

新型分段式设计燃料棒流致振动分析*

闵光云¹, 吴海², 卢志威², 郭严², 廖业宏², 李沂垅¹, 姜乃斌¹

1. 中山大学中法核工程与技术学院, 广东 珠海 519082

2. 中广核研究院有限公司, 广东 深圳 518026

摘要: 以某新型分段式设计燃料棒为研究对象, 基于 ANSYS-APDL 和多跨连续梁理论建立了有限元模型, 该有限元模型将燃料棒等效为 BEAM 4 梁单元, 将刚凸和弹簧片等效为 COMBIN 14 弹簧单元。接着, 基于 ANSYS-APDL 所得模态数据和半经验公式系统地研究了湍流激振、流弹失稳以及漩涡脱落现象, 并与传统结构的燃料棒进行了对比。最后, 评估了格架失效对燃料棒湍流激振、流弹失稳以及漩涡脱落现象的影响。

关键词: 新型分段式设计燃料棒; 流致振动; 格架失效; ANSYS-APDL

中图分类号: TL352 文献标志码: A 文章编号: 2097-0137(2024)04-0078-10

Flow-induced vibration characteristics of novel segmented-design fuel rod

MIN Guangyun¹, WU Hai², LU Zhiwei², GUO Yan², LIAO Yehong², LI Yilong¹, JIANG Naibing¹

1. Sino-French Institute of Nuclear Engineering and Technology, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China

2. China Nuclear Power Technology Research Institute Company Limited, Shenzhen 518026, China

Abstract: A finite element model (FEM) is established based on ANSYS-APDL and multi-span continuous beam theory for a new novel segmented-design fuel rod (NSDFR). The FEM equivalent the fuel rod to a BEAM 4 element, the dimple and spring to a COMBIN 14 element. Subsequently, based on the mode data obtained from ANSYS-APDL and semi-empirical equations, the characteristics of turbulent excitation, flow instability, and vortex shedding are systematically studied, as soon as compared with traditional structures. Finally, the impact of grid failure on turbulent excitation, flow instability, and vortex shedding of fuel rods is evaluated.

Key words: NSDFR; flow-induced vibration; grid failure; ANSYS-APDL

在核能领域, 反应堆内构件的流致振动(FIV, flow-induced vibration)问题属于典型的流固耦合问题(Jiang et al., 2022; 闵光云等, 2024)。以燃料棒为例, FIV会导致刚凸和弹簧片与燃料棒包壳产生微动磨损(GTRF, grid-to-rod fretting)。过度的GTRF会导致包壳破裂, 从而引起放射性物质泄漏。此外, 过度的GTRF还会磨损刚凸和弹簧片, 降低结

构局部刚度, 增大位移响应(Kim et al., 2008; Kim, 2009, 2010)。

燃料棒FIV引起的包壳磨损是现役核电站面临的重要挑战之一。Kim et al. (2008)和Kim (2009, 2010)考虑了包壳蠕变率、初始弹簧挠度、弹簧力松弛等因素, 基于ANSYS建立了燃料棒的有限元模型。王玺等(2012)基于多跨连续梁振动理论,

* 收稿日期: 2024-04-20

录用日期: 2024-05-27

网络首发日期: 2024-06-21

基金项目: 广东省重点领域研发计划(2021B0101250002); 国家自然科学基金(11872060)

作者简介: 闵光云(1995年生), 男; 研究方向: 反应堆结构力学; E-mail: mingy6@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 姜乃斌(1980年生), 男; 研究方向: 反应堆结构力学; E-mail: jiangnb@mail.sysu.edu.cn

全文阅读



ZR20240125

建立了平面弹性支撑的燃料棒有限元模型, 验证了多跨连续梁模型的合理性。黄恒等(2015)基于随机振动理论, 从纯理论的角度研究了轴向流作用下燃料棒的流致振动响应。Christon et al.(2016)提出一种预测 GTRF 磨损的新方法。黑宝平等(2017)研究了轴向流作用下液态钠中燃料棒的振动响应。刘雨等(2017)研究了超临界水堆中燃料棒的流致振动行为。齐欢欢等(2018a, 2018b)结合 ANSYS 和半经验公式, 研究了刚凸和弹簧片夹持失效对燃料棒湍流激振响应、流弹失稳以及旋涡脱落的影响。刘鹏亮等(2020)研究了附加质量对燃料棒自由振动特性的影响。赵书峰等(2022)建立了燃料棒的有限元模型与 1:1 实验模型, 系统地研究了寿期末效应对燃料棒振动特性的影响。欧洲先进压水堆的燃料棒相比 M310 的棒长更长, 系统更“柔”, 可能会产生较大的振动响应。针对这一问题, Jiang et al.(2022)基于随机振动理论和 ANSYS Mechanical 比较了 EPR 和 M310 的流致振动特性。

针对某新型分段式设计燃料棒(NSDFR, novel segmented-design fuel rod), 本文基于多跨连续梁模型分析了 NSDFR 的流致振动特性, 然后建立了燃料棒的高保真有限元模型, 并研究了夹持作用失效对 NSDFR 湍流激振、流弹失稳以及漩涡脱落的影响等。

1 数值模型

1.1 几何模型

本文的 NSDFR 包括端塞、燃料芯块、弹簧、包壳管等部件, 如图 1 所示。压水堆燃料棒通常为细长型锆合金包壳棒, 在反应堆中会受到来自堆芯底部流体的冲刷作用。在流体的作用下, 燃料棒会产生流致振动, 为了保持燃料棒的稳定性, 沿轴线方向设置 8 个格架。在定位格架处, 燃料棒由 2 个弹簧片和 4 个刚凸约束, 这些约束沿定位格架的对角线对称, 如图 2 所示。

