

文章编号 1004-924X(2024)10-1496-15

基于无模型自适应算法的磁流变液水分控制

肖晓萍^{1,2*}, 李良伟^{1,2}, 张建飞^{1,2}, 李自胜^{1,2}, 陈立^{1,2},
周涛^{1,2}, 苏星^{1,2*}, 蔡丽生^{1,2}

(1. 西南科技大学 工程技术中心, 四川 绵阳 621000;

2. 四川省精密超精密加工工程技术研究中心, 四川 成都 610200)

摘要: 磁流变抛光是一种去除效率稳定、无亚表面损伤的超精密加工工艺, 然而, 在抛光过程中, 磁流变液的水分损失会改变抛光工具的特性, 从而影响去除函数的稳定性。现有的水分控制策略受到磁流变液循环系统大时延、时变扰动的影响, 导致水分含量存在周期性波动, 使去除函数发生周期时变, 进而影响加工质量与精度。本研究建立了磁流变液循环系统的传递函数模型, 开展了系统特性分析, 并据此设计了基于全格式动态线性化的无模型自适应控制算法, 该算法能够实现非线性系统的参数自适应控制, 有效抑制因时变扰动和时延引起的水分波动, 为抛光过程中水分含量的稳定控制提供了一种简单有效、适用性强的控制策略。实验结果显示, 采用 FFDL-MFAC 控制算法时, 磁流变液水分波动的峰谷值 (Peak-valley Value, PV) 仅为 0.06%, 相较于使用 PID 减少了 40%, 误差绝对值的积分 (Integral value of Absolute Error, IAE) 减少了 58.1%。有效提升了抛光过程中磁流变液水分含量的稳定性。

关键词: 磁流变抛光; 水分含量控制; 系统建模; 参数辨识; 无模型自适应

中图分类号: O439 文献标识码: A doi: 10.37188/OPE.20243210.1496

Moisture content control strategy of magnetorheological fluid based on model-free adaptive control algorithm

XIAO Xiaoping^{1,2*}, LI Liangwei^{1,2}, ZHANG Jianfei^{1,2}, LI Zisheng^{1,2}, CHEN Li^{1,2},
ZHOU Tao^{1,2}, SU Xing^{1,2*}, CAI Lisheng^{1,2}

(1. Engineering Technology Center, Southwest University of Science and Technology,
Mianyang 621000, China;

2. Sichuan Precision and Ultra-Precision Machining Engineering Technology Center,
Chengdu 610200, China)

* Corresponding author, E-mail: 715355323@qq.com

Abstract: Magnetorheological finishing is an ultra-precision machining process with stable removal efficiency and no subsurface damage. However, the water loss of magnetorheological fluid (MR fluid) in the polishing process will change the properties of polishing tools, thus affecting the stability of removal function. The existing water control strategy is affected by the large time delay and time-varying disturbance of MR Fluid circulation system, which leads to the periodic fluctuation of water content and the periodic time-varying removal function, thus affecting the machining quality and accuracy. In this study, the transfer

收稿日期: 2023-11-14; 修订日期: 2024-01-04.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 52105488); 国家重点研发计划资助项目 (No. 2022YFB3403402)

function model of MR fluid circulation system was established, and the characteristics of the system were analyzed. based on this, a Model-free adaptive control based on full form dynamic linearization (FFDL-MFAC) algorithm is designed. The algorithm can realize the parameter adaptive control of nonlinear system, effectively suppress the water fluctuation caused by time-varying disturbance and delay, and provide a simple, effective and applicable control strategy for the stable control of water content in the polishing process. The experimental results show that when FFDL-MFAC control algorithm is adopted, the Peak-valley value (PV) of the water fluctuation of MR Fluid is only 0.06%, which is reduced by 40% compared with PID. The Integral value of absolute error (IAE) was reduced by 58.1%. The stability of water content of MR fluid in polishing process is effectively improved.

Key words: system modeling; automatic control strategy; magnetorheological polishing; water content; model-free adaptive control

1 引 言

随着航空航天、芯片制造、激光聚变、天文望远等领域的快速发展,各种非球面光学元件的需求与日俱增,同时对光学元件的表面质量和面形精度等加工指标提出了新的要求。高质量、高精度的非球面光学元件能够简化光学系统的结构、提升光学系统的整体性能^[1-3]。然而,高质量、高精度的非球面光学元件的批量化制造,是超精密光学制造领域面临的重大挑战之一。

磁流变抛光是一种确定性抛光方法,通过去除函数与驻留时间的卷积计算去除量,从而精确控制加工面形。作为一种先进的光学加工技术,磁流变抛光具有加工柔性高、去除函数确定、无亚表面损伤等优点,被广泛用于高精度、复杂曲面光学元件的精密加工^[4-10]。去除函数的稳定性直接影响加工的精度与质量,磁流变液水分含量对去除函数有直接影响。水分含量降低会导致磁流变液黏度升高,进而增大抛光时的剪切屈服应力,导致去除效率增加并改变去除函数。水分含量每降低 0.5%,峰值去除效率降低 7.35%~9%不等^[11-14]。抛光过程当中,磁流变液与空气、工件的接触以及抛光装置的发热都会导致水分的损失。在停止补水的情况下,抛光时间达到 4.5 h 时,磁流变液的水分质量分数下降量可达 3.99%^[11]。因此,响应迅速、调控准确的水分自动控制策略是保证加工质量的基础。

美国 Rochester 大学光学制造中心 (Center for Optics Manufacturing, COM) 把液体黏度作为控制反馈信号(黏度与水分含量负相关),采用

了一种三位控制策略,以实现水分含量的自动控制。具体而言,当测量值超过设定的上限时,微量泵以较高的频率补水;当测量值在上限和设定值之间的范围时,补水频率降低;当测量值在设定值与下限之间的范围时,补水频率进一步降低;当测量值小于设定的下限时,补水停止^[15]。尽管这种控制策略相对简单有效,但上下限及对应补水频率的设定高度依赖经验,需要反复调试以确定合适的设定值,因此在普适性方面存在一定挑战。此后,COM 改用毛细管法测量黏度,以提高反馈信号的精度,但控制策略仍采用三位控制,无法克服时变的水分损失率和系统大时延对控制效果的不利影响^[16]。QED 公司在公开的专利中提到,使用基于 PID 的自动控制策略,但是并未说明相关细节,其控制效果有待实验验证^[17]。

国防科技大学针对控制过程中的时滞问题提出了一种基于灰色预测的控制方案^[18]。通过在线采样系统的输出数据,建立起系统的灰色模型 (Grey Models, GM),以达到预测水分含量变化的目的,通过这种方法能够实现对系统的超前控制,在一定程度上克服了系统大时延带来的影响,但能否克服时变水分损失率对控制效果的影响还有待进一步研究。2008 年国防科技大学^[19]提出了类似于双位控制的控制策略来控制水分含量,即当测量值高于设定值时,输出较大补水频率,反之输出较小的补水频率。中国工程物理研究院最早使用人工补水的控制策略,每隔一段时间离线测量水分含量,并根据计算的水分损失率来人工设定补水频率。虽然控制效果不错,但

是操作过程比较繁琐,且依赖操作者经验。此后,中物院的彭栋梁通过建立自调节灰度预测来克服系统时延,并在此基础上引入前馈调节,以减少控制器的输出波动^[20]。

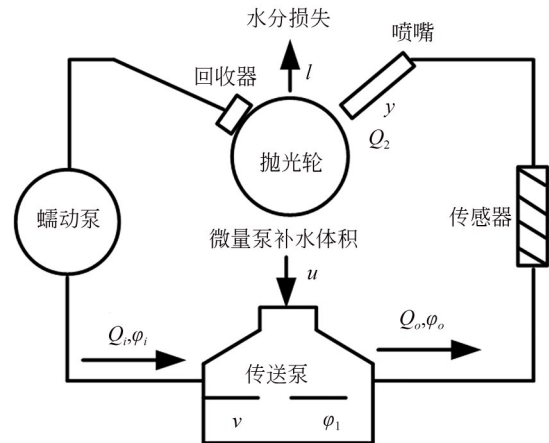
综上所述,由于磁流变抛光液循环系统具有大时延和扰动时变的特性,使用传统的三位控制、PID控制等控制策略无法避免水分的周期性波动,不能有效维持水分含量的稳定,使加工元件的表面质量和面形精度得不到保障,难以满足日益发展和提升的光学元件加工精度与加工质量的要求^[21-22]。为此,本文建立了磁流变液循环系统的传递函数模型;深入分析了被控对象的特性;设计了基于FFDL-MFAC的水分控制算法;基于MFAC与PID之间结构的相似性完成了关键参数的整定。通过水分控制实验证明,该算法对大时延、时变扰动导致的水分波动具有较好的抑制效果,为抛光过程中水分含量的稳定控制提供了一种简单有效、适用性强的自动控制策略。

