



# 中外规范重力式码头结构计算方法对比

陈志强, 骆俊彬

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290)

**摘要:** 针对沉箱重力式码头结构采用国内外不同标准计算, 进行各规范计算方法的对比研究。采用概率理论为基础的极限状态设计方法, 对某新建沉箱重力式码头结构进行计算, 重点对比中外规范对不同荷载分项系数以及工况组合差异, 分析不同规范工况组合下沉箱重力式码头结构抗倾抗滑稳定性的差异。得出在进行抗滑稳定验算时, 美标和欧标组合  $M_2$  的设计偏安全, 中标介于欧标组合  $M_2$  和  $M_1$  之间, 日标的安全系数偏小; 在抗倾稳定验算时, 欧标对比中标相对偏安全, 美标和日标的综合安全系数高于欧标和中标。本文对比研究可以为国内外沉箱重力式码头工程的设计提供相关的借鉴和参考。

**关键词:** 重力式结构; 中外规范; 分项系数; 荷载组合

中图分类号: U656.1+11

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)08-0164-06

## Comparison of calculation methods for gravity wharf structures in Chinese and foreign codes

CHEN Zhiqiang, LUO Junbin

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

**Abstract:** A comparative study is conducted on the calculation methods of different domestic and foreign standards for the structure of caisson gravity wharfs using different specifications. The limit state design method based on probability theory is adopted to calculate the structure of a newly built caisson gravity wharf. The focus is on comparing the differences in load sub coefficients and working condition combinations between Chinese and foreign standards. The differences in anti tilting and anti sliding stability of the caisson gravity wharf structure under different working condition combinations are analyzed. When conducting anti slip stability verification, the design of the American and European standard combination  $M_2$  is relatively safe, with the Chinese standard being between the European standard combination  $M_2$  and  $M_1$ , and the safety factor in the Japanese standard being relatively small. In the calculation of anti tilt stability, the European standard is relatively safer compared to the Chinese standard, and the comprehensive safety factor of the American and Japanese standards is higher than that of the European and Chinese standards. This comparative study can provide relevant reference and guidance for the design of caisson gravity wharfs both domestically and internationally.

**Keywords:** gravity structure; Chinese and foreign code; partial factor; load combination

重力式码头作为水运工程应用最广泛的三大码头结构之一, 主要依靠码头结构本身和填料的重力、并要求地基具有相应的强度, 以保证建筑物的稳定性, 它们具有整体性好、结构坚固耐久、

维修量小等优点<sup>[1]</sup>。随着“一带一路”倡议的拓展, 我国水运工程建设单位逐步向海外发展, 针对海外码头工程因选用不同国家规范, 重力式码头结构的计算存在一定差异, 除了总结国内近些年的

收稿日期: 2024-03-20

作者简介: 陈志强 (1983—), 男, 硕士, 正高级工程师, 从事港口与航道工程设计工作。

重力式码头工程经验外, 还有必要了解国外港口工程建设标准和规范。本文对中、美、欧及日等规范中重力式码头结构计算方法进行分析, 并通过具体的工程案例对计算结果进行对比。

### 1 中国标准

重力式码头结构设计在国内参照 JTS 167—2018《码头结构设计规范》<sup>[2]</sup>, 主要以概率论为基础, 以分项系数表达的极限状态设计方法。码头结构按承载能力极限状态和正常使用极限状态进行设计, 其中承载能力极限状态设计需考虑作用的持久组合、短暂组合、地震组合。

承载能力极限状态设计表达式应满足下式要求:

$$\gamma_0 S_d \leq R_d \quad (1)$$

式中:  $\gamma_0$  为重要性系数,  $S_d$  为作用组合的效应设计值,  $R_d$  为抗力设计值。

在进行码头结构设计时采用的作用主要包括永久作用、可变作用和地震作用, 有特殊要求时可考虑偶然作用。对于重力式码头结构, 需要对不同水位、不同作用组合下的码头结构的稳定性、承载力、沉降和整体稳定性进行验算。

为了方便研究, 选择在考虑波浪作用, 堆载土压力为主导可变作用时的工况进行分析, 其中, 码头沿基床顶面的抗滑和抗倾稳定性验算可分别按下式计算:

$$\gamma_0 (\gamma_E E_H + \gamma_{PW} P_W + \gamma_E E_{qH} + \psi \gamma_P P_B) \leq \frac{1}{r_d} (\gamma_G G + \gamma_E E_V + \gamma_E E_{qV} + \psi \gamma_U P_{BU}) f \quad (2)$$

$$\gamma_0 (\gamma_E M_{EH} + \gamma_{PW} M_{PW} + \gamma_E M_{EqH} + \psi \gamma_P M_{PB}) \leq \frac{1}{r_d} (\gamma_G M_G + \gamma_E M_{EV} + \gamma_E M_{EqV} + \psi \gamma_U M_{PBU}) \quad (3)$$

