

船舶、土木工程

文章编号: 1000-8608(2007)03-0383-04

舰船完整稳性实时计算方法研究

马坤^{*1}, 李作志¹, 杨洋²

(1. 大连理工大学 船舶 CAD 工程中心, 辽宁 大连 116024
2. 海军装备论证研究中心, 北京 100073)

摘要: 舰船完整稳性和破舱稳性是保障舰船安全的重要性能。目前在设计阶段完整稳性仅通过几种典型载况进行校核, 难以涵盖舰船执行任务或海战过程中复杂多样的实际状况。根据静力学中等体积小角度倾斜原理, 提出了基于液位高度修正的任意浮态实时载况计算方法, 即根据液舱液位测量管或传感器实时测量的高度值经过液位高度修正, 再利用舱容曲线插值求出当前任意浮态下液舱的液体重量。结合数据库高效处理数据的能力与程序在计算过程中稳定性的要求, 开发了完整稳性实时计算及浮态调整的仿真程序。实时浮态调整算例证明该方法实用可靠。

关键词: 完整稳性; 实时计算; 浮态; 数据库
中图分类号: U661.22 **文献标识码:** A

0 引言

舰船的完整稳性是其航行安全的重要性能之一, 完整稳性主要包括浮性、初稳性、大倾角稳性及抗风能力。浮性是舰船在一定载况下保持漂浮姿态的能力, 是研究舰船航海性能的基础。稳性是舰船在外力作用下发生倾斜而不致倾覆, 当外力作用消失后, 仍能恢复其原来状态的能力, 其可分为初稳性和大倾角稳性^[1]。一般在设计过程中, 只计算校核几种典型装载状态下的浮态和稳性; 在使用过程中, 通常按照设计时确定的配载方案装卸各种载荷、按规定的顺序消耗油水即认为满足要求。但有些舰船因其多种任务和功能的需要而经常在不同位置变换不同种类和数量的载荷, 并在航行过程中因消耗燃油和淡水等而使载荷减少, 使浮态和稳性经常发生变化。为了知道任意时刻浮态、稳性及抗风能力是否满足要求, 研究任意当前载况下完整稳性的实时计算方法非常必要。

完整稳性计算有两种方法: 直接计算法和间接计算法。前一种方法直接通过舰船型值数据计算给定载况下的浮态和稳性, 计算时需要输入型值数据, 计算过程中要多次进行水线面和船型表

面求交计算, 然后计算不同水线面处的水线面要素以及水线面下的排水体积要素^[2], 计算时间相对来说较长。后一种方法是预先计算出船型的静水力曲线和稳性插值曲线等, 计算时不需要输入型值数据, 根据实际载况插值求出浮态、稳性等参数, 计算量小, 稳定性好, 人机交互少, 更适用于实时计算。本文采用间接计算法。

1 实时计算方法

在设计阶段, 舰船浮态及稳性计算通常考虑标准排水量、正常排水量、满载排水量、超载排水量4种状态。而实时计算是根据船上当时的实际载况进行计算, 所以实时载况计算是进行完整稳性实时计算的第一步; 接下来按静力学原理计算当前载况的浮态和稳性。

1.1 实时载况计算

实时载况计算关键是需要利用液舱液位测量管或传感器实时测量的数据, 通过液舱的液面高度及舱容曲线数据插值计算液舱液体重量。通常, 液体重量的插值是按舰船正浮计算, 但舰船当前载况有可能使船处于任意浮态, 此时按正浮计算误差较大。本文考虑了当前状态为任意浮态时的液体重量, 提出了舰船倾斜时测量液位高度的

收稿日期: 2005-08-10; 修回日期: 2006-12-29.
作者简介: 马坤^{*} (1961-), 女, 副教授, E-mail: makur@dlut.edu.cn.

修正方法,采用修正后的液位高度来插值计算液体重量,使计算更加准确.

船体坐标系选取按如下方法:坐标原点为基平面、中纵剖面和中横剖面的交点; x 轴为基平面和中纵剖面的交线,向船首为正; y 轴为基平面和中横剖面的交线,向右舷为正; z 轴为中横剖面和中纵剖面的交线,向上为正.船舶向右横倾时横倾角为正,向左横倾时横倾角为负;船舶向首纵倾时纵倾角为正,向尾纵倾时纵倾角为负.

