

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2313149

# 基于分段包络线抑制端点效应的 EMD 动态称重算法\*

李建鑫<sup>1</sup> 郭晨霞<sup>2</sup> 杨瑞峰<sup>2</sup> 柴世豪<sup>1</sup>

(1.新疆政法学院信息网络安全学院 图木舒克 843806; 2.中北大学仪器与电子学院 太原 030051)

**摘要:**在对牲畜进行无应激的动态称重时,针对动态称重信号非平稳的特点,选用 EMD 算法进行处理。为了解决 EMD 分解信号过程中的端点效应,提出改进的基于分段包络线抑制端点效应的 EMD 算法。该算法首先利用最小二乘法延拓端点,然后将包络线分为:极值点内部段、延拓点与极值点段,通过在极值点间使用三次样条插值构造极值点内部端,通过依据二阶导数连续条件将延拓点与极值点连接构造延拓点与极值点段。这样在有效抑制端点效应的同时,还能减少延拓端点引入的误差。实验结果表面,牲畜的动态称重信号经所提算法处理后与真实的体重数据进行比较,相对误差平均值为 0.21%,最大值为 0.33%,说明所提算法应用于动态称重,有很好的精度与稳定性。

**关键词:** 动态称重;经验模态分解(EMD);端点效应;三次样条插值

**中图分类号:** TP274 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

## Dynamic weighing algorithm of EMD based on segmented envelope fitting endpoint effect

Li Jianxin<sup>1</sup> Guo Chenxia<sup>2</sup> Yang Rui Feng<sup>2</sup> Chai Shihao<sup>1</sup>

(1. School of Cyber Engineering, Xinjiang University of Political Science and Law, Tumushuke 843806, China;

2. School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** When the livestock is weighed dynamically, the EMD algorithm is selected for processing according to the non-stationary characteristics of the dynamic weighing signal. In order to solve the endpoint effect in the process of EMD decomposition signal, an improved EMD algorithm based on segmented envelope fitting endpoint effect is proposed. The algorithm first uses the least squares method to extend the endpoints, and then divides the envelope into the internal segments, extension points and extreme point segments, constructs the inner end of the extreme point by using cubic spline interpolation between the extreme points, and constructs the extension point and the extreme point segment by connecting the extreme point and the extension point according to the continuous condition of the second derivative. This effectively simulates the endpoint effect while reducing the error introduced by the extension endpoint. The experimental results show that the average relative error of the proposed algorithm is 0.21% and the maximum value is 0.33% after comparing the dynamic weighing signal of livestock processed by the proposed algorithm with the real weight data, indicating that the proposed algorithm has good accuracy and stability when applied to dynamic weighing.

**Keywords:** dynamic weighing algorithm; empirical mode decomposition; endpoint effects; cubic spline interpolation

## 0 引 言

畜牧业现代化要求牲畜饲养采用智能化、精细化的方式,以达成更好的肉饲比,提高经济效益。实现牲畜精细化饲养的关键是能够实时获得每只牲畜的体重信息<sup>[1]</sup>。传统

的牲畜静态称重方式人力消耗大、效率低、且会对牲畜造成应激伤害,因此必须采用无应激的动态称重<sup>[2]</sup>。

对牲畜的动态称重通常采用由称重台面和围栏组成的称重通道,在牲畜自然行走经过称重台面的过程中获得一组称重信息。然而动态称重信号中含有牲畜行进造成的大

收稿日期:2023-03-20

\* 基金项目:山西省重点研发计划(201903D121118)、中北大学与新疆政法学院合作校长基金(XZZK2021006)项目资助

的波动,简单的平均值滤波、中值滤波的处理结果存在较大的误差<sup>[1,2]</sup>。已知牲畜的动态称重信号为非平稳信号。相较于短时傅里叶变换<sup>[3]</sup>、小波去噪<sup>[4]</sup>等非平稳信号处理算法,经验模态分解算法(empirical mode decomposition, EMD)对非平稳信号具有很强的自适应性,可依据信号本身的时间尺度特征筛分信号中的高频成分与低频成分<sup>[5-6]</sup>,因此更适合用来处理动态称重信号。如文献[2]采用 EMD 对肉牛进行无应激的动态称重,取得了较高的精度,然而由于没有对 EMD 端点效应进行处理,造成稳定性较差。常见的抑制 EMD 端点效应的方法有:基于镜像延拓端点、基于波形匹配方法延拓端点<sup>[7]</sup>、基于信号端点处局部特征延拓端点<sup>[8]</sup>等。如文献[7]采用基于自适应序贯相似性检测波形的匹配延拓算法抑制 EMD 端点效应,通过实验说明稳健性较强,然而波形匹配延拓对信号的周期性要求较高,动态称重信号周期性较差,难以在信号内部找到和端点处相似的信号进行拓展;文献[8]采用了基于局部多项式回归的方法抑制 EMD 端点效应,分解精度较高,运行速度快,然而该方法过于关注信号的局部特征,动态称重信号在端点处的局部特征随机性较大,该延拓方法会引入较大误差。

