

doi: 10.7690/bgzdh.2025.01.016

无人机 3 维航迹规划仿真平台

王哲胜¹, 杨柳庆², 张勇²

(1. 南京航空航天大学自动化学院, 南京 211106; 2. 南京航空航天大学无人机研究院, 南京 210016)

摘要: 针对目前无人机航迹规划研究多集中于算法的改进, 存在规划结果 3 维直观显示不足的问题, 创建一个基于 Matlab 软件的无人机 3 维航迹规划仿真平台。利用 Matlab 软件自带的 App designer 功能完成图形用户界面开发, 建立基于地形威胁的地图模型, 使用多种目前市面常见的群智能算法, 直观比较各种群智能算法之间的区别, 并根据需求添加算法与现有算法进行比较。设计平台能实现包含多种群智能算法的 3 维航迹规划, 用于验证算法的可行性和可靠性, 并直观反映出新型算法的优势。平台的实际操作结果表明, 该平台具备对航迹规划算法结果的 3 维直观显示能力。

关键词: 无人机; 威胁源模型; 航迹规划; 仿真平台

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A

Unmanned Aerial Vehicle 3D Path Planning Simulation Platform

Wang Zhesheng¹, Yang Liuqing², Zhang Yong²

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China; 2. Unmanned Aerial Vehicles Research Institute, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Aiming at the problem that most of the current research on UAV route planning focuses on the improvement of the algorithm, and there is a lack of three-dimensional visual display of the planning results, a simulation platform for UAV three-dimensional route planning based on Matlab software is created. Using the App designer function of Matlab software to complete the development of graphical user interface, establish the map model based on terrain threat, use a variety of common swarm intelligence algorithms in the market at present, compare the differences between various swarm intelligence algorithms intuitively, and add algorithms according to the needs to compare with the existing algorithms. The design platform can realize 3D route planning including multiple swarm intelligence algorithms, which is used to verify the feasibility and reliability of the algorithm, and intuitively reflect the advantages of the new algorithm. Through the actual operation of the platform, the results show that the platform has the ability of three-dimensional visual display of the results of the route planning algorithm.

Keywords: UAV; threat source model; route planning; simulation platform

0 引言

随着无人机技术的发展, 无人机在日常生活乃至军事上得到了广泛的应用, 这对无人机的自主飞行提出了更高的要求。面对复杂的飞行空域, 对无人机航线规划的研究主要集中在算法的改进上^[1-2], 对航线规划结果的验证和可视化的研究较少, 新旧算法的对比多是通过数值对比, 缺乏更直观的对比方式。同时, 现有的无人机航迹规划演示平台都偏向于用无人机扫描取样环境, 构建任务空间, 并通过 GPS 等定位手段进行无人机航迹规划^[3-6]。

针对这些问题, 笔者利用 APP designer GUI^[7] 开发环境, 设计一个“点对点”的无人机 3 维航线规划仿真平台, 通过仿真路径规划结果, 更直观地验证无人机避障情况, 并采用不同算法对生成的航

迹规划结果进行比较, 为无人机自主决策的深度学习提供数据支撑和图像验证功能。仿真平台中选择的算法包括粒子群算法^[8-9]、蚁群算法^[10-11]、灰狼算法^[12]、鲸鱼算法^[13]。

1 仿真平台框架

1.1 仿真平台功能

无人机 3 维航迹规划仿真平台包含以下功能:

1) 模拟飞行任务环境。根据山峰模拟函数、雷达模拟函数模拟实际无人机执行任务的空域及地面信息。对于生成的地图信息, 可将其保存为 mat 格式文件; 在平台中加载保存 mat 格式文件。

2) 设置飞行任务。根据生成的地图信息, 设置无人机的飞行任务所需的起点与终点信息。

收稿日期: 2024-07-10; 修回日期: 2024-08-11

第一作者: 王哲胜(1997—), 男, 山西人, 硕士。

3) 无人机路径规划。系统平台能根据设定的起点与终点, 完成无人机的路径规划, 为无人机完成任务提供有效的路径; 同时, 可将路径规划相关数据导出, 用于无人机自主决策深度学习, 并可导入深度学习结果用以验证深度学习正确度。

