

基于灰色关联和主成分分析的车削加工多目标优化*

刘春景^{1,2} 唐敦兵¹ 何 华² 陈兴强²

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016; 2. 蚌埠学院机电系, 蚌埠 233030)

摘要: 采用田口方法构建以切削速度、进给速度和切削深度为设计变量,以表面粗糙度、切削力和刀具磨损为输出特性指标的车削试验模型,基于灰色关联和主成分分析对车削加工进行多目标优化,灰色关联度计算中的权重系数由输出特性指标的主成分分析获取。钛合金车削加工参数最优的水平组合为 $A_3B_1C_1$,即切削速度为 240 m/min、进给速度为 0.10 mm/r、切深为 0.15 mm,此时表面粗糙度为 0.168 μm ,切削力为 163.636 N,刀具磨损为 0.129 mm。

关键词: 车削加工 田口方法 灰色关联 主成分分析 多目标优化

中图分类号: TG506 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)04-0293-06

Multi-objective Optimization of Turning Based on Grey Relational and Principal Component Analysis

Liu Chunjing^{1,2} Tang Dunbing¹ He Hua² Chen Xingqiang²

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

2. Department of Mechanical and Electronic Engineering, College of Bengbu, Bengbu 233030, China)

Abstract: The turning experimental model was presented with the cutting speed, feed rate and depth of cut as design variables based on Taguchi method. The multi-objective optimization of turning was performed with the surface roughness, cutting force and tool wear as performance characteristics by using combined grey relational analysis and principal component analysis. In order to objectively reveal the relative importance for each performance characteristic in grey relational analysis, principal component analysis was specially introduced here to determine the corresponding weighting values for each performance characteristic. The result analysis showed that cutting speed of 240 m/min, feed rate of 0.10 mm/r, depth of cut of 0.15 mm were the optimal cutting parameters. Meanwhile, the optimal performance characteristics were surface roughness of 0.168 μm , cutting force of 163.636 N and tool wear of 0.129 mm.

Key words: Turning Taguchi method Grey relational Principal component analysis Multi-objective optimization

引言

在车削加工过程中,伴随着刀具与工件接触区域的复杂相互作用,将有切削力、切削热、切削变形和刀具磨损等现象产生^[1]。表面粗糙度是影响工件质量和性能的重要因素之一,它对工件的疲劳强

度、接触刚度、耐腐蚀性、配合性能和工作精度等都有重要的影响^[2]。车削加工的质量很大程度上受到刀具磨损状态的影响,车刀过度磨损或断裂等会中断加工过程,增加生产成本^[3]。切削力是表征车削加工过程的重要参数,切削力的大小直接影响加工状态和加工表面质量。切削力对刀具寿命和加工

收稿日期: 2012-03-13 修回日期: 2012-04-12

* 国家自然科学基金资助项目(51175262)、教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-08)、安徽省高等学校优秀青年基金资助项目(2010SQRL117)和安徽省自然科学基金资助项目(1308085ME65)

作者简介: 刘春景,博士后,蚌埠学院副教授,主要从事现代机械设计理论与方法研究,E-mail: liusun7575@163.com

通讯作者: 唐敦兵,教授,博士生导师,主要从事产品创新设计理论与方法、复杂系统建模与优化研究,E-mail: d.tang@nuaa.edu.cn

后零件尺寸精度与表面粗糙度有重要影响^[4]。由于机械加工过程复杂,各种过程参数都不同程度地影响着零件表面粗糙度、切削力和刀具磨损状态,且各因素之间存在复杂的相关性和高度非线性,因此车削加工输出特性指标的多目标同步优化解决方案显得非常重要。

国内外许多学者都对此进行了研究^[5~12],这些研究中一部分只是进行了单目标特性优化,而多目标优化权重系数的选择基本靠经验判断。本文提出采用田口方法构建钛合金车削试验模型,考察切削因素对表面粗糙度、切削力和刀具磨损的影响规律,基于灰色关联和主成分分析对车削加工进行多目标优化,灰色关联度计算中的权重系数由输出特性指标的主成分分析获取。

1 试验方案与分析

1.1 试验条件

试验以典型的难加工材料钛合金 TC11 为加工对象,其化学成分(质量分数)为:Al 6.42%、Mo 3.29%、Zr 1.79%、S 0.23%、C 0.025%、O 0.096%、H 0.003%、Fe 0.077%、N 0.004%,余量为 Ti。工件的长度 L 为 200 mm,直径 D 为 60 mm。所使用的刀具为 Sandvik 硬质合金 PVD-TiAlN 涂层刀具,所有的试验都是干式车削,刀具成分和特性如表 1 所示。以表面粗糙度(R_a)、切削力(F)和刀具磨损(VB)为性能评价指标。表面粗糙度采用 Mitutoyo Surftest 301 型粗糙度仪测量,每个工件选 3 个不同测试点,测量取其平均值;采用 Kistler (9257B)三向动态测力仪和 LabView 8.5、Matlab 7.1 软件获取在不同切削条件下的切削力;以刀具后刀面磨损量作为 VB 测量参数。

