

考虑截获概率的空空导弹高抛弹道性能研究

中国空空导弹研究院 张明 张蓬蓬 宋琛

目标截获概率是中远距复合制导空空导弹的重要设计指标,是影响空空导弹高抛弹道性能的重要因素。本文提出了一种空空导弹高抛弹道数学模型,结合截获概率计算方法,建立了考虑目标截获概率的空空导弹高抛弹道性能仿真模型。仿真结果显示,目标截获概率限制了高抛弹道最大动力攻击距离,优化高抛弹道参数可增加目标截获概率要求下的最大有效攻击距离。

1 引言

现代战争离不开制空权的支持,中远距空空导弹成为夺取并保持制空权的最主要武器,超视距攻击已逐渐成为现代空战的主要形式^[1]。在不改变发动机推力的情况下,中远距空空导弹采用高抛弹道可大幅提高超视距攻击能力^[2]。为有效提高空空导弹的攻击距离,国内针对高抛弹道制导率开展了大量研究,研究了综合考虑初制导、中制导和末制导三阶段的高抛弹道复合导引律^[3],研究了奇异摄动中制导导引规律^[4]。

对于中远距复合制导空空导弹,中末制导交接时成功截获目标是最终能够命中目标的前提^[5],考虑目标截获概率的有效攻击距离相比不考虑目标截获概率的最大动力攻击距离更具实战意义。目标尚未查到在目标截获概率要求下的高抛弹道研究的相关报道。对此,本文基于一种空空导弹高抛弹道数学模型以及一次弹道即可完成目标截获概率计算的数学模型,建立了考虑目标截获概率的空空导弹高抛弹道性能仿真模型进行研究。

2 数学模型

2.1 高抛弹道数学模型

高抛弹道是一种特种弹道,原理上讲大气密度越小零阻相应减小,导弹攻角的增大又使诱导阻力增加,故存在一个最佳的飞行高度使得空空导弹获得最佳的升阻比^[6]。据此思路设计如下爬高弹道,即爬升段+平飞段的方案飞行弹道以及弹道下降攻击段俯冲攻击目标的导引弹道^[7],弹道示意图如图1所示。

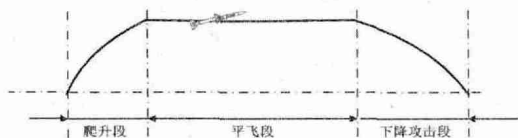


图1 空空导弹高抛弹道分段示意图

在建立高抛弹道数学模型时,为方便研究,采用如下假设:

(1) 将导弹简化为可控制的质点,导弹采用瞬时平衡的假设建立导弹运动和动力学模型^[1]。

(2) 将导弹运动分解为纵向和水平两个平面内的运动。导弹在纵向平面内采用G偏置(GB)中制导导引律,在水平面内为跟踪目标采用比例导引律。

a、爬升段是让导弹快速平稳爬高到平飞高度,给导弹施加纵向平面向上的常值法向过载,经仿真试验,过载取3.5~4.0 g较为合适,爬高段控制方程为:

$$\begin{cases} n_y = 4 \\ n_z = k_z q \dot{\phi}_z |R\dot{\phi}| \end{cases}$$

式中: n_y 、 n_z 分别为弹道坐标系下纵向和侧向的过载, k_z 为比例导引系数, $q\dot{\phi}_z$ 为弹目视线角变化率在横向平面内的投影, $|R\dot{\phi}|$ 为弹目距离变化率。

爬升段结束条件:当攻击距离较近时,导弹爬高会延长飞行时间,不能发挥高抛弹道带来的优势^[3];同时由于气动控制力的约束,还须对平飞高度进行限制,结束条件为:

$$\begin{aligned} \sqrt{r^T \cdot r} &\leq 70000m \\ y_m &\leq 25000m \end{aligned}$$

式中: r - 弹目相对距离矢量。

b、平飞段是高抛弹道的主要飞行段,导弹垂直方向过载的取值与弹道倾角 θ 的相反数成正比,平飞段控制方程为:

$$\begin{cases} n_y = -5\theta \\ n_z = k_z q \dot{\phi}_z |R\dot{\phi}| \end{cases}$$

c、在平飞段末段导弹达到设定的俯冲角度 θ_{fc} 时,在下降攻击段按照广义比例导引法进行俯冲攻击,下降段控制方程为:

$$\begin{cases} n_y = k_y q \dot{\phi}_y |R\dot{\phi}| \\ n_z = k_z q \dot{\phi}_z |R\dot{\phi}| \end{cases}$$