2 磁流变液循环系统模型及参数辨识

2.1 循环系统模型

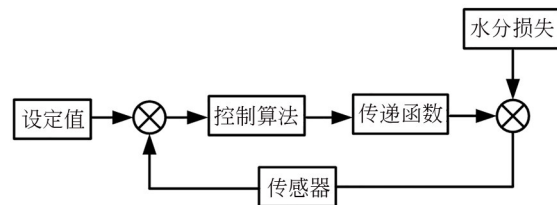
为了分析磁流变液循环系统中,磁流变液水分含量的变化规律并设计相应的控制算法,首要任务是建立磁流变液循环系统的数学模型。磁流变抛光装备中,采用专用循环系统实现磁流变液的泵送和回收,并检测和调控液体流量、水分含量等系统参量。本研究所采用的磁流变液循环系统如图1(a)所示,主要包括传送泵、蠕动泵、水分传感器和抛光轮。系统处于外循环模式时,传送泵将其储液罐中的磁流变液通过管路泵送到旋转的抛光轮上,分布在抛光轮上的梯度磁场将改变磁流变液的流变特性,增大其剪切屈服应力以满足抛光条件。蠕动泵在管路内形成负压,将回收器附近的磁流变液吸回传送泵的储液罐中,最终完成磁流变液的外循环。水分传感器用于监测这个过程中磁流变液水分含量的变化。

为简化循环系统的建模过程,做出如下假设:(1)在管路输送过程当中,水分含量与流量的变化忽略不计。(2)控制过程中仅考虑水分的损失,磨粒的磨损、磁性颗粒的损失忽略不计。如



(a) 循环系统结构框图

(a) Circulation system structure block diagram



(b) 水分控制框图

(b) Water control block diagram

图1 磁流变液循环系统运行原理

Fig. 1 Operation principle of MR Fluid circulation system

图1(a)所示,传送泵的储液罐中有体积为 v 、含水量为 φ_1 的磁流变液;微量泵的补水体积 u 为系统输入;喷嘴处磁流变液的水分含量 y 为系统输出。系统运行过程中,磁流变液与空气、工件之间接触,不可避免存在水分损失,将水分损失速率当作系统的负载扰动 l 。

根据物料守恒原理,系统可由(1)所示的微分方程组描述,式中 u 为补充水分的体积; Q_i 和 Q_o 分别表示储液罐的输入流量和输出流量; φ_i 和 φ_o 表示储液罐入口与出口处磁流变液的水分含量; Q_2 是喷嘴处的流量。方程组表明,罐中磁流变液的体积变化等于输入流量、输出流量以及补水量,这三部分体积变化的代数之和;罐中水分的体积变化等于以上三部分与对应水分含量乘积的代数之和;喷嘴处的水分含量是一个关于传送泵水分含量、输出流量和喷嘴处流量的复杂函数。

假设(1)中提到管路输送过程当中水分含量与流量的变化忽略不计,那么喷嘴处水分含量 y

与罐中水分含量 φ_1 之间只存在纯滞后的关系,即 $y = \varphi_1(t - \tau)$ 。将其代入式(1)中,得到式(2)所示的微分方程,式中 τ 表示时滞时间。假设式(2)提到抛光过程中只考虑水分的损失,忽略磁流变液其他成分的变化。故磁流变液的体积损耗与水分的体积损耗相等,即 $Q_i - Q_o = Q_i\varphi_i - Q_o\varphi_o = l(t)$,将其带入式(2),得到式(3)。化简

$$\begin{cases} \frac{dv(t)}{dt} = Q_i(t) - Q_o(t) + u(t) \\ \frac{d[v(t) \cdot \varphi_1(t)]}{dt} = Q_i(t) \cdot \varphi_i(t) - Q_o(t) \cdot \varphi_o(t) + u(t) \\ y(t) = f(\varphi_1, Q_o, Q_2) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{dv(t)}{dt} = Q_i(t) - Q_o(t) + u(t) \\ \frac{d[v(t)\varphi_1(t)]}{dt} = Q_i(t) \cdot \varphi_i(t) - Q_o(t) \cdot \varphi_o(t) + u(t) \\ y(t) = \varphi_1(t - \tau) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \frac{dv(t)}{dt} = u(t) - l(t) \\ \frac{d[v(t) \cdot \varphi_1(t)]}{dt} = u(t) - l(t) \\ y(t) = \varphi_1(t - \tau) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_1(t)}{dt} = \frac{1 - \varphi_1}{V(t)} (u(t) - l(t)) \\ y(t) = \varphi_1(t - \tau) \end{cases}, \quad (4)$$

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_1(t)}{dt} = k \left(\frac{f(t)}{60} c - l(t) \right) \\ y(t) = \varphi_1(t - \tau) \end{cases} \quad (5)$$

图 1(b) 的控制流程图表明,水分损失率 $l(t)$ 在水分控制的闭环回路中属于外界扰动,为了方便运算,可以令 $l(t)$ 为 0。对式(5)进行拉普拉斯变换,得到系统在水分损失率为 0 时的传递函数如(6)所示,式中 Y 为拉氏变换后的系统输出,即喷嘴处的水分含量; F 为拉氏变换后的系统输入,即微量泵的补水频率。

$$\frac{Y}{F} = \frac{ke^{-\tau}c}{60s} \quad (6)$$

此外,补充的水分与磁流变液的充分混合需要一定时间,这构成了一个典型的惯性环节。混合之前的水分含量 Y_T 和的混合之后的水分含量 Y 存在如(7)所示的转换关系,其中 T 为时间常数,其大小决定了水分和磁流变液完全混合所需

方程组(3),得到式(4)。令 $\frac{1 - \varphi_1}{V(t)}$ 为 k ,实际情况

下,通过控制微量泵的补水频率来控制补水量,补水频率是常用的系统输入而非补水体积。补水频率 f 和补水量 u 之间可相互转化: $u(t) = \frac{f(t)}{60}c$, c 为微量泵动作一次泵送的水分体积。将其带入(4),可以得到式(5):

的时间。系统的增益系数 K 如式(8)所示,其决定了系统输入对系统输出的映射关系,与传送泵中磁流变液的水分含量、磁流变液体积、微量泵单次动作泵送的水分体积有关。不同规格循环系统的储液能力不尽相同,大容量和小容量循环系统之间的增益系数 K 相差较大。

综上,理想条件下(水分损失率为 0)磁流变液循环系统的传递函数可由式(9)表示,式(9)由惯性环节、时滞环节、积分环节三个部分组成。那么,图 1(b) 中的传递函数与循环系统图 1(a) 的对应关系如下:(1)补充的水分累积在传送泵的过程对应积分环节 $\frac{1}{s}$; (2)补充的水分与传送泵中磁流变液混合的过程对应惯性环节 $\frac{k_T}{Ts + 1}$; (3)传送泵中的磁流变液输送到传感器位置的过程对应时滞环节 $e^{-\tau}$ 。

$$\frac{Y}{Y_T} = \frac{k_T}{Ts + 1}, \quad (7)$$

$$K = k_T c \frac{1 - \varphi_1}{60v(t)}, \quad (8)$$

$$\frac{Y}{F} = \frac{Ke^{-\tau}}{s(Ts + 1)}. \quad (9)$$

2.2 模型参数辨识

根据传递函数表达式(9),可知该模型有三个待辨识的参数 K, τ, T , 分别表示系统的增益系

数、时滞系数和惯性系数。在系统开环状态下(此时补水频率通过用户手动输入控制),通过控制微量泵的补水频率向循环系统持续补水,从而采集到系统的水分含量变化。然而,抛光液外循环时,系统的输出实际上是水分损失率 $l(t)$ 和水分含量 $y(t)$ 的叠加,因此无法根据外循环的响应数据进行准确的参数辨识。故将循环系统切换为内循环模式(喷嘴和回收器直接相连),此时抛光液不与外界空气接触,即在图1(b)所示的水分闭环控制过程中,作为外界扰动的水分损失率是0。因此,该条件下循环系统的传递函数如式(9),可完成相关参数辨识。

