

应用剪流理论计算多闭室船体 薄壁梁剖面的特性参数*

黄贻平 杨永谦

(船舶结构力学教研室)

提 要

本文讨论应用剪流理论进行复杂的船体薄壁梁剖面剪切、扭转特性参数的计算方法,给出了适用于计算机实施的规格化格式,同时提供了一个计算船体剖面弯曲有效剪切面积公式。采用本方法计算,还可采用迭代法进一步修正二次剪应力对扭心位置和扇性坐标等扭转性参数的影响。根据本方法所编制的程序,通过对开口、闭口和混合剖面各种考题的验证,计算结果是完全正确的。

关键词: 薄壁梁; 多室剖面; 剪流理论; 剖面特性

一、引 言

把船体理想化为阶梯形薄壁梁用有限梁法进行弯、扭应力分析是目前造船界广泛应用的方法,其中计算多闭室的船体剖面的剪切和扭转特性参数是十分繁重的工作。通常的做法是将剖面离散化用有限元法^{[1][2]}或采用节点剪流平衡的方法^[3]进行计算,认为直接应用剪流理论计算不能做到规格化,在计算机上实施有困难。本文提供了一个应用剪流理论的计算方法,采用局部坐标给出了统一的规格化公式,并已编制了计算程序实现了计算。该方法力学概念清楚,并且对多闭室剖面的剪切、自由扭转和约束扭转的剪流计算可以给出统一公式,只需改变右端常数项就可以分别算出它们的相应剪流,计算方便,程序简单。

采用本文提供的方法用剪流理论进行计算的另一个重要用途是:在此计算基础上,进一步用迭代法修正二次剪应力对扭心位置和扇性坐标等扭转特性参数的影响。

本文还修正了文献^{[1][3]}中的一些错误,给出了一个计算船体剖面弯曲有效剪切面积的公式。

* 本文为科学基金资助课题“薄壁梁理论及其应用”的一部分。

二、剖面扭心位置计算

若船体梁在YOZ平面内弯曲,剪力为 Q_y ,要计算横剖面(图1)每个闭室壁上所产生的弯曲剪流,可用传统的方法在各闭室切一切口,只要切口不切在相邻闭室的公共壁上,采用各闭室壁上局部坐标,其剪流可按式计算:

$$\hat{q}_{BK}^i = -\frac{Q_y}{I_{yy}} \int_0^s y_K^i t_K^i ds + \hat{q}_{OK}^i \quad (1)$$

$$\hat{q}_{OK}^i = q_{OK}^i + q_{BO}^i \quad (i=1, 2, \dots, N, \kappa=1, 2, \dots) \quad (2)$$

式中 \hat{q}_{BK}^i ——第*i*闭室第K壁上某点处的弯曲剪流,

\hat{q}_{OK}^i ——第*i*闭室第K壁上局部坐标S(图2)原点处的弯曲剪流,

\hat{q}_{OK}^i ——按开口剖面计算的第*i*闭室第K壁上坐标S原点处的弯曲剪流,

q_{BO}^i ——第*i*闭室切口处的常弯曲剪流,

I_{yy} ——横剖面对X轴的惯性矩,

N ——横剖面上闭室总数,

y_K^i, t_K^i ——第*i*闭室第K壁上任意点的y坐标及壁厚。

将 y_K^i 用S坐标表示, (1) 式可以写成如下形式

$$\hat{q}_{BK}^i = -\frac{Q_y}{I_{yy}} (A_K^i S^2 + B_K^i S) + \hat{q}_{OK}^i \quad (3)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} A_K^i &= (y_{BK}^i - y_{AK}^i) t_K^i / 2h_K^i \\ B_K^i &= y_{AK}^i t_K^i \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中 y_{AK}^i ——第*i*闭室第K壁起始点的y坐标,

y_{BK}^i ——第*i*闭室第K壁终止点的y坐标,

h_K^i ——第*i*闭室第K壁的长度,

A_K^i, B_K^i ——仅与每个闭室构件尺寸有关的系数。

采用同样的局部坐标表达形式,可以得到第*i*闭室第K壁上的 q_{OK}^i 为:

$$q_{OK}^i = -\frac{Q_y}{I_{yy}} \sum_{l=1}^K (\bar{q}_{Ol}^i + \bar{q}_{Aol}^i) \quad (5)$$

