

导弹和运载火箭

结构强度可靠性设计指南

(金属结构部分)

主 编 张骏华

副主编 徐孝诚 周东生

宇航出版社





NUAA2012035791

TJ76
1057-3

导弹和运载火箭

结构强度可靠性设计指南

(金属结构部分)

主 编 张骏华

副主编 徐孝诚 周东生



宇航出版社

2012035791

(京)新登字 181 号

内容简介

在较全面地分析、整理航天系统 30 年来的结构强度设计经验和实验数据的基础上,对结构强度可靠度分配、预测、设计计算、检验、评估等方面进行了较系统、深入的研究。其主要内容为:给出了配套的可靠性安全系数设计步骤和方法,特别是提出了已知强度变差系数的结构强度可靠性设计和检验方法;首次较系统地给出了实用的强度变差系数和部分载荷变差系数;提出结构工程的概率极限设计方法;论述部件结构强度的可靠度范围;给出较多应用实例。它是一本有理论、有方法、有实验数据的工程应用价值很大的书。虽然本书以导弹和运载火箭为主要对象,但对其它结构可靠性设计与分析亦很有参考作用。本书供从事结构设计工作人员、力学或强度工作者、可靠性工作者使用,有关方面的研究生、大学生亦可参考。

导弹和运载火箭 结构强度可靠性设计指南(金属结构部分)

主 编 张骏华
副 主 编 徐孝诚 周东生
责任编辑 李明观
执行编辑 郑淑贞 马 丽

*

宇航出版社出版
(内部发行)

北京和平里滨河路 1 号(100013)

发行部地址:北京阜成路 8 号(100830)

开本: 787×1092 1/16 印张: 17.625 字数:440 千字

1994 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数: 1—1000 册

ISBN 7-80034-697-8/V.175 定价: 39 元

言 序

顾 问 屠守锷
主 审 许椿荫 季 南
主 编 张骏华
副主编 徐孝诚 周东生

编 委 (按姓氏笔划排列)

马斌捷 刘 钟 华守廉 成楚之
周东生 周福生 张骏华 洪祖峻
赵天惠 徐孝诚 曾庆先

序 言

《导弹和运载火箭结构强度可靠性设计指南(金属结构部分)》，经过多年的努力，现在出版了。在这本书中，初步总结了航天系统 30 多年金属结构的研制经验，试图推广可靠性设计的方法，为今后研制出更先进的结构作出贡献。

在过去设计弹、箭体结构时，为保证在飞行过程中结构能有足够的强度去完成任务，一般凭经验规定一个安全系数，用这个系数乘以使用载荷来得到设计载荷，要求结构强度不小于此数值。实际上，不论外载荷还是结构强度，都有一个散布度。为了减小结构质量，应该考虑到这个情况，先分析两者的中值和散布度，再用概率分析的办法去保证必需达到的结构强度。在实际工作中，强度的散布度可用过去同类结构的试验所得数据去估算。在《指南》中强调应用无量纲的变差系数这个概念，这对估算散布度是有帮助的。

在概率分析中，往往用一些数字函数来表示随机变量的概率密度函数。这些函数的定义域往往扩展到无穷大，而实际结构的强度分布只是在一定范围内存在的。所以，如果机械地用数学方法去追求过高的结构可靠性，是没有多大意义的。如果设计是正确的，生产工艺又是稳定的，当结构可靠性不小于 0.999 时，可以认为结构是完全可靠的。因为用概率论的理论来分析，小概率事件在现实中是不会发生的。实例分析也说明这一点。

这本《指南》虽经多位专家、教授指导和审查，给予较高评价，也不能认为是一个完全成熟的作品。第二篇中积累了一些数据，这些数据还有待完善和进一步分析。全书都要在今后的实践中经受考验。我们希望在大家的关心和帮助下，不断充实和改进，使它成为一本更加完善的、成熟的、有用的工具书。



1994 年 2 月

前 言

结构强度可靠性是一门工程应用学科，使用它能消除传统安全系数设计方法的盲目性，使结构设计更加合理，有明确的可靠度，能减轻结构质量，能使结构设计科学化，有定量概念。因此，它实用性很强。欲进行结构强度可靠性设计与分析，必需将力学、统计学、实验数据以及工程知识结合起来。