表 1 试验刀具成分和特性		
Tab.1 Composition and properties of cutting tool used in experiments		
质量百分数/%	WC	94
	Co	6
特性	等级	K30
	颗粒尺寸/ μm	0.5
	厚度/ μm	3~4
涂层	薄膜成分(mol-% AlN)	Approx. 54
	处理过程	PVD-HIS

1.2 试验因素和水平

切削速度、进给速度、切削深度是影响表面粗糙度、切削力和刀具磨损的主要因素,本试验每个因素选出 3 个水平,采用田口 $L_{27}(3^3)$ 设计法,因素与水平如表 2 所示。

表 2 田口 $L_{27}(3^3)$ 设计试验因素与水平			
Tab.2 Levels and factors chosen for Taguchi $L_{27}(3^3)$ design			
水平	因素		
	切削速度	进给速度	切削深度
	$a/\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	$b/\text{mm}\cdot\text{r}^{-1}$	c/mm
1	120	0.10	0.15
2	180	0.20	0.25
3	240	0.30	0.35

1.3 试验结果

按照田口正交表 $L_{27}(3^3)$ 的统计学要求,共进行 27 组试验,试验设计和结果如表 3 所示。

表 3 $L_{27}(3^3)$ 试验设计及结果						
Tab.3 Experiment results of $L_{27}(3^3)$ design						
序号	A	B	C	$R_a/\mu\text{m}$	F/N	VB/mm
1	1	1	1	0.361	223.536	0.306
2	1	1	2	0.378	302.927	0.314
3	1	1	3	0.412	404.109	0.331
4	1	2	1	0.616	251.205	0.263
5	1	2	2	0.595	319.962	0.331
6	1	2	3	0.638	444.551	0.187
7	1	3	1	0.714	295.997	0.297
8	1	3	2	0.704	392.049	0.357
9	1	3	3	0.719	570.731	0.561
10	2	1	1	0.225	180.878	0.144
11	2	1	2	0.231	203.103	0.255
12	2	1	3	0.243	339.449	0.281
13	2	2	1	0.392	139.257	0.153
14	2	2	2	0.411	211.792	0.144
15	2	2	3	0.410	346.151	0.459
16	2	3	1	0.510	210.348	0.272
17	2	3	2	0.515	338.265	0.127
18	2	3	3	0.527	519.255	0.314
19	3	1	1	0.168	163.636	0.129
20	3	1	2	0.181	213.424	0.161
21	3	1	3	0.195	326.919	0.341
22	3	2	1	0.311	121.406	0.187
23	3	2	2	0.334	211.611	0.186
24	3	2	3	0.341	355.053	0.204
25	3	3	1	0.404	169.932	0.178
26	3	3	2	0.421	263.364	0.144
27	3	3	3	0.422	519.411	0.153

对表 3 试验结果进行方差分析,结果如表 4~6 所示。由表 4 可知: $P<0.0001$,表明表面粗糙度模型差异极显著,校正决定系数为 0.9789,复相关系数为 0.9821,模型分辨力为 52.725>4,表明表面粗糙度试验模型是合适有效的。由表 5 可知: $P<0.0001$,表明切削力模型差异极显著,校正决定系数为 0.9208,复相关系数为 0.9391,模型分辨力为

24.813>4,表明切削力试验模型合适有效。由表6可知: $P=0.009\ 9$,表明刀具磨损模型差异极显著,校正决定系数为0.804 5,复相关系数为0.823 5,模型分辨力为11.256>4,表明刀具磨损试验模型是合适有效的。

表 4 表面粗糙度方差分析

Tab.4 ANOVA for surface roughness

来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	0.699 722	6	0.116 620	227.891 1	<0.000 1
<i>A</i>	0.327 426	2	0.163 713	319.916 1	<0.000 1
<i>B</i>	0.369 853	2	0.184 926	361.369 9	<0.000 1
<i>C</i>	0.002 443	2	0.001 222	2.387 1	0.117 6
残差	0.010 235	20	0.000 512		
总和	0.709 957	26			

