

北京航空航天大学学报
Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics
ISSN 1001-5965,CN 11-2625/V

《北京航空航天大学学报》网络首发论文

题目：基于混合优化策略的滑翔制导炸弹最优攻击弹道研究
作者：黄威，陈国明，薛辉辉，王皖阳，张伟，梁欣
DOI：10.13700/j.bh.1001-5965.2025.0571
收稿日期：2025-08-13
网络首发日期：2025-11-27
引用格式：黄威，陈国明，薛辉辉，王皖阳，张伟，梁欣. 基于混合优化策略的滑翔制导炸弹最优攻击弹道研究[J/OL]. 北京航空航天大学学报.
https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2025.0571



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于混合优化策略的滑翔制导炸弹最优攻击弹道研究

黄威，陈国明✉，薛辉辉，王皖阳，张伟，梁欣

（空军工程大学 航空机务士官学校，信阳 464000）
*通信作者 E-mail：18192081790@163.com

摘要 针对滑翔制导炸弹最优攻击弹道求解问题，提出一种基于改进灰狼优化算法（IGWO）与序列二次规划（SQP）的混合优化求解策略。首先，建立了考虑弹翼变掠运动的对地攻击弹道优化模型。然后，为了增强 GWO 的寻优能力，基于立方映射和反向学习策略改善初始种群分布，提升初始种群质量，进而改进控制参数调整策略和引入个体自主探索策略，解决种群盲目跟随的问题，并将 IGWO 在 7 个标准测试函数上进行性能验证。最后，将 IGWO 算法嵌入双层混合优化求解器，用于求解炸弹最优攻击弹道问题，得到了最大射程和最短时间攻击弹道，分析和总结了初始速度和高度的影响，基于研究结果提出了作战使用建议和意见。

关键词 滑翔制导炸弹；弹道优化；灰狼优化算法；混合求解策略；作战使用
中图分类号 TJ414; TP391.9 文献标志码 A DOI：10.13700/j.bh.1001-5965.2025.0571

Research on the optimal trajectory of gliding guided bombs based on hybrid optimization strategy

HUANG Wei, CHEN Guoming✉, XUE Huihui, WANG Wanyang, ZHANG Wei, LIANG Xin

（Aviation Maintenance NCO School, Air Force Engineering University, Xinyang, 464000, China)）
*E-mail: 18192081790@163.com

Abstract Aiming at the optimal trajectory of glide guided bombs, a two-layer hybrid optimization strategy based on the Improved Grey Wolf Optimizer (IGWO) and Sequential Quadratic Programming (SQP) is proposed. First, an optimization model considering wing sweep motion is established. Then, to enhance the optimization ability of GWO, the initial population distribution was improved based on cubic mapping and the reverse learning strategy to enhance the quality of the initial population. Subsequently, the control parameter adjustment strategy was improved and an individual autonomous exploration strategy was introduced to solve the problem of population blindly follow. The performance of IGWO was validated on seven standard test functions. Finally, the two-layer hybrid optimization solver was applied to solve the optimal trajectory of the bombs, and the maximum range and shortest time trajectories were obtained. The effects of initial speed and altitude were analyzed and summarized, and suggestions were proposed for the combat use of gliding guided bombs.
Key words gliding guided bomb; trajectory optimization; Grey Wolf Optimization; hybrid optimization strategy; combat use

俄乌冲突中，俄罗斯使用通用滑翔和制导套件（UMPK），将传统的非制导航空炸弹转变为具有制导能力的滑翔制导炸弹，大大提升了此类炸弹的飞行性能和命中精度，增加了战机的生存能力。美国波音公司研制的加装折叠弹翼的联合直接攻击增程弹药（JADM-ER），其最大射程提升至 96km，并已经在俄乌战场投入实战。滑翔制导炸弹是一类具备滑翔能力、能在释放后自主飞行一段距离并精确打击预定目标的炸弹，具有成本效益高、射程远、命中精度高以及防区外投放等优点。作为一种高性价比的空对地精确打击手段，滑翔制导炸弹已经成为现代战争中低成本打击的重要手段。

滑翔制导炸弹的弹道优化技术是确保其精确打击能力的关键因素之一。目前，求解滑翔制导炸弹

收稿日期：2025-08-13
基金项目：国家自然科学基金（51779263）
Fund：National Natural Science Foundation of China (51779263)
网络首发时间：2025-11-27 10:54:30 网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20251127.1042.002

最优攻击弹道主要采用间接法、智能算法和混合算法。在间接法的运用上，针对偏差作用下的滑翔弹道优化问题，陆秋秋[1]提出了基于 hp-RPM 方法的闭环在线实时制导方法，得到最短滑翔时间的带落角约束的方案弹道；张伟[2]构建了变掠翼滑翔炸弹动力学模型，采用 hp 自适应伪谱法计算了炸弹的最大和最小射程，分析了投放高度对可达域的影响；于洋[3]采用轨迹线性化原理处理约束问题，应用序列凸优化方法研究了滑翔制导炸弹轨迹优化问题；徐兆璞[4]采用 hp 自适应伪谱法仿真计算了以最短时间和最大射程滑翔制导炸弹攻击轨迹，分析了初始发射条件对发射区域的影响。此外，贾昂[5]、张智森[6]、王捷[7]、何析隆[8]等人采用伪谱法求解了弹道优化问题。随着智能优化算法求解性能和稳定性的提升，研究人员逐渐将其引入到轨迹优化问题。赵日[9]采用粒子群算法研究了变后掠翼制导炸弹滑翔弹道优化问题，分析了影响变后掠翼制导炸弹滑翔增程能力的主要因素。高英瑞[10]采用粒子群算法求解了变后掠翼超远程制导炮弹最远射程。此外，高晓光[11]、霍明英[12]、陈国明[13-14]、杜云[15]、管军[16]等人采用遗传算法、粒子群优化、灰狼优化算法等启发式算法来求解轨迹优化问题，利用这些算法具有全局搜索能力强的特点，能够在一定程度上避免局部最优解，提高了求解方法的效率和准确性。尽管以伪谱法为代表的间接法在配点上具有高精度，并且解的最优性能够得到验证，但随着问题规模的增大，计算复杂度会显著增加，并且求解效率和收敛性对初始猜测值较为敏感，不合理的初始猜测可能导致求解失败或收敛到局部最优解；另一方面，智能算法具有较好地全局搜索和局部开发能力，能够快速得到问题的解，但是对于复杂约束条件下的优化问题求解，其容易陷入局部最优，并且求得解的最优性无法验证。因此，本文结合了传统优化算法和智能优化算法的有点，设计了混合求解策略，使得既能够利用智能优化算法的全局搜索能力，又能够有效验证解的最优性。

