



三峡成库后直立式码头结构作用效应 组合研究*

刘颖¹, 沈正连², 王多银¹, 黄然¹, 石兴勇³

(1. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074; 2. 重庆市交通委员会基本建设工程质量和安全监督站, 重庆 400060; 3. 广西交通规划勘察设计研究院, 广西南宁 530011)

摘要:利用有限元分析软件ANSYS对三峡成库后位于长江上游变动回水区河段内一新型架空直立式码头工程进行建模。建立了考虑面板刚度的空间刚架系统的有限元模型,提取了有限元静力分析下各种荷载工况各构件的力学响应值,并利用科学计算软件MATLAB编程对数据进行组合运算,得出构件在荷载工况组合作用下各力学响应量的最不利组合值与对应组合类型。找出作为构件强度验算效应值的最大合成弯矩、最大合成剪力以及最大轴力,并通过比较分析确定出排架范围内几何尺寸相同构件中受力最不利的构件位置。

关键词:三峡水库;直立式码头;空间模型;作用效应;组合

中图分类号:U 656.113

文献标志码:A

文章编号:1002-4972(2012)11-0073-06

On loading combinations of high-pile wharf after completion of Three-Gorges reservoir

LIU Ying¹, SHEN Zheng-lian², WANG Duo-yin¹, HUANG Ran¹, SHI Xing-yong³

(1. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Chongqing Communication Commissions Capital Construction Engineering Quality & Safety Control Post, Chongqing 400060, China;

3. Guangxi Communications Planning, Surveying & Designing Institute, Nanning 530011, China)

Abstract: Using the finite element analysis software ANSYS, we establish a numerical model to simulate a new high-pile wharf in the fluctuating backwater area on the upper reach of the Yangtze River after the impoundment of the Three Gorges reservoir. Mechanical response values of each component under various load cases are extracted based on the static analysis of finite element model considering the plate rigidity of space frame system. The worst case combinations and types of mechanical response values under various load cases are obtained by MATLAB programming. The maximum resultant moment, maximum resultant shear stress and maximum axial force of strength checking effect are achieved to determine the worst stress position of component in the range of frame bent with the same dimension components.

Key words: Three-Gorges reservoir; high-pile wharf; space model; loading effect; combination

三峡工程建成后,库区变动回水区水位与天然情况发生了根本性的改变,致使库区施工水位大幅度提高。对于这种特殊的自然水位环境,在加强施工效率的同时,更有效的方法应该是改进

码头的结构形式,在满足使用需求和结构要求的前提下,通过减少部分桩柱及联系撑的数量,解决施工期短暂和水上作业量大的矛盾。因为架空直立式码头能很好地适应内河大水位差变化,装

收稿日期:2012-04-18

*基金项目:重庆市重大科技专项“交通基础设施”(CSTC, 2009AA6029)

作者简介:刘颖(1989—),女,硕士研究生,主要从事内河、海岸港口及近岸工程方面的研究工作。

卸效率高，通过能力大，所以已成为内河集装箱码头的首选结构形式。因此，具有足够强度和刚度的“大桩柱、大跨度”架空直立式结构将是库区码头的主要发展方向^[1]。石兴勇^[2]曾以三峡成库前所建重庆港寸滩集装箱码头一期工程码头结构为依托，采用单位力法^[3]对可能出现的各种荷载工况进行了有限元计算，并对计算结果进行分析和组合，得到了计算结构各主要构件控制内力的最不利作用效应组合情况。但他把码头结构简化为平面钢架进行建模计算，具有一定的局限性。且三峡成库后有了新的环境形势，因此有必要对此新型架空直立式码头结构的作用效应组合进行探讨。

