

文章编号:1005-9865(2022)06-0142-10

低温柔性管道关键结构层的多目标优化设计

英玺蓬¹, 曹慧鑫¹, 杨志勋², 杨 亮³, 刘淼儿³, 范嘉堃³, 李方道³, 阎 军¹

(1. 大连理工大学 工程力学系 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, 黑龙江 哈尔滨 150001; 3. 中海石油气电集团技术研发中心, 北京 100028)

摘 要:低温柔性管道是海上浮式液化天然气装置系统 (FLNG) 的核心运输装备。针对低温柔性管道多材料、多层复合的结构设计难点, 将其按照不同功能解耦成内衬层、抗拉铠装层以及辅助层三个关键结构层。基于神经网络模型 (RBF)、Kriging 模型以及响应面模型 (RSM) 三种建模方法建立了上述三个结构层响应分析的代理模型, 并通过模型准确度的比较, 发现 RBF 的误差均最小。在优化设计中, 基于遗传算法分别对低温柔性管道上述关键结构层进行多目标优化设计。在内衬层结构的优化中, 以质量及弯曲刚度最小为优化目标; 在抗拉铠装层结构的优化中, 以质量最小及拉伸刚度最大为优化目标; 在辅助层结构的优化中, 以质量、弯曲刚度及传热速率最小为优化目标。研究作为低温柔性管道的结构提供了关键设计参数及理性的设计方法。

关键词:低温柔性管道; 关键结构层; 数值模拟; 遗传算法; 代理模型; 多目标优化设计; Pareto 优化解集

中图分类号:P751 **文献标志码:**A **DOI:**10.16483/j.issn.1005-9865.2022.06.015

Multi-objective optimization design of key structural layers of cryogenic hose

YING Xipeng¹, CAO Huixin¹, YANG Zhixun², YANG Liang³, LIU Miaoer³,
FAN Jiakun³, LI Fangqiu³, YAN Jun¹

(1. Department of Engineering Mechanics, State Key Laboratory 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; 3. Research and Development Center, CNOOC Gas & Power Group Co., Ltd., Beijing 100028, China)

Abstract: Cryogenic hose is the core equipment of offshore floating liquefied natural gas (FLNG) installation system. In this paper, according to the structural characteristics of multi-material and multi-layer, the structure of cryogenic hose is decoupled into lining layer structure, armored layer structure and auxiliary layer structure. Based on neural network (RBF), Kriging modeling and response surface (RSM) methods, the surrogate models are established and the accuracy of different models is compared. It is found that the error of RBF modeling method is the least. In the optimization design, based on genetic algorithm, multi-objective optimization design of three different functional structure layers of cryogenic hose is carried out. In the optimization of lining layer, the minimum mass and minimum bending stiffness are the optimization objectives. In the optimization of armor layer, the minimum mass and maximum tensile stiffness are the optimization objectives. In the optimization of auxiliary layers, the optimization objectives are to minimize the mass, bending stiffness and heat transfer rate. The key design parameters and rational design methods are provided for the structure of cryogenic hose.

Keywords: cryogenic hose; key structural layers; numerical simulation; genetic algorithm; surrogate model; multi-objective optimization design; Pareto optimization solution set

收稿日期:2022-01-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目 (U1906233, 11732004, 52001088); 山东省重点研发计划项目 (2019JZZY010801); 工业装备结构分析国家重点实验室开发基金资助项目 (GZ20105)

作者简介:英玺蓬 (1992—), 男, 辽宁鞍山人, 博士研究生, 主要从事海洋柔性管缆的结构设计与优化研究。

E-mail: 15952003951@163.com

通信作者:阎 军 (1978—), 男, 辽宁大连人, 教授, 博士生导师, 主要从事海洋柔性管缆的多尺度、多学科结构分析和优化设计研究。

E-mail: yanjun@dlut.edu.cn

液化天然气是一种相对绿色环保、极具潜力的清洁能源,可对我国“碳达峰”战略目标的实现起到关键作用^[1]。海上浮式液化天然气(floating liquefied natural gas,简称 FLNG)装置系统是一种集天然气的液化、存储和装卸为一体的新型海上浮式液化天然气生产系统^[2-3],具有集成化程度高、方便可靠等特点^[4]。低温柔性管道是 FLNG 系统的核心装备之一,主要用于船只间的串靠连接,典型 FLNG 系统串靠连接方式如图 1 所示^[3]。

目前,国内外学者针对低温柔性管道结构已开展了一定的研究。杨亮等^[3]对 FLNG 低温软管的应用前景进行了系统调研,对目前的低温软管结构形式和关键技术进行了总结。除了在海洋气田开发中的重要作用外,低温软管在浮式船岸传输与船舶加注等方面也有着巨大的应用前景。张进等^[5]对低温软管的标准规范以及国外主流低温软管公司的产品进行了梳理,对其结构及性能特点进行了综述,为我国低温软管的设计和制造提供了有益参考。在结构分析与性能研究方面,Yang 等^[6]基于有限元模拟方法对低温软管内衬波纹管结构的力学性能进行了机理研究及灵敏度分析,并基于不同优化算法对其进行了优化设计。Trelleborg 公司针对 FLNG 系统中的串靠连接模式,研制出了一种新型的低温柔性管道结构形式,类似于“管中管”的设计概念,其结构具有较好的密封性能与保温性能,可以满足恶劣海况下的输送需求^[7-8]。Srivastava 等^[9]和 Buitrago 等^[10]基于低温试验的方法对低温柔性管道内衬波纹管结构进行拉伸、弯曲、扭转、内压等工况下力学性能的研究,并总结出了金属波纹管的尺寸对其力学性能的灵敏度影响规律。但在已有文献中,大多是仅针对低温柔性管道中的内衬波纹管结构进行力学性能研究,而对于低温柔性管道其他关键结构层(抗拉铠装层、辅助层等)的力学性能及其优化设计理论、求解方法的研究则相对空白。

