

基于虚拟样机的空空导弹引战模型^{*}

李合新

(中国空空导弹研究院,河南洛阳 471009)

摘要:建立了一种基于空空导弹制导系统虚拟样机的引战系统仿真模型,用于研究导弹对目标的毁伤过程、引战配合效果以及引信和战斗部参数优化等。以制导仿真输出的实时弹道信息和目标三维外形为基础,构造了引信探测、延时起爆、战斗部飞散、毁伤计算等模型,仿真结果输出到视景仿真模块,用于末端交会过程的实时显示。引战仿真和制导仿真、视景仿真连接后,构成了完整的空空导弹虚拟样机。该虚拟样机运行效果良好,验证了引战仿真系统建模的合理性。

关键词:虚拟样机;引战系统;制导系统;视景仿真;建模

中图分类号:TJ762.23 **文献标志码:**A

Fuze-warhead System Model of Air-to-air Missile Based on Virtual Prototype

LI Hexin

(China Airborne Missile Academy, Henan Luoyang 471009, China)

Abstract: A fuze-warhead system model based on virtual prototype of air-to-air missile guidance system was built for studying the missile terminal destroy process at target, fuze-warhead coordination effect and fuze-warhead parameters optimization. Based on the real-time trajectory information of guidance simulation output and three-dimensional object shape of target, the fuze detection, delayed explosion, warhead dispersion and damage effectiveness calculation were constructed to really display terminal encounter process. The fuze-warhead simulation model was connected with guidance simulation subsystem and visual simulation subsystem to form integrated air-to-air missile virtual prototype. The virtual prototype ran well and the rationality of fuze-warhead subsystem simulation model was validated.

Keywords: virtual prototype; fuze-warhead system; guidance system; visual simulation; modeling

0 引言

虚拟样机技术可以缩短研制周期、降低研制成本、提高产品设计质量。近年来,虚拟样机技术在国内外发展较快,已在航空航天等领域的复杂产品设计和试验中得到了较好的应用。某型空空导弹在研制过程中借助了制导系统虚拟样机技术,在靶试弹道预测、参数优化、性能验证等方面发挥了重要作用。

为借助空空导弹虚拟样机进一步研究弹目末端交会过程、毁伤情况、引战配合情况及杀伤概率,需要在导弹虚拟样机中增加对引战系统的仿真。文中介绍了一种适用于总体性能研究的引战系统仿真建模方法,该模型能够利用制导系统仿真信息实时进行引信探测、碰撞检测计算和战斗部飞散过程模拟等。

1 某型导弹虚拟样机简介

某型空空导弹虚拟样机目前仅由制导仿真子系统 and 视景仿真子系统组成,所以也称为导弹制导系统虚拟样机,其构成如图1所示。其中制导仿真子系统在VC++环境下开发各仿真模块的用户函数,并在武器系统虚拟样机设计环境^[1]下进行模块组装与接口连接,通过运行实现导弹攻击过程的实时弹道仿真;视景仿真模块借助3D建模工具MultiGen Creator进行实体和场景的建模,并借助视景仿真软件Vega再现场景和攻击过程,达到逼真的仿真效果。制导仿真子系统通过以太网或同步内存的方式向视景仿真子系统实时传输弹道信息^[2]。

^{*} 收稿日期:2010-09-08

作者简介:李合新(1966—),河南新乡人,高级工程师,硕士,研究方向:导弹总体技术。

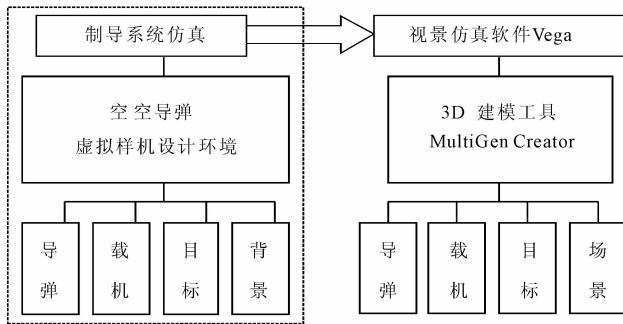


图 1 空空导弹制导系统虚拟样机结构

2 引战系统分析及仿真建模要求

2.1 引战系统分析

空空导弹引战系统由引信、战斗部和安保机构构成,其中引信同时含近炸、模块和自炸 3 个模块。

先进的导弹一般采用制导引信一体化设计,让引信充分利用制导信息,提高引信的抗干扰能力和引战配合效果。飞控计算机控制引信加电,并根据弹目相对运动关系实时计算引信延迟时间。当引信探测到目标后,向飞控计算机发出“目标存在”信号,飞控延时后再向引战系统发出“引爆”信号。

