

基于数控机床故障信息的可靠性模糊分配

张义民, 贾敬存, 黄贤振

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 提出一种基于用户反馈的数控机床故障信息的可靠性模糊分配方法. 通过对某机床厂的某系列数控机床故障记录数据进行统计整理, 分类得到 10 个子系统, 对故障信息进行分布模型优选、参数估计和皮尔逊 χ^2 法假设检验, 建立整机和各子系统的故障间隔时间的可靠度函数. 在分析影响机床故障间隔时间的 4 种因素基础上, 用熵权法求解权重进行加权, 引入模糊数学理论, 建立机床整机故障率的分配模型, 指导机床可靠性指标的再分配过程. 基于故障信息的这个方法更具实际应用性, 能较好地解决机床可靠性的再分配问题, 提高整机系统的可靠性水平.

关 键 词: 数控机床; 故障信息; 模糊数学; 熵权法; 可靠性分配

中图分类号: TP 114

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)02-0245-05

Reliability Allocation of CNC Machine Tools Based on Failure Information and Fuzzy Mathematics

ZHANG Yi-min, JIA Jing-cun, HUANG Xian-zhen

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.

Corresponding author: ZHANG Yi-min, professor, E-mail: zhangymneu@sohu.com)

Abstract: Based on the fuzzy mathematics and the failure information, a reliability allocation method for CNC machine tools was proposed. First, the fault record data of a type of CNC machine tools were sorted out, and the whole machine system was divided into ten subsystems. Then, the reliability functions for the whole system and the subsystems were established according to the statistical collation of the failure records. An allocation model of the failure rate based on the fuzzy mathematics and entropy weight methods was thus developed with four factors considered. This method can solve the reallocation of the machine's reliability, thus enhancing the reliability of the whole system.

Key words: CNC machine tool; failure information; fuzzy mathematics; entropy weight methods; reliability allocation

可靠性分配是根据一定的原则和方法, 将系统可靠性指标自上而下逐级分配到下属各级产品的过程^[1]. 国外的可靠性分配理论^[2]在 20 世纪就开始被大范围地研究, 现已应用到各个领域, 文献[3-4]介绍了可靠性分配在汽车、软件领域内的相关应用. 在机械系统可靠性分配工程中, 各种分配方法被引入其中. 文献[5-7]分别将模糊评分法、模糊层次分析法和遗传算法引入可靠性分配中以考虑多种影响因素, 但其中的专家评分必然会

存在一定的主观性; 文献[8]提出了一种基于神经网络的分配法, 但需要大量实验数据进行训练.

为提出一种容易操作、施行效果较好、能较好解决机械系统可靠性再分配问题的方法, 本文提出了一种基于机床故障信息的可靠性模糊分配方法. 鉴于影响机床可靠度的因素较多且关系复杂, 难以用经典数学加以描述, 故引入模糊理论, 建立模糊分配模型, 经熵权法加权得到整机故障率分配系数以指导机床可靠性指标的再分配.

1 建立故障间隔时间可靠度函数

1.1 故障数据预处理

经现场调研并查阅此系列机床的售后维修记录,对机床整机故障间隔时间进行预处理,去除磨合期内的故障数据和人为操作不当引起的故障数据后,共计 550 条故障信息,其分布直方图见图 1. 可以看出,该系列机床故障间隔时间大约有一半数据分布在 1 000 h 以下,查阅国外机床资料可知其平均故障间隔时间 MTBF (mean time between failures) 值一般在 1 500 h 左右,可见国产机床与国外机床还有很大差距. 按国外机床标准,初定该机床整机 MTBF 目标值为 1 500 h,整机可靠度达到 0. 99.

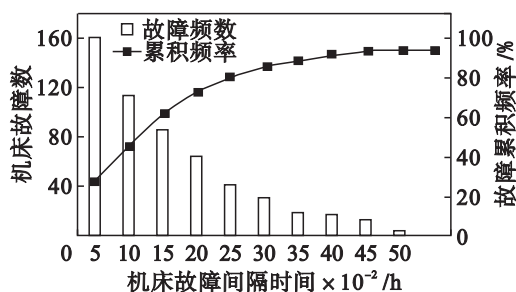


图 1 故障数据分布直方图
Fig. 1 Histogram of failure data

1.2 故障数据分布模型优选

选取两参数 Weibull 分布、对数正态分布、最小极值分布和正态分布四种分布对整机故障数据进行拟合得到模型分布图,见图 2. 各分布图相关系数分别为 0. 994, 0. 963, 0. 943, 0. 979. 由于 Weibull 分布的相关系数最大,故认为机床整机故障间隔时间数据符合两参数的 Weibull 分布.

