

文章编号: 1000-6893(2007)02-0481-09

立铣切削力分类研究及精确铣削力模型的建立

康永刚, 王仲奇, 吴建军, 姜澄宇

(西北工业大学 机电学院, 陕西 西安 710072)

Study of the Classification of Cutting Forces and the Build of the Accurate Milling Force Model in End Milling

KANG Yong-gang, WANG Zhong-qi, WU Jian-jun, JIANG Cheng-yu

(School of Mechatronics, Northwestern Polytechnical University, Xi an 710072, China)

摘要: 提出了一种根据切削力变化曲线的形状特征精确建立铣削力预测模型的方法。以立铣加工过程为研究对象, 基于静力模型, 研究铣削力的变化规律和切削用量的关系, 总结了 6 种不同切深组合下的铣削力类型并分别给出理论的切削力随刀具旋转的变化曲线图, 基于切削力交叠程度又将切削力细分为 10 类。在此基础上通过定义切削力分析指标, 得到了基于切削力曲线形状特征的实际切深的计算方法。根据理论分析结果, 提出在不同切深组合下分别建立铣削力模型的观点, 实际切深的应用使得模型更加精确, 更重要的是根据该切削力分类来组织试验, 针对性加强, 试验数据更可信。通过合理安排试验, 验证了该理论的正确性。

关键词: 立铣; 实际切深; 切削力分析指标; 切削力曲线; 铣削力模型

中图分类号: TG501.2

文献标识码: A

Abstract: A new approach is proposed to modeling the milling force based on the cutting force shape characteristics in end milling. The relationships between the cutting forces and the cutting depths are analyzed and the cutting forces are classified into six types according to the combination of cutting depths, and then into ten types based on the degree of overlap. Meanwhile, the theoretical cutting force curve is provided correspondingly. Furthermore, force indices are extracted from the cutting forces and then the real cutting depths are detected based on the changes of the force shape characteristics via the force indices in the end-milling process. Through the theoretical analyzed results, a method of modeling cutting-force based on the six milling force types is brought forward, and the use of the real cutting depth make the model to be more accurately. More importantly, experiments designed on the classification of milling forces strengthen the pertinence, and make the experiment data more reliable at the same time. The approach is validated through cutting experiments.

Key words: end milling; real cutting depth; force indice; cutting force curve; milling force model

薄壁件的加工变形预测与精度保障技术是长期困扰我国航空领域的技术难题。研究立铣加工过程及铣削力的精确建模是薄壁件加工变形控制的基础, 对加工工艺的优化有重要的指导意义。

不同的铣削力模型以及相关切削常数的确定决定了铣削力的大小, 国内外学者在相关领域已经进行了大量研究。W. A. Kline^[1]建立了平均铣削力模型, 通过安排多组试验, 测量每组试验的平均力来确定模型中切削常数, 进而进行瞬态铣削力分布预测; Won-Soo Yun 建立了三维铣削力模型^[2], 通过一组试验数据去预测模型常量; Huai zhong Li^[3]将 Oxley^[4]的切削理论用于铣削力分析, 建立了铣削力理论模型; S. Smith^[5]将铣削力

学模型总结为平均刚性力模型、静态倾斜模型、瞬态刚性模型、瞬态刚性倾斜模型、瞬态柔性倾斜模型及动态倾斜模型。上述模型在预测切削常数的过程中, 仅通过数学方法(或凭经验)组织试验、处理试验数据, 并未将对切削常数有重要影响的切削加工过程考虑进去, 而通过理论和试验研究可知, 切削过程在不同的切深(径向和轴向切深)组合下会出现总是单齿切削、有时单齿有时多齿切削或者总是多齿同时参与切削的情况, 在不同的切削情况下又有着不同的切削力变化, 也必然应该有着不同的切削常数预测模型。而不考虑切削力变化的预测模型必然是一些切削情况下精度高, 一些情况下精度较差, 存在盲目性。另外, 上述模型建立过程中使用的均是名义切削深度, 而实际生产过程中常常出现的“让刀”与“过切”现象, 使得实际切深的应用无疑将大大提高模型的

收稿日期: 2005-12-30; 修订日期: 2006-03-17

基金项目: 国家自然科学基金(50435020)

通讯作者: 王仲奇 E-mail: wangzhqi@nwpu.edu.cn

计算精度。

本文首先从分析切削面积的变化入手,总结了6种不同切深组合(径向和轴向切深的不同组合)下铣削力的变化规律,建模过程中基于Kline的平均力模型,根据实际的加工切深所属类型,合理组合切深进行试验并处理数据,从而有效地减小了因不考虑切削力变化的不同分类而造成的切削常数预测上的盲目性,提高了切削力模型的预测精度。另一方面,基于多齿交叠程度的分析,通过切削力变化曲线形状特征的研究,提取出两个切削力分析指标,分析得到了实际切深的计算方法,并应用于铣削力计算模型中,进一步提高了模型的预测精度。

1 铣削过程分析及力的空间分布

考虑到薄壁件实际加工情况,以下讨论主要针对顺铣加工,且径向切深 d_r 小于刀具半径 R 的情况,切削力仅考虑对工件变形影响显著的 Y 及 X 向力,但仍然可以扩展到其他情况。

切削力的大小与切削面积有关^[6]。考虑一单齿顺铣切削过程,图1为某一瞬时铣削状态及力的分布图。在不同时刻,刀齿与工件的接触线沿 A 向移动至不同位置,切削力的分布状态也随之发生改变。各切削用量都对切削力的分布产生影响。径向切深 d_r 及每齿进给主要影响切削厚度 t_c , t_c 随 d_r 及每齿进给量 t_x 的增大而增大(d_r 小于刀具半径 R 时),最终引起切削力的增大。从图1所示瞬时可以看出,随切削面积的变化,切削力先增大,后保持最大值不变,再减小,到 G 点切出刀具/工件接触区域。

