

# 卸荷式板桩码头数值模拟分析及结构优化研究

林玉娟, 何林丹

(河海大学设计研究院有限公司, 广东 广州 510000)

**摘要:** 以某码头为工程背景, 针对传统板桩码头在此地质条件下受力超限、位移超标及稳定失稳问题, 采用 ANSYS 建立数值模型, 分析卸荷式板桩码头受力与变形特性。结果显示, 初始方案较传统有锚板桩, 前墙最大弯矩降 54%、最大水平位移降 57.3%, 踢脚稳定系数达 1.25, 满足规范要求。针对初始方案桩间距冗余、平台卸荷饱和问题, 经多工况优化, 确定最优灌注桩桩间距 3m、卸荷平台宽度 10m。研究证实该结构在深厚软基中的适用性, 为同类工程设计提供技术支持。

**关键词:** 卸荷式板桩码头; 数值模拟; 深厚软基; 结构优化

中图分类号: U656.1

文献标识码: A

文章编号: 1006—7973 (2025) 21—0027—04

随着港口工程向深水化、大型化方向持续发展, 沿海地区码头建设频繁遭遇深厚软土地基这一复杂地质条件<sup>[1]</sup>。此类地基中的软土具有承载力低、压缩性高、长期变形量大的特点, 导致传统板桩码头在应用中常面临结构受力超出设计限值、水平位移超标<sup>[2]</sup>, 甚至整体稳定失稳的问题, 难以满足现代港口对安全性、耐久性及运营效率的要求, 亟需研发更适配深厚软基特性的新型码头结构形式<sup>[3]</sup>。卸荷式板桩码头作为一种创新结构,

通过在前墙后方设置卸荷平台与双排灌注桩, 一方面可借助土拱效应有效分担桩后土体对前墙的侧向压力<sup>[4]</sup>, 另一方面能通过卸荷平台将码头上部荷载及土体自重稳定传递至深层持力层<sup>[5]</sup>, 从根本上减小前墙的受力负担与变形量, 为解决深厚软基码头设计难题提供了可行的技术路径<sup>[6]</sup>。

基于此, 本文采用数值模拟方法, 系统分析卸荷式板桩码头在深厚软基条件下的受力特征与变形规律, 针

**#1 引桥处防汛通道:** 防汛通道在码头侧与码头引桥连接, 该处引桥面与堤防顶齐平相接, 后场区侧以 3.3% 的坡度从  $\nabla 7.65\text{m}$  降至  $\nabla 6.00\text{m}$ 。#1 引桥处堤防顶高程 7.65m, 通过缓坡与上游主堤防 ( $\nabla 7.00\text{m}$ ) 平顺过渡, 与下游主堤防 ( $\nabla 7.65\text{m}$ ) 齐平相接, 上游侧放坡衔接段坡比为 2%, 衔接段高程从 7.00m 变化至 7.65m, 上游堤防衔接段长度为 33m。

**#2 引桥处防汛通道:** 防汛通道在码头侧与码头引桥连接, 该处引桥面与堤防顶齐平相接, 后场区侧以 2.8% 的坡度从  $\nabla 7.65\text{m}$  降至  $\nabla 6.50\text{m}$ 。#2 引桥处堤防顶高程 7.65m, 通过缓坡与下游主堤防 ( $\nabla 7.00\text{m}$ ) 平顺过渡, 与上游主堤防 ( $\nabla 7.65\text{m}$ ) 齐平相接。下游侧放坡衔接段坡比为 2%, 衔接段高程从 7.65m 变化至 7.00m, 衔接段长度为 33m。

加高帮宽段堤防上游与下四圩港闸相接, 仅帮宽段堤防下游与下五圩港闸相连接, 以形成完整的防汛通道。加高帮宽段堤防在上游江堤盘角处, 堤顶宽度由 8m 帮宽至 10~12m, 防汛通道宽度由 6m 帮宽至 8~10m; 加高帮宽段堤防道路与下四圩港闸顶道路采用 2% 的坡度过渡衔接, 衔接段长度为 10m。仅帮宽段堤防在下游江堤盘角处, 堤顶宽度由 8m 帮宽至 15m, 防汛通道宽度

由 6m 帮宽至 13m。

## 5 结论

开展防洪工程设计是保障码头正常运营、维护地区经济稳定发展以及保护人民生命财产安全的关键举措, 对于提升码头的抗灾能力和可持续发展能力具有深远的战略意义。针对拟建的江苏泰州港靖江港区码头工程, 对其堤防及挡浪墙、防汛道路等进行设计, 可知本码头防洪工程设计方案合理、可行, 具有显著的工程效益。

