路网络组成,道路网络分割的区域为建筑或建筑群,在设计时往往忽略建筑的细节而更关注道路网络的属性,如道路宽度和道路连通性等.在本文的舰船舱室空间布局设计中,采用以道路网络为基础的建模,相比之下,其不关注建筑属性的变化,而更注重道路变化对空间布局的影响.本文将建筑转换为舰船舱室,道路网络转换为舰船通道网络,设计以舰船为实例的空间布局.

在建模过程中,舰船空间布局由通道网络组成,通道网络内包含若干通道,且每个舱室拥有一个或者多个出入口.所有通道网络可以构建成一个图 $G = \langle E, V, W \rangle$; 其中, E 表示所有通道, V 表示所有通道的交叉点或者顶点, W 表示通道的宽度.在进行人群仿真时,本文提取布局中每一条通道 $G' = \langle E, V \rangle$, 即图 G 中的一部分作为智能体的行走路径,出入口是智能体进入和离开布局的位置,通道是智能体在布局中行走的路线,舱室是智能体在布局中停留访问的区域.

2.2.2 智能体建模

智能体被定义为空间布局中的虚拟访客,本文将智能体定义为舰船空间布局中的虚拟船员,模拟船员在舰船空间布局中的真实体验.本文改进了智能体模型^[32],关注智能体的2个能力:环境密度感知和可移动性.不考虑复杂的认知模型,也不考虑碰撞检测.为了保证仿真结果的真实性,要求智能体不能随意访问任何舱室,而是赋予不同智能体访问某些舱室的权利和访问时间.智能体需要拥有年龄和状态2种属性才能满足本文的仿真要求,智能体每个属性与其行走速度和感知密度之间的关系如表1所示.

表1 智能体属性与其速度和感知密度的关系

属性	速度	密度
年龄	v_η	ρ
行走	v_η^{walk}	ρ_η^{walk}
访问	v_η^{visit}	ρ_η^{visit}

(1) 年龄. 由于不同年龄段人的平均移动速度不同,同一年龄段的不同人之间速度也有差异,为了将人的速度区分开,且体现人群的多样性,本文将所有智能体分配不同年龄,并在正常行走速度内随机设定行走速度.智能体的年龄在整体上服从平均分布.在随机状态下,设定智能体年龄为

$$a_\eta = a_{\min} + \xi_a (a_{\max} - a_{\min}) \quad (3)$$

其中, ξ_a 在 $[0, 1]$ 服从平均分布; $a_{\min}$ 为智能体的

最小年龄; $a_{\max}$ 为智能体的最大年龄.

不同年龄的属性主要体现在智能体的行走速度上,如在任何阻碍的前提下,正常成年人群的正常行走速度一般为 $1.402 \sim 1.508 \text{ m/s}$ ^[6].如果环境比较拥挤,智能体的移动速度会降低,实际速度达不到默认速度值.在仿真时,智能体 η 在特定时间段内的实际移动速度可表示为

$$v_\eta = \max \left(\frac{s_{t_2} - s_{t_1}}{t_2 - t_1}, v_{\min} \right) \quad (4)$$

其中, s_{t_1}, s_{t_2} 分别表示 t_1, t_2 时刻下所走的总路程; $v_{\min}$ 表示在拥挤的环境中行走的最低速度.

(2) 状态. 智能体在整个过程中有2个状态:在通道中行走,在舱室内访问.不同的状态用以区分智能体所处的不同区域,以获取智能体在不同区域时对所处环境的感知结果.如智能体在访问舱室内部时,通常需要停留一段时间,移动速度慢或者不移动,所以计算智能体平均移动速度时,只考虑行走状态下的速度.在仿真时,智能体的实际移动速度使用一定时间段内的移动距离与时间的比值计算得到,智能体 η 在行走状态的平均速度可表示为

$$\bar{v}_\eta^{\text{walk}} = S_{\text{walk}} / t_{\text{walk}} \quad (5)$$

其中, S_{walk} 表示行走状态下智能体行走的总路程; t_{walk} 表示行走状态下智能体经历的时间.

