

文章编号:1005-9865(2023)02-0031-11

## 基于遗传算法的缓波型立管多目标集成优化

余 杨<sup>1,2</sup>, 刘 成<sup>1,2</sup>, 余建星<sup>1,2</sup>, 赵明仁<sup>1,2</sup>, 李振眠<sup>1,2</sup>

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 天津大学 天津市港口与海洋工程重点实验室, 天津 300072)

**摘 要:**缓波型立管由于设计参数较多且优化目标之间相互影响,设计结果具有很大的不确定性。随着代理模型和智能优化算法的发展,针对缓波型立管的优化可以提出更好的解决方案。以提高力学性能和经济效益为优化目标,采用基于Kriging插值模型和NSGA-II算法的多目标优化策略,对考虑顶部浮体影响的深水缓波型立管进行动力响应分析,并开展线型—截面双目标优化集成设计和线型—浮筒三目标优化集成设计。将处于不同几何尺度的设计变量进行集成,旨在各目标存在相互竞争的情况下,与截面、浮筒设计形成有效互动以提高线型设计的总体性能。结果表明,Pareto最优解集可提供多个选择方案,以满足工程实际需要。将所选最优方案与初始设计进行对比,并以疲劳性能和成本估算作为优化的校核指标,取得了理想的优化效果。

**关键词:**缓波型立管;遗传算法;代理模型;动力响应;多目标优化;集成设计

**中图分类号:**P756.2 **文献标志码:**A **DOI:**10.16483/j.issn.1005-9865.2023.02.004

## Multi-objective integrated optimization of steel lazy wave riser based on genetic algorithm

YU Yang<sup>1,2</sup>, LIU Cheng<sup>1,2</sup>, YU Jianxing<sup>1,2</sup>, ZHAO Mingren<sup>1,2</sup>, LI Zhenmian<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Port and Ocean Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The design of steel lazy wave riser has great uncertainty due to the large number of design parameters and the interplay between optimization objectives. With the development of approximate model and intelligent optimization algorithm, a better solution can be proposed for the optimization of steel lazy wave riser. In order to improve the dynamic behavior and economic performance, a multi-objective optimization strategy based on Kriging interpolation and NSGA-II algorithm is adopted to analyze the dynamic response of deepwater steel lazy wave riser considering the influence of floating platform. In the case of competing objectives, the dual-objective optimization configuration-section integrated design and three-objective optimization configuration-buoyancy module integrated design are carried out, aiming to achieve effective interaction to improve the overall performance of the configuration. It is observed that Pareto optimal solution set can provide multiple alternatives to satisfy the engineering requirement. The optimal scheme is compared with the initial design, and the fatigue performance and cost estimation are taken as the validation, indicating that this multi-objective integrated optimization strategy obtains desired results.

**Keywords:** steel lazy wave riser; genetic algorithm; approximate model; dynamic response; multi-objective optimization; integrated design

缓波型立管通过在立管中部添加浮筒,使得其构型异于传统的钢悬链线立管,不仅能有效地减小立管顶部拉力,还能在一定程度上缓解触地区的疲劳损伤,被认为是基于钢悬链线立管的有效改良设计。缓波

收稿日期:2022-04-26

基金项目:高技术船舶科研项目经费资助(SSBQ-2020-HN-01-03);国家自然科学基金面上资助项目(52071234,51879189)

作者简介:余 杨(1988—),男,福建泉州人,博士,副教授,主要从事船舶与海洋工程研究。E-mail:yang.yu@tju.edu.cn

通信作者:刘 成。E-mail:2020205155@tju.edu.cn

型立管特殊的结构形式也决定了其构型的复杂性,不同构型的立管从结构强度、力学性能到疲劳寿命、经济性都不相同,这给缓波型立管的优化设计带来了很大的不确定性。由于设计参数较多且互相影响,由此引发了本文对缓波型立管优化设计的探讨。传统的立管构型优化常采用人工试算法<sup>[1]</sup>,这种设计方法要求设计者凭借经验给出立管的初始构型参数再进行校核,若不满足要求则重新确定设计参数。此种方法不仅对设计者能力要求高,并且设计周期冗长,设计结果存在随机性。随着智能算法的发展,目前缓波型立管的优化可以借助智能算法实现高效设计。

目前已经有多位国内外学者采用智能算法进行立管优化设计。Larsen 和 Hanson<sup>[2]</sup>、Vieira 等<sup>[3]</sup> 和 Pina 等<sup>[4]</sup>应用遗传算法、粒子群算法等方法以立管成本为优化目标对钢悬链线立管进行了优化设计。但这些学者着重考虑立管的静态结果,忽略了动态响应,不能较好地反映实际情况。Tanak 和 Martins 等<sup>[5]</sup>将立管动态响应结果作为目标函数,同时考虑立管成本,采用遗传算法和模拟退火两种优化算法对缓波型立管进行优化设计。Martins 等<sup>[6]</sup>应用非线性时域模拟方法,采用 NSGA-II 算法对顺应式垂直通路立管(CVAR)进行了多目标优化。Yang 和 Zheng 等<sup>[7]</sup>利用代理模型对钢悬链线立管进行可靠性优化设计,代替了非线性时域分析,大大提高设计效率。Yang 等<sup>[8]</sup>同样采用代理模型方法,以浮筒数目和单位长度浮力作为优化目标对缓波型脐带缆的浮筒进行设计,有效降低时间成本。徐莹<sup>[9]</sup>分别以静态应力、动态应力和疲劳寿命最小化为优化目标,对缓波型立管进行优化设计。

