

切入磨削与纵向磨削的磨削力分析与比较

李 厦 李郝林

上海理工大学,上海,200093

摘要:研究了同时包含切入磨削和纵向磨削的复杂外圆磨削过程。根据纵向磨削过程的特点,将砂轮等效成若干个小砂轮,在传统阶梯模型的基础上构建了砂轮磨损的抛物线模型。推导了基于两种模型的纵向磨削切向分力和切入磨削切向分力的比较公式,两切向分力的比值反映了切入磨削和纵向磨削转换时切向分力的变化情况,它主要与磨削系数、砂轮宽度和纵向进给速度有关。采用砂轮主轴功率信号分析磨削切向分力,通过实验验证了抛物线模型更符合实际情况的结论。研究结果为采用磨削力信号和功率信号研究复杂磨削过程的监控提供了参考依据。

关键词:切入磨削;纵向磨削;磨削力;功率信号

中图分类号: TG580.6

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2012.03.004

Analysis and Comparison of Grinding Forces between Plunge Grinding and Traverse Grinding

Li Sha Li Haolin

University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093

Abstract: Complex cylindrical grinding processes including both plunge grinding and traverse grinding were investigated. According to the traverse grinding characteristics, the grinding wheel was equivalent to a number of small wheels, a parabolic model for wheel wear was built based on the traditional steps model. The comparison formula of tangential grinding force was derived based on two tangential grinding forces of plunge grinding and traverse grinding the ratio of the tangential grinding force reflected tangential grinding varieties from the plunge grinding to the traverse grinding and was concerned with grinding coefficient, the wheel width and the traverse feed rate. The tangential grinding force was analyzed by the grinding wheel spindle power signals in experiments and the parabolic model is more realistic. Using force signals and power signals to monitor the complex grinding processes provides a reference method.

Key words: plunge grinding; traverse grinding; grinding force; power signal

0 引言

磨削加工技术是先进制造技术中的重要内

容,磨削加工的品质往往决定着工件的最终加工精度。外圆磨削是一种主要的磨削方式,它包括切入磨削(plunge grinding)和纵向磨削(traverse grinding)。切入磨削时,砂轮与工件之间只有径向运动;纵向磨削时,砂轮与工件之间既有径向运

收稿日期:2011-06-14

基金项目:上海市科学技术委员会科研基金资助项目(10DZ2292100);上海市教委重点学科建设资助项目(J50503)

[4] Tax D. One-class Classification: Concept-learning in the Absence of Counter-examples [D]. Delft: Delft University of Technology, 2001.

[5] 谭真臻,陈果,孙丽萍. 基于 Hilbert 谱图特征的航空发动机转子故障智能诊断[J]. 机械科学与技术, 2010, 29(9):1177-1181.

[6] 冯爱民,陈松灿. 基于核的单类分类器研究[J]. 南京师范大学学报(工程技术版), 2008, 8(4):1-6.

[7] 戴蒙,林家骏,刘云翔. 基于 FCM 聚类的多超球体一类分类数字图像隐藏信息[J]. 中国图像图形学报, 2008, 13(10):1918-1921.

[8] Wang D, Yeung D S, Tsang E C C. Structured One-class Classification[J]. IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics - Part B: Cybernetics, 2006, 36(6):1283-1294.

[9] 肖健华. 智能模式识别方法[M]. 广州:华南理工大学出版社, 2006.

[10] 杨梦宁,杨丹,张强劲. 基于最大树法的模糊图像分割方法[J]. 计算机科学, 2005, 32(8):190-191.

[11] Duda R O, Hart P E, Stork D G. 模式分类[M]. 李宏东,姚天翔,等,译. 2版. 北京:机械工业出版社, 2003.

[12] Chapelle O, Vapnik V, Bousquet O, et al. Choosing Multiple Parameters for Support Vector Machines[J]. Machine Learning, 2002, 46(1):131-159.

[13] 王东,吴湘滨. 利用粒子群算法优化 SVM 分类器的超参数[J]. 计算机应用, 2008, 28(1):134-135.

