

团 体 标 准

T/GQDA 00003—2021

机器人控制器加速试验
与可靠性指标验证方法

Accelerated test and reliability index evaluation method of robot controller

(征求意见稿)

2021-XX-XX 发布

2021-XX-XX 实施

广东省质量发展促进会 发布

目 次

目 次.....	2
前 言.....	4
引言.....	5
1 范围.....	6
2 规范性引用文件.....	6
3 术语和定义.....	6
3.1 控制器 controller.....	6
3.2 受试样机 tested prototype.....	6
3.3 加速试验 accelerated testing.....	6
3.4 基准条件 reference condition.....	7
3.5 加速试验条件 accelerated test condition.....	7
3.6 加速因子 accelerated factor.....	7
3.7 加速模型 accelerated model.....	7
3.8 激活能 activation energy, Ea.....	7
4 符号和意义.....	8
5 通用要求.....	8
5.1 试验和测试标准大气条件.....	8
5.2 试验条件允许误差.....	9
5.3 试验设备要求.....	9
5.4 测试仪器、仪表要求.....	9
5.5 一般的试验程序.....	9
6 加速试验模型方法.....	11
6.1 加速因子的度量和获取方法.....	11
6.2 寿命分布模型与加速因子.....	11
6.3 应力加速模型及加速因子.....	13
7 高温加速老化试验.....	16
7.1 确定基准条件.....	16
7.2 选择加速应力.....	17
7.3 建模评估加速因子.....	17
7.4 受试样机数量.....	17
7.5 检测项目.....	18
7.6 检测周期与试验周期.....	18
7.7 故障定义与分类.....	18
7.8 单台样机有效加速试验时间统计.....	19
8 可靠性指标验证方法.....	19
8.1 确定可靠性指标要求.....	19
8.2 选择统计方案.....	19
8.3 确定加速试验时间.....	20
8.4 折算等效试验时间.....	20
8.5 确定判定故障统计原则.....	21

8.6 可靠性指标评估.....	21
附录 A	23
A.1 基本加速因子模型.....	23
A.2 元器件基本失效率和激活能.....	24
A.3 整机加速因子计算.....	24
A.4 整机加速因子计算举例.....	25

前 言

本标准按照GB/T 1.1-2020给出的规则起草。

本标准由广东省质量发展促进会标准化工作委员会提出。

本标准由广东省质量发展促进会标准化工作委员会归口。

本标准起草单位：广东科鉴检测工程技术有限公司、广州数控设备有限公司

本标准主要起草人：

引言

近年来，用户对机器人的可靠性要求不断提高，控制器作为影响机器人功能和性能的关键部件，需要具有更高的可靠性水平。

加速试验可以大幅度缩短试验时间和研制周期，是解决高可靠和长寿命指标快速验证的有效手段之一。本标准将详细介绍一种基于阿伦尼斯模型的高温加速老化试验方法，用于机器人控制器可靠性指标的快速验证。

机器人控制器加速试验与可靠性指标验证方法

1 范围

本标准规定了机器人控制器开展加速试验与可靠性指标评价的通用要求、加速试验模型和试验方法。

本标准适用于各类机器人的控制器及其电子部件、电路板组件等，其他智能装备的控制部件可靠性指标快速评价可参考本标准。

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 12643-2013 机器人与机器人装备 词汇

GB/T 12642-2013 工业机器人 性能规范及其试验方法

GB/T 11606-2007 分析仪器环境试验方法

GB/T 29309-2012 电工电子产品加速应力试验规程 高加速寿命试验导则

GB/T 34986-2017 产品加速试验方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

控制器 controller

一套具有逻辑分析、控制和驱动功能的机器人关键部件，能控制和监测机器人机械结构并具备通讯和数据处理的能力。

（改写GB/T 12643-2013，定义2.7）

3.2

受试样机 tested prototype

用于开展加速试验与可靠性指标评价的机器人控制器。

3.3

加速试验 accelerated testing

为缩短试验时间和（或）提高试验效果，增大施加在受试样机上的应力量值或频次的试验。

注1：加速试验通常包括定性加速试验和定量加速试验。

注2: 定性加速试验通常是以充分、快速暴露受试样机缺陷或故障为目的, 最典型的是可靠性强化试验、高加速寿命 (HALT) /高加速应力筛选 (HASS)。

注3: 定量加速试验通常是以定量、快速评价可靠性指标要求为目的, 包括加速寿命试验 (以故障为判据) 和加速退化试验 (以性能退化为判据) 两类。

注4: 加速试验通常可通过时间压缩、事件压缩 (加快动作频次)、应力增强 (增大环境应力和工作载荷) 方式实现。

3.4

基准条件 reference condition

受试样机正常存储、使用、试验的环境条件, 是相对于加速试验条件而言的, 是计算确定加速因子的基准。

3.5

加速试验条件 accelerated test condition

为缩短试验时间而显著地增大施加在受试样机上的应力量值。

注1: 该类应力往往是受试样机正常存储、使用、试验的典型应力, 也是在现实当中引起受试样机失效的主要 (敏感) 应力。

注2: 该应力量值不宜过大, 过大引起受试样机失效机理变化; 该应力量值不宜过小, 过小使得加速因子过小, 难以达到显著缩短试验时间的目的。

(改写GB/T 34986-2017, 定义3.1.2)

3.6

加速因子 accelerated factor

受试样机在加速试验条件与基准条件下的失效分布特征(或可靠性水平)比值。

注1: 对于有加速效果的试验, 其加速因子大于1。

注2: 加速因子通常可用两组受试样机分别在基准条件下与在加速应力条件下达到相同的累积失效概率所需的时间比值来表示。

3.7

加速模型 accelerated model

加速试验采用的数学模型, 通常为反映速率或寿命特征值与应力的函数关系, 反映模型相关的应力对寿命的影响。

3.8

激活能 activation energy, E_a

用于评估由绝对温度改变而产生加速能力的经验系数。

注1: 激活能以eV/K为单位;