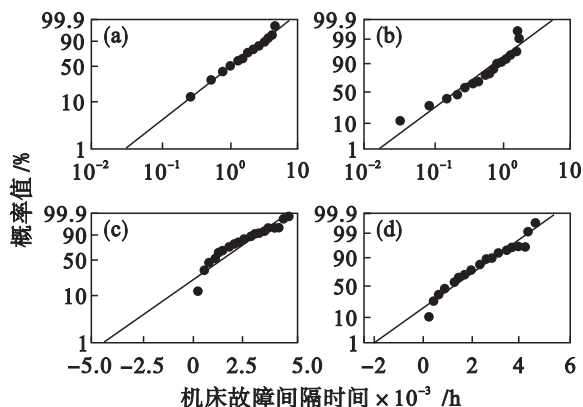


图 2 模型概率分布图
Fig. 2 Probability distribution of model
(a)—Weibull 分布; (b)—对数正态分布;
(c)—最小极值分布; (d)—正态分布.

1.3 Weibull 分布的参数估计

采用极大似然估计法进行分布模型的参数估计. 设 Weibull 分布的概率密度函数为 $f(t_i; \alpha, \beta)$, 对故障数据 t_i 的似然函数 L 求对数后,得到函数 $\ln L$,再对 α, β 分别求偏导数后令其为零,可得

$$\alpha = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i^\beta \right]^{\frac{1}{\beta}}, \beta = 1 / \left(\sum_{i=1}^n t_i^\beta \ln t_i / \sum_{i=1}^n t_i^\beta - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln t_i \right). \quad (1)$$

采用二分法求解 β ,并代入求解 α . 解得两参数的估计值为 $\hat{\alpha} = 1\,395.7$, $\hat{\beta} = 1.1646$.

1.4 分布函数的拟合检验

求出分布函数的参数估计值后,应进行假设检验. 本文采用皮尔逊 χ^2 检验法^[9]进行拟合检验. 首先,将故障数据分成 17 组,计算频数 v_i 、理论频数 np_i (p_i 为理论频率)等参数,得 $\sum_{i=1}^{17} \left(\frac{v_i^2}{np_i} \right) - n = 4.654$,其中数据总量 $n = 550$. 然后,取显著性水平为 0. 005,查 χ^2 分布表得对应自由度 $17 - 1 - 2 = 14$ 的临界值为 $\chi_{0.995}^2(14) = 31.319$,由于 $4.654 < \chi_{0.995}^2(14)$,故接受原假设,即认为故障间隔时间数据服从两参数为 $\alpha = 1\,395.7$, $\beta = 1.1646$ 的 Weibull 分布.

Weibull 分布函数 $W(t)$ 就是失效概率函数,所以到此建立了整机故障间隔时间的可靠度函数:

$$R_{\text{sys}}(t) = 1 - W(t) = \exp[-(t/1\,395.7)^{1.1646}]. \quad (2)$$

1.5 各子系统故障间隔时间可靠度函数的建立

本文中的数控机床是基于模块化生产的,在考虑故障类别和功能模块的基础上,对整机故障数据进行分类,得到 10 个子系统,见表 1. 对各子系统的故障数据进行类似整机可靠度函数的参数计算后,可得各子系统故障间隔时间的可靠度函数. 对子系统可靠度函数采用检验法进行假设检验,检验结果均可接受,得到具体的子系统可靠度函数见表 1.

鉴于篇幅问题,本文只给出相关系数最小的装夹系统的故障数据分布拟合性检验过程. 装夹系统故障数据总量 $n_s = 57$,分成 7 组,得 $\sum_{i=1}^7 \left(\frac{v_i^2}{n_s p_i} \right) - n_s = 10.926$, $i \in [1, 7]$. 取显著性水平为 0. 005,查 χ^2 分布表得对应自由度 $7 - 1 - 2 = 4$ 的临界值为 $\chi_{0.995}^2(4) = 14.860$,由于 $10.926 < \chi_{0.995}^2(4)$,故接受原假设,认为装夹系统故障间隔时间数据服从两参数为 $\alpha = 2\,415.7$, $\beta =$

