

制造业可靠性系统工程标准

STANDARD OF RELIABILITY SYSTEMS ENGINEERING FOR MANUFACTURING ENTERPRISES

RSE-STD-813 2022

确信可靠性建模与分析

Belief Reliability Modeling and Analysis

(征求意见稿)

© 本标准属于深圳市为民可靠性系统工程研究院所有，享有著作权及其他法律规定的任何权益，受法律和国际条约保护。

2022-11-16 发布



深圳市为民可靠性系统工程研究院

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 确信可靠性建模与分析流程	1
4.2 信息搜集与整理	2
4.3 学科交叉方程构建	2
4.4 退化方程构建	2
4.5 裕量方程构建	2
4.6 度量方程构建	2
4.7 确信可靠度计算	3
4.8 敏感性分析	3
4.9 编写报告	3
5 确信可靠性建模的详细步骤	3
5.1 学科交叉方程构建	3
5.2 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
附录 A (资料性附录) 舱门锁机构的确信可靠性建模与分析示例	5
A.1 信息搜集与整理	5
A.2 舱门锁机构的确信可靠性建模	6
A.3 舱门锁机构的确信可靠性分析	9
附录 B (资料性附录) 滤波电路的确信可靠性建模与分析示例	11
B.1 信息搜集与整理	11
B.2 滤波电路的确信可靠性建模	13
B.3 滤波电路的确信可靠性分析	15
附录 C (资料性附录) 锂离子电池的确信可靠性建模与分析示例	17
B.1 信息搜集与整理	17
B.2 锂离子电池的确信可靠性建模	18
B.3 锂离子电池的确信可靠性分析	19

前 言

本标准由深圳市为民可靠性系统工程研究院提出并发起编制。

本标准起草单位：北京航空航天大学、深圳为民可靠性系统工程研究院、北京航空航天大学云南创新研究院、华为技术有限公司、中国工程物理研究院总体工程研究所、兰州空间技术物理研究所、中国航空工业集团西安飞行自动控制研究所、北京蓝威技术有限公司、中国空间技术研究院、中国电子科技集团公司电子科学研究院。

本标准主要起草人：李晓阳、陈文彬、陶昭、张清源、孙富强、伍湘平、王浩伟、李清荣、税长江、谢朝阳、贾艳辉、连晓棠、张栋、张京蕊、王学望、陈卫卫。

确信可靠性建模与分析

1 范围

本标准规定了产品的确信可靠性建模与分析的要求和方法，用于建立学科交叉方程、裕量方程、退化方程和度量方程，计算产品的确信可靠度，并基于模型和计算结果定量分析影响产品可靠性的内外因素和不确定性。

本标准适用于深圳市为民可靠性系统工程研究院理事单位，也可供其他企业参照使用。

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。

- RSE-STD-451 2022 确信可靠性术语与定义
- RSE-STD-1391 2022 功能、性能及裕量分析
- RSE-STD-1392 2022 性能参数退化分析

3 术语和定义

RSE-STD-451 2022、RSE-STD-1391 2022 和 RSE-STD-1392 2022 界定的术语和定义适用于本文件。

4 通用要求

4.1 确信可靠性建模与分析流程

确信可靠性建模与分析的流程如图 1 所示。

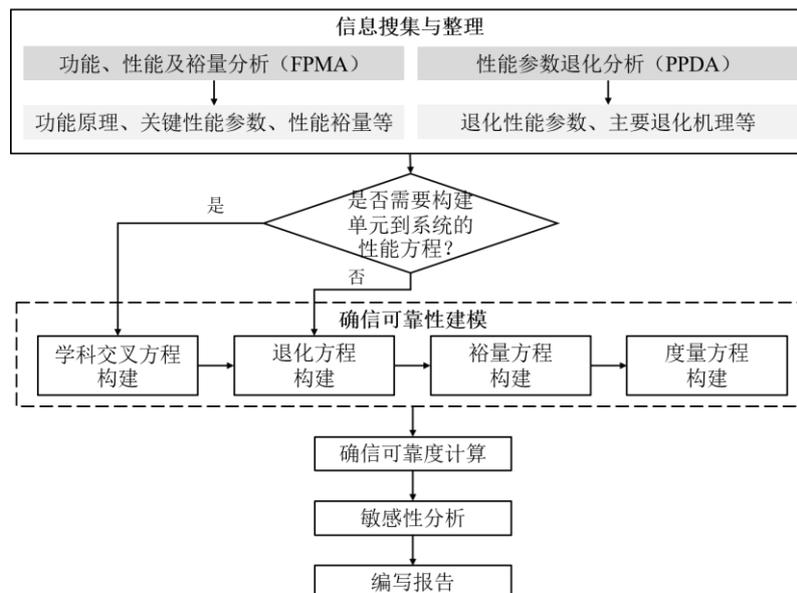


图 1 确信可靠性建模的流程（针对每一个关键性能参数）

4.2 信息搜集与整理

根据 RSE-STD-1391 2022 开展产品的功能、性能及裕量分析 (FPMA), 获得产品的功能原理、关键性能参数和性能裕量等信息; 根据 RSE-STD-1392 2022 开展产品的性能参数退化分析 (PPDA), 获得产品处于工作和破坏极限范围内存在退化的性能参数及其退化原因和影响因素等信息。

根据 FPMA 结果, 判断是否需要对产品开展结构层次分解, 若需要, 则在后续的确信可靠性建模中, 应首先构建考虑产品结构层次的关键性能参数的学科交叉方程; 若不需要, 则可略去学科交叉方程构建这一步骤。

4.3 学科交叉方程构建

根据产品的功能原理和专门学科知识, 针对每一个关键性能参数构建其学科交叉方程。

4.4 退化方程构建

根据产品的退化性能参数和主要退化机理, 针对每一个退化性能参数构建其退化方程。

4.5 裕量方程构建

根据产品的 FPMA 结果、学科交叉方程和退化方程, 针对每一个关键性能参数构建其考虑退化的裕量方程。

4.6 度量方程构建

对退化方程和裕量方程中的不确定性进行来源分析并合理量化, 度量考虑不确定性影响的性能裕量大于 0 的程度, 构建产品的度量方程。

4.7 确信可靠度计算

确定产品的学科交叉方程、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, 获得产品关键性能参数的裕量和退化与内因变量、外因变量、可逆时间和不可逆时间之间的确定性和不确定性规律, 并计算产品的确信可靠度。

