

战斗部威力场仿真系统设计与实现

陈留涛¹, 丁刚毅², 金乾坤²

(1. 北京理工大学 计算机学院, 北京 100081; 2. 北京理工大学 软件学院, 北京 100081)

摘要: 介绍一个实现导弹战斗部威力场数值仿真的集成化软件系统。按照威力场仿真的功能要求,对系统框架和接口进行了设计,给出了战斗部预制破片建模和参数化有限元建模的方法。完成的系统集成有限元建模、力学仿真和后处理工具。系统能够实现上述工具的协同工作和数据集成,根据数值计算结果计算战斗部破片空间飞散参数和冲击波载荷。仿真实例运行结果表明系统能够满足设计人员的要求。

关键词: 计算机应用;系统集成;数值仿真;参数化有限元建模;预制破片建模;战斗部威力场
中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1093(2009)10-1297-06

Design and Implementation of a Warhead Power Field Simulation System

CHEN Liu-tao¹, DING Gang-yi², JIN Qian-kun²

(1. School of Computer Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. School of Software, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: An integrated software system for numerical simulation of warhead power field simulation was proposed. In accordance with functional requirements of the power field simulation, the system architecture and the interfaces were designed, and preformed fragment and parameterized finite element modeling of the warhead were presented. The finished system integrates several tools of finite element modeling, mechanics simulation, and post-processing. The system enables collaboration of the above-mentioned tools and data integration, and calculates the spatial distribution parameters of the fragments and shock wave load of a warhead based on the numerical simulation results. The simulated results by instance show that the system can satisfy the requirement of designers.

Key words: computer application; system integration; numerical simulation; parameterized finite element modeling; performed fragment modeling; warhead power field

0 引言

随着武器性能的大幅度提高,其结构越来越复杂,采用传统方式已不能满足新武器研制的需要。数值计算模拟和仿真技术的快速发展,使之成为常规武器战斗部研制过程中的重要技术手段之一。美国很早就把高性能的计算机和先进的数值计算分析软件应用于常规武器研制,从而大幅提高了新武器的性能、缩短了研制周期、降低了研制费用。

近年来,我国的很多研究机构在这方面也开展了大量的研究工作。为了实现对战斗部爆炸过程的计算模拟和仿真,提出了战斗部威力场仿真系统的功能要求;然后对系统总体框架和系统接口进行了设计;接下来分析了系统中用到的关键建模方法;最后在分析系统工作流程的基础上,给出了系统的软件实现。最终实现的系统能够集成各种建模工具和程序、数值计算软件以及后处理工具完成对战斗部威力场的仿真。

收稿日期: 2008-05-13

作者简介: 陈留涛(1979—),男,博士研究生。E-mail: clt00000@163.net;

丁刚毅(1966—),男,教授。E-mail: dgy@bit.edu.cn

1 仿真系统概述

1.1 仿真系统的功能要求

本工作所设计实现的战斗部威力场仿真系统,要能够完成对导弹战斗部威力场的数值计算和仿真。该系统中需要集成有限元建模工具(TrueGrid)、数值计算软件(LS-DYNA)以及后处理工具等。系统可以实现战斗部的预制破片建模、参数化有限元建模、爆炸过程数值计算、破片空间飞散参数计算以及冲击波载荷计算等。战斗部设计人员可以借助该系统对设计方案进行试验。以前很多需要手工进行的工作,该系统都可自动完成;并且可以利用它尽早发现设计中存在的问题,从而提高产品设计水平、缩短产品研制周期。

1.2 仿真系统中所采用的主要软件介绍

1) 有限元建模工具 TrueGrid

TrueGrid 是世界著名、通用的网格划分前处理软件,它可方便快速的生成优化的、高质量的六面体网格模型^[1],它支持大多数主流的有限元分析软件。TrueGrid 拥有先进的图形用户界面,可以引导用户快速生成有限元网格模型。有限元网格生成之后,用户可以利用 TrueGrid 提供的图形显示窗口,从不同角度观察所生成网格的细节。

2) 数值计算软件 LS-DYNA

LS-DYNA 是世界上最著名的通用显式动力分析软件,它以 Lagrange 算法为主,兼有 ALE 和 Euler 算法,能够模拟真实世界的各种复杂问题。特别适合求解各种二维、三维非线性结构的高速碰撞、爆炸和金属成型等非线性动力冲击问题^[2],同时可以求解传热、流体及流固耦合问题。

