文章编号:1000-8608(2023)04-0377-08

基于聚类分析及灰色关联度的船舶系缆力影响因素分析

麻云平,李 楷*,郑 奕,刘 松,王运龙

(大连理工大学 船舶工程学院,辽宁 大连 116024)

摘要:为研究风、浪、流、涌以及船舶装载状态等因素对码头系泊船舶缆绳受力影响的相对 大小及线性关联程度,基于水动力计算软件 AQWA 计算获得 400 组不同影响因素组合下的 缆绳受力数据,运用机器学习中常用的无监督学习算法 k-means++算法以及灰色关联分析 方法,分析缆绳受力与影响因素的内在联系.根据分析结果,获得了各因素对不同位置缆绳受 力影响的相对大小及线性关联程度.该方法可用于优化系泊缆绳的布置方案.

关键词:码头系泊;缆绳受力;无监督学习;聚类分析;灰色关联分析 **中图分类号:**U662.3 **文献标识码:**A **doi**:10.7511/dllgxb202304007

0 引 言

码头系泊船舶受风、浪、流、涌等环境因素的 联合作用,会产生6个自由度方向的运动,相应 地,在约束船舶运动的缆绳上会发生受力的变化, 且缆绳受力与船舶装载状态也有一定关联.当系 泊船舶运动响应过大时,易发生缆绳断裂等安全 问题.因此,研究各因素对系缆力的影响及其与缆 绳位置的关联是有意义的.影响系泊船舶系缆力 的主要因素有风、浪、流、涌等环境因素及船舶吃 水.国内外诸多学者对单因素或多因素联合作用 对系泊船舶的运动响应及系缆力影响进行了 分析.

在单因素对系泊船舶的影响方面,沈文君 等^[1]研究了不同波浪入射角下小型船舶对波浪周 期的运动响应特性,研究结果表明,船舶摇荡运动 随波浪周期变化的规律在不同浪向角下大致相 同,小型船舶在较长波浪周期下,纵荡和横摇的固 有频率同时包含波浪频率及自身固有运动频率. 薛丁源等^[2]研究了长周期涌浪作用下码头系缆稳 定性,顺浪作用下船舶运动响应随波浪周期以及 波高的增加而增加,随涌浪入射角从顺浪调整至 横浪,船舶横移、升沉运动及缆绳受力幅值增加明 显.在多因素联合作用对系泊船舶的影响方面,张 鼎等^[3]研究了在风、流共同作用下缆绳预张力、缆 绳材质和缆绳布置对缆绳受力的影响,研究结果 表明,缆绳最大受力随预张力变大而逐步变大,且 缆绳刚度越大系泊张力越大.胡毅等^[4]基于水动 力计算软件 AQWA 分析了在风、浪荷载共同作 用下,大型 LNG 船系泊于码头时的运动响应,得 到在设定工况下船舶各自由度运动的响应频率和 响应幅值相对大小以及缆绳所受张力极值的相对 大小.

国外学者在该领域也进行了大量的研究. Paulauskas 等^[5]提出了一种横流(由码头方位导 致)作用于码头时,船舶系泊至码头过程中作用在 船舶上的力和力矩以及拖船系柱所受拉力的计算 方法,且与实际情况下船舶受力进行对比,结果表 明,实测结果与计算结果具有良好的相关性.Kim 等^[6]运用 AQWA MARINE 对一种大型船舶的 系泊工况进行数值模拟,并综合考虑海流、风、缆 绳特性、护舷特性等因素对系泊船舶的运动响应, 以期找到大型船舶在港口进行装卸作业的合适 条件.

灰色关联度适用于对灰色系统中某一要素与 其他要素的关联程度进行分析,在海洋结构物受 灾破坏分析中也有相关应用.孙熊雄^[7]对某重力

收稿日期: 2022-05-18; 修回日期: 2023-05-18.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51509033);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(DUT19JC51).

作者简介: 麻云平(1998—),男,硕士生,E-mail; mayunping918@126.com; 李 楷*(1984—),男,博士,副教授,硕士生导师, E-mail; likai@dlut.edu.cn.

式深水圆形网箱数值计算结果进行灰色关联分析,分别得出了与网箱锚绳张力、容积保持率和浮架应力关联度最高的因素.聚类分析则通过将大量数据分为多类,对分类结果进行分析,挖掘数据间的关联.李亚等^[8]通过改进的*k*-means聚类算法将台区样本分类,通过 BP 神经网络对数据按类别进行训练,得到了样本线损率与电气特征参数之间的关系.

