

基于 NIAH 的螺旋骨架复合柔性低温管道等效力学性能分析

英玺蓬¹, 耿东岭¹, 曹慧鑫¹, 张凯仑¹, 步宇峰¹, 杨志勋², 阎军¹

(1. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 哈尔滨工程大学 机电工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: FLNG (floating liquefied natural gas) 是一种集 LNG (液化天然气) 的液化、存储、装卸为一体的新型海上浮式生产系统。螺旋骨架复合柔性低温管道是其中关键的核心配套装备, 然而其结构形式复杂, 各结构层之间存在着大量的接触、摩擦等非线性问题, 使理论建模与数值分析求解较困难; 针对螺旋骨架复合柔性低温管道的一维周期性特征, 基于渐近均匀化理论新方法 (novel implementation of asymptotic homogenization, NIAH), 建立螺旋骨架复合柔性低温管道的微单元模型并施加周期性边界条件, 求解得到宏观结构的等效刚度参数。通过与精细有限元模型计算结果对比, 发现其等效误差小于 3.60%, 计算成本缩减约 32 倍, 验证了基于 NIAH 等效刚度计算的准确性与高效性; 针对管道螺旋缠绕结构特征, 提出双对称边界条件施加方法, 其结果比传统的单对称边界条件减少了 78.00% 的误差; 总结了不同周期性边界条件适用的结构特点, 为螺旋骨架复合柔性低温管道的结构设计与分析提供可靠、快速的等效计算方法。

关键词: 螺旋骨架复合柔性低温管道; 渐近均匀化; 双对称周期性边界条件; 等效刚度计算

中图分类号: O342

文献标志码: A

DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2023.13.002

Equivalent mechanical properties of spiral skeleton composite flexible low-temperature pipeline based on NIAH

YING Xipeng¹, GENG Dongling¹, CAO Huixin¹, ZHANG Kailun¹, BU Yufeng¹,
YANG Zhixun², YAN Jun¹

(1. State Key Lab of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Floating liquefied natural gas (FLNG) is a new offshore floating production system integrating liquefaction, storage and loading/unloading of LNG. Spiral skeleton composite flexible low-temperature pipeline is FLNG's core supporting equipment. However, the pipeline's structural form is complex, and there are a large number of nonlinear problems, such as, contact and friction among structural layers to make theoretical modeling and numerical analysis more difficult. Here, according to one-dimensional periodic characteristics of the pipeline, based on the new novel implementation of asymptotic homogenization (NIAH), the micro-cell model of the pipeline was established and periodic boundary conditions were exerted on the model for solving to obtain equivalent stiffness parameters of the corresponding macrostructure. Compared with the calculation results using the fine finite element model, the NIAH-based equivalent method's calculated results showed that the equivalent error is within 3.60% and the calculation cost is reduced by about 32 times to verify the accuracy and efficiency of the NIAH-based equivalent method. In addition, according to the pipeline's spiral wound structure characteristics, a method of applying double-symmetric boundary condition was proposed, and the calculated results showed that this method can reduce error by 78.00% compared with the traditional single symmetric boundary condition. Finally, structural characteristics applicable to different periodic boundary conditions were summarized. It was shown that the study results can provide a reliable and fast equivalent calculation method for structural design and analysis of spiral skeleton composite flexible low-temperature pipeline.

Key words: spiral skeleton composite flexible low-temperature pipeline; asymptotic homogenization; double-symmetric periodic boundary condition; equivalent stiffness calculation

FLNG (floating liquefied natural gas) 是一种集 LNG (液化天然气) 的液化、存储、装卸为一体的新型海上浮式生产系统^[1-3], 典型的 FLNG 系统如图 1 所示^[4]。此系统以浮式平台和柔性管道输送为主, 安全可靠, 有着巨大的发展前景^[5-7]。螺旋骨架复合柔性低温管道是 FLNG 系统的核心配套装备, 其结构由内到外分别是内骨架钢丝、密封层、编织增强层、外骨架钢丝, 各结构层以相同的螺距与螺旋角度依次螺旋缠绕而成, 如图 2 所示。其中, 内外骨架钢丝结构可抵抗管道内外压强, 起到支撑管道的作用。密封层主要防止液化天然气渗透。编织增强层主要增强管道拉伸性能, 提供轴向刚度。