4.8 敏感性分析

根据产品的学科交叉方程、退化方程、裕量方程、度量方程和确信可靠度计算结果, 定量分析影响产品可靠性的内因变量、外因变量及不确定性因素。

4.9 编写报告

根据各项原始记录, 编制确信可靠性建模与分析报告。确信可靠性建模与分析报告至少应包括以下内容:

- a) 产品确信可靠性建模与分析的背景及意义;
- b) 产品确信可靠性建模与分析的整体思路和内容安排;
- c) 产品 FPMA 和 PPDA 结果;
- d) 产品的学科交叉方程、退化方程、裕量方程及度量方程;
- e) 产品的确信可靠度计算结果和敏感性分析。

5 确信可靠性建模的详细步骤

5.1 学科交叉方程构建

针对 FPMA 得到的产品关键性能参数，根据产品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，构建产品关键性能参数与其内因变量、外因变量和可逆时间的数学关系，得到学科交叉方程。

5.2 退化方程构建

根据 PPDA 得到的产品退化性能参数和主要退化机理，针对每一个退化性能参数构建其退化方程。退化方程的构建主要包括理论建模和实验建模两类方法。

5.2.1 退化方程的理论建模

根据产品的主要退化机理，分析导致产品性能参数退化的物理化学过程，从而构建性能参数与内因变量、外因变量、可逆时间、不可逆时间之间的数学关系，得到性能参数的退化方程。

5.2.2 退化方程的实验建模

针对产品设计开展退化律实验，获得产品性能参数的退化数据，选择合适的经验模型或者数据驱动模型描述产品性能参数的退化过程，得到性能参数的退化方程。

5.3 裕量方程构建

将 FPMA 得到的裕量方程与上述学科交叉方程和退化方程相结合，构建考虑关键性能参数退化的裕量方程。具体流程包括：

- a) 根据 FPMA 结果，确定各关键性能参数的望大、望小或望目的参数类别，根据参数类别构建各关键性能参数的裕量方程，如式(1)所示。

$$m_i = \begin{cases} p_i - p_{th,i}, & \text{若 } p_i \text{ 是望大性能参数} \\ p_{th,i} - p_i, & \text{若 } p_i \text{ 是望小性能参数} \\ \min\{p_i - p_{thL,i}, p_{thU,i} - p_i\}, & \text{若 } p_i \text{ 是望目性能参数} \end{cases} \quad (1)$$

式中，

- i —— 关键性能参数的编号；
- p_i —— 编号为 i 的关键性能参数的学科交叉方程；
- $p_{th,i}$ —— 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，
- $\min\{\cdot\}$ —— 最小值函数。

- b) 将退化方程代入裕量方程中，构建考虑关键性能参数退化的裕量方程。

5.4 度量方程构建

对裕量方程和退化方程中的不确定性进行来源分析并合理量化，度量考虑不确定性影响的性能裕量大于 0 的程度，建立可靠性度量方程。具体流程包括：

- a) 分析不确定性的来源。从内因变量、外因变量、需求阈值等三个方面分析参数的不

确定性，针对裕量方程分析模型的不确定性；

- 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，对于模型的不确定性，采用不确定测度量化其认知不确定性；
- c) 建立度量方程。将不确定性量化结果代入裕量方程，通过度量性能裕量大于 0 的机会，获得产品可靠性的度量方程，如式(2)所示。

$$R = \text{Ch}\{\tilde{M} > 0\} \quad (2)$$

式中，

R —— 确信可靠度；

\tilde{M} —— 考虑不确定性的性能裕量；

Ch —— 机会测度。

当性能裕量为随机变量（仅包含随机不确定性）时，采用确信可靠性概率度量；当性能裕量为不确定变量（仅包含认知不确定性）时，采用确信可靠性不确定度量；当性能裕量为机会变量（包含随机和认知混合不确定性）时，采用确信可靠性机会度量。

附录 A 给出了飞机舱门锁机构的确信可靠性建模与分析案例，附录 B 给出了滤波电路的确信可靠性建模与分析案例，附录 C 给出了锂离子电池的确信可靠性建模与分析案例。

附录 A (资料性附录)

舱门锁机构的确信可靠性建模与分析示例

A.1 信息搜集与整理

起落架舱门的锁机构是飞行器关键部件之一，其失效会阻碍起落架的收缩与伸展过程，进而严重地威胁到飞行器的安全。为了对锁机构开展确信可靠性建模与分析，首先基于 FPMA 和 PPDA 进行建模的信息搜集与整理。

A.1.1 舱门锁机构的功能、性能及裕量分析 (FPMA)

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。

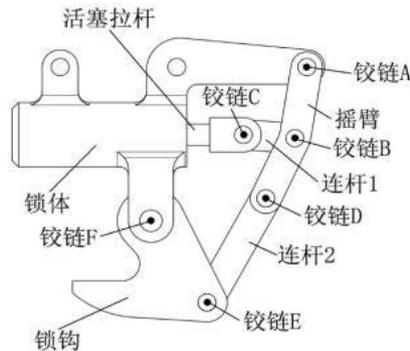


图 A.1 舱门锁机构结构示意图

锁机构的主要功能是完成开锁和关锁的运动。锁机构的工作原理为：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。

由于锁机构结构清晰、工作原理简单，因此可以直接针对锁机构整体的功能开展性能分析，确定关键性能参数。锁机构的关键性能参数分析结果如表 A.1 所示。

表 A.1 锁机构关键性能参数分析表

功能	性能	性能参数超差后果	超差后果 严重性评分	用户关注度 评分	重要度
开锁	开锁精度	锁无法开启到期望位置	6	6	36
关锁	关锁精度	锁无法关闭到期望位置并实现锁紧	10	10	100

