RSE

制造业可靠性系统工程标准

STANDARD OF RELIABILITY SYSTEMS ENGINEERING FOR MANUFACTURING ENTERPRISES

RSE-STD-12107 2023

金属材料 疲劳试验

小样本数据统计方案与分析方法

Metallic materials - Fatigue testing – Small Sample Statistical planning and analysis of data

（征求意见稿）

中国可靠性网
www.kekaoxing.com

2023-xx-xx 发布

深圳市为民可靠性系统工程研究院

目　录

前　　言

本标准由深圳市为民可靠性系统工程研究院提出并发起编制。

本标准起草单位：北京航空航天大学、深圳市为民可靠性系统工程研究院、北京蓝威技术有限公司、台州学院、中国兵器装备集团兵器装备研究所、中国航空发动机研究院、北方科技信息研究所。

本标准主要起草人：祖天培、康锐、陈云霞、文美林、廖伟骏、李沛萱、阮进喜、王羽佳、金毅、沙金龙、吴长波、王佰智、康晓明。

金属材料 疲劳试验

小样本数据统计方案与分析方法

1 范围

本标准提供了在不同应力水平下，利用线性关系在合适的坐标下统计、分析金属材料的疲劳寿命特征的方法，具体包括 $\alpha - S - N$ 曲线的统计估计方法、给定应力下疲劳寿命的统计估计方法以及在确定 $\alpha - S - N$ 曲线后对给定疲劳寿命下的疲劳强度进行统计估计的方法。

本标准适用于在小样本条件下单一疲劳失效机理而展现出的均匀特性金属材料疲劳数据的统计与分析。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

RSE-STD-451 确信可靠性术语与定义

3 术语和定义

3.1 与不确定理论相关的术语

3.1.1

信度 belief degree

相信事情发生的程度。

3.1.2

不确定变量 uncertain variable

符合不确定测度的变量。

3.1.3

不确定分布 uncertainty distribution

对于任意给出的一个值，可以给出不确定变量小于等于该值的信度的函数。

3.1.4

不确定变量的期望 expected value of uncertain variable

不确定变量的平均值。

3.1.5

不确定变量的标准偏差 standard deviation uncertain variable

不确定变量其方差的正方根值。

3.1.6

不确定变量的变异因子 variation coefficient uncertain variable

不确定变量标准偏差与期望的比值。

3.2 与疲劳试验相关的术语

3.2.1

试样 specimen

按照预定的形状和尺寸用于单一测试的材料的一部分。

3.2.2

应力水平 stress level

在试验控制条件的应力强度。例如：应力幅值、最大应力和应力范围。

3.2.3

疲劳寿命 fatigue life

在指定的应力水平下，试样达到定义的失效规范之前所经历的应力循环数。

3.2.4

对数疲劳寿命 logarithmic fatigue life

疲劳寿命的对数值，本标准采用以 10 为底的对数。

3.2.5

疲劳强度 fatigue strength

指定疲劳寿命下，试验发生失效时的应力水平值。

3.2.6

对数疲劳强度 fatigue strength

疲劳强度的对数值，本标准采用以 10 为底的对数。

3.2.7

$\alpha-S-N$ **曲线** $\alpha-S-N$ curve

描述疲劳寿命与应力水平之间关系的等信度曲线，一般用以描述金属材料高周疲劳特性。

4 符号

a ——Basquin 公式中的线性参数 A 的对数值，即 $a=\log A$；

$\hat{a}_l$ ——参数 a 在第 l 个信度下的估计值，$l=1,2,...,5$。

b ——Basquin 公式中的指数参数 B 的对数值，即 $b=\log B$；

$\hat{b}_l$ ——参数 b 在第 l 个信度下的估计值，$l=1,2,...,5$；

$d_1,d_2,\ldots,d_n$ ——升序排列的观测数据，满足 $d_1\le d_2\le\cdots\le d_n$；

n ——观测数据的数量；

p ——应力水平个数；

q ——每个应力水平下的试样个数；

x ——对数疲劳寿命；

x_{ij} ——第 i 个应力水平下第 j 个试样的对数应力循环数，$i=1,2,\ldots,p$，$j=1,2,\ldots,q$；

$\tilde{x}_{ik}$ ——第 i 个应力水平下第 k 个等效对数应力循环数，$i=1,2,\ldots,p$，$k=1,2,\ldots,Q$；

y ——对数疲劳强度；

y_i ——第 i 个对数应力水平，$i=1,2,\ldots,p$；

$\bar{y}$——对数应力水平的平均值，其计算公式为：$\bar{y}=\sum^{p} y_i / p$，$i=1,2,...,p$；

A ——Basquin 公式中的线性参数；

B ——Basquin 公式中的指数参数；

N ——疲劳寿命；

N_{ij} ——第 i 个应力水平下第 j 个试样的应力循环数，$i=1,2,\ldots,p$，$j=1,2,\ldots,q$；

Q ——各应力水平下试样个数之和；

S ——应力水平；

S_i ——第 i 个应力水平，$i=1,2,\ldots,p$；

S_0 ——给定条件下的应力水平；

α ——信度；

α_{ij} ——对数应力循环数 x_{ij} 对应的信度，$i=1,2,...,p,\ j=1,2,...,q$；

$\tilde{\alpha}_k$ ——第 k 个对数应力循环数对应的信度，$k=1,2,\ldots,Q$；

$\hat{\alpha}_l$ ——绘制 $\alpha-S-N$ 曲线时的第 l 个信度值，$l=1,2,\ldots,5$；

$\hat{\alpha}_0$ ——给定应力水平下的给定信度；

ε ——平移量，若 $d_1>0$，则 $\varepsilon=0$；若 $d_1\le 0$，则 $\varepsilon=0.1\times|d_1|-d_1$；

