

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2024.05.03

基于AFSA的电阻应变传感器布设优化方法研究

于翀, 李博*, 孟薇, 郭蔡果荟, 张鹤宇

(中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 为解决结构数字孪生系统构建、结构健康监测系统搭建以及部分结构关键信息获取等过程中传感器的布局设计(布设)优化问题, 研究了基于人工鱼群算法(Artificial Fish Swarms Algorithm, AFSA)的电阻应变传感器布设优化方法。分析了智能仿生优化算法中应用较广泛的遗传算法(Genetic Algorithm, GA)、粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)、AFSA的优势与不足, 初步确定以AFSA作为电阻应变传感器布设优化方法的核心算法; 以机翼长桁含孔结构为研究对象进行有限元分析, 确定了应力集中部位为关键部位; 根据AFSA的基本原理构建了电阻应变传感器布设区域坐标系, 进行传感器布设问题向人工鱼群游动规则的转化, 以及电阻应变传感器布设位置的寻优分析; 最后, 以传感器覆盖面积、优化所用时间为指标, 对GA、PSO、AFSA的优化结果分别进行评估, 进一步验证了此方法的有效性。基于AFSA的电阻应变传感器布设优化方法实现了对电阻应变传感器布设位置的快速优化, 可根据具体工况随时修改鱼群游动规则及传感器数量, 实用性较强, 为数字孪生、结构健康监测等系统构建过程中的传感器布设问题提供解决方案与技术参考。

关键词: 数字孪生; 结构健康监测; 布设优化; 智能仿生优化算法; 人工鱼群算法

中图分类号: V219; O348.9; TP15 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2024) 05-0022-11

Research on layout optimization method of resistance strain sensor based on AFSA

YU Chong, LI Bo*, MENG Wei, GUO Caiguohui, ZHANG Heyu

(AVIC Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: In order to solve the problem of sensor layout optimization in the process of structural digital twin system construction, structural health monitoring system construction and some structural key information acquisition, a resistance strain sensor layout optimization method based on artificial fish swarm algorithm (AFSA) was studied. The advantages and disadvantages of genetic algorithm (GA), particle swarm optimization (PSO) and AFSA, which are widely used in intelligent bionic optimization algorithm, were analyzed, and the AFSA was preliminarily determined as the core algorithm of resistance strain sensor layout optimization method; Based on the finite element analysis of the wing truss structure with holes, the stress concentration part was determined as the key part; According to the basic principle of AFSA, the regional coordinate system of resistance strain sensor layout was constructed to transform the problem of sensor layout into the swimming rules of artificial fish swarm and to optimize the layout position of resistance strain sensors; Finally, the optimization results of GA, PSO and AFSA were evaluated by using sensor coverage and optimization time as indicators to

收稿日期: 2024-10-07; 修回日期: 2024-10-20

基金项目: 航空科学基金项目(2023Z061044001)

引用格式: 于翀, 李博, 孟薇, 等. 基于AFSA的电阻应变传感器布设优化方法研究[J]. 计测技术, 2024, 44(5): 22-32.

Citation: YU C, LI B, MENG W, et al. Research on layout optimization method of resistance strain sensor based on AFSA[J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(5): 22-32.



further verify the effectiveness of this method. The layout optimization method of resistance strain sensors based on AFSA realizes the rapid optimization of the layout position of resistance strain sensors, and can modify the swimming rules of fish swarm and the number of sensors at any time according to the specific working conditions. It has strong practicality, and can provide solutions and technical references for the sensor layout problems in the construction of digital twins, structural health monitoring and other systems.

Key words: digital twin; structural health monitoring; layout optimization; intelligent biomimetic optimization algorithm; AFSA

0 引言

数字孪生技术可将物理实体的实时数据映射到数字孪生模型中,能够实时监控物理实体的全生命周期状态。在构建数字孪生功能架构的过程中,传感器及其布设方式发挥着重要作用^[1]。在一个完整的数字孪生系统中,传感器的主要功能是实时采集环境和设备状态的数据,包括温/湿度、应力、压力、振动、位移等多种参数,全面反映物理系统的运行状态。传感器的布设方式直接影响数字孪生系统的准确性、可靠性和应用效果^[2]。准确的数据是构建数字孪生模型的基础,缺乏有效的数据源,模型的精确性和可靠性将大幅降低^[3]。因此,选择合适的传感器以及合理的布设方式对于确保所采集数据的全面性和准确性至关重要。传感器采集的数据还可以用于数字孪生模型的验证和校准,数字孪生模型的创建往往基于假设和理论,通过实际数据的反馈,可以发现模型与现实之间的差距,进而对模型进行调整和优化。这一过程不仅提升了模型的可靠性,还能提高预测的准确性,使数字孪生模型在决策支持中发挥更大作用^[4-5]。

目前针对传感器布设优化的方法较多,如利用数学模型和仿真预测不同布设方案的性能以选择最佳布局的基于模型的传感器布设优化方法,通过模拟自然选择过程寻找最优传感器位置以适配大规模传感器网络布设优化的遗传算法^[6],通过模拟鸟群觅食行为优化传感器布置以适应动态环境下优化的粒子群优化算法^[7],设计合理的网络拓扑结构以提高数据传输效率和鲁棒性的网络拓扑优化算法等^[8]。准则法、数学规划法等经典优化算法由于通用性低、计算时间长、优化效率低等不

足,已无法满足迭代次数多、计算量大、优化要求高的工程问题^[9]。智能仿生优化算法自适应性强、并行处理能力高、能够减少局部最优,在解决复杂问题时具有较高的精确度和稳定性^[10]。

