

基于切触点高斯过程的直纹面侧铣可靠度分析

李霄

(西安航空职业技术学院, 陕西 西安 710089)

摘 要:针对不确定因素导致直纹面侧铣精度预测困难及计算效率低的问题,提出了基于刀具切触点 GP 模型的直纹面侧铣可靠度分析方法。首先在高斯随机过程描述中引入驱动误差和参数不确定性的刀具切触点坐标误差,然后基于某型机床的误差传递模型,利用多体理论构建直纹面侧铣加工的精度分析模型;通过带有随机常数 Z_i 的确定函数的线性组合方式,简化模型的输入变量,并根据重要性指标和精度指标选择有用样本和更新模型;最后基于更新模型采用蒙特卡洛法获得加工精度可靠度。实验结果表明,所提方法准确预测了加工精度变化趋势,具有较高的计算效率和预测精度,为直纹面侧铣精度预测提供了有效的方法。

关键词:直纹面加工;切触点高斯过程模型;加工精度;多体理论;蒙特卡洛法

中图分类号:TH161 **文献标识码:**B **文章编号:**1671-5276(2020)04-0040-04

Reliability Analysis of Flank Milling for Ruled Surface Based on Gaussian Process

LI Xiao

(Xi'an Aeronautical Polytechnic Institute, Xi'an 710089, China)

Abstract: To solve the problem of difficulty in predicting accuracy and low computational efficiency of flank milling for ruled surface, caused by uncertain factors, an accuracy analysis method based on GP model of tool cutting contact is proposed. In the method above, in Gaussian stochastic process description, the drive error and parameters which are introduced into the tool-cut contact coordinate error are uncertain. And then, based on the error transfer model of a certain type of machine tool, the multi-body theory is used to construct the precision analysis model of the flank milling for the ruled surface, the input variables of the model are simplified by linear combination of deterministic functions with random constants, and useful samples are selected and the model is updated based on importance indexes and accuracy indexes respectively. The Monte Carlo method is used to obtain the accuracy of machining accuracy based on the updated model. The experimental results show that the method above is used to accurately predict the change trend of machining accuracy, and it has high computational efficiency and prediction accuracy. An effective method is provided for predicting the accuracy of facet milling.

Keywords: flank milling for ruled surface; Gaussian process model of contact points; machining accuracy; multibody theory; Monte Carlo method

0 引言

直纹面是在航空发动机叶轮等关键部件中应用广泛的曲面类型,因其型面复杂且性能易受加工精度影响,且往往存在不确定因素,导致其加工精度可靠性预测困难^[1]。为此,分析影响侧铣加工的不确定性因素,建立反映侧铣可靠度的分析模型,对侧铣加工精度的有效分析和准确预测至关重要^[2]。

近年来,国内外学者展开了侧铣建模研究。刘佳佳等^[3]根据磨床的综合误差传递构建其侧铣加工的近似精度分析模型;WANG Zequn 等^[4]在综合分析机床误差基础上,建立了某型五轴机床的外圆铣削精度分析模型。目前,蒙特卡洛法等常用侧铣精度可靠分析方法对极限状态函数的依赖较大,不适合求解带有随机时变不确定性变量模型的精度分析问题^[5-6]。为此,在超越论^[7]及极值法^[8]等理论研究和基础上,张栋梁等^[9]基于主成分分析

和多项式混沌扩展提出时变可靠性分析方法,将时间间隔离散化并与瞬时性能函数关联后,采用主成分分析进行降维,然后采用稀疏多项式混沌扩展对降维分量进行近似表示,最后在时变响应的全局替代模型上应用蒙特卡洛方法;HAWCHAR L 等^[10]在将随机过程进行离散化预处理基础上分析侧铣加工的时变可靠性。这两种方法将动态不确定性模型求解转化为静态模型求解,有效解决了动态不确定性的影响,但其对复杂模型求解时,运算复杂度高且无法确定求解精度。WANG L 等^[11]对时变模型采用自适应极值改进的响应面法进行求解,计算结果更为精确,但极值响应在多数情况下难以获得精确分布。

为此,综合考虑直纹面侧铣加工中存在的几何误差、刀具参数及动态不确定性等因素,以高斯过程(Gaussian process, GP)描述刀具切触点的坐标误差,构建加工精度分析模型,并以精度指标迭代更新模型,最后通过蒙特卡洛法抽样获得最终可靠度预测。实验结果验证了算法的预测精度和计算效率。

