

# 结构可靠性设计与分析

张骏华 编著

宇航出版社

# 结构可靠性设计与分析

张骏华 编著

宇航出版社

## 内 容 简 介

结构可靠性问题，首先是工程问题，它的理论基础是力学和数理统计的结合，它的工程基础是实践经验和实验数据。本书从这一基本认识出发，将工程、力学、数理统计结合起来，从力学观点研究结构可靠性。书中研究结构静强度、疲劳强度、冲击和振动问题中的统计方法，给出小样本和极小样本的可靠性评定方法，还给出一些经验方法和相当一部分实验数据、曲线和许多算例。书中研究结构可靠性设计的一般原理，以静力强度和疲劳强度的结构设计为主要对象，给出了既简便又适用的可靠性安全系数设计方法，这是一种结构可靠性设计的标准化方法。虽然本书以火箭结构为主要对象，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的工作人员、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。

### 结构可靠性设计与分析

张骏华 编著

责任编辑：王敬春

\*

宇航出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

纺织工业出版社印刷厂印刷

开本：850×1168 1/32 印张：13.75 字数：360千字

1989年9月第1版第1次印刷 印数：1—4000册

ISBN 7-80034-178-X/TB·046 定价：7.40元

# 前 言

结构工程实践说明，结构强度与结构所受的载荷均是随机量。过去的结构设计不计及量的随机性，采用最大载荷和最小强度的方法。传统的安全系数就是最小强度与最大载荷之比。“最大”和“最小”常用经验确定，但和实际情况的符合程度常常说不清楚。随着科学技术的发展，对结构强度和结构载荷量的性质有了进一步的认识，要求设计出的结构质量小，灵巧耐用，并且要知道结构的可靠程度。因此，开展结构可靠性设计的研究，是势在必行的。

通常，结构问题中的各种随机量均假定符合正态分布，用正态分布来研究结构可靠性。一般讲结构可靠性是结构强度大于结构载荷的概率，或者在规定的条件下，在给定的时间内结构完成规定任务的概率。与此相反，由于内、外原因导致结构出现故障（失效、破坏等）的概率叫不可靠性。从这个定义可以看出，结构可靠性，首先是一个工程问题，其次，它用统计方法来描述。有人一提到可靠性，就认为是统计数学问题，这个认识不符合实际。统计数学仅是描述可靠性的数学工具，是可靠性的数学基础，这仅仅是一个方面。而另一方面，亦是更重要的方面，是工程的实践经验，是大量的实验数据。没有实践经验，没有实验数据，就没有可靠性。可靠性是由实验确定的。更正确地说，可靠性是设计和生产工艺的综合固有值。实验结果显示这一数值，数理统计将这一数值加以描述。由此可知：工程上解决可靠性问题，主要靠大量的工程技术知识和大量的实验数据，再加上少量的统计学知识，决不是相反。因此，研究可靠性，积累实验数据是非常重要的工作。本书着重收集实验数据，分析实验数据，力

求给出用统计数学和实验数据两者结合起来描述实践经验的方法。

有人一提到可靠性，就希望100%的可靠，这是不符合事实的。正常的只能希望出现破坏的概率很小，可靠性很高。破坏概率大小的确定，依赖多方面的因素：如实践经验，实验数据，加工难易、结构复杂程度，生产成本等。

统计方法有传统的统计方法和新发展的统计方法。本书主要采用传统的统计方法。作者认为，对大多数问题，“传统的”和“新的”统计法只有精确度上的差别。这个差别，对工程问题是微不足道的。传统的统计方法，工程技术人员容易接受，发展也较成熟。众所周知，有些问题中量的分布和正态分布有差异，但因正态分布发展成熟，数表完备，采用正态分布来计算分析，恰当的选取统计标准，亦能得到符合实际的较好结果。

