

基于切削电流系数的铣刀磨损状态监测^{*}

李宏坤¹, 张孟哲¹, 郝佰田¹, 张志新²

(1. 大连理工大学机械工程学院 大连, 116024) (2. 大连大学机械工程学院 大连, 116622)

摘要 基于切削力系数的铣刀磨损状态监测方法提出了与切削参数独立的刀具磨损指标。由于存在干扰机床正常加工、实时性不佳、传感器安装不便和成本过高等问题,限制了其在实际工业环境中的应用。针对上述问题,结合切削力与主轴电流的关系,提出一种基于主轴切削电流系数的铣刀磨损状态监测方法。首先,融合切削力系数和主轴电流的优点,建立铣削电流模型;其次,根据切削电流模型进行切削电流系数辨识,记录新刀状态下切削系数;然后,使用切削系数实时估计相同加工工况下新刀切削电流,监测实际切削电流偏离估计值的程度,判断铣刀磨损状态;最后,通过实验与力信号对比验证该方法的正确性。实验结果表明,该方法可以替代基于切削力系数的磨损状态监测方法,能有效、实时、无干扰、便利和低成本地识别新刀、正常和严重 3 种磨损状态。

关键词 主轴电流; 切削电流系数; 铣刀磨损; 状态监测

中图分类号 TH165.3

引言

随着中国制造 2025 政策的实施,智能制造、高精度制造日益成为制造行业的主流趋势。铣削加工作为加工制造业中的一种重要金属切削方式^[1],是实现智能制造和高精制造的重要一环。刀具磨损是一种在机械、热、化学和磨粒等共同作用于刃刃而产生的不可避免的刀具退化现象^[2]。在铣削过程中,铣刀磨损不仅制约着铣削精度的提高和自动化的发展,而且还限制着企业生产率及其利润的提高,甚至造成零件报废和机床损坏。因此,对其进行状态监测非常必要。

针对铣刀磨损状态的监测方法,国内外学者进行了大量研究,有直接测量法和间接监测法两类。前者通过直接测量刀具磨损量精确确定刀具磨损状态,但在实际生产中不易实现。后者主要通过采集力信号、声发射信号、振动信号及电流信号等,并使用时域、频域及时频域分析手段提取磨损特征,实现刀具磨损监测,其中基于力信号的铣刀磨损状态监测研究取得了许多成果。Altintas 等^[3]通过比较平均每齿合力的一阶差分和二阶差分,实现了铣刀破损的实时监测。李宏坤等^[4]提取特征频带小波包能量,结合 logistic 回归模型评

估刀具运行可靠性,识别出了刀具的磨损状态。文献^[5-6]通过时域、频域及时频域分析,获得与铣刀磨损程度具有良好映射关系的特征量,运用支持向量机、神经网络准确识别了刀具磨损状态。由于大多数方法对切削工况比较敏感,不能满足实际加工过程中的多切削工况磨损状态监测要求,神经网络和支持向量机虽然可以适应多工况下磨损状态识别,却在实际加工之前需要大量样本进行训练。针对此问题,Nouri 等^[7]提出了一种与切削参数独立的铣刀磨损新指标,通过切削力系数来评价刀具磨损状态,为研究刀具磨损监测方法提供了一个新思路。然而,该方法存在干扰机床正常加工、实时性不佳、传感器安装不便和成本过高等问题,限制了其在实际生产中的应用。

电流传感器具有安装方便、成本低廉且不影响机床正常加工的特点,吸引了许多学者的注意。文献^[8-11]针对机床进给系统建立了控制模型,通过进给电流实现切削力的预测和刀具状态监测,验证了进给电流代替切削力监测刀具状态的可行性,同时认为主轴齿轮箱的存在使主轴系统带宽过小,不能实现对切削力的跟踪。随着机床系统的优化改进,主轴系统相对进给系统更为简单,系统带宽更大。Kim 等^[12]通过实验证明了主轴电流准静态量在切削力映射方面优于进给电流准静态量。

