

文章编号 1004-924X(2007)01-0100-06

基于灰色预测控制的磁流变抛光液循环控制系统

彭小强,戴一帆,唐 宇

(国防科技大学 机电工程与自动化学院机电系,湖南 长沙 410073)

摘要: 保证磁流变液成分的稳定,即保证磁流变液零磁场粘度的稳定,进而保证抛光过程中材料去除模型的稳定,是磁流变抛光技术实现确定性加工的必要条件。讨论了研制的磁流变液循环控制系统,通过检测磁流变液在喷嘴中的沿程压力损失来测量磁流变液零磁场粘度,并针对其粘度控制是大时延系统的特点,采用灰色预测控制算法,实现了磁流变液零磁场粘度的闭环控制,较好地解决了磁流变液的成分稳定控制问题。

关键词: 磁流变抛光;磁流变液;循环控制系统;成分稳定控制;灰色预测控制

中图分类号: TQ171.684 **文献标识码:** A

Circulatory system for MR fluid based on gray forecast control algorithm

PENG Xiao-qiang, DAI Yi-fan, TANG Yu

(College of Mechatronics Engineering and Automation,
National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A Magnetorheological(MR) fluid circulatory system for MR finishing developed by us is introduced in this paper. The viscosity of MR fluid in non-magnetic field is obtained by measuring the pressure loss in a certain pipe. Because the viscosity control system is a big delay timing system, the gray forecast controlling algorithm is adopted to realize the viscosity control. The problem of keeping the composition of magnetorheological fluid stable can be solved. The experiment results prove that the circulatory system can keep the removal model steady.

Key words: MR finishing; MR fluid; circulatory system; keeping stable component of MR fluid; gray forecast control algorithm

1 引言

磁流变抛光技术是上世纪 90 年代出现的一种崭新的光学冷加工工艺技术,它实现了光学抛光的确定性加工,可获得高精度的光学表面,并具

有较好的表面质量,得到光学界的普遍关注和高度重视,公认是一种有效的光学加工方法,特别是非球面光学表面和大口径光学零件。美国 90 年代初成立的 COM(Center of Optical Manufacture)组织并领导了整个磁流变抛光技术的研制工作,组建了 QED 公司,并先后开发出以 Q22 为

收稿日期:2006-04-15;修订日期:2006-11-14.

基金项目:国家自然科学基金重点基金资助(No. 50535020)

代号的一系列大口径光学零件磁流变抛光设备,如 Q22-400X, Q22-750P2, Q22-950F 分别能够加工 $\phi 400$ mm, 750 mm \times 1 000 mm, $\phi 950$ mm 口径的平面,球面,和非球面光学零件。不久,能加工 1~4 m 口径光学零件的 Q22-XXXXF 型磁流变抛光设备也将问世^[1]。美国的另一家公司在 2001 年也开发出能够加工 500 mm \times 1 000 mm 口径光学零件的磁流变抛光样机,并且成功抛光了一个口径为 $\phi 500$ mm 的 SiC 材料的非球面镜,面形精度达到 $\lambda/20$ ^[2]。磁流变抛光技术同样也受到我国光学界的高度重视,本文作者在国家自然科学基金重点基金的资助下,正在进行着大口径光学零件的磁流变抛光技术研究,研制了一台 $\phi 500$ mm 抛光样机,如图 1 所示,本文是这项研制工作的一部分。