本文基于通过水动力计算软件 AQWA 计算 获得的共 400 种不同工况下的缆绳受力数据,运 用灰色关联分析及无监督学习算法中具有代表性 的 *k*-means++算法,挖掘缆绳受力与各影响因 素间的内在联系,以期获得各因素对各位置缆绳 受力影响的相对大小及线性关联程度,为缆绳布 置的设计及改进提供参考.

1 项目背景

1.1 计算条件

某 9 400 m³ LNG 船系泊于某 LNG 接收站 码头,船舶基本参数见表 1.

表1 船舶基本参数

Tab. 1 Basic parameters of sl	nip
-------------------------------	-----

舱容/	总长/	型宽/	型深/	结构	压载
m ³	m	m	m	吃水/m	吃水/m
9 400	118.5	19.6	11.8	6.62	5.56

码头环境条件如下:

(1)平均波浪周期≪6 s.

(2)流速:横流≪1.0 m/s,顺流≪2.0 m/s.

(3)流向:涨潮、落潮时流向如图1所示.

其中①落潮顺流流向与船体中心线夹角为 150°,②落潮横流流向与船体中心线夹角为 210°, ③涨潮横流流向与船体中心线夹角为 30°,④涨潮 顺流流向与船体中心线夹角为 330°.

(4)风、浪、涌的参数见表 2.



图 1 流向示意图 Fig. 1 Diagram of direction of current

表 2 风、浪、涌的;	参数	
-------------	----	--

Tab. 2 Parameters of wind, wave and swell

项目	特征参数	参数取值范围	
চা	风速/(m・s ⁻¹)	20.7,17.1	
JXL	风向	N,E,S,NE,NW,SE	
泊	浪向	N,E,S,NE,NW,SE	
(R	浪高/m	2.0,1.5,1.0	
	涌向	E,NE,ESE	
涌	涌高/m	0.5,1.0,1.2,1.5,	
	涌周期/s	6,5	

船舶系泊方式包括左舷系泊及右舷系泊,对 系泊方案模型简化,两种系泊方式下系缆方案分 别如图 2、3 所示.



图 2 左舷系泊方案 Fig. 2 Port mooring scheme



图 3 右舷系泊方案 Fig. 3 Starboard mooring scheme

两种系泊方式下各位置缆绳数量见表 3.

表 3 缆绳数量配置

Tab 3	Configuration	of the	number	of	applas
ran. ə	Configuration	or the	number	OI	cables

项目	缆绳数量(左舷系泊)	缆绳数量(右舷系泊)
艏缆	2	3
艏横缆	3	2
艏倒缆	2	2
艉倒缆	2	2
艉横缆	2	2
艉缆	3	3
总和	14	14

1.2 计算方法

组合各环境参数,形成400种计算工况,其中

包含左舷系泊及右舷系泊两种系泊方式各 200 种 工况.在某种系泊方式下每个工况可表示为集合 *E*,称其为影响因素集.

$$E = \{ d_{\text{wind}}, v_{\text{wind}}, d_{\text{wave}}, h_{\text{wave}}, d_{\text{swell}}, h_{\text{swell}}, T_{\text{swell}}, \\ d_{\text{curr}}, v_{\text{curr}}, t \}$$

其中 d_{wind} 为风向, v_{wind} 为风速, d_{wave} 为浪向, h_{wave} 为 浪高, d_{swell} 为涌向, h_{swell} 为涌高, T_{swell} 为涌周期, d_{curr} 为流向, v_{curr} 为流速, t 为对应装载状态下的吃 水. 考虑到欲获得恶劣环境条件下的缆绳受力, 在 计算中设置 $d_{wind} = d_{wave}$, 即风浪同向.

通过 AQWA 计算此 400 种工况,对计算结 果进行分析. AQWA 计算模型如图 4 所示.



图 4 AQWA 计算模型 Fig. 4 Calculation model in AQWA

随机抽取数据样本,将其在 OPTIMOOR 软件中重新计算,来验证 AQWA 系泊计算结果的 准确性.在表 4 所列工况下,二者计算结果对比如 图 5 所示.