本文针对滑翔制导炸弹对地攻击最优弹道展开研究。基于构建的滑翔制导炸弹对地攻击优化模型，采用双层混合求解策略进行求解，其中，外层作为参考轨迹生成器，内层基于 SQP 算法。外层采用灰狼优化算法，从种群初始化、控制参数调整策略和自主探索策略三个方面进行改进，增强种群多样性和探索能力，并将其应用于求解弹道优化问题，得到满足给定精度的初始解，进而将其作为初始值送给内层基于 SQP 算法的求解器，得到满足预设精度的最优解。在此基础上，分析初始高度和速度对最优轨迹弹道的影响，总结作战使用建议和意见。

1 问题描述

本文的研究对象为一类采用倾斜转弯技术（Bank-to-Turn, BTT）的滑翔制导炸弹，在空中飞行时，可以通过实时调整控制变量，实现打击弹道的调整，从而提高机动能力和对移动目标的打击能力，此外，还可以通过滑翔飞行提高炸弹的射程。

1.1 模型假设

为了便于描述滑翔制导炸弹对地攻击过程动力学模型，本文做出如下假设：

（1）炸弹的弹翼同步变掠，即不考虑左右弹翼差动变掠的形式；

（2）弹道优化过程中，炸弹等效为质点，即忽略绕质心的转动运动；

（3）控制系统理想工作，无时延。

1.2 运动建模

1.2.1 动力学模型

滑翔制导炸弹可以实时调整攻角、侧倾角和弹翼后掠角，实现对炸弹运动的控制。在对地攻击过程中，炸弹受到重力、空气动力和由于弹翼变掠运动产生的变体附加力，其质心的运动模型表示为

$$\begin{cases}\dot{x}=V\cos\theta\cos\psi\\ \dot{y}=V\sin\theta\\ \dot{z}=-V\cos\theta\sin\psi\\ \dot{V}=\dfrac{-X(\alpha,\chi)-G\sin\theta+F_{\text{addx}}(\alpha,\gamma,\chi)}{m}\\ \dot{\theta}=\dfrac{Y(\alpha,\chi)\cos\gamma-G\cos\theta+F_{\text{addy}}(\alpha,\gamma,\chi)}{mV}\\ \dot{\psi}=-\dfrac{Y(\alpha,\chi)\sin\gamma+F_{\text{addz}}(\alpha,\gamma,\chi)}{mV\cos\theta}\end{cases}\tag{1}$$

式中，(x,y,z)为炸弹的位置，$(V,\theta,\psi,\alpha,\gamma,\chi)$为速度、弹道倾角、弹道偏角、攻角、侧倾角和弹翼后掠角，(X,Y,G)为阻力、升力和重力，$F_{\text{addx}},F_{\text{addy}},F_{\text{addz}}$分别为由于弹翼变掠运动产生的变体附加力，其表达式为：

$$\begin{aligned}F_{lx}&=\ddot{S}\cos\alpha\\ F_{ly}&=\ddot{S}\sin\alpha\cos\gamma\\ F_{lz}&=\ddot{S}\sin\alpha\sin\gamma\end{aligned}$$

式中，$S=\int r(x,y,z)dm$为炸弹的静矩，与质心的位置$r(x,y,z)$和质量分布有关，即与弹翼的变掠运动有关。当炸弹的弹翼后掠角改变时，其质心位置也随之而变，进而影响静矩及附加力的表达式。同时，可以看到附加力的表达式中，存在静矩的二阶导数，可以得到变体附加力与后掠角的一阶导数和二阶导数有关。因此，在动力学系统中，状态变量和控制变量分别设置为$\boldsymbol{X}=(x,y,z,V,\theta,\psi,\chi,\dot{\chi})$和$\boldsymbol{U}=(\alpha,\gamma,\ddot{\chi})$。

动力学模型可以表示为

$$\dot{\boldsymbol{X}}=f(\boldsymbol{X},\boldsymbol{U})\tag{2}$$

1.2.2 约束模型

在滑翔制导炸弹对地打击过程中，为了确保攻击弹道可飞行和毁伤效果，炸弹的攻击弹道受到很多因素的限制和制约，主要包括边界约束、飞行性能约束、控制量约束等。在弹道优化过程中，必须充分考虑这些约束条件，确保得到的轨迹具有较高的科学性、实用性和可靠性。

为了确保打击效果，炸弹需满足边界约束，即初始状态和终端状态。初始状态包括炸弹投放瞬间的位置、速度、姿态等信息。考虑到打击目标特性，为了取得较好的毁伤效果或者减小附带损伤，通常需要对进入角、落角、落速进行约束。具体表达式如下：

$$\begin{cases}\boldsymbol{X}(t_0)=\boldsymbol{X}_0\\ \boldsymbol{X}(t_f)=\boldsymbol{X}_f\end{cases}\tag{3}$$

式中，t_0,t_f分别代表炸弹的初始和终端时刻。需要注意的是，当对目标点的约束比较宽松时，可以采用不等式约束的形式给出一定的范围，例如，求解最大/小射程时，终端时刻的位置应该是一个不等式。

飞行性能约束主要是为了保证炸弹弹道物理可实现性，以保证炸弹内外结构安全，主要包括过载、弹道角，其表达式为

$$\begin{cases}n=\dfrac{\sqrt{X^2+Y^2+F_l^2}}{G}\le n_{\max}\\ \theta_{\min}\le\theta\le\theta_{\max}\end{cases}\tag{4}$$