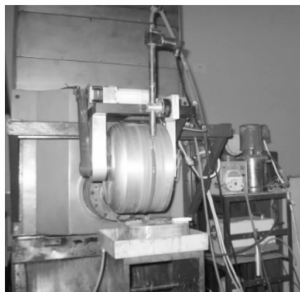


图 1 磁流变抛光样机照片

Fig.1 Photograph of MRF machine

在磁流变抛光技术的研究工作中,磁流变液的循环传输和回收是关键技术之一,为此,研制了磁流变液的循环控制系统。

在磁流变抛光技术中,磁流变液直接对光学零件表面进行机械、化学去除,和传统光学加工方法相比,磁流变液就是抛光“工具”,就是抛光盘。在抛光过程中,只有保证它的稳定,才能保证去除函数的稳定,进而保证抛光模型的稳定。加工过程中磁流变液裸露于空气中,光学抛光需要一个时间过程,特别是对于大口径光学零件的磁流变抛光,由于加工口径大,一次迭代加工时间相对会较长,作为载液的水有蒸发,并伴随抛光轮旋转、电磁铁发热、加工损失等原因,造成磁流变液在加工过程中的载液损失。磁流变抛光液的成分变化,浓度增加,其直观表现为磁流变液零磁场粘度加大。同时,流量和温度等状态将发生一定变化,影响抛光模型的稳定性,从而直接导致抛光模型

变化,进而影响加工精度。

因此,必须建立磁流变抛光液的循环控制系统,将磁流变抛光液的成分、流量和温度等状态进行控制,为实现磁流变抛光的确定性加工提供保障。

2 磁流变抛光液循环控制系统

研制的磁流变液循环控制系统如图 2 所示,主要由入射泵、流量计、回收罐、回收泵、流量泵等部件组成。图 3 为其控制功能框图。磁流变液循环控制系统包括磁流变液温度控制、流量控制和磁流变液成分控制。温度控制的实现方式:将温度控制系统泵出的恒温水通过在回收罐中安装的冷却管路,从而将磁流变液控制在一定的温差范围内,达到温控的目的。液流量控制是通过流量计检测液体流量并反馈给计算机,计算机根据流量误差大小控制入射泵的转速,达到流量闭环控制的目的。

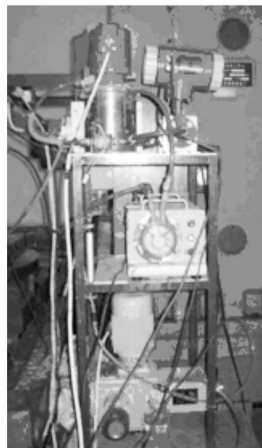


图 2 磁流变液循环控制系统照片

Fig.2 Photograph of the FDS

研究表明,磁流变抛光材料的去除函数,抛光模型与磁流变液的成分是有很大关系的,磁流变液的成分变化会引起工件材料的去除函数的不稳定,导致抛光模型的不稳定,无法进行确定性抛光,直接影响加工精度。而且,随着磁流变液浓度的增加,过粘的磁流变液会划伤光学器件的表面,进而影响加工表面质量。因此,循环控制系统对磁流变液成分进行控制。由于成分的变化直观表现为零磁场粘度变化(零磁场粘度是指在不加外磁场的条件下,磁流变液的粘度,它是磁流变液性质的一个重要参数),因此,进行磁流变液零磁场

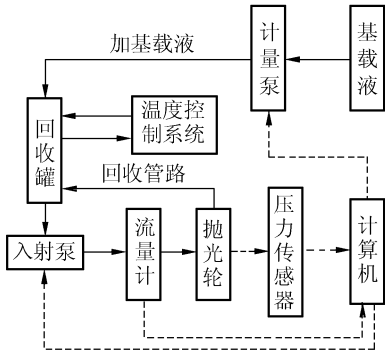


图 3 磁流变抛光循环控制系统控制框图

Fig. 3 Block diagram of the FDS

粘度控制来达到磁流变液成分控制的目的。

如何检测磁流变液粘度的变化就是要解决的问题,本文通过测量磁流变液在管路中的压力损失来对应的测量磁流变液的粘度。

压力损失是由粘性流体在流动过程中克服流体内部微团或液层间摩擦阻力而做功引起的,这部分功不可逆地变为热,使流体沿流程机械能不再守恒。不同粘度的流体在相同管路中流动时会产生不同的压力差,因此可以通过测量压力差的变化来间接获得磁流变液流体粘度的变化。

本系统在喷嘴入口处安装一压力传感器,检测磁流变液在喷嘴入口的压力,而喷嘴的出口压力即大气压,因此只需一个压力传感器就可以检测出磁流变液流经喷嘴的沿程压力损失。

根据流体流动的沿程压力损失理论^[3],当流体沿等圆管作稳定层流运动时有:

$$\Delta p = \frac{128\mu l}{\pi d^4} Q, \quad (1)$$

式(1)中:

Q 为流量;

d 为管道直径;

l 为管道长度;

Δp 为管道的沿程压力损失;

μ 为液体粘度值。

由式(1)可得:

$$\mu = \frac{\pi d^4}{128lQ} \Delta p, \quad (2)$$

由式(2)可得,当管路中两点之间的距离、流量、管径不变时,粘度与这两点间的沿程压力损失成线性关系,即可通过测量喷嘴上的沿程压力差来检测磁流变液的粘度。

磁流变液零磁场粘度直接和磁流变液的组成

有关,磁流变液成分的变化就导致磁流变液零磁场粘度的变化。因而,对磁流变液零磁场粘度控制就能达到磁流变液成分控制的目的。磁流变液的组成包括铁磁微粒和一定比例的抛光剂,用于光学抛光的磁流变液多以水作载液,研制的磁流变液也是以水作载液的,所说磁流变液成分的变化是指组成磁流变液中铁磁微粒和抛光剂对水的比例的变化,主要是含水量因损失而减少,这种控制就是适当的增加水量。

当粘度控制系统发现粘度变化,即控制计量泵往磁流变液中加入适量载液,使磁流变液零磁场粘度不变,达到成分控制的目的。

3 灰色预测控制算法

3.1 灰色预测控制原理

为解决控制问题,考虑到粘度控制系统是一个大时延系统,若按照传统的控制方法很难做到实时、准确的控制,为此,采用了近几年发展很快的灰色预测控制方法。

灰色预测控制理论,对系统行为不断采样、不断建模、不断预测、不断改变控制量。每采样一次便更新一次原始数据,并重新建立 GM(1,1)模型,从而保证了所建立的模型和所做的预测是在系统的最新输出数据的基础上进行的。

这样,通过对磁流变液的粘度行为数据的不断采样、不断建模,不断去预测磁流变液的未来粘度值,就可对磁流变液实行超前控制,来满足对磁流变液粘度控制的要求。

灰色预测控制以系统的行为数据为采样信息,寻求系统发展规律,按照新陈代谢原理建立 GM(1,1)模型,用所建的模型预测系统行为的发展,即预测未来的行为数据,然后将行为的预测值与行为的给定值进行比较,以确定系统的超前控制。

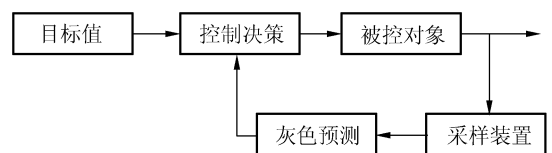


图 4 灰色预测控制原理图

Fig. 4 Schematic diagram of gray forecast control algorithm

灰色预测控制的原理如图 4 所示。在图 4 中,采样装置对被控对象的输出进行采样、整理,灰色预测模块根据采样信息对系统的输出建立灰色 GM(1,1)模型,然后根据模型预测出系统的下一步或下几步输出,控制决策再把目标值与预测值进行比较,并做出控制决策。

灰色预测控制算法的具体流程如图 5 所示。

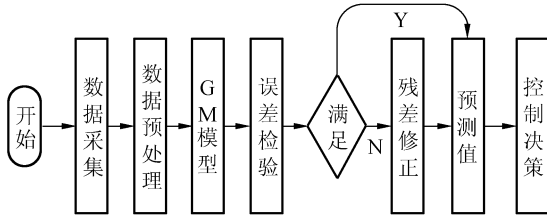


图 5 灰色预测控制流程图

Fig. 5 Flow chart of gray forecast control algorithm

3.2 数据预处理模块

灰色系统理论生成无规律的原始数据后,需要将其变为较有规律的数列,再建模分析。数据的预处理包括数据的等间距处理、数据的光滑处理、数据提升。在磁流变液的粘度控制中的原始数据基本满足 GM(1,1)对数据的要求,不需作预处理,数据预处理在这里亦不作详细介绍,具体处理方法可参阅文献[4]。

