



悬链锚腿式单点系泊系统设计水深估算

张 志¹, 刘其民², 孔友南¹, 康有为²

(1. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032;

2. 中国石油天然气管道工程有限公司, 河北 廊坊 065000)

摘要: 设计水深是悬链锚腿式单点系泊选址时首要考虑的因素。目前船级社规范中给出了确定设计水深的方法, 但是该方法对于船型尺度和环境参数等基础数据要求较高, 在项目前期设计阶段往往难以直接应用。采用数值分析方法研究主流系泊船型在不同环境组合条件下的运动响应特征, 进而提出基于系泊船型吃水直接计算最小水深的设计水深系数, 并与物模试验结果及既有工程案例的设计水深进行对比, 验证设计水深系数的可靠性和适用性。给出的主流系泊船型的设计水深系数及水深计算方法能够为悬链锚腿式单点系泊前期工程选址提供参考。

关键词: 悬链锚腿式单点系泊; 设计水深系数; 工程选址; 系泊船运动

中图分类号: U 65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)05-0056-05

Estimation method for design water depth of CALM single-point mooring system

ZHANG Zhi¹, LIU Qi-min², KONG You-nan¹, KANG You-wei²

(1.CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China;

2.China Petroleum Pipeline Engineering Corporation, Langfang 065000, China)

Abstract: The design water depth is the primary factor in the site selection of catenary anchor leg mooring (CALM). The current codes by the Classification Society provide a method for determining the design water depth with high requirements for basic data such as ship size and environmental parameters. Hardly are they applied directly in the early design stage of the project. This paper studies the motion response of mainstream moored ships in different environments by numerical analysis. It proposes the coefficient of design water depth based on the draught of moored ships which can directly calculate the minimum water depth. Furthermore, the calculation is compared with the test results of the physical model and existing engineering cases to show the reliability and applicability of the coefficient. The proposed coefficient and calculation method for the design water depth can provide a reference for the site selection of CALM in the early stage of the project.

Keywords: CALM; design water depth coefficient; site selection; motion of moored ships

悬链锚腿式单点系泊 (catenary anchor leg mooring, CALM) 系统在选址及水域布置时首先应考虑其最小水深的要求, 在 CALM 的回转水域及作业水域内均须保证系泊船在拟定的作业环境条件下不出现触底及碰触任何海底突出物的风险。单点系泊一般布置在外海水域, 波浪等环境条件较差, 系泊船在波浪、风等环境条件下的运动响

应十分复杂, 系泊船运动是确定 CALM 设计水深的关键因素。

CALM 因建造周期短、建设成本低以及对环境条件的适应性强在世界范围内有广泛的应用, 但目前国内大陆地区仅 2 处应用案例, 相关研究成果较少。罗晓键等^[1]、周楠等^[2] 分别基于某设计案例对 CALM 的设计进行综述; 许向东等^[3] 总

收稿日期: 2021-08-27

作者简介: 张志(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口工程设计与研究工作。

结了单点系泊技术及操作维护管理的经验; 蔡世亮等^[4]结合茂名石化单点的运营经验对 CALM 进行综述并对其国产化的可行性进行探讨; 周楠^[5]对 CALM 的鱼尾效应进行研究; 吕岩等^[6]对单点系泊的建设条件及选址原则进行了总结分析; 马巍巍等^[7]研究在浅水条件下单点系泊系统设计的关键要点。目前, 针对单点系泊设计水深未见相关成体系的研究成果, 确定单点系泊水深的关键在于确定系泊船在波浪、风等环境条件下的运动量。对于系泊浮体在波浪作用下的运动响应有较成熟的理论, 但需要借助水动力学软件进行分析确定, 计算耗时较多, 同时对于系泊系统、船型和水文环境参数等基础数据的准确可靠性有较高要求。目前, 业界缺少在项目前期阶段相对简单可靠的估算 CALM 设计水深的方法。本文针对水运规范统计的不同吨级设计船型, 在不同的波浪要素组合下, 利用数值分析软件模拟相应吨级船型升沉、纵摇及横摇 3 个方向的运动响应, 并适当考虑脉动风对系泊船运动量的影响, 给出采用设计水深系数估算的方法, 可为单点系泊规划选址及可行性研究阶段确定设计水深提供参考。