智能体只在舱室内为访问状态,所以计算智能体在舱室内部时的密度时,可以只选择访问状态下的智能体.智能体在访问舱室时的平均密度可表示为

$$\bar{\rho}_\eta^{\text{visit}} = \frac{1}{M} \sum_i \frac{1}{T_i} \sum_j \frac{N_{i,j}^{\text{visit}}}{A(K_i)} \quad (6)$$

其中, M 表示访问的舰船舱室的总数量; T_i 表示访问第 i 个舱室的总时间; $A(K_i)$ 表示访问的第 i 个舱室的面积; $N_{i,j}^{\text{visit}}$ 表示访问的第 i 个舱室在 j 时刻的访问人数.

智能体 η 在行走状态下的平均人群密度可表示为

$$\bar{\rho}_\eta^{\text{walk}} = \frac{1}{T} \sum_i \frac{N_i^{\text{walk}}}{A(S_i \cap P_i)} \quad (7)$$

其中, T 表示智能体在行走状态下耗费的总时间; N_i^{walk} 表示智能体在第 i 时刻感知范围内行走状态下的智能体总数量; $A(S_i \cap P_i)$ 表示智能体的感知范围,是智能体在行走状态下第 i 时刻所处位置的

社会距离 S_i 与通道面积 P_i 的交集.

2.2.3 代价函数

舰船舱室空间布局的设计质量表现在多个方面,如舱室分布、舱室面积和通道宽度等.具体表现在无论船员身处何处,对所有目的地距离都不会太远,即距离之和尽量小;舱室面积分布合理,不会出现舱室过大或者过小的情况;通道宽度合理,不会出现宽度太窄造成拥挤的情况,也不会出现宽度太宽浪费空间的情况.通过群组运动仿真可以模拟人在空间布局内的运动行为,良好的空间布局可以表现出对大量人群的接纳能力.如在自由行走访问情况下,人在舰船舱室空间布局内应当均匀分布,不会在局部位置出现拥堵,也不会集中在部分舱室内.这些可以通过人在空间布局内的移动速度和感知密度来体现,当人的移动速度逐渐减小、感知密度增大或者减小时,都说明空间布局存在部分缺陷.本文在研究过程中通过对通道网络的优化,间接优化舰船舱室,所以代价函数更关注通道网络参数的变化.综合考虑,本文定义移动性和舒适性 2 个指标来评价一个空间布局的质量,并根据评价结果,迭代调整张量场的参数.

(1) 移动性.对通道宽度的判断可以从 2 个方面来衡量: a. 人的行走速度.通道越窄,感觉越拥挤,人的行走速度越慢;反之,通道越宽,人的行走速度越快,但是不会无限快,而是越来越接近个人的速度上限.所以,其缺点是当通道足够宽时,在速度上则体现不出差异. b. 人群密度.密度低意味着通道太宽,密度高则意味着通道太窄.从密度上可以体现出通道太宽或太窄的情况,弥补了速度指标的缺陷.行走速度和人群密度有一定的关联性,密度高,行走速度会慢,都反映出通道狭窄.自由访问的情况下,人群在布局中各地方分布应该是均匀的,所以整体的行走速度和密度,间接地反映通道的宽度情况.计算智能体移动性代价公式为

$$C_m(\phi) = \omega_1 \frac{1}{N} \sum_i \left[1 - \exp \left(-\frac{(\bar{\rho}_i^{\text{walk}} - \mu)^2}{2\sigma^2} \right) \right] + \omega_2 \left(1 - \frac{1}{N} \sum_i \frac{\bar{v}_i^{\text{walk}}}{v_i} \right) \quad (8)$$

其中, N 表示智能体的总数量; $\bar{\rho}_i^{\text{walk}}$ 表示第 i 个智能体在行走状态下的平均密度; μ 表示基准人群密度; $\sigma = \mu/2$; $\bar{v}_i^{\text{walk}}$ 表示第 i 个智能体在整个布局行走过程中实际移动的平均速度; v_i 表示第 i 个智能体的默认速度; ω_1, ω_2 分别表示密度和速

度的权重, $\omega_1 + \omega_2 = 1$.

