

DOI: 10.3901/JME.2013.21.176

# 薄壁结构件铣削参数有限元正交优势分析及优化\*

胡权威<sup>1</sup> 乔立红<sup>1</sup> 张洪伟<sup>2</sup>

(1. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院 北京 100191;

2. 北京石油化工学院机械工程学院 北京 102617)

**摘要:** 大型整体薄壁结构件在航空、航天工业中得到了广泛应用。但由于其刚性差,在铣削加工过程中常常出现铣削力过大而引起较大的变形,严重影响工件的加工质量和精度。针对上述问题,提出一种有限元正交优势分析方法,用以优化铣削参数,减小铣削产生的零件变形。该方法采用正交试验设计规划指导有限元铣削加工变形分析的参数方案设计,通过不同方案的计算结果研究分析铣削速度、铣削深度、铣削宽度、每齿进给量对加工变形的影响,得到各铣削要素选择的较好水平;采用优势分析方法对正交试验结果进行处理,得到各铣削要素对加工变形的贡献率,从而确定优化的铣削加工方案。以某薄壁框类零件为例得到了铣削参数的优化组合,经过验证,优化后的试验方案减少了铣削产生的最大变形量,证明了该方法的可行性及有效性。

**关键词:** 薄壁件 铣削参数 有限元 正交优势分析 优化

**中图分类号:** TH391

## Optimization of Thin-walled Part Milling Parameters Based on Finite Element and Orthogonal Dominance Analysis

HU Quanwei<sup>1</sup> QIAO Lihong<sup>1</sup> ZHANG Hongwei<sup>2</sup>

(1. Department of Industrial and Manufacturing Systems Engineering, Beihang University, Beijing 100191;

2. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617)

**Abstract:** Complex structural component of thin-walled parts has been widely used in the field of aerospace engineering. However, because of its low rigidity, large machining deformation can often be caused by excessive milling forces in the milling process, which seriously affects the processing quality and precision of the workpiece. In view of the problem, a method based on finite element and orthogonal dominance analysis is proposed to optimize the cutting parameters and reduce the part distortion. With the method, an orthogonal test plan is designed to regulate the finite element distortion analysis scheme, and through the analysis of results of simulation data, the influence of milling factors such as cutting speed, milling depth, milling width and feed per tooth on distortion is investigated to get better levels to be chosen, moreover by the application of dominance analysis method, the contribution rate of milling factors upon machining distortions can be determined in order to get the influence of various factors and make sure the optimized scheme. Taking a kind of thin-walled component for example, an optimized milling parameters combination is acquired, and the result shows that the optimized combination can reduce distortion in the milling process and proves the validity and feasibility of that method.

**Key words:** Thin-walled components Cutting parameters Finite element Orthogonal dominance analysis Optimization

## 0 前言

大型整体薄壁结构件由于能降低重量、整体性能优越等特点在航空、航天工业中广泛应用。但由于其刚性差,在铣削加工过程中常常出现铣削力过大而引起较大的变形,严重影响工件的加工质量和

精度。针对薄壁件加工变形的研究有很多<sup>[1-5]</sup>,大部分者认为切削力引起的弹性变形是薄壁件侧壁和腹板加工变形的主要因素。因此,需要通过优化铣削参数来控制铣削力,从而减少加工变形。

目前,针对铣削参数的优化方法已进行了大量研究。刘强等<sup>[6]</sup>建立动力学仿真系统,通过对颤振稳定域及铣削加工中的物理参数进行仿真优化铣削参数,实现无颤振和高效加工;汪振华等<sup>[7]</sup>以铣削加工中的粗糙度为约束条件,以提高加工效率为目

\* 国家重大科技专项资助项目(2010ZX04015-011)。20121130收到初稿,20130729收到修改稿

标,运用遗传优化算法对切削参数进行了优化;李沪曾等<sup>[8]</sup>通过采用适当的装夹方法,合理的工序安排,优化的铣削方式和走刀路线并以提高加工效率为目标对铣削参数进行了优化;李迎等<sup>[9]</sup>以材料去除效率为目标采用组合优化模型对铣削参数进行了优化。铣削参数不仅影响加工效率,而且会影响加工成本和加工精度<sup>[10-12]</sup>。因此,以减小加工变形提高加工精度为目标的铣削参数优化研究有重要意义。

然而,影响加工变形的铣削参数要素之间又相互交叉、相互制约,使得铣削参数与加工变形的关系比较复杂。为了进行铣削参数的优化,每个变形量都需要进行铣削试验或者有限元计算,则工作量很大;为了减少试验次数,可采用正交试验。正交试验法是一门工程化的科学设计方法,在生产实践中,人们总是希望做试验的次数尽量少,而得到的结果尽可能精确或者目标值尽可能优化,而要达到这个目的,试验者可以采用正交试验法的设计原理在试验前对试验参数进行合理安排<sup>[13]</sup>,正交试验设计由于能够减少试验数量而不影响试验质量等优点,在方案优化选择上得到广泛应用<sup>[14-16]</sup>。通过正交试验设计的极差分析可以得到较好的水平,便于铣削参数的优化。此外,优势分析是 BUDESCU<sup>[10]</sup>在 1993 年提出的一种用以确定各自变量对因变量贡献大小的统计分析方法,相对传统回归模型分析方法,具有模型无依赖性的优势,即预测变量之间的相对重要性不会随全模型所衍生出来的子模型的变化而发生改变;目前该方法已在教育心理学、组织行为学等领域得到应用<sup>[11-12]</sup>。利用优势分析方法有助于得到铣削参数要素对加工变形的贡献大小,为铣削参数的优化建立依据。

本文采用正交试验设计与优势分析相结合的方法,以减少薄壁件加工过程中的变形为目标,通过大型真实非简化的薄壁结构件,进行有限元数值研究及理论分析,探求铣削参数要素对加工变形的作用机制及各个参数要素对变形的贡献大小,最终得到优化的铣削参数组合,用以指导实际生产。

## 1 铣削加工参数正交优势分析方法

### 1.1 铣削加工过程描述

铣削加工过程中的变形与铣削力大小相关,为了研究铣削变形与铣削参数的关系,需要建立铣削力模型,构建铣削参数与铣削力的关系。本文铣削力模型采用的是圆柱螺旋立铣刀力学模型<sup>[6,17]</sup>,在轴向切深范围内,切削刃先后参与切削。铣刀上的螺旋槽使切削载荷沿其逐渐增加。为计算方便,将