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51175057)

收稿日期:2017-07-27;修回日期:2018-02-02

Li等^[13]利用主轴电流和功率的关系,结合切削功率模型识别了切削力。但是,这些方法没有解决与切削参数独立的难题。

为避免使用力信号监测铣刀磨损状态时存在的干扰加工、实时性不佳、传感器安装不便及成本过高等问题,笔者根据主轴系统动力模型和切削力模型,提出基于主轴电机切削电流系数的铣刀磨损状态监测方法,给出铣刀磨损特征,更好地实现实时工况下铣刀磨损状态监测。

1 理论方法

1.1 主轴电流与切削力的关系

铣削加工中,铣削力会随着刀具旋转周期变化,并通过刀柄、主轴、同步齿型带和联轴器等传递到主轴电机,引起电机电流随之周期变化。由于轴向铣削力和径向铣削力穿过刀具中心,故对刀具不产生扭矩。因此,作用在刀具上的切向铣削力与主轴电机电流存在如下关系模型

$$K_t I_{rms} = T_m = J \frac{d\omega}{dt} + T_f + F_t R \quad (1)$$

其中: K_t 为电机扭矩常量; I_{rms} 为电机三相电流有效值; T_m 为作用在电机轴上的扭矩; J 为主轴传动系统等效转动惯量; ω 为主轴角频率; T_f 为电机轴克服的摩擦扭矩; F_t 为切向铣削力; R 为铣刀半径。

机床采用三相交流异步电动机作为主轴系统的动力源,假设电机的三相电流分别为 i_u, i_v, i_w ,则 I_{rms} 可以表示为

$$I_{rms} = \sqrt{(i_u^2 + i_v^2 + i_w^2)/3} \quad (2)$$

由于式(1)中存在等效转动惯量 J 和摩擦扭矩 T_f 两未知项的存在,使测得的主轴电流不能直接代替铣削力进行计算。实际加工时,一次走刀中主轴转速一般恒定不变,主轴角加速度为0,即 $d\omega/dt$ 为0,故不需考虑等效转动惯量。当主轴空转时,铣削力 F_t 为0,则

$$K_t I_{rms0} = T_f \quad (3)$$

其中: I_{rms0} 为某转速下空切电流。

将式(3)代入式(1),则

$$\begin{cases} \Delta I = F_t R / K_t \\ \Delta I = (I_{rms} - I_{rms0}) \end{cases} \quad (4)$$

其中: ΔI 为铣削电流增量。

显然,切削电流增量与切向铣削力成正比,因此在理论上可以使用切削电流增量代替切向铣削力。

1.2 铣削电流模型建模

切削力的力学模型最早由Sabberwaal提出,该模型中切削力被假定为与切削横截面积成正比,其中比例系数取决于切削条件和材料特性^[14]。切削力的力学模型已被成功应用于铣削过程,并且在应用中不断得到改进。目前,已发展出5种切削力模型,分别为平均切削力系数模型、双线性力模型、指数切削厚度模型、半力学模型和高阶铣削力模型。其中,平均切削力系数模型由于模型简单、适用性广泛及准确度高,已被广泛应用于许多研究。笔者为方便准确地建立铣削电流模型和辨识切削电流系数,选用平均切削力系数模型。

铣削加工中,切削厚度变化与切削力如图1所示。作用在单个刀齿上的径向力 F_r 和切向力 F_t 可以表示为

$$F_r(\phi) = [K_{RC}h(\phi) + K_{RE}]a_p \quad (5)$$

$$F_t(\phi) = [K_{TC}h(\phi) + K_{TE}]a_p \quad (6)$$

其中: K_{RC} 和 K_{RE} 分别为径向切削力系数和刃口力系数; K_{TC} 和 K_{TE} 分别为切向切削力系数和刃口力系数; a_p 为切削深度; ϕ 为刀刃旋转角度。

h 为切削厚度

$$h(\phi) = f_z \sin(\phi) \quad (7)$$

其中: f_z 为每齿进给量。

将式(5)代入式(7),可得

$$\Delta I(\phi) = [K_{TCi}h(\phi) + K_{TEi}]a_p \quad (8)$$

其中: K_{TCi} 和 K_{TEi} 分别为切削电流系数和刃口电流系数,具体表达式为

$$\begin{cases} K_{TCi} = K_{TC} K_t / R \\ K_{TEi} = K_{TE} K_t / R \end{cases} \quad (9)$$

