

基于遗传算法的数字制造加工方案多目标优化^{*}

王义强 关雪松 陶俐言 袁修华 苗立琴

【摘要】 建立了基于遗传算法的多目标优化模型,将各种影响因素分为加工时间、加工成本和加工质量三大类,利用层次分析法建立分层评价阶梯树,根据客户对评价因素重要程度的不同需求确定权重,进行加工方案的选择和优化。将该方法应用于主轴箱的表面和孔加工过程中,实例表明多目标优化模型能够简单、有效、客观地根据对评价因素的不同要求选择出最优的加工方案。

关键词: 工艺方案 遗传算法 层次分析法 多目标优化

中图分类号: TH162 **文献标识码:** A

Genetic Algorithm-based Multi-objective Optimization for Machining Scheme Selection

Wang Yiqiang¹ Guan Xuesong¹ Tao Liyan² Yuan Xiuhua¹ Miao Liqin²
(1. Jilin University 2. Changchun Tech. & Equipment Institute)

Abstract

For the high-speed development of technology, there are a lot of different machining schemes for one part. The selection of machining scheme is a multi-objective problem. A method based on genetic algorithms (GA) was proposed to find out the set of Pareto-optimal solutions for multi-objective digital machining scheme selection. To deal with multi-objective and enable the engineer to make decision on different demands, an analytic hierarchy process (AHP) was implemented in the proposed procedure to determine the weight value of evaluation indexes. Three conflicting objectives: cost, quality and operation time, were simultaneously optimized. The processing of hole and surface of headstock was used as an example to prove the validity of the hybrid algorithm.

Key words Process planning, Genetic algorithm, AHP, Multi-objective optimization

引言

传统的工艺方案选择主要依靠知识和经验,不能充分考虑各种影响因素对工艺方案选择的影响。新产品快速研制迫切需要可制造性评价、加工工艺方案优化等数字化制造技术的支持。以制造过程的知识 and 经验为基础,将数字化建模仿真和优化技术应用到零件加工方案选择中,进行多目标决策可充分考虑各种影响因素对加工方案选择的影响。

遗传算法(GA)^[1]是一种模拟自然界生物遗传和进化过程的自适应搜索的算法,是基于群体的算法。层次分析法^[2](AHP)是一种无结构的多准则决策方法,它将复杂问题分解成各个组成因素,又将这些因素按支配关系分组形成梯阶层次结构,通过两两因素比较的方式确定层次中各要素的相对重要性,并以此确定决策方案相对重要性总的排序。采用遗传算法和层次分析法相结合的方法进行工艺方案选择,既可以综合考虑各影响因素对工艺方案的

收稿日期: 2007-05-30

^{*} “十一五”装备预先研究资助项目(项目编号:51318010206)

王义强 吉林大学机械科学与工程学院 教授 博士生导师, 130025 长春市

关雪松 吉林大学机械科学与工程学院 博士生

陶俐言 中国兵器工业第五五研究所 研究员, 130012 长春市

袁修华 吉林大学机械科学与工程学院 硕士生

苗立琴 中国兵器工业第五五研究所 工程师

影响,又可以根据加工者对不同影响因素重要程度的不同要求确定权重并进行工艺方案选择和优化。

1 工艺方案选择和优化模型

1.1 工艺方案选择

传统的工艺方案选择仅是考虑影响工艺方案优劣的诸多因素中的一个,这样虽然可以使评价问题简化,但往往会出现片面的评价结果。加工工艺方案选择不仅受零件的加工成本、加工效率和加工质量要求的影响,同时还受设备资源的状态、工人的技术水平等因素的影响,工艺方案的选择是一个典型的多目标决策问题,即

$$\min F(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)) \quad (1)$$

$$\text{s.t. } g(x) = (g_1(x), g_2(x), \dots, g_r(x)) \leq 0$$

$$\text{其中 } x = (x_1, x_2, \dots, x_k) \in X$$

式中 $g(x)$ ——约束条件 $F(x)$ ——目标函数

在加工工序确定情况下,加工设备的选择过程如图1所示。在进行方案选择时,主要考虑加工成本、加工时间和加工质量对工艺方案选择的影响,利用遗传算法进行多目标优化^[3~4]。由于遗传算法通常采用单目标优化函数作为适应度函数对染色体进行评价选择,因此对于多目标优化问题一般采用将其转化为单目标的形式进行求解。考虑到加工者对各个指标可能具有不同的需求,采用线性加权法构造适应度函数,并用层次分析法^[5]建立评价指标的分层结构模型确定权重。