大多数学者将截面设计、线型设计和浮筒设计分开来考虑,这种“解耦设计”造成设计周期冗长、效率低下,并且没有考虑到各设计变量之间的相互影响,不利于立管的整体性能优化<sup>[10]</sup>。例如基于立管截面结构强度的设计不一定有利于提高立管整体线型的力学性能,而基于线型参数的设计可能过于保守导致浮筒数目偏多,浪费材料。除此之外,传统的多目标优化方法采用权重法,即将多个优化目标加权整合为一个目标,优化结果与期望结果存在较大差距,且只能得到一个最终解,没有其他选择方案<sup>[11]</sup>。本文基于 Kriging 插值模型和 NSGA-II 算法提出对缓波型立管开展多目标优化集成设计,旨在考虑各优化目标相互制约的情况下,与截面、浮筒的设计形成有效互动以提高线型设计的总体性能,通过减少设计步骤来获得更大的成本优势,为提升整个立管设计流程的效率提供了新的思路,具有重要的工程实际意义。

## 1 理论方法

### 1.1 立管耦合运动方程

通常的,在立管与半潜式平台的全耦合运动分析中,平台可以看成是刚体,作为一个特殊节点通过导缆孔与立管和系泊缆连接,其对立管的激励主要体现为对立管顶端的强制位移。将立管在空间中进行离散化处理,则可以得到立管系统的动力平衡方程:

$$\mathbf{R}^I(\mathbf{r}, \ddot{\mathbf{r}}, t) + \mathbf{R}^D(\mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}}, t) + \mathbf{R}^S(\mathbf{r}, t) = \mathbf{R}^E(\mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}}, t) \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{R}^I$ 、 $\mathbf{R}^D$ 、 $\mathbf{R}^S$  分别表示惯性力、阻尼力和内部应力矩阵,  $\mathbf{R}^E$  表示外载荷矩阵。  $\mathbf{r}$ 、 $\dot{\mathbf{r}}$ 、 $\ddot{\mathbf{r}}$  分别为结构单元的位移、速度、加速度矢量。

惯性力矩阵表示为:

$$\mathbf{R}^I(\mathbf{r}, \ddot{\mathbf{r}}, t) = \mathbf{M}(\mathbf{r})\ddot{\mathbf{r}} \quad (2)$$

其中,  $\mathbf{M}$  为系统质量矩阵,包括结构质量、管道内流体流动质量和水动力质量。

阻尼力矩阵表示为:

$$\mathbf{R}^D(\mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}}, t) = \mathbf{C}(\mathbf{r})\dot{\mathbf{r}} \quad (3)$$

其中,  $\mathbf{C}$  为系统阻尼矩阵,包含了结构内部阻尼和水动力阻尼。外载荷矩阵  $\mathbf{R}^E(\mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}}, t)$  包括重力、浮力、平台运动激励以及风、浪、流等环境载荷。

式(1)采用基于增量的 Newmark- $\beta$  法进行动态积分以及 Newton-Raphson 迭代法用于保证每一步内力和外力之间的平衡。立管耦合运动增量运动方程可以表示为:

$$\mathbf{M}_i \Delta \ddot{\mathbf{r}} + \mathbf{C}_i \Delta \dot{\mathbf{r}} + \mathbf{K}_i \Delta \mathbf{r} = \mathbf{R}_{i+\Delta t}^E - (\mathbf{R}_i^I + \mathbf{R}_i^D + \mathbf{R}_i^S) \quad (4)$$

其中,  $\Delta \ddot{\mathbf{r}}$ 、 $\Delta \dot{\mathbf{r}}$ 、 $\Delta \mathbf{r}$  为节点的加速度增量、速度增量和位移增量。

## 1.2 Kriging 插值模型

代理模型方法由于具有显著提高优化设计效率的优点,在海洋工程领域及其他领域得到了广泛应用。其中,源于地质统计学的 Kriging 插值模型是最具代表性的方法之一<sup>[12-13]</sup>。Kriging 插值模型由参数部分和非参数部分组成,是一种基于统计理论的半参数化插值方法,可以表述为<sup>[14]</sup>:

$$\begin{cases} f(\mathbf{x}) = \mu + \varepsilon(\mathbf{x}), E(\varepsilon) = 0 \\ \text{cov}[\varepsilon(\mathbf{x}^{(i)}), \varepsilon(\mathbf{x}^{(j)})] \neq 0, \forall i, j \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $f(\mathbf{x})$  是样本点处的真实响应;  $\mu$  是样本点的响应均值;  $\varepsilon$  是期望值为零的误差,其关于样本点的协方差函数  $\text{cov}$  的值不能为 0。

$\hat{f}(\mathbf{x})$  是代理模型,当  $f(\mathbf{x})$  和  $\hat{f}(\mathbf{x})$  的均方差最小时,  $\hat{f}(\mathbf{x})$  表达为:

$$\hat{f}(\mathbf{x}) = \hat{\mu} + \mathbf{r}^T(\mathbf{x})\mathbf{R}^{-1}(\mathbf{f} - \hat{\mu}\mathbf{i}) \quad (6)$$

其中,  $\hat{\mu}$  是  $\mu$  的估计值;  $\mathbf{r}$  是相关向量;  $\mathbf{R}^{-1}$  是相关矩阵  $\mathbf{R}$  的逆矩阵;  $\mathbf{f}$  是含有  $n$  个样本点的样本;  $\mathbf{i}$  是由  $n$  个 1 组成的向量。相关矩阵  $\mathbf{R}$  可参考文献<sup>[15]</sup>。

缓波型立管的运动往往具有较强的非线性。Kriging 插值模型只选取附近某些已知样本点的信息线性加权,然后以最小化估计值的误差来预测未知点的信息,不受其他样本影响,因此在处理非线性程度较高的问题时容易获得比较理想的拟合效果。除此之外,由于立管单元数目较多,所以通过构造 Kriging 插值模型去替代计算工作量巨大的数值模拟分析可以对最优点实现快速预测,提高优化效率。