定义式(9)为铣削电流模型。

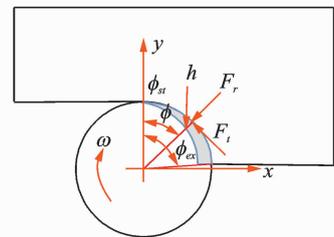


图1 铣削中的切削厚度变化与切削力

Fig. 1 Chip thickness variation and cutting forces in milling

1.3 切削电流系数估计

目前,国内外学者给出了多种离线和在线铣削

力系数辨识方法。在线校准一般需要多次改变进给速度,影响机床正常加工和加工质量。为避免该缺点,笔者选用离线校准法。为了辨识切削系数,引入每齿周期平均切削电流增量 ΔI_a 为

$$\Delta I_a = \frac{z}{2\pi} [f_z (\cos\phi_{st} - \cos\phi_{ex}) K_{TCi} + (\phi_{ex} - \phi_{st}) K_{TEi}] a_p \quad (10)$$

其中: z 为刀齿个数; f_z 为每齿进给量; ϕ_{st} 和 ϕ_{ex} 分别为刀齿的切入角和退出角。

为降低铣刀偏心和噪声对计算切削电流系数的影响,笔者对 5 个转速周期进行平均后计算每齿周期平均切削电流。

当使用不同的切削参数加工时,可以将对应值合并表达为矩阵形式

$$\begin{bmatrix} \Delta I_{a1} \\ \Delta I_{a2} \\ \vdots \\ \Delta I_{an} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{21} \\ M_{12} & M_{22} \\ \vdots & \vdots \\ M_{1n} & M_{2n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{TCi} \\ K_{TEi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中: ϵ_i 为噪声引起的误差; M_{1i} 和 M_{2i} 的表达式为

$$M_{1i} = \frac{z}{2\pi} (\cos\phi_{st} - \cos\phi_{ex}) a_p f_z \quad (12a)$$

$$M_{2i} = \frac{z}{2\pi} (\phi_{ex} - \phi_{st}) a_p \quad (12b)$$

根据最小二乘法可估计出切削电流系数为

$$\begin{bmatrix} K_{TCi} \\ K_{TEi} \end{bmatrix} = (\mathbf{M}^T \mathbf{M})^{-1} \mathbf{M}^T \Delta I_a \quad (13)$$

1.4 方法流程

基于切削电流系数的铣刀磨损实时监测方法,通过建立空转电流数据库和辨识新刀切削电流系数,结合实际加工工况实时估计每齿周期新刀平均电流,跟踪实际平均电流偏离估计电程度实现监测铣刀磨损状态,其方法流程如图 2 所示。

