

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2211918

基于周期滑动平均卡尔曼滤波的船载式 称重传感器误差抑制算法

程雪聪^{1,2,3,4} 张益鹏^{1,2,3,4} 董奇峰^{1,2,3,4} 纪晓宇^{1,2,3,4}

(1. 中交第二航务工程局有限公司 武汉 430040; 2. 长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室 武汉 430040; 3. 交通运输行业交通基础设施智能制造技术研发中心 武汉 430040; 4. 中交公路长大桥梁建设国家工程研究中心有限公司 武汉 430040)

摘要: 随着基础设施建设工程走向海洋,船载式混凝土搅拌站得到了大量的应用,但其在波浪激励下会产生升沉、横摇、纵摇、横荡、纵荡的复合运动,从而会导致计量系统产生偏差。基于此给出一种基于周期滑动平均卡尔曼滤波的船载式称重传感器误差抑制算法。首先,通过传统卡尔曼滤波对原始数据进行处理,消除其中的随机误差;然后,通过短时傅里叶变换对数据进行频谱分析,获取周期性误差的频率特征;最后通过滑动窗口均值滤波来消除系统中的周期性误差。通过6自由度实验平台模拟存在波浪激励时船舶的运动情况并通过三点秤进行计量称重,分别记录不同算法处理后的称重数据。实验结果表明,原始称重数据最大误差为9.6%;卡尔曼滤波处理的称重数据最大误差为2.1%;本文给出算法处理的称重数据最大误差为0.3%,该算法能够有效消除由于周期性波浪激励所造成的周期性误差和传感器本身所产生的随机误差,提高船载式混凝土搅拌站的计量精度。

关键词: 船载式混凝土搅拌站;周期性误差;称重传感器;短时傅里叶变换;卡尔曼滤波

中图分类号: TU641 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4

Shipboard load cell error suppression algorithm based on periodic moving average Kalman filtering

Cheng Xuecong^{1,2,3,4} Zhang Yipeng^{1,2,3,4} Dong Qifeng^{1,2,3,4} Ji Xiaoyu^{1,2,3,4}

(1. CCCC Second Harbor Engineering Company LTD, Wuhan 430040, China;

2. Key Laboratory of Large-Span Bridge Construction Technology, Wuhan 430040, China; 3. Research and Development Center of Transport Industry of Intelligent Manufacturing Technologies of Transport Infrastructure, Wuhan 430040, China;

4. CCCC Highway Bridge National Engineering Research Centre Co., Ltd., Wuhan 430040, China)

Abstract: With the infrastructure construction project to the sea, the shipborne concrete batching plant has been widely used, but its compound movement of rising and sinking, horizontal rocking, horizontal and vertical under wave excitation will occur, which will lead to deviation of the metering system. Based on this, an error suppression algorithm of shipborne load cell based on periodic sliding average Kalman filtering is proposed. Firstly, the original data is processed by traditional Kalman filtering to eliminate random errors. Then, the spectrum analysis of the data is carried out by short-time Fourier transform to obtain the frequency characteristics of periodic error. Finally, periodic errors in the system are eliminated by sliding window mean filtering. Through the six-degree-of-freedom experimental platform, the movement of the ship in the presence of wave excitation is simulated and weighed by measuring and weighing through the three-point scale, and the weighing data processed by different algorithms are recorded separately. The experimental results show that the maximum error of the original weighing data is 9.6%. The maximum error of the weighing data processed by the Kalman filter is 2.1%. In this paper, the maximum error of the weighing data processed by the algorithm is 0.3%, which can effectively eliminate the periodic error caused by periodic wave excitation and the random error generated by the sensor itself, and improve the measurement accuracy of the shipborne concrete batching plant.

Keywords: ship-mounted concrete mixer vessel; periodic errors; weigh sensor; short-term Fourier transform; Kalman filtering

0 引言

随着我国海洋基础设施建设的发展,船载式混凝土搅

拌站得到了广泛的应用^[1-4]。对于船载式混凝土搅拌站来说,配料计量是其精度要求最高的核心功能,目前,主要的称重结构有料斗秤和皮带秤,其分别用于不同物料的称重,

收稿日期:2022-11-02

称重过程主要分为静态称重和动态称重。

在进行静态称重时,由于被称物和称重传感器均处于静止状态,称重结果仅与称重传感器的精度相关;在进行动态称重时,由于被称物与称重传感器之间会发生相对运动,或被称物的重量会实时发生变化,所以称重精度较低^[5]。为了提升称重传感器本身的称重精度,黄永刚^[6]提出一种基于正交多项式拟合的称重传感器非线性校正方法,实验结果表明,该方法可以有效校正系统的非线性,提高称重精度。但该方法所选取的拟合次数并不能自适应调整,存在一定的局限性。王靖等^[7]对称重传感器的迟滞性进行了建模和实验研究,提出一种改进的 Preisach 模型数值实现方法,有效减小了称重过程中误差的累加。但该方法仅适用于电阻应变片式称重传感器。刘燕琼等^[8]提出一种针对称重传感器的温度补偿方法,其采用一种基于遗传算法优化的 BP 神经网络对称重传感器进行温度补偿修正。但该方法需要额外增加温度传感器,补偿精度受温度传感器精度的影响,增加了测量系统的复杂性和不稳定性。卢志浩等^[9]采用传统卡尔曼滤波对称重数据进行处理,仿真结果表明该算法可以消除称重结果中的突变、毛刺等一些极端数据。但当称重误差过大时,使用该算法处理过的称重数据中仍会包含较大的误差。

