

圆盘刀超声切削振动系统的振动频率数值拟合方法研究

张生芳, 庞皓文, 马付建, 刘宇, 沙智华, 张文超

大连交通大学

摘要: 圆盘刀是超声切削 NOMEX 蜂窝芯材料的刀具之一, 其几何参数直接影响超声切削振动系统的振动频率, 进而影响超声切削的加工性能。根据刀具几何参数约束区间, 确定振动频率数值模型拟合样本点, 分别采用三种拟合方法对超声切削振动系统的振动频率进行数值拟合, 并进行全区间拟合准确性对比检验。研究结果表明: 采用二次多项式逐步回归法拟合出的方程在几何参数全区间内有更高的准确性, 建立的振动频率数值模型可以为超声切削刀具几何参数优化的研究提供参考。

关键词: 数值拟合; 超声切削振动系统; 圆盘刀; NOMEX 蜂窝芯

中图分类号: TG506.5; TH161

文献标志码: A

Study on Numerical Fitting Method of Vibration Frequency of Ultrasonic Cutting Vibration System

Zhang Shengfang, Pang Haowen, Ma Fujian, Liu Yu, Sha Zhihua, Zhang Wenchao

Abstract: The disc cutter is one type of the tools of ultrasonic cutting NOMEX honeycomb core material. The geometric parameters of the cutter directly affect the vibration frequency of the ultrasonic cutting vibration system, thus affect the machining performance of the ultrasonic cutting. The fitting sample points of the vibration frequency numerical model are determined according to the constraint interval of the tool's geometric parameters. Three fitting methods are used to express the vibration frequency numerical model of the ultrasonic vibration system, and the accuracy of the whole interval is verified. The results show that the equation developed by quadratic polynomial stepwise regression method has higher accuracy in the whole interval of the geometric parameters, and the vibration frequency numerical model established can provide the design basis for the optimization of geometric parameters of ultrasonic cutter.

Keywords: numerical fitting; ultrasonic cutting vibration system; disc cutter; NOMEX honeycomb core

1 引言

圆盘刀作为超声切削 NOMEX 蜂窝芯材料的专

用刀具之一, 能够实现平面、台阶面、复杂曲面以及工件夹角的加工^[1], 并可有效减小切削热, 提高加工效率, 保证加工质量。圆盘刀的结构形状及其几何参数会对超声切削振动系统的振动频率产生影响, 进而影响到超声切削加工的加工性能。

一般情况下, 当刀具质量远小于变幅杆质量时, 可忽略加工刀具对振动频率的影响, 直接对超声变

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2015AA043402); 国家自然科学基金(51505057); 辽宁省教育厅优秀人才培养计划(LR2015012); 辽宁省自然科学基金指导(20170540113)

收稿日期: 2017年5月

(2) 采用有限元仿真手段对不同切削参数及刀条斜面角度的切削加工过程进行分析, 考虑其对切削力及切削温度等切削结果的影响, 选择出合适的切削参数及刀条斜面角度;

(3) 选用仿真得到的参数进行锥齿轮加工, 并对加工后的齿轮进行检测, 齿轮精度在合格范围内, 间接验证了切削参数与刀条斜面角度的合理性。

参考文献

- [1] 秦大同. 机械传动科学技术的发展历史与研究进展[J]. 机械工程学报, 2003, 39(12): 37-43.
[2] 董学朱. 摆线齿锥齿轮连续分齿法铣齿原理的研究[J].

机械传动, 1999(2): 29-30.

- [3] 曾韬. 螺旋锥齿轮设计与加工[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1989.
[4] 王志永, 翟华明. 螺旋锥齿轮齿面离散点空间坐标及法矢的计算[J]. 机械工程师, 2014(5): 12-15.
[5] 庄中. 格里森弧齿锥齿轮磨齿技术的发展[J]. 汽车工艺与材料, 2004(9): 11-13.

