

# 面向智能制造的数控机床多目标优选法研究

刘世豪<sup>1</sup> 杜彦斌<sup>2</sup> 姚克恒<sup>3</sup> 唐敦兵<sup>4</sup>

(1. 海南大学机电工程学院, 海口 570228; 2. 重庆工商大学机械工程学院, 重庆 400067;  
3. 农业部南京农业机械化研究所, 南京 210014; 4. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

**摘要:** 考虑当前制造业智能化发展趋势以及数控机床在现代制造工程领域所发挥的关键作用,提出了一种集质量功能展开(QFD)、模糊线性回归和0-1目标规划优点于一体的数控机床多目标优选法。在研究智能制造对数控机床特定要求的基础上,运用QFD考察智能制造需求与数控机床性能之间的因果关系,采用质量屋将智能制造的需求有机地融入数控机床选型中。基于模糊线性回归法确定智能制造需求与数控机床性能在质量屋中的相互关联程度,运用层次分析法计算智能制造需求指标的权重系数,并采用0-1目标规划法在众多候选数控机床中做出最佳选择。以某智能制造平台搭建过程中的数控机床多目标决策问题作为应用案例,从5台候选数控机床中挑选出综合性能最好的1台。研究表明,所提出的面向智能制造的数控机床多目标优选法具有较高的工程实用性。

**关键词:** 数控机床; 智能制造; 质量屋; 模糊线性回归; 优选法

**中图分类号:** TH122      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2017)03-0396-09

## Multi-objective Optimum Seeking Method of Intelligent Manufacturing Oriented CNC Machine Tool

LIU Shihao<sup>1</sup> DU Yanbin<sup>2</sup> YAO Keheng<sup>3</sup> TANG Dunbing<sup>4</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China  
2. College of Mechanical Engineering, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China  
3. Nanjing Research Institute for Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China  
4. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Considering the intelligent development trend of manufacturing industry in current and the key role of CNC machine tool in modern manufacturing engineering, a multi-objective optimum seeking method of CNC machine tool is proposed, which combines the advantages of quality function deployment (QFD), fuzzy linear regression, and zero-one goal programming (ZOGP). On the basis of studying intelligent manufacturing's specific requirements, QFD is utilized for examining the causal relationships between intelligent manufacturing's requirements and CNC machine tool's performances. The intelligent manufacturing's requirements are incorporated into machine tool selection by house of quality (HOQ). Fuzzy linear regression is used to determine the extent of functional relationships between intelligent manufacturing's requirements and machine tool's performances in the HOQ. The weight coefficients of CNC intelligent manufacturing's requirements indexes are calculated by analytic hierarchy process (AHP). Zero-one goal programming is used to select the optimal CNC machine tool. Taking the CNC machine tool's multi-objective decision problem in constructing an intelligent manufacturing platform as application case, and the optimal one with high comprehensive performance is selected from five alternative CNC machine tools. The study result shows that the proposed multi-objective optimum seeking method of intelligent manufacturing oriented CNC machine tool has high practicability.

**Key words:** CNC machine tool; intelligent manufacturing; house of quality; fuzzy linear regression; optimum seeking method

### 引言

在现代制造工程领域,选择合适的数控机床能

有效地保证产品产量与质量、减少生产成本、充分利用企业的制造资源,并提高制造过程的智能化水平。鉴于数控机床选型在零部件制造过程中的重要性,

已成为学术界广泛关注的研究热点<sup>[1-3]</sup>。传统上,数控机床选型的决策依据为:工件装夹便捷化、加工精度高、生产效率最大化和设备状态稳定等,数控机床选型的主要指标通常包括刀具尺寸、功率、加工精度、定位精度和主轴转速等<sup>[4-6]</sup>。然而,由于制造业智能化水平逐渐提高,数控机床选型会更加复杂,不仅需要考虑到智能制造的特定需求,还涉及大数据的处理,因此,数控机床选型已成为一个繁重的决策问题。为了解决上述问题,本文提出采用质量功能展开法(Quality function deployment, QFD)<sup>[7]</sup>将智能制造需求与数控机床性能有机结合,并运用模糊线性回归法建立二者之间的关系函数<sup>[8]</sup>,采用 0-1 目标规划模型在一系列可选的数控机床中确定最适合的 1 台,从而形成一套面向智能制造的数控机床多目标优选法。结合某智能制造平台搭建过程中的数控机床选型问题进行实际应用,验证所提方法的可行性和有效性。

## 1 面向智能制造的机床选型背景

现代制造企业的生产水平在很大程度上取决于所选用的数控机床的功能和性能,这也是对零部件制造进行工艺规划的依据<sup>[9]</sup>,确定零部件制造所需的基本要求后,还要根据市场上所提供的相应技术水平的数控机床来进行优选。当前,制造企业需要数控机床具有能适应多种工件加工、加工精度和生效率高、设备利用率高等特点,这就导致数控机床选型往往涉及到多指标综合对比优选。

智能制造模式是深度融合制造技术和信息技术的新型制造模式,使得数控机床具有数据采集、优化决策和自动控制等功能,进而使机床功能智能化。智能制造模式可采用生产管理软件进行工作调度,使数控机床的操作更加便捷,提高制造过程的柔性;智能制造模式还能够监控数控机床的运行状态,便于生产管理人员及时排除制造过程中的故障,从而实现高度的人-机-物协调,提高制造智能化水平。

尽管智能制造模式能满足制造业转型升级的需要,但是也对数控机床的功能提出了新的要求,增加了数控机床选型问题的复杂性。在智能制造过程中,选择合适的数控机床需要考虑的主要问题如下:

(1)功能柔性化:是指所选用的数控机床能自动适应制造系统以达到最佳工作状态的能力,从而能在一定范围内完成多种零部件的批量化高效加工。

(2)加工自适应性:是指所选用的数控机床能够实现多台设备同时协同工作,从而提高加工能力及其自动化程度。

(3)操作友好性:是指即使不具备太多专业技

能的用户也易于使用和操作,并能缩短用户对机床的适应过程、减少培训和维护时间。

(4)结构可扩展性:所选用的数控机床需要具有良好的网络化扩展功能,可通过配置各种软硬件提高其智能化水平,能符合制造物联网发展趋势。

## 2 数控机床的多目标优选法

解决智能制造的实际需求能提升企业的生产水平,在选择数控机床时应充分考虑到智能制造的特定需求,将智能制造需求反映到数控机床性能较为有效的方式是构造一种基于质量功能展开的数控机床选型方法,将智能制造需求和机床制造过程结合,并转换为选型行为。鉴于数控机床智能化的一些需求,如便于使用、便于维修、操作舒适、制造柔性好和高安全性是很难采用定量指标衡量的,必须考虑到智能制造的需求具有模糊性<sup>[10-11]</sup>。因此,本文提出采用模糊线性回归法来确定智能制造需求与数控机床性能之间的函数关系。