在工程上，由于各种量的随机性，把力学知识和统计方法结合起来处理工程问题，已日益受到工程师们的重视。目前，不少工程师认识到，没有统计知识，许多问题无法理解。如两个同样尺寸的圆柱形壳体，承受轴向压缩力，它们的临界轴压数值之间的差别范围，一般为10~20%，有时可高达30%之多。元件和结构疲劳寿命的差别就更大了。可以讲，不从统计观点描述壳体稳定性，就不是一个完整的描述，就会大大降低它的使用价值。疲劳数据不进行统计描述，就无法使用。疲劳分析是建立在实验基础上的，它的数据分散性大，数据的变化规律由试验确定。不用统计描述，不可能知道数据的变化范围，也不可能知道疲劳问题的特点。一个随机量的大小，只是统计意义下的大小，是某一概率下的量。离开统计含义就不清楚。描述一个随机量，一般要有两个变数，如平均值和标准偏差。不能仅用一个变数。因此，本书对力学知识和统计分析二者的结合，给予相当的重视。

编写本书时，注重工程适用。研究可靠性设计时，建议在将来的一段时期内，使用可靠性安全系数。本书的统计方法，尽量

采用正态或对数正态分布。统计分析时，采用工程方法，把零散的少量数据或表面上不是一个母体的数据，集中成一个母体，进行统计分析。如不同结构尺寸的同类试件，通过计算方法换算，变成一个统计样本。同时，从理论上给出已知部分母体信息的极小样本的统计方法。书中每一种统计方法均用实例加以阐述。

这本书是作者及其同志们多年工作的总结。早在1964年就开始研究可靠性设计和强度的统计分析，产品设计中曾经试行过可靠性设计，当时，提出可靠性安全系数。目前，正在多方面研究，准备更好地开展可靠性设计。结构强度统计分析的一些成果，可在《导弹结构强度计算手册》〔8〕一书中查到。这里着重介绍统计分析方法，可靠性设计方法。通过计算方法把已搜集到的试验数据进行整理，从而说明一些统计方法的使用范围和统计分析与强度分析的关系。

本书共分九章。第一章为数理统计的基本知识，介绍结构可靠性设计的基本统计知识。第二章叙述数理统计在强度分析中的应用，研究强度问题的统计方法。重点是单边容许限在强度分析中的应用，讨论强度问题中的统计标准。同时也说明使用统计方法的必要性。第三章是疲劳试验结果的统计处理方法，推荐使用单边容许限统计方法，介绍不完全子样的统计方法，讨论统计标准。阐述疲劳强度不能仅仅着眼于疲劳寿命，也要研究疲劳的断裂应力，并给出近似而保守的应力计算的疲劳强度检验方法。顺便介绍平均应力对疲劳寿命、疲劳强度的影响。第四章为冲击、振动数据的统计，根据冲击、振动问题的特点，研究统计标准，用实验数据说明使用正态分布的合理性。介绍极小子样的统计处理方法。第五章阐述结构的可靠性分析与设计，介绍可靠性设计原理和方法。推荐可靠性安全系数设计方法作为过渡阶段的设计方法。给出飞行器结构可靠性设计的基本数据，主要是变差系数。第六章介绍结构动强度可靠性设计，主要是疲劳可靠性设计问题，以及进一步阐述可靠性设计原理。第七章说明强度问题中

几种极小子样的统计处理方法，给出结构可靠性分析与设计的几种切实可行的办法。第八章为可靠性检验，介绍抽检原理与一种可用的检验方法。第九章介绍使用蒙特卡洛法进行结构可靠性分析。介绍蒙特卡洛法的一般原理。阐明结构可靠性分析使用蒙特卡洛法的必要性及其使用方法。该法是可靠性研究中的极其有益的方法。

本书的编写，本应按统计方法分类安排次序，但考虑到读者的兴趣和目的，故按专业内容分章分节。这样从统计上看有些重复，好在重复量很小。而从专业上看，比较集中，阅读方便，便于查找。

概括起来说，本书的特点是：着重于实验数据的分析整理，研究结构强度中常见问题的分散程度。统计变差系数，研究变差系数的应用。根据工程问题的特点，给出计算方法和分析方法。

