

# 逆流沉排有限元数值模拟<sup>\*</sup>

郑天宇<sup>1</sup>, 杨杰<sup>2</sup>, 陈一梅<sup>1</sup>

(1. 东南大学, 江苏南京 211189; 2. 中交上海航道局有限公司, 上海 200002)

**摘要:** 为研究逆流沉排过程中软体排受力特性, 基于排布只能承受拉应力的力学特性和几何非线性变形特点, 采用非线性壳单元 Shell181 模拟排布, 建立软体排沉排非线性有限元模型, 与悬链线理论计算结果对比, 验证了模型的准确性。分析现有研究中简化混凝土块的建模方法对计算结果的影响, 利用验证后的模型对改进施工工艺后的张家洲洲头逆流沉排过程开展非线性有限元数值模拟。结果表明, 沉排时排垫最大拉力出现在两侧 1 m 范围内, 排垫两侧 4 m 长度的横向加筋带能有效降低撕排风险; 排布和加筋带的抗拉安全系数均大于 2, 排体位移较小, 施工方案安全有效。

**关键词:** 软体排; 逆流沉排; 非线性有限元; 排垫受力特性; 数值模拟

中图分类号: U 617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)12-0092-06

## Finite element numerical simulation of counter flow flexible mattress sinking

ZHENG Tian-yu<sup>1</sup>, YANG Jie<sup>2</sup>, CHEN Yi-mei<sup>1</sup>

(1. Southeast University, Nanjing 211189, China; 2. CCCC Shanghai Dredging Co., Ltd., Shanghai 200002, China)

**Abstract:** To explore the mechanical properties of the flexible mattress in the process of counter flow sinking, based on the mechanical properties that the geotextiles can only withstand tensile stress and the geometric nonlinear deformation characteristics of the mattress, we establish the nonlinear finite element model of the flexible mattress by the nonlinear shell element Shell181 to simulate the geotextiles, and verify the the accuracy of the model by comparing with the catenary theoretical calculation results. We analyze the influence of the simplified concrete block modeling method in the existing research on the calculation results, and carry out the nonlinear finite element numerical simulation of the counter flow sinking process of Zhangjiachou head after improving the construction process by the verified model. The results show that the maximum tension of the mattress appears within the range of 1 m on both sides during sinking process, and the lateral reinforcement bar with the length of 4 m on the edge of the mattress can effectively reduce the risk of tearing. The tensile safety factor of geotextiles and reinforcement bar is greater than 2, the displacement of flexible mattress is small, and the construction scheme is safe and effective.

**Keywords:** flexible mattress; counter flow mattress sinking; nonlinear finite element; mechanical properties of geotextile; numerical simulation

在航道整治工程领域, 排垫和混凝土压载块构成的联锁块软体排具有整体性好、地形适应性强、护底性能好等优点, 在长江中下游护滩(底)带建设

中应用广泛<sup>[1]</sup>。在护滩(底)带施工时, 铺排方向一般与水流方向垂直<sup>[2]</sup>, 而在江心洲洲头位置, 铺排方向与水流方向相反, 水中悬挂部分排体受逆向水

收稿日期: 2022-03-18

\*基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1600400)

作者简介: 郑天宇(1997—), 男, 博士研究生, 从事航道整治建筑物研究。

流冲击力作用, 易发生排体上浮和漂移。为顺利沉排, 须对铺排工艺进行改进, 包括增加混凝土压载块层数、排垫两侧增设横向加筋带及沉排时对排体进行横向牵引<sup>[3]</sup>等。增加压载块层数后排垫受力增大, 有必要对排体受力开展研究。

目前关于沉排过程中排垫受力的研究较少。张景明等<sup>[4]</sup>通过室内模型试验获取软体排在静水、动水中的结构受力; 张为等<sup>[5]</sup>对垂直水流沉排时的系混凝土块软体排受力特性进行研究; LI 等<sup>[6]</sup>、Sun 等<sup>[7]</sup>研究集中质量法在静水沉排时排垫受力分析中的应用; 刘颖等<sup>[8]</sup>对静水状态下的软体排沉排进行非线性有限元计算; 袁立莎等<sup>[9]</sup>对深水顺流沉排时的软体排受力特性进行线性有限元仿真计算; 李镇宇<sup>[10]</sup>、孙峙华<sup>[11]</sup>分别对垂直水流和顺水流工况下的沉排过程开展有限元数值模拟; 周涛等<sup>[12]</sup>通过非线性有限元模拟给出顺流及逆流沉排时的水流力简化公式。但这些研究均未对改变工艺后的逆流铺排施工开展排垫受力特性研究, 且在开展静水及顺流沉排有限元数值模拟时对混凝土块进行简化, 忽略混凝土块与排垫间的相互作用, 不能反映排垫的实际受力情况。

