

# 浮子流量计抗震分析与评定

吴天宸, 翟建广, 竺宇洋

上海工程技术大学材料科学与工程学院, 上海

收稿日期: 2023年3月23日; 录用日期: 2023年5月18日; 发布日期: 2023年5月25日

## 摘要

基于ANSYS workbench 2020 R2, 建立浮子流量计三维模型, 通过等效静力法, 对在地震、自重、内压等多种载荷组合作用下的核电厂浮子流量计进行抗震性能分析, 并根据ASME规范和技术规格书的要求对计算结果进行评定。结果表明, 应力和变形均在允许限值内, 浮子流量计结构设计满足ASME规范和相应技术规格书的要求。

## 关键词

浮子流量计, 抗震分析, 载荷组合, 模态分析, ASME

# Seismic Analysis and Rating of Float Flowmeter

Tianchen Wu, Jianguang Zhai, Yuyang Zhu

School of Materials Science and Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai

Received: Mar. 23<sup>rd</sup>, 2023; accepted: May 18<sup>th</sup>, 2023; published: May 25<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

Based on ANSYS workbench 2020 R2, a three-dimensional model of the float flowmeter was established. Through the equivalent static method, the seismic performance of the nuclear power plant float flowmeter under the combined action of earthquake, dead weight, internal pressure, etc., was analyzed, and the results were based on the ASME code. It shows that the average stress and deformation are within the allowable range, and the structure design of the float flowmeter meets the requirements of the ASME code and the corresponding technical specifications.

## Keywords

Float Flowmeter, Seismic Analysis, Load Combination, Modal Analysis, ASME

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

浮子流量计是以浮子在垂直锥形管中随着流量变化而升降, 改变它们之间的流通面积来进行测量的体积流量仪表, 在核电厂监控系统中具有举足轻重的作用[1]。浮子流量计作为核安全 NC 级抗震 II 类设备, 为了确保其运行过程中的安全性, 需要在设计与调试过程中对其进行抗震分析。

目前, 常用的抗震分析方法主要有三种分别为: 等效静力法、谱分析法和时程分析法[2] [3] [4] [5]。其中时程分析法的计算结果虽然较为精确, 但是该方法不确定因素多, 计算较为复杂且计算时间较长, 因而较少采用。等效静力法和谱分析法的计算方法相对较为简单, 同时也能够较为准确地反映结构的响应特征[6]。一般对设备要求计算周期较短且裕度较大时, 采用等效静力法, 当要求计算结果较为精确或者遇到精力法所得应力结果不能满足要求时, 采用谱分析方法[7]。

本文以浮子流量计为例, 采用等效静力法, 利用 ANSYS workbench 2020 R2 对流量计进行应力分析, 计算地震工况下流量计主要部件的应力及变形分布, 依据国家标准《核电厂抗震设计规范》[8]和 ASME [9]的相关要求对该流量计结构进行完整性的评价。

## 2. 结构与设计参数

浮子流量计为核安全 NC 级抗震 II 类设备, 测量介质为水, 设计温度  $25^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$ , 设计压力为 1.05 MPa, 腐蚀裕量为 0.2 mm。其结构如图 1 所示, 由测量锥管、法兰、指示器及内部浮子结构构成, 指示器与测量管通过两个螺栓连接, 在室温条件下材料的屈服强度及抗拉强度由表 1 所示, 且在工作环境温度下 ( $25^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$ ) 材料的参数与室温相同。