机翼壁板的长桁是机翼纵向骨架中重要的含孔承力构件,对蒙皮有支撑作用,提高了蒙皮的受压、受剪失稳临界力。为保障机翼壁板在飞行中的安全性,需要通过壁板疲劳试验获得壁板的疲劳特性,确定疲劳薄弱部位以及损伤演化过程。在常规的机翼壁板复杂载荷试验中,试验件通常由上、下壁板和2个前后梁组成的封闭盒段进行试验,通过对盒段施加弯扭/疲劳载荷,实现对上壁板的压剪复合和下壁板的疲劳载荷的施加。因为下壁板处于拉伸状态,拉伸会提高其剪切屈曲载荷,所以通常是机翼上壁板先失稳破坏,机翼下壁板达不到试验目的,这不仅造成了试验件的浪费,导致试验成本升高,更重要的是无法准确获取机翼下壁板的疲劳性能和损伤容限性能^[11]。数字孪生技术给机翼下壁板疲劳特性的研究带来了新思路,通过长桁数字孪生系统,可以进行长桁的虚拟疲劳试验,基于数字化手段分析长桁的力学性能,可大幅降低试验成本。

针对含孔长桁数字孪生系统中电阻应变传感器布设及优化问题,本文分析了智能仿生优化算法中遗传算法、粒子群算法、人工鱼群算法的优势及不足,初步确定电阻应变传感器布设优化的核心算法为人工鱼群算法;根据电阻应变传感器布设需求,制定了人工鱼群的寻优规则并进行了优化结果评估;最后,以电阻应变传感器覆盖率及优化所用时间为指标,评价遗传算法、粒子群算法、人工鱼群算法的优化结果,进一步验证此优化方法的有效性。

1 智能仿生优化算法

1.1 三种智能仿生优化算法的优势及不足

智能仿生优化算法的核心思想是依靠群体的进化、觅食及智慧等得到较优的收敛目标,如遗传算法的“种群”、粒子群算法的“粒子群”等,在群体内部有明显的信息交流和信息更新过程。智能仿生优化算法依靠多点搜索寻优,可以通过多次迭代实现局部最优到全局最优。而经典的优

化算法主要依靠梯度下降法进行单点搜索寻优,在处理复杂非线性、高维、多峰问题时,容易得到局部最优解而非全局最优。所以智能仿生算法逐渐成为优化问题的关键方法。常用的智能仿生算法有:遗传算法、粒子群算法、人工鱼群算法等,3种智能仿生优化算法的优缺点如表1所示。人工鱼群算法简单易懂,具有良好的动态性和分布式特性,本文初步确定以人工鱼群算法作为电阻应变传感器布局优化的核心算法。

表1 3种智能仿生算法的优缺点

Tab.1 Advantages and disadvantages of three intelligent bionic algorithms

智能仿生优化算法	优点	缺点
遗传算法	可解决高维寻优问题;受函数特性影响小,对函数类型要求少	寻优速度慢;编码和解码复杂;存在过早收敛的风险
粒子群算法	可进行全局搜索;寻优速度快;关键参数少	易陷入局部最优;对于连续优化问题,平滑度不够
人工鱼群算法	简单易懂,动态性寻优和分布式寻优能力强;可解决复杂优化问题	局部收敛性差,需多次迭代;对参数调整敏感

1.2 人工鱼群算法基本原理

人工鱼群算法是一种综合群智能和人工智能的优化算法,由山东大学的李晓磊教授在2002年提出,其寻优能力出色,被广泛运用于神经网络参数优化、信号处理、路径规划、数据处理、机器学习等领域的优化问题^[12]。

在人工鱼群算法中,每条鱼均会处于一种漫无目的随机游动状态,这种随机游动机理保证了其搜索范围的广泛性和随机性。人工鱼在虚拟水域感知环境,通过聚群行为、追尾行为、觅食行为、随机行为等四种行为游动觅食,不断游向食物浓度高的位置,实现寻优^[13]。

在虚拟水域中,鱼群个体总数为 A_f ,人工鱼个体编码的数学表达式为 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$,即为人工鱼所处的位置,对应实际问题的一个可行解,其中, i 为第 i 条人工鱼, n 为人工鱼编码的维度,即待布置的传感器数目;人工鱼 X_i 食物浓度的数学表达式为 $Y_i = f(X_i)$,对应于实际问题的目标函数值,食物浓度越高,则目标函数值越优;人工鱼 X_i 和人工鱼 X_j 的距离为 $d_{ij} = \|X_i, X_j\|$,即鱼群中任意2条人工鱼在解空间的编码距离;人工鱼群算法的视野距离 V 为人工鱼的可见范围,人工鱼

视野范围内的人工鱼总数为 n_f ,此 n_f 条人工鱼的中心位置为 X_c , X_c 处的食物浓度为 Y_c ;游动步长为 S ,即人工鱼的最大游动步长;拥挤度因子 δ 为人工鱼所在位置的拥挤程度, T_{ny} 为人工鱼的觅食尝试次数^[14]。

1) 聚群行为

鱼在游动时会聚集成群,以躲避危险,人工鱼 X_i 搜索其视野内($d_{ij} < V$)的其他人工鱼数目 n_f ,利用式(1)计算中心位置 X_c 以及食物浓度 Y_c 。若 $Y_c/n_f < Y_i\delta$,表明其他人工鱼中心位置食物浓度较高(即状态较优)且不太拥挤,则利用式(2)使人工鱼 X_i 向其他人工鱼的中心位置 X_c 移动1步,得到新位置 X_{central} ;并按式(3)判断,若移动后位置优于原位置,则将 X_{central} 替换为 X_i^1 ,否则退回 X_i 位置。若 $Y_c/n_f \geq Y_i\delta$,则执行觅食行为。

$$X_c = \sum_{k=1}^{n_f} \frac{X_k}{n_f} \quad (1)$$

$$X_{\text{central}} = X_i + R_{\text{and}}() * S * \frac{X_i - X_c}{\|X_i - X_c\|} \quad (2)$$

$$X_i^1 = \begin{cases} X_{\text{central}}, & f(X_{\text{central}}) < f(X_i) \\ X_i, & f(X_{\text{central}}) \geq f(X_i) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $R_{\text{and}}()$ 为(0, 1)范围内的随机数, $f(X_{\text{central}})$

