

基于 LabVIEW 的反应釜监测系统设计

刘 阁¹, 陈俊森¹, 张永昌², 鄯辰泽²

(1. 华北科技学院 化工安全学院, 河北 廊坊 065201;

2. 华北科技学院 应急装备学院, 河北 廊坊 065201)

摘要: 针对反应釜生产过程中信号采集容易受到干扰的问题, 研究了一种基于 LabVIEW 的反应釜监测系统, 利用 LabVIEW 软件构建了反应釜的监测系统, 实现了反应釜运行过程中参数的数据采集、数据处理、数据存储、报警、历史数据读取等功能; 并对所建立的反应釜监测系统的监测效果利用 6 种不同的滤波方法对高斯噪声进行降噪处理。结果表明所建立的反应釜监测系统能够有效反映反应釜运行参数的信号特征, Cheby1 滤波方法对高斯噪声的降噪效果最好, 利用 Butterworth、Elip、Cheby1 等滤波方法构建的监测系统对反应釜的安全可靠运行具有重要的意义。

关键词: 反应釜; LabVIEW; 监测系统; 降噪处理

中图分类号: TP274

文章编号: 1000-0682(2024)05-0024-07

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.05.005

A monitoring system for reaction kettle based on LabVIEW

LIU Ge¹, CHEN Junsen¹, ZHANG Yongchang², SHAN Chenze²

(1. School of Chemical Safety, North China Institute of Science and Technology, Hebei Langfang 065201, China;

2. School of Emergency Equipment, North China Institute of Science and Technology, Hebei Langfang 065201, China)

Abstract: To address the problem that signal acquisition in the reaction kettle production process is easily interfered with, a reaction kettle monitoring system based on LabVIEW was proposed. LabVIEW software is used to build a reaction kettle monitoring system, which realized the functions of data acquisition, data processing, data storage, alarm and historical data reading of parameters in the reaction kettle operation process. Six different filtering methods are used for Gaussian noise reduction processing for the monitoring effect of the reaction kettle monitoring system. The results show that the established reaction kettle monitoring system can effectively reflect the signal characteristics of reaction kettle operating parameters, and the Cheby1 filtering method has the best effect on Gaussian noise reduction. The monitoring system constructed by Butterworth, Elip, Cheby1 and other filtering methods is of great significance for the safe and reliable operation of the reaction kettle.

Keywords: reaction kettle; LabVIEW; monitoring system; noise reduction processing

0 引言

反应釜是广泛应用于生物、化工等工业过程中的一种重要的综合反应容器, 可以使原料经过化学反应和物理变化转化为相应的产物^[1], 随着我国化

工水平的不断提高, 对化工产品的需求量也逐渐增大, 对反应釜的监测要求也不断提高。研究人员对反应釜的监测进行了大量的研究, Nawaz, M 等将基于移动窗口的小波变换与核主成分分析(KPCA)相结合, 对反应釜监测系统进行了实例研究, 成功地检测和识别了过程干扰、传感器偏差和过程故障, 提高了监控实时过程数据的性能^[2-3]; Maestri, F 等在移动温度记录(MTR)方法的基础上提出了一种无动力学的监测方法, 建立一种反应釜预防监测系统, 能够监测到反应釜早期的不正常的温度、流速等数据,

收稿日期: 2024-04-09

基金项目: 河北省物联网监控技术创新中心开放基金项目(WIW2022-4)资助的课题

第一作者: 刘阁(1973—), 女, 汉族, 教授, 从事传质分离和污染在线监测方面的研究。E-mail: 397289154@qq.com

并预警采取紧急措施,保证了反应釜的安全运行^[4];F Jani 等^[5-6]基于可靠声发射(AE)方法,利用高性价比的监测系统对反应釜中浆相聚烯烃聚合进行监测,通过声发射法可以监测浆料聚合过程中粉末粒度、细颗粒的积累、浆料浓度等参数。但由于反应釜的运行过程参数主要使用模拟量传感器进行监测,传感器输出的模拟量信号会因为传感器本身的结构、系统环境、采集距离的长短、接线方式不同而产生干扰现象,导致了传统的反应釜监测系统所监测的数据与实际的数据有差异,反应釜参数监测的准确性得不到保证,进而造成反应釜运行故障,严重时则会造成重大的伤亡事故^[7]。如何处理监测系统中信号传输干扰问题成为了反应釜监测的重要问题。

因而提出一种基于 LabVIEW 的反应釜监控系统,将 LabVIEW 与 Matlab 相结合,利用 LabVIEW 的可视化软件编程环境,使用 G 语言(图形化编程语言)对前面板和数据采集、数据处理、数据存储、报警、历史数据读取等功能模块进行了综合设计^[8-9],结合 Matlab 编程软件的强大计算能力以及软件本身所携带的功能库设计了 6 种不同的滤波方法,将编程的 Matlab 滤波文件嵌入 LabVIEW 中形成数据处理模块,通过对 LabVIEW 中自带的模拟噪声干扰

