船舶及海洋工程装备

柔性立管限弯器高效设计方法

董磊磊¹,王宦婷¹,王莹莹²

(1.大连理工大学 船舶工程学院,辽宁 大连 116024; 2.中国石油大学(北京) 安全与海洋工程学院,北京 102249)

摘要:目的 考虑聚氨酯材料非线性的影响,建立一种简单高效的柔性立管限弯器设计方法。方法 首先确 定限弯器的初始尺寸,在此基础上进行参数分析,并根据分析结果绘制设计图谱,然后通过插值获得最佳 的设计尺寸。结果 针对深水与浅水 2 种典型环境,分别采用本方法与基于遗传算法的优化设计方法进行限 弯器设计,通过结果对比验证了方法的有效性。同时发现,深水环境条件设计出的限弯器相对短粗,而浅 水条件设计出的限弯器则较为细长,且考虑材料非线性后,2 种环境下限弯器的设计尺寸均有所减小。结论 本文建立的限弯器设计方法具有广泛的适用性,且能够在确保得到理想设计方案的前提下,显著提高设计 效率。与基于遗传算法的优化设计方法相比,采用线性材料和考虑材料非线性时的设计效率可分别提高约 10 倍和 20 倍。

关键词:限弯器;结构设计;优化;遗传算法;细长梁模型;非线性响应分析 中图分类号:TJ02 文献标志码:A 文章编号:1672-9242(2024)08-0127-09 DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.08.015

Efficient Design Method of Flexible Riser Bend Stiffeners

DONG Leilei¹, WANG Huanting¹, WANG Yingying²

School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Dalian University of Technology, Liaoning Dalian 116024, China;
 College of Safety and Ocean Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

ABSTRACT: The work aims to build a simple and efficient design method for flexible riser bend stiffeners considering the nonlinear material behavior of polyurethane. The initial dimensions of the bend stiffener were firstly determined, based on which parametric analyses were performed and the design chart was drawn according to the analysis results. The optimal dimensions of the bend stiffener were then obtained using an interpolation technique. A case study was carried out for two typical environmental conditions, i.e. deep-water and shallow-water applications, using this method and the optimization method based on the genetic algorithm. The comparison of results confirmed the effectiveness of this method. It was also found through the comparison that the bend stiffener designed for the deep-water environmental condition was relatively short and thick, while that for the shallow-water condition was slenderer. The dimensions of the bend stiffeners for both conditions were smaller when material nonlinearity was taken into account. It is concluded that the developed method has a wide applicability and can significantly im-

收稿日期: 2024-05-20; 修订日期: 2024-05-30

Received: 2024-05-20; Revised: 2024-05-30

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC2803701);国家自然科学基金(52071054)

Fund: The National Key Research and Development Program of China (2022YFC2803701); The National Natural Science Foundation of China (52071054)

引文格式:董磊磊,王宦婷,王莹莹.柔性立管限弯器高效设计方法[J].装备环境工程,2024,21(8):127-135.

DONG Leilei, WANG Huanting, WANG Yingying. Efficient Design Method of Flexible Riser Bend Stiffeners [J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(8): 127-135.

prove the efficiency while ensuring the optimal design. Compared with the optimization method based on the genetic algorithm, the design efficiency, when using the linear material and considering material nonlinearity, can be improved by approximately 10 times and 20 times, respectively.

KEY WORDS: bend stiffener; structural design; optimization; genetic algorithm; slender beam model; non-linear behavior analysis

非黏合柔性立管因其良好的顺应性、耐腐蚀性和 低安装成本等优点,被广泛应用于海洋工程领域。然 而,因柔性立管与浮体结构的连接属于刚性连接,在 连接区域容易出现应力集中或过度弯曲。同时,在浮 体运动和波浪等交变激励的作用下,该区域还有可能 发生疲劳失效。因此,工程上通常会在连接区域安装 限弯器。限弯器在刚性较大的浮体和柔性较大的立管 之间提供了一个平缓的刚度过渡,有效避免了立管由 弯曲载荷导致的过度弯曲和交变载荷引起的疲劳破 坏^[1]。可见,作为柔性立管的关键附件,限弯器的合 理设计对保证立管的完整性至关重要。但是,目前限 弯器设计普遍是基于响应分析调整设计参数进行迭 代,这种方法不仅效率低下,且强烈依赖设计者的经 验。因此,建立一种简单高效的限弯器设计方法具有 重要的工程实用价值。

