

面向绿色制造的刀具应用评价方法研究*

Research on Evaluation Method of Cutter Choice for Green Manufacturing

四川大学制造科学与工程学院 夏吉兵 汪永超 贺江华
四川省广电局 周立新

[摘要] 绿色制造是一种现代化制造模式,刀具的合理选择能够有效提高产品绿色度。建立了一种综合考虑加工时间、加工质量、生产成本、资源消耗和环境影响等因素的评价体系和数学模型,采用可拓层次分析法与灰色关联度法对模型进行求解;结合1个滚刀选择实例,说明该方法能够合理、有效地解决刀具选择评价问题。

关键词: 绿色制造 刀具 可拓层次分析法 灰关联决策

[ABSTRACT] Green manufacturing is a modern manufacturing mode, the reasonable selection of cutter can effectively improve green cutting process. An evaluation system and a mathematical model is built, it includes time, quality, cost, resource and environment impact. Extension hierarchical analysis and grey relationship decision-making can be used to solve the model extension. Combined with a hob example, it shows that the method can solve the problem of reasonable, effective tool selection.

Keywords: Green manufacturing Cutter Extension hierarchical analysis Grey relationship decision-making

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.03.058

一般来说,刀具选择主要考虑生产成本、加工质量和生产率等因素,但根据绿色制造的要求,选择刀具还必须考虑加工过程中的环境影响和资源消耗问题,因此面向绿色制造的刀具选择是一个多目标的优化决策问题。综合考虑加工时间、加工质量、生产成本、资源消耗和环境影响等因素,建立可行的多目标评价体系,并建立刀具选择决策模型,采用可拓层次分析法与灰色关联度法相结合的方法对该模型进行求解分析。

1 面向绿色制造刀具选择决策模型建立

1.1 面向绿色制造的刀具选择决策问题评价体系建立
传统制造业切削加工主要追求的是经济效益的单

一目标模式,而面向绿色制造的刀具选择决策,除了考虑加工质量和成本因素外,同时考虑资源消耗和环境影响等因素是一个多目标的、定量与定性相结合的复杂决策问题^[1]。为提高产品的绿色度,以加工时间 $T(X)$ 、加工品质 $Q(X)$ 、生产成本 $C(X)$ 、资源消耗 $R(X)$ 和环境影响 $E(X)$ 为目标函数,希望加工时间越短越好,加工质量越高越好,生产成本越低越好,资源消耗越少越好,环境影响越小越好^[2]。以上5个决策目标构成了面向绿色制造刀具选择评价体系框架,如图1所示。

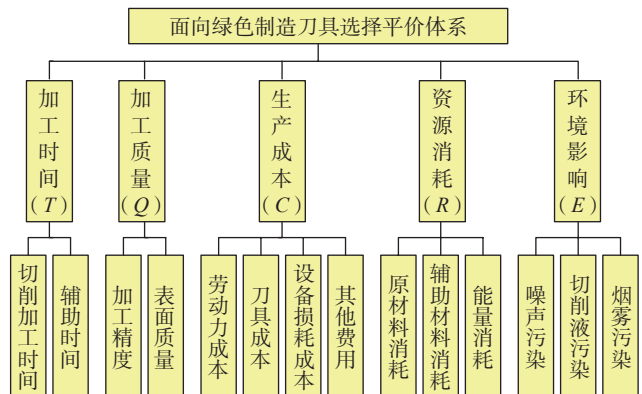


图1 面向绿色制造刀具选择评价体系结构

Fig.1 Evaluation architecture of cutter choice for green manufacturing

1.2 刀具决策问题的变量描述

刀具选择方案优化问题是从若干可能方案中选择最优或相对较优的方案,可以用一个 n 维向量来描述刀具选择决策问题,即:

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T, \quad (1)$$

其中, n 为可能方案数; x_i 为第 i 个方案,采用第 i 个方案时 $x_i=1$, 否则 $x_i=0$ 。

1.3 建立框架模型

实际机械加工过程中,由于受到生产设备和生产计划等生产条件的限制,在给定的环境条件下,综合考虑 T 、 Q 、 C 、 R 、 E 5 个因素,建立系统的多目标规划模型,对于最优刀具选择方案

$$X^* = [x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*]^T, \text{ 使得 } [3]:$$

$$\begin{aligned} &Optimum [T(X), Q(X), C(X), R(X), E(X)] \\ &= [T(x^*), Q(x^*), C(x^*), R(x^*), E(x^*)] \end{aligned}$$

