

磨粒流精密加工中的测控系统研究

Research on the Measurement and Control System for Precision Process of Abrasive Flow

许京雷 许时鸣 谭大鹏

(浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室,浙江 杭州 310014)

摘要: 针对磨粒流具有变化无形和无孔不入的特点,研究了磨粒流精密加工中信号的测量、传输和控制。测控系统通过流量、压力和液位检测单元以及转速控制单元构成闭环控制系统。系统主控模块采用 ARM 嵌入式系统和 RT-Linux 实时操作系统,测控模块的通信采用 RS-485 总线架构及校验和校验码方式,控制单元利用模糊理论来控制水泵转速,实现湍流的稳定运行。该测控系统实现了任务的实时并行处理,通信可靠、额外开销少、泵速控制效果平滑,满足磨粒流精密加工的要求。

关键词: 精密加工 嵌入式系统 模糊控制 实时检测 并行处理 总线

中图分类号: TP271+.4;TP273+.5 **文献标志码:** A

Abstract: Abrasive flow features invisible variation and in all pervasive, in accordance with this situation, the measurement, transmission and control of the signal in precision process of the abrasive flow are researched. Through the detection of flow, pressure and level, as well as the rotating speed control unit, the measurement and closed-loop control system is structured. ARM embedded system and RT-Linux real-time operating system are adopted in main control module; RS-485 bus frame and checksum code are used for the communication of measurement and control module. By adopting fuzzy control theory, the rotating speed of the water pump is controlled by the control unit for implementing stable operation of the turbulent flow. This system accomplishes real-time parallel task processing, features reliable communication and less extra overhead. The rotating speed of pump is controlled smoothly to meet the requirement for precision process of the abrasive flow.

Keywords: Precision process Embedded system Fuzzy control Real-time detection Parallel processing Bus

0 引言

松散磨粒与流体混合可构成液固两相磨粒流。由于磨粒流具有变化无形和无孔不入的特点,磨粒流加工方法成为结构化表面光整加工的主要方法^[1-5]。

两相磨粒流精密加工实验平台可用来实现“软性”磨粒流的稳定运行。该平台采用流体和磨粒分离式运行方式,有效地减少了磨粒在流体中的趋壁沉积现象。其中,测控系统的设计是实现精密加工的关键所在。

目前,关于两相磨粒流精密加工实验平台的测控系统设计很少,本文提出了测控系统的整体方案,在实验平台的关键部位设置电子检测部件,与主控模块进行通信,实现闭环控制。其中,主控模块可以实现实时多任务运行;磨粒流水泵采用模糊控制的工作方式,可以实现流体运动的平滑控制。

1 系统工作原理

在两相磨粒流精密加工实验平台运行过程中,流体和磨料以湍流形式通过夹具,对夹具内的工件进行加工。两相流在磨料罐处进行分离,磨料下行进入混合腔,同时流体通过回水管回到流体罐。

正常工作时,可以调节变频器,通过改变电机转速来调节多级离心泵的压力和流量;也可以调节出水阀,通过改变管路阻力来调节多级离心泵的压力和流量。利用键盘可以设定加工时间、调节变频器和紧急关机。工作状态的检测由一系列仪表完成:液位表 A 和液位表 B 分别检测流体罐和磨料罐的液位变化,在液位过高或者过低时给控制柜提供警示信号;温度表 A 和压力表 A 检测水泵的工作状态,在温度过高或者压力过大时给控制柜提供警示信号;流量表检测液固两相流的流量;压力表 B 和压力表 C 分别检测流道的进口压力和出口压力;温度表 B 检测夹具流道各处的温度值,具体测量位置由人工确定,为估计粘度的变化提供依据。控制柜的主控模块得到数据后,进行信号分析和数据处理,用于液晶显示,或者通过计算使变频器控制电机的转速。

两相流的流动路线如图 1 所示。

国家自然科学基金资助项目(编号:50875242);

浙江省自然科学基金重点资助项目(编号:Z107517);

