

基于多岛遗传算法的半潜式平台主尺度优化研究

汪 勇¹, 权 东²

(1.南通中远海运船务工程有限公司 海工研发中心, 江苏 南通 226001;

2.江苏海事局 考试科, 江苏 南京 210008)

摘 要:为优化某深水半潜式支持平台的主尺度,采用拉丁超立方设计对样本空间采样,在 SESAM 软件中进行参数化建模,根据现有母平台资料确定主尺度约束条件,基于多岛遗传算法分别对平台的垂荡、纵摇、横摇响应进行优化分析,选出稳性最高、排水量适宜的平台主尺度方案。结果表明,该算法能得到满足约束条件下各响应最小的主尺度方案,对平台主尺度初步方案的确定有很高的参考价值。

关键词:多岛遗传算法;主尺度优化;深水半潜式支持平台

中图分类号:U662

文献标志码:A

文章编号:1671-9891(2020)4-0042-06

0 引言

半潜式平台工作时受到环境载荷的影响较小,在恶劣的海况下运动性能较好,具有可变载荷大、甲板面积大的优点,已经成为十分常见的深海石油勘探和开采设备^[1]。为优化半潜式支持平台的综合性能,学者们对平台在波浪中的水动力性能研究较多,并且针对平台型式进行了各种优化研究^[2]。

结构优化兴起于 20 世纪五六十年代,其以数学优化方法为基础,借助现代电子计算机进行结构设计方案的优化。结构优化相比于传统设计方法,可以缩短设计周期,提高设计质量,解决传统方法无法解决的复杂问题^[3]。周佳、吕涛等曾就不同类型的平台进行结构设计和主尺度方案优化研究^[4-5]。本文探讨了运动性能、稳性、定位性能、总布置等因素对平台主尺度的影响,以垂荡、横摇和纵摇三种响应为目标函数,使用多岛遗传算法对其进行主尺度优化设计。

1 母型平台和工况数据

研究选取标准型半潜式支持平台,其结构由下浮体、立柱、甲板盒、横撑四大部分组成^[6],其中下浮体和立柱的水下部分提供迁航和作业的浮力,其尺度参数对平台的水动力性能有直接影响;立柱的布置应尽可能使平台具有相近的横稳性高和纵稳性高^[7];甲板盒布置生活区或作业设备,其高低决定整个平台的重心高度。母型平台是标准半潜式支持平台,其主尺度要素及自存工况平台基本数据分别如表 1、表 2 所示。

表 1 母型平台主尺度

下浮体长度/m	主甲板长度/m	主甲板宽度/m	下浮体宽度/m	下浮体高度/m
98	66	67	14	9

表 2 自存工况平台数据

吃水/m	排水量/t	重心高度/m	R_x /m	R_y /m	R_z /m
13.5	27 650.91	22.04	29.17	30.37	33.87

2 主尺度影响因素

(1)运动性能。在半潜式平台的初步设计阶段,要通过合理的主尺度设计使平台的波频运动固有周期在

收稿日期:2020-05-09

基金项目:工业和信息化部深水半潜式支持平台研发专项(MC-201620-H01)

作者简介:汪勇(1982—),男,江苏南通人,南通中远海运船务工程有限公司海工研发中心工程师。

波浪能量集中的周期之外,以避免与波浪发生共振,减小运动极值。半潜式平台的波频运动指垂荡、纵摇和横摇,其中垂荡的固有周期大多在 18 s 至 20 s 范围内,与波能谱的低频区域重叠,虽然不在能量集中的波谱频率范围内,但遭遇严重波浪的可能性仍然相对较高;另外,由于垂荡运动对钻井和采油设备的作业效率和安全影响较大,需要对垂荡运动严格限制。对于横摇和纵摇,出于对半潜式平台稳性方面的考虑,初稳心高的限制使得横摇和纵摇固有周期常大于 30 s,处在能量较为集中的周期范围之外,因此,初步设计阶段控制好初稳心高,就能足够保证良好的横摇和纵摇响应性能。

(2) 稳性。在初步设计阶段,通常需要结合平台功能和作业特点,给初稳心高设定下限,在此基础上确定初步设计方案,在后续的基础设计中进行深入分析及校核,详细设计以及建造过程中辅以严格的重量控制,才能保证最终的稳性。风倾力矩、平台复原力矩和水密、风雨密完整性范围与平台的完整稳性有着密切的关系。半潜式支持平台倾斜轴垂直的风向上,平台的风倾力矩最大。^[8]无论平台处于哪种状态,基于完整性考虑,最危险倾覆方向发生在同一倾斜轴。

