



# 一种新型系船柱的研究设计

刘松, 刘声树, 邹艳春

(中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430071)

**摘要:** 用当前材料、铸造技术、设计方法检验已沿用30 a的传统系船柱的设计完备性, 认为其有值得改进、优化之处。以650 kN系船柱为例, 从系船柱的材料选择、几何造型、受力机理、数值模拟4个方面阐述一种新型系船柱的研究设计。新型系船柱在安全可靠度、使用及维护性能、感官效果方面均有较大幅度提高, 且造价与同等级传统系船柱相当。

**关键词:** 新型; 系船柱; 设计; 球墨铸铁

中图分类号: U 653.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)07-0092-06

## Design and calculation of a new bollard

LIU Song, LIU Sheng-shu, ZOU Yan-chun

(CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd., Wuhan 430071, China)

**Abstract:** Since the traditional bollard has been used for more than 30 years, it is necessary to be optimized using modern casting technology and current materials. This paper introduces a new type of 650 kN bollard from its material, shape, dimension, mechanism and numerical simulation. The new bollard is improved remarkably from the safety reliability, application and maintenance, as well as appearance, but the cost is almost the same with that of the traditional one.

**Key words:** new type; bollard; design; nodular cast iron

### 1 概述

系船柱为码头表面(高桩码头为各层平台之上)较为显眼的小型附属构件,用于将船舶停靠时的系缆力传递给码头结构。系船柱的造价在整个码头项目中所占比重很小,且设计难度较大,但其为码头上不可或缺的附属构件,其使用功能、感官效果对整个码头起着较为关键的作用。

目前国内各码头的系船柱设计,均以《系船柱构件通用设计编制说明》(1978年编制)为设计蓝本,按梁系结构计算系船柱的受力。该设计方法因简单、易于被设计人员掌握而一直沿用至今。按梁系构件的计算假设前提是构件截面性能满足平截面假设。根据圣维南原理发现,系船柱由于其高度和横截面尺度的比例关系,受力特性

并不满足平截面假定, JTJ 297—2001《码头附属设施技术规范》上的计算公式(2.3.7-1~4)难以找到明确的理论依据。

用三维实体有限元分析系船柱的应力场分布情况,发现其与梁系假定的应力场分布差异性较大,认为有必要改进系船柱的设计方法。

近30 a来,国内材料科学、数值计算技术发生了质的变化。用目前的新材料、新计算方法来检测30 a前系船柱的设计完备性,认为其有值得改进、优化之处。

本文以650 kN全挡系船柱(图1)为例,从以下方面改进、完善一种新型系船柱的研究设计:

1) 优化系船柱选材,以克服灰口铸铁强度低、铸钢浇铸性能及耐磨性能低的缺陷。

收稿日期: 2012-02-02

作者简介: 刘松(1964—),男,高级工程师,注册土木工程师(岩土),从事港口与航道工程。

2) 优化系船柱几何外观及构造尺寸,以达到外形美观、模具简洁、维护简便的目的。

3) 深入分析系船柱受力机理,为规范的改进提供科学依据。

4) 更新计算方法,以全面、客观描述系船柱的受力状态。

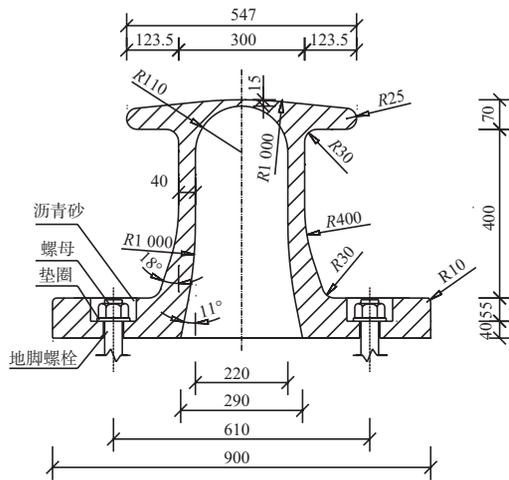


图1 650 kN系船柱剖面

## 2 系船柱材料选择

现行系船柱通用图设计的系船柱柱壳材料为灰口铸铁或铸钢。灰口铸铁单价便宜、浇铸性能好、耐磨性能好且防腐性能优越,但强度低、延性差。铸钢强度高、延性好,但浇铸性能及耐磨性能不及铸铁,且需定期做防锈维护。球墨铸铁兼备了灰口铸铁与铸钢的优点,同时摒弃了两者的致命缺陷:其强度比铸钢高,延性介于灰口铸铁与铸钢之间,耐磨性能好,防腐性能好而无需做定期防腐维护。据初步调查,目前3种材料的市场单价相差不大(铸钢约9 000元/t,灰口铸铁约6 000元/t,球墨铸铁约8 000元/t),球墨铸铁的“材料强度与单价比”较高(铸钢屈服强度200~340 MPa,灰口铸铁最小抗拉强度150~350 MPa,球墨铸铁屈服强度310~600 MPa)。

根据对3种材料的对比分析,参考国外工程应用经验,认为系船柱材料选用球墨铸铁较传统的灰口铸铁及铸钢更为合理。本文所涉及的新式系船柱柱壳所用材料全部选用球墨铸铁。

## 3 系船柱几何尺寸设计

### 3.1 底盘

底盘尺寸设计着重考虑螺母底部底盘的局部抗冲切能力、底盘与混凝土接触时混凝土的最大压应力、螺母对底座槽孔的工艺要求(螺栓的施工作业空间、螺栓顶不露出底盘顶面、螺栓中心离底座边缘最小距离)。650 kN系船柱底盘尺寸如图1所示。

### 3.2 柱颈

考虑到目前船舶上所用系船缆绳均为尼龙绳等软体绳索,认为柱颈外径最小值不再受“损坏缆绳”的制约,其值仅根据系船柱铸铁体体积最小化(认为此即为最经济)经迭代计算确定。

由后文计算结果分析知,柱颈与底盘相交处为应力最大区之一,为节省材料,结合铸铁件铸造工艺特征,将柱颈外径取为上细下粗的变截面形式(图1)。

参考现行系船柱通用图编制指南,考虑到现行系船缆绳强度均较30 a前普遍提高的有利因素,为节省系船柱造价,将脖高适当减小,其值按同一系船柱最大系缆根数与缆索直径的乘积取整后确定。

### 3.3 挡檐

挡檐的设置主要是防止船舶停靠过程中系船缆脱落。参考文献[1]的调查结果,本设计挡檐宽度按0.40~0.45倍柱颈上段外径取值。

为简化系船柱浇铸过程中模具制作构造要求,本设计将系船柱挡檐设置为实心体,其厚度根据系船柱外观曲线线形平顺衔接并能够提供足够的承载能力来确定。

### 3.4 过渡段圆弧

过渡段圆弧半径越大,对结构受力越有利。但当圆弧半径超过一定数值时,系船柱在浇铸冷却过程中,易形成气孔。本文系船柱柱颈与底座、挡檐之间的过渡圆弧半径均按文献[2]要求取值,见图1。

## 4 系船柱受力机理分析

系船柱三向结构尺寸接近相等,加载模式、边

界条件对应力场的影响非常显著。对系船柱受力机理分析的准确性直接关系到数值模拟的计算精度。

### 4.1 系缆绳与柱壳

系缆绳套箍于系船柱柱壳上，对与之接触的系船柱柱颈部位产生径向压力及切向摩擦力。当系缆绳与水平面有夹角时，系缆绳将对系船柱柱颈产生竖直向摩擦切应力，经计算对比，有竖向分力的作用工况不起控制作用，限于篇幅，本文对该工况不展开论述。为简化分析，忽略系缆绳与系船柱之间的摩擦力，则系船柱所受的系缆绳径向压力(图2)可表示为：

$$2T = B \int_{\pi}^{2\pi} \sin\theta q R d\theta \quad (1)$$

$$q = \frac{2T}{2BR} \quad (2)$$

式中： $T$ 为系缆绳拉力，即系船柱设计抗拉力的一半； $B$ 为缆绳与系船柱柱颈的接触面宽度； $R$ 为系船柱柱颈外半径； $q$ 为系缆绳对系船柱柱颈的径向压应力。