为 X_{central} 的目标函数。

2) 追尾行为

在鱼群中当某条鱼发现某处食物浓度高时，其周边的鱼会快速尾随该鱼，到达该鱼的附近位置。人工鱼 X_i 搜索其视野内 ($d_{ij} < V$) 食物浓度较高位置的人工鱼 X_j ，计算其所在位置的食物浓度 Y_j 并获得人工鱼 X_j 视野内的其他人工鱼数目 n_i 。若 $Y_j/n_i < Y_i\delta$ ，表明 X_j 附近的食物浓度较高(即状态较优)且不太拥挤，则利用式(4)使人工鱼 X_i 朝 X_j 位置移动 1 步；并按式(5)判断，若移动后位置 X_{follow} 优于原位置，则将 X_{follow} 替换为 X_i^1 ，否则退回 X_i 位置。若 $Y_j/n_i \geq Y_i\delta$ ，则执行觅食行为。

$$X_{\text{follow}} = X_i + R_{\text{and}}() * S * \frac{X_j - X_i}{\|X_j - X_i\|} \quad (4)$$

$$X_i^1 = \begin{cases} X_{\text{follow}}, & f(X_{\text{follow}}) < f(X_i) \\ X_i, & f(X_{\text{follow}}) \geq f(X_i) \end{cases} \quad (5)$$

3) 觅食行为

鱼随机游动并寻找食物，同时循着食物多的方向游动。人工鱼 X_i 在其视野内按式(6)随机选择一个状态 X_j ，分别计算它们的目标函数值并进行比较。若 Y_j 优于 Y_i ，则按式(7)人工鱼 X_i 向 X_j 的方向移动 1 步；并按式(8)判断，若移动后位置优于原位置，则将 X_{next} 替换为 X_i^1 ，否则退回 X_i 位置； X_i 继续在其视野内选择状态 X_j ，判断是否满足前进条件，反复尝试 T_{ry} 次后，仍然没有满足前进条件，则执行随机行为。

$$X_j = X_i + R_{\text{and}}() * V \quad (6)$$

$$X_{\text{next}} = X_i + R_{\text{and}}() * S * \frac{X_j - X_i}{\|X_j - X_i\|} \quad (7)$$

$$X_i^1 = \begin{cases} X_{\text{next}}, & f(X_{\text{next}}) < f(X_i) \\ X_i, & f(X_{\text{next}}) \geq f(X_i) \end{cases} \quad (8)$$

4) 随机行为

人工鱼在水中随机游动，在视野范围内随机选择一处位置，无论其食物浓度高低，均按式(9)游向该位置。随机行为作为觅食行为的缺省行为，可以使算法跳出局部最优^[15-16]。

$$X_{\text{next}} = X_i + R_{\text{and}}() * S \quad (9)$$

进行 T_{ry} 次迭代的人工鱼群算法流程图如图 1 所示。

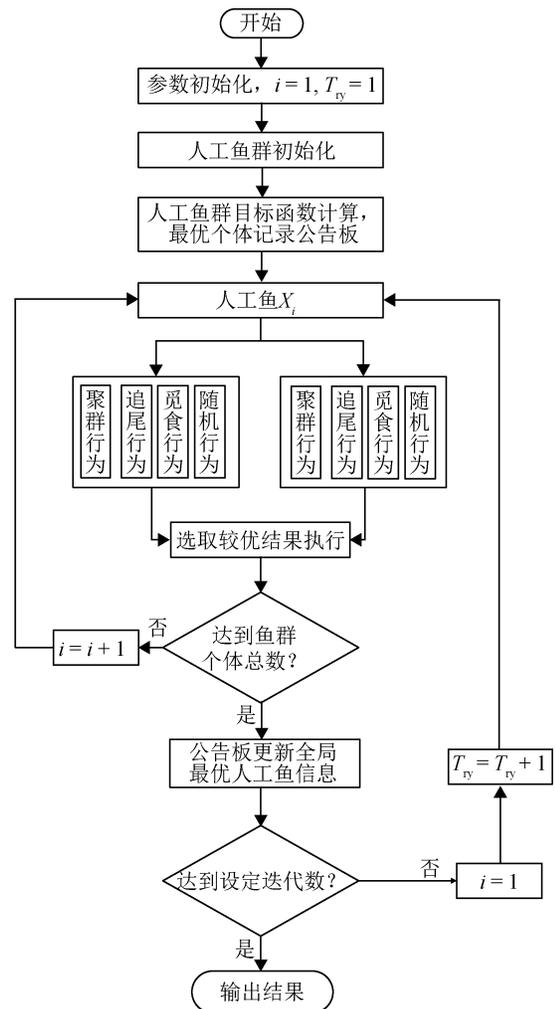


图1 人工鱼群算法流程图

Fig.1 Flow chart of AFSA

2 机翼长桁含孔结构有限元分析

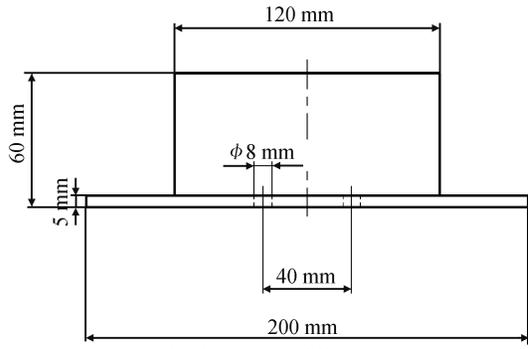
2.1 机翼长桁含孔结构设计

长桁是机翼中重要的含孔承力构件，本文设计的机翼长桁含孔结构几何尺寸如图 2 所示。试验件材料为 7075 铝合金，弹性模量为 69.2 GPa，泊松比为 0.33。

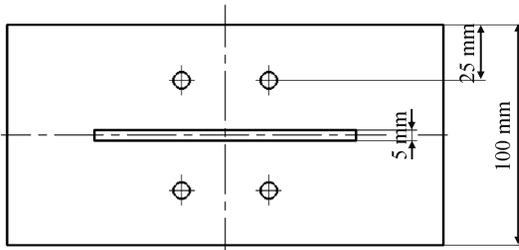
2.2 有限元分析

在飞行过程中，机翼下壁板长桁含孔结构主要承受拉伸载荷。为便于分析，在有限元分析软件中，对仿真模型的 A 端施加大小为 10 kN 的拉伸载荷，B 端固定，模拟长桁含孔结构在服役过程中承受拉伸载荷的情况。长桁仿真模型载荷施加示意图如图 3 所示，最大主应力云图如图 4 所示。