信号使用不同滤波方法进行滤波,探讨其滤波效果,从而验证反应釜监测系统抑制噪声干扰的有效性。

1 反应釜监测系统总体设计

基于 LabVIEW 的反应釜监测系统结构图如图 1 所示,主要由硬件和软件模块组成,硬件部分包括传感器和数据采集卡,软件部分利用 LabVIEW 构建的数据采集、数据处理、报警、数据保存、历史数据查询等模块。反应釜监测系统的工作过程首先由传感器和数据采集卡获取反应釜温度、压力、液位等参数信息,PT100 温度传感器通过螺纹安装分别放置于反应釜内部、热水罐内部、冷却水出入口位置测量温度,投入式液位传感器放置于反应釜内部测量液位,PT131H 压力传感器放置于反应釜内部测量压力,所有传感器连接 USB-6002 数据采集卡,USB-6002 数据采集卡内含模拟量输入和输出,可读取传感器输入的模拟量信号并通过串口将其发送到 LabVIEW 软件平台进行标定和滤波处理,并将采集到的数据及其采集时间快速保存到 TDMS 文件中,同时监测系统可以将反应釜系统各个监测参数、波动曲线、滤波效果实时显示在 LabVIEW 人机交互页面中并通过设置上下限阈值进行报警,从而实现基于 LabVIEW 的反应釜监测功能。

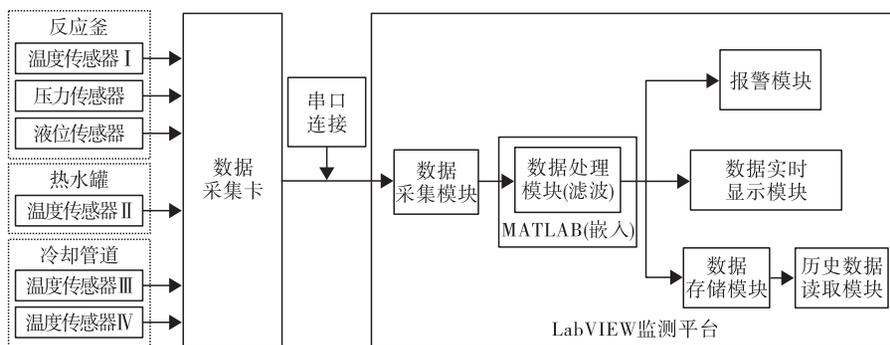


图 1 监测系统结构图

1.1 系统硬件设计

采用美国国家仪器公司(NI)生产的 NI USB-6002 数据采集卡,利用 6 个单端模拟输入(AI)通道配置 6 个差分通道,分别用于连接温度、压力、液位等传感信号。

系统选择 PT100 温度传感器对反应釜内部、热水罐内部、冷却水出入口管道进行温度监测,测量精度 0.15 °C,测量范围为 -200 ~ 450 °C,4 ~ 20 mA 输出,传感器需要连接数据采集卡的 AI 口模拟输入电流通路,将采集的温度信号传输至数据采集卡,通过 USB 端口再将电压信号传送给 LabVIEW 监测平

台进行滤波和标定得到准确温度数据,转换后的电压和温度满足线性变换。

反应釜内部压力的监测使用 PT131H 压力传感器,24 V 直流供电,输出电流信号为 4 ~ 20 mA,量程为 0 ~ 10 MPa 满足线性转换,测量精度可达 0.25% FS、响应时间低至 2 ms、采样频率最高可达 2400 Hz。

反应釜内部物料水液位监测采用投入式液位传感器,该传感器自带变送器可输出电压信号或电流信号,电压信号为 0 ~ 10 V,电流信号为 4 ~ 20 mA,测量精度为 0.5 FS,测量范围为 0 ~ 10 m,满足线性

变换,0 ~ 10 V 对应深度 0 ~ 10 mA。将所有传感器以差分的方式连接 USB - 6002 数据采集卡,能够增加数据采集的抗干扰性,接线方式如图 2 所示。

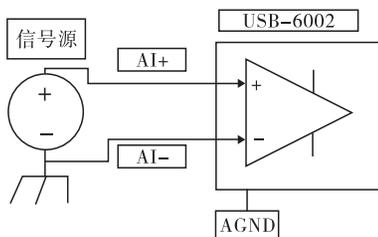


图 2 传感器差分接线方式

1.2 LabVIEW 软件设计

LabVIEW 是一个图形化编程语言的开发平台,它能够即时地对所收集的大量信息进行存储和采集,反应釜监测系统软件设计流程如图 3 所示,整个软件系统包括数据采集模块、数据处理模块、报警模块、数据实时显示模块、数据存储模块、历史数据读取模块等,整个软件系统主要实现对数据的接收、处理和存储。

