

# 基于加速寿命试验理论的履带式起重机 用控制器验收方法

熊国华<sup>1</sup>, 孙权<sup>2</sup>, 任广沛<sup>1</sup>, 冯静<sup>2</sup>, 刘芳<sup>2</sup>

(1. 徐工机械建设机械分公司, 江苏 徐州 221000;  
2. 湖南银杏可靠性技术研究有限公司, 长沙 410100)

**摘要:** **目的** 提高履带式起重机用控制器可靠性验收试验的效率和效果。**方法** 以履带式起重机用控制器为研究对象, 在分析控制器实际使用环境条件和 FMEA 的基础上, 利用加速寿命试验理论对控制器的可靠性验收试验方案进行设计, 对温度和湿度进行加速, 振动和电压保持典型值, 利用高温高湿加速系数模型, 得到改进后的验收试验定时截尾方案。**结果** 给出了三综合(通电)条件下的高风险定时截尾方案, 包括高温高湿加速条件下控制器可靠性验收试验的应力剖面、加速系数、试验方案参数以及基于试验结果的 MTBF 估计方法等。高温高湿加速系数为 142.14, 生产方风险  $\alpha$  和使用方风险  $\beta$  均为 30%, 鉴别比  $d=2$ , 最低可接受值为 30 000 h, 高温高湿加速条件下累积试验时间为 780.92 h, 判决接收故障数为 2。**结论** 该方法能够在较短的时间内获得控制器可靠性特征量的估计值, 并作出接收或拒收的验收决策。加速后验收试验时间从 111 000 h 缩短到 780.92 h, 能够满足控制器实际验收需要。

**关键词:** 履带式起重机; 控制器; 可靠性验收试验; 加速寿命试验; 加速系数

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2019.03.018

**中图分类号:** TB114.3 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2019)03-0088-04

## Method of Reliability Acceptance for Crawler Crane's Controller Based on Accelerated Life Test Theory

XIONG Guo-hua<sup>1</sup>, SUN Quan<sup>2</sup>, REN Guang-pei<sup>1</sup>, FENG Jing<sup>2</sup>, LIU Fang<sup>2</sup>

(1. XuGong Mechanical Construction Machinery Branch, Xuzhou 221000, China; 2. Hunan Ginkgo Reliability Technology Research Institute Co., Ltd, Changsha 410100, China)

**ABSTRACT: Objective** To improve efficiency and effectiveness of reliability acceptance test for controller of crawler crane. **Methods** With the controller of crawler crane as the object of study, accelerated life test theory was used to design the reliability acceptance test scheme based on operational environment analysis and failure mode effect analysis (FMEA) of controller. By accelerating temperature and relative humidity, and keeping typical vibration and voltage level, an improved time-censoring scheme was obtained based on high temperature and humidity accelerated factors. **Results** This paper presented an acceptance test scheme of triple comprehensive test (on voltage), including stress profile, accelerated coefficient and parameters and the methods of estimating MTBF based on test results. The integrated accelerated factor of high temperature and humidity was 142.14. Both of producer's risk  $\alpha$  and user's risk  $\beta$  were 30%. The discrimination ratio  $d$  was 2. The minimum acceptable value of MTBF was 30 000 h. The accumulated test time under accelerated condition was 780.92 h. The permissible number of failures was 2. **Conclusion** This method can obtain the estimated values of reliability indicators and make the judgment of accep-

tance or rejection in a short period of test time. After acceleration, the acceptance test time of controller is decreased from 111 000 h to 780.92 h which can meet the actual acceptance requirements.