切削刃上切削面积划分为许多微单元,通过计算所有处在切削区域的每个单元受力状况,即可获得铣削力的空间分布状态,将所有处在切削区域的单元力相加,即得到总的切削力<sup>[17]</sup>。

假定立铣刀的螺旋角为  $\beta$ ,直径为  $D$ ,螺旋槽数为  $N$ ,轴向切深  $a$  为常数,接触角从法向轴顺时针测量。假定某一螺旋槽底部端点的参考接触角被定为  $\varphi$ ,其余螺旋槽底部端点的接触角为  $\varphi_j = \varphi + j\varphi_p$ ,  $j=0, 1, \dots, N-1$ 。其中  $\varphi_p = 2\pi/N$ ,为刀具齿间角。在轴向切深为  $z$  处的滞后角  $\psi = k_\beta z$ ,式中  $k_\beta = 2\tan\beta/D$ 。因此,螺旋槽  $j$  在轴向  $z$  切深处的接触角

$$\varphi_j(z) = \varphi + j\varphi_p - k_\beta z \quad (1)$$

作用在高度为  $dz$  的螺旋槽微元上的切向  $dF_{t,j}$ ,径向  $dF_{r,j}$  和轴向  $dF_{a,j}$  切削力可以分别表示为

$$\begin{cases} dF_{t,j}(\varphi, z) = K_{tc} h_j(\varphi, z) dz + K_{te} a \\ dF_{r,j}(\varphi, z) = K_{rc} h_j(\varphi, z) dz + K_{re} a \\ dF_{a,j}(\varphi, z) = K_{ac} h_j(\varphi, z) dz + K_{ae} a \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $dz$  为单元轴向宽度,  $h_j(\varphi, z) = c \sin \varphi_j(z)$  为切削厚度,与每齿进给量有关。 $K_{tc}$ ,  $K_{rc}$ ,  $K_{ac}$  分别为剪切作用对切向、径向和轴向切削力的作用系数,  $K_{te}$ ,  $K_{re}$ ,  $K_{ae}$  是刃口力系数。

通过铣削力模型的建立,可构建出铣削参数与铣削力的关系,通过铣削辨识试验可求得铣削力系数,这样便可根据铣削力模型得到瞬时铣削力,并将其作为试验方案中有限元分析的输入。

### 1.2 正交试验设计

正交试验设计具有下列两个性质:① 水平均匀性,即选择的试验对每个因子和因子的每个水平都是均匀分配的,则它们能够全面地反映试验;② 搭配均匀性,在所有的试验中,每个因子的水平出现次数相同,而且任何两个因子的搭配也都以相同的次数出现。为了清晰表达正交试验的设计方法,在制订试验计划时,首先必须根据实际情况,确定因子、因子的水平和需要考察的交互作用,并选用适当正交表进行正交试验设计。

本文针对加工变形有限元仿真的试验设计主要从铣削速度、铣削深度、铣削宽度、每齿进给量 4 个因子进行考虑。根据试验水平一般以 2~4 为宜,以尽量减少试验次数为选择原则。本文试验采用四水平,每一水平对应的值需要根据实际加工中的需求来确定。例如本文的薄壁件实例在工厂中加工通常只采用 4 000 r/min, 9 000 r/min, 14 000 r/min, 20000 r/min 这 4 种转速,故选用这 4 个值作为铣削速度的候选水平。而铣削深度和铣削宽度需要在 1~4 mm 之间,可间隔 1 mm 进行铣削深度和铣削宽度的 4 水平设计。每齿进给量的选择也是根据企

业关心的离散区域决定的,其 4 水平选用 0.2 mm/齿, 0.15 mm/齿, 0.12 mm/齿, 0.10 mm/齿。采用这样的水平安排进行试验能够满足企业的需求,也能满足本文的优化实例论证。然而如果对 4 个因子中的每一个因子均进行水平搭配,则需要  $4^4$  次试验。这样较多的试验次数不仅会增加试验时间,而且影响试验数据的处理效率。相反,如果针对 4 因子 4 水平采用正交试验设计法只需要进行 16 次试验,不仅有效减少了试验数量,而且又不影响结果分析的科学性。根据试验因子和水平即可确定本文正交试验的正交表  $L_{16}(4^5)$ 。

### 1.3 优势分析方法

优势分析由于其产生的各个自变量的已预测方差百分比具有模型独立性,且不受自变量不同组合不同的影响,使得优势分析目前已经成为用来确定各自变量相对重要性的重要方法。传统上,确定回归模型中预测变量的相对重要性的方法有两类<sup>[11]</sup>: ① 以斜率为基础的指标,如回归系数、标准化回归系数、正态标准系数以及准标准系数,这些指标可以被解释为当模型中其他的预测变量保持恒定时,某预测变量变化一个单位(或标准单位)所导致标准变量的变化率;② 方差降低指标,即预测变量的有用性,如偏相关的平方、准偏相关的平方以及预测变量的直接效应与整体效应的乘积。这些相关性指标可被解释为各个预测变量占标准变量方差的百分比。然而,上述两类指标都有一个缺陷,它就是模型依赖性。此外,JOHNSON<sup>[18]</sup>还指出,用传统标准化回归系数来确定各个预测变量之间的相对重要性,会产生以下 4 个后果:夸大与标准变量具有最高相关的预测变量的相对权重;降低模型中其他预测变量的相对权重;符号逆转(比如与标准变量呈正零阶相关的某一预测变量,在多元回归中出现负的回归权重,从而掩盖它与标准变量之间的真实关系);样本的微小差别就有可能导致回归权重的巨大差异。

由于优势分析相比传统回归分析具有明显的优势,本文采用优势分析方法来得各铣削参数要素对加工变形的贡献大小。在本质上,优势分析方法可以在所有可能的与切削参数相关的子模型中对各自变量(铣削速度、铣削深度、铣削宽度、每齿进给量)对  $R^2$  的贡献进行比较,并通过对所有由铣削参数延伸来的子模型的回归分析来计算每一铣削因素的相对重要性。然后,再对每一铣削要素的相对重要性进行比较。这样,通过将各铣削要素对因变量(即加工变形量)总方差的贡献分解为贡献率,就能使各铣削要素对加工变形的相对重要性得以更精确地表现出来,为铣削参数优化提供了依据。