1.2.1 LabVIEW 程序

利用 LabVIEW 自带的功能模块对软件程序进行编写,核心程序流程如图 4 所示。数据从传感器通过 NI USB - 6002 采集卡传输至计算机,数据采集程序开始运行并将其传输到数据处理模块进行滤波处理和显示,通过设置上下限阈值来对处理后的最新数据进行判断,判断是否启动报警,最后将滤波后的数据存入 TDMS 文件,结束监测任务。程序块利

用连接线分别将 DAQmx 中的创建物理通道、采样时钟、任务启动、数据读取、任务清除等模块顺序连接,创建物理通道后设置时钟模块的采样频率、采样模式、采样数,利用任务启动模块控制数据采集的运行状态,连接数据读取模块读取通道内数据,将读取的数据连接到索引数组分离不同通道的数据,传输到数据处理模块进行滤波处理,通过 Matlab script 嵌入框调用 Matlab 程序,设置出入口对滤波器类型、采样率、通带衰减、阻带衰减、通过频率、截至频率、阶数等滤波参数进行调节,改变滤波效果,将滤波后的数据连入 TDMS 数据写入程序,保存滤波后的数据同时对其进行阈值判断,最后完成任务连入任务清除模块结束监测任务。

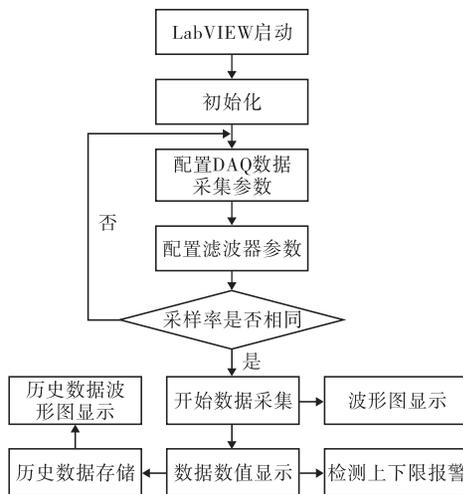


图 3 监测系统流程图

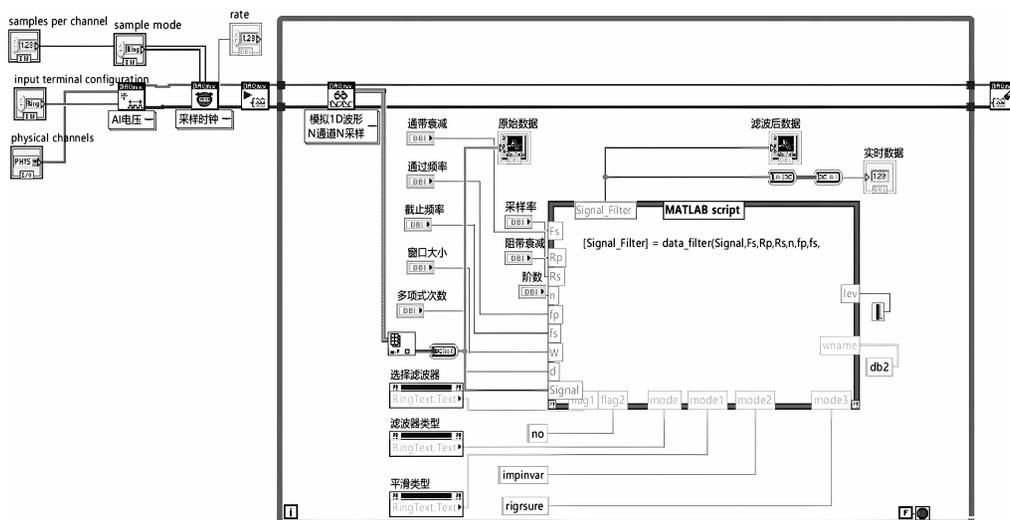


图 4 部分 LabVIEW 软件程序框图

1.2.2 LabVIEW 前面板

设计 LabVIEW 前面板,主要包含滤波器参数设

置、数据采集参数设置、阈值上下限设置、滤波前后波图表、报警等,实现了整个监测过程的可视化。

LabVIEW 监测系统前面板如图 5 所示。



图 5 LabVIEW 监测系统前面板

2 系统性能分析

为了确保所构建的反应釜监测系统能够正常运行,需要对系统进行测试验证其性能,主要测试内容为系统的滤波处理效果、报警、存储、读取模块。首先使用 LabVIEW 中自带的数据库程序,模拟理想状况下,无干扰发生的数据采集情况,选择采样模式为连续采样模式,采样速度为 1000 Hz,而后将采集的数据保存入 TDMS 文件中并利用 LabVIEW 历史数据读取模块读取历史曲线进行显示,数据采集能够得到连续的无波动的曲线,在实时数据低于设置的报警阈值时能正常报警,存储的历史数据能够正常地转化为波形图曲线。