1 系泊船型尺度

系泊船型的尺度是决定其运动响应幅值、进而决定所需设计水深的主要因素。我国水运工程一般采用相应吨级的具有 85% 保证率的船型尺度作为设计船型, CALM 适用于原油、成品油的接卸终端, 本文 CALM 设计水深的估算基于 JTS 165—2013《海港总体设计规范》统计的油船船型尺度^[8], 见表 1。

表 1 规范统计设计船型

船舶类型	船舶吨级/ 万吨级	总长 <i>L</i> /m	柱间距 <i>L</i> _{BP} /m	型宽 <i>B</i> /m	型深 <i>H</i> /m	满载吃水 <i>T</i> /m
油船	10	246	236	43.0	21.4	14.8
	12	265	255	45.0	23.0	16.0
	15	274	264	50.0	24.2	17.1
	25	333	323	60.0	29.7	19.9
	30	334	324	60.0	31.2	22.5

注: 根据统计, 对于 10 万吨级以上油船, 10 m≤船舶总长*L*—柱间距*L*_{BP}≤12 m, 本文统一按 10 m 考虑。

2 设计水深计算方法

根据美国船级社 (ABS) 的 *Rules For Building and Classing Single Point Moorings*, 单点系泊作业水域及回旋水域内应有足够的水深, 任何作业工况下应避免系泊船触底及碰触任何海底突出物的风险, 须考虑潮汐变化、龙骨下安全间隙、海底突出物高度、测量精度、海底地形变化等因素影响。按此原则, 悬链锚腿式单点系泊的水深应基于当地理论最低潮面, 可按式 (1) 计算:

$$D = T + Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5 \tag{1}$$

式中: *D* 为 CALM 设计最小水深 (m); *T* 为设计船型满载吃水 (m); *Z*₁ 为龙骨下最小富余深度 (m); *Z*₂ 为波浪、风等环境条件作用下船舶垂向运动量最大值 (m); *Z*₃ 为海底障碍物高度 (m); *Z*₄ 为水下地形测量误差 (m); *Z*₅ 为备淤富余深度 (m), 宜取设计使用年限内的淤积量。

在单点系泊设计水深的影响因素中, 海底障碍物的高度应根据实际情况确定, 如锚桩设计是否会突出海底面、海管是否采用明敷、海底管汇与系泊浮筒的相对位置以及是否有系泊船碰触海底管汇的风险等。海底管汇的高度一般为 2~4 m, 当水下软管采用中国灯笼形构型、海底管汇位于浮筒正下方且系泊船有拖尾轮辅助时, 认为系泊船碰触海底管汇的风险是较低的, 可不考虑海底管汇高度的影响。当水深小于 30 m 时水下软管一般采用中国灯笼形构型, 因此本文海底障碍物高度仅考虑锚桩、海管等因素, 按 1 m 考虑。

对于龙骨下最小富余深度, 本文参考 ABS 规范要求取 1 m。水深测量误差应满足规范要求, 根据 JTS 131—2012《水运工程测量规范》, 水深测量误差应控制在±0.01 倍水深值范围, 悬链锚腿式单点系泊的最小水深要求一般在 30 m 内, 故本文水下地形测量误差统一按 0.3 m 考虑。悬链锚腿式单点系泊选址时应选在泥沙活动强度较弱、海床相对稳定的海域, 本文备淤富余深度统一按 0.4 m 考虑。

3 系泊船垂向运动量分析

系泊船在波浪、风等环境因素作用下的运动

响应是影响 CALM 设计水深的关键因素。影响系泊船运动响应的因素较多,包括设计作业波浪要素及相应的波浪谱型、船浪夹角、系泊船体线型及主要尺度、设计作业风速及风速分布等。

系泊船的运动可分解为 6 个自由度的运动,对于设计水深来说,主要关注其升沉、纵摇及横摇 3 个方向的运动响应,可采用水动力分析数值软件确定模拟船型在给定波浪条件下 3 个方向的运动响应幅值。单点系泊具有风向标效应,且 CALM 一般均配置拖尾轮以抑制系泊船鱼尾效应,系泊船总处于环境荷载最小的位置,波浪以顺浪作用于系泊船,本文假定船浪夹角在 0°~30°范围。