(3) 总布置。上船体甲板双层底高 1.5 m~1.7 m,两层高均为 3.5 m 左右,动力定位等级为 DP3 的 8 台主机布置在 4 个机舱内,该布局对平台上船体长度要求较高^[9]。首部的 2 个机舱/配电板距离生活区较近,故对于机舱噪音以及 A 类机器处所的安全性问题需予以额外考虑。此外,机舱可以全部位于上船体内尾部区域,四个机舱间设有纵向 A60 级结构舱壁,机舱内部设备、管线、电缆布置空间较紧张。

(4) 可变载荷。半潜式支持平台排水量由空船重量、甲板可变重量、锚及锚链重量、淡水和燃油、压载水重量组成。半潜式平台各个状态下的排水量与支持平台的外形尺寸关系密切,其中下浮体的主尺度是由拖航排水量决定的。

3 优化方法及优化模型建立

与传统的梯度优化算法和直接搜索方法相比,全局优化算法适应性强,只评价设计点,不计算任何函数梯度,避免了集中在局部区域的搜索。MIGA (Multi-Island Genetic Algorithm) 是 M.KaneKo 等人对并行分布遗传算法(PDGA)的改进。遗传算法在进化搜索时基本不利用外部信息,以适应度函数为衡量标准,利用当前的种群搜索寻优。^[10]从图 1 可以看出,多岛遗传算法将种群分成若干个处于不同岛屿、互相隔绝并独立进化的子群。各个岛屿之间会有迁移操作,进行信息交换,可维持种群的多样性^[11],抑制早熟现象。作为一种伪并行遗传算法,多岛遗传算法能更好地在样本中寻找全局最优解。与传统遗传算法相比,多岛遗传算法具有更优良的全局求解能力和更高的计算效率。

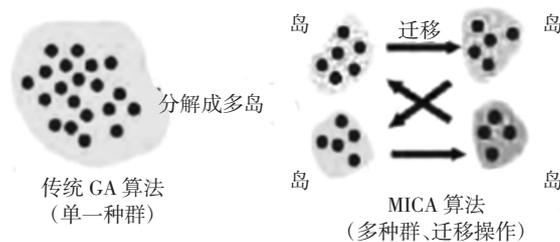


图 1 种群生成原理

多岛遗传算法反复使用算子进行选择,从亲代到子代再到孙代直至重孙代不停地繁衍,从而种群对环境的适应性得到不断地升高,流程如下:

- 第 1 步,初始化群体;
- 第 2 步,计算个体的适应度函数值;
- 第 3 步,按个体适应度值决定的某种规则选择进入下一代的个体;
- 第 4 步,按概率 P_c 进行交叉操作;
- 第 5 步,按概率 P_m 进行突变操作;
- 第 6 步,若未满足停止条件,则转第 2 步,否则进入第 7 步;
- 第 7 步,输出种群中适应度值最优的染色体作为问题的满意解或最优解。

4 建立优化模型

4.1 设计变量

本次研究选取浮体长度、宽度、高度、立柱横向间距、纵向间距、立柱高度六个主尺度要素作为设计变量^[12],分别为 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_5 、 x_6 ,如图 2 所示,设计变量变化范围及原始参数如表 3 所示。

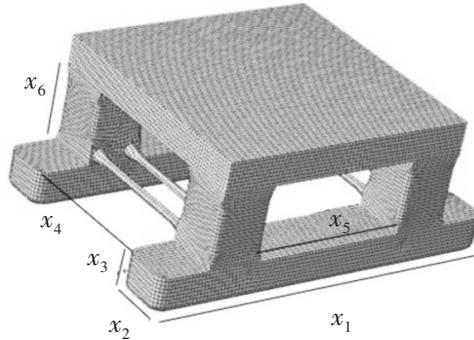


图 2 平台主尺度设计变量示意图

表 3 设计变量变化范围及原始参数

主尺度参数	设计变量	原始参数/m	变化范围/m
浮体长度	x_1	98	88.2~107.8
浮体宽度	x_2	14	12.6~15.4
浮体高度	x_3	9	8.1~9.9
立柱横向间距	x_4	39	35.1~42.9
立柱纵向间距	x_5	39	35.1~42.9
立柱高度	x_6	18.5	16.65~20.35

