

制造业可靠性系统工程标准

STANDARD OF RELIABILITY SYSTEMS ENGINEERING FOR MANUFACTURING ENTERPRISES

RSE-STD-2828 2022

产品使用过程中的可靠性抽样检测方法

Reliability Sampling Detection Method in Product Use

(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 符号	2
5 通用要求	4
5.1 可靠性抽样检测流程	4
5.2 产品状态要求	5
5.3 检测设备和仪器	5
5.4 抽样检测工作管理	5
5.5 抽样检测报告	6
6 抽样方案制定	6
6.1 制定首次抽样方案	6
6.2 制定后续抽样方案	7
附录 A（资料性附录）指标评分标准对照	8
附录 B（资料性附录）基于层次分析法的指标权重确定方法	11
附录 C（资料性附录）基于四级量表的评价等级和评分区间对照	13
附录 D（资料性附录）相似指标评分方法	14
附录 E（资料性附录）基于产品相似的母体划分方法	16
附录 F（资料性附录）抽样检测结果评价方法	17
附录 G（资料性附录）某滤波电路可靠性抽样检测示例	18

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、北京蓝威技术有限公司、中国工程物理研究院总体技术研究所、华为技术有限公司。

本标准主要起草人：李晓阳、陈大宇、文美林、祖天培、李若彪、王浩伟、彭博、阮进喜、秦晋、税长江。

产品使用过程中的可靠性抽样检测方法

1 范围

本标准规定了产品使用过程中进行可靠性抽样检测的方法，用于在使用的产品总体中抽取少量代表性个体进行性能检测，并开展裕量及不确定性量化，判定产品总体的可靠性水平，为产品的维修决策提供依据。

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 确信可靠性术语与定义

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。

3.3

定性相似指标 qualitative similarity index

评分标准不可量化的相似指标。

3.4

抽样母体 sampling population

基于相似指标计算得到的具有相似性的产品集合体。

3.5

抽样个体 sampling individual

从抽样母体中抽取的用于性能检测的个体。

3.6

抽样周期 sampling period

对抽样个体进行性能检测的时间间隔。

3.7

抽样方案 sampling plan

由抽样个体和抽样周期组成的性能检测方案。

3.8

首次抽样方案 initial sampling plan

仅包含抽样个体的第一次性能检测方案。

3.9

后续抽样方案 subsequent sampling plan

根据上次抽样方案实施性能抽样检测获取的数据更新制定的下次抽样方案。

3.10

抽样检测 sampling detection

按照规定的抽样方案，抽取代表性个体进行性能检测的过程。

3.11

风险 risk

给定时间下，产品母体或总体的性能裕量小于 0 的可能性。

4 符号

下列符号适用于本文件。

η_i	——第 i 次抽样方案, $i=0,1,2,\dots$, $i=0$ 表示首次抽样方案, $i\geq 1$ 表示后续抽样方案
n	——评价指标数; AHP 法准则层因子数
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
r_{hjl}	——第 h 位专家对第 j 个指标在第 l 个评价等级上的评分
s_l	——不确定综合评判法评分时将分数评价在第 l 个评价等级的专家数量
K_T	——母体数量或抽样数量
$K_T^{(i)}$	——第 i 次抽样的母体数量或抽样数量, $i=0$ 表示本次抽样的母体数量, $i=1$ 表示后续抽样的母体数量
N_K	——第 K 个抽样母体中的个体数
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
Q_v	——由不同产品组成的第 v 个聚类
λ_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 个抽样母体中的产品总数
$p_{ij}^{(k)}$	——第 k 次抽样中第 i 个抽样个体的第 j 个性能参数的检测或预测值, $k=0,1$, $k=0$ 表示上一次抽样, $k=1$ 表示本次抽样
$p_{i^*j}^{(1)}$	——在第 i 个个体所在的本次抽样所确定的母体中, 所抽检个体的第 j 个性能参数检测值
$p_{i^*j}^{(0)}$	——在第 i 个个体所在本次抽样所确定的母体中, 所抽检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 次抽样中第 i 个抽样个体的第 j 个性能参数的性能裕量, $k=0,1$, $k=0$ 表示上一次抽样, $k=1$ 表示本次抽样
$m_{i^*j}^{(0)}$	——在第 i 个个体所在本次抽样所确定的母体中, 所抽检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 (即本次抽样检测的时刻) 的性能
Y_0	——性能初值 (即上次抽样检测的时刻), 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, 为常数
$C(t)$	——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, $h=1,2,\dots,N_K$, $K=1,2,\dots,K_T$, $j=1,2$
$\alpha_{0j}^{K(h)}$	—— $y_{0j}^{(h)}$ 对应的信度
$\Phi(\cdot)$	——正态不确定分布
$\theta_{kj}^{(0)}$	——第 K 个母体的第 j 次性能参数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, $j=0, 1$, $j=0$ 表示上一次抽样检测, $j=1$ 表示本次抽样检测