本文在 EMD 的基础理论上进一步研究,主要研究适用于牲畜动态称重的 EMD 的端点效应抑制方法,提出基于分段包络线抑制端点效应的 EMD 动态称重算法。该方法首先将信号的极大值与极小值分别进行最小二乘拟合来延拓端点,然后将包络线分为:极值点内部段、延拓点与极值点段。先在极值点间使用三次样条插值构造极值点内部段,再依据二阶导数连续条件将极值点与延拓点连接构造延拓点与极值点段。在抑制包络线发散的同时,保证延拓端点后极值点间的包络线与延拓端点前相同,以减少延拓点引入的误差对最终分解出的体重数据精度的影响。本文利用动态称重系统,采集多组牲畜行进过程中的称重信号用所提算法进行处理,然后将相对误差与常用的动态称重信号处理算法进行比较,探究所提算法在精度方面的优势。

### 1 动态称重信号的获取

牲畜动态称重信号的获取采用集成了称重平台、自动防夹开关门、身份识别模块等的智能称重系统<sup>[9]</sup>,系统框图如图 1 所示。

称重平台为一个在 4 个角安装了压力传感器的台面,压力传感器的信号经电压输出变送器转换为标准电压信号,再经工控机处理得到称重平台当前承载的瞬时压力。自动开关门由摄像机和光电防夹传感器共同控制。射频识别(radio frequency identification, RFID)电子读卡板通过读取牲畜的电子耳标获取牲畜身份,用于上位机将体重数据存储在对应的牲畜信息中。称重平台在牧场里结合围栏组成一个单向的称重通道,如图 2 所示。

动态称重过程为当摄像头识别到单只牲畜完全行走

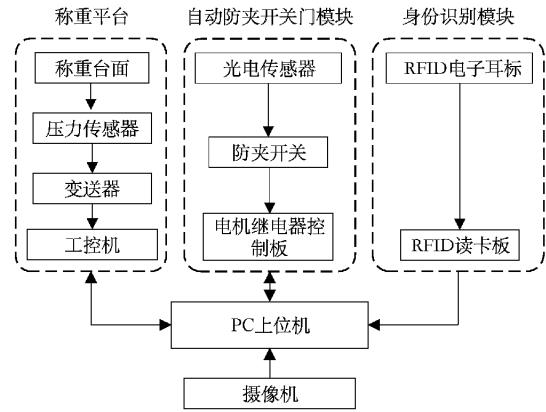


图 1 称重系统框图

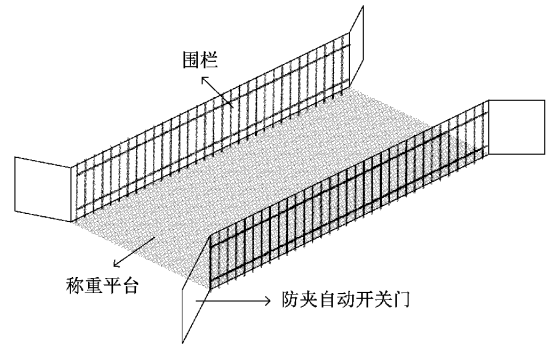


图 2 称重通道示意图

称重台面上时,控制入口门关闭,同时工控机开始读取并记录称重平台所测量的动态称重数据,直到摄像头识别到牲畜到达称重平台尽头时停止记录。在称重通道的终点位置安装 RFID 耳标读卡板,通过读取耳标进行身份识别,动态称重数据经过处理后将存储在对应的牲畜信息中。当摄像头识别到牲畜完全走下称重台面时,入口门打开,等待下一只牲畜进入。