2 仿真系统设计

2.1 仿真系统框架设计

在进行系统框架设计时,充分考虑了模块化的思想,按照不同的功能进行模块划分,每个模块都提供相应的输入输出接口。在每个模块内部,根据功能需要再将其分解为输入模块、处理模块和输出模块等子模块。

战斗部威力场仿真系统模块组成如图 1 所示。该系统由战斗部原型结构模块、前处理模块、数值计算模块、后处理模块、工程计算模块和数据库管理模块 6 个基本模块组成。下面分别对每个模块所完成的功能进行介绍:

1) 战斗部原型结构模块

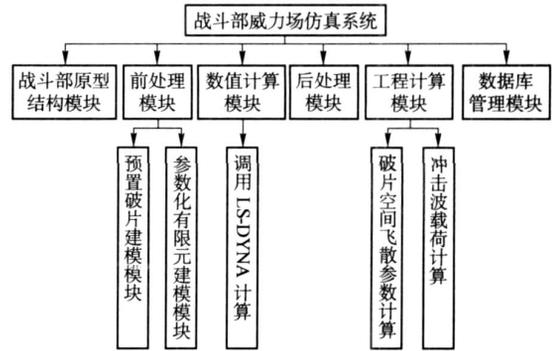


图 1 战斗部威力场仿真系统模块图

Fig. 1 Block diagram of the warhead power field simulation system

设计人员根据战斗部的总体设计要求,给出战斗部的相关结构参数(如壳体参数、装药参数等),并对战斗部中所采用的材料进行选择,作为后面计算的依据。战斗部原型结构模块根据上面提供的各种参数,构建战斗部的原型结构。

2) 前处理模块

前处理模块主要用来定义数值计算软件计算所需要的各种数据。前处理模块包含 2 个子模块:预制破片建模模块和参数化有限元建模模块。

预制破片建模模块是针对球形预制破片战斗部而言的,它对球形破片的排布进行建模,按照一定方式把球形破片排列在战斗部壳体周围,并把计算出的小球排布位置坐标按照要求保存在文件中。

参数化有限元建模模块用来实现有限元建模的参数化,该模块中包含有针对不同类型战斗部而编写的有限元程序,设计人员只需通过交互界面输入相关参数,系统就会自动调用 TrueGrid 工具生成六面体网格,并以文件的形式进行输出。

3) 数值计算模块

该模块中集成了显式有限元动力分析软件 LS-DYNA。该模块能够自动调用 LS-DYNA 求解软件,按照设定的求解时间进行数值求解,求解结果以文件的形式进行输出。

4) 后处理模块

后处理模块主要是对求解软件计算生成的结果进行提取和分析。可以通过绘制结果数据曲线、图表或者自动调用可视化工具等对结果数据进行可视化显示,以方便设计人员分析。

5) 工程计算模块

工程计算模块包含破片空间飞散参数计算模块和冲击波载荷计算模块 2 个子模块。由于数值计算

生成的结果只是战斗部爆炸后,破片在很小范围内的飞散状态,并且当破片在空气中飞散时,还要考虑空气阻力对破片速度的影响。因此破片空间飞散参数计算模块,把数值计算结果作为破片初始状态,采用相应破片飞散模型^[3],计算破片在空间的飞散参数(如破片位置、速度、方向等)。冲击波载荷计算模块完成战斗部爆炸时所产生冲击波的计算。

6) 数据库管理模块

数据库管理模块主要实现对存储在数据库中的各种战斗部材料进行管理,包括对数据库中各种材料的添加、删除、查询、修改等操作。

2.2 仿真系统接口设计

经分析 TrueGrid 和 LS-DYNA 可分别作为可执行程序,供战斗部威力场仿真系统调用,这为系统集成提供了便利。但为了实现仿真系统中的有限元建模工具和程序、数值计算软件以及后处理工具间的协同工作,必须弄清楚各种工具和软件间的接口关系。

由于仿真系统运行是基于仿真模型进行的,而仿真模型又是以数据文件或数据库文件的形式存在的,各种数据和模型文件会在仿真运行的不同阶段被生成和调用。在分析了各种工具和软件的输入输出方式以及输出数据文件的格式后,决定采用数据集成的方式,通过对各种数据进行分析、提取和格式转换,实现相关工具软件间的数据流动。

