

中国指挥与控制学会

中国指挥与控制学会

公告

中国指挥与控制学会根据《中国指挥与控制学会团体标准管理办法》规定，对中国指挥与控制学会可靠性系统科学与工程专业委员会负责的《确信可靠性术语》《功能、性能及裕量分析》《性能参数退化分析》《确信可靠性建模与预计》《产品确信可靠性评价方法》《产品使用过程中可靠性抽样检测方法》《金属材料 疲劳试验小样本数据统计分析方法》等七项团体标准进行了立项、征求意见、评审等工作。将在全国团体标准信息平台上进行发布。现予以公告，公告期为 10 天，联系方式: cicc-tb@c2.org.cn。

具体内容见附件 1-附件 7。

特此公告



T/CICC

指挥控制学会团体标准

T/CICC 35001—2025

确信可靠性术语

Belief reliability terms

2025-06-29发布

2025-06-29实施

中国指挥与控制学会 发布

目 次

前 言.....	II
1 范围.....	1
2 引用文件.....	1
3 术语.....	1
3.1 基本术语.....	1
3.2 确信可靠性度量.....	3
3.3 确信可靠性建模、分析与设计.....	4
3.4 可靠性实验.....	4
3.5 确信可靠性评估.....	5
中文索引.....	6
英文索引.....	8

前 言

本文件按照 GB/T 1.1-2020 《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由中国指挥与控制学会提出并归口。

本文件起草单位：杭州市北京航空航天大学国际创新研究院（北京航空航天大学国际创新学院）、北京航空航天大学、深圳市为民可靠性系统工程研究院、长龙（杭州）航空维修工程有限公司、北京蓝威技术有限公司、中国科学院声学研究所。

本文件主要起草人：康锐、张清源、祖天培、李晓阳、陈云霞、伍湘平、王彦林、杨穗利、赵弋飞、阮进喜、潘鸿飞、李艳春。

确信可靠性术语

1 范围

本文件规定了确信可靠性度量、确信可靠性建模、确信可靠性分析与设计、可靠性实验、确信可靠性评估等的常用术语及定义。

本文件适用于系统确信可靠性领域的相关工作。

2 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。

GJB 451B-2021 装备通用质量特性术语

3 术语

GJB 451B-2021界定的术语与定义适用于本文件。

3.1 基本术语

3.1.1

需求阈值 performance threshold of requirements

用户对系统性能要求的边界。

3.1.2

内因变量 internal variable

影响系统可靠性的系统整体及其组分的内在物理属性。如系统整体的结构、布局、工艺，系统组分的数量、尺寸、材料等。

3.1.3

外因变量 external variable

影响系统可靠性的系统环境特征及其对系统的外部作用。如系统运行过程中所处的热学、力学、电磁学等环境，以及系统环境向系统施加的载荷、操作等。

3.1.4 性能极限

3.1.4.1

性能弹性极限 performance resilience limit

用内因变量（3.1.2）和/或外因变量（3.1.3）及性能参数表征的性能受扰动后可恢复的边界。

3.1.4.2

性能工作极限 performance working limit

用内因变量（3.1.2）和/或外因变量（3.1.3）及性能参数表征的系统性能有效的边界。

3.1.4.3

性能破坏极限 performance destroy limit

用内因变量（3.1.2）和/或外因变量（3.1.3）及性能参数表征的系统破坏致使性能消失的边界。

3.1.5

性能裕量 performance margin

系统性能与需求阈值（3.1.1）之间的差距。

3.1.6

可逆时间 reversible time

系统行为在时间反演后不发生变化的时间，又称牛顿时间。

注：时间反演是指空间坐标保持不变，时间坐标改变符号的变换。

3.1.7

不可逆时间 irreversible time

系统行为在时间反演后发生变化的时间，又称退化时间。

3.1.8

不确定性 uncertainty

系统行为的非决定性。

3.1.9

随机不确定性 aleatory uncertainty

系统固有存在的不确定性（3.1.8）。

3.1.10

认知不确定性 epistemic uncertainty

系统由于知识不完备或信息不充足而呈现的不确定性（3.1.8）。

3.1.11

随机系统 random system

只考虑随机不确定性（3.1.9）影响的系统。

3.1.12

不确定系统 uncertain system

只考虑认知不确定性（3.1.10）影响的系统。

3.1.13

不确定随机系统 uncertain random system

同时考虑随机不确定性（3.1.9）与认知不确定性（3.1.10）影响的系统。

3.1.14 可靠性科学原理

3.1.14.1

裕量可靠原理 reliability principle of margin

可靠性的第一科学原理，即系统的性能裕量（3.1.5）决定了其可靠程度。

3.1.14.2

退化永恒原理 reliability principle of degradation

可靠性的第二科学原理，即系统的性能裕量（3.1.5）随不可逆时间（3.1.7）推移发生退化。

3.1.14.3

不确定性原理 reliability principle of uncertainty

可靠性的第三科学原理，即系统的性能裕量（3.1.5）及退化过程均具有不确定性（3.1.8）。

3.1.15

确信可靠性 belief reliability

系统性能裕量（3.1.5）大于零的能力。

3.1.16

确信可靠度 belief reliability metric

确信可靠性（3.1.15）的数学度量。

3.1.17

可靠域 reliable region

在给定确信可靠度（3.1.16）目标后，用内因变量（3.1.2）、外因变量（3.1.3）、可逆时间（3.1.6）、性能参数、需求阈值（3.1.1）表征的系统性能裕量（3.1.5）大于零的范围。

3.1.18

退化律 degradation law

在可靠域（3.1.17）内，用内因变量（3.1.2）和/或外因变量（3.1.3）、可逆时间（3.1.6）、不可逆时间（3.1.7）及性能参数表征的系统性能退化规律。

3.1.19 可靠性学科方程

3.1.19.1

学科交叉方程 interdisciplinary equation

系统性能与内因变量（3.1.2）、外因变量（3.1.3）、可逆时间（3.1.6）之间的函数关系。

3.1.19.2

退化方程 degradation equation

学科交叉方程（3.1.19.1）随不可逆时间（3.1.7）变化的函数关系。

3.1.19.3

裕量方程 margin equation

性能裕量（3.1.5）与退化方程（3.1.19.2）、需求阈值（3.1.1）之间的函数关系。

3.1.19.4

度量方程 measurement equation

确信可靠度（3.1.16）与考虑不确定性（3.1.8）的裕量方程（3.1.19.3）之间的函数关系。

3.2 确信可靠性度量

3.2.1

确信可靠性概率度量 probabilistic metric of belief reliability

使用概率测度描述的系统确信可靠度（3.1.16），用于随机系统（3.1.11）的确信可靠性（3.1.15）度量。

3.2.2

确信可靠性不确定度量 uncertain metric of belief reliability

使用不确定测度描述的系统确信可靠度（3.1.16），用于不确定系统（3.1.12）的确信可靠性（3.1.15）度量。

3.2.3

确信可靠性机会度量 chance metric of belief reliability

使用机会测度描述的系统确信可靠度（3.1.16），用于不确定随机系统（3.1.13）的确信可靠性（3.1.15）度量。

3.2.4

确信可靠分布 belief reliability distribution

性能裕量（3.1.5）的分布函数，根据不确定性（3.1.8）类别不同可属于概率分布、不确定分布或机会分布。

3.2.5

确信可靠寿命 belief reliable life

给定确信可靠度（3.1.16）所对应的不可逆时间（3.1.7）。

3.3 确信可靠性建模、分析与设计

3.3.1

确信可靠性建模 belief reliability modeling

构建系统的学科交叉方程（3.1.19.1）、退化方程（3.1.19.2）、裕量方程（3.1.19.3）及度量方程（3.1.19.4）的技术活动。

3.3.2

确信可靠性分析 belief reliability analysis

通过定性或定量手段，探索内因变量（3.1.2）、外因变量（3.1.3）、可逆时间（3.1.6）、不可逆时间（3.1.7）、需求阈值（3.1.1）对系统确信可靠性（3.1.15）影响的技术活动。

3.3.3

可靠性正向设计 function-oriented reliability design

运用可靠性学科方程开展的系统可靠性设计。

3.4 可靠性实验

3.4.1

可靠域实验 reliable region experiment

发现可靠域（3.1.17）并验证学科交叉方程（3.1.19.1）的实验。

3.4.2

退化律实验 degradation law experiment

发现退化律（3.1.18）并验证退化方程（3.1.19.2）的实验。

3.5 确信可靠性评估

3.5.1

可靠性数据 reliability data

可靠性学科方程及其中的内因变量（3.1.2）、外因变量（3.1.3）、可逆时间（3.1.6）、不可逆时间（3.1.7）、性能指标、需求阈值（3.1.1）等数据。

3.5.2

确信可靠性评估 belief reliability evaluation

基于已有的可靠性数据（3.5.1），利用概率统计和/或不确定统计方法确定确信可靠度（3.1.16）及相关指标的技术过程。

中文索引

B	
不可逆时间	3.1.7
不确定随机系统	3.1.13
不确定系统	3.1.12
不确定性	3.1.8
不确定性原理	3.1.14.3
D	
度量方程	3.1.19.4
K	
可靠性科学原理	3.1.14
可靠性数据	3.5.1
可靠性实验	3.4
可靠性学科方程	3.1.19
可靠性正向设计	3.3.3
可靠域	3.1.17
可靠域实验	3.4.1
可逆时间	3.1.6
N	
内因变量	3.1.2
Q	
确信可靠度	3.1.16
确信可靠分布	3.2.4
确信可靠寿命	3.2.5
确信可靠性	3.1.15
确信可靠性不确定度量	3.2.2
确信可靠性分析	3.3.2
确信可靠性概率度量	3.2.1
确信可靠性机会度量	3.2.3
确信可靠性建模	3.3.1
确信可靠性评估	3.5.2
R	
认知不确定性	3.1.10
S	
随机不确定性	3.1.9
随机系统	3.1.11
T	
退化方程	3.1.19.2
退化律	3.1.18
退化律实验	3.4.2
退化永恒原理	3.1.14.2
W	
外因变量	3.1.3
X	
性能工作极限	3.1.4.2
性能极限	3.1.4
性能破坏极限	3.1.4.3
性能弹性极限	3.1.4.1

性能裕量	3.1.5
需求阈值	3.1.1
学科交叉方程	3.1.19.1
Y	
裕量方程	3.1.19.3
裕量可靠原理	3.1.14.1

英文索引

A	
Aleatory uncertainty	3.1.9
B	
Belief reliability	3.1.15
Belief reliability analysis	3.3.2
Belief reliability distribution	3.2.4
Belief reliability evaluation	3.5.2
Belief reliability metric	3.1.16
Belief reliability modeling	3.3.1
Belief reliable life	3.2.5
C	
Chance metric of belief reliability	3.2.3
D	
Degradation equation	3.1.19.2
Degradation law	3.4.2
Degradation law experiment	3.4.2
E	
Epistemic uncertainty	3.1.10
External variable	3.1.3
F	
Function-oriented reliability design	3.3.3
I	
Internal variable	3.1.2
Interdisciplinary equation	3.1.19.1
Irreversible time	3.1.7
M	
Margin equation	3.1.19.3
Measurement equation	3.1.19.4
P	
Performance destroy limit	3.1.4.3
Performance margin	3.1.5
Performance working limit	3.1.4.2
Performance resilience limit	3.1.4.1
Performance threshold of requirement.....	3.1.1
Probabilistic metric of belief reliability	3.2.1
R	
Random system	3.1.11
Reliability data	3.5.1
Reliability experiment	3.4
Reliability principle of degradation	3.1.14.2
Reliability principle of margin	3.1.14.1
Reliability principle of uncertainty	3.1.14.3
Reliable region	3.1.17
Reliable region experiment	3.4.1
Reversible time	3.1.6
U	
Uncertain random system	3.1.13
Uncertain metric of belief reliability	3.2.2
Uncertainty	3.1.8

T/CICC

指挥控制学会团体标准

T/CICC 35002—2025

功能、性能及裕量分析

Function, performance, and margin analysis

2025-06-29发布

2025-06-29实施

中国指挥与控制学会 发布

目 次

前 言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 缩略语	1
4 通用要求	1
4.1 实施阶段	1
4.2 实施人员	1
4.3 分析结果	2
5 技术要求	2
5.1 信息收集与整理	2
5.2 功能分析	2
5.3 性能分析	3
5.4 裕量分析	6
5.5 生成分析结果	7
5.6 工作报告	8
附录 A（资料性附录）关键性能参数确定方法	9
附录 B（资料性附录）某型MOPA激光器光电组件功能、性能及裕量分析示例	12

前 言

本文件按照 GB/T 1.1-2020 《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由中国指挥与控制学会提出并归口。

本文件起草单位：杭州市北京航空航天大学国际创新研究院（北京航空航天大学国际创新学院）、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。

本文件主要起草人：张清源、张健安、祖天培、袁静、金毅、李晓阳、孙富强、伍湘平、王彦林、司晖、叶润清、管梦宇。

功能、性能及裕量分析

1 范围

本文件规定了功能、性能及裕量分析（Function, performance, and margin analysis, FPMA）的通用要求和详细要求。

本方法主要用于帮助研发人员和可靠性工程师深入了解和剖析系统功能性能，确定关键性能参数及关联内外因变量，明确需求阈值，从而构建系统裕量表达式，为后续性能参数分析、确信可靠性建模与预计等工作奠定基础。

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。

T/CICC 35001-2025 确信可靠性术语

3 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

FPMA——Function, Performance, and Margin Analysis 功能、性能及裕量分析；

FMECA——Failure Modes, Effect, and Criticality Analysis 故障模式、影响及危害性分析；

FMMEA——Failure Mode, Mechanism, and Effect Analysis 故障模式、机理及影响分析。

4 通用要求

4.1 实施阶段

FPMA应贯穿于系统全寿命周期各阶段，随着系统所处阶段的变化，FPMA应持续更新和完善。系统各阶段开展FPMA的侧重点略有不同：

- a) 论证与方案阶段应根据需求与初步设计信息分析系统功能和性能，确定关键性能参数，明确各关键性能参数的需求阈值，初步分析各关键性能参数的裕量；
- b) 研制阶段应根据详细设计与实验信息分析各关键性能参数的关联内外因设计变量，细化各关键性能参数的裕量；
- c) 制造阶段应根据工艺设计信息分析各关键性能参数的关联内外因工艺变量，细化各关键性能参数的裕量；
- d) 使用阶段应根据系统实际使用信息分析各关键性能参数的关联外因变量、需求阈值，细化各关键性能参数的裕量。

4.2 实施人员

FPMA 工作参与人员及其职责如下：

- a) 产品经理负责支撑 FPMA 的信息收集与整理，并参与系统功能分析；
- b) 产品设计师负责功能分析与性能分析，并建立裕量表达式；
- c) 工艺设计师参与性能分析，并细化裕量表达式。

4.3 分析结果

FPMA分析结果应包含以下部分：

- a) 关键性能参数及其阈值清单；
- b) 关键内因变量清单；
- c) 关键外因变量清单。

5 技术要求

5.1 信息收集与整理

信息收集与整理是FPMA的前期准备工作，分析人员应收集与整理的主要信息及内容见表 1。

表 1 FPMA 所需主要信息表

序号	信息来源	内容
1	技术标准及规范	国际/国家准入要求、行业标准及要求、设计规范、生产工艺规范等
2	用户要求	系统需要完成的任务或功能、任务。阶段、环境条件、结构组成、工作原理、性能试验和使用要求等
3	功能要素	系统结构组成、尺寸大小、各接口关系、各单元动作方式等
4	相似系统信息	a) 从相似系统以往的使用过程获取其可能出现的故障模式（影响哪个性能）、故障机理、敏感载荷； b) 从相似系统以往的可靠性设计与优化过程获取进行过设计改进的内容以及相应的补偿措施； c) 从相似系统中获取 FPMA、FMECA、FMMEA 等工作的信息
5	供应商信息	外购件名称及其主要性能指标、性能极限等

5.2 功能分析

5.2.1 系统定义

系统定义的目的是使分析人员能够有针对性地、有条理地开展系统的功能、性能及裕量分析。这个过程主要需要明确系统的下列重要信息：

- a) 系统的主要功能，明确所分析系统的研制目的和作用，梳理系统必需完成的主要功能，并对这些主要功能进行编号及说明；
- b) 系统的结构组成，对系统开展结构层次分解，一般可根据需要划分为系统级、分系统级、部组件级等，但原则上只需分解至某项子功能所对应的系统层次。对于外购件，不需对其进行结构分解；
- c) 系统的使用场景，明确系统的工作模式、工作时间以及每种工作模式下的环境与工作条件。通常情况下可通过使用场景分析来获取系统的使用场景。

5.2.2 功能分解

功能分解的目的是在系统主要功能和系统结构层次的基础上，将主要功能细分为若干子功能，为下一步的性能分析奠定基础。如图2所示。

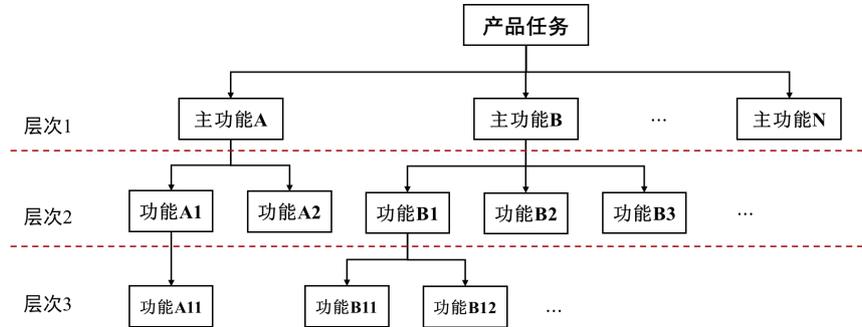


图 2 功能层次关系图

针对每个主要功能，绘制功能层次关系图，其大致结构应与图 2 相符合。功能分解能够辅助性能分析，帮助分析人员尽可能全的确定完成功能所需的性能参数。

各层次功能的编号应与系统结构层次的各单元编号一致。若某单元具有多项功能，则应额外标注。

5.2.3 功能原理分析

功能原理分析的目的是了解系统完成各功能的工作原理，从而使分析人员对系统各个层次单元及其各个接口的时序、逻辑、输入输出关系等有更加清晰的认知，便于后续分析的完成。

在功能原理分析中，应基于功能层次图，分析实现系统主要功能的基本原理。这一分析过程可通过绘制系统功能框图的形式展现，具体实施参考案例附录B。

5.3 性能分析

5.3.1 性能分解

为了全面了解系统的各类性能，应在确定关键性能参数之前，根据功能分析的结果填写完成各个功能对应的性能。

- 每个功能对应的性能可以是一个，也可以是多个；
- 对于功能或结构较为复杂多样的系统，还应将性能进行逐级分解，并填写性能分解表，如表 2 所示。

表 2 性能分解表

功能	一级性能	二级性能	...	最低层级性能
功能A	功能A1	性能A1		
	功能A2	性能A2	性能A21	性能A21..1
			性能A22	性能A22..1
功能B	功能B1	性能B1		

5.3.2 关键性能参数的确定

确定关键性能参数的目的是挑选系统关键性能参数并开展分析，从而为裕量分析和未来的可靠性建模分析奠定基础，关键性能参数的确定应随使用阶段持续更新。关键性能参数应通过对各关键性能参数的重要度进行评价和排序来确定，推荐的两种方法见附录A。

5.3.3 关键性能参数分析

5.3.3.1 目的

关键性能参数分析的目的是对关键性能参数进行分类、细化，获取它们的类别信息、关联内因变量、关联外因变量（着重分析敏感应力）以及性能参数之间的相关性特征，从而为裕量分析做好准备。

5.3.3.2 性能参数分类

关键性能参数分为三类：望大性能参数、望小性能参数、望目性能参数。应根据各关键性能参数与系统功能的关系确定它们的类别。具体分类方法如下：

- 在自身取值空间内，若性能参数的取值越大越有利于系统相关功能的实现，则将其归类为望大性能参数；
- 在自身取值空间内，若性能参数的取值越小越有利于系统相关功能的实现，则将其归类为望小性能参数；
- 在自身取值空间内，若性能参数的取值越接近于某个特定目标越有利于系统相关功能的实现，则将其归类为望目性能参数。

5.3.3.3 关联内外因分析

关联内外因是指影响性能参数取值的内因变量和外因变量。关联内外因分析的目的是为裕量分析提供重要信息，并为后续的学科交叉方程与退化方程构建奠定基础。对于关键性能参数的关联内因变量而言，往往需要首先结合系统功能原理，定位影响关键性能参数的系统结构，因此应在表格中予以注明。具体分析表格形式见表 3。

- 关联内外因变量中应该尽量选取影响相对大的变量，关联内因应选取核心的设计变量，关联外因应选取敏感应力。

表 3 关联内外因分析表

关键性能参数	对应结构	关联内因	关联外因
性能A1	结构A1-1	内因A1-1-X1 内因A1-1-X2	无
	结构A1-2	内因A1-2-X1	外因A1-2-Y1
	结构A1-3	内因A1-3-X1	无
性能B22	结构B22-1	内因B22-1-X1	外因B22-1(2)-Y1
	结构B22-2	内因B22-2-X1	
...

关联内因分析应充分结合设计过程遵循的相关原理开展分析。一般而言，典型的关联内因包括尺寸、材料、工艺、布局、内部力等类别，典型的描述方式见表 4。

]表 4 典型关联内因及描述方式

类别	描述方式
----	------

尺寸	长度、宽度、高度、跨度、角度、直径、曲率、间隙等
材料	材料类型（牌号）、材料参数（如刚度、屈服强度、热膨胀系数等）
工艺	装配工艺参数、生产工艺参数、封装形式、封装工艺参数等
布局	布局形式、安装位置等
内部力	粘合力、连接力、张紧力、预紧力矩等

关联内因分析的方法如下：

- 设计人员基于设计方法、功能原理、相似系统，结合自身工程经验，分析确定主要的关联内因；
- 基于设计过程中开展的性能测试，推断影响性能的关联内因；
- 针对系统开展性能仿真，通过改变某些内因变量的取值，观测性能的变化，从而判定是否为关联内因。

关联外因分析可以从工作应力和环境应力两个角度考虑。典型的关联外因变量类型及描述方式见表 5。

表 5 典型关联外因类型及描述方式

类别	电子系统	机械系统
工作应力	<ul style="list-style-type: none"> 电应力：电压、电流等 磁场力 	<ul style="list-style-type: none"> 静力学应力：拉应力、压应力、弯曲应力等 动力学应力：摩擦力、交变应力等
环境应力	<ul style="list-style-type: none"> 温度（热）应力：高温、低温、高低温循环/冲击等 湿度应力 振动应力 化学（腐蚀）环境应力 辐射应力 	<ul style="list-style-type: none"> 温度应力：高温、低温、高低温循环/冲击等 湿度应力 振动应力 冲击应力 化学（腐蚀）环境应力

关联外因分析应着重确定对系统关键性能参数敏感的应力。关联外因分析的方法如下：

- 根据使用场景分析中确定的系统主要工作模式和经历的环境条件，分析可能影响系统性能参数的工作应力和环境应力，并作为关联外因变量；
- 查找设计准则中对于性能指标和应力条件的相关描述或规定，识别关联外因变量；
- 基于设计过程中开展的性能测试，推断关联外因变量。

两性能参数之间典型的相关关系有：

- 正相关，即一个性能指标的增加使得另一个性能指标也相应增加；
- 负相关，即一个性能指标的增加使得另一个性能指标减小；
- 其他，即较为复杂的耦合关系。

若不确定两性能参数是否相关，则应在分析报告中注明“不确定相关关系”，并在下一步的工作中进行验证。若确定两性能参数相关，但并不明确具体的量化关系，则需要分析中说明理由，并在后续的系统研发中进行确认。

5.3.3.4 关键内外因变量确定

在关联内外因的基础上，需要进一步确定关键内外因参数分析，分析准则如下：

- 关键内外因变量中应该尽量选取影响相对大的变量；
- 关键内因应选取核心的设计变量；
- 关键外因应选取敏感应力。

5.4 裕量分析

5.4.1 需求阈值分析

需求阈值分析的目的是明确系统的需求阈值，辅助裕量表达式的构建。分析关键性能参数需求阈值的步骤如下：

- 构建关键性能参数需求阈值分析表，表头为“参数属性”、“关键性能参数名称”、“需求阈值分析过程”、“阈值来源”，见表 6；
- 根据参数属性，对关键性能参数进行分类列举；
- 根据系统功能对性能的不同需求，分析性能参数的需求阈值，并填写表 7。

表 6 关键性能参数需求阈值分析表

参数属性	关键性能参数名称	需求阈值	需求阈值分析过程	阈值来源
望大	按照关键性能参数类别，分别列出所有关键性能参数	填写需求阈值的具体值，并注明需求阈值类别	简要介绍关键性能参数阈值的分析过程及阈值确定的原因	列出阈值确定的方法和途径，如理论分析、用户要求、材料极限等
望小				
望目				

关键性能参数的需求阈值涵盖两个层面的边界要求，一是功能对关键性能参数具体指标数值的边界要求，二是功能对性能弹性极限、性能工作极限、性能破坏极限的边界要求，且两者通常耦合出现。根据两类要求的不同组合，需求阈值分为三类，即弹性需求阈值、工作需求阈值、破坏需求阈值。对这三类需求阈值的说明如下：

- 弹性需求阈值：**弹性需求阈值是根据系统性能参数指标数值边界要求和性能弹性极限边界要求确定的需求阈值。例如，系统功能需要控制误差在受到 80°C 高温冲击后即使发生漂移也仍然可以在温度降至 40°C 后恢复至 2% 以内，则可用 2%（40°C 额定，80°C 冲击）来表征弹性需求阈值；
- 工作需求阈值：**工作需求阈值是根据系统性能参数指标数值边界要求和性能工作极限边界要求确定的需求阈值。例如，电机功能要求在 20°C~80°C 的使用场景下，转速始终保持在 2000rpm±50rpm 范围内，则 1950rpm 和 2050rpm（20°C~80°C）就可以构成工作需求阈值；
- 破坏需求阈值：**破坏需求阈值是根据系统性能参数指标数值边界要求和性能工作极限边界要求确定的需求阈值，因破坏会导致性能指标消失，故通常使用外因变量来描述。例如，某电子系统功能要求其在 120°C 运行时不被烧毁，则可用 120°C 来表征破坏需求阈值。

分析关键性能参数需求阈值的要求如下：

- 需求阈值分析过程中，应该阐明是根据系统功能的何种需求确定的，即明确是弹性需求阈值、工作需求阈值还是破坏需求阈值，在分析表中用“弹性”、“工作”或“破坏”标注；
- 为了满足各种需求，关键性能参数的需求阈值可能存在多个，此时应在分析表中注明。

5.4.2 裕量计算

裕量表达式构建的目的是根据关键性能参数的类别确定性能裕量形式，并帮助设计分

析人员了解所有关键性能参数在现有设计下的性能裕量水平，并为后续的确信可靠性建模分析、可靠性实验规划等工作奠定基础。裕量表达式构建应填写表 7 所示表格，以整合所有关键性能参数的裕量信息。

表 7 关键性能参数裕量信息表

关键性能参数	关键性能参数类别	裕量表达式
列出关键性能参数的名称	望大、望小或望目	根据关键性能参数的类别列出裕量的数学表达式

裕量表达式的 2 种主要形式如下：

- a) 若主要关注裕量的绝对值，不需对各关键性能参数的裕量进行比较，则可按照如下形式构建裕量表达式：

$$m_i = \begin{cases} p_i - p_{th,i}, & \text{若 } p_i \text{ 是望大性能参数} \\ p_{th,i} - p_i, & \text{若 } p_i \text{ 是望小性能参数} \\ \min\{p_i - p_{thL,i}, p_{thU,i} - p_i\}, & \text{若 } p_i \text{ 是望目性能参数} \end{cases}$$

式中， i —— 关键性能参数的编号，

p_i —— 编号为 i 的关键性能参数，

$p_{th,i}$ —— p_i 的需求阈值，

$p_{thL,i}$ —— p_i 的下界需求阈值，

$p_{thU,i}$ —— p_i 的上界需求阈值，

m_i —— p_i 的性能裕量，

$\min\{\}$ —— 最小值函数；

- b) 若主要关注裕量的相对值，或需要对各关键性能参数的裕量进行比较，则可按照如下形式构建裕量表达式（要求将性能参数及其需求阈值的取值转化为正数）：

$$m_i = \begin{cases} \ln\left(\frac{p_i}{p_{th,i}}\right), & \text{若 } p_i \text{ 是望大性能参数} \\ \ln\left(\frac{p_{th,i}}{p_i}\right), & \text{若 } p_i \text{ 是望小性能参数} \\ \min\left\{\ln\left(\frac{p_i}{p_{thL,i}}\right), \ln\left(\frac{p_{thU,i}}{p_i}\right)\right\}, & \text{若 } p_i \text{ 是望目性能参数} \end{cases}$$

式中， $\ln(\cdot)$ —— 自然对数函数。

开展裕量计算时，相关要求如下：

- 1) p_i 为系统性能参数的设计标称值；
- 2) $p_{th,i}$ （或 $p_{thL,i}$ 和 $p_{thU,i}$ ）为需求阈值分析得到的阈值；
- 3) 对于存在多个需求阈值的情况，需要进行多次计算，得到不同类型的裕量。

5.5 生成分析结果

在完成上述全部分析后，需要生成FPMA分析结果：

- a) 根据关键性能参数确定结果与需求阈值分析结果提取得到关键性能参数及其阈值

清单：

- b) 在关联内外因分析的基础上，进行关键内外因变量确定原则确定关键内因变量，提取并整理结果得到关键内因变量清单；
- c) 在关联内外因分析的基础上，进行关键内外因变量确定原则确定关键外因变量，提取并整理结果得到关键外因变量清单。

5.6 工作报告

FPMA 工作报告应包含的具体内容如下：

- a) 完整的分析流程描述及必要说明，包括信息收集与整理、功能分析、性能分析与裕量分析；
- b) 各分析流程的关键输出表格，包括 FPMA 所需主要信息表、性能分解表、关联内外因分析表、关键性能参数需求阈值分析表与关键性能参数裕量信息表；
- c) 各分析流程的关键输出图，如功能层次关系图等。

完整的 FPMA 工作报告可参照附录 B 案例。

附录 A
(资料性附录)
关键性能参数确定方法

A.1 专家评分法

专家评分法适用于性能参数较多的情况。判别性能参数重要程度包含两方面因素。一是超差后果严重性，即性能要求不满足时，其对应的功能丧失对于系统基本使用情况的影响大小；二是用户关注程度，即用户对于系统相关性能的需求程度和要求的高低程度。本方法基于这两方面开展专家评分从而确定性能参数的重要度。实际应用时，若有其他重要度评价准则，可以视情增加。

本方法的具体流程及要求如下：

- a) 针对性能分解结果，列出专家评分表，如表 A.1 示例形式，其中表头包括“性能分解”、“超差后果严重性评分”、“用户关注度评分”、“重要度”。

表格例中：

- x_{i1} —— 第*i*个性能参数超差后果严重性评分；
 x_{i2} —— 第*i*个性能参数用户关注度评分。

表 A.1 专家评分法列表示例

性能分解		超差后果严重性评分 (1~10)	用户关注度评分 (1~10)	重要度
一级性能	二级性能			
性能 A	性能 A1	x_{11}	x_{12}	$x_{11} \times x_{12}$
	性能 A2	x_{21}	x_{22}	$x_{21} \times x_{22}$
性能 B	性能 B	x_{31}	x_{32}	$x_{31} \times x_{32}$
...	...			
关键性能参数集				

- a) 对系统性能参数超差后果严重性进行评分，评分准则如表 A.2 所示；
b) 对用户关注度进行评分，评分准则如表 A.3 所示；
c) 将超差后果严重性评分与用户关注度评分相乘，得到性能参数重要度；
d) 基于性能参数的重要度评分结果，以评分最高分和最低分的中间值为参照值，评分高于参照值的性能参数作为关键性能参数，并整理在表中。

表 A.2 超差后果严重性评分准则

超差后果严重性评分	评分准则
1, 2, 3	基本不影响系统相应功能、可能导致非计划性维护或调试、不足以或轻度导致人员伤亡、造成轻微财产损失、基本不影响环境或造成轻微环境损害
4, 5, 6	导致系统功能不能正常实现或降级运行、系统发生损伤并需要进行维修或更换、导致人员中等程度伤害、造成中等程度财产损失、造成一定程度环境损害
7, 8	导致系统功能丧失并发生严重损坏、导致人员严重伤害、造成严重财产损失及环境损害
9, 10	导致系统毁坏、导致人员死亡、造成重大财产损失及环境损害

表 A.3 用户关注度评分准则

		该性能参数符合要求时用户体验		
		满意	比较满意	无所谓
用户对该性能的需求程度	安全相关	10		
	必需	9	8	6
	无所谓	7	5	3
	非必需	4	2	1

A.2 两两比较法

两两比较法适用于性能参数较少且相互之间比较较为容易的情况。本方法的具体流程及要求如下：

- 将性能分解得到的性能参数从左到右、从上到下依次排列，形成性能参数重要度评价矩阵；
- 将各个性能两两对比，按照表 A.4 所示评价标准填写相对重要比率，构成性能

重要度评价矩阵 $A_{n \times n} = (a_{ij})_{n \times n}$ ，如表 A.5 示例所示；

式中， $A_{n \times n}$ —— $n \times n$ 阶的方阵；

n —— 进行分析的性能参数个数；

a_{ij} —— 第 i 个性能参数对第 j 个性能参数的重要比率，必须保证矩阵中元素 a_{ij} 和 a_{ji} 互为倒数。

- 对重要度评价矩阵 $A_{n \times n} = (a_{ij})_{n \times n}$ 进行一致性检验，计算一致性检验指标。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1},$$

式中， CI —— 一致性检验指标，

λ_{\max} —— 矩阵 $A_{n \times n}$ 的最大特征值，

n —— 矩阵 $A_{n \times n}$ 的维数。

若 $CI \leq 0.1$ ，则认为重要性评价矩阵具有较为满意的一致性，否则需要重新修改评价矩阵，直至一致性指标达到要求；

- 计算 λ_{\max} 对应的特征向量 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ ，对 X 进行标准化处理得到权重向量 $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ ，权重向量各元素的计算公式为：

$$w_j = \frac{x_j}{\sum_{i=1}^n x_i}, \quad j=1, 2, \dots, n.$$

式中， w_j —— 向量 W 的第 j 个元素，

x_i —— 向量 X 的第 i 个元素；

- 选择向量 W 各元素中排名前 40% ~ 50% 的元素，其下标对应的性能参数则划分为关键性能参数，进一步得到相对应的关键性能参数集。

表 A.4 重要比率评价标准

两两比较值 a_{ij}	含义
1:1	功能 <i>i</i> 和功能 <i>j</i> 的重要程度相当
3:1	功能 <i>i</i> 比功能 <i>j</i> 略重要
5:1	功能 <i>i</i> 比功能 <i>j</i> 重要
7:1	功能 <i>i</i> 比功能 <i>j</i> 重要很多
9:1	功能 <i>i</i> 比功能 <i>j</i> 极其重要

表 A.5 性能参数重要度评价矩阵示例

a_{ij}	j	1	2	3	4	5
i	含义	性能A1	性能A2	性能B1	性能C1	性能C2
1	性能A1	1	3	5	7	7
2	性能A2	1/3	1	5	3	3
3	性能B1	1/5	1/5	1	1/3	1/3
4	性能C1	1/7	1/3	3	1	1
5	性能C2	1/7	1/3	3	1	1

附录 B
(资料性附录)
某型MOPA激光器光电组件功能、性能及裕量分析示例

B.1 分析目标

针对激光器光电部分的研发状态，本FPMA分析的主要侧重点有以下几点：

- a) 对光电部分的功能进行详细分析，充分了解光路部分和电路部分的功能原理和信息流，明确各模块或组件在功能实现中的作用；
- b) 明确光电部分的主要性能，确定关键性能参数，分析其关联的内外因变量，为后续设计改进和可靠性建模提供依据；
- c) 确定关键性能参数的阈值，构建裕量表达式。