该指标的基本原理是,通过智能体在通道中行走状态下的移动速度和感知密度来表示布局中通道的宽度是否能够承载相应的人流量,从而间接地反映一个布局的质量.

(2) 舒适性.从心理学角度来讲,每个人都有个人空间,也称为人际气泡.当别人闯进自己的个人空间时,会对自己造成心理压力,从而产生不适感.周围人数越多,或者距离自己越近,心理不适感越强.同移动性一样,空间布局的舒适性可以通过智能体访问舱室时的人群密度来反映.如果一个舱室内的访问人群密度过大,即舱室内人群数量过多,会大大地降低体验效果;如果一个舱室内的访问人群密度过小,可能反映出舱室面积过大,降低空间的利用率.计算舒适性代价公式为

$$C_c(\phi) = \frac{1}{N} \sum_i \left[1 - \exp \left(-\frac{(\bar{\rho}_i^{\text{visit}} - \mu)^2}{2\sigma^2} \right) \right] \quad (9)$$

其中, N 表示智能体的总数量; $\bar{\rho}_i^{\text{visit}}$ 表示第 i 个智能体在访问舱室时的平均密度; μ 表示基准人群密度, $\sigma = \mu/2$.从式(9)可知, $\rho_{i,j}^{\text{visit}}$ 过大或过小都会使舒适性代价值变高,降低空间布局的质量.

2.2.4 仿真实验流程

每次生成一个完整空间布局后,本文都会在该布局上进行人群仿真实验,以评估该布局质量.本文根据具体的流程,将仿真实验分为 3 个模块,即预处理、智能体生成和群组运动仿真.

Step1. 初始化仿真模型,对输入的空间布局进行预处理,包括提取布局域、通道网络和舱室等信息.布局域限定了智能体的活动范围,从通道网络中可以提取智能体的行走路线,舱室则为智能体在行走过程中将要访问的对象.

Step2. 生成预定数量的智能体,并随机设置智能体的属性,包括智能体的年龄、行走速度、进入空间布局的时间、计划访问的舱室以及在该舱室内的访问时间等信息,计算并保存每个智能体的访问路线.

Step3. 群组运动仿真,读取前 2 步定义的仿真模型,构建仿真布局环境,载入智能体;从布局入口进入,使智能体根据已计算保存的路线在布局中行走,访问布局内舱室,并在舱室内访问一定时间,最后离开空间布局.

3 实验及结果分析

3.1 实验设置

在张量场生成舰船舱室空间布局中,本文主要考虑了通道宽度和通道间距 2 个影响因子.设置

不同的因子数值,可以得到不同的实验结果.在目前已有的工作中,没有对这2个因子数值进行精确计算,主要是依靠用户的主观感受去手动改变,准确性有待提高.另外,利用张量场生成空间布局时并没有考虑人的因素,无法保证所生成的空间布局一定是对人类活动友好的.本文采用张量场算法结合群组运动仿真实验,通过定义移动性和舒适性等评价指标,迭代计算求解最合适的通道宽度和通道间距,最终生成高质量的舰船空间布局.本文分别在不同舰船空间布局域下设计空间布局,每个布局域下生成多个不同的舰船舱室空间布局,都得到了高质量的舰船空间布局.

3.2 优化过程

空间布局优化是一个复杂的迭代过程,首先采用 IBFV 算法生成初始空间布局;然后在该空间布局内进行群组运动仿真,以评价空间布局的设计质量;最后再根据评价结果修改因子数值,多次迭代以上过程,得到高质量舰船空间布局.