4) 参数设置与环境信息的显示。设计友好的人机交互界面, 实现参数设置修改以及各种有效信息的显示功能。例如, 通过界面修改地图参数可模拟不同的飞行任务空间; 通过界面修改无人机飞行中的障碍物数目与类型; 将生成的地图于右侧显示, 对于不满意的地图可以重新生成。

5) 算法添加与测试。各类基于 Matlab 不断优化的群智能航迹规划算法需要进行测试, 利用本平台的此功能可以完成算法功能测试。通过此功能接口可以直接导入由 Matlab 编写的算法, 然后将其转换成平台需要的代码格式, 最后使用此平台测试算法的有效性。

1.2 仿真平台框架结构

根据无人机航迹规划系统仿真平台功能要求, 设计仿真平台的结构如图 1 所示, 平台结构主要由 5 部分组成, 分别为生成地图、设置起点终点、航迹规划、收敛曲线显示、界面可视化。

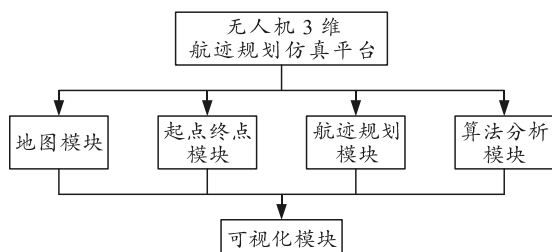


图 1 无人机仿真平台框架

生成地图模块通过输入地图信息所需的坐标轴范围以及威胁个数, 从而生成飞行空间, 并可保存生成的飞行空间或者导入之前创建的飞行空间。

设置起点终点是用于判定起点与终点设置是否合理, 避免出现起点或终点处于地面下方导致无法实现航路规划。

航迹规划通过选择算法实现对外部航迹规划算法的调度, 完成无人机 3 维航迹规划, 并通过参数输入修改航迹算法的性能, 加快航迹规划速度。

收敛曲线用于验证航迹规划算法的收敛速度, 更加直观地比较不同航迹规划算法的收敛速度以及同种算法中, 参数对于算法收敛速度的影响。

界面可视化模块基于仿真数据, 以 3 维可视化的形式演示仿真结果, 验证控制算法的有效性。

2 仿真平台算法设计

2.1 建立威胁模型

无人机在飞行途中, 经常遇到各种危险, 正因为各种类型威胁存在, 使得无人机的整个飞行过程容易发生意外事故。航迹规划主要用途就是无人机在面对各种威胁时可以自主找出一条安全的路线, 从而完成任务; 因此, 实现航迹规划的前提是一个合适且准确的威胁建模。根据威胁的来源和威胁特点, 无人机面对的多种威胁大致分为地形因素以及人为因素 2 类^[14]。

2.1.1 地形威胁

地形威胁主要是山峰威胁, 对于威胁的仿真有多种方法, 笔者采用一种随机函数法来模拟实际场景。

山峰威胁模型采用一个函数来产生, 该方法具有生成算法简单, 计算速度快, 便于控制地形的位置距离与坡度、幅值等特点^[14]。

函数形式为:

$$Z(x, y) = \sum_{i=1}^n h_i \exp \left[-\left(\frac{x-x_i}{x_{si}} \right)^2 - \left(\frac{y-y_i}{y_{si}} \right)^2 \right] \quad (1)$$

式中: $Z(x, y)$ 为坐标点 (x, y) 处的高度值; n 为山峰的数量; h_i 为任务空间中第 i 座山的高度; (x_i, y_i) 为其中心点坐标; x_{si}, y_{si} 分别为第 i 座山峰在 x, y 轴方向的衰减量, 用于控制坡度, 此值越大代表山峰更加陡峭, 值越小则山峰偏向平坦。根据对于任务空间复杂的需求, 可自行选择生成山峰的个数。

2.1.2 人为因素

人为因素主要包括地空导弹威胁, 火炮威胁以及雷达探测威胁, 其中雷达探测威胁为主要威胁方式。3 种威胁通常为相互影响, 相辅相成; 因此, 笔者将 3 种威胁简化为同一种威胁, 并用半球体进行代替, 该方式可有效减少威胁建模的运算量, 同时, 对于航路的规划影响较小。

