



不同系缆方式下的系泊条件分析

高峰, 郑宝友, 陈汉宝, 李焱

(交通部天津水运工程科学研究所, 天津 300456)

摘要: 基于25万吨级矿石码头船舶系泊条件物理模型试验成果, 分析了波、流共同作用下设计船型在不同系缆方式下, 包括3种缆绳数量、2种系缆点布置时的船舶运动量、系缆力和撞击力的船舶系泊条件, 比较各系缆方式的优劣, 对设计方案的系缆方式提出了建议。

关键词: 船舶; 系缆方式; 运动量; 系缆力; 撞击力

中图分类号: U641.3⁺4

文献标识码: A

文章编号: 1002-4972(2007)03-0048-05

Analysis of Mooring Conditions Under Different Mooring Line Arrangements

GAO Feng, ZHENG Bao-you, CHEN Han-bao, LI Yan

(Tianjin Research Institute of Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China)

Abstract: Based on the model test of a 250 000 DWT ore wharf, this paper analyzes the vessel movement, mooring force and berthing impact under three different mooring line arrangements, involving three different numbers of mooring lines and two different breast lines to alternative mooring points. Based on the comparison of various mooring line arrangements, some suggestions on mooring line arrangement of the design scheme are put forward.

Key words: vessel; mooring line arrangement; movement; mooring force; berthing impact

船舶的系泊条件一直是港口设计和使用过程中比较关心的问题, 特别是近年来随着港口建设的发展, 开敞式码头逐渐增多, 且均具有大型化、深水化特征, 停泊区普遍存在浪大、流急的情况, 对码头船舶的停泊条件提出了挑战。码头前的船舶与缆绳、护舷所共同组成系泊系统中, 若系泊船只没有被完全固定, 它可以随着潮汐、货物的装载、卸载等做升沉运动、同时由于风、水流、波浪等外在环境因素作用而产生震荡, 这样包括6个自由度的运动, 即纵荡、横荡、垂荡、横摇、纵摇和艏摇 (亦即通常所说的纵移、横移、升沉、纵摇、横摇和回转)^[1]。由外海传来的波浪, 或附近过往船舶航行兴起的波浪, 均会使在码头停泊的系泊船产生运动, 有时会使船舶产生较大幅度

的运动, 严重的会影响装卸作业, 且延长船舶在港内停泊时间, 使相应的费用增加, 有时甚至发生断缆等事故而招致更大的损失, 同时船舶运动中对码头设施的碰撞也将影响结构强度和稳定性。因此, 船舶靠泊时需保证正常作业下不发生大的运动响应, 并保证港口操作的安全。

对于船舶系泊问题, 通常是利用物理模型试验对实际情况进行模拟, 得到所需参数为实际工程提供系泊条件, 而达到优化系泊系统的有效途径就是调整系缆方式, 其中包括系缆数量、系缆点位置等因素。本文分析探讨的研究基于波、流共同作用下的25万吨级开敞式矿石码头工程系泊试验, 进行了不同系缆方式的对比, 以达到优化系泊的目的。

收稿日期: 2006-10-7

作者简介: 高峰 (1978-), 男, 工程师, 硕士研究生, 主要从事港口航道及海岸工程研究。

1 模型试验

1.1 工程概况

拟建矿石码头工程位于舟山海域的凉潭岛北侧海岸,地理坐标为 122°12'12" E, 29°43'30" N, 紧邻六横镇的台门港,南侧有六横岛和元山岛遮挡,北侧与走马塘、虾峙岛相对,周围岛屿众多。该岛所处水域东南经条帚门、虾峙门与浩瀚东海相通,西北又与佛渡水道、螺头水道相连,出口较多,拥有良好的通航条件。该码头呈“一”字形布置,为桩基结构,以栈桥与岛屿陆域连通,码头轴线近似 SE-NW 走向、总长 426 m,设计靠泊 25 万吨级矿石船,兼靠 30 万吨级等其它船型。工程区水下地形坡度较陡,拟建码头前沿平均底高程约-35 m 左右,码头面顶高程 8.0 m^[2]。

