Vol.18.No. 4 Dec.,1988

# 磨削自适应控制中在线测量 尺寸和圆度的精度分析

杨青

(农机系)

## 、 複…… 夏 パー・・・

关键词 自适应控制; 磨削; 在线测量; 圆度; 尺寸; 精度; 传感器

磨削加工的自适应控制,由于能够用计算机信息处理系统,自动地排除和调整各种参数 对加工过程的影响,以适应实际的加工条件,因此极大地改善了磨削工艺效果<sup>[1-3]</sup>。近年来, 随着计算机技术的迅速发展,它越来越受到国内外的高度重视。

在线测量磨削加工中工件的几何参数,是磨削自适应控制系统的重要组成部分。作为整 个控制系统信号反馈的依据,在线测量的精度,将直接影响系统的自动判断和调整功能。因 此,对磨削精度和经济效益有很大影响。文献〔1-7〕分别对磨削自适应控制系统及表 面粗 糙 度的在线测量和控制,作了深入的研究。本文主要探讨磨削自适应控制系统中,在线测量尺 寸和圆度的精度问题。通过理论分析和实验对比,研究影响精度的主要因素。为实现在线测 量的误差补偿及优化的自适应控制,提供一定的依据。

1 在线测量尺寸和圆度的传感器系统

在线测量尺寸和圆度的传感器系统如图1所示。测量头是经过改进的电容式传感器,测量臂由弹簧给一定预载作用在工件上。在磨削过程中,通过计算机控制,可交替地采集双测量臂或下测量臂的输出信号,因此可用同一传感器分别测量工件的尺寸及圆度<sup>[8]</sup>。

主控计算机控制整个磨削过程及在线测量的传感器系统。从测量臂得到的位移信号输入 放大器,放大并变成线性差动的电压信号,经A/D转换输入计算机。高通滤波器可把0.1HZ 的低频信号滤去,以实现尺寸和圆度信号的分离。磨床主轴上装一光敏角度传感器,用以触 发计算机,使它准确地控制主轴每转采集256个数据。主控计算机再将数据输入微型计算机, 用Basic及汇编语言对数据进行离散及快速富里哀变换(DFT及FFT)。绘图机用于绘制工 件表面的轮廓及频谱分析图。

2 在线测量圆度的数学模型

由传感器下臂输出的信号,既包括了工件的实际尺寸,又包括了工件的形状及相互位置 本文于1988年5月3日米利, 误差。为了将圆度信号从中分离出来,应用富里哀频谱分析的方法。



图1 在线测量尺寸和圆度的装置

设传感器的输出信号为一周期函数,按频谱分析原理,将它分解为由正弦波组成的富里 哀级数

$$A(k, \theta) = A_{\theta} + \sum_{k=1}^{n} (A_{\kappa} \cos(\theta + P_{\kappa} \sin \theta))$$

$$A_0 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{\infty} A(k, \theta);$$

$$A_{\mathbf{K}} = \frac{2}{n} \sum_{k=1}^{n} A(k, \theta) \cos k\theta,$$

$$P_{\mathbf{K}} = \frac{2}{n} \sum_{k=1}^{n} A(k, \theta) \sin k\theta;$$

Α(k, θ) —— 工件k阶谱波分量的半径值;

kθ-----k阶谐波分量对应的相位角。

式(1)中,基波Ao代表实际工件半径的平均值,也是用于评定圆度误差的理想圆半 径。 第一谐波分量A<sub>1</sub>coSθ+B<sub>1</sub>sinθ,代表测量中心与加工中心不同轴产生的相互位置 误 差。剩 余的项即为形状误差。在圆柱体的任一径向截面内,工件的形状误差即为圆度误差。因此, 圆度误差的数学模型为

$$R(k, \theta) = A(k, \theta) - A_0 - [A_1 \cos \theta + B_1 \sin \theta]$$

$$R_t = R(k, \theta)_{max} - R(k, \theta)_{min}$$

$$R(k, \theta) = A(k, \theta)_{min} - R(k, \theta)$$

$$R_t = R(k, \theta)_{min} - R(k, \theta)_{min}$$

$$R(k, \theta) = A(k, \theta)_{min} - R(k, \theta)_{min} - R(k, \theta)_{min}$$

$$R(k, \theta) = A(k, \theta)_{min} - R(k, \theta)_{min} - R(k$$

式中:  $R(k, \theta)$  ——工件实际轮廓相对于理想圆的偏差;  $R_i$ ——工件的圆度误差。

(1)

