

[船舶结构]

# 船舶与海洋结构物设计中的关键技术之一 (结构强度)

赵耕贤

[编者按]

该文是作者参加“中国现代科学全书”(工程卷第 25 卷)第三章第四节和第五节编写的文稿。作者在阅读众多文献中,针对船舶与海洋结构物的结构设计中关键技术——结构强度与船舶振动,从下述两方面的基本内容作了畅述:

1. 该学科基本理论的概述,其中包括其研究对象、范围、基本内容和研究方法等。
2. 该学科 20 世纪的进展回顾和总结,其中包括国内外的进展,以及该学科面临着亟需加强研究的问题,并对该学科在 21 世纪的发展趋势进行了一定预测。

文章深入浅出,通俗易懂。对管理人员和科技工作者有较重要的参考意义。

由于篇幅有限,本期先将“结构强度”刊出,下期将刊“船舶振动”。

[关键词]结构强度;波浪载荷预报;结构分析技术;安全性衡准;疲劳强度;可靠性分析

[摘 要]该文主要论及了船舶与海洋结构物的结构设计中关键技术——结构强度。在基本理论概述、船舶结构强度分类、波浪载荷预报、结构分析技术、结构强度安全性的衡准、疲劳强度、可靠性分析及结构强度研究的展望等内容作了全面的论述。文章以通俗易懂的语句,描述了该学科 20 世纪进展的回顾和总结,包括国内外的进展及提出了亟需加强研究问题,并对该学科在 21 世纪的发展趋势进行了一定预测。

[中图分类号]U661.43 [文献标识码]A [文章编号]1001-9855(2000)06-0022-014

## Structure strength-one of the key design technologies for ship and offshore structures

Zhao Gengxian

**Keywords:** structure strength; wave load forecast; structure analysis technology; safety criterion; fatigue strength; reliability analysis

**Abstract:** This paper addressed a key technology in designing ship and offshore structure, i. e. structure strength. The author gives a complete analyses on its basic theory, classification of structure strength of ship, wave load forecast, structure analysis technology, safety criterion for structure strength, fatigue strength, reliability analysis, and prospect of the structure strength research, etc. The paper reviewed and summarized its advance achieved in the 20th century, presented the major subjects that need to be further studied, and predicted the tendency of its development in the 21st century.

### 1 概 述

船舶与海洋结构物是一个复杂的水上工程建筑物。在江、湖、海,担负着运输、生产等各种任务。

船舶与海洋结构物具有造价高、使用期长、环境载荷恶劣等特点。在其使用期内可能遭遇到多种事故,这些随机的事故一旦发生,将对结构产生不利影响,导致整个结构失去工作能力,造成很大的经济损失和引起社会效益的下降。

\* [收稿日期]2000-09-03

[作者简介]赵耕贤(1941.11-),男,汉族,研究员,从事船舶设计与研究工作。



为了保证能很好地完成上述任务,它们应具有良好的航行性能、工作性能和具有一定的强度。

船舶与海洋结构物从建造、使用、直至到报废的全过程中,结构会经受多种外载荷的作用,致使整体结构产生变形甚至损坏。

“结构损坏”的定义在 1967 年的国际船舶结构会议(ISSC)作了一定的描述。

损伤(Damage)一个结构如果原来形状发生某种有损于今后功能的变化,即使没有立即丧失作用,也认为这个结构受了损伤。损伤包括结构构件失去稳定性而产生的永久变形或产生的裂纹。在这样的情况下,结构虽能承受它的设计载荷,但是已给结构留下了隐患,对发挥功能带来了不利影响,一有适当机会就应该予以修复。

破坏(Collapse)破坏是指结构损伤得很严重,以致使它不能再履行其功能。这种功能丧失的最小载荷被称为破坏载荷。

“结构损坏”这一描述,与本学科研究中分为延性破坏(Perfectly ductile)和脆性破坏(Perfectly brittle)的说法是一致的。“延性破坏”是指一个构件失效后,在某种程度上还能继续工作。“脆性破坏”是指一个构件失效后,不能再继续承受载荷。

船舶与海洋结构物所遭受的外载荷是相当复杂的,这个外载荷除了它们本身的载货质量和装备等质量以外,主要就是水作用力。除非它们是静置于水中,否则受到的力总是动力。动力包括水动压力、冲击力以及船舶与海洋结构物在运动中的惯性力等等。

人们常把船舶与海洋结构物在执行任务的过程中,抵抗这些外载荷的作用,使其结构不致产生重大损坏和严重变形的能力,称为结构强度与刚度。

船舶与海洋结构物是由成千上万个构件组成的整体结构。作用在整体结构上的水作用力这类载荷主要取决海面的情况、波浪的大小。这类载荷是随机的,确定它是相当复杂的。也正是由于这种载荷,使结构构件损坏形式也不同,诸如屈服、失稳、疲劳、塑性破坏或大变形等等,产生了一系列的结构强度问题。因此,如何合理确定结构强度,保证营运安全,降低建造成本,始终是造船界十分关注的重要课题,是该类结构的设计关键技术之一。

船舶与海洋结构物的结构研究涉及多门基础学科理论,诸如流体力学、结构力学、断裂力学、船舶制造学、材料学、概率统计与随机过程理论等,对它的研究是十分复杂的。

## 2 船舶结构强度分类

从外力引起结构变形和损坏的观点来看,外力的作用可分为总体性的和局部性的。总体性损坏会危及船舶的安全,当它蔓延到一定区域后会使船舶断裂、沉没。而过大的船体变形会使设备、机械不能正常工作。至于局部性损坏,由于涉及的面较小,一般不会危及整艘船舶的安全,但会影响船舶执行任务,故也是应该尽量避免的。因此,通常将船体的强度人为地分成总强度和局部强度。

### 2.1 总强度

人们通过长期的生产实践,分析了船体受力和变形的主要特征,在考虑船体强度问题时,把整个船体当作一根梁来研究。

将“船体梁”(Ship hull girder)静置于静水中或波浪上,船体主要受到水压力和重力的作用。作用于船体的重力包括结构本身、设备与装置等的质量(即空船质量)和各种装载(如货物、人员、燃油及水等)的质量等两大部分。其中,空船质量是不变的,它的分布与船舶的总布置有关;而装载质量是可变的,它的分布依装载情况而定。船体在水中所受到的水压力的垂直向上分量的总和称为浮力。浮力的分布由水下部分的船体形状决定。通常,船体的中部丰满,首尾两端尖瘦,因而浮力沿船长方向的分布由中部向两端逐渐减小。就整艘船舶来说,重力和浮力的大小相等、方向相反,并且重心与浮心在一条直线上,船体处于平衡状态。但是,沿船长的某一区段来说,重力和浮力一般是不平衡的。有的区段上浮力大于重力,有的区段则相反。区段上的浮力与重力之差称为载荷。如果各区段之间没有联系,则在载荷作用下,区段将有上浮或下沉的趋势。事实上,船体是个整体,不允许有相对浮沉情况存在,因此在船体横剖面上就有阻止相对移动的力,这种力称为剪力。

在浮力与重力作用下,船体会产生象扁担一样的弯曲变形,这种使整艘船体沿船长方向(亦称纵向)的弯曲称为总纵弯曲。通常,把中间上拱,两端下垂的弯曲状态称为中拱状态(Hogging condition),而把中间下垂,两端上翘的弯曲状态称为中垂状态(Sagging condition),引起船体纵向弯曲变形的“力”称为总纵弯曲力矩。它在两端为零而在船中达到最大值。

船舶在波浪中时,船体的重力曲线不变,但是浮力曲线变化了。由于浮力的变化,相对于静水状态而言,沿船长的各个区段上就作用了附加载荷,从而引起了附加剪力和弯矩。船舶在波浪中受到的附加剪力和弯矩就称为波浪附加剪力和波浪附加弯矩。在进行计算时通常假定船舶静止不动地停在波浪中,仅计算由于浮力的变化而引起的附加剪力和弯矩,



这种方法称为“船舶静置于波浪的计算方法”，是一种至今还沿用的经典计算方法。在计算时，船舶所“静置”的波浪长度、波浪的形状有规定。用这种“标准”波浪上算得的附加剪力和弯矩与所算得的静水剪力和弯矩相叠加来相对地比较各船舶的受力大小。

事实上，船舶在海洋中航行时所遭遇的波浪与上述“标准”波浪有很大的出入。由于将船舶静置在波浪上研究总强度是忽略一系列动的因素，因此多年来人们又对船舶在波浪上运动时的受力情况进行分析研究，包括对波浪本身的研究、波浪中动压力、波浪冲击力以及考虑船在波浪上运动时各种惯性力的研究等等，力图寻找出能确定船舶在波浪中所受外力的正确规律及其计算方法。