根据表 A.1 的结果，选择关锁精度作为关键性能参数，针对关锁精度开展关键性能参数特征分析，结果如表 A.2 所示。

表 A.2 锁机构关键性能参数特征分析表

关键性能参数	对应结构	关联内因	关联外因	描述方式	类别
关锁精度	锁机构	连杆尺寸参数、铰链间隙、轴套材料参数	液压驱动力	锁钩在锁定位置时的角度误差	望小

分析关键性能参数的需求阈值，并按照其望小特性，构建裕量方程，结果如表 A.3 所示。

表 A.3 锁机构关键性能参数裕量信息表

关键性能参数	参数属性	需求阈值分析过程	阈值来源	裕量方程
关锁精度	望小	工作需求阈值：当关锁精度低于 0.035 rad 时，会导致锁机构无法实现锁紧功能。考虑到实际使用要求，确定工作需求阈值为 0.035 rad。	锁机构可靠域实验	$m = \frac{0.035 - \delta}{0.035}$

A. 1. 2 舱门锁机构的性能参数退化分析

针对锁机构的关锁精度，分析引起其退化的原因与机理，结果如表 A.4 所示。

表 A. 4 锁机构关键性能参数的性能退化原因与机理分析表

关键性能参数		性能退化原因	性能退化机理		重要度			是否退化
性能	对应结构		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	
关锁精度	锁机构	使用场景：开锁和关锁运动过程 工作载荷：液压驱动力	磨损导致铰链中的轴套间隙增大，增大了锁机构的运动误差，导致关锁精度下降。	磨损	6	10	60	是

基于上述分析结果，分析导致锁机构关锁精度退化的影响因素，并确定关锁精度退化的建模方法，结果如表 A.5 所示。

表 A. 5 锁机构的性能退化影响因素分析和建模方法表

存在退化的关键性能参数	退化影响因素				建模方法
	内因变量		外因变量		
	名称	影响方式	名称	影响方式	
关锁精度	尺寸参数	连杆和套筒的尺寸参数决定着锁机构的运动位置	液压驱动力	液压驱动力会增大铰链中轴套间的接触力，影响铰链中轴套间的摩擦力及其磨损过程，从而影响锁机构的运动误差和关锁精度	理论建模
	铰链间隙	铰链间隙会增加锁机构的运动误差，降低关锁精度	/	/	
	轴套材料参数	材料参数如硬度和弹性模量等会影响轴套的磨损，从而会增加铰链间隙，降低关锁精度	/	/	

A. 2 舱门锁机构的确信可靠性建模

根据 FPMA 和 PPDA 结果，开展确信可靠性建模。

A. 2. 1 学科交叉方程

对图 A.1 的舱门锁机构进行简化，得到图 A.2 所示的几何原理图。

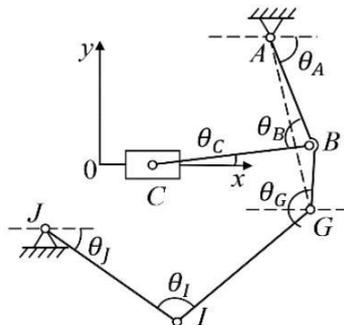


图 A. 2 舱门锁机构结构简图

根据锁机构的运动原理，可以得到锁钩角度为：

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

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， L 为杆的长度； l 为两点间的距离； (x_i, y_i) 为铰链 i 的坐标； $y = 0$ 为锁体的中心； $x = 0$ 为锁体的右端； t 为物理时间。那么，锁定位置锁钩的角度误差为：

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

式中， $x_c = a$ 表示锁定位置； $\theta_J(a)$ 为锁定位置的理想锁钩角度。式(A.6)即为锁机构性能的学科交叉方程。

A.2.2 退化方程

根据 PPDA 结果，锁机构的主要退化失效机理在于铰链的轴套之间的相对运动引起磨损，进而增加铰链的轴套间隙，影响锁钩的旋转角度。轴套间的磨损常用 Archard 模型描述，根据 Archard 模型可以计算磨损深度为：

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

式中，角标 i 表示第 i 个铰链； h 为磨损深度； \vec{t} 为退化时间，表示为锁机构的动作周期； K_{1i} 和 K_{2i} 分别表示套筒和轴的磨损系数； H_{1i} 和 H_{2i} 分别表示套筒和轴的布氏硬度； F_i 表示接触力； τ_i 表示接触长度； D_i 和 d_i 分别表示套筒和轴的直径； ν_{1i} 和 ν_{2i} 分别表示套筒和轴的泊松比； E_{1i} 和 E_{2i} 分别表示套筒和轴的弹性模量； $\Delta\theta_i$ 表示套筒和轴的转动角度差。

那么，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 表示套筒和轴的间隙； c_{0i} 表示套筒和轴的初始间隙。

为了考虑磨损对于锁钩角度 θ_J 的影响，应用“有效长度模型”，对杆的实际长度进行修正：

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

式中， L^e 表示有效长度； L^a 表示实际长度； (x_L, y_L) 表示铰链中的局部坐标，且

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

将修正后的杆长有效长度 L^e 代入式(A.1)即可得到锁钩角度的退化方程：

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

相应地，可以得到锁定位置锁钩的角度误差的退化方程为：

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

式中， $\mathbf{X} = (\mathbf{L}, \mathbf{l}, D_i, d_i, \tau_i, K_{1i}, K_{2i}, H_{1i}, H_{2i}, v_{1i}, v_{2i}, E_{1i}, E_{2i}), \mathbf{Y} = (F_i)$ ，角标 i 表示第 i 个铰链， \mathbf{L} 和 \mathbf{l} 分别表示杆长向量和两点间距离向量。

A. 2. 3 裕量方程

假设 δ 的允许极限值（即阈值）为 ε ，选用相对距离构建锁机构的裕量方程：

$$m(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, t, \vec{t}, \varepsilon) = \frac{\varepsilon - \delta(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, t, \vec{t})}{\varepsilon} \quad (\text{A.13})$$

A. 2. 4 度量方程

首先，分析不确定性的来源。考虑前述学科交叉方程、退化方程和裕量方程均是通过理论推导得到，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：内因变量方面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锁机构锁紧时锁钩和锁环的极限角度由于制造误差导致的不确定性。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，并服从正态分布，为此采用概率测度下的正态分布进行量化，具体的不确定性量化参数及对应的分布如表 A.6 所示。

