

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2025.12.017

周云, 朱华夏, 赵柔君, 等. 毫米波物位计滤波抗扰技术研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2025, 47(12): 192-200.

# 毫米波物位计滤波抗扰技术研究

周云<sup>1</sup>, 朱华夏<sup>1</sup>, 赵柔君<sup>1</sup>, 谭尧<sup>1</sup>,  
李华青<sup>2</sup>, 刘东卓<sup>2</sup>, 董卫<sup>2</sup>, 石亚伟<sup>2</sup>

1. 国家电投集团重庆合川发电有限公司, 重庆 合川 401536; 2. 西南大学 电子信息工程学院, 重庆 400715

**摘要:** 为提高发电厂煤料仓煤量测量的准确性, 解决传统毫米波物位计在复杂工业环境下易受到电磁干扰、温度波动及机械振动等影响的问题, 提出了一种改进的无限冲激响应(Infinite Impulse Response, IIR)滤波器方法。通过对毫米波物位计采集的数据进行 IIR 滤波处理, 设计并优化滤波器参数, 增强测量数据的稳定性, 并与实际煤量进行对比验证。实验结果表明: 经过 IIR 滤波处理的煤量数据精度大幅提升, 误差控制在 0.145 mm 以内, 滤波后的测量精度较传统的二项式拟合和线性卡尔曼滤波分别提高了 67.8% 和 42.0%。

**关键词:** 毫米波物位计; 发电厂; 煤量监测; 无限冲激响应滤波器; 抗干扰

中图分类号: TN958; TN713

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2025)12-0192-09

## The Research on Filtering and Anti-Interference Techniques for Millimeter Wave Radar Level Meter

ZHOU Yun<sup>1</sup>, ZHU Huaxia<sup>1</sup>, ZHAO Roujun<sup>1</sup>, TAN Yao<sup>1</sup>,  
LI Huaqing<sup>2</sup>, LIU Dongzhuo<sup>2</sup>, DONG Wei<sup>2</sup>, SHI Yawei<sup>2</sup>

1. State Power Investment Corporation Chongqing Hechuan Power Generation Co. Ltd., Hechuan Chongqing 401536, China;

2. College of Electronic Information Engineering, Southwest University, Chongqing 400715, China

**Abstract:** To enhance the accuracy of coal volume measurement in power plant coal storage silos and address the issues of electromagnetic interference, temperature fluctuations, and mechanical vibrations affecting traditional millimeter wave radar level meters in complex industrial environments, this paper proposes an improved Infinite Impulse Response (IIR) filter method. By applying IIR filtering to treat the data collected by millimeter wave radar level meters, the filter parameters were designed and optimized to enhance data stability, and compared with actual coal volume measurements for validation. Experimental

收稿日期: 2024-08-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(62173278); 西南大学博士基金项目(SWU120018)。

作者简介: 周云, 高级工程师, 主要从事生产过程自动化研究。

通信作者: 石亚伟, 博士, 副教授。

results show that the accuracy of coal volume data significantly improved after IIR filtering, with error reduced to within 0.145 mm. The measurement accuracy with the proposed method was 67.8% and 42.0% higher than that of traditional binomial fitting and linear Kalman filtering, respectively.

**Key words:** millimeter wave radar level meter; power plant; coal volume monitoring; infinite impulse response filter; anti-interference

随着工业自动化程度的提高和人民生活水平的提升,火力发电凭借其成熟的技术和庞大的装机容量在保障能源供应、支持新能源汽车发展、促进技术创新以及维护电网稳定等方面发挥着不可替代的作用。未来,随着能源结构的进一步优化,火力发电将面临来自新能源发电的竞争与挑战,促使火力发电企业通过技术升级、储能系统集成、智能电网建设等措施不断提升技术管理水平,与新能源发电形成互补,共同推动能源结构的优化和可持续发展。

输配煤系统作为火力发电生产过程中第一个重要环节,其稳定性和可靠性对于电厂的发电效率和安全稳定运行具有决定性影响。然而,输配煤系统在运行过程中由于受到现场粉尘、噪声、振动、温度变化、空间限制等因素的影响,对煤仓物位的计量一直面临着测量难度大、测量不准确等行业传统难题,从而影响发电效率和稳定性,使电厂管理难以做出科学的决策和预测,增加了运营成本。在此背景下,准确测量和控制煤料仓中的煤量显得尤为重要,这不仅直接影响发电厂的燃料管理和生产效率,还关系到安全运营和环境保护,能为实现“双碳”目标做出重要贡献<sup>[1-3]</sup>。