### 2.1 质量功能展开法

质量功能展开法是一种采用质量屋将智能制造需求反映到产品工程特征的技术,质量屋(House of quality, HOQ)<sup>[12-13]</sup>总结了各种智能制造的需求,并且反映了智能制造需求对产品特征的重要性。如图 1 所示,质量屋的行反映了智能制造需求,质量屋的列描述了根据智能制造需求所形成的工程特征<sup>[14]</sup>。面向智能制造的数控机床的质量屋主要内容如下:

(1)智能制造需求:这是一些直接或间接地影响制造智能化程度的参数,即智能制造模式对数控机床新的特定要求。

(2)数控机床性能:通常包括加工要求、工程特征、产品特征或技术要求,这些提供了机床适应智能制造需求的方式,本文将这些技术要求定义为数控机床性能。

(3)智能制造需求指标的相对重要性:这些是各种智能制造需求指标之间的相对重要性,本文采用层次分析法 (Analytic hierarchy process, AHP)<sup>[15-16]</sup>来确定重要性权重系数。

(4)智能制造需求与数控机床性能之间的关系:智能制造需求与数控机床性能之间需要建立相应的关系,用来表达数控机床性能如何符合智能制造需求。智能制造需求是比较主观和模糊的,因此,确定智能制造需求与数控机床性能之间关系需要专家知识。在本文中,采用模糊线性回归法<sup>[17]</sup>来确立智能制造需求与数控机床性能之间的函数关系。

(5)数控机床性能之间的内在关系:屋顶型矩

阵用于定义数控机床性能之间的关系,屋顶型矩阵也采用模糊线性回归法来计算和确定。

(6)对比分析:质量屋的最右部分不仅提供了智能制造的基本信息,也提供了数控机床智能化满意度。

(7)数控机床性能的整体优势和目标值:将智能制造需求的重要性和数控机床的指标值作为输入量,用于进行参数估计和选择最为合适的数控机床。

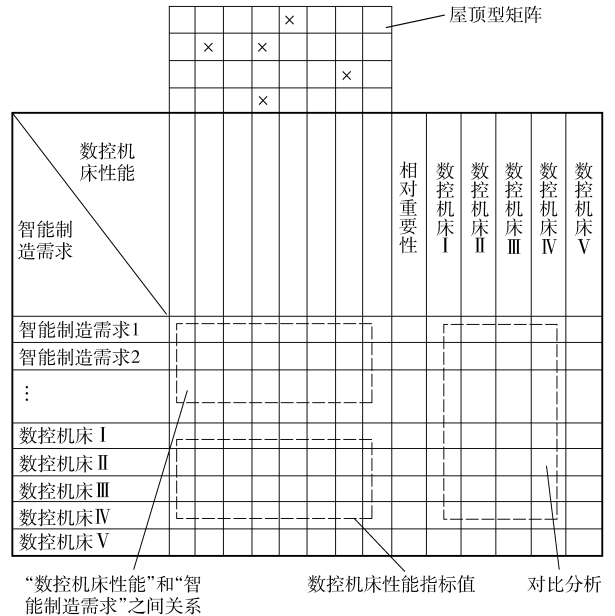


图1 数控机床质量屋

Fig. 1 Quality houses of CNC machine tool

2.2 权重的计算方法

在数控机床选型过程中,为了便于分析各智能制造需求指标的相对重要性,必须确定各指标的权重系数。如前文所述,本文采用层次分析法求解各智能制造需求指标的权重系数,其计算流程如图2所示,具体说明如下:

- (1) 结合实际的制造状况,确立面向智能制造需求的具体指标。
- (2) 对所确立的智能制造需求指标进行对比分析,确定各指标的相互优先级关系。
- (3) 根据表1所示的判断尺度准则<sup>[18]</sup>,以各指标的相互优先等级关系,对各个指标进行两两比较,建立判断矩阵 $U$ 。
- (4) 采用层次分析法求解各智能制造需求指标的相对重要性权重 $\{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$ 。
- (5) 建立判断矩阵 $U$ 的一致性指标 $C_i$ ,并计算判断矩阵的一致性比例值 $C_R$ ( $R_i$ 计算方法可参照文献<sup>[19]</sup>)。
- (6) 如果 $C_R < 0.1$ ,则认为通过一致性检验,所得智能制造需求指标权重是合理可行的;如果 $C_R > 0.1$ ,那么再次建立判断矩阵后求解计算,直到通过一致性检验为止。

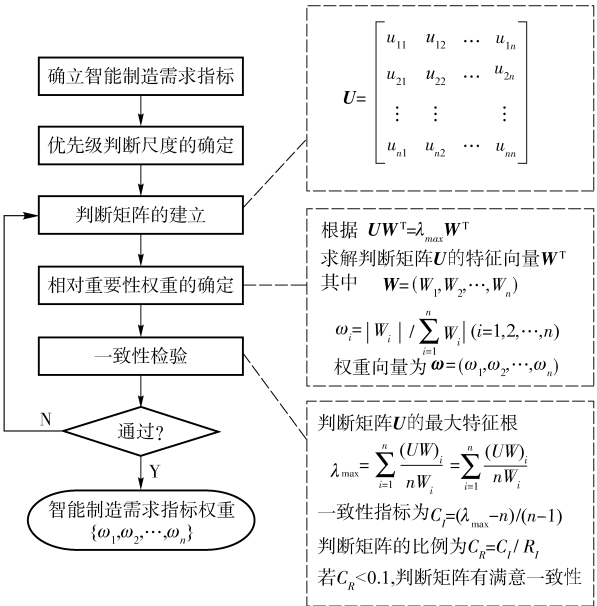


图2 权重系数的计算流程

Fig. 2 Calculation process of weight coefficient

表1 判断尺度准则

Tab. 1 Judgment dimension

| 标度 $u_{ij}$ | 含义               |
|-------------|------------------|
| 1           | 两个指标相比,具有同样的重要性  |
| 3           | 两个指标相比,前者比后者稍微重要 |
| 5           | 两个指标相比,前者比后者明显重要 |
| 7           | 两个指标相比,前者比后者非常重要 |
| 9           | 两个指标相比,前者比后者极其重要 |
| 2, 4, 6, 8  | 上述相邻判断的中间值       |