μ ——不确定分布的期望；

$\hat{\mu}_i$ ——第 i 个对数应力水平下对数疲劳寿命期望估计值，$i=1,2,...,p$；

$\tilde{\mu}_i$ ——第 i 个对数应力水平下等效对数疲劳寿命期望估计值，$i=1,2,...,p$；

μ_x ——对数疲劳寿命的平均值；

μ_x^0 ——给定应力水平 S_0 对数疲劳寿命的期望；

$\hat{\mu}_x^0$ ——给定应力水平 S_0 下等效对数疲劳寿命的期望估计值；

μ_y ——对数疲劳强度的期望；

$\hat{\mu}_y^0$ ——给定疲劳寿命 N_0 下的对数疲劳强度的期望估计值；

σ ——不确定分布的标准偏差；

$\hat{\sigma}_i$ ——第 i 个对数应力水平下对数疲劳寿命标准偏差估计值，$i=1,2,...,p$；

$\tilde{\sigma}_i$ ——第 i 个对数应力水平下等效对数疲劳寿命标准偏差估计值，$i=1,2,...,p$；

$\tilde{\sigma}_i^*$ ——第 i 个对数应力水平下调匀等效对数疲劳寿命标准偏差估计值，$i=1,2,...,p$；

σ_x ——对数疲劳寿命的标准偏差；

σ_x^0 ——给定应力水平 S_0 对数疲劳寿命的标准偏差；

$\hat{\sigma}_x^0$ ——给定应力水平 S_0 对数疲劳寿命的标准偏差估计值；

$\hat{\sigma}_x^*$ ——给定应力水平 S_0 对数疲劳寿命的调整标准偏差估计值；

σ_y ——对数疲劳强度的标准偏差；

$\hat{\sigma}_y^0$ ——给定疲劳寿命 N_0 下的对数疲劳强度的标准偏差估计值；

τ_{li} ——第 l 个信度下第 i 个应力水平下对应的等效对数疲劳寿命数据分位值，$i=1,2,...,p$， $l=1,2,...,5$；

$\overline{\tau}_l$ ——第 l 个信度下等效对数疲劳寿命数据分位值的平均值，其计算公式为：$\overline{\tau}_l=\sum^p \tau_{li}/p$， $i=1,2,...,p$， $l=1,2,...,5$；

τ_α^0 ——信度 $\hat{\alpha}_0$ 对应的给定应力水平 S_0 下的分位对数疲劳寿命数据；

η_α^0 ——信度 $\hat{\alpha}^0$ 对应的给定疲劳寿命 N_0 下的分位对数疲劳强度数据；

$\xi_1,\xi_2,\dots,\xi_n$ ——升序排列的正观测数据，满足 $\xi_1\le\xi_2\le\cdots\le\xi_n$；

υ_i ——第 i 个对数应力水平下变异因子的值，$i=1,2,...,p$；

$\overline{\upsilon}$ ——等效对数疲劳寿命变异因子的平均值，$i=1,2,...,p$；

$\tilde{A}$ ——升序信度集，$\tilde{A}=\{a_1,a_2,\mathrm{K}\ ,a_k,\mathrm{K}\ a_Q\}$；

$\Phi(\cdot)$ ——不确定分布；

$\Phi_x(x)$——疲劳寿命分布；

$\Phi_x^0(x)$——给定应力水平 S_0 下的对数疲劳寿命分布；

$\Phi_y(y)$——疲劳强度分布；

$\Phi_y^0(y)$——给定疲劳寿命 N_0 下对数疲劳强度的分布。

5 通用要求

5.1 统计分析目的

金属材料疲劳试验小样本数据统计分析方法的目的为：

(1) 合理分析与估计金属材料疲劳性能及其分散性；

(2) 合理分析与估计金属材料给定应力水平下的疲劳寿命及其分散性；

(3) 合理分析与估计金属材料给定寿命下的疲劳强度及其分散性；

5.2 统计分析大纲

对金属材料的疲劳性能进行统计分析前，应制定统计分析大纲，以保证统计分析方法的实施. 统计分析大纲应至少包括以下内容：

(1) 统计分析目的；

(2) 统计分析对象；

(3) 统计分析方案；

(4) 统计分析方法；

(5) 统计分析报告要求等。

5.3 统计分析报告

5.3.1 分析结果的表达

(1) 总则

根据所分析的试验类型，分析报告包括 $a-S-N$ 曲线、给定应力下的疲劳寿命和给定寿命下的疲劳强度等信息。

(2) $a-S-N$ 曲线

a) 针对每个试样的应力水平和循环次数的数据表。

b) 给定信度 α 下的 $\alpha-S-N$ 曲线。

(3) 给定应力下的疲劳寿命

a) 采用的统计分析方案；

b) 给定的应力水平、对应的疲劳寿命的平均值及对数疲劳寿命的标准偏差；

c) 每支试样在指定应力水平下的疲劳寿命数据，以观察失效或非失效。

(4) 给定寿命下的疲劳强度

a) 采用的统计分析方案；

b) 给定的疲劳寿命、对应的疲劳强度的平均值及对数疲劳强度的标准偏差；

c) 每支试样在指定疲劳寿命下的疲劳强度数据，以观察失效或非失效。

5.3.2 相关信息

(1) 被测材料

统计分析报告中应包括被测材料信息，例如材料牌号、加工工艺、化学成分、热处理、显微结构和力学性能等。

(2) 被测试样

统计分析报告中应该报被测试样的信息，例如试样编号，试样尺寸、试样相对于材料的加工取向、表面状态等。

(3) 疲劳试验的条件

统计分析报告中硬包包括疲劳试验条件的信息，例如应力类型或应变，应力比或其他试验过程的特征参数，应力波形，试验频率，失效定义，试验环境等。

6 详细要求

6.1 统计分析对象

6.1.1 试样抽取的基本要求

(1) 抽样前，应首先确定所要分析疲劳性能的材料的总体。

(2) 应从总体中随机抽取样本，从总体中选取的样本应能准确代表总体的疲劳特征。

(3) 如果总体呈现出明显的批次性特征，那么抽样时应根据每一批次的数量按比例随机抽取试样。

(4) 如果总体呈现出时序性特征，例如，总体的疲劳性能与生产日期相关，那么总体就应根据生产日期被划分为若干个组。抽样时应根据组每组的数量按比例抽取试样。

(5) 按照批次性特征或时序性特征将总体划分为若干组后，有时组内的特征差异与组间的特征差异同样重要。如果可以根据经验判断考虑组内的特征差异的必要性，那么，抽样时需进一步考虑组内的特征差异性。

6.1.2 试样分配的基本要求

(1) 为减少不必要的统计偏差，试样应随机分配给每个疲劳试验，并且随机安排试验的次序。

(2) 当使用多台试验机并行进行疲劳试验时，应在试验前校验试验机以保证疲劳试验结果的等同性。在进行试验时，应保证台试验机测试的试样数相等或接近相等，试样的试验次序是随机安排的。

(3) 当统计方案包含几个独立的试验序列时，例如在不同应力水平下测试材料的疲劳性能或在同一应力水平下比较不同材料的疲劳性能，每一试验序列应尽可能在相同或相近的试验速率下进行，以保证所有试验序列尽可能在同一时间完成。