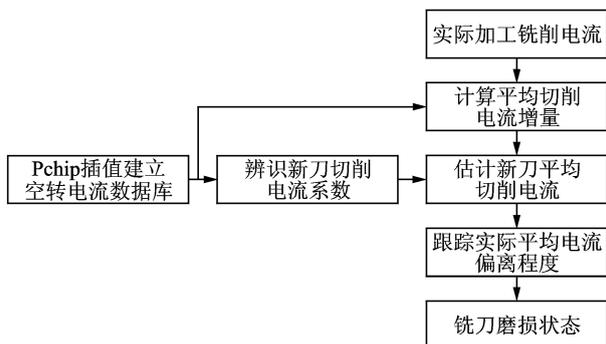


图 2 方法流程图

Fig. 2 Method flow chart

2 实验验证

2.1 实验设备及方法

本实验在某公司生产的 CMV-850A 型立式加工中心上进行。该机床采用 FANUC 0I-MC 数控系统,主轴电机为 FANUC 公司生产的 $\beta 12/8000i$ 型三相异步电动机,主轴传动方式为同步带传动。铣削电流信号和力信号分别采用瑞士 LEM 公司生产的 LT 108-S7 型闭环霍尔效应电流传感器和瑞士 Kistler 公司生产的 9257B 型三向测力仪获得,并通过丹麦 B&K 公司生产的 3053B 型 12 通道数据采集模块及其软件系统采集存储。刀具为 Di 牌 2 刃硬质合金平头立铣刀,直径为 12 mm,螺旋角为 30° ;工件材料为 40Cr。加工参数如表 1 所示。具体的实验系统组成结构原理如图 3 所示。

表 1 加工参数

Tab. 1 Cutting parameters

序号	$n/(kr \cdot \min^{-1})$	f_z/mm	a_p/mm	a_r/mm
1	1.2	0.15	2	1.5
2	1.2	0.15	1.5	1.5
3	0.9	0.15	1	1.5
4	1.2	0.15	1	1.5
5	1.5	0.15	1	1.5
6	1.2	0.10	1	1.5
7	1.2	0.20	1	1.5
8	1.2	0.15	1	1.75
9	1.2	0.15	1	2

n 为主轴转速; a_r 为径向切深

为加快刀具磨损,实验采用干铣削方式加工,并将刀具磨损分为 5 种状态,如表 2 所示。磨损量依次增大,在每种磨损状态下完成表 1 中 9 组加工参数切削实验,同时采集切削力信号和电流信号。

表 2 刀具磨损状态

Tab. 2 Tool wear status

新刀	正常磨损 1	正常磨损 2	正常磨损 3	严重磨损

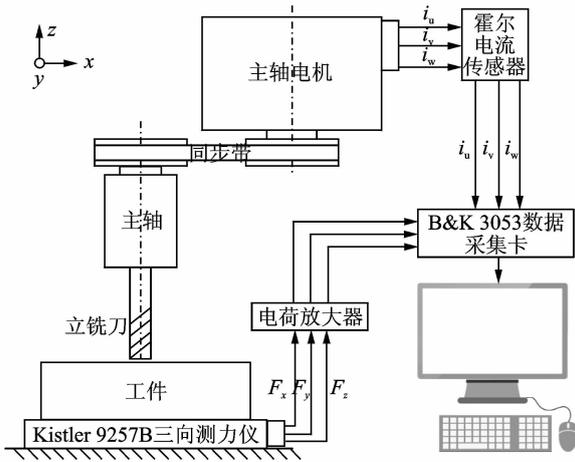


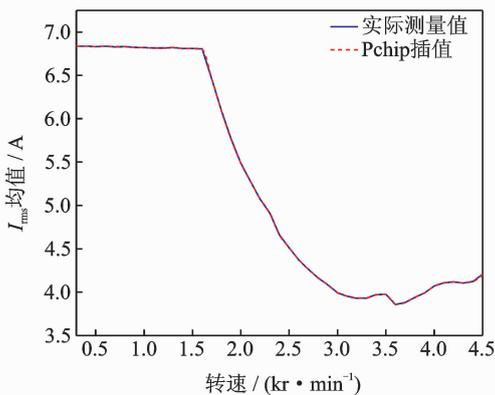
图3 实验系统组成结构原理

Fig. 3 Experimental setup

2.2 空转电流

为保证方法的实时性和广泛适应性,必须预先获得不同转速下的主轴空转电流。测量 300 ~ 4 500 r/min的空转电流大小,步长为 100 r/min,其趋势变化如图 4 所示。显然,电机空转电流随转速的增加呈现非线性变化,不能通过一个特定函数来表达。

Pchip 插值是一种通过函数在有限点处的函数值求出其近似函数,进而估算出函数在其他点出函数值的数学方法。该方法相对其他插值、逼近方法具有一阶导数连续、稳定和精度高的特点。因此,笔者使用该方法建立空转电流数据库,并比较了与实际测量值的拟合效果,如图 4 所示。

