

海上浮动堆稳压器抗冲击分析方法的比较

张国迅, 朱贺, 刘广东

(中广核研究院有限公司, 广东 深圳 518031)

摘要: **目的** 对海上浮动堆的撞船工况进行模拟计算, 并基于不同处理方法下的冲击载荷, 对稳压器简化模型进行计算和对比分析。**方法** 基于海上浮动堆撞船工况的仿真计算, 获得稳压器支承基座位置在船长、船宽、船高三个方向的冲击加速度数据, 并对时程数据进行反应谱处理。使用 ANSYS 软件, 分别用等效静力法、反应谱分析法和时程分析法的输入载荷, 计算稳压器的支承反力与顶端位移, 并对三种方法的计算结果进行对比研究。**结果** 等效静力法计算的支承轴力、剪力、弯矩三分量分别为 1.25×10^6 N、 6.97×10^5 N 和 2.08×10^9 N·mm。反应谱分析法计算的支承轴力、剪力、弯矩三分量分别为 1.90×10^5 N、 2.63×10^5 N 和 1.10×10^9 N·mm。时程分析法计算的支承轴力、剪力、弯矩三分量分别为 2.03×10^5 N、 3.54×10^5 N 和 1.15×10^9 N·mm。**结论** 验证了撞船冲击数值模拟计算方法的可行性。对于不同的撞船冲击载荷处理方法, 海上浮动堆稳压器的响应也不同, 在本分析案例中, 等效静力法计算结果大于反应谱分析法和时程分析法, 反应谱分析法计算结果与时程分析法基本一致。

关键词: 海上浮动堆; 撞船工况; 稳压器; 抗冲击; 反应谱分析法; 时程分析法

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.02.016

中图分类号: TL353 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2019)02-0078-04

Comparison of Shock Analysis Methods for Pressurizer of Floating Nuclear Reactor

ZHANG Guo-xun, ZHU He, LIU Guang-dong

(China Nuclear Power Technology Research Institute Limited, Shenzhen 518031, China)

ABSTRACT: Objective To simulate and calculate the ships collided condition of floating nuclear reactor, calculate and compare the simplified models of pressurizers based on different treatment methods. **Methods** Based on simulating calculation on ships collided condition of floating nuclear reactor, the length, width and height directions acceleration of pressurizer supporting were obtained, and response spectrum treatment of time history was completed. Through the input loads of equivalent static analysis, spectrum analysis and time-history analysis by ANSYS, the support loads and top displacement of pressurizer were calculated, and the three kinds of results were compared. **Results** The axial force, shear force and bending moment of pressurizer support calculated by equivalent static analysis were 1.25×10^6 N, 6.97×10^5 N and 2.08×10^9 N·mm. The axial force, shear force and bending moment of pressurizer support calculated by spectrum analysis were 1.90×10^5 N, 2.63×10^5 N and 1.10×10^9 N·mm. The axial force, shear force and bending moment of pressurizer support calculated by time-history analysis were 2.03×10^5 N, 3.54×10^5 N and 1.15×10^9 N·mm. **Conclusion** It proves that the method of calculating ships collided condition is feasible in the paper. For different input loads dispose methods, the structure response is different. For analysis case in this paper, the static analysis results are larger than spectrum analysis results, and the spectrum analysis results are approximately equal to time-history analysis results.

KEY WORDS: floating nuclear reactor; ships collided condition; pressurizer; shock resistance; spectrum analysis; time-history analysis

收稿日期: 2018-11-22; 修订日期: 2018-12-16

作者简介: 张国迅(1988—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为反应堆主系统与主设备力学分析。

海上浮动堆是一种安全、便捷的新型反应堆，能够有效解决海洋开发所面临的能源短缺等问题，成为满足海上能源需求的首选。由于其在海上作业的特殊性，海上浮动堆需要考虑补给船在周围作业时，可能存在的低速碰撞工况。考虑到核反应堆的安全，此类撞船工况对反应堆的冲击影响需要特别进行分析评估。

稳压器是对一回路进行控制和超压保护的核一级设备^[1]。相比反应堆压力容器、蒸汽发生器和主泵等主设备，稳压器相对独立，便于进行对比分析。因此文中选用稳压器设备作为撞船冲击工况下的分析目标。

1 撞船冲击

1.1 计算方法

根据《海上浮式装置入级规范》^[2]相关规定，补给船与核反应堆平台船的侧面碰撞动能不应小于 14 MJ，艏部或艉部碰撞动能不应小于 11 MJ。可以假设一艘 5000 t 补给船以 2.2 m/s 的速度，艏部垂直撞击平台船的反应堆舱位置。