第一作者: 王志刚, 教授, 哈尔滨理工大学机械动力工程学院, 150080 哈尔滨市

First Author: Wang Zhigang, Professor, School of Mechanical Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China

幅杆进行设计优化研究;但当刀具质量较大时,加工刀具对振动频率产生的影响较大,此时有必要将加工刀具作为超声变幅杆的一部分进行整体优化设计研究^[2]。张可昕等^[3]和潘巧生等^[4]分别对带有加工刀具与不带有加工刀具的超声变幅杆进行了动力学分析,并在此基础上设计、优化出性能优良的超声变幅杆。

当超声变幅杆设计完成后,超声切削振动系统的振动频率受到加工刀具几何参数的影响。但由于加工刀具几何参数间存在高度依赖关系,造成振动频率与几何参数的关系较复杂,不利于超声切削刀具的几何参数优化。为解决上述难题,部分学者将拟合思想引入到相关研究中,通过对试验数据分析运算,采用不同的拟合方法,最终以显性函数表示出了目标变量与设计变量之间的关系。刘明等^[5]采用响应面法建立蜂窝芯固有频率数学方程并通过遗传算法完成蜂窝芯固有频率的优化设计;胡俊峰等^[6]以响应面法为基础,完成微操作平台的多目标优化;吴巍巍等^[7]采用沿中心点展开的响应面法对蜂窝平面结构进行优化设计;陈林等^[8]选用二次多项式逐步回归法建立不同营养元素对某植物高度和数量的影响方程,并定量研究不同营养元素对其生长情况的影响。

本文通过对超声切削振动系统进行整体模态分析,确定刀具几何参数约束区间及拟合样本点。采用上述三种拟合方法分别建立振动频率与几何参数间显性数学方程,通过比较三个数学方程在几何参数全区间内的准确性,选取最适合于表示超声振动系统振动频率的数学方程,用于超声切削刀具几何参数优化设计的研究。

2 拟合样本确定

2.1 刀具几何参数约束区间确定

超声切削振动系统由超声变幅杆及圆盘刀组成,谐振频率 20kHz。圆盘刀是超声切削 NOMEX 蜂窝芯材料专用刀具之一,采用 YG8 材料,结构见图 1。超声变幅杆选用四分之一波长复合型变幅杆,材料为 45 钢,二者材料属性见表 1。

表 1 超声振动系统材料属性

材料名称	密度 (g/cm ³)	弹性模量 (GPa)	泊松比
YG8	14.5	600	0.3
45 钢	7.8	200	0.3

采用有限元分析软件 ABAQUS 对不同几何参数下的圆盘刀进行整体模态分析,获得自由振动下

的振动频率及振型。超声变幅杆及圆盘刀均采用 C3D10 十结点二次四面体单元,并将二者接触面绑定。选取纵向振动振型下的频率作为超声振动系统振动频率(见图 2);在合理几何参数取值范围内,分析圆盘刀几何参数对超声切削振动系统振动频率的影响情况(见图 3 - 图 5)。