图4 空转电流 I_{rms} 均值随主轴转速的变化Fig. 4 Mean of air cutting current I_{rms} with spindle speed

可以看出,Pchip 插值能够很好地拟合实际测量值和丰富空转电流数据库,减少不必要的工作,有助于实时监测的实现。

2.3 切削系数

切削力系数是刀具工件系统的固有属性,根据式(7)~(8)可知,其描述了相应系统下的加工参数与切削力的数学关系。国内外学者研究表明,其大小由工件材料、刀具材料及其物理形态三者共同决定。对于给定刀具工件材料,刀具物理形态是切削力系数的唯一决定因素。刀具磨损实质上是一种刀具物理形态变化,因此理论上可由切削力系数反映。Nouri 等^[7,15]通过实验证明了切削力系数会随着铣刀磨损量的增加而逐渐增加。笔者验证了上述学者的结论,同时将切削电流系数与之比较,如图 5~7 所示。

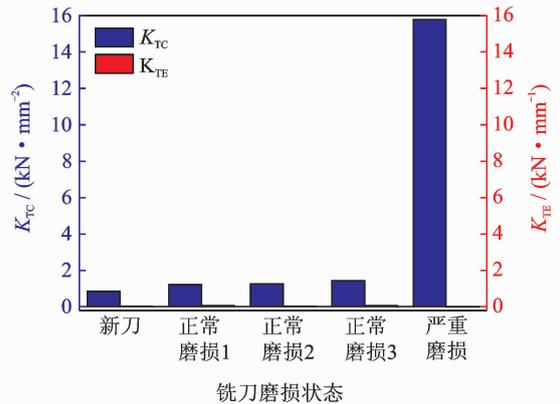


图5 切向切削力系数随铣刀磨损状态变化趋势

Fig. 5 The trend of tangential cutting force coefficient with tool wear

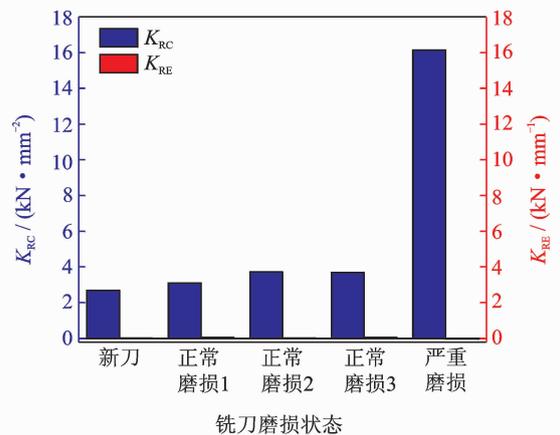


图6 径向切削力系数随铣刀磨损状态变化趋势

Fig. 6 The trend of radial cutting force coefficient with tool wear

对比图 5~7 可以发现:a. 切向、径向切削力系数 K_{TC} 和 K_{RC} 均随磨损量逐渐增加,验证了 Nouri 等^[7]的结论;b. 切削电流系数 K_{TCi} 同样随刀具磨损

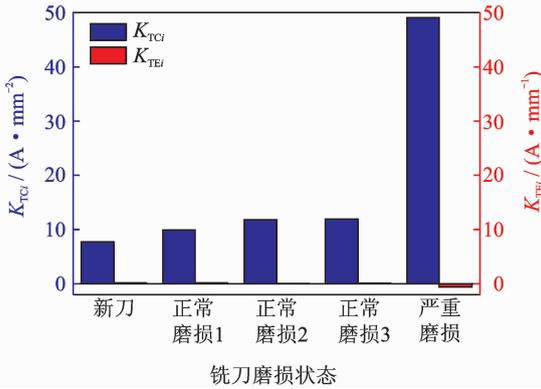


图 7 切削电流系数随铣刀磨损状态变化趋势

Fig. 7 The trend of cutting current coefficient with tool wear

量不断增加,总体趋势和切削力系数完全一致;c. 切向刃口力系数 K_{TE} 、径向刃口力系数 K_{RE} 及刃口电流系数 K_{TEI} 远小于切削系数,对铣削力和电流影响较小。

