



# PIANC 及中国标准 船舶有效撞击能计算对比分析

张华平, 冯建国, 王君辉

(中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430071)

**摘要:** 详细阐述了 PIANC 船舶有效撞击能的计算方法, 并与中国标准进行对比, 通过对比发现: PIANC 的有效撞击能计算较中国标准更高, 该标准考虑了柔性系数、泊位形状系数、偏心系数以及附加质量系数等影响因素, 与中国标准相比, 其关键差异取决于附加质量系数  $C_m$ , 两种计算方法的结果比值接近  $C_m$  的取值。同时, PIANC 还要求考虑异常靠泊工况, 其影响系数为 1.1~2.0。此外, PIANC 中对船舶靠泊速度的建议值与中国标准也存在一定差异。

**关键词:** 有效撞击能; 异常靠泊; 附加质量系数; PIANC

中图分类号: U 656.1+3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)04-0081-05

## Comparative analysis against effective impact energy of vessel based on PIANC and Chinese standard

ZHANG Hua-ping, FENG Jian-guo, WANG Jun-hui

(CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd., Wuhan 400071, China)

**Abstract:** The calculation method of PIANC standards for vessel effective impact energy is described in detail and compared with the Chinese standard. The comparison results reveal that PIANC is a higher standard comparing with the Chinese for effective impact energy calculation, which considers influential factors including the softness factor, berth cushion factor, eccentric coefficients, as well as the added mass factor. Compared with Chinese standards, the key difference depends on the added mass coefficient  $C_m$ . The ratio of results based on the two methods is close to  $C_m$ . Meanwhile, PIANC requires that the abnormal berthing condition shall be considered and its impact factor is 1.1 to 2.0. In addition, there are some differences between PIANC recommended values for berthing velocity and that of Chinese standards.

**Keywords:** effective impact energy; abnormal berthing; added mass coefficient; PIANC

近年来港口工程海外市场逐年扩大, 而海外工程通常要求采用国际标准, 不同的规范标准直接影响到项目工程量和造价, 因此, 在海外港口工程设计过程中, 决不能直接照搬国内相应设计规范。船舶撞击荷载在港口工程设计中是主要荷载之一, 尤其对高桩码头工程造价影响较大, 而中外规范对船舶撞击能的计算存在较大差异, 国内水运行

业船舶撞击能量计算标准采用 JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》<sup>[1]</sup>, 而国外船舶撞击能量计算标准通常采用国际航运协会 PIANC<sup>[2]</sup>《Guidelines for the Design of Fenders Systems: 2002》(简称 PIANC), 本文针对这两种标准的船舶撞击能计算方法的差异进行对比分析, 为海外工程设计作参考。

收稿日期: 2014-06-14

作者简介: 张华平 (1984—), 男, 工程师, 从事海港工程结构设计。

### 1 PIANC 的计算方法

#### 1.1 有效撞击能计算公式

船舶靠岸时的有效撞击能量可按下式计算：

$$E_{01} = 0.5Mv^2C_eC_mC_sC_c \quad (1)$$

式中： $E_{01}$ 为船舶靠岸时的有效撞击能量（kJ）； $M$ 为相应置信水平的满载排水量（t），通常取95%的置信水平； $v$ 为船舶靠岸法向速度（50%置信水平）； $C_m$ 为船舶附加质量系数； $C_e$ 为偏心系数； $C_s$ 为柔性系数； $C_c$ 为泊位形状系数。