实现上述数据流动的具体方法是:事先生成可供 TrueGrid 导入的模型文件(.tg 文件),TrueGrid 会根据模型文件的内容生成有限元网格模型,并保存在.k 文件中。然后,LS-DYNA 将.k 文件导入,进行数值求解,并把计算结果保存在文本文件中,以便做进一步的处理,通过以上方法就可实现各种软件和工具的集成。

3 仿真系统中的关键建模方法

3.1 预制破片建模方法研究

预制破片战斗部分很多种,预制破片有球形破片、方形破片等。其中,球形预制破片的建模过程比较复杂。以图 2 所示的球形预制破片为例,分析其建模原理。

图 2 中的例子假设战斗部是由一段圆弧 L 绕坐标系的 z 轴旋转而成的柱体,圆弧 L 的圆心为 P ,半径为 R ,该图是沿战斗部对称平面 $ABCD$ 的剖面图。小球沿着战斗部的壳体按周排列,为叙述方便,这里约定第 1 周的小球分别编号为 O_{11} 、 O_{12} ...,第

2 周的小球分别编号为 O_{21} 、 O_{22} ...,依此类推。第 1、3、5 周中编号为 1 的小球 O_{11} 、 O_{31} 、 O_{51} 可见;而第 2、4 周中编号为 1 的小球 O_{21} 和 O_{41} 与平面 $ABCD$ 相切,在该剖面图中不可见。

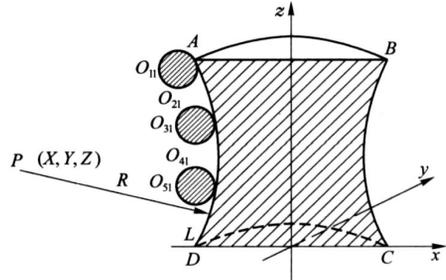


图 2 小球排布剖面示意图

Fig. 2 Sketch map of ball arrangement cutaway view

球形预制破片建模原理如图 3 所示,图 3 中的 P 点即为图 2 中的圆弧 L 的圆心 P ,图 3 中小球 O_{11} 、 O_{21} 、 O_{31} 与图 2 中的小球相对应,图 3 中的线段 PA 垂直于线段 $O_{11}O_2$,并且与 x 轴平行。从图 2 中可以看出小球 O_{11} 与圆弧 L 相切于 A 点, A 点的坐标、圆弧圆心 P 点的坐标 (X, Y, Z) 、圆弧半径 R 和小球半径 r 均为已知,从而可以很容易的计算出小球 O_{11} 球心的位置坐标 (x_{11}, y_{11}, z_{11}) 。

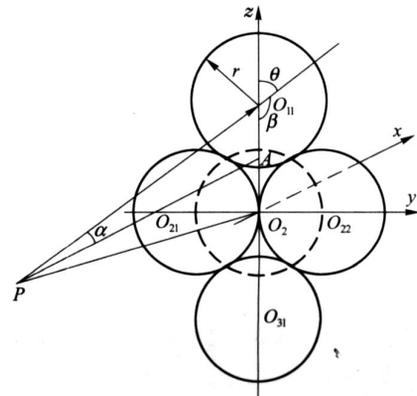


图 3 球形预制破片建模原理图

Fig. 3 Schematic diagram of ball preformed fragment modeling

小球 O_2 在图 3 中用虚线表示,为方便计算它只是一个辅助小球,计算出小球 O_2 的球心坐标 (x_2, y_2, z_2) 之后,再偏移到小球 O_{21} 的位置,小球 O_{21} 的球心位置才是第 2 周中第 1 个小球的真正位置(对于偶数周的第 1 个小球都要进行上述偏移)。

下面计算小球 O_2 的球心坐标。根据小球间的位置关系,可计算出线段 $O_{11}O_2$ 的长度,然后可以

计算出角 α 的值。设向量 PO_{11} 的方向角为 α , 根据点 P 、 O_{11} 的坐标可求得 $\cos \alpha$ 和 $\sin \alpha$ 。根据角 α 的值和图中的几何关系可求出角 β 和 γ 的值, 向量 $O_{11}O_2$ 可以通过向量 PO_{11} 顺时针旋转 β 角得到, 因此可以求得小球 O_2 球心的 x 、 z 坐标 (y 坐标不变) 相对于小球 O_{11} 球心坐标的偏移量

$$x_2 = \sqrt{3} r (-\cos \alpha \sin \beta + \sin \alpha \cos \beta), \quad (1)$$

$$z_2 = \sqrt{3} r (-\cos \alpha \cos \beta - \sin \alpha \sin \beta). \quad (2)$$