2.3 模糊线性回归法

不同于传统回归分析将观测值与估计值间的偏差认为是随机的,模糊线性回归法将残差视为由不确定性引起的不确定值。因此,模糊线性回归可以用于处理相应区间变量。考虑到智能制造需求在QFD中所具有的模糊性,本文采用模糊线性回归求解智能制造需求和数控机床性能在质量屋中的关联程度<sup>[20]</sup>,对此,本文建立了线性回归模型

$$\begin{cases} \max z(y_1, y_2, \dots, y) = \sum_{i=1}^m \frac{\omega_i (y_i - y_{i_{\min}})}{y_{i_{\max}} - y_{i_{\min}}} \\ \text{s. t.} \begin{cases} y_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ x_j = g_j(x_1, x_2, \dots, x_{j-1}, x_{j+1}, \dots, x_n) \\ (j = 1, 2, \dots, n) \\ y_{i_{\min}} \leq y_i \leq y_{i_{\max}} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

其中  $\sum_{i=1}^m \omega_i = 1 \quad 0 < \omega_i \leq 1$

式中  $\omega_i$ ——第*i*个智能制造需求指标相对重要性的权重

$y_i$ ——对应于第*i*个智能制造需求指标值

$x_j$ ——第*j*台数控机床性能的标准目标值

$f_i$ ——第*i*个智能制造需求和数控机床性能

之间的函数关系

$g_j$ ——第  $j$  台数控机床与其他数控机床之间的函数关系

$z$ ——当  $y$  取  $y_1, y_2, \dots, y_m$  时数控机床的智能化满意度

$y_{i_{\max}}, y_{i_{\min}}$ ——第  $i$  个智能制造需求指标的最大值与最小值

使用质量屋中所设置的基本数据,可以计算  $f_i$  和  $g_j$  之间的函数关系参数。一般地,模糊线性回归模型可表示为

$$t_i = \tilde{A}_0 + \tilde{A}_1 x_{i1} + \tilde{A}_2 x_{i2} + \dots + \tilde{A}_n x_{in} \quad (2)$$

式中  $t_i$ ——第  $i$  个因变量的观测值

$x_{ij}$ ——第  $j$  个自变量的第  $i$  个观测值

$A_j$ ——中心值  $\alpha_j$  和离散度  $c_j$  之间的模糊相关参数

模糊线性回归模型的问题是确定模糊参数  $\tilde{A}_j$ , 将其隶属函数定义为

$$\mu_{\tilde{A}_j} = \begin{cases} 1 - \frac{|\alpha_j - a_j|}{c_j} & (\alpha_j - c_j \leq a_j \leq \alpha_j + c_j) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (3)$$

因此,通过一个相关的隶属函数定义区间内任意实数的隶属程度。相应地,模糊线性回归方程可表示为

$$y_i = (\alpha_0, c_0) + (\alpha_1, c_1)x_{i1} + (\alpha_2, c_2)x_{i2} + \dots + (\alpha_n, c_n)x_{in} \quad (4)$$

模糊线性回归分析的目的是确定当满足目标程度  $h$  时,使因变量  $y_i$  预测值的总离散度最小的模糊参数  $\tilde{A}_j$ 。其中,  $h$  值由决策者确定,它是介于  $0 \sim 1$  之间的常数,表示估测模糊线性回归模型的适应度,即当至少存在  $h$  隶属于因变量  $y_i$  的模糊估计值时,使  $y_i$  估计值的总模糊度最小<sup>[21-22]</sup>。对此,为了确定模糊参数  $\tilde{A}_j$  所建立的模型为

$$\begin{cases} \min Z = \sum_{j=0}^n \left( c_j \sum_{k=1}^u |x_{jk}| \right) \\ \text{s. t.} \begin{cases} \sum_{j=0}^n \alpha_j x_{jk} + (1-h) \left( \sum_{j=0}^n c_j |x_{jk}| \right) \geq y_k \\ \sum_{j=0}^n \alpha_j x_{jk} - (1-h) \left( \sum_{j=0}^n c_j |x_{jk}| \right) \leq y_k \\ x_{0k} = 1 \\ c_j \geq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

式中  $x_{jk}$ ——第  $j$  个自变量的第  $k$  个观测值

$y_k$ ——第  $k$  次观察的因变量值

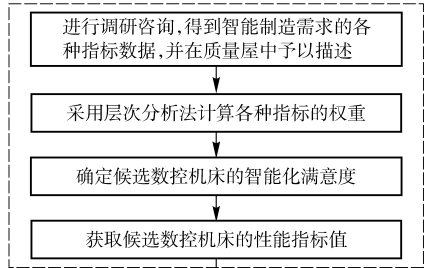
通过求解以上模型,可以获得模糊线性回归模

型的参数<sup>[23-24]</sup>。

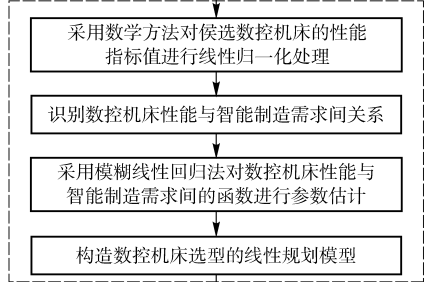
## 2.4 数控机床优选法的实施流程

为了运用所提出的数控机床优选法解决智能制造过程中遇到的机床设备选型问题,需要制定与之相对应的技术实施流程。由于  $0-1$  目标规划法 (Zero-one goal programming, ZOGP) 已经成功地被用于解决多种优选决策问题<sup>[25-26]</sup>,为数控机床优选提供了很好的参考,故本文结合前文已探讨的方法,提出按照图 3 所示的流程进行数控机床选型。

第1步:构建数控机床质量屋



第2步:模糊线性回归建模



第3步:确定最优数控机床



图 3 数控机床优选法的实施流程

Fig. 3 Implementation process of the optimum seeking method

## 3 案例应用

为了验证前文所提方法的有效性和实用性,以某智能制造平台的数控机床选型为案例进行了应用与分析。该智能制造平台搭建的原理如图 4 所示,主要是面向现代精密零部件的研发需求,并将扩大加工能力、降低生产成本、缩短交货时间作为功能目标。

