

# 基于改进阿林斯法的数控机床子系统可靠性分配

黄贤振<sup>1,2</sup>, 孙超<sup>1</sup>, 赵成英<sup>1</sup>, 刘洋<sup>1</sup>

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819;

2. 东北大学 航空动力装备振动及控制教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

**摘要:** 根据采集到的某国产数控机床的故障信息进行分析整理并进行子系统划分, 结合数控机床相关性模型改进可靠性分配方法进行目标值分配. 应用层次分析法建立影响因素隶属度集, 采取DEMATEL决策实验室分析法确定故障相关数据的中心度影响因素, 结合维修性、维修时间、故障停时、故障次数及复杂度确定隶属度函数集, 对于各影响因素的权重的确定采用熵权法, 进而计算出数控机床的可靠性分配因子. 将影响度因素引入阿林斯分配法进行改进, 使改进后的方法适用于各子系统串联且存在故障相关性的系统. 数值算例表明, 相较于传统阿林斯法, 本文方法能够减少子系统对故障时间的要求. 同时, 为验证本文分配结果的合理性, 采用蒙特卡洛仿真法以分配结果为基础对目标机床整机进行可靠性预计, 计算结果证明了方法的可行性.

**关键词:** 数控机床; 相关性; DEMATEL决策实验室分析; 改进阿林斯法; 可靠性分配

中图分类号: TH 181 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)02-0226-08

## Reliability Allocation of NC Machine Tool Subsystem Based on Improved ARINC Method

HUANG Xian-zhen<sup>1,2</sup>, SUN Chao<sup>1</sup>, ZHAO Cheng-ying<sup>1</sup>, LIU Yang<sup>1</sup>

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

2. Key Laboratory of Vibration and Control of Aero-Propulsion Systems, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: HUANG Xian-zhen, E-mail: xzhhuang@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** According to the collected fault information of a domestic NC machine tool, the subsystem is divided, and the reliability allocation method is improved according to the NC machine tool correlation model to allocate the target value. The membership degree set of influencing factors is established using the analytic hierarchy process (AHP), and the centrality influencing factors of fault-related data are determined using the DEMATEL decision laboratory analysis method. The membership function set is determined by combining maintainability, maintenance time, failure downtime, failure times, and complexity. Then the reliability allocation factor of the NC machine tool is calculated. The impact factor is introduced into the ARINS allocation method to improve the method so that the improved method is suitable for the system with subsystems connected in series and fault correlation. Numerical examples show that the proposed method can reduce the failure time requirement of the subsystem compared with the traditional ARINS method. At the same time, to verify the rationality of the distribution results in this paper, the Monte Carlo simulation method is used to predict the reliability of the target machine tool based on the distribution results, and the calculation results prove the feasibility of this method.

**Key words:** NC machine tool; correlation; DEMATEL decision laboratory analysis; improved ARINC method; reliability allocation

收稿日期: 2022-09-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51975110); 辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC1907171); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N2003005, N21003005).

作者简介: 黄贤振(1982-), 男, 山东定陶人, 东北大学教授, 博士生导师.

数控机床是机械加工领域的常用设备,对制造业的发展有着重要意义.随着智能制造等理念的推广,各类设备对于工件的加工精度要求也随之提高,确保机床的可靠性对其加工精度及机械制造业的发展有着重要的影响<sup>[1-3]</sup>.

可靠性作为衡量数控机床性能的重要指标,在数控机床中主要指在规定时间内能够正常工作完成工作任务的能力<sup>[4]</sup>.可靠性分配是否合理对数控机床整体的可靠性有着较大的影响,因此可靠性分配方法的合理性就显得尤为重要.在传统的数控机床可靠性分析中常将其视为串联系统<sup>[5]</sup>,在一些研究中通常对数控机床的各子系统进行简化分析,认为各子系统之间的故障是独立发生的,即某个子系统故障不受其他子系统的影响.但工程实际中,各子系统的故障存在相关性,故障独立性的假设会使后续的可靠性分析等计算产生较大偏差,这将产生许多不必要的成本<sup>[6-8]</sup>.Huang等<sup>[9]</sup>提出了一种基于关联理论的改进可靠性评估模型,对可靠性分析的精度有所提高.因此,在进行可靠性建模时考虑各子系统存在故障相关性的分析建模能更好符合工程实际<sup>[10]</sup>.

目前,在考虑故障相关性的可靠性分配研究中,大量研究者针对可靠性分配方法进行了改进.Chen等<sup>[11]</sup>考虑故障相关性的情况提出一种可靠性分配方法,通过算例验证,计算结果对成本节约有着较好的体现.Gu等<sup>[12]</sup>引入Copula函数,在建立相关性模型的基础上提出一种与之匹配的动态可靠性分配方法.Wang等<sup>[13]</sup>通过考虑故障频率、复杂度等因素,提出了基于影响因素的综合分配方法.Liu等<sup>[14]</sup>建立了基于子系统的费用函数等因素的燃料电池汽车模型,并运用遗传算法对整机的可靠性进行了分配.杨周等<sup>[15]</sup>在考虑多个分配因素的基础上建立了故障相关性系数矩阵,以此为基础进行可靠性指标的分配.