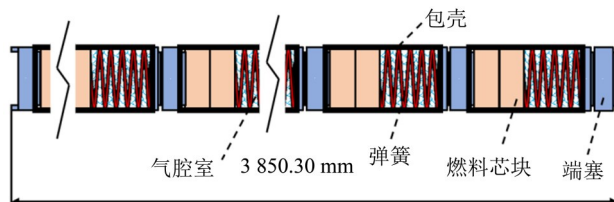


图1 燃料棒示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fuel rods

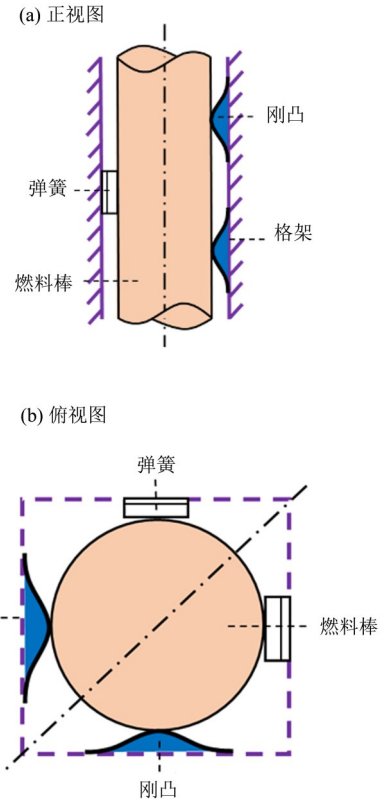


图2 燃料棒受定位格架约束的示意图

Fig. 2 Schematic diagram of a fuel rod constrained by grid

1.2 有限元模型

燃料棒为一种细长结构, 其动力学响应以梁变形为主。同时, 本文仅计算结构整体的流致振动响应, 不关注燃料包壳局部的应力应变。在保证计算精度的前提下降低计算规模, 本文拟将燃料棒简化为“空间梁模型”。同时, 对于细长结构, 剪切变形的影响可忽略, 因此本文在 ANSYS Mechanical 中采用 BEAM 4 单元离散。

刚凸和弹簧片支撑本质上是非线性接触问题。为提高计算效率并保证计算稳定性, 本文采用“弹簧”模型模拟接触问题, 在 ANSYS Mechanical 中采用 COMBINE 14 单元离散。最后, 将燃料棒两端进行全约束, 并且约束燃料棒轴向的平动与转动位移。

2 理论分析

2.1 湿模态

流固耦合问题中, 流体力由与结构运动相关的流体力 $F_m(t)$ 和与结构运动无关的流体力 $F_c(t)$ 组成。即

$$\begin{aligned} M_s \ddot{X} + C_s \dot{X} + K_s X &= F_m(t) + F_c(t) \\ &= (-M_a \ddot{X} - C_a \dot{X} - K_a X) + F_c(t), \end{aligned} \quad (1)$$

式中 M_s, C_s, K_s 为结构的质量、阻尼、刚度矩阵; M_a, C_a, K_a 为流体的附加质量、附加阻尼、附加刚度矩阵。

被多个格架约束的燃料棒可视为多点支撑系统, 此类系统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、刚度较高。基于以上分析, 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 (在 ANSYS Mechanical 中, 以修改结构密度的方式体现), 强耦合问题退化成“单向弱耦合问题”。式 (1) 进一步简化为

$$M_c \ddot{X} + K_c X = 0, \quad (2)$$

式中 $M_c = M_s + M_a$, $K_c = K_s$ 。令

$$X = \psi e^{i\omega t}, \quad (3)$$

其中 ψ 为振型, ω 为频率。将式 (3) 代入式 (2) 可得湿模态分析的特征方程:

$$(K - \omega^2 M) \psi = 0. \quad (4)$$

采用 ANSYS-APDL 对燃料棒进行湿模态分析, 模态求解方法为 ANSYS Mechanical 求解器自带的 Lanczos 方法。

2.2 湍流激振

采用湍流激振响应半经验公式计算燃料棒的湍流激振响应值 (齐欢欢等, 2018a, 2018b)。对于第 i 阶模态, 在 x 处由轴向流产生的振幅为

$$\sigma[y_i(x)]^a = C_a D \psi_i(x) \left(\frac{\rho D^2}{\rho_{eq}} \right) \left(\frac{1}{\delta_i} \right)^{0.5} \left(\frac{D}{L} \right)^{0.5} \times \left(\frac{U_{ae}}{f_i D} \right)^{\frac{3+Q_i}{2}} \left[\frac{L}{\int_0^L \psi_i^2(x) dx} \right]^{0.5}, \quad (5)$$

式中 $\sigma[y_i(x)]^a$ 为第 i 阶模态的轴向流均方根振幅, C_a 和 Q_a 为轴向流体力系数, D 为燃料棒直径, ρ 为流体密度, δ_i 为阻尼比, L 为燃料棒长度, U_{ae} 为等效轴向流速, f_i 为第 i 阶固有频率, ρ_{eq} 为燃料棒包壳的等效密度。

对于第 i 阶模态, 在 x 处由横向流产生的振幅为

$$\sigma[y_i(x)]^l = C_l D \psi_i(x) \left(\frac{\rho D^2}{\rho_{eq}} \right) \left(\frac{1}{\delta_i} \right)^{0.5} \left(\frac{D}{L} \right)^{0.5} \times \left[\frac{\int_0^L \left(\frac{U_l(x)}{f_i D} \right)^{3+Q_i} \psi_i^2(x) dx}{\int_0^L \psi_i^2(x) dx} \right]^{0.5} \left[\frac{L}{\int_0^L \psi_i^2(x) dx} \right]^{0.5}, \quad (6)$$

式中 $\sigma[y_i(x)]^l$ 为第 i 阶模态的横向流均方根振幅, C_l 和 Q_l 为横向流体力系数, U_l 为横向流速。

把轴向、横向流产生的振幅线性叠加, 有

$$\sigma_i(x) = \sigma[y_i(x)]^l + \sigma[y_i(x)]^a, \quad (7)$$

式中 $\sigma_i(x)$ 为第 i 阶模态的总振幅。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。则

$$\sigma(x) = \left[\sum_{i=1}^N \sigma_i^2(x) + 2 \sum_{i=1, j=1} \beta_{ij} \sigma_i(x) \sigma_j(x) \right]^{1/2}, \quad (8)$$

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 $\beta_{ij} = 0$ 。

2.3 流弹失稳

根据文献 (姜乃斌等, 2020), 第 i 阶模态的临界速度和等效流速为

$$U_c^i = \beta f_i D \left(\frac{m_0 \delta_i}{\rho_0 D^2} \right)^{0.5}, \quad (9)$$

$$U_e^i = \frac{\sum_{j=1}^M \frac{\rho}{\rho_0} U_j^2 \psi_{i,j}^2 \Delta x_j}{\sum_{j=1}^M \frac{m_j}{m_0} \psi_{i,j}^2 \Delta x_j}, \quad (10)$$

式中 β 为不稳定系数, 由实验确定; m_0 为参考质量; ρ_0 为参考密度; U_j 为第 j 个节点位置的流速; m_j 为第 j 个节点位置的质量; Δx_j 为第 j 个节点的单元长度。

根据式 (9) 与式 (10) 的比值可以确定是否存在流弹失稳的风险。如果 $U_e^i < U_c^i$ 不发生流弹失稳; 当 $U_e^i > U_c^i$ 时, 存在流弹失稳的可能。

2.4 漩涡脱落

漩涡脱落频率的计算公式为

$$f_i^s = St \frac{U_e^i}{D}, \quad (11)$$

式中 St 为斯特劳哈尔数, 本文的取值为 0.21。

f_i^s 与固有频率 f_i 的比值确定是否存在涡激共振的风险。当固有频率与漩涡脱落频率接近时, 系统会共振; 固有频率与脱落频率相差 20% 之内会发生锁频现象, 系统也会共振。

