

doi: 10.7690/bgzd.2019.11.015

线膛身管建模方案及弹炮耦合问题研究

邓辉咏¹, 何循来², 海燕³, 殷军辉¹

(1. 陆军工程大学石家庄校区火炮工程系, 石家庄 050003; 2. 南通理工学院机械学院, 江苏 南通 226002;
3. 白城试验中心火力打击大队, 吉林 白城 137001)

摘要: 为解决线膛身管有限元建模依赖专业软件 Hypermesh 的问题, 提出基于 ABAQUS 和 Matlab 软件的联合建模方案, 研究具有初始挠度线膛身管有限元建模流程。基于 Von Mises 屈服准则和 Johnson-cook 强化模型, 建立考虑弹带弹塑性和身管初始挠度的弹炮耦合模型, 分析弹丸在膛内的运动规律。结果表明: 考虑身管自重弯曲后, 弹炮耦合作用加剧, 身管弯曲对弹丸横向和纵向运动均有明显影响。

关键词: 弹炮耦合; 动力学; 线膛身管; 有限元; 弹塑性

中图分类号: TJ410.2 **文献标志码:** A

Study on FEM Model Built Method of Rifle Barrel with Initial Bend and Projectile-barrel Coupling Problem

Deng Huiyong¹, He Xunlai², Hai Yan³, Yin Junhui¹

(1. Department of Artillery Engineering, Shijiazhuang Campus of PLA University of Army Engineering, Shijiazhuang 050003, China; 2. Department of Mechanism, Nantong Institute of Technology, Nantong 226002, China; 3. Firing Fighting Brigade, Baicheng Equipment Testing Center, Baicheng 137001, China)

Abstract: Aimed at the fact of finite element method (FEM) building of rifled barrel relying on the professional software Hypermesh, the combination FEM model building scheme based on ABAQUS and Matlab software was proposed, and the FEM building flow process of rifled barrel with initial bend was researched. Based on Von Mises yield criterion and Johnson-cook plastic strengthen criterion, the projectile-barrel coupling model considering bearing band with elastic-plastics and rifled barrel with initial bend was built, and the movement of projectile in barrel was analyzed, the result shows that: considering the barrel self weight bend, the function of projectile-barrel coupling became serious, and both level and vertical orientation were effect by the bend of barrel.

Keywords: projectile-barrel coupling; dynamics; rifling barrel; FEM; elastic-plastic

0 引言

弹丸在膛内的运动过程是引起炮口起始扰动的重要因素之一, 是一种耦合运动。多年来, 许多学者为揭示弹炮耦合运动规律作了不懈的努力。文献[1]基于 ADAMS 软件, 将弹丸与线膛身管的约束关系转化为一个圆柱副和螺旋副, 但该模型只能模拟等齐膛线的作用, 且忽略了接触/碰撞的非线性因素, 是一个理想化的模型; 文献[2]提出了一种改进的基于有限段法的弹炮耦合建模方案, 分析了弹丸结构参数对起始扰动的影响; 文献[3]基于 ADAMS 软件和接触算法, 建立了考虑身管弹性的弹炮耦合模型; 文献[4]基于非线性有限元方法和 Hypermesh 软件, 建立了考虑弹带弹塑性的弹炮耦合模型, 但没有考虑身管自重引起的初始弯曲变形; 文献[5]采用多分析步的方法, 考虑了身管的自重变形, 但该方法每次仿真均需计算重力静载时的分析步; 文献

[6]基于有限元方法, 依赖专业化的软件 Hypermesh, 通过插值、拟合的方法得到具有初始挠度的身管。从搜索到的文献来看, 建立高精度线膛身管有限元模型, 过于依赖 Hypermesh 软件, 而专业化的软件不易获取, 有必要研究一种基于通用软件的建模方案; 因此, 笔者提出了基于 ABAQUS 和 Matlab 软件的联合建模方案, 研究了具有初始挠度线膛身管有限元建模流程。

