

Sensitivity Analysis of the Dynamical Characteristics of a Core Barrel to the Compressive Spring Parameters

Yu Zhao, Li Lu, Yiren Yang

Applied Mechanics and Structure Safety Key Laboratory of Sichuan Province, School of Applied Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan
Email: roseluli@163.com

Received: May 21st, 2015; accepted: Jun. 12th, 2015; published: Jun. 16th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

ANSYS was applied to establish the model of a core barrel of nuclear reactors in air, and dynamical characteristics were calculated. The influences of the compressive spring stiffness on the dynamical characteristics of the core barrel were mainly concerned. The results show that the bending stiffness and torsional stiffness of the compressive spring have obvious influence on the first-order beam and axial-deformation frequencies. These two types of frequencies increase when the stiffness of compressive spring is considered while the orders of the modal remain the same. During a certain area, with the increase of the compressive spring stiffness, the first-order beam and axial-deformation frequencies increase, and the changing of the compressive stiffness have little influence on the shell frequencies of the structure.

Keywords

Core Barrel of Nuclear Reactor, Compressive Spring, Dynamical Characteristics

吊篮振动特性对压紧弹簧的参数敏感分析

赵 钰, 鲁 丽, 杨翊仁

西南交通大学力学与工程学院, 应用力学与结构安全四川省重点实验室, 四川 成都
Email: roseluli@163.com

收稿日期：2015年5月21日；录用日期：2015年6月12日；发布日期：2015年6月16日

摘要

采用ANSYS程序建立反应堆吊篮在空气中的有限元模型，计算其在空气中的振动特性。重点研究压紧弹簧刚度对反应堆吊篮的振动特性影响。计算结果表明压紧弹簧的弯曲刚度和扭转刚度对吊篮结构的一阶梁式和轴向振动频率有明显的影响，刚度的存在使得结构的这几阶频率明显增大，对结构振型出现的先后顺序没有变化。在一定区域范围内随着压紧弹簧弯曲刚度的增加，吊篮的一阶梁式和轴向振动频率明显增加而吊篮的壳式振动频率几乎不受压紧弹簧弯曲刚度的影响。

关键词

反应堆吊篮，压紧弹簧，振动特性

1. 引言

反应堆吊篮是装载和支承反应堆内部各种部件及堆芯组件的重要结构，研究表明，吊篮结构在正常工作时不仅会出现壳式振动，还会引发整体的梁式振动，这种振动有时会对反应堆安全运行造成严重的危害性[1]。对反应堆吊篮的振动特性研究具有重要的工程应用价值。目前已发表的工作中，常对结构作一定简化或分别采用吊篮梁式或者壳式来计算。文献[2]研究吊篮在空气中的振动频率，结合有限元建立了两类压紧弹簧边界简化模型，并建立吊篮的振动模型。文献[3]采用吊篮的梁式和壳式模型分别计算吊篮结构的梁式模态和壳式模态，并利用 FRIZ 理论[4]和 ANSYS 程序声流 - 结构耦合考虑了下降腔流体对吊篮的影响。文献[5]采用流固耦合方法对吊篮在空气和静水中的振动特性进行分析，计算结果表明吊篮在空气和静水中前几阶固有频率都包含梁式振动和壳式振动。文献[6]对压紧弹簧刚度进行了多种方法的计算研究，表明压紧弹簧分析接触问题时能采用二维模型计算。本文拟采用数值模拟的方法，合理简化压紧弹簧处的约束，研究压紧弹簧约束对吊篮筒体的振动特性的影响。进一步探讨压紧弹簧的工程应用价值，调整压紧弹簧参数，分析吊篮振动特性对压紧弹簧参数的敏感性。

2. 反应堆吊篮结构及模型简化

图 1 为吊篮结构的示意简图。吊篮通过吊篮法兰固定在压力容器的内壁凸台(如图 2 所示)，吊篮法兰的上部一般由预紧螺栓、上凸缘和压紧弹簧等组成，下部由压力容器的下凸缘支承。

实际建模时吊篮筒体采用 Solid-shell 单元，吊篮下支承板结构较厚采用 SOLID185 单元。在吊篮法兰处，下支承简化为间支，在上支承处由于压紧弹簧形变，给吊篮上支承提供弯曲刚度和扭转刚度(图 3)。为准确模拟吊篮法兰处压紧弹簧的约束，有必要先计算出压紧弹簧的压缩刚度和扭转刚度。

