

油船结构强度分析与研究*

张少雄 杨永谦

(武汉交通科技大学船舶与土木工程学院 武汉 430063)

摘要: 简单分析和评述了油船结构强度计算的各种方法,从实用和高效的角度出发,提出用一个完整舱段和两个半舱段的计算模型来分析计算油船结构纵横强度的有限元直接计算方法,并对一艘实船进行了分析

关键词: 油船; 横强度; 有限元法; 直接计算

中图法分类号: U 674.13⁺3.1

油船结构的强度分析有总纵强度与横向强度两部分。由于油船结构的特点,其横强度的分析显得十分重要,而在横强度的分析中,应该考虑纵向构件的变形对横向框架强度的影响。对于油船的结构设计,现在一般认为还必须用有限元法进行直接计算——对立体舱段(或整个货舱区)进行三维空间刚架的有限元分析计算,得到各种载荷工况下结构节点上的位移和节点力,再将上述节点位移或节点力施加到横向框架上,进而对平面框架结构进行二维有限元分析,求得强肋骨框架的应力状态。

对于油船结构的分析,目前有许多不同的计算方法^[1]。例如,总纵强度的计算一般采用传统的船体梁法或压缩平板架法,它们均采用近似等效的合成应力方法来求得纵向构件的内力;在横强度的计算中,为了获得强肋骨框架平面上各点应力的精确值,一般都采用平面有限元法分析;而纵向构件对横框架的支持也有多种表达形式,突出的代表是强迫位移法和等效纵向压缩法,后者是一种近似的方法,其合理性及精确性影响了所求得的横强度的可靠性。

基于 Timoshenko 梁理论的等值梁法适用于细长型船舶结构。而油船结构多为丰满型,用等值梁法只能粗略地分析其结构的总纵强度,而且无法考虑结构的横向强度和局部强度。压缩平面法

(等效梁系法)把立体的舱区简化为由若干等效梁的梁系来实现结构分析。它采用应力合成的思想来计算纵向强力构件的内力,对于舷侧、纵舱壁这些大的构件,简化成梁则难以考虑型线变化等结构细节的影响,所求得的内力及应力也不能反映实际的应力分布,从而限制了横强度分析的精确性和可靠性。而且可能会掩盖局部强度的一些问题,对横强度的评估不利。另外,这种方法只能针对特定结构形式(如单底单舷,横向具有一个中油舱和两个翼舱)的油船结构进行分析,而对于其它结构形式的油船则不能采用该计算模型。

对整个货油舱段进行有限元分析最能反映油船结构受力的实际情况,然而由于计算工作量大,使它不易在船舶设计中广泛应用。用刚架模型来计算横强度又难以考虑高腹板桁材及其结合部的应力状态。比较实用的计算模型是用二维元来进行横框架分析,但要考虑纵向构件对横框架的影响。因此计算分两阶段:(1)建立三维结构模型,将横框架各构件简化成梁元,置于与纵向构件相交的原框架位置,计算由此组成的空间刚架,求出与横框架的相互作用力,避免在结构细节的模拟上花费过多的精力,以减少计算工作量;(2)用平面应力单元、杆单元和边界单元对横框架进行离散,对横框架的强度进行二维有限元细化分析。将纵向构件作用于横框架上的力作为外力的一部分参

* 收稿日期: 1999-07-06

张少雄: 男, 34岁, 博士, 副教授

* 交通部跨世纪人才专项经费(批准号: 96060228)和武汉市科委青年“晨光”计划基金(批准号: 97006086)资助

与计算, 最终求得横框架上的应力状态

1 一种综合考虑油船结构纵横强度的实用的有限元直接计算方法

原则上说, 如果可以将油船结构的所有纵向构件及横向构件都合理地离散成为足够细的有限元网格, 对油船进行全船有限元分析, 则无所谓纵横强度的区分, 结构的纵向强度和横强度可同时进行, 自然考虑了纵向构件对横向构件强度的影响。但是, 对全船结构进行有限元离散, 又不能忽略必要的细节, 一是工作量巨大, 二是对计算机容量和速度的要求太高。