上述研究者对于故障相关性的研究有很多,但存在着分配方法不合理、考虑因素不全面等问题.本文主要基于数控机床整机及各子系统的故障在考虑相关性的建模基础上对数控机床可靠性分配进行研究,根据现有的故障相关性模型,应用层次分析法建立影响因素隶属度集,通过其计算出综合分配因子矩阵.同时对阿林斯分配方法作出优化改进,将故障相关性影响部分考虑在内,使改进后的方法能够适应考虑故障相关性时的情况,较好地解决了现有可靠性分配方

法不能较好适用存在故障相关性的情况.最后,根据综合分配因子及改进阿林斯分配法对目标机床的可靠性指标进行了分配,并以分配结果为基础进行可靠性预计,从而验证分配结果的合理性.

## 1 故障信息处理及子系统划分

基于已采集到的国产某系列数控机床的故障信息进行整理,并选出具有关联故障的543条数据,故障间隔时间分布如图1所示.根据数控机床各模块功能和故障数据类型对机床整机进行子系统划分,共划分11个子系统,包括基础系统(B)、冷却系统(C)、电气系统(E)、进给系统(F)、装夹系统(G)、液压系统(H)、刀架系统(K)、润滑系统(L)、数控系统(N)、排屑系统(R)、传动系统(T).

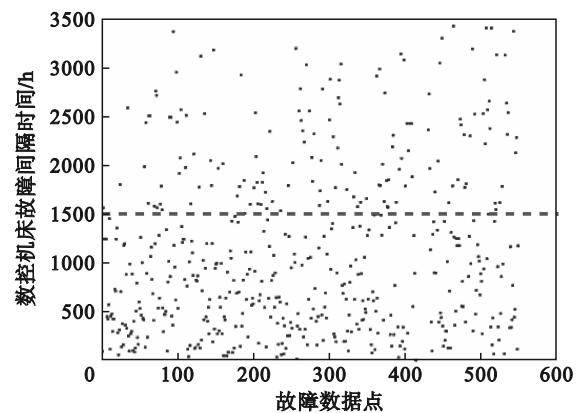


图1 故障数据散点图

Fig. 1 Failure data scatter diagram

应用DEMATEL决策实验室分析法<sup>[13,16]</sup>,根据故障信息,分别确定各子系统之间关系的有无,建立各子系统之间的有向关系图,如图2所示.

通过相关资料的查询,国内外大部分数控机床的平均无故障工作时长(mean time between failures, MTBF)至少在1500 h.而图1所示的故障信息有相当一部分处于平均水准以下,与国外相似产品差距较大,故本文选取MTBF的目标值为1500 h,整机可靠度0.999,以此作为依据进行分配.

## 2 确定可靠性分配影响因素

由于Weibull分布较多应用于机械系统的寿命分布描述且Weibull分布适应性较强,本文应用两参数Weibull分布对各子系统的寿命进行拟

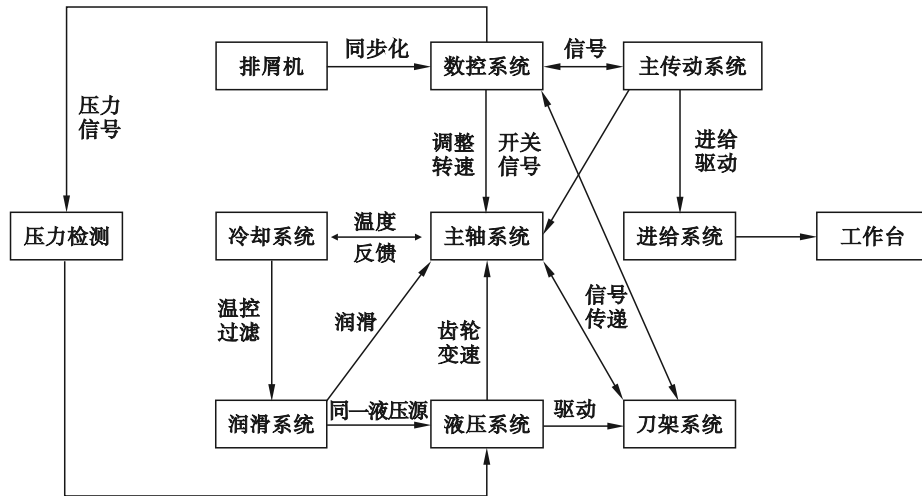


图2 子系统有向图

Fig. 2 Subsystem directed diagram

合,其分布函数如式(1)所示.

$$F_i(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m} \quad (i=1,2, \dots, 11). \quad (1)$$

式中:  $m$  和  $\eta$  分别表示 Weibull 分布的形状和尺寸参数.

类比文献[17],选取 Gumbel Copula 函数来建立各子系统相关性模型, Gumbel Copula 函数的分布函数和密度函数表示为

$$C(u_1, u_2, \dots, u_n) = \exp\left(-\left[\sum_{i=1}^n (-\ln u_i)^{1/\theta}\right]^\theta\right), \quad (2)$$

$$c(u; \theta) = \frac{\partial C(u_1, u_2, \dots, u_n)}{\partial u_1 \partial u_2 \dots \partial u_n}. \quad (3)$$

式中:  $\theta \in (0, 1]$  为体现变量相关性的相关系数;当  $\theta=1$  时,说明变量  $u_1, u_2, \dots, u_n$  之间相互独立;当  $\theta$  趋于 0 时,说明变量之间趋于完全相关.