### 1.4 正交优势分析及优化流程

鉴于正交试验设计与优势分析方法各自的特点,综合两者的优势,提出如图 1 所示的基于薄壁件的正交优势分析及优化流程,主要包括以下几个步骤。

(1) 针对薄壁件建立铣削力模型,构建铣削力与铣削参数的关系,并把铣削力作为对后续试验方案进行有限元分析的输入。

(2) 针对铣削参数进行正交因子及水平设计,确定用于进行有限分析的试验方案,通过步骤(1)构造的关系计算得到铣削力并施加到正交试验设计方案中进行有限元分析,得到加工变形的试验结果。

(3) 对试验结果进行极差分析和优势分析,确定优化的铣削参数组合方案。

(4) 验证优化方案的可行性。

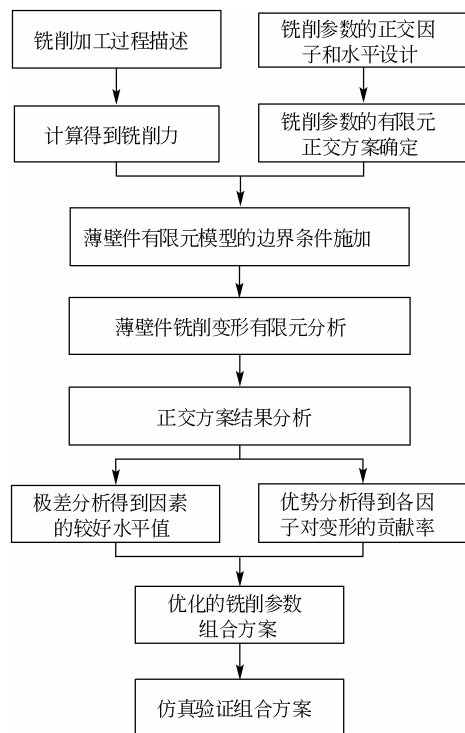


图 1 基于薄壁件的正交优势分析及优化流程

## 2 铣削参数有限元正交优势优化实例

通过薄壁件有限元分析,计算得到不同正交试验方案下的变形,然后对正交试验结果进行分析,最终得到优化的铣削参数组合方案,并进行验证。

### 2.1 薄壁件铣削变形有限元分析

#### 2.1.1 铝合金材料铣削力辨识试验

通过平均铣削力试验求得铣削力系数,试验在 Mikron ucp710 机床上进行,刀具为硬质合金整体立铣刀,材料为铝合金 7075,刀具直径 12 mm,螺旋角为  $30^\circ$ ,齿数为 3 齿。试验的结果: $K_{fc}=796.1 \text{ N/m}^2$ ,

$K_{te}=20.70 \text{ N/m}$ ,  $K_{rc}=168.8 \text{ N/m}^2$ ,  $K_{re}=30.8 \text{ N/m}$ ,  
 $K_{ac}=222.1 \text{ N/m}^2$ ,  $K_{ae}=1.4 \text{ N/m}$ 。

### 2.1.2 瞬态铣削力计算

通过铣削力辨识试验获得的铣削力系数,根据铣削力模型编制的三向瞬态铣削力仿真程序,可以对任意参数组合情况下的铣削力进行仿真,为仿真中载荷的施加做准备。例如,假定铣削加工条件:刀具直径为 20 mm 且硬质合金的两齿圆柱螺旋铣刀,铣削速度(实际为主轴转速,由于铣削速度与主轴转速的正比关系,此处用铣削速度代替主轴转速,但未做换算)为 9 000 r/min,每齿进给量 0.15 mm/齿,铣削深度 18 mm,铣削宽度 3 mm;图 2 所示为该铣削条件下的三向瞬态铣削力仿真结果。

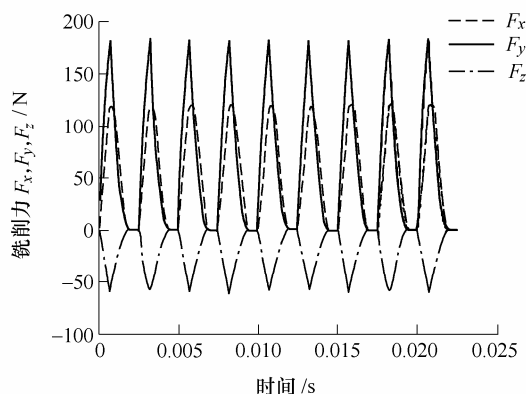


图2 三向瞬态铣削力仿真图

### 2.1.3 薄壁件铣削加工变形分析

#### 2.1.3.1 有限元模型建立

为了提高仿真可靠性和指导工程应用,本文选择典型的大型航空真实薄壁结构件为例进行分析,图 3a 为某典型 C 形框结构实例零件的有限元模型,共有 55 602 个单元,102 155 个节点。图 3b 为 C 形框零件图 3c 中 A、B 附近区域的局部放大图,该零件的主要几何信息参考图 3c,零件材料类型为铝合金,零件最大外形尺寸为 1 675 mm×600 mm×76 mm,其中缘条厚度为 6 mm,腹板厚度为 1.2 mm,筋条厚度为 1.5 mm,腹板距离筋条高为 34 mm。由于结构具有复杂的弧形特征,因此采用两边及中间定位和安排装夹凸台。本文后面正交试验方案涉及的变形量就是在精加工阶段沿着图 3c 中缘条位置铣削完 AB 段所示区域侧壁后而引起的最大加工变形量,图 3b 中 AB 所示的方向为进给方向,即载荷动态移动路径。仿真时在图 3c 各个凸台位置处进行约束,仿真刀具采用硬质合金双刃平头立铣刀,刀具直径为 20 mm,铣削方式采用顺铣加工。

