

# 恒力磨削中的闭环控制

董波 李郝林

上海理工大学 (200093)

**摘要** 分析了磨削过程中砂轮的受力情况,由于磨削力为多方向的矢量难以测定,提出了通过声发射信号来检测磨削力的变化。将声发射信号反馈到数字PID控制中构成闭环控制,从而达到控制磨削力的目的。最后,通过实验验证了该控制方法的可行性。

**关键词** 恒力磨削 声发射 数字PID 闭环控制

在高精度的磨削加工中,传统的磨削方法预先设置好了磨削路线、砂轮架进退速度、进给量等一系列参数,磨削过程中变化的砂轮磨削力影响着工件的表面质量,而且加工的速度也不可以随加工的情况不同而实时改变,一定程度上影响了加工的效率。因此,基于磨削工程最优化的理念提出了恒力磨削,即在磨削时,砂轮的进给量会自动调节,以保证整个磨削工程磨削力恒定。

## 1 砂轮受力分析

在磨削过程中工件和砂轮之间的力称为磨削力,在一般外圆磨削情况下,磨削力可以分解为三个互相垂直的分力<sup>[1]</sup>,如图1。作用于砂轮旋转的切线方向为切向磨削力 $F_t$ ,作用于砂轮和工件接触的法线方向的为法向磨削力 $F_n$ ,作用于纵向移动方向的为轴向磨削力 $F_a$ <sup>[1]</sup>。

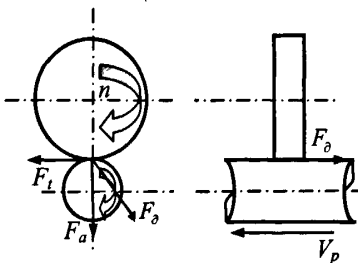


图1 砂轮的受力分析

## 2 恒力磨削控制系统

主轴转速、纵向移动速度、磨削深度和工件材

质等是影响磨削力的因素。由图1也可以得知,磨削力为多方向的矢量值,一般难以测定。我们想通过测定磨削能量的方法来评定磨削力。材料在内力或外力作用下会产生变形或断裂,同时以瞬态弹性波的形式快速释放出应变能,该种现象称为声发射(Acoustic Emission,简称AE)。通过声发射传感器在线采集磨削过程中的声发射信号,经过放大、滤波处理后,提取特征参数以及找出有效特征参数和磨削量(磨削力)的映射关系,将此时的信号反馈给数字PID来控制器控制伺服电机,以保持磨削量在一个适当的范围内,从而达到恒力磨削的目的。

整个系统由三部分组成:声发射采样分析部分、PID控制部分和数控外圆磨床,其系统图如图2所示。

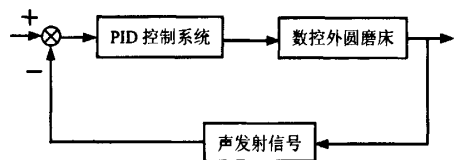


图2 控制系统图

一个完整的加工过程包括若干个加工周期,一个周期内根据工况合理调配声发射采样时间、采样信号处理时间、控制处理时间、数控指令输出时间。单位加工周期的时序图如图3所示。

图3中 $t_1$ 、 $t_4$ 时刻分别为本加工周期进退刀量输出时刻和下一加工周期进退刀量输出时刻。 $t_1$ 到 $t_4$ 之间构成了一个完整的单位加工周期。

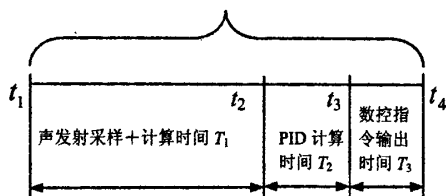


图3 单位加工周期时序图

### 3 PID 控制

在生产过程自动控制中，PID 控制简单实用，易于实现，适用范围广，鲁棒性好，在现今的工业过程中获得了广泛的应用，所有在恒力磨削的控制方法都采用 PID 控制。为了实现更准确的控制，将传统的 PID 控制器改进为数字 PID 控制器，在模拟调节系统中，理想 PID 控制算法的模拟表达式为：