B.2 前期准备

为了开展光电部分的FPMA分析，分析人员根据需求收集了三类信息或资料进行参考，详细如下：

- a) 设计原理图及仿真模型。光路部分的设计人员为本分析提供了系统的光学结构及基本功能原理信息，电路部分提供了电路原理图、实物图、EDA 仿真模型等；
- b) 相似系统的故障信息。该型激光器与历史系统有较强的继承性和相似性，客退数据、失效分析报告等资料有助于确定关键性能参数；
- c) 对标系统信息及主要性能指标。

B.3 功能分析

B.3.1 结构组成

电路部分由主控模块、驱动模块、种子控制模块、指示光控制等四个模块组成，电路部分的实物图如图B.1所示。

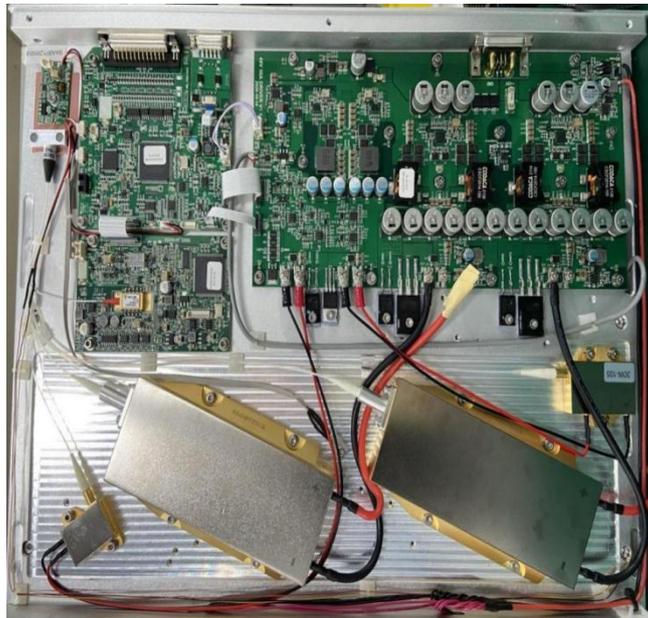


图 B. 1 电路部分实物图

该激光器的光路部分由一个单模半导体激光器和三级光纤激光放大器组成，其结构如图B.2所示。

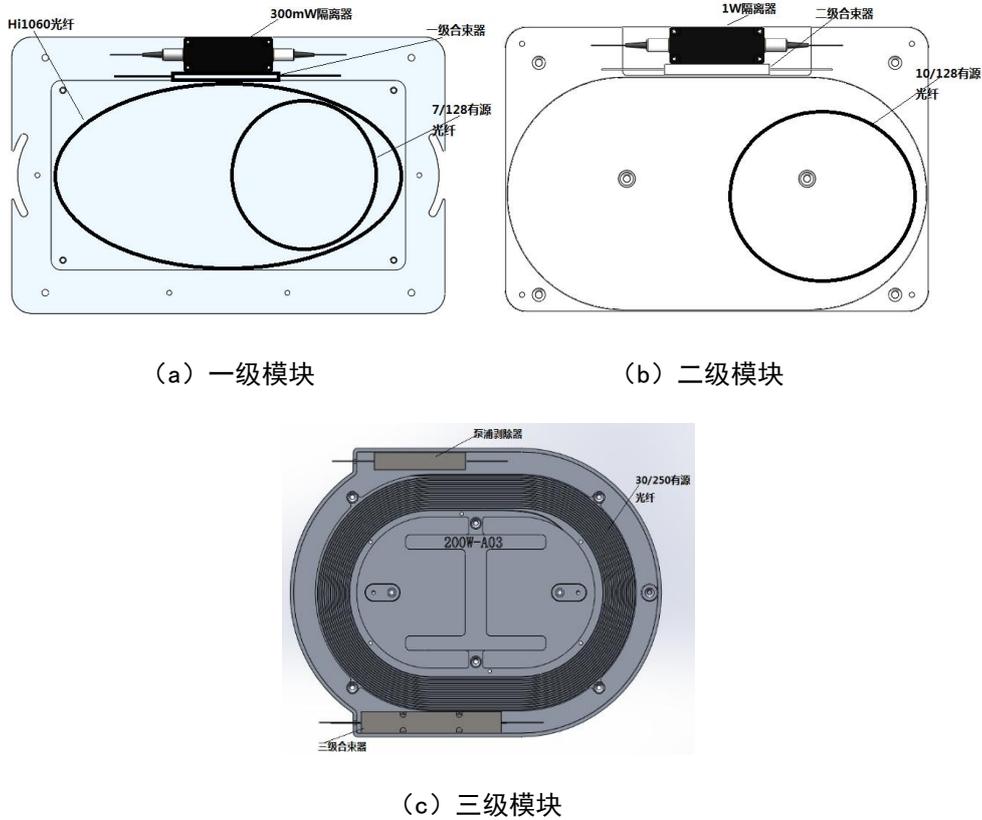


图 B. 2 光路部分结构组成图

B. 3.2 主要功能及功能原理

对某型MOPA光纤激光器的主要功能是输出高能激光，完成对板材的切割、焊接、打标等工艺加工工序，光路部分和电路部分的功能框图如图B.3和B.4所示。

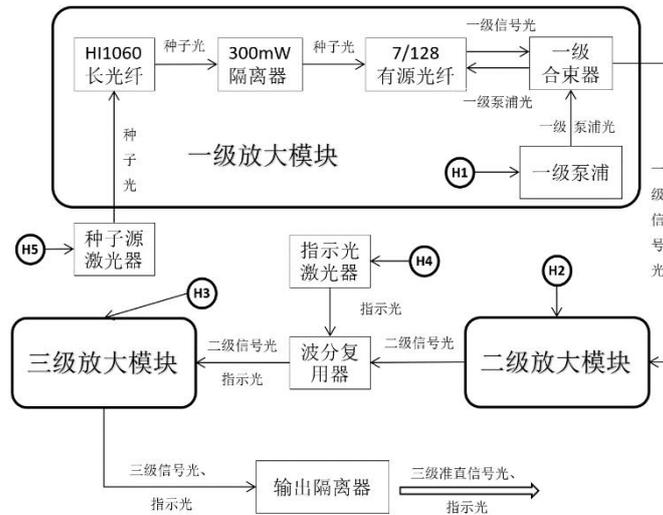


图 B. 3 光路部分功能框图

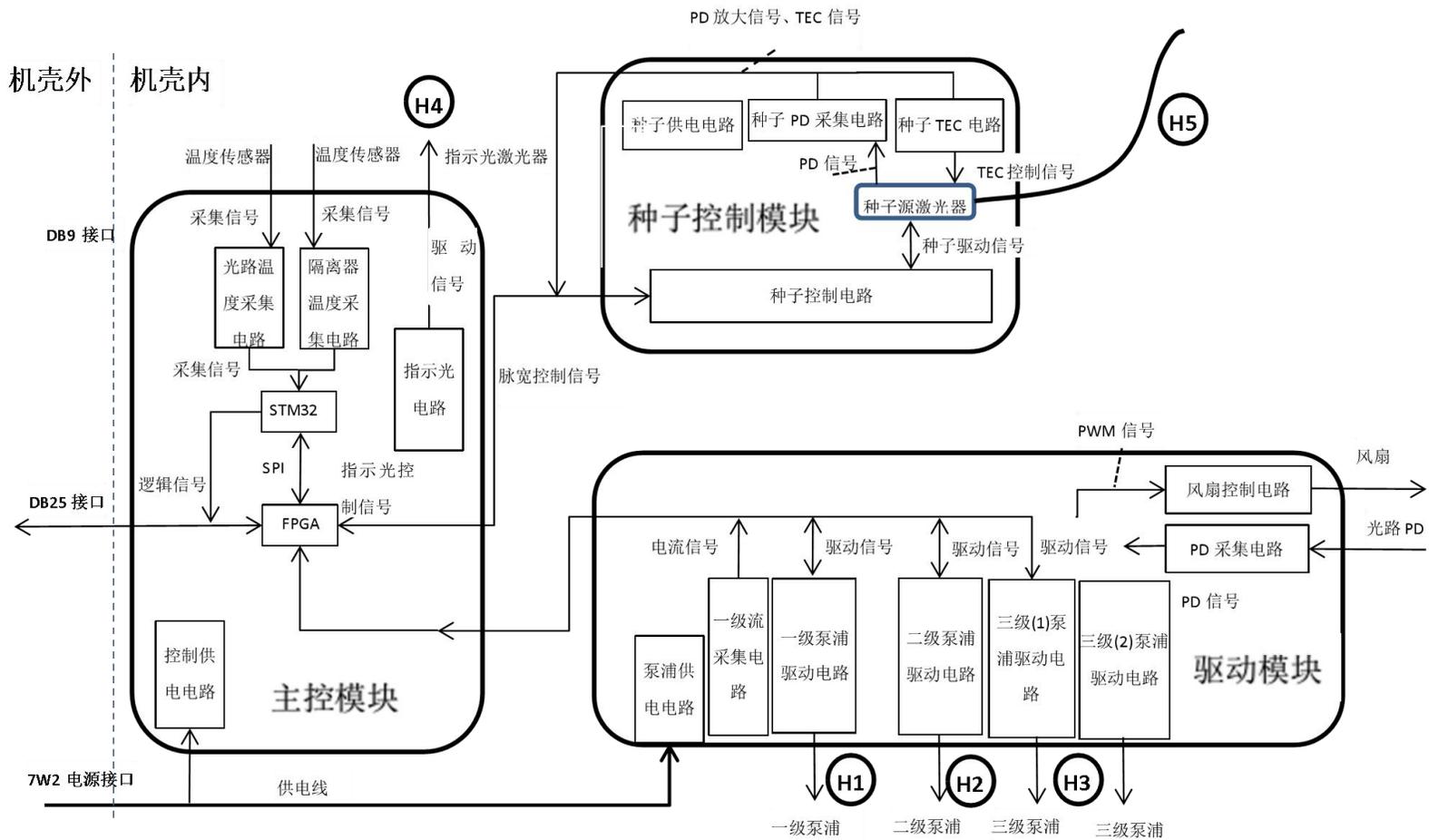


图 B. 4 电路部分功能框图

B.3.3 功能分解

该激光器光电部分的主要功能的细化分解如图B.5所示，具体的功能原理分析表见表B1。

B.3.4 使用场景

根据使用场景分析结果，该激光器的使用场景主要包括4种：电池极片切割（T_A）、电池极柱/注液孔清洗/打二维码（T_B）、硬质金属切割/切削（T_C）、金属深雕/打孔（T_D）。

电池极片切割（T_A）：主要应用于新能源动力电池领域，使用环境温度为25-28℃，湿度<80%。每个加工周期内使用参数为350ns/250kHz/180W，激光器持续出光，任务剖面如图B.6所示。

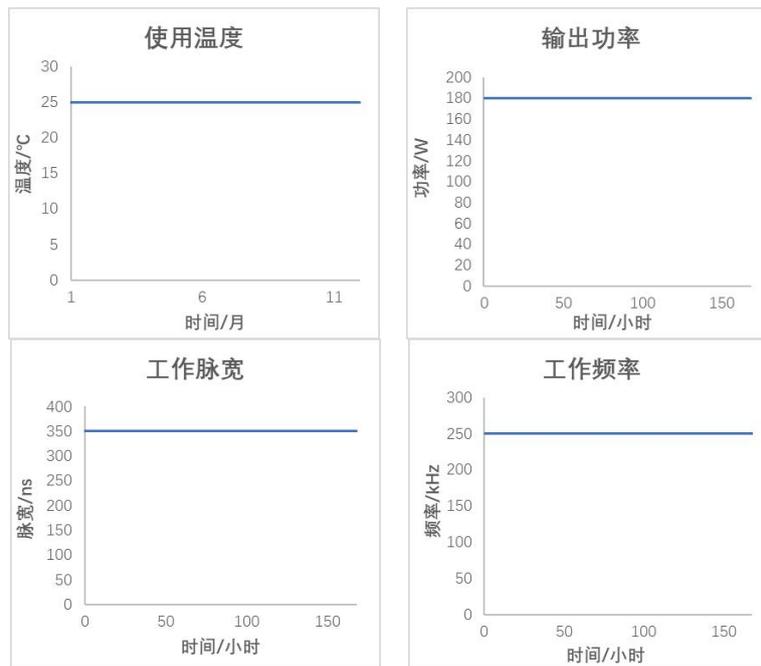


图 B. 6 电池极片切割的任务剖面

电池极柱/注液孔清洗/打二维码（T_B）：主要应用于新能源动力电池领域，使用环境温度为0-40℃，湿度<80%。每个加工周期内使用参数为200ns/240kHz/160W，完成一个工位预计3秒，切换到下一个工位预计1秒，任务剖面如图B.7所示。

硬质金属切割/切削（T_C）：主要应用于金刚石/刀具/五金等领域，使用环境温度为0-40℃，湿度<80%。每个加工周期内使用参数为350ns/150kHz/180W，完成一个预计30秒，切换到下一个预计3秒，任务剖面如图B.8所示。

金属深雕/打孔（T_D）：主要应用于模具五金/PCB覆铜板/汽车/电子烟等领域，使用环境温度为0-40℃，湿度<80%。每个加工周期分为二个阶段，第一阶段使用参数为500ns/130kHz/180W，第二个阶段使用参数为250ns/150kHz/100W，完成第一个阶段预计15秒，切换到下一个阶段预计0.1秒，完成第二个阶段预计3秒，加工周期之间的间隔1秒，任务剖面见图B.9。

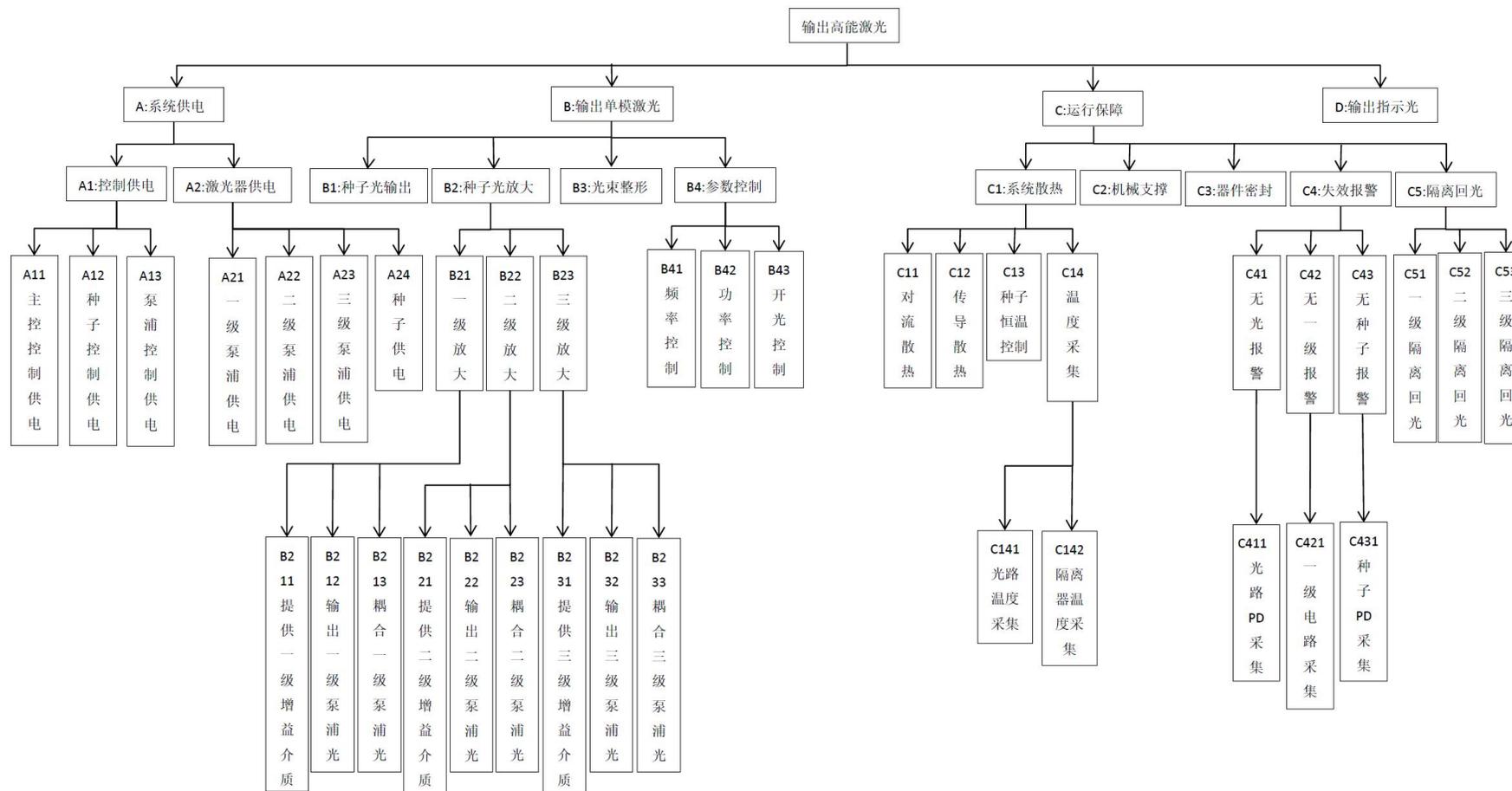


图 B. 5 功能原理分解图

表 B. 1 光电部分功能分解表

各级功能及代码		对应结构	功能描述	
A1-控制供电		控制供电电路	为各个控制部分提供稳定的供电。	
A2-激光器 供电	A21、A22、A23-泵浦供电	泵浦供电电路	为各部分泵浦电路提供稳定供电。	
	A24-种子供电	种子供电电路	为种子激光器提供稳定的供电。	
B1-种子光输出		种子控制电路 种子激光器	种子源激光器由一个光纤输出的单模半导体激光器组成，可以根据控制信号对输出激光进行调制，产生不同的脉冲宽度及重复频率。	
B2-种子光 放大	B21-一 级放大	B211-一级增益	7/128有源光纤	7/128有源光纤是一种双包层光纤，7um的纤芯内掺杂有增益介质、用于传输种子源输出的1064nm单模信号光，128um内包层用于传输泵浦激光器输出的915或960nm多模泵浦光，增益介质吸收泵浦光后、信号光再经过时便发生受激辐射、从而放大1064nm信号光。
		B212-输出一级 泵浦光	10W泵浦激光器	输出波长960nm的泵浦光，受电控控制，可调节输出时长及输出功率大小。
		B213-耦合一级 泵浦光	一级合束器	将泵浦光耦合到内包层中，同时信号光不受影响、仍在纤芯中低损耗的传输。
	B22-二 级放大	B221-二级增益	10/128有源光纤	工作原理同7/128有源光纤，使用更大纤芯的光纤使承受的平均功率更高。
		B222-输出二级 泵浦光	30W泵浦激光器	工作原理同10泵浦激光器，更多的内部芯片使输出功率更高。
		B223-耦合二级 泵浦光	二级合束器	工作原理同一级泵浦合束器，使用更大纤芯的光纤使承受的信号平均功率更高。
	B23-三 级放大	B231-三级增益	30/250有源光纤	工作原理同7/128有源光纤，使用更大纤芯的光纤使承受的信号平均功率更高，使用更大芯径的外包层是承受的泵浦功率更高。
		B232-输出三级 泵浦光	三级泵浦激光器	工作原理同一级泵浦合束器，使用5只80W泵浦激光器。
		B233-耦合三级 泵浦光	三级合束器	工作原理同一级泵浦合束器，使用更大纤芯的光纤使承受的平均功率更高，在熔接时通过不同工艺，将多条（6条）泵浦光纤熔接至合束器，可以同时连接多个泵浦激光器。
B3-光束整形		输出隔离器	由准直、隔离、扩束三部分组成，将光纤输入的发散信号光转划为大光斑的准直光束，适应应用端，同时也起到隔离回返光的作用。	
B4-参数控 制	频率控制B41	主控电路 种子控制电路	由电平转换芯片、主控芯片，种子控制电路组成，控制种子的脉宽。	
	功率控制B42	主控电路 泵浦驱动电路	由电平转换芯片，主控芯片组成，控制种子的输出频率，以及泵浦电流的限制。	

		种子控制电路		
	开光控制B43	主控电路 泵浦驱动电路 种子控制电路	由电平转换芯片、主控芯片，控制泵浦、种子的启动。	
C1-系统散热	C11-对流散热	主控电路 风扇控制电路 风扇、散热齿	由两个MOS管、24V供电组成，通过主控的PWM控制风扇的转速，散热齿为齿状铝型材，增大散热面积。	
	C12-传导散热	导热垫	加强电路和光路部分的热传导。	
	C13-种子恒温控制	种子TEC电路	实现设定温度的闭环控制。	
	C14-温度采集	C141-光路温度采集	光路温度采集电路	用于接收光路部分的温度传感器信号。
		C142-隔离器温度采集	隔离器温度采集电路	用于接收隔离器处的温度传感器信号。
C2-机械支撑		散热齿	加强散热及提供支撑。	
C3-器件密封		铝制外壳	采用铝制外壳，以到达封闭激光器的目的。	
C4-失效报警	C41-无光报警	C411-光路PD采集	光路PD采集电路	对检测到的光路部分的PD信号进行处理，以便于主控能够正常识别。
	C42-无一级报警	C412-一级电路采集	一级电流采集电路	对一级电流进行采集，由主控判断是否正常。
	C43-无种子报警	C413-种子PD采集	种子PD采集电路	对检测到的种子激光器的PD信号进行处理，以便于主控能够正常识别。
C5-回光隔离	C51-一级回光隔离	300mW隔离器	隔离反向光，反向光存在时会降低激光输出甚至损坏光路器件。	
	C52-二级回光隔离	1W隔离器	工作原理同300mW隔离器，使用更大纤芯的光纤和更大尺寸的晶体使承受的平均功率更高，达到1W。	
	C53-三级回光隔离	10W隔离器	工作原理同300mW隔离器，使用更大纤芯的光纤和不同的晶体使承受的平均功率更高，达到5W，使用2只，进一步提升隔离能力。	
D-输出指示光		指示光驱动电路 指示光激光波分复用器	红色可见光作为应用端指示光，与激光共同输出。	

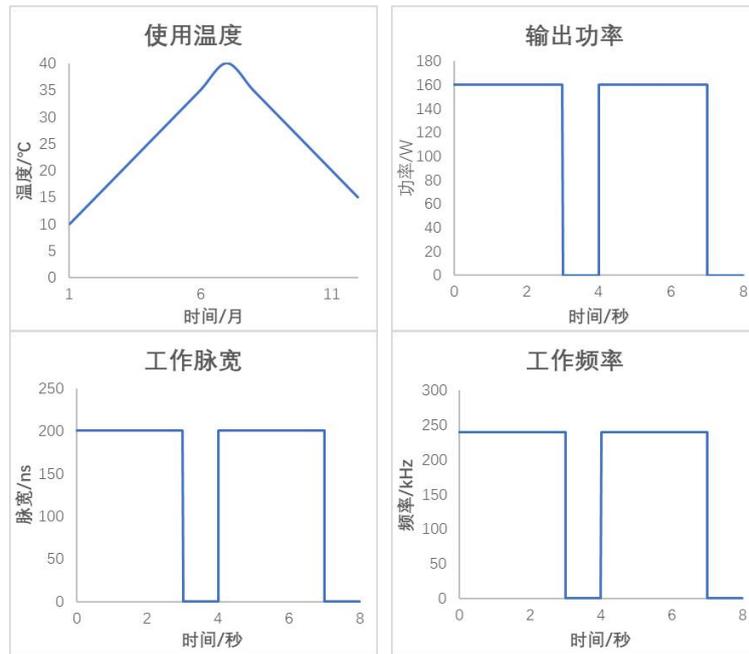


图 B. 7 注液孔清洗等的任务剖面

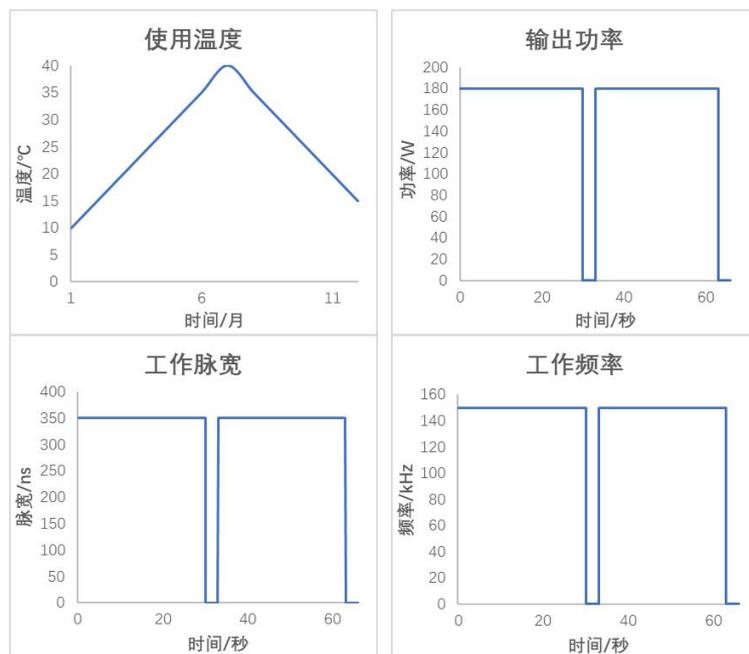


图 B. 8 硬质金属切割/切削的任务剖面

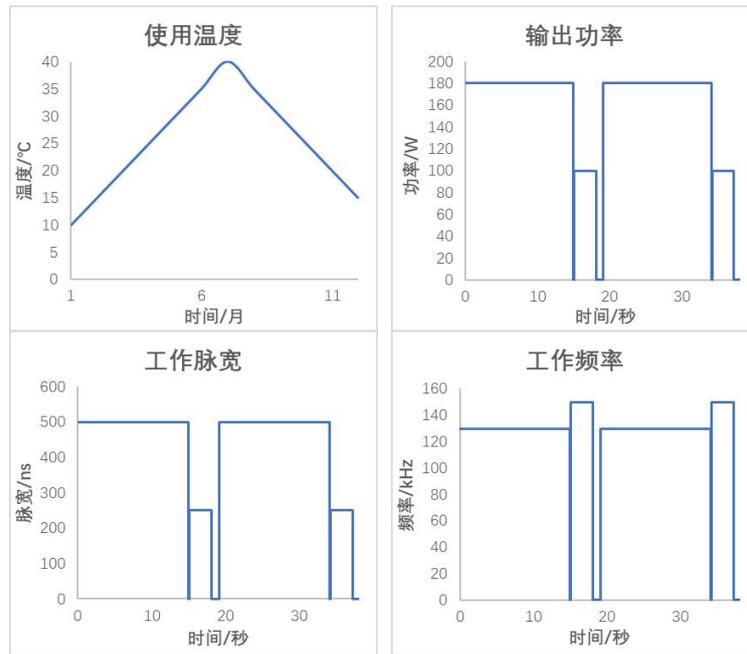


图 B. 9 金属深雕/打孔的任务剖面

B.4 性能分析

B.4.1 性能分解

基于表B.1中光电部分的功能分析结果，依据主要功能所对应的性能指标进行性能分解。结果见表B.2所示。

表B.2中，“输出光偏置光功率”指未接收到开光指令时种子源预输出的光功率，与工作光功率区分。吸收系数“ α ”指增益介质吸收泵浦光的能量，光纤中单位为dB/m，如3dB/m，指1m增益光纤可以吸收50%的泵浦光，2m则吸收75%，指数增加。“光束质量因子”用于衡量光单模的程度，一般用M2表示，为一个大于等于1的数值，越接近1表示越接近单模。“隔离度”表示对方向光的隔离能量，与正向通光率对应，单位为dB，如10dB，表示反向光通过率为10%。

B.4.2 确定关键性能参数

在激光器的光电部分性能分解的基础上，确定“超差后果严重性”、“问题常见度”等两个评分项，具体打分规则如表B.3和B.4所示。经专家打分，各性能参数的评分结果见表B.2；选取总分大于等于10的参数作为关键性能参数，见表B.2的关键性能参数集。

B.4.3 关键性能参数特征分析

根据功能对关键性能参数的要求，判定关键性能参数的类型；根据学科原理、性能试验、过往失效经验等，确定各关键性能参数的影响因素，见表B.5所示。

表 B. 2 光电部分性能分解及关键性能参数分析表

功能分析		性能分析					是否关键		
功能	功能层次	性能分解		专家打分					
		一级性能参数	二级性能参数	后果严重度	问题常见度	总分			
系统供电A	控制供电A1	主控控制供电A11	输出功率P_A11_1		3	1	3	否	
			输出电压P_A11_2		3	1	3	否	
		种子控制供电A12	输出功率P_A12_1		5	1	5	否	
			输出电压P_A12_2		5	1	5	否	
		泵浦控制供电A13	输出功率P_A13_1		3	1	3	否	
			输出电压P_A13_2		3	1	3	否	
	激光器供电A2	一级泵浦供电A21	驱动参数P_A21_1	上升时间P_A21_11		3	1	3	否
				驱动功率P_A21_12		5	1	5	否
				下降时间P_A21_13		3	1	3	否
			电源参数P_A21_2	输出电压P_A21_21		5	1	5	否
				动态响应时间P_A21_22		4	1	4	否
				输出功率P_A21_23		5	1	5	否
		输出纹波P_A21_24		2	1	2	否		
		二级泵浦供电A22	驱动参数P_A22_1	上升时间P_A22_11		3	1	3	否
				驱动功率P_A22_12		5	1	5	否
				下降时间P_A22_13		3	1	3	否
			电源参数P_A22_2	输出电压P_A22_21		5	1	5	否
				动态响应时间P_A22_22		4	1	4	否
				输出功率P_A22_23		5	1	5	否
				输出纹波P_A22_24		2	1	2	否
		三级泵浦供电A23	驱动参数P_A23_1	上升时间P_A23_11		3	1	3	否
驱动功率P_A23_12				3	1	3	否		
下降时间P_A23_13				3	1	3	否		

功能分析			性能分析						
功能	功能层次		性能分解		专家打分			是否关键	
			一级性能参数	二级性能参数	后果严重度	问题常见度	总分		
			电源参数P_A23_2	输出电压P_A23_21	3	2	6	否	
				动态响应时间P_A23_22	3	1	3	否	
				输出功率P_A23_23	3	1	3	否	
				输出纹波P_A23_24	2	1	2	否	
	种子供电A24	电源参数P_A24	输出电流P_A24_1	5	1	5	否		
			输出电压P_A24_2	5	1	5	否		
			输出纹波P_A24_3	3	1	3	否		
			驱动电流P_A24_4	5	2	10	是		
输出单模激光B	种子光输出B1		输出光光学参数P_B1_1	输出光峰值功率P_B1_11	5	1	5	否	
				输出光偏置光功率P_B1_12	3	1	3	否	
				输出光中心波长P_B1_13	5	1	5	否	
				输出光谱宽P_B1_14	5	1	5	否	
			输出光控制参数P_B1_2	输出光脉冲形状P_B1_21	5	1	5	否	
				输出光频率P_B1_22	5	1	5	否	
	种子光放大B2	一级放大B21	提供一级增益介质B211	纤芯直径P_B211_1	5	1	5	否	
				NA(数值孔径)P_B211_2	5	1	5	否	
				吸收系数P_B211_3	5	1	5	否	
		二级放大B22	提供二级增益介质B221	输出一级泵浦光B212	泵浦光功率P_B212_1	5	1	5	否
				泵浦光波长P_B212_2	5	1	5	否	
				耦合一级泵浦光B213	泵浦光通光率P_B213_1	5	1	5	否
				信号光通光率P_B213_2	5	1	5	否	
	信号光光束质量因子P_B213_3	3	1	3	否				
二级放大B22	提供二级增益介质B221	纤芯直径P_B221_1	5	1	5	否			
		NA(数值孔径)P_B221_2	5	1	5	否			
		吸收系数P_B221_3	5	1	5	否			

功能分析				性能分析					
功能	功能层次			性能分解		专家打分			是否关键
				一级性能参数	二级性能参数	后果严重度	问题常见度	总分	
		输出二级泵浦光B222	泵浦光功率P_B222_1		5	1	5	否	
			泵浦光波长P_B222_2		5	1	5	否	
		耦合二级泵浦光B223	泵浦光通光率P_B223_1		5	1	5	否	
			信号光通光率P_B223_2		5	1	5	否	
			信号光光束质量因子P_B223_3		3	1	3	否	
		三级放大B23	提供三级增益介质B231	纤芯直径P_B231_1		5	1	5	否
				NA(数值孔径)P_B231_2		5	1	5	否
				吸收系数P_B231_3		4	1	4	否
			输出三级泵浦光B232	泵浦光功率P_B232_1		4	2	8	否
				泵浦光波长P_B232_2		4	1	4	否
	耦合三级泵浦光B233	泵浦光通光率P_B233_1		5	2	10	是		
		信号光通光率P_B233_2		5	3	15	是		
		信号光光束质量因子P_B233_3		4	4	16	是		
	光束整形B3			输出光斑直径P_B3_1		4	5	20	是
				输出光束质量因子P_B3_2		4	5	20	是
	参数控制B4	频率控制B41		输出频率P_B41		5	2	10	是
		功率控制B42		输出功率P_B42		3	1	3	否
开光控制B43		开光响应时间P_B43		2	1	2	否		
运行保障C	系统散热C1	对流散热C11		满功率工作时热沉温度与环境温度温差P_C11	3	2	6	否	
		传导散热C12		发热源与热沉温差P_C12	3	2	6	否	
		种子恒温控制C13		温度精度P_C13	5	2	10	是	
		温度采集C14	光路温度采集C141	温度精度P_C141	4	2	8	否	
			隔离器温度采集C142	温度精度P_C142	4	2	8	否	
	机械支撑C2		可承受的振动参数P_C2_1	振动频率P_C2_11	3	1	3	否	

(续表)

功能分析			性能分析							
功能	功能层次		性能分解		专家打分			是否关键		
			一级性能参数	二级性能参数	后果严重度	问题常见度	总分			
失效报警C4 回光隔离C5 输出指示光D 关键性能参数集	器件密封C3		密封等级P_C3		3	1	3	否		
	无光报警C41	光路PD采集C411	最低响应光功率P_C411		4	3	12	否		
		无一级报警C42	一级电路采集C421	最低响应电流P_C421		4	1	4	否	
		无种子报警C43	种子PD采集C431	最低响应光功率P_C431		4	1	4	否	
	一级回光隔离C51	一级回光隔离C51		常温隔离度P_C51_1		5	1	5	否	
				0-50°C最低隔离度P_C51_2		5	1	5	否	
				插损P_C51_3		5	1	5	否	
		二级回光隔离C52	二级回光隔离C52		常温隔离度P_C52_1		5	1	5	否
					0-50°C最低隔离度P_C52_2		5	1	5	否
					插损P_C52_3		5	1	5	否
		三级回光隔离C53	三级回光隔离C53		常温隔离度P_C53_1		5	4	20	是
					0-50°C最低隔离度P_C53_2		5	4	20	是
					插损P_C53_3		5	4	20	是
	输出指示光D			指示光功率P_D_1		2	2	4	否	
				回光功率P_D_2		2	2	4	否	
驱动功率P_D_3				2	1	2	否			
关键性能参数集			驱动电流P_A24_4、泵浦光通光率P_B233_1、信号光通光率P_B233_2、信号光光束质量因子P_B233_3、输出光斑直径P_B3_1、输出光束质量因子P_B3_2、输出频率P_B41、温度精度P_C13、常温隔离度P_C53_1、0-50°C最低隔离度P_C53_2、插损P_C53_3。							