#### 2.1.3.2 铣削载荷分布及动态施加

当对薄壁件进行铣削加工时,由于铣刀的径向切深很小,也就是说刀刃与工件的接触长度很短,

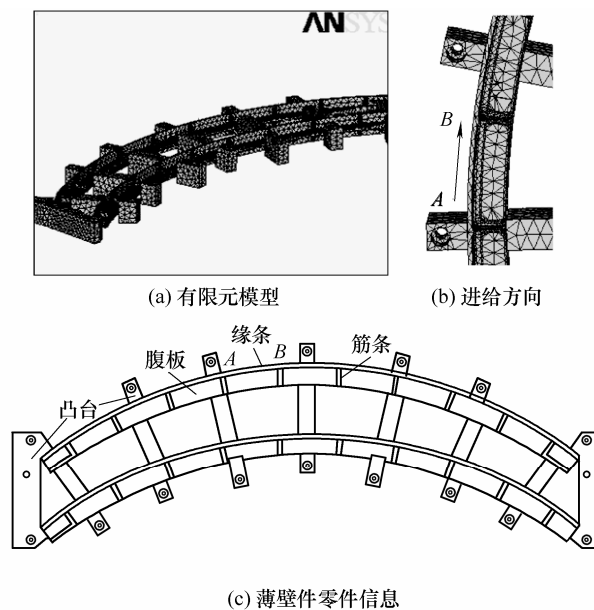


图3 零件有限元模型及进给方向

因此假设载荷呈直线分布。在有限元模型上施加载荷时,可以将分布载荷近似施加到网格节点。同时由于垂直于薄壁面的切削力对薄壁面的变形影响最大,而其他方向的力影响很小,可以忽略,因此只考虑垂直于薄壁面的切削力。而且由于工件的刚度具有弱刚度特性,可将刀具、工装均视为刚体,没有发生变形,工件加工变形为纯弹性变形。

基于上文计算得到的瞬态铣削力,通过编制参数化设计语言对铣削加工产生的侧壁变形进行仿真。由于刀具在切削过程中是连续走刀的,在计算切削力时按走刀过程离散成若干个切削位置,每一个切削位置就是工件的一个工况。为简化分析过程,可将每一个切削位置的铣削载荷简化为一个集中载荷,并沿轴向切深方向施加在刀具/工件接触线点,或当作均匀分布的载荷施加在刀具/工件接触区域(整个轴向切深)。因此,接触区域动态变化的铣削力将作为移动载荷依次施加在接触中线上,沿着加工路径依次移动,完成整个切削过程。

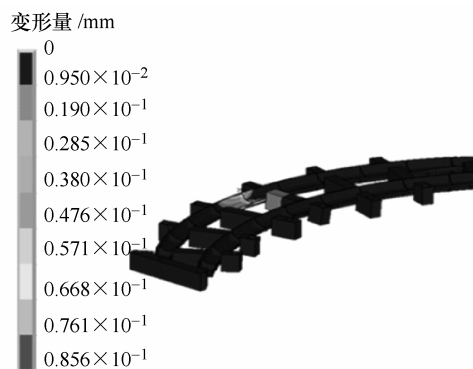
#### 2.1.3.3 加工变形初步分析

为了研究铣削变形的规律,拟定如表 1 所示的两组加工条件。图 4a 所示为加工条件 1 下加工 C 形框侧壁的加工变形云图;图 4b 为两组加工条件下沿进给方向 AB,并把从 A 到 B 的铣削路径划分为从第 1 个到第 11 个刀具位置后,工件变形随刀具位置变换的叠加分布规律,从图 4 中可以看出,沿着进给方向,随着刀具的逐步移动,工件的变形量随着刀具位置的变化逐步增加而后又逐渐减小,这是由于该侧壁在进给方向的两端分别受到其他部分的约束从而在实际上增加了切削部分刚度的结果,同时图中反应的沿刀具位置方向变形不对称的现象是

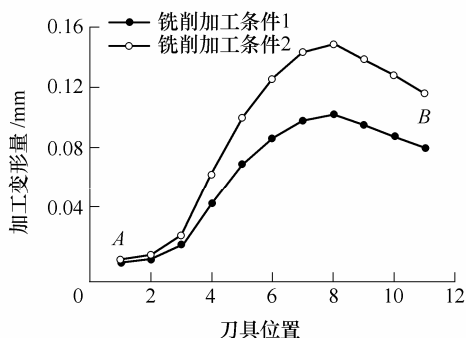
由于该侧壁的起始与终止位置  $A$ 、 $B$ (图 3b)距最近夹紧凸台的距离不同而造成的。

表 1 两组铣削加工条件

加工条件	铣削参数组合+			
	铣削速度/ (r/min)	铣削深度/ mm	铣削宽度/ mm	每齿进给量/ (mm/齿)
条件 1	4 000	5	2	0.2
条件 2	9 000	3	5	0.2



(a) 加工条件 1 下变形云图



(b) 变形随刀位变化规律

图 4 加工变形云图及变形随刀位变化规律

从图 4b 可以看出,不同的铣削条件会产生不同的变形。因此,在实际的加工中,铣削参数的选择及优化选择非常重要,后面将采用正交试验设计及优势分析进行铣削参数的优化。

## 2.2 薄壁件铣削变形正交试验设计

根据本文确定的 4 因子 4 水平正交因素及水平如表 2 所示,通过正交表得到的铣削参数正交试验方案及变形结果如表 3 所示。

表 2 铣削参数正交因素与水平表

因素	水平号			
	1	2	3	4
铣削速度 $n/(r/min)$	4	9	14	20
铣削深度 $a_p/mm$	5	4	3	2
铣削宽度 $a_d/mm$	2	3	4	5
每齿进给量 $f_z/(mm/齿)$	0.2	0.15	0.12	0.10

表 3 铣削参数正交试验方案及变形结果( $L_{16}4^5$ )

试验 序列	因素				变形结果 $\gamma/mm$
	铣削速度 $X_1/(r/min)$	铣削深度 $X_2/mm$	铣削宽度 $X_3/mm$	每齿进给量 $X_4(mm/齿)$	
1	4	5	2	0.20	0.085 6
2	4	4	3	0.15	0.080 9
3	4	3	4	0.12	0.064 5
4	4	2	5	0.10	0.042 9
5	9	5	3	0.12	0.075 6
6	9	4	2	0.10	0.037 5
7	9	3	5	0.20	0.125 0
8	9	2	4	0.15	0.055 6
9	14	5	4	0.10	0.081 0
10	14	4	5	0.12	0.096 6
11	14	3	2	0.15	0.045 9
12	14	2	3	0.20	0.060 1
13	20	5	5	0.15	0.145 0
14	20	4	4	0.20	0.137 0
15	20	3	3	0.10	0.043 1
16	20	2	2	0.12	0.026 0