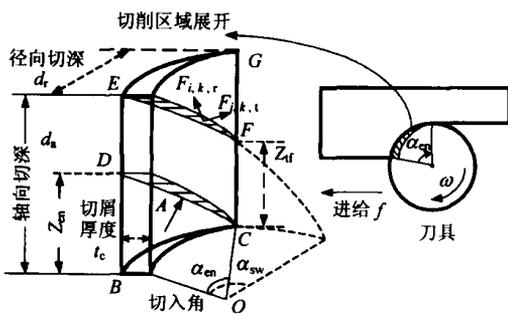


图1 瞬时铣削力空间分布图

Fig. 1 Instantaneous distribution of milling forces

图中, Z_{en} 为铣刀螺旋线在切入角范围内在垂直方向 Z 向的投影距离,其计算表达式为

$$Z_{en} = r_{en} R / \tan \alpha_{hx} \quad (1)$$

式中: α_{hx} 为刀具螺旋角; r_{en} 为切入角,且有

$$r_{en} = \arccos^{-1}(1 - d_r / R) \quad (2)$$

α_{sw} 为刀具在轴向切深范围内旋转扫过的角度,称之为扫掠角,计算表达式为

$$\alpha_{sw} = d_a \tan \alpha_{hx} / R \quad (3)$$

Z_{ef} 为铣刀相邻两螺旋刃在垂直方向 Z 向的距离,其计算表达式为

$$Z_{ef} = t_x R / \tan \alpha_{hx} \quad (4)$$

式中: t_x 为每齿空间角, $t_x = 2\pi / z$; z 为刀具齿数。

2 力的分类

2.1 切削力的分类方法与分析

Sabberwal 和 Koenigsberger^[7] 以及 Tlusty and MacNeil^[6] 以刀具切入角和扫掠角将切削力随刀具旋转角度的变化情况划分为两类,而未考虑大切深的情况;Liuqing Yang^[8] 考虑 $d_r > R$ 的情况将切削力分为3类。而根据试验得知一定刀具、材料下的切削力的变化主要由径向和轴向切深决定,而且按切深划分切削力类型简单、清晰且更便于实际的工艺控制操作。更重要的是,以实际切深分类更便于试验的组织和分析。以下详细讨论根据切深变化来划分切削类型的方法。

通过计算可知,在一般情况下(铣刀齿数小于3齿) $Z_{en} < Z_{ef}$,下面以两齿铣刀为例,针对顺铣($d_r < R$)进行了分类研究:

轴向切深 $d_a < Z_{ef} - Z_{en}$ 且 $d_a < Z_{en}$ 。如图2所示,(b)部分阴影表示切削面积。无论何时,只有一齿参与切削。且一齿回转周期内,有部分时间刀齿不与工件接触。刀齿从最下端 B 点处切入,随着切削长度的增加,切削力持续增大,到 D 点达到最大值;然后 DF 段虽然切削长度不变但是切削厚度在减小,所以切削力也随着缓降至 F 点后,急剧减小为零,到 G 点刀刃切出工件。

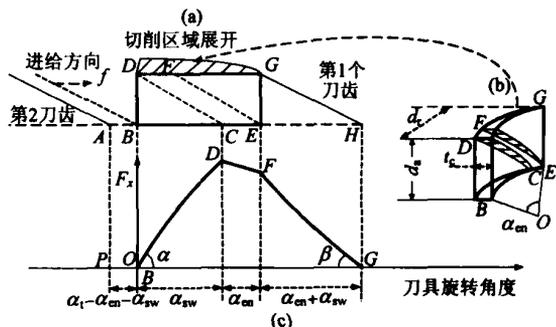


图2 类型I切削力变化

Fig. 2 Type-I cutting forces

图 2(c) 为切削力随刀具旋转的变化曲线, 它有 4 个特征角: 进入点到最大值点的角度差 α_{sw} ; 进入点与 F 点角度差 α_{en} ; 切出点与进入点角度差 $\alpha_{sw} + \alpha_{en}$; 两齿间隔 $\alpha_1 = \alpha_{sw} - \alpha_{en}$ 。

$d_a < Z_{ef} - Z_{en}$ 且 $d_a > Z_{en}$ 。如图 3 所示, 无论何时, 只有一齿参与切削。且在一齿回转周期内, 有部分时间刀齿不与工件接触。刀齿从最下端 B 点处切入, 在 BD 段由于切削长度的增加, 切削力持续增加。由于 $d_a > Z_{en}$, 在 DF 段切削面积保持不变, 所以切削力在 D 点到达最大值后, 有一段稳定时间, 然后才下降。

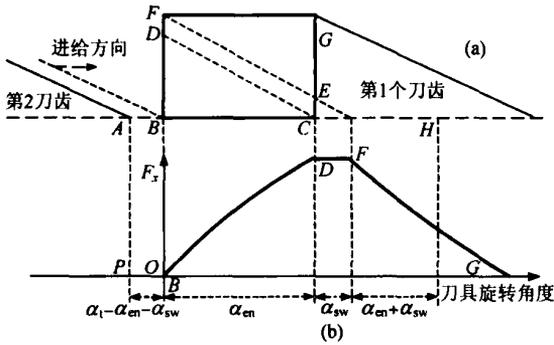


图 3 类型 切削力变化
Fig. 3 Type- cutting forces

$d_a > Z_{ef} - Z_{en}$ 但 $d_a < Z_{en}$ 且 $d_a < 2Z_{ef} - Z_{en}$ 。如图 4 所示, 在一齿回转周期内, 部分时间只有一齿在参与切削, 部分时间有两齿同时在参与切削, 任何时间刀齿都与工件接触, 所以力最小值不为 0。但由于 $d_a < Z_{en}$, 形同于类型 I, 切削力到达最大值后, 很快便下降。