牲畜在经过称重通道时,其行进会对称重台面产生额外的压力,引起称重平台的振动,造成动态称重信号大范围地波动,如图 3 所示。简单的中值滤波、均值滤波等无法有效消除误差,因此必须对动态称重信号的处理方式进行进一步研究。

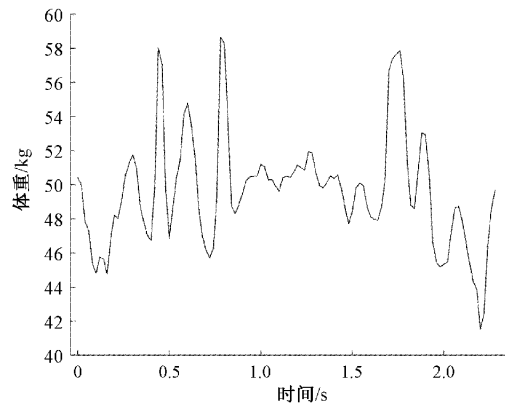


图 3 牲畜的动态称重信号

## 2 EMD 经验模态分解算法

由图3可知动态称重信号的波动为随机波动,呈现非平稳的特点。常用的非平稳信号处理方法有:短时傅里叶变换、小波变换、EMD等。短时傅里叶变换的实质是在傅里叶变换的基础上加了可移动的时间窗,因此处理效果受制于窗函数的形状与宽度<sup>[10]</sup>。在实际的工程应用中需要手动设置窗函数,处理效果受人为因素影响较大。小波变换的实质是一种可变窗的傅里叶变换<sup>[11]</sup>,但是它与短时傅里叶变换一样,需要手动选择小波基,同样缺乏对处理信号的自适应性。而EMD是一种针对非平稳信号的无需人为设置参数的自适应处理方法,EMD认为信号是由一系列不同频率的高频成分、中频成分、低频成分叠加而成。而频率可以看作是信号的振荡剧烈程度,在时域中反映为信号的极值点信息<sup>[12]</sup>。因此可利用信号的极值点信息,将信号中的高频成分不断筛分出来。筛分出的高频成分被称为本征模态函数(intrinsic mode function, IMF),IMF需满足两个准则:一是零点与极值点数目相差最多不超过一个;二是上下包络线的均值为零<sup>[12]</sup>。最终信号被分解为若干IMF以及不可再分的单调剩余分量,如式(1)所示。

$$u(t) = \sum_{i=1}^n imf_i(t) + r(t) \quad (1)$$

式中: $imf_i(t)$ 为一系列的IMF, $r(t)$ 为单调剩余分量,代表信号的趋势。

EMD分解信号的流程如下<sup>[13]</sup>:

步骤1)令 $r_i(t) = u(t)$ , $u(t)$ 为输入信号, $r_i(t)$ , $(i = 1, 2, \dots, n)$ 表示第 $i$ 个剩余分量;

步骤2)令 $h_k(t) = r_i(t)$ , $h_k(t)$ , $(k = 1, 2, \dots, n)$ 表示第 $k$ 个待分解后进行IMF准则判断的信号;

步骤3)找到信号 $h_k(t)$ 的局部极大值点和极小值点;

步骤4)采用三次样条曲线分别将极大值点、极小值点插值连接,得到信号 $h_k(t)$ 的上、下包络线,并进行平均运算,得到平均包络;

步骤5)令 $k = k + 1$ ,用信号 $h_{k-1}(t)$ 减去平均包络,得到 $h_k(t)$ ,判断 $h_k(t)$ 是否满足IMF的两个准则,若不满足,返回步骤3),若满足,则记 $imf_i(t) = h_k(t)$ , $imf_i(t)$ , $(i = 1, 2, \dots, n)$ 表示第 $i$ 个IMF;

步骤6)令 $i = i + 1$ ,并计算新的剩余分量 $r_i(t) = r_{i-1}(t) - imf_{i-1}(t)$ ,判断 $r_i(t)$ 是否为单调的趋势项,若不是,返回步骤2),若是,算法结束。

## 3 基于分段包络线方法抑制EMD端点效应

### 3.1 EMD的端点效应

EMD算法需要利用信号的局部极值点进行三次样条插值构造包络线,如果对信号的两端不做专门处理,会产生端点效应,即:插值的三次样条存在插值范围之外的曲线段,造成包络线的两端向外发散,进而导致IMF两端剧烈

