文章编号:1674-7607(2026)02-0133-06 DOI:10.19805/j.cnki.jcspe.2026.240717

50 MW 光热电站非锚固式高温熔盐储罐的模态分析

丁霄莉[1]， 杜保存[1]， 徐 超[2]， 雷勇刚[1]
(1. 太原理工大学 土木工程学院,山西太原 030024;
2. 华北电力大学 能源动力与机械工程学院,北京 102206)

摘 要: 基于声-固耦合方法模拟分析了某商用50 MW塔式光热电站熔盐储罐的模态特性,研究了锚固方式对满液位熔盐储罐液晃特性的影响,并探讨了不同液位高度和运行温度等参数对非锚固熔盐储罐模态频率的影响。结果表明:满液位下非锚固熔盐储罐前3阶易出现刚体位移振型,且3～20阶的液晃频率与锚固罐相比差异显著,因此宜选用非锚固方式对熔盐储罐进行模态分析;不同液位下储罐的液晃频率随液位高度的升高而增大,且各阶液晃频率均低于空罐的固有频率,空罐自振周期在0.06～0.1 s,而液晃周期长达2～15 s,表明充盐状态下的储罐液晃频率在长周期地震波激励作用下极易发生共振现象;运行温度对熔盐的液晃频率影响不大,但预热温度对空罐的固有频率影响显著,运行温度升高100 K时空罐的最高阶固有频率仅降低2.5%,为避免预热状态下大容量熔盐罐体在高频地震波作用下产生失稳现象,实际工程中对熔盐储罐结构进行抗震设计时应考虑预热温度对空罐体频率的影响。

关键词: 光热电站; 模态分析; 声-固耦合方法; 熔盐储罐
中图分类号: TK513.5 **文献标志码:** A **学科分类号:** 480.40

Modal Analysis of the Unanchored High-temperature Molten Salt Storage Tank for a 50 MW Concentrated Solar Power Plant

DING Xiaoli[1], *DU Baocun*[1], *XU Chao*[2], *LEI Yonggang*[1]
(1. College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi Province, China; 2. School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Based on the acoustic-structural coupling method, the modal characteristics of a molten salt storage tank in a commercial 50 MW tower-type concentrated solar power (CSP) plant were simulated. The influence of anchoring methods on the sloshing characteristics of molten salt storage tanks under full liquid level conditions was investigated, and the effects of parameters such as different liquid levels and operating temperatures on the modal frequencies of unanchored molten salt storage tanks were explored. Results show that the first three orders of unanchored molten salt storage tanks under full liquid level are prone to rigid-body displacement modes, and the sloshing frequency values of the 3rd to 20th orders differ significantly from those of anchored tanks. Therefore, the unanchored configuration is more suitable for modal analysis of molten salt storage tanks. The sloshing frequency of the tank increases with the rise of liquid

收稿日期: 2024-11-18 **修订日期:** 2024-12-16
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51906172);山西省基础研究计划资助项目(202303021221021);山西省科技创新人才团队重点资助项目(202304051001011);山西省科技合作交流专项资助项目(202104041101027)
作者简介: 丁霄莉(1997—),女,山西运城人,硕士研究生,主要研究方向为储热结构安全评定。
杜保存(通信作者),男,副教授,博士,E-mail: ntdbc0724@163.com。

level under different liquid level conditions, and the sloshing frequency of each order is lower than the natural frequency of the empty tank. The natural vibration period of the empty tank ranges from 0.06-0.1 s, while the sloshing period is as long as 2-15 s, indicating that the sloshing frequency of the tank in the salt-filled state is highly susceptible to resonance under the excitation of long-period seismic waves. Operating temperature has little effect on the sloshing frequency of molten salt, but preheating temperature has a significant impact on the natural frequency of the empty tank. When the operating temperature increases by 100 K, the highest-order natural frequency of the empty tank only decreases by 2.5%. To avoid instability of large-capacity molten salt tanks under the action of high-frequency seismic waves in the preheated state, the influence of preheating temperature on the frequency of empty tanks should be taken into account in the seismic design of molten salt tank structures in practical engineering.

