

# 数控机床故障分析与可靠性评价技术的研究

祁阳, 巩亚东, 梁春游, 李鹏飞  
(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 针对传统数控机床可靠性建模时只考虑故障间隔时间而忽略故障性质的现象, 提出兼顾机械故障和电气故障的混合威布尔分布模型, 进而提高模型准确度. 利用最大似然法来确定混合威布尔分布模型参数, 用皮尔逊相关系数来确定数控机床各故障时间之间的关系. 并通过 K-S 方法对模型进行检验, 最后确定其符合混合威布尔分布, 并运用可靠性评定方法得出数控机床的平均无故障时间.

**关 键 词:** 机床故障分析; 混合威布尔分布; 极大似然法; 皮尔逊相关系数; 可靠性评价

**中图分类号:** TG 661      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2019)06-0831-04

## On the Fault Analysis and Reliability Evaluation of CNC Machine Tools

QI Yang, GONG Ya-dong, LIANG Chun-you, LI Peng-fei  
(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.  
Corresponding author: GONG Ya-dong, E-mail: gongyd@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** Aiming at the phenomenon that conventional CNC machine tools only consider the failure time interval but ignore the nature of faults, a mixed Weibull distribution model combining mechanical failures with electrical failures is proposed to further improve the accuracy of the model. The maximum likelihood method is used to determine the mixed Weibull distribution model parameters, and the Pearson correlation coefficient method is applied to determine the relationship of fault times for the CNC machine tool. The K-S method is used to verify the model and obtain the mixed Weibull distribution model at last, and the mean time between failures (MTBF) of the CNC machine tool is obtained by using the reliability evaluation method.

**Key words:** fault analysis of machine tools; mixed Weibull distribution; maximum likelihood method; Pearson correlation coefficient; reliability evaluation

数控机床是一种装有程序控制系统的自动化机床. 它综合了机械、自动化、计算机、测量等最新技术, 能够实现高效率、高精度和高度自动化的机械加工, 由机械结构、动力装置、数控系统、检测传感器、电气控制单元组成. 数控机床广泛应用于各类制造业企业, 其优良的性能以及自动化的特点被广大客户所认可, 优良的可靠性能够极大提高生产效率, 因而提高数控机床的可靠性成为数控机床企业的重中之重.

企业对数控机床的要求不仅是精度高、性能好, 还要求在使用过程中故障少、可靠性高, 否则一旦发生机器故障停机, 可能会耽误企业的生产周期, 停产一整天的损失可能高达数十万元. 因此, 研究数控机床的故障间隔周期的分布类型, 求出数控机床故障时间的可靠性规律<sup>[1]</sup>, 分析数控机床的失效模型, 进而提高产品的可靠性. 分析数控机床的失效原因和失效模式, 以及该失效模式在机床故障所在权重, 根据不同失效模式的权重来提高失效模型的准确性.

# 1 研究方法

## 1.1 研究方法简介

数控机床主要由机械结构和电气结构两部分组成,两部分都有各自的失效规律,但在进行可靠性建模时,常常忽略两种故障性质,并没有把这两种故障按不同的失效模式、失效原因分别统计,将实验数据用二参数威布尔分布模型来描述其故障规律时,得到的结果并不能准确描述数控机床. 本文提出采用混合威布尔模型来确定数控机床故障分布<sup>[2]</sup>,能够使模型更符合实际,更精准.

根据近一年 5 台数控机床的实际故障间隔时间研究其故障时间分布类型. 对数控机床的故障间隔时间,进行 K-S 方法的检验,确定故障间隔时间所服从的分布类型. 在确定其分布类型的基础上,用极大似然法和最小二乘法对二参数威布尔分布进行参数评估,根据评估结果和可靠性评定方法对数控机床故障间隔时间的运行规律进行分析,得出其平均无故障时间和分布曲线、概率密度曲线.

## 1.2 数据的采集

对 5 台相同型号的大型落地镗床进行故障数据统计,分别标记为 A,B,C,D,E,电气故障在数据后标出,将所得数据整理如表 1 所示.

表 1 数控机床故障时间					
Table 1 Failure time of CNC machine tools					
序号	A	B	C	D	E
1	41	19	28	34	36
2	52	35	51	55	36
3	109	35	59	95	107
4	134	68	78	135	79
5	176	77	103	162	118
6	240	81	118	248	116
7	264	122	197	234	121
8	366	121	246	347	273
9	295	224	247	411	360
10	279	181	339	300	650
11	402	158	722	400	467
12	478	269	573	521	531
13	432	381	435	430	355
14	360	265	593	459	503
15	600	362	678	690	609
16	768	370	651	722	782
17	960	133	1 120	1 088	1 138
18	1 272	532	1 316	1 323	1 180
19	1 320	765	1 459	1 078	1 162
20	1 410	1 005	2 227	3 228	1 907

电气故障发生的时间如下:19,34,35,36,51,52,103,116,122,134,162,247,269,347,360,366,370,432,521,531,532,573,678,690,768,782,1 316,1 320,1 323.