式中:  $\gamma_0$  为重要性系数,  $\gamma_d$  为结构调整系数,  $\gamma_E$  为土压力分项系数,  $\gamma_G$  为自重力分项系数,  $\gamma_{PW}$  为剩余水压力分项系数,  $\gamma_P$  为波浪水平力分项系数,  $\gamma_U$  为波浪浮托力分项系数,  $E_H$ 、 $E_V$  分别为计算面以上永久作用总主动土压力的水平分

力标准值和竖向分力标准值,  $E_{qH}$ 、 $E_{qV}$  分别为计算面以上可变作用总主动土压力的水平分力标准值和竖向分力标准值,  $P_W$  为作用在计算面以上的剩余水压力的标准值,  $P_B$  为波谷作用时计算面以上水平波浪力的标准值,  $P_{BU}$  为波谷作用时作用在计算底面上波浪浮托力的标准值,  $f$  为沿计算面的摩擦力系数设计值,  $M_{EH}$  为永久作用总土压力的水平分力标准值对计算面前趾的倾覆力矩,  $M_{EV}$  为永久作用总土压力的竖向分力标准值对计算面前趾的稳定力矩,  $M_{EqH}$  为可变作用总土压力的水平分力标准值对计算面前趾的倾覆力矩,  $M_{EqV}$  为可变作用总土压力的竖向分力标准值对计算面前趾的稳定力矩,  $M_{PBU}$  为波谷作用时作用在计算底面上波浪浮托力的标准值对计算面前趾的稳定力矩,  $M_G$  为结构自重力标准值对计算面前趾的稳定力矩,  $M_{PW}$  为剩余水压力标准值对计算面前趾的倾覆力矩,  $M_{PB}$  为波谷作用时水平波浪力标准值对计算面前趾的倾覆力矩。

作用分项系数见表 1。

表 1 按中标荷载作用分项系数

荷载名称		分项系数	
永久作用	构件自重力、固定设备重力、填料重力	$\gamma_G$	1.20
	自重及回填料产生的水平和垂直土压力	$\gamma_E$	1.35
	剩余水压力	$\gamma_{PW}$	1.05
可变作用引起的水平和垂直土压力		$\gamma_E$	1.35
可变作用	构件计算时散货荷载	$\gamma_Q$	1.50
	构件计算时起重机械荷载		
	构件计算时汽车荷载	$\gamma_Q$	1.40
	构件计算时集装箱荷载		
	构件计算时运输机械荷载		
	构件计算时风荷载	$\gamma_P$	1.30
	构件计算时人群荷载		
	稳定验算时的波浪力及其浮托力	$\gamma_U$	1.30
	构件计算时的波浪力及其浮托力	$\gamma_P$	
	冰荷载	$\gamma_U$	
	水流力	$\gamma_I$	1.50
	船舶撞击力	$\gamma_C$	
船舶系缆力	$\gamma_{PZ}$		
船舶挤靠力	$\gamma_{PR}$	1.40	
	$\gamma_{PJ}$		

## 2 欧洲标准

欧洲标准是由欧洲标准化委员会制定的一系列关于建筑设计、土木工程和建筑产品的标准,其体系由 10 种结构设计的欧洲标准构成。欧洲码头结构计算参考规范 EN<sup>[3]</sup>和标准 BS 6349<sup>[4-5]</sup>,采用承载力极限状态进行设计。

重力式码头结构沿基床顶面的抗滑稳定性在 GEO 极限状态下,采用分项系数法进行验算。对极限平衡方程中的 3 个主要参数  $A$ (荷载产生的作用)、 $M$ (土体强度参数)、 $R$ (抗力)采取不同的分项系数组合。组合 1 是采用荷载作用乘以分项系