1 具有初始挠度线膛身管建模方案

1.1 inp 模型文件简介

ABAQUS 的模型文件(扩展名为.inp)包含了整个模型的完整描述, 建立了前处理器与求解器之间的连接。它是一种模块化的程序结构, 每一个模块以带“*”的关键字开始, 其组织结构:

```
*Part, Name=Part-1 //结构件名称
```

收稿日期: 2019-06-11; 修回日期: 2019-07-29

基金项目: “十三五”江苏省一级学科省重点建设学科项目(2016-0802 机械工程)

作者简介: 邓辉咏(1983—), 男, 江西人, 博士, 讲师, 从事武器系统仿真及信息化研究。E-mail: deng-124@163.com。

```

*Node //节点坐标开始关键字
1, 0, 0, 0. //第 1 个节点坐标为(0,0,0)
2, 0.1, 0.05, 0
...
*Element, type=C3D8R //八节点缩减积分六
面体 3 维实体单元
1, 8, 215, 1210, 278, 1, 33, 1033, 156 //组
成第 1 个单元的节点编号, 由 8 个节点组成
2, 215, 214, 1211, 1210, 33, 34, 1034, 1033
...
*end Part
*Assembly //装配体
...
*end Assembly
*Step //设置分析步
...

```

*end Step
...
从中可以看出：每一个 part 数据块由若干个单元组成，每一个单元由 8 个节点拓扑组成，每一节点由其 3 维笛卡尔坐标表示。根据 inp 文件的这个特点，可以在不更改单元拓扑结构的情况下，通过改变节点坐标得到线膛炮身管模型^[7]。

1.2 ABAQUS 和 Matlab 联合建模方案

该型火炮身管有 48 条膛线。为了减小建模时的计算量，先建立 1/48 模型，然后采用合并节点的方法得到整个线膛身管模型。

在 ABAQUS 中，对于简单体可采用结构化的网格划分方法，中性轴算法具有节点编号沿指定方向逐渐增大的规律，为在 Matlab 中按节点编号修改节点坐标提供了思路。具体建模流程如图 1。

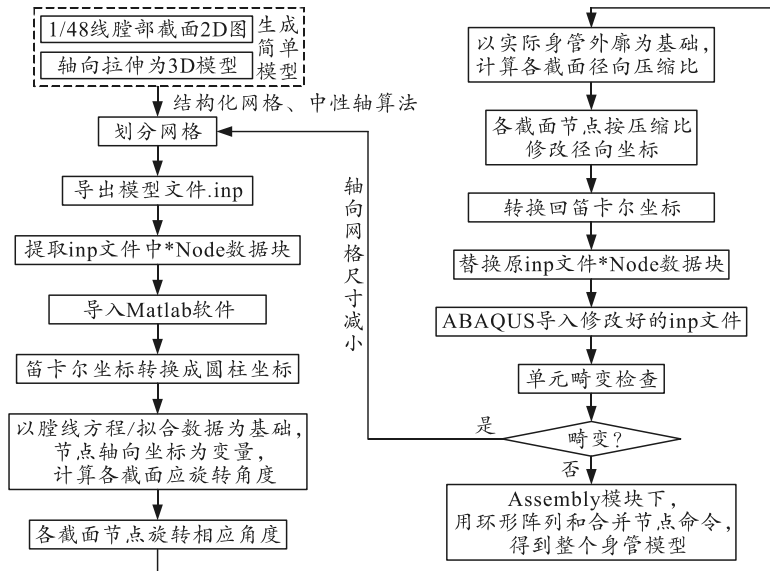


图 1 线膛身管建模流程

按图 1 所述流程建立某线膛身管 1/48 模型如图 2 所示。从图中可以看出：简单形状经过节点的沿轴线旋转和径向压缩后，形成线膛身管的锥形。在 Matlab 中修改节点坐标后，注意检查单元畸变情况，如有畸变，则要回到初始简单模型，将单元尺寸缩小，增加单元数。

