

摘要

针对问题一：以假目标为原点建立直角坐标系，通过匀速直线运动公式计算导弹 $M1$ 的实时位置，结合圆柱坐标方程确定真目标侧面离散点；基于无人机 $FY1$ 的投放参数与烟幕弹运动规律，推导烟幕云团的球面方程；通过联立导弹到真目标连线方程与云团球面方程，结合判别式 Δ 判断相交关系，离散化时间轴遍历验证有效遮挡时刻。最后得到烟幕干扰弹对 $M1$ 的有效遮蔽时间为 **1.391982s**。

针对问题二：以 $FY1$ 的飞行方向、烟幕弹投放时间 t_1 、起爆时间 t_2 为决策变量，以有效遮蔽时间最大化为目标函数，建立单目标优化模型；采用**模拟退火算法**，规避局部最优，离散化时间轴验证遮蔽状态。最后得到当 $FY1$ 飞行方向与 x 轴夹角 **3.13rad**、速度 **109.78m/s**，投放点 **(17722.061437, 0.903555, 1800.00000)**、起爆点 **(17335.661803, 5.383153, 1739.287040)** 时，最长遮蔽时间为 **4.602140s**。

针对问题三：在问题二基础上，增加烟幕弹投放间隔约束，以 $FY1$ 飞行参数及 3 枚烟幕弹的投放、起爆时间为决策变量，仍以总遮蔽时间最大化为目标，采用**模拟退火算法**迭代优化，遍历离散化的真目标点与时间点验证遮蔽效果。最后得到当 $FY1$ 飞行方向 **179.66 度**、速度 **140m/s** 时，3 枚烟幕弹投放点 x 坐标分别为 **17653.00m**、**17294.61m**、**17112.61m**，对应有效干扰时长依次为 **4.1s**、**2.7s**、**1.7s**，最大有效遮蔽时间为 **6.719452**。

针对问题四：考虑 $FY1$ 、 $FY2$ 、 $FY3$ 三架无人机，以每架无人机的飞行方向、速度及单枚烟幕弹的投放、起爆时间为决策变量，目标为总遮蔽时间最大化；采用**差分进化算法**，同步验证三枚烟幕云团的时空遮蔽覆盖。最后得到 $FY1$ 方向 **4.86 度**、速度 **96.37m/s**， $FY2$ 方向 **246.86 度**、速度 **87.25m/s**， $FY3$ 方向 **100.85 度**、速度 **93.93m/s**，其烟幕弹有效干扰时长分别为 **4.60s**、**2.95s**、**3.10s**；最大有效遮蔽时间为 **11.50s**。并且根据灵敏度分析可知，**导弹速度与有效遮蔽时间呈负相关，速度越快遮蔽时间越短**。

针对问题五：针对 5 架无人机（每架至多 3 枚烟幕弹）与 3 枚敌方导弹，先独立优化单无人机对三枚导弹的投放策略，再合并去重时间计算总遮蔽时长；以无人机飞行参数、烟幕弹投放/起爆时间为变量，考虑投放间隔与云团寿命约束，采用**差分进化算法**分阶段寻优，验证多弹对多导弹的协同遮蔽。最后得到 $FY1$ 方向 **7.45 度**、速度 **72m/s**， $FY2$ 方向 **295.07 度**、速度 **127.02m/s** 等 5 架无人机的烟幕弹对 $M1$ 、 $M2$ 、 $M3$ 的有效遮蔽时长存在差异，其中 $FY2$ 对 $M1$ 贡献 **4.12s**、对 $M2$ 贡献 **3.38s**， $FY3$ 对 $M1$ 贡献 **1.75s**、对 $M2$ 贡献 **2.77s**；最大有效遮蔽时间为 **22.97s**。

关键字： 单目标优化 遍历算法 模拟退火 差分净化算法