3.2.1 通道宽度优化

本文在不同通道宽度的舰船空间布局环境中进行群组运动仿真,仅计算移动性代价值.在该实验中,仿真人数固定不变,船员随机从入口进入,在通道中穿行,通道宽度逐渐增大.在优化通道宽度之前,为了降低迭代次数、缩短迭代时间,通常会先计算一个大概的通道宽度范围.在优化通道宽度实验过程中,本文将通道宽度分为20个等级,在等级范围内进行一系列群组运动仿真实验,以计算在不同通道宽度下的移动性代价值,计算方法详见式(8).该代价值反映了通道宽度对空间布局的友好性,代价值越低,则意味着仿真群组在通道中的移动速度越快,感知周围的密度越舒适,进而表明该通道宽度越合适.

在实验过程中设定通道宽度为 w .图4a和图4b所示分别为不同通道宽度下对比效果展示,2个空间布局中只有通道宽度不同,其他因素均相同;图4c为仿真过程中速度代价值和密度代价值的变化,分别对应移动性代价值公式中 ω_1 和 ω_2 的2部分,详细计算参考移动性代价函数计算公式.速度代价值逐渐减少后趋于平稳,密度代价值先减少再增加;图4d所示为通道宽度变化对群组运动仿真代价值的影响,其中, $\omega_1:\omega_2=1:2$,整体来看先减少再增加, w 在12~14之间最低.在仿真过程中,群组完全经过通道所需的时间逐渐减少,拥挤程度逐渐降低,代价值应当先减小再增加,代价值最小值范围附近即为最合适的通道宽度范围.

图4 不同通道宽度的对比

3.2.2 舱室面积优化

在优化舱室面积实验过程中,本文通过改变通道间距以间接改变舱室面积,在不同通道间距的布局环境中进行仿真,仅计算舒适性代价值.在该实验中,本文将通道间距也分为20个等级,在等级范围内进行了一系列实验,分别测试了不同通道间距下群组运动仿真实验,以计算不同舒适性代价值,计算方法详见式(9).

在实验过程中设定通道间距为 s .图5a和图5b所示分别为不同通道间距下空间布局的对比效果.其中,图5a状态下舱室的面积相对较小;图5b状态下舱室的面积相对较大;2个空间布局中只有通道间距不同,其他因素均相同;图5c所示为通道间距变化对仿真值的影响,详细计算参考舒

适性代价函数计算公式. 通过群组在布局中对人群密度的感知, 反映出面积分配的合理性. 由结果可知, 代价值先减小再增加, s 在 7~11 之间代价值最低. 在仿真人数不变的情况下, 不同通道间距下的舱室面积不同, 随着通道间距的增加, 舱室面积不断增大, 人群感知的拥挤程度逐渐减小至舒适范围, 再继续减小至非舒适范围, 代价值应当先减小再增加, 代价值最小值范围附近即为最合适的通道间距范围.

图 5 不同通道间距的对比

3.2.3 迭代生成布局

迭代生成布局的过程主要分为 8 个步骤:

Step1. 输入舰船空间布局域.

Step2. 使用 IBFV 算法在布局域内生成张量场.

Step3. 使用超流线布局算法生成通道网络, 根据通道宽度因子为通道网络中的道路赋予宽度值.

Step4. 根据通道间距因子调整通道网络, 这时已

经是一个完整的舰船空间布局.

Step5. 在舰船空间布局内进行群组运动仿真, 评价空间布局的设计质量.

Step6. 根据群组运动仿真评价结果, 调整通道宽度因子和通道间距因子.

Step7. 重复 Step3~Step6, 多次迭代生成舰船空间布局, 当得到布局最优解时停止迭代.

Step8. 经过以上一系列步骤找到布局最优解.