图 1 典型的 FLNG 系统

Fig. 1 Typical FLNG system

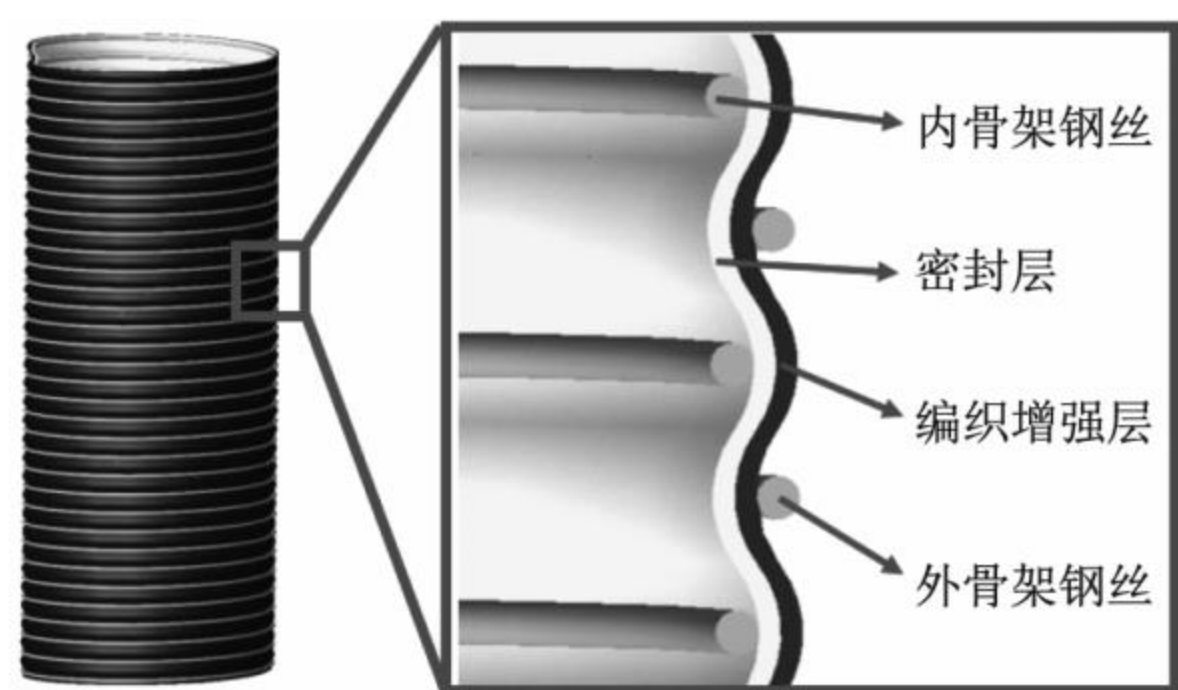


图 2 螺旋骨架复合柔性低温管道结构

Fig. 2 Structure of spiral skeleton composite flexible low-temperature pipeline

目前, 国内外学者针对 FLNG 系统与输送 LNG 低温柔性管道已开展研究。杨亮等^[8]总结了 FLNG 系统串靠和并靠的连接形式以及各自适用的实际海况环境。为满足 FLNG 系统在实际工况中低温和晃动的严苛要求, 重点研究了低温软管的结构和参数, 并分析了低温软管在柔韧、耐腐蚀和隔热性等方面的综合优势与应用前景。谢彬等^[9]对 FLNG 系统的应用背景及国内外研究现状进行总结, 梳理了 FLNG 系统装备的关键技术。通过分析在中国南海深远海气田开发过程中 FLNG 系统的应用前景, 说明了实现 FLNG 关键技术和相关设备自主、本土化的必要性。此外, 在 LNG 低温软管的结构设计与研究分析方面, Phillip^[10]针对 FLNG 系统的工程应用背景, 研制出两种新型大口径 LNG 低温柔性管道结构, 分别为悬挂型 LNG 软管与漂浮型 LNG

软管, 可应用于不同连接形式的 FLNG 系统, 其设计指标均可满足恶劣海况下的输送需求。Yang 等^[11-13]基于材料的本构关系, 考虑 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的超低温环境对 LNG 低温螺旋波纹管力学性能的影响, 通过灵敏度分析与机理研究, 开展 LNG 低温螺旋波纹管结构参数的多目标优化设计, 给出适用于不同工况的参数设计方案。Buitrago 等^[14]基于低温试验的方法得到了 LNG 内衬波纹管塑性成型后的材料本构关系, 并研究了 LNG 内衬波纹管分别在拉伸、内压、弯曲、扭转等工况下的常温和低温力学行为。Vicente 等^[15]基于数值模拟和流体试验相结合的方法, 开展了 LNG 内衬波纹管的传热和流阻性能研究, 并总结出不同的 LNG 内衬波纹管结构形式对流动和传热性能的影响规律。

虽然国内外学者对 LNG 低温管道及相关结构进行了上述研究, 但由于螺旋骨架复合柔性低温管道属于复杂的多材料、多层复合结构, 通过理论建模的方法难以求得其精确的解析解。此外, 管道各层结构之间存在着大量的接触、摩擦等非线性问题, 通过数值模拟难以使计算收敛, 导致计算成本过高, 效率极低。综上, 基于理论推导或数值模拟等常规方法开展其结构力学分析较困难。本文以螺旋骨架复合柔性低温管道作为研究对象, 考虑到其结构具有典型的一维周期性特征, 引入渐近均匀化理论新方法 (novel implementation of asymptotic homogenization, NIAH), 通过对低温管道宏观结构的微单胞模型进行加载与分析, 求解得到低温管道宏观结构的等效力学性能参数, 并基于不同的周期性边界条件对等效结果进行了分析讨论。通过与精细有限元模型结果对比, 验证了本文方法的有效性, 为实际工程应用的螺旋骨架复合柔性低温管道结构设计与分析提供了可靠、快速的等效方法。

1 螺旋骨架复合柔性低温管道的周期性结构特征

螺旋骨架复合柔性低温管道的整体结构有限元模型及局部特征, 如图 3 所示。

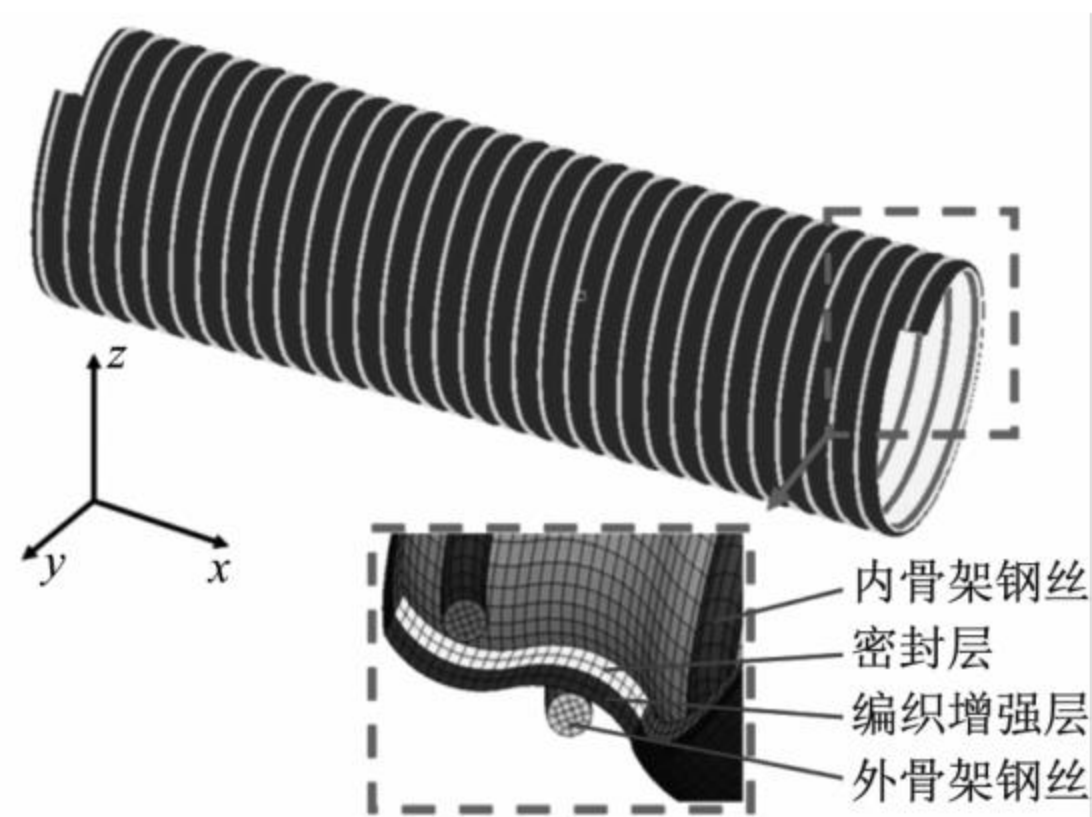


图 3 螺旋骨架复合柔性低温管道有限元模型

Fig. 3 Finite element model of spiral skeleton composite flexible low-temperature pipeline

