

doi: 10.7690/bgzdh.2013.08.004

基于小波变换的某火炮炮口振动分析

杨凡, 于存贵

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 针对弹丸发射时瞬间产生的振动严重影响火炮的射击精度的问题, 提出利用小波变换的方法对舰炮非线性有限元模型的动力学响应进行时频分析研究。利用非线性有限元理论, 建立了舰炮的非线性有限元动力学模型, 并进行了动力学计算, 得到了发射过程中炮口振动的时域历程; 采用连续小波变换对炮口加速度响应进行了分析, 得到了其频域信息。分析结果证明: 该方法弥补了传统傅里叶变换方法的不足, 可为火炮的改进和优化提供依据。

关键词: 炮口扰动; 非线性有限元; 小波变换; 时频分析

中图分类号: TJ306 **文献标志码:** A

Analysis of Certain Type Gun Muzzle Vibrations Based on Wavelet Transformation

Yang Fan, Yu Cungui

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Aiming at the problem that the gun firing accuracy is influenced seriously by vibration caused by projectile injection. The wavelet transformation method was used for time frequency analysis of naval gun nonlinear finite element dynamics response. The dynamic model of the naval gun finite element was established by using the theory of nonlinear finite element, carry out the dynamic calculation, the time history of vibration signals of muzzle in firing process was obtained with the simulation system. By using the technology of the continuous wavelet transformation to analyze muzzle acceleration response, the frequency characteristic was obtained. The analysis results show that the wavelet transformation method make up the lack of traditional Fourier transform, and provide reference for the improvement and optimization of naval gun.

Key words: muzzle vibration; nonlinear finite element; wavelet transformation; time frequency analysis

0 引言

火炮发射是一个极为复杂的瞬态运动过程。弹丸在膛内火药气体推动下突然加速, 瞬间产生的后坐力引发整个火炮的振动, 使炮口振幅增大, 进而严重影响火炮的射击精度。因此, 研究火炮的振动特性及运动状态, 对于提高火炮战斗性能有着重大的理论意义及实用价值。通过传统的傅里叶变换方法分析火炮炮口振动等非平稳信号的频域信息已经不能满足需求, 而小波变换作为 20 世纪 80 年代中后期发展起来的一种时频分析方法, 弥补了前者的不足, 其特点是能够对信号实现时域和频域的局部分析, 可以聚焦到信号任意细节, 被誉为“信号分析的显微镜”。在火炮领域, 小波变换已经得到一定的应用, 郑绍坤^[1]运用小波变换的方法对某型自行火炮减速停车过程中的振动加速度进行了时频分析, 研究其非平稳振动特性; 李连波^[2]采取小波变换方法分析膛内压力曲线信号中突变部分的有用高频量和无用噪声高频量; 傅建平^[3]通过小波变换算法对火炮后坐位移与复进到位速度值测试信号进行滤波, 并验证了结果的正确性; 陈雪峰^[4]采用第二代小波包分解、重构和信息熵指标相结合的方法,

给出了火炮俯仰机构的间隙特征的判别方法。

基于此, 笔者利用非线性有限元理论建立了考虑接触碰撞的舰炮非线性有限元模型, 进行动力学计算, 获得炮口膛内时期振动的时间历程, 并利用小波分析方法在时间域和频率域都具有很好的局部化性质, 研究炮口振动的频域信息, 找出动态响应贡献较大的频率范围及作用时刻, 以掌握火炮振动的机理, 为火炮的改进和优化提供依据。

1 火炮结构动力学模型

研究表明^[5], 弹丸出炮口瞬间的炮口扰动对火炮射击精度的影响较大。除了内弹道因素对火炮射击精度有重要影响外, 火炮振动响应也是重要的影响环节, 有时候可能是首要影响环节。笔者以某舰炮发射动力学研究为项目背景, 根据结构动力学理论和非线性有限元理论方法, 建立了考虑接触碰撞的非线性有限元模型, 通过 ABAQUS 软件精确仿真计算得出了火炮炮口振动响应。