传统的测量技术,如电容式、超声波和激光物位计等<sup>[4-7]</sup>,在复杂的工业环境中表现出局限性,容易受到各种干扰而导致测量精度下降。近年来,毫米波物位计因其非接触式测量的优点,在发电领域逐渐得到广泛应用。毫米波物位计能够在恶劣环境下保持稳定的测量性能,尤其在高温、高湿和粉尘等极端条件下,展现出了良好的适应性。然而,发电设备的电磁辐射干扰、燃料系统的温度波动以及机械设备的振动仍然会对毫米波物位计的测量准确性造成影响。发电设备的电磁干扰会影响毫米波信号的稳定性,导致测量数据波动。温度波动会影响设备的电子元件性能,进而影响测量结果的准确性<sup>[8-10]</sup>。机械振动来源于煤料仓的工作环境,例如输送系统的振动和操作设备的影响,这些振动会导致物位计的安装基座不稳定,从而引起测量误差。为解决这些问题,引入了滤波算法处理,但是传统滤波算法存在很大的局限性。Zhai 等<sup>[11]</sup>提出的均值滤波算法容易受到电磁干扰的影响,导致测量数据不稳定,尤其是在高电磁噪声的环境下。Nosrati 等<sup>[12]</sup>和 Simon<sup>[13]</sup>提出的中值滤波算法在处理快速变化的信号时响应较慢,无法及时反映物位的真实变化,造成滞后和误差。线性卡尔曼滤波算法难以处理非线性噪声<sup>[14-15]</sup>,在复杂环境下,常常需要结合其他处理方法才能达到较好的效果,这极大地增加了计算复杂度,难以满足实时性的要求,尤其是在高频率数据采集的情况下。

为了应对上述挑战,本文提出一种改进的 IIR 滤波器方法,对毫米波物位计的检测数据进行处理。改进后的 IIR 滤波器通过优化滤波器参数,能够有效减少各种干扰因素的影响,显著提高煤量测量的精度和稳定性,对于提高发电厂燃料管理的准确性和效率具有重要意义,以期发电行业的技术进步提供新的思路。

## 1 毫米波物位计工作原理及在煤料仓煤量测量中的应用

### 1.1 毫米波物位计工作原理

毫米波物位计利用高频(通常为 30~300 GHz)电磁波进行测量,这些电磁波具有较短的波长<sup>[16]</sup>,能够穿透大部分非金属材料(如塑料、石英玻璃等),并能在复杂工业环境中稳定工作。毫米波雷达基础上的高精度液/物位测量,一般可采用分段相位差测距算法,为了满足测量高精度的需求,本文对该算法进行了改进,在文献[17]的基础上,设置测距设备发射机发射出的调频连续波信号,如式(1)所示:

$$ST(t) = e^{j\varphi T(t)} = e^{j(2\pi f_0 t + \pi K t^2 + \varphi_0)} \quad (1)$$

式中:  $K = B/T$ ;  $B$  为调制带框;  $T$  为信号调频周期;  $\varphi_0$  为初始相位;  $f_0$  为发射信号的中心频率。

如果将目标距离设定为  $R$ , 那么测距设备接收机所能接收的回波信号如式(2)所示:

$$SR(t - \tau_R) = e^{j(2\pi f_0(t - \tau_R) + \pi K(t - \tau_R)^2 + \varphi_0)} \quad (2)$$

式中:  $\tau_R = 2R/c$  为回波信号的时延;  $c$  为波速。

将发射信号、回波信号进行混频与滤波处理, 从而获得中频输出信号, 如式(3)所示:

$$S_{IF}(t) = e^{j\varphi} e^{j(2\pi ft)} \quad (3)$$

式中:  $f \approx \frac{2K}{c}R - \frac{2f_0}{c}v$  为输出中频信号频率;  $v$  为目标物体相对于发射源的相对发射速度;  $\varphi = \frac{4\pi}{\lambda}R$  为相位;  $\lambda$  为发射信号的波长。

因为液/物位测量中的“液/物位”处于相对静止状态或慢速移动状态, 所以速度项可直接省略, 则频率和相位的表达式如式(4)所示:

$$\begin{aligned} f &= \frac{2K}{c}R = -\frac{R}{R_{\text{res}}} \frac{1}{T} = \frac{R}{R_{\text{res}}} df \\ \varphi &= \frac{4\pi}{\lambda}R \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $R_{\text{res}} = \frac{c}{2B}$  为距离分辨率;  $df = -\frac{1}{T}$  为频谱分辨率。

如果假设采样时间与信号调制周期相等, 那么可根据上述公式, 得出目标距离与输出信号频率密切相关。因此在测距时, 建议通过预估信号频率的方式获得目标距离, 也可采用相位估计信号的方式获得目标距离<sup>[18]</sup>。其中, 需要注意相位发生的变化, 变化周期普遍为  $2\pi$ , 因此无法采用直接测量的方式获得距离数据, 而通过相位变化量获得距离变化量。如果已知初始距离, 也可以获取目标距离的数值。

为了满足高精度液/物位测量的要求, 对传统液/物位测量中采用分段相位差法分段后得到的信号展开  $M$  点进行 FFT 处理, 将其改变为某一频率  $f$  处的幅值  $M_f$ 。在此前提下, 如果  $M_f > M$ , 便需要补零。与此同时, 经过 DFT 处理后得到  $X_1(k)$  和  $X_2(k)$  之间的相位差如式(5)所示:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi &= \text{angle}\left(\frac{X_1(k)}{X_2(k)}\right) = 2\pi(\varphi_2 - \varphi_1) = \\ &= \left[2\pi k_0 \frac{M}{M_f}\right]_{2\pi} = \left[2\pi \hat{k} \frac{M}{M_f} + 2\pi \Delta k \frac{M}{M_f}\right]_{2\pi} \end{aligned} \quad (5)$$