本文计算中，压紧弹簧材料参数：泊松比 $\mu = 0.3$ ，密度 $\rho = 7.9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，杨氏模量 $E = 2.15 \times 10^{11} \text{ pa}$ ；吊篮筒体材料参数：泊松比 $\mu = 0.3$ ，密度 $\rho = 7.9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，杨氏模量 $E = 1.97 \times 10^{11} \text{ pa}$ 。

基于 ANSYS 程序建立压紧弹簧有限元模型(图 4)，根据预紧位移确定出吊篮法兰和压紧弹簧上下表面的接触区域，并在模型底面相应区域加固支约束，顶面对应区域施加垂直于顶面的面力 F ，进行静力学分析，得到节点的转角及位移(图 5)。根据如下公式求得弯曲刚度值：

$$K_{\text{弯曲}} = \frac{F}{U} \quad (1)$$

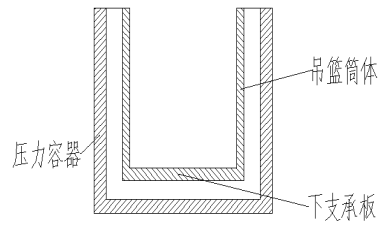


Figure 1. Sketch map of core barrel
图 1. 吊篮结构示意图

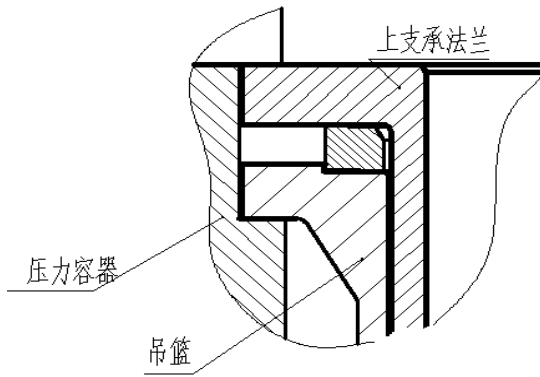


Figure 2. Sketch map of compressive spring
图 2. 法兰处压紧弹簧示意图

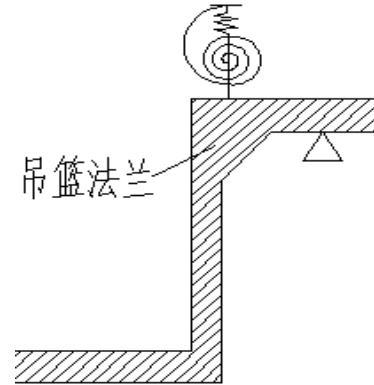


Figure 3. Constraint diagram of flange
图 3. 吊篮法兰约束示意图

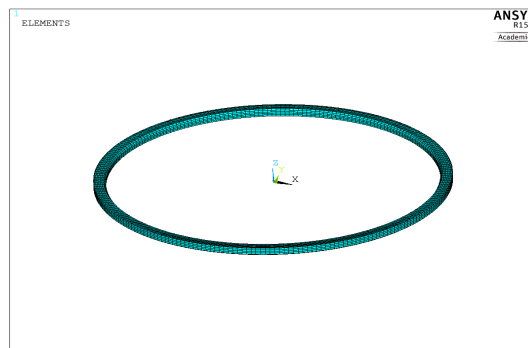


Figure 4. Finite element model of compressive spring
图 4. 压紧弹簧有限元模型图

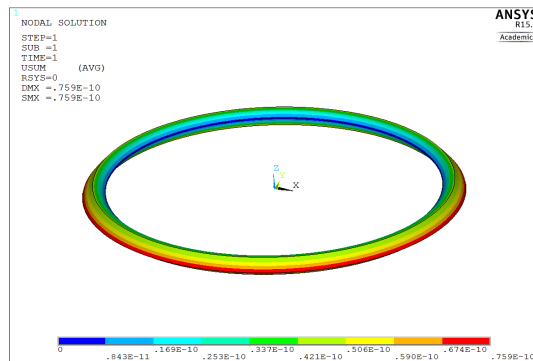


Figure 5. Displacement figure of compressive spring
图 5. 压紧弹簧位移云图

$$K_{\text{扭转}} = M/\theta \quad (2)$$

式中， F ——力； U ——位移； M ——压紧弹簧上节点的弯矩； θ ——节点转角。

3. 吊篮在空气中的振动特性计算

