



大型熔盐储罐动力特性及抗震分析方法研究

崔守杰¹, 王晓艳¹, 黄超超^{1,2}, 包世刚^{1,2}, 姜凯华^{1,2,3}, 李志军^{1,3}

(¹中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800; ²中国科学院大学, 北京 100049; ³钍基核裂变能全国重点实验室, 上海 201800)

摘要: 大型熔盐储罐作为钍基熔盐堆(thorium molten salt reactor, TMSR)储能与能量释放的核心设备, 其抗震性能直接影响整个系统的稳定性和经济性。为明确大型高温熔盐储罐在地震荷载下的动力响应特性及简化计算方法的适用性, 以TMSR系统隔离回路立式薄壁熔盐储罐为对象, 分别采用弹簧-质量方法、附加质量方法和声固耦合法建立三维有限元数值模型, 开展模态和地震反应谱计算, 对三种抗震分析方法得到的熔盐晃动频率、储罐振动频率及抗震评定结果进行了比较。结果表明: 弹簧-质量法与声固耦合法均可准确求解熔盐晃动频率, 所得地震应力结果基本相当; 声固耦合法计算的储罐水平自振频率与API 650规范吻合较好, 弹簧-质量法计算结果偏大, 附加质量法计算结果偏小。地震作用下, 三种方法的应力评定结果均满足规范要求且具有约50%的安全裕量, 其中声固耦合法最贴合实际, 但计算耗时最长, 附加质量法较其计算效率提升10.5倍, 且建模简单、收敛稳定。此外, 熔盐储罐竖向振动有效参与质量占比极低, 对整体抗震响应影响极小, 工程分析中可忽略竖向地震作用。综合建模难度、计算成本与工程效率, 本研究建议采用附加质量法进行抗震计算, 可为同类型高温熔盐储罐的抗震分析方法的选取提供工程指导依据。

关键词: 钍基熔盐堆; 高温熔盐储罐; 抗震分析; 弹簧-质量法; 附加质量法; 声固耦合法

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0405

中图分类号: TL 364+2

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 09-3654-11

Study on dynamic characteristics and seismic analysis method of large molten salt storage tanks

CUI Shoujie¹, WANG Xiaoyan¹, HUANG Chaochao^{1,2}, BAO Shigang^{1,2}, JIANG Kaihuang^{1,2,3},
LI Zhijun^{1,3}

(¹Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China; ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ³National Key Laboratory of Thorium-based Nuclear Fission Energy, Shanghai 201800, China)

Abstract: As the core equipment for energy storage and release within a thorium molten salt reactor (TMSR), large-scale molten salt tanks directly determine the stability and economic efficiency of the entire system. To clarify the dynamic response characteristics of large-scale, high-temperature molten salt tanks under seismic loads and the applicability of simplified calculation methods, a vertical thin-walled molten salt tank in the TMSR isolation loop was selected as the research object. Three-dimensional finite element models were developed using the spring-mass, added-mass, and acoustic-structure coupling methods to perform

收稿日期: 2026-05-13; 修改稿日期: 2026-05-27。

第一作者: 崔守杰 (1992—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为大型熔盐储罐抗震及高温结构完整性分析, E-mail: cuihsoujie@sianap.ac.cn; 通信作者: 王晓艳, 正高级工程师, 研究方向为熔盐堆高温结构完整性评定技术, E-mail: wangxiaoyan@sianap.ac.cn。

引用本文: 崔守杰, 王晓艳, 黄超超, 等. 大型熔盐储罐动力特性及抗震分析方法研究[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(9): 3654-3664.

Citation: CUI Shoujie, WANG Xiaoyan, HUANG Chaochao, et al. Study on dynamic characteristics and seismic analysis method of large molten salt storage tanks[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(9): 3654-3664.

modal analysis and seismic response spectrum calculations. Subsequently, the molten salt sloshing frequency, tank vibration frequency, and seismic evaluation results obtained using the three seismic analysis methods were compared. The results demonstrate that both the spring-mass and acoustic-structure coupling methods can accurately calculate the molten salt sloshing frequency with equivalent seismic stress results. The horizontal natural vibration frequency calculated using the acoustic-structure coupling method agrees well with the API 650 code, whereas the values calculated using the spring-mass and added-mass methods are overestimated and underestimated, respectively. Under seismic action, the stress evaluation results from all three methods meet the code requirements with a safety margin of approximately 50%. Although the acoustic-structure coupling method is the most realistic, it requires the longest computation time. The added-mass method is 10.5 times more efficient and provides simpler modeling and more stable convergence. In addition, the vertical vibration effective mass participation ratio of molten salt tanks is extremely low, negligibly affecting the overall seismic response. Therefore, the vertical seismic action can be ignored in engineering analysis. Considering modeling difficulty, computational cost, and engineering efficiency, the added-mass method is recommended for seismic analysis. The findings of this study can serve as a reference for selecting seismic analysis methods for similar high-temperature molten salt tanks.

Keywords: thorium molten salt reactor; high-temperature molten salt storage tank; seismic analysis; spring-mass method; added mass method; acoustic-structure coupling method

大型熔盐储罐作为钍基熔盐堆(thorium molten salt reactor, TMSR)作为第四代先进核反应堆的典型堆型,凭借固有安全性高、燃料循环灵活、能量利用效率高等优势,已成为核能领域的研究热点与发展重点^[1-2]。大型熔盐储罐通常采用立式薄壁圆筒结构,地震荷载作为突发极端动态载荷,极易引发储罐整体失稳、液体剧烈晃动甚至结构破裂,导致熔盐泄漏、环境污染等重大安全事故。因此,开展大型高温熔盐储罐的动力特性分析与抗震分析研究具有重要的工程意义与现实价值^[3]。

目前,大型高温熔盐储罐的抗震计算尚无针对性的标准,核级设备抗震分析主流规范(RCC-M、ASME等)尚未明确熔盐介质晃动问题的具体计算方法;GB 50267—2019《核电厂抗震设计标准》指出,储液容器抗震计算应同时考虑脉冲压力与对流压力引起的水平动液压力和容器壁柔度的影响,并分别给出了运行安全地震动和极限安全地震动下考虑脉冲效应和晃动效应的阻尼比,但并未明确压力的计算方法。对于熔盐晃动频率,以下规范均给出了基于Housner模型^[4-5]获得的晃动基本周期公

式,仅与储罐外径和液位高度有关,与密度、弹性模量等其他参数无关;对于罐液耦合振动频率,以下规范均给出了基于Haroun-Housner模型^[6]获得的罐液耦合基本周期公式,但国内工业储油罐规范GB 50341—2014《立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范》、GB 50761—2018《石油化工钢制设备抗震设计标准》仅适用于结构材质为碳钢或低合金钢、介质为石油的罐液耦联振动频率,无法直接适用于其他介质、其他材质储罐基本频率计算。API 650—2025《焊接石油储罐》给出适用于其他介质、其他材质储罐的罐液耦合振动频率,可作为熔盐储罐振动特性的重要参考。

储液结构的抗震分析方法主要有单/双向流固耦合模型^[7-8]和简化模型。单/双向流固耦合模型计算耗时长、计算量大,难以应用于工程实际设计。对于储液容器脉冲和对流效应的简化计算模型有以下3种。①附加质量模型,基于等效惯性原理,将液体的脉冲效应简化为均布质量附加于罐壁。宝鑫等人^[9]针对普通钢筋混凝土环形水箱研究发现,改进附加质量法精度最优,60%均布附加质量法精度

