

基于区间层次分析法的数控机床可靠性预计

郝庆波^{1,2}, 杨兆军¹, 陈传海¹, 陈 菲¹, 李国发¹

(1. 吉林大学 机械科学与工程学院, 长春 130022; 2. 空军航空大学 力学教研室, 长春 130022)

摘要:针对将传统相似比较法用于数控机床可靠性预计时,评价对象和相似产品之间可靠性水平的差异程度很难准确评定的问题,提出了一种引入区间层次分析的数控机床可靠性预计方法。首先分析了整机和子系统的可靠性关系,建立了整机的可靠性预计模型。在子系统可靠性预计过程中,充分利用了相似产品的可靠性数据。全面分析了评价对象和相似产品之间的差异,建立了可靠性修正因子评估模型。使用区间层次分析法求出了可靠性修正因子,实现了确定性信息和模糊信息的互补。结合实例进行了数控机床的可靠性预计,验证了该方法的可行性。

关键词:机床; 可靠性预计; 相似比较法; 区间层次分析法

中图分类号:TG659 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2012)04-0845-06

Reliability prediction for NC machine tool based on interval AHP

HAO Qing-bo^{1,2}, YANG Zhao-jun¹, CHEN Chuan-hai¹, CHEN Fei¹, LI Guo-fa¹

(1. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. Department of Mechanics, Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)

Abstract: In view of the problem that it is difficult to determine the difference degree of reliability levels between the evaluation object and similar products when using similar comparison method to predict the reliability level of NC machine tools, a reliability prediction method introducing interval analytic hierarchy process(AHP) was presented. The relationship between the whole machine and its subsystems was analyzed, and a reliability prediction model was built for the whole machine. The reliability data of similar products were used in the course of reliability prediction for subsystems. The differences between the evaluation object and the similar products were comprehensively analyzed and an evaluation model for reliability correction factor was built. The reliability correction factor was obtained by using the interval AHP, realizing the mutual complement of certain and fuzzy informations. The application of this method was illustrated with an example, verifying the feasibility of the method.

Key words: machine tool; reliability prediction; similar comparison method; interval analytic hierarchy process(AHP)

收稿日期:2011-10-19.

基金项目:国家科技重大专项项目(2010ZX04014-011, 2011ZX04014-011); 吉林大学研究生创新研究计划项目(20111057).

作者简介:郝庆波(1983-),男,博士研究生。研究方向:数控机床可靠性设计技术。E-mail:haoqingbo@gmail.com

通信作者:杨兆军(1956-),男,教授,博士生导师。研究方向:数控装备可靠性技术。E-mail:yzj@jlu.edu.cn

可靠性预计在数控机床可靠性设计过程中有重要的作用。通过可靠性预计,可以审查设计任务书中提出的可靠性指标能否达到;可以对设计方案进行比较,选择出既能满足功能和可靠性要求,又能实现较好的性价比的优选方案;还可以发现设计中的薄弱环节,及时采取改进措施^[1-2]。

目前工程上常用的可靠性预计方法有:元件计数法、应力分析法、相似比较法、功能预计法、相似复杂性法、失效物理分析法等^[3-8]。相似比较法是一种包含了传统预计、可靠性试验、故障分析等诸多信息的预计方法,通过寻求在用途、性能和结构等方面与研制对象相类似的现有产品,将其可靠性水平通过修正后作为研制产品可靠性的预计值^[6]。该方法用于数控机床的可靠性预计存在以下困难:①在现实中要找到与新研发机床相似程度很高并有完整故障记录的相似产品较为困难;②数控机床可靠性水平的影响因素较多,预计对象与相似产品之间的可靠性差异程度很难准确评定。

随着数控机床向着系列化、标准化、模块化的方向不断发展,要找到与新研发机床在某一个子系统上基本相同或者非常相似的现有机床相对容易,也更容易获取大量的有用数据。因此,在清楚整机和子系统之间可靠性关系的基础上,只要预计出每个子系统的可靠性水平,即可得出整机的可靠性预计值。区间层次分析法是将区间分析^[9]和层次分析法^[10]相结合的一种多属性决策方法,相比于传统层次分析法,使用区间数代替实数表达不确定信息,更适合处理有多种影响因素的不确定性问题^[11]。基于上述分析,本文提出以子系统为研究对象,在采用相似比较法预计子系统可靠性的基础上,引入区间层次分析来评估相似产品和研制对象之间的可靠性差异程度,进一步提高预计结果的准确性,最终建立一种现阶段适合于数控机床可靠性预计的有效方法。