为考察压紧弹簧对吊篮振动特性的影响，考虑两种情况：(1) 考虑吊篮法兰上支承不受压紧弹簧约束；(2) 考虑吊篮法兰上支承受压紧弹簧约束。模型 1 为考虑法兰上支承无压紧弹簧的弯曲和扭转刚度；模型 2 为考虑吊篮法兰上支承受压紧弹簧的弯曲和扭转刚度。采用三维实体建模(模型及网格图如图 6~8 所示)，分别计算吊篮结构在空气中的固有振动频率以及梁式和壳式振型，计算结果见表 1。

由表 1 梁式固有振动频率可见，模型 2 的一阶梁式振动频率和轴向振动频率明显比模型 1 的频率高；整体而言，模型 2 的各阶固有频率都较模型 1 高，除一阶梁式振动频率和轴向振动频率，其它的振动频率相差不大。由于模型 1 与模型 2 的区别就在于是否考虑压紧弹簧的约束，计算结果表明：压紧弹簧对吊篮筒体的一阶梁式振动和轴向振动有明显的影响；压紧弹簧刚度的存在使得结构的这几阶振型振动频率增大；压紧弹簧的刚度不会影响吊篮结构各阶振型出现的先后顺序(图 9~11)。究其原因，相比较模型 1，

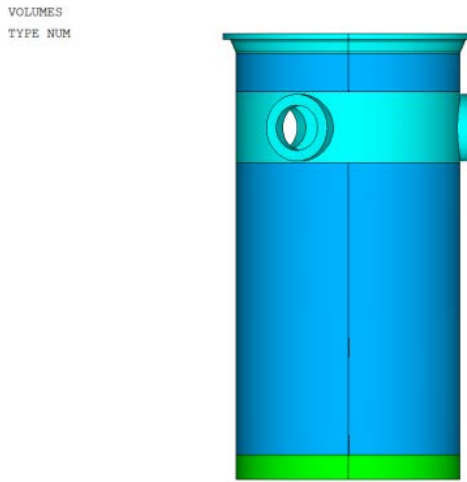


Figure 6. Sketch map of core barrel
图 6. 吊篮结构实体模型

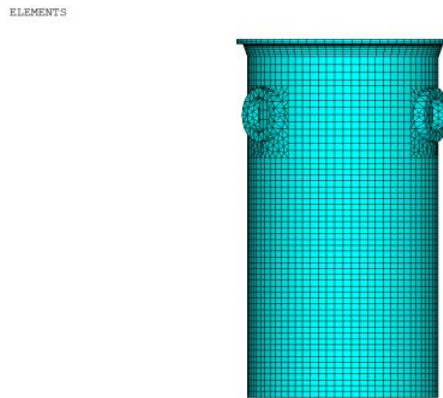


Figure 7. Finite element model of core barrel (model 1)
图 7. 吊篮结构有限元模型(模型 1)

Table 1. Natural frequencies of core barrel vibrating in air (beam mode, shell mode)
表 1. 吊篮筒体在空气中的固有振动频率(梁式振型与壳式振型)

编号	振动频率(Hz)		振动属性	振动频率(Hz)		振动属性	
	模型 1	模型 2		模型 1	模型 2	轴向半波数 m	环向半波数 n
1	24.294	25.920	一阶梁式振动	69.651	70.557	1	2
2	81.559	81.562	环向扭转	59.737	60.066	1	3
3	87.724	92.798	轴向振动	81.107	81.176	1	4
4	130.132	130.26	二阶梁式振动	164.248	164.420	2	2

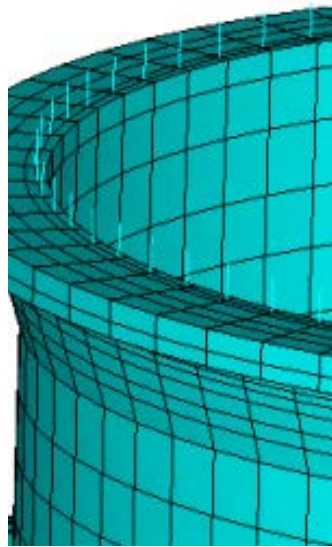


Figure 8. Finite element model of core barrel spring (model 2)