在分析计算之前，先创建碰撞分析模型。其中平台船的板壳采用壳单元模拟，横梁和加强筋等采用梁单元模拟。为保证有限元模型质量分布与实际一致，并考虑主设备质量和安装方式对平台冲击性能的影响，建立主设备及其支承平台的有限元模型，同时按照主设备的安装连接方式来耦合主设备与支承平台安装点。考虑到计算规模和计算效率，对重点关注的堆舱结构进行详细建模，对远离堆舱部分的弱构件进行刚度等效处理。反应堆舱室以及主设备模型如图 1 所示。

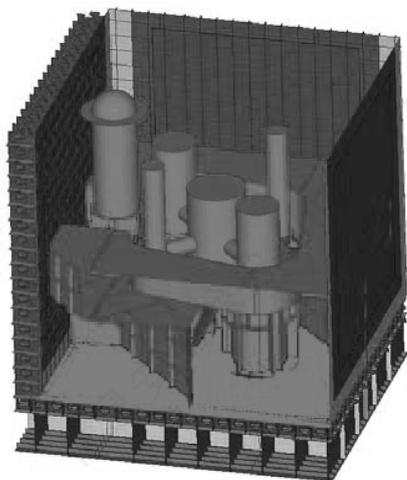


图 1 反应堆舱室与主设备模型

对于撞击船，考虑到变形区域仅限于球鼻艏接触

区域，可采用壳单元建立球鼻艏部分，并赋予其全船的等效质量。同时参考《内河双壳液货船耐碰撞评估指南》^[3]，对于撞击船不考虑球鼻艏的变形与吸能特性，将其作为刚体考虑。

通过 LS-DYNA 软件模拟计算撞船冲击工况。浮动船体平台为单点约束方式，因此对应的约束船体艏部相关节点的 3 个平动自由度。对于撞船工况，定义被撞船的舷侧壳体与撞击船球鼻艏壳体为面面接触。结构阻尼对冲击响应影响较大，但阻尼值难以准确获得，在撞船冲击工况模拟计算中，对船体结构设置一个保守的低阻尼值。从节约计算时间和计算结果保守角度考虑，撞船冲击计算中暂不考虑流体的影响。基于冲击响应数值分析反应堆舱内稳压器，因此选择对中垂直撞击反应堆舱这一最危险工况进行分析，撞船工况如图 2 所示。

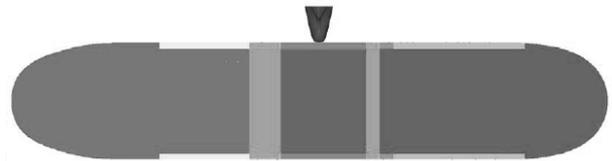


图 2 撞船工况示意

1.2 冲击加速度时程

选取稳压器下部支承基座固定位置作为输出点，提取此点的加速度时程，作为后续动力分析的计算输入。稳压器支承基座固定位置在撞船冲击工况下三个方向的加速度时程曲线如图 3 所示。

1.3 冲击加速度反应谱

使用标准时程转谱程序，将冲击时程数据按照 2% 阻尼比转换为冲击加速度反应谱数据。考虑到稳压器的主要频率范围，冲击加速度反应谱输出 1~500 Hz 范围内的数据。稳压器支承基座约束位置三个方向的加速度反应谱如图 4 所示。

2 稳压器模型简化

2.1 模型简化方法

为了快速评价稳压器的抗冲击性能，将稳压器简化为一维单元进行分析^[4]。其中稳压器筒体、上封头、下封头、支承基座和接管嘴采用直管单元进行模拟，入孔和阀门接管嘴采用质量单元进行模拟，并考虑转动惯量。内部流体、外部保温层和构件的质量以等效密度形式施加在对应的筒体管单元上。在支承基座底部施加固定约束，得到稳压器的简化模型如图 5 所示。

