第26卷 第4期 力学进展 Vol. 26 No. 4
1996年11月25日 ADVANCES IN MECHANICS Nov. 25, 1996

结构系统疲劳可靠性分析研究评述

陈伯真 胡毓仁 顾剑民
上海交通大学船舶及海洋工程系，上海 200030

提要 考虑到大量不确定因素的影响，结构在疲劳方面的安全性应采用疲劳可靠性分析的方法来作出科学合理的评估。对于海洋平台等大型复杂结构，更应从结构系统整体的角度进行结构系统的疲劳可靠性分析。本文拟对国内外在结构系统疲劳可靠性研究方面的进展和现状作一介绍和评述，并对进一步研究提出看法。

关键词 可靠性分析；结构系统；疲劳；海洋工程结构

1 前言

疲劳失效是结构的基本破坏模式之一。对于那些长期经受交变载荷作用的结构，例如海洋平台等，疲劳破坏甚至是一种主要的破坏模式。结构的疲劳又是一个受到大量不确定因素影响的极其复杂的现象，如材料的机械性能、结构的几何尺度、载荷、应力计算模型等，都具有相当的不确定性。因此，根据结构可靠性理论，从概率和统计的角度对结构进行疲劳可靠性分析是十分必要的，这是结构在疲劳方面安全性评估的一种科学合理的新方法。结构疲劳可靠性分析的具体任务是，将各不确定因素用随机变量或随机过程来描述，并在此基础上计算出结构的疲劳失效概率。

结构的疲劳可靠性分析可以分为两个层次，即单一结构构件的疲劳可靠性分析和结构系统的疲劳可靠性分析。前者仅研究单一的结构构件（如海洋平台的管节点）的疲劳可靠性问题。然而，实际的工程结构往往是由大量结构构件组成的一个结构系统。以海洋导管架平台为例，它可能有成百个管状构件，有多至几百个甚至上千个管节点。由于平台结构是高次超静定的，一个或少数几个管节点的破坏并不一定导致整个平台的破坏。显然，对于导管架平台之类大型复杂结构的疲劳可靠性问题应从结构系统整体的角度来加以研究。诚然，单一构件的疲劳可靠性分析是结构系统疲劳可靠性分析的基础，但可以认为，真正具有实际价值的是结构系统的疲劳可靠性分析。这也是结构的疲劳可靠性分析和机械零件的疲劳可靠性分析的一个重要区别。

结构可靠性分析的早期工作可以追溯到本世纪40和50年代，自60年代起结构可靠性理

* 本文的工作得到国家自然科学基金和国家教委博士学科点专项科研基金资助

论得到迅速的发展[1,2,3,4]，并在航空和航天工程、建筑工程、核工程、船舶及海洋工程等领域得到实际应用。结构在疲劳方面的可靠性分析也越来越受到重视。例如，船舶及海洋工程结构，尤其是海洋平台，常年受到海洋波浪引起的随机交变载荷的作用，极易发生疲劳破坏，因此，目前成为结构疲劳可靠性分析的一个重要的研究对象。70年代末，美国海岸警卫队的船舶结构委员会（SSC，U.S.Coast Guard）和美国石油学会（API）分别资助了由Munse和Wirsching主持的研究项目[5,6]，他们的工作对结构疲劳可靠性的研究起了先导的作用。此后，其他国家如英国、日本、挪威等也相继开展了研究。目前，在建筑及桥梁工程、船舶及海洋工程、航空及航天工程等相关工程领域主要的各国际学术刊物上，每年都有相当数量的论文发表，有许多国际学术会议还专门设立了疲劳可靠性分析的专题。在国内，自80年代开始，一些高等院校和研究机关，如中科院力学研究所、上海交通大学、西北工业大学等也开展了这方面的研究工作。

从已发表的文献资料看，目前的研究大多集中在单一构件的疲劳可靠性分析方面，相比之下，结构系统疲劳可靠性分析方面的文献数量还不很多。国外，80年代美国的Martindale和Wirsching[7]以及Stahl和Geyer[8]首先发表了研究成果后，80年代末及90年代初，有Karsan和Kumar[9,10]以及Karamchandani等[11,12]报告了一些新的研究进展。国内，从90年代初开始，西北工业大学和上海交通大学在结构系统的疲劳可靠性分析方面进行了研究，并发表了若干成果[13,14,15,16,17]。

