

不完整结构的可靠性分析

鄧文峻 編著

國防工業出版社

不完整结构的可靠性分析

邵文蛟 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

不完整结构的可靠性分析/邵文蛟编著. —北京:国防工业出版社, 1997. 5

ISBN 7-118-01688-8

I. 不… II. 邵… III. 结构可靠性-可靠性估计 IV. T
B114.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 24301 号



*

开本 850×1168 1/32 印张 7¼ 186 千字
1997 年 5 月第 1 版 1997 年 5 月北京第 1 次印刷
印数:1—3000 册 定价:11.70 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版,随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金

第二届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模		
主任委员	黄 宁		
副主任委员	殷鹤龄	高景德	陈芳允
	曾 铎		
秘 书 长	刘琯德		
委 员	尤子平	朱森元	朵英贤
(按姓氏笔划为序)	刘 仁	何庆芝	何国伟
	何新贵	宋家树	张汝果
	范学虹	胡万忱	柯有安
	侯 迁	侯正明	莫梧生
	崔尔杰		

前 言

人们在认识、研究、利用和改造客观世界中,总是先简单、局部和理想化地讨论和解决问题,然后把所得的成果应用到实际,当反馈和实践验证时,发现与实际情况有出入,就再进一步深入研究,把研究对象发展到复杂、较为全面和更符合客观实际。如还有问题,就再改进,再深入探讨,一次比一次更难,一次比一次更接近实际。这是理解客观世界和人类进步的普遍规律。

在结构强度和结构设计领域也是遵循这一认识和研究问题的规律。开始以确定性方法计算结构强度,并在这计算基础上设计结构。考虑到人们认识不足,与实际难免有出入,为了保险,引进了安全系数,使结构多少有些强度储备,但结构突然破坏,事故时有发生。对事故分析表明,多数事故是人为错误因素造成的,但也有些事故是由于我们确定性分析方法中忽略了实际存在的随机和模糊不确定性。理想完整结构分析模型是忽略了实际结构由于加工和制造过程中不可避免会出现的初始缺陷以及使用过程中难免会偶然发生的损伤等。再则,个别构件被设计成具有较高的可靠度,它不一定能保证整个结构更安全。故考虑不完整构件的可靠性和不完整结构的系统可靠性可以说是结构可靠性分析研究的更深入表现,也是必然发展的趋势之一。

本书是作者十几年来在国内外研究有关结构可靠性分析所取得的部分成果,结合了在英国、挪威和意大利以及国内有关单位讲课的部分内容,再加上在指导和辅导硕士、博士研究生中取得的一些有关结构可靠性分析问题进展写就的。全书共分六章:第一章介绍随机和模糊两种不确定因素,以及考虑这两种不确定性的结构分析方法;第二章介绍随机问题的数值分析方法;第三、四章讨论

不完整构件和结构的可靠性分析;第五、六章阐述了不完整结构的系统可靠性分析。

书中引用了周义先博士论文、邹劲松和金允龙硕士论文中一些算例和论述,他们的出色工作丰富了本书内容,为此对他们表示感谢。周国华研究员在百忙中阅读了本书全部初稿,提出了一些很有益的意见,特此致谢。作者还要特别感谢国防科技图书出版基金评审委员会同意资助出版本著作,没有国防科技图书出版基金的资助,本书不可能这么早问世。作者也感谢国防工业出版社有关人员耐心细致的合作,使本书得以出版。

本书可供有关专业科研人员和工程技术人员阅读,也可供高年级大学生、研究生和高等院校教师参考。

不完善结构可靠性分析是近来大家感兴趣的研究课题,限于笔者学识水平,不完善的地方甚或错误在所难免。恳请广大读者批评指正。

编著者

1995年10月2日

目 录

第一章 结构可靠性分析基本理论	(1)
§ 1—1 引言	(1)
§ 1—2 两种不确定现象	(2)
§ 1—3 随机可靠性分析方法	(3)
§ 1—4 第二水准法及其改进型	(8)
§ 1—5 最小距离法求 β	(14)
§ 1—6 结构模糊可靠性分析	(20)
§ 1—7 广义可靠性指标 β_G	(32)
第二章 结构随机数值分析方法	(35)
§ 2—1 引言	(35)
§ 2—2 随机有限元法	(36)
§ 2—3 随机有限元法求结构可靠度	(38)
§ 2—4 初挠度对结构静稳定性可靠度影响	(45)
§ 2—5 随机迁移矩阵法	(52)
§ 2—6 随机迁移矩阵法求结构可靠度	(61)
§ 2—7 考虑扭转影响的板架可靠性分析	(63)
§ 2—8 响应面法	(75)
第三章 不完整壳体稳定性强度的可靠性分析	(77)
§ 3—1 引言	(77)
§ 3—2 壳体弹塑性稳定性强度计算	(78)
§ 3—3 收敛性研究	(84)
§ 3—4 初始缺陷研究	(87)
§ 3—5 系列参数研究	(93)
§ 3—6 强度公式	(98)
§ 3—7 不完整壳体可靠性分析	(102)

