



中国机械工程
China Mechanical Engineering(中国机械工程)
ISSN 1004-132X,CN 42-1294/TH

《中国机械工程》网络首发论文

题目: 基于改进 PSO 算法的变截面涡旋盘瞬时铣削力模型参数求解
作者: 刘涛, 张丽芳
收稿日期: 2019-10-08
网络首发日期: 2020-01-16
引用格式: 刘涛, 张丽芳. 基于改进 PSO 算法的变截面涡旋盘瞬时铣削力模型参数求解 [J/OL]. 中国机械工程.
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1294.TH.20200115.1540.002.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于改进 PSO 算法的变截面涡旋盘瞬时铣削力模型参数求解

刘 涛 张丽芳

兰州理工大学机电工程学院，兰州，730050

摘要：针对变截面涡旋盘瞬时铣削力预测存在的多元非线性难题，从涡旋盘实际铣削过程出发，建立考虑刀具跳动的瞬时铣削力数学模型，提出一种改进粒子群（PSO）算法对铣削力模型参数进行求解，以提高瞬时铣削力预测模型精度。通过四组不同铣削参数下的瞬时铣削力实验对该方法进行验证，结果表明：该方法求解得到的变截面涡旋盘瞬时铣削力与实验测得的瞬时铣削力在形状和峰值处有较高的吻合度，四组实验的峰值误差在 15% 以内；采用自适应惯性权重和随机扰动因子的改进 PSO 算法能够有效地提高变截面涡旋盘瞬时铣削力系数辨识的收敛速度和收敛效果，提高算法整体搜索能力。该方法只需较少的实验次数就能辨识出较高精度的模型参数，较平均铣削力求解方法减少了实验成本，对涡旋盘的加工具有重要参考价值。

关键词：变截面涡旋盘；瞬时铣削力；PSO 算法；模型参数

中图分类号：TG54

DOI：

Parameters Solution of Instantaneous Milling Force Model of Variable Cross-Section Scroll Plate Based on Improved PSO Algorithm

LIU Tao ZHANG Lifang

School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050

Abstract: In order to solve the multivariate nonlinear problem in the prediction of instantaneous milling force in variable cross-section scroll plate processing, a mathematical model for instantaneous milling force considering the tool runout was established based on the actual milling process, and a modified Particle Swarm Optimization(PSO) method was proposed to solve the mathematical model to improve the accuracy of the instantaneous milling force prediction model. The method was verified by the instantaneous milling force experiment results under four groups of milling parameters. Results show that the instantaneous milling force curves obtained by this method have a high degree of agreement with the experimentally measured ones in terms of the shape and peak value, and the peak error of the four groups of tests is within 15%. The proposed PSO method could effectively improve the convergence rate of instantaneous milling force identification of variable cross-section scroll plate processing. It can identify model parameters with higher precision and fewer trials, which reduces the test cost compared with the average milling force solving method.

Key words: Variable cross-section scroll plate; Instantaneous milling force; PSO Algorithm; Model parameters.

0 前言

涡旋盘是变截面涡旋压缩机的关键零部件，其加工精度直接影响着涡旋压缩机的工作特性^[1]。

瞬时铣削力作为铣削加工过程的重要物理量，能够为铣削参数优化、刀具磨损和破损监测、铣削稳定性分析及加工表面误差预报提供依据，因此

开展瞬时铣削力预测研究对提高变截面涡旋盘加工精度具有重要意义。

目前, 瞬时铣削力预测主要有经验回归模型和机械模型两种方法。经验回归模型基于正交实验和响应曲面法, 通过铣削实验数据回归完成瞬时铣削力的预测^[2-5]。该模型预测精度依赖于实验设计人员的经验, 对实验方案设计和实验样本数量有较高的要求。而机械模型则将铣削力分解为刀刃微元剪切力和犁入力两种切削力的线性组合^[6-14], 基于多组铣削实验数据的平均铣削力系数对各参数进行求解得到瞬时铣削力^[13, 14]。该模型具备良好的力学基础, 但模型参数求解通常面临多元非线性问题, 参数求解困难; 同时由于铣削过程中不可避免地存在刀具中心与主轴旋转中心不重合的现象, 即刀具偏心。因此, 需要考虑刀具偏心跳动对未变形切屑厚度和切削深度的影响, 进一步提高了模型参数求解的难度。

为了克服以上难题, 首先通过理论推导建立变截面涡旋盘铣削过程的瞬时铣削力数学模型, 定量描述各参数对瞬时铣削力的影响; 其次, 在瞬时铣削力数学模型基础上提出一种改进粒子群 (particle swarm optimization, PSO) 算法, 结合铣削实验数据对多元非线性参数进行辨识, 完成变截面涡旋盘瞬时铣削力预测。