本文拟根据已掌握的国内外公开发表的有关文献资料，并主要以海洋平台为例，对结构系统疲劳可靠性的研究作一评述，希望能对今后的研究工作有一定的帮助。

2 结构系统疲劳可靠性分析的基本模型及特点

在结构工程中常见的桁架和刚架都是由许多构件组成的结构系统，其中各构件有多种破坏（失效）模式。在疲劳可靠性分析中，仅考虑构件的疲劳失效模式，它就是结构系统疲劳可靠性模型中的“失效单元”，是形成该模型的最基本单位。对于由大量管状构件组成的海洋平台，由于连接各管状构件的管节点处有高度的应力集中、再加上焊接的影响，最易发生疲劳破坏，因此，管节点处的疲劳失效就看作为是平台结构系统疲劳可靠性模型中的失效单元。

如果若干个失效单元相继疲劳失效而导致整个结构破坏，那么就称这些失效单元形成了一个“失效途径”。失效途径可看成是一个由若干失效单元组成的并联系统。由于结构中存在许多不同的失效途径，任一失效途径的实现都将引起结构破坏，因此，结构系统的疲劳可靠性模型应是一个由所有失效途径（并联系统）串联而成的复合系统，如图1所示。

建立上述模型后，结构系统疲劳可靠性分析的步骤可归纳为：

1．计算各失效单元的疲劳失效概率；

2．计算各失效途径的疲劳失效概率；

3．计算整个结构系统的疲劳失效概率。

显然，以上第一个步骤就是单一结构构件的疲劳可靠性问题。

在计算各失效途径的疲劳失效概率时，必须注意到结构的疲劳破坏是一个渐进的、累积的过程。当某一构件发生疲劳破坏时，一方面，整个结构中的载荷将因此而重新分配，尚未

破坏的其他构件将以一定的比例承担原由该破坏了的构件承担的那部分载荷；另一方面，尚未破坏的构件中也已累积了一定的疲劳损伤，从而消耗了一部分寿命。这是疲劳失效途径的失效概率计算区别于一般静载作用下并联结构系统失效概率计算的一个重要特点，因此，目前结构系统疲劳可靠性分析的研究工作也主要集中在这一方面。

由于实际结构中潜在的失效途径的数量极多，在疲劳可靠性分析中要包括所有的失效途径显然是不可能也是不必要的。因此，如何用适当的方法识别对结构系统疲劳可靠性有决定性影响的关键失效途径也是结构系统疲劳可靠性分析的一个重要问题。

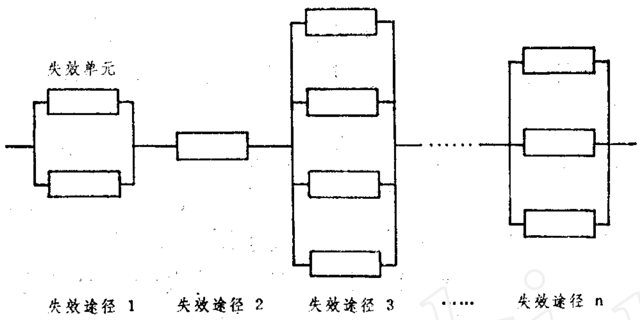

图1 结构系统疲劳可靠性模型

此外，结构中所有构件承受的交变应力都是由作用在同一结构上的外载荷引起的，因此，一般来说各失效单元之间、以及各失效途径之间总有一定的统计相关性。在计算失效途径的疲劳失效概率和计算整个结构系统的疲劳失效概率时，都必须对相关性予以充分的考虑。

最后要提及的是，在海洋工程中还有一种较为特殊的结构形式，即张力腿式平台（TLP）。张力腿式平台的每一张力腿都是由若干张力索组成的，各张力索中又有几十个甚至成百个易发生疲劳破坏的节点，任一节点的破坏都将导致张力索的破坏。因此，在疲劳可靠性分析中，每一张力索可看作是一个串联系统，而张力腿则是由若干串联系统并联而成的复合系统。更进一步，整个张力腿式平台又是一个由若干张力腿串联而成的结构系统。然而，尽管结构形式有所不同，但张力腿平台疲劳可靠性分析的基本方法与前述一般桁架和刚架结构类似，因此本文中不再另行讨论。80年代中期，美国船级社（ABS）曾组织力量对张力腿式平台的疲劳可靠性问题进行研究[18]。