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 次抽样与第 $j-1$ 次抽样之间的时间间隔
Δy_{ij}	—— Δt_{ij} ΔA_{ti} 内的性能退化增量
$\Delta y_{.j}^K$	——母体 K 下的第 j 个性能参数，所有个体的退化增量
$\Delta y_{.j}^{K(h)}$	——母体 K 下的第 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
$\alpha_{.j}^{K(h)}$	—— $\Delta y_{.j}^{K(h)}$ 对应的信度
$m_K^{(j)}$	——第 K 个母体的第 j 个性能参数的性能裕量
$\mu_{Y_0(K)}^{(j)}$	——第 K 个母体的第 j 个性能参数的 μ_{Y_0}
$\theta_{kj}^{(1)}$	——第 K 个母体第 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 个母体的第 j 个性能参数对应的风险

5 通用要求

5.1 可靠性抽样检测流程

可靠性抽样检测的流程如图 1 所示。

在抽样检测开始前，首先判断是否为首次抽样，若是，则应按照 6.1 节制定首次抽样方案，且安排首次抽样检测；否则，应按照抽样方案中规定的抽样个体和抽样周期进行抽样检测，且记录检测结果。按照检测结果，计算所有母体中产品的性能裕量，预测产品的未来某一时刻的风险，开展抽样检测结果评价，具体评价方法见附录 F。依据 6.2 节的后续抽样方案制定方法，并参考抽样检测结果评价，制定后续抽样方案，并撰写抽样检测报告。

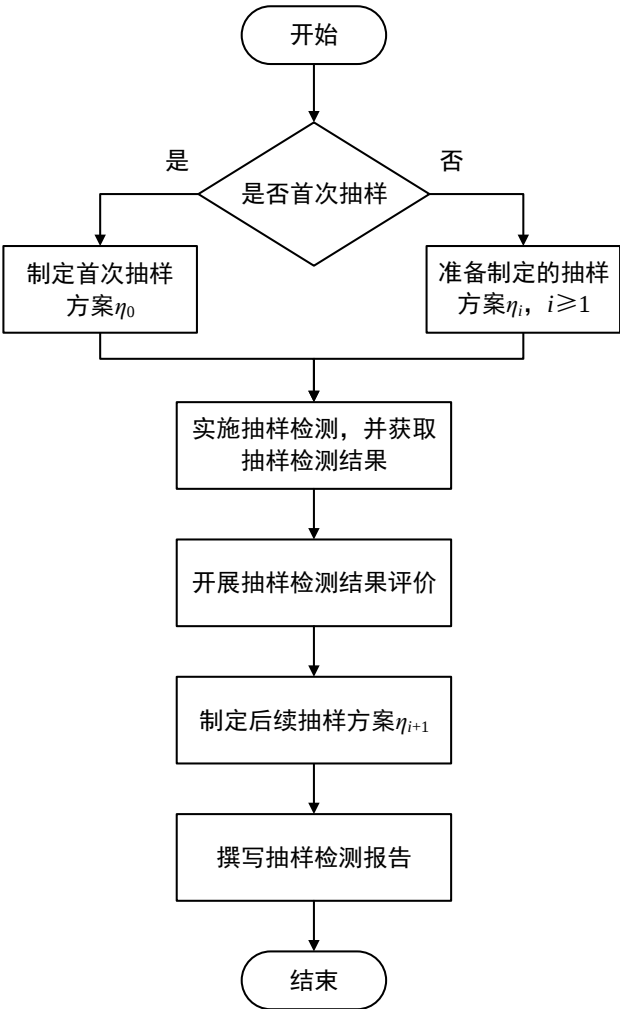


图 1 可靠性抽样检测流程

5.2 产品状态要求

进行抽样检测的产品应满足如下状态要求：

- (1) 具有完整的物理属性、工艺属性、接口属性等信息；
- (2) 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；
- (3) 性能参数可准确检测。

5.3 检测设备和仪器

性能检测设备和仪器应经计量合格并在有效期内，检测满足精度要求。

5.4 抽样检测工作管理

应成立专门的抽样检测工作小组，明确各方责任和检测工作要求，开展检测工作，确保抽样检测结果真实可信。

5.5 抽样检测报告

每次抽样检测后，应根据各项原始记录，编制正式抽样检测报告。抽样检测报告至少应包括以下内容：

- (1) 抽样检测的目的及要求；
- (2) 产品状态说明；
- (3) 抽样数量的确定原则；
- (4) 本次抽样检测方案；
- (5) 抽样检测结果；
- (6) 后续抽样方案制定
- (7) 抽样结论。