这里介绍大容量循环系统A的辨识及验证过程,小容量循环系统B的辨识及验证同理。给系统A施加幅值分别为30次/min、60次/min、90次/min,宽度分别为199 s,108 s,155 s的脉冲式补水信号作为激励输入,如图1(a)~1(c)所示;同时,监测系统对应的输出响应,即图2(d)~2(f)中的实验响应曲线。整理上述实验结果,使用最小二乘法辨识系统A的三个参数,辨识结果见表1。

为了验证辨识结果的准确性,将辨识的参

表1 模型参数辨识结果

型号	A	B
K	$11.5e^{-6}$	$6e^{-6}$
	$10.5e^{-6}$	$7e^{-6}$
	$12e^{-6}$	$7e^{-6}$
T	60	30
	80	30
	80	30
τ	30	30
	30	30
	30	30

数代入式(9),得到系统A的传递函数模型。在Simulink环境下,给系统模型输入与图2(a)、(b)、(c)相同的激励信号,得到对应的仿真响应。仿真响应与实际响应的对比见图2(d)~2(f)。经计算,系统仿真输出和系统实际输出之间误差绝对值的平均值仅为0.006 1%。同样的,对系统B的辨识结果见表1,其仿真输出与实际输出的误差仅为0.007 2%。这说明所建立的传递函数具有较高的准确度,为后续的水分控制仿真实验提供了可靠的研究对象。

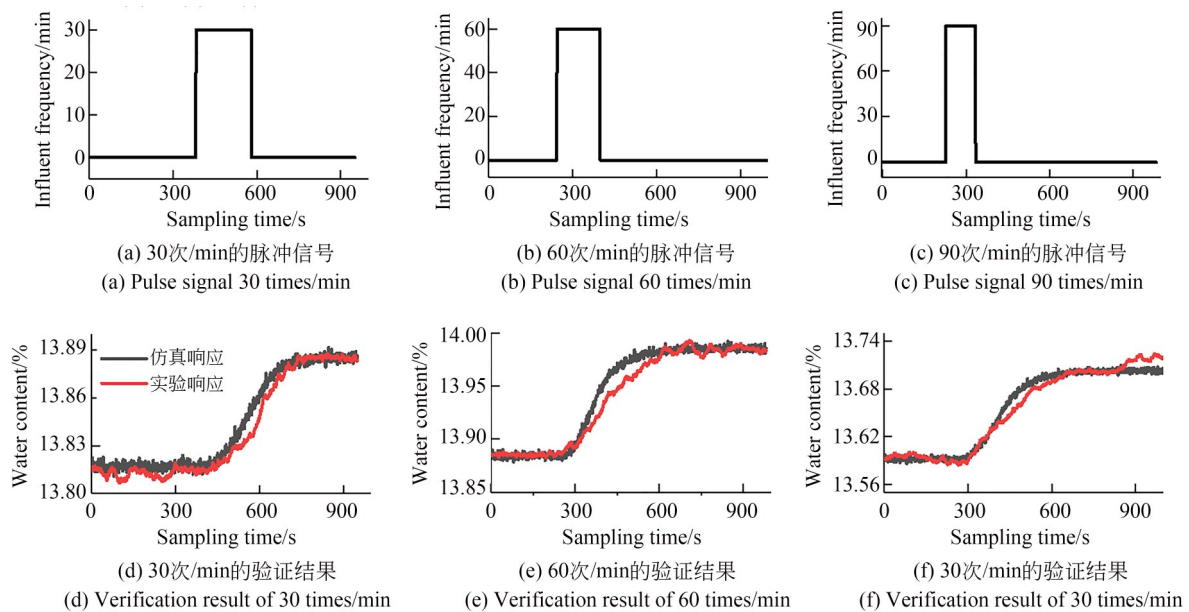


图2 不同峰值的脉冲激励信号及对应的系统响应

Fig. 2 Pulse excitation signal with different peak value and corresponding system response

与系统 B 相比,系统 A 具有更大的补水惯性,主要因其储液罐中的磁流变液体积较大,因此混合所需的时间更长。由于传感器安装位置与储液罐距离基本一致,所以两者的时滞系数并无明显差异。为进一步验证辨识结果的正确性,给仿真系统和实际系统分别输入相同的正弦激励信号,如图 3(a)所示。图 3(b)给出了仿真输出和实验输出的对比,通过计算得到采样时间内两者的平均误差绝对值仅 0.006%,与前面阶跃信号下的辨识误差一致,进一步证明了所建立的传递函数模型结构和辨识得到的模型参数都比较

准确,能够客观反应磁流变液循环系统在不同激励信号下的响应输出。

以上对传递函数的参数辨识是在循环系统内循环模式下完成的,此时水分损失率基本为 0。然而抛光工件需要循环系统处于外循环的模式,这种模式下水分损失率是大于 0 且时变的。为了使后续的仿真研究尽可能准确,需要明确水分损失率的大小。在外循环、抛光工件的工况下,将补水频率手动设置为 0,记录水分含量在 3 h 内的变化。经过计算,发现水分损失率在 0.288%/h~0.576%/h 范围内无规律的缓慢变化。

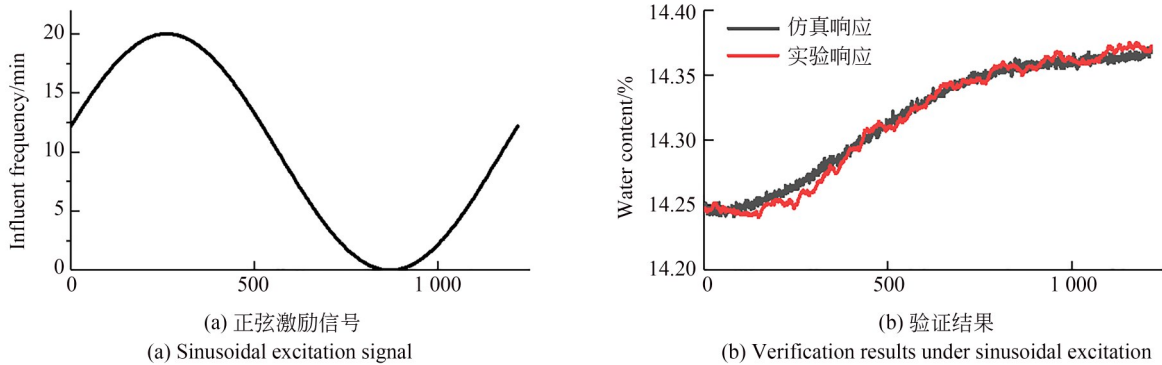


图 3 正弦激励信号及对应的系统响应

Fig. 3 Sinusoidal excitation signal and corresponding system response

辨识的传递函数模型(9)及表 1 中的模型参数结果表明,磁流变液循环系统是一个大时延的被控系统;手动测量的水分损失率表明,抛光过程中循环系统存在非线性时变的外界扰动。因此,所设计的控制器必须满足以下 2 个条件:(1)能够有效克服大时延带来的影响。(2)控制器需具备自适应的能力,在水分损失率时变的情况下有较好的适应能力。

3 无模型自适应算法设计

3.1 FFDL 方法及 MFAC 方案

无模型自适应控制算法^[23](Model-Free Adaptive Control, MFAC)是一种基于数据驱动的控制方法,控制过程仅利用系统实时的 I/O 数据,而不依赖被控对象的数学模型。此外, MFAC 能够通过 I/O 数据的变化不断更新伪偏导数 $\hat{\phi}(k)$,从而具备参数自适应的能力。因此,

本文选用 MFAC 控制算法设计水分含量控制器。

在磁流变液水分含量的闭环控制中,系统的输入和输出分别是微量泵补水频率和磁流变液水分含量,系统输入与输出之间的关系可由式(10)表示:

$$\begin{aligned} \varphi(k+1) &= F(\varphi(k), \dots, \varphi(k-L_y), \\ & f(k), \dots, f(k-L_u)) \end{aligned} \quad (10)$$

其中: $\varphi(k)$ 表示 k 时刻的水分含量, $f(k)$ 表示系统 k 时刻的微量泵频率, $F(\dots):R^{L_y+L_u} \rightarrow R$ 是一个非线性映射关系, L_y 和 L_u 分别代表输入和输出的滑窗长度。显然,磁流变液循环系统满足以下两个假设:

假设 3: $F(\dots)$ 关于各个变量均存在连续导数。

假设 4:系统(10)满足广义 Lipschitz 条件,即对任意的 $k_1 \neq k_2$; $k_1, k_2 \geq 0$ 和 $f(k_1) \neq f(k_2)$ 有:

$$|\varphi(k_1+1) - \varphi(k_2+1)| \leq b |f(k_1) - f(k_2)| \quad (11)$$

其中, $b > 0$ 是一个常数。假设 3 是一种典型的约束条件, 广泛适用于一般非线性系统。假设 4 表明, 系统输出变化率是有界的, 根据能量守恒原理, 有界的输入能量, 必然产生有界的能量输出。对磁流变液循环系统而言, 系统输入是微量泵频率, 一般设定为 0~90 次/min, 显然该系统满足输出变化率有界的假设。