##### 1) 偏心系数。

当碰撞点并非正对船舶质量中心时（图1），偏心系数  $C_e$  考虑了传递至护舷能量的减少，可按下式计算：

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

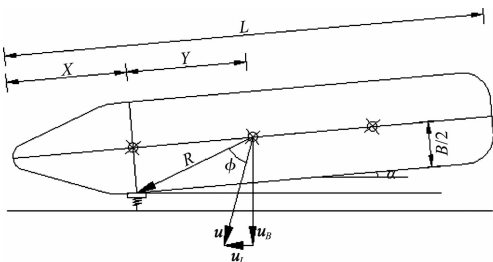
式中： $K$ 为船舶回转半径（m）； $R$ 为从质量中心至接触点的距离（m）； $\gamma$ 为接触点和质量中心的连线与船舶速度矢量的夹角；船舶回转半径  $K$  可按下式计算：

$$K = (0.19C_B + 0.11)L \quad (3)$$

式中： $R$ 为从质量中心至接触点的距离（m）； $\gamma$ 为接触点和质量中心的连线与船舶速度矢量的夹角； $C_B$ 为方形系数（m）：

$$C_B = \frac{M_D}{LBD\rho_{sw}} \quad (4)$$

式中： $M_D$ 为船舶满水量； $L$ 为船长； $B$ 为型宽； $D$ 为船舶吃水； $\rho_{sw}$ 为海水密度，取  $1.025 \text{ t/m}^3$ 。



注： $x + y = L/2$ （假设船舶质心为船舶几何中心点）。

图1 靠泊示意

若没有船型相关资料，PIANC 给出各种船型的方形系数（表1）。

表1 方形系数

船型	方形系数
集装箱船	0.6 ~ 0.8
散货船	0.72 ~ 0.85
油船	0.85
轮渡	0.55 ~ 0.65
滚装船	0.7 ~ 0.8

式(2)中  $R$  可按下述方法计算：

$$R = \sqrt{y^2 + \left(\frac{B}{2}\right)^2} \quad (5)$$

若  $\gamma = 90^\circ$ ，上式可简化为：

$$C_e = \frac{K^2}{K^2 + R^2} \quad (6)$$

若  $\gamma = 0^\circ$ ，则  $C_e = 1$ ，而这种特殊情况，也就是船舶丁靠的靠泊工况。经计算，当  $x = L/4$ ， $C_e = 0.4 \sim 0.6$ ； $x = L/3$ ， $C_e = 0.6 \sim 0.8$ ； $x = L/2$ ， $C_e = 1$ 。

##### 2) 柔性系数。

柔性系数考虑了船体吸收部分碰撞能量，PIANC建议采用以下数值：对柔性护舷及小船， $C_s$ 取值通常为1.0；对硬性护舷，则为0.9~1.0。

对柔性护舷及硬性护舷的定义，在BS 6349规范<sup>[3]</sup>中有相应建议：硬性护舷是指护舷在受船舶碰撞时的变位，设计值小于0.15 m；在受同样的碰撞情况下，柔性护舷的变位将大于0.15 m。

##### 3) 泊位形状系数。

泊位形状系数考虑了船舶的部分能量由船体与岸壁之间的水垫的缓冲作用所吸收。该数值受以下因素影响：码头结构的类型、龙骨下富余深度、靠泊速度及角度、护舷类型以及船型。通常，对于透空式高桩码头船舶速度慢或者富余水深大的情形，船体及护舷间的水体更容易消散，难以形成水垫效应，因此PIANC对形状系数的建议取值为：透空式高桩码头， $C_c = 1.0$ ；实体岸壁码头， $C_c = 0.8 \sim 1.0$ 。

#### 1.2 异常靠泊

PIANC 要求在计算船舶撞击能量时应考虑合理的异常靠泊系数，同时认为异常大的非正常靠泊在设计中是不取的，在此情形下应接受导致护舷受损的结果。在选择异常靠泊系数时，应衡量

以下几点因素:

1) 护舷损坏对泊位运营的影响。  
 2) 靠泊频率。通常对于业务繁忙的港口, 高频率的靠泊作业出现异常靠泊的概率更大, 因此需考虑一个更高的安全系数。

3) 设计靠泊速度。如果一个泊位的设计靠泊速度低于 0.1 m/s 的要求, 船员在实际操船时由于操纵水平的差异极易导致靠船速度大于设计要求的速度, 这同样属于异常靠泊。异常靠泊系数可考虑取值范围为 1.1 ~ 2.0, PIANC 同时也建议, 如果设计靠泊速度取值置信度能达到 95% 以上, 则异常靠泊系数可取值为 1.0。