本文所依托的重庆港区果园作业区二期码头结构工程，正是三峡正常蓄水后具有“大桩柱、大跨度”的库区新型架空直立式码头结构，目前正在修建当中。

1 工程概述

三峡库区变动回水段内的重庆主城港区果园作业区位于东部新城（鱼嘴组团）的东部，上距朝天门约30 km（航道里程）的长江北岸。作业区二期工程新建4个5 000吨级多用途泊位，前沿作业平台采用架空直立式结构。横向排架间距为8.0 m，共65榀，每榀排架设4根桩基，前排桩基直径 $\phi 2\ 200$ ，后3排桩基直径 $\phi 2\ 000$ ，桩基均为钢筋混凝土嵌岩灌注桩；桩基和横梁连接采用 $\phi 1\ 400$ 钢筋混凝土立柱，平台立柱间相隔一定高度设纵横撑连接；平台上部结构由横梁、纵梁、前边梁、轨道梁、后边梁及面板组成；码头前沿竖向设6层系靠船平台，由靠船立柱间设置的纵向系靠船梁形成，层间距约4.5 m。结构剖面如图1所示。

2 计算模型

有限元模型采用通用有限元软件ANSYS按照三维空间结构建立，根据重庆港果园集装箱码头二期工程结构形式及力学特点，码头面板采用3D弹性壳单元SHELL63模拟，其他构件采用3D二次有限元梁单元BEAM189模拟。有限元模型总共有11 855个节点，划分了3 988个单元。模型及单元划分见图2。

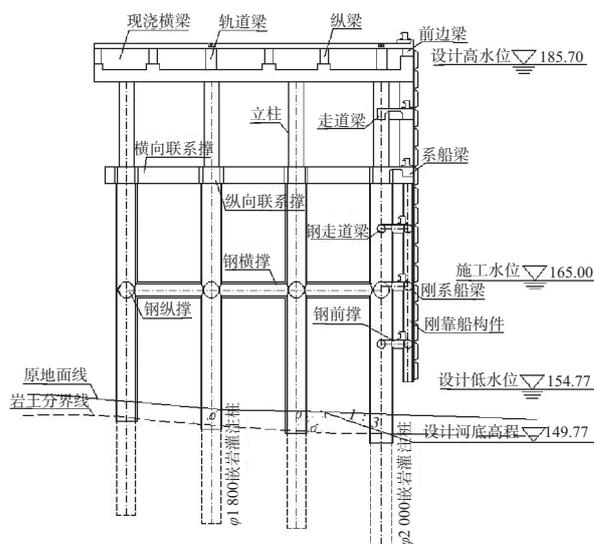


图1 码头结构剖面

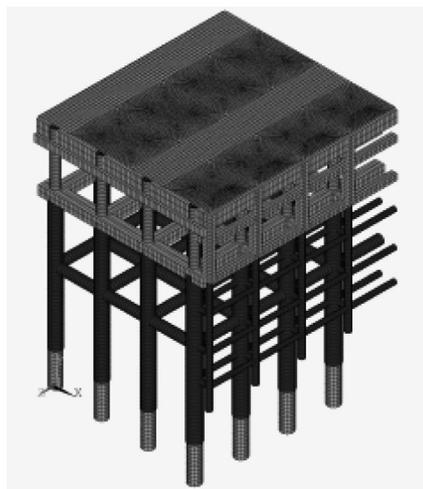


图2 码头分段有限元模型

2.1 边界条件

建模范围为上游侧第一码头分段，桩基在假想嵌固点全部约束6个自由度，码头分段间采用悬臂铰接方式衔接，在空间结构计算时，不考虑其传力作用。

2.2 计算荷载

2.2.1 永久作用

1) 钢轨自重。

钢轨自重按传递到轨道梁上的线荷载加以考虑。

2) 结构构件自重。

利用SHELL63、BEAM189单元的实常数与梁截面输入功能能够准确直观地定义面板厚度，桩基、立柱、纵横向联系撑、纵横梁、轨道梁、系

船梁、走道梁等结构构件的截面几何特性, 通过在 ANSYS 中设置参数可自动施加构件自重, 其中混凝土密度取 $2\,500\text{ kg/m}^3$, 钢密度取 $7\,850\text{ kg/m}^3$, 重力加速度取 9.8 m/s^2 。

