



潮汐河口长航道乘潮问题研究

徐元, 黄志扬, 龚鸿锋

(中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120)

摘要: 针对潮汐河口长航道乘潮计算的潮位资料代表性问题, 提出了潮汐河口乘潮水位的多站联合计算法。该方法利用多站同步潮位资料, 综合考虑船舶通航方式与潮波传播速度等因素, 可合理计算潮汐河口乘潮水位。长江口深水航道的有关计算表明, 相同乘潮历时和累积频率对应的乘潮水位, 进河口大于沿程单站的乘潮水位, 且明显大于出河口。潮汐河口长航道设计, 应根据当地河口的潮汐性质、强度及其与径流的对比, 以及船舶航行的特点包括航速、进出港载货情况和航道沿程水深, 确定合理的乘潮方式, 即选择合适的航道乘潮长度。

关键词: 潮汐河口; 潮波传播; 多站联合计算; 虚拟潮位站; 乘潮水位

中图分类号: P 731.23

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972 (2013) S1-0183-06

On riding high tide level in a long waterway at a tidal estuary

XU Yuan, HUANG Zhi-yang, GONG Hong-feng

(Shanghai Waterway Engineering, Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract: In order to improve the representativeness of data for the calculation of riding high tides in a long waterway at a tidal estuary, this paper presents the multi-station combined method for the calculation. Based on multi-station simultaneous tidal data, and taking the navigational mode, tidal wave propagation and other factors into account, this method can get a reasonable result of riding high tide level in a tidal estuarine waterway. The calculation based on Yangtze Estuary deepwater channel shows that, at the same tide-riding duration and cumulative relative frequency, the riding high tide level needed for a ship to sail into the estuary is bigger than that at a single station alongside, and esp. significantly bigger than that when the ship moving out. The design of a long navigational channel at a tidal estuary should identify a reasonable tide-riding mode according to the nature and strength of tides at local estuary and their comparison with run-off, the characteristics of ships' navigation such as speed, sailing in/out with/without load, and depths along the channel, i.e. to define a suitable tide-riding length of the channel accordingly.

Key words: tidal estuary; tidal wave propagation; multi-station combined calculation; virtual tide station; riding high tide level

河口地区常因径流、潮流相互作用而存在拦门沙, 而口内则可能由于河宽、涨落潮流路分歧等原因而存在局部浅滩, 因而在河口航道设计中通常会遇到除拦门沙浅滩需采取整治或疏浚的方法取得合适的水深外, 口内浅滩也需根据船舶航行要求采取整治或疏浚的方法来取得相应的设计

水深^[1-2]。为减少工程投资, 航道工程设计通常需经技术经济论证, 确定合适的乘潮水位, 以合理利用当地的潮汐资源, 确定相应的航道通航能力, 探讨船舶进出港的方式^[3-8]。在一般的航道设计中, 航道浅滩治理所依据的水位常采取其附近潮位站资料, 采用规范推荐的方法^[9]进行推算。当

收稿日期: 2010-11-24

作者简介: 徐元 (1965—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 从事港口与航道工程设计研究。

潮汐河口航道较长时,沿程可能有多个潮位站,设计时存在需要分析哪一个潮位站更能代表需乘潮航道潮汐特征的问题。

实际上,船舶进、出河口是一个连续的过程(以航速体现),而潮汐本身也有一个自外海向口内传播的过程(以潮高呈现),船舶航行与潮波传播两者以时间为联系,船舶行进中沿程所遇到的潮高因潮流、潮时及航速等的不同而不同,其行进过程中遭遇沿程浅滩潮高的保证率与浅滩附近潮位设单站控制的情形是完全不一样的。

笔者以长江口深水航道为例,提出乘潮水位的多站联合计算法,分别计算进、出河口的乘潮水位,并与单站控制计算方法结果进行比对。为讨论方便,设定讨论航道范围为长江口三期深水航道 W_4 点(牛皮礁站附近)至上海港罗泾港区(石洞口站附近),并假定求取的沿程乘潮水位相同。

1 乘潮水位多站联合计算的基本思路

在单站控制计算乘潮水位时,首先根据浅滩的长度和设定船舶航速确定乘潮历时,然后对每个实测潮过程获取可乘的水位。考虑到潮波传播速度与航速(如12 kn)在量级上接近,当航道足够长时,两者的相对运动已不能忽视,且河口地区潮差沿程也不同。如前所述,实际上船舶航行过程中所遇潮高是不一致的,且进、出河口由于船舶航行与潮波传播相同或相反,同样的乘潮历时其进、出河口所遇潮高也是完全不同的。