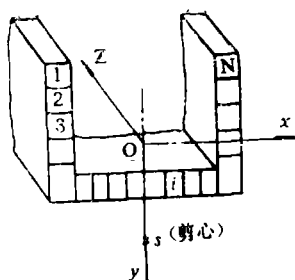


图1

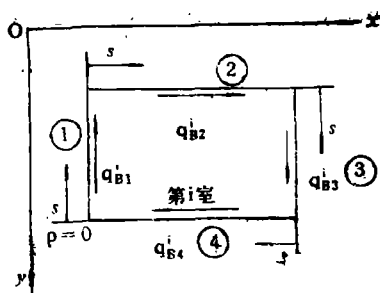


图2

$$\text{式中 } \bar{q}_{O1}^i = A_{(i-1)}^i \cdot [h_{(i-1)}^i]^2 + B_{(i-1)}^i \cdot h_{(i-1)}^i \quad (6)$$

其中 \bar{q}_{AO1}^i ——第*i*闭室第*K*壁上坐标*S*原点处相邻闭室单元所流入的弯曲剪流。

切口处的未知常弯曲剪流 q_{B0}^i 可以通过绕闭室一周剪切变形为零的协调条件求得。该条件可用下式表示:

$$\oint_i \hat{q}_{BK}^i / Gt^i ds = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (7)$$

将 (3) 和 (2) 式代入 (7) 式, 并引进

$$\bar{q}_{B0}^i = q_{B0}^i / Q_Y, \quad \bar{q}_{OK}^i = q_{OK}^i / Q_Y \quad (8)$$

则有

$$\begin{aligned} & -\bar{q}_{B0}^{i-1} \int_{i,i-1} \frac{ds}{t^{i-1}} + \bar{q}_{B0}^i \oint_i \frac{ds}{t^i} - \bar{q}_{B0}^{i+1} \int_{i,i+1} \frac{ds}{t^{i+1}} - \frac{1}{I_{yy}} \\ & \oint_i (A^i S^2 + B^i S) / t^i ds - \oint_i \bar{q}_{OK}^i / t^i ds = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, N) \end{aligned} \quad (9)$$

式中 \bar{q}_{B0}^{i-1} 、 \bar{q}_{B0}^i 、 \bar{q}_{B0}^{i+1} ——分别为由单位剪力 ($Q_Y = 1$) 作用所引起的第 (*i*-1) 闭室、第*i*闭室和第 (*i*+1) 闭室切口处未知弯曲常剪流。

方程式 (9) 左边的第一项和第三项表示和相邻闭室公共壁有关的线积分。

$$\text{令 } P_B^i = \frac{1}{I_{yy}} \oint_i (A^i S^2 + B^i S) / t^i ds - \oint_i \bar{q}_{OK}^i / t^i ds \quad (10)$$

写成求和形式为

$$P_B^i = \frac{1}{I_{yy}} \sum_{j=1}^K [A_j^i (h_j^i)^3 / 3 + B_j^i \cdot (h_j^i)^2 / 2] / t_j^i - \frac{1}{I_{yy}} \sum_{j=1}^K \frac{[\sum_{j=1}^i (\bar{q}_{O1}^j + \bar{q}_{AO1}^j)] \cdot h_j^i}{t_j^i} \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{再引进} \quad a^i &= - \int_{i, i-1} \frac{ds}{t^{i-1}} = - \frac{\sum_{(i, i-1)} h_l^{(i, i-1)} / t_l^{(i, i-1)}}{I^{(i, i-1)}} \\ b^i &= \oint_i \frac{ds}{t^i} = \frac{\sum_i h_l^i / t^i}{I^i} \\ c^i &= - \int_{i, i+1} \frac{ds}{t^{i+1}} = - \frac{\sum_{(i, i+1)} h_l^{(i, i+1)} / t_l^{(i, i+1)}}{I^{(i, i+1)}} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中 $h_l^{(i, i-1)}$ ——第*i*闭室与第*(i-1)*闭室公共壁*l*的长度,

$t_l^{(i, i-1)}$ ——第*i*闭室与第*(i-1)*闭室公共壁*l*的壁厚,

$I^{(i, i-1)}$ ——第*i*闭室与第*(i-1)*闭室公共壁数。

其它符号意义类推, 就可得到下列关于未知常弯曲剪流 \bar{q}_{BO}^i 的方程式

$$a^i \bar{q}_{BO}^{i-1} + b^i \bar{q}_{BO}^i + c^i \bar{q}_{BO}^{i+1} = P_B^i \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (13)$$