式中: k_y 为比例导引系数, $q\dot{\phi}_y$ 为弹目视线角变化率在纵平面内的投影。

俯冲角度定义 θ_{fc} 为:

$$\theta_{fc} = \tan^{-1} \left(\frac{y_t - y_m}{\sqrt{(x_t - x_m)^2 + (z_t - z_m)^2}} \right)$$

式中: (x_m, y_m, z_m) 为导弹坐标位置, (x_t, y_t, z_t) 为目标坐标位置。

在达到末制导距离前,要求导弹已经开始俯冲攻击,以保证导引头在中末制导交接时能够顺利截获目标,即 $\theta_{fc} \leq \arcsin(H/D)$,在本模型中设定 θ_{fc} 的上限为 20° 。其中, H 为导弹平

飞段高度与初始发射高度之差, D 为导引头末制导探测距离。

2.2 截获概率计算模型

目前空空导弹目标角度截获概率的分析方法主要有方差分析法和蒙特卡洛法^[8,9]。方差分析法通过对影响目标截获概率的各种误差进行分析, 得到总导引头指向误差的标准差, 可以在一次弹道计算中完成目标截获概率计算。利用方差分析法求目标角度截获概率 P 的计算公式为^[10]:

$$P = 1 - \exp(-\frac{d^2}{2\sigma^2})$$

其中 d 为导引头视场宽度, σ 为目标指示误差的均方差。

计算导弹目标角度截获概率时主要需要求解目标指示误差, 设总的目标指示误差为 Φ , 有以下误差源组成:

$$\Phi = \Phi_B + \Phi_A + \Phi_G + \Phi_R$$

式中: Φ_B 、 Φ_A 、 Φ_G 、 Φ_R 分别为对准误差、加速度计测量误差、陀螺测量误差以及机载雷达测量误差引起的目标指示误差。

这4项误差被认为是独立无偏的服从正态分布的随机变量, 故 Φ 也服从正态分布。在进行中远距攻击时, 这几项误差源对目标指示误差的贡献比重不同, 特别是空空导弹采用捷联惯导/卫星组合导航系统、惯导精对准等方法后, 机载雷达测量误差对目标指示误差的影响要远大于其它误差源^[5]。下面主要分析高抛弹道下机载雷达测量误差引起的目标指示误差的计算方法。

导弹采用高抛弹道后中末制导交接时载机、导弹及目标的相对几何位置关系如图2所示。

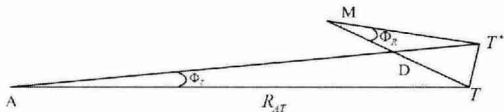


图2 载机、导弹及目标的相对几何关系示意图

图2中, 点 A 代表载机位置, M 代表导弹高抛后位置, T 代表目标真实位置, T^* 代表存在指示偏差后的目标位置, R_{AT} 为载机与目标的距离, Φ_Z 为机载雷达测量误差, Φ_R 为机载雷达测量误差引起的目标指示误差。由于 Φ_Z 、 Φ_R 均为小量, 故 Φ_R 为:

$$\Phi_R \approx \frac{R_{AT}}{D} \Phi_Z$$

其中, Φ_Z 载机自身的固有参数, 而 R_{AT} 与导弹攻击距离成正相关关系, 为减小 Φ_R , 可采取的措施是增加导引头末制导探测距离 D 。导弹在下降攻击段俯视目标时, 目标RCS与俯冲角度有关^[11], 可通过对俯冲角度的优化选择, 增加导引头末制导探测距离。

3 仿真流程

考虑目标截获概率的空空导弹高抛弹道性能仿真流程如图3所示。初始输入参数包括两大类: 一类与载机和目标初始攻击条件有关, 如载机和目标的高度及速度等; 一类是载机、导弹及目标的特有参数, 如载机雷达测量误差、导弹惯导误差等。

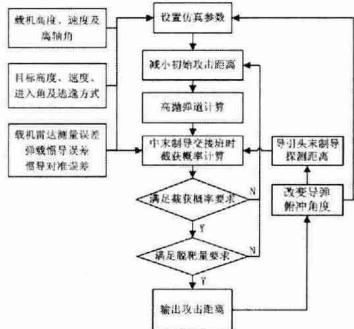


图3 仿真程序流程图

俯冲角度 θ_c 是直接影响目标角度截获以及弹道性能的重要弹道参数。在不同俯冲角度 θ_c 下, 利用空空导弹高抛弹道数学模型以及截获概率计算方法, 以导弹在中末制导交接时满足目标角度截获概率要求及在导弹遇靶时满足脱靶量要求为判定条件, 搜索此俯冲角度下的最大有效攻击距离, 记录仿真结果。