理论和实践证明，力学、统计学是结构强度可靠性的理论基础，实验数据是其依据。仅有力学、统计学知识，没有实验数据，则没有实用价值；若实验数据不和力学、统计学有机地结合起来，使用价值也不高。只有将它们紧密地结合起来，才有现实的使用价值。

科学在发展，技术在进步，结构采用可靠性设计势在必行。为了使传统的结构设计方法尽快地向可靠性设计方法转变，航天系统有关科研人员在研究和总结以往工作的基础上，搜集、整理并补充了有关的实验数据，特别是结构强度方面的数据，对一些必需解决的重点课题进行了专门研究。现根据研究成果，结合结构强度可靠性设计的特点和实际工作者的需要，编写了这本《导弹和运载火箭结构强度可靠性设计指南(金属结构部分)》。

本《指南》编写时力求系统、实用、可靠、方便。不追求数学的严密性，强调数学的合理性、正确性。尽其所能地搜集有关试验数据，特别是产品试验数据，经分析和整理后列入《指南》。试验数据分析和整理的重点是变差系数及其使用方法。为保证《指南》的实用性、正确性，广泛征求可靠性专家、型号总师、副总师、结构主任设计师等的意见。根据审查意见，作了进一步修改。

本《指南》的主要特点有：

(1) 首次系统地提出已知强度变差系数的结构强度可靠性设计、分析与评估方法。为了设计方便，建议在设计过程中使用可靠性安全系数，对复杂载荷问题，提出概率极限设计方法；

(2) 立足于我国国情，首次系统地给出导弹、运载火箭结构强度可靠性设计中必不可少的变差系数，它具有较好的实用价值；

(3) 为使工程技术人员能够迅速正确地使用本《指南》的方法和数据，给出了结构强度可靠性设计与评估的应用实例，并对其进行了分析和研究，还讨论了结构部件可靠度标准，为进一步开展结构强度可靠性设计打下良好的基础；

(4) 对结构强度可靠性设计的若干新问题进行了论述，特别是对载荷复杂的弹头结构可靠性设计进行了论述。对载荷进行了统计分析，从而使本《指南》对结构强度可靠性设计的论述更加全面、更加深入、更具有实用性。

变差系数的搜集、整理和分析，是结构强度可靠性设计研究中的重要内容。一般来说，符合正态分布的结构强度可靠性设计问题，其算式是变差系数的显函数。实践证明，应用变差系数做近似计算，有助于简化计算方法、减少计算程序。虽然各种材料的机械性能、各种结构强度，其均值和方差存在较大差异，但其变差系数的变化范围相对很小，有的可视为常数。注意到结构强度和载荷大多符合正态分布这一事实。为了便于设计人员使

用可靠性设计方法，本《指南》给出大量的经过分析整理后的实验数据及使用意见。

变差系数的整理、分析过程中，重点研究了强度变差系数的统计特性。结果表明，符合正态分布的强度的变差系数亦近似服从正态分布。因此，工程上可以按照正态分布，给出变差系数上限统计方法及其使用值范围。同时强调，一组强度数据统计出来的变差系数 C_{VS} ，虽经统计处理放大某一倍数，可信度仍然较低。只有对 C_{VS} 进行大量的数据统计分析，才能给出可靠的使用值。

根据实际需要，从宏观角度研究了C/E复合材料及结构的强度散布特性，并给出其变差系数的使用范围。对C/E复合材料结构，若不计及层合效应，在强度变差系数已知时，其可靠性设计方法和金属结构类似。