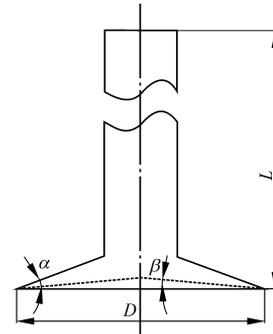


图 1 圆盘刀结构模型

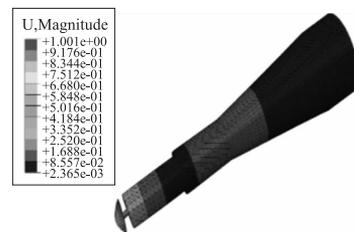


图 2 超声切削振动系统纵向振动振型

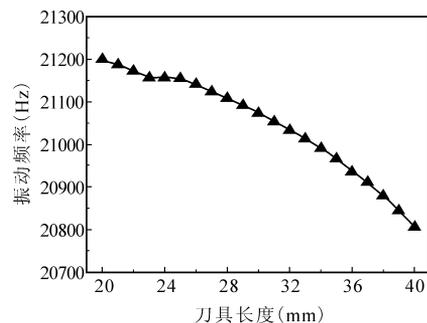


图 3 振动频率随刀具长度变化曲线

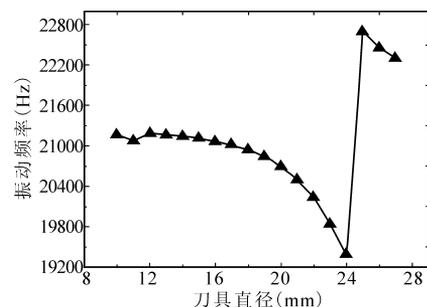


图 4 振动频率随刀具直径变化曲线

由图 3 - 图 5 可知,圆盘刀几何参数在合理范围内,超声切削振动系统振动频率随刀具长度和刀具前角的增大而减小,且振动频率处于同一阶。当

刀具直径低于 24mm 时,超声振动系统振动频率处于同一阶,且随刀具直径的增大单调递减;当刀具直径大于 24mm,振动频率增大到下一阶。

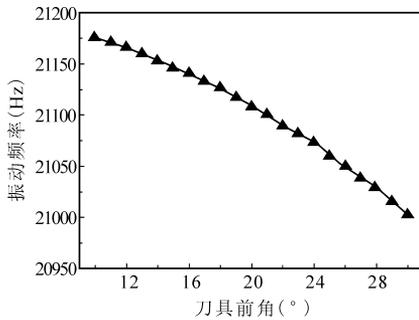


图5 振动频率随刀具前角变化曲线

2.2 拟合样本点确定

为在较少的试验次数条件下取得较高的准确性,本文采用正交试验设计方法确定拟合样本点。正交试验设计是一种多因素多水平的试验设计方法,包括确定试验目的、试验指标、选择因素和水平。该方法根据标准正交表设计出合理有效的试验方案,进而分析多个因素对目标的综合影响,最终以最少的试验次数找出最优的因素水平组合,具有均匀分散和水平可比的特点^[9]。

正交试验设计中样本点选取方法共五种,当设计变量较多时,应用部分因子设计样本点选取方法广泛且简便,因此本文采用上述方法为圆盘刀选取合理拟合样本点。具体选取方法见图6。

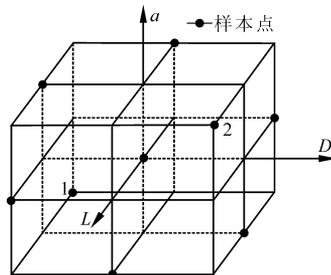


图6 部分因子设计样本点选取方法

本文所拟数值模型约束区间仅为振动频率处于同一阶内的设计变量值,对于所处阶数不同的设计变量,采用两不同数学方程分别表示各自振动频率拟合情况。根据部分因子设计样本点选取方法,若图6中1号与2号样本点发生纵振型对应振动频率存在于同一阶,则三个设计变量所组成的长方体状约束区间内所有点对应的振动频率必在同一阶。因此,根据图3-图5圆盘刀几何参数变化对超声切削振动系统振动频率的影响,逐步缩小设计变量取值范围直至样本点1与样本点2纵振型振动频率处于同一阶。

经多次调整设计变量取值,最终当1号样本点对应三个设计变量值为12、26、17,2号样本点为21、34、24时,振动频率处于同一阶,即处于同一阶内的三个设计变量约束区间分别为12-21、26-34、17-24。

根据设计变量约束区间,对超声切削振动系统进行整体模态分析,确定数值模型拟合样本点(见表2)。

表2 数值模型拟合样本点确定

试验组号	刀具直径 (mm)	刀具长度 (mm)	刀具前角 (°)	振动频率 (Hz)
1	16.5	26	24	20999
2	12	30	24	20853
3	21	34	24	18934
4	21	26	20.5	20491
5	16.5	30	20.5	20962
6	12	34	20.5	20636
7	12	26	17	21078
8	21	30	17	20447
9	16.5	34	17	20908

3 三种拟合模型的建立及拟合准确性分析

3.1 响应面法

响应面法是一种将试验设计与数理统计相结合的优化方法,广泛应用于工业设计和化学工业等领域^[10]。其理论基础为最小二乘拟合,通过对试验数据的最小二乘拟合,使输出变量(系统响应)在约束区间内全局逼近真实响应面,最终获得目标变量与设计变量间近似函数关系,具有适用性强且简便性高的优点。

(1) 建立三阶响应面数值模型

采用三阶响应面拟合方法构造超声切削振动系统振动频率数值模型,其构造形式为

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \sum_{j=1}^n \sum_{i=j}^n \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \beta_{ij} X_i^2 X_j + \sum_{i=1}^n \sum_{j>i}^n \sum_{k>j}^n x_i x_j x_k + \varepsilon \quad (1)$$