4 仿真分析

设仿真初始条件如下: ①导弹发射时载机和目标的高度均为10 km, 速度均为1.1 Ma, 目标不机动, 导弹相对目标处于迎头攻击态势。②雷达的探测性能为测角精度0.5°, 测速精度50 m/s, 测距精度250 m; 弹载陀螺的零偏为0.3(°)/h, 刻度因数误差为5000 ppm, 加速度计的零偏为 3×10^{-1} g, 刻度因数误差为5000 ppm; 传递对准的精度为航向角0.2°, 俯仰角0.2°, 横滚角0.2°。

表1给出了某飞机在x波段下方位角为0° 时随俯仰角变化的RCS仿真数值。

俯仰角	-5°	-10°	-15°	-20°
Dbm	-3.9	-2.4	-1.2	0.1

表1 随俯仰角变化的RCS仿真数值

设置不同的导弹高抛平飞段高度, 假定俯冲角度为5°, 计算高抛弹道下的最大动力攻击距离以及最大有效攻击距离, 仿真结果见表2。

导弹平飞高度/km	不考虑目标角度截获	目标截获概率不小于0.95	
	最大动力攻击距离/km	最大有效攻击距离/km	导弹末速/m/s
16	145	135	620
18	170	137	720
20	206	138	831

判定条件: 导弹末速不小于600m/s

表2 不同导弹高抛平飞段高度下的两种攻击距离

仿真结果显示, 导弹平飞段高度增加, 最大动力攻击距离增加(距离从145 m到206 km), 但导弹在目标截获概率不小于0.95的要求下, 最大有效攻击距离被压缩在135 km左右。特别在平飞段高度20 km处的飞行末速尚有较大富裕, 目标截获概率压缩了高抛弹道最大动力攻击距离(从206 km到138 km, 压缩幅度达33%)。

设置不同的俯冲角度, 假定导弹高抛平飞段高度为20 km, 计算满足目标截获概率0.95要求下的最大有效攻击距离, X-Y平面攻击弹道仿真曲线如图4所示, 图4中曲线1、2、3、4分别对应俯冲角度5°、10°、15°、20° 的攻击弹道曲线, 弹道仿真结果见表3。

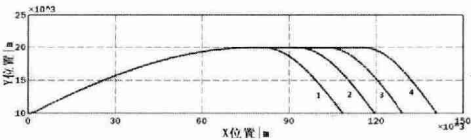


图4 不同俯冲角度下的X-Y平面攻击弹道仿真曲线

俯冲角度/°	导引头探测距离/km	最大有效攻击距离/km	导弹末速/m/s
5	18.0	138	831
10	19.6	153	775
15	21.1	167	726
20	23.2	185	670

判定条件: 目标截获概率不小于0.95, 同时导弹末速不小于600m/s

表3 不同俯冲角度下的弹道仿真结果

仿真结果表明, 在俯冲角度20° 范围内, 导 (下转98页)

现出非常显著地变化,躯体化、偏执两个因子试验后得分有所降低,未呈现出显著地变化。

因子	实验前 (N=120)		全国常模		p
	Mean	Std.	Mean	Std.	
躯体化	1.51	0.36	1.36	0.45	0.382
强迫	1.64	0.43	1.67	0.61	0.069
人际关系	1.64	0.35	1.73	0.63	0.038*
抑郁	1.43	0.36	1.56	0.51	0.043*
焦虑	1.45	0.35	1.47	0.53	0.695
敌对	1.34	0.35	1.52	0.56	0.038*
恐怖	1.46	0.44	1.36	0.42	0.011*
偏执	1.58	0.35	1.53	0.42	0.142
精神病性	1.46	0.36	1.39	0.44	0.127

表3 实验后女大学生SCL-90各因子得分与全国常模的比较

注: *表示 $p < 0.05$; **表示 $p < 0.01$; ***表示 $p < 0.001$ 。

表3是实验后女大学生SCL-90各因子得分与全国常模的比较,采用PNF法进行锻炼后人际关系、抑郁、敌对3个因子显著的低于全国常模水平;躯体化、焦虑、偏执、恐怖4个因子还是高于全国常模。这表明,女大学生通过PNF法练习后人际关系、抑郁、恐怖三个方面显著地优于全国常模,特别是在缓解女大学生人际关系、抑郁、敌对方面效果显著。