1.2 试验条件及依据

1.2.1 船模

试验模拟设计船型 250 000DWT,该船总长 326 m,型宽 54.3 m,型深 26.5 m,包含 3 种载度:满载吃水 20.5 m,半载吃水 13.2 m 和空载吃水 9.4 m。模型采用正态,比尺 1:80,船模均经过静力和动力校准试验,以保证与实船的相似性。

1.2.2 波、流动力条件

为分析不同系缆方式对船舶系泊的影响,各系缆方式均在相同试验动力条件下进行。试验波高 $H_{4\%}=1.5$ m,平均周期为 8 s,波向相对船舶为横浪,即与码头轴线夹角为 90°,水流速度为 1.41 m/s,与码头轴线成 5°,试验码头系泊布置及波、流方向情况如图 1 所示。

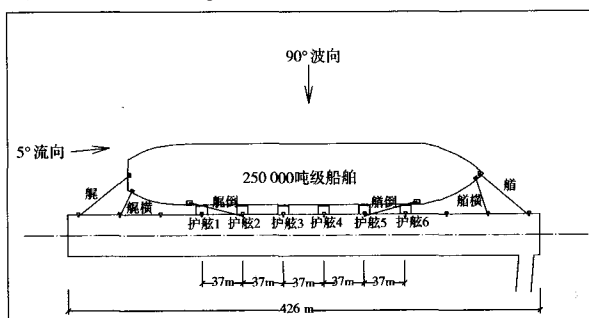


图 1 码头系泊布置及浪、流方向示意图

1.2.3 缆绳及护舷

缆绳采用尼龙缆, $\phi=80$ mm, 初始拉力 100 kN, 实验中每组缆绳的各根缆绳合并成一根进行模拟,并确保各组缆绳的受力—变形曲线模拟的相似性。

码头前沿设置 SUC2250H 低反力型两鼓一板橡胶护舷,单鼓设计反力为 2 126 kN,设计吸收能量为 2 101 kJ,单鼓最大反力为 2 260 kN,最大吸收能量为 2 224 kJ,试验中护舷两鼓合并成一鼓,并使其受力—变形曲线与原型一致。图 2 为缆绳及护舷模拟结果,由图上曲线可见,模型实测值与理论计算值相似性较好^[2]。图 1 中护舷及缆绳均为 6 组,为方便表述统一命名为 1#~6#(自船艏向船艉)。

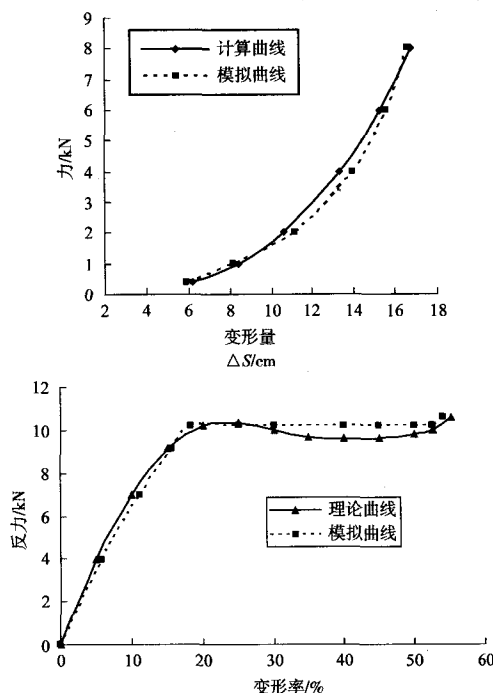


图 2 缆绳及护舷 (SUC2250H—R1) 模拟结果

1.2.4 试验参考标准

1) 对于系缆力标准,以现行《港口工程荷载规范》(JTJ 215-98)为依据,对于尼龙缆绳,其破断力为^[3]:

$$N_p=0.16D^2 \quad (1)$$

式中: N_p 为聚丙烯尼龙缆绳破断力 (kN); D 为缆绳直径 (m)。2) 对于船舶运动量,则参考PIANC (国际航运会议常设协会) 于 1995 年推荐的建议值^[4],见表 1。