Key words: concentrated solar power plant; modal analysis; acoustic-structural coupling method; molten salt storage tank

双罐熔盐热储能技术是长时储能领域的重要发展方向之一,其利用硝酸盐作为储热介质,通过太阳能、绿电与蒸汽等加热熔盐以存储新能源、余热或低谷电能,从而助力新能源消纳与提升电网灵活性[1-2]。近年来,高温熔盐储热技术已被广泛应用于太阳能光热发电、煤电机组灵活性改造、钢厂余热回收、清洁供暖与园区供汽等领域[3]。立式薄壁钢制壳体的非锚固大容量高温熔盐储罐是储热系统的重要设备,保证罐体的安全可靠性能是熔盐储能系统长周期运行的关键前提[4]。然而,面对随机地震载荷等复杂恶劣工况,储罐内万吨级高温硝酸熔盐可能会存在泄露的风险,并造成较大的安全隐患和经济损失[5]。在地震波激励作用下,通过模态分析以识别熔盐储罐的自振特性是防止罐体产生共振的重要前提,进而可优化熔盐储罐结构的抗震性能。

目前针对立式储罐模态特性的研究主要集中于常温油罐结构,如 Tursunkululy 等[6]通过建立空罐的三维有限元模型,模拟分析了等壁厚和变壁厚结构对罐体特征频率的影响情况。樊海龙[7]数值探讨了 15×10^4 m^3 非锚固储油罐内液体的晃动模态与振型分布。张美玲[8]基于流-固耦合方法研究了储液的不同深度、密度对大型非锚固储油罐模态特性的影响情况;此外,吴济航[9]利用声-固耦合方法,对 4 000 m^3 立式固定顶储罐也进行了湿模态与干模态分析,并探究了不同液位下储罐固有频率的变化情况。特别地,崔双双等[10]以锚固状态下的高温熔盐储罐为研究对象,研究了空载、满载下熔盐储罐的模态特性以及熔盐液位变化对模态频率的影响情况。

综上,已有研究鲜有围绕非锚固式的高温熔盐储罐结构进行模态特性分析。为此,本文以适用于 50 MW 太阳能光热电站的非锚固高温熔盐储罐为研究对象,基于 ANSYS Workbench 平台建立了储热时长为 8.5 h 的三维储罐有限元模型,利用声-固耦合方法模拟研究了锚固方式对满液位下储罐模态特性的影响,并探讨了不同液位与运行温度下罐体自振频率与液体晃动频率的变化规律。研究结果可为诊断和预测高温罐液体系在地震作用下的液面晃动响应及结构动力特性的优化设计提供依据。

1 模态分析方法

模态分析是研究结构动态特性的主要方法之一,其通过求解特征值和模态变换,将物理空间复杂的耦合方程组解耦为模态空间的单自由度运动方程组,以获得结构的固有频率和振型,从而避免结构产生共振现象。

1.1 结构模态分析方法

采用子空间迭代法[11]对储罐结构进行模态计算时,需进行如下假设:结构是线性的,且具有恒定的总体质量矩阵和总体刚度矩阵;结构是自由振动,无外载荷(力、温度和压力等);不考虑模型中不同的材料阻尼。无阻尼线性结构自由振动的控制方程为

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{u}}+\boldsymbol{K}\boldsymbol{u}=\boldsymbol{0} \tag{1}$$

简化后的结构自振方程[12]为

$$(\boldsymbol{K}-\omega_i^2\boldsymbol{M})\boldsymbol{\varphi}_i=\boldsymbol{0} \tag{2}$$

式中:$\boldsymbol{K}$ 为刚度矩阵;$\boldsymbol{\varphi}_i$ 为第 i 阶模态的阵型向量;$\boldsymbol{M}$ 为质量矩阵;ω_i 为第 i 阶模态的固有频率;$\ddot{\boldsymbol{u}}$ 为加速度矢量矩阵;$\boldsymbol{u}$ 为位移矢量矩阵。

1.2 声学模态分析方法

利用声-固耦合方法[13]分析高温熔盐储罐的液面晃动特性,需将流体区域视作声场区域,并将流体作为一种可压缩的声学介质,且不考虑其黏性力。同时,利用流体波动方程和结构动力学方程来计算

耦合面的位移和声压，以得到声-固耦合的有限元分析方程。

理想声学介质的波动方程为

$$\nabla^2 p=\frac{1}{c_0^2}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \tag{3}$$