3.3 GM(1,1)模型

假设原始数据为

$$X^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)), \quad (3)$$

对原始数据进行累加生成 $X^{(0)}$ 的 1-AGO 序列 $X^{(1)}$ 为:

$$X^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)), \quad (4)$$

式(4)中:

$$x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i), k=1, 2, \dots, n$$

$X^{(1)}$ 的紧邻均值生成序列 $Z^{(1)}$ 为:

$$Z^{(1)} = (z^{(1)}(1), z^{(1)}(2), \dots, z^{(1)}(n)), \quad (5)$$

式(5)中:

$$z^{(1)}(k) = \frac{1}{2}(x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k-1)), k=1, 2, \dots, n$$

若 $\hat{a} = [a, b]^T$ 为参数列,且

$$Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

则 GM(1,1)模型 $x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b$ 的最小二乘估计参数列满足:

$$\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T Y, \quad (7)$$

由此得到 GM(1,1)模型的时间响应序列为:

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \left(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a}\right)e^{-ak} + \frac{b}{a}, k=1, 2, \dots, n \quad (8)$$

其行为数据的估计还原值为:

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = (1 - e^{-a}) \left(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a}\right)e^{-ak} \quad k=1, 2, \dots, n, \quad (9)$$

根据式(9)进行预测得到的序列,称为预测模拟序列:

$$\hat{X}^{(0)} = (\hat{x}^{(0)}(1), \hat{x}^{(0)}(2), \dots, \hat{x}^{(0)}(n)), \quad (10)$$

3.4 误差检验

所建的模型是否合理有效,必须经过多种检验才能判定其合理,只有通过检验的模型才能用作预测。

模型检验通常按照残差合格模型进行检验。

设残差序列为:

$$\epsilon^{(0)} = (\epsilon(1), \epsilon(2), \dots, \epsilon(n)) = (x^{(0)}(1) - \hat{x}^{(0)}(1), x^{(0)}(2) - \hat{x}^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n) - \hat{x}^{(0)}(n)), \quad (11)$$

相对残差序列

$$\Delta = \left(\left| \frac{\epsilon(1)}{x^{(0)}(1)} \right|, \left| \frac{\epsilon(2)}{x^{(0)}(2)} \right|, \dots, \left| \frac{\epsilon(n)}{x^{(0)}(n)} \right| \right), \quad (12)$$

对于 $k \leq n$, 称 $\Delta_k = \left| \frac{\epsilon(k)}{x^{(0)}(k)} \right|$ 为 k 点的模拟

相对误差,称 $\bar{\Delta} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \Delta_k$ 为平均相对误差。

给定 α , 当 $\bar{\Delta} < \alpha$ 且 $\Delta_n < \alpha$ 时,称模型为残差合格模型。

3.5 残差修正

当残差模型不合格时,就要建立残差的 GM(1,1)模型,得到残差预测值,然后对模型进行修正,再用修正过后的模型来预测未来行为数据。

按照灰色预测算法,可以建立残差序列 $\epsilon^{(0)}$ 的 GM(1,1)模型,可得残差的还原序列为:

$$\hat{\epsilon}^{(0)}(k+1) = (1 - e^{-a}) \left(\epsilon^{(0)}(1) - \frac{b}{a}\right)e^{-ak} \quad k=1, 2, \dots, n, \quad (13)$$

3.6 预测输出

经过残差修正的最终预测输出为

$$\hat{x}_e^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(0)}(k+1) + \hat{\varepsilon}^{(0)}(k+1), \quad (14)$$

式(13)即可预测所需的时间段的行为数据。

4 实验验证

利用自行研制的磁流变抛光循环控制系统进行了磁流变抛光模型稳定性实验,在上述灰色预测控制原理和控制算法的控制下,零磁场粘度控制曲线如图 6 所示,曲线“□”为实际采集数据,曲线“×”是预测算法得到的预测数据。从中可以看出,预测算法能准确有效地跟踪和预测实际系统输出,控制系统能够控制磁流变液的零磁场粘度,稳定控制磁流变液成分。

图 7 为 K9 玻璃工件实际抛光模型干涉图。左图驻留时间是 60 s,经过 2 h 后,进行右边模型抛光,其驻留时间是 40 s。计算两个模型的单位时间材料去除率基本上是一致的,模型基本上是稳定的,表明循环控制系统对磁流变抛光液进行了有效的控制。