3 国外研究概况及评述

1983年，Martindale 和 Wirsching 在文献［7］中研究了图2所示简化的并联结构系统。这一简化的并联系统可看作是图1所示模型中的失效途径。构件两端节点的疲劳寿命，由 Wirsching 等根据 Miner 线性累积损伤理论提出的疲劳可靠性模型[6,19,20]表示为

$$T=\frac{\Delta A}{B^{m}\Omega} \tag{1}$$

式中，Δ 为结构疲劳破坏时的累积损伤度，是随机变量；A 为 S-N 曲线 $NS^{m}=A$ 的参数，也是随机变量；B 为描述疲劳载荷计算中的不确定性的随机变量，Ω 为与疲劳载荷的概率分布

有关的应力参数，m 为 S-N 曲线的斜率，作为确定量处理．Δ，A，B 都假定服从对数正态分布，因此节点的疲劳寿命也是一个对数正态分布的随机变量．当设计寿命为 T_0 时，可靠性指标 β 为

$$\beta = \frac{\ln(\tilde{T}/T_0)}{\sigma_{\ln T}} \tag{2}$$

式中，$\tilde{T}$ 为 T 的中值，$\sigma_{\ln T}$ 为 $\ln T$ 的标准差．

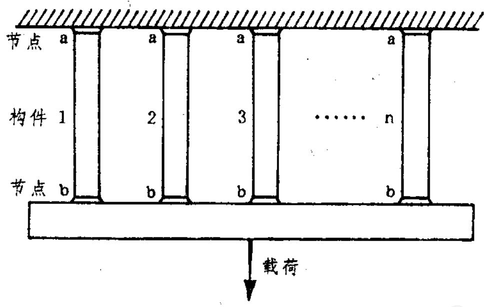

图 2　简化的并联结构系统

为了考虑各节点之间的统计相关性，进一步把影响疲劳寿命的不确定因素分成为两类，其中，Δ 对于各节点是公共（相关）的，A 对于各节点是独立的，而把 B 分成相关分量 B_D 和独立分量 B_I 两部分来考虑，于是第 i 个节点的疲劳寿命为

$$T_i = \frac{\Delta A_i}{B_D^m B_{I\,i}^m \Omega_i} \tag{3}$$

Martindale 和 Wirsching 在分析中作了一个重要的假设，即等载荷假设，认为当一个构件发生破坏时，它所受的载荷由其他还未破坏的构件均匀承担．由于疲劳寿命与应力的 m 次方成反比，根据等载荷假设有：对于有 n 个构件的并联系统，当 k 个构件失效后，第 i 个构件（未破坏）的剩余寿命 $T_i^{(k)}$ 为

$$T_i^{(k)} = (T_i^{(k-1)} - T_{(k)})\left[\frac{(n-k)}{(n-k+1)}\right]^m \tag{4}$$

式中，$T_{(k)}$ 为 $k-1$ 个构件失效至 k 个构件失效之间的时间．

运用 Monte Carlo 法对此并联结构系统的疲劳失效概率进行了计算．具体地，首先对各节点的疲劳寿命按对数正态分布随机采样，并令构件的寿命为两端节点寿命样本值中较小的那个；然后找出寿命最小的构件，判定其为失效，并按式（4）计算其他尚未破坏构件的剩余寿命，再将剩余寿命最小的构件判定为失效．按此计算直至 n 个构件全部破坏．由此可得该并联系统的疲劳寿命为

$$T_s = \sum_{j=1}^{n} T_{(j)} = \sum_{j=1}^{n} \min_{i=j,n} (T_i^{(j-1)}) \tag{5}$$