为了建立精度较高的代理模型,必须要获得具有均匀性、正交性和收敛性的样本点。由于每次试验都是基于 SESAM 数值模拟软件进行,计算耗时较大,且缓波型立管不同设计变量处于明显不同的几何尺度,本文采用拉丁超立方方法(LHS)对样本进行设计,目的在于选取尽可能少的样本点的同时又不失均匀性。LHS 方法属于分层抽样法,可以保证所有的抽样区域都能被抽样点覆盖<sup>[16]</sup>。

## 1.3 NSGA-II 算法

多目标优化问题是指在一个设计方案中使多个目标在某种约束条件下得到优化的问题,在多数情况下,各目标相互存在设计矛盾,一个目标的优化往往要以牺牲另一个目标作为代价,所以各目标无法同时达到最优。传统的权重法通过将目标函数加权整合转化成单目标优化问题,若要获得多个最优解就必须多次运行优化模型,难以获得最佳优化效果。

针对上述问题,遗传算法可以较好地克服这一困难。遗传算法是一种在达尔文的进化论基础上发展起来的智能寻优算法,其模仿了生物界中的自然选择和自然遗传机制。其中,带精英策略的非支配排序 NSGA-II 算法是最常见的用于解决多目标优化问题的遗传算法,通过引入快速无支配排序方法和拥挤度估计等方法获得 Pareto 最优解集,大大提高了优化效率<sup>[17]</sup>。NSGA-II 算法的具体迭代过程如图 1 所示,其中,  $g$  表示种群进化代数。

## 1.4 优化设计流程

文中的缓波型立管多目标优化集成设计流程如图 2 所示,具体实现方法可描述为:

- 1) 将缓波型立管型设计变量与截面设计变量、浮筒设计变量进行集成,通过拉丁超立方试验设计构造一定数目的样本点。
- 2) 考虑风、浪、流的联合作用及浮式平台的耦合作用,利用水动力软件 SESAM 对样本点所对应的立管设计方案进行动力响应分析。

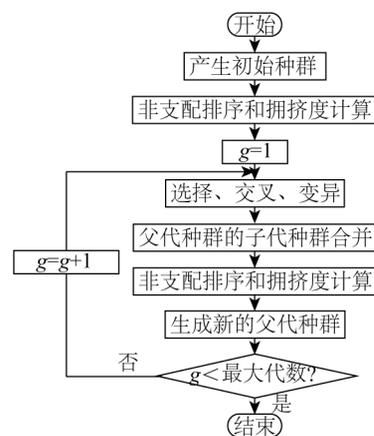


图 1 NSGA-II 算法原理示意

Fig. 1 Schematic diagram of NSGA-II algorithm principle

3)提取立管动力响应结果,建立 Kriging 插值模型并进行误差分析。

4)编写 NSGA-II 算法代码,以提高立管整体力学性能、截面结构强度和经济效益为优化目标,得到缓波型立管多目标优化问题的 Pareto 前沿。

5)根据工程实际需要从 Pareto 最优解集中选取最优解,与初始设计进行对比并以疲劳性能和成本估算作为校核指标。

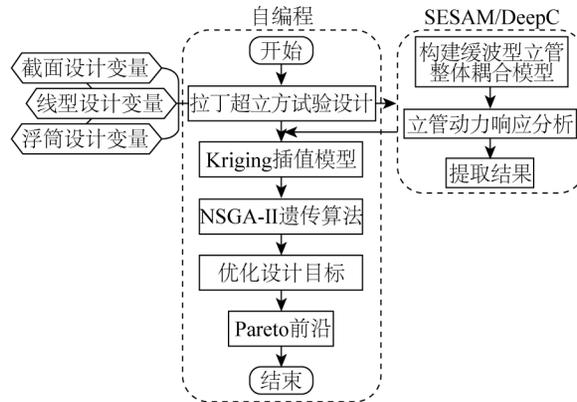


图2 缓波型立管优化设计流程框架

Fig 2 Optimization design procedure of steel lazy wave riser

## 2 计算模型

考虑不规则风、浪、流的联合作用,不同等级的海况下计算得到的立管动力响应结果不同,会导致所构建的代理模型存在差异,但由于 NSGA-II 算法具有非常强大的全局寻优能力,所以得出的结论具有普遍性。现选取我国南海某海域百年一遇工况,环境参数如表 1 所示。

表 1 环境参数

Tab. 1 Environmental parameters

工况	水深/m	波浪			风		流	
		波浪谱	有效波高/m	谱峰周期/s	风谱	风速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	海面流速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	海底流速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )
百年一遇	1 500	Jonswap	13.4	14.7	NPD	43.7	2.04	0.35

考虑浮式平台及系泊缆的耦合影响,浮式平台参考某工作于我国南海北部陵水油气田的作业水深为 1 500 m 的半潜式平台,采用分段张紧式系泊形式<sup>[18]</sup>。平台主尺度参数及系泊缆主要参数见表 2 和表 3,平台计算模型见图 3。

表 2 半潜式平台主体参数

Tab. 2 Main parameters of semi-submersible platform

参数	数值
吃水/m	37.0
干舷/m	22.0
总长、宽/m	91.5
立柱中心线间距/m	70.5
立柱宽度/m	21.0
浮筒高度/m	9.0
浮筒长度/m	49.5
排水/t	$1.05\times 10^5$

表 3 系泊缆主要参数  
Tab. 3 Main parameters of mooring line

系泊缆	长度/m	规格	直径/m	EA/MN	单位长度质量/(kg·m <sup>-1</sup> )
船链	131	R4S Chain	0.157	1 960.0	493.0
复合缆	1 950	Polyester	0.256	707.4	45.1
底链	259	R4S Chain	0.157	1 960.0	493.0