1 整机可靠性预计方法和模型

根据上述分析建立数控机床可靠性预计流程图,如图 1 所示。

1.1 构建可靠性框图

根据数控机床各组成部分之间的功能逻辑关系,可将其视为由基础部件、主传动系统、进给系统、液压系统、气动系统、润滑系统、冷却系统、排屑系统、防护系统、自动换刀装置、数控系统、伺服

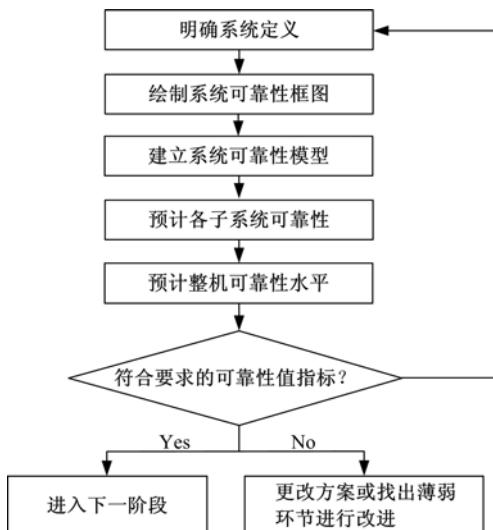


图 1 数控机床可靠性预计流程图

Fig. 1 Reliability prediction flow chart
of NC machine tools

系统、电气系统、监测和反馈系统等 14 个子系统串联而成,依次用 $S_1, S_2, S_3, \dots, S_{14}$ 表示,据此构建了整机可靠性框图。

1.2 建立整机可靠性预计模型

数控机床整机和子系统之间的可靠性关系满足下式:

$$R_S(t) = R_1(t) R_2(t) \cdots R_{14}(t) \quad (1)$$

式中: $R_S(t)$ 为整机的可靠度; $R_i(t)$ 为第 i 个子系统的可靠度, $1 \leq i \leq 14$ 。

由于 $R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$, 所以式(1)可转化为

$$e^{-\int_0^t \lambda_S(t) dt} = \prod_{i=1}^{14} e^{-\int_0^t \lambda_i(t) dt} \quad (2)$$

式中: $\lambda_S(t)$ 为整机的故障率; $\lambda_i(t)$ 为第 i 个子系统的故障率,进而可得出

$$\lambda_S(t) = \sum_{i=1}^{14} \lambda_i(t) \quad (3)$$

即整机故障率等于各子系统故障率之和。

由于各子系统的故障时间不一定服从同种分布,式(1)和式(3)存在函数不清晰的问题,这也导致在实际工程中很难使用这两种模型进行可靠性预计。这时可采用平均故障率来代替故障率函数。平均故障率的定义如下:

当 $t = T$ 时,即试验截止时间为 T 时,产品在时间区间 $[0, T]$ 内的平均故障率 $\bar{\lambda}$ 为

$$\bar{\lambda} = \int_0^T \lambda(t) dt / T \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)可得

$$\bar{\lambda}_S = \bar{\lambda}_1 + \bar{\lambda}_2 + \dots + \bar{\lambda}_{14} = \sum_{i=1}^{14} \bar{\lambda}_i \quad (5)$$

式中: $\bar{\lambda}_S$ 为整机的平均故障率; $\bar{\lambda}_i$ 为第 i 个子系统的平均故障率。

通过上式,可以不考虑故障时间服从何种分布,只要预计出所有子系统的平均故障率,就可以根据上述可靠性模型预计出整机的平均故障率。

2 子系统可靠性预计方法和模型

2.1 建立子系统可靠性预计模型

以子系统 S_i 为例,根据相似产品选取原则,假设共选出 m 台相似产品(仅指子系统 S_i 相似,其他子系统不一定相似),其中,第 j 个相似子系统的平均故障率为 $\bar{\lambda}_{ij}$ ($1 \leq j \leq m$)。