相关系数是一种常用统计指标,不仅可以描述变量之间相关关系的密切程度和线性相关程度,也可以描述两变量的相互替代性,其表达式为

$$\rho_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (14)$$

其中: x_i, y_i 分别为随机变量 X 和 Y 的第 i 个样本值; ρ_{XY} 为变量 X 和 Y 的相关系数。

一般的,根据值的大小可将相关系数分为以下几种相关程度:

- 1) $|\rho| > 0.95$, 存在显著线性相关;
- 2) $|\rho| \geq 0.8$, 高度线性相关;
- 3) $0.5 \leq |\rho| < 0.8$, 中度线性相关;
- 4) $0.3 \leq |\rho| < 0.5$, 低度线性相关;
- 5) $|\rho| < 0.3$, 关系极弱, 认为不相关。

线性相关程度越高,说明两个变量相互替代性越好。为进一步证明切削电流系数可以代替切削力系数进行监测刀具磨损状态,通过两者之间的相关系数来表示变量之间的可代替性程度,结果如表 3 所示。

表 3 切削力系数与电流系数之间的相关性

Tab. 3 Correlation between cutting force and current coefficient

系数	K_{TC}	K_{RC}
K_{TCI}	0.968 1	0.999 8

由于刃口系数远小于切削系数,对切削力和电流影响较小,故不对其分析相关性。从表 3 可以看出,切削电流系数与切向和径向切削力系数的相关系数均大于 0.95,呈现显著线性正相关性。因此,切削电流系数可以代替切削力系数识别刀具磨损状态。

2.4 实时监测

随着刀具的磨损,铣削力逐渐增大^[7,16-18]。但是切削参数变化也会影响切削力变化,使得大多数方法不能适应多工况加工的情况。根据 Nouri 等^[7]的研究,切削力系数是一种与工况独立的刀具磨损量,能够适应多工况的监测要求。但是由于存在干扰机床正常加工、实时性不佳、传感器安装不便和成本过高等问题,限制了其在实际生产中的应用。可见,切削电流系数与工况独立,可以代替切削力系数实现铣刀磨损状态监测。

直接使用切削电流系数虽然能够避免传感器的成本和安装问题,然而没有解决干扰加工和实时性不佳等问题。笔者提出预先辨识新刀切削系数,通过切削系数实时估计同工况下使用新刀时的平均切削电流,跟踪实际值偏离估计值的程度,根据偏离程度判断铣刀磨损状态。

定义实际值偏离估计值的偏离程度 E 的表达式为

$$E = \frac{|\widehat{\Delta I_a} - \Delta I_a|}{\widehat{\Delta I_a}} \times 100\% \quad (15)$$

其中: $\widehat{\Delta I_a}$ 为同工况下新刀平均切削电流估计值。

采用相同方法对切削力、电流计算偏离程度 E , 实验结果如图 8~10 所示。可以看出,随着刀具磨损量的增加,切削电流偏差程度和 x 向、 y 向切削力偏差程度总体上均呈现递增趋势。严重磨损阶段指