以 30 万吨级典型油船为例,按规范船型尺度建立水动力分析模型,装载度为满载,波浪谱按 *P-M* 谱考虑,计算不同波高、波周期组合的波浪条件下系泊船的运动量(表 2)。以 (h,α,β) 序列表示在相应波况下的升沉、横摇、纵摇运动量。以有效波高 $H_s=3.5$ 、平均周期 $T_m=8\text{ s}$ 工况为例,表示 30 万吨级油船,当船浪夹角为 0°~30°时,模拟 3*h* 油船中心处的最大升沉运动量峰值为 0.36 m,最大横摇运动量峰值为 0.70°,最大纵摇运动量峰值为 0.40°。

表 2 波浪作用下船舶中心处运动量峰值

H_s/m	船舶运动量/m		
	$T_m=8\text{ s}$	$T_m=10\text{ s}$	$T_m=12\text{ s}$
2.5	(0.25,0.50,0.25)	(0.44,0.90,0.60)	(0.64,0.90,0.80)
3.0	(0.30,0.60,0.30)	(0.53,1.00,0.70)	(0.77,1.10,1.00)
3.5	(0.36,0.70,0.40)	(0.62,1.20,0.80)	(0.90,1.20,1.10)
4.0	(0.41,0.80,0.40)	(0.70,1.40,0.90)	(1.03,1.40,1.30)
4.5	(0.46,0.90,0.50)	(0.79,1.50,1.00)	(1.16,1.60,1.50)
5.0	(0.51,1.00,0.50)	(0.88,1.70,1.10)	(1.28,1.80,1.60)

注: 30 万吨级油船。

系泊船可按刚体考虑,对于设计水深,应关注最不利位置处船体的垂荡运动值 η ,在升沉、横摇及纵摇几个方向的运动影响下,显然船首(或船尾)的舷侧为最不利位置,考虑船体尺度及船舶中心处的运动量,偏保守 η 可按式(2)计算波浪作用下船体垂荡峰值。对 30 万吨级油船,波浪作用

下垂荡峰值计算结果见表 3。

$$\eta=h+0.5B\tan\alpha+0.5L_{BP}\tan\beta$$

(2)

式中, η 为船首舷侧垂荡量峰值, h 、 α 、 β 分别为系泊船升沉、横摇及纵摇运动量, B 为船宽, L_{BP} 为船柱间距。

表 3 波浪作用下船首舷侧处垂荡峰值

H_s/m	垂荡峰值/m		
	$T_m=8\text{ s}$	$T_m=10\text{ s}$	$T_m=12\text{ s}$
2.5	1.09	2.66	3.44
3.0	1.49	3.09	4.26
3.5	1.89	3.58	4.73
4.0	1.99	4.06	5.55
4.5	2.39	4.49	6.37
5.0	2.49	4.98	6.89

注: 30 万吨级油船。

为验证上述计算结果的准确性,以我国北方地区某 30 万吨级 CALM 工可阶段物理模型试验结果为基础,进行船舶运动量结果对比分析,该物模试验含 2 组单波浪作用的试验组次,对比结果见表 4。从表 4 可以看出,本文数模计算结果与物模试验结果吻合性较好,表明数模结果可以较好地反映系泊船在波浪作用下的运动量情况。风的脉动作用亦会对系泊船运动产生影响,对比物理模型试验单波浪作用及波浪、风联合作用的试验结果,试验风速 17.5 m/s,风作用引起的系泊船垂荡量增加值在 1.03~1.23。

表 4 系泊船运动量对比结果

组次	模型	H_s/m	T/s	运动量 峰值/m	垂荡量 峰值/m
1	物模试验	2.50	7.1	(0.24,0.77,0.16)	1.10
	数模计算	2.50	8.0	(0.25,0.50,0.25)	1.09
2	物模试验	3.04	7.1	(0.34,0.88,0.17)	1.28
	数模计算	3.00	8.0	(0.30,0.60,0.30)	1.49

