

考虑不确定性的武器多体系统快速鲁棒性设计

马远卓¹ 李晨旭^{1*} 汪有钰² 张智勇³ 丁阿乃⁴ 李洪双⁴

1. 河海大学新能源学院, 常州, 213200

2. 南京理工大学能源与动力工程学院, 南京, 210094

3. 天津大学机械工程学院, 天津, 300072

4. 南京航空航天大学航空学院, 南京, 210016

摘要: 考虑不确定性参数的武器多体系统鲁棒性设计存在多体系统动力学建模、分析和鲁棒性设计优化求解效率较低的难题。为此, 基于概率论数理统计方法进行武器多体系统不确定性建模和表征, 包括随机参数快速识别和表征以及载荷随机过程的高效模拟。以某舰载火炮为例, 利用多体系统传递矩阵法进行炮口振动品质的快速求解, 并与 ADAMS 仿真结果对比。基于 PCE-Kriging (PCK) 代理模型、多目标子集模拟优化方法和单循环鲁棒性求解策略, 将原始双循环鲁棒性设计优化问题转化为单循环优化问题并进行高效求解。基于不确定性输入、某舰炮的多体系统传递矩阵法动力学模型及相应的 PCK 代理模型, 分别采用双循环及单循环鲁棒性设计优化方法进行该舰炮模型的鲁棒性设计, 对比优化结果验证了所提快速鲁棒性设计方法的性能。

关键词: 多体系统动力学; 多体系统传递矩阵法; 子集模拟优化; 鲁棒性设计优化

中图分类号: TG156

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2025.03.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Rapid Robust Design of Multibody Weapon Systems Considering Uncertainty

MA Yuanzhuo¹ LI Chenxu^{1*} WANG Youyu² ZHANG Zhiyong³ DING Anai⁴ LI Hongshuang⁴

1. College of Renewable Energy, Hohai University, Changzhou, Jiangsu, 213200

2. School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094

3. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin, 300072

4. School of Aeronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016

Abstract: The robust design of multibody weapon systems considering uncertain parameters had the problems of low efficiency in multibody system dynamics modeling, analysis and robust design solutions. Therefore, based on the probability theory and mathematical statistics, the uncertainties were formulated and characterized within multibody weapon systems, including quick identification and representation of random parameters, and the efficient simulation of load stochastic processes. Using naval artillery as an illustrative example, the multibody system transfer matrix method was quickly employed to ascertain the vibration quality of the artillery muzzles. The results were compared with ADAMS simulation outcomes. By harnessing PCE-Kriging (PCK) surrogate model, multi-objective subset simulation optimization method, and a single-cycle robust solution strategy, the original double-cycle robust design optimization problem was transformed into a single-cycle optimization problem and solved efficiently. Based on uncertain input, the dynamics model of multibody system transfer matrix method of a naval artillery and the PCK surrogate model, the robustness of the naval artillery model was finally designed using double-cycle and single-cycle robust design optimization methods. The performance of single-cycle robust design method was verified by comparing the optimization results.

Key words: multibody system dynamics; multibody system transfer matrix method; subset simulation optimization; robust design optimization

0 引言

考虑不确定性参数的武器多体系统鲁棒性设计问题涉及多个领域的研究, 其中多体系统动力学是当今力学研究热点之一, 是兵器、船舶、航空、航天、车辆、通用机械等工业大量产品动态性能设

收稿日期: 2024-04-28

基金项目: 国家自然科学基金(12102125); 中国博士后科学基金(2021M690868, 2019M661849); 中央高校基本科研业务费专项资金(B230201050); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX24_0204)

计与试验的重要基础。近 50 年迅速发展起来的各类多体系统动力学方法^[1-6]普遍存在如下特征：必须建立系统总体动力学方程；系统拓扑结构一旦改变，系统总体动力学方程需重新推导；复杂系统总体动力学方程涉及矩阵阶次高（通常不小于系统的自由度），计算速度随系统规模增大而明显减慢。

RUI 等^[7-10]基于传递矩阵思想提出并不断完善了多体系统传递矩阵法。该方法无需系统总体动力学方程并使系统矩阵阶次远低于系统自由度，实现了多刚体系统动力学、多刚柔体系统动力学、受控多体系统动力学、特别是复杂发射系统动力学的快速计算^[11-13]，但该方法还未能考虑多体系统在真实工况下普遍存在的不确定性影响。目前，国内外不确定性多体动力学分析的相关研究工作相对较少，且多采用区间方法处理多体系统中的不确定性^[14-16]。区间方法的优点是只需确定随机参数上下界，所需先验统计信息较少，但缺点是精度较差，容易“过度估计”随机性对多体系统动力学响应的影响，导致不确定性建模的精度较低。因此，该类方法并不适用于考虑不确定性的多体系统鲁棒性设计这类复杂问题。同时，在国内外针对多体系统鲁棒性设计的研究中，不确定性多体系统动力学分析仍以区间方法为主^[17]，并采用双循环方法求解鲁棒性设计优化问题^[18-22]，当前还没有针对考虑不确定性参数的武器多体系统鲁棒性设计的相关研究工作。

随着计算机技术的不断发展，代理模型方法逐步在上述面向复杂非线性结构响应的效率提升问题中得到有效应用。例如：基于元学习的多可信度深度神经网络代理模型方法^[23]；Kriging 代理模型方法^[24-27]；基于多项式响应模型、Kriging 模型和径向基函数模型方法的混合代理模型方法^[28]等。在寻找高效的求解策略的同时，如何合理嵌入代理模型进一步提高效率，也是当前考虑不确定性参数的武器多体系统鲁棒性设计需要解决的问题。