[14] 邵信光,杨慧中,陈刚. 基于粒子群优化算法的支持向量机参数选择及其应用[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(5):740-743. (编辑 王艳丽)

作者简介:刘丽娟,女,1986年生。南京航空航天大学民航学院硕士研究生。主要研究方向为图像处理与模式识别、智能故障诊断。
陈果,男,1972年生。南京航空航天大学民航学院教授、博士研究生导师。

动又有轴向运动,适用于工件长度大于砂轮宽度的情况,并且比切入磨削复杂。

磨削过程的在线监控对提高磨削加工质量有重要意义,因此国内外学者均对此进行了大量的研究。在线监控利用的主要信号有磨削力、电流、功率、声发射和振动信号等^[1-2]。目前,对外圆磨削监控的研究主要局限为单一的外圆磨削方式,要么是切入磨削,要么是纵向磨削^[3-4],而对两者进行比较研究的文献较为鲜见。本文分析了同一工况下的切入磨削和纵向磨削(先切入磨削后纵向磨削的情况),并针对纵向磨削,在传统阶梯模型的基础上提出了砂轮磨损的抛物线模型,并分析了两种模型下的切向磨削分力,推导了比较公式,利用砂轮主轴功率信号验证了研究结果。

1 外圆纵向磨削砂轮磨损

纵向磨削相比切入磨削最大的区别是加工过程中砂轮的径向磨损是变化的。外圆纵向磨削过程如图 1 所示。

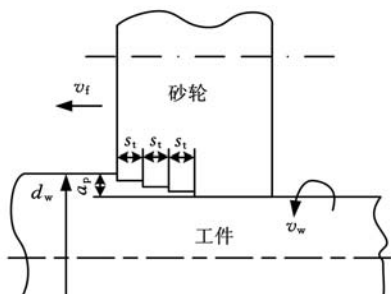


图 1 外圆纵向磨削示意图

工件每旋转一周的进给量 s_t 为

$$s_t = \frac{\pi d_w v_f}{v_w n_w} = \frac{v_f}{n_w} \quad (1)$$

式中, d_w 为工件直径; v_w 为工件线速度; v_f 为砂轮纵向进给速度; n_w 为工件转速。

文献[5]最早研究了纵向磨削的砂轮磨损情况,并提出了纵向磨削砂轮磨损的阶梯模型,由于有砂轮磨损存在,切深的一部分将在砂轮的下一转中留给和前缘 s_t 宽度相邻近的第二个 s_t 宽度的砂轮来去除,砂轮的磨损同样又引起砂轮宽度上的第 3 个 s_t 部分的磨除作用,并以此类推。砂轮越靠前缘的部分磨除金属越多,自身磨损也越快,按 s_t 的大小把砂轮沿宽度方向分成若干等分段,对于被加工工件的同一部分而言,砂轮的各等分段将依次对它进行磨削。

设砂轮的切深是 a_p ,因此起始台阶的砂轮径向切深最大值为 a_p ,后面台阶的切深都小于 a_p ,假设一共有 k 个台阶,第 j 级台阶砂轮径向切深为 a_{pj} ,根据工件表面粗糙度要求,第 k 台阶的砂轮径

向切深 $a_{pk} = 0$ ^[6],因此纵向磨削可以看作宽度为 s_t 的 $k-1$ 个砂轮做切深递减的切入磨削。将砂轮等效成宽度相等的 $k-1$ 个小砂轮是后面进行比较研究的基础。

由于实际纵向磨削砂轮磨损的形状不是阶梯形,而是曲线形的^[5-6],因此在传统的阶梯模型基础上,本文提出以抛物线来模拟实际曲线的研究模型(简称抛物线模型),并分别对以阶梯模型和抛物线模型表示的纵向磨削与切入磨削进行比较研究。

2 磨削力比较

2.1 磨削力

对于外圆切入磨削,磨削力可分为切向分力 F_t 和法向分力 F_n ,对于外圆纵向磨削,还应附加上一个平行于砂轮主轴的纵向进给磨削分力 F_s ,如图 2 所示。对于 F_s 来说,虽然从一个磨粒的角度来看,这个分力应该是很大的,但由于各磨粒具有随机分布的正负磨削力倾角,会使其各分力相互抵消,因此总磨削分力 F_s 的值不会很大^[7],分析时一般不考虑 F_s 。