波动。如图4所示为构造动态称重信号的包络线时的端点效应。包络线发散引入的误差会随着筛分IMF的过程逐渐向内传播,从而对静态余量精度造成严重影响。因此,必须对EMD的端点效应进行抑制。

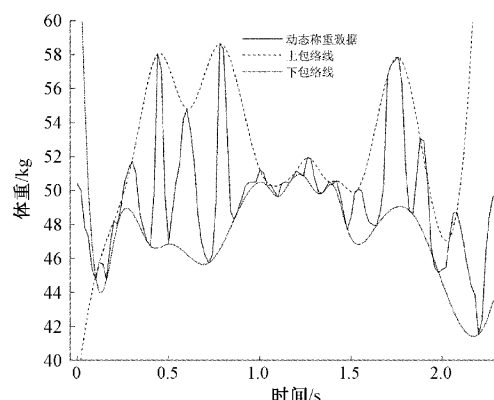


图4 EMD的端点效应

动态称重信号具有持续时间较短、频率较低、无周期性的特点。且动态称重所关注的是EMD筛分出高频信号后的静态余量的精度。为此本文提出基于分段包络线抑制端点效应的EMD的牲畜动态称重算法。该方法主要分为两步:第1步是延拓端点,第2步是分段构造包络线。

### 3.2 延拓端点

将动态称重信号的局部极大值与极小值分别进行最小二乘拟合,将拟合直线在端点处的取值作为延拓点,确保信号的整体趋势不变<sup>[14]</sup>。

设拟合方程为 $y = ax + b$ ,拟合条件为待拟合的点在 $y$ 轴方向上距离直线最短,即:

$$f(a, b) = \sum_{i=1}^n (ax_i + b - y_i)^2 \quad (2)$$

式(2)中 $(x_i, y_i)$ 是待拟合点,要取其最小值,先对式(2)求偏导得:

$$\begin{cases} \frac{\partial f(a, b)}{\partial a} = 2 \sum_{i=1}^n (ax_i + b - y_i)x_i \\ \frac{\partial f(a, b)}{\partial b} = 2 \sum_{i=1}^n (ax_i + b - y_i) \end{cases} \quad (3)$$

令偏导为零,整理得:

$$\begin{cases} a = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2} \\ b = \bar{y} - a \bar{x} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中 $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 分别为所有待拟合点的 $x$ 坐标、 $y$ 坐标的平均值。

对图3中动态称重信号的极值点进行延拓,如图5所示。

### 3.3 分段包络线

分段构造包络线是指将包络线分为两段:极值点内部

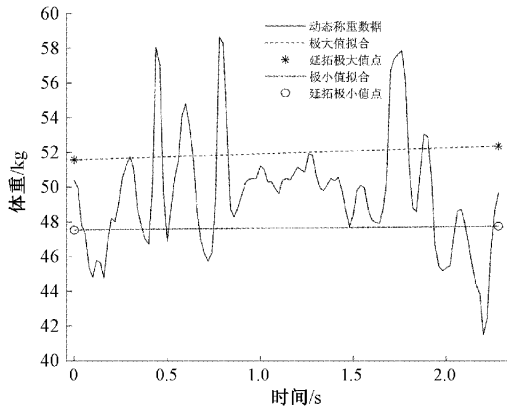


图 5 最小二乘拟合生成延拓点

段、延拓点与极值点段。先使用三次样条在极值点间进行插值,生成覆盖极值点的包络线;再使用三次样条在延拓点和极值点之间进行插值,同时保证两段包络线之间二阶导数连续。这样就有了覆盖整个信号的包络线。

首先是对极值点内部段进行插值,设信号的局部极大值为:  $(x_i, y_i), (i=0, 1, \dots, n)$ , 在相邻的两点  $(x_i, y_i)$ 、 $(x_{i+1}, y_{i+1})$  之间插入一条三次样条曲线:

$$S_i(x) = a_i + b_i(x - x_i) + c_i(x - x_i)^2 + d_i(x - x_i)^3, x \in [x_i, x_{i+1}] \quad (5)$$

式(5)中的  $a_i, b_i, c_i, d_i$  为  $(x_i, y_i)$ 、 $(x_{i+1}, y_{i+1})$  之间所插入样条曲线函数的系数。