表 1 建议最大允许船舶运动量

船型	装卸形式	纵荡 m	横荡 m	垂荡 m	纵摇 (°)	横摇 (°)	艏摇 (°)
普通 货船		2.00	1.50	1.00	3.00	2.00	5.00
大型散 装货船	起重机	2.00	1.00	1.00	2.00	2.00	6.00
	升降机及漏斗	1.00	0.50	1.00	2.00	2.00	2.00
	传送带	5.00	2.50		3.00		

1.3 数据采集及处理

试验数据采集遵循交通部《波浪模型试验规程》(JTJ/T 234—2001) 要求进行。采用自行研制开发的 TSG-2006 型船模试验测试系统进行, 包含非接触式船模运动量测试系统和系缆力/撞击力测试两个模块, 两模块可同步采集。每组试验均重复 3 次以上, 取 3 次结果的平均值作为最终结果, 该结果均以统计的最大值来表达, 该最大值是所指采集的运动量或系缆力撞击力时间历程中各个峰、谷值中绝对值最大者, 对于运动量来说即是船重心离开平衡位置的最大值。

2 试验结果及分析

试验包含 4-2-2 (8 组缆)、4-4-4 (12 组缆) 和 8-4-4 (16 组缆) 3 种系缆方式, 其中对 8-4-4 系缆方式还进行了调整系缆点位置的对比试验, 其中各缆绳及护舷布置及编号情况参见图 1 所示。另外, 由于表中系缆力值为该组缆的总力, 如要获得单根缆绳的平均受力情况, 还需除以该组缆的缆绳数目。

2.1 4-2-2 系缆方式

采用 4-2-2 系缆方式, 即艏艉缆各 4 组, 艏横、艉横、艏倒、艉倒缆各为 2 组, 共计 8 组缆绳。每根缆绳预拉初始力 100 kN, 系船缆绳与码头前沿线及水平面夹角均满足规范要求, 并根据不同载度时吃水的变化进行适当的调整, 该系缆方式下的船舶系缆力、撞击力以及最大船体运动量如表 2 所示。由表中数据可见, 各缆绳组受力极不平衡, 最大系缆力出现在满载时的 4[#] 缆 (艏倒缆组, 达到 1 575 kN), 且随着装载度的变化, 最大受力缆也在改变, 如半载时为 2[#] (艉横缆组)、空载时为 5[#] (艏横缆组), 而最小受力缆始终是 3[#] 缆 (艉倒缆组)。以规范中一般尼龙缆破断力计算式 (1), 缆绳破断力约为 1 024 kN, 则 4-2-2 系缆方式下换算到单根缆绳平均受力时, 则各缆绳不会发生断缆情况。

再看护舷撞击力, 各载度下最大撞击力分别出现于 2[#]、5[#] 护舷, 最大为半载时的 5 043 kN。另外, 在半载及空载时 1[#]、6[#] 有未发生碰撞、不受力的情况出现, 这与该护舷所在位置、船舶吃

水、船体外形及船舶运动情况有关。对于设计护舷 (SUC2250H—R1) 两鼓一板的最大反力 ($2 \times 2\ 260\text{kN}=4\ 520\text{kN}$) 标准, 表 2 中各载度均有超标值出现 (共计 7 个), 尤以空载时最为显著, 各载度时超标撞击力值超过设计护舷能力约 2%~12%不等。

同时, 船体各自由度最大运动量中, 纵荡、横荡值超出参考标准 (参见表 1), 其它各自由度均满足推荐标准。

表 2 采用 4-2-2 系缆方式下的试验结果

	系缆力			撞击力		
	满载	半载	空载	满载	半载	空载
1 [#]	1 273	898	811	1 529	/	/
2 [#]	1 263	982	1 071	4 813	5 043	4 721
3 [#]	645	514	457	4 241	4 457	4 630
4 [#]	1 575	948	715	3 744	3 924	4 709
5 [#]	1 138	942	1 167	4 343	4 852	5 073
6 [#]	662	679	773	1 759	186	/

