

基于动力学不确定性的重型切削工艺参数优化*

黄 华¹, 张树有², 刘晓健², 何再兴²

(1. 兰州理工大学机电工程学院 兰州, 730050) (2. 浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室 杭州, 310027)

摘要 针对数控重型切削加工过程的切削稳定性具有不确定性的特点, 提出了在切削稳定性和机床工作能力的约束下, 获得最大材料去除率的工艺参数优化方法。根据重型切削加工的工艺特点建立三维动力学模型, 以机床的固有频率、阻尼比、刚度和切削力系数作为不确定因素, 结合排零定理和边理论对其进行不确定性分析, 获得稳健的切削稳定性叶瓣图, 结合切削深度、刀具直径和刀具齿数的关系, 为加工过程选择能获得最大切削深度的刀具。在此基础上, 建立工艺参数优化模型, 选择最佳的轴向切削深度、径向切削深度和主轴转速的组合, 最后以一台加工中心上某型号发动机缸体表面的粗加工过程为例进行了验证。

关键词 切削稳定性; 不确定性; 三维动力学; 排零定理; 材料去除率

中图分类号 TG502.12; TP391.72; TH113.1

引 言

在数控机床上常采用大切削用量的重型切削来尽快去除工件表面的加工余量, 为了保持切削稳定性, 一般通过调整切削用量使其小于发生颤振的临界切削深度, 但这对提高生产率带来了不利影响。因此, 为了进行稳定、高效的加工, 优化工艺参数具有重要的意义。

传统的工艺参数优化一般是以切削成本、效率、表面质量为目标, 采用智能算法对切削参数进行选择。然而仅考虑切削参数本身的优化难以满足高效、稳定的加工要求, 尤其随着数控机床等精密加工设备的广泛应用和对动力学研究的深入, 在工艺设计过程中考虑切削动力学的约束十分必要。文献[1]考虑了刀具偏心的影响, 指出对于变径向切削加工, 轴向切削深度应小于径向切削深度的20%才能保证稳定加工。文献[2]说明在工程上可通过改变时滞来间接改变铣削系统的阻尼, 从而改善稳定性。文献[3]开发了一种面向数控工艺参数优化的铣削过程动力学仿真系统, 文献[4]提出了一种断续切削方法调整进给速度和径向切削深度以控制颤振。文献[5]针对薄壁工件容易变形的特点, 提出了一种同时调整每齿进给量和切削深度并保持进给量最大

的情况下减小工件表面误差的方法。文献[6]针对目前在工艺优化中缺少一种高效简洁的优化算法的缺陷, 以切削稳定性为约束, 提出一种利用增强拉格朗日函数的方法以减小刀具振动和最大化材料去除率。文献[7]以一台立式滑枕加工中心为例, 针对铸铁材料的粗加工过程进行优化, 选择了最匹配的刀具和切削参数。

以上研究考虑了切削动力学的影响, 使工艺优化结果更接近实际要求。然而, 由于机床加工位姿、测试条件或者制造、装配的差异、服役性能的退化, 工件材料的不均匀, 导致机床切削动力学会有一定的不确定性^[8], 按照确定数值进行稳定性分析并以此为基础进行工艺优化会有一定的误差。因此, 本研究通过分析重型切削加工过程中切削稳定性的不确定性因素, 应用排零定理和边理论获得稳健的切削稳定性曲线, 在此基础上根据机床额定功率、扭矩等约束条件, 选择切削参数以获得最大切削生产率。

1 重型切削加工过程动力学建模及其不确定性分析

重型切削加工指应用大直径的面铣刀进行粗加工由于刀具螺旋角的存在, 其切削动力学比较复杂, 必须在三维空间进行分析。另外, 切削动力学的不

* 国家自然科学基金资助项目(51565030); 甘肃省高等学校科研资助项目(2015B-032); 国家科技重大专项课题资助项目(2015ZX04010-011)

收稿日期: 2014-11-12; 修回日期: 2015-04-13

确定性影响因素众多,笔者选择主要的影响参数进行组合得到切削动力学方程的特征多项式族,基于不确定性分析的稳健的切削稳定性叶瓣图,为加工过程选择刀具并构建优化模型建立基础。

1.1 重型切削加工的工艺特点

在重型切削中,切削参数的不合理常常导致再生型颤振。同时,重型加工阶段工作频率比较低,常处于机床固有频率段附近,因此切削时必须选择转速以避免切削频率禁区。对于铸铁、钢等较难加工材料,在低频切削时,其切削稳定性主要取决于机床结构的固有频率而与刀具的动力学性能关系较小^[9]。对于面铣刀来说,不同直径的铣刀有不同的齿数,齿数与稳定的切削深度和激励频率相关,刀具直径又决定了切削速度,故选择合理的刀具也是工艺优化的重要目标。

1.2 切削过程三维动力学建模

根据颤振理论^[10],铣削加工系统稳定的临界切削深度 a_{plim} 可表示为

$$a_{plim} = -\frac{2\pi\Delta_R}{zK_t}(1 + \lambda^2) \quad (1)$$

对应的主轴转速为

$$N = 60/(zT) = \frac{60\omega_c}{z\{\pi - 2\arctan(\Delta_I/\Delta_R) + 2\pi k\}} \quad (2)$$

