

基于层次分析法的数控机床精度模糊评价^①

封志明^{②*} 殷国富^{**}

(* 西华大学机械工程与自动化学院 成都 610039)

(** 四川大学制造科学与工程学院 成都 610065)

摘要 为了全面准确地评价数控机床的精度,建立了考虑了几何误差、位置误差、热误差及加工误差因素,分为三个层次的数控机床精度评价指标体系。该体系采用层次分析法(AHP)确定数控机床各项性能指标的权重系数,运用模糊综合评判法对各项精度指标进行评价,以中间形梯形分布函数为依据构造隶属度函数,利用软件实现算法的仿真,并生成精度评价报告。以某型五轴数控机床为研究对象,运用三级模糊综合评价法对其精度进行了评价,得出了有利于改进机床精度的结果,验证了上述精度评价方法的可行性。该方法可用于评价其他机床的精度。

关键词 数控(CNC)机床,精度评价,模糊评价,层次分析法(AHP)

0 引言

随着数控机床在机械制造领域应用的迅猛发展,对数控机床加工精度的要求日益提高。为确保加工零件的质量,目前一般都是对加工完毕后的零件进行质量检查,发现问题后再想办法进行修复。这种方法效率低、误差率高、周期长,可能会导致长时间的停机,使得产品制造成本大大增加。理想的解决办法是对机床定期进行检测,发现其精度的变化,据此变化机床误差来源,并针对各个误差来源进行补偿以消除或减少机床误差,使机床的精度保持在要求的范围内。这样,就需要制订一套科学、合理地评价机床当前精度的方法,这是迫切需要解决的问题。目前对机床精度评价的研究较少,Shimizu 对机床精度评价技术的现状进行了综述^[1],Ueno 等对数控机床定位精度的评价进行了研究^[2],Wu 等通过建立一种几何模型对数控铣床的精度评价进行了深入的研究^[3]。本文研究了基于层次分析法的模糊综合评价对数控机床的精度进行评价。

1 模糊综合评价法

实际生产中,专家常用精度好坏等评语来综合评价机床的精度,大致给出一个精度等级,评价时不可避免地会受到个人主观因素的影响和当时环境的干扰。由于数控机床的精度评价所涉及的指标很多,而且一般是定性的,无法利用定量的方法直接进行对比分析,具有鲜明的模糊特性,因此数控机床的精度评价是一个多层次的模糊综合评判问题。

模糊集合的概念最早是由美国学者 Zadeh 于 1965 年提出的^[4]。之后几十年,模糊数学理论发展迅速,基于模糊数学理论的模糊综合评判方法取得很大进展,并在机械工程领域得到广泛的成功应用。张广鹏基于模糊数学的原理,提出一种机床整机动态特性的评价方法^[5];王桂萍提出应用模糊可拓层次分析法评价数控机床绿色度的方法^[6];刘世豪运用模糊综合评判法对数控机床各项性能指标进行评价研究^[7]。但是利用模糊综合评价对数控机床精度进行的研究几乎没有。为此,本文引入模糊综合评价法对数控机床精度进行全面的分析和评价。

① 国家科技重大专项(2013ZX04005-012),四川省教育厅自然科学一般项目(12ZB133)和西华大学重点实验室开放研究基金(szjj2013-041)资助项目。

② 男,1981年生,博士生;研究方向:计算机集成制造,数控机床精度;联系人,E-mail:federers@sohu.com (收稿日期:2013-03-13)

1.1 初级模糊综合评价

基于模糊数学的综合评判方法根据模糊数学的隶属度理论,把定性评价转化为定量评价,即用模糊数学对受到多种因素制约的事物或对象做出一个总体的评价。运用模糊综合评判法对研究对象进行评价时,需要构造等级模糊子集,把反映被评事物的模糊指标进行量化(即确定隶属度),然后利用模糊变换原理对各指标综合。其最重要的步骤是建立因素集 U 与评价集 V 之间的模糊关系 R ,并利用采用数理统计、专家估值或层次分析法确定权重向量 W ,最终得到 $Y = WR$,根据 Y 值进行结果评价,这个过程即为初级模糊综合评价^[8]。