6.2 统计分析方案

为准确合理地进行金属材料小样本疲劳试验，应根据疲劳试验情况灵活选择统计方案：

(1) 本标准建议多应力试验应在 3~5 应力水平下进行，建议每应力水平下试样样本数应不少于 3 个，推荐数量为 7 个，总样本数不多于 30 个。

(2) 本标准建议单应力水平疲劳试验方案下试样数目不少于 7 个，不多于 30 个。

6.3 统计分析方法

6.3.1 $\alpha-S-N$ 曲线的统计估计

通过对 $\alpha-S-N$ 曲线进行统计估计，可获取金属材料疲劳寿命与应力水平之间关系及其分散性，为后续给定应力下疲劳寿命的统计估计以及给定疲劳寿命下的疲劳强度的统计估计奠定基础。其基本步骤为：

(1) 疲劳试验原始数据的整理：将疲劳试验原始数据整理至疲劳试验原始数据记录表，如表 1 所示。

表 1　疲劳试验原始数据记录表

应力水平		试样应力循环数			
符号	数值/Mpa	1	2	⋯	q
S_1		N_{11}	N_{12}	⋯	N_{1q}
S_2		N_{21}	N_{22}	⋯	N_{2q}
⋯		⋮	⋮		⋮
S_p		N_{p1}	N_{p2}	⋯	N_{pq}

(a) 疲劳试验原始记录表中，各应力水平下的发生疲劳失效的试样个数可能相同，也可能不同。个数不同时按照最大个数绘制疲劳试验原始记录表。本标准仅展示个数相同的情况。

(b) 疲劳试验原始记录表中，应力水平按从大到小记录，即符号 S_1 对应最大应力水平。

(c) 疲劳试验原始记录表中，各应力水平下试样的应力循环数按从小到大的顺序填入，即标号“1”对应该应力水平下试样的最小应力循环数。

(2) 疲劳数据的转换：应根据疲劳寿命的分布情况对疲劳数据进行转换，例如，当认

为对数疲劳寿命服从正态不确定分布时，需要对疲劳试验原始数据进行以 10 为底对数变换，并将数据填入疲劳试验数据对数转换表，如资料性附录 A 中表 A.1 所示。

(3) 疲劳寿命计算：根据寿命分布类型，选择合适的计算工具，根据疲劳数据或转换后的疲劳数据计算疲劳寿命的分布参数。

(4) 信度计算：根据确定的疲劳寿命分布，计算各应力水平下疲劳寿命数据对应的信度，并将所有的信度重新排列，组成升序信度集 $\tilde{A}$ ，$\tilde{A} = \left\{a_1, a_2, \cdots, a_k, \cdots a_Q\right\}$。

(5) 等效疲劳寿命数据的计算：根据确定的疲劳寿命分布，计算各应力水平下升序信度集对应的等效疲劳寿命数据。

(6) 调匀等效疲劳寿命分布的计算：依据等效疲劳寿命数据，计算等效寿命分布，并依据应力水平对分布参数进行调整，得到调匀等效疲劳寿命分布。

(7) $\alpha - S - N$ 曲线参数的统计分析：结合 $S - N$ 曲线的基本形式，选择合适的统计估计方法，分别获得 a 取值为 0.05，0.10，0.50，0.90，0.95 时的 $\alpha - S - N$ 曲线。

(8) $\alpha - S - N$ 曲线的绘制：根据 $\alpha - S - N$ 曲线参数的统计分析，绘制 $\alpha - S - N$ 曲线。

6.3.2 给定应力下疲劳寿命的统计估计

根据疲劳试验中应力水平数的不同，给定应力下疲劳寿命的统计估计可以分为多应力水平下给定应力下疲劳寿命的统计估计方法和单应力水平下给定应力下疲劳寿命的统计估计方法两类。

(1) 多应力水平下给定应力下疲劳寿命的统计估计方法：首先按照 6.3.1 中的(1)至(6)步对多应力水平下疲劳寿命数据进行融合，并得到给定应力水平下的调匀等效疲劳寿命分布，最后据此分布，计算各项可靠性指标。

(2) 单应力水平下给定应力下疲劳寿命的统计估计方法：首先按照 6.3.1 中的(1)至(3)步得到给定应力水平下的疲劳寿命分布，并据此分布，计算各项所需指标。

6.3.3 给定疲劳寿命下疲劳强度的统计估计

在进行 $\alpha - S - N$ 曲线的统计估计后，可根据需要，进行给定疲劳寿命下疲劳强度的统计估计，具体步骤为：

(1) 根据 6.3.1 中的(1)至(7)步获得 $\alpha - S - N$ 曲线。

(2) 将给定的疲劳寿命带入上一步中获得的 $\alpha - S - N$ 曲线，分别得到疲劳强度的 0.05，0.10，0.50，0.90，0.95 分位值。

(3) 选择合适的方法，根据疲劳强度的分位值获取疲劳强度分布，并据此分布，计算各项所需指标。

附 录 A

（资料性附录）

$\alpha-S-N$曲线的统计估计（对数正态分布型）

A.1 概述

本资料性附录介绍当对数疲劳寿命服从正态分布时，在双对数坐标轴下，基于 Basquin 公式的$\alpha-S-N$统计估计流程及方法。

A.2 疲劳试验数据对数转换

将疲劳试验原始数据记录表中的数据进行以 10 为底对数变换，并将结果填入疲劳试验数据对数转换表，如表 A.1 所示。

表 A.1 疲劳试验数据对数转换表

对数应力水平		试样的对数应力循环数			
符号	数值/Mpa	1	2	…	q
y_1		x_{11}	x_{12}	…	x_{1q}
y_2		x_{21}	x_{22}	…	x_{2q}
…		⋮	⋮		⋮
y_p		x_{p1}	x_{p2}	…	x_{pq}

表中，对数应力水平 $y_i=\log_{10}S_i$ $(i=1,2,\ldots p)$，试样的对数应力循环数 $x_{ij}=\log_{10}N_{ij}$ $(i=1,2,\ldots p\ ,\ j=1,2,\ldots,q)$。

A.3 疲劳寿命计算

利用修匀公式（参见附录 D）计算各应力水平下的对数疲劳寿命的平均值和标准偏差，并填入对数疲劳寿命平均值和标准偏差计算表，如表 A.2 所示。

表 A.2 对数疲劳寿命平均值和标准偏差计算表

对数应力水平	对数疲劳寿命 期望估计值	对数疲劳寿命 标准偏差估计值
y_1	$\hat{\mu}_1$	$\hat{\sigma}_1$
y_2	$\hat{\mu}_2$	$\hat{\sigma}_2$
…	…	…
y_p	$\hat{\mu}_p$	$\hat{\sigma}_p$