函数形式为:

$$W_i(x, y, z) = \begin{cases} \sum_i (x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + z^2 = R^2 \\ z \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $W_i(x, y, z)$ 为第 i 个雷达的探测区域; (x_i, y_i, z_i) 为雷达所在位置; R 为雷达探测半径。根据对任务空间复杂度的需求, 可自行选择生成雷达的个数。

2.2 航迹规划算法

粒子群算法初始化为一群随机粒子, 然后通过

下列公式完成迭代更新从而找到最优解。

$$\begin{aligned} v_i &= v_i + c_1 \times \text{rand}() \times (pdest_i - x_i) + \dots \\ &+ c_2 \times \text{rand}() \times (gbest_i - x_i); \\ x_i &= x_i + v_i; \\ v_i &= \omega \times v_i + c_1 \times \text{rand}() \times (pdest_i - x_i) + \dots \\ &+ c_2 \times \text{rand}() \times (gbest_i - x_i)。 \end{aligned} \quad (3)$$

式中： $i=1,2,\dots,N$ ， N 为粒子群的总数； v_i 为粒子的速度； $\text{rand}()$ 为介于 $(0, 1)$ 之间的随机数； x_i 为粒子的当前位置； c_1 和 c_2 为学习因子，通常 $c_1=c_2=1$ 。

蚁群算法是模仿蚂蚁寻路的原理，蚂蚁随机选择下一节点并对经过的道路留下信息素，最后通过信息素浓度判断最优路径。

每一只蚂蚁对于下一路径节点的选择通常采用随机选取，即轮盘赌算法，具体公式如下：

$$P_{ij}^k = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha(t) * \eta_{ij}^\beta(t)}{\sum_{s \in \text{allowed}_k} \tau_{ij}^\alpha(t) * \eta_{ij}^\beta(t)} & j \in \text{allowed}_k \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式中： x, y 分别为每段路径的起点和终点； τ 为时间 t 时由 i 到 j 的信息素浓度； η 的值等于路径长度 d 的倒数； allowed_k 为未访问过的节点的集合。

然后对每一代的蚂蚁群路径进行信息素浓度按下式更新，从而得出最优路径：

$$\tau_{ij}(t+1) = \tau_{ij}(t) * (1 - \rho) + \Delta\tau_{ij}, \quad 0 < \rho < 1。 \quad (5)$$

式中 $\Delta\tau_{ij} = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k$ 。

狼群算法依据狼群分工合作围捕猎物的原理，将粒子分为头狼、探狼、猛狼 3 类；狼群捕猎行为分为探狼游走、头狼召唤、猛狼围攻；通过胜者为王原则选择狼王与优胜劣汰对狼群进行迭代更新，从而实现最优路径规划。

下式分别为游走行为、召唤行为、围攻行为的狼群位置更新公式：

$$\begin{aligned} x_i^p &= x_i + \sin(2\pi \times (p/h)) \times \text{step}_a; \\ x_i(k+1) &= x_i(k) + \text{step}_a \times \frac{g_k - x_i(k)}{|g_k - x_i(k)|}; \\ x_i(k+1) &= x_i(k) + \lambda \times \text{step}_c \times |G_k - x_i(k)|。 \end{aligned} \quad (6)$$

鲸鱼算法主要模拟鲸鱼捕食，用气泡网包围猎物，在搜索和包围的不断交替中完成对猎物的捕食，整个捕食过程包括围捕猎物、气泡网捕食以及搜索猎物。对于鲸鱼的捕食策略选择主要靠值域为 $[0, 1]$ 的随机数 ρ 和向量 A 决定：

$$A = 2a \times r_1 - a。 \quad (7)$$

式中： a 由 2 线性降到 0； r_1 为 $[0, 1]$ 中的随机向量。

当 $|A| < 1$ 时，鲸鱼群包围当前最优解，处于局部寻优，位置更新公式为：

$$\begin{aligned} D' &= |X^*(t) - X(t)|; \\ X(t+1) &= \begin{cases} X^*(t) - A \cdot D' & \rho < 0.5 \\ D' \times e^{bl} \times \cos(2\pi l) + X^*(t) & \rho \geq 0.5 \end{cases}。 \end{aligned} \quad (8)$$