一般地,内外骨架钢丝为 316L 不锈钢材料,密封层为高模量聚乙烯材料,编织增强层为碳纤维材料。各层结构的几何参数与对应的材料参数分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 螺旋骨架复合柔性低温管道结构参数

Tab. 1 Structural parameters of spiral skeleton composite flexible low-temperature pipeline

各结构层参数	数值
内骨架钢丝截面直径/mm	4
外骨架钢丝截面直径/mm	4
密封层厚度/mm	2
编织增强层厚度/mm	2
螺距/mm	24
螺旋缠绕角度/(°)	86

表 2 螺旋骨架复合柔性低温管道材料参数

Tab. 2 Material parameters of spiral skeleton composite flexible low-temperature pipeline

各结构层	材料参数	数值
编织增强层	弹性模量 E/GPa	84.0
	泊松比 μ	0.36
密封层	弹性模量 E/GPa	1.2
	泊松比 μ	0.30
内外骨架钢丝	弹性模量 E/GPa	193.0
	泊松比 μ	0.30

螺旋骨架复合柔性低温管道结构属于典型的一维周期性结构,因此在选取单胞时,沿管道轴向方向截取整数倍螺距的周期即可。其结构单个螺距的长度即为最小周期单元,为节省计算成本,本文选取单个螺距的周期作为一个单胞,单胞结构模型如图 4 所示。

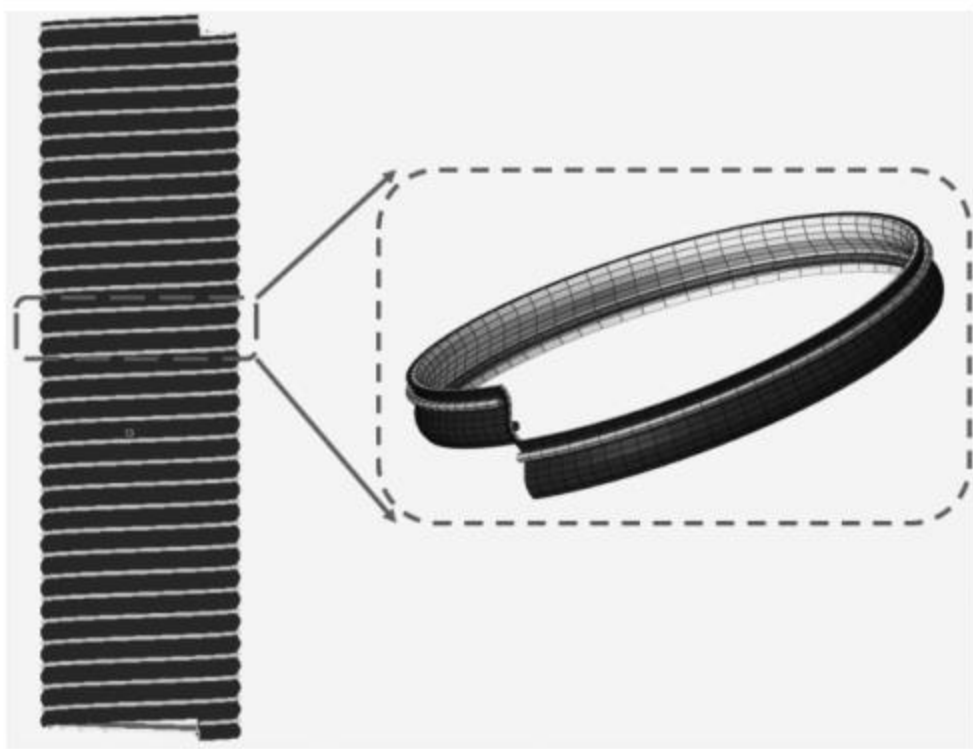


图 4 螺旋骨架复合柔性低温管道单胞模型

Fig. 4 Microcell model of spiral skeleton composite flexible low-temperature pipeline

2 基于 NIAH 的等效力学性能计算

2.1 NIAH 的有限元新格式

形如螺旋骨架复合柔性低温管道,由微单胞组成的典型一维周期性结构,如图 5 所示。在宏观坐标系下,其结构的任意物理场特征函数 $g^\Omega(x)$ 在微小域 Ω 内都具有显著变化。建立宏观坐标 x 与微观坐标 y 的关系如式(1)所示。