3 流致振动特性

如前文所示, 将刚凸和弹簧片对燃料棒的夹持作用等效为弹性支承, ANSYS Mechanical 中表现为 COMBIN 14 弹簧单元; 将燃料棒等效为 3D 梁模型, ANSYS Mechanical 中表现为 BEAM 4 梁单元。因此带定位格架约束的燃料棒模型可等效为多跨连续梁模型, 如图 3 所示。

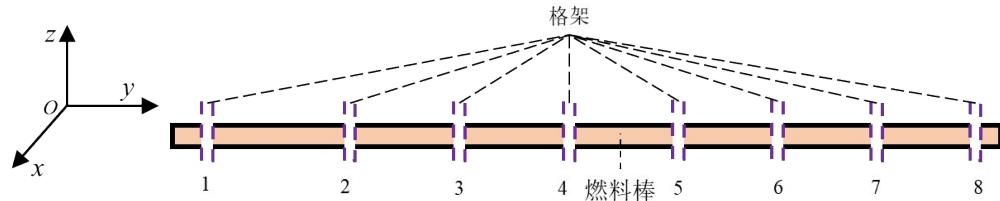


图3 多跨连续简支梁示意图

Fig. 3 Multi-span continuous simply supported beam

影响燃料棒模态、频率的因素是刚度分布和质量分布。芯块对刚度分布影响很小, 因此刚度分布由包壳的弯曲刚度决定。在对 NSDFR 进行流致振动分析时, 可认为其刚度分布主要为燃料棒包壳的刚度分布, 但其他部分的质量需要折算进燃料包壳中。考虑直径为 D , 壁厚为 t_d 的单位长度燃料棒, 若除包壳外燃料棒其它部分的质量为 m_i , 则折算进燃料棒包壳的体积密度为

$$\rho_{eq,i} = \frac{4m_i}{\pi[D^2 - (D - 2t_d)^2]} \quad (12)$$

将冷却剂对燃料棒的静流体力等效为附加水质量, 并将该质量折算进燃料包壳内。对于单位长度的燃料棒, 其排开的水质量为

$$\rho_{eq,w} = \frac{D^2 \rho_w}{D^2 - (D - 2t_d)^2} \quad (13)$$

因此, 燃料棒包壳的等效密度总值包括等效水密度、燃料包壳密度以及其他部分的等效密度, 即

$$\rho_{eq} = \zeta \rho_{eq,w} + \rho_c + \rho_{eq,i} \quad (14)$$

流体附加质量系数 ζ 的取法参考文献(朱勇等, 2014)。可得到 NSDFR 流致振动特性所需的端塞段质量参数为 0.579 2 kg/m、芯块段质量参数为 0.793 6 kg/m、气腔段质量参数为 0.222 4 kg/m。此外, 端塞的材料为铝合金, 其杨氏模量为 4.36 GPa, 泊松比为 0.37; 包壳的材料为 Zr-4, 其杨氏模量为 92.1 GPa, 泊松比为 0.37。

3.1 湍流激振

核反应堆运行时, 轴向流速和横向流速沿着燃料棒轴线的分布是非均匀的, 两者湍流脉动造成的位移响应需分开考虑。本文通过试验测得了轴向流速和横向流速沿燃料棒轴向的分布形式, 并拟合了试验值, 详见图 4。

基于式(5)和式(6)分别计算了轴向流速和横向流速引起的 NSDFR 流致振动响应, 详见图 5 和图 6。对比图 5 和图 6 可知: 横向流引起的湍流激振响应大于轴向流引起的湍流激振响应。通常情况下, 低阶模态的湍流激振响应需重点关注。1 阶

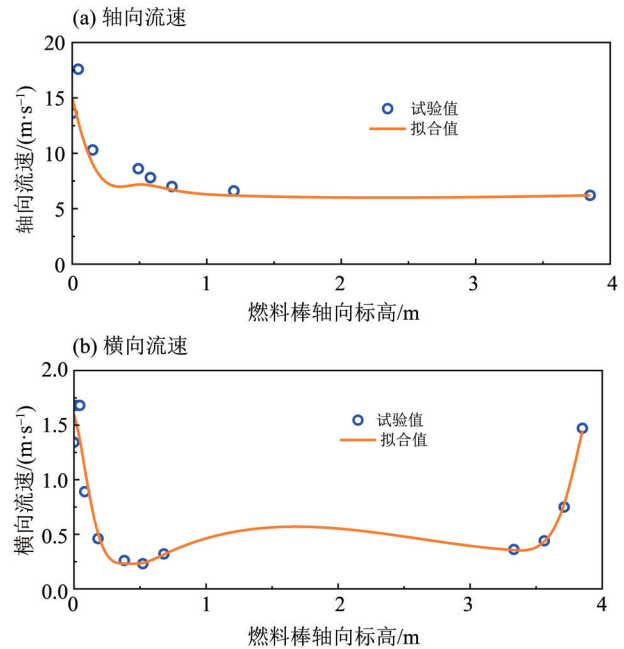


图4 流速

Fig. 4 Flow velocity

模态的最大湍流激振响应出现在第 1 和第 2 个格架之间。2 阶模态的最大湍流激振响应出现在第 7 和第 8 个格架之间。

根据式(7)对轴向流速和横向流速引起的湍流激振响应进行线性叠加, 然后基于式(8)考虑不同阶模态之间的耦合效应, 进而得到 NSDFR 总的湍流激振响应, 如图 7 所示。由图 7 可知: 较大的位移响应产生在燃料棒第 1 和第 2 个格架之间, 以及第 7 和第 8 个格架之间, 最大值接近 0.04 mm。最大响应值是一个非常小的数值, 就湍流激振响应来说, NSDFR 能够满足核反应堆的运行要求。

图 8 中的纵坐标为无量纲振幅(有量纲振幅/包壳直径)。观察图 8 可以发现, NSDFR 与 Jiang et al. (2022) 的最大幅值相当。两者区别是 NSDFR 存在 2 个峰值, 分别为第 1 和第 2 个格架之间, 以及第 7 和第 8 个格架之间; Jiang et al. (2022) 只存在 1 个峰值, 在第 1 和第 2 个格架之间。造成这种差异的原因是 NSDFR 的端塞段较多, 局部密度较大,

