

美国国防部 UFC 规范船舶撞击能计算解析



王广夫, 许松乔

(大连理工大学土木建筑设计研究院有限公司, 辽宁 大连 116023)

摘要:简述美国国防部 UFC 规范关于船舶撞击能的计算公式,并比较其设计参数选取和计算结果与英标 BSI 规范和我国规范的异同,着重分析偏心系数 C_e 和虚拟质量系数 C_m 。结果表明,UFC 规范在 C_m 中考虑了船底相对水深对船舶撞击能的影响,且此时 C_m 的计算结果与船模试验结果较为接近;船舶撞击能的计算结果, UFC 规范>英标>我国规范; C_e 、 C_m 在不同船型中基本为常量,不随吨级而变化。

关键词: 护舷; 船舶撞击能量; 虚拟质量系数 C_m ; 相对水深

中图分类号: U 652.7⁺¹

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)01-0047-06

Analysis of berthing energy calculation in unified facilities criteria of United States Department of Defense

WANG Guang-fu, XU Song-qiao

(Design Institute of Civil Engineering & Architecture of Dalian University of Technology Co., Ltd., Dalian 116023, China)

Abstract: We present the calculation formula of berthing energy in unified facilities criteria, compare the similarities and differences of selection of design parameters and calculation results in unified facilities criteria (UFC), BSI standard and Chinese standard, and further study the eccentricity coefficient C_e and virtual mass coefficient C_m . The results show that UFC considers the influence of the under keel relative clearance on berthing energy in C_m , and the calculation result of C_m in UFC is similar to that in ship model test. The berthing energy in UFC is higher than that in BSI standard, while it is the lowest in Chinese standard. C_e and C_m are basically constants in different ship types, and they vary little in relation to tonnages.

Keywords: fender; berthing energy; virtual mass coefficient C_m ; relative depth

随着中国制造走出国门,中国设计也已迈入全球市场,参考并吸纳其他规范的优点不仅可沟通不同国家的业主和咨询工程师,也对我国规范的优化发展起到促进作用。护舷设计是港航设计前期工作中的一项重要内容,影响着结构安全性和经济性。

目前海外工程中的护舷设计多以英标 BS 6349 和国际航运协会 PIANC WG 33 的标准为主,我国设计人员也对这两种规范有所研究^[1]。而对美国

国防部统一设施标准 UFC (Unified Facilities Criteria)的研究较少,该标准不仅在撞击能计算中考虑船底相对水深的影响,还可为潜艇等浸没水下的船体提供可行的附加水体质量计算方法。

本文对 UFC 中船舶撞击能计算方法进行介绍,并比较各船型、吨级下撞击能的变化,同时比较其与英标 BSI 和我国规范的差异,着重分析虚拟质量系数的计算方法,得出不同船型、吨级的船舶撞击能变化趋势及特点,可为采用 UFC

规范设计的码头或军港码头的设计提供指导，并为细化国标中的船舶撞击能计算公式、考虑相对水深和虚拟质量系数的影响提供参考。

1 UFC 船舶撞击能公式

UFC 4-152-01^[2] 中船舶撞击能公式的计算原理与其他船舶撞击能计算公式一致，从基本动能公式(1)转化而来。须特殊注意的是美标中采用的是美式英制单位，这点与国标、PIANC 以及 BSI 规范不同。

$$E_{\text{ship}} = \frac{W}{2g} v^2 \quad (1)$$

式中： E_{ship} 为船舶靠泊能量($\text{ft} \cdot \text{lbs}$)； W 为排水量(lbs)； g 为重力加速度，为 32.2 ft/s^2 ； v 为靠泊速度(ft/s)。

护舷吸收的能量在式(1)基础上再乘以修正系数，见式(2)(3)。

$$E_{\text{fender}} = C_b C_m E_{\text{ship}} \quad (2)$$

$$C_b = C_e C_g C_d C_c \quad (3)$$

式中： C_b 为靠泊系数； C_e 为偏心系数； C_g 为几何系数； C_d 为变形系数； C_c 为结构系数； C_m 为虚拟质量系数。以下对各系数的原理及计算参数进行说明。

