

doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2020.05.015

基于不同规范的 CALM 单点系泊系统锚链直径选型对比研究

梁 凯¹, 王亚琼¹, 徐万海^{2*}, 周大可¹

(1. 中国石油天然气管道工程有限公司, 河北 廊坊 065000; 2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072)

摘 要: CALM 型单点系泊系统通过悬链式锚链固定在某一海域作为永久性系泊终端, 锚链的完整性对系泊油轮的安全至关重要, 确定满足规范要求的锚链直径是系泊系统设计的关键。本文对中国船级社 (CCS)、挪威—劳氏船级社 (DNVGL)、美国船级社 (ABS) 和美国石油协会 (API) 的 4 种规范对 CALM 型系泊系统锚链强度校核要求进行了对比分析, 给出了不同锚链张力下各规范要求的最小锚链直径, 分析了不同规范选取对锚链直径选型的影响。研究成果可为海洋工程锚链选型设计提供必要的技术支持。

关键词: 悬链式系泊系统; 锚链选型; 单点系泊系统; 规范对比

中图分类号: P751 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-2029 (2020) 05-0100-05

悬链式系泊系统 (Catenary Anchor Leg Mooring, CALM) 是一种广泛应用于原油装卸的单点系泊系统。CALM 系统主要由浮筒、系泊缆、漂浮软管、水下软管、水下管汇、系泊锚链和辅助设备组成。油轮通过系泊缆连接浮筒, CALM 系统通过悬链式的多根锚链固定在海底, 锚链为整个系统提供约束, 限制浮筒在一定的范围内运动, 使油轮能够进行输油作业。CALM 系统可使大型油轮不受港口和航道水深的限制进行油品传输, 且具有投资低和受气候影响小等优点, 在世界原油和天然气的进出口中发挥着重要作用。随着世界主要港口码头拥挤程度日渐加剧以及码头投资成本不断提高, 利用悬链式单点系泊系统配合海上油轮过驳油品至陆上炼化终端将成为未来的主要选择。因此, 对安全且更加经济的 CALM 系统的需求将变得愈加旺盛^[1]。而系泊锚链作为 CALM 系统的关键组成部分, 其完整性对整个作业系统安全至

关重要, 其造价影响整个 CALM 系统的经济性, 是单点系统系泊设计关键内容, 多种规范都对系泊锚链的结构强度校核和疲劳校核方法做了明确规定^[2]。

工程界和学术界对单点系泊系统的锚链张力分析和强度校核开展了较多研究工作。冷述栋^[2]采用耦合时域动态分析方法, 对单点系泊系统进行了动力响应分析, 基于挪威船级社规范对锚链强度及疲劳进行了校核; 罗慧明等^[3]基于中国船级社规范分析了 CALM 系统的系泊链疲劳强度; 秦川^[4]分析了不同浮力材起始位置、间隔等参数对锚链最大张力的影响, 并以张力最小为目标对 CALM 系统锚链进行了优化设计; 来俊^[5]通过对锚索进行静力分析, 依据中国船级社规范完成了锚链材质的选型, 并分别基于准静力和动力方法完成了极端海况下的系泊分析; Brown A 等^[6]研究了在飓风情况下 CALM 系统的动力响应, 并确

收稿日期: 2020-05-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51679167, 51979193); 国家自然科学基金创新研究群体科学基金资助项目 (51621092)

作者简介: 梁凯 (1989-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事海洋工程结构物系泊设计分析工作。E-mail: lk1895@163.com

通讯作者: 徐万海 (1981-), 男, 博士, 副教授, 主要从事海工细长结构的设计分析工作。E-mail: xuwanhai@tju.edu.cn

定了极端载荷情况下的设计参数。在规范对比研究方面, 马邦勇^[7]对各大船级社对单点系泊系统浮筒主轴承安全系数的要求进行了对比分析; 周楠等^[8]简单列举了几种不同规范的系泊锚链强度设计标准。此外, 易丛等^[9]探讨了设计工况和设计规范选取的不同对单点系泊系统方案的影响。