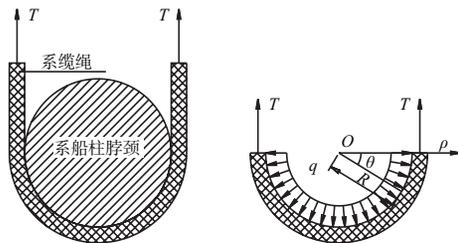


图2 系缆索与系船柱相互作用计算图示

假设系缆索沿竖直方向与系船柱柱颈的接触高度为27.6 mm，该值系根据破断力为650 kN的纤维缆绳的绳直径的0.8倍，结合有限元模型的单元尺寸确定，因缺乏试验数据，预测今后系缆绳强度会更高的实际情况，取值相对保守。根据式(2)，可算得650 kN系船柱所受来自系缆力的径向压应力为  $q = \frac{650 \text{ kN}}{2 \times 27.6 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}} = 78.50 \text{ MPa}$ 。

### 4.2 系船柱与锚固螺栓

螺母与系船柱底座接触面之间的摩擦传递一部分系船柱所受的水平力。系船柱底座与码头面脱空区域的螺栓承受来自系船柱的上拔力。

与系船柱有挤压接触的螺栓以抗剪切形式传递一部分缆绳水平荷载。

### 4.3 系船柱与码头面

系船柱与码头面挤压部分区域之间既有法向(竖向)压力，也有水平向摩擦力。系船柱与码头面间的摩擦系数参考钢与混凝土之间的摩擦系数，本设计该值取0.5。

### 4.4 系船柱传力机理

系船柱底的水平力由地脚螺栓的抗剪力及螺帽与系船柱底、系船柱底与码头面之间的水平摩擦力来平衡；系船柱底的弯矩则由部分螺栓的抗拔力与系船柱、码头面之间的法向接触压应力形成的力偶来平衡。

## 5 整体计算有限元模型简介

计算选用ANSYS软件完成。柱壳、底盘下混凝土块体均用SOLID45单元模拟；锚栓用Beam188单元模拟；底盘与其下部混凝土土体之间用接触单元模拟，接触面间摩擦系数为0.5(图3)。

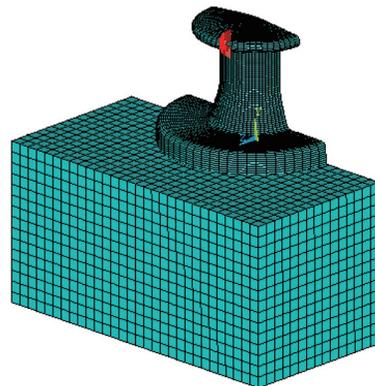


图3 有限元计算模型

QT550(柱壳)的弹性模量取110 GPa，泊松比取0.26；C30混凝土(底座下混凝土块体)的弹性模量取30 GPa，泊松比取0.2；Q235B(锚栓)的弹性模量取206 GPa，泊松比取0.3；锚栓用实心圆截面梁模拟，非对称加载面上实心圆直径取锚栓螺纹处的有效直径，对称加载面上实心圆直径取锚栓有效直径的0.707倍。

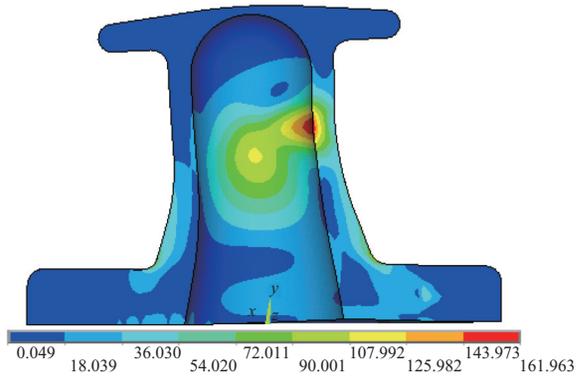
螺帽与码头面结构采用梁单元上的两个点与实体单元上的对应位置节点作3个方向的平动耦合( $U_x, U_y, U_z$ )；螺栓与系船柱柱壳之间，当螺栓位于柱底受拉区时，采用3个方向的平动耦合( $U_x, U_y, U_z$ )；当螺栓位于柱底受压区时，采

用两个方向的平动耦合 ( $U_x, U_z$ ), 即螺栓只传递轴向拉力与水平向剪力。系船柱底与码头面之间通过接触对模拟。

船缆作用于系船柱上的系缆力简化为作用在系船柱柱颈半圆范围内的径向压应力。压应力作用高度按设计船缆的直径确定, 压应力大小由式 (2) 计算确定。压应力在系船柱柱颈的作用位置从柱颈顶部依次向下, 每一作用位置对应一种分析工况。本计算模型共分析了5种工况, 对应缆绳作用在5个不同高度处, 即缆绳中心离系船柱底盘底面高度在140~460 mm。