写成矩形式为

$$[K] \left\{ \bar{q}_{BO} \right\} = \left\{ P_B \right\} \quad (14)$$

式中

$$\left\{ \bar{q}_{BO} \right\} = \left\{ \bar{q}_{BO}^i \right\}$$

$$\left\{ P_B \right\} = \left\{ P_B^i \right\}$$

$[K]$ 是由 a^i 、 b^i 、 c^i ($i=1, 2, \dots, N$) 所组成的系数矩阵。于是未知剪流 \bar{q}_{BO}^i ($i=1, 2, \dots, N$) 可求得

$$\left\{ \bar{q}_{BO} \right\} = [K]^{-1} \left\{ P_B \right\} \quad (15)$$

由所有闭室的弯曲剪流对*Z*轴所形成的扭矩 T_B 与横向剪力 Q_y 对*Z*轴力矩相平衡, 就可求得剖面扭心坐标 a_x , 即

$$T_B = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K \int_0^{h_l^i} \hat{q}_{Bk}^i r_{O1}^i ds \quad (16)$$

$$T_B - Q_y \cdot a_x = 0 \quad (17)$$

式中 r_{O1}^i ——第*i*室第*K*壁上任意点切线与坐标原点间的距离。

引用 $\bar{q}_{BK}^i = \hat{q}_{BK}^i / Q_y$, 于是扭心坐标 a_x 为:

$$a_x = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K \int_0^{h_l^i} \bar{q}_{BK}^i r_{O1}^i ds \quad (18)$$

用同样的方法可求得扭心的 a_y 坐标。

三、横向力作用下船体梁剖面的有效剪切面积

根据剪流在 dz 长度薄壁梁上所引起的剪切变形能等于剪力 Q_y 在 Y 方向剪切挠度 $d\eta$ 上所做的功,可以求得剖面在 y 方向的有效剪切面积 A_{ey} 。

$$\frac{1}{2} Q_y d\eta = \left[\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K \int_0^{h_j^i} (\hat{q}_{Bj}^i)^2 / 2G t_j^i ds \right] dz \quad (19)$$

将前面求得的剪流表达式(3)、(2)和(5)代入(19)式,则有

$$Q_y = GA_{ey} \frac{d\eta}{dz} \quad (20)$$

式中 $A_{ey} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K \frac{K Y_j^i}{t_j^i}} \quad (21)$

其中 A_{ey} ——剖面沿 y 方向的有效剪切面积。

$$\begin{aligned} K Y_j^i = & \frac{1}{I_{yy}} \left[(A_j^i)^2 \frac{(h_j^i)^5}{5} + A_j^i B_j^i (h_j^i)^4 / 2 + (B_j^i)^2 (h_j^i)^3 / 3 \right] \\ & + \frac{2}{I_{yy}} \left[\frac{1}{I_{yy}} \sum_{j=1}^i (\bar{q}_{0j}^i + \bar{q}_{A0j}^i) + \bar{q}_{B0}^i \right] \left[A_j^i \frac{(h_j^i)^3}{3} + B_j^i \frac{(h_j^i)^2}{2} \right] \\ & + \left(\frac{1}{I_{yy}} \sum_{j=1}^i (\bar{q}_{0j}^i + \bar{q}_{A0j}^i) + \bar{q}_{B0}^i \right)^2 \cdot h_j^i \end{aligned} \quad (22)$$

用同样的方法可以求得沿 X 方向的有效剪切面积 A_{ex} 。

分析 A_{ey} 的表达式,可见其量纲是正确的。与文献[3][1]中所给出的相应公式相比较,修正了其中一些错误,提供了计算船体剖面弯曲有效剪切面积的另一个公式。

四、St.Venant 扭转刚度 GI_t 计算

剖面的St.Venant扭转刚度 GI_t 可在计算自由扭转所产生的Bredt剪流时求得。对于多闭室薄壁梁剖面,自由扭转在每个闭室所产生的剪流应满足下列环流方程

$$a^i \bar{q}_B^{i-1} + b^i \bar{q}_B^i + c^i \bar{q}_B^{i+1} = 2A^i \quad (i=1,2,\dots,N) \quad (23)$$

式中 $\bar{q}_B^i = q_B^i / G \frac{d\phi}{dz}$ 为自由扭转的单位剪流;

A^i ——第 i 闭室的封闭剖面积;

ϕ ——扭转角;

a^i, b^i, c^i 同(12)式。

同样可把 (23) 式表达成矩阵形式

$$[K] \{ \overline{q_B} \} = 2 \{ A \} \quad (24)$$

式中 $\{ \overline{q_B} \} = \{ q_B^i \}$

$$\{ A \} = \{ A^i \}$$

于是可求得Bredt剪流

$$\{ \overline{q_B} \} = 2[K]^{-1} \{ A \} \quad (25)$$

剪流 q_B^i 绕剪心轴所形成的扭矩 T_s 为

$$T_s = \sum_{i=1}^N \oint_i q_B^i r_s^i ds = G I_t \frac{d\phi}{dz} \quad (26)$$

