

基于 MATLAB 的切削力建模方法研究*

杨 浩,刘献礼,刘 强,郭艳德,李传东

(哈尔滨理工大学机械动力工程学院,哈尔滨 150080)

[摘要] 提出了一种镗削过程中基于 MATLAB 的切削力仿真预测方法,并开发了一种切削力仿真软件。通过建立镗削加工过程的基本参数,研究了刀具几何参数和加工工艺参数与切削面积和线长的关系;根据主副切削刃参与切削情况,将镗削过程分为 4 种工况,分别计算 4 种工况下的切削面积和线长,通过 MATLAB 仿真得到相应的函数关系曲线;建立切削力关于切削面积和线长的数学模型,从而得到切削力与镗削基本参数的关系,同时对镗削过程刀具振动进行研究。通过试验对比,验证了基于 MATLAB 的切削力仿真预测方法的准确性,为镗削过程中切削力和振动的智能控制奠定基础。

关键词: 切削力预测; 切削力数学模型; 切削面积和线长; MATLAB; 45# 钢

Research on Cutting Force Modeling Method Based on MATLAB

YANG Hao, LIU Xianli, LIU Qiang, GUO Yande, LI Chuandong

(School of Mechanical and Power Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080)

[ABSTRACT] This paper presents a simulation prediction method of cutting force based on MATLAB in boring process, and a simulation software of cutting force is developed. By establishing the basic parameters of boring process, the relationship of cutting area and line length, cutting tool geometry parameters and machining process parameters is studied. According to the participation of the main and secondary cutting edges, the boring process is divided into four working conditions, and the cutting area and the line length are calculated respectively under the four working conditions, and the corresponding function curves are obtained by MATLAB simulation. The mathematical model of cutting force about cutting area and line length is established, and the relationship between cutting force and basic parameters of boring is obtained. At the same time, the vibration of cutting tools in boring process is studied. Through experimental comparison, the accuracy of simulation prediction method based on MATLAB is verified, which provides the basis for intelligent control of cutting force and vibration in boring process.

Keywords: Cutting force prediction; Cutting force mathematical model; Cutting area and line length; MATLAB; 45# steel
DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.23/24.070

镗削加工时,镗杆的悬伸长度较大且受切削力的冲击,会使刀具产生振动,降低工件的加工精度,因此对镗削过程中切削力和振动的控制提出了更高的要求。近年来,国内外诸多学者已经通过建立了镗削基本参数与切削力的数学关系,达到对镗削过程切削力预测的目的,并取得一定成果。Yussefian 等^[1]建立了关于刀具几何参数的切削力数学模型,达到对切削力预测的目的,但是数学模型参数复杂。Moetakef-Imani 等^[2]基于 MATLAB 对镗削过程进行了动态仿真研究,分析了镗削过程切削力和切削面积随振动的变化规律。刘学杰

等^[3]建立了切削力与切削面积和线长的关系,但是切削面积和线长几何算法未能给出准确的计算。范胜波等^[4-5]采用了 BP 神经网络学习以及方差分析对切削力进行预测,并与试验切削力数据进行对比,得到了各参数对切削力影响大小的关系,最终分析了影响预测精度的因素。杨文明等^[6]建立了切削力关于切削面积及线长的函数,并考虑了镗刀刀片加工受力时在径向和轴向所产生的位移,并建立了镗削加工的力学模型。王荣栋等^[7]建立了减振镗杆的动力学数学模型,得到了镗杆在切削不同加工参数下的振动特性,从切削参数的角度实现了振动的控制。吴岳昆等^[8-9]对切削力建模和切削力切削参数进行了试验研究,得到准确的数学模型和切

* 基金项目: 国家自然科学基金(51720105009)。

削力系数。许成阳等^[10-11]研究了减振镗杆在不同切削加工参数下的振动特性,并进行切削力和振动的仿真分析,通过试验验证了振动仿真结果的准确性以及切削力预测的准确性。本文基于MATLAB对镗削过程的切削力进行建模方法研究,建立精确的切削参数与切削力数学关系,并给出镗削过程振动的数学模型,开发关于镗削过程的切削力仿真软件,达到对切削力准确预测的目的。

1 建立几何模型

1.1 几何参数

本文研究的镗削基本参数包括:刀具几何参数、工艺参数。研究的刀具几何参数为:刀尖圆弧半径 r 、刀尖角 ε_r 、主偏角 K_r 及副偏角 K'_r 。研究的加工工艺参数为:背吃刀量 a_p 、进给量 f 和主轴转速 n ,镗削过程基本参数如图1所示,本文根据主切削刃和刀尖圆弧刃(红色部分)参与切削的情况,来确定临界背吃刀量(a_{p0}),再根据副切削刃和刀尖圆弧刃参与切削情况,来确定临界进给(f_0)。