$R^2=0.982\ 1$ $\text{Adj } R^2=0.978\ 9$ Adeq Precision = 52.725

表 5 切削力方差分析

Tab.5 ANOVA for cutting force

来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	353 484.00	6	58 914.00	51.359 1	<0.000 1
<i>A</i>	47 195.11	2	23 597.55	20.571 5	<0.000 1
<i>B</i>	60 085.09	2	30 042.55	26.190 0	<0.000 1
<i>C</i>	246 203.80	2	123 101.90	107.315 8	<0.000 1
残差	22 941.98	20	1 147.09		
总和	376 426.00	26			

$R^2=0.939\ 1$ $\text{Adj } R^2=0.920\ 8$ Adeq Precision = 24.813

表 6 刀具磨损方差分析

Tab.6 ANOVA for tool wear

来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	0.150 297	6	0.025 049	3.393 011	0.009 9
<i>A</i>	0.090 802	2	0.045 401	6.149 686	0.008 3
<i>B</i>	0.004 641	2	0.002 320	0.314 315	0.733 8
<i>C</i>	0.054 854	2	0.027 427	3.715 032	0.042 5
残差	0.147 653	20	0.007 383		
总和	0.297 950	26			

$R^2=0.823\ 5$ $\text{Adj } R^2=0.804\ 5$ Adeq Precision = 11.256

2 钛合金车削加工多目标优化

以表面粗糙度、切削力和刀具磨损为输出特性指标,以切削速度、进给速度和切削深度为设计变量,基于灰色关联和主成分分析的钛合金车削加工多目标优化流程如图1所示。

2.1 灰色关联分析

灰色关联分析是寻找一种能够衡量系统各因素间的关联度大小,确定参考序列和比较序列之间的关联系数和关联度的稳健设计方法^[13]。

田口方法提出了信噪比(SNR)的概念,它是衡量输出特性稳健性的指标,信噪比分为望目特性、望

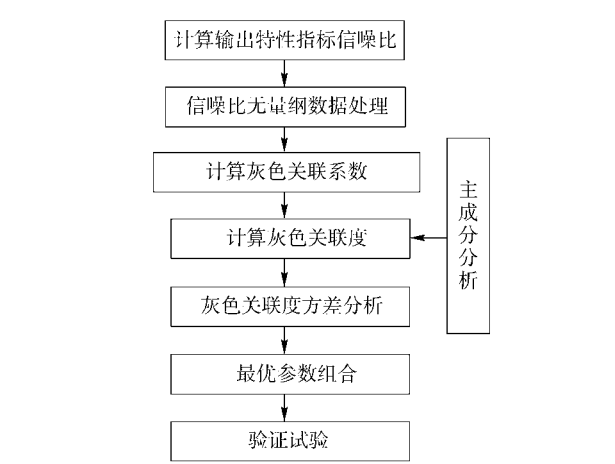


图 1 优化流程图

Fig.1 Flowchart of optimization strategy

小特性和望大特性3种类型。假定输出特性指标 y_i 为随机变量,其数学期望为 μ ,方差为 σ^2 ,则信噪比

$$\eta = \frac{\mu^2}{\sigma^2}$$

(1)

η 值越大,输出特性越稳定,信噪比为无量纲数据,同时考虑方差与均值对输出特性稳健性的影响,在实际计算时一般将信噪比转换成dB值。

望目特性的SNR(dB)表示为

$$\eta_T = -10\lg \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \right]$$

(2)

望大特性的SNR(dB)表示为

$$\eta_L = -10\lg \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right)$$

(3)

望小特性的SNR(dB)表示为

$$\eta_s = -10\lg \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right)$$

(4)

由于表面粗糙度、切削力和刀具磨损均具有望小特性,根据式(4)可以分别计算出3个输出特性指标的信噪比,结果见表7。

为了保证数据具有等效性和同序性,必须在灰色关联分析前对原始数据序列进行无量纲化的数据处理,生成比较数据序列。

望目特性的数据处理为

$$x_i^*(k) = 1 - \frac{|x_i^{(o)}(k) - x^{(o)}|}{\max x_i^{(o)}(k) - x^{(o)}}$$

(5)

望大特性的数据处理为

$$x_i^*(k) = \frac{x_i^{(o)}(k) - \min x_i^{(o)}(k)}{\max x_i^{(o)}(k) - \min x_i^{(o)}(k)}$$

(6)

望小特性的数据处理为

$$x_i^*(k) = \frac{\max x_i^{(o)}(k) - x_i^{(o)}(k)}{\max x_i^{(o)}(k) - \min x_i^{(o)}(k)}$$

(7)

式中 $x_i^*(k)$ ——处理后的数据序列
 $x_i^{(o)}(k)$ ——原始数据序列, $i=1,2,\cdots,m$;

