

抗震分析

一、概述

核能作为绿色可持续能源，成为世界各国能源开发的重要领域，但近些年发生的一些重大核事故也引发了人们对于核安全的关注，其中地震作为不可抗拒的自然灾害对于核安全影响重大，因此为保证核电设备在使用期限内安全运行，必须对其进行抗震鉴定。

二、抗震分析方法

抗震分析的目的在于证明设备在地震期间和之后，能保证结构的完整性以及设备的可运行性。目前核电设备的抗震分析一般有：试验法，分析法、试验和分析相结合的方法，在结构设计阶段，有限元分析方法是目前常用的设备抗震分析方法，是结构设计优化的重要辅助手段，其分析流程可以归结为下图所示：

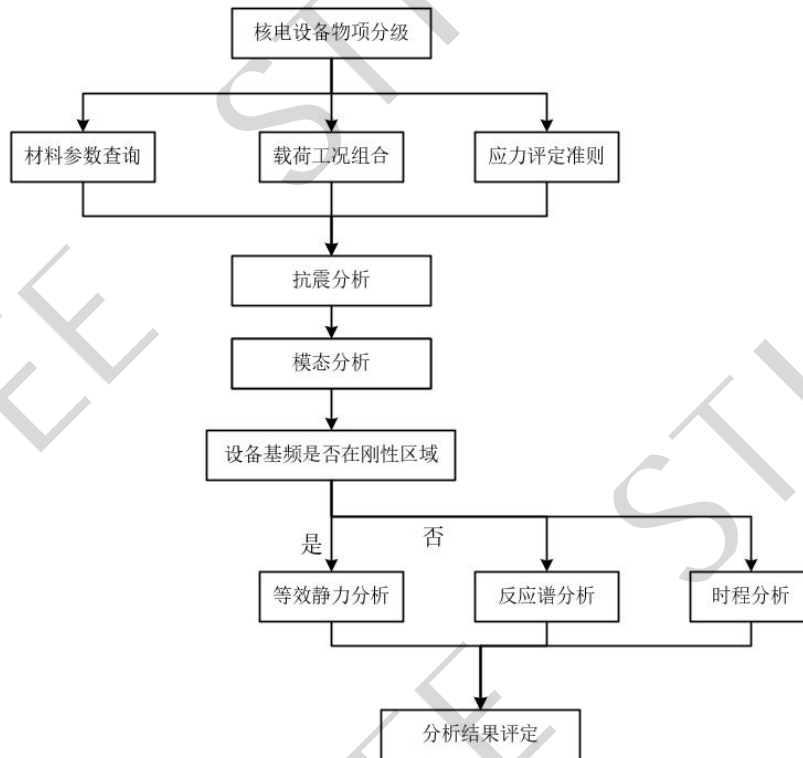


图 1 抗震分析流程图

三、参考的标准及要求

在核电设备的设计建造必须遵守相应的规范标准并接受其检验评估，不同国家的核电规范对物项级别划分也有所不同。我国核电工业起步较晚，尚没有完成具有自己特色的核电规范，目前核电项目主要采用美国 ASME 和法国 RCC 两种标准体系规范。随着我国核电厂建造技术的发展，我国的核电标准也在引用国外标准的基础上不断更新和完善，到目前为止，现行的物项分级标准是 GB/T 17569-2021《压水堆核电厂物项分级》。

我国核电厂的物项划分为抗震 I 类、抗震 II 类和非核抗震类。GB/T 17569-2021 的抗震类别与 GB 50267-2019《核电厂抗震设计标准》相同，相比 RCC-P 准则，增加了抗震 II 类。抗震 I 类应按照 SL-2 地震动设计和论证，并要求地震发生期间和地震后能执行规定的安全功能；抗震 II 类的物项应按照 SL-1 设计，其强度可以取 1/2 SL-2；非抗震类物项可按常规设备抗震规范设计。

四、案例

本文使用有限元数值模拟技术对某核电设备的抗震 II 类部件一截止阀进行抗震分析，并依据 RCC-M 规范对截止阀在不同工况组合下的求解结果进行安全评定。

1、模态分析

自然界中地震波的频率普遍低于 33Hz，对于基频大于 33Hz 的部件可以视作刚性体，具有一定的抵抗地震的能力，因此首先需要对截止阀模型进行模态计算，获取其固有频率和阵型。