由于传感器采集数据的过程会因传感器本身的结构、系统环境、采集距离的长短、接线方式不同而受到轻重不一的干扰,监测系统设置了数据处理模块(滤波),利用 LabVIEW 自带的数据库采集模块,分析噪声干扰的处理效果。将各个通道的滤波方法设置为不同的方法,反应釜温度、反应釜压力、反应釜液位、冷却水出口温度、冷却水入口温度、热水罐子温度分别利用 Butterworth(巴特沃斯)、Cheby1(切比雪夫 I 型)、Cheby2(切比雪夫 II 型)、Ellip(椭圆)、Smooth(平滑)、Wavelet(小波)滤波方法进行滤波,收集滤波前后的数据进行对比,以此来验证数据滤波的效果。

2.1 高斯噪声

在反应釜运行过程中大部分噪声近似高斯分

布,所以选择直流原信号为有用信号,添加高斯噪声信号到直流信号中进行处理,为了方便观察滤波效果,设置高斯噪声的标准差为 0.04,信号发送值始终为 1,检验 6 种滤波方法的滤波效果。

2.1.1 Butterworth 滤波

Butterworth 滤波器的频率响应函数是一个实系数有理函数,其数学公式为:

$$|H(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^{2N}}} \quad (1)$$

其中: $H(\omega)$ 是频率响应函数; ω 是角频率; ω_c 是截止频率; N 是滤波器的阶数。

公式描述了 Butterworth 滤波器的频率响应,巴特沃斯滤波器具有平滑的幅频特性,通频带内的频率响应曲线最大限度平坦,没有起伏,而在阻频带则逐渐下降为零。它的阶数 N 决定了滤波器的陡峭程度,阶数越高,滤波器的截止频率附近的衰减越快。

对 Butterworth 滤波器的参数进行设置,设置截止频率为 50、阶数为 3、通带纹波为 3、阻带衰减为 40,将设置的噪声信号通入滤波器,滤波效果如图 6 所示,噪声信号的幅值波动范围是 0.89 ~ 1.09,幅值差为 0.20,滤波后得到的信号幅值波动在 0.99 ~ 1.03 之间,幅值差为 0.04,与原信号的误差范围为 0 ~ 0.03,噪声信号减少了 80.0%,滤波效果较好,滤波曲线较为平滑,波形保持效果取决于通带频率和阶数的选择。

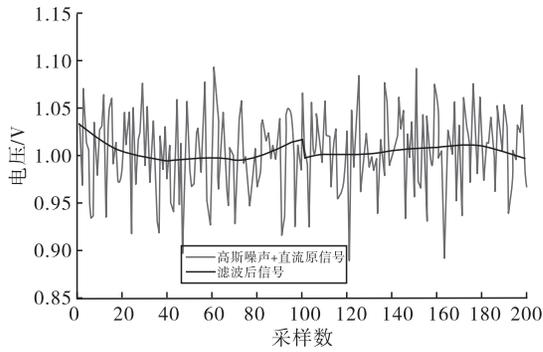


图 6 高斯噪声下 Butterworth 滤波效果图

2.1.2 Cheby 滤波

Cheby 滤波器是信号处理中常用的滤波器类型,分为 ChebyI 型和 ChebyII 型。它们的数学函数分别是式(2)(3)^[10]。

ChebyI 型滤波器是一种带通或带阻滤波器,其特点是在通带或阻带内具有等波纹的幅度响应。其数学公式可以表示为:

$$|H(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \epsilon^2 \cdot T_N^2\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)}} \quad (2)$$

其中: $H(\omega)$ 是频率响应函数; ϵ 是通带或阻带最大允许波纹的幅度; ω_c 是截止频率; $T_N\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)$ 是切比雪夫多项式。

切比雪夫多项式 $T_N\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)$ 的表达式为:

$$T_N\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right) = \frac{1}{2} \left[\left(Z + \sqrt{Z^2 - 1} \right)^N + \left(Z - \sqrt{Z^2 - 1} \right)^N \right] \quad (3)$$

其中: $Z = \frac{\omega}{\omega_c}$; N 为滤波器阶数

ChebyII 型滤波器也称倒数 Cheby 滤波器,截止频率速度慢于 Cheby I 型滤波器,只在阻带内有幅度波动,其数学公式可以表示为:

$$|H(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\epsilon^2 \cdot T_N^2\left(\frac{\omega_c}{\omega}\right)}}} \quad (4)$$