作者简介:李霄(1980—),女,陕西西安人,实验师,硕士,研究方向为机械制造。

1 侧铣精度可靠度模型

1.1 直纹面切触点坐标变换 GP 模型

含噪随机函数 $f(x)$ 的 GP 模型可由其均值和协方差表示,即 $f(x) = GP[m(x), k(x, x')]$, $m(x)$ 为均值函数, $k(x, x')$ 为协方差函数, x' 与 x 为不同的测试数据。

图 1(a) 所示为工程中常用直纹面示意图,其矢量表达式为 $\text{var}(y_*) = S(u, v) = (1-v)B_0(u) + vB_1(u)$, 其中: $B_0(u)$ 和 $B_1(u)$ 表示直纹面准线函数; u 和 v 分别表示准线与直母线变量参数。图 1(b) 为通过法向偏置^[9]获得的直纹面加工刀位示意图。

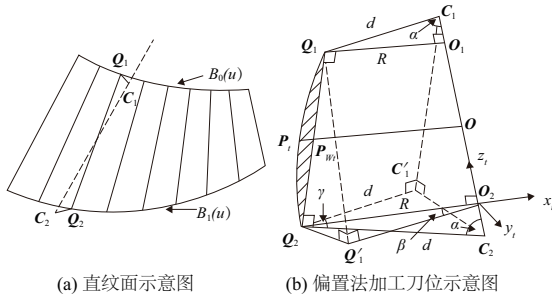


图 1 直纹面及偏置法加工刀位示意图

图 1 中 Q_1 和 Q_2 为某母线与直纹面两准线交点, $|Q_1Q_2| = l$, C_1C_2 为 Q_1 和 Q_2 的法向直线, $|Q_1C_1| = |Q_2C_2| = d$, O_1 和 O_2 为其在直线 C_1C_2 上的垂足, 令刀具半径 $|Q_1O_1| = |Q_2O_2| = R$, 则 Q_1 和 Q_2 可与刀具的切触点重合^[12]; C_1' 为 C_1 在面 $Q_2C_2C_1'$ 上的垂足, 令扭曲角 $\angle C_1C_1'Q_2C_2 = \gamma$, 则可以得到 $|C_1C_1'| = |Q_1Q_2| = l$; 根据图中 $\angle O_1C_1Q_1 = \angle O_2C_2Q_2 = \alpha$, 可得 O_1 和 O_2 坐标为:

$$\begin{cases} O_1 = C_1 + d \cdot \cos(\alpha) \cdot \left(\frac{C_2C_1}{|C_2C_1|} \right) \\ O_2 = C_2 + d \cdot \cos(\alpha) \cdot \left(\frac{C_1C_2}{|C_1C_2|} \right) \end{cases} \quad (1)$$

式中: d, α 值可通过数值迭代^[7] 计算; O_2 为刀具端面中心; O_1O_2 为立铣刀的刀位矢量。

以 O_2 为原点, O_1O_2 为 z_i 轴, Q_2O_2 为 x_i 轴建立刀具坐标系 $(xyz)_i$, 如图 1(b) 中所示, 设 P_w 和 P_t 分别为直纹面的理想切触点和实际切触点。 Q_1' 为 Q_1 在平面 $y_iO_2x_i$ 上的投影, 由余弦定理可计算 $\beta = \angle Q_1'O_2Q_2$ 。设铣削刃长 $|Q_1Q_1'| = |O_1O_2| = b$, 根据几何分析, Q_1 在刀具坐标系中为 $Q_1 = (R\cos\beta, R\sin\beta, b)$, 则根据切触点弧线参数式 $z_{\max} = k \cdot \beta^{[11]}$, k 为某系数, 可得 $k = b/\beta$, 从而得到 $Q_1P_iQ_2$ 弧线方程为:

$$x = -R\cos(\theta), y = R\sin(\theta), z = b \cdot \theta/\beta \quad (2)$$

式中 $0 < \theta < \beta$ 。

根据 O_1 和 O_2 坐标, 直线 Q_1Q_2 方程为:

$$x = R \cdot (1 - \cos\beta) \cdot z/b, y = R \cdot \sin\beta \cdot z/b \quad (3)$$