典型的低温柔性管道整体结构如图 2 所示。由内到外分别为:内衬波纹管层、防磨层、抗拉铠装层、保温层以及护套层。内衬层是低温柔性管道的最内层结构,起到承受管道内压和密封液化天然气的作用,一般为 316L 不锈钢材料的 U 型波纹管结构;防磨层在低温柔性管道的各个金属结构层之间,起到防磨作用,由薄纤维布螺旋缠绕而成;抗拉铠装层是由多个扁带状纤维小角度螺旋缠绕、密排而成,是整个管道中承受载荷的部分;保温层起到隔绝热量传递的作用,防止管道外壁结冰,一般为气凝胶材料;护套层是整个管道的最外层,直接与海面接触,起到保护整个管道、防止腐蚀的作用。其中,内衬波纹管层、抗拉铠装层属于功能不同的承载层,保温层、防磨层、护套层属于辅助层。

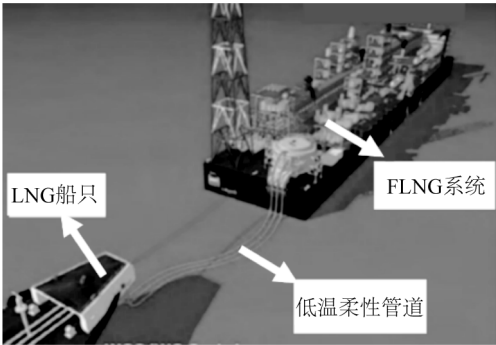


图 1 典型的 FLNG 串靠系统

Fig. 1 Typical FLNG system in series connection

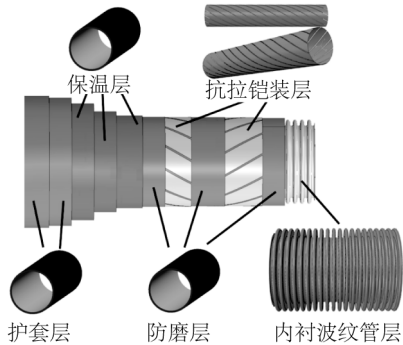


图 2 低温柔性管道结构形式

Fig. 2 Structure of cryogenic flexible hose

在实际工程中,低温柔性管道主要应用于深远海的天然气开发,其环境工况往往较为恶劣,将持续受到风、浪、流等载荷作用。在低温柔性管道的结构设计中,根据低温柔性管道规范^[11]中的要求,需要具有较强的轴向抗拉伸性能和较好的横向弯曲柔顺性,同时为了防止管道外壁结冰进而影响管道的结构力学性能,还需使管道的隔热性能最强并控制成本最低。综上所述,需对低温柔性管道进行多目标优化设计。此外,针对低温柔性管道这种非黏结结构,通常可采用控制失效模式的设计方法。在结构的定量设计过程中,引起同一失效模式的荷载应该取最大值,且应该针对最先发生的结构破坏形式进行分析校核并提出控制策略以及优化设计方案^[12-14]。本文以低温柔性管道结构作为研究对象,将其按照实际工程应用中的不同功能解耦成不同结构层,包括内衬层(对应最小弯曲半径失效)、抗拉铠装层(对应拉伸失效)以及辅助层(对应最小弯曲半径失效)三个关键结构。分别基于神经网络模型(RBF)、Kriging 模型以及响应面模型(RSM)方法建立其力学

响应分析的代理模型,并比较不同建模方法的准确度。在优化设计中,对于内衬层结构,以质量及弯曲刚度最小为优化目标;对于抗拉铠装层结构,以质量最小及拉伸刚度最大为优化目标;对于辅助层结构,以质量、弯曲刚度及传热速率最小为优化目标,基于遗传算法分别对低温柔性管道关键结构层进行多目标优化设计。最终得到了低温柔性管道不同结构层的 Pareto 解集,可根据不同工程应用中的需求从解集中选择符合实际要求的优化设计^[15],为低温柔性管道的结构设计提供了理性的设计方法。

1 低温柔性管道结构的代理模型及优化方法

1.1 代理模型建模方法

代理模型方法是工程上针对复杂结构较为常用的优化方法之一。其原理是用一个计算量较小的数学模型替换原复杂结构,通过一组变量与对应的输出数据搭建近似的映射关系,将拟合出的近似函数替代原真实模型的物理过程^[16]。响应面法(RSM)是最具代表性的建立代理模型方法^[16],其原理是通过一系列确定性试验,用多项式函数来近似隐式极限状态函数,在不降低计算精度的情况下简化模型的计算量,适用于线性问题的建模与计算^[17]。在响应面法(RSM)的基础上,Kriging 模型和神经网络模型(RBF)建模方法陆续出现并逐渐应用于各类优化问题中^[16]。Kriging 模型是一种插值模型,对于非线性问题的拟合精度较好,并且

具有较好的约束处理能力,是一种通用的建模方法^[16-17]。神经网络模型(RBF)是基于径向基函数的建模方法,具有最佳逼近和全局最优的优势,训练方法快速简便、成本较低,具有良好的收敛能力,典型的神经网络(RBF)建模方法流程如图 3 所示^[16]。

