



基于仿真技术的黄骅港煤炭港区 航道拓宽方案确定

禹化强, 唐 颖

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 2017 年以来黄骅港煤炭港区吞吐量持续超过 2 亿 t, 船舶大型化趋势显著, 导致船舶等待时间偏长, 航道通过能力也已不能满足港区发展要求, 急需对现状 5 万吨级航道进行拓宽升级。为了合理确定航道拓宽方案, 采用系统仿真技术, 通过建立涵盖锚地、航道、港池和泊位的港航系统模型, 结合港口生产数据, 对多个航道拓宽方案开展港航系统仿真研究。结果表明, 各航道拓宽方案均能满足港区吞吐量发展要求; 随着航道拓宽里程增加, 煤炭船舶平均离港等航道时间、煤炭码头平均单船空泊时间呈减小趋势, 相应煤炭码头泊位利用率、港航系统通过能力逐步提升。基于仿真研究结论, 通过综合对比投资、航道横流、后期维护费用等因素, 推荐采用航道拓宽方案 1。

关键词: 港口; 航道拓宽方案; 通过能力; 仿真

中图分类号: U 651+.3; U 653.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)10-0316-07

Determination of channel widening scheme in coal port area of Huanghua Port based on simulation technology

YU Hua-qiang, TANG Ying

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: Since 2017, the throughput of the coal port area of the Huanghua Port has continuously exceeded 200 million tons, and the trend of large-scale ships is obvious, which leads to a long waiting time for ship, and the throughput capacity of the channel cannot meet the development requirements of the port. Therefore, it is urgent to widen the current 50, 000 DWT channel. In order to reasonably determine the channel widening scheme, we establish a port and channel system model covering anchorage, channel, harbor basin and berths by using the system simulation technology, and carry out simulation research on the multiple channel widening schemes combined with realistic data of port production. The results show that each channel widening scheme can meet the development requirements of port throughput. With the increase of channel widening mileage, average departure time of coal vessels and average empty berthing time of a single ship at the coal terminal show a decreasing trend, the berth utilization rate of the coal wharf and the throughput capacity of the port and channel system are gradually improved. Based on the simulation results, the channel widening scheme 1 is recommended by comprehensively comparing the factors such as investment, channel cross flow and later maintenance cost.

Keywords: port; channel widening scheme; throughput capacity; simulation

黄骅港煤炭港区是我国“西煤东运”“北煤南运”的第二通道出海口。目前, 港区已建设

17 个 2 万~10 万吨级煤炭装船泊位、2 个 3 万吨级通用散杂泊位、1 个 5 万吨级液体化工品泊

收稿日期: 2021-06-08

作者简介: 禹化强(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港航工程咨询、设计及项目管理。

位, 翻车机 13 台, 设计年吞吐量 1.82 亿 t(其中煤炭 1.78 亿 t)。2017 年以来港区吞吐量持续超过 2.0 亿 t(煤炭下水量均超过 1.9 亿 t)。煤炭港区唯一进出港航道为现有 5 万吨级航道(2012 年底建成), 全长约 43.48 km; 现状通航规则仅允许 3.5 万吨级及以下散货船双向、5 万吨级与 2 万吨级散货船双向通航。

根据港区生产系统统计数据, 近年来, 到港煤炭船舶平均载质量逐年增大, 5 万吨级及以上船舶无论承运比还是艘次比均呈逐渐上升趋势; 2019 年总到港煤炭船舶 4 356 艘^[1], 5 万吨级及以上船舶达到 2 924 艘, 艘次比、承运比大幅增加分别达到 67.13%、79.19%(相比 2013 年分别增加 33.59%、26.52%)。但受现有航道通航条件限制, 船舶在港停时大幅增加, 5 万、7 万吨级及以上船舶在港平均停时分别达到约 114、126 h, 离港平均等航道时间约 3 h, 对港口服务水平产生较大影响, 现状航道明显已成为制约港区煤炭下水进一步增加的瓶颈。