* 国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAC02A02)资助。

2 模型求解

面向绿色制造的刀具选择是一个多目标的、定量与定性相结合的复杂决策问题,刀具选择方案的评价体系应满足层次分析法,同时具有定量因素和定性因素并存的特点,因此采用可拓层次分析法和灰关联决策相结合的方法,从用户的角度对其绿色度进行综合评价。

2.1 可拓层次分析法

2.1.1 构造可拓判断矩阵

建立判断矩阵的过程是通过一定的标度体系将原始数据转化为可直接比较的规范化格式的过程^[4]。在一定准则下,专家对隶属于同一层次多个元素之间的相对重要性进行两两比较,采用互反性 1~9 作为标量化方法,利用可拓区间数定量表示它们的相对优劣程度,构造可拓区间判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ ($i, j = 1, 2, \dots, n$), 元素 $a_{ij} = \langle a_{ij}^-, a_{ij}^+ \rangle$ 为可拓区间数, a_{ij}^-, a_{ij}^+ 分别为可拓判断矩阵第 i 行第 j 列的最小值和最大值。

2.1.2 计算满足一致性条件的权重矢量

(1) 对可拓判断矩阵 $A = \langle A^-, A^+ \rangle$, 求 $A^- = (a_{ij}^-)_{n \times n}$, $A^+ = (a_{ij}^+)_{n \times n}$ 的最大特征值所对应的归一化特征矢量 x^-, x^+ 。

(2) 计算 k 和 m 的值,公式如下:

$$\begin{cases} k = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (1/\sum_{i=1}^n a_{ij}^+)}{\sum_{i=1}^n (1/\sum_{j=1}^n a_{ij}^-)}} \\ m = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (1/\sum_{i=1}^n a_{ij}^-)}{\sum_{i=1}^n (1/\sum_{j=1}^n a_{ij}^+)}} \end{cases}, \quad (1)$$

式中, k, m 分别为满足 $0 < kx^- \leq mx^+$ 的全体正实数,若 $0 \leq k \leq 1 \leq m$, 则说明可拓判断矩阵的一致性良好。若一致性较差时,应校正判断矩阵或专家重新判断,直到满足一致性要求。

(3) 求出权重矢量:

$$S = (S_1, S_2, \dots, S_{nk})^T = \langle kx^-, mx^+ \rangle,$$

式中, S_{nk} 为第 k 层第 n 个元素对上一层某个元素的区间权重。

2.1.3 层次单层排序

层次单排序的目的是通过计算相对重要度对本层次各要素相对于上一层的某要素进行重要度排序。

设 $S_i = \langle S_i^-, S_i^+ \rangle, S_j = \langle S_j^-, S_j^+ \rangle$,

$$\text{利用公式 } V(S_i \geq S_j) = \frac{2(S_i^+ - S_j^-)}{(S_i^+ - S_i^-) + (S_j^+ - S_j^-)}, \quad (2)$$

如果 $\forall i, j = 1, 2, \dots, n; V(S_i \geq S_j) \geq 0 (i \neq j)$, 则

$$\begin{cases} P_{jh} = 1 \\ P_{ih} = V(S_i \geq S_j) \end{cases}, \quad (3)$$

式中, P_{ih} 表示第 i 个元素对上一层第 h 元素单排序,经

归一化后得到 $P_h = (P_{1h}, P_{2h}, \dots, P_{nh})^T$ 表示某层上各元素对上层的第 h 元素的单排序矢量。

2.1.4 层次总排序

在求出所有 $P_h^k = (P_{1h}^k, P_{2h}^k, \dots, P_{nh}^k)^T$ 后, 可从最上层开始, 自上而下求出当前层各要素相对上一层整体的综合重要度, 即进行层次总排序。当 $h = 1, 2, \dots, n_{k-1}$ 时, 得到: $P^k = (P_1^k, P_2^k, \dots, P_{n_{k-1}}^k)$ 。

如果 $k-1$ 层对总目标的排序权重矢量为 $W^{k-1} = (W_1^{k-1}, W_2^{k-1}, \dots, W_{n_{k-1}}^{k-1})^T$, 那么 k 层上各元素对总目标的合成排序为 $W^k = (W_1^k, W_2^k, \dots, W_n^k)^T = P^k W^{k-1}$ 。

2.2 基于灰色关联度的决策方法

灰色关联度法可以通过确定最优方案的指标效果评价向量并计算各备选方案对最优方案的灰色关联程度, 最终得到各备选方案的优劣程度排序^[5], 因此采用基于灰色关联度的决策方法可以更好地适用于主要由定量指标组成的评价体系的刀具选择决策问题。

