

文章编号: 1004-7271(2003)01-0087-05

·研究简报·

# 深水双锥型网箱的阻力估算

## The estimation of the hydrodynamic resistance of two cones shaped submersible cages

夏泰淳, 张 健

(上海水产大学海洋学院, 上海 200090)

XIA Tai-chun, ZHANG Jian

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

关键词 深水网箱 双锥形 阻力 理论计算

Key words submersible cage; two cones shaped; hydrodynamic resistance; theoretical calculation

中图分类号 S972 文献标识码: A

估算方法以流体力学基本理论为基础,对深水网箱的阻力其估算方法进行了探讨。网箱在风浪中的水动力学问题是相当复杂的,从主要问题着手,以理想化的模型代替复杂多变的模型,其计算方法和得到的一系列公式,倘若能和网箱模型试验的实测结果进行对照的话,那么经过适当修正以后,其结论将是相当有益的。

### 1 深水网箱的简介

美式双锥形网箱由于上下对称稳定性好,抗风浪能力强,在近海养殖业中已在逐步引进。网箱在水中结构如图 1 所示<sup>[1]</sup>。在海流的作用下,其阻力主要来自于浮杆(直杆)、浮环(圆环)和网衣这三部分组成<sup>[2]</sup>,而其它称之为附件阻力等。倘若其阻力能准确估算的话,那么对于网箱的锚泊装置的计算和网箱本身在风浪流中的结构强度、刚度等问题的解决均会带来决定性的影响。

由于网箱的存在,水流流速显然会发生变化,但考虑到海况工作条件的复杂多变,流速的变化往往有一个范围,而在实用计算中往往从有效的角度出发,一般总是取一个概率最大的流速场,然后在此基础上从安全的角度出发,相应在结构上定出一个合理的安全系数。显然在计算中暂不考虑网箱内流场的变化还是比较简便和实用的。

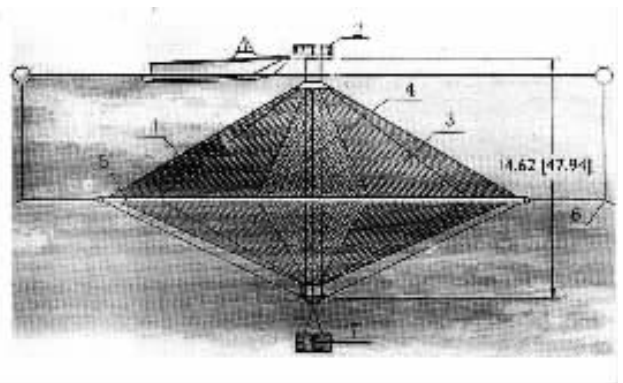


图 1 双锥型网箱结构示意图

Fig.1 The construction of the two cones shaped submersible cages

- 1 辐条 2 平台 3 网衣 4 浮杆  
5 浮环 6 锚定系统 7 沉子

## 2 阻力的分析与计算

网箱的阻力主要来自于直杆、圆环和网衣等,以下分别对这三种部件进行计算。

### 2.1 直杆阻力的计算

直杆水流中的阻力  $R$ ,可表示成函数式: $R = f(V_0, d, \rho, \nu, H)^{31}$

其中  $V_0$ ——水流速度( $m/s$ ); $\rho$ ——流体密度( $kg/m^3$ ),海水一般取  $1025 kg/m^3$ ;

$\nu$ ——流体运动粘性系数( $m^2/s$ ),海水一般取  $1.31 \times 10^{-6} m^2/s$ (水温  $10^\circ C$ 时);

