

文章编号:1000-582X(2003)03-0117-05

面向绿色制造的刀具选择决策模型及其应用

谭显春, 刘飞, 曹华军, 张鹏

(重庆大学制造工程研究所, 重庆 400044)

摘要:刀具的合理选择是提高切削加工绿色性能的重要途径之一。绿色制造是解决当前制造业日益严峻的环境问题的新模式。基于绿色制造的思想,建立了一种集时间(T)、质量(Q)、成本(C)、能源消耗(R)、环境影响(E)等五大决策目标的面向绿色制造的刀具的优化决策模型及其多目标评价指标体系和以及模型约束条件。采用模糊聚类综合评价方法,对上述模型进行求解。结合一个齿轮加工过程中面向绿色制造的滚刀选用针对不同材料的刀具进行决策的切削性能研究的实例,对该决策模型的应用和求解过程进行了说明。

关键词:绿色制造;刀具选择;决策模型;聚类模糊法

中图分类号:TH186

文献标识码:A

环境、资源、人口是当今人类社会面临的三大主要问题。特别是环境问题,其恶化程度与日俱增,正在对人类社会的生存与发展造成严重威胁。制造业是创造人类财富的支柱产业,但同时又大量消耗掉人类社会的有限资源,并且是造成当前环境污染问题的主要根源,为此制造业实施可持续发展战略已势在必行^[1-3]。绿色制造是一个综合考虑环境影响和资源效率的现代制造模式,其目标是使得产品从设计、制造、包装、运输、使用到报废处理的整个产品生命周期中,对环境的影响(负作用)尽可能小,资源消耗尽可能少,并使企业经济效益和社会效益协调优化。

切削加工是作为制造技术的主要基础工艺,随着制造技术的发展,进入了以发展高速切削、开发新的切削工艺和加工方法、提供成套技术为特征的发展新阶段。诸如高速切削是切削加工的发展方向已成为切削加工的主流,它的发展和推广应用(包括机床和刀具技术的全面发展和提高)将带动整体制造业水平、效益、环境友好性的进步与提高。而在现代切削加工工艺中,刀具是切削加工中保证加工质量、提高生产效率的一个重要因素,同时也影响着切削加工过程中的能

量消耗、切削液的使用、生产的安全性,即影响切削加工的绿色性^[4]。近年来,环保型的高性能刀具材料(含表面涂层材料)、刀具制造工艺技术、刀具安全技术及刀具使用技术的发展^[5],大大改善了切削加工性能,使得高速切削、干切削等绿色切削加工技术得以实现,传统切削加工的加工质量、切削效率、加工成本、能耗以及切削液的使用等也得到了改善,有利于实现绿色制造。在面向绿色制造的工艺规划中,刀具的合理选择决定着刀具对切削加工过程的绿色性能影响。从加工时间、加工质量、成本、资源消耗、环境影响五个方面,分析了刀具对切削加工的影响,建立了刀具选择的多目标评价体系;并建立了一种面向绿色制造的刀具选择决策框架模型,采用模糊聚类综合评价的定量分析和专家系统的定性推理相结合的方法,对模型进行求解。

1 面向绿色制造的刀具综合选择模型的建立

作者们从80年代初以来已对绿色制造直接相关的制造系统中的资源问题和能源问题进行了长期研究,并提出了绿色制造的T(时间)、Q(质量)、C(成

• 收稿日期:2002-12-23

基金项目:国家863主题资助项目(2001AA412200);重庆市技术委员会资助项目

作者简介:谭显春(1974-),女,新疆石河子人,重庆大学博士生,主要从事绿色制造技术及LCA领域研究。

本)、E(环境影响)、R(资源消耗)等5大决策目标变量的决策目标体系以及相应的决策框架模型^[6]。绿色制造中的任何一个决策问题都或多或少与上述5个决策目标变量中的某些或全部有关。结合刀具选用的具体问题,提出了面向绿色制造的刀具决策目标体系,并在此基础上建立刀具的可操作性综合选择模型及相应的模型求解方法。