所以，现在趋向于应用“切片理论”(Strip theory)计算或由模型试验确定波浪弯矩，并用概率统计方法推算船舶在各种海浪上所遭受的最大波浪载荷以及船舶在整个使用期内可能遭受的最大载荷。

## 2.2 砰击

船舶在海洋中保持一定的航速迎浪航行，则船体端部就会受到波浪冲击，并引起激烈的船体振动。这种波浪对船体端部的冲击称为砰击。砰击时除了被波浪直接冲击的船体端部范围产生很大的冲击力外，并在船体中部引起瞬时的冲击弯矩。这种冲击弯矩在数量上有时会接近，甚至超过波浪弯矩。所以在船舶设计中，尤其是高速舰艇或大型船舶的设计越来越重视船体砰击问题。

## 2.3 扭转强度

船舶在航行时，并不总是正对着波浪的运动方向，经常会出现船舶与波浪行进方向成某种角度航行的情况。船舶在斜浪上航行，由于受力的不对称作用，就会导致船体发生扭转，因此，也就存在船体的扭转强度问题。近年来，世界各国大量建造的集装箱船和大开口多用途船舶，因其货舱开口特别大，船体的抗扭刚度相对较低，对其扭转强度的研究就显得十分必要。此外如内河和沿海使用的大开口驳船，也有同样的现象。

## 2.4 局部强度

除了总强度以外，船体的横向构件(如横梁、肋骨、肋板等)及船体的局部构件(如船底板及底纵桁等)也会因局部荷重而发生变形或受到损坏，这些横向构件或局部构件的强度问题，通常称为“局部强度”问题。

## 2.5 应力集中

船舶海损事故又告诉人们，大多数海损事故都是因为船上舱口角隅等处的应力集中而引起的。应

力集中引起的裂缝，可蔓延到甲板甚至舷侧，严重的可以导致整艘船舶折断。应力集中通常是由于船体结构不连续而引起的。除了舱口角隅以外，船体上层建筑的端部、船侧的门开孔及其它结构不连续的地方也都会发生应力集中。因此如何减少应力集中问题又是船舶结构强度中的另一个重要问题。

# 3 船舶在波浪中的载荷响应预报主要方法

进行船舶结构分析时，首先要确定作用在船体上的载荷。结构分析的精度又很大程度地取决于载荷计算。因此，载荷问题是船舶结构研究中非常重要的一个问题。

按照传统，作用在船体上的波浪载荷可分为总体载荷(波浪弯矩、扭矩和剪力)和局部载荷(作用在船体表面上的海水动压力)。事实上，总体载荷就是局部海水动压力的合力，可将海水动压力沿全船积分得到。波浪还引起冲击力、甲板上浪的水压力、舱内液体晃荡力(Sloshing pressure)等载荷。从船舶安全性角度考虑，波浪载荷对船舶的极限强度起重要的作用。

由于船体形状的复杂性，波浪的不规则性，船舶和波浪遭遇的随机性等因素，波浪载荷计算是十分复杂的。人们十分重视应用谱分析法计算船体所受的波浪载荷。也就是说，把波浪对船体的作用视作对船体系统的输入，而船体受力和运动视作系统的输出。对于每一种输出过程，系统都有相应的传递函数(传递函数可以由试验得到，也可以由切片理论计算得到)，把传递函数与实际海况的波谱相结合，就可以得到船体受到的载荷谱，进而可以求得载荷的统计特征值，以及载荷的长期和短期预报值。人们常称这种方法为船舶在波浪中的载荷响应预报技术(Wave Load Prediction Technology)。

## 3.1 基本的波谱

无论是用船模试验或是切片理论计算波浪载荷，都应用了丹尼斯(St. Denis)和皮尔逊(Pierson)的假定，即不规则波可以看成由若干规则波线性迭加而成。对于线性系统来说，船舶的响应也可以通过对组成不规则波的所有规则波的响应迭加而成。

常用的波谱有纽曼谱(Neumann Spectrum)、皮尔逊·莫兹科维奇谱(Pierson-Moskowitz)、两参数谱(Two Parameter)等。

## 3.2 波浪载荷预报的基本原理

波浪载荷预报可分为长期预报(Long-term Prediction)和短期预报(Short-term prediction)两种。



### 3.2.1 波浪载荷长期预报方法

船舶在一生中可能遇到各种不同的海况和航行条件,而每一种海况和航行条件认为是相互独立的随机变量,都可以看成是一个短期分布,而且近似地认为是一个平稳、窄带、正态过程,其幅值符合瑞利分布(Rayleigh distribution)或指数分布(Exponential distribution)。长期分布可以看成是由大量的短期分布,按其海况及航行条件发生频率加权的组合,用超越概率的形式表达。主要方法有刘易斯(Lewis)法、越智(Ochi)法和曼索(A·Mansour)法。前两者的长期分布幅值为瑞利分布,后者为指数分布。曼索应用极值的序列统计原理,由超越概率中求得波浪载荷的可能极值与设计极值。

### 3.2.2 波浪载荷的短期预报(越智方法)

船舶在恶劣的海况下,短时间的营运,载荷响应值可达到临界水平。据统计推测,大尺度船舶在恶劣海况中的营运时间占总航行时间的5%左右。在这种海况下,船舶将遭受到足够大的设计响应值。特定海况的短期分布为瑞利分布。用极值统计学中的序列统计法,可求得载荷的可能极值与设计极值。

## 3.3 波浪载荷预报的主要方法

随着计算机技术的发展,以及数值算法、有限元分析和谱分析法的进展,致使复杂的理论分析用于工程实践逐步成为现实。

船体结构在波浪中的响应预报技术,大致可分为4种方法。

### 3.3.1 静力分析法

是最经典的计算方法,将船体结构简化为一等值梁,静置在“标准”波浪上,计算此等值梁在重力和浮力作用下的纵向弯矩和垂向剪力,进而校核船体结构各部位(诸如甲板、舷侧和底部)应力。显然此方法不符合船舶在波浪中航行时结构受力的真实情况,因忽略了所有流体动力和船舶运动引起的力。

### 3.3.2 动态静力分析法

从20世纪50年代中后期到20世纪70年代初,船舶在波浪中的运动得到了比较充分的研究。1970年萨尔文森(Salvesen)等提出了新切片理论,较好地解决了船舶在波浪中的运动和波浪载荷的分析方法。该方法把船舶动置在波浪中,应用二因次势流理论分析船舶的运动和受力,在波浪载荷中计入了船舶运动引起的各项流体动力、波浪扰动力和惯性力等。船体结构仍按等值梁或薄壁梁考虑。假定海浪为规则波或不规则波,此方法是一种比较合理的简便计算方法,适合于各种类型船舶。但此方法中未考虑船体结构的变形和振动,对超大型油船和大型集装箱船等有一定影响。

### 3.3.3 动力分析法

此方法把船舶视作弹性体结构,研究此弹性体在空气和水中的振动模态,采用模态迭加法分析此弹性体在波浪中的船体结构振动和应力响应。计算中一般不考虑(也可考虑)船舶运动引起的流体动力,但未考虑船舶运动和结构振动间的耦合影响。此方法可用于分析船体结构的自振频率和振动模态,但在应力响应分析方面,因忽略了船体的刚体运动引起的流体动力影响,将会产生较大误差。

### 3.3.4 水弹性分析法

亦称流固耦合响应分析。此方法在20世纪70年代初提出,是研究弹性体的船舶在波浪中的刚体运动和船体结构振动的耦合的统一运动方程,求解各项流体动力(包括流固耦合影响引起的对刚体运动和弹性体变形的力)。分析中,将船体结构视作变断面薄壁梁或按壳体考虑。但用壳体分析的计算工作量大,实际应用中还是先以弹性体的梁作整体分析,然后取出其中任一梁段,以整体计算所得的内力或变形作为局部梁段分析的边界条件,再按壳体作有限元分析。此方法目前在大型油船和某些大型海洋结构物的研究开发中有所应用。随着理论研究的不断发展与完善,此方法必将逐步推广应用于各类有可能与遭遇海浪发生共振的大型船舶(诸如大型散货船、大型集装箱船)。

## 4 波浪载荷预报展望

### 4.1 船舶在规则波的载荷响应

船舶在规则波的载荷计算,长期采用二维切片理论(Strip theory)。在20世纪80年代国内外学者开始研究基于绕射理论的三维面格法(3D Panel method),开发了相应的计算机程序,从而使整船的直接计算方便地得以实施。

船舶在大波幅波浪中非线性运动和载荷的计算是一个富于挑战性的课题。在时域内进行模拟计算的方法,在20世纪90年代已引起了重视。通常可采用基于非线性切片理论的方法和边界元法(Boundary element method)。近年发展的全非线性边界元方法(采用了精确的自由液面条件),并考虑了船舶在波浪中的精确位置来确定边界条件,并开发相应的计算机程序。但这一方法仍有待进一步深入研究。