4.2 目标函数及约束条件

(1)垂荡响应。相对于其他方向,平台在垂荡方向上灵活性较小。半潜式支持平台相对于其他平台的垂荡响应要大得多,因此,设定半潜式支持平台垂荡运动幅度限度,减小半潜式支持平台在恶劣工况下的垂荡响应,对保证支持平台的稳定和安全具有重要意义。本文研究单位波下的垂荡响应对半潜式支持平台主尺度的影响。通过计算得知,在 90° 横浪下垂荡响应最为显著,因此选取所有方案在 90° 横浪下的最大垂荡响应值来研究。

(2)横摇响应和纵摇响应。平台的横摇、纵摇性能关系平台能否正常作业,如果横摇、纵摇过大,将会导致甲板上很多设备无法正常运转,还会导致人员身体不适^[12]。波浪在 90° 的方向入射时横摇响应最大,因此也采取单位波 90° 横浪下各方案的最大横摇值来进行研究。纵摇响应在 0° 迎浪下的响应最大,因此选取单位波 0° 迎浪下各方案的最大纵摇值研究。

初稳心高以 $GM > 2.0$ m 作为约束标准;排水量以原平台排水量的 2%作为约束标准。

4.3 近似模型

近似模型是一项以试验设计和近似方法为主要内容的技术,通过数学方法拟合一组输入变量和输出变量的关系,使人们可以通过已知的数据点来预测未知的数据点。近似模型的优势在于能够建立经验公式,获得输入变量和输出变量的关系;减少耗时的仿真程序的调用,节省优化时间;对响应函数进行平滑处理更有利于寻找到全局最优点。目前,常用的近似模型主要有响应面模型、径向基模型和克里格模型。由于平台主尺度与水动力性能具有很强的非线性,所以选取径向基模型作为近似模型。径向基网络以待测点和样本点之间的欧几里得距离为自变量,即假设 $x_1, x_2, \dots, x_N \in \Omega \subset \gamma^n$,代表一组输入变量, $g_j = g(\|x - x_j\|^c) \in \gamma$, ($j =$

$1, \dots, n$) 是基函数, 其中 $\|x - x_j\|$ 是欧几里得距离。径向基模型的精度可以通过相关系数 R^2 来评价, 定义为:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_E}{SS_T} \tag{1}$$

式中: $SS_T = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$, $SS_E = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$, \bar{y} 为近似模型均值, \hat{y}_i 为 y_i 的估计值, n 为试验次数。 R^2 的值介于 0 和 1 之间, 其值越大, 说明近似模型的精度越高。垂荡、横摇和纵摇的近似模型模拟情况如表 4 所示。

表 4 径向基模型近似误差

相关系数	纵摇	横摇	垂荡	排水量	初稳心高
R^2	0.96	0.9	0.929	0.973	0.993

图 3 为基于近似模型的敏感度分析图。(a) 是纵摇响应关于不同变量的敏感分析图, x_3 的影响最大, x_2 、 x_4 次之, x_5 影响最小; (b) 是横摇响应关于不同变量的敏感分析图, 可以看出 x_3 的影响最大, x_2 、 x_6 次之, x_4 影响最小; (c) 是垂荡响应关于不同变量的敏感分析图, x_2 的影响最大, x_3 、 x_1 次之, x_5 影响最小; (d) 是排水量关于不同变量的敏感分析图, x_2 的影响最大, x_3 、 x_1 次之, x_4 影响最小; (e) 是初稳心高关于不同变量的敏感分析图, x_2 的影响最大, x_3 、 x_5 次之, x_4 影响最小。

