

冰区海上结构物的可靠性分析

方华灿 陈国明 著



石油工业出版社

0495950

TE951
006

冰区海上结构物的可靠性分析

方华灿 陈国明 著



石油大学 0553078

石油工业出版社

8492220
150/100

内 容 提 要

本书是石油大学海洋石油钻采设备研究室近十多年来,围绕冰区海上结构物的疲劳、断裂及其可靠性分析所进行的试验与科研成果的总结。

本书从可靠性分析的理论基础开始,全面介绍了冰区海上结构物所承受的应力与材料的强度两个方面的概率特性,系统地给出了海上结构物的两种主要失效模式(疲劳、断裂)可靠性分析的步骤和方法,详细地论述了含裂纹(缺陷)构件及结构整体系统安全可靠性评估的方法,并提供了计算实例。

本书可供海洋、浅海、石油、机械工程的科研及工程技术人员做为参考书,也可供有关高等院校研究生、本科生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

冰区海上结构物的可靠性分析/方华灿,陈国明著.
北京:石油工业出版社,2000.11

ISBN 7-5021-3140-X

I. 冰…

II. ①方…②陈…

III. 冰封冻-海上-建筑物-可靠性-分析

IV. P715

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 71623 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

北京施奈德自动化录入排版中心排版

石油工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 25.5 印张 652 千字 印 1—1000

2000 年 11 月北京第 1 版 2000 年 11 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-3140-X/TE·2390

定价:60.00 元

前 言

海上结构物多为由构件焊接而成的大型结构物,其构件在制造过程中和服役期间,均难免产生缺陷(如气孔、空穴、夹渣、焊瘤、凹坑、切口等)。海上结构物承受的载荷,无论是来自风、波浪、海流、还是来自海冰的海洋环境载荷多为随机交变载荷。在复杂的交变载荷作用下,缺陷要萌生出裂纹,裂纹要进一步扩展,直至发生疲劳及断裂失效。海上结构物及其含缺陷(裂纹)构件,始终存在着载荷与抗力(应力与强度)的矛盾。应力大于强度,则发生失效;反之,强度大于应力,则保持可靠。因此,对于海上结构物,无论是设计、制造过程中,或是服役运行期间,都必须进行可靠性分析。可靠性的重要定量指标就是可靠度,可靠度是描述可靠程度大小可能出现的概率值。对海上结构物进行可靠性分析,就是要在设计、研制阶段给出可靠度预测,在服役运行期间给出可靠度评估。我国渤海冬季最低气温达 $-25\sim-20^{\circ}\text{C}$,海冰与海上结构物相互作用,冰激振动严重,它所引起的疲劳应力远较波浪为甚。因此,冰区海上结构物的可靠性分析就更成为海洋工程及浅海工程中的重要课题了。

石油大学早在 20 世纪 80 年代就开始了海洋石油钢结构的疲劳断裂及其可靠性分析的研究工作。石油大学海洋石油钻采设备研究室曾于 1983 年在国家经委立项,完成了“海上平台 T 型管节点疲劳断裂强度的研究”课题。尔后,于 1985 年又在国家自然科学基金委员会立项,进行了“海洋石油钢结构的模糊疲劳可靠性研究”项目。此后,自 1990 年开始在中国海洋石油总公司立项,从事了“渤海海上固定平台低温疲劳强度研究”工作,并于 1998 年完成了中国海洋石油总公司科研项目“海上结构物裂纹类缺陷评估与寿命预测的研究”。总之,本书的编写是从我国海上结构物的实际需要出发,也是作者在石油大学多年来从事渤海石油钢结构疲劳断裂及其可靠性分析的科研工作基础上开始的。可以说,本书是石油大学多年来开展冰区海上结构物可靠性分析科研工作的结晶。

本书共分为六章,为了使读者对可靠性分析的基本知识与基本理论有所了解,本书第一章首先介绍了可靠性分析理论基础。由于可靠性分析要解决的问题是强度与应力的矛盾,因此,第二章专门针对冰区海上结构物的强度问题,介绍了低温下疲劳与断裂强度试验及其概率特性;第三章则围绕载荷与应力问题,介绍了海冰载荷的计算及其概率分析。因为冰区海上结构物及其构件的主要失效模式是疲劳失效与断裂失效,故冰区海上结构物的疲劳可靠性分析以及冰区海上结构物的断裂可靠性分析就分别做为两个重点,在本书的第四章和第五章进行了详细介绍。冰区海上结构物在服役期间,为了保证安全都需要进行可靠性评估,这是因为制造与服役过程中的缺陷,经过结构物的长期服役,已发展成为裂纹并不断继续扩展,所以对经检测发现裂纹的构件以及结构物整体系统均应进行安全可靠性评估。基于这种需要,本书第六章专门介绍了冰区海上结构物裂纹的安全可靠性评估。

笔者编写本书,着重考虑了以下 3 个问题。

第一,实用性。可靠性理论属于新兴的学科分支,海洋工程实际中的问题很需要运用可靠性理论来解决。但是,必须解决了很多问题,才能对冰区海上结构物进行可靠性分析,石油大学花了十多年的时间,开展这方面的科研工作,就是为了解决将可靠性理论应用于海洋工程实际的问题。因此,本书总结了多年来围绕冰区海上结构物可靠性分析的科研成果,立足于将可

靠性理论应用于海洋工程的实用性。

第二,创造性。力争在内容上有所创新,这就需要正确处理创新与继承的关系,一方面对其他行业已经行之有效的有关可靠性理论的一些内容以及围绕海冰力学、海洋工程等课题的已有研究成果,要继续继承,尽量减少重复性工作;另一方面要在创新上下功夫,争取在前人尚未解决的有关冰区海上结构物的可靠性分析问题上有所前进。为此,石油大学海洋石油钻采设备研究室参加了大连理工大学岳前进教授主持的国家自然科学基金“九五”重点基金课题“河冰、海冰危害及其防护问题研究”,自1997年开始承担了“概率型冰荷载与冰激结构疲劳寿命问题研究”子课题的科研工作。这样,既有利于继承兄弟单位在海冰力学上的研究成果,也促进石油大学更加集中精力在冰区海上结构物的可靠性分析方面,做些创造性的开拓工作,从而为本书的内容创新,创造了条件。