$k=1,2,\cdots,n$

$\max x_i^{(o)}(k)$ ——原始数据序列的最大值

$\min x_i^{(o)}(k)$ ——原始数据序列的最小值

$x^{(o)}$ ——望目特性目标值

把表 7 中输出特性指标的信噪比代入式(7)对原始数据序列进行无量纲化数据处理,生成的比较数据序列如表 7 所示。比较数据序列值越大,该性能指标越优^[14]。

表 7 试验结果信噪比及数据处理序列
Tab.7 SNR and sequences data of pre-processing for experiment results

序号	信噪比/dB			数据处理序列		
	R_a	F	VB	R_a	F	VB
1	8.849	-46.986	10.285	0.473 8	0.605 6	0.408 0
2	8.450	-49.626	10.061	0.442 2	0.409 2	0.390 6
3	7.702	-52.130	9.603	0.383 0	0.222 9	0.355 1
4	4.208	-48.000	11.600	0.106 3	0.530 1	0.509 9
5	4.509	-50.102	9.603	0.130 1	0.373 8	0.355 1
6	3.903	-52.958	14.563	0.082 1	0.161 4	0.739 5
7	2.926	-49.425	10.544	0.004 8	0.424 2	0.428 1
8	3.048	-51.866	8.946	0.014 4	0.242 6	0.304 2
9	2.865	-55.128	5.020	0	0	0
10	12.956	-45.147	16.832	0.799 0	0.742 4	0.915 4
11	12.727	-46.154	11.869	0.780 9	0.667 5	0.530 8
12	12.287	-50.615	11.025	0.746 1	0.335 6	0.465 3
13	8.134	-42.876	16.306	0.417 2	0.911 3	0.874 6
14	7.723	-46.518	16.832	0.384 7	0.640 4	0.915 4
15	7.744	-50.785	6.763	0.386 3	0.323 0	0.135 0
16	5.848	-46.458	11.308	0.236 2	0.644 8	0.487 3
17	5.763	-50.585	17.923	0.229 4	0.337 9	1.000 0
18	5.563	-54.307	10.061	0.213 6	0.061 0	0.390 6
19	15.493	-44.277	17.788	1.000 0	0.807 1	0.989 5
20	14.846	-46.584	15.863	0.948 7	0.635 5	0.840 3
21	14.199	-50.288	9.344	0.897 5	0.360 0	0.335 1
22	10.144	-41.684	14.563	0.576 4	1.000 0	0.739 5
23	9.525	-46.510	14.565	0.527 3	0.641 0	0.739 7
24	9.344	-51.005	13.807	0.513 0	0.306 6	0.681 0
25	7.872	-44.605	14.991	0.396 5	0.782 7	0.772 7
26	7.514	-48.411	16.832	0.368 1	0.499 6	0.915 4
27	7.513	-54.310	16.306	0.368 0	0.060 8	0.874 6

基于处理后的数据序列,可计算出灰色关联系数

$$\gamma(x_o^*(k),x_i^*(k))=\frac{\Delta_{\min}+\xi\Delta_{\max}}{\Delta_{oi}(k)+\xi\Delta_{\max}} \tag{8}$$

其中 $\Delta_{oi}(k)=\parallel x_o^*(k)-x_i^*(k)\parallel$
 $\Delta_{\min}=\min\limits_{\forall i}\min\limits_{\forall k}\Delta_{oi}(k)$ $\Delta_{\max}=\max\limits_{\forall i}\max\limits_{\forall k}\Delta_{oi}(k)$

式中 $x_o^*(k)$ ——参考序列

$\Delta_{oi}(k)$ ——偏差序列

ξ ——分辨系数,取 0.5

基于处理后的数据序列(表 7),可计算出偏差序列,结果如表 8 所示。由表 8 中偏差序列值可知, $\Delta_{\min}=0,\Delta_{\max}=1$ 。根据式(8),结合表 8 中所列偏差序列值,可求出灰色关联系数,如表 8 所示。