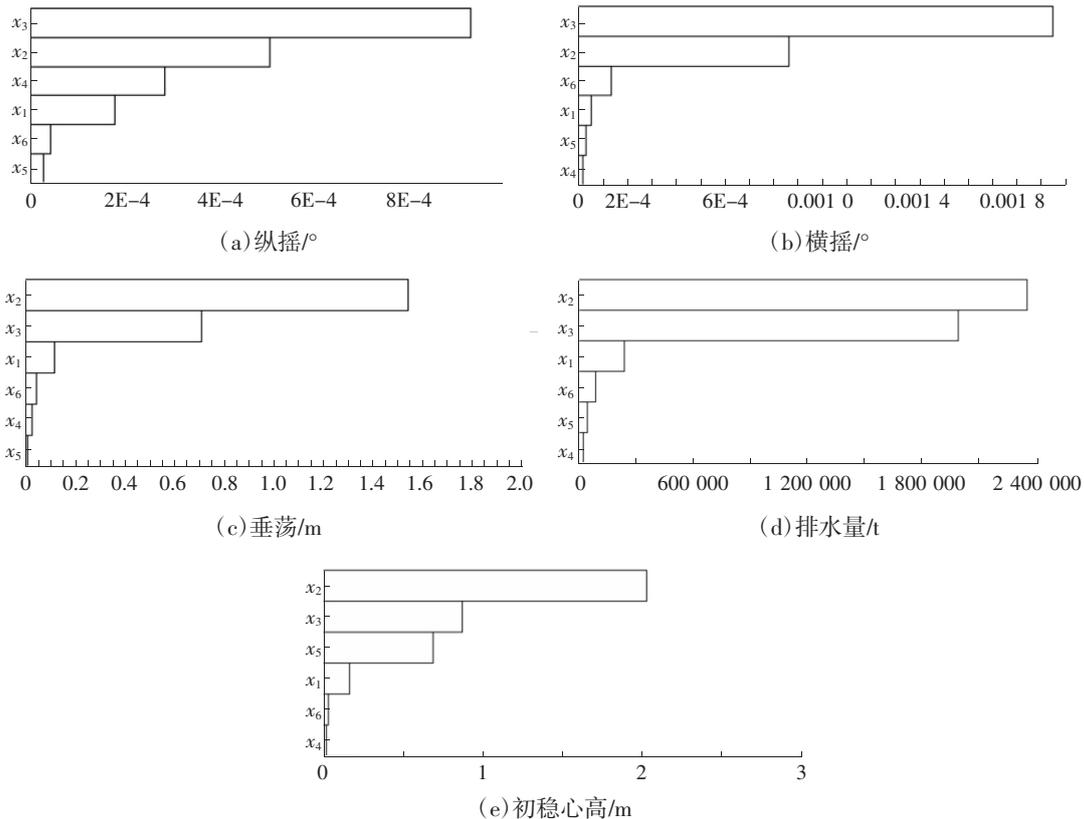


图 3 基于近似模型的敏感性分析图

通过上述主要影响参数 x_2 、 x_3 作为输入, 基于近似模型拟合的纵摇、横摇和垂荡的响应曲面如图 4 所示。

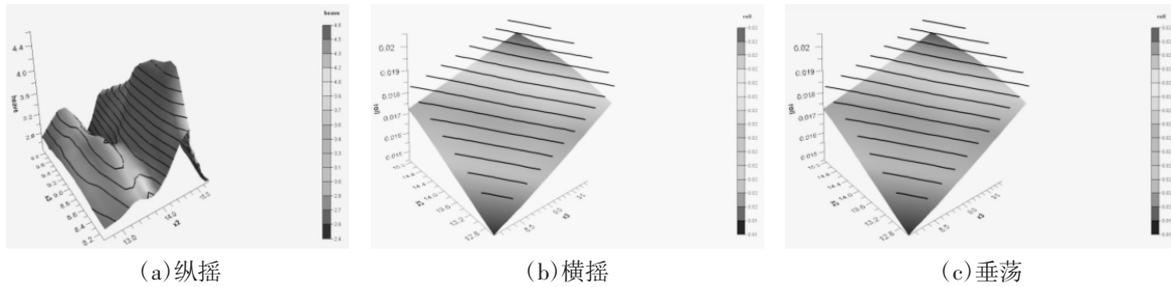


图4 近似模型拟合响应曲面

5 半潜式平台优化算例

基于表3所给信息,使用优化拉丁超立方试验设计方法,对样本空间进行采样操作,选取200组样本数据进行研究。优化拉丁超立方设计是由美国西北大学Wei Chen教授提出,除了拉丁超立方设计所具有的高效空间填充能力、更好的拟合非线性响应等优点外,还对拉丁超立方设计进行改进,提高了样本点在设计空间中分布的均匀性。进行优化拉丁超立方抽样时,忽略平台质量变化,通过Isight软件构造抽样流程,在Excel组件中导入表3中的变量名称及变量范围,然后在DOE组件中选择采样方式为优化拉丁超立方抽样,采点数目为200,表5展示前20组数据,供参考。

表5 样本数据(前20组)