1 变截面涡旋盘瞬时铣削力理论模型

1.1 瞬时铣削力模型

变截面涡旋盘圆周顺铣内壁面瞬时铣削状态如图 1 所示, 刀具铣削变截面涡旋盘侧壁面时将其沿轴向方向视为刚体, 并将螺旋铣刀切削刃沿轴向划分为相等厚度 dz 的若干微小切削刃, 将瞬时铣削力表示为瞬时铣削力系数、未变形切屑厚度和切削深度的乘积^[13, 14]。由于涡旋盘轴向铣削力远小于径向力和切向力, 因此只考虑切向和径向力的影响。作用在第 i 个刀齿第 j 个微元上的切向和径向瞬时铣削力可表示为 $dF_{ti,j}(\varphi)$ 和 $dF_{ri,j}(\varphi)$:

$$\begin{cases} dF_{ti,j}(\varphi) = K_t(h_{i,j}(\varphi))h_{i,j}(\varphi)dz \\ dF_{ri,j}(\varphi) = K_r(h_{i,j}(\varphi))h_{i,j}(\varphi)dz \end{cases} \quad (1)$$

式中, $i=1, 2, \dots, N$; N 为刀齿数; $j=1, 2, \dots, M$; M 为每齿微元数; $K_t(h_{i,j}(\varphi))$ 和 $K_r(h_{i,j}(\varphi))$ 为切向和径向瞬时切削力系数; $h_{i,j}(\varphi)$ 为瞬时未变形切屑厚度; φ 为刀具旋转角。

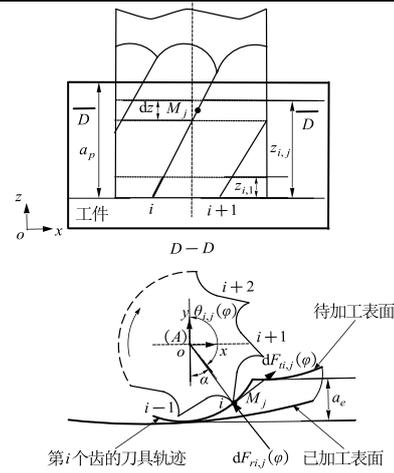


图 1 变截面涡旋盘内壁面顺铣加工

Fig.1 Milling inner wall of variable cross-section scroll plate

将切向和径向瞬时铣削力转换到 x 和 y 坐标轴上, 则

$$\begin{bmatrix} dF_{xi,j}(\varphi) \\ dF_{yi,j}(\varphi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos\theta_{i,j}(\varphi) & -\sin\theta_{i,j}(\varphi) \\ \sin\theta_{i,j}(\varphi) & -\cos\theta_{i,j}(\varphi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dF_{ti,j}(\varphi) \\ dF_{ri,j}(\varphi) \end{bmatrix} \quad (2)$$

将式(1)代入式(2), 并对式(2)在所有刀齿和所有轴向微元上进行求解, 得到瞬时铣削力为

$$F_x(\varphi) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M [-K_t(h_{i,j}(\varphi))\cos\theta_{i,j}(\varphi) - K_r(h_{i,j}(\varphi))\sin\theta_{i,j}(\varphi)]h_{i,j}(\varphi)dz \quad (3)$$

$$F_y(\varphi) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M [K_t(h_{i,j}(\varphi))\sin\theta_{i,j}(\varphi) - K_r(h_{i,j}(\varphi))\cos\theta_{i,j}(\varphi)]h_{i,j}(\varphi)dz \quad (4)$$

$\theta_{i,j}(\varphi)$ 为微元 (i,j) 瞬时角位置:

$$\theta_{i,j}(\varphi) = -\varphi + \frac{2\pi(i-1)}{N} + \frac{(j-0.5)\tan\beta dz}{R} \quad (5)$$

式中, R 为名义刀具半径; β 为刀具螺旋角。

1.2 瞬时未变形切屑厚度计算

刀具偏心跳动在一个铣削周期内不会引起总的切屑体积变化, 但对刀具的瞬时未变形切屑厚度具有较大的影响, 计算切屑厚度时应考虑其影响。变截面涡旋盘内壁面侧铣加工过程只考虑刀具径向跳动, 示意图如图 2 所示, O 为刀具中心; O' 为旋转几何中心; ρ 为刀具的径向跳动, 表示刀具轴与旋转轴之间的偏移距离; λ 为偏心方向角, 即偏心方向与刀齿 1 (铣削力峰值最大的刀齿) 在刀尖点处的夹角。