### 3.1 构建数控机床质量屋

为了便于该智能制造平台优选性能优良的数控机床,提出了面向智能制造的需求指标:耐用性、柔性、加工率、服务质量、操作友好性、安全性、自适应性以及可扩展性,还将数控机床的性能指标作为选型依据,依次为:功率、最大刀具直径、机床设置时间、台面尺寸、操作时间、加工速度、定位精度和保修期限;根据该智能制造平台实际需求初步选出了

5 台数控机床,依次记为 MT-I、MT-II、MT-III、MT-IV、MT-V。采用本文 2.2 节所论述的方法求解各项智能制造需求指标的相对重要性权重,求解过程中判断矩阵为

$$U = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 2 & 2 & 1 & 3 & 2 & 2 \\ 2 & 1 & 4 & 3 & 2 & 5 & 4 & 4 \\ 1/2 & 1/4 & 1 & 1 & 1/2 & 1 & 1 & 1 \\ 1/2 & 1/3 & 1 & 1 & 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1/2 & 2 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 \\ 1/3 & 1/5 & 1 & 1/2 & 1/2 & 1 & 1 & 1 \\ 1/2 & 1/4 & 1 & 1 & 1/2 & 1/2 & 1 & 1 \\ 1/2 & 1/4 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

(6)

最终得到的权重向量为 {0.161, 0.302, 0.077, 0.096, 0.141, 0.065, 0.073, 0.085}。候选的 5 台数控机床的性能指标值调研后获得,智能化满意度被划分为 A~E 级,A 表示最不满意,E 表示最满意,图 5 给出了数控机床选型 HOQ 的详细情况。本案例的任务是运用所提出的优选方法在 5 台候选的数控机床中选择最为合适的一台。

3.2 模糊线性回归建模

采用线性归一法将数控机床性能指标值进行归一化处理,功率、最大刀具直径、台面尺寸、加工速度、精度和保修期限( $j=1,2,4,6,7,8$ )的归一化,采用  $x_{ij}/x_j^*$  计算,其中  $x_j^* = \max x_{ij}$ ;机床设置时间和操作时间( $j=3,5$ )的归一化则用  $x_j/x_{ij}$  计算,其中  $x_j =$

|                 |             |           |       |          |            |        |                             |         |        |           |          |           |            |           |          |  |  |   |  |
|-----------------|-------------|-----------|-------|----------|------------|--------|-----------------------------|---------|--------|-----------|----------|-----------|------------|-----------|----------|--|--|---|--|
|                 |             |           | ×     |          |            | ×      | ×                           |         |        |           |          |           |            |           |          |  |  |   |  |
|                 | ×           |           |       |          |            |        |                             |         |        |           |          |           |            |           |          |  |  |   |  |
|                 |             |           |       |          |            |        |                             |         |        |           |          |           |            |           |          |  |  | × |  |
|                 |             |           |       |          |            |        |                             |         |        |           |          |           |            |           |          |  |  |   |  |
|                 | ×           |           | ×     |          |            |        |                             |         |        |           |          |           |            |           |          |  |  |   |  |
|                 | ×           |           | ×     |          |            |        |                             |         |        |           |          |           |            |           |          |  |  |   |  |
|                 |             |           |       |          |            |        |                             |         |        |           |          |           |            |           |          |  |  |   |  |
|                 |             |           |       |          |            |        |                             |         |        |           |          |           |            |           |          |  |  |   |  |
| 智能制造需求 \ 数控机床性能 | 功率/KW       | 最大刀具直径/mm |       | 机床设置时间/s | 台面尺寸/(m×m) | 操作时间/s | 加工速度/(r·min <sup>-1</sup> ) | 定位精度/μm | 保修期限/a | 对智能制造的重要性 | 数控机床MT-I | 数控机床MT-II | 数控机床MT-III | 数控机床MT-IV | 数控机床MT-V |  |  |   |  |
|                 | $x_1$       | $x_2$     | $x_3$ | $x_4$    | $x_5$      | $x_6$  | $x_7$                       | $x_8$   |        |           |          |           |            |           |          |  |  |   |  |
|                 | 耐用性 $y_1$   | ×         |       |          |            |        | ×                           | ×       |        | 0.161     | A        | D         | B          | A         | B        |  |  |   |  |
|                 | 柔性 $y_2$    |           | ×     | ×        |            |        | ×                           |         |        | 0.302     | A        | E         | D          | B         | C        |  |  |   |  |
|                 | 加工率 $y_3$   | ×         | ×     |          |            | ×      |                             |         |        | 0.077     | B        | A         | B          | A         | D        |  |  |   |  |
|                 | 服务质量 $y_4$  |           |       |          |            |        | ×                           |         | ×      | 0.096     | D        | A         | C          | C         | B        |  |  |   |  |
|                 | 操作友好性 $y_5$ |           |       | ×        |            | ×      | ×                           |         |        | 0.141     | C        | A         | B          | D         | E        |  |  |   |  |
|                 | 安全性 $y_6$   |           |       |          |            | ×      | ×                           | ×       |        | 0.065     | E        | B         | A          | D         | C        |  |  |   |  |
|                 | 自适应性 $y_7$  | ×         | ×     |          | ×          |        |                             |         |        | 0.073     | A        | B         | C          | B         | E        |  |  |   |  |
| 数控机床            | 可扩展性 $y_8$  |           | ×     |          |            | ×      |                             |         | ×      | 0.085     | D        | A         | E          | C         | A        |  |  |   |  |
|                 | 数控机床MT-I    | 32        | 96    | 10       | 0.50       | 30     | 2000                        | 10      | 6      |           |          |           |            |           |          |  |  |   |  |
|                 | 数控机床MT-II   | 38        | 108   | 8        | 0.50       | 24     | 1200                        | 20      | 6      |           |          |           |            |           |          |  |  |   |  |
|                 | 数控机床MT-III  | 60        | 162   | 8        | 0.52       | 20     | 2000                        | 15      | 6      |           |          |           |            |           |          |  |  |   |  |
|                 | 数控机床MT-IV   | 44        | 96    | 6        | 0.50       | 24     | 2000                        | 10      | 6      |           |          |           |            |           |          |  |  |   |  |
|                 | 数控机床MT-V    | 74        | 168   | 6        | 0.64       | 18     | 2400                        | 25      | 8      |           |          |           |            |           |          |  |  |   |  |

