

随机不确定性影响下某航炮发射动力学仿真

王景, 杨永锋

(西北工业大学 振动工程研究所, 西安 710072)

摘要: **目的** 研究随机不确定性对航炮发射动力学响应的影响, 提高其射击密集度。**方法** 建立某航炮刚柔耦合动力学模型, 利用 ADAMS 软件进行发射动力学仿真分析。考虑航炮射击过程中的不确定因素, 采用非概率凸集模型进行量化, 揭示缓冲器弹簧刚度、平衡机弹簧刚度、炮膛合力等参数不确定性对航炮射击密集度的影响规律。**结果** 炮口振动在不确定性因素的影响下, 出现振动幅值增大, 在区间范围内波动的现象。**结论** 航炮射击时的炮口振动严重影响了射击密集度, 因此在设计时必须考虑不确定性因素, 所得结果对于提高航炮系统射击密集度具有一定的指导意义。

关键词: 航炮; 随机不确定性; 刚柔耦合; 凸集模型; 振动; 射击密集度

中图分类号: TJ85 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9242(2022)09-0114-09

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.09.017

Launch Dynamic Response of an Aircraft Gun with Uncertain Parameters

WANG Jing, YANG Yong-feng

(Institute of Vibration Engineering, Northwestern Polytechnic University, Xi'an 710072, China)

ABSTRACT: Analyze the influence of random uncertainty on the launch dynamics to improve the shooting intensity. In this paper, a rigid-flexible coupling dynamic model of an aircraft gun is established. The launch dynamics simulation analysis is carried out by ADAMS. And the uncertainties of aircraft gun are considered. The convex model is introduced to quantify the uncertainty of aircraft gun system. The influence of parameter uncertainties such as buffer spring stiffness, balancer spring stiffness and chamber resultant force on the firing density of aircraft guns is revealed. The results show that the muzzle vibration amplitude increases and fluctuates in the interval under the influence of uncertainty factors. The muzzle vibration of the aerial gun seriously affects the firing density, therefore, uncertainties must be taken into account in the design of aircraft gun. The obtained results have certain guiding significance for improving the firing density of aircraft gun.

KEY WORDS: aircraft gun, uncertainty, rigid flexible coupling, convex model, vibration, firing density

航炮是装备在作战飞机或直升机上的自动火炮武器, 其结构紧凑, 且稳定可靠, 使用时对操作水平

要求较低, 结构稳定可靠, 在近距离格斗中, 目标命中率较高, 是空战中的主要格斗武器之一^[1]。但航炮结

收稿日期: 2022-06-26; 修订日期: 2022-08-15

Received: 2022-06-26; Revised: 2022-08-15

作者简介: 王景 (1996—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为结构动力学。

Biography: WANG Jing (1996-), Female, Postgraduate, Research focus: structural dynamics.

通讯作者: 杨永锋 (1981—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为结构动力学。

Corresponding author: YANG Yong-feng (1981-), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: structural dynamics.

引文格式: 王景, 杨永锋. 随机不确定性影响下某航炮发射动力学仿真[J]. 装备环境工程, 2022, 19(9): 114-122.

WANG Jing, YANG Yong-feng. Launch Dynamic Response of an Aircraft Gun with Uncertain Parameters[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(9): 114-122.

构复杂, 运动自由度多, 存在多体接触与撞击, 且往往在高温高压环境下工作, 众多随机不确定性因素的存在, 增加了航炮动力学分析的难度^[2]。

目前, 国内外学者在火炮动力学方面已展开了大量研究。根据多体系统动力学原理, 在对火炮进行动力学分析时, 可以将火炮视为由多个刚体与弹性体组成的多自由度系统。通过推导多自由度系统运动微分方程, 可以求解方程得到火炮发射时的动力学特性。如 Langhaar 等^[3]以多刚体系统动力学为基础, 对弹丸进行了受力分析, 考虑了射击时的弹炮耦合效应, 推导了考虑反后坐装置作用力时的发射动力学方程。芮筱亭等^[4-5]以多体系统传递矩阵法为理论基础, 将火炮视为由多个刚体、弹性梁、集中质量以及多种铰连接组合而成的多体系统, 研究了火炮的振动特性。杨国来等^[6-7]研究了迫击炮、舰炮、自行火炮等多种类型的火炮, 根据多体系统动力学理论, 建立了火炮射击过程的动力学模型, 分析了在不同环境因素下火炮的发射密集度。蔡文勇^[8]构建了车载火炮多柔体系统动力学模型, 基于变分原理分析了结构参数扰动对炮口振动的影响。王飞^[9]针对某大口径火炮结构组成和发射过程的特点, 基于变分法建立了火炮总体结构参数敏感度分析模型, 调用刚柔耦合动力学模型进行了分析计算, 找出了对火炮射击稳定性和炮口扰动影响较大的总体结构参数。何永等^[10]将火炮身管考虑为有限元梁单元, 提出了一种考虑身管柔性的刚-柔耦合多体系统动力学方法。郭保全等^[11]将传统的火炮动力学理论与速度矩阵法结合起来, 对速度矩阵法进行了改进, 得到了改进的速度矩阵法动力学方程组。