1.1.1 利用测量管测量时的修正 如图 1 所示,假设舰船处于横倾状态,横倾角为 A ,液舱液面平行于水面.液面上的 m 点为测量点, f 点为液面形心.测量管一般垂直基线布置,测量管的横向坐标为 Y ,测量管测得的液位高度是指测量点到舱底的距离,用 L_m 表示.利用此液位高度进行液舱重量重心计算,就会带来一定的误差.根据静力学中等体积小角度倾斜原理(倾斜前后液面线的交点通过该液面形心 f),则船舶倾斜状态时可利用 f 点的液位高度 L_{fc} 进行液舱重量重心计算.由图上的几何关系可得到下式:

$$L_{fc} = L_m + (Y_f - Y) \tan A \tag{1}$$

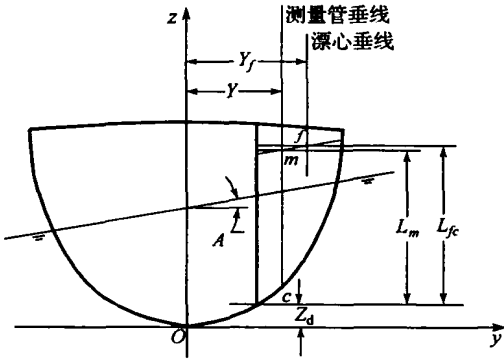


图 1 横倾时测量管测量液位示意图
Fig. 1 Gauged water level by gauging pipe when listing

同理,可以对纵倾时进行修正.纵倾时测量管测量液位示意图见图 2.假设纵倾角为 B ,测量管的纵向坐标为 X ,液面形心的纵向坐标为 X_f ,则考

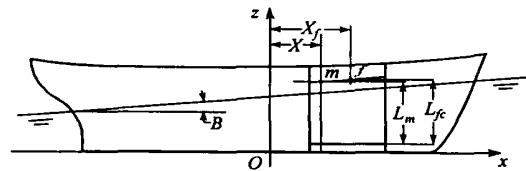


图 2 纵倾时测量管测量液位示意图
Fig. 2 Gauged water level by gauging pipe when trimming

虑船舶一般倾斜状态时 L_{fc} 的计算公式可写成

$$L_{fc} = L_m + (Y_f - Y) \tan A + (X_f - X) \tan B \tag{2}$$

1.1.2 利用传感器测量时的修正 如图 3 所示,假设传感器安装点 c 的坐标为 (X_c, Y_c, Z_c) , Z_d 为舱底距基线高. h_{yz} 表示 c 点到倾斜液面的垂直距离 h 在 yOz 坐标面的投影,传感器测得的液位高为 $h + (Z - Z_d)$,由图上的几何关系可求得测量点 m 处的测深 L_m :

$$L_m = h_{yz} \cdot \cos A + (Z_c - Z_d) \tag{3}$$

测量点 m 处的 y 坐标可写成

$$Y = Y_c - h_{yz} \cdot \sin A \tag{4}$$

由 L_m 修正到 L_{fc} 的方法与上述的测量管测量时的修正方法相同.

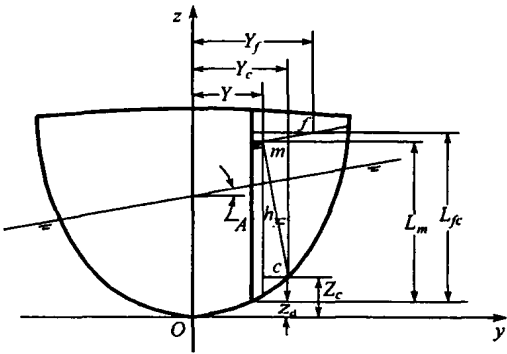


图 3 横倾时传感器测量液位示意图
Fig. 3 Gauged water level by sensor when listing

同理,可以对纵倾时进行修正.如图 4 所示,假设纵倾角为 B , h_{xz} 表示 c 点到倾斜液面的垂直距离 h 在 xOz 坐标面的投影,由图上的几何关系可求得同时考虑横倾和纵倾时的测深:

$$L_m = h \cdot \cos A \cdot \cos B + (Z_c - Z_d) \tag{5}$$

测量点 m 处的 x 坐标可写成

$$X = X_c - h_{xz} \cdot \sin B \tag{6}$$

其中 $h_{xz} = h \cdot \cos A$.