数,土体强度参数采用标准值进行设计;组合 2 是对于土体强度参数偏于不利的情况,永久作用采用标准值,可变作用乘以略小的分项系数,土体强度参数除以分项系数。

组合 1:  $A_1+M_1+R_1$ , 组合 2:  $A_2+M_2+R_1$ , 其中,  $A_1$ 、 $A_2$  为作用分项系数,  $A_1$  按 GEO(Set B)选取,  $A_2$  按 GEO(Set C)选取,见表 2。  $M_1$ 、 $M_2$  为土体指标分项系数,按 GEO 选取,见表 3。  $R_1$  为抗滑稳定系数( $\gamma_R$ ),取 1.00。效应组合按照欧洲标准的相关规定,本案例的持久组合工况与中国标准相同。

表 2 按欧标荷载分项系数

荷载			作用分项系数 $\gamma_F$			组合系数 $\psi_0$
			EQU(Set A)	GEO(Set B)	GEO(Set C)	
永久荷载	不利	自重力 $G$	1.05	1.35	1.00	-
	有利		0.95	0.95	1.00	-
可变荷载	持久和短暂	活载 $q$	1.50	1.50	1.30	0.70
		潮差或地下水 $P_w$	1.50	1.50	1.30	0.60
		波浪荷载 $P_B$	1.50	1.50	1.30	0.60
		门机 $P_{sp}$	1.35	1.35	1.15	0.75
		系缆力 $P_r$	1.50	1.50	1.30	0.70

表 3 按欧标土体指标分项系数

工况	抗剪角(适用于 $\tan\phi'$ ) $\gamma_{\phi'}$	有效黏聚力 $\gamma_{c'}$	不排水抗剪强度 $\gamma_{cu}$	无侧限强度 $\gamma_{qu}$	质量密度 $\gamma_\gamma$
EQU	1.25	1.25	1.4	1.4	1.0
GEO	$M_1$	1.00	1.00	1.0	1.0
	$M_2$	1.25	1.25	1.4	1.4

抗滑稳定性验算应满足:

$$H_d \leq R_d + R_{psd} \quad (4)$$

对于结构倾覆验算,欧标未给出具体公式,设计时应考虑静态平衡或结构或地面整体位移(EQU)的极限状态。作用分项系数按 EQU(Set A)选取,见表 3,土体指标分项系数按 EQU 选取,  $R_1$  取 1.00。

抗倾覆稳定性验算应满足:

$$E_{dst,d} \leq E_{stb,d} + T_d \quad (5)$$

式中:  $H_d$  为地基上的任何主动土压力,  $R_d$  为抗力作用设计值,  $R_{psd}$  为土压力对基础侧阻力的设计值,  $E_{dst,d}$  为倾覆力矩,  $E_{stb,d}$  为稳定力矩设计值,  $T_d$  为剪切阻力。

## 3 美国标准

美国规范体系主要由规范(code)、标准(consensus standard)、源文档(resource document) 3 部分构成,其内容形成一定的层次关系,其中规范的级别最高、认可度最高、内容也最少。美国码头结构设计主要参考美国土木工程协会(ASCE)<sup>[6]</sup>和 IBC(international building code)<sup>[7]</sup>制定的相关标准,重力式码头抗倾、抗滑稳定验算的土体指标通常采用标准值计算,再通过满足一定的安全系数进行评估。

其中,重力式码头结构沿基床顶面的抗滑稳定性验算方法为:

$$F_R/F_S > 1.5 \quad (6)$$

式中:  $F_R$  为抵抗力, 是竖向合力与摩擦阻力的乘积, 摩擦阻力  $f = \tan\delta$ ;  $F_S$  为倾覆力, 是水平合力。

作用效应组合应满足:

$$(G + E_V + E_{qV} + P_{BU})f / (E_H + E_{qH} + P_W + P_B) > 1.5 \quad (7)$$

式中:  $G$  为作用计算面上的结构自重力的标准值。

重力式码头结构沿计算面前趾的抗倾稳定性验算方法:

$$M_R / M_O > 2.0 \quad (8)$$

式中:  $M_R$  为全部抵抗力矩标准值,  $M_O$  为全部倾覆力矩标准值。

作用效应组合应满足:

$$(M_G + M_{EV} + M_{EqV} + M_{PBU}) / (M_{EH} + M_{PW} + M_{EqH} + M_{PB}) > 2.0 \quad (9)$$

#### 4 日本标准

日本重力式码头结构设计参照日本标准 OCIDI<sup>[8]</sup> 中的极限状态进行设计。OCIDI 认为重力式岸壁的稳定性靠墙体的质量来维持, 失稳模式包括两种: 一种是在永久作用状况下, 滑动失稳风险为自重为主导荷载小于等于极限水平; 另一种是墙身滑动、倾覆、地基承载力失效风险为在永久作用状况下, 土压力为主导荷载小于等于极限水平。因此, 一般来说, 重力式码头抗倾、抗滑稳定性验算仅考虑永久状况和地震状况下可变作用的