表 8 偏差序列、灰色关联系数和灰色关联度
Tab.8 Deviation sequences, grey relational

序号	偏差			灰色关联系数			灰色关联度
	$\Delta_{oi}(1)$	$\Delta_{oi}(2)$	$\Delta_{oi}(3)$	R_a	F	VB	
1	0.526 2	0.394 4	0.592 0	0.487 2	0.559 0	0.457 8	0.503 0
2	0.557 8	0.590 8	0.609 4	0.472 6	0.458 3	0.450 6	0.460 3
3	0.617 0	0.777 1	0.644 9	0.447 6	0.391 5	0.436 7	0.424 3
4	0.893 7	0.469 9	0.490 1	0.358 7	0.515 5	0.504 9	0.465 0
5	0.869 9	0.626 2	0.644 9	0.364 9	0.443 9	0.436 7	0.418 0
6	0.917 9	0.838 6	0.260 5	0.352 6	0.373 5	0.657 4	0.465 2
7	0.995 2	0.575 8	0.571 9	0.334 4	0.464 7	0.466 4	0.426 4
8	0.985 6	0.757 4	0.695 8	0.336 5	0.397 6	0.418 1	0.386 6
9	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.333 3	0.333 3	0.333 3	0.333 6
10	0.201 0	0.257 6	0.084 6	0.713 2	0.659 9	0.855 2	0.743 8
11	0.219 1	0.332 5	0.469 2	0.695 3	0.600 6	0.515 8	0.600 4
12	0.253 9	0.664 4	0.534 7	0.663 2	0.429 4	0.483 2	0.518 7
13	0.582 8	0.088 7	0.125 4	0.461 7	0.849 3	0.799 4	0.716 0
14	0.615 3	0.359 6	0.084 6	0.448 3	0.581 6	0.855 2	0.636 1
15	0.613 7	0.677 0	0.865 0	0.448 9	0.424 8	0.366 3	0.412 3
16	0.763 8	0.355 2	0.512 7	0.395 6	0.584 6	0.493 7	0.496 8
17	0.770 6	0.662 1	0.000 0	0.393 5	0.430 2	1.000 0	0.615 7
18	0.786 4	0.939 0	0.609 4	0.388 6	0.347 4	0.450 6	0.395 6
19	0.000 0	0.192 9	0.010 5	1.000 0	0.721 6	0.979 4	0.894 9
20	0.051 3	0.364 5	0.159 7	0.906 9	0.578 3	0.757 9	0.739 6
21	0.102 5	0.640 0	0.664 9	0.829 8	0.438 5	0.429 2	0.553 6
22	0.423 6	0.000 0	0.260 5	0.541 3	1.000 0	0.657 4	0.744 6
23	0.472 7	0.359 0	0.260 3	0.514 0	0.582 0	0.657 6	0.588 0
24	0.487 0	0.693 4	0.319 0	0.506 5	0.418 9	0.610 5	0.511 6
25	0.603 5	0.217 3	0.227 3	0.453 1	0.697 0	0.687 4	0.620 8
26	0.631 9	0.500 4	0.084 6	0.441 7	0.499 8	0.855 2	0.605 1
27	0.632 0	0.939 2	0.125 4	0.441 6	0.347 4	0.799 4	0.531 7

由于表面粗糙度、切削力和刀具磨损在灰色关联分析中相对重要性不一致,因此各输出特性指标不能按平均权进行处理。为了客观反映各输出特性指标在灰色关联分析中的相对重要性,灰色关联度计算中的权重系数由输出特性指标的主成分分析获取。

2.2 主成分分析

主成分分析是把多个变量简化为少数几个综合指标的数理统计方法,主成分分析计算步骤如下^[15]:

(1) 输出特性指标矩阵

$$X=\begin{bmatrix} x_1(1) & x_1(2) & \cdots & x_1(n) \\ x_2(1) & x_2(2) & \cdots & x_2(n) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_m(1) & x_m(2) & \cdots & x_m(n) \end{bmatrix} \tag{9}$$

(2) 计算相关系数矩阵

$$R_{jl} = \frac{\text{Cov}(x_i(j), x_i(l))}{\sigma_{x_i(j)} \sigma_{x_i(l)}} \\ (j = 1, 2, \cdots, n; l = 1, 2, \cdots, n)$$

(10)

式中 $\text{Cov}(x_i(j), x_i(l))$ ——序列 $x_i(j)$ 和 $x_i(l)$ 的协方差

$\sigma_{x_i(j)}$ ——序列 $x_i(j)$ 的标准差

$\sigma_{x_i(l)}$ ——序列 $x_i(l)$ 的标准差

(3) 计算特征值与特征向量

$$(R - \lambda_k I_m) V_{ik} = 0 \quad (k = 1, 2, \cdots, n)$$

(11)

其中 $\sum_{k=1}^n \lambda_k = n$ $V_{ik} = [a_{k1} \ a_{k2} \ \cdots \ a_{kn}]^T$

式中 λ_k ——特征值 V_{ik} ——特征向量

(4) 主成分

对应于大特征值的特征向量称为主成分。

第 i 个主成分的贡献率为

$$p_i = \lambda_i / \sum_{k=1}^n \lambda_k \quad (i = 1, 2, \cdots, n)$$

(12)