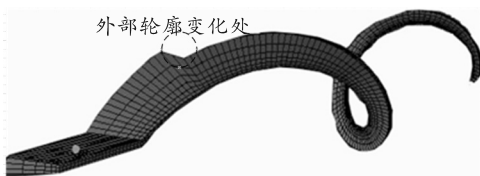


图 2 节点按膛线方程旋转后的 1/48 模型

部安装有炮尾，炮尾上安装有导轨，可在摇架内作后坐运动。由于炮尾和制退器不参与弹丸接触，在建模时将其设置为刚性单元。将炮尾作为固定端约束，整个模型施加重力作用，通过有限元计算得到身管在重力作用下的弯曲变形，即得到身管各截面的初始挠度，计算得到的炮口部挠度为 6.88 mm。

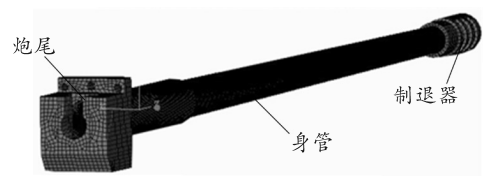


图 3 炮身有限元模型

1.3 身管初始挠度计算

如图 3 所示，身管炮口部安装有制退器，炮尾

1.4 具有初始挠度身管模型

身管为中空结构，无法直接得到其轴线的弯曲

变形情况。笔者采用重力方向，上下 2 个节点位移平均值作为身管轴线初始变形量，将身管轴线的初始变形作为身管的初始挠度。

采用合并节点操作后，身管各截面节点编号规律性不再明显，不再适合 Matlab 操作修改节点坐标参数。在 ABAQUS 中 Mesh 模块下的网格编辑工具，可将节点按任意方向移动，利用该工具可得到具有初始挠度身管的有限元模型。具体建模流程如图 4 所示。

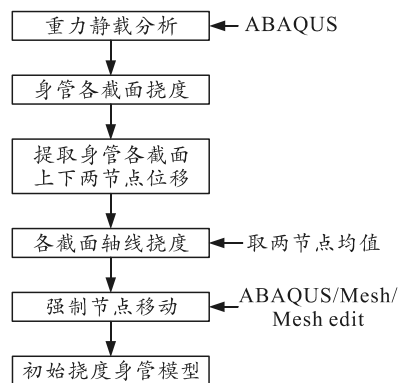


图 4 具有初始挠度身管建模流程

2 弹炮耦合有限元建模

2.1 基本假设

- 1) 身管、弹体为弹性体，弹带为弹塑性体。
- 2) 忽略弹带挤进时的强化，挤进后的加载作为第一次加载。这个假设是合理的，根据 Clark D.S 的研究成果，塑性变形具有滞后性，挤进后没有直接接触膛线的弹带材料还来不及达到屈服极限；因此，只有弹带外层材料发生了较大塑性变形，内部材料发生的塑性变形有限^[8]。
- 3) 忽略抽气装置和身管上抽气孔的影响。
- 4) 射击时，炮身的高低角为 0°、常温、底凹弹、方向角 0°，弹底压力垂直于弹底。
- 5) 初始时，弹轴与炮轴重合。

2.2 实体模型

身管模型按前节所述建立，预切的弹带单独建立，该型火炮弹带采用双弹带，建立的预切弹带和弹炮耦合剖面图如图 5 所示。

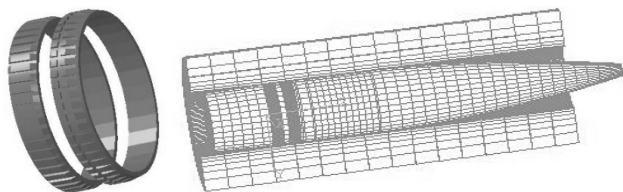


图 5 弹炮耦合实体模型

2.3 屈服准则

屈服准则用于判定材料处于弹性状态还是塑性状态，较常用的是 Von Misses 准则。

Von Misses 屈服准则又称能量屈服准则，由 Misses 于 1913 年提出，弥补了 Tresca 屈服准则的不足。它的屈服条件是：当物体内一点的应力偏张量的第二不变量达到某一数值时，那么这一点发生屈服，其数学描述为

$$f(\sigma_{ij}, \sigma_s) = \frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] - \frac{1}{3}\sigma_s^2 = 0. \quad (1)$$