疲劳问题没有给出更多的论述。仅给出必要知识，这些知识可以满足初步分析、设计的需要。

本《指南》共分四篇。第一篇是结构强度可靠性设计的基本概念和方法。论述了结构强度可靠性的分析、设计、检验及其评定的基本方法。强调已知强度变差系数的计算方法的应用，讨论了强度和载荷的散布特性，简单介绍了故障分析和可靠性增长技术；第二篇是强度与载荷的数据统计，搜集、整理了国内、外有关的强度实验数据，特别是我国航天系统的强度实验数据。强度数据较全、较系统。但载荷数据较少。过去，载荷实测数据较少，载荷实测数据主要是为了检验计算方法。载荷的散布主要由控制干扰和大气、自然环境等确定。第三篇是应用与研究。结合实际结构进行了可靠性分析与评估。对结构强度可靠性设计的实践进行了总结。对结构强度可靠性的分析和评估中的某些问题进一步进行了研究。第四篇是专题论述。它是对前三篇的补充和说明。这一部分或是补充，或具有独特性、或具有方向性。这对读者进一步了解编写本《指南》的工作基础和开拓研究思路不无裨益。

本《指南》是集体创作。确定关键研究课题、编写提纲、修改直至定稿，均经讨论和商定。研究和编写过程中，得到中国运载火箭技术研究院刘宝庸总师的指导，得到702所杨永新所长的关心和支持，得到可靠性专家何国伟教授和宇航结构设计专家、可靠性专家胡昌寿教授的指导。不少同志给予支持，提供信息和数据，提出修改意见，对此一并表示谢意！

编写人员尽了最大努力，由于水平和精力所限，可能还有错误，望读者指正。有些问题还需进一步研究。

主 要 符 号

a	裂纹尺寸
C_V	变差系数 $C_V = s / \bar{x}$
$C_{VS}, C_{VL}; C_{VS} = \sigma_S / \mu_S, C_{VL} = \sigma_L / \mu_L$	强度、载荷母体的变差系数
D	损伤变量
da / dN	裂纹扩展速率
$E(X), \mu$	随机变量的数学期望(均值)
F	F 分布随机变量
$F(x), G(x), \dots$	分布函数(在 x 处的值)
$F_S(x), F_L(x)$	强度、载荷的分布函数
f	安全系数
f_R	可靠性安全系数
$f(x), g(x), \dots$	连续随机变量的概率密度函数(在 x 处的值)
$f_S(x), f_L(x)$	强度、载荷的概率密度函数
K_I	I 型应力强度因子
K_{IC}	平面应变断裂韧性
K_σ	有效应力集中系数
k	圆筒壳轴压临界应力系数
L	载荷随机变量
$L_{p, \gamma}$	单边容许限因子
N	疲劳寿命
n	样本容量
P	可靠度、概率
P_f, Q	不可靠度, 失效概率
$P(A)$	事件 A 的概率
p	内压
P_i	子系统可靠度
q_i	子系统不可靠度
R	半径
r	应力比
S	强度随机变量
\bar{S}, \bar{L}	强度、载荷样本的均值
s	样本的标准偏差
s_S, s_L	强度、载荷样本的标准偏差
t	t 分布随机变量
U	标准正态随机变量
u_0	可靠度系数

u_p	标准正态分布分位数
X, Y, \dots	随机变量
x, y, \dots	随机变量的观测量
$x_p(v)$	随机变量 X 对应于概率 P 、自由度 v 的分位数
\bar{x}	样本的算术平均值
α	显著性水平, I 类错误概率
β	II 类错误概率; 表面系数; 形状参数
γ	置信度
δ	厚度; 位置参数
ε	尺寸系数; 应变
θ	尺度参数
λ	失效率
μ_S, μ_L	强度、载荷母体的均值
ν	自由度
ρ	相关系数; 密度
σ	随机变量或总体的标准偏差; 应力
σ_b	材料强度极限
σ_r	疲劳极限
σ_S, σ_L	强度、载荷母体的标准偏差
$\Phi(x)$	标准正态随机变量的概率密度函数
χ^2	χ^2 分布随机变量