### 4.2 船舶在不规则波的载荷响应

海洋波浪是一个典型的随机过程,波浪载荷也是一个随机过程。工程研究中,常常将不规则海面视作由很多规则波组合而成,并假设船舶在很多规则波上的响应之和,等于在规则波之和的响应。



根据波浪散布图及传递函数来计算的谱分析方法仍是20世纪最常用的方法,其中传递函数的计算就用了上述规则波的方法。严格而言,谱分析方法仅适用于线性问题,但各国学者在对待非线性问题,大多是对传递函数进行适当的处理,如利用“二阶传递函数”、“伪传递函数”等。另一方面,时域方法也可用于对随机波浪进行模拟,在时域内用模拟计算直接得到波浪载荷的长期分布的方法正在受到重视。

为了简化计算,各国船级社的规范中一般给出对应于一定超越概率的波浪载荷的经验计算公式。我国应尽快建立自己的载荷计算系统。

同时应指出,各种不同理论方法及各国船级社开发的载荷分析系统的计算结果之间有很大的差异。有报告指出,用不同方法计算的超越概率为 $10^{-8}$ 的垂向波浪弯矩值的差异可在1.5倍左右。这主要是由于问题本身的复杂性及所采用的假设不同所引起的。这样就引出了两个研究课题。一是对现有载荷计算的各种方法进行比较评价;另一方面,将计算结果的差异作为不确定性因素在可靠性分析中予以考虑。

此外,总体载荷各分量之间、局部载荷各分量之间、总体载荷与局部载荷之间由于作用相位的不同,还需要从统计角度研究它们的组合问题。

## 5 船舶与海洋结构物的结构分析技术

船舶与海洋结构物的结构是由一定种类的材料制造,例如各种成份的船用钢材或铝合金材料。结构构件的内部应力由船体所受的各种外部载荷,主要是重力与流体静动力载荷所引起。在采用各种理论与方法获得了外部载荷后,必需计算出结构构件的内部应力,然后再根据一定的准则判断该结构是否处于安全状态。

由于船舶和海洋结构物的结构复杂性和外部载荷的复杂性,准确地计算结构内力一直是一项困难的任务。它从传统的手工计算发展到现代化的大规模电子计算机,大致分为如下三个发展阶段。

(1) 在20世纪70年代以前,完全依靠手工计算的方法,确定结构内部的应力。具体做法是根据经典的固体力学理论,结合结构构件多为梁系、板材和加筋板的特点,发展出适合船舶和海洋结构物计算的船舶结构力学,建立了一系列专用的方法与公式。我国主要参照前苏联20世纪50年代发展起来的体系,完成各类船舶和海洋结构物的结构计算。由于手工计算能力的限制,人们只能计算从整个结构中取出某一小部分,并对取出的真实结构按其规定的特

征作粗略的简化。因此其结果带有明显的局限性和不精确性。在某一艘船舶的设计过程中,所能考察与计算的结构部位也受到手工计算能力和工作量的限制。

(2) 20世纪70年代起,随着电子计算机和有限元方法的发展,人们将两者有机地结合,从而突破了手工计算能力的限制,使结构计算技术进入迅速发展的第二阶段。有限元方法将结构物划分成大量的基本结构单元,例如梁元、四边形或三角形的板元等,然后将这些大量的结构单元按照结构的实际组成情况联接起来,从而用这样的力学模型表征了原来真实的复杂结构,并按照有限元的规格化过程形成一个高阶方程组,借助于计算机的高速运算,解出结构变形和每一个结构单元的应力。因此,人们可以对结构进行比较详细的应力计算,例如船舶货舱区的船底或甲板、舱壁、一个完整的横向框架、甚至形状不规则的结构片段,都可以用简化的空间梁系代表一个或几个货舱进行应力计算。大约在20年的时间内,国内外开发了一大批中型的计算程序,构成了这一阶段船体结构应力计算的实践基础。

(3) 进入20世纪90年代以后,船体结构计算技术有了更新的发展。与第二阶段相比,这阶段在理论与方法上没有新的变革,但由于计算机硬件的处理能力大幅度的提高,而且以一批高性能软件系统的开发成功为标志,船舶结构计算的规模已经扩大到船体中部数个货舱段的立体结构计算和整艘船舶全部结构整体的详细计算,此时船体结构的各个细部可以真实地反映在计算中,使结构应力计算达到相当高的精确与详细程度。可以认为,在已经知道外载荷的前提下,20世纪末期的计算手段已可以准确地计算任意复杂结构的内部应力。因此,在这个时期内,对新型船舶的设计进行船体中部立体舱段的应力计算已属常规的工作要求。随着对海洋波浪的研究进展,船舶在波浪上的响应预报技术日益广泛地应用于大型油船、集装箱船和各类新型船舶的结构设计中。在这个发展阶段中,大型软件系统的开发起着决定的作用。一个典型的软件系统包含着完整的单元库,可以处理数万至数十万阶方程组的求解系统,以及具有功能强大的前后处理系统,可大大减轻操作人员的工作量。世界上各主要造船国家都进行了巨额投资,经过长期开发,在20世纪90年代后期陆续推出了各自集成的设计计算系统,已经发表可资应用的代表性系统有:英国劳氏船级社的SHIPRIGHT系统,美国船级社的SAFEHULL系统,挪威船级社的NAUTICUS系统和法国船级社的VERISTAR系统等,这标志着船体结构分析技



术进入了新的阶段。

在我国造船界中,有限元技术的发展始由 20 世纪 70 年代,经过大约 10 年时间的开发,一些中小型的专用程序被广泛采用在船舶结构分析中,对我国新船型的开发研制起了重要的作用。然而在大型综合性分析系统的研制工作起步较晚,目前尚未形成具有国际竞争力的规模性软件。

## 6 结构强度安全性的衡准

结构强度安全性的衡准是用于结构受载荷作用后,判别其响应的允许程度,是人们对船舶和海洋结构物的结构强度的一种控制。船舶结构安全性衡准的高低,直接影响到结构构件设计的结果,也影响船舶的经济性和安全性。因此,衡准是结构强度研究中必不可少的重要内容。人们在制定衡准过程中,主要是依赖于大量的理论分析和经验积累,同时也注意到,船体结构分析计算得到的应力值与外载荷大小及其计算方法的精确性有着密切的关系。因此,研究并制定结构强度安全性衡准的定量标准与一定的外力计算规则和内力计算方法相关联。各国船级社都积极研究,并颁布相应的规范文件,例如对一般的或特定船舶规定外力的计算条件、内力计算规则以及相对应的许用应力,构成一个完整的结构强度衡准体系。船体强度的控制,目前仍以材料的屈服为安全界线,认为结构构件的内部应力不超过材料的屈服应力,并具有一定的安全储备,结构是安全的。在常规设计过程中,考虑到一个常规的静力计算不可能充分反映外力的复杂性和可变性,也不可能完全反映结构的真实性,因此引进安全系数的概念,将材料的屈服应力按一定的安全系数降低,作为结构强度安全性的衡准(即许用应力)。随着技术的发展,对于外力与内力计算的精确性的日益提高,因而衡准的定量标准也随之修订。近代可靠性理论的发展,可以考虑载荷与结构能力的不确定性,这一方法尚未广泛地应用于船舶结构常规设计过程,但可以适当地反映到安全系数中。同时还应注意到,结构强度有不同的分类,所以有不同的对应强度衡准,其中船体的总纵强度的极限衡准十分令人关注。

长期以来,在总纵强度计算中采用的经典的线弹性理论,这时,认为船中剖面所能承受的最大弯矩是始屈弯矩(即船中剖面上的应力开始达到材料屈服应力时所对应的弯矩)。在目前大多数船级社的规范中,主要还是采用基于始屈弯矩的总纵强度衡准。但是,随着对船体损坏的机理不断深入研究和认识,总纵强度的概念已经有了很大的变化和发展。早在

20 世纪 50 年代末,Vasta 在 1958 年提出了“极限承载能力”的概念。各国学者在近 20 年的研究进一步揭示了,在研究船体的总纵强度时,必须考虑构件的屈服、失稳等各种可能的损坏模式,考虑受压构件失稳后及损伤后剩余强度的影响,并考虑组成船体的各个构件发生损坏的渐进性质和相互作用,以及因此而引起载荷分布的变化等等。计及上述这些因素后,船中剖面所能承受的最大弯矩称为总纵极限弯矩,它表征了船体垂向弯曲时的极限承载能力。这样定义的总纵极限弯矩总是小于塑性弯矩,但它有可能大于始屈弯矩,也有可能小于始屈弯矩。由此也可看出,它比用始屈弯矩作为衡准要合理。

