

中低速数控铣削参数优化技术研究及应用*

Research and Application of NC Milling Parameter Optimization in Medium Cutting Speed Case

北京航空航天大学机械工程及自动化学院 李 峥 刘 强

[摘要] 采用平均铣削力系数模型对数控加工过程中的铣削力进行仿真预测。在此基础上,综合考虑数控加工过程中机床、刀具以及工件3方面限制加工效率的因素,对主轴转速、进给速度、径向切宽以及轴向切深4个参数进行优化。利用VC与Matlab编程,开发了“中低速数控铣削过程力学仿真与参数优化系统”。针对航空难加工材料GH4169,在Sandvik推荐参数基础上进行仿真优化。结果表明,基于力学仿真的数控铣削参数优化技术在难加工材料加工中可提高加工效率12%~378%。

关键词: 切削力仿真 铣削参数优化 难加工材料

[ABSTRACT] Average cutting coefficient model is used to simulate cutting forces in NC machining. Based on cutting force simulation, spindle speed, feed rate, depth of cut and width of cut are optimized considering confinements of machine tool, cutter and workpiece comprehensively. The target of optimization is categorized into machining efficiency, cost of machining and combination of efficiency and cost. OptiCut, aimed at optimize milling parameters in medium spindle speed is developed under Visual C++ and Matlab environment. With this software milling parameters in GH4169 machining are optimized. According to the experiment, it is easy to conclude that OptiCut is effective in improving machining efficiency.

Keywords: Cutting force simulation Cutting parameter optimization Difficult-to-cut material

数控机床是现代制造企业不可缺少的关键设备,与传统机床相比,数控机床精度高、价格昂贵。随着国内企业数控化率的不断增长,数控设备使用效率问题成为人们关注的焦点。按转速来分,数控机床可分为高速机床与中低速机床。高速机床在加工过程中采用的往往是高速低载荷,而中低速机床则采用重载低速。在高速加工中,颤振是影响加工效率的主要因素,而在中低速加工中,机床、刀具以及工件质量要求对加工过程都有较大影响。

1 切削参数优化模型

1.1 目标函数选取

目标函数是建立评价指标与设计变量之间的数学关系,是优化设计的前提和关键。企业在不同生产任务阶段,关注加工的方面并不一致:在生产任务饱和时,生产效率是企业关注的目标;当生产任务轻松时,企业关注的则是加工成本;在更多情况下,企业会同时关注生产成本以及加工效率。因此,在铣削参数优化时,优化目标可分为:最大生产率、最低成本以及综合优化(加权考虑生产效率与成本)3种^[1]。

(1)最大生产率是指单位时间内切除最大材料体积或加工表面面积。在粗加工过程中,表现为最大材料去除速率 MRR ^[2],且

$$MRR = a_p \cdot a_e \cdot n \cdot f_z \cdot N,$$

式中, a_p 为轴向切深; a_e 为径向切宽; n 为主轴转速; f_z 为每齿进给量; N 为铣刀齿数。

(2)最低生产成本是指切除单位体积材料或加工单位表面面积所消耗的生产成本最低。单位生产成本 C_u 可表示为:

$$C_u = \frac{1}{MRR} [C_m + \frac{C_t}{T} + C_c + C_w + C_f + C_e],$$

式中, C_m 为单位机床成本; C_t 为单位刀具成本; T 为单件刀具寿命; C_c 为单位切削液成本; C_w 为单位员工成本; C_f 为单位厂房成本; C_e 为单位能源消耗成本。

在所有成本中,机床、厂房、员工成本可视为固定成本,与切削参数选取无关;切削液成本以及能源消耗与切削参数关系很小,在参数优化时可将其视为固定成本 C_s 。对于不同切削参数下,尤其是难加工材料加工中刀具消耗会有很大区别,必须视为可变成本。从而,单位生产成本可简化为:

$$C_u = (C_s + C_t/T) / MRR.$$

(3)综合优化——单纯以加工效率或加工成本为目标进行参数优化往往是不合理的,实际加工中更多情况下需要兼顾效率和成本^[3]。通过多目标线性加权的方式,得到综合优化模型如下:

$$M = \lambda_1 \frac{MRR_0}{MRR} + \lambda_2 \frac{C_u}{C_{u0}}, \lambda_1 + \lambda_2 = 1,$$