本文基于软体排的结构及力学特性, 建立软体排逆流沉排非线性有限元模型, 分析沉排时排垫受力及位移情况, 为逆流沉排施工提供技术支撑。

## 1 模型构建

### 1.1 建模方法

目前关于软体排沉排的有限元数值模拟研究中, 在建立软体排有限元模型时均采取简化混凝土块的建模方法, 即将混凝土块的重力等效加载至排布自身重力。实际沉排时, 混凝土块系在排垫加筋带的加筋环上, 混凝土块的重力由排布及加筋带共同承受, 且混凝土块之间存在空隙, 并未完全铺满排垫, 因此该方法不能体现排垫的实际受力情况。本文在建立软体排有限元模型时, 采用固体单元模拟混凝土块, 并在混凝土块与排垫间建立绑定接触, 更好地反映排体的真实结构。

考虑到排布只能承受拉应力的力学特性和几何非线性变形特点, 采用有限元分析软件 ANSYS 中的非线性壳单元 Shell181 模拟排布, 缝制在排布上的丙纶加筋带具有一定的抗扭转及侧向刚度, 采用梁单元 Beam189 模拟加筋带, 选择固体单元 Solid95 模拟混凝土块: 1) Shell181 为四节点有限应变壳单元, 非常适合进行大转动、大变形的非线性分析, 单元每个节点有 6 个自由度(若采用薄膜选项则仅有平动自由度), 即沿节点坐标系 x、y 和 z 方向的平动自由度和绕各轴的转动自由度<sup>[13]</sup>, 选择适合大挠度分析的三角形单元对排布进行网格划分。2) BEAM189 单元为三维二次有限应变梁单元, 适用于模拟细长到中等细长的梁结构, 单元基于铁摩辛柯梁理论, 考虑剪切应变影响。该单元具有 3 个节点, 每个节点有 6 个自由度, 适合进行大转动、大应变问题分析。3) Solid95 为三维 20 节点结构实体单元, 对不规则形状具有较好的精度, 采用协调的位移插值函数, 可很好地适应曲线边界。该单元由 20 个节点定义, 每个节点有 3 个自由度。

为模拟混凝土块和排垫间的连接方式, 选择 CONTA175 面-面接触单元和 TARGET170 目标单元在混凝土块和排垫间建立接触对, 接触类型为绑定接触, 即混凝土块和排垫在所有方向上绑定。

逆流铺排时, 悬挂部分排体背面受到动水压力建立。选择平板莫里森公式计算水流冲击力  $F$ :

$$F = \frac{1}{2} A C_D \rho v^2 \quad (1)$$

式中:  $v$  为软体排迎水面平均流速 (m/s);  $C_D$  为水流拖曳力系数, 取 1.0;  $\rho$  为水的密度 (t/m<sup>3</sup>);  $A$  为有效挡水面积 (m<sup>2</sup>)。

### 1.2 软体排初始构型

建立软体排沉排非线性有限元模型前, 需要确定排体在水中的初始构型。当放排速度等于移船速度时, 排体在水中保持竖直状态, 悬挂排体形状如图 1 的线型 1 所示; 当移船速度大于放排速度时, 悬挂排体形状如图 1 的线型 2 所示。线

型 2 工况下悬挂排体长度更大, 排垫受力状态更为不利, 故本文对线型 2 工况开展研究。目前, 关于软体排沉排的悬链线理论认为, 线型 2 可用悬链线方程描述。故本文选择悬链线方程作为排体初始构型方程, 悬链线方程及对应的翻板边缘单位宽度排垫拉力  $T$  计算公式为:

$$y = c \left[ \operatorname{ch} \left( \frac{x}{c} \right) - 1 \right] \quad (2)$$

$$T = W(h + c) \quad (3)$$

$$c = \frac{T_x}{W} \quad (4)$$

式中:  $y$  为竖向距离 (m);  $x$  为排体上端与下端之间的水平距离 (m);  $h$  为水深 (m);  $W$  为单位面积软体排的重力 ( $\text{N}/\text{m}^2$ );  $T_x$  为排体上任意一点拉力的水平分力 ( $\text{N}/\text{m}$ )。