修正后测深 L_{fc} 可写成

$$L_{fc} = L_m + (Y_f - Y) \tan A + (X_f - X) \tan B \tag{7}$$

同时考虑横倾和纵倾时

$$L_m = h \cdot \cos A \cdot \cos B + (Z_c - Z_d) \tag{8}$$

测量点 m 处的 x 坐标可写成

$$X = X_c - h_{xz} \cdot \sin B \tag{9}$$

其中 $h_{xz} = h \cdot \cos A$.

$$L_{fc} = L_m + (Y_f - Y) \tan A + (X_f - X) \tan B \tag{10}$$

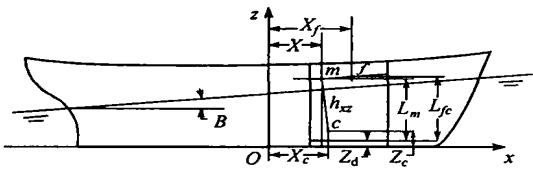


图 4 纵倾时传感器测量液位示意图
Fig. 4 Gauged water level by sensor when trimming

1. 1. 3 重量重心的计算

$$\Delta = \sum W_i; X_g = \frac{\sum W_i X_i}{\sum W_i};$$
$$Y_g = \frac{\sum W_i Y_i}{\sum W_i}; Z_g = \frac{\sum W_i Z_i}{\sum W_i} \quad (11)$$

式中： Δ 、 X_g 、 Y_g 、 Z_g 分别为全船当前状态的排水量、重心坐标； W_i 、 X_i 、 Y_i 、 Z_i 分别为当前载况时各项固体载荷及液体载荷的重量、重心坐标，各液舱液体重量及重心按修正后的液位高度计算。

根据实时载况的计算结果，可按静力学原理求出当前任意载况下舰船的浮态。

1. 2 初稳性高度计算

初稳性高度可写为

$$h_o = Z_m - Z_g \quad (12)$$

式中： Z_m 为稳心垂向坐标； Z_g 为重心垂向坐标。

自由液面修正量

$$\Delta h = \sum d_{I_{xi}} \Delta \quad (13)$$

式中： d 为第 i 个舱柜液体密度； I_{xi} 为第 i 个舱柜自由液面惯性矩。

修正后初稳性高

$$h = h_o - \Delta h \quad (14)$$

1. 3 抗风能力计算

利用稳性插值曲线求出当前载况对应的排水体积下各横倾角 H 时的形状稳性力臂 l_s ，然后根据当前载况的重心高度 Z_g 求出静稳性曲线，即 $l = l_s - Z_g \cdot \sin H$ 。

按舰船规范^[3]要求对静稳性曲线进行自由液面修正，横倾 30° 时的修正值为

$$\delta_{30} = \frac{M_{30}}{\Delta} \quad (15)$$

式中： M_{30} 为各舱半载液面横倾 30° 时的横倾总力矩。

横摇角 $H_r(^{\circ})$ 按规范方法计算：

$$H_r = 10.8 \left\{ \frac{h_o}{B} \right\} \left[\frac{T_H}{B/g} \right] - \frac{\overline{W}}{n} \quad (16)$$

式中：横摇周期 $T_H = 0.8B \sqrt{\frac{1}{h_o}}$ ； B 为核算装载

状态下的水线宽； $\overline{W}/n$ 由舰船规范中给出的曲线进行插值得得。

利用修正后的静稳性曲线按作图法求出最小倾覆力臂 l_q 。此时要考虑进水角 H_i 的影响 (参见图 5)。

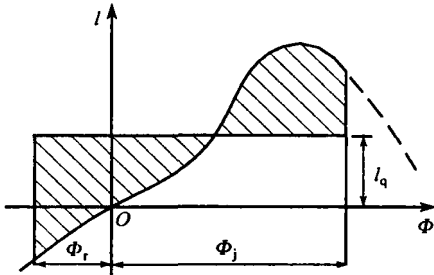


图 5 静稳性曲线
Fig. 5 Static stability curve

抗风能力计算是按式计算出舰艇所能承受的极限风速 U_l (即水面 10 m 高度处)，并要满足不小于规范中指定的额定阵风风速的要求。

$$U_l = C \cdot C_h \frac{l_q \cdot \Delta}{A_f \cdot Z_f} \quad (17)$$

式中： C 为系数，取 115.5； C_h 为风速沿高度分布的修正系数； A_f 为受风面积，由受风面积曲线插值得得； Z_f 为受风面积形心至水线距离，由受风面积矩曲线插值得得。

2 仿真计算

2. 1 数据库系统的运用

计算中用到大量的原始数据，它们在计算过程中不能改变；大量的数据需要一种良好的管理机制；有些中间数据需要频繁擦、写并且多处用到，操作复杂。这些都要求在程序中运用一种高效、便捷的数据文件管理模式。数据库 Microsoft Access 和编程语言的结合满足了这个要求，亦容易实现数据文件之间的关联操作。数据库管理系统的运用简化了原先对大量数据的计算过程，可以一次生成正浮状态下不同吃水处船 (舱) 型要素数据表和 5° 、 10° 、 15° 、 $\dots$ 、 85° 各横倾角状态下不同吃水处船 (舱) 型要素数据表，通过索引表的名字插值取得船型、舱形要素值，可以大大缩短计算时间。