三次样条插值要求:每对相邻点之间的曲线二阶导数连续<sup>[15]</sup>,即需满足三个连续条件,如式(6):

$$\begin{cases} S_i(x_{i+1}) = S_{i+1}(x_{i+1}) \\ S'_i(x_{i+1}) = S'_{i+1}(x_{i+1}) \\ S''_i(x_{i+1}) = S''_{i+1}(x_{i+1}) \end{cases} \quad (6)$$

令  $l_i = x_{i+1} - x_i, (i=0, 1, \dots, n-1)$ , 代入式(6), 可得式(7):

$$\begin{cases} a_i + b_i l_i + c_i l_i^2 + d_i l_i^3 = a_{i+1} \\ b_i + 2c_i l_i + 3d_i l_i^2 = b_{i+1} \\ 2c_i + 6d_i l_i = 2c_{i+1} \end{cases} \quad (7)$$

令  $m_i = S''_i(x_i)$  并结合易知条件  $S_i(x_i) = y_i$ 、 $S''_i(x_i) = 2c_i$  代入方程组(7)中的第 1 个、第 3 个连续条件, 可得式(8):

$$\begin{cases} a_i = y_i \\ b_i = \frac{y_{i+1} - y_i}{l_i} - \frac{l_i}{2} - \frac{l_i}{2}(m_{i-1} - m_i) \\ c_i = \frac{m_i}{2} \\ d_i = \frac{m_{i+1} - m_i}{6l_i} \end{cases} \quad (8)$$

在式(8)中,  $a_i$  已知,  $b_i, c_i, d_i$  都为未知量  $m_i$  的表达式, 为了求  $m_i$ , 将式(8)代入式(7)中的第 2 个连续条件, 可得式(9):

$$l_i m_i + 2(l_i + l_{i+1})m_{i+1} + l_{i+1}m_{i+2} = 6 \left[ \frac{y_{i+2} - y_{i+1}}{l_{i+1}} - \frac{y_{i+1} - y_i}{l_i} \right] \quad (9)$$

式(9)中,  $m_i$  为唯一的未知量, 建立未知量  $m_i$  的线性方程组, 并选定非扭结边界条件, 即  $S''_0 = S''_1, S''_{n-2} = S''_{n-1}$  得式(10):

$$\begin{bmatrix} -l_1 & l_0 + l_1 & -l_0 & \dots & 0 \\ l_0 & 2(l_0 + l_1) & l_1 & \dots & \vdots \\ 0 & l_1 & 2(l_0 + l_1) & l_2 & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & 0 & l_{n-2} & 2(l_{n-2} + l_{n-1}) & l_{n-1} \\ \vdots & 0 & -l_{n-1} & l_{n-2} + l_{n-1} & l_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_0 \\ m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_n \end{bmatrix} = 6 \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{y_2 - y_1}{l_1} - \frac{y_1 - y_0}{l_0} \\ \frac{y_3 - y_2}{l_2} - \frac{y_2 - y_1}{l_1} \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式(10)的系数矩阵为  $n$  阶方阵, 经过简单的初等行变换将首行、末行进行处理, 能够化成三对角矩阵, 分解为上三角矩阵和下三角矩阵后再用追赶法求解<sup>[16]</sup>。求出  $m_i$  后, 代入式(8)便可求出极值点内部段包络线, 如图 6 所示。

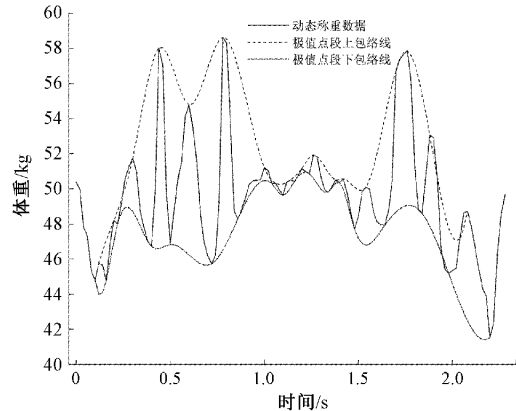


图 6 极值点内部段包络线段

接下来构造延拓点与极值点间包络线, 以左延拓点为例。

设左延拓点为  $(x_i, y_i)$ , 在  $(x_i, y_i)$  和左起第一个极值点  $(x_0, y_0)$  之间插入一条三次样条曲线:

$$S_i(x) = a_i + b_i(x - x_i) + c_i(x - x_i)^2 + d_i(x - x_i)^3, x \in [x_i, x_0] \quad (11)$$