略低但简便实用，100%均布法偏差较大不宜采用。

②弹簧-质量模型，利用弹簧-质量系统模拟液体的对流晃动效应，脉冲效应直接附加到罐壁，建立三维弹簧-质量模型。杜坤等人^[10]开展核电厂大型储罐抗震有限元分析，所得晃动频率与规范理论值高度吻合，验证了该方法的合理性，但未进一步对比储液耦合频率和抗震结果。

③流体单元流固耦合模型（声固耦合模型），将罐内介质采用势流体单元（声学单元）或流体单元建模，通过结构与流体交界面节点实现耦合关联，获得结构的振动特性和响应。文献[11-14]采用流体单元流固耦合模型数值模拟结合试验揭示了储液罐振动特性与地震响应规律。文献[15-24]基于声固耦合法对储液容器进行了振动特性研究；罗欢等人^[25]对空罐和不同液位下的核电厂日用油箱采用声固耦合法进一步开展抗震分析。目前采用声固耦合法对高温熔盐储罐进行抗震计算相关研究的文献鲜少。

针对以上方法的对比，已有对比研究结论不一致。楚士礼^[26]对常温立式钢制储水罐的研究表明：弹簧-质量模型较流体单元流固耦合模型计算结果偏于安全，且效率更高。张兆龙等人^[27]针对常温立式钢制储水罐的研究表明，附加质量模型较流体单元流固耦合模型，结果吻合良好且计算效率更高。刘奥博等人^[28]对混凝土重力坝的研究指出，在坝-水相互作用中采用声固耦合模型显著优于附加质量模型。然而，上述结论是否适用于高温熔盐介质尚不明确。

因此，本工作以大型高温熔盐储罐为对象，系统对比了弹簧-质量法、附加质量法与声固耦合有限元法在熔盐介质下的适用性。通过模态分析与地震反应谱响应计算，评估三种方法在晃动频率、流固耦合频率及应力响应上的差异，提出兼顾安全性与实用性的工程建议。结果可为同类高温熔盐储罐的抗震设计、方法选取与规范完善提供参考依据。研究技术路线如图 1 所示。

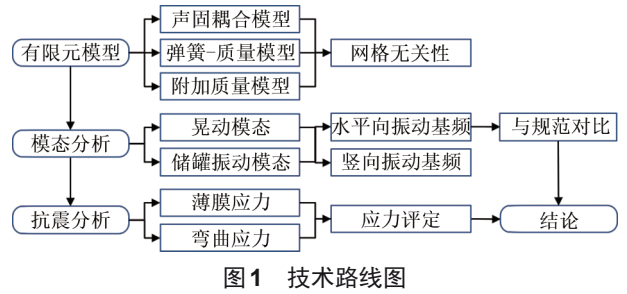


Fig. 1 Technology roadmap

1 结构介绍

选取中国科学院上海应用物理研究所设计的大型熔盐储罐为研究对象，结构示意图见图 2。其核心几何与材料参数如下：储罐罐顶形式采用固定顶，储罐外径 $D=11.2\text{ m}$ ，罐壁圆筒高度 $H=12.5\text{ m}$ ，熔盐高度 10 m ，罐底厚度为 0.044 m ，各层壁厚参数见表 1，每层高度 2.5 m 。储罐结构材料为 347H 不锈钢，运行温度为 700°C ，该温度下 347H 的弹性模量 $E=1.4\times10^{11}\text{ Pa}$ ，泊松比 $\nu=0.31$ ，密度 $\rho_s=8030\text{ kg/m}^3$ 。介质为氯化盐， 700°C 下的密度 $\rho_f=1745.52\text{ kg/m}^3$ 。

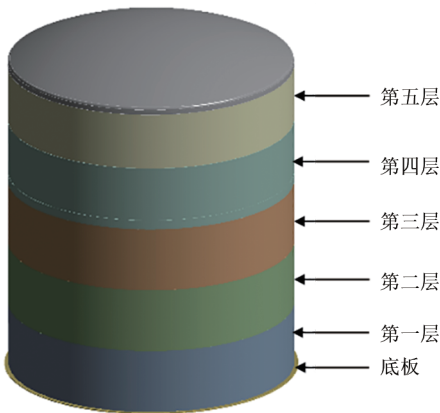


图2 熔盐储罐结构示意图
Fig. 2 Structural schematic diagram of molten salt storage tank

表 1 大型熔盐储罐各层壁厚参数
Table 1 Parameters of the wall thickness of each layer for large-scale molten salt storage tanks

层数	厚度/mm
第一层	70.5
第二层	55.5
第三层	44.5
第四层	32.5
第五层	21.5

2 有限元分析模型与方法

本工作重点对比了三种抗震计算方法在 700°C 高温环境下的适用性与差异。有限元计算中仅引入 700°C 下材料的恒定弹性模量，暂未计及材料非线性、蠕变及边界弱化等因素。这一简化基于工程中抗震与高温蠕变分析解耦处理的常规做法，在此前提下，本工作结论对方法间相对优劣的评价仍具有

参考价值。

(1) 弹簧-质量模型

根据 Housner 力学模型^[2-3]计算出脉冲质量及其重心、晃动质量及其重心、弹簧刚度等参数如表 2 所示。不等厚罐壁按照表 1 的厚度，采用高阶壳单元 SHELL281，底板采用实体单元 SOLID187，晃动液体质量单元采用 MASS21 单元，弹簧采用 COMBIN14 单元，一端与质量单元连接，另一端与储罐筒壁上的节点连接。对于冲击液体，将其质量等效分布到储罐罐壁上，储罐底部采用固定约束，晃动液体质量单元约束竖直方向平动自由度和

所有转动自由度。计算分析的三维有限元模型及载荷与边界条件，如图 3(a)所示，为方便展示内部情况，采用 1/2 剖面展示。

表 2 弹簧-质量模型计算参数

Table 2 Parameters of spring-mass model	
参数	值
总质量/kg	1.719×10^6
脉冲质量/kg	1.299×10^6
脉冲质量重心/m	3.936
晃动质量/kg	4.415×10^5
晃动质量重心/m	7.170
弹簧刚度/(N/m)	7.076×10^5