1.2 多级模糊综合评价

由于机床的精度是一个多目标决策问题,因此必须应用多级评判模型。建立多级评判模型的原则是将要考虑的诸多因素按属性分为若干层,首先在每一层内部进行初级综合评判,再对各层的评判结果进行层次间的高一层次的综合评判。多级模糊综合评判的步骤如下^[7]:

(1) 将因素集 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 按某种属性分成 s 个子集:

$$U_i = \{u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{ip}\}, i = 1, 2, \dots, s \quad (1)$$

(2) 对每一个子因素 U_i , 分别作出单因素综合评价。设评价集为 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$, U_i 中的各因素的权重向量为

$$A_i = (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{im}) \quad (2)$$

若 R_i 为单因素矩阵, 则得一级评判向量:

$$B_i = A_i \cdot R_i = (b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{im}), i = 1, 2, \dots, s \quad (3)$$

(3) 对因素 U 作二级综合评判, 将每个 U_i 视为 U 的一个因素, 将 B_i 作为它的单因素评价向量, 可得隶属关系矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1m} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2m} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ b_{s1} & b_{s2} & \dots & b_{sm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

按 U_i 的重要性给出权重分配:

$$A = (a_1, a_2, \dots, a_s) \quad (5)$$

则二级模糊综合评判向量为

$$B = A \cdot R = (b_1, b_2, \dots, b_m) \quad (6)$$

二级模糊综合评判模型的框图如图 1 所示。

若一级因素集 $U_i (i = 1, 2, \dots, s)$ 仍含有较多的因素, 还可将 U_i 再细分, 得到三级模糊综合评判模型、四级模糊综合评判模型等。由于影响数控机床

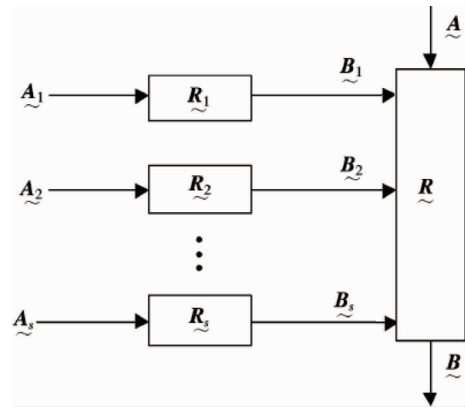


图 1 二级模糊综合评判模型图

精度的因素较多, 因此本文采取三级模糊综合评判模型对数控机床综合精度进行评价。

2 数控机床精度评价模型

2.1 建立数控机床精度指标评价体系

影响数控机床精度的因素包括几何误差、位置误差、热误差误差、加工误差等。为了全面准确地评价数控机床的精度, 运用层次分析法 (AHP)^[9] 的思想建立了如图 2 所示的评价指标体系。