在对火炮进行动力学仿真时, 一般将火炮的身管视为柔性体, 并且可以考虑一些难以求解的非线性因素。Malachowski 等^[12]建立了枪栓抽壳机构的有限元模型, 分析了推弹抽壳过程中闭体的受力情况, 结果显示, 材料的缺陷导致了抽壳机构的断裂失效。Soifer 等^[13]建立了 75 mm ADMAG 炮的有限元仿真模型, 模拟了单发和突发射击模式下的系统动态响应, 通过仿真得到了系统的固有频率与振型, 以及炮口线位移、角位移、速度和加速度等动力学响应。张永存等^[14]利用有限元软件, 建立了火炮整体有限元模型, 通过计算求解, 得到了炮口振动特性曲线, 并对影响射击精度的火炮结构参数进行了识别。葛建立等^[15]基于有限元理论研究了车载榴弹炮发射过程中的接触碰撞问题, 并且考虑了弹丸与膛线的耦合和身管的静挠度变形, 研究了射击时的炮口振动。张俊飞等^[16]采用有限元方法, 对弹丸进行了柔性化处理, 建立了某型火炮弹炮耦合模型, 研究了摇架钢板厚度、托架耳轴与方向机的刚度和阻尼等系统结构参数对炮口振动的影响。Gast^[17]基于有限元方法, 分析了坦克炮身管、弹丸、炮架、弹道等因素对炮口振动和射击密集度的影响, 并与试验测试结果进行了对比,

以提高坦克炮的射击精度。Eches 等^[18]和 Edward^[19]利用有限元软件建立了火炮的弹炮耦合模型, 计算得到了炮口振动响应数值结果, 并通过试验分析, 验证了计算结果可靠性。Ahmed 等^[20]利用商业有限元软件 ANSYS 建立了某大口径火炮的三维有限元模型, 并对其在射击周期内的运动进行了仿真, 研究并预测了各种设计因素对火炮动态响应的影响。

受载荷随机性、任务阶段性、材料的退化等不确定性因素的影响, 机械结构或系统的动力学行为也一定是不确定的。对于结构中随机不确定性参数的响应分析, 陈塑寰等^[21]用确定性控制问题来近似研究了不确定性控制问题, 通过将不确定参数表示为区间变量, 对二阶振动控制系统的响应进行了分析。邱志平等^[22-23]探讨了含不确定性问题的区间响应, 并将结果与用概率模型所得结果进行对比, 发现区间解包含了概率算法所得到的响应边界。对于认知不确定性的研究, 目前还没有统一的方法, 需要根据具体问题的特点选择相应的数学工具。实际工程中, 往往出现的是 2 种不确定参数混合的情况。针对这种情况, 吴景铨等^[24]提出用 PCCI (Polynomial-Chaos-Chebyshev-Interval) 方法来分析混合不确定性下的动力学特性, 并用蒙特卡洛法和扫描法进行了精度验证。Li 等^[25]研究了随机-区间混合下的稳健性优化问题。针对复杂机械系统中的不确定性因素的影响, 王丽群等^[26]考虑了火炮射击时的起始扰动、弹丸初速、弹丸结构参数, 以及风速的随机性, 引入神经网络分析, 计算得到了系统随机变量与射击密集度之间的关系。Jiang 等^[27]利用凸模型来描述结构时变不确定性, 建立了变量特征函数, 提出了一种解决不确定性问题的非概率分析方法。杨伯忠等^[2]针对火炮射击精度的计算机仿真方法展开了研究, 分析了影响射击密集度的随机参数的概率特征, 能够有效避免相关性误差。

尽管国内外针对火炮及不确定性动力学特性分析已有大量研究, 但火炮系统的结构复杂性、工况复杂性, 使得此类问题仍有待深入探索。航炮射击过程中, 许多部件的弹性变形不可忽略, 鉴于航炮全柔体动力学模型的复杂性, 本文对射击时变形较大、不可忽略的身管采用柔体模型, 并考虑刚柔部件间的耦合效应。航炮射击过程伴随着高温高压条件, 且试验成本高, 难以获得参数准确的概率分布, 因此采用认知不确定方法对航炮发射系统中不确定性参数的影响展开研究。凸集模型只需要参数上下界, 无需具体概率分布, 且可以考虑到参数之间的相关性, 适用于航炮这类因试验成本及结构复杂性而掌握原始数据有限的模型。在此基础上, 考虑影响航炮射击密集度的因素, 选择对炮口位移有重要影响的缓冲器弹簧刚度与平衡机弹簧刚度, 以及炮膛合力为不确定性参数, 通过数值仿真分别计算出在以上参数不确定性影响下的炮口振动响应, 分析不确定性对航炮发射动力学

响应的影响及其传播规律,为提高航炮射击密集度提供理论依据。

1 航炮刚柔耦合动力学建模

根据航炮射击时各部件的运动规律,简化航炮三维模型,将系统简化为由座圈、回转部分、摇架、炮尾、反后坐装置等多个刚体与柔性身管组成的刚柔耦合系统。航炮系统的拓扑结构如图1所示。

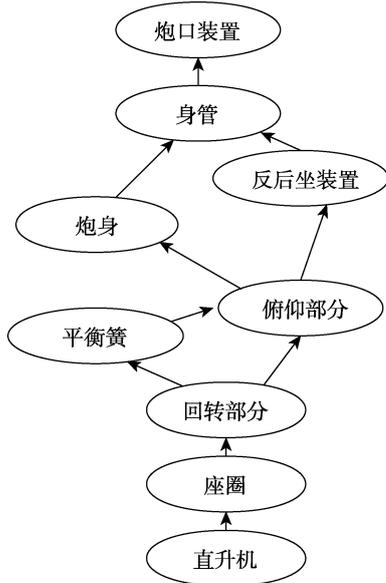


图1 航炮系统拓扑结构 Fig.1 Aircraft gun system topology

在射击过程中,膛内弹丸高速运动产生的离心力作用、运动构件的撞击作用、火药燃气压力的作用都会使身管产生扭转和弯曲变形,导致航炮射击密集度降低,因此需要将对炮口振动响应影响最大的身管进行柔性化处理。在MSC.PATRAN中,采用10节点的四边形单元对身管进行网格划分,共划分526 636个单元,136 006个节点。定义身管材料为钢,弹性模量为 2.1×10^5 MPa,泊松比为0.3,密度为 7.85×10^{-6} kg/mm³。有限元网格模型如图2所示。