因为  $2\pi \hat{k} \frac{M}{M_f}$  很大概率是非整周期,  $\hat{k}$  是经过最小二乘估计后的值, 所以计算  $X_1(k)$  和  $X_2(k)$  之间的相位差, 便可将其对应的相位数据去除, 获得修正之后的相位差  $\Delta\varphi$ 。

本文中毫米波雷达进行高精度液/物位测量的优势在于: ① 毫米波雷达的天线口径小, 同时具有波束的特点, 所以能够实现高跟踪、低仰角跟踪以及获得高引导精度。将毫米波雷达应用在液/物位测量中, 其抗地面多径与杂波干扰的能力也会得到提升。② 邻近频率雷达、毫米波识别器在运行中, 可以消除相互干扰<sup>[19]</sup>。③ 毫米波雷达多普勒频率高, 即便是慢目标与振动目标, 也依然能够实现不低于 10 mm 的高精度检测。通过目标多普勒频率特性, 识别测量目标特征, 在液/物位测量过程中也能体现出良好的适应性。

## 1.2 毫米波物位计在煤料仓煤量测量中的应用

煤料仓是煤炭储存和管理的重要设备, 准确测量煤料仓中的煤量对煤炭的调度、库存管理、燃料供应等方面至关重要。毫米波物位计在煤料仓中的应用主要体现在以下 4 个方面:

- 1) 实时监测煤量: 毫米波物位计可以连续实时地测量煤面高度, 不受煤粉、湿气等环境因素的影响, 从而提供准确的煤量数据, 这对于自动化控制系统的运行和调度决策具有重要意义。
- 2) 防止超载和缺料: 通过实时监测煤量, 可以有效防止煤料仓超载或缺料情况的发生, 这对于保障设备的安全运行和生产线的正常运转至关重要。
- 3) 数据记录与分析: 毫米波物位计能够提供稳定的测量数据, 这些数据可以用于煤量的历史记录和趋势分析。通过分析这些数据, 能够优化煤炭的使用策略, 降低生产成本, 提高资源利用效率。

4) 优化库存管理: 准确的煤量测量能够帮助企业优化库存管理, 减少煤炭库存的积压或短缺, 从而提高仓储效率, 降低库存成本。

在煤料仓煤量测量中, 毫米波物位计具有以下优点: ① 不与煤炭直接接触, 避免了因接触引起的磨损和损坏。② 对粉尘、温度变化和恶劣天气具有较强的适应能力, 能在复杂的工业环境中稳定工作。③ 相比于其他类型的物位计, 毫米波物位计具有更高的测量精度, 特别适用于测量精度需求较高的场合。④ 毫米波信号传输速度快, 测量结果的响应时间短, 适用于需要实时监测的场合。

然而, 发电设备的电磁辐射干扰、燃料系统的温度波动以及机械设备的振动仍然会对毫米波物位计的测量准确性造成影响。为克服这些挑战, 提高测量精度, 本文提出使用 IIR 滤波器对毫米波物位计的数据进行处理。IIR 滤波器能够有效滤除高频干扰信号和噪声, 提高测量数据的稳定性和准确性。通过应用毫米波物位计, 并结合 IIR 滤波器的数据处理方法, 能够实现煤料仓内煤量的高精度测量, 从而优化工业生产控制 and 安全管理。

## 2 IIR 滤波器的设计

IIR 滤波器是一种常用的数字滤波器, 因其能实现较高的滤波精度, 且结构简单而被广泛应用。IIR 滤波器的设计过程包括选择适当的滤波器类型、设计滤波器系数, 以及实现滤波器的应用。本文将详细描述 IIR 滤波器在处理煤料仓煤量测量数据中的设计与实现, 包括模拟系统函数  $H(s)$  的设计、数字滤波器系统函数  $H(z)$  的设计, 以及滤波器阶数的选择与数学公式推导。

### 2.1 滤波器的选择

根据煤料仓煤量测量数据的特点和所面临的干扰类型(电磁干扰、温度波动、机械振动), 选择适合的 IIR 滤波器类型。常用的 IIR 滤波器类型包括 Butterworth 滤波器、Chebyshev 滤波器、椭圆滤波器等<sup>[20]</sup>。Butterworth 滤波器具有平坦的通带响应, 且过渡带较宽<sup>[21]</sup>; Chebyshev 滤波器的通带或阻带有波纹, 可以获得较窄的过渡带; 椭圆滤波器的通带和阻带都有波纹, 但过渡带最窄<sup>[22]</sup>。考虑到需要在电磁干扰、温度波动和机械振动的条件下实现平滑的煤量测量数据, 本文选择 Butterworth 滤波器用于设计和实现。

### 2.2 滤波器参数设计以及阶数设计

根据采样频率和干扰频率范围, 设计适当的滤波器参数。已知数据采样频率为 1 Hz, 因此 Nyquist 频率为 0.5 Hz。根据经验和实际情况, 设定滤波器的截止频率  $\omega_c$  为 0.01 Hz, 以滤除高频干扰。滤波器的阶数影响其性能, 较高的阶数通常能实现更陡峭的过渡, 但会增加计算复杂度。考虑到计算效率和滤波效果, 最终选择 4 阶的 Butterworth 滤波器。