序号	x_1/m	x_2/m	x_3/m	x_4/m	x_5/m	x_6/m
1	88.25	13.96	9.86	37.52	41.70	18.04
2	89.27	14.06	9.45	35.40	37.75	19.01
3	89.31	15.33	8.89	39.54	39.08	18.61
4	90.29	12.60	9.10	38.57	39.43	19.35
5	90.83	14.54	9.38	39.84	36.14	17.49
6	90.95	13.24	9.82	38.75	42.45	18.81
7	91.76	14.81	8.18	35.23	37.20	19.09
8	92.52	13.49	8.42	37.13	39.45	20.19
9	92.73	13.17	8.24	36.64	37.03	18.26
10	93.54	13.33	9.19	37.43	38.93	17.17
11	93.97	15.20	9.31	36.34	40.69	18.41
12	94.62	14.20	8.99	42.02	40.04	19.95
13	95.17	15.10	8.29	40.83	40.42	18.33
14	95.30	14.61	8.63	37.72	39.70	18.55
15	95.98	14.15	9.07	40.64	36.32	19.61
16	96.72	12.95	8.49	38.32	40.98	18.15
17	97.18	15.00	9.50	36.47	42.06	18.78
18	97.99	12.83	8.36	42.75	40.89	16.82
19	98.41	12.89	9.41	41.02	38.35	20.10
20	98.85	13.56	9.00	41.68	37.62	17.36

运用多岛遗传算法分别对垂荡、纵倾、横摇响应进行优化计算,寻求满足约束条件下使各响应最小的尺度方案,计算时选取个体数量10、多岛数量20、遗传代数50,其他参数为默认值。通过计算,纵摇、横摇和垂荡单一运动响应最优时对应的平台主尺度如表6所示。

表6 各响应下的主尺度优化数据

响应	x_1/m	x_2/m	x_3/m	x_4/m	x_5/m	x_6/m
纵摇	100.44	13.919	8.515	42.412	38.433	16.718
横摇	96.454	14.736	8.101	35.101	37.798	18.035
垂荡	102.6	13.793	8.939 9	40.066	39.122	17.117

6 结束语

通过建立半潜式支持平台主尺度的数学模型,采用多岛遗传算法,分别以平台的垂荡、横摇和纵摇响应为目标,实现了全部参数的自动寻优,得到全局最优解。结果表明,多岛遗传算法的有效性和可行性,适用于半潜式平台的型式优化问题,可用于平台的初步设计。

参考文献:

- [1]刘华祥,王璞,梁剑.半潜式钻井平台结构设计要点简述[J].中国海洋平台,2011(5):1-5.
- [2]丘文楨.基于代理模型的半潜平台多目标优化研究[D].上海:上海交通大学,2019.
- [3]褚胡冰,张海鹏,刘一.基于遗传算法的气垫船主尺度优化设计研究[J].船舶,2018(6):109-116.
- [4]周佳,尉志源,王璞.半潜式生产平台整体设计与方案优化[J].中国海洋平台,2017(1):21-25,32.
- [5]吕涛,陈国明,徐长航,等.基于MADM的自升式钻井平台主尺度方案优化[J].海洋工程,2018(4):19-27.
- [6]范文华.准陷波现象对多柱平台特征内力影响的研究[D].大连:大连理工大学,2016.
- [7]刘曰强.半潜式平台动力定位系统推力分配优化算法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2009.
- [8]童波,金强.深水半潜式钻井平台主尺度论证研究[J].船舶,2011(4):20-24.
- [9]杨轶普.半潜式平台钻井系统布置技术研究[D].青岛:中国石油大学,2009.
- [10]陈新权,谭家华.基于遗传算法的超深水半潜式平台优化[J].中国海洋平台,2006(6):24-27.
- [11]叶舟,宋建业,刘天亮,等.基于多岛遗传算法的襟翼优化[J].热能动力工程,2017(S1):80-85,131.
- [12]陈新权,谭家华.基于迎浪中垂荡响应最小化的超深水半潜式平台型式优化[J].上海交通大学学报,2008(6):934-938.

(责任编辑:张 利)

Study on Optimization of Main Scale of Semi-submersible Platform Based on Multi-island Genetic Algorithm

WANG Yong¹, QUAN Dong²

(1. Ocean Engineering Research and Development Centre, Nantong COSCO Shipping Engineering Co., Ltd.,
Nantong 226001, China;

2. Division of Examination, Jiangsu Maritime Safety Administration, Nanjing 210008, China)

Abstract: In order to optimize the main scale of a deep-water semi-submersible supporting platform, the Latin hypercube design is adopted for space sampling, and the parameterized modeling is carried out by the SESAM software. The main scale constraint conditions are determined by the existing parent platform data. Based on multiple-island genetic algorithm, the platform's heave, pitch, and roll responses are optimized and analyzed respectively, based on which the platform's main scale plan with highest stability and suitable displacement is selected. The results show that the algorithm can produce the main scale scheme with the smallest response under the constraint conditions, and it has strong reference value for the determination of the preliminary scheme of the platform main scale.

Key words: multi-island genetic algorithm; main scale optimization; deep-water semi-submersible supporting platform