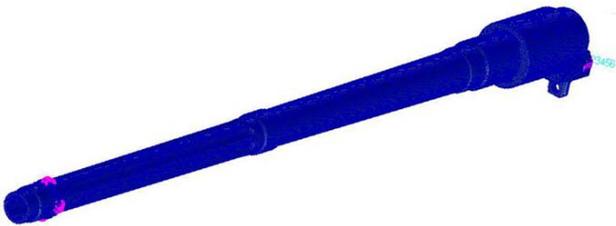


图2 航炮身管有限元网格划分 Fig.2 Finite element mesh division of aircraft gun barrel

从MSC.PATRAN中导出身管模态中性文件,并导入ADAMS中,代替原刚性身管模型,并通过刚性节点与航炮炮口装置、炮尾进行连接,建立刚柔耦合

模型。然后在ADAMS中根据实际情况为航炮各部件之间添加运动副以限制其自由度,模型约束关系见表1。

表1 航炮零件之间的约束关系 Tab.1 Constraint relationship between aircraft gun parts

组件一	组件二	约束副
直升机体	座圈	固定副
座圈	托架	固定副
托架	左右耳轴	旋转副
左右耳轴	摇架	旋转副
托架	摇架	移动副、弹簧
摇架	炮尾	固定副
输弹机构	炮尾	固定副
复进机、制退机	炮尾	固定副
液压缸	身管衬套	固定副
炮尾	液压缸	移动副、弹簧
身管	膛口装置	固定副
身管	炮口缓冲器	固定副

航炮射击过程中,受到的主要外载荷有:火药燃烧后产生的炮膛合力、发射瞬间反后坐装置产生的后坐阻力、后坐结束后复进机产生的复进机力和弹壳从炮膛中抽出时与炮膛之间的抽壳阻力。通过编写内弹道程序,计算得到射击时的火药作用力,在ADAMS中以样条曲线形式将载荷曲线导入模型,设置触发传感器,控制载荷作用时间,至此完成航炮刚柔耦合建模。

2 航炮不确定性动力学分析

2.1 凸集蒙特卡洛法

凸集模型是一种考虑不确定参数之间相关性的非概率模型,它仅使用不确定参数的上、下边界信息来描述不确定域。对于难以获得精确概率分布的参数可以很好地进行不确定变量建模,并合理预测不确定域,避免了因人为增大不确定域而使得动力学响应结果区间变大的问题。

记不确定性区间变量为 X ,区间上界与区间下界所包含的区域即为 X 的取值范围,可表示为^[26]:

$$X \in X^1 = [\underline{X}, \overline{X}] = \{X \in \mathbb{R} | \underline{X} \leq X \leq \overline{X}\} \quad (1)$$

首先以二维不确定问题为例进行描述。记2个区间变量 X_1 与 X_2 构成的联合不确定域为椭圆域 E_2 ,边缘区间分别为 $X_1^1 = [\underline{X}_1, \overline{X}_1]$ 与 $X_2^1 = [\underline{X}_2, \overline{X}_2]$,方差 $D(X_1)$ 与 $D(X_2)$ 分别为:

$$D(X_1) = \left(\frac{\underline{X}_1 - \overline{X}_1}{2}\right)^2, D(X_2) = \left(\frac{\underline{X}_2 - \overline{X}_2}{2}\right)^2 \quad (2)$$

协方差 $Cov(X_1, X_2)$ 定义为:

$$\text{Cov}(X_1, X_2) = \sin \theta \cos \theta (r_1^2 - r_2^2) \quad (3)$$

式中: r_1 、 r_2 分别为椭圆的两个半主轴长; θ 为椭圆主轴与坐标轴的夹角。 θ 可以表示为:

$$-\arctan \left\{ \frac{\min[\sqrt{D(X_1)}, \sqrt{D(X_2)}]}{\max[\sqrt{D(X_1)}, \sqrt{D(X_2)}]} \right\} \leq \theta \leq \arctan \left\{ \frac{\min[\sqrt{D(X_1)}, \sqrt{D(X_2)}]}{\max[\sqrt{D(X_1)}, \sqrt{D(X_2)}]} \right\} \quad (4)$$

相关系数 $\rho_{X_1^L X_2^L}$ 为:

$$\rho_{X_1^L X_2^L} = \frac{\text{Cov}(X_1, X_2)}{\sqrt{D(X_1)}\sqrt{D(X_2)}} \quad (5)$$

相关系数 $\rho_{X_1^L X_2^L}$ 的大小反映了区间变量 X_1 与 X_2 之间的相关程度。当 $0 < \rho_{X_1^L X_2^L} < 1$ 时, 两变量正相关; 当 $-1 < \rho_{X_1^L X_2^L} < 0$ 时, 两变量负相关; 当 $\rho_{X_1^L X_2^L} = 0$ 时, 两变量不相关。

对于二维椭球模型, 根据协方差函数定义, 可以将两变量 X_1 与 X_2 的联合不确定域表示为椭圆方程, 见式 (6)。

$$\begin{bmatrix} X_1 - X_1^C & X_2 - X_2^C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D(X_1) & \text{Cov}(X_1, X_2) \\ \text{Cov}(X_2, X_1) & D(X_2) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X_1 - X_1^C \\ X_2 - X_2^C \end{bmatrix} \leq 1 \quad (6)$$

当同时存在 n 个具有相关性的区间变量 $X_i, i=1, 2, \dots, n$, 其 n 维不确定椭球域可表示为:

$$E_n = \{ \mathbf{X} | (\mathbf{X} - \mathbf{X}^m)^T \mathbf{W}_e (\mathbf{X} - \mathbf{X}^m) \leq 1 \} \quad (7)$$