A.4 信度计算

信度的计算公式为：

$$\alpha_{ij}=\Phi\left(x_{ij}\right)=\left(1+\exp\left(\frac{\pi\left(\hat{\mu}_i-x_{ij}\right)}{\sqrt{3}\hat{\sigma}_i}\right)\right)^{-1}\quad\left(i=1,2,\ldots,p,\ j=1,2,\ldots,q\right)\tag{A.1}$$

式中：

x_{ij}——对数应力水平 y_i 下第 j 个对数应力循环数，$i=1,2,\ldots,p,\ j=1,2,\ldots,q$；

α_{ij}——对数应力循环数 x_{ij} 对应的信度，$i=1,2,\ldots,p,\ j=1,2,\ldots,q$；

$\Phi(\cdot)$——正态不确定分布；

$\hat{\mu}_i$——对数应力水平 y_i 下对数疲劳寿命期望估计值，$i=1,2,...,p$；

$\hat{\sigma}_i$——对数应力水平 y_i 下对数疲劳寿命标准偏差估计值，$i=1,2,...,p$。

利用公式(A.1)计算各应力水平下的对数应力循环数对应的信度，填入信度统计表，如表 A.3 所示。

表 A.3　疲劳试验数据对数转换表

对数应力水平	信 度			
	1	2	…	q
y_1	α_{11}	α_{12}	…	α_{1q}
y_2	α_{21}	α_{22}	…	α_{2q}
…	⋮	⋮		⋮
y_p	α_{p1}	α_{p2}	…	α_{pq}

将表 A.3 中所有信度按从小到大的顺序重新排列，记作 $\tilde{\alpha}_k(k=1,2,...,Q)$。$Q$ 为表 1 中数据“应力循环数”数据的总数。

A.5 计算等效对数疲劳寿命

等效对数疲劳寿命的计算公式为：

$$\tilde{x}_{ik}=\hat{\mu}_i+\frac{\sqrt{3}\hat{\sigma}_i}{\pi}\ln\left(\frac{\tilde{\alpha}_k}{1-\tilde{\alpha}_k}\right)\ \left(i=1,2,...,p,\ k=1,2,...,Q\right) \tag{A.2}$$

式中：

$\tilde{x}_{ik}$——对数应力水平 y_i 下第 k 个等效对数应力循环数，$i=1,2,...,p$，$k=1,2,...,Q$；

$\hat{\mu}_i$——对数应力水平 y_i 下对数疲劳寿命期望估计值，$i=1,2,...,p$；

$\hat{\sigma}_i$——对数应力水平 y_i 下对数疲劳寿命期望估计值，$i=1,2,...,p$；

$\tilde{\alpha}_k$——对数应力水平 y_i 下的第 k 个信度，$i=1,2,...,p$，$k=1,2,...,Q$。

利用公式(A.2)计算等效对数疲劳寿命，将结果填入等效对数疲劳寿命表，如表 A.4 所示。

表 A.4　等效对数疲劳寿命表

对数应力水平	等效对数疲劳寿命			
	1	2	…	Q
y_1	$\tilde{x}_{11}$	$\tilde{x}_{12}$	…	$\tilde{x}_{1Q}$
y_2	$\tilde{x}_{21}$	$\tilde{x}_{22}$	…	$\tilde{x}_{2Q}$
…	⋮	⋮		⋮
y_p	$\tilde{x}_{p1}$	$\tilde{x}_{p2}$	…	$\tilde{x}_{pQ}$

A.6 调匀等效疲劳寿命分布的计算

利用修匀公式（参见附录 D）和表 A.5 中数据，计算等效对数疲劳寿命的期望估计值、标准偏差估计值和变异因子，并将结果填入对数疲劳寿命期望机制、标准偏差估计值和变异因子计算表，如表 A.5 所示。

表 A.5　等效对数疲劳寿命表

对数应力水平	等效对数疲劳寿命期望估计值	等效对数疲劳寿命标准偏差估计值	等效对数疲劳寿命变异因子	变异因子的平均值
y_1	$\tilde{\mu}_1$	$\tilde{\sigma}_1$	υ_1	$\bar{\upsilon}$
y_2	$\tilde{\mu}_2$	$\tilde{\sigma}_2$	υ_2	
…	…	…	…	
y_p	$\tilde{\mu}_p$	$\tilde{\sigma}_p$	υ_p	

表中，变异因子的平均值的计算公式为：

$$\bar{\upsilon} = \frac{1}{p}\sum_{i}^{p}\upsilon_i \tag{A.3}$$

式中：

$\bar{\upsilon}$ ——等效对数疲劳寿命变异因子的平均值，$i=1,2,...,p$；

υ_i ——对数应力水平 y_i 下变异因子的值，$i=1,2,...,p$。

利用标准偏差调整公式计算调整后标准偏差。标准偏差调整公式为：

$$\tilde{\sigma}_i^* = \bar{\upsilon} \times \tilde{\mu}_i \tag{A.4}$$

式中：

$\tilde{\sigma}_i^*$ ——对数应力水平 y_i 下等效对数疲劳寿命的调整后标准偏差，$i=1,2,...,p$；

$\bar{\upsilon}$ ——等效对数疲劳寿命变异因子的平均值；

$\tilde{\mu}_i$ ——对数应力水平 y_i 下等效对数疲劳寿命的期望估计值，$i=1,2,...,p$。

因此，调匀等效对数疲劳寿命分布为：

$$F(x) = \left\{1 + \exp\left[\frac{\pi(\hat{\mu}_i - x)}{\sqrt{3}\hat{\sigma}_i^*}\right]\right\}^{-1}$$

式中：

$\tilde{\sigma}_i^*$ ——对数应力水平 y_i 下等效对数疲劳寿命的调整后标准偏差，$i=1,2,...,p$；

$\tilde{\mu}_i$ ——对数应力水平 y_i 下等效对数疲劳寿命的期望估计值，$i=1,2,...,p$。

A.7 计算 $\alpha-S-N$ 曲线

A.7.1　确定信度值

本标准建议绘制 $\alpha-S-N$ 曲线的所需信度值为 0.05，0.10，0.50，0.90，0.95。

A.7.2　计算等效对数疲劳寿命分位值

根据上述确定的信度值，利用公式(A.5)计算各应力水平下该信度对应的对数疲劳寿命分位值，并填入信度-分位对数疲劳寿命表，如表 A.6 所示。

分位对数疲劳寿命的计算公式为：

$$\tau_{li} = \tilde{\mu}_i + \frac{\sqrt{3}\hat{\sigma}_i^*}{\pi}\ln\left(\frac{\hat{\alpha}_l}{1-\hat{\alpha}_l}\right)\ (i=1,2,...,p,\ l=1,2,...,5) \tag{A.5}$$