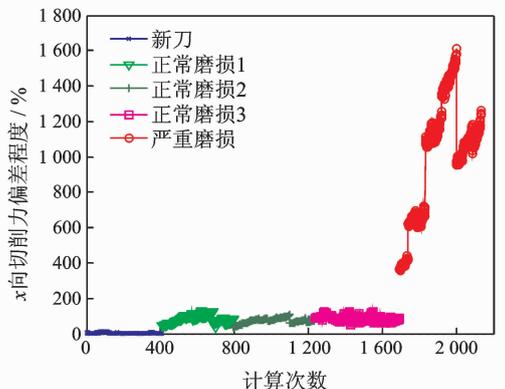


图 8 x 向切削力偏差程度随铣刀磨损状态变化

Fig. 8 x -direction cutting force deviation degree with tool wear

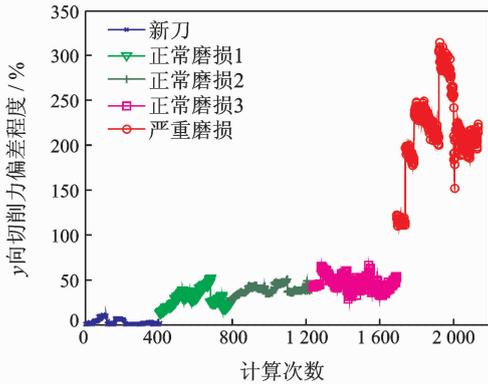


图9 y向切削力偏差程度随铣刀磨损状态变化

Fig. 9 y-direction cutting force deviation degree with tool wear

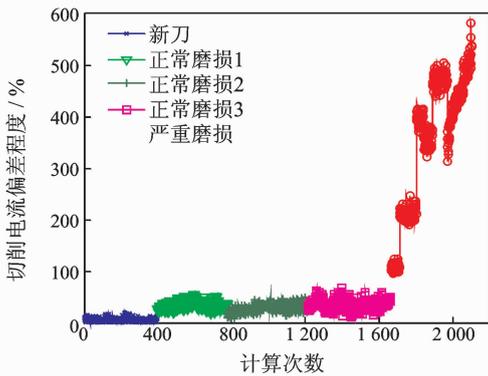


图10 切削电流偏差程度随铣刀磨损状态变化

Fig. 10 Cutting current deviation degree with tool wear

标变化幅度较大,这是因为刀具在严重磨损阶段磨损速率高、冲击力大,引起切削力和切削电流的剧烈增大,使得指标量也迅速增大。同时,在部分时刻指标出现突然下降又逐渐上升的现象,这是由冲击引起的破坏方向不确定性决定的。

表4为监测指标平均值。为表述方便,将 x 向、 y 向切削力偏离程度和切削电流偏离程度平均值分别记为 E_x 、 E_y 和 E_c 。

表4 监测指标平均值

Tab. 4 Average of monitoring index

参数	新刀	正常磨损1	正常磨损2	正常磨损3	严重磨损
E_x	3.624 4	79.407 4	73.431 1	84.727 4	999.401 7
E_y	2.465 6	28.276 9	38.965 1	46.069 7	215.297 1
E_c	6.003 0	33.466 4	27.819 0	35.643 5	350.383 1

从表4可以看出,监测指标 E_c 和 E_x 、 E_y 总体上随刀具磨损量的增加而逐渐增加,三者的趋势总

体相同,符合刀具磨损状态变化过程。“正常磨损2”的磨损量大于“正常磨损1”,磨损指标 E_x 和 E_c 却略微减小。这是由于切削力不仅与切削系数有关,还与加工参数、切削条件及噪声等相关,这些因素会导致切削力的波动,进而引起监测量的偏离程度的波动,因此在某种程度上导致偏离程度略小于前一磨损状态。但是这种波动程度相对较小,并不影响新刀、正常磨损和严重磨损3种铣刀状态的有效识别。

3 结束语

基于切削电流系数的铣刀磨损状态实时监测方法取代了使用切削力系数作为监测指标的非实时监测方法,根据主轴传动模型和切削力模型建立切削电流模型,提出使用切削电流系数和切削电流偏差程度进行铣刀磨损状态识别。实验结果表明,切削力系数与切削电流系数之间具有显著线性相关关系,可以使用切削电流系数代替切削力系数进行磨损状态识别。同时,针对直接使用切削系数监测磨损状态的不足,使用切削电流偏差程度代替,验证了提出方法的可行性和有效性。该方法具有实时监测方便和成本低廉的优点,为刀具磨损状态监测提供新思路,丰富了智能制造和高精制造方法。

