

面向固-液两相软性磨粒流嵌入式实时测控系统*

计时鸣, 兰信鸿

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

摘要: 针对固-液两相软性磨粒流精密抛光方法中流道微小,无法采用常规直接信号传感器的问题,提出了一种基于二次信号-加速度振动信号的软性磨粒流监测方法。通过小波包分析提取了振动信号的特征。结合基于有限状态机理论与基于嵌入式实时操作系统的并发多任务的程序设计方法,采用面向对象技术开发了一种测控软件框架。采用Linux和DSP/BIOS RTOS实施了双操作系统信号处理技术,开发实现了一个面向软性磨粒流的,具有通用多通道高速数据采集功能的智能化嵌入式实时测控平台。研究表明,该系统具有易扩展与易交互的优点。

关键词: 固-液两相软性磨粒流;振动信号;面向对象;小波包;有限状态机

中图分类号: TP311;TH39;TG506

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)02-0131-05

For solid-liquid two phase softness abrasive flow embedded real-time monitoring and control system

JI Shi-ming, LAN Xin-hong

(Key Laboratory of E&M, Ministry of Education & Zhejiang Province, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: In order to solve the problems of flow pipe is too small to the conventional sensor for solid-liquid two phase softness abrasive flow, a monitoring method based on the vibration signal was proposed. Through the wavelet packet analysis of vibration signal, extraction signal characteristics were gotten. Using object-oriented technology, a kind of measurement and control software framework was developed, combined with finite state machine theory and embedded real-time operating system and programming methods of multitasking. Using Linux and DSP/BIOS RTOS, the double operating system signal processing technology was implemented, a multi-channel high speed data acquisition function was implemented on the intelligence embedded real-time measurement and control platform. The results indicate that it is easy to expand and interactive.

Key words: solid-liquid two phase softness abrasive flow; vibration signal; object-oriented; finite state machine

0 引言

现代先进抛光测控技术定性、定量实验研究并识别加工环境、温度、加工压力、抛光液介质速度、抛光液的供给情况等因素对抛光效果的影响的权重。

针对基于固-液两相软性磨粒流的光整加工^[1-2]研究,目前主要通过理论分析与计算流体仿真为主的问题,为了更进一步实验研究,提出一种结合嵌入式系统,实现固-液两相软性磨粒流抛光的测量与控制。

本研究探讨应用于抛光测控系统的嵌入式体系结构,从面向对象的软件设计方法、基本结构、模块功能、运行机制、实现技术等方面进行分析。通过分析软性磨粒流流道外壁的加速度信号,提出一种“以加速度振动信号的特征向量为被控变量,以流道入口阀门开度为控制量”的测控方法,总结嵌入式系统软件体系结构从而建立一种轻量级的基于有限状态机编程模型与多线程并发编程模型嵌入式软件框架,该框架同时还包括多通道多速率数据采集功能类以及面向

收稿日期: 2011-10-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50875242;50905163)

作者简介: 计时鸣(1957-),男,浙江温州人,教授,博士生导师,主要从事先进加工技术方面的研究。E-mail: jishiming@zjut.edu.cn

软性磨粒流抛光的服务功能类库。

1 软性磨粒流振动信号分析

1.1 抛光影响因素

抛光过程复杂多变,影响的因素多,且各因素的相互作用及其综合效应错综复杂,呈现高度非线性。围绕这些因素,国内外学者作了大量的研究。例如,日本学者赤松洁等人研究了温度对抛光质量的影响;还有一些学者分别研究了抛光材料对抛光质量的影响。影响抛光效果主要分为四大部分:抛光模、抛光剂、抛光条件和抛光环境。在实际的抛光实验中对抛光具有影响且参数可控是抛光条件和抛光环境,包括温度、湿度、流量及入口压力。加速度振动信号不仅能体现留到内流体的特征,同时还克服了无法在微小流道内安装传感器的问题。如图 1 所示,加速度传感器是在入口(左)与出口(右)不同安装点。入口与出口的粗糙度加工随时间的曲线如图 2 所示。软性磨粒流动状态下的加速度振动信号及其小波包分解系数如图 3 所示。加速度传感器量程为 100 g,灵敏度为 100 mV/g,输出模拟电压信号,使用粗糙度仪证明两个测点对应的流道表面具有不同的抛光效果,由 CFD 仿真可知流道出口的压力大于入口。为了进一步分析,本研究对加速度传感器采集的振动信号进行小波包分析并提取特征向量。

