



基于修正 Morris 筛选的软刚臂单点系泊装置 主尺度参数局部敏感性研究^{*}

郑锦涛, 朱 刚, 董海防, 郭 翔

(武汉第二船舶设计研究所, 湖北 武汉 430064)

摘要: 软刚臂单点系泊装置作为典型的大型多体运动结构, 设计中考虑的变量众多, 其主尺度的确定是设计中的难题。通过 Morris 筛选法的敏感性分析, 采用扰动分析的方式(固定步长 5%, 扰动范围 $\pm 25\%$), 以设计中着重关注的最大水平系泊力和水平系泊位移为考察对象, 考虑系泊浮体的定常力、高频力和二阶波漂力, 建立软刚臂单点系泊理想力学模型, 并进行参数局部敏感性分析, 以更好地对模型参数的不确定性进行识别, 为系统主尺度的设计提供决策依据。结果表明: 对于具有 13 个自由度、8 个主要设计变量的软刚臂型单点系泊装置, 模型参数中与最大水平系泊力和系泊位移的敏感性大小依次为系泊刚臂长度、系泊腿长度和压载力, 设计中应优先考虑确定上述参数值。

关键词: Morris 筛选法; 软刚臂单点系泊; 主尺度设计; 局部敏感性分析

中图分类号: P 756; O 32

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)07-0014-05

Local sensitivity analysis for principle parameters of soft yoke single point mooring system based on modified Morris filter method

ZHENG Jin-tao, ZHU Gang, DONG Hai-fang, GUO Xiang

(Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan 430064, China)

Abstract: As a typical multi-body dynamics system, the design of principle parameters for a soft yoke single point mooring system(SPM) is a tough problem for its so many principle parameters. We use the modified Morris filter method with the perturbation analysis technology(fixed step size 5%, and perturbation range $\pm 25\%$) to study the maximum horizontal mooring force and displacement on which much attention is focused during the system design. Considering the steady force, high-frequency force and second-order wave drift force of moored body, we establish an ideal mechanism model of SPM to study the local sensitivity analysis on the parameters, so that can strengthen the identification of the model parameters and uncertainty, and provide some useful decision-making basis when determining the principles of SPM. The results show that for SPM with 13 DOFs and 8 principles, the descending order of sensitivity of parameters related to the maximum mooring force and displacement in the model is the length of the yoke, length of mooring leg, and ballast force, so these variables should be given corresponding priority in the design process.

Keywords: Morris filter method; soft yoke single mooring system; principle parameters design; local sensitivity analysis

收稿日期: 2020-09-22

^{*}基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0307800); 湖北省自然科学基金重点类项目(2018CFA025)

作者简介: 郑锦涛(1990—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为计算流体力学和海洋结构物设计。

通讯作者: 朱刚(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为水下工程和海洋工程。E-mail: zg1025@163.com。

单点系泊凭借特有的“风标效应”, 使其所系泊浮体具备良好的海洋环境适应性, 从而为浮式生产储卸油装置(FPSO)、海洋核动力平台等海上浮式结构提供了重要的系泊支撑点和综合能源传输通道, 在全球近岸、码头与岛礁附近, 以及深远海油气产区应用广泛。然而, 由于单点系泊装置构成复杂、研制难度大, 其设计长期被国外公司垄断。近年来, 国内先后有学者对软刚臂单点系泊装置的设计技术进行过相关研究。席时春等^[1]介绍单点系泊系统的设计原理, 根据水下软刚臂式单点系泊装置的特殊性, 对其系泊系统设计进行简述, 着重探讨并分析其系泊刚度特性。Xiao 等^[2]给出软刚臂单点系泊装置的水动力系泊特性和理想动力学计算模型。唐永刚等^[3]在单点系泊装置及环境荷载研究的基础上, 探讨单点系泊系统的设计技术, 并根据模型试验获得软刚臂单点系泊装置的时域耦合图谱。肖泥土等^[4]针对软刚臂单点系泊装置历次系泊腿失效及风险事件, 通过统计学方法拟合效应的概率分布, 为单点系泊系统的风险防范设计提供初步定量分析。韦晓强^[5]探讨渤海单点系泊转场至南海的改造设计技术及其可行性。

单点系泊装置设计技术虽然一直是学术讨论的热点, 但单点系泊的研制, 尤其是主尺度设计却始终困扰我国高端系泊装备产业纵深发展的难点之一。因此, 针对软刚臂单点系泊装置设计变量多、设计难度大的特点, 开展系统系泊特性对模型参数敏感性的研究, 为系统主尺度设计提供有力的参考依据, 可以加强对模型的认识, 有助于软刚臂单点系泊系统的国产化研制。