式中：

$\hat{\alpha}_l$ ——绘制 $\alpha-S-N$ 曲线所需信度值，$l=1,2,...,5$；

τ_{li} ——给定信度 $\hat{\alpha}_l$ 时对数应力水平 y_i 下的等效对数疲劳寿命分位值，$i=1,2,...,p$，$l=1,2,...,5$；

$\tilde{\mu}_i$ ——对数应力水平 y_i 下等效对数疲劳寿命的期望估计值，$i=1,2,...,p$；

$\tilde{\sigma}_i^*$ ——对数应力水平 y_i 下等效对数疲劳寿命的调整后标准偏差，$i=1,2,...,p$。

表 A.6 信度-分位等效对数疲劳寿命表

对数应力水平	信度				
	$\hat{\alpha}_1=0.05$	$\hat{\alpha}_2=0.10$	$\hat{\alpha}_3=0.50$	$\hat{\alpha}_4=0.90$	$\hat{\alpha}_5=0.95$
y_1	τ_{11}	τ_{12}	$\cdots$	τ_{14}	τ_{15}
y_2	τ_{21}	τ_{22}	$\cdots$	τ_{24}	τ_{25}
$\cdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$
y_p	τ_{p1}	τ_{p2}	$\cdots$	τ_{p4}	τ_{p5}

A.7.3 计算 $\alpha-S-N$ 曲线参数

根据 Basquin 公式：$N=AS^{-B}$，两侧取对数后可得：

$$\log N=\log A-B\log S \tag{A.6}$$

令 $x=\log N$，$y=\log S$，$a=\log A$，$b=B$ 可得：

$$x=a-by \tag{A.7}$$

则可以利用公式(A.8)对第 l 个信度下的线性参数 a,b 进行估计：

$$\begin{cases}\hat{b}_l=-\dfrac{\sum_{i=1}^{p}(\tau_{li}-\overline{\tau}_l)(y_i-\overline{y})}{\sum_{i=1}^{p}(y_i-\overline{y})^2}\\ \hat{a}_l=\overline{\tau}_l+\hat{b}_l\overline{y}\end{cases} \tag{A.8}$$

式中：

$\hat{b}_l$——线性参数 b 在第 l 个信度下的估计值，$l=1,2,...,5$；

τ_{li}——第 l 个信度下第 i 个应力水平下对应的等效对数疲劳寿命数据分位值，$i=1,2,...,p$ $l=1,2,...,5$；

$\overline{\tau}_l$——第 l 个信度下等效对数疲劳寿命数据分位值的平均值，其计算公式为：

$$\overline{\tau}_l=\frac{1}{p}\sum_{i=1}^{p}\tau_{li}\text{，}\quad i=1,2,...,p\text{，}\quad l=1,2,...,5\text{；}$$

y_i——第 i 个应力水平的对数值，$i=1,2,...,p$；

$\overline{y}$——对数应力水平的平均值，其计算公式为：

$$\overline{y}=\frac{1}{p}\sum_{i=1}^{p}y_i\text{，}\quad i=1,2,...,p\text{；}$$

$\hat{a}_l$——线性参数 a 在第 l 个信度下的估计值，$l=1,2,...,5$。

A.8 绘制 $\alpha-S-N$ 曲线

根据计算的线性参数估计值绘制 $\alpha-S-N$ 曲线。具体的 $\alpha-S-N$ 曲线估计示例参见附录 E。

附 录 B
资料性附录
给定应力下疲劳寿命的统计估计（对数正态分布型）
B.1 多应力水平试验下给定疲劳寿命的统计估计

(1) 执行步骤 A.6.1 条至 A.6.7 条。

(2) 给定应力水平 S_0 下的对数疲劳寿命分布为：

$$\Phi_x^0\left(x\right)=\left(1+\exp\left(\frac{\pi\left(\hat{\mu}_x^0-x\right)}{\sqrt{3}\hat{\sigma}_x^*}\right)\right)^{-1} \tag{B.1}$$

式中：

$\Phi_x^0(x)$——给定应力水平 S_0 下的对数疲劳寿命分布；

$\hat{\mu}_x^0$——给定应力水平 S_0 下等效对数疲劳寿命的平均值，计算方法参见 A.6.6 条；

$\hat{\sigma}_x^0$——给定应力水平 S_0 下等效对数疲劳寿命调整后标准偏差，计算方法参见 A.6.7 条。

(3) 计算给定应力水平 S_0 下的信度-分位对数疲劳寿命，其计算公式为：

$$\tau_a^0=\hat{\mu}_x^0+\frac{\sqrt{3}\hat{\sigma}_x^*}{\pi}\ \ln\left(\frac{\hat{\alpha}_0}{1-\hat{\alpha}_0}\right) \tag{B.2}$$

式中：

τ_α^0——信度 $\hat{\alpha}_0$ 对应的给定应力水平 S_0 下的分位对数疲劳寿命数据；

$\hat{\mu}_x^0$——给定应力水平 S_0 下等效对数疲劳寿命的平均值，计算方法参见 A.6.6 条；

$\hat{\sigma}_x^*$——给定应力水平 S_0 下等效对数疲劳寿命调整后标准偏差，计算方法参见 A.6.7 条；

$\hat{\alpha}_0$——信度。

多应力水平试验下给定疲劳寿命的统计估计示例参见附录 F。

B.2 单应力水平试验下给定疲劳寿命的统计估计

在给定应力水平 S_0 下进行疲劳试验，并将得到的疲劳试验数据取对数，并按照从小到大的顺序进行整理，记作 $x_1^0,x_2^0,...,x_p^0$，且满足 $x_1^0<x_2^0<\cdots<x_p^0$。

利用修匀公式（参见附录 D）计算给定应力水平下的对数疲劳寿命的平均值 $\hat{\mu}_0$ 和标准偏差 $\hat{\sigma}_0$。则给定应力水平 S_0 下的对数疲劳寿命分布为：

$$\Phi_x^0\left(x\right)=\left(1+\exp\left(\frac{\pi\left(\hat{\mu}_x^0-x\right)}{\sqrt{3}\hat{\sigma}_x^*}\right)\right)^{-1} \tag{B.3}$$