磁流变液循环系统基于全格式动态线性化 (Full Form Dynamic Linearization, FFDL) 的数据模型可以表示为:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi(k+1) &= \phi_{f,L_y,L_u}^T(k) \Delta H_{L_y,L_u}(k), \quad (12) \\ \Delta H_{L_y,L_u}(k) &= [\Delta\varphi(k), \dots, \Delta\varphi(k-L_y+1), \\ &\quad \Delta f(k), \dots, \Delta f(k-L_u+1)]^T \end{aligned}$$

表示 L_y 长度滑窗内的输出变化量与 L_u 长度滑窗内的输入变化量所组成的 $L_y + L_u$ 维向量, 其中 $\Delta\varphi(k) = \varphi(k) - \varphi(k-1)$ 表示系统输出的变化量; $\Delta f(k) = f(k) - f(k-1)$ 表示系统输入的变化量; $\phi_{f,L_y,L_u}^T(k) = [\phi_1(k), \dots, \phi_{L_y}(k), \phi_{L_y+1}(k), \dots, \phi_{L_y+L_u}(k)]$ 为未知但有界的伪梯度 (pseudo gradient, PG); $\Delta\varphi(k+1)$ 是下一时刻的系统水分含量变化量。通过式 (12) 建立了循环系统的等效动态线性化模型, 被控对象复杂的特征信息均被整合到伪梯度 ϕ_{f,L_y,L_u}^T 中。为了使控制器的输出平滑, 从而减小系统输出的波动, 控制方案的设计应该遵循以下两个原则。

(1) 为了使系统输出值尽可能接近设定值, 应使系统的误差最小;

(2) 为减少系统水分含量的波动, 应最小化控制器输出的变化率。

考虑原则 (1) 和原则 (2), 控制输入的准则函数设计如下:

$$J(f(k)) = \left| \varphi^*(k+1) - \varphi(k+1) \right|^2 + \lambda \left| f(k) - f(k-1) \right|^2, \quad (13)$$

其中: $\varphi^*(k+1)$ 为下一时刻水分含量的设定值, $\lambda > 0$ 是控制器输出的权重因子, 直接决定输出的变化幅度, λ 越小控制器输出变化越快、输出曲线越陡峭; λ 越大控制器输出变化越慢、输出曲线越平滑。将 FFDL 的数据模型 (12) 带入式 (13) 中, 对 $f(k)$ 求导并令其为 0, 得到 MFAC 的控制

算法如下:

$$\begin{aligned} f(k) &= f(k-1) + \\ &\frac{\rho_{L_y+1} \hat{\phi}_{L_y+1}(k) (\varphi^*(k+1) - \varphi(k))}{\lambda + |\hat{\phi}_{L_y+1}(k)|^2} - \\ &\frac{\hat{\phi}_{L_y+1}(k) \sum_{i=1}^{L_y} \rho_i \hat{\phi}_i(k) \Delta\varphi(k-i+1)}{\lambda + |\hat{\phi}_{L_y+1}(k)|^2} - \\ &\frac{\hat{\phi}_{L_y+1}(k) \sum_{i=L_y+2}^{L_y+L_u} \rho_i \hat{\phi}_i(k) \Delta f(k-L_y-i+1)}{\lambda + |\hat{\phi}_{L_y+1}(k)|^2}, \quad (14) \end{aligned}$$

其中: 控制器输出的步长因子 $\rho_i \in (0, R)$, $i = 1, 2, \dots, L_y + L_u$ 的加入使算法更具一般性。

PG 估计算法的准则函数选择如下:

$$\begin{aligned} J(\phi_{f,L_y,L_u}(k)) &= \\ &\left| \varphi(k) - \varphi(k-1) - \phi_{f,L_y,L_u}^T(k-1) \right|^2 + \\ &\mu \left\| \phi_{f,L_y,L_u}(k) - \hat{\phi}_{f,L_y,L_u}(k-2) \right\|^2, \quad (15) \end{aligned}$$

式中, $\mu > 0$ 是 PG 的权重因子。类似的, 代入式 (12) 并对 $\phi_{f,L_y,L_u}(k)$ 求极值, 通过逆矩阵引理, 求得伪梯度的估计算法如下:

$$\begin{aligned} \hat{\phi}_{f,L_y,L_u}(k) &= \hat{\phi}_{f,L_y,L_u}(k-1) + \\ &\frac{\eta \Delta H_{L_y,L_u}(k-1)}{\mu + \|\Delta H_{L_y,L_u}(k-1)\|^2} - \\ &\frac{\hat{\phi}_{f,L_y,L_u}^T(k-1) \Delta H_{L_y,L_u}(k-1)}{\mu + \|\Delta H_{L_y,L_u}(k-1)\|^2}, \quad (16) \end{aligned}$$

式中, $\eta \in (0, 2]$ 是 PG 的步长因子。同时, 为了防止 PG 过小, 需设计如下的伪梯度重置算法:

$$\begin{aligned} \hat{\phi}_{f,L_y,L_u}(k) &= \hat{\phi}_{f,L_y,L_u}(1), \text{ if } \|\hat{\phi}_{f,L_y,L_u}(k)\| \leq \epsilon \\ &\text{或 } \|\Delta H_{L_y,L_u}(k-1)\| \leq \epsilon \\ &\text{或 } \text{sign}(\hat{\phi}_{L_y+1}(k)) \neq \text{sign}(\hat{\phi}_{L_y+1}(1)), \quad (17) \end{aligned}$$

式中, ϵ 是一个极小且大于 0 的数。式 (14)、式 (16) 和式 (17) 构成了 MFAC 的总体控制方案, 其中滑窗长度 L_y 和 L_u 可以根据被控对象的复杂程度进行调整, 以平衡计算复杂度和控制效果。当 L_y 为 0 时, 算法退化为基于偏格式动态线性化的无模型自适应算法; 当 L_y 为 0 且 L_u 为 1 时, 算法退化为基于紧格式动态线性化的无模型自适应算法, 因此全格式 MFAC 算法更具一般性。

3.2 MFAC 的参数整定

文献^[24]中指出,当输入数据的阶数 L_u 为 1,输出数据的阶数 L_y 为 2 时,MFAC 和 PID 在结构上存在相似性,PID 的参数整定方法也适用于 MFAC。

将 $L_u=1, L_y=2$ 代入式(14),得到全格式 MFAC 的控制算法如式(18):

$$\begin{aligned} \Delta f(k) = & \frac{\rho_3 \hat{\phi}_3(k)}{\lambda + |\hat{\phi}_3(k)|^2} (\varphi^*(k+1) - \varphi(k)) - \\ & \frac{\rho_1 \hat{\phi}_3(k) \hat{\phi}_1(k)}{\lambda + |\hat{\phi}_3(k)|^2} (\Delta \varphi(k)) - \\ & \frac{\rho_2 \hat{\phi}_3(k) \hat{\phi}_2(k)}{\lambda + |\hat{\phi}_3(k)|^2} (\Delta \varphi(k-1)). \end{aligned} \quad (18)$$

对于磁流变液水分控制问题而言,手动输入水分含量设定值的过程相当于输入一个阶跃激励,在一定范围内,期望函数 $\varphi^*(k)$ 是一个常值,即 $\varphi^*(k) = \varphi^*(k-1)$ 。那么可以对系统输出变化量 $\Delta \varphi(k)$ 做如下变换:

$$\begin{aligned} \Delta \varphi(k) = & \varphi(k) - \varphi(k-1) = \varphi(k) - \\ & \varphi(k-1) - \varphi^*(k) + \varphi^*(k-1) = -\Delta e(k). \end{aligned} \quad (19)$$

$\Delta e(k)$ 表示实际值与设定值之间的误差,将式(19)代入式(18)中,可以得到与 PID 结构相似的控制算法(20):

$$\begin{aligned} \Delta f(k) = & \left(\frac{\rho_1 \hat{\phi}_3(k) \hat{\phi}_1(k) + \rho_2 \hat{\phi}_3(k) \hat{\phi}_2(k)}{\lambda + |\hat{\phi}_3(k)|^2} \right) * (\Delta e(k)) + \\ & \frac{\rho_3 \hat{\phi}_3(k)}{\lambda + |\hat{\phi}_3(k)|^2} e(k) - \\ & \frac{\rho_2 \hat{\phi}_3(k) \hat{\phi}_2(k)}{\lambda + |\hat{\phi}_3(k)|^2} (\Delta e(k) - \Delta e(k-1)). \end{aligned} \quad (20)$$

