

基于第二水平法的受损船体梁纵向强度可靠性分析

马 骏*, 段明昕, 郭昌捷

(大连理工大学 船舶工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 基于可靠性原理,假设一条实船发生碰撞和搁浅损伤,采用第二水平法对船体梁纵向强度的可靠性进行了分析.当原始变量呈非正态分布时,根据 Rackwitz-Fiessler 法对变量进行了等效处理,基于增量-叠代法求解损伤船体极限强度,并运用 Rosenbluthe 法求解损伤船体极限强度的统计特征.实船计算结果表明方法是实际可行的.

关键词: 极限强度;结构可靠性;第二水平法;增量-叠代法;Rosenbluthe 法

中图分类号: U663.2 **文献标志码:** A

0 引言

传统的船体梁纵向强度校核方法为确定性方法.通过引入一个安全系数 K ,利用条件 $\sigma \leq [\sigma]$ 来检验船体梁纵向强度是否满足要求, $[\sigma]$ 称为许用应力,且 $[\sigma] = \sigma_y / K$,其中 σ_y 为材料的屈服极限.

这种方法简单方便,已经成为船体梁纵向强度校核的标准计算方法.但是存在着一些问题.首先,用这种方法来判断船体梁纵向强度其实是一种比较强度,并不是船体的真正强度.其次, K 的选取具有相对性.再次,这种方法容易让人产生一种错觉,认为凡是计算结果满足条件 $\sigma \leq [\sigma]$ 的船体结构就是安全的.实际上即使计算结果满足强度条件的船体结构,也有可能因为不确定性因素而发生破坏.

基于上述原因,对船体梁纵向强度的判断采用可靠性原理进行分析和校准更加符合实际情况.

结构可靠性原理和计算方法在航空航天以及土木建筑领域早已得到了应用与发展,其在船舶领域的应用相对较晚.在国内,桑国光^[1]对可靠性方法在船舶领域的应用率先做了一系列有益的工作.

本文基于第二水平法,对一条实船船体梁纵向强度进行分析,并考虑损伤后的情况.

1 可靠性分析模型

在结构可靠性分析中,结构可靠度一般可表示为

$$R = 1 - P_f = 1 - P[G(X) < 0] = 1 - \int \cdots \int_{G(X) \leq 0} f_x(X) dX \quad (1)$$

式中: R 为结构可靠度; P_f 为结构失效概率; $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为基本随机变量, n 为随机变量个数; $f_x(X)$ 为 X 的联合概率密度函数; $G(X)$ 为状态极限函数.

船体梁纵向强度的状态极限函数可写为

$$G = M_u - M_s - M_w \quad (2)$$

式中: M_u 是船体极限弯矩; M_s 是静水弯矩; M_w 是波浪弯矩.

要求解式(1)的积分是非常困难的,因为基本随机变量的联合概率密度函数通常是难以得出的,因此本文采用一种近似解法,即第二水平法来求解.

对基本变量 M_u 、 M_s 、 M_w 作标准化变换并代入失效面方程($G = 0$),得

$$(Z_1 \cdot \sigma_{M_u} + \overline{M_u}) - (Z_2 \cdot \sigma_{M_s} + \overline{M_s}) - (Z_3 \cdot \sigma_{M_w} + \overline{M_w}) = 0 \quad (3)$$

根据 Hasofer-Lind 定义的可靠性指数^[1],即在标准化 z 坐标系内,从原点到失效面的最短距离定义为安全指数 β .令

$$Z_i^* = \alpha_i \cdot \beta \quad (4)$$

则可将原设计点转换为变换后空间内设计点.

