基于视景仿真的引战配合效率评估方法

韩 波1,张 凯1,蒋 涛2

(1.中国人民解放军 92941 部队,辽宁 葫芦岛 125001; 2. 上海机电工程研究所,上海 201109)

摘 要:针对舰空导弹飞行试验中导弹引战配合性能难以直接观测,以及靶标与典型作战对象差异较大的问题,提出了一种基于视景仿真的引战配合效率评估方法,实现了导弹对典型目标的引战配合效率评估。基于某型舰空导弹引战系统的工作原理,建立了引信启动模型、战斗部毁伤模型和目标毁伤效果评估模型,实现了对典型目标引战配合及毁伤的定量分析。仿真模型经过靶试飞行试验数据检验,仿真结果与实际靶试结果基本吻合,仿真模型得到了有效验证。所提供的毁伤评估手段可为导弹性能鉴定及导弹对防空体系贡献度提供参考依据,对后续靶场开展相关舰空导弹试验鉴定具有借鉴意义。

关键词:舰空导弹;引战配合;可视化;毁伤评估;数字仿真 中图分类号:V19 文献标志码:A

DOI: 10. 19328/j.cnki.1006-1630. 2019. 01. 005

Fuze-Warhead Coordination Efficiency Evaluation Based on Visual Simulation

HAN Bo¹, ZHANG Kai¹, JIANG Tao²

(1.Unit 92941 of PLA, Huludao 125001, Liaoning, China; 2. Shanghai Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Shanghai 201109, China)

Abstract: Aiming at the difficulty with direct observation of fuze-warhead coordination and great difference between drones and opponent targets in the flight test of the ship-to-air missile, a damage evaluation method based on the fuze-warhead coordination simulation is proposed, solving the problem mentioned above. The method, based on one ship-to-air missile fuze-warhead system, realizes a quantitative analysis on damage evaluation by establishing the fuze working model, the warhead damage model and the damage evaluation model. Simulation models are verified by missile flight test data, and the simulation result fits the flight test result well. The damage evaluation method can provide the reference for missile performance evaluation and contribution degree of the missile to the anti-air system. It can also be used for the range to conduct the test evaluation of ship-to-air missiles.

Keywords: ship-to-air missile; fuze-warhead coordination; visualization; damage evaluation; digital simulation

0 引言

引战系统即引信战斗部系统,是导弹的战斗装备;引战配合的概念是保证引信适时起爆战斗部并有效摧毁目标^[1]。受试验条件制约,目前舰空导弹飞行试验用靶标主要为模拟靶标,无论在飞行高度、飞行速度还是几何尺寸上都与典型目标相差较大,故单纯依靠飞行试验结果对其引战配合与毁伤效果进行评估缺乏客观性和真实性。国内针对引战配合的仿真与建模研究有很多,文献[2-8]分别从不同角度进行了引战配合仿真建模与研究,但大多侧重于对引战配

合的设计与优化进行研究。如何根据导弹拦截靶标获得的飞行试验数据来评估导弹对典型目标的毁伤效果是亟需解决的难题。本文重点从靶场试验鉴定的角度进行引战配合仿真建模及应用研究,提供了某型号舰空导弹对典型目标的毁伤评估手段。

1 仿真系统构建

引战配合仿真软件系统框架如图 1 所示。该系 统主要包括两大模块:仿真计算模块和可视化模块。 仿真计算模块在后台对引信和战斗部工作过程进行

收稿日期:2018-08-14;修回日期:2018-10-15

作者简介:韩 波(1981一),男,工程师,主要研究方向为导弹武器系统试验总体。

仿真,并进行杀伤概率计算;可视化模块基于三维仿 真技术,在前台模拟引信和战斗部的工作过程。



图 1 引战配合仿真框架

Fig. 1 Fuze-warhead coordination simulation framework

1.1 仿真计算模块

按照引战配合系统的工作原理构建仿真流程, 主要包括引信处理模块、弹道仿真模块、战斗部毁伤 模块和分析处理模块4部分。

1) 引信仿真模块。引信是引战系统的目标探测器,其作用是在引战配合后输出引爆脉冲引爆战斗部。本文以某型号导弹为研究基础,该导弹引信采用无线电脉冲多普勒-收/发分置体制,其信号调制、解调、滤波等作用机理与同类型无线电雷达一致。需要注意的是,该引信的起爆准则采用最佳多普勒频率准则,其破片在弹体相对速度坐标系中的动态飞散中心方向角

$$\cos \Omega_{\rm rd} = \frac{v_{\rm r} + v_0 \cos \omega_{\rm r} \sin \Omega_{\rm r}}{\sqrt{v_0^2 + v_{\rm r}^2 + 2v_{\rm r} \sin \Omega_{\rm r} \cos \omega_{\rm r}}} \quad (1)$$