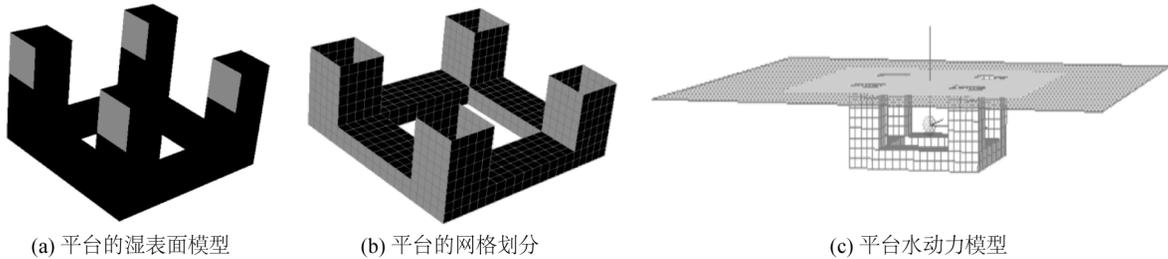


图 3 半潜式平台计算模型  
Fig. 3 Numerical model of semi-submersible platform

缓波型立管初始线型参考文献[9],主要参数如表 4 所示。

表 4 缓波型立管主要参数  
Tab. 4 Main parameters of steel lazy wave riser

参数	数值	参数	数值
外径/m	0.232	$L_1$ /m	1 560
内径/m	0.181	$L_2$ /m	455
杨氏模量/kPa	$2.07 \times 10^8$	$L_3$ /m	720
轴向刚度/kN	$3.424 \times 10^6$	浮筒长度/m	2
弯曲刚度/(kN·m <sup>2</sup> )	$18.531 \times 10^3$	浮筒直径/m	1
总长度/m	2 735	浮筒间距/m	2.3
水平总跨距/m	1 763	浮筒密度/(t·m <sup>-3</sup> )	0.4

这里运用 SESAM 软件进行缓波型立管的动力响应分析。首先利用 GeniE 模块建立半潜平台的湿表面模型,然后利用 HydroD 模块对平台进行水动力分析,最后在 DeepC 模块中建立立管和系泊缆模型,分别用 SIMO 和 RIFLEX 对浮式平台和系泊缆、立管等细长结构进行非线性时域分析。因考虑立管内流体会随着立管截面尺寸变化而变化,进而对立管动力响应结果造成影响,故将立管设置为空管状态。建立平台—系泊缆—立管整体耦合模型,如图 4 所示。

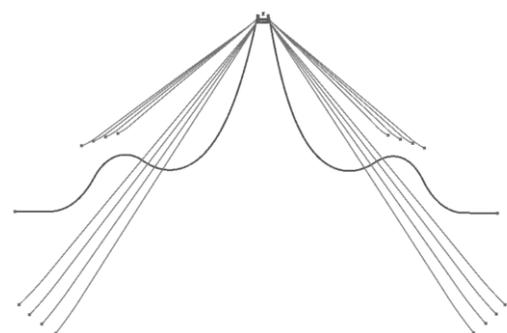


图 4 整体耦合模型  
Fig. 4 Global coupling model

### 3 多目标优化集成设计

#### 3.1 设计变量和优化目标分析

在立管的线型设计中,缓波型立管的三段长,即上悬链线段长度  $L_1$ 、浮力段长度  $L_2$  和下悬链线段长度  $L_3$

是控制立管在位线型最直接的设计变量,直接影响着立管的最大拉力和弯曲曲率的响应。标记线型设计变量  $X_1 = (L_1, L_2, L_3)$ 。对于截面的设计变量,由于壁厚  $t$  的变化会直接导致立管拉伸刚度和弯曲刚度的变化,进而影响立管的抗拉性能和柔顺性能。所以选取壁厚  $t$  作为截面设计参数,标记截面设计变量  $X_s = (t)$ ,这里视整根立管上下截面参数保持一致。对于浮筒的设计变量,浮筒分布间距  $S_f$  直接决定了浮筒的数目,即浮力段所提供浮力的大小,进而影响波型<sup>[19]</sup>。所以选取浮筒分布间距  $S_f$  作为浮筒设计参数,标记浮筒设计变量  $X_b = (S_f)$ 。这三类设计变量均属于不同的几何尺度,如图5所示。

针对缓波型立管的优化,以往的设计方案通常是以串行或循环迭代的方法先后对立管进行截面设计、线型设计和附件安装设计。设计周期冗长、效率低下,不利于立管的整体性能优化。将线型设计参数与截面设计参数或者附件设计参数进行集成的耦合设计方法能综合考虑不同设计步骤中的设计参数,减少设计步骤,同时可以避免多次构造代理模型,是相较于传统“解耦设计”在设计效率和模拟精度上的提升。基于集成设计方法提出了以线型设计为主的线型—截面集成设计和线型—浮筒集成设计。

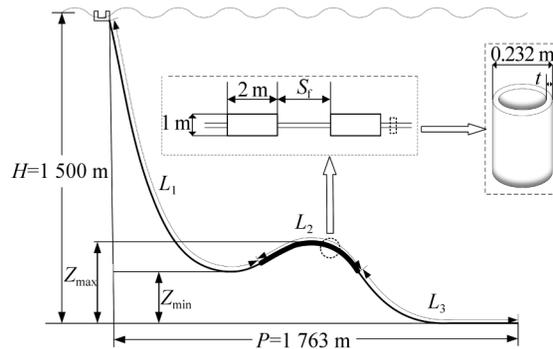


图5 缓波型立管集成设计变量示意

Fig. 5 Schematic diagram of design variables of the integrated optimization of steel lazy wave riser