临界背吃刀量计算:

$$\delta = K_r - \frac{\pi}{2} \quad (1)$$

$$K'_r = \pi - K_r - \varepsilon_r \quad (2)$$

$$L_{AD} = |AO| \sin(\delta) = r \sin(\delta) \quad (3)$$

$$a_{p0} = L_{AD} + |OB| = L_{AD} + r = r \left(1 + \sin \left(K_r - \frac{\pi}{2} \right) \right) \quad (4)$$

临界进给计算:

$$f_0 = 2 \cdot |OE| \cdot \sin(K'_r) = 2 \cdot r \cdot \sin(\pi - K_r - \varepsilon_r) \quad (5)$$

式中: K_r 、 K'_r 、 ε_r 、 δ 单位为(rad)。

根据背吃刀量(a_p)和临界背吃刀量(a_{p0})的关系以及进给(f)和临界进给(f_0)的关系,可以将镗削过程简单分为4种情况(a) $f < f_0, a_p < a_{p0}$;(b) $f > f_0, a_p$

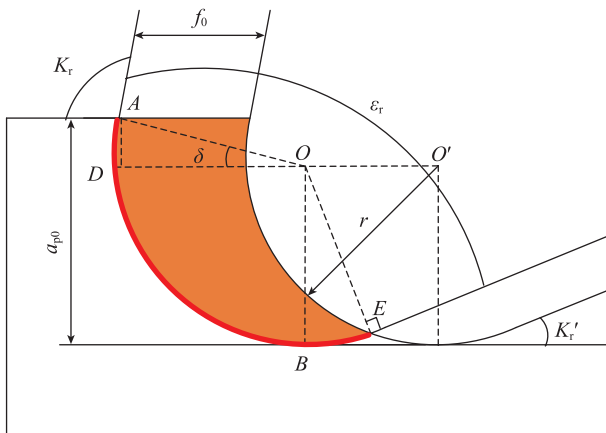


图1 镗削切削参数示意图

Fig.1 Diagram of cutting parameters in boring

$a_p < a_{p0} ; (c) f < f_0, a_p > a_{p0} ; (d) f > f_0, a_p > a_{p0}$,切削情况如图2所示。

1.2 切削面积和线长的计算

如图3所示,在一定刀具几何参数,当进给小于临界进给($f < f_0$),背吃刀量小于临界背吃刀量($a_p < a_{p0}$)时,只有部分刀尖圆弧刃参与切削。

1.2.1 切削面积计算

切削层截面是不规则曲边形,面积用 S 表示,由不规则面积为 S_{ABCD} 减去 S_{BCE} 得,其中 S_{BCE} 为 $S_{\text{矩形}OO'CB}$ 减去 $S_{\text{扇形}O'EO}$ 、 $S_{\text{扇形}OBE}$ 和 $S_{\text{扇形}O'CE}$,所以不规则切削面积可以表示为:

$$S = S_{ABCD} - (S_{\text{矩形}OO'CB} - S_{\text{扇形}O'EO} - 2 \cdot S_{\text{扇形}OBE}) \quad (6)$$

各部分面积计算如下:

$$S_{ABCD} = |AD| \cdot a_p = f \cdot a_p \quad (7)$$

$$S_{\text{矩形}OO'CB} = |OO'| \cdot |OB| = f \cdot r \quad (8)$$

$$S_{\Delta O'EO} = \frac{1}{2} |O'O| \cdot |OE| \cdot \sin(\alpha) = \frac{1}{2} f \cdot r \cdot \sin(\alpha) \quad (9)$$

$$S_{\text{扇形}OBE} = \frac{1}{2} |OB| \cdot \beta = \frac{1}{2} \cdot r \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) \quad (10)$$

将公式(7)~(10)代入(6)得:

$$S = S_{ABCD} - (S_{\text{矩形}OO'CB} - S_{\Delta O'EO} - 2 \cdot S_{\text{扇形}OBE}) \\ = f \cdot (a_p - r) + r \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) + \frac{1}{2} f \cdot r \cdot \sin(\alpha) \quad (11)$$

其中:

$$\alpha = \arccos \left(\frac{f}{2|OE|} \right) = \arccos \left(\frac{f}{2 \cdot r} \right) \quad (12)$$

$$\beta = \frac{\pi}{2} - \alpha \quad (13)$$

式中: α 、 β 单位为rad。

1.2.2 切削线长计算

此时参与切削的切削刃,只有部分刀尖圆弧刃,为图3中红色部分,记为 L 。

$$|AF| = |OB| - a_p = r - a_p \quad (14)$$

$$\delta = \arcsin \left(\frac{|AF|}{r} \right) = \arcsin \left(\frac{r - a_p}{r} \right) \quad (15)$$

$$\theta = \pi - \alpha - \delta \quad (16)$$

$$L = \theta \cdot |OA| = (\pi - \alpha - \delta) \cdot r \quad (17)$$

式中: α 、 θ 、 δ 单位为rad。

1.3 背吃刀量 a_p 和进给 f 对切削面积和线长的影响

切削面积和线长的大小取决于刀具几何参数、切削用量、刀具振动,本文针对以上因素分析切削面积和线长变化规律。根据实际加工情况,给定刀具几何参数:选取刀尖圆弧半径 $r=0.4\text{mm}$,主偏角 $k_r=95^\circ$,刀尖角 $\varepsilon_r=80^\circ$ 。