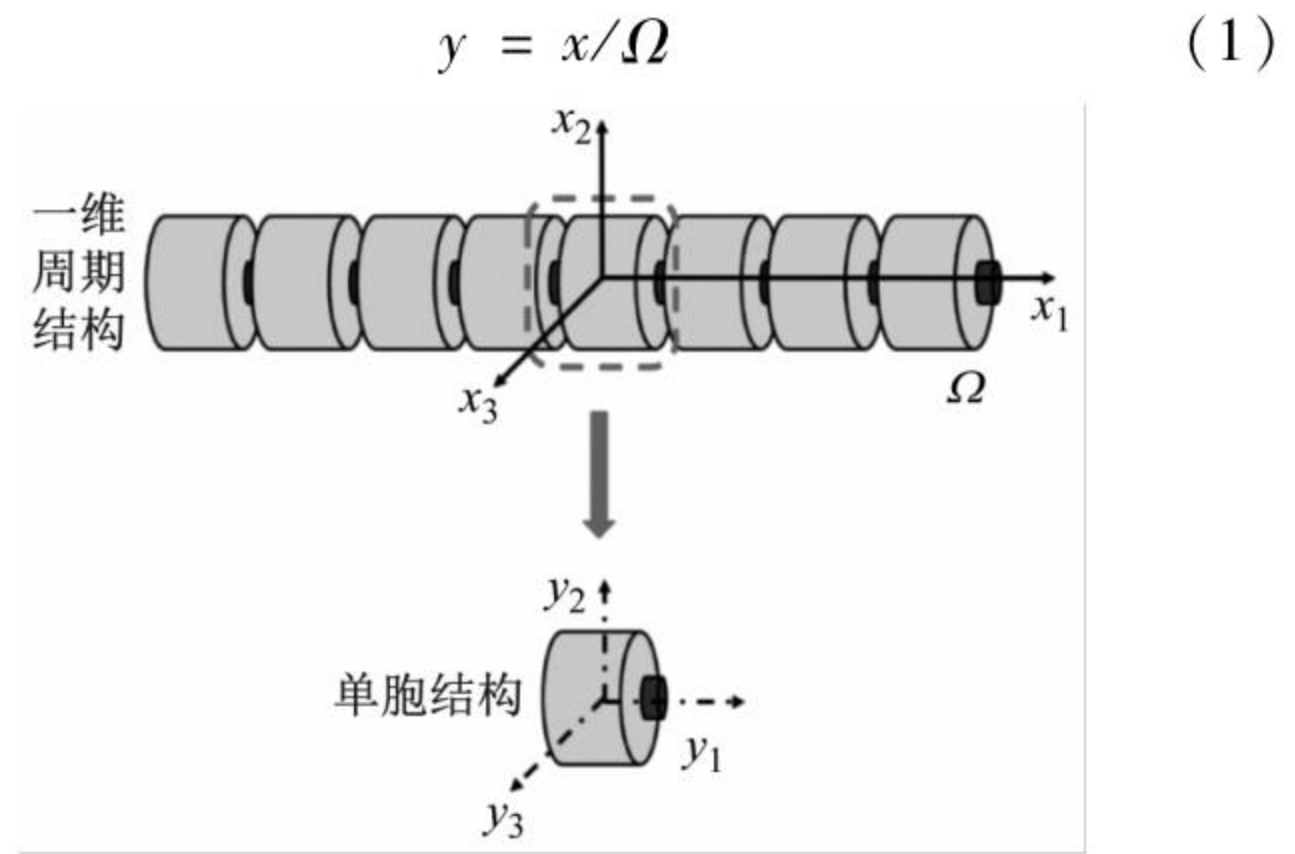


图 5 典型的周期性结构及其单胞示意图

Fig. 5 Typical periodic structure and microcell model

取微单胞结构在相应坐标中的周期为 Y ,考虑到其物理场特征函数 $g^\Omega(x)$ 在微观坐标中的周期性,因此可推导出^[16-17]

$$g^\Omega(x) = g(x, y) = g(x, y + Y) \quad (2)$$

对其宏观坐标 x 求偏导展开,可得:

$$\frac{\partial g^\Omega(x)}{\partial x_i} = \frac{\partial g(x, y)}{\partial x_i} + \frac{1}{\Omega} \frac{\partial g(x, y)}{\partial y_i} \quad (3)$$

同理,将位移 u 也表示成双尺度坐标形式,并根据摄动理论按小参数 Ω 进行渐近展开。基于域内微结构的虚功原理以及积分计算,当 Y 为微单胞体积、 Ω 较小时,推导可得

$$u^{(0)}(x, y) = u^{(0)}(x) \quad (4)$$

$$\int_Y \left(\mathbf{E}_{ijkl} - \mathbf{E}_{ijmn} \frac{\partial \chi_m^{*(kl)}}{\partial y_n} \right) \frac{\partial v_i}{\partial y_j} dy = 0, \forall v(y) \in V_Y \quad (5)$$

$$\mathbf{E}_{ijkl}^H = \frac{1}{|Y|} \int_Y \left(\mathbf{E}_{ijkl} - \mathbf{E}_{ijmn} \frac{\partial \chi_m^{*(kl)}}{\partial y_n} \right) dy \quad (6)$$

式中: \mathbf{E}_{ijkl}^H 为域内材料的等效弹性模量; χ^* 为结构的特征位移; v 为满足位移约束的任意函数。可先通过式(5)获得结构的特征位移 χ^* ,进而通过式(6)计算得到域内材料的等效弹性模量矩阵 \mathbf{E}_{ijkl}^H 。考虑到 \mathbf{E}_{ijkl}^H 的对称性,可将式(6)改写为^[18-19]

$$\mathbf{E}_{ijkl}^H = \frac{1}{|Y|} \int_Y \left(\frac{\partial \chi_p^{0(ij)}}{\partial y_q} - \frac{\partial \chi_p^{*(ij)}}{\partial y_q} \right) \mathbf{E}_{pqmn} \left(\frac{\partial \chi_m^{0(ij)}}{\partial y_n} - \frac{\partial \chi_m^{*(kl)}}{\partial y_n} \right) dy \quad (7)$$

式中: χ^0 为单胞结构在单位应变场对应下的广义位移矩阵,式(7)即为渐近均匀化方法预测非均质材料性能的传统等效方法。但在实际的等效计算中,对于不同的微单胞结构,需要修改对应的微单胞模型或修改大量程序源代码进行相应结构的有限元计算。此外,数值积分计算本身也是一个较为复杂、繁琐的过程,整个计算过程费时费力。鉴于上述问题,Cheng 等^[20]在渐近均匀化方法理论的基础上,提出了一种基于数值求解格式的 NIAH。此方法可借助成熟的商业有限元软件,避免传统均匀化方法中单胞域内复杂的积分计算

问题,能够较为简便地适用于多种单胞类型,降低了计算求解的工作量,显著提升了解决问题的计算效率。

通过式(6)可得特征位移 χ^* 与等效弹性矩阵 E_{ijkl}^H , 其对应的有限元平衡方程如式(8)所示。

$$\mathbf{K}\chi^* = \mathbf{f} \quad (8)$$

式中: \mathbf{K} 为微单胞结构的总体刚度矩阵; \mathbf{f} 为总载荷。将 \mathbf{K} 与 \mathbf{f} 展开后可得如下关系

$$\mathbf{K} = \int_Y \mathbf{B}^T \mathbf{E} \mathbf{B} dy \quad (9)$$

$$\mathbf{f} = \int_Y \mathbf{B}^T \mathbf{E} \mathbf{I} dy = \int_Y \mathbf{B}^T \mathbf{E} \mathbf{B} \chi^0 dy = \mathbf{K} \chi^0 \quad (10)$$