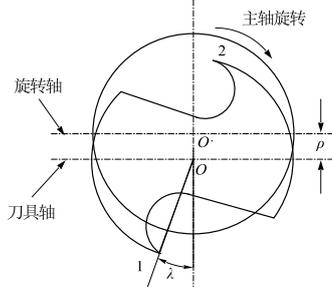


图 2 侧铣刀具径向跳动

Fig.2 Radial runout of side milling cutter

图 3 为轴向第 j 个微元处的切屑示意图，图中 A 和 B 分别为第 i 个和第 $i-1$ 个刀齿在瞬时角位置 $\theta_{i,j}(\varphi)$ 处的刀具中心； J 为第 i 个齿刀具实际铣削半径 $R_{i,j}$ 与其刀具轨迹的交点； H 为第 $i-1$ 个齿刀具实际铣削半径 $R_{i-1,j}$ 与其刀具轨迹的交点； a_e 为侧吃刀量。在第 i 个刀齿第 j 个微元处，刀具的实际铣削半径为：

$$R_{i,j} = R + \rho \cos\left(\lambda - \frac{z_{i,j} \tan \beta}{R} - \frac{2\pi(i-1)}{N}\right) \quad (6)$$

式中， $z_{i,j}$ 为第 i 个刀齿第 j 个微元到第 i 个刀齿第 1 个微元处的距离。

变截面涡旋盘铣削过程中，选取最大实际每齿进给量小于 1mm，因此将相邻两刀齿刀具中心的曲线轨迹 AB 近似为直线，如图 3 所示。

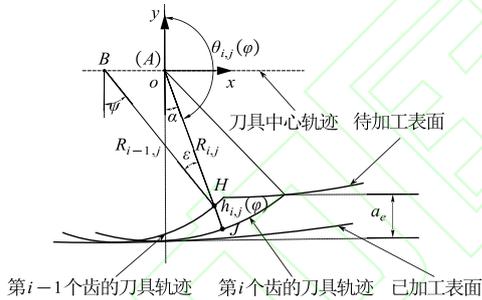


图 3 瞬时未变形切屑厚度

Fig.3 Instant undeformed chip thickness

令 $L_{AB} = f_z$ ， f_z 为每齿进给量； $L_{AJ} = R_{i,j}$ ， $L_{BH} = R_{i-1,j}$ ，则有

$$h_{i,j}(\varphi) = R_{i,j} - L_{AH} \quad (7)$$

在 $\triangle ABH$ 中，由正弦定理得：

$$L_{AH} = R_{i-1,j} \left(\cos \varepsilon - \frac{\sin \alpha \sin \varepsilon}{\cos \alpha} \right) \quad (8)$$

$$\sin \varepsilon = \frac{f_z \cos \alpha}{R_{i-1,j}} \quad (9)$$

由 $\sin^2 \varepsilon + \cos^2 \varepsilon = 1$ 得：

$$\cos \varepsilon = \frac{\sqrt{R_{i-1,j}^2 - (f_z \cos \alpha)^2}}{R_{i-1,j}} \quad (10)$$

将式(8)~(10)代入式(7)并化简得：

$$h_{i,j}(\varphi) = R_{i,j} - \sqrt{R_{i-1,j}^2 - (f_z \cos \alpha)^2} + f_z \sin \alpha \quad (11)$$

假定 $R_{i-1,j} \gg f_z$ ，则

$$h_{i,j}(\varphi) = R_{i,j} - R_{i-1,j} + f_z \sin \alpha \quad (12)$$

将 $\alpha = \pi - \theta_{i,j}(\varphi)$ 代入式(12)得瞬时未变形切屑厚度为：

$$h_{i,j}(\varphi) = R_{i,j} - R_{i-1,j} + f_z \sin \theta_{i,j}(\varphi) \quad (13)$$

如果 $i=1$ ，则 $R_{i-1,j} = R_{N,j}$ ，此时切屑方程表示当前齿正在移除前一个齿留下的表面。

2 基于改进 PSO 算法的瞬时铣削力模型参数求解

PSO 算法是一种群体智能优化算法，具有良好的局部搜索和全局搜索功能^[15,16]。对于变截面涡旋盘瞬时铣削力模型参数辨识这样的多元非线性问题，PSO 算法具有收敛快、通用性强等优点，但标准 PSO 算法在优化问题求解过程时往往会陷入局部最优解的不利情况，降低参数辨识精度。因此，提出一种改进粒子群算法对变截面涡旋盘铣削过程中瞬时铣削力模型参数进行求解。