式中： t 为当前迭代次数； $X^*(t)$ 为目前得到的最佳解的位置向量； $X(t)$ 向量是位置向量； D' 为当前搜索个体与当前最优解的距离； b 为螺旋形状参数； l 值域为 $[-1, 1]$ 均匀分布的随机数。

与之相反，当 $|A| \geq 1$ 时，鲸鱼群包围随机一只鲸鱼，处于全局寻优，位置更新公式为：

$$\begin{aligned} D'' &= |C \cdot X_{\text{rand}}(t) - X(t)| \\ X(t+1) &= X_{\text{rand}}(t) - A \cdot D'' \end{aligned} \quad (9)$$

式中： D'' 为当前搜索个体与随机个体的距离； $X_{\text{rand}}(t)$ 为当前随机个体的位置。

2.3 主要程序设计

使用 Matlab 软件创建地图生成程序，首先通过使用结构体实现对威胁特征参数的初始化，依据威胁个数，使用随机函数随机生成威胁的中心位置、威胁高度和威胁范围，并且对威胁高度进行判断，当高于坐标轴 Z 轴最大值时，重新生成威胁高度。依据威胁建模公式，针对已经生成的威胁特征参数计算威胁范围内的威胁高度值，进行曲面数据扩充，实现威胁的整体建模。最后，通过插值计算地图中每一点的高度值，获得整个地图的曲面数据信息，使用 surf 函数绘制 3 维图形。将坐标轴的范围和威胁个数作为输入，地图的曲面数据作为输出，构建地图生成函数，方便后续主程序调用与整个仿真平台的数据流通。

起点与终点作为航迹规划的重要组成部分，在输入后必须判断坐标位置是否合理；因此，需要加入判断函数，根据地图曲面数据对设置的起点与终点坐标信息进行比较，确保起点与终点的 Z 轴坐标高于当前位置地图的 Z 轴坐标，避免因起点或终点位于地图下方而导致无法实现航迹规划。在完成坐标比对后，当起点或终点设置不合理时，弹出错误提示框，指出起点或终点设置错误，需要重新设置起点或终点坐标。

航迹规划算法作为仿真平台的重要组成部分，根据 4 种群智能算法原理公式，分别建立对应的粒子群算法航迹规划函数、蚁群算法航迹规划函数、狼群算法航迹规划函数和鲸鱼算法航迹规划函数，

将各自算法所需的迭代次数、种群数以及之前地图生成的信息与设置的起点、终点坐标作为算法函数输入，将各自算法的航迹路径与最佳适应度作为算法函数输出。在 3 维地图中，当航迹节点数据少时，节点之间的连线容易与威胁发生碰撞，从而减弱群智能算法的优化能力；航迹节点设置较多时，可以充分发挥群智能算法的优化能力，但会增加算法的计算复杂度与计算时间。为平衡两者，采取中间插值的方法实现减少算法节点设置，同时保证计算时间。在航迹节点之间使用 *spline* 函数根据设置步长进行插值处理；同时，增加角度限制，避免航迹路径出现锐角等不合理的转角。最后，对插值后生成的路径进行碰撞判定，确保生成的航迹是可行的。群智能算法函数输出的航迹路径通过绘图函数，从而在 3 维地图中显示，直观展示出航路规划结果的可行性；群智能算法函数输出的最佳适应度可用于绘制收敛度曲线。与 3 维地图中显示用于航迹可行性的不同，收敛度曲线可明确反映出当前群智能算法适应度收敛的速度，即在当前群智能算法参数下群智能算法的寻优速度。

仿真平台主程序首先通过调用地图生成程序，通过用户输入地图生成所需的参数，从而生成一个具有随机威胁信息的地图，调用绘图程序用于展示生成的 3 维地图；接下来调用起点、终点设置函数，判断用户输入的坐标信息是否正确，调用绘图函数在 3 维地图上标示出起点与终点位置，在主程序中初始化无人机参数，方便后续群智能算法中调用无人机参数信息，用户选择群智能算法，调用对应的群智能算法函数，并输入群智能算法函数所需参数数据，仿真平台调用绘图函数给出带有无人机航迹路径的 3 维地图和收敛曲线图像，完成整体航迹规划流程。为确保仿真平台具有足够的可拓展性，平台采用模块化的设计方法，当需要对仿真平台某项功能进行修改时只需修改主程序中调用的函数或者功能对应的 *m* 文件。如增加威胁类型模型、增加任务规划功能或增加群智能算法，只需在主程序中增加对应函数的调用即可实现。