为进行低温柔性管道关键结构层的多目标优化设计,分别基于神经网络模型(RBF)、Kriging 模型、响应面模型(RSM)三种方法建立低温柔性管道三个关键结构层的各项力学性能的代理模型,并分别比较其准确度,进而筛选出适用于低温柔性管道结构的近似代理模型。

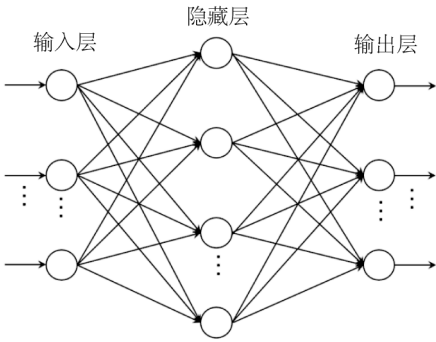


图 3 典型的神经网络(RBF)建模方法流程
Fig. 3 Typical neural network (RBF) modeling method

1.2 优化算法

遗传算法(genetic algorithm)是一种基于群体进化的计算模型,通过群体中个体之间的繁殖、变异、竞争等方法进行信息交换、优胜劣汰,从而逐步逼近问题的最优解^[16-17]。其中,对个体的遗传操作主要是通过选择(繁殖)、交叉和变异(突变)三个基本的遗传算子实现^[16-17]。

在各种遗传算法中,NSGA 算法(non-dominated sorting genetic algorithm)是解决多目标优化问题中较为常见的方法。基于非支配分层策略,NSGA 算法可使得更好的个体有更大的机会遗传到下一代。在多目标优化求解的过程中,NSGA 算法保持了群体的多样性,其 Pareto 解集上的个体均匀分布,防止了个别超级个体的过度繁殖。NSGA-II 优化算法是 NSGA 的改良算法,其优点在于探索性良好,在非支配排序中 Pareto 解集的前进能力更强。克服了前期 NSGA 算法的缺点,使得 NSGA-II 算法的优化效率更高、解集前沿更加清晰^[16-17]。因此,本文选用遗传算法中的 NSGA-II 优化算法进行低温柔性管道关键结构层的多目标优化设计。

1.3 优化设计流程

如前文所述,可将低温柔性管道按其力学性能与功能特点分为内衬波纹管层、抗拉铠装层、辅助层三个关键结构层。分别基于神经网络模型(RBF)、Kriging 模型、响应面模型(RSM)三种建模方法建立上述各结构层的代理模型,通过比较验证各代理模型对于不同结构层力学响应的准确性。并基于遗传算法中的 NSGA-II 优化算法分别对内衬波纹管层、抗拉铠装层、辅助层三个结构层进行多目标优化设计。最后得到低温柔性管道各层结构尺寸参数的 Pareto 优化解集,按照结构多目标优化设计的有限解理论^[15, 18-21],根据工程需要选用解集中的优化设计方案。本文低温柔性管道关键结构层的多目标优化设计流程如图 4 所示。

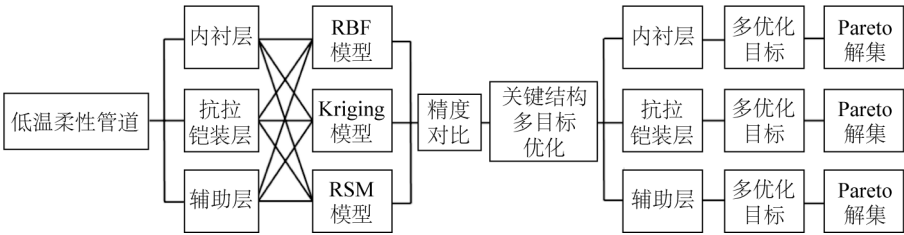


图 4 低温柔性管道多目标优化设计流程

Fig. 4 Multi-objective optimization design process of cryogenic flexible hose

2 低温柔性管道关键结构层的多目标优化

本文所建立的低温柔性管道有限元模型如图 5 所示,共有 73 779 个网格。有限元模型长度设置为 1 710 mm,包括内衬 U 型波纹管层、抗拉铠装层、辅助层等结构。

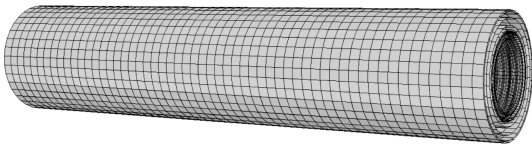


图 5 低温柔性管道的有限元模型

Fig. 5 Finite element model of cryogenic flexible hose

2.1 内衬层的多目标优化

低温柔性管道内衬 U 型波纹管截面结构如图 6 所示。其中, P 为波纹管的波距, H 为波纹管的波高, T_1 为波纹管的壁厚。一般地,U 型波纹管的截面结构由其波距 P 、波高 H 和壁厚 T_1 所确定,因此取以上三个结构参数作为低温柔性管道内衬层多目标优化的设计变量。