综上所述, 国内外学者对 CALM 系泊系统的研究主要集中在计算方法和优化设计方面, 对于不同规范的对比研究较少, 主要原因在于 CALM 系统的工程设计通常采用入级船级社标准, 而船级社常由业主指定, 缺乏横向对比优化过程。对于锚链强度设计安全系数, 国际上几大船级社的规范都给出了明确的要求。然而, 各规范规定的计算工况及对应的安全系数并不完全一致, 是否需要考虑结果风险等级也存在差异, 因此在相同锚链张力条件下, 选取的锚链直径也不完全相同。此外, 各规范对于不同的锚链等级规定了同样的安全系数, 只考虑了锚链安全属性, 未考虑不同等级对锚链造价影响。上述问题的存在直接导致参照不同规范进行系泊设计, 得到的锚链直径变化较大, 影响工程项目造价。本文对比分析了中国船级社 (China Classification Society, CCS)、挪威—劳氏船级社 (Det Norske Veritas-Germanischer Lloyd, DNVGL)、美国船级社 (American Bureau of Shipping, ABS) 和美国石油协会 (American Petroleum Institute, API) 的相关规范的 CALM 系统系泊锚链强度衡准, 给出了不同锚链张力下各规范要求的最小锚链直径, 分析了不同规范的选取对锚链选型的影响。研究成果可为海洋工程锚链选型及优化提供支撑, 为设计出更加安全、经济的 CALM 系泊系统提供了依据。

1 各规范锚链强度要求

1.1 DNVGL 规范

挪威—劳氏船级社 (DNVGL) 规范^[10]规定要按照公式 (1) 对系泊锚链的强度进行校核。

$$S_C - T_{\text{pret}} \cdot \gamma_{\text{pret}} - T_{\text{C-env}} \cdot \gamma_{\text{env}} > 0 \quad (1)$$

式中: T_{pret} 为锚链预张力, kN; $T_{\text{C-env}}$ 为特征环境力, kN; S_C 为锚链特征强度, kN; γ_{pret} 为

预张力安全系数; γ_{env} 为特征环境力安全系数。DNVGL 锚链设计安全系数如表 1 所示, 偶然极限状态是指一根锚链破断的系泊状态, 最大极限状态是指系泊系统锚链完整且承受最大操作环境载荷的系泊状态。

表 1 DNVGL 锚链强度分项安全系数表

结果	设施类型	最大极限		偶然极限	
		γ_{pret}	γ_{env}	γ_{pret}	γ_{env}
1	永久系泊	1.20	1.45	1.00	1.10
2	永久系泊 & 移动式	1.20	1.90	1.00	1.45

注: 结果等级 1 是指当锚泊系统失效时不会导致不可接受的后果, 例如人员伤亡、与附近平台发生碰撞、导致不可控的溢油或燃气泄漏以及结构物损伤或沉没等。结果等级 2 是指当锚泊系统失效时可能导致如上不可接受的后果。

1.2 ABS 规范

美国船级社 (ABS) 规范^[11]要求, 锚链设计应满足表 2 中指定的最低安全系数。安全系数定义如下:

$$FOS = MBS / T_{\text{max}} \quad (2)$$

式中: FOS 为强度安全系数; MBS 为锚链最小破断强度; T_{max} 为最大锚链张力。表 2 中的设计环境条件为油轮与浮筒连接断开, 浮筒自存工况; 设计操作条件为油轮连接浮筒进行装卸油作业的工况。

表 2 ABS 锚链设计安全系数表

锚链状态	环境条件	动态
锚链完整	设计环境条件	2.5
	设计操作条件	2.5
一根锚链破断	设计环境条件	2.0
	设计操作条件	2.0

1.3 API 规范

根据美国石油协会 (API) 规范^[12]要求, 张力极限可以表示为系泊件的最小破断强度 (MBS) 的百分比:

$$FOS = MBS / T_{\text{max}} \quad (3)$$

API 规范要求, 对于不同设计工况, 采用动态

分析方法的锚链的张力极值和安全系数如表3所示。

表3 API 锚链张力范围及安全系数表

锚链状态	张力极值 (MBS 的百分比)	安全系数
锚链完整	60	1.67
一根锚链破断	80	1.25

1.4 CCS 规范

根据中国船级社 (CCS) 规范^[13], 锚索张力安全系数取决于设计工况以及所采用的锚泊分析方法。采用动态分析法的锚链或钢缆的安全系数应符合表4的规定。锚链安全系数 F 定义如下:

$$F = PB / T_{\max} \quad (4)$$

式中: PB 为锚索的最小拉断强度, kN。

表4 CCS 锚链安全系数表

设计工况	安全系数	设计工况	安全系数
完整作业工况	2.25	破损作业工况	1.57
完整自存工况	1.67	破损自存工况	1.25

2 规范对比分析

分析以上四种规范对锚链强度安全系数的要求可以发现, 所有规范均规定了锚链完整和一根锚链破断工况下安全系数的取值。其主要的区别在于:

(1) DNVGL 采用分项安全系数法, 规定了锚链预张力和特征环境力的分项安全系数, ABS、API 和 CCS 的方法一致, 均采用统一安全系数法。

(2) DNVGL 设置了不同的结果等级, 对锚链损伤后造成严重后果的情况规定了更严格的安全系数, ABS、API 和 CCS 没有考虑失效后果影响。

(3) ABS 和 CCS 对作业工况 (设计操作条件) 和自存工况 (设计环境条件) 的安全系数做了区分, DNVGL 和 API 对两种环境工况取相同的安全系数。

(4) CCS 自存工况和 API 的安全系数要求一致。

为了进一步明确不同规范要求对 CALM 系泊

系统锚链设计的影响, 本文选取3种锚链等级, 对不同锚链载荷条件下各规范要求的最小锚链直径进行了核算及对比, 计算基于以下假定: 不考虑锚链的腐蚀、磨损余量; 采用同样的环境条件组合; 采用时域动态的分析方法。

根据工程经验, CALM 系泊系统锚链的预张力范围一般为 60 ~ 140 kN, 锚链最大张力处于 1 400 ~ 3 400 kN 之间, 常用的锚链等级为 R3、R4 及 R4S。因此, 本文设置锚链完整和锚链破断两种计算工况, 设置锚链预张力为 100 kN, 锚链最大张力 (不含预张力) 取 1 400 ~ 3 400 kN, 步长 200 kN, 共 11 个最大锚链张力等级, 在此基础上, 分别选取 R3、R4 及 R4S 等级锚链, 计算不同锚链张力下的各规范要求的最小锚链直径。

图1为锚链完整工况下不同规范要求的最小锚链直径, 从图中可以看出: (1) 对锚链直径的要求, ABS 计算直径最大, 其次分别为 CCS 作业工况, DNV 等级 2, API&CCS 自存工况和 DNV 等级 1。(2) 锚链张力为 1 400 kN 时, 对于 R3、R4 和 R4S 级锚链, ABS 规范和 DNV 规范等级 1 计算锚链直径相差分别为 16 mm、14 mm 和 14 mm, ABS 规范和 DNV 规范等级 2 计算锚链直径相差分别为 8 mm、8 mm 和 8 mm; 锚链张力为 3 400 kN 时, 差值分别为 27 mm、25 mm 和 24 mm, 15 mm、14 mm 和 14 mm。可以看出, 分别依照 ABS 规范与 DNV 规范选取锚链, 随着锚链张力增大, 两个规范选取的最小锚链直径差值呈现出增大的趋势。(3) 当锚链张力为 1 400 ~ 3 400 kN 时, 分别按照 ABS、CCS 作业工况、DNV 等级 2、API&CCS 自存工况以及 DNV 等级 1 要求选取锚链, R4 级锚链比 R3 级锚链直径最大减小分别为 12.3%、12.5%、12.9%、13.1% 和 12.1%, R4S 级锚链直径比 R4 级锚链直径最大减小分别为 7.1%、7.9%、7.7%、7.1% 和 8.7%。