6 抽样方案制定

6.1 首次抽样方案

(1) 划分相似指标

参照图 2 进行相似指标划分。

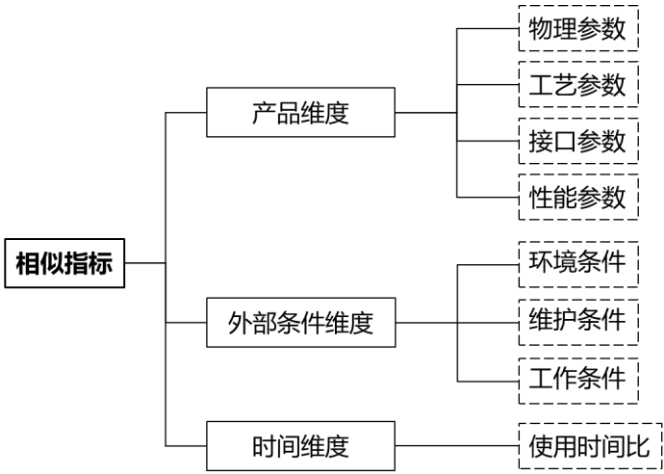


图 2 相似指标的划分体系

(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，评分标准详见附录 A 《指标评分标准对照表》。

对于定性相似指标，其得分采用不确定综合评判法进行计算。具体步骤如下：

1) 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 B；

2) 采用优、良、中、差等四级量表的方式建立评价集，确定评分指标的评价等级，

得到评价方案 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 。具体评价等级见附录 C；

3) 计算定性相似指标的得分，具体方法见附录 D.1。

对于定量相似指标，其得分计算方法见附录 D.2。

(3) 划分抽样母体

利用得到的所有产品的相似指标得分，划分母体，具体算法见附录 E。

(4) 确定首次抽样个体

将得到的每一母体中的聚类中心个体为抽样个体，进行抽样检测。

6.2 后续抽样方案

6.2.1 确定后续抽样个体

根据附录 F 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，则后续抽样母体数量 $K_r^{(1)} = K_r^{(0)} + j - 1$ ， $K_r^{(0)}$ 表示本次抽样母体数量，并进一步进行母体划分，确定后续抽样个体。

6.2.2 确定后续抽样周期

根据附录 F 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，则后续抽样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)
指标评分标准对照

表 A. 1 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	0.8~1	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	0.6~0.8	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	0.3~0.6	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	0~0.3	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	0.8~1	工作条件在额定值的 20%范围内。
		良	0.6~0.8	工作条件在额定值的 20%~40%范围内。
		中	0.3~0.6	工作条件在额定值的 40%~60%范围内。
		差	0~0.3	工作条件在额定值的 60%范围之外。
定量相似指标	环境条件——	(10,25]	0.9~1.0	根据调研，10-25℃、相对湿度 45-70%对产品的各个部位都是最优，

	温度(°C)	(0,10] ∪ (25,30]	0.8~0.9	在这两个范围之外离取值空间越远则外部条件越差。
		(30,35]	0.6~0.8	
		(35,40]	0.3~0.5	
		(40,+∞)	0~0.2	
	环境条件—— 湿度(%RH)	(45,70]	0.9~1.0	
		(30,45]	0.6~0.9	
		(0,30] ∪ (70,80]	0.3~0.6	
		(80,100)	0~0.3	
	环境条件—— 振动 (响应加速度均 方根值 Grms)	(0,0.3]	0.9~1.0	通常情况下，Grms 划分为 4 档，分别为(0,0.3]、(0.3,1]、(1,2.5]、(2.5,+∞)。
		(0.3,1]	0.6~0.9	
		(1,2.5]	0.3~0.6	
		(2.5,+∞)	0~0.3	
	环境条件—— 空气质量 (AQI)	(0,50]	0.9~1.0	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]	0.8~0.9	
		(100,150]	0.6~0.8	
		(150,200]	0.4~0.6	
		(200,300]	0.2~0.4	
		(300,+∞)	0~0.2	
	维护条件—— 维修次数	(0,2]	0.9~1.0	维修次数指的是抽样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]	0.8~0.9	
		(4,6]	0.6~0.8	