前 m 个主成分的累积贡献率为

$$p_{\Sigma m} = \sum_{i=1}^m \lambda_i / \sum_{k=1}^n \lambda_k$$

(13)

一般取累计贡献率达 85% ~ 95% 的特征值所对应的前 m 个主成分代替原始数据进行分析。

$$Y_{mk} = \sum_{i=1}^n x_m(i) V_{ik}$$

(14)

式中 Y_{mk} ——第 k 主成分

2.3 灰色关联度

取灰色关联系数的平均值作为比较全过程的灰色关联度,因此灰色关联度为

$$\Gamma(x_o^*, x_i^*) = \sum_{i=1}^n \beta_k \gamma(x_o^*(k), x_i^*(k))$$

(15)

式中 $\Gamma(x_o^*, x_i^*)$ —— x_i^* 对 x_o^* 的灰色关联度

β_k ——第 k 个输出特性指标的权重, $\sum_{k=1}^n \beta_k = 1$, 本文通过主成分分析求取 β_k 值

灰色关联度表示比较序列和参考序列的关联水平,当比较序列和参考序列相对变化基本一致,则认为两者关联度大, $\Gamma(x_o^*, x_i^*) = 1$ 。灰色关联度也表示比较序列对参考序列的影响程度,随着影响程度的增加,相应的比较序列的灰色关联度也随之增大。

由表 8 中灰色关联系数,根据式(11)可求出主成分分析对应的特征值和特征向量,结果见表 9 和表 10。第 1 主成分各特征向量的平方代表对应输出特性指标的权重^[16],因此在钛合金车削加工灰色关联分析中,表面粗糙度、切削力和刀具磨损的权重分别为 0.301 4、0.355 2、0.343 4。基于式(15)和表 8 中的灰色关联系数,可计算出灰色关联度,结果如

表 8 所示。

表 9 主成分特征值及贡献率

Tab.9 Eigen values and explained variation for principal components

主成分	特征值	贡献率	第 1 主成分贡献率
1	1.742 2	0.581 0	0.301 4
2	0.682 0	0.227 0	0.355 2
3	0.575 8	0.192 0	0.343 4

表 10 主成分特征向量

Tab.10 Eigenvectors for principal components

输出特性指标	特征向量		
	第 1 主成分	第 2 主成分	第 3 主成分
R_a	0.549	0.829	-0.109
F	0.596	-0.297	0.746
VB	0.586	-0.474	-0.657

3 钛合金车削加工优化结果

钛合金车削加工参数对灰色关联度均值响应如表 11 所示,由表 11 可知切削速度对灰色关联度影响最显著,其次是切削深度和进给速度。

表 11 灰色关联度均值响应

Tab.11 Mean effect response of grey relational grade

水平	因素		
	A	B	C
1	0.431 4	0.604 3	0.623 5
2	0.570 6	0.550 8	0.561 1
3	0.643 3	0.490 3	0.460 7
Δ	0.211 9	0.114 0	0.162 7

图 2 为灰色关联度信噪比主效应图。由图 2 可知,切削速度的增加,随着进给速度和切削深度的减小,灰色关联度信噪比逐渐增大。灰色关联度方差分析如表 12 所示,该模型极显著 ($P < 0.000 1$),失拟项不显著,模型的复相关系数为 0.815 4,模型的校正决定系数为 0.760 0,模型分辨力 14.470,表明该车削试验模型能解释灰色关联度的变化。

基于灰色关联度信噪比越大,输出性能特性越

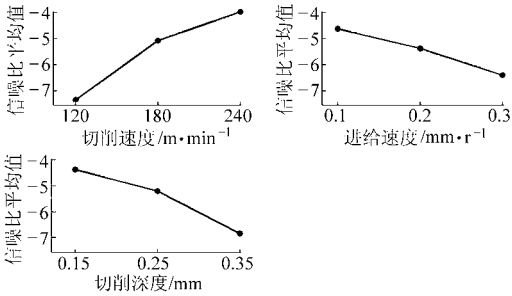


图 2 切削参数对灰色关联度信噪比主响应

Fig.2 SNR at different control levels of cutting parameters for grey relational grade

表 12 灰色关联度方差分析

Tab. 12 ANOVA for grey relational grade

来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	0.388 712	6	0.064 785	14.723 02	<0.000 1
<i>A</i>	0.208 775	2	0.104 388	23.722 96	<0.000 1
<i>B</i>	0.058 589	2	0.029 295	6.657 417	0.006 1
<i>C</i>	0.121 348	2	0.060 674	13.788 68	0.000 2
残差	0.088 006	20	0.004 400		
总和	0.476 718	26			
<i>R</i> ² = 0.815 4 Adj <i>R</i> ² = 0.760 0 Adeq Precision = 14.470					