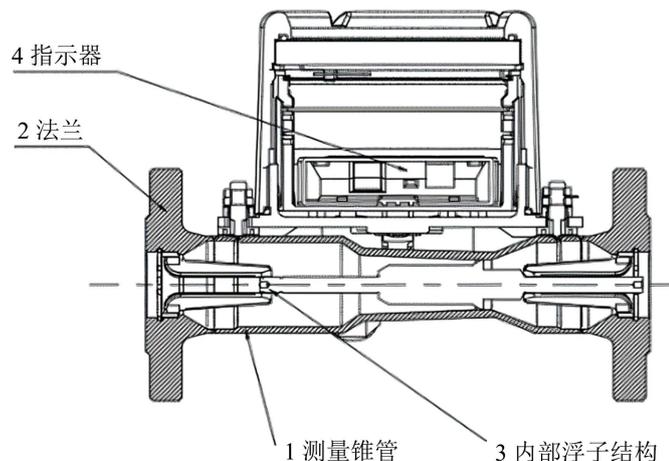


Figure 1. Schematic diagram of flowmeter structure

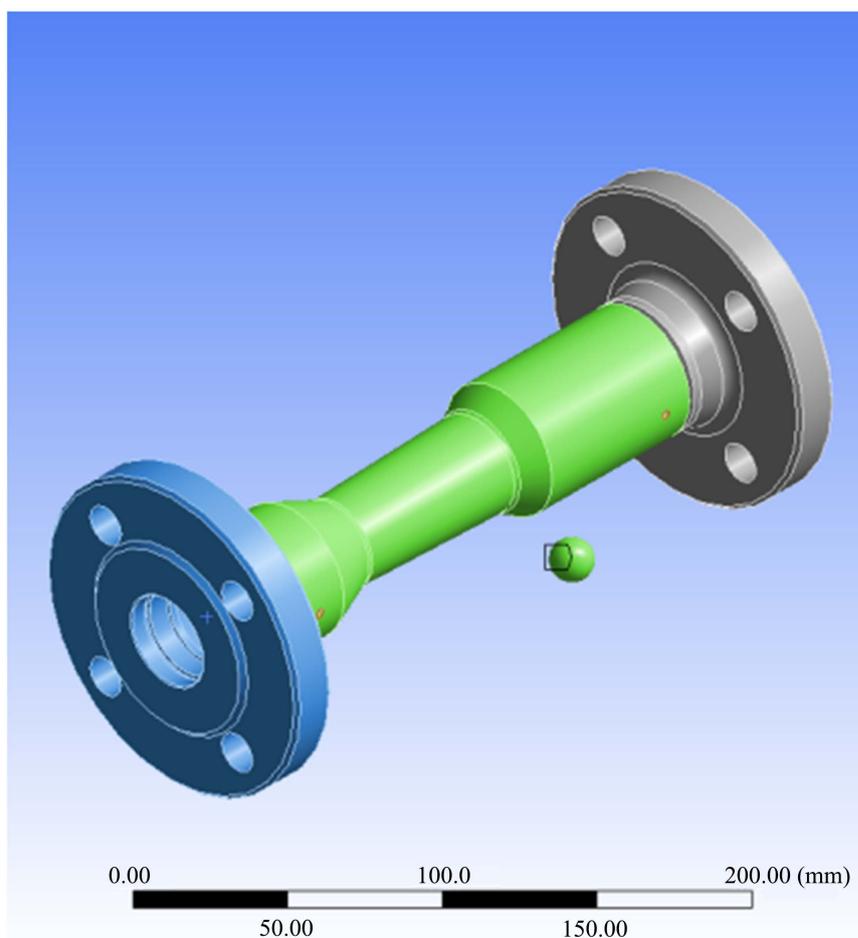
图 1. 流量计结构示意图

**Table 1.** Material parameters of main components**表 1.** 主要部件材料参数

部件	材质	弹性模量(MPa)	屈服强度(MPa)	抗拉强度(MPa)	基本许用应力(MPa)
法兰, 锥管	316 L	201,000	180	500	108 (Z11.5)
法兰螺栓	304		210	520	124 (Z11.6)
指示器螺栓	0Cr18Ni9Ti		210	520	
弹簧卡	0Cr18Ni12Mo2Ti		190	530	
指示器底板	铸铝	69,000	195	265	

### 3. 几何模型

由于浮子流量计的内部结构较为复杂, 所以将模型导入时需要进行简化。其中指示器的质量由集中质量代替, 指示器质心位于两连接螺栓连线中间偏离 60 mm (实际质心) 处。如图 2 所示。流量计中锥管内部浮子等附件结构仅考虑其质量, 网格采用 8 节点六面体单元, 壁厚划分为四层, 最小单元尺寸 0.3 mm, 模型共有 72,733 个单元和 218,009 个节点, 计算模型总质量为 3.06 Kg, 如图 3 所示。