增量式 PID 的控制式如式(21):

$$\begin{aligned} \Delta f(k) = & K_p (\Delta e(k)) + K_i e(k) + \\ & K_d (\Delta e(k) - \Delta e(k-1)). \end{aligned} \quad (21)$$

通过比较式(20)和式(21),可以很容易得到步长系数 ρ_1, ρ_2, ρ_3 与 PID 参数 K_p, T_d, T_i 的转换关系,见式(22)。使用已有的方法整定 PID 即可得到步长系数的取值。和 PID 一样,全格式 MFAC 利用系统误差的三阶信息 $e(k), \Delta e(k), (\Delta e(k) - \Delta e(k-1))$ 这三项来调控输出,不同的是由于伪梯度的引入,这三项的权重是实时变化的。

通过临界度比例法,得到 PID 的三个参数 K_p, K_i, K_d 的取值分别为 600, 100, 300。结合式(22),只需设定 $\hat{\phi}_{f, L_y, L_u}(1:3)$ 和 λ 的初值即可确定步长系数 ρ_1, ρ_2, ρ_3 的值。将 $\hat{\phi}_{f, L_y, L_u}(1:3)$ 初值设定为 $[2, 0.5, 0.9]^T$ λ 设定为 0.02。类似于 PID 控制器中比例、积分、微分项的系数,MFAC 的三个步长系数 ρ_1, ρ_2, ρ_3 对最终输出有重要影响,合适的取值直接决定控制器的控制效果,步长系数的存在使 MFAC 控制器更具有一般性,通过调整 ρ_1, ρ_2, ρ_3 三个参数的值,以满足不同系统的控制需求。

$$\left\{ \begin{aligned} \rho_1 & \Leftrightarrow (K_p + K_d) \frac{\lambda + |\hat{\phi}_3(1)|^2}{\hat{\phi}_1(1) \hat{\phi}_3(1)} \\ \rho_2 & \Leftrightarrow -K_d \frac{(\lambda + |\hat{\phi}_3(1)|^2)}{\hat{\phi}_2(1) \hat{\phi}_3(1)} \\ \rho_3 & \Leftrightarrow K_i \frac{(\lambda + |\hat{\phi}_3(1)|^2)}{\hat{\phi}_3(1)} \end{aligned} \right. \quad (22)$$

3.3 无模型自适应控制仿真分析

为了验证 MFAC 控制器的有效性,选取增量式 PID 控制器作为对照组,使用 Simulink 完成不同工况下的水分控制实验,不同实验组的工况参数设置见表 2。在 $-0.01\% \sim 0.01\%$ 之间正弦分

表 2 仿真参数设置

Tab. 2 Simulation parameter setting

组别	对应工况	扰动周期/(rad·s ⁻¹)	系统增益		负载峰值/(%·h ⁻¹)
A	不加工 1	0.003	$K = 6 \times 10^{-6}$	$T = 130$	0.14~0.58
B	不加工 2	0.003	$K = 12 \times 10^{-6}$	$T = 130$	0.14~0.58
C	加工工件 1	0.006	$K = 6 \times 10^{-6}$	$T = 130$	0.14~0.94
D	加工工件 2	0.006	$K = 12 \times 10^{-6}$	$T = 130$	0.14~0.94

布的噪声信号作为传感器的测量扰动,系统的初始水分含量设定为 14.2%。使用正弦信号来模拟时变的水分损失率,不加工时水分损失率的变化范围和变化频率相对较小,此时波峰和波谷值分别设定为 4×10^{-5} 和 1.6×10^{-4} (每秒损失的

水分百分比),周期设定为 40 min;抛光轮加工时的波峰和波谷值设定为 4×10^{-5} 和 2.5×10^{-4} ,周期设定为 20 min。模拟 MFAC 和 PID 控制器在 A,B,C,D 四种工况下对循环系统水分含量的控制效果,仿真结果如图 4~图 7 所示。

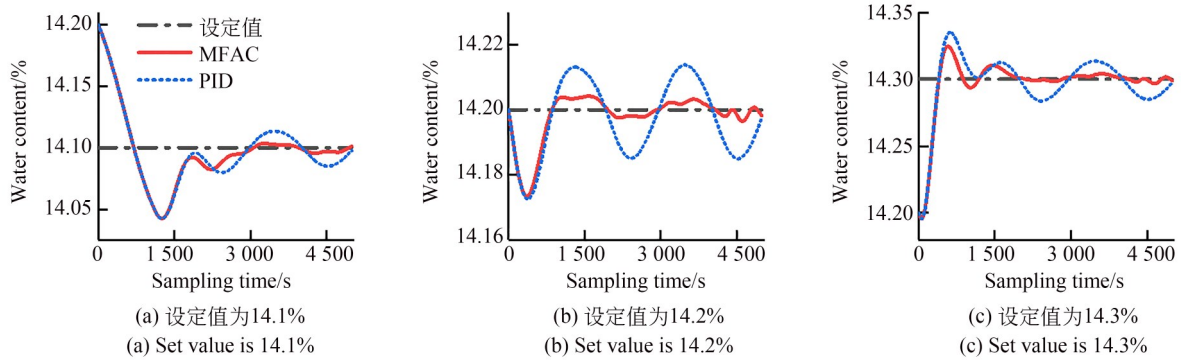


图 4 A 组参数在不同设定值下两种算法的控制效果

Fig. 4 Control effect of two algorithms for group A parameters at different set values

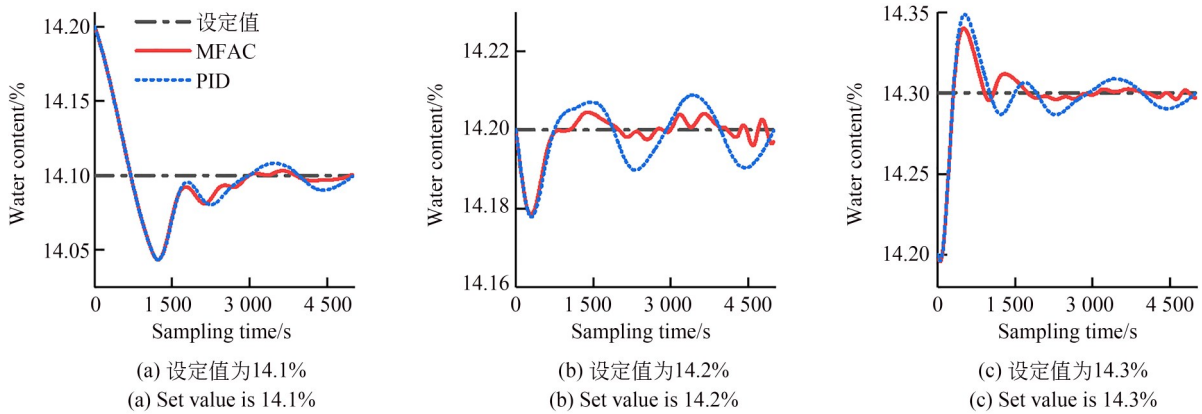


图 5 B 组参数在不同设定值下两种算法的控制效果

Fig. 5 Control effect of two algorithms for group B parameters at different set values

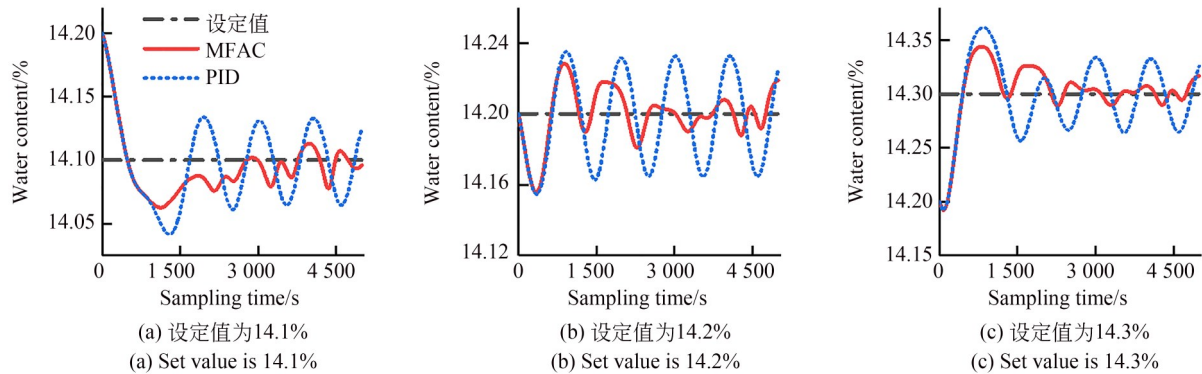


图 6 C 组参数在不同设定值下两种算法的控制效果

Fig. 6 Control effect of two algorithms for group C parameters at different set values