注: /表示未发生碰撞, 护舷基本不受力。船体运动量: 纵荡 3.03 m, 横荡 2.32 m, 垂荡 1.09 m, 纵摇 0.77°, 横摇 3.28°, 艏摇 1.27°

2.2 4-4-4 系缆方式

采用 4-4-4 系缆方式, 即艏艉缆、艏横、艉横、艏倒、艉倒缆均为 4 组, 共计 12 组缆绳, 主要是希望通过增加横缆、倒缆数量来改善船舶的系泊条件, 该系缆方式下的船舶最大系缆力、撞击力及船舶运动量见表 3 所示。表中最大系缆力出现在满载时的 5[#] 缆 (艏横缆组), 即 1 472 kN, 比 4-2-2 系缆方式时减小 6%, 且随着装载度的变化, 最大受力缆也在改变, 半载时为 4[#] (艏横缆组)、空载时为 5[#] (艏横缆组), 而最小受力缆则有所改变, 各载度中分别是艏缆组和艉倒缆组。系缆力与 4-2-2 系缆方式相比, 改善效果并不明显, 个别缆绳还有受力增加情况, 但各缆绳系缆力均小于最大破断力要求。

各护舷撞击力中, 最大撞击力出现于 2[#] 及 5[#] 护舷, 最大为空载时的 4 884 kN, 其中 1[#] 护舷始终未受力, 6[#] 护舷在半载及空载时未发生碰撞。表 3 中各护舷所受撞击力与 4-2-2 系缆方式时相比, 虽然峰值略有减小, 但整体上各护舷受力有增有减, 可见撞击力也没有明显改善。以设计护舷两鼓一板最大反力标准 (4 520 kN) 衡量, 表 3 中各载度也均有超标值出现 (共计 6 个), 空载时最

为显著,各载度时的超标撞击力值超过设计护舷能力约2%~8%。

此时,船体最大运动量中纵荡和横荡依然与推荐标准(参见表1)有一定距离,但其它各运动量均满足推荐标准,且各运动量均比4-2-2系统方式有所减小。

可见,4-4-4系统方式虽然没有明显改善系统缆力/撞击力,但从限制系泊船舶的运动上看,起到了一定的积极作用,使船舶运动的六个自由度运动量,特别是纵荡、横荡值更进一步接近推荐参考标准范围。

表3 采用4-4-4系统方式下的试验结果 kN

	系统缆力			撞击力		
	满载	半载	空载	满载	半载	空载
1 [#]	1 067	894	822	/	/	/
2 [#]	1 195	969	1 070	4 707	4 766	4 770
3 [#]	819	785	679	4 444	3 770	4 749
4 [#]	1 387	1 051	892	4 088	4 220	4 592
5 [#]	1 472	877	1 124	4 236	4 865	4 884
6 [#]	550	626	744	2478	/	/

注:/表示未发生碰撞,护舷基本不受力。船体运动量:纵荡250m,横荡1.95m,垂荡0.81m,纵摇0.66°,横摇3.25°,艏摇1.07°

2.3 8-4-4系统方式

采用8-4-4系统方式,即艏艉缆各增加到8组,艏横、艉横、艏倒、艉倒缆仍保持4组,共计16组缆绳。

该系统方式还包含2种系统缆点布置方案,即8-4-4A与8-4-4B,前者与4-2-2、4-4-4系统方式的布置一致(如图1),而后者为将原系统缆布置中的横缆(即2[#]和5[#]缆)系统缆点分别向码头中部各移了一个系统缆柱的距离,同时对应船上的系统缆点位置也向船舳移动,并随之相应缩短横绳长度,而其它缆绳布置不变,如图3所示。

表4和表5分别为系统缆布置A与B时的最大缆力、撞击力和运动量结果。

表4、表5中最大系统缆力均出现在满载时的1[#]缆(艏缆组),采用8-4-4B系统方式比8-4-4A略大,同时又均比4-4-4系统方式下最大缆力要小。另外不同载度时,最大受力缆也均出现在艏缆组,而最小受力缆在各载度中均是艉倒缆组。各缆力相比4-4-4系统方式,缆绳受力有所减小。2种系