**Figure 2.** Entity model**图 2.** 实体模型

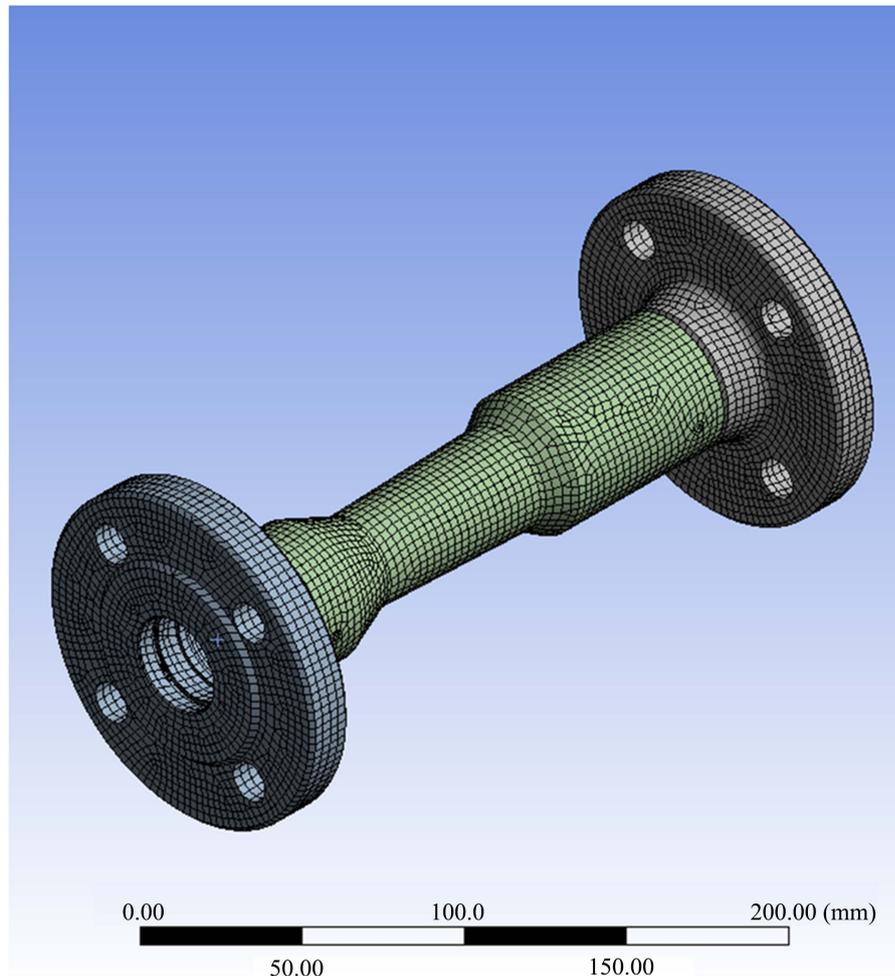


Figure 3. Mesh division  
图 3. 网格划分

#### 4. 载荷、载荷组合及边界条件

流量计的外载荷包括内压、地震、自重、管道极限载荷和法兰力矩。

##### 4.1. 重量载荷

流量计自重以及设备内含液体质量。重力加速度取  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ 。

##### 4.2. 压力

根据流量计结构设计，其设计内压为 1.05 MPa。

##### 4.3. 地震载荷

L1 为厂区运行基准地震动，SL2 为厂区安全停堆地震动。

根据《百万千瓦级先进压水堆核电机组——在线流量仪表技术规格书》[10]规定：SL2 地震，三个方向分别作用 6.0 g 加速度；SL1 地震，三个方向分别作用 4.8 g 加速度；三个方向地震作用按 SRSS 进行组合。

#### 4.4. 法兰力矩或管道极限载荷

法兰力矩或管道极限载荷均是管道传递给流量计的全部外载荷，为计算流量计在管道所传递的载荷作用下的应力，需要选择其中之一计算。因为前者引起的应力强度远大于后者，所以前者被用于锥管和法兰的应力分析，根据 ASME 第 III 卷 BC-3658.3 规定计算可知

设计工况及正常工况的法兰力矩大小：

$$M_{fd} \leq 21.55 \times 10^{-3} \left( \frac{S_y}{250} \right) C A_b = 138.75 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (1)$$

异常工况下法兰力矩大小：

$$M_{fd} \leq 43.1 \times 10^{-3} \left( \frac{S_y}{250} \right) C A_b = 276.95 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (2)$$