4) 靠泊船型的范围。当泊位靠泊船型范围较大, 若主要使用船型为小船, 大船偶尔停靠, 异常靠泊系数可取小值; 相反, 若主要使用船型为大船, 小船偶尔停靠, 异常靠泊系数则取大值更合适。

值得注意的是, 任何情形下异常靠泊系数不应考虑得过大而导致使用的护舷反力过大, 从而非常不利于小船靠泊。对于异常靠泊系数具体取值, PIANC 给出了相应船型的建议值 (表 2)。

表 2 异常靠泊系数取值

船型	船的大小	异常靠泊系数
油船和散货船	最大	1.25
	最小	1.75
集装箱船	最大	1.25
	最小	1.75
件杂货船		1.75
轮渡和滚装船		≥2.0
拖轮和工作船等		2.0

1.3 系泊船舶在波浪作用下的撞击能量

PIANC 中关于系泊船舶在波浪作用下的撞击能量没有明确的计算公式, 但要求对重要的港口进行数模研究或模型试验以确定系泊船舶运动量及撞击能量。

2 对比分析

2.1 公式对比

PIANC 及中国标准的撞击能计算公式对比见表 3。对于在波浪作用下产生的撞击能, 中国规范的计算公式适用范围非常窄, 总体建议与 PIANC 基本一致, 即建议进行数模或物模研究。因此, 着重针对船舶靠岸时的有效撞击能计算公式进行对比分析。

表 3 PIANC 及中国标准的撞击能计算

规范	靠泊时有效撞击能	波浪作用下产生的撞击能	异常靠泊系数
PIANC	$E_{01} = 0.5Mv^2 C_e C_m C_s C_c$	建议进行数模或物模研究	1.1 ~ 2.0
中国标准	$E_{02} = 0.5\rho Mv_n^2$ , $\rho$ 为有效动能系数, 取 0.7~0.8	1) 对岸壁码头或横浪周期不大于 6 s 的墩式码头, 无试验资料时 $E_{w0} = 0.5kC_m Mv_B^2$ 2) 对结构安全等级为 2 级且停靠船舶为 10 万吨级及其以上的码头, 宜通过数学模型计算 3) 对结构安全等级为 1 级的海港码头, 应通过数学模型计算或物理模型试验确定	无 (即 1.0)

根据表 3 中两种规范的计算公式, 若假定靠泊速度取值相同, 可得到:  $E_{01}/E_{02} = C_e C_m C_s C_c / \rho$ 。而根据本文第 1 节所作介绍, 柔性系数和泊位形状系数影响最小, 可考虑  $C_s = 1, C_c = 1$ ; 对于偏心系数, 若考虑其平均值  $C_e = 0.7 \sim 0.8$ , 此时  $E_{01}/E_{02} = C_m$ , 即在正常靠泊的工况下, 中外规范对船舶撞击能计算的差