总的来说，考虑不确定性的多体系统鲁棒性设计目前仍然面临着不确定性多体系统建模与分析的精度和效率较低、鲁棒性设计求解效率较低等难题。针对上述问题，本文首先基于概率论数理统计的方法，进行武器多体系统不确定性的建模和表征；其次，以某舰载火炮为例，采用多体系统传递矩阵法建立舰炮多体系统动力学模型，并利用 ADAMS 软件验证动力学模型的精度；然后，利用 PCE-Kriging(PCK)代理模型、多目标子

集模拟优化方法和单循环鲁棒性设计优化策略，从三方面提高考虑不确定性参数的武器多体系统鲁棒性设计优化的计算效率；最后，基于本文建立的舰载火炮动力学模型，以双循环鲁棒性设计优化方法的优化结果为对照，验证单循环鲁棒性设计优化方法的效率。

1 多体系统不确定性识别和表征

多体系统在设计、制造和使用过程中不可避免地存在一些不确定性因素，这些不确定性因素往往影响着多体系统的性能和安全性，这些不确定因素包括随机变量（时不变，如加工尺寸）及随机过程（时变，如随机激励）等。因此，考虑不确定性参数的武器多体系统的鲁棒性设计优化首先需要系统对系统中的随机参数和随机过程进行识别与表征。

1.1 随机参数表征方法

为表征多体系统结构几何尺寸及材料属性参数中广泛存在的随机性，需首先利用数据相容性、异常性及等同性检测等对原始输入数据进行数据处理。然后，优先基于参数方法，在常规分布类型库中，依据显著性水平，为相应参数选取数据拟合精度最佳的分布类型。若各常规分布模型拟合精度均不达标，则采用基于最大熵准则的非参数方法，分别计算数据样本的前四阶统计矩，构成相应参数的近似概率密度函数。篇幅所限，数据处理和参数估计方法细节见文献^[29-30]。

1.2 载荷随机过程模拟

在多体系统的运行过程中输入载荷并不是一成不变的，常会受不确定性影响而出现波动。为更好地体现输入载荷随时间变化的特性（即时变特性），输入载荷需要用随机过程来表征。对于载荷等实测数据，需首先基于实测数据进行归一化处理，并拟合得到归一化均值、标准差及自相关函数等统计量与时间的函数关系；然后，可采用 Karhunen-Loeve(K-L)级数展开法和级数最优线性估计（expansion optimal linear estimation, EOLE）两种非侵入式方法对多体系统的随机载荷进行随机过程模拟。

1.2.1 K-L 级数展开法

K-L 级数展开法可模拟平稳和非平稳、高斯和非高斯随机过程，这些随机过程通常用于表示工程分析和设计中的空间变化或者时间变化量。

设随机过程 $X(x, t)$ 定义在概率空间 (Ω, A, P) 并在有界域 D 上索引，假设随机过程的均值函数为 $\bar{X}(x)$ ，方差为 $E(X(x, t) - \bar{X}(x))^2$ ，限制边界 $x \in D$ ，这个随机过程可以表示为

$$X(x, t) = \bar{X}(t) + \sum_{i=1}^{\infty} \sqrt{\lambda_i} \xi_i(t) g_i(x) \quad (1)$$

式中： $\xi_i(t)$ 为随机参数； λ_i 、 $g_i(x)$ 为协方差函数的特征值和特征函数。

1.2.2 EOLE 方法

EOLE 方法首先将目标时间的区间 $[0, T]$ 离散为 s 个离散时间点 $t_i, i=1, 2, \dots, s$ 。考虑计算上的简便，时间步长 Δt 一般取定值。在所有时间点处多维随机变量的相关矩阵可以表示为

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \rho_X(t_1, t_1) & \rho_X(t_1, t_2) & \dots & \rho_X(t_1, t_s) \\ \rho_X(t_2, t_1) & \rho_X(t_2, t_2) & \dots & \rho_X(t_2, t_s) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_X(t_s, t_1) & \rho_X(t_s, t_2) & \dots & \rho_X(t_s, t_s) \end{bmatrix}_{s \times s} \quad (2)$$

设此矩阵的特征值和特征向量分别为 η_i 和 ϕ_i^T ，随机过程 $X(t)$ 可以利用下式进行近似：

$$X(t) = \mu_X(t) + \sigma_X(t) \sum_{i=1}^p \frac{U_i}{\sqrt{\eta_i}} \phi_i^T \rho_X(t) \quad (3)$$

式中： U_i 为相互独立的标准正态随机变量。

1.2.3 方法案例

利用某舰载火炮实测膛压数据，通过拟合得到膛压数据的归一化均值、标准差、自相关函数及相应拟合函数，如图 1 所示。然后利用 K-L 方法和 EOLE 方法对随机过程进行表征，分别得到输入膛压抽样样本曲线，如图 2 所示。不难发现：两种方法抽样模拟的膛压随机过程均与实测膛压数据拟合所得的归一化统计量基本一致。对于该问题，上述两种模拟方法均可采用。为简化描述，后文选取 EOLE 模拟的随机过程作为鲁棒性设计的载荷随机过程输入。

2 多体系统确定性建模

2.1 多体系统传递矩阵法建模

本节通过多体系统传递矩阵法建立多体系统的动力学响应求解模型，以图 3 所示的某舰炮模型为例，其中俯仰体、回转体和炮尾为刚体，身管为弹性体，俯仰体 5 的射角为 θ 。