式中：

$\Phi_x^0(x)$——给定应力水平 S_0 下的对数疲劳寿命分布；；

$\hat{\mu}_x^0$——给定应力水平 S_0 下对数疲劳寿命的平均值；

$\hat{\sigma}_x^0$——给定应力水平 S_0 下对数疲劳寿命的标准偏差。

计算给定应力水平 S_0 下的信度-分位对数疲劳寿命，其计算公式为：

$$\tau_a^0 = \hat{\mu}_x^0 + \frac{\sqrt{3}\hat{\sigma}_x^0}{\pi} \ln\left(\frac{\hat{\alpha}_0}{1-\hat{\alpha}_0}\right) \tag{B.4}$$

式中：

τ_a^0——信度 $\hat{\alpha}_0$ 对应的给定应力水平 S_0 下的分位对数疲劳寿命数据；

$\hat{\mu}_x^0$——给定应力水平 S_0 下对数疲劳寿命的平均值；

$\hat{\sigma}_x^0$——给定应力水平 S_0 下对数疲劳寿命的标准偏差；

$\hat{\alpha}_0$——信度。

单应力水平试验下给定疲劳寿命的统计估计示例参见附录 G。

附 录 C
资料性附录
给定疲劳寿命下疲劳强度的统计估计（对数正态分布型）

C.1 疲劳强度的分布

执行A.6.1条至A.6.8条后，计算第l个信度$\hat{a}_l$,分别对应的对数疲劳强度$\hat{y}_l\,(l=1,2,...,5)$，其计算公式为：

$$\hat{y}_l=\frac{\hat{a}_l}{\hat{b}_l}-\frac{1}{\hat{b}_l}x_0 \tag{C.1}$$

式中：

$\hat{y}_l$——第l个信度$\hat{\alpha}_l$分别对应的对数疲劳强度；

$\hat{a}_l$——第l个信度$\hat{\alpha}_l$对应的$\alpha-S-N$曲线的线性参数a的估计值；

$\hat{b}_l$——第l个信度$\hat{\alpha}_l$对应的$\alpha-S-N$曲线的线性参数b的估计值；

x_0——给定疲劳寿命N_0的对数值，即$x_0=\log_{10}N_0$。

整理对数疲劳强度及其信度，并记作$(\hat{y}_1,\hat{\alpha}_1),(\hat{y}_2,\hat{\alpha}_2),...(\hat{y}_L,\hat{\alpha}_L)$。利用最小二乘法计算疲劳强度的分布中参数$\mu_v,\sigma_v$的估计值$\hat{\mu}_v$和$\hat{\sigma}_v$,则给定疲劳寿命$N_0$下的对数疲劳强度的分布可表示为：

$$\Phi_y^0(y)=\left(1+\exp\left(\frac{\pi\left(\hat{\mu}_y^0-y\right)}{\sqrt{3}\hat{\sigma}_y^0}\right)\right)^{-1} \tag{C.2}$$

式中：

$\Phi_v^0(y)$——给定疲劳寿命N_0下对数疲劳强度的分布；

$\hat{\mu}_v^0$——给定疲劳寿命N_0下的对数疲劳强度的平均值；

$\hat{\sigma}_v^0$——给定疲劳寿命N_0下的对数疲劳强度的标准偏差。

C.2 计算对数疲劳强度分位值

计算给定疲劳寿命下的对数疲劳强度分位值，其计算公式为：

$$\eta_\alpha^0=\hat{\mu}_y^0+\frac{\sqrt{3}\hat{\sigma}_y^0}{\pi}\ln\left(\frac{\hat{\alpha}^0}{1-\hat{\alpha}^0}\right) \tag{C.3}$$

式中：

$\hat{\alpha}^0$——给定信度；

η_α^0——信度$\hat{\alpha}^0$对应的给定疲劳寿命N_0下的分位对数疲劳强度数据；

$\hat{\mu}_y^0$——给定疲劳寿命N_0下的对数疲劳强度的平均值；

$\hat{\sigma}_y^0$——给定疲劳寿命N_0下的对数疲劳强度的标准偏差。

给定疲劳寿命下疲劳强度的统计估计示例参见附录 E。

附 录 D
（资料性附录）
修匀公式

D.1 概述

修匀公式是一种利用观测数据估计正态不确定分布参数的方法。

D.2 修匀公式的实施步骤

D.2.1 数据预处理

设 $d_1,d_2,...,d_n$ 为升序排列的观测数据，即有 $d_1 \le d_2 \le \cdots \le d_n$。由于根据不确定理论的规则，需要保证处理数据全为正数，因此，需要对数据进行预处理。

设处理后的升序正观测数据集为 $\xi_1,\xi_2,...,\xi_n$，则 $\xi_i = d_i + \varepsilon$，$(i=1,2,\cdots,n)$，$\varepsilon$ 为平移量。若 $d_1 > 0$，则 $\varepsilon = 0$；若 $d_1 \le 0$，则 $\varepsilon = 0.1\times|d_1| - d_1$。

D.2.2 修匀公式的一般表达式

修匀公式为一组 n 维超越方程组，其表达式如下：

$$\alpha_i = \left(1+\exp\left(\frac{\pi\left(\mu-\xi_i\right)}{\sqrt{3}\sigma}\right)\right)^{-1}, i=1,2,3,...,n$$

式中，

$$\begin{cases} \mu = \dfrac{\alpha_1+\alpha_2}{2}\xi_1 + \displaystyle\sum_{i=2}^{n-1}\dfrac{\alpha_{i+1}-\alpha_{i-1}}{2}\xi_i + \left(1-\dfrac{\alpha_{n-1}+\alpha_n}{2}\right)\xi_n \\ \sigma = \sqrt{\alpha_1\left(\xi_1-e\right)^2 + \dfrac{1}{3}\displaystyle\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=0}^{2}\left(\alpha_{i+1}-\alpha_i\right)\left(x_i-e\right)^j\left(\xi_{i+1}-e\right)^{2-j} + \left(1-\alpha_n\right)\left(\xi_n-e\right)^2} \end{cases}$$

则，数据 $\xi_1,\xi_2,...,\xi_n$ 服从正态不确定分布。

D.2.3 修匀公式的求解

修匀公式的求解可采用北京蓝威技术有限公司的工具软件，亦可自行求解。

D.2.4 修匀公式的估计结果

记修匀公式的解为 $\hat{\mu},\hat{\sigma}$，则观测数据 $x_1,x_2,...,x_n$ 所服从正态不确定分布的分布函数 $\Phi(x)$ 如下所示：

$$\Phi(x) = \left(1+\exp\left(\frac{\pi\left(\hat{\mu}-\varepsilon-d\right)}{\sqrt{3}\hat{\sigma}}\right)\right)^{-1}.$$

