

文章编号:1674-8190(2022)04-073-10

# 任务规划系统机动模型与航线设计

朱金冬<sup>1</sup>,张方齐<sup>1</sup>,赵彤<sup>2</sup>,王景志<sup>1</sup>,田静<sup>1</sup>

(1.航空工业沈阳飞机设计研究所体系部,沈阳110035)

(2.南京航空航天大学航空学院,南京210016)

**摘要:** 航空兵任务规划系统中飞机空对地攻击航线解算的准确性、航线生成质量和航线解算速度是衡量任务规划系统能力的重要指标。飞机空对地攻击航线设计是飞机航线规划中典型的多约束复杂机动,其在设计与使用过程中受到来自时间、空间及飞机本体的多维约束,对飞行动力学建模与航迹优化提出了较高的要求。本文利用面向对象的思想对飞机无侧滑动力学模型进行建模,通过航线机动动作拼接、分段优化的方式实现复杂机动过程的设计与优化,并进行仿真分析。结果表明:该航线优化设计能够实现飞机多约束航迹设计与规划功能,迭代优化算法具有较好的收敛性,可满足航空兵任务规划使用要求。

**关键词:** 任务规划;航线规划;机动模型;对地攻击

**中图分类号:** V249; E91

**DOI:** 10.16615/j.cnki.1674-8190.2022.04.08

**文献标识码:** A

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## Maneuver Model and Route Designing in Mission Planning System

ZHU Jindong<sup>1</sup>, ZHANG Fangqi<sup>1</sup>, ZHAO Tong<sup>2</sup>, WANG Jingzhi<sup>1</sup>, TIAN Jing<sup>1</sup>

(1. System Department, AVIC Shenyang Aircraft Design and Research Institute, Shenyang 110035, China)

(2. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** In aviation mission planning system, the accuracy of aircraft air-to-ground attack route solution, route generation quality and route calculation speed are important indicators to measure multi constraint complex maneuver in aircraft route planning. In the process of design and use, it is subject to multi-dimensional constraints from time, space and aircraft body, which puts forward high requirements for flight dynamics modeling and track optimization. In this paper the object-oriented thinking is used to model the aircraft's side-slip dynamics model, and the design and optimization of the complex maneuvering process are realized by the way of route maneuvering splicing and segmental optimization. After simulation analysis, it is proved that the route optimization design can realize the multi-constrained trajectory design and planning function of the aircraft in terms of ideas and methods. The iterative optimization algorithm has good convergence, and the model and algorithm can meet the requirements of aviation mission planning.

**Key words:** mission planning; route planning; maneuver model; air-to-ground attack

收稿日期:2021-09-15; 修回日期:2022-03-03

通信作者:张方齐, eblis282@163.com

引用格式:朱金冬,张方齐,赵彤,等.任务规划系统机动模型与航线设计[J].航空工程进展,2022,13(4):73-82.

ZHU Jindong, ZHANG Fangqi, ZHAO Tong, et al. Maneuver model and route designing in mission planning system[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(4): 73-82. (in Chinese)

## 0 引言

在空军作战部队中,战勤人员主要使用航空兵任务规划系统进行任务预演与准备。参战人员利用该系统在任务准备阶段进行预先战术任务规划,任务执行后利用该系统进行任务回放与讲评。任务规划系统以上级指挥信息系统下达的空中作战任务指令、基础数据、情报数据等为输入内容,依据统一的规划流程,按照任务指令给定的任务和约束,对任务编队/单机的具体战斗过程进行详细设计。任务规划系统的主要功能包括:战场环境分析、任务协同、航线规划、武器投放规划、机载航电设备使用规划等。飞机的机动模型与上述功能模块间有着密切的联系与参数传递,是航空兵任务规划系统的重要功能模块之一。

以往,受任务规划工作条件限制,传统的航迹规划方法各有不同。黄俊等<sup>[1]</sup>依据飞机性能参数结合经验与试飞数据对飞行航迹的可飞性进行检验,来确定飞机的航迹;杨冲<sup>[2]</sup>、杨莉等<sup>[3]</sup>和何荣茂等<sup>[4]</sup>将飞机在三维空间的机动简化为直线与曲线的相互组合,形成航迹,通过特定条件假设解飞行运动方程的方式进行航迹计算;滕鹏等<sup>[5]</sup>利用样条插值方法拟合飞机航迹,得到符合作战、机动意图的航迹。传统方法受当时研究与使用条件的局限,或在精度上已不能满足当下的任务规划需求,或无法引入相应的环境约束。因此,需要针对上述不足开展更详细地航线规划算法设计。

本文结合航空兵任务规划系统航迹规划功能的需求,分析对地攻击航线的机动特点与约束条件,将动力学建模与控制指令模型相结合,通过环境约束确定关键航路点信息,利用单纯形搜索法<sup>[6]</sup>与反向积分<sup>[7]</sup>对最优航线进行求解,实现飞机对地攻击航迹从跃升到俯冲投弹再到退出的全航迹设计与优化。

## 1 航线规划在任务规划中的应用

### 1.1 航线规划概述

飞行任务规划技术以数字地图作为载体,将飞行任务可能涉及到的区域、点、线目标等内容放

置在地图上,并以图标的方式直观显示。系统提供对这些目标的属性访问功能,使用时,操作人员设置飞行中关键点为航路点,分别设置航路点和各航段的高度、速度、进入方式及剩油量等信息,根据点目标的属性,最终设定在各航路点和航段上能由机载综合控制系统自动执行的巡逻、加油、攻击等飞行任务。这样,航路点按顺序连线就组成了任务航线。

