

文章编号: 1004-7271(2005)01-0061-05

不同张纲连接系统对碟形网箱 浮环安全性能影响的分析

汤 威, 孙满昌, 袁军亭, 钱卫国

(上海水产大学海洋学院, 上海 200090)

摘 要: 以碟形网箱浮环上的法兰所承受的剪应力来衡量浮环的安全性能。指出了法兰最危险的受剪情况, 通过对网箱的力学分析和计算, 分别得出单张纲和双张纲连接系统中法兰所受剪应力的理论计算公式。对目前应用的 12 边形碟形网箱进行了计算, 得出法兰两端面所受剪应力在单张纲连接系统中同为 $5.74 \times 10^7 \text{ N/m}^2$, 在双张纲连接系统中 ($\gamma = 45^\circ$) 则分别为 $4.82 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ 和 $7.50 \times 10^6 \text{ N/m}^2$, 相比单张纲连接系统减小了 16% 和 87%, 从而说明了双张纲连接方式的优点。讨论结果表明, 在双张纲连接系统中, 12 边形碟形网箱的 γ 应在 $0^\circ - 60^\circ$ 间选择为宜, 且当 $\gamma = 26^\circ$ 时, 浮环的安全性能达到最佳。建议将常用的单张纲连接系统改进为双张纲式, 以提高网箱的抗风浪性能。

关键词: 碟形网箱; 张纲; 浮环; 法兰; 剪应力

中图分类号: S 972 文献标识码: A

Analysis of the effects of different rope-joint systems on the security of the buoyant spar of Sea Station cage

TANG Wei, SUN Man-chang, YUAN Jun-ting, QIAN Wei-guo

(Ocean College, Shanghai Fisheries University, Shanghai 200090, China)

Abstract: The security of the buoyant spar of Sea Station cage is measured by the value of the shearing stress (τ) on the flange. The most dangerous situation of shearing on flanges is showed in this paper. Theoretical formulas for calculating the shearing stress in both single-rope and double-rope joint systems are deduced through mechanical analysis and calculation. The superiority of the double-rope joint system over the single-rope one is confirmed based on the calculation results of the dodecagonal cage, which indicate that the shearing stress on flanges in the double-rope joint system when $\gamma = 45^\circ$ are $4.82 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ and $7.50 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ respectively, or 16% and 87% smaller than that of the single-rope joint system ($\tau = 5.74 \times 10^7 \text{ N/m}^2$) accordingly. Discussion shows that γ should be chosen between 0° and 60° in the double-rope joint system and the buoyant spar has the optimal security performance when $\gamma = 26^\circ$. It is proposed that the double-rope joint system be used instead of the single-rope one to improve the capability of resistance against wave and current.

Key words: Sea Station cage; rope; buoyant spar; flange; shearing stress

我国海水养殖业向外海发展的过程中, 碟形抗风浪网箱得到推广和应用。该网箱是一种刚性网箱,

其箱体主要由立柱、浮环、网衣、力纲等组成,锚泊系统则由张纲、浮子、锚绳等构成^[1](图 1)。然而,在使用中发现,如果海区潮流急,网箱浮环在张纲拉力作用下经常会出现断裂现象,经济损失严重。因此,如何提高浮环安全性能已成为亟待解决的问题。

常用的锚泊系统是由张纲通过浮环各段端部的法兰与浮环相连接。对于单张纲连接方式,当水流沿与某根张纲平行的方向流向网箱时,可能会造成仅该张纲受力张紧的情况(图 2a)。此时,该张纲的张力最大,与该张纲相连的法兰的两端面所受到的剪应力也相应达到最大值,这是浮环在此处断裂的主要原因。改进后的双张纲连接系统是在浮环的各个方向通过两根张纲系结两个法兰 I 和 II 所构成(图 2b)。本文将分别对单、双张纲连接系统中法兰的受剪情况进行分析和计算,以此说明采用双张纲方式在提高浮环安全性能方面的作用。