## 参考文献:

- [1] 谢志高. 水利工程建设对防洪评价影响——以梯子崖码头工程为例 [J]. 中国科技信息, 2023, (11): 111-113.
- [2] 卢剑涛. 涉水码头防洪设计浅析 [J]. 中国水运 (下半月), 2016, 16(09): 279-280.
- [3] 王岩. 水生态修复技术在河道治理中的应用 [J]. 珠江水运, 2024, (04): 129-131.
- [4] 肖和华, 黄杜. 扶壁式防洪墙在防洪工程中的应用 [J]. 工程设计与建设, 2004, (02): 22-25.
- [5] 叶林宜. 深圳河防洪工程规划的航运效益分析 [J]. 水利经济, 1995, (03): 42-43.

对性优化其关键结构参数，并验证该结构在深厚软基中的适用性，最终为同类深厚软基码头工程的设计与实践提供科学的技术支撑。

## 1 工程概况

### 1.1 工程地质条件

本文以某码头为背景，其场地以深厚淤泥为主，下部为细中砂层（作为持力层），各土层物理力学参数基于场地勘察数据确定，具体如下表 1 所示。

表 1 某码头工程地质参数

土层类型	厚度/m	重度 $\gamma$ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	粘聚力 $c$ /kPa	内摩擦角 $\varphi$ /°	弹性模量 $E$ /MPa	泊松比 $\mu$
上部淤泥 (0-20m)	20	17.6	9.8	7.6	1.2	0.42
下部淤泥 (20-35m)	15	18.1	12.2	9.5	1.5	0.40
细中砂 (35m 以下)	$\geq 10$	19.2	/	31.4	18.3	0.25

### 1.2 初始设计方案

结合某码头地质条件与卸荷式板桩码头结构特点，初始方案设计如下：前墙采用地下连续墙结构，厚度 1.0m，顶标高 4.0m，底标高 -30.0m；卸荷平台采用钢筋混凝土结构，宽度 10.11m，厚度 1.0m，顶标高 0.3m，底标高 -0.7m，由双排灌注桩支撑；灌注桩前排采用 PHC-800 管桩，后排采用 PHC-700 管桩，桩长 36m，初始桩间距 4m；锚碇系统锚碇墙厚度 1.1m，顶标高 -0.5m，底标高 -15.0m，拉杆采用 Q345 钢材，直径 95mm。

## 2 数值模型

### 2.1 本构模型与网格划分

为验证卸荷式板桩码头在某码头深厚软基中的受力合理性与稳定性及分析灌注桩间距、卸荷平台宽度等参数对结构力学响应的影响，本文选用 ANSYS WorkBench19.0 作为数值模拟工具进行建模。其中土体的本构模型采用 Mohr-Coulomb 弹塑性模型，模拟软土的屈服与塑性变形特性；前墙、灌注桩、锚碇墙等结构采用 Linear Elastic 模型，混凝土弹性模量取  $3.0 \times 10^4$  MPa，泊松比 0.167，钢材弹性模量取  $2.06 \times 10^5$  MPa，泊松比 0.30。土体采用六面体扫略网格如图 1，结构构件采用实体单元，前墙单元尺寸 0.5m，灌注桩单元尺寸 0.8m，模型总单元数约  $1.2 \times 10^5$ ，节点数约  $6.8 \times 10^5$ ；灌注桩与卸荷平台间采用绑定接触以模拟刚性连接，结构与土体间采用摩擦接触，摩擦系数根据土体内摩擦角确定本文取  $\tan(\phi/3)$ 。

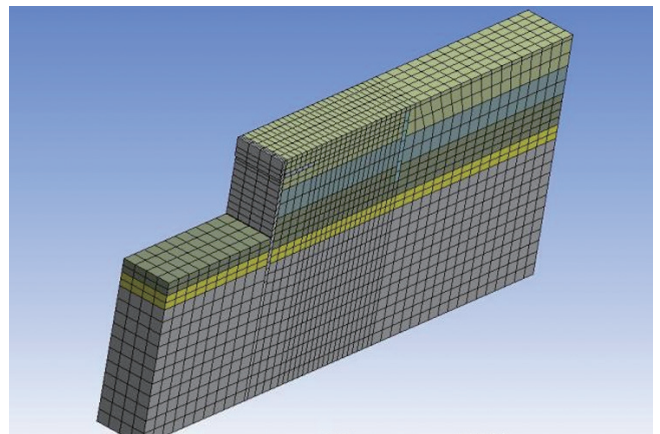


图 1 有限元网格划分

### 2.2 边界条件与荷载

灌注桩与卸荷平台间采用绑定接触以模拟刚性连接，结构与土体间采用摩擦接触，摩擦系数根据土体内摩擦角确定本文取  $\tan(\phi/3)$ 。模型底面采用固定约束，侧面采用法向约束，法向刚度系数设为 0.05，荷载条件主要考虑码头面均布荷载、结构与土体自重，以及港池泥面处的剩余水压力。