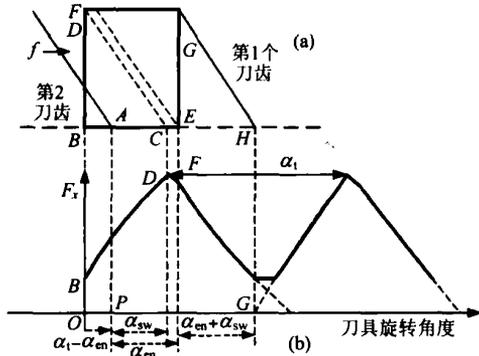


图 4 类型 切削力变化
Fig. 4 Type- cutting forces

$d_a > Z_{ef} - Z_{en}$, $d_a > Z_{en}$, 且 $d_a < 2Z_{ef} - Z_{en}$ 。如图 5 所示, 切削力变化曲线同类型 I, 任何时间刀齿都与工件接触, 所以力最小值不为 0。在 DF 段, 总的切削面积不变, 所以切削力到达最大值后, 有一段稳定时间, 然后才下降。

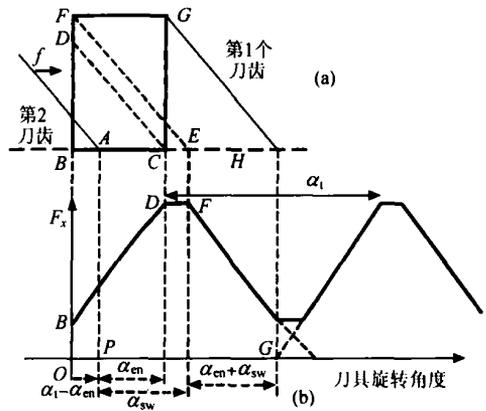


图 5 类型 切削力变化

Fig. 5 Type- cutting forces

$d_a > 2Z_{ef} - Z_{en}$, $d_a > Z_{en}$ 。如图 6 所示, 无论何时, 在一齿回转周期内, 总有两齿同时在参与切削。且 $d_a > Z_{en}$, 切削力有一段稳定时间。

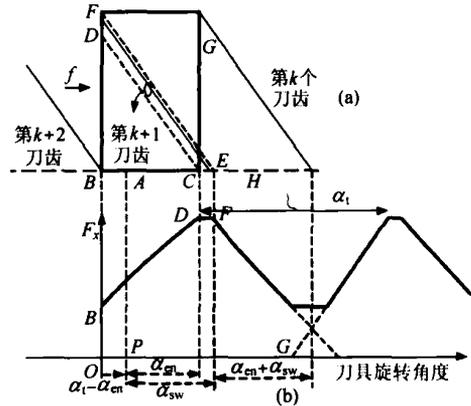


图 6 类型 切削力变化

Fig. 6 Type- cutting forces

$d_a > 2Z_{ef} - Z_{en}$, $d_a < Z_{en}$ 。切削形状同第 5 类, 但是 $d_a < Z_{en}$, 所以 DF 段为切削力缓降。

需要指出的是以上分析虽然针对的是顺铣过程, 但是同样适合于逆铣过程的分析, 分类方法也相同, 只不过进给方向相反, 对于顺铣的切入点 B 变成了逆铣的切出点。 $d_r > R$ 时的情况可以视为 $0-R$ 段以及 $R-d_r$ 段力的叠加。分析中应该注意, $R-2R$ 段属于逆铣过程, 如图 7 所示。

另外, 虽然以上仅对 2 齿铣刀进行了分析, 但切削力的分类方法同样适合于多齿情况。图 8 清晰地表示了 6 类铣削模式的分类和径向及轴向切深的关系。其中径向切深 d_r 范围 $[0, 2R]$ 。实线表示 3 齿时的分类情况, 双点划线和虚线分别表示 4 齿以及 2 齿的分类。可以看出随着齿数的增大, 类型 I, II, III 范围将明显减小, 类型 IV 明显增大。4 齿以上情况下, $d_r / R > 1$ 时, 切削类型 IV 就

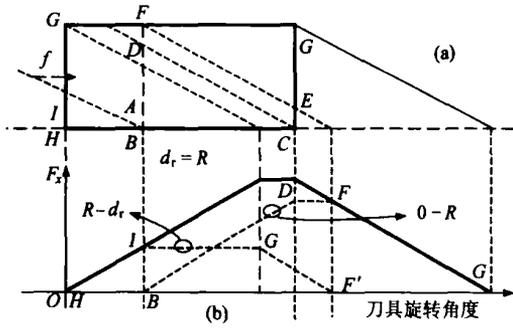


图7 $d_r > R$ 时切削力变化
Fig. 7 Cutting force curves of $d_r > R$

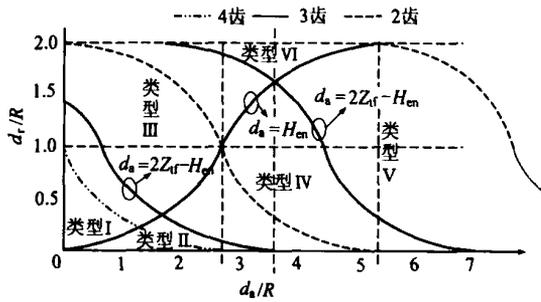


图8 切削类型的分类
Fig. 8 Classification of cutting types

已经不存在了,而 $d_r/R < 1$ 时甚至也可以出现类型 ;另外在刀具刃长一定下,类型的选择余地也增大了。对于两齿加工的情况,类型 消失; $d_r < R$ 时类型 也没有了。还可以证明图8中3条竖直虚线,通过与齿数相对应的 $d_a = Z_{rf} - Z_{en}$ 与 $d_r = 0$ 的交点以及 $d_a = Z_{en}$ 与 $d_a = 2Z_{rf} - Z_{en}$ 的交点。利用以上特征可以合理地安排试验并分析应用于切削力建模。