第三,通俗性。由于本书是一本涉及到随机数学、可靠性理论、断裂力学、海洋力学等理论及其应用的专著,因此,本书力图做到深入浅出,通俗易懂,成为有关专业及工程技术人员的一本实用书籍。

本书由方华灿执笔完成。但是,这个成果应该属于石油大学海洋石油钻采设备研究室的全体工作人员、研究生以及所引用科研成果的有关兄弟单位。大连理工大学岳前进教授,把他们多年来研究的有关正倒锥结构的海冰动载荷计算理论成果,无私地提供给石油大学引用,在这里向他们致以诚挚的感谢!石油大学海洋石油钻采设备研究室的陈国明、许发彦、段梦兰、贾星兰、王江、沈可斌、盛宝成、樊晓东、赵勇、高国华、张来斌、陈振鑫、董守平、马汝建、黄东升、徐兴平等,在过去的十多年里,参加了与本书内容有关的科研工作,在此谨向他们表示衷心地感谢!这里,还要特别感谢陈国明教授,他在石油大学海洋石油钻采设备研究室中,是与本书有关的多项科研项目的实际负责人,做了大量关于冰区海上结构物可靠性分析的理论研究与试验工作,他的博士论文题目就是“冰区海洋石油平台疲劳断裂评估与可靠性分析”,并曾先后围绕这方面的内容在国内外发表论文数十篇,这些内容均被融入本书,为本书得以问世,做出了巨大的贡献。为此,笔者未征求陈国明教授本人意见,将他做为本书合作作者之一并以署名。

本书得到中国石油天然气集团公司纵向补贴,由石油工业出版社出版,在此也向集团公司科技发展部等有关单位以及石油工业出版社的有关同志致以由衷的谢意!

本书编写过程中,引用了不少文献,除在本书参考文献中列出外,也向这些参考文献的作者,致以衷心地感谢!特别是有些引用的资料属于未公开发表的,不能列入参考文献中。再此,笔者向这些提供资料的单位、个人表示感谢,并将这些资料的名称、作者,在本书后记中加以说明,以补不足。

本书面向海洋及浅海工程,可供海洋及浅海石油工程、机械工程等方面的科研及工程技术人员学习参考,也可供有关高等院校做为研究生、本科生的选修教材。

冰区海上结构物的可靠性分析是个新课题,本书写作中不妥之处在所难免,敬请读者批评指正,不吝赐教。

方华灿

2000年2月

目 录

第一章 可靠性分析理论基础	(1)
第一节 可靠与失效	(1)
第二节 可靠度的计算理论与方法	(11)
第三节 常用失效模式的可靠度计算	(31)
第四节 可靠性试验及其数据处理	(48)
第二章 低温下疲劳与断裂强度试验及其概率特性	(61)
第一节 概述	(61)
第二节 焊接接头低温下的断裂韧性试验及其概率特性	(69)
第三节 低温环境下常幅疲劳裂纹扩展试验及其特性	(79)
第四节 低温及随机应力幅作用下疲劳裂纹扩展试验及其特性	(92)
第五节 不同温度下板状焊接接头的疲劳强度试验及其特性	(101)
第六节 疲劳裂纹扩展的低温危险临界值	(112)
第三章 海冰载荷的计算及其概率分析	(121)
第一节 海冰基本参数的确定及其概率分析	(121)
第二节 海冰静冰力的计算及其概率分析	(146)
第三节 海冰的冰激振动分析与动冰力的计算	(179)
第四节 冰载荷与地震载荷的组合	(214)
第四章 冰区海上结构物的疲劳可靠性分析	(228)
第一节 概述	(228)
第二节 疲劳载荷与疲劳应力的计算	(234)
第三节 疲劳强度与疲劳寿命的预测	(256)
第四节 管节点疲劳全寿命的预测	(269)
第五节 构件的疲劳可靠性分析	(278)
第五章 冰区海上结构物的断裂可靠性分析	(291)
第一节 断裂可靠性分析的计算模型	(291)
第二节 断裂可靠性分析模型中随机变量的概率特性	(298)
第三节 断裂可靠度的定量评价	(305)
第六章 冰区海上结构物裂纹的安全可靠性评估	(328)
第一节 概述	(328)
第二节 含裂纹构件的断裂评估	(339)
第三节 含裂纹构件的塑性失稳评估	(351)
第四节 含裂纹构件的疲劳失效评估	(358)
第五节 含裂纹构件的综合安全可靠性评估	(367)
第六节 海洋平台整体的寿命及可靠性评估	(379)
附录	(395)
后记	(401)
参考文献	(402)

第一章 可靠性分析理论基础

产品包括工程均存在着载荷与抗力(或应力与强度)的矛盾,抗力大于载荷则可靠;载荷大于抗力则失效,但可靠与失效均属未来发生的事物。若将此矛盾的两个对立面(载荷与抗力)均看成是具有随机性的,则未来事物——产品(工程)的可靠与否以及可靠的程度均是随机的,对其随机性及发生的概率的分析,就叫做可靠性分析,本章将介绍其理论基础。

第一节 可靠与失效

可靠与失效是一对矛盾,可靠是产品(含工程)功能正常,失效是产品丧失了原规定的功能。可靠与失效是可以相互转化的,可靠可以转化成失效,产品失效后经过修复又可以转化成可靠,本节即介绍分析可靠与失效的理论基础。

一、可靠性的定义与特点^[1]