实践证明这样做是没有必要的, 因为无论在何种装载条件和波浪条件下, 从弯曲状态下横强度的角度来说, 考虑到船体所受到的弯矩和剪力的分布, 在船中附近货油舱的横向构件之应力状态显然总是最危险的。只要这些构件的强度能够得到满足, 则全船的横强度是可以满足的。所以对油船结构横强度的分析和评估关键在于当最危险的装载和波浪条件时船中附近货油舱的横向构件的强度是否满足要求。

把这些舱室从整船结构中隔离出来是容易的, 而且从计算机容量和速度的角度来看, 在这个隔离体上可以将有限元网络划分得足够细, 从而得到比较精确的应力分布。只要能够将外载荷合理地施加到该隔离体之上, 建立一个合理的比较符合实际的计算模型, 就可以准确地分析油船结构的横强度。

1.1 油船强度计算模型

1.1.1 计算模型 以船体中部的一个完整的货油舱为分析的对象, 将其从整个船体中隔离出来前后船体结构对其影响约化为边界条件(位移边界条件和力的边界条件), 为了减小边界条件近似性的影响, 实际计算中将该完整油舱向前后各延长半个舱段作为计算结构, 如图 1 所示。

在计算舱段两端施加总纵弯曲在端面上的弯矩和剪力, 以及波浪压力、货油压力、船体重量等作用力对它进行有限元分析。

根据船体梁理论, 作用在船体梁任意剖面上的剪力和弯矩为^[3]

$$N(x) = \int_0^x q(x) dx$$

$$M(x) = \int_0^x q(x) dx = \int_0^x \int_0^x q(x) dx dx \quad (1)$$

式中: $q(x)$ 为载荷曲线, $q(x) = p(x) - b(x)$; $p(x)$ 和 $b(x)$ 分别为计算工况的重量曲线和浮力曲线。

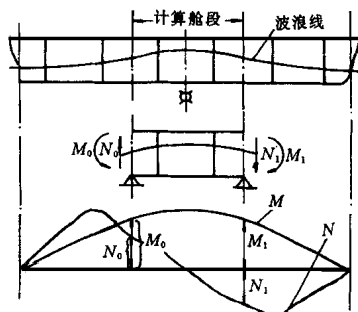


图1 货油舱段计算模型

剪力曲线和弯矩曲线都是连续的, 所以对计算舱段而言, 剪力和弯矩分布为

$$N(x) = \int_0^x [p(x) - b(x)] dx + N_0$$

$$M(x) = \int_0^x \int_0^x [p(x) - b(x)] dx dx + M_0 \quad (2)$$

式中: N_0 和 M_0 分别为左端面的剪力和弯矩值。

本计算模型将舱段两端面的弯矩和剪力作为力的边界条件, 相当于梁的初参数法, 同时计入计算舱段重力和浮力的作用, 因此与总体计算是等价的。但由于对计算舱段直接用重力和浮力进行三维有限元分析, 不仅可以计算纵向构件的总纵弯曲应力, 还可以计算出各横向构件的应力状态, 而且纵横强度是耦合的, 能比较正确地反映油舱货油舱的应力状态。

1.1.2 单元划分 对图 1 所示的立体舱段, 可采用两种方式进行有限元离散。

1) 如果将货油压力及舷外水压力等效离散到相应节点上, 则构成空间平面应力组合结构, 每个单元都处于平面应力状态。对于舷侧板、甲板、船底、舱壁板及大的桁材的腹板等采用空间膜元离散, 而桁材面板、立柱、斜撑等采用杆元离散。由于一般油船结构中还有纵骨或加强筋等小梁, 在离散时可将它们约化为正交异性板^[2]来处理以减少网格的节点数量。

用正交空间膜元和杆元进行立体舱段有限元分析可大大减少自由度, 提高计算效率。

2) 如果将货油压力及舷外水压力直接作用在板面上, 则需要采用板壳元来处理, 虽然可较好地反映板的弯曲特性, 但缺点是结构自由度较多。

本文建议采用正交空间膜元和杆元进行离散的有限元模型。

1.2 外力


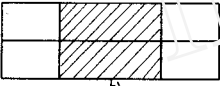
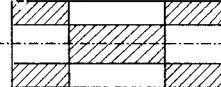