附 录 E

（资料性附录）

$\alpha-S-N$ 曲线的统计估计（对数正态分布型）示例

E.1 概述

本节将通过一个示例来验证所提出的 $\alpha-S-N$ 曲线的统计估计方法。使用数据来自铝合金 2524-T3 的疲劳测试数据。表 E.1 中是从原始数据生成的疲劳试验数据，其中包含 4 个应力水平下的 5 个样本，并按升序显示。

表 E. 1 铝合金 2524-T3 的疲劳试验数据

应力/MPa	试样的对数应力循环数				
400	4.400	4.426	4.462	4.477	4.592
350	4.775	4.784	4.813	4.842	4.860
300	4.894	4.993	5.016	5.028	5.074
200	5.528	5.540	5.544	5.594	5.603

E.2 疲劳试验数据对数转换

由于疲劳失效数据已经转换为对数形式，因此仅需要进行应力水平的对数转换，即 $y_1=\log_{10}400=2.602$，$y_2=\log_{10}350=2.544$， $y_3=\log_{10}300=2.488$，$y_4=\log_{10}200=2.301$。

E.3 疲劳寿命分布计算

利用修匀公式计算各应力水平下的对数疲劳寿命的平均值和标准偏差，结果如表 E.2 所示。

表 E. 2 对数疲劳寿命平均值和标准偏差计算表

对数应力水平	对数疲劳寿命期望估计值	对数疲劳寿命标准偏差估计值
2.602	4.531	0.043
2.544	4.817	0.022
2.488	4.947	0.038
2.301	5.569	0.019

E.4 信度计算

根据公式(A.3)计算各应力水平下的对数应力循环数对应的信度，结果如表 E.3 所示。

表 E. 3 对数疲劳寿命平均值和标准偏差计算表

对数应力水平	信度				
	1	2	3	4	5
2.602	0.004	0.012	0.051	0.093	0.931
2.544	0.030	0.062	0.423	0.890	0.973
2.488	0.071	0.900	0.965	0.980	0.998
2.301	0.020	0.060	0.085	0.920	0.965

将表 E.3 中所有信度按从小到大的顺序重新排列，则信度 $\tilde{\alpha}=\{0.004, 0.012, 0.020, 0.030,$

0.051, 0.060, 0.062, 0.071, 0.085, 0.093, 0.423, 0.890, 0.0900, 0.920, 0.931, 0.965, 0.965, 0.973, 0.980, 0.998}。

E.5 计算等效对数疲劳寿命

根据公式(A.4)计算等效对数疲劳寿命，结果填入等效如表 E.4 所示。

表 E. 4 等效对数疲劳寿命表

对数应力水平	等效对数疲劳寿命								
2.602	4.400	4.426	4.439	4.449	4.462	4.466	4.467	4.470	4.475
	4.523	4.580	4.582	4.588	4.592	4.609	4.609	4.615	4.622
2.544	4.750	4.763	4.770	4.775	4.782	4.783	4.784	4.786	4.788
	4.813	4.842	4.843	4.846	4.848	4.857	4.857	4.860	4.864
2.488	4.832	4.855	4.866	4.875	4.887	4.890	4.891	4.894	4.898
	4.941	4.991	4.993	4.998	5.001	5.016	5.016	5.022	5.028
2.301	5.511	5.522	5.528	5.533	5.538	5.540	5.540	5.542	5.544
	5.565	5.590	5.591	5.594	5.596	5.603	5.603	5.606	5.609

E.6 计算等效对数疲劳寿命的平均值、标准偏差和变异因子

首先，利用修匀公式计算等效对数疲劳寿命的期望估计值、标准偏差估计值，再根据定义计算变异因子及其平均值，其结果如表 E.5 所示。

表 E. 5 等效对数疲劳寿命期望估计值、标准偏差估计值和变异因子计算表

对数应力水平	等效对数疲劳寿命期望估计值	等效对数疲劳寿命标准偏差估计值	等效对数疲劳寿命变异因子	变异因子的平均值
2.602	4.539	0.053	0.012	0.008
2.544	4.821	0.027	0.006	
2.488	4.954	0.047	0.009	
2.301	5.572	0.023	0.004	

E.7 标准偏差调整

根据变异因子的平均值，根据公式(A.6)计算可得调整后的标准偏差依次为：$\tilde{\sigma}_1^* = 0.035$，$\tilde{\sigma}_2^* = 0.037$，$\tilde{\sigma}_3^* = 0.038$，$\tilde{\sigma}_4^* = 0.043$。

E.8 计算 $\alpha - S - N$ 曲线

E.8.1 确定信度值依次为：0.05, 0.10, 0.50, 0.90, 0.95.

E.8.2 计算各应力水平下各信度对应的对数疲劳寿命分位值，结果如表 E.6 所示。

表 E. 6 等效对数疲劳寿命平均值和标准偏差、变异因子计算表

对数应力水平	信度				
	0.05	0.10	0.50	0.90	0.95
2.602	4.482	4.496	4.539	4.581	4.595
2.544	4.761	4.776	4.821	4.866	4.881

2.488	4.892	4.908	4.954	5.001	5.016
2.301	5.502	5.520	5.572	5.624	5.642

E.8.3 根据表 E.6 中数据，利用公式(A.8)计算各个信度下的线性参数，结果如表 E.7 所示。

表 E. 7　线性参数表

对数应力水平	信度				
	0.05	0.10	0.50	0.90	0.95
$\hat{b}_l$	4.758	4.774	4.819	4.863	4.879
$\hat{a}_l$	16.830	16.884	17.043	17.202	17.256