事故工况条件下法兰力矩大小：

$$M_{fd} \leq \left( 77.6 \times S_B - \frac{\pi D_f^2}{16} \times P_{fd} \right) \times 10^{-3} \left( \frac{S_y}{250} \right) C = 453.81 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (3)$$

其中： $S_y$  是在设计工况下法兰的屈服强度； $C = 85 \text{ mm}$  是螺栓圆直径； $A_b = 105$  是受力状态下螺纹根部或最小直径处螺栓总的横截面积； $P_{fd} = 0.22 \text{ MPa}$ ， $D_f = 70 \text{ mm}$ ，是法兰盘凸面外径。

#### 4.5. 载荷组合

具体载荷组合情况如表 2 所示。

Table 2. Load combination

表 2. 载荷组合

序号	工况	载荷组合
1	正常工况(A)	重量载荷 + 1.0 内压 + 法兰力矩
2	异常工况(B)	重量载荷 + 1.1 内压 + 法兰力矩 ± SL-1
3	事故工况(D)	重量载荷 + 1.2 内压 + 法兰力矩 ± SL-2

#### 4.6. 边界条件

基于实际模型所处位置，设定下法兰底面螺栓紧固面为约束面。

### 5. 模态分析

应用 workbench 2020 R2 中的模态分析板块，计算得到浮子流量计如图 4~6 所示的前三阶频率分别为 78.43、170.9 和 222.36 Hz。由于第一阶固有频率大于 33 Hz，故可采用等效静力法进行地震工况下的应力分析[11]。

### 6. 应力计算与评定

应力评定只涉及总体一次薄膜应力  $\sigma_m$  以及局部薄膜应力与一次弯曲应力之和  $\sigma_m(\sigma_1) + \sigma_b$  [12]。根据锥管结构和加载方式，评定位置如图 7 所示。其中 P1 和 P6 位于法兰与锥管连接处，P2 和 P5 位于指示仪固定螺栓处，P3、P4 位于锥管大颈与小颈过渡处。