模型敏感性分析主要是研究模型输入参数对输出结果的影响程度, 该方法可有效识别影响模型的关键输入参数。现有的研究方法主要包括 Sobol 法^[6]、Morris 筛选法^[7]、傅立叶幅度敏感性分析方法 (FAST)^[8]等。乔东生等^[9]在时域范围内建立深水锚泊线串联浮筒系统的动力分析模型, 考虑锚泊线和海床之间的接触作用, 对串联浮筒的大小和所处位置进行参数敏感性分析。霍发力等^[10]

运用风洞和水池试验结果, 以一个典型双浮体四立柱半潜式平台为例, 对半潜式平台气隙响应进行非线性数值分析, 得出工作水深对平台气隙影响非常敏感。宋林峰等^[11]针对一座传统式张力腿平台进行数值模拟和分析, 研究系泊筋腱受力以及平台位移对筋腱刚度、布置角度、预张力和筋腱数目的敏感性。但是迄今仍罕见关于软刚臂单点系泊装置主尺度设计参数敏感性研究的报道。

基于以上分析, 本文建立“系泊浮体-软刚臂单点系泊装置”的理想力学模型, 结合修正的 Morris 筛选法, 针对典型作业工况下的环境条件, 开展主尺度模型的局部参数敏感性分析。

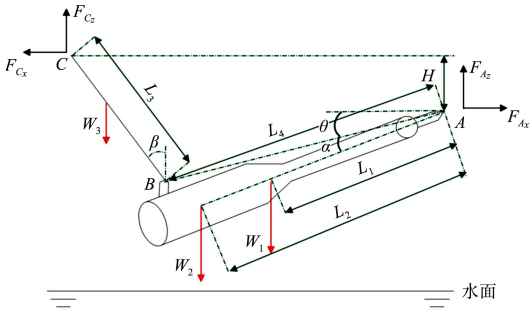
1 软刚臂单点系泊装置理想力学模型

1.1 水平刚度曲线

软刚臂单点系泊装置及其理想化力学模型如图 1 所示。考虑软刚臂系泊装置静力稳定状态, 根据软刚臂结构的力平衡与力矩平衡关系, 可得到式(1)~(4)。



a) “HYSY102”号FPSO及其软刚臂单点系泊装置



b) 软刚臂单点系泊装置理想力学模型

图 1 软刚臂单点系泊装置及其理想化力学模型

$$F_{Ax} = F_{Cx}$$

(1)

$$F_{Az} + F_{Cz} = W_1 + W_2 + W_3 \quad (2)$$

$$F_{Cz}L_3\sin\beta = F_{Cx}L_3\cos\beta + W_3\frac{L_3}{2}\sin\beta \quad (3)$$

$$F_{Cx}H = F_{Cz}(L_4\cos\theta + L_3\sin\beta) - (W_1L_1 + W_2L_2) \cdot \cos(\alpha + \theta) - W_3\left(L_4\cos\theta + \frac{L_3}{2}\sin\beta\right) \quad (4)$$

式中: F_{Ax} 、 F_{Az} 分别为 A 点 x 、 z 方向受力; F_{Cx} 、 F_{Cz} 分别为 C 点 x 、 z 方向受力; H 为单点系泊系统两端系泊点 A 和 C 点间的高差; L_1 为系泊刚臂结构重心(不含内部压载水)到系泊点 A 的距离; L_2 为系泊刚臂结构重心(考虑内部压载水)到系泊点 A 的距离; L_3 为系泊腿长度; L_4 为系泊刚臂有效长度; W_1 为系泊刚臂结构自身重力; W_2 为压载力; W_3 为系泊腿重力; α 为 AB 与系泊刚臂中心轴线的夹角; β 为系泊腿与竖直垂线的夹角; θ 为 AB 与水平面的夹角。式(1)、(2)为单点系泊装置沿 x 、 z 方向受力平衡; 式(3)、(4)分别为系泊腿对于 B、A 点的力矩平衡。联合求解式(1)~(4), 可得软刚臂单点系泊装置在静力平衡状态下的纵向位移与纵向系泊力之间的关系, 如图 2 所示。