式中, \mathbf{I} 为单位应变矩阵。通过应变位移关系可知, $\mathbf{I} = \mathbf{B} \chi^0$, χ^0 为单位应变相等价的对应位移,其格式并不唯一。将式(8)按工况改写为式(11)形式

$$\tilde{\mathbf{K}} \tilde{\chi}^{*(kl)} = \tilde{\mathbf{F}}^{kl} \quad (11)$$

Cai 等指出, $\tilde{\mathbf{K}} = \boldsymbol{\beta}^T \mathbf{K} \boldsymbol{\beta}$, $\tilde{\mathbf{F}}^{kl} = \boldsymbol{\beta}^T \mathbf{F}^{kl}$, $\tilde{\chi}^{*(kl)} = \boldsymbol{\beta} \chi^{*(kl)}$, 其中 $\boldsymbol{\beta}$ 为转换矩阵。在给单胞结构施加 χ^0 位移后, 获得支反力 \mathbf{F} , 在周期性边界条件与力 \mathbf{F} 作用下, 获得特征位移 χ^* , 通过式(12)获得等效弹性矩阵 E^H

$$E^H = \frac{1}{|Y|} (\chi^0 - \chi^*)^T (\mathbf{F} - \mathbf{F}^*) \quad (12)$$

式中: $\mathbf{F}^* = \mathbf{K} \chi^*$, 即获得 χ^* 之后, 对单胞施加 χ^* 并计算, 再从商业有限元软件中提取节点反力 \mathbf{F}^* , 进而获得求解微单胞的等效性质 E^H 所需的全部参数, 避免了单胞域内复杂、繁琐的积分计算过程。

综上, 渐近均匀化方法的新格式计算是以商业有限元分析软件作为求解器: ① 对结构的微单胞模型施加产生单位应变的初始位移场函数 χ^0 , 通过一次静力学分析获得此时的节点反力 \mathbf{F} ; ② 施加周期性边界条件与力 \mathbf{F} 共同作用在单胞模型上, 通过静力学分析即可

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \end{Bmatrix}, \quad \boldsymbol{\varepsilon}^1 = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad \boldsymbol{\varepsilon}^2 = \begin{Bmatrix} -y_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad \boldsymbol{\varepsilon}^3 = \begin{Bmatrix} -y_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad \boldsymbol{\varepsilon}^4 = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -y_3 \\ 0 \\ y_2 \end{Bmatrix} \quad (13)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{L} \cdot \mathbf{X} \quad (14)$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

获得特征位移 χ^* ; ③ 对单胞施加特征位移 χ^* , 进行静力学分析获得对应的节点特征反力 \mathbf{F}^* ; ④ 通过式(12)求解计算, 获得宏观结构的等效力学参数, 其计算流程如图 6 所示。

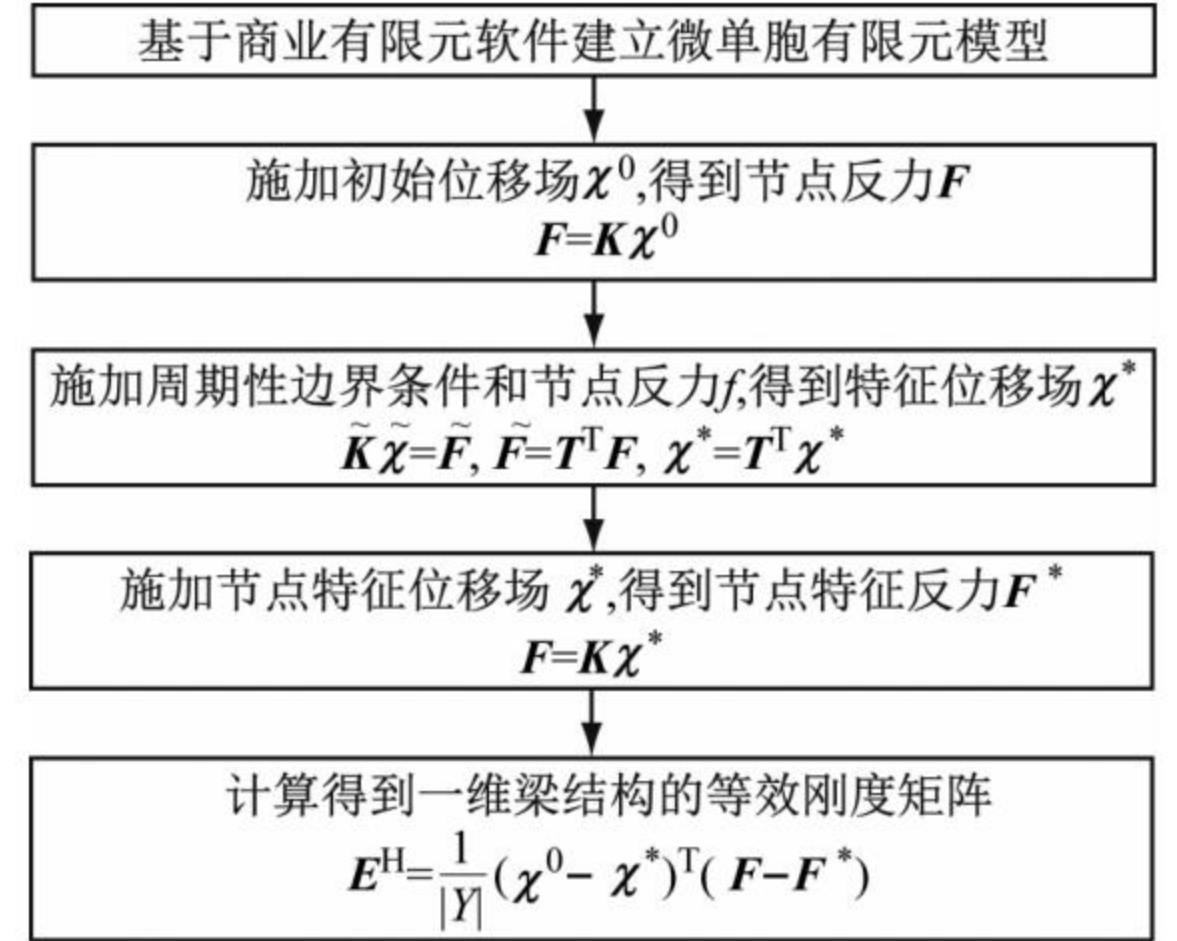


图 6 NIAH 等效刚度计算流程图

Fig. 6 Flow chart of NIAH equivalent calculation

2.2 一维周期性结构的 NIAH 等效原理

在宏观结构中, 螺旋骨架复合柔性低温管道(见图 2)的轴向尺寸远大于其他两个方向, 只在轴向具有周期性, 属于典型的一维周期性结构(见图 5), 因此本文采用一维梁结构的等效原理进行理论推导。一维周期性梁结构的广义单位应变场 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 如式(13)所示, 分别代表拉伸工况、两个方向上的弯曲工况以及扭转工况下的单位应变场。其中, $\boldsymbol{\varepsilon}^1$ 为 y_1 方向的单位拉伸应变, $\boldsymbol{\varepsilon}^2$ 、 $\boldsymbol{\varepsilon}^3$ 分别为 $y_1 y_2$ 平面和 $y_1 y_3$ 平面内的单位曲率, $\boldsymbol{\varepsilon}^4$ 为关于 y_1 轴的单位扭率。