控制变量为攻角、侧倾角和后掠角的二阶导数，受限于控制过程的执行机构限制，控制变量需满足

$$\begin{cases}\alpha_{\min}\le\alpha\le\alpha_{\max}\\ |\gamma|\le\gamma_{\max}\\ |\ddot{x}|\le\ddot{x}_{\max}\end{cases}\tag{5}$$

1.2.3 优化指标

在执行对地攻击时，需要根据任务目标合理设置优化指标。如执行防区外打击任务时，为了避免进入敌方防空圈，优化指标应设置为最大化射程；而对于高机动导弹发射车等时间敏感目标，优化指标应该设置为最小化飞行时间，实现尽快打击的目的。

$$\begin{cases}J_1=\min\quad -\sqrt{x_f^2+z_f^2}\\ J_2=\min\quad t_f\end{cases}\tag{6}$$

2 混合优化策略

求解优化问题时，基于梯度的方法（如 SQP）具有求解精度高的优点，但是其对初始猜测值敏感，而启发式算法则具有全局寻优能力强的优点，但是其解的最优性无法验证。为了充分利用两类方法的优点，本文提出了基于改进灰狼算法和 SQP 算法的双层混合求解器，其中外层作为参考轨迹生成器，采用改进灰狼优化算法 IGWO 进行全局搜索，得到满足一定精度的初始可行解，接着，将其作为初始猜测值提供给内层的基于梯度的求解器，最终得到满足预设精度的最优解。

2.1 灰狼优化算法 GWO

在灰狼优化算法中，每头灰狼的位置被视为一个可行解，记最优解、次优解和优解所在的位置为 $\alpha_w,\beta_w,\delta_w$，其余可行解为 ω。算法求解时，ω 在 $\alpha_w,\beta_w,\delta_w$ 的引导下，向全局最优解逼近。

若搜索空间维度为 D，记灰狼个体的位置为

$$\boldsymbol{P}=\left(p^1,p^2,\cdots p^D\right)\tag{7}$$

通过适应度函数值来衡量其位置的优劣程度，则当前 $\alpha_w,\beta_w,\delta_w$ 狼和狼群中 ω 狼位置为

$$\begin{cases}\boldsymbol{P}_{\mathrm{p}}=\left(P_{\mathrm{p}}^1,P_{\mathrm{p}}^2,\cdots P_{\mathrm{p}}^D\right)\quad \mathrm{p}=\alpha_w,\beta_w,\delta_w\\ \boldsymbol{P}_{\omega}=\left(P_{\omega}^1,P_{\omega}^2,\cdots P_{\omega}^D\right)\end{cases}\tag{8}$$

狼群在 $\alpha_w,\beta_w,\delta_w$ 狼的带领下，向猎物逼近的导引方程为

$$\begin{cases}\boldsymbol{P}(t+1)=\dfrac{1}{3}\displaystyle\sum_{\mathrm{p}=\alpha_w,\beta_w,\delta_w}\left(\boldsymbol{P}_{\mathrm{p}}(t)-A\cdot\boldsymbol{D}_{\omega\mathrm{p}}\right)\\ \boldsymbol{D}_{\omega\mathrm{p}}=\left|C\cdot\boldsymbol{P}_{\mathrm{p}}(t)-\boldsymbol{P}_{\omega}(t)\right|\\ A=2\cdot a\cdot r_1-a\\ C=2\cdot r_2\end{cases}\tag{9}$$

式中，t 为迭代次数，$\boldsymbol{D}_{\omega\mathrm{p}}$ 为 ω 狼与 $\alpha_w,\beta_w,\delta_w$ 狼的距离，A,C 为导引系数，r_1,r_2 为[0,1]内的随机数。

在算法实现过程中，为了缩短狼群与 $\alpha_w,\beta_w,\delta_w$ 狼的距离和逼近猎物，控制参数 a 的值应设置为随着迭代次数的增加而减小的变量，其表达式为

$$a=2-2\left(\frac{t}{T}\right)\tag{10}$$

式中，T 为最大迭代次数。

参数 C 是[0,2]内的随机数，为对 $\alpha_w,\beta_w,\delta_w$ 狼的位置的随机权重，可以类似于地形等自然条件对狼群捕食行为的影响。

2.2 改进灰狼优化算法 IGWO

多次仿真结果表明，同其他大多数智能算法一样，在求解复杂约束条件下的优化问题时，GWO 由于种群多样性降低，容易陷入局部最优，导致收敛精度不高。因此，算法的改进首先需要考虑提高全局搜索能力。本文从种群初始化、控制参数调整策略和自主探索策略三个方面对 GWO 进行改进。

2.2.1 种群初始化

优化算法在求解时，本质上是从一群初始猜测值出发，起点种群分布对收敛速度、探索能力和防止早熟等方面有较大影响。混沌算子具有随机性与规律性，且能定义域内不重复地遍历所有状态，避免初始种群聚集，提高全局搜索能力。因此，在初始种群生成时，本文采用立方混沌映射算子进行映射，以改善种群的分布情况，提高种群个体的多样性，解决随机初始化聚集或者盲区的问题，其表达式为

$$y_{n+1}=4y_n^3-3y_n,-1<y_n<1,y_n\neq 0 \tag{11}$$

利用式（12）生成初始种群位置。

$$x_{ib}=x_{lb}+\frac{\left(x_{ub}-x_{lb}\right)\left(y_i+1\right)}{2} \tag{12}$$

式中，y_i 由立方映射生成，x_{lb},x_{ub} 分别为第 b 维的边界。

然后采用反向学习策略，对混沌个体求反向解，进一步扩大搜索范围，提高初始解的质量，其表达式为

$$x_{i,obl}=k\left(x_{ub}+x_{lb}\right)-x_{ib},k\square U\left(0,1\right) \tag{13}$$

进一步，将混沌种群和反向种群合并，按照适应度函数值排序，择优保留前 N 个作为最终的初始种群。

2.2.2 控制参数调整策略

在原始 GWO 中，控制参数 a 采取线性递减的方式，平衡全局搜索和局部开发能力。仿真计算结果表明，GWO 存在容易陷入局部最优的问题，导致其稳定性不足，同时 GWO 的开发速度都有明显高于探索速度，一旦陷入局部最优，跳出局部最优的速度将极为缓慢，因此，线性递减的方式较难匹配复杂的搜索区域。