		(6,10]	0.3~0.6	
		(10,+∞)	0~0.3	
	使用时间比	(0,0.2]	0.9~1.0	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]	0.8~0.9	
		(0.4,0.6]	0.6~0.8	
		(0.6,0.8]	0.3~0.6	
		(0.8,1]	0~0.3	

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。

附录 B
(资料性附录)

基于层次分析法的指标权重确定方法

B.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，建立系统的递阶层次结构，其中目标层（指标权重）表示为 C ，准则层包含 n 个因素（评价指标）分别为 $C_1, C_2, \dots, C_n$ 。当准则层指标过多（>10 个）时，采用分级指标，目标层为指标赋权，准则层为前文所建立的指标体系，没有方案层，以此自下而上逐级计算权重。

B.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：

Step 1. 选择熟悉长贮装备服役情况的专家，组成专家小组，一般为 5-20 人；

Step 2. 所有专家依照表 B.1 对指标两两之间的重要度进行评分，构造如(B.1)所示的重要度矩阵，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 $1/n_{i_1 i_2}$ ；

Step 3. 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。

Step 4. 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。

Step 5. 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 B.1 1-9 度标准表

$C_{i_1 i_2}$	定义	$C_{i_1 i_2}$	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		

注： $i_1, i_2 = 1, 2, \dots, n, (i_1 \neq i_2)$

$$A = \begin{pmatrix} 1 & n_{12} & \dots & n_{1i_2} \\ 1/n_{12} & 1 & & \\ \dots & & \dots & \\ 1/n_{1i_2} & & & 1 \end{pmatrix} \quad (B.1)$$

B.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：

Step 1. 计算重要度矩阵中最大特征值 $\lambda_{\max}$ 对应的特征向量 $\mathbf{x}$ ，即解如式(B.2)所示的等式：

Step 2. 计算如公式(B.3)所示的 CR ，其中 N' 为准则层因子即评价指标的个数， RI 取值参考如表 B.2 所示；

Step 3. 当 $CR < 0.1$ 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' 个因素指标确定的权重 $\mathbf{x} = (w_1, w_2, \dots, w_{N'})$ 。

$$A\mathbf{x} = \lambda_{\max} \mathbf{x} \tag{B.2}$$

$$CR = \frac{\lambda_{\max} - n}{(n - 1) \cdot RI} \tag{B.3}$$

表 B.2 RI 取值参照表

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

附 录 C
(资料性附录)

基于四级量表的评价等级和评分区间对照

本标准中采用四级量表，按照“优”、“良”、“中”、“差”4 个评价等级对指标进行评价，如表 C.1 所示。

表 C.1 定性相似指标四级量表

评价等级	优	良	中	差
评分区间	80~100	60~80	30~60	0~30

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

对某一定量相似指标的得分 r_i 采用式(D.1)进行计算:

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

式中, n_0 ——定量相似指标数, s ——为专家数。

D.2 定性相似指标评分

(1) 确定指标权值

评价方案 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_{n_1}\}$ 包含 n_1 个评价指标 (定性相似指标), 每个指标在评价中重

要程度由附录 B 得到, 通过归一化得到每个定性相似指标 u_j 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 $\sum_{j=1}^{n_1} w_j = 1 (w_j \geq 0)$ 。

(2) 确定评分分数及其分布

对 m 个评价等级由 s 位专家对 n_1 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} 服从为之字型不确定分布 $Z(a_{jl}, b_{jl}, c_{jl})$, 其期望计算式如式(D.2)所示。

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

引入 $a'_{jl}, b'_{jl}, c'_{jl}$ 如(D.3),(D.4),(D.5)所示:

$$a'_{jl} = \min(r_{1jl}, r_{2jl}, \dots, r_{hjl}, \dots, r_{sjl}) \quad (\text{D.3})$$

$$b'_{jl} = \frac{r_{1jl} + r_{2jl} + \dots + r_{sjl}}{n} \quad (\text{D.4})$$

$$c'_{jl} = \max(r_{1jl}, r_{2jl}, \dots, r_{hjl}, \dots, r_{sjl}) \quad (\text{D.5})$$

进一步地, 将 $a'_{jl}, b'_{jl}, c'_{jl}$ 进行标准化处理, 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, 用矩阵 $\mathbf{R}$ 表示, 如(D.6)所示。

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

(3) 计算不确定评价矩阵 $\mathbf{B}$

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 $\mathbf{B}'$ 如(D.7)所示，

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

其中， $b'_l = w_1 E(r_{1l}) + w_2 E(r_{2l}) + \dots + w_{n_l} E(r_{n_l l})$ ，反应了第 l 级评价在评价总体中所占的地位。