对足够数量的样本计算后，可得 T_s 的概率分布．当设计寿命为 T_0 时，该并联系统的疲劳失效概率为

$$p_f = P[T < T_0] \tag{6}$$

Martindale 和 Wirsching 的工作对结构系统疲劳可靠性研究的主要贡献在于，对并联系统的失效机理作了准确的描述，并成功地运用 Monte Carlo 法计算出了并联系统的疲劳失效概率。他们对管节点之间统计相关性的研究及处理方法也很有意义。这些成果为后续的研究奠定了基础。然而，他们的工作还有较大的局限性，主要表现在：（1）等载荷假设与实际有较大的距离；（2）Monte Carlo 法的计算工作量庞大，事实上是无法在实际中应用的；（3）未研究一般结构系统(由若干并联系统串联而成的复合系统)的疲劳可靠性问题。

1984 年，Stahl 和 Geyer 也对上述简化的并联结构系统进行了研究[8]。他们采用与文献[7]相同的节点疲劳可靠性模型及节点之间相关性的处理方法，并将节点的疲劳寿命分成相关分量 T_D 和独立分量 T_I 两部分，写成：

$$T = T_D T_I \tag{7}$$

其中，T_D 对所有节点都是相同的。由于各节点的 T_D 和 T_I 间也相互独立，于是当设计寿命为 T_0 时，其疲劳失效概率可表示为：

$$p_f = P[T \leqslant T_0] = P\left[T_I \leqslant \frac{T_0}{T_D}\right] = \int_0^\infty f_{T_0/T_D}(t) F_{T_I}(t) \mathrm{d}t \tag{8}$$

式中，$f_{T_0/T_D}(t)$ 为 T_0/T_D 的概率密度函数，$F_{T_I}(t)$ 为 T_I 的概率分布函数。

在一般情况下，当一个构件中有 m 个节点时，节点疲劳寿命独立分量的概率分布和构件疲劳寿命独立分量的概率分布之间有下列关系：

$$F_T(t) = 1 - [1 - F_{T_I}(t)]^m \tag{9}$$

$$f_T(t) = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} F_T(t) = m[1 - F_{T_I}(t)]^{m-1} f_{T_I}(t) \tag{10}$$

对于由 n 个构件组成的并联系统，当所有构件破坏时，系统的疲劳失效概率为

$$p_f = \int_0^\infty f_{T_0/T_D}(t) F_{T_{nn}}(t) dt \tag{11}$$

式中，$F_{T_{nn}}(t)$ 为所有构件寿命的独立分量的联合概率分布函数。

Stahl 和 Geyer 在等载荷假设下再假设各节点的疲劳寿命具有相同的概率分布（等强度假设），并据此导出了 $F_{T_{nn}}(t)$，其中包含有 $n-1$ 重积分，这里不详细列出。他们还导出了在 n 个构件的并联系统中有 k 个构件破坏时的联合概率分布函数 $F_{T_{nk}}(t)$。

按上述方法，并联系统的疲劳失效概率是通过对疲劳寿命的联合概率密度函数直接积分得到的，Stahl 和 Geyer 认为是一种"精确解"。但是，它是在等强度、等载荷假设下得到的，此外，计算中需进行高维数的多重积分，通常情况下要采用数值积分方法，计算工作量极大，给实际应用带来困难。

从式（9）和式（10）可看出，Stahl 和 Geyer 的方法可以处理一个构件中有多于 2 个节点的情况，因此可以用于张力腿式平台的疲劳可靠性分析。

1990年，Kumar 和 Karsan 把上述方法推广到非等强度和非等载荷的一般情况[9]。同时，他们在文献[10]中进一步研究了一般结构系统疲劳可靠性分析中关键失效途径的搜寻问题。考虑到搜寻关键失效途径时，合理而可行的做法是把结构中易发生疲劳破坏的节点作为搜索对象，因此直接将节点而不是构件作为失效单元形成代表失效途径的并联系统。这与图 2 所示并联结构系统模型有所不同。具体实施时，当某一节点被判断为失效时，其姐妹节点