式中:v_r为弹目相对速度值,单位为 m/s;Ω_r为相对 速度矢量与导弹纵轴的夹角;v₀为战斗部破片飞散 初速,单位为 m/s。则起爆对应的最佳多普勒频率为

$$F_{\rm d}^{*} = \frac{2v_{\rm r}}{\lambda_0} \cos \Omega_{\rm rd} \tag{2}$$

式中: λ。为引信工作波长,单位为 m; F^{*}。为最佳启 动多普勒频率,单位为 Hz。

在弹目交会段,随着弹目不断接近,目标视线角 (弹目连线偏离导弹轴线角度)不断增大,引信收到 的弹目多普勒频率不断减小。当弹目多普勒频率满 足最佳多普勒频率时,引信引爆战斗部。

2)战斗部毁伤模块。为减小计算复杂度,一个 外形结构复杂的目标可等效为一系列易损舱段(要 害舱段)的组合,如图2所示。通常易损舱等效为一 个长方体,该长方体尺寸恰好外接目标实际部位,同时长方体6个面(易损面)代表目标不同侧面的材料和结构特性,根据文献[1]提供的易损舱段毁伤概率 计算方法即可得到易损舱的毁伤概率值,进而得到目标的毁伤概率。



仿真过程中确定战斗部破片与目标易损舱的交 点位置是关键问题。静态飞散方向位置为(ω_{0i},φ_i) 的破片在目标坐标系内的射线方程为

$$\begin{cases} x = x_{0} + v_{x}T \\ y = y_{0} + v_{y}T \\ z = z_{0} + v_{z}T \end{cases}$$
(3)

式中: T 为破片飞散时间; x_0 , y_0 , z_0 为战斗部起爆 瞬间战斗部中心在目标坐标系中的坐标; v_x , v_y , v_z 为静态飞散方向位置为(ω_{0i} , ϕ_i)的破片动态飞散 速度在目标坐标系中的分量。

在目标坐标系中,目标易损面的平面方程可写为 Ax + By + Cz = D (4)

式中:A,B,C,D为目标易损面的几何参数。将式 (3)代入式(4),可得破片射线与易损面相交的时间

$$T_m = -\left(Ax_0 + By_0 + Cz_0 - D\right)/$$

$$(Av_x + Bv_y + Cv_z) \tag{5}$$

已知碰撞时间就可得到碰撞点 *M*,但需要确定该点 是否落在平板中。计算碰撞点 *M* 与易损面相邻顶 点所组成的三角形面积之和,有

$$S = \sum_{i=1}^{4} S_i \tag{6}$$

若面积 S 不超过易损面面积 S_k,则破片命中易损面。

3)毁伤效果分析。统计前文得到的命中易损舱 破片及其毁伤参数,根据文献[1]提供的毁伤概率计 算模型即可得到易损舱的毁伤概率 P_c。在脱靶量为 ρ 且脱靶方位为θ时,导弹对目标的条件杀伤概率为

$$P_{\rm d} = 1 - \prod_{c=1}^{c_{\rm max}} (1 - P_c) \tag{7}$$

1.2 可视化模块

用三维图形库 OpenGL 结合 Visual C++开发 视景仿真软件^[9]。利用 CATIA 三维造型软件分别 建立导弹和目标的三维模型,将所建立的模型进行 面元划分,如图 3 所示。