2.4 仿真平台实现流程

在主函数中，通过输入地图模型所需参数，完成地图生成，输入任务信息，根据任务的输入先后顺序确定任务规划问题，根据选择的群智能算法代码，调用对应的群智能算法完成无人机的航迹规划，并给出收敛曲线以便对算法进行分析，流程如

图 2 所示。

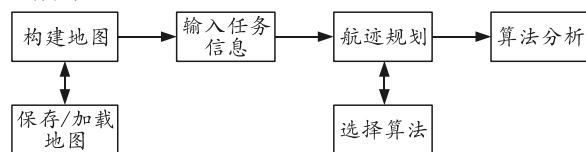


图 2 仿真平台实现流程

3 界面交互设计

笔者应用 Matlab 2016a 中发布的新 GUI 设计工具 App designer 作为开发环境。根据程序界面的设计原则，整个过程分为：1) 根据需求，利用设计指南完成整个 GUI 的布局，然后调整控件的位置，对各个控件的属性进行必要的修改，完成整个 GUI 的结构设计；2) 编写与所用组件功能相对应的回调函数，通过使用 Callback 函数实现其功能。

本平台由地图生成界面、起点终点设置界面、航迹规划界面、收敛曲线显示界面 4 个主要界面组成。

地图生成界面用于跟踪输入的地图参数范围和威胁的数量。在右侧坐标图中显示随机生成的 3 维地图图像，并作为后续验证的任务空间。生成地图按钮的回调函数回调用于生成地图的主函数，根据输入的地图 *X*、*Y*、*Z* 轴的上限、威胁数量和威胁类型修改生成的地图，并对每一个输入窗口和按钮添加注释，用于介绍窗口和按钮的功能。保存按钮的回调函数使用 *uiputfile* 函数来保存文件，并将地图信息保存为一个 *mat* 格式文件，以便以后使用。加载按钮的回调函数使用 *uigetfile* 函数来加载文件，当没有选择文件时报告错误，并将选定的文件存储在工作区，在右侧坐标区显示地图。

起点终点设置界面用于在地图上清楚地标记起点和终点，并确定输入值是否与地图相冲突。绘制图像按钮的回调功能记录输入的起点和终点的坐标和编号，并将 *Z* 轴坐标与地图信息进行比较，判断起点和终点是否可行，如果失败则弹出窗口提醒。

航迹规划界面主要用于选择蜂群智能算法，并根据输入参数显示具体的路线结果图像，有 4 种群智能算法可供选择。在下拉按钮中，可选择所需的群智能算法完成航迹规划。

收敛曲线界面主要用于显示群智能算法的收敛曲线，以评价群智能算法的收敛速度和收敛程度，方便比对新旧算法的计算速度与实际避障情况。

4 仿真与分析

在 App designer 中打开创建的平台，点击运行，

启动平台,并弹出提示框“欢迎使用航迹规划平台”,如图 3 所示。



图 3 航迹平台欢迎界面

在生成地图界面输入地图范围为[100, 100, 100], 威胁类型选择为山峰, 个数为 3, 生成一随机地图, 如图 4 所示。可根据需求自行保存生成地图并命名, 也可直接加载之前保存的地图。