**KEY WORDS:** crawler crane; controller; reliability acceptance test; accelerated life test; accelerated factor

履带式起重机用控制器是起重量力限位器系统的重要组成部分,可以根据整车的工况参数及逻辑关系对车辆进行动作控制,具有超载限制、起升高度限制、臂架起落角度限制等相关控制功能。该控制器一旦出现故障,将导致车辆无动作或误动作,对起重机安全作业造成严重影响。因此,该控制器是影响履带式起重机可靠性和安全性的关键功能产品。根据现场反馈的故障数据,目前该控制器的平均故障间隔时间(MTBF)约为 5500 h。从提升整车可靠性角度考虑,需要对控制器提出更高的可靠性要求。这就亟需一套用于验证控制器是否满足规定可靠性要求的方法。目前,主要的验证方法是可靠性验收试验。可靠性验收试验是为了验证产品能否达到规定的可靠性要求而进行的一种统计试验<sup>[1]</sup>。传统的可靠性验收试验是在模拟产品实际使用环境条件下进行的,具有试验时间长、成本高等缺点<sup>[2]</sup>。如果采用传统的可靠性验收试验方法,即使采用高风险验收方案(生产方风险  $\alpha=30\%$ ,使用方风险  $\beta=30\%$ ,鉴别比  $d=3$ ),现有的控制器可靠性水平下验收试验时间也需要 6000 h 以上,这样长的时间是控制器实际验收无法承受的。在这种情况下,可以通过提高试验应力严酷度的方式缩短验收试验时间。

加速寿命试验是指在合理的工程及统计假设的基础上,利用与产品物理失效规律相关的统计模型,如温度加速的 Arrhenius 模型和 Eyring 模型、电应力加速的逆幂律模型、温度循环的 Coffin-Manson 模型、温湿加速的 Peck 模型等,对超出产品正常应力水平的加速环境下获得的可靠性信息进行转换,以获得产品在正常应力条件下可靠性特征值的数值估计的一种试验方法<sup>[3-4]</sup>。目前加速寿命试验应力施加方式分为恒定应力、步进应力和序进应力三种。虽然步进和序进的加速效率更高一些,但试验结果的统计分析算法复杂,增大了两者工程应用的难度。目前工程中广泛采用恒定应力加速试验。加速寿命试验理论被广泛应用于导弹定寿延寿,武器装备、航空航天、民用机电产品等诸多领域的长寿命预测和评估。俄罗斯在导弹延寿中,采用加速寿命试验只用 6 个月即获得了导弹贮存寿命 10 年的结论,美国民兵导弹在温度 85 °C、相对湿度 85%的环境下进行加速试验,为导弹提供了 48 个月的寿命预报<sup>[5]</sup>。目前大部分产品可靠性验收仍采用 GJB 899A 所提供的基于产品正常综合环境应力的验收试验方法,而加速寿命试验理论在产品可靠性验收中的应用研究主要基于某单一应力加速模型。例如刘博等<sup>[6]</sup>将基于温度加速的 Arrhenius 模型的加速

寿命试验用于教学触摸一体机的可靠性验收中,石镇山等<sup>[7]</sup>使用 Arrhenius 温度加速模型改进了水质分析仪的可靠性验收方案。

文中在控制器实际使用环境和可靠性环境影响因素分析的基础上,利用温湿加速寿命试验技术对控制器可靠性验收试验方案进行设计,提出了一套经济、有效且可行的控制器可靠性验收方法。该方法不仅能够较短的时间内作出接收或拒收的验收决策判定,还能够获得控制器可靠性特征量的估计值。

## 1 控制器的使用环境条件

该控制器主要由集成电路板、连接器及保护壳体构成,其中可靠性关键部件为控制器集成电路板。由控制器 FMEA 分析结果可知,控制器的主要故障模式有输出芯片损坏、电源芯片损坏、TVS 管被击穿、元器件开路、短路、电源输出异常等。对上述故障模式进行进一步的机理分析,得到影响控制器可靠性的主要环境因素包括温度、湿度、振动、工作电压等。控制器工作环境条件见表 1,其中典型值为控制器正常工作条件下环境载荷谱中最常见的量值水平。

表 1 控制器工作环境条件

条件	影响因素	额定工作范围	典型值
气候	工作温度	-20~85 °C	25 °C
	相对湿度	25%~90%	70%
机械	振动	频率: 0.2~30 Hz	1~2 Hz
		均方根加速度: 0.01g~1g	0.5g
电应力	电压	10~36V DC	24 V