此时失效面方程变成

$$F(Z_1^*, Z_2^*, Z_3^*) = 0 \quad (5)$$

其中 α_1 、 α_2 、 α_3 称为敏感系数,可通过以下方程求出:

$$\alpha_i = - \frac{\left(\frac{\partial F}{\partial Z_i} \right)_{Z_i^*}}{\left(\sum_i \left(\frac{\partial F}{\partial Z_i} \right)_{Z_i^*}^2 \right)^{1/2}} \quad (6)$$

由式(5)和(6)可得安全指数 β 的计算公式:

$$\beta = \frac{\overline{M}_u - \overline{M}_s - \overline{M}_w}{\sqrt{\sigma_{M_u}^2 + \sigma_{M_s}^2 + \sigma_{M_w}^2}} \quad (7)$$

一般认为船体梁纵向极限强度、静水弯矩服从正态分布;波浪弯矩幅值短期呈 Rayleigh 分布,长期服从指数分布;波浪诱导弯矩的极值分布服从 Gumbel-I 型分布。

对于非正态分布的变量 M_w , 根据 Rackwitz-Fiessler 法^[1]对变量进行等效处理,即令随机变量 M_w 在设计点 (Z_1^*, Z_2^*, Z_3^*) 上的原始密度函数和原始分布函数的值分别等于一正态分布变量的密度函数和分布函数相应的值,即

$$F_{M_w}(Z_3^*) = \Phi\left(\frac{Z_3^* - \overline{M}'_w}{\sigma'_{M_w}}\right) \quad (8)$$
$$f_{M_w}(Z_3^*) = \frac{1}{\sigma'_{M_w}} \varphi\left(\frac{Z_3^* - \overline{M}'_w}{\sigma'_{M_w}}\right)$$

式中 $\overline{M}'_w, \sigma'_{M_w}$ 分别是近似正态分布的平均值和标准差。

由式(8)可得

$$\sigma'_{M_w} = \frac{\varphi(\Phi^{-1}(F_{M_w}(Z_3^*)))}{f_{M_w}(M_w^*)} \quad (9)$$

$$\overline{M}'_w = Z_3^* - \Phi^{-1}(F_{M_w}(Z_3^*)) \cdot \sigma'_{M_w}$$

将上式与前面的求正态变量问题的迭代方程结合起来进行迭代即可求解非正态变量问题。

2 破损船体承载能力统计特性

当考虑受损船体时,为了校核船舶破损结构的剩余极限强度,ABS SafeHull^[2]给出了船舶在碰撞和搁浅后船体破损的部位和范围,但实际上,碰撞和搁浅后船体破损的部位和范围并不是确定的,即破损模型应用概率方法描述。由于这方面公开的相关资料较少,本文考察 2 个可能性较大且后果较严重的位置:舷侧和艏部。破损形状为一正方形开口,尺寸分布服从正态分布 $N(a, 0.25a)$, 其中 a 为正方形破口边长, $0.25a$ 为标准差。

对于材料屈服极限、板厚尺寸和破口尺寸等变量,其随机特性用相互独立的基本随机变量 $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 来描述,其均值和标准差分别为 $\bar{x}_i, \sigma_{x_i}$ 。采用增量-叠代法^[3]来计算破损船极限强度,并采用 Rosenbluthe 法^[4]计算承载能力 M_u 的统计特征值。

2.1 增量-叠代法计算过程

(a)将船体梁横剖面离散成结构单元,即纵向/横向加筋板格和硬角单元。

(b)导出所有单元的应力-应变曲线,见文献[5]。

(c)导出期望的最大要求曲率 k_t 。每一计算步的增量 Δk 为 $k_t/300$ 。根据船体梁横剖面的剖面模数 $z_{v-net50}$,得到第一步计算的中和轴位置 z_{NA-1} 。

(d)对各单元,计算其对于曲率 k_i 的应变 $\varepsilon_{ij} = k_i(z_j - z_{NA-i})$ 、应力 σ_j ,及单元上的反力 $\sigma_j A_j$ 。

(e)调整 z_{NA-i} 的位置直到 $F_i = \sum A_i \sigma_i = 0$ 为止。重复步骤(c)和(d),当中和轴的变化小于 0.0001 m 时即认为已达到平衡。