* 国防基础科研计划项目(B2120080261)和教育部高校博士点基金项目(B200800060010)资助。

式中, λ_1 为加工效率权值; λ_2 为加工成本权值; MRR_0 为优化前材料去除速率; C_{u0} 为优化前单位生产成本。其同解方程为

$$M' = \frac{1}{MRR} \left\{ 1 - \frac{\lambda_2 C_i (T - T_0)}{T [T_0 \cdot (C_s + C_i)]} \right\}。$$

1.2 设计变量

铣削加工中涉及的切削用量包括: 轴向切深 a_p (mm)、径向切宽 a_e (mm)、主轴转速 n (mm/r)、切削速度 v_c (m/min)、进给速度 f (mm/min)、每齿进给 f_z (mm) 和每转进给 f_r (mm)。这 7 个切削用量之间有以下转换关系:

$$\begin{aligned} v_c &= \frac{\pi dn}{1000}, \\ f_z &= f / (n \cdot N), \\ f_r &= f_z \cdot N, \end{aligned}$$

式中, d 为刀具直径, N 为铣刀齿数。

从而, 铣削参数优化中的设计变量确定为: 轴向切深 a_p (mm)、径向切宽 a_e (mm)、主轴转速 n (mm) 和进给速度 f (mm/min)。

1.3 约束条件

铣削过程中, 机床、刀具的性能以及零件质量要求对切削参数的选取都会产生影响。其中机床方面, 限制切削参数选取的因素包括: 主轴转速范围、进给速度范围、主轴功率、主轴扭矩、进给抗力以及机床模态。刀具方面, 最主要的限制因素为许用线速度、许用每齿进给以及刀具耐用度(刀具寿命), 此外, 刀具几何尺寸决定了径向切宽范围以及轴向切深范围; 有关刀具的其他约束条件还包括: 许用切削温度、夹持面弯矩、扭转剪应力和刀尖变形等。零件质量要求对切削参数选取也有较大影响, 主要表现为零件几何精度、表面粗糙度以及残余应力等^[4]。加工过程约束条件如图 1 所示。

2 主要约束模型

2.1 铣削力模型

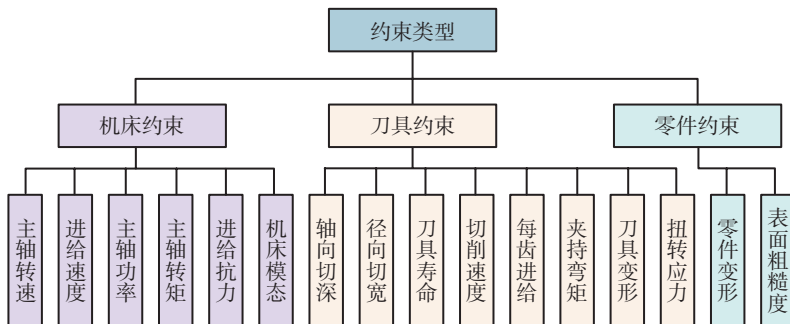


图 1 参数优化约束条件

Fig.1 Confinements in cutting parameter optimization

在数控加工过程中, 常用的铣刀类型有: 圆柱螺旋立铣刀、球头刀、R 刀、镶片刀和面铣刀等。下面以圆柱螺旋立铣刀为例, 建立加工过程铣削力模型。

设铣刀直径为 D , 齿数为 N , 螺旋角为 β , 则齿间角 $\phi_p = 2\pi/N$ 。将铣刀沿轴线方向划分为 m 个微元, 每个微元厚度为 dz , 根据平均铣削力系数模型, 当刀具转动到角度 ϕ 时, 作用在刀齿 j 上 z 高度处微元上的切向铣削力 (dF_{ij})、径向铣削力 (dF_{rj}) 和轴向铣削力 (dF_{aj}) 可以表示为^[2]:

$$\begin{cases} dF_{ij}(\phi, z) = [K_{ic}h_j(\phi_j(z)) + K_{ie}]dz \\ dF_{rj}(\phi, z) = [K_{rc}h_j(\phi_j(z)) + K_{re}]dz \\ dF_{aj}(\phi, z) = [K_{ac}h_j(\phi_j(z)) + K_{ae}]dz \end{cases}。$$