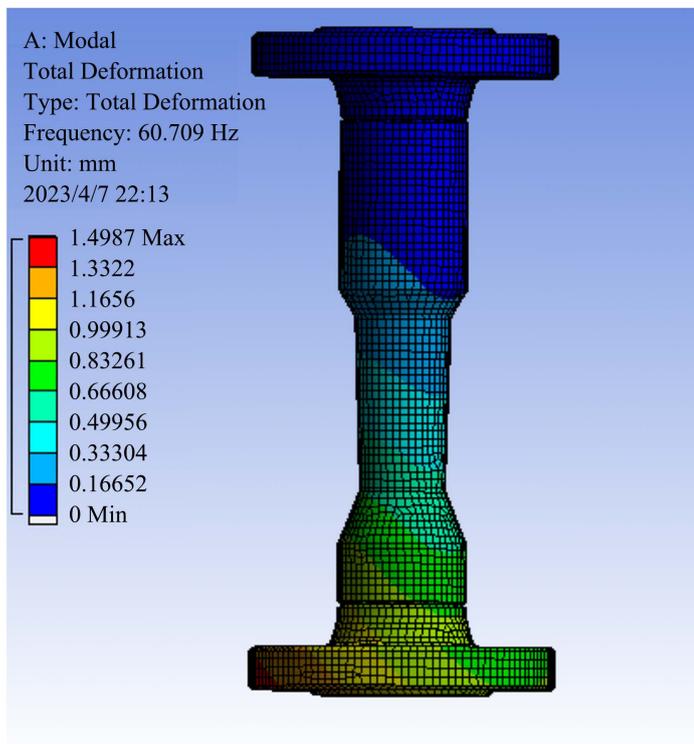


Figure 4. The first-order mode shape  
图 4. 第 1 阶模态振型

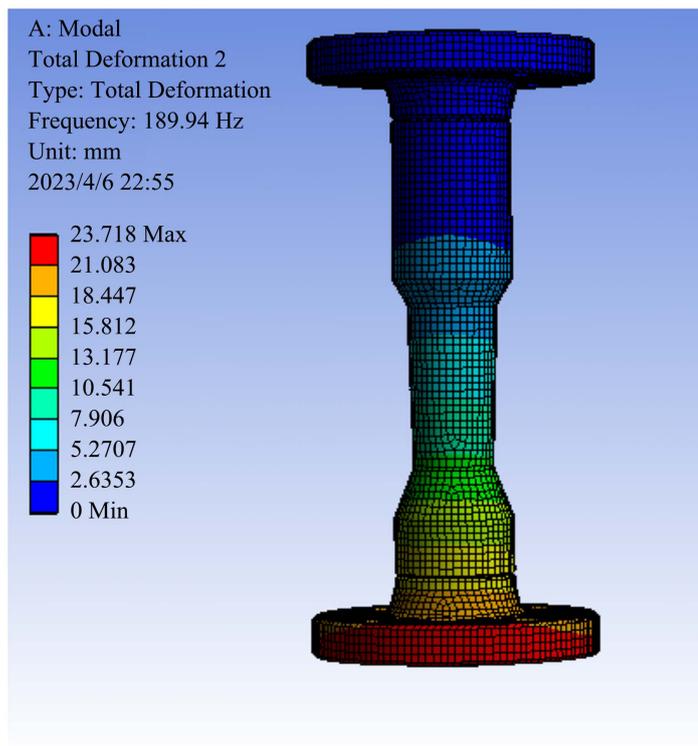
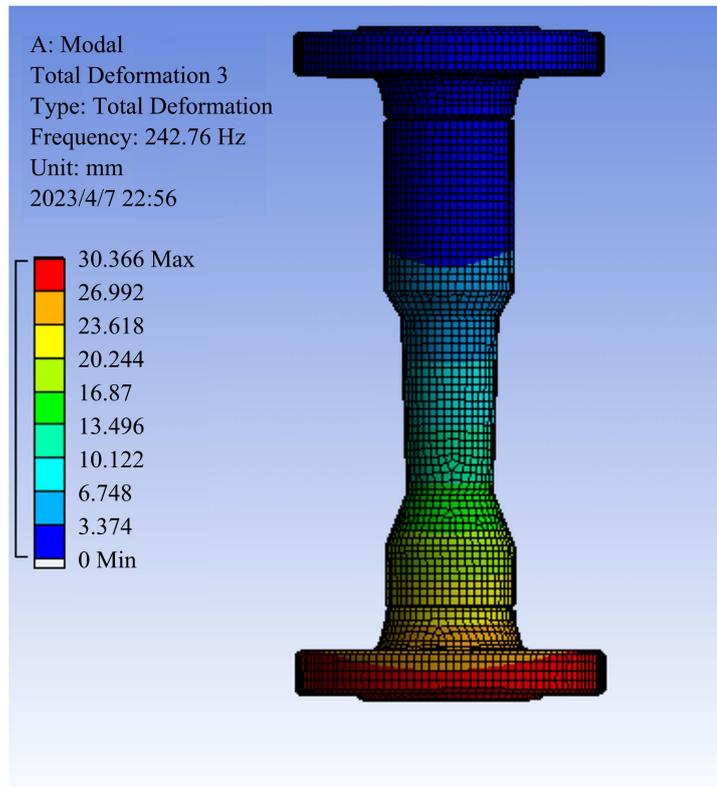
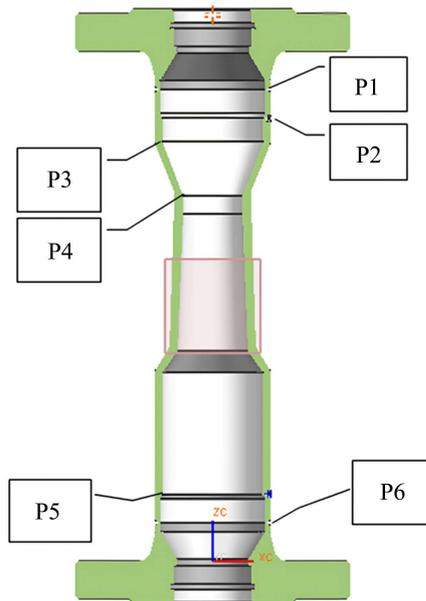