本书给出的算式，省略了算式推导。对算式推导有兴趣的读者，请查找参考文献中有关资料。

由于作者水平有限，书中缺点错误难免。希望读者批评指正。

编写本书时，得到中国科学院学部委员胡海昌教授的鼓励和指导。得到国防科技大学季南教授的鼓励与帮助，并详细地校阅全部书稿，特表示感谢。

编写过程中，得到吴德隆、洪祖峻、马斌捷、袁方、李宪珊等同志的帮助。郑淑贞同志协助整理全部书稿，深表谢意。王敬春、王立祥同志，对本书出版给予了很大帮助，十分感谢。

# 目 录

## 前言

主要符号 .....	(1)
第一章 数理统计基本知识 .....	(2)
1.1 几个基本术语 .....	(2)
1.1.1 母体与个体 .....	(2)
1.1.2 样本 .....	(2)
1.1.3 事件 .....	(3)
1.1.4 概率 .....	(3)
1.1.5 随机性与确定性 .....	(4)
1.1.6 小概率原理 .....	(5)
1.2 统计参数 .....	(5)
1.2.1 平均值 .....	(6)
1.2.2 中值 $\bar{x}$ .....	(7)
1.2.3 众数 $\hat{x}$ .....	(7)
1.2.4 平均差 .....	(7)
1.2.5 标准偏差和方差 .....	(8)
1.2.6 变差系数 $C_V$ .....	(10)
1.2.7 中心距 .....	(10)
1.2.8 偏度 .....	(11)
1.3 几种常用的概率分布函数 .....	(12)
1.3.1 正态分布和对数正态分布 .....	(12)
1.3.2 $\chi^2$ 分布 .....	(17)
1.3.3 $t^2$ 分布 .....	(19)
1.3.4 $F$ 分布 .....	(23)
1.4 统计推断的基本方法 .....	(25)
1.4.1 基本问题 .....	(25)
1.4.2 显著度和差异显著性 .....	(26)



1.4.3	置信区间	(27)
1.4.4	一个正态母体的假设检验	(30)
1.4.5	两个正态母体的假设检验	(31)
1.5	样本相关系数	(33)
1.6	异常数据的取舍	(36)
1.6.1	格拉布斯 (Grubbs) 方法	(36)
1.6.2	肖维纳 (Chauvenet) 方法	(37)
1.6.3	$\sigma$ 检验	(38)
<b>第二章</b>	<b>数理统计在强度分析中的应用</b>	<b>(40)</b>
2.1	强度分析与统计分析	(41)
2.2	稳定性分析中的统计方法	(50)
2.2.1	统计方法的应用	(50)
2.2.2	单边容许限因子 $L_{p,\gamma}$ 的计算	(52)
2.3	界限值的确定	(56)
2.3.1	双边界限值的确定	(56)
2.3.2	单边界限值的确定	(58)
2.4	生产过程中处理焊接问题所用的统计方法	(59)
2.4.1	焊接试片性能和产品焊接性能之间的关系	(59)
2.4.2	产品不同批次间的焊接性能差异显著性判断	(60)
2.4.3	焊接性能达到预定值的可靠性	(62)
2.5	不同数据比较—成对成组比较法	(64)
2.5.1	成对比较法	(65)
2.5.2	成组比较法	(67)
2.6	一组数与标准值的比较	(68)
2.7	统计标准的确定	(69)
2.8	统计分析中遇到的几个问题	(72)
2.8.1	试样数量的确定	(72)
2.8.2	置信度 $\gamma$ 大小的选取	(73)
2.8.3	极值非参量法的使用	(64)
<b>第三章</b>	<b>疲劳试验结果的统计处理方法</b>	<b>(79)</b>
3.1	疲劳寿命的统计分布函数	(83)
3.1.1	疲劳寿命符合对数正态分布	(83)