表 A. 6 锁机构的不确定性量化结果

不确定性来源	参数含义	参数	分布	不确定性来源	参数含义	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	$N(L_{0,i} + \mu_{L_j}, \sigma_{L_j}^2)$	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.6 所示的不确定性量化结果代入锁机构的裕量方程(A.13)中，可以得到考虑退化和不确定性的性能裕量，记为 $\tilde{m}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, t, \vec{t}, \varepsilon)$ ，上标 \sim 表示参数具有不确定性。显然，

$\tilde{m}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, t, \vec{t}, \varepsilon)$ 是一个随机变量。根据确信可靠性理论，锁机构的的确信可靠度表示为锁定位置锁钩的角度误差裕量大于 0 的概率，可得锁机构的的确信可靠性度量方程为：

$$R(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, t, \vec{t}, \varepsilon) = \Pr(m(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, t, \vec{t}, \varepsilon) > 0) = \Pr\left(\frac{\varepsilon - \delta(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, t, \vec{t})}{\varepsilon} > 0\right) \quad (\text{A.14})$$

式中，Pr 表示概率测度。

由于锁机构的的确信可靠性模型形式复杂，难以给出模型的显式表达，在进行可靠度评估时，将借助蒙特卡洛仿真方法计算锁机构的可靠度。

A.3 舱门锁机构的的确信可靠性分析

首先，确定锁机构的确信可靠性方程中的参数取值。根据某飞行器的锁机构的技术规范和实验数据，参数取值结果如表 A.7 和表 A.8 所示。

表 A.7 锁机构的尺寸参数名义值

参数	名义值	参数	名义值	参数	名义值
$L_{0,AB}$	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)	$d_{0,A}$	10(mm)	$d_{0,B}$	10(mm)
$d_{0,C}$	10(mm)	$d_{0,G}$	10(mm)	$d_{0,I}$	10(mm)
$d_{0,J}$	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)	/	/	/	/

表 A.8 锁机构的材料属性、外因变量及需求阈值的名义值及相应不确定性量化模型的参数取值

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)	/	/

此外，本案例中，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）。根据对应的尺寸参数名义值查找极限偏差，利用式(A.15)和(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 为套筒直径的上偏差； es_i 和 ei_i 分别为轴直径的上偏差和下偏差； ES_j 和 Ei_j 分别为杆长的上偏差和下偏差。

将上述参数取值代入式(A.12)和式(A.13)，可以计算得到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，如图 A.3 所示。可以发现：锁钩角度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；锁钩角度误差及其裕量的不确定性分位点宽度随动作周期的增加而增加，表明不确定性在退化时间是增大的。

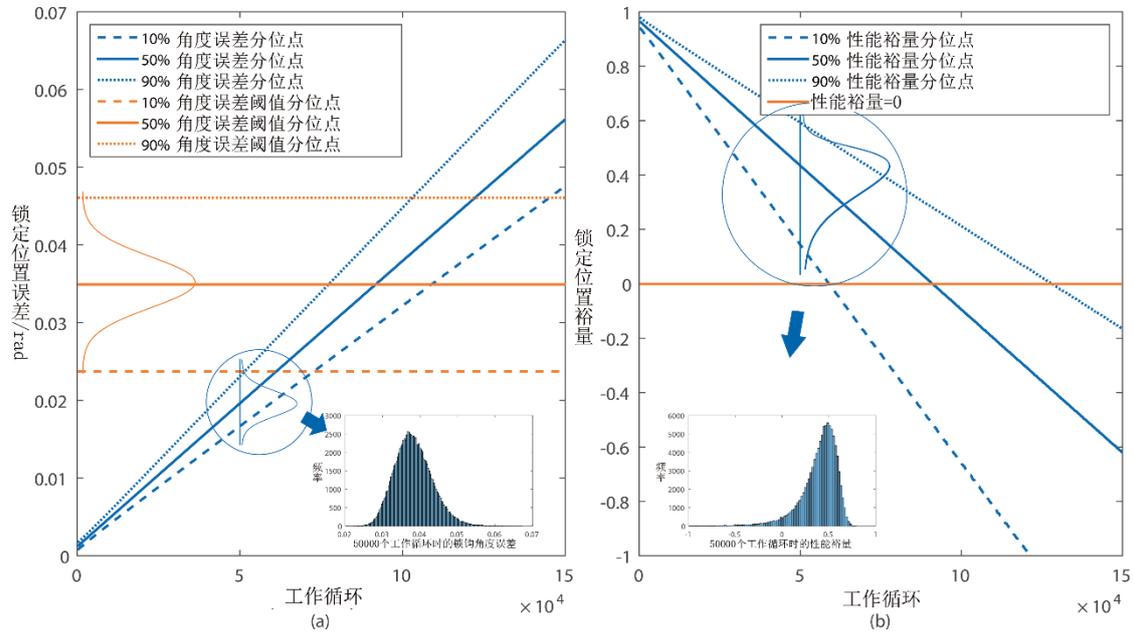


图 A.3 锁机构锁定位置的锁钩角度误差及其裕量的退化预测结果

将上述参数取值代入式(A.14)中，可以计算得到锁机构的确信可靠度曲线，如图 A.4 所示，可靠度 0.999 对应的可靠寿命为 17800 个动作周期，合飞行器 8900 次起落。