性能与可靠性是产品(含工程)质量的两大指标,其中可靠性的定义又有狭义与广义之分。

1. 狭义的可靠性

产品(包括工程)在规定的条件下,规定的时间内,完成规定功能的能力,即称为狭义的可靠性。例如渤海的固定采油平台在极端条件 10a 一遇的最大波高 7.2m 和最大冰厚 30cm 作用下,正常完成 12 口井采油任务,服务寿命为 20a,这种能力即为狭义的可靠性。

2. 广义的可靠性

除了狭义的可靠性定义之外,若再考虑产品的维修性、有效性,则称为广义的可靠性。

1) 维修性

对于可修复的产品,若丧失了规定的功能则叫做故障,而不称为失效。发生故障的产品,在规定的条件下,规定的时间内,经修理恢复到原规定功能的能力,叫做维修性。

2) 有效性

可修复产品包括狭义可靠性及维修性在内的有效能力,即称为有效性。

此外,有时还将产品的耐久性、安全性及环境适应性等也包括在广义的可靠性定义中。

3. 可靠性的特点

根据可靠性的定义可看出,可靠性具有下列 3 个特点:

(1)全面性。可靠性既有狭义的定义,又有广义的定义;既可适用于不可修复产品,又可用于可修复产品,它可以从正常运行、维修等各方面全面地描述产品的有效工作能力。

(2)时间性。可靠性的时间性表现在两个方面,其一是可靠性的定义中包含有时间,可靠是指在规定的时间内;其二是可靠性是时间的函数,意即可靠性随着时间的推移而递减。

(3)随机性。可靠性是产品的能力的指标,但能力的大小受多种不确定性因素的影响,虽属同样产品在成批生产中,也有可能存在差异,具有明显的随机性,必须用概率来表达。

二、可靠性的主要指标

描述产品(工程)可靠性水平的定量指标即叫做可靠性指标,又称为可靠性的特征量。常用的可靠性的主要指标,有下述6个。

1. 可靠度

它是指产品(工程)在规定的条件下,规定的时间内,完成规定的功能能力的概率,通常以 R (Reliability) 或 $R(t)$ 来表示, $R(t)$ 表明可靠度是时间 t 的函数。 R 可用下述3种表达式表达。

1) 用观测的数据值表达

设 N 为试验或使用的产品总数,而到达规定的寿命时间终了时仍存活的产品数目为 $N_s(t)$,则通过观测得到的产品可靠度 $\hat{R}(t)$ 即为

$$\hat{R}(t) = \frac{N_s(t)}{N} = 1 - \frac{N_f(t)}{N} \quad (1-1)$$

式(1-1)中, $N_f(t)$ 为到达规定寿命时,失效的产品数目。式(1-1)表明,当 N 数量很大时,在数学上可以用 $N_s(t)$ 与 N 的比值来定量表达可靠度(概率)。

式(1-1)用于表达不可修复的产品的可靠度。若为可修复产品,则应该改用无故障工作次数的观测值来表达。所谓无故障工作次数是指产品发生故障时已达到甚至超过规定检修时间的次数。观测时可以是一个产品,也可以是多个产品,若其规定的检修总数为 n_{RT} , 而其中的无故障工作次数为 n_{NR} , 则通过观测值表达的可靠度 $\hat{R}(t)$ 即为

$$\hat{R}(t) = \frac{n_{NR}}{n_{RT}} \quad (1-2)$$

最后一次无故障工作时间若不超过规定检修时间,则不计入 n_{RT} 中。

2) 用概率密度函数表达

若已掌握统计数据,得出产品寿命 T 大于规定时间 t 的概率密度函数 $p(t)$, 如图 1-1 所示,则产品的可靠度 $R(t)$ 即可用概率 $P(T > t)$ 来表达,如下式所示:

$$R(t) = P(T > t) = \int_t^{\infty} p(t) dt \quad (1-3)$$

图 1-1 产品寿命的概率密度曲线 上式中, T 为随机变量,对不可修复产品为其寿命,而可修复产品则应为无故障工作时间, t 为规定的设计寿命或可修复产品的检修时间。

3) 某段时间内的表达式

工程实际中常常遇到时间 t 不是从零开始,而是在产品工作过程中,给出其某一段时间内的可靠度。若产品已工作 t_1 时间,则在 t_1 后的 t_2 时间内的可靠度 $R(t_1 + t_2 | t_1)$ 应为

$$R(t_1 + t_2 | t_1) = P(T > t_1 + t_2 | T > t_1) = \frac{R(t_1 + t_2)}{R(t_1)} \quad (1-4)$$

式(1-4)是根据概率论的条件概率运算法则得出的。式中竖线代表条件, $R(t_1 + t_2 | t_1)$ 即代表在 $0 \sim t_1$ 时间段可靠的条件下,产品在 t_1 后的 t_2 时间段内的可靠度。显然,它应该是产品

寿命 T 大于 t_1 的条件下,在 t_1 后的 t_2 时间段内寿命 T 大于 t_1+t_2 的概率 $P(T > t_1+t_2 | T > t_1)$ 。按照概率论,此条件概率应为在 t_1+t_2 时间段的概率 $R(t_1+t_2)$ 被时间段 t_1 内的概率 $R(t)$ 除。

对于不可修复产品,若以观测值存活的产品数量 $N_s(t_1+t_2)$ 及 $N_s(t_1)$ 来表达时,则应为

$$\hat{R}(t_1+t_2 | t_1) = \frac{N_s(t_1+t_2)}{N_s(t_1)} \quad (1-5)$$

同理,对于不可修复产品,则应以分别在 t_1+t_2 及 t_1 时间段的无故障工作次数 $n_{NR}(t_1+t_2)$ 、 $n_{NR}(t_1)$ 以及在 t_1+t_2 和 t_1 时间段的定期检修总次数 $n_{RT}(t_1+t_2)$ 及 $n_{RT}(t_1)$ 来表达,即

$$\hat{R}(t_1+t_2 | t_1) = \frac{\frac{n_{NR}(t_1+t_2)}{n_{RT}(t_1+t_2)}}{\frac{n_{NR}(t_1)}{n_{RT}(t_1)}} \quad (1-6)$$