令  $u_i = F_i(t)$ , 以式(2)为基础,采用极大似然估计法获取各子系统之间的相关系数  $\theta$ . 经计算,将基础和数控这两个随整机的相关性变化较大的子系统单独考虑,其余 9 个子系统中的任意 3 个作为一组进行参数估计时,CRH,FKL,EGT 三组的相关性系数  $\theta$  值最低,表明其相关性较好,故将 11 个子系统分为 5 个部分. 第 1 部分:排屑系统、冷却系统、液压系统;第 2 部分:进给系统、刀架系统、润滑系统;第 3 部分:电气系统、装夹系统、传动系统;第 4 部分:基础系统;第 5 部分:数控系统. 整机的可靠性可表示为这 5 部分的乘积,即

$$R_r = f(R_{z1}, R_{z2}, R_{z3}, R_B, R_N). \quad (4)$$

式中,  $R_{z1}$  为第一部分在  $t$  时间的可靠性,可表示为

$$\begin{aligned} R_{z1} &= \{X_1(t) \geq Z_j^1\} = \\ R_{R1} &\{X_1(t) \geq j, X_2(t) \geq j, X_3(t) \geq j\} = \\ R_{R1} &\{T_j^1 > t, T_j^2 > t, T_j^3 > t\} = \\ &1 - \sum_{i=1}^3 F_j^i(t) + \sum_{1 \leq i_1 < i_2 \leq 3} C_j(F_{j^{i_1}}(t), F_{j^{i_2}}(t)) - \\ &C(F_{j^{i_1}}(t), F_{j^{i_2}}(t), F_{j^{i_3}}(t)) = \\ &1 - \sum_{i=1}^3 F_j^i(t) + C_j(F_{j^{i_1}}(t), F_{j^{i_2}}(t)) + C_j(F_{j^{i_1}}(t), F_{j^{i_3}}(t)) + \\ &C_j(F_{j^{i_2}}(t), F_{j^{i_3}}(t)) - C(F_{j^{i_1}}(t), F_{j^{i_2}}(t), F_{j^{i_3}}(t)). \quad (5) \end{aligned}$$

式中:  $C_j(F_{j^{i_1}}(t), F_{j^{i_2}}(t))$ ,  $C_j(F_{j^{i_1}}(t), F_{j^{i_3}}(t))$ ,  $C_j(F_{j^{i_2}}(t), F_{j^{i_3}}(t))$ ,  $C_j(F_{j^{i_1}}(t), F_{j^{i_2}}(t), F_{j^{i_3}}(t))$  为 Gumbel Copula 函数;  $F(t)$  为各子系统的失效概率密度函数.

首先,设整机故障间隔时间为 1 500 h,分别计算各子系统的可靠度并依据式(5)计算前三部分的可靠度. 其次,计算各部分与子系统之间的可靠性影响度,其表达式为

$$I_i = \frac{\partial R_{z1}}{\partial R_i}. \quad (6)$$

然后,类比表 1 分别计算第 2,第 3 部分与子系统之间的可靠性影响度,同时采用前文计算相关性系数的方法,将前三部分作为一组进行参数估计得出前三部分之间的相关性参数  $\theta_z = 0.8462$ ,并类比表 1 计算分组部分对整机的可靠性影响度,如表 2 所示.

最后,考虑基础和数控子系统对整机的影响,同上述计算分别得出基础、数控子系统及各分组部分对整机的可靠度及可靠性影响度计算结果,如表 3 所示.

表 1 第 1 部分与子系统之间的可靠性影响度  
Table 1 Reliability impact of part 1 with subsystems

子系统 可靠度	可靠度 影响度	第 1 部分 可靠度
$R_C=0.6478$	$I_C=0.4239$	
$R_R=0.6964$	$I_R=0.2222$	$R_{Z1}=0.5727$
$R_H=0.6559$	$I_H=0.3844$	

表 2 各分组对整机的可靠性影响度  
Table 2 Impact of each group on the reliability of the whole system

各分组 可靠度	可靠性 影响度	整机 可靠度
$R_{Z1}=0.5727$	$I_{Z1}=0.2309$	
$R_{Z2}=0.4810$	$I_{Z2}=0.3054$	$R_{Z2}=0.204$
$R_{Z3}=0.5072$	$I_{Z3}=0.2802$	

表 3 分组部分、基础及数控系统对整机的可靠性影响度  
Table 3 Impact of the group, foundation, and NC system on the reliability of the whole system

可靠度	可靠性影响度
$R_B=0.7463$	$I_B=0.0631$
$R_N=0.6953$	$I_N=0.0779$
$R_Z=0.2040$	$I_Z=0.7475$

由上述计算结果可求得各子系统对整机的可靠性影响度,以此作为第一个影响因素,以刀架系统为例进行计算:

$$I_K = \frac{\partial R}{\partial R_K} = \frac{\partial R}{\partial R_Z} \cdot \frac{\partial R_Z}{\partial R_K} = \frac{\partial R}{\partial R_Z} \cdot \frac{\partial R_Z}{\partial R_{Z1}} \cdot \frac{\partial R_{Z1}}{\partial R_K} = I_Z \cdot I_{Z1} \cdot I_K = 0.7475 \times 0.3054 \times 0.3662 = 0.0836 \quad (7)$$

同时可以得到整机的可靠度函数为

$$R = C(R_{Z1}, R_{Z2}, R_{Z3}) \cdot R_N \cdot R_B \quad (8)$$

其中,  $C(\cdot)$  表示 Gumbel Copula 函数.