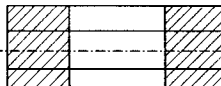

1.2.1 装载工况 计算载荷应考虑可能的最危

险装载情况 对于内河油船,可采用表 1 所列出的装载状态来计算

1 2 2 舷外水压力及端面弯矩和剪力 根据装载情况,将船体斜置于波长等于船长,波高等于相应航区的波高的波浪之上,求出波浪中拱和中垂状态下船体各理论站处的吃水高度,由此计算舷外水压力分布,然后施加到计算舱段相应节点上;计算出相应在装载状态下的总纵弯矩和剪力,取

计算舱段端面处的值,等效分配到计算舱段端面相应的节点之上 将总纵弯曲的弯矩和剪力分配到计算模型前后端面相应的节点上可能难以做到很精确,但是由于所关心的最危险的断面距端面较远,根据 St Venant 原理,这种近似性对立体舱段中间部分纵横构件的应力状态影响不大.另外,有限元计算时还要计入立体舱的结构重量,并且应通过调整密度尽量使支座反力为 0

表 1 油船计算部位货油舱装载状态

结构形式	装载状态	
有一道中纵舱壁的油船		
	a)	b)
有两道纵舱壁的油船		
	c)	d)
		
		e)

1 3 边界条件

有限元计算模型不能产生刚体位移(线位移和角位移),因此在计算舱段上应施加约束,原则是不影响计算舱段的实际应力状态,采用空间平面应力组合结构模型时,边界条件假定为:所有节点的三个方向的转角均为 0;两端面下面舷侧板处 4 个顶点的垂向位移为 0;为了消除刚体位移,在上述 4 个点上还要适当约束横向及纵向位移

2 计算实例

采用本文提出的油船强度计算方法,对一条长江 5 000 t 原油半分节驳进行了计算分析.为了说明其有效性,还对全部货油舱段进行了有限元分析.该船航行于长江 A 级航区

2.1 主要尺度

总长: $L_T = 85.2\text{ m}$ 水线长: $L_w = 84.15\text{ m}$
型宽: $B = 20.8\text{ m}$ 设计吃水: $d = 3.95\text{ m}$
全船肋距: $S = 0.6\text{ m}$ 型深: $D = 4.8\text{ m}$
梁拱高度: $\sim 0.22\text{ m}$

2.2 结构形式

双舷,双底;货油舱区从 # 14 到 # 122,在 # 38,

86和# 110 肋位处设有槽型横舱壁,将整个舱区分为 5 个货油舱,横舱壁上设有水平桁;每隔 4 个肋位有一个强框架.还设有两道纵桁架,纵桁架有交叉斜撑连系

2.3 有限元计算模型

取从 # 50~ # 98 肋位间的一段隔离体,它含有一个完整的舱段和两个相邻的半舱段,如图 2 共离散 1 179 个节点,1 578 个空间膜元和 1 071 个空间杆元.如对全部货油舱段进行计算,则需 2 624 个节点,3 622 个空间膜元和 2 558 个空间杆元

2.4 边界条件

所有节点的三个方向的转角均为 0.其它约束的节点如图 2

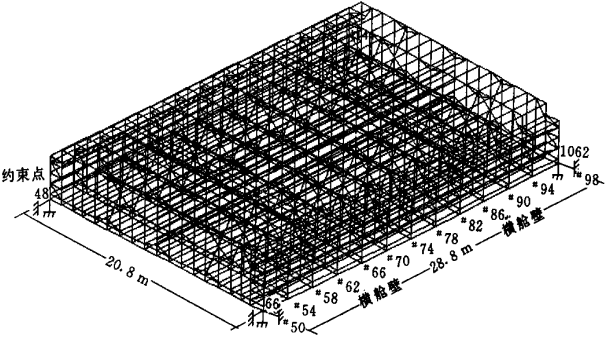


图 2 有限元计算模型

节点数 1 179;
协调元 192
Wilson 单元 1 386;
杆元 1 071

2 5 外力

考虑最危险的装载情况见表 1a)。由装载情况和长江 A 级航区的波高 $\eta=2.5\text{m}$, 用外力直接计算程序求出油船结构在波浪中拱和中垂状态下的浮态及波浪弯矩 M 和剪力 N , 见表 2 计算时将油船斜置在波长等于船长的波浪之上 线性插