（同一构件上的其他节点）也同时被认为失效．Kumar 和 Karsan 运用分枝限界（branch-and-bound）法搜寻关键失效途径，并计算了整个结构系统疲劳失效概率的简单上限

$$p_{fs} \leqslant 1-\prod_{i=1,k}(1-p_{fj}) \tag{12}$$

式中，p_{fs} 为整个结构系统的疲劳失效概率，k 为列入计算的关键失效途径数目，p_{fj} 为第 j 个关键失效途径的失效概率．

Kumar 和 Karsan 提出的以节点作为失效途径中失效单元的方法有较大的实用意义，但是，失效途径的失效概率的计算仍需计算工作量极大的多重数值积分，此外，整个结构系统的疲劳失效概率采用简单上限计算，从而未对各失效途径间的统计相关性进行研究．

1991年和 1992 年，Karamchandani 等为了克服 Monte Carlo 方法和直接积分法因巨大的计算工作量造成实际应用的限制，提出了可用一阶可靠性方法（FORM）或二阶可靠性方法（SORM）计算失效途径失效概率的格式[11,12]，其要点是：

首先，将结构中失效单元的疲劳寿命表示成若干基本随机变量的函数，各基本随机变量之间允许存在统计相关性．例如，用 S-N 曲线计算疲劳损伤时，疲劳寿命的表达式为式（1），其中 Δ, A, B 即是基本随机变量．Karamchandani 等在文献［11］和［12］中对海洋平台管节点用断裂力学方法从裂纹扩展的角度计算疲劳损伤，疲劳寿命的表达式为

$$T=\frac{R_{sec}R_{ahs}}{C\varepsilon_F^m\varepsilon_S^m\varepsilon_{SCF}^m\Omega}\int_{a_0}^{t}\frac{da}{\varepsilon_Y^m Y(a)^m(\pi a)^{m/2}} \tag{13}$$

式中，C，a_0，t，R_{sec}、R_{ahs}、ε_F、ε_S、ε_{SCF}、ε_Y 等为基本随机变量，其中，C 为 Paris 公式 $da/dn=C(\Delta K)^m$ 的参数，a_0 为初始裂纹深度，t 为管节点弦管壁厚，R_{sec}，R_{ahs}，ε_F，ε_S，ε_{SCF}，ε_Y 为代表各阶段计算中不确定性的随机变量，具体意义见文献［11］．此外，m 为 Paris 公式中的参数，Ω 为应力参数，均为确定的量．

若 n 个失效单元 $E_1,E_2,\cdots E_n$ 按顺序依次发生破坏，它们构成的失效途径的失效概率为

$$p_f=\left[\bigcap_{i=1,n}(T_{i/1,2,\cdots i-1}\leqslant T_0)\right] \tag{14}$$

式中，$T_{i/1,2,\cdots i-1}$ 表示当失效单元 $E_1,E_2,\cdots E_{i-1}$ 发生破坏后，失效单元 E_i 的疲劳寿命，可以导出它与失效单元在无其他单元在其之前破坏情况下的疲劳寿命 T_i 之间的关系．上式将一失效途径的失效这一事件定义为该失效途径中各失效单元疲劳寿命小于设计寿命的事件的交集．对上式不难用结构可靠性理论的一阶或二阶近似方法来计算．

Karamchandani 等提出的这一格式使失效途径的失效概率可用简便和有效的方法计算，从而向结构系统疲劳可靠性分析的实际应用迈出了一大步．而且，由于一阶或二阶可靠性方法的应用使随机变量的分布形式没有限制，可以适用于更多类型的结构以及各种概率分布的载荷．但是式（14）的定义不尽完善，需加以改进，对此将在下一节中详述．

4 国内研究概况及评述

尽管国内对结构系统在极限静载下的可靠性以及单一结构构件的疲劳可靠性的研究已有不少，但涉及结构系统疲劳可靠性的还为数不多．1988年西北工业大学张永苍研究了结构系

统的疲劳可靠性问题[13]，提出了结构系统在对称等幅循环载荷作用下疲劳极限承载能力及其可靠度的计算方法。但是，这一方法对于一般随机载荷作用的结构系统，如海洋平台，并不适用。

