

现役船体结构可靠性评估理论研究现状及展望*

滑林^{1,2}, 吴梵^{1,2}, 吕岩松^{1,2}, 牟金磊^{1,2}

(1. 海军工程大学舰船与海洋学院, 湖北武汉 430033;

2. 海军舰艇技术鉴定船体结构强度校核中心, 湖北武汉 430033)

摘要:作为现役船体结构可靠性评估的关键技术,可靠性评估理论直接决定了可靠性评估结果的有效性和置信度。从可靠性评估理论的计算原理、度量指标计算及工程应用等方面阐述了传统可靠性评估理论和非概率可靠性评估理论的发展历程及研究现状,分析、总结了各可靠性评估理论在现役船体结构可靠性中的优势及不足,给出了今后开展相关研究的展望,并指出了现役船体结构可靠性研究的重点。

关键词:现役船体;随机可靠性;模糊可靠性;非概率可靠性;随机变量;区间变量

中图分类号:U661.43 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2018)04-173-08

Current status and prospect for the method on reliability analysis of hull structures in-service

HUA Lin^{1,2}, WU Fan^{1,2}, LYU Yansong^{1,2}, MU Jinlei^{1,2}

(1. School of Naval Architecture & Ocean, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. Naval Vessel Technical Evaluation Center for Hull Structure Strength, Wuhan 430033, China)

Abstract: As the key technology of reliability evaluation for hull structure in-service, the merits of the reliability assessment theories determines the effectiveness and confidence level of the reliability evaluation result directly. The development course and current research situation of traditional reliability assessment theories and non-probabilistic reliability assessment theory were elaborated in the view of calculation principle, computing of measurement index and engineering application. Simultaneously, the advantages and disadvantages of all current reliability assessment theories that applied in hull structure in-service were analyzed and summarized. The future research outlook was developed and the focus in the study of hull structure reliability was outlined.

Key words: hull structures in-service; random reliability; fuzz reliability; non-probabilistic reliability; stochastic variables; interval variables

随着计算机技术和数理统计理论的发展,船体结构安全性评估已逐渐由传统的确定性方法向可靠性评估方法转移^[1-2]。20世纪70年代, Nordenstrom 发表了首篇关于船体结构可靠性分析的文章^[3]。Mansour^[4]对船体总纵强度的概率模型进行了系统的专题研究,计算了拟建船舶在各种失效模式下的失效概率。随着船舶的老龄化,现役船体结构可靠性评估成为当前新的研究热点^[5]。但由于腐蚀、疲劳等损伤的影响,现役船体结构参数变量的样本数据极其有限^[6],其真实的概率分布类型及数学统计特征很难确定,在此条件下,开展现役船体结构的可靠性评估,可靠性评估理论至关重要。

鉴于此,本文从可靠性评估理论的计算原理和度量指标的计算等方面阐述了传统可靠性评估

理论和非概率可靠性评估理论的研究现状,分析、总结了各可靠性评估理论在现役船体结构可靠性中的优势及不足,给出了今后开展相关研究的展望,并指出了现役船体结构可靠性研究的重点。从而为把握现役船体结构可靠性研究工作的重点奠定基础。

1 传统可靠性评估理论研究概述

传统可靠性评估理论主要包括:随机概率可靠性理论和模糊概率可靠性理论^[7]。

1.1 随机概率可靠性理论

随机概率可靠性理论基于数学概率统计,以明确随机变量数字特征为技术手段,评估结构在规定使用条件下及预期使用时间内,保持其规定功能能力的理论^[8]。假定随机变量 X 的概率密

* 收稿日期:2018-05-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51779261);海军工程大学自然科学基金资助项目(20161595)

作者简介:滑林(1986—),男,山东济宁人,讲师,博士, E-mail: hly123@126.com

度函数为 $f(x)$, 概率分布函数为 $F_x(X)$, 则变量 X 在区间 $(a, b]$ 内的概率为:

$$P_x(a < X \leq b) = F_x(b) - F_x(a) = \int_a^b f(x) dx \quad (1)$$

上式是基于随机概率理论开展结构可靠性分析的基本公式。随机概率理论下船体结构失效概率 P_f 的计算公式为:

$$P_f = P(M(R, S) \leq 0) = P(R \leq S) \leq P_{fa} \quad (2)$$

式中, R 为船体抗力; S 为载荷效应; $M(R, S)$ 为船体功能函数; P_{fa} 为临界失效概率, 其计算公式为:

$$P_{fa} = \int_0^{+\infty} \int_0^{+\infty} f(r, s) dr ds = \int_0^{+\infty} f_s(s) F_R(r) ds \quad (3)$$

式中, $f(r, s)$ 为 R 和 S 的联合概率密度函数; f_s 为 S 的概率密度函数; F_R 为 R 的概率分布函数。

采用可靠度 P_r 或失效概率 P_f 衡量船体结构的安全性, 通常只能采用全概率积分法和蒙特卡洛数值模拟法^[9], 在工程中非常不便。为此, 有学者提出采用概率可靠性指数 β 来衡量结构的安全性^[10-12]。 β 的几何意义为: 在标准化坐标系内, 坐标原点到结构失效面的最短距离^[13], 如图 1 所示。