2. 失效概率

产品在规定的条件下,规定的时间内,未完成规定功能的概率,称为失效概率,又称为不可靠度,通常以 F 或 $F(t)$ 来表示。

1) 用观测的数据值表达

自观测数据得出的 $F(t)$ 均冠以“ $\hat{}$ ”符号,即 $\hat{F}(t)$ 。它根据产品可修复及不可修复两种情况,表达式分别如下:

(1) 不可修复产品

$$\hat{F}(t) = \frac{N_f(t)}{N} \quad (1-7)$$

(2) 可修复产品

$$\hat{F}(t) = \frac{n_R}{n_{RT}} \quad (1-8)$$

式(1-7)及式(1-8)中, $N_f(t)$ 为未达到规定的条件及时间即丧失规定功能的产品数; n_R 为在定期检修前即发生故障的次数; N 为产品总数; n_{RT} 为检修总次数。

2) 用可靠度的函数表达

自式(1-1)可得

$$F(t) = \frac{N_f(t)}{N} = 1 - R(t) \quad (1-9)$$

显然, $F(t)$ 与 $R(t)$ 这两个概率,符合概率互补定理。

3) 用概率密度函数表达

设 t 为设计规定的产品寿命, T 为产品寿命随机变量,则 $F(t)$ 应为概率 $P(T < t)$, 在如图 1-1 所示的概率密度曲线中,当概率密度函数 $p(t)$ 为已知时,则 $F(t)$ 即可表达为

$$F(t) = P(T < t) = \int_0^t p(t) dt \quad (1-10)$$

3. 失效率(故障率)

失效率是指产品工作到某时刻 t 尚未失效,而在 t 时刻后的 Δt 时间内,单位时间的失效

概率。对于可修复产品,则为 Δt 时间内,单位时间发生故障的概率。失效率(故障率)一般均以符号 λ 或时间函数 $\lambda(t)$ 表示。失效率的表达有下述几种方式。

1)用观测的数据值表达

设在 t 时刻后 Δt 时间内失效的产品数为 $\Delta N_f(t)$;而到 t 时刻时尚未失效仍存活的产品总数为 $N_s(t)$,则对于不可修复的产品的失效率 $\hat{\lambda}(t)$,依其定义即可按下式表达:

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{\Delta N_f(t)}{N_s(t)\Delta t} \quad (1-11)$$

若以 $\bar{\lambda}(t)$ 代表自观测数据得到的平均失效率,则对于不可修复产品

$$\bar{\lambda}(t) = \frac{N_f(t)}{\sum t} \quad (1-12)$$

对于可修复产品

$$\bar{\lambda}(t) = \frac{n_R}{\sum t} \quad (1-13)$$

式(1-12)及式(1-13)中, $\sum t$ 为一个或多个产品的累积工作时间; $N_f(t)$ 为在一个规定时期内多个产品的失效数,它与累积工作时间之比,即定义为不可修复产品的平均失效率; n_R 为可修复产品在观测期间发生故障的次数,它与累积工作时间之比,也定义为平均失效率。

2)用概率分布函数达

(1)瞬时失效率。设失效概率的分布函数 $F(t)$ 已知,当规定的时间段 Δt 很小时,则瞬时失效率即可表达为 $\frac{dF(t)}{dt}$ 。若产品寿命 T 为随机变量,则产品在 t 时刻后的 Δt 时间内的失效概率应为在 $T > t$ 的条件下 $t < T \leq t + \Delta t$ 的概率 $P[(t < T \leq t + \Delta t) | (T > t)]$,于是依失效率定义,即可得出

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} P[(t < T \leq t + \Delta t) | (T > t)] \quad (1-14)$$

(2)平均失效率。若根据统计已获得 t_1 至 t_2 时间段的失效率的函数 $\lambda(t)$ 时,则可依下式得出平均失效率 $\bar{\lambda}(t)$ 为

$$\bar{\lambda}(t) = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) dt \quad (1-15)$$

失效率的单位用单位时间(小时)的百分数表示,可记为 $10^{-5}/h$,对于高可靠度则用 $10^{-9}/h$,称为菲特(Fit);但式(1-12)及式(1-13)的 $\hat{\lambda}(t)$ 则只是单位时间,记为 h^{-1} 。

3)失效率与可靠度的关系

按照式(1-11)给出的失效率的表达式,当 Δt 时间间隔很小时,则可写出

$$\begin{aligned} \lambda(t) &= \frac{dN_f(t)}{N_s(t)} \cdot \frac{1}{dt} = \frac{dN_f(t)}{dt} \cdot \frac{N}{NN_s(t)} = \frac{dN_f(t)}{N} \cdot \frac{1}{dt} \cdot \frac{1}{N_s(t)/N} \\ &= dF(t) \frac{1}{dt} \cdot \frac{1}{R(t)} = \frac{dF(t)}{dt} \cdot \frac{1}{R(t)} = p(t) \frac{1}{R(t)} \end{aligned} \quad (1-16)$$

式(1-16)即为 $\lambda(t)$ 与 $R(t)$ 的关系式,式中 $p(t)$ 为如图 1-1 所示的概率密度函数(图中纵坐标)。按照上述同样方法,还可求得 $\lambda(t)$ 与累积失效概率 $F(t)$ 以及失效概率密度函数 $f(t)$ 的关系,如表 1-1 所示。表 1-1 中还给出了它们互相之间的关系式。