E.8.4 根据线性参数，可绘制 $\alpha - S - N$ 曲线如图 E.1 所示。

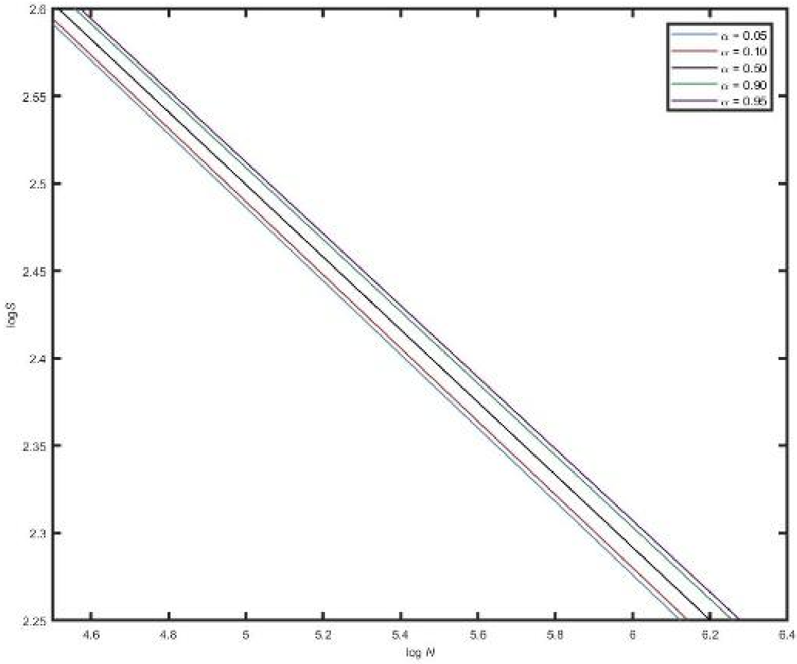

图 E. 1　$\alpha - S - N$ 曲线

附 录 F

（资料性附录）

多应力水平试验下给定疲劳寿命的统计估计（对数正态分布型）示例

F.1 概述

本节将基于附录 E 中示例的计算结果，演示多应力水平试验下给定疲劳寿命的统计估计方法。如表 E.1 所示，疲劳试验方案包含 400、350、300、200MPa 四个应力水平。本示例假设给定应力 $S_0 = 400\,\mathrm{MPa}$，目的在于 400MPa 应力下给定疲劳寿命的统计分析。

F.2 计算给定应力水平下的对数疲劳寿命分布

基于附录 E 中 E.6 和 E.7 的计算结果，给定应力 $S_0 = 400\,\mathrm{MPa}$ 下的对数疲劳寿命分布为：

$$\Phi_x^0(x) = \left(1 + \exp\left(\frac{\pi\left(\hat{\mu}_x^0 - x\right)}{\sqrt{3}\hat{\sigma}_x^*}\right)\right)^{-1}$$

其中，$\hat{\mu}_x^0 = 4.593, \hat{\sigma}_x^* = 0.035$ 。

F.3 计算给定应力水平下的信度-分位对数疲劳寿命

基于附录 E.8 的计算结果，给定应力 $S_0 = 400\,\mathrm{MPa}$ 下各信度对应的对数疲劳寿命分位值如表 F.1 所示。

表 F. 1 给定应力 $S_0 = 400\mathrm{MPa}$ 下的信度-分位对数疲劳寿命表

应力/MPa	信度				
	0.05	0.10	0.50	0.90	0.95
400	4.482	4.496	4.539	4.581	4.595

附 录 G

（资料性附录）

单应力水平试验下给定疲劳寿命的统计估计（对数正态分布型）示例

G.1 概述

本节将演示单应力水平试验下给定疲劳寿命的统计估计方法，使用数据同样来自铝合金 2524-T3 的疲劳测试数据。对于单应力水平试验方案，本标准推荐试验数目不少于 7 个。因此疲劳测试数据包含给定应力 $S_0 = 400\,\mathrm{MPa}$ 下的 14 个样本。将疲劳试验数据取对数，并按照从小到大的顺序进行整理，记作 $x_1^0, x_2^0, ..., x_{14}^0$，且满足 $x_1^0 < x_2^0 < \cdots < x_{14}^0$,列表如表 D.1。

表 G. 1 铝合金 2524-T3 的疲劳试验数据

应力/MPa	试样的对数应力循环数						
400	x_1^0	x_2^0	x_3^0	x_4^0	x_5^0	x_6^0	x_7^0
	4.400	4.402	4.411	4.426	4.447	4.458	4.461
	x_8^0	x_9^0	x_{10}^0	x_{11}^0	x_{12}^0	x_{13}^0	x_{14}^0
	4.462	4.475	4.477	4.525	4.551	4.592	4.665

G.2 计算给定应力水平下的对数疲劳寿命分布

利用修匀公式计算给定应力水平下的对数疲劳寿命的均值 $\hat{\mu}_0$ 和标准差 $\hat{\sigma}_0$。计算得到给定应力 $S_0 = 400\,\mathrm{MPa}$ 下的对数疲劳寿命分布为：

$$\Phi_x^0\left(x\right) = \left(1 + \exp\left(\frac{\pi\left(\hat{\mu}_x^0 - x\right)}{\sqrt{3}\hat{\sigma}_x^0}\right)\right)^{-1}$$

其中，$\hat{\mu}_x^0 = 4.620, \hat{\sigma}_x^0 = 0.0345$。

G.3 计算给定应力水平下的信度-分位对数疲劳寿命

计算各信度对应的对数疲劳寿命分位值，结果如表 G.2.所示。

表 G. 2 给定应力 $S_0 = 400\,\mathrm{MPa}$ 下的信度-分位对数疲劳寿命表

对数应力水平	信度				
	0.05	0.10	0.50	0.90	0.95
2.602	4.564	4.578	4.620	4.661	4.676

附 录 H
（资料性附录）
给定疲劳寿命下疲劳强度的统计估计（对数正态分布型）示例

H.1 概述

本节基于附录 E 中示例的计算结果，以给定对数疲劳寿命 $x_0 = \log_{10} N_0 = 4.400$ 为例，演示给定疲劳寿命下疲劳强度的统计估计方法。

H.2 计算对数疲劳强度

基于附录 E.8.3 的计算结果，利用公式(C.1)计算各信度对应的对数疲劳强度，结果见表 H.1。

表 H.1 给定对数疲劳寿命 $x_0 = 4.400$ 下各信度对应对数疲劳强度

对数 应力水平	信度				
	0.05	0.10	0.50	0.90	0.95
4.400	2.612	2.615	2.624	2.633	2.635

H.3 计算疲劳强度分布

基于对数疲劳强度与信度，利用最小二乘法计算疲劳强度的分布中参数 μ_y, σ_y 的估计值 $\hat{\mu}_y, \hat{\sigma}_y$。计算得到给定对数疲劳寿命 $x_0 = 4.400$ 下的对数疲劳强度分布为：

$$\Phi_y^0(y) = \left(1 + \exp\left(\frac{\pi\left(\hat{\mu}_y^0 - y\right)}{\sqrt{3}\hat{\sigma}_y^0}\right)\right)^{-1}$$

其中，$\hat{\mu}_y^0 = 2.624, \hat{\sigma}_y^0 = 0.00713$。

H.4 计算给定疲劳寿命下的对数疲劳强度分位值

根据公式(C.3)计算各信度对应的对数疲劳强度分位值，结果如表 H.2 所示。

表 H.2. 给定对数疲劳寿命 $x_0 = 4.400$ 下的信度-分位对数疲劳强度表

对数 应力水平	信度				
	0.05	0.10	0.50	0.90	0.95
4.400	2.612	2.615	2.624	2.633	2.635