同时，将向量 $\mathbf{B}'$ 进行归一化可得向量 $\mathbf{B}$ 为：

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

(4) 加权求得指标最终得分

用 b_l 代替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，

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

其中， s_l 表示评分时将分数打在第 l 个评价等级的专家数量。

由式(D.1)与式(D.9)可得产品的完整特征向量 $\mathbf{r} = (r_1, r_2, \dots, r_{n_0}, r'_1, r'_2, \dots, r'_{n_l})$ 。

附录 E

(资料性附录)

基于产品相似的母体划分方法

具体步骤如下：

Step 1. 确定母体个数 K_T 为抽样数量；

Step 2. 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 $\{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_K\}$ ；

Step 3. 计算每个产品向量 $x_u (u=1, 2, \dots, N)$ 与第 K 个聚类中心向量 $\mu_v (v=1, 2, \dots, K)$ 的“相似距离” d_{uv} (用两个特征向量的欧氏距离来表示，如式(E.1)所示)，将产品归入相似距离最小的那一类中。

$$d_{uv} = \|x_u - \mu_v\|^2 \quad (\text{E.1})$$

Step 4. 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“均值相似向量” λ_v 如式(E.2)所示 (其中 N_v 表示类 Q_v 中个体数量)，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；

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

Step 5. 重复第 3、4 步，直至聚类中心不再变化。此时聚类中心即为母体中心，聚类结果为母体划分结果。

附录 F

(资料性附录)

抽样检测结果评价方法

F.1 计算性能裕量

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 $p_{th,L}^{(j)}$, $j=1,2,\dots,n_p$, n_p 为性能参数的个数。对总体中的所有个体 i 进行编号, $i=1,2,\dots,N$, 根据公式(F.1), 计算第 k 次抽样中第 i 个个体的第 j 个性能参数的性能裕量 $m_{ij}^{(k)}$, $k=0,1$, $k=0$ 表示上一次抽样, $k=1$ 表示本次抽样。其中 $p_{ij}^{(k)}$ 为第 k 次抽样中第 i 个个体的第 j 个性能参数值。对于进行抽检的个体, $p_{ij}^{(k)}$ 就是性能检测值; 对于未进行抽检的个体, $p_{ij}^{(k)}$ 的计算公式如(F.2)所示, 其中, $p_{i,j}^{(1)}$ 表示在第 i 个个体所在的本次抽样所确定的母体中, 所抽检个体的第 j 个性能参数检测值, $p_{i,j}^{(0)}$ 表示在第 i 个个体所在本次抽样所确定的母体中, 所抽检的个体在上一次检测中的第 j 个性能参数检测值, $m_{i,j}^{(0)}$ 为 $p_{i,j}^{(0)}$ 对应的性能裕量。

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

$$\frac{p_{i,j}^{(1)} - p_{i,j}^{(0)}}{m_{i,j}^{(0)}} = \frac{p_{ij}^{(k)} - p_{ij}^{(0)}}{m_{ij}^{(0)}} \Rightarrow p_{ij}^{(k)} = \frac{p_{i,j}^{(1)} - p_{i,j}^{(0)}}{m_{i,j}^{(0)}} \cdot m_{ij}^{(0)} + p_{ij}^{(0)} \quad (F.2)$$

F.2 预测风险

将风险等级区间按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 为最低风险等级区间, n_r 为最高风险等级区间。根据母体划分结果, 利用每一母体中的所有个体的本次和上次抽样检测的 (或预测的) 性能裕量, 获取所有母体的风险变化规律, 对所有母体的未来风险进行预测, 并按照风险等级区间序列, 获得母体和总体的风险评价, 得到抽样检测评价结果。

附录 G
(资料性附录)

某滤波电路可靠性抽样检测示例

G.1 制定首次抽样方案

G.1.1 确定首次抽样个体

(1) 划分相似指标

指标选取如图 G.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。此外，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。定性和定量相似指标中 C5~C7 这 3 个指标与退化或检测数据相关，在每次抽样检测完后，重新对其评分。剩下 4 个指标与退化无关，无需更新。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。