## 2 加速试验条件

### 2.1 施加的应力种类和量级

根据控制器工作环境条件,确定加速后的验收试验施加的应力种类和量级,见表 2。选取温度、湿度

表 2 验收试验的应力种类和量级

序号	应力	量级
1	温度	85 °C
2	相对湿度	85%
3	振动	频率: 1~2 Hz 均方根加速度: 0.5 g
4	电压	24 V DC

两种应力进行加速，随机振动和电压应力取典型值。验收试验采取定时截尾方案，其试验应力剖面如图1所示。

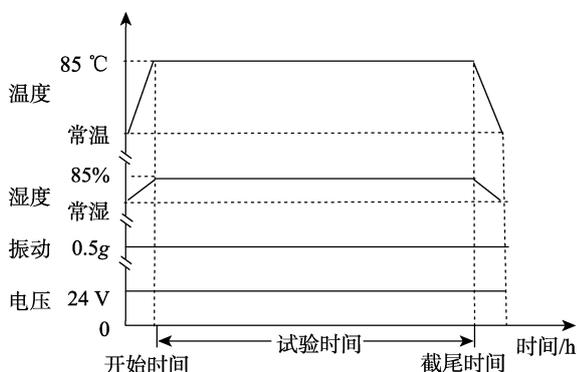


图1 试验应力剖面

## 2.2 试验设备

根据试验应力剖面，验收试验设备选用温湿振三综合试验箱。除此以外，还包括可编程控制器、稳压电源、模拟盒等试验设备。试验过程中对试样进行通电测试，测试项目覆盖该型起重机控制器的所有功能项目，如联机功能检测、开关量输入输出设置、开关量输入输出端口检测、CAN 通讯检测等。

## 2.3 加速系数

在确定了试验施加的应力种类和量级后，可以获得加速条件下可靠性验收试验的加速系数。根据多应力加速模型<sup>[8-10]</sup>，高温高湿环境下验收试验的加速系数为：

$$AF = T_{AF} \times H_{AF} \quad (1)$$

式中： $T_{AF}$  为温度加速系数； $H_{AF}$  为湿度加速系数。

温度加速系数主要取决于激活能 ( $E_a$ )，根据 Arrhenius 模型 (IEC61709-5: 2011)<sup>[11]</sup>得到：

$$T_{AF} = \exp \left[ \frac{E_a}{K} \left( \frac{1}{T_{normal}} - \frac{1}{T_{stress}} \right) \right] \quad (2)$$

式中： $T_{normal}$  为正常工作条件下的绝对温度值； $T_{stress}$  为高温高湿加速条件的绝对温度值，该温度必须小于电路板上所有元器件的结温； $K$  为波尔兹曼常数， $K=8.617 \times 10^{-5}$  eV/K； $E_a$  为激活能，根据国际标准和控制器自身特点，选取经验值  $E_a=0.7$  eV。

由此，可计算温度加速系数为  $T_{AF} \approx 96.4$ 。

湿度的加速系数由 Hallberg 和 Peck 模型 (IEC

62059-31-1-2008)<sup>[12-13]</sup>得到：

$$H_{AF} = \left( \frac{RH_{stress}}{RH_{normal}} \right)^n \quad (3)$$

式中： $RH_{stress}$  为高湿高温加速条件的相对湿度 (85%)； $RH_{normal}$  为正常工作条件的相对湿度 (70%)； $n$  为湿度的加速率常数，一般介于 2~3 之间，这里取保守值 2。

由此，湿度加速系数  $H_{AF} \approx 1.47$ 。根据式 (1)，可得高温高湿加速条件下可靠性验收试验的加速系数  $AF \approx 142.14$ 。

高温高湿加速条件下可靠性验收试验的累积试验时间为：

$$t_{stress} = t_{normal} / AF \quad (4)$$

式中： $t_{stress}$  为高温高湿加速条件下验收试验的累积试验时间； $t_{normal}$  为典型工作环境条件下 (温度为 25℃，相对湿度为 70%) 验收试验的累积试验时间。