1.1 火炮实体模型及有限元模型

精确求解舰炮发射过程之中炮口扰动响应对于后续分析的准确性至关重要, 而解决这一问题, 有

收稿日期: 2013-02-22; 修回日期: 2013-03-18

作者简介: 杨凡(1987—), 男, 内蒙古人, 硕士, 从事火炮、火箭炮发射动力学分析与优化技术研究。

赖于建立合理的有限元模型^[6]。笔者研究的舰炮，除了具有如其他类型火炮强瞬态冲击碰撞等非线性因素，还有自动供弹设备及双层身管水冷等功能，因此结构组成复杂。笔者选用软件 Pro-e 作为舰炮三维实体简化模型的建模工具，然后将模型导入到 Abaqus 中。在简化模型时遵循以下规则：去掉对于舰炮部件动态刚度影响较小的结构特征，例如凸台、圆孔、圆角等；将模型中大量的薄板实体转换为壳单元，保证计算精度的同时，提高计算效率；保证身管、摇架质量和质心同原始模型基本一致等。舰炮结构复杂，以模块化的建模思路，整个舰炮主要分为炮身、摇架、托架、回转支撑 4 个部分。在网格划分方式上，本模型采用多种划分方式相结合的方法进行网格划分，分别采用减缩实体积单元 (C3D8I) 和减缩积分壳单元 (S3R) 对身管、摇架、托架、回转支撑进行了网格划分，共计约五万个网格，在划分过程中，还要注意对重点考察对象的网格处理，全炮网格如图 1 所示。

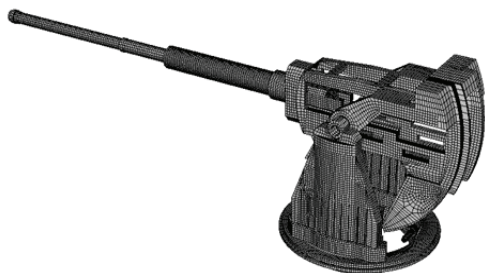


图 1 某舰炮有限元模型

1.2 部件间的连接关系

对全炮发射过程进行结构动力学仿真的关键是准确模拟舰炮各部件之间的非线性连接关系。如果充分考虑所有的连接关系，会大大增加模型的复杂性和计算成本，甚至难以实现仿真计算；因此，笔者只考虑主要连接关系，各部件之间建立了如下连接关系：炮身与摇架导轨、颈筒之间的大位移接触；在耳轴处，摇架与托架之间建立的耦合约束连接；摇架齿弧同高低机齿轮的接触碰撞连接；回转支撑上下座圈之间的扭簧连接关系。

1.2.1 炮身与摇架连接

该炮的摇架为混合型摇架，兼容了筒型摇架和槽型摇架的特点，接触定义比较复杂，在舰炮发射过程中，炮身与摇架之间主要的接触碰撞关系为：一是炮尾两侧的滑槽与摇架导轨之间的滑动接触；二是身管前支撑环与颈筒的接触。除此之外，炮尾与摇架端面存在接触碰撞：初始状态下，后坐部分

受复进机力作用，炮尾的前端面与摇架发生接触；复进结束时，炮尾前端面同摇架后端面发生碰撞，起限位作用，并最终回到初始状态。

在 Abaqus 中定义接触对时，有 2 种接触公式可以描述接触面之间的相对滑动：有限滑移和小滑移。炮身与摇架之间的大位移接触，选择有限滑移的计算公式来模拟接触行为；由于炮尾与摇架的接触面之间的位移变化只是法向方向，切向滑移量特别小，故选用小滑移计算公式来模拟接触行为。任意接触面之间的接触属性主要有 2 部分：接触面之间的法向作用和切向作用。在本模型中，法向作用采用指数形式的软接触方式，虽然求解难度加大，却有更好的精确性；切向属性选择无摩擦类型，这是因为摩擦阻力同制退机力作用方向、作用效果一致，且作用力数值相对较小，为了简化计算，将摩擦力整合到后坐阻力中去。炮身与摇架的主要接触定义如图 2 和图 3 所示。