目 录

主要符号	(VII)
第一篇 结构强度可靠性设计的基本概念和方法	(1)
1.1 结构强度可靠性和概率极限设计概念	张骏华 (1)
1.2 结构强度的失效模型	张骏华 (2)
1.3 可靠性安全系数	张骏华 (7)
1.4 强度分布函数及强度散布特性	张骏华 (13)
1.5 载荷分布函数及载荷散布特性	成楚之 赵人廉 (18)
1.6 结构强度可靠性设计步骤	张骏华 (26)
1.7 结构强度可靠度与统计标准	张骏华 (27)
1.8 结构强度的可靠性试验与可靠性检验	张骏华 马斌捷 (30)
1.9 结构强度可靠性评定	张骏华 (35)
1.10 结构强度故障及薄弱环节分析与可靠性增长	张骏华 (39)
参考文献	(44)
第二篇 强度和载荷数据统计	张骏华等 (45)
2.1 强度和载荷数据统计分析与说明	(45)
2.2 金属材料静态机械性能统计	(48)
2.3 金属结构(包括元构件)静态强度数据统计	(59)
2.4 螺栓静态强度数据统计	(64)
2.5 C/E 复合材料静态机械性能数据统计(包括温度、湿度影响)	(66)
2.6 C/E 复合材料结构的静态强度数据统计	(78)
2.7 若干种金属材料及结构的断裂韧性数据统计	(82)
2.8 若干种金属材料及结构的疲劳特性数据统计	(86)
2.9 强动载下的几种材料的机械性能统计	(98)
2.10 几种特殊强度、刚度数据统计	(99)
2.11 几种载荷数据统计	(100)
第三篇 应用与研究	(102)
3.1 再入弹头结构强度可靠性设计与概率极限设计	徐孝诚 (102)
3.2 再入弹头载荷及其上限研究	徐孝诚 王世铭 (107)
3.3 防空导弹结构系统强度可靠性评估	华守廉 范广元 (114)
3.4 球形壳和化铣整体网格加筋壳的可靠性设计——应用实例	王世萱 周东生 (118)
3.5 大型导弹和运载火箭部段强度可靠性评估	洪祖峻 (121)
3.6 圆筒壳的强度可靠性设计	赵天惠 (125)
3.7 飞航导弹结构强度可靠性评估	周福生 (129)
3.8 固体火箭发动机钢壳体强度可靠性设计	伍天健 (133)
3.9 纤维缠绕的固体发动机壳体强度可靠性分析	伍天健 (141)

3.10	强度变差系数的统计分析.....	张骏华	(148)
3.11	潜-地固体导弹壳体强度变差系数的统计分析	周东生 王世萱	(156)
3.12	潜-地、地-地(陆上机动发射)固体导弹载荷 变差系数的统计分析	周东生 王世萱	(160)
3.13	防空导弹结构静强度变差系数统计分析	华守廉 范广元	(162)
3.14	防空导弹结构刚度实测数据分析	华守廉 范广元	(168)
3.15	结构强度可靠度指标确定的实例	华守廉 范广元	(175)
3.16	飞航导弹几种飞行载荷变差系数的统计分析	张 虹 候希久	(178)
	参考文献		(180)
	第四篇 专题论述		(182)
4.1	结构强度可靠性中小样本问题的处理方法	马斌捷	(182)
4.2	非正态分布的结构强度可靠性分析	马斌捷	(189)
4.3	舱段的功能函数及其应用.....	华守廉 范广元	(195)
4.4	随机载荷简化为载荷上限的结构强度可靠度分析	马斌捷	(199)
4.5	结构强度可靠性检验的 C_V 方法	马斌捷	(204)
4.6	飞行器结构强度的可靠性检验	徐孝诚	(211)
4.7	基于断裂力学的结构可靠性分析	秦子增 马斌捷 郑荣跃	(215)
4.8	疲劳强度和寿命的可靠性分析	马斌捷	(220)
4.9	超硬铝合金整体精车加工圆筒壳轴、外压临界载荷 及其散布特性研究	徐孝诚 夏 初	(226)
4.10	超硬铝合金材料强度性能及其在弹头结构中的应用.....	徐孝诚	(232)
4.11	大型导弹与运载火箭结构强度安全系数的应用研究.....	洪祖峻	(236)
4.12	C/E 复合材料结构强度散布特性的初步研究	张骏华	(242)
4.13	动载荷作用下结构强度可靠性设计方法的探讨.....	成楚之	(247)
4.14	评估结构系统可靠度的 Monte Carlo 法	孟洛萍 周东生	(252)
	参考文献		(259)
	结束语		(260)
	附表 1 正态分布的单侧分位数表		(261)
	附表 2 χ^2 分布的上侧分位数表		(268)
	附表 3 t 分布的单侧分位数表.....		(270)
	附表 4 单边容许限因子 $L_{P,\gamma}$ 表		(272)
	附表 5 d 检验(或 K-S 检验)的临界值 $D_{n,\alpha}$ 表		(273)