1.1 偏心系数 C_e

当船舶靠泊过程中，船体不平行于码头前沿线时，并不是所有的动能都由护舷吸收。受护舷反力作用，船体会绕接触点开始旋转，因此有一部分动能会溢散掉。 C_e 的计算公式如下：

$$C_e = k^2 / (a^2 + k^2) \quad (4)$$

$$k = (0.19 C_{BL} + 0.11) L \quad (5)$$

$$C_{BL} = M / (LBD\rho_w) \quad (6)$$

式中： k 为船舶纵轴的回转半径(ft)； a 为船舶重心与靠泊接触点在船舶纵轴上投影的距离(ft)； C_{BL} 为船舶方形系数； M 为船舶排水量(ft)； L 为船长(ft)； B 为船宽(ft)； D 为吃水(ft)； ρ_w 为水密度，一般取 64 lb/ft^3 。 C_e 值一般介于 $0.4 \sim 0.7$ 之间，此外 C_e 值还可通过图 1 查得。

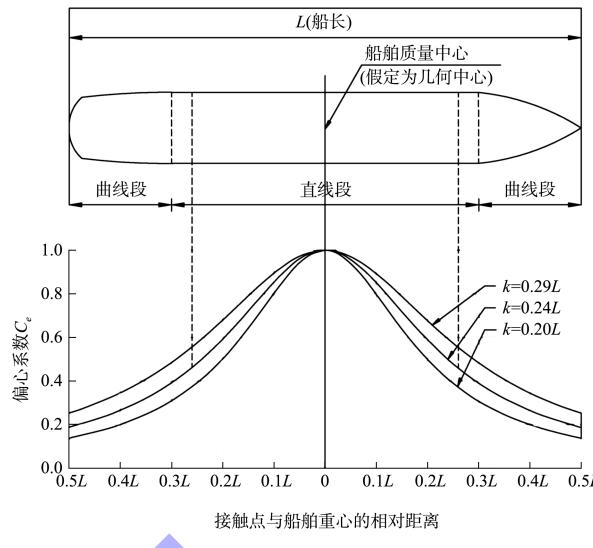


图 1 偏心系数 C_e 取值

1.2 几何系数 C_g

几何系数取决于撞击点位置处船壳几何形状，渐增的凸曲率时为 0.85，凹曲率时为 1.25。通常来说，靠泊点在四分点或超过四分点时取 0.95，采用舷侧靠泊时取 1.0。

1.3 变形系数 C_d

变形系数是由于局部船壳变形以及船体沿其纵轴偏转导致的能量减小，被吸收的能量取决于船体和护舷的相对刚度。非弹性护舷变形系数为 0.9，弹性护舷时可取接近 1.0。但对于采用吸能型护舷的大船来说，船体很少或几乎不变形，因此建议该系数取 1.0。

1.4 泊位形式系数 C_c

引入泊位形式系数是为了考虑开敞式码头及实体式码头的区别。开敞式码头中靠泊船舶周围的水体运动不会(或几乎不会)受到码头的影响，而实体式码头中靠泊船舶和码头间的水体将受到挤压，因此会起到缓冲作用，体现为对船体产生一个推离码头的力，并减少护舷所要吸收的能量。因此引入一个减小系数来考虑这一效应。

经验表明，对于实体式岸壁码头约有 $1/4$ 的靠泊能量会被水体缓冲吸收，因此建议取值为：开敞式和拐角处的实体式码头取 $C_c = 1.0$ ；对平行靠泊的实体式码头取 $C_c = 0.8$ ；对其他不同情况的泊位形式， C_c 可取以上的中间值。

1.5 虚拟质量系数 C_m

当船舶靠泊码头时, 靠泊撞击是由移动的船舶以及其周边的水体质量共同引起的。后者通常也被称作水动力质量或附加质量, 在确定靠泊船舶的动能时, 有效或虚拟质量要考虑船体质量和水动力质量之和。水动力质量未必会随着船舶质量变化, 而是和垂直于运动方向的投影面积有关。其他如船型、水深、船舶的靠泊速度以及加减速均会影响水动力质量。

