

基于POD方法的EPR燃料棒流致振动特性分析

闵光云, 冯琳娜, 姜乃斌

FLOW-INDUCED VIBRATION CHARACTERISTICS ANALYSIS OF EPR FUEL RODS BASED ON POD METHOD

Min Guangyun, Feng Linna, and Jiang Naibin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.6052/0459-1879-23-243>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

附磁压电悬臂梁流致振动俘能特性分析

ENERGY HARVESTING ANALYSIS OF A PIEZOELECTRIC CANTILEVER BEAM WITH MAGNETS FOR FLOW-INDUCED VIBRATION

力学学报. 2019, 51(4): 1148-1155

低雷诺数串列双方柱流致振动质量比效应的数值研究

NUMERICAL INVESTIGATION OF MASS RATIO EFFECT ON FLOW-INDUCED VIBRATION OF TWO TANDEM SQUARE CYLINDERS AT LOW REYNOLDS NUMBER

力学学报. 2019, 51(6): 1740-1751

流致振动能量收集的钝头体几何设计研究

THE EFFECT OF GEOMETRIC FEATURE OF BLUFF BODY ON FLOW-INDUCED VIBRATION ENERGY HARVESTING

力学学报. 2021, 53(11): 3007-3015

Gappy POD方法重构湍流数据的研究

RECONSTRUCTION OF TURBULENT DATA WITH GAPPY POD METHOD

力学学报. 2021, 53(10): 2703-2711

平面剪切来流作用下串列布置三圆柱流致运动特性研究

STUDY OF FLOW-INDUCED MOTION CHARACTERISTICS OF THREE TANDEM CIRCULAR CYLINDERS IN PLANAR SHEAR FLOW

力学学报. 2019, 51(3): 787-802

大规模边界元模态分析的高效数值方法

AN EFFICIENT NUMERICAL METHOD FOR LARGE-SCALE MODAL ANALYSIS USING BOUNDARY ELEMENT METHOD

力学学报. 2017, 49(5): 1070-1080



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

基于 POD 方法的 EPR 燃料棒流致振动特性分析¹⁾闵光云* 冯琳娜[†] 姜乃斌*,²⁾

*(中山大学中法核工程与技术学院, 广东珠海 519082)

[†](中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室, 成都 610213)

摘要 EPR (European pressurized reactor) 燃料棒相比 M310 燃料棒的棒长更长, 导致其频率降低、幅值增大, 在冷却剂的作用下, 会加剧格架与棒束之间微动磨损 (grid-to-rod fretting, GTRF), 进而造成放射性物质的泄漏. 将 EPR 燃料棒简化为 3D 梁模型, 将刚凸和弹簧对燃料棒的约束等效为弹性约束, 将带格架的燃料棒简化为多跨连续简支梁模型, 然后基于 ANSYS-APDL 建立了 EPR 燃料棒的有限元模型. 阐述了湿模态分析和湍流激振响应分析的基本原理, 整理了 12 个格架失效工况, 系统地研究了格架失效对湿模态和湍流激振响应的影响. 针对 EPR 燃料棒流致振动问题, 提出了采用本征正交分解 (proper orthogonal decomposition, POD) 原理分析 EPR 燃料棒流致振动特性的方法, 通过对快照矩阵进行 POD 分解生成投影子空间, 将湍流激振响应投影到子空间进行模型降阶, 最后在物理空间快速地重构湍流激振响应. 结果表明: 格架失效会导致频率降低, 且湍流激振响应的幅值会在格架失效处增大; 当格架失效使得 EPR 燃料棒模型成为悬臂梁结构时, 湍流激振响应最大; 前 2 阶 POD 降阶模型基本能快速重构燃料棒的湍流激振响应, 且误差非常小. 文章的研究将有助于核反应堆工程的优化和设计.

关键词 流致振动, POD 方法, EPR 燃料棒, 模态分析, 格架失效

中图分类号: TL352 文献标识码: A doi: [10.6052/0459-1879-23-243](https://doi.org/10.6052/0459-1879-23-243)

FLOW-INDUCED VIBRATION CHARACTERISTICS ANALYSIS OF EPR FUEL RODS
BASED ON POD METHOD¹⁾Min Guangyun* Feng Linna[†] Jiang Naibin*,²⁾

*(Sino-French Institute of Nuclear Engineering and Technology, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, Guangdong, China)

[†](Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China)

Abstract The length of the EPR (European pressurized reactor) fuel rod is longer compared to the M310 fuel rod, resulting in a decrease in frequency and an increase in amplitude compared to the M310 fuel rod. Under the influences of the coolant, grid-to-rod fretting (GTRF) wear may be exacerbated, potentially leading to the leakage of radioactive materials. Here, the EPR fuel rod is simplified as a 3D beam model, where the constraints of dimples and springs on the fuel rod are treated as equivalent elastic constraints. Additionally, the fuel rod with a spacer grid is further simplified as a multi-span continuous simply supported beam model. A finite element model of the EPR fuel rod based on ANSYS-APDL is established, and the fundamental principles of wet mode analysis and vibration response analysis are explained.

2023-06-14 收稿, 2023-09-14 录用, 2023-09-15 网络版发表.

1) 国家自然科学基金 (11872060) 和广东省重点领域研发计划 (2021B0101250002) 资助项目.

2) 通讯作者: 姜乃斌, 教授, 主要研究方向为反应堆结构力学. E-mail: jiangnb@mail.sysu.edu.cn

引用格式: 闵光云, 冯琳娜, 姜乃斌. 基于 POD 方法的 EPR 燃料棒流致振动特性分析. 力学学报, 2024, 56(3): 659-669

Min Guangyun, Feng Linna, Jiang Naibin. Flow-induced vibration characteristics analysis of EPR fuel rods based on POD method. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2024, 56(3): 659-669

12 grid failure conditions have been sorted out, and the influences of grid failure on wet mode and vibration response have been systematically studied. A method for analyzing the vibration characteristics of the EPR fuel rod using the proper orthogonal decomposition (POD) method is proposed, targeting flow-induced vibration (FIV) of the EPR fuel rod. The snapshot matrix is decomposed by POD method to generate the projection subspace, and the responses are projected onto the subspace for model reduction. Finally, the response is reconstructed in the physical space. The results show that the amplitude of vibration responses would increase at the location of grid failure; When the grid structure fails and causes the EPR fuel rod model to become a cantilever beam configuration, the maximum response to turbulent excitation is achieved; For the analysis of response, the first 2 orders POD reduced order model (ROM) can basically reconstruct the response of the fuel rod. The research in this paper will help to the optimization and design of nuclear reactor engineering.

Key words flow-induced vibration, POD method, EPR fuel rods, mode analysis, grid failure

引言

承受轴向或横向流的结构常见于能量产生和转换的行业中^[1-2], 限制这些结构的发展和可靠性的一个重要原因是流体-结构耦合的振动, 通常被称作流致振动^[3](flow-induced vibration, FIV). FIV 是造成燃料棒包壳微动磨损 (grid-to-rod fretting, GTRF) 最主要的原因之一^[4-5], 在工程中需时刻注意. 燃料棒包壳容纳燃料芯块, 并包容裂变气体, 它是防止放射性物质外泄的第一道屏障^[6]. 然而, GTRF 磨损会使得包壳变薄, 严重时可能会造成放射性物质泄漏, 严重影响国民经济、危害人民安全.