## 3 数值模拟结果分析

### 3.1 位移场分析

为明确灌注桩桩间距对分离卸荷式板桩码头前墙位移场的影响规律，以传统板桩方案<sup>[4]</sup>为基准，对比传统板状码头方案与某码头初步设计中软基处理后普通有锚板桩方案的前墙水平位移，结果如图 2 所示。

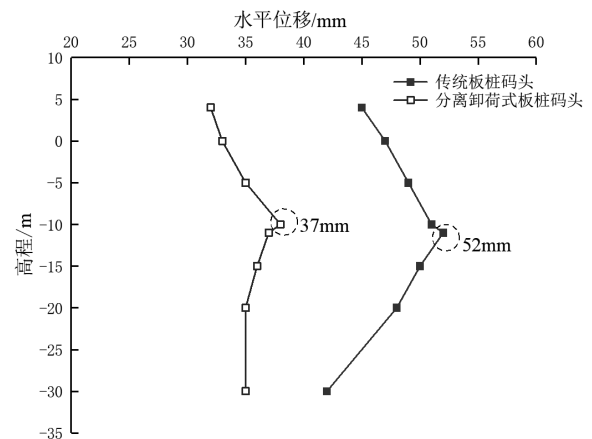


图 2 前墙水平位移分布对比图

由图 2 可知，传统板桩码头方案前墙最大水平位移集中在高程 -11m 处，其最大位移数值为 52mm；而分离卸荷式板桩码头初始方案最大水平位移降至 37mm，降幅 23.1%，表明初始方案虽仍存在较大位移，但能显著改善传统方案板桩码头结构变形问题。除此之外，初始方案

中的分离卸荷式板桩码头前墙位移呈两端小、中间大的分布特征,表现为顶部因拉杆锚固约束,位移约 32mm,底部因嵌入细中砂层受嵌固作用,位移约 35mm;中部即高程 -10m 附近则因土压力集中且约束较弱,位移最大,符合软基中结构位移的典型规律;且传统方案板桩码头位移曲线整体偏高,因无卸荷平台分担上部土体荷载,前墙全高程均承受较大侧向土压力,导致变形普遍偏大,而分离卸荷式板桩码头受荷相对平均。总体来看,分离卸荷式板桩码头初始方案结构可有效抑制受荷过程中的水平位移,克服传统方案中的核心缺陷,改善软基中结构变形,但水平位移的抑制效果仍存在改进空间。