$d$ ——直杆的直径( $m$ ); $H$ ——直杆的总高度( $m$ ),

根据量纲分析法,可以证明:阻力系数  $C_d = \frac{2R}{\rho V_0^2 A} = f(Re)^{41}$

其中  $A = H \cdot d$ ,即直杆与来流相垂直方向的投影面积; $Re = \frac{V_0 \cdot d}{\nu}$ ,直杆的雷诺数。

其中阻力系数  $C_d$ 与雷诺数  $Re$ 函数关系式  $C_d = f(Re)$ ,经过数学拟合为:

$$C_d = \frac{1.1}{1 + 1.336 \times 10^{-3} e^{1.644 \times 10^{-5} Re}}$$

拟合后的数据与原始数据见表 1,结果看来是令人满意的。

表 1 处理后的数据与原始数据的比较

Tab.1 The contrast between the calculated data and the original data

$Re(\times 10^{-4})$	9.6	11.58	13.51	14.48	15.44	17.37	19.30	20.27	23.17
$C_d$	1.1	1.092	1.08	1.078	1.073	1.063	1.053	1.049	1.034
$\widehat{C}_d$	1.092	1.089	1.084	1.082	1.078	1.070	1.058	1.050	1.020
$ C_d - \widehat{C}_d $	0.008	0.003	0.004	0.004	0.005	0.007	0.005	0.001	0.014
$Re(\times 10^{-4})$	24.13	27.03	28.96	30.89	33.78	34.75	38.61	40.54	46.33
$C_d$	1.029	1.015	1.005	0.938	0.735	0.668	0.454	0.382	0.215
$\widehat{C}_d$	1.006	0.953	0.904	0.843	0.730	0.687	0.503	0.413	0.196
$ C_d - \widehat{C}_d $	0.023	0.062	0.101	0.095	0.005	0.019	0.049	0.031	0.019

在实用计算中,要计算直杆在水流中的阻力  $R_1$ ,其公式是:

$$R_1 = C_d \times \frac{1}{2} \rho V_0^2 A = \frac{1.1}{1 + 1.336 \times 10^{-3} e^{1.644 \times 10^{-5} Re}} \times \frac{1}{2} \rho V_0^2 A$$

### 2.2 圆环阻力的计算:

圆环在水流中的阻力  $R$ ,可表示成函数式: $R = f(V_0, d, \rho, \nu, D)^{31}$ ,其中  $d$ ——圆环杆的直径( $m$ );

$D$ ——圆环的直径( $m$ ),根据量纲分析法,可以证明:

$$C_d = \frac{2R}{\rho V_0^2 A} = f(Re)^{41}$$

其中  $A = d \cdot D$ ,即圆环在与来流相垂直方向的投影面积; $Re = \frac{V_0 \cdot d}{\nu}$ ,圆环的雷诺数,圆环的阻力计算如图 2 所示。

在圆环上取一微元  $dl$ ,来流  $V_0$ 在其径向的分速度  $V_r = V_0 \cos \theta$ ,来流在其切向的分速度  $V_\tau = V_0 \sin \theta$ ;那么,在  $dl$ 长度的圆环上,

$$\text{水流的径向阻力为: } dR_r = C_{dr} \frac{\rho_0^2 \cos^2 \theta}{2} \cdot d \cdot \frac{D}{2} \cdot d\theta$$

$$\text{水流的切向阻力为: } dR_\tau = C_{d\tau} \frac{\rho_0^2 \sin^2 \theta}{2} \cdot d \cdot \frac{D}{2} \cdot d\theta$$

该微元受到水流在来流方向的阻力  $dR$ 为:

$$dR = dR_r \cos\theta + dR_t \sin\theta = \frac{\rho V_0^2}{2} \cdot \frac{D}{2} \cdot d \cdot [ C_{dr} \cos^3\theta + C_{dt} \sin^3\theta ] d\theta ;$$

对于四分之一圆环 其来流方向的阻力为：

$$R_{0.25} = \frac{\rho V_0^2}{2} \cdot \frac{D}{2} \cdot d \cdot [ C_{dr} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^3\theta d\theta + C_{dt} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^3\theta d\theta ] ;$$

所以  $R = \frac{4}{3} C_d \times \rho V_0^2 \cdot D \cdot d$  其中  $C_d = C_{dr} + C_{dt}$  ;

令  $f(Re) = \frac{4}{3} C_d = \lambda$  则上式  $R = \lambda \times \frac{1}{2} \rho V_0^2 D \cdot d$