注2: 激活能是晶体中晶格点阵上的原子运动到另一点阵或间隙位置时所需的能量, 是反映温度应力对受试样机寿命影响的一种指标。对物质而言, 它从正常的未失效状态向失效状态转换的过程中存在着势垒。这就是激活能。激活能越小, 失效的物理过程越容易进行。激活能越大, 加速系数越大, 越容易被加速而失效。

注3：在加速试验中，随着失效判定依据的定义不同，激活能的统计意义有所不同，在加速寿命试验过程中，当对试验对象的所有故障合并统计时，求解的加速模型中的激活能是该对象的激活能；当对试验对象的失效机理进行分类统计时，求解的加速模型中的激活能是该对象的该类失效机理的激活能。在加速退化试验中，当对试验对象的某个性能参数退化进行预测判定时，求解的加速模型的激活能是该对象的该参数的激活能。

4 符号和意义

A	用于寿命应力模型中的常数(如 Arrhenius 模型、Eyring 模型或 Peck 温-湿模型)
E_a	元器件的激活能（单位为 eV）
AF	加速因子
CL	置信度
MTTF	平均失效时间，即平均寿命
K	玻尔兹曼常数($8.617 \times 10^{-5} \text{eV/K}$)
$R(t)$	可靠性函数，也就是到时间 t 时的残存率或到时间 t 时未失效受试样机的百分比
RH	百分比相对湿度
RH_s	应力条件下的百分比相对湿度
RH_u	正常使用条件下的百分比相对湿度
S	施加的应力(Eyring 模型中)
T	用小时表示的失效前工作时间
t_s	应力温度 T_s 下的失效前时间
t_u	正常使用温度下 T_u 下的失效前时间
T	用 K 表示的温度
T_s	应力温度
T_u	正常使用温度

5 通用要求

5.1 试验和测试标准大气条件

除非另有规定，所有试验和测试应在以下标准大气条件下进行：

- a) 温度：15℃~35℃；
- b) 相对湿度（RH）：25%~75%，适用时；
- c) 大气压力：86kPa~106kPa。

在研制单位准许的情况下，可在更恶劣的自然气候环境下开展可靠性试验。

5.2 试验条件允许误差

试验条件允许误差应符合以下规定：

- a) 温度：温度稳定后 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ；
- b) 相对湿度：湿度稳定后 $\pm 5\%$ ；
- c) 振动
 - 1) 正弦：幅值： $\pm 10\%$ ；加速度： $\pm 10\%$ ；频率： $\pm 2\%$ （低于 25Hz 时 $\pm 0.5\text{Hz}$ ）；
 - 2) 随机：功率谱密度 $\pm 3\text{dB}$ ；频率： $\pm 2\%$ （低于 25Hz 时 $\pm 0.5\text{Hz}$ ）。

5.3 试验设备要求

- a) 试验箱（室）应配有辅助仪器，辅助仪器应能保持和监控试件周围的空气高温条件（适用时还有湿度）；
- b) 除装备的平台环境已证明使用其他速度是合理的，并且要防止在试件中产生与实际不符的热传递外，试件附近的风速应不超过 1.7m/s；
- c) 应能连续记录试验箱内温度的测量值，必要时还应能连续记录试件的温度测量值。

5.4 测试仪器、仪表要求

所有测试仪器、仪表应满足以下要求：

- a) 均应经计量、校准、检定合格并在有效期内；
- b) 其精度至少应为被测参数容差的三分之一；
- c) 能适应测试的环境条件要求。

对个别特殊仪器仪表，无计量校准条件和方法的，可通过对比测试，证明其测试的准确性。

5.5 一般的试验程序

5.5.1 预处理（必要时）

在试验开始之前，为了消除或部分消除受试样机过去所受的影响。需要对受试样机进行预处理，如果有要求时，预处理作为试验程序的第一步骤。

5.5.2 初始检测

在进行任何试验之前，受试样机应在试验的标准大气条件下（特殊要求除外）进行电性能、机械性能和其它性能测量以及外观检查，并记录检测数据。

5.5.3 受试样机在试验设备中的安装

若无其它规定，受试样机在试验设备中应模拟实际使用状态安装、连接，并按需要附加测试设备。实际工作中使用而在试验中不用的插头、外罩及检测板应保持原状。实际工作中加以保护的而在试验中无需的机械或电气连接处应加以适当的覆盖。

对于要求控制温度的试验，受试样机应当在正常试验的标准大气条件下进行安装，并应尽可能安装在试验设备中央，如果规定受试样机在试验过程中需要工作，则安装时应考虑满足工作要求。

被安装的受试样机之间，以及受试样机与试验箱壁、箱底及箱顶之间应当有适当间隔，以便空气能自由循环。

受试样机安装完后，如需要，应工作并进行检查，不应发生因安装不当而造成故障。

5.5.4 试验

给受试样机施加规定的环境条件，以便确定这种条件对受试样机的影响。

5.5.5 试验中检测

在试验期间要求受试样机工作时，为将其试验时的性能与初始检测的性能进行比较，应进行中间检测。试验可能分成若干个检测周期均应进行中间检测，每个周期的中间检测均应在规定的环境条件下进行。

5.5.6 恢复（必要时）

在试验之后，最终检测之前，为使受试样机的性能稳定，应在正常试验的标准大气条件下（特殊要求除外）进行恢复处理。

5.5.7 试验后检测

恢复期结束后，受试样机应按设备有关标准或技术文件规定进行电性能、机械性能和其它性能测量以及外观检查，并与初始检测数据进行比较。

5.5.8 合格判据

当受试样机发生下列任何一种情况时，则被认为不合格：

- a) 性能参数指标的偏离值超出了受试样机有关标准和技术文件规定的允许极限；
- b) 结构上的损坏影响了受试样机功能；
- c) 不能满足安全要求，或出现危及安全的故障；
- d) 受试样机出现某些变化（例如：某一部分被腐蚀）使其不能满足维修要求；
- e) 设备有关标准和技术文件规定的其它判据。

