

# 海外散货码头多点系泊结构设计

吴哲丰,张馨竹,赵颖慧

(中交水运规划设计院有限公司,北京100007)

摘要:海外干散货码头常设有多点系泊结构,船舶等待装船时系泊使用,其适应性强,有较强的成本优势,在国内采 用尚不广泛。总结吉布提盐业码头项目和几内亚铝业 GAC 码头项目中多点系泊结构的设计经验,研究多点系泊结构的荷载、 工况组合以及锚块、锚链、浮筒和快速脱缆钩等设计方法,并结合 optimoor 软件对理论计算结果进行了数值分析验证。 关键词:干散货码头;多点系泊;锚块;锚链;浮筒;optimoor 软件

中图分类号: U 656.1<sup>+</sup>39

文献标志码:A

文章编号: 1002-4972(2016)S1-0039-06

## Design of multi-point mooring system in overseas dry bulk cargo terminal

WU Zhe-feng, ZHANG Xin-zhu, ZHAO Ying-hui

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

**Abstract:** Overseas dry bulk cargo terminals set up the multi-point mooring system for a waiting ship to berth. It's adaptable and cost advantaged which is not widely used domestically. The paper mainly introduces the design experience of the multi-point mooring system in Salt Export Terminal Project and Guinea Bauxite Export Project, such as the forces on mooring system, load combination, the calculation of the anchor, chain, buoy and quick release mooring hook. The results are verified by numerical analysis using optimoor software.

Keywords: dry bulk cargo terminal; multi-point mooring; anchor; chain; buoy; optimoor software

# 1 吉布提盐业码头

## 1.1 项目概况

吉布提盐业码头位于吉布提 Ghoubbet 湾底, 设计年盐矿物出口量为 500 万 t。码头为墩式蝶形 布置,总长 447 m,顶面高程为 4.5 m,码头前沿 水深-16.5 m。到港船型最大为 10 万吨级散货船。

吉布提盐业码头由于港区地处偏僻,拖轮配置 困难,需要设置双点系泊设施辅助靠离泊使用;另 一方面,由于码头配置的卸船机为固定式卸船机, 因此需要船只频繁地进行移船操作,在码头移船操 作时,也需要利用双点系泊设施辅助靠离泊。 1.2 多点系泊系统设置

1.2.1 设计代表船型

设计代表船型参数见表1。

表1 设计代表船型参数

船舶吨级		3只由			
/万 t	总长 L	型宽 B	型深 $H$	满载吃水 T	近明
10	255	39.2	21.1	15.2	设计船型
8	239	36.2	19.6	14.2	兼顾船型
6	220	33.0	18.0	13.1	兼顾船型
4	195	29.2	15.9	11.5	兼顾船型

注:根据 PIANC-WG33 标准受风面积按 75% 特征值选取,空载受风面积取为 4 460 m<sup>2</sup>,满载受风面积取为 2 460 m<sup>2</sup>。

收稿日期: 2016-06-16

作者简介:吴哲丰 (1978—),男,高级工程师,从事港口水工结构设计。

# 1.2.2 自然条件

风速条件见表 2, 波浪条件见表 3。工程区域 流速小于 0.1 m/s, 流向大致与岸线平行。

表 2 风速条件

壬卯期/	风速 U <sub>10</sub> /(m/s)			
重现别/a	风向 N-E	风向W		
5	15	18		
10	16	20		
50	20	24		
100	21	26		
N 15661111				

注: 浮筒设计主要考虑 N-E 方向的风, 与靠、离泊方向基本 平行。

重现期/a	有效波高 $H_s/m$	谱峰周期 $T_p/s$
1	0.7	3.6
10	1.1	4.2
100	1.5	4.8

# 1.2.3 多点系泊系统布置

为了辅助散货船靠、离泊,在码头的海侧设 置了一套双点系泊系统,其组件如下:2个圆筒形 浮筒,最小净浮力=230 kN;2根约310 m 的主锚 链连接浮筒与锚块,最小破断力1960 kN;2组锚 块,每组锚块由5个混凝土沉块组成,沉块尺寸 为3.5 m×3.5 m×2.5 m。

多点系泊系统平面布置见图 1,浮筒、锚链、 锚块的断面见图 2。

1.3 多点系泊系统设计

1.3.1 设计工况

双点系泊系统主要是为船只移船作业时频繁 靠、离泊时使用,针对船舶靠、离泊,以及卸船 机工作、非工作的不同情况,对多点系泊系统考 虑了3个设计工况(表4)。

混凝土锚块



图 2 浮筒、锚链、锚块断面 (单位: m)