1. 501 7 的 Weibull 分布.

| 表 1 子系统故障间隔时间可靠度函数 Table 1 Subsystem's reliability functions | | | |
|---|----|---|-------|
| 序号 | 系统 | 故障间隔时间可靠度函数表达式 | 相关系数 |
| 1 | 基础 | $R_B(t) = \exp[-(t/2\,212.4)^{1.699\,3}]$ | 0.987 |
| 2 | 传动 | $R_T(t) = \exp[-(t/2\,157.8)^{1.373\,9}]$ | 0.985 |
| 3 | 进给 | $R_F(t) = \exp[-(t/3\,184.8)^{1.706\,9}]$ | 0.956 |
| 4 | 刀架 | $R_K(t) = \exp[-(t/1\,971.0)^{1.269\,1}]$ | 0.982 |
| 5 | 装夹 | $R_G(t) = \exp[-(t/2\,415.7)^{1.501\,7}]$ | 0.949 |
| 6 | 数控 | $R_N(t) = \exp[-(t/2\,410.2)^{2.250\,1}]$ | 0.984 |
| 7 | 液压 | $R_H(t) = \exp[-(t/2\,279.9)^{1.294\,6}]$ | 0.987 |
| 8 | 排屑 | $R_R(t) = \exp[-(t/1\,827.4)^{1.215\,2}]$ | 0.999 |
| 9 | 冷却 | $R_C(t) = \exp[-(t/2\,066.2)^{1.372\,7}]$ | 0.993 |
| 10 | 润滑 | $R_P(t) = \exp[-(t/2\,435.2)^{2.122\,7}]$ | 0.985 |

图 3 为机床整机和子系统随工作时间的可靠度函数曲线. 由图可知,整机的可靠度总是低于各子系统可靠度,排屑系统的可靠度最低,可见由故障信息统计得到的可靠度曲线符合该机床的工程实际.

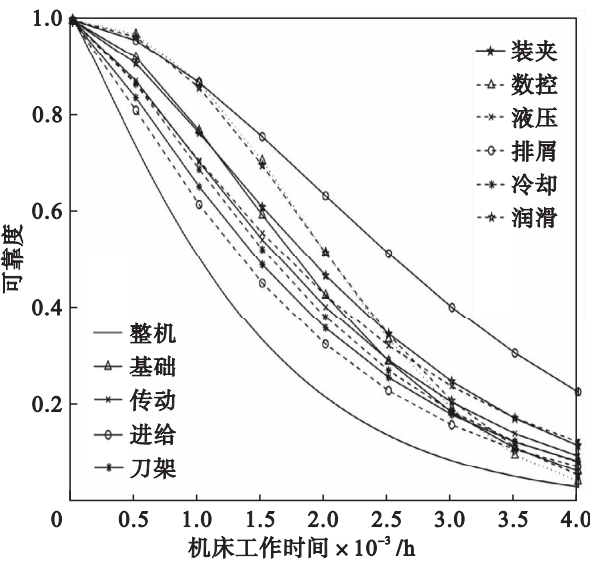


图 3 整机/子系统的可靠度曲线
Fig. 3 Curves of systems' /subsystems' reliability

2 故障间隔时间可靠度影响因素

2.1 故障次数比重比

故障次数比重比 f_i 定义为子系统*i*故障次数占整机故障次数总和的比重. 某子系统 f_i 值越小,说明该系统越不容易出现故障,应分配给较低的故障率.

整机故障次数共 550 次,各子系统故障次数

分别为 54,38,42,60,57,11,61,128,84,15,由此可得各子系统(按表 1 所示序号)的故障次数比重比 $\{f_i|i=1,\cdots,10\}=\{0.098\,2,0.069\,1,0.076\,4,0.109\,1,0.103\,6,0.020\,0,0.110\,9,0.232\,7,0.152\,7,0.027\,3\}$.很明显,排屑系统的故障比重比较大,是整机的薄弱环节,应分配给较高的故障率.

2.2 故障维修停时比重比

故障维修停时比重比 r_i 定义为子系统*i*每次故障的平均维修停时占整机故障平均维修停时的比例. 经计算, $\{r_i|i=1,\cdots,10\}=\{0.045\,2,0.041\,2,0.076\,2,0.250\,7,0.041\,5,0.056\,7,0.049\,4,0.360\,3,0.037\,8,0.041\,0\}$.