### 3.2 土压力分布特征分析

为研究其卸荷效果,对前墙陆侧土压力分别采用理论计算<sup>[5]</sup>和数值模拟,并分别对其误差进行分析,数值模拟与理论计算对比如图 3 所示。

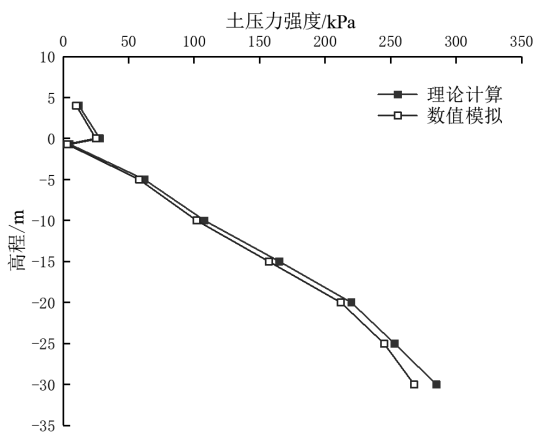


图 3 前墙陆侧土压力对比图

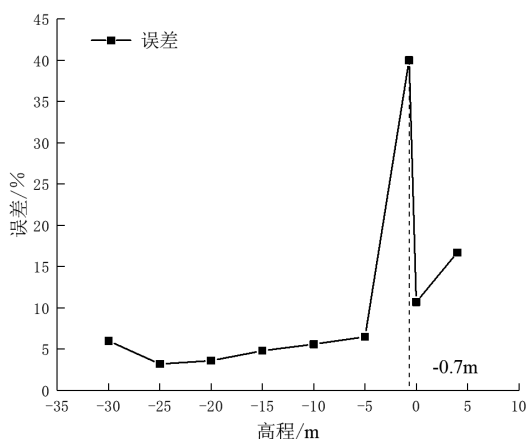


图 4 理论计算与模拟计算误差

由图 3 可知,卸荷平台底面即高程 -0.7m 处土压力接近零,其中数值模拟 3kPa,理论计算 5kPa,表明平台有效承担了上部土体自重与码头面载,并通过灌注桩传递至细中砂层,大幅减少前墙附加侧向土压力。

图 4 为理论计算与模拟计算的误差分布图,可以看出高程 -10m 以下,数值模拟与理论计算误差  $\leq 10\%$ ,此结果验证了土压力计算方法的合理性,但高程 -10m 以上尤其在 -0.7m 左右时,二者计算误差达 40%,其主要原因在于此处数值模拟土压力略低,因模型考虑了桩土相互作用的非线性,而理论计算则为极限平衡状态。

### 3.3 受力及稳定指标对比

为进一步研究分离卸荷式板桩码头的实际效果,将其前墙最大弯矩、前排灌注桩最大弯矩、拉杆平均拉力、前墙最大水平位移和踢脚稳定系数等稳定性指标与传统方案进行对比,经计算,其结果如表 2 所示。

表 2 初始方案与传统板桩码头受力及稳定指标对比

方案类型	前墙最大弯矩 ( $\text{kN} \cdot \text{m/m}$ )	前排灌注桩最大 弯矩( $\text{kN} \cdot \text{m}$ )	拉杆平均 拉力/ $\text{kN}$	前墙最大水 平位移/ $\text{mm}$	踢脚稳定系数
传统普通有锚板桩	695	/	585	89	0.92
卸荷式初始方案	320	185	440	38	1.25

从表中的数据可以看出,卸荷式初始方案前墙最大弯矩较传统普通有锚板桩方案降低 54%,其原因主要在于卸荷平台承担码头面载与上部土体自重并通过灌注桩传递至持力层,减少前墙附加侧向土压力,同时双排灌注桩通过水平土拱效应承担 30%~40% 桩后土体压力,共同减轻前墙受力负担;拉杆平均拉力降低 24.8%,因前墙受卸荷及遮帘协同作用,导致侧向土压力减小导致水平位移从 89mm 降至 38mm,拉杆变形量同步减少,拉力随之降低;前墙最大水平位移降低 57.3%,主要在于前墙顶部受拉杆锚固、底部受细中砂层嵌固,且灌注桩通过土拱效应限制桩间土体滑移,间接约束前墙中部位移,使位移符合深水码头  $\leq 2\%$  墙高的要求;踢脚稳定系数从 0.92 不满足规范提升至 1.25 满足规范要求,主要因为卸荷平台减少前墙上部土压力以降低滑动力矩,灌注桩通过遮帘作用阻止土体沿前墙底部滑移以增大抗倾覆力矩。

### 3.4 初始方案不足分析

基于前文的各项结果,尽管初始方案优于传统码头,但通过结合有限元结果深度分析,仍存在灌注桩桩间距经济性冗余和卸荷平台宽度卸荷效果饱和两方面不足。其中,初始桩间距 4.4m 接近土拱效应最优范围上限,导致桩间土拱传递效率未达最大化,部分土压力仍作用于前墙,且桩间距偏大导致灌注桩用量偏多,会大大增加工程成本。此外,根据前文的土压力结果可知,初始平台宽度 10.11m 时,前墙上部土压力降幅从 8~10m 时的 18.4% 骤降至 10~15m 时的 6.9%,卸荷效果趋于饱和,继续维持大宽度会增加混凝土用量,不符合经济性原则。

## 4 结构优化设计

### 4.1 灌注桩桩间距优化

针对初始方案的不足,研究采用多工况有限元模拟方法,分别优化灌注桩桩间距与卸荷平台宽度来获取最优结构参数。为研究灌注桩最优间距,选取桩间距2m、3m、4m、5m、6m、7m共6个工况,分析前墙最大水平位移与陆侧土压力变化。模拟结果如图5所示。