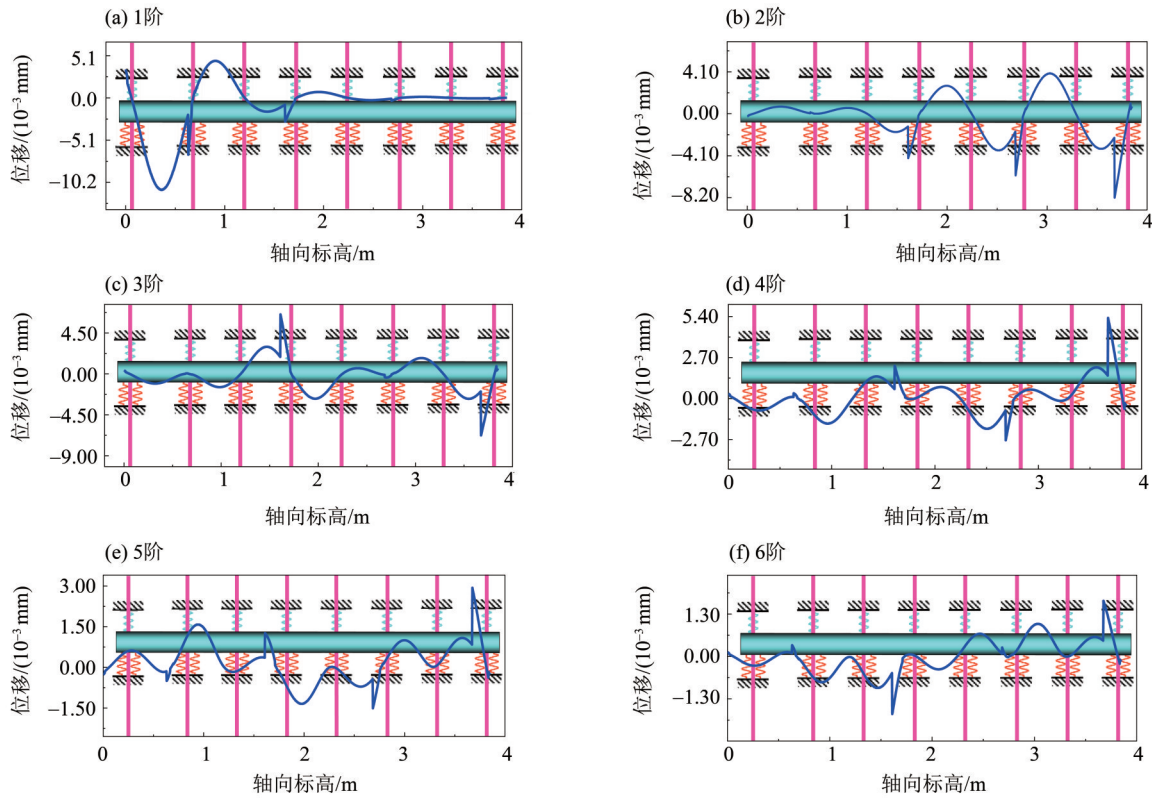


图5 轴向流引起的燃料棒的流致振动响应

Fig. 5 Flow-induced vibration response of fuel rods caused by axial flows

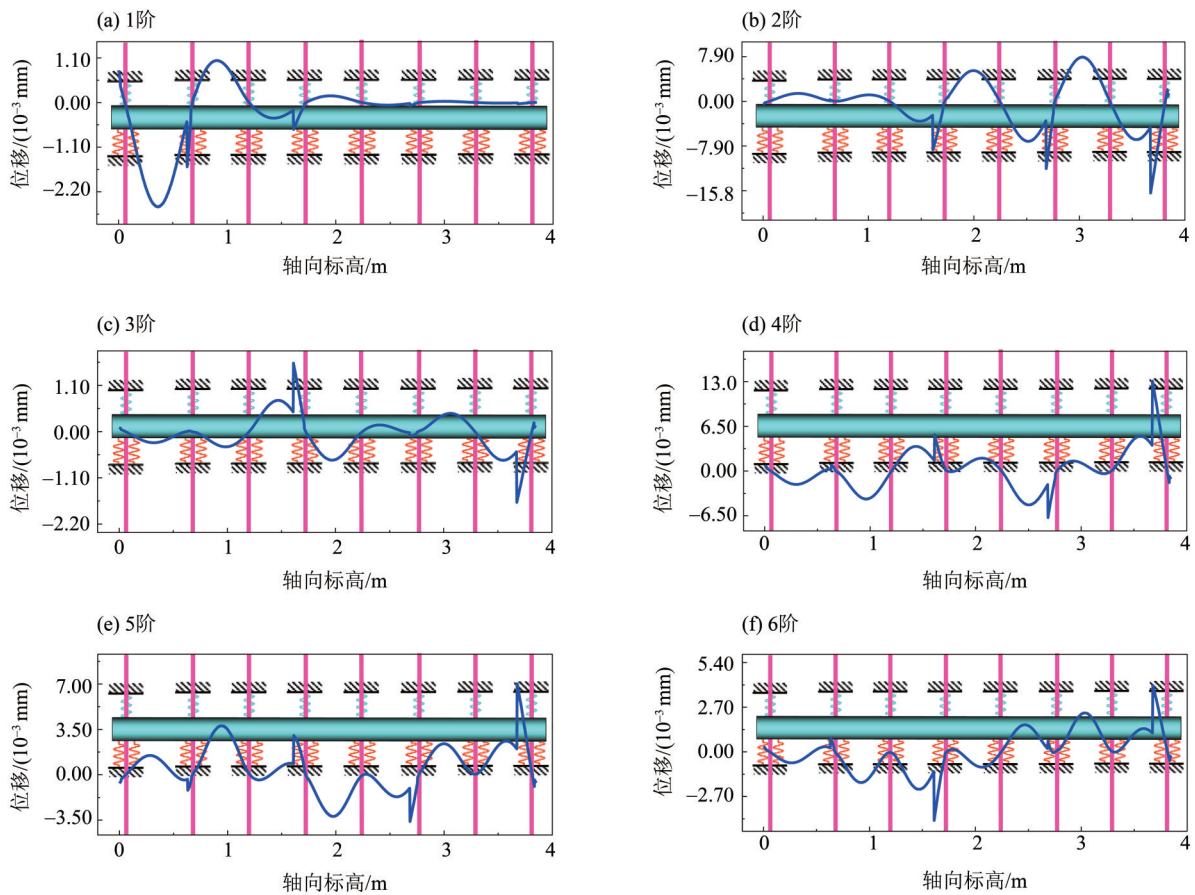


图6 横向流引起的燃料棒的流致振动响应

Fig. 6 Flow-induced vibration response of fuel rods caused by transverse flows

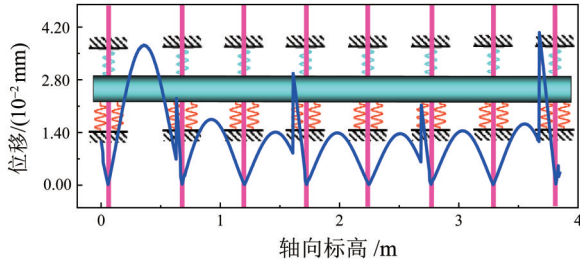


图7 燃料棒总的流致振动响应

Fig. 7 Flow-induced vibration response of NSDFR

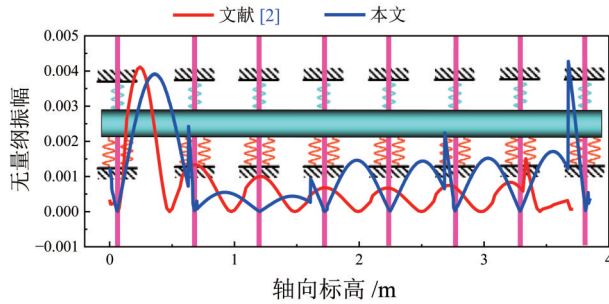


图8 流致振动响应对比

Fig. 8 Comparison of flow-induced vibration response

以及NSDFR在第7和第8个格架之间处的横向流相比文献(Jiang et al., 2022)较大。

3.2 流弹失稳

流弹失稳是流体附加阻尼大于结构阻尼的一种自激振动(杨世豪等, 2022; Gadelhak et al., 2023), 本质是流体给结构提供的能量大于结构自身耗散的能量。当结构发生流弹失稳时, 结构的振幅会显著增加(张伟伟等, 2020)。振幅的增加会加剧弹簧片和刚凸与燃料棒之间的微动磨损, 严重时会导致包壳破裂, 引发放射性物质泄漏, 因此工程中需要避免流弹失稳的产生。

基于式(9)可得到燃料棒的临界流速, 基于式(10)可得到核反应堆运行时流体作用在燃料棒上的等效流速。当等效流速小于临界流速时, 燃料棒不会发生流弹失稳, 否则会发生流弹失稳。

图9给出了前10阶模态下等效流速与临界流

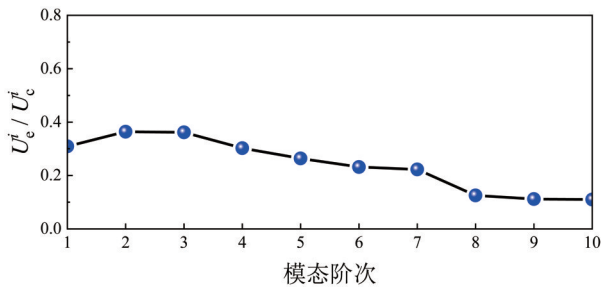


图9 等效流速和临界流速的比值

Fig. 9 Ratio of equivalent velocity to critical velocity

速的比值。工程上通常会考虑安全裕量, 根据AMSE(2013)规范等效流速与临界流速的比值的限值是0.75。从图9可以得知SDFR的等效流速都小于临界流速, 最大比值出现在第2阶模态, 比值接近0.4, 距离限值较远, 可以判断NSDFR不会出现流弹失稳现象。

3.3 漩涡脱落

流体流过障碍物时, 会在障碍物后方形成交替脱落的漩涡, 该现象被称为卡门涡街。当固有频率与漩涡脱落频率接近时, 系统会共振; 固有频率与脱落频率较相差20%之内系统会发生锁频现象(张伟伟等, 2020), 系统也会共振。当系统发生涡激共振时, 振幅会被显著放大, 因此工程中需要抑制涡激振动产生。