§ 3—8 与规范要求比较	(115)
第四章 有损伤结构可靠性分析	(118)
§ 4—1 引言	(118)
§ 4—2 圆柱壳受冲击后的凹陷模型	(119)
§ 4—3 损伤圆柱壳的极限状态方程	(123)
§ 4—4 损伤圆柱壳的可靠性分析	(125)
§ 4—5 管接头极限强度公式	(127)
§ 4—6 用几何法建立失效机构	(132)
§ 4—7 机构的极限状态方程	(140)
§ 4—8 临界机构的识别	(142)
§ 4—9 用几何法求可靠度算例	(143)
§ 4—10 有损伤构件海洋平台的可靠性分析	(150)
第五章 结构系统可靠性分析基本理论	(157)
§ 5—1 引言	(157)
§ 5—2 串联系统可靠性分析	(160)
§ 5—3 并联系统可靠性分析	(164)
§ 5—4 混联结构系统	(167)
§ 5—5 结构系统可靠性的界值计算	(169)
§ 5—6 具有相同相关强度构件组成的结构系统	(175)
§ 5—7 具有不相同相关强度构件组成的结构系统	(179)
§ 5—8 求系统可靠性的其他方法	(185)
第六章 不完整结构的系统可靠性分析	(188)
§ 6—1 引言	(188)
§ 6—2 β -分级法	(189)
§ 6—3 分支截界法	(192)
§ 6—4 截断列举法	(196)
§ 6—5 任意曲线梁元的刚度矩阵	(200)
§ 6—6 平面刚架破坏函数的生成	(205)
§ 6—7 具有初挠度结构的系统可靠性分析	(209)
参考文献	(214)

第一章 结构可靠性分析基本理论

§ 1-1 引言

传统的结构设计和强度校核是基于确定性分析,也即结构计算时假定结构的几何尺寸、材料的物理性能以及所受的载荷均是确定的。实际上这些因素都带有随机性,例如作用在海洋平台的波浪、潮水和风等载荷都是不确定的;结构中用的材料物理性能数据可能与提供的有所差别;名义尺寸也可能与实际结构不完全一致;计算中引进的一些假设,也会使计算模式与实际情况有偏离等等。这些都会影响对结构真实可靠性的评价。在惯用的确定性分析中为了考虑这些不确定因素的影响,简单地引进安全因子概念,使许用应力略低于材料的试验数据或人为地加大外载荷,以抵消一些偏危险的因素,提高安全感。令安全因子 K (或称强度储备)

$$K = \frac{\sigma_L}{\sigma_c} \quad (1-1)$$

式中 σ_L ——结构产生危险状态时响应特征值,如应力、挠度或循环次数等;

σ_c ——结构在工作状态时的计算特征值。

一般取 $K > 1$,以弥补某些难以预料的影响。经验告诉我们,即使在设计工程结构时通常均取 $K > 1$,但结构发生破坏的事件还时有发生。这表明将结构分析中变量全部按确定性量进行处理与实际情况有差距。在设计结构时,即使采用很大安全系数,也无法保证该结构绝对不坏。合理和可行的思路是允许实际结构在指定使用年限内具有足够小的破坏概率,也即允许有可能遭到破坏的某

些风险。故若不采用考虑不确定因素的结构可靠性分析方法,要对工程结构设计作出合理决策是不可能的。

下面先说明在结构分析中会遇到的两类不同性质的不确定性变量,接着介绍仅考虑随机不确定性变量的结构可靠性分析基本概念和方法。本章中还讨论结构模糊可靠性问题,给出求该问题模糊解和清晰解的方法。最后阐述广义可靠性指标。