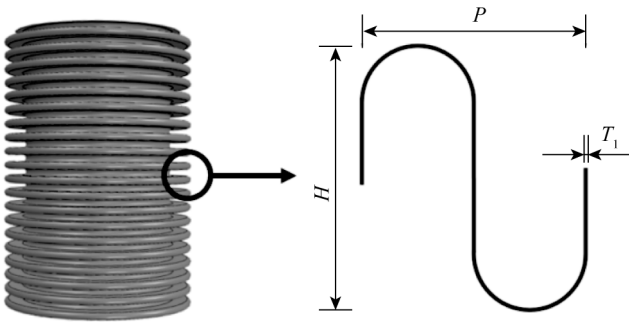


图 6 内衬 U 型波纹管截面结构示意图

Fig. 6 Section structure of lined U-shaped bellows

考虑到 U 型波纹管的实际工艺水平与规范要求^[22-23],分别取波距 P 的范围为 6.0~12.0 mm、波高 H 的范围为 7.0~13.0 mm、壁厚 T_1 的范围为 0.8~1.2 mm。为方便计算,采用有限元分析软件中的 S4R 壳单元建立内衬 U 型波纹管参数化模型,其材料为 304 不锈钢(弹性模量为 193 GPa、泊松比为 0.3)。在实际工程应用中,内衬 U 型波纹管作为低温柔性管道的最内层结构,决定着整个管道结构的最小弯曲半径。应使得 U 型波纹管具有较小的弯曲刚度,进而保证整个管道的弯曲柔顺性,并同时控制 U 型波纹管的制造成本。因此,在低温柔性管道内衬层的多目标优化中,以内衬 U 型波纹管的弯曲刚度 EI_1 最小(保证整管的弯曲柔顺性)和质量 m_1 最小(控制成本)作为两个优化目标进行多目标优化,其多目标优化列式如式(1)所示。需要特别指出的是,波纹管的成本与材料用量、成型精度、工艺选择等密切相关。为简化计算,暂不考虑成型工艺等其他因素的影响,取成型后的材料用量,即质量作为成本的标识,抗拉铠装层与辅助层的成本做同样处理。

to find: P, H, T_1

$\min: [EI_1, m_1]$

$\text{s.t.: } 6.0 \text{ mm} \leq P \leq 12.0 \text{ mm}$
 $7.0 \text{ mm} \leq H \leq 13.0 \text{ mm}$
 $0.8 \text{ mm} \leq T_1 \leq 1.2 \text{ mm}$

(1)

根据代理模型建模方法,分别采用神经网络模型(RBF)、Kriging 模型以及响应面模型(RSM)三种方法建立输入变量与输出变量的映射关系。基于参数化有限元模拟计算 U 型波纹管结构在 6 组波距 P 、6 组波高 H 、5 组壁厚 T_1 下的弯曲刚度及质量,由此共获得 180 组数据样本。随机取其中的 90 组数据建立代理模型,取余下的 90 组数据验证其预测准确度,得到基于三种建模方法的代理模型及其预测的准确度(与有限元模拟结果相比),如表 1 所示。由表 1 中数据可知,在低温柔性管道内衬层结构的代理模型中,虽然神经网络模型(RBF)的方差与响应面模型(RSM)的方差几乎相等,但 RBF 模型的平均误差均小于 RSM 模型;Kriging 模型的方差与平均误差均劣于 RBF 模型与 RSM 模型。由此可见,与其他两种建模方法相比,RBF 模型具有准确度好、稳定性强等优点。因此,选用神经网络模型(RBF)建立低温柔性管道内衬层结构的代理模型。

表 1 内衬层代理模型预测准确度对比(与有限元模型相比)

Tab. 1 Precision comparison of agent models of lined U-shaped bellows (compared with FEM results)

代理模型	弯曲刚度 EI_1		质量 m_1	
	平均误差	方差	平均误差	方差
RBF	0.019 3	0.993	0.001 6	0.999
Kriging	0.080 6	0.882	0.077 5	0.926
RSM	0.026 3	0.993	0.002 3	1.000

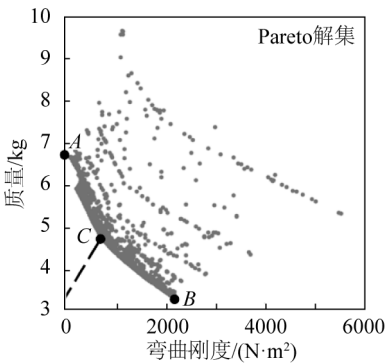


图 7 内衬层多目标优化的 Pareto 解集

Fig. 7 Pareto solution for multi-objective optimization of lined U-shaped bellows

在低温柔性管道内衬层结构的多目标优化设计中,基于 NSGA-II 优化算法对其多目标优化问题进行计算求解。设置初始优化种群规模为 90,遗传代数为 100,可基于 NSGA-II 优化算法计算出 1 167 个 Pareto 优化解集,所得 Pareto 解集如图 7 所示。由图 7 可知,在 Pareto 优化解集中,A 点表示弯曲刚度最小的单目标优化时内衬 U 型波纹管的设计,此时弯曲柔顺性最优;B 点表示质量最小单优化目标时内衬 U 型波纹管的设计,此时质量最小(一定程度上表示制造成本最低);C 点则表示兼顾质量与弯曲刚度两个目标时(坐标原点到 Pareto 前沿距离最短的设计点),内衬 U 型波纹管结构的多目标优化设计。三个点分别代表的低温柔性管道内衬波纹管层的结构设计方案如表 2 所示。

表 2 低温柔性管道内衬层代表性设计方案

Tab. 2 Typical designs of lined U-shaped bellows of cryogenic flexible hose

设计点	波高 H/mm	波距 P/mm	厚度 T_1/mm	弯曲刚度 $EI_1/(\text{N} \cdot \text{m}^2)$	质量 m_1/kg	描述
A	12.9	12.0	0.80	94.7	6.69	以最小弯曲刚度为单目标
B	7.0	6.0	0.80	2 136.4	3.34	以最小质量为单目标
C	10.0	6.2	0.80	748.6	4.73	兼顾质量与弯曲刚度的多目标