### 2.3 系统函数设计

4 阶 Butterworth 滤波器模拟系统函数  $H(s)$  的传递函数如式(6)所示:

$$H(s) = \frac{\omega_c^2}{(s^2 + \sqrt{2}\omega_c s + \omega_c^2)^2} \quad (6)$$

式中:  $s$  为复频域变量;  $\omega_c$  为截止频率;  $n$  为滤波器阶数。

将  $\omega_c = 0.01$  Hz 代入式(6)得到式(7):

$$H(s) = \frac{0.0001}{(s^2 + 0.01414s + 0.0001)^2} \quad (7)$$

双线性变换的表达式为:

$$s = \frac{2}{T} \times \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \quad (8)$$

式中:  $T$  为采样周期。

应用双线性变换, 将  $S$  域传递函数  $H(s)$  转换为  $Z$  域传递函数  $H(z)$ , 如式(9)所示:

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + b_3 z^{-3} + b_4 z^{-4}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + a_3 z^{-3} + a_4 z^{-4}} \quad (9)$$

从式(9)可以得到数字滤波器的差分方程形式, 如式(10)所示:

$$y[n] = b_0x[n] + b_1x[n-1] + b_2x[n-2] + b_3x[n-3] + b_4x[n-4] - a_1y[n-1] - a_2y[n-2] - a_3y[n-3] - a_4y[n-4] \quad (10)$$

式中:  $x[n]$  为输入信号;  $y[n]$  为输出信号。

通过对煤料仓内不同时间点的测量数据进行处理, 可以发现该 IIR 滤波器能够有效减少电磁干扰、温度波动和机械振动对测量结果的影响, 使得毫米波物位计的测量数据更加接近实际煤量。

### 3 滤波器实现

本文以发电厂加煤过程采集的数据为例, 对毫米波物位计采集到的加煤过程数据进行滤波处理, 使得处理后的数据更加平滑并接近真实值, 以此更好地控制煤量发电。针对发电厂采集到的数据, 采用二项式拟合、卡尔曼滤波、IIR 滤波 3 种不同的滤波方式对数据进行处理, 通过对滤波之后的处理效果进行对比, 选择最佳的滤波方式。

#### 3.1 系统整体流程

毫米波物位计用于煤料仓中煤量数据的采集, 如图 1 所示。首先以 1 Hz 的采样频率采集原始数据, 原始数据中可能包含噪声和异常值, 因此需要进行初步的数据预处理, 包括去除明显的噪声和异常值, 以及对数据进行平滑处理。预处理后的数据更加稳定, 为后续滤波器的应用做好准备。

系统整体流程如图 2 所示。由图 2 可知, 数据处理后选择适合煤量数据的 IIR 滤波器类型, 确定滤波器的阶数以及截止频率。在选择好滤波器之后通过编写程序实现数字滤波器, 将采集的煤量数据通过滤波器进行滤波处理, 去除高频噪声, 平滑数据, 使其更接近真实值。分析比较滤波前后的数据, 验证滤波器的性能和效果。通过计算误差和其他指标, 确保滤波后的数据满足预期要求。最后输出经过滤波处理后的数据, 用于系统控制燃料供给。



图 1 毫米波物位计实物图

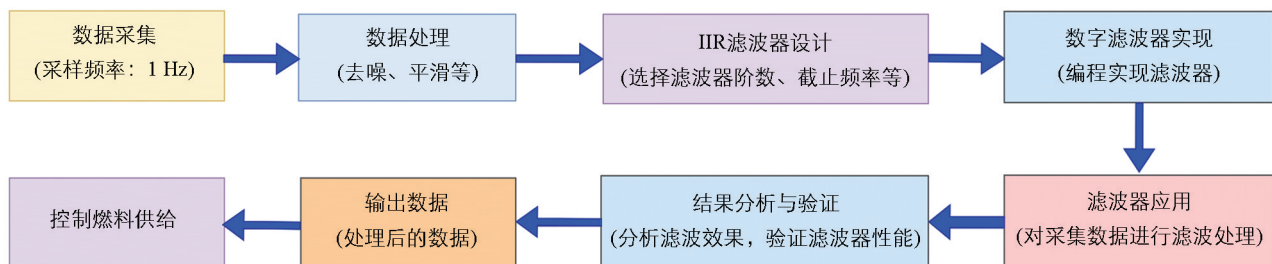


图 2 系统整体流程

#### 3.2 二项式拟合

使用二项式拟合的目的是使物位计采集到的数据经过滤波后更加接近真实值。由于加煤速度总体是固定的, 所以理论上物位计采集到的数据是平滑的, 因此采用二次二项式模型进行拟合。为了更加符合实际应用场景, 将滑动窗口大小设置为 20 s, 并且每次滑动 1 格, 进行拟合的窗口分别为 1~20 s、2~21 s、3~22 s、……, 依次类推。采集的真实数据并进行二项式拟合的效果如图 3 所示。