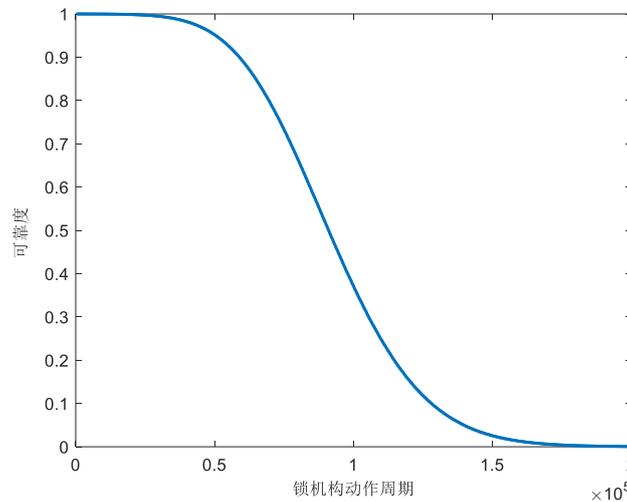


图 A.4 锁机构的确信可靠度评估结果

在此基础上，结合锁机构的确信可靠性方程，开展参数敏感性分析，能够确定对锁机构可靠度影响显著的参数，可以通过设计参数的改进或者不确定性的控制实现锁机构可靠度的提高。本案例的建模与分析可以为锁机构的制造加工、材料选择和来料控制提供理论依据，指导产品设计和生产制造。

附录 B (资料性附录)

滤波电路的确信可靠性建模与分析示例

B.1 信息搜集与整理

B.1.1 滤波电路的功能、性能及裕量分析

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。

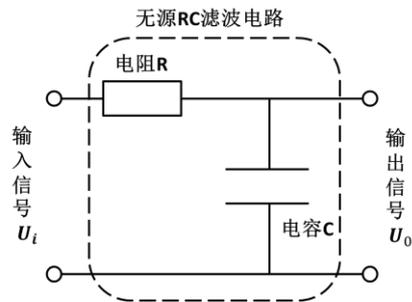


图 B.1 滤波电路结构示意图

对滤波电路的使用场景进行分析，结果如表 B.2 所示。

表 B.1 滤波电路的使用场景分析结果

工作条件		环境条件		
输入电压	负载电阻 (Ω)	温度 ($^{\circ}\text{C}$)	振动 (g)	湿度 (RH)
直流 (3V) + 交流 (幅值 2.5V, 频率 120Hz)	5000	20 - 60	0 - 0.05	30 - 60

由于滤波电路结构清晰、工作原理简单，因此可以直接针对滤波电路整体的功能开展关键性能参数分析，结果如表 B.2 所示。

表 B.2 滤波电路的关键性能参数分析表

功能	性能	性能参数超差后果	超差后果 严重性评分	用户关注度 评分	重要度
低通滤波 (保留输入信号中的直流成分，滤除高频成分)	截止频率	滤除高频交流成分的效果变差，或滤除了应该保留的信号	7	8	56
	直流衰减	直流成分缺失，输出信号偏离	7	8	56
	交流衰减	滤除交流成分的效果变差	8	9	72
	功率因数	信号传输的损耗较大	6	6	36
	平均功率	电路功率不匹配	7	6	42

根据表 B.2，选择重要度等级大于 60 的交流衰减作为关键性能参数。针对交流衰减开展关键性能参数特征分析，结果如表 B.3 所示。

表 B.3 滤波电路的关键性能参数特征分析表

关键性能参数	对应结构	关联内因	关联外因	描述方式	类别
交流衰减	滤波电路	电阻值、电容值、电容等效电阻值	输入电压、负载电阻、环境温度	输入频率下电路幅频函数的响应	望小

分析关键性能参数的需求阈值，并按照其望小特性，构建裕量方程，结果如表 B.4 所示。

表 B.4 滤波电路关键性能参数裕量分析表

关键性能参数	参数属性	需求阈值分析过程	阈值来源	裕量方程
交流衰减	望小	工作需求阈值：当交流衰减低于-3.3dB 时，滤除高频交流成分的效果不能达到设计要求，因此其需求阈值确定为-3.3dB。	设计要求	$m = -3.3 - H$

B.1.2 滤波电路的性能参数退化分析

针对滤波电路的交流衰减，分析引起其退化的原因与机理，结果如表 B.5 所示。

表 B.5 滤波电路关键性能参数的性能退化原因与机理分析表

关键性能参数			性能退化原因	性能退化机理		重要度			是否退化
一级性能	二级性能	对应结构		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	
交流衰减	电阻值	金属膜电阻	使用场景：通电工作 环境应力：温度	金属导电膜层发生氧化，导电能力下降，电阻值增大，导致交流衰减降低，温度会加速上述过程	老化	8	8	64	是
	电容值	铝电解电容	使用场景：通电工作 环境应力：温度	电解液蒸发泄露，导致电容值减小，导致交流衰减降低，温度会加速上述过程	老化	9	10	90	
	电容等效电阻值			电解液蒸发泄露，导致电容等效电阻增大，导致交流衰减降低，温度会加速上述过程	老化	9	8	72	

基于上述分析结果，分析导致滤波电路交流衰减退化的影响因素，结果如表 B.6 所示。

表 B.6 滤波电路的性能退化影响因素分析和建模方法表

存在退化的关键性能参数		退化影响因素			
		内因变量		外因变量	
		名称	影响方式	名称	影响方式
交流衰减	电阻值	电阻的电学参数、尺寸参数和材料参数	电学参数、尺寸参数和材料参数决定着电阻的阻值	温度	温度会影响电阻导电膜层氧化过程
	电容值	电容的电学参数、尺寸参数和材料参数	电学参数、尺寸参数和材料参数决定着电容的电容值	温度	温度会影响电容电解液的蒸发泄露过程，影响电容值的退化
	电容等效电阻值	电容的电学参数、尺寸参数和材料参数	电学参数、尺寸参数和材料参数决定着电容的等效电阻值	温度	温度会影响电容电解液的蒸发泄露过程，影响电容等效电阻值的退化

基于上述分析结果，进一步确定各性能参数退化的建模方法，结果如表 B.7 所示。

表 B.7 滤波电路的性能退化影响因素分析和建模方法表

一级性能	建模方法	二级性能	建模方法
交流衰减	理论建模	电阻值	理论建模
		电容值	理论建模
		电容等效电阻值	实验建模

B.2 滤波电路确信可靠性建模

B.2.1 学科交叉方程

在滤波电路工作过程中，由于电路工作的频率不是很高（远低于 10kHz），可将金属膜电阻器电路模型表示为一只电阻；铝电解电容器的电路模型表示为等效电容与等效电阻串联。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。