长桁含孔结构有限元模型承受拉伸载荷时，孔的存在导致承载截面几何形状发生变化，在孔



(a) 机翼长桁含孔结构主视图
(a) Front view of wing truss with holes



(b) 机翼长桁含孔结构俯视图
(b) Top view of wing truss with holes

图2 机翼长桁含孔结构几何尺寸

Fig.2 Geometry of wing girder with hole structure

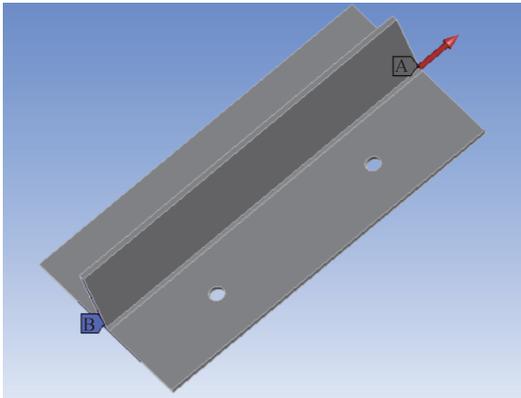


图3 长桁仿真模型载荷施加示意图

Fig.3 Load application diagram of girder simulation model

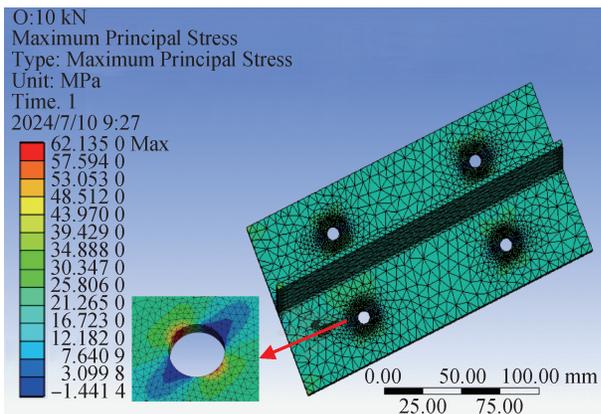


图4 最大主应力云图

Fig.4 Maximum principal stress nephogram

边出现明显的应力集中且与载荷方向垂直的方向上应力较大。因此，在长桁含孔结构数字孪生系统中，电阻应变传感器主要获取应力集中部位附近的应变值，同时为保证长桁含孔结构数字孪生系统能够全面地反映结构在承载过程中的应变场，也需要对其他部位的应变进行测量。如何以较少的电阻应变传感器获取尽可能多的应变信息，涉及传感器的布设及优化问题。

3 基于人工鱼群算法的应变传感器布设及优化

3.1 电阻应变传感器布设区域坐标系构建

2.1节中设计的长桁试验件为对称结构，如图5所示，选取其中的A区域进行电阻应变传感器的初步布设及后续的优化。对区域A进行坐标系构建，长桁试验件长边为 y 轴，短边为 x 轴，间隔为1 mm，每个网格面积为 1 mm^2 ，构建的区域A坐标系如图6所示。

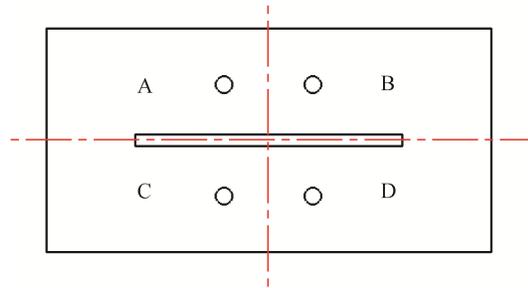


图5 长桁试验件俯视图

Fig.5 Top view of girder test piece

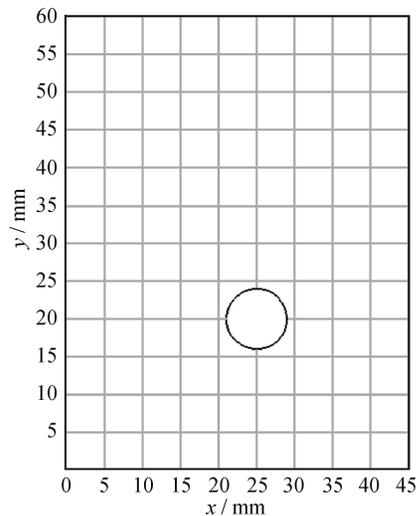


图6 区域A坐标系

Fig.6 Region A coordinate system

使用的电阻应变传感器如图7所示，基宽4 mm、基长7 mm，栅宽2 mm、栅长3 mm。根据电阻应变传感器布设规则及2.2节中的有限元分析结果，结合布设经验进行电阻应变传感器初步布设，布设方式如图8所示。图8中，红色部分为孔边应力集中区域，距离孔边10 mm两侧布置电阻应变传感器1、2用于测量孔边应变，电阻应变传感器3、4初步布设在电阻应变传感器1、2正上方（此布设方式仅为优化过程中随机布设情况之一）。