由图 3 可以看出, 原始数据有较大的波动和噪声, 特别是在样本点较多的区域(如 100~200 s 和 250~300 s)更加明显。随着样本点的增加, 使用固定大小为 20 的窗口对物位计采集到的煤量数据进行滤波, 其效果相较于物位计采集到的数据更加平滑, 但仍然存在较多毛刺。原始数据经过二项式拟合滤波处理之后

仍保留了原始数据的总体趋势。在样本点较少的区域(如 0~50 s 和 350 s 之后),拟合曲线较为平滑,说明二项式拟合在这些区间能有效降低噪声;在样本点较多且波动较大的区域(如 100~200 s 和 250~300 s),拟合曲线基本跟随了原始数据的变化,且仍能平滑一些高频噪声。总体而言,滑动窗口二项式拟合有效地平滑了物位计采集到的数据,降低了噪声,使得数据的整体趋势更加明显,但仍存在比较明显的波动,不能有效应用于实际场景,因此不宜采用二项式拟合的方式作为最终物位计数据滤波处理的办法。

图 3 中二项式拟合效果不佳,主要由 2 个方面的原因造成,即滑动窗口大小和拟合多项式阶数。首先,滑动窗口的大小直接影响拟合效果。窗口过大会导致平滑效果过强,丢失数据的细节,窗口过小则无法有效平滑噪声,因此找到合适的窗口大小是一个关键问题。其次,拟合多项式的阶数决定了拟合曲线的复杂度和灵活性。低阶多项式可能无法捕捉数据的复杂变化,而高阶多项式可能会引入过拟合问题,导致对噪声的过度敏感。

### 3.3 卡尔曼滤波

卡尔曼滤波是一种递归算法,广泛应用于动态系统的状态估计中。它通过预测和更新 2 个阶段,结合系统模型和观测数据,提供最优的状态估计。使用文献[23]中卡尔曼滤波的方法对毫米波物位计采集到的数据进行滤波后,得到如图 4 所示的结果。红色曲线显示了经过卡尔曼滤波后的数据,整体也呈现上升趋势,但曲线更加平滑。可以看出卡尔曼滤波显著减少了原始数据中的噪声,使得数据曲线更加平稳,更能反映实际物位的变化趋势。从样本点 200 s 以后可以看出,卡尔曼滤波后的数据与原始数据的差异逐渐减小,表明在该区域数据波动较小,滤波效果稳定。总体而言,通过卡尔曼滤波处理,物位数据的波动得到了显著减少,数据曲线更加平滑,便于后续分析和处理。

虽然卡尔曼滤波能得到一个比较平滑的结果,但是由图 4 可以明显地看出 50~200 s 的滤波数据与原始数据相差较大,滤波后的数据在采集到的真实数据下方,其原因在于系统噪声和测量噪声的建模方面。由于卡尔曼滤波的复杂度较高,如果噪声模型不准确,滤波效果会大打折扣。此外,初始状态的选择也会影响滤波的收敛速度和精度,因此也不宜在毫米波物位计上采用卡尔曼滤波。

### 3.4 IIR 滤波

IIR 滤波器是一种数字滤波器,其输出不仅依赖于当前和过去的输入信号,还依赖于过去的输出信号。IIR 滤波器使用递归计算方式,通过反馈机制将过去的输出信号作为当前输出计算的一部分。由于反馈机制的存在,不恰当的系数选择可能导致滤波器的不稳定性。按照 2.2 节的结论,本文选择 4 阶 Butterworth 低通滤波器对物位计采集的数据进行处理。

图 5 展示了毫米波物位计数据经过 2 阶 IIR 滤波器处理后的效果,其中蓝色曲线表示原始数据,红色曲线表示经过 2 阶 IIR 滤波器处理后的数据。可以观察到,经过滤波处理后,红色曲线明显更加平滑,原始数据中的高频噪声得到了有效抑制。由于采样频率为 1 Hz,截止频率为 0.1 Hz,滤波器成功地将高