2.2 引战系统仿真建模要求

目前国内对引战系统进行数学仿真的建模方法较多,但这些方法一般仅适用于单独引战系统仿真,并不适合与制导系统进行联合仿真。根据制导虚拟样机的运行原理,结合引战系统仿真自身要求,总结对引战系统进行仿真建模应遵循的原则如下:

- 1)真实性:能够真实反映交会状态和引战系统性能,并有足够的精度;
- 2)实时能力:可在末端弹道上连续实时计算;
- 3)快速性:不过分影响系统的仿真运行速度;
- 4)接口要求:可与制导仿真子系统实现无缝连接,所有输入参数均可以从制导仿真中获取。

3 引战仿真子系统建模方法

3.1 仿真坐标系选择与坐标转换

制导仿真以地理系(CKOg)为基准系,输出的弹道信息包括导弹、目标的位置和姿态,这些信息确定了弹目相对关系,可供引战仿真使用。地理系以导弹发射点在大地上的投影为原点,采用北天东坐标系。

引战系统工作于近距,末端交会仿真需要导弹和目标几何外形,用目标系(CKOt)和弹体系(CKOm)定义。目标系原点设在目标的几何中心, X 轴沿目

标纵轴为正方向, Y 轴取在目标对称平面内,向上为正, Z 轴构成右手系。弹体系定义与目标系类似。

导弹和目标在地理系中的位置和姿态确定后,可将目标上一点转换到弹体系中。设地理系中导弹位置 $(x_{r0}, y_{r0}, z_{r0})'$ 、目标位置 $(x_{t0}, y_{t0}, z_{t0})'$ 、弹体系到地理系转换矩阵 A_{GR} 、目标到地理系转换矩阵 A_{GZ} ,对目标上任意一点 $(x_t, y_t, z_t)'$,转换到弹体系中的坐标 $(x_r, y_r, z_r)'$ 为:

$$\begin{pmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{pmatrix} = A_{GR}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_{r0} \\ y_{r0} \\ z_{r0} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_{t0} \\ y_{t0} \\ z_{t0} \end{pmatrix} \quad (1)$$

3.2 仿真模型分割与组装

根据引战系统原理将引战系统功能模块划分为近距探测、碰撞检测、自炸、延时与炸点控制、战斗部飞散及毁伤判定等子模块。根据制导系统和引战系统的工作关系,将引战系统仿真模型插在制导仿真和视景仿真两个模块之间,引战仿真输入来自制导仿真,仿真结果可用于渲染末端交会过程。

基于以上分析,建立引战仿真模型,并与制导仿真、视景仿真模型连接,确定接口关系,如图 2 所示。其中与制导仿真的接口信息包括弹道信息(导弹和目标的位置、姿态)和飞控对引信的控制信息;对视景仿真的输出除转接弹道信息外,主要包括引信视场倾角和作用距离、战斗部杀伤元飞散等信息。

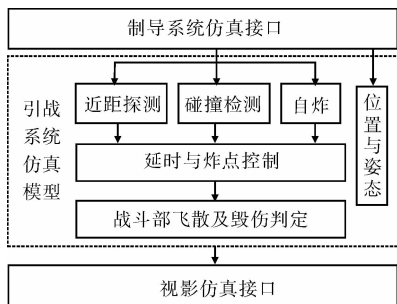


图 2 引战仿真模型结构及与制导、视景仿真接口

3.3 引战系统仿真步长确定

引战虚拟样机与制导虚拟样机连接,首先必须考虑外接口同步,采用制导仿真步长;其次,引战虚拟样机内部要考虑仿真精度,包括引信探测、炸点输出、碰撞检测、战斗部杀伤元飞散等,需要对制导仿真步长进行细分,多步实现;第三要考虑仿真计算量,仿真步长不可过小。制导仿真步长为 1ms,考虑上述因素,引战仿真步长取 0.2ms 较为合适。