情况。

日本标准中重力式码头沿基床顶面的抗滑稳定性验算表达式为:

$$f_d(W_d + P_{V_d} - P_{B_d}) \geq \gamma_a(P_{H_d} + P_{W_d} + P_{d_{wd}} + P_{F_d}) \quad (10)$$

日本标准中重力式码头沿计算面前趾的抗倾稳定性验算表达式为:

$$(aW_d + cP_{V_d} - bP_{B_d}) \geq \gamma_a(dP_{H_d} + eP_{W_d} + hP_{d_{wd}} + iP_{F_d}) \quad (11)$$

式中:  $f_d$  为码头结构底面与基床之间的摩擦系数,  $W_d$  为自重合力,  $P_{V_d}$  为码头竖向作用力,  $P_{B_d}$  为浮托力,  $P_{H_d}$  为码头水平作用力,  $P_{W_d}$  为剩余水压力,  $P_{d_{wd}}$  为动水压力(地震作用下),  $P_{F_d}$  为惯性力(地震作用下),  $\gamma_a$  为结构分项系数,  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $e$ 、 $h$ 、 $i$  为荷载作用力臂。

#### 5 工程案例

##### 5.1 工程概况

某新建重力式码头为 1 座 5 万吨级的散货码头, 结构形式为重力式沉箱。码头面顶高程为 7.2 m, 码头前沿港池底高程为 -14.3 m。沉箱底宽 14.35 m, 沿泊位长度方向长 24.96 m、高 17.6 m, 沉箱前壁厚 35 cm、后壁厚 30 cm、侧壁厚 30 cm、纵隔板厚 25 cm、横隔板厚 25 cm、底板厚 60 cm, 单个沉箱质量 2 750 t。码头结构断面见图 1。

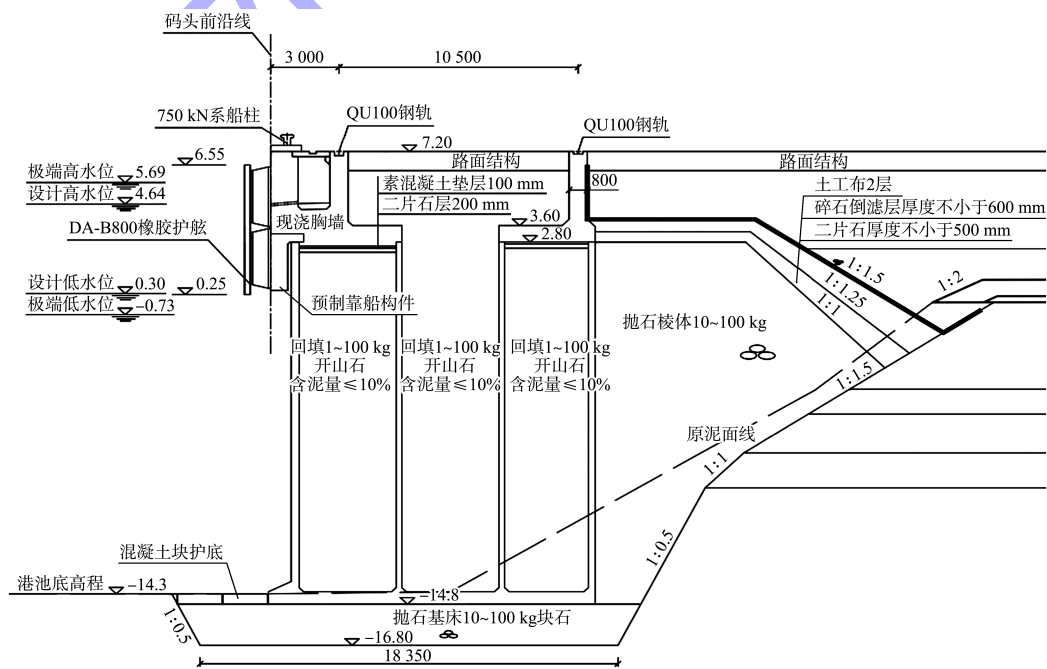


图 1 某重力式码头结构 (尺寸: mm; 高程: m)