图 5 数控机床选型的指标值

Fig.5 Values of selection indexes for CNC machine tool

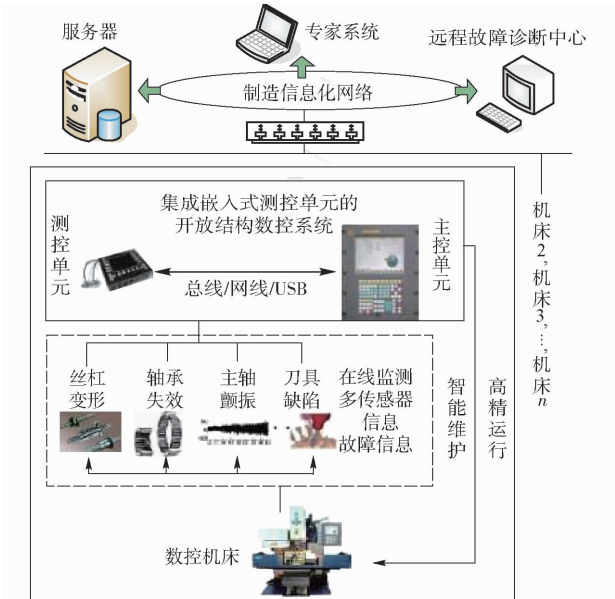


图 4 智能制造平台框架

Fig.4 Framework of intelligent manufacturing platform

$$\min x_{ij}, \text{数控机床性能指标值归一化计算结果如下}$$

$$X = \begin{bmatrix} 0.432 & 0.571 & 0.600 & 0.781 & 0.600 & 0.833 & 0.200 & 0.750 \\ 0.513 & 0.642 & 0.800 & 0.781 & 0.750 & 0.500 & 0.800 & 0.750 \\ 0.810 & 0.964 & 0.800 & 0.812 & 0.900 & 0.833 & 0.400 & 0.750 \\ 0.594 & 0.571 & 1.000 & 0.781 & 0.750 & 0.833 & 0.200 & 0.750 \\ 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 \end{bmatrix}$$

(7)

$h$  值介于 0~1 之间,模型(5)中的参数可通过取  $h$  为 0.5 进行模糊线性回归得到。例如,由图 5

可得,  $y_1$  与  $x_1, x_6, x_7$  相关, 取  $h = 0.5$  时求解式 (5) 所得的相关线性规划模型为

$$\min Z = 5c_0 + 3.352c_1 + 4c_6 + 2.799c_7$$
$$\text{s. t. } \begin{cases} \alpha_0 + 0.432\alpha_1 + 0.833\alpha_6 + 0.400\alpha_7 + 0.500c_0 + 0.217c_1 + 0.418c_6 + 0.200c_7 \geq 1 \\ \alpha_0 + 0.432\alpha_1 + 0.833\alpha_6 + 0.400\alpha_7 - 0.500c_0 - 0.217c_1 - 0.418c_6 - 0.200c_7 \leq 1 \\ \alpha_0 + 0.513\alpha_1 + 0.500\alpha_6 + 0.800\alpha_7 + 0.500c_0 + 0.258c_1 + 0.251c_6 + 0.400c_7 \geq 4 \\ \alpha_0 + 0.513\alpha_1 + 0.500\alpha_6 + 0.800\alpha_7 - 0.500c_0 - 0.258c_1 - 0.251c_6 - 0.400c_7 \leq 4 \\ \alpha_0 + 0.810\alpha_1 + 0.833\alpha_6 + 0.200\alpha_7 + 0.500c_0 + 0.407c_1 + 0.418c_6 + 0.100c_7 \geq 2 \\ \alpha_0 + 0.810\alpha_1 + 0.833\alpha_6 + 0.200\alpha_7 - 0.500c_0 - 0.407c_1 - 0.418c_6 - 0.100c_7 \leq 2 \\ \alpha_0 + 0.594\alpha_1 + 0.833\alpha_6 + 0.400\alpha_7 + 0.500c_0 + 0.297c_1 + 0.418c_6 + 0.200c_7 \geq 1 \\ \alpha_0 + 0.594\alpha_1 + 0.833\alpha_6 + 0.400\alpha_7 - 0.500c_0 - 0.297c_1 - 0.418c_6 - 0.200c_7 \leq 1 \\ \alpha_0 + 1.000\alpha_1 + 1.000\alpha_6 + 1.000\alpha_7 + 0.500c_0 + 0.500c_1 + 0.500c_6 + 0.500c_7 \geq 2 \\ \alpha_0 + 1.000\alpha_1 + 1.000\alpha_6 + 1.000\alpha_7 - 0.500c_0 - 0.500c_1 - 0.500c_6 - 0.500c_7 \leq 2 \\ c_0, c_1, c_6, c_7 \geq 0 \end{cases}$$

(8)

为了研究  $h$  取值对中心偏差的影响, 选择几个不同的  $h$  值进行比较。然后, 以智能制造需求和数控机床性能值作为数据集, 采用模糊线性回归法进行求解。智能制造需求指标  $y_i$  的相应结果如表 2 所示, 模糊参数的估计根据  $h$  的水平得到。由此可知,  $h$  影响中心值  $\alpha_j$  和  $A_j$  的离散度  $c_j$ , 合适的  $h$  能反映模糊参数的可能分布范围。如表 2 所示的计算结果, 中心值不变而离散度随  $h$  的变化而变化。因此,  $h$  越大, 则  $c_6$  和  $Z$  越大, 对于某一  $h$  值, 模糊线性回

归减小了估计值的总离散度。本文取  $h$  为 0.5 时, 参数估计结果如表 3 所示。

数控机床性能  $x_i$  和智能制造需求  $y_i$  之间的函数关系参数采用模糊线性回归法来确定,  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, y_7, y_8$  函数关系的估计参数如表 3 所示。由表 3 可得,  $x_4, x_7, x_8$  与其他的数控机床性能无关, 所以  $y_4, y_7, y_8$  为 0。

