第20卷 第2期
2013年2月

电 光 与 控 制
Electronics Optics & Control

Vol. 20 No. 2
Feb. 2013

doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2013.02.008

武器投放规划研究

马冬前[1,2]， 李晓俊[3]， 贺建良[1]， 刘 敏[1,2]

(1.中国航空工业洛阳电光设备研究所,河南 洛阳 471009； 2.光电控制技术重点实验室,河南 洛阳 471009；
3.海军装备部,北京 100841)

摘 要：为了能够完成机上实时武器投放的规划,生成攻击航路,实现飞行、打击和退出的一体化设计,提出了武器投放规划的方法。以制导炸弹为例,分析了武器火力控制处理流程、战场威胁模型和航路规划模型,设计了计算武器投放关键点模型和退出航路规划的算法。仿真结果表明算法可行。

关键词：武器投放；制导炸弹；火力控制；航路规划；战斗机

中图分类号：V271.4 **文献标志码**：A **文章编号**：1671-637X(2013)02-0028-05

Researches on Weapon Delivery Planning

MA Dongqian[1,2], LI Xiaojun[3], HE Jianliang[1], LIU Min[1,2]

(1. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471009, China; 2. Science and Technology on Electro-Optical Control Laboratory, Luoyang 471009, China; 3. PLA Navy Armament Department, Beijing 100841, China)

Abstract: In order to implement real-time weapon delivery planning onborad a fighter aircraft, to create a path for attacking, and to realize the path design integrating flying, attacking with quitting, a method of weapon delivery planning was put forward. Taking a guided bomb as an example, the process of fire control for the bomb, the threat model of battlefield and a path-planning model were described. A model was established for calculating the key points of weapon delivery, and an agorithm of quitting path-planning was given. Simulation result showed that the algorithm is feasible.

Key words: weapon delivery; guided bomb; fire control; path-planning; fighter

0 概述

武器投放规划技术首先要求规划的航路能够有效避开敌方雷达的探测以及敌防空武器的攻击,其次要求该航路能够避开可能影响飞行的险要地形、恶劣气候和人工障碍等不利因素,以保证载机的最大生存性。当临时出现事先未知并可能会影响飞行和作战的威胁场、恶劣气候等情况,或者已知的威胁、地形、气候等发生变化时,能够实时规划出新的飞行路径;并且航路上要充分考虑火控攻击的特点,使航路飞行、攻击和退出相结合,提示飞行员在规划的航路上完成全部作战任务。

1 武器火控处理模块

1.1 发现、识别目标的距离计算模型

根据光电传感器的作用距离与其焦距、目标大小和分辨率等级与所占电视行关系[1],有

$$R=\frac{f'}{h\times n}\times H\times N \tag{1}$$

式中:N 为水平分辨率;R 为光电传感器作用距离;f' 为系统焦距;H 为目标大小;h 为 CCD 水平像面尺寸;n 为目标像所占线对数。通过修改 f'、n 的取值,得到光电传感器的发现、识别距离。

1.2 飞机最佳飞行高度和俯冲角度计算方法

作为理论研究,本模型仅建立投放制导炸弹的水平 CCRP 方式下的武器投放规划算法。

由于在同样条件下投弹越高,炸弹飞行距离越远,按照尽可能早地攻击目标的攻击规划原则,首先按照载机和武器匹配的最高高度 h_{max} 完成投弹,把目标点平移到坐标原点,把飞机引导到所匹配的高度,当前的飞机高度为 h_{max},依据式(1)得出的发现、识别距离 R(不考虑天气恶劣的情况),可以得出这个高度下发现、识别距离与目标点的水平距离