式中, K_{ic} 、 K_{rc} 、 K_{ac} 分别为切向铣削力系数、径向铣削力系数和轴向铣削力系数; K_{ie} 、 K_{re} 、 K_{ae} 分别为切向刃口系数、径向刃口系数和轴向刃口系数。刀齿 j 的径向接触角 $\phi_j(z) = \phi + (j-1)\phi_p + \varphi$, 其中 ϕ 为第一个刀齿的径向接触角, $\varphi = \frac{2z \tan \beta}{D}$ 为由于螺旋角而产生的滞后角。 h_j

为刀齿瞬时切削厚度。若当前刀齿的偏心量为 E_j , 前一个刀齿的偏心量为 E_{j-1} , 则瞬时切削厚度为

$$h_j(\phi_j(z)) = (f_z + E_j - E_{j-1}) \cdot \sin(\phi_j(z))。$$

通过坐标变换, 可以将作用在微元上的铣削力分解到 $X/Y/Z$ 3 个进给方向:

$$\begin{cases} dF_{xj}(\phi, z) = -dF_{ij} \cos \phi_j(z) - dF_{rj} \sin \phi_j(z) \\ dF_{yj}(\phi, z) = +dF_{ij} \sin \phi_j(z) - dF_{rj} \cos \phi_j(z) \\ dF_{zj}(\phi, z) = +dF_{aj} \end{cases}。$$

将微元上的铣削力进行轴向积分、刀齿积分以及角向积分即可获得作用在铣刀上的切削力。

2.2 切削扭矩和功率

铣削过程中, 切削功率 $P(\phi)$ 和扭矩 $T_q(\phi)$ 主要由切向力 $F_t(\phi)$ 决定, 当铣刀直径为 D 时, 可以表示为:

$$\begin{cases} T_q(\phi) = F_t(\phi) \cdot D / 2000 \\ P(\phi) = 2T_q(\phi) \cdot n \cdot \pi / 60 \end{cases}。$$

2.3 刀具变形模型

由于铣刀分为刀柄部分和刀刃部分, 本课题采用等效直径的方法, 将铣刀等效为阶梯轴。铣削力作用在刀刃上, 当轴向切深较小时, 可以近似认为是均布载荷, 其受力如图 2 所示。

图中, L_1 、 I_1 分别表示刀柄部分长度和截面惯性矩; L_2 、 I_2 分别表示刀刃部分长度和截面惯性矩; E 为刀具材料杨氏模量。

刀具悬长: $L = L_1 + L_2$; 刀柄惯性矩:

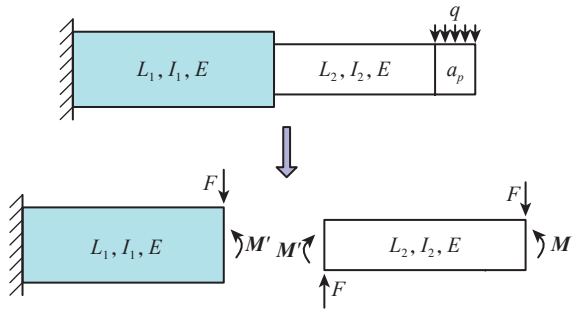


图2 铣刀变形分析

Fig.2 Cutting tool deflection analysis

$I_1 = \pi D^4/64$; 刃部惯性矩: $I_2 = \pi d^4/64$, 其中 d 为刃部等效直径。通过有限元仿真计算, d/D 与齿数 N 的关系如表 1 所示。

表1 等效直径比

N	2	3	4	6
d/D	0.81	0.63	0.80	0.85

刀尖处等效切削力: $F = q \cdot a_p$,

刀尖处等效弯矩: $M = F \cdot a_p/2$,

阶梯处等效弯矩: $M' = F \cdot (2L_1 - a_p)/2$ 。

刀具在刀尖点处的变形量:

$$\delta_c = -\frac{FL_1^3}{3EI_1} + \frac{F(a_p - 4L_2)L_1^3}{4EI_1} + \frac{F(a_p - 2L_1)L_1L_2}{2EI_1} - \frac{FL_2^3}{3EI_2} + \frac{Fa_pL_2^2}{4EI_2}$$