基于航路点生成的航线即为任务航线的基本形式。为保证任务航线的可行性,以航路点信息、飞机任务构型信息作为输入,通过任务规划系统设置给飞机的飞行力学模型赋值。由飞机飞行力学模型解算出实际飞行航线的状态信息,包括飞机的位置坐标、速度、航向、姿态、飞行时间、油耗等详细信息,可直观地体现出飞机执行本次任务的详细情况与自身资源利用、消耗情况。作战人员针对任务目标,可以设计执行任务的多种航线方案,方便快速地开展各种飞行方案的对比与权衡。

### 1.2 对地攻击航线规划

对地攻击的任务规划是航空兵任务规划系统典型的使用场景,使用的频率非常高。

现代战争中,对地攻击的手段已多种多样,历次现代实战经验证明,对地攻击的精确性一直是空军追求的目标。同时,飞机尤其是具备高机动能力的战斗机,更是在突破敌方防空阵地,实现大纵深精确打击任务中具备先天的优势<sup>[8]</sup>。

歼击机执行对地攻击任务时,主要威胁是敌防空体系。同时,复杂的地形环境成为了任务与航线的约束。这些威胁与约束是相互关联的,任务规划需要在飞行高度和飞行速度之间进行权衡,以降低与地面碰撞的概率,从而降低被发现和被击毁的概率。在执行低空突防任务时,为充分利用敌方防空炮火与雷达的“死区”,达到尽快接近目标或突破防空网的目的,多数情况下会选择低空掠地突防的方式,此时复杂地形则会增加飞机的撞地、撞山风险。在飞机接近任务目标时,若无地形或防空威胁约束时,可能会采用平飞投弹的方式进行轰炸;若存在地形或防空威胁,飞机多会利用快速“拉起—俯冲—瞄准—投弹—改出”的方式进行对地攻击。前者相对约束较少,飞机可

以较轻松地完成打击任务;后者除上述提出的地形与威胁约束外,在航向与机动的规划过程中还要考虑:

(1) 空面武器对投放点高度、方位、速度的约束;

(2) 武器对瞄准时间要求的约束;

(3) 飞机机动能力极限与如何实现复杂飞行轨迹的关系约束;

(4) 在满足上述条件的情况下,如何使得轨迹达到最优或近似最优。

同时,对地攻击任务航线规划还要满足燃料限制和航程约束。在降低被摧毁和撞地这两种事

$$\begin{cases} m \frac{dv}{dt} = P \cos(\alpha + \varphi_p) \cos \beta - Q - G \sin \theta \\ mV \frac{d\theta}{dt} = P [\cos(\alpha + \varphi_p) \sin \beta \sin \gamma_s + \sin(\alpha + \varphi_p) \cos \gamma_s] + Y \cos \gamma_s - Z \sin \gamma_s - G \cos \theta \\ -mV \cos \theta \frac{d\Psi_s}{dt} = P [-\cos(\alpha + \varphi_p) \sin \beta \cos \gamma_s + \sin(\alpha + \varphi_p) \sin \gamma_s] + \\ Y \sin \gamma_s + Z \cos \gamma_s \end{cases} \quad (1)$$

当飞机做无侧滑飞行时,  $Z=0, \beta=0$ , 式(1)可 写为

$$\begin{cases} m \frac{dv}{dt} = P \cos(\alpha + \varphi_p) - Q - G \sin \theta \\ mV \frac{d\theta}{dt} = [P \sin(\alpha + \varphi_p) + Y] \cos \gamma_s - G \cos \theta - mV \cos \theta \frac{d\Psi_s}{dt} = [P \sin(\alpha + \varphi_p) + Y] \sin \gamma_s \end{cases} \quad (2)$$

设  $n_x$  为气流坐标系下的切向过载,与飞行速度方向一致时为正;  $n_y$  为气流坐标系下的法向过载,与升力方向一致时为正<sup>[10]</sup>。

$$\begin{cases} n_x = \frac{P \cos(\alpha + \varphi_p) - Q}{G} \\ n_y = \frac{P \sin(\alpha + \varphi_p) + Y}{G} \end{cases} \quad (3)$$

进一步,航迹运动模型可写成

$$\begin{cases} \dot{V} = n_x - g \sin \theta \\ \dot{\theta} = \frac{n_y \cos \gamma_s - g}{V} \\ \dot{\Psi}_s = \frac{n_y \sin \gamma_s}{V \cos \theta} \end{cases} \quad (4)$$

可见,飞机机动模型控制利用油门与推力的映射可实现  $n_x$  的控制,进而改变速度;利用拉杆与推杆可实现俯仰方向  $n_y$  的控制,进而改变纵向姿态角与运动方向;利用左右压杆可改变滚转角,实现滚转的控制。设油门杆控制函数为  $f(T_c)$ ,操纵杆纵向控制函数为  $f(H_c)$ ,操纵杆横向控制函数为  $f(\omega_c)$ ,可建立控制量与模型参数的映射关系:

故的同时,必须考虑到任何复杂机动都会增加燃料消耗并减少飞行器的航程。

## 2 航迹规划机动模型

### 2.1 飞机航迹的质点模型

航线规划分析关注飞行轨迹变化,应用飞机质点方程进行动力学与运动学建模。采用BTT(Bank-to-Turn)方式,利用过载和滚转角对飞行轨迹进行控制。飞机的质心动力学方程一般在航迹坐标系中给出,无侧滑时其动力学方程组的标量形式<sup>[9-10]</sup>为

$$\begin{cases} f(T_c) \rightarrow n_x \\ f(H_c) \rightarrow n_y \\ f(\omega_c) \rightarrow \gamma_s \end{cases}$$

飞机的运动学方程一般在地轴系下表示,具体形式<sup>[11]</sup>如下:

$$\begin{cases} \frac{dx_g}{dt} = V \cos \theta \cos \Psi_s \\ \frac{dy_g}{dt} = V \sin \theta \\ \frac{dz_g}{dt} = -V \cos \theta \sin \Psi_s \end{cases} \quad (5)$$