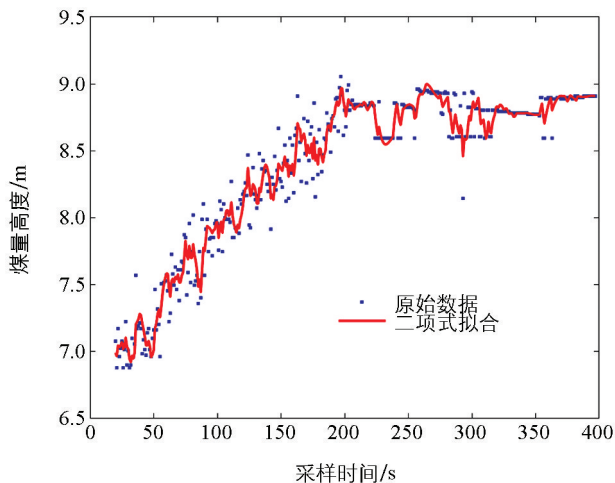


图 3 二项式拟合效果

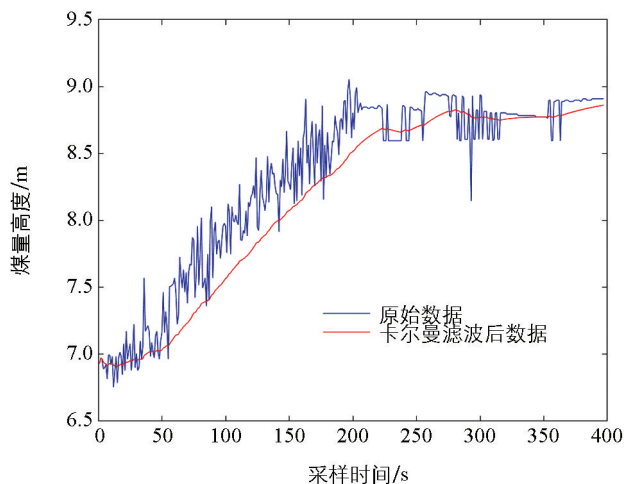


图 4 卡尔曼滤波效果

于 0.1 Hz 的频率成分滤除, 从而保留了低频的物位变化趋势。这种平滑效果使得数据的整体趋势更加明显, 有助于后续的数据分析和处理。然而, 滤波后的数据在样本点 300 s 附近存在一些较大波动, 表明 IIR 滤波器在处理突变或异常点时的响应速度较慢。虽然总体上滤波效果显著, 但是在样本点 200 s 之后存在较大的波动, 这也是 IIR 滤波器实际应用中存在的问题。

基于上述设计的 2 阶滤波处理中存在的问题, 尝试使用 4 阶和更高阶的 IIR 滤波器进行处理, 4 阶 IIR 滤波器的处理结果如图 6 所示。由图 6 可以看出, 在样本点 200 s 之后也存在平滑效果一般的情况, 因此一直增加 IIR 滤波器的阶数对于毫米波物位计的数据处理作用并不明显, 反而会增加计算的复杂度。

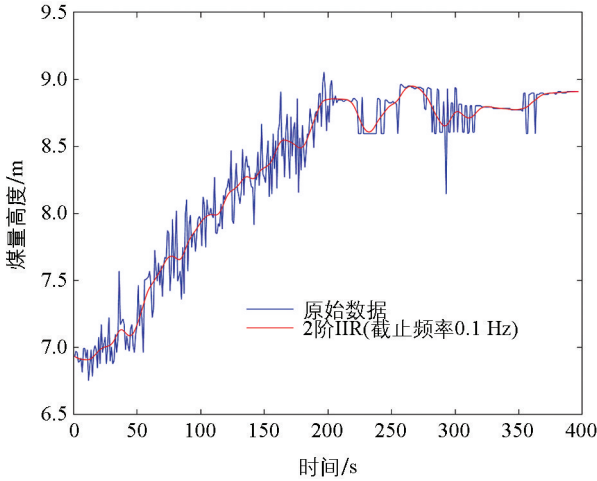


图 5 2 阶 IIR 滤波(截止频率 0.1 Hz)

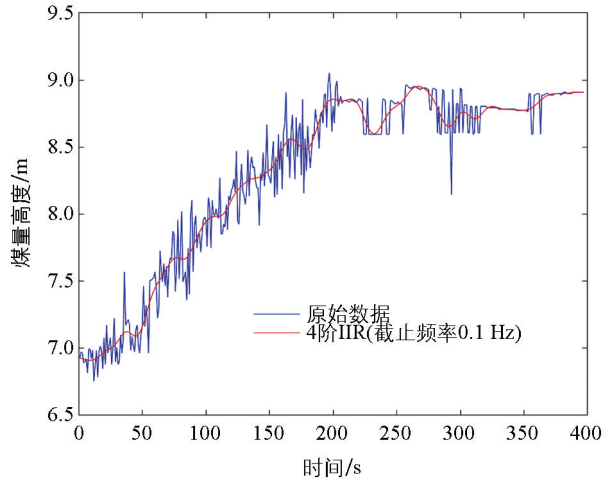


图 6 4 阶 IIR 滤波(截止频率 0.1 Hz)

基于上述观点, 将滤波器阶数固定在 4 阶, 然后通过改变截止频率的大小来调整滤波器处理的效果。将截止频率改为 0.01 Hz 后的结果如图 7 所示。由图 7 可以看出, 原始数据中包含了大量高频噪声, 波动较大。经过 4 阶 IIR 滤波器(截止频率 0.01 Hz)处理后, 滤波数据明显更加平滑, 去除了大部分高频噪声, 这表明 IIR 滤波器在抑制噪声方面效果显著。不仅滤波后的数据更加平滑, 其整体趋势与原始数据也基本一致, 这表明 4 阶 IIR 滤波器在消除噪声的同时, 较好地保留了原始信号的低频成分和主要趋势。数据呈现出的平滑趋势也能更好地反映出物位的变化趋势, 而不受高频噪声的干扰, 这为后续的处理与分析提供了更为准确和可靠的数据基础。