采用 DEMATEL 决策实验室分析法结合图 2 建立各子系统故障信息有向图,对各子系统之间的故障信息相关情况进行矩阵之间的运算,得到不同因素的影响度、被影响度,并分别用  $R$  和  $D$  表示.同时,用  $R-D$ ,  $R+D$  分别表示原因度及中心度,从而用来确定子系统之间的影响度,计算结果如表 4 所示.

计算结果中,中心度的大小表示在各子系统故障关系中的重要程度,中心度值越大表明此部分在发生故障时越重要.因此,选取中心度作为第二个影响因素.

根据故障数据分别对维修性、维修时间、故障停时、故障次数及复杂度对整机的影响度做出整理,分别建立剩余 5 个影响因素数据表,具体结果如表 5 所示.

表 4 各子系统间的影响度  
Table 4 Impact between subsystems

子系统	影响度 $R_j$	被影响度 $D_j$	原因度 $R_j - D_j$	中心度 $R_j + D_j$
基础 B	0	0.3334	-0.3334	0.3334
传动 T	0.3658	0.0272	0.3386	0.393
进给 F	0.0922	0.0456	0.0466	0.1378
刀架 K	0.6142	0	0.6142	0.6142
装夹 G	0.6698	0	0.6698	0.6698
数控 N	0.0986	0.2238	-0.1252	0.3224
液压 H	0.0450	0.6889	-0.6439	0.7339
排屑 R	0.0683	0.1358	-0.0675	0.2041
冷却 C	0.4309	0.0222	0.4087	0.4531
润滑 L	0.1192	0	0.1192	0.1192
电气 E	0.0243	1.0514	-1.0271	1.0757

表 5 中,维修性定义为维修停时与故障停时的比值;维修时间定义为各子系统维修停时与整机维修停时的比值;故障停时定义为子系统故障平均停时与整机故障平均停时的比值;故障次数定义为子系统故障次数与整机故障次数的比值;复杂度定义为子系统的组件数与整机组件数的比值.

表 5 其他影响因素的影响度  
Table 5 Impact of other influencing factors

子系统 代号	维修性	维修 时间	故障 停时	故障 次数	复杂度
B	0.0984	0.0859	0.0419	0.0976	0.0408
T	0.1510	0.0622	0.0361	0.0534	0.0816
F	0.0758	0.0867	0.0693	0.0773	0.1551
K	0.0251	0.1267	0.2249	0.1050	0.2531
G	0.1326	0.1022	0.0363	0.0994	0.1143
N	0.1439	0.0304	0.0413	0.0239	0.0571
H	0.015	0.1081	0.0159	0.1087	0.0490
R	0.0126	0.2052	0.3275	0.2339	0.0449
C	0.1036	0.1333	0.0409	0.1473	0.0367
L	0.0860	0.0319	0.0589	0.0295	0.0367
E	0.0695	0.0274	0.0767	0.0239	0.1306

### 3 计算可靠性影响度

首先,通过前文数据综合建立各影响因素的隶属度集,设影响因素集为  $m=[m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_6, m_7]$ ,并分别以矩阵中的元素代表影响因素.以  $m_1$  为例建立对比矩阵:

$$\mathbf{S}_1 = \begin{bmatrix} u_{1,1} & u_{1,2} & \cdots & u_{1,11} \\ u_{2,1} & u_{2,2} & \cdots & u_{2,11} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ u_{11,1} & u_{11,2} & \cdots & u_{11,11} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

式中,  $u_{i,j} = \frac{m_{1i}}{m_{1i} + m_{2i}}$  ( $i, j = 1, 2, \dots, 11$ ). 可得到各影响因素的对比矩阵.

依次计算各影响因素的影响矩阵,  $\mathbf{S}_1$  为子系统对整机可靠度的影响矩阵,  $\mathbf{S}_2$  为子系统间影响

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 0.4891 & 0.3325 & 0.4189 & 0.5598 & 0.5792 & 0.5386 & 0.4999 & 0.3701 & 0.5239 & 0.5901 & 0.5980 \\ 0.4717 & 0.5088 & 0.2863 & 0.6083 & 0.6270 & 0.4642 & 0.6463 & 0.3644 & 0.5409 & 0.2600 & 0.7221 \\ 0.5656 & 0.4324 & 0.5140 & 0.5816 & 0.5697 & 0.2710 & 0.5892 & 0.7420 & 0.6534 & 0.3100 & 0.2710 \\ 0.4069 & 0.3743 & 0.5199 & 0.7543 & 0.3755 & 0.4037 & 0.4272 & 0.8107 & 0.4016 & 0.4833 & 0.5426 \\ 0.5267 & 0.4535 & 0.5288 & 0.6136 & 0.5660 & 0.3018 & 0.5786 & 0.7128 & 0.6247 & 0.3112 & 0.2821 \\ 0.6289 & 0.4733 & 0.3337 & 0.2422 & 0.3981 & 0.5545 & 0.5888 & 0.6081 & 0.6515 & 0.6515 & 0.3694 \\ 0.4478 & 0.3537 & 0.5066 & 0.7316 & 0.3816 & 0.3640 & 0.4409 & 0.8332 & 0.4363 & 0.4782 & 0.5261 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