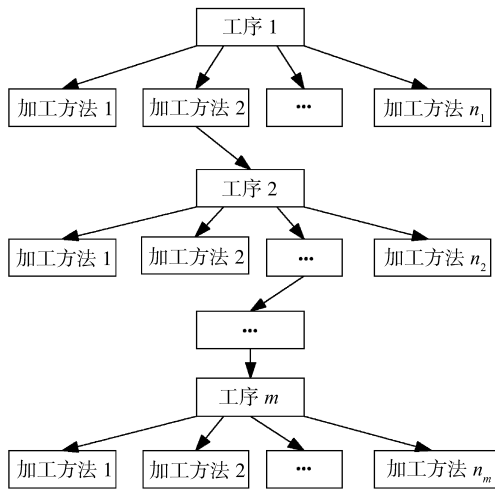


图1 加工设备选择示意图

Fig.1 Demonstration of machining tool selection

以加工设备选择作为目标层建立分层评价阶梯树:加工成本、加工时间和加工质量是加工设备选择的主要影响因素。将它们作为第一层影响因素;机床使用费用、刀具费用、机床和夹具的折旧费用、操作工人工资、切削时间、辅助时间、服务时间、休息时间、表面质量、尺寸公差和形位公差作为第二层影响

因素。以非大型工件为研究对象,假设各种方案的物流成本基本相同,分层评价阶梯树如图2所示。

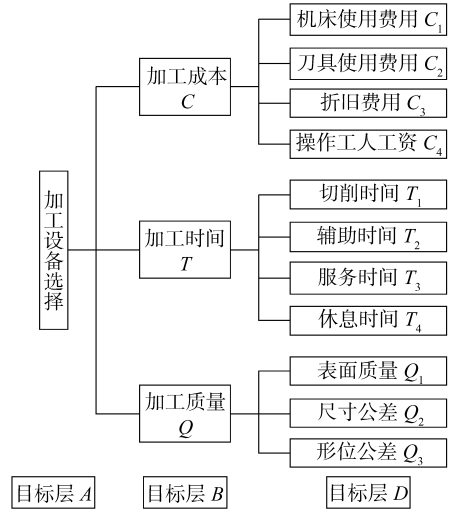


图2 分层评价阶梯树

Fig.2 Hierarchical structure of model for evaluation

1.2 优化模型

对不同组合的工艺方案进行评价,根据加工成本最低、生产效率最高和加工质量最优的目标建立目标函数。

设零件的加工过程由若干个工序组成,记为: $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$; 对应于工序 p_i 有制造资源 R , 记为 $R_i = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$, m 为与 p_i 对应的制造资源个数。设计变量 x_{ij} ($i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$), 当第 i 道工序由相对应的制造资源中的第 j 台机床加工时 x_{ij} 的值为 1, 否则为零。则目标函数描述为

$$f_1 = \min C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_{ij} x_{ij} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (C_{1ij} + C_{2ij} + C_{3ij} + C_{4ij}) x_{ij} \quad (2)$$

$$f_2 = \min T = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m T_{ij} x_{ij} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (T_{1ij} + T_{2ij} + T_{3ij} + T_{4ij}) x_{ij} \quad (3)$$

$$f_3 = \max Q = \min(Q' - \max Q) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [Q' - (Q_{1ij} + Q_{2ij} + Q_{3ij}) x_{ij}] \quad (4)$$

式中 C_{ij} ——第 i 道工序的加工成本
 T_{ij} ——第 i 道工序加工时间
 Q_{ij} ——第 i 道工序加工质量
 Q' ——大于 $\max Q$ 的数