异大小的关键取决于船舶附加质量系数的取值。

2.2 关键参数取值对比

1) 附加质量系数  $C_m$ 。

关于附加质量系数的计算, 国内外学者做了很多相关研究, PIANC 中列举了 3 种方法, 中国规范也有相应计算公式 (表 4)。

表 4 附加质量系数计算对比

规范	船舶靠岸时有效撞击能	波浪作用下产生的撞击能	备注
	Vasco costa (1964)	$C_m = 1 + \frac{2D}{B}$	此式计算结果为 1.3 ~ 1.8
PIANC	Shigera Ueda (1981)	$C_m = 1 + \frac{\pi D}{2C_B B}$	当 $C_B = 0.785$ 时, 其公式与 Vasco costa 公式完全一致
		$K_c/D \leq 0.1, C_m = 1.8$	
	建议取值	$K_c/D \geq 0.5, C_m = 1.5$ $0.5 > K_c/D > 0.1$ , 插值取值	取值 1.5 ~ 1.8
中国标准		$C_m = \alpha_m + \beta_m \cdot \frac{D^2}{Bd}$	$\alpha_m$ 、 $\beta_m$ 为码头结构形式影响系数, 对于墩式码头, $\alpha_m = 1.04$ 、 $\beta_m = 0.9$ ; 对于岸壁式码头, $\alpha_m = 1.00$ 、 $\beta_m = 1.69$ , $d$ 为码头前水深

基于中国标准计算的附加质量系数, 郭士勇等<sup>[4]</sup>统计了常见船型的计算结果, 其值在 1.1 ~ 1.7。从以上对比分析可看出, 附加质量系数基于中国标准及 PIANC 标准的计算结果范围较为接近, 总的范围为 1.1 ~ 1.8, 若考虑其均值为 1.45, 即可认为在正常靠泊工况下, PIANC 的有效撞击能计算结果约为中国标准的 1.45 倍。

2) 靠泊速度。

除计算公式的差异以外, 中国标准及 PIANC 对船舶法向靠船速度的规定同样存在一定差异, 而该参数是对船舶撞击能量影响最大的一个参数, 该参数的影响因素很多, 包括风、浪、流、靠泊方法、船型及尺寸、靠泊角度、人为因素等。中国标准中该参数的取值仍沿用重庆交通大学对海轮靠岸速度进行的系统观测和分析研究, 其中海船靠泊速度可按表 5 取值。

表 5 中国标准海船靠泊速度

海船满载 排水量 $W/万 t$	法向靠岸速度 $v/(m \cdot s^{-1})$	
	有掩护	无掩护
$W \leq 0.1$	0.20 ~ 0.25	0.25 ~ 0.45
$0.1 < W \leq 0.5$	0.15 ~ 0.20	0.20 ~ 0.40
$0.5 < W \leq 1$	0.12 ~ 0.17	0.17 ~ 0.35
$1 < W \leq 3$	0.10 ~ 0.15	0.15 ~ 0.30
$3 < W \leq 5$	0.10 ~ 0.12	0.12 ~ 0.25
$5 < W \leq 10$	0.08 ~ 0.10	0.10 ~ 0.20
$W > 10$	0.06 ~ 0.08	0.08 ~ 0.15

PIANC 则建议了 2 种速度取值方法。第 1 种方法为 Brolsma 等 1977 推荐的取值曲线 (图 2)。该

曲线对应了 5 种靠泊条件: ①有掩护, 很好的靠泊条件; ②有掩护, 困难的靠泊条件; ③无掩护, 容易的靠泊条件; ④无掩护, 很好的靠泊条件; ⑤无掩护, 困难的航行条件。

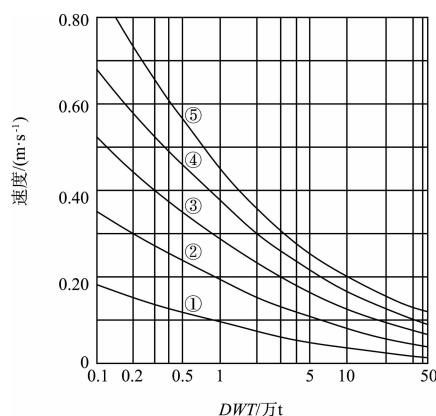


图 2 取值曲线

PIANC 认为该方法中④和⑤条件下速度取值过大, 在计算时应谨慎采用。为此, PIANC 同时引用了 Spanish Rom Standard 里面 50% 置信水平的靠泊速度建议值, 见表 6。