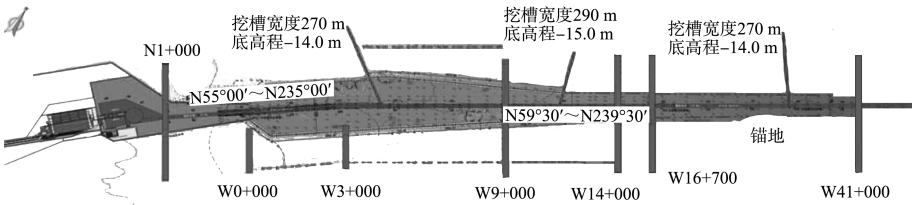


图 1 航道现状

根据河北省海洋功能区划, 黄骅港口航运区海域边界位于黄骅港煤炭港区航道里程 W12+000 处, W12+000 以外航段为山东省滨州市滨州北农渔业区用海范围。

根据当地海事部门制订的通航规则, 在满足乘潮水位以及风、横流、能见度条件下, 对所有船舶, W9+000—W16+700 航段只允许单向通航; 其余航段实行有条件双向通航, 双向通航船型组合为: 3.5 万吨级及以下散杂货船舶可以双向通

根据国能黄骅港务有限公司发展规划, “十四五”期将新增 1 个 12 万吨级油品泊位及 2 个 5 万吨级通用散货泊位, 2025 年港区吞吐量将达到 2.5 亿 t(其中煤炭吞吐量 2.3 亿 t), 现状航道已不能满足港区运量发展要求, 急需将现状航道拓宽升级为 7 万吨级双向航道, 满足 7 万吨级散货船乘潮双向通航要求, 以适应港区吞吐量不断增长、船舶大型化的发展需要。同时, 可改善航道通航条件, 提高航道通过能力、抵御风险能力。

1 工程概况

1.1 航道现状

黄骅港煤炭港区现状 5 万吨级双向航道总长 43.48 km, 各航段具体尺度为: 内航道 N1+000—N3+480.5 及外航道 W0+000(N3+480.5)—W9+000、W14+000—W41+000 段航道挖槽宽度为 270 m, 设计底高程为 -14.0 m。外航道口门段 W9+000—W14+000 航道挖槽宽度为 290 m, 设计底高程为 -15.0 m。航道现状如图 1 所示。

航, 5 万吨级与 2 万吨级散杂货船舶可以双向通航。

1.2 航道拓宽方案

1.2.1 航道拓宽尺度计算

现状航道设计底高程 -14.0 m(口门段为 -15.0 m)满足 7 万吨级散货船乘潮通航要求(乘潮水位 2.47 m, 乘潮历时 4 h、保证率 90%)。因此, 为满足 7 万吨级散货船双向通航要求, 仅需要对现状航道进行拓宽。各航段拓宽尺度计算^[2]见表 1。

表 1 航道拓宽尺度计算

船型及航段	船舶 吨级/ 万吨级	设计 航速/ kn	船舶漂 移倍数 <i>n</i>	风、流 压偏角 $\gamma/(^{\circ})$	船舶 总长 <i>L</i> /m	船舶 型宽 <i>B</i> /m	航迹带 宽度 <i>A</i> (= $Lnsin\gamma+nB$)/m	船舶与航 道底边线 间的富余 宽度 <i>c</i> /m	船舶间富 余宽度 <i>b</i> (取设计船 宽 <i>B</i>)/m	单向航道 有效宽度 计算值 $W(=A+2c)$ /m	双向航道 通航宽度 计算值 $W'(=2A+b+2c)$ /m
散货船(口门 段以外航段)	7	8	1.69	7	228	32.3	101.5	32.3	32.3	166.1	300.0
散货船(口门 段)	7	8	1.45	14	228	32.3	126.8	32.3	32.3	191.4	350.5