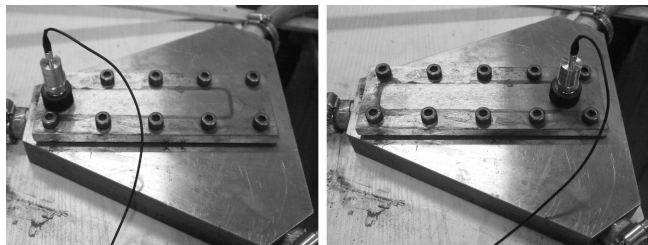


图 1 加速度传感器安装位置

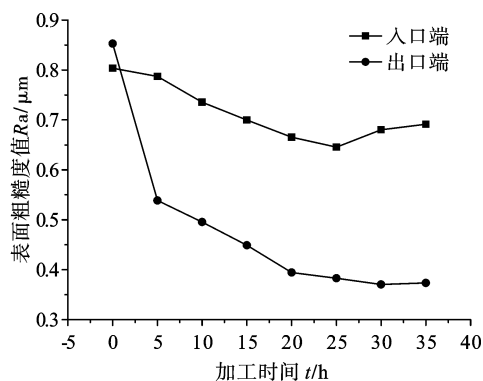


图 2 入口与出口的粗糙度曲线

1.2 软性磨粒流振动信号小波包分析

对于信号 $f(t) \in L^2(R)$, 离散正交小波变换定义为 $f(t)$ 在正交小波包基 $\{W_{n,j,k}(t)\}$ 上的投影系数^[3], 表示为:

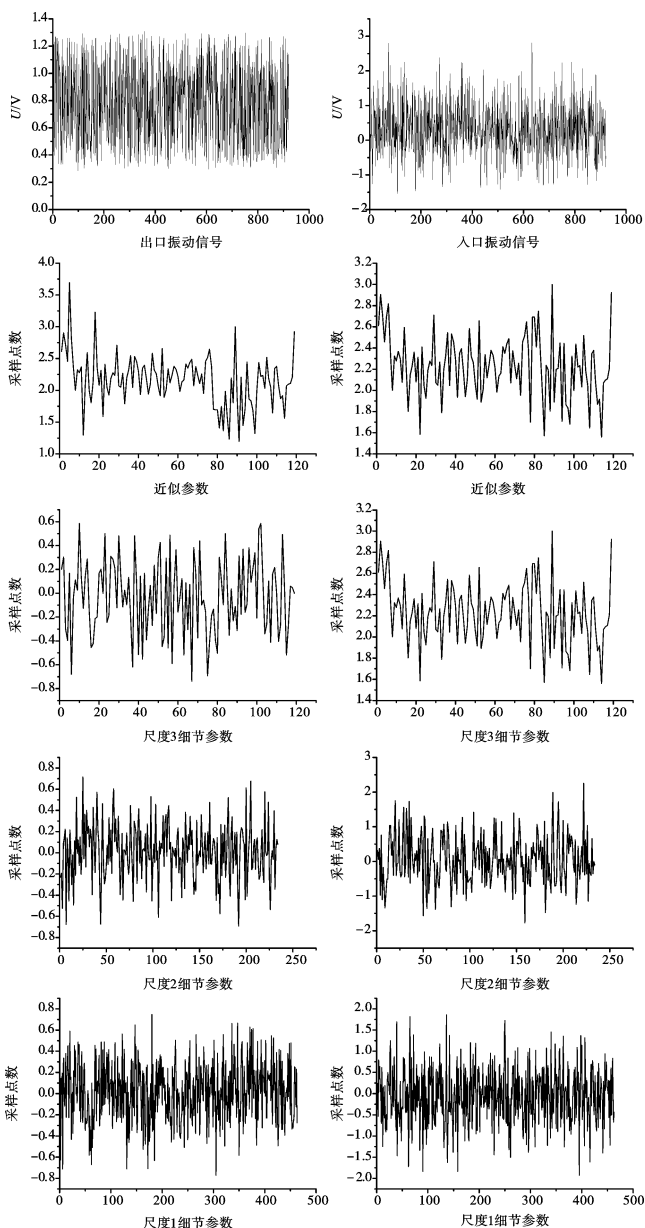


图 3 出口与入口振动信号及其小波包分解系数

$$P_f(n, j, k) = [f(t), W_{n,j,k}(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) [2^{j/2} \overline{W_n}(2^j t - k)] dt \quad (1)$$

