

基于声发射信号的精密外圆切入磨削加工时间优化及仿真

陆葳坪, 姜 晨, 张奥君, 程金义, 王 鹏

(上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

摘要: 针对精密外圆切入磨削智能监控的需求, 设计了一种基于声发射信号的精密外圆切入磨削加工时间的在线优化算法。通过建立 AE 信号 RMS 曲线理论模型, 获得了声发射信号与磨削系统时间常数的关系, 建立了优化前各阶段 AE 信号 RMS 曲线; 编写外圆切入磨削加工时间的在线优化算法, 通过试验分析磨削系统加工时间对加工精度及表面粗糙度的影响, 并对优化算法进行验证, 建立优化后各阶段 AE 信号 RMS 曲线。试验结果表明: 该优化方法能够在保证总去除量不变的情况下缩短加工时间, 为精密外圆切入磨削提高加工效率、改善加工工艺提供了重要依据。

关键词: 声发射; 外圆切入磨削; 加工效率

中图分类号: TH 161 文献标志码: A

Optimization and Simulation on the Time of Precise Cylindrical Plunge Grinding Based on Acoustic Emission Signals

LU Weiping, JIANG Chen, ZHANG AoJun, CHENG Jinyi, WANG Peng

(School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to meet the requirement of intelligent monitoring for precise cylindrical plunge grinding, an online optimization algorithm with respect to the grinding time based on acoustic emission signals for precise cylindrical plunge grinding was designed. By establishing the theoretical model of acoustic emission (AE) signal root mean square (RMS) curves, the relationship between the acoustic emission signal and the time constant of grinding system was obtained, and the AE signal RMS curves at each stage before optimization were provided. By preparing a cylindrical plunge grinding time online optimization algorithm, through the test and analysis on the effect of processing time of grinding system on the machining accuracy and surface roughness, and validating the optimization algorithm, the AE signal RMS curves at each stage after optimization were also provided. The test results show that the optimization method can shorten the processing time and improve the processing efficiency, while the total removed amount of material can be ensured unchanged. The improvement of the processing technology provides an important basis for precision cylindrical plunge grinding.

Keywords: *acoustic emission; cylindrical plunge grinding; machining efficiency*

精密外圆切入磨削是应用十分广泛的一种加工技术, 是一种非常重要的轴类零件加工方法, 可以获得非常高的表面质量和几何精度。磨削质量往往决定工件最终的加工精度, 其中, 磨削加工时间作为一种重要的加工参数, 是评价加工效率的重要依据。如何优化磨削过程中各阶段的加工时间, 对磨削过程智能监控技术具有重要意义。声发射是材料局域源快速释放能量产生瞬态弹性波^[1]的现象, 它与工件有着密切的关系, 是磨削过程监控的重要手段之一^[2]。因此, 如果能通过 AE(acoustic emission)信号来实现外圆切入磨削加工时间的在线优化, 对磨削过程智能监控技术来说具有重要的应用前景。

刘贵杰等^[3]利用 AE 信号对磨削表面进行了在线监测; 高宏力等^[1]基于动态树理论利用 AE 信号对刀具磨损情况进行了监测; 郭力等^[4]模拟了磨削烧伤情况下 AE 信号的特征; König 等^[5]通过试验进行了工件去除率及表面粗糙度的 AE 信号关系的研究; Monici 等^[6]通过试验研究了不同的切削液对于 AE 信号的影响。在功率信号和振动信号基础上, 增加 AE 信号, 从而控制工件的切削热以及砂轮磨损情况。Sutowski 等^[7]通过图像分析的方法对外圆磨削砂轮磨损的 AE 信号进行了研究, 建立了非接触式磨削监测系统。