式中： σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为 3 个方向上的主应力； σ_s 为屈服应力。

2.4 强化准则

强化准则是判定某点再次屈服的准则，弹带与身管内壁的作用属于高速冲击接触，并在这种作用下产生很大的塑性变形。材料在塑性变形过程中，有很大部分塑性功转化成了热量。对于大多数的金属，90%~100%的塑性变形耗散为热量。Johnson-cook 模型能较好地反映大应变率材料在冲击载荷下材料的变形，其表达式为

$$\sigma = [A + B(\varepsilon^{pl})^n][1 + C \ln(1 + \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0})](1 - \bar{T}^m). \quad (2)$$

式中： A 、 B 、 n 、 m 、 C 是弹带材料参数，由实验确定； ε^{pl} 为塑性应变； $\dot{\varepsilon}$ 为应变率； $\dot{\varepsilon}_0$ 为转变温度下，温度无关的应变率； \bar{T} 为温度的无量纲化符号。

2.5 材料模型和边界条件

身管、弹体、炮口制退器和炮尾赋予炮钢的密度、泊松比和弹性模量等参数，由于炮口制退器和炮尾在弹丸膛内运动过程中不考虑其变化，为了提高计算效率，将其设置为刚性单元；弹带按 Johnson-cook 模型赋予其材料属性参数。