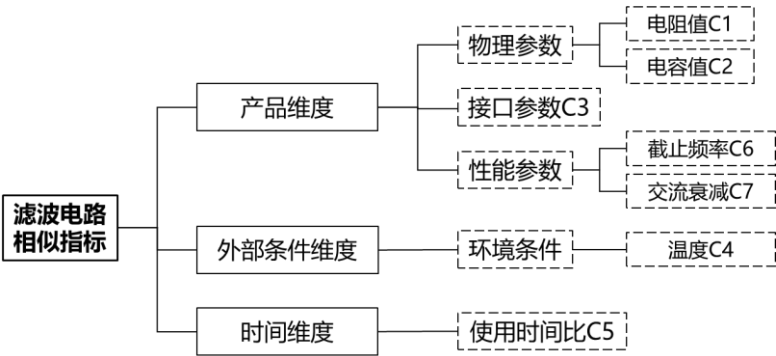


图 G.1 滤波电路案例相似指标层次结构

(2) 计算相似指标得分

首先，根据如表 G.1 所示出厂检测数据，由 5 位专家对每个样本的 7 个指标采用百分制（将附录 A 中的分数值对应乘以 100 即可得到百分制评分标准）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，此案例中的实验产品预期使用寿命为 1000 天。

表 G.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 测量参数	13	14	15	16	17	
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	

1) 定量相似指标得分

以样本 1 为例，表 G.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 G.2 样本 1 的定量相似指标评分（百分制）

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

2) 定性相似指标得分

采用附录 D 所述的不确定综合评判计算样本 1 定性相似指标最终得分，步骤如下所示。

i. 确定指标权值

参照附录 B，各层级指标重要度评分表如表 G.3~表 G.8 所示。

表 G.3 产品维度下三级指标重要度评分

三级指标	电阻值	电容值	截止频率	交流衰减
电阻值	1	1/2	1/3	1/5
电容值	2	1	1/2	1/4
截止频率	3	2	1	1/3
交流衰减	5	4	3	1

表 G.4 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 G.5 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 G.6 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 G.7 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 G.8 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如表 G.9 所示。

表 G.9 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	0.0425	0.0698	0.1325	0.2253	0.5298

ii. 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 G.10 和表 G.11 所示。

表 G.10 样本 1 的定性相似指标评分（百分制）

		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 G.11 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	$r_{51} \sim Z(0,0.6,1)$	$r_{52} \sim Z(0,0,1)$	$r_{53} \sim Z(0,0,0)$	$r_{54} \sim Z(0,0,0)$

iii. 计算不确定评价矩阵和最终得分

根据附录 D，可得 B 为：

$$B = (1, 0, 0, 0) \quad (G.1)$$

进一步地，得到样本 1 定性相似指标的最终得分（保留小数点后两位小数）如表 G.12 所示。

表 G.12 样本 1 定性相似指标最终得分（百分制）

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 G.13 所示。

表 G.13 17 个样本 7 指标最终得分（百分制）

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	/	/	/

(3) 划分抽样母体

本案例中以个体 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：

- 1) 母体 1：个体 11，12，15，17
- 2) 母体 2：个体 1，2，5，8
- 3) 母体 3：个体 3，4，6，7
- 4) 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。

(4) 确定首次抽样个体

首次抽样个体为个体 12、个体 8、个体 4、个体 13。

G.1.2 确定首次抽样周期

得到首次抽样个体后，立刻安排对其进行检测。

G.2 实施抽样检测和获取检测结果

按照首次抽样方案进行抽样检测，检测时间距离上次检测已过 200 天，记录的检测结果如 G.14 所示。

表 G.14 首次抽样个体检测数据

产品编号 测量参数	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
---------	----------	----------	----------	---------

G.3 开展抽样检测结果评价

G.3.1 计算性能裕量

根据公式(F.1)和(F.2)，结合截止频率的阈值上界 $p_{th,U}^1=110$ 和下界 $p_{th,L}^1=80$ 以及交流衰减的阈值 $p_{th}^2=-3.3$ ，计算得到的上次抽样和本次抽样各个母体中每个个体的性能值和裕量值如表 G.15~ G.20 所示。

表 G.15 上一次检测的性能值和裕量值

产品编号 测量参数		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
产品编号 测量参数		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
产品编号 测量参数		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 G.16 首次抽检个体的性能值和裕量值

产品编号 测量参数		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 G.17 母体 1 未检测产品的性能预测值和裕量预测值

产品编号 预测参数		11	15	17
--------------	--	----	----	----

截止 频率	性能值	88.41	87.39	90.96
	裕量值	8.41	7.39	10.96
交流 衰减	性能值	-4.03	-4.50	-4.08
	裕量值	0.73	1.2	0.78

表 G.18 母体 2 未检测产品的性能预测值和裕量预测值

产品编号 预测参数		1	2	5
截止 频率	性能值	87.79	89.07	87.79
	裕量值	7.79	9.07	7.79
交流 衰减	性能值	-4.42	-4.13	-4.03
	裕量值	1.12	0.83	0.73