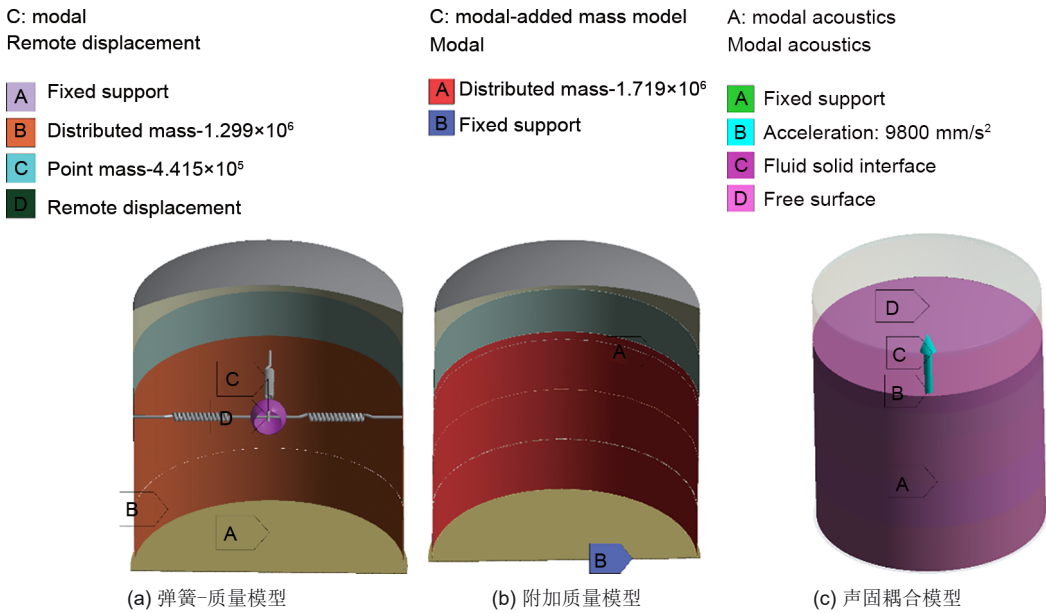


图 3 计算模型及载荷与边界条件
Fig. 3 Model and loads & boundary conditions

(2) 附加质量模型

附加质量方法计算模型仅将全部的熔盐质量施加于罐壁，而不考虑熔盐的晃动效应，即图 3(a)中 B 部分的均布质量 $1.299\times10^6\text{ kg}$ 变为表 2 中的总质量 $1.719\times10^6\text{ kg}$ ，同时忽略晃动质量和弹簧，计算模型如图 3(b)所示。

(3) 声固耦合模型

采用声固耦合法建立大型储液罐的三维有限元模型，不等厚罐壁按照表 1 的厚度，采用高阶壳单元 SHELL281，底板采用实体单元 SOLID187，流体域采用 FLUID220 单元建模，该单元基于无黏、可压缩、均匀理想流体假设，满足小振幅线性声学波动方程，并通过流固界面的位移与压力连续条件实现与罐

壁结构的耦合分析。材料赋予声速及熔盐密度、流体单元与固体单元的交界面节点耦合，并添加自由液面和重力加速度来模拟液体的晃动，流体域和结构域网格均采用六面体结构化网格，计算分析的三维有限元模型及载荷与边界条件，如图 3(c)所示。

(4) 网格无关性验证

对三种有限元分析模型进行网格划分，生成六面体单元，为验证本工作所选网格尺寸的准确性，在计算分析之前进行网格无关性验证，取阻尼比为 2% 情况的反应谱进行抗震计算，取三种不同的壳单元尺寸下最大等效应力的相对误差作为评判依据，结果如表 3 所示，壳单元尺寸从 450 mm 减小到 350 mm，最大等效应力单调递增，且误差均小于 1%，

表3 网格无关性验证

Table 3 Grid independence verification

参数	弹簧质量方法			附加质量方法			声固耦合法		
壳单元尺寸/mm	450	400	350	450	400	350	450	400	350
最大等效应力/MPa	47.66	47.94	48.17	59.44	58.85	59.39	47.82	50.19	50.30

可认为计算结果达到收敛，故网格尺寸满足无关性验证要求。因此，选用的壳单元尺寸为400 mm。

3 分析结果与讨论

3.1 模态分析

采用上述三种抗震分析模型分别计算结构的固有频率与振型，计算发现储罐局部振型较多，振型对结构动力响应的主导贡献可通过某阶振型参与系数与所有阶振型参与系数最大值的比值判定，比值越接近1，贡献越显著，熔盐与储罐主要振动模态如图4~5所示。

图4展示了熔盐的晃动模态示意图，弹簧-质量法与声固耦合法计算得熔盐第一阶水平晃动频率分别为0.2849 Hz和0.2854 Hz，与API 650—2025规范中计算的晃动频率（0.2868 Hz，仅与储罐外径和熔盐高度有关）的相对误差分别为0.66%和0.49%，均小于1%，结果吻合较好，证明了本工作弹簧-质量法和声固耦合模型能够准确模拟储罐内熔盐的对流晃动效应。进一步对比可知，弹簧-质量法仅能计算储罐结构的水平晃动模态，熔盐的晃动仅能通过弹簧水平振动来体现；附加质量法无法得到熔盐的晃动频率；声固耦合法可同时获得水平与竖向晃动模态，竖向模态频率0.4123 Hz，并清晰呈现结构与流体的变形分布特征，为后续流固耦合抗震分析提供了完整的模态基础。

图5为三种抗震分析方法计算获得的储罐-熔盐耦合振动模态示意图。由图可知，弹簧-质量法、附加质量法与声固耦合法计算得到的储罐-熔盐耦合振动频率分别为14.08 Hz、12.52 Hz和13.19 Hz。弹簧-质量法将晃动质量简化为随着弹簧水平晃动的质点，得到储罐与熔盐的耦合振动；附加质量法通过将全部熔盐质量等效附加到罐壁，得到储罐-熔盐的振动，仅能得到罐壁的弯曲变形，无法得到流体的变形特征；声固耦合法可同时获得罐壁与熔盐的耦合变形分布，罐壁弯曲的同时，流体也呈现出相应的流动变形特征。

图6为三种抗震分析方法计算得到的储罐-熔

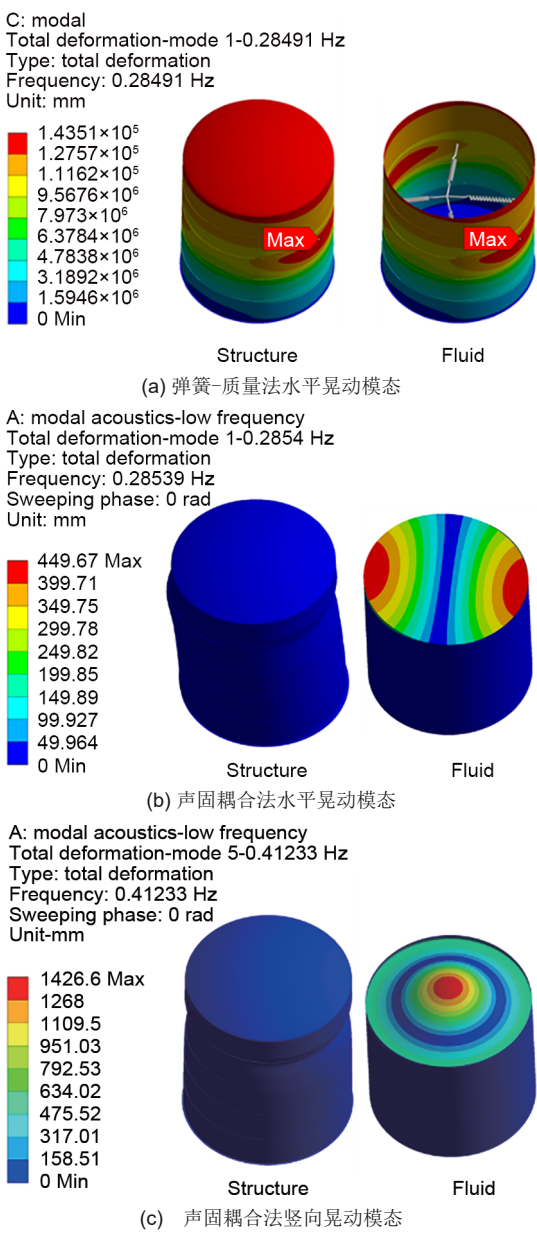


图4 晃动模态示意图

Fig. 4 Schematic of sloshing modes

盐竖向耦合振动模态示意图。由图可得，弹簧-质量法、附加质量法与声固耦合法计算得到的竖向晃动频率分别为11.00 Hz、14.56 Hz和14.82 Hz。弹簧-质量法与附加质量法均仅能得到罐壁的竖向振动模态；声固耦合法可同时获得罐壁与熔盐的耦