第一篇 结构强度可靠性设计的基本概念和方法

1.1 结构强度可靠性和概率极限设计概念

1.1.1 结构强度可靠度定义

可靠性和可靠度经常出现在同一资料中,这两个名词均来自英文 Reliability。可靠性是从性质、能力来讲的;可靠度是指可靠性的概率度量。结构在规定的条件下,在规定的时间内,完成规定功能的能力,称为结构可靠性。

结构可靠度有两种表述方式:①按可靠度一般定义表述;②按结构问题特点表述。

(1)按可靠度一般定义,结构可靠度表述为结构在规定的时间内,规定的条件下完成预定功能的概率。此概率叫可靠度,亦叫可靠概率,常用 P_S 表示。反之,不能完成预定功能的概率为失效概率,常用 P_f 表示。显然, $P_S + P_f = 1$ 。

(2)按结构问题特点,结构可靠度表述为结构强度大于结构所承受载荷的概率。若强度用 S 表示,载荷用 L 表示, P_S 和 P_f 可表述为

$$P_S = P(S-L > 0) = P[(S/L) > 1] \quad (1.1.1)$$

$$P_f = P(S-L < 0) = P[(S/L) < 1] \quad (1.1.2)$$

对于结构,这两个定义是一致的。强度和载荷是广义的,它们均可以是时间的变量,也可以随外界条件而变。强度是结构功能的特征参数,是结构在一定条件下随时间而变化的固有能能力,如破坏应力,临界应力等。载荷是外界作用的总称,反映结构的外部使用条件。如结构受振动和温度作用,动载和温度,通常均随时间变化,它们都属于载荷范围。振动及其它变化载荷常使结构产生疲劳破坏,结构在不同温度下,有不同的疲劳强度或疲劳寿命。强度分析中,常把温度作为条件。结构在腐蚀条件下,强度将随时间而降低,即强度随时间变化。当材料或结构承受快速加载时,加载速度不同,相应的强度亦将有所差别。

下面对时间、条件、功能加以进一步的阐述。

时间是一个重要因素,它是与产品质量好坏、性能优劣程度直接有关的度量。它可以用时间表示,也可以用次数、距离表示。

条件是指结构所处的环境条件和维护条件,如承受的载荷、振动、冲击、温度、腐蚀介质等。

结构的功能常包括安全性、适用性和耐久性。安全性是指结构在各种环境作用下,不产生破坏的性能;适用性是指在正常条件下,不应有过大的变形或大的裂纹等;耐久性是指结构在循环载荷作用下或在腐蚀条件下的耐久能力。

基于上述解释可以将可靠度概括为安全性、适用性、耐久性的综合度量。

1.1.2 结构强度可靠度分类

结构所受的载荷，通常可分为三类：

(1) 静载荷。通常载荷增加的速度对应的应变率 $\dot{\epsilon} < 10^0 / \text{s}$ 时，称为静载荷。如一般材料试验机的加载，火箭上升段的载荷。

(2) 振动载荷。具有周期性或非周期性反复变化的载荷，对应的应变率 $\dot{\epsilon}$ 的变化范围在 $10^0 \sim 10^2 / \text{s}$ 之间。

(3) 强动载。强脉冲载荷、强快速加载、强吸能过程属于这一类，对应的应变率一般为 $\dot{\epsilon} > 10^2 / \text{s}$ 。进行受力分析时，需计及应力波及动稳定性。