4结论与建议

4.1 结论

(上接18页)(2)采用椭圆形面元组合方式优化参与速度分析的方法是胜利油田济阳坳陷陆上地震资料提出的,拾取偏移速度采用超道集方式,可以拥有能量较为集中,趋势更为明显的谱,有利于精确速度场的建立。

【参考文献】

(上接67页)弹在下降攻击段俯视目标,随俯冲角度增大目标RCS增大,导引头探测距离增加(探测距离从18.0km~23.2km),机载雷达测量误差引起的目标指示误差减小,利于目标角度截获,可使导弹的有效攻击距离增加(138km~185km,增加幅度达34%)。

5结论

仿真结果表明,导弹采用高抛弹道进行中远距攻击时,目标截获概率限制了高抛弹道最大动力攻击距离的发挥。为提高导弹弹道性能对高抛弹道参数寻优时,不仅要考虑对导弹动力性能方面提升,还应关注如何使雷达导引头更易成功截获目标。本文提出了对俯冲角度进行寻优的思路,大幅增加了目标截获概率要求下的最大有效攻击距离。

导弹在下降攻击段俯视攻击低空目标将出现低空下视的问题,下一阶段主要工作将是研究不同俯冲角度下的地面杂波特性,通过分析其对目标截获的影响,进一步给出俯冲角度的优化选择方法。

【参考文献】

[1] 樊会涛.空战制胜“四先”原则[J].航空兵器,2013,(1):3-7

瑜伽运用PNF法有助于提升女大学生心理健康,试验后各因子得分均有降低,强迫、人际关系、抑郁、敌对4个因子呈现出非常显著地变化,焦虑、恐怖、精神病性3个因子呈现出显著的变化,躯体化、偏执两个因子试验后得分有所降低,未呈现出显著的变化。在瑜伽课放松阶段中运用可让学生提高自我认可度,减少或降低焦虑、紧张、压抑等负面情绪,对调节心理平衡和保持心理健康具有重要意义和作用。

4.2 建议

基于PNF法可以在瑜伽课程中有效提高学生心理健康的作用。建议在各高校开展的瑜伽课中广泛普及PNF法,并将其用于瑜伽课的放松练习中,可以帮助女大学生释放和缓解精神上的压力和紧张,消除忧郁情绪,增强自信心,从而达到新课标所提倡的培养全面高素质人才的目标。

【参考文献】

[1] 林少娜,郑李茹.论高校体育与心理健康的关系[J].汕头大学学报(人文科学版),1994,4(10):88-94

[2] 李世芬.大学生心理健康状况调查与分析[J].长春大学学报,2002,12(5):89-91

[3] 黄伟清.大学生心理健康状况调查[J].临床精神医学杂志,2002,12(2):79

基金项目:湖北省教学研究项目,项目编号:2013283。

[1] 张军华.关于几种速度分析方法的讨论及效果分析[J].石油物探,2009,48(4):347-353

[2] 刘洋,魏修成.基于线性连续速度模型的速度分析与动校正方法[J].石油勘探与开发(综合勘探开发技术),2003,30(5):71-74

[3] 李振春,姚云霞,马在田,等.基于参数多级优化的共反射面叠加方法及其应用[J].石油地球物理勘探,2003,38(2):156-161

[2] 段朝阳,姜殿民.远距空空导弹最优中制导律研究[J].战术导弹控制技术,2005,(3):45-47

[3] 杨雪榕,梁加红,李晓冬.空空导弹高抛弹道仿真研究[J].系统仿真学报,2010,22(5):1261-1265

[4] 崔垚,李顺利,计佳俊,等.空空导弹高抛弹道作战效能研究[J].飞行力学,2012,30(4):376-379

[5] 赵志伟,张安,夏庆军,等.中远程空空导弹目标截获概率仿真计算[J].火力与指挥控制,2011,36(10):160-164

[6] 樊会涛,吕长起,林忠贤,等.空空导弹系统总体设计[M].北京:国防工业出版社,2007

[7] 钱杏芳,林瑞雄,赵亚男.导弹飞行力学[M].北京:北京理工大学出版社,2000:81-89

[8] 李峰,王新龙,王起飞.空空导弹目标截获概率研究[J].光电与控制,2010,17(8):15-20

[9] 樊会涛.复合制导空空导弹截获目标概率研究[J].航空学报,2010,31(6):1225-1229

[10] 王琪,吕长起.一种提高导引头截获概率的搜索方法[J].航空兵器,2011,(3):11-13

[11] 姜浩,昂海松.F-35战斗机气动及隐身特性分析[J].飞机设计,2010,30(6):1-10