对于潜艇, 其计算公式为:

$$C_m = 2.36 + 1.74 (T/d)^{3.5} \quad (7)$$

式中: T 为船舶中心处吃水(ft); d 为水深(ft)。

对于水面上的船舶, 其计算公式为:

$$C_m = C_{m0} + (C_{m1} - C_{m0}) (T/d)^{3.5} \quad (8)$$

$$C_{m0} = 1.3 + 1.5 (T/B) \quad (9)$$

$$C_{m1} = F [12.4 (T/B)^{0.3} - 50T/L] \quad (10)$$

式中: C_{m0} 为深水极限状态 $T/d=0$ 时的附加质量系数; C_{m1} 为潜水极限状态 $T/d=1$ 时的附加质量系数; F 为判别参数, 取值为:

$$\begin{cases} F = 1.5 C_{BL} & (C_{BL} \leq 0.6) \\ F = 0.9 & (C_{BL} > 0.6) \end{cases} \quad (11)$$

式中: C_{BL} 为船舶方形系数。

1.6 靠泊速度 v

靠泊速度是以平方的程度影响靠泊能量, 因

此靠泊能量和结构反力对速度的变化会很敏感。一般靠泊速度根据船型尺寸及拖轮情况在 0.25~1.5 ft/s 之间(合 0.08~0.46 m/s)。大船有充足拖轮辅助时靠泊速度取低值, 反之小船自行靠泊的情况下取大值。靠泊速度还受到靠泊方式、拖轮操作空间、码头位置及设施的影响。垂向靠泊速度可从图 2 查得。

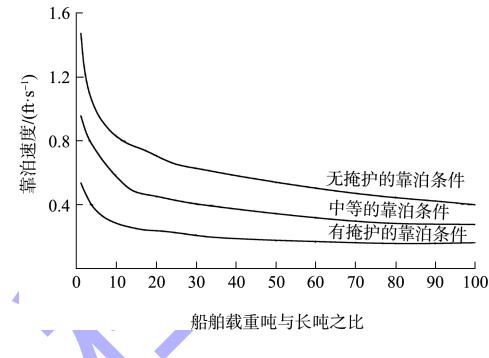


图 2 不同吨级船舶垂向靠泊速度

2 各规范船舶撞击能计算公式比较

2.1 不同规范参数取值比较

UFC 规范中船舶撞击能计算公式及原理与 BSI^[3] 及 PIANC 规范^[4]相近, 如偏心系数 C_e 、变形系数 C_d 、泊位形式系数 C_c 和虚拟质量系数 C_m 均在以上公式中得到体现, 仅几何系数 C_g 未在其他规范中提及。

各规范船舶撞击能计算参数及公式见表 1。

表 1 不同规范下船舶撞击能计算系数取值比较

采用规范	偏心系数	几何系数	变形系数	泊位形式系数	虚拟质量系数	异常靠泊系数
UFC	$C_e = k^2 / (a^2 + k^2)$	0.85~1.25	0.9~1.0	0.8~1.0	$C_m = C_{m0} + (C_{m1} - C_{m0}) (T/d)^{3.5}$	>1.5
BS 6349	$C_e = \frac{K^2 + R^2 \cos^2 \gamma}{K^2 + R^2}$	-	0.9~1.0	0.9~1.0	$C_m = 1 + \frac{2D}{B}$	1.5~2.0
PIANC	同英标	-	0.9~1.0	0.9~1.0	$C_m = 1 + \frac{2D}{B}$ 或 $C_m = 1 + \frac{\pi D}{2C_{BL} B}$	1.1~2.0
国标(系泊时撞击)	$k = \frac{1}{1 + \left(\frac{l}{r}\right)^2}$	-	-	-	$C_m = \alpha_m + \beta_m \cdot \frac{D^2}{Bd}$	-
国标(靠泊时撞击)				有效动能系数 ρ 为 0.7~0.8		-

注: R 为靠泊接触点与船舶质心的距离; γ 为靠泊接触点和质心连线与码头前沿法线方向的夹角; K 为参数, 其值为 $(0.19C_{BL} + 0.11)L_{BP}$, 其中 L_{BP} 为船长; l 为船舶与码头撞击点到船舶横断面重心高程的垂直距离; r 为船舶横断面上的回转半径; α_m 、 β_m 为码头结构形式影响系数; 其他参数同前。国标(系泊时撞击)偏心系数取值为 0.90~0.97, 与国外规范中取值为 0.4~0.7 差异较大。