浙江省机电重中之重学科开放基金资助项目(编号:20090303)。

修改稿收到日期:2010-09-13。

第一作者许京雷,男,1974年生,现为浙江工业大学机械电子工程专业在读博士研究生;主要从事精密超精密加工技术和测控技术方面的研究。

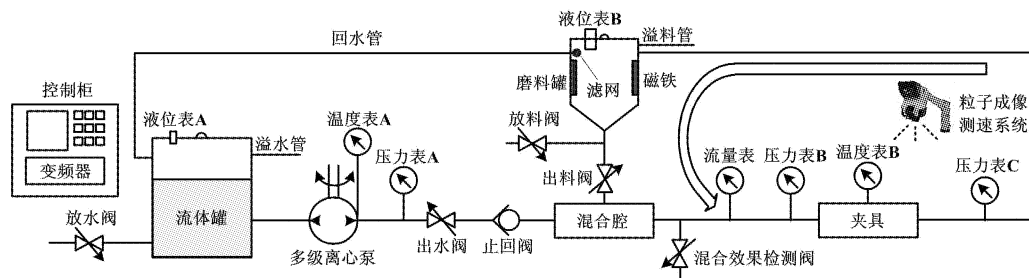


图1 两相流的流动路线图

Fig.1 Flowing route of the two-phase flow

2 主控模块

两相磨粒流精密加工实验平台的测控系统内部存在多通道的数据或控制信号,如压力、温度、流量和转速等。实验平台运行期间工作压力可达10 MPa以上,如果超过管道承压界限会发生危险,甚至对生命造成伤害。因此,为了实现多通道、高速和实时处理,主控模块采用嵌入式系统。

嵌入式系统是小型化通用计算机系统,采用软件固化等手段。嵌入式系统硬件上采用32位ARM9系列处理器S3C2410,主频为266 MHz,寻址空间为1 GB。对于传统的前后台软件系统,当任务过多时,每个任务等待时间过长,中断得不到及时响应,实时性很难保证。采用嵌入式实时操作系统就可以避免此情况的发生。应用程序运行优先于实时操作系统,操作系统根据各个任务的优先级和实时性在不同任务间合理地分配CPU时间,实现多任务并行处理。

实时嵌入式操作系统有RT-Linux、 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 、Vx-Works和QNX等。本文选用RT-Linux为实验平台的嵌入式操作系统。RT-Linux是以Linux为基础的嵌入式实时操作系统,具有多种硬件平台支持、软件资源丰富、性能优异和网络支持良好等优点。

系统将实验平台的压力检测、温度检测和液位检测等重要任务划为实时任务,由RT-Linux的实时内核处理。其中,压力检测设定为高优先级;其他任务如流量检测、键盘输入及液晶显示等作为非实时任务,由普通内核处理。

实时内核采用抢占式工作方式,当压力检测等实时任务需要处理时,实时内核将抢占普通内核,暂停执行普通内核任务,从而保证了压力检测任务在限定时间内完成。配合高速处理器,压力检测所用时间最快可以达到 $10\ \mu\text{s}$ 。由于采用增加独立实时内核的RT-Linux未对原Linux内核作改动,因此,还可以充分利用原Linux下的丰富的软件资源。实时任务分配方式如图2所示。

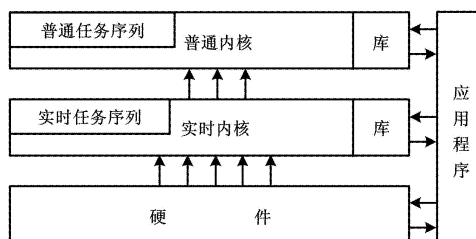


图2 实时任务分配示意图

Fig.2 Real-time task allocation

RT-Linux嵌入式操作系统具有独立的实时核。该实时核可以提供独立的API供应用程序调用。测控系统程序的实时部分需要写成模块形式,以内核态运行,非实时部分运行于用户态,实时部分和非实时部分的数据交换通过FIFO设备进行。

