

ICS 17.020
CCS A 20



中华人民共和国文物保护行业标准

WW/T 0097—2020

馆藏文物预防性保护装备 可靠性鉴定方法

Equipment used for preventive conservation of museum
collection—Reliability evaluation methods

2021-06-02 发布

2021-06-02 实施

中华人民共和国国家文物局 发布

中华人民共和国文物保护行业标准
馆藏文物预防性保护装备 可靠性鉴定方法

Equipment used for preventive conservation of museum collection—Reliability evaluation methods
WW/T 0097—2020

*

文物出版社出版发行

北京市东城区东直门内北小街2号楼

<http://www.wenwu.com>

宝蕾元仁浩（天津）印刷有限公司

新华书店经销

*

开本：880 毫米×1230 毫米 1/16

印张：1.5

2021 年 6 月第 1 版 2021 年 6 月第 1 次印刷

统一书号：115010·2005 定价：36.00 元

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语、定义和符号	1
4 可靠性鉴定试验流程	2
5 可靠性鉴定试验分类	2
5.1 依据试验类型分类	2
5.2 依据试验环境分类	3
5.3 依据试验方法分类	3
6 试验总体要求	3
6.1 试验指标选择	3
6.2 可靠性预计	4
6.3 试验方案的制定	4
6.4 样品的抽取	4
6.5 样品预处理	4
6.6 试验环境搭建	4
6.7 样品的检测	5
6.8 试验数据处理	5
6.9 试验记录与试验报告	5
7 可靠性等级	6
8 可靠性鉴定试验方案及试验程序	6
8.1 试验方案	6
8.2 试验程序	9
9 失效分类与判据	10
9.1 相关失效	10
9.2 非相关失效	11
9.3 总相关失效数统计	11
9.4 失效时刻的判决	11
9.5 失效的处理	11
附录 A (资料性) 定时截尾试验方案的数据处理	12
附录 B (资料性) 可靠性加速试验参考模型	13
附录 C (资料性) 加速试验中加速因子的计算实例	18
附录 D (资料性) 计算实例	19
附录 E (资料性) 推荐的设备可靠性试验报告	20

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。

本文件由中华人民共和国国家文物局提出。

本文件由全国文物保护标准化技术委员会（SAC/TC 289）归口。

本文件起草单位：机械工业仪器仪表综合技术经济研究所、敦煌研究院、中电科技集团重庆声光电有限公司、浙江省计量科学研究院。

本文件主要起草人：王成城、苏伯民、郭青松、张辉、柳晓菁、曾飞。

馆藏文物预防性保护装备 可靠性鉴定方法

1 范围

本文件规定了馆藏文物预防性保护装备（以下简称“装备”）的可靠性等级、可靠性鉴定试验方法及要求，可靠性鉴定试验方案及试验程序、失效分类与判据、试验数据处理、试验记录与报告格式等。

本文件适用于馆藏文物预防性保护用装备。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；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 2900.18—2008 电工术语 低压电器

GB/T 3187—1994 可靠性、维修性术语（idt IEC 60191 - 1: 1991）

GB/T 5080（所有部分）设备可靠性试验

IEC 60605 - 7: 1978 设备可靠性试验 第7部分：恒定失效率先决条件下的失效率与平均无故障时间的验证试验方法

3 术语、定义和符号

3.1 术语和定义

GB/T 2900.18—2008、GB/T 3187—1994 和 GB/T 5080 界定的术语和定义适用于本文件。本标准中有关部分可靠性量值“时间”单位，可用“次数”替代。