2

1 1 1 利用计算机实时时钟脉冲和中断响应,实时地对数据进行DFT和FFT分析,可将 谐 波 中的第一谐波分量除去,传感器系统中的高通滤波器,可将尺寸分量除去。因此,综合应用 计算机硬件软件技术,便可实现圆度信号的分离。

3 在线测量尺寸和圆度的精度分析

磨削自适应控制系统中,传感器在线测量工件的几何参数精度,不但受测量误差的影响,同时还受传感器本身特性及各种工艺因素的影响。根据在 1076外圆磨床的试验结果,对影响测量精度的因素作如下分析。

#### 3.1 传感器性能的影响

3.1.1 传感器的静动态特性

设传感器系统静态输入的位移量为<sup>4</sup>,计算机输出的数字量为<sup>D</sup>。由实验得到,系统 静态定标线性回归的曲线方程为

$$D = -51.305 + 0.1624 \tag{4}$$

线性化后拟合的相关系数等于1。说明系统的静态输入与输出完全相关。因此不会对在线测量的精度有任何影响。

设传感器系统的动态输入,为工件转速频率/变化时,数值相同的工件位移激 振 量;它 的输出为相应转速频率时,传感器下臂的位移量4(1)。通过大量试验<sup>[8]</sup>,得到了传 感 器 输出与工件转速之间的频率响应曲线。应用线性回归分析的最小二乘原理及计算机 软 件 技 术,便可由实验的方法建立传感器系统的传递函数。

工件转速频率分别在高频和低频时的响应特性曲线如图 2 (a), 2 (b) 所示。它们的最 佳 拟合曲线方程分别为

$$A(I) = \begin{cases} 3.4 & (0 \le I \le 9HZ) \\ 6.913e^{-77I} & (I > 9HZ) \end{cases}$$

$$AI = 4.832e^{-0.018I} & (a \text{ met})$$

方程线性化后拟合的相关系数分别为0.967和0.997。大大超过了显著水平α=0.01时的临介值0.641,说明线性相关极为显著。

综合上述实验结果,得到传感线器系统动态响应特性的数学模型

$$A(l) = \begin{cases} c & (0 \leq \langle 9 \rangle Z) \\ c \rangle - b l & (\langle \rangle 9 \rangle IZ) \end{cases}$$
(5)

式中: ,,为任意常数。

公式(5)表明,对于相同的传感器输入位移,当工件转速频率小于或等于9<sup>HZ</sup>(工件转速为60<sup>-</sup>·<sup>2</sup>。)时,传感器输出的位移近似为常量,引起的测量误差很小;当频率大于9<sup>HZ</sup>时,传感器的输出按指数衰减,从而产生较大的动态测量误差。

对传感器动态特性进一步的研究结果<sup>[9]</sup>表明,当工件的转速频率超过临界频率时,传感器的动态响应产生滞后作用,使测量臂不能随着工件的波动而输出相应的信号,由此产生了 传感器的动态测量误差。应用空间状态法,导出了临界频率的公式为

$$\omega_{c} = \omega_{s} \sqrt{1 + \frac{d}{e}} \tag{6}$$



图 2 传感器的频率响应特性曲线

考虑到工件表面的形状不是绝对的正弦波以及其他高频分量对临界频率的影响。按叠加 原理对上式进行修正[9]:

$$v_{\bullet} = \frac{60\omega_{\rm n}}{c} \sqrt{d} \tag{7}$$

式中: \_\_\_\_工件临界转速; \_\_\_工件波形系数。 将  $\omega_{n} = \sqrt{k/m}$ 代入公式 (7),得

4

$$n_{\bullet} = \frac{60}{c} \sqrt{\frac{kd}{m}} \tag{8}$$

式中: k\_\_\_\_传感器的刚度; m----传感器的质量。

由公式(8)可知,增加'和或减小", 均可使临界转速增加,可改善传感器的动态特 性。但增加k和d,将使测量臂的预应力增加,10 从而加深了工件表面的印痕及加速了测量臂的 磨损和变形。实验结果表明,当 =0.135 时, 传感器在常用的转速范围内,具有较好的动态 响应特性(图3),因而使动态测量误差减小。 3.1.2 在线与离线测量圆度结果的比较

为了验证传感器在线测量圆度的精确性, 將其测量结果与TALYROUND圆度仪离线测 量的结果进行比较。同一工件测得的频谱图分别如图4(a),4(b)所示。比较测量结果,频 谱分布极为相似。再对15个工件进行对比测量,结果如图5所示。用最小二乘法拟合得到 线性回归方程为

$$() = 0.363 + 0.553$$
 ()

式中: ()\_\_\_\_圆度仪离线测得的圆度误差;

A(I) \_\_\_\_ 传感器在线测得的圆度误差。



图 3 d=0.135cm时的传感器动态特性

(9)

线性相关系数为0.929,大于显著水平 $\alpha$ =0.01时的临界值0.641。说明两种测量结果相关性极为显著。



图 4 两种测量结果的频谱图

在六种不同的工件转速下,两种测量结果的比较如图 6 所示。线性回归的计算 结 果 表 明,在工件转速为320<sup>2</sup>···及210 ····时,它们的相关系数分别为0.499及0.931,其他四种 转速 ,相关系数均在0.970以上 (α=0.05及α=0.01时,临界值分 别 为0.878及0.959)。 说明在较宽的转速范围内,两种测量结果相关性显著。因此,可应用计算机软件,对在线测 量圆度的结果进行补偿。

图 6 的结果还表明,随着工件转速的增加,直线方程的斜率增加。进一步说明传感器的 动态特性对在线测量圆度有较大影响。



3.1.3 传感器动态测量的示值精度

为评定传感器动态测量的示值精度,对同一工件在相同主轴转速及装夹条件下,分别以 每转采集256及128个数据,重复测量15次,并用数理统计方法进行数据处理。根据对四个零 件抽样检验的结果,得到如下结论:

(1) 传感器动态测量的示值精度可用 σ<sub>2</sub>表示,其值为 ±0.034~ ±0.070µm。

(2) 按95%及99%的置信概率估计,传感器示值不重复度总误差δ<sub>1</sub>及δ<sub>2</sub>分别为
 ±0.074~±0.155μm,±0.109~±0.219μm。相对误差ε<sub>1</sub>及ε<sub>2</sub>分别为±2.08~±5.31%,

6

(3) 工件旋转一周采集的数据越多,测量精度越高。

#### 3.2 砂轮振动对测量结果的影响

实验表明,在磨削加工中,砂轮的振动与不平衡,对被加工零件的圆度误差有较大的影响<sup>[10]</sup>。

当砂轮及磨床主轴转速分别为2000 · · 及210 · · 时,工件和分别在砂轮平衡及不平衡状态下磨削完工。比较测量得到的两工件的表面轮廓及相应的频谱图(图7,图8)可以看出,工件表面均有9个正弦波,频谱图中的第9谐波分量均较为突出。但是,对于工件 *B*,这个特性尤为显著。



图 8 工件表面频谱比较

通过分析,发现砂轮与工件的转速比(ω=2000/210)近似为9。砂轮的不平衡引起了本 身周期性的回转误差,同时将大小相等的加工误差叠加在工件的敏感方向,使工件的形状产 生误差。另外,砂轮的不平衡还会引起整个加工系统的振动,由振动产生的高频谐波分量叠 加在工件表面,对工件的圆度也产生一定影响。