通过以上数据可以分别计算出数控机床故障率机械和电气的权重. 即  $p = 0.29$ , 则  $1 - p = 0.71$ . 分别求出每个子分布的参数,即可求出数控机床整体的概率密度函数与分布函数.

由于采集的每台机床故障数据不多,为了使参数估值更加准确,采用故障总时间法,即将 5 台数控机床的故障间隔时间统计到 1 台机床上,然后建立模型进行估值.

## 1.3 混合威布尔分布

实际计算时,通常假设数控机床在  $t = 0$  时便发生故障. 从而将三参数威布尔分布简化为二参数威布尔分布<sup>[3]</sup>,数控机床故障由机械和电气两部分组成,因此其混合二参数威布尔分布的概率密度函数与累积分布函数为

$$f(t) = p \frac{\beta_1}{\alpha_1} \left(\frac{t}{\alpha_1}\right)^{\beta_1-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha_1}\right)^{\beta_1}\right] + (1-p) \left[\frac{\beta_2}{\alpha_2} \left(\frac{t}{\alpha_2}\right)^{\beta_2-1} \exp\left(-\left(\frac{t}{\alpha_2}\right)^{\beta_2}\right)\right], \quad (1)$$

$$F(t) = p \left[1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{\alpha_1}\right)^{\beta_1}\right)\right] + (1-p) \left[1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{\alpha_2}\right)^{\beta_2}\right)\right]. \quad (2)$$

式中: $\beta > 0$  为形状参数; $\alpha > 0$  为尺度参数; $p$  为机械故障威布尔子分布的权重.

## 1.4 威布尔参数评估

研究数控机床故障发生规律,有利于企业有针对性地对机床进行维修来提高数控机床可靠性<sup>[4]</sup>. 因此通过建立故障分布模型来研究数控机床故障发生规律. 威布尔函数可以利用图解法、最小二乘法、遗传算法、极大似然法等进行参数求解. 通过对比发现,极大似然法能较精确计算出参数值. 极大似然法的基本思想是通过若干次试验,观察结果,利用结果推出参数大概值,选择的参数能够使样本出现在所求范围中的概率最大,并以这个参数作为未知参数值.

对数控机床故障进行分析,设  $f(x, \theta)$  为故障时间间隔的总体分布密度,因其是连续型随机变量,其中  $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m)$  是  $m$  个待估参数,根据随机变量  $X$  的  $n$  个观测数据可构造似然函数<sup>[5]</sup>:

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^n f(X_i; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m). \quad (3)$$

对式(1)两端求导,即可求得  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m$  的估计值.

$$\frac{\partial \ln L(\theta)}{\partial \theta_j} = 0, \quad j = 1, 2, \dots, m. \tag{4}$$

威布尔分布的概率密度函数为

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha} \cdot \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}\right]. \tag{5}$$

威布尔分布的对数似然函数为

$$\ln L(\theta) = n \ln\left(\frac{\beta}{\alpha}\right) + \sum_{i=1}^n \left(-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta} + (\beta - 1) \ln\left(\frac{t}{\alpha}\right)\right). \tag{6}$$

由于机床故障分为机械和电气两个部分,根据所采集的样本对其分别求解,得到  $\beta_1 = 1.038$ ,  $\alpha_1 = 430.037$ ,  $\beta_2 = 1.006$ ,  $\alpha_2 = 516.936$ . 尺度参数和形状参数的置信区间如表 2 所示.

表 2 区间估计结果  
Table 2 Interval estimation results

模型参数	置信区间
尺度参数 $\alpha_1$	[297.200 7, 622.246 2]
尺度参数 $\alpha_2$	[404.669 8, 660.348 9]
形状参数 $\beta_1$	[0.775 2, 1.389 4]
形状参数 $\beta_2$	[0.845 9, 1.197 5]

因此混合二参数威布尔分布的概率密度函数与分布函数可写为<sup>[6]</sup>

$$f(t) = \frac{29}{100} \times \frac{1.006}{430.037} \left(\frac{t}{430.037}\right)^{0.038} \times \exp\left[-\left(\frac{t}{430.037}\right)^{1.038}\right] + \frac{71}{100} \times \frac{1.006}{516.936} \times \left(\frac{t}{516.936}\right)^{0.006} \exp\left[-\left(\frac{t}{516.936}\right)^{1.006}\right], \tag{7}$$

$$F(t) = \frac{29}{100} \times \left(1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{430.037}\right)^{1.038}\right)\right) + \frac{71}{100} \times \left(1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{516.936}\right)^{1.006}\right)\right). \tag{8}$$

根据已求出的威布尔分布各参数结果,利用 MATLAB 进行分析,分别绘制概率密度函数与分布函数拟合曲线,如图 1,图 2 所示.