1.2.2 航道拓宽方案

结合海域自然条件、海洋功能区划、煤炭船舶进出港特点，提出 3 个航道拓宽方案：

1) 航道拓宽方案 1。考虑口门段受横流、大风骤淤影响较大，人工长航道内大型船舶双向通航经验需要逐步积累，而且跨省办理用海难度较大(W12+000 以外为山东海域)，提出航道拓宽方案 1，仅对口门段以内航段即 N1+000—W9+000 进行拓宽，航道挖槽宽度由 270 m 向两侧拓宽至 300 m。

2) 航道拓宽方案 2。为进一步延长 7 万吨级大型船舶双向通航里程、增加港区通过能力，提出航道拓宽方案 2，拓宽里程为 N1+000—W12+000 航段(拓宽段全部位于河北省海洋功能区划确定的黄骅港口航运区海域)，各航段拓宽尺度为：N1+000—W9+000 航段的航道挖槽宽度由 270 m 向两侧拓宽至 300 m；W9+000—W12+000 航段(位于口门段)的航道挖槽宽度由 290 m 向两侧拓宽至 350 m。

3) 航道拓宽方案 3。煤炭船舶锚地位于航道 W22+000 附近，根据船舶吃水、航道水深以及航行习惯，7 万吨级压载煤炭船舶自锚地进入航道位置在 W16+700 附近，7 万吨级重载出港煤炭船舶须航行至航道末端进入公共航路，煤炭船舶实际须双向通道航段为 N1+000—W16+700 航段，为最大限度提高港区通过能力，航道拓宽方案 3 拓宽里程为 N1+000—W16+700 航段。各航段拓宽尺度为：N1+000—W9+000 及 W14+000—W16+700 航段的航道挖槽宽度由 270 m 向两侧拓宽至 300 m；

W9+000—W14+000 航段(口门段)的航道挖槽宽度由 290 m 向两侧拓宽至 350 m。

1.2.3 拓宽段航道设计通航规则

1) 双向通航的船舶为 7 万吨级及以下散杂货船舶。

2) 航道双向通航时，船舶遭遇的风力不宜超过 6 级；遭遇的横流不宜超过 0.51 m/s；有效波高 $H_{1/3}$ 限制在 1.5 m 以下；最小能见距离不应小于 1.5 n mile(2.8 km)；浮冰最大厚度不超过 10 cm。

航道拓宽的目的主要为提升港区通过能力，港区通过能力分析涉及自然条件、船型、航行规则、泊位作业效率、泊位性质等众多因素，传统计算方法无法系统、全面地进行港区通过能力分析。因此，本文结合煤炭港区生产运营状况及航道自身特点，提出采用计算机系统仿真手段，针对 3 个航道拓宽方案开展港区通过能力研究^[3]，为合理确定航道拓宽方案提供科学依据。

2 系统仿真模型

2.1 仿真模型研究范围

根据黄骅港煤炭港区实际生产运营特点，建立涵盖船舶、锚地、航道与港池、泊位以及潮汐、潮流、大风、大雾等自然条件影响因素的港航系统仿真模型^[4]，较传统计算航道通过能力采用的经验公式法有较大的改进和提高。陆域边界为泊位，船舶在此停靠并进行装卸作业；水域边界为锚地和航道末端，锚地为船舶对象进入仿真模型的边界，航道末端为船舶离开系统的仿真模型。模型范围见图 2。

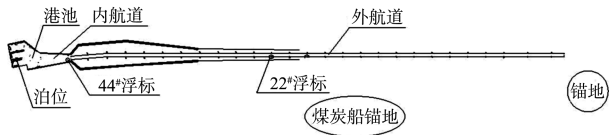


图 2 模型范围

2.2 仿真模型要素与模拟过程

港航系统通过能力受船型、锚地、航道通航条件、港池布置、泊位作业条件以及自然条件(潮汐、横流、大风、大雾)等众多因素影响, 为保证系统仿真结论真实可信, 本文根据黄骅港煤炭港区实际生产运营情况, 对上述众多因素进行详细研究分析; 仿真模型的模拟过程包括: 船舶到达、船舶指泊、船舶进入航道、船舶在航道内航行、船舶在港池内航行与靠离泊作业、泊位作业、离港等全过程。