根据公式(1)和(2),计算得:临界背吃刀量

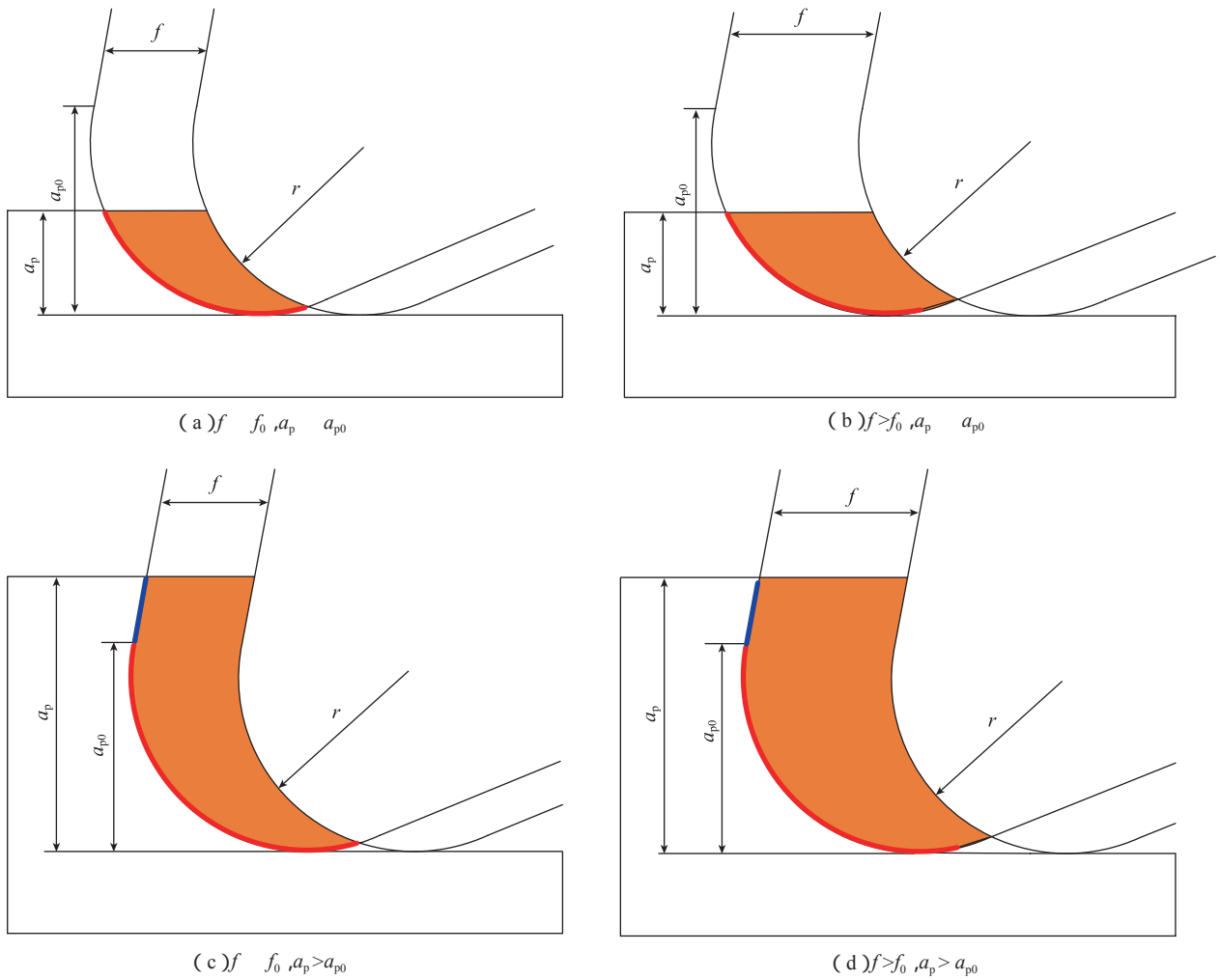


图2 切削情况示意图
Fig.2 Schematic diagram of cutting conditions

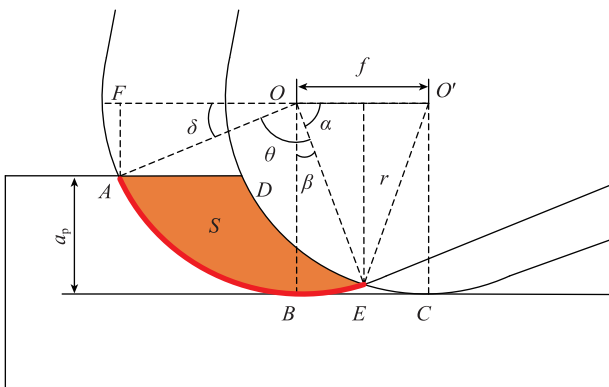


图3 切削面积和线长示意图($f \leq f_0, a_p \leq a_{p0}$)
Fig.3 Diagram of cutting area and line length ($f \leq f_0, a_p \leq a_{p0}$)