可算出小球 O_2 的球心坐标

$$x_2 = x_{11} + x_2, \quad (3)$$

$$y_2 = y_{11}, \quad (4)$$

$$z_2 = z_{11} + z_2. \quad (5)$$

依此类推, 可求出下面各周第 1 个小球的球心位置。下面以第 2 周中的小球 O_2 为例, 说明其偏移方法, 首先计算小球沿战斗部壳体偏移的角度

$$= 2\arcsin(0.5 r / x_2). \quad (6)$$

进而求出小球 O_{21} 球心位置的 x 、 y 坐标 (z 坐标不变) 相对于小球 O_2 的偏移量

$$x = r \cdot (-\sin(\alpha / 2)), \quad (7)$$

$$y = r \cos(\alpha / 2). \quad (8)$$

求得小球 O_{21} 球心位置坐标

$$x_{21} = x_2 + x, \quad (9)$$

$$y_{21} = y_2 + y, \quad (10)$$

$$z_{21} = z_2. \quad (11)$$

最后, 根据每周中第 1 个小球的球心位置坐标, 求出该周中其它小球的位置坐标。所用方法与对小球 O_2 位置坐标进行偏移的方法类似, 不再赘述。利用上述方法, 可以将若干段圆弧、直线段、抛物线等连接起来, 组合成复杂的战斗部外形。

3.2 参数化有限元建模研究

在该系统中, 要想实现参数化有限元建模, 需对不同战斗部的结构进行分析, 找出能够代表战斗部共性的原型参数, 这些参数的值不是在编写有限元程序时给出, 而是在战斗部原型结构模块中, 通过管理界面进行输入。

该系统针对不同类型的战斗部, 编制了若干种战斗部有限元程序。这里分 2 种情况: 1) 对于球形预制破片来说, 无法直接由 Truegrid 建模工具完成建模任务, 首先要按照 3.1 节中所述的方法, 单独编写 C 程序计算小球的位置坐标, 再根据小球位置坐标利用 Truegrid 建模工具进行参数化有限元建模; 2) 对于方形破片、杆条形破片, 直接利用 Truegrid 建模工具即可完成参数化有限元建模。

上述做法最大的好处在于, 设计人员无需亲自去编写复杂的有限元程序, 只要根据设计需要输入一些参数, 就能够生成符合要求的有限元模型, 从而提高了设计人员的工作效率。

由于整个战斗部的破片数目较多, 用完整战斗部进行计算, 既费时又没有必要。因此, 在考虑了计算模型的大小和反映模型真实程度的基础上, 对战斗部进行剖切, 只选择战斗部的局部进行有限元建模和计算^[4]。

4 仿真系统实现

4.1 仿真系统工作流程

根据仿真系统框架设计中各功能模块所完成的功能, 在分析仿真试验流程的基础上, 得到了该仿真系统的工作流程, 如图 4 所示。

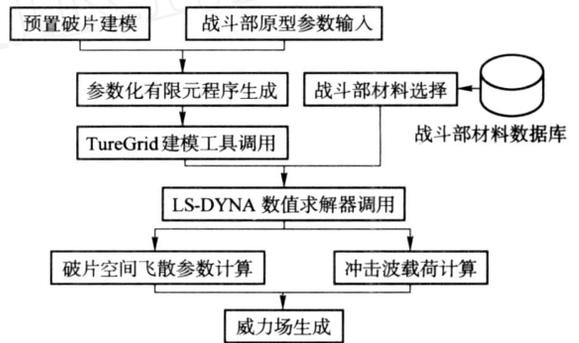


图 4 仿真系统工作流程图

Fig. 4 Flow chart of the simulation system running

下面分析仿真系统的工作流程:

1) 对预制破片战斗部来说, 首先对预制破片进行建模; 然后, 设计人员根据设计需要, 在战斗部原型结构模块中输入战斗部原型参数, 系统自动生成参数化的有限元程序。