限弯器设计离不开可靠的结构响应分析,因此 国内外学者对限弯器的结构响应分析方法开展了深 入的研究。Beof 等^[2]将限弯器与柔性立管组成的系 统模拟为截面沿轴线变化的线弹性细长梁模型,分 析了立管在大变形下的曲率分布,并用有限元分析 验证了理论结果的准确性。后来众多学者又基于此 方法进一步讨论了不同设计参数对立管曲率分布的 影响^[3-6]。Tong 等^[7]提出的斜张力悬臂梁模型,以及 Drobyshevski^[8]建立的弹性梁模型等,也为限弯器的 结构响应分析提供了理论参考。为了更加准确地计算 立管的曲率分布, Vaz 等^[9]考虑了材料非线性对系统 响应的影响。在其模型中,限弯器材料的应力-应变 关系为拉压不对称的非线性关系,此时截面中性轴相 对于形心轴产生了一定的偏移。文中通过算例分析强 调了限弯器响应分析的精确性依赖于其材料本构关 系的准确测定。Caire 等^[10-14]考虑了材料黏弹性对限 弯器结构响应的影响。Caire 等^[15]考虑了柔性立管非 线性的弯矩-曲率关系的影响,但限弯器的材料属性 仍假定为线性。孙凯等[16]考虑了材料非线性、限弯器 与立管之间的接触摩擦,采用实体单元建立了限弯器 三维有限元模型,并对立管最大曲率随材料行为的变 化进行了讨论,认为材料非线性对限弯器抗弯性能的 影响显著,需要在设计时加以考虑。尽管材料非线性 对限弯器设计有较大影响,但因考虑材料非线性需要 相对较高的计算成本,因此在工程实践中,通常仍选 择采用线性本构关系开展设计,而仅在对设计方案进行最终校核时才考虑材料非线性^[17]。显然,如果校核不通过,必须修改设计方案,大大降低了设计效率。

限弯器设计通常难以一蹴而就,而是需要迭代确 定最优方案。因此,为了得到较为理想的结果,同时 减少对设计人员的经验依赖,部分学者将结构优化设 计理论与方法引入到了限弯器设计中。Tanaka 等^[18] 以脐带缆的许用曲率、限弯器尺寸、许用应变和端部 最大弯矩为约束,采用遗传算法对限弯器进行了优化 设计。Yang 等^[19]采用最优拉丁超立方方法建立了考 虑材料、几何和载荷不确定性的立管分析代理模型, 通过优化提高了限弯器的疲劳可靠性。Tang 等^[20]将 质量和抗疲劳性能作为优化目标,以柔性立管的最大 曲率为约束,对限弯器的尺寸参数进行了多目标优 化。然而,这些工作仍是假设限弯器材料的本构关系 为线性关系。优化算法固然能够在既定可行域内提供 最优值,但基于优化算法的设计过程往往需要进行大 量的结构响应分析与反复的迭代计算,计算量大,且 耗时严重。对于大多数优化算法,均难以保证当前寻 优结果即为全局最优解。以遗传算法为例,如果一个 个体的适应能力比种群内其他个体的适应能力强得 多,那么它的重复性可能足以覆盖整个种群,这就可 能导致遗传算法过早地陷入局部最优解,而不是全局 最优解。此外,如果设计变量数目较多,种群规模较 大时,更加需要大量的重复计算,在达到良好的结果 之前会非常耗时。

综上所述,限弯器材料的非线性会大大影响其设 计结果,而考虑材料非线性的优化设计则效率低下。 针对这一问题,本文建立了一种简单方便的限弯器设 计方法,能够在确保得到理想方案的前提下,显著提 升设计效率。

1 基本结构及力学模型

工程上常用的限弯器如图 1 所示,其基本结构 按几何形状可分为 3 段,根部为一段较短的圆柱段, 中间为锥形段,末端又是一段较短的圆柱段。图 1 中,*L*₁和 *D*₁分别为根部圆柱段的长度和外径;*L*₂ 为锥形段的长度;*L*₃和 *d*₂分别为末端圆柱段的长度 和外径。