总纵极限弯矩的计算是一个非线性问题,涉及材料的非线性和几何的非线性,必须用增量的方法逐步计算,得到完整的弯矩-曲率曲线后,才能得到总纵极限弯矩的精确值。同时,为了计算船体的总纵极限弯矩,还必须首先对组成船体结构的板、加筋板等基本构件进行非线性分析,以掌握它们在受压情况下的失稳及损伤后的剩余强度等性能。极限总纵弯矩的计算目前有四种主要的方法,即非线性有限元法、理想结构单元法、基于梁-柱理论的简化方法和经验公式。

近年来,基于结构极限强度的极限状态设计法在结构工程领域得到了迅猛的发展,与传统的线弹性的强度衡准相比,采用极限强度衡准可以进一步地提高结构的安全性经济性。在船舶工程中,用总纵极限弯矩的设计方法来取代传统的始屈弯矩的设计方法也已成为一种趋势。尤其在基于可靠性的设计方法中,极限承载能力的计算已成为必要。因此,总纵极限弯矩计算方法的研究成为船体结构强度和设计方法研究中的一个热点。

## 7 疲劳强度

船舶在海浪中航行,船体构件承受随机交变载荷,所以船体结构的疲劳强度问题一直被造船工作者所关注,特别是 20 世纪 70 年代以来,由于船舶尺度迅速增长,要求采用高强度钢来建造船舶,结构上能承受的应力也随高强度钢的屈服强度的提高有较大的提高。人们认识到采用高强度钢可以减小船体构件的尺寸,但结构的疲劳强度几乎没有增加,反而会降低船体构件的疲劳寿命,甚至在应力集中的地方会产生疲劳裂纹。船舶的疲劳损坏不仅造成船舶的修理工作的大量耗费,而且易使船舶引发灾难性的损害。因此,对结构进行疲劳强度分析是船舶与海洋结构物的结构强度中十分重要的内容。



各国相继在这方面开展了大量的研究,应用力学及材料学的知识从微观角度研究材料的疲劳机理,并注重从宏观的角度,将研究成果应用于工程实际。

### 7.1 结构疲劳的实质

材料或结构构件受到多次重复变化的载荷作用时,即使承受的最大重复交变应力低于材料的屈服极限,但经过一段时间的工作后,最后会导致材料或结构构件的损坏,材料或结构构件的这种损坏叫做疲劳损坏。

结构的疲劳损坏实质上是在交变载荷作用下结构损坏的过程。这一过程由裂纹生成、裂纹扩展和脆性断裂三个阶段组成。船舶及海洋结构物是常见的焊接结构,它们的疲劳性能与金属材料及经机械加工后的零件有较大的不同,主要的区别在于,焊接结构由于制造的原因不可避免地存在初始缺陷,裂纹生成较快,不像金属材料和机械零件有较长的裂纹生成阶段。研究发现,在裂纹生成阶段,焊接结构内的微小缺陷逐渐发展成一些微小的裂纹,这些微裂纹又逐渐汇合,形成类似半椭圆状的初始表面裂纹。这一阶段通常耗时不多。半椭圆形的初始表面裂纹形成后,为裂纹扩展阶段,沿着深度和长度两个方向扩展,直到穿透板厚。当表面裂纹穿透板厚时,其穿透点(裂纹最深处)迅速张开,形成类似矩形状的贯穿裂纹。矩形贯穿裂纹继续扩展,直到其长度达到失稳临界值,从而使结构发生脆性断裂。这一阶段常称为疲劳裂纹的亚临界扩展阶段。结构的疲劳寿命主要取决于裂纹在这一阶段的扩展情况。

这里要指出,以上所述是针对焊接结构而言的,对于非焊接结构或焊接后焊缝采用打磨措施消除缺陷的情况,裂纹的生成主要是由于结构内的结晶缺陷或夹杂物等,使局部范围产生微观的塑性滑移,从而形成疲劳裂纹源。这个过程需要经历一个较长的时间。疲劳裂纹源形成所需的这一段时间作为结构疲劳寿命的一部分,又称为裂纹生成寿命。

由此可见,疲劳损坏的特点是:

- (1) 在多次重复载荷作用下产生,它是长时间的交变载荷作用的结果;
- (2) 没有宏观显著塑性变形的迹象,与脆性破坏很类似,所以具有突发性;
- (3) 在破坏的断口上呈现两个区域:一部分是暗淡光滑区,即疲劳裂纹发生和扩展区;另一部分是光亮晶粒状区,即快速断裂区;
- (4) 在交变载荷作用下,疲劳损坏是从材料或结构构件上存在缺陷处开始的,对光滑无缺口试件则由于滑移产生微裂纹,裂纹起点叫疲劳源;

(5) 对疲劳损坏来说,材料组成、构件的形状和尺寸、表面状态、使用环境等因素都是非常敏感的。

从宏观的角度上看,整个疲劳过程中,塑性应变与弹性应变是同时存在的。根据损坏时循环数的高低,疲劳可分为高周疲劳和低周疲劳。高周疲劳受应力幅控制,故又称应力疲劳。在高周疲劳中,弹性应变起主导作用。低周疲劳受应变幅控制,故又称应变疲劳。在应变疲劳中,塑性应变起主导作用。研究指出,对焊接结构而言,无论在高周疲劳,还是低周疲劳,裂纹扩展寿命是疲劳寿命的主要部分。在工程实际中,一般以  $10^5$  次循环作为高周疲劳和低周疲劳的分界点。

### 7.2 结构疲劳可靠性的基本理论与方法

结构疲劳可靠性理论主要包括三大部分:

- (1) 随机疲劳载荷谱的编制,即对结构在各种海况下承受的波浪载荷及其所产生的疲劳循环应力进行测定和计算;
- (2) 等幅疲劳寿命与疲劳强度的可靠性分析;
- (3) 变幅或随机载荷时间历程作用下,疲劳寿命与疲劳强度的可靠性分析。

其中最核心的问题是如何建立随机疲劳累积损伤准则,只有根据合理的随机疲劳累积损伤准则,才能在疲劳载荷谱给定的条件下,由等幅疲劳试验结果,对结构进行相应的变幅或随机时间历程加载下的疲劳可靠性分析。

在分析船舶结构的疲劳分析时,一般都采用在实验基础上,建立结构疲劳的模型,主要有两类方法。一类是基于 S-N 曲线及迈因纳(Miner)线性累积损伤理论的方法。德国人 A·沃勒对结构的疲劳进行了系列试验,他首次提出了 S-N 曲线及疲劳极限的概念。此外,他还研究了热处理、应力集中和叠加静载荷对疲劳的影响,为常规疲劳强度设计奠定了基础。1930年,英国人 J·古德曼对疲劳极限提出简化假设并考虑平均应力对疲劳寿命的影响。1945年,美国人迈因纳在前人工作的基础上提出了损伤和应力循环数成线性关系的线性疲劳累积损伤理论,这些都进一步完善了常规疲劳设计。

在确定结构的疲劳寿命时,取船舶最恶劣的航行工况计算船体结构的疲劳载荷,显然十分保守的。国外学者开始对疲劳强度长期分布进行研究。认为结构的疲劳应力范围服从韦勃尔(Weibull)分布,并对韦勃尔分布的两个参数给出经验公式。较多的学者是用谱分析法进行频域分析,拟合出结构疲劳应力范围的韦勃尔分布参数,但其中也对载荷进行了简化,如定义特定的波浪方向或频率、选择特定点或



剖面的载荷传递函数等等。

20 世纪 70 年代末, Wirsching 等人提出了一套基于 S-N 曲线的分析方法。此方法是用对数正态格式来考虑 S-N 曲线和线性累积损伤理论的不确定性, 将疲劳载荷用一个确定性的载荷因子加以考虑, 但对载荷因子的确定未作讨论。Munse 在综合大量实船和实验资料的基础上, 在 1981 年也给出了一个船舶结构构件的疲劳许用应力标准, 并对主要参数作了简要讨论。但对设计寿命下结构所受的等幅应力范围未作过多讨论。这一类方法都是建立在试验基础上, 方法比较简单, 相对也比较成熟。

而另一类是基于线弹性断裂力学 (LEFM) 的方法。断裂力学理论应用于疲劳强度设计是 20 世纪 60 年代开始发展。断裂力学中裂纹扩展的概念早在 1920 年, 英国人 A·A·格里菲思就提出了裂纹扩展的能量理论; 1957 年, 美国人 G·R·欧文引入应力强度因子, 描述材料在裂纹尖端的受力程度; 1963 年, 美国人 A·C·帕里斯提出了疲劳裂纹扩展速度的指数幂定律或称为帕里斯公式, 这一公式在工程上被广泛用来估算疲劳裂纹扩展寿命, 并应用于疲劳强度的各个方面, 如高周疲劳、低周疲劳、高温疲劳和腐蚀疲劳等。