表 B.3 超差后果严重性打分规则

分数	后果严重度描述
1	不严重，如外观稍有影响，不影响使用性能。
2	严重程度弱，稍微影响性能或用户体验，如功耗增大，噪音增加，偶尔误报警，红光弱。
3	较严重，影响使用或引入失效风险，如热透、光斑抖动、串口连不上。
4	很严重，导致难以使用或引入较大失效风险，如PD误报无法开光、输出光斑严重异常。
5	非常严重，导致破坏性烧毁。

表 B.4 问题常见度打分规则

分数	问题常见度描述
1	未出现，理论上可能出现，但实际未出现过
2	极少出现，只作为个例出现，小于1%
3	少出现，实际系统中偶尔出现，小于3%
4	较常出现，实际系统中较常出现，小于6%
5	经常出现，实际系统中经常出现，大于6%

表 B.5 激光器关键性能参数关联内外因分析表

关键性能参数	类别	关联内因	关联外因
驱动电流P_A24_4	望大	MOS管最大输出电流	环境温度
		运放IC输入电压	
		采样电阻的精度	
泵浦光通光率P_B233_1	望大	泵浦熔接点参数	挤压应力
		泵浦光功率	
		泵浦光模式	
信号光通光率P_B233_2	望大	信号熔接点参数	挤压应力
		信号光功率	
		信号光模式	

关键性能参数	类别	关联内因	关联外因
信号光光束质量因子P_B233_3	望小	信号熔接点参数	挤压应力
		注入光模式	
输出光斑直径P_B3_1	望目	输出光功率	环境温度
		输出光模式	
		输出光谱宽	环境洁净度
		输出光波长	
输出光束质量因子P_B3_2	望小	输出熔接点参数	环境温度
		输出光功率	
		输出光模式	环境洁净度
		输出光谱宽	
输出光波长			
输出频率P_B41	望目	电平转换芯片的转换速率	环境温度
温度精度P_C13	望小	供电电源的输出电流	环境与TEC温度设置值温差
		功放IC的输出电流	
常温隔离度P_C53_1	望大	输出光功率	外部反射率
		输出光波长	
0-50℃最低隔离度P_C53_2	望大	输出光功率	外部反射率
		输出光波长	
插损P_C53_3	望小	输出熔接点参数	环境温度
		信号光功率	
		信号光模式	挤压应力
		信号光波长	环境洁净度

B.5 裕量分析

本部分对关键性能参数进行需求阈值分析，并构建裕量表达式和计算确定性的性能裕量值，分析结果如表B.6和表B.7所示。本案例中，所有的需求阈值均为工作需求阈值，故在表中不再具体标注。

表 B.6 激光器关键性能参数需求阈值分析表

参数属性	关键性能参数	需求阈值	需求阈值分析过程	阈值来源
望大	驱动电流	1.8A	根据种子峰值功率要求，驱动电流不得低于1.8A，否则无法驱动种子电源	系统自身功能设计要求
	泵浦光通光率	97%	该参数低于阈值会导致激光器效率降低、性能劣化，同时会增大合束器处热累积，增加激光器失效风险。	系统自身功能设计要求
	信号光通光率	95%		
	常温隔离度	23dB (25℃)	该参数低于阈值，会造成较强的回光、易损坏光路器件、增加激光器失效风险。	风险管控要求
	0-50℃最低隔离度	18dB (0-50℃)		
望小	信号光光束质量因子	1.6	信号光束质量会影响最终输出的光束质量，该参数超过阈值会导致激光器性能劣化。	系统自身功能设计要求
	输出光束质量因子	2.0	根据激光加工工艺要求，对光束质量有一定要求	应用端要求
	温度精度	±0.5℃	种子光谱稳定性需求	系统自身功能设计要求
	插损	0.4dB	该参数低于阈值会导致激光器效率降低、性能劣化，同时增大输出隔离器的热累积，增加激光器失效风险。	系统自身功能设计要求
望目	输出光斑直径	7±0.5mm	根据激光加工工艺要求，需要光斑直径控制在合理范围内，否则无法实现加工功能	应用端要求
	输出频率	±1KHz	光放大需求，光路各个脉宽输出所需的最大频率	系统自身功能设计要求

表 B. 7 激光器关键性能参数裕量信息表

关键性能参数	关键性能参数类型	裕量表达式
驱动电流 P_A24_4	望大	$m_{A24-4} = p_{A24-4} - p_{th,A24-4}$
泵浦光通光率 P_B233_1	望大	$m_{B233-1} = p_{B233-1} - p_{th,B233-1}$
信号光通光率 P_B233_2	望大	$m_{B233-2} = p_{B233-2} - p_{th,B233-2}$
信号光光束质量因子 P_B233_3	望小	$m_{B233-3} = p_{th,B233-3} - p_{B233-3}$
输出光斑直径 P_B3_1	望目	$m_{B3-1} = \min \left\{ \begin{array}{l} p_{thU,B3-1} - p_{B3-1}, \\ p_{B3-1} - p_{thL,B3-1} \end{array} \right\}$
输出光束质量因子 P_B3_2	望小	$m_{B3-2} = p_{th,B3-2} - p_{B3-2}$
输出频率 P_B41	望目	$m_{B41} = \min \left\{ \begin{array}{l} p_{thU,B41} - p_{B41}, \\ p_{B41} - p_{thL,B41} \end{array} \right\}$ p_{B41} 取其取值范围内的所有可能取值
温度精度 P_C13	望小	$m_{C13} = \min \left\{ \begin{array}{l} p_{thU,C13} - p_{C13}, \\ p_{C13} - p_{thL,C13} \end{array} \right\}$ p_{C13} 取其取值范围内的所有可能取值
常温隔离度 P_C53_1	望大	$m_{C53-1} = p_{C53-1} - p_{th,C53-1}$
0-50℃最低隔离度 P_C53_2	望大	$m_{C53-2} = p_{C53-2} - p_{th,C53-2}$
插损 P_C53_3	望小	$m_{C53-3} = p_{th,C53-3} - p_{C53-3}$

T/CICC

指挥控制学会团体标准

T/CICC 35003—2025

性能参数退化分析

Performance parameter degradation analysis

2025-06-29发布

2025-06-29实施

中国指挥与控制学会 发布

目 次

前 言	II
1 范围	1
2 引用文件	1
3 术语与定义	1
4 通用要求	1
4.1 实施阶段	1
4.2 实施人员	1
4.3 分析结果	1
5 技术要求	2
5.1 信息收集与整理	2
5.2 性能退化原因与机理分析	2
5.3 退化性能参数分析	3
5.4 性能退化内外因变量分析	4
5.5 生成分析结果	5
5.6 工作报告	5
附录 A（资料性附录）性能退化机理评分准则	6
附录 B（资料性附录）常见的性能退化机理及判别方法	7
附录 C（资料性附录）某型激光器种子控制模块性能参数退化分析示例	8

前 言

本文件按照 GB/T 1.1-2020 《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由中国指挥与控制学会提出并归口。

本文件起草单位：杭州市北京航空航天大学国际创新研究院（北京航空航天大学国际创新学院）、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、中国航空综合技术研究院、长龙（杭州）航空维修工程有限公司、厦门宏发电力电器有限公司。

本文件主要起草人：张清源、王浩伟、张健安、胡杨、李晓阳、陈颖、陈文彬、伍湘平、王彦林、司晖、叶润清、王文慧、王鑫、冯吉开、代文广、苏礼季。

性能参数退化分析

1 范围

本文件规定了性能参数退化分析（Performance Parameter Degradation Analysis, PPDA）的通用要求和详细要求。

本文件主要用于帮助研发人员和可靠性工程师深入了解和剖析系统性能退化原因与机理，确定退化性能参数，明确性能退化影响因素，为后续的确信可靠性建模与预计等工作奠定基础。

2 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。

T/CICC 35001-2025	确信可靠性术语
T/CICC 35002-2025	功能、性能及裕量分析

3 术语与定义

T/CICC 35001-2025界定的术语与定义适用于本文件。

4 通用要求

4.1 实施阶段

PPDA应贯穿于系统全寿命周期各阶段，且随着系统所处阶段的变化，PPDA应持续更新和完善。系统各阶段开展PPDA的侧重点略有不同：

- 方案阶段应根据需求与初步设计分析确定可能存在退化的关键性能参数，明确存在的退化机理及模型，确定各可能存在退化的关键性能参数；
- 研制阶段应根据详细设计与实验信息分析各关键性能参数的性能退化影响因素内外因设计变量及其影响方式，更新各可能存在退化的关键性能参数；
- 制造阶段应根据工艺设计信息分析各关键性能参数的关联内外因工艺变量及其影响方式，更新各可能存在退化的关键性能参数；
- 使用阶段应根据系统实际使用信息分析各关键性能参数的关联外因变量及其影响方式，更新各可能存在退化的关键性能参数。

4.2 实施人员

PPDA工作参与人员及其职责如下：

- 产品经理负责支撑 PPDA 的信息收集与整理；
- 产品设计师负责退化性能参数分析；
- 可靠性工程师负责性能退化影响因素分析。

4.3 分析结果

PPDA 输出报告应包含以下部分：

- a) 退化关键性能参数清单；
- b) 退化原因与机理清单；
- c) 影响退化关键性能参数的内因变量清单；
- d) 影响退化关键性能参数的外因变量清单。

5 技术要求

5.1 信息收集与整理

信息收集与整理是PPDA的前期准备工作，分析人员应该收集与整理的主要信息及内容见表 1。

表 1 PPDA 所需主要信息表

序号	信息来源	内容
1	系统使用场景分析报告	系统使用场景，包括工作模式、环境应力、工作载荷等
2	系统FPMA报告	系统功能原理、关键性能参数、关联内外因变量等
3	相似系统信息	相似系统的FPMA报告、PPDA报告、性能退化模型等
4	供应商信息	外购件进行的性能退化分析、性能退化实验等

5.2 性能退化原因与机理分析

5.2.1 分析步骤

性能退化原因与机理分析的目的是评估性能退化机理的重要程度，从而为后续的性能参数分析奠定基础。性能退化原因与机理分析表如表 2所示，分析的主要步骤如下：

- a) 梳理使用场景中会长期连续或长期间隔作用的环境应力和工作载荷类型，明确相应的系统工作模式；
- b) 根据这些应力或载荷的作用方式，结合系统功能原理，分析这些应力和载荷的长期作用对系统结构可能造成的影响；
- c) 基于上述分析，确定可能导致性能参数发生退化的原因，填写性能退化原因与机理分析表中“性能退化原因”部分；
- d) 分析描述可能存在的性能退化过程，并基于相应的退化原因判别性能退化机理，填写性能退化原因与机理分析表中“性能退化机理”部分；
- e) 基于性能退化过程描述和机理分析结果，分析确定各退化机理可能影响的最低层次关键性能参数，填写性能退化原因与机理分析表中“影响的关键性能参数”部分；
- f) 针对各退化机理对关键性能参数的危害性和可能性进行评分，并将危害性评分和可能性评分相乘得到重要度得分，填写性能退化原因与机理分析表中“重要度”部分。

表 2 性能退化原因与机理分析表

系统结构	性能退化原因	性能退化机理		影响的关键性能参数	重要度		
		性能退化过程描述	机理名称		危害性评分	可能性评分	重要度得分
列出可能发生退化效应的系统最低层次结构	阐述造成性能退化的原因，即可能使得性能参数发生退化的使用场景、环境应力和工作载荷	定性地阐述性能退化过程	根据退化原因确定退化机理	填写各退化机理影响的关键性能参数	对各退化机理的影响危害性进行评分	对各退化机理发生的可能性进行评分	计算各退化机理的重要度得分

5.2.2 具体要求

开展性能退化原因与机理分析的具体要求与说明如下：

- a) 性能退化原因的分析应密切联系系统的使用场景，并结合设计人员和可靠性分析人员的经验综合确定；
- b) 性能退化过程的描述应使用如下形式：在系统某个使用场景中的某个应力/载荷作用下，系统结构发生了何种变化，或直接使得某个最低层次性能参数发生退化；
- c) 性能退化机理的分析应从退化原因着手，根据性能退化过程的描述确定机理类型，常见的性能退化机理及相应的判别标准见附录 B；
- d) 性能退化机理的严重性推荐评分准则见附录 A，严重性评分和可能性评分相乘得到重要度得分。

5.3 退化性能参数分析

5.3.1 方法选择

退化性能参数分析的目的是分析关键性能参数，并判定一级关键性能参数是否存在退化。若未按层次进行分解或只有一个层次的性能参数，可不开展。退化性能参数分析推荐方法如下：

- a) 经验分析法，即设计人员和领域专家基于工程经验和相似系统直接确定存在退化的关键性能参数；
- b) 理论分析法，即分析人员基于系统结构层次，结合性能参数退化原因与机理分析结果，逐层分析下一级性能退化是否导致上一级性能退化，并最终确定存在退化的一级关键性能参数。

5.3.2 理论分析步骤

本部分主要规定理论分析法的步骤和要求。若采用经验分析法确定存在退化的关键性能参数，直接在PPDA报告中说明即可。理论分析法应参照表 3所示的分析表开展分析。表中，判定关键性能参数是否存在退化通常有以下几种依据：

- a) 判定为“是”：
 - 1) 对于最低层次性能，存在性能退化机理，且重要度得分在 25 以上；

- 2) 对于其他层次性能，更低层次的性能会发生退化，并相应地造成该性能发生退化。
- b) 判定为“否”：
- 1) 对于最低层次性能，不存在性能退化机理或退化机理重要度得分在 25 以下；
 - 2) 对于其他层次性能，更低层次的性能会发生退化，但对该性能几乎没有影响，可以忽略。
- c) 判定为“不确定”：
- 在现有认识下不确定该关键性能参数是否退化。

表 3 退化性能参数分析表

一级性能	对应结构	是否退化	二级性能	对应结构	是否退化	...	最低层次性能	对应结构	是否退化
列出所有一级性能参数及其对应的系统结构		判定是否退化	列出所有二级性能参数及其对应的系统结构		判定是否退化	...	列出所有最低层次性能参数及其对应的系统结构		判定是否退化

5.4 性能退化内外因变量分析

5.4.1 内因变量分析

通过定性分析关键性能参数的关联内因变量发生变化（变大或变小）后如何影响对应结构特性及工作过程，并结合功能原理和相关的性能参数综合判定。典型的判定依据如下：

- a) 内因变量的变化将改变相应结构的动作速率或工作频率，从而改变性能退化速率；
- b) 内因变量的变化将改变相应结构自身性质，使系统某些变化（如物质流失、形变、应力释放等）的速率发生变化，从而改变性能退化速率；
- c) 结合相似系统或专家经验判定。

5.4.2 外因变量分析

一般而言，在性能退化原因分析中分析确定的性能退化原因（环境应力和工作载荷）就是影响性能退化的外因变量。在这一步的分析中，应更明确地确定具体的影响方式。典型的判定依据如下：

- a) 外因变量的变化将改变相应结构性质或内因变量（如材料参数、形变）发生变化的速率，从而改变性能退化的速率；
- b) 外因变量的长期作用直接引起相关性能参数的不可逆漂移；
- c) 结合相似系统或专家经验判定。

5.4.3 填写性能退化内外因变量分析表

性能退化内外因变量分析应填写如表 4所示的分析表。

表 4 性能退化影响因素分析表

存在退化的关键性能参数				影响因素			
				内因变量		外因变量	
一级性能	二级性能	...	最低层次性能	名称	影响方式	名称	影响方式
按层次关系列出存在退化的所有关键性能参数				列出影响退化的内因变量	分别说明各内因变量对退化的影响方式	列出影响退化的外因变量	分别说明各外因变量对退化的影响方式

5.5 生成分析结果

在完成上述全部分析后，需要生成PPDA分析结果：

- 根据退化性能参数分析得到的退化性能参数分析表中提取存在退化的关键性能参数，整理得到退化关键性能参数清单；
- 在性能退化原因与机理分析得到的性能退化原因与机理分析表，筛选出退化性能参数的退化原因与机理，整理得到退化原因与机理清单；
- 根据内因变量分析结果与的性能退化影响因素分析表，整理得到影响退化关键性能参数的内因变量清单；
- 根据内因变量分析结果与的性能退化影响因素分析表，整理得到影响退化关键性能参数的内因变量清单。

5.6 工作报告

PPDA工作报告应包含的具体内容如下：

- 完整的分析流程描述及必要说明，包括信息收集与整理、性能退化原因与机理分析、退化性能参数分析与性能退化内外因变量分析；
- 各分析流程的关键输出表格，包括 PPDA 所需信息表、性能退化原因与机理分析表、退化性能参数分析表、性能退化影响因素分析表；
- 各分析流程的关键输出图。

完整的PPDA工作报告可参照附录C案例。

附录 A
(资料性附录)
性能退化机理评分准则

A.1 性能退化机理的严重性评分准则

表 A.1 性能退化机理的严重性评分准则

性能退化严重性描述		分数
轻度危害	对系统相关关键性能几乎没有影响，或影响轻微	1~3
中等危害	使系统相关关键性能发生一定程度退化，可能导致功能降级、任务延误、非计划性维修等中等程度影响	4~6
严重危害	使系统相关关键性能发生显著退化，可能导致功能丧失、任务失败、系统损坏等严重影响	7~8
重大危害	使系统相关关键性能发生显著且迅速退化，可能导致人员伤亡、系统毁坏等重大影响	9~10

A.2 性能退化机理的可能性评分准则

表 A.2 性能退化机理的可能性评分准则

可能性评分准则		分数
该机理对应的性能退化原因涉及的使用场景占全部使用场景的比例 p 满足	$0 < p \leq 10\%$	1
	$10\% < p \leq 20\%$	2
	$20\% < p \leq 30\%$	3
	$30\% < p \leq 40\%$	4
	$40\% < p \leq 50\%$	5
	$50\% < p \leq 60\%$	6
	$60\% < p \leq 70\%$	7
	$70\% < p \leq 80\%$	8
	$80\% < p \leq 90\%$	9
	$90\% < p \leq 100\%$	10

附录 B
(资料性附录)
常见的性能退化机理及判别方法

常见的性能退化机理与判别方法见表 B.1。

表 B.1 常见性能退化机理及判别方法表

机理名称	判别方法
物质流失/生长 (如磨损、晶枝生长)	<ul style="list-style-type: none"> • 使用场景：存在物质间（机械界面/导电粒子）的相对运动 • 环境应力/工作载荷：包含机械摩擦力或电应力 • 退化过程：发生尺寸的减少/增加和材料的流失/生长，导致相关性能参数发生退化
疲劳	<ul style="list-style-type: none"> • 使用场景：系统长时间工作或间歇工作 • 环境应力/工作载荷：包含周期性变化的交变环境应力或工作载荷，如交变的温度应力、交变的剪切应力等 • 退化过程：产生裂纹导致结构内部聚合力或应力分布变化，如交变温度应力使得焊点产生微小裂纹导致电路板与器件连接力变小
腐蚀	<ul style="list-style-type: none"> • 使用场景：系统在具有腐蚀性的气体、液体的环境中工作 • 环境应力/工作载荷：腐蚀性气体、液体或混合环境应力，如盐雾气氛、腐蚀性冷却液、人体汗液等 • 退化过程：系统物理、化学或生物性质的变化，如点蚀脱落、锈蚀甚至内部物质的泄露
老化	<ul style="list-style-type: none"> • 使用场景：系统长时间工作或间歇工作 • 环境应力/工作载荷：往往为温度应力、电应力等 • 退化过程：材料参数发生变化，如强度降低、粘性变差、热阻降低等，导致相关性能参数发生退化
应力松弛	<ul style="list-style-type: none"> • 使用场景：有力或加速度作用于连接结构、弹簧等结构的场景 • 环境应力/工作载荷：往往为温度和振动 • 退化过程：结构内部力减小，导致相关性能参数发生退化
蠕变	<ul style="list-style-type: none"> • 使用场景：有力或加速度作用于具有粘弹性、粘塑性材料的结构的场景 • 环境应力/工作载荷：往往为机械应力和温度 • 退化过程：系统某一结构尺寸缓慢增加，导致相关性能参数发生退化
偏移/漂移	<ul style="list-style-type: none"> • 使用场景：有温度应力或电应力等长期作用于电子系统的场景 • 环境应力/工作载荷：往往为温度应力、电应力等 • 退化过程：系统固有物理属性偏移名义值，或直接导致相关性能参数逐步偏移名义值

附录 C (资料性附录)

某型激光器种子控制模块性能参数退化分析示例

C.1 信息收集与整理

为了开展激光器种子控制模块（电子组件）的PPDA分析，分析人员根据需求，从FPMA报告中收集了使用场景、结构组成、功能原理、关键性能参数、关联内外因变量等信息。主要内容如图C.1和表C.1所示。

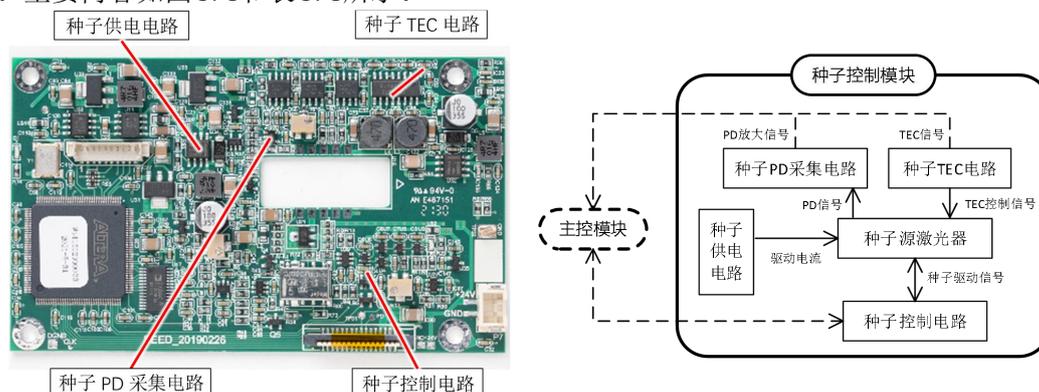


图 C.1 种子控制模块结构组成及功能框图

表 C.1 种子控制模块关键性能参数及关联内外因变量

功能	关键性能参数		对应结构	关联内因	关联外因
	一级性能	二级性能			
种子输出供电与控制	种子控制信号	脉冲频率的控制电压	控制芯片及其控制回路	信号源内阻、电阻反馈网络	温度
	种子源供电	输出驱动电流	发光二极管、MOS管及其放大反馈、恒流控制回路	运放IC失调电压和失调电流、放大反馈电阻、采样电阻	温度
		输出驱动电压		发光二极管、MOS管、电源压降及内阻	温度

C.2 性能退化原因与机理分析

基于种子控制模块（电子组件）的使用场景、结构组成、功能原理等分析了可能引起退化的原因与机理，并分析了各机理对关键性能参数的影响，如表C.2所示。

表 C.2 种子控制模块性能退化原因与机理分析表

系统结构	性能退化原因	性能退化机理		影响的关键性能参数	重要度		
		性能退化过程描述	机理名称		危害性评分	可能性评分	重要度得分
运放反馈回路	运算放大器	使用场景：锂电池极耳加工	在进行极耳加工时，多个运放芯片的失调电压和失调电流受	输出驱动	8	4	32

系统结构		性能退化原因	性能退化机理		影响的 关键性 能参 数	重要度		
			性能退化过程描述	机理 名称		危害 性评 分	可能 性评 分	重要 度得 分
及采样 电阻	芯片	工作载荷：脉冲 电压信号 环境应力：温度	温度影响发生较大偏移，导致传递到采样电阻的电压发生偏移与退化。		电流			
	采样 电阻		在进行极耳加工时，采样电阻将会承受2A的峰值电流，可能造成电阻退化，同时该电阻只有0.125 Ω，阻值的退化可能很显著。	老化		8	2	16
发光二 极管及 其恒流 输出支 路	发光 二极管	使用场景：锂电 池极耳加工 工作载荷：脉冲 电压信号 环境应力：温度	在进行极耳加工时，由于二极管的半导体特性，在温度发生变化时期伏安特性及承载电压均可能发生较大变化，导致偏移退化发生。	偏移	输出 驱动 电压	5	7	35
	MOS 开关		在进行极耳加工时，MOS管将承受绝大部分电源电压（8V），同时电流峰值可达2A，在长期电应力作用下，MOS开关的导通特性发生老化，影响输出驱动电压。	老化		9	6	48

C.3 退化性能参数分析

依据关键性能参数的层次关系，确定存在退化的性能参数，结果如表C.3所示。

表 C.3 种子控制模块退化性能参数分析表

一级性能	对应结构	是否 退化	二级性能	对应结构	是否退化
种子控制信号	控制芯片及其控制回路	否	脉冲频率的控制电压	控制芯片及等效RC回路	否
种子源供电	发光二极管、MOS管及其恒流控制回路	是	输出驱动电流	运放反馈回路及采样电阻	是
			输出驱动电压	发光二极管及其恒流输出支路	是

T/CICC

指挥控制学会团体标准

T/CICC 35004—2025

确信可靠性建模与预计

Belief reliability modeling and prediction

2025-06-29 发布

2025-06-29 实施

中国指挥与控制学会 发布

目 次

前 言.....	II
1 范围.....	1
2 引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 通用要求.....	1
4.1 工作输入.....	1
4.2 模型型式及要素.....	1
5 技术要求.....	2
5.1 学科交叉方程构建.....	2
5.2 性能退化方程构建.....	3
5.3 裕量方程构建.....	3
5.4 度量方程构建.....	4
5.5 确信可靠性分析.....	4
5.6 确信可靠性预计.....	4
5.7 工作报告.....	5
附录 A.....	6
附录 B.....	14
附录 C.....	22
附录 D.....	30

前 言

本文件按照 GB/T 1.1-2020 《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由中国指挥与控制学会提出并归口。

本文件起草单位：北京航空航天大学、杭州市北京航空航天大学国际创新研究院（北京航空航天大学国际创新学院）、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、长龙（杭州）航空维修工程有限公司、厦门宏发电力电器有限公司。

本文件主要起草人：陈文彬、李晓阳、陶昭、孙富强、张清源、祖天培、康锐、王浩伟、张健安、伍湘平、阮进喜、曾康、徐衍涛。

确信可靠性建模与预计

1 范围

本文件规定了确信可靠性建模与预计的要求和步骤，主要包括建立学科交叉方程、性能退化方程、裕量方程和度量方程，并计算系统的确信可靠度。

本文件适用于新研系统正向设计过程，也可供已投入使用的系统进行可靠性设计改进时参照使用。

2 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。

T/CICC 35001-2025	确信可靠性术语
T/CICC 35002-2025	功能、性能及裕量分析
T/CICC 35003-2025	性能参数退化分析

3 术语和定义

T/CICC 35001-2025、T/CICC 35002-2025 和 T/CICC 35003-2025 界定的术语和定义适用于本文件。

4 通用要求

4.1 工作输入

开展确信可靠性建模与预计工作前，应做好以下工作输入：

- a) 根据 T/CICC 35002-2025 完成系统的功能、性能及裕量分析；
- b) 根据 T/CICC 35003-2025 完成系统的性能参数退化分析；

4.2 模型型式及要素

确信可靠性模型型式包括：学科交叉方程、性能退化方程、裕量方程、度量方程。各模型中的构成要素具体如下：

- a) 学科交叉方程由系统的关键性能参数与其内因变量、外因变量和牛顿时间的数学关系来表达，记为：

$$P = f(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) \quad (1)$$

式中：

- P —— 关键性能参数；
- $f(\cdot)$ —— 学科交叉方程；
- \mathbf{X} —— 内因变量向量；
- \mathbf{Y} —— 外因变量向量。

- b) 退化方程由系统的关键性能参数与其内因变量、外因变量、牛顿时间、退化时间之间的数学关系来表达，记为：

$$P = f_{\vec{t}}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) \quad (2)$$

式中：

- \vec{t} —— 退化时间；
 $f_{\vec{t}}$ —— 退化方程。

- c) 裕量方程由系统的关键性能参数与其需求阈值之间的差距来表达，记为：

$$M = m_{\vec{t}}(P, P_{\text{th}}) \quad (3)$$

式中，

- M —— 性能裕量；
 $m_{\vec{t}}$ —— 裕量方程；
 P_{th} —— 性能阈值。

- d) 度量方程由系统的关键性能参数与其内因变量、外因变量、牛顿时间、退化时间、需求阈值之间的数学关系来表达，记为：

$$R(f_{\vec{t}}(\tilde{\mathbf{X}}, \tilde{\mathbf{Y}}, \vec{t}) = \text{Ch}\{m_{\vec{t}}(\tilde{P}, \tilde{P}_{\text{th}}) > 0\} \quad (4)$$

式中，

- R —— 确信可靠度；
 $\tilde{\mathbf{X}}$ —— 考虑不确定性的内因变量向量 \mathbf{X} ；
 $\tilde{\mathbf{Y}}$ —— 考虑不确定性的外因变量向量 \mathbf{Y} ；
 \tilde{P} —— 考虑不确定性的关键性能参数；
 \tilde{P}_{th} —— 考虑不确定性的性能阈值；
 $\text{Ch}\{\cdot\}$ —— 机会测度。

当性能裕量为机会变量（包含随机和认知混合不确定性）时， $\text{Ch}\{\cdot\}$ 为机会测度；当性能裕量为随机变量（仅包含随机不确定性）时， $\text{Ch}\{\cdot\}$ 转化为概率测度，记作 $\text{Pr}\{\cdot\}$ ；当性能裕量为不确定变量（仅包含认知不确定性）时， $\text{Ch}\{\cdot\}$ 转化为不确定测度，记作 $\mathcal{M}\{\cdot\}$ 。

5 技术要求

5.1 学科交叉方程构建

5.1.1 学科交叉方程构建方法

针对每个关键性能参数，其学科交叉方程（式(1)）构建方法如下：

- a) 基于工作原理的学科交叉方程建模，详见 5.1.2 条；
- b) 基于功能/故障逻辑的学科交叉方程建模，详见 5.1.3 条；
- c) 基于数据驱动的学科交叉方程建模，详见 5.1.4 条。

5.1.2 基于工作原理的学科交叉方程构建

根据系统的功能原理和结构层次，结合动力学、电磁学、光学等单/多门学科知识，在学科模型基础上，完成学科交叉方程的构建。具体实施参考附录 A.1、附录 B.1.1 和附录 C.1.1。

5.1.3 基于功能/故障逻辑的学科交叉方程构建

将系统的功能/故障状态视为关键性能参数，根据系统的功能/故障逻辑和结构层次，利用适合描述系统功能/故障逻辑的建模方法，如可靠性框图、故障树、马尔科夫链、贝叶斯网络等，完成学科交叉方程的构建。具体实施参考附录 B.1.2 和附录 C.1.2。

5.1.4 基于数据驱动的学科交叉方程构建

基于能够反映系统关键性能参数的特征参量数据，选择合适的数据驱动方法，如线性回归、系统辨识等，完成学科交叉方程的构建。具体实施参考附录 D.1。

5.2 性能退化方程构建

5.2.1 性能退化方程构建方法

根据系统性能参数退化分析得到的系统关键性能退化机理及其对应的系统层次，选择其退化方程（式(2)）的构建方法，有如下两种方法：

- a) 若系统最低层次的退化机理已知，则开展基于原理推导的性能退化方程建模，建模方法见 5.2.2 条；
- b) 若系统最低层次的退化机理未知或难以基于原理建立其退化机理模型，则开展基于数据驱动的性能退化方程建模，建模方法见 5.2.3 条。

5.2.2 基于原理推导的性能退化方程构建

基于原理推导的性能退化方程构建的主要步骤为：

- a) 根据系统最低层次的主要退化机理，分析其对应的物理化学过程，结合摩擦学、断裂力学、反应动力学等方法，建立系统最低层次的退化机理模型；
- b) 将最低层次的退化机理模型带入系统的学科交叉方程，得到系统关键性能参数的性能退化方程。

具体实施参考附录 A.2 和附录 B.2。

5.2.3 基于数据驱动的性能退化方程构建

基于数据驱动的性能退化方程构建方法分两类：

- a) 若系统的学科交叉方程是基于工作原理或功能/故障逻辑构建的，则主要步骤为：
 - 1) 基于最低层次部件的退化数据，采用数据驱动方法，建立系统最低层次的退化机理模型；
 - 2) 将最低层次的退化机理模型带入系统的学科交叉方程，得到系统的性能退化方程。

具体实施参考附录 B.2 和附录 C.2。

- b) 若系统关键性能参数的学科交叉方程是基于数据驱动方法构建的，则基于系统的该关键性能参数的退化数据，选择合适的数据驱动方法，如线性回归、系统辨识等，完成性能退化方程的构建。具体实施参考附录 D.1。

5.3 裕量方程构建

裕量方程构建的主要步骤为：

- a) 基于系统关键性能参数的学科交叉方程，根据系统功能、性能及裕量分析得到的性能阈值和裕量方程构建方法，完成系统初始裕量方程的构建；
- b) 基于系统关键性能参数的性能退化方程，根据系统功能、性能及裕量分析得到的性

能阈值和裕量方程构建方法，完成如(3)所示的裕量方程构建。
具体实施参考附录 A.3、附录 B.3、附录 C.3、附录 D.2。

5.4 度量方程构建

度量方程构建的主要步骤为：

- a) 分析学科交叉方程、裕量方程和退化方程中的不确定性来源。从内因变量、外因变量、需求阈值等三个方面分析参数不确定性，针对学科交叉方程、退化方程和裕量方程分析模型不确定性；
- b) 分析参数和模型不确定性的类型并进行量化。对有大量统计数据的参数采用概率测度量化其随机不确定性，对于仅有少数统计数据的参数采用不确定测度量化其认知不确定性；对于模型不确定性，采用不确定测度量化其认知不确定性；
- c) 将参数和模型的不确定性量化结果代入式(3)，通过度量性能裕量大于 0 的机会，完成如(4)所示的度量方程的构建。

具体实施参考附录 A.4、附录 B.4、附录 C.4、附录 D.3。

5.5 确信可靠性分析

5.5.1 确信可靠性模型中的参数取值确定

确信可靠性模型中的参数取值确定主要方式包括：

- a) 系统的设计、生产、工艺方案；
- b) 系统的使用规格书；
- c) 基于系统可靠性实验的统计分析；
- d) 相似系统的相关参数取值和可靠性实验；
- e) 系统供应商的相关信息。

具体实施参考附录 A.5.1、附录 B.5.1、附录 C.5.1、附录 D.4.1。

5.5.2 确信可靠度计算

确定系统的学科交叉方程、性能退化方程、裕量方程和度量方程中的参数取值，将参数取值代入上述四个方程中，获得系统关键性能参数的裕量和退化与内因变量、外因变量、牛顿时间、退化时间、需求阈值之间的确定性和不确定性规律，并计算系统的确信可靠度。具体实施参考附录 A.5.2、附录 B.5.2、附录 C.5.2。

5.5.3 可靠性敏感性分析

根据系统的学科交叉方程、性能退化方程、裕量方程、度量方程和确信可靠度计算结果，结合系统的设计、生产、工艺、使用等过程，定量分析影响系统可靠性的内因变量、外因变量及不确定性因素，给出系统面向高可靠性的系统设计、生产、工艺和使用过程中的指导建议。具体实施参考附录 A.5.3、附录 B.5.3、附录 C.5.3。

5.6 确信可靠性预计

采用构建的系统学科交叉方程、性能退化方程、裕量方程和度量方程，针对给定的使用剖面，预计系统在规定时间内规定条件下完成规定功能的可靠度。具体实施参考附录 A.6、附录 B.6、附录 C.6、附录 D.4.2。

5.7 工作报告

确信可靠性建模与预计报告至少应包括以下内容：

- a) 概述；
- b) 学科交叉方程构建；
- c) 性能退化方程构建；
- d) 不确定性分析与量化；
- e) 确信可靠度方程构建与分析；
- f) 确信可靠性预计；
- g) 结论与建议。

附录 A
(资料性附录)