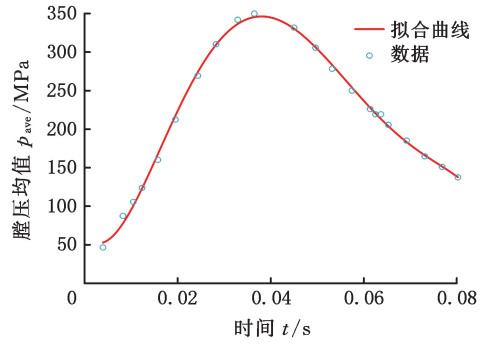
首先，利用新版多体系统传递矩阵法 (NVMSTMM) 建立身管传递矩阵。每个元件输入、输出状态矢量如下所示：

$$\left. \begin{aligned} Z_1 &= (\ddot{X}, \ddot{Y}, \ddot{Z}, \dot{\alpha}_x, \dot{\alpha}_y, \dot{\alpha}_z, M_x, M_y, M_z, Q_x, Q_y, Q_z, 1)^T \\ Z_0 &= (\ddot{X}, \ddot{Y}, \ddot{Z}, \dot{\alpha}_x, \dot{\alpha}_y, \dot{\alpha}_z, M_x, M_y, M_z, Q_x, Q_y, Q_z, 1)^T_0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

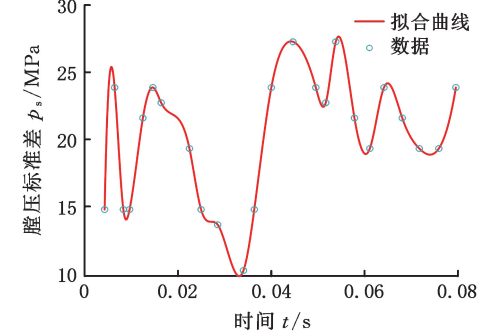
每个元件传递方程为

$$Z_0 = UZ_1 \quad (5)$$

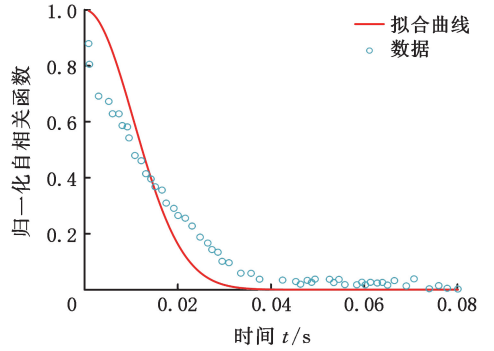
将弹性铰进行切断，分成两个子系统，弹性铰视为外力和外力矩加入刚体传递矩阵中。总的传递矩阵为



(a) 均值



(b) 标准差



(c) 自相关函数

图 1 膛压数据归一化统计量及拟合函数

Fig.1 Normalization statistics and fitted functions of barrel gun pressure

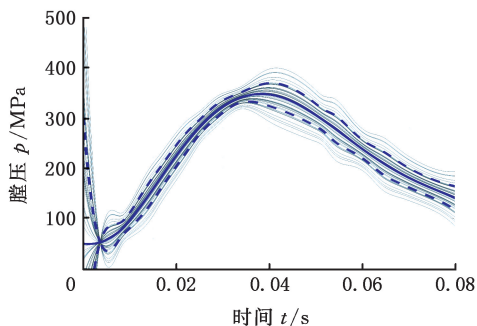
$$\left. \begin{aligned} Z_{9,8} &= U_8 U_7 U_6 U_5 Z_{5,4} \\ Z_{4,3} &= U_3 Z_{2,1} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} Z_{2,1} &= (X, Y, Z, \theta_x, \theta_y, \theta_z, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1)^T \\ Z_{4,3} &= (X, Y, Z, \theta_x, \theta_y, \theta_z, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1)^T_0 \\ Z_{5,4} &= (X, Y, Z, \theta_x, \theta_y, \theta_z, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1)^T \\ Z_{9,8} &= (X, Y, Z, \theta_x, \theta_y, \theta_z, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1)^T_0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

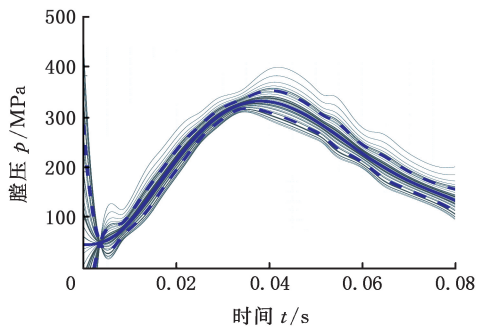
式中： U_3 、 U_5 、 U_7 、 U_8 均为一端输入一端输出刚体传递矩阵， U_6 为滑移铰传递矩阵。

相关的传递矩阵具体形式及推导过程见文献 [31]。两个传递方程所有的边界均为自由边界条件。

将式(7)代入式(6)，使用四阶龙格-库塔方法积分求解，得到相应射角下炮口振动响应。



(a)K-L



(b)EOLE

图 2 输入膛压抽样样本曲线

Fig.2 Sample curves of input barrel gun pressure

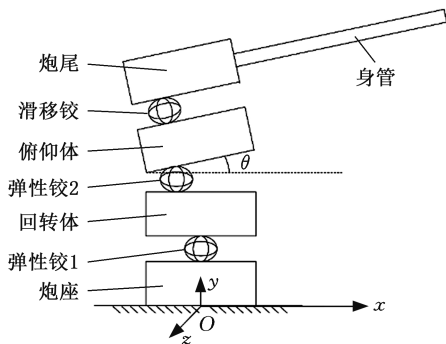


图 3 舰炮系统动力学响应计算模型

Fig.3 Computational model of system dynamic response for shipborne artillery

2.2 ADAMS 有限元软件建模

为验证多体系统传递矩阵法的建模精度,本文使用 ADAMS 有限元法对舰炮进行建模,舰炮有限元模型如图 4 所示。在 ADAMS 操作界面,定义积分格式为线性,选择与炮尾连接处的标记点,并将连接方式定义为刚性,第二个标记点选择为炮管口的一点,定义连接方式为自由,断面为实心圆,直径为 0.1 m。设置仿真时间为 1 s,步数为 1000 步,得到炮口处的 X、Y 方向的振动响应。