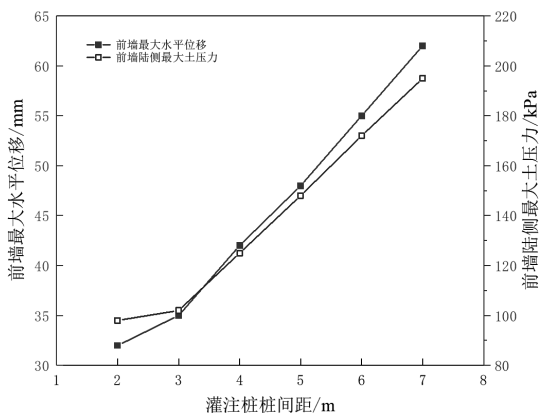


图5 多工况下的最大水平位移及最大土压力

从图5所示的结果可以看出,桩间距2~3m时,前墙最大水平位移从32mm增至35mm且均 $\leq 40$ mm规范限值,土拱效应充分,前墙土压力稳定在102kPa;桩间距达到3~5m时,位移增幅加快,其中从3m增至5m时,位移增至48mm,土拱效应减弱,前墙土压力回升至125kPa;当桩间距大于3.5m时,位移超40mm,土拱效应消失,前墙受力接近传统方案。结合安全性与经济性,最优桩间距为3m。

### 4.2 卸荷平台宽度优化

保持平台海侧端至前排桩净距前后排桩净距为9:20的固定比例,选取宽度5m、7.5m、10m、12.5m、15m、20m共6个工况,分析前墙最大土压力以获取卸荷平台最优宽度。通过模拟,其结果如图6所示。

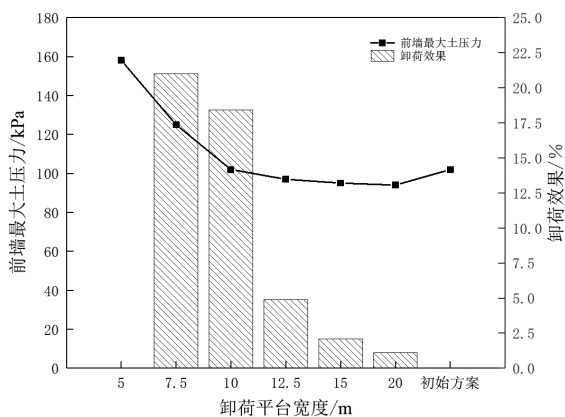


图6 卸荷平台宽度优化图

通过图6结合位移结果可以看出,宽度5~10m时,前墙最大土压力从125kPa降至102kPa,位移从51mm降至35mm,卸荷范围覆盖前墙上部主要受力区;宽度10~15m时,土压力从102kPa降至95kPa,降幅仅6.9%,位移增至42mm,工程量增加25%;宽度大于15m时,土压力趋于稳定,位移继续增大,此时超规范。根据以上分析,最优平台宽度为10m,此时卸荷效果充分,前墙上部土压力85kPa,工程量与初始方案(10.11m)基本持平。

## 5 结束语

本文以某码头为背景,针对传统板桩码头在该类地质条件下易出现的受力超限、位移超标及稳定失稳等核心问题,依托ANSYS WorkBench19.0数值模拟工具,围绕卸荷式板桩码头的受力变形特性分析与结构参数优化展开系统性研究,研究发现:

(1) 相较于传统普通有锚板桩方案,分离卸荷式板桩码头前墙最大弯矩降低54%、拉杆平均拉力降低24.8%、前墙最大水平位移降低57.3%,踢脚稳定系数更是从0.92提升至1.25,但初始方案中灌注桩桩间距存在经济性冗余、卸荷平台宽度出现卸荷效果饱和等不足。

(2) 综合安全性与经济性,确定3m为最优间距,此时土拱效应充分发挥,前墙土压力稳定在合理范围。在卸荷平台宽度优化中,基于卸荷效果与工程量平衡,确定10m为最优宽度,此时前墙上部土压力降至85kPa,卸荷效果饱和问题得以解决。

### 参考文献:

- [1] 李哲,赵丁凤,潘强,等.可液化场地20万吨级卸荷式板桩码头地震反应分析[J].水运工程,2023,(04):43-50.
- [2] 周末,张佳玮.分离卸荷式板桩码头结构动土压力分布特点研究[J].珠江水运,2024,(19):31-33.
- [3] 吴锋,卓杨,刘旭.整体卸荷式板桩码头原型观测技术[J].水运工程,2023,(01):29-33.
- [4] 梁丰收,王俐.海工码头接岸结构选型与设计[J].水道港口,2023,44(02):238-244.
- [5] 池海,王键,王俊杰,等.基于国外某矿厂码头的结构方案研究[J].港口航道与近海工程,2024,61(02):31-34.
- [6] 张文健.高桩码头工程施工方案优化[J].电脑采购,2022,(05):74-76.