全部程序代码采用C语言和汇编语言混合编辑。PC机专用开发环境将程序交叉编译和交叉连接,生成S3C2410的机器代码,并通过JTAG接口下载到S3C2410的Flash程序存储器。当程序执行出现问题时,用户利用ISP功能可进行在线运行和调试。系统工作流程如图3所示。

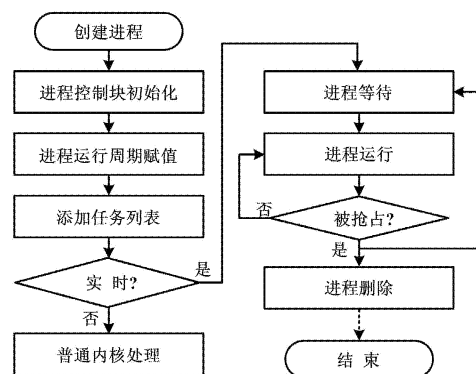


图3 工作流程图

Fig.3 Working procedure

两相磨粒流精密加工实验平台的测控任务可以以进程或者线程的方式运行。由于进程拥有独立的内存空间和硬件资源,因此,大部分任务以进程方式运行。

3 测控单元

温度测量使用 Pt100 铂电阻。铂电阻性能稳定,测量精度高,测量范围达到 $-200 \sim +850 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。但铂电阻阻值与温度之间的线性关系良好,当 Pt100 铂电阻断线时,可认为其电阻值是无穷大,反映到温度是一个较大的数值,这会引起系统误操作。因此,有必要进行传感器断线自动检测^[6]。

液位测量采用非接触式超声波方式。只需测出超声波到达液面和返回接收器所用的时间,就能换算出液面的高低数值。传感器安装位置远离两相流体,避免了流体的腐蚀和磨损。

磨粒流流量测量采用电磁流量计。这是因为两相磨粒流对插入式流量计的磨损较大,而电磁流量计测量时固定在管壁外侧,不受磨损的影响。此外,电磁流量计输出的是标准电信号,便于构成闭环自动控制系统;测量不受被测介质流态影响,且几乎无压力损失,增加了其测量的可靠性。

主控模块通过控制变频器实现流道压力和流量的调节。变频器的工作方式是通过改变电源电压的频率来改变旋转磁场的转速,从而改变水泵电机的转速。变频器可无极调速,提高了电机效率,适用于两相磨粒流的加工,且使用变频器控制水泵电机,还可以保证水泵运行稳定可靠。这是因为变频器具有过载、欠载、过流、过压、欠压和过热保护及自动重合闸等多种保护功能。同时,变频器可以对电机升降速时间进行预置,减小电机在开启和关闭水泵时的动态转矩,从而彻底消除破坏性极大的水锤效应。

4 通信结构

主控模块和各个数字化仪表之间采用 RS-485 总线进行通信。RS-485 总线允许连接多达 32 个负载设备,可非常方便地联网,从而构成分布式测控系统。在电缆长度小于 120 m 时,最大传输速率可以达到 10 Mbit/s;且 RS-485 总线用于多点互联时非常方便,可以节省许多信号线。

为了准确可靠地传输数据以及协调系统之间的工作,总线通信采用应答方式,在并行总线中使用硬件连线实现,并配置读操作请求线、读应答输入线、写操作请求线和写应答输入线。而对于 RS-485 串行总线,硬件应答线不存在,必须由软件根据一定的通信协议实现应答信息的交互^[7]。