$$\Delta D_1=\sqrt{R^2-h_{max}^2} \tag{2}$$

通过武器模拟,得出武器在当前条件下的投弹距

收稿日期:2011-01-07 **修回日期**:2012-02-23

作者简介:马冬前(1980—),男,河南新野人,学士,工程师,研究方向为作战任务规划。

离 ΔD_2，依据实际情况，在不考虑恶劣天气的情况下，传感器的探测识别距离大于武器的投弹距离，则 $\Delta D_1 - \Delta D_2$ 即为飞机发现、识别目标至到达投弹点的水平直线距离，根据常用的攻击速度值 V，即可得出飞机飞过这段距离的最短时间值为

$$t = (\Delta D_1 - \Delta D_2)/V \tag{3}$$

若式(3)所得出的飞行时间大于飞行员最小反应时间，则认为此高度为飞机的可飞高度，结合水平投弹的高度条件和云层高度，在工程应用上，飞机的俯冲角在一个小的角度范围$(-\varphi, +\varphi)$内就可以假设为水平投弹，得到计算飞机最佳飞行高度的流程：

1）选取水平投弹高度条件上界和云层高度的最小值；

2）计算此高度下、俯冲角度为 $+\varphi$ 的 t 值；

3）判断 t 是否大于最小反应时间；

4）若 t 大于最小反应时间，则现有高度为最佳飞行高度值，否则减小俯冲角度，转到 2)，直至俯冲角度小于 $-\varphi$，则减少飞行高度从 2) 计算，直到满足 t 大于最小反应时间。

由上述流程最终可以求出飞机飞行的最佳高度和最佳俯冲角度，由于飞机在攻击阶段速度方向始终指向目标，所以理论上飞机的侧滑角 β 为 0°，规定飞机的俯仰角 θ 上为正，攻角 α 上为正，则飞机要达到最佳俯冲角 λ_a，需要按照式(4)～式(5)来调整姿态。

$$\beta = 0 \tag{4}$$

$$\alpha = \lambda_a - \theta。 \tag{5}$$

2　战场环境处理模块

目前考虑的威胁种类包括：敌地面防空系统、地形威胁和禁飞区。

2.1　敌地面防空系统

为了简化规划复杂度和提高规划的快速性，文献[2]的做法是将地面防空系统等效成圆柱形或圆锥形威胁体，但是这样的处理是不准确的。本文运用如下方法建立地面防空系统模型。

建立地面雷达探测模型。影响雷达探测特性的因素有很多，在这里主要考虑飞行器与雷达的距离以及雷达的性能等因素。当飞行器处于雷达的作用区域内时，可以认为雷达发现目标的概率分布服从泊松分布。因此，雷达探测目标的概率模型可以近似表示为

$$P_R = \begin{cases} e^{-\frac{kr^2}{h} \times \frac{r^4}{R_{R\max}^4}}, & r \leqslant R_{R\max} \\ 0, & r > R_{R\max} \end{cases} \tag{6}$$

式中：$r = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}$，为雷达与飞行器之间的水平距离；$R_{R\max}$ 为雷达的水平最大作用距离；h 为雷达与飞行器的高度差；k 为与雷达特性有关的系数。

建立防空火力系统模型。根据敌防空火力的杀伤区特点，假设火力杀伤目标的概率分布是关于飞行器与防空系统水平距离 r 的泊松分布，并且在 $r = R_{M\max}$ 处的杀伤概率[3]为 e^{-1}，其中 $R_{M\max}$ 为防空系统的最大杀伤距离。敌防空火力对飞行器造成的杀伤概率模型可以表示为

$$P_M = \begin{cases} e^{-\frac{r}{R_{M\max}}}, & r \leqslant R_{M\max} \\ 0, & r > R_{M\max} \end{cases} \tag{7}$$

处于点(x, y, h)处的飞行器在 m 部地面雷达和 n 个敌防空火力联合作用下的发现(攻击)概率应为

$$P_{RT} = 1 - \prod_{i=1}^{m} \prod_{j=1}^{n} (1 - P_{Ri}(r_i, h)) \cdot (1 - P_{Mj}(r_j)) \tag{8}$$