式中：c_0 为流体介质中声的传播速度；p 为声场中任一点的声压函数；t 为时间。

采用 Galerkin 法获得声场区域有限元方程。

$$\boldsymbol{M}_a\ddot{p}+\boldsymbol{C}_a\dot{p}+\boldsymbol{K}_a p=-\rho_0\boldsymbol{A} \tag{4}$$

式中：ρ_0 为流体密度；$\boldsymbol{M}_a$、$\boldsymbol{C}_a$、$\boldsymbol{K}_a$、$\boldsymbol{A}$ 分别为声场中的总体质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵以及声场与结构的耦合反对称矩阵，$\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}=-\boldsymbol{A}_s$，$\boldsymbol{A}_s$ 为声场与结构的耦合矩阵。

通过虚功原理，可得与声场耦合的结构动力学方程为

$$\boldsymbol{M}_s\ddot{\boldsymbol{u}}+\boldsymbol{C}_s\dot{\boldsymbol{u}}+\boldsymbol{K}_s\boldsymbol{u}=\boldsymbol{F}_s+\boldsymbol{A}_s p \tag{5}$$

式中：$\boldsymbol{M}_s$、$\boldsymbol{C}_s$、$\boldsymbol{K}_s$ 分别为结构的总体质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵；$\boldsymbol{F}_s$ 为结构载荷矩阵。

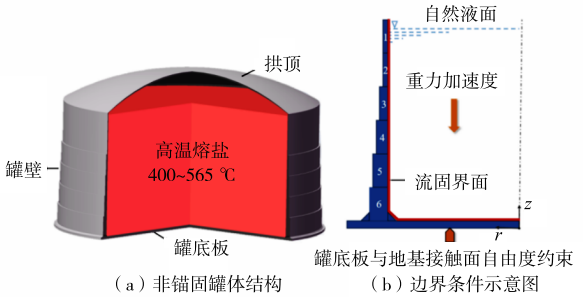
将式(4)和式(5)合并可得声-固耦合分析的方程。

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{M}_a & \boldsymbol{p}_a\boldsymbol{A}\\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{M}_s\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\ddot{p}\\ \ddot{\boldsymbol{u}}\end{Bmatrix}+\begin{bmatrix}\boldsymbol{C}_a & \boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{C}_s\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\dot{p}\\ \dot{\boldsymbol{u}}\end{Bmatrix}+\begin{bmatrix}\boldsymbol{K}_a & \boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{A}^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{K}_s\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}p\\ \boldsymbol{u}\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}\boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{F}_s\end{Bmatrix} \tag{6}$$

式中：$\boldsymbol{p}_a$ 为声压矩阵。

2　模型的建立

本文以国内某 50 MW 商业塔式光热电站中储热时长为 8.5 h 的高温熔盐储罐为研究对象，其为立式薄壁壳体的非锚固罐体结构，如图 1(a)所示。模型中考虑了罐顶、罐壁、罐底板以及大角焊缝等真实结构，其中罐壁板按变厚度设计，具体结构参数见表 1。罐体母材和焊材分别选用 347H 不锈钢与 TFW-347H 焊丝，熔盐储热介质选用常用的太阳盐[14]，熔盐的设计液位为 11.7 m，材料物性参数[15-16]见表 2，其中 T 为熔盐温度。



(a) 非锚固罐体结构　　(b) 边界条件示意图

罐底板与地基接触面自由度约束

图 1　非锚固高温熔盐储罐结构及边界条件示意图

Fig. 1　Diagram of structure and boundary conditions for unanchored high-temperature molten salt storage tank

表 1　熔盐储罐结构参数

Tab. 1　Structure parameters of molten salt tank

参数	数值
罐体高度/m	12
底板直径/m	25.58
底板厚度/mm	22
角焊缝尺寸/mm	13
壁板 1～壁板 6 高度/m	2、2、2、2、2、2
壁板 1～壁板 6 厚度/mm	10、10、16、20、24、30

表 2　材料物性参数

Tab. 2　Physical parameters of materials

参数	太阳盐	347H
密度/(kg·m^{-3})	2 090.095 4−0.636T	7 980
导热系数 k/(W·m^{-1}·K^{-1})	0.443+1.9×10^{-4}T	20.2
35 ℃水的声速/(m·s^{-1})	1 520	
泊松比 ν		0.31
弹性模量 E/GPa		205.986−0.085 2T−1.468×10^{-5}T^2+1.896×10^{-8}T^3