式中: \mathbf{X} 为区间变量向量, $\mathbf{X} = [X_1, X_1, \dots, X_n]^T$; \mathbf{X}^m 为椭球变量的中值向量, $\mathbf{X}^m = [X_1^m, X_2^m, \dots, X_n^m]^T$; \mathbf{W}_e 是一个对称正定矩阵, 可表示为式 (8), 称为椭球模型的特征矩阵, 椭球的大小、形态均由 \mathbf{W}_e 来确定, 可用来描述变量之间的相关性。

$$\mathbf{W}_e = \begin{bmatrix} W_{11} & \dots & W_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ W_{n1} & \dots & W_{nn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

区间变量 X_i 的边界区间 X_i^L 、中值 X_i^m 、方差 $D(X_i)$, 协方差 \mathbf{C} , 相关系数 ρ 分别定义为:

$$X_i^L = [\underline{X}_i, \bar{X}_i] = \{ X_i | X_i \in E_n \}, i=1, 2, \dots, n \quad (9)$$

$$X_i^m = \frac{X_i^L + X_i^R}{2}, i=1, 2, \dots, n \quad (10)$$

$$D(X_i) = \left(X_i^w \right)^2 = \left(\frac{X_i - \bar{X}_i}{2} \right)^2, i=1, 2, \dots, n \quad (11)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \text{Cov}(X_1, X_2) & \dots & \text{Cov}(X_1, X_n) \\ \vdots & & \vdots \\ \text{Cov}(X_n, X_2) & \dots & \text{Cov}(X_n, X_n) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\rho = \begin{bmatrix} \rho_{X_1^L X_1^L} & \dots & \rho_{X_1^L X_n^L} \\ \vdots & & \vdots \\ \rho_{X_n^L X_1^L} & \dots & \rho_{X_n^L X_n^L} \end{bmatrix} \quad (13)$$

由于凸集变量 x 是有界的, 则凸集不确定航炮射击系统响应也是有界的。凸集蒙特卡洛法 (Convex Monte Carlo Simulation, CMCS) 求解过程如下: 假设所有不确定参数为在边界区间内遵循均匀分布的独立随机变量, 则通过随机抽样在边界区间内获取 M 个样本; 将 M 个样本代入椭球函数中, 忽略不满足椭球域的样本, 可得到在椭球域内均匀分布的 N 个样本; 将 N 个样本代入运动微分方程, 可得到 N 个响应值; 在 N 个响应之中搜索极值, 可获得响应的最小区间。凸集蒙特卡洛法简单稳定, 在采样点足够多时, 计算结果可靠精度很高。

2.2 航炮不确定性动力学响应

本文运用椭球凸集模型进行不确定性参数影响下的航炮发射系统动力学响应仿真, 分别考虑了炮口缓冲器左右两边的弹簧部件、平衡机弹簧以及载荷不确定性对炮口振动位移的影响。

首先考虑 2 个缓冲器弹簧刚度的不确定性, 当缓冲器弹簧刚度不确定度为 10% 时, 两刚度相关性选取 10%, 从凸集中抽取设计变量, 计算航炮射击系统在缓冲器弹簧刚度不确定性参数影响下的炮口振动响应, 记录不确定性边界值的计算结果, 得到如图 3 所示的炮口横向 (X 方向)、纵向 (Y 方向)、垂向 (Z 方向) 振动位移。图 3 中, 红线为不确定性下界的计算结果, 蓝线为不确定性上界的计算结果。可以看出, 考虑缓冲器弹簧刚度不确定时, 炮口 X 方向位移变化幅度较小。当缓冲器弹簧的刚度降低时, Y 方向上的位移增大, 且出现移频现象。当弹簧刚度增加时, Z 方向位移的最大值基本不变, 而位移衰减速度加快。综上所述, 缓冲器弹簧刚度对炮口 X 方向的影响较小, 而对 Y 方向与 Z 方向的影响较大。

考虑平衡机弹簧刚度不确定性时, 同样以 10% 的不确定度确定平衡机弹簧刚度不确定性分布的上下界。刚度在不确定性上下界时炮口的位移如图 4 所示。由图 4a 可知, X 方向上的最大位移约为 3.48×10^{-4} mm, 上下界结果相近, 且都为微小值。由图 4b 可知, 平衡机弹簧刚度变化时, 炮口沿 Y 方向的位移几乎不变。由图 4c 可知, 平衡机弹簧刚度的变化基本未改变炮口 Z 向位移的最大值和衰退速度, 但是产生了移频现象。综上所述, 平衡机弹簧刚度在小范围内改变, 基本不影响炮口的振动响应, 不是影响航炮射击密度的主要因素。