其中：$P_{Ri}(r_i, h)$ 为第 i 部雷达对飞行器的发现概率；$P_{Mj}(r_j)$ 为第 j 个敌防空火力对飞行器造成杀伤的概率。

2.2　地形威胁

地形威胁主要有山峰、土丘，其外形接近圆锥体，故威胁高度以圆来近似。对于实际的地形，可以得到该高度的等高线。如果其外形接近方形，可以找到每个封闭等高线的几何中心，以其为圆心，离圆心最远的点到圆心的距离加上一定的余度为半径，形成威胁圆，当飞行器在地形圆内，则认为威胁概率 $P_D = 1$，否则 $P_D = 0$，如图 1a 所示。如果其外形瘦长，则可以用数个圆叠加来构成威胁模型，如图 1b 所示。

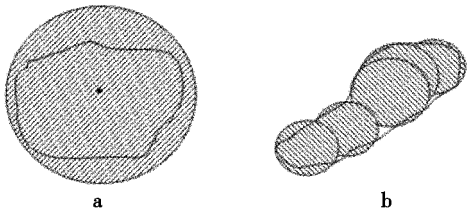

图 1　地形威胁模型

Fig. 1　Threat model of terrain

禁飞区威胁概率 P_J 与地形威胁的处理方法类似，不再赘述。

3　规划算法模块

3.1　改进型 A* 算法

改进型 A* 算法在文献[4－8]中讨论较多，本文不再赘述，只对评价函数的模型进行建模。

A* 算法的特点就在于对评价函数的定义上。在搜索过程中的首要工作是确定被求解问题的状态空间表示，然后是建立评价函数。对于一般的有序搜索，总是选择 f 值最小的节点作为扩展节点。因此，评价函数 f 是根据寻找一条最小代价路径的观点来估算节点的，所以，可考虑每个节点 m 的评价函数值为两个分

量:从起始节点到节点 m 的代价以及从节点 m 到达目标节点的代价可表示为

$$f(M)=g(M)+h(M) \tag{9}$$

式中:M 表示当前的扩展节点;$g(M)$ 表示从初始节点 S 到该扩展节点 M 的最小路径代价,称为代价函数;$h(M)$ 表示从该扩展节点 M 到目标节点 G 的实际最小代价路径的估计值,即启发函数;$f(M)$ 表示从初始节点 S 出发,通过节点 M 到达目标节点 G 的最小代价路径的估计值。

在战术飞行路径优化问题中,为了保证飞机的安全性,飞行路线需要尽量避开地形和障碍物,尽量避免进入恶劣气候和地面火力的威胁,而且还要保证充足的燃油量。若任务紧急,可以穿越敌地面火力威胁区或恶劣气候,但要在满足时间要求的条件下使飞机的威胁代价最小。因此,代价函数中必须包括地面威胁源、地形障碍物、恶劣气候和燃油量等因素对飞行安全造成的威胁。

从起始点到当前点 M 的当前最小代价路径的代价函数 $g(M)$ 可以表示为

$$g(M)=\tau_1\cdot P_{RT}+\tau_2P_D+\tau_3P_J+\tau_4D_M \tag{10}$$

式中:P_{RT} 为飞机被地面威胁源击中的概率;P_D 为飞机撞上障碍物或突出地形的可能性;P_J 为飞机在禁飞区中飞行的危险性;D_M 为从起始点到当前点 M 的已规划路径长度;$\tau_i(i=1,2,3,4)$ 为各项的加权系数。$\tau_4=1$,$\tau_2=\tau_3=M_{\max}$,$M_{\max}$ 指系统所表示的最大数,可以通过调整其他加权系数改变规划模式。

$$h(M)=|x_M-x_G|+|y_M-y_G|+|h_M-h_G| \tag{11}$$

式中:(x_M,y_M,h_M) 表示当前点坐标;(x_G,y_G,h_G) 表示目标点坐标;$h(M)$ 为从当前点到目标点的 Manhattan 距离[8]。