5.5.9 试验中断处理

- a) 容差范围内的中断：当中断期间试验条件没有超出允许误差范围时，中断时间应作为总试验持续时间的一部分。
- b) 欠试验条件中断：当试验条件低于允许误差下限时，应从低于试验条件的点重新达到预先规定的试验条件，恢复试验，一直进行到完成预定的试验周期。
- c) 过试验条件中断：当出现过度的试验条件时，最好停止此试验，用新的受试样机重做。如果过试验条件不会直接造成影响受试样机特性的损坏，或者此受试样机可以修复，则可按以上 b) 条处理。如果以后试验中出现受试样机失效，则应认为此试验结果无效。

5.5.10 试验记录及报告

试验记录应包括：

- a) 试验时间、地点和参试人员；
- b) 试验设备、测量仪器仪表的名称、型号和计量结果；
- c) 试验时的大气条件；
- d) 所采用的试验顺序和试验程序；
- e) 受试样机性能的检测数据等，以便为试验报告提供完整、准确的原始数据；
- f) 试验记录应有参加试验人员签字；
- g) 试验报告应对试验的全过程进行概述，并给出试验的结论。

6 加速试验模型方法

6.1 加速因子的度量和获取方法

6.1.1 加速因子的度量方法

加速因子度量方法通常有：

- a) 在达到相同累积失效概率时正常试验所用的时间与加速试验所用的时间的比值；
- b) 在加速试验条件的反应速率与在常规条件下的反应速率的比值。

6.1.2 加速因子的获得方法

根据加速因子的度量方法，通常获得加速因子的方法有：

- a) 通过多组应力下开展加速试验，获得各组应力下的可靠性特征值，通过应力强度模型外推，可获得加速因子。
- b) 在已知基准条件、加速条件的前提下，通过利用经验模型和经验参数，获得单一对象的加速因子，甚至通过建模获得更高层次电气系统的加速因子。

6.2 寿命分布模型与加速因子

6.2.1 指数分布模型与加速因子

指数分布是一种广泛应用于电气系统的寿命分布模型。

单参数指数分布可靠度函数见式（1）：

$$R(t) = e^{-\lambda t} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

λ ——失效率。

$R(t)$ —— t 时刻电气系统的可靠度。

电气系统对应可靠度值为 R 时的时间 t 见式（2）：

$$\begin{aligned} t &= \frac{-\ln R}{\lambda} \dots\dots\dots (2) \\ &= \frac{-\ln(1-F)}{\lambda} \end{aligned}$$

式中：

F ——累积失效概率， $F = 1 - R$ 。

假设在正常应力水平 S_u 下的元器件的失效分布函数为 $F_0(t_u)$ ，失效率为 λ_u ， t_u 为失效概率达到 F_0 的时间。设该单一个体在加速应力水平 S_a 下的失效分布函数为 $F_a(t_a)$ ，失效率为 λ_a ， t_a 为失效概率达到 F_0 的时间。

根据加速因子的定义，则电气系统加速因子 AF 见式（3）：

$$AF = \frac{t_u}{t_a} \dots\dots\dots(3)$$

$$= \frac{\lambda_a}{\lambda_u}$$

式中:

λ_u ——常规试验或使用条件下, 电气系统的失效率;

λ_a ——加速试验条件下, 产品的失效率;

AF ——加速试验条件相对常规试验或使用条件的加速因子。

如已知产品常规条件下的失效率 λ_u 和加速因子 AF , 则可得出其在加速应力条件 S_a 下的失效率 λ_a 见式 (4):

$$\lambda_a = AF \cdot \lambda_u \dots\dots\dots(4)$$

某整机寿命服从指数分布, 由 m 类元器件构成, 第 i 类元器件有 N_i 个、失效率为 λ_i 、加速因子为 AF_i , 根据基本可靠性模型, 则该整机的失效率 λ_s 可表示见式 (5):

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^m N_i \lambda_i \dots\dots\dots(5)$$

式中:

m ——整机包含元器件种类数;

N_i ——第 i 类元器件的数量, $i=1, 2, \dots, m$;

λ_i ——第 i 类元器件的失效率;

λ_s ——整机的失效率。

结合加速因子定义和整机基本可靠性模型, 可得出整机加速因子 AF_s 见式 (6):

$$AF_s = \frac{\lambda_{sa}}{\lambda_{su}}$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^m N_i AF_i \lambda_{iu}}{\sum_{i=1}^m N_i \lambda_{iu}} \dots\dots\dots(6)$$

式中:

λ_{iu} ——第 i 类元器件在常规试验与使用条件下的失效率;

AF_i ——在加速试验条件下相对常规使用或试验条件下，第*i*类元器件的加速因子；

AF_s ——在加速试验条件下相对常规使用或试验条件下，整机的加速因子；

由此可见，针对电气设备，已知组成元器件种类、数量、激活能的前提下，即可建模获得电气设备整机的加速因子。

6.2.2 威布尔分布模型

威布尔分布是可靠性研究中常用的一种比较复杂的分布，广泛应用于复杂机电产品的寿命分布模型。威布尔分布的可靠度函数见式（7）：

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^m\right] \dots\dots\dots(7)$$

式中：

η ——为尺度参数；

m ——为形状参数；

γ ——为位置参数。

当位置参数 $\gamma=0$ 时，两参数威布尔分布的可靠度函数见式（8）：

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right] \dots\dots\dots(8)$$

假设在正常应力水平 S_u 下的元器件的失效分布函数为 $F_0(t_u)$ ，形状参数为 m ，尺度参数为 η_u ， t_u 为失效概率达到 F_0 的时间。设该单一个体在加速应力水平 S_a 下的失效分布函数为 $F_a(t_a)$ ，形状参数保持为 m ，尺度参数为 η_a ， t_a 为失效概率达到 F_0 的时间。