采用模糊线性回归法计算出智能制造需求  $y_i$  所对应的数控机床智能化满意度后, 可以得到新的数

表 2 模糊线性回归结果  
Tab. 2 Fuzzy linear regression results

| 参数         | $h$    |        |        |        |        |        |        |        |        |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|            | 0.1    | 0.2    | 0.3    | 0.4    | 0.5    | 0.6    | 0.7    | 0.8    | 0.9    |
| $\alpha_0$ | 5.433  | 5.433  | 5.433  | 5.433  | 5.433  | 5.433  | 5.433  | 5.433  | 5.433  |
| $\alpha_1$ | 3.062  | 3.062  | 3.062  | 3.062  | 3.062  | 3.062  | 3.062  | 3.062  | 3.062  |
| $\alpha_6$ | -7.593 | -7.593 | -7.593 | -7.593 | -7.593 | -7.593 | -7.593 | -7.593 | -7.593 |
| $\alpha_7$ | 0.801  | 0.801  | 0.801  | 0.801  | 0.801  | 0.801  | 0.801  | 0.801  | 0.801  |
| $c_0$      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      |
| $c_1$      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      |
| $c_6$      | 0.334  | 0.375  | 0.428  | 0.499  | 0.598  | 0.749  | 0.998  | 1.494  | 3.005  |
| $c_7$      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      |
| $Z$        | 1.331  | 1.497  | 1.712  | 1.995  | 2.394  | 2.995  | 3.992  | 5.974  | 12.017 |

表 3 参数估计结果 ( $h = 0.5$ )  
Tab. 3 Parameter estimation results ( $h = 0.5$ )

| 变量    | $y_1$  | $y_2$  | $y_3$   | $y_4$  | $y_5$  | $y_6$   | $y_7$  | $y_8$  | $x_1$  | $x_2$  | $x_3$ | $x_5$  | $x_6$  |
|-------|--------|--------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|
|       | 5.433  | 4.703  | 4.146   | 4.009  | -4.048 | 5.303   | -2.107 | 5.543  | -0.586 | 0.092  | 0.462 | 0.454  | 0.586  |
| $x_1$ | 3.062  |        | 11.202  |        |        |         | 6.136  |        |        | 1.036  |       | 0.748  | 0.411  |
| $x_2$ |        | 6.421  | 2.183   |        |        |         | -0.961 | 7.635  | 0.118  |        |       |        |        |
| $x_3$ |        | 2.238  |         |        | 5.447  |         |        |        |        |        |       | 0.053  | -0.167 |
| $x_4$ |        |        |         |        |        |         | 1.653  |        |        |        |       |        |        |
| $x_5$ |        |        | -14.207 |        | -3.801 | -11.643 |        | -6.668 | 1.157  |        | 0.501 |        |        |
| $x_6$ | -7.593 | -9.637 |         | 6.608  | 6.952  | 7.255   |        |        | 0.304  | -0.062 |       | -0.245 |        |
| $x_7$ | 0.801  |        |         |        |        | 2.533   |        |        |        |        |       |        |        |
| $x_8$ |        |        |         | -8.015 |        |         |        | -4.233 |        |        |       |        |        |

控机床性能目标值  $x_j$ 。因此,数控机床性能的指标参数  $x_j$ 可由模型(5)计算得到。由图5可得, $x_1$ 与

$x_2$ 、 $x_5$ 和 $x_6$ 相关,当取 $h=0.5$ 时,所得到的线性规划模型如下

$$\begin{cases} \min Z = 5c_0 + 3.751c_2 + 4c_5 + 4c_6 \\ \text{s. t.} \begin{cases} \alpha_0 + 0.571\alpha_2 + 0.600\alpha_5 + 0.833\alpha_6 + 0.500c_0 + 0.286c_2 + 0.300c_5 + 0.418c_6 \geq 0.433 \\ \alpha_0 + 0.571\alpha_2 + 0.600\alpha_5 + 0.833\alpha_6 - 0.500c_0 - 0.286c_2 - 0.300c_5 - 0.418c_6 \leq 0.433 \\ \alpha_0 + 0.644\alpha_2 + 0.750\alpha_5 + 0.500\alpha_6 + 0.500c_0 + 0.322c_2 + 0.375c_5 + 0.251c_6 \geq 0.513 \\ \alpha_0 + 0.644\alpha_2 + 0.750\alpha_5 + 0.500\alpha_6 - 0.500c_0 - 0.322c_2 - 0.375c_5 - 0.251c_6 \leq 0.513 \\ \alpha_0 + 0.964\alpha_2 + 0.900\alpha_5 + 0.833\alpha_6 + 0.500c_0 + 0.483c_2 + 0.451c_5 + 0.418c_6 \geq 0.812 \\ \alpha_0 + 0.964\alpha_2 + 0.900\alpha_5 + 0.833\alpha_6 - 0.500c_0 - 0.483c_2 - 0.451c_5 - 0.418c_6 \leq 0.812 \\ \alpha_0 + 0.571\alpha_2 + 0.750\alpha_5 + 0.833\alpha_6 + 0.500c_0 + 0.287c_2 + 0.375c_5 + 0.418c_6 \geq 0.594 \\ \alpha_0 + 0.571\alpha_2 + 0.750\alpha_5 + 0.833\alpha_6 - 0.500c_0 - 0.287c_2 - 0.375c_5 - 0.418c_6 \leq 0.594 \\ \alpha_0 + \alpha_2 + \alpha_5 + \alpha_6 + 0.500c_0 + 0.500c_2 + 0.500c_5 + 0.500c_6 \geq 1 \\ \alpha_0 + \alpha_2 + \alpha_5 + \alpha_6 - 0.500c_0 - 0.500c_2 - 0.500c_5 - 0.500c_6 \leq 1 \\ c_0, c_2, c_5, c_6 \geq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