主控模块和各个数字化仪表之间的通信结构如图 4 所示。

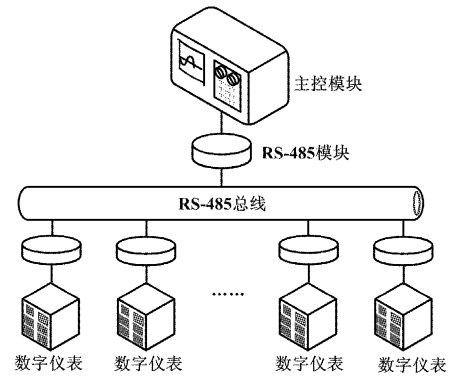


图 4 通信结构图

Fig. 4 Communication structure

系统通信结构为主从式结构,主控模块每向数字仪表发一个指令,仪表即返回一个数据。RS-485 模块负责将 TTL 信号转换为 RS-485 信号,并采用光电隔离技术将通信接口与仪表的其他部分线路隔离,以保证当通信线路上的某台仪表损坏或故障时,不会对其他仪表产生影响。根据芯片工作速度,仪表平均响应时间设计为 10 ms,则每条指令仪表应在 0 ~ 150 ms 内作出应答。主控模块必须等仪表返回数据后才能发送新的指令,以保证不会混乱。如果仪表超过最大响应时间(150 ms)仍没有应答,其原因可能是指令错误、校验码错误、线路故障、仪表没有开机或通信地址不等等,此时就重发指令或跳过该仪表。

主控模块和数字仪表的数据格式为 1 个起始位、8 位数据、无校验位和 1 个或 2 个停止位。起始位以一个低电平唤起通信,停止位以若干个高电平结束本字节的通信。通信传输数据的波特率可调范围为 4 800 ~ 19 200 bit/s。对于刷新率要求高的,可选用较高的波特率;对于数据可靠性要求高的,可选用较低的波特率,通常采用 9 600 bit/s。主控模块采用 2 个字节表示各种指令,具体含义如图 5 所示。

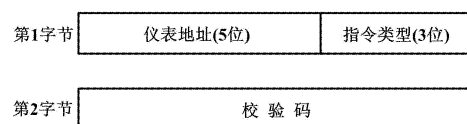


图 5 各指令示意图

Fig. 5 Schematic of each instruction

仪表地址用 5 位表示,可表达的地址范围为 0 ~ 31。指令类型表示该指令的具体含义,对同一台仪表可有 8 种不同的操作,能充分满足智能化仪表的操作需求。校验码用一个字节表示,错误检出率远高于普通的奇偶校验,基本保证了指令的完整性。

数字仪表的返回数据用3个字节表示,如图6所示。

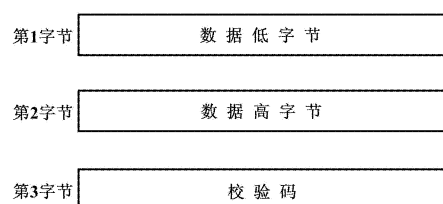


图6 返回数据示意图

Fig.6 Schematic of the returned data

返回数据用16位二进制有符号补码表示,可表达的数据范围为 $-32\ 767 \sim +32\ 768$,从而满足磨粒流测控平台流量、温度、压力和液位的数据范围要求。

指令校验码的表达式为:

$$k_3 = [(k_1 + k_2) + 82H] \bmod 256 \quad (1)$$

式中: k_1 和 k_2 分别为仪表地址和指令类型; k_3 为生成的指令校验码。

数据校验码的表达式为:

$$k_3 = [(k_1 + k_2) + 67H] \bmod 256 \quad (2)$$

式中: k_1 和 k_2 分别为数据低字节和数据高字节; k_3 为生成的数据校验码。

主控模块和数字仪表使用检验和校验码生成方式,错误检出率远高于奇偶检验,接近于CRC检验。奇偶检验的错误检出率理论上为50%,生成方式最简单;CRC检验的错误检出率高达99%,但生成算法十分复杂。综合考虑成本及性能,检验和校验码生成方式适合磨粒流实验平台的情况。

5 模糊控制

水泵电机转速的自动控制是实验平台正常运行的关键部分。它的目标是根据磨粒流的压力、流量、温度和液位来决定当前转速的大小,并且可以动态地改变参数,达到在完成加工任务的情况下尽量提高加工效率、保障设备安全的目的。模糊控制可以不需要被控对象的数学模型即可实现较好的控制,并可将被控对象的动态特性隐含在输入、输出模糊集和模糊规则中^[8-10]。