图10给出了前10阶模态下NSDFR的固有频率和漩涡脱落频率的比值。从图10可以发现最大的比值在0.31左右, 距离限值较远, 所以NSDFR不存在涡激共振的危险。

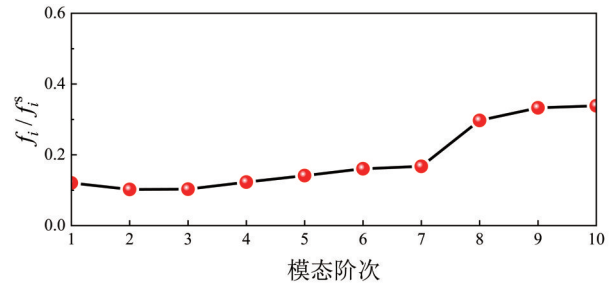


图10 固有频率和脱落频率的比值

Fig. 10 Ratio of natural frequency to shedding frequency

4 格架失效

核反应堆运行时, 在流体的脉动作用下, 刚凸和弹簧片会时刻与燃料棒发生GTRF磨损, 严重的GTRF磨损会使得刚凸和弹簧片对燃料棒的夹持作用失效, 进而降低系统的刚度, 放大系统的振幅。本文分析了事故工况下, 即图2中格架处的刚凸和弹簧片对燃料棒的夹持作用同时失效时, NSDFR的流致振动特性。为了便于分析, 设置了8个失效工况, 如表1所示。

4.1 格架失效对频率的影响

基于ANSYS-APDL对格架失效情况下的NSDFR进行模态分析, 得到格架失效对NSDFR固有频率影响, 详见图11。图11中虚线表示格架没有失效时NSDFR的固有频率。

表1 失效工况

Table 1 Failure working conditions

编号	工况
C. 1	格架1失效
C. 2	格架2失效
C. 3	格架3失效
C. 4	格架4失效
C. 5	格架5失效
C. 6	格架6失效
C. 7	格架7失效
C. 8	格架8失效

从图 11 可知：格架失效时，NSDFR 的固有频率会降低，这主要是因为格架失效会导致系统的刚度降低。随着固有频率的阶数和格架失效的位置不同，固有频率的变化趋势也不同。对于 1 阶频率，C.1 和 C.8 对频率的影响较大，这主要是因为 C.1 和 C.8 会使得整个模型变为悬臂梁模型；C.2 对 2 阶频率的影响较大；C.5、C.6、C.7 对 3 阶频率的影响较大；C.3、C.4、C.7 对 4 阶频率的影响较大；

C.3、C.5 对 5 阶频率的影响较大；C.1 对 6 阶频率的影响较大。C.1 和 C.5 对 7 阶频率的影响较大。C.1、C.2、C.7 对 8 阶频率的影响较大；C.5 对 10 阶频率的影响较大。

总体而言，3 阶频率之后，格架失效对频率的影响相较前 2 阶频率较小；格架失效对 1 阶固有频率的影响最大；固有频率的阶数越大，格架失效对固有频率的影响越小。

4.2 格架失效对湍流激振响应的影响

同样，基于 ANSYS-APDL 得到的模态数据和式(5)-(8)研究格架失效对燃料棒湍流激振响应的影响，详见图 12。从图 12 可以发现：位移响应会在格架失效处突然变大；C.1 和 C.8 的位移响应相比其它格架失效时更大，这主要是因为这两个格架失效时，燃料棒变成了悬臂梁结构，刚度较小；C.1 比 C.8 的位移响应更大，这主要是格架 1 失效后，燃料棒起点到第 2 个格架的管长较长，局部刚度较小，易发生大幅振动。反应堆运行时，需时刻关注第 1 和第 8 个格架的磨损情况，避免格架失效造成位移响应变大，进而诱发严重事故发生。