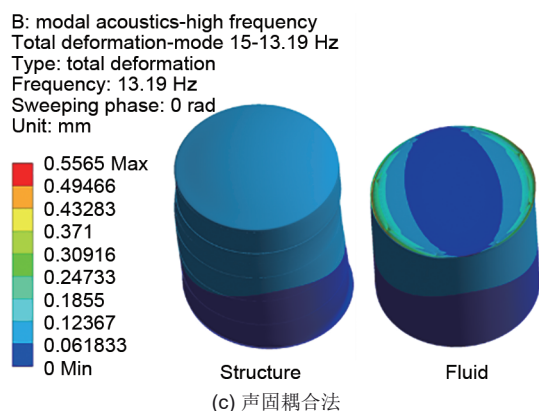
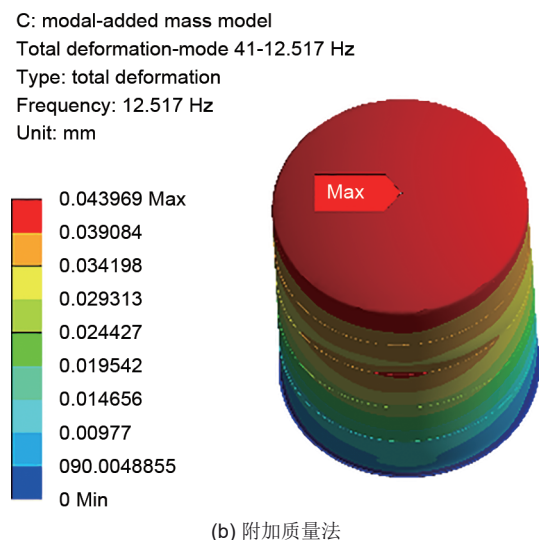
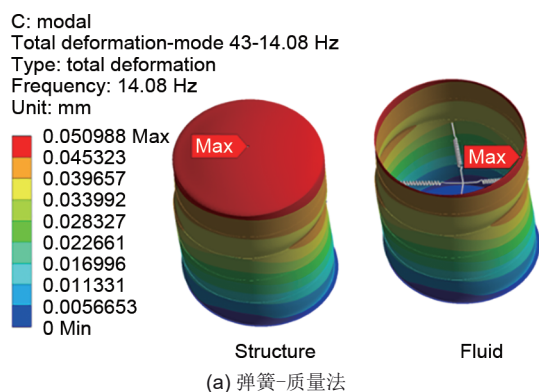


图 5 储罐-熔盐耦合振动模式示意图

Fig. 5 Schematic of tank-molten salt coupled vibration modes

合变形分布，罐壁径向鼓胀的同时，流体也呈现出明显的竖向声压型变形，能够真实反映竖向地震作用下储罐-熔盐系统的动力特性。

图 7 为三种抗震分析方法计算得到的储罐-熔盐水平与竖向耦合振动频率对比结果。①水平方向振动频率，与 API 650—2025 规范相比，声固耦合

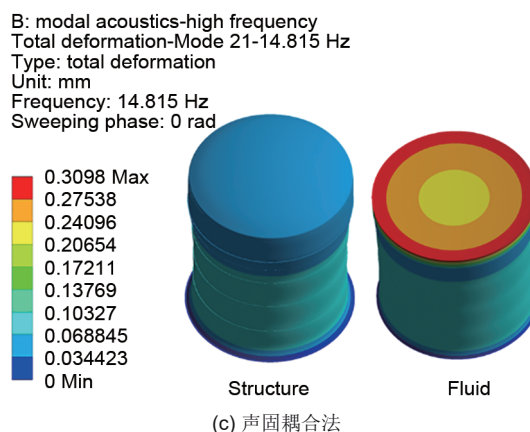
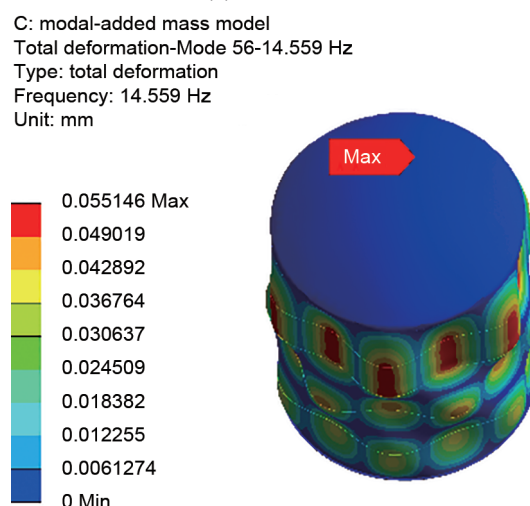
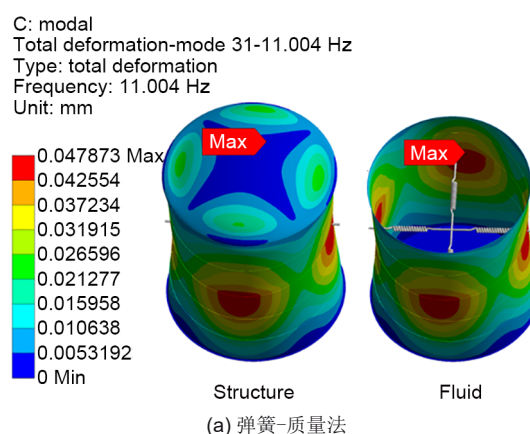


图 6 储罐竖向振动模式示意图

Fig. 6 Schematic of tank vertical vibration modes

法同时考虑了流体的质量效应与流固耦合刚度效应，与 API 650—2025 规范中计算的罐液耦合频率（与熔盐密度、储罐弹性模量相关）高度吻合，误差仅为+0.30%，结果可靠；弹簧-质量法因简化模型的重心位置、简化质量等因素导致频率偏高，误差为+7.07%；附加质量法考虑全部熔盐质量，简化

质量偏大, 导致频率偏低, 误差为-4.79%。②竖向方向振动频率, API 650—2025 规范并未给出竖向振动频率公式, 竖向频率采用计算相对准确的声固耦合法作为基准来对比, 弹簧-质量法的频率误差高达-25.51%, 远大于附加质量法的-1.75%。这是因为弹簧-质量法忽略了其竖向刚度, 导致频率大幅降低; 附加质量法考虑全部熔盐惯性质量, 与实际竖向振动有效质量匹配度高, 因而误差较小。