根据计算 可以得到对于不同的雷诺数  $Re$  阻力系数  $C_d$  和  $\lambda$  的函数关系 通过拟合 得  $\lambda = f(Re)$  的函数关系式为

$$\lambda = \frac{1.7683}{1 + 8.03 \times 10^{-4} e^{1.928 \times 10^{-5} Re}}$$

拟合后的数据与原始数据如表 2 ,结果看来是令人满意的。

表 2 处理后的数据与原始数据的比较

Tab.2 The contrast between the calculated data and the original data

$Re (\times 10^{-4})$	5.79	7.72	8.69	9.65	11.58	14.48	15.44
$\lambda = \frac{4}{3} C_d$	1.76	1.76	1.76	1.76	1.747	1.725	1.717
$\hat{\lambda}$	1.764	1.762	1.760	1.759	1.755	1.764	1.741
$ \lambda - \hat{\lambda} $	0.004	0.002	0.000	0.001	0.008	0.021	0.024
$Re (\times 10^{-4})$	17.37	19.30	23.17	24.13	28.96	34.75	
$\lambda = \frac{4}{3} C_d$	1.701	1.685	1.655	1.647	1.565	1.069	
$\hat{\lambda}$	1.729	1.711	1.652	1.631	1.457	1.070	
$ \lambda - \hat{\lambda} $	0.028	0.026	0.003	0.016	0.108	0.001	

在实用上 要计算圆环在水流中的阻力

$$R_{II} = \lambda \cdot \frac{1}{2} \rho V_0^2 \cdot A$$

$$= \frac{1.7683}{1 + 8.03 \times 10^{-4} e^{1.829 \times 10^{-5} Re}} \times \frac{1}{2} \rho V_0^2 \cdot A$$

### 2.3 网衣阻力的计算

假设网片处于较位理想状态：

(1)网片编结采用无结工艺 锥形网片近似看成圆锥形 且网片充分张开；

(2)网片不因水流而变形 网片始终保持着圆锥型 即网片微元与水流的夹角呈理想状态；

(3)圆锥型网片上下部的缩结系数一致为一常数。取上半部网衣 如图 3 所示：

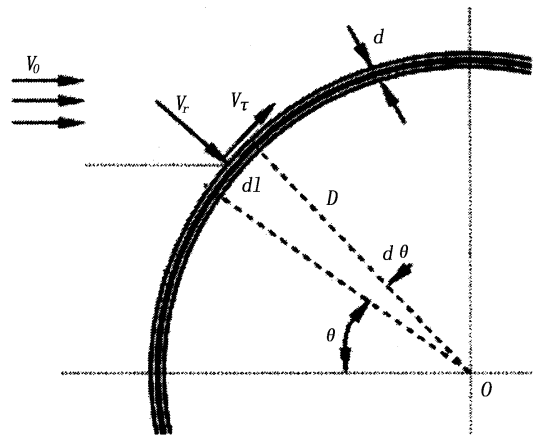


图 2 圆环阻力计算示意图

Fig. 2 The sketch map the calculation method of the resistance of round rim

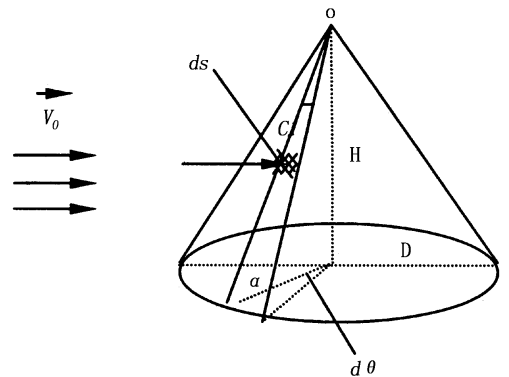


图 3 网衣阻力计算示意图

Fig.3 The calculation method of the resistance of net enclosure

将来流  $V_0$  分解成网片微元的径向速度来流  $V_0$  在其径向的分速度  $V_r$ , 来流在其切向的分速度  $V_\tau$ , 如图 4 所示 图 5 为网片微元轴对称平面示意图。