式中: $\{P_f(n, j, k), k \in Z\}$ — $f(t)$ 在正交小波包 U_j^n 空间上的小波包系数序列。

小波包变换系数 $\{P_f(n, j, k), k \in Z\}$ 的计算过程类似于 Mallat 快速小波算法, 即对信号 $f(t)$ 一组低通滤波器和高通滤波器共轭正交滤波系数 $\{h_k\}_{k \in Z}, \{g_k\}_{k \in Z}$ 进行滤波。小波包变换的系数的递推公式如下:

$$\begin{cases} P_f(2n, j, k) = \sum_{l \in Z} h_{l-2k} P_f(n, j-1, l) \\ P_f(2n+1, j, k) = \sum_{l \in Z} g_{l-2k} P_f(n, j-1, l) \end{cases} \quad (2)$$

如果能够计算出某一分解层上的小波包空间中信号的能量分布, 则就可将这些能量按正交小波包空间 U_j^n 频率指标 n 的次序构成原始信号的特征向量。小波

包空间 U_j^n 的能量 $E(j,n)$ 定义如下:

$$E(j,n) = \sum_{k \in Z} [P_f(n,j,k)]^2 \quad (3)$$

现在本研究对流道的进出口外壁的振动信号进行3层小波包分解,小波基采用db3。其结果如图3所示。图的左边代表出口振动信号的小波包分解系数,而右边则为入口振动信号的小波包分解系数。然后计算每个尺度的能量 $E(j,n)$,出口与入口加速度振动信号小波包分解系数的各尺度能量图如图4所示(图中,E2代表出口振动信号的特征,而E1代表入口),每个特征向量具有8个值。从图中可以看出,在软性磨粒流的抛光过程中,抛光的效果(以粗糙度为参考)与磨粒流的加速度振动信号的相关性如下:当流道中的压力增大时,其加速度振动信号的小波包能量特征向量在中、低频的取值也随着增大,粗糙度则随之降低。这样,可以通过设计测控系统采集加速度振动信号并进行小波包算法提取基于能量的特征,以此为被控量,控制流道某点的抛光效果。

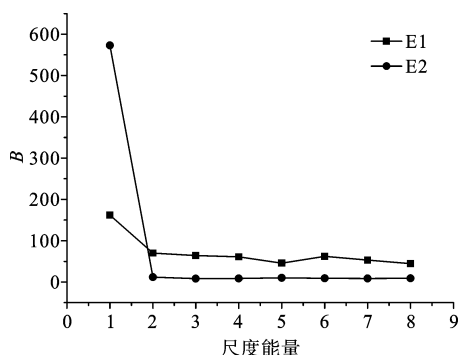


图4 出口与入口小波包能量特征曲线

2 嵌入式实时测控系统的实现方案

由于面向固-液两相软性磨粒流的嵌入式实时测控系统,不仅需要高速的数据采集,而且还需要如小波变换及小波包分析等数字信号处理算法,这样系统就需要大量的运算量以及很高的数据吞吐能力,而且系统还需要实现友好的人机交互界面以及网络功能。因此,本研究论述的测控系统采用“DSP+ARM”的双核硬件模式,DSP专用于信号采集及其处理分析,而ARM则用于实现图形用户界面(GUI)、网络连接、系统控制以及多种操作系统下的应用处理。

系统总体实施方案实际电路平台如图5所示。该嵌入式实时测控系统根据电路划分,主要分为3个主要模块:传感器及其调理电路模块、数据采集及其数字信号处理模块、显示与控制模块。其中,数据采集及其数字信号处理模块运行于DSP系统中,显示与控制模块运行于ARM系统中。