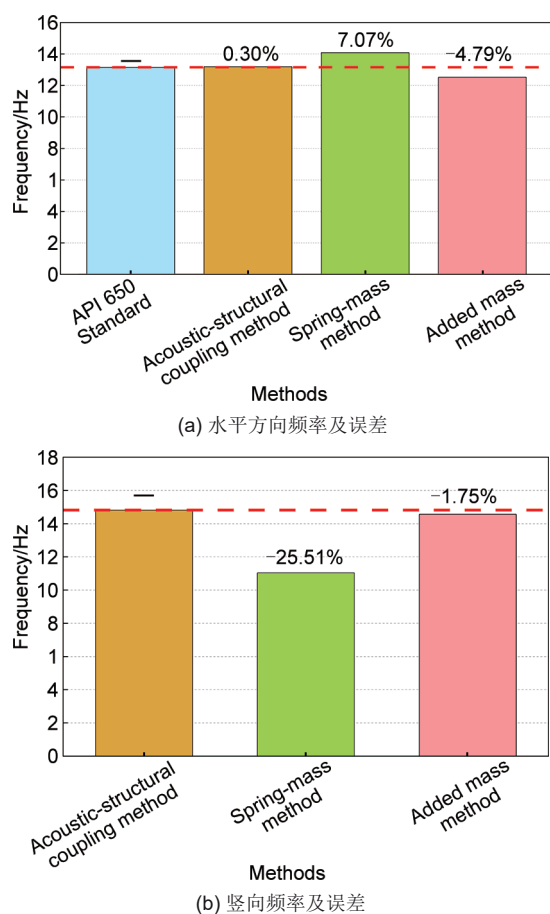


图7 储罐振动频率对比

Fig. 7 Comparison of tanks frequencies vibration

从模态计算结果可知, 在熔盐晃动频率计算方面, 弹簧-质量法与声固耦合法所得结果均与规范值吻合较好, 计算精度相当; 在储罐结构振动频率求解方面, 声固耦合法可同时考虑流固间的惯性质量与耦合刚度效应, 能够真实表征储罐-熔盐系统的动力耦合特性, 其计算精度与适用性均显著优于附加质量法。

3.2 抗震分析

分别采用以上三种抗震分析方法来计算熔盐储罐在地震作用下的响应。根据 GB 50267—2019

《核电厂抗震设计标准》, 液体的阻尼比取 0.5%, 结构的阻尼比取 2%, 基于设计基准地震动计算得到不同阻尼比下的楼层谱, 分别选取储罐所处楼层阻尼比为 0.5% 和 2% 下的地震动反应谱, 结果如图 8 所示。抗震计算采用 SRSS 法振型组合方法, 采用 von Mises 等效应力作为应力响应评价指标。

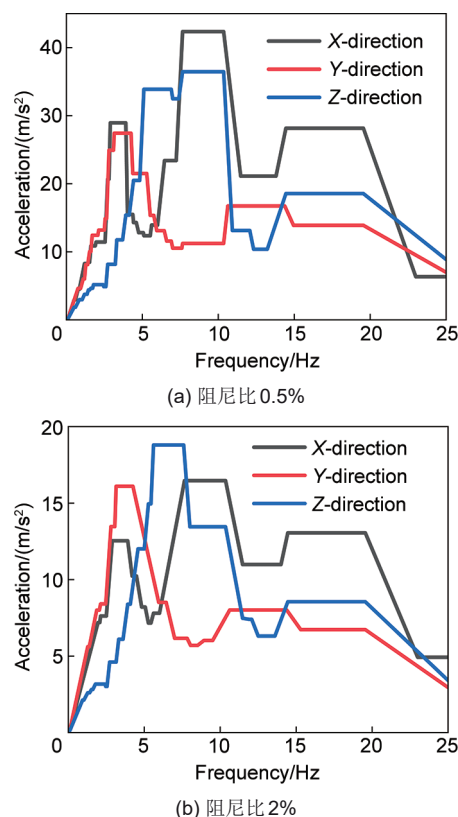


图8 地震动反应谱

Fig. 8 Seismic response spectrum

按照 GB 50267—2019《核电厂抗震设计标准》中 8.3.7 设备抗震验算的应力限值和设计限值可采用该标准附录 L 的规定。附录 L 中给出的应力限值 $P_m \leq 1.1S_m$, P_m 或 $P_L + P_b \leq 1.65S_m$, 700℃ 下 347H 材料的许用应力为 31.8 MPa, 按照规范分别提取三种方法计算得到的储罐结构的薄膜应力和弯曲应力 (图 9~12), 并据此重新进行了评定。

从应力云图 9~12 可以看出, 附加质量法将熔盐的全部质量附加到罐壁, 仅考虑熔盐的脉冲效应, 不考虑熔盐的晃动效应, 故无法单独获得熔盐晃动引起的储罐的应力。声固耦合法对全高度 (10 m) 熔盐进行建模, 考虑了熔盐与罐壁的流固耦合作用, 故储罐应力影响范围更广; 而弹簧-质量法与附加质量法

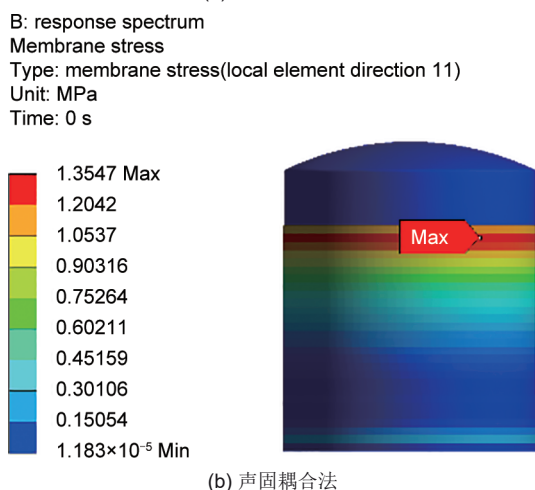
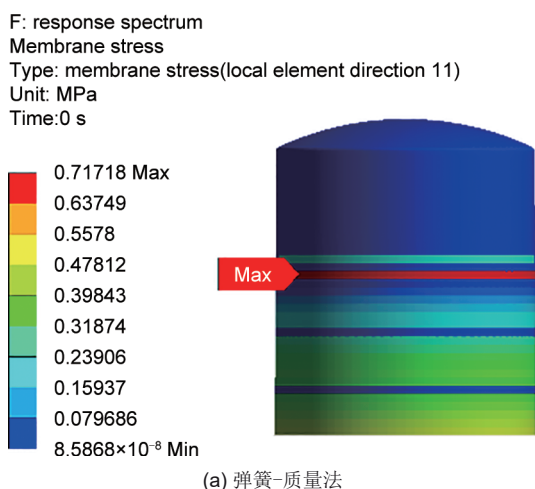


图9 地震作用下熔盐晃动引起的储罐薄膜应力云图
Fig. 9 Membrane stress contours of tank caused by molten salt sloshing under seismic action

进行了简化, 故等效作用高度偏低、流体耦合作用范围受限。同时计算中发现竖直方向的有效参与质量很小, 声固耦合法考虑和不考虑竖向的最大应力仅相差 0.03 MPa, 故竖向地震作用下的响应可忽略。