2.1 标准 PSO 算法

标准 PSO 算法首先在目标空间中随机初始化一群粒子，每个粒子都代表优化问题的一个潜在最优解，用位置、速度和适应度三项指标表示该粒子的特征。适应度值由适应度函数计算得到，其值的好坏表示当前粒子解决该优化问题的优劣程度。假设在一个 D 维的搜索空间中，有 n 个粒子组成的种群 $\mathbf{X} = (\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_n)$ ，其中第 i 个粒子表示为一个 D 维的向量 $\mathbf{X}_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}]^T$ ，代表第 i 个粒子在 D 维的搜索空间中的位置，亦代表优化问题的一个潜在解。根据适应度函数即可计算出每个粒子位置 \mathbf{X}_i 对应的适应度值。第 i 个粒子的速度为 $\mathbf{V}_i = [V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{iD}]^T$ ，其个体极值为 $\mathbf{P}_i = [P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{iD}]^T$ ，种群的全局极值为 $\mathbf{P}_g = [P_{g1}, P_{g2}, \dots, P_{gD}]^T$ 。在每一次迭代过程中，粒子通过个体极值和全局极值更新自身的速度和位置，更新公式为：

$$V_{id}^{k+1} = \omega V_{id}^k + c_1 r_1 (P_{id}^k - X_{id}^k) + c_2 r_2 (P_{gd}^k - X_{id}^k) \quad (14)$$

$$X_{id}^{k+1} = X_{id}^k + V_{id}^{k+1} \quad (15)$$

式中， ω 为惯性权重； $d=1, 2, \dots, D$ ； $i=1, 2, \dots, n$ ； n 为种群规模； k 为当前迭代次数； V_{id} 为粒子的速度； c_1 和 c_2 为非负的常数，称为加速度因子； r_1 和 r_2 为分布于 $[0, 1]$ 之间的随机数。图 4 为标准粒子群算法示意图，其中 $\mathbf{a} = \omega \mathbf{V}_i^k$ ， $\mathbf{b} = c_1 r_1 (\mathbf{P}_i - \mathbf{X}_i^k)$ ， $\mathbf{c} = c_2 r_2 (\mathbf{P}_g - \mathbf{X}_i^k)$ 。

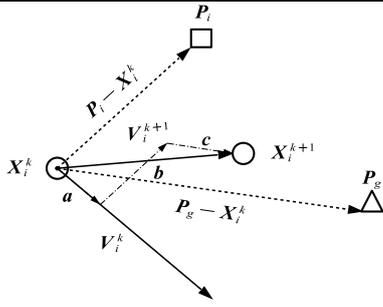


图4 标准 PSO 算法示意图

Fig.4 Schematic diagram of standard PSO algorithm

2.2 改进 PSO 算法的变截面涡旋盘瞬时铣削力系数求解

在变截面涡旋盘铣削加工过程中，每个切削微元随铣削刀具的旋转处于不同的位置角，则微元的瞬时未变形切屑厚度不同，从而使得每个微元对应于不同的瞬时切削力系数。将瞬时铣削力系数表示成瞬时未变形切屑厚度的函数^[17]，其函数可表示为：

$$\begin{cases} K_r(h_{i,j}(\varphi)) = T_0 h_{i,j}(\varphi)^{T_1} \\ K_r(h_{i,j}(\varphi)) = R_0 h_{i,j}(\varphi)^{R_1} \end{cases} \quad (16)$$

式中， T_0 、 T_1 、 R_0 、 R_1 为常数，主要由刀具、工件以及主轴转速等因素决定，由于模型是有关瞬时切屑厚度的函数，因此这些常数几乎不受每齿进给量、轴向切深和径向切深的影响。

将式(16)代入式(3)、(4)得瞬时铣削力模型中包含了 T_0 、 T_1 、 R_0 、 R_1 、 ρ 、 λ 六个参数，则搜索空间的维数为6，第 i 个粒子表示为一个6维的向量 $X_i = [T_{i0}, T_{i1}, R_{i0}, R_{i1}, \rho_i, \lambda_i]^T$ ($i=1, 2, \dots, n$)，粒子在飞行的过程中，由适应度函数来判断是否已接近最优位置。

变截面涡旋盘瞬时铣削力建模中，以刀具旋转角 φ 为自变量，而实测的瞬时铣削力随时间变化，此时需将实测的瞬时铣削力随时间变化的关系转化为随旋转角变化的关系。选取刀具一个旋转周期为研究对象，在该旋转周期内，同时从 x 和 y 方向上选取 m 个可以代表波形变化规律的关键点(实测的瞬时铣削力 $\hat{F}_x(\varphi_i)$ 和 $\hat{F}_y(\varphi_i)$)作为样本点，定义适应度函数为：

$$Q(X) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \{ [F_x(\varphi_i) - \hat{F}_x(\varphi_i)] + [F_y(\varphi_i) - \hat{F}_y(\varphi_i)] \} \quad (17)$$