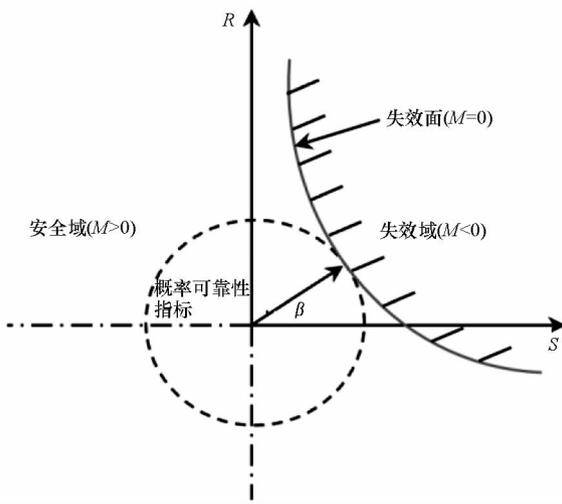


图 1 概率可靠性指标 β 的几何意义
Fig. 1 Geometry implication of β

设船体失效状态 M 的均值为 μ_m , 标准差为 δ_m , 对应的概率可靠性指数 $\beta = \mu_m / \delta_m$, 均值 μ_m 距坐标原点的距离 $l = \beta \cdot \delta_m$, 见图 2。

如图 2 所示, 船体失效状态的概率密度函数处于坐标原点左边阴影部分, 即为船体失效概率 P_f 。当 β 的值增大时, M 的概率密度曲线向右移动, 船体失效概率 P_f 的值减小; 当 β 的值减小时, M 的概率密度曲线向左移动, 船体失效概率 P_f 的

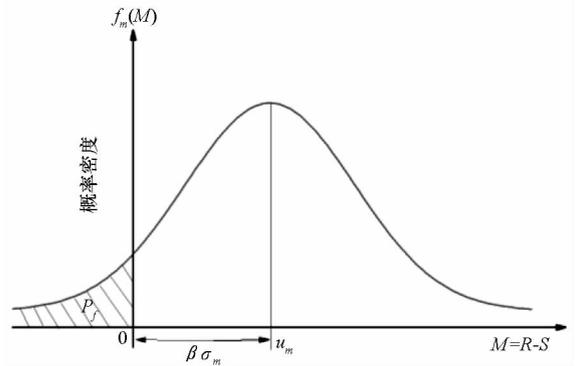


图 2 β 与 P_f 的关系

Fig. 2 Relationship between β and P_f

值增大。虽然概率可靠性指数 β 在形式上与基于确定方法的船体强度储备系数 K 类似, 但两者却有本质上的区别。强度储备系数 K 表征船体结构安全裕度, 其大小的确定往往依据工程经验, 因此以其作为船体安全与否的衡量标准具有一定的盲目性和保守性^[14]; 而 β 由于反映了结构抗力和载荷效应在空间坐标系中的位置和离散度, 因而其更能全面地反映决定船体可靠影响因素的变异性, 这是强度储备系数 K 所不能达到的。

基于随机概率可靠性理论, 国内外学者相继开展了一系列工作。Guedes^[15] 在考虑了均匀腐蚀对船体结构可靠性的影响后, 对某散货船的可靠性进行了分析; Akpan^[16] 建立了综合考虑腐蚀、疲劳破坏及腐蚀加速疲劳破坏等作用的船体时变随机模型; Kutt^[17] 开展了船体材料不确定性因素对船体结构可靠性的影响研究。国内, 桑国光教授及其团队在船体可靠性评估方面进行了一系列开创性的研究工作^[18], 为国内开展船体结构可靠性评估奠定了基础^[19-23]。俞铭华^[24-25] 提出了改进的复形优化方法; 易宏^[26] 将总体可靠度分为使用可靠度和任务可靠度并以此开展了舰船总体可靠性分析; 孙克淋^[27] 针对船体局部可靠性, 提出了船体板结构可靠性敏感度分析的方法; 考虑到船舶可能遭遇极端海况, 杨俊^[28] 建立了基于极限强度和极值载荷的损伤舰船结构可靠性模型; 针对船体结构的疲劳损伤, 何文涛^[29] 在裂纹闭合理论及有限元分析的基础上进行了船体结构疲劳裂纹扩展及可靠性分析直接计算方法研究。

1.2 模糊概率可靠性理论

随着模糊数学理论的发展, 有学者提出采用模糊概率可靠性理论开展结构的可靠性计算^[30-31]。模糊数学理论的基础是参量的模糊性, 模糊性表现在变量的归属上, 模糊变量在归属性上表现为“亦次亦彼”的性质^[32-33]。从集合的

角度上讲,模糊性导致元素不再总满足排中定律^[34-35]。

设 Ω 为随机试验的样本空间, x 为连续随机变量, $f(x)$ 为变量 x 的概率密度函数, u_A 为隶属函数, A 为样本空间内实数域上的模糊事件,其概率 $P_r(A)$ 的计算公式为:

$$P_r(A) = \int_{\Omega} u_A(x)f(x)dx \quad (4)$$

式(4)是基于模糊概率可靠性理论开展结构可靠性评估的基本公式。设船体抗力 R 为模糊变量,对应的空间为 V ,载荷效应 S 亦为模糊变量,对应的空间为 U , x 为船体结构参数变量,如构件尺寸参数、材料属性参数、载荷参数等, $u_R(x)$ 为船体抗力 R 的隶属函数, $u_S(x)$ 为载荷效应 S 的隶属函数。船体结构模糊失效概率 P_f 的计算公式为:

$$P_f = \frac{\int_{U \cap V} u_S(x)u_R(x)dx}{\int_V u_R(x)dx} \quad (5)$$

在模糊数学范畴内采用式(5)计算船体结构的模糊失效概率有一定难度,这是因为在变量隶属空间内采用函数形式描述变量的隶属性不切实际。因此,在实际工程中,常基于水平截集的概念将模糊变量转变为普通变量^[36]或将模糊集合转化为普通集合^[37]后再进行结构的模糊可靠度计算。