$a_{p0}=0.43\text{mm}$, 临界进给 $f=0.069\text{mm/r}$ 。根据实际加工经验,取背吃刀量范围为 $0.03\sim 2.5\text{mm}$,进给范围为 $0.01\sim 0.5\text{mm/r}$; 并取几种常用刀尖圆弧半径值:

$r=0.8\text{mm}$ 、 $r=1.2\text{mm}$ 进行分析,考虑不同刀尖圆弧半径下的切削面积和线长的变化规律。

1.3.1 背吃刀量 a_p 对切削面积和线长的影响

取一个进给 $f=0.2\text{mm/r}$ 的恒定值,大于临界值时,研究切削面积和线长随背吃刀量的变化关系。由图 4 可知切削面积和背吃刀量是线性关系,切削面积不受刀尖圆弧部分参与切削多少的影响。由图 5 可知在背吃刀量小于临界值时,只有刀尖圆弧刃参与切削,切削线长和背吃刀量的关系是非线性的;背吃刀量大于临界值时,主切削刃和刀尖圆弧刃同时参与切削,线长和背吃刀量为线性关系。

1.3.2 进给 f 对切削面积和线长的影响

在背吃刀量取 0.1mm 的恒定值,小于临界值时,研究切削面积和线长随进给的变化关系。如图 6~7 所示,在不同刀尖圆弧半径下,切削面积随进给的线性变化较为接近,切削线长随进给的非线性变化相差较大,说

明刀尖圆弧半径对切削面积影响较小,对切削线长影响较大。

1.3.3 背吃刀量 a_p 和进给 f 对切削面积和线长的综合影响
在图 8~9 中,切削面积和线长为函数,背吃刀量

和进给为自变量,在一定切削参数范围内,背吃刀量和进给对切削面积的影响趋势基本相同。背吃刀量对切削线长的影响较大,进给对切削线长影响较小。

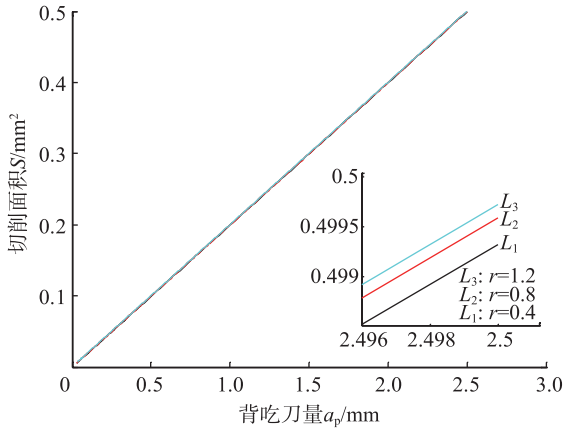


图4 切削面积与背吃刀量的关系

Fig.4 Relationship between cutting area and back engagement of cutting edge

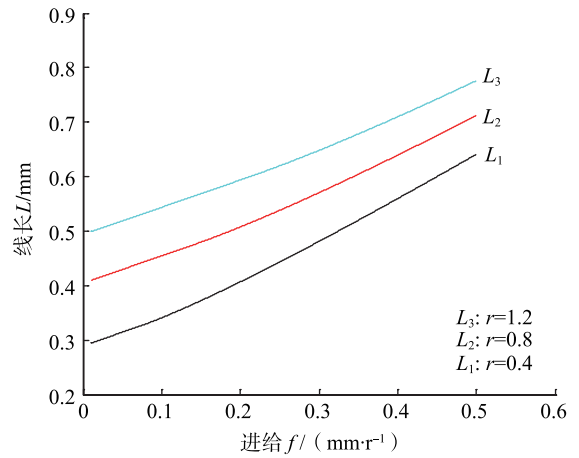


图7 切削线长与进给的关系

Fig.7 Relationship between cutting line length and feed

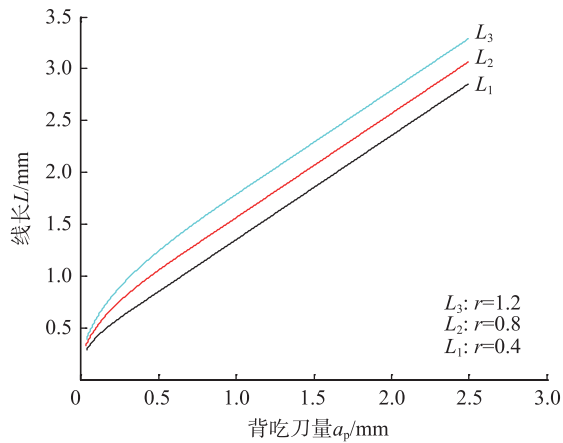


图5 切削线长与背吃刀量的关系

Fig.5 Relationship between cutting line length and back engagement of cutting edge