表 4 设计工况对比

设计工况	风向	风速/(m/s)	流向	流速/(m/s)	说明
工况1(双锚)	N-E	15	垂直于码头	0.20	2个浮筒工作,船舶处于离泊状态
工况 2(单锚)	N-E	15	垂直于码头	0.20	1 根锚链破断,单个浮筒工作,船舶处于离泊状态
工况3(极端,非工作)	N-E	21	平行于码头	0.10	2个浮筒工作,船舶处于系泊状态

注: 工况 1、工况 2 的风速考虑 5 a 重现期,船舶移船时垂直于码头的速度为 0.2 m/s,相当于流速 0.2 m/s。工况 3 的风速考虑 100 a 重 现期,船舶在系泊状态,流速为真实流速。

1.3.2 船舶力

根据3种工况,船舶荷载依据规范[1]计算, 分别计算设计船型和兼顾船型的多个载量后,得 到的3个工况的船舶荷载以及在单个浮筒上所分 配的水平力设计值(表5)。

表 5 设计工况下浮筒水平受力值

工况	船舶荷载合力/kN	浮筒分配系数	浮筒所受水平力/kN
1	656. 17	0.6	393. 70
2	656.17	1.0	656. 17
3	1 166. 70	0.6	700. 02

注:考虑浮筒受力不平衡,2个浮筒工作时,单个浮筒的分 配系数取为 0.6; 1 个浮筒工作则取为 1.0。

## 1.3.3 浮筒、锚链设计

锚链的拉力与锚链的长度有关, 锚链的长度 不同, 锚链受力状态也不同。锚链如果较长, 其 水下末端处于拖地状态,则锚链近似为悬链线, 锚块仅承受水平力(图3)。由于本工程海底为岩 石,为了避免炸礁,因此锚链的受力状态考虑悬 链线, 锚块水平力则由摩擦力来提供。锚链和锚 块受力可参考 JTJ 294—1999《斜坡码头及浮码头 设计与施工规范》)<sup>[2]</sup>,用悬链线标准方程计算, 结果见表6。



锚链拖地时的受力

锚链所受拉力 
$$F = \frac{T}{\cos\theta} = T + \omega H$$
 (1)

锚链的水平投影长度 
$$l = \frac{T}{\omega} \cdot \operatorname{arcch}\left(\frac{\omega H}{T} + 1\right)$$
 (2)

导链孔处至着地点的锚链曲线长度  $L = \frac{T}{c} \operatorname{sh} \left( \frac{\omega l}{T} \right)$ (3) 式中: $\omega$ 为锚链的水下单位长度自重力(kN/m)。

表 6 设计工况下锚链长度及受力

工况	T/kN	<i>F/</i> kN	l/m	L/m	$\theta/(\text{rad})$
1	393.70	414.76	230. 73	234.83	0.32
2	656.17	677.23	298.39	301.57	0. 25
3	700.02	721.08	308.25	309.33	0.24

锚链的最大拉力为 700.02 kN, 锚链安全系数 y=2.0, 锚链设计破断力 P=1 960 kN>(yT=2.0× 700.02 kN), 锚链长度取为 310 m。

系泊浮筒受到向上的作用力

$$F_{v} = T \tan \theta \tag{4}$$

浮筒的最大竖向力为 F<sub>v</sub> = 191.50 kN,浮筒的 最小净浮力安全系数  $\gamma = 1.2$ ,因此试选的浮筒最 小净浮力指标为  $F_B = F_V \gamma = 230 \text{ kN}(表 7)$ 。

表7 设计工况下浮筒所受竖向力

浮筒竖向力	工况 1	工况 2	工况 3
$F_{v}/\mathrm{kN}$	148.98	186.07	191.50

## 1.3.4 锚块的设计

当锚链为悬链线时, 锚只承受水平力, 锚块 的放置可以根据当地土壤的情况选择抛在海底表 面或者挖坑抛锚。此处海底为岩石,因此选择抛 锚在海底表面,利用摩擦力提供抗力。

假设混凝土锚块与海底表面的摩擦系数为u= 0.58, 锚块的抗拉安全系数为 γ=1.5, 锚块的摩 擦力  $f = \mu G = 1$  221 kN(> $\gamma T = 1.5 \times 700.02$  kN)。锚 块水下单个重力 G=421 kN。

## 2 几内亚阿联酋铝业码头

#### 2.1 项目概况

拟建几内亚阿联酋铝业码头位于西非几内亚 的 Boke 区,码头总长 388 m,顶面高程为 9.0 m, 停泊水域疏浚至-19.0 m。码头最大可靠泊 20 万 吨级散货船。由于码头数量有限,为了空载船舶 待泊时系泊使用,设置双点系泊系统。