结构功能函数为 M ,由于 R 、 S 均为模糊变量,所以 M 亦为模糊变量,记为 \underline{M} 。给定某一阈值或置信水平 λ , \underline{M} 的 λ 水平截集为 M_λ ,对应的特征函数为:

$$V_{M_\lambda} = \begin{cases} 1 & u_{\underline{M}} \geq \lambda \\ 0 & u_{\underline{M}} < \lambda \end{cases} \quad (6)$$

\underline{M} 用普通集合形式表述为:

$$M = \{u \mid u_{\underline{M}}(u) \geq \lambda\} \quad (7)$$

按元素数值大小进行排序后,可记为:

$$M = \{[e_\lambda, f_\lambda] = u \mid (u_1, u_2, \dots, u_n)\} \quad (8)$$

由于集合 M 中各元素被选取的可能性相同,故可认为 M 中的元素在取值区间内呈均匀分布。此时,结构模糊可靠度 P_r 的计算公式为:

$$P_r(M_\lambda \geq 0) = 1 - \int_0^1 \frac{f_\lambda}{f_\lambda - e_\lambda} d\lambda \quad (9)$$

除了模糊可靠度 P_r 外,还可采用模糊可靠性指数 β 衡量结构的安全性,模糊可靠性指数 β' 的计算公式为:

$$\beta = \frac{(\mu_R - \mu_S)}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (10)$$

式中, μ_R 为 R 的均值; μ_S 为 S 的均值; σ_R 为 R 的标准方差; σ_S 为 S 的标准方差。

β 的物理含义与概率可靠性指数 β 的相同。模糊可靠性指标 β 越小,模糊度 P_r 越大,结构破坏失效概率越大。

基于模糊概率可靠性理论,国内外学者在船体工程领域开展了一系列研究工作。Yang^[38]针对船体结构极限强度,计算了一次二阶矩法(First-Order-Second-Moment, FOSM)的船体结构时变可靠性;Mentes^[39]分析了各影响因素对集装箱船结构可靠性的影响。余建星^[40-41]利用模糊集合和普通集合间的转换关系对油船纵向强度失效概率进行了分析,提出改进后的船体结构模糊可靠性评估方法,论证了模糊概率可靠性理论较于随机概率可靠性理论在工程应用中更具实用价值的结论。

1.3 传统可靠性评估理论的局限性

虽然传统可靠性评估理论较为成熟^[42],技术手段较为完善^[43-44],但在现役船体结构可靠性评估中仍具有较大的局限性,主要体现在:

1) 随机概率可靠性理论在工程中得以应用的前提条件是明确结构参数变量的概率统计特征,而对于现役船体,由于客观条件、经济效应等因素的限制,采集到的样本数据极其有限,因而很难获取船体结构参量的概率统计特征。在参量概率统计特征不明确的情况下,基于随机概率可靠性理论开展船体结构可靠性分析,其评估结果的准确性和可信度大大降低。

2) 模糊可靠性理论虽在一定程度上克服了对样本数据过度依赖的缺陷,但在隶属函数的选择及置信水平的设定过程中,掺入了大量的人为因素,不能很好地体现参量的客观规律,导致现役船体结构可靠性评估结果的偏差较大。在没有工程经验的情况下,很难基于该理论开展实际工程的结构可靠性分析。

2 非概率可靠性理论研究概述

随着对可靠性认识的理解和深入,有学者认为:“结构或系统的可靠与否,采用定量描述不能反映其客观属性,结构的安全应该是一个模糊概念^[45],即如果结构或系统不确定性变量在被允许的范围内波动,那么结构或系统可认为是安全可靠的^[46]”。基于这一思想,Ben^[47]提出了非概率可靠性的概念,并基于凸集模型,将结构的可靠性描述为结构能允许不确定参量在一定范围内波

动^[48],这就是非概率可靠性理论。非概率可靠性理论主要包括两种可靠性分析模型:区间数学模型和椭球凸集模型^[49]。其中,区间数学模型主要应用于参数变量相互独立、互不影响的结构可靠性分析^[50-51];椭球凸集模型主要应用于参数具有相关性的结构可靠性分析^[52]。

2.1 区间数学模型

设船体抗力 R 和载荷效应 S 均为区间变量, X 为船体结构的参数变量(区间变量)。以区间数学方法可表示为:

$$\begin{cases} X_i \in X_i^I = [x_i^l, x_i^u] \\ S \in S^I = [S(x_1^l, x_2^l, \dots, x_n^l), S(x_1^u, x_2^u, \dots, x_n^u)] \\ R \in R^I = [R(x_1^l, x_2^l, \dots, x_m^l), R(x_1^u, x_2^u, \dots, x_m^u)] \end{cases} \quad (11)$$

船体结构功能函数为:

$$M = R - S = m(x_1, x_2, \dots, x_{m+n}) \quad (12)$$

假定函数 $m(x_1, x_2, \dots, x_{m+n})$ 连续可导,当参数为区间变量时,利用泰勒级数线性展开,此时船体结构功能函数为:

$$M^c(x_1, x_2, \dots, x_n) = m(x_1^c, x_2^c, \dots, x_n^c) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial m(x_1^c, x_2^c, \dots, x_n^c)}{\partial x_i} dx \quad (13)$$

