

# 数控机床用户现场可靠性定时截尾实验的研究

赵迎珍

(西安航空职业技术学院 西安 710089)

**摘要:**以国产数控机床为研究对象,根据所采集的可靠性实验数据,采用用户现场可靠性定时截尾实验方法进行数控机床可靠性评估。阐述了机床用户现场可靠性评估流程与方法;首先选择适当的可靠性模型;其次选择模型参数的估计方法;最后针对所选模型及参数估计结果完成拟合优度检验。结合该流程给出了具体实例,对数控机床用户现场定时截尾实验故障信息进行了未考虑工况差异可靠性评估,并获得了机床的可靠性水平。

**关键词:**用户现场;可靠性;定时截尾试验;评估

**中图分类号:** TG659    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 46050

## Research on user site reliability timing truncation test of CNC machine

Zhao Yingzhen

(Xi'an Aeronautical Polytechnic Institute, Xi'an 710089, China)

**Abstract:** Taking the domestic CNC machine tools as the research object, the reliability evaluation of NC machine tools was carried out by using the user site reliability timing truncation test method, based on the collected reliability test data. The process and method of reliability evaluation for machine tool users was elaborated; Firstly, the appropriate reliability model was chosen; Secondly, the estimation method of the model parameters was selected; Finally, the goodness of fit test was completed according to the selected model and parameter estimation results. Combined with the process, the specific example was given, and the reliability of the machine tool was evaluated without considering the difference of the operating conditions, and the reliability level of the machine tool was obtained.

**Keywords:** user site; reliability; fixed time truncated test; evaluation

### 0 引言

众所周知,批量生产的通用数控机床的用户遍及各个行业与地区,同一规格型号的机床承担的加工任务各不相同,所处环境也相差较大。在可靠性评估时,若仅考虑故障信息,而忽略其工况和环境影响,会致使可靠性评估结果具有较大的差异。目前数控机床可靠性建模方法主要是基于故障信息的建模,尚未考虑数控机床所处工况对其可靠性的影响。研究表明,同型号产品处于不同的工况条件下,产品表现出的可靠性水平有很大不同。基于此,本文在未考虑数控机床工况条件下,采用用户现场可靠性定时截尾实验的方法,通过建立准确的可靠性模型,并最终提高了可靠性评估精度。

### 1 可靠性模型选择

#### 1) 指数分布

指数分布一般适用于电子产品的可靠性,其概率密度函数如式(1):

$$f(t) = \lambda \exp(-\lambda t) \quad t > 0 \quad (1)$$

式中: $\lambda$ 为失效率; $t$ 为故障间隔时间。

其中 $\lambda$ 为与时间无关的常数,并且指数分布拥有无记忆性的特点。

#### 2) 威布尔分布

威布尔分布是由最薄弱环节模型以及串联模型推导出的,是目前常用的寿命模型之一,特别适合于复杂机械产品的寿命描述<sup>[1-2]</sup>。

$$f(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right] \quad t > 0 \quad (2)$$

式中： $m$  为形状参数； $\eta$  为尺度参数； $t$  为故障间隔时间。

其故障率函数为：

$$\lambda(t) = \frac{m}{\eta} \left( \frac{t}{\eta} \right)^{m-1} \quad (3)$$

其可靠度函数为：

$$R(t) = \exp \left[ - \left( \frac{t}{\eta} \right)^m \right] \quad (4)$$

其累积分布函数为：

$$F(t) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{t}{\eta} \right)^m \right] \quad (5)$$

### 3) 正态分布

正态分布通常用来分析由磨损导致故障出现的产品  
的可靠性分析，正态分布概率密度函数为：

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left[ - \frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2} \right] t > 0 \quad (6)$$

式中： $\mu$  为正态分布的均值； $\sigma$  为正态分布的方差。

正态分布故障率函数为：

$$\lambda(t) = \frac{e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}}}{\int_t^{\infty} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt} \quad (7)$$

### 4) 对数正态分布

对数正态分布可主要用作描述半导体等产品的可靠  
性以及部分机械产品的疲劳寿命，其概率密度函数<sup>[3-4]</sup>为：

$$f(t) = \frac{1}{st\sqrt{2\pi}} \exp \left[ - \frac{1}{2s^2} \left( \ln \frac{t}{t_{med}} \right)^2 \right] t \geq 0 \quad (8)$$