由于熔盐罐体为非锚固式结构，因此在模态分析过程中罐底板与地基间接触面的边界条件可简化为约束罐底竖向移动和罐底平面转动的 2 个自由度。另外，进行液晃模态分析时，固体域与流体域的交界面设置为流-固耦合面，熔盐液面考虑为自由液面。边界条件的施加见图 1(b)。

3　模型验证

对满液位下(设计液位为 11.7 m)熔盐储罐模态分析中的第 1 阶、第 100 阶模态频率进行了网格独立性考核，其中固体域和流体域分别采用四面体和六面体网格进行划分。研究了 6 组网格模型(69 910、73 676、79 417、210 262、229 069、254 372)对熔盐液晃模态频率的影响情况，如图 2 所示。可以看到，当网格数量超过 210 262 后，熔盐储罐液晃模态频率趋于平稳。因此，在兼顾计算精度和计算时间的前提下，本文选用第 4 组网格模型对熔盐储罐进行液晃模态分析。

此外，为验证声-固耦合方法的可靠性，进一步考察了不同液位(1.7、3.7、5.7、7.7、9.7、11.7 m)下熔盐储罐的动态响应特性，并将获得的第 1 阶液晃模态频率与规范计算值[17]进行了对比。通常，储液晃动基本周期可按式(7)进行计算。

$$T_w=K_s\sqrt{D} \tag{7}$$

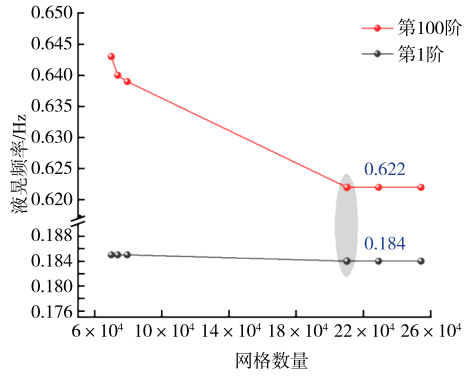


图 2 满液位下熔盐储罐的网格独立性考核

Fig. 2 Grid independence test of molten salt storage tank under full liquid level condition

式中：T_w 为储液晃动基本周期；K_s 为晃动周期系数；D 为储罐内径。

由图 3 可看出，模拟结果与规范计算值相比误差较小，最大相对误差为 5.6%，表明所建立的模型是可靠的。

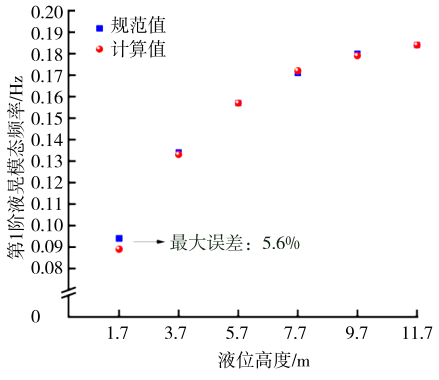


图 3 模拟结果与规范计算值对比情况

Fig. 3 Comparison of simulated and normative values

4 储罐模态分析

本文基于声-固耦合方法模拟分析了高温熔盐储罐的自振特性与液体晃动特性。首先，建立了真实熔盐储罐的三维数值模型，利用声-固耦合方法获得了满液位下锚固与非锚固 2 种方式下高温熔盐的晃动频率和振型分布，并通过子空间迭代法得到了罐体的固有频率；最后，探讨了不同液位高度和运行温度对非锚固式熔盐储罐模态频率的影响。

4.1 锚固方式对满液位储罐模态特性的影响

图 4 给出了满液位条件下锚固和非锚固罐的熔盐前 20 阶液晃频率的变化情况。可以看出，锚固罐和非锚固罐的前 20 阶液晃频率均随着阶数的增加呈上升趋势，且锚固罐的各阶液晃频率均高于非锚固罐，这是由于锚固罐底约束了全部自由度，使其刚度增大，致使其液晃频率较高。同时，从图 5 中锚固与非锚固罐的熔盐前 10 阶振型分布可看到，满液位状态下熔盐介质在液面外圈最易被激发出波浪，且液晃频率越高，熔盐被激发出的波浪数越多。