综合分析,在线型—截面集成设计中,考虑整体线型动力响应性能和截面结构强度,针对拉伸破坏行为提出以最大张力响应和拉伸刚度的比值,即最大拉伸应变作为优化目标;针对弯曲破坏行为提出以最大弯曲曲率响应和弯曲刚度的乘积,即最大截面弯矩作为优化目标,进行双目标优化。在线型—浮筒集成设计中,考虑整体线型动力响应性能和经济适用性,提出以最大张力响应、最大弯曲曲率响应和以浮筒数目作为表征的浮筒材料体积作为优化目标的三目标优化。在立管三段长  $L_1, L_2, L_3$  保持不变的情况下,截面壁厚和浮筒分布间距对各优化目标的影响如图6所示。

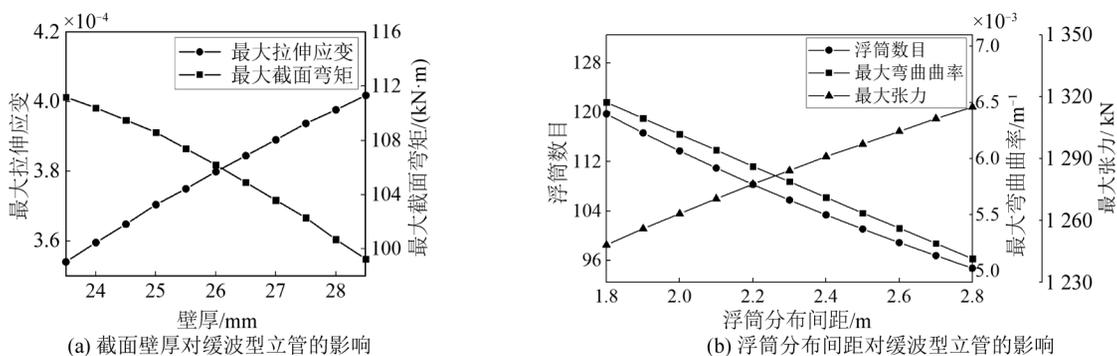


图6 两种设计变量参数对缓波型立管的影响

Fig. 6 Influence of two design variables on the steel lazy wave riser

由图6可以看到在一个多目标优化方案中,不同的优化目标往往存在相互竞争的现象,一个目标性能的提升往往要以牺牲另一个目标作为代价。这里的双目标优化问题和三目标优化问题分别如式(7)和式(8)所示。

$$\begin{aligned}
 & \text{find } [X_1 + X_s] \\
 & \min \left[ \frac{F_{\max}}{K_F}, k_{\max} \times K_B \right] \\
 & \text{s.t.} \begin{cases} F_{\max} \leq \hat{F} \\ k_{\max} \leq \hat{k} \\ \underline{L}_1 \leq L_1 \leq \overline{L}_1 \\ \underline{L}_2 \leq L_2 \leq \overline{L}_2 \\ \underline{L}_3 \leq L_3 \leq \overline{L}_3 \\ \underline{t} \leq t \leq \overline{t} \end{cases} \quad (7)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{find } [X_1 + X_b] \\
 & \min [F_{\max}, k_{\max}, N] \\
 & \text{s.t.} \begin{cases} F_{\max} \leq \hat{F} \\ k_{\max} \leq \hat{k} \\ \underline{L}_1 \leq L_1 \leq \overline{L}_1 \\ \underline{L}_2 \leq L_2 \leq \overline{L}_2 \\ \underline{L}_3 \leq L_3 \leq \overline{L}_3 \\ \underline{S}_f \leq S_f \leq \overline{S}_f \end{cases} \quad (8)
 \end{aligned}$$

式中： $F_{\max}$ 和 $k_{\max}$ 分别为最大张力响应和最大弯曲曲率响应， $K_F$ 和 $K_B$ 分别为截面拉伸刚度和截面抗弯刚度， $N$ 为浮筒数目， $\hat{F}$ 和 $\hat{k}$ 分别表示最大许用张力和曲率，下划线“ $\underline{\quad}$ ”和上划线“ $\overline{\quad}$ ”分别代表设计变量的下限值和上限值。

设计变量的取值范围除了要满足基本工程要求以外，还应当满足一定的约束条件，如图 5 所示，为避免上悬链线段触地和浮力段拱起过高， $Z_{\min}$ 不得小于 80 m， $Z_{\max}$ 不大于 500 m。各设计参数取值范围如表 5 所示。

表 5 设计变量取值范围  
Tab. 5 Value range of design variables

设计变量	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$t$	$S_f$
初始设计	1 560	455	720	0.025 5	2.3
下限	1 480	400	680	0.023 5	1.8
上限	1 760	500	820	0.028 5	2.8

### 3.2 线型—截面双目标优化集成设计

通过自编程可实现代理模型的构建和遗传算法的寻优，NSGA-II 算法参数设置如表 6 所示。

表 6 NSGA-II 算法主要参数  
Tab. 6 Main parameters of NSGA-II algorithm

参数	种群规模	进化代数	交叉概率	变异概率
数值	150	300	0.90	0.10

图 7 所示解集为在满足自变量范围内通过寻优得出的一组 Pareto 最优解，这组最优解利用 Kriging 插值模型根据样本点动力响应计算结果近似预测得到，所以需要精确数值模拟进行误差分析。提取单目标最优解即图 7 中 Pareto 前沿中的 A 点和 B 点对应的设计变量进行动力响应分析，两种极端设计下的缓波型立管构型如图 8 所示。经对比分析发现误差均小于 1.49%，如表 7 所示。考虑到风、浪、流环境的不规则性以及半潜平台和系泊缆的耦合影响，该误差范围可充分验证所提出的多目标优化策略的准确性和可行性。