式中 r_s^i ——第 i 闭室壁上任意点切线至剪心的距离。

由 (26) 式及单位剪流 $\overline{q_B^i} = q_B^i / G \frac{d\phi}{dz}$ 可得

$$G I_t = G \sum_{i=1}^N \overline{q_B^i} \oint_i r_s^i ds \quad (27)$$

因为 $\oint_i r_s^i ds = 2A^i$, 故得St. Venant扭转刚度为

$$G I_t = 2G \sum_{i=1}^N \overline{q_B^i} A^i \quad (28)$$

五、扇性坐标 $\hat{\Omega}$ 的计算

多闭室船体梁约束扭转时的翘曲按Kollbrunner的修正理论由下式给出:

$$W = - \frac{d\theta}{dz} \hat{\Omega} \quad (29)$$

式中 θ ——翘曲扭转函数;

$\hat{\Omega}$ ——剖面的扇性坐标, 其计算公式为^[4]

$$\hat{\Omega} = \int_0^p \left(r_s - \frac{\overline{q_B}}{t} \right) d\rho \quad (30)$$

对于剖面上第 i 闭室第 k 壁上的扇性坐标 $\hat{\Omega}_K^i$, 在采用该壁的局部坐标 S 后, 可按下列式计算

$$\hat{\Omega}_K^i = \int_0^s \left(r_{sK}^i - \overline{q_B^i} / t_K^i \right) ds + \hat{\Omega}_{OK}^i \quad (31)$$

式中 $\hat{\Omega}_{OK}^i$ ——第 i 闭室第 K 壁上局部坐标 S 原点处的扇性坐标值;

$\int_0^s (r_{SK}^i - \bar{q}_0^i / t_K^i) ds$ ——该壁上任一点与S原点处扇性坐标的相对值。

对于具体某一壁来说, 该壁切线至剪心距离 r_{SK}^i 为定值, 剪流 \bar{q}_B^i 前面已求得, 故每个壁首尾节点之间扇性坐标相对值可以确定。因此只需选一个点作为扇性零点, 就可以得到各点的扇性坐标值, 然后通过剖面对同一极点、不同起始点扇性坐标之间的转换关系, 就可以求得剖面上正规的扇性坐标 $\hat{\Omega}$ 。

六、约束扭转刚度 $EI_{\Omega\Omega}$ 计算

首先计算约束扭转时剖面上所产生的二次剪流 τ_w 和二次扭矩 T_w 。

每个闭室壁上的二次剪流 \hat{q}_{WK}^i 可按下式^[4]计算:

$$\hat{q}_{WK}^i = E \frac{d^3 \theta}{dz^3} \int_0^s \hat{\Omega}_K^i t_K^i ds + q_{W0}^i \quad (32)$$

式中 q_{W0}^i ——第 i 闭室切口处的常二次剪流。

第一项是按开口剖面计算的第 i 闭室第 K 壁上某一点处的二次剪流, $\hat{\Omega}_K^i$ 为该点的扇性坐标。

切口处未知常二次剪流可利用变形协调条件

$$\oint_i \hat{q}_W^i / t^i ds = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (33)$$

求得。

比较(32)(33)与(1)(7)式, 可以看到它们是类似的, 差别仅在于积分项中 y_K^i 换成了

$\hat{\Omega}_K^i$, 因此可用类似公式进行计算:

$$a^i \bar{q}_{W0}^{i-1} + b^i \bar{q}_{W0}^i + c^i \bar{q}_{W0}^{i+1} = P_W^i \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (34)$$

式中 $\bar{q}_{W0}^i = q_{W0}^i / E \frac{d^3 \theta}{dz^3}$,

$$P_W^i = - \oint_i \left[\int_0^{\rho} \hat{\Omega}_K^i t_K^i d\rho \right] \frac{ds}{t^i},$$

a^i, b^i, c^i 同(12)式。

写成矩阵形式

$$[K] \{ \bar{q}_{W0} \} = \{ P_W \} \quad (35)$$

式中 $\{ \bar{q}_{W0} \} = \{ \bar{q}_{W0}^i \}$

$$\{ P_W \} = \{ P_W^i \}$$

于是

$$\{\bar{q}_{w0}\} = [K]^{-1}\{P_w\} \quad (36)$$

二次剪流 \hat{q}_w^i 绕扭心轴所形成的二次扭矩 T_w 按下式计算:

$$T_w = \sum_{i=1}^N \oint_i \hat{q}_w^i r_s^i ds = -EI_{\Omega\Omega} \frac{d^3\theta}{dz^3} \quad (37)$$

引用 $\bar{q}_{wk}^i = \hat{q}_{wk}^i / E \frac{d^3\theta}{dz^3}$, 则可得约束扭转刚度:

$$EI_{\Omega\Omega} = - \sum_{i=1}^N \oint_i \bar{q}_w^i r_s^i ds \quad (38)$$

综上所述, 剖面扭心位置, St. Venant 扭转刚度 GI_t 及约束扭转刚度 $EI_{\Omega\Omega}$ 均可在相应的剪流计算后求得, 而相应剪流的计算都归结为求解相同的线性方程组, 不同的仅是常数项, 因此程序实施非常方便, 而且 $[K]$ 只需计算一次。