4 引战系统各子模块建模方法

4.1 近距探测模型

近距探测模型模拟近炸引信探测和启动过程。

近炸引信的探测和启动特性用一些主要参数描述,如引信视场倾角、作用距离、进入目标深度等。

对近炸引信探测仿真可采用触发线方法^[3]进行建模,如图3所示。图中引信距导弹中心的距离为 L ,引信视场中心倾角和视场宽度分别为 α 和 $\Delta\alpha$,引信作用距离为 R 。

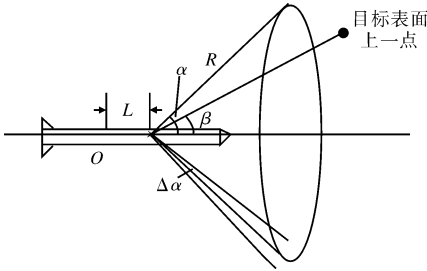


图3 触发线模型

先研究目标上的一点 $(x_t, y_t, z_t)'$ 是否被引信探测到。该点转换到弹体系的坐标为 $(x_r, y_r, z_r)'$ 。计算目标点离引信中心距离 d_{DM} 及目标视线与弹轴的夹角 β ：

$$d_{DM} = \sqrt{(x_t - L)^2 + y_t^2 + z_t^2} \quad (2)$$

$$\beta = \arctan \frac{\sqrt{y_r^2 + z_r^2}}{x_r - L} \quad (3)$$

如果 $|\beta - \alpha| < \frac{1}{2}\Delta\alpha$ 且 $d_{DM} < R$,则认为该点在

引信的视场范围内,能够被引信探测到。

引信探测到目标上一个点不等于引信能够马上启动。对引信启动特性仿真,可采用多种方法,如:

1) 两点法:当引信探测到目标表面上的一个点后,根据引信启动特性取一个足够使引信启动的最小时间,在此时间段内不进行探测计算,当启动时间结束时再判断一次,若在探测场内仍存在一个目标点,则确认引信启动;

2) 探痕长度法:在某一交会时刻如果目标上有两个以上点能被引信探测到,且存在两点距离大于一门限值,确认引信启动;

3) 进入深度法:由仿真步长和弹目接近速度可计算出引信进入目标的深度。当引信连续探测到目标且达到一定的进入深度时,确认引信启动。

4.2 碰撞检测模型

碰撞检测模型模拟触发引信的工作。把导弹简化

成1个或3个圆柱体。设目标上一点转换到弹体系的坐标为 $(x_r, y_r, z_r)'$,判断目标上一点与弹体的关系,若此点在弹体内,可判定弹体与目标相撞,将碰撞标志送至延时起爆模块。判断条件为:

$$x_1 \leq x_t \leq x_2 \text{ 且 } y_r^2 + z_r^2 \leq r^2 \quad (4)$$

式中, x_1, x_2 为圆柱体轴向前、后界, r 为圆柱体半径。

4.3 自炸模型

引信自炸模块从引信加电开始计时,计时完成后给出炸点。根据自炸模块的计时起点和时间常数直接设置计时器,如果触发和近炸引信均未作用,计时结束后将自炸标志传给延时与炸点控制模块。

4.4 延时与炸点控制模型

延时与炸点控制建模包括两方面:

1) 引信延迟时间计算。根据交会条件,实时计算最佳引战配合延时:

$$t = f(v_r, k_1, k_2, k_3) \quad (5)$$

式中: v_r 为弹目相对速度, k_1, k_2, k_3 为根据交会角、攻击平面夹角、目标类型、目标指示精度等参数实时查表得出的常数。

2) 炸点控制。当近炸模块给出“目标存在”标志后,根据当前最佳延迟时间进行计时,结束后输出炸点。如果接收到来自碰撞检测模块和自炸模块输出的碰撞或自炸标志,不经延时直接给出炸点。

4.5 战斗部飞散及毁伤判定模型

战斗部爆炸后通过杀伤元高速飞散杀伤目标,爆炸离目标较近时爆轰波也可直接毁伤目标。

以聚焦式离散杆战斗部为例进行建模。战斗部的主要性能指标包括威力半径、飞散方向角、飞散角、杆条参数、初速均值与方差、速度衰减系数等,这些参数可以从战斗部静爆试验中获得。战斗部爆炸后,杀伤元(离散杆)以一定的初速向外飞散,在弹体系中可以看作是一个逐渐扩大的圆环。若忽略空气的阻力(时间极短,可不考虑),在弹体系中杀伤元向外扩散的过程与战斗部静爆的飞散过程是一致的,近似等效为飞散环。飞散环是一个动态变化的物体,飞散环特性用飞散半径 R 、环截面半径 r 和战斗部威力半径 D 三个参数描述,其中 R 根据战斗部静爆初速飞散时间计算, r 根据初速、飞散时间和飞散角计算。战斗部威力半径 D 限制了环半径的上限。飞散环模型见图4。