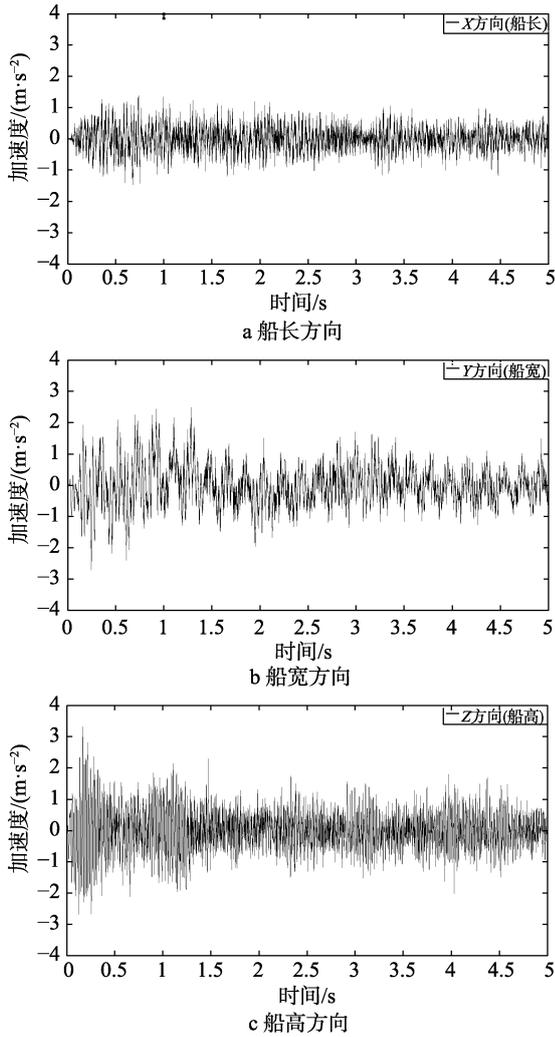


图3 稳压器支承基座约束位置沿三个方向的冲击加速度时程

2.2 模态分析

进行冲击动力学分析之前,先开展模态分析,观察各阶的模态响应,得到稳压器的动力学特性。使用 ANSYS 软件,并采用分块兰索斯法进行模态分析,稳压器各阶固有频率见表 1。基于计算频率和冲击反应谱可知,海上浮动段稳压器前两阶振型对应频率处于撞船冲击反应谱的第一个加速度峰值频率区间范围内,可能会对稳压器产生较大的影响。

3 稳压器抗冲击分析

结构的抗冲击分析主要有等效静力法、反应谱分析法和时程分析法^[5]。下面将分别介绍三种分析方法,计算海上浮动堆稳压器的响应。

3.2 等效静力法

等效静力法以冲击的最大加速度作为计算的输入条件,以该加速度与被分析设备的质量乘积作为冲

击力施加于设备上,并计算结构的内力与变形。通常以反应谱加速度峰值的 1.5 倍作为等效静力法的计算输入加速度值。

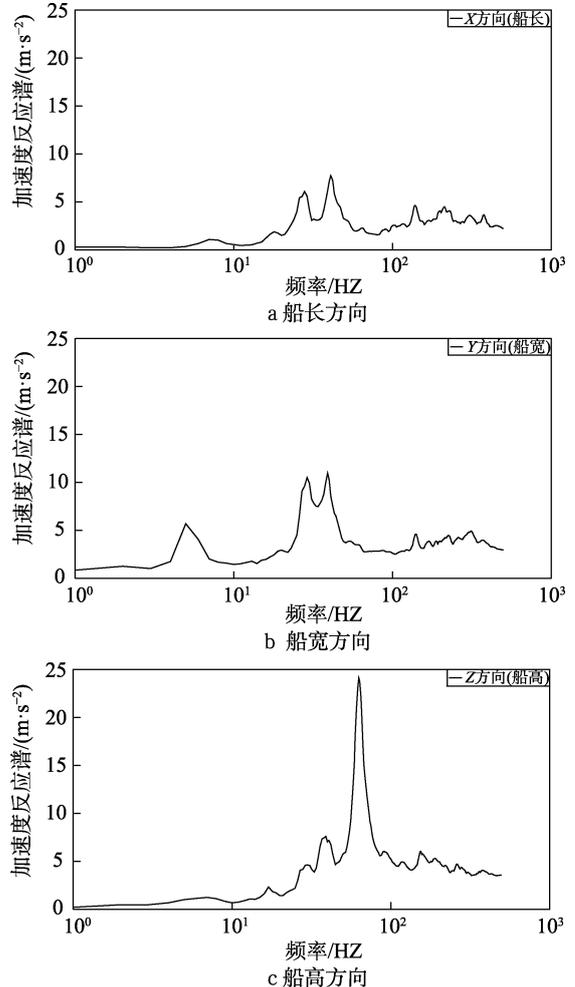


图4 稳压器支承基座约束位置沿三个方向的加速度反应谱

根据 1.3 节撞船冲击加速度反应谱值,按照 1.5 放大系数,海上浮动堆稳压器在撞船冲击工况下 x、y、z 三个方向的数值分别为 11.58、16.44、36.14 m/s^2 。