根据加速因子的定义，则该单一个体加速因子 AF 见式（9）：

$$AF = \frac{t_u}{t_a} = \frac{\eta_a}{\eta_u} \dots\dots\dots(9)$$

式中：

η_a ——为加速试验条件下的尺度参数；

η_u ——为常规使用或试验条件下的尺度参数。

6.2.3 其他寿命分布模型

寿命分布模型还有对数正态分布、伽玛分布、极值分布等分布模型。

6.3 应力加速模型及加速因子

6.3.1 高温加速模型

高温加速模型通常称为阿伦尼斯模型，该模型假设反应速率是绝对温度的指数函数。

反应速率可用式（10）表示：

$$u_l = Ae^{-\frac{E_a}{k_B \times T_l}} \tag{10}$$

式中：

μ_l —— 在温度应力为 T_l 条件下的反应速率；

A —— 频数因子，常量（与温度无关）；

E_a —— 激活能（eV）

K_B —— 波尔兹曼常数（ $8.6174 \times 10^{-5} \text{eV/K}$ ）

T_l —— 在应力水平 l 下的绝对温度（K）

加速因子是两种不同试验环境下的反应速率之比见式（11）：

$$AF = \frac{u_a}{u_u} = \frac{A \times e^{-\frac{E_a}{k_B \cdot T_a}}}{A \times e^{-\frac{E_a}{k_B \cdot T_u}}} = e^{\left[\frac{E_a}{k_B} \times \left(\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_a} \right) \right]} \tag{11}$$

式中：

T_u —— 在常规使用或试验环境条件下的绝对温度；

T_a —— 在加速试验环境条件下的绝对温度。

加速应力条件下的失效率见式（12）：

$$\lambda(T_a) = \lambda(T_u) \cdot AF = \lambda(T_u) \times e^{\left[\frac{E_a}{k_B} \times \left(\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_a} \right) \right]} \tag{12}$$

一个使用阿伦尼斯模型的例子是，在25℃（298K）时的失效率为 1×10^{-8} /h，确定试验中的失效率 λ ，该失效率是绝对温度 T 的函数，如图1所示。

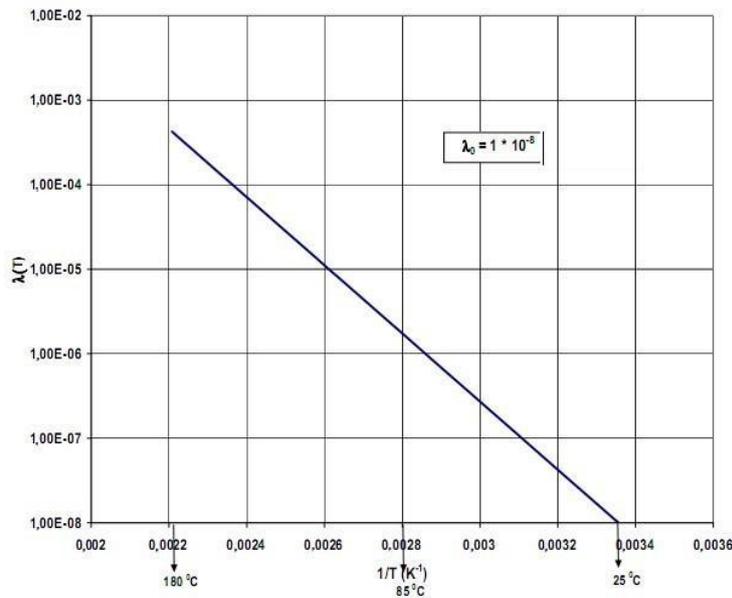


图1 阿伦尼斯反应模型的线形图

6.3.2 温湿度加速模型及加速因子

温湿度加速模型假设反应速率是绝对温度的指数函数与相对湿度的幂函数乘积。
反应速率可用式（13）表示：

$$u_i = Ae^{-\frac{Ea}{KT_i}} \cdot RH_i^n \dots\dots\dots (13)$$

式中：

- μ_i —— 在温度应力为 T (K)和相对湿度应力为 RH %条件下的反应速率；
- Ea —— 激活能，以 eV 为单位，经验数值在 0.6~2.51 之间；
- A —— 频数因子；
- K_B —— 波尔兹曼常数（ 8.6174×10^{-5} eV / k）；
- T_i —— 绝对温度（K）；
- RH_i —— 相对湿度（%）；
- n —— 幂指数。

可推导出加速因子见式（14）：

$$AF = e^{\frac{Ea}{K_B} \left(\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_a} \right)} \cdot \left(\frac{RH_a}{RH_u} \right)^n \dots\dots\dots (14)$$

式中：

- Ea —— 激活能，以 eV 为单位，经验数值在 0.6~2.51 之间；
- A —— 频数因子；
- K_B —— 波尔兹曼常数（ 8.6174×10^{-5} eV / k）；
- T_u —— 基准条件下的绝对温度（K）；
- T_a —— 加速条件下的绝对温度（K）；
- RH_u —— 基准条件下的相对湿度（%）；
- RH_a —— 加速条件下的相对湿度（%）；
- n —— 幂指数。

6.3.3 逆幂加速模型及加速因子

逆幂模型是指寿命与应力是逆幂函数关系，逆幂模型适用于：

- a) 动态应力，例如，冲击（脉冲型）和振动（正弦及随机）；
- b) 电应力，如电压、电流、功率等；
- c) 气候应力，例如，温度循环、温度变化（温度冲击及热循环）、湿度、太阳辐射，及其它存