在这些相似产品中,每一个产品与研制对象都会有些差异,这里的差异不单指外观和功能上的,还包括设计、制造装配、使用以及生产企业的管理等一系列可能影响产品可靠性的各因素的差异。通过分析研制对象与相似产品的各方面差异,评估出两者可靠性水平的差异程度,进而赋予相应的可靠性修正因子。这样,需要预计的子系统的平均故障率可通过下式得出:

$$\bar{\lambda}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (\bar{\lambda}_{ij} / W_j) \quad (6)$$

式中: W_j 为第 j 个相似产品的可靠性修正因子,代表了通过对比研制对象的第 i 个子系统与第 j 台相似产品的第 i 个子系统之间的差异,评估出两者可靠性水平(平均故障率的倒数)的比值。

可靠性修正因子 W_j 的准确程度直接决定了预计结果的准确性。因此,修正因子评价模型的建立就显得尤为重要。

2.2 建立可靠性修正因子评价模型

确定可靠性修正因子需要综合考虑产品的组成结构、设计、制造装配、使用等多个环节。但在实际操作中,会发现上述指标过于笼统,较难量化。因此,应尽可能地考虑把上述几个大的环节拆分成容易量化的指标,从而建立起更全面的指标体系来评价差异程度。

针对上述特点,通过查阅相关手册和对大量现场故障数据进行分析,得出了数控机床寿命周期的各种可靠性影响因素,进而建立了数控机床子系统可靠性修正因子综合评价层次模型,如图 2 所示。

该层次模型包含三层,顶层为目标层,中间层

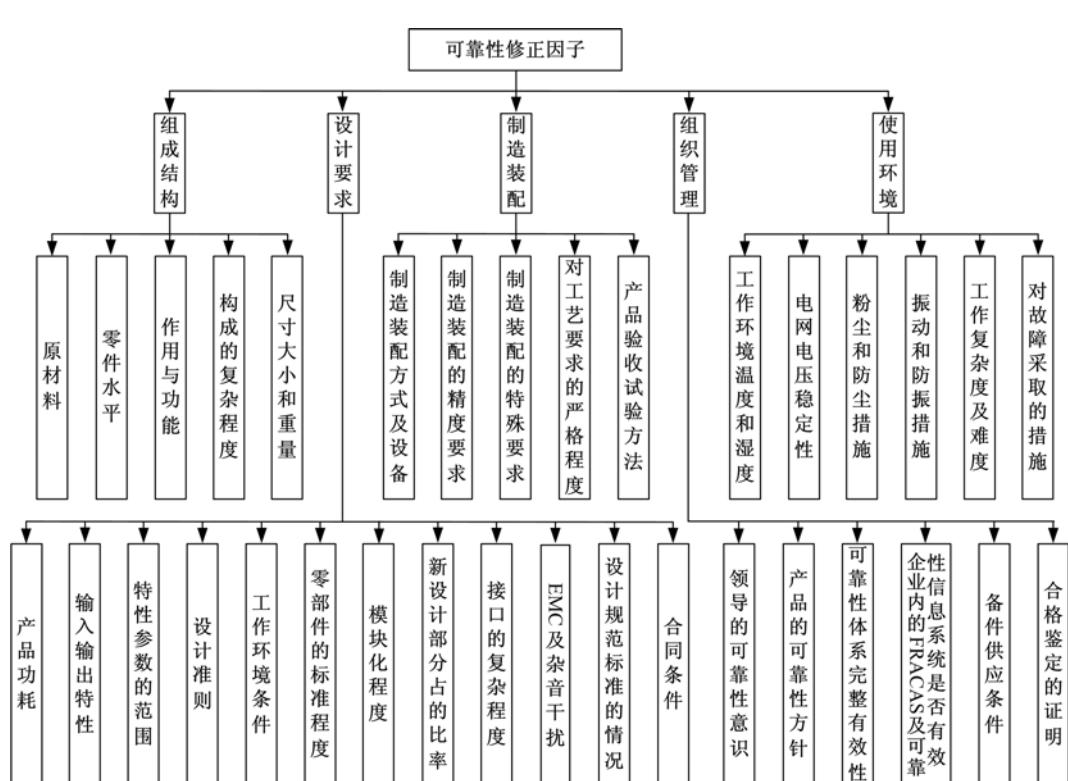


图 2 数控机床子系统可靠性修正因子综合评价层次模型

Fig. 2 Hierarchical model of correction factor comprehensive evaluation for subsystems of NC machine tools