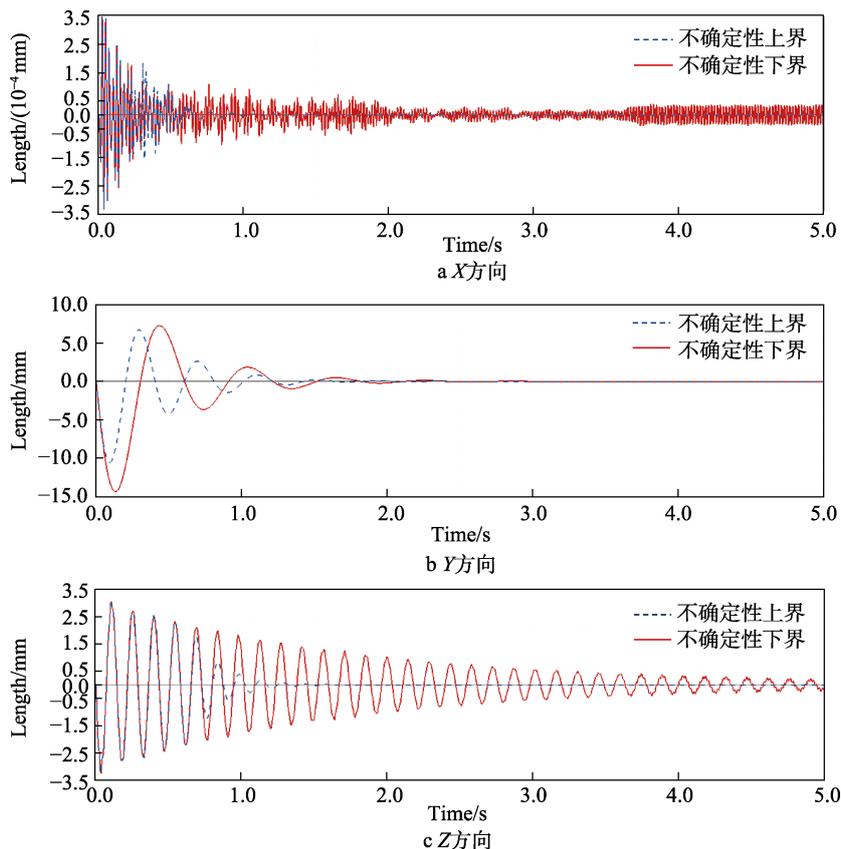


图3 缓冲器弹簧刚度不确定性影响下炮口的位移

Fig.3 Displacement of muzzle with the uncertainty of buffer spring stiffness: a) X direction; b) Y direction; c) Z direction

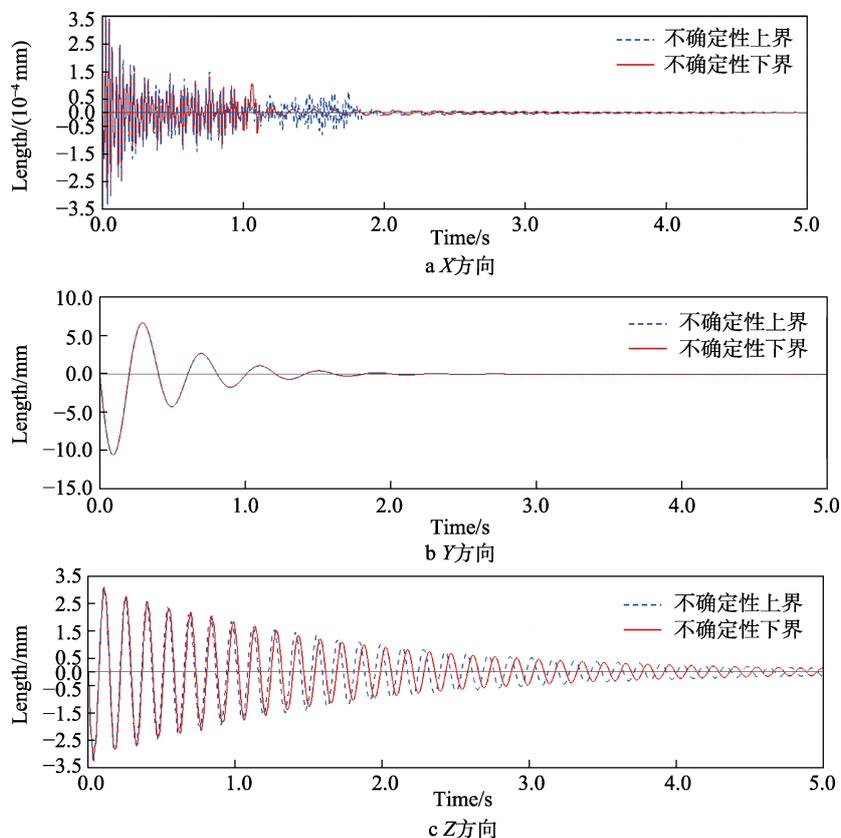


图4 平衡机弹簧刚度不确定性影响下炮口 Z 方向的位移

Fig.4 Displacement of muzzle under the influence of uncertainty of spring stiffness of balancing machine: a) X direction; b) Y direction; c) Z direction

当炮膛合力峰值不确定度为 10% 时, 计算炮膛合力上下界处的炮口响应, 结果如图 5 所示。从图 5a 中可以看出, 随着载荷的增大, 炮口沿 X 方向位移响应的最大值有所增加, 且载荷的衰减速度明显提升, 衰减后于初始位置处还存在微小的振动, 但是振动幅值很小, 不是影响航炮射击密集度的主要因素。从图 5b 可以看出, 炮膛合力对 Y 向位移响应的影响较大, 当载荷峰值增大, 炮口沿 Y 方向的位移响应峰值有明显的增加, 振动周期基本保持不变。由图 5c 可知, 炮膛合力峰值的改变对炮口 Z 向位移的影响较大, 刚度最小时, 位移响应的最大值为 3.09 mm; 刚度最大时, 位移响应的最大值为 3.40 mm, 且随着载荷峰值的增加, 位移响应的衰减速度也增加。

综合考虑上述 3 种不确定性参数的影响, 在不确定度同为 10% 的条件下, 分析 3 种不确定性参数共同作用下的炮口位移, 结果如图 6 所示。由图 6a 可知, 上述 3 个参数的不确定性对 X 方向位移的影响较小, 这可能是因为 X 方向的位移本来就很小, 使得其对参数不确定性的敏感度表现不明显。由图 6b 可知, 在 3 种不确定性参数的影响下, 炮口 Y 方向的位移曲线与图 3b 相似。由此可知, 上述 3 种影响炮口响应的

不确定性参数中, 缓冲器弹簧刚度是影响炮口 Y 方向位移响应的主要因素。由图 6c 可知, 炮口 Z 方向的位移曲线与图 5c 相似, 可知炮膛合力不确定性是影响炮口 Z 方向位移的主要因素。