从表 2 中的数据可以看出,虽然 A 点的弯曲刚度最小($94.7\text{ N}\cdot\text{m}^2$),但其质量最大,达到 6.69 kg ;而虽然 B 点的质量最小,为 3.34 kg (仅为 A 点的一半),但其弯曲刚度远远大于 A 点对应的弯曲刚度(是 A 点弯曲刚度的 22 倍);而 C 点较好地兼顾了质量与弯曲刚度的设计要求,可以更好地满足低温柔性管道内衬波纹管结构的使用要求。同时,从上述分析可以看出,对于 Pareto 前沿上的优化设计点,当弯曲刚度变优时,必然引起质量目标的劣化;反之亦然。这体现了多目标优化中 Pareto 前沿的工程设计意义。

2.2 抗拉铠装层的多目标优化

本节进行低温柔性管道结构抗拉铠装层的多目标优化。抗拉铠装层结构如图 8 所示。其中, α 为抗拉铠装层扁带状纤维的螺旋缠绕角度, T_2 为扁带状纤维的厚度。抗拉铠装层结构的力学性能是由其扁带状纤维螺旋缠绕角度 α 和厚度 T_2 所确定,因此取以上两个结构参数作为低温柔性管道抗拉铠装层多目标优化的设计变量。

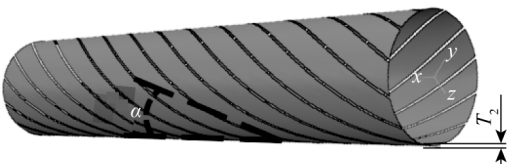


图 8 抗拉铠装层螺旋缠绕结构示意图
Fig. 8 Structure of spiral armored layer

考虑到抗拉铠装层的工程应用需要与实际工艺水平^[24],分别取扁带状纤维螺旋缠绕角度的范围为 $30^\circ\sim 40^\circ$ 、壁厚 T_2 的范围为 $1.0\sim 3.0\text{ mm}$ 。为方便计算,基于有限元分析软件中的 C3D8R 实体单元建立抗拉铠装层结构的参数化模型,选用碳纤维编织材料(弹性模量为 84 GPa 、泊松比为 0.36)。在实际工程应用中,抗拉铠装层是低温柔性管道的重要承载结构,其主要承担轴向载荷。当低温柔性管道在位作业时,海面上的风、浪、流等环境载荷较为恶劣,要求抗拉铠装层具有较强的拉伸刚度,进而有效抵抗管道整体的轴向变形,防止因管道整体变形过大而导致的失效。同时,管道设计也要求控制抗拉铠装层的制造成本(与内衬层相同,本节中亦采用抗拉铠装层的质量作为成本标识)。因此,在低温柔性管道抗拉铠装层的多目标优化中,以抗拉铠装层的拉伸刚度 EA 最大(保证整管具有足够的拉伸刚度)和质量 m_2 最小(控制成本)作为两个优化目标进行多目标优化,其多目标优化列式如式(2)所示。

to find: α, T_2

$\min: [EA, -m_2]$

s.t.: $30^\circ \leq \alpha \leq 40^\circ$

$1.0\text{ mm} \leq T_2 \leq 3.0\text{ mm}$

(2)

与内衬层类似,分别采用神经网络模型(RBF)、Kriging 模型以及响应面模型(RSM)三种方法建立抗拉铠装层力学性能的代理模型。基于参数化建模,计算出在 10 组螺旋缠绕角度 α 、8 组厚度 T_2 组合下抗拉铠装层的拉伸刚度及质量,由此共获得 80 组数据样本。随机取其其中的 40 组数据建立代理模型,取余下的 40 组数据验证其预测准确度,得到基于三种建模方法的代理模型及其预测的准确度(与有限元模拟结果相比),如表 3 所示。

表 3 抗拉铠装层代理模型准确度对比(与有限元模型相比)
Tab. 3 Precision comparison of agent models of spiral armored layer (compared with FEM results)

代理模型	拉伸刚度 EA		质量 m_2	
	平均误差	方差	平均误差	方差
RBF	0.037 3	0.974	0.014 9	0.994
Kriging	0.077 6	0.868	0.047 8	0.949
RSM	0.063 1	0.941	0.028 9	0.987

由表 3 中数据可知,在低温柔性管道抗拉铠装层结构的代理模型中,与其他两种建模方法相比,神经网络模型(RBF)的近似准确度最好、稳定性最强。因此,本节同样选用神经网络模型(RBF)建立低温柔性管道抗拉铠装层结构的代理模型。

在低温柔性管道抗拉铠装层结构的多目标优化设计中,同样基于 NSGA-II 优化算法对其多目标优化问题进行计算求解。设置初始优化种群规模为 40,遗传代数为 100,可基于 NSGA-II 优化算法计算出 1 237 个 Pareto 优化解集,所得 Pareto 解集如图 8 所示(为在图中更直观得到 Pareto 最优前沿,此处将质量 m_2 最小化处理为负质量($-m_2$)最大化)。由图 9 可知,在 Pareto 优化解集中,A 点表示拉伸刚度最大的单目标优化时抗拉铠装层的设计,此时抵抗管道整体轴向变形的能力最强;B 点表示质量最小单优化目标时抗拉铠装层的设计,此时质量最小(一定程度上表示制造成本最低);C 点则表示兼顾质量与拉伸刚度两个目标时(坐标原点到 Pareto 前沿距离最短的设计点),抗拉铠装层结构的多目标优化设计。