舱门锁机构的确信可靠性建模与预计示例

A.1 舱门锁机构的学科交叉方程构建

舱门锁机构由锁体、活塞杆、连杆、摇臂、铰链和锁钩等组成，如图 A.1 所示。

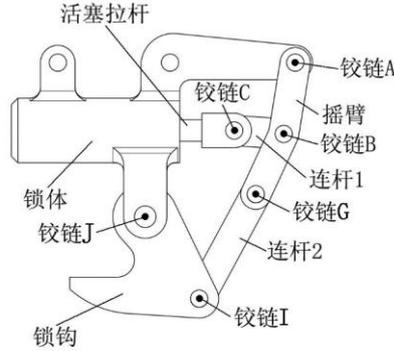


图 A.1 舱门锁机构结构示意图

舱门锁机构的主要功能是完成开锁和关锁的运动，其工作原理为：在锁定阶段，液压系统驱动活塞杆线性向左移动，活塞杆进一步驱动摇臂和锁钩顺时针旋转。当活塞杆移动到最左端时，锁钩到达锁定位置，完成锁紧运动。开锁阶段与锁定阶段的运动相反。

针对舱门锁机构开展了功能、性能及裕量分析，选择锁定误差作为关键性能参数，下面针对舱门锁机构的锁定误差构建学科交叉方程。

对舱门锁机构的结构进行简化，得到其几何原理图，如图 A.2 所示。

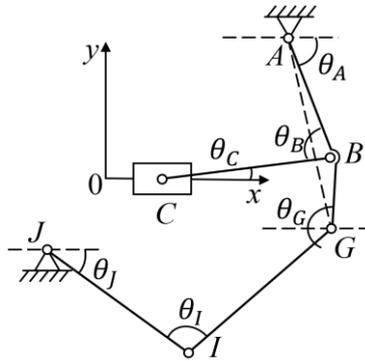


图 A.2 舱门锁机构的几何原理图

根据舱门锁机构的运动原理，可以得到锁钩角度为：

$$\theta_J(t) = \arccos \frac{L_{IJ}^2 + l_{GJ}^2(t) - L_{GI}^2}{2L_{IJ}l_{GJ}(t)} - \arctan \frac{y_A - y_J}{x_A - x_J} + \arccos \frac{l_{GJ}^2(t) + l_{AJ}^2 - l_{AG}^2(t)}{2l_{GJ}(t)l_{AJ}} \quad (\text{A.1})$$

式中，

$$l_{GJ}^2(t) = l_{AJ}^2 + l_{AG}^2 - 2l_{AJ}l_{AG} \cos \left(\arccos \frac{l_{AC}^2(t) + L_{AB}^2 - L_{BC}^2}{2l_{AC}(t)L_{AB}} - \arccos \frac{l_{AG}^2 + L_{AB}^2 - L_{BG}^2}{2l_{AG}L_{AB}} + \arccos \frac{l_{AC}^2(t) + l_{AJ}^2 - l_{CJ}^2(t)}{2l_{AC}(t)l_{AJ}} \right) \quad (\text{A.2})$$

$$l_{AJ}^2 = (y_J - y_A)^2 + (x_J - x_A)^2 \quad (\text{A.3})$$

$$l_{AC}^2(t) = y_A^2 + (x_C(t) - x_A)^2 \quad (\text{A.4})$$

$$l_{CJ}^2(t) = y_J^2 + (x_C(t) - x_J)^2 \quad (\text{A.5})$$

式中：

$\theta_J(t)$ —— 牛顿时间 t 下的锁钩角度，即杆 IJ 与水平线的夹角，单位为毫米（mm）；

$x_C(t)$ —— 牛顿时间 t 下铰链 C 的坐标，单位为毫米（mm）；

t —— 牛顿时间，单位为秒（s）；

L_{IJ} —— 杆 IJ 的长度，单位为毫米（mm）；

L_{GI} —— 杆 GI 的长度，单位为毫米（mm）；

L_{AB} —— 杆 AB 的长度，单位为毫米（mm）；

L_{BC} —— 杆 BC 的长度，单位为毫米（mm）；

L_{BG} —— 杆 BG 的长度，单位为毫米（mm）；

$l_{AC}(t)$ —— 牛顿时间 t 下铰链 A 和 C 的距离，单位为毫米（mm）；

l_{AJ} —— 铰链 A 和 J 的距离，单位为毫米（mm）；

$l_{AG}(t)$ —— 牛顿时间 t 下铰链 A 和 G 的距离，单位为毫米（mm）；

$l_{CJ}(t)$ —— 牛顿时间 t 下铰链 C 和 J 的距离，单位为毫米（mm）；

$l_{GJ}(t)$ —— 牛顿时间 t 下铰链 G 和 J 的距离，单位为毫米（mm）；

x_A —— 铰链 A 的横坐标，单位为毫米（mm）；

y_A —— 铰链 A 的纵坐标，单位为毫米（mm）；

x_J —— 铰链 J 的横坐标，单位为毫米（mm）；

y_J —— 铰链 J 的纵坐标，单位为毫米（mm）。

进一步地，可计算舱门锁机构的锁定误差，即学科交叉方程为：

$$\delta = \left| \theta_J(x_C(t) = a) - \theta_J^*(x_C(t) = a) \right| \quad (\text{A.6})$$

式中：

δ —— 舱门锁机构的锁定误差，单位为弧度（rad）；

a —— 锁定位置时铰链 C 的坐标 x_C 的取值，单位为毫米（mm）；

θ_J^* —— 理想锁钩角度，单位为弧度（rad）；

A.2 舱门锁机构的性能退化方程构建

针对舱门锁机构开展了性能参数退化分析，获得舱门锁机构的主要退化机理为舱门锁机构中铰链的轴套之间的相对运动会引起磨损，进而增加铰链的轴套间隙，影响舱门锁机构的锁定误差。

轴套间的磨损可用 Archard 模型描述，根据 Archard 模型，计算铰链中的磨损深度：

$$h_i(\vec{t}) = \vec{t} \left(\frac{K_{1i}}{3H_{1i}} + \frac{K_{2i}}{3H_{2i}} \right) \cdot 0.5642 \sqrt{\frac{2F_i}{\tau_i} \frac{D_i - d_i}{D_i d_i \left(\frac{1 - \nu_{1i}^2}{E_{1i}} + \frac{1 - \nu_{2i}^2}{E_{2i}} \right)}} \cdot d_i |\Delta\theta_i| \quad (\text{A.7})$$

式中：

- $h_i(\vec{t})$ —— 第 i 个铰链的磨损深度, 单位为毫米 (mm);
 \vec{t} —— 退化时间, 以锁机构的动作周期数表示;
 K_{1i} —— 第 i 个铰链套筒的磨损系数, 单位为 $\text{mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$;
 K_{2i} —— 第 i 个铰链轴的磨损系数, 单位为 $\text{mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$;
 H_{1i} —— 第 i 个铰链套筒的布氏硬度, 单位为 HB;
 H_{2i} —— 第 i 个铰链轴的布氏硬度, 单位为 HB;
 F_i —— 第 i 个铰链套筒和轴的接触力, 单位为牛 (N);
 τ_i —— 第 i 个铰链套筒和轴的接触长度, 单位为毫米 (mm);
 D_i —— 第 i 个铰链套筒的直径, 单位为毫米 (mm);
 d_i —— 第 i 个铰链轴的直径, 单位为毫米 (mm);
 ν_{1i} —— 第 i 个铰链套筒的泊松比, 无量纲;
 ν_{2i} —— 第 i 个铰链轴的泊松比, 无量纲;
 E_{1i} —— 第 i 个铰链套筒的弹性模量, 单位为吉帕 (GPa);
 E_{2i} —— 第 i 个铰链轴的弹性模量, 单位为吉帕 (GPa);
 $\Delta\theta_i$ —— 第 i 个铰链套筒和轴的转动角度差, 单位为弧度 (rad)。

进一步可得铰链中轴套的间隙为:

$$c_i(\vec{t}) = c_{0i} + h_i(\vec{t}) \quad (\text{A.8})$$

式中:

- $c_i(\vec{t})$ —— 退化时间 \vec{t} 下第 i 个铰链中的轴套间隙, 单位为毫米 (mm)。
 c_{0i} —— 第 i 个铰链中的轴套初始间隙, 单位为毫米 (mm);

为了考虑磨损对锁定误差的影响, 应用“有效长度模型”, 对杆的实际长度进行修正:

$$L^e = \sqrt{(L^a + x_L)^2 + y_L^2} \quad (\text{A.9})$$

式中:

- L^e —— 有效长度, 单位为毫米 (mm);
 L^a —— 实际长度, 单位为毫米 (mm);
 (x_L, y_L) —— 铰链中的局部坐标, 单位为毫米 (mm)。

由于铰链中的轴套具有力的相互作用, 因而 x_L 和 y_L 满足

$$x_L^2 + y_L^2 = c(\vec{t})^2 \quad (\text{A.10})$$

将杆长有效长度 L^e 代入式(A.1)即可得到舱门锁机构锁钩角度的退化方程为:

$$\theta_J(t, \vec{t}) = \arccos \frac{L_{IJ}^e(\vec{t}) + l_{GJ}^e(t, \vec{t}) - L_{GI}^e(\vec{t})}{2L_{IJ}^e(\vec{t})l_{GJ}^e(t, \vec{t})} - \arctan \frac{y_A - y_J}{x_A - x_J} + \arccos \frac{l_{GJ}^e(t, \vec{t}) + l_{AJ}^e(\vec{t}) - l_{AG}^e(t, \vec{t})}{2l_{GJ}^e(t, \vec{t})l_{AJ}^e(\vec{t})} \quad (\text{A.11})$$

进一步地, 可以得到舱门锁机构锁定误差的退化方程为:

$$\delta_t(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \left| \theta_J(x_C(t) = a, \vec{t}) - \theta_J^*(x_C(t) = a) \right| \quad (\text{A.12})$$

式中:

- X** —— 舱门锁机构的内因变量向量, $\mathbf{X} = (\mathbf{L}, \mathbf{l}, \mathbf{D}, \mathbf{d}, \boldsymbol{\tau}, \mathbf{X}_m)$;
- L** —— 杆长向量, $\mathbf{L} = (L_{AB}^e, L_{AG}^e, L_{BG}^e, L_{BC}^e, L_{GI}^e, L_{LJ}^e, L_{\text{piston}}^e)$;
- l** —— 两点间距离向量, $\mathbf{l} = (l_{GJ}^e, l_{AJ}^e, l_{AG}^e)$;
- D** —— 铰链中套筒直径向量, $\mathbf{D} = (D_i, i = A, B, C, G, I, J)$;
- d** —— 铰链中轴直径向量, $\mathbf{d} = (d_i, i = A, B, C, G, I, J)$;
- $\boldsymbol{\tau}$** —— 铰链中轴套的接触长度向量, $\boldsymbol{\tau} = (\tau_i, i = A, B, C, G, I, J)$;
- \mathbf{X}_m** —— 材料属性向量, $\mathbf{X}_m = (K_{1i}, K_{2i}, H_{1i}, H_{2i}, v_{1i}, v_{2i}, E_{1i}, E_{2i}, i = A, B, C, G, I, J)$;
- Y** —— 舱门锁机构的外因变量向量, $\mathbf{Y} = (F_i, i = A, B, C, G, I, J)$ 。

A.3 舱门锁机构的裕量方程构建

舱门锁机构锁定误差是个望小的性能参数, 令 ε 表示锁定误差阈值, 选用相对距离构建舱门锁机构锁定误差的裕量方程为:

$$m_{\tilde{\varepsilon}}(\delta, \varepsilon) = \frac{\varepsilon - \delta_{\tilde{\varepsilon}}(\mathbf{X}, \mathbf{Y})}{\varepsilon} \quad (\text{A.13})$$

A.4 舱门锁机构的度量方程构建

首先, 分析不确定性来源并进行量化。考虑前述学科交叉方程、退化方程和裕量方程均是通过原理推导得到, 对锁机构的运动过程描述准确, 因而不考虑模型不确定性, 仅考虑参数不确定性。

从内因变量、外因变量和需求阈值三个方面对不确定性进行分析:

- 内因变量的不确定性来源于制造过程中的尺寸偏差以及材料属性的不均匀性;
- 外因变量的不确定性来源于液压驱动力的波动, 体现在轴套的接触应力上;
- 性能阈值的不确定性来源于舱门锁机构由于制造误差导致的锁紧时锁钩和锁环的极限角度的不确定性。

上述不确定性均有大量的文献或者实验研究, 表明适合通过随机不确定性进行描述, 并服从正态概率分布, 为此采用正态概率分布进行量化, 具体的不确定性量化参数及对应的分布如表 A.1 所示。

表 A.1 舱门锁机构的不确定性量化结果

来源	参数	分布	来源	参数	分布
内因变量	套筒直径 D_i	$N(d_{0,i} + \mu_{D_i}, \sigma_{D_i}^2)$	内因变量	泊松比 ν_i	$N(\mu_{\nu_i}, (c_{\nu, \nu_i} \cdot \mu_{\nu_i})^2)$
	轴直径 d_i	$N(d_{0,i} + \mu_{d_i}, \sigma_{d_i}^2)$		磨损系数 K_i	$N(\mu_{K_i}, (c_{\nu, K_i} \cdot \mu_{K_i})^2)$
	连杆长度 L_j	$N(L_{0,i} + \mu_{L_j}, \sigma_{L_i}^2)$	外因变量	轴套接触应力 F_i	$N(\mu_{F_i}, (c_{\nu, F_i} \cdot \mu_{F_i})^2)$
	弹性模量 E_i	$N(\mu_{E_i}, (c_{\nu, E_i} \cdot \mu_{E_i})^2)$	需求阈值	角度误差阈值 ε	$N(\mu_{\varepsilon}, \sigma_{\varepsilon}^2)$
	布氏硬度 H_i	$N(\mu_{H_i}, (c_{\nu, H_i} \cdot \mu_{H_i})^2)$	/	/	/

将表 A.1 所示的不确定性量化结果代入舱门锁机构的裕量方程(A.13)中, 可以得到考虑退化和不确定性的性能裕量, 记为 $m_{\tilde{\varepsilon}}(\tilde{\delta}, \tilde{\varepsilon})$, 其中, 上标 \sim 表示参数具有不确定性。显然, $m_{\tilde{\varepsilon}}(\tilde{\delta}, \tilde{\varepsilon})$ 是一个随机变量。根据确信可靠性理论, 舱门锁机构锁定误差的确信可靠度表示为锁定误差裕量大于 0 的概率, 可得舱门锁机构的的确信可靠性度量方程为:

$$R = \Pr\{m_i(\tilde{\delta}, \tilde{\varepsilon}) > 0\} \quad (\text{A.14})$$

式中，Pr 表示概率测度。

由于舱门锁机构的确信可靠性方程形式复杂，难以给出方程的显式表达，在进行可靠性预测时，可借助蒙特卡洛仿真方法计算舱门锁机构的可靠度。

A.5 舱门锁机构的确信可靠性分析

A.5.1 舱门锁机构确信可靠性模型中的参数取值确定

根据某飞行器的舱门锁机构的技术规范和实验数据，确定舱门锁机构确信可靠性方程中的参数取值，结果如表 A.2 和表 A.3 所示。

表 A.2 舱门锁机构的公称尺寸

参数	公称尺寸	参数	公称尺寸	参数	公称尺寸
$L_{0,AB}$	33.534 (mm)	$L_{0,AG}$	63.738 (mm)	$L_{0,BG}$	30.806 (mm)
$L_{0,BC}$	23 (mm)	$L_{0,GI}$	55.082 (mm)	$L_{0,IJ}$	45.486 (mm)
$L_{0,piston}$	25 (mm)	d_{0A}	10 (mm)	d_{0B}	10 (mm)
d_{0C}	10 (mm)	d_{0G}	10 (mm)	d_{0I}	10 (mm)
d_{0J}	14 (mm)	τ_A	6 (mm)	τ_B	6 (mm)
τ_C	6 (mm)	τ_G	6 (mm)	τ_I	6 (mm)
τ_J	14 (mm)	/	/	/	/

注：各连杆的制造公差均为 IT8，铰链中轴孔的配合均为 H8/f8（基孔制）。

表 A.3 舱门锁机构的材料属性、外因变量及需求阈值的参数取值

不确定性来源	参数	分布	参数	分布
材料属性	E_{1i}	$N(120, 12^2)$ (GPa)	ν_{1i}	$N(0.37, 0.037^2)$
	E_{2i}	$N(210, 21^2)$ (GPa)	ν_{2i}	$N(0.29, 0.029^2)$
	H_{1i}	$N(85, 8.5^2)$ (HB)	K_{1i}	$N(4.07 \times 10^{-3}, (4.07 \times 10^{-4})^2)$ (mm ³ /(N·m))
	H_{2i}	$N(174, 17.4^2)$ (HB)	K_{2i}	$N(2.1 \times 10^{-2}, (2.1 \times 10^{-3})^2)$ (mm ³ /(N·m))
外因变量	F_A	$N(400, 40^2)$ (N)	F_B	$N(460, 46^2)$ (N)
	F_C	$N(400, 40^2)$ (N)	F_G	$N(400, 40^2)$ (N)
	F_I	$N(400, 40^2)$ (N)	F_J	$N(350, 35^2)$ (N)
需求阈值	ε	$N(0.035, 0.00875^2)$ (rad)	/	/

根据对应的公称尺寸查找极限偏差，利用式(A.15)和式(A.16)计算尺寸偏差的不确定性量化参数：

$$\mu_{D_i} = \frac{ES_i}{2}, \mu_{d_i} = es_i - \frac{es_i - ei_i}{2}, \mu_{L_j} = \frac{1}{2} |Es_j + Ei_j| = 0 \quad (\text{A.15})$$

$$\sigma_{D_i} = \frac{1}{6} ES_i, \sigma_{d_i} = \frac{1}{6} (es_i - ei_i), \sigma_{L_j} = \frac{1}{6} (Es_j - Ei_j) \quad (\text{A.16})$$

式中：

- ES_i —— 第 i 个铰链套筒直径的上偏差，单位为毫米 (mm)；
- es_i —— 第 i 个铰链轴直径的上偏差，单位为毫米 (mm)；
- ei_i —— 第 i 个铰链轴直径的下偏差，单位为毫米 (mm)；

- Es_j —— 第 j 个杆的杆长上偏差, 单位为毫米 (mm);
- Ei_j —— 第 j 个杆的杆长下偏差, 单位为毫米 (mm);
- j —— 杆的角标。

A.5.2 舱门锁机构的确信可靠度计算

将 A.5.1 节的参数取值代入式(A.12)和式(A.13), 可以计算得到舱门锁机构锁定误差及其裕量的退化预测结果, 如图 A.3 所示。可以发现: 锁定误差随动作周期的增加而增加, 裕量随动作周期的增加而下降, 这表明性能及其裕量的退化特征; 锁定误差及其裕量退化的 90% 包络区间随动作周期的增加而增加, 表明不确定性在退化时间下是增大的。

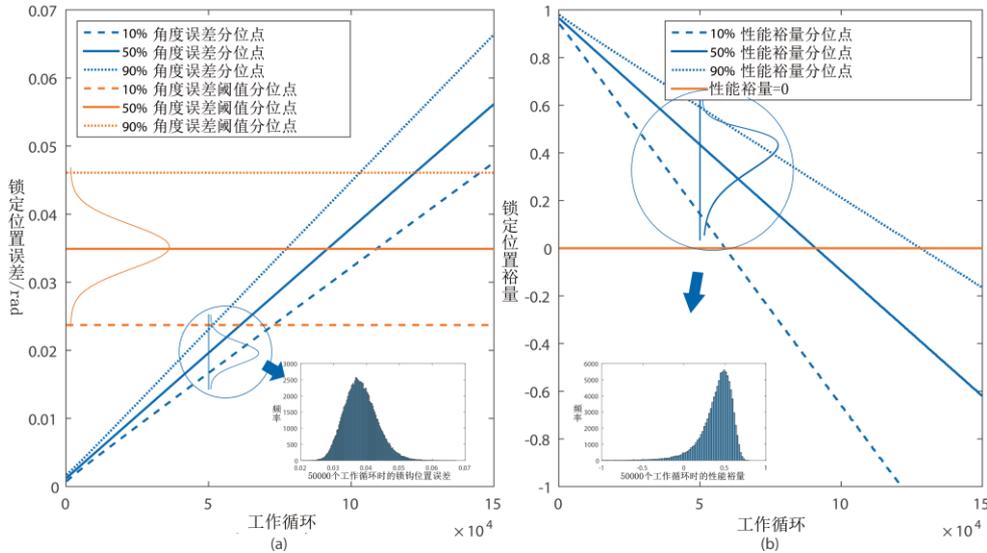


图 A.3 舱门锁机构锁定位置的锁钩角度误差及其裕量的退化预测结果

进一步地, 根据式(A.14), 可以计算得到舱门锁机构的确信可靠度: 可靠度 0.999 对应的可靠寿命为 17800 个动作周期, 对应飞行器 8900 次起落。

A.5.3 舱门锁机构的可靠性敏感性分析

结合舱门锁机构的确信可靠性模型, 开展了可靠性敏感性分析, 结果如图 A.4 至图 A.7 所示。

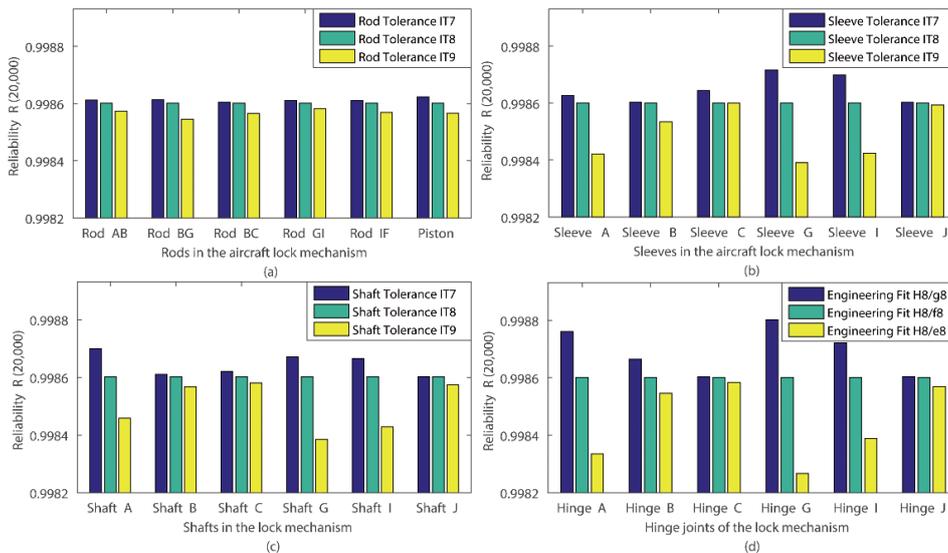


图 A.4 舱门锁机构加工制造参数的可靠性敏感性分析结果

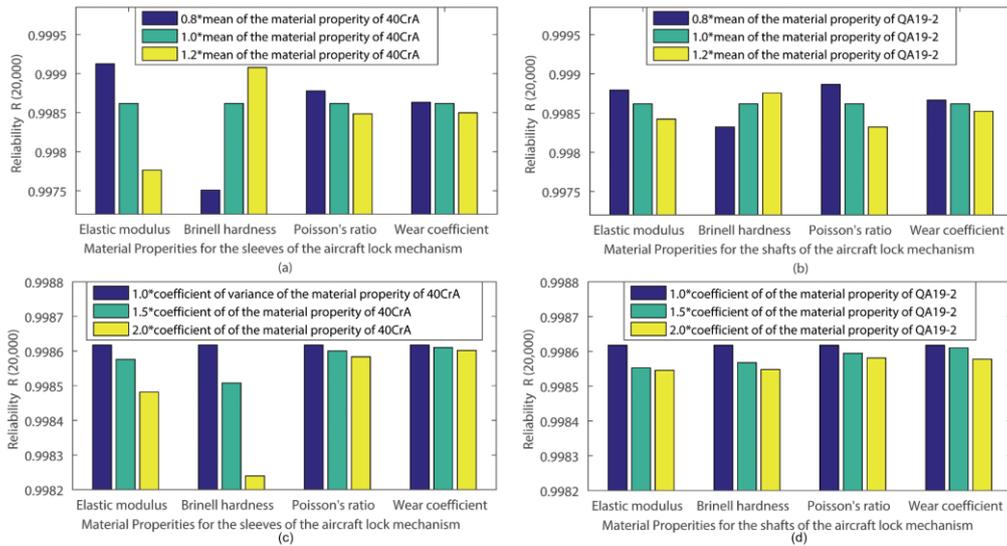


图 A.5 舱门锁机构材料参数的可靠性敏感性分析结果

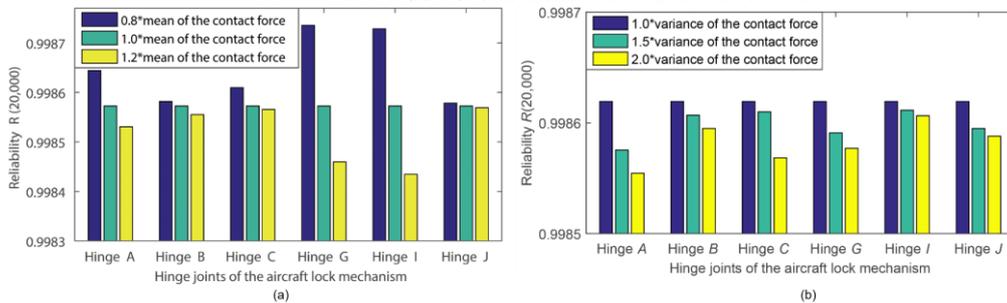


图 A.6 舱门锁机构轴套接触应力的可靠性敏感性分析结果

根据图 A.4 至图 A.6 可得：

- 连杆和轴套的公差越大，可靠度越低，其中，可靠度对连杆公差不敏感，铰链 A、G、J 的公差变化影响可靠度的程度最大。因此，可重点关注如何提高铰链 A、G、J 的制造公差。
- 较低的弹性模量、较高的布氏硬度和较低的泊松比有助于提高锁机构可靠性。材料属性的变异系数越大，可靠度越低。因此，可选择属性一致性较高的材料。
- 接触应力均值越大，可靠度越低，变异系数越大，可靠度越低。其中，铰链 G、I 和 A 中的轴套接触应力对可靠度的影响最大，在实际使用中应该适当关注。

上述结果表明，舱门锁机构的可信可靠性模型能够确定对其可靠性影响显著的参数，可以通过设计参数的改进或者不确定性的控制实现舱门锁机构可靠性的提高。本案例可以为舱门锁机构的制造加工、材料选择和来料控制提供理论依据，指导舱门锁机构设计和生产制造。

A.6 舱门锁机构的可信可靠性预计

根据舱门锁机构的可信可靠性模型，可以预计舱门锁机构的可信可靠度，如图 A.8 所示。

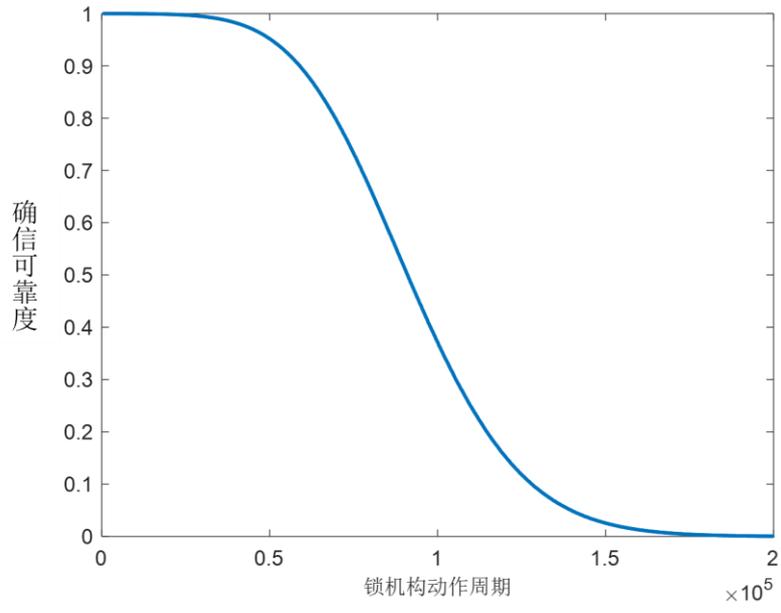


图 A.8 舱门锁机构的确信可靠性预计结果

附录 B (资料性附录)

滤波电路的确信可靠性建模与预计示例

B.1 滤波电路的学科交叉方程构建

考虑一个用于低通滤波的无源一阶 RC 滤波电路，该滤波电路由电阻、电容构成，如图 B.1 所示。滤波电路利用电容通高频阻低频的特点，通过与合适阻值的电阻配合，实现允许某特定频率下的低频信号通过，同时滤除高频成分的功能。

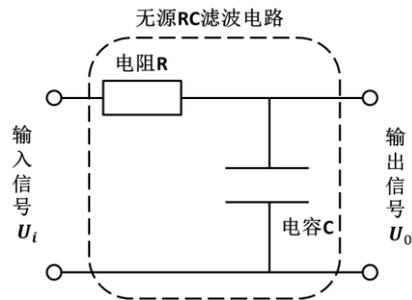


图 B.1 滤波电路结构示意图

针对滤波电路开展了功能、性能及裕量分析，选择交流衰减作为关键性能参数，同时，也关注滤波电路的失效逻辑。下面针对滤波电路，基于工作原理构建交流衰减的学科交叉方程，基于故障树构建滤波电路失效的考虑故障逻辑的学科交叉方程。

B.1.1 基于工作原理的滤波电路交流衰减的学科交叉方程构建

在滤波电路工作过程中，由于电路工作的频率较低（远低于 10KHz），可将金属膜电阻器的电路模型表示为一只电阻，将铝电解电容器的电路模型表示为等效电容与等效电阻的串联。基于上述分析，可以得到滤波电路的等效电路模型，如图 B.2 所示。

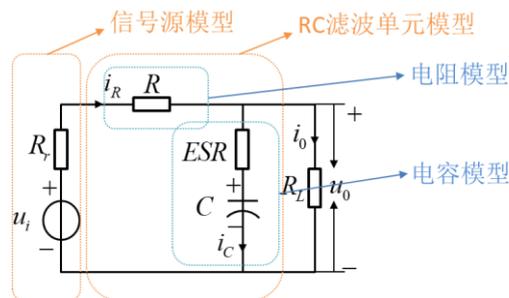


图 B.2 滤波电路的等效电路模型

图中：

- u_i —— 输入电压，单位为伏 (V)；
- u_o —— 输出电压，单位为伏 (V)；
- R_r —— 输入阻抗，结合实际工作中输入信号的特征，取 $R_r = 0$ ；
- R —— 金属膜电阻器的电阻值，单位为欧姆 (Ω)；
- C —— 铝电解电容器的电容值，单位为微法 (μF)；
- ESR —— 铝电解电容器的等效电阻值，单位为欧姆 (Ω)；
- R_L —— 负载电阻，结合实际任务剖面，取 $R_L = 5\text{k}\Omega$ ；
- i_R —— 流经电阻器的电流，单位为安培 (A)；

- i_c —— 流经电容器的电流，单位为安培（A）；
 i_0 —— 流经负载电阻的电流，单位为安培（A）。

幅频函数是描述滤波电路滤波特性的一种常见方法，它反映了不同频率的信号通过电路后衰减的程度。根据电路原理，滤波电路的交流衰减可计算为频率为输入电压信号频率时的幅频函数，即滤波电路交流衰减的学科交叉方程：

$$\begin{aligned}
 H(f_0) &= 20 \cdot \log \left| \frac{u_0(f_0)}{u_i(f_0)} \right| \\
 &= 20 \cdot \log \left| \left(ESR - \frac{1}{2\pi f_0 \cdot C} j \right) \cdot R_L \right| - 20 \cdot \log \left| \left(\left(ESR - \frac{1}{2\pi f_0 \cdot C} j \right) + R_L \right) \right| - \\
 &\quad 20 \cdot \log \left| \left(\left(R_r + R + \frac{(2\pi f_0)^2 C^2 (1 + R_L + ESR)}{R_L ((2\pi f_0)^2 C^2 ESR^2 + 1)} \right) + \frac{1}{2\pi f_0 \cdot C} j \right) \right|
 \end{aligned} \quad (B.1)$$

式中：

- f_0 —— 输入电压信号频率，单位为赫兹（Hz）；
 $H(f_0)$ —— 输入电压信号频率为 f_0 时的幅频函数，单位为分贝（dB）。

B.1.2 基于故障树的滤波电路失效的学科交叉方程构建

针对滤波电路构建故障树模型，以“滤波电路失效”为顶事件，定义四类功能失效路径作为中间事件，分别为：特征频率超差、直流成分衰减过大、交流成分衰减不足和功率消耗过大。进一步地，根据故障逻辑，各中间事件进一步分解为具体的基本事件，包括电阻器阻值超差、电容器容量超差以及等效串联电阻超差。基于上述分析，构建滤波电路的故障树模型，如图 B.3 所示。

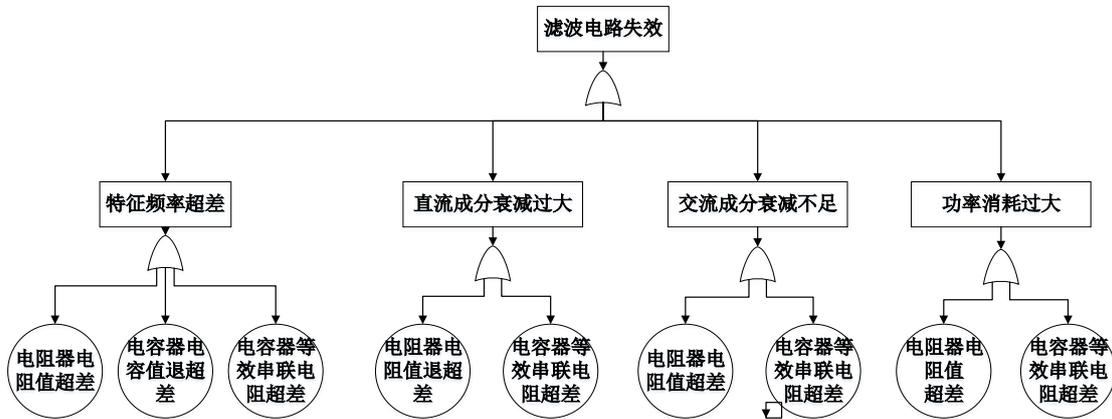


图 B.3 滤波电路的故障树模型

B.2 滤波电路的性能退化方程构建

本节针对滤波电路开展了性能参数退化分析，暂不考虑基于故障树的底层基本事件的失效率的退化，获得滤波电路的主要退化机理为金属膜电阻器的金属导电膜层氧化和铝电解电容器的电解液蒸发，进而影响金属膜电阻器和铝电解电容的电路特性，影响滤波电路的交流衰减。为此，首先构建金属膜电阻器和铝电解电容的退化方程，进一步构建滤波电路交流衰减的退化方程。

(1) 金属膜电阻器的退化方程

针对金属膜电阻器的金属导电膜层氧化的主要退化机理，基于金属氧化动力学，量化电阻氧化膜厚度的退化，并以阿伦尼斯模型描述温度对电阻表面氧化的加速作用，得到金属膜电阻器的电阻退化方程为

$$R(\bar{t}) = R_0 \cdot \frac{d_0 - x_0}{d_0 - (A_0 e^{-E_A/kT \cdot \bar{t}^{0.5}} - B_R)} \quad (\text{B.2})$$

式中：

- R_0 —— 初始电阻值，单位为欧姆（ Ω ）；
- x_0 —— 金属膜的初始退化量，单位为毫米（mm）；
- d_0 —— 电阻器制造完成时的实际膜厚，单位为毫米（mm）；
- E_A —— 常数；
- A_0 —— 常数；
- B_R —— 常数；
- k —— 玻尔兹曼常数；
- T —— 滤波电路的工作温度，单位为开尔文（K）。