3.1.2	疲劳寿命符合威布尔 (Weibull) 分布	(88)
3.2	单边容许限统计方法的应用	(90)
3.3	疲劳寿命的统计标准	(91)
3.4	$P-S-N$ 曲线的作法	(91)
3.4.1	作图法	(95)
3.4.2	解析法	(97)
3.4.3	经验统计法	(99)
3.5	不完全样本的统计—带不破坏试件的处理方法	(104)
3.6	母体平均值区间统计	(106)
3.7	平均应力对疲劳强度的影响	(107)
3.8	对比试验统计分析	(111)
3.8.1	成对对比试验	(112)
3.8.2	成组对比试验	(114)
<b>第四章</b>	<b>冲击、振动数据的统计</b>	<b>(117)</b>
4.1	冲击、振动条件的制订与数理统计	(118)
4.1.1	统计曲线代替包络线	(118)
4.1.2	对制订条件的要求	(119)
4.1.3	随机过程特性与统计方法	(120)
4.2	冲击、振动数据的统计方法	(122)
4.2.1	正态类型分布函数的使用	(122)
4.2.2	非正态分布函数变换成正态分布函数	(124)
4.2.3	瑞利 (Rayleigh) 分布	(127)
4.2.4	冈贝尔 (Gumbel) 极值分布	(129)
4.2.5	皮尔逊 (Pearson) III 型分布函数应用	(130)
4.3	实例统计分析	(137)
4.3.1	53 台燃烧室的测试结果	(135)
4.3.2	某一类型发动机历次试车数据的综合 (大样本)	(135)
4.3.3	小样本的统计结果	(146)
4.4	统计概率标准的确定	(146)
4.4.1	统计概率标准	(146)
4.4.2	扩大样本数 $N$ 的一种方法	(149)
4.4.3	统计标准的一个应用实例	(150)

4.5	正弦试验和随机试验的等效问题	(153)
<b>第五章</b>	<b>结构可靠性分析与设计</b>	<b>(158)</b>
5.1	结构可靠性设计指标的确定	(159)
5.2	结构可靠性设计方法	(161)
5.2.1	结构可靠性设计简述	(161)
5.2.2	标准偏差 $s$ 和变差系数 $C_v$ 的代数运算	(164)
5.2.3	可靠性设计举例	(167)
5.3	变差系数分析	(171)
5.4	可靠性安全系数的引入	(182)
5.5	压力容器可靠性设计	(189)
5.5.1	假定壳体上没有缺陷的可靠性设计	(190)
5.5.2	假定壳体上有缺陷, 必须用断裂力学的可靠性设计	(192)
5.5.3	采用可靠性安全系数的设计方法	(194)
5.6	受轴压或受外压作用的光圆筒壳的可靠性设计	(195)
5.7	“共振”式机械的可靠性设计	(199)
<b>第六章</b>	<b>结构动力可靠性设计</b>	<b>(205)</b>
6.1	结构材料在动载荷下的断裂特性	(207)
6.2	壳体动临界强度(动力失稳)设计	(213)
6.3	疲劳强度和疲劳寿命的可靠性计算	(218)
6.3.1	疲劳问题可靠性设计原理	(218)
6.3.2	给定疲劳载荷时的疲劳寿命的可靠性计算	(221)
6.3.3	构件在不变的循环应力作用下, 并给定工作循环数的 对数正态分布时的可靠性	(223)
6.3.4	给定构件循环寿命和工作应力的正态分布, 计算其可靠性	(223)
6.3.5	一个试件疲劳循环 $N_1$ 转后, 再疲劳循环 $N$ 转时的 可靠性	(227)
6.4	顺序累积疲劳可靠性计算	(228)
6.5	几个问题	(234)
6.5.1	结构动力可靠性设计的具体方法	(234)
6.5.2	动应力的计算	(235)
6.5.3	结构设计方法	(235)

<b>第七章 强度问题中几种小子样、极小子样的</b>	
<b>工程统计处理方法</b> .....	(238)
7.1 同类母体综合法 .....	(239)
7.2 计算公式串联法 .....	(242)
7.3 母体子因素测试结果综合法 .....	(248)
7.4 相近母体归一法 .....	(252)
7.5 使用历史数据进行统计分析 .....	(253)
7.6 使用最小二乘法, 将零散的试验数据集中起来, 统计特征参数 .....	(255)
7.7 综合判断法 .....	(260)
7.8 已知部分母体信息的结构可靠性评估 .....	(262)
<b>第八章 可靠性检验</b> .....	(269)
8.1 抽样检验的基本原理 .....	(269)
8.1.1 抽检的理想特性曲线 .....	(270)
8.1.2 两种错误判断 .....	(272)
8.1.3 <i>OC</i> 函数或抽检特征函数 .....	(272)
8.2 检验方案的选择 .....	(276)
8.2.1 检验方案1 .....	(277)
8.2.2 检验方案2 .....	(279)
8.2.3 检验方案3 .....	(281)
8.2.4 三种检验方案的比较 .....	(283)
8.2.5 检验方案2和可靠性安全系数的关系 .....	(284)
8.3 单件、双件结构强度试验后的可靠性评定 .....	(286)
8.4 零部件加工过程中的检验 .....	(291)
8.4.1 逐道工序检验 .....	(292)
8.4.2 质量控制图法 .....	(293)
8.4.3 计数抽样检验 .....	(294)
<b>第九章 使用蒙特卡洛法进行结构可靠性分析</b> .....	(298)
9.1 蒙特卡洛法简介 .....	(298)
9.2 随机数的产生 .....	(301)
9.2.1 取中方法 .....	(301)
9.2.2 乘同余法 .....	(302)