给炮尾施加一个速度场，在 ABAQUS 中建立一般接触，弹底施加理论计算的弹底压力。

3 仿真分析

为了研究身管自重弯曲对弹丸膛内运动规律的影响，分别考虑身管自重弯曲和身管自重弯曲的弹炮耦合模型进行计算，得到弹轴在膛内横向和纵向摆动曲线如图 6—9 所示。

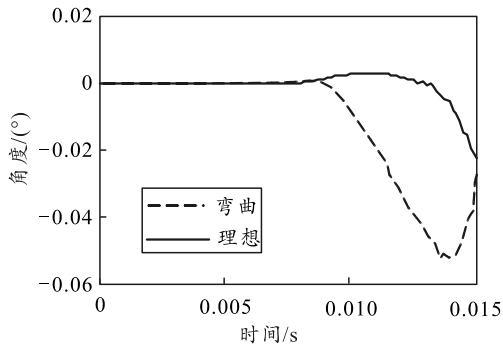


图 6 弹轴横向摆动角度曲线

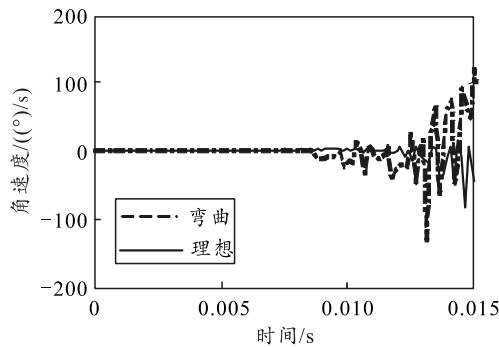


图 7 弹轴横向摆动角速度曲线

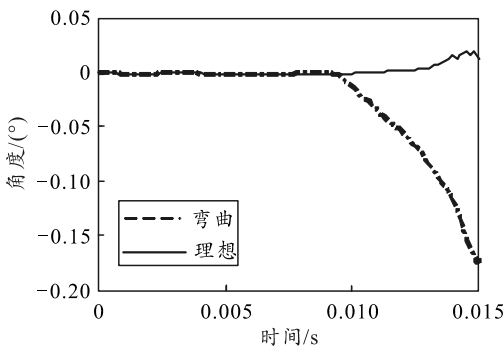


图 8 弹轴纵向摆动角度曲线

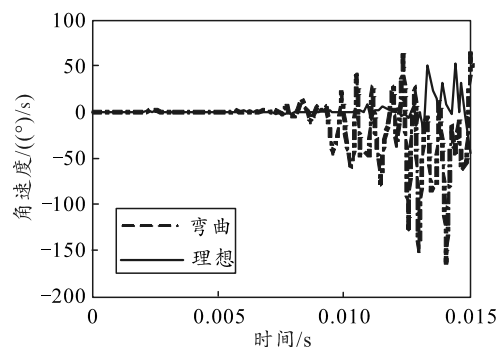


图 9 弹轴纵向摆动角速度曲线

从图中可以得到以下结论：

1) 弹轴的扰动主要发生在膛内运动的后期。这是由于在膛内运动前期，弹丸速度较小，弹炮耦合作用不明显，而在后期，弹丸速度较大，弹炮之间的耦合作用得到了明显体现，充分说明在以射击精度为研究对象的火炮射击动力学研究时，必须考虑

弹炮耦合作用^[9]。

2) 从横向摆动曲线来看，不考虑身管时弹轴有左右摆动的趋势。这是由于弹带与膛线的相互作用，使得身管向一侧扰动，由于身管的弹性，身管会向其平衡位置运动；而考虑身管弯曲变形后，弹轴的运动明显变化，具有向一侧运动的趋势，说明身管弯曲对弹丸的运动不只体现在纵向，在横向也会存在偏差，产生方向误差；在膛内运动后期，具有向另一侧加速运动的趋势。这是由于弹丸前定心部出炮口后，弹丸前端推动支撑，加上弹丸的旋转运动，使得弹轴发生偏转。

3) 从纵向摆动曲线来看，弹轴有一个明显沿重力方向(向下)偏转的趋势，说明身管的初始挠度对弹丸膛内运动影响较大。

4) 从横向和纵向摆动角速度曲线来看，考虑身管自重弯曲后弹丸在膛内的运动比不考虑弯曲要激烈得多。这是由身管失去其轴对称特性引起的，因此，在分析火炮射击精度时应考虑身管的初始挠度。

4 结论

基于 ABAQUS 模型文件的特性，通过更改节点坐标的方法，建立高精度六面体单元具有初始挠度线膛身管的有限元建模方案，研究了其建模流程，克服了复杂零部件有限元建模依赖专业软件 Hypermesh 的不足。基于此，建立考虑弹带弹塑性和身管自重弯曲的弹炮耦合模型，分析了自重弯曲对弹丸膛内运动的影响。结果表明：弹炮耦合运动在膛内运动后期明显，身管自重弯曲对弹丸膛内运动影响激烈，且对弹丸的横向和纵向运动均有影响；因此，会引起弹丸方向和距离的误差，在以精度为目标的火炮动力学研究时应该考虑身管弯曲情况。

参考文献：

- [1] 马吉胜. 基于 ADAMS 软件的弹炮耦合问题研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2001(2): 29-31.
- [2] 邓辉咏, 马吉用, 刘海平, 等. 弹丸前定心部间隙对炮口扰动规律仿真研究[J]. 科学通报, 2013, 29(1): 93-97.
- [3] 郭保全, 刘佳. 弹性身管的弹炮耦合问题研究[J]. 机械强度, 2013, 35(3): 297-301.
- [4] 葛建立, 杨国来, 陈运生, 等. 基于弹塑性接触/碰撞模型的弹炮耦合问题研究[J]. 弹道学报, 2008, 20(3): 103-106.
- [5] 林秉奇. 基于弹炮耦合的火炮非线性动态特性分析与研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013: 35-39.

和定期检测策略下基于蒙特卡罗仿真计算评价指标的方法和流程，并以评价制动器摩擦盘定期检测间隔期为例，验证了该方法的有效性。

参考文献：

[1] XU A, QIAO X. On the Optimizing Maintenance Intervals of Transport Vehicles[C]//International Conference of Logistics Engineering and Management (ICLEM) 2010.