不同载荷或不同应变率下的材料或结构具有不同的失效方式，相应的可靠性分析方法亦有差异。根据可靠性分析方法，将结构可靠度分为：

- (1) 静强度可靠度；
- (2) 疲劳强度或疲劳寿命可靠度，简称为疲劳可靠度；
- (3) 强动载的结构强度可靠度，或简称为动强度可靠度。

静强度可靠度和疲劳可靠度的研究较多，已进入实际应用阶段，动强度可靠度的研究工作甚少。疲劳寿命可靠性分析在第四篇中介绍和讨论。

1.1.3 概率极限设计

某些结构问题，如弹头，载荷条件很复杂，实验数据很难获得，较准确的统计分析无法进行。此时，采用工程近似的统计和分析方法求得载荷的某一概率的单边上限并使其等于强度的另一概率的单边下限，以此进行结构分析和设计，称为概率极限设计。此时，可使用统计标准： 3σ 的载荷上限，99% 概率的强度下限。概率极限设计不同于概率极限状态设计。

1.2 结构强度的失效模型

可靠性工程中，失效原因的分析 and 失效物理模型的建立是两个很重要的问题。失效原因分析主要指失效物理原因分析，这里不涉及。失效物理模型的建立是用统计分析方法，使失效的机制模型化，提出可供计算的数学模型，或叫概率统计模型。这里结合结构可靠性特点，阐述失效模型及可靠度计算方法。

1.2.1 干涉模型

干涉模型亦叫应力-强度模型，或载荷-强度模型。结构失效与否，决定于结构中的应力(或载荷)和材料(或结构)强度之间的关系。这里应力(或载荷)和强度都是广义的，如包括稳定问题、刚度问题等。对静强度，失效的形式主要是整体破坏(包括失稳)或过大的残余变形，前者是应力超过临界值，如强度极限或临界应力等，后者是应力超过屈服极限。因此，也可以这样叙述，结构失效与否，决定于结构所受的载荷和结构强度之间的关系。载荷用 L 表示，强度用 S 表示。 $f_L(x)$ 、 $f_S(x)$ 分别表示载荷和强度的概率密度函数，图 1.2.1 中阴影部分表示干涉区，此区域称为可能的破坏区，但破坏概率或失败概率 P_f 并不等于干涉面积。

$$P_f = P(S < L) = P(S - L < 0)$$

将强度和载荷的干涉区放大，如图 1.2.2，横坐标 x 代表应力参数，在 dx 内的载荷概率为

$$P\left(x_0 - \frac{dx}{2} \leq x \leq x_0 + \frac{dx}{2}\right) = f_L(x_0) dx$$

强度大于 x_0 的概率为

$$P(S > x_0) = \int_{x_0}^{\infty} f_S(x) dx$$

若载荷在 dx 内的概率和强度大于 x 的概率同时成立且相互独立，则它们同时发生的概率为

$$f_L(x_0) dx \left[\int_{x_0}^{\infty} f_S(x) dx \right]$$

该式对任意 x 都应成立。根据定义，结构可靠度是强度大于载荷的概率，可靠度 P 的表达式为

$$P = \int_{-\infty}^{\infty} f_L(x) \left[\int_x^{\infty} f_S(t) dt \right] dx \quad (1.2.1)$$

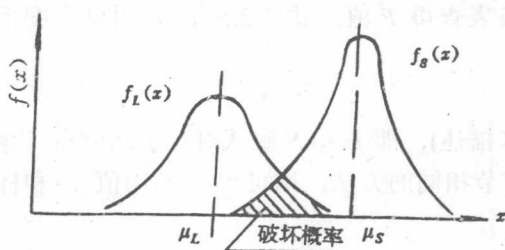


图 1.2.1 破坏概率 P_f 和 $f_L(x)$, $f_S(x)$ 之间的关系

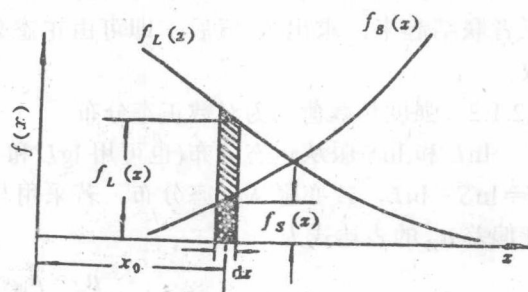


图 1.2.2 强度和载荷干涉区放大图

1.2.1.1 强度和载荷均为正态分布

载荷的概率密度函数为

$$f_L(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_L} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x - \mu_L}{\sigma_L}\right)^2\right] \quad (1.2.2)$$