联合式(2)和式(3)可以计算 P_w 和 P_t , 从而得到切触点的理论误差值, 但由于式(3)中 R 与 b 存在不确定项, 且切触点坐标无法使用显式函数表示, 因此 P_w, P_t 之间距离误差值采用 GP 高斯随机过程可表示为:

$$Y(s) = GP[m(s), k(s, s')] \quad (4)$$

以 $P_{ts}(p_{tsx}, p_{tsy}, p_{tsz})$ 表示切触点在刀具坐标系三坐标轴方向的 GP 预测值。

1.2 直纹面侧铣精度可靠度模型

图 2 所示为某型五轴机床通过位置和姿态特征矩阵构建侧铣加工精度模型, 模型忽略工艺温度变化和系统的刚度误差。图中 O_1 为立转台中心, O_2, O_3 和 O_4 分别为主轴、刀具和工件的端面中心, 机床、立转台以及摆动转台的原点设置在 O_1 ; 三轴滑轨与主轴的原点设置在 O_2 ; 刀具坐标原点设置在 O_3 ; 工件坐标系的原点设置在 O_4 , 各坐标系原点之间的平移矢量分别为 $P_1 = P_{Q_2O_1} = (x_{21}, y_{21}, z_{21})^T$, $P_2 = P_{Q_3O_2} = (0, 0, z_{32})^T$ 和 $P_3 = P_{Q_4O_1} = (x_{41}, y_{41}, z_{41})^T$ 。

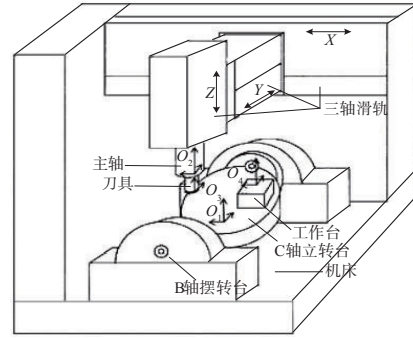


图 2 某型 BC 轴五轴机床结构示意图

设切触点坐标的齐次坐标形式为 $P_t = (p_{tx}, p_{ty}, p_{tz}, 1)^T$, 其由 GP 模型预测得到 $P_{ts} = (p_{tsx}, p_{tsy}, p_{tsz}, 1)^T$, 而理想侧铣加工成形点坐标 $P_w = (p_{wx}, p_{wy}, p_{wz}, 1)^T$ 。则利用多体特征变换矩阵, 将 P_{ts} 与 P_w 变换到基坐标系下, 即可构建侧铣精度可靠度模型, 即

$$E = T_{01}T_{12}T_{23}P_w - T_{04}T_{45}T_{56}T_{67}T_{78}P_{ts} = (E_x, E_y, E_z, 1) \quad (5)$$

式中: E_x, E_y, E_z 为参考坐标系三轴方向误差, 可得总误差为 $E(\Delta) = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$; T_{ij} 为根据工件结构获得的坐标变换矩阵, 其表达式分别为:

$$\begin{aligned} T_{01} &= \begin{bmatrix} \cos B - \Delta\beta_B \sin B & 0 & \sin B + \Delta\beta_B \cos B & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin B - \Delta\beta_B \cos B & 0 & \cos B - \Delta\beta_B \sin B & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ T_{12} &= \begin{bmatrix} \cos C - \Delta\gamma_C \sin C & -\Delta\gamma_C \cos C - \sin C & 0 & 0 \\ \sin C + \Delta\gamma_C \cos C & -\Delta\gamma_C \sin C + \cos C & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ T_{23} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{41} \\ 0 & 1 & 0 & y_{41} \\ 0 & 0 & 1 & z_{41} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ T_{04} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x + \Delta x_x + x_{21} \\ 0 & 1 & 0 & y_{21} \\ 0 & 0 & 1 & z_{21} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, T_{45} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y + \Delta y_y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$T_{56} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z + \Delta z_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, T_{78} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z_{32} + \Delta z_{87} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中: $T_{67} = E$; Δz_{87} 为刀具实测长度方差; x, y, z 及 B, C 为计算刀轴矢量后, 通过运动学反变换计算的各轴瞬时参数; $\Delta \beta_B$ 和 $\Delta \gamma_C$ 分别为机床绕 y 轴和 z 轴的转动误差; $\Delta x_x, \Delta y_y$ 和 Δz_z 为机床沿坐标三轴的平动误差, 则模型在允许极限误差情况下的状态函数为:

$$g[X, Y(s), S] = \delta - E(\Delta) \quad (6)$$

式中: δ 为允许极限误差; X 为模型的随机不确定量; S 为切触点坐标范围。

2 侧铣精度 GP 模型求解

2.1 随机过程预处理

将切触点坐标范围 $[0, S]$ 离散为节点 $s = (s_1, \dots, s_i, \dots, s_n)$, 则得到协方差矩阵为:

$$\Sigma = \begin{pmatrix} k(s_1, s_1) & \dots & k(s_1, s_n) \\ \vdots & \dots & \vdots \\ k(s_n, s_1) & \dots & k(s_n, s_n) \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中 $k(s_i, s_j)$ 表示 s_i 与 s_j 两位置的协方差函数。可以看出, 协方差矩阵 Σ 是对称正定的, 此时, 精度模型中 $Y(s)$ 可以表示为带有随机常数 Z_i 的确定函数的线性组合, 即

$$Y(s) = u_{Y(s)} + \sum_{i=1}^P \sqrt{I_i} \cdot \Phi_i^T(s) \cdot Z_i \quad (8)$$

式中: $Z = [z_1, z_2, \dots, z_p]$ 为线性表示中 $P < n$ 个确定性函数的随机权重值, 其为不相关的正态分布变量, P 需满足^[11]:

$$\frac{\sum_{i=1}^P \sqrt{I_i} \cdot \Phi_i^2(s)}{(\sum_{i=1}^n \sqrt{I_i} \cdot \Phi_i^2(s))} > \xi \quad (9)$$

式中: ξ 为临界阈值, $\xi = 0.95$ 。则式 (8) 可重新表示为 $g[X, Y(s), S] = g(X, Z, S)$, 即输入变量转换为两个随机变量 $[X, Z]$, 为此, 以 $w = [w_1, w_2, \dots]$ 替代 $[X, Z]$ 作为输入变量, 其似然函数为:

$$L_{GP} = -\frac{1}{2} \left[p \ln(\sigma^2) + \ln(|C|) + \frac{1}{2\sigma^2} (G - Iu)^T C^{-1} (G - Iu) \right] \quad (10)$$

式中: I 为 P 维单位矩阵; G 为输入的观测值。最大化 L_{GP} 可以计算模型的超参数, 然后在抽样数据下, 通过极大似然估计可计算 GP 模型。对于测试样本 w' , GP 模型预测值为:

$$g_s(w', s_i) = u + r^T C^{-1} (G - Au) \quad (11)$$

式中: u 为预测均值; r 描述了 w' 与训练样本 w 的相关性, 即 $r(i) = \text{Corr}(w', w_i)$ 。

2.2 模型更新与求解

设切触点节点 s_i 上某样本点 w_i 被正确预测的概率为 $P_c(w_i, s_i)$, 将模型更新指标设为节点概率期望, 当输入 m 个有效样本时, s_i 上的模型精度指标为:

$$\eta(s_i) = E[P_c] = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m P_c(w_i, s_i) \quad (12)$$

式中 $E(\cdot)$ 表示模型期望。 $\eta(s_i)$ 值越大说明模型精度越高, 通常取值 $[0.95 \sim 1]$ 。为了确保有用样本参与模型更新迭代, 设样本重要性指标: $\varphi(w_i, s_i) = [1 - p_c(w_i, s_i)] \cdot f_w(w_i) \cdot \sqrt{\frac{1}{e} \ln(w_i, s_i)}$, 其中 $f_w(w_i)$ 为 w_i 的概率密度函数。最大化 $\varphi(w_i, s_i)$ 可得到 s_i 的有用样本, 用于更新代理模型。单刀位下整条刀触线可靠度随直纹面参数 S 而变化, 其失效概率为:

$$P_f(0, S) = \int_{R^k} I(w) |_{[0, S]} f_w(w) dw = E[I(w) |_{[0, S]}] \quad (13)$$

式中 $I(w) |_{[0, S]}$ 为 n 个离散节点的模型预测响应函数。通过蒙特卡洛法进行 N 次抽样后可得切触线精度可靠度值:

$$R(0, S) = 1 - P_f(0, S) = 1 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I(w) |_{[0, S]} \quad (14)$$