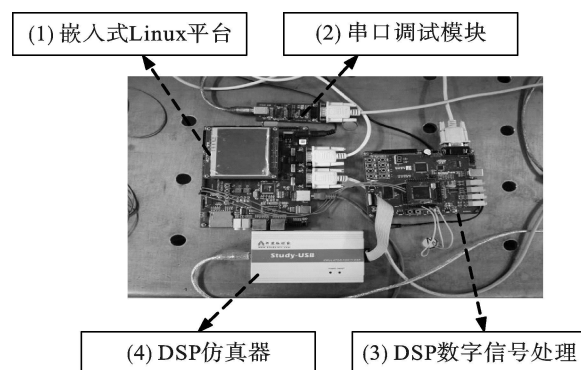


图5 系统电路平台

该嵌入式实时测控系统中的DSP采用TI公司的TMS320C5509,ARM则采用三星公司的基于ARM9核的S3C2440,并且在ARM9上移植了Linux2.6。本研究选择使用嵌入式Linux系统优秀的网络服务,以便于程序开发;同时选择TI公司DSP具有方便开发与调试的集成开发环境(Code Composer Studio, CCS)^[4]。

3 软件框架设计

3.1 DSP软件体系面向对象分析

嵌入式软件规模不断扩大,以往的面向过程的模块化分析与设计方法已经难以满足要求,基于对象的统一建模语言(UML)可以描述对于实时系统极为关键的结构和行为方面,并且已成为有效设计的优秀媒介。Hassan Gomma提出的并发对象建模和体系结构设计方法(COMET)^[5]以及Bruce Powel Douglass等人提出的嵌入式系统快速面向对象过程^[6](ROPES)都在吸收了统一建模语言(UML)精髓的基础上,融合了嵌入式实时系统固有的特点发展而来。

面向对象技术由于内在地支持对系统的抽象、分层和复用,能够很好地控制系统的复杂性。本研究以类的形式封装了高效的状态机实现代码,并通过活动对象设计模式对嵌入式系统的并发多任务需求进行了支持。

本研究根据面向对象分析与设计技术,首先对实时操作系统建模,根据嵌入式实时操作系统提供的任务管理、内存管理、事件管理、调度管理、时钟管理的函数及数据结构进行抽象,得到系统核心类、任务类、事件管理类、时钟类及内存管理类。在此基础上,本研究确定每个类的属性和行为以及实时操作系统各类之间的关系,为面向对象技术在基于嵌入式实时操作系统设计中的应用提供一个设计参考;其次,面向固-液两相软性磨粒流的嵌入式实时测控系统按需求^[7]可划分为监控子系统、控制子系统、数据采集子系统、命令行界面子系统、网络连接子系统、报警子系统、历史数据存取子系统、数字信号处理子系统、抛光管理子

系统等,这些功能子系统均设计为活动对象,由活动对象基类扩展而来;再次,系统是由一组相互协作的类构成,每个类及对象都是通过事件消息队列来实现接口,均由事件基类派生。

3.2 DSP 活动对象的并发设计与时序分析

活动对象不仅是各个功能模块的抽象,而且还具有并发性,其包括 3 个要素:

- (1) 内嵌一个状态机;
- (2) 拥有一个与其相关的事件队列;
- (3) 绑定一个执行线程(即 RTOS 中的一个任务)。

嵌入式实时操作系统为多任务并发创建运行环境,并完成任务间的切换、调度、通信、同步、互斥、管理时钟与中断等。

DSP/BIOS 系统采用抢占式调度算法。由于在本研究中把 DSP 系统设计成多通道周期任务模式,即数据采集、信号处理、数据传输均为周期任务,只是在数据传输的任务作为一个周期服务器服务于其他服务集活动对象。因此,本研究的多任务调度策略可以采用单调速率算法进行分析。

单调速率算法(Rate Monotonic Scheduling Algorithm)是由 Liu 和 Layland 提出的^[8],已经被证明单调速率算法是最优静态实时调度算法。

该算法归纳为:优先级按照周期来定,周期越短的任务优先级越高。

在单调速率算法调度中,被调度任务满足下面的条件,则可调度:

$$U_n = \sum_{i=1}^n \frac{E_i}{T_i} \leq n(2^{\frac{1}{n}} - 1) \quad (4)$$

式中: E_i —任务的最长执行时间; T_i —任务的执行周期; U_n —CPU 利用率约束。

根据公式计算任务数为 3 的可调度时 CPU 利用率应该小于 77.9%(如表 1 所示)。

表 1 RM 调度算法对应的任务数与 CPU 最高利用率

任务数	利用率
1	1.000
2	0.828
3	0.779
4	0.756
5	0.743
.....	
n	0.693

固-液两相软性磨粒流嵌入式实时测控系统具有的程序执行时序设计约束如图 6 所示。本研究主要考虑上文提到的任务,即:数据采集任务、信号处理任务、数据传输任务(包括服务集子系统)。