($k = 0, 1, \dots, n$)

其中: K_t 为切向切削力系数; z 为刀具齿数; Δ 为切削力的特征方程的特征值; Δ_R, Δ_I 分别表示 Δ 的特征解的实部和虚部;用 α 表示切削系统的方向系数矩阵, $G(i\omega_c)$ 表示传递函数矩阵, ω_c 为颤振频率。令 $\Phi = \alpha G(i\omega_c)$, 则面铣刀的三维铣削力特征方程^[11]可表示为

$$a_0\Lambda^3 + a_1\Lambda^2 + a_2\Lambda + 1 = 0 \quad (3)$$

其中:系数 a_0, a_1, a_2 是与切削系统的方向系数、传递函数相关的矩阵。

工件-刀具接触区各方向的直接传递函数为

$$\begin{cases} G_{xx} = \sum_{i=1}^l \frac{\omega_{n,x,i}^2/k_{x,i}}{s^2 + 2\xi_{x,i}\omega_{n,x,i}s + \omega_{n,x,i}^2} \\ G_{yy} = \sum_{i=1}^l \frac{\omega_{n,y,i}^2/k_{y,i}}{s^2 + 2\xi_{y,i}\omega_{n,y,i}s + \omega_{n,y,i}^2} \\ G_{zz} = \sum_{i=1}^l \frac{\omega_{n,z,i}^2/k_{z,i}}{s^2 + 2\xi_{z,i}\omega_{n,z,i}s + \omega_{n,z,i}^2} \end{cases} \quad (4)$$

其中: $\omega, k, \xi, \phi_x, \phi_{ex}$ 分别为固有频率、模态刚度、阻尼、切入角和切出角。

式(4)表明,临界切削深度主要取决于方向因子 $\alpha_{xx}, \alpha_{xy}, \alpha_{yx}, \alpha_{yy}$ 和传递函数 Φ_{xx}, Φ_{yy} , 这两项主要由切削工艺参数和模态参数决定。

1.3 基于排零定理的切削动力学不确定性

在实际加工过程中,固有频率、阻尼率、刚度和切削力系数不确定性比较大,因此把这4个参数作为不确定因素,传统的稳定性分析将结构参数和工艺参数视为常数,实际上各个参数都有一定的变化范围^[8]。将各参数的最大值和最小值组合,得到一个多项式函数族,每个函数对应复平面上一个多项式顶点,将相邻点连线得到一个多边形,如果原点包括在该多边形内,则说明系统不稳定,否则稳定。

对于每个频率,特征多项式形成了多个特征方程(每个参数的极值的组合)。该算法在每个转速频率上扫描切深和颤振频率,通过排零定理检测其稳定性。设参数及其最值表示为 $\omega_n \in [\omega_{n(\min)}, \omega_{n(\max)}]$, $\xi \in [\xi_{\min}, \xi_{\max}]$, $k \in [k_{\min}, k_{\max}]$, $K_t \in [K_{t(\min)}, K_{t(\max)}]$ 。

将各参数的最值组合,共有 2^4 种组合方式,代入 a_0, a_1 的表达式和式(3),可得到

$$p_q(s, \omega_n, \xi, k, K_t) = a_0(s, \omega_n, \xi, k)(\Lambda(K_t))^3 + a_1(s, \omega_n, \xi, k)(\Lambda(K_t))^2 + a_2(s, \omega_n, \xi, k)(\Lambda(K_t)) + 1 \quad (5)$$

其中, $q = 1, \dots, m$ ($m = 16$) 表示多项式的极值点。

式(5)表明,对于给定的激励频率每个多项式对应一个顶点,即为不确定参数组合的稳定性极值点。可以将这些点连成凸多边形,按照排零定理,如果原点在多边形内,说明系统稳定,否则不稳定。根据边理论和排零定理,得到系统稳定性分析流程,如图1所示。

2 考虑切削特性的加工工艺优化

本研究面向切削过程的粗加工,以最大切除率为目标,以切削深度、径向切削宽度和主轴转速为优化参数。在机床最大功率、扭矩和切削稳定性的约束下,对轴向和径向切削深度、主轴转速进行优化。

2.1 基于直径与齿数之比的刀具选择

使用面铣刀进行重型切削的加工过程受众多因素的影响,除了包括轴向切削深度和主轴转速、进给速度的切削参数之外,刀具的选择也非常重要。面铣刀一般采用可转位的硬质合金刀片,加工中心的