以设定航速(如12 kn)、按合适的时间间隔(如5~10 min)放行船舶,可以取得每个航行过程中船舶到达不同位置的潮高。对每个潮过程,计算从起始的潮位站的潮谷时刻开始,截止时间是船舶航行至最末的潮位站时恰为潮谷的时刻。根据不断取得的相对于船舶的潮高过程,结合航道沿程水深情况或设计水深要求,必能从每个潮过程中找到某时刻出发的船舶潮位利用“最优”,取得相应的“最优乘潮水位”。

可以设想,上述相对船舶的“潮过程”形态仍基本类似固定站点的潮位过程,但有所变形,即当从口外向口内航行时“潮过程”被“放

缓”,而当从口内向口外航行时“潮过程”被“压缩”。因实测潮位资料除潮峰、潮谷外,常以整点潮位形式记录,所以有必要以合适的时间间隔(如5 min)进行插值,插值可以3次样条函数法等方法进行。如果需要(比如相邻潮位站距离较大且存在浅滩),可通过以相对距离为权重的方法进行线性插值,得到关心区域的虚拟潮位站资料,再采用前述插值方法取得等时距的插值资料。

通过以上方法计算得到一系列与自然潮过程一一对应的“最优乘潮水位”资料,可采用与单站控制计算乘潮水位相同的方法^[9],根据航道通航需求,确定乘潮保证率,计算相应的乘潮水位。

2 计算方法与结果

2.1 长江口潮汐基本特性

自长江口口外(W_4)向口内至罗泾港区,沿程经北槽深水航道、南港航道、吴淞口航道和宝山航道,航道全长约116 km,沿程依次分布有牛皮礁、北槽中、横沙、长兴、吴淞和石洞口等潮位站。长江口是中等强度的潮汐河口,口外潮汐为正规半日潮,口内为非正规半日浅海潮。潮波传入长江口后,因水深变浅、岸滩约束和径流作用,潮波发生变形,平均潮位、当地理论深度基面均逐渐抬升,而潮差则逐渐减小(图1)。

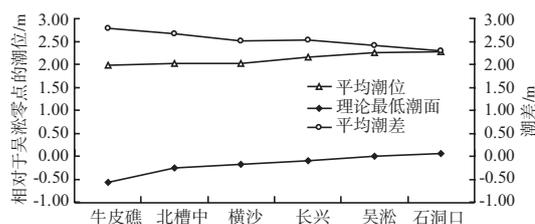


图1 河段沿程平均潮位、理论最低潮面和潮差的变化

长江口每天两涨两落,一涨一落平均历时约12.42 h。从口外向口内涨潮历时逐渐减小、落潮历时逐渐增加。口外如牛皮礁站涨落潮历时基本相同,均为6.21 h,随着潮波向口内的传播变形,到石洞口站涨、落潮历时分别为4.59 h和7.83 h(表1)。

潮波传播速度一般可通过沿程相邻站点间的距离,以及站点间潮峰、中潮位和潮谷出现时间差来分析计算,考虑到船舶乘潮通航主要为乘高潮,因而主要分析潮峰的传播速度。由表2,近口

外牛皮礁至北槽中潮峰传播速度明显高于口内, 而口内的吴淞至石洞口明显小于口外。

表1 长江口沿程主要潮位站点年平均涨落潮历时

站点	平均涨潮历时/h	平均落潮历时/h
牛皮礁	6.21	6.21
北槽中	5.62	6.80
横沙	5.32	7.09
长兴	4.99	7.43
吴淞	4.72	7.70
石洞口	4.59	7.83

表2 沿程相邻潮位站点间潮峰传播速度

站位	潮峰出现时间差/h			潮峰传播速度/ (km · h ⁻¹)
	最大值	最小值	平均值	
牛皮礁—北槽中	0.9	0.2	0.52	48.3
壮槽中—横沙	1.0	0.1	0.56	30.0
横沙—长兴	1.1	0.1	0.51	35.9
长兴—吴淞	0.6	0.1	0.39	36.4
吴淞—石洞口	0.7	0.2	0.42	28.1