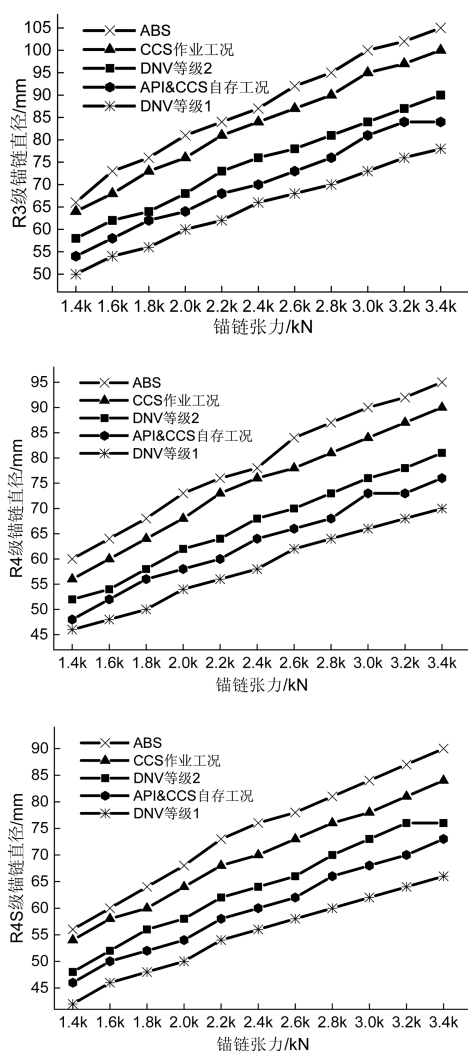


图1 完整工况 R3、R4 和 R4S 级锚链规范计算直径

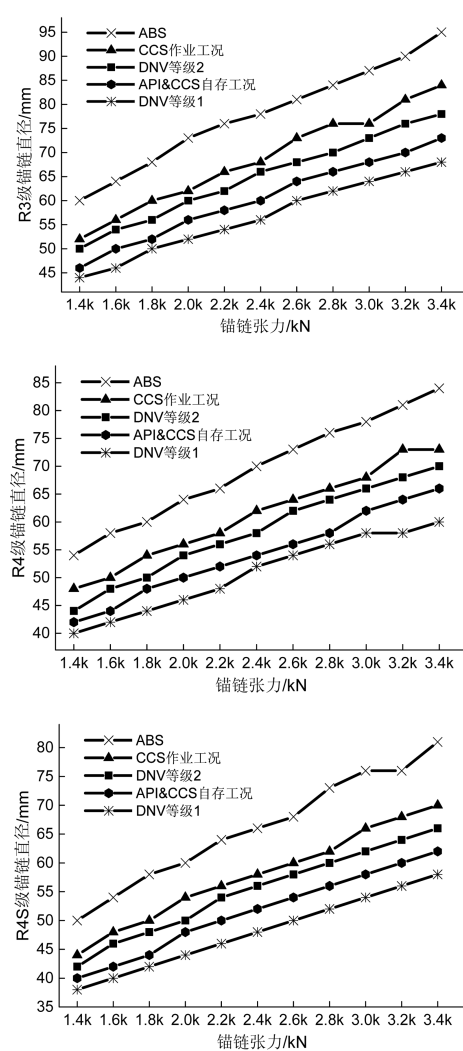


图2 破断工况 R3、R4 和 R4S 级锚链规范计算直径

图2为单根锚链破断工况下不同规范要求的R3、R4、R4S级锚链最小直径,从图中可以看出:

(1) 对锚链直径的要求,不同规范的严格程度与完整工况一致,但ABS的要求与其它规范要求差距进一步增大。(2) 分别依照ABS规范与DNV规范选取锚链,同等级锚链,随着锚链张力增大,两个规范选取的最小锚链直径差值呈现出增大的趋势。(3) 当锚链张力为1 400~3 400kN时,分别按照ABS、CCS作业工况、DNV等级2、API&CCS自存工况以及DNV等级1要求选取锚链,R4级锚链直径比R3级锚链直径最大减小分别为13.2%、13.2%、12.1%、12.5%和12.1%,R4S级锚链直径比R4级锚链直径最大减小分别为7.4%、8.3%、7.4%、8.3%和7.7%。