由表 1 可看出除国标外, UFC 中变形系数、泊位形式系数与英标及 PIANC 差异不大, 偏心系数与虚拟质量系数与以上两规范差异较大, 另新增了几何系数。

英标及 PIANC 中偏心系数 C_e 在假定船舶为水平靠泊, 即当 $\gamma=90^\circ$, C_e 可简化为:

$$C_e = \frac{K^2}{K^2 + R^2} \quad (12)$$

而 UFC 中 $a \approx R \sin \gamma$, 此时两规范偏心系数的计算公式相近。但英标及 PIANC 规范中所取靠泊角度一般均大于 0° 。经计算比对, UFC 中偏心系数略小于英标及 PIANC 规范。

UFC 中虚拟质量系数计算方式迥异于英标及 PIANC, 单独考虑了水下船体(如潜艇)的 C_m 和船底相对水深对 C_m 的影响。

英标及 PIANC 中分别应用了 Vasco Costa 公式、Shigeru Ueda 公式, 其取值范围分别介于 $1.3 \sim 1.9$ 、 $1.5 \sim 2.2$, 然而这两个公式均未反映相对水深 d/T 对 C_m 的影响。

通过试验所得的 C_m 值经常会比传统公式中要大^[5], 在 $d/T=1.2$ 时, C_m 一般介于 $2.4 \sim 3.1$ 之间。而这一点在前人所做的一些模型试验中也得到验证^[6], 如 Saurin 在 1963 年 1:60 船模试验得出水深 d 在 $1.03T \sim 1.15T$ 之间时, C_m 介于 $2.2 \sim 3.5$; Giraudet 在 1966 年 1:50 船模试验得出的公式也考虑了相对水深的影响, C_m 介于 $1.50 \sim 2.91$, 如式(13); Blok 和 Dekker 在 1979 年 1:75 船模试验中, 假定船底相对水深为 $0.2d$, 得出 C_m 介于 $2.0 \sim 3.8$ 。

$$C_m = 1.2 + 0.12D/(d-D) \quad (13)$$

UFC 规范则先分别计算极限深水 $T/d=0$ 和极限浅水 $T/d=1$ 时的附加质量系数, 再根据吃水条件在两极限值中选取。这一理念与 Lewandowski 在 2004 年所提理论相似, Lewandowski 公式为:

$$\xi = D/(H-D) \quad (14)$$

当 $\xi = 0$ 时:

$$S_{\text{deep}} = 1 + \frac{\pi D^2 L_{BP}}{2M} \left[1 + 0.16 \cdot \frac{BC_{BL}}{D} - 5.1 \left(\frac{B}{L_{BP}} \right)^2 \right] \quad (15)$$

当 $0 < \xi < 5$ 时:

$$S_{\text{shallow}} = S_{\text{deep}} + C_1 \xi \quad (16)$$

当 $5 \leq \xi \leq 10$ 时:

$$S_{\text{shallow}} = S_{\text{deep}} + 1 + C_2 \xi \quad (17)$$

式中: ξ 为参数, 反映船舶吃水与船底下富余距离的比例; H 为水深; D 为船舶吃水; L_{BP} 为船舶垂线间长度; S_{deep} 为深水附加质量系数; S_{shallow} 为浅水附加质量系数; C_1 、 C_2 为相关系数, 集装箱船分别取 0.4、0.2, 液化天然气船和超大型油船取 0.425、0.225。