为方便比较, 在表 2 中列出缓冲器弹簧刚度不确定性、平衡机弹簧不确定性、炮膛合力峰值不确定性以及上述 3 种参数不确定性共同作用对炮口 X、Y、Z 方向振动位移最大值的影响。

考虑各参数不确定性时, 炮口 X 方向位移的变化幅度均小于 Y、Z 方向炮口位移的变化幅度, 说明炮口的 X 向位移对于参数变化的敏感度较小。在不确定度同为 10% 的条件下, 缓冲器弹簧刚度不确定性与炮膛合力不确定性引起的位移变化大于平衡机弹簧刚度不确定性的影响。当 3 种参数共同作用时, 此时不确定性区间包含了前述单个参数不确定性作用区间, 对航炮射击密集度的影响显著。综合上述的分析结果可知, 缓冲器弹簧刚度和炮膛合力是影响炮口响应的主要因素, 平衡机弹簧刚度是影响炮口响应的次要因素。因此, 提升炮口稳定性要从弹簧刚度和炮膛合力这 2 个因素着手: 一方面, 适当地提升弹簧的刚度; 另一方面, 降低炮膛合力的变化。

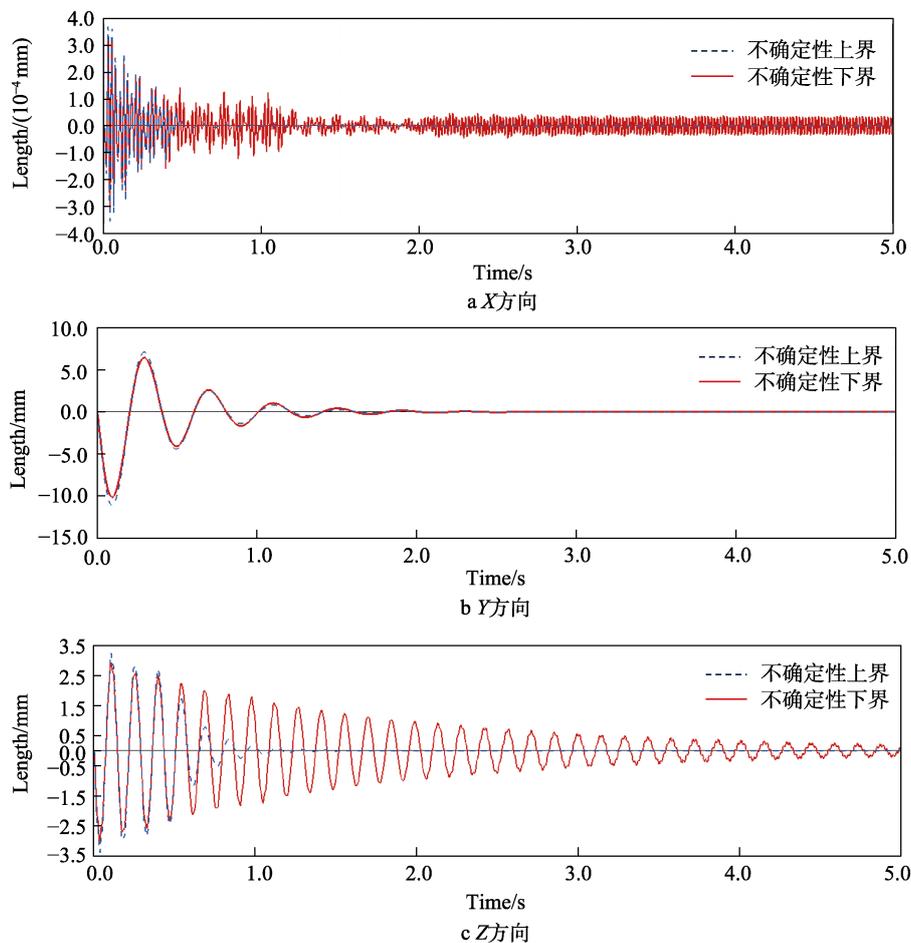


图 5 炮膛合力不确定性影响下炮口的位移

Fig.5 Displacement of muzzle under the influence of uncertainty of chamber resultant force: a) X direction; b) Y direction; c) Z direction