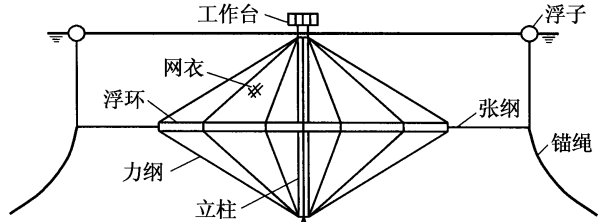


图 1 碟形网箱结构示意图

Fig.1 The structure of Sea Station cage

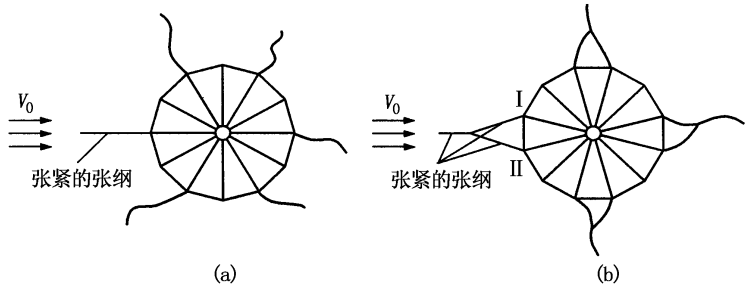


图 2 最危险的法兰受剪状态

Fig.2 The most dangerous status of the flange under the shearing stress

1 计算方法

1.1 相关假设

由于网箱基本都浸入水中,受波浪影响较小,因此假设(1)网箱只受水流的作用(2)流体为定常流动,在一段时间内其运动方向与流速大小均不变(3)忽略网箱箱体内外流速差异(4)忽略网箱在水流作用下产生的网片变形和容积变化(5)网箱网片采用无节工艺。

1.2 法兰受剪情况的分析

主要讨论法兰最危险的受剪状态,即某一方向的张纲完全张紧,其余方向张纲均松弛的情况(图 2)。此时, l_a 张纲和 l_{b1} 、 l_{b2} 张纲是完全张紧的(图 3)。根据力的平衡,张紧的张纲承受了网箱各组成部分阻力的共同作用,其张力须通过计算网箱总阻力得出。



图 3 张纲与法兰的连接

Fig.3 The joint of the rope and the flange

在张纲的拉力作用下,单张纲连接系统中受拉法兰的两端面分别沿 $m - m$ 、 $n - n$ 两个面错动(图 3a),在双张纲连接系统中则分别沿 $p_1 - p_1$ 、 $q_1 - q_1$ 和 $p_2 - p_2$ 、 $q_2 - q_2$ 错动(图 3b)。这样,在法兰的两端面各自形成两个剪切面,构成了双剪切^[2]。在此,可以计算出 $m - m$ 、 $n - n$ 、 $p_1 - p_1$ 、 $q_1 - q_1$ 面上的剪应力大小($p_2 - p_2$ 、 $q_2 - q_2$ 面的受力情况与 $p_1 - p_1$ 、 $q_1 - q_1$ 面相同),并以此来衡量浮环的安全性能。

1.3 计算公式的推导

1.3.1 网箱阻力的计算

在本文假设的理想定常流场中,网箱受到的阻力应沿水平方向,因此具有上下、左右全对称结构的网箱在水中应保持直立稳定。由于网箱各组成部分的阻力仅与水流速度等因素有关,而与水平来流方

向无关,因此两种张纲连接系统中的网箱总阻力应相等。对网箱阻力的计算只考虑网箱主体结构所受的水流作用,即浮环(4n 边形)网衣、立柱,其总阻力为此三部分阻力之和。通过对单张纲连接系统中网箱主体结构的阻力进行计算,得出网箱总阻力的值。

(1)单张纲连接系统中的浮环阻力^[3,4]

$$R_{1a} = 2\rho v_0^2 l d \sum_{i=1}^n \{ C_{N90} \cos^3 [\frac{\pi}{4n} + \frac{\pi}{2n}(i-1)] + C_{N0} \sin^3 [\frac{\pi}{4n} + \frac{\pi}{2n}(i-1)] \} \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

式中: ρ ——海水密度(kg/m³); v_0 ——水流速度(m/s); l ——浮环各段长度(m); d ——浮环各段直径(m); C_{N90} ——浮环各段圆柱体与来流方向成 90°时的阻力系数; C_{N0} ——浮环各段圆柱体与来流方向成 0°时的阻力系数。

(2)单张纲连接系统中的网衣阻力^[3-5](图 4)

$$R_{2a} = 4\rho v_0^2 ds' \sum_{i=1}^n \{ C_{\alpha} \cos^3 [\frac{\pi}{4n} + \frac{\pi}{2n}(i-1)] + C_{D0} \sin^3 [\frac{\pi}{4n} + \frac{\pi}{2n}(i-1)] \} \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