## 2.3 试验结果的极差分析与优势分析

### 2.3.1 正交试验结果的极差分析

极差分析是对正交试验结果进行分析的一种方法。通过极差分析可以得到铣削参数要素不同水平对加工变形的影响,为后续进行铣削参数的优化决策提供依据。对极差分析的计算定义为

$$\begin{aligned}\bar{K}_{ij} &= K_{ij} / s \\ R_j &= \max \{ \bar{K}_{ij} \} - \min \{ \bar{K}_{ij} \}\end{aligned}\quad (3)$$

式中,  $\bar{K}_{ij}$  表示第  $j$  列的因素取水平  $i$  时,进行试验所得试验结果的平均值;  $s$  为第  $j$  列水平号为  $i$  出现的次数,本次正交试验  $s=4$ ;  $K_{ij} = \sum y(i, j)$  表示表示第  $j$  列中水平号为  $i$  的加工变形量之和;  $R_j$  表示第  $j$  列的极差或其所在因素的极差;  $i=1, 2, 3, 4$ , 对应各个因素的 4 个水平号;  $j=1, 2, 3, 4$ , 表示正交表列号,分别对应因素  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$  所在列。

根据式(3)对极差分析的定义,对表 3 中的加工变形结果进行极差计算,其结果如表 4 所示。

表 4 极差计算结果

各水平结 果的平均 值与极差	因素			
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
$\bar{K}_{1j}$	0.069	0.097	0.049	0.102
$\bar{K}_{2j}$	0.073	0.088	0.065	0.082
$\bar{K}_{3j}$	0.071	0.070	0.085	0.066
$\bar{K}_{4j}$	0.088	0.046	0.102	0.051
$R_j$	0.019	0.051	0.053	0.051

通过表 4 中得到的各水平结果的平均值与极差可以得到各因素下不同水平与变形的关系,如图 5 所示,从图 5 中可以看出:针对所设计的正交试验方案,铣削速度每齿进给量随着水平数的增加变形量增加;铣削深度和铣削宽度随着水平数的增加而减少。这些为后续优化铣削参数组合方案的形成提供较好水平。

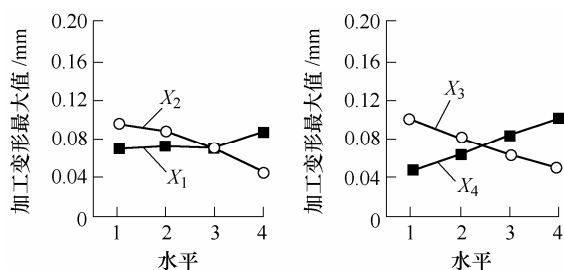


图 5 各因素下不同水平与变形的关系图

### 2.3.2 正交试验结果的优势分析

为了运用优势分析方法确定不同的铣削参数对加工变形影响的相对重要性,需要将铣削产生的

加工变量  $Y$  对不同的自变量即铣削要素(用  $X_1, X_2, X_3, X_4$  来表示,其分别对应的铣削要素与表 3 一致)作回归。这些自变量包括  $X_1, X_2, X_3, X_4$  以及这四个铣削要素变量的各种组合。根据优势分析理论,在预测 4 个自变量时,总共可以产生  $2n-1$  ( $n$  为全模型中预测变量数,本文为四因素,故  $n=4$ ),即 15 个子模型回归方程,它们分别如下:4 个含有一个自变量的回归方程( $X_1, X_2, X_3, X_4$ ),6 个含有 2 个自变量的方程( $X_1X_2, X_1X_3, X_1X_4, X_2X_3, X_2X_4, X_3X_4$ ),4 个含有 3 个自变量的回归方程( $X_1X_2X_3, X_1X_2X_4, X_1X_3X_4, X_2X_3X_4$ )以及一个含有 4 个自变量的回归方程( $X_1X_2X_3X_4$ )。其中  $X_1X_2$  指的是采用  $X_1$  和  $X_2$  这两个变量同时预测因变量  $Y$ ,而非二者构成的乘机项; $X_1X_2X_3$  指的是  $X_1, X_2$  和  $X_3$  这 3 个变量同时预测因变量  $Y$ ;同理, $X_1X_2X_3X_4$  指的是 4 个变量同时预测因变量  $y$ 。表 5 是基于铣削参数的 4 因素优势分析方法数学模型,根据表中定义即可求出各铣削要素对加工变形的贡献,表格中符号的相关说明参考表的注释。