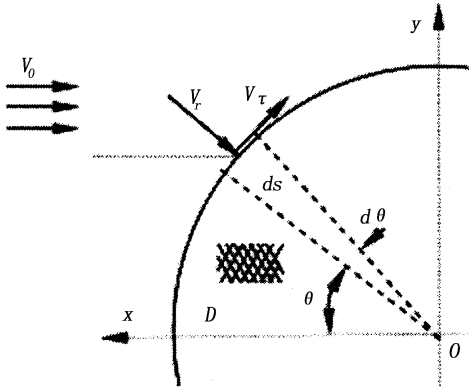


图 4 水平面内来流与网片的俯视示意图

Fig.4 The overlook of the net enclosure and velocity distributions in the horizontal

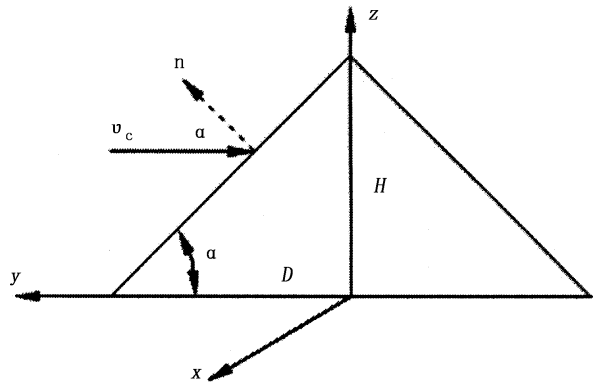


图 5 网片微元轴对称平面示意图

Fig.5 The sketch map of tiny unit of the net enclosure in the axial symmetrical plane

显然,  $V_r = V_0 \cos\theta$ ,  $V_\tau = V_0 \sin\theta$ ,  $V_r$  与网片的夹角为  $\alpha = \arctg \frac{H}{D}$ ,  $V_\tau$  与网片的夹角为  $0$ , 微元的虚构

面积  $ds = \frac{1}{2} \times \frac{D}{4} \sqrt{D^2 + H^2} d\theta$  实际线面积为:

$$ds' = \frac{d}{a} \frac{1}{E_t E_n} \times \frac{1}{2} \times \frac{D}{4} \sqrt{D^2 + H^2} d\theta$$

其中,  $d$  ——网线的直径;  $a$  ——网目的目脚长度;  $E_t$  ——网片的横向缩结系数;  $E_n$  ——网片的纵向缩结系数;  $D$  ——网箱圆环直径;  $H$  ——网箱直杆高度 现令  $\frac{d}{a} \frac{1}{E_t E_n} = \lambda$  则

$ds' = \frac{1}{2} \times \lambda \times \frac{D}{4} \sqrt{D^2 + H^2} d\theta$  网片微元所受的径向、切向水阻力分别为:

$$dR_r = C_a \times \frac{1}{2} \rho V_r^2 ds' = \frac{1}{4} C_a (\rho V_0^2 \cos^2 \theta) \lambda \frac{D}{4} \sqrt{D^2 + H^2} d\theta$$

$$dR_t = C_a \times \frac{1}{2} \rho V_\tau^2 ds' = \frac{1}{4} C_a (\rho V_0^2 \sin^2 \theta) \lambda \frac{D}{4} \sqrt{D^2 + H^2} d\theta$$

阻力系数根据田内的网片阻力系数公式:

$C_a = (C_{D90} - C_{D0}) \sin^2 \alpha + C_{D0}$ ,  $C_r = C_{D0}$  其中  $C_{D90}$  ——网片与来流垂直时的阻力系数 取 1.1;  $C_{D0}$  ——网片与来流平行时的阻力系数 取  $0.27^{[5]}$ 。

则微元网片所受的  $x$  方向的阻力:

$$dR = dR_r \cos\theta + dR_t \sin\theta = \frac{1}{4} \rho V_0^2 \lambda \frac{D}{4} \sqrt{D^2 + H^2} (C_a \cos^3 \theta + C_r \sin^3 \theta) d\theta$$