从 20 世纪 70 年代起, 由于电子计算机的应用, 而且也发展了一种估算疲劳裂纹形成寿命的计算方法——局部应力-应变法。这种方法综合了 50 年代以来疲劳强度研究中的各方面成果, 特别是对材料循环特性的研究, 采用了现代的实验方法和分析技术, 建立了一套估算裂纹形成寿命的方法, 再利用断裂力学的裂纹扩展速度公式估算裂纹扩展寿命, 最终求得材料或构件的疲劳寿命。这类方法的理论依据较充分, 在研究包含裂纹结构的剩余寿命及与此相应的检测、维修决策方面特别有效。目前, 上述两类方法已成为船舶结构抗疲劳设计中相互补充的方法。

无论采用何种方法, 在结构寿命期间, 确定应力范围的长期分布是十分重要的。对此, 相应有两类处理方法, 一类是计数方法, 即直接从交变应力历程中将那些对结构造成疲劳损坏的应力循环识别出来, 并用统计的方法得到应力范围的长期分布, 目前雨流法已被国内外学者公认为是一种准确有效的计数方法; 另一类是建立应力范围长期分布的理论模型。目前, 常用的理论模型有: (1) 简化的模型, 认为在整个寿命期间, 应力范围的长期分布可用一个理论概率分布函数来描述。通常假设为韦勃尔分布。这时, 韦勃尔分布的形式参数的确定是一个需要研究的问题; (2) 谱分析的模型, 即在窄带平稳正态假设下, 认

为应力范围在短期海况中服从瑞利分布, 长期分布则结合波浪散布图得到。由于真实船体结构中的交变应力一般是宽带的, 且具有非正态性, 因此有必要研究如何在模型中计及宽带和非正态的影响。现有的做法是根据雨流计数法的结果进行修正, 即引入所谓的“雨流修正系数”。理想的理论模型还有待开发。近年, 日本学者根据实船长期观测结果提出了一种用于疲劳分析的新的随机载荷模型“风暴模型 (Storm model)”, 可较好地模拟真实海况的非平稳性, 因而引起了各国学者的重视。

采用基于 S-N 曲线的方法时, 根据所用应力的特性又可分为名义应力法、热点应力法和切口应力法三种。采用名义应力法时, 应有一组对应于不同类型节点的 S-N 曲线 (常用名义应力 S-N 曲线有英国健康与安全执行委员会 (HSE) 的曲线组和国际焊接学会 (IIW) 的曲线组。根据实际节点准确选择 S-N 曲线是非常重要的。因此, 如何将常见的节点合理地分类, 是需要研究的。采用热点应力法和切口应力法时, 都只需相应的一根 S-N 曲线, 但需要计算节点的应力集中。对于热点应力法, 还需对热点应力作统一的定义。特别当采用有限元法时, 需要对名义应力、热点应力的定义作统一的规定。近年, 船舶的疲劳强度也引起船级社的高度重视。各国船级社相继在规范中对疲劳强度提出了要求或编制了有关的指导性文件。由于各国船级社采用的基本方法不尽相同, 且为了便于实施, 采用了大量的简化与假设。因此各国规范或指导性文件从具体做法到计算结果都有很大的差异。在各国船级社的规范或指导性文件中, 名义应力法仍是结构疲劳分析中应用最广泛的一种“标准”方法, 热点应力法也受到一定的重视, 但切口应力法尚处于研究阶段, 仅适用于十分简单的情况。此外, 还有一些影响疲劳寿命的因素需要加以研究, 包括平均应力、残余应力、周期性过载、环境腐蚀、制造工艺、构件尺度等。根据船舶的特点。其中残余应力、周期性过载及腐蚀的影响应引起特别的重视。

因此, 国际焊接学会正在制定用有限元法计算热点应力的标准, 国际船级社协会 (IACS) 正在致力于建立统一的疲劳强度评估流程, 应当说是具有重要实际意义的。

值得指出的是: 由于轻金属材料 (如铝合金) 和复合材料 (如玻璃钢) 正在越来越多地应用于高速船或其他高性能船舶, 轻金属材料和复合材料结构不同于钢结构的某些疲劳问题, 也已成为引起重视的研究课题。

### 7.3 疲劳强度研究的进展与回顾



疲劳载荷,疲劳寿命,疲劳强度,是疲劳可靠性理论最重要的三个基本内容。疲劳强度,是结构抗疲劳设计的首要指标。其经典定义是当指定疲劳循环寿命  $N$  时,由  $S-N$  曲线求得的相对应的应力水平。人们在研究疲劳损伤理论时,就如其他工程技术学科一样,其理论应具有四大特性:可证性、可适性、可验性、可行性。可证性是指理论要有明确的前提条件,并且可以在给定的前提条件下进行数学上的逻辑证明;可适性是指理论要有明确的适用范围;可验性是指理论能经受得住实验验证或实践检验;可行性是指理论在目前的技术条件下可以实现或被应用。对于疲劳累积损伤准则来说,若具备以上“四性”,则最终标准便是预测结果与试验结果相吻合的程度。

### 7.3.1 国外的进展

实际结构所承受的疲劳载荷大小随时间而随机变化。对疲劳寿命的试验研究是非常巨大的。等幅疲劳试验相对来说简单,且已积累了大量试验结果。外国学者对疲劳理论进行了长期的探索。主要是:

- 最广泛采用的累积损伤准则是 Miner 准则。1945 年 Miner 将 Palmgren 在 1924 年提出“损伤积累与循环次数成线性关系”的假设给以公式化,并给出力学的物理概念,即在某一等幅疲劳应力作用下,在每一交变应力循环里,材料吸收的净功相等,当这些被材料吸收的净功达到临界值,疲劳破坏发生。Miner 准则不足之处在于疲劳发生与裂纹无直接关系,而且未考虑材料的分散性,即认为同样材料,在不同时间,同样加载的结果是相同的。但由于大量的试验结果接近于该准则,工程上使用亦较简单,即使考虑众多因素影响的其他方法,由于很难描述清楚众多因素的不确定性,所以 Miner 准则应用最为广泛。

- 1937 年 Langer 将疲劳损坏分成裂纹萌生与扩展两个阶段,并建立了对这两个阶段均适用的 Langer 准则。

- Marco-Starkey 在 1954 年提出等幅加载的累积损伤的一般准则,Miner 准则仅是该准则的特例。然而该准则未解决求解问题,而只能用于定性分析。

1955 年 Henry 提出等幅剩余  $S-N$  曲线的思路。

- 1955 年 Lery 和 1993 年 Choukairi 及 Barault,假定材料各试件的  $S-N$  曲线不相交,做了材料的疲劳试验,试图检验 Miner 准则对于每组个别试件是否成立。1968~1970 年间, Birnbaum 和 Saunders 等人认为疲劳损伤中的随机变量是独立的,疲劳裂纹也可独立统计,并对 Miner 准则进行

了概率解释。

- Kececioglu 在 1974 年提出在程序谱加载下的概率递推法,其实质是同一试件在不同应力下的等幅疲劳寿命对应同一可靠度值。1978 年又提出较为著名的疲劳应力与强度的干涉模型,把疲劳应力当做构件承受随机载荷的时间经历,引起人们的注意。

- 自 1975 年国外许多学者对 Miner 准则进行了一系列的研究,如 Tanaka 的统计 Miner 准则(其实质是在各种疲劳载荷下,可用统计 Miner 准则进行疲劳可靠性分析)。另外,早在 1949 年,Wallgren 已提出相对 Miner 准则(这是确定性的研究方法,类似于在静强度分析中求安全系数)。相对 Miner 准则,即认为同一构件在两个大小以及分布都相近的载荷谱作用下,若已知其中一个载荷谱下的值,则可用该值对另一相近载荷谱作用下的构件进行寿命预测。

- Ichikawa 在 1987 年提出的干涉模型,Hashin 1980 年建立的损伤曲线、Kutt-Bieniek

1988 年的二阶矩模型及 1991 年 Wirsching Torng 的二阶矩模型仍然仅适用于随机等幅加载的情况。

- Altus 在 1991 年试图从微观解释疲劳损坏的过程,提出了分子链机械-化学连锁断裂模型,即假设材料由一组分子链单元组成,这组链单元的强度服从某一概率分布;则在等幅加载的第一个循环作用下,较弱的链将先发生断裂(“机械反应”);在下一个载荷循环里,假设在前一个循环里已失效的链会引起附近的链发生连锁断裂(“化学反应”),使得未失效链的强度下降,且其所承受的应变上升,于是又有较弱的链发生断裂(“机械反应”);当所有分子链全部断裂时,材料发生疲劳破坏。