表 6 Spanish Rom Standard 建议值

满载排水量 $W/万 t$	有利的靠泊条件	中等靠泊条件	不利靠泊条件
$> 1$	0.20 ~ 0.16	0.45 ~ 0.30	0.6 ~ 0.40
$1 \sim < 5$	0.12 ~ 0.08	0.3 ~ 0.15	0.45 ~ 0.22
$5 \sim < 10$	0.08	0.15	0.2
$> 10$	0.08	0.15	0.2

从以上 2 种标准的速度建议值可看出, 在有利的靠泊条件下, 中国标准取值范围为 0.06 ~ 0.25 m/s, PIANC 取值范围为 0.08 ~ 0.20 m/s, 两

者较为接近,而在不利的靠泊条件下,PIANC中速度建议值较中国标准偏大,最大值超过0.6 m/s。

### 3 工程实例

为使两种标准的计算差异更为直观,以印尼某海港工程的船舶靠岸时的有效撞击能计算为例,进行了结果对比。

设计船型:散货船3万DWT,186 m×27.9 m×14.9 m×10.9 m(船长×船宽×型深×满载吃水);满载排水量3.86万t;靠泊速度:港区有防波堤掩护,并有拖轮辅助靠泊,条件较好,综合考虑中国标准及PIANC,取值0.11 m/s。计算结果见表7。

表7 撞击能计算结果

规范	正常靠泊		异常靠泊	
	参数	撞击能/kJ	参数	撞击能/kJ
PIANC	$C_s = 1$	266	$F_s = 1.75$	465
	$C_c = 1$			
	$C_c = 0.67$			
	$C_m = 1.7$			
中国标准	$\rho = 0.75$	175	无	175
比值		1.52		2.66

### 4 结语

1) 对于船舶靠岸时的有效撞击能,PIANC考虑的因素更为全面,包括柔性系数、泊位形状系数、偏心系数以及附加质量系数等,此外,在护舷最终选型时,还需考虑异常靠泊系数。而中国

标准仅考虑了有效动能系数,因此,PIANC的撞击能计算更为安全保守。

2) 对于船舶靠岸时的有效撞击能,在正常靠泊时,PIANC的计算结果与中国标准相比,其关键差异取决于附加质量系数 $C_m$ ,两种计算方法的结果比值接近 $C_m$ 的取值。考虑异常靠泊时,则接近 $C_m F_s$ 倍。

3) 对于波浪作用下导致船舶发生运动产生的船舶撞击能,中国标准及PIANC均建议采用数模或物模试验研究进行确定。

4) 两种标准中对于靠泊速度的建议值存在一定差异,在有利的靠泊条件下,中国标准取值范围为0.06~0.25 m/s,PIANC取值范围为0.08~0.20 m/s,两者较为接近;而在不利的靠泊条件下,PIANC中速度建议值较中国标准偏大,最大值超过0.6 m/s。靠泊速度的取值对撞击能计算结果影响最大,因此,在进行国外工程技术合同谈判时,应特别留意对该参数的取值规定。

### 参考文献:

- [1] JTS 144-1—2010 港口工程荷载规范[S].
- [2] International navigation association guidelines for the design of fenders systems: 2002[S].
- [3] BS: 6349-4: Design of fendering and mooring systems[S].
- [4] 郭士勇,腾斌,刘昌凤. 横浪作用下系泊船舶撞击能量的分析和研究[J]. 水运工程, 2010(12): 89-92.

(本文编辑 武亚庆)

## · 消 息 ·

### 二航局承建的湘潭芙蓉大桥通车

3月31日,二航局承建的湘潭芙蓉大桥及北引线工程通车。

该项目由采用BT模式投资建设,总投资6.6亿元。项目全线长3304 m,其中桥梁部分长1607.04 m,为连续刚构混凝土桥,双向6车道,桥面总宽27 m,设计时速60 km。

该项目是长株潭城市群交通的标志性工程,建成后,将为长株潭城市群新增一条快速通道,成为长株潭融城路网的重要组成部分,使株洲、湘潭两市人流物流联系更加便利。

(来源:二航局)