$$y(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1)$$

式中：

$y(t)$  ——调节器的输出信号；

$e(t)$  ——调节器的偏差信号，它等于给定值与测量值之差；

$K_p$  ——调节器的比例系数；

$T_I$  ——调节器的积分时间常数，它表示积分速度的大小，数值越大积分速度越慢，积分作用越弱；

$T_D$  ——调节器的微分时间常数。

对PID控制算法模拟表达式进行数字离散化，即利用Z变换得到如下差分方程<sup>[2]</sup>：

$$\int_0^t e(t) dt \approx \sum_{j=0}^n e(j) \Delta t = T \sum_{j=0}^n e(j)$$

$$\frac{de(t)}{dt} \approx \frac{e(n) - e(n-1)}{T}$$

$$y(n) = K_p \left\{ e(n) + \frac{T}{T_I} \sum_{j=0}^n e(j) + \frac{T_D}{T} [e(n) - e(n-1)] \right\}$$

$$y(n) - y(n-1) = K_p \left\{ [e(n) - e(n-1)] + \frac{T}{T_I} e(n) + \frac{T_D}{T} [e(n) - 2e(n-1) + e(n-2)] \right\}$$

式中：

$t, T$  ——采样时间；

$e(n)$  ——第  $n$  次采样时的偏差；

$e(n-1)$  ——第  $n-1$  次采样时的偏差；

$n$  ——采样系列， $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ 。

整理后得到：

$$\begin{aligned} \Delta y(n) &= y(n) - y(n-1) \\ &= (K_p + K_I + K_D)e(n) - \\ &\quad (K_p + 2K_D)e(n-1) + K_D e(n-2) \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)就是增量型PID算法，实现了PID算法的数字化，为控制程序的编写提供了前提，其特点就是只需保持当前时刻以前三个时刻的误差即可，消除了累积计算误差，当计算有误差或精度不够时对控制量的影响较小。理想情况下，输出应无延迟、无超调地跟踪输入指令的变化。因为每个加工周期时间短，控制算法必须在非常短暂的时间内实现动态调节，那么控制算法不能非常复杂，在满足主要要求的同时，兼顾其跟踪能力和抗干扰能力。在这种情况下，在现有的PID控制基础上加入了速度和加速度的前馈环节，用速度前馈来减小微分增益所带来的跟随误差，用加速度前馈来补偿由于惯性所带来的跟随误差<sup>[3]</sup>，结构图如图4所示。

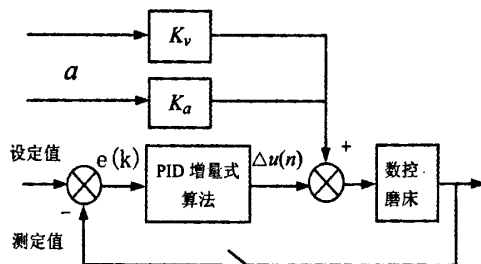


图4 带速度、加速度前馈环节的系统图

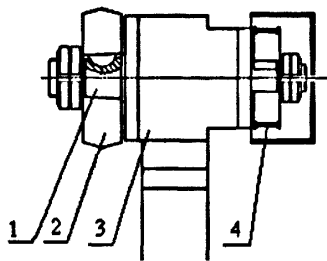
### 4 试验

作者在外圆磨床上验证了该控制策略的性能。试验对象：圆柱形 T10 工具钢，主轴转速 200 r/min；工作台移动速度：0.80 mm/s；砂轮进给速度：0.1mm/s；控制程序开发平台：VB6.0。

用 KISTLER 8152B 型声发射传感器采集声发射信号时间约 42 ns，可忽略。采样分析单位周期时间为 18 ms，PID 单次计算时间是约 13 ms，计算机

(下转第 34 页)

给结束并返回, 停止修整。工件继续进行磨削, 从而实现轴承内圈的沟槽加工, 如图 5 所示。



1. 旋转轴 2. 金刚石滚轮 3. 轴座 4. 齿形带轮

图 5 金刚石滚轮砂轮修整器结构示意图

### 3 机床改造后的使用效果

我们对原机床进行了改进, 设计了金刚石滚轮砂轮修整器部分、液压部分、机械传动部分和电器

部分等, 用了 2 个月的设计时间后加工、制造、调试, 现已正式投入生产使用, 效果良好。

设备改造后, 实现了设备的一台多用。既能加工方沟, 又能加工双沟, 改造成了能加工各种异形表面轴承内圈的磨床, 只要根据产品形状的需要, 设计新的金刚石滚轮就能满足加工要求, 结构简单, 使用方便。并且实现了轴承内圈内沟的成形磨削, 解决了调心滚子轴承、调心球轴承、双沟球轴承和短圆柱滚子轴承加工中的主要技术难点, 具有轴承行业的前瞻性。