通过式(14)的应变与位移转换关系, 可得与上述单位应变场相等价的初始位移场 \mathbf{X} , 应变位移转换算子 \mathbf{L} 如式(15)所示, 初始位移场 \mathbf{X} 如式(16)所示。

$$\mathbf{X} = \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{X}^1 = \begin{Bmatrix} x \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{X}^2 = \begin{Bmatrix} -xy \\ \frac{x^2}{2} \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{X}^3 = \begin{Bmatrix} -xz \\ 0 \\ \frac{x^2}{2} \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{X}^4 = \begin{Bmatrix} 0 \\ -xz \\ xy \end{Bmatrix} \quad (16)$$

式(16)即为本文所施加的可使单胞结构产生单位应变的初始位移场, 作为求解输入条件代入计算程序中。基于欧拉伯努利梁推导一维梁结构均匀化理论,

进而可定义其等效刚度矩阵 \mathbf{D} 如式(17)所示。

$$\begin{Bmatrix} N_1 \\ M_2 \\ M_3 \\ T_4 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & D_{14} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} & D_{24} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} & D_{34} \\ D_{41} & D_{42} & D_{43} & D_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \kappa_2 \\ \kappa_3 \\ \kappa_4 \end{Bmatrix} \quad (17)$$

式中:刚度矩阵 \mathbf{D} 对角线项的 D_{11} 为拉伸刚度; D_{22} 、 D_{33} 分别为 y_1y_2 平面和 y_1y_3 平面内的弯曲刚度; D_{44} 为扭转刚度。其他非对角线上的各项代表与下标相对应的两种工况下的耦合刚度,例如 D_{21} 为结构的拉弯耦合刚度, D_{41} 为结构的拉扭耦合刚度。

2.3 周期性边界条件

对于传统的一维周期性结构,一般对单胞模型的

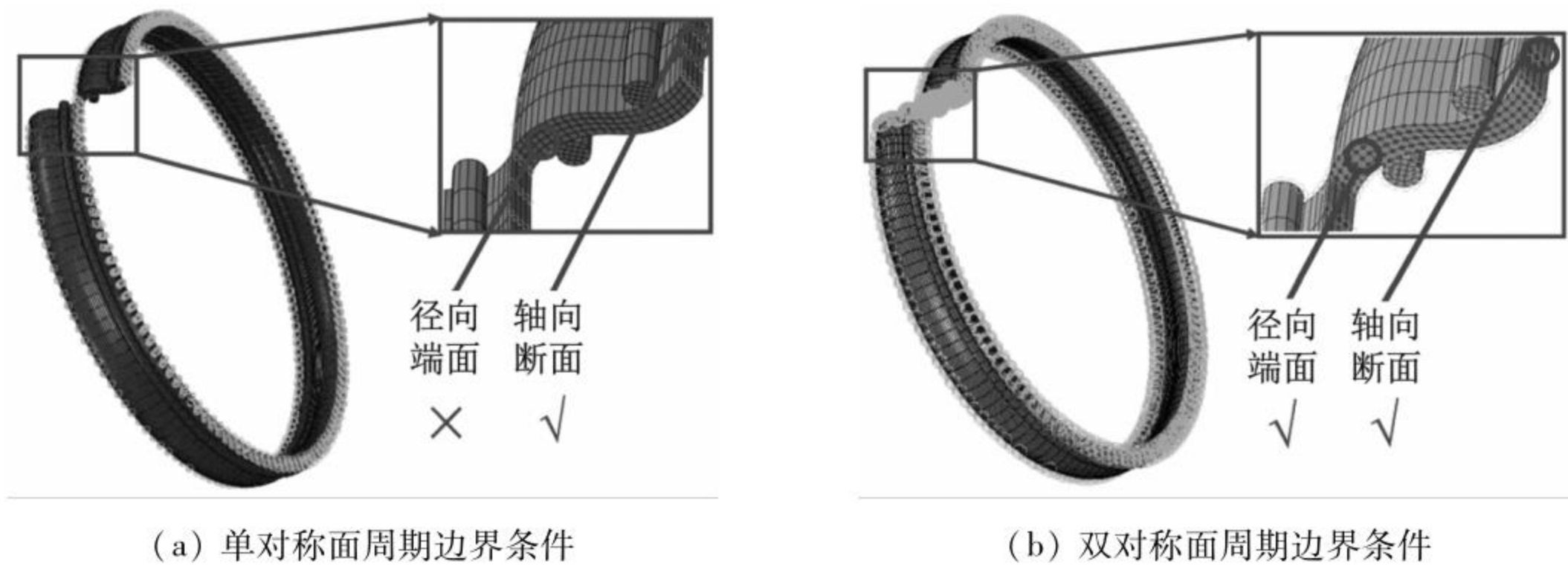


图7 两种周期性边界条件施加方式

Fig.7 Two different periodic boundary conditions

3 等效结果对比及分析

基于 NIAH 的等效性能计算,对螺旋骨架复合柔性低温管道结构单胞模型分别施加单对称面周期边界条件和双对称面周期边界条件,可对应得到两种不同的

轴向断面施加单对称面的周期性边界条件,不涉及径向端面的问题。但螺旋骨架复合柔性低温管道属于螺旋缠绕结构,其单胞模型不仅存在轴向断面,同时还将出现径向端面,如图7所示。因此,与传统一维周期性结构单胞的周期性边界条件相比,螺旋骨架复合柔性低温管道单胞模型需要不同的周期性边界条件施加方法,即双对称面周期边界条件。单对称面周期性边界条件只作用在周期性结构的轴向断面上,见图7(a)。而双对称面周期性边界条件可同时作用于周期性结构的轴向断面和径向端面,见图7(b)。除了周期性边界条件,单胞模型需继续施加固定约束边界条件,选择节点约束其全部自由度,避免结构产生刚体位移。

等效刚度计算结果。为验证 NIAH 等效性能计算的准确性,建立长度为 0.8 m 的螺旋骨架复合柔性低温管道结构的精细有限元模型进行数值分析,其拉伸、弯曲、扭转工况下的位移计算结果,如图8所示。精细有限元模型与 NIAH 等效刚度计算结果对比,如表3所示。