图 8. 吊篮弹簧有限元模型(模型 2)

DISPLACEMENT
 STEP=1
 SUB =2
 FREQ=24.3007
 DMX =.005402

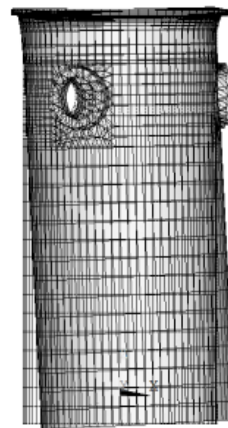


Figure 9. First-order beam modal

图 9. 一阶梁式振型图

DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =10
FREQ=67.7238
DMX =.006145

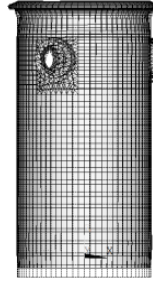


Figure 10. Axial vibration modal
图 10. 轴向振动振型图

DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =5
FREQ=69.6508
DMX =.009341

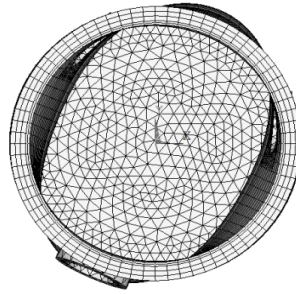


Figure 11. Shell modal (m = 1, n = 2)
图 11. 壳式振型图(m = 1, n = 2)

模型 2 仅在吊篮法兰处增加压紧弹簧的作用，体现在边界条件上，即增加了弯曲刚度和扭转刚度，此刚度对吊篮筒体结构的梁式频率影响较大，而整体的壳式刚度变化不大，因此，对壳式振动频率的影响相对较小。

4. 压紧弹簧刚度对吊篮振动特性的影响

由压紧弹簧的对称性分析，压紧弹簧的扭转刚度对结构整体振动影响较弱。为进一步考察吊篮振动特性对压紧弹簧参数的敏感性，本节通过改变压紧弹簧的弯曲刚度计算吊篮的振动频率，讨论吊篮振动频率随压紧弹簧弯曲刚度的变化规律。图 12，图 13 给出了反应堆吊篮的固有振动频率随压紧弹簧弯曲刚度的变化图。

由图 12 和图 13 可见，当压紧弹簧弯曲刚度取值小于 $K_{\text{弯曲}} = 1.0 \times 10^8 \text{ N/m}$ 以及大于 $K_{\text{弯曲}} = 1.0 \times 10^{12} \text{ N/m}$ 的区域，吊篮的振动频率变化很小；在 $K_{\text{弯曲}} = 1.0 \times 10^8 \text{ N/m}$ 到 $K_{\text{弯曲}} = 1.0 \times 10^{12} \text{ N/m}$ 之间的区域，随着压紧弹簧弯曲刚度的增加，一阶梁式振动、轴向振动和壳式振动(m = 1, n = 2)振型的振动频率都有明显升高，其它振型振动频率变化不明显；整体而言，压紧弹簧的弯曲刚度的改变对吊篮壳式振型频率影响较小。研究结果表明：在本文的参数下，在压紧弹簧的弯曲刚度取值为 $10 \times 10^8 \text{ N/m} \sim 10 \times 10^{12} \text{ N/m}$ 区间时，压紧弹簧的约束对吊篮筒体的固有振动特性有较明显的影响。当压紧弹簧弯曲刚度较小时，意味着相对整个吊篮筒体的结构以及约束而言，其刚度不足以影响吊篮筒体的动力学特性；而当压紧弹簧的弯曲刚度取值足够大时，其约束性质和固支的约束非常接近，这时如进一步增加其弯曲刚度，也不会对结构的动力学特性有很大的影响。