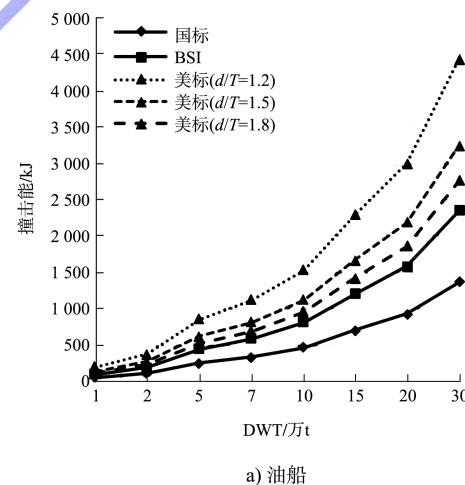
以上研究表明, 传统的 C_m 计算公式有所不

足, 未反映相对水深对船舶撞击能的影响, 且取值偏小。

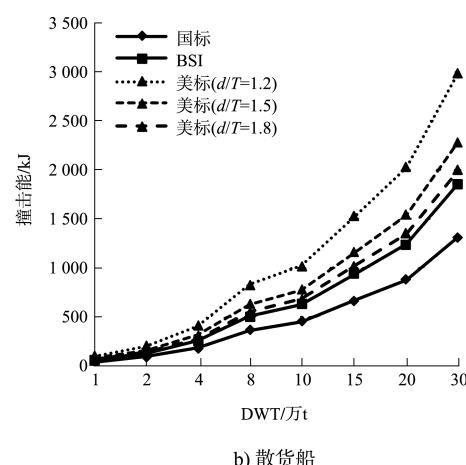
2.2 不同规范计算结果比较

因 PIANC 规范船舶撞击能计算公式与 BSI 规范相近, 而国标中靠泊时撞击计算原理与之相近, 因此选取 BSI 规范及国标^[7] 中的靠泊撞击能计算与 UFC 规范的船舶撞击能进行比较。同时为了体现船底相对水深 d/T 对结果的影响, 本文考虑了 d/T 为 1.2、1.5 和 1.8 共 3 种工况。为比较公式差异, 摒除输入条件的影响, 边界条件统一为: 1) 靠泊速度统一选取为 0.1 m/s; 2) 靠泊角度取为 6° ; 3) 变形系数 C_d 和泊位形式系数 C_c 均取 1; 4) 不考虑非正常靠泊系数的影响; 5) 油船靠泊模型假设其为三分点靠泊, 集装箱船及散货船假定其为四分点靠泊; 6) 国标中有效动能系数取 0.75。

各规范油船、散货船和集装箱船撞击能计算结果见图 3。



a) 油船



b) 散货船

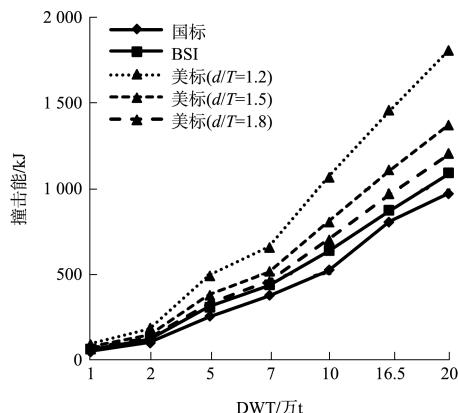


图 3 不同规范计算的撞击能比较

由图 3a) 可知, UFC 规范计算值远大于 BSI 和国标, 其中相对水深 d/T 为 1.2、1.5 和 1.8 时, 撞击能结果分别是国标的 3.3、2.4 和 2.1 倍, BSI 规范计算值约是国标的 1.7 倍; 由图 3b) 可知, UFC 规范相对水深 d/T 为 1.2、1.5 和 1.8 时, 撞击能结果分别是国标的 2.2、1.7 和 1.5 倍, BSI 规范计算值约是国标的 1.4 倍; 由图 3c) 可知, UFC 规范相对水深 d/T 为 1.2、1.5 和 1.8 时, 撞击能结果分别是国标的 1.9、1.4 和 1.3 倍, BSI 规范计算值约是国标的 1.2 倍。

综合以上结论, UFC 规范计算船舶撞击能普遍比 BSI 规范和国标要大, 这一特征在油船中更为明显。造成这一结果的主要原因在于 UFC 规范中虚拟质量系数 C_m 大于 BSI 规范中的 C_m 及我国的有效动能系数 ρ 。