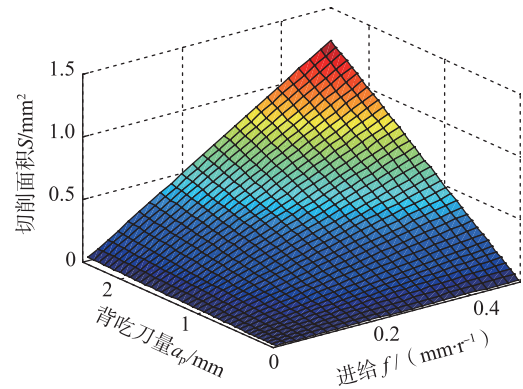


图8 背吃刀量和进给对切削面积的影响

Fig.8 Influence of back engagement of cutting edge and feed on cutting area

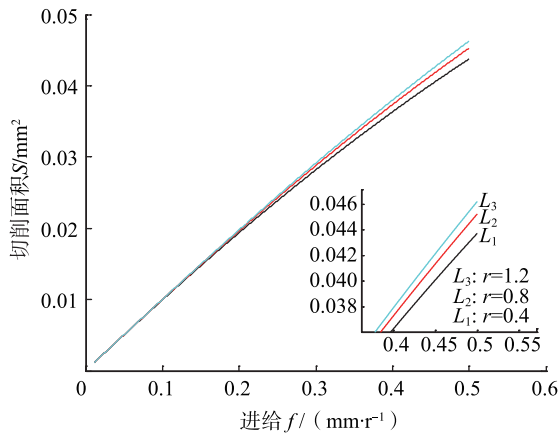


图6 切削面积与进给的关系

Fig.6 Relationship between cutting area and feed

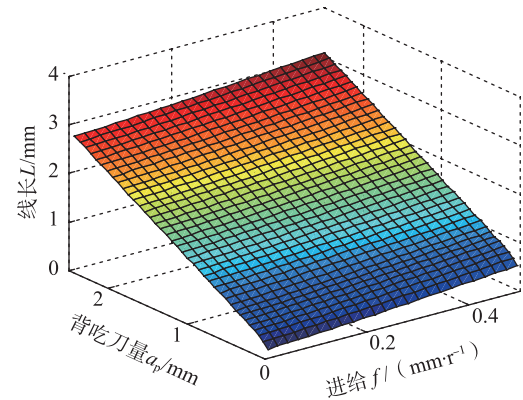


图9 背吃刀量和进给对切削线长影响

Fig.9 Influence of back engagement of cutting edge and feed on cutting line length

2 切削力建模

2.1 建立切削力数学模型

镗削加工时切削合力可以分解为:切向力 F_t 、进给力 F_f 和径向力 F_r , 其中切向力和径向力合成在平面中用摩擦力来计算。根据切削力经验公式中切削力与切削面积和线长的关系, 在切削面任意点上, 可以将切削力微元表示成切削面积微元和切削刃线长微元的函数:

$$dF_t = dF_{tc} + dF_{te} = K_{tc}dS + K_{te}dL \quad (18)$$

$$dF_{fr} = dF_{frc} + dF_{fre} = K_{frc}dS + K_{fre}dL \quad (19)$$

式中, dF_{tc} 和 dF_{frc} 是由切除切屑时产生, dF_{te} 和 dF_{fre} 是切削过程摩擦引起的。

由式(3)~(4)积分运算可得:

$$F_t = F_{tc} + F_{te} = K_{tc}S + K_{te}L \quad (20)$$

$$F_{fr} = F_{frc} + F_{fre} = K_{frc}S + K_{fre}L \quad (21)$$

将 F_{fr} 分解为 F_r 、 F_f 则有:

$$F_f = F_{fc} + F_{fe} = K_{fc}S + K_{fe}L \quad (22)$$

$$F_r = F_{rc} + F_{re} = K_{rc}S + K_{re}L \quad (23)$$

$$F = \sqrt{F_t^2 + F_f^2 + F_r^2} \quad (24)$$

确定具体的切削力数学模型可以通过求解公式(20)和(21)中的切削系数 K (K_{tc} 、 K_{frc} 等)、 K (K_{te} 、 K_{fre} 等)。

2.2 切削参数对切削力的影响

2.2.1 背吃刀量 a_p 和进给 f 对切削力的影响

根据上述切削力数学模型, 进一步研究不同切削参数对切削力的影响。由已建立的数学关系, 分别得到三向分力以及切削合力关于背吃刀量和进给的函数关系, 如图 10~11 所示。