表 5 基于铣削参数的四因素优势分析数学模型

子模型中的变量	预测方差 $R^2$	增值贡献( $\Delta R^2$ )			
		$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
$k=0$ 时的平均贡献	0	$X_{10}=R^2_1$	$X_{20}=R^2_2$	$X_{30}=R^2_3$	$X_{40}=R^2_4$
$X_1$	$R^2_1$	—	$\Delta R^2_{2,1}$	$\Delta R^2_{3,1}$	$\Delta R^2_{4,1}$
$X_2$	$R^2_2$	$\Delta R^2_{1,2}$	—	$\Delta R^2_{3,2}$	$\Delta R^2_{4,2}$
$X_3$	$R^2_3$	$\Delta R^2_{1,3}$	$\Delta R^2_{2,3}$	—	$\Delta R^2_{4,3}$
$X_4$	$R^2_4$	$\Delta R^2_{1,4}$	$\Delta R^2_{2,4}$	$\Delta R^2_{3,4}$	—
$k=1$ 时的平均贡献	—	$X_{11}=\frac{1}{3}\sum_{i=2}^4\Delta R^2_{1,i}$	$X_{21}=\frac{1}{3}\sum_{i=1,3,4}\Delta R^2_{2,i}$	$X_{31}=\frac{1}{3}\sum_{i=1,2,4}\Delta R^2_{3,i}$	$X_{41}=\frac{1}{3}\sum_{i=1}^3\Delta R^2_{4,i}$
$X_1X_2$	$R^2_{1+2}$	—	—	$\Delta R^2_{3,1+2}$	$\Delta R^2_{4,1+2}$
$X_1X_3$	$R^2_{1+3}$	—	$\Delta R^2_{2,1+3}$	—	$\Delta R^2_{4,1+3}$
$X_1X_4$	$R^2_{1+4}$	—	$\Delta R^2_{2,1+4}$	$\Delta R^2_{3,1+4}$	—
$X_2X_3$	$R^2_{2+3}$	$\Delta R^2_{1,2+3}$	—	—	$\Delta R^2_{4,2+3}$
$X_2X_4$	$R^2_{2+4}$	$\Delta R^2_{1,2+4}$	—	$\Delta R^2_{3,2+4}$	—
$X_3X_4$	$R^2_{3+4}$	$\Delta R^2_{1,3+4}$	$\Delta R^2_{2,3+4}$	—	—
$k=2$ 时的平均贡献	—	$X_{12}=1/3(\Delta R^2_{1,2+3}+\Delta R^2_{1,2+4}+\Delta R^2_{1,3+4})$	$X_{22}=1/3(\Delta R^2_{2,1+3}+\Delta R^2_{2,1+4}+\Delta R^2_{2,3+4})$	$X_{32}=1/3(\Delta R^2_{3,1+2}+\Delta R^2_{3,1+4}+\Delta R^2_{3,2+4})$	$X_{42}=1/3(\Delta R^2_{4,1+2}+\Delta R^2_{4,1+3}+\Delta R^2_{4,2+3})$
$X_1X_2X_3$	$R^2_{1+2+3}$	—	—	—	$\Delta R^2_{4,1+2+3}$
$X_1X_2X_4$	$R^2_{1+2+4}$	—	—	$\Delta R^2_{3,1+2+4}$	—
$X_1X_3X_4$	$R^2_{1+3+4}$	—	$\Delta R^2_{2,1+3+4}$	—	—
$X_2X_3X_4$	$R^2_{2+3+4}$	$\Delta R^2_{1,2+3+4}$	—	—	—
$k=3$ 时的平均贡献	—	$X_{13}=\Delta R^2_{1,2+3+4}$	$X_{23}=\Delta R^2_{2,1+3+4}$	$X_{33}=\Delta R^2_{3,1+2+4}$	$X_{43}=\Delta R^2_{4,1+2+3}$
$X_1X_2X_3X_4$	$R^2_{1+2+3+4}$	—	—	—	—
总平均贡献	—	$\frac{1}{4}\sum_{i=0}^3X_{1i}$	$\frac{1}{4}\sum_{i=0}^3X_{2i}$	$\frac{1}{4}\sum_{i=0}^3X_{3i}$	$\frac{1}{4}\sum_{i=0}^3X_{4i}$

注:  $k=0$  数据行表示,子模型中不含预测变量时,单独考察变量  $X_1, X_2, X_3$  和  $X_4$  对  $Y$  的影响方差;  $R^2_1$  表示模型只引入变量  $X_1$  时,产生的预测方差;  $R^2_{1+2}$  表示模型同时引入变量  $X_1, X_2$  时的预测方差;  $R^2_{1+2+3}$  表示模型同时引入变量  $X_1, X_2, X_3$  时的预测方差;  $R^2_{1+2+3+4}$  表示模型同时引入所有变量的预测方差。  $\Delta R^2_{2,1}$  表示只有  $X_1$  变量参与的模型中引入变量  $X_2$  时的方差增值贡献;  $\Delta R^2_{2,1+3}$  表示在只有  $X_1, X_3$  变量参与的模型中引入变量  $X_2$  时的方差增值贡献;  $\Delta R^2_{2,1+3+4}$  表示在只有  $X_1, X_3, X_4$  变量参与的模型中引入变量  $X_2$  时的方差增值贡献。  $X_{ik}$  表示变量  $X_i$  对  $k$  个变量的子模型的平均方差贡献。

表 5 基于铣削参数的四因素优势分析数学模型中存在下列关系, 如式 4 所示, 此关系式用来表达模型中预测方差  $R^2$  与增值方差  $\Delta R^2$  之间的相互关系, 也是后续进行计算的依据

$$\begin{cases}
 R_{1+2}^2 = R_1^2 + \Delta R_{2,1}^2 = R_2^2 + \Delta R_{1,2}^2 \\
 R_{1+3}^2 = R_1^2 + \Delta R_{3,1}^2 = R_3^2 + \Delta R_{1,3}^2 \\
 R_{1+4}^2 = R_1^2 + \Delta R_{4,1}^2 = R_4^2 + \Delta R_{1,4}^2 \\
 R_{2+3}^2 = R_2^2 + \Delta R_{3,2}^2 = R_3^2 + \Delta R_{2,3}^2 \\
 R_{2+4}^2 = R_2^2 + \Delta R_{4,2}^2 = R_4^2 + \Delta R_{2,4}^2 \\
 R_{3+4}^2 = R_3^2 + \Delta R_{4,3}^2 = R_4^2 + \Delta R_{3,4}^2 \\
 R_{1+2+3}^2 = R_{1+2}^2 + \Delta R_{3,1+2}^2 = R_{1+3}^2 + \Delta R_{2,1+3}^2 = R_{2+3}^2 + \Delta R_{1,2+3}^2 \\
 R_{1+2+4}^2 = R_{1+2}^2 + \Delta R_{4,1+2}^2 = R_{1+4}^2 + \Delta R_{2,1+4}^2 = R_{2+4}^2 + \Delta R_{1,2+4}^2 \\
 R_{1+3+4}^2 = R_{1+3}^2 + \Delta R_{4,1+3}^2 = R_{1+4}^2 + \Delta R_{3,1+4}^2 = R_{3+4}^2 + \Delta R_{1,3+4}^2 \\
 R_{2+3+4}^2 = R_{2+3}^2 + \Delta R_{4,2+3}^2 = R_{2+4}^2 + \Delta R_{3,2+4}^2 = R_{3+4}^2 + \Delta R_{2,3+4}^2 \\
 R_{1+2+3+4}^2 = R_{1+2+3}^2 + \Delta R_{4,1+2+3}^2 = R_{1+2+4}^2 + \Delta R_{3,1+2+4}^2 = \\
 R_{1+3+4}^2 + \Delta R_{2,1+3+4}^2 = R_{2+3+4}^2 + \Delta R_{1,2+3+4}^2
 \end{cases} \quad (4)$$

在利用优势分析方法计算各铣削要素对加工变形量贡献率时, 需要以下几个步骤。

(1) 首先需要将铣削要素及不同铣削要素组合形式对因变量即加工变形进行回归分析, 分析含有这些预测指标及各类不同指标组合的所有子模型回归方程的预测方差  $R^2$ 。本文在计算预测方差  $R^2$  时, 采用 AZEN 等<sup>[19]</sup>提出的无模型依赖的方差相关分析方法, 使用此方法需要进行以下两步。