近 20 年来, 国内外学者在燃料棒流致振动机理及 GTRF 磨损领域开展了大量的研究^[7-15]. 部分学者采用数值模拟方法研究燃料棒的流致振动, 学者们通常只借鉴“弱流固耦合”思想, 即只考虑流场对结构的影响, 并没有考虑结构变形对流场的影响. 如 Kim 等^[7-9]建立了燃料棒的多跨连续简支梁模型, 结合半经验公式并基于随机振动理论, 系统地研究了格架失效对燃料棒固有频率和振型的影响. 齐欢欢等^[10-11]也通过多跨连续梁模型研究了格架失效对燃料棒湍流激振和旋涡脱落的影响. 然而, “弱流固耦合”会乐观地估计燃料棒的换热能力^[12], 因此考虑流场与结构的双向耦合, 实时更新结构和流场的数据是非常必要的, 但对计算机的性能要求较高. 陈德奇等^[13-14]通过 3D 建模软件 UG 建立了带格架的 5×5 燃料棒束模型, 并通过 ICEM 进行了网格划分, 最后基于 ANSYS-Workbench 中的 system couple 模块实现了燃料棒和流场的双向耦合, 系统地研究了燃料棒束的流致振动特性. 马玉琢等^[15]在文献^[14]的基

础上, 进一步考虑了流场-结构场-温度场多物理场耦合效应下燃料棒束的流致振动特性. 也有部分学者通过试验手段研究燃料棒的流致振动特性, 但试验成本高且工况单一. 因此, 性价比低、经济性差是限制通过试验手段研究燃料棒流致振动特性的主要原因之一.

另外, 在计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 研究中, 基于试验或仿真数据样本, 构建降阶模型 (reduced-order model, ROM) 是一种重要的研究手段. 目前存在两类典型的降阶模型^[16-17]: 基于系统辨识方法的 ROM (如神经网络模型) 和基于流场特征提取方法的 ROM (如本征正交分解 (proper orthogonal decomposition, POD)). 有关 POD 的研究, 寇家庆等^[18]基于 POD 方法研究了 OAT15A 翼型的跨声速抖振模态; 李凯等^[19]发展了一种基于 POD 和 Kriging 模型的定常气动力降阶模型, 针对三维机翼模型的结果证明了该方法的可行性; 孙翀等^[20]基于 POD 方法研究了风力机翼型在失速工况下的非定常流场特性; 郭子漪等^[21]基于 POD-Galerkin 降维法构建了低维模型, 系统地分析了热毛细对流分岔. 魏代同等^[22]基于 POD 方法对叶片碰摩响应问题进行了求解; 李玉韦等^[23]基于 POD 方法求解了加筋筒壳的结构动力响应. Wang 等^[24]基于 POD-ROM 模型系统地研究了黏弹性流体的流动特征. 余波等^[25]基于 POD-RBF 方法对管道内壁进行几何识别. 基于 POD 方法搭建降阶模型, 能够实现振动特性的快速预测, 为燃料棒的流致振动行为研究提供了新的研究手段.

目前, 国内外公开文献针对 (European pressurized reactor, EPR) 压力容器内部流场的研究较多, 但对

于 EPR 燃料棒的振动响应仍未有相关研究公开发表. 基于此, 本文将系统地研究 EPR 燃料棒的振动特性. EPR 燃料棒相比 M310 燃料棒的棒长更长, 导致其频率降低且幅值增大, 在冷却剂的作用下, 可能会加剧 GTRF 磨损, 造成放射性物质的泄漏. 本文基于 ANSYS-APDL 建立了带格架的 EPR 燃料棒的多跨连续简支梁模型, 系统地研究了格架失效对 EPR 燃料棒频率、模态的影响. 然后, 基于全阶模型的样本数据形成快照 (snapshots) 矩阵, 利用 POD 方法搭建了 ROM, 该 ROM 能够对模态、湍流响应快速重构. 本文研究结果对 EPR 燃料棒流致振动特性研究有一定的参考价值.

1 POD 分解

1.1 快照矩阵生成

POD 方法是在全阶模型试验数据或者仿真数据的基础上形成快照矩阵^[26-29], 然后将快照矩阵投影到低维度的空间, 该空间满足快照矩阵的分散程度最大, 数学解释即为方差最大.

POD 方法的快照矩阵 $\mathbf{Y}$ 可描述为

$$\mathbf{Y} = [\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_n] \quad (1)$$

式中, $\mathbf{y}_1$ 到 $\mathbf{y}_n$ 为不同工况下的样本数据.

1.2 POD 分解及最优基底获取

POD 的本质是在全阶模型试验数据或者仿真数据的基础上, 获得一组最优正交基底

$$\boldsymbol{\phi} = [\boldsymbol{\phi}_1, \boldsymbol{\phi}_2, \dots, \boldsymbol{\phi}_n] \quad (2)$$

寻找全阶系统的最优正交基等价于 1 个最值问题

$$G = \max \sum_{i=1}^m \frac{(\mathbf{y}_i, \boldsymbol{\phi})^2}{\|\boldsymbol{\phi}\|^2} \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\phi}^T \boldsymbol{\phi} = \mathbf{I}(n) \quad (4)$$

式中, 向量 $\boldsymbol{\phi}$ 为 POD 模态正交基, 矩阵 $\boldsymbol{\phi}$ 是 POD 模态正交基的组合, 并且矩阵 $\boldsymbol{\phi}$ 满足式 (4) 所示的正交性. 式 (3) 中表述的最值问题可以转化为特征值求解问题

$$\mathbf{Y}\mathbf{Y}^T \mathbf{u} = \lambda \mathbf{u} \quad (5)$$

由于快照矩阵 $\mathbf{Y}$ 的行号通常会远大于其列号, 那么矩阵 $\mathbf{Y}\mathbf{Y}^T$ 的维数也会远大于矩阵 $\mathbf{Y}^T \mathbf{Y}$ 的维数. 因此, 为了降低本征正交分解过程中的计算规模, 可

以定义相关矩阵 $\mathbf{R}$

$$\mathbf{R} = \mathbf{Y}^T \mathbf{Y} \quad (6)$$

首先通过求解相关矩阵 $\mathbf{R}$ 的特征值和特征向量

$$\mathbf{R}\boldsymbol{\phi}_i = \lambda_i \boldsymbol{\phi}_i \quad (7)$$

进而得到矩阵 $\mathbf{Y}\mathbf{Y}^T$ 的特征值对应的特征向量

$$\boldsymbol{\varphi}_i = \frac{1}{\sqrt{\lambda_i}} \mathbf{Y} \boldsymbol{\phi}_i \quad (8)$$

由此, 得到一组 POD 模态正交基, 且任意样本数据都可以表示成这组 POD 模态基的线性组合, 即

$$\mathbf{Y} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \boldsymbol{\varphi}_i \quad (9)$$

式中, α_i 为 POD 模态基的系数.

利用上述式 (8) 获得的少数几个 POD 模态正交基可实现对原始全阶模型进行自由度缩减.

为了选择尽可能少的 POD 模态正交基, 可以通过子空间的总能量与全阶空间能量之比 $I(h)$ 进行模态截取, $I(h)$ 可以表述为相应 POD 模态特征值和与全部特征值和的比值

$$I(h) = \sum_i^k \lambda_i / \sum_i^n \lambda_i \quad (10)$$

一般 $I(h)$ 的值应大于 90% 以上, 这样所截取的 POD 模态基可以用于将全阶模型投影到更低维的子空间, 并且保证一定的精度.