2.2.1 建立方案评价效果矩阵

面向绿色制造刀具选择评价体系为多层次结构, 以同一层次元素作为准则, 在受上一层元素支配的同时可以支配下一层次的某些元素。设刀具选择决策问题由 w 个评价指标构成, n 个方案待评, 第 i 个方案关于 w 个指标构成集合 $x_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iw}\}$, 则关于 n 个选择方案可建立评价效果矩阵:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1w} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2w} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nw} \end{bmatrix} \quad \circ$$

通常, 参考指标集是由 ω 个指标的最佳值构成理想方案, 以此为基准, 采用灰色关联度评价各方案与理想方案的关联程度, 从而为各方案的优劣程度进行排序, 并选取最优指标集 $x_0 = \{x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0w}\}$ 为参考指标集。

2.2.2 评价指标规范化处理

由于各评价指标的数据差别很大, 且数据量纲不一定相同, 为了便于比较, 需将评价效果矩阵的各个元素进行规范化处理。

$$\text{对于定量极大值指标: } c_{ij} = \frac{x_{ik} - x_k^{\min}}{x_k^{\max} - x_k^{\min}}$$

$$\text{对于定量极小型指标: } c_{ij} = \frac{x_k^{\max} - x_{ik}}{x_k^{\max} - x_k^{\min}}, \quad (4)$$

式中, x_k^{\min}, x_k^{\max} 分别表示第 k 个指标在所有方案中的最大值和最小值; x_{ik} 表示第 i 个方案的第 k 指标值的规范化数值。得到规范化效果矩阵:

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1w} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2w} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & c_{nw} \end{bmatrix},$$

参考指标集变为 $c_0 = \{1, 1, \dots, 1\}$ 。

2.2.3 计算关联系数

关联度表征指各方案指标与理想方案参考指标的关联程度。计算关联度系数

$$\xi_{ik} = \frac{\min_i (\min_k |c_{0k} - c_{ik}|) + \rho \max_i (\max_k |c_{0k} - c_{ik}|)}{|c_{0k} - c_{ik}| + \rho \max_i (\max_k |c_{0k} - c_{ik}|)}, \quad (5)$$

式中, $\rho \in [0, 1]$, 一般取 0.5。

2.2.4 计算各个方案的灰色关联度

由可拓层次分析法得到的权重向量 $W = (W_1, W_2, \dots, W_n)^T$, 则可计算关联度

$$R = \xi W = (r_1, r_2, \dots, r_n)^T, \quad (6)$$

通过比较数值 r_i , 可以比较各方案的优劣程度。

3 案例分析

某工厂采用数控滚刀切削加工一批齿轮, 为了提高产品质量, 减少资源浪费和环境污染, 针对涂层高速钢逆铣、进口高速钢逆铣和进口高速钢顺铣在同一数控机床 YKX31320 对同一工件加工, 从面向绿色制造的角度研究刀具选择问题。检测结果如表 1 所示。

表1 3种方案检测结果

检测项目	涂层高速钢逆铣	进口高速钢逆铣	进口高速钢顺铣
加工时间 /s	799	416	400
表面粗糙度 / μm	1.75	1.25	0.825
单件生产刀具成本 / 元	3.64	5.2	4.83
生产成本 / 元	9.33	9	8.55
能源消耗 /kW	3.9	3.6	3.45
刀具寿命	2.25	3.75	4
刀具磨损量	0.071	0.0425	0.04
机床噪声 /dB	78	77.3	76.6
切削液烟雾	较小	一般	一般
切削液消耗	0.7	0.37	0.37

根据刀具选择评价体系, 由专家通过两两比较建立合理且具有弹性的可拓判断矩阵, 结果见表 2。

以此类推, 对刀具评价体系由上到下逐层建立可拓判断矩阵。对表 2 计算得:

$$\begin{aligned} x^- &= [0.1058, 0.554, 0.2607, 0.554, 0.554]^T \\ x^+ &= [0.1074, 0.5433, 0.3207, 0.5433, 0.5433]^T \\ \text{由公式(1)得: } k &= 0.954, m = 1.045, \text{ 计算公式(2)得} \\ S_1 &= \langle 0.101, 0.112 \rangle, S_2 = \langle 0.528, 0.568 \rangle, \\ S_3 &= \langle 0.248, 0.335 \rangle, S_4 = \langle 0.528, 0.568 \rangle, \\ S_5 &= \langle 0.528, 0.568 \rangle, \end{aligned}$$

所以有 $V(S_2 \geq S_1) = 6.227, V(S_3 \geq S_1) = 4.775,$
 $V(S_4 \geq S_1) = 6.227, V(S_5 \geq S_1) = 6.227$