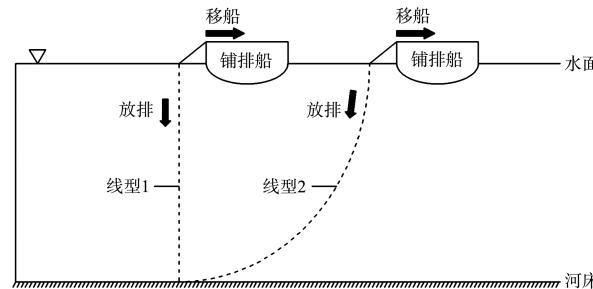


图 1 沉排时悬挂排体形状

在移船过程中, 排垫所受拉力与移船速度和放排速度有关, 放排速度一定时, 移船速度越快, 排垫产生的拉力越大。可用式(5)计算出不同  $\Delta x/h$  值对应的  $c/h$  值, 结果见表 1。

$$\frac{\Delta x}{h} = 1 + \frac{c}{h} \ln \left[ \left( 1 + \frac{h}{c} \right) + \sqrt{\left( 1 + \frac{h}{c} \right)^2 - 1} \right] - \sqrt{1 + \frac{2c}{h}} \quad (5)$$

式中:  $\Delta x$  为一次放排时移船距离与放排长度的差值, 称为相对移船位移 (m)。

表 1  $\Delta x/h - c/h$  关系

$\Delta x/h$	0.050	0.100	0.150	0.200	0.250	0.300	0.350	0.400	0.450	0.500
$c/h$	0.0121	0.0312	0.0567	0.0897	0.1316	0.1848	0.2525	0.3396	0.4531	0.6040

## 2 模型验证

### 2.1 模型设置

在开展逆流沉排非线性有限元数值模拟之前, 需要对模型的精确性进行验证。对静水中的单位宽度 (1m) 软体排进行非线性有限元计算, 将计算得到的排垫上端拉力与悬链线理论计算结果进行对比验证。

排垫由排布和加筋带缝制而成, 按照材料检验报告确定混凝土块、排布及加筋带的各项参数, 见表 2。

表 2 材料参数

名称	长度(直径)/m	厚度/m	浮密度/ $(\text{t} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量/GPa	泊松比
排布	6.00	0.002	0.250	0.16	0.40
加筋带	6.00	0.002	0.500	16.00	0.40
混凝土块	0.36	0.100	1.101	25.50	0.25

相对移船位移与水深的比值  $\Delta x/h$  取 0.4, 按表 1 确定排体初始构型方程参数  $c$ 。排垫上下端约束类型均为固定约束, 即限制所有方向的平动及转动约束。单位宽度软体排有限元模型

如图 2 所示。



图 2 宽 1 m 软体排有限元模型

### 2.2 有限元及悬链线计算结果对比分析

将参数代入式(3), 计算悬链线理论对应的翻板边缘单位宽度排垫拉力, 有限元及悬链线理论计算结果见表 3。可以看出, 3 种排体长度下有限元计算结果相对误差均小于 1%, 验证了软体排沉排非线性有限元计算方法的准确性。将该方法用于逆流沉排排垫受力特性研究具有一定的可靠性。

表 3 静水中 1 m 宽软体排所受拉力计算结果

排体长度/m	有限元计算 排垫上端拉力 $T_1/(kN \cdot m^{-1})$	悬链线计算 排垫上端拉力 $T_2/(kN \cdot m^{-1})$	相对误差/%
6	2.774	2.771	0.11
8	3.697	3.695	0.05
10	4.620	4.619	0.02

### 2.3 简化混凝土块前后有限元计算结果对比分析

为分析建模时简化混凝土块对有限元计算结果的影响, 分别采用本文及现有研究中的两种建模方法对单位宽度软排体(长度 6 m)进行非线性有限元计算, 分别将两种方法建立的模型称为完整模型及简化模型, 计算得到的排垫应力云图如图 3 所示。