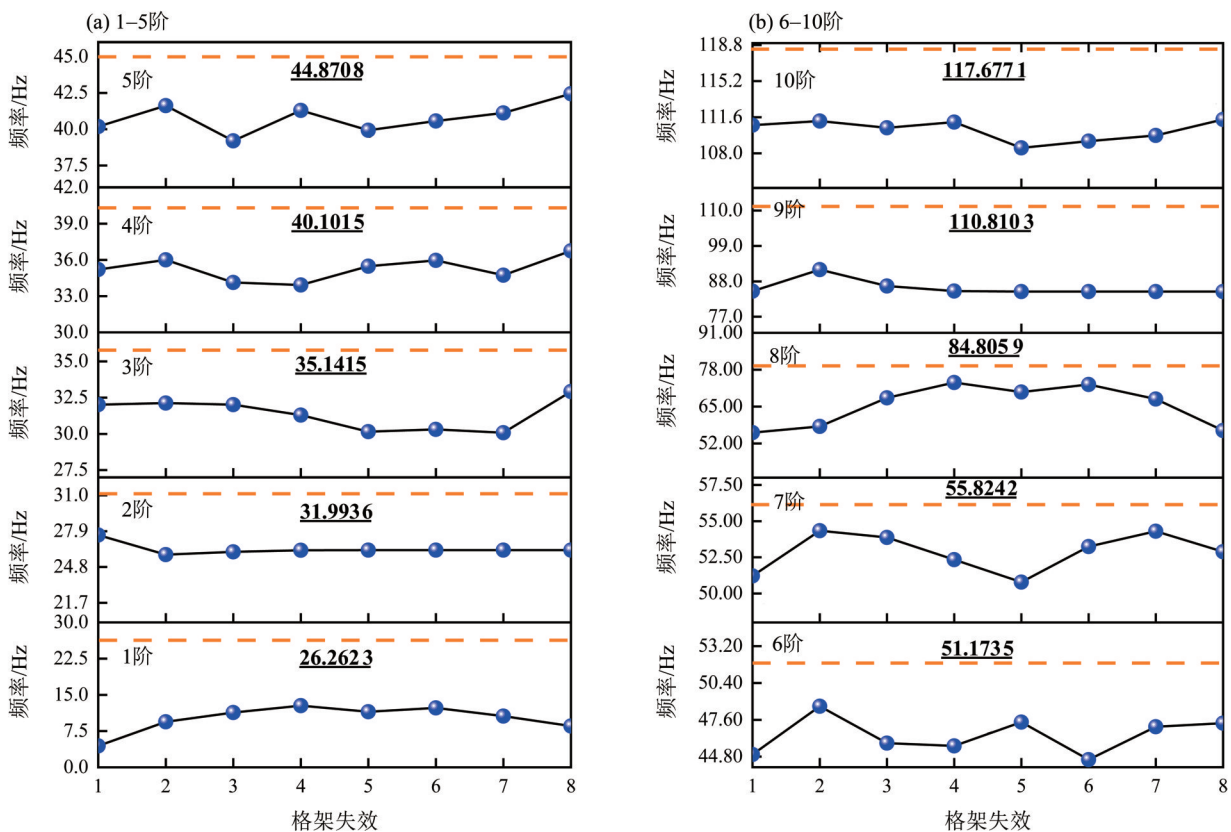


图 11 格架失效对频率的影响

Fig. 11 Effect of grid failure on natural frequency

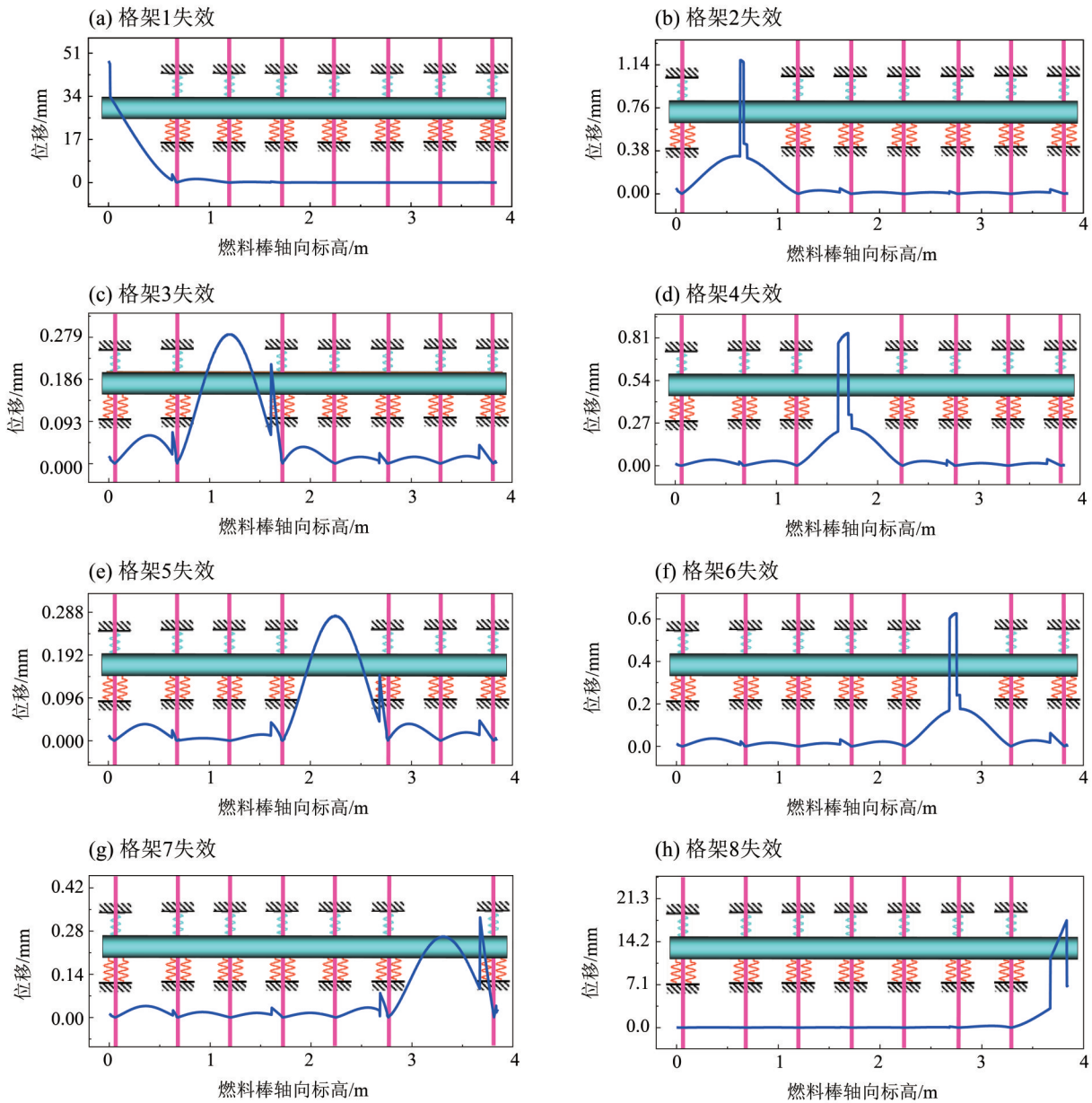


图 12 格架失效对振动响应的影响

Fig. 12 Effect of grid failure on vibration response

4.3 格架失效对流弹失稳和漩涡脱落的影响

从图 13 可以发现, 格架失效会导致 1 阶模态运行流速大于临界流速, 即运行流速与临界流速的比值会超过 0.75 的限制, 这需要引起重视。工程中应时刻关注刚凸和弹簧片的磨损情况, 避免格架失效造成流弹失稳现象的发生。格架失效对漩涡脱落的影响, 如图 14 所示。从图 14 可以发现: 格架失效对漩涡脱落没有影响, 这主要是因为核反应堆中燃料棒束的节径比非常小。

5 结 论

本文建立了 NSDFR 的有限元模型, 该模型将燃料棒等效为 3D 梁, 将刚凸和弹簧片等效为弹簧约束。结合 ANSYS-APDL 与半经验公式, 评估了 NSDFR 的流致振动特性以及格架失效对流致振动特性的影响, 主要结论如下:

1) NSDFR 最大的幅值约为 0.042 mm, 和 M310 机组相当; 等效流速远小于临界流速, 不存在流弹失稳现象; 固有频率和漩涡脱落频率的数值相差较大, 不存在涡激共振的危害。正常工况