目标是否被毁伤是一个复杂的问题,与战斗部威力、目标易损性、引战配合等因素有关。为满足仿真快速性要求,将问题简化,只考虑引战配合和战斗部

威力半径,不考虑目标易损性,这种方法完全能够满足导弹性能和引战配合研究的需要。

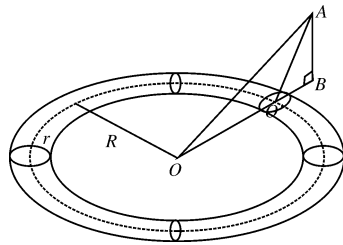
下面研究目标毁伤判据,假定毁伤结果有 1(被毁)和 0(完好)两种状态,当以下三个条件中任何一个满足时,判定目标被毁:

- 1) 导弹和目标直接发生碰撞,此标志由碰撞检测模块给出;
- 2) 爆轰波毁伤,在战斗部爆炸瞬间目标离战斗部质心的距离在战斗部的爆轰波威力半径之内;
- 3) 战斗部飞散环与目标碰撞。

其中战斗部飞散环与目标碰撞的判断算法较复杂,下面给出计算方法。

如图 4 所示,设 O 点为导弹质心,同时也是战斗部的中心。战斗部飞散环在弹体系的 YZ 平面内,环半径和环截面半径分别为 R 和 r。已知目标上一点 A 转换到弹体系中的位置为 $(x_a, y_a, z_a)'$,研究此点是否与飞散环相遇。

先过 O 点与 A 点作垂直于 YZ 平面的辅助平面 OAB, $B(0, y_a, z_a)'$ 点为 A 点在 YZ 平面的投影, OAB 平面垂直



切割战斗部飞散环图 4 目标点与战斗部飞散环关系图截得一个圆截面,其半径为 r,圆心 O' 在弹体系中的坐标为:

$$(0, y_a * R / \sqrt{y_a^2 + z_a^2}, z_a * R / \sqrt{y_a^2 + z_a^2})'$$

判断 A 点是否落入所求的圆截面内,即可知 A 点是否在飞散环内。A 点落入圆截面的条件为:

$$x_a^2 + (y_a - \frac{R * y_a}{\sqrt{y_a^2 + z_a^2}})^2 + (z_a - \frac{R * z_a}{\sqrt{y_a^2 + z_a^2}})^2 < r^2 \tag{6}$$

若目标上任何一点与战斗部飞散环相遇,即判断飞散环撞击目标。当战斗部飞散环半径大于战斗部威力半径时,停止毁伤计算。

5 视景仿真改造

视景仿真模块已实现了实体目标的三维显示,为研究末端交会详细过程,在原视景仿真基础上增加引信视场空心锥面和战斗部飞散环,为此建立引信视场空心锥和战斗部飞散环 3D 模型并载入场景,通过开关变量控制它们的显隐,其中引信探测场在近炸引信工作时同步显示,战斗部飞散环从起爆信号给出后开始,并逐渐扩大。

6 结论与仿真实例

建立引战仿真模型后,与制导仿真、视景仿真实现了顺利连接,导弹虚拟样机功能更加完整,经实际运行效果良好。

图 5 是截取末端交会过程战斗部爆炸后某一瞬间目标通道画面,画面中除目标外还可以观察到导弹、引信视场、战斗部飞散锥等。从图中可以看出战斗部飞散锥杀伤目标的大致部位,验证了引战配合的合理性。



图 5 末端交会过程战斗部爆炸后某一瞬间画面

参考文献:

- [1] 赵建卫,唐硕,吴催生. 武器系统虚拟样机设计环境[J]. 飞行力学,2000(2):15-18.
- [2] 崔颖,赵建卫,唐硕. 基于 RTNET 的分布仿真设计[J]. 航空兵器,2002(1):42-44.
- [3] 掌亚军. 引信触发线模型在空空导弹杀伤效能仿真中的应用[J]. 航空兵器,2000(4):21-23.