考虑到风的修正影响,运动方程可表示为

$$\begin{cases} \frac{dx_g}{dt} = V \cos \theta \cos \Psi_s + V_{wxd} \\ \frac{dy_g}{dt} = V \sin \theta + V_{wyd} \\ \frac{dz_g}{dt} = -V \cos \theta \sin \Psi_s + V_{wzd} \end{cases} \quad (6)$$

考虑温度修正时,可由式(7)修正,温度的单位是K。

$$\begin{cases} T = 288.15 - 0.0065H & (H \leq 11000 \text{ m}) \\ T = 216.65 & (11000 \text{ m} \leq H \leq 20000 \text{ m}) \\ T = 216.65 + 0.001(H - 20000) & (20000 \text{ m} \leq H \leq 32000 \text{ m}) \end{cases} \quad (7)$$

## 2.2 飞机质点模型的控制

飞机模型建模用面向对象的方式设计,在每个仿真周期中,利用控制量实现飞机对象的状态改变,进而实现飞机航迹解算。飞机航迹机动模型对象中主要包括飞机本体数据、飞机动力学模型、飞机运动学模型、控制变量和计算过程的中间量。通过航线规划及优化算法产生操纵指令,改变飞机对象的状态,完成航线的规划<sup>[12]</sup>。

依据对飞机飞行控制过程的分析,采用“分层级”的方式进行机动模型建模,采用功能模块化的形式实现(如图1所示)。通过组合各种功能模块,实现拼接完整的机动动作。从模型软件的机动性能运算逻辑角度,软件解算方法的层次可分为:机动性能模型层、子机动模型层和操纵模块层。最基础的操纵模块的组合构成子机动模型函数,子机动函数的组合构成机动性能模型函数。

环境参数	飞机状态量	控制量	控制方法	辅助量
大地高度 风速矢量 当地温度 标准大气压 大气密度 音速常数 重力加速度	时间 重量 油耗 位置坐标 速度 航迹角 姿态角	法相过载 滚转角 油门杆量 舵面构型 减速板 刹车 外挂构型 .....	俯仰控制函数 滚转控制函数 油门控制函数 速度控制函数 姿态控制函数 状态重置函数 飞机方程	速度类型量 姿态角辅助量 跑到坡度 地面支撑力 地面摩擦系数 角度转换常数 .....

图1 航迹机动模型对象示意图

Fig. 1 The schematic diagram of trajectory maneuvering model object

“机动性能模型层”主要包括进入方式机动性能和退出方式接口。进入方式机动性能包括:拉起平飞进入、侧跃升俯冲进入、直接跃升进入、侧跃升平飞进入、直接跃升平飞进入、水平拉起进入。退出方式接口包括:水平转弯退出、爬升退出、空间转弯退出、改平爬升退出、改平水平转弯退出、改平空间转弯退出。

子机动模型层是飞机的常规战术机动集合,用于完成飞机的基本战术机动,包括:爬升退出、俯冲拉平、俯冲拉平退出、在水平面内转过角度、在水平面内转过角度退出、俯冲拉起进入、改平转

弯退出、改平爬升退出、改平空间转弯退出、空间转弯、空间转弯退出、按时间直线飞行、垂直转弯。

本层程序由基础的操纵模块组成,均为基础的简单油门、操纵杆操作程序模块。操纵模块是拼接子机动模型的基础单元,主要包括:初始平飞模块、按时间直线飞行模块、滚转模块、拉杆加载模块、保持模块、推杆卸载模块、回滚模块、完成模块。

## 3 航线规划模型的求解算法

### 3.1 飞行控制过程分析

为降低航线规划中投弹机动的复杂程度,将完整的制导/非制导炸弹投放过程分为进入段、投放段和退出段。同时,进入、投放和退出过程依然是通过一系列动作组合而成的,在机动动作设计过程中,如何实现好这些机动是非常重要的。良好的机动动作设计不仅有利于更加精确地对飞机的机动能力进行评估,而且可以为飞行员的操纵提供参考,得到更优化、高效的规划航线。

在实际的飞行控制过程中,飞行员的控制主要是通过推杆和拉杆来改变飞机的航迹爬升角度;通过左右压杆改变滚转角度,建立坡度,实现盘旋或转弯;通过油门控制发动机推力,实现飞机的速度的变化。在本文的设计中,以纵向过载的变化模拟飞行员的推杆和拉杆动作,以滚转角的变化模拟飞行员的左右压杆动作,以推力的变化模拟油门操纵动作。为了更加精确地模拟飞行员的操纵动作,考虑了过载的建立过程、卸载过程、滚转角的建立与恢复过程。过载增加和减小的时间和滚转角建立时间可以从外部输入,以增强实际应用时的适用范围。

在飞机模型中,各个机动动作都是靠飞行员推杆、拉杆、压杆和控制油门来实现,但是,推杆、拉杆、压杆后保持多长时间是准确实现各个机动动作的关键,如果推杆、拉杆和压杆保持的时间掌握不好,则很难实现好整个完整动作,可能会在某些关键点上不满足预期的要求,致使整个机动过程不能满足投弹条件要求,从而导致导弹发射失败。为了满足各个机动的预期要求,机动动作仿真时,采用参数优化手段对推杆、拉杆和压杆时间以及杆量进行优化<sup>[12]</sup>。

### 3.2 机动过程优化原理

针对飞机与目标的集合位置关系,不同的航线规划会产生不同的效果。机动过程的优化是使整个投弹攻击过程效果最大化,同时时间最小化<sup>[13]</sup>。

根据微分几何学,空间几何曲线可以由  $\text{arc}[\theta_{\text{ini}}, \varphi_{\text{ini}}, \tau(t), \kappa(t), h(t)]$  唯一确定。其中,挠率  $\tau$  与曲率  $\kappa$  可以视为飞机法向过载与滚转角的函数。根据给定的  $\theta_{\text{ini}}, \varphi_{\text{ini}}, \theta_{\text{end}}, \varphi_{\text{end}}, h$  可以确定出完成一个特定轨迹所需的操作。