2.2 两齿切削力的交叠程度(DOO)的分析

切削过程中仅单齿参与的过程,前述分类法就可以惟一确定其切削力的变化。但有两齿同时参与切削的 , , 情况比较复杂,需要进一步进行切削力交叠程度的分析。

考虑到切削力变化曲线的形状特征,切削力的交叠程度可以分为4类:无交叠(NO),发生在切削过程仅有一齿参与的情况;轻度交叠(LO),上一齿切削力下降边与下一齿上升边交叠;中度交叠(MO),上一齿切削力下降边与下一齿下降边交叠;高度交叠(HO),上一齿切削力上升边与下一齿上升边也交叠。据此进一步将切削力细分为10类。图9表示的是一个三齿,30°螺旋角的铣刀切削力细分实例,两条虚直线 $d_r = (1 - \cos \alpha_t)R$, $d_a = Z_{rf}$ 及实曲线 $d_a = Z_{rf} - Z_{en}$ 决定了交

叠程度的定义。可以看出LO以及NO类型出现的几率很大,而HO出现的情况则极少,实际加工过程中应用的也多是LO和NO的类型。

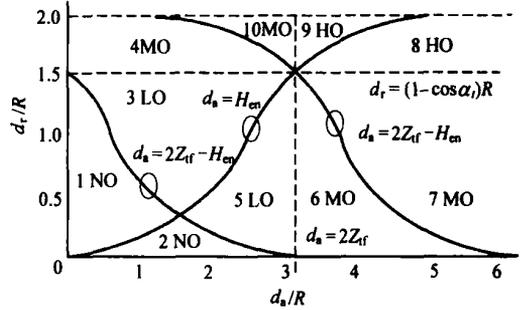


图9 考虑交叠程度的切削力细分
Fig. 9 Classification of cutting types of DOO

2.3 切削力分析指标和实际切深的计算

为了获得实际切深,从分析切削力曲线的形状特征入手,定义了以下2个切削力分析指标: P_{VP} 为切削力波峰和波谷之间的角度距离; P_{AV} 为刀具旋转2周的铣削平均力。

切削力指标与切削过程中的实际切深有着密切的关系。以下就图9划分的10类切削力,分别讨论从切削力指标得到实际切深的方法。

(1) 类型 ,

由图2和图3得类型 和 指标计算公式为

$$P_{VP} = \begin{cases} sw & (d_r < R) \text{ 类型} \\ sw - \frac{1}{2} & (d_r > R) \text{ 类型} \\ en & \text{类型} \end{cases} \quad (5)$$

(2) 类型 (图10)

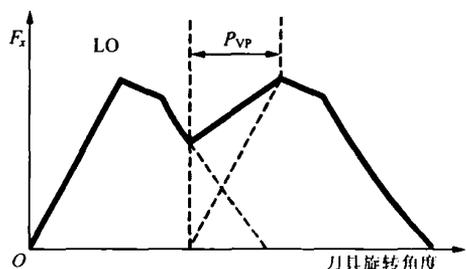
切削力指标及切削力特征角度的关系定义为

$$P_{VP} = \begin{cases} en - \frac{1}{2} & (d_r > R, LO) \\ sw & (\text{其余}) \end{cases} \quad (6)$$

(3) 类型 (图11)

指标计算公式为

$$P_{VP} = \begin{cases} t - sw & (LO) \\ sw - t & (MO) \end{cases} \quad (7)$$



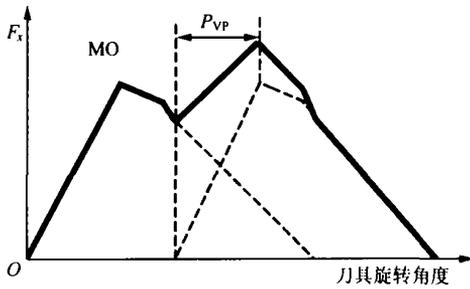


图 10 类型 MO 的切削力指标
Fig. 10 Force indexes of type MO

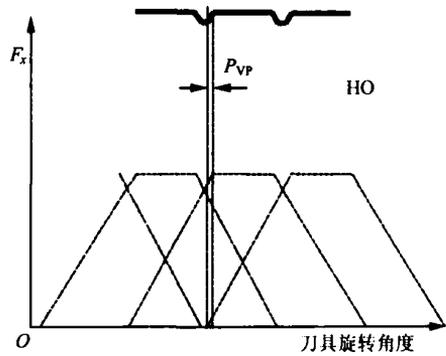


图 12 类型 HO 的切削力指标
Fig. 12 Force indexes of type HO

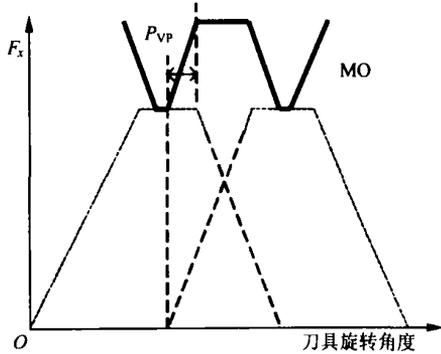
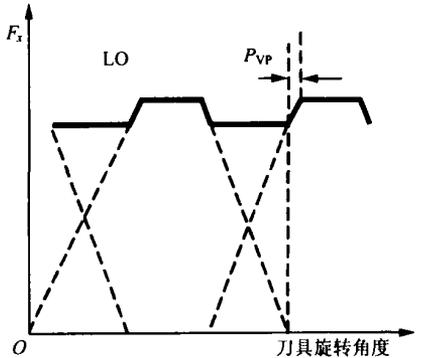