- 2.2 多系泊系统设置
- 2.2.1 设计代表船型

设计代表船型见表8。

表 8 待泊设计船型参数

船舶吨级		计日			
/万 t	总长 L	型宽 B	型深 $H$	满载吃水 T	近明
20.0	300	50.0	26.0	18.4	设计船型
8.2	229	32.2	19.6	14.4	兼顾船型
注,设	计船刑滞	裁排水量	为 236 487	+ 待泊时最	大裁量为满

载量的 75%。

## 2.2.2 自然条件

船舶待泊时风速为:操作工况 20 m/s,极端 工况 30 m/s。波浪条件见表 9。工程区域流速小于 2.0 m/s,流向大致与岸线平行。

表 9 波浪条件

工况	重现期/a	$H_s$ 特征波高/m	$T_p$ 谱峰周期/s
操作工况	1(超越概率1%)	0.7	5.8
极端工况	100	2.4	5.1

# 2.2.3 系泊系统平面布置

与吉布提项目中不同,本工程的双点系泊系 统主要是限制船只的位移在固定区域,因此系泊 浮筒主要作用于散货船的首尾。船舶可移动区域 范围为423 m×150 m。其组件如下:2个圆筒形 浮筒,最小净浮力为1785 kN,配有4×1000 kN 快速脱缆钩;2根系泊锚链,每根长度为32 m, 最小破断力3890 kN;2组锚块,每组锚块由 6个混凝土沉块组成,沉块尺寸为3.5 m× 3.5 m×2.6 m。

多点系泊系统平面布置见图 4, 浮筒、锚链、 锚块的断面见图 5。



图 4 多点系泊平面布置 (单位: m)





- 2.3 多点系泊系统设计
- 2.3.1 设计工况

双点系泊系统主要是将待泊船只限定在 423 m× 150 m 的范围内。从受力角度分析,同样的外荷 载作用下,船舶在系泊区域内运动偏移量越大, 系泊锚链与系泊缆绳的张紧状态越紧,当船舶偏 移到待泊区边缘时(此时船舶中心线与系泊缆绳的 水平向夹角为 36°),船舶缆绳和浮筒的锚链都到 张紧状态,此时锚链的拉力最大。设计计算考虑 的设计工况见表 10。

2.3.2 船舶荷载

由于船舶的风与流基本成直角,船舶所受的 水平力则根据缆绳与船舶的中心线的角度进行分 配,分配到两个浮筒上,见图 6。



表 10 设计工况对比

设计工况	风向	风速/(m/s)	流向	流速/(m/s)	船舶中心线与缆绳夹角/(°)	说明
工况1(普通情况)	N-E	20	平行	2.0	36	2个浮筒工作,风与船垂直
工况 2(普通情况)	N-E	20	平行	2.0	36	1个浮筒工作,风与船垂直,单个锚链破断
工况3(极端情况)	N-E	30	平行	2.0	36	2个浮筒工作,风与船垂直

设计船舶考虑 75% 压载情况下风和流共同作

用下船舶荷载包络值见表 11。

表 11 设计工况下船舶荷载包络值

工况	75%载量舶荷载	风引起的水平力/kN	流引起的水平力/kN	船舶所受水平合力/kN	浮筒所受水平力 T/kN
普通工况	横向力	993.68	253.97	1.267(	2,122,62(mm)
(工况1、2)	纵向力	54.45	172.70	1 207 ( max )	2 122. 02( max)
招端工力	横向力	2 235.77	253.97	2 506 ( man )	2.117.00(max)
似峏丄优	纵向力	122. 50	172.70	2 300 ( max )	2 117. 90( max)

注:浮筒水平力按夹角 36°计算。

# 2.3.3 浮筒和锚链的计算

受待泊区域范围限制,锚链有长度的限制, 因此锚链按不拖地考虑,受力见图 7。可参照《海 港工程设计手册中册》<sup>[3]</sup>中锚链无拖地长度的情况 下的曲线公式,计算此种锚链的受力。





 $\theta_A = h/l - \omega l/(2T) \tag{5}$ 

$$\theta_B = h/l + \omega l/(2T) \tag{6}$$

计算得,  $\theta_A = 0.6110$  rad,  $\theta_B = 0.6113$  rad。

经计算, 锚链所受拉力  $F = \frac{T}{\cos\theta_B} = 2590$  kN (B 点), 安全系数  $\gamma = 1.5$ , 设计锚链的破断力  $P = F\gamma = 3890$  kN 。

锚链长度 L=(H<sub>1</sub>+H<sub>2</sub>+H<sub>3</sub>+H<sub>4</sub>)f (7)
式中: H<sub>1</sub>为锚地水深,取为 16.50 m; H<sub>2</sub>为校核高
潮位,取 5.1 m; H<sub>3</sub>为沉锤埋深,取 1 m; H<sub>4</sub>为浮
筒干舷高,取 2 m; f 为锚链长配长系数,取 1.15。
考虑锚链在使用期间存在一定的沉降量,设计在