强度的概率密度函数为

$$f_S(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_S} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x - \mu_S}{\sigma_S}\right)^2\right] \quad (1.2.3)$$

式中： μ_L , σ_L 分别为载荷的母体均值和标准偏差； μ_S , σ_S 分别为强度的母体均值和标准偏差。

令 $Z = S - L$ ，由于 S 和 L 符合正态分布， Z 也符合正态分布。 Z 的均值和标准偏差为

$$\mu_Z = \mu_S - \mu_L$$

$$\sigma_Z = \sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_L^2}$$

则可靠度的表达式为

$$P = P(Z > 0) = \int_0^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{Z - \mu_Z}{\sigma_Z}\right)^2\right] dZ$$

令 $u = \frac{Z - \mu_Z}{\sigma_Z}$, u 称为标准正态变量。将 u 和 $dZ = \sigma_Z du$ 代入上式, 则有

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}}^{\infty} \exp\left(-\frac{1}{2}u^2\right) du \quad (1.2.4)$$

这是标准正态分布, P 值由 μ_Z/σ_Z 确定。令 $u_0 = \mu_Z/\sigma_Z$, u_0 和 P 之间一一对应。

$$u_0 = \frac{\mu_S - \mu_L}{\sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_L^2}} \quad (1.2.5)$$

或

$$\mu_S = \mu_L + u_0 \sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_L^2}$$

式(1.2.5)称为联结方程, 它是结构强度可靠性设计的基本方程。它将强度、载荷、可靠度三者联结起来, 求出 u_0 值后, 即可由正态分布表查得 P 值。式(1.2.5)中 u_0 叫可靠度系数。

1.2.1.2 强度和载荷均为对数正态分布

$\ln L$ 和 $\ln S$ 服从正态分布(也可用 $\lg L$ 和 $\lg S$ 描述), 即 L 和 S 服从对数正态分布。令 $Z = \ln S - \ln L$, Z 亦服从正态分布。若采用与前节相同的方法, 则可得 Z 的均值 μ_Z 和标准偏差 σ_Z 的表达式为

$$\mu_Z = \mu_{\ln S} - \mu_{\ln L}$$

$$\sigma_Z = \sqrt{\sigma_{\ln S}^2 + \sigma_{\ln L}^2}$$

式中: $\mu_{\ln S}$, $\sigma_{\ln S}$ 分别为 $\ln S$ 的母体均值和标准偏差; $\mu_{\ln L}$, $\sigma_{\ln L}$ 分别为 $\ln L$ 的母体均值和标准偏差。

1.2.1.3 强度和载荷, 一为正态分布, 另一为对数正态分布

强度为正态分布, 载荷为对数正态分布, 或者相反。可靠度按式(1.2.1)计算, 但要注意对数正态分布的概率密度函数与正态分布的区别, 此种情况无解析解, 需用数值方法。

1.2.2 蜕化模型

蜕化是指在有害环境条件下, 材料强度、结构强度的降低。如在腐蚀条件下, 随着时间推移, 强度将会下降; 随着环境温度升高, 强度也会降低。强度降低的规律这里不阐述。

在蜕化的情况下, 计算可靠度时, 仍假定蜕化后的强度符合正态分布, 用试验方法确定所要求的条件下的均值和标准偏差, 然后按 1.2.1.1 节的方法计算可靠度。

1.2.3 累积损伤模型

在材料、结构的疲劳问题中，迈纳(M.A.Miner)提出了线性累积损伤理论，疲劳寿命预测的表达式为

$$\sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (1.2.6)$$

式中： n_i ——在应力水平 s_i 下的循环次数；

N_i ——在应力水平 s_i 下的破坏循环次数。

式(1.2.6)是累积损伤式，即在每个应力水平 s_i 下，经 n_i 次循环，结构“寿命”缩短了 (n_i/N_i) 。材料累积损伤达到一定值时，材料就破坏。

大量实验表明，由于材料的不同性质，结构或试件的形状、载荷性质等的差异，所得的数值大致在 $\sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} = 0.5 \sim 1.49$ 的范围内。有人建议将式(1.2.6)改为

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{n_i}{N_i} \right)^\alpha = 1$$