本文采用余弦函数和指数函数对控制参数 a 进行改进，改进后的表达式为

$$a=2\cos\left[\frac{\pi}{2}\left(\frac{t}{T}\right)^2\right] \tag{14}$$

式中，t 为当前迭代次数。与原算法中探索和开法阶段各占比 50%相比，改进后的算法中，a 的值前期缓慢下降、后期快速下降，全局探索和局部开发占比分别为 81.6%和 18.4%，能提高全局搜索能力。

2.2.3 自主探索策略

在算法仿真中发现，灰狼优化算法还存在盲目跟随的问题，即在运动过程中，灰狼个体只会跟着 $\alpha_w,\beta_w,\delta_w$ 狼的引导运动，而忽略自身周边是否存在最优解，尤其是针对距离 $\alpha_w,\beta_w,\delta_w$ 狼较远的个体。针对这种现象，本文借引入自主探索行为，即当 ω 狼在头狼 $\alpha_w,\beta_w,\delta_w$ 引领作用下更新位置后，立即评估自身位置的目标函数值，并对附近位置进行随机探索，一方面，能够探索个体周围是否存在最优解，增强算法求解效率，另一方面，可以帮助算法跳出局部最优，其表达式为：

$$P_{\mathrm{D}}^{\mathrm{new}}=\begin{cases}P_{\mathrm{D}}+r_3\left(P_{\mathrm{Dmax}}-P_{\mathrm{Dmin}}\right) & \text{新位置}\\ P_{\mathrm{D}} & \text{其他}\end{cases} \tag{15}$$

式中，$X_{Dj\min}$ 和 $X_{Dj\max}$ 分别为个体第 j 维分量的最小值和最大值，r_3 为[-0.5,0.5]上的随机数。

2.2.4 IGWO 求解流程

综合上述内容，基于 IGWO 的求解流程如图 1 所示。

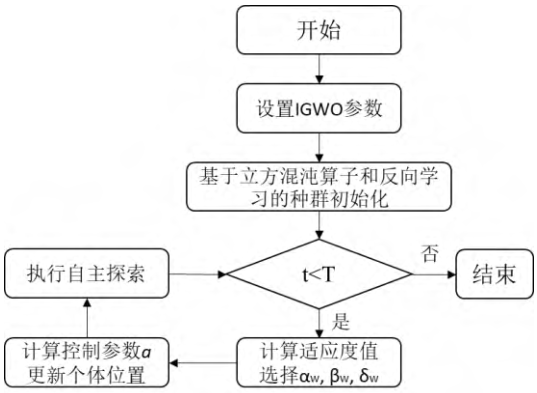


图 1 IGWO 求解流程
Fig.1 The process of IGWO

2.3 IGWO 测试

为了评估改进灰狼优化算法的性能，本部分分别采用 PSO、ABC、GWO 和 IGWO 等 4 种算法对 7 个测试函数进行求解，其中，测试函数包括 4 个单峰函数和 3 个多峰函数，其中，单峰函数，主要用于测试算法的局部开发能力，多峰函数主要由于测试函数的全局探索能力，衡量算法跳出局部最优的能力，其表达式及其维度、范围和最优值如表 1 所示。

在各算法测试时，种群数量均设置为 100，总迭代次数为 100 次。应用上述智能优化算法，分别对各测试函数进行 50 次仿真试验，其平均值如表 2 所示。

表 1 测试函数
Table 1 Test functions

函数	表达式	维度	范围	最优值
单峰函数	$F_1(x)=\sum_{i=1}^{n}x_i^2$	30	[-100,100]	0
	$F_2(x)=\sum_{i=1}^{n}\lvert x_i\rvert+\prod_{i=1}^{n}\lvert x_i\rvert$		[-10,10]	
	$F_3(x)=\sum_{i=1}^{n}\left(\sum_{j=1}^{i}\lvert x_i\rvert\right)^2$		[-100,100]	
	$F_4(x)=\sum_{i=1}^{n}(x_i+0.5)^2$		[-100,100]	
多峰函数	$F_5(x)=\sum_{i=1}^{n}\left[x_i^2-10\cos(2\pi x_i)+10\right]$	30	[-5.12,5.12]	0
	$F_6(x)=\frac{1}{4000}\sum_{i=1}^{n}x_i^2-\prod_{i=1}^{n}\cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right)+1$		[-600,600]	
	$F_7(x)=-20\exp\left(-0.2\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i^2}\right)-\exp\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\cos(2\pi x_i)\right)+20+e$		[-32,32]	

表 2 不同优化算法求解结果
Table 2 Results of different optimization algorithms

测试函数	指标	IGWO	ABC	PSO	GWO
F_1	平均值	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	9.38E-76

F_2	平均值	8.37E-69	8.32E-36	1.28E-91	7.90E-15
F_3	平均值	3.91E-57	8.78E-18	4.92E-36	9.90E-34
F_4	平均值	0.00E+00	7.55E-27	0.00E+00	0.00E+00
F_5	平均值	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	9.10E-67
F_6	平均值	7.87E-02	1.98E+00	3.54E-01	4.78E+00
F_7	平均值	5.71E-12	1.29E-05	3.31E-06	6.11E-02

总体来看，四种算法对于单峰函数的求解效果均较好，能够稳定收敛到最优解附近，局部开发能力均较强，比较而言，本文提出的 IGWO 求解效果更好；对于多峰函数，智能优化算法在求解时容易陷入局部最优，IGWO 的求解效果要好于其余三种算法，说明了 IGWO 的全局探索能力更强，一方面，通过改进控制参数，使得算法的全局探索占比更长，另一方面，自主探索策略既有助于发现潜在最优解，还能帮助算法跳出局部最优。