表2 各属性重要度排序

目标层	加工时间 T	加工质量 Q	生产成本 C	资源消耗 R	环境影响 E
加工时间 T	$\langle 1, 1 \rangle$	$\langle 0.182, 0.222 \rangle$	$\langle 0.286, 0.4 \rangle$	$\langle 0.182, 0.222 \rangle$	$\langle 0.182, 0.222 \rangle$
加工质量 Q	$\langle 4.5, 5.5 \rangle$	$\langle 1, 1 \rangle$	$\langle 1.5, 2.5 \rangle$	$\langle 1, 1 \rangle$	$\langle 1, 1 \rangle$
生产成本 C	$\langle 2.5, 3.5 \rangle$	$\langle 0.4, 0.667 \rangle$	$\langle 1, 1 \rangle$	$\langle 0.4, 0.667 \rangle$	$\langle 0.4, 0.667 \rangle$
资源消耗 R	$\langle 4.5, 5.5 \rangle$	$\langle 1, 1 \rangle$	$\langle 1.5, 2.5 \rangle$	$\langle 1, 1 \rangle$	$\langle 1, 1 \rangle$
环境影响 E	$\langle 4.5, 5.5 \rangle$	$\langle 1, 1 \rangle$	$\langle 1.5, 2.5 \rangle$	$\langle 1, 1 \rangle$	$\langle 1, 1 \rangle$

由公式(3)经过归一化处理可得:

$$P = [0.043, 0.254, 0.195, 0.254, 0.254]^T$$

同理可得, 逐层计算各指标的权重及层次总排序, 结果见表 3。

表3 各指标绿色度综合评价表

项目	权重	子指标	单层权重	总权重
加工时间	0.043	加工时间	1	0.043
加工质量	0.254	表面粗糙度	1	0.254
生产成本	0.195	单件生产刀具成本	0.4	0.078
		生产成本	0.6	0.117
		能源消耗	0.2	0.0508
资源消耗	0.254	刀具寿命	0.5	0.127
		刀具磨损量	0.3	0.762
环境影响	0.254	机床噪声	0.2	0.0508
		切削液烟雾	0.4	0.1016
		切削液消耗	0.4	0.1016

因此得到各元素对总目标的权重向量

$$W = [0.043, 0.254, \dots, 0.1016]^T$$

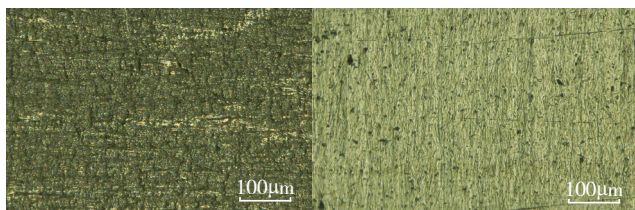
由表 1 可建立方案评价效果矩阵

$$X = \begin{bmatrix} 13.19 & 1.75 & 3.64 & 9.33 & 3.9 & 2.25 \\ 0.071 & 78 & 3 & 0.7 & & \\ 6.56 & 1.25 & 5.2 & 9 & 3.6 & 3.75 \\ 0.0425 & 77.3 & 5 & 0.37 & & \\ 6.40 & 0.825 & 4.83 & 8.55 & 3.45 & 4 \\ 0.04 & 76.6 & 5 & 0.37 & & \end{bmatrix},$$

其中, 对定性指标切削液烟雾取(极小, 较小, 一般) = (1, 3, 5)。由公式(4)对评价效果矩阵进行规范化处理, 通过公式(5)可得到关联系数矩阵

$$\xi = \begin{bmatrix} 0.28 & 0.22 & 1 & 0.206 & 0.167 & 0.222 \\ 0.295 & 0.213 & 0.286 & 0.276 & & \\ 0.943 & 0.35 & 0.167 & 0.313 & 0.206 & 0.667 \\ 0.84 & 0.487 & 0.167 & 1 & & \\ 1 & 1 & 0.208 & 1 & 0.234 & 1 \\ 1 & 1 & 0.167 & 1 & & \end{bmatrix}.$$

(下转第 63 页)



(a) 研磨前内表面纹理 (b) 研磨后内表面纹理

图4 研磨前后弯管内表面纹理变化情况

Fig.4 Inner surface texture contrast before and after grinding

纹理及缺陷完全被去除, 裸露出新的表面, 说明经研磨 35min 后钛合金管内表面的抛光效果要优于原始表面。同时, 钛合金弯管的内表面粗糙度值由原来的 $R_a 0.35\mu\text{m}$ 降至 $R_a 0.12\mu\text{m}$ 。