2 层次分析法确定权重

采用层次分析法的 1~9 比例标度构造各层的判断矩阵,判断矩阵中只能出现 1~9 的自然数,但

由于在计算权重的过程中,常会考虑多个专家的意见,并将这些意见作类似于“平均化”的处理,这时会出现非整数化的取值。采用改进的“1~9度评分方法”^[6],使其更接近主观判断,评分方法如表1所示。

表1 改进的“1~9度评分方法”

Tab.1 Modified “1~9” criterion

分数	含义(某一指标相对于另一指标的重要程度)
5:5=1	两个目标相比,具有同等重要性
6:4=1.5	两个目标相比,前者比后者稍重要
7:3=2.33	两个目标相比,前者比后者明显重要
8:2=4	两个目标相比,前者比后者明显重要得多
9:1=9	两个目标相比,前者比后者绝对重要
5.5:4.5=1.22	
6.5:3.5=1.86	上述相邻判断的中间值
7.5:2.5=3	
8.5:1.5=5.67	

根据表1所示的评分标准,构造各层的判断矩阵。认为第2层影响因素即B-D层的判断矩阵不变,第1层影响因素即A-B层的判断矩阵根据客户对加工成本、加工时间和加工质量的不同要求而改变判断矩阵,从而得到不同的总体评价指标。各层判断矩阵如表2~5所示。

表2 A-B层评价指标评价矩阵

Tab.2 Pair-wise comparison matrix for layer A-B

A	B ₁	B ₂	B ₃
B ₁	1	1.22	1.5
B ₂	1/1.22	1	1.22
B ₃	1/1.5	1/1.22	1

表3 加工成本评价矩阵

Tab.3 Pair-wise comparison matrix for processing cost

B ₁	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄
D ₁	1	1.5	1/1.22	1/1.5
D ₂	1/1.5	1	1/1.86	1/2.33
D ₃	1.22	1.86	1	1/1.22
D ₄	1.5	2.33	1.22	1

表4 加工时间评价矩阵

Tab.4 Pair-wise comparison matrix for processing time

B ₂	D ₅	D ₆	D ₇	D ₈
D ₅	1	2.33	4	9
D ₆	1/2.33	1	1.22	1.5
D ₇	1/4	1/1.22	1	1.22
D ₈	1/9	1/1.5	1/1.22	1

表5 加工质量评价矩阵

Tab.5 Pair-wise comparison matrix for processing quality

B ₃	D ₉	D ₁₀	D ₁₁
D ₉	1	1.22	1.22
D ₁₀	1/1.22	1	1
D ₁₁	1/1.22	1	1

根据以上构造的判断矩阵计算各判断矩阵的最大特征根 λ_1 和单排序权向量,同时计算一致性指标 $C_I = \frac{\lambda_1 - k}{k - 1}$ 和一致性比率 $C_R = \frac{C_I}{R_I}$ (R_I 为随机一致性指标),进行一致性判断。 $C_R < 0.1$ 时满足一致性条件,否则需要调整判断矩阵。改进后的“1~9度评分方法”对应的三阶判断矩阵和四阶判断矩阵的随机一致性指标 R_I 分别为0.1690和0.2589。

层次单排序结果如表6所示。经一致性检验, C_R 值均小于0.1,说明构造的判断矩阵合理可靠。

表6 单层次排序结果

Tab.6 Result of pair-wise comparison matrix

排序层	ω	λ_1	C_I	C_R
A-B	[0.402 3, 0.328 9, 0.268 8]	3.0	0	0
B ₁ -D	[0.227 5, 0.149 8, 0.279 2, 0.343 5]	4.0	0	0
B ₂ -D	[0.548 7, 0.193 0, 0.144 2, 0.114 1]	4.023 6	0.007 9	0.03
B ₃ -D	[0.378 8, 0.310 6, 0.310 6]	3.0	0	0