(f)将各单元反力的贡献相加得到相应的弯矩。即, $\overline{M}_i = \sum |\sigma_i A_i (z_j - z_{NA-i})|$ 。

(g)按 Δk 增加曲率,用当前中和轴作为下一步计算的初始值并重复步骤(d)到(f)直至达到最大要求曲率 k_t 。极限强度为 $M-k$ 曲线的极值。如该曲线的极值没有出现则增加最终曲率 k_t 至极值出现为止。

2.2 Rosenbluthe 法计算过程

破损船体剩余承载能力可表示为材料屈服极限和弹性模量、板厚尺寸、破口尺寸等随机变量的函数。定义变异系数 $V_Y = \sigma_Y / \bar{Y}$, 其中 $\sigma_Y, \bar{Y}$ 分别是剩余承载能力的标准差和均值。

令

$$Y^* = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n) \quad (10)$$

对于任一变量 x_i ,构造一单变量函数

$$Y_i = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_{i-1}, x_i, \bar{x}_{i+1}, \dots, \bar{x}_n) \quad (11)$$

$$Y_i^+ = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_{i-1}, \bar{x}_i + \sigma_{x_i}, \bar{x}_{i+1}, \dots, \bar{x}_n) \quad (12)$$

$$Y_i^- = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_{i-1}, \bar{x}_i - \sigma_{x_i}, \bar{x}_{i+1}, \dots, \bar{x}_n) \quad (13)$$

$$\mu_i = (Y_i^+ + Y_i^-) / 2 \quad (14)$$

$$\sigma_i = (Y_i^+ - Y_i^-) / 2 \quad (15)$$

$$V_i = \sigma_i / \mu_i \quad (16)$$

则有

$$\frac{\bar{Y}}{Y^*} = \frac{\mu_1}{Y^*} \cdot \frac{\mu_2}{Y^*} \dots \frac{\mu_n}{Y^*} \quad (17)$$

$$V_Y^2 = (1 + V_1^2)(1 + V_2^2) \dots (1 + V_n^2) - 1 \quad (18)$$

3 实船计算结果

根据可靠性分析模型,作为算例,本文对某 24 000DWT 多用途船满载出港工况进行了分析,该船的主要尺度及船型系数见表 1,典型横剖面图及破损部位见图 1。本文将破损部位简化为船中区域的舷侧和艏部,其中舷侧破口模拟船舶遭

受碰撞后的受损情况,舳部破口模拟船舶遭受搁浅后的受损情况.

表 1 主尺度及船型系数

Tab.1 Principal sizes and ship coefficients					
垂向 间长/m	型宽/m	型深/m	设计 吃水/m	结构 吃水/m	方形系数
152	27.4	13.5	8.5	9.8	0.806

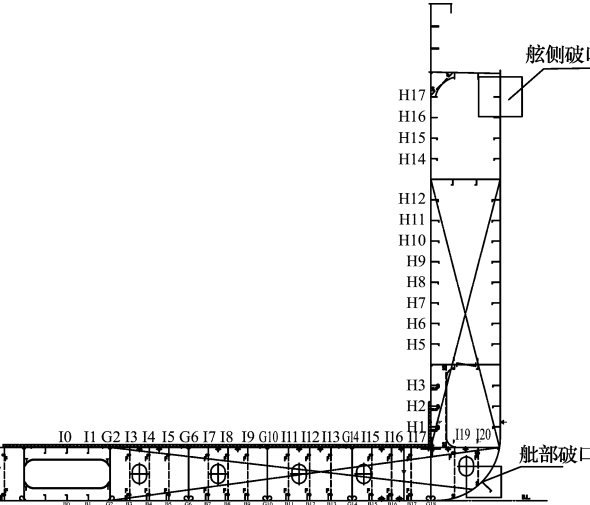


图 1 典型横剖面图及破损部位

Fig.1 Midship section and damaged parts

表 2 是与船舶极限弯矩不确定性有关的随机变量. 其中板厚、屈服强度和破损尺寸呈正态分布,弹性模量呈对数正态分布. 由于缺少这方面的统计资料,板厚、屈服强度、弹性模量的变异系数按文献[6]选取.