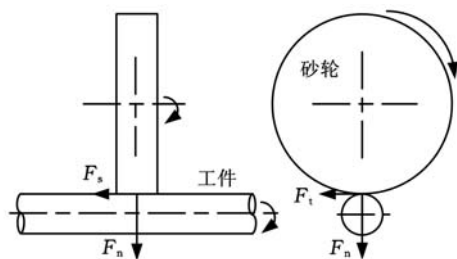


图 2 纵向磨削加工中的磨削力

研究磨削力的文献较多^[8-10],以磨削切向分力为例,其经验表达式如下:

$$F_t = K \left(\frac{v_w}{v_s} \right)^\gamma a_p^\alpha d_c^\beta \quad (2)$$

$$d_e = d_w d_s / (d_w \pm d_s)$$

式中, K 、 α 、 β 、 γ 均为磨削力因数; v_s 为砂轮线速度; d_e 为砂轮当量直径; d_s 为砂轮直径。

法向分力一般大于切向分力,并且二者成比例关系。根据式(2)可以看出,磨削切向分力 F_t 主要与砂轮线速度 v_s 、工件线速度 v_w 、砂轮当量直径 d_e 和磨削切深 a_p 有关。因此,从易于测量的角度出发,只需分析磨削切向分力,就可很容易得出磨削力。对于在同一工况下的先切入磨削后纵向磨削的情况, v_w 、 v_s 和 d_e 是相同的,不同的是磨削切深 a_p 。因此,可以将磨削切向分力公式简化为

$$F_t = Q a_p^\alpha \quad (3)$$

$$Q = K \left(\frac{v_w}{v_s} \right)^\gamma d_e^\beta$$

磨削切向分力 F_t 的测量是通过测量磨削功率来实现的。由于工件的线速度远小于砂轮的线速度,因此磨削功率 P 可简化表示为

$$P = F_t v_s \quad (4)$$

在已知 v_s 的情况下,通过测量磨削功率 P ,即可间接获得磨削切向力 F_t 。下面主要比较切入磨削情况下的切向分力和纵向磨削情况下的切向分力。

2.2 切入磨削的切向分力

由于将砂轮看成是由 $k-1$ 个小砂轮组成的,则切入磨削时的每个小砂轮的切深都是 a_p ,其切向分力用 F'_t 表示,则切入磨削的切向分力总和为

$$\sum F'_t = F'_{t_1} + F'_{t_2} + \dots + F'_{t_{k-1}} = (k-1)Qa_p^\alpha \quad (5)$$

2.3 纵向磨削的切向分力

2.3.1 阶梯模型的切向分力

将图 2 中的砂轮放大,为了进行近似的定量分析,假设阶梯的倾斜角度为定量,如图 3 所示。 L 为砂轮宽度, L_k 为砂轮前缘到第 k 级台阶宽度,此处砂轮切深为 0, ψ 为砂轮磨损形成的斜面角度。分析中不考虑由于工件是细长杆件而引起的支架和工件的弹性变形,也不考虑工件和砂轮的接触变形。

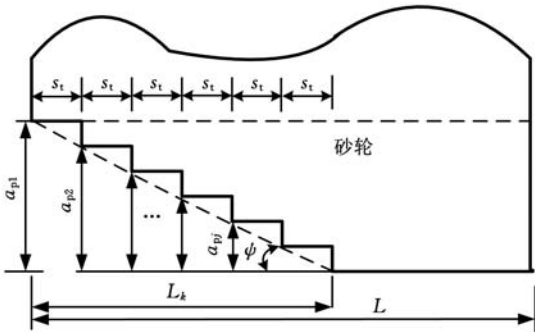


图 3 阶梯模型砂轮切深示意图

取 $a_p = a_{p1}$, $L_k = L$,此时整个砂轮都参与纵向磨削,切向磨削分力最大。根据图 3 可以推得

$$\left. \begin{aligned} a_{p1} &= L \tan \psi = a_p \\ a_{p2} &= (L - s_t) \tan \psi = a_p (L - s_t) / L \\ &\vdots \\ a_{p(k-1)} &= [L - (k-2)s_t] \tan \psi = a_p [L - (k-2)s_t] / L \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

用 F'' 表示纵向磨削的切向分力,则纵向磨削的切向分力总和为

$$\sum F''_t = F''_{t_1} + F''_{t_2} + \dots + F''_{t_{k-1}} = Qa_{p1}^\alpha + Qa_{p2}^\alpha + \dots + Qa_{p(k-1)}^\alpha =$$

$$Qa_p^\alpha \{1 + (1 - s_t/L)\alpha + \dots + [1 - (k-2)s_t/L]\alpha\} \quad (7)$$

由于 $s_t/L \ll 1$,因此将幂函数用泰勒级数展开,忽略高阶项,得

$$\sum F''_t = Qa_p^\alpha \{1 + (1 - \frac{s_t}{L}\alpha) + \dots + [1 - (k-2)\frac{s_t}{L}\alpha]\} = Qa_p^\alpha [(k-1) - \frac{s_t}{L}\alpha \frac{(k-2)(k-1)}{2}] \quad (8)$$