七、用迭代法修正二次剪应力对扭转特性参数影响

我们知道在用 Kollbrunner 理论对船体梁进行扭转分析中, 考虑二次剪应力 τ_w 对翘曲 W 影响时, 只是把 φ' 修正为 θ' , 而没有考虑二次剪应力 τ_w 对扇性坐标 $\hat{\Omega}$ 和扭心位置的影响。 $\hat{\Omega}$ 仍采用自由扭转中的扇性坐标, 这显然是不合理的。事实上随着二次剪应力 τ_w 的产生和变化, 扭心的位置、扇性坐标等扭转特性也将相应地发生变化。要考虑二次剪应力 τ_w 这种影响, 用文献[1] 有限元法是很难做到的。采用本文的方法, 在上述相应剪流计算基础上, 可用迭代法修正二次剪应力对扭心位置和扇性坐标等扭转特性参数的影响, 具体迭代做法如图 3。

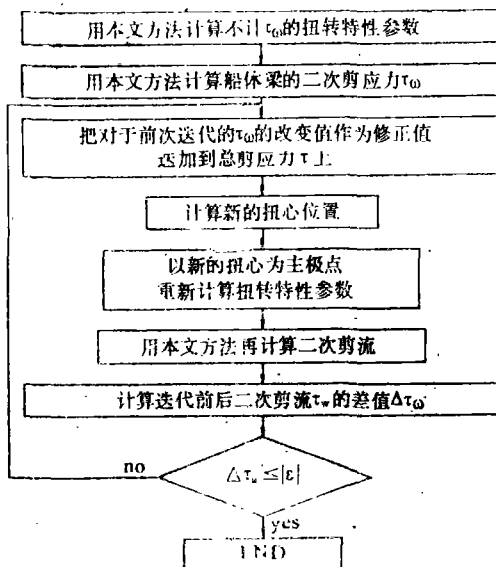


图 3

八、程序实施框图和算例

根据上述公式编制的程序, 可计算复杂船体薄壁梁剖面弯、剪、扭全部特性参数, 程序实施框图见图 4。

本程序具有节点和单元自动生成功能, 可以进行图检。在计算闭口和混合剖面时, 闭室切口只要不切在相邻闭室的公共壁上, 切口可任意。整个计算所需信息量少, 对于开口、闭口和混合剖面均可做到规格化。下面给出几个典型剖面算例。

1. 简单双连域剖面算例

剖面形状与尺寸如图 3 所示, 计算给出:

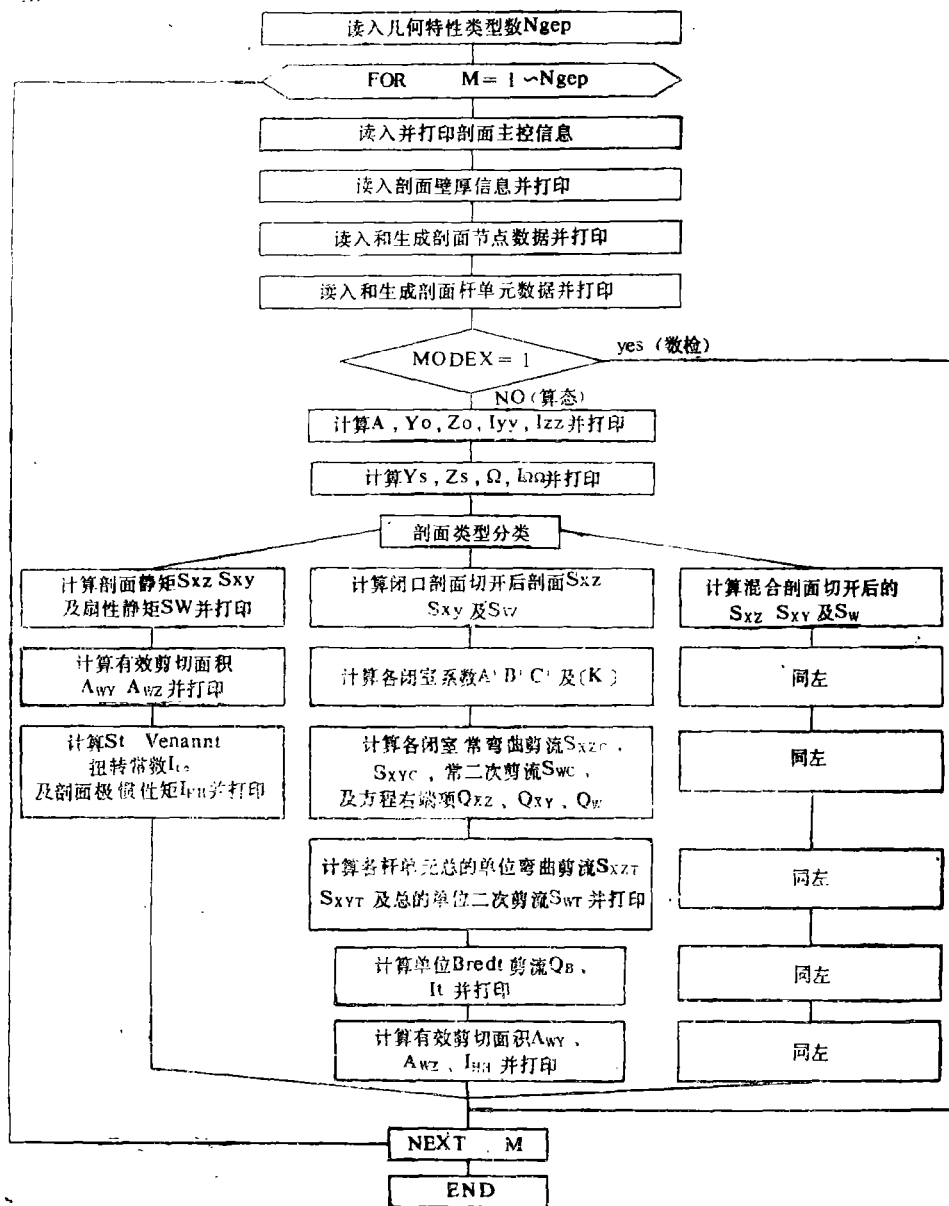


图 4

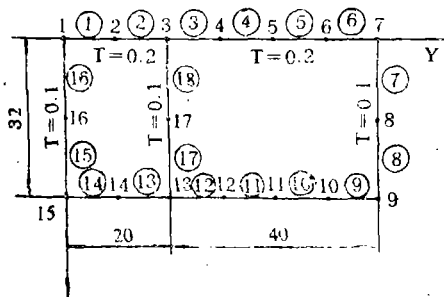


图 5

剖面面积: $A = 3.6800E + 01 \text{ cm}^2$;
 对Z轴惯性矩: $I_{yy} = 1.6049E + 04 \text{ cm}^4$;
 对Y轴惯性矩: $I_{zz} = 7.2363E + 03 \text{ cm}^4$;
 形心位置: $Y_0 = 3.1739E + 01 \text{ cm}$;
 $Z_0 = 1.6000E + 01 \text{ cm}$;
 扭心位置: $Y_s = 1.7462E + 00 \text{ cm}$;
 $Z_s = 0$;

扇性惯性矩: $I_{\Omega\Omega} = 9.5112E + 04 \text{ cm}^6$;

St. Venant 扭转常数: $I_t = 1.4202E + 04 \text{ cm}^4$;

有效剪切面积: $A_{\omega z} = 1.0482E + 01 \text{ cm}^2$;

$A_{\omega y} = 2.1227E + 01 \text{ cm}^2$;

极惯性矩: $I_{HH} = 1.4813E + 04 \text{ cm}^4$ 。

各节点处扇性坐标值见表1, 各单元之节点处的扇性静矩见表2。

表 1

单位: cm^2

节点号	$\hat{\Omega}$	节点号	$\hat{\Omega}$	节点号	$\hat{\Omega}$	节点号	$\hat{\Omega}$
1	4.6921E + 01	2	5.4158E + 01	3	6.1394E + 01	4	2.0389E + 01
5	-2.0616E + 01	6	-6.1621E + 01	7	-1.0263E + 02	8	0
9	1.0263E + 02	10	6.1621E + 01	11	2.0616E + 01	12	-2.0389E + 01
13	-6.1394E + 01	14	-5.4158E + 01	15	-4.6921E + 01	16	0
17	0						

表 2

单位: cm^4

单元	节点	SWT	节点	SWT	单元	节点	SWT	节点	SWT
1	1	-7.1053E + 01	2	3.0025E + 01	2	2	3.0025E + 01	3	1.4558E + 02
3	3	1.0252E + 02	4	1.8430E + 02	4	4	1.8430E + 02	5	1.8407E + 02
5	5	1.8407E + 02	6	1.0183E + 02	6	6	1.0183E + 02	7	-6.2415E + 01
7	7	-6.2415E + 01	8	-2.2662E + 02	8	8	-2.2662E + 02	9	-6.2415E + 01
9	9	-6.2415E + 01	10	1.0183E + 02	10	10	1.0183E + 02	11	1.8407E + 02
11	11	1.8407E + 02	12	1.8430E + 02	12	12	1.8430E + 02	13	1.0252E + 02
13	13	1.4558E + 02	14	3.0025E + 01	14	14	3.0025E + 01	15	-7.1053E + 01
15	15	-7.1053E + 01	16	-1.0859E + 02	16	16	-1.0859E + 02	1	-7.1053E + 01
17	17	9.2176E + 01	13	4.3061E + 01	18	3	4.3061E + 01	17	9.2176E + 01