采用区间数学将船体结构基本区间变量进行标准化处理,则:

$$\begin{cases} \delta_{x_i} = \frac{x_i - x^c}{x^r} \\ \delta_R = \frac{R - R^c}{R^r} \\ \delta_S = \frac{S - S^c}{S^r} \end{cases} \quad (14)$$

式中, x^c 为变量的均值, x^r 为变量的离差, R^c 为船体抗力均值, R^r 为船体抗力离差, S^c 为载荷效应均值, S^r 为载荷效应离差。将式(14)代入式(13)可得:

$$M = R^c + R^r \delta_R - S^c - S^r \delta_S = m(x_1, x_2, \dots, x_{m+n}, \delta_{x_1}, \delta_{x_2}, \dots, \delta_{x_{m+n}}) \quad (15)$$

定义安全域体积 $m(x_1, x_2, \dots, x_{m+n}, \delta_{x_1}, \delta_{x_2}, \dots, \delta_{x_{m+n}}) > 0$ 与基本变量区域 $[\delta_{x_1}, \delta_{x_2}, \dots, \delta_{x_{m+n}}]$ 总体积的比值为非概率可靠度 P'_{fs} , 相应的计算公式为:

$$P'_{fs} = \frac{V_{\text{safety-region}}(m(x_i, \delta_{x_i}) > 0)}{V_{\text{total}}} \quad (16)$$

与非概率可靠度相对应的是非概率失效度 P'_{fs} , 其定义为失效域体积 $m(x_1, x_2, \dots, x_{m+n}, \delta_{x_1},$

$\delta_{x_2}, \dots, \delta_{x_{m+n}}) > 0$ 与基本变量区域 $[\delta_{x_1}, \delta_{x_2}, \dots, \delta_{x_{m+n}}]$ 总体积的比值。对应的计算公式为:

$$P'_{fs} = \frac{V_{\text{failure}}(m(x_i, \delta_{x_i}) < 0)}{V_{\text{total}}} \quad (17)$$

除了采用 P'_{rs} 和 P'_{fs} 外,还可采用非概率可靠性指标 β' 来评判结构的可靠性^[53-54],对于非概率理论下可靠性指标 β' 的内涵,文献[55]给出了明确的阐释。将结构中的基本区间变量以标准区间化的变量 δ_i 替代,可得:

$$M = R(\delta_{x_1}, \delta_{x_2}, \dots, \delta_{x_n}) - S(\delta_{x_1}, \delta_{x_2}, \dots, \delta_{x_m}) \quad (18)$$

式(18)是以标准化变量为基本变量的结构极限状态函数,当函数值等于 0 时,得到标准化后的失效面为:

$$M = m(\delta_{x_1}, \delta_{x_2}, \dots, \delta_{x_{m+n}}) = 0 \quad (19)$$

在标准化基本变量组成的空间内,按无穷范数度量的从坐标原点到标准化失效面上的最短距离,即为 β' , 其计算公式为:

$$\begin{aligned} \beta' &= \min(\|\delta\|_{\infty}) \\ &= \min\{\max(|\delta_{x_1}|, |\delta_{x_2}|, \dots, |\delta_{x_{m+n}}|)\} \end{aligned} \quad (20)$$

式中, $\delta = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 为标准化区间变量向量, $\|\delta\|_{\infty}$ 为无穷范数。

除了采用上式计算结构的非概率可靠性指标 β' 外,郭书祥等^[56]从区间数学角度给出了 β' 的计算公式:

$$\beta' = \frac{M^c}{M^r} = \frac{R^c - S^c}{R^r + S^r} \quad (21)$$

β' 的几何含义为:在标准化后的坐标系内,从坐标原点到结构极限状态方程确定失效面的最短距离。

2.2 椭球凸集模型

当结构中的不确定性参量具有一定相关性时,仍采用区间数学模型开展结构的非概率可靠性分析显然不合适。为此, Elishakoff 等提出了椭球凸集模型^[57-58]。

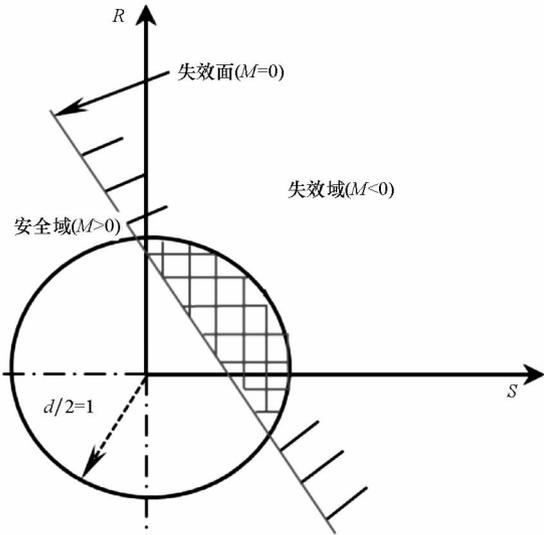
设结构中含有 n 个相关的不确定性参量,其对应的椭球凸集模型可表述为:

$$\begin{cases} x - x_0 = y \\ y \in Y \in \{y \mid Y^T W y \leq \varepsilon^2\} \end{cases} \quad x \in E \quad (22)$$