将决策矩阵(11)进行标准化处理,并代入式(12)计算出熵值向量  $\mathbf{E} = [1.2243 \ 1.2101 \ 1.2073 \ 1.2128 \ 1.2114 \ 1.2115 \ 1.2126]$ .

$$E_j = -k \sum_{i=1}^7 r_{ij} \ln r_{ij} \quad (k = 1/\ln 7). \quad (12)$$

式中,  $r_{ij}$  为矩阵  $\mathbf{M}$  中的元素.

将熵值向量  $\mathbf{E}$  代入式(13)计算影响因素权重向量  $\mathbf{v}$ , 随后通过影响因素权重向量和决策矩阵的标准化矩阵计算各子系统可靠度的综合影响度  $\mathbf{C}$ , 即  $\mathbf{C} = \mathbf{v} \cdot \mathbf{M}_s$  ( $\mathbf{M}_s$  为决策矩阵的标准化矩阵), 同时通过归一化综合影响度  $\mathbf{C}$  获得各子系统的综合分配因子矩阵  $\mathbf{C}_0 = [0.0918 \ 0.0759 \ 0.0807 \ 0.1063 \ 0.0909 \ 0.0755 \ 0.0978 \ 0.1150 \ 0.0994 \ 0.0805 \ 0.0863]$ .

$$v_j = (1 - E_j) / \sum_{j=1}^7 (1 - E_j). \quad (13)$$

#### 4 改进可靠性分配模型

在以往的可靠性分配时采用的方法有很多, 如传统的阿林斯分配法<sup>[18]</sup>通过计算分配权重因子, 将需求的故障率分配给各子系统. 此时, 其分配模型可以表示为  $\lambda_1 : \lambda_2 : \cdots : \lambda_i = u_1(k) : u_2(k) : \cdots : u_i(k)$ .

但阿林斯分配法适用于各子系统之间相互独立的情况, 不能较好适用于存在故障相关性的情况. 本文对阿林斯分配法作出了一些改进, 并作出如下假设:

假设在原分配模型的故障率前添加一个系数, 把整机与各子系统间的关系由非线性转化为线性并借此提升实际应分配给各子系统的故障率, 即

矩阵,  $\mathbf{S}_3$  为故障次数影响矩阵,  $\mathbf{S}_4$  为故障停时影响矩阵,  $\mathbf{S}_5$  为维修时间影响矩阵,  $\mathbf{S}_6$  为复杂度影响矩阵,  $\mathbf{S}_7$  为维修性影响矩阵.

计算各子系统  $i$  对不同因素的隶属度:

$$u_i = \frac{1}{11} \sum_{j=1}^{11} u_{i,j} \quad (i, j = 1, 2, \dots, 11). \quad (10)$$

分别将矩阵  $\mathbf{S}_1$  至  $\mathbf{S}_7$  代入式(10)获得各子系统对各影响因素的隶属度集合, 将隶属度集合整理为决策矩阵(11).

$$l_1 \lambda_1 : l_2 \lambda_2 : \cdots : l_i \lambda_i = u_1(k) : u_2(k) : \cdots : u_i(k). \quad (14)$$

其中, 系数  $l_i$  表示考虑故障相关性时对各子系统故障率的修正系数. 结合上述分别考虑各子系统独立与存在故障相关性的情况, 整机的可靠性影响度  $I'_i$  应表示考虑串联时的可靠性影响度  $I'_{\text{ind}}$  与考虑故障相关性时的可靠性影响度  $I'_{\text{rel}}$  之和, 即

$$I'_i = I'_{\text{ind}} + I'_{\text{rel}}. \quad (15)$$

假设数控机床各子系统为串联时, 根据式(16)及各子系统在故障间隔时间为 1 500 h 时的可靠度可以分别计算各子系统对整机的可靠性影响度  $I'_{\text{ind}}$ , 结合式(15)的变形计算:

$$I'_{\text{ind}} = \frac{\partial R_{\text{sys}}(t)}{\partial R_i(t)} = R_1(t) R_2(t) \cdots R_{i-1}(t) R_{i+1}(t) \cdots R_n(t) = \frac{R_{\text{sys}}(t)}{R_i(t)}. \quad (16)$$

根据  $l_i$  在模型中的实际意义, 假设  $l_i$  有两种表达方式:

$$l_{i1} = \frac{1}{1 + \frac{I'_{\text{rel}}}{I'_i}} = \frac{I'_i}{I'_i + I'_{\text{rel}}} \quad \text{或} \quad l_{i2} = \frac{1}{1 + I'_{\text{rel}}}, \quad l_i \in (0, 1). \quad (17)$$

结合式(15)~(17)计算各子系统的可靠性影响度及两种情况下的假设参数  $l_i$  的数值, 计算结果如表 6 所示.