3.2 符号

下列符号适用于本文件。

$MTBF$ ：平均故障间隔时间。

L ：失效寿命。

L_{work} ：预计使用寿命。

A_c ：合格判定数（允许失效数）。

n ：样品数。

r ：相关失效数。

r_c ：截尾失效数（ $r_c = A_c + 1$ ）。

T ：累积相关试验时间。

T_c ：截尾时间（全部样品要达到的试验总时间）。

t_c ：（单台样品）试验截止时间。

$MTBF_{min}$ ：可靠性等级最低平均故障间隔时间指标。

L_{min} ：可靠性等级最低失效寿命指标。

AF ：加速试验的加速因子。

4 可靠性鉴定试验流程

可靠性鉴定试验的流程如图 1 所示。

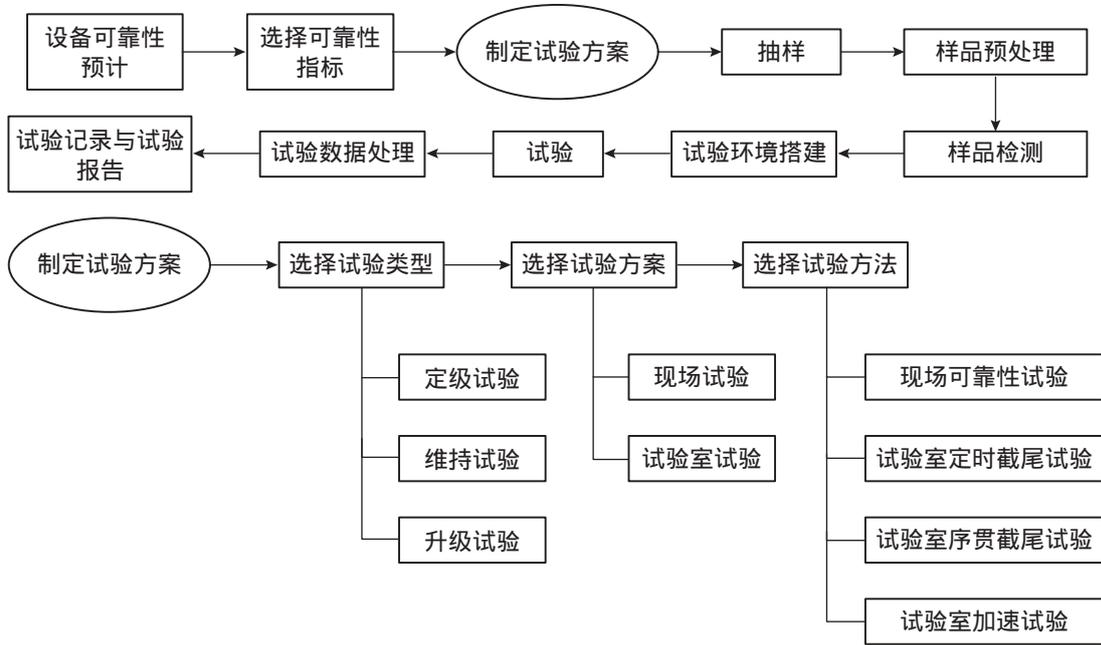


图 1 可靠性鉴定试验的流程图

图中下半部分描述了可靠性试验方案的制定过程见第 5 章，依次确定试验类型、试验环境和试验方法。

图中上半部分为可靠性试验的流程，其中可靠性预计、抽样、样品预处理、样品检测、试验环境搭建等规定参照第 6 章要求，可靠性指标依据第 7 章规定的可靠性等级表确定，制定试验方案依据第 8 章的要求，失效分析依据第 9 章的要求。

5 可靠性鉴定试验分类

5.1 依据试验类型分类

5.1.1 定级试验

定级试验是指首次确定产品的可靠性等级而进行的试验，或在某一可靠性等级的维持试验或升级试验失败后，对产品重新确定其可靠性等级而进行的试验。

5.1.2 维持试验

维持试验是指为证明产品的可靠性等级仍不低于定级试验或升级试验后所确定的可靠性等级而进行的试验

5.1.3 升级试验

升级试验是指为证明产品的可靠性等级比原定的可靠性等级更高而进行的试验。

5.2 依据试验环境分类

5.2.1 现场试验

进行现场可靠性试验时，现场的工作环境、维修及测量条件需加以记录。现场可靠性试验通常采用 MTBF 作为考量的可靠性指标。

5.2.2 实验室试验

在规定的受控制的工作及环境条件下进行可靠性鉴定试验，其工作及环境条件应尽可能模拟现场条件。

实验室可靠性试验根据其考量指标的不同，可以分为以 MTBF 为指标的可靠性鉴定试验和以失效寿命为指标的可靠性鉴定试验。

5.3 依据试验方法分类

5.3.1 现场试验方法

现场试验方法在生产方、使用方和第三方商定的环境条件下，监控设备运行状态。在不允许维修的条件下，记录所有试验样本的故障时间，取算数平均值作为 MTBF 指标；在允许维修的条件下，记录所有试验样本正常工作到发生故障的时间，不包括维修的时间，取算数平均值作为 MTBF 指标。试验可采用约定的时间或约定的失效数作为试验终止判据。

5.3.2 定时截尾试验方法

定时截尾试验在试验前先规定一个试验时间，当试验达到所规定的时间就停止。

假设在一批数量为 N 的产品中，任意抽取数量为 n 的样本，规定试验截止时间为 T_0 。进行可靠性鉴定试验时，出现故障的序号为 r ，记录第 r 个故障发生的时刻 T_r ，如果到规定的截尾时间 T_0 还没有出现 r 个故障，则判定可靠性鉴定试验通过，反之，则判定试验失败。

5.3.3 序贯截尾试验方法

序贯截尾试验在一批数量为 N 的产品中，任意抽取数量为 n 的样本，观察发生 r 个故障出现时的时间，即 ($r=1, 2, 3, \dots$) 对应的试验时间 (T_1, T_2, T_3, \dots)，并计算出总的试验时间 T ，确定一个合适的范围 h ， $T_A = h + sr$ ， $T_B = -h + sr$ ， s 为常数， r 为故障数。若 $T \geq T_A$ 则试验成功，若 $T \leq T_B$ 则试验失败， $T_B < T < T_A$ ，则无法做出判决，继续进行试验。

5.3.4 加速试验方法

加速试验是在进行合理工程及统计假设的基础上，利用与物理失效规律相关的统计模型对在超出正常应力水平的加速环境下获得的信息进行转换，得到产品在额定应力水平下的特征可复现的数值。

6 试验总体要求

6.1 试验指标选择

可靠性鉴定试验的指标应根据设备进行选取。电子、电气、光电等电气元件宜采用 MTBF 指标评定可靠性等级，机械类、机电类设备宜采用失效寿命指标评定可靠性等级。复杂型、组合型的设备依据其各单元最低可靠性指标评定可靠性等级，指标可根据实际情况选择。

6.2 可靠性预计

在可靠性鉴定试验之前，应对设备进行可靠性预计，设备的 MTBF 预计值应等于或大于目标 MTBF 值，以保证可靠性试验方案以高概率接收受试设备。

6.3 试验方案的制定

试验前应制定可靠性鉴定试验方案，其内容包括：

- a) 可靠性试验的目的和要求；
- b) 受试设备型号、名称；
- c) 受试设备的技术状态和数量；
- d) 失效判据的规定；
- e) 确定设备的可靠性指标，以及可靠性试验方案的选定；
- f) 确定样本大小；
- g) 试验条件、环境以及加载周期；
- h) 试验设备及测试仪表的要求；
- i) 试验时间的安排及测试时间的规定；
- j) 设备的可靠性指标；
- k) 各项偏离标准的详细理由；
- l) 方案制定以及审核批准人员签署意见。

6.4 样品的抽取

试验中样品的抽取应满足以下要求：

- a) 样品应从稳定给的工艺条件下生产的并经出厂检验合格的产品中随机抽取；
- b) 现场试验的样品数应根据生产方、使用方和第三方共同约定的结果选取，供抽样的产品应不少于被抽取样品数的 10 倍；
- c) 实验室试验的样品数根据不同的试验方案决定。