2.3 对比验证

2.3.1 振动响应

传递矩阵法舰炮模型与 ADAMS 模型参数一致,取振动时间为 1 s 区间段,射角为 45° 时,所

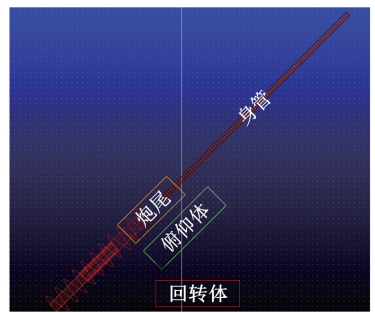
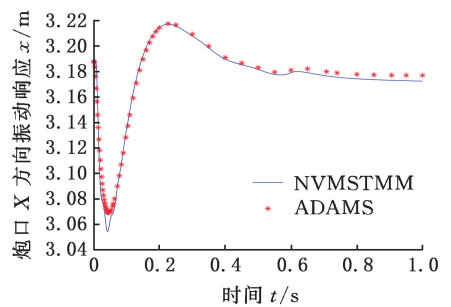
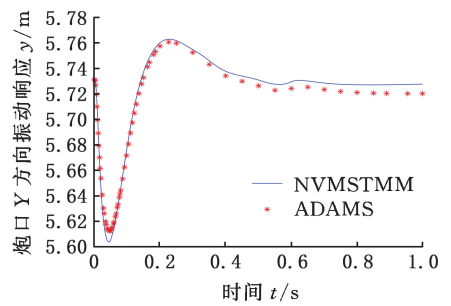


图 4 舰炮 ADAMS 有限元模型

Fig.4 ADAMS finite element model of shipborne artillery
得计算结果与 ADAMS 有限元法结果对比,X 和 Y 方向振动响应值见图 5。



(a)X 方向



(b)Y 方向

图 5 炮口振动响应对比

Fig.5 Comparison of vibration responses of barrel muzzle

2.3.2 振动品质

获得炮口 X 及 Y 方向在时间历程上的振动响应后,将炮口位置绝对位移 X 方向 3.188 m、Y 方向 5.731 55 m 扣除,获得相应的相对位移。为综合评价炮口的振动特性,本文按如下相对振动响应的均方根量化其综合振动品质。

$$z = \sqrt{g_1^2 + g_2^2} \quad (8)$$

$$g_1 = \sqrt{\sum_{t=1}^{n_t} [x(t_i)]^2}, g_2 = \sqrt{\sum_{t=1}^{n_t} [y(t_i)]^2}$$

式中: n_t 为时间 t 离散点数。

按式(8)分别计算多体系统传递矩阵法及 ADAMS 有限元法所得的振动品质指标并进行比较,多体系统传递矩阵法所得结果相对于 ADAMS 方法误差仅为 2.91%。同时,上述单次动力学仿真计算,ADAMS 方法需 60 s,而多体系

统传递矩阵法仅需 45 s,在保证精度的同时效率更高。

3 多体系统快速鲁棒性设计优化方法

3.1 问题描述

该多体系统鲁棒性设计优化决策模型如下:

$$\left. \begin{aligned} \min \mu_x (\sqrt{[g_1(x, \mathbf{d})]^2 + [g_2(x, \mathbf{d})]^2}) \\ \min \sigma_x (\sqrt{[g_1(x, \mathbf{d})]^2 + [g_2(x, \mathbf{d})]^2}) \\ \text{s.t. } d_k^l \leq d_k \in d \leq d_k^u \quad k = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

其中, $\mu_x(\sqrt{[g_1(x, \mathbf{d})]^2 + [g_2(x, \mathbf{d})]^2})$ 为 X 和 Y 方向振幅在时间历程上二范数的平方和算术平方根均值; $\sigma_x(\sqrt{[g_1(x, \mathbf{d})]^2 + [g_2(x, \mathbf{d})]^2})$ 为相应的标准差。优化目标为两个方向振幅均值及方差在时间历程上的均方和最小。d 为设计变量向量, x 为相应的随机变量向量。该案例中, $x \sim N(\mathbf{d}, \sigma)$, d 取值范围及相应变异系数如表 1 所示。

表 1 设计变量取值范围及相应变异系数

Tab.1 Design intervals of the design variables

设计变量	取值范围	初始值	变异系数
身管长度 /m	[3.5, 6.5]	5	0.05
炮膛截面积 /cm ²	[5.495 × 10 ⁻³ , 1.0205 × 10 ⁻²]	7.85 × 10 ⁻³	0.05
弹性铰 1 等效刚度	[3.2 × 10 ⁸ , 1.28 × 10 ⁹]	8 × 10 ⁸	0.1
弹性铰 1 等效阻尼	[4 × 10 ⁵ , 1.6 × 10 ⁶]	1 × 10 ⁶	0.1
弹性铰 2 等效刚度	[2 × 10 ⁸ , 8 × 10 ⁸]	5 × 10 ⁸	0.1
弹性铰 2 等效阻尼	[1.2 × 10 ⁵ , 4.8 × 10 ⁵]	3 × 10 ⁵	0.1
滑移铰等效刚度	[4 × 10 ⁷ , 1.6 × 10 ⁸]	1 × 10 ⁸	0.1
滑移铰等效阻尼	[1.2 × 10 ⁵ , 4.8 × 10 ⁵]	3 × 10 ⁵	0.1