2.4 混合优化策略求解流程

针对建立的滑翔制导炸弹对地弹道优化问题，定义待优化的变量，设置解空间，采用改进灰狼优化算法全局搜索能力求解满足给定精度的优质初始解，而后将其作为猜测值，送给内层的基于 SQP 的求解器，作为其迭代的起始点，使其能够精确计算出高精度的局部最优解，直至满足终止条件。这样，基于混合优化策略的双层求解器，既能解释得到解的最优性，又解决了基于梯度的求解算法对猜测值敏感的问题。混合优化策略求解流程如图 2 所示。

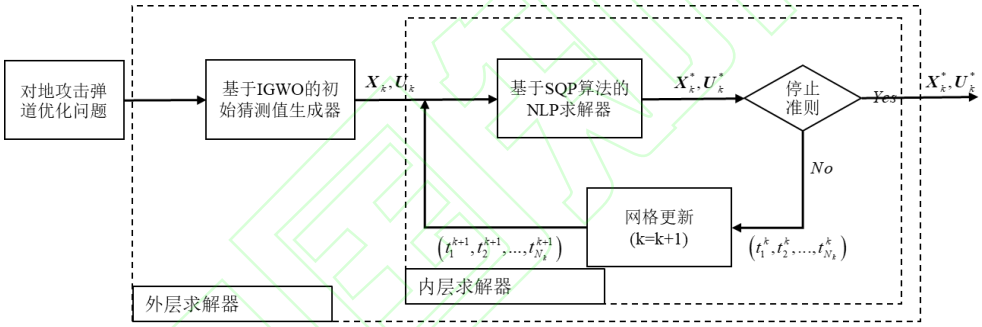


图 2 基于混合优化策略的对地攻击最优轨迹求解示意图

Fig.2 Schematic diagram for the optimal trajectory based on hybrid optimization strategy

3 最优攻击弹道求解

3.1 仿真条件设置

基于第二节构建的滑翔制导炸弹对地攻击弹道优化模型，采用第三节提出的混合优化策略进行仿真计算，求解滑翔制导炸弹的最远射程和打击定点的最短时间。

炸弹投放瞬间的初始条件设置为：投放高度 10km，速度 Ma=0.8，投放角度 0°，攻角 0°，后掠角为 90°（挂载时处于折叠弹翼状态）。

改进灰狼优化算法中，种群数量设置为 100，最大迭代次数 200。

约束条件中，设置飞行过程最大过载为 30，攻角 $-6 \le \alpha \le 18$，侧倾角 $|\gamma| \le \pi/2$，后掠角的二阶导数 $|\ddot{\chi}| \le 20^{\circ}/\mathrm{s}$。

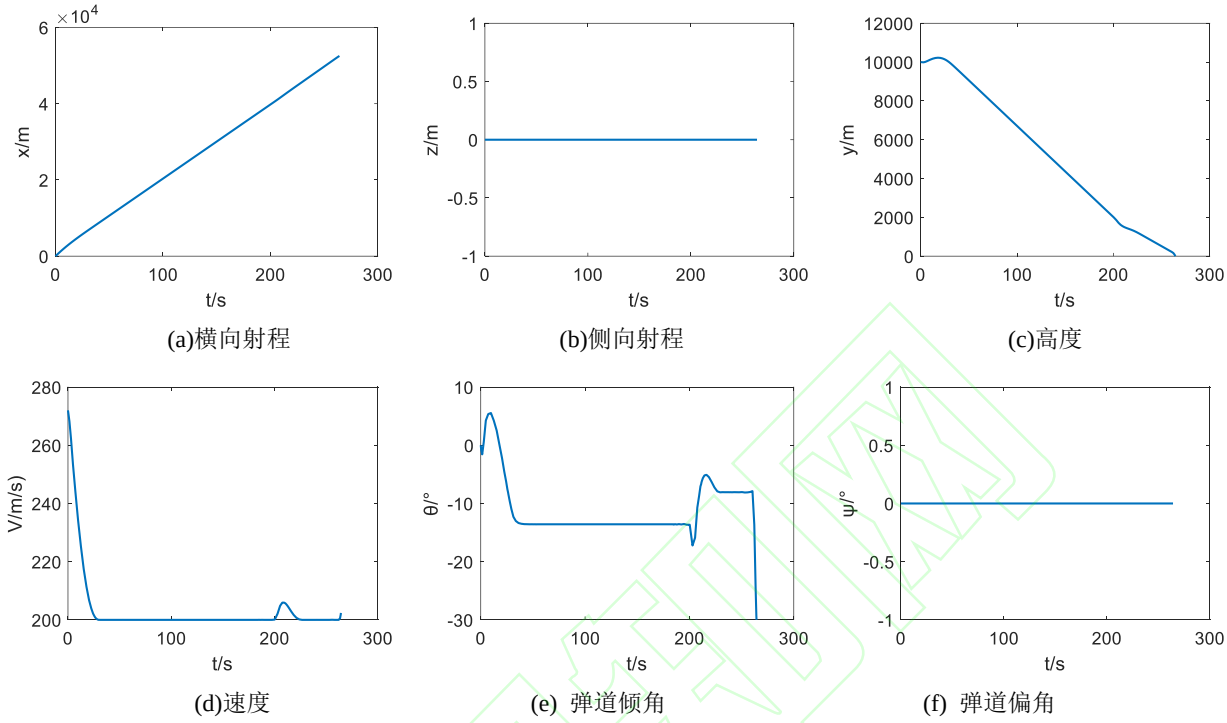
考虑到对目标的打击效果，终端落角设置为[-60°,-30°]，终端攻角设置为[-1°,2°]，侧倾角为 0。

3.2 求解结果

3.2.1 射程最远攻击弹道

当作战场景为运用滑翔制导炸弹遂行远边界地面打击任务时，优化指标设置为射程最远，即

$\min \quad -\sqrt{x_f^2+z_f^2}$。应用混合优化策略求解得到了炸弹的最优攻击弹道及其运动参数，如图 3~4 所示。炸弹的终端运动参数值如表 3 所示。