式(11)中的  $a_i, b_i, c_i, d_i$  为  $(x_i, y_i)$ 、 $(x_0, y_0)$  之间所插入样条曲线函数的系数。

要求该曲线与极值点内部段的包络线二阶导数连续, 可得:

$$\begin{cases} a_l = y_l \\ a_l + b_l(x_0 - x_l) + c_l(x_0 - x_l)^2 + d_l(x_0 - x_l)^3 = S_0(x_0) \\ b_l + 2c_l(x_0 - x_l) + 3d_l(x_0 - x_l)^2 = S'_0(x_0) \\ 2c_l + 6d_l(x_0 - x_l) = S''_0(x_0) \end{cases} \quad (12)$$

对式(12)求解,便可求出极值点与左延拓点之间的包络线。极值点与右延拓点之间的包络线同理可得。

将延拓点与极值点连接后,构造的覆盖整个信号的包络线如图7所示,明显抑制了端点效应。

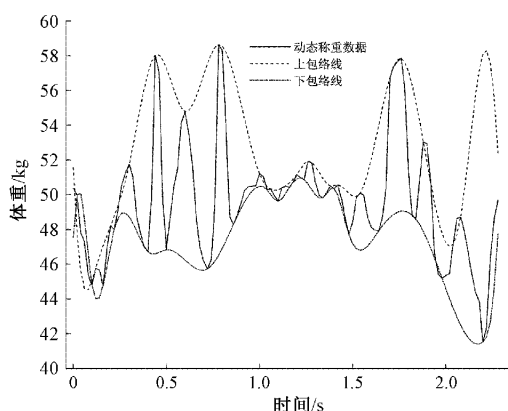


图7 延拓端点后的包络线

#### 4 实验结果

为了对所提动态称重算法的精度进行研究,以静态体重为 50.05 kg 的羊只作为实验对象,让羊只以自由速度走过图2所示的称重平台,采样频率设置为 50 Hz 获得一组连续的瞬时压力信号,将这一组瞬时压力信号作为牲畜的动态称重信号。

将取得的动态称重数据分别以未抑制端点效应的EMD算法、文献[17]所述基于镜像延拓抑制端点效应的EMD算法、文献[18]所述基于最小二乘延拓抑制端点效应的EMD算法、本文提出的基于分段包络线抑制端点效应的EMD算法进行处理,结果分别如图8~11所示。

图8表明,未抑制端点效应的EMD算法处理动态称重信号后的静态余量两端剧烈发散,极差为 29.93,可见EMD的端点效应引入了较大的误差。图9~11中所用的方法均有效抑制了端点效应,较好得分离了动态称重信号中的高频成分。其中基于镜像延拓抑制端点效应的EMD算法处理得到的静态余量均值为:50.40,极差为:1.43;基于最小二乘延拓抑制端点效应的EMD算法处理得到的静态余量均值为:49.75,极差为:0.78;本文所提基于分段包络线抑制端点效应的EMD算法处理得到的静态余量均值为:49.98,极差为:0.20。从图中可得,本文所提算法处理动态称重信号后得到的静态余量极差更小、更平稳。