对于 CALM 来说,油轮作业风速的限制标准不会有过大的差别。本文在对 CALM 设计水深的估算中,统一按风作用引起的油轮垂向运动量为 1.0~1.2 m 考虑,并与波浪作用的运动量线性叠加,则波浪、风联合作用下 30 万吨级油轮的垂荡运动量峰值见表 5。

表 5 波浪、风联合作用下系泊 30 万吨级船垂荡峰值

H_s/m	垂荡峰值/m		
	$T_m=8\text{ s}$	$T_m=10\text{ s}$	$T_m=12\text{ s}$
2.5	2.29	3.86	4.64
3.0	2.69	4.29	5.46
3.5	3.09	4.78	5.93
4.0	3.19	5.26	6.75
4.5	3.59	5.69	7.57
5.0	3.69	6.18	8.09

4 设计水深系数

在单点系泊系统前期设计阶段往往只有油轮吨位等初步参数，不具备进行完整的风浪流环境下船体运动响应幅值计算的条件。因此本文提出设计水深系数的概念，基于目标系泊油轮的满载吃水乘以设计水深系数，即可得到所需的最小设计水深：

$$D=KT \tag{3}$$

式中： D 为单点系泊设计最小水深， K 为设计水深系数， T 为设计船型满载吃水。

根据设计水深系数的定义，将表 5 不同波浪要素组次下的系泊船运动量代入式(1)和(3)，可得 30 万吨级 CALM 的设计最小水深要求及设计水深系数(表 6)。

表 6 30 万吨级油船设计最小水深 D 及设计水深系数 K			
H_s/m	T_m/s	D/m	K
2.5	8	27.49	1.22
	10	29.06	1.29
	12	29.84	1.33
3.0	8	27.89	1.24
	10	29.49	1.31
	12	30.66	1.36
3.5	8	28.29	1.26
	10	29.98	1.33
	12	31.13	1.38

采用上述相同的方法，再对规范给定的 10 万~25 万吨级的油船尺度分别计算其设计水深系数(表 7)，在 CALM 规划选址及可行性研究阶段，可根据拟定的设计船型以及作业环境条件按本文对应吨级船型设计水深系数表初步确定水域的最小设计水深要求。

表 7 油船设计水深系数 K

H_s/m	T_m/s	K			
		10 万吨级	12 万吨级	15 万吨级	25 万吨级
2.5	8	1.38	1.36	1.31	1.26
	10	1.51	1.44	1.40	1.32
	12	1.60	1.52	1.48	1.36
3.0	8	1.40	1.38	1.32	1.27
	10	1.55	1.48	1.44	1.34
	12	1.67	1.58	1.52	1.40
3.5	8	1.42	1.40	1.34	1.28
	10	1.59	1.53	1.46	1.36
	12	1.73	1.62	1.58	1.44
4.0	8	1.45	1.42	1.35	1.29
	10	1.65	1.57	1.50	1.38
	12	1.81	1.68	1.63	1.48
4.5	8	1.47	1.44	1.37	1.31
	10	1.69	1.61	1.53	1.40
	12	1.88	1.74	1.68	1.50
5.0	8	1.49	1.45	1.39	1.31
	10	1.73	1.65	1.57	1.43
	12	1.94	1.80	1.73	1.54

5 工程案例分析

我国茂名、涠州及部分国外 CALM 工程案例设计水深情况如表 8 所示，工程案例设计水深系数与本文推荐设计水深系数基本吻合，我国近海地形一般相对平缓，国内已建 2 处单点均按最小水深要求选址，以最大限度地减小海底管线的长度，节省建设投资。

当水深较小时，系泊船在波浪作用下会产生浅水效应，当水深系数 K 小于 1.3 时会相对明显，系泊船对系泊设施的水平作用力会有较大幅度的增加，将对系泊设施的强度有较高的要求，因此有条件时 CALM 选址应尽可能选择在水深充足海域。

表 8 工程案例设计水深系数对比

工程名称	设计船型满载吃水/m	设计作业波要素		设计水深/m	设计水深系数	本文推荐设计水深系数
		H_s/m	T_m/s			
茂名 CALM	19.6	≤9.6	≤9.0	23.7	1.21	1.26
涠州 CALM	12.8	≤2.8	≤2.0	18.0	1.41	1.40
阿曼某 CALM	22.5	≤3.0	≤10.0	31.0	1.38	1.31
贝宁某 CALM	17.5	≤7.5	≤7.5	23.5	1.34	1.36