图 11 类型 LO 的切削力指标
Fig. 11 Force indexes of type LO

(5) 类型 (图 13)

指标计算公式为

$$P_{VP} = \begin{cases} en - 2t + sw & en - 2t + sw > 0 \\ en - t & en - 2t + sw < 0 \\ sw - t & \end{cases} \begin{matrix} MO \\ MO \\ HO \end{matrix} \quad (9)$$

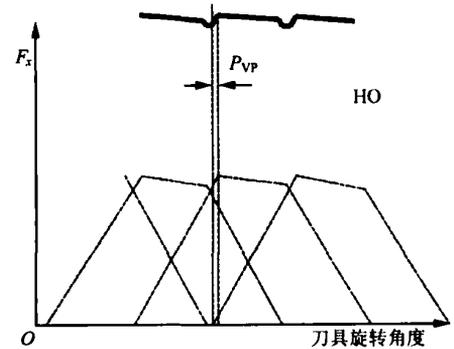
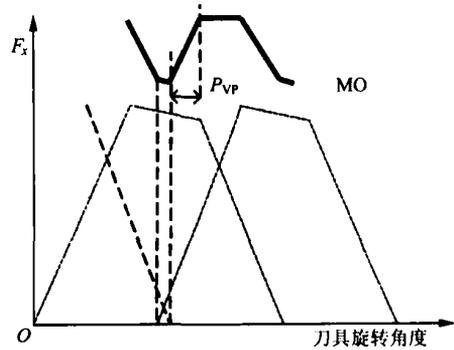
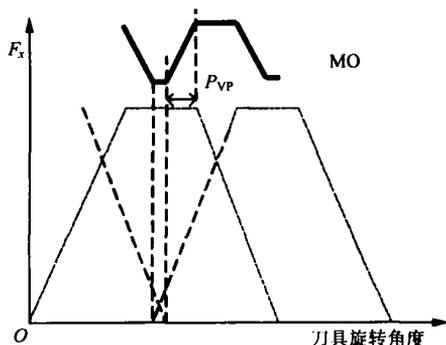


图 13 类型 MO 的切削力指标
Fig. 13 Force index of type HO

(4) 类型 (图 12)

指标计算公式为

$$P_{VP} = \begin{cases} sw - 2t + en & sw - 2t + en > 0 \\ sw - t & sw - 2t + en < 0 \\ en - t & \end{cases} \begin{matrix} MO \\ MO \\ HO \end{matrix} \quad (8)$$



(6) 实际切深的计算

切削力指标和切削力特征角度之间的关系可以由式(5)~式(9)确定,进一步由式(1)~式(3)可以得到实际切深的计算方法为

$$d_a = sw R / \tan \alpha_{hx} \quad (10)$$

$$d_r = R(1 - \cos \alpha_{en}) \quad (11)$$

切削力指数 P_{AV} 和切深的关系可以由以下关系确定^[9]

$$P_{AV} = K d_r d_a \quad (12)$$

3 铣削过程分析及力的空间分布

3.1 力模型的选择

由以上的分析过程,可以看出 6 类切削力曲线各不相同,故而切削力必然有所差异,因此按此分类分别计算切削力常量是很有必要的。相应的,按图 8 选择切深组合进行试验,在减少了实验盲目性的同时,更可以提高力模型的精确度。

采用 Kline 的平均铣削力模型,在 6 个分类上分别建立铣削力模型。

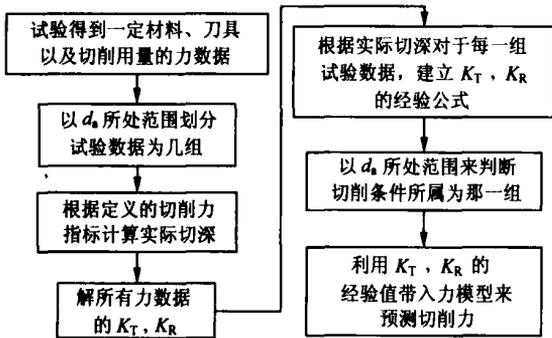


图 14 力模型建立的流程图

Fig 14 Flowchart of mechanical modeling procedure

基于微分段思想,将刀齿沿轴向均分为长度为 d_z 的微小单元,单元切向切削力及径向切削力可以计算如下

$$\begin{bmatrix} F_{i,k,r} \\ F_{i,k,t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_T d_z t_c \\ K_R d F_T \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中: $F_{i,k,r}$, $F_{i,k,t}$ 分别为单元的切向、径向切削力; d_z 为微单元的宽度; t_c 为微单元厚度; K_T , K_R 为切削常量。

为计算与分析方便,将单元力分解到 X 向、Y 向,这样计算平均切削力的公式表示如下(上面符号表示顺铣,下面符号表示逆铣)

$$\overline{F_y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N_z} \sum_{k=1}^{N_f} \{ \mp K_R K_T d_z f_z \sin [(i, j, k)] \cdot \cos [(i, j, k)] + K_T d_z f_z \sin^2 [(i, j, k)] \} / N \quad (14)$$

$$\overline{F_x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N_z} \sum_{k=1}^{N_f} \{ \pm K_R K_T d_z f_z \sin^2 [(i, j, k)] + K_T d_z f_z \cos [(i, j, k)] \sin [(i, j, k)] \} / N \quad (15)$$

