

doi: 10.7690/bgzd.2015.06.009

自行火炮射击密集度仿真平台

赖煜坤, 徐礼, 温辉, 卓洪波
(中国人民解放军 75130 部队保障部, 广西 贵港 537103)

摘要: 为了快速准确地预测自行火炮的射击密集度, 运用基于接口的协同仿真技术, 将火炮部分结构参数化三维建模、内弹道计算、柔性身管建模、多柔体动力学仿真、外弹道计算以及射击密集度计算等模块进行集成, 构建了参数化的自行火炮射击密集度仿真平台, 并以某自行火炮为例, 运用该仿真平台计算了自行火炮的射击密集度。研究表明: 该平台可快速、准确地计算自行火炮射击密集度, 同时也为自行火炮结构参数优化提供了模型基础。

关键词: 自行火炮; 射击密集度; 仿真平台; 协同仿真; 参数化建模
中图分类号: TJ303 **文献标志码:** A

Self-propelled Gun Fire Intensity Simulation Platform

Lai Yukun, Xu Li, Wen Hui, Zhuo Hongbo
(Support Department, No. 75130 Unit of PLA, Guigang 537103, China)

Abstract: In order to quickly and accurately predict the fire intensity of self-propelled gun, this paper use collaborative simulation technology based on the interface to integrate part of the structural parameters of gun 3D model, interior ballistics calculations, flexible tube body modeling, flexible multi-body dynamics simulation and exterior ballistics calculation module. The parametric self-propelled gun fire intensity simulation platform is built. Take certain type of self-propelled gun as example, the fire intensity of this gun is calculated by the simulation platform. The results show that the platform can be quickly and accurately calculate fire intensity of self-propelled gun, and also provides the model basis for self-propelled gun structural parameters optimization.

Keywords: self-propelled gun; fire intensity; simulation platform; collaborative simulation; parametric modeling

0 引言

射击密集度是自行火炮设计研制过程中需要时刻关注的指标之一, 如何快速、准确地计算其射击密集度非常重要。射击密集度的计算方法包括试验法和计算机仿真法。试验法需要花费大量的人力、物力和财力, 特别是在武器的研制阶段, 武器结构方案常常需要不断修改, 这更加增大了试验的难度、经费和周期; 计算机仿真法是目前常用的方法, 相比试验法, 其实施难度小, 花费的时间和经费都少。以往进行火炮射击密集度计算多采用 Pro/E、Adams 或 Ansys 等 CAD/CAE 软件单独计算, 并通过手工操作完成各计算软件中的数据传递^[1-2]。为提高计算的效率、准确性和通用性, 火炮射击各个阶段的仿真模型应该参数化, 各模型应该能够按流程自动运行, 模型之间的数据能够自动传递。为实现上述功能, 笔者引入基于接口的协同仿真技术, 探讨一种自行火炮射击密集度快速计算的技术途径。

1 自行火炮射击密集度计算模型

计算机仿真法计算自行火炮射击密集度是运用弹道学理论、火炮发射动力学理论、计算机仿真、随机模拟技术、设计参数灵敏度分析以及概率统计

等理论方法, 利用计算机仿真自行火炮系统发射全过程, 研究发射过程中各个阶段上的射击现象, 分析弹-炮-药系统设计参数统计特性对射弹散布影响规律, 寻求提高射击精度的技术途径^[3]。

图 1 为自行火炮射击密集度计算流程, 包括三维实体建模、内弹道计算、柔性身管建模、多柔体发射动力学仿真、外弹道计算和射击密集度计算等模块^[4]。笔者建立的自行火炮射击密集度仿真平台能够按此流程自动进行射击密集度计算。



图 1 射击密集度计算分析流程

火炮发射过程实际上是一个受多种随机扰动因素影响的随机过程, 为了能在仿真模型中反映这种统计规律, 需要使用随机模拟技术。笔者在各模块中嵌入了产生 $N(0,1)$ 分布随机数的程序, 以便仿真过程中随时调用该函数产生随机变量。