表 G.19 母体 3 未检测产品的性能预测值和裕量预测值

产品编号 预测参数		3	6	7
截止 频率	性能值	92.90	94.07	94.07
	裕量值	12.90	14.07	14.07
交流 衰减	性能值	-4.77	-4.30	-4.19
	裕量值	1.47	1.00	0.89

表 G.20 母体 4 未检测产品的性能预测值和裕量预测值

产品编号 测量参数		9	10	14	16
截止 频率	性能值	92.48	90.14	90.99	87.95
	裕量值	12.48	10.14	10.99	7.95
交流 衰减	性能值	-4.15	-4.13	-4.01	-4.56
	裕量值	0.85	0.83	0.71	1.26

G.3.2 预测风险

(1) 构建性能退化模型

滤波电路的性能参数——截止频率和交流衰减的退化模型为

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

其中， Y_t 表示 t 时刻（即本次抽样检测的时刻）的性能，服从如(G.3)所示的正态不确定分布； Y_0 表示性能初值（即上次抽样检测的时刻），服从均值为 μ_{Y_0} 、标准差为 σ_{Y_0} 的正态不确定分布； e 表示性能退化速率，服从均值为 μ_e 、标准差为 σ_e 的正态不确定分布； σ 表示扩散系数，为常数； $C(t)$ 表示 Liu 过程，服从均值为 0、标准差为 t 的正态不确定分布。

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

(2) 估计模型未知参数

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(G.4)计算 $y_{0j}^{K(h)}$ 对应的信度 $\alpha_{0j}^{K(h)}$ 。

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

基于获得的 $y_{0j}^{K(1)}, y_{0j}^{K(2)}, \dots, y_{0j}^{K(N_K)}$ 和 $\alpha_{0j}^{K(1)}, \alpha_{0j}^{K(2)}, \dots, \alpha_{0j}^{K(N_K)}$, 利用最小二乘原则进行参

数估计, 即求解如(G.5)所示的优化模型,

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

其中, $\Phi(\cdot)$ 表示正态不确定分布, $\theta_{Kj}^{(0)} = (\mu_{Y_0}^{(Kj)}, \sigma_{Y_0}^{(Kj)})$ 为第 K 个母体的性能初值待估参数向量。

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 的个体的第 j 次性能检测 (或预测) 值, $j=0, 1$, $j=0$ 表示上一次抽样检测, $j=1$ 表示本次抽样检测, t_{ij} 是对应的性能检测 (或预测) 时间点。设 $\Delta t_{ij} = t_{ij} - t_{i(j-1)}$ 为编号为 i 的个体的第 j 次抽样与第 $j-1$ 次抽样之间的时间间隔, Δy_{ij} 是 Δt_{ij} 内的性能退化增量。在母体 K 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 $\mathcal{N}\left(\mu_e^{(K)} \cdot \Delta t_{ij}, \left(\sigma_e^{(K)} + \sigma^{(K)}\right) \cdot \Delta t_{ij}\right)$, 上角标 K 或 (K) 表示第 K 个母体。

进一步地, 针对本次抽样检测划分的母体, 对同一母体、同一性能参数下的 Δy_{ij}^K 进行从小到大的排序, 得到 $\Delta y_{.j}^{K(1)}, \Delta y_{.j}^{K(2)}, \dots, \Delta y_{.j}^{K(N_K)}$, $\Delta y_{.j}^{K(h)}$ 母体 K 下的第 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, 并按照公式(G.4)计算对应的信度 $\alpha_{.j}^{K(1)}, \alpha_{.j}^{K(2)}, \dots, \alpha_{.j}^{K(N_K)}$ 。

基于获得的 $\Delta y_{.j}^{K(1)}, \Delta y_{.j}^{K(2)}, \dots, \Delta y_{.j}^{K(N_K)}$ 和 $\alpha_{.j}^{K(1)}, \alpha_{.j}^{K(2)}, \dots, \alpha_{.j}^{K(N_K)}$, 利用最小二乘原则进

行参数估计,即求解如(G.6)所示的优化模型,

$$\min_{\theta_{Kj}^{(1)}} \sum_{h=1}^{N_K} \left(\Phi \left(\Delta y_{\cdot j}^{K(h)} \mid \theta_{Kj}^{(1)} \right) - \alpha_j^{K(h)} \right)^2 \quad (\text{G.6})$$

其中, $\theta_{Kj}^{(1)} = (\mu_e^{(Kj)}, \sigma_e^{(Kj)}, \sigma^{(Kj)})$ 为第 K 个母体第 j 个性能参数的性能退化过程待估参数向量。

3) 参数估计结果

根据 1) 和 2) 的估计方法,结合 G.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(G.7)所示,