D层对于目标层的总权向量 W ,总一致性指标 C_I 和总平均随机一致性指标 R_I 可分别由下式求得

$$\begin{cases} W = \omega_{B-C} \omega_{A-B} \\ C_I = (C_{I1}, C_{I2}, C_{I3}) \omega_{A-B} \\ R_I = (R_{I1}, R_{I2}, R_{I3}) \omega_{A-B} \end{cases} \quad (5)$$

根据表6求得的总权向量 W 为

$$W = [(0.091 5, 0.060 3, 0.112 3, 0.138 2), (0.180 5, 0.063 5, 0.047 4, 0.037 5), (0.101 8, 0.083 5, 0.083 5)]$$

总一致性指标为 $C_I = 0.002 6$,总平均随机一致性指标 $R_I = 0.234 7$,则总随机一致性比例 $C_R = C_I/R_I = 0.01 < 0.1$,故满足整体一致性要求。

3 遗传算法实现

3.1 适应度计算

直接采用目标函数作为适应度函数,根据加工者对评价指标的不同偏好用线性加权法构造适应度函数,即

$$G(x) = \begin{cases} C_{\max} - f(x) & (f(x) < C_{\max}) \\ 0 & (f(x) \geq C_{\max}) \end{cases} \quad (6)$$

$$f = \omega_1 f_1 + \omega_2 f_2 + \omega_3 f_3$$

$$\text{s. t. } \sum_{j=1}^m x_{ij} = 1$$

ω_i 分别代表与加工成本、加工时间和加工质量对应的由 11 个评价指标的权值组成的 3 个权向量, 由层次分析法确定。

3.2 染色体编码方案

编码方法采用整数编码, $X = (x_1, x_2, \dots, x_i)$, x_i 为 $1 \sim z$ 之间的正整数, 表示第 i 道工序由与其对应的加工方法中的第 x_i 个加工方法。一组编码对应一种加工方案。采用随机方式产生初始种群。

3.3 选择算子

选择算子采用无回放余数随机选择策略, 这种算子的优点是可确保适应度高的一些个体一定能够遗传到下一代群体里, 选择误差比较小, 具体实现步骤如下: ①计算群体中每个个体在下一代的生存期望数目: $N_i = M \frac{F_i}{\sum_{i=1}^M F_i}$ ($i = 1, 2, \dots, M, M$ 为当代

群体总数)。②取 N_i 的整数部分 N'_i 为对应个体在下一代的生存数目, 这样就确定了下一代群体总数 M 中的 $\sum_{i=1}^M N'_i$ 个个体。③下一代中剩下的还未确定的 $M - \sum_{i=1}^M N'_i$ 个个体以 $F_i - N'_i \sum_{i=1}^M F_i / M$ 为新的适应度, 用比例选择方法(赌轮方法)来生成。

带有最优个体保存策略的遗传算法是全局收敛的^[7], 故在选择操作中采用最优个体保存策略。

3.4 交叉和变异

采用单点交叉, 随机设置交叉点, 设交叉概率为 $0.4 \sim 0.99$ 。变异算子在每代中随机选择个体, 随机设置 2 个位置进行基因交换, 概率为 $0.0001 \sim 0.1$ 。变异操作有约束条件, 每一位的变异范围在可取整数范围内变异。

迭代的中止条件为设置总的迭代次数, 这里取最大迭代次数为 100。

3.5 算法的具体实现过程

①根据编码规则随机产生初始种群 N 。②进行交叉运算, 产生新的 N 个子代个体。③计算适应度, 并保存最优个体。④进行选择运算。⑤对第③步选出的 N 个个体按给定概率进行变异运算, 并用最优个体替换当前最差个体, 形成新一代群体。⑥判断新一代群体是否满足中止条件, 如满足, 则停止; 否则, 转至第②步继续。

4 计算实例与结果分析

以主轴箱的表面和孔加工过程为例, 主轴箱的

主视图如图 3 所示。主轴孔加工精度 IT6, 表面粗糙度 $R_a 0.2 \mu\text{m}$, 其他支撑孔粗糙度不大于 $0.8 \mu\text{m}$, 主轴箱体粗糙度为 $R_a 1.6 \mu\text{m}$ 。