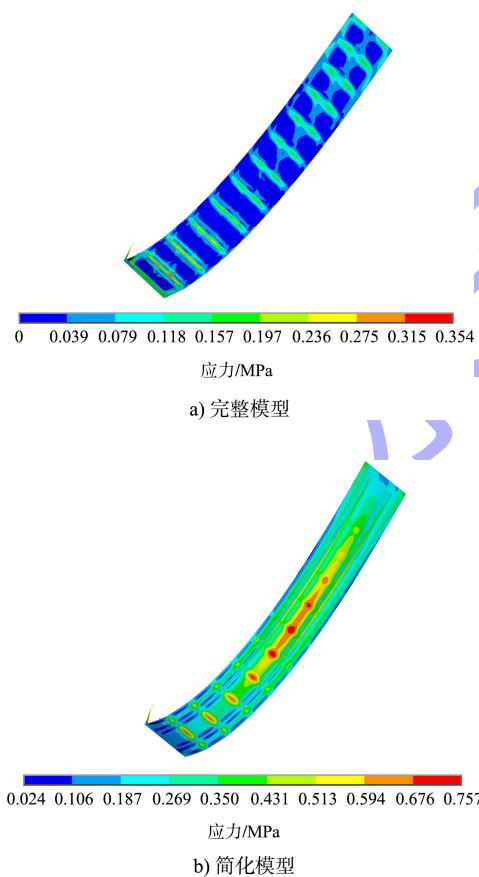


图 3 简化前后 1 m 宽软体排排垫应力云图

根据图 3 可见, 简化、完整模型排垫最大应力分别为 0.757、0.354 MPa, 简化模型排垫最大应力相对误差为 113.7%, 计算结果偏大。完整模型中混凝土块最大应力为 0.680 MPa, 大于排垫最

大应力。

## 3 逆流沉排工况模拟

### 3.1 工程概况

对张家洲洲头逆流沉排过程开展非线性有限元数值模拟。依据沉排区域水文资料及护岸工程设计资料, 洲头逆流沉排最大施工水深为 4 m, 因此取排体长度为 6 m, 对应施工水深为 4.63 m, 排体初始构型方程参数与 2.1 节相同。

据文献[3]的逆流沉排施工改进措施, 排体横、纵向第 1 排(列)及最后 1 排(列)均采用双层混凝土块压载, 其余部位间隔梅花形满铺双层压载块, 考虑排头排尾沉放时的最不利受力状态, 模型采取双层混凝土块压载; 在排垫两侧间隔 2 m 增设长度 4 m 的横向加筋带, 并在沉排时对排体进行横向牵引防止缩排, 排体上下端均限制所有方向的平动和转动约束, 排布、加筋带及混凝土块参数设置与表 2 相同。

逆流沉排时水中悬挂排体背面水流冲击力按式(1)计算确定, 测得施工现场最大垂线平均流速为 1 m/s。

### 3.2 结果分析

逆流沉排时排垫上端拉力沿宽度方向分布如图 4 所示。可以看出, 排垫上端拉力沿宽度方向分布并不均匀, 对排体进行横向牵引时, 排垫两侧拉力较大, 最大值出现在排垫两侧 1 m 范围内, 排垫两侧长度为 4 m 的横向加筋带能有效降低撕排风险。

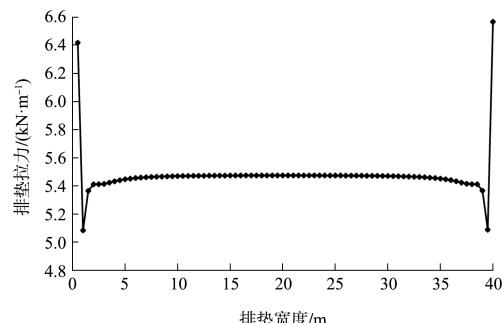


图 4 逆流沉排排垫上端拉力分布

排布应力云图如图 5 所示。在结果中提取排布及加筋带的应力进行分析, 其中排布的最大应

力为 1.30 MPa, 加筋带最大应力为 95.4 MPa。根据排布及加筋带检验报告, 550 g/m<sup>2</sup> 复合土工布单宽设计抗拉强度为 60 kN/m, 5 cm 丙纶加筋带设计抗拉强度为 20 kN/根, 按照排布厚度及加筋带横截面积换算得到的设计容许最大应力值分别为 30、200 MPa, 排布和加筋带抗拉强度均满足要求, 且安全系数均大于 2, 表明施工过程安全可靠。