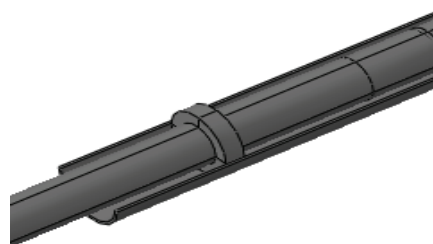


图 2 炮身与筒形支撑

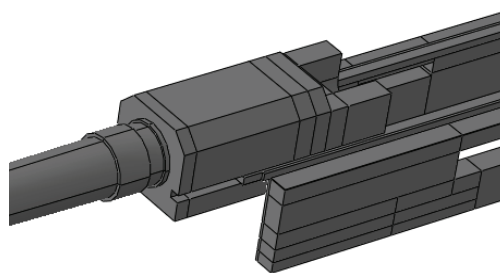


图 3 炮尾与导轨接触

1.2.2 其他部件的连接

摇架与托架之间主要是基于耳轴建立的连接关系。调整射角时，通过高低机齿轮传动，摇架耳轴孔与托架耳轴之间发生相对旋转；射击过程中，高低机齿轮又起到限位作用；因此，笔者通过节点耦合的方式来模拟二者的相对旋转（释放轴向旋转自由度），如图 4 所示。

高低机齿轮连接关系是重点研究对象。在发射工况下，高低机处于锁死状态，以限制摇架的俯仰运动，期间，强大的后坐力会引起高低机齿轮接触区域发生剧烈的接触碰撞行为，其动态响应直接影

响舰炮的作战性能。因此，在建立齿轮接触时，细化接触部位的网格，以便更好地模拟接触行为。采用了软接触的方式，切向摩擦系数设为 0.1。舰炮的回转支撑位于托架和舰体之间，其上座圈固定在托架底部，下座圈与舰体相连。在瞄准期间，在方向机的作用下，上座圈同下座圈发生相对转动；射击状态下，方向机锁死旋转自由度^[7]。在这里，笔者通过扭簧连接关系模拟二者的发射状态下的运动关系，旋转自由度通过定义扭转刚度来约束，其值由经验值确定。

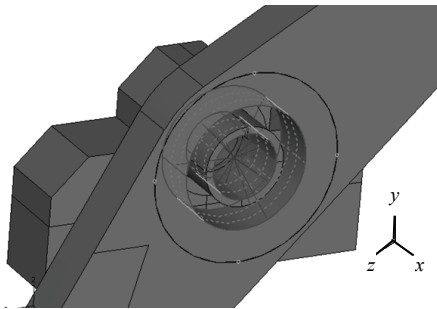


图 4 摇架与托架耳轴连接

1.3 载荷与材料

作用在舰炮上的主动力是膛合力和重力。在炮尾与摇架的驻退机力连接点上加一对共线且反向的力来模拟驻退机特性，用同样的方法来模拟复进机力。重力加速度取 9800 mm/s^2 。文中涉及的材料主要是合金结构钢， $E = 210\ 000 \text{ Mpa}$ ， $\nu = 0.31$ 。

2 小波变换

小波变换是 20 世纪 80 年代中后期逐渐发展起来的一种非平稳信号的分析方法。傅里叶分析将信号分解为不同频率组成的正弦曲线，而小波分析则是将信号分解为源小波不同相移和尺度伸缩的组合信号。小波分析在时间域和频率域都具有良好的局部化性质，较好地解决了时间和频率的矛盾。

2.1 连续小波变换

设函数 $\varphi(t) \in L^2(R)$ ，且满足 $\int \varphi(t)dt = 0$ ，则称 $\varphi(t)$ 为母小波函数，它具有衰减性和震荡性^[8]。对母小波 $\varphi(t)$ 可通过平移 τ 和伸缩 a ，可构成一个函数族

$$\varphi_{a,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \varphi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) \quad (1)$$