### 5.2 设计条件

堆货荷载：码头 26.3 m 范围内按 40 kPa 考虑。  
材料参数：墙后填土的水上密度 1.80 t/m<sup>3</sup>、饱和密度 2.10 t/m<sup>3</sup>、摩擦角 32°；抛石棱体的水上密度 1.80 t/m<sup>3</sup>、饱和密度 2.10 t/m<sup>3</sup>、摩擦角 45°；强风化岩的饱和密度 1.85 t/m<sup>3</sup>、摩擦角 28°、黏聚力 40 kPa。

### 5.3 计算结果对比

为便于比较重力式码头的抗倾、抗滑稳定计算结果，各国标准均针对考虑波浪作用、堆载土压力为主导可变作用时的工况进行分析，计算工况和结果见表 4~6。

表 4 设计工况组合

持久组合	承载能力极限状态
LC <sub>1</sub>	极端高水位(永久作用)+堆货(主导)+波谷作用(非主导)
LC <sub>2</sub>	设计高水位(永久作用)+堆货(主导)+波谷作用(非主导)
LC <sub>3</sub>	设计低水位(永久作用)+堆货(主导)+波谷作用(非主导)
LC <sub>4</sub>	极端低水位(永久作用)+堆货(主导)+波谷作用(非主导)

表 5 抗滑稳定性计算结果对比

组合	标准	$S_d(F_S)/$ (kN·m <sup>-1</sup> )	$R_d(F_R)/$ (kN·m <sup>-1</sup> )	$R_d/S_d$ ( $F_R/F_S$ )	
LC <sub>1</sub>	中标	1 378.6	1 934.2	1.40	
	欧标	GEO:M <sub>1</sub>	1 384.5	1 762.1	1.27
		GEO:M <sub>2</sub>	1 286.3	1 932.4	1.50
	美标	1 065.2	1 867.9	1.75	
	日标	893.6	1 074.7	1.20	
LC <sub>2</sub>	中标	1 479.0	2 175.9	1.47	
	欧标	GEO:M <sub>1</sub>	1 423.6	1 896.7	1.33
		GEO:M <sub>2</sub>	1 357.4	2 114.1	1.56
	美标	1 087.4	1 945.3	1.79	
	日标	1 053.2	1 164.7	1.11	
LC <sub>3</sub>	中标	1 538.6	2 243.4	1.46	
	欧标	GEO:M <sub>1</sub>	1 695.3	2 132.2	1.26
		GEO:M <sub>2</sub>	1 576.3	2 259.6	1.43
	美标	1 368.7	2 198.4	1.61	
	日标	1 174.8	1 301.4	1.11	
LC <sub>4</sub>	中标	1 598.2	2 289.7	1.43	
	欧标	GEO:M <sub>1</sub>	1 806.3	2 134.5	1.18
		GEO:M <sub>2</sub>	1 581.5	2 335.7	1.48
	美标	1 324.2	2 258.4	1.71	
	日标	1 321.3	1 375.2	1.04	

表 6 抗倾稳定性计算结果对比

组合	项目	$S_d(M_O)/$ (kN·m·m <sup>-1</sup> )	$R_d(M_R)/$ (kN·m·m <sup>-1</sup> )	$R_d/S_d/$ ( $M_R/M_O$ )
LC <sub>1</sub>	中标	10 795.2	21 435.3	1.99
	欧标 EQU	12 456.3	26 745.7	2.15
	美标	9 123.5	25 963.3	2.85
	日标	7 477.5	24 763.9	3.31
LC <sub>2</sub>	中标	11 623.8	22 578.6	1.94
	欧标 EQU	12 698.6	28 178.4	2.22
	美标	9 345.9	27 643.5	2.96
	日标	8 198.7	26 325.4	3.21
LC <sub>3</sub>	中标	13 234.5	24 796.6	1.87
	欧标 EQU	13 643.8	30 098.6	2.21
	美标	10 387.8	31 278.1	3.01
	日标	10 156.3	28 763.7	2.83
LC <sub>4</sub>	中标	13 075.3	25 449.8	1.95
	欧标 EQU	13 886.5	31 462.1	2.27
	美标	10 649.2	31 174.5	2.93
	日标	10 645.1	30 105.2	2.83

通过上述计算，可以看出：

1) 根据各国标准抗滑稳定性验算结果，中标和欧标的荷载效应设计值和抗力设计值较为接近。中标计算得出的最小安全系数为 1.40，介于欧标 M<sub>1</sub> 的 1.18 和 M<sub>2</sub> 的 1.56 之间；美标和日标的荷载效应设计值较为接近，均小于中标和欧标。但美标的抗力设计值大于日标，因此，美标计算得出的最小安全系数为 1.61，大于日标的 1.04。