式中, ds' ——浮环各段与力纲所围网片的线面积(m²);

$$ds' = \frac{d_l}{aE_n E_n} ds = \frac{d_l}{aE_n E_n} \cdot \frac{1}{2} \cdot l \sqrt{R^2 + H^2}$$

式中, d_l ——网线直径(m); a ——网目的目脚长度(m); E_n ——网片横向缩结系数; E_n ——网片纵向缩结系数; ds ——浮环各段与力纲所围网片的虚构面积(m²); R ——浮环(4n 边形)内接圆半径(m); H ——立柱半高(m)。

C_{α} ——水流速度分量 v_n 与网片的冲角为 α 时的阻力系数;

$$C_{\alpha} = (C_{D90} - C_{D0}) \sin^2 \alpha + C_{D0}$$

式中, C_{D90} ——水流与网片的冲角为 90°时的阻力系数; C_{D0} ——水流与网片的冲角为 0°时的阻力系数。

(3)单张纲连接系统中的立柱阻力^[3]

$$R_{3a} = C_{D0} v_0^2 D H$$

其中: C_{D0} ——立柱圆柱体与来流方向垂直时的阻力系数; D ——立柱直径(m)。

那么,单张纲连接系统中的网箱总阻力 $R_a = R_{1a} + R_{2a} + R_{3a}$ 。可得,双张纲连接系统中的网箱总阻力 $R_b = R_a$ 。

1.3.2 法兰两端面剪应力的计算

视网箱为刚体,将水流对整个网箱的总阻力视为一作用在网箱重心 O 的集中力^[6]。

(1)单张纲连接系统中,根据力的平衡(图 5a),易得出张纲张力 $T_a = R_a$ 。由于网箱为对称结构,法兰两端面 $m - m$ 、 $n - n$ 上的剪力应相等(图 5b),则

$$Q_a = \frac{T_a}{2} = \frac{R_a}{2}$$

(2)双张纲连接系统中,根据力的平衡(图 6a),

易得出张纲张力 $T_{b1} = T_{b2} = \frac{R_b}{2\cos\gamma}$,式中 γ ——张纲与来流方向的夹角。由于法兰 I 左右两侧载荷不对

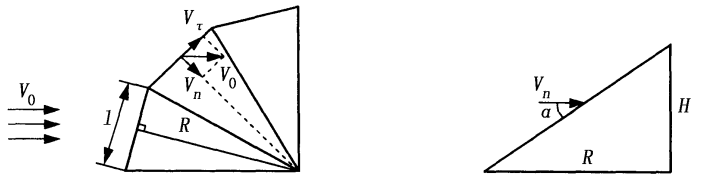


图 4 网衣阻力计算示意图

Fig.4 The diagram of the hydrodynamic resistance on the net enclosure

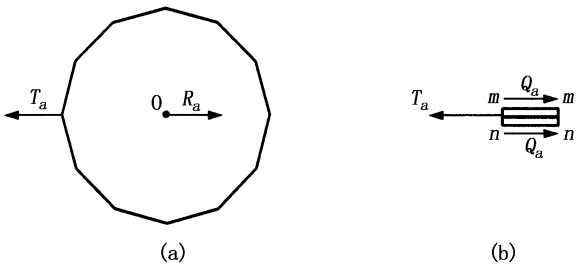


图 5 单张纲连接系统中浮环和法兰的受力分析

Fig.5 Forces on the buoyant spar and the flange in the single-rope joint system

称,无法直接得出其两端面 $p_1 - p_1$ 、 $q_1 - q_1$ 上剪力的值,现沿网箱竖直对称轴 AB 将其切开,左右两部分所承受的阻力分别为总阻力的一半(图 6b)。由载荷的对称性质,浮环截面 A、B 上的剪力等于零,只有 N 轴力和 M 弯矩(由于只进行力的计算,故 M 在本文中不作涉及)。由于浮环、网衣、力纲等部分之间力的作用十分复杂,为了简化计算,假设浮环承受全部力的作用。利用平衡条件易得 $N = \frac{R_b}{4}$ 。又由于网箱对 AB 轴和 CD 轴都是对称的,可以只研究浮环的四分之一。取 AC 段(图 6c),并沿 $p_1 - p_1$ 面将浮环再次切开(图 6d)。为求剪力 Q_b ,沿 AC 方向将浮环各段标记为 1、2、3、...、 n 段,分别计算各段范围内网衣和浮环阻力在 $p_1 - p_1$ 方向上的分力(不计法兰厚度),求出各分力之和 F ,再由力的平衡计算剪力 Q_b 。然后以法兰 I 为研究对象,计算 $q_1 - q_1$ 面上的剪力 Q'_b 。