2) 在输入战斗部原型参数的同时, 还要对战斗部所使用的材料进行选择, 为后面的数值计算做准备, 所有战斗部材料都存储在材料数据库中。

3) 系统调用 TrueGrid 建模工具, 根据上述生成的有限元程序进行有限元网格划分, 并把结果保存在文件中。网格生成后可以查看其是否满足要求, 如果不满意, 可调整相关参数重新生成网格模型, 直到满足要求为止。

4) 系统调用 LS-DYNA 软件, 根据有限元建模生成的结果, 并结合所选定的战斗部材料数据进行数值求解。求解结果保存在文件中, 提供给后面的处理工具进行处理。

5) 根据 4) 中生成的求解结果,利用破片空间飞散参数计算模块和冲击波载荷计算模块,对生成的数据进行相应处理后,生成战斗部威力场。战斗部设计人员可对生成的威力场进行评估,如果对结果不满意,可修改相关参数重新进行试验。

4.2 仿真系统实现

战斗部威力场仿真系统采用 MFC 单文档/视图结构,利用 VC++ 6.0 开发环境创建应用程序主框架类,系统中各模块的功能在各自对应的类中实现,下面对几个重要模块的软件实现进行介绍。

4.2.1 预制破片建模模块

预制破片建模在对话框类 CArrayBallDlg 中完成,在输入预制破片建模所需的参数后,类的成员函数 OnComputeBallArray() 按照 3.1 节中的方法,计算小球排布的位置坐标,计算结果保存在 core.k 文件中,core.k 文件被包含在 .tg 文件中。

4.2.2 战斗部原型结构模块

该模块的功能在对话框类 CAddWarheadDlg 中实现,利用界面上的文本输入框和材料选择按钮进行战斗部原型参数输入和材料选择。类的成员函数 OnWriteButton() 生成参数化的有限元程序并保存在 .tg 文件中,同时生成数值计算软件的输入文件并保存在 main.k 文件中。

4.2.3 有限元建模模块

有限元建模模块在对话框类 CModelingDlg 中实现,类中的 ThreadProc() 函数完成新线程创建前的相关处理。

```
ThreadProc()
{
    .....
    GetModulePath(); 取得建模工具的路径
    CreateProcess(); 为建模工具建立进程
    .....
}
```

在对话框初始化时,利用 CreateThread() 函数创建一个新线程,ThreadProc() 函数作为 CreateThread() 函数的一个参数被调用。新建的线程实现了自动调用 TrueGrid 工具进行有限元建模,建模结果保存在 k.k 文件中,k.k 文件被包含在 main.k 文件中。

4.2.4 数值计算模块

该模块的功能在对话框类 CComputeDlg 中实现,采用与有限元建模时相同的方法,在对话框初始化时,新建一个线程自动调用 LS-DYNA 软件,LS-

DYNA 根据 main.k 文件的内容进行数值计算,计算的结果保存在 nodout 文件中。

4.2.5 破片空间飞散参数计算模块

该模块的功能由类 CComputeFlyParaDlg 中的 OnCompute() 函数实现。首先读取 LS-DYNA 数值计算结果文件 nodout 中破片的状态数据。在 nodout 文件中,结果数据按照时间步长分块存储,读取最后一个时间步长的数据作为破片的初始状态。文件中每个数据块的各列分别对应破片节点编号、破片沿 3 个坐标轴的位移分量、速度分量、加速度分量和位置坐标分量。由于文件 nodout 的格式固定,所以可以编写通用的程序从文件中读取所需数据,具体读取方法如下:

- 1) 打开 nodout 文件,遍历第 1 个数据块,得到破片总数 NodeNumber;接下来遍历所有数据块,得到破片按照时间步长输出的次数 StepNumber;关闭文件。

- 2) 重新打开文件,根据 1) 中得到的 NodeNumber 和 StepNumber,移动文件指针到最后一个数据块,读取数据块中的破片位置坐标和速度值等,关闭文件。

上述读取的是战斗部爆炸后,破片飞散几十厘米后对应的位置坐标和速度值,以此作为破片初始状态,再根据相应的破片飞散模型计算破片在空间飞散的参数。这里采用射击迹线模型,考虑破片速度在空气中的衰减,破片飞散距离和计算时间步长由设计人员根据需要在仿真系统界面上进行设定,系统按照时间步长输出破片在不同时刻的位置坐标和对应的速度值,计算后的结果保存在文件中。