两相流的流量是实现实验平台加工效果的首要因素,且系统要求在一定时间内保持流量恒定不变。设流量给定值为 Q_0 ,流量实测值为 Q ,流量误差 $E = (Q - Q_0)$,将其作为模糊控制器的输入变量并模糊化,等价映射到模糊子集 $X = \{-2, -1, 0, +1, +2\}$,并选取5档词集: $\{VL, L, D, M, VM\}$,则建立输入变量 E 的隶属度如表1所示。

表1 E 的隶属度

Tab.1 Membership degree of E

E	VL	L	D	M	VM
-2.0	1.0	0.6	0.0	0.0	0.0
-1.0	0.5	1.0	0.5	0.1	0.0
0.0	0.0	0.6	1.0	0.6	0.0
1.0	0.0	0.1	0.5	1.0	0.5
2.0	0.0	0.0	0.0	0.6	1.0

把转速实际变化范围量化为5级,作为模糊控制器的输出变量 $K = \{-2, -1, 0, +1, +2\}$ 。对于输出变量 K 选取如下5档词集: $\{HD, D, S, G, HG\}$,则输出变量 K 的隶属度如表2所示。

表2 K 的隶属度

Tab.2 Membership degree of K

K	HD	D	S	G	HG
-2.0	1.0	0.5	0.0	0.0	0.0
-1.0	0.4	1.0	0.5	0.1	0.0
0.0	0.0	0.4	1.0	0.5	0.0
1.0	0.0	0.1	0.5	1.0	0.4
2.0	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0

根据水泵实际运行状况建立模糊规则表,如表3所示。

表3 模糊规则表

Tab.3 Fuzzy rules

E	VL	L	D	M	VM
K	HD	G	S	D	HD

根据模糊规则表,分别代入对应的隶属度,对每条规则进行矩阵运算,可得到适合主控模块运算的形式。对于流量误差的各种取值,主控模块按照模糊关系得到水泵电机转速的取值范围,再根据隶属度表,得到精确的转速数值。这种非线性的控制方式可以得到令人满意的控制效果。

6 结束语

本文对两相磨粒流加工平台的测控系统组作了全面分析,保证了磨粒流运行的稳定性和安全性,便于实时掌握磨粒流运行的情况,并提出了测控设备和主控模块的实时高速通信协议,保证了通信的可靠性和鲁棒性。同时,采用模糊控制实现水泵电机的转速自动控制,使平台运行更加智能化、人性化。

(下转第25页)

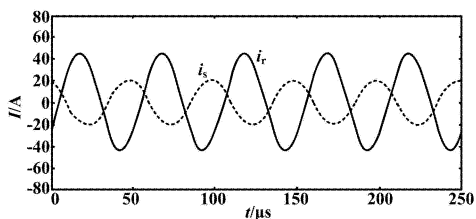


图7 逆变器输出电流和负载电流波形
Fig. 7 Waveforms of output current and load current

当输出功率为 P_{max} 和 $P_{max}/2$ 时,逆变器输出电压 u_{ab} 、输出电流 i_s 和电容电压 u_c 波形分别如图 8(a) 和 8(b) 所示。图 8 中,纵坐标 u_{ab} 为 200 V/div、 u_c 为 400 V/div、 i_s 为 20 A/div。当系统工作在谐振点时,逆变器输出电压 u_{ab} 和电容电压 u_c 相位角约为 $-\pi/2$,与理论分析吻合。

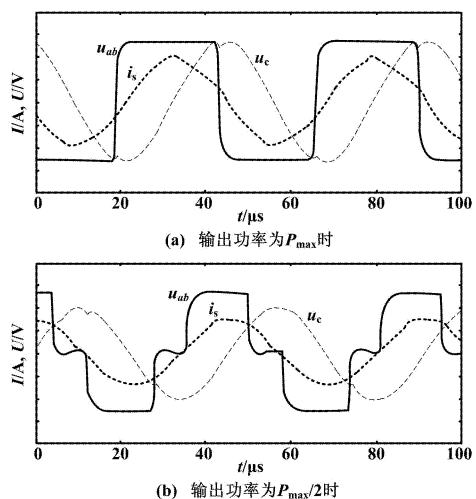


图8 逆变器输出电压、电流和电容电压实验波形
Fig. 8 Experimental waveforms of output voltage, current and capacitance voltage