比较图 10~11 不同切削参数对切削力的影响, 可知在切削面积和线长保持不变, 以及机床切削效率相同时, 比较增大背吃刀量与增大进给对机床能耗的影响, 前者既增加了切削力又增加了机床功率的能耗; 在机床能耗相等以及表面粗糙度允许情况下, 采取较大的进给, 单次走刀可切除更多的金属, 从而可以提高生产效率。

2.2.2 背吃刀量 a_p 和进给 f 对切削力综合的影响

在其他参数恒定时, 得到切削合力关于背吃刀量和进给的函数关系, 如图 12 所示。便于综合考虑背吃刀量和进给等参数, 来选定一个适宜实际加工的切削力, 同时可以根据不同的镗削参数预测切削力的大小, 对生产实践具有指导作用。

2.3 镗削的振动特性分析

在上述加工工况下, 加工过程中刀具存在振动, 假设刀具在背吃刀方向的振动位移为正弦曲线, 背吃刀量振动位移用正弦函数 $a = A \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t)$ 表示, 瞬时背吃刀

量用 a_p' 表示, 代入切削面积公式(11), 得到切削面积关于时间 t 的函数, 如图 13 所示; 代入切削合力公式(24), 得到切削合力关于时间 t 的函数曲线, 函数曲线如图 14 所示。其中 A 为振幅, f 为频率, t 为时间。根据实际加工测得, 振幅取 $0.05\mu\text{m}$, 频率取 90Hz 。其他参数采取

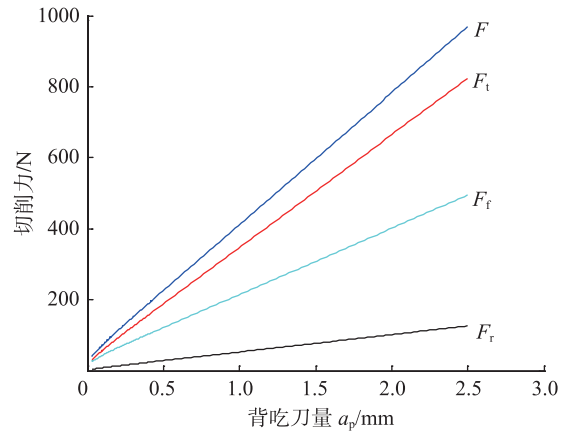


图10 背吃刀量对切削力的影响

Fig.10 Influence of back engagement of cutting edge on cutting force

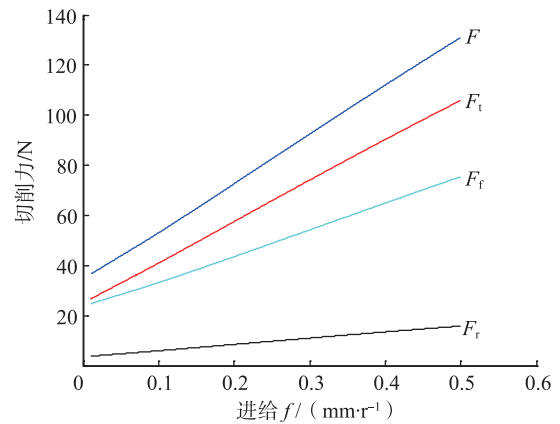


图11 进给对切削力的影响

Fig.11 Influence of feed on cutting force

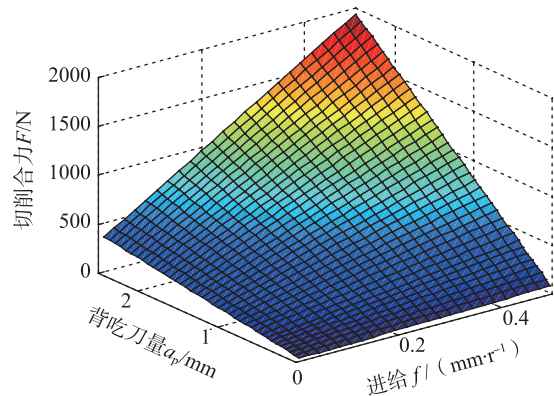


图12 背吃刀量和进给对切削力的影响

Fig.12 Influence of back engagement of cutting edge and feed on cutting force

以上参数。

$$a = A \cdot \sin(2\pi \cdot f' \cdot t) \quad (25)$$

代入参数得：

$$a = 0.05 \sin(2 \times 90\pi \cdot t) \quad (26)$$

$$a'_p = a_p + a = a_p + 0.05 \sin(2 \times 90\pi \cdot t) \quad (27)$$

3 切削力仿真软件开发

在以上加工参数的基础上,再给定常用主偏角范围 $75^\circ \sim 115^\circ$,常用刀尖角 $75^\circ, 80^\circ, 95^\circ$ 等,转速、工件直径任意,材料属性可设置。进行 MATLAB 仿真页面设计,设计判断加工工况程序,并计算出相应工况切削面积和线长,为切削力的计算提供基础。根据切削面积、线长、工件直径和转速等参数计算出切削合力以及分力,软件页面如图 15 所示。切削力仿真软件提供了切削力有效的预测和刀具振动变化规律分析,为镗削过程中的切削力及振动的智能控制提高参照依据,提高工件的加工质量。