(2) 铝电解电容器的退化方程

针对铝电解电容器的电解液蒸发的主要退化机理，基于电容器的物理结构和电解液蒸发机理，并以阿伦尼斯模型描述温度对蒸发速率的加速作用，可以得到铝电解电容器的电容退化方程为

$$C(\bar{t}) = C_0 \cdot \frac{l_c}{l_c + \varpi \cdot \exp\left(-\frac{E_\omega}{kT}\right) \cdot \bar{t}} \quad (\text{B.3})$$

式中：

- C_0 —— 电容初值，单位为微法（ μF ）；
- l_c —— 电容的长度，单位为毫米（mm）；
- ϖ —— 常数；
- E_ω —— 常数。

在铝电解电容器的电解液蒸发过程中，电容的等效电阻 ESR 随时间呈现出指数增大的退化规律。由于等效电阻的退化规律较为复杂，建模较为困难，因此本案例采用基于数据驱动的建模方法，通过指数形式的退化模型描述等效电阻退化。铝电解电容器的等效电阻退化方程为

$$ESR(\bar{t}) = ESR_0 + \alpha_0 \exp(\alpha_1 T) \bar{t}^\beta \quad (\text{B.4})$$

式中：

- ESR_0 —— 等效电阻初值，单位为欧姆（ Ω ）；
- α_0 —— 常数；
- α_1 —— 常数；
- β —— 常数。

(3) 滤波电路交流衰减的退化方程

将式(B.2)至式(B.4)代入式(B.1)，得到滤波电路交流衰减的退化方程为

$$H_i(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = 20 \cdot \log \left[\left(ESR(\bar{t}) - \frac{1}{2\pi f_0 \cdot C(\bar{t})} j \right) \cdot R_L \right] - 20 \cdot \log \left[\left(\left(ESR(\bar{t}) - \frac{1}{2\pi f_0 \cdot C(\bar{t})} j \right) + R_L \right) \right] - 20 \cdot \log \left[\left(R_r + R(\bar{t}) + \frac{(2\pi f_0)^2 C(\bar{t})^2 (1 + R_L + ESR(\bar{t}))}{R_L \left((2\pi f_0)^2 C(\bar{t})^2 ESR(\bar{t})^2 + 1 \right)} \right) + \frac{1}{2\pi f_0 \cdot C(\bar{t})} j \right] \quad (\text{B.5})$$

式中：

- X** —— 滤波电路的内因变量向量， $\mathbf{X} = (f_0, R_L, R_r, R_0, d_0, x_0, E_A, A_0, B_R, C_0, l_c, \varpi, E_\omega, ESR_0, \alpha_0, \alpha_1, \beta)$ ；
- Y** —— 滤波电路的外因变量向量， $\mathbf{Y} = (T, f_0)$ 。

B.3 滤波电路的裕量方程构建

滤波电路交流衰减是个望小的性能参数，令 H_{th} 表示交流衰减阈值，构建滤波电路交流衰减的裕量方程为：

$$m_i(H, H_{th}) = H_{th} - H_i(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) \quad (\text{B.6})$$

对于从基于故障树的滤波电路失效的学科交叉方程，可直接基于故障树构建度量方程，无需给出裕量方程。

B.4 滤波电路的度量方程构建

首先，分析不确定性来源并进行量化。考虑前述学科交叉方程、退化方程和裕量方程均是通过原理推导得到，对滤波电路的性能、退化和裕量描述准确，因而不考虑模型不确定性，仅考虑参数不确定性。此外，滤波电路的交流衰减阈值是根据设计需求给出的，其不确定性本案例中也不予考虑。

从内因变量和外因变量两个方面对不确定性进行分析：

- 内因变量的不确定性来源于生产过程中，金属膜电阻器的电阻、铝电解电容的电容和等效电阻的初值由于加工制造缺陷导致的不一致性，在基于工作原理的滤波电路可靠性建模中考虑为参数 R_0 ， C_0 ， ESR_0 具有不确定性，在基于故障树的滤波电路可靠性建模中考虑为电阻器阻值超差、电容器容量超差以及等效串联电阻超差具有失效率，其他内因变量的不确定性影响较小，本案例中不予考虑；
- 外因变量的不确定性考虑滤波电路在工作过程中存在的温度波动，即参数 T 具有不确定性。

对于基于工作原理的滤波电路可靠性建模中参数 R_0 ， C_0 ， ESR_0 的不确定性均有大量的文献或者实验研究，表明适合通过随机不确定性进行描述，并服从正态概率分布，为此采用正态概率分布进行量化，即

$$R_0 \sim N(\mu_{R_0}, \sigma_{R_0}^2), C_0 \sim N(\mu_{C_0}, \sigma_{C_0}^2), ESR_0 \sim N(\mu_{ESR_0}, \sigma_{ESR_0}^2), T \sim N(\mu_T, \sigma_T^2) \quad (\text{B.7})$$

对于基于故障树的滤波电路可靠性建模中电阻器阻值超差、电容器容量超差以及等效串联电阻超差的不确定性，尽管底层基本事件是相同的，但考虑导致不同中间事件失效的基

本事件的失效率存在差异，对每一个中间事件的基本事件考虑其服从指数分布，分配一个失效率，如表 B.1 所示。

表 B.1 基于故障树的滤波电路可靠性建模中底层基本事件的失效率

中间事件	基本事件	失效率
特征频率超差	电阻器阻值退化超差	λ_1
特征频率超差	电容器电容量退化超差	λ_2
特征频率超差	电容器 ESR 退化超差	λ_3
直流成分衰减过大	电阻器阻值退化超差	λ_4
直流成分衰减过大	ESR 退化超差	λ_5
交流成分衰减不足	电容器 ESR 退化超差	λ_6
交流成分衰减不足	电容器电容量退化超差	λ_7
功率消耗过大	电容器电容量退化超差	λ_8
功率消耗过大	ESR 退化超差	λ_9

将式(B.7)所示的不确定性量化结果代入滤波电路的裕量方程(B.6)中，可以得到考虑退化和不确定性的性能裕量，记为 $m_{\tilde{z}}(\tilde{H}, H_{th})$ ，其中，上标 \sim 表示参数具有不确定性。显然， $m_{\tilde{z}}(\tilde{H}, H_{th})$ 是一个随机变量。根据确信可靠性理论，滤波电路交流衰减的确信可靠度表示为交流衰减裕量大于 0 的概率，可得基于工作原理的滤波电路的确信可靠性度量方程为：

$$R_p = \Pr\{m_{\tilde{z}}(\tilde{H}, H_{th}) > 0\} \quad (\text{B.8})$$

式中，Pr 表示概率测度。

由于滤波电路的确信可靠性方程形式复杂，难以给出方程的显式表达，在进行可靠性预测时，可借助蒙特卡洛仿真方法计算滤波电路的可靠度。

根据失效原理，每个中间事件采用 OR 门逻辑建模，顶事件同样为各路径的 OR 组合。在指数分布假设下，可得基于故障树的滤波电路的确信可靠性度量方程为：

$$R_f(t) = \prod_{i=1}^4 R_i(t) = e^{-t \sum_{i=1}^9 \lambda_i} \quad (\text{B.9})$$

B.5 滤波电路的确信可靠性分析

B.5.1 滤波电路确信可靠性模型中的参数取值确定

根据滤波电路的技术规范和实验数据，确定基于工作原理的滤波电路确信可靠性方程中的参数取值，结果如表 B.2 所示，确定基于故障树的滤波电路确信可靠性方程中的参数取值，结果如表 B.3 所示。

表 B.2 基于工作原理的滤波电路确信可靠性方程的参数取值表

参数来源		参数	取值	单位	参数	取值	单位
内因变量	电阻	μ_{R_0}	160	Ω	A_0	0.008	/
		σ_{R_0}	0.64	Ω	E_A/k	978	/
		d_0	10	mm	B_R	-0.003	/
		x_0	0.003	mm	/	/	/
	电容	μ_{C_0}	10	μF	ϖ	200	/
		σ_{C_0}	0.04	μF	E_ω/k	3983	/
		l_C	110	mm	/	/	/
	电容等效电阻	μ_{ESR_0}	10	Ω	α_1	0.03	/
		σ_{ESR_0}	0.04	Ω	β	1.12	/
		α_0	5.8×10^{-8}	/	/	/	/
外因变量	输入电压	交流幅值	2.5	V	直流幅值	3	V
		f_0	120	Hz	/	/	/
	温度	μ_T	35	K	σ_T	1	K
需求阈值		H_{th}	-3.3	dB	/	//	/

表 B.3 基于工作原理的滤波电路确信可靠性方程的参数取值表

失效率	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7	λ_8	λ_9
取值 (10^{-6} /小时)	3	25	12	5	8	20	30	15	25

B.5.2 滤波电路的确信可靠度计算

将表 B.3 的参数取值代入式(B.5)中，可以计算得到基于工作原理的滤波电路交流衰减的退化预测结果，如图 B.3 所示。可以发现：交流衰减随着退化时间的增加而增大，表明对交流信号的滤除能力下降；而且，交流衰减的 90%包络区间随着退化时间的增加而增加，表明不确定性在退化时间下是增大的。

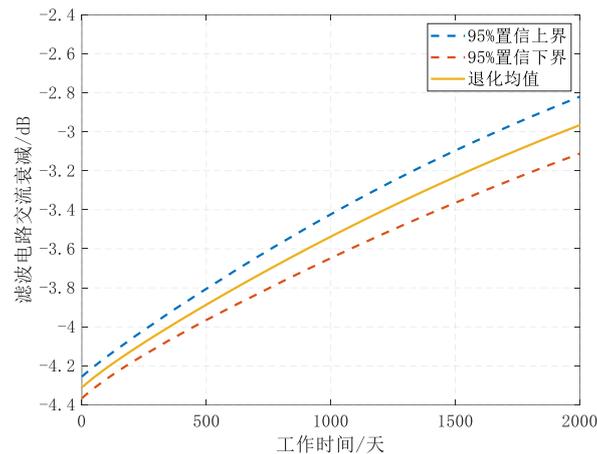


图 B.3 滤波电路的交流衰减的退化预测结果

进一步地，根据式(B.8)，可以计算得到基于工作原理的滤波电路的确信可靠度：滤波电路可靠度为 0.9 对应的可靠寿命约为 1200 天（3.3 年）。根据式(B.9)，可以计算得到基于故障树的滤波电路的确信可靠度：工作时间为 1000 小时的可靠度为 0.867，工作时间为 5000 小时的可靠度为 0.489，工作时间为 10000 小时的可靠度为 0.239，工作时间为 20000 小时的可靠度为 0.119。

靠度为 0.057。

B.5.3 滤波电路的可靠性敏感性分析

本节结合基于工作原理的滤波电路的确信可靠性模型，开展了可靠性敏感性分析，敏感性分析中的参数设置如表 B.4 所示，结果如图 B.4 所示。

图 B.4 滤波电路的可靠性敏感性分析中的参数设置

参数	水平 1	水平 2 (基准)	水平 3
R	$T = 60^\circ\text{C}$ 和 $\vec{t} = 0$ 时, $R = 159.85$	$T = 60^\circ\text{C}$ 和 $\vec{t} = 100$ 时, $R = 160.14$, $c = 9.78 \times 10^{-6}$, $ESR = 7.85$, $E = 3.02$, $U_0 = 2.50$, $R_L = 5078.66$	$T = 60^\circ\text{C}$ 和 $\vec{t} = 200$ 时, $R = 160.34$
c	$T = 60^\circ\text{C}$ 和 $\vec{t} = 0$ 时, $c = 10.04 \times 10^{-6}$		$T = 60^\circ\text{C}$ 和 $\vec{t} = 200$ 时, $c = 9.48 \times 10^{-6}$
ESR	$T = 60^\circ\text{C}$ 和 $\vec{t} = 0$ 时, $ESR = 7.26$		$T = 60^\circ\text{C}$ 和 $\vec{t} = 200$ 时, $ESR = 8.44$
T	$T = 20^\circ\text{C}$		$T = 100^\circ\text{C}$
E	$E = 2.94$		$E = 3.08$
U_0	$U_0 = 2.405$		$U_0 = 2.595$
R_L	$R_L = 4914.14$		$R_L = 5243.28$

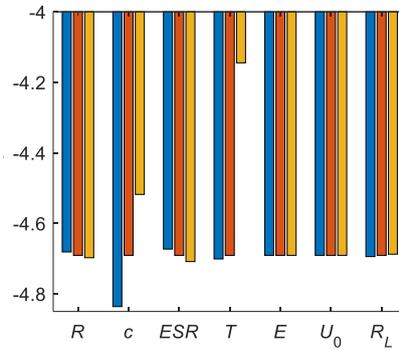


图 B.4 滤波电路的可靠性敏感性分析结果

根据图 B.4 可得：

- 对于滤波电路，电容 c 对交流衰减最为敏感，其次是等效串联电阻 ESR 和电阻 R 。因而，在设计阶段，需要更加关注电容值，保证电容接近理论值且不确定度小，有利于保持滤波电路的滤波性能。此外，在使用过程中也需要关注电容的退化，当检测到电容明显退化时，可以进行电容的更换和管理。
- 外界条件方面，温度最为敏感，负载电阻的影响较小。基于上述结果，可以认识到在使用阶段将温度控制在较低的水平以减缓元件的退化，从而可以降低温度对滤波电路性能的影响。

上述结果表明，滤波电路的确信可靠性模型能够确定对其可靠性影响显著的参数，可以通过设计参数的改进或者不确定性的控制实现滤波电路可靠性的提高。本案例可以为滤波电路的制造加工、材料选择和来料控制提供理论依据，指导滤波电路设计和生产制造。

B.6 滤波电路的确信可靠性预计

根据滤波电路的确信可靠性模型，可以预计滤波电路的确信可靠度，如图 B.5 所示。

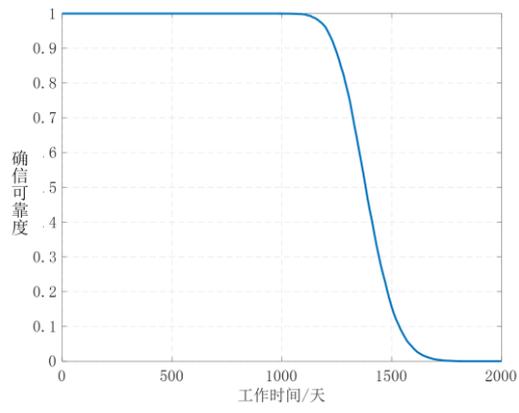


图 B.5 滤波电路的确信可靠性预计结果

附录 C (资料性附录)

太阳能电池阵的确信可靠性建模与预计示例

C.1 太阳能电池阵的学科交叉方程构建

太阳能电池阵的主要功能是采集太阳能，将太阳能转换为电能。太阳能电池阵最基本组成器件为太阳能电池单元，数个太阳能电池单元以串联的形式构成太阳能电池串，数个太阳能电池串再以串联+并联的形式构成太阳能电池阵。太阳能电池阵中还包括旁路二极管和隔离二极管，能够在出现故障时实现单体隔离/串组隔离防倒灌，太阳能电池阵结构如图 C.1 所示。

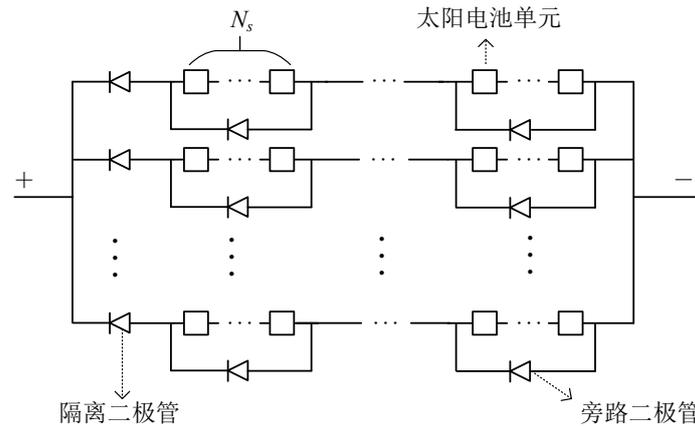


图 C.1 太阳能电池阵结构示意图

针对太阳能电池阵开展了功能、性能及裕量分析，选择最大输出功率和结构容错度作为关键性能参数，下面针对太阳能电池阵的最大输出功率和结构容错度分别构建学科交叉方程。

C.1.1 太阳能电池阵最大输出功率的学科交叉方程

太阳能电池阵由太阳能电池单元和二二极管构成的，首先需对太阳能电池单元和二二极管进行数学建模，获得太阳能电池单元和二二极管的伏安特性曲线。

对于太阳能电池单元，采用五参数等效电路模型，如图 C.2 所示。

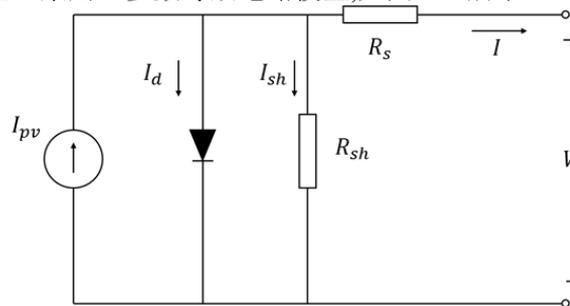


图 C.2 太阳能电池单元五参数等效电路模型示意图

根据图 C.2 所示的太阳能电池单元五参数等效电路模型，太阳能电池单元的电流和电压满足：

$$I^{unit} = I_{pv} - I_d \left[\exp \left(\frac{q(V^{unit} + R_s I^{unit})}{nkT^{pv}} \right) - 1 \right] - \frac{V^{unit} + R_s I^{unit}}{R_{sh}} \quad (C.1)$$

式中：

- I^{unit} —— 太阳能电池单元的电流，单位为安 (A)；
 V^{unit} —— 太阳能电池单元的电压，单位为伏 (V)；
 I_{pv} —— 光生电流，单位为安 (A)；
 I_d —— 二极管反向饱和电流，单位为安 (A)；
 n —— 理想因子；
 R_s —— 等效串联电阻，单位为欧姆 (Ω)；
 R_{sh} —— 等效并联电阻，单位为欧姆 (Ω)；
 k —— 玻尔兹曼常数；
 q —— 电子元电荷；
 T^{pv} —— 太阳能电池温度，单位为开尔文 (K)。

对于太阳能电池阵中的旁联二极管，可以将其视为理想二极管。对于隔离二极管，将其视为非理想二极管，可使用分段函数来建立二极管的数学模型：

$$I^{id} = \begin{cases} \frac{V^{id} - V_s}{R_{on}} & V^{id} > V_f \\ G_{off} V^{id} & V^{id} \leq V_f \end{cases} \quad (C.2)$$

式中：

- I^{id} —— 二极管电流，单位为安 (A)；
 V^{id} —— 二极管电压，单位为伏 (V)；
 R_{on} —— 导通电阻，单位为欧姆 (Ω)；
 G_{off} —— 截断电感，单位为亨利 (H)；
 V_f —— 导通电压，单位为伏 (V)；
 V_s —— 虚拟电压， $V_s = V_f(1 - R_{on} \cdot G_{off})$ 。

记太阳能电池阵由 N_{pd} 个太阳能电池串并联而成，每个太阳能电池串包含 N_{sd} 个太阳能电池子串和1个隔离二极管，每个太阳能电池子串由 N_s 个太阳能电池单元串联，同时并联1个旁路二极管构成。记第 j 个太阳能电池串中的隔离二极管的电压与电流分别为 V_j^{id} 与 I_j^{id} ，第 i 个太阳能电池单元的电压和电流分别为 $V_{i,j}^{id}$ 和 $I_{i,j}^{id}$ 。根据电路原理，太阳能电池阵满足：

$$\begin{cases} V^{sys} = \left(\sum_{i=1}^{N_{sd}} V_{i,j}^{unit} \right) + V_j^{id} \\ I^{sys} = \sum_{j=1}^{N_{pd}} I_j^{id} \end{cases} \quad (C.3)$$

式中：

- I^{sys} —— 太阳能电池阵的电流，单位为安 (A)；
 V^{sys} —— 太阳能电池阵的电压，单位为伏 (V)；

根据式(C.3)，可计算得到太阳能电池阵的伏安特性曲线，进而可以获得太阳能电池阵最大输出功率的学科交叉方程

$$P = \max \{ V^{sys} I^{sys} \} \quad (C.4)$$

C.1.2 太阳能电池阵结构容错度的学科交叉方程

太阳能电池阵的结构容错能力可以通过太阳能电池阵的结构拓扑结合其功能逻辑描述，首先构建太阳能电池阵的功能逻辑图，如图 C.3 所示。

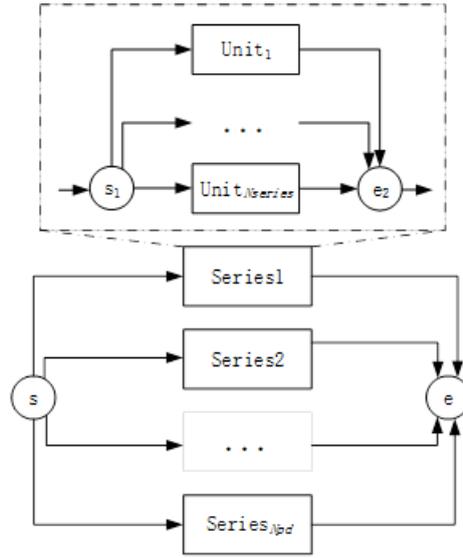


图 C.3 太阳能电池阵的功能逻辑图

图 C.3 所示的功能逻辑图中包含起点 s 和与终点 e ，为了满足从起点 s 和与终点 e 的完整通路，定义结构容错度为：

$$v_s = \begin{cases} \frac{AFP(G_\delta, s, e) - 1}{AFP(G_{\delta^*}, s, e) - 1}, & AFP(G_{\delta^*}, s, e) > 1 \\ 0, & AFP(G_{\delta^*}, s, e) = 1 \text{ 或 } AFP(G_\delta, s, e) = 0 \end{cases} \quad (C.5)$$

式中：

$AFP(G_\delta, s, e)$ —— 某状态 δ 下的太阳能电池阵功能路径总数；

$AFP(G_{\delta^*}, s, e)$ —— 理想状态下的太阳能电池阵功能路径总数。

在太阳能电池阵中，太阳能电池串的功能路径数可用其能够正常工作的太阳能电池单元数来表示。记第 j 个太阳能电池串中能够正常工作的太阳能电池单元数为 N_j ，那么 $AFP(G_\delta, s, e)$ 为所有太阳能电池串中能够正常工作的太阳能电池单元数之和，理想状态下的太阳能电池阵功能路径总数 $AFP(G_{\delta^*}, s, e)$ 可以表示为太阳能电池单元的总数，即 $N_s N_{pd} N_{sd}$ 。由此，可以得到太阳能电池阵结构容错度的学科交叉方程为：

$$v = \frac{\left(\sum_{j=1}^{N_{pd}} N_j \right) - 1}{N_s N_{pd} N_{sd} - 1} \quad (C.6)$$

C.2 太阳能电池阵的性能退化方程构建

针对太阳能电池阵开展了性能参数退化分析，获得太阳能电池阵的主要退化机理为太阳能电池单元老化导致的输出功率衰减、静电积累导致的太阳能电池单元短路、电连接部位存在疲劳或化学腐蚀导致的太阳能电池单元断路。为此，首先针对上述三个方面构建退化机理模型，进一步构建太阳能电池阵最大输出功率和结构容错度的退化方程。

(1) 太阳能电池单元老化导致的输出功率衰减

太阳能电池单元在长期使用下，其会发生老化导致输出功率衰减。太阳能电池单元输出功率的衰减主要是由于等效串联电阻 R_s 增大、等效并联电阻 R_{sh} 减小导致的。因此，构建等效串联电阻 R_s 和等效并联电阻 R_{sh} 的退化方程为：

$$\begin{cases} R_s(\vec{t}) = R_{s0} + d_{R_s} \vec{t}^{\beta_{R_s}} \\ R_{sh}(\vec{t}) = R_{sh0} - d_{R_{sh}} \vec{t}^{\beta_{R_{sh}}} \end{cases} \quad (\text{C.7})$$

式中：

- R_{s0} —— 等效串联电阻的退化初值；
- R_{sh0} —— 等效并联电阻的退化初值；
- d_{R_s} —— 等效串联电阻的退化速率；
- $d_{R_{sh}}$ —— 等效并联电阻的退化速率；
- β_{R_s} —— 等效串联电阻退化的非线性时间系数；
- $\beta_{R_{sh}}$ —— 等效并联电阻退化的非线性时间系数。

(2) 静电积累导致的太阳电池单元短路

现有研究表明，太阳电池单元在使用过程中存在静电积累，当静电压超过击穿电压 V_{ESD} ，就会出现静电放电击穿的现象，从而使太阳电池单元发生短路。构建静电压积累过程模型为：

$$V_E(\vec{t}) = d_E \vec{t}^{\beta_E} \quad (\text{C.8})$$

式中：

- d_E —— 静电压积累速率；
- β_E —— 静电压积累的非线性时间系数。

(3) 电连接部位存在疲劳或化学腐蚀导致的太阳电池单元断路

现有研究表明，太阳电池单元在使用过程中其电连接部位存在疲劳或化学腐蚀，导致材料强度 S_σ 下降，当 S_σ 低于机械应力 S 时，连接结构将无法支撑，从而导致太阳电池单元发生断路。构建材料强度退化过程模型为：

$$S_\sigma(\vec{t}) = S_{\sigma0} - d_S \vec{t}^{\beta_S} \quad (\text{C.9})$$

式中：

- $S_{\sigma0}$ —— 材料强度退化初值；
- d_S —— 材料强度退化速率；
- β_S —— 材料强度退化的非线性时间系数。

(4) 太阳电池阵的性能退化方程

将各太阳电池单元的等效串联电阻和等效并联电阻的退化方程代入太阳电池阵的学科交叉方程（式(C.4)）中，即可得到太阳电池阵最大输出功率的退化方程，记为 $P_{\vec{t}}$ 。

对于一个太阳电池单元，其仅会发生短路或者断路其中的一种，具体来讲，其可能发生的状态转移包括：从S0到S1以及从S0到S2，其中S1和S2分别对应太阳电池单元的短路状态和断路状态。取短路或者断路状态中最先发生的故障模式为太阳电池单元的状态，而且各太阳电池单元之间的状态转移是互相独立的。

根据式(C.8)与式(C.9)，可以得到退化时间 \vec{t} 下第 j 个太阳电池串中能够正常工作的太阳电池单元数 $N_j(\vec{t})$ 。进一步结合式(C.6)，可以得到太阳电池阵结构容错度的退化方程为：

$$V_i = \frac{\left(\sum_{j=1}^{N_{pd}} N_j(\vec{t}) \right) - 1}{N_s N_{pd} N_{sd} - 1} \quad (\text{C.10})$$

C.3 太阳能电池阵的裕量方程构建

(1) 最大输出功率的裕量方程

太阳能电池阵最大输出功率是一个望大参数，令 P_{th} 表示最大输出功率阈值，构建太阳能电池阵最大输出功率的裕量方程为：

$$m_i(P, P_{th}) = P_i - P_{th} \quad (\text{C.11})$$

(2) 结构容错度的裕量方程

在部分太阳能电池单元故障的情形下，太阳能电池阵的结构容错度应满足：系统至少有 k_f 个太阳能电池单元能够正常工作，据此得到结构容错度阈值 v_{sth} 。太阳能电池阵结构容错度是一个望大参数，构建太阳能电池阵结构容错度的裕量方程为：

$$m_i(v, v_{sth}) = v_i - v_{sth} \quad (\text{C.12})$$

式中：

$$v_{sth} = \frac{k_f - 1}{N_s N_{pd} N_{sd} - 1} \quad (\text{C.13})$$

C.4 太阳能电池阵的度量方程构建

首先，分析不确定性来源并进行量化。考虑前述学科交叉方程、退化方程和裕量方程均是通过原理推导得到，对太阳能电池阵的性能、退化和裕量描述准确，因而不考虑模型不确定性，仅考虑参数不确定性。为便于计算，本案例仅考虑太阳能电池单元之间的样本间差异性及其退化过程中存在的不确定性。

对于太阳能电池单元之间的样本差异性，具体表现为太阳能电池单元的等效电路模型参数的不确定性，选择正态概率分布进行量化，具体为：

$$\begin{aligned} I_{pv} &\sim N\left(\mu_{pv}, (\mu_{pv} \cdot CV_{pv})^2\right), I_d \sim N\left(\mu_d, (\mu_d \cdot CV_d)^2\right), n \sim N\left(\mu_n, (\mu_n \cdot CV_n)^2\right), \\ R_{s0} &\sim N\left(\mu_{R_{s0}}, (\mu_{R_{s0}} \cdot CV_{R_{s0}})^2\right), R_{sh0} \sim N\left(\mu_{R_{sh0}}, (\mu_{R_{sh0}} \cdot CV_{R_{sh0}})^2\right) \end{aligned} \quad (\text{C.14})$$

对于太阳能电池单元退化过程中的不确定性，主要为 R_s 、 R_{sh} 、 V_E 、 S_σ 退化中的不确定性，选择维纳过程进行量化，具体为：

$$\begin{cases} \tilde{R}_s(\vec{t}) = R_s(\vec{t}) + \sigma_{Bs} B(\vec{t}) \\ \tilde{R}_{sh}(\vec{t}) = R_{sh}(\vec{t}) + \sigma_{Bsh} B(\vec{t}) \\ \tilde{V}_E(\vec{t}) = V_E(\vec{t}) + \sigma_E B(\vec{t}) \\ \tilde{S}_\sigma(\vec{t}) = S_\sigma(\vec{t}) + \sigma_S B(\vec{t}) \end{cases} \quad (\text{C.15})$$

式中：

$B(\vec{t})$ —— 标准布朗运动；

- σ_{Bs} —— 等效串联电阻退化的扩散系数；
 σ_{Bsh} —— 等效并联电阻退化的扩散系数；
 σ_E —— 静电压积累的扩散系数；
 σ_S —— 材料强度退化的扩散系数。

将上述不确定性量化结果代入太阳能电池阵的裕量方程(C.11)与(C.12)中,可以得到考虑退化和不确定性的性能裕量,记为 $m_{\tilde{t}}(\tilde{P}, P_{th})$ 和 $m_{\tilde{t}}(\tilde{v}, v_{sth})$,其中,上标 \sim 表示参数具有不确定性。显然, $m_{\tilde{t}}(\tilde{P}, P_{th})$ 和 $m_{\tilde{t}}(\tilde{v}, v_{sth})$ 是随机变量。根据确信可靠性理论,太阳能电池阵的确信可靠度表示为最大输出功率裕量和结构容错度裕量大于0的概率,可得太阳能电池阵的确信可靠度量方程为:

$$\begin{cases} R_p(\tilde{t}) = \Pr\{\tilde{M}_p(\tilde{t}) > 0\} \\ R_v(\tilde{t}) = \Pr\{\tilde{M}_v(\tilde{t}) > 0\} \end{cases} \quad (C.16)$$

式中,Pr表示概率测度。

由于太阳能电池阵的确信可靠性模型形式复杂,难以给出模型的显式表达,在进行可靠度预计时,将借助蒙特卡洛仿真方法计算太阳能电池阵的可靠度。

C.5 太阳能电池阵的确信可靠性分析

C.5.1 太阳能电池阵确信可靠性模型中的参数取值确定

根据太阳能电池阵的技术规范和实验数据,确定太阳能电池阵确信可靠性方程中的参数取值,结果如表C.1所示。

表 C.1 太阳能电池阵确信可靠性模型的参数取值

模型参数	取值	模型参数	取值
μ_{pv}	10	R_{on}	0.3
μ_d	2.5×10^{-10}	G_{off}	1×10^{-8}
μ_n	2	N_s	6
$\mu_{R_{s0}}$	1×10^{-5}	N_{sd}	10
$\mu_{R_{sh0}}$	100	N_{pd}	6
V_f	0.6	$r\%$	0.5
P_{max}^{th}	1000	k_f	40
d_{R_s}	1×10^{-4}	β_E	1
$d_{R_{sh}}$	0.01	β_S	1
d_E	0.001	$S_{\sigma 0}$	1
d_S	5×10^{-4}	V_{ESD}	1
β_{R_s}	1	S	2
$\beta_{R_{sh}}$	1	σ_{Bs}	0.01
σ_{sh}	1×10^{-4}	σ_s	0.02
σ_E	0.01	CV_{pv}	0.05
CV_d	0.05	CV_n	0.05
$CV_{R_{s0}}$	0.05	$CV_{R_{sh0}}$	0.05

C.5.2 太阳能电池阵的确信可靠度计算

将表 C.1 的参数取值代入太阳能电池阵最大输出功率和结构容错度的性能退化方程，可以计算得到太阳能电池阵最大输出功率和结构容错度的退化预测结果，如图 C.4 所示。可以发现：最大输出功率和结构容错度随着退化时间的增加而增大；而且，最大输出功率和结构容错度的 90%包络区间随着退化时间的增加而增加，表明不确定性在退化时间下是增大的。

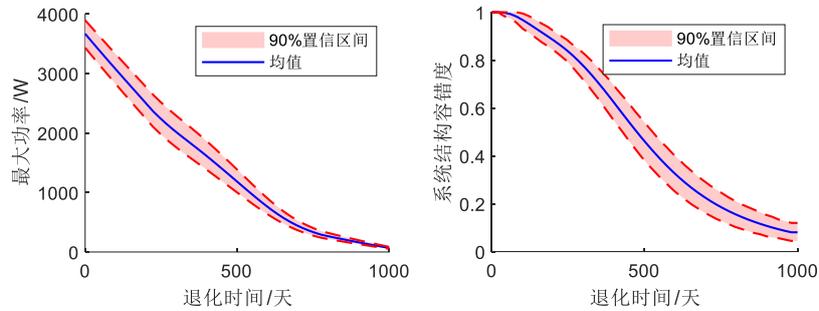


图 C.4 太阳能电池阵的最大输出功率和结构容错度的退化预测结果

进一步地，根据式(C.14)，可以计算得到太阳能电池阵的确信可靠度：太阳能电池阵在 320 天时最大输出功率的可靠度为 0.9，在 530 天时结构容错度的可靠度为 0.9。

C.5.3 太阳能电池阵的可靠性敏感性分析

结合太阳能电池阵的确信可靠性模型，开展了可靠性敏感性分析，太阳能电池阵的可靠性是由其能够输出的最大功率决定的，因而可靠性的敏感性参数分析结果与最大功率的敏感性参数分析结果是一致的，结果如图 C.5 所示。

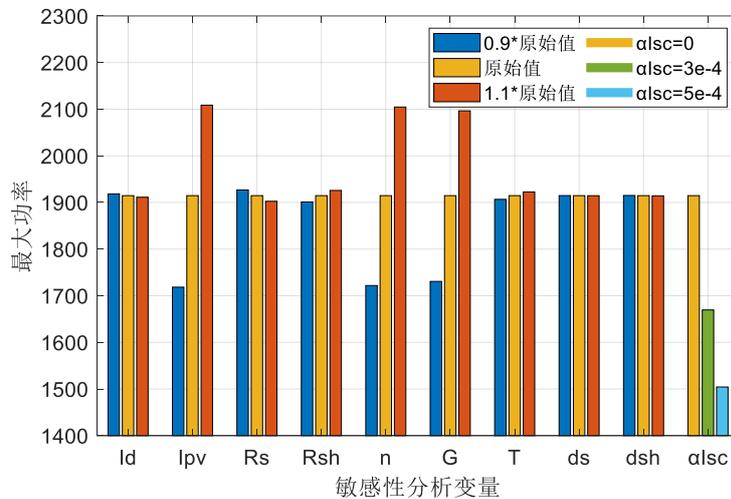


图 C.5 太阳能电池阵第 60 天最大功率的敏感性分析结果

根据图 C.5 可以发现：在太阳能电池的等效电路模型参数中，光生电流 I_{pv} 和理想因子 n 是对最大功率影响较大的参数；在外界条件中，辐照强度 G 对最大功率的影响较大，温度 T 的影响较小；在退化部分，等效串联电阻 R_s^{ref} 和等效并联电阻 R_{sh}^{ref} 的影响均较小，这主要是由于退化速率较小导致的。