缆点布置,各缆绳最大受力均未超过最大破断力。

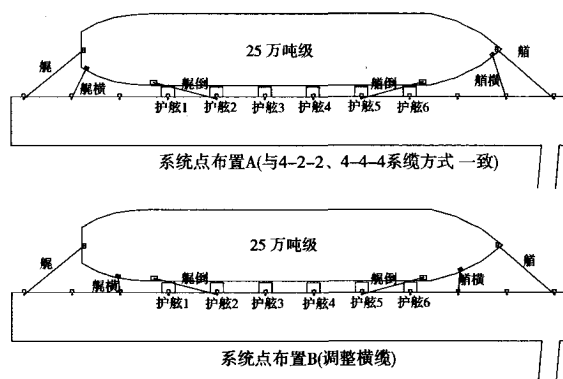


图3 8-4-4系统方式示意图

各护舷撞击力中,8-4-4A最大撞击力出现于3[#]~5[#]护舷,最大为半载时的4 745 kN,其中1[#]护舷始终未受力,6[#]护舷在半载及空载时未发生碰撞。8-4-4B最大撞击力出现于2[#]和3[#]护舷,最大为半载时的4 840 kN,其中1[#]护舷始终未受力,6[#]护舷在半载及空载时未发生碰撞。表4中各护舷所受撞击力与4-4-4系统方式时相比,最大撞击力有所减小,且整体上各护舷受力也有所改善。比较2种系统缆点布置下的撞击力,以设计护舷最大反力(4 520 kN)衡量,表4和表5中各载度也均有超标值出现(分别为11个和5个),两表中各载度时的超标撞击力值超过设计护舷能力分别约1%~5%和3%~7%。此时,2种系统缆点布置条件下的船体最大运动量中纵荡可缩小到1.5 m以下,各自由度运动量均满足PIANC推荐标准。

试验结果表明增加系统缆数到8-4-4方式,可以对系统缆力/撞击力有一定改善,同时从系泊船舶的运动量上看,使船舶运动的六个自由度运动量均满足了推荐参考标准,特别是较好地改善了船体纵荡、横荡运动。

表4 采用8-4-4A系统方式下的试验结果 kN

	系统缆力			撞击力		
	满载	半载	空载	满载	半载	空载
1 [#]	1 356	1 213	1 295	/	/	/
2 [#]	749	881	931	4 583	4 727	4 645
3 [#]	709	640	535	4 602	4 745	4 642
4 [#]	1 075	948	880	4 611	4 657	4 617
5 [#]	752	914	1 239	4 189	4 718	4 706
6 [#]	954	936	1 165	1 464	/	/

注:/表示未发生碰撞,护舷基本不受力。船体运动量:纵荡1.09m,横荡1.08m,垂荡0.7m,纵摇0.46°,横摇2.88°,艏摇0.69°

表 5 采用 8-4-4B 系缆方式下的试验结果 kN

	系缆力			撞击力		
	满载	半载	空载	满载	半载	空载
1 [#]	1 390	1 450	1 353	/	/	/
2 [#]	679	750	1 092	4 704	4 840	4 514
3 [#]	566	589	498	4 317	4 801	4 664
4 [#]	986	971	791	4 154	4 757	4 503
5 [#]	709	889	800	4 384	4 495	4 517
6 [#]	977	981	1 078	351	/	/

注: /表示未发生碰撞, 护舷基本不受力。船体运动量: 纵荡 1.25 m, 横荡 1.29 m, 垂荡 0.88 m, 纵摇 0.44°, 横摇 2.16°, 艏摇 0.66°

同在 8-4-4 系缆方式下, 2 种系缆点布置 (A 和 B) 的比较可以看出, 移动原横缆位置, 不但没有明显改善系缆力及撞击力, 反而导致个别缆绳组及护舷受力增加, 同时使得船舶的位移运动量略有增加, 但是却对改善船体摇角运动起到了一定优化效果, 特别是横摇减小了约 25%, 这对船舶的装卸作业安全及乘员舒适性是有利的。