式中, Y 为超声切削振动系统振动频率; x_i 、 x_j 、 x_k 为三设计变量分量; n 为设计变量个数; ε 为拟合误差。

响应面数值模型可由式(2)所示的矩阵形式表示为

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad (2)$$

$$\beta = (\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p)^T \quad (3)$$

$$Y = (y_0, y_1, \dots, y_{m-1})^T \quad (4)$$

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{01} & x_{02} & \cdots & x_{0p} \\ 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{(m-1)1} & x_{(m-1)2} & \cdots & x_{(m-1)p} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, Y 为振动频率响应值矩阵; X 为样本点组成的设计变量矩阵; β 为振动频率响应系数矩阵; ε 为拟合误差向量; m 为试验组数。

以最小二乘法拟合振动频率响应系数矩阵, 设 $L\varepsilon' \varepsilon = (Y - X\beta)'(Y - X\beta)$, 令 $\partial L / \partial \beta = 0$, 得 $X'X\beta = X'Y$, 振动频率响应系数矩阵 β 可表示为

$$\beta = (X'X)^{-1}(X'Y) \quad (6)$$

根据表2 超声切削振动系统振动频率拟合样本点, 结合最小二乘拟合后的振动频率响应系数矩阵 β , 得三阶响应面近似函数方程为

$$\begin{aligned} Y = & 0.391 + 0.433D + 6.065L + 3.177\alpha - 25.881D^2 \\ & + 65.694L^2 + 11.333\alpha^2 - 0.606D^3 - 0.884L^3 - 0.23 \\ & 2\alpha^3 + 1.163D^2L + 1.844D^2\alpha - 0.556L^2D - 1.518L^2 \\ & \alpha - 0.039\alpha^2D + 0.029\alpha^2L - 6.652DL - 11.948D\alpha \\ & + 30.627L\alpha - 0.265DL\alpha \end{aligned}$$

(2) 三阶响应面数值模型准确性检验

以复相关系数 R^2 的值评价响应面数值模型对样本点拟合的准确性。其值越接近1, 则样本点处拟合曲线值与实际样本值越接近, 有

$$R^2 = SSE/SSY \quad (7)$$

$$SSE = Y^T Y - \beta^T X^T Y \quad (8)$$

$$SSY = Y^T Y - (I^T Y)^2 / m \quad (9)$$

式中, SSE 表示响应值与响应估计值差的平方和; SSY 表示响应值与响应均差值的平方和; m 为正交试验的组数; I 为 $m \times 1$ 全为1的列向量。将相应矩阵带入响应面理论模型准确性检验公式, 得 $R^2 = 0.999$, 即拟合曲线在样本点处有较高的拟合准确度。

3.2 通过中心点展开的响应面法

(1) 二阶中心点响应面法数值模型建立

三阶响应面法是对试验值的无偏估计, 存在中心设计点拟合不精确的缺陷, 同时在优化设计中更希望当前设计点近似约束值等于准确分析值。因此, 提出了以任意样本点及其振动频率响应值作为响应面中心点, 对除中心点外的其他样本点进行响应面值与真实值之差的最小二乘拟合的通过中心点展开的响应面模型^[7]。

对通过中心点展开的响应面模型进行二阶拟合, 其构造形式见式(10)。若三阶响应面振动频率响应值矩阵 Y 及设计变量矩阵 X 如式(4)和式(5)

所示, 则通过中心点展开的响应面模型对应矩阵变化为式(11)和式(12); 式(13)为通过中心点展开的响应面常数项计算式, m 为正交试验设计组数。

$$Y' = C_0 + \sum_{i=1}^n C_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} x_i x_j \quad (10)$$

$$X' = \begin{bmatrix} x_{11} - x_{01} & x_{12} - x_{02} & \cdots & x_{1p} - x_{0p} \\ x_{21} - x_{01} & x_{22} - x_{02} & \cdots & x_{2p} - x_{0p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{(m-1)1} - x_{01} & x_{(m-1)2} - x_{02} & \cdots & x_{(m-1)p} - x_{0p} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$Y' = [y_1 - y_0 \quad y_2 - y_0 \quad \cdots \quad y_{m-1} - y_0]^T \quad (12)$$