式中， $Q(X)$ 为粒子的适应度值，最优解为使适应度值 $Q(X)$ 最小的粒子； $F_x(\varphi_i)$ 和 $F_y(\varphi_i)$ 为瞬时铣削力模型所求值，由式(3)、(4)求解； $\hat{F}_x(\varphi_i)$ 、 $\hat{F}_y(\varphi_i)$ 为瞬时铣削力实测值。

对于上述变截面涡旋盘瞬时铣削力系数辨识，标准 PSO 算法通常会因为多元非线性问题陷入局部最优的不利情况^[18]。一方面，粒子群存在趋

同性，当个体极值 P_i 处于优势时，粒子只能在较小的范围内搜索从而导致粒子群聚集，可通过在速度 V_i 更新时引入随机扰动因子对个体极值 P_i 和群体极值 P_g 进行调整，扩大粒子群搜索范围降低粒子群聚集效应。另一方面惯性权重 w 的选取决定了 PSO 算法全局和局部寻优能力。当 w 较大时算法全局搜索能力较强，当 w 较小时算法局部搜索能力较强，然而变截面涡旋盘瞬时铣削力系数辨识需要在迭代寻优的前期保持较强的全局搜索能力，在迭代后期保持较强的局部搜索能力，这就需要依据迭代寻优的收敛程度和适应度值调节惯性权重。因此，在标准 PSO 算法的基础之上引入自适应惯性权重 w 、随机扰动因子 r_3 和 r_4 ，对粒子的速度 V_i 进行更新：

$$V_{id}^{k+1} = wV_{id}^k + c_1r_1(r_3P_{id}^k - X_{id}^k) + c_2r_2(r_4P_{gd}^k - X_{id}^k) \quad (18)$$

式中， r_3 和 r_4 是服从均值为1，标准差为1/3的正态分布随机数。根据 3σ 准则个体极值 P_i 和群体极值 P_g 将以99.73%概率在 $[0, 2]$ 区间内随机扰动，使粒子在更大的空间范围内进行搜索，提高算法跳出局部最优解、找到全局最优解的概率。自适应惯性权重 w 依据当前粒子群收敛程度和适应度值进行调整，其计算流程如图5所示：

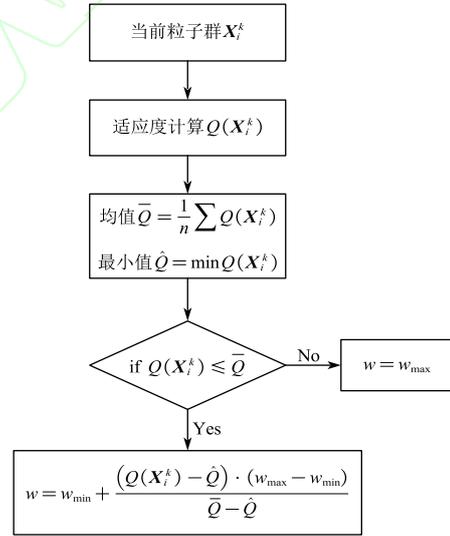


图5 自适应惯性权重 w 计算流程

Fig.5 Flowchart of adaptive inertia weight w calculation

综上所述，基于改进 PSO 算法求解变截面涡旋盘瞬时铣削力系数的算法步骤如下：

- (1) 从瞬时铣削力实测曲线 x 和 y 方向上选取 m 个可以代表波形变化规律的关键点作为辨识样本，即 $[\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m]$ 、 $[\hat{F}_x(\varphi_1), \hat{F}_x(\varphi_2), \dots, \hat{F}_x(\varphi_m)]$ 和 $[\hat{F}_y(\varphi_1), \hat{F}_y(\varphi_2), \dots, \hat{F}_y(\varphi_m)]$ ；

(2) 设定搜索空间维度 D ，最大迭代次数 k_{total} ，粒子群规模 n ，加速度因子 c_1 和 c_2 ，最大和最小惯性权重 ω_{max} 、 ω_{min} ，每齿进给量 f_z ，侧吃刀量 a_e ，吃刀深度 a_p ，随机初始化种群粒子的位置 X_i^0 、速度 V_i^0 ；

(3) 将每个粒子位置表示的模型参数代入式 (3)、(4) 计算变截面涡旋盘瞬时铣削力预测值，并依据式 (17) 计算每个粒子的适应度值 $Q(X_i^k)$ ，通过最小适应值 Q_{min} 设置种群粒子个体最优位置 P_i 和全局最优粒子 P_g ；

(4) 根据式 (15) 和 (18) 更新粒子的位置 X_i 和速度 V_i ；

(5) 判断算法是否达到最大迭代次数，若是，输出最优粒子并绘制瞬时铣削力预测曲线，算法结束，否则转至步骤 (3)。

3 铣削实验与结果讨论

图 6 为变截面涡旋盘铣削实验装置，涡旋盘在 XK714 立式数控铣床上进行加工，工件固定在 Kistler9257B 三向压电式测力仪上，测力仪实时获取瞬时铣削力，并经过电荷放大器由数据采集系统完成实验数据的采集。刀具和工件的参数如下：