另外, 从调整后的横缆看 (2[#] 和 5[#]), 该组系缆力基本上呈减弱趋势, 除 2[#] 缆空载时例外, 其它横缆系缆力均有不同程度的减小, 而同时艏缆等个别缆绳组受力增加, 表明原系缆布置 A 中横缆的负荷被其它缆绳所接替, 这也说明在其它条件均未改变的前提下, 系缆点的位置改变能导致各个缆绳的系缆力重新分配, 并可以使个别缆绳负荷减轻。

3 结语

1) 各系缆力中, 横缆、艏缆和艏倒缆组受力相对较大, 靠近船舳的 4 个护舷为主要受力护舷, 而艏艏处的 2 个护舷往往受碰撞机会较少。

2) 3 种系缆方式下, 最大撞击力为 5 073 kN, 最大系缆力为 1 575 kN (4-2-2 系缆方式), 且部分撞击力已超过设计护舷两鼓一板的最大反力 (4 520 kN), 建议提高设计护舷硬度。

3) 80 mm 直径尼龙缆的破断力为 1 024 kN, 对于 4-2-2 系缆方式, 最大系缆力为 1 575 kN (艏倒缆), 平均分配给单根缆, 则每根缆最大受力 788 kN, 虽与缆绳破断力还有一定差距, 但若考虑同一缆绳组内每根缆绳所受力的不均匀性, 这种系缆方式下有可能会造成断缆的事故, 因此可适当增加缆数或加大缆绳直径。而对于 4-4-4、8-4-4 系缆方式, 最大系缆力分别为 1 472 kN 和

1 450 kN, 由 4 根缆绳承担, 平均每根缆绳的受力 368 kN, 远小于破断力计算值, 故不会破断。

4) 随着系缆数的增加, 系缆力及撞击力均有不同的改变, 且最大撞击力和系缆力随着缆绳数目的增加而有所减小, 船舶六自由度运动量也呈现此趋势, 并在 8-4-4 系缆方式下全部满足 PIANC 推荐标准。

5) 改变系缆点位置, 能改变系缆力及撞击力在各个缆绳及护舷中的分配, 可相应地缓解个别缆绳或护舷的负荷, 同时对船舶运动量的变化也有较为明显的影响。

6) 从改善船舶系泊条件的角度看, 8-4-4 系缆方式相对较好, 既能降低缆绳及护舷最大受力负荷, 又能保证系泊船舶的运动量满足推荐标准; 比较 8-4-4 系缆方式下的 2 种系缆点布置方案, 推荐 8-4-4A 系缆方式, 虽然其撞击力超标的护舷较多, 但均在 5% 以内, 且此系缆方式下船舶运动量相对更小, 特别是纵荡及横荡, 更有利于系泊船舶的装载作业。

7) 由于本试验每组缆绳采用合并模拟的方法, 与实际系缆方式有些差别, 实际每根的受力还应考虑各根缆绳受力的不均匀性, 此时单根缆绳的最大受力可能会大于平均分配的缆绳受力数值。本试验研究仅考虑了一种调整系缆点位置的情况, 即 8-4-4 系缆方式下的横缆组, 而对于其它缆绳组 (如艏艏缆、倒缆等) 的系缆点布置未进行对比试验, 因此可能还有更为理想的系缆方式可供选择, 这将在以后的工作中得以重视和深入研究, 积累更多经验。

参考文献:

- [1] 李积德. 船舶耐波性[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981.
- [2] 高峰, 李焱. 武钢舟山凉潭岛矿石中转码头工程系泊船舶运动物理模型试验研究报告 [R]. 天津: 交通部天津水运工程科学研究所, 2006.
- [3] JTJ 215-98, 港口工程荷载规范[S].
- [4] Chaeles Fournier, Dave Anglin. The use of moored ship response modelling coupled with PIANC vessel motion criteria for the estimate of port downtime[C]. Canadian Coastal Conference, 2003.