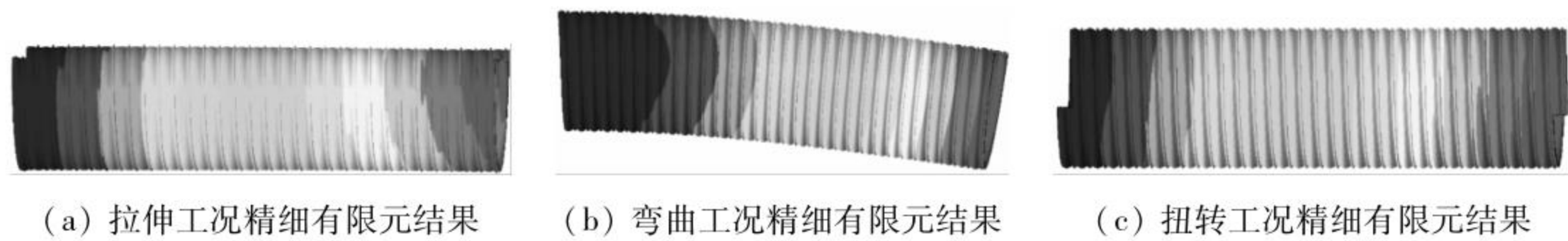


图8 精细有限元模型位移计算结果

Fig.8 Displacement calculation results of finite element models

表3 精细有限元模型与 NIAH 等效刚度计算结果对比

Tab.3 Comparison of fine finite element models and NIAH equivalent calculation results

不同方法	网格数量	类别	D_{11}/kN	$D_{22}/(\text{N} \cdot \text{m}^2)$	$D_{33}/(\text{N} \cdot \text{m}^2)$	$D_{44}/(\text{N} \cdot \text{m}^2)$
精细有限元模型	605 368	计算刚度	14 758.50	78 462	78 462	398 504
		等效刚度	14 489.86	81 363	81 279	238 466
单对称面边界条件 NIAH 等效	18 174	相对误差/%	1.82	-3.70	-3.60	40.16
		等效刚度	14 698.38	81 296	81 135	400 816
双对称面边界条件 NIAH 等效	18 174	相对误差/%	0.40	-3.60	-3.40	-0.58

由表3可知,基于单对称面周期性边界条件的 NIAH 等效分析结果的拉伸刚度 D_{11} 、弯曲刚度 D_{22} 与 D_{33} 均具有较高的精度,但其扭转刚度 D_{44} 的误差较大。这是由于在单对称面边界条件下,周期性边界条件只

作用于图7中单胞模型里的轴向断面。对于拉伸与弯曲工况,单胞模型的轴向断面对结构的力学响应起到决定性作用,直接影响着拉伸刚度与弯曲刚度。因此对于宏观结构的拉伸与弯曲工况,单对称面周期性边







界条件下的 NIAH 等效刚度计算仍能够保证较好的等效结果。然而,单对称面周期性边界条件不作用于单胞模型的径向端面,对于扭转工况,宏观结构的抗扭能力主要由单胞模型中的径向端面承担,因此将会导致边界条件的缺失,进而导致 NIAH 等效刚度计算存在较大的弱化,造成了扭转刚度的较大计算误差。而基于本文所提出的双对称面周期性边界条件,图 7 中单胞模型的轴向断面与径向端面都将施加边界条件,保证了其边界条件更符合真实的情况,比传统的单对称边界条件减少误差约 78.00%。因此在拉伸、弯曲、扭转等工况下,双对称面周期性边界条件的等效计算结果都较精确,其误差均小于 3.60%,验证了本文等效计算方法的准确性。此外,在计算成本方面,与精细有限元模型相比,基于 NIAH 等效刚度计算的网格数量减少约 32 倍,大大提高了计算效率,实现宏观结构的准确、快速的等效刚度计算。

为进一步讨论单对称面周期性边界条件与双对称面周期性边界条件的适用性,对两种边界条件所适用

的周期性结构进行对比分析,即螺旋缠绕结构与非螺旋缠绕结构,其几何特征对比如表 4 所示。首先,在两种结构的单胞建模方面,对于形如螺旋骨架复合柔性低温管道的螺旋缠绕结构,其单胞模型以螺旋阵列的形式组建形成对应的宏观结构。而对于具有周期性的非螺旋缠绕结构,其宏观结构是由单胞模型以平移阵列的形式组建而成;在周期性方面,两种结构均具有沿轴向的单周期性方向,即呈现典型的一维周期性特征;此外,在周期性边界条件的作用方面,对于形如螺旋骨架复合柔性低温管道的螺旋缠绕结构,其单胞模型具有两个周期性边界条件对称面,即轴向断面和径向端面。而对于具有周期性的非螺旋缠绕结构,由于其自身闭环的结构特征,因此其周期边界条件仅具有一个单对称面,即轴向断面。综上,双对称面周期性边界条件适用于形如螺旋骨架复合柔性低温管道的螺旋缠绕结构,单对称面周期性边界条件适用于具有周期性的非螺旋缠绕结构。

表 4 两种结构的几何特征对比

Tab. 4 Comparison of geometric features between spiral structure and toroidal structure

	螺旋缠绕结构		非螺旋缠绕结构	
	结构模型	结构特征	结构模型	结构特征
单胞建模形式		螺旋阵列		平移阵列
周期方向		轴向单周期性		轴向单周期性
周期对称面		双对称面		单对称面

4 结 论

(1) 本文针对螺旋骨架复合柔性低温管道的一维周期性结构特征,基于渐近均匀化理论新方法(NIAH)对管道宏观结构进行等效刚度计算。通过与精细有限元模型结果对比,发现其等效误差小于 3.60%,计算成本缩减了约 32 倍,验证了本文基于 NIAH 等效刚度计算的准确性与高效性。