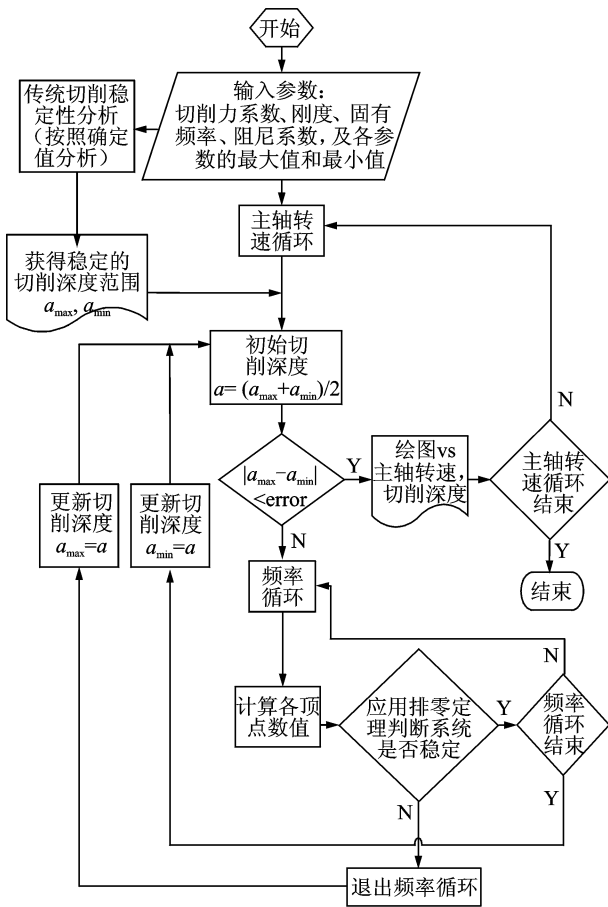


图 1 基于排零定理的切削稳定性不确定性分析流程
Fig. 1 Flow chart of uncertainty analysis of cutting stability based on zero exclusion principle

刀库中都会有多把面铣刀可供选择。一般情况下, 选择直径大的铣刀对加工有利, 但是直径大的铣刀往往有较多的齿数, 降低了其能达到的稳定切削深度。因此, 需要根据切削稳定性的约束, 以最大去除率为目标, 为加工选择刀具直径和齿数最合理的刀具。根据式(1),(2), 有

$$\begin{cases} Z a_{lim} = (-2\pi\Lambda_R/K_t)(1 + (\Lambda_I/\Lambda_R)) \sin\kappa \\ D/Z = (16.6V_c/\omega_c) \{1 - (2/\pi) \cdot \\ \arctan(\Lambda_I/\Lambda_R) + 2k\} \quad (k=0, 1, 2, \dots) \end{cases} \quad (6)$$

根据式(6)作出切削深度与刀具齿数之积和刀具直径与刀具齿数之比的关系曲线, 即 $z a_{lim}$ VS D/z 曲线, 如图 2 所示。

因为材料去除率可表示为 $MRR = Z a_{lim} d V_c \cdot f_z / \pi$, 其中 $d = a_c / D$ 表示切削浸入比, V_c 为切削速度, f_z 为每齿进给量。在给定 d, V, f_z 的情况下, MRR 仅与 $Z a_{lim}$ 相关。因此, 为了获得最大的 MRR , 只需选择能获得最大的 $Z a_{lim}$ 的刀具。图 2 中

圆圈表示可选的工艺点, 据此便可以选相应刀具。

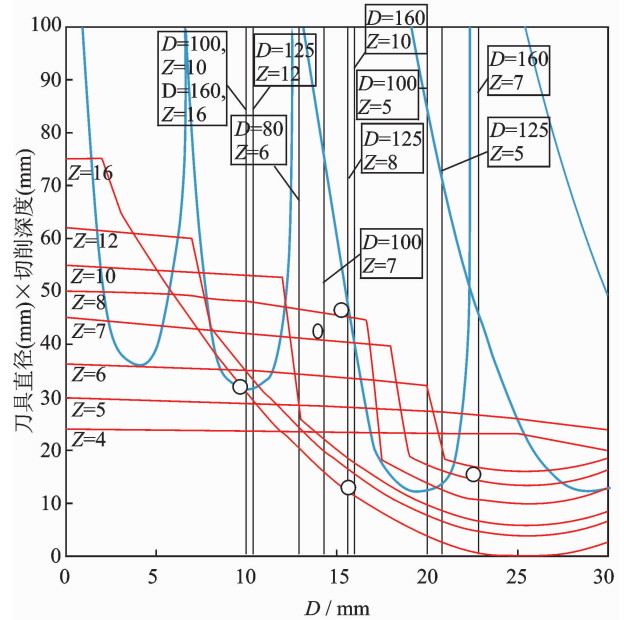


图 2 刀具选择图

Fig. 2 Diagram of cutting tool selection

2.2 建立加工工艺参数优化模型

对于一般的切削加工来说, 切削速度对刀具使用寿命的影响最大, 进给量次之, 切削深度最小^[12]。针对毛坯材料粗加工过程, 令每齿进给量一定, 根据使用经验, 笔者假定切削速度在 900 m/min 以下都能满足该机床上面铣刀刀具集的寿命要求, 在此前提下令工艺优化的目标为材料去除率最高, 同时总加工时间最小。材料去除率可表示为

$$MRR = Z a_p a_c N f_t \quad (7)$$

其中: z 为铣刀齿数; a_p 为轴向切削深度 (mm); a_c 为径向切削切宽 (mm); f_t 为每齿进给量 (mm); N 为主轴转速 (r/min)。