式中, E 为椭球凸集合; x_0 为椭球中心; W 为椭球凸集的特征矩阵,其表征了所建椭球的形状和主轴方向; ε 为正实数,其表示椭球的大小,即变量参数的不确定性程度。将椭球集合进行标准化后,结合区间数学基本运算,标准化后的椭球凸集模型可表述为:

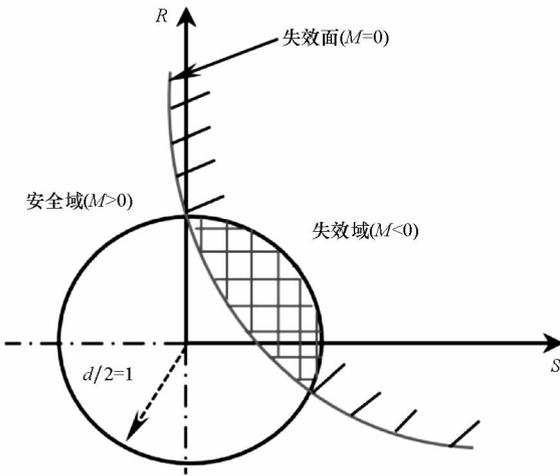
$$\begin{pmatrix} x_1 - x_1^c \\ x_1^r \end{pmatrix}, \dots, \begin{pmatrix} x_n - x_n^c \\ x_n^r \end{pmatrix}^T \cdot \begin{pmatrix} x_1 - x_1^c \\ x_1^r \end{pmatrix}, \dots, \begin{pmatrix} x_n - x_n^c \\ x_n^r \end{pmatrix} \leq 1 \quad (23)$$

设 R 为船体抗力, S 为载荷效应, 两者之间具有某种相关性, 此时结构的椭球凸集模型下的非概率可靠度 P'_{f_c} 和非概率失效度 P'_{f_c} 的物理含义, 如图 3 所示。



(a) 线性下标准化空间示意图

(a) Standardization space schematic diagram under linear condition



(b) 非线性下标准化空间示意图

(b) Standardization space schematic diagram under non-linear condition

图 3 椭球凸集模型下应力 - 强度干涉模型

Fig. 3 Strength-stress interfere standardization space under ellipsoidal convex model

图 3 中阴影部分面积与总面积的比值即为结构非概率失效度 P'_{f_c} , 其计算公式为:

$$P'_{f_c} = \frac{A_{\text{failure-region}} (M < 0)}{A_{\text{total}}} \quad (24)$$

当前, 非概率可靠性理论在现役船体结构可

靠性评估应用中尚处于理论研究阶段, 但仍有一些学者开展了相应的研究工作。如王东^[59]基于区间数学模型给出了船体结构可靠度评估的区间方法, 但其给出的区间可靠度计算方法并没有体现出非概率可靠性理论的实际工程应用性; 滑林^[60]基于随机概率可靠性理论验证了非概率可靠性理论在现役船体结构可靠性中的适用性后, 分析了载荷效应参数(航速和波高)对船体结构可靠性的影响规律, 并给出了不同航速和海况条件下的现役舰艇船体结构可靠性评估公式^[61]。但对于非概率可靠性理论在现役船体结构可靠性评估中的应用, 还有待开展更深入的研究。

2.3 存在的问题

现有研究表明, 非概率可靠性理论在现役船体结构可靠性评估方面表现出很强的实用性, 其计算效率高, 且不受船体参量分布类型、数字特征的影响^[62], 但也存有部分问题尚待解决:

1) 当参数变量过多时, 非概率可靠性理论中的区间扩张现象加剧, 导致船体结构可靠性评估结果的计算精度和准确度下降。

2) 虽然非概率可靠性理论在现役船体结构中具有可行性, 但与随机概率可靠性理论的相容性有待进行系统的分析。此外, 非概率可靠性理论评估结果过于保守的机理现有研究并不深入。

3 结论与展望

通过梳理当前现役船体结构可靠性评估理论的研究现状, 可以发现: 基于有限的实船勘验数据, 传统可靠性评估理论在现役船体结构可靠性评估方面具有显著的局限性。随机概率可靠性理论虽能较好地表现出结构参量的客观属性, 但其难以摆脱对样本数据过度依赖; 模糊概率可靠性理论虽克服了对样本数据过度依赖的缺陷, 但在确定结构隶属函数及置信水平时, 融入了大量的人为因素, 因而不能很好地体现参量的客观性, 造成其评估结果受人为干扰异常敏感。非概率可靠性理论虽提高了勘验数据的利用率, 在一定程度上能体现参量的客观规律, 且在现役船体结构可靠性评估中表现出良好的应用前景, 但该理论尚未完善, 其评估结果过于保守。

虽然传统可靠性和非概率可靠性两种理论自身都存有其固有的缺陷, 但在现役船体结构可靠性评估中又各具优势。因为现役船体参数变量既含有随机变量又有区间变量, 针对该特性, 如何将上述两种可靠性评估理论的优势进行有效整合, 使现役船体结构可靠性分析结果既能避免盲目保

守又能反映不确定变量的客观随机性,具有重要的学术意义和工程应用价值。

在开展现役船体结构可靠性评估过程中,为提高评估结果的准确度及合理性,本文认为相关研究的重点应主要体现在以下两个方面:

1) 开展现役船体结构损伤后的数据采集方法研究;对实船勘验方法进行深入研究,以使其既能有效降低经济成本,摆脱客观条件约束,又能满足基于随机概率可靠性理论开展结构可靠性分析所需样本数据的要求。

2) 深入现役船体结构可靠性评估方法研究;在可靠性评估方法研究过程中,尤其是基于实船勘验数据并结合船体参数变量中既有随机变量又有区间变量的特性开展新的可靠性评估方法研究。当然,根据可靠性评估的目标,有针对性地从现在的可靠性评估理论中选择一种可靠性评估方法,并对其进行改进,以使其能满足工程应用的需求也是一种有效的解决手段。此外,基于现役船体结构参量的随机性和区间性,开展基于随机-非概率可靠性模型的船体结构可靠性评估方法研究,不失为一种开展可靠性评估方法研究的捷径。

参考文献 (References)

- [1] Kawano K, Venkataramana K. Dynamic response and reliability analysis of large offshore structures[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering*, 1999, 168(1): 255 - 272.
- [2] Lee C E, Kim S W, Park D H, et al. Risk assessment of wave run-up height and armor stability of inclined coastal structures subject to long-term sea level rise[J]. *Ocean Engineering*, 2013, 71(5): 130 - 136.
- [3] Nordenstrom N. Probability of failure for weibull load and normal strength[R]. *Det Norske Veritas*, 1969.
- [4] Mansour A E. Approximate probability method of calculating ship longitudinal strength[J]. *Journal of Ship Research*, 1974, 18(3): 203 - 213.
- [5] 吴梵, 滑林. 腐蚀、疲劳损伤下船体结构可靠性研究现状与展望[J]. *中国舰船研究*, 2017, 12(5): 52 - 63.
WU Fan, HUA Lin. Current status and prospect for reliability analysis of hull structures under corrosion and fatigue damage[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2017, 12(5): 52 - 63. (in Chinese)
- [6] Guedes S C, Garbatov Y. Reliability of maintained ship hulls subjected to corrosion[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 1999, 52(1): 93 - 115.
- [7] 李世军. 非概率可靠性理论及相关算法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
LI Shijun. Research on algorithms of non-probabilistic convex reliability and its theories[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2013. (in Chinese)
- [8] Kaymaz I, McMahon C A. A response surface method based on weighted regression for structural reliability analysis[J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2005, 20(1): 11 - 17.
- [9] Melchers R E. Importance sampling in structural systems[J]. *Structure Safety*, 1989, 6(1): 3 - 10.
- [10] 高社生, 张玲霞. 可靠性理论与工程应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
GAO Shesheng, ZHANG Lingxia. Reliability theory and application engineering[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [11] Shinozuka M. Basic analysis of structural safety[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1983, 109(3): 721 - 740.
- [12] 赵国藩, 金伟良, 贡金鑫. 结构可靠度理论[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
ZHAO Guofan, JIN Weiliang, GONG Jinxin. Probability theories of structures[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000. (in Chinese)
- [13] Hasofer A M, Lind N C. An exact and invariant first-order reliability format[J]. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 1974, 100(1): 111 - 121.
- [14] 任慧龙, 宋竞正, 戴仰山. 关于船舶规范中计算载荷的分析[J]. *中国造船*, 1995, 2: 32 - 40.
REN Huilong, SONG Jingzheng, DAI Yangshan. Analysis of design load in ship specification[J]. *Shipbuilding of China*, 1995, 2: 32 - 40. (in Chinese)
- [15] Guedes S C. Uncertainty modelling in plate buckling[J]. *Structure Safety*, 1988, 5(1): 17 - 34.
- [16] Akpan U O, Koko T S, Ayyub B, et al. Risk assessment of aging ship hull structures in the presence of corrosion and fatigue[J]. *Marine Structures*, 2002, 15(3): 211 - 231.
- [17] Kutt L M, Piaszczyk C M, Chen Y, et al. Evaluation of the longitudinal ultimate strength of various ship hull configurations[J]. *SNAME Transactions*, 1985, 93: 33 - 53.
- [18] 桑国光, 龚恢. 船体梁抗弯能力的计算[J]. *中国造船*, 1984, 1: 65 - 75.
SANG Guoguang, GONG Hui. A method for calculating the capability of the hull girder subjected to vertical bending[J]. *Shipbuilding of China*, 1984, 1: 65 - 75. (in Chinese)
- [19] 桑国光. 应用结构可靠性原理研究船舶纵弯强度[J]. *中国造船*, 1986, 4: 100 - 121.
SANG Guoguang. Application of structural reliability theory to ship longitudinal strength[J]. *Shipbuilding of China*, 1986, 4: 100 - 121. (in Chinese)
- [20] 袁杰, 桑国光. 船体总纵强度可靠性分析[J]. *中国造船*, 1987, 4: 45 - 58.
YUAN Jie, SANG Guoguang. Reliability analysis in ship's longitudinal strength[J]. *Shipbuilding of China*, 1987, 4: 45 - 58. (in Chinese)
- [21] 刘东, 袁杰, 桑国光. 甲板板格屈曲破坏下船体梁的可靠性计算[J]. *上海交通大学学报*, 1988, 22(3): 19 - 26, 107.
LIU Dong, YUAN Jie, SANG Guoguang. Failure probability of ship hull under panel collapse modes[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 1988, 22(3): 19 - 26, 107. (in Chinese)
- [22] 刘东, 桑国光. 改变结构参数的可靠性再分析[J]. *中国造船*, 1989, 3: 80 - 88.
LIU Dong, SANG Guoguang. Reliability reanalysis with incremented structural parameters[J]. *Shipbuilding of China*, 1989, 3: 80 - 88. (in Chinese)
- [23] 刘东, 桑国光. 结构可靠度对结构参数的敏感性导