优^[17~18],因此钛合金车削加工参数最优的水平组合为 $A_3B_1C_1$,即切削速度为 240 m/min、进给速度为 0.10 mm/r、切削深度为 0.15 mm,对应的输出特性指标表面粗糙度为 0.168 μm,切削力为 163.636 N,

刀具磨损为 0.129 mm。

4 结论

(1) 采用田口方法构建了以切削速度、进给速度和切削深度为设计变量,以表面粗糙度、切削力和刀具磨损为输出特性指标的钛合金车削试验模型。

(2) 基于灰色关联和主成分分析对钛合金车削加工进行多目标优化,灰色关联度计算中的权重系数由输出特性指标的主成分分析获取。

(3) 钛合金车削加工参数最优的水平组合为 $A_3B_1C_1$,即切削速度为 240 m/min、进给速度为 0.10 mm/r、切削深度为 0.15 mm,此时表面粗糙度为 0.168 μm,切削力为 163.636 N,刀具磨损为 0.129 mm。

参 考 文 献

1 Yallese M A, Chaoui K, Zeghib N, et al. Hard machining of hardened bearing steel using cubic boron nitride tool[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(2): 1 092 ~ 1 104.

2 吴德会. 铣削加工粗糙度的智能预测方法[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(6): 1 137 ~ 1 141.
Wu Dehui. Intelligent prediction model for surface roughness in milling[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2007, 13(6): 1 137 ~ 1 141. (in Chinese)

3 敖银辉,汪宝生. 钻头磨损检测与剩余寿命评估[J]. 机械工程学报, 2011, 47(1): 177 ~ 181.
Ao Yinhui, Wang Baosheng. Monitoring of drill process and prediction for remaining useful life of drill tool[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(1): 177 ~ 181. (in Chinese)

4 张承龙,冯平法,吴志军,等. 旋转超声钻削的切削力数学模型及试验研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(15): 149 ~ 155.
Zhang Chenglong, Feng Pingfa, Wu Zhijun, et al. Mathematical modeling and experimental research for cutting force in rotary ultrasonic drilling[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(15): 149 ~ 155. (in Chinese)

5 Lebaal N, Nouari M, Ginting A. A new optimization approach based on Kriging interpolation and sequential quadratic programming algorithm for end milling refractory titanium alloys[J]. Applied Soft Computing, 2011, 11(8): 5 110 ~ 5 119.

6 Zain A M, Haron H, Sharif S. Application of GA to optimize cutting conditions for minimizing surface roughness in end milling machining process[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(6): 4 650 ~ 4 659.

7 Nalbant M, Gökaya H, Sur G. Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning[J]. Materials & Design, 2007, 28(4): 1 379 ~ 1 385.

8 Bharathi Raja S, Baskar N. Application of particle swarm optimization technique for achieving desired milled surface roughness in minimum machining time[J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(5): 5 982 ~ 5 989.

9 Lee K M, Hsu M R, Chou J H, et al. Improved differential evolution approach for optimization of surface grinding process[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(5): 5 680 ~ 5 686.

10 Chen H C, Lin J C, Yang Y K, et al. Optimization of wire electrical discharge machining for pure tungsten using a neural network integrated simulated annealing approach[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(10): 7 147 ~ 7 153.

11 曹成铭,刘战强,杨奇彪. 切削速度对 Inconel 718 加工表面完整性的影响[J]. 农业机械学报, 2011, 42(1): 223 ~ 227.
Cao Chengming, Liu Zhanqiang, Yang Qibiao. Effects of cutting speed on surface integrity of Inconel 718[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1): 223 ~ 227. (in Chinese)

12 丁金福,鄂世举,曾平,等. 精密车削二维微位移刀架研究[J]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 230 ~ 234.
Ding Jinfu, E Shiju, Zeng Ping, et al. 2-D micro-displacement turret of ultra-precision lathe[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 230 ~ 234. (in Chinese)

13 谢延敏. 基于 Kriging 模型和灰色关联分析的板料成形工艺稳健优化设计研究[D]. 上海:上海交通大学, 2007.
Xie Yanmin. Research on robust optimization of sheet metal forming based on Kriging and grey relational analysis[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007. (in Chinese)

14 Deng J. Control problems of grey systems[J]. Syst. Contr. Lett., 1982, 5: 288 ~ 294.

15 Fung H C, Kang P C. Multi-response optimization in friction properties of PBT composites using Taguchi method and principal component analysis[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 170(3): 602 ~ 610.