对于整个网片(上部分)在  $x$  方向上的阻力:

$$R_{III} = \frac{2}{3} \times \rho V_0^2 \lambda \frac{D}{4} \sqrt{D^2 + H^2} [(C_{D90} - C_{D0}) \frac{H^2}{D^2 + H^2} + 2C_{D0}]$$

### 2.4 计算实例

设网箱的主尺度为:直杆高度  $H = 14.62m$ 。圆环曲半径  $D = 25m$ , 来流的速度  $V_0$  在  $1.0 \sim 3.0$  节变化,直杆的直径  $d$  在  $0.25 \sim 0.4m$  变化,圆环材料直径在  $0.15 \sim 0.3m$  变化;为了方便计算 取网片的横向缩结系数  $E_t = 0.5$  则  $E_n = \sqrt{1 - 0.5^2} = 0.866$ ,网箱用网线种类很多,这里采用较为常用的  $23.3dtx - 72^{[6]}$  其网线直径约为  $1.4mm$  左右,网目大小在  $25 \sim 50mm$ ,故网片的线面积系数  $d/a$  取  $0.04 \sim 0.11$ ; 分别求出直杆、圆环、网片的阻力如表 3、表 4 和表 5。

表 3 直杆在不同流速下的阻力(N)

Tab.3 The resistances of the buoyant spar according to the different medium velocity

直径 (m)	流速 $V_f$ (n mile)				
	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
0.25	543	1211	2114	3175	4203
0.3	650	1440	2464	3503	4074
0.35	755	1656	2725	3461	3155
0.4	859	1848	2832	2944	1910

表 4 圆环在不同流速下的阻力(N)

Tab.4 The resistances of teh round rim according to the different medium velocity

直径 (m)	流速 $V_f$ (n mile)				
	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
0.15	889	2019	3578	5557	7920
0.20	1197	2683	4728	7254	10053
0.25	1494	3334	5803	8601	10936
0.30	1789	3960	6713	9113	9342

表 5 网片在不同流速下的阻力(N)

Tab.5 The resistances of the net enclosure according to the different medium velocity

$d/a$	流速 $V_f$ (n mile)				
	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
0.04	2277	5124	9110	14234	30497
0.06	3416	7686	13665	21351	30746
0.08	4555	10249	18220	28468	40994
0.09	5124	11530	20497	32027	46119
0.11	6243	14092	25052	39144	56367

那么,整个网箱的水阻力  $R=(R_I+R_{II}+2R_{III})+R_{附件}$  对于该尺寸的网箱在 2.5~3.0 n mile 的水流中,其总阻力大致为 9500kg 左右。

### 3 讨论

(1)前已所述,由于海流是相当复杂的,以上估算是建立在流体作定常运动,即对于水流在一段时间内其流向和流速保持不变,并认为网箱内外的流速场差别很小;

(2)在估算过程中,由于辐条直径远小于浮杆和圆环,只将网箱分为主要三部分,忽略了其余部分的阻力,从最终的计算也可看出,网箱的主要阻力在于网片上,因此这种简化是可行的;

(3)仅讨论估算方法的可行性,故采用理想化模型的方法,尽可能的简化了模型,不考虑网箱在复杂环境中,例如网箱倾斜或动阻力等,所得结果同实际情况势必存在一定得差异,本文仅对网箱的水动力学中相对重要的水阻力估算进行了探讨,希望能在此基础上,结合网箱模型实验或海上实测的结果,提出行之有效的实用计算方法。

### 参考文献:

- [1] <http://www.oceanspar.com/seastation.htm>[Z].
- [2] 谌志新,王中新. 外海抗风浪网箱系统[J]. 渔业现代化, 200(3):19-22.
- [3] Becker H. A. , Dimensionless Parameter[M], NY. Halstead. 1976.
- [4] 陈建宏(译). 流体力学[M]. 北京: 晓圆出版社. 1992.
- [5] 周应祺, 许柳雄, 何其渝. 渔具力学[M]. 北京: 中国农业出版社. 1999.
- [6] 杭州飞鹰船艇有限公司, 浙江省海洋水产研究所. 碟型升降式深水网箱[R]. 2001.