1992年，西北工业大学董聪和杨庆雄研究了非对称应力循环（随机载荷）作用下结构系统的疲劳可靠性问题[14]．对于由 m 个失效单元依次破坏形成的失效途径，根据线性累积损伤原理，其损伤累积过程表示为

$$\left.\begin{array}{l}\dfrac{n_1}{N_{11}}=\Delta_1\\ \cdots\cdots\cdots\cdots\\ \dfrac{n_1}{N_{i1}}+\dfrac{n_2}{N_{i2}}+\cdots+\dfrac{n_j}{N_{ij}}+\cdots+\dfrac{n_i}{N_{ii}}=\Delta_i\\ \cdots\cdots\cdots\cdots\\ \dfrac{n_1}{N_{m1}}+\dfrac{n_2}{N_{m2}}+\cdots+\dfrac{n_j}{N_{mj}}+\cdots+\dfrac{n_m}{N_{mm}}=\Delta_m\end{array}\right\}\tag{15}$$

式中，n_j 为第 $j-1$ 个单元失效到第 j 个单元失效之间的循环数，N_{ij} 为第 i 个失效单元在前 $j-1$ 个单元失效情况下的疲劳寿命（用循环数表示），Δ_i 为代表第 i 个失效单元破坏时的累积损伤度的随机变量。

由上式解出各 n_j 后，失效途径的疲劳寿命为

$$N_T=\sum_{j=1}^{m}n_j\tag{16}$$

对于给定的设计寿命 N_S，失效途径的失效概率为

$$p_f=P[N_T<N_S]\tag{17}$$

文献[14]还在全量加载方法的基础上，提出了搜寻关键失效途径的阶段分枝限界法，其具体做法是在疲劳失效的每一阶段，将阶段疲劳寿命满足规定条件的失效单元作为关键失效途径的侯选单元。

比较式（17）与 Karamchandani 等的疲劳失效定义式（14）可以发现，式（17）事实上只考虑了失效途径中最后破坏的失效单元的疲劳寿命小于设计寿命这一个事件，这一定义显然是不够充分的．此外，文献[14]有关失效途径之间强烈相关的结论也值得进一步讨论。

1993年，本文作者在深入研究 Martindale 和 Wirsching 对并联系统失效机理的描述以及 Karamchandani 等提出的疲劳可靠性格式的基础上进一步指出[15,16]，对于由 n 个失效单元依次破坏形成的失效途径，其失效条件除下式

$$T_{n/1,2\cdots(n-1)}<T_0\tag{18}$$

外，还应满足下列条件以保证失效单元的失效顺序：

$$\left.\begin{array}{l}T_1<T_2,\ T_1<T_3,\ \cdots\ T_1<T_n\\ T_{2/1}<T_{3/1},\ T_{2/1}<T_{4/1},\ \cdots\ T_{2/1}<T_{n/1}\\ \cdots\cdots\cdots\cdots\\ T_{(n-1)/1,2\cdots(n-2)}<T_{n/1,2\cdots(n-2)}\end{array}\right\}\tag{19}$$

推导进一步证明，失效途径的疲劳失效概率可更准确地定义为

$$p_f = P[(T_1 < T_2) \cap (T_{2/1} < T_{3/1}) \cap (T_{3/1,2} < T_{4/1,2}) \cap \cdots \cap (T_{(n-1)/1,2\cdots(n-2)} < T_{n/1,2\cdots(n-2)}) \cap (T_{n/1,2\cdots(n-1)} < T_c)] \tag{20}$$

上式也不难用一阶或二阶可靠性方法来计算，笔者还导出了各失效单元的剩余寿命 $T_{i/1,2,\cdots,(i-1)}$ 与它们在无其他单元首先破坏情况下的疲劳寿命 T_i 之间的关系。

在文献[17]中，采用 β 解链（β-unzipping）法搜寻关键失效途径。为了计及各失效途径之间的统计相关性，首先在用一阶可靠性方法计算式（20）时，把失效单元的疲劳寿命如式（7）分解成 T_D 和 T_I 两部分，然后利用等效线性安全余量的概念[2]，将各失效途径转换成一等效的失效单元，其安全余量为

$$Z_j = -\boldsymbol{\alpha}_j^T \mathbf{Y} + \beta_j \tag{21}$$

式中，β_j 为等效可靠性指标，$\boldsymbol{\alpha}_j$ 为等效敏感性系数矢量，$\mathbf{Y}$为由各失效单元的 T_D 和 T_I 转换得到的标准正态变量。当整个结构系统包含 m 个关键失效途径时，疲劳失效概率为