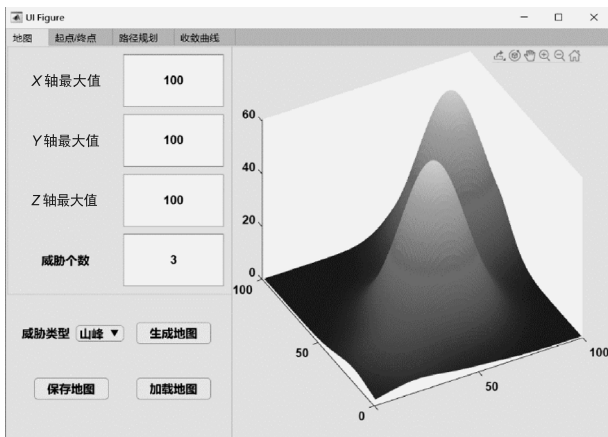


图 4 生成随机地图

在起点终点设置界面,当输入起点坐标[10, 10, 1]时,弹出起点设置错误,如图 5 所示,需要重新输入起点坐标。

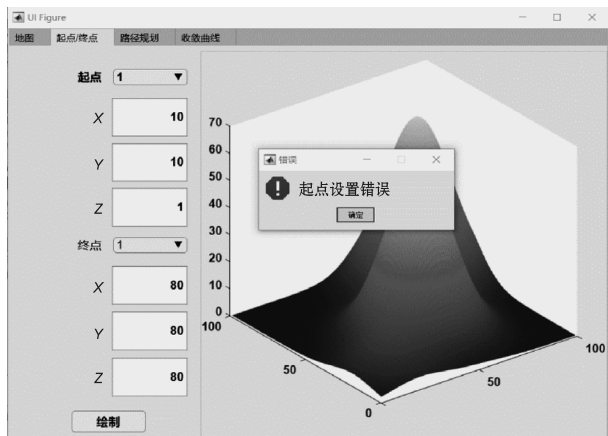


图 5 起点错误提示

输入起点坐标[10, 10, 10], 终点坐标[80, 80, 80], 将 2 点绘制于地图上, 并用星号进行标记, 方便查看, 如图 6 所示。

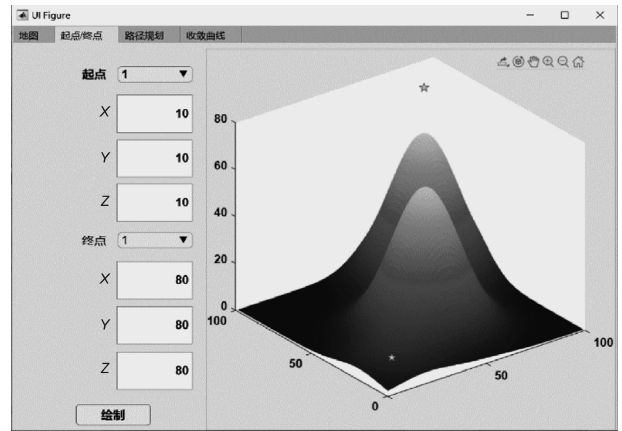


图 6 绘制起点终点

在航迹规划界面输入群智能算法所需的种群个数为 100, 迭代次数为 20, 选择 WOA 算法进行航迹规划, 并将算法的收敛曲线显示于收敛曲线显示界面, 如图 7 所示。算法收敛曲线如图 8 所示。