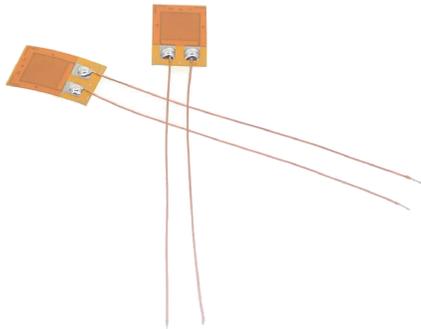


图7 电阻应变传感器

Fig.7 Resistance strain sensor

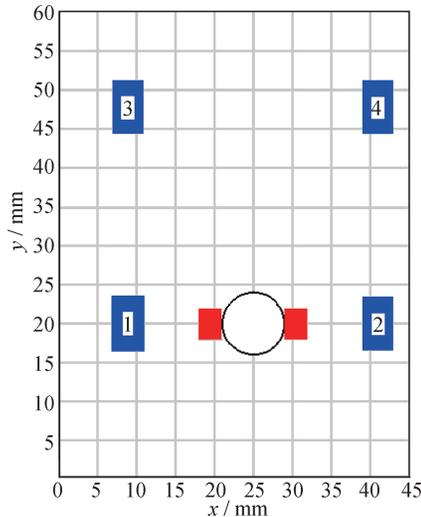


图8 电阻应变传感器初步布设方式

Fig.8 Preliminary layout of resistance strain sensors

3.2 电阻应变传感器布设优化问题转化

根据人工鱼群算法基本思路以及长桁试验件的实际工况，将电阻应变传感器布设问题转化为人工鱼群算法寻优问题。

1) 应变传感器布设区域映射为人工鱼塘区域

将在区域A中构建的坐标系映射为人工鱼塘的寻优区域，人工鱼塘范围为45 mm × 60 mm的坐标

系，在人工鱼塘中有1个以坐标(25, 20)为圆心，半径为4 mm的圆，此圆覆盖的区域为障碍区域，人工鱼无法进入，区域映射示意图如图9所示。

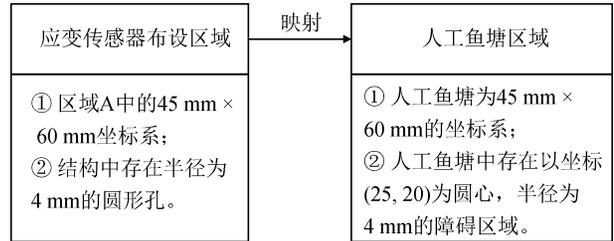


图9 区域映射示意图

Fig.9 Schematic diagram of area mapping

2) 电阻应变传感器尺寸映射为人工鱼大小

电阻应变传感器的基宽为4 mm、基长为7 mm，所以矩形鱼的大小为4 mm × 7 mm(基宽与坐标系的x轴平行，基长与坐标系的y轴平行)，在鱼塘内随意游动，传感器尺寸映射示意图如图10所示。

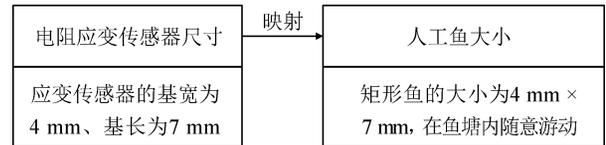


图10 传感器尺寸映射示意图

Fig.10 Schematic diagram of sensor size mapping

3) 应力集中部位映射为人工鱼塘中食物集中区域

经典人工鱼群算法大多应用于路线规划等问题，食物位置是未知的，而在区域A中食物位置(应力集中区域)是已知的，区域A中食物位置直接映射为人工鱼塘中食物集中区域。人工鱼塘中的食物集中于2处，顶点坐标分别为(18, 18)、(18, 22)、(21, 18)、(21, 22)与(29, 18)、(29, 22)、(32, 18)、(32, 22)，应力集中部位映射示意图如图11所示。

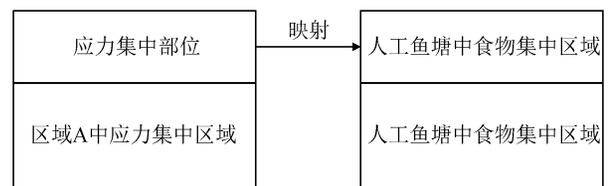


图11 应力集中部位映射示意图

Fig.11 Mapping diagram of stress concentration part

4) 电阻应变传感器布设规则映射为人工鱼游动规则

①电阻应变传感器随机布设，即每条鱼可以自由游动；②应力集中部位附近已经布设了电阻应变传感器1、2，即2个食物集中部位附近已经各有1条鱼；③在区域A共布设4支电阻应变传感器，即人工鱼塘中人工鱼的数量为4条；④电阻应变传感器的布设位置不可以超出区域A且不可布置在孔内，即人工鱼的游动范围为区域A坐标系中且不可以游动到障碍区域中；⑤电阻应变传感器均匀布置且不重叠，即人工鱼塘中的人工鱼均匀分布。布设规则映射示意图如图12所示。

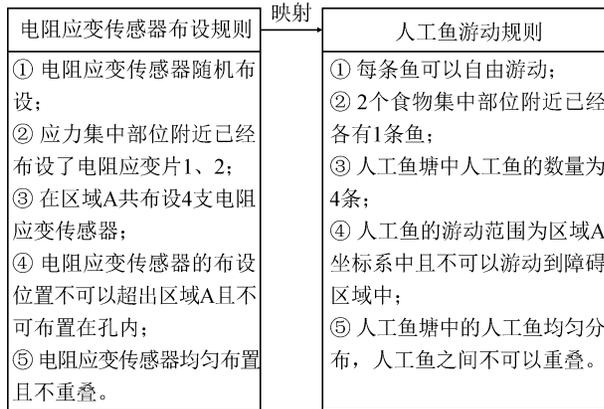


图12 布设规则映射示意图

Fig.12 Schematic diagram of layout rule mapping

5) 电阻应变传感器布设位置寻优规则映射为人工鱼觅食规则

①电阻应变传感器所探测到的应变为某区域的平均应变，所以根据所使用的电阻应变传感器尺寸将随意游动的人工鱼设定为半径为3.5 mm的圆，即“圆形人工鱼”；②电阻应变传感器布设位置寻优的目的是以最少的传感器探测到尽可能大范围的应变，所以将2条“圆形人工鱼”与2条矩形鱼共同能够探测的面积为评价指标；③电阻应变传感器探测到的应变区域是一个范围区域，所以“圆形人工鱼”的任意一部分能够覆盖1 mm × 1 mm网格的任意一部分，即认为“圆形人工鱼”能够覆盖整个1 mm × 1 mm网格。布设寻优规则映射示意图如图13所示。