设工件表面需要去除的材料体积径向宽度为 ω , 轴向深度为 L , 进给方向长 S , 则加工时间为

$$t = c \left(\frac{L}{a_p} \right) c \left(\frac{W}{a_c} \right) c \left(\frac{S}{Z N f_t} \right) \quad (8)$$

其中: c 表示为实数取比原实数大的最小整数。

1) 机床最大功率和扭矩约束

铣削过程中作用在每个刀齿上的平均切削力可表示为

$$\bar{F}_{ij} = \frac{\int_{\varphi_{st}}^{\varphi_{end}} (K_{tc} f_t \sin\phi a_p + K_{te} a_p / \sin\kappa) d\phi}{\Delta\phi_j}$$

其中: K_{tc} , K_{te} 分别代表切向切削力和切向犁切力, 前者正比于切屑面积, 后者正比于切削深度 (对于铸

铁件加工取 $K_{tc} = 1\ 883\ \text{N/mm}^2$, $K_{te} = 97.6\ \text{N/mm}^2$; f_t 为每齿进给量; a_p 为轴向切削深度; κ 为铣刀主偏角。 ϕ_{end} , ϕ_{st} 分别是切出角和切入角, $\Delta\phi = \phi_{\text{end}} - \phi_{\text{st}}$ 。

设此时同时处在切削区域的刀具齿数为 z' , 则刀具所受的扭矩和功率消耗分别为

$$\bar{T} = (D/2) \sum_{j=1}^z \bar{F}_{tj}, \quad \bar{P} = \bar{T}V_c / (30D)$$

铣削功率和扭矩不能超过机床设计的额定值, 即

$$\begin{cases} P_m \leq P_e \eta_s \\ T_q \leq T_{qe} \end{cases} \quad (9)$$

其中: P_e 为机床主轴额定功率; T_{qe} 为机床主轴额定功率; η_s 为机床效率。

2) 切削稳定性约束

在高速铣削中铣削参数选择不合理容易引起颤振, 影响加工质量甚至损坏机床和刀具, 通过辨识机床-刀具-工件工艺系统的动力学特性并进行切削稳定性仿真, 得到切削深度为

$$a_{\text{lim}} = -\frac{2\pi\Lambda_R}{zK_{tc}}(1+r^2) \quad (10)$$

其中: $r = \frac{\sin\omega_c}{1-\cos\omega_c}$; $N = \frac{60\omega_c}{z(\epsilon+2k\pi)}$; z 表示刀齿数; a_{lim} 为临界切削厚度; ω_c 为颤振发生频率。

3) 切削频率禁区约束

当激励频率与机床固有频率重合时, 系统容易引起共振, 由振动理论知, 系统共振发生在共振频率附近的一个频段内, 设共振区的半带宽频率为

$$\begin{cases} \omega_{\text{down},j} = \omega_n(\sqrt{1+\zeta^2} - \zeta) \\ \omega_{\text{up},j} = \omega_n(\sqrt{1+\zeta^2} + \zeta) \end{cases} \quad (j=1,2,\dots) \quad (11)$$

其中: ω_{down} , ω_{up} 分别为共振区对应的上、下边界角频率, 单位为 rad/s。

则该范围内的频率为切削频率禁区, 对应的主轴转速分别为 $n_{\text{down},j} = 60\omega_{\text{down},j}/Z$, $n_{\text{up},j} = 60\omega_{\text{up},j}/Z$ 。在切削频率禁区约束下, 主轴转速的约束条件为

$$N \notin \left(\frac{60\omega_{\text{down},1}}{Z}, \frac{60\omega_{\text{up},1}}{Z} \right) \cup \left(\frac{60\omega_{\text{down},2}}{Z}, \frac{60\omega_{\text{up},2}}{Z} \right), \dots, \cup \left(\frac{60\omega_{\text{down},n}}{Z}, \frac{60\omega_{\text{up},n}}{Z} \right) \quad (12)$$

本研究针对灰铸铁材料进行粗加工, 转速范围可取 400~1 200 r/min。

4) 径向切削深度约束

面铣刀加工时, 为提高刀具的使用寿命而较少采用全齿浸入铣削, 一般其径向切削深度不大于直

径的 75%, 通常在 50%~60% 范围内。

2.3 考虑切削特性的加工工艺优化流程

根据以上分析, 按图 3 所示的流程进行加工工艺参数的优化。首先, 根据工件尺寸获得轴向切削深度 L 和径向切削深度 W ; 然后, 按工件材料和面铣刀刀片形状确定切削力系数, 并根据动力学实验得到机床的模态参数, 获得切削稳定性叶瓣图, 在此基础上根据不确定性分析进一步获得稳健的叶瓣图, 根据刀具选择图确定合适的刀具; 最后, 根据稳定性叶瓣图和工艺参数优化模型, 确定主轴转速及径向、轴向切削深度。