值求出模型两端面的弯矩和剪力以及各横向构件所在肋位处的吃水

立体舱段所受的外力包括:

1) 油压 根据装载情况, 不考虑货油的晃荡效应 渣油密度 $\rho=0.87\sim 0.95$ (随温度而变化) 取 $\rho=0.95\text{ t/m}^3$ 计算出各高度处的油压, 再静力等效到相应节点之上

2) 水压 根据油船的浮态, 求出舷外水各高度处及船底的水压, 再静力等效到相应节点上

表 2 5 000 t 原油半分节驳各理论站吃水、波浪弯矩和剪力

站号	中 拱			中 垂		
	ZH /m	N /kN	M /kN · m	ZH /m	N /kN	M /kN · m
0	2.54	0.0	0.0	5.10	0.0	0.0
1	2.59	- 1 065.2	- 2 001.5	5.02	- 1 999.6	- 3 978.9
2	2.74	- 3 177.2	- 11 751.2	4.79	- 5 139.1	- 19 900.9
3	2.98	- 2 089.3	- 22 886.2	4.48	- 4 858.9	- 41 131.3
4	3.30	- 1 075.1	- 29 531.4	4.10	- 4 366.5	- 60 695.6
5	3.68	- 104.8	- 32 007.9	3.71	- 3 582.3	- 77 593.6
6	4.07	778.2	- 30 484.3	3.33	- 2 536.6	- 90 538.0
7	4.42	1 174.9	- 26 313.6	3.01	- 1 648.0	- 99 446.9
8	4.73	1 403.4	- 20 910.9	2.75	- 643.2	- 101 135.6
9	4.93	1 678.3	- 14 423.2	2.60	618.1	- 104 595.7
10	5.01	1 893.6	- 6 927.2	2.55	1 925.4	- 99 317.9
11	4.92	681.7	- 967.2	2.60	1 804.6	- 90 983.1
12	4.70	- 699.1	- 1 062.6	2.74	1 402.1	- 84 290.0
13	4.39	- 1 713.1	- 6 779.7	2.99	1 154.7	- 79 516.7
14	4.02	- 1 152.6	- 12 896.1	3.31	2 197.6	- 72 493.0
15	3.62	- 422.6	- 16 295.1	3.69	3 076.4	- 61 411.9
16	3.25	617.9	- 16 019.2	4.07	3 917.9	- 46 763.4
17	2.93	1 993.4	- 10 539.7	4.43	4 765.6	- 28 452.5
18	2.67	1 436.9	- 2 586.8	4.73	3 397.7	- 10 515.5
19	2.52	46.9	450.4	4.94	980.8	- 1 415.2
20	2.47	0.0	0.0	5.01	0.0	0.0

3) 端面弯矩和剪力 将端面剪力平均摊到端面承受剪力的节点之上; 根据中和轴的高度把端面弯矩折算到相应的节点

2 6 计算结果

根据上述有限元计算模型, 对长江 5 000 t 原油半分节驳装载条件 a) 时中拱和中垂状态下的强度进行了分析计算 表 3 和表 4 分别给出了采用本文的计算模型以及全部货油舱段模型时, 装载条件 a) 时中拱和中垂状态下货油舱内各横向构件空间膜元和杆元最大应力的计算结果及其所在位置(单

元). 表中相当应力

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2 - \sigma_{11} \cdot \sigma_{22} + 3\tau_{12}^2} \quad (3)$$

计算表明:

两种计算模型所得各横向构件的应力结构有很好的可比性, 说明本文提出的方法是正确可行的 横向构件的应力水平在装载工况 a) 时的波浪中拱状态下是较危险的 而各种工况下[#] 74 肋位处的横框架应力水平最大 计算所得纵向构件的应力水平平均小于横向构件中的最大应力 各横框架及横舱壁的单位位置如图 3