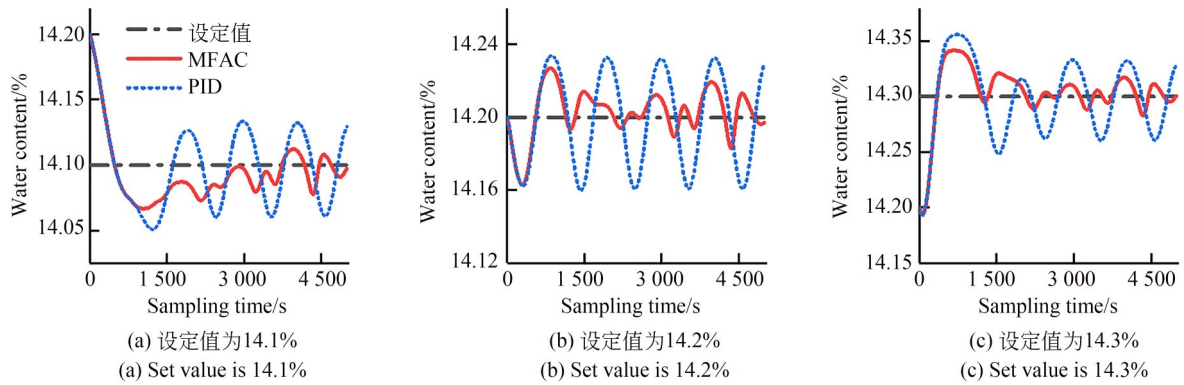


图 7 D组参数在不同设定值下两种算法的控制效果

Fig. 7 Control effect of two algorithms for group D parameters at different set values

仿真结果表明,四组仿真实验中MFAC的控制效果均优于PID。以采样时间内误差绝对值的积分(Integral value of Absolute Error, IAE)和波动的峰谷值(Peak-valley Value, PV)作为评价指标。MFAC的IAE相较于PID最多下降了50.7%,PV最多降低了73.2%。这说明MFAC控制器能够克服大时延和时变扰动带来的影响,在长时间的水分稳定性控制过程中,相较于PID控制器具有更优的控制效果。

传递函数式(9)中,增益系数K的变化对控制效果的影响较小,这是因为微量泵单次动作的泵水量仅有0.02 mL,因此增益系数的改变对控制的影响有限。扰动项的时变范围和频率

对控制效果的影响最大,时变的扰动使系统非线性时变,更大的时变范围和更高的时变频率会加剧系统的非线性。相较于轮空转时,抛光工件工况下,负载扰动的时变范围更大、频率更高,所以在加工工件时对水分的控制更为困难。

为了进一步探究两种算法的跟随性能,选表2中的D组参数进行仿真实验,分别选呈正弦、方波变化的设定值作为激励信号。比较MFAC和PID的控制效果。结果如下图所示,方波激励时MFAC的IAE相较于PID减少29.8%,正弦激励时IAE减少了21.1%,仿真结果表明MFAC控制器的跟随性优于PID。

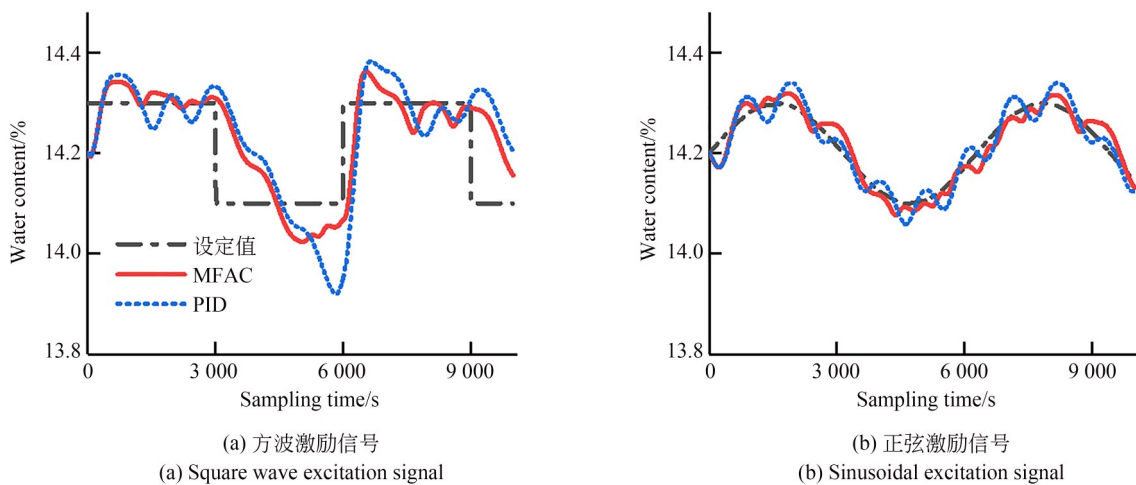


图 8 正弦和方波激励信号下的控制效果

Fig. 8 Control effect in sine and square wave excitation signal

4 MFAC 控制实验验证

4.1 实验装置

在自研的磁流变液循环系统上进行验证实验,循环系统的主要组成部分及具体功能已在第 2 节中详细介绍。系统实物图如图 9 所示,编号 1-9 分别代表蠕动泵、传送泵与储液罐、补水罐、流量传感器、微量泵、水分传感器、磁场发生器、抛光轮、喷嘴和回收器。在实验中,磁流变液储存在储液罐中,在传送泵的作用下通过喷嘴泵送到分布梯度磁场的抛光轮上。经过抛光轮旋转一周后,蠕动泵通过回收器将磁流变液吸回储液罐中。在这个过程中,损失的水分由微量泵补充。

具体的实验参数设置如下:抛光轮直径为 400 mm;抛光轮转速设定为 750 rpm/min;传送泵转速设定值为 1 600 rpm/min;回收泵转速设定为 1 000 rpm/min;流量为 2 200 mL/min。

4.2 系统误差分析

第 3 节的仿真中,用传感器的噪声代替了系统误差。事实上,系统误差的产生受多因素的影响,除了传感器噪声之外,还会受到磁流变液均匀度、磁流变液大颗粒等因素的影响,这些因素

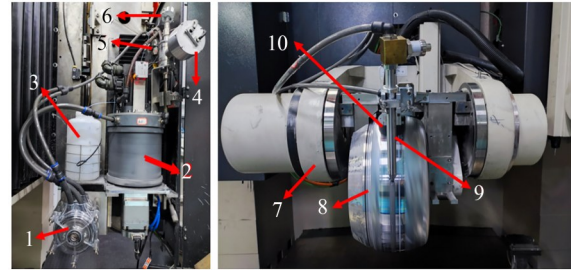


图 9 磁流变液循环系统装置

Fig. 9 Magnetorheological fluid circulation system device

会导致反馈信号出现波动和误差。系统误差并不能通过控制器消除,是系统固有的属性。明确系统误差的量级,能够更好的评价控制器对水分的控制效果。为了测量系统误差,在内循环状态下将微量泵补水频率手动设为 0 次/min,系统处于外循环时的水分损失率基本为 0,此时可以排除由于水分损失或水分补充导致的水分波动,测量到的水分波动完全由系统误差引起。

图 10(a)~10(c)展示了内循环期间三次采样下的水分波动情况。补水频率设定为 0 时,系统的水分含量在 0.03%~0.035% 范围内呈周期 5~20 min 的不规律波动。由此说明,磁流变液循环的反馈误差在 0.035% 量级。