2.4 刀具耐用度

对铣削而言, 刀具耐用度与切削速度、每齿进给量以及轴向切深有关。刀具耐用度经验公式^[4]:

$$L_f = \frac{C_T}{v^{\frac{1}{m}} f_z^{\frac{1}{n}} a_p^{\frac{1}{p}}}$$

式中, C_T 为系数, 与除切削用量之外的切削条件诸因素有关; $\frac{1}{m}$ 、 $\frac{1}{n}$ 、 $\frac{1}{p}$ 分别为 f 和 a_p 对 L_f 的影响指数, 且

$$\frac{1}{m} > \frac{1}{n} > \frac{1}{p}$$

3 切削参数优化

以图 3 所示零件为对象进行铣削参数优化。该零件所涉及的加工方式包括螺旋插补铣、插铣、摆线铣、斜坡铣削、等高槽铣、顺铣和逆铣等。其中, A 区域为外圆铣削; B 区域为螺旋铣圆槽; C 区域为铣内圆台; D 区域

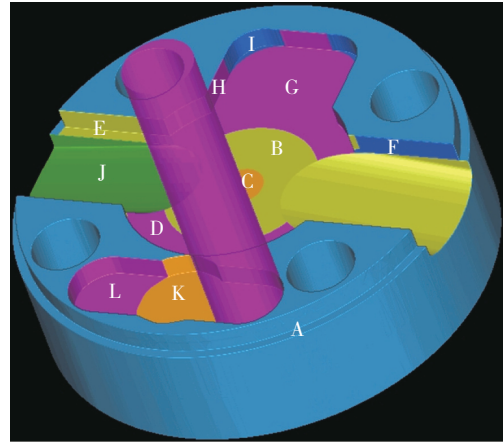


图3 试验零件

Fig.3 Specimen part

为内圆铣削; E 区域为摆线铣削; F 区域为等高槽铣及扩边; G 区域为插铣; H 区域为铣侧壁; I 区域为清圆角; J 区域为铣斜坡; K 区域为螺旋铣孔; L 区域为等高槽铣。

3.1 基本条件

(1) 机床。

德马吉 DMU 80T 五轴加工中心: 该机床转速范围 20~18000r/min; 最大进给速度 30000mm/min; 在 2200r/min 之前为恒扭矩 82N·m, 在 2200~15000r/min 之间为恒功率 19kW, 在 15000~18000r/min 之间功率线性衰减。

(2) 刀具。

山特维克可乐满镶片铣刀, 刀具直径分别为 25mm、20mm、16mm 和 12mm。选用 TiAlN 超多涂层刀片 1030。山特维克推荐: 切削 GH4169 时, 线速度不超过 30m, 槽铣时每齿进给不超过 0.08mm, 非槽铣时每齿进给不超过 0.12mm。

(3) 工件材料。

镍基高温合金 GH4169 (Inconel718), 硬度 HRC43~44; 抗拉强度 1370~1380MPa; 屈服强度 1160~1170MPa。

3.2 参数优化过程

3.2.1 铣削力系数辨识

铣削力系数辨识试验采用正交测试原理, 由 Kistler 9257B 测力仪 (测量范围 X、Y: ±5kN, Z: -5~10kN) 对 9 组切削参数下的铣削力进行测试, 在 SimuCut 软件中进行辨识, 辨识结果如表 2 所示。

3.2.2 “主轴-刀具”动态特性

以直径 20mm 两齿镶片铣刀、安装悬长 70mm 为例。利用 Cutpro 系统对“主轴-刀具”系统进行锤击试验, 对位移传递函数进行模态拟合^[3,5], 结果如表 3 所示。

3.2.3 优化参数获取

利用 VC 及 Matlab, 综合考虑上述机床、刀具以及工

表2 GH4169铣削力系数

$K_{tc} / (N \cdot mm^{-2})$	$K_{te} / (N \cdot mm^{-2})$	$K_{ac} / (N \cdot mm^{-2})$	$K_{te} / (N \cdot mm^{-1})$	$K_{re} / (N \cdot mm^{-1})$	$K_{ac} / (N \cdot mm^{-1})$
3992.000	2201.910	1636.250	77.870	91.150	63.950