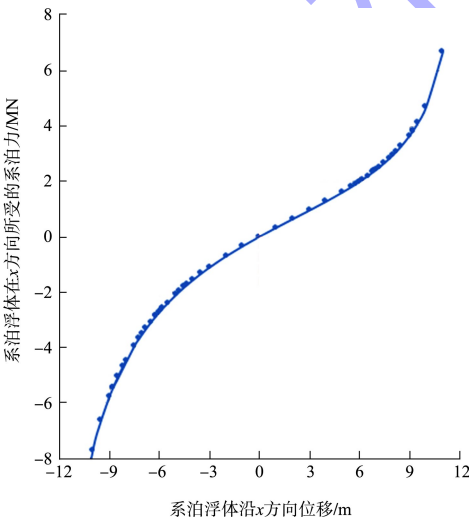


图 2 软刚臂单点系泊装置典型刚度曲线

1.2 平均波浪漂移力

NONAKAK^[12]采用双时标展开方法证明: 在理想流体的假设下, 可以将浮体在波浪中的运动视

为一阶高频运动、一阶和二阶低频运动的叠加。平均波浪漂移力即由波浪的一阶低频运动引起的二阶波浪力, 这里采用谱分析法, 通过式(5)计算平均波浪漂移力:

$$F_{\text{mean}} = 2 \int_0^{+\infty} S(\omega) T_x(\omega, \omega) d\omega \quad (5)$$

式中: $S(\omega)$ 为波浪谱, 本文选用标准 JONSWAP 波能谱; $T_x(\omega, \omega)$ 为平均波浪漂移力传递函数。根据平均波浪漂移力 F_{mean} , 通过图 2 中的刚度曲线可得系统平均位移 X_{mean} 。

1.3 系泊浮体一阶高频位移

根据式(6)、(7)可分别求得系泊船的一阶高频位移有义值 $X_{H-1/3}$ 与最大值 $X_{H-\max}$:

$$X_{H-1/3} = 2 \int_0^{+\infty} |H_x(\omega)|^2 S(\omega) d\omega \quad (6)$$

$$X_{H-\max} = \sqrt{2 \ln N} \int_0^{+\infty} |H_x(\omega)|^2 S(\omega) d\omega \quad (7)$$

式中: N 为震荡次数; $H_x(\omega)$ 为高频传递函数。

1.4 系泊浮体二阶低频纵荡运动

二阶低频纵荡位移有义值 $X_{L-1/3}$ 与最大值 $X_{L-\max}$ 根据式(8)、(9)进行计算:

$$X_{L-1/3} = 2 \sqrt{\frac{\pi}{2CK}} S_F \quad (8)$$

$$X_{L-\max} = \sqrt{\frac{\pi \ln N}{CK}} S_F \quad (9)$$

式中: C 为系统纵荡阻尼; K 为系统刚度, 即图 2 中的刚度曲线在原点处斜率; S_F 为低频运动的波漂力谱, 按(10)式进行计算:

$$S_F = 8 \int_0^{+\infty} S(\omega + \mu) S(\omega) Q_x^2(\omega + \mu, \omega) d\omega \quad (10)$$

式中: $Q_x(\omega + \mu, \omega)$ 为波漂力幅二阶传递函数; μ 为差频, 近似为系统固有频率。

1.5 纵向总位移与系泊力

按照图 3 所示的计算流程, 综合式(5)~(10), 可得系泊船的总位移:

$$X_t = X_{\text{mean}} + \max(X_{L-\max} + X_{H-1/3}, X_{H-\max} + X_{L-1/3}) \quad (11)$$