Cheby 滤波器过渡带比 Butterworth 滤波器衰减快,但频率响应的幅频特性不如后者平坦。Cheby 滤波器和理想滤波器的频率响应曲线之间的误差最小,但是在通频带内存在幅度波动。通常情况下, I 型滤波器在频域内有较为平滑的幅度响应, II 型滤波器在过渡带内的频率响应更为陡峭。

对 Cheby1 型滤波器和 Cheby2 型滤波器的参数

进行设置,设置截止频率为 50,阶数为 3,将设置的噪声信号通入滤波器,滤波效果如图 7、图 8 所示。

Cheby1 滤波器中,噪声信号的幅值波动范围是 0.89 ~ 1.12,幅值差为 0.23,滤波后的信号幅值波动在 0.99 ~ 1.02 之间,幅值差为 0.03,与原信号的误差范围为 0 ~ 0.02,噪声信号减少了 86.9%,滤波曲线平滑,滤波效果好。

Cheby2 滤波器中,噪声信号的幅值波动范围为 0.90 ~ 1.10,幅值差为 0.20,滤波后的信号幅值波动在 0.95 ~ 1.05 之间,幅值差为 0.10,与原信号的误差范围为 0 ~ 0.05,噪声信号减少了 50%,滤波效果较差,信号出现了大量的毛刺和突起,可能是由于滤波参数调节不当或滤波器本身算法不稳定。

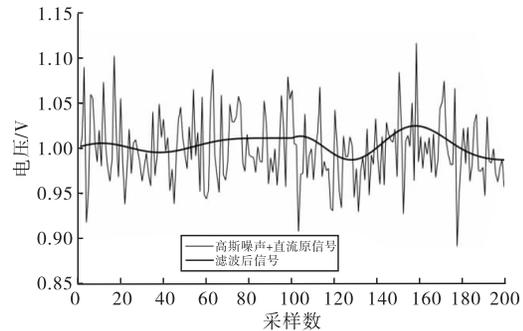


图 7 高斯噪声下 Cheby1 滤波效果图

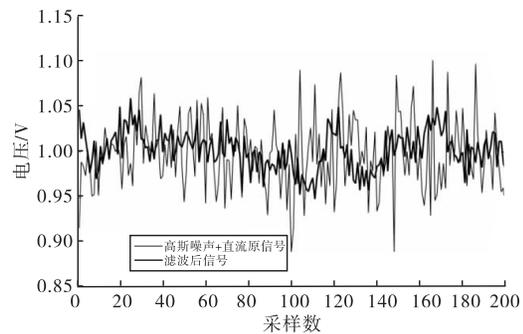


图 8 高斯噪声下 Cheby2 滤波效果图

2.1.3 Elip 滤波

椭圆滤波器是在通带和阻带等波纹的一种滤波器,阶数相同的条件下有着最小的通带和阻带波动。椭圆滤波器的设计基于椭圆函数,其数学公式可以表示为:

$$|H(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \epsilon^2 \cdot R_N^2\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)}} \quad (5)$$

其中: ϵ 是通带或阻带最大允许波纹的幅度; $R_N\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)$ 是雅可比椭圆函数; ω_c 是截止频率; N 为滤波器阶数; $R_N\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)$ 雅可比椭圆函数的数学表达式为:

$$R_N\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right) = \int_0^{\varphi} \frac{1}{\sqrt{1 - K^2 \sin^2\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)}} \quad (6)$$

其中: K 是椭圆积分的模量, 取值范围为 $0 \sim 1$ 。

在阶数相同的条件下, 椭圆滤波器相比于其他类型的滤波器, 拥有更窄的过渡带宽和较小的阻带波动, 但是通带和阻带的起伏较大。

对 Elip 滤波器的参数进行设置, 设置截止频率为 50, 阶数为 3, 通带纹波为 3, 阻带衰减为 40, 将设置的噪声信号通入滤波器, 滤波效果如图 9 所示, 噪声信号的幅值波动范围是 $0.88 \sim 1.10$, 幅值差为 0.22 , 滤波后得到的信号幅值波动在 $0.98 \sim 1.01$ 之间, 幅值差为 0.03 , 与原信号的误差范围为 $0 \sim 0.02$, 噪声信号减少了 86.3% , 滤波效果较好, 但是信号滤波过程中出现了少量的毛刺, 滤波曲线不够平滑, 原因可能是因为滤波器参数调节不当或是信号幅度过大导致 Elip 滤波器在处理信号过程中产生了非线性效益, 从而在输出信号中产生毛刺。