1) 针对表 3 中正交试验的相关数据, 采用 SPSS19 软件中的双变量相关模块, 计算得到因变量及自变量  $Y$ 、 $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$  的相关系数矩阵, 结果如表 6 所示。

表 6 相关矩阵系数

相关系数	$Y$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
$Y$	1.000	0.056	0.466	0.429	0.410
$X_1$	0.056	1.000	0	0	0
$X_2$	0.466	0	1.000	0	0
$X_3$	0.429	0	0	1.000	0
$X_4$	0.410	0	0	0	1.000

2) 其次, 根据表 6 中的相关系数矩阵计算得出各阶子模型的预测方差  $R^2$ , 其结果如表 7 所示。

(2) 根据表 7 中的预测方差, 利用式(4)中关系定义即可计算得到不同变量下的增值贡献  $\Delta R^2$ 。例如增值贡献  $\Delta R_{1,2}^2$  等于模型中同时引入变量  $X_1$ 、 $X_2$  时的预测方差  $R_{1+2}^2$  减去只引入变量  $X_1$  的预测方

差  $R_1^2$ , 即 0.220 29–0.217 16; 预测方差  $\Delta R_{2,1+3}^2$  等于模型中同时引入变量  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$  时的预测方差  $R_{1+2+3}^2$  减去同时引入变量  $X_1$ 、 $X_3$  时的预测方差  $R_{1+3}^2$ , 即 0.404 33–0.187 18; 同理, 预测方差  $\Delta R_{3,1+2+4}^2$  等于模型中同时引入所有变量的预测方差  $R_{1+2+3+4}^2$  减去同时引入变量  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_4$  时的预测方差  $R_{1+2+4}^2$ , 即 0.569 30–0.388 39。

表 7 各阶子模型的预测方差

方差	结果	方差	结果
$R_1^2$	0.003 14	$R_{1+2}^2$	0.220 29
$R_2^2$	0.217 16	$R_{1+3}^2$	0.187 18
$R_3^2$	0.184 04	$R_{1+4}^2$	0.171 24
$R_4^2$	0.168 10	$R_{2+3}^2$	0.401 20
$R_{2+4}^2$	0.385 26	$R_{3+4}^2$	0.352 14
$R_{1+2+3}^2$	0.404 33	$R_{1+2+4}^2$	0.388 39
$R_{1+3+4}^2$	0.355 28	$R_{2+3+4}^2$	0.569 30
$R_{1+2+3+4}^2$	0.572 43		

(3) 计算不同铣削要素对加工变形的总平均贡献及相对贡献率。根据步骤(1)得到的预测方差  $R^2$  以及步骤(2)计算得到的增值贡献  $\Delta R^2$ , 联合表 5 中对平均贡献及总平均贡献的表达, 最终得到不同铣削要素对加工变形总的平均贡献值及贡献率, 结果如表 8 所示。从表 8 中可以看出, 即使是贡献率相近的因素依然可以通过优势分析方法进行优劣势选择, 这有利于优化方案的确定。

表 8 铣削参数四因素的相对贡献率

变量	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
总平均贡献	0.003 1	0.217 2	0.184 0	0.168 1
对 $Y$ 的贡献率(%)	0.548	37.936	32.151	29.366

### 2.3.3 优化的铣削参数组合方案

根据表 8 中铣削参数四因素对加工变形的贡献率结果可知, 对变形影响最大的是铣削深度, 贡献率为 37.936%; 其次是铣削宽度及每齿进给量, 贡献率分别为 32.151%和 29.366%; 而铣削速度对变形的影响最小, 贡献率只有 0.548%。通过表 4 极差分析结果可以得到各铣削要素选择的较好水平, 其中铣削深度的水平优选顺序为 4→3→2→1, 铣削宽度的水平优选顺序为 1→2→3→4, 每齿进给量的水平优选顺序为 4→3→2→1, 铣削速度的水平优选顺序为 1→3→2→4。综合铣削要素的影响大小及各要素较好水平的优选顺序, 即可得出优化的铣削参数组合方案。由于铣削速度对加工变形的贡献非常小, 因此在较好水平的选择上可以根据实际需求任意选取, 而铣削深度、铣削宽度、每齿进给量对加工变形的影响较大, 在较好水平的选择上需要择优选择。最终得到的铣削参数优化组合方案为  $X_2$ (水平

4) $X_3$ (水平 1) $X_4$ (水平 4) $X_1$ (各水平均可)。

## 2.4 方案验证

根据优势分析得出的优化组合方案,选取  $X_1=14\ 000\text{ r/min}$ ,  $X_2=2\text{ mm}$ ,  $X_3=2\text{ mm}$ ,  $X_4=0.1\text{ mm/齿}$  进行铣削变形仿真验证,通过仿真得到的最大变形量为  $y=0.018\ 6\text{ mm}$ ,其变形云图如图 6 所示。对比表 3 中 16 组正交试验的变形结果,其最大变形量的最小值为  $0.026\ 0\text{ mm}$ 。可以看出,运用正交优势分析优化后的铣削参数组合方案得到的最大变形量显著减小。因此,通过正交优势分析法,可以得到试验方案之外的更加优化的参数组合。

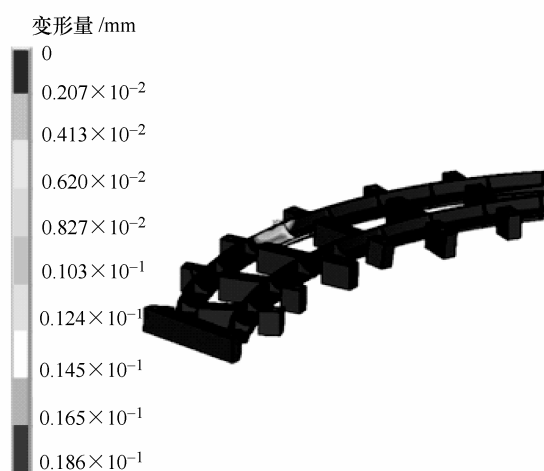


图 6 正交优势分析优化后的加工变形云图

## 3 结论

(1) 本文提出了一种有限元正交优势分析方法。该方法把正交试验设计与优势分析方法相结合,在影响铣削变形的铣削参数优化过程中,利用正交试验方法指导进行有限元铣削分析的参数方案设计,减少了模拟计算和仿真工作量。正交试验设计可以在薄壁件加工制造前,组合影响变形的各因素等级水平,通过较少的有限元仿真计算量即可预测出铣削加工中的变形量,有助于进一步判定实际制造出来的结构件是否满足实际要求的精度指标。