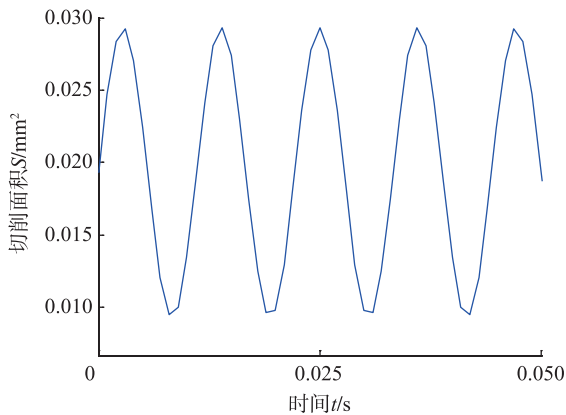


图13 振动对面积的影响

Fig.13 Influence of vibration on area

4 试验验证

4.1 切削力经验公式系数的确定

根据文献 [9] 提出的切削力系数试验原理和方法,得到金属材料 45# 钢的切削力系数如下:

$$K_{re} = 521.7, K_{fe} = 183.2, K_{te} = 1156.2;$$

$$K_{rc} = 821.1, K_{fc} = 12.2, K_{tc} = 86.3。$$

代入公式切削力经验公式可以得到:

$$F_r = K_{re} S + K_{rc} L = 521.7 S + 821.1 L \quad (28)$$

$$F_f = K_{fe} S + K_{fc} L = 183.2 S + 12.2 L \quad (29)$$

$$F_t = K_{te} S + K_{tc} L = 1156.2 S + 86.3 L \quad (30)$$

4.2 切削力经验公式的验证

根据文献 [9] 提供的 45# 钢的切削参数,对文献 [10] 的试验数据进行验证。文献 [9] 的试验条件为刀具 CNMG-12-04-04-XM;材料为 45# 钢,切削速度 $v=100\text{m/min}$,背吃刀量 $a_p=0.3\text{mm}$ 。选取进给对切削力合力和主切削力的影响进行验证,结果如表 1 所示。

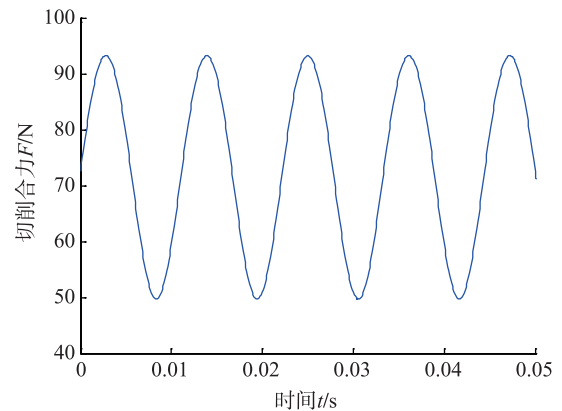


图14 振动对切削合力的影响

Fig.14 Influence of vibration on cutting force

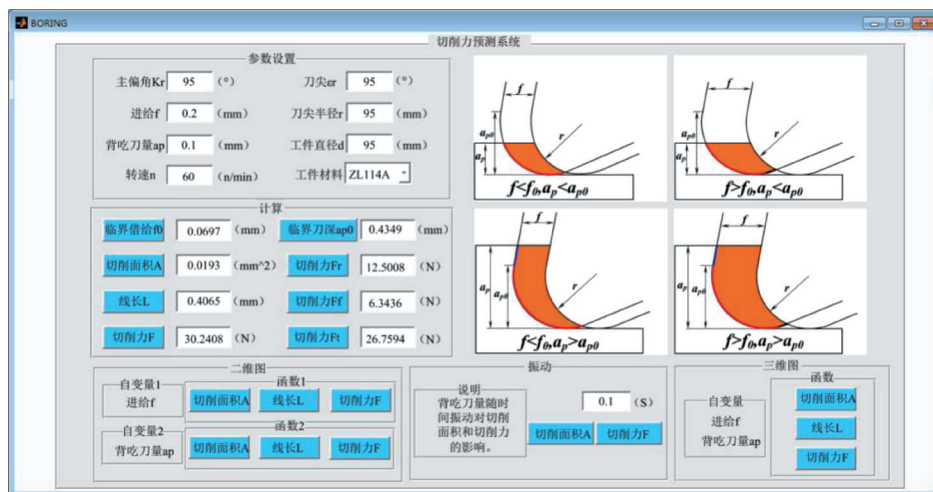


图15 切削力仿真软件界面

Fig.15 Interface of cutting force simulation software

表1 样本的预测结果与实测结果比较

Table 1 Comparison of predicted results with measured data

序号	输入参数	试验结果		预测结果及误差			
	进给 $f/(mm \cdot r^{-1})$	合力 F/N	主切削力 F_t/N	合力 F/N	误差 /%	主切削力 F_t/N	误差 /%
1	0.1	85.72	70.82	106.2	23.8	84.53	19.3
2	0.2	140.9	119.1	151.1	7.2	124.2	4.2
3	0.3	188.7	161.4	196.2	3.9	163.9	1.5
4	0.4	232.5	200.3	241.2	3.7	203.2	1.4
5	0.5	273.3	236.8	285.6	4.5	242.0	2.1