由表 1 可知,该考虑不确定性参数的武器多体系统减振鲁棒性设计是一个双目标优化问题。鲁棒性设计在每一步设计点迭代时,均需要进行物理模型的不确定性传播分析,如图 6 所示,因此,该问题同时还是一个天然嵌套的双循环问题。外循环为设计优化,需反复迭代方能收敛到最优,而内循环为不确定性传播分析,通常需要对真实物理模型进行成千上万次统计计算。内外嵌套后计算量十分巨大,这严重制约了该类鲁棒性设计的求解效率和收敛精度。

针对上述问题,本文从代理模型、优化方法和设计策略三方面对鲁棒性设计优化方法进行改进:①使用 PCK 代理模型拟合仿真过程的隐式方程,有效缩减真实动力学分析次数;②采用多目标子集模拟优化方法,提高确定性优化效率的同时避免优化陷入局部最优;③利用单循环鲁棒性设计优化策略将双循环的鲁棒性设计问题转化为单循环问题求解,提高计算效率。

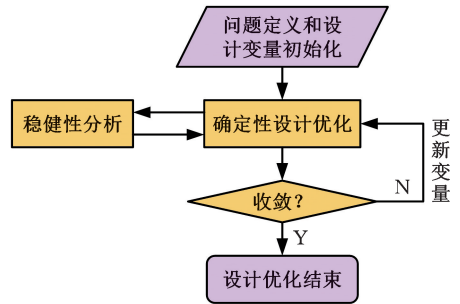


图 6 双循环鲁棒性优化流程图

Fig.6 Flowchart of double loop robust optimization

3.2 PCK 代理模型

武器多体系统的输入设计变量与动力学特性之间的关系通常为强非线性隐式函数,这给武器多体系统综合鲁棒性设计带来极大的阻碍。代理模型利用少量信息即可高效近似武器多体系统鲁棒性设计的原始模型,能够有效提高快速鲁棒性设计的可行性。本文采用基于多项式混沌展开(PCE)和 Kriging 模型的 PCK 代理模型,其表达式如下:

$$g_{PCK}(x) = \sum_{i=0}^{p-1} c_i \psi_i(x) + z(x) \quad (10)$$

式中: $\sum_{i=0}^{p-1} c_i \psi_i(x)$ 为多项式混沌展开项; z(x) 为随机过程项。

以上文舰炮动力学模型为例,采用该方法建立炮口综合响应指标 g 关于输入设计变量的 PCK 代理模型,仅需 50 个训练点(即真实动力学响应求解次数),其中,初始训练点为 12 个,自适应增加训练点 38 个。为验证代理模型精度,将随机选取测试点集处计算所得多体系统传递矩阵法、ADAMS 有限元法的真实响应值和自适应 PCK 模型预测值一一对比,如表 2 所示,所得最大相对误差仅为 2.89%。不难发现,PCK 模型能在保证精度的同时有效提高多体系统仿真计算效率。

表 2 真实响应与 PCK 拟合结构响应的对比

Tab.2 Comparison of real response and PCK fitting structure response

样本点序号	真实响应 g_1	自适应 Kriging 拟合结构响应 g_1	误差 /%
1	3.3303	3.3068	0.71
2	1.2362	1.2448	0.70
3	13.2234	13.6053	2.89
4	1.1811	1.1576	1.99
5	6.4523	6.6357	2.84
6	3.1768	3.2433	2.09
7	7.4241	7.4242	0.00
8	4.2030	4.1159	2.07

3.3 多目标子集模拟优化

为实现鲁棒性设计快速求解的同时有效避免

优化陷入局部最优,本文采用多目标子集模拟优化求解该优化问题。原始单目标子集模拟优化方法的详细过程可参考文献[32]。

单目标与多目标子集模拟优化算法的主要区别集中在第二步样本优劣的排序与种子样本的选取。不同于单目标优化,多目标优化可直接利用目标函数值和约束值的大小作为判断样本优劣的依据,进而选择合适的种子样本,避免优化陷入局部最优。同时,由于考虑不确定性的多体系统鲁棒性设计优化问题为双目标问题,故本文选择多目标子集模拟优化方法作为确定性设计优化方法,其优化流程如图7所示。

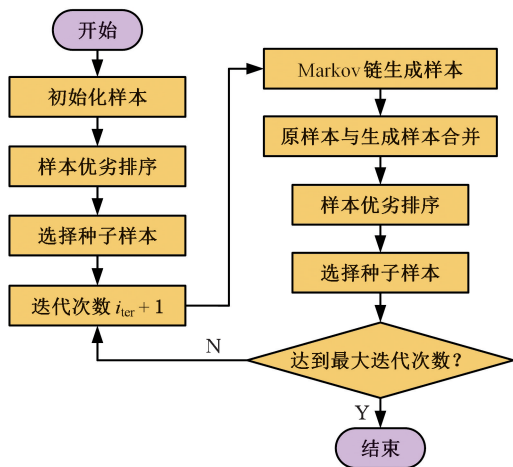


图7 多目标子集模拟优化算法流程图
Fig.7 Flowchart of multi-objective subset simulation optimization algorithm