$$C_0 = y_0 - \sum_{i=1}^{m-1} C_i x_0 \quad (13)$$

$$C = [C_0 \quad C_1 \quad \cdots \quad C_p]^T \quad (14)$$

通过中心点展开的响应面法的振动频率响应系数矩阵与三阶响应面法相同, 因此将式(10)、式(11)相应矩阵代入式(6)进行最小二乘估计, 得到频率响应值系数矩阵 β ; 根据式(12)得到二阶改进响应面常数项; 则二阶改进响应面方程为

$$\begin{aligned} Y' = & 3248 + 1000.14D + 445.59L + 556.14\alpha \\ & - 21.11D^2 - 4.58L^2 - 5.15\alpha^2 - 5.69DL - 11.34D\alpha - 7.92L\alpha \end{aligned}$$

(2) 中心点响应面数值模型准确性检验

通过中心点展开响应面数值模型与三阶响应面模型准确性检验方法相同, 同样以复相关系数作为模型准确性标准, 有

$$R^2 = SSR/SSY \quad (15)$$

$$SSR = C^T X^T Y - (I^T Y)^2 / m \quad (16)$$

$$SSY = Y^T Y - (I^T Y)^2 / m \quad (17)$$

通过中心点展开的响应面准确性检验方法只能评价样本点处拟合准确性, 此模型中复相关系数 $R^2 = 0.9969$, 即样本点处函数拟合值准确。

3.3 二次多项式逐步回归

(1) 二次多项式逐步回归模型

二次多项式逐步回归模型是在类似于式(18)的二次多项式回归模型的基础上, 对模型中的变量进行逐步回归检验后所得数学方程。

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j \quad (18)$$

逐步回归检验的基本思想是将变量逐个引入, 引入变量的条件是偏回归平方和经检验是显著的。同时每引入一个新变量后, 需要对模型中已引入的变量再次逐个检验, 将不再显著的变量剔除, 直至所有变量引入完毕, 以此来保证最后所得的变量子集内的所有变量均是显著的^[11]。

若目标 Y 共受 n 个自变量 x_1, x_2, \dots, x_n 影响,且对目标 Y 进行 m 组正交试验。假设现已引入 $q-1$ 个自变量 $x_1, x_2, \dots, x_{q-1}, x_q, x_{q+1}, \dots, x_n$ 为待引入自变量,此时目标 Y 与自变量 X 满足式(19)。

$$Y = X_q \varphi_q + \varepsilon \quad (19)$$

若引入自变量 $x_i (i = q, q+1, \dots, n)$, 则式(19)变化为式(20), 其假设检验统计量可按式(21)表示。式中 β, RSS_{q+1} 分别为式(20)中回归模型回归系数的最小二乘估计与残差平方和。

$$Y = (X_q, x_i) \begin{bmatrix} \varphi_q \\ \beta_i \end{bmatrix} + \varepsilon, i = (q, q+1, \dots, n) \quad (20)$$

$$F_0(i) = (m - q - 1) \beta_i^2 (x'_q N_q x_{q=i}) / RSS_{q+1} \quad (21)$$

$$N_q = 1 - X'_q (X'_q X)^{-1} X_q \quad (22)$$

设 $F_0(q)$ 为 $F_0(i) (i = q, q+1, \dots, n)$ 中最大者, 如式(23)所示, 对于给定的显著性水平 α , 若满足式(24), 则自变量被接受, 反之自变量被剔除。

$$F_0(q) = \max \{ F_0(q), F_0(q+1), \dots, F_0(n) \} \quad (23)$$

$$F_0(q) \neq F_{m-q-1}(\alpha) \quad (24)$$

由于二次多项式逐步回归模型计算量大, 因此利用 DPS9.01 数值计算软件辅助求得振动频率方程为

$$Y = 11288.11 + 1530.56D - 29.91D^2 + 1.77\alpha^2 - 10.24DL - 16.39D\alpha + 3.99L\alpha$$

(2) 二次多项式逐步回归数值模型准确性检验

二次多项式逐步回归数值模型通过方差分析及 F 检验验证振动频率数值模型准确性。检验指数包括决定系数 R 、衡量回归均方相对大小的 F 值、各个回归系数的偏相关系数的显著水平 P 以及 Durbin - Watson 统计量 D 。当决定系数 R 越接近于 1、 F 值越大、 P 值越接近于 0、统计量 D 越接近于 2, 则拟合精度越高。