使用 ANSYS 软件,按照等效静力法计算的稳压器支承基座的支承轴力、剪力、弯矩见表 2,计算的稳压器顶端位移分量见表 3。

3.3 反应谱分析法

反应谱分析法是当前抗冲击分析最普遍的方法,通过反应谱把随时间变化的冲击加速度作用转化为与频率相关的等效冲击加速度^[6]。通过分解结构的各阶振型,计算各阶振型对应的响应,并对振型进行组合以获得计算结果。

以 1.3 章节中的撞船冲击反应谱,构建包络谱反应谱作为计算输入,并采用 ANSYS 软件单点响应谱分析方法对海上浮动堆稳压器开展抗冲击分析。计算

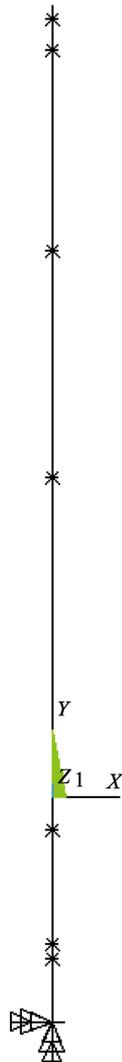


图 5 稳压器简化模型

的稳压器支承基座的支承轴力、剪力、弯矩见表 2，计算的稳压器顶端位移分量见表 3。

3.2 时程分析法

时程分析法是最精确的冲击计算方法，随着计算机处理能力的提高，目前已逐渐被广大青年工程师所接受。时程分析法是将结构作为弹性/弹塑性振动系统，将结构固定位置处的位移、速度或加速度直接作用在系统上，对运动方程进行直接积分，获得结构各个位置处的位移、速度、加速度和内力的时程变化曲线^[4]。

以 1.2 章节中撞船冲击加速度时程作为计算输入，并采用 ANSYS 软件对海上浮动堆稳压器开展抗冲击分析。计算的稳压器支承基座的支承轴力、剪力、弯矩见表 2，计算的稳压器顶端位移分量见表 3。

4 结论

文中以某海上浮动堆的撞船工况为工程背景，介绍了撞船工况的计算方法。同时以稳压器支承位置的撞船冲击时程载荷作为输入，进行反应谱处理。基于稳压器的简化模型，分别采用等效静力法、反应谱分析法和时程分析法进行计算和对比分析。

结果显示，对于本分析案例，等效静力法计算结果明显大于反应谱分析法和时程分析法，而反应谱分析法计算结果与时程分析法计算结果基本一致。在本分析案例中，由于在将时程信息转换为反应谱信息的过程中，会丢失少部分激励载荷信息，因此反应谱分析方法计算结果会略小于时程分析方法计算结果。

表 1 各阶固有频率

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
频率值/Hz	29.48	29.05	94.84	112.86	113.36	142.12	240.20	241.57	288.93	384.66

表 2 稳压器支承反力

方法	轴力/N	剪力/N	弯矩/(N·mm)
等效静力法	1.25×10^6	6.97×10^5	2.08×10^9
反应谱分析法	1.90×10^5	2.63×10^5	1.10×10^9
时程分析法	2.03×10^5	3.54×10^5	1.15×10^9

表 3 稳压器顶端位移值 mm

方法	船长方向	船宽方向	船高方向	总位移
等效静力法	0.50	0.71	0.55	0.87
反应谱分析法	0.21	0.45	0.01	0.50
时程分析法	0.28	0.62	0.01	0.65

此外，从冲击反应谱与模态分析的结果可见，作为分析案例的稳压器，其主要响应频率与水平方向冲击反应谱的峰值频率有重合，易产生共振效应，可考

虑增加支承刚度等措施来避免频率重合。

参考文献：

- [1] 杨能仁, 钦军伟, 刘攀. 核电厂稳压器抗震分析方法研究[J]. 核动力工程, 2011, 32(S1): 90-92.
- [2] 中国船级社. 海上浮式装置入级规范[K]. 北京: 中国船级社, 2014.
- [3] 中国船级社. 内河双壳液货船耐碰撞评估指南[K]. 北京: 中国船级社, 2012.
- [4] 毛庆, 曾忠秀, 王伟. 秦山核电二期工程反应堆主冷却剂系统与辅助系统力学分析[J]. 核动力工程, 2003, 24(z1): 114-117.
- [5] 胡志强, 徐嗣华. 核电汽轮机抗震分析方法的发展和运用[J]. 热力透平, 2015, 44(4): 290-295.
- [6] 周文建, 陈宏, 闻邦椿. 核电站反应堆冷却剂泵的地震响应分析[J]. 振动与冲击, 2006, 25(1): 32-35.