## 3 可靠性验收试验方案

验收试验样本量的选取一般为每批次产品总数的 10%，至少为 2，最多不超过 20 个<sup>[14]</sup>，文中选取样本量  $n=3$ 。综合考虑试验时间、费用以及可行性，验收试验采用短时高风险的定时截尾方案，生产方风险  $\alpha$  和使用方风险  $\beta$  均为 30%，鉴别比  $d=2$ 。

控制器属于典型电子产品，可认为其寿命服从指数分布，选取 MTBF 为控制器可靠性验收指标。从整车可靠性水平出发，综合考虑控制器的复杂度、环境严酷度、技术成熟度以及当前可靠性水平等因素，确定控制器的 MTBF 最低可接受值为 10 年，即 30 000 h (1 年工作 300 天，一天工作 10 h)，即  $\theta_1=30 000$  h。由此可得，MTBF 的规定值  $\theta_0=d \cdot \theta_1=60 000$  h。

根据 GJB 899A—2009 高风险定时截尾方案<sup>[14]</sup>，得到的验收方案见表 3。当  $\alpha=30\%$ ， $\beta=30\%$ ， $d=2$  时，正常工作条件下验收试验的累积试验时间  $t_{normal}=3.7$ ， $\theta_1=111 000$  h。由式 (4) 可得，高温高湿加速条件下验收试验的累积试验时间  $t_{stress}=780.92$  h。接收数为 2，拒收数为 3，即在试验期间出现 3 个或 3 个以上故障即拒收，否则接收。

综合考虑试验时间和可投入的试样数，可以采用定时有替换或定时无替换两种截尾方案，如图 3 所示。定时有替换试验截尾时间  $t_0=t_{stress}/n=260$  h，无替换截尾时间  $t_0 \geq 260$  h，但需要准备的控制器试

表 3 控制器可靠性验收试验定时截尾方案

方案号	指定		实际		鉴别比 $d$	累积试验时间	判决故障数	
	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$			接收	拒收
20	30%	30%	28.3%	28.5%	2.0	$3.7\theta_1$	$\leq 2$	$\geq 3$

样较少。

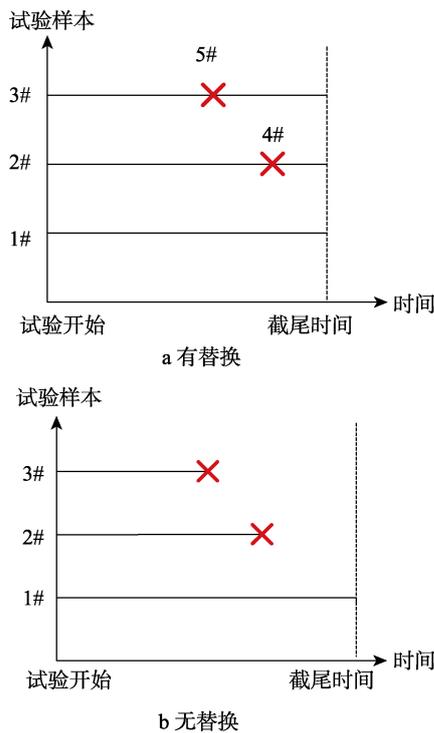


图 2 两种定时截尾方案

## 4 基于试验结果的控制器 MTBF 评估方法

无论验收试验的结论是接收还是拒收，基于验收试验后所观测到的样本值，利用数理统计和加速系数可以得到控制器 MTBF 的评估结论。

1) MTBF 点估计法。由于控制器寿命服从指数分布，则高温高湿加速条件下控制器 MTBF 点估计值为：

$$\hat{\theta}_{\text{stress}} = T / r = \begin{cases} \left[ \sum_{i=1}^r t_i + (n-r)t_0 \right] / r & \text{无替换} \\ nt_0 / r & \text{有替换} \end{cases} \quad (5)$$