6.5 样品预处理

试验前不得对设备进行与交付使用的设备所不同的老练试验和其他预处理，试验前允许对设备进行与现场一致的预防性维护处理。

6.6 试验环境搭建

6.6.1 试验环境条件

现场试验应在设备正常使用的条件下进行或按照产品标准或技术条件规定的使用环境条件下进行。实验室试验应在试验方案中规定的实验室环境条件下进行。

6.6.2 安装条件

样品的安装应与实际工作状态一致，环境条件与倾斜度等应符合产品标准或技术条件的规定。

6.6.3 试验电源条件

样品供电应减少干扰，电源波形和频率应稳定，样品试验供电应与实际工作状态一致，如试验

有电应力测试要求除外。

6.6.4 操作条件

实际工作中采用输入激励的方式进行操作的设备，在试验中也应采用相同的输入激励；实际工作中采用手动激励方式的设备，在试验中应采用手动或操作机构进行激励。

试验时设备工作循环次数或时间不应低于产品标准中规定的额定值。为了缩短试验时间，在不影响设备正常工作及不改变失效机理的条件下，允许提高工作循环次数或时间。

6.7 样品的检测

6.7.1 试验前检测

试验前先对样品进行检测，检查样品有无损坏、变形、断裂等，剔除零部件损坏、变形、断裂者，并按规定补足样品数，剔除掉的样品不计入相关失效数 r 内。

6.7.2 试验中检测

试验中不允许对样品进行清理和调整（可维修设备可靠性鉴定试验除外）

试验中应对设备性能进行监测，一旦出现失效现象，需进行记录，并根据试验方案采取相应措施。

6.7.3 试验后检测

试验结束后需对样品进行性能检测，重点检测零部件有无破损、断裂，电气元件的电气性能是否完好。

样品在试验后检测中，任一项目的检测结果不符合产品标准的规定，即认为该样品失效。其失效时间按试验结束时的时间或循环次数计算，失效数为 1。

6.8 试验数据处理

根据采用的不同试验方法，选用不同的数据处理方法。采用定时截尾试验方案时的数据处理见附录 A。采用序贯截尾试验方案时的数据处理见附录 B。采用加速试验方案时的数据处理见附录 C。验证一台馆藏文物预防性保护智能传感器的可靠性等级的计算实例见附录 D。

6.9 试验记录与试验报告

6.9.1 试验记录

每台样品都要有试验记录，并按失效时间先后顺序将失效样品进行失效数据登记，如有失效分析过程，还应详细记录失效分析内容。主要记录内容为：

- a) 样品名称、型号、规格；
- b) 制造单位；
- c) 样品制造日期；
- d) 试验日期及样品数；
- e) 试验条件；
- f) 失效样品编号，失效时间及失效现象；
- g) 失效分析与判断；
- h) 试验人员。

6.9.2 试验报告

试验报告应写明试验依据和要求，失效样品编号，失效时间及失效原因，作出试验是否合格的判定（推荐的设备可靠性试验报告见附录 E）。

7 可靠性等级

装备可采用 MTBF 或失效寿命作为可靠性特征量，根据不同的可靠性指标，可将设备分为一级、二级、三级、四级、五级、六级共 6 个可靠性等级。

可靠性等级的名称、符号和最低 MTBF 与最低失效寿命见表 1。

表 1 可靠性等级名称、符号和可靠性指标

可靠性等级名称	可靠性等级符号	MTBF _{min} /h	失效寿命 L_{min} /h
一级	REL1	1000	$1 \times L_{work}$
二级	REL2	3000	$1.5 \times L_{work}$
三级	REL3	8000	$2 \times L_{work}$
四级	REL4	16000	$2.5 \times L_{work}$
五级	REL5	24000	$3 \times L_{work}$
六级	REL6	40000	$4 \times L_{work}$

L_{work} 为设备预计使用寿命，不同的可靠性等级对应不同的失效寿命，即预计使用寿命的不同倍数。

8 可靠性鉴定试验方案及试验程序

8.1 试验方案

8.1.1 定级试验和升级试验方案

8.1.1.1 现场试验

现场试验设备样本量不应低于合同规定的单一型号产品数量的 50%，用设备工作时间 T 除以失效数 r ，见公式（1）：

$$MTBF = T/r \dots\dots\dots (1)$$

现场试验定级和升级试验有效期为 24 个月。

8.1.1.2 实验室试验

通常用定时截尾法和序贯试验法鉴定可靠性 MTBF 指标。

定时截尾试验方案详见表 2（置信度即置信水平为 0.9）。

表 2 定时截尾试验方案

可靠性等级	MTBF 指标/h	定级有效期/月	截尾时间 $T_c/10^5$ h									
			Ac=0	Ac=1	Ac=2	Ac=3	Ac=4	Ac=5	Ac=6	Ac=7	Ac=8	Ac=9
REL1	1000	24	0.023	0.039	0.053	0.069	0.080	0.093	0.11	0.12	0.13	0.14

表 2 (续)

可靠性等级	MTBF 指标/h	定级有效期/月	截尾时间 $T_c / \times 10^5 \text{ h}$									
			Ac=0	Ac=1	Ac=2	Ac=3	Ac=4	Ac=5	Ac=6	Ac=7	Ac=8	Ac=9
REL2	3000	24	0.069	0.12	0.16	0.20	0.24	0.28	0.32	0.36	0.39	0.43
REL3	8000	30	0.18	0.31	0.43	0.53	0.64	0.74	0.84	0.96	1.04	1.14
REL4	16000	30	0.36	0.62	0.85	1.07	1.28	1.48	1.68	1.88	2.08	2.27
REL5	24000	36	0.54	0.93	1.29	1.59	1.92	2.22	2.53	2.82	3.12	3.42
REL6	40000	36	0.92	1.55	2.15	2.65	3.20	3.70	4.21	4.71	5.20	5.68

序贯试验方案详见表 3 (生产方风险 $\alpha=0.1$, 使用方风险 $\beta=0.1$, 鉴别比 $D_m=1.5$):

表 3 序贯试验方案

可靠性等级	MTBF 指标/h	定级有效期/月	试验时间 $T_c / \times 10^5 \text{ h}$									
			Ac=0	Ac=1	Ac=2	Ac=3	Ac=4	Ac=5	Ac=6	Ac=7	Ac=8	Ac=9
REL1	1000	24	0.044	0.053	0.060	0.069	0.076	0.085	0.093	0.10	0.11	0.12
REL2	3000	24	0.13	0.16	0.18	0.21	0.23	0.26	0.28	0.30	0.33	0.35
REL3	8000	30	0.35	0.42	0.48	0.55	0.61	0.68	0.74	0.81	0.87	0.94
REL4	16000	30	0.70	0.84	0.96	1.10	1.22	1.36	1.48	1.62	1.74	1.88
REL5	24000	36	1.05	1.68	1.44	1.65	2.44	2.72	2.96	3.24	3.48	3.76
REL6	40000	36	1.75	2.10	2.40	2.75	3.05	3.40	3.70	4.05	4.35	4.70