为准则层,底层为指标层。准则层包含组成结构、设计、制造装配、组织管理、使用环境 5 个类因素,依次用 U_1, U_2, \dots, U_5 表示,相应地,建立影响因素集 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_5\}$ 。每一个类因素下又包含了若干个子因素,也就是具体的对比指标,从而构建了该层次模型的指标层。例如,对于组成结构 U_1 来说,考虑了原材料、零件水平、作用和功能、复杂程度、大小和重量 5 个子因素,分别用 $u_{11}, u_{12}, \dots, u_{15}$ 表示。

2.3 确定准则层的各个类因素的权重

各个类因素权重的确定,是将影响可靠性水平的各个类因素按其对目标的影响程度大小分别赋予不同的权重,以充分体现各个类因素在可靠性修正因子综合评价过程中的地位和作用。

在一般问题的层次分析法 (Analytic hierarchy process, AHP) 中,构造两两比较判断矩阵时通常采用 3 标度、5 标度或 9 标度来度量。不管采用上述哪种标度法,都只是数值的类型和范围不同而已,其重要程度本质上都是一个确定值。即在两两比较时只考虑人的判断的两种可能的极端情况:以隶属度 1 选择某个标度值,同时又以隶属度 1 否定(以隶属度 0 选择)其他标度值,没有考虑人的判断的模糊性^[12]。但在现实中进行专家咨询时,专家们往往给出一个模糊范围,其处理结果必然是一个模糊范围。因此,AHP 在模糊环境下的扩展是有必要的。考虑到评价过程中的模糊性,对于准则层的 5 个类因素,根据相关领域专家的意见,按照 1~9 标度^[13]以区间数 $\tilde{a}_{kl} = [a_{kl}^-, a_{kl}^+]$ 进行相对重要程度赋值,构造各个类因素对目标的比较判断矩阵,即

$$\tilde{\mathbf{A}} = (\tilde{a}_{kl})_{5 \times 5} = [\mathbf{A}^-, \mathbf{A}^+] \quad (7)$$

式中: $\tilde{a}_{kl} = [a_{kl}^-, a_{kl}^+]$ 表示第 k 个类因素与第 l 个类因素相对于目标的重要性的比值,可以选取 1~9 范围内的任意区间数(或其倒数); $1 \leq k \leq 5, 1 \leq l \leq 5$; $\mathbf{A}^- = (a_{kl}^-)_{5 \times 5}, \mathbf{A}^+ = (a_{kl}^+)_{5 \times 5}$ 。

$\tilde{a}_{kl} = 1/\tilde{a}_{lk}$,因此专家仅需给出矩阵上三角的元素的值。区间数的运算可参考文献[14]。本文采用文献[9]中的方法(Interval eigenvector method, IEM)来求解表达各个类因素相对重要程度的权重向量,计算过程如下。

采用特征根向量法分别求出 \mathbf{A}^- 、 \mathbf{A}^+ 的权重向量,记为 \mathbf{x}^- 、 \mathbf{x}^+ 。然后由下式得出 $\tilde{\mathbf{A}}$ 的区间数权重向量,即

$$\tilde{\boldsymbol{\omega}} = (\tilde{w}_k)_{1 \times 5} = [\alpha \mathbf{x}^-, \beta \mathbf{x}^+] \quad (8)$$

式中:

$$\alpha = \left[\sum_{l=1}^5 \frac{1}{\sum_{k=1}^5 a_{kl}^+} \right]^{\frac{1}{2}}, \beta = \left[\sum_{l=1}^5 \frac{1}{\sum_{k=1}^5 a_{kl}^-} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