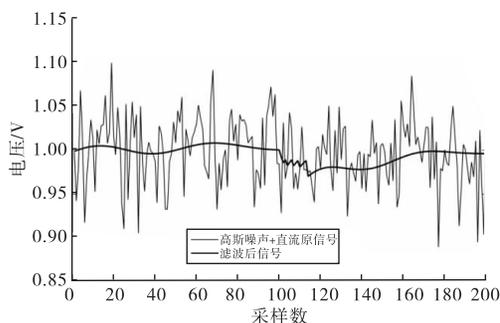


图9 高斯噪声下 Elip 滤波效果图

2.1.4 Smooth 滤波

Smooth 滤波并不是指代一种滤波方法, 它是平滑信号的滤波方法的统称, 具体的 Smooth 滤波器可以有多种方法, 所用到的方法为移动平均滤波器, 它用于减小信号中的噪声或去除高频成分, 从而平滑信号。它基于对信号中一定窗口内数据的平均值进行计算。其数学公式可以表示为:

$$y(n) = \frac{1}{N} [x(n) + x(n-1) + x(n-2) + \dots + x(n-N+1)] \quad (7)$$

其中: $y(n)$ 是滤波后输出信号; $x(n)$ 是输入信号; N 为滑动窗口大小。

移动平均滤波是利用多个样本的平均值来代表当前样本的值, 从而减小随机噪声或高频成分对信号的影响。滑动窗口的大小 N 决定了平滑的程度, 较大的窗口可以更有效地平滑信号, 但可能会导致滞后响应; 较小的窗口可以更快地响应信号的变化,

但平滑效果可能较差。

对 Smooth 滤波器的参数进行设置, 设置窗口长度为 20。将设置的噪声信号通入滤波器, 滤波效果如图 10 所示, 噪声信号的幅值波动范围是 $0.89 \sim 1.10$, 幅值差为 0.21 , 滤波后得到的信号幅值波动在 $0.98 \sim 1.05$ 之间, 幅值差为 0.07 , 与原信号的误差范围为 $0 \sim 0.05$, 噪声信号减少了 66.6% , 滤波效果一般, 滤波曲线出现大量的毛刺, 原因可能是由于滤波器滑动窗口设置太小, 从而导致滤波曲线不够平滑, 突起的原因可能是滤波器滞后于滤波中的突变信号。

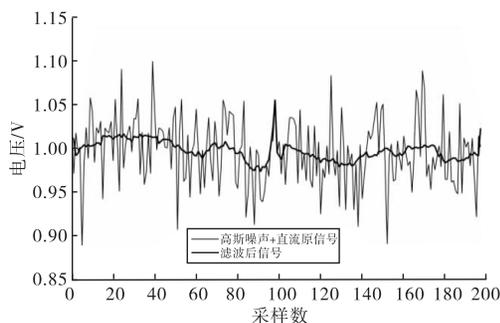


图10 高斯噪声下 Smooth 滤波效果图

2.1.5 Wavelet 滤波

Wavelet 滤波是一种常用于信号处理和图像处理的滤波方法, 基于小波变换原理, 在连续小波变换中, 信号与小波函数进行内积计算, 得到一系列连续尺度和平移位置上的小波系数, Wavelet 滤波器的数学公式可以表达为式(8):

$$C(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot \varphi(a, b, t) \cdot dt \quad (8)$$

其中: $C(a, b)$ 是小波系数; $x(t)$ 是输入信号; $\varphi(a, b, t)$ 是通过尺度参数 a 和平移参数 b 进行尺度和平移后得到的小波系数。

Wavelet 滤波器的基本思想是利用小波函数的尺度和平移特性, 将信号分解成不同尺度和频率的小波系数, 然后可以根据需要对这些小波系数进行处理, 如滤波、降噪等, 经过处理后可以得到滤波后的信号。

对 Wavelet 滤波器的参数进行设置, 设置滤波器类型为 db2, 分解层数为 3。将设置的噪声信号通入滤波器, 滤波效果如图 11 所示, 噪声信号的幅值波动范围是 $0.91 \sim 1.11$, 幅值差为 0.20 , 滤波后得到的信号幅值波动在 $0.98 \sim 1.10$ 之间, 幅值差为 0.12 , 与原信号的误差范围为 $0 \sim 0.10$, 噪声信号减少了 40% , 滤波效果较差, 滤波曲线出现大量的毛刺, 原因可能是选择的滤波器的类型不对或分解层数不够, 导致滤波曲线不够平滑, 突起的原因可能是小波滤波器对信号的快速变化做出了过度响应。