表 1-1 可靠性的基本函数间的关系式

函 数	$R(t)$	$F(t)$	$f(t)$	$\lambda(t)$
$R(t)$	$R(t)$	$1 - F(t)$	$\int_t^{\infty} f(t)dt$	$\exp\left[\int_0^t \lambda(t)dt\right]$
$F(t)$	$1 - R(t)$	$F(t)$	$\int_0^{\infty} f(t)dt$	$\exp\left[-\int_0^t \lambda(t)dt\right]$
$f(t)$	$-\frac{dR(t)}{dt}$	$\frac{dF(t)}{dt}$	$f(t)$	$\lambda(t)\exp\left[-\int_0^t \lambda(t)dt\right]$
$\lambda(t)$	$-\frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt}$	$\frac{1}{1 - F(t)} \cdot \frac{dF(t)}{dt}$	$\frac{f(t)}{\int_0^{\infty} f(t)dt}$	$\lambda(t)$

由于产品使用后一段时间内的失效率比较容易观测获得,因此有了表 1-1 中给出的关系式,便可借助 $\lambda(t)$ 来间接求得可靠度和失效率,这是通常在工程上常用的观测可靠度的方法

4. 平均寿命 MTTF(Mean time to failure)和平均无故障工作时间 MTBF(Mean time between failures)

1) 对于不可修复的产品

使用 MTTF 指标,它是指多个产品的平均寿命,其表达方式如下:

(1) 用观测的数据值表达。设产品总数为 N ;第 i 个产品的寿命为 $t_i, i=1,2,\dots,N$,则平均寿命 \bar{t} 为

$$\bar{t} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N} \quad (1-17)$$

(2) 用概率密度函数表达。若产品的寿命 T 为随机变量,其概率密度函数 $p(t)$ 如图 1-1 所示已知,则平均寿命 \bar{t} 即应为寿命 T 的数学期望 $E(T)$,即

$$\bar{t} = E(T) = \int_0^{\infty} tp(t)dt \quad (1-18)$$

2) 对于可修复产品

使用 MTBF 指标,它以平均无故障工作时间 \bar{t} 来表示。若通过观测,得出一个或多个产品的总工作时间为 $\sum t$,而发生故障的次数为 n_r ,则观测所得 MTBF 以 \hat{t} 代表时,应为

$$\hat{t} = \frac{\sum t}{n_r} \quad (1-19)$$

5. 可靠寿命与存活率

可靠度均应对应一定的寿命,通常称给定的可靠度所对应的产品寿命为可靠寿命。反过来,当产品的寿命给定时,则其所对应的可靠度即称为存活率。

一般以 $t(R)$ 代表对应于可靠度 R 的可靠寿命,即

$$t(R) = R^{-1}(R) \quad (1-20)$$

上式中, $R^{-1}(R)$ 表示可靠度 R 的反函数。

通常称可靠度为 50% 时所对应的产品寿命为中位(中值)寿命, 即产品对应此寿命时的存活率为 50%。

6. 维修度与有效度

它们是广义可靠性中的维修性与有效性的定量指标, 其定义及表达方式如下。

1) 维修度

维修度是指可修复产品在规定条件下使用, 发生故障后, 按照规定的条件(包括程序和方法等), 在规定的时间内, 通过修理使产品恢复到原来规定功能的概率。一般用符号 M 代表, 因为它是维修时间 τ 的函数, 故又可以维修度函数 $M(\tau)$ 来代表。

(1) 用观测的数据值表达。设维修的产品总数为 N_r , 其中按规定维修时间 τ 能够修复的产品数为 N_τ , 则观测所得维修度 $\hat{M}(\tau)$ 即可表达为

$$\hat{M}(\tau) = \frac{N_\tau}{N_r} \quad (1-21)$$

若将 $\Delta\hat{M}(\tau)$ 被 $\Delta\tau$ 除做为维修度的概率密度函数 $\hat{m}(\tau)$ 时, 则

$$\hat{m}(\tau) = \frac{\Delta\hat{M}(\tau)}{\Delta\tau} = \frac{\Delta N_\tau}{N_r} \frac{1}{\Delta\tau} \quad (1-22)$$

上式中, ΔN_τ 为在维修时间的 $\Delta\tau$ 时间段完成修复的产品数。

(2) 用概率密度函数表达。设产品的维修时间以随机变量 T 来表示, 若已掌握随机变量的概率密度分布 $m(\tau)$ 时, 则可将维修度 $M(\tau)$ 表达为

$$M(\tau) = P(T \leq \tau) = \int_0^\tau m(\tau) d\tau \quad (1-23)$$

式(1-23)中, $P(T \leq \tau)$ 代表维修时间小于规定时间 τ 的概率。

(3) 用平均修复时间表达。平均修复时间是产品修复时间的平均值, 一般以 MTTR (Mean time to repair) 来代表, 它是维修时间 T (随机变量) 的数学期望 $E(T)$, 以符号 $\bar{\tau}$ 表示, 即

$$\text{MTTR} = \bar{\tau} = E(T) = \int_0^\infty \tau m(\tau) d\tau \quad (1-24)$$

若多个产品修复时间总数和为 $\sum \tau$, 而修复的产品总数为 N_r , 则 MTTR 可以此两者观测值的比值表达, 即

$$\widehat{\text{MTTR}} = \frac{\hat{\tau}}{\tau} = \frac{\sum \tau}{N_r} \quad (1-25)$$

2) 有效度

可修复产品在规定的条件下使用, 在规定的修复条件下修复, 在规定的时间内保持其规定的功能处于正常状态的概率, 叫做有效度。它是产品工作(使用)时间 t 及维修时间 τ 的函数, 通常以 $A(t, \tau)$ 表示, 它有 3 种表达方式。

(1)固有有效度。它是总工作时间 $\sum t_i$ 与总工作时间和总修复时间 $\sum \tau_i$ 之和的比,若以 $A_I(t, \tau)$ 代表固有有效度,则即

$$A_I(t, \tau) = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{\sum_{i=1}^N (t_i + \tau_i)} \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (1-26)$$