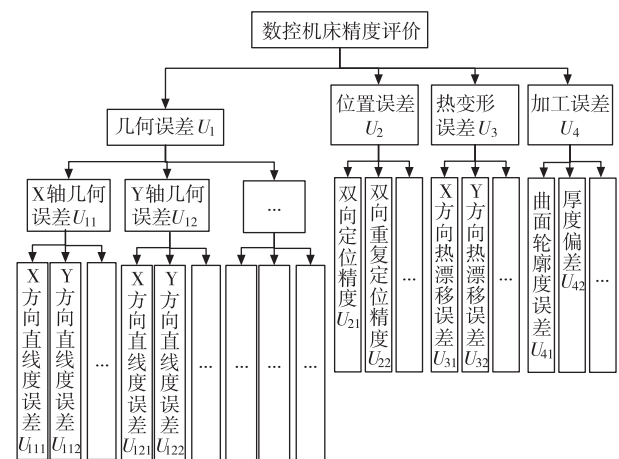


图 2 数控机床精度指标体系

数控机床精度指标体系分为三个层次, 第一层为总目标因素集 $U = \{U_1, U_2, U_3, U_4\}$, U_1 为几何误差, U_2 为位置误差, U_3 为热变形误差, U_4 为加工误差。第二层将第一层的各影响因素分解, 其中 U_1 几何误差可以分解为 X 轴几何误差、Y 轴几何误差、Z 轴几何误差等 8 个分项。 U_2 位置误差包括双向定位误差、双向重复定位误差等 5 项指标; U_3 热变形误差包括 X 方向热漂移误差、Y 方向热漂移误

差等5项指标; U_4 加工误差包括外形曲面轮廓度误差、厚度偏差等4项指标。由于几何误差指标集较多,因此又将第二层中几何误差的8个分项细分,作为评价指标体系的第三层。如X轴几何误差包括X方向直线度误差、Y方向直线度误差等5项指标。

2.2 建立数控机床精度评价的评价集

评价集是评价人员对各层次评价指标所给出的评语集合。根据数控机床各项精度指标的特点,给出评价集 $V = \{v_i\}$,共设5个评价等级,即 $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$,其中 $v_1 = \{\text{很好}\}$, $v_2 = \{\text{较好}\}$, $v_3 = \{\text{一般}\}$, $v_4 = \{\text{较差}\}$, $v_5 = \{\text{很差}\}$ 。因此数控机床精度指标的评价集为 $V = \{\text{很好,较好,一般,较差,很差}\}$ 。对于不同的评价指标而言,其评语等级所代表的含义各不相同。

2.3 确定数控机床精度评价指标的权重

确定指标的权重带有一定的主观性,用不同方法确定的权重分配,可能不尽一致,最终可能导致评价结果的不确定性。因而在实际应用中,不论用哪种方法确定权重分配,都应当依赖于较为合理的专业解释。在进行数控机床精度评价时,各项指标的权重系数对最终的评判结果有很大的影响,不同的权重系数会导致不同的评判结果,因此正确确定权重系数至关重要。确定指标权重的方法很多,包括专家评分法、成对比较法、相关系数法及熵权法等。本文采用层次分析法(AHP)建立评价指标体系,因此在确定权重时,应该分别计算各个层次的权重,并且次级评价指标的权重应考虑其高层评价指标在所有评价指标中的权重分配。

2.3.1 确定第一层次精度影响因素权重

某些统计方法分析结果,可提供有关因素权重分配的客观信息。因此在确定第一层次精度影响因素权重时,可根据数控机床各误差源比例分配的统计结果^[10],并经专家修正,最终确定权重为 $A = [0.25, 0.10, 0.40, 0.25]$ 。

2.3.2 确定第二、第三层次精度指标权重

用(AHP)确定第二层次的指标分项或精度指标权重时,最关键的一步是建立判定矩阵,针对每层每项的各下属因素两两进行比较来确定矩阵中各元素的值^[11]。其判断标准按表1给出元素*i*相对于元素*j*的重要性比例标度 a_{ij} 。显然,元素*j*相对于元素*i*的重要性比例尺度 $a_{ji} = 1/a_{ij}$ 。

这样, n 个元素对于所属的上一层元素便可构成一个以重要性标度 a_{ij} 为元素的两两比较判断矩阵 $I = (a_{ij})_{n \times n}$,本文判定矩阵中各个元素的值由数

控机床设计专家组根据机床各精度指标的重要程度结合表1给出。 I_{21} 、 I_{22} 、 I_{23} 、 I_{24} 分别表示几何误差、位置误差、热变形误差及加工误差的判定矩阵。