1.1 面向绿色制造的刀具决策问题的目标体系

面向绿色制造的刀具的综合选择问题实际上是一个多目标的、定性与定量相结合的复杂决策问题。通常,对刀具选择,切削过程的优化以最高生产率(或最短生产时间)、最低单件成本和最高利润率作为判据。随着21世纪制造业可持续发展的要求,刀具制造业将由主要追求经济效益的单一目标模式转变为追求经济效益与社会效益、环境效益协调发展的多目标模式。影响刀具产业发展的要素将由传统刀具产业的功能、质量、成本、服务拓展为功能、质量成本、时间、环境和资源。面向绿色制造的刀具选择决策目标体系把时间(T)、质量(Q)、成本(C)、资源(R)、环境(E)作为重要因素加以考虑,相应的目标函数为加工时间 $T(X)$ 、加工质量 $Q(X)$ 、生产成本 $C(X)$ 、资源消耗 $R(X)$ 、环境影响 $E(X)$ 。对这五个目标变量追求的变化结果,即加工时间希望越少越好,加工质量希望越高越好,生产成本希望越低越好,资源消耗越少越好,环境影响希望越小越好。以上五个决策目标之间存在着密切的联系,它们共同构成了面向绿色制造的刀具决策目标体系。相应的决策目标向量分解如图1所示:



图1 面向绿色制造的刀具决策多目标体系

刀具的环境影响主要包括生态环境影响、职业健康安全与卫生管理的影响、生产安全影响等方面内容。

1.2 面向绿色制造的刀具决策问题的变量描述

刀具的优选决策问题为使用方案优化问题,即从若干可能的方案中选出其中最优或相对较优的方案。

对刀具的使用方案优化问题,其变量可用一个 n 维向量来描述,即:

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

其中, n 为可能的加工方案数; $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 代表第 i 个加工方案,并有

$$x_i = \begin{cases} 0 & \text{不采用第 } i \text{ 个方案} \\ 1 & \text{采用第 } i \text{ 个方案} \end{cases}$$

因此,对刀具的使用方案优化问题,其涉及的所有变量均可用一个 n 维向量来表示。

1.3 决策框架模型

基于以上分析,可建立面向绿色制造的刀具决策框架的数学模型(I)。其中 $T(X)$ 描述时间决策目标, $Q(X)$ 描述质量决策目标, $C(X)$ 描述成本决策目标, $R(X)$ 描述资源消耗决策目标, $E(X)$ 描述环境决策目标。

对于某一刀具优选决策

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

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

$$\text{满足: } \begin{cases} g_u(x) \leq 0 (u = 1, 2, \dots, k) \\ h_v(x) = 0 (v = 1, 2, \dots, p < n) \end{cases}$$

$$\text{使得: Optimun } [T(X), Q(X), C(X), R(X), E(X)] = [T(X^*), Q(X^*), C(X^*), R(X^*), E(X^*)]$$

$$\text{其中: } \begin{cases} X \in R^n, x_1, x_2, \dots, \text{代表可选方案} \\ X^* \text{ 为最优刀具选择方案} \\ g_u(X) \text{ 不等式约束条件} \\ h_v(X) \text{ 等式约束条件} \end{cases}$$

在生产实际中,切削速度和进给量的数值是不能任意选择的,它们要受到生产条件的种种限制。例如最大进给量不但受到刀具耐用度的限制,还会受到加工表面粗糙度、工件刚性、刀具强度和刚度以及夹紧机构可靠性的影响。上述选择模型是一个在给定的环境条件(即系统约束边界,如有限资源控制,分别为质量目标约束、成本目标约束、环境目标约束及原材料约束,以及满足加工工艺要求)以及目标下建立系统的多目标规划模型,此模型有两个约束条件,其中 $g_u(X)$ 为模型的不等式约束条件, $h_v(X)$ 为模型的等式约束条件。

1.4 模型求解方法

由于面向绿色制造刀具的优选决策问题的复杂性,上述总体决策框架中的许多目标难以进行定量的计算和分析,许多问题只能定性分析和定量分析及逻

辑判断相结合的方法来求解。其中模糊聚类综合评价的定量分析^[7,8]和专家打分法的定性推理相结合的方法是解决这一问题的有效方法之一。

模糊聚类分析评价法是运用模糊集理论对系统进行综合评价和决策的一种方法,可以获得各侯选方案优先顺序的有关信息。因此也是进行绿色制造决策分析的有效方法之一。应用模糊聚类综合评价的定量分析和专家打分法的定性推理的主要步骤为:

1) 建立评价指标集 U

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_m\}$$

式中 m 为评价方面个数,对第 i 个评价方面的集成 u_i ($i=1, 2, \dots, n$) 式中 N 为第 l 个评价要素的个数,如果需要可继续划分下去。