2.2 单船进、出河口乘潮水位的计算

2.2.1 进河口

船舶沿涨潮方向乘潮通过图2中AD航段, 沿程依次经过A, B, C, D共4个控制潮位站。相邻潮位站间航道长度分别为L_{AB}, L_{BC}, L_{CD}, 通过相应航段的船舶航速分别为v_{AB}, v_{BC}, v_{CD}, 航行时间分别为t_{AB}, t_{BC}, t_{CD}, 考虑时间富裕系数K_t (取1.1~1.3), 则通过AD航段的总的航行时间即乘潮时间为t_{AD}。

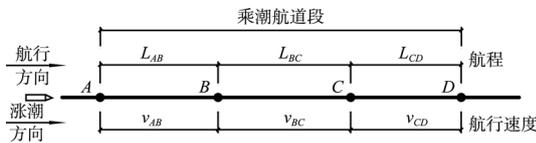


图2 单船乘潮进河口示意

$$t_{AB} = \frac{L_{AB}}{v_{AB}} \quad (1)$$

$$t_{BC} = \frac{L_{BC}}{v_{BC}} \quad (2)$$

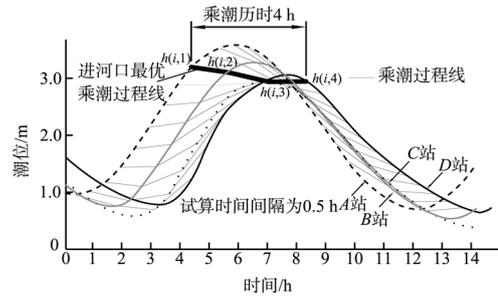
$$t_{CD} = \frac{L_{CD}}{v_{CD}} \quad (3)$$

$$t_{AD} = \left(\frac{L_{AB}}{v_{AB}} + \frac{L_{BC}}{v_{BC}} + \frac{L_{CD}}{v_{CD}} \right) \cdot K_t \quad (4)$$

将A, B, C, D站每个站整点潮位值按三次样条函数拟合, 并按时间间隔t₁ (取10 min) 进行

离散, 得到各站间隔为10 min的潮位数值。根据每对相邻站的距离、航速, 确定相邻站之间虚拟潮位站的数量, 然后采用等距离“布设”虚拟潮位站, 线性插值得到各虚拟潮位站的潮位值。

假想从A站的潮谷开始计算, 以时间间隔t₂ (取10 min) 有一艘船从A站发出, 依次经B, C到达D站完成一个船舶航行过程, 得到第i艘次船舶通过第n个虚拟潮位站的潮位值h(i, n), 如图3所示。需要说明的是图中仅列出了A, B, C, D站潮过程 (粗线) 和船舶所遭遇的潮位过程 (细线, “最优”者也标为粗线), 同时为了使乘潮过程线比较清晰, 与实际计算时不同, 图示时间间隔Δt取得较大。



注: 图中潮位的起算基面为当地理论最低潮面, 下同。

图3 单船进河口乘潮过程线

船舶乘潮通过航道要满足的水深、潮位关系式为

$$D_0 \leq H + h \quad (5)$$

式中: H为航道相对于理论最低潮面的水深; D₀为航道通航水深; h为相对于理论最低潮面的乘潮水位。对一个潮过程, 假设从A站潮谷开始每Δt时间发出一艘船, 直至A站出发的船到D站时正好 (或邻近) 到达潮谷, 共计有I个与航次对应的乘潮过程。当航道沿程乘潮要求相同时, 为保证第i艘船安全通过整段航道, 该时刻出发的船舶可利用的水位h₀(i)为船舶途经第n个虚拟潮位站时潮位最小值, 即

$$h_0(i) = \min[h(i, n)] \quad n=1, 2, 3, \dots, N \quad (6)$$

上述I个航次过程中必存在某时刻出发的潮位利用最大 (h_m), 该乘潮过程称为“最优”, 其计算表达式如下:

$$h_m = \max[h_0(i)] \quad i=1, 2, 3, \dots, I \quad (7)$$

至此得到一一一对应于单个潮过程的乘潮水位h_m。

可参照《海港水文规范》中推荐的乘潮水位计算方法，对全年或多年每个潮过程的乘潮水位 h_m 按从大到小进行排序，求得不同乘潮累积频率对应的乘潮水位。

2.2.2 出河口

当船舶出河口时，船舶航行方向与潮波传播方向相反。出河口乘潮水位的计算方法与进河口类似，即首先计算单个潮过程的最优乘潮水位 h_m ，然后再对所有潮过程的最优乘潮水位 h_m 进行累积频率统计，从而得到不同累积频率对应的乘潮水位。与进河口情况所不同的是，对一个潮过程，出河口在推求每个潮过程最优乘潮水位 h_0 时，乘潮过程线从D站开始，依次通过C, B, A站（图4）。假设从D站高潮前某时刻开始每 Δt 时间发出一艘船，直至D站出发的船到A站时正好（或邻近）到达潮谷。具体计算方法不作具体介绍。

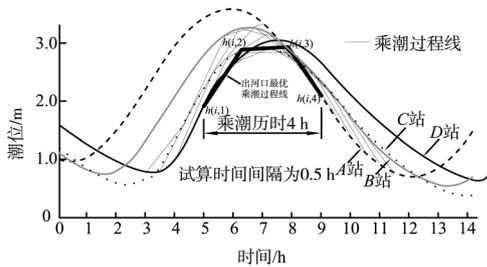


图4 单船出河口乘潮过程线

图3和图4为同一潮位过程，从该潮过程乘潮历时4 h对应的乘潮水位来看，进、出河口分别为2.95 m和1.92 m，即乘潮水位进河口明显大于出河口。

2.3 船队进、出河口乘潮水位的计算

为提高河口航道的通过能力，大型船舶通过河口常采用编队方式。参照单船进出河口乘潮水位的计算思路，假想从A站潮谷开始，每隔时间 Δt 有一船队自A站经B, C驶向D站（或相反）。各潮位站包括虚拟潮位站的系列潮位资料的取得，与前文一致。

考虑船队进河口的情况。假设 M 艘大型船舶以编队方式从A点出发，依次通过B, C站到达D站。为保证船队安全通过航道，船队首、尾船到各潮位站期间的任一时刻潮位均应满足关系式（5），其实质相当于单船需经过原航段加船队长

度。为了分析简单，船长均取 L ，船舶间的安全间距为 l_0 ，沿程航速不变设为 v ，船队通过航道AD段的乘潮时间为：

$$t_s = \left[\frac{L_{AB} + L_{BC} + L_{CD}}{v} + \frac{ML + (M-1)l_0}{v} \right] K_t \quad (8)$$

对某潮位过程，需计算的时段是A站潮谷时刻至D站潮谷前某时刻，该时刻与潮谷的时间间隔为船队首、末艘船以设定航速通过同一地点的时间差。 i 时刻从A站出发的船队第 k 艘船通过各潮位站时的潮位值为 $h(i,k,n)$ ，其中 i 为船队编号； k 为船舶编号； n 为虚拟潮位站编号。该航次的船队第 k 艘船所遭遇的最小潮位为：

$$h_0(i,k) = \min[h(i,k,n)] \quad n=1,2,3,\dots,N \quad (9)$$

当 $k=1$ ，即为船队第一艘船舶， $k=M$ 为船队最后一艘船舶。取两者较小者即为该航次安全通过需乘潮航道的船队所遭遇的最小潮位，即：

$$h_0(i) = \min[h(i,1,n), h(i,M,n)] \quad n=1,2,3,\dots,N \quad (10)$$

I 个航次过程必有一个潮位利用相对最优，其乘潮水位为：

$$h_m = \max[h_0(i)] \quad i=1,2,3,\dots,I \quad (11)$$

至此计算得到了单个潮过程的船队乘潮水位，然后对每个潮过程的乘潮水位值 h_m 按由大到小排序，可求得不同累积频率对应的乘潮水位值。

船队出河口情况，可综合单船出河口和船队进河口的思路计算乘潮水位。具体计算方法不再介绍。

3 讨论

3.1 进、出河口乘潮水位比较

以单船通过长江口三期航道 W_4 点与罗泾港区之间航道为例，船舶依次通过三期深水航道、吴淞口航道和宝山航道，航道全长116 km，按12 kn航速计算，船舶通过航道的持续时间为5.2 h，若考虑1.15倍的时间富裕系数，则总的乘潮时间约6.0 h。