决定飞行轨迹的变量较多,机动过程优化问题可转化为一个多变量约束下的轨迹优化问题。

以“侧跃升平飞进入—俯冲投放—水平转弯退出”这一典型复杂对地投弹机动(简称 Pop-Up 机动)为例,Pop-Up 机动示意图如图2所示,其飞行机动动作复杂,轨迹约束点多,且约束点要求严格。在执行机动规划时,不仅需要给出各关键约束点的位置信息,还需给出飞行员的具体操纵<sup>[14]</sup>。针对问题特点,可选用单纯形搜索(Nelder-Mead)算法进行优化。

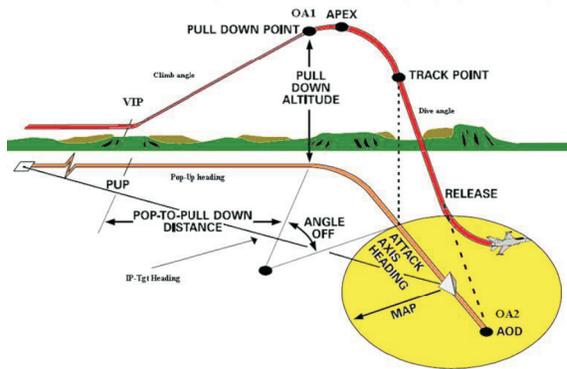


图2 Pop-Up 机动示意图

Fig. 2 The sketch map of Pop-Up maneuvering

### 3.3 单纯形搜索算法

单纯形搜索算法是一种解决在多变量空间中寻找或搜索路径,达到解算目标函数在多维空间中最大值与最小值的方法。该方法在很多相关领域中用于解决导数难以确定的非线性优化问题。

$n$  维的 Nelder-Mead 包括  $n+1$  个测试点,组成一个单纯形(simplex),计算每个点的目标函数值,目的是找到一个新的测试点代替旧的测试点,迭代进程。最直接的方法是利用前  $n$  个点的均值(即

质心)的反射点,替换最差的点。如果此反射点比当前点更好,可继续在反射点的上方延伸寻找;如果不及当前点,就将所有点向一个更好的方向收缩<sup>[15]</sup>。

单纯形搜索算法的实现可按下述方式进行<sup>[15]</sup>。若求函数  $f(x)$  的最小值,  $x \in R$ 。目前测试点有  $x_1, x_2, \dots, x_{n+1}$ 。

第一步,将各个测试点的函数值从小到大排列:

$$f(x_1) \leq f(x_2) \leq \dots \leq f(x_{n+1})$$

第二步,计算质心  $x_0$ , 等于前  $n$  个  $x$  的平均值。

第三步,计算反射点

$$x_r = x_0 + \alpha(x_0 - x_{n+1}) \quad (\alpha > 0)$$

(1) 如果  $f(x_r)$  优于第二差的点,但劣于目前最好的点,则

$$f(x_1) < f(x_r) < f(x_n)$$

将  $x_{n+1}$  替换成  $x_r$  获得新的单纯形,回到第一步。

(2) 如果  $f(x_r) \leq f(x_1)$ , 那么,在这一方向上延伸寻找扩展点

$$x_e = x_0 + \gamma(x_r - x_0) \quad (\gamma > 1)$$

若  $f(x_e) < f(x_r)$ , 用  $x_e$  替代  $x_{n+1}$ , 回到第一步; 否则,用  $x_r$  替代  $x_{n+1}$ , 回到第一步。

(3) 如果  $f(x_r) \geq f(x_n)$ , 接着计算紧缩点:

$$x_c = x_0 + \rho(x_{n+1} - x_0) \quad (0 < \rho < 0.5)$$

如果  $f(x_c) < f(x_{n+1})$ , 用  $x_c$  替代  $x_{n+1}$ , 回到第一步。

(4) 如果以上条件都不满足,将  $x_1$  以外的点全部按如下方式替换:

$$x_i = x_1 + \sigma(x_i - x_1)$$

返回第一步。

(5)  $\alpha, \gamma, \rho, \sigma$  分别称为反射系数、扩张系数、紧缩系数和收紧系数,根据工程经验,常取  $\alpha=1, \gamma=2, \rho=0.5, \sigma=0.5$ 。

(6) 终止条件:标准离差或其他数值小于预定误差或迭代次数到达指定的阈值。

## 4 飞机机动航线设计

一个典型的 Pop-Up 对地攻击航线机动按飞机飞行轨迹可分解为“直线飞行”“空间转弯”“俯冲后改平”“水平转弯”4 部分,该机动过程的投影

图如图 3 所示,其中,IP、AP、Roll in、APEX、TRACK、REL 等为机动航线的关键点。在进行任务航线规划时,指挥员依据情报、地形等数据,确定关键点位置和飞机当时的飞行状态,这样就可以描绘航线大致走向,设计出既满足航线安全,又满足对地攻击需求的初步航线。用这种方法,将地形约束、敌方威胁约束等条件转换为航线设计的关键点约束。