在进行外圆切入磨削精密加工过程中, 工件的磨削质量与效率主要取决于机床操作者的技术水平, 难以对磨削过程进行定量描述, 在指导实际加工过程中具有一定局限性。为了在磨削过程中提高加工效率及改善加工工艺流程, 本文根据 AE 信号产生机理并结合传统的磨削技术, 建立了 AE 信号 RMS(均方根)曲线, 并通过磨削过程各阶段实际去除量的计算、稳定后节点的判定以及加工时间的再分布计算, 提出了一种外圆磨削加工时间的优化算法, 从而保证在总去除量不变的情况下缩短加工时间, 提高加工效率。

1 磨削过程各阶段加工时间优化算法

首先建立磨削过程各阶段 AE 信号均方根值模型, 然后分别算出优化前后各阶段的去除量。根据优化后半精磨阶段、光磨阶段的去除量算出优

化后粗磨阶段的去除量。根据优化后粗磨阶段的去除量算出优化后粗磨阶段的加工时间。通过优化后各阶段加工时间生成优化后各阶段 AE 信号 RMS 曲线, 与优化前各阶段 AE 信号 RMS 曲线进行对比, 取得了预期的优化效果。

1.1 磨削过程各阶段 AE 信号均方根值模型的建立

由于磨削过程中的磨削系统误差以及砂轮磨损会导致数控指令进给速度和实际进给速度存在差异, 因此, 对各阶段建立磨削系统控制式^[8-10], 其表达式为

$$\tau \ddot{r} + \varepsilon \dot{r} = u \quad (1)$$

式中: τ 为系统的时间常数; $\ddot{r}$ 为实际的进给速度的导数; $\dot{r}$ 为实际的进给速度; ε 为砂轮的磨削系数, $\varepsilon=1$; u 为数控指令进给速度。

对式(1)通过非齐次线性微分方程进行变换, 可得

$$r(t) = c_1 + c_2 e^{-\frac{t}{\tau}} + tu \quad (2)$$

式中: c_1, c_2 为常数; r 为材料去除率; t 为加工时间。

粗磨阶段开始, 此时的进给速度由 0 变为 u_1 , 由此可得

$$r(t) = 0, \quad u(t) = 0 \quad (3)$$

将式(3)代入式(2), 可得

$$r(t) = -\tau u_1 + \tau u_1 e^{-\frac{t}{\tau}} + t u_1 \quad (4)$$

粗磨阶段结束, 半精磨阶段开始, 此时的进给速度由 u_1 变为 u_2 , 由此可得

$$r(t_1) = -\tau u_1 + \tau u_1 e^{-\frac{t_1}{\tau}} + t_1 u_1, \quad u(t_1) = u_1 \quad (5)$$

将式(5)代入式(3), 可得

$$r(t) = t_1(u_1 - u_2) + \tau u_1 e^{-\frac{t_1}{\tau}} + u_2(t - \tau) + \tau(u_2 - u_1)e^{-\frac{t-t_1}{\tau}} \quad (6)$$

半精磨阶段结束, 光磨阶段开始, 此时进给速度由 u_2 变为 0, 由此可得

$$r(t_2) = t_1(u_1 - u_2) + \tau u_1 e^{-\frac{t_1}{\tau}} + u_2(t_2 - \tau) + \tau(u_2 - u_1)e^{-\frac{t_2-t_1}{\tau}}, \quad u(t_2) = u_2 \quad (7)$$

将式(7)代入式(3), 可得

$$r(t) = t_1(u_1 - u_2) + t_2(u_2 - u_3) + \tau u_1 e^{-\frac{t_1}{\tau}} + \tau(u_2 - u_1)e^{-\frac{t_2-t_1}{\tau}} + \tau(u_3 - u_2)e^{-\frac{t_3-t_2}{\tau}} + t_3 u_3 - \tau u_3 e^{-\frac{t-t_3}{\tau}} \quad (8)$$