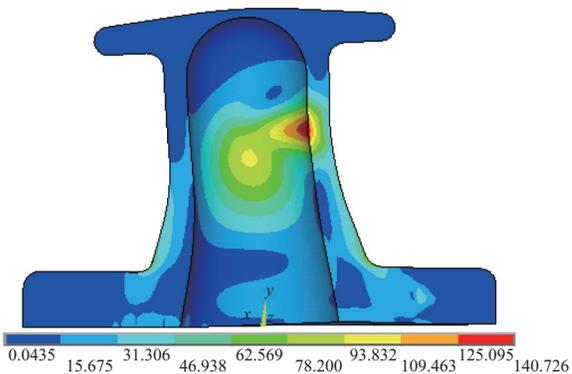
### 6 整体计算结果分析

根据文献[3]关于结构破坏强度理论的论述, 考虑到系船柱应力状态较为复杂, 其真实破坏情况可能涉及到几个强度理论。系船柱强度设计时, 为安全起见, 对Von Mises应力、最大剪应力及主拉应力均加以控制 (图4~9)。



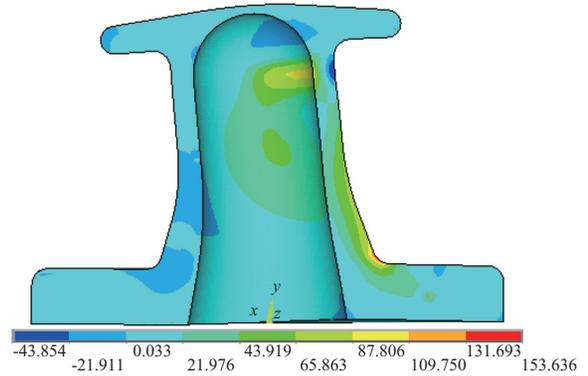
注: 最大剪应力81 MPa, 材料允许剪应力限值84 MPa。材料容许应力值由文献[4]中相关数据除以材料安全系数确定, 下同。

图4 系船柱最大剪应力云图 (MPa)



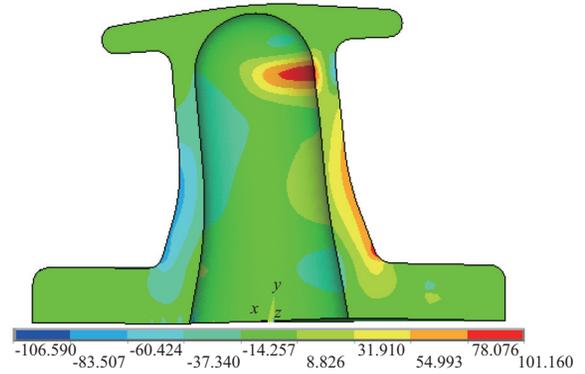
注: 最大Von Mises应力141 MPa, 材料允许应力限值168 MPa。

图5 系船柱Von Mises应力云图 (MPa)



注: 最大主拉应力154 MPa, 材料允许应力限值156 MPa。

图6 系船柱主拉应力云图 (MPa)



注: 最大竖向压应力107 MPa, 材料允许应力限值156 MPa。

图7 系船柱竖向应力云图 (MPa)

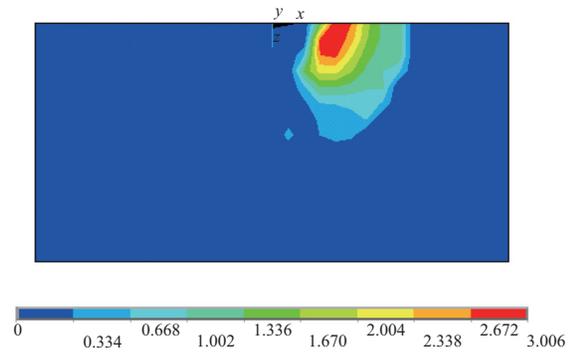
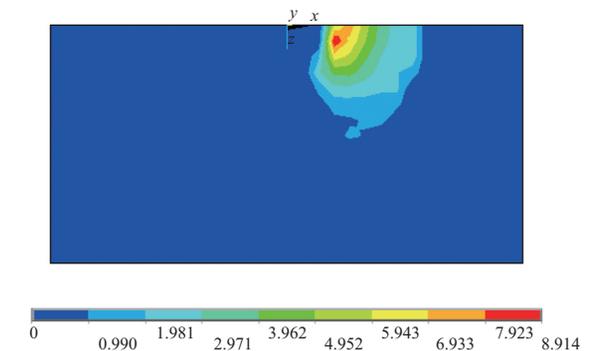