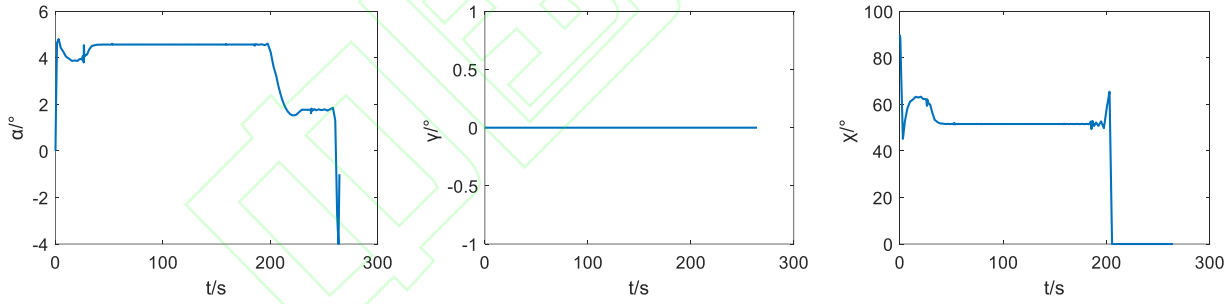


(a)横向射程 (b)侧向射程 (c)高度

(d)速度 (e) 弹道倾角 (f) 弹道偏角

图 3 射程最远攻击弹道状态变量

Fig.3 The state variables of the range-optimal trajectory



(a)攻角 (b)侧倾角 (c)后掠角

图 4 射程最远攻击弹道控制变量

Fig.4 The control variables of the range-optimal trajectory

可以看到，炸弹在该初始投放条件下，最远飞行 52.522km，飞行时间为 264.3s。同时，从图 3（b）（f）和图 4（b）可以看到，炸弹的侧向运动非常小，其最大侧向射程、弹道偏角几乎为 0，说明在求解最远攻击弹道时，尽管优化指标中包含了侧向射程，但其侧向运动可以忽略。因此，为了更加快速和便捷求解不同初始条件下炸弹对地攻击的最大射程，可以将原模型简化到垂直平面，能有效提高计算效率和降低计算复杂度。

图 5 给出了整个攻击过程炸弹的过载。在射程最远攻击弹道中，过载均满足约束条件，且最大过载不超过 2.5，易于工程实现。

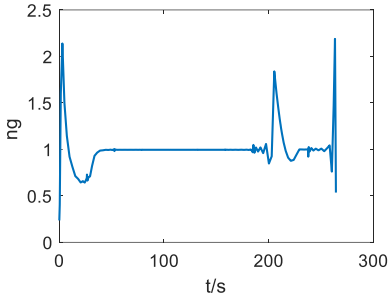


图 5　射程最远攻击弹道过载
Fig.5　The load of the range-optimal trajectory

从整个对地攻击过程来看，炸弹的运动参数均在给定范围内，说明了计算方法的有效性。炸弹从处于折叠弹翼挂载状态被投放后，会调整攻角和打开弹翼，经历一个爬升阶段，将动能转化为重力势能，飞行速度快速减小。随后，通过调整攻角，使其在重力和气动力作用下达到近似平衡状态，进入滑翔飞行阶段；此时，炸弹的滑翔速度为 200m/s，弹道倾角为-13.48°，攻角 4.57°，侧向运动参数和弹翼后掠角几乎保持为 0，并且滑翔飞行阶段占据了整个攻击过程的 65%。该滑翔速度由炸弹的升力和阻力特性决定。最后，为了满足对目标的毁伤要求，炸弹通过减小攻角和增大弹翼后掠角，使得弹道倾角快速减小，直至命中目标。

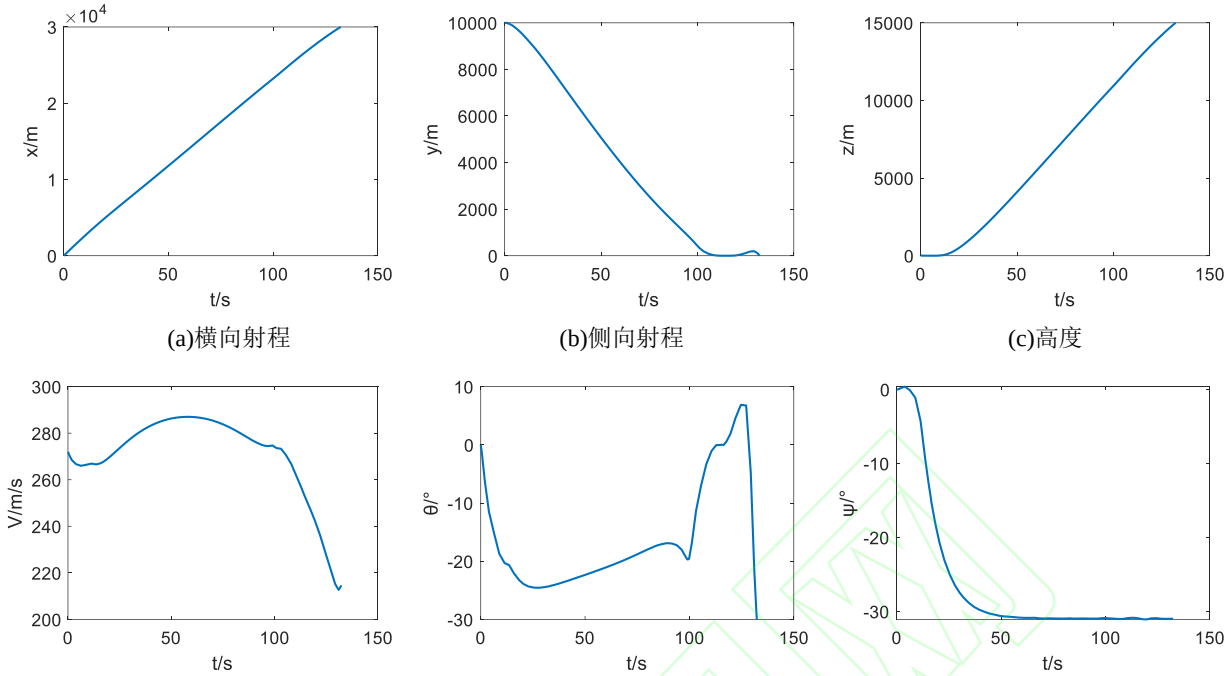
表 3 射程最远攻击弹道终端参数
Table 3　The terminal parameters of the range-optimal trajectory