➤ 前处理

在有限元计算时，通常需要对模型做合理简化以保证求解精度和效率；接着定义材料参数，并将材料指派给对应的零件；最后对模型进行网格划分，划分完成后见图 2 所示。

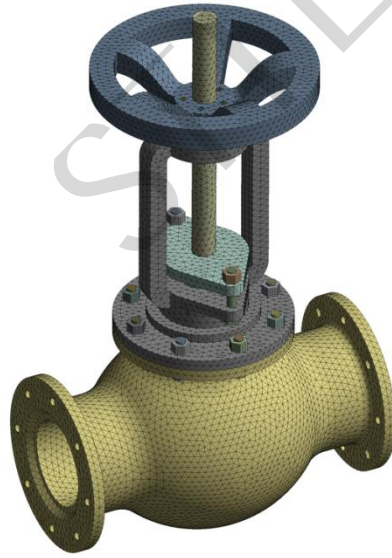


图 2 网格模型

➤ 求解

在模态分析中不考虑非线性因素，因此对于螺栓接触区域以及阀体与阀盖接触区域等做了绑定处理，同时本分析中未考虑螺栓预紧力的影响。分析设置中输入 6 阶模态，边界条件设置为阀体两端的螺栓孔固定约束。见图 3 所示。

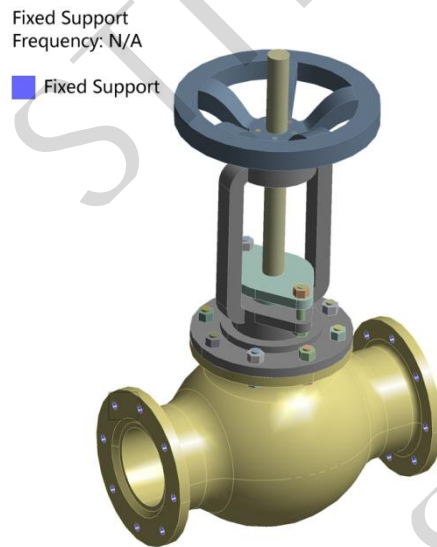
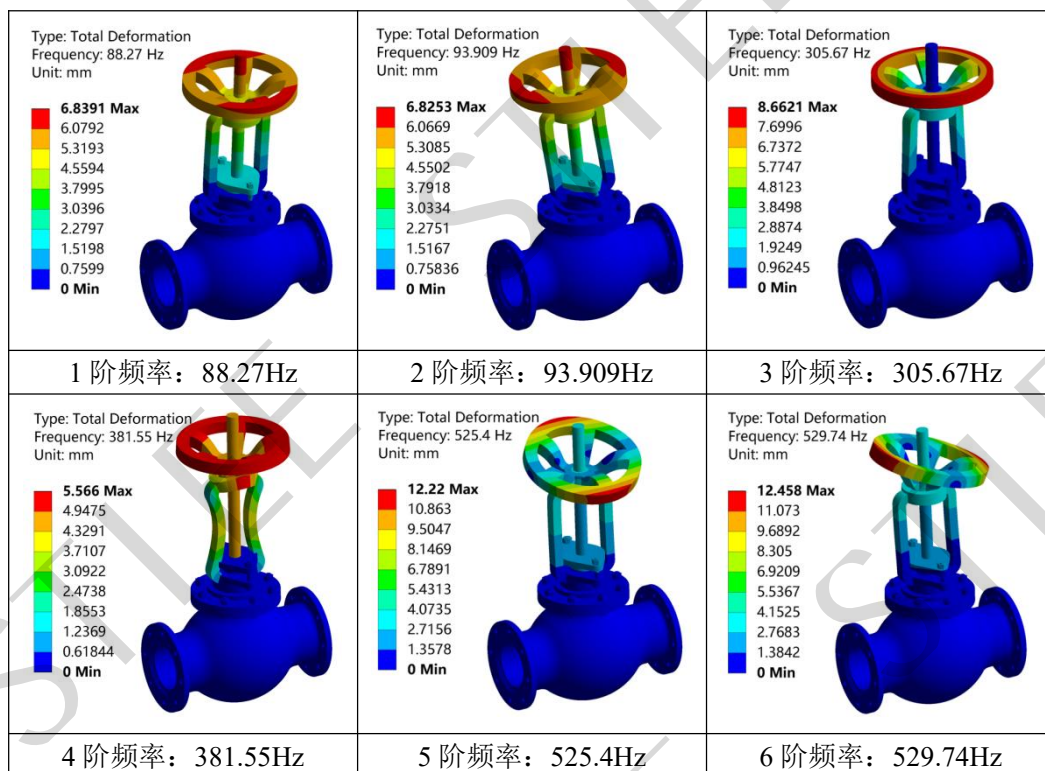