由综合分配因子及表 6 中的假设参数  $l_i$  计算出考虑故障相关性时的实际可靠性综合分配因子矩阵, 即数控机床各子系统的不可靠度综合矩阵  $\mathbf{C}_{11}$ , 以假设参数  $l_{i1}$  为例进行计算获得  $\mathbf{C}_{11} = [0.1181 \ 0.1165 \ 0.1327 \ 0.1117 \ 0.0943$

表 6 各子系统假设参数的数值  
Table 6 The values of the assumed parameters of each subsystem

$I'_{rel}$	数值	$l_{i1}$	数值	$l_{i2}$	数值
$I'_{K相关}$	0.020 8	$l_K$	1/1.286 3	$l_K$	1/1.020 8
$I'_{L相关}$	0.021 7	$l_L$	1/1.221 9	$l_L$	1/1.021 7
$I'_{F相关}$	0.019 3	$l_F$	1/1.320 2	$l_F$	1/1.019 3
$I'_{E相关}$	0.021 5	$l_E$	1/1.215 9	$l_E$	1/1.021 5
$I'_{T相关}$	0.017 3	$l_T$	1/1.535 4	$l_T$	1/1.017 3
$I'_{G相关}$	0.021 1	$l_G$	1/1.229 0	$l_G$	1/1.021 1
$I'_{C相关}$	0.020 8	$l_C$	1/1.284 3	$l_C$	1/1.020 8
$I'_{R相关}$	0.019 4	$l_R$	1/1.504 2	$l_R$	1/1.019 4
$I'_{H相关}$	0.020 6	$l_H$	1/1.310 0	$l_H$	1/1.020 6
$I'_{B相关}$	0.018 1	$l_B$	1/1.286 3	$l_B$	1/1.018 1
$I'_{N相关}$	0.019 4	$l_N$	1/1.248 9	$l_N$	1/1.019 4

0.128 1 0.173 0 0.127 7 0.098 4 0.104 9].

根据  $C_{11}$  可确定各子系统中最薄弱的为排屑系统,并以此为基础分别计算其余子系统与排屑系统之间的不可靠比例关系为  $F_R(t):F_B(t):F_T(t):F_F(t):F_K(t):F_G(t):F_N(t):F_H(t):F_C(t):F_L(t):F_E(t)=$

1:0.682 7:0.673 4:0.615 6:0.767 1:0.645 7:0.545 1:0.740 5:0.738 2:0.568 8:0.606 4.

假设需求目标机床的 MTBF 为 1 500 h,期望可靠度为 0.999,根据式(2)和式(5)计算出排屑系统的可靠度为  $R_R=0.999 827$ ,进而通过其不可靠度依次计算出其余子系统应分配的指标,分别计算本文所建立的两种模型下及传统阿林斯模型下的分配指标,以此作为对比,计算结果如表 7 所示.

### 5 可靠性分配结果分析

根据表 7 结果,可看出对数控机床进行可靠性分配时,采用本文所建立的新模型可降低对平均无故障工作时长的需求,从而可以降低加工难度,减少加工成本.

同时,为将分配结果表示更为直观,分别针对不同模型下的平均无故障工作时长进行计算,分别以 M1 和 M2 表示各子系统为串联,考虑故障相关性分别应用两种改进模型的情况下各子系统的故障间隔时间, M0 为考虑故障相关性但应用传统阿林斯分配方法得到的故障时间,如表 8 所示.

表 7 各子系统的可靠度指标分配  
Table 7 Reliability index assignment of each subsystem

系统名称	现有子系统 MTBF	$l_{i1}$ 模型下 分配指标	$l_{i2}$ 模型下 分配指标	传统阿林斯方法 分配指标	串联独立 分配指标	可靠度
刀架	2 133.8	7 537.1	11 302	14 114	12 386	0.999 881
润滑	2 196.0	10 164	15 258	18 644	19 562	0.999 884
进给	2 129.2	9 391.3	14 078	18 586	15 710	0.999 894
电气	2 597.4	9 534.5	14 297	17 384	17 306	0.999 867
传动	2 665.8	8 585.2	12 873	19 765	20 044	0.999 888
装夹	2 283.6	8 954.1	13 432	16 509	16 095	0.999 906
冷却	2 232.7	7 832.2	11 749	15 089	16 580	0.999 872
排屑	2 156.9	5 781.3	8 672	13 045	12 867	0.999 827
液压	2 730.3	7 807.8	11 707	15 336	16 809	0.999 872
基础	3 839.6	8 468.9	12 704	16 341	17 642	0.999 902
数控	2 408.0	10 606	15 904	19 862	21 214	0.999 895
整机	1 300	1 500	1 500	1 500	1 500	0.999

数控机床各子系统分配前后的 MTBF 的对比情况如图 3 所示.

### 6 可靠性预计验证

为验证新模型所获取的各子系统分配指标能够使整机工作时长达到 1 500 h 的预期,以  $l_{i1}$  模型下的分配指标为例对整机进行可靠性预计,验

证分配结果的合理性.