改变张量场中通道间距的目的是改变空间布局中舱室的面积. 在通道间距不变的情况下, 改变通道宽度时, 通道会侵占舱室的部分面积; 而在通道宽度不变的情况下, 改变通道间距并不会影响通道宽度. 因此调整因子的顺序应当是先调整通道宽度, 再调整通道间距. 根据这个顺序, 本文提出人群仿真迭代调整张量场的方法, 首先, 根据人群移动性和通道宽度影响移动性代价值, 增加或减少通道宽度并优化此结果. 然后, 根据人群舒适性和通道间距影响舱室面积, 以及影响舒适性代价值, 增大或减小通道间距并优化此结果. 同时, 在调整张量场的过程中, 用户可根据自己的主观感受调整张量场细节. 本文在运行群组运动仿真算法时, 从开始进入布局到离开布局中不同时刻的仿真结果如图 6 所示. 仿真过程中的智能体总数为 400 人, 每个智能体随机选择进入和离开空间布局的时间、访问舱室的时长, 尽量真实地模拟群组运动.

由于舱室的面积受到通道间距的影响, 但通道间距为一个具体的数值, 而非一组数值区间, 因此生成的舱室面积比较平均. 这样的分布从整体上来看符合美学评价标准, 但在“功能-空间”优化时受到一定的限制, 这是本文工作的一个不足之处, 在未来工作会针对这一不足做出改进.

3.3 对比实验分析

3.3.1 不同舱室布局的遗传算法结果

以往的舱室布局设计多是在已确定的固定区域内进行二次规划, 并确定划分之后的舱室功能,

图 6 群组运动仿真算法运行过程时刻图

如居住舱、盥洗室和活动室等. 这就意味着首次规划结果对二次规划有非常大的影响, 如果首次规划质量不高, 二次规划时即使再优秀的算法也很难规划出高质量舱室布局. 本部分设计的对比实验, 参考了改进型遗传算法优化舰船舱室布局^[19]. 对比实验中, 首先在不改变整体协调性的基础上小幅度调整首次规划的固定区域大小, 然后重新使用改进型遗传算法优化舱室布局, 最后将实验结果与原文中进行对比分析. 在该实验中, 有2层连通的甲板, 图7所示为待规划的2层甲板的布局模型, 共分为8个已规划的固定区域, 计划规划出17个舱室. 在该实验的遗传算法中, 直接将舱室序列 X 作为固定长度染色体, 直接对舱室序列进行优化.

本部分实验旨在证明首次规划结果对二次规划的影响非常大, 所以并不改变参考论文中的任何实验变量, 只是改变8个已规划的固定区域的面积大小, 在此基础上, 重新优化舱室布局. 如果得到了质量更高的舱室布局, 可以认为有更优的解, 应优化一次规划的算法. 在实验中, 本文改变了1甲板的区域1和区域2的面积, 适当减小了区域1

的面积, 并相应增加了区域2的面积, 对区域6和区域7也有同样的改变.

图7 2层甲板的布局模型^[19]

由于参考论文中篇幅有限, 因此没有给出所有的数据, 本文在复现遗传算法时难免会和原论文中的数据有一点误差. 如表2所示, $H_1(X)$ 表示参考文献中的总目标适应度函数值, $H_2(X)$ 表示本文复现的遗传算法中的总目标适应度函数值. 由表可以发现, 本文遗传算法的总目标适应度函数值相比整体偏低一些, 但是总体变化趋势不变. 图8所示实验结果考虑了2个实验之间的误差, 可以认为, 本文得到的最终种群最优适应值更高一些, 即可以得到更优的解, 从而证实了假设.