§ 1-2 两种不确定现象

自然界存在两种性质不同的不确定现象:随机和模糊现象。

随机现象是因为难以全部估计的多种偶然因素存在,通常无法事先准确断定未来事件的结果,也即由于因果关系的不充分,在一定条件下,某些结果并不总满足“必然如此”。它除了客观事物有这种特性外,常常还包括主观认识的不完善性,如决策者对客观事物认识不全面或限于目前人类知识水平,不得不在建立数学计算模型中采取一些简化假定和(或)求解时用简单近似方法等等。事件结果的不可预知性是随机事件的特点。

模糊现象是因为难以对周围某些事物给出明确的定义和确定性的评定标准,通常无法绝对判定事物属于何类型,也即由于客观事物的差异在中介过渡所呈现出的“亦此亦彼”性,这些事物并不总满足排中律(在同一时间,同一关系下,对同一对象作出判断时,必须在两个互相矛盾的思想中有所肯定,即对 A 与非 A 不能都加以否定,而须承认其中必有一真)。判断事件属性时其边界的不清晰性是模糊事件的特点。

在工程结构分析中,上面两种不确定现象均存在。早在1926年迈尔(Mayer)^[1]指出安全因子具有随机性,在选用安全因子时他考虑了基本设计变量的随机特性。军用航空工业首先对结构可靠性分析发生兴趣^[2]。弗罗伊登塔尔(Freudenthal)^[3]于1947年为土木工程结构正式引进了可靠性分析方法。其后,结构可靠性分析

的数学理论有了很大发展,并在很多领域,例如土木工程、桥梁结构和海洋工程等作为改进设计或修订规范的理论依据。

进一步研究表明,结构破坏准则除了具有随机不确定性外,还有模糊不确定性。在仅考虑随机性的可靠性分析中,以强度问题为例,如计算求得的最大应力值小于或等于某一预先给定许用应力值,则结构被认为绝对没有破坏;但如计算所得的应力值超过该许用应力值,有时哪怕只超过万分之一或更小,则结构被认为是失效了。事实上应力的允许范围具有模糊性,从允许到不允许理应是逐步过渡的,也即实际不存在突变的绝对边界。

模糊性与随机性不同还可从实验后的结果来看。对仅具有随机性的事件,当实验结束后即转化为确定事件;而具有模糊性的事件,即使事件发生后仍然带有不确定性。例如作用在海洋平台上的波浪高度,经 50 年统计后,可以知道这 50 年内该平台遇到的最高波浪波高为某一值。但如某一固定式导管架海洋平台所在海域在 50 年内发生了地震,由于地震烈度概念本身是模糊的,所以在地震发生后也不能得出确定性答案,在事件发生前后这个不确定性没有改变。

在评定结构实际安全度时,有时仅考虑随机不确定性的随机可靠性分析方法就显得有不足之处。因为它是以一个有明确边界的普通集合来简化代替实际上具有模糊集合性质的问题。这个问题我们在 § 1-5 中再详细讨论。

§ 1-3 随机可靠性分析方法

工程结构的随机可靠性分析与电子产品、机械工程和系统工程可靠性分析从本质上讲它们均基于经典可靠性理论。自 1940 年由于军事上对电子系统可靠度的要求不断提高,促使了该理论的发展。然而,工程结构的随机可靠性与电子和机械系统等可靠性在一些重要方面还是不同的,例如电子产品或机械系统多数是批量生产,且可以假定在名义上是相同的,这样可根据一定数量的

试验或实测结果推算出破坏概率,但对工程结构常常无法以类似方法来求得破坏概率。

通常结构或结构构件的破坏是指结构遇到极值载荷或几个载荷组合构成相当的极值载荷,这些极值载荷的大小已足以使结构或其构件达到破坏状态。所以一方面需要预示这些极值事件出现的数量;另一方面在设计阶段从可能情报来预估各结构构件强度或载荷-挠度特性,也即要从这两方面综合其概率模型,这模型需要包括对所受载荷和结构抗坏能力有影响的所有随机不确定因素。