2) 根据各国标准各工况组合抗倾稳定性验算结果，中标和欧标的荷载效应设计值比较接近，但欧标的抗力设计值略高于中标，因此，综合起来中标计算得出的最小安全系数为 1.87，小于欧标的 2.15；美标和日标计算得出的效应设计值比较接近，其中美标略大，抗力设计值也略大，两者计算得出的最小安全系数也较为接近，均大于中标和欧标计算得出的安全系数。

3) 根据各国设计标准的计算结果，同一控制工况条件下，各国计算得出的最小安全系数所对应的水位结论也不尽相同。因此，中标规定应计算不同水位下的组合情况，必要时应采用设计高水位与设计低水位之间的某不利水位进行结构计算，此规定合理、准确。

## 6 结语

1) 本工程标准均基于分项系数法进行重力式码头抗倾、抗滑稳定验算,中、欧、日标考虑主导可变荷载和非主导可变荷载,明确分项系数和组合系数,而美标中只采用荷载标准值,给予综合安全系数。欧标中采用两种组合进行抗滑稳定验算,其中组合  $M_2$  中考虑了土体的折减,这是一种偏于安全的设计考虑。

2) 综合来看,抗滑稳定验算中,美标和欧标组合  $M_2$  的设计偏安全,中标介于欧标的  $M_2$  和  $M_1$  之间,日标中的安全系数偏小;抗倾稳定验算中,欧标在 EQU 极限状态下进行抗倾覆稳定性验算,考虑了土体的折减,对比中标来说偏安全,而且美标和日标的综合安全系数高于欧标和中标,是趋于严格的设计。

3) 中、欧、美、日标各国规范中抗倾、抗滑稳定验算尽管在分项系数和综合系数上略有不同,但概念基本一致,结论也没有明显偏差。工程中具体采用何种标准进行验算,可根据项目实际要求进行选择,本文分析结果可为类似工程提供借鉴。

## 参考文献:

- [1] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 海港工程设计手册 [M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [2] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 码头结构设计规范: JST 167—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [3] European Committee For Standardization. Eurocode 7: Geotechnical design-Part1: General rules: BS EN 1997-1: 2004[S]. Brussels: Technical Committee CEN/TC250, 2004.
- [4] British Standard Institution. Maritime Works-Part2: Code of practice for the design of quay wall, jetties and dolphins: BS 6349-2: 2010[S]. London: BSI Standards Limited, 2010.
- [5] British Standard Institution. Maritime Works-Part1-2: General - Code of practice for assessment of actions: BS 6349-1-2: 2016[S]. London: BSI Standards Limited, 2016.
- [6] American Society of Civil Engineers (ASCE). Design of marine facilities[S]. Reston: ASCE PRESS, 2016.
- [7] ICC. International Building Code [S]. Washington D C: International Code Council, 2018.
- [8] Overseas Coastal Area Development Institute of Japan (OCDI). Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan[S]. Japan: The overseas Coastal Area Development institute of Japan, 2009.

(本文编辑 赵娟)

(上接第 163 页)

- [3] 王立志,王钰. 如何实现输油管道设计中泵的优化组合[J]. 石油工程建设, 2010, 36(6): 26-29.
- [4] 王浩,王长保,王璐. 输油管道变频泵和工频泵的比选[J]. 石油和化工设备, 2013, 16(4)77-79.
- [5] 林宝辉,潘盼,孙宇,等. 输油管道超压保护系统设置原则[J]. 石油天然气学报, 2014, 36(8): 211-216.
- [6] 靳春义. 密闭输送工艺的安全联锁保护系统[J]. 石油化工自动化, 2011, 47(5): 39-42.
- [7] 李蔚鹏. 成品油输送管道水击计算分析以及措施[J]. 中国化工贸易, 2023, 15(2): 109-111.
- [8] 王涛. 长引桥码头加压泵设置及管道水击分析[J]. 水运工程, 2013(5): 84-87.
- [9] 中国石油天然气集团公司. 输油管道工程设计规范: GB 50253—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [10] 杨筱蘅,张国忠. 输油管道设计与管理[M]. 山东东营: 石油大学出版社, 2003: 29.
- [11] 马驰. 串联泵输油工艺在华锦集团输油管道上的应用[J]. 当代化工, 2012, 41(9): 905-907.

(本文编辑 赵娟)