2.2.1 船舶到达

仿真模型中包括 4 种船舶, 分别是煤炭船、杂货船、油船和液体化工品船, 船舶生成后直接进入相应的锚地。对于煤炭船舶, 为使模型更加接近港区实际生产情况, 煤炭压载船舶待泊锚地总是有足够的待泊船舶(20~30 艘), 当有船舶进港作业时, 仿真模型会再次生成船舶; 对于其他类型船舶到达时间间隔按照负指数分布抽样获得^[5], 船舶平均到达时间间隔根据不同试验方案的杂货码头、油码头、液体化工码头的吞吐量计算得到。

纵观近几年黄骅港煤炭港区的到港船型, 船舶大型化趋势仍在继续。本文船舶采用 2 种船型比例: 第 1 种为 2019 年的实际到港船型; 第 2 种为根据 2025 年港区预测吞吐量 2.5 亿 t(其中煤炭 2.3 亿 t、液体散货 1 000 万 t、通用散杂货 1 000 万 t), 并考虑船舶大型化, 研究提出的 2025 年预测到港船型。船型信息根据试验方案不同, 分别从这 2 种船型比例中抽样生成。

1) 煤炭船。黄骅港煤炭港区 2019 年煤炭船实际到港船型和 2025 年煤炭船预测到港船型见表 2、3。

表 2 黄骅港煤炭港区煤炭船到港船型

年份	船舶吨级/ 万 DWT	数量/艘	占比/%	单船平均载 质量/万 t
2019	1.0	91	2.1	1.113 5
	1.5	140	3.2	1.606 8
	2.0	278	6.4	2.029 6
	3.5	923	21.2	3.539 5
	5.0	2 107	48.4	4.874 1
	7.0	791	18.2	6.696 6
	10.0	26	0.6	9.619 0
	合计	4 356	100.0	—
2025 (预测)	1.0	200	4.26	1.1
	1.5	100	2.13	1.6
	2.0	200	4.26	2.0
	3.5	1 000	21.28	3.8
	5.0	2 200	46.81	5.2
	7.0	900	19.15	7.2
	10.0	100	2.13	9.0
	合计	4 700	100.00	—

2) 杂货船、油船、液体化工品船。杂货船、油船、液体化工品船分别按照 2019 年实际到港船型和 2025 年预测到港船型(拟建 2 个 5 万吨级通用散货泊位和 1 个 12 万吨级油品泊位建成后)抽样生成。

2.2.2 船舶指泊

船舶到达锚地后, 模型判断泊位是否空闲、船舶类型是否与泊位类型匹配、船舶吨位与泊位等级是否匹配。如果以上条件都满足, 即指泊成功, 则为船舶指定合适的作业泊位; 否则, 船舶在锚地继续等待。

2.2.3 船舶进入航道的判断规则

指泊成功的船舶在进入航道前, 模型将从船舶同向航行安全距离、船舶会遇规则、港池内的会遇冲突、潮汐、大风影响等方面判断是否可进入航道。

船舶在现状航道条件下遵循现状通航规则; 7 万吨级双向航道拓宽后, 按照设计通航规则通航。基于安全作业的考虑, 根据港区实际船舶调度规则, 模型将港池依照图 3 划分为公共港池水域、一港池、二港池、三港池、油品码头掉头水域等 5 个区域, 同一水域同一时间不得出现两艘船舶航行及靠离泊作业的情况。