2.2.2 可变作用

1) 船舶荷载^[4]。

考虑系缆力和撞击力。其中: 系船缆的水平

投影与码头前沿线夹角 α 取 $\pi/6$; 系船缆与水平面夹角 β 取 $\pi/12$ 。单个橡胶护舷反力为 516 kN , 考虑撞击同时作用 2 个护舷得: $F=1\,032\text{ kN}$ 。

2) 装卸机械荷载。

根据工艺资料, 考虑 2 个岸边集装箱起重机并机, 并机的最小距离取为 2 m 。单个轮压 350 kN , 轮系分布如图 3 所示。

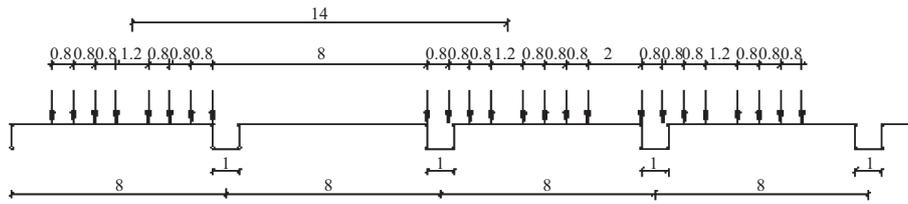


图 3 岸边集装箱起重机轮系分布

3) 水流力。

取平均水流流速 3.0 m/s , 水密度 $1\,000\text{ kg/m}^3$, 根据 JTS144-1-2010 《港口工程荷载规范》计算各构件水流力标准值, 荷载分布按线性考虑。

4) 堆载。

码头面堆载考虑两轨间取 20 kPa , 后轨以后取 30 kPa 。

3 计算工况

3.1 恒载

钢轨与结构构件自重作为一种荷载工况计算。

3.2 可变荷载

可变荷载工况按荷载实际可能作用的位置分类。

1) 船舶系缆力。

码头前沿竖向共设 6 层系靠船平台, 按照平台布置情况, 码头分段内系缆力共计算 12 种工况, 荷载位置见图 4。

2) 船舶撞击力。

单一排架上按撞击力从设计高水位到设计低水位的作用位置, 共计 12 种工况; 2 排架间考虑撞击力作用于跨中位置, 共计 6 种工况。码头分段内撞击力共计算 72 种工况, 其中荷载工况 1~12 位置见图 5。