件3方面约束条件^[4],开发了“中低速数控铣削过程力学仿真及参数优化系统”——OptiCut。在OptiCut中除“铣侧壁”和“铣拐角”2道工序没有优化外,其他工序都在刀具厂商推荐参数^[6](见表4)基础上进行仿真优化。

在机床约束中,主轴转速限定为18000r/min;功率、转矩以机床技术手册提供曲线为约束;基于切削力系数试验,当切削力小于2000N时铣削过程平稳。因此,进给抗力约束设置为2000N。机床模态方面,考虑“主轴-刀具”系统模态参数影响。

GH4169由于含有钼、钛、铌等元素,刀具极易磨损、破损;镍、铬元素使切屑不易断开,切削时与刀具粘结现象严重,切削非常困难。由此可见,在仿真优化时,刀具约束非常关键。为保证加工过程中刀具的正常使用寿

命,将刀具许用切削速度设置为30m/min;槽铣时许用每齿进给设置为0.08mm;单边铣削时许用每齿进给设置为0.12mm。考虑到加工过程为粗加工,对零件表面质量要求不高,将表面粗糙度约束设置为Ra 6.3;同时,该零件不涉及薄壁等弱刚性结构,在优化过程中不考虑零件变形。

利用OptiCut进行优化系统,优化后铣削参数如表5所示。

3.3 优化前后切削效果对比

3.3.1 加工时间及效率对比

参数仿真优化前,零件材料去除速率MRR在0.19~4.299cm³/min之间,利用OptiCut仿真优化后,材料去除速率最大提升为6cm³/min,提高幅度为12%~378%。仿真优化前铣削加工总时间为94.88min,在对10道主要工序进行参数优化后,切削加工总时间为68.9min,通过参数优化节约加工时间25.98min,各工序优化前后的铣削参数如表4和表5所示。

3.3.2 主要特征切削力对比

采用Kistler测力仪,记录铣削过程中各个特征下的铣削力。根据测量结果,在不同工序中,优化前铣削力波动幅度大:在外圆铣削中,最大铣削力为1600N,而内圆铣削力仅为400N。通过仿真优化,各个工序中的铣削力均保持在1500~2000N之间,加工过程更加平稳。优化前后的外圆铣削力和内圆铣削力如图4所示。

表3 D20L70N2刀具模态参数

阶数	频率/Hz	阻尼比	模态刚度/(N·m ⁻¹)
1	965.63	0.03965	78168656.98
2	1048.20	0.02759	44429350.40
3	1688.82	0.069	18030981.28
4	2117.51	0.044	21089412.89
5	3232.88	0.0303	47788168.71

表4 优化前铣削参数

工序名称	铣刀直径/mm	铣刀齿数	转速/(r·min ⁻¹)	速度/(m·min ⁻¹)	进给/(mm·min ⁻¹)	每齿进给/mm	切深/mm	切宽/mm	MRR/(cm ³ ·min ⁻¹)	加工时间/min
铣外圆	20	2	430	27	86	0.1	5	3	1.29	5.28
铣圆槽	12	1	717	27	50.2	0.07	0.5	12	0.30	20.5
铣内台	12	1	717	27	50.2	0.07	5	1	0.25	10.67
扩内圆	16	2	537	27	75.2	0.07	5	1	0.38	9.45
摆线铣槽	16	2	537	27	75.2	0.07	5	0.5	0.19	32.06
槽铣扩边	20	2	430	27	43.0	0.05	5	20	4.30	2.93
插铣	25	2	344	27	34.4	0.05	5	5	0.86	3.57
铣斜坡	20	2	430	27	43.0	0.05	5	20	4.30	4.68
螺旋铣孔	12	1	717	27	35.9	0.05	5	10	1.80	0.85
等高槽	16	2	537	27	53.7	0.05	5	16	4.30	5.28