表 4 验证工况 Tab. 4 Working conditions used for validation

装载	风向/	风速/	浪向/	浪高/	流向/	流速/	系泊
状态	(°)	(m・s ⁻¹)	(°)	m	(°)	(m・s ⁻¹)	方式
压载	93	17.1	93	1.5	-151.5	5 1	右舷 系泊



图 5 OPTIMOOR 与 AQWA 计算结果对比

Fig. 5 Comparison between the calculation results of OPTIMOOR and AQWA

2 分析方法

2.1 聚类算法

2.1.1 算法原理 *k*-means 算法是一种被广泛 使用的无监督学习算法,其以聚类数 *k* 为参数,将 *n* 个对象分成 *k* 簇,并使得同簇内的数据具有较 高的相似性,而簇间数据的相似度则较低.算法步 骤可简要描述如下:

(1)从数据集中随机选取 k 个数据作为初始 聚类中心.

(2)分别计算数据集中其他数据与所选 k 个 聚类中心之间的距离,将各数据归入距其最近的 聚类中心所属的类别.

(3)分别计算各簇所有数据的均值,将其作为 新的聚类中心.

(4)重复步骤(2)、(3),直至聚类中心基本趋 于稳定.

图 6 为 k-means 算法的流程图.



图 6 k-means 算法的流程图 Fig. 6 Flow chart of k-means algorithm

待聚类数据为各位置缆绳在 3 h 的历时分析 中各自系缆力的最大值,每个位置缆绳数量为2~ 3 根,故待聚类数据为二维或三维数据,且每个数 据的每个维度都同等重要,采用欧氏距离来度量 各数据与各聚类中心的距离.

聚类数 k 需要事先确定是运用 k-means 算法 面临的一个重要问题,k 的选取直接影响聚类结 果的好坏.但多数条件下无法事先知道数据应被 聚类的数目,针对这一问题,许多学者提出了不同 的确定 k 的科学方法,包括手肘法、轮廓系数法、 DBI 指数法、赤池信息准则、间隔统计量法等^[9]. 其中,手肘法的核心思想如下:已知聚类结果的误 差平方和 S。会随聚类数 k 增大而降低,且先迅速 下降,后缓慢下降,曲线近似呈手肘形,选取肘部 位置为最佳聚类数.图 7 为左舷系泊时艉缆受力 数据聚类结果手肘图,可见,当聚类数k=8 时,误 差平方和开始缓慢下降,为肘部位置,故选择 8 为 聚类数.



图 7 左舷系泊艉缆受力数据聚类结果手肘图 Fig. 7 Elbow diagram of clustering results of stern cable force data for port mooring

选取 S_e 开始缓慢下降时(即曲线肘部)对应的 k 为聚类数,S_e 的表达式为

$$S_{e} = \sum_{i=1}^{k} \sum_{\boldsymbol{p} \in \boldsymbol{S}_{i}} \|\boldsymbol{p} - \boldsymbol{c}_{i}\|_{2}^{2}$$
(1)

式中:*k* 为聚类数,*S_i* 代表第*i* 簇,*p* 为*S_i* 中的数据,*c_i* 为*S_i* 的聚类中心.

根据手肘法的思想,可确定各位置缆力的最 佳聚类数,见表 5.

表 5 最佳聚类数 k的确定 Tab. 5 Determination of the optimal number k of clusters

继强反称	,	ķ
现纯石你 一	左舷系泊	右舷系泊
艉缆	8	8
艉横缆	8	8
艉倒缆	10	9
艏倒缆	9	8
艏横缆	8	8
艏缆	9	8

选取不同的初始聚类中心,会产生不同的聚 类结果,这也是传统 k-means 算法的另一个不足 之处.针对此问题,Arthur 等^[10]提出改进后的 kmeans 算法——k-means++算法,该算法改进了 初始聚类中心的选取方法,基本思想如下:根据某 一数据与已确定的初始聚类中心之间距离的平方 来衡量该数据的权重,作为确定下一个初始聚类 中心的依据.其具体实现步骤如下^[10]:

(1)从数据集 X 中随机选取一个数据作为一 个初始的聚类中心.

(2)计算其他各个数据与当前已有聚类中心的最短距离,记作 D(x),选取概率 P(x)最大时 对应的数据作为下一个初始聚类中心,P(x)表 示为

$$P(x) = D^{2}(x) \Big/ \sum_{x \in X} D^{2}(x)$$
(2)

(3)重复步骤(2),直至确定全部 k 个初始聚 类中心.