2 数值计算对象与方法

2.1 燃料棒-格架模型

目前, 中国台山的 EPR 机组可选择使用两种燃料组件, 一种是西门子设计的 HTP 型燃料组件, 另一种被采用的是法国阿海珐 (AREVA) 设计的 AFA-3G LE 型燃料组件.

AFA-3G LE 型燃料组件的设计基于 AFA-3G L 型燃料组件^[30], 每个燃料组件有 265 根燃料棒和 24 根导向管, 呈 17×17 的方式排布. AFA-3G LE 型的燃料组件全长 4802 mm, 共有 11 个格架, 其中 8 个为带有搅混翼的搅混格架, 另外 3 个为不具有搅混功能的定位格架. 该型燃料组件底部的 2 个格架为定位格架, 格架之间的距离较近; 再往上为 8 个搅混格架, 最后 1 个定位格架在燃料组件的顶部, 详

见图 1 所示^[30].

AFA-3G LE 燃料组件的燃料棒由下部端塞、上部端塞、燃料芯块、弹簧、包壳管和支撑管等部件组成. 核反应堆运行过程中燃料棒内部的压力和包壳的应变可能发生变化 (辐照蠕变、热膨胀或核裂变过程中会产生气体). 因此, 在包壳的顶部和底部保留了气腔室, 且燃料芯块由弹簧压紧, 详见图 2 所示.

AFA-3G LE 燃料组件中每个燃料棒的长度为 4553.4 mm, 包壳的外径和厚度分别为 9.5 mm 和 0.57 mm. 格架作为保持燃料棒稳定性和提高其刚度的弹性构件, 其由多个相互焊接的 Zr-4 合金条带组成.

如图 3 所示, 在格架位置处, 每个燃料棒由 2 个弹簧片和 4 个刚凸约束, 保持了燃料棒的稳定性.

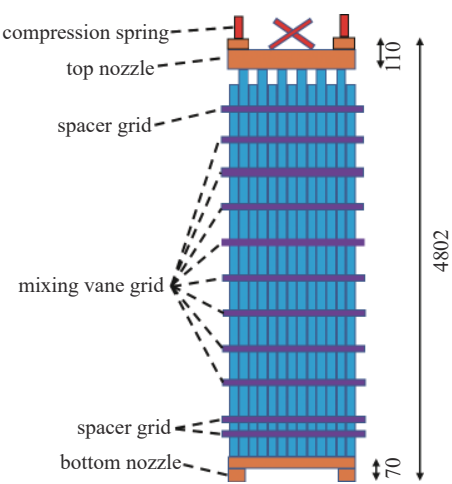


图 1 AFA-3G LE 燃料组件示意图 (单位: mm)
Fig. 1 Schematic of AFA-3G LE fuel assembly (unit: mm)

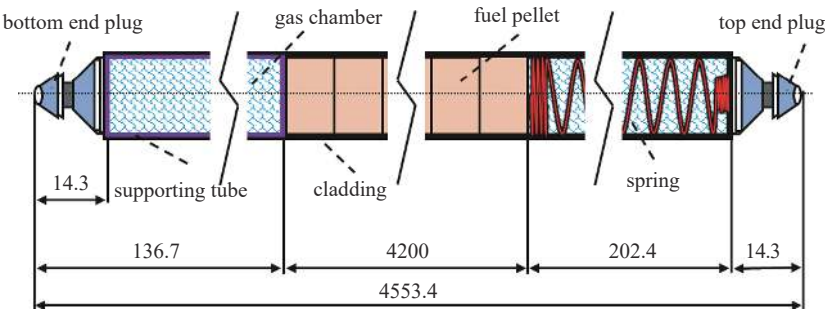


图 2 EPR 燃料棒示意图 (单位: mm)
Fig. 2 Schematic of the EPR fuel rod (unit: mm)

单根燃料棒受到 2 个弹簧片和 4 个刚凸的约束, 并且这些约束沿格架的对角线对称. 本文将刚凸和弹簧等效于弹性约束, 如图 4 所示.

综上, 单根燃料棒可以简化为多跨连续简支梁模型.

燃料棒的简化模型如图 5 所示, 在燃料棒每个格架位置处都有弹性约束.

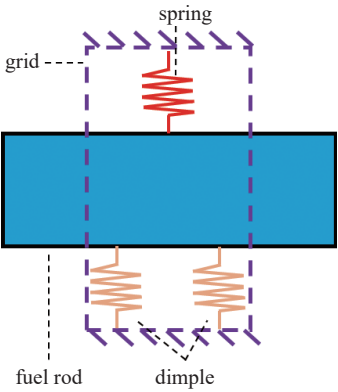


图 4 弹性约束示意图
Fig. 4 Schematic of elastic constraints

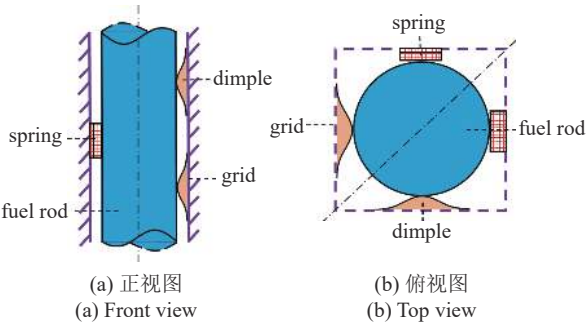


图 3 燃料棒受定位格架约束的示意图
Fig. 3 Schematic of a fuel rod constrained by grid

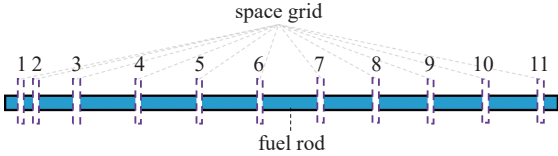


图 5 EPR 燃料棒的多跨连续简支梁示意图
Fig. 5 Schematic of a multi-span continuous simply supported beam of EPR fuel

2.2 湿模态分析

放置在压力容器冷却剂中的燃料棒是典型的流固耦合 (fluid-structure interaction, FSI) 结构. 对于 FSI 结构, 由于流体和结构之间的耦合效应, 模态分析更加复杂. 然而, 湿模态分析考虑了流体和结构耦合效应. 对于 FSI 模型, 其控制方程可以写成

$$\mathbf{M}_S \ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}_S \dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}_S \mathbf{X} = \mathbf{F}_m(t) + \mathbf{F}_e(t) = (-\mathbf{M}_a \ddot{\mathbf{X}} - \mathbf{C}_a \dot{\mathbf{X}} - \mathbf{K}_a \mathbf{X}) + \mathbf{F}_e(t) \quad (11)$$

式中, $\mathbf{M}_S$, $\mathbf{C}_S$ 和 $\mathbf{K}_S$ 分别是结构的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $\mathbf{M}_a$, $\mathbf{C}_a$ 和 $\mathbf{K}_a$ 分别是流体对结构附加的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $\mathbf{F}_m(t)$ 和 $\mathbf{F}_e(t)$ 分别为与运动相关和运动无关的流体载荷; $\mathbf{X}$ 是广义位移; $(\cdot)$ 表示对时间求导数.

当流速远低于临界流速且结构振幅很小时, 流体附加刚度和附加阻尼可以忽略, 仅考虑流体附加质量的影响, 强耦合问题退化为单向弱耦合问题: 考虑附加质量的流固耦合系统强迫激振问题.

EPR 燃料棒为多点支撑系统. 在多点支撑作用下, 此类系统的临界速度通常很高, 即运行流速通常远低于临界流速. 同时, 多点支撑意味着支撑之间的管段较短且刚度较高, 系统不易发生大幅值振动, 即系统满足小变形假设. 基于以上两点分析, 本论文采用单向耦合计算方案分析燃料棒的流致振动特性. 流体附加质量等于每个燃料棒排开水的质量, 本论文以密度修正方式体现到梁模型中.