进而通过图 2 中的刚度曲线, 插值求得浮体的纵向总系泊力 F_t 。

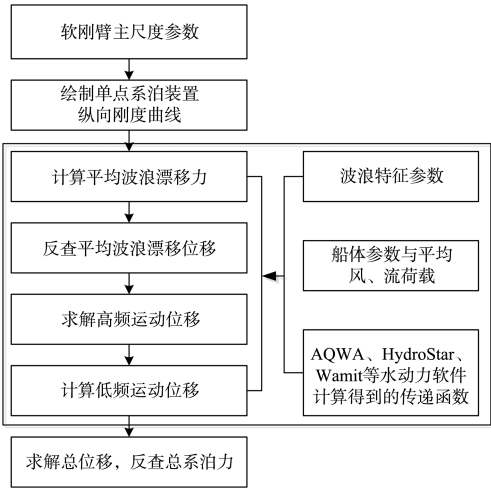


图 3 系泊力和系泊位移计算流程

2 修正的 Morris 局部敏感性分析

2.1 Morris 局部敏感性分析

参数敏感性分析包括全局敏感性分析和局部敏感性分析。Morris 筛选法的基本思想是评估单个因素产生的微量变化对输出结果的响应变化,该方法针对各相关因子引入了初级影响值的概念:假设 $x_1, x_2, x_3, \cdots, x_n$ 是影响模型输出结果的 n 个输入量, y 为模型模拟输出的结果。选取模型中的一个变量 x_i , 其余参数值固定不变, 在变量阈值范围内随机改变 x_i , 通过运行模型即可得到目标函数 $y(x)=y(x_1, x_2, x_3, \cdots, x_n)$ 的值, 则可用第 i 个因子的初级影响值 e_i 评估参数变化对目标函数的影响程度:

$$e_i = \frac{y^* - y}{\Delta_i} \tag{12}$$

式中: $y^*=y(x_1, x_2, x_3, \cdots, x_i+\Delta_i, \cdots, x_n)$ 为模型参数变化后的目标函数值; $y=y(x_1, x_2, x_3, \cdots, x_i, \cdots, x_n)$ 为模型参数变化前的目标函数值; Δ_i 为第 i 个因子的模型参数的变化值。

修正的 Morris 筛选法改进了敏感性判别参数, 对相关自变量按固定步长在一定扰动范围内变化,

灵敏度判别因子则如式(13)取 Morris 多个平均值:

$$S = \frac{1}{n-1} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(y_{i+1} - y_i)/y_0}{(P_{i+1} - P_i)/100} \tag{13}$$

式中: S 为敏感性判别参数; y_i 为计算模型第 i 组变量对应的的目标函数值; y_{i+1} 为计算模型第 $i+1$ 组变量对应的的目标函数值; y_0 为按照模型参数初始变量计算得到的初始目标函数值(即基准值); P_i 为第 i 组变量对应的的目标函数值相对于基准值的变化百分率; P_{i+1} 为第 $i+1$ 组变量对应的的目标函数值相对于基准值的变化百分率; n 为敏感性分析所用的变量组数, 与扰动范围和固定步长有关。

对于不同 S 值的各相关参数, Morris 筛选法一般按照表 1 对参数的敏感性进行敏感性层次划分。

表 1 敏感性层次划分

$ S $ 范围	$[1, +\infty)$	$[0.2, 1.0)$	$[0.05, 0.2)$	$[0, 0.05)$
敏感程度	高度灵敏	灵敏	一般灵敏	不灵敏

2.2 软刚臂单点系泊主尺度参数敏感性

本文以某双瓶型软刚臂单点系泊装置为研究对象, 分析其各主尺度参数的敏感性。根据实际设计经验, 双瓶型软刚臂单点系泊装置的系泊刚臂有效长度 L_4 与其结构重心到系泊点距离 L_2 、压载重心到系泊点距离 L_1 之间存在如下近似关系:

$$L_2 \approx 0.75L_4 \tag{14}$$

$$L_1 \approx 0.65L_2 \tag{15}$$

于是, 图 1 所示的主尺度变量缩减为两端系泊点高差 H 、系泊腿长度 L_3 、系泊刚臂有效长度 L_4 、系泊刚臂结构重力 W_1 、压载力 W_2 、系泊腿重力 W_3 等 6 个变量。

选取设计中特别关心的水平系泊力和系泊位移为目标函数, 按照表 2 以固定步长 5% 对单个变量进行扰动分析, 扰动范围取为初始变量的 $\pm 25\%$ 变化幅度。扰动分析过程中, 每次单个参数沿步长变化时, 其他参数均保持不变。

表 2 计算模型主要参数及其取值范围

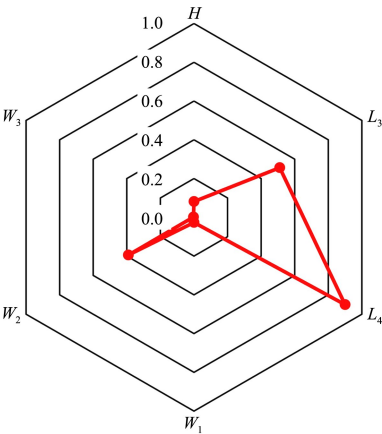
取值	H/m	L_3/m	L_4/m	W_1/kN	W_2/kN	W_3/kN
初始值	4.5	12.0	30.0	2 548.0	2 842.0	392.0
取值范围	3.4~5.6	9.0~15.0	22.5~37.5	1 950.0~3 250.0	2 175.0~3 625.0	300.0~500.0