视景仿真包括动态视景仿真和引战配合效果仿 真,如图4所示。前者用于实时显示弹目交会、引信 启动及战斗部破片飞散的过程,提供直观了解弹目 交会情况的手段。引战配合效果图显示了在弹体参 考坐标系(原点在战斗部中心)中,目标在某一脱靶 量和脱靶方位点被战斗部破片动态飞散区覆盖的情 况。图中,横坐标为弹体方位角分布,纵坐标为相对 弹体的倾角分布,蓝色区域为破片动态打击范围。 红色区域表示目标投影图,为目标机体上均匀抽取 的特征点在弹体参考坐标系中对应的点(倾角、方位 角)的集合。若目标投影图全部或部分落在蓝色区 域,则目标部分能被破片杀伤。

2 引战配合仿真模型验证

对仿真模型进行可信性验证评估是系统应用的 前提。王晓英等^[10]用静态一致性检验法验证模型 的可信性,该方法可实现对模型的定量验证,即将引 战配合仿真的输出结果与相对应的实物试验的结果 作一致性检验,从而使仿真可信性的置信度转化为 一致性检验的置信度。借鉴文献[10]提出的模型检 验方法,对仿真模型的可信性进行定量分析。



某型舰空导弹进行过多次实际靶试飞行试验, 本文选取其中试验数据较为完整的2次靶试数据进 行分析,所用靶标分别为靶机和靶弹。

根据某型舰空导弹战斗部作用特点,确定靶机 要害舱段主要包括机身、发动机、主机翼、水平吊尾 和垂直吊尾;靶弹要害舱段主要包括弹身、弹翼和舵 机舱。采用蒙特卡洛抽样法,根据战斗部地面静爆 试验数据和飞行试验获取的引信延时、脱靶量、弹目 运动速度等数据,进行 200 次仿真试验,分别对导弹 命中靶机数、靶弹的破片平均数、引信延时均值,以 及导弹对 2 类目标的杀伤概率进行统计。

2.1 仿真输入

某型舰空导弹拦截靶机和靶弹飞行试验的弹道 参数和交会姿态见表 1。

- 表 1 某型舰空导弹拦截靶机和靶弹飞行试验的弹道参数 和交会姿态
- Tab. 1
 Trajectory and encounter parameters of ship-to-air

 missile flight test for intercepting drone aircraft and

 missile

输入参数	靶机	靶弹
目标速度/(m•s ⁻¹)	220	750
导弹速度/(m•s ⁻¹)	790	1 150
	127.36(偏航)	-40.28(偏航)
导弹姿态/(°)	-30.78(俯仰)	13.57(俯仰)
	0(滚转)	0(滚转)
导弹高度/m	5 300	12 000
	-60(偏航)	140(偏航)
目标姿态/(°)	0(俯仰)	-40(俯仰)
	0(滚转)	0(滚转)
脱靶量/m	25	5
脱靶方位/(°)	11	7

2.2 仿真结果与分析

根据表1给出的实际飞行试验的弹道参数,可 得引战延时仿真结果对比,见表2。引战延时反映 了引信对目标的启动特性,从表中可得:2次仿真结 果与实际飞行结果相对误差不大于1.5%,验证了 引信起爆模型的正确性。

表 2 引战延时仿真结果对比

Tab. 2 Coordination delay-time comparison

参数	靶机	靶弹
飞行试验结果/ms	95	57
仿真结果/ms	96.2	56.4
相对误差/%	1.26	1.05

战斗部破片着靶统计结果见表 3,4。可以看出:仿真值与实际靶试命中结果间绝对误差不高于 5%,说明战斗部毁伤模型可信度较好。

毁伤概率仿真结果见表 5,可视化仿真得到的 战斗部破片命中仿真情况分别如图 5,6 所示。飞行 试样中导弹均直接击毁靶标,结合光测数据和仿真 得到引战配合效果图(见图 5,6)。可以看出:战斗 部破片大部分命中靶标中心部位,毁伤效果较好,毁 伤概率较高,与仿真得到的高毁伤概率吻合,仿真模 型的可信度得到了验证。

表 3 靶机破片着靶结果统计 Tab. 3 Warhead fragments of hitting plane targets

破片着靶部位	仿真值	靶试值	相对误差/%
机身	97	98.4	-1.42
发动机	76	73.1	3.97
主机翼	148	144.5	2.42
水平吊尾	0	0	0
垂直吊尾	0	0	0
合计	321	316.0	1.58