参数	t_f/s	x_f/m	y_f/m	z_f/m	V_f/m/s	θ_f/(°)	ψ_f/(°)
终端值	264.3	52522	0	0	202.4	-30	0

当改变目标函数中横向和侧向射程的比重时，即 $\max\ (1-\omega)x_f+\omega z_f$，可以求解该初始投放条件下滑翔制导炸弹的攻击区域。

3.2.2 时间最短攻击弹道

当作战场景为运用滑翔制导炸弹遂行时敏目标打击时，优化指标设置应为飞行时间最短，即 $\min\ t_f$。若时敏目标的坐标为 $(300000,0,15000)$，应用混合优化策略求解得到了炸弹的最优攻击弹道及其运动参数，如图 6-7 所示。炸弹的终端运动参数值如表 4 所示。

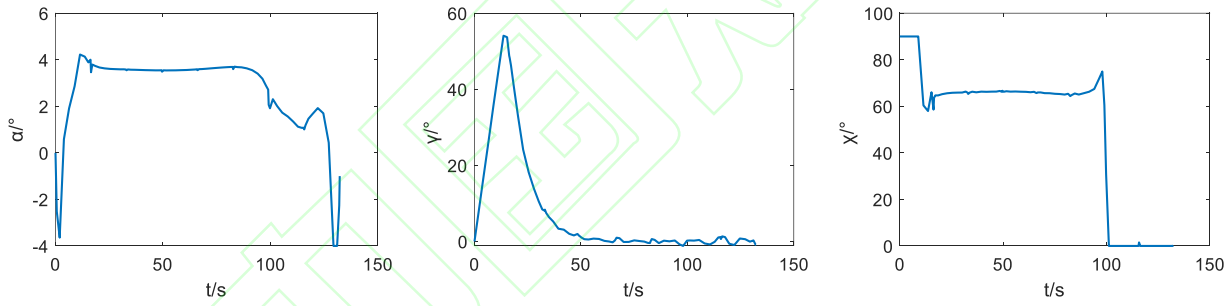


(a)横向射程 (b)侧向射程 (c)高度

(d)速度 (e) 弹道倾角 (f) 弹道偏角

图 6 射程最远攻击弹道状态变量

Fig.6 The state variables of the range-optimal trajectory



(a)攻角 (b)侧倾角 (c)后掠角

图 7 时间最短攻击弹道控制变量

Fig.7 The control variables of the time-optimal trajectory

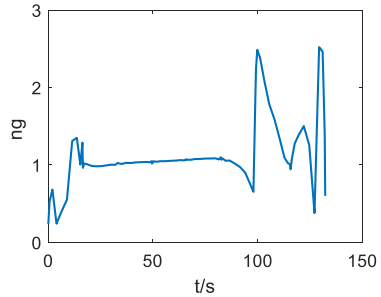


图 8 时间最短攻击弹道过载

Fig.8 The load of the time-optimal trajectory

可以看到，在攻击定点目标的时间最短攻击弹道，炸弹的飞行时间为 132.3s，能够准确命中目标。与最大射程攻击弹道相比，时间最短攻击弹道既有横向机动，也有侧向机动。炸弹刚从载机投放

后一段时间内，弹翼保持收拢状态，攻角先减小后增加，侧倾角快速增加到最大值 54°，使得炸弹的弹道倾角和弹道偏角快速减小；随后，攻角逐渐趋于稳定，侧倾角逐渐减小到 0°附近，后掠角减小至 66°，炸弹朝着目标飞行；最后，炸弹进入末端攻击状态，通过较小的拉起动作，以-30 ℃落角和 214.6m/s 速度命中目标，实现对目标的高效打击。

表 4 时间最短攻击弹道终端参数

Table 4　The terminal parameters of the time-optimal trajectory

参数	t_f/s	x_f/m	y_f/m	z_f/m	V_f/m/s	θ_f/(°)	ψ_f/(°)
终端值	132.3	30000	0	15000	214.6	-30	-31

3.2.3 初始条件对最优攻击弹道的影响

本部分主要采用控制变量法，分别改变炸弹的投放高度和速度，采用混合优化策略求解，得到不同初始投放条件下炸弹的最远射程和最短时间，结果如表 5 所示。

表 5 不同投放条件最优攻击弹道指标值

Table 5　Index values for optimal trajectory under different initial conditions

高度	指标	0.8 Ma	1.0 Ma	1.2 Ma	1.4 Ma
3 km	最大射程	12.9 km	15.5 km	16.9 km	18.4 km
	最短时间	16.6 s	14.6 s	13.2 s	13.1 s
6 km	最大射程	26.4 km	27.9 km	31.5 km	34.6 km
	最短时间	27.5 s	24.8 s	22.4 s	20.7 s
9 km	最大射程	44.7 km	52.8 km	56.3 km	64.1 km
	最短时间	37.7 s	34.8 s	32.3 s	30.2 s
12 km	最大射程	69.4 km	73.7 km	76.8 km	82.6 km
	最短时间	46.8 s	44.5 s	41.8 s	39.4 s
15 km	最大射程	83.2 km	85.6 km	89.5 km	94.3 km
	最短时间	57.1 s	53.9 s	51.02 s	48.7 s

当投放速度和高度分别为 1.4Ma 和 15km 时，炸弹的最大射程可以达到 94.3km，与美国公布的 JDAM ER 最大射程接近，进一步验证了本文提出的混合优化策略的准确性。

4　结　论

针对滑翔制导炸弹最优攻击弹道求解，本文结合改进灰狼优化算法和 SQP 算法设计了双层混合优化求解器，求解了最大射程和最短时间攻击弹道，分析和总结了初始速度和高度对最优攻击弹道的影响，得到如下结论：