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{母体1、截止频率: } Y_0 \sim \mathcal{N}(86.4163, 0.7480), e \sim \mathcal{N}(0.0088, 5.1499 \cdot 10^{-4}), \sigma = 5.1416 \cdot 10^{-4} \\ \text{母体1、交流衰减: } Y_0 \sim \mathcal{N}(-4.0759, 0.0408), e \sim \mathcal{N}(1.0557 \cdot 10^{-5}, 8.1032 \cdot 10^{-6}), \sigma = 1.2031 \cdot 10^{-5} \\ \text{母体2、截止频率: } Y_0 \sim \mathcal{N}(86.63, 0.9575), e \sim \mathcal{N}(0.0092, 6.7338 \cdot 10^{-4}), \sigma = 6.7338 \cdot 10^{-4} \\ \text{母体2、交流衰减: } Y_0 \sim \mathcal{N}(-4.1721, 0.0964), e \sim \mathcal{N}(2.7582 \cdot 10^{-4}, 3.3037 \cdot 10^{-5}), \sigma = 3.3035 \cdot 10^{-5} \\ \text{母体3、截止频率: } Y_0 \sim \mathcal{N}(83.3897, 0.4024), e \sim \mathcal{N}(0.0493, 0.0029), \sigma = 0.0029 \\ \text{母体3、交流衰减: } Y_0 \sim \mathcal{N}(-4.5197, 0.4439), e \sim \mathcal{N}(1.4692 \cdot 10^{-4}, 2.6963 \cdot 10^{-5}), \sigma = 2.6962 \cdot 10^{-5} \\ \text{母体4、截止频率: } Y_0 \sim \mathcal{N}(85.5797, 1.4587), e \sim \mathcal{N}(0.0202, 0.0036), \sigma = 0.0036 \\ \text{母体4、交流衰减: } Y_0 \sim \mathcal{N}(-4.1593, 0.0498), e \sim \mathcal{N}(1.4800 \cdot 10^{-4}, 1.7069 \cdot 10^{-5}), \sigma = 1.7073 \cdot 10^{-5} \end{array} \right. \quad (\text{G.7})$$

4) 预测风险

根据确信可靠性理论,每个母体下载截止频率和交流衰减的风险表达式分别为 $r_K^{(1)}$ 和 $r_K^{(2)}$,

如(G.8)所示,

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

其中,上角标(1)表示截止频率,上角标(2)表示交流衰减,下角标 K 或 (K) 表示第 K 个母体; $r_K^{(j)}$

表示第 K 个母体的第 j 个性能参数对应的风险, $K=1,2,3,4, j=1,2$ 分别表示截止频率和交流衰减;

$m_K^{(j)}$ 表示第 K 个母体的第 j 个性能参数的性能裕量。

在本案例中,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抽样检测 200 天时风险,将(G.7)中估计的参数值

代入(G.8)，可以得到不同母体、不同性能参数对应的风险如(G.9)所示。因此，可以得到对于不同性能参数来说，所有母体的风险均为第 1 等级，即最小风险等级；总体的风险等级，即所有母体风险的最大值，也为第 1 等级。

$$\begin{cases} r_1^{(1)} = 0, r_1^{(2)} = 0 \\ r_2^{(1)} = 0, r_2^{(2)} = 0 \\ r_3^{(1)} = 1.06\%, r_3^{(2)} = 1.07\% \\ r_4^{(1)} = 0.46\%, r_4^{(2)} = 0 \end{cases} \tag{G.9}$$

G.4 后续抽样方案设计

G.4.1 确定后续抽样个体

根据 G.3.2 节得到的预测的 200 天后产品总体的风险可知，后续抽样继续划分为 4 个母体，对上一次抽样检测个体更新相似指标评分如表 G.21 所示。

表 G.21 首次抽样检测后，17 个样本 7 指标最终得分（百分制）

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	97.4	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			

进一步更新抽样母体，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：

- (1) 母体 1: 个体 12
- (2) 母体 2: 个体 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 14, 15, 16, 17
- (3) 母体 3: 个体 4
- (4) 母体 4: 个体 13

后续抽样方案的抽样个体为个体 12、个体 9、个体 4、个体 13。

G.4.2 确定后续抽样周期

假设风险预测时间点为 307 天后, 则根据 G.3.2 节的得到的风险规律, 307 天后的风险为 30%, 位于第 5 风险等级区间内, 按照 6.2.2 节抽样周期的计方法, 可以得到后续抽样周期为 $307 \times 1/6 = 51.2 \approx 51$ 天, 即在 51 天后对个体 12、个体 9、个体 4、个体 13 进行后续抽样检测。