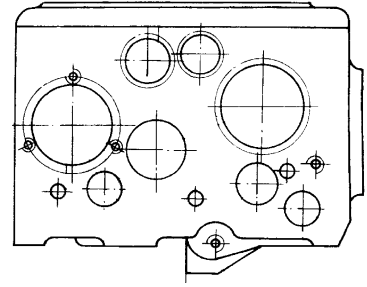


图3 主轴箱示意图

Fig.3 Scheme of headstock

图 4 和图 5 分别为平面和孔表面的加工方案和 各种加工方案所能达到的加工经济精度和表面粗糙度。主轴孔和平面可选择加工方法如表 7 所示。

根据各加工方法的实际情况和经验估算出各加

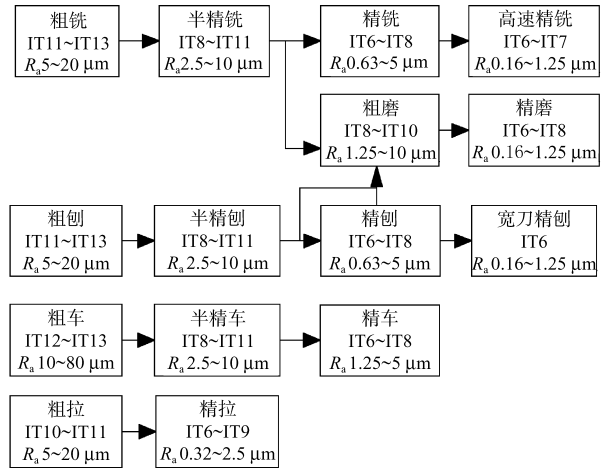


图4 平面加工可行方案

Fig.4 Feasible machining schemes of plane

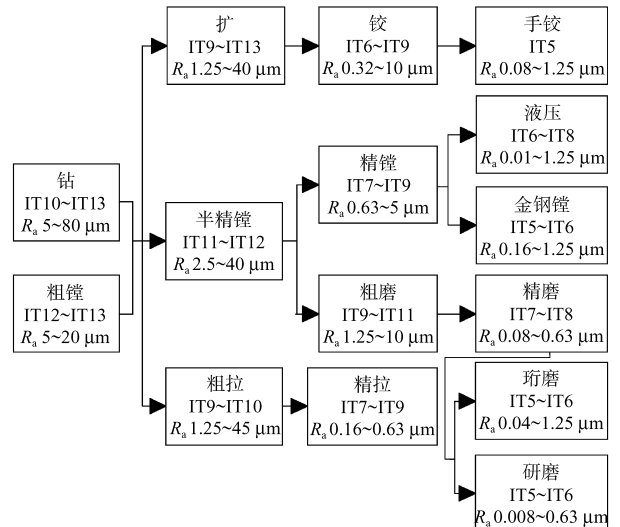


图5 孔加工可行方案

Fig.5 Feasible machining schemes of hole

表7 加工方法
Tab.7 Processing method

加工任务	加工方法
粗加工平面	粗铣,粗刨,粗车
半精、精加工平面	半精铣-精铣,半精铣-粗磨,半精刨-精刨,半精刨-粗磨,半精车-精车
	粗加工孔
半精、精加工孔	扩-铰-手铰,半精镗-精镗,半精镗-粗磨-精磨
	粗加工主轴孔
半精加工主轴孔	半精镗-精镗,粗磨-精磨
精加工主轴孔	金刚镗,研磨