对于熔盐晃动引起的应力 (图9、图10), 声固耦合法计算的最大薄膜应力位于最高液位 (10 m) 附近; 而弹簧-质量法因晃动质心高度偏低 (7.17 m) 且弹簧仅水平方向作用、晃动效应较弱, 导致最大薄膜应力位置下移、数值偏小。弯曲应力方面, 弹簧-质量法计算结果高于声固耦合法, 因其简化近似悬臂梁。

对于罐-熔盐耦合振动引起的应力 (图11、图12), 三种方法的最大弯曲应力均出现在罐体根部与底板的连接位置。其中附加质量法将全部质量作为脉冲质量直接施加于罐壁, 类似悬臂梁受集中

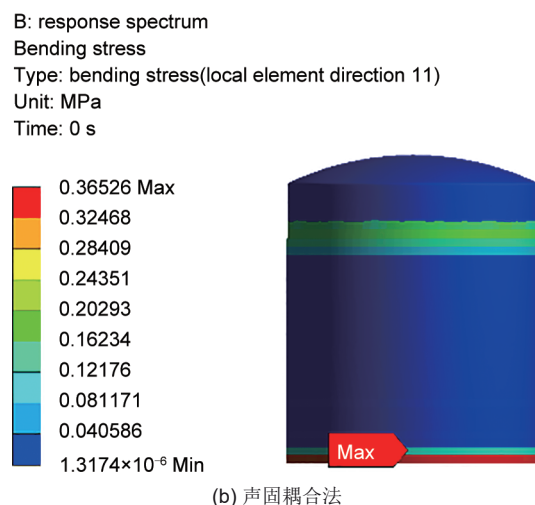
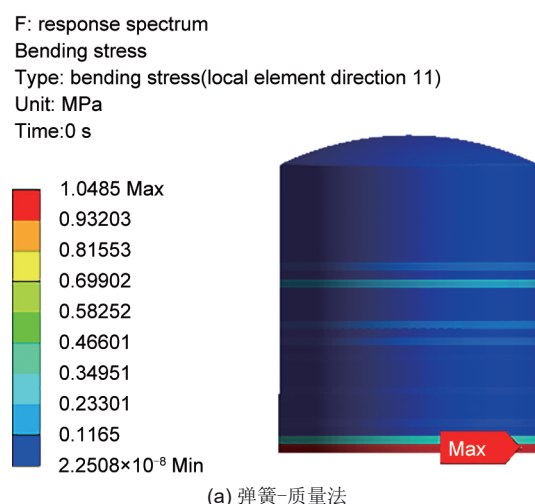
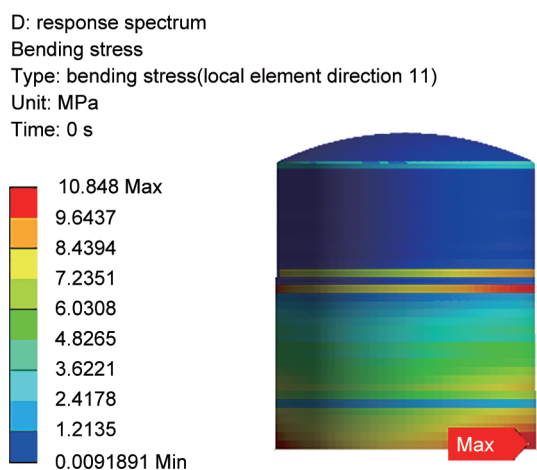


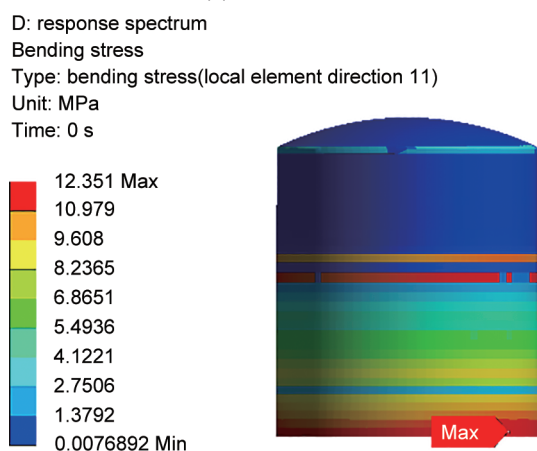
图10 地震作用下熔盐晃动引起的储罐弯曲应力云图
Fig. 10 Bending stress contours of tank caused by molten salt sloshing under seismic action

质量作用, 故根部弯曲应力最大 (27.175 MPa); 弹簧-质量法次之 (23.904 MPa); 声固耦合法最小 (9.921 MPa), 最符合实际。薄膜应力方面, 弹簧-质量法和附加质量法分别在弹簧作用位置及脉冲质量作用最高位置 (均接近第三、第四层罐壁之间) 出现较大薄膜应力; 液位增大或者减小, 薄膜均减小。而声固耦合法计算所得的最大薄膜应力位于液位高度的中部, 随着液位向两侧 (升高或降低) 变化, 薄膜应力均逐渐减小。这也说明, 熔盐对罐壁具有一定的支承作用, 使得罐壁受力更接近连续支撑梁而非悬臂梁, 因此最大薄膜应力并不出现在根部, 而是位于液位中部。

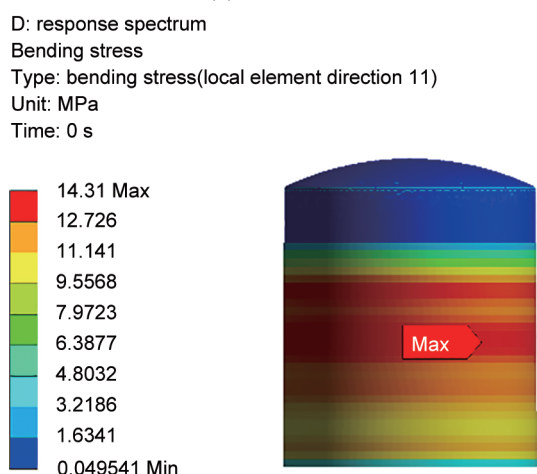
按照规范对储罐结构进行应力评定, 评定结果如表5所示, 从表中可以看出, 三种分析方法计算



(a) 弹簧-质量法



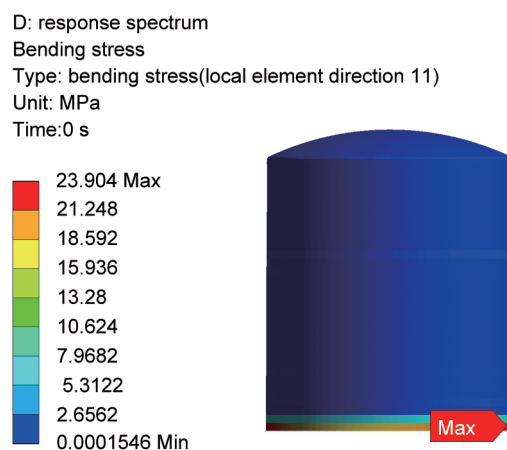
(b) 附加质量法



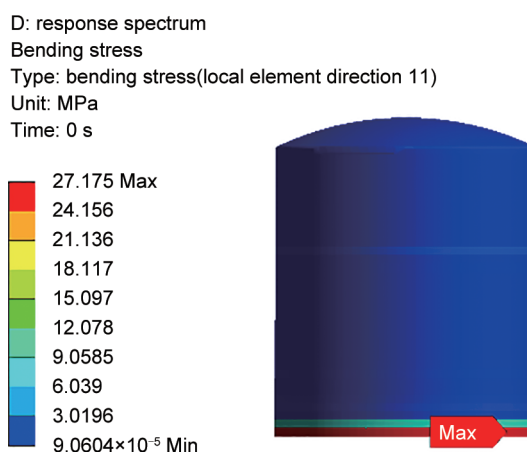
(c) 声固耦合法

图 11 地震作用下罐液耦合振动引起的薄膜应力云图
Fig. 11 Membrane stress contours of tank-liquid coupled vibration under seismic action