## 2 数控机床故障分析与检验

### 2.1 数控机床各次故障时间相关性研究

数控机床各故障时间间隔难以用确定的函数关系式进行描述,但可以用相关关系法对其进行解析. 相关关系是自变量变化,因变量也随之变化但数值是非确定性的,其可以分为完全相关、不完全相关、简单相关和复杂相关关系. 简单相关关系

可以用皮尔逊相关系数法进行计算,皮尔逊相关系数可以反映两个变量线性相关程度<sup>[7]</sup>. 相关系数用  $r$  表示,  $r$  描述的是两个变量间线性相关的强弱程度,  $r$  值越大表明相关性越强.

皮尔逊相关系数

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} = 0.848\ 1. \tag{9}$$

通过计算得出  $\bar{x} = 488.91$ ,  $\bar{y} = 0.496\ 5$ ,  $r_{xy} = 0.848\ 1$ , 说明  $x$  与  $y$  不是线性相关,但是具有极强相关性.

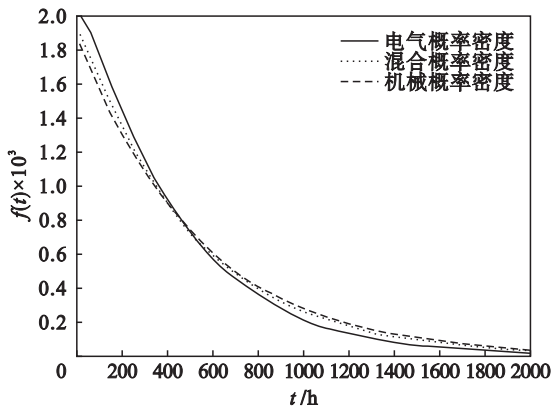


图 1 故障间隔时间概率密度函数  
Fig. 1 Probability density function of fault interval time

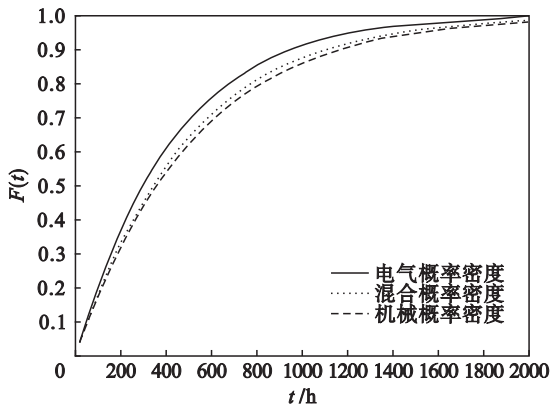


图 2 故障间隔时间分布函数  
Fig. 2 Fault interval time distribution function

## 3 威布尔混合模型拟合优度检验

拟合优度检验是用来检验一批分类数据所来自的总体的分布是否与某种理论分布相一致的统计方法<sup>[8]</sup>. 其中 K-S 检验方法具有适合小样本、检验结果的鲁棒性强等优点. 因此本文采用 K-S 检验法进行威布尔分布的假设检验.

先将  $n$  个试验数据按顺序从小到大依次排

列,然后根据威布尔分布函数计算相对应的  $F_0(t_i)$  和经验分布函数  $F_n(t_i)$  的值,算出两者差值的最大绝对值  $D_n$ . 将  $D_n$  与临界值  $D_{n,\alpha}$  进行比较,若满足  $D_n < D_{n,\alpha}$ ,则接受原假设,否则拒绝原假设.

$$D_n = \max |F_0(t_i) - F_n(t_i)| = \max \{d_i\} \leq D_{n,\alpha}. \quad (10)$$

式中:  $F_0(t_i)$  为原假设分布函数;  $F_n(t_i)$  为经验分布函数;  $D_{n,\alpha}$  为临界值.

$$d_i = \max \left\{ \left| F_0(t_i) - \frac{i-0.3}{n+0.4} \right| \right\}. \quad (11)$$

式中:  $i = 1, 2, \dots, 100; n = 100$ .