2.3 UFC 规范不同吨级及船型计算结果比较

针对 UFC 规范中撞击能考虑了船底相对水深的影响关系, 对不同相对水深下的各类船型的撞击能计算结果进行比较。为摒除非相关要素的影响, 选取的计算原则与 2.2 节相同。

油船在不同的相对水深条件下船舶撞击能见图 4。

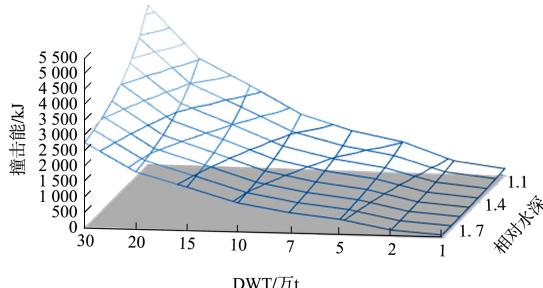
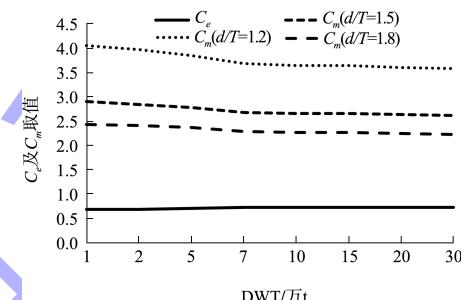


图 4 不同相对水深下油船撞击能比较

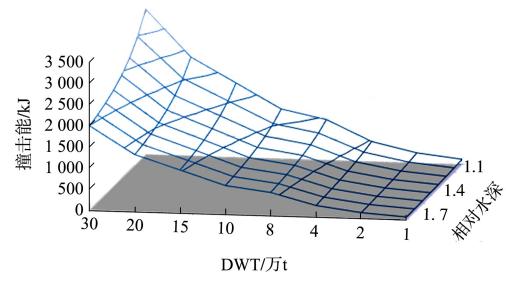
由图 4 可知, 相对水深越小, 撞击能越大, 各吨级油船的撞击能在相对水深为 1.1 时约为相对水深为 1.8 时的 1.9 倍。此外撞击能的差距随着相对水深的增大而减小, 如相对水深 d/T 为 1.1 和 1.2 时的撞击能差距占其总撞击能的 18% 左右, 而 d/T 为 1.7 和 1.8 时, 其差距仅占总撞击能的 4% 左右。

由表 1 及上文分析可知, 国外规范船舶撞击能的差异主要体现在偏心系数 C_e 及虚拟质量系数 C_m 上, 各吨级油船的 C_e 及 C_m 取值变化趋势如图 5 所示。

图 5 不同吨级油船 C_e 及 C_m 取值变化趋势

由图 5 可看出随着吨级的增大, C_e 及 C_m 的变化趋势不大。油船的 C_e 约为 0.7; 在 $d/T = 1.2$ 、1.5 和 1.8 时, C_m 分别约为 3.8、2.7 和 2.3。因此在考虑几何系数 $C_g = 0.95$ 时, UFC 规范中的综合系数 $C (= C_e C_m C_g C_d C_c)$, 等同于国标的有效动能系数 ρ 在 3 种相对水深下约为 2.51、1.82 和 1.55。而英标的综合影响系数 $C' (= C_m C_e C_s C_c)$ 为 1.31, 国标的有效动能系数 ρ 为 0.7~0.8, 英标及国标均未考虑相对水深的影响, 因此无变化。