2. 2 算例分析

程序能够实时计算当前载况下的浮态、稳性，并进行浮态调整^[4]。作为用来调整浮态的舱室有燃油舱、淡水舱和压载水舱，其中燃油舱和淡水舱可利用移动载荷的方法进行浮态调整，压载水舱

可利用注入或排除压载水的方式进行浮态调整. 通过某船移动载荷调整横倾为例给出经过几次浮态调整的过程 (见表 1). 表中 T_f 为首吃水, T_a 为尾吃水, c_w 为液体舱载荷现有量, a_w 为当前装载情况下该液体舱最大还可以加载的量, s_w 为当前

装载情况下该舱拟增加或减少的载荷量. 序号 1 对应的状态为初始状态, 序号 2 为第 1 次调整后状态, 序号 3 为第 2 次调整后状态, 由表中结果可看到该算例经过 2 次调整横倾状态基本消失, 接近平浮.

表 1 实时浮态调整状态表
Tab. 1 State of the real-time floatation adjusting

序号	T_f / m	T_a / m	$H / (^\circ)$	h / m	$U_1 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	No. 1 燃油舱 (左舷)			No. 2 燃油舱 (右舷)		
						c_w / t	a_w / t	s_w / t	c_w / t	a_w / t	s_w / t
1	4. 234	4. 309	0. 626	1. 142	63. 203	7. 667	10. 971	5	8. 832	14. 073	- 5
2	4. 235	4. 309	0. 184	1. 141	63. 192	12. 667	5. 971	2	3. 832	19. 073	- 2
3	4. 235	4. 309	0. 002	1. 141	63. 185	14. 667	3. 971		1. 832	21. 073	

该软件可以方便地进行当前载况下浮态和稳性的实时计算, 并可通过人机交互方式进行浮态调整, 能够为舰船作战人员提供浮态及稳性的模拟演示与学习, 作为指战员平时训练、考核的工具.

3 结 论

- (1) 本文提出的任意浮态时液舱测深修正法简单、实用, 可方便、快速计算出液舱倾斜液面下液体重量, 适合于舰载计算机实时稳性计算.
- (2) 利用间接法计算舰船任意载况下的完整稳性, 可充分利用设计时的数据, 程序中不需要输入船体型值、舱室型值, 使计算稳定性更好、快速、准确.
- (3) 自动导入液舱测深传感器的模拟数据,

程序能够实时计算并显示舰船当前的浮态、稳性情况, 并能辅助操作人员进行浮态及稳性调整.

参考文献:

[1] 盛振邦, 杨尚荣, 陈雪深. 船舶静力学 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1988

[2] 马 坤, 张明霞, 纪卓尚. 基于非线性规划法的船舶浮态计算 [J]. 大连理工大学学报, 2003, 43(3): 329-331
(MA Kun, ZHANG Ming-xia, JI Zhuo-shang. Ship floating calculation based on nonlinear programming [J]. J Dalian Univ Technol, 2003, 43(3): 329-331)

[3] GJB 4000—2000. 舰船通用规范 [S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2000

[4] 程 虹, 李 炜, 杨 屹. 舰船浮态调整系统研究 [J]. 中国造船, 2001, 42(1): 75-79

Research on real-time calculation method
for intact stability of warships

MA Kun^{* 1}, LI Zuo zhi¹, YANG Yang²

(1.Ship CAD Eng. Cent., Dalian Univ. of Technol., Dalian 116024, China;
2.Navy Equip. Demonstration Res. Cent., Beijing 100073, China)

Abstract The intact and damage stability of warships is the important performance of their security. The present intact stability is evaluated only under a few typical load conditions in the design stage, which hardly covers the various complex status of executing tasks and a naval battle. Therefore, based on the principle of careening with identical volume and small inclining angle, and depending on the corrected liquid level height, a method of real-time calculation is presented under load conditions, i. e. making use of the corrected height value measured by sounding pipes or sensors of liquid holds, and the liquid weight is acquired by real-time interpolation of holds capacity curve. Combined with the capability of efficient database and the requirements of exact calculation, the program of the real-time calculation and the floatation adjusting is developed. In the end, the example of the floatation adjusting is proved to be practicable and reliable.

Key words intact stability; real-time calculation; floatation; database