- 1993 年 Kopnov 进一步发展 1982 年 Raiher 提出的独特疲劳曲线。

由上可见,自 1924~1995 年的 70 余年间,外国学者在发展疲劳累积损伤理论上作了大量深入的研究。同时,应清楚地看到,上述研究未能区分结构构件中某一单体的损伤与其他单体损伤增长的差异。

迄今为止,只能给定等幅疲劳试验数据和变幅载荷谱,而疲劳累积损伤准则仍无法进行变幅疲劳寿命预测。

船舶与海洋结构物一般承受变幅和随机载荷作用,所以建立变幅、随机载荷作用下结构疲劳可靠性方法,将是结构设计研究工作者所面临的艰巨工作。

### 7.3.2 国内研究的进展

船舶与海洋结构物的疲劳问题在中国日益得到



重视。1986~1993 年期间上海交通大学教授陈伯真、胡毓仁等人在海洋平台结构有限元模型中,开发了一种代表管节点局部柔度的等效单元,其研究成果受到国际学术界重视。在 1990 年前,由中国海上平台管节点研究委员会(TJCOS)组织了国产 Z 向钢管节点疲劳试验,获得的试验数据,根据疲劳统计学的原理进行了统计分析,并与国外有关资料比较,以对中国生产的 Z 向钢疲劳性能作出评估,建立可供中国的海上平台设计使用的管节点疲劳曲线。

在 1992 年以来,我国高等学校,诸如上海交通大学船舶与海洋工程学院开设了研究生课程“船舶及海洋工程结构的疲劳可靠性分析”,并出版了正式教材,硕士研究生进行了“海洋平台结构系统的可靠性分析”、“船舶结构的风险评估”等研究。

在 1995 年~1997 年 12 月,在国家自然科学基金和高等院校博士学科点专项科研基金资助下展开了“结构与结构系统的疲劳可靠性分析方法及其应用研究”,主要进行了下述三方面工作:

- 在疲劳可靠性分析方法及其应用方面,主要采用基于 Miner 线性累积损伤理论和 S-N 曲线的方法及基于线弹性断裂力学的方法计算结构的疲劳损伤,采用一阶可靠性方法计算疲劳失效概率,对海洋平台管节点、大型散货船、液化气船低温液舱等进行了疲劳可靠性分析。

- 在结构系统疲劳可靠性分析方面,以海洋平台为对象建立了结构系统疲劳可靠性分析的计算模型,研究了疲劳损坏过程中结构系统内疲劳载荷的重新分配及失效单元疲劳损伤累积变化的规律及其统计相关性,提出了结构系统疲劳寿命的表达式、疲劳失效的定义及计算失效途径及复合结构系统疲劳失效概率的方法。

- 在结构模糊疲劳可靠性分析方面,利用模糊集合理论的基本原理研究了结构疲劳失效的模糊定义,给出了计算结构模糊疲劳失效概率的直接积分方法和基于模糊优化和模糊判决原理计算模糊可靠性指标的方法。

1997~1998 年中国船级社上海规范研究所编写《船体结构疲劳强度指南》,该指南采用简化的方法进行船体结构疲劳强度校核。该方法的特征是:

- (1) 疲劳载荷用经验公式计算;
- (2) 疲劳应力用传统的结构力学方法计算;
- (3) 结构内应力范围的长期分布采用二参数 Weibull 分布模型;
- (4) 疲劳累积损伤用基于 S-N 曲线和 Miner 线性累积损伤理论的方法计算;
- (5) 用名义应力范围校核。

## 8 船舶与海洋结构物的可靠性分析

### 8.1 问题的提出

在船舶与海洋结构物结构强度的常规计算方法和校核中,将有关参量都取为定值,这样的方法为确定性法(Deterministic method)。这种方法所采用的安全系数表现为强度的储备,使人们对结构产生某种安全裕度的印象,甚至使人产生一种错觉,认为结构是绝对安全不会破坏的。这种方法沿用已久,用它来检验结构构件的强度及进行构件尺寸的设计。事实上,船舶的舱段,无论是哪种船型,采用哪种结构形式,都是空间的板梁组合结构。各类海洋结构物是高次静不定的空间刚架结构;这样,结构中某个构件失效后,内力将重新分配,整个结构还能继续工作,要延续到有相当数量的构件失效后,整个结构才失效,结构具有较富裕的安全储备。这就促使人们研究船舶与海洋结构物中,某些构件产生破坏的可能性(尽管这种机会极少)对结构损坏的影响,从而形成了采用概率法对结构进行可靠性的分析。

结构可靠性的重要意义在于对结构安全性检验提出了建立在概率分析基础上的一系列新的概念、原理、方法和衡量标准,综合考虑了工程结构中的各种不确定因素,加深了对结构构件工作性能的认识,对结构可靠性有了一个客观的统一度量,这样就能对结构安全性作出合理的判断,从而设计出更为经济而安全的工程结构。可以说,结构可靠性方法是近年来结构工程的主要发展方向,是结构强度理论和计算结构力学的一个新分支。

船舶结构工程正面临着一个改造和再发展的任务,应用可靠性分析研究强度问题是船舶结构工程达到一个新水平的标志。海洋工程是一门年轻的新学科,面广,在缺少经验的情况下,可靠性要求更高,可靠性分析显得日益重要。

### 8.2 可靠性理论的进展

自从 20 世纪 60 年代以来,结构可靠性理论在各个领域(特别是在航空和土木工程)中的应用得到了很大的发展。在船舶工程领域中,虽然早在 50 年代就提出了可靠性概念,但研究进展较慢。由于海洋工程的兴起,情况有所改观。至今,挪威、法国船级社及美国石油工业部门已先后采用了以结构可靠性原理制定的海上平台设计规范或标准。几个国际上有影响的船级社,如英国、美国船级社等,正在着手研究可靠性方法在船舶建造规范中的应用。

可靠性设计的思想可追溯至 20 世纪初的概率设计思想。在 1911 年,卡宾奇提出用统计数学的方



法研究载荷及材料强度。在1926—1929年间,霍契阿诺夫和马耶诺夫制定了概率设计的计算方法,但由于提法不严格,没有得到广泛赞同,未能付诸实践。直到20世纪40年代,由于A. M. Fredenthal和拉尼岑各自独立的研究工作,方才奠定了结构可靠性的理论基础。1954年拉尼岑提出了应力-强度结构可靠性设计的正态-正态模型,并推导了用正态分布二阶矩表达的可靠性中心安全系数的一般形式。1969年美国Cornell在拉尼岑的基础上,从实用角度出发进行改进,提出了可靠性指标,并将它与失效概率直接联系,从而建立了一阶二次矩法。此后林德(Lind)为解决由于功能函数线性化而降低精度的问题,提出了改进的一阶二次矩法。美籍华人洪华生教授(A. H. S. Ang)继而提出了广义可靠性概率法。在1976年,国际结构安全联合委员会(ICSS)采用Rackwitz和Fiessler等人提出的通过“当量正态”方法以考虑随机变量实际分布的二阶矩模型,确立了该方法的地位。至此,二阶矩模式的结构可靠性表达式与设计方法开始进入实用阶段。

国内外学者对结构可靠性计算作了很多有益的探讨。室津义定提出分枝界限法,并于20世纪80年代中期在平面刚架系统和空间刚架系统的可靠性分析领域取得一系列成果。Christensen提出了 $\beta$ 分解法,也获得了较大成功。在国内,许多学者孜孜不倦的工作为可靠性分析奠定了基础。天津大学的胡云昌等人做了大量的工作,推进了结构可靠性分析的实用计算。同期,西北工业大学的冯元生等人也开发了实用程序。上海交通大学的张圣坤在 $\beta$ 分解法中引入人工智能,给结构可靠性分析提出了新的思路。还有学者将遗传算法引入可靠性计算,拓宽了可靠性计算方法的领域。

模糊数学的兴起也为广大学者所注意,模糊可靠性的研究正方兴未艾。Alvi和Ayyub于1990年首先提出模糊失效概念,1992年Ayyub又进一步完善了这个概念。Yao也在这个领域做出了一定的贡献。我国高等院校也开展了运用于船舶失效的模糊判定,计算了船舶总纵强度模糊可靠性的研究。哈尔滨建筑大学的王光远等人导出结构模糊随机可靠度的具体计算方法,推进了模糊可靠性的实用化。

### 8.3 结构可靠性的基本原理

在结构工程中,结构或构件的失效或破坏,是指它们遇到一个载荷,或者遇到一种组合载荷所产生的极值效应,使结构达到一种“失效状态”或“破坏状态”;这种状态可以是它们的最终状态,也可以是营运的状态。因此,问题就是预报这些极值事件的大小,以及预报每一构件的强度。