注:半精加工和精加工所对应的加工方法还可采用数控加工方法。

工方法的 11 个评价指标的值,为说明算法的有效性仅以其中一些加工方法为例,如表 8 所示。

表8 加工方法的有关数据
Tab.8 Data of the processing method

平面加工	1. 粗铣	1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1
	2. 粗刨	0.6,0.5,1.2,1,0.5,1,1,1,1,1,1
	1. 半精铣-精铣	1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1
	2. 半精铣-粗磨	0.8,1,0.6,1,2,1,4,1,2,1,0.9,0.9,0.9
孔加工	3. 半精刨-精刨	0.6,0.5,1.2,1,0.5,1,1,1,1,1,1
	4. 数控铣	3,3,2,1.5,0.8,0.5,0.8,0.8,1.5,1.5,1.5
	1. 粗镗	1,0.6,1,1,1,1,1,1,1,1,1
	1. 半精镗-精镗	1,0.6,1,1,1,1,1,1,1,1,1
加工	2. 粗磨-静磨	1,1,0.8,0.8,1,2,1,1,1,1.9,0.9,1
	3. 数控镗	3,3,2,1.5,0.8,0.5,0.8,0.8,1.5,1.5,1
	4. 数控磨	3,0.8,2,1.5,1.5,0.8,0.8,1.5,1.2,1.2,1
	1. 金刚镗	1.5,1,1.2,1,1,1,1,1,1.5,1.2,1
	2. 研磨	0.1,0.8,0.1,1,3,1,1.4,1.4,2,1.2,1

注:表中的每组数据依次代表文中提到的 11 个评价指标的数值。

由层次分析法已经计算出了一组权值。根据加工的不同需要,改变第一层影响因素的权重利用层次分析法再次确定一组权值。第一层权值为(0.111 1,0.444 45,0.444 45),总权向量为

$$W = [(0.025\ 3, 0.016\ 6, 0.031\ 0, 0.038\ 2), (0.243\ 9, 0.085\ 8, 0.064\ 1, 0.050\ 7), (0.168\ 4, 0.138\ 0, 0.138\ 0)]$$

对遗传算法采用 C++ 方法编程在 VC++ 6.0 环境下进行了仿真。对前面提到的 2 组权重值进行运算,得到与其相对应的两组最优个体,100 代运行结果如表 9 所示,第一组权重对应的代数与适应度如图 6 所示。

由表9可以看出经过100次迭代运算,最大适

表9 遗传算法运行结果

Tab.9 Result of GA

序号	权重 (0.402 3, 0.328 9, 0.268 8)		权重 (0.111 1, 0.444 45, 0.444 45)	
	最终群体	适应度	最终群体	适应度
1	13 122	6.115 5	23 141	6.580 8
2	12 121	5.919 0	24 131	6.867 1
3	23 132	6.051 1	14 131	6.732 9
4	23 131	6.163 6	21 131	6.707 8
5	12 111	6.070 4	24 131	6.867 1
6	23 111	6.518 2	23 131	6.842 0
7	23 121	6.362 5	23 131	6.842 0
8	23 111	6.518 2	24 131	6.867 1
9	23 111	6.518 2	24 131	6.867 1
10	13 131	6.029 0	23 141	6.580 8

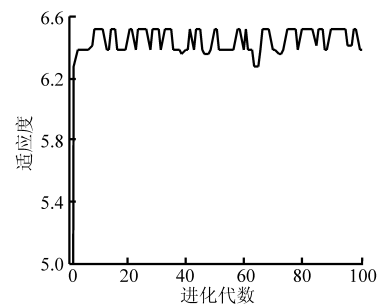


图6 代数适应度

Fig.6 Relationship between fitness and number of generation

度分别稳定在 6.518 2 和 6.867 1,最优个体分别为 23 111 和 24 131。

第 1 组权值的第 1 层评价指标,加工成本比加工时间和加工质量稍微重要,第 2 组权值的第 1 层评价指标的加工时间和加工质量比加工成本明显重要。第 1 组采用的加工方法为普通机床的刨削和镗削加工,而第 2 组在半精和精加工时则采用的数控铣和数控镗的加工方法,明显提高了加工速度和加工质量。由两组不同的权重及遗传算法的运行结果可以看出,根据加工对方案选择因素的不同要求,层次分析法可以更为准确地确定权重,并用遗传算法得到对应的最佳个体,保留了最优结构,而且收敛较快,说明了算法的有效性。

5 结束语

以主轴箱的表面和孔加工过程为例,把加工成本、加工时间和加工质量作为评价指标建立多目标优化数学算法。提出了基于层次分析法和遗传算法相结合的加工设备优选模型,根据决策者对评价指标的不同要求利用层次分析法得到两组不同的权重,定量分析加工设备选择问题,并利用遗传算法的全局搜索能力进行加工方案的优选。