本文针对原始双循环鲁棒性设计优化问题,提出整合子集模拟优化方法的单循环处理方法,单循环求解思路如图8所示。

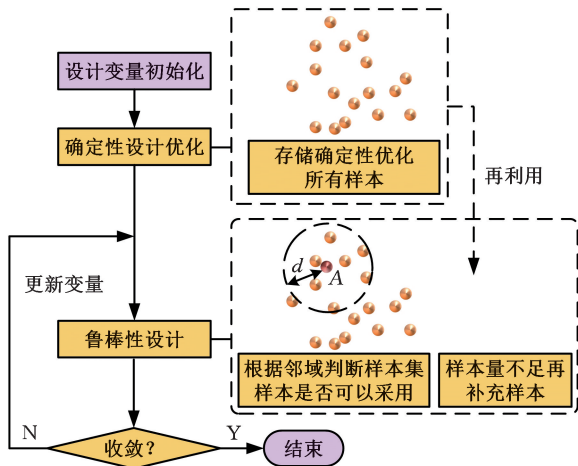


图8 单循环鲁棒性设计思想流程图
Fig.8 Flowchart of single-loop robust design

3.4 单循环鲁棒性设计

单循环处理方法仅对邻域样本集内样本点进行求解,可有效降低不确定性鲁棒性设计的计算

量,具体操作步骤如下:

1) 初始化。初始化设计变量,并进行确定性设计优化。计算所得样本点之间的欧氏距离,找到与任意样本距离最近的点 x ,由它邻域欧氏距离 T 内的样本点集 $\{x_1, x_2, \dots, x_k\}$ 得到种子样本矩阵 η ,对它们进行鲁棒性设计,根据 $F = F(x)$,取响应值最大的样本点作为阈值样本。

2) 更新。计算新的样本点 x_{k+1} ,并得出对应的响应值,若 $F(x_{k+1}) \leq F(x_k)$,则更新其邻域 $\{x_1, \dots, x_k, x_{k+1}\}$,以此更新种子样本矩阵 η ,同时将样本点 x_{k+1} 加入信息矩阵,即保存计算后的样本信息,在后续计算中重复利用,并继续将响应值最大的样本点作为阈值样本。

3) 终止准则。如果满足终止准则或计算的样本数达到最大可承受值,则停止并输出当前数值;否则,继续执行步骤2)。

4 计算结果

基于上文所述的不确定性量化、多体系统传递矩阵法舰炮动力学分析模型和 PCK 代理模型,分别采用双循环和单循环鲁棒性设计策略进行优化计算,对比分析优化结果、验证单循环方法的精度和效率。

4.1 双循环方法

采用双循环方法求解考虑不确定性的舰炮鲁棒性设计问题。多目标子集模拟每层样本 N (种群数) 为 100, p_0 取 0.2,共进行迭代(种群数)20次,外层采用 1700 个样本,内层用蒙特卡罗法求解每个样本点对应的振动品质均值及方差,每个样本需 100 次抽样,共需 $1700 \times 100 = 170\ 000$ 次原始结构系统分析次数,所得帕累托前沿及结果如图9所示。

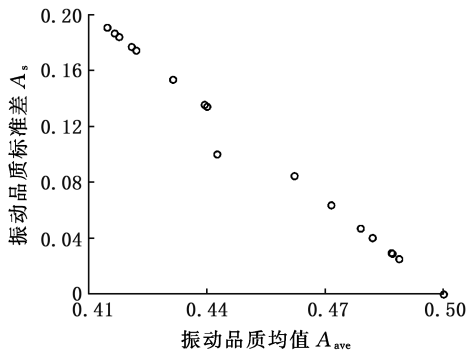


图9 双循环鲁棒性优化帕累托前沿

Fig.9 Pareto frontier of double loop robust optimization

图9中所有数据构成了考虑振动品质均值及方差双目标下的可行域解集,其中振动品质均值最小为 0.4148。振动品质均值为 0.4427、标准差为 0.0999 的一组(第11组)解集对应的设计值见表3。

表 3 第 11 组帕累托解对应的最优设计

Tab.3 Optimum design corresponds to group 11 of the Pareto solution

变量	最优设计
身管长度/m	4.9981
炮膛截面积/cm ²	0.0064
弹性铰 1 等效刚度	8.9669×10^8
弹性铰 1 等效阻尼	7.0410×10^5
弹性铰 2 等效刚度	4.3157×10^8
弹性铰 2 等效阻尼	3.1865×10^5
滑移铰等效刚度	7.2983×10^7
滑移铰等效阻尼	3.3617×10^5

4.2 单循环方法

采用单循环方法求解上述问题, 仅需 8720 次结构分析, 所得帕累托前沿及结果如图 10 所示。相较于原始双循环方法的 170 000 次计算, 计算效率明显提高。

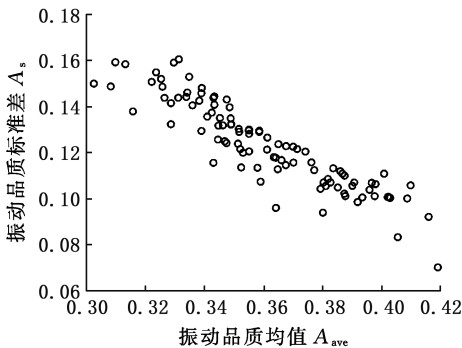


图 10 单循环鲁棒性优化帕累托前沿

Fig.10 The Pareto frontier of single-loop robust optimization

图 10 中所有数据构成了考虑振动品质均值及方差双目标下的可行域解集, 其中振动品质均值最小为 0.3027。振动品质均值为 0.3642、标准差为 0.0960 的一组(第 13 组)解集对应设计值见表 4。

表 4 第 13 组帕累托解对应的最优设计

Tab.4 Optimum design corresponds to group 13 of the Pareto solution

变量	最优设计
身管长度/m	5.0521
炮膛截面积/cm ²	0.0067
弹性铰 1 等效刚度	6.1991×10^8
弹性铰 1 等效阻尼	1.3534×10^6
弹性铰 2 等效刚度	4.2059×10^8
弹性铰 2 等效阻尼	2.5260×10^5
滑移铰等效刚度	9.5876×10^7
滑移铰等效阻尼	3.1732×10^5