故障维修停时比重比值越大说明该子系统发生故障时平均维修停时越长,则该故障对生产造成的停时影响越大,故应尽量分配给相对较低的故障率,以减少机床工作期间因故障产生过长的维修停时. 由 r_i 可知,排屑系统的故障维修停时比重比较大,说明维修性较差,故应分配给较低的故障率.

2.3 系统可靠度影响度

机械系统可看作串联系统,可靠度数学模型为

$$R_{\text{sys}}(t) = R_1(t)R_2(t)\cdots R_n(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t). \quad (3)$$

定义可靠度影响度为

$$I_i = R_1(t)R_2(t)\cdots R_{i-1}(t)R_{i+1}(t)\cdots R_n(t) = \frac{R_{\text{sys}}(t)}{R_i(t)}. \quad (4)$$

式中*i*为子系统序号,本文*n*=10.

可靠度影响度表征了子系统可靠度对整机可靠度的影响程度,若某子系统 I_i 值较大,说明其可靠度对整机可靠度的影响较大,应着力提高该子系统的可靠度,降低故障率.

将整机和各子系统的可靠度函数代入式(4)便可求得 $t=1\,500\text{ h}$ 时的子系统可靠度影响度 $\{I_i|i=1,\cdots,10\}=[0.565\,0,0.618\,3,0.444\,4,0.683\,6,0.549\,6,0.475\,4,0.602\,9,0.740\,2,0.641\,9,0.481\,9]$.易知,刀架系统可靠度影响度较大,则该子系统对整机故障率影响度较大,故应分配给较低的故障率.

2.4 子系统结构复杂度

定义子系统结构复杂度为每个子系统的组件数占整机组件数的比例,即

$$c_i = N_i / \sum_{i=1}^{10} N_i. \quad (5)$$

式中*i*为子系统序号. 各子系统组件数 N_i 为:50,

100,190,310,140,70,60,55,45,45;代入式(5)求得各子系统的结构复杂度为 $\{c_i|i=1,\cdots,10\}=[0.046\ 9,0.093\ 9,0.178\ 4,0.291\ 1,0.131\ 5,0.065\ 7,0.056\ 3,0.051\ 6,0.042\ 3,0.042\ 3]$.

分配可靠性指标时应考虑子系统的复杂度,机构复杂的子系统应分配给较低的 MTBF.

3 基于模糊算法 - 熵权法的可靠性分配模型

3.1 建立子系统对影响因素的隶属度集合

在实际机床可靠性分配过程中,本文考虑了以上 4 种故障影响因素,鉴于很难用确定的函数式或概率统计方法表达出具体的分配模型,本文引入模糊数学理论来建立可靠性指标的分配模型^[9-10].

设影响因素集 $K=\{k_1,k_2,k_3,k_4\}=\{\text{故障次数比重比,维修停时比重比,可靠度影响度,结构复杂度}\}$.

首先建立针对影响因素 k_1 的对比矩阵 S_1 :

$$S_1=\begin{bmatrix}u_{1,1}(k_1)&u_{1,2}(k_1)&\cdots&u_{1,10}(k_1)\\u_{2,1}(k_1)&u_{2,2}(k_1)&\cdots&u_{2,10}(k_1)\\\vdots&\vdots&&\vdots\\u_{10,1}(k_1)&u_{10,2}(k_1)&\cdots&u_{10,10}(k_1)\end{bmatrix}. \quad (6)$$

式中 $u_{i,j}(k_1)=k_{1,i}/(k_{1,i}+k_{1,j})$, i,j 为子系统序号. 该式表示子系统 i 与 j 相比, i 对因素 k_1 的相对隶属度. 很明显, $u_{i,j}(k_1)=1-u_{j,i}(k_1)$, $u_{i,i}(k_1)=0.5$. 若 $u_{i,j}(k_1)>0.5$, 则说明子系统 i 与 j 相比较, i 对整机可靠度影响度大于 j , 故应着力提高子系统 i 的可靠度, 分配给较低的故障率.

同理, 由式(6)可得到各子系统针对其他三个影响因素的对比矩阵 S_2, S_3, S_4 .