图 5 为钛合金弯管经 35min 研磨后的效果图。从图中可以看出, 经过磁力研磨光整加工后, 钛合金弯管内表面光亮, 而没有加工的区域则呈灰色。

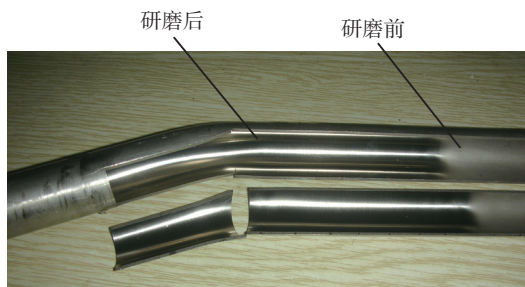


图5 钛合金弯管经研磨前后效果

Fig.5 Effect of titanium alloy elbow pipe before and after grinding

4 结论

本文针对航空发动机所用钛合金弯管内表面抛光这一加工难题, 提出利用非传统的磁力研磨加工法, 即采用旋转磁场带动磁性磨粒旋转与工件产生相对运动, 达到抛光去除内表面缺陷的目的, 并以试验结果为依据加以分析, 得到如下结论:

(1) 六自由度机械手与磁力研磨抛光装置相结合有效地完成了复杂弯管内表面的光整加工。

(2) 利用磁力研磨加工方法有效地去除了钛合金弯管弯曲处内表面的缺陷, 如裂纹、褶皱等。

(3) 经 35min 研磨后, 有效地将钛合金弯管内表面粗糙度值由 $R_a 0.35\mu\text{m}$ 降低到 $R_a 0.12\mu\text{m}$ 。

参考文献

- [1] 江志强, 杨合, 詹梅, 等. 钛合金管材研制及其在航空领域应用的现状与前景. 塑性工程学报, 2009, 4(16):44-50.
- [2] 卑喜敏, 王劲松, 张同. 钛合金磨削加工技术. 硅谷, 2012(18):34-35.
- [3] Singh D K, Jain V K, Raghuram V. Experimental investigations

into forces acting during a magnetic abrasive finishing process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 30:652-662.

[4] Girma B, Joshi S S, Raghuram MVGS, et al. An experimental analysis of magnetic abrasives finishing of plane surfaces. Machining Science and Technology, 2006, 10(3):323-40.

[5] Jha S, Jain V K, Komanduri R. Effect of extrusion pressure and number of finishing cycles on surface roughness in magnetorheological abrasive flow finishing (MRAFF) process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 33:725-729.

[6] Nishida H, Shimada K, Goto M. Polishing inner capillary walls by a magnetic compound fluid. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 25(1-4): 25-29.

[7] Yamaguchi H, Shinmura T, Ikeda R. Study of internal finishing of austenitic stainless steel capillary tubes by magnetic abrasive finishing. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2007, 129(5):885-892.

[8] Junmo K, Hitomi Y. Internal finishing of capillary tubes by magnetic abrasive finishing using a multiple pole-tip System. Precision Engineering, 2012, 36:510-516.

[9] 陈燕, 巨东英. 应用磁研磨法对细长管内表面的抛光处理. 模具制造技术, 2004(10):48-50.

(责编 谷雨)

(上接第 60 页)

最后由公式(6)计算可得

$R = \xi W = (0.2968, 0.4813, 0.8247)^T$, 可知面向绿色制造的刀具选择决策问题, 进口高速钢顺铣 > 进口高速钢逆铣 > 涂层高速钢逆铣, 所以采用进口高速钢顺铣为最优方案。

4 结束语

合理选择刀具对提高切削加工绿色度、协调优化企业经济效益和社会效益有着重大意义。综合考虑各决策因素, 建立可行的多目标决策体系和决策模型, 结合可拓层次分析法和灰色关联度法对决策模型进行了求解分析, 并通过实例对上述方法进行验证, 证明了该方法能够有效提高产品的绿色性。

参考文献

- [1] 谭显春, 刘飞. 面向绿色制造的刀具选择决策模型及其应用. 重庆大学学报(自然科学版), 2003, 26(3):117-121.
- [2] 江志刚, 张华. 面向绿色制造的生产过程多目标集成决策模型及应用. 机械工程学报, 2008, 44(4):41-46.
- [3] 刘飞, 张华, 陈晓慧. 绿色制造的决策框架模型及其应用. 机械工程学报, 1999, 35(5):11-15.
- [4] 王桂萍, 贾亚洲, 周广文. 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, 46(3):141-147.
- [5] 闫莉, 陈青. 绿色切削加工中刀具选择的灰关联决策. 工具技术, 2010, 44(5):81-83.

(责编 谷雨)