图 1 限弯器基本结构^[21] Fig.1 Structural diagram of bend stiffener^[21]



根据柔性立管及限弯器系统的结构形式和受力 特点,可以将其模拟为根部刚性固定、末端受到倾斜 作用力(F, α, φ_L)的细长梁,其力学模型及系统微元 的受力如图 2 所示。其中, x和 y为笛卡尔坐标; s为弧长坐标; F 为端部作用力; α 为F 与立管轴线之 间的夹角,其值通常很小,一般可取为 0; φ_L 为立管 自由端的转角; T 和 V 分别为微元截面受到的张力和 剪力; M 为弯矩。





假设立管与限弯器之间不发生相对滑移,并忽略 限弯器自身的重力和其受到的水动力。由水平和竖直 方向力的平衡以及弯矩的平衡,结合变形协调关系, 可以建立在大变形下细长梁的4个一阶常微分方程:

$$\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}s} = \cos\phi \tag{1}$$

$$\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}s} = \sin\phi \tag{2}$$

$$\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}s} = \kappa \tag{3}$$

$$\frac{\mathrm{d}M}{\mathrm{d}s} = -F\sin\left(\phi_{\mathrm{L}} + \alpha - \phi\right) \tag{4}$$

式中: ϕ 为细长梁的转角, 随弧长 s 改变; κ 为 梁的曲率。

为了求解细长梁的结构响应,还须基于材料的应 力-应变关系补充弯矩 M 与曲率 κ 之间的关系。限弯 器通常由聚氨酯材料铸造而成,其应力-应变关系通 常需要通过试验测定,且可以采用 N 阶多项式对测得 的应力-应变关系 $\sigma = f(\varepsilon)$ 进行拟合,即:

$$\sigma = A_1 \varepsilon + A_2 \varepsilon^2 + A_3 \varepsilon^3 + \dots + A_N \varepsilon^N = \sum_{n=1}^N A_n \varepsilon^n$$
(5)

式中: A1, A2, A3,…, AN为多项式的拟合系数。

具有非线性应力-应变关系的薄壁圆管在纯弯曲 状态下的弯矩-曲率关系可按式(6)计算^[22]:

$$M = 4R^{2}t\sum_{n=1}^{N} A_{n}I_{n+1}(\kappa R)^{n}$$
(6)

式中: $R \ \pi t \ \beta$ 别为圆管截面的平均半径和壁厚; $I_n = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^n \theta d\theta$,且有式(7)所示的递推关系成立。

$$I_n = \frac{n-1}{n} I_{n-2} \tag{7}$$

式(6) 仅适用于薄壁管状截面,即 t<<R 的情况。 显然,限弯器截面并不满足这一条件。为了使用该方 法,这里将限弯器截面划分为若干同心圆环,使得对 于每个圆环均有 t<<R 成立^[7],如图 3 所示,则整个 截面的弯矩 *M* 即为各个圆环的弯矩 *M*_i之和^[7,23]:

$$M = \sum_{j=1}^{J} M_{j} = \sum_{j=1}^{J} 4R_{j}^{2} t \sum_{n=1}^{N} A_{n} I_{n+1} \left(\kappa R_{j}\right)^{n} = 4t \sum_{j=1}^{J} \sum_{n=1}^{N} A_{n} I_{n+1} \kappa^{n} R_{j}^{n+2}$$
(8)

式中: J 为划分的圆环个数。



图 3 限弯器截面的划分 Fig.3 Division of bend stiffener cross section

根据式(8)可以计算不同曲率下限弯器任意截 面的弯矩,进而得到细长梁截面的弯矩-曲率关系, 并可将弯矩以曲率的多项式进行表示,即:

些系数均为弧长坐标s的函数。

$$M = A\kappa + B\kappa^{2} + C\kappa^{3} + \cdots$$
 (9)
式中: *A*、*B*和*C*等均为拟合得到的系数,且这

将式 (9) 代入式 (4) 可得:

$$\frac{d\kappa}{ds} = -\frac{\left\{\frac{dA}{ds}\kappa + \frac{dB}{ds}\kappa^2 + \frac{dC}{ds}\kappa^3 + \dots + F\sin\left(\phi_{L} + \alpha - \phi\right)\right\}}{A + 2B\kappa + 3C\kappa^2 + \dots}$$
(10)