上式中, N 为产品发生故障的总次数。

(2)维修有效度。它是平均工作时间 MTBF 与其和平均维修时间(包括预防维修时间) \bar{M} 之和的比,若以 $A_P(t, \tau)$ 来表示维修有效度,则即

$$A_P(t, \tau) = \frac{MTBF}{MTBF + \bar{M}} \quad (1-27)$$

(3)工作有效度。它定义为平均可工作时间 MUT(Mean up time)与平均停机时间 MDT(Mean down time)和平均可工作时间之和的比值。若以 $A_o(t, \tau)$ 来代表工作有效度,则

$$A_o(t, \tau) = \frac{MUT}{MUT + MDT} \quad (1-28)$$

三、失效与失效分析

1. 失效的定义

失效是指产品丧失规定的功能,对于可修复产品也称作故障。所谓丧失规定的功能是指:

- (1)在规定的条件下,不能完成其规定功能。
- (2)在规定的条件下,一个或几个性能参数,不能保持在规定的范围内。
- (3)在规定的条件下,虽具有完成规定功能的能力,但因操作者失误而造成功能丧失。
- (4)由于环境载荷与应力变化而导致功能失效。

例如海上结构物原设计是按 10a 一遇的最大冰厚 30cm 的冰载荷考虑的,但若冰厚达 40cm 时,则冰载荷及引起的应力均加大,以致发生构件断裂失效。

2. 失效的判据

失效判据即是失效的标准,它是失效分析与可靠性研究的前提。不同产品(工程)、不同工况、不同失效方式,其失效判据也不同。通常是在产品具有使用功能的情况下,按照产品的主要性能指标,而且这些性能指标又是产品可接受的性能,来做为产品失效的判据。例如海上固定采油平台的整体失效,常可以其导管架的最重要构件——桩腿的管节点出现的裂纹尺寸超过了按规范标准所计算得出的许用裂纹尺寸,作为平台整体失效的判据。

3. 失效模式

失效模式即失效的表现形式。这种表现形式可以通过人的感官来观察,也可以使用仪器或仪表来观测。失效模式具有下列特性:

(1)失效模式的多变性。由于产品的材质、设计、制造、储存、使用、维修、工作条件等多种因素,均会影响失效模式的变化,故失效模式常常不是固定不变的,而是多变的。例如海上结构物的构件,通常在海浪与海冰的交变载荷作用下会引起疲劳失效;但在疲劳裂纹扩展过程中,突然遇到极端冰载荷的作用,当最大应力超过构件剩余强度时,又会发生脆断失效。

(2)失效模式的相关性。产品都是由许多零(构)件、部件、子系统组成的系统,零件(构件)的失效模式是产品整个系统的失效模式的基础,而零件(部件)之间的失效模式又是相关联的,这就是失效模式的相关性。例如对于海上固定平台,通常是将结构系统中某一种失效模式下,若干个构件的失效看成是一个并联系统,意即只有这几个构件依次全都失效时,才会导致平台按此种失效模式破坏。但又将平台构件同时存在的若干种失效模式,看成是一个串联系统,即只要有一种失效模式达到失效判据就会使平台整体失效。显然,失效模式具有相关性。

(3)失效模式的多样性。失效模式的分类,多种多样,形成了它的多样性。通常是将失效模式分成7大类,即:损坏、退化、松脱、失调、堵塞、渗漏、功能下降等。但其中仅损坏一类失效模式又可分成:疲劳、疲劳裂纹扩展(断裂力学)、脆断、失稳断裂(断裂力学)、屈服(弯曲、扭转、屈曲等)、塑性失稳(断裂力学)、磨料磨损、点蚀、冲蚀、蠕变等,显然,多种多样。

4. 失效机理

失效机理就是指引起失效的物理、化学等内在的原因。失效模式是产品失效的外在表现,失效机理才是其内因所在。因此,进行失效分析,只分析失效模式是不够的,还必须研究失效机理,找出失效的根本内因,“对症下药”采取有效措施,才能提高产品的可靠性。例如断裂是一种失效模式,但是它可以由变形分析出是脆性断裂还是韧性断裂,后者有显著塑性变形,前者几乎不产生,而且脆性断裂的断口形貌平滑而光亮与正应力垂直,断口附近的截面在厚度方向上收缩很少,断口上还有花样。再进一步分析,还会找出构件内部存在的脆断的裂纹源,这种裂纹可能是在制造中的缺陷如轧制裂纹、锻造裂纹、焊接冷裂纹等,也可能是服役中的缺陷如应力腐蚀裂纹等。这样,直到分析出断裂的根本内因,才能从制造过程或服役中采取消除缺陷的有效措施,达到提高可靠性的目的。通常称这种失效机理的研究为可靠性物理。

5. 失效分析^[2]

失效分析是根据产品的原始数据及资料,在调查故障部位、缺陷形状尺寸的基础上,判断失效模式,研究失效机理,计算失效概率,评估失效危害性,提出改进措施的全部分析过程。常用的失效分析方法有下述2种。

1)故障(失效)树 FTA(Fault tree analysis)法

它是一种从部分到总体分析失效的方法,即从产品组成的各个零(构)件开始,逐步分析到产品的整体失效。它是以分析失效模式及其原因为核心,先从零、部件入手,再到子系统,一层层地分析,直至最后,找出导致产品的整体失效的几种原因以及造成产品整体失效的路线。这种分析方法通常是应用一些规定的代表符号,依照产生失效的因果逻辑关系,自零(构)件至产品整体,用一个类似一棵树的图形表达出来,故称这种图形为故障(失效)树分析图,称这种分析方法为故障(失效)树分析法。今以海洋钻井平台上的塔型井架为例,如图1-2所示的故障树分析图,来说明此种分析方法。