图 3 边界条件

➤ 后处理

在分析求解完成之后查看截止阀前六阶模态的结果，见下表 1 所示。从表格中可以看出截止阀的第一阶固有频率为 88.27Hz，大于自然频率 33Hz，因此可以使用拟静力法进行抗震计算。

表 1 截止阀前 6 阶模态



2、载荷工况组合

截止阀在使用过程中考虑压力、自重和地震载荷作用，其中地震载荷分为运行基准地震（OBE）和安全停堆地震（SSE），对于此分析中的截止阀，OBE 加速度反应谱的峰值加速度为 4.6g，SSE 加速度反应谱的峰值加速度为 6g。运行压力按照允许工作的最大压力并乘以相应的载荷系数给出。具体载荷工况组合见下表 2 所示。

表 2 抗震分析载荷工况组合

工况	准则等级	载荷组合
设计工况	A	设计压力+自重
异常工况	B	运行压力+自重+OBE
事故工况	D	事故压力+自重+SSE

3、抗震分析

分别对上述 3 种工况进行抗震分析，求解计算完成后查看截止阀模型的变形和应力情况。见图 4-6 所示。

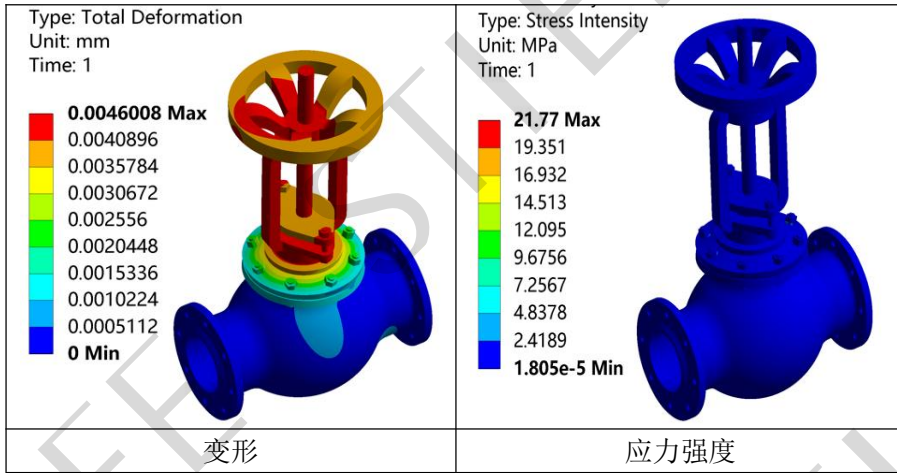


图 4 工况一

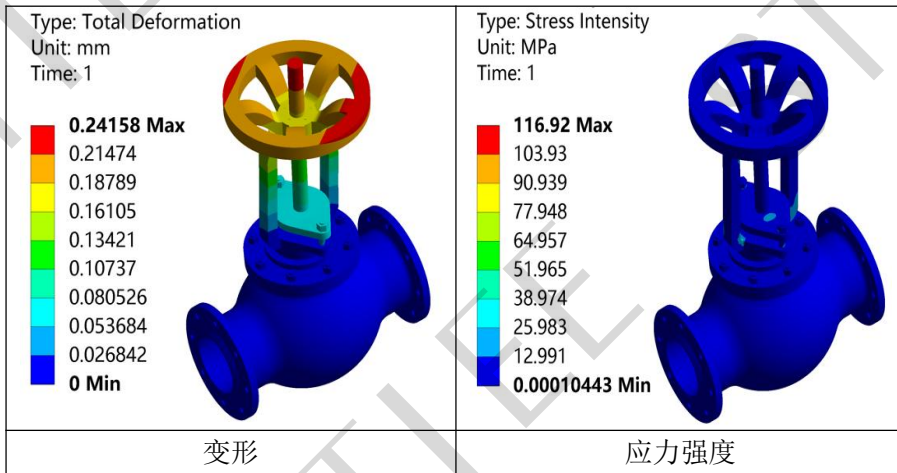


图 5 工况二

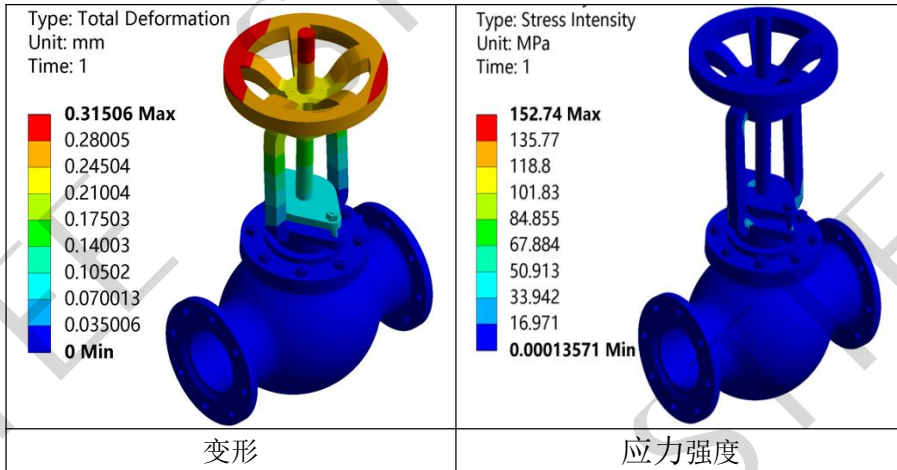


图 6 工况三

4、结果评定

根据 RCC-M 规范对截止阀中的承压部件进行结果评定，具体步骤是：根据上述分析结果确定应力分布的危险区域；然后在危险区域创建线性化路径进行应力线性化；最后将线性化后的应力分类后按照第三强度理论进行结果评定。见表 3 所示。

表 3 截止阀承压件应力结果评定

工况	名称	薄膜应力 (MPa)	应力限值 (MPa)	薄膜+弯曲应力 (MPa)	应力限值 (MPa)	评定结果
设计工况	阀体	5.0	121	6.31	181.5	通过
	阀盖	5.75	121	6.82	181.5	通过
	阀杆	0.69	175	1.13	262.5	通过
异常工况	阀体	8.63	133.1	9.70	199.6	通过
	阀盖	18.25	133.1	22.19	199.6	通过
	阀杆	2.79	192.5	3.26	288.7	通过
事故工况	阀体	11.16	242	12.63	290.4	通过
	阀盖	23.90	242	29.0	290.4	通过
	阀杆	4.13	350	6.33	420	通过