若采用线性本构关系 *σ=Eε*,则限弯器截面的弯 矩-曲率关系为 *M=EI*κ。将其代入式(4),式(10) 变为:

$$\frac{\mathrm{d}\kappa}{\mathrm{d}s} = -\frac{1}{EI} \left\{ \frac{\mathrm{d}EI}{\mathrm{d}s} \kappa + F \sin\left(\phi_{\mathrm{L}} + \alpha - \phi\right) \right\}$$
(11)

式中: E 为聚氨酯材料的弹性模量; I 为限弯器 截面的惯性矩。

结合式(1)~(3)及式(10)或(11),可以建 立求解柔性立管-限弯器系统结构响应的微分控制方 程组,其边界条件可由固定端和自由端的挠度和转角 给出: $x(0)=y(0)=\phi(0)=\phi(L)-\phi=0$ 。该问题是一个 典型的一维边值问题,故本文采用 MATLAB 软件中 的内置函数 bvp5c 进行求解。该函数采用配置方法来 求解边值问题,在处理奇点时更加稳定。

2 限弯器设计方法

2.1 设计方法概述

根据文献[17],在极值载荷作用下,若将限弯器 的根部直径保持不变,选取不同的长度比例因子来缩 放锥形段的长度,则柔性立管-限弯器系统的最小弯 曲半径 R_{min} 与锥形段长度之间的关系曲线上凸, 即在 某个长度范围内, R_{min}会达到最大值。这也意味着对 于当前所取的根部直径,该点对应的锥形段长度是最 优的。若再考虑不同的根部直径分别绘制 R_{min} 与锥形 段长度之间的关系曲线,则每条曲线均有1个最优点 出现, 连接所有的最优点, 即可得到一条最优的设计 线。对于一个合格的设计, R_{min}应不小于柔性立管的 许用弯曲半径 R_a。因此,可将比值 R_{min}/R_a作为衡量 标准。当 R_{min}/R_a=1.0 时,表明设计恰好满足要求。为 了直观判断设计是否可行,将 R_{min}/R_a 随根部直径和 锥形段长度这2个参数的变化绘制为设计图谱,并将 $R_{\min}/R_a=1.0$ 这条直线作为设计容许线一同绘入,如图 4 所示。设计线超过设计容许线的部分,便是符合要 求的合格设计,设计线与容许线的交点即为最优设 计。这样,只须计算少量根部直径和锥形段长度下 的结构响应,根据设计图谱的变化趋势,便可快速 得到合理的限弯器设计方案。该方法的设计流程如 图 5 所示。

2.2 设计载荷提取

根据柔性立管-限弯器系统的力学模型(见图2), 限弯器的设计载荷是指可能在细长梁内引起较大弯





矩的张力与角度组合。限弯器的设计应当确保柔性立 管在服役期间可能遭受的任何工况下均能保持完整 性。因此,为了获取限弯器的设计载荷,首先应对立 管进行典型工况下的整体动力分析。此时,分析模型 中不含限弯器,立管与浮体的连接模拟为铰接。整体 分析结束后,提取不同工况 *i*下立管顶端的最大张力 *F_{imax}*及其对应的角度 *φ_i*、最大角度 *φ_{imax}*及其对应的 张力 *F_i*以及最大伪曲率对应的张力和角度作为设计 载荷^[24]。

2.3 设计参数选取

为了使设计方法尽可能高效,应尽量减少设计变量的数目。通常,限弯器根部的圆柱段用于与浮体连接,其长度是由连接器和钢插入件的装配决定的。 末端圆柱段则用以补偿弯曲刚度的不连续性,其尺寸一般根据立管的外径确定。因此,这2部分的尺寸不依赖于结构响应分析,故本文选取锥形段的尺寸,即根部直径 D₁和锥形段的长度 L₂,作为限弯器的设计参数。

2.4 初始设计尺寸

合理的初始尺寸可以为后续设计阶段提供良好 的初值。确定初始尺寸时,假设限弯器的曲率半径沿 轴向恒定且达到许用弯曲半径,即限弯器弯成曲率半径为 R_a的一段圆弧(如图 6 所示),则锥形段长度的初始值为:

 $L_2 = R_a \phi_{\max} \tag{12}$

式中: qmax 取设计载荷中所有角度的最大值。



图 6 限弯器恒定弯曲时的力矩平衡 Fig.6 Moment equilibrium of bend stiffener with constant bend radius

根据力矩平衡和几何关系,可得限弯器的弯曲刚 度沿轴向的变化为:

$$EI(s) = EI_{\rm r} + 2F_{\rm max}R_{\rm a}^2\sin^2\left(\frac{s}{2R_{\rm a}}\right)$$
(13)

式中: *EI*_r 为立管的弯曲刚度; *F*_{max} 取设计载荷 中所有张力的最大值;弧长坐标*s* 从限弯器末端量起。

由式(13)可得锥形段外径沿轴向的变化:

$$D(s) = \left(\frac{64}{\pi} \frac{EI(s)}{E} + D_i^4\right)^{1/4}$$
(14)

式中: *D_i* 为限弯器的内径,通常比立管的外径稍大。将式(13)代入式(14),即可得根部直径的初始值,此时聚氨酯材料的弹性模量 *E* 可取其典型模量。

2.5 参数分析

在初始设计尺寸的基础上,考虑适当的比例因 子,对限弯器根部直径和锥形段长度进行缩放,考虑 材料非线性进行结构响应分析,并根据分析结果绘制 设计图谱,进而通过插值得到最佳的直径与长度。若 设计图谱中无最优点出现,则根据 *R*_{min}/*R*_a的变化趋 势,调整初始设计尺寸。例如,如果趋势线完全位 处于上升段(即图 4 中的区域 A),说明所取的初始 长度偏小;反之,如果趋势线全部位于下降段(即 图 4 中的区域 B),则表明初始长度偏大。此外,如 果出现最优点,但最优点全部位于容许线以下,则 需要同时增大长度与直径的取值。根据这一设计思 想,即使是毫无经验的设计人员,也能快速设计出 理想的限弯器。

3 设计实例及结果分析

下面通过立管不同服役环境下的设计实例验证 本方法的有效性。为了进行对比,同时采用遗传算 法进行优化设计。为此,首先对编制的优化程序进 行验证。

3.1 优化程序验证

遗传算法首先以随机方法决定一个初始群体,然 后通过选择、交叉、变异操作产生新的群体,最后根 据适者生存的原理,保留其中适应度大的后代,从而 使群体在搜索空间中越来越集中于最优的区域,最终 求出最优解^[25]。Tanaka 等^[18]曾采用遗传算法对一根 以自由悬链式构型安装在深水半潜式平台上的脐带 缆所用的限弯器进行了优化设计,本文将通过与其结 果进行对比来验证优化程序的准确性。

考虑到限弯器的尺寸越小越容易安装,也越容易 与其他装备进行连接,同时传递给浮体的力矩更小且 更具经济效益,Tanaka 等^[18]将限弯器的体积作为目 标函数,即:

$$V = \int_{L_1}^{L_1 + L_2 + L_3} \frac{\pi}{4} \left[D(s) \right]^2 ds - \frac{\pi}{4} d_1^2 \left(L_2 + L_3 \right)$$
(15)

所取设计变量为锥形段和末端圆柱段的尺寸,变 量的可行域见表1。

表 1 设计变量取值范围 Tab.1 Design variable range

Tu	Designi variable la	iige
设计变量	最小值/m	最大值/m
L_2	1.0	5.0
L_3	0.10	3.0
D_1	0.20	1.0
d_2	0.17	D_1

优化问题的约束条件需要针对具体问题决定, Tanaka 等^[18]基于设计实践选择的约束条件为,脐带 缆的许用曲率、限弯器的许用应变及最大端部弯矩, 具体取值见表 2。

表 2 约束条件及取值 Tab.2 Constraints and their values

脐带缆许用曲率	限弯器许用应	最大端部弯矩
/m ⁻¹	变/%	/(kN·m)
0.25	5	300

为了获得限弯器的设计载荷, Tanaka 等^[18]对不 含限弯器的脐带缆进行了整体动力分析, 共计算了 50 种工况, 最终选取 4 组张力和角度的组合作为设 计载荷, 见表 3。

限弯器的优化设计结果见表 4。从表 4 中可以看出,与 Tanaka 等^[18]的结果相比,本文优化程序得出

	表 3 设计载荷 Tab.3 Design load	ī s
工况	张力/kN	角度/(°)
1	192.2	14.3
2	333.9	21.0
3	321.2	21.4
4	247.3	22.2