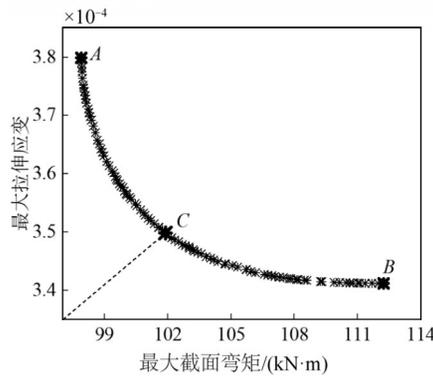


图 7 线型—截面集成设计 Pareto 前沿

Fig. 7 Pareto front of the configuration-section integrated design

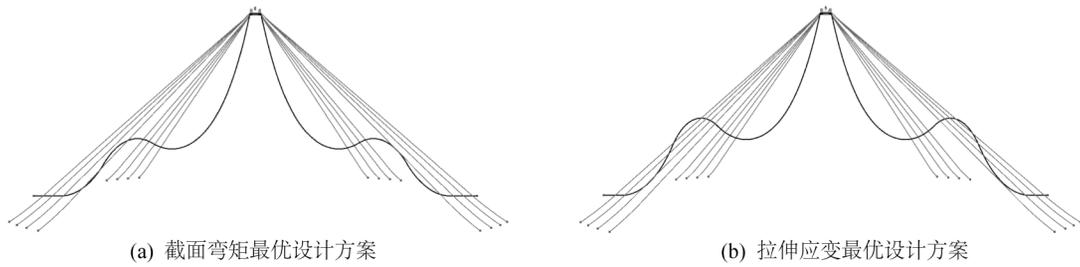


图 8 单一目标最优方案立管构型对比

Fig. 8 Comparison of the configurations for two single-objective optimization

表 7 单一目标最优方案数值结果对比

Tab. 7 Comparison of the numerical results for two single-objective optimization

计算方法	截面弯矩最优设计		拉伸应变最优设计	
	最大截面弯矩/(kN·m)	最大拉伸应变	最大截面弯矩/(kN·m)	最大拉伸应变
代理模型	97.89	$3.799 \times 10^{-4}$	112.2	$3.412 \times 10^{-4}$
数值模拟	97.34	$3.806 \times 10^{-4}$	113.9	$3.385 \times 10^{-4}$
误差/%	0.57	0.18	1.49	0.80

在实际工程中这两种设计方案都属于极端设计方案,应当避免,最优设计方案应当为兼顾拉伸应变和截面弯矩两个优化目标的方案。根据工程实际需要可以在 Pareto 最优解集中视具体情况权衡选择其中一个解作为最终设计方案,一般情况下选取坐标原点附近的解作为最优方案,使得各目标函数值均能取得相对较小值以实现各目标性能的平衡。这里选取 C 点作为参考最优解,以期实现缓波型立管抗拉性能和柔顺性能的平衡。提取 C 点设计变量进行动力响应计算并与初始设计对比,结果如图 9 所示。数值结果对比如表 8 所示。

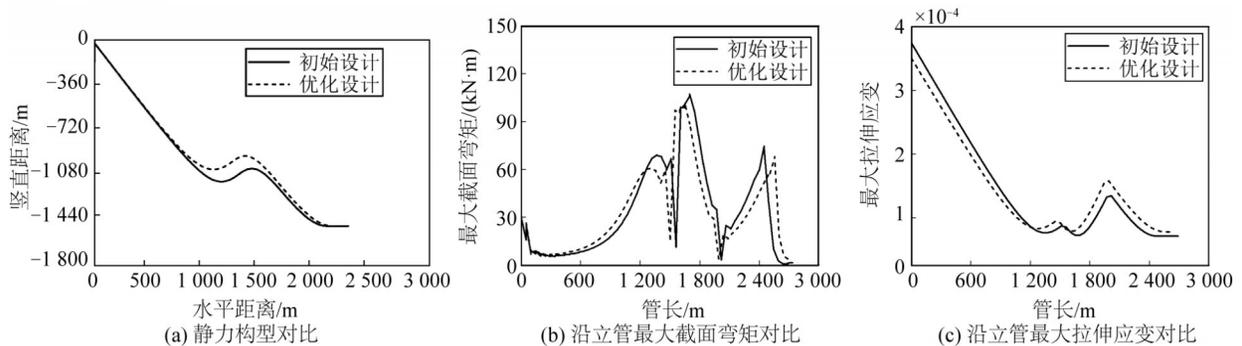


图 9 线型—截面集成设计优化前后结果对比

Fig. 9 Results comparison between the initial and configuration-section integrated designs

表 8 初始设计与线型一截面集成设计数值结果对比

Tab. 8 Numerical result comparison between the initial and configuration-section integrated designs

设计方案对比	优化目标		截面参数		整体线型参数		
	最大截面弯矩/ (kN·m)	最大拉伸应变	壁厚/mm	上悬链线段/m	浮力段/m	下悬链线 段/m	总长/m
初始设计	107.4	$3.750 \times 10^{-4}$	25.5	1 560	455	720	2 735
优化设计	101.9	$3.498 \times 10^{-4}$	24.5	1 500.542	488.963	704.525	2 694.031
变化率/%	-5.12	-6.72	-3.92	—	—	—	-1.50

可以看到,优化后的立管截面壁厚减小且浮力段长度增加,导致与初始设计相比立管波型拱起更高,波型更陡,且由于上悬链线段长度的减小,波型前移,而下悬链线段长度的减小则有利于调节整体线型曲率更平稳的分布。波型更高更陡使得立管浮力段前后拉伸性能有所降低,但立管截面壁厚的减小与浮力段长度的增加有效缓解了悬挂点处的拉力,立管最大拉伸应变减小 6.72%,总体而言拉伸性能得到提高。除此之外,波型变陡会导致浮力段曲率变大,但由于截面壁厚的减小导致抗弯刚度的减小,立管的最大截面弯矩呈减小的效果,较优化前降低了 5.12%。通过与初始设计对比,优化后缓波型立管的整体动力响应性能有着一定程度的提升,无论是抗拉性能还是柔顺性能都得到了改善,保证立管在在位工况环境下长期安全运行。再者,立管总长度及截面壁厚的减小降低了立管自重,一方面有利于降低平台运动时产生的拉力,另一方面也节省了立管的材料,提高利用率。