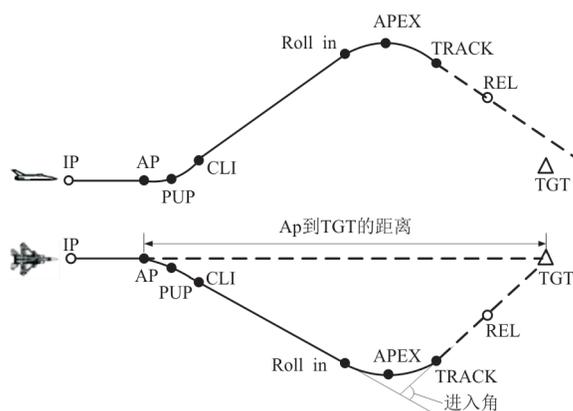


图 3 Pop-Up 攻击航线关键点

Fig. 3 The key points of Pop-Up trajectory

攻击机从 IP 点出发,水平飞行到 AP 点后以一定过载拉起,建立指定的爬升角后飞行一定水平距离,在 Roll in 点滚转,同时以一定过载将机头拉低,期间达到整个航线的最高点 APEX,待达到投弹所需俯冲角后回滚,在 TRACK 点处飞机要形成对目标一定时间的稳定跟踪,在 REL 点投放炸弹后以一定过载拉起改平,随后在水平面做水平转弯退出机动。飞机从 Roll in 点至 TRACK 点要求在水平面及铅垂面同时协调地转过一定的角度。

特定的攻击航线均可以分解为一系列子机动过程。在进行算法拼接时必须考虑航线段光滑过度的问题,即保证相邻两个机动参数在连接点处是连续的。以飞行员以  $3g$  过载从水平拉起至指定俯仰角的航线规划为例,飞行员的操纵应该是拉杆建立过载,待过载达到  $3g$  后维持一定的时间,随后以一定速率推杆使飞机姿态达到特定的俯仰角。在规划中,为了更加精确地模拟飞行员的操纵动作,反映实际飞行中加载及卸载过程、滚转与改平过程,引入法向过载变化率和滚转角变化率。其次,为保证在建立、维持、消除过载/滚转一系列

操纵过程后飞机恰好能完成特定的轨迹,规划时必须采用优化手段对操纵时间及操纵量的大小进行优化。

考虑航线约束的问题,为了保证非制导炸弹的毁伤效果,必须使飞机在投放炸弹时有足够的速度、瞄准时间及规定的俯冲角,因此上述三个变量是航线规划的强约束<sup>[16]</sup>。

综上,关键点的位置,瞄准点的飞机姿态、瞄准时间等约束都集中在整个航线的后段,而航线进入前的位置,姿态和时间的约束较宽松,这就如同一个一端固定的绳子,另一端位置自由性很高。如果正向去规划航线,则要以强约束为优化条件确定航段的进入条件。为提高算法效率,针对投弹点之前的机动过程,引入对时间反向积分<sup>[7]</sup>(时间步长为负)的方式进行计算,而投弹点之后的机动采用正向积分。优化过程的收敛速度可以大幅提高。

## 5 机动航线规划的分析与仿真

Pop-Up 机动航线中,从 Roll in 点到 TRACK 点需要进行一次空间转弯。在进行空间转过一定角度的同时,要保证飞机飞到空间中 TRACK 点时,满足航向对此时飞机速度、姿态角的约束。这部分优化是 Pop-Up 机动航线的关键部分,也是决定对地投弹效率与效果的关键。

从 Roll in 点处一边爬升一边滚转,到达 TRACK 点时要达到给定的航迹爬升角和航迹偏航角,该过程需要拉杆和压杆动作合理组合,并保持合理的时间才能实现。要实现该动作,可以有多种不同的操纵组合方式,为了与飞行员的操纵习惯相一致,采用先滚转达到一定滚转角  $\phi_c$  后,再拉杆加载到指定过载指令,保持一段时间  $t_l$  后,推杆卸载,然后回杆到中的动作组合。在该机动过程中,假设滚转角速度  $\dot{\phi}$ 、过载指令  $n_{zc}$  及加载和卸载时间  $t_c$  已知,需要优化的变量有滚转角  $\phi_c$  和拉杆保持时间  $t_l$ 。滚转角与过载指令建立和保持时间示例如图 4 所示。

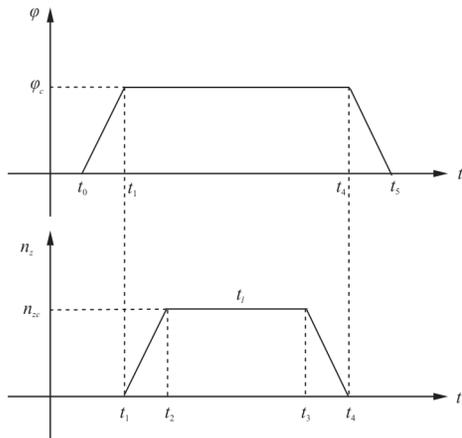
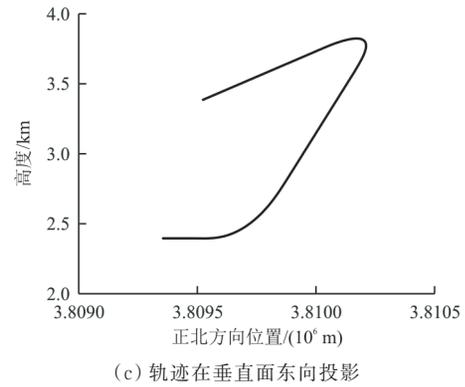


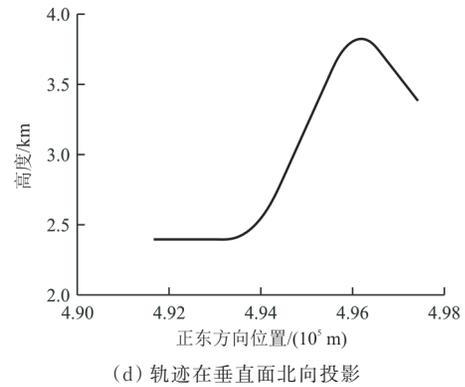
图 4 滚转角与过载指令建立和保持时间  
Fig. 4 The establishing and holding time of roll angle and overload command

仿真条件描述:某飞机起始条件包括,总质量 21 000 kg;位置坐标按照(北,东,天)的方式描述,单位为 m,飞机起始点坐标为(3 820 000, 480 000, 2 400),目标点坐标为(3 808 520, 500 000, 1 383),炸弹投放点坐标为(3 809 520, 497 425, 3 383);投放点速度 200 m/s,俯冲角 $-20^\circ$ ,瞄准时间 5 s。