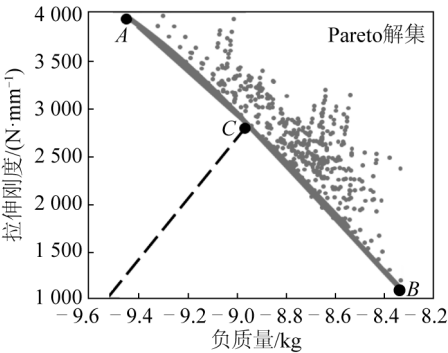


图 9 抗拉铠装层多目标优化的 Pareto 解集
Fig. 9 Pareto solution for multi-objective optimization of spiral armored layer

三个点分别代表的低温柔性管道抗拉铠装层的结构设计方案如表 4 所示。从表 4 中的数据可以看出,虽然 A 点的拉伸刚度最大(3 843.7 N/mm),但其质量也最大,为 9.41 kg;而虽然 B 点的质量最小(仅为 8.36 kg),但其拉伸刚度远远小于 A 点对应的拉伸刚度(仅为 A 点拉伸刚度的 27%);而 C 点较好地兼顾了质量与拉伸刚度的设计要求,可以更好地满足低温柔性管道抗拉铠装层结构的使用要求。从上述分析亦可看出,对于 Pareto 前沿上的优化设计点,当拉伸刚度变优时,必然引起质量目标的劣化;反之亦然。

表 4 低温柔性管道抗拉铠装层代表性设计方案
Tab. 4 Typical designs of spiral armored layer of cryogenic flexible hose

设计点	螺旋角度 $\alpha/(^{\circ})$	厚度 T_2/mm	拉伸刚度 $EA/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$	质量 m_2/kg	描述
A	30.0	3.0	3 843.7	9.41	以最大拉伸刚度为单目标
B	35.0	1.0	1 042.7	8.36	以最小质量为单目标
C	30.0	2.3	2 753.8	8.97	权衡质量与拉伸刚度的多目标

2.3 辅助层的多目标优化

本节进行低温柔性管道结构辅助层的多目标优化。辅助层结构包括防磨层、护套层、保温层,其结构可简化成如图 10 所示的薄壁圆筒,对应的厚度分别为 T_3 、 T_4 、 T_5 。其中,保温层主要起到隔绝内外热量传递、防止管道外壁结冰的作用,可通过热传导理论直接求出保温层最小厚度 T_5 ,进而以最小的成本实现隔绝热量传递的效果,因此本文不针对保温层进行优化设计。除保温层外,防磨层和护套层的结构都是由其对应的厚度 T_3 、 T_4 所确定,因此取以上两个结构参数作为低温柔性管道辅助层多目标优化的设计变量。

考虑到辅助层的防磨层与护套层在实际工程应用中的功能需要^[25],分别取防磨层厚度 T_3 的范围为 2.0~6.0 mm、护套层厚度 T_4 的范围为 1.0~3.0 mm。为方便计算,采用有限元分析软件中的 S4R 壳单元建立辅助层结构的参数化模型,选用橡胶材料(弹性模

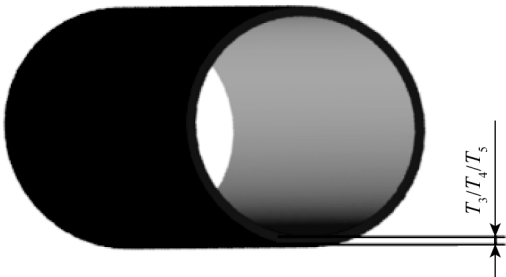


图 10 辅助层结构参数示意
Fig. 10 Structure of auxiliary layers

量为 78 GPa、泊松比为 0.47)。在实际应用中,防磨层主要起到防止各个金属层结构之间的摩擦、磨损作用,而护套层则主要起到保护整个管道、防止腐蚀的作用。在满足防磨层和护套层自身功能的基础上,应使得其具有较好的弯曲柔顺性,进而保证整个管道的弯曲柔顺性,并同时控制防磨层和护套层的制造成本。此外,由于防磨层和护套层属于非金属材料,还希望其起到一定隔绝热量传递的作用。因此,在低温柔性管道辅助层的多目标优化中,以辅助层的弯曲刚度 EI_2 最小(保证整管的弯曲柔顺性)、质量 m_3 最小(控制成本)(与内衬层相同,本节中亦采用辅助层的质量作为成本标识)以及热传递速率 R 最小(保证整管的隔热性能)作为三个优化目标进行多目标优化,其多目标优化列式如式(3)所示。

$$\begin{cases} \text{to find: } T_3, T_4 \\ \text{min: } [EI_2, R, m_3] \\ \text{s.t.: } 2.0 \text{ mm} \leq T_3 \leq 6.0 \text{ mm} \\ \qquad \qquad 1.0 \text{ mm} \leq T_4 \leq 3.0 \text{ mm} \end{cases} \quad (3)$$

类比内衬层、抗拉铠装层,分别采用神经网络模型(RBF)、Kriging 模型以及响应面模型(RSM)三种方法建立辅助层的代理模型。基于参数化有限元模拟计算出辅助层在 10 组防磨层厚度 T_3 、10 组护套层厚度 T_4 下的弯曲刚度 EI_2 、质量 m_3 以及热传递速率 R ,由此共获得 100 组数据样本。随机取其中的 50 组数据建立代理模型,取余下的 50 组数据验证其预测准确度,得到基于三种建模方法的代理模型结果及其预测的准确度(与有限元模拟结果相比),如表 5 所示。

表 5 辅助层代理模型准确度对比(与有限元模型相比)

Tab. 5 Precision comparison of agent models of auxiliary layers (compared with FEM results)