人工鱼塘、人工鱼、食物集中区域及障碍区域示意图如图14所示。

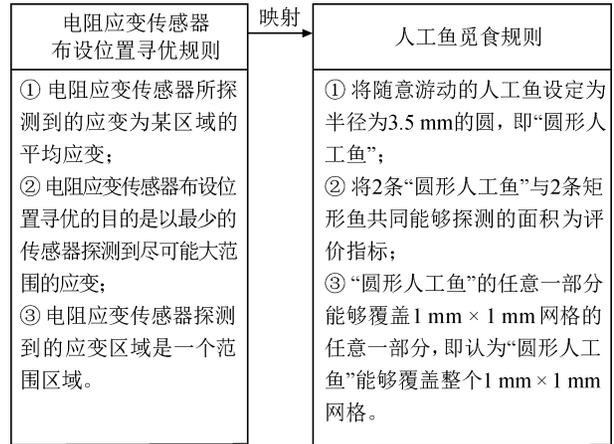


图13 布设寻优规则映射示意图

Fig.13 Mapping diagram of deployment optimization rules

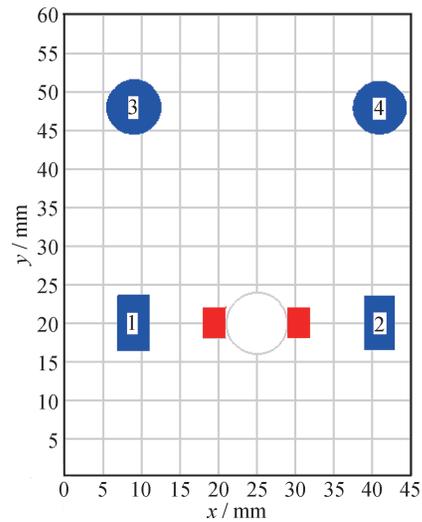


图14 人工鱼塘、人工鱼、食物集中区域及障碍区域示意图

Fig.14 Diagram of artificial fish pond, artificial fish, food concentration area and obstacle area

3.3 电阻应变传感器布局优化

基于人工鱼群算法的电阻应变传感器布局优化算法流程图如图15所示，主要包括以下几个步骤：①平面二维坐标系的构建；②障碍区域、食物集中区域、人工矩形鱼坐标及范围的设置；③人工圆形鱼初始位置的随机生成；④人工圆形鱼游动规则判断；⑤覆盖面积的检测及计算；⑥最优布局结果输出及可视化。

3.4 布局优化结果及评估

图15中共进行了100次迭代，迭代次数与覆盖面积的曲线图如图16所示，横坐标为迭代次数，纵坐标为覆盖面积。在第20次迭代中覆盖面积达

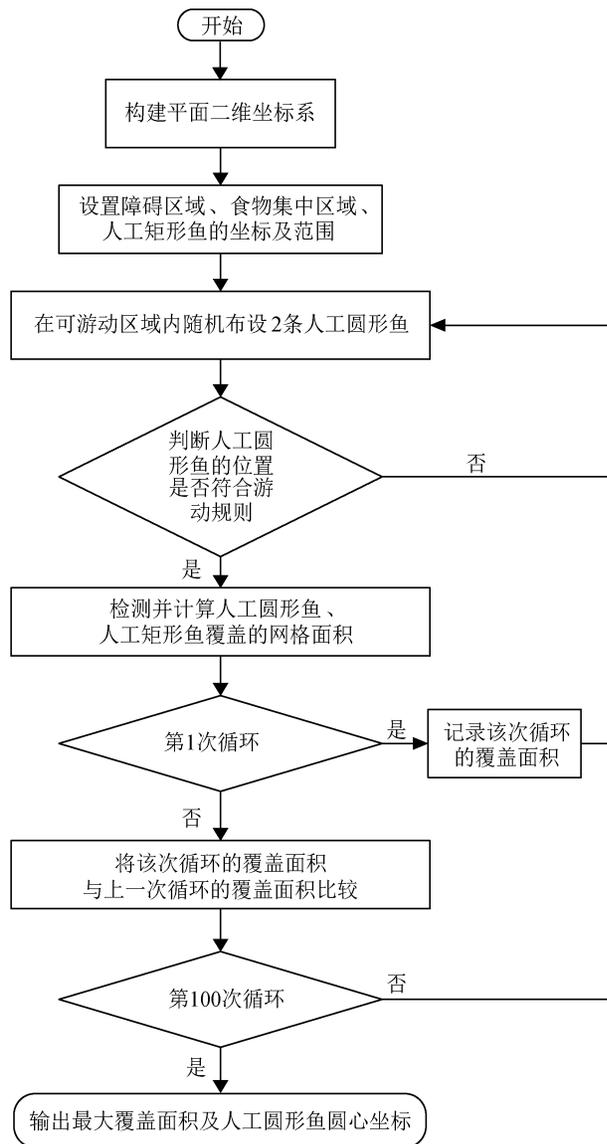


图15 基于人工鱼群算法的电阻应变传感器布局优化算法流程图

Fig.15 Flow chart of resistance strain sensor layout optimization algorithm based on AFSA

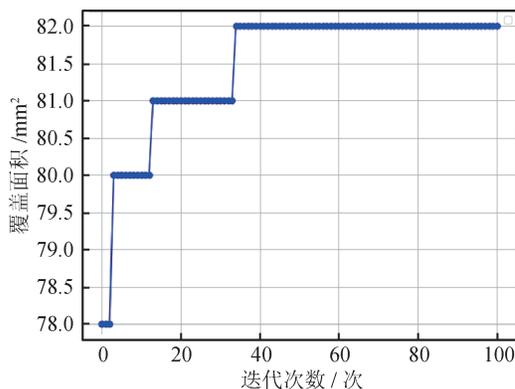


图16 迭代次数与覆盖面积的曲线图

Fig.16 Plot of iteration times and coverage area

到了最大且趋于平稳，此时算法收敛，不再有显著变化，所以在此优化问题中，100次迭代次数足够获得使算法收敛的最优结果。

为验证基于人工鱼群算法的应变传感器布局优化算法及优化结果的有效性，使用遗传优化算法及粒子群优化算法同步进行电阻应变传感器布局优化，以同样的方法获得遗传算法及粒子群算法的最优结果。3种优化算法最优结果如图17所示，3种智能优化算法结果对比如表2所示。