机动航线规划的计算算例结果如图 5~图 8 所示。

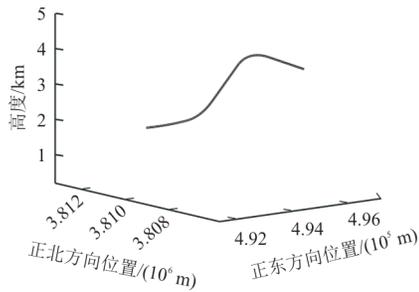


(c) 轨迹在垂直面东向投影

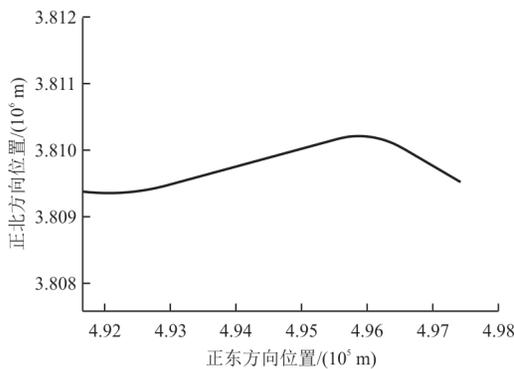


(d) 轨迹在垂直面北向投影

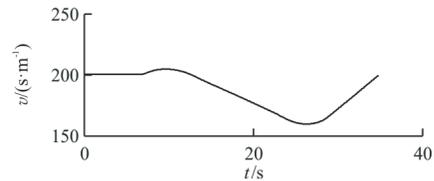
图 5 Pop-Up 机动轨迹  
Fig. 5 The trajectory of Pop-Up maneuvering



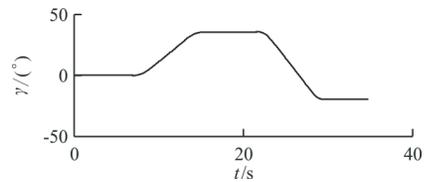
(a) Pop-Up 机动三维轨迹



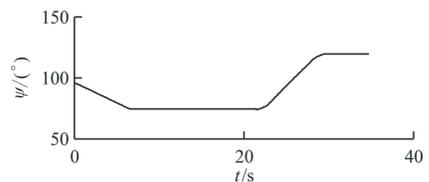
(b) 轨迹在水平面的投影



(a) 飞行速度随时间变化曲线



(b) 航迹倾角随时间变化曲线



(c) 航迹偏角随时间变化曲线

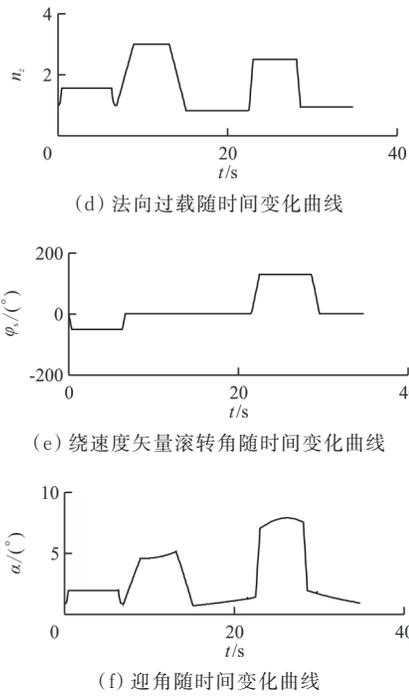


图 6 Pop-Up 机动的参数变化曲线

Fig. 6 The curves of parameters of Pop-Up maneuvering

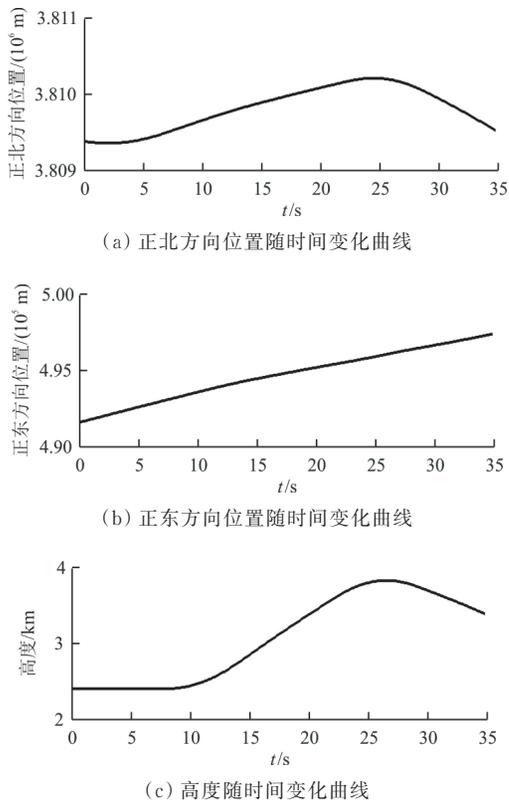
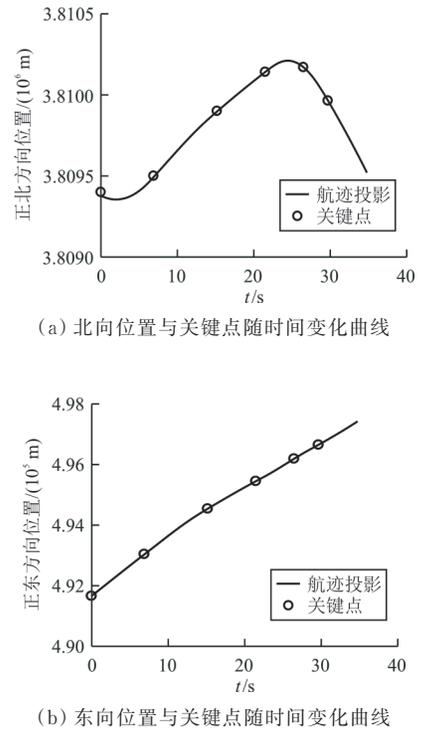