经计算, 此模型中相关系数 $R = 0.9992$ 、 $F = 216.8$ 、显著水平 $P = 0.0046$, 统计量 $D = 2.34$ 。检验结果表明利用二次多项式逐步回归方法拟合出的超声振动系统振动性能数学模型拟合比较准确, 但 Durbin - Watson 统计量与标准值 2 相距较大, 表明模型残差自相关性较弱, 即各变量间相互独立性较弱, 有较强的依赖性, 对模型拟合的准确性造成一定影响。

4 三种拟合方程的全区间准确检验

响应面准确性检验方法仅能对样本点处数值模型拟合准确性进行评价, 但无法分析出非样本点处

函数拟合情况; 在上述三种方程的准确性检验分析中, 复相关系数均大于 0.99, 即三个方程在样本点处均有较高的拟合精度, 无法选择出最优拟合方程。因此, 为得到全区间内的最优振动频率拟合方程, 需在数值模型约束区间内添加一定数量的检验点, 所添加的检验点应较平均的分布于约束区间内, 以此来较全面的反映出方程拟合准确性。

检验点选取方法如图 7 所示。在三设计变量所组成的长方体状约束区间内, 将每个设计变量分为三个水平, 则在约束区间内共有 27 个可选择水平点; 在 27 个可选择水平点中, 9 个水平点已作为样本点用于数值模型拟合, 因此基于检验点选择原则, 将约束区间内除样本点外的剩余可选择水平点作为数值模型检验点, 通过比较三个方程在检验点处实际振动频率值与理论振动频率值, 最终确定最优振动频率数值模型。

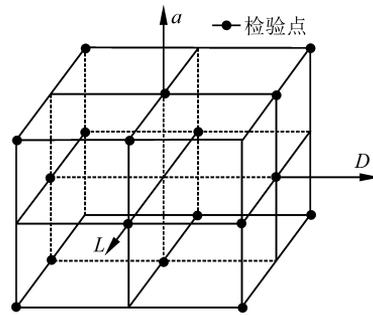


图 7 正交试验设计检验点选取

图 8 - 图 10 分别为三种拟合方法所拟合出的振动频率模型在检验点处的振动频率与实际仿真结果的对比情况。由图 8 可知, 在 18 个检验点处, 采用三阶响应面法拟合出的数值模型在全区间内仅有 5 处检验点拟合误差低于 1%, 其中 3 处检验点拟合误差值低于 100; 因此, 此模型无法准确反映出圆盘刀超声切削振动系统振动频率的变化情况。

对比图 9 与图 10 可得, 沿中心点展开的响应面模型共有 14 处检验点拟合误差低于 1%, 其中 7 个检验点拟合误差值低于 100; 二次多项式逐步回归模型共有 14 处检验点拟合误差低于 1%, 其中 9 个检验点拟合误差值低于 100; 二次多项式逐步回归模型相比于沿中心点展开的响应面模型, 前者虽在拟合误差低于 1% 的检验点个数上略低于后者, 但其中具有高拟合准确性的检验点个数上优于后者, 使二次多项式逐步回归法数值模型在设计变量全区间内的整体变化趋势与实际值更为接近, 所拟曲线更能准确表示出圆盘刀超声切削振