2. 开、闭混合剖面算例

剖面形状与尺寸如图 6 所示, 计算给出:

$A = 5.7108E + 03 \text{ cm}^2$; $I_{YY} = 7.1479E + 08 \text{ cm}^4$; $I_{ZZ} = 9.9843E + 07 \text{ cm}^4$;

$Y_0 = 0$; $Z_0 = 1.0903E + 02 \text{ cm}$; $Y_s = 0$;

$Z_s = 3.2707E + 01 \text{ cm}$; $I_{\Omega\Omega} = 5.604E + 11 \text{ cm}^6$; $I_t = 1.5755E + 08 \text{ cm}^4$;

$A_{\omega z} = 1.0097E + 03 \text{ cm}^2$; $A_{\omega y} = 3.845E + 03 \text{ cm}^2$; $I_{HH} = 1.8697E + 08 \text{ cm}^4$ 。

各节点处扇性坐标值见表 3, 各单元节点处的扇性静矩见表 4。

表 3

单位: cm^2

节点	$\hat{\Omega}$	节点	$\hat{\Omega}$	节点	$\hat{\Omega}$	节点	$\hat{\Omega}$
1	$-2.9170\text{E}+04$	2	$1.3350\text{E}+04$	3	$9.9221\text{E}+03$	4	$-9.9221\text{E}+03$
5	$-1.3350\text{E}+04$	6	$2.9170\text{E}+04$	7	$-2.3507\text{E}+03$	8	$2.2448\text{E}+03$
9	$-2.2448\text{E}+03$	10	$2.3507\text{E}+03$				

表 4

单位: cm^4

单元	节点	SWT	节点	SWT	单元	节点	SWT	节点	SWT
1	1	0	2	$-4.7462\text{E}+06$	2	2	$-3.5260\text{E}+06$	3	$3.4555\text{E}+06$
3	3	$3.6270\text{E}+06$	4	$3.6270\text{E}+06$	4	4	$3.4555\text{E}+06$	5	$-3.5260\text{E}+06$
5	6	0	5	$4.7462\text{E}+06$	6	10	$-1.4129\text{E}+06$	2	$1.2202\text{E}+06$
7	3	$-1.7153\text{E}+05$	9	$9.8006\text{E}+05$	8	4	$1.7153\text{E}+05$	8	$-9.8006\text{E}+05$
9	5	$1.2202\text{E}+06$	7	$-1.4129\text{E}+06$	10	7	$-1.4129\text{E}+06$	8	$-1.4319\text{E}+06$
11	8	$-2.4120\text{E}+06$	9	$-2.4120\text{E}+06$	12	9	$-1.4319\text{E}+06$	10	$-1.4129\text{E}+06$

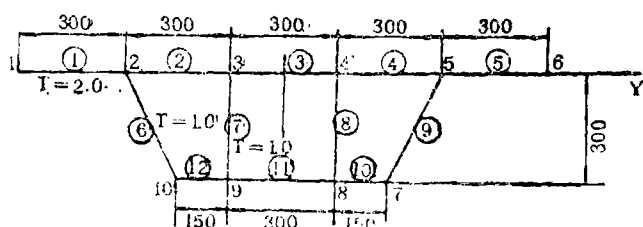


图 6

3. 开闭混合剖面算例

剖面为闭开域混合型, 划分18个节点, 22个线单元, 剖面形状与尺寸如图7所示。计算的主要结果如下:

$$\begin{aligned}
 A &= 4.2000\text{E}+03 \text{ cm}^2; & I_{YY} &= 1.4373\text{E}+07 \text{ cm}^4; & I_{ZZ} &= 1.7356\text{E}+06 \text{ cm}^4; \\
 Y_0 &= 0; & Z_0 &= 2.0857\text{E}+01 \text{ cm}; & Y_s &= 0; & Z_s &= -3.4607\text{E}+01 \text{ cm}; \\
 I_{\Omega\Omega} &= 8.6537\text{E}+09 \text{ cm}^6; & I_t &= 9.5554\text{E}+05 \text{ cm}^4; & A_{\Omega Z} &= 7.0849\text{E}+02 \text{ cm}^2; \\
 A_{\Omega Y} &= 1.6717\text{E}+03 \text{ cm}^2; & I_{HH} &= 1.0423\text{E}+07 \text{ cm}^4.
 \end{aligned}$$