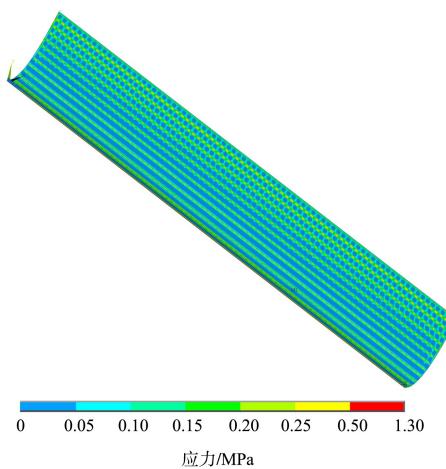
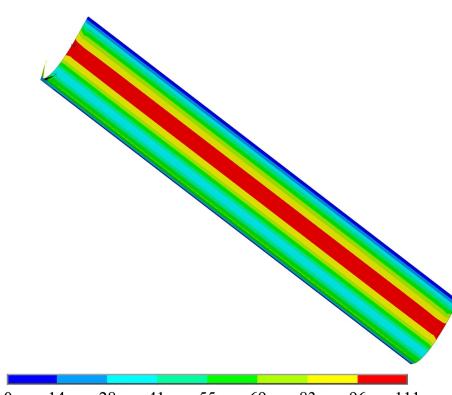
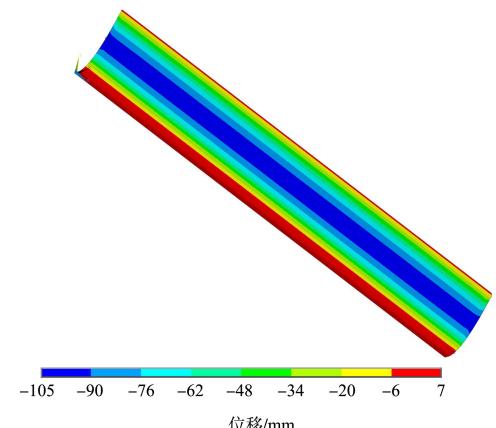


图 5 逆流沉排排布应力云图

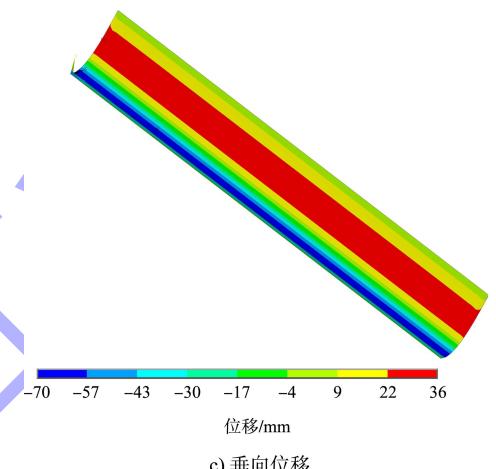
排垫位移云图如图 6 所示。可以看出, 排体位移分布并不均匀, 最大位移位于排体中部。在结果中提取排体位移数据进行分析, 排体位移主要由纵向位移和垂向位移构成, 最大纵向位移为 -105 mm, 最大垂向位移为 70 mm, 横向收缩小于 1 mm, 未出现明显的排体漂浮和缩排现象, 表明采用双层混凝土块压载能有效抵消逆向水流冲击力的影响。



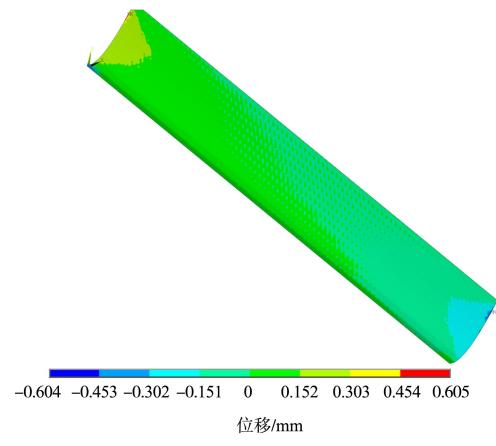
a) 总位移



b) 纵向位移



c) 垂向位移



d) 横向位移

图 6 逆流沉排排垫位移云图

#### 4 结论

1) 通过比较单位宽度软体排有限元计算结果与悬链线理论计算值, 验证了软体排沉排非线性有限元模型的可靠性。

2) 静水中单位宽度排体的计算结果表明, 简化模型相较完整模型排垫最大应力超出了 113.7%, 误差较大。

3) 对张家洲洲头逆流铺排施工有限元数值模拟结果表明, 对排体进行横向牵引时, 排垫最大拉力出现在两侧 1 m 范围内, 排垫两侧长度为 4 m 的横向加筋带能有效降低撕排风险; 排布和加筋带的抗拉安全系数均大于 2, 排体位移较小, 该施工方案安全有效。