表 3 各横向构件的应力计算结果比较(装载条件(a)、中拱状态) M Pa

肋位号	计算模型	膜 元							杆 元	
		单元	σ_1	σ_2	τ_{12}	σ_{max}	σ_{in}	σ_c	单元	$\sigma_{\pm max}$
# 62	本文	[40]	3.396	47.623	- 62.660	91.957	- 40.938	117.884	14	16.564
		[4]	- 1.671	- 18.595	- 44.021	34.694	- 54.960	78.302	19	- 6.519
	全部	[27]	- 16.587	- 1.535	36.421	28.130	- 46.251	65.050	14	4.144
		货油舱	[27]	- 16.587	- 1.535	36.421	28.130	- 46.251	19	- 6.468
# 66	本文	(17)	- 5.715	- 1.969	70.225	66.412	- 74.088	121.737	58	61.657
									60	- 154.234
	全部	(17)	0.537	16.401	64.832	73.785	- 56.846	113.446	58	57.040
		货油舱							60	- 149.734
# 70	本文	(17)	- 5.868	- 1.651	81.545	77.813	- 85.331	141.337	55	66.002
		(18)	- 18.087	- 75.895	- 30.053	- 5.295	- 86.688	86.163	60	- 159.745
	全部	(17)	0.400	15.670	75.860	84.279	- 68.209	132.301	55	70.127
		货油舱	(18)	- 1.450	- 62.098	- 24.928	7.481	- 71.028	60	- 161.654
# 74	本文	(17)	- 5.715	- 2.019	84.844	80.996	- 88.732	147.040	55	77.308
		(18)	- 19.747	- 81.437	- 33.689	- 4.915	- 96.368	93.907	60	- 156.694
	全部	(17)	0.411	15.452	78.736	87.025	- 71.163	137.225	55	78.846
		货油舱	(18)	- 2.707	- 66.627	- 27.961	7.797	- 77.132	60	- 161.757
# 78	本文	(17)	- 5.652	- 1.329	79.893	76.432	- 83.413	138.474	55	74.015
		(18)	- 17.757	- 74.471	- 29.715	- 5.040	- 87.188	84.781	60	- 151.015
	全部	(17)	0.298	15.107	74.261	82.331	- 66.927	129.491	55	76.580
		货油舱	(18)	- 1.707	- 60.886	- 24.530	7.139	- 69.731	60	- 155.152
# 82	本文	(17)	- 5.406	- 1.308	67.635	64.270	- 71.060	117.248	55	57.392
		(18)	- 5.406	- 1.308	67.635	- 64.270	- 71.060	117.248	60	- 141.120
	全部	(17)	0.263	15.136	62.281	70.423	- 55.024	108.913	55	64.705
		货油舱							60	- 139.831
# 86	本文	[40]	3.140	46.354	- 59.136	86.768	- 37.275	110.238	14	15.894
		[4]	- 1.661	- 16.683	- 38.497	30.051	- 48.394	68.552	18	- 5.789
	全部	[27]	- 14.427	2.283	35.014	29.925	- 42.070	62.644	14	5.120
		货油舱	[27]	- 14.426	2.283	35.014	29.925	- 42.070	18	- 5.986

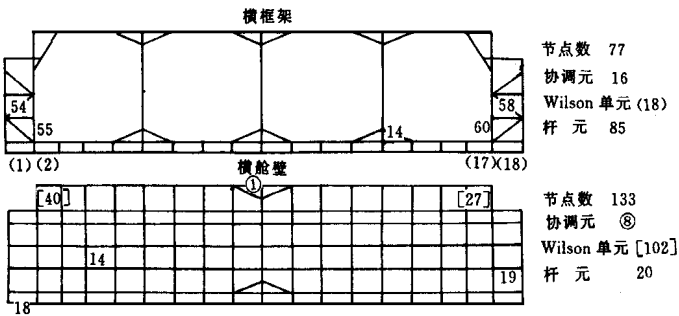


图 3 横框架及横舱壁的单位位置

3 结 论

本文提出的计算模型简便实用, 易于实现

油船结构最危险横向构件的应力水平在中垂和中拱状态下孰大孰小, 可能因船而异, 也与配载等有关, 所以分析计算时应该分别计算中垂和中拱两种情况

表 4 各横向构件的应力计算结果比较(装载条件(a)、中垂状态)