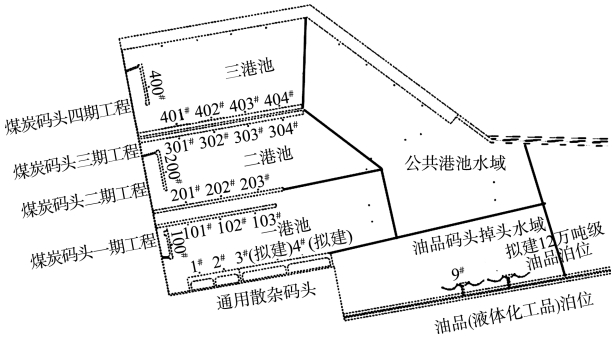


图 3 港池泊位平面布置

模型根据黄骅港潮汐表，用 13 个分潮拟合潮汐曲线输入模型模拟潮位变化。当需要乘潮通航的船舶，在预计航行时间内潮位都满足乘潮水位的要求且其他通航条件也满足时，该船方可进入航道。

黄骅港潮汐为不规则半日潮，1 d (24.83 h) 会出现 2 次横流，流速 >0.25 m/s。将大横流的出现过程简化为：间隔时间 12.42 h 出现 1 次，每次持续 1 h，双向航道在此时间段单向通航。

煤炭港区所在地区 4~5 级、6 级及以上大风频率分别占全年风频率的 28.9%、4.5%，且集中于春秋两季。当风力大于 6 级或能见度小于 1 km 时，禁止船舶进出港，但在泊船舶可以正常进行装卸船作业。模型根据近 7 年煤炭港区封航资料，模拟船舶封航过程。

2.2.4 船舶进入航道的位置

煤炭船舶为压载进港，从 W16+700 附近切入航道。杂货船、油船、液体化工品船为重载进港，考虑到航行安全性，均从航道末端位置进入航道。

2.2.5 船舶在水域内的航行与靠离泊作业

根据港区生产实际情况，船舶从外航道末端 (W41+000) 航行至 W16+700 需要约 1.2 h；从 W16+700 航行至与港池交界位置 (N1+000) 需要约 1 h。

船舶在各港池中的航行时间由港区实际生产数据统计得到，在港池航行时间根据距离远近为 10~17 min，船舶靠泊时间约为 40 min，离泊时间约为 15 min。

2.2.6 船舶在泊位上的作业时间

对于已有泊位的船舶在泊作业时间，由港区实际生产数据统计获得。对于拟建的两个 5 万吨级通用泊位，船舶在泊位作业时间沿用现状杂货船在泊作业时间；对于拟建的 12 吨级油品泊位、现状油品泊位 (功能调整为液体化工品泊位)，船舶在泊作业时间按照装卸工艺方案及规范要求计算确定。

2.2.7 船舶离港

船舶作业完成后，在判断港池和航道满足通航条件下，解缆离开泊位，离港船舶均从航道末端离港。

2.3 仿真模型的实现

本文利用仿真软件 Simio 实现上述仿真模拟过程。模型分为船舶生成、锚地等待、航道港池、泊位作业、船舶调度、潮汐水位、横流生成、大风大雾生成、数据统计等 9 个模块。模拟动画界面见图 4。

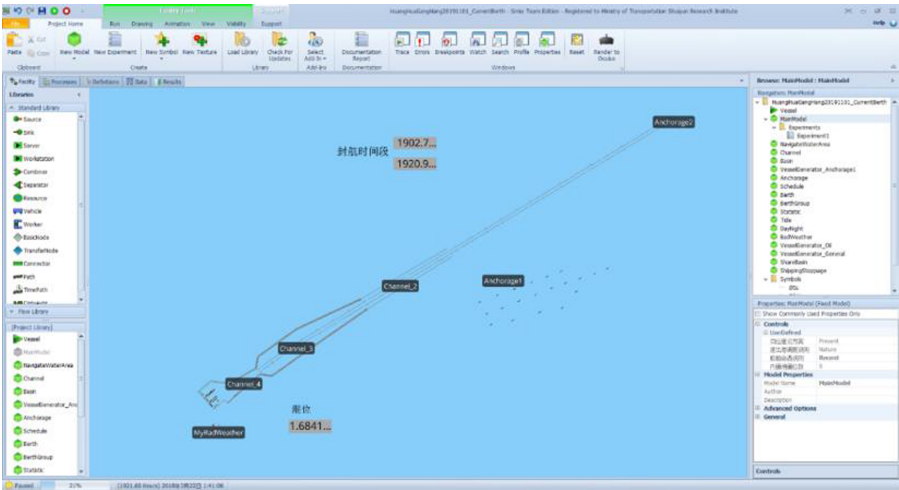


图 4 仿真模拟动画界面

3 仿真试验设计及结果分析

3.1 仿真试验设计

为分析各航道拓宽方案和船舶大型化对港航系统通过能力的提升作用, 本文针对现状航道条件和 3 个航道拓宽方案共设计了 2 类仿真试验方案:

1) 基于 2019 年的到港船型和泊位作业数据, 在现状泊位情况下, 分别对现状航道和 3 个航道拓宽方案的港航系统通过能力进行试验分析。本试验方案主要为研究仅航道拓宽对港航系统通过能力的影响。

2) 按照 2025 年预测船型, 分别对现状航道和 3 个航道拓宽方案的港航系统通过能力进行试验分

析。在此试验方案下, 港区拟建通用泊位和油品泊位均已建成。本试验方案主要为研究未来船舶大型化及泊位建设对港航系统通过能力的影响。

3.2 通过能力仿真试验结果及分析

3.2.1 第 1 类试验方案

现状船型的试验结果见表 3。可以看出: 1) 在 2019 年现状船型下, 仅航道拓宽对港航系统通过能力提升明显; 2) 对于航道拓宽方案 1~3, 由于 7 万吨级及以下船舶可双向通航里程不断加长, 煤炭船舶平均离港等航道时间、煤炭码头平均单船空泊时间呈不断减小趋势, 相应煤炭码头泊位利用率不断提高。

表 3 2019 年现状船型条件下的港航系统通过能力试验结果

方案	港区总通过能力/亿 t	煤炭码头通过能力/亿 t	煤炭船舶平均在泊时间/h	煤炭船舶平均离港等航道时间/h	煤炭码头泊位利用率/%	煤炭码头平均单船空泊时间/h
现状航道	2. 16	2. 10	28. 23	4. 20	80. 5	5. 89
航道拓宽方案 1 (N1+000—W9+000)	2. 31	2. 25	27. 25	3. 26	86. 1	3. 84
航道拓宽方案 2 (N1+000—W12+000)	2. 36	2. 30	27. 15	3. 14	88. 5	3. 03
航道拓宽方案 3 (N1+000—W16+700)	2. 41	2. 35	27. 06	2. 99	90. 5	2. 39

3.2.2 第 2 类试验方案

2025 年预测船型的试验结果见表 4。可以看出: 1) 在 2025 年预测船型下, 一方面新建泊位带来港航系统通过能力增加; 但同时, 受航道条件限制及油船数量增加的影响, 煤炭船舶平均离港等航道时间由 4. 2 h 增加至 4. 9 h, 港口服务

水平有所下降。2) 随着未来船舶大型化和新建泊位建设, 港航系统通过能力得到进一步提升。3) 随着航道拓宽里程不断加长, 煤炭船舶平均离港等航道时间、煤炭码头平均单船空泊时间呈不断减小趋势, 相应煤炭码头泊位利用率不断提高。

表 4 2025 年预测船型下的港航系统通过能力试验结果

方案	港区总通过能力/亿 t	煤炭码头通过能力/亿 t	煤炭船舶平均在泊时间/h	煤炭船舶平均离港等航道时间/h	煤炭码头泊位利用率/%	煤炭码头平均单船空泊时间/h
现状航道	2. 40	2. 20	29. 05	4. 89	80. 0	6. 29
航道拓宽方案 1 (N1+000—W9+000)	2. 57	2. 37	27. 68	3. 53	84. 7	4. 36
航道拓宽方案 2 (N1+000—W12+000)	2. 62	2. 42	27. 64	3. 50	87. 1	3. 55
航道拓宽方案 3 (N1+000—W16+700)	2. 68	2. 48	27. 63	3. 47	89. 8	2. 65