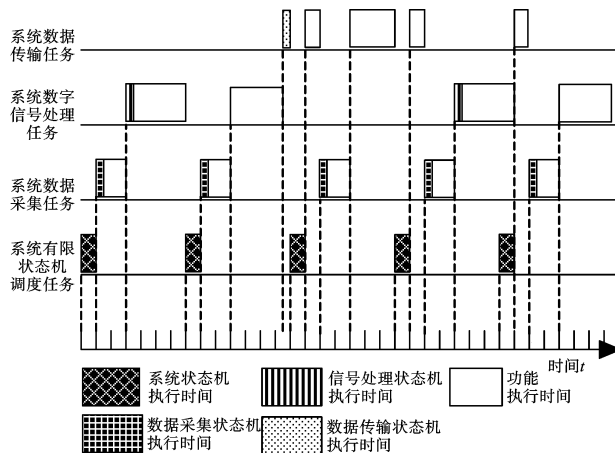


图 6 DSP 系统设计时序约束

从图 6 中可以看出,DSP 系统按主要功能划分成 3 个相对独立的任务(活动对象):①数据采集任务;②信号处理任务;③数据传输任务;④服务集。

这些任务在 DSP/BIOS 的调度下,按软性磨粒流测控系统要求指定的优先级与运行速率并发运行。在软性磨粒流的测控系统中,数据采集任务以 10 kHz 的速率运行。根据系统要求,信号处理任务的优先级低于数据采集任务但高于数据传输任务,运行于大约 0.5 kHz 的速率下。而数据传输任务中运行包括监控活动对象及其他服务类活动对象运行在 CPU 其他时间。实时测控系统中,时间是最宝贵的资源,控制行为必须在指定的时间内开始和完成,信号及消息要求按时发送,系统的正确不仅依赖于逻辑的正确而且依赖于结果产生的时间。为了满足软性磨粒流的实时性要求,本研究通过对软件的时序的性能设计,开发出严格的实时系统。

3.3 DSP 系统有限状态机实现方案

本研究是以代码为中心的解决方法,需要创建实际的可工作代码而不是仅仅建模分析开发。测控系统软件体系是在多线程并发的基础上关于状态机的实用的、可维护的、可直接复用的编程实现技术,虽然采用面向对象的分析与设计原则,但是在嵌入式系统中,主流的编程语言仍然是以 C 作为主要的编程语言。在编程框架中使用 C 语言实现基本的封装概念和单一的继承以及特例化和扩展机制,实现面向对象编程。

有限状态机典型的 C 语言实现方法。首先,最简单、最常用的有限状态机的实现方法是通过嵌套 2 层 switch case 实现。外层 switch case 判断状态,内层 switch case 判断事件。反之亦然。状态采用枚举变量。其优点在于结构简单便于理解,其缺点在于代码结构冗长,状态机执行时间不确定,不便于封装与继承,不适合在复杂的状态机中使用。

其次,本研究根据状态、事件做成二维表格,表格

中的项表示动作和转换。状态与事件采用枚举变量。其优点在于比较简练,查表算法的效率最高,且查表算法时间具有确定性。在面向软性磨粒流的测控系统中的 DSP 需要较高的实时性。因此,本研究采用第 2 种方法的改进方法实现有限状态机,该算法实现方案的主要数据结构如图 7 所示。

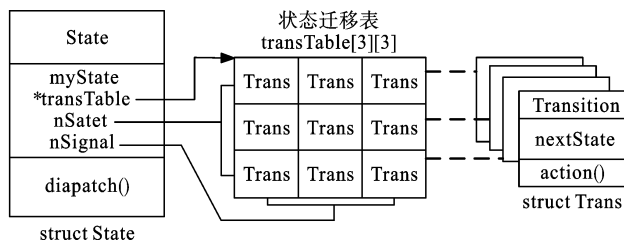


图7 有限状态机实现主要结构体

迁移结构体 Transition 包括状态迁移实现函数 action() 和迁移以后的状态机状态; 状态迁移表 transTable[][] 是结构体 trans 的二维数组, 即状态转换矩阵; 结构体 State 是状态记录节点, 主要功能是: 记录状态机当前处于的状态, 存储状态迁移矩阵的地址。而状态迁移函数则为:

```
void dispatch(State *state, unsigned const signal)
{
    Transition const *t = state->transTable + state->myState*nSignal+
    signal; //状态迁移计算
    (t->action)(state); //执行迁移函数
    state->myState = t->nextState; //切换状态机状态
}
```