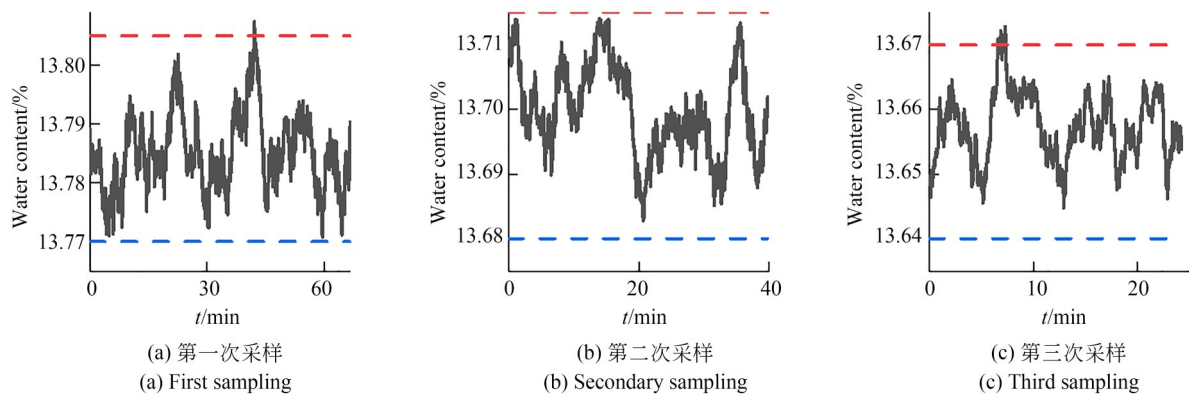


图 10 不同时间段内循环下水分含量的波动情况

Fig. 10 Fluctuation of water content under internal circulation

4.3 实验验证

使用西门子 STEP7 V5.5 软件将式(14)、式(16)和式(17)所示的全格式 MFAC 控制方案和(21)所示的 PID 控制方案编写成 PLC 程序块,通过上位机下载到机床 PLC 的 CPU 上。为验证算法的有效性,设计两组水分调控实验,以比较两

算法的控制性能:

实验一:水分稳定控制实验,实验中水分含量设定值不变,考察算法控制的稳定性。实验二:水分调节实验,实验中水分含量设定值先升高再降低,考察算法的调节能力。3.3 小节的仿真结果表明,加工工件时的水分控制比不加工时

更为困难,因此两组实验均在机床加工时进行。

实验一的水分控制结果如图 11(c)和图 11(d)所示,分别表示 MFAC 与 PID 在相同时间内对水分控制效果。通过计算,MFAC 的 IAE 相比于 PID 减少了 58.1%,PV 减少了 40%。实验二的水分调控结果如图 12(c)和图 11(d)所示,分别表示 MFAC 与 PID 在相同的效果。MFAC 的 IAE 相比于 PID 减少了 28.9%,调节时间下降了

13.9%。实验结果表明,MFAC 控制的稳定性和准确性均优于 PID,即 MFAC 控制下的去除函数具有更高的稳定性。

图 11(a)和图 12(a)表示 PID 控制器的输出;图 11(b)和图 12(b)表示 MFAC 控制器的输出。与 PID 相比,MFAC 的控制输出具有更高的变化频率且变化范围更小,说明 MFAC 对系统的 I/O 信息更敏感。这种控制输出能实现更均匀的水

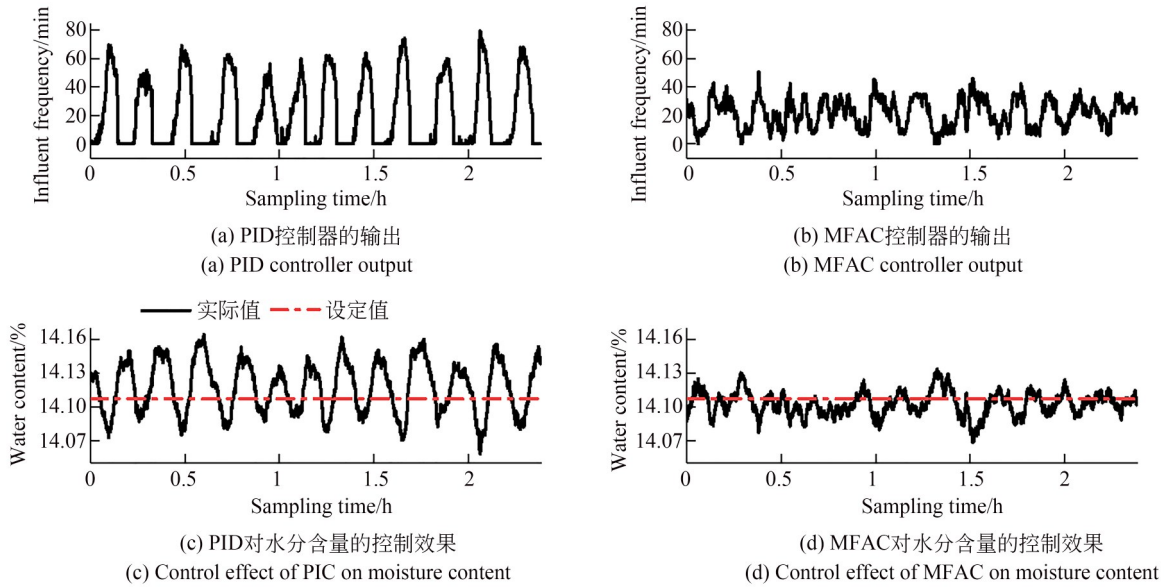


图 11 实验一结果

Fig. 11 Result of experiment 1

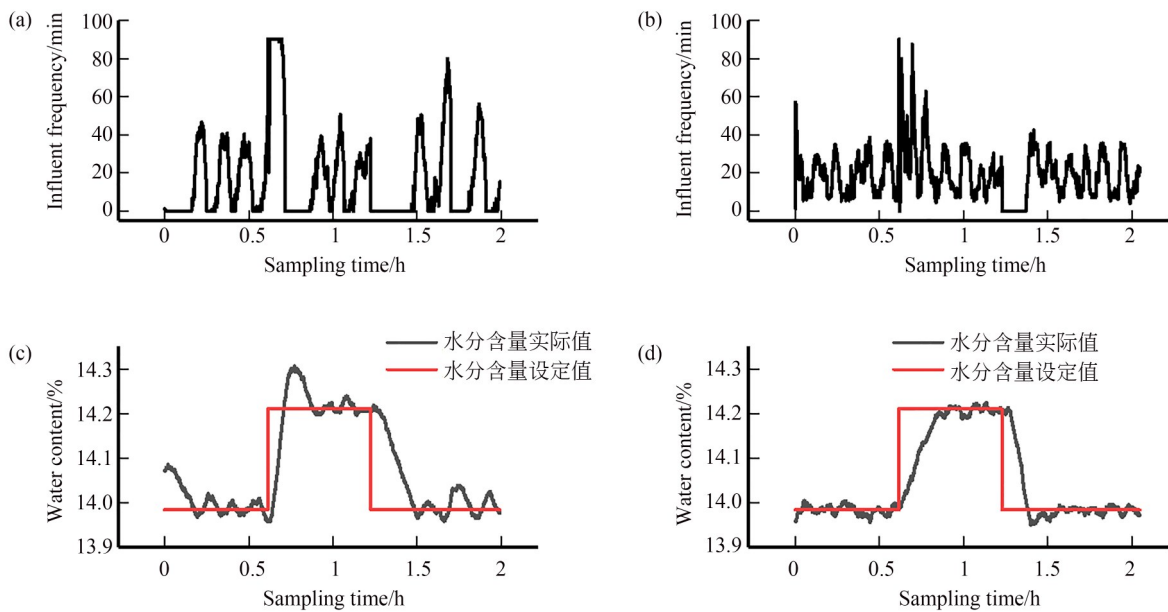


图 12 实验二结果

Fig. 12 Result of experiment 2

分补给,可有效减缓系统的水分波动。当设定值高于实际值时,PID控制器的输出为执行器的极限值,MFAC控制器的输出虽然也会达到执行器的极限值,但是在实际值不断接近设定值的过程中,控制器输出是快速变化的,这能够有效减弱时延所造成的超调。

MFAC能够实现更稳定的水分控制,理论上

使用MFAC水分控制策略加工的工件具有更高的表面质量。为了验证该水分控制策略对加工质量的影响程度,分别在PID和MFAC控制策略下进行工件加工。加工结果如图13,实验结果表明,使用MFAC水分控制策略能够有效提高加工件的表面质量,进一步证明了该控制策略的有效性。