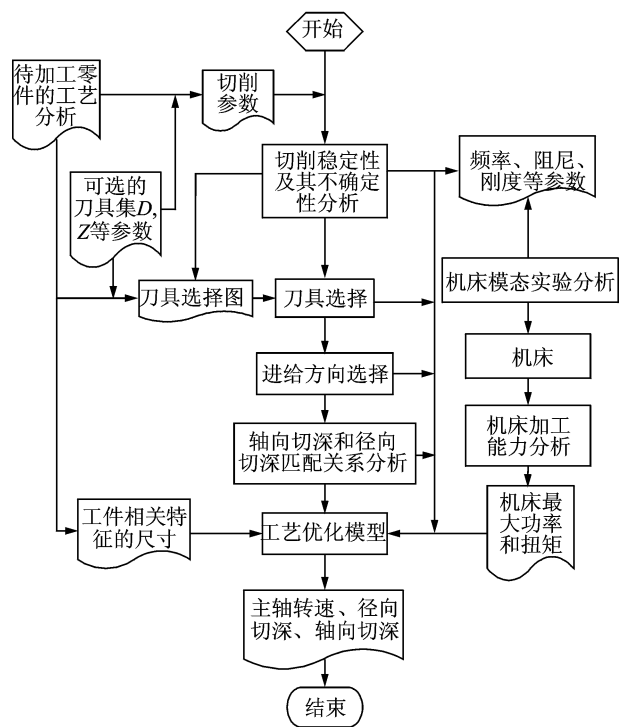


图3 工艺优化流程

Fig. 3 Flow of process optimization

3 实例分析

3.1 优化目标的提出

现有某卧式加工中心用来加工柴油机发动机缸体, 缸体毛坯待切除区域的长宽高为 800 mm × 300 mm × 15 mm。机床的最大额定功率和扭矩分别为 26 kW 和 160 N·m, 机床效率为 0.8。缸体表面的粗加工所使用的工艺参数如表 1 所示。该表面在所有工序中加工时间最长, 为提高生产率, 要求对该工序的工艺参数进行优化。

表 1 顶面加工工艺参数

Tab. 1 Processing parameters of top surface

刀具编号	加工内容	加工部位	刀具直径/mm	刀具齿数	切深/mm	切宽/mm	切削速度/($m \cdot min^{-1}$)	每转进给量/($mm \cdot r^{-1}$)	每分进给量/($mm \cdot min^{-1}$)	每齿进给量/($mm \cdot tooth^{-1}$)	转速/($r \cdot min^{-1}$)	
1001	粗铣	顶面	F100	100	7	3.00	60	175.84	1.75	980	0.25	560

3.2 切削过程动力学分析

实验测得主轴端点前端 6 阶模态参数如表 2 所示。因为切削稳定性主要取决于刚度最小的模态^[5],因此文中取表 2 中第 5 阶模态的数据进行计

表 2 系统各方向模态数据

Tab. 2 Modal parameters

模态阶次	x 方向			y 方向			z 方向		
	固有频率 ω_n /Hz	阻尼比 ζ	刚度 $k/(N \cdot \mu m^{-1})$	固有频率 ω_n /Hz	阻尼比 ζ	刚度 $k/(N \cdot \mu m^{-1})$	固有频率 ω_n /Hz	阻尼比 ζ	刚度 $k/(N \cdot \mu m^{-1})$
1	28	0.030	29.41	26	0.026	25	20	0.032	31.25
2	38	0.068	37.04	36	0.059	35.71	31	0.035	28.57
3	64	0.048	66.40	62	0.041	60.42	47	0.057	17.54
4	93	0.015	52.63	90	0.012	38.46	68	0.026	41.20
5	127	0.036	26.32	120	0.033	17.54	95	0.048	16.50
6	141	0.045	75.86	133	0.040	70.67	110	0.051	52.36

算。令模态参数在其初值 90%~110% 的范围内变化;令最大的切向切削力系数 $K_t=2\ 193\ N/mm^2$,最小为 $1\ 883\ N/mm^2$ 。获得的稳定性叶瓣图如图 4 所示。

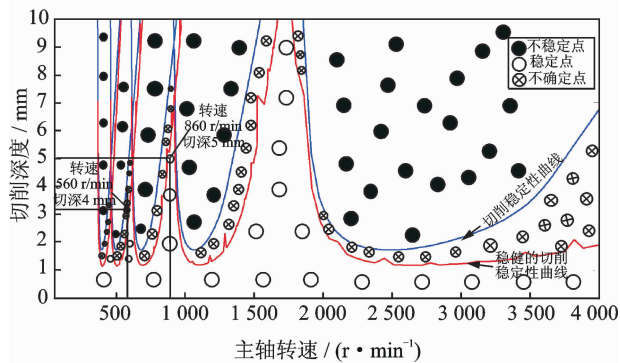


图 4 切削稳定性图

Fig. 4 Diagram of cutting stability

图 4 中两条曲线分别是按照确定参数分析得到的切削稳定性曲线和按照不确定参数得到的稳健的切削稳定性曲线。不稳定性切削点所在区域为不稳定切削区;稳定性切削点所在区域为不稳定切削区;不确定切削点所在区域为稳定性不确定的切削区。目前,按照工艺手册和加工经验选择的主轴转速为 560 r/min,切削深度为 3 mm。从图 4 中可以看到,该参数处于不确定切削区,有可能导致产生颤振。因此,必须在稳健的切削稳定区选择工艺参数。