分别对式 (4), (6), (8) 进行求导, 得到粗磨阶段、半精磨阶段及光磨阶段的 AE 信号 RMS 曲线的变化表达式 $v_1(t)$, $v_2(t)$, $v_3(t)$ 。

$$v_1(t) = u_1 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \tag{9}$$

$$v_2(t) = u_2 - (u_2 - u_1)e^{-\frac{t-t_1}{\tau}} \tag{10}$$

$$v_3(t) = u_2 e^{-\frac{t-t_3}{\tau}} \tag{11}$$

1.2 磨削过程各阶段实际去除量的计算

根据磨削过程各阶段 AE 信号 RMS 曲线, 计算优化前粗磨阶段 ($0 \sim t_1$), 半精磨阶段 ($t_1 \sim t_2$), 光磨阶段 ($t_2 \sim t_3$) 的去除量 r_1 , r_2 , r_3 , 可得

$$r_1(t) = -\tau u_1 + \tau u_1 e^{-\frac{t_1}{\tau}} + t_1 u_1 \tag{12}$$

$$r_2(t) = t_1(u_1 - u_2) + \tau u_1 e^{-\frac{t_1}{\tau}} + u_2(t_2 - \tau) + \tau(u_2 - u_1)e^{-\frac{t_2-t_1}{\tau}} - r_1(t) \tag{13}$$

$$r_3(t) = t_1(u_1 - u_2) + t_2(u_2 - u_3) + \tau u_1 e^{-\frac{t_1}{\tau}} + \tau(u_2 - u_1)e^{-\frac{t_2-t_1}{\tau}} - \tau u_3 + \tau(u_3 - u_2)e^{-\frac{t_3-t_2}{\tau}} + t_3 u_3 - r_1(t) - r_2(t) \tag{14}$$

根据磨削过程各阶段去除量即可算出优化前的总去除量

$$r = r_1 + r_2 + r_3 \tag{15}$$

1.3 磨削过程各阶段稳定后节点的判定

当半精磨阶段加工时间为 $t_1 \sim t_2$ 时, 计算半精磨阶段曲线斜率

$$K_2(t_1 + it_s) = ((v_2 - v_1)/\tau) \exp(-(t_1 + it_s - t_1)/\tau) \tag{16}$$

式中, t_s 为时间间隔, $i=0, 1, 2, \dots$ 。

当第 n_1 次计算斜率 $K_2(t_1 + n_1 t_s)$ 的绝对值小于等于常数 T_h 时, 即达到稳定, 此时, 半精磨阶段时间变为 $t_1 \sim t_6$,

$$t_6 = t_2 - (t_1 + n_1 t_s) \tag{17}$$

当光磨阶段加工时间为 $t_2 \sim t_3$ 时, 计算精磨阶段曲线斜率

$$K_3(t_2 + it_s) = ((v_3 - v_2)/\tau) \exp(-(t_2 + it_s - t_2)/\tau) \tag{18}$$

当第 n_2 次计算斜率 $K_3(t_2 + n_2 t_s)$ 的绝对值小于等于常数 T_h 时, 即达到稳定, 此时, 精磨阶段时间变为 $t_6 \sim t_7$,

$$t_7 = t_3 - (t_2 + n_2 t_s) \tag{19}$$

1.4 磨削过程各阶段加工时间的再分布计算

根据半精磨阶段、光磨阶段达到稳定后的节点即可得出优化后半精磨阶段、光磨阶段的加工时间, 从而算出优化后各阶段的去除量。

优化后半精磨阶段加工时间为 $t_5 \sim t_6$, 半精磨阶段去除量

$$l_2(t) = t_1(u_1 - u_2) + \tau u_1 e^{-\frac{t_1}{\tau}} + u_2(t_6 - \tau) + \tau(u_2 - u_1)e^{-\frac{t_6-t_1}{\tau}} - r_1(t) \tag{20}$$

优化后光磨阶段加工时间为 $t_6 \sim t_7$, 精磨阶段去除量

$$l_3(t) = t_1(u_1 - u_2) + t_2(u_2 - u_3) + \tau u_1 e^{-\frac{t_1}{\tau}} + \tau(u_2 - u_1)e^{-\frac{t_2-t_1}{\tau}} - \tau u_3 + \tau(u_3 - u_2)e^{-\frac{t_7-t_2}{\tau}} + t_7 u_3 - r_1(t) - r_2(t) \tag{21}$$