采用前面介绍的的多站联合算法，利用牛皮礁、北槽中、横沙、长兴、吴淞和石洞口的某年潮位资料，可计算得到从长江口三期航道 W_4 点至罗泾港区，进、出河口两种情况下不同乘潮历时对应的乘潮水位，如图5所示。由计算成果可知，同样乘潮6 h、累积频率90%对应的乘潮水

位, 进、出河口分别为 2.51 m 和 0.99 m, 两者相差达 1.52 m。

可见潮汐河口长航道进河口乘潮水位明显大于出河口情况, 即同样吃水的船舶可以安全驶进, 但不一定能安全驶出。其原因是进河口时船舶与潮波传播方向一致, 两者同向运动, 潮位利用相对充分; 而出河口则相反, 船舶航行与潮波传播为相向运动, 潮位利用相对较差。

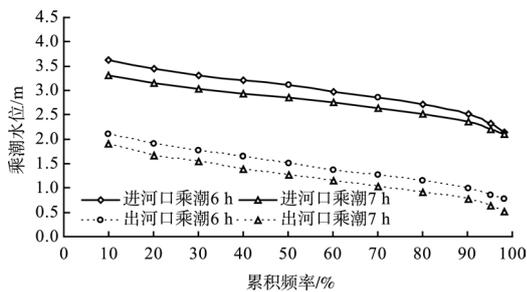


图5 单船进、出河口乘潮水位的比较

3.2 多站联合计算值与单站计算值的比较

为了解多站联合计算与单站计算的差异, 采用笔者提出的多站联合计算法和规范方法进行乘潮 6 h 水位的分析比对 (图 6)。由图可知, 相同乘潮历时和乘潮保证率对应的乘潮水位, 进河口时, 多站联合计算值比单站计算值明显大 (如前述相对船舶潮波“放缓”而相同历时的水位变大), 而出河口时多站联合计算值比单站计算值明显要小 (相对船舶潮波“压缩”而相同历时的水位变小)。如进、出河口多站联合计算值累积频率 90% 乘潮水位分别为 2.51 m 和 0.99 m, 而沿程牛皮礁、北槽中、横沙、长兴、吴淞以及石洞口单站计算值在 1.60~2.19 m, 介于联合计算法进、出河口两种情况之间。

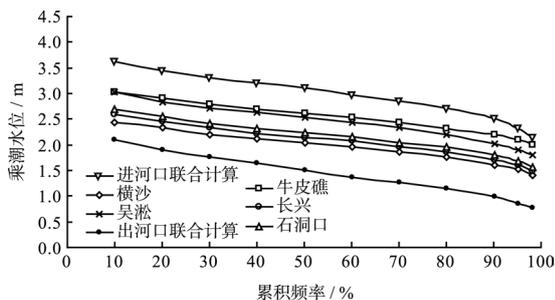


图6 乘潮水位的多站联合计算值与单站计算值的比较

可见, 潮汐河口长航道乘潮水位的计算,

如采用单站乘潮水位法计算, 首先实际存在着潮位站的代表性问题, 即难于确定应采用这些潮位站中的哪一个, 计算分析表明所有潮位站的代表性都不好, 单站计算结果对于进河口情况偏于保守, 据此确定航道水深不能充分利用当地的潮位资源, 而对于出河口则偏于不安全。

3.3 “河口长航道”的界定

前文分析还未述及潮汐河口长航道究竟有“多长”? 换言之, 多站联合方法计算乘潮水位的适用性如何? 实际上, 这与当地河口的潮汐性质、强度及其与径流的对比以及河口沿程水深有关, 还与船舶航行的特点包括航速、进出港载货情况有关。一般而言, 在目前的船舶条件下, 中等及以上潮汐强度半日潮河口 (我国多数)、以重进轻出为主要特点的航道, 其合理的乘潮历时在 10 h 左右, 一次乘潮的航道长度大约为 120~180 km, 且不宜超过 200 km, 更长的航道应考虑二次乘潮, 否则一次乘潮所利用潮位较低反而不经济。

可以看出, 潮汐河口长航道设计的重要内容和首先要确定的是选择合适的乘潮方式, 而后才是具体的乘潮水位计算。在具体的航道设计中, 从不同的乘潮方式可提出不同的航道设计方案, 结合通航的需要进行经济比较。