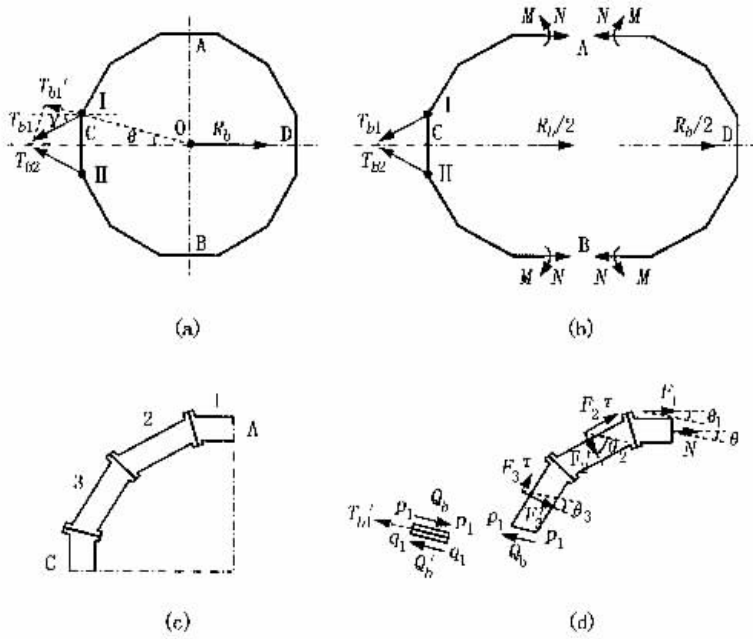


图 6 双张纲连接系统中浮环和法兰的受力分析

Fig.6 Forces on the buoyant spar and the flange in the double-rope joint system

计算出各个面上的剪力后,即可得出剪应力

$$\tau = \frac{Q}{A}$$

其中: Q —— 剪力(N); A —— 法兰端面的截面积(m^2), $A = \frac{\pi d(d - \delta)}{\cos \theta}$, 式中, δ —— 浮环壁厚(m),

θ —— 浮环各段对应的圆心角的一半, 其值 $\theta = \frac{\pi}{4n}$ 。

2 结果与分析

2.1 网箱阻力计算结果

以 $1 \times n = 3$ 边形碟形网箱为例,进行实物计算。

已知 $l = 6 \text{ m}$, $d = 0.3 \text{ m}$, $H = 9 \text{ m}$, $R = 11.2 \text{ m}$, $D = 1 \text{ m}$, $\delta = 8 \times 10^{-3} \text{ m}$ 。

取 $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$, $v_0 = 1.3 \text{ m/s}$, $\frac{d_l}{a} = 0.1$, $E_l = 0.5$, 则 $E_n = 0.866$, $\gamma = 45^\circ$, 各项阻力系数^[7] $C_{N90} = 0.9335$, $C_{N0} = 0.1277$, $C_{D90} = 1.1$, $C_{D0} = 0.27$, $C_D = 0.3$ 。

分别求出浮环、网片、立柱及总阻力,得 $R_{1a} = 8.25 \times 10^4 \text{ (N)}$, $R_{2a} = 7.44 \times 10^5 \text{ (N)}$, $R_{3a} = 4.58 \times 10^4$

(N), $R_a = 8.72 \times 10^5$ (N), $R_b = R_a = 8.72 \times 10^5$ (N)。

2.2 法兰两端面剪应力计算结果

(1) 单张纲连接系统中, $Q_a = \frac{R_a}{2} = 4.36 \times 10^5$ (N), $\tau_a = \frac{Q_a}{A} = 5.74 \times 10^7$ (N/m²)。