参 考 文 献

- [1] 朱国奎,张敏良,朱鹤. 基于铣削声音信号的刀具状态实验研究[J]. 轻工机械, 2017(1): 54-58, 63.
Zhu Guokui, Zhang Minliang, Zhu He. Experimental study on tool condition in milling based on sound signal [J]. Light Industry Machinery, 2017(1): 54-58, 63. (in Chinese)
- [2] Sandvik Coromant (Firm). Modern metal cutting: a practical handbook[M]. [S. l.]: Sandvik Coromant, 1994: 100-116.
- [3] Altintas Y, Yellowley I. In-process detection of tool failure in milling using cutting force models[J]. Journal of Engineering for Industry, 1989, 111(2): 149-157.
- [4] 李宏坤,汪寅虎,杨树华,等. 基于声发射信号的铣刀运行可靠性评估[J]. 大连理工大学学报, 2014, 54(4): 418-423.
Li Hongkun, Wang Yinhu, Yang Shuhua, et al. Estimation of operational reliability for milling cutter based

- on acoustic emission signal[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2014,54(4):418-423. (in Chinese)
- [5] Ning Qian, Wang Taiyong. Morphological filtering algorithm for estimation of tool wear in CNC milling machining[J]. *Materials Science Forum*, 2011, 697-698:566-569.
- [6] Liu Qingrong, Yan Changgang. Research on tool wear state recognition based on milling force and wavelet neural network[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2008,30(2):72-76.
- [7] Nouri M, Fussell B K, Ziniti B L, et al. Real-time tool wear monitoring in milling using a cutting condition independent method[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2015,89:1-13.
- [8] Stein J L, Colvin D, Clever G, et al. Evaluation of DC servo machine tool feed drives as force sensors[J]. *Transactions of Asme Journal of Dynamic Systems Measurement & Control*, 1986,108(4):279-288.
- [9] Altintas Y. Prediction of cutting force and tool breakage in milling feed drive current measurements[J]. *ASME Journal Engineering for Industry*, 1992, 114(4): 386.
- [10] Jeong Y H, Cho D W. Estimating cutting force from rotating and stationary feed motor currents on a milling machine [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2002,42(14):1559-1566.
- [11] Li Xiaoli, Tso S K, Wang Jun. Real-time tool condition monitoring using wavelet transforms and fuzzy techniques[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 2000,30(3):352-357.
- [12] Kim D, Jeon D. Fuzzy-logic control of cutting forces in CNC milling processes using motor currents as indirect force sensors[J]. *Precision Engineering*, 2011,35(1):143-152.
- [13] Li Songsheng, Mao Huawei, Chen Ping, et al. Study of the method on cutting-force modeling based on the current of high-speed electric spindles[J]. *Advanced Materials Research*, 2010, 156-157:517-522.
- [14] 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, 2011:50-60.
- [15] Cui Yanjun. Tool wear monitoring for milling by tracking cutting force model coefficients [D]. New Hampshire: University of New Hampsnire, 2008.
- [16] Slamani M, Chatelain J F, Hamedanianpour H. Comparison of two models for predicting tool wear and cutting force components during high speed trimming of CFRP[J]. *International Journal of Material Forming*, 2015, 8(2):305-316.
- [17] Gao Dong, Liao Zhirong, Lü Zekun, et al. Multi-scale statistical signal processing of cutting force in cutting tool condition monitoring[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 80 (9/12):1843-1853.
- [18] Kasim M S, Haron C H C, Ghani J A, et al. Wear mechanism and notch wear location prediction model in ball nose end milling of Inconel 718[J]. *Wear*, 2013, 302(1/2):1171-1179.



第一作者简介:李宏坤,男,1974年9月生,教授、博士生导师。主要研究方向为设备状态监测、颤振稳定域分析和故障诊断。曾发表《Cutting tool operational reliability prediction based on acoustic emission and logistic regression model》(《Journal of Intelligent Manufacturing》2015, Vol. 26, No. 5) 等论文。

E-mail: lihk@dlut.edu.cn