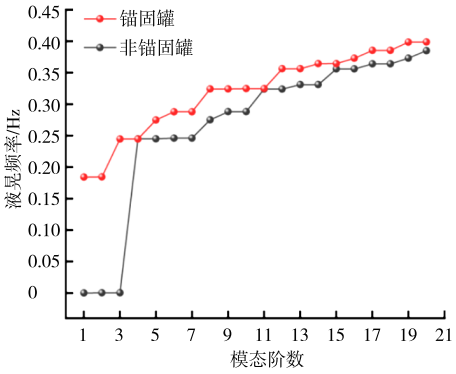


图 4 满液位下锚固罐与非锚固罐液晃频率对比

Fig. 4 Comparison of liquid sloshing frequency between anchored and unanchored tanks under full liquid level condition

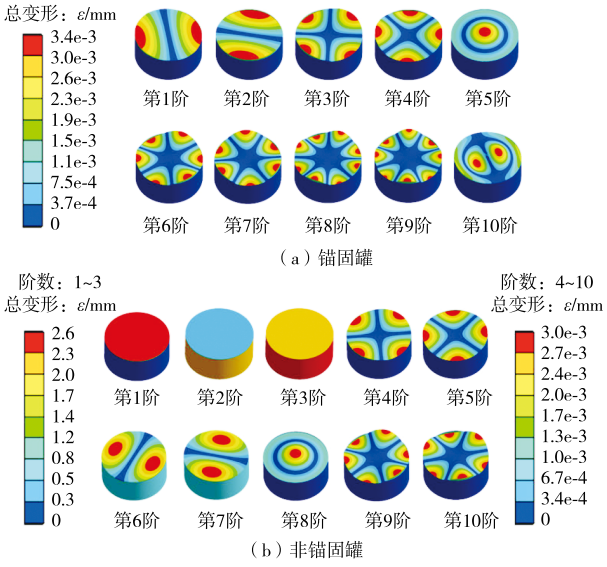


图 5 满液位下锚固与非锚固罐的前 10 阶液晃模态振型分布

Fig. 5 Distribution of the first 10-order liquid sloshing modes for anchored and unanchored tanks under full liquid level condition

此外，与锚固罐相比，由于非锚固状态下罐底受约束的自由度较少，导致储罐整体出现无周期性的刚体位移振型（前 3 阶振型），使得非锚固罐的前 3 阶液晃频率几乎为 0 Hz。值得注意的是，由于储罐的刚体运动不具有周期性特征，无法产生固有频率，且刚体的位移振型在抗震设计过程中不具有参考价值，当忽略锚固条件下罐体的前 3 阶位移振型时，锚固罐和非锚固罐的 3～20 阶液晃频率存在显著差异。因此，考虑到计算结果的准确性，宜选用非锚固边界条件对熔盐储罐进行模态分析。

4.2 熔盐液位对储罐模态特性的影响

为探究不同充盐高度下熔盐储罐的自振性能和液晃特性，研究了空罐、最低液位（1.0 m）和满

液位条件下储罐前 20 阶模态频率的变化情况，如图 6 所示。可以看到，与最低和满液位相比，由于空罐的固有频率受结构刚度和质量的影响，其固有频率较高；与空罐相比，最低和满液位下熔盐的前 20 阶液晃频率较小，其液晃周期长达 2～15 s，而空罐自振周期在 0.06～0.1 s，两者周期差异达到了 2 个数量级，说明其液晃频率在长周期地震波激励作用下极易发生共振。此外，熔盐液位高度的变化对液晃频率影响较为显著，满液位下熔盐的液晃频率均高于最低液位的频率，这是由于增加液位高度使得熔盐质量增大，熔盐介质的附加惯性力增强，致使液晃频率提高。

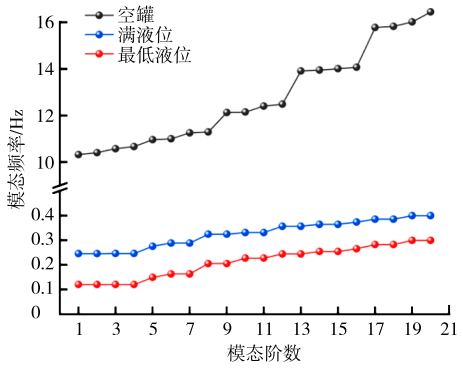


图 6　不同液位下熔盐储罐前 20 阶模态频率的对比情况

Fig. 6　Comparison of the first 20-order modal frequency of molten salt storage tanks under different liquid level conditions