图8 摩擦应力分布 (MPa)



注: 最大接触应力8.9 MPa, C30混凝土允许压应力限值15 MPa。

图9 法向接触应力分布 (MPa)

球墨铸铁材料设计安全系数参考文献[1]及脆性材料在结构工程设计中的经验取值，选为2.5。与现行灰口铸铁系船柱的换算设计安全系数相比，依据该安全系数值，系船柱铸铁体按容许应力法设计，其可靠度略有提高。

根据以上应力图知，系船柱的真实受力状态与按规范公式（平截面假定）计算的应力场相差较远。系船柱与码头面之间的接触应力最大点在系船柱内腔顶点而非底盘外边缘顶点，柱壳破坏点可能出现在与缆索接触的空腔内壁，而非仅仅是出现在柱颈与底盘接触的部位（该部位也属高应力区域）。

从扩散系缆与系船柱接触高度处内腔最大应力的角度出发，系船柱柱颈外径宜较大、柱颈壁厚不宜选过小值。

根据上述应力场分析结果，认为系船柱确需按三维实体有限元模型分析其受力状态，按现行规范的简化计算公式设计，与系船柱的真实应力场分布不符。

锚栓孔附近尖角边缘的Von Mises应力较大，最大值达310 MPa，其他区域的最大Von Mises应力为200 MPa。图中尖角边缘区域的应力过度集中，可能是未考虑螺母下软钢垫圈的缓冲作用所致。该处应力场分析涉及多个接触面，数值计算结果很难收敛。考虑到工程实际应用中尚未见该处出现破坏的实际情况，为简化设计难度，新式系船柱设计仅按前文所述简化方法来处理。

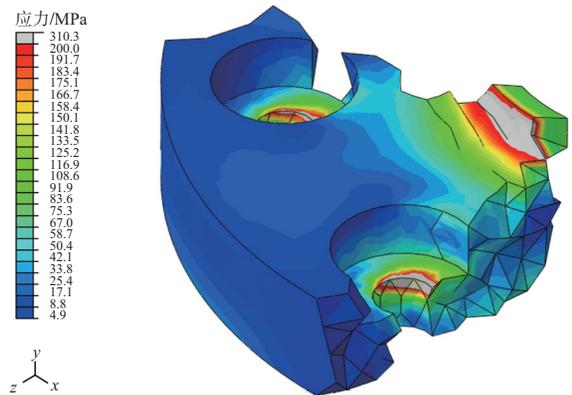


图10 螺栓孔处Von Mises应力云图

7 螺栓孔局部应力状况介绍

图10为用ABAQUS软件模拟计算传统设计的650 kN铸钢系船柱底盘螺栓孔处应力场分布。

8 新旧系船柱性能对比

为便于对新型系船柱的直观理解，将其与传统系船柱的各项性能指标做一对比，见表1，2。

表1 新旧系船柱性能对比

类型	设计方法		制造与使用性能		观感效果	安全度
	优点	缺点	优点	缺点		
新型系船柱	1.理论依据充分 2.计算过程概念清晰 3.计算结果直观明了	1.设计较繁琐，设计周期较长，但可以标准图的形式设计出定型产品，一劳永逸	1.防腐蚀性能较好，使用维护较为容易 2.耐磨性能强 3.浇铸性能好 4.材料强度高		较好	较高
传统设计系船柱	1.设计难度小，设计周期短	1.理论依据不足 2.计算过程简化尺度偏大 3.计算结果不够直观	1.灰口铸铁系船柱防腐及耐磨性能较好 2.铸钢强度较高	1.灰口铸铁强度太低，对应产品笨重，仅局限于制作小型系船柱 2.铸钢易腐蚀，耐磨性能不及铸铁，浇铸性能较差	一般	偏低