- 数[J]. 上海交通大学学报, 1989, 23(3): 55-62.
- LIU Dong, SANG Guoguang. Sensitivity derivatives of structural reliability [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1989, 23(3): 55-62. (in Chinese)
- [24] 俞铭华, 姚金山, 徐昌文. 变量相关的船舶结构可靠性分析[J]. 华东船舶工业学院学报, 1997, 11(2): 2-7.
- YU Minghua, YAO Jinshan, XU Changwen. Reliability analysis of ship structures with correlated random variables[J]. Journal of East China Shipbuilding Institute, 1997, 11(2): 2-7. (in Chinese)
- [25] 俞铭华, 姚金山, 徐昌文. 应用复形优化方法的船舶结构可靠性分析[J]. 中国造船, 1997(3): 60-65.
- YU Minghua, YAO Jinshan, XU Changwen. Reliability analysis of ship structures using improved complex method of optimization[J]. Shipbuilding of China, 1997(3): 60-65. (in Chinese)
- [26] 易宏, 朱煜, 林洲, 等. 舰船总体可靠性分配方法[J]. 上海交通大学学报, 1998, 32(7): 99-104.
- YI Hong, ZHU Yu, LIN Zhou, et al. Distribution method of whole ship's reliability [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1998, 32(7): 99-104. (in Chinese)
- [27] 孙克林. 具有缺陷板的船体极限强度可靠性分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.
- SUN Kelin. Reliability analysis of ultimate strength of hull with defective plate [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2008. (in Chinese)
- [28] 杨俊, 祁恩荣. 损伤舰船结构安全性评估[J]. 中国舰船研究, 2007, 2(5): 15-18.
- YANG Jun, QI Enrong. Structure safety assessment of damaged ship[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2007, 2(5): 15-18. (in Chinese)
- [29] 何文涛. 船体结构疲劳裂纹扩展及其可靠性分析直接计算法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- HE Wentao. Research on the direct analysis approach of reliability regarding fatigue crack growth of ship structures[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [30] Brown C B. Entropy constructed probabilities[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1980, 106(4): 633-640.
- [31] Brown C B. The merging of fuzzy and crisp information[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1980, 106(1): 123-133.
- [32] Ayyub B M, Lai K L. Structural reliability assessment with ambiguity and vagueness in failure [J]. Naval Engineering Journal, 1992, 104(3): 21-35.
- [33] 蔡开元, 文传源, 张明廉. 模糊可靠性理论中的基本概念[J]. 航空学报, 1993, 14(7): 388-398.
- CAI Kaiyuan, WEN Chuanyuan, ZHANG Minglian. Basic concepts in fuzzy reliability theories[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1993, 14(7): 388-398. (in Chinese)
- [34] 杨纶标, 高英. 模糊数学原理及应用[M]. 3版. 广州: 华南理工大学出版社, 2001.
- YANG Lunbiao, GAO Ying. Theories and applications of fuzzy mathematics [M]. 3rd ed. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2001. (in Chinese)
- [35] 王琦. 实用模糊数学[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1992.
- WANG Qi. Fuzzy mathematics application [M]. Beijing: Scientific and Technical Documentation Press, 2002. (in Chinese)
- [36] 邵文蛟. 结构模糊可靠性分析[J]. 中国造船, 1994, 4: 66-74.
- SHAO Wenjiao. Structural fuzzy reliability analysis [J]. Shipbuilding of China, 1994, 4: 66-74. (in Chinese)
- [37] 陈胜军. 机械系统模糊可靠度的估计模型[J]. 机械设计与制造, 2009, 11: 128-129.
- CHEN Shengjun. Estimating models of mechanical system fuzzy reliability[J]. Machinery Design & Manufacture, 2009, 11: 128-129. (in Chinese)
- [38] Yang J M, Huang J Y. Fuzzy reliability analysis of a ship longitudinal strength [C]//Proceeding of the Eighth International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures, 2001, 2(9): 931-937.
- [39] Montes A, Akyildiz H, Yetkin M, et al. A FSA based fuzzy DEMATEL approach for risk assessment of cargo ships at coasts and open seas of Turkey[J]. Safety Science, 2015, 79: 1-10.
- [40] 余建星, 杨利敏. 基于模糊理论的油船船体纵向强度失效概率分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2004, 25(5): 601-604.
- YU Jianxing, YANG Limin. The failed probability of oil-tanker's longitudinal strength based on the fuzzy theory[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2004, 25(5): 601-604. (in Chinese)
- [41] 余建星, 杨利敏. 船舶总纵极限强度模糊可靠性研究[J]. 中国造船, 2005, 46(3): 11-16.
- YU Jianxing, YANG Limin. The fuzzy reliability study of ship longitudinal ultimate strength [J]. Shipbuilding of China, 2005, 46(3): 11-16. (in Chinese)
- [42] 余建星, 郭振邦, 徐慧, 等. 船舶与海洋结构物可靠性原理[M]. 天津: 天津大学出版社, 2001.
- YU Jianxing, GUO Zhenbang, XU Hui, et al. Probability theories of ship and ocean architecture [M]. Tianjing: Tianjing University Press, 2001. (in Chinese)
- [43] 王晓军, 王磊, 邱志平. 结构可靠性分析与优化设计的非概率集合理论[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- WANG Xiaojun, WANG Lei, QIU Zhiping. Analysis of structural reliability and non-probability gather theories of optimization design [M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese)
- [44] Cremona C, Gao Y. The possibilistic reliability theory: theoretical aspects and applications [J]. Structural Safety, 1997, 19(2): 173-201.
- [45] Qiu Z P, Miller P C, Frommer A. The new non-probabilistic criterion of failure for dynamical systems based on convex models [J]. Mathematical and Computer Modeling, 2004, 40(1/2): 201-215.
- [46] Ben-Haim Y. A non-probabilistic concept of reliability [J]. Structural Safety, 1994, 14(4): 227-245.
- [47] Ben-Haim Y. A non-probabilistic measure of reliability of linear systems based on expansion of convex models [J]. Structural Safety, 1995, 17(2): 91-109.
- [48] Ben-Haim Y. Convex models of uncertainty in radial pulse buckling of shells [J]. Journal of Applied Mechanics, 1993, 60(3): 683-688.
- [49] 李贵杰, 吕震宙, 葛山增, 等. 用非概率理论分析混合不确定性结构的可靠性 [J]. 国防科技大学学报, 2014, 36(5): 21-25.
- LI Guijie, LYU Zhenzhou, GE Shanzeng, et al. A reliability