该算法的剩余步骤与上述传统 k-means 算法 步骤(2)~(4)一致.k-means++算法解决了传统 k-means 算法可能产生的由于初始聚类中心选择 不当而使得聚类效果不显著的问题.本文采取 kmeans++算法对缆绳受力数据进行分析.

2.1.2 相似性评估 运用 *k*-means++算法,可 将每一位置缆绳的受力划分为多簇.以左舷系泊 方式时艉横缆为例,设其系缆力被划分为 *k* 簇,选 择其中第 *i* 簇进行分析,*i* \in (1,2,...,*k*).设该簇 中共包含 *M* 组缆绳受力数据,每组受力数据均对 应一影响因素集 *E*,对于某一影响因素 *e* \in *E*,设 *e* 在该簇中共有 *N* 种取值,每种取值出现的次数记 为 *n_i*,*j* \in (1,2,...,*N*),则有

$$\sum_{j=1}^{N} n_j = M \tag{3}$$

$$(1/M) \cdot \max_{i}(n_{i}) \in (1/N, 1)$$
 (4)

定义相似度 S 为

$$S = \frac{(1/M) \cdot \max_{j}(n_{j}) - 1/N}{1 - 1/N}$$
(5)

若对于某一影响因素 e,计算所得对应的 S 大 于其他因素对应的 S,则说明在该簇中,因素 e 更具 有一致性,e 有更大的可能性为导致该簇产生的主 要原因,即 e 有更大的可能性为导致缆绳受力相似 的主要原因,即 e 对缆绳受力的影响更大.

2.2 灰色关联分析

灰色关联分析是多因素统计分析中常用的一种方法,其以灰色关联度顺序来描述因素间关系的强弱、大小、顺序.传统灰色关联分析的基本步骤如下^[11-12]:

(1)确定待分析序列.记因变量为参考序列 x₀,自变量为比较序列 x_i(i=1,2,...,n),统称 x₀ 和 x_i 为变量序列.

(2)变量序列量纲一化. 在本分析中采用均值 化的方法进行量纲一化,记转化后的变量序列为 x₀[']和 x_i['].

(3)求差值绝对值、最大差及最小差.差值绝对值指某一观察对象 m(m=1,2,...,s)处 x'₀和x'_i
 之差的绝对值,即:

$$\Delta_{0i}(m) = |x'_0(m) - x'_i(m)|$$
(6)

两级最大差:

$$\Delta_{\max} = \max_{i,m} [\Delta_{0i}(m)]$$
⁽⁷⁾

两级最小差:

$$\Delta_{\min} = \min_{i,m} \left[\Delta_{0i}(m) \right] \tag{8}$$

(4)求灰色关联系数 $\xi_{0i}(k)$. $\Lambda + + a \cdot \Lambda$

$$\boldsymbol{\xi}_{0i}(m) = \frac{\Delta_{\min} + \rho \cdot \Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(m) + \rho \cdot \Delta_{\max}}$$
(9)

其中 ρ 为分辨系数, $\rho \in (0,1)$,根据不同的背景要求取值.

(5)计算灰色关联度 γ_{0i}.

$$\gamma_{0i} = \frac{1}{s} \sum_{m=1}^{s} \xi_{0i}(m)$$
 (10)

(6)对灰色关联度进行排序.

可见,灰色关联度的计算不仅与变量序列有 关,而且还受到分辨系数的影响.在很多情况下分 辨系数的选取都依据经验值,甚至直接取为 0.5, 这势必会影响结果的准确性.基于这一问题,吕 锋^[13]提出了分辨系数的一种取值准则:记Δ、为 所有差值绝对值的均值,即:

$$\Delta_{\mathbf{v}} = \frac{1}{s \cdot n} \sum_{i=1}^{n} \sum_{m=1}^{s} \Delta_{0i}(m) \tag{11}$$

并记 $X_{\Delta} = \Delta_v / \Delta_{max}$,分辨系数的取值如下:

(1)当
$$\Delta_{\max}$$
>3 Δ_v 时, X_{Δ} 《戶《1.5 X_{Δ} ;

(2)当 $\Delta_{\max} \leqslant 3\Delta_v$ 时,1.5 $X_{\Delta} < \rho \leqslant 2X_{\Delta}$.