在累积损伤的气候应力。

逆幂模型很容易理解和使用，对各种失效分布具有很好的适应性。其参数可使用极大似然估计的方法来确定。

在逆幂律模型中与时间相关的产品可靠性特征参数（如特征寿命、平均寿命、平均故障前时间等）可以用式（15）表示如下：

$$L(S) = C^{-1} \times S^{-m} \dots\dots\dots (15)$$

式中：

- S —— 应力大小；
- C —— 待定常数（ $c > 0$ ）；
- m —— 与应力相关的待定参数；
- $L(s)$ —— 寿命或规定的时间周期（为应力的函数）。

考虑到寿命与反应速率是反比关系，因此寿命逆幂模型，采用反应速率表征时变成幂指数模型。逆幂模型的加速因子见式（16）：

$$AF = \frac{u_a}{u_u} = \frac{L_u}{L_a} = \frac{C^{-1} \times S_u^{-m}}{C^{-1} \times S_a^{-m}} = \left(\frac{S_a}{S_u}\right)^m \dots\dots\dots (16)$$

式中：

- AF —— 指逆幂模型中的应力加速；
- L_u —— 实际环境条件下的寿命特征值（与实际使用应力相关的函数）；
- L_a —— 加速试验条件下的寿命特征值（与试验应力相关的函数）；
- S_u —— 实际环境条件下应力值；
- S_a —— 加速试验条件下的应力值；
- m —— 逆幂指数。

6.3.4 其他加速模型

其他加速模型包括适用于温度循环、随机振动、正弦振动、温度-振动、温循-振动、温湿度-振动等典型应力试验的加速模型。

7 高温加速老化试验

7.1 确定基准条件

对于直接暴露于室内大气中的电气系统，温度基准可确定为20℃~30℃，必要时相对湿度可确定为50%RH~75%RH。

对于在机箱内部的电气系统，温度基准可确定为30℃~60℃，可根据电气设备的局部环境温度实测结果确定基准温度。

可根据电气设备的局部环境温度实测结果确定基准温度。

7.2 选择加速应力

采用一组加速试验，推荐的温度应力为+55~+80℃。

温度应力可结合物料耐温范围调研和可靠性强化试验更加合理给出。

7.3 建模评估加速因子

根据电气设备组成元器件种类、数量及其每类元器件的基本失效率和激活能参数，可建立电气设备整机加速因子模型见式（17）：

$$AF_s = \frac{\sum_{i=1}^m N_i \lambda_{iu} AF_i}{\sum_{i=1}^m N_i \lambda_{iu}} \dots\dots\dots (17)$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^m N_i \lambda_{iu} e^{\frac{Ea_i}{K} (\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_a})}}{\sum_{i=1}^m N_i \lambda_{iu}}$$

式中：

N_i —— 第 i 类元器件的数量， $i=1, 2, \dots, m$ ；

λ_{iu} —— 第 i 类元器件的失效率；

Ea_i —— 第 i 类元器件的激活能，以 eV 为单位，经验数值在 0.6~2.51 之间；

K_B —— 波尔兹曼常数（ $8.6174 \times 10^{-5} \text{ eV/k}$ ）；

T_u —— 常规使用或试验条件下的绝对温度（K）；

T_a —— 加速试验条件下的绝对温度（K）；

λ_s —— 整机的失效率。

其中，元器件的种类和数量由研发方确定；每类元器件的失效率优先由已有产品的可靠性统计分析结果导出，其次可参照标准数据；激活能优先采用已积累的加速试验数据统计分析的结果，其次可采用标准、文献调查的结果并进行综合。

7.4 受试样机数量

当验证指标 $MTBF \geq x \cdot 1000 \text{ h}$ 时，允许受试样机数量 n 与 x 之间的关系见式（18）：

$$n = \begin{cases} 1 \sim 2x & \text{当 } 1 \leq x \leq 9 \\ 1 \sim x & \text{当 } 10 \leq x \leq 99 \\ 1 \sim \frac{x}{2} & \text{当 } 100 \leq x \leq 999 \\ 1 \sim \frac{x}{4} & \text{当 } 1000 \leq x \leq 9999 \end{cases} \quad (18)$$

式中：

n ——受试样机数量；

x ——验证指标（MTBF）的千时倍数。

7.5 检测项目

试验前、后，在实验室环境条件下对受试样机进行全面的性能检查和性能测试。

试验中，至少应对受试样机的主要功能性能进行检测，不能检测的项目应给予说明。

7.6 检测周期与试验周期

当受试样机可在试验时同步进行在线自动检测时，检测周期根据在线检测系统特性确定，试验周期确定为100小时，在一个试验周期中每10小时抽取1次在线自动检测数据，每100h试验后恢复到常温进行1次检测。

当电气设备必须取出试验箱进行离线检测时，检测周期规定为100h，检测时间控制在20h内完成，试验周期为120h。

7.7 故障定义与分类

7.7.1 故障定义

调制器的受试样机在加速试验中出现下列任一情况判为故障：

- a) 受试样机不能工作或部分功能丧失；
- b) 受试样机参数检测结果超出规范（规定）允许范围；
- c) 受试样机的机械、结构部件或元器件发生的松动、破裂、断裂或损坏。

7.7.2 故障后果分类

将故障按照后果分成两类：

- a) 严重故障——直接导致停机的事件，导致无法开机、无法正常运行、无法实现基本和主要功能、技术指标超差至不可接受，可能导致严重后果或不符合安全规定，而必须停机处理的故障；
- b) 一般故障——样机出现故障报警或征兆、部分功能丧失、技术指标超标，但样机未停机、无需停机、可正常运行、可继续正常使用，且可完成基本和主要功能。