3.2 出发点速度方向限制以及目标点进入方向限制

可以通过在出发点和目标点添加代价很大的虚拟威胁圆(采用飞机的最小转弯半径圆)迫使规划的路径避开该虚拟威胁,从而达到满足最小转弯半径的目的,如图2和图3所示。

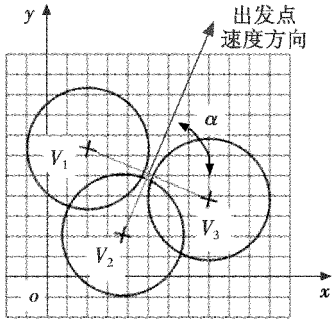

图2 出发点方向确定的处理方法

Fig. 2 A way for determining the confine of start-aspect

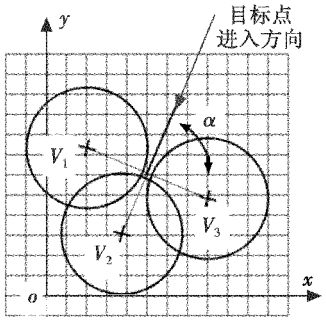

图3 终点方向确定的处理方法

Fig. 3 A way for determining the confine of end-aspect

图2中,虚拟威胁圆 V_2 处于出发速度方向与出发点的延长线上,V_1 和 V_3 两个虚拟威胁圆的中心连线与出发速度方向垂直并通过出发点。

同样的方法可以得到为满足目标进入限制所添加的3个威胁圆的中心坐标。

4 可飞性验证及优化模块

在对飞行航路的搜索过程中需要考虑下文所述的飞机自身性能的约束[5,9-10],以保证飞机能够顺利完成规划的动作。

1) 最小步长。限制了飞行器在开始改变飞行姿态前必须直飞的最短距离。远距离飞行的飞行器通常不希望迂回行进和频繁转弯,以免增加驾驶员的疲劳度和导航误差。

2) 最大偏航角。限制了生成的航路只能在小于或等于预先确定的最大偏航角范围内转弯。

3) 航路距离约束。限制了航路的长度必须小于或等于一个预先设置的最大距离。它相应于有限的燃料供应或在某一固定时间内必须到达目标。

4) 固定的目标点位置进入(接近)方向。限制了航路从某一预先确定的角度接近目标点位置。

5) 最大爬升/下滑角。这是由飞行器自身的机动性能决定的,限制了航路在垂直平面内上升和下滑的最大角度。

6) 飞行高度限制。在通过敌方防御区时,需要在尽可能低的高度上飞行,以减少被探测器发现或被地面防御系统摧毁的概率。但是飞得过低往往会使得与地面相撞的坠毁概率增加。

5 武器投放相关关键点选择

5.1 发现、识别目标点标定

依据发现、识别目标的计算模型,可以得到发现、识别目标距离 R,再由1.2节中的计算方法得出载机的飞行高度 H,则可以求出发现、识别目标距离在水平面上的投影距离

$$R_s = \sqrt{R \times R - H \times H} \tag{12}$$

首先计算以目标点为圆心、R_s 为半径的圆，根据已规划好的航路段，计算发现、识别目标点。

5.2 投放点标定

武器的最大水平射程 A 可以通过武器火控解算模型获取，考虑到武器投弹篮筐特点，可以允许飞行员在投弹中心点的附近有一定的定距偏差，所以真正的投弹点离目标中心的水平距离可表示为

$$R_t = A + \sqrt{E_x \times E_x + E_z \times E_z}/2 \tag{13}$$

式中：E_x 为水平偏差；E_z 为侧向偏差。

首先计算以目标为圆心、R_t 为半径的圆，根据已规划好的航路段，计算投弹点，也即航路规划的终点。

根据文献[11]，篮筐计算模型为

$$E_{X2} = k_1(k_H H + k_V V_1) \tag{14}$$

$$E_{Y2} = k_2 E_x \tag{15}$$

式中：E_{X2} 为射程 x 方向的概率偏差，可达域长度的一半；E_{Y2} 为侧射程 y 方向的概率偏差，可达域宽度的一半；k_1, k_2, k_H, k_V 为实验确定的修正系数；H 为载机投弹高度；V_1 为载机投弹速度。$2E_{X2} \times 2E_{Y2}$ 为制导炸弹攻击区的连续计算可达域。