表2 相同舱室布局的不同适应度函数值对比

方案	舱室序列	$H_1(X)$	$H_2(X)$
1	12-7-6-10-9-8-5-13-3-15-14-4-2-1-11-17-16	-143.123 0	-156.810 8
2	13-5-16-17-11-6-7-12-14-15-10-4-2-1-3-8-9	-139.731 4	-152.588 2
3	12-7-6-9-8-10-5-13-16-17-11-3-1-2-4-14-15	-142.276 0	-154.239 6
4	12-7-6-11-9-8-5-13-4-14-15-3-1-2-16-17-10	-141.347 9	-153.120 3

图8 不同方法种群最优适应值变化曲线的对比

3.3.2 群组运动仿真算法评价布局

本部分设计的对比实验, 参考了一种模糊层次分析综合评价法^[20], 图9所示为参考论文中的生活区舱室布局. 本文在该舱室布局的基础上进

行群组运动仿真实验, 并与模糊层次分析综合评价结果作比较. 模糊层次分析综合评价法的评价分数设为5分制, 5分最优, 1分最差, 评价分数及格门槛值设为3分, 及格门槛值以下的为不合格方

案. 群组运动仿真的评价分数区间为[0,1], 分数越高则质量越低. 表 3 所示为分别对图 9 的舱室布局采用模糊层次分析综合评价法和群组运动仿真算法, 从表 3 可知, 模糊层次分析综合评价法的评估质量很高, 然而采用群组运动仿真评价的评估质量却很低. 结果说明, 图 9 的舱室布局虽然符合其评价方法, 但是却不是对人类活动而言最优的设计方案, 舱室布局应当进一步优化.

表 3 不同评价方法的指标对比

评价方法	评价指标	得分
模糊层次分析综合评价法 ^[20]	定性指标 B_1	3.744 8
	定量指标 B_2	3.141 1
	布局总目标 A	3.443 0
群组运动仿真	C_m	0.652 3
	C_c	0.901 2

图 9 生活区舱室布局^[20]

3.3.3 相同布局域下的不同舱室布局

舰船一般为多层甲板, 不同甲板层之间可以设计不同风格的布局, 以满足不同的功能需求. 本

文在设计时没有对舱室区域进行更细致的划分, 也没有考虑舱室的门、窗以及多层甲板之间的梯道, 旨在寻找一个能从整体上规划舱室布局的算法, 提高舰船的空间利用率、区域之间的协调性以及改善舰员的生活舒适性, 最终提升舰船的作战能力.

为了达到上述目的, 本文简化了舰船布局结构, 选择 2 型甲板平面型布局作为优化目标, 图 10 所示为 3 种 2 型甲板平面型舱室布局, 每种布局均是通过改变张量场算法参数生成的, 并由群组运动仿真算法进行评估. 图 10a 中的舱室划分面积相对较大, 适用于餐厅和活动室等公共场所; 图 10b 中舱室面积较小, 适用于居住舱和生活舱等私人区域; 图 10c 中的舱室面积更小, 适用于各类储藏室等用途. 表 4 中具体列出了 3 种风格舱室布局的代价值, 包括移动性代价值 C_m 和舒适性代价值 C_c , 从中可发现各类代价值都较低.

图 10 弧型布局域下的不同舰船舱室布局

表 4 不同风格舰船舱室布局的代价值

舱室布局	C_m	C_c
风格 1	0.308 9	0.252 1
风格 2	0.323 4	0.285 9
风格 3	0.336 9	0.312 6

3.3.4 其他布局域结构

舰船布局结构并非只有前面展示的半弧形布局域, 除此之外本文还充分考虑了其他情形下的舰船舱室布局. 图 11 所示为其他布局域风格下的一些舰船舱室布局. 同一种布局域下的通道间距

图11 圆弧和矩形布局域下的不同舰船空间布局

不同,最终设计出的舱室数量和面积均不同;通道间距越高,则密集程度越低。

4 结 语

本文提出一种优化中等规模舰船舱室空间布局设计的方法,以舰船通道网络为基础进行建模,通过张量场设计空间布局,以群组运动仿真作为空间布局的评价方法,迭代设计与优化舰船空间布局。与传统方法相比,本文更注重舰船空间布局与人类活动之间的相互影响关系,以及舰船空间布局的整体规划,使船员在设计的舰船空间布局中活动更舒适便利。