7.7.3 故障性质分类

在可靠性验证中出现的所有故障，分为关联故障和非关联故障。

非关联故障是指已经证实未按规定的条件使用而引起的故障，主要包括：

- a) 试验设备、测试仪器及配套条件保障不满足要求引起的故障；
- b) 施加了不符合规定的试验应力或确定为过应力引起的故障；
- c) 对受试样机搬运、操作、检测、维修不当引起的人为故障；
- d) 由独立故障引发的从属故障、超出寿命规定使用发生的故障等。

除非关联故障以外的故障均为关联故障，关联故障主要是指因受试样机本身存在的问题而引发的故障，结合寿命评估试验的特点，关联故障主要包括：

- a) 受试样机设计、工艺和装配不当引起的故障；

- b) 零部件和元器件设计、制造和选用不当引起的故障；
- c) 受试样机出现明显的老化、腐蚀、磨损等耗损性故障。

7.8 单台样机有效加速试验时间统计

在进行可靠性验证时，允许将各个样机的有效加速试验时间累加作为总有效加速试验时间。单台样机有效加速时间是其可确定的正常运行时间之和，也可为其总加速时间减去无效加速时间，统计原则如下：

- a) 如样机在试验期间未发生故障，则整个试验时间均为有效加速时间；
- b) 如样机在试验期间发生故障，则带故障运行的时间不能作为有效加速时间；
- c) 当验证中测试发现某个受试样机故障时，无效加速时间为发生故障的受试样机上次检测结果正常的对应检测结束时刻至本次检测发现故障对应检测开始时刻之间的时间。

8 可靠性指标验证方法

8.1 确定可靠性指标要求

在开展加速试验前，应明确受试样机的可靠性指标，受试样机的典型可靠性指标是平均故障间隔时间（MTBF）。

8.2 选择统计方案

开展加速试验验证受试样机的可靠性指标，应先选择统计方案，以确定试验时间，推荐采用定时截尾统计方案，受试方可综合质量状况、风险承受能力、试验成本代价等因素，选取统计方案，见表1。

表1 定时截尾试验方案

方案 序号	方案的特征			截尾时间 T (θ_1 倍数 m)	判决故障数 r	
	风险标称值/%		鉴别比 $D = \theta_0 / \theta_1$		拒收 (\geq)	接收 (\leq)
	α	β				
1	30	30	3.37	1.20	1	0
2	30	30	2.22	2.44	2	1
3	30	30	2.00	3.70	3	2
4	30	30	1.72	4.76	4	3
5	30	30	1.62	5.89	5	4
6	20	20	7.22	1.61	1	0
7	20	20	3.63	2.99	2	1
8	20	20	3.00	4.30	3	2
9	20	20	2.79	4.28	3	2
10	20	20	2.40	5.51	4	3
11	20	20	2.17	6.72	5	4
12	10	10	21.85	2.30	1	0
13	10	10	7.32	3.89	2	1
14	10	10	4.83	5.32	3	2

15	10	10	3.83	6.68	4	3
16	10	10	3.29	7.99	5	4

8.3 确定加速试验时间

8.3.1 确定加速试验总时间

根据表1选择的统计方案给出的m值，可求得加速试验总时间 t_{ta} 要求见式（19）：

$$t_{ta} = \frac{m \cdot \theta_1}{AF} \dots\dots\dots (19)$$

式中：

m —— 统计方案中试验时间与最低可接受值 θ_1 倍数关系；

θ_1 —— 平均故障间隔时间（MTBF）最低可接受值；

Ea_i —— 第*i*类元器件的激活能，以eV为单位，经验数值在0.6~2.51之间；

AF —— 加速试验条件下的加速系数；

t_{ta} —— 加速试验条件下所有样机所需的总台时。

8.3.2 确定单台加速试验时间

由确定受试产品数量（n）和加速因子AF后，单台加速试验时间 t_{sa} 可从式（20）。求得：

$$t_{sa} = \frac{t_{ta}}{n} = \frac{m \cdot \theta_1}{n \cdot AF} \dots\dots\dots (20)$$

式中：

n —— 投入试验的样机数量；

t_{sa} —— 加速试验条件下计划的单台样机试验时间。

8.4 折算等效试验时间

8.4.1 样机等效试验时间折算

在必要时间点和故障时刻点统计有效加速试验时间后，可根据加速因子和加速试验实际开展时间 \hat{t}_{ta} ，计算出（故障）对应时刻的等效试验时间 \hat{t}_{te} ，（故障）对应时刻的等效试验时间 \hat{t}_{te} 等于加速试验时间 \hat{t}_{ta} 与加速因子的乘积见式（21）：

$$\hat{t}_{tek} = AF \cdot \hat{t}_{iak} \dots\dots\dots (21)$$

式中：

- \hat{t}_{tak} —— 加速试验条件下第 k 台样机发生故障时刻该样机累积的有效加速试验台时；
- \hat{t}_{cek} —— 截至该样机发生故障时刻累积的有效加速试验时间的等效（常规使用或试验条件下的）试验时间。

8.4.2 试验结束时所有样机等效试验时间折算

当试验结束时，所有样机累积的等效试验时间计算见式（22）：

$$\hat{t}_{ie} = AF \sum_{k=1}^n \hat{t}_{tak} \dots\dots\dots (22)$$

式中：

- \hat{t}_{ca} —— 在加速试验条件下，第 k 台样机试验结束时累积的有效加速试验台时；
- \hat{t}_{ce} —— 所有样机累积的等效（常规使用或试验条件下的）试验时间。

8.5 确定判定故障统计原则

判定故障数的统计原则如下：

- a) 发生一次关联、严重故障，记为 1 次判定故障；
- b) 发生的相同的关联严重故障，应分开各计 1 次判定故障；
- c) 每发生 10 个关联一般故障，记为 1 次判定故障。