(2) 双张纲连接系统中, $N = \frac{R_b}{4} = 2.18 \times 10^5$ (N), 浮环各段所受阻力沿 $p_1 - p_1$ 方向的分力之和 $F = F_1 \cos \theta_1 + F_2^c \sin \theta_2 + F_2^y \cos \theta_2 + F_3^c \sin \theta_3 + F_3^y \cos \theta_3 = 1.55 \times 10^5$ (N), 故可得 $Q_b = N \cos \theta + F = 3.66 \times 10^5$ (N), 而 $T'_{b1} = T_{b1} \cos(\theta + \gamma) = \frac{R_b \cos(\theta + \gamma)}{2 \cos \gamma} = 3.09 \times 10^5$ (N), 则 $Q'_b = Q_b - T'_{b1} = 5.70 \times 10^4$ (N)。由上述计算, $p_1 - p_1$ 面上的剪应力 $\tau_b = \frac{Q_b}{A} = 4.82 \times 10^7$ (N/m²), $q_1 - q_1$ 面上的剪应力 $\tau'_b = \frac{Q'_b}{A} = 7.50 \times 10^6$ (N/m²)。

3 讨论

(1) 12 边形碟形网箱的计算结果表明, 在双张纲连接系统中法兰所承受的剪应力 τ_b 与单张纲连接系统中的 τ_a 相比在数值上缩小了 16%, τ'_b 则相对缩小了 87%。而且, 由于计算剪力 Q_b 的过程中, 本文假设浮环承受全部力的作用, 而忽略了网衣等其余部分的作用, 因此, Q_b 的实际值定小于理论值, τ_b 相应更小, 浮环安全性能应比理论计算结果更高。

(2) 根据图 6a 所示的受力情况可以得出, 张纲 l_{b1} 的张力 $T_{b1} = \frac{R_b}{2 \cos \gamma}$ 随着 γ 的增大, T_{b1} 同时增大。当 $\gamma = 60^\circ$ 时, $T_{b1} = R_b$, 即张纲 l_{b1} 相当于单张纲连接系统中的张纲 l_a 一样, 承受了网箱总阻力。若 $\gamma > 60^\circ$, 则张纲 l_{b1} 的强度要求将比张纲 l_a 更高, 这样虽提高了浮环的安全性能, 但同时也增加了张纲自身失效的风险。因此, γ 角度的大小应在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 间选择为宜。

(3) 理论计算公式的结果表明, $p_1 - p_1$ 面上的剪力为定值, 不随 γ 的变化而变化。然而, 由于 $Q'_b = Q_b - T'_{b1}$, 若 γ 的取值能使 $T'_{b1} = Q_b$, 那么 $Q'_b = 0$, 即 $q_1 - q_1$ 面上的剪应力为 0, 这种情况对浮环来说最为安全。对于 12 边形碟形网箱, 若 $Q_b = T'_{b1}$, 则 $Q_b = \frac{R_b \cos(\theta + \gamma)}{2 \cos \gamma} = \frac{R_b}{2}(\cos \theta - \sin \theta \cdot \text{tg} \gamma)$, 代入数据可得最适宜的角度 $\gamma = 26^\circ$ 。因此, $Q'_b = Q_b - T'_{b1} = 0$ 一式为 γ 的确定提供了另一个依据。

(4) 本文的计算公式都是基于理想状态建立的。而在实际应用中不得不考虑波浪、网箱内外流速场差异等因素的影响, 因此, 精确计算应对所得结果进行修正。文章所讨论的新型双张纲连接系统已在浙江嵊泗外海进行了相关试验, 效果良好。

参考文献：

- [1] 桂福坤, 王炜霞, 张怀慧. 网箱工程发展现状及展望[J]. 大连水产学院学报, 2002, 17: 70-78.
- [2] 刘鸿文. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1996.
- [3] 周应祺, 许柳雄, 何其渝. 渔具力学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- [4] 孙满昌, 张健, 钱卫国. 飞碟型网箱水动力模型试验与理论计算的比较[J]. 上海水产大学学报, 2003, 1(4): 319-324.
- [5] 张健, 孙满昌. 碟型网箱网片阻力理论计算探讨[J]. 海洋渔业, 2002, 24: 75-79.
- [6] 王铎, 赵经文. 理论力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1997.
- [7] 夏泰淳, 张健. 深水双锥型网箱的阻力估算[J]. 上海水产大学学报, 2003, 1(1): 87-91.