针对以上模型,结合数控机床性能指标值归一化数据和参数估计结果,本文采用模糊线性回归方法分析计算后,进一步得到的线性规划模型如下

$$\begin{cases} \max Z = 0.052y_1 + 0.071y_2 + 0.026y_3 + 0.038y_4 + 0.034y_5 + \\ 0.016y_6 + 0.021y_7 + 0.022y_8 - 0.278 \\ \begin{cases} y_1 - 3.062x_1 + 7.593x_6 - 0.799x_7 = 5.435 \\ y_2 - 6.421x_2 + 2.236x_3 + 9.637x_6 = 4.073 \\ y_3 - 11.202x_1 + 2.184x_2 + 14.207x_5 = 4.146 \\ y_4 - 6.608x_6 + 8.015x_8 = 4.007 \\ y_5 - 5.447x_3 + 3.803x_5 - 6.952x_6 = -4.048 \\ y_6 + 11.643x_5 - 7.257x_6 - 2.533x_7 = 5.303 \\ y_7 - 6.134x_1 + 0.963x_2 - 1.653x_4 = -2.107 \\ y_8 - 7.633x_2 + 6.668x_5 + 4.233x_8 = 5.543 \\ x_1 - 0.118x_2 + 1.157x_5 - 0.304x_6 = -0.586 \\ x_2 - 1.038x_1 + 0.062x_6 = 0.092 \\ x_3 - 0.501x_5 = 0.462 \\ \text{s. t.} \begin{cases} x_5 - 0.746x_1 - 0.053x_3 + 0.244x_6 = 0.454 \\ x_6 - 0.413x_1 + 0.167x_3 = 0.584 \\ x_1 \geq 0.433 \\ x_2 \geq 0.572 \\ x_3 \geq 0.601 \\ x_4 \geq 0.782 \\ x_5 \geq 0.601 \\ x_6 \geq 0.501 \\ x_7 \geq 0.199 \\ x_8 \geq 0.751 \\ x_j \leq 1 \quad j=1,2,\dots,8 \\ 1 \leq y_i \leq 5 \quad i=1,2,\dots,8 \end{cases} \end{cases} \end{cases} \quad (10)$$

3.3 确定最优数控机床

表4给出了为了让智能化满意度最大化的数控机床性能的目标值,一旦这些值确定后,就可用0-1目标规划法ZOGP进行数控机床的多目标优选。

ZOGP的目的是减小关于智能化满意度最大化的正负偏离值的加权,从而选择出最适合的数控机床,本文数控机床多目标选型的ZOGP模型如下

$$\begin{cases} \min Z = 0.161d_1^- + 0.302d_2^- + 0.077d_3^- + 0.096d_4^- + \\ 0.141d_5^- + 0.065d_6^- + 0.073d_7^- + 0.085d_8^- \\ \text{s. t.} \begin{cases} \lambda_1 + 4\lambda_2 + 2\lambda_3 + \lambda_4 + 2\lambda_5 - d_1^+ + d_1^- = 2.86 \\ \lambda_1 + 5\lambda_2 + 4\lambda_3 + 2\lambda_4 + 3\lambda_5 - d_2^+ + d_2^- = 3.82 \\ 2\lambda_1 + \lambda_2 + 2\lambda_3 + \lambda_4 + 4\lambda_5 - d_3^+ + d_3^- = 1.45 \\ 4\lambda_1 + \lambda_2 + 3\lambda_3 + 3\lambda_4 + 2\lambda_5 - d_4^+ + d_4^- = 2.66 \\ 3\lambda_1 + \lambda_2 + 2\lambda_3 + 4\lambda_4 + 5\lambda_5 - d_5^+ + d_5^- = 2.51 \\ 5\lambda_1 + 2\lambda_2 + \lambda_3 + 4\lambda_4 + 3\lambda_5 - d_6^+ + d_6^- = 3.55 \\ \lambda_1 + 2\lambda_2 + 3\lambda_3 + 2\lambda_4 + 5\lambda_5 - d_7^+ + d_7^- = 2.82 \\ 4\lambda_1 + \lambda_2 + 5\lambda_3 + 3\lambda_4 + \lambda_5 - d_8^+ + d_8^- = 2.44 \\ \sum_{i=1}^5 \lambda_i = 1 \quad (\lambda_i \in \{0,1\}) \end{cases} \end{cases} \quad (11)$$

根据AHP求出ZOGP模型中 $d_i$ 的权重 $\omega_j$ ,再计算出ZOGP模型的 $\lambda_i$ 。在式(11)中, $\lambda_i$ 是数控机床优选的二进制决策变量, $d_i^+$ 和 $d_i^-$ 分别是第 $i$ 个智能制造需求的正、负偏差变量。上述ZOGP模型的解是 $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_4 = \lambda_5 = 0, \lambda_3 = 1$ 。因此,MT-Ⅲ是最合适的数控机床,如图6所示。

本文所提出的面向智能制造的数控机床多目标优选法不仅考虑智能制造模式对数控机床性能的新要求,而且运用质量屋和模糊线性回归法将二者有

表 4 最终解  
Tab.4 Final solution

| 参数 | $Z_{\max}$ | $y_1$ | $y_2$ | $y_3$ | $y_4$ | $y_5$ | $y_6$ | $y_7$ | $y_8$ | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $x_4$ | $x_5$ | $x_6$ | $x_7$ | $x_8$ |
|----|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 数值 | 0.52       | 2.86  | 3.82  | 1.45  | 2.66  | 2.51  | 3.55  | 2.82  | 2.44  | 0.63  | 0.73  | 0.86  | 1     | 0.82  | 0.72  | 1     | 0.74  |



图 6 优选的数控机床  
Fig.6 Selected CNC machine tool

机结合,从而更加有利于选择综合性能优良的数控机床。综上所述,本文所提出的面向智能制造的数控机床多目标优选法具有较高的工程实用性,可作为智能制造企业选择数控机床的参考方法。

4 结论

(1)针对制造业智能化发展的趋势,提出了一

种面向智能制造的数控机床多目标优选法。这种优选方法不同于常规思维,运用质量屋将智能制造需求反映到数控机床性能上,并在诸多数控机床选型标准中确立它们之间的模糊关系。

(2)传统的数控机床优选是凭经验决策的过程,而所提出的方法则采用融 QFD、模糊线性回归和 ZOGP 优点于一体的复合型方法作为决策工具。采用这种方法解决了搭建某智能制造平台所遇到的数控机床选型问题,从而验证了该方法的有效性和实用性。

(3)所提出的面向智能制造的数控机床多目标优选法还可嵌入智能优化算法,并与专家决策系统、大数据技术相融合,形成一套更为便捷的计算机软件辅助决策工具,从而有利于解决未来制造业可能面临的智能机床选型问题,更好地促进制造业智能化发展。

参 考 文 献

1 鄢萍,阎春平,刘飞,等. 智能机床发展现状与技术体系框架[J]. 机械工程学报, 2013, 49(21): 1-10.  
YAN Ping, YAN Chunping, LIU Fei, et al. Development status and technical system framework for smart machine tool[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(21): 1-10. (in Chinese)

2 刘世豪,张云顺,王宏睿. 数控机床主轴优化设计专家系统研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(4): 372-381. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20160449&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160449&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.04.049.  
LIU Shihao, ZHANG Yunshun, WANG Hongrui. Optimization design expert system of CNC machine tool spindle[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(4):372-381. (in Chinese)

3 邢元,张连洪,何柏岩,等. 基于多体理论的数控机床精度逆设计方法[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(3): 282-287. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20140346&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140346&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.03.046.  
XING Yuan,ZHANG Lianhong, HE Baiyan, et al. Precision reverse design of numerical controlled (NC) machine on the basis of multibody theory[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(3): 282-287. (in Chinese)

4 ARSLAN M C, ATAY B C, BUDAK E. A decision support system for machine tool selection[J]. Journal of Manufacturing Technology Management, 2004, 15(1):101-109.