根据式 (11) 进一步可得到

$$\mathbf{M}_c \ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}_c \dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}_c \mathbf{X} = \mathbf{F}_e(t) \quad (12)$$

式中, $\mathbf{M}_c = \mathbf{M}_S + \mathbf{M}_a$, $\mathbf{C}_c = \mathbf{C}_S$, $\mathbf{K}_c = \mathbf{K}_S$.

对于不考虑阻尼效应的自由振动, 式 (12) 可简化为

$$\mathbf{M}_c \ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}_c \mathbf{X} = 0 \quad (13)$$

令

$$\mathbf{X} = \boldsymbol{\psi} e^{i\omega t} \quad (14)$$

式中, ω 为固有频率, $\boldsymbol{\psi}$ 为振型.

将式 (14) 代入式 (13) 可得到湿模态分析的特征方程

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}) \boldsymbol{\psi} = \mathbf{0} \quad (15)$$

本文采用 ANSYS-APDL 对燃料棒进行湿模态

分析.

2.3 湍流激振响应分析

工程上, 通常采用湍流激励响应半经验公式计算燃料棒的湍流激振响应值. 根据压水堆燃料棒的结构和流场分布特征, 采用功率谱密度表征湍流激励, 结合相关功率谱密度试验参数, 求解每阶模态的振动位移均方值.

根据文献 [31], 对于第 i 阶模态, 在 x 处由轴向流产生的燃料棒均方根振幅为

$$\sigma[X_i(x)]^a = C(D)\phi_i(x) \left(\frac{\rho D^2}{\rho_{eq}} \right) \left(\frac{1}{\delta_i} \right)^{0.5} \left(\frac{D}{L} \right)^{0.5} \left(\frac{U_a^e}{f D_i} \right)^{\frac{3+Q}{2}} \left(\frac{L}{\int_0^L \phi_i^2(x) dx} \right)^{0.5} \quad (16)$$

对于第 i 阶模态, 在 x 处由横向流产生的燃料棒均方根振幅为

$$\sigma[X_i(x)]^t = C(D)\phi_i(x) \left(\frac{\rho D^2}{\rho_{eq}} \right) \left(\frac{1}{\delta_i} \right)^{0.5} \left(\frac{D}{L} \right)^{0.5} \left[\frac{\int_0^L \left(\frac{U_t(x)}{f_i D} \right)^{3+Q} \phi_i^2(x) dx}{\int_0^L \phi_i^2(x) dx} \right]^{0.5} \left(\frac{L}{\int_0^L \phi_i^2(x) dx} \right)^{0.5} \quad (17)$$

式 (16) 和式 (17) 中的物理参数可参考文献 [31].

把轴向、横向流产生的振幅线性叠加, 则有

$$\sigma_i(x) = \sigma[X_i(x)]^t + \sigma[X_i(x)]^a \quad (18)$$

式中, $\sigma_i(x)$ 为第 i 阶模态的振幅. 总振幅由每个模态的振幅组合求得, 模态组合采用 10% 频率组合将各振型组集在一起 [31]. 由每个振型的振幅 $\sigma_i(x)$ 组合得到总振幅 $\sigma(x)$, 在节点 x 处总振幅可表示为

$$\sigma(x) = \left(\sum_{i=1}^N \sigma_i^2(x) + 2 \sum_{\substack{j=1, N \\ i=1, j-1}} \beta_{ij} \sigma_i(x) \sigma_j(x) \right)^{1/2} \quad (19)$$

式中, β_{ij} 为组合系数, 如果频率之间的相对偏差小于 10%, 那么 $\beta_{ij} = 0.5$, 否则 $\beta_{ij} = 0$.

3 POD 分解与结果分析

3.1 EPR 燃料棒的流致振动

本文基于 ANSYS-APDL 进行湿模态分析. 燃料

棒是典型的细长结构,其变形主要为梁式变形,因此本文将燃料棒简化为受约束的多跨连续简支梁模型,使用 Beam4 单元模拟燃料棒,使用 Combine40 单元来模拟弹簧、刚凸与燃料棒之间的夹持作用。

由于本文建立的 EPR 燃料棒简化模型是结构高度对称的模型,因此其模态是成对出现的,即 $X-Z$ 平面和 $X-Y$ 平面的模态是一样的,如图 6 所示。

图 6 仅列出了没有格架失效时 EPR 燃料棒的 1 阶模态。在本文建立的有限元模型下,当模态阶次为 16 时,有效质量系数接近 1。为了节约篇幅,下文的分析都是基于 $X-Y$ 面。

在燃料棒的设计过程中,除了考虑燃料棒的材料特性和结构特征外,还需确定格架上弹簧片和刚凸对燃料棒夹持力的大小。夹持力太小时,燃料棒和格架之间的 GTRF 磨损将增加;夹持力太大时,燃料棒将因过度约束而产生变形。

本文分析了格架失效对燃料棒湿模态和湍流激振响应的影响,且在本文中,认为格架失效为图 3 中

格架处的弹性支撑全部失效,即格架中所有的弹簧和刚凸都失去了对燃料棒的弹性约束。本文设定了 12 个失效工况,用于 EPR 燃料棒的湿模态分析和湍流激振响应分析,相应的 12 种失效工况如表 1 所示。

气腔室不具备刚度,燃料芯块是一块一块堆叠起来的,也不具备刚度。因此本文在建立燃料棒有限元模型时,认为燃料棒的刚度特性主要由燃料包壳提供,即其他部件对刚度的贡献很少,不考虑刚度,但需考虑质量。将其他部件的质量折算入对应的包壳管材料密度中可得到湿模态分析、湍流激振响应计算所需的质量参数,详见表 2。此外,杨氏模量为 76.9 GPa,泊松比为 0.37。

在上述 12 种失效工况下,通过对燃料棒的湿模态分析,得出格架失效对湿模态 1 阶模态的影响。以 $X-Y$ 平面的为例,如图 7 所示,其中虚线表示没有格架失效时燃料棒的固有频率。同样,在本文建立的有限元模型下,当模态阶次为 16 时,有效质量系数接

表 1 失效工况

Table 1 Failure working conditions	
Working condition	Introduction
C.1	spring and dimple failure of grid 1
C.2	spring and dimple failure of grid 2
C.3	spring and dimple failure of grid 3
C.4	spring and dimple failure of grid 4
C.5	spring and dimple failure of grid 5
C.6	spring and dimple failure of grid 6
C.7	spring and dimple failure of grid 7
C.8	spring and dimple failure of grid 8
C.9	spring and dimple failure of grid 9
C.10	spring and dimple failure of grid 10
C.11	spring and dimple failure of grid 11
C.12	spring and dimple failure of grid 1 and grid 2

表 2 质量参数

Table 2 Mass parameter	
Parameter	Value/(kg·m ⁻¹)
top end plug	1.384
gas chamber	0.215
fuel pellet	0.795
bottom end plug	1.052