式中： $s$  为形状参数； $t_{med}$  为位置参数； $t$  为故障间隔工作  
时间。

## 2 模型参数估计

可靠性模型的参数估计法目前用的较多的是解析法，  
主要有以下 3 种<sup>[5-6]</sup>。

### 1) 最小二乘法

若样本数据为非线性关系，对其进行变量转换获得具  
有线性关系的  $(t_i, y_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ 。则可用式 (9) 拟合  
 $(t_i, y_i)$  的相互关系。

$$y = a_1 + c_1 t \quad (9)$$

由最小二乘法原理，可得式 (10)。

$$J = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a_1 - c_1 t_i)^2 \quad (10)$$

则对式 (10) 求偏导数，可得到式 (11)。

$$\frac{\partial J}{\partial a_1} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a_1 - c_1 t_i) = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial J}{\partial c_1} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a_1 - c_1 t_i) t_i = 0$$

求解式 (11) 即可得到  $a_1$  和  $c_1$ 。

### 2) 矩法

设总体概率密度函数为  $f(t)$ ，那么第  $j$  阶总体矩：

$$\mu_j(\theta) = \int_0^{\infty} t^j f(t) dt \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (12)$$

式中： $\theta$  为总体的未知参数。

由式 (12) 可知，一阶总体矩为总体的数学期望，二阶  
总体矩与方差呈线性关系。在不知道总体分布形式的情  
况下可以考虑采用该法，且样本容量越大，估计越准确。

### 3) 极大似然法

极大似然估计的基本思想：由于实验样本取自于总体，  
所以实验样本的特征在一定程度水平上能够反映总体的特  
征，即出现概率最大的事件在单次实验中最有可能发生<sup>[7]</sup>。

设总体的概率密度函数  $f(t, \theta)$ ，其中  $\theta$  是参数，样本  
的测量值是  $t_i$ ，那么极大似然函数为：

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^n f(t_i, \theta) \quad (13)$$

式 (13) 对  $\theta$  求偏导，并使其为 0，可得

$$\frac{\partial L(\theta)}{\partial \theta} = 0 \quad (14)$$

求解式 (14) 可得极大似然估计值。

## 3 拟合优度检验

经常采用的拟合优度检验有皮尔逊检验法 ( $\chi^2$  检验  
法) 和科尔莫哥洛夫检验 (K-S 检验法)<sup>[8-9]</sup>。皮尔逊检验  
法在大样本情况下较精确，在小样本情况检验结果略差。  
而 K-S 检验法一般适用于小样本情况，另外当总体分布一  
定时，K-S 检验法比  $\chi^2$  检验法的精确度更高。因此本文  
采用 K-S 法。

设 K-S 检验统计量：

$$D_{n,T} = \sup_{0 \leq t < T} |F_n(t) - F(t)| \quad (15)$$

式中： $T$  为定时截尾试验的试验周期； $F(t)$  为样本理论累  
积分布函数； $F_n(t)$  为样本经验分布累积分布函数。

则有：

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P\{\sqrt{n}D_{n,T} < d\} = G_T(d) \quad (16)$$

给定置信水平  $1 - \alpha$  下，查表<sup>[10]</sup>可得满足下式的  $D_{T,\alpha}$

$$P\{\sqrt{n}D_{n,T} \leq D_{T,\alpha}\} = G_T(D_{T,\alpha}) = 1 - \alpha \quad (17)$$

$D_{T,\alpha}$  即为 K-S 检验的临界值。

当由实验数据计算得到  $\sqrt{n}D_{n,T} > D_{T,\alpha}$  时，可判断假设  
不成立。当  $\sqrt{n}D_{n,T} < D_{T,\alpha}$  时，原假设分布成立。

## 4 MTBF

由此可得到数控机床的 MTBF：

$$MTBF = \eta \Gamma(1 + 1/m) \quad (18)$$

式中： $\Gamma(\cdot)$  为 Gamma 函数。

## 5 实例分析

于 2016 年对某型号加工中心在两家机床用户企业  
(共计 19 台) 进行了用户现场可靠性试验。根据故障信息  
采集方法采集到故障信息如下：437, 1 896, 340, 244, 249,  
898, 158, 67, 242, 107, 155, 1 717, 812, 724, 316, 99, 14, 19,  
1 430, 225, 773, 398, 29, 401, 1 148, 1 012, 733, 1 717, 773,  
348, 167, 1 232, 1 118, 633, 382, 321, 58, 37, 58, 592, 1 008,