将 $k = L/s_t$ 代入式(8),得

$$\sum F''_t = Qa_p^\alpha (k-1) (1 - \frac{\alpha}{2} + \frac{s_t}{L}\alpha) \quad (9)$$

则切入磨削与阶梯模型的纵向磨削的切向分力之比为

$$\frac{\sum F'_t}{\sum F''_t} = \frac{(k-1)Qa_p^\alpha}{Qa_p^\alpha (k-1) (1 - \frac{\alpha}{2} + \frac{s_t}{L}\alpha)} = \frac{1}{1 - \frac{\alpha}{2} + \frac{s_t}{L}\alpha} \quad (10)$$

2.3.2 抛物线模型的切向分力

纵向磨削砂轮磨损的抛物线模型如图 4 所示,以砂轮轴向方向为 x 轴(图 4 中 x 方向为正方向),以砂轮径向方向为 y 轴,建立砂轮切深抛物线方程 $y^2 = 2px$,推导时取最大切向分力,即 $a_p = a_{p1}$, $L_k = L$ 。

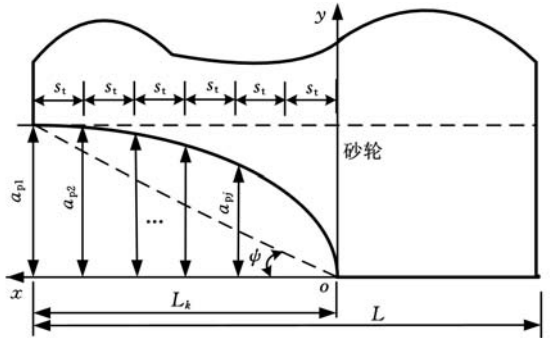


图 4 抛物线模型砂轮切深示意图

则

$$p = \frac{a_p^2}{2L}$$

每个小砂轮的切深用抛物线的前点表示,则根据抛物线方程可得每个小砂轮的切深:

$$\left. \begin{aligned} a_{p1} &= \sqrt{2pL} = a_p \\ a_{p2} &= \sqrt{2p(L - s_t)} \\ &\vdots \\ a_{p(k-1)} &= \sqrt{2p[L - (k-2)s_t]} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

那么纵向磨削的切向分力总和为

$$\begin{aligned} \sum F''_t &= F''_{t_1} + F''_{t_2} + \dots + F''_{t_{k-1}} = Qa_{p1}^\alpha + Qa_{p2}^\alpha + \dots + Qa_{p(k-1)}^\alpha = Q\{(2pL)^{\frac{\alpha}{2}} + 2p(L - s_t)^{\frac{\alpha}{2}} + \dots + 2p[L - (k-2)s_t]^{\frac{\alpha}{2}}\} = \\ &= Q(2pL)^{\frac{\alpha}{2}} \{1 + (1 - s_t/L)^{\frac{\alpha}{2}} + \dots + [1 - (k-2)s_t/L]^{\frac{\alpha}{2}}\} \end{aligned} \quad (12)$$

由于 $s_t/L \ll 1$,因此将幂函数用泰勒级数展开,忽略高阶项,得

$$\sum F''_t = Q(2pL)^{\frac{\alpha}{2}} \{1 + (1 - \frac{s_t}{L}\frac{\alpha}{2}) +$$

$$\dots + [1 - (k-2) \frac{s_i}{L} \frac{\alpha}{2}] =$$

$$Q(2\rho L)^{\frac{\alpha}{2}} \{ (k-1) - \frac{s_i}{L} \frac{\alpha}{2} [1 + 2 + \dots + (k-2)] \}$$
(13)

将 $k = L/s_i$ 代入式(13),得

$$\sum F'_t = Q\alpha_p^\alpha (k-1) (1 - \frac{\alpha}{4} + \frac{s_i}{L} \frac{\alpha}{2})$$

则切入磨削与抛物线模型的纵向磨削的切向分力之比为

$$\frac{\sum F'_t}{\sum F''_t} = \frac{(k-1)Q\alpha_p^\alpha}{Q\alpha_p^\alpha (k-1) (1 - \frac{\alpha}{4} + \frac{s_i}{L} \frac{\alpha}{2})} = \frac{1}{1 - \frac{\alpha}{4} + \frac{s_i}{L} \frac{\alpha}{2}}$$
(14)