表1 判定尺度表

标度 a_i	含 义
1	表示两个元素相比,具有同样重要性
3	表示两个元素相比,前者比后者稍微重要
5	表示两个元素相比,前者比后者明显重要
7	表示两个元素相比,前者比后者强烈重要
9	表示两个元素相比,前者比后者极端重要
2,4	表示上述相邻判断的中间值
6,8	

以热变形误差为例,经过专家根据热变形误差的重要程度打分,得到判断矩阵 I_{23} :

$$I_{23} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 & 5 & 5 \\ 1 & 1 & 2 & 5 & 5 \\ 0.5 & 0.5 & 1 & 7 & 7 \\ 0.2 & 0.2 & 0.14 & 1 & 1 \\ 0.2 & 0.2 & 0.14 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

对于两两比较判断矩阵 I ,通过一致性检验后,根据 $IA^T = \lambda_{\max} A^T$,便可求得矩阵 I 的最大特征值 λ_{\max} 及其对应的特征向量 A^T 。 A 经归一化处理得到权重向量,权重向量表示某项的各下属因素相对于上属因素重要程度的量化评判结果,即下层各因素对上层所隶属因素的重要程度权重系数的分配。经计算可得:

$$A_3 = [0.322, 0.322, 0.252, 0.052, 0.052] \quad (8)$$

用同样的方法,可分别求得二级指标权重系数,计算结果详见表2。

几何误差下的三级指标权重系数可由同样的方法计算得到。

2.4 确定各评价指标项当前精度的隶属度

隶属函数是模糊评价中最为基本的概念,应用模糊评价法解决实际问题时,隶属函数的确定非常重要。常用的隶属度函数确定方法包括模糊统计法、例证法、专家经验法及二元对比排序法等^[12]。在工程中,常见的是以实数域 R 为论域,根据讨论对象的特点来选择隶属函数的形式,再根据隶属函数所要满足的条件,由经验或试验数据来确定较符合实际的参数。常用的模糊分布包括正态分布、梯形分布、岭形分布及抛物形分布等。文献[13]用模糊集表征了零件尺寸公差带,并基于模糊概率理论,

表2 数控机床精度指标权重系数

总指标	一级指标	权重系数	二级指标	权重系数
数控机床综合精度	几何误差	0.25	X轴几何误差	0.222
			Y轴几何误差	0.222
			∴	∴
	位置误差	0.10	双向定位误差	0.262
			双向重复定位误差	0.474
			∴	∴
	热变形误差	0.40	X方向热漂移误差	0.322
			Y方向热漂移误差	0.322
			∴	∴
	加工误差	0.25	外形曲面轮廓度误差	0.533
			厚度偏差	0.267
			∴	∴

给出了零件模糊合格与模糊不合格的概率计算公式,用中间梯形分布构造了零件的合格公差带分布函数。该方法不仅考虑了零件尺寸的随机性,而且考虑了尺寸公差带的模糊性,与传统的零件合格概率相比,更接近实际情况。目前中间形梯形分布函数

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & 0 \leq x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ 1, & c \geq x \geq b \\ \frac{d-x}{d-c}, & c < x < d \\ 0, & x \geq d \end{cases} \quad (9)$$

已经广泛用于零件的合格公差带分布描述中。其中, a, b, c, d 是参数,且 $a < b < c < d$,如图3所示。

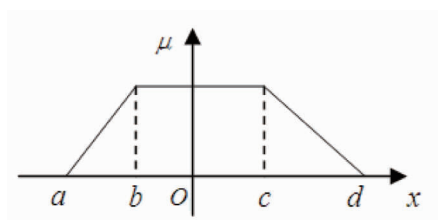


图3 中间形梯形分布函数

由于机床精度评价指标的允差范围和零件的合格公差带具有相似性,因此以中间形梯形分布函数为依据,可以构造机床精度评价指标的隶属函数

V_1, V_2, V_3, V_4, V_5 , 分别表示 $0 \leq x \leq a$ 、 $a < x < b$ 、 $c \geq x \geq b$ 、 $c < x < d$ 及 $x \geq d$ 的隶属度。其中 x 为精度指标项目的测量值。 $V_1 - V_5$ 由下式表示:

$$V_1 = [1, 0, 0, 0, 0] \quad (10)$$

$$V_2 = \left[\frac{x-a}{b-a}, 1 - \frac{x-a}{b-a}, 0, 0, 0 \right] \quad (11)$$

$$V_3 = [0, 0, 1, 0, 0] \quad (12)$$

$$V_4 = \left[0, 0, 0, \frac{d-x}{d-c}, 1 - \frac{d-x}{d-c} \right] \quad (13)$$

$$V_5 = [0, 0, 0, 0, 1] \quad (14)$$

为了使该数控机床综合精度的评判结果具有尽可能高的客观性,参数 a, b, c, d 值的确定非常关键。为此成立由该型数控机床设计技术人员、高校专家、用户等共 50 人组成的评价小组,采用问卷调查法,由小组成员确定评价指标体系中的各个指标的参数 a, b, c, d 的值。

以 X 轴 X 方向直线度误差为例,该指标项的允差值为 0.01,由评价小组确定的隶属函数参数分别为: $a=0.005, b=0.01, c=0.015, d=0.02$ 。当实测值 $x=0.007$,根据上述隶属度函数(式(11)),可得该指标的评价向量 $B_i = [0.4, 0.6, 0, 0, 0]$ 。

3 应用实例

应用实例为某龙门五轴加工中心机床。该机床主要应用于汽车工业中的模具制造、原型制造、大型钢模和铸铁模具的制造以及航空航天工业中的铝结构件的高速加工,是加工精度要求较高、形状复杂零件和模具行业、航空航天工业的理想设备。本文以该机床为研究对象,运用三级模糊综合评价法对其精度进行评价。

3.1 建立单因素模糊评价矩阵

根据评价指标体系中各指标的隶属度函数,以及实际测量的值,可很方便地求得该单因素的模糊评价矩阵 R_i 。以热变形误差 U_3 为例,对其二级指标中的各个因素进行评价,根据实测值以及对应的隶属度函数,最终得到评价结果如表3所示。

根据表3的评价结果,可得热变形误差单因素模糊综合评价矩阵

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.7 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.6 & 0.4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0.8 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

表3 热变形误差评价结果

一级指标	二级指标	权重	隶属度				
			很好	较好	一般	较差	很差
热变形误差 U_3	X方向热漂移误差	0.322	0.3	0.7	0	0	0
	Y方向热漂移误差	0.322	1	0	0	0	0
	Z方向热漂移误差	0.252	0.6	0.4	0	0	0
	绕X轴转角误差	0.052	0	0	1	0	0
	绕Y轴转角误差	0.052	0.8	0.2	0	0	0

3.2 各项精度的模糊综合评价

单因素模糊评价矩阵建立之后,根据本文所求得的二级指标权重向量,即可求得一级指标的单因素的模糊综合向量 B_i 。以热变形误差 B_3 为例,有

$$B_3 = A_3 \cdot R_3 = \begin{bmatrix} 0.322 \\ 0.322 \\ 0.252 \\ 0.052 \\ 0.052 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 0.3 & 0.7 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.6 & 0.4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0.8 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$= [0.611, 0.337, 0.052, 0, 0] \quad (16)$$