365,1 144,1 430,373,659,234,175,190,151,18,530,  
349,526,368,174,1 148+,843+,445+,576+。

1)模型初选

由于机床故障间隔工作时间常服从二参数威布尔分布。因此初选模型时,先采用画 WPP 图的方法来初步估计和选择模型。

若为定时截尾数据,有两种方法可求得可靠度函数  $R(t)$ <sup>[11]</sup>。一种方法为 Johnson 方法;另一种方法为 Kaplan Meierey 方法。本文采用 Kaplan Meierey 方法。设有  $n$  个故障信息,并以增序排列。 $d_j$  是在时刻  $j_i$  时的故障信息个数,当为定时截尾数据时<sup>[12]</sup>,则  $d_j=0, n_j$  为包括  $j_i$  及  $j_i$  时刻之后的全部数据个数,则

$$n_j = n - j + 1 \quad (19)$$

可靠度函数为:

$$R(t) = \prod_{i=1}^i \left( \frac{n_i - d_i}{n_i} \right) \quad t_j < t < t_{j+1} \quad (20)$$

对可靠度函数式(4)连续求二次对数得:

$$\ln\{-\ln[R(t)]\} = m[\ln(t) - \ln(\eta)] \quad (21)$$

$$\text{令 } x = \ln(t), y = \ln\{-\ln[R(t)]\} \quad (22)$$

从而获得在  $x-y$  坐标系下的威布尔分布可靠度图形,亦称为 WPP 图(weibull plotting paper),该批数控机床的

WPP 如图 1 所示。

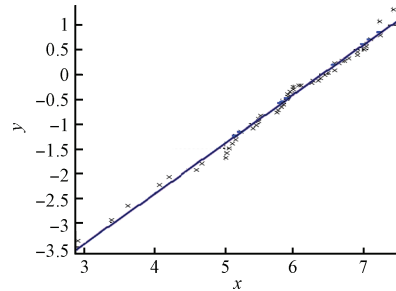


图 1 数控机床的 WPP 图

显然,在威布尔概率纸图上该批机床故障间隔工作时间近似一条直线,故先假定其服从二参数威布尔分布。通过极大似然估计分别得到形状与尺度参数,如表 1 所示。

表 1 数控机床的形状与尺度参数

$\eta$	$m$
644.831 0	1.146 8

采用 K-S 检验法<sup>[13]</sup>,实验周期设计为  $T=1\ 896\ \text{h}$ ,置信水平为  $1-\alpha=95\%$ ,计算过程如表 2 所示。

表 2 K-S 检验过程

故障时间	累积故障数	$F_n(t)$	$F(t_i)$	$ F_n(t_i) - F(t_i) $
1 0~237	17	0.238 14	0.271 9	0.016 24
2 238~474	32	0.542 37	0.504 71	0.037 67
3 475~711	37	0.627 12	0.673 24	-0.046 12
4 712~948	43	0.728 81	0.788 96	-0.060 15
5 949~1 185	48	0.813 56	0.865 93	-0.052 87
6 1 186~1 422	50	0.847 46	0.915 98	-0.685 2
7 1 423~1 659	50	0.847 46	0.947 95	-0.100 5
8 1 660~1 896	55	0.932 2	0.966 09	-0.035 38

由表 2 计算得到  $D_{n,T}=0.100\ 5$ ,则  $\sqrt{n}D_{n,T} = \sqrt{59} \times 0.100\ 5 = 0.773\ 6$ 。

表 1 中的值代入式(5)可得:

$$F(1\ 896) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{1\ 896}{644.810}\right)^{1.146\ 8}\right] = 0.968\ 1 \approx 1$$