3) 装卸机械荷载。

选择两个岸边集装箱起重机并机, 并机距取

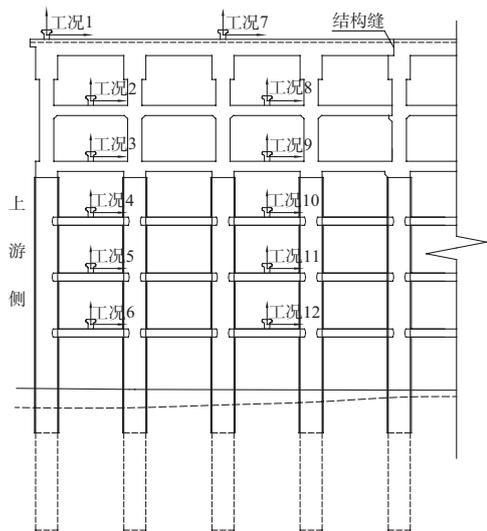


图 4 1~12号船舶系缆力荷载工况分布

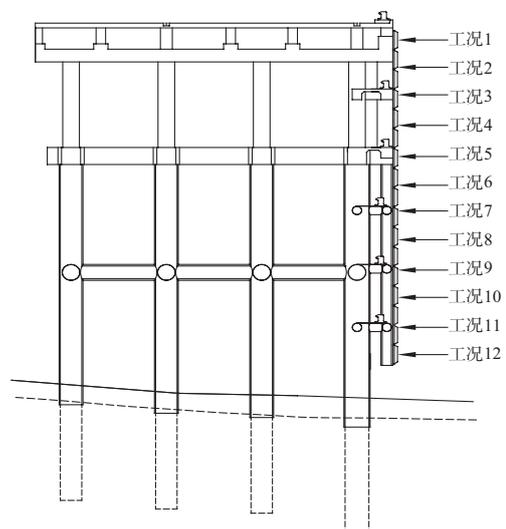


图 5 1~12号船舶撞击力荷载工况分布

最小值2 m，轮系压力作用位置考虑岸边集装箱起重机从大车车档开始一直行走整个码头分段，共计算62种工况。

4) 水流力。

水流力按系缆力或撞击力对应的实际水位考虑，共计算12种工况。

5) 堆载。

考虑码头上部纵横向梁结构（纵梁、横梁、轨道梁、前边梁、后边梁）间码头面堆载可能出现的位置，共计算77种工况。堆货荷载码头纵、横向分跨加载位置见图6。

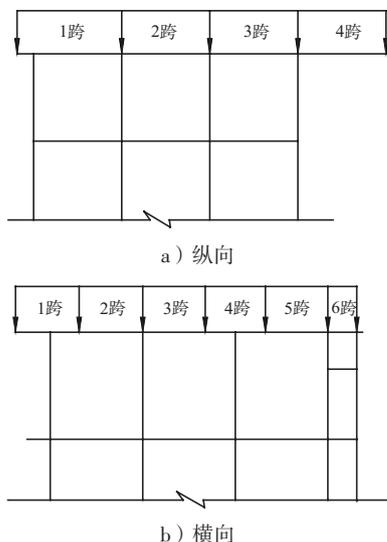


图6 堆货荷载分跨加载位置

4 荷载工况组合原则及基本思路

结构设计中荷载效应组合是非常重要的环节，它涉及结构安全，关系着国家投资和人民生命财产。当结构承受自由作用时，应根据每一自由作用可能出现的空间位置，确定对结构的最不利的作用布置^[5]。

根据以上考虑的荷载类型，对每一种可能出现的荷载进行组合分析。对于恒载，钢轨与结构构件自重参与每一项荷载组合；对于可变荷载，船舶系缆力与船舶撞击力只单独考虑其中1种，或都不予考虑；当不考虑系缆力或撞击力时，按照设计高水位（185.7 m）考虑水流力作用，当考虑系缆力或撞击力时，按照系缆力或撞击力对应的实际水位考虑水流力作用；装卸机械荷载与堆载均按照参与或不参与荷载组合两种情况考虑。

对于既定的荷载组合形式，考虑每一项参与组合的荷载可能出现的工况类型，从而找出对结构构件最不利的荷载工况组合。

按上述方法，共计算415 896种可能出现的工况进行组合，从计算结果中搜索计算对象各构件有限元单元在单元坐标系中各弯矩分量（ M_Y ， M_Z ）、轴力（ F_N ）、剪力分量（ F_{qx} ， F_{qy} ）以及组合弯矩（ M ）、组合剪力（ F_q ）对应的最值，并记录其对应的荷载工况组合情况。基本思路见图7。