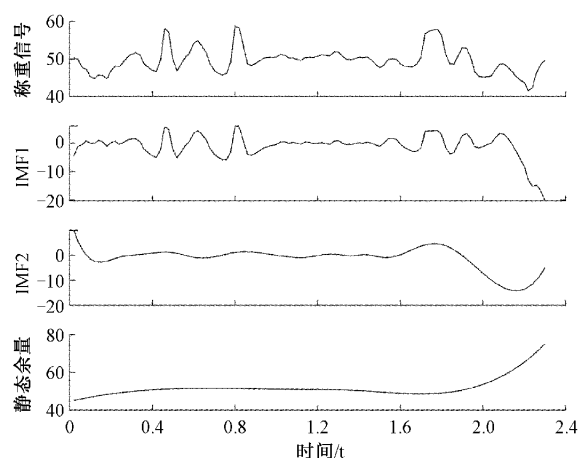


图8 未抑制端点效应的EMD算法

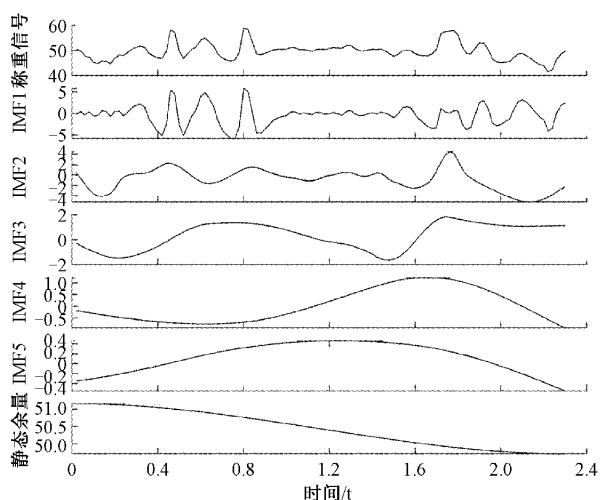


图9 基于镜像延拓抑制端点效应的EMD算法

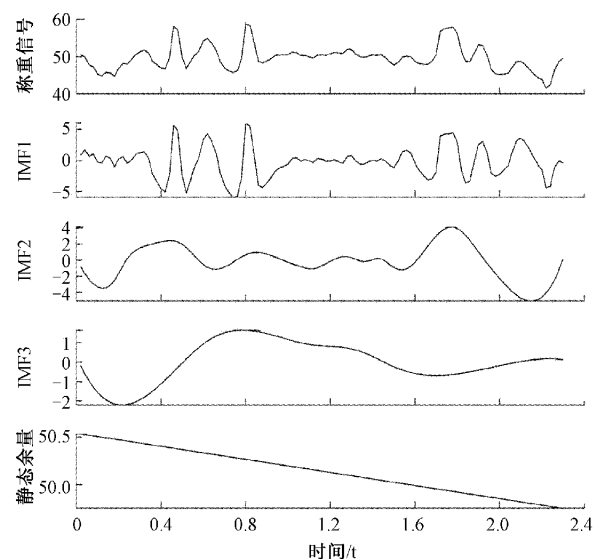


图10 基于最小二乘延拓抑制端点效应的EMD算法

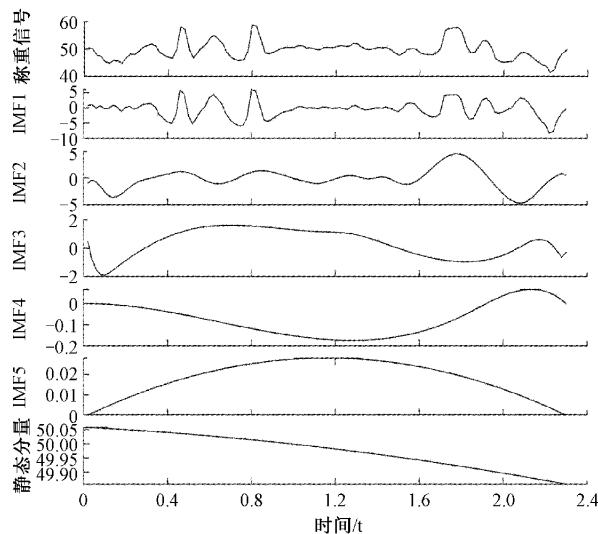


图 11 基于分段包络线抑制端点效应的 EMD 算法

对不同静态体重的羊只进行动态称重,然后将动态称重数据分别用图 9~11 中的不同 EMD 算法进行处理,将处理后的静态余量的均值与静态体重进行比较,得相对误差为表 1。

表 1 不同的 EMD 动态称重算法的相对误差

静态 体重/ kg	基于镜像延 拓抑制端点 效应/%	基于最小二 乘延拓抑制 端点效应/%	基于分段包 络线抑制端 点效应/%
50.05	0.70	0.60	0.14
46.57	1.02	0.93	0.24
44.24	1.22	1.85	0.18
51.10	1.90	1.08	0.27
43.24	0.93	1.59	0.33
43.35	0.78	1.20	0.10
误差均值	1.09	1.21	0.21

从表 1 中可知在多次的动态称重过程中,基于镜像延拓抑制端点效应的 EMD 算法相对误差平均为 1.09%,最大为 1.90%;基于最小二乘延拓抑制端点效应的 EMD 算法相对误差平均为 1.21%,最大为 1.85%;本文所提基于分段包络线抑制端点效应的 EMD 算法相对误差平均值为 0.21%,最大为 0.33%。对比可得,本文所提算法具有更高的精度与稳定性。