代理模型	弯曲刚度 EI_2		质量 m_3		传热速率 R	
	平均误差	方差	平均误差	方差	平均误差	方差
RBF	0.001 5	0.999	0.000 7	0.999	0.007 8	0.998
Kriging	0.057 3	0.943	0.052 9	0.962	0.052 9	0.954
RSM	0.011 7	0.998	0.001 6	0.999	0.062 9	0.945

由表 5 数据可知,在低温柔性管道辅助层结构的代理模型中,与其他两种建模方法相比,神经网络模型(RBF)的平均误差与方差均是最优的。因此,本节同样选用神经网络模型(RBF)建立低温柔性管道辅助层的代理模型。

在低温柔性管道辅助层的多目标优化设计中,基于 NSGA-II 优化算法对其多目标优化问题进行求解。设置初始优化种群规模为 50,遗传代数为 100,可基于 NSGA-II 优化算法计算出 2 552 个 Pareto 优化解集,优化所得 Pareto 解集如图 11 所示。

从 Pareto 优化解集中可选出部分具有代表性的低温柔性管道辅助层设计方案,如表 6 所示。从表 6 中的数据可以看出,虽然 A 点的弯曲刚度最小($10.4 \text{ N} \cdot \text{m}^2$),但其传热速率最大,质量也处于明显劣势;而 B 点的质量虽然最小(仅为 8.15 kg),但其弯曲刚度是 A 点对应弯曲刚度的 2 倍以上;而 C 点的传热速率虽然最小,但其弯曲刚度是 A 点对应弯曲刚度的 3 倍以上,质量也处于劣势;而 D 点较好地兼顾了弯曲刚度、质量、传热速率的设计要求,可以更好地满足低温柔性管道辅助层结构的使用要求。

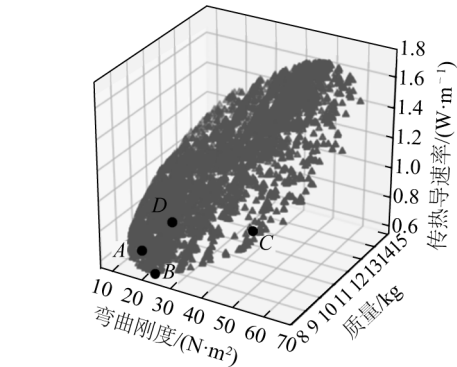


图 11 辅助层多目标优化的 Pareto 解集

Fig. 11 Pareto solution for multi-objective optimization of auxiliary layers

表 6 低温柔性管道辅助层部分代表性设计方案
Tab. 6 Typical designs of auxiliary layers of cryogenic flexible hose

设计点	耐磨层厚度 T_3/mm	护套层厚度 T_4/mm	弯曲刚度 $EI_2/(\text{N} \cdot \text{m}^2)$	质量 m_3/kg	传热速率 $R/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1})$	描述
A	3.71	1.97	10.40	9.82	0.83	以最小弯曲刚度为单目标
B	2.50	2.40	21.80	8.15	0.62	以最小质量为单目标
C	6.00	3.00	38.71	12.46	0.55	以最小传热速率为单目标
D	3.50	2.10	12.70	10.30	0.78	权衡弯曲刚度、质量、传热速率的多目标

3 结 语

以海上浮式液化天然气装置系统 (FLNG) 的低温柔性管道为研究对象, 针对其多材料、多层复合的结构设计难点, 将其按照不同功能解耦成内衬层、抗拉铠装层及辅助层三个关键结构层。基于神经网络模型 (RBF)、Kriging 模型以及响应面模型 (RSM) 三种建模方法建立了上述三个结构层响应分析的代理模型, 并通过模型准确度的比较, 发现神经网络模型 (RBF) 的误差均最小。在优化设计中, 基于遗传算法中的 NSGA-II 算法分别对低温柔性管道的内衬层、抗拉铠装层、辅助层三个关键结构层分别进行多目标优化设计, 得到了各个结构层的 Pareto 优化解集。可根据实际工程应用中的特定需求, 在 Pareto 优化解集里找到各个结构层的最优解。本文的研究工作为低温柔性管道的结构提供了关键设计参数及理性的设计方法。

目前主要对机械载荷下低温柔性管道的多目标优化设计进行了研究, 未来还需充分考虑因超低温环境造成的温度应力以及成型工艺参数等对管道性能的影响, 研究超低温环境下低温柔性管道各结构层材料的性能变化规律; 并考虑在拉伸、弯曲、扭转、多工况复合载荷作用下进行低温柔性管道的结构力学分析与优化设计。

参考文献:

[1] 张风伟, 匡晓峰, 齐向阳. LNG-FSRU 在软刚臂系泊下水动力特性研究[J]. 海洋工程, 2018, 36(6): 38-45. (ZHANG Fengwei, KUANG Xiaofeng, QI Xiangyang. Hydrodynamic study of soft yoke moored LNG-FSRU[J]. The Ocean Engineering, 2018, 36(6): 38-45. (in Chinese))

[2] 张东伟, 胡志强, 陈刚, 等. FLNG 液舱晃动压力影响因素及安全性评估研究[J]. 海洋工程, 2015, 33(6): 26-34. (ZHANG Dongwei, HU Zhiqiang, CHEN Gang, et al. Research on influencing factors and safety evaluation for sloshing-induced-pressure in FLNG liquid tanks[J]. The Ocean Engineering, 2015, 33(6): 26-34. (in Chinese))

[3] 杨亮, 刘森儿, 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 Miao'er, LIU Yun, et al. Analysis on current situation and application prospect of FLNG cryogenic hose technology[J]. Ocean Engineering Equipment and Technology, 2019, 6(6): 810-818. (in Chinese))

[4] 杨亮, 刘森儿, 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 Miao'er, LIU Yun, et al. Progress of the research on unloading system for LNG floating production storage and offloading unit[J]. Naval Architecture and Ocean Engineering, 2018, 34(3): 8-14. (in Chinese))

[5] 张进, 安晨, 高强, 等. 海洋 LNG 低温软管结构设计与试验研究现状[J]. 海洋工程装备与技术, 2020, 7(5): 300-310. (ZHANG Jin, AN Chen, GAO Qiang, et al. Research situation of structural design and experiment of offshore LNG cryogenic hose[J]. Ocean Engineering Equipment and Technology, 2020, 7(5): 300-310. (in Chinese))

[6] 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.