如图4所示，O 点为计算的武器投放点，T 为要攻击的目标，矩形 $ABCD$ 即为投放篮筐。

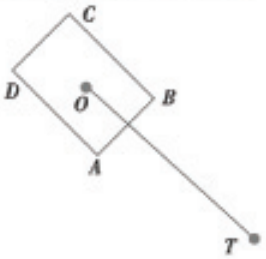

图4　篮筐顶点示意图

Fig. 4　The sketch of basketry point calculation

6 退出航路规划

在退出航路的设计中需要考虑2种因素：1）要满足传感器的工作要求；2）要考虑退出时载机的安全因素。

传感器的工作要求主要是针对那些需要制导的武器，从武器投放到命中目标的过程中，武器需要从传感器得到制导信息，这就要求载机和目标在距离、角度、信息传播载体几个方面需要结合传感器的工作性能指标。

理想的武器投放应该在满足安全性要求的前提下兼顾退出意图，安全性方面可以在威胁建模的基础上选择经过威胁代价最小的退出航路，考虑退出意图是指兼顾完成本次任务后的后续飞行计划的类型，退出意图会反映在退出航路的结束点和退出方向上，这为下一阶段的规划提供了很好的衔接信息。算法流程如下：

1）对于制导武器，首先需要根据传感器的工作范围和武器的制导要求计算退出航路的总长度和转弯点；

2）根据飞行攻击段的飞行航路在转弯点附近设置与飞行航路垂直的障碍；

3）重新设置非目标点的规划终点，目的是可以根据威胁布局使用规划算法自动选择退出方向；

4）使用改进型 A* 算法解算从投弹点到新目标点之间的航路；

5）对新产生的路径进行优化处理。

7 仿真分析

在仿真中，选取 300 km * 200 km 的二维数字地图作为战场，A* 算法栅格选取为 1.5 km，投放的武器为制导炸弹。图5中威胁为随机分布，被攻击的目标为6号地面固定目标。经过仿真，在图5的态势下，规划投放路径耗时不大于0.1 s。

仿真结果表明：该算法能够选择威胁最小的路径投放武器，并且满足机载环境的实时性需要；该算法经过与飞机模拟器和武器模拟器的联试，当飞机飞行到算法中所计算的武器投放点时能够正确投放武器。

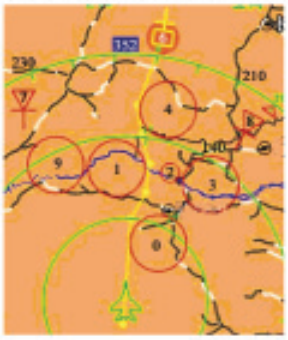

图5　仿真

Fig. 5　Simulation

8 小结

武器投放航路规划是在武器任务规划的基础上，以发挥作战飞机最佳作战效能为目的，充分考虑武器的特性，确定武器攻击的包络，计算武器投放的最优位置，然后再决定飞行器的攻击路径。在规划时充分考虑具有特定终点进入角、进入高度等限制条件的规划方法，满足飞行、攻击和退出的一体化要求，实现整个飞行计划的无缝连接。

参考文献

[1]　白廷柱，金伟其. 光电成像原理与技术[M]. 北京：北京理工大学出版社，2006：391-392.