散货船和集装箱船在不同的相对水深条件下船舶撞击能如图 6 所示。



a) 散货船

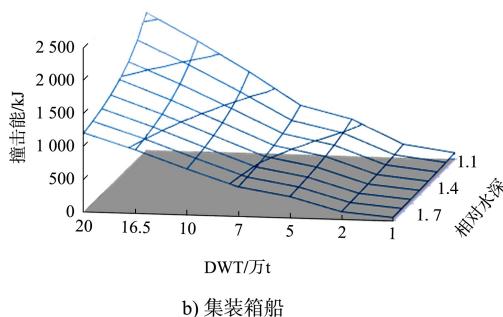
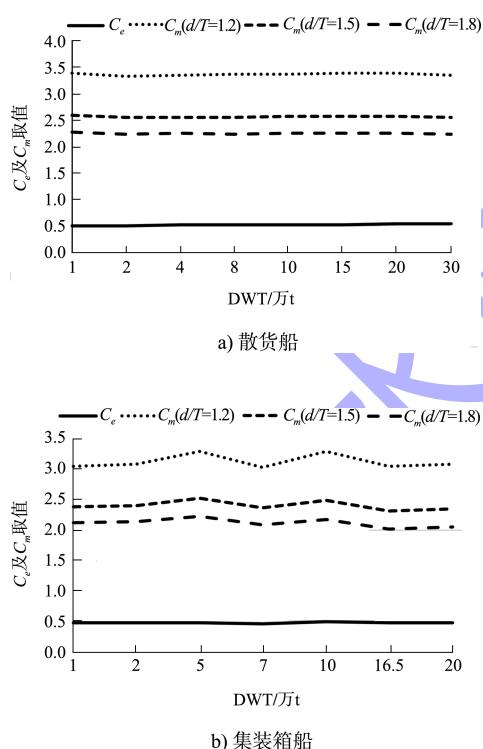


图 6 不同相对水深下撞击能比较

由图 6 可看出散货船和集装箱船的撞击能在不同吨级和相对水深的条件下总的变化趋势与油船相同。

散货船及集装箱船的 C_e 和 C_m 曲线如图 7 所示。

图 7 不同吨级船舶 C_e 及 C_m 取值变化趋势

由图 7 可以看出，散货船和集装箱船的 C_e 相似，且在各吨级间变化不大，约为 0.5。而散货船的 C_m 略大于集装箱船，在相对水深 d/T 为 1.2、1.5 和 1.8 时，散货船 C_m 约为 3.4、2.6 和 2.2，而集装箱船则为 3.1、2.4 和 2.1。

则 UFC 规范下散货船的综合影响系数 C 约为 1.68、1.28 和 1.12，集装箱船 C 约为 1.40、1.08

和 0.95。BSI 规范中散货船和集装箱船的 C' 约为 1.04 和 0.88。

因此可以看出 UFC 规范中 C_m 值介于 2~4，与模型试验值较为接近，大于 BSI 和 PIANC 规范采用的 Vasco Costa 公式和 Shigeru Ueda 公式(其取值范围分别介于 1.3~1.9、1.5~2.2)。

3 结论

1) UFC 规范中船舶撞击能计算与英标 BSI 和 PIANC 规范考虑因素及表达形式相近，但虚拟质量系数 C_m 差异较大。UFC 考虑了船底相对水深的影响， C_m 计算值与前人所做的船模试验中数值较为接近。

2) 船舶撞击能的计算结果，UFC 规范 > 英标 > 我国规范。其中以油船表现最明显，在不同相对水深条件下(d/T 为 1.2、1.5、1.8) UFC 规范计算值是我国规范的 3.3、2.4 和 2.1 倍，在散货船中为 2.2、1.7 和 1.5 倍，在集装箱船中则为 1.9、1.4 和 1.3 倍。

3) C_e 和 C_m 基本随船型及靠泊形式而改变，不随船舶吨级变化而改变。油船 C_e 约为 0.7；在 d/T 为 1.2、1.5 和 1.8 时， C_m 分别约为 3.8、2.7 和 2.3；散货船 C_e 约为 0.5，上述 3 种相对水深时， C_m 分别约为 3.4、2.6 和 2.2；集装箱船 C_e 约为 0.5， C_m 分别约为 3.1、2.4 和 2.1。

4) 本文着眼于比较各规范公式进行了数据分析，引入更多的设计考量因素，可为海外项目靠泊设施设计提供一定参考。建议后续结合船模试验对各规范计算结果进行佐证，为护舷设计提供更有利的技术支撑。

参考文献：

- [1] 黄建,许松乔.英标及 PIANC 规范船舶撞击能量计算比较[J].水运工程,2020(6):40-45.
- [2] US Department of Defense. Unified Facilities Criteria(UFC) design: piers and wharves: UFC 4-152-01 [S]. Washington: US Department of Defense, 2017.

(下转第 81 页)