Figure 5. The second-order mode shape  
图 5. 第 2 阶模态振型



**Figure 6.** The third-order mode shape  
**图 6.** 第 3 阶模态振型



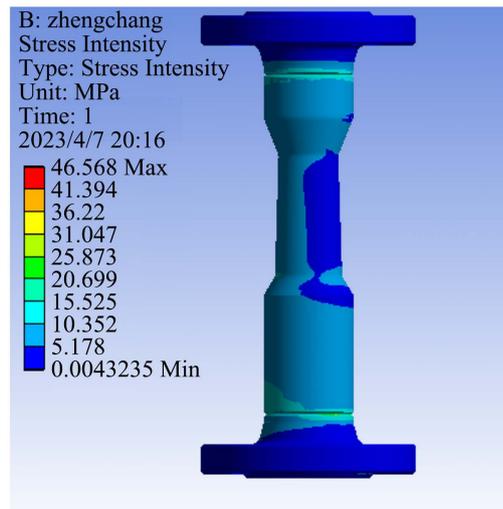
**Figure 7.** Location of stress analysis assessment  
**图 7.** 应力分析评定位置

按规范要求，在核安全 2 级设备中对于带有焊接连接的部件和零件取基本许用应力  $S$  的 0.85 倍作为许用作用力。各工况的应力限值如表 3 所示。 $\alpha$  为焊缝系数， $S$  为基本许用应力 108 MPa。

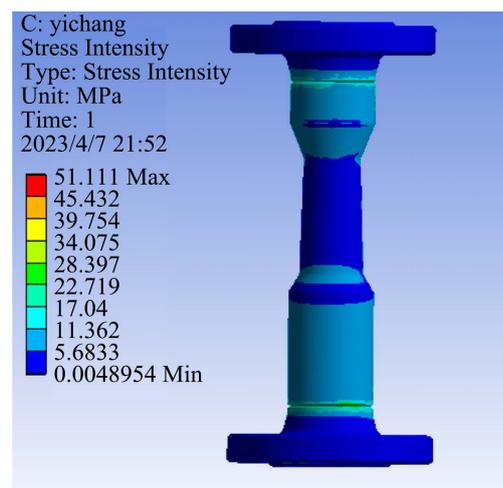
**Table 3.** Stress evaluation values of various working conditions  
**表 3.** 各工况的应力评定值

工况分类	总体一次薄膜应力限值(MPa)		局部薄膜加弯曲应力(MPa)	
	计算式	限值	计算式	限值
正常工况(A)	$\alpha \times S$	91.8	$1.5\alpha \times S$	137.7
异常工况(B)	$1.1\alpha \times S$	101.0	$1.65\alpha \times S$	151.5
事故工况(D)	$2.0\alpha \times S$	183.6	$2.4\alpha \times S$	220.3

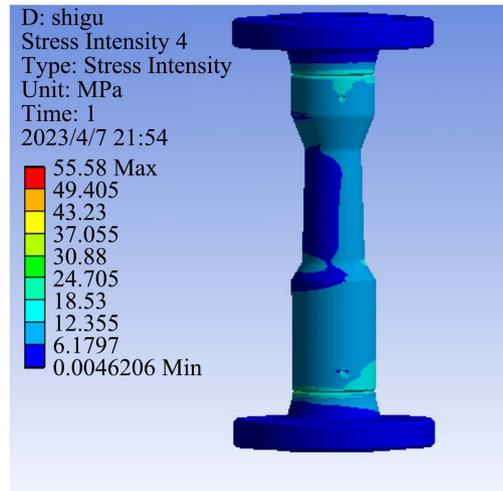
根据表 3 中不同工况下的载荷组合, 对浮子流量计进行抗震分析。其中在 SL-1 和 SL-2 地震载荷作用下, 正常、异常和事故工况下浮子流量计的应力分布图如下图 8~10 所示。正常工况下浮子流量计应力最大值为 46.568 MPa, 最小值为 0.0043235 MPa; 异常工况下应力最大值为 51.111 MPa, 最小值为 0.0048954 MPa; 事故工况下应力最大值为 55.58 MPa, 最小值为 0.0046206 MPa。



**Figure 8.** Stress intensity cloud diagram of float flowmeter under normal working conditions  
**图 8.** 正常工况下浮子流量计应力强度云图



**Figure 9.** Stress intensity cloud diagram of float flowmeter under abnormal working conditions  
**图 9.** 异常工况下浮子流量计应力强度云图