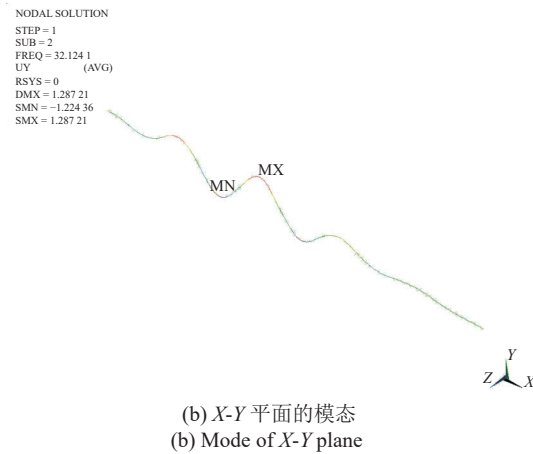
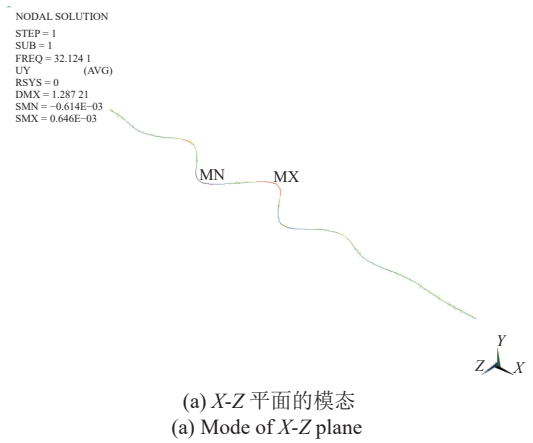


图 6 燃料棒的 1 阶模态

Fig. 6 1th-order mode of fuel rod

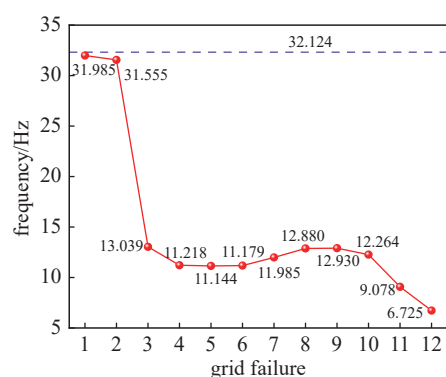


图 7 格架失效和无格架失效下的 1 阶固有频率

Fig. 7 1th-order frequency under grid failure and no grid failure

近 1, 但由于格架失效对第 2 阶到第 8 阶模态的影响远低于 1 阶, 因此这里只列出了 1 阶固有频率 (图 7 中的数值为频率的大小).

观察图 7 可得知, 格架失效对燃料棒 1 阶固有频率的影响非常显著. 第 1 个和第 2 个格架单独失效时燃料棒的固有频率降低不明显, 这是因为这两个格架紧邻, 其中 1 个格架失效时还有另 1 个格架提供支撑刚度. 但第 1 个和第 2 个格架同时失效时, 燃料棒的固有频率将大幅度下降. 另外, 第 11 个格架失效时, 燃料棒的固有频率也非常小. 这两个情况下燃料棒的固有频率非常小的原因是: 格架失效时, 结构刚度大幅降低, 有限元模型也变为悬臂梁模型.

基于湿模态分析所得模态信息, 结合式 (16) 到式 (19) 可得到格架未失效时燃料棒的湍流激振响应, 如图 8 所示. 图 8 中的纵坐标为振幅, 横坐标为燃料棒轴线的标高.

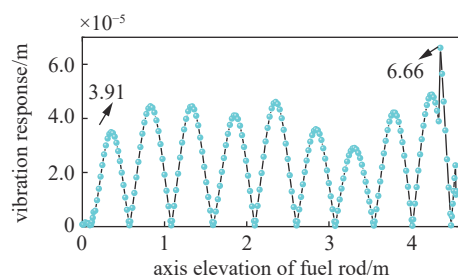


图 8 EPR 燃料棒的湍流激振响应

Fig. 8 Response of EPR fuel rod

图 8 的主要作用是为了与下面格架失效时燃料棒的湍流激振响应作对比. 格架失效对燃料棒湍流激振响应的影响将在下文详细讨论.

3.2 湿模态分析的 POD 降阶模型

基于全阶模型对 EPR 燃料棒进行模态分析, 得到 12 格架失效工况下燃料棒的模态信息并形成快

照矩阵 Y . 根据本文中第 1 节介绍的 POD 方法将快照矩阵进行 POD 分解, 得到最优的 POD 基, 前 12 阶 POD 模态的特征值 λ (线性坐标) 见图 9.

根据式 (10) 计算的模态能量占比 I 进行 POD 模态的截断. 如图 9 可知第 1 阶 POD 模态能量占比为 10.1%, 第 2 阶 POD 模态能量占比为 9.6%; 第 3 阶到第 8 阶的 POD 模态能量占比相差不大, 都在 9% 左右, 与第 1 和第 2 阶 POD 模态能量占比的差异不是很大. 实际上, 对于 POD 方法来说, 前 2 阶 POD 模态能量占比应该是远远大于后 2 阶的 POD 模态能量占比, 这里出现这个现象的根本原因可解释为 ANSYS-APDL 在计算湿模态时导出的模态信息是“归一化”后的模态数据, 因此得到的快照矩阵在空间上的分布上是比较均匀的.

为保证降阶模型的计算精度, 截取前 8 阶 POD 模态作为投影子空间 $\phi = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_8]$, 将全阶模型投影到由 POD 基所展成的子空间中, 从而达到模型降阶目的, 最后重新投影回原始的物理空间重构 EPR 燃料棒的湿模态. 将格架失效后, 全阶模型和 POD 降阶模型所得湿模态进行对比, 评估 POD 降阶模型的计算精度.

本文通过湿模态分析, 发现格架失效会对 EPR 燃料棒的 1 阶模态产生明显的影响, 且这种影响是具有规律的. 为了便于分析, 本文只列出了格架失效后燃料棒的 1 阶模态, 如图 10 所示.

观察图 10 得到: 湿模态的幅值会在格架失效位置处突然变大. 8 阶截断的 POD 降阶模型基本能够完全重构大部分失效工况下燃料棒的湿模态, 但对于第 10 工况下燃料棒的湿模态的重构误差较大, 需要增加截断阶次. 但继续增加阶次将使得降阶效果