3.3 工艺参数优化

在该加工中心的刀库中可供选择的面铣刀刀具一共有 9 把,其规格如表 3 所示。

表 3 面铣刀刀具集

Tab. 3 Face milling tools set

刀具编号	1001	1002	1003	1004	1005	1006	1007	1008	1009
\varnothing	100	125	160	100	125	160	100	125	160
Z	5	6	7	7	8	10	10	12	16

从表 3 可以看到,规格为 $\varnothing 125/Z=8$ 的刀具可以获得最大的材料去除率,其次为 $\varnothing 100/Z=7$ 的刀具。这里选择表 3 中规格为 $\varnothing 125/Z=8$ 的刀具,该铣刀主偏角 45 度。另外,实验测得整机前 6 阶模态频率为 29.2, 38.1, 63.2, 92.4, 127.0, 141.0 及 221.0 Hz,对应的阻尼比为 2.99×10^{-2} , 5.72×10^{-2} , 4.41×10^{-2} , 5.92×10^{-2} , 4.59×10^{-2} , 4.41×10^{-2} 。根据测得的整机模态频率和阻尼比,结合主轴转速范围,得到各频率带宽为:(35.858 3, 40.216 9),(62.920 7, 63.478 1), (86.767 9, 97.708 0),(121.036 8, 132.695 4),(135.13, 146.64), (211.04, 230.53)。将以上数据代入式(6)中,得到

$$\begin{cases} \bar{T} = (D/2) \sum_{j=1}^{Z'} \bar{F}_{ij} \leq 160 \times 10^3 \\ \bar{P} = \frac{11}{3} \sum_{j=1}^{Z'} \bar{F}_{ij} \leq 20.8 \times 10^3 \end{cases} \quad (13)$$

将 $D=125$ 代入式(11)中,取两者之间相对小的数值,得到 $\bar{T} = (D/2) \sum_{j=1}^{Z'} \bar{F}_{ij} \leq 160 \times 10^3$, 即: $\sum_{j=1}^{Z'} \bar{F}_{ij} \leq 2.56 \times 10^3$ 。将其他参数代入式(5)~(12),最后得到工艺参数优化模型为

$$\begin{cases} \text{MRR}_{\max} = 2a_p a_e N \\ t_{\min} = (c(15/a_p) \times c(300/a_e) \times c(400/N)) \\ a_p < a_{\text{lim}}, \sum_{j=1}^{Z'} \bar{F}_{ij} \leq 2.56 \times 10^3 \\ N \notin (269, 302), (453, 495), (651, 733), \\ (908, 1\ 005), (1\ 014, 1\ 100), (1\ 583, 1\ 729) \end{cases} \quad (14)$$

其中: $\bar{F}_{ij} = \frac{470.75a_p}{\arccos(1-a_e/R)} (2-a_e/R)$, $Z' = c \left(\frac{Z}{2\pi} \arccos \frac{(D/2-2a_e)^2 - 2a_e^2}{(D/2)^2} \right)$ 。

为减少计算量,首先确定几组常用的切削浸入比 $1/8, 2/8, 3/8, 4/8, 5/8, 6/8$, 然后再根据约束条件筛选最佳的参数组合,具体计算流程如下:

$\text{MRR}_0 = 1$; $t_0 = 60$; $F_{ij0} = 2.56 \times 10^3$; % 为 MRR、切削时间和切削力赋初值;

$N_1 = [269\ 270\ 271 \cdots 302]$; $N_2 = [453\ 454\ 455 \cdots 495]$; \cdots ; $N_6 = [1\ 583\ 1\ 584\ 1\ 585 \cdots 1\ 729]$; $N_0 = [N_1\ N_2 \cdots N_6]$; % 不允许选择的转速数组

jinrubi = [1/8 2/8 3/8 4/8 5/8 6/8] % 切削浸入比
For m = 1:length(jinrubi);

稳定性的不确定性计算; % 得到对应于某一浸入比的转速数组 Nall 和轴向切削深度数组 apall;

For t = 1 : length(Nall) % 转速数组 Nall 循环

If isnumber(Nall(t)) = 0 % 判断转速是否在允许范围

计算切削力;

If $F_{ij} < F_{ij0}$ % 判断切削力是否小于允许值

$$\text{MRR} = 2a_p a_e N; t = (c(\frac{15}{a_p}) \times c(\frac{300}{a_e}) \times$$

$c(\frac{400}{N}))$; % 计算材料切除率和切削时间

If $(\text{MRR} > \text{MRR}_0) \&\&. (t < t_0)$ % 判断 MRR 和切削时间是否优于初值,是则替换。

$$\text{MRR}_0 = \text{MRR}; t_0 = t;$$

Else break

Else break

Else break

End

End

经过计算,最后得到的切削深度为 5 mm,转速为 860 r/min,如图 4 中○所示的工艺点。此时对应的切削浸入比为 1/2,优化前后的结果比较如表 4 所示,可以看到优化后的切削参数大大提高了切削效率。