- (1) 刀具参数：整体硬质合金，YG6X， $\phi 10$ ，2 刃。
- (2) 工件规格：材料为 HT250；直径 130mm，高 54mm；退火方式为加热至 750℃，保温 100min。
- (3) 基本条件：精顺铣第二段基圆内圈型线，曲率由大到小，刀具转速为 2000r/min。



图 6 变截面涡旋盘铣削加工实验

Fig.6 Milling experiment of variable cross-section scroll plate

变截面涡旋盘铣削实验参数如表 1 所示，从实测瞬时铣削力曲线 x 和 y 方向上选取 30 个关键点作为辨识样本，取粒子群维度 $D = 6$ ，群体规模 $n = 50$ ，学习因子 $c_1 = c_2 = 2$ ，最大和最小惯性权重 $\omega_{max} = 0.8$ 、 $\omega_{min} = 0.2$ ，算法最大迭代次数

$k_{total} = 100$ ，随机初始粒子位置和速度，基于改进粒子群算法对 4 组不同实验参数下的铣削力模型进行参数辨识。

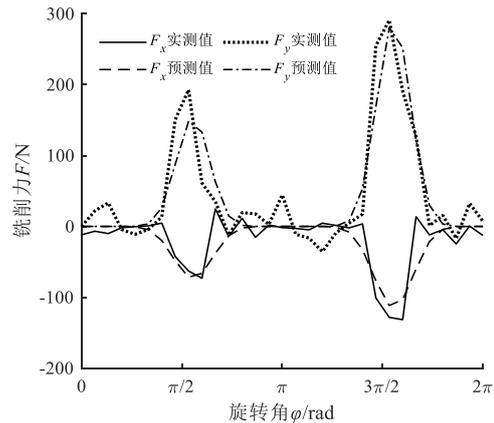
表 1 变截面涡旋盘铣削实验参数

Tab.1 Parameters of variable cross-section scroll plate

milling experiment			
单 位: mm			
序号	每齿进给量 f_z	侧吃刀量 a_e	吃刀深度 a_p
1	0.05	1.00	3.00
2	0.15	0.40	1.50
3	0.20	0.60	2.00
4	0.25	0.80	2.50

应用改进 PSO 算法，对不同实验条件下 x 和 y 方向铣削力的预测结果如图 7 所示。可以看出实测曲线与预测曲线形状和峰值具有较高的吻合程度。实测曲线与预测曲线的峰值误差如表 2 所示，其中 $F_{x,max}$ 、 $F_{y,max}$ 为实测曲线峰值， $\hat{F}_{x,max}$ 、 $\hat{F}_{y,max}$ 为预测曲线峰值。将三维变截面涡旋盘铣削加工过程经过一定的假设和简化转化为二维切削进行分析，势必对分析结果产生一定的影响。但由表 2 可以看出，基于改进 PSO 算法所得预测曲线与实测曲线在峰值处误差控制在 15% 以内，说明该方法能够为考虑刀具偏心跳动的瞬时铣削力预测提供依据。

由于涡旋盘铣削刀具为 2 刃，所以在一个周期内铣削力出现了两个峰值；由于刀具跳动的影响，后一刀齿与前一刀齿移除的工件材料大小不同，使得两个铣削力峰值存在差异；由于颤振与表面粗糙度情况的影响，实测瞬时铣削力仍存在一定的跳动。