## 5 结 论

针对 EMD 算法应用于动态称重领域,因端点效应造成误差较大、稳定性较差的问题,提出改进的基于分段包络线抑制端点效应的 EMD 算法,该方法在抑制端点效应的同时,还能有效减少延拓端点引入的误差。通

过实验采集多组牲畜的动态称重数据进行处理,结果表明:与常用的基于镜像延拓抑制端点效应的 EMD 算法、基于最小二乘延拓抑制端点效应的 EMD 算法相比,本文所提算法处理动态称重信号后,得到的静态余量体重数据相对误差更小。说明所提算法应用于动态称重,有更好的精度与稳定性。但本文对 EMD 算法数学原理的探究略显不足,严密的数学论证可能是所提算法更广泛应用的关键。

## 参考文献

- [1] 李琦,夏云龙. 基于卡尔曼滤波的牲畜动态称重系统的设计[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2017, No. 539(23): 23-27, 285-286.
- [2] 赵慧兵,马娟,张杰,等. 肉牛自动化无应激动态称重系统的设计与试验[J]. 新疆农业科学, 2022, 59(7): 1795-1801.
- [3] SPECKBACHER M. Sampling trajectories for the short-time fourier transform[J]. Journal of Fourier Analysis and Applications, 2022, 28(6): 82-82.
- [4] 王天伟,张厚江,路敦民,等. 基于小波去噪和经验模态分解算法的足尺人造板动态称重研究[J]. 计量学报, 2017, 38(3): 300-303.
- [5] QIAN X W, ZHAO L Y. Filtering method of airborne gravity gradiometer signal based on EMD[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2387(1).
- [6] 张坤硕,齐华,任安虎,等. 超声信号的改进 EMD 阈值方法降噪研究[J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(11): 15-20.
- [7] 杨剑锋,石戈戈,周天奇,等. 基于自适应序贯相似性检测波形匹配延拓的 EMD 端点效应抑制[J]. 振动与冲击, 2018, 37(18): 121-125.
- [8] 李勇,方兆本,韦勇凤. 基于局部多项式回归的 EMD 端点效应抑制[J]. 中国科学技术大学学报, 2014, 44(9): 786-792.
- [9] 李达,郭晨霞,杨瑞峰. 基于改进 PSO-BP 算法的动态称重数据处理[J]. 电子测量技术, 2021, 44(20): 132-136.
- [10] NICOLA F, TILLI P. The Faber-Krahn inequality for the short-time Fourier transform [J]. Inventiones mathematicae, 2022, 230(1): 1-30.
- [11] YOU N. Research on image denoising in edge detection based on wavelet transform [J]. Applied Sciences, 2023, 13(3): 1837-1837.
- [12] 吕峥,庄炜,吴越,等. 基于改进 EMD 方法的 FBG 传感网络光谱基线校正研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(1): 190-197.

- [13] LI H Y. An improved empirical mode decomposition method based on the cubic trigonometric B-spline interpolation algorithm[J]. Applied Mathematics and Computation, 2018, 332: 406-419.
- [14] 梁黎明,王茂芝,徐文暂,等. 综合斜率和三次样条的 EMD 端点效应抑制方法[J]. 振动与冲击, 2022, 41(14):70-76.
- [15] 李长春,李元金. 基于多阈值分割和 B 样条插值的 CT 图像金属伪影去除方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(7):128-132.
- [16] 陶婷. 三次样条插值函数稳定性分析及其应用[D]. 成都:成都理工大学, 2021.
- [17] 吕乾涛. 用于动物的动态称重系统研究[D]. 杭州:杭州电子科技大学, 2017.
- [18] 何振鹏,朱志琪,谢海超,等. 基于最小二乘法线性拟合抑制 EMD 端点效应[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(9): 3377-3385, 3398.

#### 作者简介

**李建鑫**, 讲师, 主要研究方向为电子信息技术。

E-mail: 2021302@xjzfu. edu. cn

**郭晨霞**, 副教授, 主要研究方向为测控技术和视觉测量。

E-mail: guochenxia@nuc. edu. cn

**杨瑞峰**, 教授, 主要研究方向为自动化测试与控制技术。

E-mail: yangruifeng@nuc. edu. cn

**柴世豪**, 讲师, 主要研究方向为电子信息技术。

E-mail: 2022105@xjzfu. edu. cn