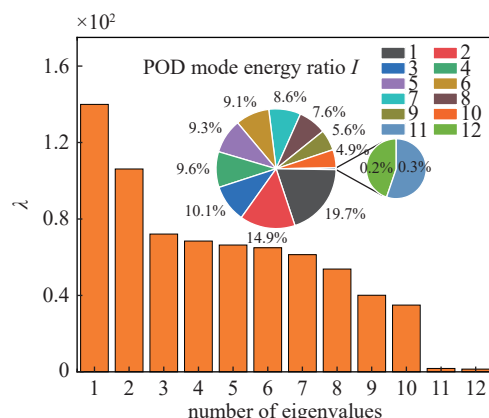


图 9 前 12 阶 POD 模态对应的特征值

Fig. 9 Eigenvalues of the first 12 POD modes

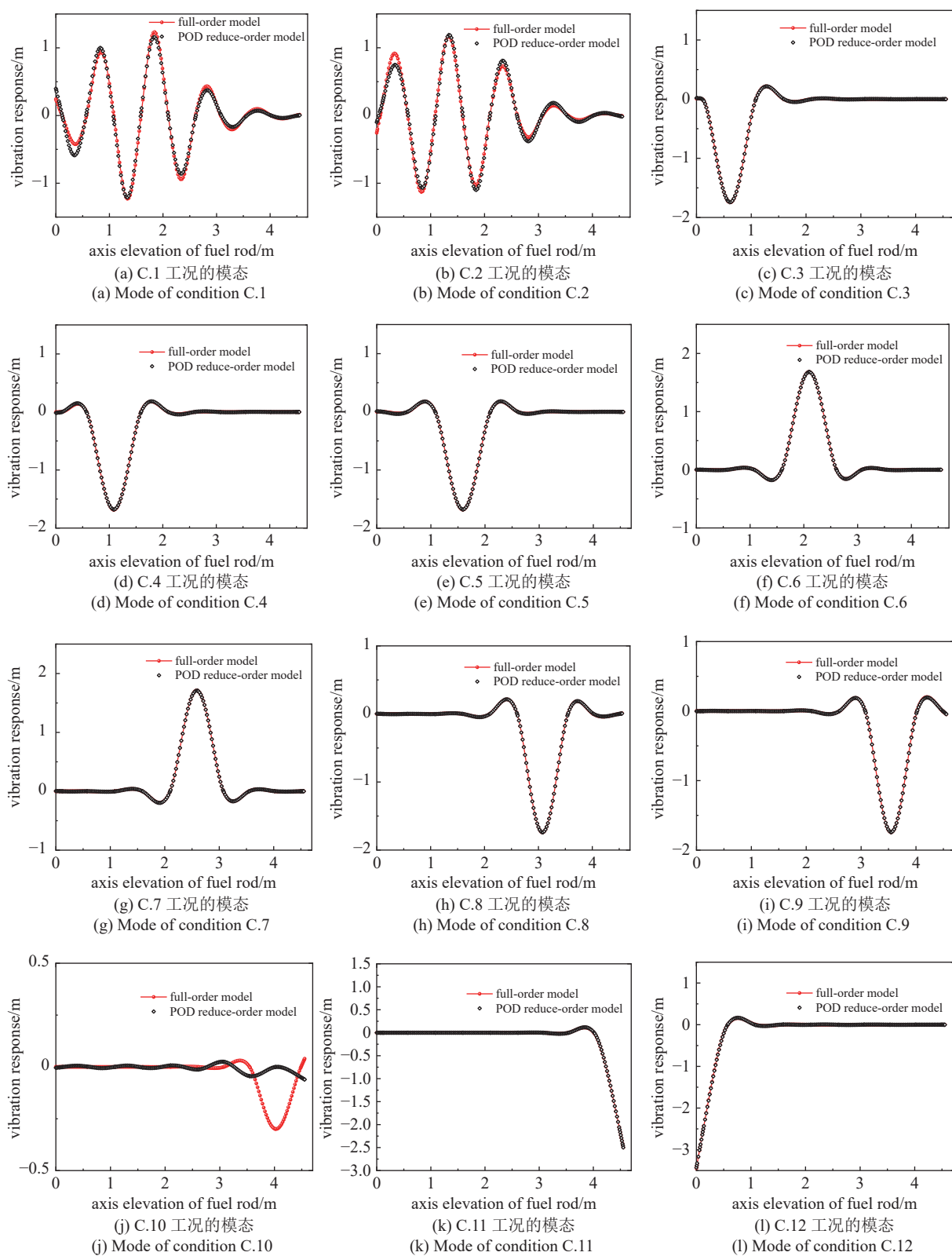


图 10 EPR 燃料棒的 1 阶模态

Fig. 10 1th-order mode of EPR fuel rod

不明显,这主要是模态数据“归一化”导致的.

3.3 湍流激振响应的 POD 降阶模型

基于全阶模型对 EPR 燃料棒进行湍流激振响

应分析(前 8 阶模态响应的叠加),得到 12 个格架失效工况下燃料棒的湍流激振响应,并形成快照矩阵

Y .接着,根据本文中第 1 节介绍的 POD 方法将快照

矩阵进行 POD 分解, 得到 POD 正交基, 前 12 阶 POD 模态的特征值 λ (对数坐标) 见图 11。

根据式 (10) 计算的模态能量占比 I 进行 POD 模态截断。如图 11 可知第 1 阶 POD 模态能量占比为 58.59%, 第 2 阶 POD 模态能量占比为 41.27%, 第 3 阶 POD 模态能量占比为 0.08%。观察湍流激振响应的 POD 模态能量占比图, 可以明显看到前 2 阶模态能量占比远大于后 2 阶的模态能量占比。

对于湍流激振响应分析, 为保证降阶模型的计算精度, 截取前 2 阶 POD 模态作为投影子空间 $\phi = [\phi_1, \phi_2]$, 将全阶模型投影到由 POD 正交基所展成的子空间中实现模型降阶, 最后在物理空间重构湍流激振响应。12 个格架失效工况下燃料棒的湍流激振响应如图 12 所示。