2) 针对某一指标,对该指标所支配的下一层元素进行模糊评价,建立评价等级集 V

$$V = (v_{11}, v_{12}, \dots, v_j, \dots, v_m)$$

各因素可以简单地取相同数目的评价等级个数。得到 n 个方案的原始资料矩阵,即

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix}$$

3) 距离的标定

即求出衡量被分类对象间相似程度的统计量 r_{ij} , 从而确定论域上的模糊相似关系矩阵 R 。统计数据归一化,以便于分析比较,通常可用极值标准化公式:

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \bigwedge_{i=1}^n x_{ij}}{\bigvee_{i=1}^n x_{ij} - \bigwedge_{i=1}^n x_{ij}}$$

式中: $i \in (1, n), j \in (1, m)$ 。

显然 $x'_{ij} \in [0, 1]$ 。于是得到矩阵 $X' = [x'_{ij}]$ 。各 x'_{ij} 的意义表示指标隶属与集合 X_i 的隶属度。用贴近度 $t(X_i, X_j)$ 确定 x_i 和 x_j 的相似程度 r_{ij} , 即 $r_{ij} = t(X_i, X_j)$,

贴近度可用海明贴近度 $r_{ij} = 1 - c \sum_{k=1}^m |x_{ik} - x_{jk}|$, 也

可以用最小最大贴近度 $r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m (x_{ik} \wedge x_{jk})}{\sum_{k=1}^m (x_{ik} \vee x_{jk})}$ 。其中: $k \in$

$(1, m)$ 。于是得到相似矩阵 $R = [r_{ij}]$

4) 进行聚类分析

通常采用模糊等价关系聚类法和最大树法。由于模糊相似关系不一定是模糊等价关系,故需将 R 改造成模糊等价关系 R^* , 然后作出聚类图,并在适当的阈值上进行截取进行需要的分类。

5) 建立权重集

根据所得到的评价结果,运用专家打分法的定性推理确立权重如下:

$$A = (a_1, a_2, \dots, a_j, \dots, a_m),$$

且满足 $\sum_{j=1}^m a_j = 1$

6) 进行模糊变换,并进行归一化处理。模糊变换公式为: $B = A \cdot R = (b_1, b_2, \dots, b_k, \dots, b_m)$, 归一化公式为:

$$b_j = \frac{b_j}{\sum_{j=1}^m b_j}$$

7) 重复上述步骤,向上逐层合并,得到该方案的综合评价结果。最后还可以用一总分数来表达综合评价结果,一般可取评价标准隶属度集为 $u = \{u_1, u_2, u_i \dots u_n \dots\}$, 则可计算出综合评价结果度具体得分,据此分数可以将被评价对象排序。方法为:得分 = $100 B \cdot u = (b_1, b_2, \dots, b_i \dots b_m) * \{u_1,$

$$u_2, u_i \dots u_n \dots\} T * 100 = (\sum_{i=1}^n b_i * u_i) * 100$$

2 案例分析

某机床厂的数控滚切削加工过程中使用的刀具是传统普通高速钢,加工过程中,产品表面加工质量、加工效率和刀具寿命都较低,刀具磨损量较大,且加工过程中产生的废油雾、切屑、噪声等造成的环境污染较大。该厂希望采用一种国内研制的 TiN 涂层高速钢刀具、进口 TiN 涂层高速钢刀具来代替传统的普通高速钢刀具以此来提高产品的竞争力,并要求作者们对此帮助做出决策。本文针对传统普通高速钢、TiN 涂层高速钢、进口 TiN 涂层高速钢等三种不同材料的刀具在同一数控机床 YKX31320 上(全封闭式),分别采用逆铣和顺铣的不同切削方式,在近似相同的加工参数条件下,对同一工件碎火 45 钢件 0903201 加工,刀具后刀面磨损试验遵循 ISO3685 ~ 1977(E) 国际标准,从面向绿色制造的角度对此问题作出系统决策。检测项目和检测结果如下表 1 所示。