则称 $\varphi_{a,\tau}(t)$ 为分析小波。

动态信号 $x(t)$ 的连续小波变换的定义为

$$W_x(a, \tau) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int x(t) \varphi^*\left(\frac{t-\tau}{a}\right) dt \quad (2)$$

若母小波函数为实函数，则 $x(t)$ 的连续小波变换的定义为

$$W_x(a, \tau) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int x(t) \varphi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) dt \quad (3)$$

由以上两式可知，当 a 增大时， $\varphi\left(\frac{t-\tau}{a}\right)$ 在时间轴上扩展，即可计及长的时间过程，通过一固定的 $\varphi\left(\frac{t-\tau}{a}\right)$ (滤波器) 观察到波形压缩的信号，反之亦然，因此 a 成为尺度因子。大尺度可以观测总体信号，小尺度可观测细节信号。小波变换的时间域、频率域局部化方式在高频范围内时间分辨率高，在低频范围内频率分辨率高。

当母小波及母小波的傅里叶变换 $\hat{\varphi}(\omega)$ 满足下述约束条件时，即

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\hat{\varphi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (4)$$

则原信号 $x(t)$ 可由 $W_x(a, \tau)$ 完全重构，即

$$x(t) = C_\varphi^{-1} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_{a,\tau} W_x(a, \tau) \frac{da}{a^2} d\tau \quad (5)$$

式中 $C_\varphi = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{\varphi}(a)|^2}{|a|} da$ 。

2.2 小波基的选取

小波分析的基也就是小波函数，不是唯一存在的，所有满足小波条件的函数都可以作为小波函数，笔者选取了小波分析中应用最早也是最简单的 Haar^[5] 小波作为小波函数，其表达方式如下：

$$\varphi(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < 1/2 \\ -1, & 1/2 \leq t \leq 1 \\ 0, & \text{elsewise} \end{cases} \quad (6)$$

Harr 小波可以快速构造一组标准化的正交基，从而为多分辨率分析系统提供很好的尺度函数。

小波变换特别适用于信号的分解与重构，其特点为：具有对非平稳信号进行时频分析的功能，在高频带内，时间局部化程度很高，具有数学显微镜的功能。若非平稳信号是由低频长波叠加高频短波信号组成，则小波变换是最为理想的分析工具。小波分解有快速算法，信号的分解与重构可有针对性地选择有关频带信息。因此，小波变换在研究火炮

非平稳信号中可以充分发挥其局域性优势，找出信号中突变能量及发生时刻。

3 火炮动力学计算结果

根据前文中建立的火炮发射动力学有限元模型，通过 ABAQUS 软件仿真得出了全炮发射时间内的炮口、后坐部分的动力学响应结果，将得到的后坐位移、速度响应同实验值对比，误差率在 5% 之内，证明了本模型的正确性。对于笔者重点关注的炮口扰动，主要关注的是 y 轴(垂向)和 z 轴(横向)方向的运动情况。图 5 为计算得出的膛内时期炮口 y 轴方向加速度变化曲线，取样时间为 0.1 ms。