4 结语

潮汐河口潮波从口外向口内传播的过程中, 受岸滩和径流等因素的影响, 潮波变形明显, 另外由于航道较长, 口内潮峰出现时间明显滞后于口外潮峰出现时间。因此, 在潮汐河口长航道的乘潮水位计算时, 不仅要考虑船舶的航行方式, 而且要考虑潮波的传播过程。为此, 笔者提出了潮汐河口乘潮水位计算的多站联合计算法。

采用多站联合计算法可先计算得到每个潮过程船舶航行的“最优乘潮过程”和相应的“最优乘潮水位”, 然后对计算期内每个潮过程的“最优乘潮水位”进行排序, 即可得到不同累积频率对应的乘潮水位。

以长江口航道为例分别计算了进、出河口的乘潮水位, 表明相同乘潮历时和乘潮累积频率对应的乘潮水位, 进河口明显高于出河口, 即进河

口时船舶“赶潮”而行利于高潮位的利用，而出河口时船舶“逆潮”而行则潮位利用较差；在相同乘潮历时情况下，同样吃水的船舶可以安全进河口，但不能保证其可以安全出河口。

多站联合计算方法符合河口潮汐情况的特点，并揭示了长航道设计应分别考虑进出河口船舶不同吃水要求，结合进出河口的乘潮水位情况，合理确定航道设计水深。应根据当地河口的潮汐性质、强度及其与径流的对比，以及船舶航行的特点包括航速、进出港载货情况和航道沿程水深确定合理的乘潮方式，即选择合适的航道乘潮长度。

参考文献：

[1] 黄胜. 河口航道整治的进展[J]. 水利学报, 1985(5): 35-39.
 [2] 乐嘉钻. 长江口拦门沙航道的治理[J]. 水运工程, 2002(10): 58-64.

[3] 黄蕴和. 大型船舶进出港安全乘潮计算模式的研究[J]. 中国航海, 1989(1): 30-40.
 [4] 宣敏明. 乘潮水位的计算与修正[J]. 港口工程, 1995(1):31-34.
 [5] 宣敏明. 利用乘潮水位航道的通过能力计算[J]. 水道港口, 1995(2): 20-26.
 [6] 郑勤. 船舶乘潮过浅模拟研究[J]. 交通部上海船舶运输科学研究所学报, 1989(24): 86-92.
 [7] 李宜伦, 张维波. 深吃水船舶进港方法探讨[J]. 世界海运, 1997(2): 11-17.
 [8] 王辉, 杨亚东, 张海涛. 船舶乘潮进出港编队模式研究[J/OL]. 中国科技论文在线, 2010.(2010-04-02)[2010-09-15]http://www.paper.edu.cn/index.php/default/releasepaper/content/201004-105.
 [9] 交通运输部JTJ 213—1998海港水文[S].

(本文编辑 武亚庆)

《水运工程》优秀论文评选

评委点评：

大型船舶在潮汐河口长航道营运中乘潮是必要的。但潮波在向河口内传播的过程中受沿程岸滩边界条件和径流等作用，潮波变形明显，航道越长、变形越大。通常长航道设计中以单一潮位站资料推算的乘潮水位误差较大。

本文结合长江口三期深水航道工程实例，以沿程6个潮位站的实测值进行多站联合统计分析，并与单站结果对比表明：潮波传播速度、特征潮位、涨落潮历时等相差较大；多站联合方法确定的进河口乘潮水位大、潮位自然资源得到充分利用；出口乘潮水位小、船舶航行安全得到确切保证，这一结论对航道设计和营运至关重要。文中对计算方法、最优乘潮水位、船队乘潮等均有清晰表述，对国内同类潮汐河口长航道的设计、营运具有重要参考价值。期盼作者对虚拟潮位站间距、潮位插值方法、“河口长航道”定量界定探讨等问题再拟文论述，以便同行借鉴。

2012年12月

评委简介：

李松，教高，大连理工大学土木建筑设计研究院水运分院副院长。

主持、参加及经营管理设计项目百余项，其中有：大连港总体规划，大连长兴岛、盘锦荣兴港区30万吨级原油泊位，STX(大连)海洋工程建造基地特种大型船坞，烟大列车轮渡泊位，大连星海湾敞海人工沙滩等项目。获市、省、部级优秀设计奖12项，大连理工大学优秀教学成果一等奖1项。在《水运工程》、《中国勘察设计》等核心期刊上发表论文多篇。