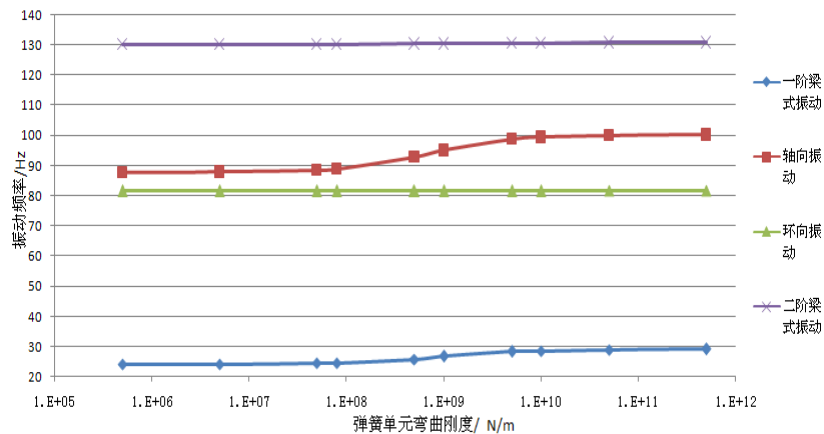


Figure 12. Changing tendencies of beam frequencies vs. bending stiffness
图 12. 梁式振动随弹簧单元弯曲刚度变化图

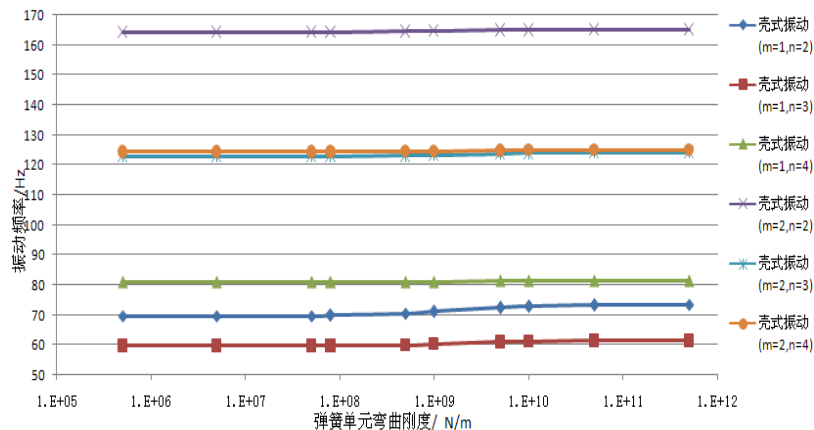


Figure 13. Changing tendencies of shell frequencies vs. bending stiffness
图 13. 壳式振动随弹簧单元弯曲刚度变化图

5. 结论

本文首先采用有限元方法获得压紧弹簧作用在吊篮法兰的弯曲刚度和扭转刚度，计算分析了在其约束下反应堆吊篮在空气中的振动特性。进一步调整了压紧弹簧的弯曲刚度，讨论了吊篮的振动频率随其弯曲刚度的参数变化敏感性。计算结果表明：

- (1) 压紧弹簧的刚度对吊篮筒体一阶梁式振型和轴向振动有较大的影响。
- (2) 压紧弹簧的约束使吊篮结构整体的振动频率升高，但是不改变吊篮结构各阶振型的出现顺序。

(3) 在一定区域时，吊篮结构的一阶梁式振动、轴向振动和壳式振动($m=1, n=2$)对压紧弹簧的刚度变化较为敏感，随着压紧弹簧弯曲刚度的增加，其振动频率增加。吊篮结果的壳式振型对压紧弹簧弯曲刚度的改变不敏感。

基金项目

国家自然科学基金(编号：11102170，11372258)。

参考文献 (References)

- [1] 蒋自龙 (2000) 反应堆吊篮结构梁型振动频率的计算方法. *核动力工程*, **3**, 253-255.

- [2] 马建中, 杨翊仁, 张继业, 蒋自龙 (2000) 空气中吊篮结构的振动特性分析. *核动力工程*, **4**, 323-327.
- [3] 藏峰刚 (2000) 反应堆在空气中和水中的模态分析. *核动力工程*, **增刊**, 107-110.
- [4] Fritz, R.J. (1972) The effect of liquids on the dynamic motions of immersed solid. *Journal of Engineering for Industry*, **94**, 167-173.
- [5] 鲁丽, 杨翊仁, 金建明 (2004) 反应堆吊篮在空气和静水中的振动特性分析. *西南交通大学学报*, **39**, 82-85.
- [6] 郑连纲 (2007) 反应堆堆内构件压紧弹簧弯曲刚度计算方法研究. 2007 年中国科协年专题论坛暨第四届湖北科技论坛优秀论文集.