9.2.3	乘加同余法	(303)
9.2.4	加同余法	(305)
9.2.5	随机数表的使用	(305)
9.2.6	准随机数	(305)
9.3	随机数的使用	(305)
9.3.1	直接抽样法	(306)
9.3.2	变换抽样法	(307)
9.4	蒙特卡洛法应用举例	(309)
9.5	疲劳裂纹扩展速率的蒙特卡洛法模拟	(318)
9.5.1	疲劳本构关系和各参数的分布	(319)
9.5.2	确定 $n$ 、 $c$ 的分布函数	(324)
9.5.3	考查 $n$ 、 $c$ 的相关性	(328)
9.5.4	确定 $\frac{da}{dN}$ 的分布和概率限	(330)
9.6	蒙特卡洛法解题的一般步骤	(333)
<b>结束语</b>		(335)
<b>参考文献</b>		(338)
<b>附录</b>		(342)
<b>附表：常用统计数值表</b>		(348)

# 主要符号

$P$	概率
$p_i$	合格品率
$q$	不合格品率
$\bar{x}, s, n$	分别为样本平均值, 标准偏差和样本个数, 对一个给定的样本组 $x_1, x_2, \dots, x_n$ ,
	$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$
$\mu, \sigma$	分别为母体平均值 (或数学期望)、标准偏差
$C_V$	变差系数 $C_V = \frac{s}{\bar{x}}$ 或 $C_V = \frac{\sigma}{\mu}$
$F(x)$	分布函数
$f(x), \varphi(x)$	概率密度函数
$L_{p, \gamma}$	给定置信度 $\gamma$ , 概率 $P$ 的单边容许限因子
$u$	给定概率 $P$ 的概率系数
$\alpha$	显著度或犯第一类错误的概率
$P_S, P_S$	分别为结构强度和强度平均值
$P_L, P_L$	分别为结构所受的载荷和载荷平均值
$C_{V_S}, C_{V_L}$	分别为强度和载荷的变差系数
$\sigma_b, \sigma_s$	分别为材料的拉伸强度极限, 屈服极限
$S$	疲劳应力
$N$	疲劳应力循环数或样本数
$p$	容器内压
$\sigma$	应力
$\delta$	壳体壁厚、板厚

# 第一章 数理统计基本知识

## 1.1 几个基本术语

### 1.1.1 母体与个体

母体也叫总体，是指研究对象的全体。个体是指母体中的一个基本单位。比如研究一批焊接试片的焊接强度 $\sigma_{b_{焊}}$ ，这批 $\sigma_{b_{焊}}$ 数值的全体构成一个母体，而这批中某一个试片的 $\sigma_{b_{焊}}$ 值则是个体。母体的性质是由个体性质综合而成的。母体中各个个体产生的条件相同。

### 1.1.2 样本

样本也叫子样，是由母体中抽出的部分个体组成的。因此，样本和母体具有同一分布。统计分析时，要求样本中各个个体互相独立。样本中包含个体的数量叫样本数量或样本容量，常用 $n$ 表示。母体的性质都从样本的分析、推测求得。用样本研究母体的理由有四：①一定数量的样本能够反映母体的某一性质。研究母体的不同性质可以使用（或者需要）不同的样本数量。②母体可能包含许多个体，亦可能近似无限多个，因此不可能研究所有个体，只能研究部分个体。③某些产品批量不大，对产品性能的研究带有破坏性，如壳体强度，若测定每个壳体强度，则产品不复存在。④一批产品是否合格，或者产品是否投产，要看样本的统计特性是否符合要求而定。