5 结论

- (1) 轴向各间隙中磁流变液的温度存在差异,由内向外,温度逐渐降低,滑差刚开始时,温差较小,随着滑差时间的增加,内外间隙中磁流变液的温度差值越来越大。
- (2) 传动装置中磁流变液的表面温度最高值出

现在工作半径中心处,即 $r = 96\text{ mm}$ 处,由中心向两端温度逐渐降低;截面温度场关于间隙中心平面基本对称,最高值在中心平面上。

(3) 滑差工况时,磁流变液温度随滑差时间近似呈线性上升,且温升速度随滑差功率的增加而加快,随工作间隙的增大而减缓。

参 考 文 献

1 董小闵,余森,廖昌荣,等. 冲击载荷下磁流变刚度变阻尼缓冲系统减振控制[J]. 农业机械学报, 2010, 41(3): 20~24.
Dong Xiaomin, Yu Miao, Liao Changrong, et al. Absorbing control of magneto-rheological variable stiffness and damping system under impact load[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3): 20~24. (in Chinese)

2 兰文奎,郑玲,李以农,等. 活塞式磁流变液阻尼器磁场有限元分析[J]. 农业机械学报, 2007, 38(4): 142~145.
Lan Wenkui, Zheng Ling, Li Yinong, et al. FEM analysis of magnetic field of piston-type MR fluids damper[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(4): 142~145. (in Chinese)

3 Jolly M R, Bender J W, Carlson D J. Properties and applications of commercial magnetorheological fluids [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1999, 10(1): 5~13.

4 Osama A, Craic A R. Magnetorheological fluid: materials, characterization, and devices [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1996, 7(2): 123~130.

5 陈杰平,冯武堂,郭万山,等. 整车磁流变减振器半主动悬架变论域模糊控制策略[J]. 农业机械学报, 2011, 42(5): 7~13.
Chen Jieping, Feng Wutang, Guo Wanshan, et al. Whole vehicle magnetorheological fluid damper semi-active suspension variable universe fuzzy control simulation and test[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(5): 7~13. (in Chinese)

6 Weiss K D, Duclos T G. Controllable fluids: the temperature dependence of post-yield properties [J]. International Journal of Modern Physics B, 1994, 8(7): 3 015~3 032.

7 廖昌荣. 汽车悬架系统磁流变阻尼器研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2001.
Liao Changrong. Study on magnetorheological fluid damper for automobile suspension system [D]. Chongqing: Chongqing University, 2001. (in Chinese)

8 Park E J, Stoikov D, da Luz L F, et al. A performance evaluation of an automotive magnetorheological brake design with a sliding mode controller[J]. Mechatronics, 2006, 16(7): 405~416.

9 田祖织,侯友夫,王囡囡. 磁流变传动装置温度特性研究[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(3): 596~601.
Tian Zuzhi, Hou Youfu, Wang Nannan. Study on temperature properties of magnetorheological transmission device[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(3): 596~601. (in Chinese)

10 郑军,张光辉,曹兴进. 热管式磁流变传动装置的设计与试验[J]. 机械工程学报, 2009, 45(7): 305~311.
Zheng Jun, Zhang Guanghui, Cao Xingjin. Design and experiment for magnetorheological transmission device with heat pipes[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(7): 305~311. (in Chinese)

11 谢方伟,侯友夫. 液体黏性传动装置摩擦副瞬态热应力耦合[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2010, 41(6): 2 201~2 206.
Xie Fangwei, Hou Youfu. Transient thermal-stress coupling of friction pair of hydro-viscous drive device[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2010, 41(6): 2 201~2 206. (in Chinese)

12 Guo H T, Liao W H. A novel multifunctional rotary actuator with magnetorheological fluid[J]. Smart Materials and Structures, 2012, 21(6): 1~9.

(上接第 298 页)

16 张敏,黎向锋,左敦稳,等. 基于主成分分析的 BP 神经网络内螺纹冷挤压成形质量预测[J]. 中国机械工程, 2012, 23(1): 51~54.
Zhang Min, Li Xiangfeng, Zuo Dunwen, et al. Forming quality forecast for internal threads formed by cold extrusion based on principal component analysis and neural networks[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(1): 51~54. (in Chinese)

17 Khan Z A, Kamaruddin S, Siddiquee A N. Feasibility study of use of recycled high density polyethylene and multi response optimization of injection moulding parameters using combined grey relational and principal component analyses[J]. Materials & Design, 2010, 31(6): 2 925~2 931.

18 Lu H S, Chang C K, Hwang N C, et al. Grey relational analysis coupled with principal component analysis for optimization design of the cutting parameters in high-speed end milling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(8): 3 808~3 817.