一般情况下, $0 < \alpha < 1 < \beta$ 时,该区间判断矩阵的一致性较好,即可采用。

若 $\mathbf{A}^- = \mathbf{A}^+$, 则 IEM 方法与传统 AHP 方法中的特征根法所求出的权重向量相同。

2.4 确定子因素的权重并判断差异程度

每一个子因素对上一层所属类因素的影响程度不同。此处,仍然采用准则层权重的确定方法来分别确定各个子因素对所属类因素影响的重要程度,同样可得到一组区间数权重向量

$$\tilde{\boldsymbol{\omega}}_k = (\tilde{w}_{kv})_{1 \times n} = [\alpha_k \mathbf{x}_k^-, \beta_k \mathbf{x}_k^+] \quad (10)$$

式中: $1 \leq k \leq 5$; \tilde{w}_{kv} 为第 k 个类因素下第 v 个子因素的权重。

例如, $\tilde{\boldsymbol{\omega}}_1$ 表示组成结构类因素中各子因素相对重要程度的权重向量, \tilde{w}_{14} 表示组成结构类因素中第 4 个子因素,即复杂程度的相对权重值。

对比指标层的每一个子因素,根据研制对象与相似产品对应子系统的差异程度,选取 1~9 范围内的区间数(或其倒数) $\tilde{Y}_{kv} = [Y_{kv}^-, Y_{kv}^+]$ 进行赋值, \tilde{Y}_{kv} 代表第 k 个类因素下第 v 个子因素的差异程度,两者完全相同取 [1, 1];新产品改变后导致可靠性水平提高的,根据可靠性水平提高的程度取 1~9 范围内相应的区间数;若改变后导致可靠性水平降低的,根据互反性取相应区间数的倒数。

根据子因素权重向量 $\tilde{\boldsymbol{\omega}}_k$ 和子因素的差异程度 \tilde{Y}_{kv} ,计算出第 k 个类因素的差异程度 \tilde{B}_k

$$\tilde{B}_k = \sum_{v=1}^n (\tilde{w}_{kv} \cdot \tilde{Y}_{kv}) \quad (11)$$

将通过式(8)和(11)得出的权重 \tilde{w}_k 和差异程度 \tilde{B}_k 代入下式,可得出第 j 个相似产品的子系统 S_i 的可靠性修正因子 \tilde{W}_j 为

$$\tilde{W}_j = \sum_{k=1}^5 (\tilde{B}_k \cdot \tilde{w}_k) / \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^5 (\tilde{B}_k \cdot \tilde{w}_k) \quad (12)$$

由上式得出的可靠性修正因子 $\tilde{W}_j = [\tilde{W}_j^-, \tilde{W}_j^+]$ 是区间数,需要对区间数进行解模糊化,通

常会直接取 \tilde{W}_j 的上下限均值作为子系统的修正因子。考虑到 \tilde{W}_j 的上下限差值较大时,表示该评定的不确定性范围较大,仅按其上下限均值赋值的风险就越大。为降低预计的风险程度,本文提出一种区间数解模糊化的方法,具体计算过程如下

$$\text{令 } M_{W_j} = \frac{W_j^- + W_j^+}{2}, D_{W_j} = \frac{W_j^+ - W_j^-}{2},$$

则

$$W_j = M_{W_j} + (2\alpha - 1) \times D_{W_j} \quad (13)$$

式中: α 是由专家选定的权值, $0 \leq \alpha \leq 1; 1 \leq j \leq m$ 。

当 $\alpha = 0$ 时, $W_j = W_j^-$, 这时决策者持谨慎心态; 当 $\alpha = 1/2$ 时, $W_j = \frac{W_j^- + W_j^+}{2}$, 这时决策者持中庸心态; 当 $\alpha = 1$ 时, $W_j = W_j^+$, 这时决策者持激进心态。

2.5 计算子系统及整机的可靠性水平

按照式(13)依次计算出所有 m 台相似产品的第 i 个子系统 S_i 的可靠性修正因子 W_i , 然后根据前期得出的各个相似子系统的平均故障率 λ_{ij} , 将 W_i 和 λ_{ij} 代入式(6), 即可求出第 i 个子系统的平均故障率预计值。