表2 3种智能优化算法结果对比

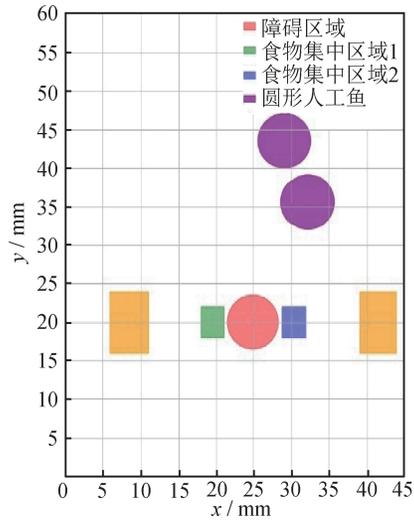
Tab.2 Comparison of results of three intelligent optimization algorithms

智能仿生算法	优化后传感器最大覆盖面积/mm ²	优化所用时间/s
遗传算法	82	30
粒子群算法	41	2
人工鱼群算法	82	5

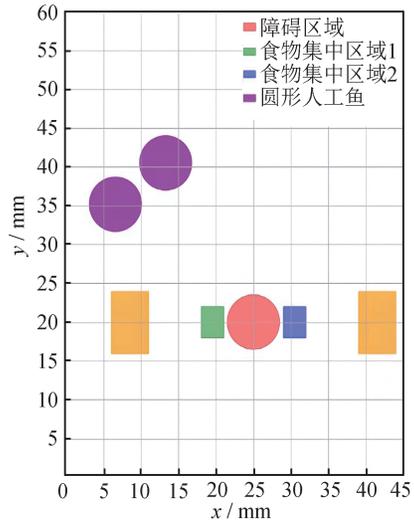
图17中，遗传算法的优化结果及粒子群算法优化结果相较于人工鱼群算法优化结果，传感器布设位置更集中、均匀性差，不利于全场应变的测量。表2中，遗传算法的优化结果与人工鱼群算法相同，但是优化所用时间较长，目前仅对4支电阻应变传感器的布设位置进行优化，若传感器数量增多，遗传算法优化所用时间将大幅增加，效率较低。粒子群算法优化时间最短，但是优化结果不理想，最大覆盖面积仅41 mm²。本文提出的基于人工鱼群算法的电阻应变传感器布局优化算法优化结果较好，优化效率较高。

A区域电阻应变传感器布设方式如图18所示。经基于人工鱼群算法的电阻应变传感器布局优化算法优化后，4支电阻应变传感器可探测到的最大面积为82 mm²，4支电阻应变传感器在区域A中的坐标为：1号：(9.0, 20.0)，2号：(41.0, 20.0)，3号：(13.5, 42.5)，4号：(34.5, 6.5)。

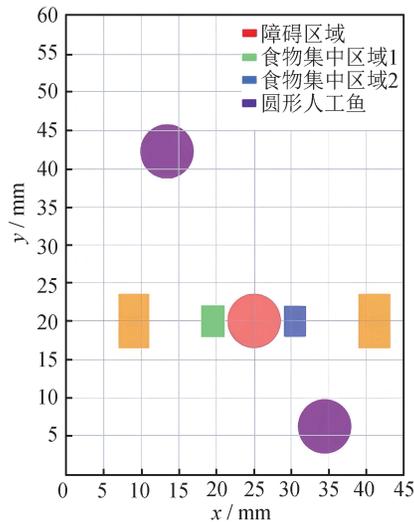
根据算法优化结果，确定试验件中电阻应变传感器布设方式如图19所示，电阻应变传感器布设实物图如图20所示。



(a) 遗传算法优化结果
(a) Genetic algorithm optimization results



(b) 粒子群算法优化结果
(b) Particle swarm algorithm optimization results



(c) 人工鱼群算法优化结果
(c) Optimization results of artificial fish swarm algorithm

图17 3种优化算法最优结果

Fig.17 Optimal results of three optimization algorithms

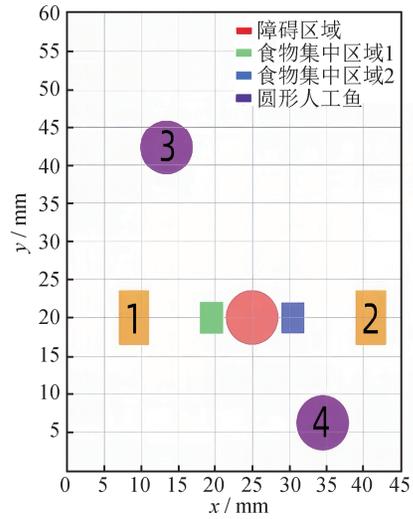


图18 A区域电阻应变传感器布局方式

Fig.18 Layout of resistance strain sensor in area A

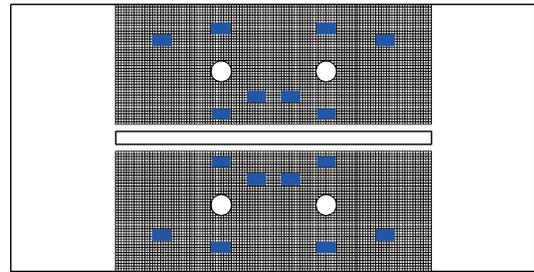


图19 试验件电阻应变传感器布设方式

Fig.19 Layout of resistance strain sensor of test piece



图20 电阻应变传感器布设实物图

Fig.20 Physical layout of resistance strain sensor

4 结论与展望

本文针对结构数字孪生系统构建、结构健康监测监测系统搭建等过程中的传感器布设及优化问题，以机翼长桁含孔结构为研究对象，以电阻应变传感器布设优化为研究目标，结合智能仿生优化算