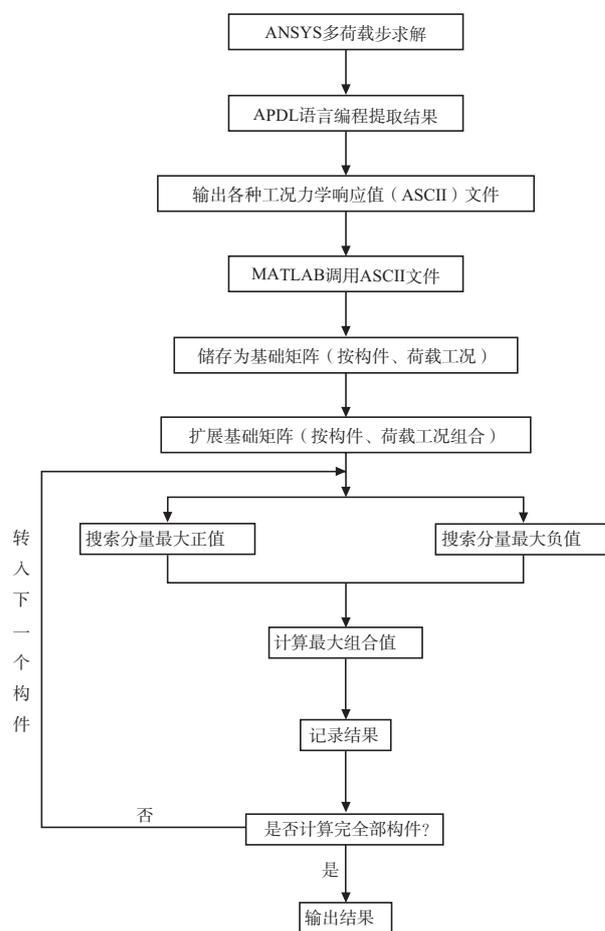


图7 最不利荷载工况组合的寻优过程

5 构件最不利荷载工况组合结果

整理输出结果，得到横向排架共9种几何构件的合成弯矩、合成剪力和轴力的最不利作用效应组合（表1），并找出几何尺寸相同的结构构件中受力状态最不利构件的编号。表1列出了可变荷载的最不利作用效应组合，因恒载参与每种作用效应组合，水流力按系缆力或撞击力对应的实际水位进行加载，故未再列出。