3 实验验证

磨削实验是在德国斯来福临公司的 K-C33 数控内外圆磨床上进行的。磨床的主轴转速为 1~1500r/min,最小进给量为 0.1 μ m;砂轮型号为 53A80L15V,宽度为 62mm,直径为 440mm;实验试件为圆柱体,直径为 61.5mm,长度为 120mm,材料为 45 钢,加工时通过双顶尖将其固定;冷却液为嘉实多 Hysol R 水基磨削液。试件的加工现场如图 5a 所示。

电流或功率信号常用于刀具磨损检测^[11-12],也可用于切削力间接获得过程中^[13-14]。本文采用的功率传感器型号为 Power Cell PH-3A,安装在电气柜内,与砂轮电机(EMWB F200L)的三相线连接如图 5b 所示。采集板卡型号为 Spectrum M1.3120(2 通道,12 位 A/D 转换),采集软件为 DEWESoft(版本 6.31SE),功率信号采样频率为 10kHz。



(a) 试件加工现场 (b) 功率传感器

图 5 试件加工现场和功率传感器

磨削方式为多次切入走刀磨削,其过程如下:砂轮与工件端部对齐,先切入磨削,然后纵向磨削,到另一端部再切入磨削,然后再纵向磨削。对应的磨削过程为粗磨→半精磨→精磨→光磨,以纵向进给速度即走刀速度分别为 100mm/min、200mm/min 和 400 mm/min 来采集实验数据,每个纵向进给速度下重复做三次,共采集 9 组实验

数据。半精磨的切深分别为 4 μ m 和 2 μ m,精磨的切深分别为 2 μ m 和 1 μ m。工件转速为 100 r/min;砂轮线速度为 35m/s。

通过 DEWESoft 软件采集的原始数据如图 6 所示,可以看出,切入磨削有明显的峰值,切入磨削和纵向磨削连续交替进行。

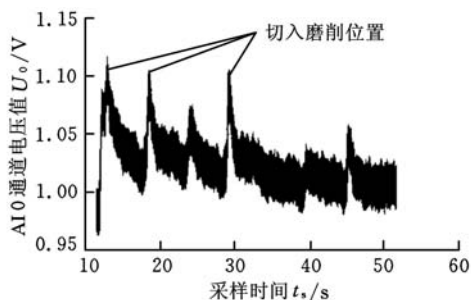
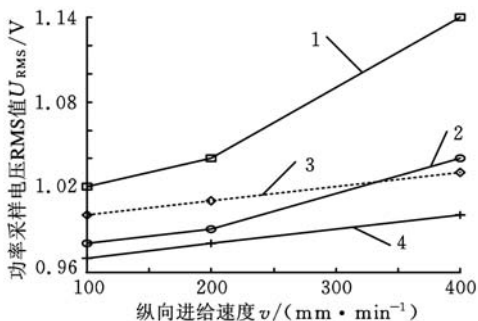


图 6 功率信号波形图

砂轮电机功率信号中,不可避免地含有种种干扰。根据信号的频谱图,主要的干扰有砂轮转速干扰、50Hz工频干扰,这些干扰常常使测量信号的波动过大。因此,为了进行准确的测量和监控必须消除被测信号中的干扰。首先,对信号进行切比雪夫低通滤波,截止频率为 10Hz,切入磨削取功率采样电压 RMS 值的峰值,纵向磨削根据 3 σ 准则去除突变信号^[14],然后取功率采样电压 RMS 值的平均值。分别分析了不同进给量(4 μ m、2 μ m、1 μ m)和不同纵向进给速度(400 mm/min、200mm/min、100mm/min)情况下的切入磨削和纵向磨削功率信号,纵向进给速度、切深和功率采样电压 RMS 值关系如图 7 所示。可以看出,功率采样电压 RMS 值与纵向进给速度成正比,同等工况下,切入磨削力大于纵向磨削力,随着纵向进给速度的增加,切入磨削的功率采样电压 RMS 值变化大于纵向磨削的功率采样电压 RMS 值。