3 算法实验验证分析

为验证文中侧铣可靠度模型的有效性, 以 LU400 型五轴数控机床为实验对象, 采用文献[12]中方法设计曲面, $u_0 = 0.02$, $\sigma_0 = 0.008$, 立铣刀直径为 6 mm。以 $n = 21$ 对 $u = 11.507$ 位置的母线进行节点离散, 在机床上加工后通过三坐标测量机检测并获取 2 万组训练样本, 以获得精确的预测数据, 对数据进行 z -score 标准化处理。

3.1 基于实测数据的模型有效性实验

为获得预测坐标值 P_{ts} 的变化趋势, 图 3 中所示为 $Y(s)$ 表征的切触点坐标在 x 轴方向的坐标变化, 即 p_{ts} 变化。可以看出, 在 95% 的预设置信度范围内, 预测数据相对于原始数据具有更小的波动, 有利降低部分失效数据的大幅值波动, 从而可以确保在后续样本点抽样时的数据稳定。同理, 实验测试发现, y 轴与 z 轴的切触点坐标 p_{tsy} 和 p_{tsz} 变化在 95% 的置信度下, 其预测数据的波动幅度更小。因此, 3 个坐标方向的数据预测响应值表明其更能反映训练数据的变化趋势。

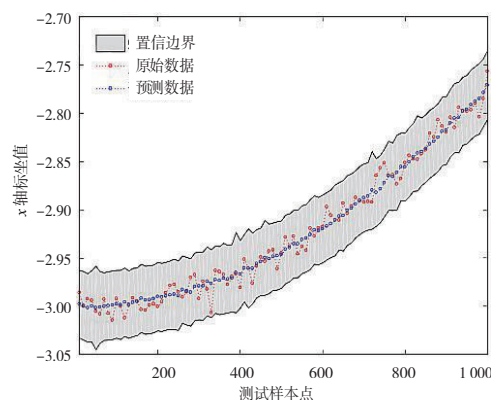


图 3 切触点坐标预测 p_{tsx} 结果

为尽可能覆盖 $Y(s)$ 的变化过程, 当 $p = 3$ 时, 根据式 (12) 可得 $0.961 > 0.95$, 即 p 值满足不等式判断条件, 此时以标准正态变量 $Z = [Z_1, Z_2, Z_3]$ 作为 $Y(s)$ 的特征函数对

$Y(s)$ 进行重构。算法在每个节点建立 GP 模型,然后以似然估计获取有用新样本,以计算模型超参数和迭代更新模型,预测误差设置为 0.98。图 4 所示为节点 s_{11} 位置的 GP 模型在迭代更新时 $\eta(s_{11})$ 的变化规律。由图中可以看出,在迭代次数为 10 后,连接出现 $\eta(s_{11}) > 0.98$,此时算法迭代结束。实验过程的中间参数数量如表 1 所示,表中 P_i^T 为模型常量,由实际加工条件确定。

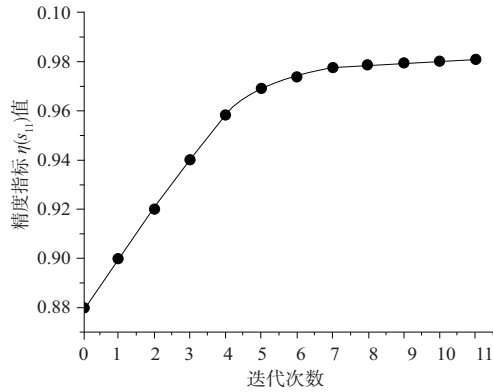
图4 节点 s_{11} 模型精度指标变化

表1 实验过程模型中间参数

参数	值	参数	值
x/mm	15.892 613	C/rad	0.194 691
y/mm	32.318 521	$P_1^T = (x_{21}, y_{21}, z_{21})$	$(-100, 150, 200)$
z/mm	-28.910 961	$P_2^T = (0, 0, z_{32})$	$(0, 0, -168.969)$
B/rad	0.173 108	$P_3^T = (x_{41}, y_{41}, z_{41})$	$(5.728, 4.375, 27.013)$

3.2 模型性能比较实验

文中模型通过蒙特卡洛法进行 N 次抽样后运用指示函数计算切触线精度可靠度值 $R(0, S)$ 。表 2 所示为文中采用方法和传统蒙特卡洛法求得的侧铣加工可靠度值,表中节点区间为直纹面某母线的离散节点区间, N_c 为两种模型调用状态函数的次数。从表中结果可以看出,文中模型在 3 种节点范围都取得较高的可靠度,同时,与传统方法相比,其状态函数调用次数减少了一个数量级,从而明显提高了模型的计算效率。