因总去除量 r 保持不变, 根据优化后半精磨阶段、精磨阶段及光磨阶段的去除量可知优化后粗磨阶段的去除量

$$l_1 = r - l_2 - l_3 \tag{22}$$

由优化后粗磨阶段的去除量 l_1 算出优化后粗磨阶段的加工时间 t_5 。

$$l_1 = -\tau u_1 + \tau u_1 e^{-\frac{t_5}{\tau}} + t u_1 \tag{23}$$

此时, 优化后磨削过程各阶段的加工时间变为粗磨阶段 ($0 \sim t_5$), 半精磨阶段 ($t_5 \sim t_6$), 光磨阶段 ($t_6 \sim t_7$)。

2 磨削过程各阶段加工时间优化流程

将磨削过程分为粗磨阶段、半精磨阶段和光磨阶段这 3 个阶段。首先建立磨削过程各阶段 AE 信号均方根值模型, 然后分别算出优化前各阶段的去除量, 通过各阶段曲线的斜率找出进入稳定状态的起始点, 并将该点设为曲线节点。通过新的节点就能算出优化后半精磨阶段、光磨阶段的去除量。保证总去除量不变, 根据优化后半精磨阶段、光磨阶段的去除量即可算出优化后粗磨阶段的去除量。根据优化后粗磨阶段的去除量即可算出优化后粗磨阶段的加工时间。通过优化后各阶段的加工时间即可生成优化后各阶段 AE 信号 RMS 曲线。磨削过程各阶段加工时间优化流程如图 1 所示, 通过一次完整的优化过程, 分析采集了优化前后的 AE 信号 RMS 值 V_{AE} , 获得了相关的优化结果。

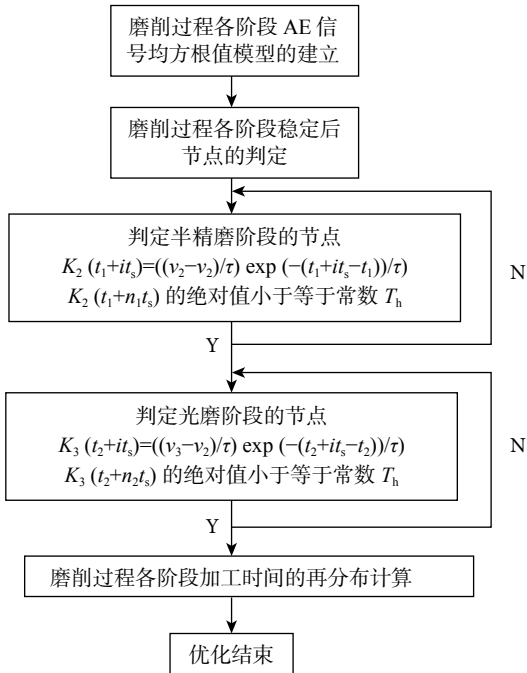


图 1 磨削过程各阶段加工时间优化流程

Fig. 1 Optimization process for the machining time at various stages of grinding process

3 磨削过程各阶段加工时间优化及仿真

在磨削过程中通过监测 AE 信号的变化，磨削力和表面粗糙度能够被预测，因此，能够有效地控制磨削过程并获得所要求的磨削结果。图 2 为磨削过程各阶段加工时间优化的界面图，能够分别显示磨削过程各阶段时间常数及试验数据的变化趋势，同时生成相应的优化前后 AE 信号 RMS 曲线。 N 为时间常数的个数。磨削过程各阶段加工时间优化软件分为输入区域和操作区域，首先在输入区域输入磨削过程各阶段的进给速度和加工时间，然后在操作区域导入时间常数和试验数据，并且生成相应的曲线，最终根据以上数据即可生成优化前后的 AE 信号 RMS 曲线。如图 3 所示(见下页)，通过判定磨削过程各阶段稳定后的节点，即利用曲线斜率的绝对值小于等于常数 0.001，找到稳定后的节点。优化后能够实现当半精磨阶段及光磨阶段达到稳定后立即进入下个阶段，在保证总去除量不变的情况下，缩短了工件加工时间，从而提高加工效率。比较优化前和优化后的磨削加工时间，