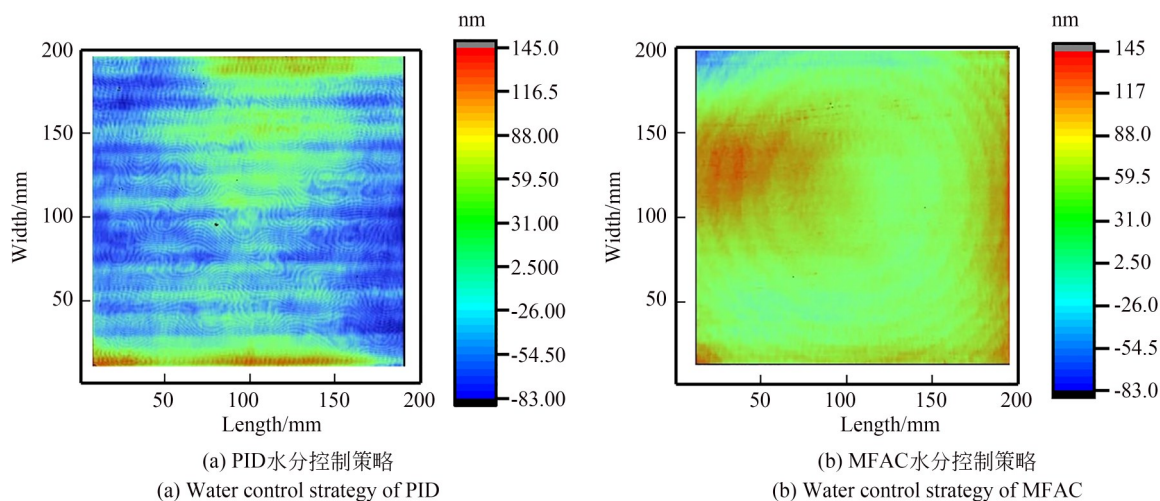


图 13 不同水分控制策略下的加工质量

Fig. 13 Processing quality under different moisture control strategies

5 结 论

磁流变抛光液循环系统具有大时延、扰动时变的特点,导致补充的水分无法及时作用到磁流变液、磁流变液水分不均匀损失,从而引起系统水分含量的周期性波动。传统的控制策略难以克服大时延、非线性时变扰动带来的影响。本研究设计了一种基于FFDL-MFAC

的水分控制器,能够自适应系统的非线性变化,并实时调整控制器参数和控制器输出,有效减弱了系统的周期性振荡。为水分含量的自动控制提供了一种简单而有效、适用性强的控制策略。实验结果表明,FFDL-MFAC的PV仅为0.06%,相较于PID减少了40%。IAE相较于PID减少了58.1%,这表明了该控制器的有效性。

参考文献:

- [1] 彭云峰,何佳宽,黄雪鹏,等. 光学元件超精密磨抛加工技术与装备开发[J]. 光电工程, 2023, 50(4): 220097.
PENG Y F, HE J K, HUANG X P, *et al.* Ultra-precision grinding and polishing processing technology research and equipment development[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2023, 50(4): 220097. (in Chinese)
- [2] 吴伦哲,徐学科,吴令奇,等. 非球面光学元件面

形误差边缘处理方法(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(9): 3788/IRLA20220602.

WU L Z, XU X K, WU L Q, *et al.* Method of edge control on surface error in aspherical optics (invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(9): 3788/IRLA20220602. (in Chinese)

- [3] LI C S, SUN L, CHEN Z X, *et al.* Wheel setting error modeling and compensation for arc envelope grinding of large-aperture aspherical optics[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 35(1): 108.

- [4] ZHANG L M, LI W X, LU M M, *et al.* Material removal mechanism of fused silica glass in magnetorheological finishing [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 128 (3): 1271-1289.
- [5] GU Y, FU B, LIN J Q, *et al.* A novel wheel-type vibration-magnetorheological compound finishing method [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 125 (9): 4213-4235.
- [6] RAJPUT A S, DAS M, KAPIL S. Investigations on a hybrid chemo-magnetorheological finishing process for freeform surface quality enhancement [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 81: 522-536.
- [7] HARRIS D C. History of magnetorheological finishing [C]. *Window and Dome Technologies and Materials XII. Orlando, Florida, USA*. SPIE, 2011, 8016(4): 561-566.
- [8] WANG R S, SUN C, XIU S C, *et al.* Experimental study on reciprocating magnetorheological polishing [J]. *Industrial Lubrication and Tribology*, 2022, 74(2): 164-170.
- [9] KORDONSKI W I, JACOBS S D. Magnetorheological finishing [J]. *International Journal of modern physics B*, 1996, 10(23n24): 2837-2848.
- [10] 杨军, 樊炜, 海阔, 等. 锥面镜磁流变抛光去除函数畸变规律分析与演绎 [J]. *光学精密工程*, 2023, 31(16): 2383-2394.
YANG J, FAN W, HAI K, *et al.* Distortion law analysis and deduction of removal function for magnetorheological finishing of conical mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(16): 2383-2394. (in Chinese)
- [11] 彭栋梁. 磁流变抛光过程抛光液水分含量自动控制方法与系统研究 [D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2014.
PENG D L. *Research on Automatic Control Method and System of Water Content of Polishing Solution in Magnetorheological Polishing Process* [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2014. (in Chinese)
- [12] SCHINHAERL M, VOGT C, GEISS A, *et al.* Forces acting between polishing tool and workpiece surface in magnetorheological finishing [C]. *Current Developments in Lens Design and Optical Engineering IX. San Diego, California, USA*. SPIE, 2008, 7060.
- [13] SRIVASTAVA M, PANDEY P M. The influence of ultrasonic vibrations on material removal in the silicon wafer polishing using DDCAMRF: experimental investigations and process optimization [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2022, 236(6): 3198-3215.
- [14] 秦北志, 杨李茗, 朱日宏, 等. 光学元件精密加工中的磁流变抛光技术工艺参数 [J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(9): 2281-2286.
QIN B Z, YANG L M, ZHU R H, *et al.* Polishing parameters of magnetorheological finishing for high precision optical components [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25 (9): 2281-2286. (in Chinese)
- [15] KORDONSKI W I, GOLINI D. Fundamentals of magnetorheological fluid utilization in high precision finishing [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1999, 10(9): 683-689.
- [16] KORDONSKI W I, GOLINI D, HOGAN S, *et al.* System for magnetorheological finishing of substrates: US19990226326 [P]. US5951369A
- [17] KORDONSKI W, NATKIN M, GORODKIN S. Method and apparatus for measuring and controlling solids composition of a magnetorheological fluid: US6893322 [P]. 2005-05-17.
- [18] 彭小强, 戴一帆, 唐宇. 基于灰色预测控制的磁流变抛光液循环控制系统 [J]. *光学精密工程*, 2007, 15(1): 100-105.
PENG X Q, DAI Y F, TANG Y. Circulatory system for MR fluid based on gray forecast control algorithm [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15 (1): 100-105. (in Chinese)
- [19] 戴一帆, 李圣怡, 彭小强, 等. 可长时稳定抛光液性能的磁流变抛光液循环装置: CN101249637A [P]. 2008-08-27.
DAI Y F, LI S Y, PENG X Q, *et al.* Magnetic current change polishing solution circulating device capable of long-time steadily polishing solution performance: CN101249637A [P]. 2008-08-27. (in Chinese)
- [20] 彭栋梁, 何建国, 黄文, 等. 磁流变抛光液磁性颗粒体积分数在线检测装置研制 [J]. *传感器与微系统*, 2014, 33(3): 121-124.
PENG D L, HE J G, HUANG W, *et al.* Re-

- search and fabrication of device for on-line detection of volume fraction of magnetic particle in magnetorheological polishing fluid[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2014, 33 (3) : 121-124. (in Chinese)
- [21] 崔栋刚, 张彦斌, 苏彦民. 纯滞后过程控制算法的研究[J]. *控制工程*, 2005, 12 (4) : 368-369, 388.
CUI D G, ZHANG Y B, SU Y M. On control algorithm for process with pure time delay[J]. *Control Engineering of China*, 2005, 12 (4) : 368-369, 388. (in Chinese)
- [22] MA X Y, Huang C Q. Data-driven approach for time-delay estimation of industrial processes [J]. *ISA transactions*, 2023, 137:35-38.
- [23] SUN J G, WEI Z Q, LIU X. GRU-based model-free adaptive control for industrial processes [J]. *Neural Computing and Applications*, 2023, 35 (24): 17701-17715.
- [24] 郭代银. 无模型自适应控制参数整定方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
GUO D Y. *Parameter Tuning Methods in Model-Free Adaptive Control*[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014. (in Chinese)

作者简介:



肖晓萍(1979—),女,江苏人,副教授,硕士生导师,2017年于四川大学获得博士学位,主要从事机电一体化控制、智能制造等方面的研究。E-mail: 715355323@qq.com



李良伟(1999—),男,四川内江人,硕士研究生,主要从事超精密抛光、自适应控制方面的研究。E-mail: 1528692803@qq.com