结构受载荷作用后,安全与否,在概率分析中常用可靠度来衡量。

结构可靠度的定义是结构在规定的时间内与条件下完成预定功能的概率,所以结构的功能达到极限状态就可以认为结构失效。

结构可靠性分析的基本思路可以分为以下几个阶段:

(1) 搜集结构随机变量的观测数据或实验资料,用统计方法进行统计分析,求出其分布规律及有关的统计量,作为可靠性计算的依据。一般比较关心的是外载荷、材料性质以及结构的几何尺寸,它们的分布有正态分布、对数正态分布和极值型分布等。

(2) 计算结构的载荷响应,通过实验与统计获得结构的抗力,建立结构的破坏标准。所谓载荷响应,指的是载荷作用下结构的应力、变形等量值。所谓结构抗力,指的是结构抵抗破坏或变形的能力,如屈服强度、极限强度、容许变形等。

(3) 用概率理论计算满足结构破坏标准下的结构可靠度。

整体结构受载荷作用后,各构件可能因屈服、失稳、疲劳、塑性破坏或大变形而失效,建立失效模式是十分重要,但又是相当复杂。但是有一点是十分明确的,研究整个结构的失效,首先应考虑各种可能产生的失效模式对整个结构的失效的影响,也就是要计算每一构件的可靠度,计算各构件的相关性,以便寻找主要控制整个结构的主要失效的方法。

### 8.4 结构可靠性的基本内容

结构可靠性分析中各设计变量都是随机和变异的。如结构构件的几何尺度、位形,结构材料的机械性能(屈服强度、弹性模量等)以及环境载荷等都不是一个确定的值,而是可用某种分布规律或随机过程来描述,譬如说正态分布,极值型分布等。这样,常规的确定性有限元法已不足以求解这类问题了。

在进行结构可靠性分析时,必然要引用若干个对结构响应起支配作用的基本变量。它们具有不确定性,主要表现在:

(1) 物理量的不确定性 如载荷、材料的机械性能及尺度等物理量是随时间变化。

(2) 统计的不确定性 为了对某些物理量的变化建立概率模型,一定要收集一批数据,以选择适当的概率分布确定其概率分布的特征值。由于实际收集数据有限和经验不同,将造成统计的不确定性。

(3) 模型不确定性 在结构设计分析中,总要对结构建立数学模型,将欲求的结果与给定的基本变量联系起来。这种模型或者根据力学原理或者根据经验建立之后,它们对结构响应的预报或多或少



有一定的误差。这种称为模型不确定性,包括结构中构件的加工、装配以及焊接等一系列因素造成的结构中的残余应力或材料机械性能变化等。

无论是哪种不定性,都是随机变化,参量可作为随机变量看待,就可用表征随机变量的特征如平均值和标准偏差来描述不定性。

所以结构可靠性分析实质上也是综合各个变量的不确定性,评价结构的承载能力。

## 8.5 结构可靠性的基本方法

结构可靠性原理近年来得到很大发展,已被用来检验结构的安全性。大致有三种方法:

(1) 全概率分析 这种方法要求对结构响应起作用的各个量,作出联合出现的全概率描述,利用这种联合概率密度函数,并考虑到失效的真实性,求得结构或构件的“精确”失效概率。这种称为全概率分析(第三水平法)但除了极为简单的情况而外,对结构响应作出全概率的描述是极为困难的。

(2) 第二水平法(level 2 methods) 一般要对失效进行理想化处理,对各变量的联合概率密度作简化表达,用某种近似迭代法求得结构失效概率的近似值,因而也称为近似概率法。有时它通过安全指数或可靠性指数来表示。

(3) 第一水平法 是应用一系列局部安全因子,与事先定义的主要结构变量及载荷变量的特征值或名义值联系起来,提供结构可靠度的设计方法。因为考虑一系列独立的极限状态,故有时也称为极限状态设计。这类方法不能对结构的失效概率或可靠度作出直接定量估计,但由于其表达形式和传统方法很相似,易被人们所接受,故在实际工作中(如设计规范、标准)应用很广。

## 8.6 结构可靠性分析中亟待解决的问题

随着结构可靠性理论与方法的研究与完善,在船舶与海洋结构物中有了一定的应用。其中,采用上述三种方法研究了船体总纵弯曲的程度。某些海洋工程业发达的国家,正在制定以结构可靠性原理为依据的设计标准。对海洋工程整个结构失效的临界状态(极限状态)设计中,用多个局部安全因子代替原来单个安全系数。像美国船级社和 CONOCO 一起发展基于可靠性理论的张力腿平台的设计准则。这正说明国外海洋工程领域的固定平台规范也正在从传统的工作应力设计法向基于可靠性的载荷抗力系数设计法过渡。相比之下,船舶工程在这领域方面已显得落后。另外,海洋工程结构的动力可靠性分析应用的研究也有所开展。结构可靠性分析中亟待解决的新问题主要有如下几个方面。

(1) 现有的结构可靠性分析,大多仅限于求得

整个结构的主要失效路径。问题在于如何有效地寻找主要失效途径;对于大型结构系统而言,如何有效地计算其系统失效概率。尽管各国学者提出了各种近似方法。寻找结构主要失效途径主要有 F. Moses 的载荷增量法、P. Thoft-Christensen 的  $\beta$  分解法和室律义定的分枝界限法等。估算结构失效概率主要有 Stevensen-Moses 法、Gorman-Moses 法、O. Ditlevsen 界限法、一般界限法、PNET 法、Monte-Carlo 法等。由于极少有人综合考虑各个随机变量的不确定性,所以即使对结构可靠性分析方法作改进,仍然不能把由于模型和方法所产生的不确定性降下来。同时,应认识到这种主要失效路径并不能给设计者以明确的定量说明,究竟这些危险点处于何种危险水平。因此,若要结构优化或给检测提供指示,则主要失效路径未免范围过大,工程中也无法判别。而应用模糊综合评判的方法可对这些主要失效路径作一综合评判。因此,开展这类方法的研究是十分重要的。

(2) 根据结构可靠性的理论,不难看出,必须建立在大量试验和实测数据进行统计分析和计算的基础之上,但目前有关不确定性的数据资料,尤其是实测或试验数据相当缺乏,迫切需要各方面力量协同配合,进行长期的收集和积累,建立有关的数据库。近年,实船监控在国外越来越引起重视。在实船上安装测量仪器,不但可控制静水弯矩和波浪弯矩,避免事故发生,还可对实船数据进行长期的测量和记录,显然是极有价值的。事实上,目前实船监控在技术上已无问题,在国内组织实施方面可能存在的困难,应引起重视。

(3) 随着计算技术的发展,将精确积分算法引入实用计算,以前看来似乎不可逾越的繁重计算有可能不再成为难事,寻找结构失效路径的时间将大大减少,这是十分有利的条件。但由于结构失效有多种模式,必须全面考虑结构的各种失效模式,对每一阶段的每一种失效都与各失效模式联系起来,这样才能获得更符合实际情况的结构可靠性分析。

(4) 损伤结构的可靠性计算的研究。如碰撞形成凹坑、海生物腐蚀、疲劳损坏等对海洋平台结构的可靠性有着很大的影响,怎样计及这些损伤的影响也需要专门的研究。

(5) 需要尽快使理论研究转化为结构设计的实际工具。一个重要的工作是要建立以可靠性为基础的设计标准和规范。国内外建筑、桥梁、港口、核电站等工程领域已相继制定了可靠性设计标准和规范。我国船舶工程界亦有必要在这方面着手开展工作,以逐步建立自己的船舶结构可靠性设计标准和



规范体系。为此尚需进行三方面的工作:

- (a) 建立不确定性因素的定量模型;
- (b) 建立可靠性计算方法;
- (c) 确定可靠度目标值。

如何考虑实际结构在工作期间所遇到的组合载荷,又是建立精确分析模型的关键。

(6) 一个值得注意的发展趋势是,可靠性研究已从船舶设计阶段拓展到了营运阶段,例如为船舶的维护修理提供指导性意见,对老龄船舶进行状态评估,必需相应地建立一套损坏设计及其判别方法,以确定是否可以延长使用年限等。