5 结论

本文利用不确定性量化、多体系统传递矩阵法、PCK 代理模型和单循环鲁棒性分析策略等方法对不确定性多体系统鲁棒性设计流程进行改

进, 并以某型舰载火炮为例进行验证, 得出以下结论。

1) 利用多体系统传递矩阵法可实现武器多体系统的建模和分析。以舰炮为例建立动力学模型, 与 ADAMS 有限元软件所得结果相比, 响应值误差小于 2.91%, 单次计算时间减少 25%。

2) PCK 代理模型方法可精确、快速拟合多体系统仿真过程中的隐式方程。在舰炮模型上进行验证, 仅用 50 个训练样本即可构建 PCK 代理模型, 且最大相对误差仅为 2.89%。

3) 单循环鲁棒性优化方法相比于传统双循环方法, 效率上有了巨大的提升。在第 4 节算例验证中, 单循环方法仅需 8720 次计算即可得到误差较小的结果, 单循环方法相较于双循环方法的 170 000 次计算, 计算效率明显提高。

综上所述, 在保证精度的同时, 所提方法显著提高了考虑不确定性参数的武器多体系统鲁棒性设计问题的求解效率, 可为相关领域的研究提供参考。

参考文献:

- [1] WASFY T M, NOOR A K. Computational Strategies for Flexible Multibody Systems [J]. Applied Mechanics Reviews, 2003, 56(6):553-613.
- [2] YOO W S, KIM K N, KIM H W, et al. Developments of Multibody System Dynamics: Computer Simulations and Experiments [J]. Multibody System Dynamics, 2007, 18(1):35-58.
- [3] 洪嘉振. 计算多体系统动力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.
HONG Jiazhen. Computational Dynamics of Multibody Systems [M]. Beijing: Higher Education Press, 1999.
- [4] 齐朝晖. 多体系统动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
QI Zhao-hui, Dynamics of Multibody Systems [M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [5] SHABANA A A. Dynamics of Multibody Systems [M]. 3rd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [6] 郝丙飞, 王红岩, 芮强, 等. 坦克多体系统动力学建模及模型试验验证 [J]. 中国机械工程, 2018, 29(4):429-433.
HAO Bingfei, WANG Hongyan, RUI Qiang, et al. Dynamics Modeling and Model Test Verification of Tank Multibody Systems [J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(4):429-433.
- [7] RUI Xiaoting, WANG Guoping, LU Yuqi, et al.

- Transfer Matrix Method for Linear Multibody System[J]. *Multibody System Dynamics*, 2008, 19(3):179-207.
- [8] 芮筱亭, 戎保. 多体系统传递矩阵法研究进展[J]. *力学进展*, 2012, 42(1):4-17.
RUI Xiaoting, RONG Bao. Advances in Transfer Matrix Method for Multibody System Dynamics[J]. *Advances in Mechanics*, 2012, 42(1):4-17.
- [9] RUI Xiaoting, HE Bin, LU Yuqi, et al. Discrete Time Transfer Matrix Method for Multibody System Dynamics [J]. *Multibody System Dynamics*, 2005, 14(3):317-344.
- [10] RONG Bao, RUI Xiaoting, WANG Guoping, et al. Discrete Time Transfer Matrix Method for Dynamics of Multibody System with Real-time Control[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2010, 329(6):627-643.
- [11] 周秦渤. 多管火箭发射动力学多体系统传递矩阵法研究[D]. 南京:南京理工大学, 2018.
ZHOU Qinbo. Study on Multibody System Transfer Matrix Method of Launch Dynamics of Multi-tube Rocket [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.
- [12] 芮筱亭, 负来峰, 陆毓琪, 等. 多管火箭发射动力学研究[J]. *兵工学报*, 2004, 25(5):556-561.
RUI Xiaoting, YUN Laifeng, LU Yuqi, et al. A Study on the Launch Dynamics of Multiple Launch Rocket System[J]. *Acta Armamentarii*, 2004, 25(5):556-561.
- [13] 芮筱亭, 王国平, 陆毓琪, 等. 提高多管火箭射击密集度新技术[J]. *兵工学报*, 2006, 27(2):301-305.
RUI Xiaoting, WANG Guoping, LU Yuqi, et al. A New Technology to Improving Firing Dispersion of Multiple Launch Rocket System[J]. *Acta Armamentarii*, 2006, 27(2):301-305.
- [14] 常琦, 周长聪, 刘付超, 等. 考虑铰接间隙区间不确定性的飞机舱门锁机构可靠性分析[J]. *机械工程学报*, 2023, 59(8):264-272.
CHANG Qi, ZHOU Changcong, LIU Fuchao, et al. Reliability Analysis of Aircraft Door Lock Mechanism with Interval Joint Clearance Uncertainties[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(8):264-272.
- [15] 冯华渊, 上官文斌, 康英姿. 考虑粗糙表面特性的驱动轴系统轴向派生力的区间不确定性优化[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(1):221-230.
FENG Huayuan, SHANGGUAN Wenbin, KANG Yingzi. Interval Optimization for Generated Axial Force of Drive Shaft Systems Considering Rough Surface Characteristics[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(1):221-230.
- [16] 陈剑, 李士爱, 刘策, 等. 基于 Chebyshev 区间方法的动力总成悬置系统稳健性优化[J]. *中国机械工程*, 2018, 29(3):314-319.
CHEN Jian, LI Shiai, LIU Ce, et al. Robustness Optimization of Powertrain Mounting Systems Based on Chebyshev Interval Method[J]. *China Mechanical Engineering*, 2018, 29(3):314-319.
- [17] QIN Liming, LI Jun, YU Gaoyuan. The Uncertain Optimization Algorithm to Suppress Vibration of the Crankshaft System with Random-interval Hybrid Variables[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2019, 11(3):168781401983389.
- [18] BATOU A, SOIZE C, CHOI C K, et al. Robust Design in Multibody Dynamics-application to Vehicle Ride-comfort Optimization[J]. *Procedia IUTAM*, 2015, 13:90-97.
- [19] HAN H, PARK T. Robust Optimal Design of Multibody Systems[J]. *Multibody System Dynamics*, 2004, 11(2):167-183.
- [20] 丰星星. 含不确定参数的多体系统分析与优化[D]. 武汉:华中科技大学, 2019.
FENG Xingxing. Analysis and Optimization of Multibody System with Uncertain Parameters[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [21] 程市, 马彬彬. 基于蒙特卡洛分析的双横臂独立悬架稳健性优化[J]. *农业装备与车辆工程*, 2015, 53(5):27-32.
CHENG Shi, MA Binbin. Robustness Optimization of Double Wishbone Independent Suspension Based on Monte Carlo Analysis[J]. *Agricultural Equipment & Vehicle Engineering*, 2015, 53(5):27-32.
- [22] 田宗睿, 智鹏鹏, 云国丽, 等. 基于自适应增量 Kriging 模型的多目标稳健优化设计方法[J]. *中国机械工程*, 2023, 34(8):931-940.
TIAN Zongrui, ZHI Pengpeng, YUN Guoli, et al. Multi-objective Robust Optimization Design Method Based on Adaptive Incremental Kriging Model[J]. *China Mechanical Engineering*, 2023, 34(8):931-940.
- [23] 张立, 陈江涛, 熊芬芬, 等. 基于元学习的多可信度深度神经网络代理模型[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(1):190-200.
ZHANG Li, CHEN Jiangtao, XIONG Fenfen, et al. Meta-learning Based Multi-fidelity Deep Neural Networks Metamodel Method[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(1):190-200.
- [24] 智鹏鹏, 汪忠来, 李永华, 等. 基于 RMQGS-APS-Kriging 的主动学习结构可靠性分析方法[J]. *机械*