**Figure 10.** Stress intensity cloud diagram of float flowmeter under emergency conditions  
**图 10.** 紧急工况下浮子流量计应力强度云图

根据 ASME 规范，对于不同类别载荷组合下的应力，按照不同的规范限值进行评定，如表 4 所示。根据评定结果可知，流量计薄弱部位在地震工况下的应力值均小于规范中的对对应限值，并具有一定的安全裕度，因此该流量计满足抗震要求。

**Table 4.** Flowmeter stress analysis results  
**表 4.** 流量计应力分析结果

工况	路径	$\sigma_m$	$\sigma_m + \sigma_b$
正常工况(A)	P1	11.421 < 91.8	17.258 < 137.7
	P2	10.877 < 91.8	14.733 < 137.7
	P3	5.8403 < 91.8	6.4556 < 137.7
	P4	5.5569 < 91.8	6.0571 < 137.7
	P5	13.151 < 91.8	15.302 < 137.7
	P6	13.356 < 91.8	28.009 < 137.7
异常工况(B)	P1	12.57 < 101.0	18.998 < 151.5
	P2	11.98 < 101.0	15.89 < 151.5
	P3	6.4059 < 101.0	7.0324 < 151.5
	P4	6.1087 < 101.0	6.682 < 151.5
	P5	14.358 < 101.0	16.645 < 151.5
	P6	14.673 < 101.0	30.735 < 151.5
事故工况(D)	P1	13.727 < 183.3	20.744 < 220.3
	P2	13.109 < 183.3	17.23 < 220.3
	P3	6.9684 < 183.3	7.6082 < 220.3
	P4	6.6594 < 183.3	7.3048 < 220.3
	P5	15.559 < 183.3	18.141 < 220.3
	P6	15.982 < 183.3	33.428 < 220.3

## 7. 结束语

利用 ANSYS workbench 2020 R2 对核安全 NC 级抗震 2 类设备流量计进行了抗震分析, 采用等效静力法分析地震载荷作用下流量计各部位的应力分布, 确定流量计受力的薄弱位置, 结合 ASME 规范中的应力评定准则进行校核, 应力计算结果均小于规定限值。地震载荷下流量计的设计是合理的, 且流量计的结构设计满足 ASME 规范和相关技术规格书的要求。

## 参考文献

- [1] 王斌, 姚骏, 张玮. 基于 HLO-LSSVM 算法的浮子流量计非线性校正[J]. 工业控制计算机, 2017, 30(4): 103-104, 106.
- [2] 李伟正, 郭石永. 核电站抗震仪表支架应力分析及结构优化[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(16): 6530-6536.
- [3] 钟紫蓝, 甄立斌, 申铁尧, 赵密, 杜修力. 基于耐震时程分析法的地下结构抗震性能评价[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(8): 1482-1490.
- [4] 汤占峰, 徐声云, 陈曦, 范勇. 基于等效静力法的核级气动执行机构抗震分析[J]. 机电工程技术, 2019, 48(12): 163-165.
- [5] 汤凤, 张周红. 多谱分析法在核级管道抗震分析中的应用[J]. 核动力工程, 2011, 32(S2): 5-8.
- [6] 伍杜傲, 高红波, 徐德城, 等. 核级管接头抗震特性分析[J]. 噪声与振动控制, 2018, 38(z1): 402-405.
- [7] 兰麒, 胡雯婷. 等效静力法和谱分析法在设备抗震分析中的应用[J]. 核动力工程, 2014, 35(z1): 145-148.
- [8] 中国地震局. 核电厂抗震设计标准(GB 50267-2019) [S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
- [9] American Society for Testing and Materials (2012) ASTM NC 1387-99. Standard Specification for Performance of Piping and Tubing Mechanically Attached Fittings.
- [10] NB/T20010.10-2010. 压水堆核电厂阀门第 10 部分: 应力分析和抗震分析[S]. 北京: 中国核电工程有限公司, 2010.
- [11] 周文霞, 张继革, 宋志平, 等. 核 2 级调节阀的抗震分析及试验研究[J]. 世界地震工程, 2011, 27(1): 148-152.
- [12] 王伟. 核安全二级气动球阀力学分析[J]. 核动力工程, 2012(2): 47-50.