表 4 顶面加工工艺参数

Tab. 4 Process parameters

刀具 编号	加工 内容	加工部位	刀具直径/ mm	刀具 齿数	切深/ mm	切宽/ mm	切削速度/ ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	每转进给量/ ($\text{mm} \cdot \text{r}^{-1}$)	每分进给量/ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	每齿进给量/ ($\text{mm} \cdot \text{tooth}^{-1}$)	转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	t/ min	
1001	粗铣	顶面	F100	100	7	3.00	60	175.84	1.75	980	0.25	560	17.86
1008	粗铣	顶面	F100	125	8	5.00	62.5	337.71	2.00	1 720	0.25	860	6.7

表 5 切削实验参数

Tab. 5 Parameters of cutting experiment

主轴转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	切削深度/ mm	进给量 ($\text{mm} \cdot \text{tooth}^{-1}$)	铣削宽度/ mm	刀具 直径/($\text{mm} \cdot$ 齿数)
300	2	0.25	60	125/ 8 齿
500	2	0.25	60	125/8 齿
750	3	0.25	75	125/8 齿
860	5	0.25	63	125/8 齿
1 000	3	0.25	60	125/ 8 齿
1 000	2	0.25	50	125/8 齿

3.4 切削加工参数实验验证

为了验证优化后工艺参数的可行性,对工件进行切削实验,并根据图 4 选择不同的切削参数,分别在切削状况和空转情况下进行振动实验,测量机床的主轴端、工作台、床身(地脚位置处)和立柱的振动速度,表 5 为切削参数。部分测试数据结果见表 6,表 6 中 x, y, z 表示各测试点对应的最大振动速度,单位为 $\mu\text{m/s}$; f_1 表示振幅最大的频率成份, f_2 表示其他频率成份,各测点对应的 f_2 包含从 0 到 3 种频率成分不等,单位为 Hz。

表 6 测试点的最大振动速度及峰值频率
Tab. 6 Maximum vibration velocity and peak frequency of the test point

主轴转速/ r/min-切削 深度/mm	主轴端						床身						工作台						立柱					
	x		y		z		x		y		z		x		y		z		x		y		z	
	f ₁	f ₂	f ₁	f ₂	f ₁	f ₂	f ₁	f ₂	f ₁	f ₂	f ₁	f ₂	f ₁	f ₂	f ₁	f ₂	f ₁	f ₂	f ₁	f ₂	f ₁	f ₂	f ₁	f ₂
300-2	274		169		41.7		135		174		40.9		250		148		220		285		72.1		196	
	35	105	245	105	35	350	35	175	105	175	35	105	35	105	105	175	245	105	35	35	35	105	35	105
300-空转	22.6		16.7		8		9.58		8.58		8.2		11.1		5.95		12.2		12		8.7		18.1	
	100	25	240	240	30	12	13	25	25	200	25	224	25	100	200	12	224	100	25	20	25	300	100	12
500-2	239		149		68		74.7		249		55.6		164		182		282		80.7		26.5		101	
	58	234	350	125	117	58	350	175	58	175	58	175	58	234	117	175	158	175	234	175	58	33	17	58
500-空转	28.6		10.5		7.5		5.67		8.12		7.6		15.8		6.2		14		13.4		8.7		20.7	
	100	25	200	100	8	200	224	25	100	25	14	25	224	100	25	224	200	100	100	224	25	100	25	100
1000-2	216		182		81.8		36.3		123		23.8		256		427		166		83.6		23		178	
	100	234	350	50	117	100	117	50	117	100	117	50	117	100	117	50	133	100	117	50	17	50	17	50
1000-空转	24.4		23.8		8.94		6.19		7.73		6.75		10.9		5.8		12.5		13.1		8.4		19.3	
	100	25	200	200	178	200	223	25	25	200	25	223	25	100	200	100	223	100	25	25	200	25	300	100
750-3	345		155		44		36.4		125		29.8		192		180		209		102		24		264	
	100	75	50	125	50	350	175	175	175	175	100	175	100	175	50	150	175	100	100	100	100	175	25	100
860-5	28.6		23.8		8.94		6.19		7.73		6.75		10.9		5.8		12.5		13.1		8.4		19.3	
	115	82	245	117	82	327	115	35	115	82	35	245	82	115	47	245	82	327	35	82	35	115	115	82
860-空转	24.4		14.5		7.7		20.4		6.6		6.97		10.7		5.48		12.5		12.7		9.29		19.3	
	100	25	140	280	12	200	11	8	25	25	200	223	25	100	200	223	11	223	100	25	100	25	280	100

结合图 4 的仿真分析结果和表 6 的振动测试结果,可以看到:

1) 以 300 r/min 的转速切削 2 mm 时的系统频率和空转时的频率 25 Hz 相比,主轴端、床身(地脚位置处)、工作台和立柱这 4 个测量位置的振动峰值频率都变为 35 Hz,接近第 2 阶固有频率 38 Hz,主轴动刚度实验也表明主轴系统存在 35 Hz 这阶固有频率,此时机床已经发生了颤振。同时,从图 4 可以看出,该切削情况下系统确实处于不稳定区。从实验获得的振动速度来看,发生颤振时的振动速度