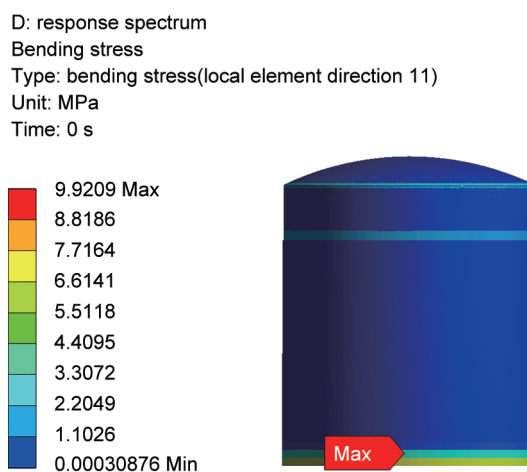
结果均满足规范限值要求, 相较于声固耦合法, 弹簧质量法和附加质量法的 P_m 值分别偏低 26.1% 和 21.1%, P_L+P_b 值分别偏高 142.47% 和 164.14%,



(a) 弹簧-质量法



(b) 附加质量法



(c) 声固耦合法

图 12 地震作用下罐液耦合振动引起的弯曲应力云图
Fig. 12 Bending stress contours of tank-liquid coupled vibration under seismic action

均具有 50% 左右的安全裕量, 因此不会导致设计冗余或成本增加。从计算效率来看, 在相同硬件条件下, 弹簧质量法耗时 168 s, 声固耦合法耗时

483 s，附加质量法耗时 46 s，较声固耦合法提升 10.5 倍，且建模简单、收敛稳定。综合来看，可作为工程计算的优选方法。

表 5 应力评定结果		单位: MPa					
Table 5 Stress evaluation results		Unit:MPa					
方法	$P_m < 1.1S_m$			$P_L + P_b < 1.65S_m$			评定结果
	$(P_m)_{max}$	限值	$(P_m)_{max}/$ 限值	$(P_L + P_b)_{max}$	限值	$(P_L + P_b)_{max}/$ 限值	
弹簧-质量法	11.57	34.98	33.08%	24.95	52.47	47.55%	通过
附加质量法	12.35	34.98	35.31%	27.18	52.47	51.80%	通过
声固耦合法	15.66	34.98	44.77%	10.29	52.47	19.61%	通过

3 结 论

本工作以钍基熔盐堆隔离回路中的大型熔盐储罐为研究对象，采用弹簧-质量法、附加质量法和声固耦合法，开展模态分析与地震反应谱动力响应计算，系统探究三种抗震分析方法在熔盐储罐振动特性与抗震应力响应中的计算差异，得到主要结论如下。

（1）模态分析结果表明：弹簧-质量法与声固耦合法均可较准确求解熔盐晃动基频（与 API 650—2025 规范的相对误差均小于 1%），其中声固耦合法还可同时获得熔盐竖向振动频率；在储罐水平自振频率计算中，与 API 650 规范相比，声固耦合法精度最优，附加质量法偏小，相对误差为-4.79%，弹簧-质量法偏大，相对误差为+7.07%。

（2）地震荷载作用下三种抗震分析方法的计算结果均满足规范要求，且均具有约 50% 的安全裕量。声固耦合法考虑罐壁与熔盐间的流固耦合作用，更贴合实际，计算结果最为合理、准确，但该方法需建立全域实体模型，网格数量大，且涉及复模态求解，对计算机内存与算力资源消耗显著。而附加质量法建模简单、收敛稳定，计算效率较声固耦合法提升 10.5 倍。

（3）熔盐储罐竖向振动对应的有效参与质量占比较低，其所激发的地震动响应幅值有限，对结构整体抗震控制影响较小，工程抗震分析中可适当忽略竖向地震作用。

综合建模难度、计算成本、求解精度与安全储备要求，本研究推荐采用附加质量法开展高温熔盐储罐抗震保守计算，可在满足工程安全设计要求的同时显著提升计算效率。

参 考 文 献

[1] 周兴泰, 李志军, 陆燕玲, 等. 钍基熔盐堆材料发展战略[J]. 中国工程科学, 2019, 21(1): 29-38. DOI:10.15302/J-SSCAE-2019.01.005.
ZHOU X T, LI Z J, LU Y L, et al. Development strategy for thorium molten salt reactor materials[J]. Engineering Science, 2019, 21 (1): 29-38. DOI:10.15302/J-SSCAE-2019.01.005.

[2] 徐洪杰, 戴志敏, 蔡翔舟, 等. 钍基熔盐堆和核能综合利用[J]. 现代物理知识, 2018, 30(4): 25-34.
XU H J, DAI Z M, CAI X Z, et al. Thorium-based molten salt reactor and comprehensive utilization of nuclear energy[J]. Modern Physics, 2018, 30(4): 25-34.

[3] SHI C X, YANG W M. Analysis of modal and seismic property of oil storage tanks[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 527: 95-99. DOI:10.4028/www.scientific.net/amm.527.95.

[4] HOUSNER G W. The dynamic behavior of water tanks[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1963, 53(2): 381-387. DOI:10.1785/bssa0530020381.

[5] American Society of Civil Engineers. Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary[M]. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2000 DOI: 10.1061/9780784404331.

[6] HAROUN M A. Vibration studies and tests of liquid storage tanks [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1983, 11(2): 179-206. DOI:10.1002/eqe.4290110204.

[7] 张春龙. LNG 储罐抗震性能数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.
ZHANG C L. The numerical simulation of seismic performance on LNG storage tank[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2015.

[8] 彭景. 储液罐的流固耦合分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.

[9] 宝鑫, 刘晶波, 杨悦, 等. 核电工程环形水箱动力分析的附加质量法比较研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(9): 130-139. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2018.09.015.
BAO X, LIU J B, YANG Y, et al. Comparative study on added mass methods for dynamic analysis of annular water tank in nuclear engineering[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39 (9): 130-139. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2018.09.015.

[10] 杜坤, 初起宝, 梁明邦, 等. 考虑液晃效应的大型储罐有限元抗震分析方法[J]. 核动力工程, 2016, 37(6): 58-61. . DOI: 10.13832/j.jnpe.2016.06.0058
DU K, CHU Q B, LIANG M B, et al. FEM seismic analysis method of large storage tank in consideration of liquid sloshing[J]. Nuclear Power Engineering, 2016, 37(6): 58-61. . DOI:10.13832/j.jnpe.2016.06.0058

[11] 孙建刚, 崔利富, 罗东雨. 大型 LNG 储罐抗震与隔震分析及试验 [M]. 北京: 科学出版社, 2019.
SUN J G, CUI L F, LUO D Y. Seismic and isolation analysis method and test of large LNG storage tank[M]. Beijing: Science Press, 2019.