对于截止阀中的螺栓紧固件同时承受拉伸和剪切，因此其所受到的拉伸和剪切应力应满足下式要求：

$$\frac{f_t^2}{(F_{tb})^2} + \frac{f_v^2}{(F_{vb})^2} \leq 1$$

式中： f_t 为拉伸应力； f_v 为剪切应力； F_{tb} 为该工作温度下的许用拉应力； F_{vb} 为该工作温度下的许用剪应力。螺栓的应力结果评定下表 4 所示。

名称	工况	应力类别	应力结果 (MPa)	应力限值 (MPa)	评定结果
M16 螺栓	设计工况	f_t	0.25	292.8	通过
		f_v	0.022	122	通过
		$\frac{f_t^2}{(F_{tb})^2} + \frac{f_v^2}{(F_{vb})^2}$	7.62e-7 (无量纲)	1 (无量纲)	通过
	异常工况	f_t	50.84	292.8	通过
		f_v	3.76	122	通过
		$\frac{f_t^2}{(F_{tb})^2} + \frac{f_v^2}{(F_{vb})^2}$	0.031 (无量纲)	1 (无量纲)	通过
	事故工况	f_t	104.02	292.8	通过
		f_v	7.6	122	通过
		$\frac{f_t^2}{(F_{tb})^2} + \frac{f_v^2}{(F_{vb})^2}$	0.130 (无量纲)	1 (无量纲)	通过
M6 螺栓	设计工况	f_t	0.056	292.8	通过
		f_v	0.05	122	通过
		$\frac{f_t^2}{(F_{tb})^2} + \frac{f_v^2}{(F_{vb})^2}$	2.05e-7 (无量纲)	1 (无量纲)	通过
	异常工况	f_t	2.76	292.8	通过
		f_v	1.48	122	通过
		$\frac{f_t^2}{(F_{tb})^2} + \frac{f_v^2}{(F_{vb})^2}$	0.000236 (无量纲)	1 (无量纲)	通过

	事故工况	f_t	7.50	292.8	通过
		f_v	2.46	122	通过
		$\frac{f_t^2}{(F_{tb})^2} + \frac{f_v^2}{(F_{vb})^2}$	0.001063 (无量纲)	1 (无量纲)	通过

5、结论

本案例通过有限元数值模拟方法对核级截止阀进行抗震分析，在指定工况下，截止阀承压部件以及螺栓紧固件所受最大应力均小于运行情况下的应力限值，满足 RCC-M 规范要求；表明在该地震条件写结构能够保持其完整性。