以一简单结构构件为例,如对某一给定的破坏形式,该结构所受的载荷为 S , 它的抗坏能力(或称抗坏强度)为 R , 其概率密度和分布函数分别为 f_S 、 f_R 和 F_S 、 F_R 。如以同一量纲表示 R 和 S , 引进新的随机变量 M

$$M = R - S \quad (1-2)$$

则 $M > 0$ 、 $M < 0$ 和 $M = 0$ 分别表示构件能正常工作、破坏和处于临界状态。称 M 为破坏函数。称 $M = 0$ 为极限状态方程。我们感兴趣的是知道构件可能出现的破坏概率 P_f

$$P_f = P(M \leq 0) \quad (1-3)$$

或它的可靠度

$$\mathcal{R} = 1 - P_f \quad (1-4)$$

因为载荷 S 和抗坏能力 R 用同一量纲表示,故可将这两随机变量都以 x 取值^①表示之(见图 1-1),再简单些,假定 S 和 R 是两个独立事件,则破坏概率 P_f 是这两个独立事件概率的乘积,并对所有可能发生的情况取和。具体地讲,如 $F_S(x)$ 和 $F_R(x)$ 分别为 S 和 R 的分布函数, $f_S(x)$ 和 $f_R(x)$ 分别为 S 和 R 的概率密度函数,则随机变量 S 位于区间 $[x, x+dx]$ 的概率为 P_1

^① 按习惯用法,以后随机变量用大写字母表示,例如 X , 而其值以小写字母表示,例如 x 。

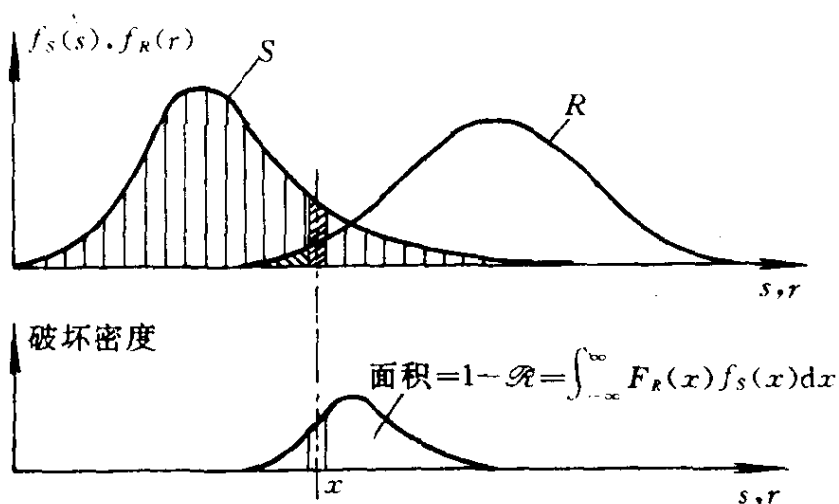


图 1-1 一维情况的破坏概率

$$P_1 = f_S(x)dx \quad (1-5)$$

又随机变量 R 取值小于或等于 x 的概率为 $P_2 = F_R(x)$, 则构件破坏概率为

$$P_f = \int_{-\infty}^{\infty} F_R(x) f_S(x) dx \quad (1-6)$$

构件在载荷 S 作用下的可靠度为

$$R = 1 - P_f = 1 - \int_{-\infty}^{\infty} F_R(x) f_S(x) dx \quad (1-7)$$

考虑到它的对称性, 还可以写成

$$R = 1 - \int_{-\infty}^{\infty} (1 - F_S(x)) f_R(x) dx \quad (1-8)$$

因为 $F_S(x)$ 是随机变量 S 的值小于 x 时的分布函数, 而 $(1 - F_S(x))$ 是它大于 x 的分布函数。通常负强度没实际意义, 可以把积分下限改为零。

应该指出 P_f 不是在图 1-1 中 $f_R(x)$ 和 $f_S(x)$ 两个密度函数的重叠部分。

对一般情况, 式(1-6)中的积分不存在封闭解。但如果 R 和 S 为独立随机变量, 且均服从正态分布, 则随机变量 M 的平均值(又称期望值) μ_M 和方差 σ_M^2 分别为

$$\mu_M = E[M] = \mu_R - \mu_S \quad (1-9)$$

$$\sigma_M^2 = \text{var}[M] = \sigma_R^2 + \sigma_S^2 \quad (1-10)$$

式中 μ_R 、 μ_S 和 σ_R^2 、 σ_S^2 分别为抗坏能力 R 和载荷 S 的平均值和方差。因为 M 是 R 和 S 的线性函数, 所以它也服从正态分布。引进参数 $((M - \mu_M)/\sigma_M)$, 再进行标准化处理, 得

$$P_f = \Phi\left(\frac{0 - \mu_M}{\sigma_M}\right) = \Phi\left(\frac{\mu_S - \mu_R}{\sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_R^2}}\right) \quad (1-11)$$