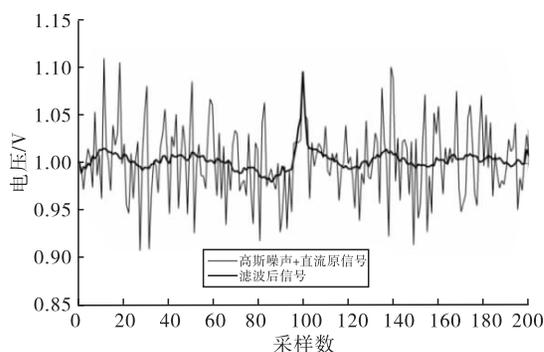


图 11 高斯噪声下 Wavelet 滤波效果图

综上所述,不同类型的滤波器对同种噪声信号的滤波效果不同, Butterworth 滤波器的响应速度快,在通带范围频率响应较平坦,不会引入幅度失真; Cheby 滤波器可以在频域内更加灵活地控制通带波纹和阻带衰减; Elip 滤波器在通带和阻带均表现为等波纹特性,提供了最优的平方幅度响应; Smooth 滤波器对周期性干扰有良好的抑制作用,平滑度高; Wavelet 滤波器能够根据信号的特征自适应地调整分析窗口的尺度和位置,从而更有效地捕获信号的特征。根据 6 种滤波器滤波效果图,可以明显地看出信号滤波作用,滤波信号皆与原始信号走势一致,保留了原始信号的特征。根据采集的数据计算滤波前后幅度差值、误差范围、噪声信号减少率,结果如表 1、表 2 所示,将 6 种滤波方法的滤波结果进行对比,在直流信号发送值始终为 1 的情况下, Cheby1 的误差范围最小,噪声减少率最高, Elip 和 Butterworth 的滤波效果较好,噪声减少率分别为 86.3% 和 80%。Cheby2、Wavelet 和 Smooth 滤波方法噪声减少率最小,分别为 50.0%、40.0%、66.6%,滤波效果与图片符合,所以在噪声参数相同的情况下, Cheby1 滤波方法的滤波效果最好,得到的数据曲线是最平滑, Elip 和 Butterworth 滤波方法的滤波效果较好但仍有少量突起和毛刺的情况出现,其中 Cheby2、Wavelet 和 smooth 滤波方法的毛刺情况最严重。所以在反应釜运行过程中产生的噪声符合高斯分布的情况下,利用 Cheby1 滤波方法滤波反应釜采集的是最有效的。

表 1 高斯噪声测试数据滤波前后幅度差

滤波方法	滤波前幅度差/V	滤波后幅度差/V
Butterworth	0.20	0.04
Cheby1	0.23	0.03
Cheby2	0.20	0.10
Ellip	0.22	0.03
Smooth	0.21	0.07
Wavelet	0.20	0.12

表 2 高斯噪声测试数据滤波后噪声减少率

滤波方法	误差范围/V	噪声信号减少率/%
Butterworth	0 ~ 0.03	80.0
Cheby1	0 ~ 0.02	86.9
Cheby2	0 ~ 0.05	50.0
Ellip	0 ~ 0.02	86.3
Smooth	0 ~ 0.05	66.6
Wavelet	0 ~ 0.10	40.0

3 结论

利用 LabVIEW 在虚拟仪器领域以及 Matlab 在数据计算能力的优势,设计了反应釜监测系统的总体方案,开发了系统的数据采集、数据处理(调用 Matlab)、数据存储、报警、历史数据读取等功能。

(1) 基于 LabVIEW 的反应釜监控系统性能良好,运行正常,能够有效地完成反应釜的监测工作;

(2) 利用 LabVIEW 平台调用 Matlab 程序能够进行有效的滤波,得到滤波后的信号,滤波信号皆与原始信号走势一致,保留了原始信号的特征且滤波效果较好;

(3) 由于在反应釜运行过程中大部分噪声近似高斯分布,利用 6 种不同的滤波方法对高斯噪声进行了滤波效果验证,得出了 Cheby1 滤波方法的滤波效果是有效的。其他的滤波方法在滤波过程中或多或少有突起和毛刺的情况出现,其 Cheby2、Wavelet 和 Smooth 三种滤波方法的毛刺情况最为严重。

参考文献:

- [1] 张静,辛丽平,单文悦,等. 基于观测器的串级连续搅拌反应釜有限时间命令滤波控制[J]. 控制工程, 2023, 30(7): 1248 - 1258.
- [2] NAWAZ M, MAULUD A S, ZABIRIH, et al. Multiscale framework for real-time process monitoring of nonlinear chemical process systems[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020, 59(41): 18595 - 18606.
- [3] AIT-IZEM T, HARKAT M, DJEGHABAM, et al. On the application of interval PCA to process monitoring: A robust strategy for sensor FDI with new efficient control statistics[J]. Journal of process control, 2018(63): 29 - 46.
- [4] MAESTRI F, OMODEO SALÈ F, ROTAR. Early warning monitoring of exothermic batch reactions: A kinetic-free approach[J]. Chemical engineering journal (Lausanne, Switzerland; 1996), 2021(418): 129371.
- [5] NSUGBE E, STARR A, JENNIONS I, et al. Estimation of online particle size distribution of a particle mixture in free fall with acoustic emission[J]. Particulate science and technology, 2019, 37(8): 953 - 963.