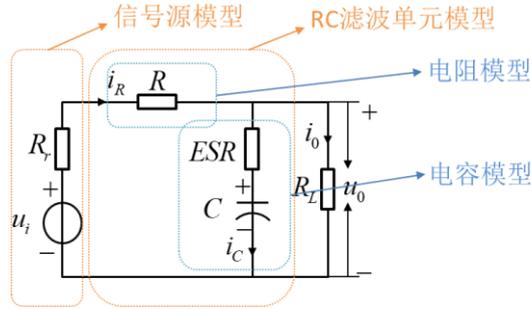


图 B.2 滤波电路的等效电路模型

式中， u_i 表示输入电压； u_0 表示输出电压； R_r 表示输入阻抗，结合实际工作中输入信号的特征，取 $R_r=0$ ； R 、 C 、 ESR 分别表示金属膜电阻器的电阻值、铝电解电容器的电容值及其等效电阻值； R_L 表示负载，结合实际任务剖面，取 $R_L=5k\Omega$ 。 i_R 、 i_C 、 i_0 分别为流经电阻器、电容器、负载的电流。

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。由电路原理可知，交流衰减即为频率为输入频率时电路幅频函数的响应，可计算为：

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

式中， f_0 表示输入电压信号的频率。式(B.1)即为滤波电路交流衰减的学科交叉方程。

B.2.2 退化方程

(1) 金属膜电阻器的电阻退化方程

金属膜电阻器在各种理化过程的作用下会出现阻值增大的退化现象，其中电阻器的金属导电膜层氧化是其主要的退化机理。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，可以得到金属膜电阻器电阻值的退化方程为

$$R(\vec{t}) = R_0 \cdot \frac{d_0 - x_0}{d_0 - \left(A_0 e^{-E_A/kT \cdot \vec{t}^{-1/2}} - B_R \right)} \quad (B.2)$$

式中， R_0 表示初始电阻值； x_0 表示金属膜的初始退化量； d_0 表示电阻器制造完成时的实际膜

厚； E_A 、 A_0 和 B_R 为常数； k 为玻尔兹曼常数； T 为滤波电路的工作温度。

(2) 铝电解电容器的电容退化方程

铝电解电容器在各种理化过程的作用下会出现电容值减小的退化现象，其中电容器的电解液蒸发是主要的退化机理。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电容值的退化方程为

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

式中， C_0 表示电容初值； l_c 为电容的长度； ϖ 和 E_ω 为常数。

(3) 铝电解电容器的等效电阻退化方程

现有研究表明电容等效电阻 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，因此本案例采用实验建模方法，通过指数形式的退化模型描述等效电阻的退化。铝电解电容器等效电阻值的退化方程可表示为

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

式中， ESR_0 为等效电阻初值； α_0 、 α_1 和 β 为常数。

将(B.2)~(B.4)代入(B.1)得到滤波电路交流衰减的退化方程为

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

将交流衰减的退化函数记为 $H(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \vec{t})$ ，其中 $\mathbf{X} = (f_0, R_L, R_r, R_0, d_0, x_0, E_A, A_0, B_R, C_0, l_c, \varpi, E_\omega, ESR_0, \alpha_0, \alpha_1, \beta)$ ， $\mathbf{Y} = (T)$ 。

B.2.3 裕量方程

记滤波电路交流衰减的阈值为 H_{th} ，交流衰减为望小性能参数，因此考虑退化的滤波电路交流衰减的裕量方程为：

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

B.2.4 度量方程

首先，分析不确定性的来源。考虑前述学科交叉方程、退化方程和裕量方程均是通过理论推导得到，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，对于滤波电路交流衰减的性能阈值，是根据设计需求给出的，其不确定性本案例中也不予考虑。因此，仅考虑内因变量和外因变量两个方面的不确定性：内因变量的不确定性考虑在实际生产过程中，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 inconsistency，即参数 R_0 、 C_0 、 ESR_0 具有不确定性，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。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，并服从正态分布，为此采用概率测度下的正态分布进行量化，即

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

将上述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 $\tilde{m}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \vec{t})$ ，上标 $\tilde{\cdot}$ 表示参数具有不确定性。显然， $\tilde{m}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \vec{t})$ 是一个随机变量。根据确信可靠性理论，滤波电路的确信可靠度表示为交流衰减的裕量大于 0 的概率，可得滤波电路的确信可靠性度量方程为：

$$R(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \vec{t}) = \Pr\{M(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \vec{t}) > 0\} \quad (\text{B.8})$$

式中，Pr 表示概率测度。

由于滤波电路交流衰减的确信可靠性模型形式复杂，难以给出模型的显式表达，在进行可靠度评估时，将借助蒙特卡洛仿真方法计算滤波电路的可靠度。

B.3 滤波电路的确信可靠性分析

首先，确定滤波电路确信可靠性方程中的参数取值。根据滤波电路的技术规范和开展的可靠性实验，参数取值结果如表 B.9 所示。

表 B.8 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	B	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	/	//	/

将上述参数取值代入式(B.5)中，可以计算得到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，交流衰减的上下限宽度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。

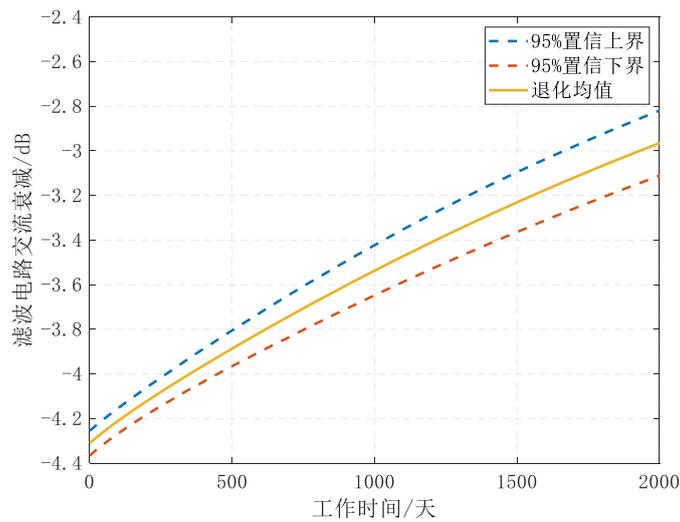


图 B.3 滤波电路的交流衰减的退化预测结果

将上述参数结果代入式(B.8)中，可以计算得到滤波电路的确信可靠度曲线，如图 B.4 所示，滤波电路可靠度为 0.9 对应的可靠寿命约为 1200 天（3.3 年）。