## 9 结构强度研究的展望

船舶与海洋结构物的结构强度依赖于载荷、响应和材料的研究,而逐步形成船舶结构力学的一门学科。船舶的设计在很大程度上取决于船舶结构规范。第二次世界大战前后有关船舶结构载荷、响应、破损和材料的研究已积累了大量的资料,直到20世纪50年代,规范要求完全采用船舶在运营中的经验,很少反映其研究成果。随着大型船、新型船、新材料船、高速船的出现,如巨型油轮、集装箱船、大型散货船和地效应船、水翼艇、气垫船、双体船、高性能船等等,以及它们的事故。在缺乏运营经验时,对结构力学的需求就更为迫切,这就需要定出设计载荷、许用应力和推荐的应力分析方法(所谓外力、内力、许用应力)以决定船舶结构的主要横向结构尺寸,即直接设计法。这在50年代初前苏联已开始研究和实施。而作为一门学科,早在40年代就在苏联形成了。我国在50年代初,辛一心教授在上海交通大学开设了《船体构造力学》这门课,主要讲授船体总纵强度及横强度问题。1954年苏联专家布拉甫金带来了圣彼得堡造船学院的《船舶结构力学》教学大纲。经过翻译,从1955年起,以这些译本为教材在我国各造船院系先后设置《船舶结构力学》课程。1960年,上海交通大学成立船舶结构力学专业,并开始培养本科生和研究生。随着造船事业的发展,船舶结构力学在船舶结构设计中逐渐得到一些应用和发展。1964年中国造船学会在上海召开了“船舶结构力学学术报告会”,检阅了我国10年来船舶结构力学的成就和发展。与此同时,国际上对船舶结构理论与实践亦逐渐予以重视。1961年在英国成立了国际船舶结构议会(International Ship Structure Congress, ISSC),下设若干个技术委员会,有来自欧、美、亚的一些造船专家参加,为国际性造船结构学术组织的发展奠定了基础。每隔3年轮流在欧、美、亚各国举

行ISSC会议。自1978年以后,很多国际上著名的欧、美、日本等国的船舶结构力学专家应邀来我国讲学、交流,而我国亦派出为数不少的留学生和专家学者到国外一些著名大学、研究所、船级社留学、进修和讲学,进行学术交流,为我国船舶结构力学的发展打下了基础。而我国作为世界上主要造船国家,还存在相当大的差距。因此,在发展我国造船事业,尚有许多有关船舶结构理论与实际工作有待去研究。主要有:

(1) 收集与分析有关我国海洋、内河的环境(即风、浪、流和温度)以及冰区和地震的长期和短期统计资料,由于风、浪、流、冲击、晃荡、振动等引起的环境与载荷,以及基于模型试验、实船测试和理论计算的确定性载荷和统计设计载荷等仍是今后研究的方向。尤其随着高速船舶的发展,研究高速船舶的船体结构在流体冲击载荷作用下的动力性能,如结构-空气-流体耦合作用下,船体结构所受的流体冲击载荷计算及其动力响应和动力失稳将是重点研究的问题。其中也包括对于钢质船舶在冲击载荷作用下的非弹性动力失稳及动塑性失效,以及复合材料船体结构的动力失稳及响应研究。

(2) 在船舶结构极限强度分析中,制造缺陷与运营中的损伤对船体储备强度的影响以及设计中有关强度的不确定性将是今后研究的方向,这将涉及船体结构制造过程中引起的初始缺陷(初挠度和残余应力)的统计资料以及矩形板的弹塑性屈曲的分析。

(3) 船舶与海洋结构物的可靠性是今后研究的重点。长期来船体结构总体与局部设计总是停留在确定性方法上,但实际上按同样确定性方法设计的一批构件,会有少量构件发生破坏,当然这是一个很小的量。由于计算中的载荷、结构尺度、机械性能等都是随机变量,从而船舶结构的概率强度、结构可靠性等问题,受到国际造船界的重视。

(4) 用断裂力学方法研究船舶结构的疲劳与断裂,是今后发展的趋势。随着高强度钢材的使用,结构构件的大型化以及焊接工艺的普遍使用,发生过用传统设计观点不能解释的灾难性脆性断裂事故,亦就是断裂应力低于屈服应力,并以脆性方式断裂。

(5) 设计准则和设计方法的不断探索,需要综合考虑船舶在使用过程中可能出现的结构损伤、腐蚀、疲劳、冲击、碰撞、晃荡、触礁载荷、海损事故等因素,来提高船舶运营期内的可靠性。

总之,随着船舶的大型化、高性能化的发展,许许多多疑难的船舶强度问题,有待进一步深入研究。



此外随着电子计算机的高度发展,模拟人脑结构和功能的人工神经网络方法、人工智能、专家系统、模糊数学等先进技术用来探讨船体结构的 CAD 与可靠度分析已成为目前船体结构强度研究的一种趋势。✕

### [参考文献]

- [1] 中国舰船研究院,舰船概论,1983 年
- [2] Папковичф, Строительная Механика Корабля, Морской Транспорт, 1945
- [3] 辛一心, 船舶构造力学, 上海科技卫生出版社, 1958 年
- [4] 陈铁云、陈伯真, 船舶结构力学, 国防工业出版社, 1980 年
- [5] Standard wave data proposal of recommendation. I-ACS WP/S Meeting, Oct 1991
- [6] 陈瑞章、沈进威, 波浪弯矩设计值与长期预报理论计算值的比较, 中国造船, 1996(4)
- [7] Soares C G., On the definition of rule requirements for wave induced vertical bending moments, Marine Structures, 1996(9)
- [8] 魏东、张圣坤, 基于余度概念的船舶总纵剩余强度评估, 上海交通大学学报第 32 卷第 11 期, 1998 年 11 月
- [9] 顾学康、陈瑞章、沈进威, 海浪统计资料对船舶波浪弯矩设计值的影响, 上海交通大学学报第 32 卷第 11 期, 1998 年 11 月
- [10] 陈铁云, 中国船舶结构力学 50 年及其展望, 上海交通大学学报第 32 卷第 11 期, 1998 年 11 月
- [11] 徐昌文, 船舶结构优化设计的研究进展, 上海交通大学学报第 32 卷第 11 期, 1998 年 11 月
- [12] Valsgaard S., Ultimate hull girder strength margins and present class requirements, Proceeding of Marine Structural Inspection, Maintenance and Monitoring, Arlington Virginia, 1991
- [13] 郑学祥, 船舶及海洋工程结构的断裂与疲劳分析, 海洋出版社, 1988 年
- [14] 胡毓仁、陈伯真, 船舶及海洋工程结构疲劳可靠性分析, 人民交通出版社, 1996 年 12 月
- [15] 高镇同, 疲劳应用统计学, 国防工业出版社, 1986 年
- [16] Wirsching P. H., Fatigue reliability in welded joints of offshore structures, International Journal of Fatigue, April 1980
- [17] Wirsching P. H., Probability based fatigue design Criteria for offshore structures, Final Report, American Petroleum Institute, PRAC Project 81-15, 1983
- [18] 桑国光、张圣坤, 结构可靠性原理及其应用, 第 1 版, 上海交通大学出版社, 1987 年
- [19] Ang, H. S. and Tang, W. H., Probability concepts in Engineering planning and Design, John Wiley & Sons, 1984
- [20] Mansour A. E., Faulkner D., on Applying the Statistical Approach to Extreme Sea Loads and Ship Hull strength, Trans, RINA, 1973
- [21] Stiansen S. G., Mansour A., Jan H. Y. and Thayamballi A, Reliability Methods in Ship Structural Design, Trans, SNAME, 1979
- [22] Knapp, A. E., Stahl, B., Offshore platform fatigue cracking probability, J. Strut. Eng., 8, (1985)
- [23] Shimokawa T., Tanaka, S., A statistical consideration of Miner's rule, Int. J. Fat., 2.4, (1980)

\*

\*

\*

\*

\*

\*

## 江苏省南通航海机械有限公司

南通航海机械有限公司(南通航海机械厂)建于 1973 年,是专业制造船用过滤器生产厂,现已发展成为能自行设计、制造各类过滤器、船用模块、阀门遥控装置、船用柴油机液压支撑等多种以船用配套产品为主的生产企业。产品广泛用于造船、造机、发电、化工、冶金、石油等行业。

地址:江苏省南通市人民西路 60 号

邮编:226005

电话:(0513)3518128(总机) (0513)3513339(销售科)

传真:(0513)3527356

电子信箱:nmmc@public.nt.js.cn

## 江苏振华泵业制造有限公司

江苏振华泵业制造有限公司自去年通过 GB/T19002 认证和 GJB/Z9002 认定后,今年元月又通过了海军装备部组织的第三方认证。该公司专利产品 CP(J)、CP(T)型喷射泵、CLZ 立式自吸泵、CWY 柴油机应急消防泵已获准国家星火、火炬计划立项支持。这标志着该公司在企业管理和新品开发

上又迈上了一个崭新的台阶,必将为国内舰、船配套作出更大的贡献。

该公司员工吉荣华同志今年获“全国劳动模范”光荣称号,并赴京参加表彰大会。

地址:江苏省姜堰市通扬中路 56 号

电话:(0523)8213639 8210045

总经理:巫 进

http:www.zhhby.com

邮编:225500

传真:(0523)8216235

联系人:陈 皓

E-mail:zhhyby.jy@public.tz.js.cn