1. 切入磨削,切深 2 μ m 2. 纵向磨削,切深 2 μ m
3. 切入磨削,切深 1 μ m 4. 纵向磨削,切深 1 μ m

图 7 纵向进给速度、切深和功率采样电压 RMS 值关系图

根据切入磨削和纵向磨削的功率采样电压 RMS 值,求出其比值,根据经验,磨削系数 α 取 0.4,以切深 2 μ m 为例,实验数据与理论值的比较

见表 1。从表 1 可以看出,抛物线模型的准确率高于阶梯模型的准确率,切入磨削和纵向磨削的切向分力的理论比值随着纵向进给速度的增大而

增大,实验数据的比值随着纵向进给速度的增大而减小。

表 1 实验数据与理论值比较表

工况				功率采样电压 RMS 值(V)		切入磨削与纵向磨削的切向分力比值				
						实验比值	理论比值			
纵向进给速度 (mm/min)	纵向进给 (mm)	切深 (μm)	磨削力 因数 α	切入 磨削	纵向 磨削	切入磨削与 纵向磨削功 率采样电压 RMS 比值	阶梯模型	准确率 (%)	抛物线模型	准确率 (%)
							$1 - \frac{\alpha}{2} + \frac{s_t}{L}\alpha$		$1 - \frac{\alpha}{4} + \frac{s_t}{L} \frac{\alpha}{2}$	
							1		1	
400	4	2	0.4	1.14	1.03	1.110	1.157	95.8	1.095	98.6
200	2	2		1.04	0.99	1.051	1.201	85.7	1.103	95.1
100	1	2		1.02	0.98	1.041	1.225	82.3	1.107	93.7

4 结论

(1)由式(10)、式(14)和图 7 可知,切入磨削与纵向磨削的切向分力比值与磨削力因数、砂轮宽度和纵向进给量有关,同等工况下,由于切深的原因,切入磨削力大于纵向磨削力。

(2)实验结果证明:纵向磨削的抛物线模型相比阶梯模型更接近实际情况,当纵向进给速度分别为 100mm/min、200mm/min、400mm/min 时,其准确率分别为 98.6%、95.1%和 93.7%,高于阶梯模型的 95.8%、85.7%和 82.3%。

(3)砂轮纵向进给速度减小,使磨削切向分力减小,砂轮主轴功率减小。切入磨削和纵向磨削的理论比值随着纵向进给速度的增大而增大,实验数据的比值随着纵向进给速度的增大而减小,其原因有待于进一步分析。

参考文献:

[1] Liang S Y, Hecker R L, Landers R G. Machining Process Monitoring and Control: the State-of-the-art[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, 2004, 126:297-310.

[2] Abellan-Nebot J V, Romero Subiron F. A Review of Machining Monitoring Systems Based on Artificial Intelligence Process Models[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 47:237-257.

[3] 丁宁. 外圆纵向智能磨削研究[D]. 长春: 吉林大学, 2004.

[4] Kruszynski B W, Lajmert P. An Intelligent System for Online Optimization of the Cylindrical Traverse Grinding Operation [J]. Journal of Engineering Manufacture, 2006, 220(3):355-363.

[5] Verkerk J. Plunge Grinding Data for the Control of

Traverse Grinding Operations [C]//North Am Manuf. Res. Conf. Proc., 8th, Rolla: Manufacturing Engineering Transactions, 1980:80-98.

[6] 庄司克雄. 磨削加工技术[M]. 郭隐彪, 王振忠, 译. 北京: 机械工业出版社, 2007.

[7] 白井英治. 切削磨削加工学[M]. 高希正, 刘德忠, 译. 北京: 机械工业出版社, 1982.

[8] Patnaik D, Singh V, Rao P V. A New Model for Grinding Force Prediction and Analysis[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010, 50:231-240.

[9] Liu Q, Chen X, Wang Y, et al. Empirical Modelling of Grinding Force based on Multivariate Analysis [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 203:420-430.

[10] 张建华, 葛培琪, 张磊. 基于概率统计的磨削力研究[J]. 中国机械工程, 2007, 18(20):2399-2402.

[11] Li X L, Guan X P. Time-frequency-analysis-based Minor Cutting Edge Fracture Detection During and Milling[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2004, 18:1485-1496.

[12] Gangopadhyay A, Barber G, Zhao H. Tool Wear Reduction Through an Externally Applied Electric Current[J]. Wear, 2006, 260:549-553.

[13] 李斌, 张琛, 刘红奇. 基于主轴电流的铣削力间接测量方法研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(3):5-7.

[14] 焦阳, 李郝林. 数控磨削过程中砂轮电机电流的实时监测[J]. 上海理工大学学报, 2009, 31(1):77-79.

(编辑 郭伟)

作者简介:李 厦,男,1969 年生。上海理工大学机械工程学院讲师、博士。主要研究方向为数控技术、智能控制、机电一体化和故障诊断。李郝林,男,1961 年生。上海理工大学机械工程学院院长、教授、博士研究生导师。