观察图 12 得到: 湍流激振响应会在格架失效位置处突然增大, 这主要是因为格架失效会导致燃料

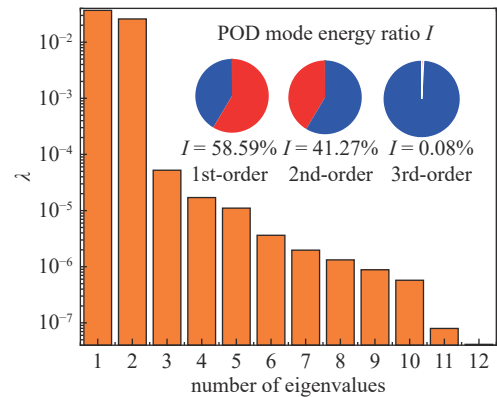


图 11 前 12 阶 POD 模态对应的特征值

Fig. 11 Eigenvalues of the first 12 POD modes

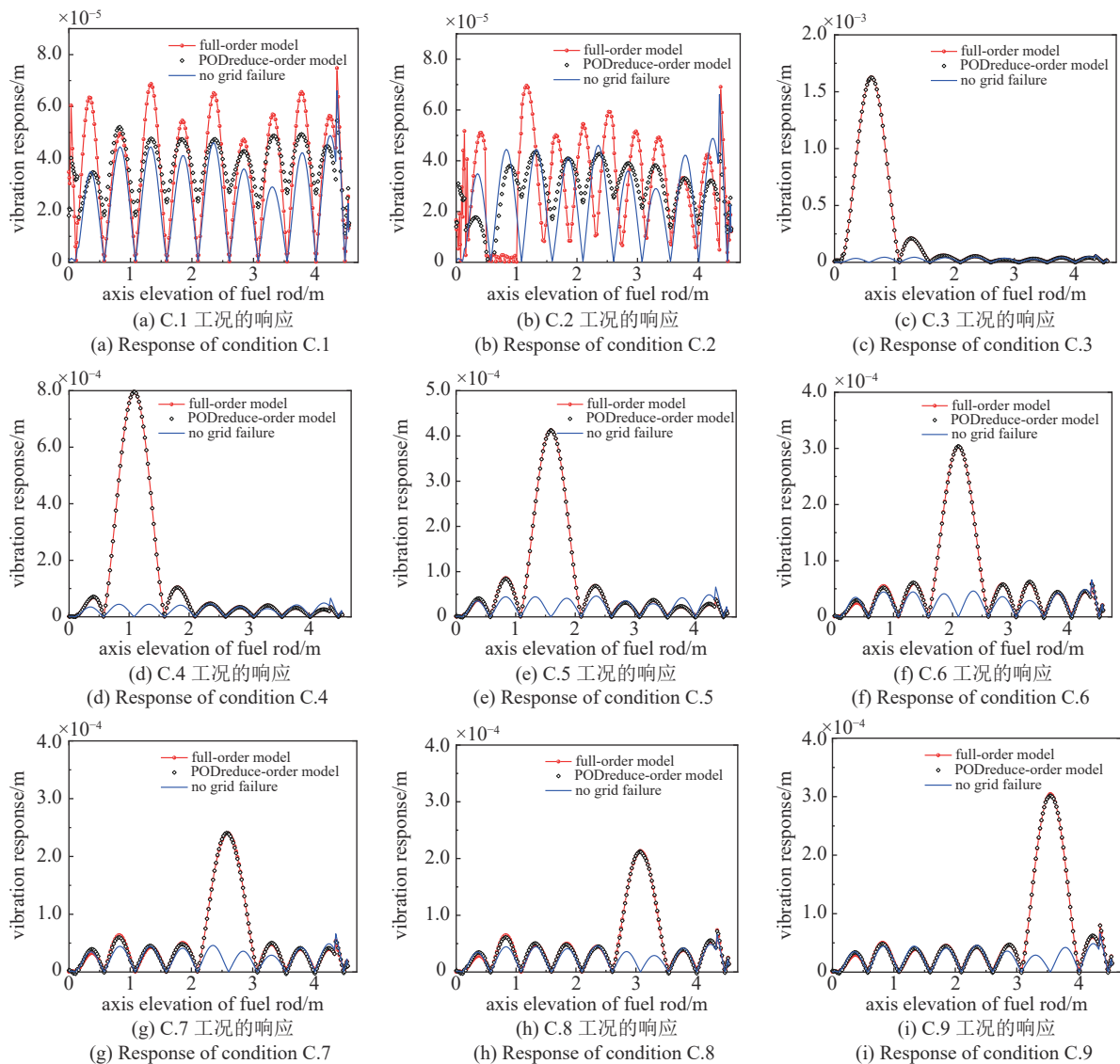


图 12 EPR 燃料棒的湍流激振响应

Fig. 12 Response of EPR fuel rod

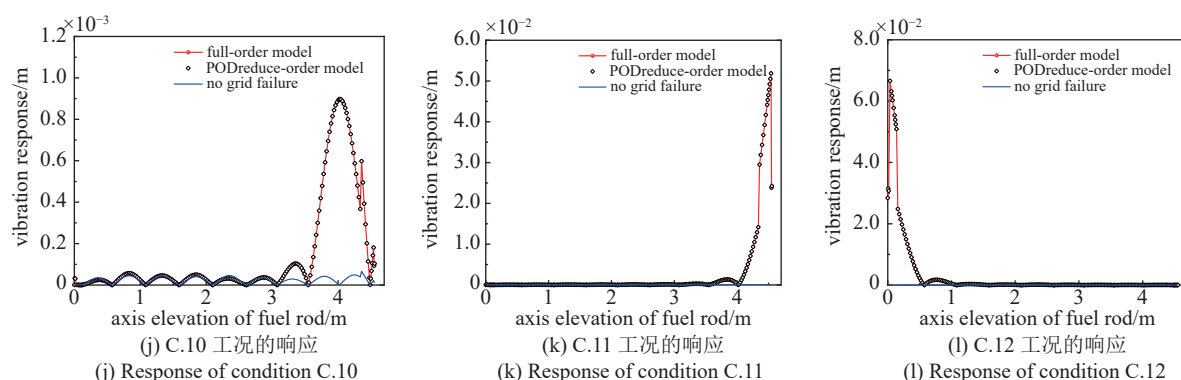


图 12 EPR 燃料棒的湍流激振响应 (续)

Fig. 12 Response of EPR fuel rod (continued)

棒的局部刚度减小. 第 11 和第 12 工况下燃料棒的湍流激振响应非常大, 因为这两个工况下燃料棒的简化模型将变为悬臂梁模型. 此外, 第 3 和第 10 工况下燃料棒的湍流激振响应也比较大, 工程中也值得注意.

基于 2 阶截断的 POD 降阶模型能够重构大部分失效工况下的湍流激振响应, 但对于第 1 和第 2 个格架失效时燃料棒湍流激振响应的重构误差较大; 对于第 1 和第 2 个格架失效时燃料棒湍流激振响应的重构需要增加截断阶次. 但第 1 和第 2 个格架失效时燃料棒的湍流激振响应非常小, 对结构的危险性是非常低的.

4 结论

本文以 EPR 燃料棒为例, 系统地研究了格架失效对燃料棒频率、湍流激励响应的影响, 得到以下结论.

(1) 格架失效对燃料棒 1 阶固有频率的影响非常显著. 其中, 第 1 个和第 2 个格架同时失效、第 11 个格架失效时, 燃料棒的固有频率明显低于无格架失效的固有频率.

(2) 格架失效会导致局部的刚度减小, 因此格架失效会使得燃料棒的固有频率降低, 且在格架失效处, 燃料棒的湍流激振响应会明显增大.

(3) 第 1 个格架和第 2 个格架同时失效、第 11 个格架失效时, 燃料棒的湍流激振响应非常大. 此外, 第 3 个格架、第 10 个格架失效时, 燃料棒的湍流激振响应也比较大.

(4) 对于湍流激振响应分析, POD 方法能降低样本维度, 截取前 2 阶 POD 正交基形成的降阶模型基本能重构燃料棒的湍流激振响应. 对于湿模态分析,

前 8 阶 POD 降阶模型才能基本重构燃料棒的湿模态.

(5) 增加燃料棒的支撑刚度以及增加格架的数量能有效地降低 EPR 燃料棒的激振响应, 工程中应当注意.

参 考 文 献

- Salachna J, Cioncolini A, Iacovides H. Benchmark simulation of the flow-induced vibrations for nuclear applications. *Annals of Nuclear Energy*, 2023, 180: 109425
- 颜雄, 魏莎, 毛晓晖等. 两端弹性支承输流管道固有特性研究. 力学学报, 2022, 54(5): 1341-1352 (Yan Xiong, Wei Sha, Mao Xiaoye, et al. Study on natural characteristics of fluid-conveying pipes with elastic supports at both ends. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2022, 54(5): 1341-1352 (in Chinese))
- Amirian R, Zarepoor GR, Talebi M. Numerical simulation and validation of flow-induced vibration of the specific rod under elastic supports using one-way fluid-solid interaction. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2023, 16(5): 1044-1056
- 姜乃斌, 熊夫睿, 冯志鹏等. 动力与过程装备部件的流致振动: 实用工作手册. 上海: 上海交通大学出版社, 2020 (Jiang Naibin, Xiong Furui, Feng Zhipeng, et al. Flow-Induced Vibration of Power and Process Plant Components: A Practical Workbook. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2020 (in Chinese))
- Qin S, Ren Q, Liu H, et al. Numerical investigations on flow-induced vibration characteristics of wire-wrapped fuel rod. *Progress in Nuclear Energy*, 2022, 148: 104223
- 高李霞, 李朋洲, 赖姜等. 反应堆结构的磨蚀研究现状. 核动力工程, 2016, 37(S2): 73-76 (Gao Lixia, Li Pengzhou, Lai Jiang, et al. Status for fretting-wear study of nuclear structural components. *Nuclear Power Engineering*, 2016, 37(S2): 73-76 (in Chinese))
- Simoneau JP, Sageaux T, Moussallam N, et al. Fluid structure interaction between rods and a cross flow-numerical approach. *Nuclear Engineering and Design*, 2011, 241(11): 4515-4522
- Kim KT. The study on grid-to-rod fretting wear models for PWR fuel. *Nuclear Engineering and Design*, 2009, 239(12): 2820-2824
- Kim KT. The effect of fuel rod supporting conditions on fuel rod vibration characteristics and grid-to-rod fretting wear. *Nuclear Engineering and Design*, 2010, 240(6): 1386-1391
- 齐欢欢, 冯志鹏, 姜乃斌等. 格架松弛对燃料棒湍流激励及微振磨损的影响研究. 原子能科学技术, 2018, 52(10): 1810-1816 (Qi