将表 2 中的主尺度参数, 按照图 3 所示计算流程更新模型的水平系泊力和系泊位移(共 60 组

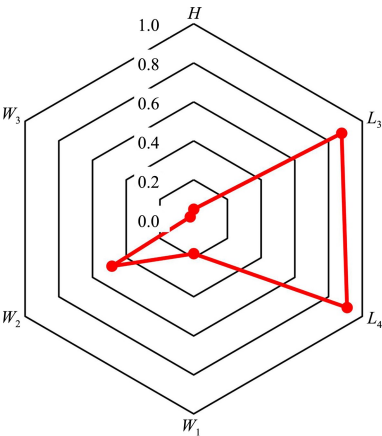
主尺度参数), 从而得到表 3、图 4 中的软刚臂主尺度理想力学模型参数局部敏感性分析结果。

表 3 计算模型参数局部敏感性分析结果

变量	水平系泊力		水平系泊位移	
	敏感性参数 S	敏感性等级	敏感性参数 S	敏感性等级
H	0.081	一般灵敏	-0.049	不灵敏
L_3	-0.511	灵敏	0.879	灵敏
L_4	0.901	灵敏	0.911	灵敏
W_1	0.027	不灵敏	-0.178	一般灵敏
W_2	0.390	灵敏	-0.485	灵敏
W_3	0.003	不灵敏	-0.021	不灵敏



a) 水平系泊力对模型参数的局部敏感性



b) 水平系泊位移对模型参数的局部敏感性

图 4 软刚臂单点系泊装置系泊特性对模型参数的局部敏感性分析结果

由图 4 可直观地发现，系泊刚臂有效长度 L_4 、系泊腿长度 L_3 和压载力 W_2 是直接影响软刚臂单点系泊装置的水平系泊力和水平系泊位移的敏感性参数，且敏感性远高于两端系泊点高差 H 、系泊刚臂结构重力 W_1 和系泊腿重力 W_3 等其余参数。图 4 还表明，虽然软刚臂单点系泊装置的系泊力和系泊位移互为负相关关系，但系泊刚臂有效长

度、系泊腿长度和压载力的小幅变化却同时显著影响系泊力和系泊位移，尤其是系泊刚臂有效长度对系泊力和系泊位移的敏感性参数 S 均超过 0.9，接近表 1 中高度灵敏的层次。可以认为，对软刚臂单点系泊装置海上系泊特性起主导作用的设计参数依次为系泊刚臂有效长度>系泊腿长度>压载力>其他变量。

根据表 2 中的变量取值范围，与压载力相比，系泊腿重力 W_3 是一个相对小量，对软刚臂单点系泊装置的展开与收缩过程中的回复力贡献较小；系泊刚臂结构重力 W_1 与压载力数值相当，但其沿系泊刚臂长度范围内近乎均匀分布，在图 1 中相对于 A 点产生的回复力矩小于压载力对应的回复力矩，因而 W_1 与 W_3 的敏感性参数远小于压载力 W_2 的敏感性参数。同理，两端系泊点高差 H 与系泊刚臂有效长度 L_4 、系泊腿长度 L_3 相比数值较小，且式(4)表明 H 只参与系统内水平方向力对应的力矩平衡，因此其敏感性等级自然小于其他长度变量的敏感性等级。

3 结论

1) 软刚臂单点系泊装置各设计参数中对最大水平系泊力和系泊位移的敏感性大小依次为系泊刚臂长度、系泊腿长度和压载力、两端系泊点高差与系泊刚臂结构重力、系泊腿重力，设计中应优先考虑确定系泊刚臂长度、系泊腿长度和压载力这 3 个参数值。

2) 修正的 Morris 筛选法作为一种快捷的局部敏感性分析方法，可以实现对软刚臂单点系泊装置模型参数不确定性的快速识别，设计中可以通过对潜在方案的参数化系列调整，有效评判方案的系泊特性。

参考文献：

[1] 席时春, 袁翔, 郝孟江.论 FPSO 总体设计[J].中国造船, 2013, 54(2): 140-144.

[2] XIAO L F, YANG J M, LI X.Shallow water effects on surge motion and load of soft yoke moored FPSO[J].China ocean engineering, 2007, 21(2): 187-196.