C.6 太阳能电池阵的确信可靠性预计

根据太阳能电池阵的确信可靠性模型，可以预计太阳能电池阵的确信可靠度，如图 C.6 所示。

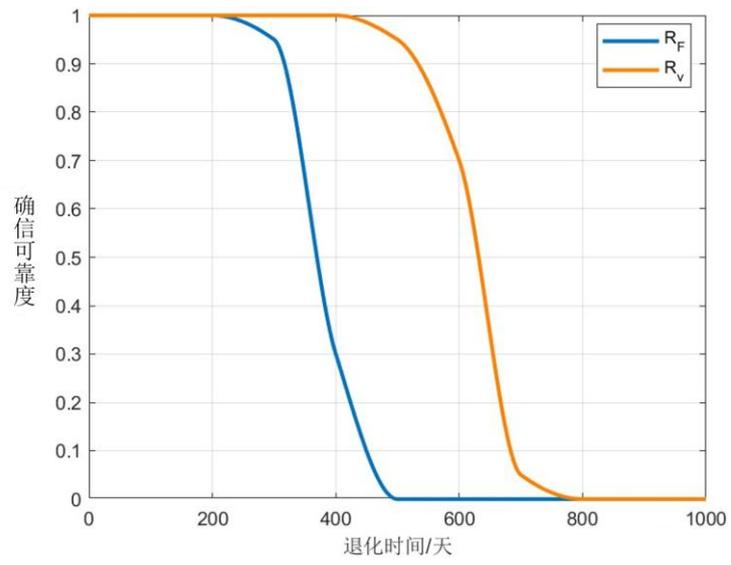


图 C.6 太阳能电池阵最大输出功率和结构容错度的可靠度

附录 D (资料性附录)

锂离子电池的确信可靠性建模与预计示例

D.1 锂离子电池的学科交叉方程和性能退化方程构建

针对某锂离子电池开展了功能、性能及裕量分析，选择电池容量作为关键性能参数。针对锂离子电池开展了性能参数退化分析，获得锂离子电池的主要退化机理为 SEI 膜生长、电解质分解等，会导致锂离子电池容量衰减。

由于锂离子电池的结构组成复杂，电化学机理复杂，导致学科交叉方程与性能退化方程构建难度较大，因此本案例基于数据驱动方法构建锂离子电池的学科交叉方程和性能退化方程。

以温度和放电倍率作为敏感应力类型，投入 3 个锂离子电池样品，开展温度应力+放电倍率双应力综合的退化律实验，其中每个应力选择 3 个水平，温度水平包括 $T_1 = 40^\circ\text{C}$ ， $T_2 = 55^\circ\text{C}$ 和 $T_3 = 60^\circ\text{C}$ ，放电倍率水平包括 $I_1 = 2\text{C}$ ， $I_2 = 4\text{C}$ 和 $I_3 = 4.5\text{C}$ 。采用均匀设计方法进行实验的应力组合设计，退化律实验方案见表 D.1。

表 D.1 锂离子电池温度应力+放电倍率双应力综合的退化律实验方案

应力水平	55°C+2C	40°C+4C	T3=60°C+4.5C
检测次数	$M_1 = 90$	$M_2 = 60$	$M_3 = 40$

退化律实验中采集到的锂离子电池容量退化数据如图 D.1。

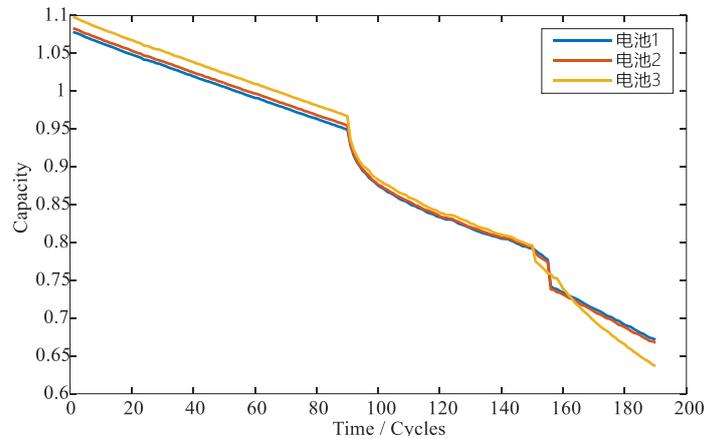


图 D.1 锂离子电池退化律实验中的电池容量退化数据

根据锂离子电池退化律实验数据，构建锂离子电池的容量退化过程为：

$$P_{\bar{t}}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = P_0 + \exp\left(a + b_1 \frac{1}{T} + b_2 I\right) t^\beta \quad (\text{D.1})$$

式中：

- $P_{\bar{t}}$ —— 退化时间 \bar{t} 下的电池容量，单位为毫安时 (mAh)；
- \bar{t} —— 退化时间，以充放电循环次数表征，单位为循环数 (Cycles)；
- \mathbf{X} —— 电池内因变量， $\mathbf{X} = (P_0, a, b_1, b_2, \beta)$ ；
- \mathbf{Y} —— 电池外因变量， $\mathbf{Y} = (T, I)$ ；
- P_0 —— 电池容量初始值，单位为毫安时 (mAh)；
- T —— 热力学温度，单位为开尔文 (K)；

- I —— 放电电流，单位为安培（A）；
 β —— 退化的非线性尺度参数，无量纲；
 a —— 常数；
 b_1 —— 常数；
 b_2 —— 常数。

D.2 锂离子电池的裕量方程构建

锂离子电池容量是个望大的性能参数，令 Y_{th} 表示电池容量阈值，构建锂离子电池容量的裕量方程为：

$$m_i(P, P_{th}) = P_i(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) - P_{th} \quad (\text{D.2})$$

D.3 锂离子电池的度量方程构建

首先，分析不确定性来源并进行量化。由于本案例基于数据驱动方法，将锂离子电池作为整体进行研究，因而仅考虑不确定性对锂离子电池容量退化的系统性影响。

假设电池容量的退化过程服从逆高斯过程，即

$$\tilde{P}_i \sim IG(P_i, \lambda t^{2\beta}) \quad (\text{D.3})$$

式中，

- $IG(\cdot)$ —— 逆高斯过程；
 λ —— 常数。

根据确信可靠性理论，锂离子电池容量的确信可靠度表示为电池容量裕量大于0的概率，可得锂离子电池的确信可靠性度量方程近似为：

$$R = \Phi \left[\frac{P_{th} - P_0 - \exp\left(a + b_1 \frac{1}{T} + b_2 I\right) t^\beta}{\sqrt{\exp^3\left(a + b_1 \frac{1}{T} + b_2 I\right) t^\beta / \lambda}} \right] \quad (\text{D.4})$$

式中， Φ 为标准正态概率分布的累积概率分布函数。

D.4 锂离子电池的确信可靠性分析与预计

D.4.1 锂离子电池确信可靠性模型中的参数取值确定

在锂离子电池退化律实验中，记 x_{lij} 为第 l 个应力水平下（ $T_l + I_l$ ），第 i 个电池样品在第 j 次的性能检测值， t_{lij} 为对应的性能检测时间点， $l = 1, 2, 3$ ， $i = 1, 2, 3$ ， $j = 1, 2, \dots, M_l$ 。性能退化增量为 $\Delta x_{lij} = x_{li(j+1)} - x_{lij}$ ，其对应的时间间隔为 $\Delta \tau_{lij} = t_{li(j+1)}^\beta - t_{lij}^\beta$ 。根据概率测度的运算法则可知，

$$\Delta x_{lij} \sim IG\left(\exp\left(a + b_1 \frac{1}{T} + b_2 I\right) \Delta \tau_{lij}, \lambda \left(t_{li(j+1)}^\beta - t_{lij}^\beta\right)^2\right) \quad (\text{D.5})$$

根据式(D.5)，可得步进应力加速退化实验的对数极大似然函数：

$$\ln L = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^k \sum_{j=1}^{m_l-1} \left\{ \frac{\ln \lambda + 2 \ln \Delta \tau_{ij} - \ln(2\pi) - 3 \ln(\Delta x_{ij})}{\lambda \left(\Delta x_{ij} - \exp\left(a + b_1 \frac{1}{T} + b_2 I\right) (t_{ii(j+1)}^\beta - t_{ij}^\beta) \right)^2} \right\} \quad (\text{D.6})$$

$$\frac{\exp\left(2a + 2b_1 \frac{1}{T} + 2b_2 I\right) \Delta x_{ij}}{\lambda \left(\Delta x_{ij} - \exp\left(a + b_1 \frac{1}{T} + b_2 I\right) (t_{ii(j+1)}^\beta - t_{ij}^\beta) \right)^2}$$

采用极大似然估计的方法求解式，即可获得 a ， b_1 ， b_2 ， λ 和 β 的极大似然估计值 \hat{a} ， \hat{b}_1 ， \hat{b}_2 ， $\hat{\lambda}$ 和 $\hat{\beta}$ ，结果如表 D.6 所示。

表 D.6 锂离子电池容量退化方程中的未知参数估计结果

未知参数	\hat{a}	\hat{b}_1	\hat{b}_2	$\hat{\lambda}$	$\hat{\beta}$
估计值	-2.0060	-1175.87	0.5574	0.0206	0.7225

D.4.2 锂离子电池的确信可靠性预计

根据以上结果，可以计算锂离子电池容量在基准温度条件 25℃（温度）+0.5CA（放电倍率）下的确信可靠度，结果如图 D.2 所示。

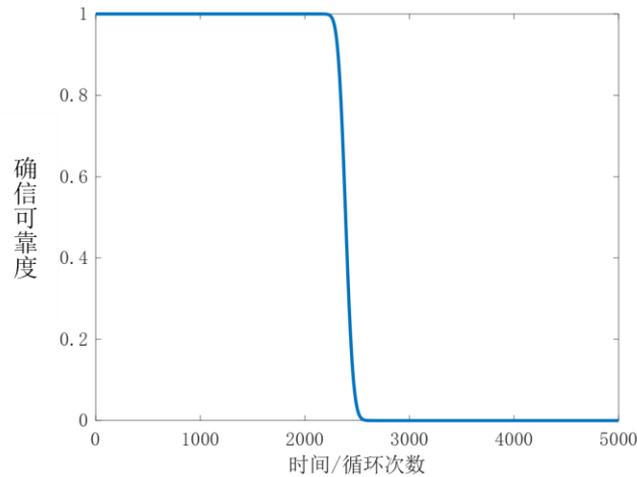


图 D.2 锂离子电池容量的确信可靠性预计结果

T/CICC

指挥控制学会团体标准

T/CICC 35005—2025

产品确信可靠性评价方法

Evaluation method for product belief reliability

2025-06-29发布

2025-06-29实施

中国指挥与控制学会 发布

目 次

前 言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 评价指标	1
5 关键性能参数选择	1
6 评价工况	2
7 数据获取与计算	2
7.1 关键性能一致性 (IC)	2
7.2 关键性能裕量 (IM)	2
7.3 关键性能退化量 (ID)	2
7.4 产品现场失效数据 (IF)	3
8 确信可靠性等级评定	3
9 撰写评价报告	3

前 言

本文件按照 GB/T 1.1-2020 《标准化工作导则 第 1 部分： 标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由中国指挥与控制学会提出并归口。

本文件起草单位： 杭州市北京航空航天大学国际创新研究院（北京航空航天大学国际创新学院）、北京航空航天大学、深圳市为民可靠性系统工程研究院、北京品驰医疗设备股份有限公司、北京蓝威技术有限公司、中国航空综合技术研究院、北京华安中泰检测技术有限公司、广东众志检测仪器有限公司、昆畅科技（昆明）有限公司。

本文件主要起草人： 康锐、张清源、李晓阳、伍湘平、王彦林、张栋、赵弋飞、阮进喜、林聪、潘鸿飞、李艳春、黄初期、彭博。

产品确信可靠性评价方法

1 范围

本文件规定了对投入使用的产品开展确信可靠性评价的指标体系和评价方法。

本文件适用于对同一制造商所生产的同类产品开展评价，也适用于对不同制造商生产的同类产品开展评价。

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。

GB/T 3358.1-2009/ISO 3354-1:2006 统计学术语及符号 第1部分：一般统计术语与用于概率的术语

T/CICC 35001-2025	确信可靠性术语
T/CICC 35002-2025	功能、性能及裕量分析
T/CICC 35003-2025	性能参数退化分析
T/CICC 35009-2025	功能可靠域实验
T/CICC 35010-2025	性能退化律实验

3 术语和定义

GB/T 3358.1-2009/ISO 3354-1:2006 和T/CICC 35001—2025 界定的术语与定义适用于本文件。

4 评价指标

产品确信可靠性评价指标包含以下四类指标：

- a) 产品关键性能一致性 (IC)；
- b) 产品关键性能裕量 (IM)；
- c) 产品关键性能退化量 (ID)；
- d) 产品现场失效百分比 (IF)。

5 关键性能参数选择

关键性能参数的选择遵循如下原则：

- a) 根据《T/CICC 35002-2025 功能、性能及裕量分析》确定产品关键性能参数及其阈值；
- b) 根据《T/CICC 35003-2025 性能参数退化分析》确定具有明显退化特征的关键性能参数；
- c) 至少分别选择 1 个关键性能参数用于产品关键性能一致性评价、产品关键性能裕量评价、产品关键性能退化量评价。

6 评价工况

产品确信可靠性评价的工况包括：

a) 标准工况

在产品出厂状态下按照规定的检验合格标准对产品关键性能参数进行测试的工况，标准工况用于关键性能一致性的评价；

b) 极限工况

用工作载荷和/或环境载荷表征的可以测出产品性能极限的工况。极限工况的具体量值以不使产品失效为原则。极限工况用于关键性能裕量的评价。

c) 典型工况

用工作载荷和/或环境载荷表征的在产品使用过程中占比最高的工况。典型工况的具体量值能以快速促进产品性能退化为原则。典型工况用于关键性能退化量评价。

d) 使用工况

产品实际使用过程中经历的各种工作载荷和环境载荷，可不做定量表征，仅用于产品失效数据评价。

7 数据获取与计算

7.1 关键性能一致性（IC）

关键性能一致性（IC）的数据获取与计算方法如下：

- a) 产品出厂时在标准工况下对关键性能参数的测试数据，产品样本数至少30个；
- b) 如无a)条款规定的的数据，则选择产品投入使用后在标准工况下对关键性能参数的测试数据，产品样本数至少30个，且产品使用时间不超过预期总使用时间十分之一。
- c) 计算关键性能参数的均值和标准差；
- d) 计算关键性能变异系数，即关键性能参数的标准差与均值之比的百分数；
- e) 多个关键性参数中取变异系数最大值作为评价的依据。

7.2 关键性能裕量（IM）

关键性能裕量（IM）的数据获取与计算方法如下：

- a) 选定至少5种极限工况，每种极限工况下产品样本数至少3个，且产品样本投入使用的时间占预期总使用时间的三分之一以上，并尽可能保持各样本的使用时间相近；
- b) 各种极限工况下关键性能参数的测试采用功能可靠域实验方法，可靠域实验参照T/CICC 35009-2025进行；
- c) 计算每一样本在每种极限工况下的每一性能参数的性能裕量，性能裕量的计算方法参照T/CICC 35002-2025。

7.3 关键性能退化量（ID）

关键性能退化量（ID）的数据获取与计算方法如下：

- a) 在典型工况下，选取产品样本数至少3个，且产品样本投入使用的时间占预期总使用时间三分之一以上，并尽可能保持各样本的使用时间相近；
- b) 对产品的关键性能参数按照出厂检验时的测试条件进行测试；
- c) 关键性能退化量用关键性能参数退化后的性能裕量与产品出厂检验时的性能裕量之比的百分数表示；
- d) 只有一个关键性能参数时，取全部样本中的性能参数取退化量最大值作为关键性能退化量；有多个关键性能参数时，取全部样本的所有关键性能参数的退化量最大值作为关键性能退化量。

7.4 产品现场失效百分比（IF）

产品现场失效数据的获取与计算方法如下：

- a) 选取已投入使用的产品样本数至少30个，且产品样本投入使用的时间占预期总使用时间三分之一以上，并尽可能保持各样本的使用时间相近；
- b) 统计所选取的产品样本发生失效的次数，同一样本发生多次失效时，失效次数累计计算；
- c) 用产品样本的累计失效数据除以产品样本总数的百分比作为产品现场失效百分比。

8 确信可靠性等级评定

按照下述步骤给出产品确信可靠性的等级评定结果：

- a) 依据7.1至7.4计算结果，按照表1给出产品确信可靠性四类评价指标的评分；
- b) 将关键性能一致性、关键性能裕量、关键性能退化量、现场失效百分比等四类指标的得分相加，得到产品确信可靠性评价总分；
- c) 按产品确信可靠性评价总分将产品的确信可靠性分为五个等级，90至100分为A级，80-90分为B级，70-80分为C级，60-70分为D级；60分以下为E级。

9 撰写评价报告

产品确信可靠性评价报告至少包括以下内容：

- a) 评价的目的与要求
- b) 产品功能、性能简介及选择的关键性能参数
- c) 评价工况简介
- d) 关键性能一致性数据来源与计算结果
- e) 关键性能裕量数据来源与计算结果
- f) 关键性能退化量数据来源与计算结果
- g) 产品现场失效数据来源预计算结果
- h) 确信可靠性评分结果及评定等级
- i) 分析与建议
- j) 附件（各种实验报告、数据分析报告等）

表 1 产品确信可靠性指标评分表

评价指标	分值	评分说明	得分
关键性能一致性 (IC)	20分	a) 变异系数在 3%以下（18-20 分）； b) 变异系数在 3%-6%之间（15-17 分）； c) 变异系数在 6%-9%之间（11-14 分）； d) 变异系数在 9%-15%之间（6-10 分）； e) 变异系数大于 15%（0-5 分）。	
关键性能裕量 (IM)	30分	f) 性能裕量均大于零（27-30 分）。 g) 性能裕量小于零的次数在 1-3 之间（21-26 分）。；性能裕量小于零的次数在 4-6 之间（15-20 分）； h) 性能裕量小于零的次数在 7-10 之间（10-14 分）；	

评价指标	分值	评分说明	得分
		i) 5.性能裕量小于零的次数在 10 以上 (0-9 分)。	
关键性能退化量 (ID)	30分	j) 性能退化量在 20%以内 (27-30 分)； k) 性能退化量在 20%-40%之间 (21-26 分)； l) 性能退化量在 40%-60%之间 (15-20 分)； m) 性能退化量在 60%-80%之间 (10-14 分)； n) 性能退化量在 80%以上 (0-9 分)。	
产品现场失效百分比 (IF)	20分	o) 百分比在 20%以内 (18-20 分)； p) 百分比在 20%-40%之间 (15-17 分)； q) 百分比在 40%-60%之间 (11-14 分)； r) 百分比在 60%-80%之间 (6-10 分)； s) 百分比在 80-100%之间 (1-5 分)； t) 百分比在 100%以上 (0 分)	
总分			

T/CICC

指挥控制学会团体标准

T/CICC 35006—2025

产品使用过程确信可靠性检测方法

Belief reliability detection method in product use

2025-06-29发布

2025-06-29实施

中国指挥与控制学会 发布

目 次

前 言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 符号	2
5.1 确信可靠性检测流程	3
5.2 产品状态要求	4
5.3 确信可靠性检测报告	4
6 技术要求	5
6.1 首次检测方案	5
6.2 后续检测方案	5
附录 A（资料性附录）检测结果评价方法	7
附录 B（资料性附录）指标评分标准对照	8
附录 C（资料性附录）基于层次分析法的指标权重确定方法	10
附录 D（资料性附录）相似指标评分方法	12
附录 E（资料性附录）基于产品相似的母体划分方法	14
附录 F（资料性附录）某滤波电路确信可靠性检测示例	15

前 言

本文件按照 GB/T 1.1-2020 《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由中国指挥与控制学会提出并归口。

本文件起草单位：北京航空航天大学、杭州市北京航空航天大学国际创新研究院（北京航空航天大学国际创新学院）、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、北京华安中泰检测技术有限公司。

本文件主要起草人：李晓阳、陈大宇、陈文彬、文美林、康锐、祖天培、陈锐、张健安、司晖、叶润清、阮进喜、潘鸿飞、张娇。

产品使用过程中确信可靠性检测方法

1 范围

本文件规定了产品在变母体、变环境、小样本情况下的可靠性检测方法。

本文件适用于产品使用过程中的健康状态评估和维修间隔期确定，可为动态制定维修保障策略提供依据。

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。

T/ CICC 35001—2025	确信可靠性术语
T/ CICC 35002—2025	功能、性能及裕量分析
T/ CICC 35003—2025	性能参数退化分析

3 术语和定义

3.1

相似指标 similarity index

以所关注的产品特性为依据，用来度量产品间相似程度的性能指标。

3.2

定量相似指标 quantitative similarity index

评分标准可量化的相似指标（3.1）。

3.3

定性相似指标 qualitative similarity index

评分标准不可量化的相似指标（3.1）。

3.4

相似母体 similarity population

基于相似指标（3.1）计算得到的产品集合体。

3.5

检测样本 detection sample

从相似母体（3.4）中选择的用于性能检测的个体。

3.6

检测周期 detection period

对检测样本（3.5）进行性能检测的时间间隔。

3.7

检测方案 detection plan

由检测样本（3.5）和检测周期（3.6）组成的方案。

3.8

首次检测方案 initial sampling plan

仅包含检测样本（3.5）的第一次检测方案（3.7）。

3.9

后续检测方案 subsequent sampling plan

根据上次检测方案（3.7）实施性能检测获取的数据更新制定的下次检测方案（3.7）。

4 符号

下列符号适用于本文件。

η_i	——第 <i>i</i> 次检测方案， <i>i</i> =0表示首次检测方案， <i>i</i> ≥1表示后续检测方案；
n	——评价指标数；
n_0	——定量相似指标数；
n_1	——定性相似指标数；
s	——专家数；
m	——不确定综合评判法评价等级数；
C_{i_1}	——第 <i>i</i> ₁ 个评价指标；
$n_{i_1 i_2}$	—— C_{i_1} 对于 C_{i_2} 的重要度；
A	——重要度矩阵；
x	——重要度矩阵的特征向量；
C_R	——一致性比率；
R_l	——随机一致性指标；
r_i	——第 <i>i</i> 个定量相似指标的得分；
w_j	——第 <i>j</i> 个定性相似指标的权重；
A'	——定性相似指标权重向量；
r_{jl}	——第 <i>j</i> 个评价指标处于第 <i>l</i> 档指标评价等级的程度；
r_{hjl}	——第 <i>h</i> 位专家对第 <i>j</i> 个指标在第 <i>l</i> 个评价等级上的评分；
ξ_{jl}	——刻画 r_{hjl} 的不确定变量；
B'	——不确定评价矩阵；
B	——归一化后的不确定评价矩阵；
r'_j	——第 <i>j</i> 个定性相似指标最终得分；
r	——产品完整的特征向量；
s_l	——不确定综合评判法评分时将分数评价在第 <i>l</i> 个评价等级的专家数量；
K_T	——相似母体个数；
$K_T^{(i)}$	——第 <i>i</i> 次检测的相似母体数量， <i>i</i> =0表示本次检测的相似母体数量， <i>i</i> =1表示后续检测的相似母体数量；
N_K	——第 <i>K</i> 个相似母体中的个体数；
N	——总体中的产品总数；

- d_{uv} ——产品向量 $\mathbf{x}_u (u = 1, 2, \dots, N_a)$ 与第 v 个聚类中心 $\boldsymbol{\mu}_v (v = 1, 2, \dots, K)$ 的相似距离；
 \mathbf{Q}_v ——由不同产品组成的第 v 个聚类；
 $\boldsymbol{\lambda}_v$ ——第 v 个聚类中的“均值相似向量”；
 N_v ——第 v 个聚类中个体数量；
 N_K ——表示第 K 个相似母体中的产品数；
 $p_{ij}^{(k)}$ ——第 k 次检测中第 i 个检测个体的第 j 个性能参数的检测或预测值， $k=0$ 表示上一次检测， $k=1$ 表示本次检测；
 $p_{i^*j}^{(1)}$ ——在第 i 个个体所在的本次检测所确定的相似母体中，所检测个体的第 j 个性能参数检测值；
 $p_{i^*j}^{(0)}$ ——在第 i 个个体所在本次检测所确定的相似母体中，所检测的个体在上一次检测中的第 j 个性能参数检测值；
 $p_{th}^{(j)}$ ——第 j 个性能参数的性能阈值；
 $p_{th,U}^{(j)}$ ——第 j 个性能参数的性能阈值上界；
 $p_{th,L}^{(j)}$ ——第 j 个性能参数的性能阈值下界；
 n_P ——性能参数数量；
 $m_{ij}^{(k)}$ ——第 k 次检测中第 i 个检测个体的第 j 个性能参数的性能裕量， $k=0$ 表示上一次检测， $k=1$ 表示本次检测；
 $m_{i^*j}^{(0)}$ ——在第 i 个个体所在本次检测所确定的相似母体中，所检测的个体在上一次检测中的第 j 个性能参数的性能裕量；
 Y_t —— t 时刻（即本次检测检测的时刻）的性能；
 Y_0 ——性能初值（即上次检测的时刻），服从均值为 μ_{Y_0} 、标准差为 σ_{Y_0} 的正态不确定分布；
 e ——性能退化速率，服从均值为 μ_e 、标准差为 σ_e 的正态不确定分布；
 σ ——扩散系数；
 $C(t)$ ——Liu 过程，服从均值为 0、标准差为 t 的正态不确定分布；
 $y_{0j}^{K(h)}$ ——第 K 个相似母体的第 j 次性能参数，按从小到大排序后的第 h 个性能初值的观测值， $h=1, 2, \dots, N_K$ ， $K=1, 2, \dots, K_T$ ， $j=1, 2$ ；
 $\alpha_{0j}^{K(h)}$ —— $y_{0j}^{K(h)}$ 对应的信度；
 $\Phi(\cdot)$ ——正态不确定分布；
 $\boldsymbol{\theta}_K^{(0)}$ ——第 K 个相似母体的第 j 次性能的性能初值待估参数向量；
 y_{ij} ——编号为 i 的个体的第 j 次性能检测（或预测）值， $j=0$ 表示上一次检测， $j=1$ 表示本次检测；
 t_{ij} t_{ij} —— y_{ij} 对应的性能检测（或预测）时间点；
 Δt_{ij} ——编号为 i 的个体的第 j 次检测与第 $j-1$ 次检测之间的时间间隔；
 Δy_{ij} —— Δt_{ij} 下的性能退化增量；
 $\Delta y_{\cdot j}^K$ ——第 K 个相似母体的第 j 个性能参数的所有个体的退化增量；
 $\Delta y_{\cdot j}^{K(h)}$ ——第 K 个相似母体的第 j 个性能参数的退化增量，按从小到大排序后的第 h 个退化增量；
 $\alpha_{\cdot j}^{K(h)}$ —— $\Delta y_{\cdot j}^{K(h)}$ 对应的信度；
 $m_K^{(j)}$ ——第 K 个相似母体的第 j 个性能参数的性能裕量；

$\mu_{Y_0}^{(j)}$ ——第 K 个相似母体的第 j 个性能参数的 μ_{Y_0} ；

$\theta_K^{(j)}$ ——第 K 个相似母体的第 j 个性能参数的性能退化过程待估参数向量；

n_r ——最高风险等级区间；

$r_K^{(j)}$ ——表示第 K 个相似母体的第 j 个性能参数对应的风险；

5 通用要求

5.1 确信可靠性检测流程

确信可靠性检测的流程如图 1 所示。

在检测开始前，首先判断是否为首次检测，若是，应按照 5.1 节制定首次检测方案 η_0 ，安排首次检测；否则，应按照制定的后续检测方案 η_i ($i \geq 1$) 进行检测，记录检测结果。按照检测结果，开展检测结果评价，具体评价方法可参考附录 A。依据 5.2 节制定后续检测方案 η_{i+1} ，撰写确信可靠性检测报告。

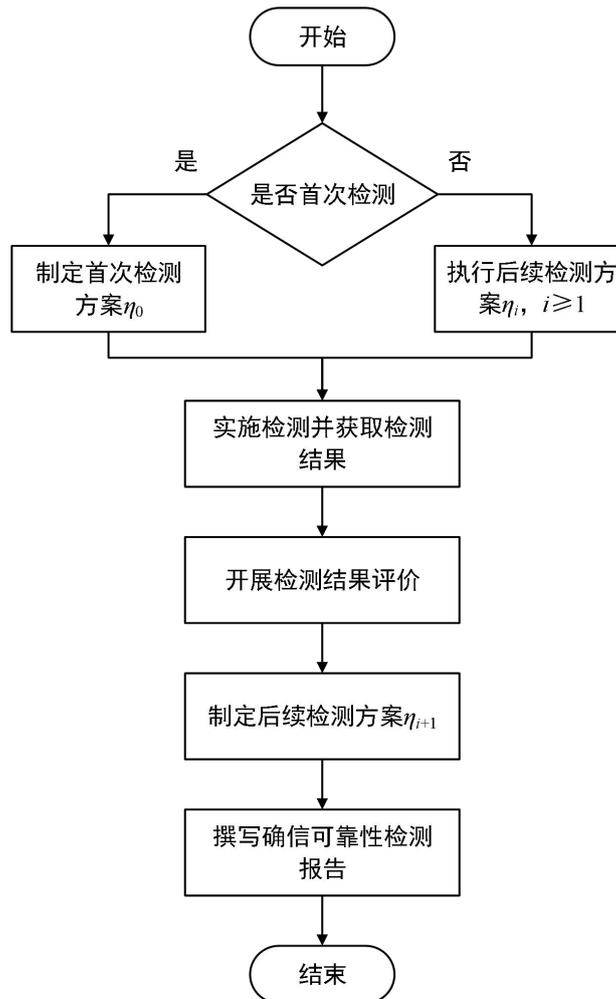


图 1 确信可靠性检测流程

5.2 产品状态要求

进行检测的产品应满足如下状态要求：

- a) 具有完整的物理属性、工艺属性、接口属性等信息；
- b) 具有明确的使用条件（如使用时间、环境条件、工作条件、维护条件等）信息记录；
- c) 性能参数可准确检测。

5.3 确信可靠性检测报告

每次检测后，应根据各项原始记录，编制正式确信可靠性检测报告。确信可靠性检测报告应包括以下内容：

- a) 检测的目的及要求；
- b) 产品状态说明；
- c) 检测样本的确定原则；
- d) 检测方案制定；
- e) 检测结果记录；
- f) 后续检测方案制定；
- g) 确信可靠性检测结论。

6 技术要求

6.1 首次检测方案

6.1.1 划分相似指标

可参照图 2 进行相似指标划分。



图 2 相似指标的划分体系

6.1.2 计算相似指标得分

邀请若干名专家分别对定量相似指标和定性相似指标进行评分，评分标准可参照附录B《指标评分标准对照表》。

对于定性相似指标，其得分可采用不确定综合评判法进行计算。具体步骤如下：

a) 通过层次分析法建立因素集和权重集，确定因素的层次结构，计算各指标权重，具体计算方法见附录 C；

b) 建立指标的评价标准，即评价集，具体评价标准见附录 B 的表 B.1；

c) 计算定性相似指标的得分，具体方法见附录 D.2。

对于定量相似指标，其得分计算方法见附录 D.1。

6.1.3 划分相似母体

利用得到的所有产品的相似指标得分，划分相似母体，具体算法可参考附录 E。

6.1.4 确定首次检测样本

将得到的每一母体中的聚类中心个体为检测样本，进行性能检测。

6.2 后续检测方案

6.2.1 确定后续检测样本

根据附录 A 得到的风险变化规律，预测未来某一时刻的产品总体的风险，即所有母体的最大风险，若此风险位于第 j 风险等级区间内，则后续相似母体数量 $K_T^{(1)} = K_T^{(0)} + j - 1$ ， $K_T^{(0)}$ 表示本次相似母体数量，并进一步进行母体划分，确定后续检测样本。

6.2.2 确定后续检测周期

根据附录 A 得到的风险变化规律，预测未来某一时刻的产品总体的风险，若此风险位于第 j 风险等级区间内，则后续检测周期为本次检测时刻和风险预测时刻之间的时间间隔的 $1/(j+1)$ 。

附录 A
(资料性附录)
检测结果评价方法

A.1 计算性能裕量

按照T/ CICC 35002—2025功能、性能及裕量分析，计算性能裕量。具体为，给定第 j 个性能参数的性能阈值 $p_{th}^{(j)}$ 或性能阈值上界 $p_{th,U}^{(j)}$ 和下界 $p_{th,L}^{(j)}$ 。对总体中所有个体 i 进行编号，按照性能裕量计算公式(A.1)，计算第 k 次检测中第 i 个个体第 j 个性能参数的性能裕量 $m_{ij}^{(k)}$ 。

$$m_{ij}^{(k)} = \begin{cases} p_{th}^{(j)} - p_{ij}^{(k)}, & \text{若 } p \text{ 望小} \\ p_{ij}^{(k)} - p_{th}^{(j)}, & \text{若 } p \text{ 望大} \\ \min(p_{th,U}^{(j)} - p_{ij}^{(k)}, p_{ij}^{(k)} - p_{th,L}^{(j)}), & \text{若 } p \text{ 望目} \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

对于进行检测的个体， $p_{ij}^{(k)}$ 为性能检测值；对于未检测的个体，性能参数 $p_{ij}^{(k)}$ 计算公式如(A.2)所示。

$$\frac{p_{ij}^{(1)} - p_{ij}^{(0)}}{m_{ij}^{(0)}} = \frac{p_{ij}^{(k)} - p_{ij}^{(0)}}{m_{ij}^{(0)}} \Rightarrow p_{ij}^{(k)} = \frac{p_{ij}^{(1)} - p_{ij}^{(0)}}{m_{ij}^{(0)}} \cdot m_{ij}^{(0)} + p_{ij}^{(0)} \quad (\text{A.2})$$

A.2 预测风险

将风险等级区间接从小到大的顺序排列，得到风险等级区间序列 $\{1, 2, \dots, n_r\}$ ，其中1表示最低风险等级区间， n_r 为最高风险等级区间。

根据相似母体划分结果，利用每一相似母体中的所有个体的本次和上次检测的（或预测的）性能裕量，获取所有相似母体的风险变化规律，对所有相似母体的未来风险进行预测，并按照风险等级区间序列，获得相似母体和总体的风险评价，得到检测评价结果。

附录 B
(资料性附录)

指标评分标准对照

定性指标评分标准对照表如表B.1所示，定量指标评分标准对照表如表B.2所示。

表B.1 定性指标评分标准对照表

相似指标		评分标准	所评分数	评分标准分级依据
定性相似指标	物理/接口/工艺/性能参数	优	80~100	所测指标值均优于技术要求中的标称值一个量级以上，无任何故障发生，且可抵抗各类干扰。此时，无需进行检修，可供使用。
		良	60~80	所测指标值均基本满足技术要求，可能存在普通故障，但能有效抵抗各类干扰。此时，根据技术要求安排周期性检修，无任何问题后，可提供用户使用。
		中	30~60	所测指标值大部分满足技术要求，存在个别指标未达到要求，且存在一般性故障，无法有效抵抗干扰影响。此时，需要安排进一步检修，不可使用。
		差	0~30	所测数据大多不满足技术要求，且抗干扰性能差，需进行反复检修，性能劣化趋势十分明显。此时，应停止使用，作报废更换处理。
	工作条件	优	80~100	工作条件在额定值的20%范围内。
		良	60~80	工作条件在额定值的20%~40%范围内。
		中	30~60	工作条件在额定值的40%~60%范围内。
		差	0~30	工作条件在额定值的60%范围之外。
注：定性指标采用优、良、中、差的四级量表进行评分，具体评判标准可由专家小组依据产品情况及各参数性质讨论决定，如不同性能参数具有不同的等级划分标准，在此不作详细规定				