浮筒底部预留 3 m 的短链,因此锚链每根总长取 为 *L*=32 m。

最危险工况下浮筒受到向上的作用力  $F_{\nu} = T \tan \theta =$ 1 487 kN(B点),浮筒浄浮力的安全系数  $\gamma = 1.2$ , 浮筒最小净浮力  $F_{B} = F_{\nu}\gamma = 1$  785 kN。

# 2.3.4 沉块的计算

锚链与地面成一定角度,则锚块既受到水平 力,又受到垂直力,锚块可以采用重力沉块或者 打入锚桩的方式。由于本工程海底土质比较松散, 打桩需要长替打,还需要水下锚链安装等复杂的 工艺,因此设计采用挖坑埋设沉块的方式。埋设 深度为1.0m,通过沉块自重及其上覆土的破土力 来平衡竖向力。

锚块的水下自重为 G=2 627 kN, 锚块所受竖 向上拔力  $F_v = T \tan \theta = 1$  486 kN(A 点), 锚块所受 水平力  $F_H = T = 2$  122.6 kN(A 点)。

考虑锚块的安全系数  $\gamma$ =1.5, 锚块的水下自重 G=2 627 kN(>  $F_{\nu}\gamma$ =1 486 kN ×1.5), 满足设计要 求。锚块沉底后,考虑沉块上方覆土压力后,其水 平抗力也远大于锚块所受水平力  $F_{H}$ =2 122.6 kN。

## 2.4 Optimoor 动力分析

为验证几内亚铝矿项目的双点系泊的设计, 通过 Optimoor 软件对双点系泊系统进行模拟和计 算,经过 Optimoor 计算,验证了船舶的水平偏移 量越大则锚链拉力越大。Optimoor 软件模拟的计 算工况见图 8, Optimoor 计算结果见表 12。

表 12 Optimoor 计算结果

船舶横移量/m	最大缆绳张力/kN	锚块最大水平力/kN	锚块最大竖向力/kN	计算采用初始缆绳张力
40. 7	864	1 144	423	初始给0,模型自动调试
45.0	875	1 177	656	初始给0,模型自动调试
46.0	900	2 386	1 140	初始给0,模型自动调试



a) 工况1, 正常情况系缆模型



b) 工况2,极端情况系缆模型 注:波高0.7 m;水流流速2 m/s;风速20 m/s。

图 8 Optimoor 动力分析模型

在本工程允许的系泊移动范围内(423 m× 150 m), Optimoor模拟的船舶最大偏移量达46 m, 此时船舶中心线与系泊缆绳的水平向夹角为36°, 软件与理论计算结果的对比验证见表13、14。

工况	船舶荷载水平	船舶偏	
	Optimoor 软件结果	理论计算结果	移量/m
正常情况	1 250	1 267.50	46
极端情况	2 850	2 506.42	46

表 13 船舶荷载水平合力结果对比

	表 1	4 钴	快受力	」结果:	对比
--	-----	-----	-----	------	----

计管士计	锚块受力/kN		船舶横
月昇刀伝	竖向力	水平力	移量/m
Optimoor 软件结果	1 140	2 386	46
理论计算结果	1 486	2 122	46

通过对比分析,可以发现 Optimoor 软件计算结 果与理论计算的结果较为一致,说明采用Optimoor 软件模拟来辅助双点系泊系统的设计是可行的。

## 3 结语

 1)多点系泊结构可用于缺少拖轮辅助时船舶 的靠、离泊和移船作业,也经常在岸线紧张时船 泊待泊系缆时使用,在海外不发达地区的散货码 头中较为常见。

 2)多点系泊系统设计时至少应考虑正常情况 和极端情况两种工况,且需校核其中单个锚链断 裂的情况。

3)根据多点系泊系统对船舶的约束情况, 其受力可分为悬链线和近似曲线两种。悬链线的 情况下,锚链长度远远大于近似曲线的长度,锚 块不受垂直上拔力仅受水平力;近似曲线的情况 下,锚链较短,锚块既受水平力,也受垂直上 拔力。

4) 在锚链受力为近似曲线的情况下,锚链的拉力和船只的水平偏移量成正比,锚链在船只水平偏移量达到限制时,锚链的拉力达到最大值。

5) 经验证, Optimoor 软件计算结果与理论计 算的结果一致性较好, Optimoor 软件用于多点系 泊系统设计是可行的。

## 参考文献:

- [1] JTS 144-1—2010 港口工程荷载规范[S].
- [2] JTJ 294—1998 斜坡码头及浮码头设计与施工规范[S].
- [3] 交通部第一航务工程勘察设计院.海港工程设计手册 (中册)[M].北京:人民交通出版社,1997.

(本文编辑 武亚庆)