序贯试验与定时截尾试验各有优缺点。序贯试验节省试验成本, 能较快地确定可靠性等级, 但是失效数及试验时间、费用在试验前难以确定, 不便于管理; 定时截尾试验的试验时间较长, 但是判决故障数和试验时间在试验前能够确定, 易于管理。

序贯截尾试验与定时截尾试验可以采用加速方法进行, 其加速应力的选取、加速模型以及加速因子见附录 C。

通常采用加速试验方法鉴定可靠性失效寿命指标。加速试验的试验样品为 3 台~5 台, 通过增加试验应力导致产品快速失效, 采取多台样品测试, 取算术平均值的方式获得可靠性失效寿命指标, 见公式 (2):

$$L = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{n} \dots\dots\dots (2)$$

式中:

- L ——加速试验测定的失效寿命指标
- L_i ——单台设备通过加速试验测定的失效寿命
- n ——加速试验的样品数

加速试验的应力应是产品实际使用过程中导致产品失效的主要应力, 加速试验可以是单一应力的加速, 也可以是综合多应力的加速, 综合多应力加速的加速效果强于单一应力逐个加速。设备失效时间与加速因子的乘积即为可靠性失效寿命指标。

加速试验的加速模型见附录 C, 通常加速应力的加速因子一般不大于 500。

以预计使用寿命 L_{work} 为 1000 h 为例, 加速试验方案见表 4:

表 4 加速试验方案

可靠性等级	失效寿命指标/h	定级有效期/月	试验时间/h							
			AF = 5	AF = 10	AF = 15	AF = 20	AF = 25	AF = 30	AF = 40	AF = 50
REL1	1000	24	200	100	67	50	40	34	25	20
REL2	1500	24	300	150	100	75	60	50	38	30
REL3	2000	30	400	200	134	100	80	67	50	40
REL4	2500	30	500	250	167	125	100	83	63	50
REL5	3000	36	600	300	200	150	120	100	75	60
REL6	4000	36	800	400	267	200	160	133	100	80

8.1.2 维持试验方案

8.1.2.1 现场试验

现场试验的维持试验方案与定级试验方案相同。

8.1.2.2 实验室试验

通常用定时截尾法和序贯试验法鉴定可靠性 MTBF 指标。

定时截尾试验方案见表 5（置信度即置信水平为 0.7）：

表 5 定时截尾试验方案

可靠性等级	MTBF 指标/h	最大维持周期/月	截尾时间 $T_c / \times 10^5 h$									
			Ac = 0	Ac = 1	Ac = 2	Ac = 3	Ac = 4	Ac = 5	Ac = 6	Ac = 7	Ac = 8	Ac = 9
REL1	1000	12	0.012	0.024	0.036	0.048	0.059	0.070	0.081	0.092	0.10	0.11
REL2	3000	12	0.036	0.073	0.11	0.14	0.18	0.21	0.24	0.28	0.31	0.34
REL3	8000	18	0.096	0.20	0.29	0.38	0.47	0.56	0.65	0.74	0.82	0.91
REL4	16000	18	0.192	0.39	0.58	0.76	0.94	1.12	1.30	1.47	1.65	1.82
REL5	24000	24	0.288	0.59	0.87	1.14	1.41	1.68	1.95	2.21	2.47	2.73
REL6	40000	24	0.48	0.98	1.45	1.90	2.36	2.80	3.24	3.68	0.41	4.55

序贯试验方案见表 6（生产方风险 $\alpha = 0.2$ ，使用方风险 $\beta = 0.2$ ，鉴别比 $D_m = 2.0$ ）。

表 6 序贯试验方案

可靠性等级	MTBF 指标/h	最大维持周期/月	试验时间 $T_c / \times 10^5 h$									
			Ac = 0	Ac = 1	Ac = 2	Ac = 3	Ac = 4	Ac = 5	Ac = 6	Ac = 7	Ac = 8	Ac = 9
REL1	1000	12	0.014	0.021	0.028	0.035	0.041	0.049	0.049	0.049	—	—
REL2	3000	12	0.041	0.064	0.083	0.11	0.12	0.15	0.15	0.15	—	—
REL3	8000	18	0.11	0.17	0.22	0.28	0.33	0.39	0.39	0.39	—	—
REL4	16000	18	0.22	0.33	0.45	0.56	0.67	0.78	0.78	0.78	—	—
REL5	24000	24	0.33	0.51	0.66	0.84	0.99	1.17	1.17	1.17	—	—

表 6 (续)

可靠性等级	MTBF 指标/h	最大维持周期/月	试验时间 $T_c / \times 10^5 \text{h}$									
			Ac = 0	Ac = 1	Ac = 2	Ac = 3	Ac = 4	Ac = 5	Ac = 6	Ac = 7	Ac = 8	Ac = 9
REL6	40000	24	0.56	0.84	1.12	1.39	1.67	1.95	1.95	1.95	—	—

以预计使用寿命 L_{work} 为 1000 h 为例，加速试验方案见表 7。

表 7 加速试验方案

可靠性等级	失效寿命指标/h	最大维持周期/月	试验时间 T_c / h								
			AF = 5	AF = 10	AF = 15	AF = 20	AF = 25	AF = 30	AF = 40	AF = 50	
REL1	1000	24	200	100	67	50	40	34	25	20	
REL2	1500	24	300	150	100	75	60	50	38	30	
REL3	2000	30	400	200	134	100	80	67	50	40	
REL4	2500	30	500	250	167	125	100	83	63	50	
REL5	3000	36	600	300	200	150	120	100	75	60	
REL6	4000	36	800	400	267	200	160	133	100	80	