完整船极限强度和荷载随机变量见表 3,遭受碰撞和搁浅损伤后计算结果分别见表 4、5,弯矩-曲率曲线见图 2;满载出港静水弯矩和波浪弯矩从该船装载计算书中查阅. 安全指数、船体梁纵向强度失效概率计算结果见表 6. 极限弯矩变异系数计算结果为 0.08,静水弯矩变异系数和波浪弯矩变异系数按文献[6]分别取为 0.05、0.15.

表 2 与极限弯矩不确定性有关的随机变量

Tab.2 Random variables related to ultimate bending moment		
随机变量	分布	V
板厚 t	正态分布	0.05
屈服强度 σ_y	正态分布	0.10
弹性模量 E	对数正态	0.03
破损尺寸	正态分布	0.25

表 3 完整船极限弯矩和荷载随机变量

Tab.3 Random variables of ultimate bending moment and loads of intact ship				
随机变量	状态	分布	均值	V
$M_u/(MN \cdot m)$	中拱	正态分布	1 083	0.08
	中垂		-826	
$M_s/(MN \cdot m)$	中拱	正态分布	169	0.05
	中垂		-33	
$M_w/(MN \cdot m)$	中拱	Gumbel-I 型分布	576	0.15
	中垂		-552	

表 4 遭受碰撞损伤后极限弯矩和荷载随机变量

Tab.4 Random variables of ultimate bending moment and loads in collision event				
随机变量	状态	分布	均值	V
$M_u/(MN \cdot m)$	中拱	正态分布	947	0.08
	中垂		-715	
$M_s/(MN \cdot m)$	中拱	正态分布	169	0.05
	中垂		-33	
$M_w/(MN \cdot m)$	中拱	Gumbel-I 型分布	576	0.15
	中垂		-552	

表 5 遭受搁浅损伤后极限弯矩和荷载随机变量

Tab.5 Random variables of ultimate bending moment and loads in grounding event				
随机变量	状态	分布	均值	V
$M_u/(MN \cdot m)$	中拱	正态分布	1 032	0.08
	中垂		-771	
$M_s/(MN \cdot m)$	中拱	正态分布	186	0.05
	中垂		-27	
$M_w/(MN \cdot m)$	中拱	Gumbel-I 型分布	576	0.15
	中垂		-552	

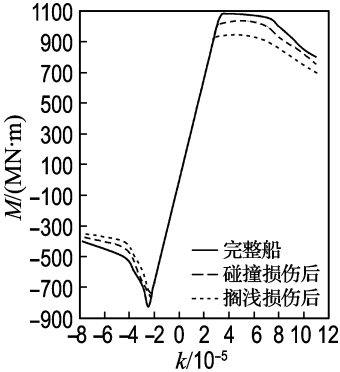


图 2 弯矩-曲率曲线

Fig.2 Bending moment-curvature curve

需要说明一下,船舶遭受搁浅损伤后,其静水弯矩发生了变化,这是因为搁浅的破损部位在船舶吃水线以下,破损后海水进入船舱造成船舶浮态发生了变化.

表 6 结构失效概率
Tab.6 The structural failure probability

结构状况	状态	β	P_f
完整	中拱	2.81	2.6×10^{-3}
	中垂	2.31	1.1×10^{-2}
碰撞损伤	中拱	1.78	3.8×10^{-2}
	中垂	1.31	9.5×10^{-2}
搁浅损伤	中拱	2.30	1.1×10^{-2}
	中垂	1.89	2.9×10^{-2}

4 结 语

本文采用增量-叠代法计算了破损船体的极限弯矩,并基于统计学原理,运用 Rosenbluthe 法计算了破损船体剩余承载能力的变异系数,采用第二水平法计算了一条实船分别遭受碰撞和搁浅损伤后的安全指数 β 和失效概率 P_f .