- approach based on non-probabilistic theory for structures with hybrid uncertainties [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2014, 36(5): 21–25. (in Chinese)
- [50] 李世军, 樊建平, 漆伟, 等. 非概率区间模型可靠性指标的梯度投影法[J]. *计算力学学报*, 2013, 20(3): 192–197.
LI Shijun, FAN Jianping, QI Wei, et al. The gradient projection method for non-probabilistic reliability index based on interval model [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2013, 20(3): 192–197. (in Chinese)
- [51] Sun Z Z, Meng G W, li F, et al. Interval perturbation method to structural non-probabilistic reliability analysis[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 893: 1527–1530.
- [52] 曹鸿钧, 段宝岩. 基于凸集合模型的非概率可靠性研究[J]. *计算力学学报*, 2005, 22(5): 546–549.
CAO Hongjun, DUAN Baoyan. An approach on the non-probabilistic reliability of structures based on uncertainty convex models [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2005, 22(5): 546–549. (in Chinese)
- [53] 郭书祥, 吕震宙, 冯元生. 基于区间分析的结构非概率可靠性模型[J]. *计算力学学报*, 2001, 18(1): 56–60.
GUO Shuxiang, LYU Zhenzhou, FENG Yuansheng. A non-probabilistic model of structural reliability based on interval analysis [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2001, 18(1): 56–60. (in Chinese)
- [54] 王晓军, 邱志平, 武哲. 结构非概率集合可靠性模型[J]. *力学学报*, 2007, 39(5): 641–646.
WANG Xiaojun, QIU Zhiping, WU Zhe. Non-probabilistic set-based model for structural reliability [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2007, 39(5): 641–646. (in Chinese)
- [55] 郭书祥, 张陵, 李颖. 结构非概率可靠性指标的求解方法[J]. *计算力学学报*, 2005, 22(4): 227–231.
GUO Shuxiang, ZHANG Ling, LI Ying. Procedures for computing the non-probabilistic reliability index of uncertain structures [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2005, 22(4): 227–231. (in Chinese)
- [56] 郭书祥, 吕震宙. 结构体系的非概率可靠性分析方法[J]. *计算力学学报*, 2002, 19(3): 332–335.
GUO Shuxiang, LYU Zhenzhou. A procedure of the analysis of non-probabilistic reliability of structural systems [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2002, 19(3): 332–335. (in Chinese)
- [57] Elishakoff I. Three version of finite element method based on concepts of either stochasticity, fuzziness or anti-optimization [J]. *Applied Mechanics Reviews*, 1998, 51(3): 209–218.
- [58] Ben-Haim Y, Elishakoff I. Discussion on a non-probabilistic concept of reliability [J]. *Structural Safety*, 1995, 17(3): 195–199.
- [59] 王东. 基于区间数学的船舶总纵强度区间可靠性方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
WANG Dong. An interval model of ship structural reliability based on interval analysis [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese)
- [60] 滑林, 吴梵, 牟金磊, 等. 关于现役舰艇非概率可靠性模型的安全性评估[J]. *船舶力学*, 2017, 21(2): 184–191.
HUA Lin, WU Fan, MU Jinlei, et al. Safety evaluation of non-probabilistic reliability model of vessels in service [J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2017, 21(2): 184–191. (in Chinese)
- [61] 滑林, 吴梵. 载荷响应参数对现役舰艇结构可靠性的影响[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(5): 40–44.
HUA Lin, WU Fan. Effect of loads parameters on structure reliability of warship in-service [J]. *Journal of Huazhong University of Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2017, 45(5): 40–44. (in Chinese)
- [62] 滑林, 吕岩松, 吴梵, 等. 腐蚀损伤下船体总纵极限强度可靠性分析方法探讨[J]. *国防科技大学学报*, 2018, 40(2): 156–160.
HUA Lin, LYU Yansong, WU Fan, et al. Discussion on reliability analysis method for ultimate longitudinal strength of hull structure under corrosion damage [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2018, 40(2): 156–160. (in Chinese)