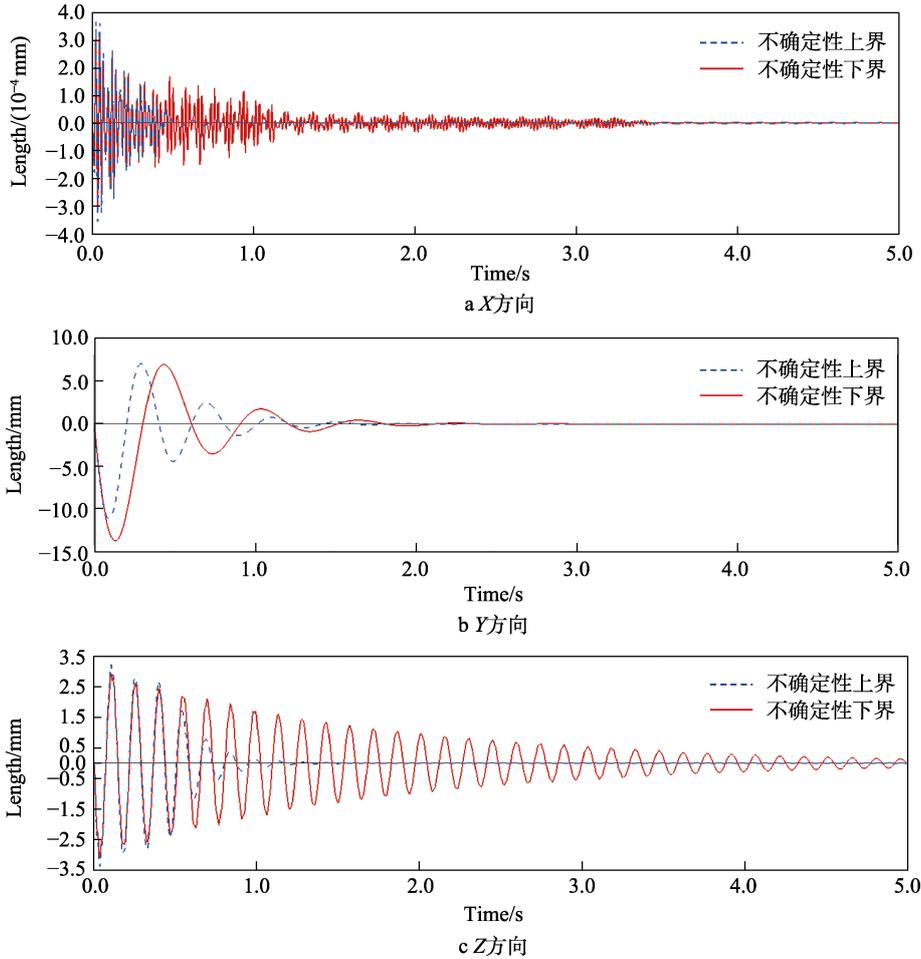


图 6 3种参数不确定性影响下炮口的位移

Fig.6 Displacement of muzzle under the influence of three parameter uncertainties: a) X direction; b) Y direction; c) Z direction

表 2 不确定性因素影响下刚柔耦合模型振动位移

Tab.2 Vibration displacement of rigid flexible coupling model under the influence of uncertainty factors

分析类型	X 方向		Y 方向		Z 方向	
	上界	下界	上界	下界	上界	下界
确定性分析	3.47×10^{-4}		12.00		3.24	
缓冲器弹簧刚度不确定性	3.47×10^{-4}	3.47×10^{-4}	10.56	14.35	3.24	3.25
平衡机弹簧刚度不确定性	3.48×10^{-4}	3.46×10^{-4}	10.53	10.56	3.22	3.26
炮膛合力不确定性	3.66×10^{-4}	3.23×10^{-4}	11.13	10.13	3.40	3.09
3种参数不确定性	3.68×10^{-4}	3.11×10^{-4}	11.13	13.77	3.40	3.13

3 结语

本文建立了某型航炮的刚柔耦合动力学模型，采用非概率凸集模型量化航炮系统参数不确定性，从而避免了参数的概率分布难以获得的问题，降低了计算难度，并通过仿真计算得到了缓冲器弹簧刚度、平衡机弹簧刚度、炮膛合力不确定性对炮口振动响应的影响规律。结果表明，3种参数不确定性对X方向的位移敏感度表现均不明显。在Y方向和Z方向，缓冲器弹簧刚度、炮膛合力不确定性对位移和速度响应的影响较大，而平衡机弹簧刚度的变化对位移的影响很

小。分析了3个参数对航炮射击密集度的影响，可以看出，缓冲器弹簧刚度与炮膛合力参数不确定性对炮口振动幅值与振动衰减速度均有较大影响，是影响射击密集度的主要因素，而平衡机弹簧刚度影响较小，是影响射击密集度的次要因素。本文通过数值仿真，分析了不确定性在航炮发射过程中的传播规律，为提高航炮射击密集度提供了理论依据。

参考文献：

[1] 王亚平, 徐诚, 王永娟. 火炮与自动武器动力学[M].