# 非体系航运企业水上交通安全管理 水平评价指标体系研究及应用

陈金<sup>1</sup>, 肖勇<sup>2</sup>

(1. 贵州远航交通工程有限公司, 贵州 铜仁 554300; 2. 贵州省交通运输厅, 贵州 贵阳 550000)

**摘要:** 根据小微企业规模小、收入低、安全管理成本占比大等特点, 构建内河非水网地区非体系航运企业水上交通安全管理评价指标体系, 本研究从基础条件、过程控制、应急响应及激励改进四个维度出发, 建立包含 12 项评价指标和 43 个评分要点的综合评价体系, 成果不仅可以用于评价非体系航运企业安全管理水平, 还能规范企业的安全管理活动, 为企业开展安全管理提供理论依据, 对提升内河非水网地区航运安全水平具有促进意义。

**关键词:** 水上交通; 安全管理; 指标体系; 非体系航运公司

中图分类号: U698

文献标识码: A

文章编号: 1006—7973 (2025) 21—0031—05

## Research and Application of the Evaluation Index System for Water Traffic Safety Management Level of Non-System Shipping Enterprises

Chen Jin<sup>1</sup>, Xiao Yong<sup>2</sup>

(1. Guizhou Yuanhang Transportation Engineering Co., Ltd., Tongren 565100, Guizhou, China; 2. Guizhou Provincial Department of Transportation, Guiyang 550003, Guizhou, China)

**Abstract:** Based on the characteristics of small and micro enterprises, such as small scale, low income, and a large proportion of safety management costs, an evaluation index system for water traffic safety management of non-system shipping enterprises in inland non-water-network areas is constructed. This study starts from four dimensions: basic conditions, process control, emergency response, and incentive-based improvement, and establishes a comprehensive evaluation system consisting of 12 evaluation indicators and 43 scoring points. The results can not only be used to evaluate the safety management level of non-system shipping enterprises but also standardize their safety management activities, providing a theoretical basis for enterprises to carry out safety management. It is of great significance for promoting the safety level of shipping in inland non-water-network areas.

**Keywords:** water traffic; safety management; index system; non-system shipping companies

## 1 引言

航运公司作为水上交通安全的责任主体, 是水上交通安全管理的重要源头之一。在我国, 仅部分公司建有安全管理体系, 其余大部分公司均为未建立安全管理体系的“非体系公司”, 相对已建立安全管理体系的公司而言, 非体系航运公司在安全管理方面存在的问题较多, 是目前水上交通安全管理的重点和难点。

《中华人民共和国航运公司安全与防污染管理规定》(交通运输部令 2007 年第 6 号, 以下简称“6 号令”) 明确将所有水路运输企业(体系和非体系)的安全与防污染管理纳入海事主管机关的日常监管范围, 填补了我国海事主管机关对水路运输企业安全与防污染活动日常监管的盲区。6 号令自 2008 年 1 月 1 日起施行以来, 在监督水路运输企业安全运营及相关防污染管理等活动, 进一步提升水路运输企业的安全管理能力, 保

障水上交通安全方面发挥了巨大的作用。

尽管国内学者关于水路运输企业安全管理的相关研究众多, 例如, 基于聚权分级模型构建的企业安全管理评价模型<sup>[1]</sup>、结合因素管理分析的方法研究企业安全管理能力的评价<sup>[2]</sup>、基于云模型理论构建综合指标<sup>[3]</sup>、采用模糊综合评价法建立评价模型<sup>[4]</sup>在熵权法(EVM)和层次分析法(AHP)计算的基础上建立有效性组合赋权评价模型<sup>[5]</sup>等研究, 大多研究对象为体系水路运输企业, 对评价内河非水网地区的非体系水路运输企业安全管理水平终究存在不适应性。因此, 针对非体系水路运输企业安全管理评价相关研究不足问题, 本研究在系统分析水路运输企业安全管理影响因素的基础上, 通过梳理目前涉及企业安全管理方面的法律法规要求, 查找非体系水路运输企业存在的安全意识淡薄、管理制度不健全、人员素质不高、安全投入不够及相关法律法规不完