则查表<sup>[14]</sup>得到  $D_{T,\alpha}=1.358\ 1$ 。

因而有  $\sqrt{n}D_{n,T}=0.7736 < D_{T,\alpha}=1.358\ 1$ 。

所以接受原假设,即该批机床服从参数为  $\eta = 644.831\ 0, m=1.146\ 8$  的二参数威布尔分布<sup>[15]</sup>。

则由式(4)、(5)、(2)、(3)可得到该批数控机床的可靠性、累积分布、概率密度和故障率函数,其函数图形如

图 2~5 所示。

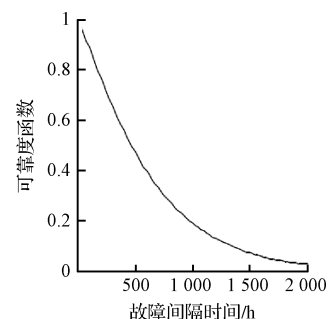
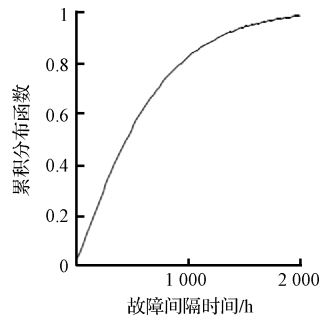
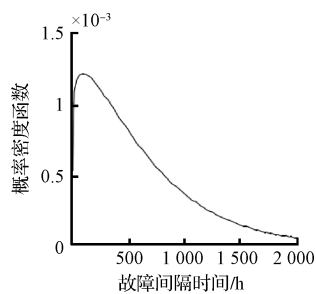
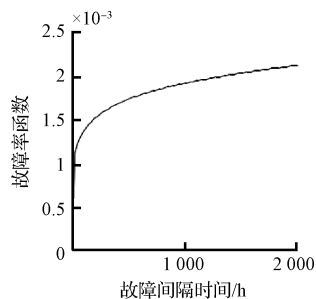


图 2 可靠性  $R(t)$

由式可得到机床的平均故障间隔时间:

图3 累积分布函数  $F(t)$ 图4 概率密度  $f(t)$ 图5 故障率  $\lambda(t)$ 

$$MTBF=614.1914 \text{ h}$$

## 6 结论

论文分析了数控机床用户现场定时截尾实验的一般步骤,并结合实例,对数控机床用户现场定时截尾实验故障信息进行了未考虑工况差异可靠性评估,得到该批机床服从  $\eta=644.8310$ ,  $m=1.1468$  二参数威布尔分布,其  $MTBF=614.1914 \text{ h}$ ,从而为数控机床考虑工况差异可靠性建模奠定了分析与对比基础。

## 参考文献

- [1] 谭波. 考虑环境温度的重型机床综合误差建模和补偿[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [2] 任丽娜, 芮执元, 刘军, 等. 数控机床最小维修的全寿命周期可靠性评估[J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(1): 19-23.
- [3] 王智明, 杨建国, 王国强, 等. 多台数控机床最小维修的可靠性评估[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(7): 127-130.
- [4] 陈卓, 陈柏金. 基于 ARM 和 CPLD 的嵌入式卷板机数控系统设计[J]. 电子测量技术, 2015, 38(7): 45-49.
- [5] 陈永进, 任震, 黄雯莹. 考虑天气变化的可靠性评估模型与分析[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(21): 17-21.
- [6] 孙志礼, 张义民. 数控机床性能分析及可靠性设计技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [7] 中国电子技术标准化研究所. 可靠性试验用表[M]. 北京: 国防工业出版社, 1987.
- [8] 朱孟兵. 基于小样本数据的数控机床 MTBF 评估[D]. 沈阳: 东北大学, 2012.
- [9] 周彤, 顾金良, 刘静宝, 等. 高速弹丸测量的激光触发装置可靠性分析[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(10): 16-20.
- [10] 姜同敏. 可靠性与寿命试验[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [11] 杨兆军, 陈传海, 陈菲, 等. 数控机床可靠性技术的研究进展[J]. 机械工程学报, 2013, 49(20): 130-139.
- [12] 张根保, 李冬英, 刘杰, 等. 面向不完全维修的数控机床可靠性评估[J]. 机械工程学报, 2013, 49(23): 136-141.
- [13] 邓超, 孙耀宗, 李嵘, 等. 基于隐 Markov 模型的重型数控机床健康状态评估[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(3): 552-558.
- [14] 张根保, 王立平. 国产数控机床可靠性技术综述[J]. 航空制造技术, 2013(5): 26-31.
- [15] 侯伟, 员三妮. 基于 DSP 的工业缝纫机数控改造[J]. 电子测量技术, 2016, 39(10): 135-139.

## 作者简介

赵迎珍, 1972 出生, 学士, 实验师, 主要研究方向为机械实验。

E-mail: xhyzyz666@163.com