表B.2 定量指标评分标准对照表

相似指标	评分标准	所评分数	评分标准分级依据	
定量相似指标	环境条件——温度(°C)	(10,25]	90~100	根据调研, 10-25°C、相对湿度45-70%对产品的各个部位都是最优, 在这两个范围之外离取值空间越远则外部条件越差。
		(0,10]∪(25,30]	80~90	
		(30,35]	60~80	
		(35,40]	30~50	
		(40,+∞)	0~20	
	环境条件——湿度(%RH)	(45,70]	90~100	
		(30,45]	60~90	
		(0,30]∪(70,80]	30~60	
		(80,100)	0~30	
	环境条件——振动(响应加速度均方根值Grms)	(0,0.3]	90~100	
		(0.3,1]	60~90	
		(1,2.5]	30~60	
		(2.5,+∞)	0~30	
	环境条件——空气质量(AQI)	(0,50]	90~100	空气质量指数(Air Quality Index, 简称AQI)划分为6档, 分别为(0,50]、(50,100]、(100,150]、(150,200]、(200,300]和(300,+∞)。
		(50,100]	80~90	
		(100,150]	60~80	
		(150,200]	40~60	
		(200,300]	20~40	
		(300,+∞)	0~20	
	维护条件——维修次数	(0,2]	90~100	维修次数指的是检测个体从出厂至性能检测前累积的维修次数, 划分为5档, 分别为(0,2]、(2,4]、(4,6]、(6,10]、(10,+∞)。
(2,4]		80~90		
(4,6]		60~80		
(6,10]		30~60		
(10,+∞)		0~30		
使用时间比	(0,0.2]	90~100	使用时间比指的是产品使用时间与预期寿命之比, 划分为5档, 分别为(0,0.2]、(0.2,0.4]、(0.4,0.6]、(0.6,0.8]、(0.8,1]。	
	(0.2,0.4]	80~90		
	(0.4,0.6]	60~80		
	(0.6,0.8]	30~60		
	(0.8,1]	0~30		

附录 C
(资料性附录)
基于层次分析法的指标权重确定方法

C.1 建立以评价指标为因素集的递阶框架

分析系统中各因子之间的关系，将决策的目标、考虑的因素集（决策准则）和决策对象，按它们之间的相互关系自上而下确定目标层、准则层（指标层）、方案层，其中目标层为指标权重，准则层包含 n 个因素（评价指标）分别为 C_1, C_2, \dots, C_n 。

C.2 基于德尔菲法构造重要度评判矩阵

通过德尔菲法构造重要度矩阵，具体步骤如下：

- a) 选择熟悉系统情况的专家，组成专家小组，一般为 5-20 人；
- b) 所有专家依照表 C.1 对指标两两之间的重要度进行评分，构造重要度矩阵(C.1)，其中 C_{i_1} 对于 C_{i_2} 重要度为 $n_{i_1 i_2}$ ，则 C_{i_2} 对于 C_{i_1} 重要度为 $1/n_{i_1 i_2}$ ， $i_1, i_2 = 1, 2, \dots, n, (i_1 \neq i_2)$ ；

$$A = \begin{pmatrix} 1 & n_{12} & \dots & n_{1n} \\ 1/n_{12} & 1 & & \\ \dots & & \dots & \\ 1/n_{1n} & & & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{C.1})$$

- c) 将各位专家第一次判断意见汇总，列成图表，进行对比，给出评分的中位数和上下四分点，再匿名反馈给各位专家，让专家比较自己同他人的不同意见，修改自己的意见和判断，重新对重要度进行评分；

- d) 将所有专家的修改意见收集起来，汇总整理，再次反馈给各位专家，以做第二次修改；

- e) 通过 3~4 轮的专家评分——归纳统计——匿名反馈——归纳统计的反馈匿名函询方法，最终得到唯一的重要度矩阵。

表 C.1 1-9 度标准表

C_{i_1}	定义	C_{i_2}	定义
1	C_{i_1} 和 C_{i_2} 同等重要	2	介于同等与略微重要之间
3	C_{i_1} 较 C_{i_2} 略微重要	4	介于略微与明显重要之间
5	C_{i_1} 较 C_{i_2} 明显重要	6	介于明显与特别重要之间
7	C_{i_1} 较 C_{i_2} 特别重要	8	介于特别与绝对重要之间
9	C_{i_1} 较 C_{i_2} 绝对重要		

C.3 计算各因子权重

当指标层只存在1个指标时，对应的权重为1；当指标层存在大于1个指标时，各因子的权重确定步骤如下：

- a) 计算重要度矩阵中最大特征值 λ_{\max} 对应的特征向量 \mathbf{x} ，即解等式(C.2)；

$$A\mathbf{x} = \lambda_{\max}\mathbf{x} \quad (\text{C.2})$$

b) 计算如公式(C.3)所示的一致性比率 C_R ，随机一致性指标 R_I 取值参考如表 C.2 所示：

$$C_R = \frac{\lambda_{\max} - n}{(n - 1) \cdot RI} \quad (C.3)$$

c) 当 $C_R < 0.1$ 时，判断矩阵通过一致性检验，否则调整矩阵 A 的取值，直至通过检验。
输出经过归一化的 s 位专家对 n 个指标确定的权重 w_1, w_2, \dots, w_n 。

表 C.2 R_I 取值参照表

矩阵阶数	1	2	3	4	5	6
R_I	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24
矩阵阶数	7	8	9	10	11	12
R_I	1.36	1.41	1.46	1.49	1.52	1.54

附录 D
(资料性附录)
相似指标评分方法

D.1 定量相似指标评分

对第*i*个定量相似指标的得分 r_i 采用式(D.1)进行计算。

$$r_i = \frac{1}{S} \sum_{h=1}^S r_{hi}, i = 1, 2, \dots, n_0 \quad (\text{D.1})$$

D.2 定性相似指标评分

每个定性相似指标在评价中的重要程度由附录C得到, 通过归一化得到每个定性相似指标被赋予的权重 $w_j (j=1, 2, \dots, n_1)$, 构成一个权值的集合 $A' = \{w_1, w_2, \dots, w_{n_1}\}$, 其中

$$\sum_{j=1}^{n_1} w_j = 1 (w_j \geq 0).$$

对*m*个评价等级由*s*位专家对*n₁*个指标进行评分得到一系列 r_{jl} 的值 $(r_{hjl})_{s \times n_1 \times m}$, $h=1, 2, \dots, s, j=1, 2, \dots, n_1, l=1, 2, \dots, m$, 其中 r_{jl} 表示该方案第*j*个评价指标处于第*l*档指标评价等级的程度, 其为之字型(Zigzag)不确定变量 ξ_{jl} 的观测值, ξ_{jl} 服从之字型不确定分布 $Z(a_{jl}, b_{jl}, c_{jl})$, 其期望计算式如式(D.2)所示。

$$E[\xi_{jl}] = \frac{a_{jl} + 2b_{jl} + c_{jl}}{4} \quad (\text{D.2})$$

为了计算 a_{jl}, b_{jl}, c_{jl} , 引入计算公式如(D.3)~(D.5)所示的 $a'_{jl}, b'_{jl}, c'_{jl}$ 。

$$a'_{jl} = \min_{h=1}^S r_{hjl} \quad (\text{D.3})$$

$$b'_{jl} = \frac{1}{S} \min_{h=1}^S r_{hjl} \quad (\text{D.4})$$

$$c'_{jl} = \max_{h=1}^S r_{hjl} \quad (\text{D.5})$$

进一步地, 将 $a'_{jl}, b'_{jl}, c'_{jl}$ 进行标准化处理, 当 $c'_{jl} = 0$ 时, a_{jl}, b_{jl}, c_{jl} 均为0, 当 $c'_{jl} > 0$ 时, 得到 $a_{jl} = 0, c_{jl} = 1, b_{jl} = b'_{jl} - a'_{jl} / c'_{jl} - a'_{jl}$, 故得到不确定分布 $Z(a_{jl}, b_{jl}, c_{jl})$ 。进而可以得到各个指标位于各档评语下的统计特征, 用如(D.6)所示的矩阵 R 表示。

$$R = \begin{bmatrix} E(r_{11}) & E(r_{12}) & \dots & E(r_{1l}) \\ E(r_{21}) & E(r_{22}) & \dots & E(r_{2l}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ E(r_{n_1 1}) & E(r_{n_1 2}) & \dots & E(r_{n_1 l}) \end{bmatrix} \quad (\text{D.6})$$

将权重集、因素集和指标分数分布通过不确定运算法则进行合成, 得到不确定评价矩阵 B' (D.7), 其中 $b'_l = w_1 E(r_{1l}) + w_2 E(r_{2l}) + \dots + w_{n_1} E(r_{n_1 l})$, 反应了第*l*级评价在评价总体中所占的地位。

$$B' = A' \cdot R = (w_1, w_2, \dots, w_{n_1}) \begin{bmatrix} E(r_{11}) & E(r_{12}) & \dots & E(r_{1l}) \\ E(r_{21}) & E(r_{22}) & \dots & E(r_{2l}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ E(r_{n_1 1}) & E(r_{n_1 2}) & \dots & E(r_{n_1 l}) \end{bmatrix} = (b'_1, b'_2, \dots, b'_l) \quad (\text{D.7})$$

同时, 将向量 B' 进行归一化可得如公式(D.8)所示的向量 B 。

$$\mathbf{B} = (b_1, b_2, \dots, b_l), b_l = \frac{b'_l}{(b'_1 + b'_2 + \dots + b'_l)} \quad (\text{D.8})$$

用 b_l 权重对评分进行加权，再进行归一化处理，得到样本定性相似指标的最终得分，其计算公式如(D.9)所示，

$$r'_j = \frac{\sum_{l=1}^m \sum_{h=1}^s r_{hjl} \cdot b_l}{\sum_{l=1}^m s_l \cdot b_l} \quad (\text{D.9})$$

由定量相似指标得分(D.1)与定性相似指标得分(D.9)可得产品完整特征向量 $\mathbf{r} = (r_1, r_2, \dots, r_{n_0}, r'_1, r'_2, \dots, r'_{n_1})$ 。

附录 E

(资料性附录)

基于产品相似的母体划分方法

相似母体划分方法具体步骤如下：

a) 确定母体个数 K_T 为检测样本数量；

b) 在所有 N 个产品中选择较有代表性的 K 个产品作为初始聚类中心，确定初始聚类中心向量集合为 $\{\boldsymbol{\mu}_1, \boldsymbol{\mu}_2, \dots, \boldsymbol{\mu}_K\}$ ；

c) 计算每个产品向量 \boldsymbol{x}_u ($u=1, 2, \dots, N$) 与第 K 个聚类中心向量 $\boldsymbol{\mu}_v$ ($v=1, 2, \dots, K$) 的如式 (E.1) 所示的“相似距离” d_{uv} ；

$$d_{uv} = \|\boldsymbol{x}_u - \boldsymbol{\mu}_v\|^2 \quad (\text{E.1})$$

d) 在每个类 Q_v 中，计算所有产品向量的均值，得出每个类中的如式 (E.2) 所示的“均值相似向量” $\boldsymbol{\lambda}_v$ ，并将与“均值相似向量”相似距离最小的产品向量所代表的产品作为新的聚类中心点；

$$\boldsymbol{\lambda}_v = \frac{1}{N_v} \sum_{\boldsymbol{x} \in Q_v} \boldsymbol{x} \quad (\text{E.2})$$

e) 重复第 3、4 步，直至聚类中心不再变化。此时聚类中心即为相似母体中心，聚类结果为相似母体划分结果。

附录 F
(资料性附录)
某滤波电路确信可靠性检测示例

F.1 制定首次检测方案

F.1.1 确定首次检测个体

F.1.1.1 划分相似指标

指标选取如图F.1所示。其中一级指标为产品维度、外部条件维度、时间维度，产品维度下的二级指标为物理参数、接口参数、性能参数，三级指标为电阻值和电容值，以及截止频率和交流衰减；外部条件维度下的二级指标为环境条件，三级指标为温度；时间维度下的二级指标为使用时间比。

C4~C5为定量相似指标，C1~C3、C6~C7共5个指标为定性相似指标。C5~C7这3个指标与退化或检测数据相关，在每次检测后，重新对其评分。在这里需要说明的是，对于接口参数来说，指电路板各个接口，经测量均为优，在实验中并未记录，通过专家的主观认知来进行评分。

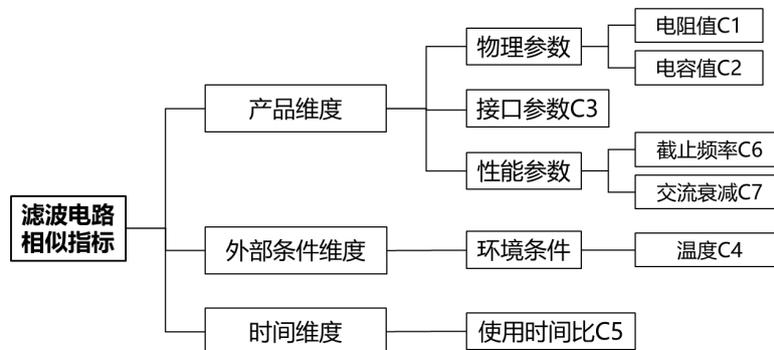


图 F.1 滤波电路示例相似指标层次结构

F.1.1.2 计算相似指标得分

首先，根据如表F.1所示出厂检测数据，由5位专家对每个样本的7个指标进行评分，以下仅以样本1为例进行详细阐述评分过程。注意，此示例中的实验产品预期使用寿命为1000天。

表 F.1 17个样本出厂检测数据

产品编号 测量参数	1	2	3	4	5	6
电阻/ Ω	159.87	159.21	160.05	159.97	327.29	327.51
电容/ μF	10.38	10.57	10.97	10.96	4.71	4.97
温度/ $^{\circ}\text{C}$	100	100	100	100	100	100
使用时间比/%	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
截止频率/Hz	86.1	87.1	83.3	82.2	86.1	83.6
交流衰减/dB	-4.49537	-4.1854	-4.80854	-4.73362	-4.07557	-4.32516
产品编号 测量参数	7	8	9	10	11	12
电阻/ Ω	330.06	329.51	329.48	329.77	329.87	329.55
电容/ μF	4.81	4.69	4.77	4.76	4.59	4.62
温度/ $^{\circ}\text{C}$	100	100	100	80	80	80
使用时间比/%	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
截止频率/Hz	83.6	87.2	86.2	86	86.6	86.2

交流衰减/dB	-4.21127	-4.16045	-4.17673	-4.16206	-4.03395	-4.07332
产品编号	13	14	15	16	17	
测量参数						
电阻/ Ω	327.83	327.77	159.89	159.63	159.71	
电容/ μF	4.78	4.67	10.38	10.69	9.84	
温度/ $^{\circ}\text{C}$	80	80	80	80	80	
使用时间比/%	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	
截止频率/Hz	84.2	86.5	85.8	84.7	88.6	
交流衰减/dB	-4.13917	-4.03328	-4.50053	-4.60198	-4.07947	

F.1.1.2.1 定量相似指标得分

以样本1为例，表F.2是5位专家对该样本的2个定量相似指标的评分情况，定量相似指标的最终得分为专家评分的均值。

表 F.2 样本 1 的定量相似指标评分

定量相似指标		专家1	专家2	专家3	专家4	专家5	均分
C4	温度	70	72	68	70	86	73.2
C5	使用时间比	99	100	100	100	98	99.4

F.1.1.2.2 定性相似指标得分

F.1.1.2.2.1 确定指标权值

参照附录 C，各层级指标重要度评分表如表 F.3~表 F.9 所示。

表F.3 产品维度下物理属性三级指标重要度评分

三级指标	电阻值	电容值
电阻值	1	1/2
电容值	2	1

表F.4 产品维度下性能参数三级指标重要度评分

三级指标	截止频率	交流衰减
截止频率	1	1/3
交流衰减	3	1

表F.5 外部条件维度下三级指标重要度评分

三级指标	温度
温度	1

表F.6 产品维度下二级指标重要度评分

二级指标	物理参数	接口参数	性能参数
物理参数	1	4	1/2
接口参数	1/4	1	1/7
性能参数	2	7	1

表F.7 外部条件维度下二级指标重要度评分

二级指标	环境条件
环境条件	1

表F.8 时间维度下二级指标重要度评分

二级指标	使用时间比
使用时间比	1

表F.9 一级指标重要度评分

一级指标	产品维度	外部条件维度	时间维度
产品维度	1	1/3	5

外部条件维度	3	1	7
时间维度	1/5	1/7	1

进一步地，得到归一化后的定性指标权重如表F.10所示。

表F.10 指标权重计算结果

指标名称或代号	C1	C2	C3	C6	C7
归一化后的权重	0.1023	0.2302	0.0802	0.1468	0.4404

F.1.1.2.2.2 确定评分分数及其分布

5位专家对该样本的5个定性相似指标的评分情况以及分数分布分别如表F.11和表F.12所示。

表 F.11 样本 1 的定性相似指标评分

		专家1	专家2	专家3	专家4	专家5
C1	电阻值	95	99	100	99	98
C2	电容值	95	92	92	90	94
C3	电路板	90	93	93	94	95
C6	截止频率	98	100	100	95	98
C7	交流衰减	98	100	100	100	98

表 F.12 分数分布

指标	优	正常	较差	差
C1	$r_{11} \sim Z(0,0.64,1)$	$r_{12} \sim Z(0,0,1)$	$r_{13} \sim Z(0,0,0)$	$r_{14} \sim Z(0,0,0)$
C2	$r_{21} \sim Z(0,0.52,1)$	$r_{22} \sim Z(0,0,1)$	$r_{23} \sim Z(0,0,0)$	$r_{24} \sim Z(0,0,0)$
C3	$r_{31} \sim Z(0,0.6,1)$	$r_{32} \sim Z(0,0,1)$	$r_{33} \sim Z(0,0,0)$	$r_{34} \sim Z(0,0,0)$
C6	$r_{41} \sim Z(0,0.64,1)$	$r_{42} \sim Z(0,0,1)$	$r_{43} \sim Z(0,0,0)$	$r_{44} \sim Z(0,0,0)$
C7	$r_{51} \sim Z(0,0.6,1)$	$r_{52} \sim Z(0,0,1)$	$r_{53} \sim Z(0,0,0)$	$r_{54} \sim Z(0,0,0)$

F.1.1.2.2.3 计算不确定评价矩阵和最终得分

根据附录 D.2，可得如公式(F.1)所示的归一化后的不确定评价矩阵 B 。

$$B = (1, 0, 0, 0)$$

(F.1)

进一步地，得到样本1定性相似指标的最终得分如表F.13所示。

表 F.13 样本 1 定性相似指标最终得分

指标	1	2	3	6	7
最终得分	98.2	92.6	93	98.2	99.2

同理计算其余16个样本，得到所有样本的所有指标最终得分如表F.14所示。

表 F.14 17 个样本 7 指标最终得分

样本		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
定量相似指标	C4	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	79.2	81.4
	C5	99.4	99.4	99.4	99.4	99.4	99.4	99.4	99.4	99.4	99.4
定性相似指标	C1	98.2	96.2	98.8	98.8	94.6	94.4	98	97.2	96.8	98.6
	C2	92.6	90.80	83.2	83.2	91.6	84.8	87.8	92.2	88.60	88.4
	C3	93	91.8	89.8	90	91.8	90.2	90.6	92.2	91	91.2
	C6	98.2	98	98.4	98.4	97.4	97.6	97.6	97.4	97.4	97.4
	C7	99.2	99	99.4	99.4	98.4	98.6	98.6	98.4	98.4	98.4
样本		11	12	13	14	15	16	17	/	/	/
定量相似指标	C4	81.4	81.4	81.4	81.4	81.4	81.4	81.4	/	/	/
	C5	99.4	99.4	99.4	99.4	99.4	99.4	99.4	/	/	/
定性相似指标	C1	98	97.8	95.4	95.4	98.4	97.4	97.6	/	/	/
	C2	95.4	93.8	89.2	92.2	92.8	87.2	96.6	/	/	/

	C3	94.6	93	90.4	92.2	92	92.2	94.4	/	/	/
	C6	97.4	97.4	97.4	97.4	97.8	97.8	97.4	/	/	/
	C7	98.4	98.4	98.4	98.4	98.8	98.8	98.4	/	/	/

F.1.1.3 划分相似母体

本示例中以个体1、个体5、个体8、个体16为初始聚类中心，得到的初始聚类效果为：

- a) 母体 1：个体 11, 12, 15, 17；
- b) 母体 2：个体 1, 2, 5, 8；
- c) 母体 3：个体 3, 4, 6, 7；
- d) 母体 4：个体 9, 10, 13, 14, 16。

各个母体的聚类中心为个体12、个体8、个体4、个体13。

F.1.1.4 确定首次检测个体

首次检测个体为个体12、个体8、个体4、个体13。

F.1.2 确定首次检测周期

得到首次检测个体后，立刻安排对其进行检测。

F.2 实施检测和获取检测结果

按照首次检测方案进行检测，检测时间距离上次检测已过200天，记录的检测结果如F.15所示。

表 F.15 首次检测个体检测数据

测量参数 \ 产品编号	8	12	13	4
电阻/ Ω	329.51	329.55	327.83	327.77
电容/ μF	4.69	4.62	4.78	4.67
温度/ $^{\circ}\text{C}$	100	80	80	80
使用时间比/%	1.4	1.4	1.4	1.4
截止频率/Hz	88.2	87.9	87.1	88.6
交流衰减/dB	-4.10717	-4.07007	-4.10965	-4.7006

F.3 开展检测结果评价

F.3.1 计算性能裕量

根据性能裕量计算公式(A.1)和性能参数计算公式(A.2)，结合截止频率的阈值上界 $p_{m,U}^1=110$ 和下界 $p_{m,L}^1=80$ 以及交流衰减的阈值 $p_m^2=-3.3$ ，计算得到的上次检测和本次检测各个母体中每个个体的性能值和裕量值如表F.16~ F.21所示。

表 F.16 上一次检测的性能值和裕量值

测量参数 \ 产品编号		产品编号					
		1	2	3	4	5	6
截止频率	性能值	86.1	87.1	83.3	82.2	86.1	83.6
	裕量值	6.1	7.1	3.3	2.2	6.1	3.6
交流衰减	性能值	-4.49537	-4.1854	-4.80854	-4.73362	-4.07557	-4.32516
	裕量值	1.19537	0.8854	1.50854	1.43362	0.77557	1.02516
测量参数 \ 产品编号		产品编号					
		7	8	9	10	11	12

截止频率	性能值	83.6	87.2	86.2	86	86.6	86.2
	裕量值	3.6	7.2	6.2	6	6.6	6.2
交流衰减	性能值	-4.21127	-4.16045	-4.17673	-4.16206	-4.03395	-4.07332
	裕量值	0.91127	0.86045	0.87673	0.86206	0.73395	0.77332
测量参数	产品编号	13	14	15	16	17	
截止频率	性能值	84.2	86.5	85.8	84.7	88.6	
	裕量值	4.2	6.5	5.8	4.7	8.6	
交流衰减	性能值	-4.13917	-4.03328	-4.50053	-4.60198	-4.07947	
	裕量值	0.83917	0.73328	1.20053	1.30198	0.77947	

表 F.17 首次检测个体的性能值和裕量值

测量参数	产品编号	8	12	13	4
截止频率	性能值	89.2	87.9	87.1	88.6
	裕量值	9.2	7.9	7.1	8.6
交流衰减	性能值	-4.10717	-4.07007	-4.10965	-4.7006
	裕量值	0.80717	0.77007	0.80965	1.4006

表 F.18 母体 1 未检测产品的性能预测值和裕量预测值

预测参数	产品编号	11	15	17
截止频率	性能值	88.3742	87.3591	90.9118
	裕量值	8.3742	7.3591	10.9118
交流衰减	性能值	-4.0309	-4.4955	-4.0762
	裕量值	0.7309	1.1955	0.7762

表 F.19 母体 2 未检测产品的性能预测值和裕量预测值

预测参数	产品编号	1	2	5
截止频率	性能值	86.1000	87.1000	86.1000
	裕量值	6.1000	7.1000	6.1000
交流衰减	性能值	-4.4214	-4.1306	-4.0275
	裕量值	1.1214	0.8306	0.7275

表 F.20 母体 3 未检测产品的性能预测值和裕量预测值

预测参数	产品编号	3	6	7
截止频率	性能值	84.5500	84.9636	84.9636
	裕量值	4.5500	4.9636	4.9636
交流衰减	性能值	-4.7763	-4.3032	-4.1918
	裕量值	1.4763	1.0032	0.8918

表 F.21 母体 4 未检测产品的性能预测值和裕量预测值

测量参数	产品编号	9	10	14	16
截止频率	性能值	90.5302	90.1905	91.0397	87.9825
	裕量值	10.5302	10.1905	11.0397	7.9825
交流衰减	性能值	-4.1459	-4.1317	-4.0075	-4.5562

	裕量值	0.8459	0.8317	0.7075	1.2562
--	-----	--------	--------	--------	--------

F.3.2 预测风险

F.3.2.1 构建性能退化模型

根据T/ CICC 35003—2025性能参数退化分析，对滤波电路的性能参数——截止频率和交流衰减构建如公式(F.2)所示的退化模型， Y_t 服从如(F.3)所示的正态不确定分布。

$$Y_t = Y_0 + e \cdot t + \sigma \cdot C(t), Y_0 \sim N(\mu_{Y_0}, \sigma_{Y_0}), e \sim N(\mu_e, \sigma_e), C(t) \sim N(0, t) \quad (F.2)$$

$$\Phi(y | \mu_{Y_0}, \sigma_{Y_0}, \mu_e, \sigma_e, \sigma) = \left(1 + \exp \left(\frac{\pi(\mu_{Y_0} + \mu_e \cdot t - y)}{\sqrt{3}(\sigma_{Y_0} + \sigma_e \cdot t + \sigma \cdot t)} \right) \right)^{-1} \quad (F.3)$$

F.3.2.2 估计模型未知参数

F.3.2.2.1 μ_{Y_0} 和 σ_{Y_0} 的估计方法

对所有母体构成的总体中的产品进行统一编号 i , $i=1,2,\dots,N$ 。对于同一性能参数来说，设 $y_{0j}^{K(h)}$ 表示在第 K 个母体第 j 个性能参数，按从小到大排序后的第 h 个性能初值的观测值， $h=1,2,\dots,N_K$, N_K 表示第 K 个母体中的个体数。

进一步地，按照公式(F.4)计算 $y_{0j}^{K(h)}$ 对应的信度 $\alpha_{0j}^{K(h)}$ 。

$$\alpha_{0j}^{K(h)} = (h - 0.3) / (N_K + 0.4) \quad (F.4)$$

基于获得的 $y_{0j}^{K(1)}, y_{0j}^{K(2)}, \dots, y_{0j}^{K(N_K)}$ 和 $\alpha_{0j}^{K(1)}, \alpha_{0j}^{K(2)}, \dots, \alpha_{0j}^{K(N_K)}$ ，利用最小二乘原则估计参数向量 $\theta_{Kj}^{(0)} = (\mu_{Y_0}^{(Kj)}, \sigma_{Y_0}^{(Kj)})$ ，即求解优化模型(F.5)。

$$\min_{\theta_{Kj}^{(0)}} \sum_{h=1}^{N_K} \left(\Phi(y_{0j}^{K(h)} | \theta_{Kj}^{(0)}) - \alpha_{0j}^{K(h)} \right)^2 \quad (F.5)$$

F.3.2.2.2 μ_e 、 σ_e 和 σ 的估计方法

对于同一性能参数来说，设 y_{ij} 表示编号为 i 的个体第 j 次性能检测（或预测）值， $j=0, 1$ ， $j=0$ 表示上一次检测， $j=1$ 表示本次检测， t_{ij} 是对应的性能检测（或预测）时间点。设 $\Delta t_{ij} = t_{ij} - t_{i(j-1)}$ 表示编号为 i 的个体的第 j 次检测与第 $j-1$ 次检测之间的时间间隔， Δy_{ij} 是 Δt_{ij} 内的性能退化增量。

在第 K 个相似母体下的第 j 个性能参数，所有个体的退化增量 Δy_{ij}^K 服从同一个正态不确定分布 $N\left(\mu_e^{(K)} \cdot \Delta t_{ij}, \left(\sigma_e^{(K)} + \sigma^{(K)}\right) \cdot \Delta t_{ij}\right)$ 。

进一步地，针对本次检测划分的相似母体，对同一相似母体、同一性能参数下的 Δy_{ij}^K 进行从小到大的排序，得到 $\Delta y_{ij}^{K(1)}, \Delta y_{ij}^{K(2)}, \dots, \Delta y_{ij}^{K(N_K)}$ ，其中 $\Delta y_{ij}^{K(h)}$ 为第 K 个相似母体下的第 j 个性能参数的排序后的第 h 个退化增量，并按照公式(F.4)计算对应的信度 $\alpha_{ij}^{K(1)}, \alpha_{ij}^{K(2)}, \dots, \alpha_{ij}^{K(N_K)}$ 。

基于获得的 $\Delta y_{ij}^{K(1)}, \Delta y_{ij}^{K(2)}, \dots, \Delta y_{ij}^{K(N_K)}$ 和 $\alpha_{ij}^{K(1)}, \alpha_{ij}^{K(2)}, \dots, \alpha_{ij}^{K(N_K)}$ ，利用最小二乘原则估计参数 $\theta_{Kj}^{(1)} = (\mu_e^{(Kj)}, \sigma_e^{(Kj)}, \sigma^{(Kj)})$ ，即求解优化模型(F.6)。

$$\min_{\theta_{Kj}^{(1)}} \sum_{h=1}^{N_K} \left(\Phi(\Delta y_{ij}^{K(h)} | \theta_{Kj}^{(1)}) - \alpha_{ij}^{K(h)} \right)^2 \quad (F.6)$$

F.3.2.2.3 参数估计结果

根据F.3.2.2.1和F.3.2.2.2的估计方法，结合F.3.1节的数据，可以得到所有母体下、截止频率和交流衰减的退化模型参数分别如(F.7)所示，

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \text{母体1、截止频率: } Y_0 \sim N(86.4163, 0.7480), e \sim N(4.8037 \cdot 10^{-7}, 0.0596) \quad \sigma = 0.0596 \\
 \text{母体1、交流衰减: } Y_0 \sim N(-4.0759, 0.0408), e \sim N(1.6259 \cdot 10^{-5}, 1.2311 \cdot 10^{-6}) \quad \sigma = 1.5415 \cdot 10^{-7} \\
 \text{母体2、截止频率: } Y_0 \sim N(86.63, 0.9575), e \sim N(1.1274 \cdot 10^{-9}, 0.0054) \quad \sigma = 0.0054 \\
 \text{母体2、交流衰减: } Y_0 \sim N(-4.1721, 0.0964), e \sim N(2.6993 \cdot 10^{-4}, 1.4718 \cdot 10^{-5}) \quad \sigma = 1.4721 \cdot 10^{-5} \\
 \text{母体3、截止频率: } Y_0 \sim N(83.3897, 0.4024), e \sim N(4.4481 \cdot 10^{-9}, 0.0306) \quad \sigma = 0.0306 \\
 \text{母体3、交流衰减: } Y_0 \sim N(-4.5197, 0.4439), e \sim N(1.3320 \cdot 10^{-4}, 2.6604 \cdot 10^{-5}) \quad \sigma = 2.6604 \cdot 10^{-5} \\
 \text{母体4、截止频率: } Y_0 \sim N(85.5797, 1.4587), e \sim N(3.2118 \cdot 10^{-6}, 0.0998) \quad \sigma = 0.0998 \\
 \text{母体4、交流衰减: } Y_0 \sim N(-4.1593, 0.0498), e \sim N(1.5111 \cdot 10^{-4}, 7.0010 \cdot 10^{-6}) \quad \sigma = 1.6858 \cdot 10^{-6}
 \end{array} \right. \quad (\text{F.7})$$

F.3.2.3 预测风险

每个母体下截止频率和交流衰减的风险表达式分别为如(F.8)所示的 $r_K^{(1)}$ 和 $r_K^{(2)}$ 。

$$\left\{ \begin{array}{l}
 r_K^{(1)} = 1 - M(m_K^{(1)} > 0) = 1 - M(p_{th,L}^{(1)} < p_K^{(1)} < p_{th,U}^{(1)}) \\
 \quad = 1 - \Phi(p_{th,U}^{(1)} | \theta_{K1}^{(0)}, \theta_{K1}^{(1)}) + \Phi(p_{th,L}^{(1)} | \theta_{K1}^{(0)}, \theta_{K1}^{(1)}) \\
 r_K^{(2)} = 1 - M(m_K^{(2)} > 0) = 1 - M(p_K^{(2)} < p_{th}^{(2)}) = 1 - \Phi(p_{th}^{(2)} | \theta_{K2}^{(0)}, \theta_{K2}^{(1)})
 \end{array} \right. \quad (\text{F.8})$$

在本示例中，将风险等级区间划分为3个区间，即[0, 5%)、[5%, 10%)、[10%, 20%)、[20%, 30%)、[30%, 100%]。假设需要预测距离本次检测200天时的风险，将(F.7)中估计的参数值代入(F.8)，可以得到不同母体、不同性能参数对应的风险(F.9)。

$$\left\{ \begin{array}{l}
 r_1^{(1)} = 53.33\%, r_1^{(2)} = 0 \\
 r_2^{(1)} = 2.12\%, r_2^{(2)} = 0 \\
 r_3^{(1)} = 40.18\%, r_3^{(2)} = 0.85\% \\
 r_4^{(1)} = 69.45\%, r_4^{(2)} = 0
 \end{array} \right. \quad (\text{F.9})$$

综上，对于截止频率来说，母体1、3、4均为第5风险等级，母体2为第1风险等级；对于交流衰减来说，所有母体均为第1风险等级；总体的风险等级，即所有母体风险的最大值，为第5等级。

F.4 后续检测方案设计

F.4.1 确定后续检测个体

根据F.3.2节得到的预测的200天后产品总体的风险可知，后续检测划分为8个母体，对上一次检测个体更新相似指标评分如表F.22所示。

表F.22首次检测后，17个样本7指标最终得分

样本		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
定量相似指标	C4	73.2	73.2	73.2	81.4	73.2	73.2	73.2	73.2	79.2	81.4
	C5	99.4	99.4	99.4	97.4	99.4	99.4	99.4	99.4	99.4	99.4
定性相似指标	C1	98.2	96.2	98.8	95.4	94.6	94.4	98	97.2	96.8	98.6
	C2	92.6	90.80	83.2	92.2	91.6	84.8	87.8	92.2	88.60	88.4
	C3	93	91.8	89.8	92.2	91.8	90.2	90.6	92.2	91	91.2
	C6	98.2	98	98.4	72.7	97.4	97.6	97.6	97.2	97.4	97.4

	C7	99.2	99	99.4	91.3	98.4	98.6	98.6	88.2	98.4	98.4
样本		11	12	13	14	15	16	17			
定量相似指标	C4	81.4	81.4	81.4	81.4	81.4	81.4	81.4			
	C5	99.4	97.4	97.4	99.4	99.4	99.4	99.4			
定性相似指标	C1	98	97.8	95.4	95.4	98.4	97.4	97.6			
	C2	95.4	93.8	89.2	92.2	92.8	87.2	96.6			
	C3	94.6	93	90.4	92.2	92	92.2	94.4			
	C6	97.4	81.7	66.4	97.4	97.8	97.8	97.4			
	C7	98.4	97.8	92.4	98.4	98.8	98.8	98.4			