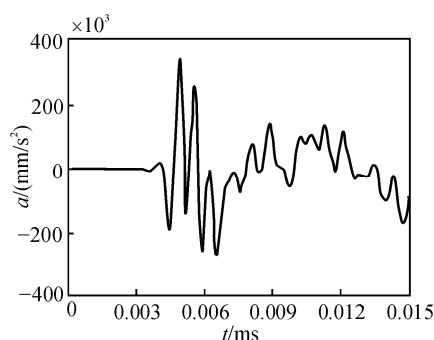


图 5 炮口 y 轴方向加速度曲线

通过快速傅里叶变化，得到了炮口 y 向加速度响应的频谱图，如图 6 所示。

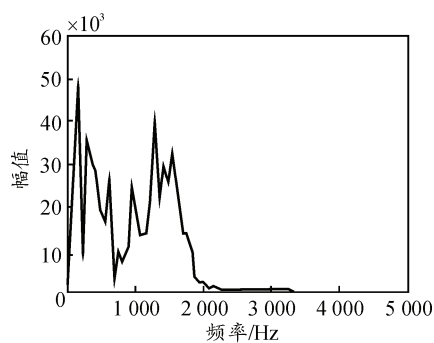


图 6 炮口 y 轴方向加速度频谱

可以看出， y 向加速度变化频率范围主要发生在 2 kHz 以下。但傅里叶变换只是从整体上将信号分解为不同的频率分量，而缺乏局域性信息，即它并不能告诉某种频率分量在哪个时间段内发生，而非平稳信号的局域性特性恰恰是非常重要的。因此，傅里叶变换并不能满足对于振动突变信号的研究。

基于此，笔者选用 Haar 小波作为小波基函数，通过 Matlab^[9]软件对炮口 y 轴方向运动加速度变化信号进行连续小波变换，得到信号时频图，如图 7。

从图 7 中可以得出如下结论：在中高尺度，即中高分辨率下，可以发现存在着高频脉冲，在时间

轴上约在 4.5~6 ms 处发生了中高频的变化，贡献最大，这样的结果对照图 5 所示的时域曲线也是吻合的。同时，在时频平面上各个尺度的信号分布情况一目了然，这样有利于分析炮口运动状态，从而找出对动态响应贡献较大的频率成分及其作用时刻，为揭示炮身的运动机理提供理论参考。同理，可以采用同样的方法对炮口振动横向加速度、角速度，垂向角速度的运动规律进行分析。

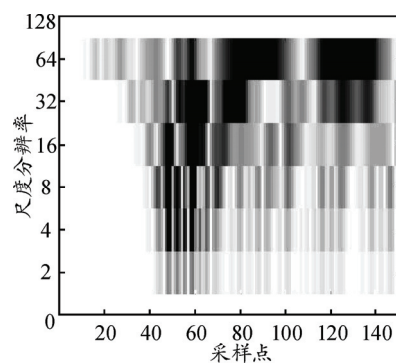


图 7 炮口 y 向加速度时频相位图

4 结束语

火炮发射过程中的强瞬态性导致其振动响应是非平稳性的，采用小波变换的方法对动力学结果进行时频分析，可以更加详细地了解炮口振动的运动特性，弥补了传统傅里叶变换方法的不足。因此，小波变化的方法不仅适用于研究火炮动力学仿真计算结果，也可以用于实验数据的分析。该方法在火炮非平稳动态信号数据分析中将大有作为。

参考文献：

- [1] 郑绍坤, 郑坚, 熊超. 自行火炮路面振动信号时频特性研究[J]. 传感器与微系统, 2009, 28(5): 46-49.
- [2] 李连波, 张小兵, 罗曼. 火炮膛内压力曲线的小波分析[J]. 南京理工大学学报, 2006, 30(5): 542-545.
- [3] 傅建平, 张晓东, 张培林. 火炮后坐复进运动动态检测与模糊评估[J]. 火炮发射与控制学报, 2007(3): 58-61.
- [4] 陈雪峰, 李兵, 刘云生. 基于第二代小波的火炮机构间隙特征提取方法研究[J]. 振动与冲击, 2008, 27(5): 124-125.
- [5] 欧阳光耀, 王树宗, 王德石. 火炮身管振动特性及减振研究[J]. 海军工程学院学报, 1999(2): 79-87.
- [6] 葛建立. 车载炮动态非线性有限元仿真分析[D]. 南京: 南京理工大学博士论文, 2008.
- [7] 张华, 管红根, 桂成兵. 基于 LabVIEW 的火炮振动测试分析系统[J]. 兵工自动化, 2012, 31(4): 75-77.
- [8] 高成. Matlab 小波分析与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 2-28.
- [9] 张德丰. Matlab 小波分析与工程应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 95-107.