定义子系统 i 对影响因素 k_1 的隶属度为 $u_i(k_1)=\frac{1}{10}\sum_{j=1}^{10}u_{i,j}(k_1)$, 代入数据得到各子系统对影响因素 k_1 的隶属度向量:

$$M_1=(u_i(k_1))=[0.461\ 9,0.540\ 7,0.518\ 3,0.438\ 4,0.449\ 9,0.781\ 2,0.434\ 7,0.280\ 3,0.364\ 9,0.729\ 6].$$

同理可求得其他三个因素的隶属度向量分别为:

$$M_2=(u_i(k_2))=[0.582\ 9,0.603\ 2,0.467\ 0,0.237\ 9,0.601\ 6,0.532\ 5,0.563\ 2,0.185\ 6,0.621\ 9,0.604\ 3];$$

$$M_3=(u_i(k_3))=[0.503\ 6,0.481\ 2,0.562\ 9,0.456\ 4,0.510\ 4,0.546\ 3,0.487\ 4,0.436\ 8,0.471\ 9,$$

$$0.543\ 0];$$
$$M_4=(u_i(k_4))=[0.615\ 8,0.459\ 0,0.321\ 4,0.232\ 4,0.384\ 6,0.540\ 3,0.575\ 3,0.594\ 8,0.638\ 2,0.638\ 2].$$

3.2 熵权法求机床可靠度综合影响度

熵权法是一种较客观的、能保留较多原始信息的求权法, 本文用其求解子系统对各影响因素的相对隶属度向量的权重, 经加权得可靠度综合影响度.

首先形成决策矩阵 $M_0=[M_1,M_2,M_3,M_4]^T$, 对矩阵元素进行标准化处理 $m_{li}=u_i(k_l)/\sum_{i=1}^{10}U_i(k_l)$, $l=1,\cdots,4$, 得到标准化矩阵 $M_s=[M_{s,1},M_{s,2},M_{s,3},M_{s,4}]^T$, 计算熵值 $E_l=-k\sum_{i=1}^{10}m_{li}\ln m_{li}$ ($k=1/\ln 4$), 计算各因素权重 $w_l=(1-E_l)/\sum_{l=1}^4(1-E_l)$, 得到如下权重: $w_1=0.248\ 2, w_2=0.244\ 5, w_3=0.259\ 0, w_4=0.248\ 3$, 则可靠度综合影响度加权公式为

$$C=(u_i(k))=\sum_{l=1}^4w_lM_{s,l}. \quad (7)$$

将权重和隶属度向量代入式(7)得子系统对整机可靠度的综合影响度 $C=[0.540\ 5,0.520\ 3,0.468\ 4,0.342\ 9,0.486\ 5,0.599\ 8,0.514\ 7,0.375\ 8,0.523\ 3,0.627\ 9]$.

3.3 对可靠性指标进行分配计算

按文献[10]可得机床故障率分配模型为 $\lambda_1:\lambda_2:\cdots:\lambda_{10}=u_1(k):u_2(k):\cdots:u_{10}(k)$. 若机床可靠性分配指标(即 MTBF 值)为 1 500 h, 则整机故障率 $\lambda_s=1/1\ 500$, 各子系统故障率 λ_i 的分配公式为

$$\lambda_i=(u_i(k)/\sum_{i=1}^{10}u_i(k))\lambda_s. \quad (8)$$

式中: i 为子系统序号; $u_i(k)$ 为子系统 i 对整机可靠度的综合影响度.

将向量 C 代入式(8)得各子系统故障率分配值: $\{\lambda_i\}=\{0.720\ 7,0.693\ 7,0.624\ 6,0.457\ 2,0.648\ 6,0.799\ 7,0.686\ 2,0.501\ 0,0.697\ 7,0.837\ 2\}\times 10^{-4}\text{ h}^{-1}$.

由公式 $\text{MTBF}_i=1/\lambda_i$ 得

$$\text{MTBF}_i=[13\ 876,14\ 415,16\ 011,21\ 871,15\ 418,12\ 505,14\ 572,19\ 960,14\ 332,11\ 944]\text{ h}.$$

3.4 结果验证

分配后, 由 $R_i=1-\lambda_i$ 求各子系统的可靠度, 分配前后 MBTF 值和可靠度对比如表 2 所示. 从

中可明显看出,若要提高整机系统的可靠性,必须着力提高可靠性较差的刀架系统和排屑系统的可靠度,这与进一步提高可靠度较高的子系统相比是相对容易的.