表1 9种几何构件最不利作用效应组合结果

构件名称	尺寸/mm	作用效应	工况组合	构件位置
前排桩基	$\phi 2\ 200$	合成弯矩 (M)	撞击力第一排架最低层; 堆载横向1, 2, 3跨; 岸吊 (结构段最左侧)	
		合成剪力 (S_F)	撞击力第一排架最低层; 堆载横向1, 5跨; 岸吊 (结构段最左侧)	
		轴力 (F_X)	撞击力第一排架最低层; 堆载横向1, 4, 5, 6跨; 岸吊 (结构段最左侧)	
后排桩基	$\phi 2\ 000$	合成弯矩 (M)	撞击力第一排架最低层; 堆载纵向1, 2, 3跨; 岸吊 (结构段最右侧)	3 [#]
		合成剪力 (S_F)	撞击力第一排架最低层; 堆载纵向1, 2跨; 岸吊位于结构段右侧	3 [#]
		轴力 (F_X)	撞击力工况72 (第4跨底层跨中) 堆载纵向1, 3跨; 岸吊 (结构段最左侧)	2 [#]
立柱	$\phi 1\ 400$	合成弯矩 (M)	撞击力第一排架第3层; 堆载纵向1, 3跨; 岸吊 (结构段最左侧)	1 [#]
		合成剪力 (S_F)	撞击力第一排架第3层; 堆载纵向1, 3跨; 岸吊 (结构段最左侧)	1 [#]
		轴力 (F_X)	撞击力第一排架第5层; 堆载纵向2跨; 岸吊 (结构段最左侧)	3 [#]
靠船立柱	1 300 × 1 000	合成弯矩 (M)	撞击力第一排架第4层; 堆载纵向1, 3, 4, 6跨; 岸吊 (结构段最左侧)	
		合成剪力 (S_F)	撞击力第一排架第2层; 堆载横向1, 4, 5, 6跨; 岸吊 (结构段最左侧)	
		轴力 (F_X)	撞击力第一排架第4层; 堆载横向2, 5, 6跨; 岸吊 (结构段最左侧)	
横向联系撑	2 000 × 1 600	合成弯矩 (M)	系缆力第一排架横梁 (工况1); 堆载横向1, 4, 5, 6跨; 岸吊 (结构段最左侧)	1 [#]
		合成剪力 (S_F)	系缆力第一排架横梁 (工况1); 堆载横向1, 4, 5, 6跨; 岸吊 (结构段最左侧)	1 [#]
		轴力 (F_X)	撞击力第一排架第5层; 堆载横向第2跨; 岸吊 (无)	2 [#]
横梁	倒T高3 200	合成弯矩 (M)	撞击力第一排架最低层; 堆载满载; 岸吊 (结构段最左侧)	
		合成剪力 (S_F)	撞击力第一排架最高层; 堆载纵向2跨; 岸吊 (结构段最左侧)	
		轴力 (F_X)	压 撞击力第一排架最高层; 堆载纵向第2跨; 岸吊 (结构段中段) 拉 撞击力第一排架最高层; 堆载纵向第2, 3, 4跨; 岸吊 (无)	
钢横梁	$\phi 1\ 500\delta 20$	合成弯矩 (M)	撞击力第一排架第4层; 堆载横向第2, 3, 5跨; 岸吊 (无)	3 [#]
		合成剪力 (S_F)	撞击力第一排架第4层; 堆载横向第2, 3, 5跨; 岸吊 (无)	3 [#]
		轴力 (F_X)	撞击力第一排架最低层; 堆载横向第2, 5, 6跨; 岸吊 (结构段最左侧)	1 [#]
钢前撑	$\phi 800\delta 16$	合成弯矩 (M)	撞击力第一排架最低层; 堆载横向第1, 2, 4跨; 岸吊 (结构段最右侧)	1 [#]
		合成剪力 (S_F)	撞击力第一排架第10层; 堆载横向第1, 5, 6跨; 岸吊 (结构段最右侧)	1 [#]
		轴力 (F_X)	撞击力第一排架最低层; 堆载横向第1, 5, 6跨; 岸吊 (结构段最左侧)	1 [#]
钢靠船构件	$\phi 1\ 000\delta 16$	合成弯矩 (M)	撞击力第一排架最低层; 堆载横向第1跨; 岸吊 (结构段最左侧)	
		合成剪力 (S_F)	撞击力第一排架最低层; 堆载横向第1, 2, 4跨; 岸吊 (结构段最左侧)	
		轴力 (F_X)	压 系缆力工况5 (第2跨底层跨中); 堆载横向第1, 2, 3跨; 岸吊 (结构段最左段) 拉 撞击力第一排架最低层; 堆载纵向第1, 2, 3跨; 岸吊 (结构段右侧)	

6 结论

1) 由于水位变幅高达31 m, 本文为确定横向排架各构件受力状态总共计算415 896种荷载工况并将其进行组合, 由此可见长江变动回水段架空直立式码头结构的受力状况十分复杂, 起控制作用的荷载工况组合类型较多。

2) 本文利用通用有限元软件ANSYS与数学计算软件MATLAB实现最不利荷载工况组合的寻优过程, 得到了对横向排架中共9种几何构件的合成

弯矩、合成剪力和轴力起控制作用的效应组合, 可供设计人员参考使用。

3) 对于横向排架中其多数构件, 船舶荷载中的船舶撞击力对其受力状态起着控制作用; 虽然在数值上系缆力远小于撞击力, 但其对诸如横向联系撑和钢靠船构件的某些控制内力的计算起着主导作用, 在计算时不可忽视。

4) 从最不利荷载工况组合中可以明显看出, 不同结构构件, 乃至同一构件不同控制内力的计

算对于码头面堆载的位置都十分敏感，在计算过程中应引起重视。

5) 对于不同构件的最不利作用效应组合，岸吊荷载在纵向上的位置在变化。在有些计算中，对架空直立式码头结构取平面排架进行建模，而把纵向上的岸吊荷载简化为支座反力形式加载到横梁上的方式并不符合实际情况。