(2) 针对形如螺旋骨架复合柔性低温管道的螺旋缠绕结构,提出了双对称面周期性边界条件的施加方

法,比传统的单对称面周期性边界条件减少误差约 78.00%,验证了双对称面周期性边界条件的优势,并分析了两种周期性边界条件适用的结构特点。

(3) 研究作为一维周期性结构的快速等效计算提供了有价值的参考,为工程应用中的螺旋骨架复合柔性低温管道结构设计与分析提供了可靠、快速的等效方法。

目前本文主要针对螺旋骨架复合柔性低温管道的等效力学性能进行了分析,未来还需充分考虑在超低温环境下对管道结构进行等效力学性能计算,并考虑

在拉伸、弯曲、扭转等多工况复合载荷作用下螺旋骨架复合柔性低温管道的结构力学性能的耦合规律。

参考文献

- [1] 罗东雨, 孙建刚, 柳春光, 等. 考虑保温层的 LNG 储罐隔震力学模型及响应研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(23): 255 - 262.
LUO Dongyu, SUN Jiangan, LIU Chunguang, et al. Study on isolation simplification model and isolation response of LNG storage tank considering thermal insulation layer[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(23): 255 - 262.
- [2] 秦梦飞, 施伟, 柴威, 等. 台风过境下大型单桩式海上风机结构动力特性研究[J]. 力学学报, 2022, 54(4): 881 - 891.
QIN Mengfei, SHI Wei, CHAI Wei, et al. Research on dynamic characteristics of large-scale pile offshore wind turbine under typhoon event [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2022, 54(4): 881 - 891.
- [3] 王伟波, 郝娇山, 刘柏圻, 等. LNG 超低温调节阀阀杆流激共振分析[J]. 振动与冲击, 2021, 40(3): 218 - 225.
WANG Weibo, HAO Jiaoshan, LIU Baiqi, et al. Flow-induced resonance analysis of valve stem for LNG ultra-low temperature control valve [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(3): 218 - 225.
- [4] 杨亮, 刘淼儿, 刘云, 等. 浮式 LNG 生产储卸装置卸料系统研究[J]. 船舶与海洋工程, 2018, 34(3): 8 - 14.
YANG Liang, LIU Miaoer, LIU Yun, et al. Floating LNG production storage and offloading unit discharge system research[J]. Journal of Ship and Ocean Engineering, 2018, 34(3): 8 - 14.
- [5] 徐万海, 吴应湘, 钟兴福, 等. 海洋细长结构参数激励不稳定区的确定方法[J]. 振动与冲击, 2011, 30(9): 79 - 83.
XU Wanhai, WU Yingxiang, ZHONG Xingfu, et al. Methods for parametric excitation instability analysis of slender flexible cylindrical structures in offshore engineering[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(9): 79 - 83.
- [6] 张进, 安晨, 高强, 等. 海洋 LNG 低温软管结构与试验研究现状[J]. 海洋工程装备与技术, 2020, 7(5): 300 - 310.
ZHANG Jin, AN Chen, GAO Qiang, et al. Current situation of design and experimental study of marine LNG cryogenic hose structure [J]. Ocean Engineering Equipment and Technology, 2020, 7(5): 300 - 310.
- [7] 马焯璇, 徐万海, 徐增伟, 等. 基于多项式拟合的细长梁结构振动位移重构方法[J]. 振动与冲击, 2020, 39(11): 152 - 157.
MA Yexuan, XU Wanhai, XU Zengwei, et al. Displacement reconstruction of slender beam based on polynomial fitting method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(11): 152 - 157.
- [8] 杨亮, 刘淼儿, 刘云, 等. FLNG 低温软管技术现状与应用前景分析[J]. 海洋工程装备与技术, 2019, 6(6): 810 - 818.
YANG Liang, LIU Miaoer, LIU Yun, et al. FLNG cryogenic hose technology present situation and the application prospect analysis [J]. Journal of Marine Engineering Equipment and Technology, 2019, 6(6): 810 - 818.
- [9] 谢彬, 喻西崇, 韩旭亮, 等. FLNG 研究现状及在中国南海深远海气田开发中的应用前景[J]. 中国海上油气, 2017, 29(2): 127 - 134.
XIE Bin, YU Xichong, HAN Xuliang, et al. Research status and application prospect of FLNG in the development of far-reaching sea gas field in the South China Sea [J]. China Offshore Oil and Gas, 2017, 29(2): 127 - 134.
- [10] PHILLIP J C. Preparing the way for future offshore LNG marine terminals [C]//Proceeding of Offshore Technology Conference. Houston: OTC, 2008.
- [11] YANG Zhixun, YAN Jun, CHEN Jinlong, et al. Multi-objective shape optimization design for LNG cryogenic helical corrugated steel pipe[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2017, 139(5): 051703.
- [12] 杨志勋, 阎军, 卢青针, 等. 结构尺寸对 LNG 低温螺旋波纹钢管弯曲性能的影响分析[J]. 计算机辅助工程, 2016, 25(6): 14 - 19.
YANG Zhixun, YAN Jun, LU Qingzhen, et al. Influence of structure size on bending performance of LNG low-temperature spiral corrugated steel tube [J]. Computer Aided Engineering, 2016, 25(6): 14 - 19.
- [13] 杨亮, 胡海涛, 熊飞宇, 等. 结构尺寸对 LNG 低温柔性管道内衬层力学性能的敏感性分析[J]. 计算机辅助工程, 2018, 27(2): 23 - 29.
YANG Liang, HU Haitao, XIONG Feiyu, et al. Sensitivity analysis of structural dimensions to mechanical properties of LNG low temperature flexible pipeline liner [J]. Computer Aided Engineering, 2018, 27(2): 23 - 29.
- [14] BUITRAGO J, SLOCUM S T, HUDAK S J, et al. Cryogenic structural performance of a corrugated pipe [C]//Proceedings of ASME 2010 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Shanghai: OMAE, 2010.
- [15] VICENTE P G, GARCIA A, VIEDMA A. Experimental investigation on heat transfer and frictional characteristics of spirally corrugated tubes in turbulent flow at different prandtl numbers [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47(4): 671 - 681.
- [16] CAI Yuanwu, XU Liang, CHENG Gengdong. Novel numerical implementation of asymptotic homogenization method for periodic plate structures[J]. International Journal of Solids and Structures, 2014, 51: 284 - 292.
- [17] YI Sinan, XU Liang, CHENG Gengdong, et al. FEM formulation of homogenization method for effective properties of periodic heterogeneous beam and size effect of basic cell in thickness direction[J]. Computers & Structures, 2015, 156: 1 - 11.
- [18] XU Liang, CHENG Gengdong, YI Sinan. A new method of shear stiffness prediction of periodic Timoshenko beams[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2016, 23(6): 670 - 680.
- [19] XU Liang, CHENG Gengdong. Shear stiffness prediction of Reissner-Mindlin plates with periodic microstructures [J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2017, 24(4): 271 - 286.
- [20] CHENG Gengdong, CAI Yuanwu, XU Liang. Novel implementation of homogenization method to predict effective properties of periodic materials[J]. Acta Mechanica Sinica, 2013, 29(4): 550 - 556.