表2 加工精度可靠度对比

比较模型	区间	可靠度	N_c
文中模型	$[0, 0.2]$	0.988 7	0.15×10^6
	$[0, 0.6]$	0.968 2	0.31×10^6
	$[0, 1.0]$	0.949 5	0.51×10^6
传统蒙特卡洛法	$[0, 0.2]$	0.990 2	4×10^6
	$[0, 0.6]$	0.971 6	17×10^6
	$[0, 1.0]$	0.957 1	33×10^6

图 5 为参数为 1 的直母线参数在不同的节点范围下两模型的失效概率变化情况。从图中可以看出,失效概率值

随着节点范围的增大,开始时逐渐增大,后逐渐趋于平缓,其变化规律与传统蒙特卡洛方法变化规律一致,说明文中直纹面侧铣模型实现了对节点加工可靠度的有效预测。

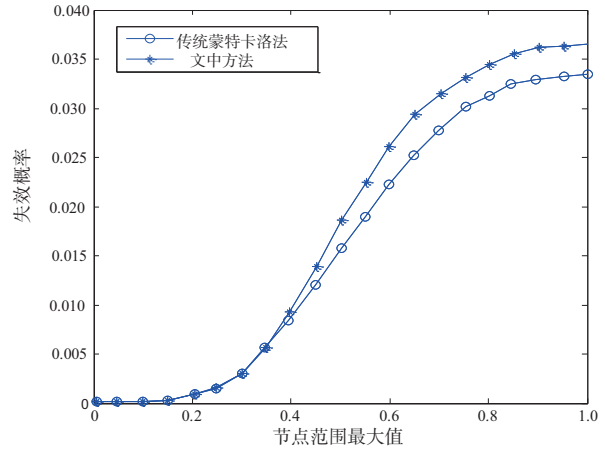


图5 位置节点的失效概率值

4 结语

针对不确定因素导致直纹面侧铣精度预测困难及计算效率低的问题,提出了基于刀具切触点 GP 模型的精度分析方法。首先以高斯随机过程描述引入驱动误差和参数不确定性的刀具切触点坐标误差,然后基于某型机床的误差传递模型,利用多体理论构建直纹面侧铣加工的精度分析模型;通过带有随机常数 Z_i 的确定函数的线性组合方式,简化模型的输入变量,并根据重要性指标和精度指标选择有用样本和更新模型;最后基于蒙特卡洛法获得加工精度可靠度。实验结果表明,所提方法准确预测了加工精度变化趋势,具有较高的计算效率和预测精度,为直纹面侧铣精度预测提供了有效的方法。

参考文献:

- [1] HAYAJNEH A M, ZAIDI S A R, MCLERNON D C, et al. Performance analysis of UAV enabled disaster recovery networks: A stochastic geometric framework based on cluster processes[J]. IEEE Access, 2018, 99(6):26215-26230.
- [2] 邹启晓, 董雷, 曹利新. 非开展直纹面侧铣加工的最小二乘刀位规划方法[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(3):748-753.
- [3] 刘佳佳, 姜兴刚, 高泽, 等. 高速旋转超声椭圆振动侧铣削振幅对钛合金表面完整性影响的研究[J]. 机械工程学报, 2018, 55(11):215-223.
- [4] WANG Zequn, CHEN Wei. Confidence-based adaptive extreme response surface for time-variant reliability analysis under random excitation[J]. Structural Safety, 2017, 64:76-86.
- [5] 蔺小军, 樊宁静, 郭研, 等. 非开展直纹面侧铣刀位轨迹优化算法[J]. 机械工程学报, 2014, 50(9):136-141.
- [6] YU Z, CHEN Z T, YUN Z, et al. Tool positioning method for achieving double-point contact in flank milling of a concave surface with a barrel cutter[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 93(5/6/7/8):1791-1807.