3 结论

本文通过对中国船级社(CCS)、挪威一劳氏船级社(DNVGL)、美国船级社(ABS)和美国石油协会(API)的4种规范对CALM型系泊系统锚链强度校核要求的对比分析,主要得到以下结论:(1)任何工况下,在同等锚链张力及锚链等级条件下,按照不同规范选取锚链直径,对锚链直径要求从大到小的规范(工况)依次为:ABS、CCS作业工况, DNV等级2, API&CCS自存工况和DNV等级1。(2)分别依照ABS规范与DNV规范选取最小锚链直径,同等级锚链,随着锚链张力增大,依照两个规范选取的最小锚链直径相差也呈现出增大的趋势。ABS规范与DNV

等级1要求的值最大相差40%，与DNV等级2要求的值最大相差22.7%。（3）锚链最大可能张力在1 400～3 400 kN范围时，按照同一规范计算得到的最小锚链直径，R4级锚链直径比R3级锚链直径减小在12%～14%之间，R4S级锚链直径

比R4级锚链直径减小在7%～10%之间。本文的研究基于不考虑锚链的腐蚀和磨损余量的假定条件，因此实际工程中的锚链直径应为本文计算直径加锚链的腐蚀余量，不同规范腐蚀余量取值要求对锚链直径选取的影响有待进一步研究。

参考文献：

- [1] 马春青,姚海玉,高云青.孟加拉悬链式单点系泊安装工艺[J].油气储运,2018,37(5):586-590.
- [2] 冷述栋.CALM系泊系统动力响应分析[D].大连:大连理工大学,2013.
- [3] 罗慧明,王领,李艳贞.悬链式单点系泊锚链疲劳强度分析[J].中国海洋平台,2016,31(4):19-26.
- [4] 秦川.基于遗传算法的CALM系统软管及锚链优化设计[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2018.
- [5] 来俊.CALM系泊系统方案设计与极端海况系泊分析[D].大连:大连理工大学,2018.
- [6] BROWN A, GORTER W, PAALVAST M, et al. Design approach for CALM buoy moored vessel in squall Conditions[C]// Proceedings of the 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Busan: American Society of Mechanical Engineers,2016.
- [7] 马邦勇.CALM单点系泊系统浮筒主轴承选型研究[J].石油机械,2018,46(7):45-50.
- [8] 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.
- [9] 易丛,李达,赵晶瑞,等.规范及设计工况对单点系泊系统设计的影响[J].船海工程,2017,46(2):93-97.
- [10] DNVGL. DNVGL-OS-E301.Position Mooring[S].DNV GL AS,2018.
- [11] ABS. Guide for position mooring systems[S].USA: American Bureau of Shipping, 2019.
- [12] API. Design and analysis of station keeping systems for floating structures[S].USA: American Petroleum Institute,2005.
- [13] 中国船级社.海上单点系泊装置入级与建造规范[S].北京:中国船级社,1996.

Comparative Study on the Selection of Anchor Chain Diameter for CALM Single Point Mooring System Based on Different Rules

LIANG Kai¹, WANG Ya-qiong¹, XU Wan-hai², ZHOU Da-ke¹

1. China Petroleum Pipeline Engineering Corporation, Langfang 065000, China;

2. College of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract: Catenary Anchor Leg Mooring (CALM) single point mooring system is moored in a certain sea area with catenary anchor chains as a permanent terminal. The integrity of the anchor chains is critically important to the safety of the mooring tanker and the key point for mooring design is determined with the chain diameter complying with the rule. The criteria of China Classification Society (CCS), Det Norske Veritas (DNVGL), American Bureau of Shipping (ABS) and American Petroleum Institute (API) for chain strength check are compared, minimum chain diameters required by each rule for different chain tension are calculated and the influence of different rules for chain selection is also analyzed in this paper. The research results can provide necessary technical support for the selection and design of the anchor chain in offshore engineering.

Key words: Catenary Anchor Leg Mooring (CALM); anchor chain selection; single point mooring system; rules comparison