由评价结果可知,该数控机床的热变形精度很好,其隶属度为 61.1%。

用同样的方法,可以求得

$$B_1 = [0.833, 0.120, 0.047, 0, 0] \quad (17)$$

$$B_2 = [0.625, 0.173, 0.134, 0.068, 0] \quad (18)$$

$$B_4 = [0.765, 0.214, 0.021, 0, 0] \quad (19)$$

根据机床精度一级指标的权重向量: $A = [0.25, 0.10, 0.40, 0.25]$, 则该数控机床精度的综合模糊评价结果为

$$B = A \cdot R = [0.25, 0.10, 0.40, 0.25] \cdot \begin{bmatrix} 0.833 & 0.120 & 0.047 & 0 & 0 \\ 0.625 & 0.173 & 0.134 & 0.068 & 0 \\ 0.611 & 0.337 & 0.052 & 0 & 0 \\ 0.765 & 0.214 & 0.021 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$= [0.706, 0.236, 0.051, 0.007, 0] \quad (20)$$

根据以上结果可知,该数控机床的综合精度评价为很好,其隶属度为 70.6%。

3.3 系统仿真与评价结果分析

本文的模糊综合评价结果采用最大隶属度原则,在评价结果中,如果出现至少两个相等的最大分

量,则模糊综合评价结果无效^[14],否则评价结果是可行的。本文中的 B, B_1, B_2, B_3, B_4 的结果中均未出现相同的最大值,因此评价结果是有效的。

为了实现数控机床的精度模糊评价,使用 J2EE 为平台,结合 Oracle9i 数据库,开发了数控机床精度测评系统,客户端应用环境为 Windows XP/ Server 2003。系统界面如图 4 所示。

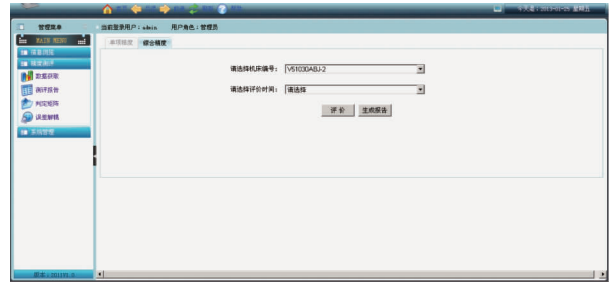


图4 基于 J2EE 的数控机床精度测评系统界面

评价时,系统提取机床的精度数据,并结合基于 AHP 生成的权重向量,对机床的综合精度进行评价,生成精度评价报告。图 5 所示为机床当前综合精度的评价结果,图 6 为机床精度变化趋势。