- Huanhuan, Feng Zhipeng, Jiang Naibin, et al. Effect of grid relaxation on turbulence excitation and fretting wear of fuel rod. *Atomic Energy Science and Technology*, 2018, 52(10): 1810-1816 (in Chinese))
- 11 齐欢欢, 冯志鹏, 姜乃斌等. 格架夹持失效对燃料棒流弹稳定性及漩涡脱落影响的数值研究. *核动力工程*, 2018, 39(4): 182-186 (Qi Huanhuan, Feng Zhipeng, Jiang Naibin, et al. Numerical study on effect of clamping failure on flow induced vibration and fretting wear analysis of fuel rods. *Nuclear Power Engineering*, 2018, 39(4): 182-186 (in Chinese))
- 12 毛景礼. 5×5 棒束定位格架流致振动特性研究. [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013 (Mao Jingli. Study on flow-induced vibration of 5×5 rod bundles with spacer grids. [Master Thesis]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013 (in Chinese))
- 13 Liu H, Chen D, Hu L, et al. Numerical investigations on flow-induced vibration of fuel rods with spacer grids subjected to turbulent flow. *Nuclear Engineering and Design*, 2017, 325: 68-77
- 14 陈德奇, 刘海东, 黄彦平等. 带格架 5×5 燃料棒束流致振动特性数值研究. *原子能科学技术*, 2018, 52(5): 954-960 (Chen Deqi, Liu Haidong, Huang Yanping, et al. Numerical study on flow-induced vibration characteristics of 5×5 rod bundle with spacer grid. *Atomic Energy Science and Technology*, 2018, 52(5): 954-960 (in Chinese))
- 15 马玉琢, 黄美, 黄继缘等. 冷却剂与含格架燃料棒束多场耦合分析. *原子能科学技术*, 2020, 54(8): 1371-1377 (Ma Yuzhuo, Huang Mei, Huang Jiyuan, et al. Multi-field coupling analysis on coolant and fuel rod bundle with grid spacer. *Atomic Energy Science and Technology*, 2020, 54(8): 1371-1377 (in Chinese))
- 16 Feeny BF, Kappagantu R. On the physical interpretation of proper orthogonal modes in vibrations. *Journal of Sound and Vibration*, 1998, 211(4): 607-617
- 17 Liang YC, Lee HP, Lim SP, et al. Proper orthogonal decomposition and its applications-part I: Theory. *Journal of Sound and Vibration*, 2002, 252(3): 527-544
- 18 寇家庆, 张伟伟, 高传强. 基于 POD 和 DMD 方法的跨声速抖振模态分析. *航空学报*, 2016, 37(9): 2679-2689 (Kou Jiaqing, Zhang Weiwei, Gao Chuanqiang. Modal analysis of transonic buffet based on POD and DMD method. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2016, 37(9): 2679-2689 (in Chinese))
- 19 李凯, 杨静媛, 高传强等. 基于 POD 和代理模型的静气动弹性分析方法. *力学学报*, 2023, 55(2): 299-308 (Li Kai, Yang Jingyuan, Gao Chuanqiang, et al. Static aeroelastic analysis based on proper orthogonal decomposition and surrogate model. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2023, 55(2): 299-308 (in Chinese))
- 20 孙翀, 石磊, 沈昕等. 风力机翼型在失速工况下非定常流场的本征正交分解分析. *工程热物理学报*, 2021, 42(4): 894-904 (Sun Chong, Shi Lei, Shen Xin, et al. Analysis of POD for the flow field of the wind turbine airfoil at high angle of attack. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2021, 42(4): 894-904 (in Chinese))
- 21 郭子漪, 赵建福, 李凯等. 基于 POD-Galerkin 降维方法的热毛细对流分岔分析. *力学学报*, 2022, 54(5): 1186-1198 (Guo Ziyi, Zhao Jianfu, Li Kai, et al. Bifurcation analysis of thermocapillary convection based on POD-Galerkin reduced-order method. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2022, 54(5): 1186-1198 (in Chinese))
- 22 魏代同, 陈星, 陈玉刚等. 基于本征正交分解的叶片碰摩系统降阶方法. *航空动力学报*, 2022, 37(4): 711-720 (Wei Daitong, Chen Xing, Chen Yugang, et al. Reduced order method of blade rubbing system based on proper orthogonal decomposition. *Journal of Aerospace Power*, 2022, 37(4): 711-720 (in Chinese))
- 23 李玉韦, 郝鹏, 王博等. 基于本征正交分解的网格加筋筒壳模型降阶方法. *固体力学学报*, 2019, 40(4): 334-341 (Li Yuwei, Hao Peng, Wang Bo, et al. A model reduction method based on proper orthogonal decomposition for stiffened shells. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2019, 40(4): 334-341 (in Chinese))
- 24 Wang Y, Ma HH, Cai WH, et al. A POD-Galerkin reduced-order model for two-dimensional Rayleigh-Bénard convection with viscoelastic fluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2020, 117: 104747
- 25 余波, 陶盈盈. 基于 POD-RBF 方法的管道内壁几何识别. *应用数学和力学*, 2023, 44(4): 406-418 (Yu Bo, Tao Yingying. Identification of pipeline inner wall geometry based on the POD-RBF method. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2023, 44(4): 406-418 (in Chinese))
- 26 金晓威, 赖树金, 李惠. 物理增强的流场深度学习建模与模拟方法. *力学学报*, 2021, 53(10): 2616-2629 (Jin Xiaowei, Laima Shujin, Li Hui. Physics-enhanced deep learning methods for modelling and simulating flow fields. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2021, 53(10): 2616-2629 (in Chinese))
- 27 Crowell AR, Mcnamara JJ. Model reduction of computational aerothermodynamics for hypersonic aerothermoelasticity. *AIAA Journal*, 2012, 50(1): 74-84
- 28 Chen X, Liu L, Long T, et al. A reduced order aerothermodynamic modeling framework for hypersonic vehicles based on surrogate and POD. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2015, 28(5): 1328-1342
- 29 朱强华, 杨恺, 梁钰等. 基于特征正交分解的一类瞬态非线性热传导问题的新型快速分析方法. *力学学报*, 2020, 52(1): 124-138 (Zhu Qianghua, Yang Kai, Liang Yu, et al. A novel fast algorithm based on model order reduction for one class of transient nonlinear heat conduction problem. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2020, 52(1): 124-138 (in Chinese))
- 30 姚波, 向文欣, 王鹏等. AFA3G LE 燃料组件的结构特点和设计论证. *核动力工程*, 2015, 36(S1): 40-43 (Yao Bo, Xiang Wenxin, Wang Peng, et al. Structure features and design qualification of AFA3G LE fuel assembly. *Nuclear Power Engineering*, 2015, 36(S1): 40-43 (in Chinese))
- 31 姜乃斌, 冯志鹏, 臧峰刚等. 核工程中的流致振动理论与应用. 上海: 上海交通大学出版社, 2018 (Jiang Naibin, Feng Zhipeng, Zang Fenggang, et al. Theory and Application of Flow-induced Vibration in Nuclear Engineering. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2018 (in Chinese))