图 8 是 3 种方法滤波后的效果比较, 从图中可以明显地看出, 当截止频率设置为 0.01 Hz 时, 4 阶 IIR 滤波器的滤波效果最好。表 1 展示了 3 种滤波方法的测量误差比较, 可以看出 4 阶 IIR 滤波器处理之后的最大测量误差仅有 0.145 mm, 相比二项式拟合和卡尔曼滤波的方法, 测量精度分别提高了 67.8% 和 42.0%。

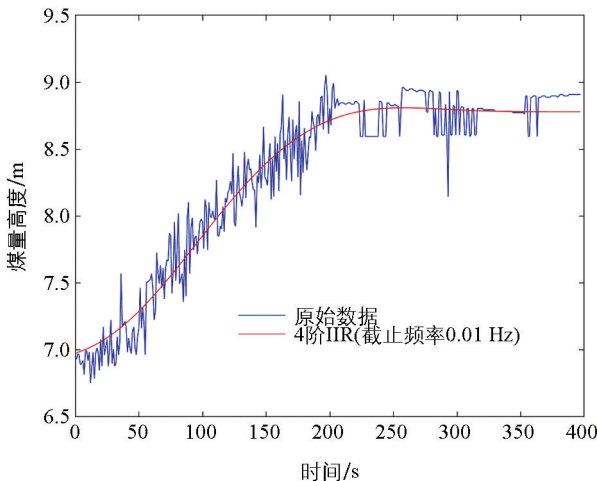


图 7 4 阶 IIR 滤波(截止频率 0.01 Hz)

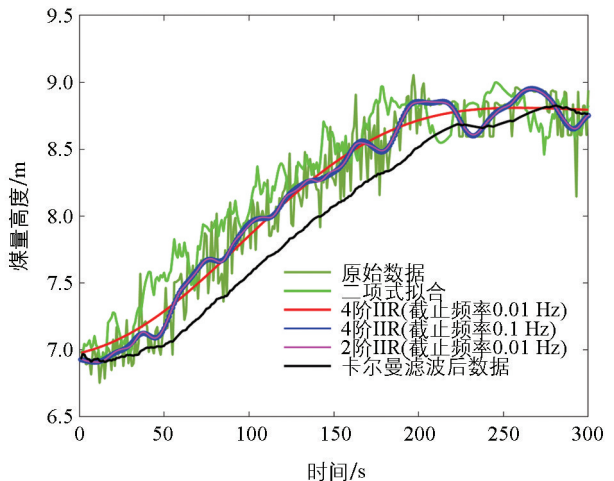


图 8 不同方法滤波效果比较

表 1 误差比较表

滤波方法	平均测量误差/mm	最大测量误差/mm	最小测量误差/mm
4 阶 IIR( $\omega_c = 0.01$ Hz)	0.05	0.145	0.02
二项式拟合	0.20	0.450	0.10
卡尔曼滤波	0.10	0.250	0.05

总之,不同滤波方法在处理物位数据时表现出的性能差异主要源于各自算法的特点及其对噪声和信号的处理能力。卡尔曼滤波算法复杂度高,但滤波效果显著;二项式拟合能平滑数据,但在高频噪声较大的情况下效果有限;IIR 滤波器在综合考虑复杂度和滤波效果的情况下,是处理物位数据的优选方法。

表 2 给出了使用 4 阶 IIR 滤波处理毫米波物位计采集的数据结果。检测物位高度与实际物位高度之间的误差值范围在 $-4\sim 4$  mm 之间,其中最大误差值的绝对值为 4 mm,发生在序号 2、3、5 的数据点,这可能是检测环境中的干扰因素造成的。但由于误差值较小,表明 IIR 滤波器有效地减弱了这些干扰。误差比(误差值与实际物位高度之比)均在 $\pm 0.20\%$ 以内,误差比的绝对值最小为 $0.02\%$ ,最大为 $0.20\%$ ,这显示了检测系统在不同物位高度下的稳定性,且误差与物位高度之间并没有明显的线性关系。

表 2 误差测量表

序号	实际物位高度/mm	检测物位高度/mm	误差值/mm	误差比/%
1	1 340	1 342	-2	-0.15
2	1 985	1 981	4	0.20
3	2 331	2 335	-4	-0.17
4	4 865	4 866	-1	-0.02
5	7 275	7 279	-4	-0.05

通过使用 4 阶 IIR 滤波器处理毫米波物位计的数据,测量误差显著降低。实验数据表明,经过滤波处理后,误差值保持在 $\pm 4$  mm 范围内,误差比在 $\pm 0.20\%$ 范围内,这种高精度的物位监测对于发电厂的燃料管理和供应链优化至关重要。通过减少误差,提高物位测量的准确性,可以更好地控制燃料供应,避免资源浪费,并确保发电过程的稳定性和安全性。

## 4 结论

本文研究了一种适用于发电厂复杂环境下的毫米波物位计抗干扰方法,通过引入 IIR 滤波器,对煤料仓内的物位检测数据进行处理,大幅提升了测量精度和系统的抗干扰能力。实验表明,该方法有效克服了电磁干扰、温度变化和机械振动等因素造成的影响,将测量误差控制在 $0.145$  mm 以内,与传统滤波方法相比,测量精度显著提升。研究表明,IIR 滤波器不仅能够提高发电厂中煤量监测的可靠性,还为发电过程的精细化管理提供了重要的数据支持。通过提高物位测量的准确性,优化了燃料供给,降低了发电成本,提升了发电效率与安全性,为实现“双碳”目标助力。