(下转第 53 页)

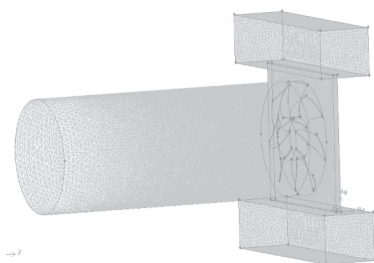


图5 网格模型示意图

孔隙率为0.78^[9]。

装置中的空气运动可认为是不可压缩定常流动,结合物理学三大定律即质量守恒定律、能量守恒定律及牛顿第二定律,根据流体力学计算分析需要,应用其相应的连续性方程、能量方程和动量方程^[10-11]。

应用 FLUENT 软件,分别对冷却扇旋转速度为1 600 r/min、1 900 r/min 和 2 200 r/min 的模型进行仿真。提取吸尘腔空气输入面的流量数据,如表1所示。

表1 不同冷却扇转速下空气输入面流量数据

参数	冷却扇转速/(r/min)		
	1 600	1 900	2 200
流量/(kg/s)	0.27	0.32	0.35

根据仿真数据可知,汽车冷却风扇产生的负压力,经散热器清洁装置转化,作用至吸尘腔空气输入面时仍能产生足够速度与流量的气流。这反映出散热器清洁装置能够满足基本的工作要求,符合设计预期目标。

5 结语

根据散热器使用需求,针对汽车动力舱实际条件,初步设计了一种汽车散热器清洁装置,并对其工作效果进行了仿真分析。

该汽车散热器清洁装置的运用,能够使得散热器的清洁便利,且避免了散热器拆除的繁琐,节省了清灰工作所需的时间与成本;避免了传统清洁方式易造成的散热器翅片折弯等问题;为增强汽车散热器作用效果,提高冷却系统工作效率提供了有效保障。

参考文献:

- [1] 张学镭,葛永建,孙苗青. 直接空冷凝汽器管外积灰特性研究[J]. 节能,2015,34(5):40-43.
- [2] 葛永建. 直接空冷凝汽器翅片管外积灰特性的数值模拟[D]. 保定:华北电力大学,2016.
- [3] 王飞龙,何雅玲,汤松臻,等. 典型烟气余热换热器气侧积灰特性[J]. 科学通报,2017,62(12):1292-1301.
- [4] 徐陈凯,张润卿,郭佳,等. 高压静电吸尘窗的设计与应用[J]. 家电科技,2007(6):42-43.
- [5] 林枫,林龙,胡启迪,等. 环栅式动力除尘器的两相流数值模拟[J]. 热能动力工程,2004(2):134-136,190-212.
- [6] 冯胜山,许顺红,刘庆丰,等. 高温工业废气过滤除尘技术研究进展[J]. 中国铸造装备与技术,2009(1):1-7.
- [7] 高俊旭. 吸扫车吸嘴卷吸尘粒流动数值模拟及模糊灰色关联分析[D]. 长沙:湖南大学,2016.
- [8] HUSSEIN, ADNAN M., H. K. DAWOOD, et al. Numerical study on turbulent forced convective heat transfer using nanofluids TiO₂ in an automotive cooling system[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2017, 9:72-78.
- [9] 刘佳鑫. 工程机械散热模块传热性能研究[D]. 长春:吉林大学,2013.
- [10] El Zahaby, ALY M., A. E. Kabeel, et al. CFD analysis of flow fields for shrouded wind turbine's diffuser model with different flange angles[J]. Alexandria Engineering Journal, 2017, 56(1):171-179.
- [11] KARIMI, ALI, MASOUD Afrand. Numerical study on thermal performance of an air-cooled heat exchanger: effects of hybrid nanofluid[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 164:615-628.

收稿日期:2019-04-22

(上接第43页)

- [7] YUAN X, CAI B, MA Y, et al. Reliability evaluation methodology of complex systems based on dynamic object-oriented Bayesian networks[J]. IEEE Access, 2018, 99(6):11289-11300.
- [8] BURKERT A, BATE M R, BODENHEIMER P. Protostellar fragmentation in a power-law density distribution[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2018, 289(3):497-504.
- [9] 张栋梁,莫蓉,常智勇,等. 考虑主轴运动误差与刀具安装误差的铣削刀具轴线运动建模[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(11):2497-2507.
- [10] HAWCHAR L, SOUEIDY C P E, SCHOEFS F. Principal com-

ponent analysis and polynomial chaos expansion for time-variant reliability problems[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2017, 167:406-416.

- [11] WANG L, WANG X, WU D, et al. Structural optimization oriented time-dependent reliability methodology under static and dynamic uncertainties[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2018, 57(4):1533-1551.
- [12] 李林,吴玲. 非可展直纹面叶片侧铣加工变形误差补偿[J]. 煤矿机械, 2018, 39(2):61-63.

收稿日期:2019-8-12