表 4 靶弹破片着靶结果统计

Tab. 4	Warhead	fragments	of hitting	g missile	targets
--------	---------	-----------	------------	-----------	---------

破片着靶部位	仿真值	靶试值	相对误差/%
弹身	98	95.2	-2.94
右上翼	0	0	0
左上翼	0	0	0
尾翼	0	0	0
命中破片总数	98	95.2	-2.94

表 5 毁伤概率结果对比

Tab. 5 Damage probability comparison

仿真结果	靶机	靶弹
杀伤概率	0.90	0.83
实际效果	直接击毁	直接击毁





3 对典型目标的毁伤评估

导弹以拦截敌对目标为使命,根据某型舰空导 弹的特点,敌对目标可分为飞机类和导弹类,分别以 现役某型常规气动布局飞机和超音速反舰导弹为典 型目标。典型目标与靶标或靶弹在外形、结构和易 损部位分布上均有较大差异。根据某型舰空导弹战 斗部作用特点,确定典型飞机要害舱段主要包括机 身、发动机、主机翼、水平吊尾、垂直吊尾;典型导弹 要害舱段主要包括弹身、发动机舱、进气道、舵机舱、 空气舵。利用本文提出的"引战配合"评估模型,进 行 200 次仿真试验,完成了导弹对 2 类目标的引战 配合效率和杀伤概率评估。

弹目交会时刻引战配合及战斗部破片命中仿真 情况如图 7,8 所示,试验结果见表 6。可见在靶试 弹道条件下,该型导弹战斗部破片均能命中目标的 中心部位,对 2 类典型目标均有较好的杀伤作用。





Ship-to-air missile intercepting typical plane targets





图 8 某型舰空导弹拦截典型导弹类目标 Fig. 8 Ship-to-air missile intercepting typical missile targets

 Tab. 7
 Kill probability of typical targets

仿真结果	飞机	导弹
引信延时均值/ms	93.6	56.4
杀伤概率	0.86	0.79

4 结束语

Fig. 7

通过引战配合与毁伤效果可视化仿真,能较为

直观地掌握导弹战斗部破片在不同条件下命中 靶标的位置、数量情况,并得到以毁伤概率为参 考的目标毁伤评估模型。本文提供了一种导弹 对典型目标的毁伤评估手段,为试验基地对导弹 性能的鉴定及导弹对防空体系的贡献评价提供 了参考依据。同时本文在相关计算模型建立中 进行了一些简化处理,假定各易损舱毁伤概率独 立,后续将考虑易损舱之间的关联性,构建毁伤 树,不断完善系统。

参考文献

- [1] 张志鸿,周申生.防空导弹引信与战斗部配合效率和 战斗部设计[M].北京:中国宇航出版社,1994:68-72.
- [2] 张斌. 引战配合动态仿真计算软件[J]. 现代防御技 术, 1998, 26(2): 27-31.
- [3] 简金蕾,任宏滨,汤伟华,等.防空导弹引战配合的 数字仿真[J].计算机仿真,2000,17(2):40-42.
- [4] 牛冰,谷良贤,龚春林.一种模块化引战配合仿真系 统的设计与应用[J].系统仿真学报,2009,23(21): 7452-7455.
- [5] 徐文旭, 宋振铎, 张更宇. 多用途导弹战斗部对武装 直升机的终点毁伤建模及仿真[J]. 兵工学报, 2007, 28(6): 671-676.
- [6] 李合新.基于虚拟样机的空空导弹引战模型[J].弹箭 与制导学报,2011,31(3):15-18.
- [7] 孙博,胡国怀,赵军民,张安民.基于激光近炸引信的 引战配合数学仿真设计[J]. 弹箭与制导学报, 2012, 32(4):123-126.
- [8] 徐新林,石伟峰,刘双战. 舰空导弹引战配合可视化 仿真分析方法[J]. 现代防御技术,2011,39(2):35-39.
- [9] OpenGL体系结构审核委员会,邓郑祥.OpenGL 编 程指南[M].4版.北京:人民邮电出版社,2005:1-6.
- [10] 王晓英,张庆明,黄风雷.引战配合计算机仿真的静态一致性研究[J].系统仿真学报,2002,14(4):451-454.

(本文编辑:姚麒伟)