$$p_{fs} = 1 - \Phi_m(\boldsymbol{\beta};[\rho]) \tag{22}$$

式中，$\boldsymbol{\beta}$ 为由等效可靠性指标组成的矢量，$[\rho]$ 为相关系数矩阵：

$$[\rho] = \boldsymbol{\alpha}_i^T \boldsymbol{\alpha}_j \tag{23}$$

式（22）中 Φ_m 为 m 维标准正态分布函数，可以用数值积分计算，但当维数较大时，数值积分的计算工作量巨大，这时需采用适当的近似方法，如简单界限法（忽略相关性）和 Ditlevsen 界限法[21]等。文献[17]中采用 Hohenbichler 方法[22,23]，通过一系列变换，将 Φ_m 逐级降维运算，能有效地减少计算工作量，提高计算效率。

5 几点看法

根据前文对国内外在结构系统疲劳可靠性方面的研究进展和现状的介绍和分析，最后提出几点看法。

1．失效单元的疲劳可靠性模型是结构系统疲劳可靠性分析的基础。目前对失效单元，一般根据线性累积损伤理论，采用 S-N 曲线的方法（式(1)）或断裂力学的方法（式(13)）计算疲劳损伤。一个值得指出的问题是，各基本随机变量的统计特性对疲劳寿命有显著影响，因此，长期积累和掌握各种不确定因素的统计数据资料是一项十分重要的工作。

2．失效途径的失效概率计算是结构系统疲劳可靠性分析中最具有特色的一个主要研究课题。目前已有采用 Monte Carlo 法、直接积分法和一阶可靠性方法等格式，其中采用一阶可靠性方法的格式因计算效率高，且对基本随机变量的概率分布及统计相关性无特殊限制，最适于在工程实际中应用。但是也要指出，Monte Carlo 法虽然计算工作量大，但它可以对失效途径的失效作出准确的模拟，计算中也不受概率分布和相关性等限制，因此在研究中可用来作为验证比较的依据。失效途径的失效概率计算方面的研究有必要进一步深入。

3．一般来说，结构系统可靠性分析中的各种搜寻关键失效途径的方法亦可用于疲劳可靠性分析，目前，分枝限界法和 β 解链法已成功地应用于结构系统的疲劳可靠性分析。这里，适当地选定取舍的衡准是一个关键的问题。

4．整个结构系统的疲劳失效概率可用简单界限（式(12)）来计算，这时，忽略了各失效途径之间的统计相关性．用一阶可靠性方法时，利用等效线性安全余量的概念，将失效途径转换成等效失效单元，可计及它们的相关性．这时，结构系统疲劳失效概率的计算归结为多维标准正态分布函数的计算，Hohenbichler方法是一种较好的方法．为了便于实际应用，有必要在保证一定精度的基础上，设法进一步提高其计算效率．

5．限于篇幅，本文未对现有文献中算例的计算结果进行讨论，通过实例计算积累结构系统在疲劳可靠性方面的数据，掌握规律性，对结构系统的设计和安全性评估是极有意义的．

6．在海洋工程领域，结构系统疲劳可靠性分析可以成为合理制定海洋平台检测修复计划的科学依据，这是一项非常重要的实际应用．目前，这一课题的研究工作也正在展开，如文献[24]．

7．目前，结构系统在极限静载作用下失效和疲劳失效这两种情况下的可靠性大多是分别予以考虑的，然而对于许多海洋工程结构，非常可能出现两种失效模式混合的情况，首先因较小的波浪载荷引起一定的疲劳损伤并造成极限承载能力的降低，然后因极限波浪载荷而引起结构的完全破坏．因此，考虑两种失效模式混合情况的结构系统可靠性分析也是一个有实际意义的研究课题[11]．

参考文献

1 Thoft-Christensen P, Baker M J. Structural Reliability Theory and Its Applications. Springer-Verlag, Berlin (1982)

2 Thoft-Christensen P, Murotsu Y. Application of Structural Systems Reliability Theory. Springer-Verlag, New York (1986)

3 Madsen H O, Krenk S, Lind N C. Methods of Structural Safety. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs., New York (1986)