根据故障性质及后果分类，总的判定故障数为：

$$r=r_1+r_2/10\dots\dots\dots(23)$$

式中：

- r——判定故障数；
- r_1 ——后果严重关联故障数；
- r_2 ——后果一般关联故障数。

8.6 可靠性指标评估

利用对应时刻的累积等效试验时间 \hat{t}_{ie} 、累积责任故障数 r、置信下限 C（通常取 $C=1-\beta$ ），可评估出加速试验对应的平均故障间隔时间最低可接受值。

当按照定时截尾统计试验方案试验通过时，平均故障间隔时间的最低可接受值置信下限见式（24）：

$$\theta_{L,C} = \frac{2\hat{t}_{ie}}{\chi_{\beta}^2(2r+2)} \dots\dots\dots (24)$$

式中：

- \hat{t}_{ie} —— 所有样机累积的等效（常规使用或试验条件下的）试验时间；
- r —— 所有样机累积的判定故障数；
- β —— 使用方风险；
- C —— 置信度， $C = 1 - \beta$ 。

当定时截尾统计试验方案试验不通过时,平均故障间隔时间的最低可接受值置信下限见式(25):

$$\theta_{L,C} = \frac{2\hat{t}_{te}}{\chi_{\beta}^2(2r)} \dots\dots\dots (25)$$

式中:

\hat{t}_{te}	——	所有样机累积的等效(常规使用或试验条件下的)试验时间;
r	——	所有样机累积的判定故障数;
β	——	使用方风险;
C	——	置信度, $C = 1 - \beta$ 。

附录 A

(资料性附录)

加速建模与加速因子计算

A.1 基本加速因子模型

加速系数是产品在正常应力水平下达到某一失效概率所经历的试验时间，与产品在加速应力水平下达到相同失效概率所经历的试验时间之比。那么对于服从指数分布的电子产品，失效率率为常数，其失效概率函数见式 (A.1)：

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (\text{A.1})$$

假设在正常应力水平 S_0 下的某元器件的失效分布函数为 $F_0(t)$ ，失效率为 λ_0 ， $t_{p,0}$ 为失效概率达到 p 的时间，即 $F_0(t_{p,0}) = p$ ，又设该元器件在加速应力水平 S_j 下的失效分布函数为 $F_j(t)$ ，失效率为 λ_j ， $t_{p,j}$ 为失效概率达到 p 的时间，即 $F_j(t_{p,j}) = p$ 。根据加速系数 τ_1 的定义，则：

$$F_0(t_{p,0}) = F_j(t_{p,j}) \quad (\text{A.2})$$

$$1 - e^{-\lambda_0 t_{p,0}} = 1 - e^{-\lambda_j t_{p,j}} \quad (\text{A.3})$$

$$\tau_1 = \frac{t_{p,0}}{t_{p,j}} = \frac{\lambda_j}{\lambda_0} \quad (\text{A.4})$$

而根据基本可靠性的串联模型，各个单元的失效率等于包含的所有元器件失效率之和，产品的失效率等于各个单元的失效率之和见式 (A.5)：

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (\text{A.5})$$

因此，设备级高温保持加速因子见式 (A.6)

$$AF = \frac{t_{p,0}}{t_{p,j}} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i'}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} = \frac{\lambda_s'}{\lambda_s} \quad (\text{A.6})$$

式中：

λ_i ——在正常应力水平下第 i 个组成单元的失效率；

λ_i' ——在加速应力水平下第 i 个组成单元的失效率；

λ_s ——在正常应力水平下产品的失效率；

λ'_s ——在加速应力水平下产品的失效率；

n ——组成产品的元器件数。

A.2 元器件基本失效率和激活能

某板卡元器件的基本失效率和激活能见表A.1。其他元器件基本失效率参看GJB299C，激活能和参数A查看GB/T 7289。

表 A.1 LED 产品主要元器件失效率

元器件	基本失效率 (10 ⁻⁶ /h)	激活能 E_{a1} (eV)	激活能 E_{a2} (eV)	A
LED	0.004264	0.65	/	/
整流二极管	0.073	0.4	/	/
电容	0.00888	0.5	1.59	0.999
电阻	0.0021	0.16	0.44	0.873
压敏电阻	0.04	0.16	0.44	0.873
变压器	0.0276	0.06	1.13	0.996
电感	0.0076	0.06	1.13	0.996
光电耦合器	0.0104	0.5	/	/

A.3 整机加速因子计算

根据GB/T 7289，75℃和85℃下各类元器件相对于25℃的加速因子 π_T 如式、A.7-A.8。所示：

$$\pi_T = \exp \left[\frac{E_a}{k_0} \left(\frac{1}{25+273} - \frac{1}{T+273} \right) \right] \quad (\text{A.7})$$

$$\pi_T = \frac{A \times e^{E_{a1} \times z} + (1-A) \times e^{E_{a2} \times z}}{A \times e^{E_{a1} \times z_{ref}} + (1-A) \times e^{E_{a2} \times z_{ref}}} \quad (\text{A.8})$$

辅助变量 $z = \frac{1}{k_0} \left(\frac{1}{313} - \frac{1}{T+273} \right)$, $z_{ref} = \frac{1}{k_0} \left(\frac{1}{313} - \frac{1}{25+273} \right)$, (单位为 1/eV) 其中 T 为 70℃

或 85℃。

其中LED、整流二极管、光电耦合器适用于式A.7,电容、电阻、敏压电阻、变压器和电感适用于式A.8。

查表A.1中的数据带入A.7、A.8式，即可得到各类元器件的加速因子，将它与正常应力（25℃）下基本失效率相乘，可以得到加速条件下的失效率。

将这些失效率信息带入A.6式可以得到整机的加速因子。

A.4 整机加速因子计算举例

某电气系统元器件清单见表A.2，现根据上面的方法计算其加速系数。

表 A.2 某型某电气系统元器件清单与失效率预计值

序号	元器件	数量（个）	单个元器件的失效率（10 ⁻⁶ /h）	计算过程	25℃失效率（10 ⁻⁶ /h）
1	LED	4	0.004264	0.004264×4	0.017056
2	整流二极管	1	0.073	0.0073×1	0.073
3	电容	7	0.00888	0.00888×7	0.06216
4	电阻	14	0.0021	0.0021×14	0.0294
5	压敏电阻	4	0.04	0.04×4	0.16
6	变压器	7	0.0276	0.0276×7	0.1932
7	光电耦合器	3	0.0076	0.0076×3	0.0228
8	合计	40	/	/	0.557616