8.2 试验程序

8.2.1 定级试验

定级试验按照下列程序进行：

- a) 选定可靠性等级，首次定级试验一般应选可靠性等级为 REL1、REL2 或 REL3 级；
- b) 统计试验选定允许失效数 A_c 和截尾失效数 r_c ($r_c = A_c + 1$)，推荐在 2 ~ 5 的范围内选择 A_c ，不推荐选择 $A_c = 0$ 。加速试验选定试验应力与加速因子；
- c) 统计试验根据选定的可靠性等级和 A_c ，查表得出试验时间 T_c 。加速试验根据选定的可靠性等级和加速因子，查表得出试验时间 T_c ；
- d) 统计试验确定样品的试验时间 t_z ， t_z 一般不应低于 10^3h ；加速试验的试验时间 T_c 即样品试验时间 t_z 。
- e) 统计试验根据 T_c 、 A_c 及 t_z ，确定样品数 n (用进一法取整)，按照公式 (3) 进行计算：

$$n = \frac{T_c}{t_z} + A_c \dots\dots\dots (3)$$

应注意，样品数 n 一般不得小于 10；

- f) 统计试验按 6.7 的规定随机抽取 n 个样品；
- g) 按 6.9 的规定进行试验检测及判断样品是否失效；
- h) 统计相关失效数 r 及各失效样品的相关试验时间 (失效时间)；
- i) 统计试验计算累积相关试验时间 T ；加速试验计算失效寿命算术平均值 T_{Life} 。
- j) 统计试验结果判定：

当累积相关试验时间 T 达到或超过了截尾时间 T_c ，而相关失效数 r 未达到截尾失效数 r_c (即 $r \leq A_c$)，则判为试验合格 (接收)，当累积相关试验时间 T 未达到截尾时间 T_c ，而相关失效数 r 已经达到了截尾失效数 r_c (即 $r > A_c$)，则判为试验不合格 (拒收)。

加速试验结果判定：

当失效寿命指标 T_{Life} 大于或等于相应可靠性等级对应的最少失效寿命指标 T_c ，即判为试验合

格；当失效寿命指标 T_{inf} 小于相应可靠性等级对应的最少失效寿命指标时 T_c ，则判为试验不合格。

8.2.2 维持试验

定级试验合格的产品，可按 6.2.2 中规定的维持周期进行该等级的维持试验，采用加速试验方式的维持试验程序与定级试验相同，采用统计试验方式的维持试验按下列程序进行：

- a) 选定允许失效数 A_c ；
- b) 根据产品已试验合格的可靠性等级及选定的允许失效数，查表得出试验时间 T_c ；
- c) 选定样品的试验截止时间 t_2 [同 8.1.1 中 d) 项]；
- d) 确定样品数 n [同 8.1.1 中 e) 项]；
- e) 抽取样品 [同 8.1.1 中 f) 项]；
- f) 按 6.9 的规定进行试验检测及判断样品是否失效；
- g) 统计相关失效数 r 及各失效样品的相关试验时间 [同 8.1.1 中 h) 项]；
- h) 统计累积相关试验时间 T ；
- i) 试验结果判定 [同 8.2.1 中 j) 项]；
- j) 若维持试验合格，则应继续按规定的维持周期进行下一次维持试验；若维持试验不合格，则应重新进行定级试验，以确定其可靠性等级；
- k) 重新确定可靠性等级时，应将该产品从首次定级试验起的全部试验数据（包括维持试验不合格的数据）进行累积，根据累积的相关失效数及累积的相关试验时间确定产品的可靠性等级。

8.2.3 升级试验

定级试验合格的产品可继续进行升级试验。升级试验的数据可从定级试验和维持试验和样品进行延长试验以及为升级试验投入的样品进行试验得出。采用加速试验的升级试验方法与定级试验相同，采用统计试验的升级试验按下列程序进行：

- a) 选定待升的可靠性等级（一般比原定的等级高一级）；
- b) 选定允许失效数 A_c 。加速试验选定可靠性等级对应的最少失效寿命指标；
- c) 根据选定的可靠性等级及允许失效数，由第 7 章查出试验时间；
- d) 根据 T_c 确定延长试验的时间以及升级试验投入的样品数和试验时间。
- e) 抽取样品 [同 8.1.1 中 f) 项]；
- f) 按 6.9 的规定进行试验检测及判断样品是否失效；
- g) 统计相关失效数 r 及累积相关试验时间 T ；
- h) 试验结果判定 [同 8.2.1 中 j) 项]；
- i) 若升级试验合格，则应按规定的维持周期进行该等级的维持试验；若升级试验不合格，则应重新进行定级试验，以确定其可靠性等级；
- j) 重新确定可靠性等级时，应将该产品的全部试验数据进行累积，根据累积的相关失效数及累积的相关试验时间由第 7 章确定产品的可靠性等级。

9 失效分类与判据

9.1 相关失效

9.1.1 相关失效原因

所有的相关失效应计入设备相关失效数中，下列失效为相关失效：

- a) 设计缺陷引起的失效；

- b) 工艺缺陷引起的失效；
- c) 制造缺陷引起的失效；
- d) 元器件的失效和误差引起的失效；
- e) 软件误差引起的失效；
- f) 应生产方提供的安装，使用说明不当引起的失效。

9.1.2 相关失效分类

根据失效产生的后果，失效可分为3类：

- a) 不允许发生的失效，包括：按照生产方提供的使用说明所规定的方法进行操作时会造成操作者人身危害或不安全的失效；设备的电气，机械安全指标失效。
- b) 严重失效，是指严重影响设备执行其规定功能的失效，包括：设备丧失或降低了基本使用功能；提供使用人员操作的各种开关、旋钮所具备的功能失效；设备的数据处理失真；设备的主要技术性能指标下降，不符合产品标准的要求；其他影响设备完成主要功能的失效。
- c) 轻度失效，是指虽不影响设备最终完成规定功能，但确系设备设计、制造或元器件不良引起的失效，按照每两次轻度失效折算为一次计入设备的相关失效数，包括：有重复功能部件的失效；检测性部件的失效；辅助的指示性部件的失效（不包括图像显示）；辅助性字符显示功能的失效；其他不影响设备最终完成主要功能的失效。

9.2 非相关失效

非相关失效主要包括：

- a) 从属失效；
- b) 误用失效；
- c) 由于外部设备或测量不当所引起的失效；
- d) 设备使用说明中规定的短失效寿命器件，应试验时间超过其失效寿命未更换而引起的失效；
- e) 非相关试验时间内所发生的失效。