图 7 Pop-Up 机动位置随时间变化曲线  
Fig. 7 The change curves of position with time of Pop-Up maneuvering



(b) 东向位置与关键点随时间变化曲线

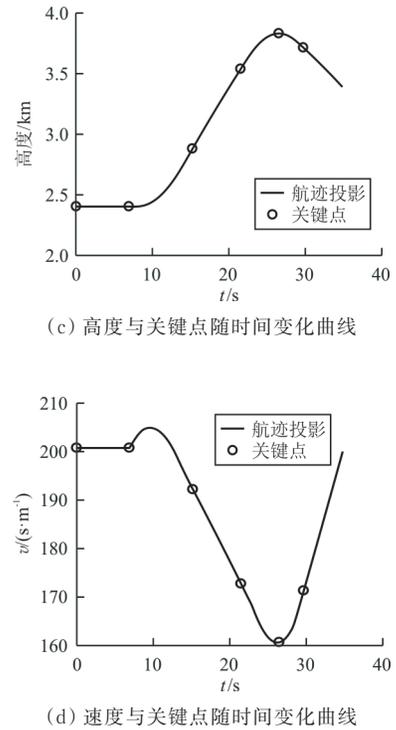


图 8 Pop-Up 机动中关键点位置与速度  
Fig. 8 The position and speed of the key points of Pop-Up maneuvering

需要注意的是,应用反向积分方式计算时,所得航线信息为“从后向前”的计算顺序,而飞机重

量消耗则与正向积分消耗一致,这是因为反向积分给定的初始位置量实则为航线的结束点状态,而重量初始值亦为航线结束时的“剩余重量”。故需要利用牛顿法进行试算,以真正的初始重量为目标迭代出真实的剩余重量。

从计算结果和工程经验可知,只要飞机机动相对位置合理,关键点约束条件选择正确,都可以很好地得到优化的机动航线。

## 6 结 论

Pop-Up 机动是空对地攻击航线中的一种较复杂机动。航空兵任务规划系统的航迹规划部分利用本文模型与优化算法实现了较好的航迹规划结果,且具有较好的收敛效果,解算时间满足实际应用要求。本文的设计方案可作为航迹规划的一种有效解决方案。

### 参 考 文 献

- [1] 黄俊,滕鹏,于雷,等. 战斗机航迹可飞性过载检验算法[J]. 飞行力学, 2008, 26(3): 22-25.  
HUANG Jun, TENG Peng, YU Lei, et al. Algorithm of overloading verification for some fighter's trajectory [J]. Flight Dynamics, 2008, 26(3): 22-25. (in Chinese)
- [2] 杨冲. 一种二维平面运动目标航迹仿真方法[J]. 陕西科技大学学报, 2014, 32(3): 153-157.  
YANG Chong. Simulation method for tow-dimensional plan moving target track[J]. Journal of Shaanxi University of Science and Technology, 2014, 32(3): 153-157. (in Chinese)
- [3] 杨莉,安红. 作战飞机机动飞行航迹仿真建模研究[J]. 微计算机信息, 2011, 27(11): 132-134.  
YANG Li, AN Hong. Research on combat airplane maneuvering flight path simulation [J]. Microcomputer Information, 2011, 27(11): 132-134. (in Chinese)
- [4] 何荣茂,邱超,王敏. 平面假设条件下基于运动方程的飞机航迹仿真[J]. 舰船电子工程, 2009, 29(1): 122-124.  
HE Rongmao, QIU Chao, WANG Min. Flight path simulation based on movement equations under assumption of earth's surface as reference [J]. Ship Electric Engineering, 2009, 29(1): 122-124. (in Chinese)
- [5] 滕鹏,黄俊,张斌. 三维航迹的B样条曲线拟合算法[J]. 火力与指挥控制, 2007, 32(9): 115-118.  
TENG Peng, HUANG Jun, ZHANG Bin. Study on the three-dimensional trajectory optimization by using the method of B-spline curve fitting [J]. Fire Control and Command Control, 2007, 32(9): 115-118. (in Chinese)
- [6] 刘劲宏,桑吉章,刘宏康. 基于单纯形法的TLE轨道确定[J]. 空间科学学报, 2020, 40(6): 1102-1108.  
LIU Jinhong, SANG Jizhang, LIU Hongkang. TLE orbital determination based on simplex method [J]. Chinese Journal of Space Science, 2020, 40(6): 1102-1108. (in Chinese)
- [7] 简爱平,唐硕,李小龙. 逆时间反向积分方法研究[J]. 战术导弹技术, 2000(2): 57-63.  
JIAN Aiping, TANG Shuo, LI Xiaolong. Study of inverse-time integration method [J]. Tactical Missile Technology, 2000(2): 57-63. (in Chinese)
- [8] 刘新艳,黄显林,吴强. 对地攻击任务规划系统的功能体系框架设计[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(7): 1013-1016.  
LIU Xinyan, HUANG Xianlin, WU Qiang. Function architecture framework study on air-to-ground attack mission planning system [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(7): 1013-1016. (in Chinese)
- [9] 张方齐,荆武兴,范金辉. 高超声速导弹编队动力学与控制[C]// 2010中国制导、导航与控制学术会议. 上海: 中国航空学会, 2010: 946-950.  
ZHANG Fangqi, JING Wuxing, FAN Jinhui. The dynamics and control of hypersonic missile formation [C]// 2010 China Guidance, Navigation and Control Conference. Shanghai: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2010: 946-950. (in Chinese)
- [10] 《飞机飞行性能计算手册》编写组. 飞机飞行性能计算手册[M]. 西安: 飞行力学杂志社, 1983: 2-3.  
Writing Group of Aircraft Flight Performance Calculation Manual. Aircraft flight performance calculation manual [M]. Xi'an: Flight Dynamics Magazine, 1983: 2-3. (in Chinese)
- [11] 吴奇科,姚登凯,周一叶,等. 歼击空战机动飞行航迹建模仿真研究[J]. 计算机仿真, 2016, 33(10): 71-81.  
WU Qike, YAO Dengkai, ZHOU Yiye, et al. Research on maneuvering flight trail simulation of air combat [J]. Computer Simulation, 2016, 33(10): 71-81. (in Chinese)
- [12] 张镭. 飞行模拟器飞行仿真系统建模与软件实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.  
ZHANG Lei. Flight simulation modelling and software development for flight simulator [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. (in Chinese)
- [13] NILS-HASSAN Q, TORBJÖRN L. Military aircraft mission planning efficient model-based metaheuristic approaches [J]. Optimization Letters, 2015, 9: 1625-1639.
- [14] 黄达. 基于约束模型的作战飞机战术模板生成和应用方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2009.  
HUANG Da. Research on generation and application of combat aircraft tactical template based on constraint model [D]. Changsha: National University of Defense Technolo-