如在 85℃下开展试验，则各器件的失效率如下。

LED 器件在 85℃下的失效率：

$$\begin{aligned}\lambda &= \lambda_b \times \pi_T = 0.004264 \times \exp \left[\frac{Ea}{k_0} \left(\frac{1}{25+273} - \frac{1}{85+273} \right) \right] \\ &= 0.004264 \times \exp \left[\frac{0.65}{8.6171 \times 10^{-5}} \left(\frac{1}{25+273} - \frac{1}{85+273} \right) \right] \\ &= 0.004264 \times 69.6 = 0.29664\end{aligned}$$

整流二极管在 85℃下的失效率：

$$\begin{aligned}\lambda &= \lambda_b \times \pi_T = 0.073 \times \exp \left[\frac{Ea}{k_0} \left(\frac{1}{25+273} - \frac{1}{85+273} \right) \right] \\ &= 0.073 \times \exp \left[\frac{0.4}{8.6171 \times 10^{-5}} \left(\frac{1}{25+273} - \frac{1}{85+273} \right) \right] \\ &= 0.073 \times 13.6 = 0.99339\end{aligned}$$

电容在 85℃下的失效率：

$$\lambda = \lambda_b \times \pi_T = 0.00888 \times \frac{A \times e^{Ea_1 \times z} + (1-A) \times e^{Ea_2 \times z}}{A \times e^{Ea_1 \times z_{ref}} + (1-A) \times e^{Ea_2 \times z_{ref}}}$$

$$= 0.00888 \times \frac{0.999 \times e^{0.5 \times 4.66} + (1 - 0.999) \times e^{1.59 \times 4.66}}{0.999 \times e^{0.5 \times (-1.866)} + (1 - 0.999) \times e^{1.59 \times (-1.866)}}$$

$$= 0.00888 \times 30.338 = 0.2694$$

电阻在 85°C 下的失效率:

$$\lambda = \lambda_b \times \pi_T = 0.0021 \times \frac{A \times e^{Ea_1 \times z} + (1 - A) \times e^{Ea_2 \times z}}{A \times e^{Ea_1 \times z_{ref}} + (1 - A) \times e^{Ea_2 \times z_{ref}}}$$

$$= 0.0021 \times \frac{0.873 \times e^{0.16 \times 4.66} + (1 - 0.873) \times e^{0.44 \times 4.66}}{0.873 \times e^{0.16 \times (-1.866)} + (1 - 0.873) \times e^{0.44 \times (-1.866)}}$$

$$= 0.0021 \times 4.01 = 0.0084$$

压敏电阻在 85°C 下的失效率:

$$\lambda = \lambda_b \times \pi_T = 0.04 \times \frac{A \times e^{Ea_1 \times z} + (1 - A) \times e^{Ea_2 \times z}}{A \times e^{Ea_1 \times z_{ref}} + (1 - A) \times e^{Ea_2 \times z_{ref}}}$$

$$= 0.04 \times \frac{0.873 \times e^{0.16 \times 4.66} + (1 - 0.873) \times e^{0.44 \times 4.66}}{0.873 \times e^{0.16 \times (-1.866)} + (1 - 0.873) \times e^{0.44 \times (-1.866)}}$$

$$= 0.04 \times 4.01 = 0.161$$

变压器在 85°C 下的失效率:

$$\lambda = \lambda_b \times \pi_T = 0.0276 \times \frac{A \times e^{Ea_1 \times z} + (1 - A) \times e^{Ea_2 \times z}}{A \times e^{Ea_1 \times z_{ref}} + (1 - A) \times e^{Ea_2 \times z_{ref}}}$$

$$= 0.00276 \times \frac{0.966 \times e^{0.06 \times 4.66} + (1 - 0.966) \times e^{1.13 \times 4.66}}{0.966 \times e^{0.06 \times (-1.866)} + (1 - 0.966) \times e^{1.13 \times (-1.866)}}$$

$$= 0.00276 \times 2.348 = 0.06481$$

光电耦合器在 85°C 下的失效率:

$$\lambda = \lambda_b \times \pi_T = 0.0104 \times \exp \left[\frac{Ea}{k_0} \left(\frac{1}{25 + 273} - \frac{1}{85 + 273} \right) \right]$$

$$= 0.0104 \times \exp \left[\frac{0.5}{8.6171 \times 10^{-5}} \left(\frac{1}{25 + 273} - \frac{1}{85 + 273} \right) \right]$$

$$= 0.0104 \times 26.1 = 0.2718$$

根据以上的计算结果, 可以计算 85°C 下该型产品的失效率, 计算过程见表 A.3。

表 A.3 改型产品 85℃下失效率预计值

序号	元器件	数量 (个)	单个器件的失效率 (10 ⁻⁶ /h)	计算过程	85℃失效率 (10 ⁻⁶ /h)
1	LED	4	0.2966	0.2966×4	1.186579
2	整流二极管	1	0.9933	0.9933×1	0.993389
3	电容	7	0.2694	0.2694×7	1.885812
4	电阻	14	0.0084	0.0084×14	0.118152
5	压敏电阻	4	0.160	0.160×4	0.643002
6	变压器	7	0.0648	0.0648×7	0.453654
7	光电耦合器	3	0.2718	0.2718×3	0.815456
8	合计	40	/	/	6.096044

则该型产品 85℃下相对于 25℃的加速因子为:

AF=6.096/0.558=10.92 倍。