实船遭受碰撞或搁浅损伤后其安全指数要小于完整船体安全指数,失效概率要大于完整船体失效概率.对于第二水平法校核船体梁纵向强度,以 β_0 代表目标安全指数,在船舶结构设计中,应要求 $\beta \geq \beta_0$.但是目前对于船体梁纵向强度,船级社规定采用确定性方法计算和评估,对 β_0 有待深入研究.

另一方面,可以看到在同一状态下(中拱或中垂),船舶遭受碰撞后结构失效概率要大于船舶遭受搁浅后结构失效概率.这是因为假定碰撞部位离中和轴较搁浅部位远,碰撞损失的结构对船体梁纵向强度的贡献要大于搁浅损失的结构.如果真实碰撞情况破口位置离中和轴较近,则本文得出的结果偏于安全.

另外,由于波浪弯矩的变异系数难以准确计算,本文直接采用设计波浪弯矩(船舶 25 a 寿命期的最大值),以使计算结果偏于安全.今后可以基于耐波性表的短期分析得到波浪弯矩及其变异系数,以使计算结果更为准确.

如前述,建立概率型的破损模型更为合理,也

是有待深入研究的课题.

本文方法并无船型或其他条件限制,因而具有一定通用性,可适用于其他民用船和军船.

参考文献:

[1] 桑国光. 应用结构可靠性原理研究船舶总纵弯曲强度[J]. 中国造船,1986(4):100-123.
SANG Guo-guang. Application of structural reliability theory to ship longitudinal strength [J]. **Shipbuilding of China**, 1986(4):100-123. (in Chinese)

[2] ABS. ABS Safehull System for Tankers Guide for Assessing Hull-Girder Residual Strength for Tankers [Z]. Houston: ABS,1995.

[3] 国际船级社协会. 散货船共同结构规范[S]. 伦敦: IACS, 2006.
IACS. Common Structural Rules for Bulk Carriers [S]. London:IACS, 2006. (in Chinese)

[4] 崔维成,徐向东,邱 强. 一种快速计算随机变量函数均值与标准差的新方法[J]. 船舶力学, 1998, 2(6):50-60.
CUI Wei-cheng, XU Xiang-dong, QIU Qiang. A fast method to calculate the mean and the standard deviation of the function of random variables [J]. **Journal of Ship Mechanics**, 1998, 2(6):50-60. (in Chinese)

[5] 束长庚,周国华. 船舶结构的屈曲强度[M]. 北京: 国防工业出版社,2003.
SU Chang-geng, ZHOU Guo-hua. **Buckling Strength of Ship Structures** [M]. Beijing: National Defense Industry Press,2003. (in Chinese)

[6] 祁恩荣,崔维成. 损伤船舶极限强度可靠性分析 [C]//2007 年船舶力学学术会议论文集. 无锡: [s n], 2007
QI En-rong, CUI Wei-cheng. Reliability analysis of the ultimate strength of damaged ships [C] // **The Proceedings of 2007's Academic Conference of Ship Mechanics**. Wuxi:[s n],2007. (in Chinese)

Longitudinal strength reliability analysis of damaged hull girder
by using Level-2 method

MA Jun*, DUAN Ming-xin, GUO Chang-jie

(Department of Naval Architecture, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Level-2 method is used to analyze the reliability of a ship hull girder's longitudinal strength in collision and grounding events based on reliability principle. Non-normal distribution variables are equivalently treated by Rackwitz-Fiessler method. The ultimate strength of hull girder after damage is solved by incremental iteration method, and the statistic features of ultimate strength are solved by Rosenbluthe method. The experimental results indicate that the methods are feasible.

Key words: ultimate strength; structural reliability; Level-2 method; incremental iteration method; Rosenbluthe method