在对数控机床进行可靠性预计的过程中,假设各子系统的 MTBF 服从两参数 Weibull 分布,包含尺寸参数  $\eta$  和形状参数  $m$ . Weibull 分布中形状参数  $m$  代表斜率,控制着分布曲线的位置及轮廓,且其只与数控机床的故障原理有关.而对重新进行可靠性分配的目标机床进行可靠性预计

表 8 不同模式下各子系统的 MTBF

Table 8 MTBF of each subsystem in different modes

子系统代码	M1	M2	M0
K	11 302	13 826	14 114
L	15 227	18 248	18 644
F	14 080	18 234	18 586
E	14 275	17 018	17 384
T	12 887	19 429	19 765
G	13 430	16 167	16 509
C	11 756	14 782	15 089
R	8 686	12 797	13 045
H	11 715	15 027	15 336
B	12 709	16 051	16 341
N	15 879	19 484	19 862

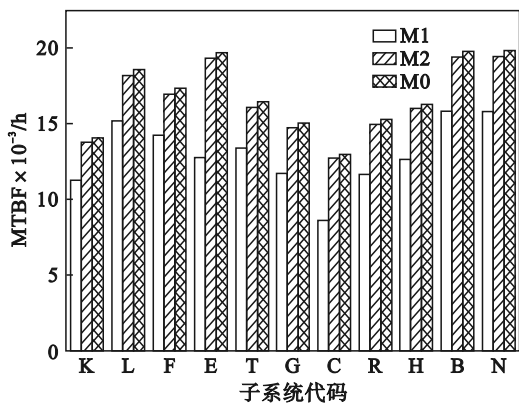


图 3 各子系统的 MTBF 对比图

Fig. 3 MTBF comparison diagram of each subsystem

时,只调整了可靠性的分布,即各子系统在发生故障时的机理是没有变化的,故在进行可靠性预计时可假定形状参数不变<sup>[19]</sup>. MTBF 与分布参数的关系如下:

$$MTBF = a\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right). \quad (18)$$

首先,根据式(18)重新确定各子系统的尺寸参数  $\eta$ . 然后,采用蒙特卡洛仿真法对目标机床进行可靠性预计求解,而蒙特卡洛仿真法的重点就是  $[0, 1]$  区间均匀分布随机数的产生,本文选用反函数法来完成已知概率分布的随机抽样,由式(1)获得两参数 Weibull 分布函数的随机变量  $X_F = \eta(-\ln r)^{\frac{1}{m}}$ .

因此,本文通过反函数法抽样产生服从两参数 Weibull 分布的随机变量过程为

- 1) 抽样产生均匀分布随机数  $r \sim U(0, 1)$ ;
- 2) 令  $X_F = \eta(-\ln r)^{\frac{1}{m}}$ , 则  $X$  服从两参数 Weibull

分布且参数为  $m$  和  $\eta$ .

数控机床整机的可靠性蒙特卡洛仿真流程如图 4 所示.

根据蒙特卡洛方法,仿真过程中增大仿真总次数  $N_s$  和单次仿真的终止条件  $m$  可以减小仿真结果与实际结果的误差,但仿真次数如果过大会增大计算量以及计算时间. 工程实践中,由于相关制度的不完善以及企业重视度不足使得可靠性基础数据收集不足普遍存在.

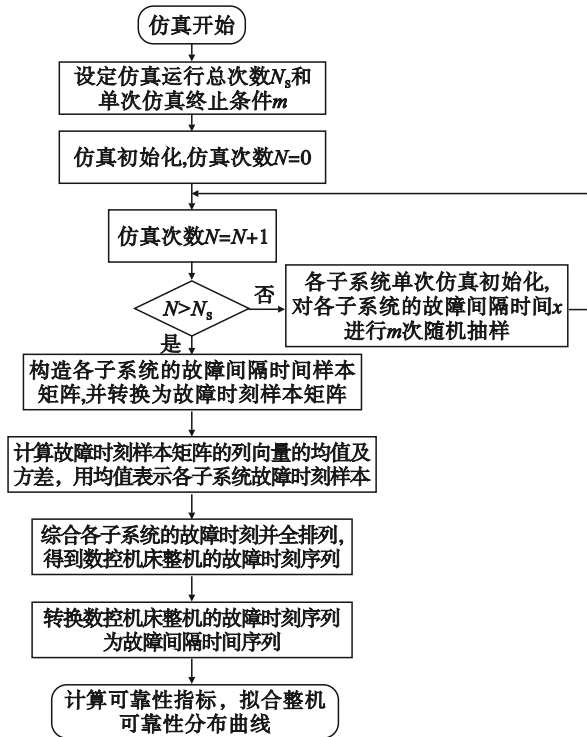


图 4 数控机床蒙特卡洛仿真流程图

Fig. 4 Monte Carlo simulation flow chart of CNC machine tool

通常情况下,能够收集到的整机有效故障数据不超过 1 500 条. 综合考虑,本文设定仿真总次数  $N_s=10\ 000$ , 单次仿真终止条件  $m$  设定为各子系统现有故障数据数量的 10 倍. 各子系统实际故障次数如表 9 所示. 若仿真得到的子系统故障时刻数据不重复,经蒙特卡洛仿真共获得故障数据 2 492 条.

表 9 实际的子系统故障次数  
Table 9 Actual subsystem failure times

子系统代码	实际故障次数	子系统代码	实际故障次数
K	31	C	62
L	11	R	130
F	39	H	88
E	57	B	67
T	14	N	19
G	25		

经仿真计算获得故障数据服从形状参数  $m=1\ 730.7$ , 尺寸参数  $\eta=1.258$  的两参数 Weibull 分布. 同时, 计算出数控机床整机 MTBF 预测值为  $1\ 609.6\text{ h}$ , 符合数控机床整机平均无故障工作时长在  $1\ 500\text{ h}$  的预期.