- 北京: 北京理工大学出版社, 2014.
WANG Ya-ping, XU Cheng, WANG Yong-juan. Dynamics of artillery and automatic weapons[M]. Beijing: Beijing Insitute of Technology Press, 2014.
- [2] 杨伯忠, 陈运生, 程贤进. 火炮射击精度仿真研究[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2002, 26(2): 127-130.
YANG Bo-zhong, CHEN Yun-sheng, CHENG Xian-jin. Study on Simulation Method for Evaluating Firing Accuracy of Ground Gun[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2002, 26(2): 127-130.
- [3] LANGHAAR H L, BORESI A P. Buckling and Post-Buckling Behavior of a Cylindrical Shell Subjected to External Pressure[R]. TAM Report 0093, 1956.
- [4] 唐静静, 芮筱亭, 陆毓琪, 负来峰, 侯日升, 邢卫健. 自行火炮振动特性的计算[J]. 弹道学报, 2003, 15(2): 23-27.
TANG Jing-jing, RUI Xiao-ting, LU Yu-qi, et al. Calculation of the self-Propelled Artillery Vibration Characteristics[J]. Journal of Ballistics, 2003, 15(2): 23-27.
- [5] 芮筱亭, 邱凤昌. 多体火炮系统的固有振动特性——多体系统动力学的传递矩阵法[J]. 兵工学报, 1995, 16(2): 7-12.
RUI Xiao-ting, QIU Feng-chang. Natural Vibration of Multibody Gun System—Transfer Matrix Method of Multibody System Dynamics[J]. Acta Armamentarii, 1995, 16(2): 7-12.
- [6] 杨国来, 陈运生, 王进平. 舰载火炮系统的运动稳定性研究[J]. 南京理工大学学报, 1999(3): 205-208.
YANG Guo-lai, CHEN Yun-sheng, WANG Jin-ping. Study on Kinetic Stability of Trawler System with Howitzer[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 1999(3): 205-208.
- [7] 杨国来, 陈运生, 闵建平. 火炮多柔体系统动力学的自动建模技术[J]. 工程力学, 2001, 18(5): 95-99.
YANG Guo-lai, CHEN Yun-sheng, MIN Jian-ping. Techniques of Automatic Modeling for Dynamic Analysis of Flexible Multibody System of Guns[J]. Engineering Mechanics, 2001, 18(5): 95-99.
- [8] 蔡文勇. 大口径车载火炮多柔体动力学与总体优化研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
CAI Wen-yong. Study on Flexible Multi-Body Dynamics and Overall Parameters Optimization for Large Caliber Vehicle-Mounted Howitzers[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009.
- [9] 王飞. 基于刚柔耦合动力学的火炮射击稳定性优化[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
WANG Fei. Optimization of Gun Firing Stability Based on Rigid Flexible Coupling Dynamics[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015.
- [10] 何永, 高树滋. 考虑身管柔性的火炮多体动力学方法[J]. 华北工学院学报, 1995, 16(4): 302-307.
HE Yong, GAO Shu-zi. A multi-Body Method with Flexible Gun Tube for Gun Dynamics[J]. Journal of North China Institute of Technology, 1995, 16(4): 302-307.
- [11] 郭保全, 侯宏花, 潘玉田. 改进的速度矩阵法在火炮动力学上的应用研究[J]. 华北工学院学报, 2002, 23(1): 50-55.
GUO Bao-quan, HOU Hong-hua, PAN Yu-tian. The Application of Improved Velocity Matrix Method on Gun Dynamics[J]. Journal of North China Institute of Technology, 2002, 23(1): 50-55.
- [12] MALACHOWSKI J, DAMAZIAK K, PLATEK P, et al. Numerical and Experimental Failure Analysis of Rifle Extractor[J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 62: 112-127.
- [13] SOIFER M T, BECKER R S. Dynamic Analysis of the 75 mm ADMAG Gun System[R]. Huntington: Dynamic Analysis of Themm Admag Gun System, 1982.
- [14] 张永存, 吴雪云, 刘书田. 典型火炮结构振动分析与前支架设计改进[J]. 工程力学, 2013, 30(6): 308-312.
ZHANG Yong-cun, WU Xue-yun, LIU Shu-tian. Vibration Analysis of Typical Artillery and Improvement of Front Bracket[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(6): 308-312.
- [15] 葛建立, 杨国来, 陈运生. 某车载炮摇架和上架的静动态有限元设计[J]. 力学与实践, 2007, 29(3): 41-44.
GE Jian-li, YANG Guo-lai, CHEN Yun-sheng. Static and Dynamic Fe Design of Cradle and Top Carriage for a vehicle-Mounted Howitzer[J]. Mechanics in Engineering, 2007, 29(3): 41-44.
- [16] 张俊飞, 顾克秋, 付帅. 基于有限元弹炮耦合的某牵引火炮炮口扰动灵敏度分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2014, 35(1): 25-30.
ZHANG Jun-fei, GU Ke-qiu, FU Shuai. Sensitivity Analysis of a Towed Howitzer Muzzle Disturbance Based on Finite Element Projectile-Barrel Coupling Model[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2014, 35(1): 25-30.
- [17] GAST G R. Prediction of Shot Impact Using Dynamic Analysis and Firing Results for the M1A1 Tank[R]. New York: Army Armament Research Development and Engineering Center, 1995.
- [18] ECHES N, PAUGAIN N, DOFFEMONT C. In Bore Behavior of Large Caliber Armour Piercing Fin Stabilized Discarding Sabot Projectiles[C]//20th International Symposium on Ballistics. Orlanda: [s. n.], 2002.
- [19] EDWARD A J. Advanced Gun System Gun and Projectile Dynamic Model Results and Correlation to Test Data[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2012, 134(4): 041005.
- [20] AHMED N, BROWN R D, HAMEED A. Finite Element Modelling and Simulation of Gun Dynamics Us-

- ing “ANSYS”[C]//Tenth International Conference on Computer Modeling and Simulation. Cambridge: IEEE, 2008.
- [21] 陈塑寰, 裴春艳. 不确定二阶振动控制系统动力响应的区间方法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2008, 38(1): 94-98.
CHEN Su-huan, PEI Chun-yan. Dynamic Response of Second-Order Uncertain Vibration Control Systems with Interval Method[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2008, 38(1): 94-98.
- [22] 邱志平, 马丽红, 王晓军. 不确定非线性结构动力响应的区间分析方法[J]. 力学学报, 2006, 38(5): 645-651.
QIU Zhi-ping, MA Li-hong, WANG Xiao-jun. Interval Analysis for Dynamic Response of Nonlinear Structures with Uncertainties[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2006, 38(5): 645-651.
- [23] 邱志平, 王晓军, 马一. 结构复固有频率区域的区间摄动法[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(5): 406-409.
QIU Zhi-ping, WANG Xiao-jun, MA Yi. Interval Perturbation Method for Computing Regions Containing Complex Natural Frequencies of Structures[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(5): 406-409.
- [24] WU Jing-lai, LUO Zhen, ZHANG Nong, et al. A New Uncertain Analysis Method and Its Application in Vehicle Dynamics[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015, 50-51: 659-675.
- [25] LI Fang-yi, SUN Guang-yong, HUANG Xiao-dong, et al. Multiobjective Robust Optimization for Crashworthiness Design of Foam Filled Thin-Walled Structures with Random and Interval Uncertainties[J]. Engineering Structures, 2015, 88: 111-124.
- [26] 王丽群, 杨国来, 葛建立. 面向射击密集度的随机因素影响分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2016, 37(4): 54-57.
WANG Li-qun, YANG Guo-lai, GE Jian-li. Influence of the Random Factors on Firing Dispersion[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2016, 37(4): 54-57.
- [27] JIANG C, NI B Y, HAN X, et al. Non-Probabilistic Convex Model Process: A New Method of Time-Variant Uncertainty Analysis and Its Application to Structural Dynamic Reliability Problems[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2014, 268: 656-676.

责任编辑: 刘世忠