- gy, 2009. (in Chinese)
- [15] 张婷, 韩璞, 刘森. 一种基于单纯形搜索的混合分布估计算法[J]. 计算机仿真, 2016, 33(9): 265-267.  
ZHANG Ting, HAN Pu, LIU Miao. A hybrid optimization and estimation method combining simplex search of distribution algorithm [J]. Computer Simulation, 2016, 33 (9) : 265-267. (in Chinese)
- [16] 鲁艺, 张淘沙, 俞利新, 等. 作战飞机对地攻击任务规划系统概念研究[J]. 战术导弹技术, 2014(6): 50-55.  
LU Yi, ZHANG Taosha, YU Lixin, et al. Conceptual study of air-to-round attack mission planning system of combat aircraft[J]. Tactical Missile Technology, 2014(6): 50-55. (in Chinese)

#### 作者简介:

朱金冬(1980—),男,硕士,研究员。主要研究方向:空战战术战法,体系对抗,任务规划。

张方齐(1983—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:飞行器总体,飞行力学,效能与仿真,任务规划。

赵彤(1989—),男,博士研究生。主要研究方向:飞行力学,飞行控制,飞行器系统参数辨识。

王景志(1984—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:体系对抗设计。

田静(1973—),女,学士,高级工程师。主要研究方向:有人机任务规划。

(编辑:马文静)

(上接第72页)

- WANG Nan, ZHONG Yu. Thoughts on the civil-military integration development of aviation equipment base maintenance[J]. Science and Technology & Innovation, 2020(7): 95-96,98. (in Chinese)
- [7] 战希臣, 李文立, 于德水. 航空装备军民融合技术保障管理信息化平台构建研究[J]. 中国管理信息化, 2020, 23(5): 180-181.  
ZHAN Xichen, LI Wenli, YU Deshui. Research on the construction of aviation equipment military civilian integration technology support management informatization platform [J]. China Management Informatization, 2020, 23 (5) : 180-181. (in Chinese)
- [8] 路旭, 赵德勇, 胡玉清. 合同商保障是我军装备保障的发展趋势[J]. 国防技术基础, 2010(2): 7-10.  
LU Xu, ZHAO Deyong, HU Yuqing. Contractor support is the development trend of military equipment support [J]. Technology Foundation of National Defence, 2010(2): 7-10. (in Chinese)
- [9] 方炜, 校利敏, 杨步, 等. 民参军知识转移影响因素实证研究——基于军民融合协同创新视角[J]. 科学学研究, 2019, 37(4): 664-678.  
FANG Wei, XIAO Limin, YANG Bu, et al. An empirical study of influencing factors on civil: involved military knowledge transfer—a perspective of civil-military integration collaborative innovation [J]. Studies in Science of Science, 2019, 37(4): 664-678. (in Chinese)
- [10] 魏龙, 党兴华. 惯例复制与知识转移: 作用机制的权变条件研究[J]. 运筹与管理, 2020, 29(1): 86-95.  
WEI Long, DANG Xinghua. Study on the relationship between routines replication and knowledge transfer: mecha-

nism and contingency[J]. Operations Research and Management Science, 2020, 29(1): 86-95. (in Chinese)

- [11] 马腾, 曹吉鸣, 李冲, 等. 基于知识中介的项目型组织知识转移多群体演化博弈分析[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2016, 13(3): 86-96.

MA Teng, CAO Jiming, LI Chong, et al. Knowledge transfer in project-based organization based on knowledge broker: a multi-population evolutionary game analysis [J]. Complex Systems and Complexity Science, 2016, 13(3): 86-96. (in Chinese)

- [12] ZHAO Daozhi, HAO Jiaqin, CAO Cejun, et al. Evolutionary game analysis of three-player for low-carbon production capacity sharing[J]. Sustainability, 2019, 11(11): 1-20.

[13] FRIEDMAN D. Evolutionary game in economics [J]. Econometrica, 1991, 59(3): 637-666.

- [14] 许玲燕, 杜建国, 汪文丽. 农村水环境治理行动的演化博弈分析[J]. 中国人口资源与环境, 2017(5): 17-26.

XU Lingyan, DU Jianguo, WANG Wenli. Evolutionary game analysis on rural water environmental governance [J]. China Population, Resources and Environment, 2017(5): 17-26. (in Chinese)

#### 作者简介:

方炜(1976—),男,博士,教授。主要研究方向:技术创新管理,军民融合。

冯启良(1995—),男,硕士研究生。主要研究方向:技术创新管理,军民融合。

(编辑:丛艳娟)