4 Melchers R E. Structural Reliability Analysis and Prediction. Ellis Horwood Limited (1987)

5 Munse W H, Wilbur T W, Tellalian M L, Nicoll K, Wilson K. Fatigue Characterization of Fabricated Ship Details for Design. SSC-318, U.S. Coast Guard, Washington DC (1982)

6 Wirsching P H. Probability-Based Fatigue Design Criteria for Offshore Structures. Final Report, API, PRAC Project 81-15 (1983)

7 Martindale S G, Wirsching P H. Reliability-based progressive fatigue collapse. *J. Structuarl Engineering*, ASCE, **109**, 8 (1983) : 1792—1811

8 Stahl B, Geyer J F. Fatigue reliability of parallel member systems. *J. Structural Engineering*, ASCE, **110**, 10 (1984) : 2307—2323

9 Kumar A, Karsan D I. Fatigue reliability of parallel systems. *J. Structural Engineering*, ASCE, **116**, 3 (1990) : 719—729

10 Karsan D I, Kumar A. Fatigue failure paths for offshore platform inspection. *J. Structural Engineering*, ASCE, **116**, 6 (1990) : 1679—1695

11 Karamchandani A, Dalane J I, Bjerager P. Systems reliability of offshore structures including fatigue and extreme wave loading. *Marine Structures*, **4** (1991) : 353—379

12 Karamchandani A, Dalane J I, Bjerager P. A systems reliability approach to fatigue of structures. *J. Structural Engineering*, ASCE, **118**, 3 (1992) : 684—700

13 张永苍．在对称循环载荷下结构系统的疲劳可靠性．航空学报，**9**, 3 (1988) : 135—141

14 董聪，杨庆雄．结构系统疲劳裂纹形成寿命的可靠性分析．西北工业大学学报，**10**, 2 (1992) : 252—258

15 Hu Yuren, Chen Bozhen. A first order second moment approcach to systems fatigue reliability of offshore structures. Proc. 12th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol. 2 (1993) : 327—334

16 胡毓仁，陈伯真．海洋平台结构系统疲劳可靠性分析的一阶二次矩方法．中国造船，**4** (1994) : 88—102

17 Gu Jianmin, Hu Yuren, Chen Bozhen. Systems fatigue reliability of offshore platforms by using

first-order second-moment method. Proc. 13th Ocean Engineering Symposium, Tokyo, Japan (1995)
18 Wirsching P H, Chen Y N. Fatigue design criteria for TLP tenders, *J. Structural Engineering*, ASCE, **113**, 7 (1987) : 1398—1414
19 Wirsching P H, Ortiz K, Chen Y N. Fracture mechanics fatigue model in a reliability format. Proc. 6th International Symposium on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, ASME, New York (1987) : 331—337
20 Wirsching P H, Chen Y N. Considerations of probability-based fatigue design for marine structures. *Marine Structures*, 1 (1988) : 23—45
21 Ditlevsen O. Narrow reliability bounds for structural systems. *J. Struct. Mech.*, 7 (1979) : 453—472
22 Hohenbichler M, Rackwitz R. First-order concepts in system Reliability. *Structural Safety*. 1 (1983) : 177—188
23 Hohenbichler M, Rackwitz R. A bound and an approximation to the multivariate normal distribution function. *Math. Japonica*, **30**, 5 (1985) : 821—828
24 Madsen H O, Skjong R K, Tallin A G, Kirkemo F. Probabilistic fatigue crack growth analysis of offshore structures, with reliability updating through inspection. Marine Structural Reliability Symposium, The Ship Structure Committee and SNAME, Alington VA. USA (1987) : 45—55

A REVIEW OF RESEARCH ON FATIGUE RELIABILITY OF STRUCTURAL SYSTEMS

Chen Bozhen Hu Yuren Cu Jianmin
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030

Abstract Due to the effect of a large amount of uncertainties, fatigue reliability analysis should be used for safety assessment with respect to fatigue of structures. For large complex structures such as offshore platforms, fatigue reliability should be studied from a view point of the overall structural system. The progress and the state of the art of the research on fatigue reliability of structural systems are reviewed in this paper. Suggestions for further researches are also made.

Keywords *Reliability Analysis; Structural System; Fatigue; Offshore Structure*