## 7 结 论

1) 基于数控机床实际工况中的故障信息, 采用现有故障相关性模型, 综合选取故障次数、故障停时等影响因素获得可靠性分配矩阵, 考虑了各类因素对可靠性分配结果的影响.

2) 改进并优化了可靠性分配方法, 在可靠性分配矩阵的基础上考虑了影响因素权重在可靠性分配过程中的影响, 对可靠性指标进行了分配. 结果显示, 在考虑相关性的情况下, 本文方法相较于传统阿林斯法减少了各子系统的 MTBF 要求. 同时, 为验证分配结果的合理性, 本文以分配结果为基础对目标机床整机进行可靠性预计. 数值计算结果表明, 采用本文方法的可靠性分配结果能够达到预期水平, 充分验证了本文分配方法的合理性.

### 参考文献:

- [1] 郑财, 黄贤振, 胡明伟, 等. 三轴数控机床加工精度可靠性分析[J]. 机床与液压, 2017, 45(15): 180-183.  
(Zheng Cai, Huang Xian-zhen, Hu Ming-wei, et al. Three axis NC machine tool machining accuracy reliability analysis [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2017, 45(15): 180-183.)
- [2] Cai L G, Zhang Z L, Cheng Q, et al. An approach to optimize the machining accuracy reliability of multi-axis NC machine tool based on robust design [J]. *Precision Engineering*, 2016, 43: 370-386.
- [3] Hansel A, Yamazaki K, Konishi K. Improving CNC machine tool geometric precision using manufacturing process analysis techniques [J]. *Procedia CIRP*, 2014, 14 (1): 263-268.
- [4] 张玉刚, 孙杰, 喻天翔. 考虑不同失效相关性的系统可靠性分配方法[J]. 机械工程学报, 2018, 54(24): 206-215.  
(Zhang Yu-gang, Sun Jie, Yu Tian-xiang. A reliability allocation method considering failure correlation based on vine Copula [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(24): 206-215.)
- [5] Yang Z, Liu P X, Zhu Y P, et al. A comprehensive reliability allocation method for series systems based on failure mode and effects analysis transformed functions [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2016, 230(12): 2239-2248.
- [6] Sun Y, Ma L, Mathew J, et al. An analytical model for interactive failures [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2006, 91(5): 495-504.
- [7] Cheng Y, Du X P. System reliability analysis with dependent component failures during early design stage a feasibility study [J]. *Journal of Mechanical Design*, 2016, 138 (5) : 051405.
- [8] Chen Y, Yang L, Ye C, et al. Failure mechanism dependence and reliability evaluation of non-repairable system [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2015, 138: 273-283.
- [9] Huang M S, Wang Q H, Li Y H, et al. An approach for improvement of avionics reliability assessment based on Copula theory [C]// 9th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety. Guiyang, 2011: 179-183.
- [10] Zhao Y G, Ang A H S. System reliability assessment by method of moments [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2003, 129(10): 1341-1349.
- [11] Chen Z Z, Liu Y, Huang H Z, et al. A reliability allocation method considering failure dependence [C]// ASME 2013 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Portland, 2013: 12944.
- [12] Gu Y K, Fan C J, Liang L Q, et al. Reliability calculation method based on the Copula function for mechanical systems with dependent failure [J]. *Annals of Operations Research*, 2022, 311(1): 99-116.
- [13] Wang Y Q, Yam R C M, Zuo M J, et al. A comprehensive reliability allocation method for design of CNC lathes [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2001, 72(3): 247-252.
- [14] Liu X T, Zheng S L, Feng J Z, et al. Reliability reallocation for fuel cell vehicles based on genetic algorithm [J]. *Quality and Reliability Engineering International*, 2015, 31 (8) : 1495-1502.
- [15] 杨周, 朱云鹏, 张义民, 等. 基于 Copula 函数的数控车床可靠性综合分配方法[J]. 兵工学报, 2016, 37(1): 131-140.  
(Yang Zhou, Zhu Yun-peng, Zhang Yi-min, et al. A comprehensive reliability allocation method for numerical-controlled lathes based on Copula function [J]. *Acta Armamentarii*, 2016, 37(1): 131-140.)
- [16] Mohammadfam I, Khajevaadi A A, Dehghani H, et al. Analysis of factors affecting human reliability in the mining process design using fuzzy Delphi and DEMATEL methods [J]. *Sustainability*, 2022, 14(13): 8168.
- [17] 刘洋. 数控机床子系统相关性分析与可靠性分配[D]. 沈阳: 东北大学, 2017.  
(Liu Yang. Correlation analysis and reliability allocation of CNC machine tool subsystems [D]. Shenyang: Northeastern University, 2017.)
- [18] Chang K H. A novel reliability allocation approach using the OWA tree and soft set [J]. *Annals of Operations Research*, 2016, 244(1): 3-22.
- [19] 罗军. 车削中心可靠性建模与预计技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.  
(Luo Jun. Research on reliability modeling and prediction technology of turning center [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.)