各节点处扇性坐标值见表5, 各单元节点处的扇性静矩见表6。

表 5

单位: cm^2

节点	Ω	节点	Ω	节点	Ω	节点	Ω
1	$-2.0498\text{E}+03$	2	$-6.4978\text{E}+02$	3	$-1.9248\text{E}+03$	4	$-3.3248\text{E}+03$
5	$9.5022\text{E}+02$	6	$2.2322\text{E}+03$	7	$4.0975\text{E}+02$	8	$1.1584\text{E}+03$
9	0	10	0	11	$-4.0975\text{E}+02$	12	$-1.1584\text{E}+03$
13	$-9.5022\text{E}+02$	14	$-2.2322\text{E}+03$	15	$6.4978\text{E}+02$	16	$2.0498\text{E}+03$
17	$3.3248\text{E}+03$	18	$1.9248\text{E}+03$				

表 6

单位: cm^4

单元	节点	SWT	单元	节点	SWT	单元	节点	SWT	单元	节点	SWT
1	1	-3.7184E+05	2	2	-5.6081E+05	2	2	5.5206E+05	3	3	3.7184E+05
3	3	3.7184E+05	4	4	4.3751E+03	4	4	4.3751E+03	1	1	-3.7184E+05
5	2	-1.1129E+06	5	7	-1.0918E+06	6	7	2.2697E+05	5	5	3.7656E+05
7	9	-2.6598E+04	7	11	1.8475E+04	8	11	1.8475E+04	9	9	-2.6598E+04
9	13	3.7656E+05	11	12	2.2697E+05	10	5	-7.1528E+05	6	6	-4.9251E+05
11	8	9.8723E+04	7	12	2.0849E+05	12	12	-9.8723E+04	11	11	-2.0849E+05
13	14	-4.9251E+05	13	14	-7.1528E+05	14	6	-4.9251E+05	8	8	8.3890E+04
15	8	-1.4833E+04	10	16	1.8209E+05	16	10	1.8209E+05	12	12	-1.4833E+04
17	12	8.3890E+04	14	18	-4.9251E+05	18	13	-1.0918E+06	15	15	-1.1129E+06
19	15	-5.6081E+05	16	20	-3.7184E+05	20	16	-3.7184E+05	17	17	4.3751E+03
21	17	4.3751E+03	18	22	3.7184E+05	22	18	3.7184E+05	15	15	5.5206E+05

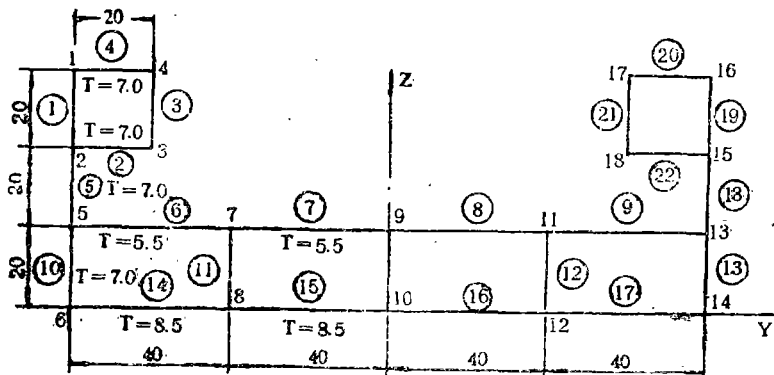


图 7

参 考 文 献

- [1] 顾永宁: 复杂薄壁剖面弯、剪、扭特性参数的有限元计算, 《船舶工程》, 1981(3)
- [2] 胡毓仁: 船体薄壁梁的二次剪流和二次扭矩, 《中国造船》, 1985(2)
- [3] 清水作造、矢岛久义: 水平纵曲げおよび捻り考虑したユニテナー船の船体纵强度に関する研究《日本造船学会论文集》第135号
- [4] Haslum, K. and Tonnessen, A.: An Analysis of Torsion in Ship Hulls, European Shipbuilding, No5/6, 1972

(1986年11月收到 责任编辑: 翁长俭)

Calculation of Properties of Multicell Hull Section Using Shear Flow Theory

Huang Yiping Yan Yongqian

Abstract

This paper presents a method for applying the theory of shear flow to the calculation of the properties of shear, bend and torsion of the section of the hull thin-walled beam. Furthermore, a standard format suitable for computers and a formula for calculating the effective shear area of the hull section under bending are given in the paper. The influence of warping shear stresses both on the position of the shear centre and on the sectorial coordinates can be corrected by the iterative method. The results of calculation made by the program which is worked out by the method given prove completely valid after computations of various problems.

Key words: thin-walled beam; multi-cell section; shear flow theory; sectorial characteristics