(2) 通过有限元试验结果的极差分析和优势分析,得到了在精加工阶段影响薄壁件变形的铣削要素中,铣削深度对加工变形的影响显著,其次是铣削宽度和每齿进给量,而铣削速度的影响却很小,几乎可以忽略不计。

(3) 通过实例可以看出,正交优势分析法将方案设计与统计分析相结合,能够有效指导参数的优

化选择,对生产过程中的精度控制有重要意义。

## 参 考 文 献

- [1] GUO H, ZUO D W, WANG S H. The application of fem technology on the deformation analysis of the aero thin-walled frame shape workpiece[J]. Key Engineering Materials, 2006, 315-316: 174-179.
- [2] RATCH EV S, LIU S, BECKER A. Milling error prediction and compensation in machining of low-rigidity parts[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2004, 44: 1629-1641.
- [3] 吴红兵,柯映林,刘刚,等. 航空框类整体结构件铣削加工变形研究[J]. 浙江大学学报, 2009, 43(3): 546-550. WU Hongbing, KE Yinglin, LIU Gang, et al. Study on milling deformation of aerospace frame monolithic components[J]. Journal of Zhejiang University, 2009, 43(3): 546-550.
- [4] 毕运波,柯映林,董辉跃. 航空铝合金薄壁件加工变形有限元仿真与分析[J]. 浙江大学学报, 2008, 42(3): 546-550. BI Yunbo, KE Yinglin, DONG Huiyue. Finite element simulation and analysis of deformation in machining of aeronautical aluminum alloy thin-walled workpiece[J]. Journal of Zhejiang University, 2008, 42(3): 546-550.
- [5] 张以都,张洪伟. 航空整体结构件加工变形有限元数值仿真[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(2): 188-192. ZHANG Yidu, ZHANG Hongwei. Finite element simulation of machining deformation for aeronautical monolithic component[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(2): 188-192.
- [6] 刘强,尹力. 一种面向数控工艺参数优化的铣削加工过程动力学仿真系统研究[J]. 中国机械工程, 2005, 16(13): 1146-1150. LIU Qiang, YIN Li. Study on milling process dynamics simulation system about the process parameter optimization of NC machine tools[J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16(13): 1146-1150.
- [7] 汪振华,赵成刚,袁军堂,等. 高速铣削 AlMnCu 表面粗糙度变化规律及铣削参数优化研究[J]. 南京理工大学学报, 2010, 34(4): 537-542. WANG Zhenhua, ZHAO Chenggang, YUAN Juntang, et al. Surface roughness of AlMnCu and cutting parameter optimization in high-speed end milling[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2010, 34(4): 537-542.
- [8] 李沪曾,王逸,张冲,等. 薄壁整体结构件的高速铣削[J]. 同济大学学报, 2007, 35(4): 522-525.



- LI Huzeng, WANG Yi, ZHANG Chong, et al. High speed milling of integral parts with thin walls[J]. Journal of Tongji University, 2007, 35(4): 522-525.
- [9] 李迎, 朱红雨, 赵新. 基于高速铣削的工艺参数组合优化模型研究[J]. 南京理工大学学报, 2007, 31(5): 564-567.
- LI Ying, ZHU Hongyu, ZHAO Xin. High-speed milling process parameter optimization model[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2007, 31(5): 564-567.
- [10] BUDESCU D V. Dominance analysis: A new approach to the problem of relative importance of predictors in multiple regression[J]. Psychological Bulletin, 1993, 114: 542-551.
- [11] MORROW S L, MCGONAGLE A K. Relationships between psychological safety climate facets and safety behavior in the rail industry: A dominance analysis[J]. Accident Analysis and Prevention, 2010, 42(5): 1460-7.
- [12] HUO Y, BUDESCU D V. An extension of dominance analysis to canonical correlation analysis[J]. Multivariate Behavioral Research, 2009, 44(5): 688-709.
- [13] MONTGOMERY D. Design and analysis of experiments[M]. New York: John Wiley and Sons-Inc., 2001.
- [14] 胥芳, 张立彬, 蒋建东, 等. 农机扶手有限元正交优化方法及应用[J]. 机械工程学报, 2008, 44(10): 245-249.
- XU Fang, ZHANG Libin, JIANG Jiandong, et al. Optimization method of agricultural machinery handle based on FEA and orthogonal experimental design[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(10): 245-249.
- [15] 马辉, 孙伟, 戴继双, 等. 基于正交试验的大型离心压缩机轴承参数优化[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(2): 390-395.
- MA Hui, SUN Wei, DAI Jishuang, et al. Bearing parameter optimization of a large-scale centrifugal compressor based on orthogonal experiment[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(2): 390-395.
- [16] 陈吉清, 王玉超, 兰凤崇. 基于正交试验的汽车覆盖件冲压工艺参数优化[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(12): 2433-2440.
- CHEN Jiqing, WANG Yuchao, LAN Fengchong. Optimization for stamping process parameters of automotive body parts based on orthogonal experiments[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2007, 13(12): 2433-2440.
- [17] MARTIN B. Finite element simulation of high-speed cutting forces[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 176:117-126.
- [18] JOHNSON J W. A heuristic method for estimating the relative weight of predictor variables in multiple regression[J]. Multivariate Behavioral Research, 2000, 35(1): 1-19.
- [19] AZEN R, SASS D A. Comparing the squared multiple correlation coefficients of non-nested models: An examination of confidence intervals and hypothesis testing[J]. British Journal of Mathematical and Statistical Psychology, 2008, 61(1): 163-178.
- 
- 作者简介: 胡权威, 男, 1986 年出生, 博士研究生。主要研究方向为数字化工艺设计与优化。  
E-mail: powerworlddd@163.com
- 乔立红(通信作者), 女, 1961 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为产品全生命周期管理、制造过程规划与管理、信息建模与集成等  
E-mail: lhqiao@buaa.edu.cn
- 张洪伟, 男, 1978 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为数值模拟及系统动力学。  
E-mail: zhanghw@bupt.edu.cn