[12] 周利剑, 黄兢, 王向英, 等. 内罐影响下 LNG 储罐外罐地震响应分析 [J]. 世界地震工程, 2012, 28(1): 21-25. DOI:10.3969/j.issn.1001-4837.2012.01.004.
ZHOU L J, HUANG J, WANG X Y, et al. Seismic response

- analysis of LNG storage tank wall under influence of inner tank[J]. *World Earthquake Engineering*, 2012, 28(1): 21-25. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4837.2012.01.004.
- [13] 王振, 孙建刚, 唐立强. 立式浮放储罐三维地震台模型试验分析[J]. *东北林业大学学报*, 2006, 34(4): 78-80, 102. DOI: 10.3969/j.issn.1000-5382.2006.04.029.
- WANG Z, SUN J G, TANG L Q. Analysis of three dimensional shaking table test of vertical unanchored storage tank model[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2006, 34(4): 78-80, 102. DOI: 10.3969/j.issn.1000-5382.2006.04.029.
- [14] 陈志平. 大型非锚固储油罐应力分析与抗震研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- CHEN Z P. Stress analysis and aseismatic research of large unanchored oil storage tanks[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [15] 潘露燕, 朱翔, 李天匀, 等. 考虑晃动效应时充液圆柱壳的振动特性[J]. *中国舰船研究*, 2019, 14(S1): 126-134.
- PAN L Y, ZHU X, LI T Y, et al. Vibration characteristics of a fluid-filled cylindrical shell considering sloshing effect[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2019, 14(S1): 126-134.
- [16] 杨鸣, 王辉, 段玉康, 等. 基于声-固耦合算法的储液容器湿模态分析[J]. *四川兵工学报*, 2015, 36(5): 152-154. DOI: 10.11809/scbgxb.2015.05.039.
- YANG M, WANG H, DUAN Y K, et al. Wet mode analysis of liquid storage containers based on acoustic-structure coupling method[J]. *Journal of Sichuan Ordnance*, 2015, 36(5): 152-154. DOI: 10.11809/scbgxb.2015.05.039.
- [17] 潘传禹, 李兆慈, 汪翔翔, 等. 基于声固耦合算法的 LNG 储罐的内罐湿模态分析[J]. *当代化工*, 2022, 51(11): 2662-2667. DOI: 10.3969/j.issn.1671-0460.2022.11.030.
- PAN C Y, LI Z C, WANG C X, et al. Wet modal analysis of inner wall of LNG tank based on acoustic-structure coupling algorithm[J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2022, 51(11): 2662-2667. DOI: 10.3969/j.issn.1671-0460.2022.11.030.
- [18] 丁多亮, 朱幼君, 葛磊. 核电厂储液容器抗震鉴定方法研究[J]. *发电设备*, 2020, 34(5): 339-343.
- DING D L, ZHU Y J, GE L. Study on seismic qualification methods for reservoirs in nuclear power plants[J]. *Power Equipment*, 2020, 34(5): 339-343.
- [19] 崔双双, 何青, 李京浩, 等. 太阳能热发电系统熔盐储罐模态特性分析[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(10): 124-128. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2019-1003.
- CUI S S, HE Q, LI J H, et al. Modal analysis of molten salt storage tank in solar thermal power system[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2021, 42(10): 124-128. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2019-1003.
- [20] 胡会朋, 卢丙举, 秦丽萍. 预应力和流固耦合效应对水下壳结构振动特性影响研究[J]. *舰船科学技术*, 2017, 39(8): 47-50. DOI: 10.3404/j.issn.1672-7649.2017.08.010.
- HU H P, LU B J, QIN L P. The study of effects of pre-stress and fluid-solid interaction effect on vibration properties of underwater shell structures[J]. *Ship Science and Technology*, 2017, 39(8): 47-50. DOI: 10.3404/j.issn.1672-7649.2017.08.010.
- [21] 薛杰, 何尚龙, 杜大华, 等. 充液容器流固耦合模态仿真分析研究[J]. *火箭推进*, 2015, 41(1): 90-97. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9374.2015.01.014.
- XUE J, HE S L, DU D H, et al. Study on fluid-structure coupling modal simulation of liquid filling container[J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2015, 41(1): 90-97. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9374.2015.01.014.
- [22] 陈炜彬, 段浩, 王云. 基于声固耦合算法的发射模拟试验承压结构湿模态分析[J]. *水下无人系统学报*, 2017, 25(5): 365-370. DOI: 10.3969/j.issn.1006-446X.2004.07.011.
- CHEN W B, DUAN H, WANG Y. Wet modal analysis of pressurized structure in launcher simulation experiment based on sound-structure coupling algorithm[J]. *Journal of Unmanned Undersea Systems*, 2017, 25(5): 365-370. DOI: 10.3969/j.issn.1006-446X.2004.07.011.
- [23] 姚煜中. 充液管道动力学建模与振动特性分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- YAO Y Z. Analysis of fluid-filled pipe dynamic modeling and vibration characteristic[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.
- [24] 丁霄莉, 杜保存, 徐超, 等. 50MW 光热电站非锚固式高温熔盐储罐的模态分析[J]. *动力工程学报*, 2026, 46(2): 133-138.
- DING X L, DU B C, XU C, et al. Modal analysis of the unanchored high-temperature molten salt storage tank for a 50 MW concentrated solar power plant[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2026, 46(2): 133-138.
- [25] 罗欢, 韩娟, 陈雪瑶, 等. 基于声-固耦合算法考虑液体晃动的日用油箱的抗震分析[J]. *科技创新导报*, 2022, 19(4): 10-13. DOI: 10.16660/j.cnki.1674-098X.2202-5640-7593.
- LUO H, HAN J, CHEN X Y, et al. Seismic analysis of daily fuel tank considering liquid sloshing based on acoustic-structure coupling algorithm[J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2022, 19(4): 10-13. DOI: 10.16660/j.cnki.1674-098X.2202-5640-7593.
- [26] 楚士礼. 基于附加质量法的大型储罐群体动力响应分析[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2021.
- CHU S L. Dynamic response analysis of large storage tank group system based on additional mass method[D]. Dongying: China University of Petroleum (Huadong), 2021.
- [27] 张兆龙, 高博青, 杨宏康. 基于附加质量法的大型固定顶储液罐基底隔震分析[J]. *振动与冲击*, 2012, 31(23): 32-38. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2012.23.006.
- ZHANG Z L, GAO B Q, YANG H K. Seismic analysis of a large base-isolated liquid storage tank with fixed roof based on added mass method[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(23): 32-38. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2012.23.006.
- [28] 刘奥博, 王高辉, 卢文波. 基于声固耦合法的混凝土重力坝地震响应分析[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2024, 57(9): 1213-1220. DOI: 10.14188/j.1671-8844.2024-09-003.
- LIU A B, WANG G H, LU W B. Seismic response analysis of concrete gravity dam based on acoustic-structural coupling method[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2024, 57(9): 1213-1220. DOI: 10.14188/j.1671-8844.2024-09-003.