M Pa

肋位号	计算模型	膜 元							杆 元	
		单元	σ_1	σ_2	τ_{12}	σ_{\max}	σ_{\min}	σ_c	单元	$\sigma_{\pm\max}$
# 62	本文		44.312	21.627	16.540	53.025	12.915	47.892	14	13.558
		[4]	- 0.694	- 8.706	- 30.999	26.833	- 35.603	54.248	18	- 4.050
	全部	[41]	2.286	24.078	- 9.296	27.505	- 1.140	28.092	14	7.396
		货油舱	[25]	- 8.073	- 1.023	- 2.796	- 0.049	- 9.047	9.023	18
# 66	本文	(1)	5.273	27.208	- 26.015	44.473	- 11.992	51.525	55	141.664
		(2)	- 7.297	- 2.471	41.592	36.778	- 46.546	72.326	54	- 84.275
	全部								55	146.136
		货油舱	(2)	- 4.997	4.073	45.164	44.929	- 45.853	78.621	54
# 70	本文	(1)	7.217	37.620	- 32.360	58.171	- 13.334	65.859	55	164.294
		(2)	- 7.576	- 2.691	49.718	44.644	- 54.911	86.371	54	- 84.275
	全部	(1)	10.909	39.466	- 32.553	60.734	- 10.360	66.522	55	159.261
		货油舱	(2)	- 5.414	3.757	53.682	53.226	- 54.889	93.632	53
# 74	本文	(1)	7.920	39.131	- 33.399	60.391	- 13.339	68.048	55	172.246
		(2)	- 7.541	- 2.410	51.671	46.802	- 56.663	89.739	54	- 84.275
	全部	(1)	11.520	42.110	- 34.383	64.446	- 10.817	70.480	55	175.821
		货油舱	(2)	- 5.448	3.654	56.154	55.441	- 57.235	97.585	53
# 78	本文	(1)	7.397	36.584	- 31.898	57.068	- 13.087	64.613	55	164.410
		(2)	- 7.424	- 2.195	48.809	44.070	- 53.689	84.798	54	- 84.275
	全部	(1)	10.583	38.677	- 32.389	59.934	- 10.674	65.922	55	166.855
		货油舱	(2)	- 5.570	- 3.533	52.977	52.154	- 54.190	92.102	53
# 82	本文	(1)	6.018	25.942	- 25.437	43.299	- 11.338	49.943	55	141.624
		(2)	- 6.955	- 1.247	40.098	36.085	- 44.313	69.748	54	- 84.275
	全部								55	142.830
		货油舱	(2)	- 5.263	3.689	43.680	43.122	- 44.696	76.056	54
# 86	本文	[40]	9.254	35.280	- 23.637	49.249	- 4.715	51.768	14	13.892
		[4]	0.027	- 8.542	- 28.362	24.426	- 32.941	49.863	18	- 4.180
	全部	[56]	2.846	25.664	8.558	28.517	- 0.007	28.520	14	7.775
		货油舱	[5]	- 0.356	- 2.839	7.788	6.289	- 9.484	13.752	18

参 考 文 献

1 张少雄, 杨永谦 关于油船结构强度计算的几种方法
武汉造船, 1999(1): 4~ 12

2 杨永谦 有限元法及其在结构分析中的应用 大连: 大连海运学院出版社, 1992 95~ 96

3 王杰德, 杨永谦 船体强度与结构设计 北京: 国防工业出版社, 1995 12~ 18

A Study of the Strength of Oil Tanks

Zhang Shaoxiong Yang Yongqian

(Department of Naval Architecture & Civil Engineering, W TU, Wuhan 430063)

Abstract

It summarized and analyzed various kinds of methods for analysis of the strength of tanks A new calculation model was proposed to form the practical and efficient method of tank's strength analysis A numerical example was given to show the validity of the method proposed
Key words: transverse strength; FE analysis; direct calculation; oil tank