表1 4种方案比较结果如下

项目	A	B	C	D	
刀具参数	材料	高速钢逆铣	涂层高速钢逆铣	进口高速钢逆铣	进口高速钢顺铣
	模数	4	4	3.941/4.00	3.941/4.00
	螺旋方向	右旋(2°20')	右旋(2°16')	右旋(4°27'14")	右旋(4°27'14")
	规格	φ40 * 110 * 110	φ40 * φ110 * 110φ	40 * φ110 * 110φ	40 * φ110 * 110
	精度等级	AA	AA	AA	AA
切削规范	切削次数	5	5	5	5
	切削速度 m/min	43.2	69	67.2	67.2
	滚刀转数 r/min	125	200	200	200
	轴向进给 mm/r	1.4	1.4	1.4	1.4
	吃刀深度	8	5	5	5
检测项目	加工时间	19m6s	13m19s	6m56s	6m40s
	表面粗糙度	2.125	1.75	1.25	0.825
	刀具寿命(切削长度 m)	1.5	2.25	3.75	4.0
	刀具磨损量	0.105	0.071	0.042 5	0.040
	能源消耗	2.6 kW(其中主轴 1.64 kW) 3.9kW(其中主轴 2.7kW) 3.6 kW(其中主轴 2.6kW) 3.45 kW(其中主轴 2.5 kW)			
	单件生产刀具成本(元)	4.27	3.64	5.2	4.83
	成本(元)	9.56	9.33	9.0	8.55
	机床噪声	78.5	78.0	77.3	76.6
	切削液烟雾	极小	较小	一般	一般
	切削液消耗	1	0.70	0.37	0.37
	安全性	0.5	0.6	0.8	0.8

备注加工机床:YB3120 是三轴数控的数控机床;工件:钢 45°,模数 4,齿数 49,外径 209,切齿宽度 40。

注:切削液消耗是以普通高速钢为标准作为参照值;噪声是在同一个产生最大噪声点取值的。

2.1 变量描述(方案描述)

$$X = (x_1, x_2, x_3, x_4) \quad \text{其中 } x_i (i = 1, 2, 3, 4) = \begin{cases} 0 & \text{不采用第 } i \text{ 个方案} \\ 1 & \text{采用第 } i \text{ 个方案} \end{cases}$$

$$X = \begin{cases} (1, 0, 0, 0) & = \text{方案 A, 即采用高速钢刀具逆铣方式}(x_1 = 1, x_2 = 0, x_3 = 0, x_4 = 0) \\ (0, 1, 0, 0) & = \text{方案 B, 即采用国产涂层高速钢刀具逆铣方式}(x_1 = 0, x_2 = 1, x_3 = 0, x_4 = 0) \\ (0, 0, 1, 0) & = \text{方案 C, 即采用进口涂层高速钢刀具逆铣方式}(x_1 = 0, x_2 = 0, x_3 = 1, x_4 = 0) \\ (0, 0, 0, 1) & = \text{方案 D, 即采用进口涂层高速钢刀具顺铣方式}(x_1 = 0, x_2 = 0, x_3 = 0, x_4 = 1) \end{cases}$$

2.2 目标函数及初步分析

时间函数 T(X)、质量函数 Q(X)、成本函数 C(X)、资源消耗函数 R(X)、环境影响函数 E(X) 所包涵的内容如图 1 所示,依据面向绿色制造的刀具决策目标体系的分解内容建立 4 种方案综合评价体系如表 1 所示,在此决策过程中,采用决策模型中给出的求解方法对此五目标函数进行综合评价,得到可以量化的结果,以此来反映出 4 个方案的最后优化结果。

3.3 4 种方案的综合评价结果

依据上述模型的求解方法,得出 4 种方案的综合评价矩阵 B 和综合评价分数结果见表 2:

表2 4种方案比较结果

方 案	综合评价矩阵	综合评价分数
A	(0.486, 0.302, 0.205)	67.47
B	(0.567, 0.302, 0.122)	72.79
C	(0.757, 0.179, 0.07)	80.67
D	(0.764, 0.168, 0.068)	81.12

最终的综合评价结果表明:进口 TiN 涂层高速钢顺铣方式方案 > 进口 TiN 涂层高速钢逆铣方式方案 > 国内研制的 TiN 涂层高速钢刀具逆铣方式方案 > 普通高速钢逆铣方式方案。特别是实验数据描述能源消耗和环境影响目标体系的要素诸如在能源消耗、噪声、加工精度、表面粗糙度、以及刀具寿命和刀具磨损方面,