（1）对最大射程的影响。随着初始速度和高度的增加，炸弹的最大射程增加，并且高度对射程的影响更显著。一方面，初始速度和高度越高，炸弹初始动能和势能越大，有助于提高射程；另一方面，高度增加后，空气密度减小，阻力作用减小，有助于炸弹滑翔更远的距离。

（2）对最短时间的影响。在同一投放高度下，初始速度越大，整个攻击过程的平均速度越大，炸弹到达攻击目标高度的时间就越短；初始高度越高，炸弹需要更多时间飞行至目标高度，所需的飞行时间越长。

（3）投放高度和速度对最大射程的协同影响。在不同高度和速度条件下，两者对射程的贡献存在协同作用。当高度和速度同时增加时，最大射程的增加效果更显著。在实际应用中，若要对超出最大射程外的目标进行打击，既可以提升初始投放高度，也可以提高飞行速度。

（4）投放高度和速度对最短时间的权衡关系。对于最短飞行时间而言，速度的提升对时间的减少作用更为直接和显著，而高度的增加则会导致时间延长。在实际应用中，若任务优先级为快速打击，应更注重提高投放速度；若目标距离较远，需优先保障射程，则应选择更高的投放高度。

参考文献（References）

[1] 陆秋秋，易文俊．基于 hp-RPM 的滑翔弹道优化及制导仿真[J]．兵器装备工程学报，2021，42（09）：34-39，125．
LU Q Q, YI W J. Trajectory optimization and guidance simulation of gliding projectile based on hp-RPM[J].Journal of Ordnance Equipment Engineering,2021,42(09):34-39,125(in Chinese).

[2] 张伟，陈国明，黄威．空投变掠翼滑翔炸弹轨迹优化[J]．飞行力学，2022，40（6）：39-43．
ZHANG W, CHEN G M, HUANG W. Trajectory optimization of air-dropped variable-sweep wing glide bombs[J].Flight Dynamics,2022,40(6):39-43(in Chinese).

[3] 于洋．滑翔制导炸弹轨迹优化与制导技术研究[D]．哈尔滨工业大学，2018：25-48．

YU Y. Research on trajectory optimization & guidance of gliding guided bombs[D].Harbin Institute of Technology,2018:25-48(in Chinese).
[4] 徐兆璞．滑翔制导炸弹弹道优化和发射区域计算研究[D]．国防科技大学，2017：66-72．
XU Z Y. Research on trajectory optimization andrelease region calculation of glide guided bomb[D].National University of Defense Technology,2017:66-72(in Chinese).
[5] 贾昂．变体制导炮弹弹道优化与控制方法研究[D]．南京理工大学，2023：6-15．
JIA A. Trajectory optimization and control method of morphing guided projectile[D].Nanjing University of Science & Technology,2023: 6-15(in Chinese).
[6] 张智森．滑翔增程制导炮弹弹道规划技术研究[D]．中北大学，2023：35-49．
ZHANG Z S. Ballistic planning technology for gliding extended range guided artillery shells[D].North University of China,2023:35-49(in Chinese).
[7] 王捷．滑翔增程火箭弹弹道优化研究[D]．中北大学，2020：1-8．
WANG J. Research on trajectory optimization of gliding extended range rocket[D].North University of China,2020:1-8(in Chinese).
[8] 何析隆．高空高速弹药自适应制导与抗扰控制[D]．哈尔滨工业大学，2020：41-54．
HE X L. Adaptive guidance &disturbance-rejection control of high-speed high-altitude missile[D].Harbin Institute of Technology,2020:41-54(in Chinese).
[9] 赵日，孙瑞胜，沈坚平．变后掠翼制导炸弹滑翔弹道优化设计[J]．航天控制，2014， 32（1）：16-20．
ZHAO R, SUN R S, SHEN J P. The optimization design of glide trajectory for guide bomb with morphing swept wings[J].Aerospace Control,2014,32(1):16-20(in Chinese).
[10] 高英瑞，史金光，任华杰，变后掠翼超远程制导炮弹方案弹道优化方法[J]．弹道学报，2025，37（2）：69-75，128．
GAO Y R, SHI J G, REN H J. Ballistic optimization method of variable swept wing extended-range guided projectiles[J].Journal of Ballistics,2025,37(2):69-75,128(in Chinese).
[11] 高晓光， 汤洪， 端军红． 基于混合优化算法的空间拦截轨道优化设计[J]． 北京航空航天大学学报， 2015， 41（9）： 1574-1581
GAO X G, TANG H, DUAN J H. Space interception orbit optimization design based on hybrid optimal algorithm[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronsutics,2015,41(9):1574-1581(in Chinese).
[12] 霍明英， 齐乃明， 曹世磊，． 一种用于行星间转移轨迹优化的混合优化方法[J]． 国际航空航天科学，2017，5（3）：151-162．
HUO M Y, QI N M, CAO S L. A hybrid optimization method for interplanetary transition trajectory optimization[J].Journal of Aerospace Science and Technology,2017,5(3):151-162(in Chinese).
[13] CHEN G M, ZHANG W, QI L, et al. Constrained multi-objective trans-media maneuver trajectory optimization for morphing unmanned aerial-underwater vehicles[J].Ocean Engineering, 2024, 299:117380.
[14] CHEN G M, YANG H Y, HU J H, et al. Multi-objective optimization of dive trajectory for morphing unmanned aerial-underwater vehicle[J].Ocean Engineering, 2021, 228: 108930.
[15] 杜云， 贾慧敏， 邵士凯． 面向多目标侦察任务的无人机航线规划[J]． 控制与决策， 2021， 36（5）： 1191-1198．
DU Y, JIA H M, SHAO S K. UAV trajectory planning for multi-target reconnaissance missions[J]. Control and Decision, 2021, 36(5): 1191-1198(in Chinese).
[16] 管军，叶双慧，易文俊．基于 PSO-hpRPM 算法的滑翔制导炮弹弹道优化，控制与决策，2025（5）：1733-1741．
GUAN J, YE S H, YI W J. Trajectory optimization of glide guidance projectile based on PSO-hpRPM hybrid algorithm[J]. Control and decision,2025(5):1733-1741(in Chinese).