1.1 三维实体建模模块

笔者建立了履带式自行火炮的三维模型, 其结构主要包括火力系统和履带底盘两大部分。建模时将火力系统简化为炮塔、炮尾、高低机、方向机、

收稿日期: 2015-01-25; 修回日期: 2015-02-19

作者简介: 赖煜坤(1976—), 男, 广西人, 硕士, 从事武器系统集成与评估研究。

平衡机、身管、炮口制退器和摇架等部件；将底盘系统简化为车体、悬挂系统和履带等部件。

本模块可调用 Pro/E 或 SolidWorks 三维建模软件建立或修改工作目录中的火炮三维模型。另外也可对个别关键件的主要尺寸参数化，通过输入相关参数自动修改其三维模型。如笔者建立了身管和弹丸参数的可视化输入界面，通过 Python 脚本程序调用 WorkBench/DM 模块对已建立的身管和弹丸模型进行修改，身管的主要参数包括身管内径和长度、材料密度、弹性模量和泊松比等参数；弹丸的参数包括弹带直径、前后弹带距离、材料密度、弹性模量和泊松比等参数。模块可自动完成所有设计点数据的修改、模型更新、网格划分、载荷施加及有限元分析。有限元分析结果为应力应变等计算结果，作为模块的输出参数。另外，还需要输出动力学建模时需要的中间格式模型文件(x_t 文件)。

1.2 内弹道计算模块

火药气体压力是火炮发射动力学仿真的主动力。内弹道计算模块可使用 2 方法产生火药气体压力，一是调用内弹道试验数据，并对其进行处理，得到发射动力学模块(Adams)可调用的数据格式；二是通过输入参数并调用内嵌的经典内弹道方程求解程序得到火药气体压力。图 2 为内弹道计算模块的参数输入界面。



图 2 内弹道计算模块

模块的计算结果为单发弹丸的膛内火药气体压力，将火药气体压力数据保存为 dat 格式文件作为动力学模型的输入文件。

1.3 柔性身管建模模块

此模块通过读取 APDL 脚本程序来调用 Ansys/APDL 建立身管的柔性体中性文件。APDL 文件读取身管的有限元分析工程文件中的网格、载荷、约束和外部节点等参数的数据文件(ds.dat)，根据输入的截取模态除数自动运行 ADAMS 宏命令，自动选择编号最大的与外部节点数对应的几个节点号生成 MNF 文件。

1.4 多柔体发射动力学仿真模块

此模块通过 CMD 文件调用 ADAMS/Slover 来进行火炮发射动力学仿真，CMD 文件包含火炮动力学模型完整的拓扑结构信息(所有几何信息)、模型仿真信息。为实现外部模型数据的自动更新、仿真结果自动后处理及输出，需要利用 CMD 二次开发语言对该文件修改或添加部分代码。

通过 CMD 文件可自动读取火药气体压力文件，修改零部件质量属性，设置高低和方位射角，修改动力偶臂大小，读取修改后的零部件三维实体模型并添加载荷自动建立动力学模型，自动对输出结果进行后处理并输出，输出结果包括弹丸出膛口时刻炮口振动和弹丸姿态参数(卡尔丹角与角速度、线速度等)以及该时刻柔性部件外部节点上的载荷数据。图 3 为多柔体动力学仿真参数设置界面。



图 3 多柔体发射动力学仿真模块

1.5 六自由度外弹道计算模块

采用六自由度外弹道程序仿真自行火炮的射击密集度，外弹道开始时刻，弹丸的动态参数是通过发射动力学仿真组件计算得到的，由于外弹道学中描述弹丸的姿态角所采用的方法与 ADAMS 多体动力学仿真平台不同，因此利用发射动力学仿真组件计算得到的弹丸出膛口时刻的动态参数不能直接用于外弹道仿真，必须研制相应的接口程序将其转换成外弹道方程可识别的弹丸起始扰动参数。

将文献[5]中的弹丸起始扰动坐标转换方程编写求解函数并嵌入自行火炮射击密集度仿真平台，将发射动力学仿真模块得到的弹丸出膛口的动态参数转换为起始扰动参数，作为外弹道计算条件。

六自由度外弹道计算模块可计算每发弹丸落点的坐标。该模块的输入参数为弹丸和身管的结构参数、高低射角以及气象条件等参数。该模块的输入输出参数如图 4 所示。

六自由度外弹道方程可参考文献[6]。将方程的求解函数嵌入平台中，该函数可产生随机数，产生弹丸起始扰动、气象条件和弹丸结构等参数的随机变量，接受用户输入的外弹道参数，输出千米立靶