式中:各参数意义及计算方法参见文献[1, 10, 11]。

3.2 力模型常量的确定过程

Kline 和武凯^[10]的研究表明 K_T , K_R 与各切削用量 n , t_x , d_a , d_r 符合多项式关系模型,通过回归方程的最优选择,最终建立的 K_T , K_R 关于切削用量的多项式模型如下

$$K_T = b_0 + b_1 n + b_2 t_x + b_3 d_a + b_4 d_r + b_{22} t_x t_x + b_{33} d_a d_a + b_{44} d_r d_r + b_{12} n t_x + b_{23} t_x d_a + b_{24} t_x d_r + b_{34} d_a d_r \quad (16)$$

$$K_R = c_0 + c_1 n + c_2 t_x + c_3 d_a + c_4 d_r + c_{22} t_x t_x + c_{33} d_a d_a + c_{44} d_r d_r + c_{12} n t_x + c_{23} t_x d_a + c_{24} t_x d_r + c_{34} d_a d_r \quad (17)$$

式中: d_r 和 d_a 采用第 2 节计算得到的实际切深。

4 试验验证

为了验证前文根据力的分类来建立力学模型观点的正确性,以及根据切削力曲线特征计算切削力指标,并应用于力学模型的有效性,针对航空铝合金材料 7050-T7451,在 JOHN FORD VMC-850 三坐标数控铣床上进行了实验,采用的测力仪为 KisTLer9255B,试验用刀具参数列于表 1。

表 1 实验参数

Table 1 Experiment parameters of tools

| 刀具 | 材料 | 齿数 | 螺旋角/(°) | 直径/mm | 法前角/(°) | 后角/(°) |
|----|-----|----|---------|-------|---------|--------|
| 1 | K35 | 3 | 30 | 20 | 12 | 12 |
| 2 | K30 | 2 | 30 | 20 | 12 | 12 |
| 3 | K30 | 2 | 30 | 12 | 12 | 12 |

4.1 切削力指标有效性的验证

为了验证利用切削力指标计算实际切深的方法,利用表 1 提供的刀具,进行了 8 组切削试验,如表 2 所示。

表 2 切削力实验切削用量

Table 2 Nominal cutting parameters

| 刀具 | 试验编号 | d_r /mm | d_a /mm | n /(r · min ⁻¹) | t_x /(mm · 齿 ⁻¹) | 切削类型 | 铣削方式 |
|----|------|-----------|-----------|-------------------------------|--------------------------------|------|------|
| 1 | 1 | 6.0 | 9 | 3 000 | 0.10 | 1 | 顺铣 |
| | 2 | 8.0 | 15 | 5 000 | 0.05 | 3 | |
| | 3 | 4.0 | 24 | 3 000 | 0.01 | 4 | |
| 2 | 4 | 2.0 | 24 | 2 000 | 0.05 | 2 | 逆铣 |
| | 5 | 2.0 | 6 | 2 000 | 0.05 | 1 | |
| | 6 | 0.5 | 30 | 1 000 | 0.01 | 4 | |
| 3 | 7 | 2.0 | 15 | 1 000 | 0.01 | 2 | 逆铣 |
| | 8 | 2.0 | 15 | 1 000 | 0.01 | 2 | |

为了去除切削过程中的不稳定因素,以及刀具制造以及安装偏心对于指标测定的影响,采用 2 周切削力信号作平均来得到切削力指标,计算过程如图 15 所示。

按图 15 的方法得到 P_{VP} , P_{AV} 之后,需要根据第 2 节的切削力类型来选择相对应的切削力指标公式,进而利用式(10)~式(12)得到实际切深,但是切削类型正是需要实际的切深组合来确定。解决这个问题一个方法是,将 P_{VP} , P_{AV} 代入所有指标公式,求得各自实际切深并与名义切深比较,剔除相差较大者(如大于 $\pm 50\%$)。再将余下的切深

组合,重新计算其所属切削类型,与所用指标公式所对应的切削力类型相同的组合,就是要求的实际切深: d_{ar} 及 d_{rr} 。以上方法适用于切深变化较大的情况,例如检测由于刀具的崩刃引起的切深变化。

然而,事实上,加工过程中由于刀具或(和)工件的变形引起的实际切深的变化属于小切深变化,对于该情况可采用第 2 种方法:根据名义切削力类型选择指标公式,并计算实际切深。以下的实际切深的计算正是用的第 2 种方法。根据计算结果得到的实际切深以及由 3 坐标测量机 Global Status 提供的实际切深列于表 3。