进口 TiN 涂层高速钢刀具也依次优于 TiN 涂层高速钢刀具和普通高速钢刀具的结果;四种方案中刀具的磨损大小如表 1 所示,若磨损标准为 0.105 mm,则国产 TiN 涂层高速钢刀具和进口 TiN 涂层高速钢刀具的耐用度分别比未涂层高速钢刀具提高约 2 倍和 5 倍。而涂层刀具加工的工件表面粗糙比未涂层刀具加工的工件表面粗糙度降低约 50%。从表 1 中可以看出,尽管进口 TiN 涂层高速钢单件生产刀具成本很高,但由于效率的提高则使机床费用和人工费用有很大的降低,其综合成本降低,这也是工业发达国家制造业所采取的经营策略相一致。所以考虑在大规模批量生产下综合成本的因素下,该厂仍然采用进口 TiN 涂层高速钢刀具方案,并因此而取得了较显著的综合效益(经济效益和社会效益)。实践生产表明取得了良好的效果。

4 结论

分析了在现代切削加工中,刀具是切削加工中保证加工质量、提高生产效率、减少环境污染的一个重要因素,刀具的合理选择是提高切削加工绿色性能的重要途径之一。建立了面向绿色制造的刀具优选决策多目标体系,包括时间 T、质量 Q、成本 C、资源消耗 R、环境影响 E 等五大决策目标,并对目标体系中决策向量进行分解。在此基础上,建立了面向绿色制造的刀具综合选择模型,并建议采用模糊聚类综合评价的定量分析和专家系统的定性推理相结合的方法进行模型求

解方法。用实例对上述模型和方法进行了验证,说明该模型和求解方法的应用是可行的。

致谢

感谢重庆机床厂李智勇高工在实验期间的大力协助。

参考文献:

- [1] ZUST R, GADUFF. Life-cycle Modeling as an Instrument for Life-cycle Engineering[J]. Annals of the CIRP, 1997, 46(1): 351 - 354.
- [2] SHENG P, SRINIVASAN M. Multi-Objective Process Planning in Environmentally Conscious manufacturing; A Feature-Based Approach[J]. Annals of the CIRP, 1995, 44(1): 433 - 427.
- [3] 刘飞. 绿色制造的决策框架模型及其应用[J]. 机械工程学报, 1999, 35(5): 11 - 15.
- [4] MUNOA a, SHENG P. An Analytical Approach for Determining the Environmental impact of Machining Process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1995, 53(3 - 4): 736 - 758.
- [5] 陈维喜. 刀具涂层技术的现状与展望[J]. 工具技术, 2000, 34(3): 3 - 6.
- [6] 张华, 刘飞, 李友如. 绿色工艺规划的决策模型及应用案例研究[J]. 中国机械工程. 2000, 11(9): 979 - 982
- [7] 王跃进, 孟宪颐. 绿色产品多级模糊评价方法的研究[J]. 中国机械工程. 2000, 11(9): 1 016 - 1 019.
- [8] 申丽国, 韩至骏. 选择高速钢刀具材料的专家模糊聚类算法[J]. 机械工程学报, 1995, 31(3): 51 - 55.

A Decision-Making Framework Model of Tool Selection for Green Manufacturing and Its Applications*

TAN Xian-chun, LIU Fei, CAO Hua-jun, ZHANG Peng

(Institute of Manufacturing Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Pursuing the green manufacturing of products is beneficial to the alleviation of environment burdens. In order to reap such benefits, green manufacturing is involved in every aspect of manufacturing processes. The optimization selection of tool is one of the important approach to improve environmentally performance of cutting machining. The objective factors of decision-making problems for traditional tool selection are usually the following, quality and cost. Based on the main idea of environmentally conscious and decision-making framework model of green manufacturing proposed by the authors, an multi-object decision-making model for tool selection is put forward. The objects includes Time (T), Quality (Q), Cost (C), Resources (R) and Environment impact (E), where T aims to minimize the produce time, Q means to maximize the quality, C means to minimize the cost, R means to minimize the consume the resources and E means to minimize the environment impact respectively. Each object is analyzed in detail and integrated the Fuzzy Clustering Analysis Algorithm together with the expert judging method apply to the model too. A case study in which a practical decision-making problem for tool selection in green manufacturing machining is analyzed. Successful application of above model shows the model is practical.

Key words: green manufacturing-oriented; tool selection; decision-making model; algorithm

(责任编辑 张小强)