6) 从表1可知，几何尺寸相同的同一序号结构构件（由于数量>1，位置有区分），其不同控制内力的最不利荷载工况组合可能并不在同一位置上出现（如立柱的合成剪力与轴力），在设计中，应针对不同的控制内力挑选最不利的构件位置进行强度的校核。

7) 钢靠船构件、横梁轴力的拉、压力值较为接近，且受不同的荷载工况组合控制，在结构设

计及验算中应予以考虑。

参考文献:

- [1] 温焰清,王多垠. 关于山区河流码头施工水位的讨论[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2010(12): 133-135,155.
- [2] 王多垠,石兴勇,丁德斌,等. 内河架空直立式集装箱码头结构计算中的作用效应组合探讨[J]. 中国港湾建设,2005(4):33-35.
- [3] 重庆交通大学. 重庆港寸滩集装箱码头关键技术研究分析报告[R]. 重庆: 重庆交通大学,2006.
- [4] JTS 144-1—2010 港口工程荷载规范[S].
- [5] 高金生,邓藩荣. 传统荷载效应组合方法的缺陷[C]//第十二届全国工程建设计算机应用学术会议论文集,2004:96-99.

(本文编辑 郭雪珍)



(上接第67页)

从表9结果得知，在风浪流共同作用情况下，艏艉缆系缆角大小对船体横向束缚起到的作用并不大，主要体现在束缚船体纵向运动，包括纵移与纵摇。4种方案中，方案1与方案2的运动量比其他两种方案略大，但仍然在合理范围；而分析表9中的纵移及纵摇，虽然方案3与方案4减小艏艉缆系缆角度辅助倒缆系缆，但在加流、加风作用下，对船舶纵向运动束缚效果反而不如方案1与方案2。因此方案1与方案2的倒缆完全能够控制船体纵向运动，无需减小艏艉缆系缆角辅助系缆。

3 结语

1) 船舶纵向力主要由横浪作用下船舶横移运动产生的力，而纵向水流和斜向浪产生的船舶纵向力相对较小，船舶作业和系泊安全的控制条件是横向作用力和横移运动量。

2) 采用“蝶形”1.4倍船长布置的目的是通过较小角度艏艉缆系缆方式同时约束船舶的纵、横向运动，分担由纵向水流和斜向浪引起船舶纵向作用力，减小艏艉倒缆受力。试验结果表明，不同方案艏艉倒缆力差别不大，甚至艏艉倒缆力略有增大。因此，“蝶形”布置并不能有效束缚船体纵向运动与分担倒缆受力，反而使得横缆缆力增

大明显，整体上系缆效果差，易形成安全事故。

3) “蝶形”1.4倍船长与“一字型”1.3倍船长布置易形成横缆位置的缆力过大，整体缆力分布不均匀；相比之下，1.08倍船长与1.2倍船长的布置形式缆力分布更加均匀，运动量在限定范围内，挤靠能量大小合理，能够承受更加苛刻的外海环境荷载，因此开敞式油气码头建议采用“一字型”码头布置，增大艏艉缆夹角，缩短泊位长度，控制其他位置缆绳夹角，尽量在船舶自身长度范围内系缆，保持泊位长度在1.08~1.2倍船长之间。

参考文献:

- [1] 胡昕,吕锐. 大型开敞式油码头泊位长度的探讨[J]. 水运工程, 2006(9): 79-82.
- [2] 吴澎,姜俊杰,张廷辉,等. 开敞式蝶形码头墩位平面布置的优化研究[J]. 水运工程, 2009(1): 28-32.
- [3] JTJ 295—2000 开敞式码头设计及施工技术规程[S].
- [4] Mooring Equipment Guidelines [M]. 3rd Edition. OICMF, 2008.
- [5] BS 6349-4: 1994 Maritime structures: Code of practice for design of fendering and mooring system[S].
- [6] 杨宪章. 不规则波作用下系泊船舶的动态特性[J]. 港口工程, 1988(5): 43-49.

(本文编辑 郭雪珍)