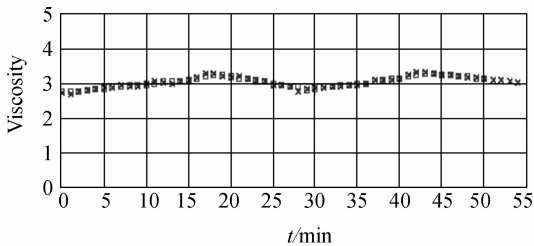


图 6 磁流变抛光液零磁场粘度控制曲线

Fig. 6 Viscosity curve of MR fluid

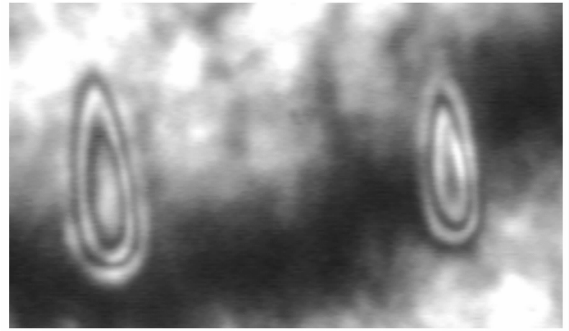


图 7 抛光模型对比图

Fig. 7 Contrast drawing of MRF model

5 结 论

磁流变抛光循环控制系统的建立能有效地控制抛光液的温度、流量以及成分等参数,从而保持磁流变液在加工中的相对稳定不变性(包括成分稳定性、粘度稳定性、温度稳定性等)和均匀同一性,保持了材料去除函数和抛光模型的稳定性,为实现磁流变抛光的确定性加工打下良好的基础。

灰色预测控制是基于系统发展变化的预测控制,未来事态的超前控制,因此具有小超调量,较高准确度的优点,特别适用于大时延系统的控制。灰色预测建模是少数数据建模、“采样瞬态建模”、数据的新陈代谢建模,因此控制实时性好、适应性强。该控制算法很适合本系统,较好地解决了大时延的粘度控制问题,达到了控制磁流变液的零磁场粘度,稳定磁流变液成分的目的。

参考文献:

- [1] SHOREY A, KORDONSKI W, TRICARD K M. Magnetorheological finishing of large and lightweight optics[J]. *SPIE*, 2004, 5533, 99-107.
- [2] JOHNSON J S, GROBSKY J K, CORPORATION Z. Rapid fabrication of lightweight silicon carbide mirrors[J]. *SPIE*, 2002, 4771, 243-249.
- [3] 王宝和. 流体传动与控制[M]. 长沙:国防科技大学出版社, 2001.
WANG B H. *Liquid drive and control*[M]. Changsha: National University of Defence Technology Press, 2001. (in Chinese)
- [4] 刘勇涛. 转子振动系统的灰色关联控制和灰色预测控制[D]. 西北工业大学, 2000.
LIU Y T. *The gray associated control and the gray forecast control of rotor oscillation*[D]. University of Northwest Industry, 2000. (in Chinese)
- [5] 张峰, 余景池, 张学军, 等. 磁流变抛光技术[J]. *光学 精密工程*, 1999, 7(5): 1-8.
ZHANG F, YU J CH, ZHANG X J, et al.. Magnetorheological finishing technology[J]. *Opt. Precision. Eng.*,

1999,7(5):1-8. (in Chinese)

[6] 刘思峰. 灰色系统理论及其应用[M]. 科学出版社,2004.

LIU S F. *The gray system theory and application*[M]. Beijing:Science Press,2004. (in Chinese)

[7] 邓聚龙. 灰色控制系统[M]. 西安:华中理工大学出版社,1993.

DENG J L. *The system of the gray control*[M]. Xi'an Huazhong University of Science and Technology Press, 1993. (in Chinese)

作者简介:彭小强(1977—),男,江西宁都人,国防科技大学机电工程与自动化学院讲师,博士,主要研究方向为精密工程与计算机控制。E-mail:pxq2000@vip.sina.com