(下转第 64 页)

4 结论

根据乙烯裂解炉热电偶的 FMEA 分析,结合热电偶的相关参数,对热电偶进行设计改进和优化补偿措施。该次设计方案中选择的测温元件为 K 分度的单支式热电偶,考虑到使用寿命,选用的测量端形式为绝缘式。该热电偶的长期最高工作为 1100 °C,短期最高工作温度为 1200 °C。

热电偶测温核心元件选用高品质测温芯;保护管在高温、酸碱环境中易引起腐蚀,选用耐高温、腐蚀速率慢的 Inconel 800H 合金。接线盒设计时,选用 ADC12 铸铝材质,表面喷聚氨酯涂层。

参考文献:

- [1] 陶小利,高嵩,黄宏伟,等. 耐高温压力变送器在特殊场合应用的分析[J]. 工业仪表与自动化装置, 2021(6):112-113.
- [2] 陈昱伦,关敏仪,梁佩博,等. 基于 FMEA 的某型高温熔盐压力变送器可靠性分析[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2023(02):33-39.
- [3] 陈清清. K 型热电偶高温测温特性的研究[D]. 杭州:中国计量大学, 2021.
- [4] 系统可靠性分析技术、失效模式和影响分析(FMEA)程序:GB/T 7826—2012 [S]. 2012.
- [5] 故障模式、影响及危害性分析指南:GJB/Z 1391—2006 [S]. 2006.
- [6] 可靠性维修性保障性术语:GJB 451A—2005[S]. 2005.
- [7] 陶小利,高嵩,黄宏伟,等. 耐高温压力变送器在特殊场合应用的分析[J]. E3S Web of Conferences, 2021(268):1059.
- [8] 周细凤,曾荣周,林愿,等. 基于 NI Multisim 和 LabVIEW 的通信电子线路课程开放式虚拟实验平台[J]. 实验科学与技术, 2020, 18(5):135-139.
- [9] GE Z, GUO H, WANG T, et al. Universal graph filter design based on butterworth, chebyshev and elliptic functions[J]. Circuits, Systems, and Signal Processing, 2023, 42(1): 564-579.
- [10] 吴淑梅,张志超,赵剑伟,等. 基于视觉与 PLC 的面相物流末端的智能分拣系统[J]. 机电工程技术, 2022, 51(5):112-115.
- [11] 高净净. 基于 MES 与 AGV 互连的智能仓储系统设计[J]. 机电工程技术, 2021, 50(7):72-74.
- [12] 薛玉东,贺鹏飞,王中训,等. 基于分布式控制系统的带电作业工器具智慧仓储设计[J]. 电子设计工程, 2023, 31(24):42-46.
- [13] 乐天达,赵强,章志鸿,等. 基于 PWKNN 算法的风电系统故障诊断研究[J]. 微型电脑应用, 2024, 40(01):188-192.
- [14] 杜静,许亚能,谢双义,等. 基于 TMD 的风力机塔筒振动控制研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(02):157-162.
- [15] 单立宇,张兰红,陈小海. 基于磁链预测的永磁直驱风力发电机 SVM-DTC 技术[J]. 电子设计工程, 2023, 31(4):62-67.

(上接第 30 页)

- [6] JANI F, ADHAMDOUST S R, HOSSEINIS, et al. Process monitoring of polyolefin slurry - phase polymerization in continuous stirred - tank reactor via analysis of acoustic emission waves [J]. Brazilian journal of chemical engineering, 2023:1-13.
- [7] 唐宇,黄海龙. 反应釜实训装置的设计与应用[J]. 机械设计与制造, 2023, 388(6):176-179+183.
- [8] WU F, YANG F, MAD, et al. Design of virtual digital os-

(上接第 39 页)

- [6] 刘高强. AGV 自动运输系统在 PCB 生产车间的应用研究[D]. 成都:西华大学, 2018.
- [7] 戴博,杨根科. 面向高端装备制造企业的智能生产物流系统设计[J]. 制造业自动化, 2017, 39(6):136-139.
- [8] 张晓东,曹毅,李秀娟. 立体仓库巷道堆垛机控制系统设计[J]. 自动化仪表, 2013, 34(5):46-48.
- [9] 梁胜涛,陈良坤,舒奇奇,等. 基于无线通信与 RFID 定位的智能仓储系统的设计[J]. 自动化技术与应用,

(上接第 43 页)

- [6] 张雁忠,刁嘉,翟化欣,等. 基于嵌入式技术的风电场智慧监控系统[J]. 微型电脑应用, 2023, 39(10):91-94.
- [7] 晋高建. 基于 BAS-BPNN 模型的风电机组塔筒倾斜度预测研究[J]. 电气技术与经济, 2023(10):20-23+28.
- [8] 赵飞飞,张显云. 三维激光技术在风力发电机塔筒垂直度检测中的应用[J]. 电视技术, 2023, 47(06):201-204.