采用同样的方法预计出其他子系统的平均故障率, 代入式(5), 即可求得整机的平均故障率预计值 $\bar{\lambda}_s$ 。

3 应用实例

以某型号数控机床的主传动系统为例, 阐述本文模型的应用。依据相似产品选取原则, 共选择了 4 台相似产品, 相应的主传动系统 S_2 的平均故障率 $\bar{\lambda}_{21}、\bar{\lambda}_{22}、\bar{\lambda}_{23}、\bar{\lambda}_{24}$ 分别为 2.563×10^{-4} 、 1.880×10^{-4} 、 3.364×10^{-4} 、 2.363×10^{-4} 。

对于准则层的 5 个类因素, 选取相关领域专家和技术人员, 按照 2.3 节中提出的评判原则进行打分。综合各专家意见, 构造了如下的区间判断矩阵 \tilde{A} (见表 1)。

根据 IEM 方法计算出各个类因素的权重如下:

$$\tilde{\omega} = [[0.070, 0.114] [0.211, 0.285] [0.272, 0.353] [0.133, 0.156] [0.178, 0.229]]$$

得出准则层各因素的权重后, 下一步需计算准则层下的各子因素的权重及差异程度。首先构

造组成结构准则下各个子因素的权重矩阵 $\tilde{\omega}_1$ (见表 2)。

表 1 准则层各影响因素的权重矩阵

Table 1 Weight matrix for influence factors of criterion layer

	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5
U_1	[1.0, 1.0]	[0.2, 0.6]	[0.15, 0.5]	[0.5, 0.9]	[0.3, 0.7]
U_2		[1.0, 1.0]	[0.6, 1.0]	[1.3, 2.1]	[0.9, 1.6]
U_3			[1.0, 1.0]	[1.7, 2.3]	[1.2, 1.8]
U_4				[1.0, 1.0]	[0.5, 1.0]
U_5					[1.0, 1.0]

表 2 组成结构准则下属的子因素的权重矩阵

Table 2 Weight matrix of subfactors within U_1

	u_{11}	u_{12}	u_{13}	u_{14}	u_{15}
u_{11}	[1.0, 1.0]	[0.3, 0.7]	[0.4, 0.8]	[0.5, 0.95]	[1.0, 1.5]
u_{12}		[1.0, 1.0]	[1.1, 1.5]	[1.4, 1.8]	[2.2, 2.7]
u_{13}			[1.0, 1.0]	[1.1, 1.6]	[1.7, 2.3]
u_{14}				[1.0, 1.0]	[1.2, 1.7]
u_{15}					[1.0, 1.0]

根据 IEM 计算出组成结构准则下各个子因素的权重 $\tilde{\omega}_1 = [[0.120, 0.164] [0.282, 0.328] [0.224, 0.263] [0.173, 0.202] [0.118, 0.124]]$

对比研制对象和第 1 台相似产品, 通过专家综合评价, 得出组成结构准则下 5 个子因素的差异程度(见表 3)。

表 3 组成结构准则下属的子因素的差异程度

Table 3 Discrepancy degree of subfactors within U_1

子因素	u_{11}	u_{12}	u_{13}	u_{14}	u_{15}
差异程度	[0.8, 1.0]	[1.3, 1.5]	[1.2, 1.6]	[0.5, 0.8]	[0.9, 1.1]

代入式(11)可计算出组成结构准则的差异程度 $\tilde{B}_1 = [0.92, 1.38]$ 。采用同样方法得出其他类因素的差异程度(见表 4)。

表 4 准则层各影响因素的差异程度

Table 4 Discrepancy degree for influence factors of criterion layer

因素	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5
差异程度	[0.92, 1.38]	[1.02, 1.45]	[0.87, 1.23]	[0.83, 1.10]	[0.73, 0.97]

将准则层各类因素的权重和表 4 中的差异程度代入式(12), 可得出研制对象和第 1 台相似产品对比的可靠性修正因子 $\tilde{W}_1 = [0.76, 1.40]$ 。代入式(13), 取 $\alpha = 0.45$, 可得 $W_1 = 1.046$ 。表示新研制机床主传动系统的可靠性水平略高于第 1 台相似产品。