对比各吨级船的设计水深系数得知：当船型较小时，其设计水深系数较大；船型较大时，设

计水深系数较小。而对于给定船型,当拟定作业条件的波高、波周期增大时,其设计水深系数亦会相应增大,特别是波周期,其设计水深系数增幅明显,可见在中长周期波作用下,系泊船的运动响应更加剧烈,因此在 CALM 选址及水域布置时尤其应关注所处海域是否受中长周期波浪的影响。我国大部分海域由平均波周期 8 s 内的风浪控制,其设计水深系数可取 1.2~1.5,船型较小或环境条件较差时应取大值,同时海底障碍物高度、备淤量应根据项目实际情况考虑,在确定设计水深时应考虑其实际情况与本文假定值差异的影响。

本文设计水深系数的推求采用了某些基于一般情况的假定,实际工程中海域波浪谱、所模拟典型船型的线型等参数以及系泊船升沉、纵摇及横摇运动峰值的同步性等与本文所考虑的可能有差异,对设计水深系数有一定的影响,因此本文所述设计水深系数仅用于前期规划选址及可行性研究阶段,对于详细设计阶段,宜针对具体船型参数、环境要素等进行分析确定设计水深要求。

6 结 论

1)在规划选址及工行性研究阶段,CALM 的设计水深可根据拟定的设计作业环境波要素参照本文给定的相应吨级船型设计水深系数确定,以风浪为主的海域 CALM 设计水深系数宜取 1.2~1.5,船型较小或环境条件较差时应取大值。

2)设计水深系数与设计作业环境波浪的波高及波周期有关,对给定船型当波高或波周期增大时,其设计水深系数亦增大,设计水深系数对波周期的敏感性要大于波高。

3)中长周期涌浪作用下,系泊船的运动响应较剧烈,CALM 的设计水深系数增幅十分明显,在 CALM 选址及水域布置时应充分考虑工程所处海域是否受中长周期波浪影响。

参考文献:

[1] 罗晓健,张爱霞,李绂.单点系泊系统设计思路及原则[J].中国海洋平台,2013,28(2):19-23,56.

[2] 周楠,刘旭平,李俊汲.CALM 单点系泊系统设计综述[J].海洋工程装备与技术,2017,4(2):102-104.

[3] 许向东,蔡世亮.单点系泊技术及 CALM 系统的操作维护和管理[M].北京:企业管理出版社,1998.

[4] 蔡世亮.CALM 单点系泊系统国产化可行性探讨[J].石油规划设计,2021,32(1):41-47,66.

[5] 周楠.CALM 单点系泊油船“鱼尾效应”[J].中国海洋平台,2018,33(5):70-74.

[6] 吕岩,琚选择,李秀峰,等.海上原油装卸单点建设条件及场址选择技术研究[J].海洋工程装备与技术,2018,5(5):300-304.

[7] 马巍巍,范模.极浅水单点系泊系统的设计研究[J].船舶工程,2013,35(2):92-95.

[8] 中交第四航务工程勘察设计院有限公司.基于国内外规范和标准的海港工程总平面设计指南[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.

(本文编辑 郭雪珍)

(上接第 55 页)

[5] British Standards Institution.Railway applications-track-track alignment design parameters: EN 13803: 2017[S]. London: British Standards Institution, 2017.

[6] 铁道第四勘察设计院.铁路工程设计技术手册[M].北京:中国铁道出版社,2004.

[7] British Standards Institution.Railway applications-track-switches and crossings: BS EN 13232-1: 2003[S]. London: British Standards Institution, 2003.

[8] UK Ministry of Defence. Railways permanent way design and maintenance policy and standards[S]. Bristol: Defence

Movements & Transport Policy Division, 2009.

[9] US National Archives and Records Administration. Code of federal regulations [S]. Washington: U. S. Government Printing Office, 2020.

[10] John Holland Rail.Signalling design principles: CRN SD 014[S]. Parramatta: John Holland Rail, 2016.

[11] Jörn Pachtl, Railway Signalling Principles[M]. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2020.

(本文编辑 郭雪珍)