然而,本文尚有一些不足之处,可在后续工作中逐步完成,包括:(1)空间布局中通道宽度只能整体调整,而不能针对局部区域增大或者减小。原因是局部通道宽度调整,对代价值的影响甚小,代价值模型的精度不足以检测到这种细微变化。可寻找更精确的模型,提高效率。(2)调整张量场时,

用户的主观感受对结果的影响很大,不同用户操作得到的空间布局结果有一定的差别。在未来的工作中,拟建立布局域特征与空间布局之间的关联,用户在设计空间布局时,推荐选择适合该布局域的最优空间布局,再深度融合用户的主观感受。这样,既保留了空间布局的特点,又结合了用户的主观感受。

参考文献(References):

- [1] Papanikolaou A. Holistic ship design optimization[J]. Computer Aided Design, 2010, 42(11): 1028-1044
- [2] Cui H, Turan O, Sayer P. Learning-based ship design optimization approach[J]. Computer Aided Design, 2012, 44(3): 186-195
- [3] Zheng Xuanliang. Research and application of game theoretic methodology in naval architecture & ocean engineering[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010(in Chinese)
(郑玄亮. 船海工程设计中的博弈分析法研究与应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2010)
- [4] Li Zhiyuan. Application and researches of AHP in multi index evaluation system[J]. Journal of Huaihai Institute of Technol-