## 参考文献:

- [1] 肖庆华, 潘美元, 雷国平, 等. D 型软体排沉排施工中缩撕断机理[J]. 水运工程, 2015(1): 200-203.
- [2] 谢盛开. 长江下游黑沙洲水道航道整治工程顺水沉排施工工艺研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
- [3] 方佳敏, 杨杰, 张源立. 长江航道整治工程逆水沉排施工工艺及质量控制[J]. 中国水运(下半月), 2020, 20(9): 107-108, 111.
- [4] 张景明, 严之菲. 软体排深水沉放结构受力试验分析[J]. 水运工程, 2002(10): 34-35.
- [5] 张为, 李义天. 系混凝土块压载体软体排受力特性研究[J]. 水运工程, 2006(1): 9-15.

(上接第 16 页)

2) 港口总体规划仍为核心、约束引导作用显著, 为行业健康发展提供了明确边界与保障。从目前规划体系构成和规划定位看, 全国港口布局规划和区域港口布局规划只解决区域层面港口空间分布与港口间分工关系问题, 省级港口布局规划虽聚焦到省域范围, 但对单港的指导性仍不强, 而下一层级的港区/作业区控制性详细规划是对港口总体规划方案的细化与落实, 港口总体规划作为建设项目规划许可、岸线审批的依据, 在目前港口规划体系及规划管理中处于核心地位。

3) 依托港口总体规划案例, 进一步探索港口规划编制内容的刚弹结合。选取典型港口总体规划作为案例, 根据不同情况将规划编制内容分为刚性管理、弹性管理范畴, 对于严格管控的内容部分, 明确刚性编制及管理要求; 对于港口码头平面布置、水陆域港界等需要在前期工作中深化的内容采用“刚弹结合”的处理方式。对于主要港口, 平面布置方案主要针对部、省联合事权下的核心港区; 探索其他港区/港点仅在主要港口总体规划中落实大体选址或初步方案, 其具体平面

- [6] LI Z Y, YANG P, SUN Z H, et al. Analysis of configuration and tension force for flexible mattress by Lumped-Mass Method[J]. Applied mechanics and materials, 2014, 3590(668/669): 322-325.
- [7] SUN Z H, CHENG M L. Mechanical characteristics analysis on flexible mattress in downstream sinking based on Lumped Mass Method[J]. Applied mechanics and materials, 2014, 3307(580/583): 1910-1917.
- [8] 刘颖, 杨平. 软体排沉排受力分析与非线性有限元计算[J]. 船海工程, 2011, 40(3): 52-55, 58.
- [9] 袁立莎, 马燕. 联锁块软体排深水沉排受力的线性有限元分析[J]. 水运工程, 2013(3): 11-14, 55.
- [10] 李镇宇. 水下沉排过程中软体排力学特性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.
- [11] 孙峙华. 航道整治工程中软体排沉排力学特性的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.
- [12] 周涛, 何炎平, 黄超, 等. 超深水铺排作业计算方法与结果分析[J]. 水运工程, 2016(5): 156-161.
- [13] 王新敏, 李义强, 许宏伟. ANSYS 结构分析单元与应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011. (本文编辑 王璁)

方案可由地方组织编制港口控制性详细规划、结合前期工作等进一步深化、细化。

## 参考文献:

- [1] 季则舟, 杨兴宴, 尤再进, 等. 中国沿海港口建设状况及发展趋势[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(10): 1211-1217.
- [2] 蒋千. 我国沿海港口规划建设中的几个问题[J]. 土木工程学报, 1991(3): 92-94.
- [3] 国家发展和改革委员会, 中华人民共和国交通运输部. 全国沿海港口布局规划[R]. 北京: 国家发展和改革委员会, 2006.
- [4] 姚海元, 扬懿, 靳廉洁, 等. 我国沿海主要港口布局规划方案深化研究[J]. 综合运输, 2017, 39(10): 10-14.
- [5] 史国光, 李善友. 建国以来我国港口规划的回顾与总结[J]. 中国港口, 2009(10): 1-4.
- [6] 姜长杰. 浅谈港口规划编制工作需要关注的问题[J]. 中国港口, 2008(6): 8-9.
- [7] 史国光. 做好港口规划评估工作的一些思考[J]. 中国港口, 2012(7): 23-25, 44.

(本文编辑 武亚庆)