动系统振动频率变化情况,因此以二次多项式逐步回归数值模型作为圆盘刀超声切削振动系统振动频率数值模型。

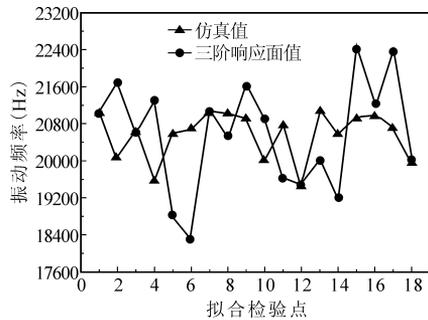


图8 三阶响应面模型拟合准确性比较

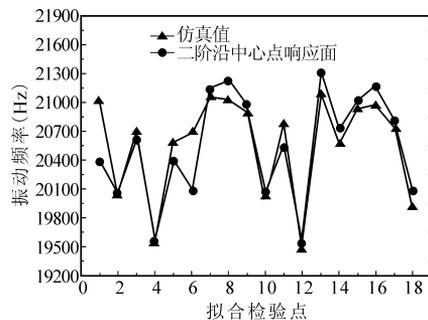


图9 二阶沿中心点响应面模型拟合准确性比较

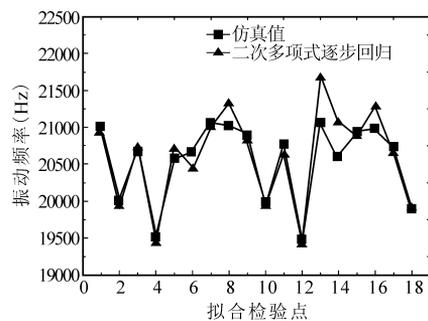


图10 二次多项式逐步回归模型拟合准确性比较

5 结语

(1)对带有圆盘刀的超声切削振动系统进行整体模态分析,根据超声切削振动系统振动频率随圆盘刀几何参数变化曲线,确定振动频率处于同一阶时对应的圆盘刀刀具直径、刀具长度、刀具前角约束区间分别为12-21、26-34、17-24,并根据约束区间确定模型拟合样本点及检验点。

(2)根据模型拟合样本点,分别采用三阶响应面法、二阶沿中心点展开的响应面法及二次多项式逐步回归法建立圆盘刀超声切削振动系统振动频率数值模型,并分别对三者进行样本点拟合准确性检验。结果表明,三模型复相关系数均大于0.99,即三模型在样本点处拟合准确性高。

(3)在模型检验点处分别对三个圆盘刀振动频率数值模型拟合准确性进行对比验证。比较结果表明,三阶响应面模型在检验点处拟合准确性差,所拟曲线不能很好反映出超声切削振动系统振动频率变化情况。二次多项式逐步回归模型与沿中心点展开的响应面模型相比,二次多项式逐步回归模型所拟曲线在设计变量全区间内的整体变化趋势与实际更为接近,因此采用二次多项式逐步回归模型作为圆盘刀超声切削振动系统振动频率数值模型,并为超声切削刀具几何参数设计优化研究提供基础。

参考文献

- [1]程勇,聂海平,崔博,等. Nomex 蜂窝芯结构零件超声切割与传统数控加工的对比研究[C]. 全国复合材料学术会议,2012.
- [2]马付建,董志刚,康仁科,等. 超声变幅杆与杯型工具一体化设计[J]. 振动工程学报,2016,29(2):231-236.
- [3]张可昕,张向慧,高炬. 带有加工工具的超声复合变幅杆的优化设计[J]. 机械设计与制造,2011(11):33-35.
- [4]潘巧生,刘永斌,贺良国,等. 一种大振幅超声变幅杆设计[J]. 振动与冲击,2014,33(9):1-5.
- [5]刘明,李永新,吴金玺,等. 基于响应面法的蜂窝芯固有频率优化设计[J]. 机械研究与应用,2014(4):15-17.
- [6]胡俊峰,徐贵阳,郝亚洲. 基于响应面法的微操作平台多目标优化[J]. 光学精密工程,2015,23(4):1096-1104.
- [7]吴巍巍,李永新,李天齐,等. 基于响应面法的蜂窝拓扑结构频响优化[J]. 机电一体化,2015,21(10):3-6.
- [8]陈林,杨蕾,王艺璇,等. 二次多项式逐步回归在狭叶仙鹤藓生长研究中的应用[J]. 昆明学院学报,2012(3):37-40.
- [9]谢黎明,程格,靳岚. 基于正交试验的Cr12MoV切削温度预测模型的研究[J]. 工具技术,2016,50(1):30-33.
- [10]黄重阳,林焰,于雁云. 基于响应面法的强力甲板结构优化设计[J]. 中国舰船研究,2012(3):50-54.
- [11]徐继红. 服装廓体松量与面料力学性能相关性及其预测模型的研究[D]. 上海:东华大学,2008.

第一作者:张生芳,博士,教授,大连交通大学机械工程学院,116028 辽宁省大连市

First Author: Zhang Shengfang, Doctor, Professor, College of Mechanical Engineering and Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian, Liaoning 116028, China