4.3　运行温度对储罐模态特性的影响

在储-放热过程中，熔盐的运行温度通常在 400～565 ℃波动，为研究不同运行温度对熔盐液晃频率的影响，以满液位下的非锚固熔盐储罐为研究对象，进一步模拟分析了不同温度下储液前 20 阶液晃频率的变化情况，如图 7 所示。可以看出，在相同阶数下，运行温度对熔盐的液晃频率影响不大，这是由于介质液晃频率的产生与变化主要受储罐的固有特性

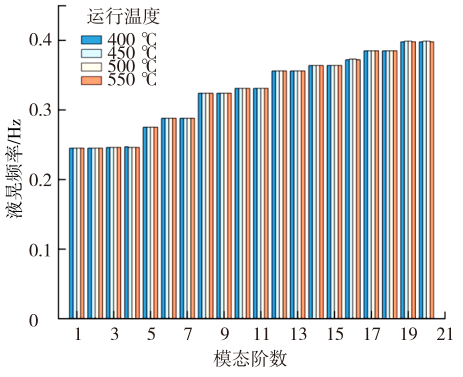


图 7　满液位下储罐前 20 阶液晃模态频率

Fig. 7　First 20-order liquid sloshing modal frequency of the storage tank under full liquid level condition

(质量、形状和材质等)、边界条件与液位高度影响，且上述参数的变化与运行温度无关，从而导致液晃频率未发生显著变化。

此外，由实际工程经验可知，熔盐储热系统在初次投运时，需使用电伴热或者热空气将未注盐的空罐预热至 300～400 ℃(预热时间为一周左右)，以降低罐体热应力并避免出现熔盐凝固现象。由于预热状态下空罐在随机地震波激励下更易产生失稳现象，因此模拟分析了不同预热温度(常温、300、400 ℃)下空罐的模态性能。图 8 给出了不同预热温度下罐体前 20 阶模态频率的变化情况。可以看到，预热温度对固有频率的影响较为显著，常温条件下罐体的固有频率最高，且预热温度越高，空罐体的固有频率越低。这是由于预热温度升高使得罐材的弹性模量降低，罐体刚度减小，结合无阻尼振动特征值公式可知，罐体的固有频率 f 也会随之减小。与预热温度 300 ℃相比，第 20 阶状态下 400 ℃罐体的固有频率仅降低 2.5%，固有频率仍处于较高水平。因此，实际工程中对熔盐储罐结构进行抗震设计时，应考虑预热温度对空罐固有频率的影响情况，以避免在高频地震波作用下处于预热状态的大容量熔盐罐体产生破坏。

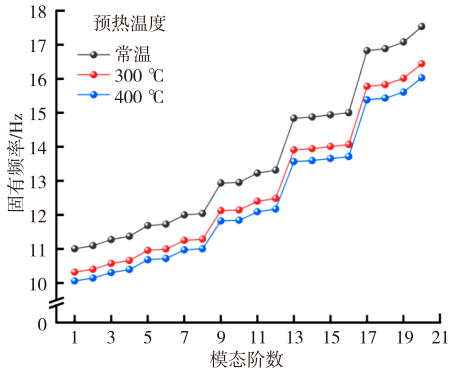


图 8　运行温度对空罐前 20 阶固有频率的影响

Fig. 8　Effect of operating temperature on the first 20-order natural frequency of empty tanks

5　结论

(1) 满液位条件下，锚固罐和非锚固罐的前 20 阶液晃频率均随着阶数的增加呈上升趋势，且锚固罐的各阶液晃频率均高于非锚固罐；熔盐介质在液面外圈最易被激发出波浪，且液晃频率越高，熔盐被激发出的波浪数越多；非锚固熔盐储罐前 3 阶出现刚体位移且 3～20 阶液晃频率与锚固罐相比存在显著差异，因此宜选用非锚固边界条件对熔盐储罐进行模态分析。