经过对 3MZ136 型全自动球轴承内沟磨床的改造设计, 我们把一台设备变成了多功能, 实现了一机多能的作用, 随时应对产品频繁变换的需要, 迎合了市场变化的需要。如买一台专用磨床大约需要 16~18 万元, 而改造一台这样的设备只需数千元, 可节约大量的资金。

(上接第 27 页)

到伺服系统串口通讯单次传输指令的时间为 10 ms。所以单位加工周期是  $300+13+10=323$  ms, 一个单位加工周期的纵向加工距离是  $0.8 \times 0.313=0.2584$  mm。产生纵向距离误差是  $0.8 \times (10+13) / 1000=0.0184$  mm, 所以在单位加工周期中由于 PID 运算和指令输出时间导致的误差距离百分比为 7.12%, 由于硬件通讯采用串口通讯, 为了更好的减少误差, 可以简化 PID 算法, 提高 PID 算法的计算效率。通讯采用并口通讯, 减少通讯时间。图 5 为加工实景图。

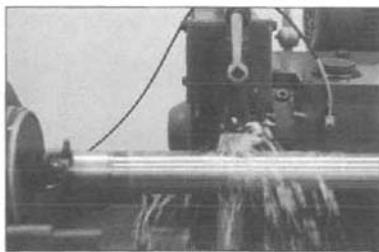


图 5 加工实景图

### 5 结语

用控制磨削能量的方法来控制磨削力, 通过把实时检测声发射信号反馈到伺服系统中, 根据声发射信号和磨削力的映射关系来判断磨削力的大小, 从而来实时控制磨削进给量使磨削力保持恒定。使砂轮跟工件的表面接触均匀, 可以用于复杂曲面的磨削加工。如果对控制策略进行改进, 如采用模糊控制, 使控制系统具有自学习的功能, 进而做到智能磨削, 在磨削加工中有着更广泛的运用。

#### 参考文献

- [1] 陈飞, 方挺, 葛芦生, 王育飞. 钢管磨削力软测量模型及其应用研究[J]. 安徽工业大学学报, 2004, 4.
- [2] 程佩青. 数字信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社.
- [3] 赖国庭, 吴玉厚, 富大伟. 基于 PMAC 的直线电机速度/加速度前馈控制[J]. 控制工程, 2003, 10, 6.
- [4] 陈新宁, 张丽梅, 刘寅桐. PID 的数字化算法在自动化测试系统中的应用[J]. 国外电子测量技术, 2006, 4.

**本刊讯:** 2007 年 12 月 21 日, 中国机床工具工业协会在北京召开了“2007 年机床工具行业标准化工作会议”。机床工具行业各标委会、分标委会的秘书长及秘书处的代表参加了本次工作会议。国家标委会郭辉主任、陆旭忠同志, 中国机械工业联合会、王金弟副秘书长等有关主管领导到会指挥工作。

# 恒力磨削中的闭环控制

作者: [董波](#), [李郝林](#), [DONG Bo](#), [LI Haolin](#)  
作者单位: [上海理工大学](#), 200093  
刊名: [精密制造与自动化](#) **ISTIC**  
英文刊名: [PRECICE MANUFACTURING & AUTOMATION](#)  
年, 卷(期): 2008, "" (1)  
引用次数: 0次

## 参考文献(4条)

1. [陈飞](#), [方挺](#), [葛芦生](#), [王育飞](#) [钢管磨削力软测量模型及其应用研究](#) [期刊论文] - [安徽工业大学学报](#) 2004 (04)
2. [程佩青](#) [数字信号处理](#)
3. [赖国庭](#), [吴玉厚](#), [富大伟](#) [基于PMAC的直线电机速度/加速度前馈控制](#) [期刊论文] - [控制工程](#) 2003 (06)
4. [陈新宁](#), [张丽梅](#), [刘寅桐](#) [PID的数字化算法在自动化测试系统中的应用](#) [期刊论文] - [国外电子测量技术](#) 2006 (04)

## 相似文献(0条)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_jmzyzdh200801009.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_jmzyzdh200801009.aspx)

下载时间: 2010年5月28日