的尺寸更小。对 Tanaka 等的优化方案进行响应分析 发现,不同工况下脐带缆的最大曲率和限弯器的最大 应变分别为 0.218 和 4.20%,均未达到表 2 中的许用 值,说明 Tanaka 等的寻优可能陷入了局部最优解。 对于本文的优化方案,最大曲率和最大应变分别为 0.25 和 5%,达到了各自的许用值,成功寻得了全局 最优解,从而验证了优化程序的准确性。

表 4 优化设计结果对比 Tab.4 Comparison of optimization design results

-		-		-	
参数	D_1/m	d_2/m	L_2/m	L_3/m	V/m^3
初始值	0.60	0.17	2.80	0.10	0.317 5
Tanaka 等 ^[18] 优化值	0.62	0.19	2.10	0.30	0.267 5
本程序优化值	0.52	0.18	1.67	0.11	0.144 3

3.2 设计实例

作业水深不同的柔性立管,其限弯器的设计载荷 具有不同的特征。在深水环境下,设计载荷通常张力 较大而角度较小;浅水环境则相反,往往张力较小而 角度较大。下面针对这2种典型情况分别进行限弯器 设计,采用的设计载荷见表5,柔性立管的相关参数 见表6,聚氨酯材料的应力-应变关系如图7所示。确 定限弯器的初始尺寸时,聚氨酯的弹性模量取 80 MPa,即图7中线性关系的斜率。

表 5 设计实例采用的设计载荷 Tab 5 Design loads for case study

Tab.5 Design loads for case study					
工况 -	深水环境		浅水环境		
	张力/kN	角度/(°)	张力/kN	角度/(°)	
1	2 473.46	4.86	33.70	48.50	
2	1 734.54	11.42	30.70	50.80	
3	1 651.18	12.77	16.40	54.70	
4	1 323.13	15.05	19.10	56.80	





限弯器的设计结果见表 7 和表 8,分别针对线性 和非线性关系的聚氨酯材料,线性关系的弹性模量仍 取 80 MPa。通过对比可知,本方法与基于遗传算法 的优化设计结果非常相近,从而验证了方法的有效 性。在相同主流配置的计算环境下,即使不计调试算 法的时间,假设聚氨酯为线性材料的优化设计耗时一 般也要超过 2 h,考虑材料非线性时耗时更是接近 4 h,而本方法只需十几分钟便均可完成设计,设计 效率分别提高了约 10、20 倍。这种效率提升不仅对 限弯器本身的设计有重要价值,对立管设计也有重要 意义,特别是在设计初期想要快速确认方案可行性或 从多个可行方案中筛选最优方案的时候。

对比不同水深的设计结果可以发现,深水环境的 限弯器相对短粗,而浅水环境的限弯器较为细长。这 是由不同环境下设计载荷的特点不同决定的。如前所 述,深水环境的设计载荷张力大角度小,限弯器根部 附近容易发生过度弯曲,故其形状短粗;而在浅水环 境下,设计载荷张力小、角度大,限弯器末端区域容 易发生过度弯曲,故其形状细长。

表 7 限弯器设计结果对比(线性材料) ab.7 Comparison of design results of bend stiffener for linear materia

rab. / Comparison of design results of bend stiffener for intear inaterial						
会粉		深水环境			浅水环境	
多奴	初始值	遗传算法优化值	本方法设计结果	初始值	遗传算法优化值	本方法设计结果
D_1/m	0.953	0.833	0.820	0.657	0.578	0.572
L_2/m	1.576	1.510	1.623	5.948	3.368	3.569
V/m^3	0.458	0.338	0.351	0.805	0.347	0.360

ての一般号路反打石未刈に(非线注約本) Tab.8 Comparison of design results of bend stiffener for nonlinear material							
会粉		深水环境			浅水环境		
多 奴	初始值	遗传算法优化值	本方法设计结果	初始值	遗传算法优化值	本方法设计结果	
D_1/m	0.953	0.830	0.839	0.657	0.571	0.578	
L_2/m	1.576	1.489	1.497	5.948	3.376	3.450	
V/m^3	0.458	0.331	0.340	0.805	0.338	0.356	