(a) 实验 1

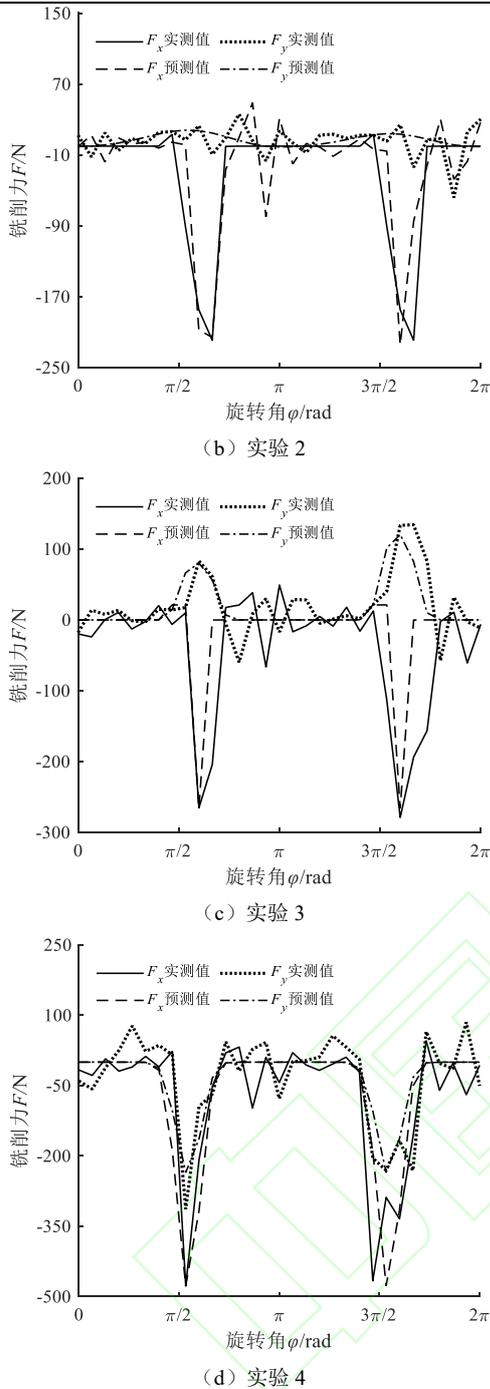


图7 实测铣削力与预测铣削力对比

Fig.7 Comparison of measured and predicted milling forces

表2 实测曲线与预测曲线的峰值误差

Tab.2 The peak value error of measured and predicted curve

峰值误差	$\epsilon_{x,max} = \frac{ F_{x,max} - \hat{F}_{x,max} }{\hat{F}_{x,max}} \times 100\%$	$\epsilon_{y,max} = \frac{ F_{y,max} - \hat{F}_{y,max} }{\hat{F}_{y,max}} \times 100\%$
实验1	9.84%	7.58%
实验2	2.18%	13.04%
实验3	7.64%	8.96%
实验4	2.31%	9.27%

铣削力模型参数辨识结果如表3所示，四组实验条件下铣削力模型参数辨识结果相近，说明算法稳定性较好。误差是由颤振和表面粗糙度等

因素引起的，结合图7可以看出，铣削力模型参数相近的情况下随着每齿进给量 f_z 的增大，铣削力峰值不断增大。

表3 铣削力模型参数辨识结果

Tab.3 Parameters identification results of milling force

序号	model					
	$T_0/(N/mm^2)$	T_1	$R_0/(N/mm^2)$	R_1	$\rho/\mu m$	λ/rad
实验1	81.62	1.26	198.34	0.43	1.40	0.76
实验2	85.71	0.92	228.44	0.30	1.74	1.04
实验3	93.12	1.44	211.66	0.39	1.50	0.88
实验4	72.73	1.26	209.30	0.48	1.62	0.77
均值	83.30	1.22	211.94	0.40	1.57	0.86

改进 PSO 算法收敛性能如图8所示，该算法在最大迭代次数前均达到收敛，说明采用自适应惯性权重和随机扰动因子的方法能够有效地提高变截面涡旋盘瞬时铣削力系数辨识的收敛速度和收敛效果，提高了算法整体搜索能力，更容易跳出局部最优解。

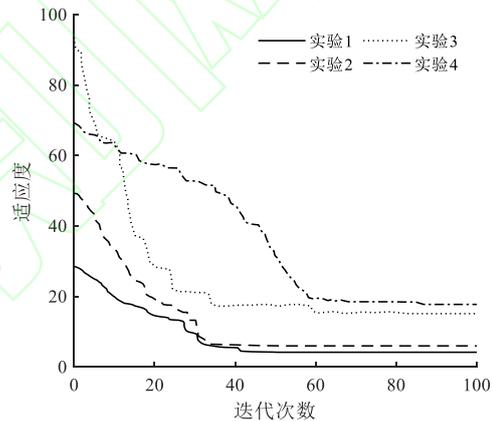


图8 改进 PSO 算法收敛性能

Fig.8 Convergence performance of improved PSO algorithm

4 结论

在考虑刀具跳动影响的前提下，建立了变截面涡旋盘瞬时铣削力数学模型，基于改进 PSO 算法对模型参数进行了求解。主要研究结论如下：

(1) 应用所提出的改进 PSO 算法，对不同实验条件下铣削力的预测结果表明实测曲线与预测曲线形状和峰值具有较高的吻合程度；说明该方法能够为考虑刀具偏心跳动情况下的瞬时铣削力预测提供依据。