以此准则来对分辨系数进行取值,可以避免 系统因子观测序列的异常值支配整个系统关联度 取值的情形,能使关联度更好地体现系统的整体 性^[13].

3 影响分析

k-means++算法的分析结果能够表明各因 素对各位置缆绳受力影响的相对大小,灰色关联 分析的分析结果则能够表明缆绳受力与各影响因 素的线性关联程度.综合两种分析方法得出的结 果,可为系泊缆绳布置的设计及优化提供参考.

3.1 k-means++算法分析结果

根据上述 k-means++算法原理,以欧氏距 离来度量待聚类数据与聚类中心的距离,得到左 舷系泊和右舷系泊时缆绳受力数据的聚类结果, 如图8、9所示.对于高于二维的数据,图中只展示



Fig. 8 Cluster analysis results of cable forces for port moorings



Fig. 9 Cluster analysis results of cable forces for starboard mooring

其前两个维度(即其中两根缆绳的受力,分别为 F_1 和 F_2).由图可见,聚类效果明显,受力相近的 数据被较好地聚为同一类.

382

对于左舷系泊情况,各影响因素平均相似度 计算结果见表 6.

表 6 各影响因素平均相似度计算结果(左舷系泊) Tab. 6 Calculation results of the average similarity of each influencing factor (port mooring)

缆绳					S				
名称	吃水	风(浪)向	风速	浪高	涌向	涌高	涌周期	流向	流速
艉缆	0.364	0.492	0.466	0.452	0.267	0.240	0.706	0.377	0.430
艉横缆	0.365	0.505	0.378	0.414	0.317	0.304	0.639	0.228	0.336
艉倒缆	0.566	0.396	0.393	0.470	0.237	0.178	0.580	0.188	0.467
艏倒缆	0.441	0.366	0.463	0.435	0.194	0.199	0.700	0.279	0.355
艏横缆	0.383	0.481	0.288	0.218	0.249	0.221	0.624	0.254	0.262
艏缆	0.443	0.469	0.339	0.256	0.241	0.190	0.616	0.284	0.481

根据计算结果可得,对于左舷系泊情况,涌周 期的相似度相对于其他各因素普遍较大,即可认 为涌周期的变化对各位置缆绳的受力均有较大影 响.其次,对于艉缆、艉横缆、艉倒缆、艏倒缆,浪高 的变化对缆绳受力影响程度也相对较大.艉倒缆 和艏倒缆受力受船舶装载状态(船舶吃水)变化的 影响较大;而剩余的缆绳,包括艉缆、艉横缆、艏 缆、艏横缆,其受力受风(浪)向的变化影响较大. 风速的变化对艉缆和艏倒缆受力有较大影响,相 反,流速的变化则对艏缆和艉倒缆受力的影响 较大.

对于右舷系泊情况,各影响因素平均相似度 计算结果见表 7.

表7 各影响因素平均相似度计算结果(右舷系泊) Tab.7 Calculation results of the average similarity of

each influencing factor (starboard mooring)

缆绳					S				
名称	吃水	风(浪)向	风速	浪高	涌向	涌高	涌周期	流向	流速
艏缆	0.354	0.358	0.386	0.341	0.324	0.256	0.736	0.356	0.337
艏横缆	0.411	0.275	0.369	0.339	0.280	0.239	0.709	0.322	0.449
艏倒缆	0.461	0.238	0.445	0.557	0.407	0.375	0.770	0.291	0.448
艉倒缆	0.474	0.332	0.405	0.407	0.346	0.319	0.754	0.306	0.345
艉横缆	0.584	0.458	0.358	0.390	0.420	0.371	0.773	0.432	0.561
艉缆	0.488	0.373	0.317	0.319	0.331	0.277	0.712	0.351	0.586

根据计算结果可得,对于右舷系泊情况,同样 地,涌周期的相似度相对于其他各因素普遍较大, 即涌周期的变化对各位置缆绳的受力均有较大影 响.其次,流速的变化对除艏缆和艉倒缆以外的缆 绳的受力均有较大影响.船舶装载状态(船舶吃水)的变化对除艏缆和艏横缆以外的其他缆绳的 受力均有较大影响;风速与浪高的变化对中间的 两组缆绳受力有较大影响;涌向的变化则对艏倒 缆和艉横缆的受力有较大影响.

3.2 灰色关联分析结果

对于左舷系泊情况,各影响因素的灰色关联 度计算结果见表 8.