四本型の辻佐田社は(北松林社会)

对比相同环境下不同材料属性的结果可以发现, 考虑材料非线性后,限弯器的设计尺寸变化不大。这 是因为,在深水环境下,由于张力较大,几何非线性 对系统响应的影响更为重要,使得线性和非线性材料 下的曲率分布非常接近;对于浅水环境,在限弯器达 到的应变范围(约2%~4%)内,聚氨酯材料应力-应 变关系曲线的斜率与线性关系所取的弹性模量相差 并不大,如图7所示。

参考商业软件先采用线性材料开展设计,然后考

虑材料非线性进行校核的做法[17],对表7中的设计方 案进行校核,深水环境的结果如图 8 所示。从图 8 中 可见,在工况4的设计载荷作用下,限弯器根部附近 的最大曲率超过了许用曲率,说明基于线性材料的方 案不满足设计要求,需要重新调整设计参数。这一方 面说明采用线性材料时弹性模量的取值十分关键,另 一方面也凸显了直接采用非线性材料进行设计的必 要性。采用本文建立的方法,由此带来的计算成本增 加基本可以忽略不计。



图 8 考虑材料非线性的限弯器结构响应 Fig.8 Structural response of bend stiffener considering material nonlinearity: a) condition 1; b) condition 2; c) condition 3; d) condition 4

结论 4

本文建立了一种简单高效的柔性立管限弯器设 计方法,通过典型环境下的设计实例,得到以下结论: 1) 深水环境的设计载荷张力较大而角度较小,

设计出的限弯器相对短粗;浅水环境的设计载荷张力 较小而角度较大,设计出的限弯器相对细长。本文建 立的柔性立管限弯器高效设计方法在这 2 种典型环 境下均能得到理想的设计方案,具有广泛的适用性。 2) 基于线性材料的设计方案在考虑材料非线性 进行校核时可能不满足要求,需要调整设计参数;而 本文建立的设计方法可直接采用非线性材料进行设 计,避免了这一弊端,且基本不会增加计算成本。

3)建立的柔性立管限弯器高效设计方法可显著 提高设计效率,与基于遗传算法的优化设计方法相 比,采用线性材料和考虑材料非线性时的设计效率可 分别提高约 10 倍和 20 倍。

参考文献:

- 汤明刚. 深水柔性立管及附件设计的关键力学问题研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
 TANG M G. Study on Key Mechanical Problems in Design of Deepwater Flexible Riser and Its Accessories[D].
 Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [2] BOET W J C, OUT J M M. Analysis of a Flexible-Riser Top Connection with Bend Restrictor[C]// Proceedings of the 22nd Annual Offshore Technology Conference. Houston: [s. n.], 1990.
- [3] DE SOUZA J R, RAMOS R. Bending Stiffeners: A Parametric Structural Analysis[C]// Proceedings of the ASME 2008 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Estoril: American Society of Mechanical Engineers, 2009.
- [4] HE Y Y, VAZ M A, CAIRE M. An Inverse Problem for Parameter Estimation in a Bend Stiffener System[C]// Proceedings of the ASME 2018 37th International Conference on Ocean, Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Madrid: American Society of Mechanical Engineers, 2018.
- [5] HE Y Y, VAZ M A, CAIRE M. An Inverse Problem Methodology for Multiple Parameter Estimation in Bend Stiffeners[J]. Applied Ocean Research, 2019, 83: 37-47.
- [6] 刘刚, 袁振钦, 张磊, 等. 海洋电缆弯曲加强器参数化 设计与分析[J]. 海洋技术学报, 2019, 38(3): 77-84.
 LIU G, YUAN Z Q, ZHANG L, et al. Parametric Design and Analysis of Bend Stiffeners for Marine Cables[J]. Journal of Ocean Technology, 2019, 38(3): 77-84.
- [7] TONG D J, LOW Y M, SHEEHAN J M. Nonlinear Bend Stiffener Analysis Using a Simple Formulation and Finite Element Method[J]. China Ocean Engineering, 2011, 25(4): 577-590.
- [8] DROBYSHEVSKI Y. Investigation into Non-Linear Bending of Elastic Bars with Application to Design of Bend Stiffeners[J]. Marine Structures, 2013, 31: 102-130.
- [9] VAZ M A, DE LEMOS C A D. Geometrical and Material Non-Linear Formulation for Bend Stiffeners[C]// Proceedings of OAME04 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Vancouver: American Society of Mechanical Engineers, 2004.
- [10] CAIRE M, VAZ M A, DE LEMOS C A D. Viscoelastic Analysis of Bend Stiffeners[C]// ASME 2005 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic

Engineering, Halkidiki, Greece. 2008: 531-538.