5 CHAN T S, SWARNKAR R. Ant colony optimization approach to a fuzzy goal programming model for a machine tool selection and operation allocation problem in an FMS[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2006,22(4): 353-362.

6 肖海宁,楼佩煌,严伟国,等. 柔性作业车间中机床与自动导引车在线调度方法[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(4):280-286. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20130448&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130448&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.04.048.

XIAO Haining, LOU Peihuang, YAN Weiguo, et al. On-line scheduling method for simultaneous scheduling of machines and automated guided vehicles in flexible job shop[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(4):280-286. (in Chinese)

7 王增强,李延来,蒲云,等. 基于 QFD 和前景理论的产品规划方案选择方法[J]. 机械工程学报,2013,49(4):174-183.  
WANG Zengqiang, LI Yanlai, PU Yun, et al. Selection in product plan alternatives based on quality function deployment and prospect theory[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013,49(4):174-183. (in Chinese)

8 陈以增,唐加福,任立义,等. 模糊回归理论在 QFD 系统建模中的应用研究[J]. 机械工程学报, 2003, 39(4): 25-29.  
CHEN Yizeng, TANG Jiafu, Ren Liyi, et al. Application research of using fuzzy regression in QFD modeling[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(4): 25-29. (in Chinese)

- 9 孙惠娟,蒋红海,殷国富. 基于机器视觉的五坐标机床旋转轴误差检测方法[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(8): 293 – 298. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20130850&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130850&flag=1). DOI:doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.08.050.
- SUN Huijuan, JIANG Honghai, YIN Goufu. Error measurement method for rotation axes of five axis machine tool based on machine vision[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 293 – 298. (in Chinese)
- 10 樊成,张雷,袁俊,等. 基于粗糙集和模糊聚类的复杂曲面零件可制造性评价[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 253 – 259. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20131041&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20131041&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.10.041.
- FAN Cheng, ZHANG Lei, Yuan Jun, et al. Manufacturability evaluation of complex surface parts based on rough set theory and fuzzy clustering[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 253 – 259. (in Chinese)
- 11 KO W C, CHEN L H. An approach of new product planning using quality function deployment and fuzzy linear programming model[J]. International Journal of Production Research, 2014, 52(6): 1728 – 1743.
- 12 李延来,唐加福,姚建明,等. 产品改进的质量屋中顾客需求排序的集成方法[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(10): 2059 – 2067.
- LI Yanlai, TANG Jiafu, YAO Jianming, et al. Integration methodology for prioritizing customer requirements in house of quality for product improvement[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 14(10): 2059 – 2067. (in Chinese)
- 13 LIU H T, CHENG H S. An improved grey quality function deployment approach using the grey TRIZ technique[J]. Computers and Industrial Engineering, 2016, 92: 57 – 71.
- 14 VINODH S, CHINTHA S K. Application of fuzzy QFD for enabling sustainability[J]. International Journal of Sustainable Engineering, 2011, 4(4): 313 – 322.
- 15 秦国华,周美丹,叶海潮,等. 基于 AHP 的夹具定位元件选择方法[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(2): 326 – 332.
- QIN Guohua, ZHOU Meidan, YE Haichao, et al. AHP-based fixture locator selection[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(2): 326 – 332. (in Chinese)
- 16 KIM D H, SOHN S Y. Fuzzy analytic hierarchy process applied to technology credit scorecard considering entrepreneurs' psychological and behavioral attributes[J]. Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, 2016, 30(4): 2349 – 2364.
- 17 SEKKELI G, KÖKSAL G, BATMAZ I, et al. Classification models based on Tanaka's fuzzy linear regression approach: the case of customer satisfaction modeling[J]. Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, 2010, 21(5): 341 – 351.
- 18 NETSANET J, BIRHANU B, DANIEL K. Ethiopian livestock husbandry cluster identification using FUZZY – AHP approach[J]. Advances in Intelligent Systems and Computing, 2015, 334: 233 – 243.
- 19 AKTAS A, CEBI S, TEMI I. A new evaluation model for service quality of health care systems based on AHP and information axiom[J]. Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, 2015, 28(3): 1009 – 1021.
- 20 雒兴刚,王福斌, KWONG C K. 可伸缩产品平台优化设计的质量功能展开方法[J]. 机械工程学报, 2011, 47(12): 175 – 184.
- LUO Xinggang, WANG Fubin, KWONG C K. Quality function deployment-based methodology for optimizing scalable product platform[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(12): 175 – 184. (in Chinese)
- 21 KIM K J, MOSKOWITZ H, KOKSALAN M. Fuzzy versus statistical regression[J]. European Journal of Operational Research, 1996, 92(2): 417 – 434.
- 22 ALPTEKIN S E, KARSAK E E. An integrated decision framework for evaluating and selecting e-learning products[J]. Applied Soft Computing, 2011, 11(3): 2990 – 2998.
- 23 KARSAK E E. Robot selection using an integrated approach based on quality function deployment and fuzzy regression[J]. International Journal of Production Research, 2008, 46(3): 723 – 738.
- 24 TANAKA H, WATADA J. Possibilistic linear systems and their application to the linear regression model[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1988, 27(3): 275 – 289.
- 25 TSAI W H, CHOU W C. Selecting management systems for sustainable development in SMEs: a novel hybrid model based on DEMATEL, ANP, and ZOGP[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 36(2): 1444 – 1458.
- 26 ÇİMREN E, ÇATAY B, BUDAK E. Development of a machine tool selection system using AHP[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 35(3 – 4): 363 – 376.