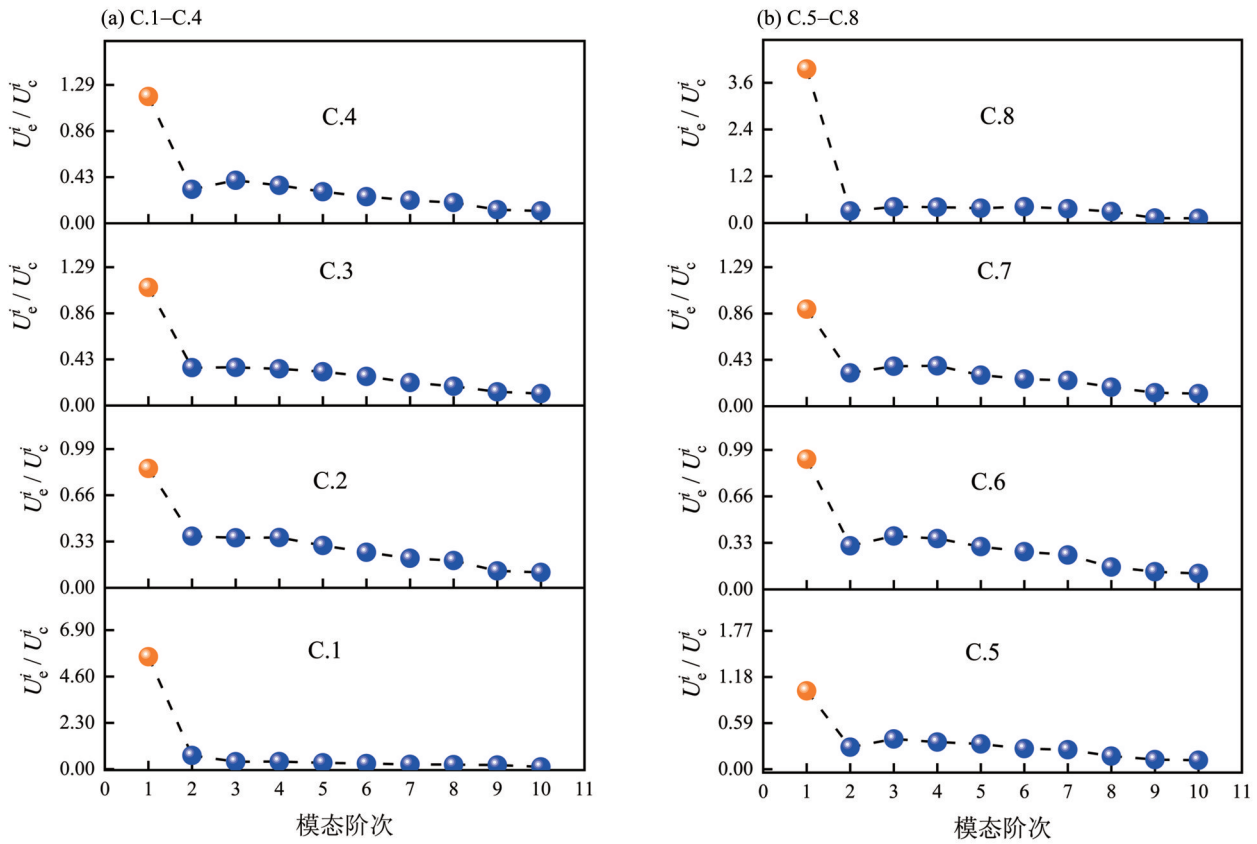


图 13 格架失效对流弹失稳的影响
 Fig. 13 Effect of grid failure on fluidelastic instability

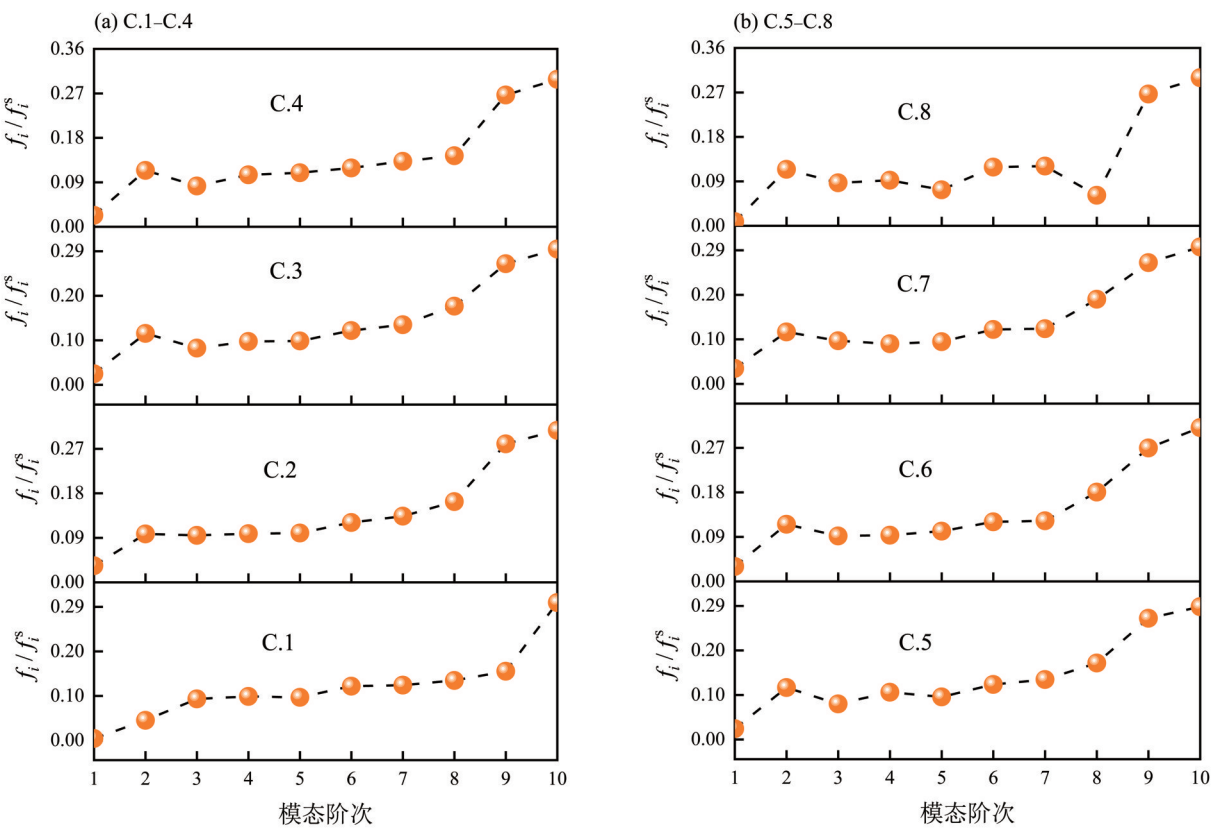


图 14 格架失效对漩涡脱落的影响
 Fig. 14 Effect of grid failure on vortex shedding

下 NSDFR 能够满足核反应堆的运行要求。

2) 格架失效会使得 NSDFR 的固有频率降低, 且格架失效对 1 阶固有频率的影响最大; 格架失效会使得 NSDFR 的幅值在格架失效处突然变大, 格架 1 和格架 8 失效时对幅值的影响最大。

3) 格架失效不会造成涡激共振的发生, 但是格架失效会使得 NSDFR 发生 1 阶流弹失稳, 工程中应时刻关注刚凸和弹簧片的磨损情况, 避免流弹失稳现象的发生。

参考文献:

- 黑宝平, 高付海, 李晓轩, 2017. 轴向流动液态钠中燃料元件的振动响应分析[J]. 地震工程与工程振动, 37(4): 189-193.
- 黄恒, 刘彤, 周跃民, 2015. 压水堆燃料棒在轴向流作用下的随机振动响应研究[J]. 原子能科学技术, 49(3): 468-472.
- 姜乃斌, 熊夫睿, 冯志鹏, 等, 2020. 动力与过程装备部件的流致振动: 实用工作手册[M]. 上海: 上海交通大学出版社.
- 刘鹏亮, 陈飘松, 范晨光, 等, 2020. 多约束燃料棒自由振动特性[J]. 西南交通大学学报, 55(2): 428-434.
- 刘雨, 陆道纲, 汪喆, 等, 2017. 超临界水堆燃料棒流致振动简化模型[J]. 核科学与工程, 37(3): 362-366.
- 闵光云, 冯琳娜, 姜乃斌, 2024. 基于 POD 方法的 EPR 燃料棒流致振动特性分析[J]. 力学学报, 56(3): 659-669.
- 齐欢欢, 冯志鹏, 姜乃斌, 等, 2018a. 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[J]. 核动力工程, 39(4): 182-186.
- 齐欢欢, 冯志鹏, 姜乃斌, 等, 2018b. 格架松弛对燃料棒湍流激励及微振磨损的影响研究[J]. 原子能科学技术, 52(10): 1810-1816.
- 王玺, 陈力奋, 钱浩, 等, 2012. 定位格架弹性约束对燃料棒振动特性的影响[J]. 振动与冲击, 31(5): 165-170.
- 杨世豪, 赖姜, 谭添才, 等, 2022. 蒸汽发生器传热管束流弹失稳现象中的基础力学问题研究[J]. 核动力工程, 43(S1): 103-110.
- 赵书峰, 孙靖雅, 徐时吟, 等, 2022. 寿期末全尺寸燃料棒振动特性研究与验证[J]. 噪声与振动控制, 42(3): 122-126.