采用上述方法,依次求出 W_2 、 W_3 、 W_4 分别为 0.875、1.357、0.966。代入式(6)可得出该数控机床的主传动系统平均故障率 λ_e 的预计值为 2.373×10^{-4} 。

采用同样方法可以预计出其他子系统的平均故障率,进而可以预计出整机的平均故障率和其他可靠性指标。

4 结 论

(1) 在相似比较法基础上,提出了一种引入区间层次分析的数控机床可靠性预计方法,建立了整机和子系统的可靠性预计模型,对有效解决目前困扰数控机床可靠性预计的数据缺乏及预计精度较差的问题提供了一种新思路。

(2) 综合考虑了设计、制造装配、使用环境和组织管理等多个环节的影响,并结合这些因素制定了数控机床可靠性修正因子综合评价模型,通过该模型能得出更为准确合理的可靠性修正因子,提高预计结果的精确性。

(3) 该方法既考虑了大量已有相似产品的现有故障数据,又结合了相关领域专家长期积累的经验,实现了数控机床可靠性预计过程中确定性信息和模糊信息的互补。

参考文献:

- [1] Blischke W R, Murthy D N P. Reliability: Modeling, Prediction, and Optimization[M]. New York: Wiley, 2000: 517-519.
- [2] Isis Didier Lins, Márcio das Chagas Moura, Enrico Zio, et al. A particle swarm-optimized support vector machine for reliability prediction[J]. Quality and Reliability Engineering International, 2012, 28(2): 141-158.
- [3] MIL-HDBK-217F, Notice 2. Military handbook: reliability prediction of electronic equipment [S]. Washington DC: Department of Defense, 1995.
- [4] Lee Seung-woo, Lee Hwa-ki. Reliability prediction system based on the failure rate model for electronic components[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2008, 22(5): 957-964.
- [5] NSWC-06. Handbook of reliability prediction procedures for mechanical equipment[S]. Maryland: Naval Surface Warfare Center, Department of Defense, 2006.
- [6] 张增照. 以可靠性为中心的质量设计、分析和控制[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 51-67.
- [7] Jin Yan, Huang Zhao-feng. Reliability prediction methods: a survey and selection for mechanical design-for-reliability[C]// Proceedings of ASME 2009 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, California, 2009: 759-771.
- [8] 陈云霞, 谢汶姝, 曾声奎. 功能分析与失效物理结合的可靠性预计方法[J]. 航空学报, 2008, 29(5): 1133-1138.
Chen Yun-xia, Xie Wen-shu, Zeng Sheng-kui. Functional analysis and physics of failure associated reliability prediction[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2008, 29(5): 1133-1138.
- [9] 徐玖平, 吴巍. 多属性决策的理论与方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 285-287.
- [10] Lee Gwo-luh, Lin Horng-jyh, Yu Tse-wei, et al. Optimal allocation for improving system reliability using AHP[C]// The 30th International Conference on Software Engineering, Leipzig, Germany, 2008: 159-163.
- [11] 杨兆军, 郝庆波, 陈菲, 等. 基于区间分析的数控机床可靠性模糊综合分配方法[J]. 北京工业大学学报, 2011, 37(3): 321-329.
Yang Zhao-jun, Hao Qing-bo, Chen Fei, et al. A comprehensive fuzzy reliability allocation method of NC machine tools based on interval analysis [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2011, 37(3): 321-329.
- [12] 郭齐胜, 董志明, 李亮, 等. 系统建模与仿真[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 243-245.
- [13] 高美丽, 洪军, 刘瑞萍, 等. 多准则数控机床模块谱系聚类的划分方法研究[J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(5): 131-136.
Gao Xian-ming, Hong Jun, Liu Rui-ping, et al. Numerical control machine tool module partition with multi-criteria pedigree clustering method[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(5): 131-136.
- [14] Moore R, Lodwick W. Interval analysis and fuzzy set theory[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2003, 135(1): 5-9.