5 仿真实例

下面利用该仿真系统对某导弹战斗部进行威力场数值仿真。首先利用该系统对单聚焦球形预制破片战斗部的小球破片排布进行建模,生成有限元模型。然后根据有限元建模结果,利用 LS-DYNA 进行数值计算后生成战斗部威力场,如图 5 所示(图中所示是战斗部爆炸 100.01 μs 时的状态)。

利用该仿真系统可以计算出战斗部的相关指标参数,战斗部仿真计算结果与试验结果数据如表 1 所示。

通过对表中的战斗部仿真计算结果与试验结果进行分析比较,战斗部仿真计算结果与试验结果中的破片平均速度相差 7%,聚焦率相差 5.09%。说明该仿真系统计算结果可靠有效,能够满足实际应

用的要求。

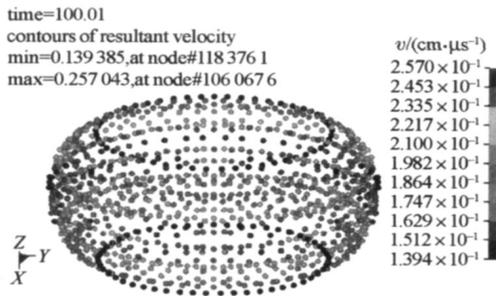


图 5 战斗部威力场数值模拟

Fig. 5 Numerical simulation of the warhead power field

表 1 战斗部仿真计算与试验结果

Tab. 1 The computed and tested results of warhead fragment

结果类型	破片平均速度 $v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	聚焦带宽/ (°)	聚焦率/ %
计算结果	1 860	8.1	93.52
试验结果	2 000	7.0	98.61

6 结论

以上设计实现的仿真系统,满足了本文所提出的系统功能要求,在对系统实现过程中的几项关键建模方法进行分析后,实现了各种建模工具、数值计算软件以及后处理工具的集成。利用该仿真系统对某型战斗部威力场进行仿真,能够满足战斗部设计人员的使用要求。该系统提高了设计人员工作效率和产品的水平,同时可减少真实靶场试验次数,降低靶场试验的费用。

由于战斗部威力场仿真系统计算所需时间较长,不能直接作为子系统加入到其它实时仿真系统中。但可以根据需要提前进行相关计算,把计算结果保存在文件或数据库中;然后通过 HLA/RTI 底层支撑结构,把计算结果发送给其它的仿真子系统,从而构建更大的分布式仿真系统。比如该系统可与模拟导弹飞行攻击过程的仿真子系统相结合,实现导弹飞行、目标攻击和战斗部爆炸毁伤过程的仿真。

参考文献(References)

- [1] 杨育林,陈占利,齐效文. 滑动摩擦磨损试验机的 ANSYS 模态分析[J]. 试验技术与试验机, 2006, (1): 57 - 59.
YANG Yu-lin, CHEN Zhan-li, QI Xiao-wen. Model analysis of friction wear test machine based on ANSYS software [J]. Test Technology and Test Machine, 2006, (1): 57 - 59. (in Chinese)
- [2] 孟会林,孙新利,王少龙. LS-DYNA 程序在战斗部仿真计算中的应用[J]. 上海航天, 2003, (2): 33 - 37.
MENG Hui-lin, SUN Xin-li, WANG Shao-long. Application of LS-DYNA program in emulation calculation of warhead [J]. Aerospace Shanghai, 2003, (2): 33 - 37. (in Chinese)
- [3] 何广军,万少松,高福利. 防空导弹战斗部破片飞散特性分析[J]. 空军工程大学学报, 2000, 1(4): 17 - 20.
HE Guang-jun, WAN Shao-song, GAO Fu-li. The analysis on dispersion characteristic of aerial defence missile warhead [J]. Journal of Air Force Engineering University, 2000, 1(4): 17 - 20. (in Chinese)
- [4] 魏继锋,焦清介,宁建国. 双聚焦式破片战斗部不同起爆方式的数值模拟研究[J]. 含能材料, 2005, 13(1): 17 - 21.
WEI Ji-feng, JIAO Qing-jie, NING Jian-guo. Numerical investigation of different initiation modes for dual-focusing fragment warhead [J]. Energetic Materials, 2005, 13(1): 17 - 21. (in Chinese)