式中： $T$  为高温高湿加速条件下验收试验的总试验时间； $r$  为试验期间发生的故障数； $t_i$  为第  $i$  个样品故障前的工作时间。

因此，正常工作条件下控制器 MTBF 点估计值为：

$$\hat{\theta}_{\text{normal}} = \hat{\theta}_{\text{stress}} \cdot AF \quad (6)$$

2) MTBF 置信下限估计法。选取  $1 - \beta = 70\%$  为单边置信区间的置信度，根据判决结果，查 GJB 899A—2009 表 A.12 或 A.13，得到 MTBF 的单边置信下限系数  $\theta_L(1 - \beta, r)$ ，则高温高湿加速条件下控制器 MTBF 单边置信下限为：

$$\hat{\theta}_{L,\text{stress}} = (1 - \beta, r) \hat{\theta}_{\text{stress}} \quad (7)$$

因此，正常工作条件下控制器 MTBF 单边置信下限为：

$$\hat{\theta}_{L,\text{normal}} = \hat{\theta}_{L,\text{stress}} \cdot AF \quad (8)$$

3) 无失效情况下 MTBF 估计方法。若验收试验过程中未出现故障，则按照无失效情况下可靠性估计方法<sup>[15]</sup>进行估计，置信度  $1 - \beta = 70\%$  的 MTBF 的高温高湿加速条件下控制器 MTBF 单边置信下限为：

$$\hat{\theta}_{L,\text{stress}} = -nt_0 / \ln \beta \quad (9)$$

由式 (8) 可得无失效情况时正常工作条件下控制器 MTBF 单边置信下限  $\hat{\theta}_{L,\text{normal}}$ 。

## 5 结语

文中利用恒定加速寿命试验理论对传统的可靠性验收试验方法进行改进，改进后的验收方法可以将控制器验收试验时间从 111 000 h 缩短为 780.92 h，大大缩短了试验时间，降低了试验费用。该方法也可以应用于履带式起重机其他电气产品的可靠性验收或鉴定试验方案的制定，具有重要的现实意义。

### 参考文献：

- [1] 胡湘洪, 高军, 李劲. 可靠性试验[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.
- [2] 邱述斌, 王春晖, 李晓钢. 可靠性验收试验的方法与途径[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2013, 31(S1): 24-28.
- [3] NELSON W. Accelerated Testing: Statistical Methods, Test Plans, and Data Analysis[M]. New York: Wiley, 1990.
- [4] 张志华. 加速寿命试验及其统计分析[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2002.
- [5] 冯志刚, 方昌华, 李静. 国外导弹加速老化试验现状分析[J]. 导弹与航天运载技术, 2008(2): 30-34.
- [6] 刘博, 白琳. 加速寿命试验在教学触摸一体机可靠性验收试验中的应用[J]. 环境技术, 2017(5): 25-27.
- [7] 石镇山, 李春霞, 吴亚平. 水质分析仪可靠性验收试验[J]. 分析仪器, 2014(6): 76-79.
- [8] 李梅. 考虑温湿度的可靠性快速评估方案选择优化和分析[J]. 环境技术, 2018(1): 9-12.
- [9] 康劲松, 景诗毅, 张焯. 多应力加速模型及加速系数研究[J]. 机电一体化, 2009(8): 32-34.
- [10] 李晓阳, 姜同敏. 加速寿命试验中多应力加速模型综述[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(5): 828-831.
- [11] IEC 61709-5—2011, Electric Components-Reliability-Reference conditions for Failure Rates and Stress Models for Conversion[S].
- [12] HALLBERG O, PECK D S. Recent Humidity Accelerations, a Base for Testing Standards[J]. Quality and Reliability Engineering International, 1991(7): 169-180.
- [13] IEC 62059-31-1—2008, Electricity Metering Equipment-dependability—Part 31-1: Accelerated Reliability Testing—Elevated Temperature and Humidity[S].
- [14] GJB 899A—2009, 可靠性鉴定和验收试验[S].
- [15] 陈家鼎, 孙万龙, 李补喜. 关于无失效数据情形下的置信限[J]. 应用数学学报, 1995, 18(1): 90-100.