能量特征提取。结果表明,小波分析可以很好地提取碰摩引起的冲击成分,清楚地识别碰摩时的时频特征,进而判断出碰摩状态。并可以在一定情况下,识别出碰摩周期。

(2) 可通过频带能量比例图和小波尺度图分析不同状态下的转静子碰摩。轻微碰摩时,系统不平衡响应占主导地位,碰摩引起的高低频分量很弱;中

度碰摩时,由于碰撞引起冲击,高频成分增加,引起比较稳定的 $X/2$ 谐波系列,此时低于转频的 $X/2$ 谐波成分和高于或略高于转频的 $3X/2, 2X$ 等振动幅值均增大;随着碰摩的进一步加重,达到严重碰摩时,系统响应高于转频的谐波成分,能量均达到最大,并且产生一些比较杂乱的有色噪声成分。

参 考 文 献

- 1 闻邦椿,武新华,丁千,等. 故障旋转机械非线性动力学的理论与试验[M]. 北京:科学出版社,2004.
- 2 Agnes M, Paul G. Chaotic responses of unbalanced rotor bearing stator systems with looseness or rubs [J]. Chaos, Solitons and Fractals, 1995, 5 (9):1 683~1 704.
- 3 科恩 Leon. 时频分析:理论与应用 [M]. 白居宪,译. 西安:西安交通大学出版社,1998.
- 4 Classen T A C M, Mecklenbrauker W F G. The Winger distribution—a tool for time-frequency signal analysis, part I : continuous-time signals [J]. Philips J. Res., 1980, 35: 217~250.
- 5 Feldman M. Non-linear system vibration analysis using Hilbert transform [J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 1994, 8(3): 309~318.
- 6 刘献栋,李其汉. 小波变换在转子系统动静件早期碰摩故障诊断中的应用[J]. 航空学报,1995, 20(3): 220~223.
- 7 陈长征,罗跃纲,张省,等. 基于小波分析的机械故障特征提取研究[J]. 机械强度,2001, 23(2): 161~164.
- 8 韩清凯,俞建成,邓庆绪,等. 转子系统油膜振荡的小波包分解与频带能量比例特征分析[J]. 中国机械工程,2004, 15(4): 343~346.
- 9 杨斌,范文杰,陆爽,等. 基于小波变换的车辆油气悬架信号提取技术[J]. 农业机械学报,2006, 37(5): 19~21.
- 10 Peng Z K, He Y, Lu Q, et al. Feature extraction of the rub-impact rotor system by means of wavelet analysis [J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 259(4):1 000~1 010.
- 11 何正嘉,誉艳阳,孟庆丰,等. 机械设备非平稳信号的故障诊断原理及应用[M]. 北京:高等教育出版社,2000.

(上接第 146 页)

参 考 文 献

- 1 Abdullah Konakk, Coit D W, Smith A E. Multi-objective optimization using genetic algorithms: a tutorial[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2006, 91(9):992~1 007.
- 2 Ngai E W T, Chan E W C. Evaluation of knowledge management tools using AHP[J]. Expert Systems with Applications, 2005, 29(4):889~899.
- 3 花广如,王会凤,张震寰,等. 基于遗传算法的加工方案选择与操作排序综合优化方法[J]. 上海交通大学学报,2006, 40(2):195~200.
- 4 刘明周,吴俊峰,郭嘉,等. 基于遗传算法的机械产品多参数选配方法[J]. 农业机械学报,2006,37(1):124~127.
- 5 Kamal M, Al-Subhi, Al-Harbi. Application of the AHP in project management[J]. International Journal of Project Management, 2001, 19(1):19~27.
- 6 刘洋,吴洁. 层次分析法在应用中的几个问题[J]. 温州大学学报,2002,12(4):67~72.
- 7 恽为民,席裕庚. 遗传算法的全局收敛性和计算效率分析[J]. 控制理论与应用,1996,13(4):455~460.