9.3 总相关失效数统计

总相关失效数统计按照公式（4）进行计算：

$$\gamma_z = \gamma_y + \frac{\gamma_q}{2} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

γ_z ——总相关失效数；

γ_y ——严重失效数；

γ_q ——轻度失效数。

对小数点的处理采用四舍五入法。

9.4 失效时刻的判决

如果对于发生失效的时刻不能作出确切的判决，则判决此失效发生在上一次观测检查时刻。

9.5 失效的处理

采用加速试验方法，在试验期间，设备一旦失效，应立即退出试验，记录失效时间；采用统计试验方法，设备一旦失效，应立即退出试验，如设备可修复，则在修复后重新投入试验。在失效检修之后，重新开始试验之前，允许用试验设施测试受试设备的性能，此时发生的失效不应作为相关失效数。

附录 A
(资料性)
定时截尾试验方案的数据处理

A.1 平均无故障时间点估计值 (\hat{m}) 的计算

用累积总相关试验时间 T 除以总累积相关失效数 r , 见公式 (A.1):

$$\hat{m} = \frac{T}{r} \dots\dots\dots (A.1)$$

A.2 平均无故障时间单侧置信区间的估计

按公式 (A.1) 计算平均无故障时间的点估计 (\hat{m})。按对应的累积相关失效数及规定的置信水平查表 A.1 读出相应的单侧估计因子。用单侧估计因子分别乘以平均无故障时间的点估计值 (\hat{m}), 求得平均无故障时间的单侧估计下限值 (m_1)。

将上面的计算结果以公式 (2) 形式表达:

$$m = C, (m_1) \dots\dots\dots (A.2)$$

式中:

C —— 区间估计的置信水平。

对于表 A.1 中未列出的数值按公式 (A.3) 计算单侧下限值:

$$MTBF \text{ 的单侧下限值} = \frac{2T}{\chi^2(C, 2r + 2)} \dots\dots\dots (A.3)$$

式中:

T —— 总累积相关试验时间;

r —— 累积相关失效数;

C —— 区间估计置信水平;

χ^2 —— χ^2 分布的分位点。

表 A.1 定时截尾试验方案 MTBF 验证值的置信限因子 (接收时)

累积相关失效数	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
置信度 70%	2.41	4.88	7.23	9.52	11.78	14.01	16.22	18.42	20.60	22.77
置信度 90%	4.61	7.78	10.64	13.36	15.99	18.55	21.06	23.54	25.99	28.41

附录 B
(资料性)
可靠性加速试验参考模型

B.1 概述

本文件中涉及的可靠性加速试验是指定量加速试验，能够定量计算出受试样品的可靠性指标。加速试验中可加速的应力包括环境应力和工作应力。环境应力包括温度、湿度、振动等，工作应力主要是指电应力及设备工作时产生的相关应力，工作应力加速通常为重复加载的应力。

B.2 概率失效风险模型

概率失效风险模型主要用于将加速试验与失效率等可靠性指标相结合。概率失效风险模型多应用于服从威布尔分布的设备（指数分布是威布尔分布的特殊情况）。

环境应力加速试验概率失效风险模型见公式（B.1）：

$$H_{PH}(t) = AF \times \left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta \dots\dots\dots (B.1)$$

工作应力加速试验概率失效风险模型见公式（B.2）：

$$H_{AL}(t) = \left(\frac{AF \times t}{\eta}\right)^\beta \dots\dots\dots (B.2)$$

式中：

$H_{AL}(t)$ ——环境应力的累积风险函数；

$H_{PH}(t)$ ——工作应力的累积风险函数；

AF ——加速因子；

$\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta$ ——威布尔分布的累积风险（ t 是时间， η 是寿命参数， β 是尺度参数）。

B.3 综合应力加速

当对产品同时施加两种以上应力进行加速时，整体寿命依据不同失效模式加速进行计算。设备整体可靠度计算方式见公式（B.3）：

$$R = \prod_{i=1}^{N_s} R_i \dots\dots\dots (B.3)$$

式中：

R_i ——应力 i 对于试验样品的可靠性的影响，应力为独立的；

R ——试验样品的可靠性；

N_s ——独立应力的个数。

如果设备的寿命服从指数分布，公式（B.3）可以简化为公式（B.4）：

$$\lambda_{item}(Stress) = \lambda_U + \sum_{i=1}^{N_s} \lambda_i(Stress_i) \dots\dots\dots (B.4)$$

式中：

λ_U ——基本失效率。

如果设备的寿命服从威布尔分布，公式 (B.3) 可以简化为公式 (B.5)：

$$\frac{1}{\eta_{Item}^\beta (Stress)} = \frac{1}{\eta_U^\beta} + \sum_{i=1}^{N_i} \frac{1}{\eta_i^\beta (Stress_i)} \dots\dots\dots (B.5)$$

式中：

β ——威布尔分布的形状参数；

η_{Item} ——单独应力的集合；

η_U ——基准尺度参数；

η_i ——单独应力的尺度参数。

以指数分布为例，采用综合应力进行加速试验，失效率按照公式 (B.6) 表示：

$$A \cdot \lambda_{item} = \lambda_U + \sum_{i=1}^{N_i} A_i \cdot \lambda_{Item} (Stress_i) \dots\dots\dots (B.6)$$

或按照公式 (B.7) 表示：

$$\lambda_A = A_{Test} \cdot \lambda_0 = \sum_{i=1}^{N_i} [(\prod_k A_k)_i \cdot \lambda_i] \dots\dots\dots (B.7)$$

式中：

λ_0 ——对象正常使用条件下的失效率；

λ_A ——加速试验的失效率；

A_i ——试验中加速应力的加速因子或者应力 i 对于失效模式 k 的加速因子；

λ_i ——规范应力对应的对象失效率；

N_s ——应力数；

A_{Test} ——试验条件下加速的失效率的加速因子。

如果加载应力影响所有的失效模式，那么可以直接将其加速因子叠加，整体失效率是综合环境应力下修正后的失效率，见公式 (B.8)：

$$\lambda_{Item} (Stress) = \lambda_U \cdot \prod_{i=1}^{N_i} A_i \dots\dots\dots (B.8)$$