为了更进一步验证本文提出的多目标优化策略的可靠性,现基于中国南海某海域海洋环境统计数据对两种设计方案的疲劳性能进行评估,并将疲劳寿命预测作为优化前后的校验目标。采用雨流计数法进行应力时程统计,得到各级应力幅值、应力均值和应力循环次数,再结合材料的 S-N 曲线计算各级应力循环造成的疲劳损伤并基于 Miner 线性损伤累积理论获得缓波型立管沿管长的疲劳寿命。计算结果如图 10 所示。可以发现,立管最小疲劳寿命发生在悬挂点处,且经过优化设计后较初始设计提高了 18.51%,整体的疲劳性能尤其是触地区的疲劳性能也有所提高,从另一角度论证了本次优化的可行性。

### 3.3 线型一浮筒三目标优化集成设计

以浮筒数目、浮力段曲率和悬挂点有效张力为目标的三目标优化计算得出的 Pareto 前沿如图 11 所示,这是一组三维空间内的最优解集,分布在一个不规则曲面上。与双目标优化类似,权衡选取参考最优解进行动力响应分析与初始设计进行对比,结果分别如图 12 和表 9 所示。

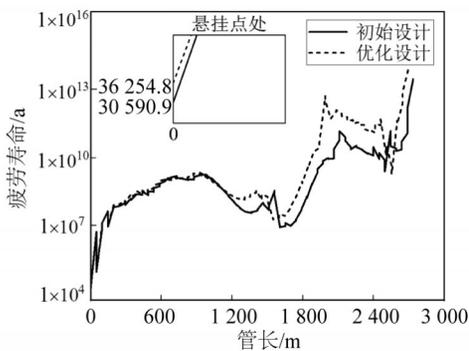


图 10 线型一截面优化前后疲劳寿命对比

Fig. 10 Fatigue life comparison between the initial and configuration-section integrated designs

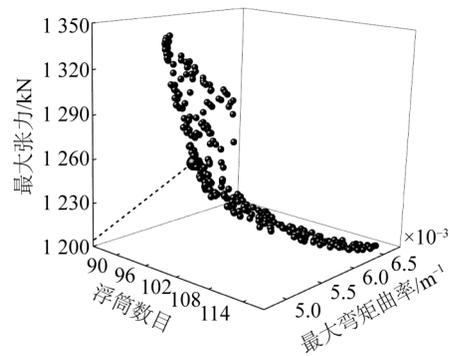


图 11 线型一浮筒集成设计 Pareto 前沿

Fig. 11 Pareto front of the configuration-buoyancy module integrated design

可以看到,优化后的立管虽然浮力段长度增加,但浮筒分布间距也增加,从而导致浮筒总数目减少了 5.69%。浮筒数目的减少使得浮力段提供总浮力减小,浮力分布更均匀,立管波型更平缓,立管最大弯曲曲率降低 12.25%,优化效果十分显著。从立管悬挂点的有效张力时程曲线来看,虽然优化前后数值差别不大,但并没有因为浮力段提供浮力减少而导致最大有效张力增大,反而降低了 1.11%,这是由于立管总长度减小导致立管自重的减小,从另一方面缓解了因浮筒浮力减小造成的悬挂点处的负荷。

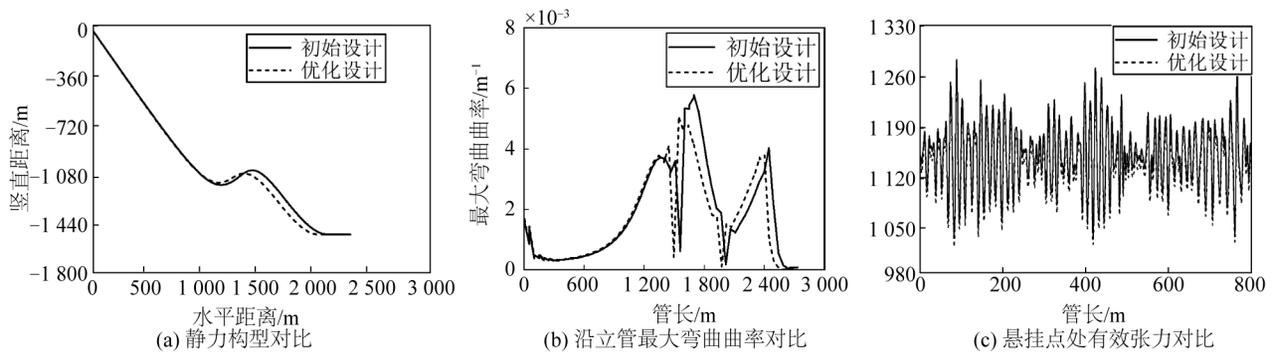


图12 线型—浮筒集成设计优化前后结果对比

Fig. 12 Results comparison between the initial and configuration-buoyancy module integrated designs

表9 初始设计与线型—浮筒集成设计数值结果对比

Tab. 9 Numerical results comparison between the initial and configuration-buoyancy module integrated designs

设计方案对比	优化目标		浮筒参数			整体线型参数		
	浮筒数目	浮力段曲率/ $m^{-1}$	悬挂点有效张力/kN	分布间距/m	上悬链线段/m	浮力段/m	下悬链线段/m	总长/m
初始设计	105.81	$5.795 \times 10^{-3}$	1284.24	2.3	1560	455	720	2735
优化设计	99.79	$5.085 \times 10^{-3}$	1269.95	2.795	1495.724	478.524	713.060	2687.308
变化率/%	-5.69	-12.25	-1.11	-21.52	—	—	—	-1.74