假设故障间隔时间服从威布尔分布,则

$$F_0(t_i) = \frac{29}{100} \times (1 - \exp(-(\frac{t}{2088.1})^{0.8})) + \frac{71}{100} \times (1 - \exp(-(\frac{t}{2704.4})^{0.8})). \quad (12)$$

根据以上公式可得  $D_n = 0.058517$ . 取显著性水平  $\alpha = 0.1$ , 由经验公式可得出:  $n = 100, D_{n,\alpha} = \frac{1.22}{\sqrt{n}} = 0.122$ . 由于  $D_n < D_{n,\alpha}$ , 因此认为  $F_0(t_i)$  模型正确.

## 4 可靠性分析

国产数控机床的平均无故障时间为<sup>[9]</sup>

$$\text{MTBF} = \int_0^{\infty} R(t) dt = p_1 \alpha_1 \Gamma(\frac{1}{\beta_1} + 1) + p_2 \alpha_2 \Gamma(\frac{1}{\beta_2} + 1) = 488.96. \quad (13)$$

由此可知,国产数控机床的 MTBF 为 488.96 h, 要提高国产数控机床的 MTBF, 就要提高概率密度极值点的数值.

MTBF 的区间估计是根据数据求得, 结果是一个置信区间, 这个区间以一定的概率包括未知参数 MTBF 的真值. 取置信水平为 90%, 这时的 MTBF 的双边置信区间为

$$\frac{2T}{\chi_{0.95}^2(2r+2)} < \theta < \frac{2T}{\chi_{0.05}^2(2r)}. \quad (14)$$

式中:  $r$  为故障发生次数;  $T$  为总试验时间.

应用 MATLAB 软件根据所得试验总时间进行计算. 可得置信水平为 90% 时, MTBF 的双边置信区间估计值为 [414.052, 581.071] h.

因为数控机床故障间隔时间分布服从二参数威布尔分布, 设备在  $t$  时的可靠性函数为<sup>[10]</sup>

$$R(t) = p_1 e^{-(\frac{t}{\alpha_1})^{\beta_1}} + p_2 e^{-(\frac{t}{\alpha_2})^{\beta_2}}. \quad (15)$$

机床在  $t$  时的故障率函数为

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{p_1 f_1(t) + p_2 f_2(t)}{p_1 R_1(t) + p_2 R_2(t)}. \quad (16)$$

## 5 结 论

通过对国产数控机床的发生故障间隔时间进行分析, 利用混合威布尔函数来确定其分布, 并通过极大似然法对该模型进行参数评估, 并应用 K-S 检验方法, 确定故障间隔时间服从该分布模型. 根据威布尔分布的可靠性评定方法, 计算出国产数控机床的 MTBF 为 489 h. 同时得到国产数控机床故障间隔时间累计分布曲线和概率密度曲线, 更加直观体现国产数控机床的可靠性和故障发生规律, 对提高国产数控机床的无故障运行具有极大的意义.

### 参考文献:

- [1] Zhong X. Reliability assessment of complex mechatronic systems using a modified nonparametric belief propagation algorithm [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2010, 95: 1174–1185.
- [2] Khaledi B E. Weibull distribution: some stochastic comparisons results [J]. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 2006, 136(9): 3121–3129.
- [3] Wingo D R. Parametric point estimation for a doubly-truncated Weibull distribution [J]. *Microelectronics Reliability*, 1988, 28(4): 613–617.
- [4] Yang Z J, Kan Y N, Chen F, et al. Bayesian reliability modeling and assessment solution for NC machine tools under small-sample data [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 28(6): 1229–1239.
- [5] Edimu M, Gaunt C T, Herman R. Using probability distribution functions in reliability analyses [J]. *Electric Power System Research*, 2011, 81: 915–921.
- [6] Ross R. Graphical methods for plotting and evaluating Weibull distributed data [C]//Proceedings of the 4th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. Brisbane, 1994: 250–253.
- [7] 裴峻峰, 郑庆元, 姜海一, 等. 离心式压缩机定期维修周期及可靠性研究 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2014, 38(6): 127–133.  
(Pei Jun-feng, Zheng Qing-yuan, Jiang Hai-yi, et al. Research on regular maintenance cycle and reliability for centrifugal compressors [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2014, 38(6): 127–133.)
- [8] Nagode M, Fajdiga M. An improved algorithm for parameter estimation suitable for mixed Weibull distributions [J]. *International Journal of Fatigue*, 2000, 22: 75–80.
- [9] Zhang T, Xie M. On the upper truncated Weibull distribution and its reliability implications [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2011, 96(1): 194–200.
- [10] Cheng K. Machining dynamics: fundamentals, applications and practices [M]. Berlin: Springer, 2008: 65–80.