该方法简洁, 且实时性与逻辑性均强于嵌套 switch case。

3.4 嵌入式 Linux 系统平台

面向固-液两相软性磨粒流的嵌入式实时测控系统中, 嵌入式 Linux 平台功能是: 用于完成数据显示以及网络服务功能、抛光环境的控制、抛光过程管理。

在 Linux 平台主要实现 3 个守护进程: 抛光环境进程、抛光管理进程以及数据传输进程和一个 Web 服务器。其中抛光环境进程主要用于控制抛光过程中抛光

条件; 抛光管理进程主要是根据工艺要求根据信号处理结果调整抛光环境; 数据传输进程主要负责与 DSP 系统的数据交换。Web 服务器主要负责将数据通过以太网进行传输与显示, 以及远程控制。与 Web 服务器通过 CGI 接口。系统数据采集传输结果如图 8 所示。

4 结束语

(1) 针对固-液两相软性磨粒流精密抛光方法中由于微小流道的限制直接测量传感器无法安装的问题, 本研究采用二次信号-加速度振动信号来确定磨粒流工况。

(2) 本研究采用小波包分析并提取加速度振动信号的特征, 以此作为测控系统的被控变量, 同时设定流道入口的阀门开度作为控制量。

(3) 本研究采用面向对象技术分析并设计软性磨粒流嵌入式实时测控系统。对测控系统的功能设计进行了封装、抽象, 然后在类的粒度上实现软件复用。改善了嵌入式系统中代码数量及复杂度越来越高, 维护效率低下的问题。

(4) 在基于实时操作系统的开发下, 本研究根据单调速率算法调度方法分析, 建立了测控系统实时 DSP 系统的运行时序约束, 在该约束下开发以满足实时捕获抛光系统工况要求的测控系统。

(5) 嵌入式 Linux 与 DSP/BIOS 同时运行, 既能提供 Linux 解决方案的全部功能, 又可确保 DSP 系统在 DSP/BIOS 环境下的高精度实时分析。

参考文献(References):

- [1] 计时鸣, 张生昌, 张 宪, 等. 基于流场约束型液动磨粒流的表面光整加工方法: 中国, 10067628. 3[P]. 2007-03-21.
- [2] 计时鸣, 唐 波, 谭大鹏, 等. 结构化表面软性磨粒流精密光整加工方法及其磨粒流动力学数值分析[J]. 机械工程学报, 2010, 46(15): 178-184.
- [3] 谭大鹏, 李培玉. 基于小波的钢液连下渣检测系统[J]. 机械工程学报, 2007, 43(2): 142-146.
- [4] 彭启琼, 管 庆. DSP 集成开发环境——CCS 及 DSP/BIOS 的原理及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [5] GOMMA H. Concurrent and Real-time System Software Design[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [6] DOUGLASS B P. Real-Time UML: Developing Efficient Objects for Embedded Systems[M]. Pearson Education, 1999.
- [7] 李江波, 朱世强, 郑东鑫. 基于 ARM 的燃气调压器检测系统设计[J]. 机电工程, 2010, 27(4): 108-111.
- [8] LIU C, LAYLAND J. Scheduling algorithms for multi programming in hard-real-time environment [J]. Journal of ACM, 1973, 20(4): 237-250.

[编辑: 张 翔]

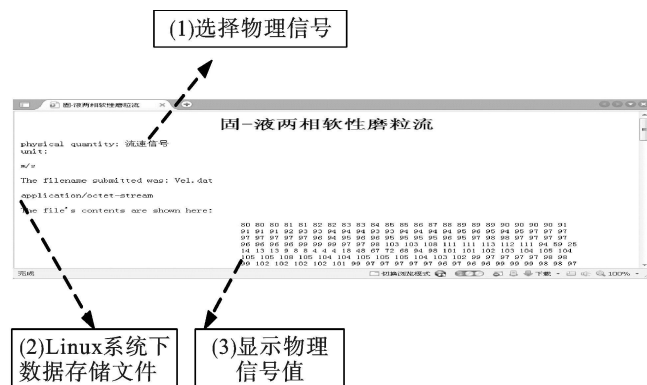


图8 系统实际结果图