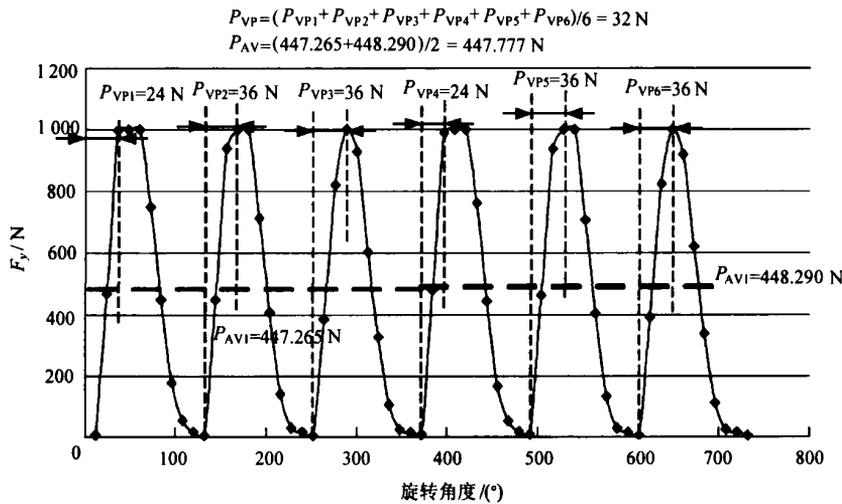


图 15 试验 1 切削力指标的标定

Fig. 15 Definitions of force indexes of test 1

表 3 实际切深的计算值与测量值的比较

Table 3 Cutting depths of the predicted and the tested

| 试验 | 计算/mm | | 测量/mm | | 实际误差/% | 计算误差/% | 相对误差/% |
|----|-------|-------|----------|----------|-------------|------------|-------------|
| | d_r | d_a | d_{rr} | d_{ar} | | | |
| 1 | 5.214 | 9.67 | 5.243 | 9.6 | -12.62/6.7 | -0.48/0.8 | 3.83/8.6 |
| 2 | 7.201 | 15.04 | 7.225 | 15.4 | -9.69/2.7 | -0.3/-0.24 | 3.1/-1.1 |
| 3 | 3.108 | 23.68 | 3.217 | 23.5 | -19.58/-2.1 | -2.7/0.8 | 13.78/-2.8 |
| 4 | 2.2 | 23.49 | 2.179 | 23.5 | 8.95/-2.1 | 1.05/0.4 | 11.73/50 |
| 5 | 2.176 | 6.41 | 2.212 | 6.0 | 10.60/N | -1.80/N | -16.98/N |
| 6 | 0.575 | 29.41 | 0.589 | 29.0 | 15/-3.3 | -2.8/1.4 | -18.7/-2.44 |
| 7 | 2.279 | 15.26 | 2.225 | 15.0 | 13.95/N | 2.7/1.7 | 19.35/N |
| 8 | 2.243 | 15.13 | 2.207 | 15.2 | 12.15/-0.5 | 1.8/0.5 | 14.8/-2.9 |

注:实际误差 = (测量值 - 名义值) / 名义值; 计算误差 = (计算值 - 测量值) / 名义值; 相对误差 = 计算误差 / 实际误差。

由表 3 可以看出尽管 8 组实验切削类型不同,刀具、铣削方式也不尽相同,但实际切深的预测有着一致性。其最大计算误差小于 2.8%,证明本文计算实际切深的方法是合理、有效的。

4.2 切削力模型有效性的验证

为了进一步验证所提出的建立切削力模型的

方法,以及验证实际切深对于模型预测切削力的精确度,就表 1 提供的 3 把刀具,对于每一把刀具的每一种切削力类型分别进行了 36 组正交切削力试验(4 因素旋转中心复合正交试验。对于机床状况较差或刀具质量不好的情况应该适当增加试验数,或对试验数据进行处理),并根据第 3 节得到了切削力模型常量,仅将第 3 把刀具的 3 组

表4 考虑实际切深的切削力常数模型系数

Table 4 Coefficients of the force constants

| 常量模型 | 1 | 2 | 3 | 常量模型 | 1 | 2 | 3 |
|-----------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------|------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 切削类型 | 1 | 2 | 4 | 切削类型 | 1 | 2 | 4 |
| b ₀ | 5 313 | 4 532.7 | - 1 900 | c ₀ | - 0.74 | 1.21 | 7.40 |
| b ₁ | - 0.21 | - 0.062 | 0.43 | c ₁ | - 6 × 10 ⁻⁵ | 2.33 × 10 ⁻⁵ | - 2.1 × 10 ⁻⁴ |
| b ₂ | - 46 103 | - 82 839 | 4.5 × 10 ⁵ | c ₂ | 5.69 | - 12.9 | - 318.2 |
| b ₃ | - 55.5 | 34.717 | - 234.9 | c ₃ | 0.066 | - 0.037 | 0.13 |
| b ₄ | - 1 132 | - 486.4 | 6 000 | c ₄ | 0.68 | 0.16 | - 3.31 |
| b ₁₂ | 0.794 | 0.482 7 | - 6.99 | c ₁₂ | 0.001 | - 6 × 10 ⁻⁴ | 0.004 |
| b ₂₃ | - 1 212 | 1 799.6 | - 5 645 | c ₂₃ | 0.394 | - 0.04 | 6.52 |
| b ₂₄ | 3 489.5 | 3 009.6 | - 82 000 | c ₂₄ | - 3.67 | 0.99 | 38.96 |
| b ₂₂ | 2.8 × 10 ⁵ | 2.7 × 10 ⁵ | - 8.6 × 10 ⁵ | c ₂₂ | - 21.03 | 75.47 | 442.39 |
| b ₃₃ | 26.97 | - 5.689 | - 3.430 | c ₃₃ | - 0.011 | 0.0018 | - 0.005 7 |
| b ₄₄ | 180.25 | - 17.82 | - 577.8 | c ₄₄ | - 0.079 | 0.0038 | 0.286 |
| b ₃₄ | - 68.5 | 25.003 | - 47.14 | c ₃₄ | 0.017 | - 0.015 | 0.025 |

表5 切削力测量值和预测值的比较

Table 5 Cutting forces for the predicted and the tested

| 常量模型 | 切削用量 d _a / d _r / t _x / n | 预测切削力/ N | | 测量值/ N | | 误差/ % | | 试验编号 |
|------|--|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------|
| | | F _x | F _y | F _x | F _y | F _x | F _y | |
| 1 | 5/ 3. 5/ 0. 09/ 2 000 | 103. 16 | 33. 99 | 95. 71 | 31. 125 | 7. 6 | 9. 2 | 1 |
| | 10/ 4. 0/ 0. 09/ 5 000 | 182. 54 | 70. 04 | 178. 88 | 65. 11 | 2. 0 | 7. 6 | 2 |
| 2 | 20/ 1. 5/ 0. 09/ 2 000 | 135. 43 | 157. 63 | 128. 08 | 159. 35 | 5. 7 | - 1. 1 | 3 |
| | 20/ 3. 5/ 0. 01/ 3 000 | 29. 98 | 97. 29 | 26. 11 | 103. 77 | 10. 6 | - 6. 2 | 4 |
| 3 | 22/ 4. 0/ 0. 02/ 2 000 | 66. 42 | 208. 56 | 62. 49 | 201. 45 | 6. 3 | 3. 5 | 5 |
| | 22/ 4. 5/ 0. 02/ 3 000 | 67. 02 | 231. 13 | 64. 32 | 224. 50 | 4. 2 | 2. 95 | 6 |