在进行强度研究时，专供试验用的零部件，或者为了鉴定某个零部件的强度而生产的模拟件，通常叫做试件。一个试件的强度试验值就相当一个个体。一组试件强度试验值构成一个样本。

如样本数量 $n=5$ ，即表示样本包含5个强度试验值。

为了分析方便，一般样本数量不宜太大。实际工作中，样本数量和批量是有关的。当批量很大时，为了检查方便，及时控制质量，往往将大批量化成小批量，再从中抽取样本进行计算分析。将大批量化成小批量，不仅分析方便，产品质量控制及时，产品也容易通过。即样本数量越大，不合格品出现机会越多。批量小，样本数量少，不合格品不易出现。

### 1.1.3 事件

一次独立试验的结果叫做一个事件。更一般的讲，产品在研究、设计、生产使用中出现的某些现象、状态，其试验测试结果叫做事件。当试验时，某一事件可能发生，亦可能不发生，或者说，在一定条件下，可能出现也可能不出现的事件，则称此事件为随机事件。如发动机研制阶段，发动机试车时，管路可能破坏亦可能不破坏。出现管路破坏的情况，是一个随机事件。若某一事件在试验时必然发生，则叫做必然事件，如长圆柱壳受轴压作用，如果破坏，则一定是失稳破坏，就是一个必然事件。若某一事件在试验中永远不可能发生，则称之为不可能事件。如长圆柱壳受轴压作用时的临界应力 $\sigma$ 大于强度极限 $\sigma_b$ 就是不可能事件。

### 1.1.4 概率

粗略地讲，事件出现可能性的度量就是概率。例如，某一类试验，试验中有 $n$ 个可能发生的情况，每个情况的出现都是等可能性。试验中，有 $m$ 个情况使事件 $A$ 发生，则说事件 $A$ 发生的概率为

$$P(A) = \frac{m}{n}$$

概率的统计定义，是以大量的重复性试验或统计资料为基础的。设在 $n$ 次试验中，如果事件 $A$ 发生 $m$ 次，则比值 $m/n$ 叫做事件



$A$ 发生的频率。当试验次数足够多时，可以把频率 $m/n$ 作为事件 $A$ 发生的概率 $P(A)$ 近似值。由此可知， $P(A)$ 具有下列性质：

$$0 \leq P(A) \leq 1$$

$P(A) = 1$ ，表示必然事件一定发生。

$P(A) = 0$ ，表示不可能事件一定不发生。

### 1.1.5 随机性与确定性

物理量可以分为确定性的和随机性的两类。确定性是指一个量被另外一些量唯一地确定。一个给定的拉伸试片，在拉力 $B$ 作用下，试片内部应力 $\sigma$ 由 $B$ 唯一地确定。 $\sigma$ 和 $B$ 之间的算式为

$$\sigma = \frac{B}{F}$$

式中  $F$ ——试片横断面面积。

或者，确定性的量是能够用明确的数学关系式描述的。量。 $\sigma$ 和 $B$ 之间，就有明确的数学关系式。又如，一物体从高处自由下落，当物体在真空中运动时，下落距离 $S$ 和运动时间的算式为

$$S = \frac{1}{2}gt^2$$

式中  $g$ ——重力加速度。时间 $t$ 给定后， $S$ 就被唯一地确定。

和确定性相对应的是随机性。所谓随机性，是指前一次观测值不能预测下一次观测值，而只能预测下次观测值的范围。换句话说，随机变量取什么值不能在试验前得知，而在试验后确定。或者观测值随时间变化，没有一定的规律。许多物理量都具有随机性。一个量具有随机性且服从某一分布规律，则称随机变量。一般工程中的量都是随机变量。例如，发动机燃烧室内的脉动压力，飞行器受的风载，结构或材料的疲劳寿命，圆柱壳在轴压或外压作用下的临界应力等。这些量的实测值，必需用统计方法描述，即不仅要看它们的平均值，亦要计及它们的分散度。

有些物理量，分散度小，它的随机性常常不被人们重视，如