4 结束语

本文提出了一种新型 LLC 高频感应加热电源谐振变换器。该变换器采用移相全桥型逆变器,通过改变两臂对角线上、下管驱动电压移相角的大小来调节输出电压,并通过锁相环实现软开关状态,大大降低了器件的功率损耗,提高了电源效率。LLC 谐振回路中,加入的电感 L_s 使负载回路具有电流变换作用,可以通过调整参数达到负载阻抗匹配的目的,从而替代笨重的高频大功率匹配变压器,实现高效低成本匹配。

参考文献

- [1] 陈辉明,钱照明. 感应加热电源的最新发展[J]. 电工技术学报, 1999,14(增刊):50-53.
- [2] Chudjarjeen S, Sangswang A, Koopai C. LLC resonant inverter for induction heating with asymmetrical voltage-cancellation control [C] // IEEE International Symposium on Circuits and Systems, Taipei, 2009: 2874-2877.
- [3] Chen Muping, Chen J K, Murata K, et al. Surge analysis of induction heating power supply with PLL [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2001, 16(5): 702-709.
- [4] Kawaguchi Y, Hiraki E, Tanaka T, et al. Full bridge phase-shifted soft switching high-frequency inverter with boost PFC function for induction heating system [C] // 2007 European Conference on Power Electronics and Applications, Aalborg, 2007: 1-8.
- [5] Lin Jingang, Zhong Yanru, Ma Xin. Study on a new way of load-matched for voltage-source induction heating inverters [C] // 2006 1st IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Singapore, 2006: 1-5.
- [6] Mollov S V, Theodoridis M, Forsyth A J. High frequency voltage-fed inverter with phase-shift control for induction heating [J]. IEE Proceedings of Electric Power Applications, 2004, 151(1): 12-18.
- [7] 陈辉明,王英,张仲超. 高频 LLC 感应加热电源及降低开关损耗策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(17): 67-71.

(上接第 21 页)

参考文献

- [1] Gorana V K, Jain V K, Lal G K. Forces prediction during material deformation in abrasive flow machining [J]. Wear, 2006, 260(1-2): 128-139.
- [2] Jain R K, Jain V K, Kalra P K. Modeling of abrasive flow machining process: a neural network approach [J]. Wear, 1999, 231(2): 242-248.
- [3] Fang Liang, Zhao Jia, Li Bo, et al. Movement patterns of ellipsoidal particle in abrasive flow machining [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(20): 6048-6056.
- [4] 计时鸣, 金明生, 张宪, 等. 应用于模具自由曲面的新型气囊抛光技术 [J]. 机械工程学报, 2007, 43(8): 2-6.

- [5] 谭援强, 李艺, Yong S. 磨粒流加工的固液两相流模型及压力特性模拟 [J]. 中国机械工程, 2008, 19(4): 439-441.
- [6] 徐和飞, 蒋存波. 一种现场总线温度测控仪信号处理方案 [J]. 自动化与仪表, 2009(9): 12-15.
- [7] 李芳, 张俊智, 王丽芳, 等. 电动汽车动力总成系统控制器局域网 (CAN) 总线通信协议 [J]. 机械工程学报, 2008, 44(5): 102-107.
- [8] 陈光柱, 肖兴明, 李志蜀, 等. 基于模糊多目标免疫算法的概念设计 [J]. 机械工程学报, 2007, 43(3): 165-171.
- [9] 方道星, 余跃庆, 陈炜. 基于模糊控制的 2R 欠驱动机器人位置控制 [J]. 机械工程学报, 2008, 44(1): 144-149.
- [10] 武星星, 朱喜林, 杨会肖. 自适应神经模糊推理系统改进算法在机械加工参数优化中的应用 [J]. 机械工程学报, 2008, 44(1): 199-203.