注:切削用量一项的各参数量纲同表2中对应项。

切削常量模型常数的回归系数列于表4(1为逆铣;2,3为顺铣)。

为验证模型的有效性,进行了另外3组试验,列于表5。其中模型1为逆铣;2,3为顺铣。试验最大误差为10.6%,误差较小,证明本文建立的切削力模型是正确的。

图16列出了本文建立的切削力模型(A)与考虑分类但未考虑实际切深的模型(B),以及不考虑切削力分类的模型(Kline)(C)与测量值的比较(绝对值)。可以看出,模型B对于顺铣预测值偏大,逆铣预测值偏小,这是由于顺铣时F_y有分离工件和刀具的作用,使得径向切深减小,而逆铣

时F_y方向相反,径向切深增大的原因,与“让刀”、“过切”相对应。模型C则整体精度较低,模型A的精确度是最高的。

5 结论

(1) 切削力分类 根据切削力变化曲线将切削力分为6类,进一步根据切削力的交叠程度细分为10类。

(2) 切削力指标及实际切深的计算 P_{VP}定义为切削力变化曲线上波谷及紧接着的下一个波峰之间的角度差,P_{AV}是切削力2周内的平均值,通过切削力指标P_{VP}及P_{AV},在10个力的分类上,分别得到了实际切深的计算方法。

(3) 精确的切削力计算模型 提出了根据切削力的分类建立平均力模型的观点,将由切削力指标得到的实际切深用于模型常量的计算。

(4) 试验 通过多组试验,验证了切削力指标计算实际切深的方法,误差控制在2.8%以下,而所建立的切削力模型较其他模型精度更高,误差控制在10.6%以下。

实际切深的计算方法可应用于主要功能为检测崩刃和刀具磨损的在线监控系统,由于能够计

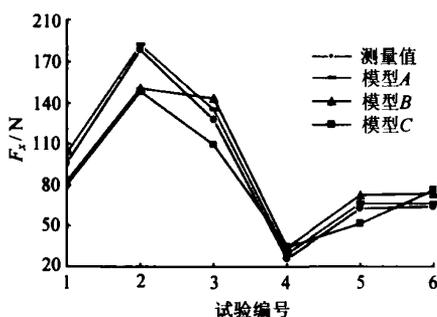


图16 3种切削力模型的对比

Fig. 16 Forces of the three models

算并剔除切深变化的影响,从而可以有效地减少系统的错误判断和报警。同时该模型可以通过在线计算切削深度来计算刀具和工件的变形并预测表面误差,从而为在线误差补偿提供依据,对于航空薄壁件的加工有着很好的工程应用前景。

致 谢

感谢武凯的指导及相关资料的提供。

参 考 文 献

- [1] Kline W A,Devor R E,Lindberg R. The prediction of cutting forces in end milling with application to cornering cuts [J]. International Journal of Machine Tool Design and research ,1982 ,22(1) :7-22.
- [2] Yun W S. Accurate 3-D cutting force prediction using cutting condition independent coefficients in end milling[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture , 2001 ,41(4) :463-478.
- [3] Li H Z,Zhang W B ,Li X P. A predictive model for helical end milling forces[C]// 2000 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Orlando ,Florida :ASME,2000 :231-236.
- [4] Oxley P L B. Mechanics of machining[M]. Chichester : Elie Horwood Limited ,1989.
- [5] Smith S. An overview of modeling and simulation of the milling process[J]. ASME Journal of Engineering for Industry. 1991 ,113(5) :169-175.
- [6] Tlusty J , MacNeil P. Dynamics of cutting forces in end milling[J]. CIRP Annals ,1975 ,24 :21-25.
- [7] Sabberwal A J P , Koenigsberger F. Chip section and cutting force during the milling operation [J]. CIRP Ann , 1960 ,9 :197-203.
- [8] Yang L Q ,DeVorShiv R E , Kapoor G. Analysis of force

shape characteristics and detection of depth-of-cut variations in end milling[J]. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering ,2005 ,127(3) 454-462.

- [9] Walsh A. Handbook of machining and metalworking calculations[M]. New York :Mc Graw- Hill ,2001.
- [10] 武凯. 航空薄壁件加工变形分析与控制[D]. 南京:南京航空航天大学,2002.
Wu K. Machining errors analysis and control of the thin wall structure components in aero industries[D]. Nanjing : Nanjing University of Aeronautics and Astronautics , 2002. (in Chinese)
- [11] 万敏,张卫红. 薄壁件周铣切削力建模与表面误差预测方法研究[J]. 航空学报,2005 ,26(5) :598-603.
Wan M ,Zhang W H. Investigation on cutting force modeling and numerical prediction of surface errors in pseripheral milling of thin-walled workpiece[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica ,2005 ,26(5) :598-603. (in Chinese)

作者简介:



康永刚(1977 -) 男,博士研究生。主要研究方向:先进航空制造技术及有限元结构分析技术。

E-mail :westfly@mail.nwpu.edu.cn.

王仲奇(1963 -) 男,教授。主要研究方向:模具 CAD/CAE 技术的研究。

E-mail :wangzhqi@nwpu.edu.cn

吴建军(1963 -) 男,教授。主要研究方向:金属塑性理论、有限元分析技术的研究。

姜澄宇(1947 -) 男,教授。主要研究方向:金属切削理论、MEMS 技术的研究。

(责任编辑:蔡斐)