B.4 单一应力加速

B.4.1 逆幂律模型

该模型适用于所有的可靠性分布，不同分布的参数的置信限，寿命函数和可靠性可以通过近似的统计确定，主要用于非温度应力加速试验，例如电应力、机械应力、化学应力（腐蚀）等，包括：

——动态应力，如冲击（包括脉冲）和振动（正弦和随机）；

——气候应力，如热循环、温度变化（冲击和热循环）、湿度、光照辐射或者其他累积损伤的应力，见公式 (B.9)：

$$L(S) = C^{-1} \times S^{-m} \dots\dots\dots (B.9)$$

式中：

S ——应力；

C ——待定的常数；

m ——基于应力的参数，可以通过试验进行确定；

$L(S)$ ——寿命，或者其他的时间周期。

加速试验因子见公式 (B.10)：

$$A_{S_{-IPL}} = \frac{L(S_{Use})}{L(S_{Test})} = \frac{C^{-1} \cdot S_{Use}^{-m}}{C^{-1} \cdot S_{Test}^{-m}} = \left(\frac{S_{Test}}{S_{Use}}\right)^m \dots\dots\dots (B. 10)$$

式中：

- A —— 逆幂律模型应力的加速因子；
- $L(S_{Use})$ —— 寿命，与实际使用应力相关；
- $L(S_{Test})$ —— 寿命，与试验应力相关。

B. 4. 2 阿伦尼斯模型

阿伦尼斯模型基于表面反映速率，将器件类型和失效模式作为绝对温度 T 的函数。该模型基于反应速率是绝对温度的指数。

反应速率见公式 (B. 11)：

$$\rho(T) = K \times e^{-\frac{E_a}{k_B T}} \dots\dots\dots (B. 11)$$

式中：

- K —— 常数（与温度无关）；
- E_a —— 活化能（eV）；
- k_B —— 玻尔兹曼常数， 8.617385×10^{-5} eV/K；
- T —— 绝对温度，单位为开尔齐（K）；
- $\rho(T)$ —— 反应速率，绝对温度的函数。

表征可靠性寿命的函数表示为温度函数，见公式 (B. 12)：

$$L(T) = C \times e^{\frac{D}{T}} \dots\dots\dots (B. 12)$$

使用情况和试验环境之间的加速因子可以采用两种方式表示，见公式 (B. 13)：

$$A = \frac{\rho(T)}{\rho(T_0)} = \frac{K \times e^{-\frac{E_a}{k_B T}}}{K \times e^{-\frac{E_a}{k_B T_0}}} = e^{\left[\frac{E_a}{k_B} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right]} \dots\dots\dots (B. 13)$$

失效率作为绝对温度 T 的函数，可以修正为失效率与规范绝对温度 T_0 ，见公式 (B. 14)：

$$\lambda(T) = C \cdot e^{-\frac{E_a}{k_B T}} \dots\dots\dots (B. 14)$$

规范温度 T_0 的失效率 λ_0 见公式 (B. 15)：

$$\lambda_0(T_0) = C \cdot e^{-\frac{E_a}{k_B T_0}} \dots\dots\dots (B. 15)$$

公式 (B. 14) 与公式 (B. 15) 之间相除，得出公式 (B. 16)：

$$\lambda(T) = \lambda_0(T_0) \cdot e^{\left[\frac{E_a}{k_B} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right]} \dots\dots\dots (B. 16)$$

式中：

- T_0 和 T —— 使用和试验环境下的绝对温度。
- 如活化能未知，可以采用试验的方法进行测定，见公式 (B. 17)：

$$E_a = k_B \cdot \frac{\{\ln[\lambda(T)] - \ln(\lambda_0)\}}{\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}} \dots\dots\dots (B. 17)$$

$$E_a = k_B \cdot SLOPE$$

式中：

- λ_0 —— 25℃ 下某产品失效率， 1×10^{-8} /h；
- λ_F —— 180℃ 下某产品的失效率；
- $\ln(\lambda_0)$ —— -18.421；
- T_0 —— 298K；

$\ln(\lambda_F)$ —— -7.7645;

T_F —— 453K。

通过计算可知, $E_a = 0.8\text{eV}$ 。

B.4.3 艾林模型

艾林模型主要用于热应力为加速应力的过程,也可以用于除温度外的应力,如湿度,或其他化学应力。

预期寿命的函数见公式 (B.18):

$$L(S_E) = \frac{1}{S_E} \cdot e^{-(A-\frac{B}{S_E})} \dots\dots\dots (B.18)$$

式中:

A 和 B —— 函数参数,需要通过试验或文献进行确定,见第2章。参数 B 可能是常数,但是通常为某些应力的函数,通常为温度;

S_E —— 模型中使用的应力(通常为绝对温度),单位为开尔齐(K);

$L(S_E)$ —— 寿命的测量,例如 MTTF,特征寿命,寿命中位值等。

该模型的加速因子见公式 (B.19):

$$A_{S_E} = \frac{L(S_{E_Use})}{L(S_{E_Test})} = \frac{\frac{1}{S_{E_Use}} \cdot e^{-(A-\frac{B}{S_{E_Use}})}}{\frac{1}{S_{E_Test}} \cdot e^{-(A-\frac{B}{S_{E_Test}})}} = \frac{S_{E_Test}}{S_{E_Use}} e^{B(\frac{1}{S_{E_Test}} - \frac{1}{S_{E_Use}})} \dots\dots\dots (B.19)$$

式中:

S_{E_Use} —— 使用和试验的应力;

S_{E_Test} —— 使用和试验的应力;

B —— 需要通过试验或文献确定的常数。

艾林模型可以应用于所有分布的可靠性分析。所有分布的参数的置信限、寿命函数和可靠性可以通过统计获得。

B.4.4 疲劳模型

疲劳可以通过对象材料或结构的退化以定义,当加载是重复的。这些加载可以是机械的、动态的、热循环、电压循环等。在循环加载下(例如热循环,弯曲或其他)疲劳与多个参数相关,通常为极限加载(与极限不同)的循环数和变化率。

Miner 线性累积疲劳损伤理论(准则 Miner)用于计算重复加载的疲劳寿命。根据 Miner 准则,失效发生见公式 (B.20):