表2 新旧系船柱“柱壳体”价格对比

类型	材质	元	
		350 kN系船柱	1500 kN系船柱
新型系船柱	球墨铸铁	3 200	15 150
传统设计系船柱	铸钢	3 060	14 600
	灰口铸铁	2 600	

注：1.价格数据由系船柱制造厂提供，费用仅包括系船柱柱壳体铸造成本，即不包括螺栓等附属构件、运输、安装等费用。

2.如均按有限元方法设计，且各种材料设计可靠度按相同标准考虑，传统系船柱柱颈底部需局部加强，则球墨铸铁系船柱造价最低，亦即新型系船柱性价比最高。

### 9 结语

根据上述设计思路,二航院已完成从50 kN到2 000 kN的系船柱系列设计通用图纸,并已获得实用新型发明专利。350 kN和1 500 kN新型系船柱已应用于“苏州港张家港港区东沙作业区盛泰通用码头工程”项目。

本设计主要成果:发现现行规范JTJ 297—2001关于系船柱的简化计算公式所得计算结果与用三维实体有限元分析所得系船柱的应力场分布差异较大,不能正确反映结构的真实受力状态;新型系船柱在安全可靠度、使用与维护性能、感官效果方面均有较大幅度提高,且造价与同等级传统系船柱相当。

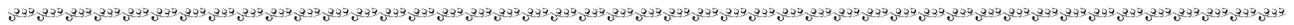
课题组今后研究方向:球墨铸铁的破坏机理、用于水工结构的规范指导及相关试验数据

较为匮乏,材料安全系数取值可能偏于保守,合理取值有待更深入研究;检验基于上述理论假设的有限元计算结果的模型或现场试验,目前正在策划中;根据系船柱在实际应用过程中的反馈信息,进一步完善新型系船柱系列的创新设计。该项工作宜在两年后进行。

### 参考文献:

- [1] 水运规划设计院技术管理室. 系船柱构件通用设计编制说明[J]. 水运工程, 1978(12): 3-17.
- [2] JB/ZQ 4169—2006 铸件设计规范[S].
- [3] 孙训方, 方孝淑, 关来泰. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.
- [4] GB/T 1348—2009 球墨铸铁件[S].

(本文编辑 武亚庆)



(上接第91页)

表9 大型油轮用尾绳直径

船型/万吨级	10	12	15	VLCC
尼龙尾绳直径/mm	80	80	80	96

即尼龙尾绳的最小破断强度不小于钢缆最小破断强度的137%。

码头系泊设计相关的缆力约束参数见表10。

表10 大型油轮码头系泊设计缆力约束代表值

设计船型 /万吨级	缆绳数量	缆绳在甲板上的分布	钢缆直径 /mm	缆绳最小破断载荷	缆绳最小破断载荷	绞车制动保持力	尾绳直径/mm	尾绳最小破断强度
				覆盖率95%	覆盖率-95%	BHC/kN		
10	16	4-4-2-6	36	970	680	400	80	137% MBL
12	16	4-4-2-6	36	930	680	400	80	
15	16	4-4-2-6	38	1 030	760	450	80	
VLCC	20	4-6-4-6	42	1 280	1 050	610	96	

注:尾绳为长度11m的尼龙。

### 3 结语

本文通过对Q88船舶数据库中10万~30万吨级油轮资料的统计分析,确定了各代表船型的缆绳数量及其在甲板上的分布、缆绳直径、缆绳材质、缆绳最小破断强度、绞车制动保持力和尾绳情况的统计代表值,并给出了与系泊约束相关的其他一些基础性数据的统计结果。其中,按上覆盖率95%确定的缆绳最小破断强度MBL和绞车制动保持力BHC的数值,可用于确定码头系泊设备的技术参数以及系缆墩墩体稳定性核算;而按下

覆盖率-95%覆盖率确定的缆绳最小破断强度MBL和绞车制动保持力BHC等数值,可用于确定码头系泊能力、进行系泊模型试验,以及制定油码头作业标准。

### 参考文献:

- [1] OCIMF Mooring Equipment Guidelines [S]: 3rd Edition. 2007.
- [2] 秦子君. 大型油码头设计船型的系靠泊尺度研究 [J]. 水运工程, 2011(11): 82-93.

(本文编辑 武亚庆)