假设各子系统均为独立串联系统,当整机 MTBF=1 500 h 时,其可靠度为 $R_s = \prod_{i=1}^{10} R_i = 0.999\ 3$. 但事实上,机床系统内部关系较复杂,子系统间并非完全独立串联关系,实际为相关系统,即各子系统失效为相容事件. 由独立事件和相容事件的概率加法公式知,在各子系统失效率不变的情况下,子系统为独立串联关系的整机失效率比子系统为相关关系的整机失效率要大,故子系统独立串联的整机系统可靠度比子系统为相关关系的整机系统可靠度要小. 所以,若按本文方法分配故障率,分配后的机床整机可靠度应大于 0.999 3,满足设计目标 $R_s=0.99$.

| 表 2 平均故障间隔时间和可靠度 Table 2 MTBF and reliability | | | | |
|--|--------|---------|--------|----------|
| 子 系 统 | 分配前 | | 分配后 | |
| | MTBF/h | R | MTBF/h | R |
| 基础系统 | 1 974 | 0.596 5 | 13 876 | 0.999 92 |
| 传动系统 | 1 973 | 0.545 1 | 14 415 | 0.999 93 |
| 进给系统 | 2 841 | 0.758 4 | 16 011 | 0.999 94 |
| 刀架系统 | 1 830 | 0.493 1 | 21 871 | 0.999 95 |
| 装夹系统 | 2 181 | 0.613 3 | 15 418 | 0.999 94 |
| 数控系统 | 2 135 | 0.709 0 | 12 505 | 0.999 92 |
| 液压系统 | 2 107 | 0.559 0 | 14 572 | 0.999 93 |
| 排屑系统 | 1 714 | 0.455 3 | 19 960 | 0.999 95 |
| 冷却系统 | 1 889 | 0.525 0 | 14 332 | 0.999 93 |
| 润滑系统 | 2 156 | 0.699 4 | 11 944 | 0.999 92 |

4 结 语

本文基于数控机床的实际工作故障信息,建立了系统可靠度模型,充分考虑了多种可靠度分配影响因素,引入模糊数学知识和熵权法建立了机电液复杂系统可靠度的模糊分配模型. 基于实际的产品工作故障数据,本方法较其他评分分配

法包含了更多的产品故障信息,更具实用性,对复杂机电液系统的可靠性再分配和产品可靠性的改善有较大指导意义.

参考文献：

[1] 张义民. 机械可靠性漫谈[M]. 北京: 科学出版社,2012: 152 – 168.
(Zhang Yi-min. About mechanical reliability [M]. Beijing: Science Press,2012;152 – 168 .)

[2] Hudoklin A, Rozman V. Reliability allocation [J]. *Electrotechnical Review*,1980,47(1):10 – 14.

[3] Ivanovic G. Reliability allocation application in vehicle design [J]. *International Journal of Vehicle Design*,2000,24(2): 274 – 286.

[4] Zahedi F,Ashrafi N. Software reliability allocation based on structure, utility, price, and cost [J]. *IEEE Transactions on Software Engineering*,1991,17(4):345 – 356.

[5] Sriramdas V,Chaturvedi S K,Gargama H. Fuzzy arithmetic based reliability allocation approach during early design and development[J]. *Expert Systems with Applications*,2014,41(7):3444 – 3449.

[6] Fang M,Liu H W. A research on the reliability allocation of complex equipments based on improved fuzzy analytic hierarchy process [C]// International Conference on Industrial Engineering and Management Science. Shanghai, 2013:780 – 785.

[7] Farsi M A,Jahromi B K. Reliability allocation of a complex system by genetic algorithm method [C]// International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance and Safety Engineering. Chengdu,2012;1046 – 1049.

[8] Zhang H B,Jia Z X ,Xi A M. Accurate reliability allocation of complex system using neutral networks [C]// 2009 International Conference on Future BioMedical Information Engineering. Sanya,2009 ;457 – 460.

[9] 孙荣恒. 应用数理统计[M]. 北京: 科学出版社,2012: 136 – 140.
(Sun Rong-heng. Applied mathematical statistics [M]. Beijing: Science Press,2012;136 – 140.)

[10] 樊少华. 基于模糊理论的数控机床可靠性分配[D]. 长春: 吉林大学,2011.
(Fan Shao-hua. Reliability allocation of NC lathe based on fuzzy theory[D]. Changchun;Jilin University,2011.)