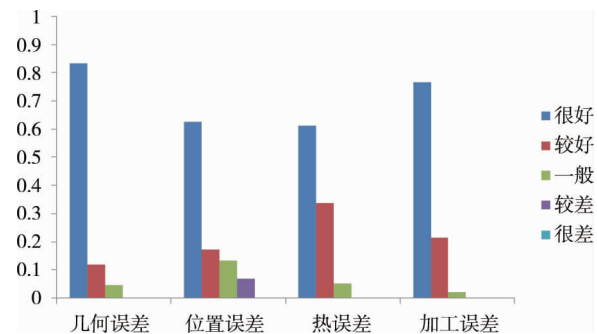


图5 数控机床精度评价结果

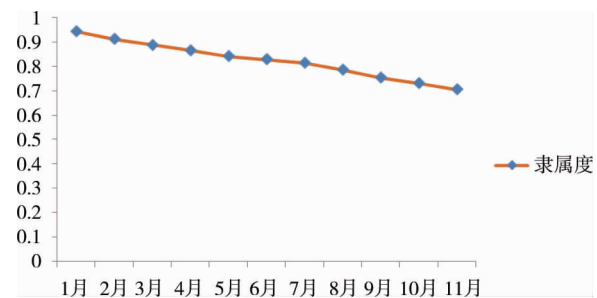


图6 机床精度状态变化趋势

从图 5 可知,机床的位置误差及热误差相比几何误差及加工误差精度较差,且权重向量较高,因此为了提高机床的综合精度,建议重点对位置误差及

热误差进行补偿。同时图6显示的最近一年机床精度状态呈逐月降低的趋势,建议对机床的综合精度进行修整,以提高零件的加工精度。

4 结论

本文以某龙门五轴加工中心机床为研究对象,利用层次分析法确定了数控机床精度评价体系中各指标的权重系数,以中间形梯形分布函数为依据,构造了隶属度函数,采用模糊综合评价法对机床的综合精度进行了评价,并给出了精度改进建议。由于模糊评价法很容易通过编制相关软件进行计算,同时评价体系中各指标的权重系数及隶属度函数中各参数的值可以通过经验数据不断修正,这在一定程度上降低了模糊评价法的主观性,因此,本文提出的数控机床综合精度评价方法为其他数控机床的精度评价提供了很好的借鉴作用。

参考文献

[1] Shimizu S. The state of evaluation technique of the machine tool accuracy and its problem in future. *Journal of the Society of Instrument and Control Engineers*, 2002, 43 (3) : 775-780

[2] Ueno S, Matsumaru S. Evaluation of numerically controlled machine tool positioning accuracy. *Laser metrology and machine performance VI*, 2003 : 485-493

[3] Wu C T, Yang H J. A Study on the Geometry Model for Accuracy Evaluation in Numerically Controlled Milling Machines. *Recent Researches in Artificial Intelligence, Knowledge Engineering and Data Bases*, 2011 : 66-72

[4] Zadeh L. A fuzzy sets. *Information and Control*, 1965 (8) : 338-353

[5] 张广鹏. 一种机床动态特性的模糊评价方法. *制造技术与机床*. 2001 : 14-16

[6] 王桂萍. 基于模糊可拓层次分析法的数控机床绿色度评价方法及应用. *机械工程学报*. 2010, 43 (3) : 141-147

[7] 刘世豪. 基于层次分析法的数控机床性能模糊综合评判. *山东大学学报*. 2010, 40 (1) : 68-72

[8] 杨晓红, 刘建伟. 模糊综合评判技术在 CAPP 中的应用. *机床与液压*. 2009, 37 (2) : 153-155

[9] 孙宏才. *网络层次分析法与决策科学*. 北京 : 国防工业出版社, 2011

[10] 李圣怡, 戴一帆等. *精密和超精密机床精度建模技术*. 长沙 : 国防科技大学出版社, 2007

[11] 彭安华, 杨刚刚. 基于层次分析法的二级模糊综合评判在机构选型中的应用. *工程设计学报*, 2007, 14 (4) : 278-281

[12] 马春翔, 曲征洪. 基于模糊数学理论零件的合格概率. *计量学报*, 2005, 26 (3) : 217-220

[13] 刘俊娟, 王炜. 基于梯形隶属函数的区间数模糊评价方法. *系统工程与电子技术*, 2009, 31 (2) : 390-392

[14] 王道勇. 模糊综合评判的失效与消除. *系统工程理论方法应用*, 1998, 7 (2) : 66-69

Fuzzy comprehensive evaluation of the accuracy of CNC machine tools Based on AHP

Feng Zhiming* **, Yin Guofu**

(* School of Mechanical Engineering and Automation, Xihua University, Chengdu 610039)

(** School of Manufacturing Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065)

Abstract

In order to evaluate the accuracy of a computerized numerical control (CNC) machine tool comprehensively, a 3-level accuracy evaluation index system for CNC machine tools was established under the consideration of the error factors of geometry, position, heat, and machining. The system determines the accuracy index weight coefficient by using the analytic hierarchy process (AHP), evaluates each accuracy index of a machine tool by using the fuzzy comprehensive evaluation, and constructs the membership function according to the intermediate form trapezoidal distribution function. A five-axis numerical control machine tool was evaluated by using the above-mentioned method, and the results indicate that the accuracy evaluation method is feasible and effective in application. The presented method can be used to evaluate the accuracy of other numerical control machine tools.

Key Words: computerized numerical control (CNC) machine tool, accuracy evaluation, comprehensive evaluation, analytic hierarchy process (AHP)