[2] 李燕燕. 汽车变速器可靠性分析及维修决策系统软件开发[D]. 沈阳: 东北大学, 2014: 47-49.

[3] 周刚. 车辆装备单部件系统定时更换间隔期研究[D]. 天津: 陆军军事交通学院, 2018: 28-32.

(上接第 70 页)

[6] 李振. 弹炮耦合中若干因素对弹丸起始扰动的影响分析研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016: 8-14.

[7] 黄银柳, 陶如意, 王骁, 等. 某异形弹丸的气动特性研究[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(4): 42-45.

(上接第 78 页)

[9] FORRESTER J W. Lesson From System Dynamic Modeling[J]. System Dynamic Review, 1987, 3(2): 136-149.

[10] LEE Z J, Lee C Y, SU S F. An immunity-based ant colony optimization algorithm for solving weapon-target assignment problem[J]. Applied Soft Compting, 2002, 2(1): 39-47.

[11] LIU B, QIN Z, WANG R, et al. A hybrid heuristic ant colony system for coordinated multi-target assignment[J]. Information Technology Journal, 2009, 8(2): 156-164.

[12] 林炜, 屈洋, 刘洪坤. 基于 SD 的两栖坦克连水上火力支援行动分析[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(2): 6-8.

[13] 葛涛, 朱小冬, 高鲁. 基于消耗规律的战时弹药供应计划优化研究[J]. 电光与控制, 2009, 16(8): 68-71.

[14] 付东, 方程, 王震雷. 作战能力与作战效能评估方法研究[J]. 军事运筹与系统工程, 2006, 30(12): 57-58.

[15] QUINLAN S, KHATIB O. Elastic Bands Connecting Path

[4] 周斌, 封会娟, 杨万成, 等. 军用车辆维修工程: 第一分册 基础理论[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2016: 1.

[5] 周刚, 唐彦峰, 封会娟. 车辆装备单部件系统定时更换间隔期研究[J]. 军事交通学院学报, 2018, 20(7): 28-32.

[6] 文建国, 孙作佩, 陈争新. 基于故障树的蒙特卡罗仿真在可靠性评估中的应用[J]. 海军航空工程学院学报, 2010, 25(1): 88-92.

[7] 许一帆, 曾杨智, 朱万红. 电磁防护对装甲车辆效能评估的影响[J]. 兵工自动化, 2018, 37(12): 71-73.

[8] 张星, 郝立山, 李华. 战时装备抢修业务流程框架建模研究[J]. 火力与指挥控制, 2015, 40(5): 116-119.

[8] 殷军辉. 基于弹带微观组织分析的弹炮耦合建模与弹丸起始扰动多目标优化研究[D]. 石家庄: 军械工程学院, 2011: 20.

[9] 曹营修, 郑立评, 朱建杰, 等. 基于四目曲柄链式结构的火炮窥膛装置[J]. 兵工自动化, 2018, 37(7): 16-19.

Planning and Robot Control[C]. The Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation, Atlanta, GA, 1993: 802-807.

[16] 俞杰, 王三喜, 沈寿林, 等. 基于 SD 模型的弹药消耗规律研究[J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(6): 154-157.

[17] 王三喜, 俞杰, 夏新民. 联合火力打击弹药需求计算动态模型研究[J]. 火力与指挥控制, 2009: 33(10): 99-102.

[18] CHASPARIS G C, SHAMMA J S. Linear-Programming-Based Multi-vehicle Path Planning with Adversaries[C]. Proceedings of 2005 American Control Conference, 2005: 1072-1077.

[19] LEE S, PARK J. Neural computation for Collision Free Path Planning[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 1991, 2(1): 315-326.

[20] RAVINDRA KA, AHUJA K, KRISHNACJ, et al. Exact and Heuristic Algorithms for Weapon-warget Assignment Problem[J]. Operations Research, 2007, 55(6): 1136-1146.