式中： α 由试验确定。

实践证明，对于大多数问题，使用式(1.2.6)计算寿命可靠度，其数值偏低。

1.2.4 剩余强度模型

考虑的剩余强度有两种情况：① 有裂纹结构的强度；② 经过一定疲劳载荷作用后结构可能产生新的损伤和裂纹的结构强度。这种有裂纹结构的可靠度按概率断裂力学方法计算，和疲劳有关的结构，其可靠度计算方法在疲劳可靠性设计中阐述。

1.2.5 串联模型

在结构可靠性中，静定结构系统的可靠性分析一般使用串联模型。若结构系统由 n 个部件组成，部件的可靠度为 P_i ， $i=1, 2, \dots, n$ ，则结构系统可靠度 P_{JG} 等于 P_i 的乘积，即

$$P_{JG} = \prod_{i=1}^n P_i \quad (1.2.7)$$

若已知结构系统可靠度 P_{JG} ，根据确定的分配原则，使用式(1.2.7)近似且保守的确定 P_i 。

1.2.6 并联模型

静不定结构的可靠性分析是一个复杂的问题，目前已有一些专著专门研究这个问题，如随机有限元分析方法。在静不定结构中，一个元件破坏后，整个结构还具有承载能力，这种特性有些类似于并联系统。假设有一个 $(n-1)$ 度静不定结构中 n 个元件的破坏顺序为 $1 \rightarrow n$ ，令 P_i 为前 $(i-1)$ 个元件破坏后第 i 个元件的可靠度，则此失效模式的可靠度为

$$P = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i) \quad (1.2.8)$$

这里 $P_i (i=1, \dots, n)$ 是相互不独立的, 是前 $(i-1)$ 个元件破坏后的条件概率, 这是与普通并联系统的区别所在, 也是结构可靠性分析的难点所在。

1.2.7 混联模型

混联模型是串联和并联的混合, 亦叫混合模型。并串联模型的算式为

$$P = 1 - \prod_{i=1}^m \left(1 - \prod_{j=1}^{n_i} P_{ij} \right) \quad (1.2.9)$$

串并联模型算式为

$$P = \prod_{j=1}^n \left[1 - \prod_{i=1}^{m_j} (1 - P_{ij}) \right] \quad (1.2.10)$$

式中: j 为串联序号, i 为并联序号。

1.2.8 失效模式的确定

结构是由部件组成的, 结构失效有各种定义, 有局部失效和总体失效, 有强度失效和刚度失效, 有弹性失效和塑性失效。一般可综合定义为结构的一部分达到临界状态, 使整个结构丧失指定的功能。

结构失效包含多个部件的多种失效形式, 即有多种失效模式, 可靠性是通过综合主要失效模式得出的。对完整结构进行应力分析, 找出若干个达到接近临界状态的部件, 构成第 1 层失效单元; 依次将每个失效单元的临界条件代入结构分析程序, 找出第 2 层失效单元; 如此反复进行, 直到结构失效, 形成失效树, 亦可叫事件树。每一个支路就是一个失效模式, 这样就确定了主要失效模式。

从强度计算观点看, 结构失效是指失稳、破断、疲劳破坏、断裂、腐蚀开裂、变形或位移过大等原因, 使结构失去设计要求的功能。失效模式由结构形式和外力性质确定。一般讲, 当应力为负时, 失效模式为失稳; 应力为正时, 失效模式为破断; 反复应力作用下, 常为疲劳破坏。有裂纹的构件, 裂纹扩展至断裂。

进行强度计算和强度设计时, 需要确定危险部位, 危险部位由应力性质、应力大小和结构特点确定。失效模式对应计算情况的选取, 确定计算情况的方法加以适当改进, 即可用来确定失效模式。对一个给定的结构, 列出所有载荷情况, 选出几个较大受力状态及相应的失效模式, 计算相应的可靠度。对于组合载荷, 较大受力状态, 可能有不同的载荷比例, 不同载荷比例的受力情况, 也要分析比较。这种方法称之为枚举和确认方法。即枚举所有可能的失效模式, 确定一至两个主要失效模式。主要情况的结构可靠度 P_i 满足设计要求, 其它自然满足了。