(1)底事件。它是导致其他事件发生的原因事件,如图中的“○”形符号所示。例如其中⑦、⑧、⑨分别为表面腐蚀、初弯曲、表面裂纹3个导致天车支承梁产生缺陷的原因事件;再如④、⑤、⑥,则分别为初弯曲、基础下沉,绷绳作用缺陷等3个造成井架整体缺陷的原因事件。其他①、②、③及⑩、⑪和⑫、⑬均为形成相应缺陷的底事件。

(2)结果事件。它是故障树中由其他事件或事件组合所导致的结果事件,如图1-2中以矩形“□”符号所示的井架联结缺陷等共7个事件,其中除最上端外的6个均称中间结果事件。

(3)顶事件。如图1-2中最上端所示的矩形——塔型架井失效事件,它也是结果事件,但

是最终的分析结果,位于故障树顶端,故曰顶事件。

(4)或门和与门。图 1-2 中的符号 \cup 代表或门,意即此符号下部的任一个原因事件发生,则即可使此符号上部相连的结果事件产生,结果事件发生的概率应按照几个相关的原因事件中任一事件发生的概率运算法则来计算。若故障树中出现有 \cap 符号,则代表与门,它是表明,符号下部的原因事件必须同时发生,才会导致符号上部相连的结果事件发生,其发生的概率应为下部各个原因事件的概率,依概率乘法运算法则来求出。图 1-2 中均为或门符号,故其顶部及中间结果事件均系由于其任一原因事件所造成。

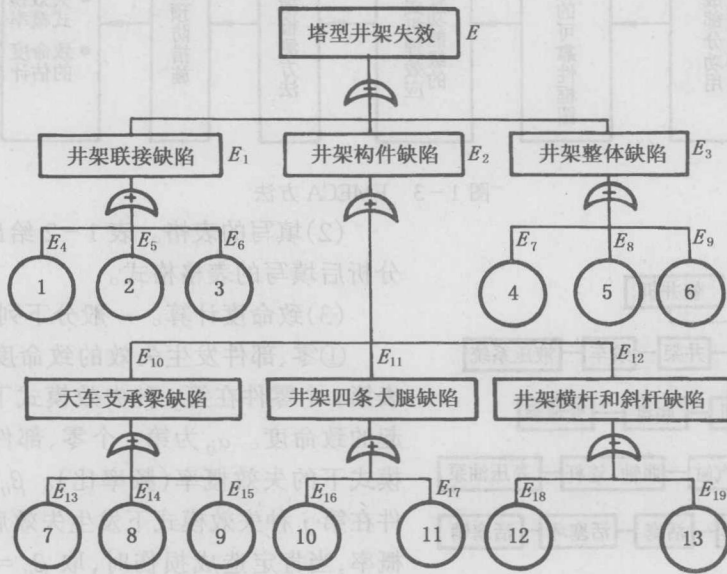


图 1-2 塔型井架故障树分析图

(5)顶部结果事件发生的概率计算。通过分析得出的故障树,可计算出产品整体失效(顶部结果事件发生)的概率。显然,只要按照或门或者与门与其上、下连结的结果和原因事件的逻辑关系,依概率运算法则,逐层推算,即可得出最终结果事件(顶部)发生的概率。如图 1-2 中每个事件旁标出的 $E, E_1, E_2, \dots, E_{19}$, 即为相应的事件号,其发生的概率则分别为 $P(E), P(E_1), \dots, P(E_{19})$, 于是,即可依概率运算法则写出:

$$P(E) = P(E_1 \cup E_2 \cup E_3) = P(E_1) + P(E_2) + P(E_3) - P(E_1 \cap E_2) - P(E_2 \cap E_3) - P(E_1 \cap E_3) + P(E_1 \cap E_2 \cap E_3) \quad (1-29)$$

$$P(E_1) = P(E_4 \cup E_5 \cup E_6) \quad (1-30)$$

$$P(E_2) = P(E_{10} \cup E_{11} \cup E_{12}) \quad (1-31)$$

$$P(E_3) = P(E_7 \cup E_8 \cup E_9) \quad (1-32)$$

同样,还可将 $P(E_{10})$ 及 $P(E_{11})$ 和 $P(E_{12})$ 按照同于式(1-29)的相关事件的概率加法定理展开。最后,连同式(1-30)及(1-31)、式(1-32)的展开式一起,代入到式(1-29)中,即可得出塔型井架失效的概率 $P(E)$ 。式中符号 \cap 及 \cup 分别代表按概率乘法及加法定理运算。

2)失效模式影响及致命性分析 FMECA(Failure mode effect and criticality analysis)法

这种分析方法包括3项内容,即:失效模式分析、失效影响分析及失效后果(致命性)分析,它是一种从部分到整体,即从零件到部件,再到子系统以至整个系统的失效分析方法。

(1)分析的过程。图1-3给出了FMECA方法自输入原始资料到输出表格的全过程。以修井机为例,图1-4给出了结构及零件、组件、部件、子系统各组成部分的功能逻辑框图。

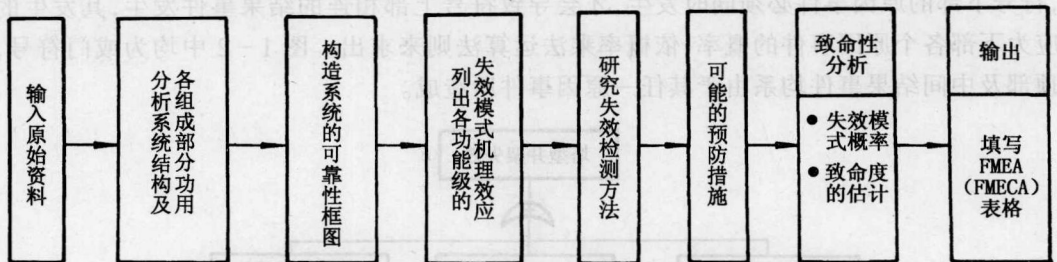


图 1-3 FMECA 方法

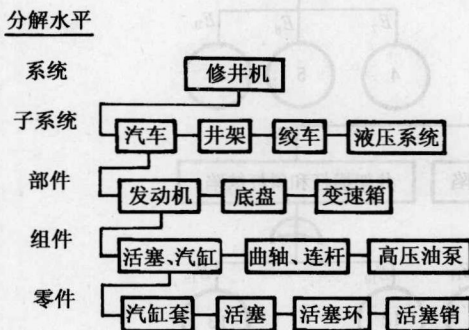


图 1-4 修井机的部分组成功能逻辑框图

(2)填写的表格。表1-2给出了FMECA分析后填写的表格格式。

(3)致命度计算。一般分下列两步计算:

①零、部件发生失效的致命度。设以 CR_{ij} 代表第 i 个零件在第 j 种失效模式下发生失效所引起的致命度。 α_{ij} 为第 i 个零、部件在第 j 种失效模式下的失效概率(频率比)。 β_{ij} 为第 i 个零、部件在第 j 种失效模式下发生失效后所造成损伤的概率,当肯定造成损伤时,取 $\beta_{ij} = 1$;不会造成损伤时,取 $\beta_{ij} = 0$;可能会造成损伤时,取 $\beta_{ij} = 0.5$;

可能性很小时,取 $\beta_{ij} = 0.1$ 。 λ_{ij} 代表第 i 个零、部件的第 j 种失效模式的失效率。于是,即可得出

$$CR_{ij} = \lambda_{ij} \alpha_{ij} \beta_{ij} \quad (1-33)$$

表 1-2 FMECA 法填写的表格

FMECA 表											第 页 共 页	
系统名称			代号			设计者						
制造厂			使用单位			投运时间						
分析者			分析时间									
序号	零部件名称	功用	零部件数量	失效模式	失效机理	失效效应		失效检测	失效模式概率	致命度	可能预防措施	备注
						局部效应	最终效应					

②整个系统发生失效的致命度。若以 CR_s 代表整个系统的致命度,设整个系统共有 N 个零、部件;第 i 个零、部件的失效模式共有 n 种,则可写出

$$CR_s = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n CR_{ij} \quad (1-34)$$

6. 失效(功能)函数与可靠性模型

失效函数是由影响产品失效的因素为变量所组成的描述失效与否的函数。例如影响构件失效的因素有材料的强度 r 和构件承受的应力 S , 若以 r 和 S 为变量, 则失效函数 y 为

$$y = r - S \quad (1-35)$$

即称作失效函数。因为自式(1-35)可看出, 当 $S > r$ 时 ($y < 0$), 则发生失效; 否则 $r > S$ 时 ($y > 0$), 则不会发生失效, 故式(1-35)是能够描述失效与否的函数。

今若将式(1-35)中的强度 r 及应力 S 均看成随机变量, 则即可得出概率 $P(y > 0)$ 为可靠度 $R(t)$; 而概率 $P(y < 0)$ 为失效概率 P_f , 即

$$R(t) = P(y > 0), \quad P_f = P(y < 0) \quad (1-36)$$

因此, 式(1-35)又是计算可靠度的数学模型。

由于式(1-35)是以强度 r 及应力 S 做为随机变量的, 故称此可靠性模型为强度模型。实际上, 强度与应力都可以是广义的。若将强度换成产品的预测寿命, 将应力换成设计要求的寿命, 则即可建立起以寿命表达的可靠性模型, 称为寿命模型。此外, 还有以存在裂纹尺寸和允许裂纹尺寸表达的, 以及用剩余强度和最大应力表达的多种类型可靠性模型。

自式(1-35)还可看出, 当 $r = S$ 时, 则 $y = 0$, 而强度 r 与应力 S 相等, 正好是失效发生的极限状态, 也就是由可靠向失效转化的关节点(度), 所以通常又称 $y = 0$ 为极限状态方程。

第二节 可靠的计算理论与方法

进行可靠性分析时, 必须要计算可靠度。本节将从理论上对可靠度的计算进行推证, 并介绍几种常用的计算可靠度的方法。

一、应力与强度干涉理论^[2]

若将应力与强度均看成随机变量, 则按照应力与强度的概率分布, 根据概率论的运算法则, 所推导出的可靠度计算理论, 即称作应力与强度干涉理论。下面介绍其推证过程。

1. 定义应力 S 与强度 r 的干涉区

如图 1-5 所示, 设以 $f_S(S)$ 及 $f_r(r)$ 分别代表 S 和 r 做为随机变量的概率密度函数, 即图 1-5 的纵坐标, 而其横坐标即为 S 及 r 。图中标注出的 μ_S 及 μ_r 分别为 S 及 r 的均值, σ_S 及 σ_r 分别为应力 S 和强度 r 的标准差。图中两条曲线即分别为应力 S 和强度 r 的概率密度曲线。图中 $f_S(S)$ 与 $f_r(r)$ 两条曲线交叉所形成的阴影部分, 即定义为干涉区。从图中可看出, 在干涉区内会出现 $f_S(S) > f_r(r)$ 的情况, 而且干涉区的面积越大, $f_S(S) > f_r(r)$ 越增大。这就表明: 在干涉区内有可能出现应力高于强度的失效事件, 干涉区面积的大

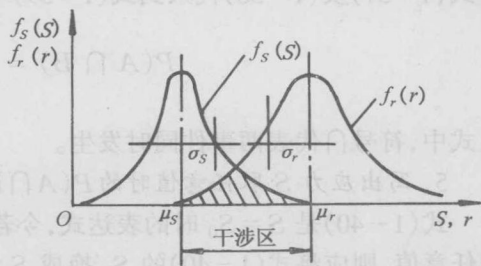


图 1-5 应力与强度概率分布的干涉区