表 8 灰色关联度(左舷系泊)

Tab. 8 Grey relational degree (port mooring)

缆绳					γ_{0i}				
名称	吃水	风(浪)向	风速	浪高	涌向	涌高	涌周期	流向	流速
艉缆	0.557	0.598	0.546	0.587	0.561	0.546	0.549	0.511	0.582
艉横缆	0.565	0.600	0.560	0.587	0.578	0.540	0.559	0.536	0.586
艉倒缆	0.575	0.601	0.587	0.627	0.606	0.559	0.575	0.453	0.567
艏倒缆	0.564	0.608	0.555	0.574	0.563	0.554	0.556	0.500	0.552
艏横缆	0.586	0.597	0.585	0.591	0.597	0.573	0.585	0.493	0.538
艏缆	0.575	0.609	0.570	0.613	0.608	0.564	0.569	0.472	0.508

根据计算结果可得,对于左舷系泊情况,风 (浪)向与浪高两个因素对于各位置缆绳的受力都 具有相对较高的线性关联程度.除此之外,对于艉 缆和艉横缆,流速与缆绳受力有较高的线性关联 程度;而对于艉倒缆、艏横缆和艏缆,涌向与缆绳 受力具有较高的线性关联程度.

对于右舷系泊情况,各影响因素的灰色关联 度计算结果见表 9.

表 9 灰色关联度(右舷系泊) Tab. 9 Grey relational degree (starboard mooring)

缆绳					γ_{0i}				
名称	吃水	风(浪)向	风速	浪高	涌向	涌高	涌周期	流向	流速
艏缆	0.620	0.523	0.619	0.626	0.474	0.617	0.625	0.477	0.608
艏横缆	0.630	0.545	0.630	0.635	0.492	0.630	0.636	0.493	0.626
艏倒缆	0.641	0.511	0.640	0.643	0.471	0.623	0.635	0.493	0.598
艉倒缆	0.620	0.521	0.618	0.637	0.492	0.620	0.624	0.485	0.654
艉横缆	0.617	0.522	0.616	0.634	0.491	0.617	0.621	0.482	0.651
艉缆	0.687	0.423	0.684	0.713	0.429	0.676	0.671	0.551	0.606

在右舷系泊方案中,对于各个位置的缆绳,船 舶吃水、风速、浪高、涌高、涌周期、流速等均与缆 绳受力具有较高的线性关联程度,而风(浪)向、涌 向、流向与缆绳受力的线性关联程度均较低.

4 结 语

本文以 9 400 m³ LNG 船系泊方案为例进行 了计算和分析.根据分析结果发现,两种系泊方式 下,相比于其他因素,系泊缆绳受力均对涌周期的 变化更为敏感.浪高的变化对左舷系泊时艉倒缆 和艉缆(对应于右舷系泊时的艏倒缆和艏缆)有较 大的影响,且在艉倒缆(右舷系泊时为艏倒缆)处, 缆绳受力与浪高有相对较高的线性关联程度.故 在缆绳布置设计中,如果码头浪高较大,应考虑采 取某些措施如增加相应位置缆绳的数量、改变缆 绳所用材料、减小预张力等来减小上述两处缆绳 的受力,尤其是艉倒缆处的受力.

参考文献:

- [1] 沈文君,赵志娟,刘利琴,等.波浪周期对小型船舶动力响应的影响研究[J].船舶力学,2022,26(3):342-352.
 SHEN Wenjun, ZHAO Zhijuan, LIU Liqin, *et al*. Research of wave period effect on the dynamic response characteristics of a small ship [J]. Journal of Ship Mechanics, 2022, 26(3): 342-352. (in Chinese)
 [2] 薛丁源,邵昌浩,杨 婷.长周期涌浪作用下码头船 脑系缆稳定性研究[J].水云工程,2017(3),80-83.
- 艏系缆稳定性研究 [J]. 水运工程, 2017(3): 80-83. XUE Dingyuan, SHAO Changhao, YANG Ting. Movement and mooring force of mooring system in long period wave [J]. **Port and Waterway Engineering**, 2017(3): 80-83. (in Chinese)
- [3] 张 鼎,黄 维,俞 赟.大型集装箱船码头系泊及抗台风计算分析 [J].船舶与海洋工程,2014(2): 15-19.
 ZHANG Ding, HUANG Wei, YU Yun. Analysis on large containership quay mooring and anti-typhoon calculation [J]. Naval Architecture and Ocean Engineering, 2014(2): 15-19. (in Chinese)
 [4] 胡 毅,胡紫剑,刘元丹,等.基于 AQWA 的大型
- [4] 胡 毅,胡索剑,刘元丹,寺. 基丁 AQWA 的天型LNG 船码头系 泊分析 [J]. 舰船科学技术, 2012, 34(2): 70-73, 110.
 HU Yi, HU Zijian, LIU Yuandan, *et al*. Analysis of the large LNG ships moored against a quay based on AQWA [J]. Ship Science and Technology, 2012, 34(2): 70-73, 110. (in Chinese)
- [5] PAULAUSKAS V, PAULAUSKAS D, PLAČIENÉ
 B, et al. Ship mooring to jetties under the crosscurrent [J]. Transport, 2018, 33(2): 454-460.
- $\circlet{6}\circlet{1}$ KIM W O, LEE S W, BAE J Y. A study on