(2) 熔盐液位高度的变化对液晃频率影响较为显著,其液晃频率随液位高度的升高而增大。与空罐相比,最低和满液位下熔盐的前 20 阶液晃频率较小,其液晃周期长达 2～15 s,而空罐自振周期在 0.06～0.1 s,两者周期差异达到了 2 个数量级,说明充盐状态下的储罐液晃频率在长周期地震波激励作用下极易发生共振现象。

(3) 运行温度对熔盐的液晃频率影响不大,但预热温度对空罐的固有频率影响显著,其各阶固有频率随温度的升高而下降,与预热温度 300 ℃相比,第 20 阶状态下 400 ℃罐体的固有频率仅降低 2.5%,固有频率仍处于较高水平。因此,实际工程中对熔盐储罐结构进行抗震设计时,应考虑温度对罐体频率的影响情况,以避免预热状态的大容量熔盐罐体在高频地震波作用下产生失稳现象。

参考文献:

[1] 国家太阳能光热产业技术创新战略联盟,中国可再生能源学会太阳能热发电专业委员会. 中国太阳能热发电行业蓝皮书 2023[EB/OL]. (2024-01-18)[2024-11-18]. http://www.cnste.org/news/detail/3273.html.

[2] 周凡宇,曾晋珏,王学斌. 碳中和目标下电化学储能技术进展及展望[J]. 动力工程学报,2024,44(3):396-405.
ZHOU Fanyu, ZENG Jinyu, WANG Xuebin. Progress and prospect of electrochemical energy storage for carbon neutralization[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2024, 44(3): 396-405.

[3] 徐二树,黄钰琛,孔艳强,等. 塔式太阳能光热发电系统蒸发器动态特性研究[J]. 动力工程学报,2023,43(6):710-716.
XU Ershu, HUANG Yuchen, KONG Yanqiang, et al. Study on dynamic characteristics of steam generator in solar tower power generation system[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2023, 43(6): 710-716.

[4] 杜保存,黄丽娟,雷勇刚,等. 填充床熔盐蓄热器的动态温度与应力特性[J]. 储能科学与技术,2022,11(7):2141-2150.
DU Baocun, HUANG Lijuan, LEI Yonggang, et al. Dynamic study on the thermal and stress performances of the molten salt packed-bed thermal storage tank[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(7): 2141-2150.

[5] 赵鹤锦. 大型储液罐在地震作用下的响应分析[D]. 大连:大连理工大学,2021.

[6] TURSUNKULULY T, ZHANGABAYN, SULEIMENOV U, et al. Analysis of strength and eigenfrequencies of a steel vertical cylindrical tank without liquid, reinforced by a plain composite thread[J]. Case Studies in Construction Materials, 2023, 18: e02019.

[7] 樊海龙. 大型立式储油罐地震响应及隔震研究[D]. 天津:河北工业大学,2020.

[8] 张美玲. 大型非锚固储油罐抗震性能研究[D]. 成都:西南交通大学,2018.

[9] 吴济航. 基础不均匀沉降下储液罐地震动力响应分析[D]. 杭州:浙江大学,2021.

[10] 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.
CUI Shuangshuang, HE Qing, LI Jinghao, et al. Modal analysis of molten salt storage tank in solar thermal power system[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(10): 124-128.

[11] 尹家聪. 模态分析的自动多重子结构法与动力重分析研究[D]. 北京:北京大学,2012.

[12] PETROVIĆ K, DOBRIĆ D, GOTIĆ I, et al. Comparison of empty and oil-filled transformer tank mode shapes using experimental and FEM modal analysis[J]. Energies, 2024, 17(3): 589.

[13] 潘传禹. 双金属 LNG 储罐的地震响应分析[D]. 北京:中国石油大学,2022.

[14] DU Baocun, GUO Yifan, XU Chao, et al. Dynamic creep and stress performances of the packed-bed thermal energy storage tank with molten salt EPCM particles[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 225: 120247.

[15] LUBBERS J, GRAAFF R. A simple and accurate formula for the sound velocity in water[J]. Ultrasound in Medicine & Biology, 1998, 24(7): 1065-1068.

[16] ASME Boiler and Pressure Vessel Committee on Materials. ASME boiler and pressure vessel code, section II-materials part D properties (metric)[S]. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2013.

[17] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范:GB 50341—2014[S]. 北京:北京计划出版社,2015:110-117.