(2) 采用自适应惯性权重和随机扰动因子的改进 PSO 算法能够有效地提高变截面涡旋盘瞬时铣削力系数辨识的收敛速度和收敛效果，提高了算法整体搜索能力。

(3) 基于以上方法可以通过较少的实验次数获得较高精度的参数辨识结果，减少了实验成本，提高了涡旋盘瞬时铣削力模型精度，对涡旋盘的加工具有重要参考价值。

参考文献

- [1] 李连生. 涡旋压缩机[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998: 214-215.
LI Liansheng. Scroll Compressor[M]. Beijing: China Machine Press, 1998: 214-215.
- [2] 唐克岩. 基于正交试验 TA15 钛合金铣削性能研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2011, (9): 20-23.
TANG Keyan. Investigation of the Milling Performance about Titanium Alloy Based on Orthogonal Experiment[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2011, (9): 20-23.
- [3] KALIDASS S, MATHAVARAJ R T. Cutting Force Prediction in End Milling Process of AISI 304 Steel Using Solid Carbide Tools[J]. International Journal of Engineering, Transactions A: Basics, 2015, 28(7): 1104-1111.
- [4] 梁永收, 史耀耀, 任军学, 等. 基于响应曲面法的 GH4169 铣削力预测模型研究[J]. 机械科学与技术, 2010, 29(11): 1547-1552.
LIANG Yongshou, SHI Yaoyao, REN Junxue, et al. Prediction Model of GH4169 Milling Force by Response Surface Methodology[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2010, 29(11): 1547-1552.
- [5] 谢英星. 基于响应曲面法的模具钢高速铣削切削力模型研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015, (6): 24-27.
XIE Yingxing. Prediction Cutting Force Model of High-speed Milling Hardened Steel by Response Surface Methodology[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2015, (6): 24-27.
- [6] 吴石, 杨琳, 刘献礼, 等. 覆盖件模具曲面曲率特征对球头刀铣削力的影响[J]. 机械工程学报, 2017, 53(13): 188-198.
WU Shi, YANG Lin, LIU Xianli, et al. Influence of Curvature Characteristics of Sculptured Surface on Milling Force in Ball-end Milling of Panel Moulds[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(13): 188-198.
- [7] 刘献礼, 马晶, 岳彩旭, 等. 汽车模具凸曲面精加工极限切削深度预测[J]. 机械工程学报, 2015, 51(2): 117-126.
LIU Xianli, MA Jing, YUE Caixu, et al. Limit Cutting Depth Prediction for Automobile Dies Finishing Machining of Convex Surface[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(2): 117-126.
- [8] 魏兆成, 王敏杰, 蔡玉俊, 等. 球头铣刀三维曲面加工的铣削力预报[J]. 机械工程学报, 2013, 49(1): 178-184.
WEI Zhaocheng, WANG Minjie, CAI Yujun, et al. Milling Force Prediction for Ball-end Milling of 3D Curved Surfaces[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(1): 178-184.
- [9] WEI Zhaocheng, WANG Minjie, MA Riguang, et al. Modeling of Process Geometry in Peripheral Milling of Curved Surfaces[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(5): 799-806.
- [10] AHMADI K, ISMAIL F. Machining Chatter in Flank Milling[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2010, 50(1): 75-85.
- [11] ALTINTAS Y, SHAMOTO E, LEE P, et al. Analytical Prediction of Stability Lobes in Ball End Milling[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1999, 121(4): 586-592.
- [12] YANG Yun, ZHANG Weihong, WAN Min. Effect of Cutter Runout on Process Geometry and Forces in Peripheral Milling of Curved Surfaces with Variable Curvature[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2011, 51(5): 420-427.
- [13] WAN Min, ZHANG Weihong. Systematic Study on Cutting Force Modelling Methods for Peripheral Milling[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2009, 49(5): 424-432.
- [14] WAN Min, ZHANG Weihong, QIN Guohua, et al. Efficient Calibration of Instantaneous Cutting Force Coefficients and Runout Parameters for General End Mills[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, 47(11): 1767-1776.
- [15] 王小川. MATLAB 神经网络 43 个案例分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2013: 306-312.
WANG Xiaochuan. Analysis of 43 Cases of MATLAB Neural Network [M]. Beijing: Beihang University Press, 2013: 306-312.
- [16] 杨英杰. 粒子群算法及其应用研究[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2017: 9-30.
YANG Yingjie. Particle Swarm Optimization and ITS Application[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2017: 9-30.
- [17] Azeem A, Feng HY, Wang L. Simplified and Efficient Calibration of a Mechanistic Cutting Force Model for Ball-End Milling[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2004, 44(2): 291-298.
- [18] 王保升. 瞬时铣削力模型参数辨识及其实验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2011: 62-66.
WANG Baosheng. Parameters Identification of Instantaneous Milling Force Model and Its Experimental Investigation[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2011: 62-66.

作者简介: 刘 涛, 女, 1971 年生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机械设计制造及其自动化、测试技术。发表论文 80 余篇, 参编专著《涡旋式流体机械与涡旋压缩机》1 部。E-mail: liutao1971@lut.cn