mooring limit analysis of large ship [J]. Journal of Fisheries and Marine Sciences Education, 2017, 29(2): 415-421.

- [7] 孙熊雄. 基于机器学习的重力式深水网箱受灾风险 评估分析研究 [D]. 大连:大连理工大学, 2019.
 SUN Xiongxiong. Risk assessment and analysis of the gravity net cage based on machine learning [D].
 Dalian: Dalian University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [8] 李 亚,刘丽平,李柏青,等.基于改进 K-Means 聚类和 BP 神经网络的台区线损率计算方法 [J]. 中国电机工程学报,2016,36(17):4543-4552.
 LI Ya, LIU Liping, LI Baiqing, et al. Calculation of line loss rate in transformer district based on improved K-Means clustering algorithm and BP neural network [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17): 4543-4552. (in Chinese)
- [9] 黄燕鹏, 汪远昊, 王 超, 等. 基于自组织神经网络和 K-means 的场地地下水污染特征分析与分区管控研究 [J]. 环境工程, 2022, 40(6): 31-41, 47. HUANG Yanpeng, WANG Yuanhao, WANG Chao, et al. Characteristics analysis and zoning control of groundwater pollution based on selforganizing maps and K-means [J]. Environmental

Engineering, 2022, 40(6): 31-41, 47. (in Chinese)

- [10] ARTHUR D, VASSILVITSKII S. k-means + +: The advantages of careful seeding [C]// Proceedings of the Eighteenth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms, SODA 2007. New Orleans: ACM, 2007: 1027-1035.
- [11] 谭学瑞,邓聚龙. 灰色关联分析:多因素统计分析 新方法 [J]. 统计研究, 1995(3): 46-48.
 TAN Xuerui, DENG Julong. Grey correlation analysis: A new method of multivariate statistical analysis [J]. Statistical Research, 1995(3): 46-48. (in Chinese)
- [12] 周文浩,曾 波. 灰色关联度模型研究综述 [J]. 统计与决策, 2020(15): 29-34.
 ZHOU Wenhao, ZENG Bo. A research review of grey relational degree model [J]. Statistics and Decision, 2020 (15): 29-34. (in Chinese)
- [13] 吕 锋. 灰色系统关联度之分辨系数的研究 [J]. 系统工程理论与实践, 1997(6): 49-54.
 LÜ Feng. Research on the identification coefficient of relational grade for grey system [J]. Systems Engineering-Theory and Practice, 1997(6): 49-54. (in Chinese)

Analysis of influencing factors of ship mooring force based on cluster analysis and grey relational degree

MA Yunping, LI Kai*, ZHENG Yi, LIU Song, WANG Yunlong

(School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: In order to study the relative magnitude and linear correlation degree of the influence of wind, wave, current, swell and ship loading state on the cable force of the mooring ship in the port, based on the 400 groups of cable force data calculated by hydrodynamic calculation software AQWA under different combinations of influencing factors, the internal relationship between the cable force and the influencing factors is analyzed by using the k-means++ algorithm, an unsupervised learning algorithm commonly used in machine learning, and the grey relational analysis method. According to the analysis results, the relative magnitude and linear correlation degree of each factor on the cable force at each position are obtained. The method can be used to optimize the mooring cable layout plan.

Key words: port mooring; cable force; unsupervised learning; cluster analysis; grey relational analysis