要比空转时大 10~20 倍,如空转时立柱 x 向振动速度为 12 μm/s,但在切削时突变为 285 μm/s。

2) 以 500 r/min 的转速切削 2 mm 的振动情况同上,在各位置检测出切削峰值频率接近 63.2 Hz 这阶固有频率,且与空转时频率 25,100 Hz 不同,此时机床也发生了颤振。图 4 表明以 750 r/min 速度切削 3 mm 时,切削时系统处于不确定稳定区,按该参数进行切削时也发生了颤振。然而,如果按照传统的分析在该区域不会发生颤振,这说明忽略不确定特性将会导致工艺优化结果与实际情况不符。另

外在机床选定 860 r/min, 切削深度 5 mm 时, 尽管切削深度和转速都要大于前面几组数据, 但是因为处在切削稳定域, 所以仍未发生颤振。

3) 从图 4 中可以看到, 在以 1000 r/min 切削 1 mm 时系统处于稳定区, 在切削实验中检测出的峰值频率如 100, 50, 117, 234, 350 Hz 都是 $1\ 000/60 = 16.6$ Hz 的倍频, 和空转峰值频率成分一致, 因此可知机床此时以受迫振动为主, 与 300 r/min 时初颤振速度相比, 受迫振动的速度远小于颤振速度。

4 结 论

1) 考虑了切削动力学的不确定特性, 根据重型切削的工艺特点, 分析了刀具直径、齿数和切削深度的关系, 结合切削动力学的不确定特性为切削过程选择能获得最大切削深度的刀具和优化的切削参数, 结果证明该方法得到的结果比常规方法更为稳健、可靠。

2) 以固有频率、阻尼比、刚度和切削力系数为不确定因素, 应用排零定理和边理论获得了新的切削稳定性叶瓣图, 与传统的稳定性叶瓣图之间存在稳定性不确定区域, 在该区域内切削有一定的概率产生颤振, 因此选择切削参数应尽量避免该区域。

3) 考虑面铣刀螺旋角的影响, 建立了切削过程的三维动力学方程, 以获得材料的最大去除率为目标, 建立了优化模型并选择了最佳的切削参数。在一台卧式加工中心上对发动机缸体表面的粗加工工艺应用了本方法, 切削振动实验结果表明该方法是可行的。

参 考 文 献

- [1] 宋清华, 艾兴, 万熠, 等. 考虑刀具偏心的变径向切深铣削稳定性研究[J]. 振动、测试与诊断, 2008, 28(3): 206-210.
Song Qinghua, Ai Xing, Wan Yi, et al. Research on milling stability of variable radial cutting depth consideration of cutter eccentricity[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2008, 28(3): 206-210. (in Chinese)
- [2] 李欣, 李亮, 何宁, 等. 时滞效应对铣削系统稳定性的影响[J]. 振动、测试与诊断, 2014, 34(2): 301-305.
Li Xin, Li Liang, He Ning, et al. Influence of delay time on milling system stability[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2014, 34(2): 301-305. (in Chinese)

- [3] 刘强, 李忠群. 数控铣削加工过程仿真与优化-建模、算法与工程应用[M]. 北京: 航空工业出版社, 2011: 157-184.
- [4] Al-Zaharnah I T. Suppressing vibrations of machining processes in both feed and radial directions using an optimal control strategy: The case of interrupted cutting[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 172(2): 305-310.
- [5] Wan Min, Zhang Weihong, Qin Guohua, et al. Strategies for error prediction and error control in peripheral milling of thin-walled workpiece[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2008, 48(12): 1366-1374.
- [6] Zhang Xiaoming, Ding Han. Note on a novel method for machining parameters optimization in a chatter-free milling process[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2013, 72(9): 11-15.
- [7] Iglesias A, Munoa J, Ciurana J. Optimization of face milling operations with structural chatter using a stability model based process planning methodology[J]. International Journal of Advanced Manufacture Technology, 2014, 70(3): 559-571.
- [8] Graham E, Mehrpouya M, Park S S. Robust Prediction of chatter stability in milling based on the analytical chatter stability [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2013, 15(4): 508-517.
- [9] Zulaika J J, Campa F J, LNL de Lacalle. An integrated process machine approach for designing productive and lightweight milling machines[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2011, 51(7-8): 591-604.
- [10] Altintas Y, Budak E. Analytical prediction of stability lobes in milling[J]. Annals of Interatonal Institution for Production Engineering Research, 1995, 44(1): 357-362.
- [11] Altintas Y. Analytical prediction of three dimensional chatter stability in milling[J]. International Journal of Mechanical Engineering, Series C, 2001, 44(3): 717-723.
- [12] 王先逵, 艾兴. 机械加工工艺手册(第1卷): 工艺基础卷[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2007: 78-81.



第一作者简介: 黄华, 男, 1978年8月生, 博士, 副教授。主要研究方向为机床动力学和机械产品数字化设计。曾发表《面向加工中心的加工方案优化技术研究》《《同济大学学报》2010年第38卷第1期》等论文。

E-mail: hh318872@126.com