尽管本文提出的 IIR 滤波方法在实验中取得了较好的效果,但仍然存在一些局限性。例如,IIR 滤波器的设计与优化过程需要根据具体应用场景进行调整,这可能导致在不同的发电厂环境中需要重新设计滤波器参数。在未来,还可以探索毫米波物位计与其他传感技术的融合,开发更加智能和多功能的监测系统,以满足未来工业生产中更高的测量需求。

## 参考文献:

- [1] 张全斌,周琼芳.基于“双碳”目标的中国火力发电技术发展路径研究[J].发电技术,2023,44(2):143-154.
- [2] 张安安,周奇,李茜,等.“双碳”目标下火电厂 $\text{CO}_2$ 计量技术研究现状与展望[J].发电技术,2024,45(1):51-61.
- [3] 吴兆娟,周霖,杨小玲,等.“双碳”目标下低碳农业技术发展应用条件评价及路径研究[J].西南大学学报(自然科学版),2024,46(7):71-83.

- [4] 李伟, 王鑫, 刘雨, 等. 基于 Thompson-Lampard 定理的交叉电容式油液检测传感器 [J]. 航海技术, 2024(4): 59-64.
- [5] 李彦霖, 秦本科, 何雯, 等. 弧板型电容式鼓位探测器的结构设计方法研究及特性分析 [J]. 原子能科学技术, 2024, 58(11): 2355-2362.
- [6] 常青, 杨晓明. 管道内天然气流态对时差法超声波流量计测量准确性影响的分析 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(12): 112-114.
- [7] DIAKOV D I, NIKOLOVA H N, VASSILEV V A. Laser Measurement System with the Laser Beam Instability Compensation [C] //2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL), September 6-8, 2019, Sozopol, Bulgaria. IEEE, 2019: 368-370.
- [8] 王昆, 吴翠, 李佳静. 电学计量中低阻值电阻测量的技术优化与不确定度分析 [J]. 技术与市场, 2025, 32(6): 84-87.
- [9] 张有锋, 郑运鸿, 戴冬云, 等. 温度对电子式电压互感器测量精度的影响研究 [J]. 高压电器, 2022, 58(6): 221-227, 236.
- [10] 周国清. 电子设备中基于接地与屏蔽的电磁兼容性设计 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2014, 36(8): 185-188.
- [11] ZHAI L, HU G X, SONG C, et al. Comparison of Two Filter Design Methods for Conducted EMI Suppression of PMSM Drive System for Electric Vehicle [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(7): 6472-6484.
- [12] NOSRATI M, KARIMI R. Detection of Circular Shapes from Impulse Noisy Images Using Median and Laplacian Filter and Circular Hough Transform [C] //2011 8th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control. October 26-28, 2011, Merida City, Mexico. IEEE, 2011: 1-5.
- [13] SIMON D. Optimal State Estimation: Kalman, H Infinity, and Nonlinear Approaches [M]. New York: John Wiley & Sons, 2006.
- [14] LING Q H, IKBAL M A, KUMAR P. Optimized LMS Algorithm for System Identification and Noise Cancellation [J]. Journal of Intelligent Systems, 2021, 30(1): 487-498.
- [15] THEODORIDIS S, CHELLAPPA R. Academic Press Library in Signal Processing, Volume 3: Array and Statistical Signal Processing [M]. New York: Academic Press, 2013.
- [16] 何健. 基于电磁波透视技术的煤矿隐伏地质构造识别方法分析 [J]. 凿岩机械气动工具, 2025, 51(8): 140-142.
- [17] 朱劲, 王剑锋, 陈昱, 等. 实孔径毫米波雷达的边坡变形监测能力分析 [J]. 人民长江, 2023, 54(12): 147-155.
- [18] 庄天海, 张轩轩, 刘志钢, 等. 基于毫米波雷达的高精度液位测量方法 [J]. 电子世界, 2020(21): 118-122.
- [19] 陈龙, 杨冬冬, 李泉新, 等. 煤矿井下钻孔测量技术研究现状及发展趋势 [J/OL]. 煤田地质与勘探, (2025-09-17) [2025-09-21]. <https://link.cnki.net/urlid/61.1155.P.20250916.0840.002>.
- [20] 李晴晴, 汤振华, 姜艳娜, 等. 基于椭圆逼近算法的低通 IIR 滤波器设计与实现 [J]. 制导与引信, 2021, 42(1): 1-5.
- [21] 陈胜利, 杨焕凤. 电动助力转向器的扭矩测试滤波问题研究 [J]. 机电产品开发与创新, 2025, 38(3): 127-131.
- [22] 卓群忠. 椭圆函数在滤波器上的应用 [J]. 科技创新与应用, 2021, 11(29): 26-28, 31.
- [23] 汤爱华, 刘尚梅, 邹航, 等. 基于变分贝叶斯无迹卡尔曼滤波 SOC 估计 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(12): 51-59.

责任编辑 柳剑