式中 Φ 是标准正态分布函数。

1969 年科内尔(Cornell)^[4]引进可靠性指标 β

$$\beta = \frac{\mu_M}{\sigma_M} \quad (1-12)$$

它的图解可见图 1-2。现在有

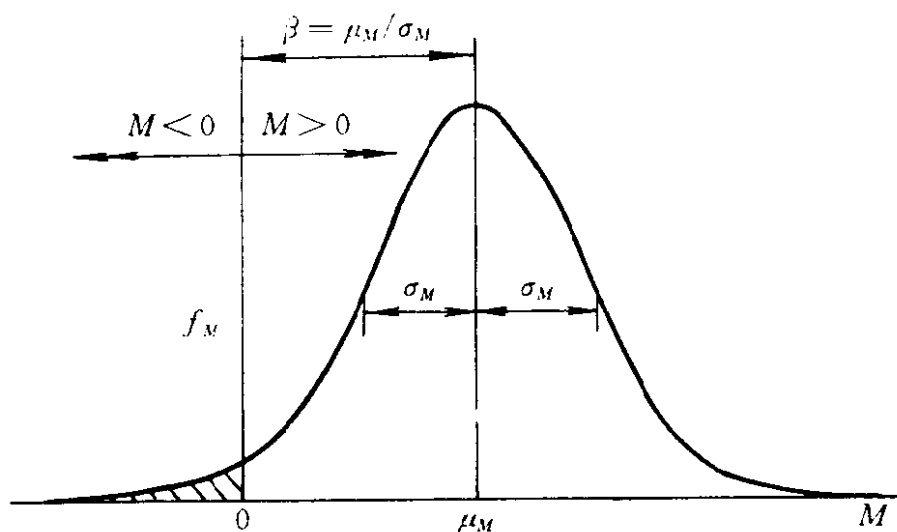


图 1-2 可靠性指标 β 的图解

$$P_f = \Phi\left(-\frac{\mu_M}{\sigma_M}\right) = \Phi(-\beta) \quad (1-13)$$

可见, 只要能求得可靠性指标 β , 则利用标准正态分布函数表就可以查得结构破坏概率。

只有简单结构可靠度问题可以通过两个随机变量 R 和 S 表示。一般情况下, 抗坏能力 R 和载荷 S 常常是很多随机变量的函

数,例如 R 是材料物理性能和结构几何尺度的函数, S 是外载荷、密度和尺度的函数。有时 R 和 S 还不能处理成独立的,例如截面尺寸既影响强度也与由重量引起的外载荷有关。这时,可以以一组基本变量 X 来表示破坏函数 M

$$M = f(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0 \quad (1-14)$$

用确定性概念可理解为它是定义在 n 维空间的一个曲面,故又称 $M=0$ 为破坏曲面。在曲面的一侧($M>0$)是安全区域,另一侧($M<0$)是不安全区域(又称破坏区域)。结构的可靠度可表示为

$$\mathcal{R} = 1 - P_f = 1 - \iint_{f(x) \leq 0} \dots \int f_{X_1, X_2, \dots, X_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n \quad (1-15)$$

式中 $f_{X_1, X_2, \dots, X_n}(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 是 n 个随机变量 X_i 联合概率密度函数,积分是在破坏区域内进行。当且仅当 X 是统计独立时,可简化为

$$\mathcal{R} = 1 - P_f = 1 - \iint_{f(x) \leq 0} \dots \int f_{X_1}(x_1) f_{X_2}(x_2) \dots f_{X_n}(x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n \quad (1-16)$$

在分析结构是否安全时,根据所采用的近似形式和计算手段,通常有三种不同方法,称第一至第三水准法。

第一水准法

这种方法用部分安全因子提供结构可靠性的必要水准。这类类似于确定性方法中的安全因子,比较简单,也是工程师们所熟悉和习惯用的手段,但这些部分安全因子通常需要通过第二或第三水准法来求得。

第二水准法

它可用于设计或分析,与第三水准法比较,它采用了一些近似,分析中仅用到随机变量的平均值和其二阶矩,通过可靠性指标 β 来估算结构破坏概率。所以第二水准法又称一次二阶矩法。如果将基本变量表示的破坏曲面映射到标准化的 n 维空间,则可以证明可靠性指标 β 就是标准化 n 维空间原点到破坏曲面最近一点的