注:误差 = (预测值 - 实测值) / 实测值。

为了验证所建立的切削力数学模型与切屑几何参数关系的准确性,表1记录了预测结果和相对误差。所得2~5组数据预测准确度较高,误差均在8%以内;数据1误差较大,由于进给较小,刀具不易切入工件,真实的切削面积和线长比理论计算值小,使试验测的切削力小于仿真预测的切削力。本文提出的切削面积和线长几何算法和切削力数学模型较为准确。

5 结论

通过切削面积和线长几何模型,得到切削面积和线长的精确算法,并建立关于切削面积及线长的切削力数学模型。通过MATLAB设计镗削切削力仿真软件页面,进行仿真分析,可以实现对不同镗刀几何参数和切削参数下的切削力进行预测,并得到切削面积、切削线长和切削力函数关系曲线,同时对镗削过程刀具振动进行研究。通过与试验数据的对比,验证了基于MATLAB的切削力仿真预测方法的准确性,为镗削过程中切削力和振动的智能控制奠定基础。

参 考 文 献

[1] YUSSEFIAN N Z, MOETAKEF-IMANI B, EL-MOUNAYRI H. The prediction of cutting force for boring process[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2008, 48(12/13): 1387-1394.

[2] MOETAKEF-IMANI B, YUSSEFIAN N Z. Dynamic simulation of boring process[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2009, 49(14): 1096-1103.

[3] 刘学杰,王红州. 基于金属切削原理的镗削力建模方法研究[J]. 机械工程师, 2014(1): 135-137.

LIU Xuejie, WANG Hongzhou. Modeling method of boring force based on metal cutting principle[J]. Journal of Mechanical Engineers 2014(1): 135-137.

[4] 范胜波,王太勇,汪文津,等. 基于MATLAB神经网络的切削力预测[J]. 机床与液压, 2006(1): 4-5.

FAN Shengbo, WANG Taiyong, WANG Wenjin, et al. Prediction of cutting force based on MATLAB neural network[J]. Machine Tool and Hydraulic Pressure, 2006(1): 4-5.

[5] 崔伯第,郭建亮,殷宝麟. 基于神经网络的高速硬车切削力预测研究[J]. 机械设计与制造, 2012(9): 175-177.

CUI Bodi, GUO Jianliang, YIN Baolin. Predictive modeling study on cutting force in high speed turning of hardened steel based on artificial neural[J]. Mechanical Design and Manufacture, 2012(9): 175-177.

[6] 杨文明. 两刀片固定镗刀块切削加工的力学模型[J]. 装备制造技术, 2014(7): 269-271.

YANG Wenming. Mechanical model of machining by boring cutter head fixed by two blades[J]. Journal of Equipment Manufacture Technology, 2014(7): 269-271.

[7] 王荣栋,高国生,郝瑞晓. 基于Matlab的减振镗杆动态特性分析[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版, 2015, 28(3): 91-98.

WANG Rongdong, GAO Guosheng, HAO Ruixiao. Research on dynamic characteristics of damping boring bar based on Matlab[J]. Journal of Shijiazhuang Railway University: Natural Science Edition, 2015, 28(3): 91-98.

[8] 吴岳昆. 金属切削原理与刀具[M]. 北京:机械工业出版社, 2011.

WU Yuekun. Metal cutting principle and cutting tools[M]. Beijing: China Machine Press, 2011.

[9] 刘强,李忠群. 数控铣削加工过程仿真与优化[M]. 北京:航空工业出版社, 2011.

LIU Qiang, LI Zhongqun. Simulation and optimization of CNC milling process[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2011.

[10] 许成阳. 深孔加工用镗杆减振性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2015.

XU Chengyang. Research on vibration reduction performance of deep processing boring bar[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2015.

[11] 潘永智,艾兴,唐志涛,等. 基于切削力预测模型的刀具几何参数和切削参数优化[J]. 中国机械工程, 2008, 19(4): 428-431.

PAN Yongzhi, AI Xing, TANG Zhitao, et al. Optimization of tool geometry and cutting parameters based on a predictive model of cutting force[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(4): 428-431.

通讯作者:刘献礼,教授,博士,研究方向为高效切削加工及刀具技术, E-mail: xianli.liu@hrbust.edu.cn.

(责编 古京)