- 张伟伟, 豆子皓, 李新涛, 等, 2020. 桥梁若干流致振动与卡门涡街[J]. 空气动力学学报, 38(3): 405-412.
- 朱勇, 秦加明, 任红兵, 等, 2014. 基于 ANSYS 的蒸汽发生器传热管流致振动分析程序[J]. 核动力工程, 35(4): 17-20.
- AMSE, 2013. ASME's boiler and pressure vessel code [S]. New York: The American Society of Mechanical Engineers.
- CHRISTON M A, LU R, BAKOSI J, et al, 2016. Large-eddy simulation, fuel rod vibration and grid-to-rod fretting in pressurized water reactors [J]. J Comput Phys, 322: 142-161.
- GADELHAK I, MUREITHI N, KARAZIS K, 2023. Fluidelastic instability of a fuel rod bundle subjected to combined axial flow and jet cross-flow [J]. J Fluid Struct, 121: 103939.
- JIANG N B, MIN G Y, FANG Z Y, et al, 2022. Investigation on vibration response characteristics and influencing factors of the fuel rods of EPR [J]. Front Energy Res, 10: 990525.
- KIM H K, LEE Y H, LEE K H, 2008. On the geometry of the fuel rod supports concerning a fretting wear failure [J]. Nucl Eng Des, 238(12): 3321-3330.
- KIM K T, 2009. The study on grid-to-rod fretting wear models for PWR fuel [J]. Nucl Eng Des, 239(12): 2820-2824.
- KIM K T, 2010. The effect of fuel rod supporting conditions on fuel rod vibration characteristics and grid-to-rod fretting wear [J]. Nucl Eng Des, 240(6): 1386-1391.

(责任编辑 王海蓉)