## 3.3 测量基准对测量精度的影响

在线测量工件的圆度,是以工件实际中心孔形成的轴线作为测量基准的。因此中心孔的

加工质量以及两顶针座的实际形状及相互位置精度,对在线测量的精度有一定影响。由不同 轴度产生的位置误差,可通过DFT分析将其 剔 除。为了评定基准改变引起的不确定度对在 线测量圆度的影响,分别测量同一工件在相同转速下重复装夹12次时的圆度误差,并用数理 统计方法处理数据。根据抽样检验的结果,得到如下结论:

(1) 由基准改变引起的不确定度可用 σ<sub>x</sub>来表示,其值为±0.029~±0.047μm。

(2)按95%及99%的置信概率,不确定度引起的总误差δ<sub>1</sub>及δ<sub>2</sub>分别为±0.063~
 ±0.097μm,±0.089~±0.137μm。相应的相对误差ε<sub>1</sub>及ε<sub>2</sub>,分别为±1.8~±2.97%,
 ±2.6~±4.19%。

(3) 控制中心孔的加工质量以及两顶针座的几何参数精度,可明显提高在线 测 量 精 度。

# 4 结 论

4.1 经过改进的传感器,可用计算机交替地测量工件的尺寸和圆度,并实时地进行FFT 和DFT富氏数据处理,大大提高了检测精度和效率。

4.2 传感器的动态特性,砂轮的不平衡以及测量基准误差,对在线测量尺寸和圆度的 精度有较大的影响,

4.3 改善传感器特性,控制加工过程的工艺因素,可明显地提高在线测量精度;

4.4 比较传感器在线测量圆度和圆度仪离线测量圆度的结果表明,相关性极为显著。

作者衷心感谢英国伯明翰大学机械系Kaliszer博士对研究工作的指导,Webster博士在实验工作中的具体帮助。

#### 参考文献

1 Kaliszer H, NAMRC-XII USA 1981

- 2 Spiewak S, Kaliszer H. Proc 24th Int MTDR Conf 1983: 247-257
- 3 Kaliszer H. Proc 4th Int ICPE Conf Tokyo 1980: 579-593
- 4 Kaliszer H, Mishina O, Webster J. Proc 20th Int MTDR Conf 1979: 471-478
- 5 Kaliszer H, Spiewak S, Kuchta M. Int Grinding Conf SME USA 1984: MR84-533

8 Spiewak S, Kaliszer H. Proc 24th Int MTDR Conf 1983; 331-338

7 Trmal G, ; Kaliszer H. Proc 25th Int MTDR Conf 1985: 307-311

8 Kaliszer H, Yang Q, Webster J. Proc Int ASME Conf USA 1985

9 Kaliszer H, Zhao Y W, Webster J. Int SME Conf 1986: 1Q86-627

10 Kaliszer H. Ist of Mesh Eng Conf Cambridge 1980; 421-426

# RESEARCH ON ACCURACY OF SIZE AND ROUNDNESS MEASURMENT FOR ADAPTIVELY CONTROLLED GRINDING SYSTEM

Yang Qing

(Department of Farm Machinery)

#### Abstract

A microcomputer controlled size and roundness sensor forms a part of a modular adaptively controlled system. The accuracy of the in-process measurement is of utmost importance because the overall effect of adaptive control will largely depend upon the feedback from the output of in-process sensor. The purpose of this paper is to investigate the accuracy of size and roundness in-process measurement and to discuss the main factors which effect on them using Fourier Speetrum Analysis. A dynamic response of the in-process sensor is analysed. A correlation between in-process measurement and Talyround roundness measuring system is given by means of regressive analysis.

Key words: adaptive control; grinding; on-line "measurement; roundness; size, precision, sensors

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net