- [11] CAIRE M, VAZ M A, FERREIRA DA COSTA M. Bend Stiffener Nonlinear Viscoelastic Time Domain Formulation[J]. Marine Structures, 2016, 49: 206-223.
- [12] CAIRE M, VAZ M A. A Nonlinear Viscoelastic Bend Stiffener Steady-State Formulation[J]. Applied Ocean Research, 2017, 66: 32-45.
- [13] ARIZA GOMEZ A J, CAIRE M, TORRES L C A R, et al. Bend Stiffener Linear Viscoelastic Thermo-Mechanical Analysis. Part I—Experimental Characterization and Mathematical Formulation[J]. Marine Structures, 2021, 77: 102946.
- [14] GOMEZ A J A, CAIRE M, TORRES L C A R, et al. Bend Stiffener Linear Viscoelastic Thermo-Mechanical Analysis, Part II: Numerical Solution and Case Study[J]. Marine Structures, 2021, 77: 102947.
- [15] CAIRE M, VAZ M A. The Effect of Flexible Pipe Non-Linear Bending Stiffness Behavior on Bend Stiffener Analysis[C]// Proceedings of OAME 2007 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. San Diego: American Society of Mechanical Engineers, 2009.
- [16] 孙凯,岳前进,阎军,等.基于材料非线性的海洋柔性 立管防弯器有限元分析[J]. 计算机辅助工程, 2014, 23(6): 66-69.
 SUN K, YUE Q J, YAN J, et al. Finite Element Analysis on Bending Stiffener of Flexible Marine Riser Based on Material Non-Linearity[J]. Computer Aided Engineering, 2014, 23(6): 66-69.
 [17] Orcina Ltd. OrcaBend Help[EB/OL]. https://www.orcina.
- [17] Orcina Ltd. OrcaBend Heip[EB/OL]. https://www.orcina. com/wp-content/uploads/OrcaBend/OrcaBendHelp.zip. 2024-05-13.
- [18] TANAKA R L, DA SILVEIRA L M Y, NOVAES J P Z, et al. Bending Stiffener Design through Structural Optimization[C]// ASME 2009 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Honolulu, Hawaii, USA. 2010: 411-418.
- [19] YANG H Z, WANG A J. Fatigue Reliability Based Design Optimization of Bending Stiffener[J]. Journal of Ship Research, 2012, 56(2): 120-128.
- [20] TANG M G, YAN J, CHEN J L, et al. Nonlinear Analysis and Multi-Objective Optimization for Bend Stiffeners of Flexible Riser[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2015, 20(4): 591-603.
- [21] 尚丽军. 海洋柔性管线防弯器的优化设计研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
 SHANG L J. Study on Optimal Design Of Bending Prevents for Offshore Flexible Pipelines[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2019.
- [22] CHRYSSANTHOPOULOS M K, LOW Y M. A Method for Predicting the Flexural Response of Tubular Members with Non-Linear Stress–Strain Characteristics[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2001, 57(11): 1197-1216.

48-51.

- [23] 董磊磊. 非粘合柔性立管截面特性的理论计算及 BSR 区域的疲劳分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2013. DONG L L. Theoretical Calculation of Section Characteristics of Unbonded Flexible Riser and Fatigue Analysis in BSR Area[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [24] SMITH R. Bending Stiffeners for Extreme and Fatigue Loading of Unbonded Flexible Risers[C]// Proceedings of the ASME 27th International Conference on Ocean, Off-

shore and Arctic Engineering. Estoril: ASMEDC, 2008.

[25] 张崎, 姬鸾, 黄一, 等. 基于进化策略的柔性立管防弯 器优化设计[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(6): 48-51.
ZHANG Q, JI L, HUANG Y, et al. Optimization Design of Bend Stiffener Based on Evolution Strategy Principle[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2014, 42(6):