上每发弹丸弹着点的高低和方位向坐标文件以及最大射程上的落点坐标文件。



图 4 外弹道计算模块

1.6 射击密集度统计模块

射击密集度模块用来统计自行火炮千米立靶密集度和最大射程地面密集度，立靶密集度一般用高低中间误差 E_y 和方向中间误差 E_z 来表示^[7]，即

$$\begin{cases} E_y = 0.6745 \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{y} - y_i)^2} \\ E_z = 0.6745 \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{z} - z_i)^2} \end{cases} \quad (1)$$

式中： $Y_i, Z_i (i=1,2,\dots,n)$ 是第 i 发炮弹仿真射击时的靶着点在高低和方位上的坐标，由外弹道模型计算得到； \bar{y}, \bar{z} 分别为发炮弹弹着点在高低和方位上的坐标平均值，一般 $n \geq 7$ 。

地面密集度的计算方法与立靶密集度类似，一般用距离中间偏差 E_x 和侧向中间偏差 E_z 来表示：

$$\begin{cases} E_x = 0.6745 \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2} \\ E_z = 0.6745 \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{z} - z_i)^2} \end{cases} \quad (2)$$

射击密集度仿真平台各模块都施加了随机变量，故外弹道仿真计算获得的弹丸落点也是随机的，运用式 (1) 和 (2) 进行数理统计可计算得到立靶密集度和地面密集度。模块将多次射击仿真获得的弹丸落点数据进行统计，得到自行火炮的射击密集度。

2 软件平台

在上述原理的基础上，基于 QT5.3 环境开发了火炮射击密集度仿真平台，包括前处理程序、核心计算程序和后处理程序，其中前处理程序为各模块参数的输入界面，核心计算程序为 Pro/E、ANSYS 和 ADAMS 等 CAD/CAE 软件以及内外弹道计算程序，后处理器为各种仿真结果的输出^[8]。在软件的用户欢迎界面中，可选择手动分步计算，或选择按流程自动计算火炮射击密集度。

与以往手工调用各个计算软件进行射击密集度相比，笔者构建的仿真软件平台具有以下几个优点：一是通过自动调用 CAD/CAE 软件和自编程序，减少人工的重复性工作，提高了仿真分析的效率。各软件采用后台运行方式，节省了计算时间；二是各模块之间的数据自动传递，不会出现数据丢失或传递错误的现象，提高了仿真分析效率和准确度；三是采用参数化建模技术，通过改变平台中各模块的参数可以快速计算不同结构的自行火炮在不同射击条件下的射击密集度。

3 应用实例

为了验证火炮射击密集度仿真模型的正确性，以某自行榴弹炮为例，射击工况为 0° 高低射角正前方射击、榴弹炮标准装药以及标准大气压条件下。在本软件平台上进行火炮射击密集度仿真计算，计算结果与试验结果对比如表 1 所示。

表 1 仿真结果与试验结果对比 m

千米立靶密集度		地面密集度	
高低中间误差	方向中间误差	距离中间偏差	侧向中间偏差
预测	试验	预测	试验
0.318	0.278	0.279	0.298
		34.63	38.56
		8.95	9.02

由表 1 可知：千米立靶密集度与地面密集度仿真结果与试验结果吻合得较好，说明笔者开发的自行火炮射击密集度仿真软件平台是正确可行的。

4 结论

笔者基于协同仿真技术及射击密集度仿真原理，开发了自行火炮射击密集度仿真软件平台，并通过仿真结果与试验结果对比，验证了平台的正确性。研究表明：该软件平台可快速准确地计算自行火炮射击密集度，为火炮动力学优化提供基础。

参考文献：

- [1] 曾晋春, 杨国来, 王晓锋. 某火炮自动机虚拟样机建模与仿真[J]. 火炮发射与控制学报, 2008(3): 42-45.
- [2] 周成, 顾克秋, 卢其辉, 等. 式自行火炮发射动力学仿真建模[J]. 四川兵工学报, 2010(6): 23-26.
- [3] 郭锡福. 远程火炮武器系统射击精度分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 49-53.
- [4] 曹万有, 张文柱, 王道宏, 等. 高膛压火炮技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1989: 115-127.
- [5] 杨国平, 陈运生. 火炮密集度的计算机模拟研究[J]. 火炮发射与控制学报, 1999(3): 1-4.
- [6] 韩子鹏. 弹箭外弹道学[D]. 北京: 北京理工大学出版社, 2008: 89-93.
- [7] 徐诚, 王亚平. 火炮与自动武器动力学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006: 249-253.
- [8] 陆文周. Qt5 开发及实例[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014: 75-92.