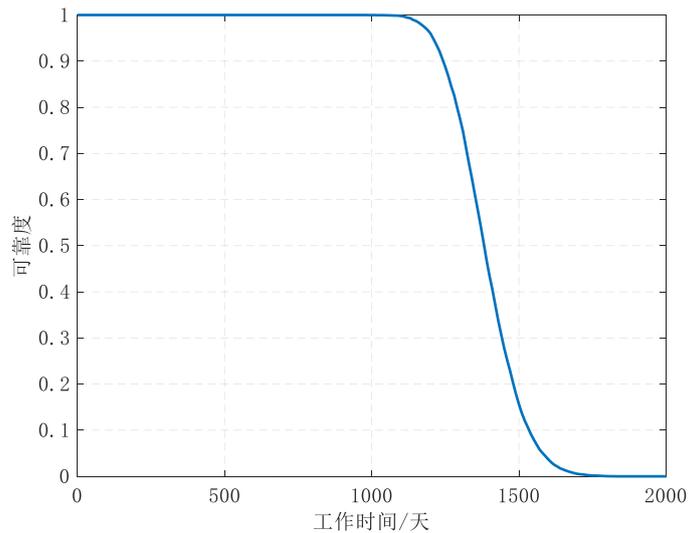


图 B.4 滤波电路的可靠度曲线

在此基础上，结合滤波电路的确信可靠性方程，可以开展参数敏感性分析，能够确定对滤波电路可靠度影响显著的参数，通过设计参数的改进或者不确定性的控制提高滤波电路的可靠度，从而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，指导产品设计和生产制造。

附录 C (资料性附录)

锂离子电池的确信可靠性建模与分析示例

C.1 信息搜集与整理

C.1.1 锂离子电池的功能、性能及裕量分析

针对某型号锂离子电池开展 FPMA，该锂离子电池是由两个可嵌入与可脱嵌锂离子的材料作为电池的正极与负极，依靠锂离子在正负极之间的转移实现可多次充放电的功能。

分析锂离子电池的使用场景，其在一个充放电循环内的常规充放电程序如图 C.1 所示。

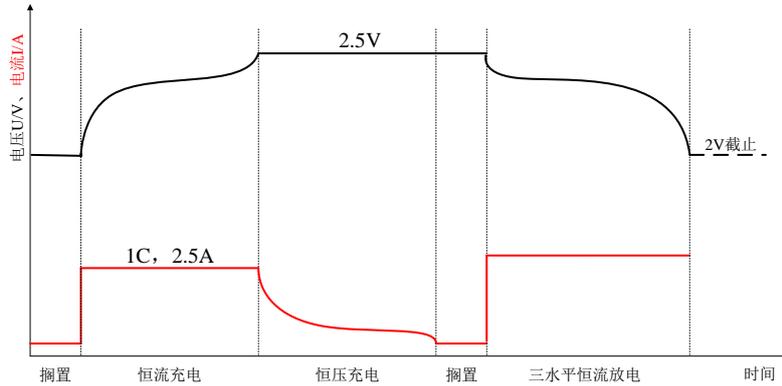


图 C.1 锂离子电池的常规充放电程序

对于锂离子电池，容量是最常关注的电池性能，因而本案例中选择电池容量作为关键性能参数。针对电池容量开展关键性能参数特征分析，结果如表 C.1 所示。

表 C.1 锂离子电池关键性能参数特征分析表

关键性能参数	对应结构	关联内因	关联外因	描述方式	类别
电池容量	电池	电池的电极材料、电解液材料、尺寸等参数	充放电程序、温度	电池输出电流对时间的积分	望大

分析关键性能参数的需求阈值，并按照其望大特性，构建裕量方程，结果如表 C.2 所示。

表 C.2 锂离子电池关键性能参数裕量信息表

关键性能参数	参数属性	需求阈值分析过程	阈值来源	裕量方程
电池容量	望大	工作需求阈值：当电池容量低于 0.8Ah 时，认为电池容量无法满足工作要求，因此其需求阈值确定为 0.8Ah dB。	工作要求	$m = Y - 0.8$

C.1.2 锂离子电池的性能参数退化分析

针对电池容量，分析引起其退化的原因与机理，结果如表 C.3 所示。

表 C.3 锂离子电池关键性能参数的性能退化原因与机理分析表

关键性能参数		性能退化原因	性能退化机理		重要度			是否退化
性能	对应结构		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	
电池容量	锂离子电池	使用场景：充放电过程 工作载荷：充放电电流、温度	锂离子电池工作时存在的活性物质损失、锂离子析出、负极生成固体氧化物薄膜等现象，影响锂离子的嵌入脱出过程，造成锂离子电池容量的退化。	SEI 膜生长、电解质分解等	8	10	80	是

基于上述分析结果，分析导致电池容量退化的影响因素，并确定电池容量退化的建模方法，结果如表 C.4 所示。

表 C.4 锂离子电池的性能退化影响因素分析和建模方法表

存在退化的关键性能参数	退化影响因素				建模方法
	内因变量		外因变量		
	名称	影响方式	名称	影响方式	
电池容量	电池的电极材料、电解液材料、尺寸等参数	上述参数均影响表 C.3 列出的性能退化过程	充放电电流、温度	冲放电电流和温度会对电池容量的性能退化速率产生影响	实验建模

C.2 锂离子电池确信可靠性建模

由于锂离子电池的结构组成复杂，本案例将其作为一个整体开展研究。根据上述 FPMA 和 PPDA 结果，无需构建锂离子电池从单元到系统的性能方程，因而其确信可靠性建模从退化方程构建即可。