[2] 马云红,周德云. 飞行器低空突防威胁建模与航迹优化算法[J]. 火力指挥与控制,2004,29(5):31-33.
[3] 张冲,朱凡,张健,等. 飞行器三维突防航迹快速生成方法[J]. 电光与控制,2008,15(12):33-37.
[4] 许立军,鲜勇,杨其,等. 基于 A* 算法的多线程并行航迹规划方法研究[J]. 电光与控制,2009,16(9):33-36.
[5] 王琦. 飞行器航迹规划与航迹评价算法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
[6] 宋建梅,李侃. 基于 A* 算法的远程导弹三维航迹规划算法[J]. 北京理工大学学报,2007,27(7):613-617.
[7] 丁明跃,郑昌文,周成平,等. 无人机飞行器航迹规划[M]. 北京:电子工业出版社,2009:46-57.
[8] 穆中林,鲁艺,任波,等. 基于改进 A* 算法的无人机航路规划方法研究[J]. 弹箭与制导学报,2007(1):297-300.
[9] 李锐,刘占辰,荆献勇. 基于启发式算法的无人机三维航迹规划仿真研究[J]. 电光与控制,2009,16(8):27-31.
[10] 李士波,孙秀霞,李海军. 多约束条件下的飞行器航迹规划算法[J]. 电光与控制,2007,14(2):34-37.
[11] 周志刚. 航空综合火力控制原理[M]. 北京:国防工业出版社,2008:297.

(上接第 22 页)

与激光指示器进行通信,激光指示器的默认状态是关闭的,只有当武器需要时才要求对目标进行照射。对目标方位的量测用来改进武器目标矢量估计,进而通过对卡尔曼滤波的反馈改进自身的惯性状态估计。通过缩短激光照射时间,该算法可以增加激光照射单元的安全系数,也可以提高导航系统中的位置精度。该算法通过改进激光制导武器自身的卡尔曼滤波算法,可以在 GPS 被干扰的环境中对目标进行精确打击。新型增强型宝石路Ⅲ可以进行多目标坐标信息装订,在飞行过程中可以随时更改攻击目标。本文提出的方法为该攻击模式提供了解决方案。

上面讨论的只是各矢量估计的空间坐标和协方差,在任何实际导航系统中,卡尔曼滤波器的状态 x_K 不仅仅包含空间坐标,还包括速度、旋转角、角速度等其他变量。而本算法中使用的位置的协方差 $\boldsymbol{P}_W$ 仅包含武器位置 3 个状态,要从滤波器中提取实时的协方差,以及组合估计后如何将修正后的协方差更新到卡尔曼滤波中也是一个需要解决的问题[8]。关于激光指示器照射总时间减少多少,开关机极限时间以及单指示器照射多目标的可行性问题还需进一步研究。同时,新型的激光制导武器具备了攻击过程中更改攻击目标的能力,如何采用本文提出的减小激光指示器照射时间的算法,还需进一步的改进和研究。

参 考 文 献

[1] 万德钧,房建成,王庆. GPS 动态滤波的理论、方法及其应用[M]. 南京:江苏科学技术出版社,2000.
[2] 秦永元,张洪钺,汪叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 西安:西北工业大学出版社,1998.
[3] 陆彦,周志刚,夏英明. 航空火力控制技术[M]. 北京:国防工业出版社,1994.
[4] 付新华,王健. 多机协同多目标攻击的目标分配和攻击排序[J]. 火力与指挥控制,2006,31(3):75-77.
[5] 周洪仁,敬忠良,王培德. 机动目标跟踪[M]. 北京:国防工业出版社,1991.
[6] 卢建斌,胡卫东,郁文贤. 基于协方差控制的相控阵雷达资源管理算法[J]. 电子学报,2007,35(3):402-408.
[7] SHERLOCK B G, KAKAD Y P. FREEMAN B J. A target tracking algorithm that reduces designation time for laser guided weapons[C]//Proceedings of SPIE, The International Society for Optical Engineering, 2005, 5810:150-157.
[8] 王林,彭辉,朱华勇,等. 应用无人机跟踪地面目标——最新研究进展[J]. 系统仿真学报,2010(s1):172-177.

本刊国内邮发代号为 36－693 欢迎订阅