- ogy: Natural Science Edition, 2012, 21(2): 73-76(in Chinese)
(李支元. 层次分析法在多层次多指标评估系统中的应用研究[J]. 淮海工学院学报: 自然科学版, 2012, 21(2): 73-76)
- [5] Li Junhua, Chen Binkang, Ying Wenye, *et al.* Fuzzy comprehensive evaluation for vessel compartment layout[J]. *Ship-building of China*, 2000, 41(4): 22-27(in Chinese)
(李俊华, 陈宾康, 应文烨, 等. 船舶舱室布置方案的模糊综合评价[J]. 中国造船, 2000, 41(4): 22-27)
- [6] Feng T, Yu L F, Yeung S K, *et al.* Crowd-driven mid-scale layout design[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2016, 35(4): Article No.132
- [7] Vanegas C A, Aliaga D G, Benes B, *et al.* Interactive design of urban spaces using geometrical and behavioral modeling[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2009, 28(5): 1-10
- [8] Sun J, Yu X B, Baciú G, *et al.* Template-based generation of road networks for virtual city modeling[C] //Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology. New York: ACM Press, 2002: 33-40
- [9] Chen G N, Esch G, Wonka P, *et al.* Interactive procedural street modeling[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, 27(3): 1-10
- [10] Huerre S, Lee J, Lin M C, *et al.* Simulating believable crowd and group behaviors[C] //Proceedings of ACM SIGGRAPH ASIA 2010 Courses. New York: ACM Press, 2010: 1-92
- [11] Parish Y I H, Müller P. Procedural modeling of cities[C] //Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM Press, 2001: 301-308
- [12] Sun J, Yu X B, Baciú G, *et al.* Template-based generation of road networks for virtual city modeling[C] //Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology. New York: ACM Press, 2002: 33-40
- [13] Peng C H, Yang Y L, Bao F, *et al.* Computational network design from functional specifications[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2016, 35(4): Article No.131
- [14] Merrell P, Schkufza E, Koltun V. Computer-generated residential building layouts[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2010, 29(6): Article No.181
- [15] Merrell P, Schkufza E, Li Z, *et al.* Interactive furniture layout using interior design guidelines[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2011, 30(4): Article No.87
- [16] Wang Wenquan, Huang Sheng, Hu Yulong, *et al.* Ship passage layout optimization model and PSO algorithm[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2012, 34(9): 52-56(in Chinese)
(王文全, 黄胜, 胡玉龙, 等. 舰船通道布局优化模型及其粒子群算法[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(9): 52-56)
- [17] Wang Yunlong, Wang Chen, Ji Zhuoshang, *et al.* A study on intelligent layout design of ship cabin[J]. *Ship Building of China*, 2013(3): 139-146(in Chinese)
(王运龙, 王晨, 纪卓尚, 等. 船舶居住舱室智能布局优化设计方法研究[J]. 中国造船, 2013(3): 139-146)
- [18] Hu Yao, Jiang Zhifang, Xiong Zhiguo, *et al.* The optimized layout design of volume type ship cabins based on SLP and GA[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2013(5): 19-26(in Chinese)
(胡耀, 姜治芳, 熊治国, 等. 基于 SLP 和遗传算法的容积型船舶内部舱室位置布局设计优化[J]. 中国舰船研究, 2013(5): 19-26)
- [19] Hu Yao, Jiang Zhifang, Xiong Zhiguo, *et al.* Warship cabin layout design optimization based on an improved genetic algorithm[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2014, 9(1): 20-30(in Chinese)
(胡耀, 姜治芳, 熊治国, 等. 基于改进型遗传算法的舰船舱室布局优化[J]. 中国舰船研究, 2014, 9(1): 20-30)
- [20] Zhao Nan, Hu Yao, Jiang Zhifang, *et al.* A fuzzy analytic hierarchical comprehensive evaluation method for the living district cabin layout design[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2013(6): 54-62(in Chinese)
(赵楠, 胡耀, 姜治芳, 等. 生活区舱室布局设计模糊层次分析综合评价[J]. 中国舰船研究, 2013(6): 54-62)
- [21] Jiang Wenying, Lin Yan, Chen Ming, *et al.* An optimization approach based on particle swarm optimization and ant colony optimization for arrangement of marine engine room[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2014(4): 502-507(in Chinese)
(姜文英, 林焰, 陈明, 等. 基于粒子群和蚁群算法的船舶机舱规划方法[J]. 上海交通大学学报, 2014(4): 502-507)
- [22] Wang Yu, Huang Sheng, Liao Quanmi, *et al.* A method for ship compartment layout design based on gravitational search algorithm[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2016(1): 131-139(in Chinese)
(王宇, 黄胜, 廖全蜜, 等. 基于引力搜索算法的船舶舱室布置方法[J]. 上海交通大学学报, 2016(1): 131-139)
- [23] Wang Yunlong, Wu Zhangpan, Li Kai, *et al.* Ship cabin intelligent layout design based on tabu search algorithm[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2018, 46(6): 49-53+70(in Chinese)
(王运龙, 吴张盼, 李楷, 等. 基于禁忌搜索算法的船舶舱室智能布局设计[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2018, 46(6): 49-53+70)
- [24] Palacios J, Zhang E. Rotational symmetry field design on surfaces[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, 26(3): Article No.55
- [25] Zhang E, Hays J, Turk G. Interactive tensor field design and visualization on surfaces[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2007, 13(1): 94-107
- [26] Gao L, Zhang L X, Meng H Y, *et al.* PRS-Net: Planar reflective symmetry detection net for 3D models[OL]. [2020-11-30]. <https://arxiv.org/abs/1910.06511v2>
- [27] Jobard B, Lefer W. Creating evenly-spaced streamlines of arbitrary density[M] //Visualization in Scientific Computing. Heidelberg: Springer, 1997: 43-55
- [28] Peng C H, Yang Y L, Wonka P. Computing layouts with deformable templates[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2014, 33(4): Article No.99
- [29] Kalojanov J, Lim I, Mitra N, *et al.* String-Based synthesis of structured shapes[J]. *Computer Graphics Forum*. 2019, 38(2): 27-36
- [30] Hu R Z, Huang Z Y, Tang Y H, *et al.* Graph2Plan: learning floorplan generation from layout graphs[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2020, 39(4): Article No.118
- [31] Chu H, Li D Q, Acuna D, *et al.* Neural turtle graphics for modeling city road layouts[C] //Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2019: 4521-4529
- [32] Li W Z, Di Z C, Allbeck J M. Crowd distribution and location preference[J]. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 2012, 23(3/4): 343-351