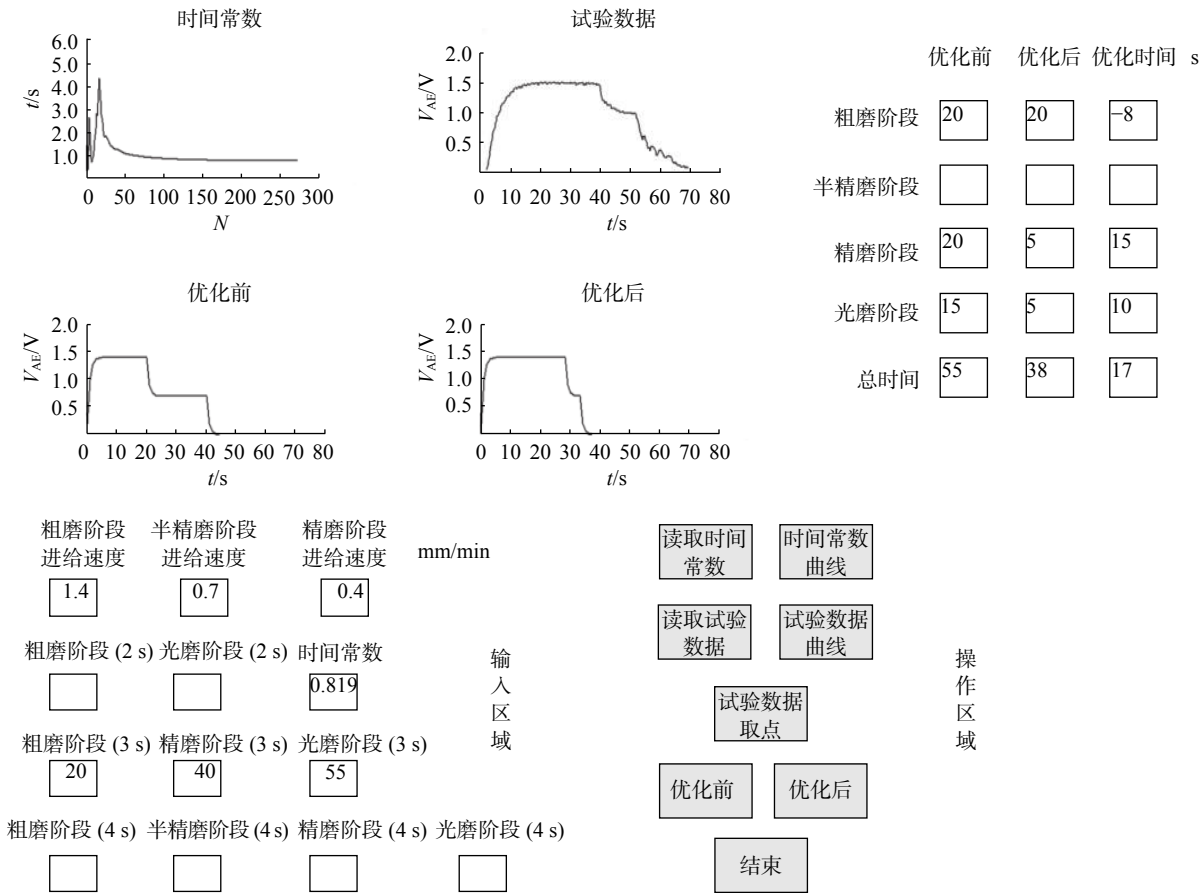


图 2 磨削过程各阶段加工时间优化界面

Fig.2 Optimization interface for each stage of grinding process

可以看出优化后的总加工时间相比于优化前的总加工时间更短,说明优化方法是可行的。如表1所

示,优化结果表明,该方法能够在保证总去除量不变的情况下缩短加工时间,从而提高加工效率。

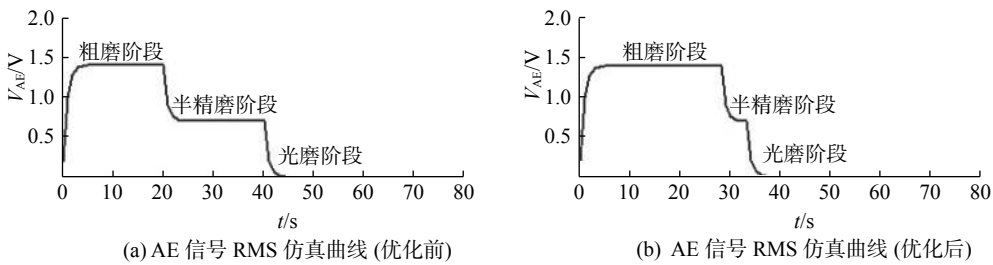


图3 磨削过程各阶段优化前后对比

Fig.3 Comparison of various stages of grinding process before and after optimization

表1 磨削过程各阶段优化前后加工时间结果比较
Tab.1 Comparison of the processing time at various stages of grinding process before and after the optimization s

试验组	优化前	优化后	优化时间
1	16	14	2
2	21	18	3
3	26	25	1
4	31	27	4
5	36	30	6
6	41	32	9
7	46	35	11
8	51	37	14
9	55	38	17
10	61	42	19

4 结 论

根据磨削过程各阶段 AE 信号均方根值模型生成了优化前的 AE 信号 RMS 曲线,通过优化算法对其加工时间进行了优化,在保证总去除量不变的情况下生成了优化后的 AE 信号 RMS 曲线。结果表明,优化后磨削过程各阶段的加工时间相较于优化前磨削过程各阶段的加工时间更短,说明优化方法是可行的。采用 AE 信号进行精密外圆切入磨削加工时间优化,获得了预期的磨削过程各阶段加工时间的优化结果。该优化方法通用性强,能实现磨削过程各阶段加工时间的优化,提高了加工效率,为精密外圆切入磨削改善加工工艺提供了一种可靠、通用的优化策略。

参考文献:

[1] 高宏力, 许明恒, 傅攀, 等. 基于动态树理论的刀具磨损监测技术[J]. 机械工程学报, 2006, 42(7): 227-230.

[2] KIM H Y, KIM S R, AHN J H, et al. Process monitoring of centerless grinding using acoustic emission[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 111(1/2/3): 273-278.

[3] 刘贵杰, 巩亚东, 王宛山. 基于摩擦声发射信号的磨削表面粗糙度在线检测方法研究[J]. 摩擦学学报, 2003, 23(3): 236-239.

[4] 郭力, 尹韶辉, 李波, 等. 模拟磨削烧伤条件下的声发射信号特征[J]. 中国机械工程, 2009, 20(4): 413-416.

[5] KÖNIG W, ALTINTAS Y, MEMIS F. Direct adaptive control of plunge grinding process using acoustic emission (AE) sensor[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1995, 35(10): 1445-1457.

[6] MONICI R D, BIANCHI E C, CATAI R E, et al. Analysis of the different forms of application and types of cutting fluid used in plunge cylindrical grinding using conventional and superabrasive CBN grinding wheels[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(2): 122-131.

[7] SUTOWSKI P, NADOLNY K, KAPLONEK W. Monitoring of cylindrical grinding processes by use of a non-contact AE system[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2012, 13(10): 1737-1743.

[8] CHEN X, ROWE W B, MILLS B, et al. Analysis and simulation of the grinding process. Part III: Comparison with experiment[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1996, 36(8): 897-906.

[9] SONG Q. The efficiency optimization of the cylindrical grinding based on acoustic emission signals[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 494-495: 721-724.

[10] 姜晨, 李郝林. 基于声发射信号的精密外圆切入磨削时间评估算法及试验研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50(5): 194-200.