- 工程学报, 2022, 58(16):420-429.
- ZHI Pengpeng, WANG Zhonglai, LI Yonghua, et al. RMQGS-APS-Kriging-based Active Learning Structural Reliability Analysis Method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(16):420-429.
- [25] 张文鑫, 吕震宙. 一种新的自适应 Kriging 法停止准则及其在涡轮盘疲劳寿命可靠性中的应用[J]. 机械工程学报, 2022, 58(6):263-273.
- ZHANG Wenxin, LYU Zhenzhou. New Stopping Criterion of Adaptive Kriging Method and Its Application in Fatigue Life Reliability for Turbine Disk[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(6):263-273.
- [26] 高进, 崔海冰, 樊涛, 等. 一种基于自适应 Kriging 集成模型的结构可靠性分析方法[J]. 中国机械工程, 2024, 35(1):83-92.
- GAO Jin, CUI Haibing, FAN Tao, et al. A Structural Reliability Calculation Method Based on Adaptive Kriging Ensemble Model[J]. China Mechanical Engineering, 2024, 35(1):83-92.
- [27] 宋周洲, 张涵寓, 刘钊, 等. 基于监督降维和自适应 Kriging 建模的高维不确定性传播方法研究[J]. 中国机械工程, 2024, 35(5):762-769.
- SONG Zhouzhou, ZHANG Hanyu, LIU Zhao, et al. A Supervised Dimension Reduction-based Adaptive Kriging Method for High-dimensional Uncertainty Propagation[J]. China Mechanical Engineering, 2024, 35(5):762-769.
- [28] 刘基盛, 计良, 李威, 等. 基于多代理模型的离心叶轮高效优化设计方法[J]. 中国机械工程, 2023, 34(8):899-907.
- LIU Jisheng, JI Liang, LI Wei, et al. Efficient Optimization Design Method of Centrifugal Impellers Based on Multi-surrogate Model[J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(8):899-907.
- [29] LI Hongshuang, WEN Debing, LU Zizi, et al. Identifying the Probability Distribution of Fatigue Life Using the Maximum Entropy Principle[J]. Entropy, 2016, 18(4):111.
- [30] SCHOLZ F W, STEPHENS M A. K-sample Anderson-darling Tests[J]. Journal of the American Statistical Association, 1987, 82(399):918.
- [31] 芮筱亭, 负来峰, 陆毓琪, 等. 多体系统传递矩阵法及其应用[M]. 北京:科学出版社, 2008.
- RUI Xiaoting, YUN Laifeng, LU Yuqi, et al. Transfer Matrix Method for Many-body System and Its Application[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [32] LI Hongshuang, AU S K. Design Optimization Using Subset Simulation Algorithm[J]. Structural Safety, 2010, 32(6):384-392.

(编辑 王旻玥)

作者简介:马远卓,男,1989年生,副教授、硕士研究生导师。研究方向为结构鲁棒性设计优化与可靠性评估方法。E-mail:20200007@hhu.edu.cn。李晨旭*(通信作者),男,2000年生,硕士研究生。研究方向为结构鲁棒性设计优化与可靠性评估方法。E-mail:221606040002@hhu.edu.cn。

本文引用格式:

马远卓,李晨旭,汪有钰,等.考虑不确定性的武器多体系统快速鲁棒性设计[J].中国机械工程,2025,36(3):398-406.

MA Yuanzhuo, LI Chenxu, WANG Youyu, et al. Rapid Robust Design of Multibody Weapon Systems Considering Uncertainty[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(3):398-406.