参考文献[20],对优化前后的缓波型立管进行成本差价估算。假设深水钢悬链线立管价格为10万元每米,浮筒单价包括浮筒立管夹及安装单价计10万元每个,则可节省成本约为540万元。本设计方案在满足线型设计基本需求的同时,不仅考虑了整体线型的力学性能指标,而且将经济性指标加入优化设计的考虑因素,得到各目标在可接受水平内优化后浮筒数量的最优设计结果,使得优化后的缓波型立管整体线型不仅具备更好的力学性能,而且更具成本优势,具有工程参考价值。

#### 4 结 语

针对缓波型立管,考虑平台和系泊缆耦合作用在时域中进行整体动力响应分析,基于Kriging插值模型和NSGA-II算法开展多目标优化集成设计。得到以下结论:

1) 缓波型立管线型设计变量、截面设计变量和浮筒设计变量处于不同的几何尺度,相较于传统的解耦设计,提出集成设计以提高优化效率,实现立管整体性能的优化。

2) 通过NSGA-II算法对缓波型立管进行多目标优化,得到的优化结果并不是唯一的而是一组最优解,根据实际工程需要可在Pareto最优解集中选择某一个解作为最优设计方案,相较于传统的权重法提供了更多的选择。

3) 从Pareto最优解集中选择一个解作为最优解并与优化前的目标值对比,对于线型—截面集成设计来说,两个目标值较初始设计分别降低了5.12%和6.72%;对于线型—浮筒集成设计来说,三个目标值较初始设计分别降低了1.11%、5.69%和12.25%,取得了理想的优化效果。

#### 参考文献:

- [1] 李英, 贾尚儒. 基于NSGA-II算法的陡波型柔性立管优化设计方法[J]. 中国造船, 2021, 62(4): 207-218. (LI Ying, JIA Shangru. Optimal design method of steep wave flexible riser based on algorithm NSGA-II [J]. Shipbuilding of China, 2021, 62(4): 207-218. (in Chinese))
- [2] LARSEN C M, HANSON T. Optimization of catenary risers[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1999, 121(2): 90-94.
- [3] VIEIRA I N, LIMA B S L P, JACOB B P. Bio-inspired algorithms for the optimization of offshore oil production systems[J].

- International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2012, 91(10): 1023-1044.
- [4] PINA A A D, ALBRECHT C H, LIMA B S L P, et al. Tailoring the particle swarm optimization algorithm for the design of offshore oil production risers[J]. Optimization and Engineering, 2011, 12(1/2): 215-235.
- [5] TANAKA R L, MARTINS C D A. Parallel dynamic optimization of steel risers[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2011, 133(1): 11301-11302.
- [6] MARTINS M A L, LAGES E N, SILVEIRA E S S. Compliant vertical access riser assessment: DOE analysis and dynamic response optimization[J]. Applied Ocean Research, 2013, 41: 28-40.
- [7] YANG H Z, ZHENG W. Metamodel approach for reliability-based design optimization of a steel catenary riser[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2011, 16(2): 202-213.
- [8] YANG H Z, WANG A J, LI H J, et al. Multi-objective optimization for deepwater dynamic umbilical installation analysis[J]. Science China Physics Mechanics and Astronomy, 2012, 55(8): 1445-1453.
- [9] 徐莹. 缓波型钢悬链立管分析与优化设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016. (XU Ying. Analysis and optimization design of steel lazy wave catenary riser[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016. (in Chinese))
- [10] 杨志勋. 海洋脐带缆结构几何双尺度分析及优化设计研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019. (YANG Zhixun. Study on geometric Bi-scale analysis and optimization design of the structure of marine umbilical [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019. (in Chinese))
- [11] 吴武刚. 深水顺应式垂直通路立管力学特性及优化研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017. (WU Wugang. Mechanical performance analysis and optimization design study of deepwater compliant vertical access riser [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2017. (in Chinese))
- [12] JONES D R, SCHONLAU M, WELCH W J. Efficient global optimization of expensive black-box functions[J]. Journal of Global Optimization, 1998, 13: 445-492.
- [13] SIMPSON T W, MAUERY T M, KORTE J J, et al. Kriging models for global approximation in simulation-based multidisciplinary design optimization[J]. AIAA Journal, 2001, 39(12): 2233-2241.
- [14] QUEIPO N V, HAFTKA R T, SHYY W, et al. Surrogate-based analysis and optimization[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2005, 41(1): 1-28.
- [15] ZIMMERMANN R. On the condition number anomaly of Gaussian correlation matrices [J]. Linear Algebra and Its Applications, 2015, 466: 521-526.
- [16] 吴振君, 王水林, 葛修润. LHS方法在边坡可靠度分析中的应用[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1047-1053. (WU Zhenjun, WANG Shuilin, GE Xiurun. Application of Latin hypercube sampling technique to slope reliability analysis [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(4): 1047-1053. (in Chinese))
- [17] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [18] 朱海山, 李达. 陵水17-2气田"深海一号"能源站总体设计及关键技术研究[J]. 中国海上油气, 2021, 33(3): 160-169. (ZHU Haishan, LI Da. Research on overall design and key technologies of "Deep Sea No. 1" energy station in LS17-2 gas field [J]. China Offshore Oil and Gas, 2021, 33(3): 160-169. (in Chinese))
- [19] 丁鹏龙, 李英, 刘志龙. 陡波型柔性立管浮力块参数优化及应用[J]. 海洋工程, 2014, 32(4): 18-24. (DING Penglong, LI Ying, LIU Zhilong. Optimization for buoyancy modulus of dynamic flexible risers with steep-wave configuration and its application[J]. The Ocean Engineering, 2014, 32(4): 18-24. (in Chinese))
- [20] 陈金龙. 海洋柔性立管线型基本设计方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018. (CHEN Jinlong. Research on the preliminary design method of flexible marine riser configurations [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018. (in Chinese))