法开展了研究,通过算法对比分析、结构有限元仿真、坐标系构建、区域映射、问题转化实现了基于人工鱼群算法的电阻应变传感器布设优化,为相关传感器的布设提供了参考。

在本文的研究中,应力集中部位明显、传感器数量较少。未来可以依据此方法,开展针对不规则结构及大量传感器或其他类型传感器布设优化问题的研究,推动数字孪生、结构健康监测、物理参数全场测量及校准技术的发展。

参考文献

- [1] 高经纬,罗振炼,王东辉. 固体火箭发动机数字孪生系统框架及关键技术分析[J/OL]. 国防科技大学学报: 1-16. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1067.T.20241107.1132.002.html>.
GAO J W, LUO Z L, WANG D H. Framework and key technology analysis of digital twin system for solid rocket motor [J/OL]. Journal of National University of Defense Science and Technology: 1-16. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1067.T.20241107.1132.002.html>. (in Chinese)
- [2] FRANCESCO F. Digital twins as run-time predictive models for the resilience of cyber-physical systems: a conceptual framework [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 2021, 379(2207). DOI: 10.1098/rsta.2020.0369
- [3] 张学涛,马腾达,石旭东. 面向飞机运维的测试与计量数字化构想[J]. 计测技术, 2024, 44(3): 118-124.
ZHANG X T, MA T D, SHI X D. Digital concept of testing and measurement for aircraft operation and maintenance [J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(3): 118-124. (in Chinese)
- [4] 刘雪蓉,曹贺,张宝珍. 飞机结构健康监测技术发展研究[J]. 计测技术, 2024, 44(2): 13-24.
LIU X R, CAO H, ZHANG B Z. Research on the development of aircraft structural health monitoring technology [J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(2): 13-24. (in Chinese)
- [5] 方旭,薛景锋,宋昊,等. 飞机结构健康监测系统数据处理及在线应用[J]. 计测技术, 2019, 39(6): 1-7.
FANG X, XUE J F, SONG H, et al. Data processing and online application of aircraft structural health monitoring system [J]. Metrology & Measurement Technology, 2019, 39(6): 1-7. (in Chinese)
- [6] 白晓兰,袁铮,周文全,等. 移动机器人路径规划算法研究综述[J]. 机械工程师, 2024(8): 24-28, 33.
BAI X L, YUAN Z, ZHOU W Q, et al. A review of mobile robot path planning algorithms [J]. Mechanical Engineer, 2024(8): 24-28, 33. (in Chinese)
- [7] 周茹平,李雪英,刘耿耿. 改进多子群合作的约束多目标粒子群优化算法[J/OL]. 小型微型计算机系统: 1-11. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1106.TP.2024105.1636.018.html>.
ZHOU R P, LI X Y, LIU G. Constrained multi-objective particle swarm optimization algorithm with improved Multi-subgroup cooperation [J/OL]. Minicomputer Systems: 1-11. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1106.TP.2024105.1636.018.html>. (in Chinese)
- [8] 徐倩. 无线传感器网络的自适应网络拓扑控制技术研究[J]. 信息记录材料, 2024, 25(8): 153-155.
XU Q. Research on adaptive network topology control technology for wireless sensor networks [J]. Information Recording Materials, 2024, 25(8): 153-155. (in Chinese)
- [9] 唐杰,董亚超,张磊,等. 基于CFD模拟与数学规划法的熔融聚合物流动管道设计优化[J]. 高校化学工程学报, 2024, 38(4): 652-662.
TANG J, DONG Y C, ZHANG L, et al. Design optimization of molten polymer flow pipeline based on computational fluid dynamics simulation and mathematical programming method [J]. Journal of Chemical Engineering, 2024, 38(4): 652-662. (in Chinese)
- [10] 田疆. 基于无人机航迹规划优化的几种新型仿生智能优化算法综述[J]. 兰州文理学院学报(自然科学版), 2017, 31(6): 80-85.
TIAN J. A review of several new bionic intelligent optimization algorithms based on UAV track planning optimization [J]. Journal of Lanzhou University of Arts and Sciences (Natural Science Edition), 2017, 31(6): 80-85. (in Chinese)
- [11] 王彬文,陈向明,邓凡臣,等. 飞机壁板复杂载荷试验技术[J]. 航空学报, 2022, 43(3): 80-97.
WANG B W, CHEN X M, DENG F C, et al. Complex load test technology for aircraft siding [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(3): 80-97. (in Chinese)
- [12] 张涛. 基于改进人工鱼群算法的无人机路径规划研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2024.

ZHANG T. Research on UAV path planning based on improved artificial fish swarm algorithm [D]. Guiyang: Guizhou University, 2024. (in Chinese)

[13] 刘榕, 周旋, 卢立志, 等. 基于优化全局版人工鱼群算法的斜拉桥成桥索力优化[J]. 湖南交通科技, 2024, 50(1): 137-145.

LIU R, ZHOU X, LU L Z, et al. Cable force optimization of cable stayed bridges based on optimized global artificial fish swarm algorithm [J]. Hunan Communications Technology, 2024, 50(1): 137-145. (in Chinese)

[14] 田周泰, 柴梦娟, 刘广怡, 等. 基于改进人工鱼群算法的无人机三维航迹规划[J]. 信息工程大学学报, 2024, 25(1): 80-84.

TIAN Z T, CHAI M J, LIU G Y, et al. UAV three-dimensional trajectory planning based on improved artificial fish swarm algorithm [J]. Journal of University of information engineering, 2024, 25(1): 80-84. (in Chinese)

[15] 阮佳. 基于人工鱼群算法的船舶电子设备故障智能诊断方法[J]. 舰船科学技术, 2023, 45(24): 188-191.

RUAN J. Intelligent fault diagnosis method of marine electronic equipment based on artificial fish swarm algorithm [J]. Ship Science and Technology, 2023, 45(24): 188-191. (in Chinese)

[16] 刘昊天. 无人机空战对抗博弈决策研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2022.

LIU H T. Research on game decision making of UAV air combat confrontation [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2022. (in Chinese)

(本文编辑: 刘宇轩)



第一作者: 于翀(1997—), 男, 助理工程师, 硕士, 主要研究方向为动态力学计量校准技术。



通信作者: 李博(1990—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为动态力学计量校准技术。