3.3 小结

1) 现状航道条件下, 煤炭港区总通过能力 2. 16 亿 t, 其中煤炭码头通过能力为 2. 10 亿 t; 根

据国能黄骅港务有限公司发展规划, “十四五”期间还将建设 2 个 5 万吨级通用泊位和 1 个 12 万吨级油品泊位, 2025 年港区吞吐量将达到 2. 5 亿 t

(其中煤炭吞吐量 2.3 亿 t)，现状航道通过能力无法满足港区未来吞吐量发展要求。

2) 航道拓宽为 7 万吨级双向航道对港航系统通过能力的提升效果明显，综合考虑航道拓宽以及未来泊位建设、船舶大型化，航道拓宽方案1~3 的港航系统通过能力分别可达到 2.57 亿、2.62 亿、2.68 亿 t(其中煤炭码头通过能力分别为 2.37 亿、2.42 亿、2.48 亿 t)，3 个航道拓宽方案均可满足港区未来发展要求，港区服务水平也有明显提升。

3) 港航系统通过能力提升主要有两方面：①航道拓宽后使得 7 万吨级及以下大型船舶可双向通航，煤炭船舶离港等航道时间、煤炭码头平均单船空泊时

间相应减少，泊位利用率得以提高，港航系统通过能力随之提高，航道拓宽方案 1~3 随着航道拓宽里程不断增加，仅航道拓宽带来的港航系统通过能力由 1 500 万 t增加至 2 500 万 t；②随着船舶大型化，单船平均装载量提升，作业相同数量船舶的总吞吐量增加，从而带来港航系统通过能力提升，根据本次仿真研究确定的预测船型，船舶大型化可提升港航系统通过能力 1 000 万~1 300 万 t。

4 航道拓宽方案比选

航道拓宽方案的确定需要综合考虑工程投资、港航系统通过能力、项目实施难度等多方面因素，3 个航道拓宽方案主要技术指标对比见表 5。

表 5 航道拓宽方案主要技术指标对比

拓宽方案	拓宽里程	拓宽长度/km	疏浚量/万 m ³	投资估算/亿元	港航系统通过能力/亿 t		煤炭码头通过能力提升值	煤炭码头通过能力提升所增加的投资/(元·t ⁻¹)	年增加维护性疏浚量/万 m ³	项目实施难度	通航安全管理
					总能力	煤炭码头通过能力					
方案 1	N1+000—W9+000	11.48	381.7	2.60	2.57	2.37	0.27	9.6	10	全部位于黄骅港港口区，实施难度较小	全部位于拦沙堤掩护段以内，通航条件较好，通航安全管理风险较小
方案 2	N1+000—W12+000	14.48	545.5	3.23	2.62	2.42	0.32	10.1	45		部分拓宽段航道位于拦沙堤掩护段以外，该段通航条件较差，通航安全管理风险较大
方案 3	N1+000—W16+700	19.18	797.6	4.34	2.68	2.48	0.38	11.4	100	部分航段位于山东海域，协调难度较大	

结合本仿真研究结论，3 个航道拓宽方案均能满足港区发展要求。航道拓宽方案 1 总投资及煤炭码头通过能力提升每吨所需的投资均最省，不涉及山东用海、利于实施，拓宽段全部位于拦沙堤掩护段以内，通航安全管理风险均较小、后期维护性疏浚量小。因此，经综合比选推荐采用航道拓宽方案 1。

5 结语

1) 随着黄骅港煤炭港区吞吐量不断增加以及

船舶大型化，现状航道已成为制约港口发展的瓶颈，将现状航道拓宽升级为 7 万吨级双向航道是必要、紧迫的。本文将仿真技术运用于航道拓宽方案的确定，为类似工程建设提供了新思路。

2) 现状航道条件下，煤炭港区总通过能力 2.16 亿 t，现状航道通过能力无法满足港区未来 2.5 亿 t 吞吐量发展要求；3 个航道拓宽方案实施后，均可满足港区未来发展要求。