[7] GIACOSA A, MAURIES B, LAGARRIGUE V, et al. Joining forces to unlock LNG tandem offloading using 20" LNG floating hoses: An example of industrial collaboration[C]//Proceedings of the Offshore Technology Conference. USA, 2016.

[8] LAGARRIGUE V, HERMARY J. Re-shaping LNG transfer [C]//Proceedings of the Offshore Technology Conference. USA, 2018.

[9] SRIVASTAVA V, BUITRAGO J, SLOCUM S. Stress analysis of a cryogenic corrugated pipe [C]//Proceedings of the 30th

- International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. 2011; 411-421.
- [10] BUITRAGO J, SLOCUM S, HUDAK S, et al. Cryogenic structural performance of a corrugated pipe[C]//Proceedings of the 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. 2010; 331-342.
- [11] EN. Installation and equipment for liquefied natural gas-design and testing of marine transfer systems-Part 2: Design and testing of transfer hoses; EN1474-2[S]. 2008.
- [12] WITZ J, TAN Z. On the flexural structural behavior of flexible pipes, umbilicals and marine cables[J]. Marine Structures, 1992, 5(2): 229-249.
- [13] SAEVIK S, YE N. Aspects of design and analysis of offshore pipelines and flexibles[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2016.
- [14] TANG Minggang, YANG Chan, YAN Jun. Validity and limitation of analytical models for the bending stress a helical wire in unbonded flexible pipes[J]. Applied Ocean Research, 2015, 50(3): 58-68.
- [15] 程耿东. 工程结构优化设计基础[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2020. (CHENG Gengdong. Introduction to optimum design of engineering structures[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2020. (in Chinese))
- [16] 赖宇阳. Isight 参数优化理论与实例详解[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012. (LAI Yuyang. Isight parameter optimization theory and case study[M]. Beijing: Beihang University Press, 2012. (in Chinese))
- [17] 王元, 王德禹. 考虑晃荡效应的独立 B 型 LNG 液舱结构多目标优化[J]. 海洋工程, 2016, 34(2): 88-94. (WANG Yuan, WANG Deyu. Structural multi-objective optimization of SPB LNG tanks under sloshing pressure[J]. The Ocean Engineering, 2016, 34(2): 88-94. (in Chinese))
- [18] 张卫红, 徐仕杰, 朱继宏. 循环对称结构的多尺度拓扑优化方法[J]. 计算力学学报, 2021, 38(4): 512-522. (ZHANG Weihong, XU Shijie, ZHU Jihong. Multi-scale topology optimization method for cyclic symmetric structures[J]. Journal of Computational Mechanics, 2021, 38(4): 512-522. (in Chinese))
- [19] YANG Zhixun, YAN Jun, SAEVIK S. Integrated optimisation design of a dynamic umbilical based on an approximate model[J]. Marine Structures, 2021, 7(78): 102995.
- [20] 张平, 马健, 那景新. 波纹管耐撞性的多目标优化[J]. 振动与冲击, 2015, 34(15): 12-16. (ZHANG Ping, MA Jian, NA Jingxin. Multi-objective optimization for crashworthiness of corrugated tubes[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(15): 12-16. (in Chinese))
- [21] 刘佳琦, 蔡忠华, 王德禹. 基于拓扑优化与多目标优化的集装箱相似畸变模型设计[J]. 海洋工程, 2020, 38(2): 39-48. (LIU Jiaqi, CAI Zhonghua, WANG Deyu. Design of container similarity distortion model based on topology optimization and multi-objective optimization[J]. The Ocean Engineering, 2020, 38(2): 39-48. (in Chinese))
- [22] KO B, PARK G, LEE W. Mechanical behavior of U-shaped bellows and shape optimal design using multiple objective optimization method[J]. KSME Journal, 1995, 9(1): 91-101.
- [23] 樊大钧. 波纹管设计学[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 1988. (FAN Dajun. Bellows design science[M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 1988. (in Chinese))
- [24] 王东, 卢青针, 吴尚华, 等. 海洋柔性管道抗拉铠装钢丝加工残余应力分析研究[J]. 海洋工程装备与技术, 2019, 6(S1): 80-85. (WANG Dong, LU Qingzhen, WU Shanghua, et al. Study on residual stress for tensile armor wires of marine flexible pipeline during winding forming process[J]. Ocean Engineering Equipment and Technology, 2019, 6(S1): 80-85. (in Chinese))
- [25] 吴尚华, 王旭颀, 杨志勋, 等. 海洋橡胶管道弯曲失效特征行为分析研究[J]. 中国造船, 2019, 60(4): 12-19. (WU Shanghua, WANG Xujie, YANG Zhixun, et al. Study on bending failure behavior of marine rubber hoses[J]. Shipbuilding of China, 2019, 60(4): 12-19. (in Chinese))