C.2.1 退化方程

根据 PPDA 结果，选择放电电流和温度作为敏感应力类型，投入 3 个受试样品，开展温度应力+放电倍率双应力综合的加速退化实验，其中每个应力选择 3 个水平，分别为确定温度水平 $T_1 = 40^\circ\text{C}$ ， $T_2 = 55^\circ\text{C}$ 和 $T_3 = 60^\circ\text{C}$ ，放电倍率分别 $I_1 = 2\text{C}$ ， $I_2 = 4\text{C}$ 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，步进应力加速退化实验方案见表 C.5

表 C.5 锂离子电池温度应力+放电倍率双应力综合的步进加速退化实验方案

检测间隔	检测次数		
	$55^\circ\text{C}+2\text{C}$	$40^\circ\text{C}+4\text{C}$	$T_3=60^\circ\text{C}+4.5\text{C}$
1	$M_1 = 90$	$M_2 = 60$	$M_3 = 40$

实验中采集到的锂离子电池容量退化数据如图 C.1。

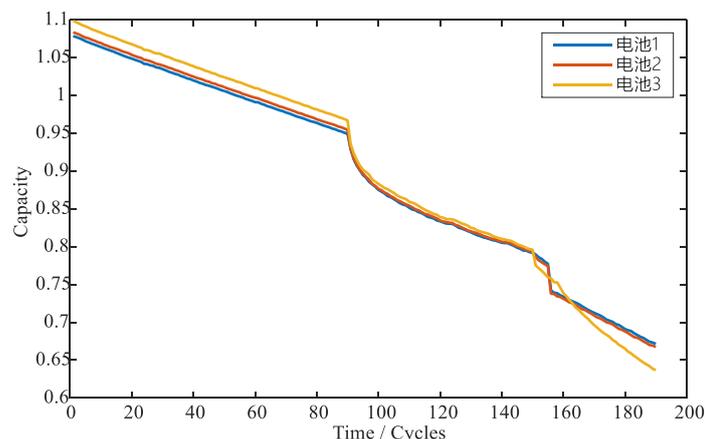


图 C.1 锂离子电池加速应力下的电池容量退化数据

使用如下的退化方程描述锂离子电池的容量退化过程：

$$Y(\vec{t}) = Y_0 + \exp\left(a + b_1 \frac{1}{T} + b_2 I\right) \times \vec{t}^{-\beta} \quad (\text{C.1})$$

式中， Y 为电池容量； Y_0 为电池容量初始值； T 为热力学温度； I 为放电电流； \vec{t} 为退化时间； β 为退化的非线性尺度参数； a ， b_1 ， b_2 为常数。

C.2.2 裕量方程

记电池容量阈值为 Y_{th} , 电池容量为望大性能参数, 因此考虑退化的电池容量裕量方程为:

$$m(\bar{t}) = Y(\bar{t}) - Y_{th} \quad (C.2)$$

C.2.3 度量方程

首先, 分析不确定性的来源。由于本节对锂离子电池作为整体开展研究, 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

$$Y(\bar{t}) \sim IG\left(Y(\bar{t}), \lambda \times \bar{t}^{-2\beta}\right) \quad (C.3)$$

式中, λ 为常数。

根据确信可靠性理论, 锂离子电池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:

$$R(\bar{t}) = \Phi \left[\frac{Y_{th} - Y_0 - \exp\left(a + b_1 \frac{1}{T} + b_2 I\right) \times \bar{t}^{-\beta}}{\sqrt{\exp^3\left(a + b_1 \frac{1}{T} + b_2 I\right) \times \bar{t}^{-\beta} / \lambda}} \right] \quad (C.4)$$

式中, Φ 为标准正态概率分布的累积概率分布函数。

C.3 锂离子电池确信可靠性分析

在上述退化实验中, 记 x_{lij} 为第 l 个应力水平下 ($T_l + I_l$), 第 i 个样品的第 j 个性能检测之, 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,

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

根据式 (C.5), 可得步进应力加速退化实验的对数极大似然函数:

$$\ln L = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^k \sum_{j=1}^{m_l-1} \left\{ \begin{array}{l} \ln \lambda + 2 \ln (t_{li(j+1)}^\beta - t_{lij}^\beta) - \ln(2\pi) - 3 \ln(\Delta x_{lij}) \\ \lambda \left(\Delta x_{lij} - \exp\left(a + b_1 \frac{1}{T} + b_2 I\right) (t_{li(j+1)}^\beta - t_{lij}^\beta) \right)^2 \\ \exp\left(2a + 2b_1 \frac{1}{T} + 2b_2 I\right) \Delta x_{lij} \end{array} \right\} \quad (C.6)$$

采用极大似然估计的方法求解函数 (C.6) 中的参数, 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 C.6 所示。

表 C.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	a	b_1	b_2	λ	β
估计值	-2.0060	-1175.87	0.5574	0.0206	0.7225

根据以上结果, 就可以确定锂离子电池容量在基准温度条件 25°C (温度) +0.5CA (放电倍率) 下的可靠度函数, 其变化曲线如图 C.2 所示。

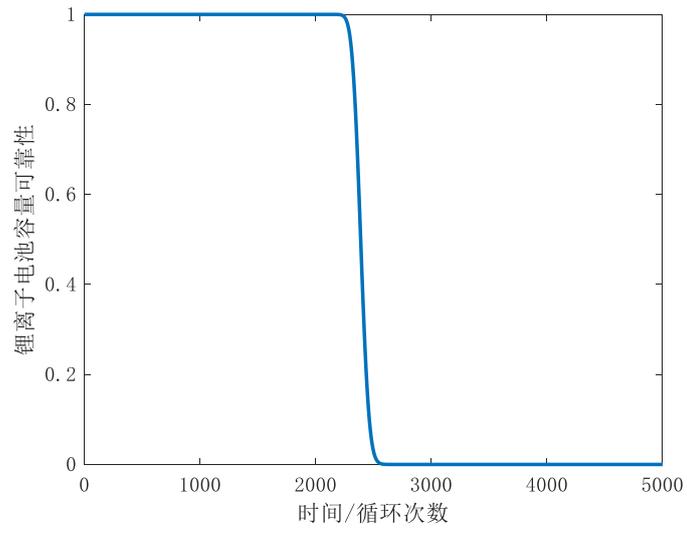


图 C.2 锂离子电池容量的可靠度曲线