进一步更新检测母体，以个体12、个体8、个体4、个体13作为初始聚类中心，得到的母体划分结果为：

- a) 母体 1：个体 1， 2， 5；
- b) 母体 2：个体 3， 6， 7；
- c) 母体 3：个体 8；
- d) 母体 4：个体 9， 10， 16；
- e) 母体 5：个体 12；
- f) 母体 6：个体 4；
- g) 母体 7：个体 13；
- h) 母体 8：个体 11， 14， 15， 17；

后续检测方案的检测个体为个体2、6、8、10、12、4、13、11。

F.4.2 确定后续检测周期

假设风险预测时间点为200天后，则根据F.3.2节的得到的风险规律，200天后的风险为69.45%，位于第5风险等级区间内，按照6.2.2节检测周期的计算方法，可以得到后续检测周期为 $200 \times 1/6 = 33.33 \approx 33$ 天，即在33天后对个体2、6、8、10、12、4、13、11进行后续检测。

T/CICC

指挥控制学会团体标准

T/CICC 35007—2025

金属材料 疲劳试验 小样本数据统计分析方法

Statistical analysis methods for small sample data in metal
fatigue testing

2025-06-29发布

2025-06-29实施

中国指挥与控制学会 发布

目 次

前 言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 符号	2
5 通用要求	5
5.1 试验方法	5
5.2 试验大纲	5
5.3 试验报告	5
6 技术要求	6
6.1 试验对象	6
6.2 试验方案	6
6.3 统计分析方法	7
附录 A (资料性附录) $\alpha - S - N$ 曲线的估计(对数正态分布型)	9
附录 B (资料性附录) 给定应力下疲劳寿命的估计(对数正态分布型)	13
附录 C (资料性附录) 给定疲劳寿命下疲劳强度的估计(对数正态分布型)	15
附录 D (资料性附录) 修匀公式	16
附录 E (资料性附录) $\alpha - S - N$ 曲线的估计(对数正态分布型)示例	20
附录 F (资料性附录) 单应力水平试验下给定疲劳寿命的估计(对数正态分布型)示例	23
附录 G (资料性附录) 多应力水平试验下给定疲劳寿命的估计(对数正态分布型)示例	24
附录 H (资料性附录) 给定疲劳寿命下疲劳强度的估计(对数正态分布型)示例	25

前 言

本文件按照GB/T 1.1-2020《标准化工作导则第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由中国指挥与控制学会提出并归口。

本文件起草参与单位：杭州市北京航空航天大学国际创新研究院（北京航空航天大学国际创新学院）、北京航空航天大学、深圳市为民可靠性系统工程研究院、北京蓝威科技有限公司、中国科学院声学研究所。

本文件主要起草人：祖天培、康锐、金毅、陈云霞、文美林、廖伟骏、李沛萱、王彦林、阮进喜、郝程鹏、司昌龙、包超鹏、代国良。

金属材料 疲劳试验 小样本数据统计分析方法

1 范围

本文件提供了在金属材料疲劳试验中， $\alpha-S-N$ 曲线的估计方法、给定应力估计疲劳寿命的方法以及给定疲劳寿命估计疲劳强度的方法。

本文件适用于试验样本数小于30个的金属材料疲劳试验，其他非金属材料也可参考使用。

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。

GB/T 10623-2008	金属材料力学性能试验术语
GB/T 3075-2021	金属材料疲劳试验轴向力控制方法
T/CICC 35001-2025	确信可靠性术语

3 术语和定义

GB/T 10623-2008和T/CICC 35001-2025界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

信度 belief degree

相信事情发生的程度。

3.2

不确定变量 uncertain variable

符合不确定测度的变量。

3.3

不确定分布 uncertainty distribution

表征不确定变量(3.2)小于等于任意值的信度的函数。

3.4

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

不确定变量(3.2)的平均值。

3.5

不确定变量的方差 variance of uncertain variable

不确定变量(3.2)与其期望(3.4)的差的平方的期望。

3.6 不确定变量的标准差 standard deviation of uncertain variable
不确定变量的方差(3.5)的正方根值。

3.7 不确定变量的变异因子 variation coefficient of uncertain variable
不确定变量标准差(3.6)与期望(3.4)的比值。

3.8 正态不确定分布 normal uncertainty distribution
如果不确定变量(3.2)的不确定分布(3.3)满足如下形式：

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

则称其为正态不确定分布，记作 $N(e, \sigma)$ 。

3.9 对数疲劳寿命 logarithmic fatigue life
疲劳寿命的对数值，本文件采用以10为底的对数。

3.10 对数疲劳强度 fatigue strength
疲劳强度的对数值，本文件采用以10为底的对数。

3.11 $\alpha - S - N$ 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， $l = 1, 2, \dots, 5$ 。
- 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， $l = 1, 2, \dots, 5$ ；
- d_1, d_2, \dots, d_n —— 升序排列的观测数据，满足 $d_1 \leq d_2 \leq \dots \leq d_n$ ；
- 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；
- s_0 —— 修匀公式求解过程中升序正观测数据 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ 的标准差， $t = 0, 1, 2, \dots$ ；
- s_{t+1} —— 修匀公式求解过程中第 t 轮迭代后数据的经验标准差， $t = 0, 1, 2, \dots$ ；

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， $i=1,2,\dots,p$ ， $j=1,2,\dots,q$ ；
\tilde{x}_{ik}	——第 i 个应力水平下第 k 个等效对数应力循环数， $i=1,2,\dots,p$ ， $k=1,2,\dots,Q$ ；
y	——对数疲劳强度；
y_i	——第 i 个对数应力水平， $i=1,2,\dots,p$ ；
\bar{y}	——对数应力水平的平均值，其计算公式为： $\bar{y} = \sum_{i=1}^p y_i / p$ ， $i=1,2,\dots,p$ ；
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， $i=1,2,\dots,p$ ， $j=1,2,\dots,q$ ；
N_0	——给定疲劳寿命；
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， $i=1,2,\dots,p$ ；
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， $i=1,2,\dots,p$ ， $j=1,2,\dots,q$ ；
$\tilde{\alpha}_k$	——第 k 个对数应力循环数对应的信度， $k=1,2,\dots,Q$ ；
$\hat{\alpha}_l$	——绘制 $\alpha - S - N$ 曲线时的第 l 个信度值， $l=1,2,\dots,5$ ；
$\hat{\alpha}_0$	——给定应力水平下的给定信度；
β_i	——修匀公式定义式中的信度；
β_i^0	——修匀公式定义式预处理后的数据 ξ_i^0 对应的信度；
β_i^t	——修匀公式定义式第 t 轮迭代后数据 ξ_i^t 对应的信度， $t=0,1,2,\dots$ ；
β_i^{t+1}	——修匀公式定义式第 $t+1$ 轮迭代后数据 ξ_i^t 对应的信度， $t=0,1,2,\dots$ ；
ε	——平移量，若 $d_1 > 0$ ，则 $\varepsilon = 0$ ；若 $d_1 \leq 0$ ，则 $\varepsilon = 0.1 \times d_1 - d_1$ ；
μ	——不确定分布的期望；
$\hat{\mu}$	——不确定分布的期望估计值；
$\hat{\mu}_i$	——第 i 个对数应力水平下对数疲劳寿命期望估计值， $i=1,2,\dots,p$ ；
$\tilde{\mu}_i$	——第 i 个对数应力水平下等效对数疲劳寿命期望估计值， $i=1,2,\dots,p$ ；
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 —— 不确定分布的标准差；
 $\hat{\sigma}_i$ —— 第 i 个对数应力水平下对数疲劳寿命标准差估计值， $i=1,2,\dots,p$ ；
 $\tilde{\sigma}_i$ —— 第 i 个对数应力水平下等效对数疲劳寿命标准差估计值， $i=1,2,\dots,p$ ；
 $\tilde{\sigma}_i^*$ —— 第 i 个对数应力水平下调匀等效对数疲劳寿命标准差估计值， $i=1,2,\dots,p$ ；
 σ_X —— 对数疲劳寿命的标准差；
 σ_X^0 —— 给定应力水平 S_0 对数疲劳寿命的标准差；
 $\hat{\sigma}_X^0$ —— 给定应力水平 S_0 对数疲劳寿命的标准差估计值；
 σ_Y —— 对数疲劳强度的标准差；
 σ_Y^0 —— 给定疲劳寿命 N_0 下的对数疲劳强度的标准差；
 $\hat{\sigma}_Y^0$ —— 给定疲劳寿命 N_0 下的对数疲劳强度的标准差估计值；
 δ_i —— 修匀公式求解过程中迭代终止条件的判据，即第 t 轮信度 β_t^l 与第 $t+1$ 轮信度 β_t^{l+1} 间的距离， $i=1,2,\dots,n$ ；
 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， $i=1,2,\dots,p$ ， $l=1,2,\dots,5$ ；
 $\bar{\tau}_l$ —— 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：
 $\bar{\tau}_l = \sum \tau_{li} / p$ ， $i=1,2,\dots,p$ ， $l=1,2,\dots,5$ ；
 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 $\xi_1 \leq \xi_2 \leq \dots \leq \xi_n$ ；
 ξ_i^0 —— 修匀公式求解过程中预处理后的数据， $i=1,2,\dots,n$ ；
 ξ_i^t —— 修匀公式求解过程中第 t 轮迭代后数据， $t=0,1,2,\dots$ ， $i=1,2,\dots,n$ ；
 ξ_i^{t+1} —— 修匀公式求解过程中第 $t+1$ 轮迭代后数据， $t=0,1,2,\dots$ ， $i=1,2,\dots,n$ ；
 ω_0 —— 修匀公式求解过程中升序正观测数据 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ 的算数平均值；
 ω_{t+1} —— 修匀公式求解过程中第 t 轮迭代后数据的经验期望；
 ν_i —— 第 i 个对数应力水平下变异因子的值， $i=1,2,\dots,p$ ；
 $\bar{\nu}$ —— 等效对数疲劳寿命变异因子的平均值， $i=1,2,\dots,p$ ；
 \mathbb{A} —— 升序信度集， $\mathbb{A} = \{a_1, a_2, \dots, a_k, \dots, a_Q\}$ ；
 $\Phi(\cdot)$ —— 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 试验方法

金属材料疲劳试验方法应参考GB/T 3075-2021等国家标准进行。

5.2 试验大纲

对金属材料的疲劳性能进行小样本试验前，应制定试验大纲，以保证疲劳试验的实施。试验大纲应至少包括以下内容：

- a) 试验目的；
- b) 试验对象；
- c) 试验方案；
- d) 统计分析方法等。

5.3 试验报告

5.3.1 试验结果的表达

5.3.1.1 总则

根据所分析的试验目的，试验报告应包括 $a-S-N$ 曲线的统计分析和/或给定应力下的疲劳寿命的统计分析和/或给定寿命下的疲劳强度的统计分析及其他相关信息等。

5.3.1.2 $a-S-N$ 曲线的统计分析

试验报告中涉及 $\alpha-S-N$ 曲线的内容时，应包括：

- 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。

5.3.1.3 给定应力下的疲劳寿命的统计分析

试验报告中涉及给定应力下的疲劳寿命的统计分析的内容时，应包括：

- a) 采用的统计分析方法；
- 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。

5.3.1.4 给定寿命下的疲劳强度的统计分析

试验报告中涉及给定寿命下的疲劳强度的统计分析的内容时，应包括：

- a) 采用的统计分析方法；
- 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 其他相关信息

5.3.2.1 被测材料

试验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。

5.3.2.2 被测试样

试验报告中应包括被测试样的信息，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。

5.3.2.3 疲劳试验的条件

试验报告中应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 技术要求

6.1 试验对象

6.1.1 试样抽取的基本要求

- a) 抽样前，应首先确定所要分析疲劳性能的材料总体。
- b) 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。
- c) 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。
- d) 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。
- e) 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

- a) 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。
- b) 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，应保证每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。
- c) 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 试验方案

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试验方案：

- a) 本文件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；

- b) 本文件建议多应力试验应在3~5个应力水平下进行，建议每应力水平下试样样本数不少于3个，推荐数量为7个，总样本数不多于30个。

6.3 统计分析方法

6.3.1 $\alpha-S-N$ 曲线的估计

通过对 $\alpha-S-N$ 曲线进行估计，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估计以及给定疲劳寿命下的疲劳强度的估计奠定基础。其基本步骤为：

- a) 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}
...		\vdots	\vdots		\vdots
S_p		N_{p1}	N_{p2}	...	N_{pq}

- b) 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以相同，也可以不同。个数不同时按照最大个数绘制疲劳试验原始记录表。本文件仅展示个数相同的情况：
- 1) 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；
 - 2) 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。
- c) 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；
- d) 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。本文件资料性附录A中提供了对数疲劳寿命服从正态不确定分布（简称对数正态分布型）时的计算方法。
- e) 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 \mathbb{K} ， $\mathbb{K} = \{a_1, a_2, \dots, a_k, \dots, a_q\}$ ；
- f) 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；
- g) 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；
- h) $\alpha-S-N$ 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；

- i) $\alpha-S-N$ 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估计可分为多应力水平下给定应力下疲劳寿命的估计方法和单应力水平下给定应力下疲劳寿命的估计方法两类：

- a) 单应力水平下给定应力下疲劳寿命的估计方法：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。本文件资料性附录B.1中提供了单应力水平下给定应力下疲劳寿命的估计方法（对数正态分布型）；
- b) 多应力水平下给定应力下疲劳寿命的估计方法：首先按照6.3.1中的(1)至(7)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。本文件资料性附录B.2中提供了多应力水平下给定应力下疲劳寿命的估计方法（对数正态分布型）。

6.3.3 给定疲劳寿命下疲劳强度的估计

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

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

本文件资料性附录C中提供了给定疲劳寿命下疲劳强度的估计方法（对数正态分布型）。

附录 A
(资料性附录)

$\alpha-S-N$ 曲线的估计 (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 $\alpha-S-N$ 曲线估计流程及方法。

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}
...		\vdots	\vdots		\vdots
y_p		x_{p1}	x_{p2}	...	x_{pq}

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

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期望估计值和标准差估计值, 并填入对数疲劳寿命平均值和标准差计算表, 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:

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

式中:

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

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

$\Phi(\cdot)$ ——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, $i = 1, 2, \dots, p$;

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

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}
...	\vdots	\vdots		\vdots
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 $\tilde{\alpha}_k (k=1,2,\dots,Q)$ 。 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:

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

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, $i=1,2,\dots,p, k=1,2,\dots,Q$;

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

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

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

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}
...	\vdots	\vdots		\vdots
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 等效对数疲劳寿命期望估计值、标准差估计值和变异因子表

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	$\tilde{\mu}_1$	$\tilde{\sigma}_1$	v_1	\bar{v}
y_2	$\tilde{\mu}_2$	$\tilde{\sigma}_2$	v_2	
...	
y_p	$\tilde{\mu}_p$	$\tilde{\sigma}_p$	v_p	

表中，变异因子的平均值的计算公式为：

$$\bar{v} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p v_i \quad (\text{A.3})$$

式中：

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

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

利用标准差调整公式计算调整后标准差。标准差调整公式为：

$$\tilde{\sigma}_i^* = \bar{v} \times \tilde{\mu}_i \quad (\text{A.4})$$

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差， $i=1,2,\dots,p$ ；

\bar{v} ——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， $i=1,2,\dots,p$ 。

因此，调匀等效对数疲劳寿命分布为：

$$\Phi(x) = \left(1 + \left(\exp\left(\frac{\pi(\tilde{\mu}_i - x)}{\sqrt{3}\tilde{\sigma}_i^*} \right) \right) \right)^{-1} \quad (\text{A.5})$$

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差， $i=1,2,\dots,p$ ；

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

A.7 计算 α -S-N 曲线

A.7.1 确定信度值

本文件建议绘制 α -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-分位等效对数疲劳寿命表，如表A.6所示。

分位等效对数疲劳寿命的计算公式为：

$$\tau_{li} = \tilde{\mu}_i + \frac{\sqrt{3}\tilde{\sigma}_i^*}{\pi} \ln\left(\frac{\hat{\alpha}_l}{1-\hat{\alpha}_l} \right) \quad (i=1,2,\dots,p, l=1,2,\dots,5) \quad (\text{A.6})$$

式中：

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

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， $i=1,2,\dots,p, l=1,2,\dots,5$ ；

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

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

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}	...	τ_{14}	τ_{15}
y_2	τ_{21}	τ_{22}	...	τ_{24}	τ_{25}
...	\vdots	\vdots		\vdots	\vdots
y_p	τ_{p1}	τ_{p2}	...	τ_{p4}	τ_{p5}

A.7.3 计算 α - S - N 曲线参数

根据Basquin公式: $N = AS^{-B}$, 两侧取对数后可得:

$$\log N = \log A - B \log S \quad (\text{A.7})$$

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

$$x = a - by \quad (\text{A.8})$$

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:

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{b}_l = -\frac{\sum_{i=1}^p (\tau_{li} - \bar{\tau}_l)(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^p (y_i - \bar{y})^2} \\ \hat{a}_l = \bar{\tau}_l + \hat{b}_l \bar{y} \end{array} \right. \quad (\text{A.9})$$

式中:

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

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, $i=1,2,\dots,p$ $l=1,2,\dots,5$;

$\bar{\tau}_l$ ——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:

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

y_i ——第 i 个应力水平的对数值, $i=1,2,\dots,p$;

\bar{y} ——对数应力水平的平均值, 其计算公式为:

$$\bar{y} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p y_i, \quad i=1,2,\dots,p;$$

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

A.8 绘制 α - S - N 曲线

根据计算的线性参数估计值绘制 α - S - N 曲线。具体的 α - S - N 曲线估计示例参见本文资料性附录E。

附录 B
(资料性附录)

给定应力下疲劳寿命的估计 (对数正态分布型)

B.1 单应力水平试验下疲劳寿命的估计

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 $x_1^0, x_2^0, \dots, x_p^0$, 且满足 $x_1^0 < x_2^0 < \dots < x_p^0$ 。

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 $\hat{\mu}_x^0$ 和标准差 $\hat{\sigma}_x^0$ 。则给定应力水平 S_0 下的对数疲劳寿命分布为:

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

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:

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

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 下对数疲劳寿命的期望估计值;

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

$\hat{\alpha}_0$ —— 给定信度。

单应力水平试验下疲劳寿命的估计示例参见附录 F。

B.2 多应力水平试验下疲劳寿命的估计

多应力水平试验下疲劳寿命的估计应按照以下步骤进行:

a) 执行步骤 A.1 条至 A.7 条;

b) 计算第 l 个信度 $\hat{\alpha}_l$, 分别对应的对数疲劳寿命分位值 \hat{x}_l , 其计算公式为:

$$\hat{x}_l = \hat{a}_l - \hat{b}_l y_0 \quad (\text{B.3})$$

式中:

\hat{x}_l —— 第 l 个信度 $\hat{\alpha}_l$ 分别对应的对数疲劳寿命;

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

y_0 —— 给定应力水平 S_0 的对数值, 即 $y_0 = \log_{10} S_0$ 。

c) 整理对数疲劳寿命及其信度, 并记作 $(\hat{x}_1, \hat{\alpha}_1), (\hat{x}_2, \hat{\alpha}_2), \dots, (\hat{x}_L, \hat{\alpha}_L)$ 。利用最小二乘法计算对数疲劳寿命分布中参数 μ_x^0, σ_x^0 的估计值 $\hat{\mu}_x^0$ 和 $\hat{\sigma}_x^0$, 给定应力水平下的对数疲劳寿命分布可表示为:

$$\Phi_x^0(x) = \left(1 + \exp\left(\frac{\pi(\hat{\mu}_x^0 - x)}{\sqrt{3}\hat{\sigma}_x^0}\right) \right)^{-1} \quad (\text{B.4})$$

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 下的对数疲劳寿命的期望估计值;

$\hat{\sigma}_x^0$ ——给定应力水平 S_0 下的对数疲劳寿命的标准差估计值。

d) 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:

$$\tau_a^0 = \hat{\mu}_x^0 + \frac{\sqrt{3}\hat{\sigma}_x^0}{\pi} \ln\left(\frac{\hat{\alpha}_0}{1-\hat{\alpha}_0}\right) \quad (\text{B.5})$$

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 下对数疲劳寿命的期望估计值;

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

$\hat{\alpha}_0$ ——设定的信度值。

多应力水平试验下给定疲劳寿命的估计示例参见附录G。

附录 C
资料性附录

给定疲劳寿命下疲劳强度的估计（对数正态分布型）

C.1 疲劳强度的分布

给定疲劳寿命下疲劳强度的估计应按照以下步骤进行：

执行A.1条至A.7条后，计算第 l 个信度 $\hat{\alpha}_l$ 分别对应的对数疲劳强度 \hat{y}_l ($l=1,2,\dots,5$)，其计算公式为：

$$\hat{y}_l = \frac{\hat{a}_l}{\hat{b}_l} - \frac{1}{\hat{b}_l} x_0 \quad (\text{C.1})$$

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 α -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 α -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 $(\hat{y}_1, \hat{\alpha}_1), (\hat{y}_2, \hat{\alpha}_2), \dots, (\hat{y}_L, \hat{\alpha}_L)$ 。利用最小二乘法计算疲劳强度的分布中参数 μ_y, σ_y 的估计值 $\hat{\mu}_y$ 和 $\hat{\sigma}_y$ ，则给定疲劳寿命 N_0 下的对数疲劳强度的分布可表示为：

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

式中：

$\Phi_y^0(y)$ ——给定疲劳寿命 N_0 下对数疲劳强度的分布；

$\hat{\mu}_y^0$ ——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：

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

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差。

给定疲劳寿命下疲劳强度的估计示例参见附录H。

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, \dots, d_n 为升序排列的观测数据, 即有 $d_1 \leq d_2 \leq \dots \leq d_n$ 。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 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$, 则 $\xi_i = d_i + \varepsilon$, ($i=1, 2, \dots, n$), ε 为平移量。若 $d_1 > 0$, 则 $\varepsilon=0$; 若 $d_1 \leq 0$, 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:

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

其中,

$$\begin{cases} \mu = \frac{\beta_1 + \beta_2}{2} \xi_1 + \sum_{i=2}^{n-1} \frac{\beta_{i+1} - \beta_{i-1}}{2} \xi_i + \left(1 - \frac{\beta_{n-1} + \beta_n}{2} \right) \xi_n \\ \sigma = \sqrt{\beta_1 (\xi_1 - \mu)^2 + \frac{1}{3} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=0}^2 (\beta_{i+1} - \beta_i) (\xi_i - \mu)^j (\xi_{i+1} - \mu)^{2-j} + (1 - \beta_n) (\xi_n - \mu)^2} \end{cases}$$

D.2.3 修匀公式的求解

D.2.3.1 数据预处理

- a) 计算正观测数据集的算数平均值 ω_0 :

$$\omega_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \xi_i. \quad (\text{D.1})$$

式中:

ω_0 ——升序正观测数据 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ 的算数平均值;

$\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ ——观测数据 d_1, d_2, \dots, d_n 处理后的升序正观测数据;

n ——观测数据的个数。

- b) 计算正观测数据集的标准差 s_0 :

$$s_0 = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (\xi_i - \omega_0)^2}. \quad (\text{D.2})$$

式中:

s_0 ——升序正观测数据 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ 的标准差;

n ——观测数据的个数;

$\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ ——观测数据 d_1, d_2, \dots, d_n 处理后的升序正观测数据;

ω_0 ——升序正观测数据 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ 的算数平均值, 由公式(D.1)计算得到。

- c) 进行坐标系变换, 原坐标系向左平移 ω_0 , 并将新坐标系下的数据点记作 ξ^0 :

$$\xi_i^0 = \xi_i - \omega_0, \quad i=1,2,\dots,n \quad (\text{D.3})$$

式中:

ξ_i^0 ——预处理后的数据, $i=1,2,\dots,n$;

ξ_i ——升序正观测数据, $i=1,2,\dots,n$;

ω_0 ——升序正观测数据 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ 的算数平均值, 由公式(D.1)计算得到。

d) 计算数据 ξ_i^0 对应的信度 β_i^0 :

$$\beta_i^0 = \left(1 + \exp \left(\frac{\pi(0 - \xi_i^0)}{\sqrt{3}s_0} \right) \right)^{-1} \quad (\text{D.4})$$

式中:

β_i^0 ——预处理后的数据 ξ_i^0 对应的信度;

ξ_i^0 ——预处理后的数据, $i=1,2,\dots,n$;

s_0 ——升序正观测数据 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ 的标准差, 由公式(D.2)计算得到。

D.2.3.2 (t+1)轮迭代过程

a) 计算经验期望 ω_{t+1} :

$$\omega_{t+1} = \frac{\beta_1^t + \beta_2^t}{2} \xi_1^t + \sum_{i=2}^{n-1} \frac{\beta_{i+1}^t - \beta_{i-1}^t}{2} \xi_i^t + \left(1 - \frac{\beta_{n-1}^t + \beta_n^t}{2} \right) \xi_n^t. \quad (\text{D.5})$$

式中:

ω_{t+1} ——第 t 轮迭代后数据的经验期望;

β_i^t ——第 t 轮迭代后数据 ξ_i^t 对应的信度, $i=1,2,\dots,n$;

ξ_i^t ——第 t 轮迭代后数据, $i=1,2,\dots,n$ 。

b) 进行坐标系向左平移, 距离为 ω_{t+1} , 并将新的坐标系下的数据点记作 ξ_i^{t+1} :

$$\xi_i^{t+1} = \xi_i^t - \omega_{t+1}, \quad i=1,2,\dots,n. \quad (\text{D.6})$$

式中:

ξ_i^{t+1} ——第 $t+1$ 轮迭代后数据, $i=1,2,\dots,n$;

ξ_i^t ——第 t 轮迭代后数据, $i=1,2,\dots,n$;

ω_{t+1} ——第 t 轮迭代后数据的经验期望, 由公式(D.5)计算得到。

c) 根据数据 $\xi_1^{t+1}, \xi_2^{t+1}, \dots, \xi_n^{t+1}$ 计算经验标准差 s_{t+1} :

$$s_{t+1} = \sqrt{\beta_1^t (\xi_1^{t+1})^2 + \frac{1}{3} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=0}^2 (\beta_{i+1}^t - \beta_i^t) (\xi_i^{t+1})^j (\xi_{i+1}^{t+1})^{2-j} + (1 - \beta_n^t) (\xi_n^{t+1})^2}. \quad (\text{D.7})$$

式中:

s_{t+1} ——第 t 轮迭代后数据的经验标准差;

β_i^t ——第 t 轮迭代后数据 ξ_i^t 对应的信度, $i=1,2,\dots,n$;

ξ_i^{t+1} ——第 $t+1$ 轮迭代后数据, $i=1,2,\dots,n$, 由公式(D.6)计算得到。

d) 计算数据 $\xi_1^{t+1}, \xi_2^{t+1}, \dots, \xi_n^{t+1}$ 对应的信度 β_i^{t+1} :

$$\beta_i^{t+1} = \left(1 + \exp \left(\frac{\pi(0 - \xi_i^{t+1})}{\sqrt{3}s_{t+1}} \right) \right)^{-1}.$$

式中:

β_i^{t+1} ——第 $t+1$ 轮迭代后数据 ξ_i^{t+1} 对应的信度, $i=1,2,\dots,n$;

ξ_i^{t+1} ——第 $t+1$ 轮迭代后数据, $i=1,2,\dots,n$, 由公式(D.6)计算得到;

s_{t+1} ——第 t 轮迭代后数据的经验标准差, 由公式(D.7)计算得到。

e) 计算第 t 轮信度 β_i^t 与第 $t+1$ 轮信度 β_i^{t+1} 之间的距离 δ_i :

$$\delta_i = |\beta_i^{t+1} - \beta_i^t|. \quad (\text{D.8})$$

式中:

δ_i ——迭代终止条件的判据, 即第 t 轮信度 β_i^t 与第 $t+1$ 轮信度 β_i^{t+1} 间的距离, $i=1,2,\dots,n$;

β_i^{t+1} ——第 $t+1$ 轮迭代后数据 ξ_i^{t+1} 对应的信度, $i=1,2,\dots,n$;

β_i^t ——第 t 轮迭代后数据 ξ_i^t 对应的信度, $i=1,2,\dots,n$ 。

D.2.3.3 迭代过程终止条件

a) 判断 $\max\{\delta_i\} > 10^{-6}$ 是否为真。

b) 若为真, 则进行 $t+2$ 轮迭代, 按照2.3.2条继续计算;

c) 若为假, 输出 β_i^{t+1} , $i=1,2,\dots,n$ 作为最终信度计算结果, 并根据升序正观测数据集

$\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ 计算所求正态不确定分布中期望 μ 和标准差 σ 的估计值 $\hat{\mu}$ 和 $\hat{\sigma}$:

$$\hat{\mu} = \frac{\beta_1^{t+1} + \beta_2^{t+1}}{2} \xi_1 + \sum_{i=2}^{n-1} \frac{\beta_{i+1}^{t+1} - \beta_{i-1}^{t+1}}{2} \xi_i + \left(1 - \frac{\beta_{n-1}^{t+1} + \beta_n^{t+1}}{2}\right) \xi_n \quad (\text{D.9})$$

式中:

$\hat{\mu}$ ——正态不确定分布的期望估计值;

β_i^{t+1} ——第 $t+1$ 轮迭代后数据 ξ_i^{t+1} 对应的信度, $i=1,2,\dots,n$;

ξ_i^{t+1} ——第 $t+1$ 轮迭代后数据, $i=1,2,\dots,n$ 。

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\beta_1^{t+1}(\xi_1 - \hat{\mu})^2 + \frac{1}{3} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=0}^2 (\beta_{i+1}^{t+1} - \beta_i^{t+1})(\xi_i - \hat{\mu})^j (\xi_{i+1} - \hat{\mu})^{2-j} + (1 - \beta_n^{t+1})(\xi_n - \hat{\mu})^2} \quad (\text{D.10})$$

式中:

$\hat{\sigma}$ ——正态不确定分布的标准差估计值;

$\hat{\mu}$ ——正态不确定分布的期望估计值;

β_i^{t+1} ——第 $t+1$ 轮迭代后数据 ξ_i^{t+1} 对应的信度, $i=1,2,\dots,n$;

ξ_i^{t+1} ——第 $t+1$ 轮迭代后数据, $i=1,2,\dots,n$ 。

D.2.4 输出修匀公式的估计结果

观测数据 d_1, d_2, \dots, d_n 所服从正态不确定分布的分布函数 $\Phi(x)$ 如下所示:

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

式中:

$\Phi(x)$ ——正态不确定分布函数;

- x ——分布函数自变量，取值范围 $-\infty$ 到 $+\infty$ 上的实数；
- $\hat{\mu}$ ——正态不确定分布的期望估计值；
- $\hat{\sigma}$ ——正态不确定分布的标准差估计值。

附录 E
(资料性附录)

$\alpha-S-N$ 曲线的估计 (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期望估计值和标准差估计值，结果如表 E.2 所示。

表 E.2 对数疲劳寿命平均值和标准差计算表

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 各应力水平下的对数应力循环数对应的信度计算表

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
4.523		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期望估计值、标准差估计值和变异因子

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 各应力水平下各信度对应的对数疲劳寿命分位值计算表

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

c) 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}_i	4.758	4.774	4.819	4.863	4.879
\hat{a}_i	16.830	16.884	17.043	17.202	17.256

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

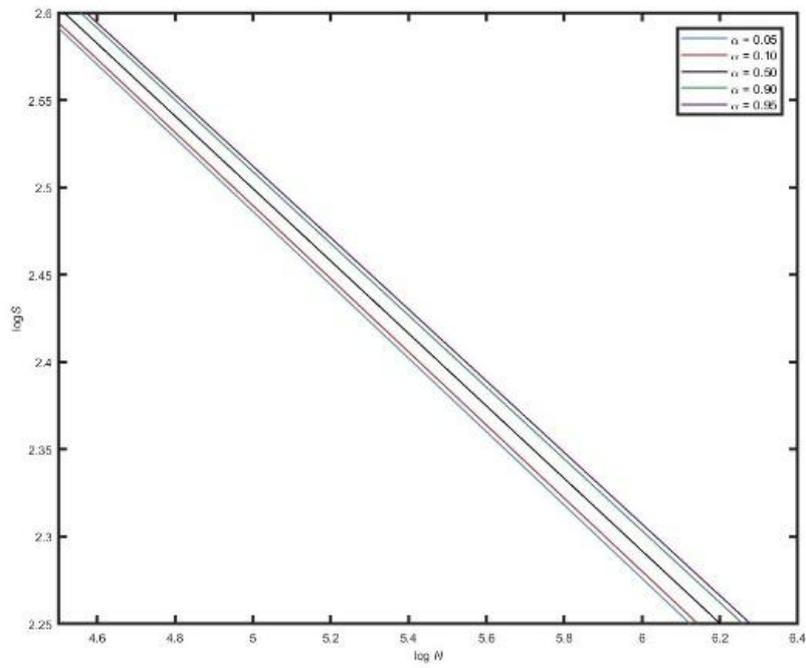


图 E. 1 $\alpha-S-N$ 曲线

附录 F
(资料性附录)

单应力水平试验下疲劳寿命的估计（对数正态分布型）示例

F.1 概述

本节将演示单应力水平试验下给定疲劳寿命的估计方法，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，本文件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 $S_0 = 400\text{MPa}$ 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 $x_1^0, x_2^0, \dots, x_{14}^0$ ，且满足 $x_1^0 < x_2^0 < \dots < x_{14}^0$ ，列表如表 F.1。

表 F.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

F.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期望估计值 $\hat{\mu}_0$ 和标准差估计值 $\hat{\sigma}_0$ 。计算得到给定应力 $S_0 = 400\text{MPa}$ 下的对数疲劳寿命分布为：

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

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

F.3 计算给定应力水平下的信度-分位对数疲劳寿命

计算给定应力水平下的信度-分位对数疲劳寿命，结果如表 F.2 所示。

表 F.2 给定应力 $S_0 = 400\text{MPa}$ 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 G
(资料性附录)

多应力水平试验下疲劳寿命的估计（对数正态分布型）示例

G.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 $S_0 = 380$ MPa，目的在于380MPa应力下给定疲劳寿命的统计分析。

G.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.7的计算结果，带入应力 $S_0 = 380$ MPa，即 $y_0 = 2.800$ ，根据公式(B.3)可求得对数疲劳寿命分位值计算结果如表G.1所示。

表 G.1 给定应力 $S_0 = 380$ 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
380	4.555	4.570	4.613	4.656	4.670

整理对数疲劳寿命分位值及其信度，并记作(4.555,0.05), (4.570, 0.10), (4.613, 0.50), (4.656, 0.90), (4.670, 0.95)。利用最小二乘法计算对数疲劳寿命分布中参数 μ_x^0 和 σ_x^0 的估计值 $\hat{\mu}_x^0$ 和 $\hat{\sigma}_x^0$ ，计算结果为 $\hat{\mu}_x^0 = 4.613$ ， $\hat{\sigma}_x^0 = 0.036$ 。

因此，给定应力水平 $S_0 = 380$ MPa 下对数疲劳寿命的分布为：

$$\Phi_x^0(x) = \left(1 + \exp\left(\frac{\pi(4.613 - x)}{\sqrt{3} \times 0.036} \right) \right)^{-1}. \quad (\text{G.1})$$

G.3 计算给定应力水平下的信度-分位对数疲劳寿命

设定的信度值 $\hat{\alpha}_0$ 为0.15，根据公式(B.5)计算得到信度-分位对数疲劳寿命 τ_α^0 为4.5796，对应的循环次数为37986次。即可靠度0.85时对应的疲劳寿命为37986次循环。

附录 H
(资料性附录)

给定疲劳寿命下疲劳强度的估计 (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 $x_0 = 4.400$ 下各信度对应数疲劳强度

对数 疲劳寿命	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:

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

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 疲劳寿命	信度				
	0.05	0.10	0.50	0.90	0.95
4.400	2.612	2.615	2.624	2.632	2.635