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_i}{N_i} + \dots + \frac{n_m}{N_m} = 1 \dots\dots\dots (B.20)$$

式中:

n_i —— i 应力水平下的循环数;

N_i —— i 应力水平下的失效循环数;

$\frac{n_i}{N_i}$ —— i 应力水平下的损伤比例。

采用循环数进行表示,见公式 (B.21):

$$\frac{l_1}{L_1} + \frac{l_2}{L_2} + \dots + \frac{l_i}{L_i} + \dots + \frac{l_m}{L_m} = 1 \dots\dots\dots (B.21)$$

式中：

l_i —— i 应力水平下的时间；

L_i —— i 应力水平下的寿命；

$\frac{l_i}{L_i}$ —— i 应力水平下的损伤比例。

如果每种应力水平下的损伤采用时间表示：

$$l_1 = a_1 \times L$$

$$l_2 = a_2 \times L$$

$$l_i = a_i \times L$$

式中：

a_i —— i 水平应力下的时间；

L ——应用加载下的失效寿命。

如果寿命循环具有相同的比例，则：

$$\frac{a_1 \times L}{L_1} + \frac{a_2 \times L}{L_2} + \dots + \frac{a_i \times L}{L_i} + \dots + \frac{a_m \times L}{L_m} = 1$$

$$L = \frac{1}{\frac{a_1}{L_1} + \frac{a_2}{L_2} + \dots + \frac{a_i}{L_i} + \dots + \frac{a_m}{L_m}} \dots\dots\dots (B. 22)$$

附录 C
(资料性)

加速试验中加速因子的计算实例

C.1 工作应力加速

验证一台馆藏文物预防性保护防震装置的可靠性等级，由于其主要部分为机电控制系统，主要失效机理为磨损失效，故采用加速试验进行验证。

防震装置要求在地震发生时正常工作 1h，防震装置每分钟运行 15 次，共 900 次。以此作为预计使用寿命，拟对其定级 RLE6，加速试验预计使防震装置每分钟运行 30 次，共需 120min，合 2h。

根据附录 B 要求，采用工作应力加速的方法进行加速，加速因子 AF = 2。

C.2 环境应力加速

验证一台馆藏文物预防性保护智能储存装置的可靠性等级，由于其主要部分为机电控制系统，主要失效机理为热应力失效，故采用加速试验进行验证。

智能储存装置要求在室温 20℃ 下正常工作 8000h，拟对其定级 RLE3，对应失效寿命时间为 16000h，根据附录 B 要求，拟在 80℃ 下对设备进行加速试验，采用阿伦尼斯模型进行加速因子的计算见公式 (C.1)：

$$A = \frac{\rho(T)}{\rho(T_0)} = \frac{K \times e^{-\frac{E_a}{k_B T}}}{K \times e^{-\frac{E_a}{k_B T_0}}} = e^{\left[\frac{E_a}{k_B} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right]} \dots\dots\dots (C.1)$$

式中：

T_0 ——使用环境下的温度， $20 + 273.15 = 293.15\text{K}$ ；

T ——试验环境下温度， $80 + 273.15 = 353.15\text{K}$ ；

E_a —— 0.8eV ；

k_B ——玻尔兹曼常数， $8.617385 \times 10^{-5}\text{eV/K}$ 。

因此，该试验加速因子 $AF = e^{5.38} = 218$

故该设备实际试验时间为 73.4h。

附录 D

(资料性)

计算实例

验证一台馆藏文物预防性保护智能温度传感器的可靠性等级，首次定级试验，选择 REL3 级，有现场使用数据及可靠性预计数据，选择定时截尾试验、截尾序贯试验、定时截尾试验与加速试验综合的三种方式进行定级。

可靠性预计结果 MTBF 为 20000h，现场使用数据为 300 台，总工作时间为 3.57×10^5 h，故障数 20 个，故 MTBF 点估计值为 17850h。

查表获得 REL4 对应的 MTBF 值为 16000h，温度传感器预计工作寿命为 6000h，对应的失效寿命值为 15000h，采用定时截尾试验，初定总试验时间 17120h，最大允许故障数为 3 个，样品 20 个，实际试验时间 856h；采用序贯截尾试验，总试验时间 15360h，样品 20 个，实际试验时间 768h，最大允许故障数为 2 个，若 11200h 未出现故障，则可提前判定，若 13440h 内只出现一个故障，也可提前判定；采用定时截尾试验结合加速试验方式，以温度为主加速应力，温度变化为第二加速应力，通过加速模型的计算，加速因子 $AF = 10$ ，实际试验时间为 85.6h。

实际试验过程中，定时截尾试验在 20 个样品经历了 856h 的试验后，出现的故障数为 2 个，满足 REL3 等级要求；序贯截尾试验在 20 个样品经历了 560h 的试验后，并未出现故障现象，所以试验提前结束，并判定设备满足 REL3 等级要求；定时截尾试验结合加速试验在 70h 时刻出现故障，并不符合标准要求，将设备定级为 REL2 级。

完成定级试验后的设备，根据不同的可靠性等级，具有不同的持续时间。以上例中设备为例，REL3 等级持续时间 30 个月有效。

附录 E
(资料性)
推荐的设备可靠性试验报告

推荐的设备可靠性试验报告见表 D.1。

表 D.1 馆藏文物预防性保护装备可靠性试验报告

制造单位		产品型号 和规格		生产日期		试验地点	
试验日期						样品数 n	
试验条件	环境温度/℃	湿度/%	性能参数 A	性能参数 B	性能参数 C	性能参数 D	性能参数 E
试验目的	可靠性等级	可靠性试验 方案 A_c	截尾时间 T_c/h	截尾失效 数 r_c	试验截止 时间 t_z/h	加速因子	加速试验 时间 t_z
序号	失效产品 编号	相关试验 时间/h	失效现象	失效原因	备注		
累积相关试验时间 T				相关失效数 r			
试验结论							
试验人员							
试验负责人		试验单位		(盖章)	年	月	日
注：试验目的的栏内应注明是定级试验、维持试验还是升级试验。							

WW/T 0097—2020

统一书号：115010·2005

定价：36.00 元