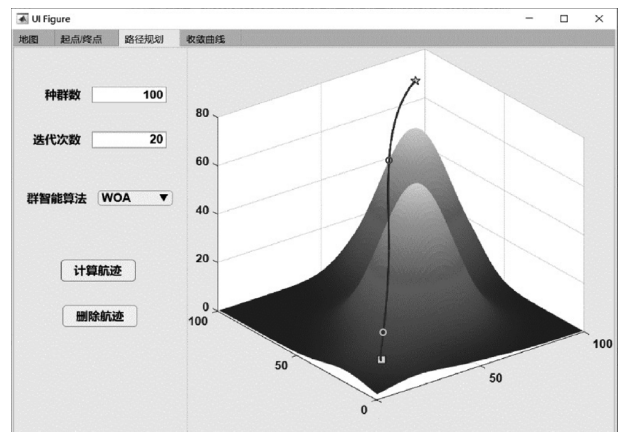


图 7 航迹规划完成

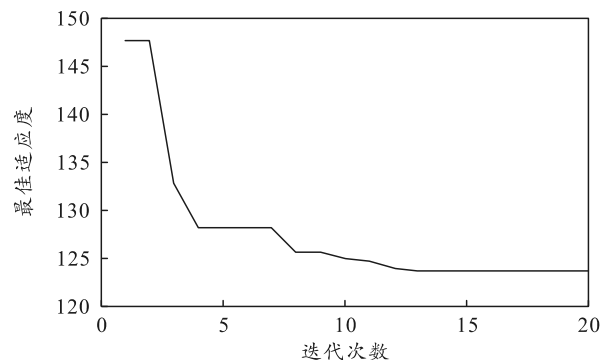


图 8 算法收敛曲线显示

由图 8 可以看出: 规划出的航迹有效避开了地形威胁, 算法收敛曲线也明显显示出了算法的收敛性质。

本平台经过仿真验证, 可实现对群智能算法的

航迹规划 3 维显示, 并且操作简单, 对于航迹规划所需的多项参数可以自行修改, 方便模拟多种飞行任务, 并且对于同一起点终点可选择不同的群智能算法进行规划, 从而更直观地比较出算法之间的优劣; 对于同一算法, 可根据修改算法的参数, 从而得出对群智能算法哪些参数影响更大; 同时, 本平台方便插入其他群智能算法, 可用于对于新旧算法收敛性的直观比较, 方便完成新算法的验证; 可将路径规划数据导出用以无人机自主决策深度学习, 可将深度学习产生的结果输入仿真平台用以直观显示, 从而判断深度学习的正确度。

5 结束语

通过使用仿真平台, 可直观得到无人机 3 维航迹规划结果, 验证了此仿真平台的可行性。但本平台目前只可对单架无人机的航路进行规划显示, 缺少对于无人机集群的航路规划和避障规划, 后续研究将在此方向上进行。此平台具有较强的拓展性, 可用于对新算法的可行性验证、改进算法相比原有算法的优势以及无人机自主决策深度学习研究数据积累和成果验证。

参考文献:

- [1] 伍鹏飞. 基于智能算法的无人机路径规划研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2022.
- [2] 刘庆健, 疏利生, 刘刚, 等. 低空无人机路径规划算法

(上接第 56 页)
- [18] 王海峰, 李朝阳, 吕政权, 等. 泛在电力物联网环境下网络安全攻击研究[J]. 浙江电力, 2019, 38(12): 76-81.
- [19] 王哲, 赵宏大, 朱铭霞. 电力无线专网在泛在电力物联网中的应用[J]. 中国电力, 2019, 52(12): 27-38.
- [20] 王宣元, 刘敦楠, 刘蓁, 等. 泛在电力物联网下虚拟电厂运营机制及关键技术[J]. 电网技术, 2019, 43(9):

- 综述[J]. 航空工程进展, 2023(2): 1-11.
- [3] 黄克明. 无人机作战仿真平台设计及其关键技术研究[J]. 兵工自动化, 2016, 35(1): 90-92.
- [4] 邹立岩, 张明智, 柏俊汝, 等. 无人机集群作战建模与仿真研究综述[J]. 战术导弹技术, 2021(3): 98-108.
- [5] 杨杨. 基于 MATLAB 和 JAVA 混合编程的物流无人机航迹规划教学演示平台[J]. 物流工程与管理, 2022, 44(1): 60-63, 40.
- [6] 陈隰. 无人机协同路径规划三维实时可视化仿真平台[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
- [7] 宛伟民. MATLAB App Designer 从入门到实践[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2022: 145-158.
- [8] 周鑫, 李新洪, 王谦. 基于威胁建模的 PSO 在 UAV 3 维航路规划中的应用[J]. 兵工自动化, 2017, 36(4): 73-76, 80.
- [9] 刘冰. 基于群智能算法的无人机航迹规划研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2020.
- [10] 邵长旭, 王茂森, 戴劲松, 等. 基于蚁群算法的无人机最短航路规划[J]. 兵工自动化, 2018, 37(9): 93-96.
- [11] 何光勤, 黄鑫. 蚁群算法在无人机物流路径规划中的应用[J]. 现代计算机, 2021, 27(34): 56-60.
- [12] 蒋长胜. 基于改进狼群算法的多无人机路径规划系统研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2022.
- [13] 石刻. 基于改进鲸鱼算法的无人机航迹规划研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [14] 杨文平, 李严. 无人机三维实时航迹规划仿真平台[J]. 计算机仿真, 2011, 28(8): 41-46.
- 3175-3183.
- [21] 胡恒箫. 基于物联网的电力营销移动作业互动服务技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2018: 1-9.
- [22] 曹一家, 何杰. 物联网技术在输变电设备状态监测中的应用[J]. 电力科学与技术学报, 2012, 27(3): 16-27.
- [23] 王广辉, 李保卫, 胡泽春. 未来智能电网控制中心面临的挑战和形态演变[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 1-5.