表5 优化后铣削参数

工序名称	转速 / ($r \cdot \text{min}^{-1}$)	速度 / ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	进给 / ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	每齿进给 / mm	切深 / mm	切宽 / mm	MRR/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	效率 提高 /%	加工时间 / min	缩短时间 / min
铣外圆	480	30	96	0.1	5	3	1.44	12	4.75	0.53
铣圆槽	780	29	55	0.07	2	12	1.32	339	18.72	1.78
铣内台	780	29	60	0.08	5	3	0.9	259	5.88	4.78
扩内圆	600	30	120	0.1	5	2	1.2	219	4.62	4.83
摆线铣槽	600	30	120	0.1	5	1.5	0.9	378	20.25	11.83
槽铣扩边	480	30	50	0.05	5	20	5	16	2.75	0.15
插铣	380	30	40	0.05	5	5	1	16	3.12	0.45
铣斜坡	480	30	60	0.06	5	20	6	40	3.65	1.03
螺旋铣孔	780	29	60	0.08	5	10	3	30	0.63	0.22
等高槽	600	30	70	0.06	5	16	5.6	30	4.75	0.33

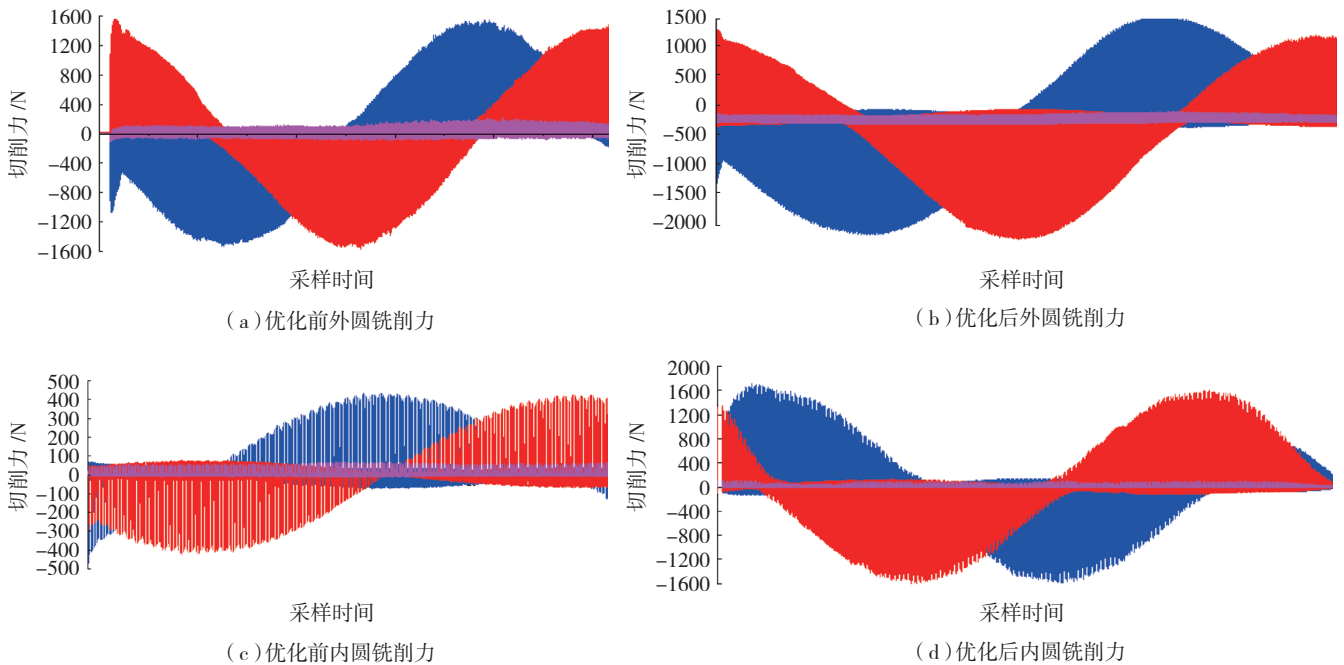


图4 优化前后的内外圆铣削力

Fig.4 Cutting force in outer and inner circle before and after parameter optimization

3.3.3 实际零件对比

采用优化前后铣削参数加工出来的零件见图5。其中,左图为参数优化前加工零件;右图为优化后切削参数下所得零件。在仿真优化过程中,考虑到加工过程为粗加工,粗糙度不是主要因素,因而右图中间圆形区域粗糙度比左图稍差。在其他区域,优化前后参数加工出来零件基本一致。



图5 实际零件对比

Fig.5 Comparison of actual parts

4 结论

本课题以铣削加工力学仿真为基础,综合考虑数控

(下转第 73 页)