在提高动态称重的称重精度方面,李达等^[10]提出一种 PSO-BP 算法,优化了神经网络模型,提高了称重精度。虽然该经过该算法处理后的称重数据平均误差较低,但样本中某些个体动态称重的误差仍然较大。为了减少环境或称重传感器本身振动对称重结果产生的影响,Tiboni 等^[11]提出采用多个加速度传感器来采集称重传感器的振动数据,进而来补偿因振动产生的称重误差。但在实际应用中发现,加速度传感器的安装数量和安装位置会严重影响称重结果。Niedzwiecki 等^[12]在 Tiboni 的基础上进行了改进,提出一种基于数据驱动的神经网络训练,进而可以得到更加准确的振动误差模型,以此来实现振动补偿。但该方法通过静态神经网络建立的系统模型缺乏动态特性,不具备记忆功能,系统辨识能力有限。陈荣生等人利用动态神经网络对振动干扰信号进行自动辨识,建立振动信号误差模型,用来消除称重信号中的振动干扰^[13]。但该方法所建立的系统模型并没有考虑由于外部环境所产生的振动误差,仅能处理由于称重传感器自身振动产生的误差。

以上文献从不同角度提出了对静态称重和动态称重的优化方法,但对于船载式混凝土搅拌站的计量系统并不能发挥很好的作用,当船载式混凝土搅拌站在江河海洋中作业时,由于波浪的激励会导致船体产生晃动,则计量系统的称重结果通常表现为与波浪周期基本保持一致的周期信号。为了减少周期性噪声信号对于计量系统的干扰,本文给出了一种周期滑动平均卡尔曼滤波(periodic moving average Kalman filter, PMAKF)算法,该算法首先通过卡尔曼滤波对原始数据进行预处理,其次通过短时傅里叶变

换对数据周期进行辨识,最后通过滑动平均滤波进一步对数据进行优化。通过六自由度实验平台模拟存在波浪激励时船舶的运动情况并通过三点秤进行计量称重实验,通过分析对比原始称重数据、卡尔曼滤波算法处理后的称重数据和周期滑动平均卡尔曼滤波算法处理后的称重数据来验证本文所给出算法的有效性和优越性。

1 计量系统误差分析

导致混凝土搅拌站计量系统产生误差的传统因素主要包括人为因素和设备因素,其中人为因素主要表现为日常对搅拌站中的配料、称料和卸料等机构的检查、保养不及时;设备因素主要表现为与称重相关的传感器在安装位置和安装形式上存在问题等^[14-15]。对于船载式混凝土搅拌站而言,计量系统产生误差的主要因素为环境因素,船舶由于波浪的激励会产生升沉、横摇、纵摇、横荡、纵荡的复合运动,进而导致其计量系统失准^[16]。

图 1 所示为船舶处于波浪激励下的纵向和横向晃动情况,从图中可以看出船舶纵向晃动角度 α 最大可以达到 1° ,横向晃动角度 β 最大可以达到 2.18° 。由于船载式混凝土搅拌站的称重传感器通常为拉力传感器或压力传感器,所以其计量精度很大程度上会受到船舶运动的影响。图 2 所示为船舶在波浪激励下产生运动时计量系统的称重结果,其采样频率为 100 Hz,所称配料的实际重量为 78.15 kg,从图中可以看出,配料的称重的结果随着船舶晃动的情况而改变且具有明显的周期性,其中称量结果的最大值为 85.62 kg,最小值为 71.76 kg,计量误差最大达到了 9.6%。

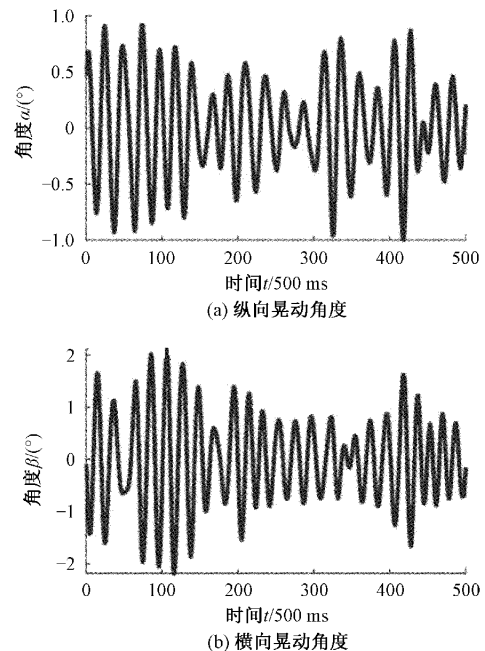


图 1 船舶纵向、横向晃动角度

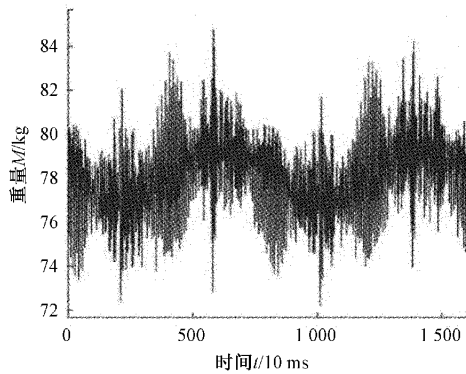


图2 波浪激励下配料秤的称重结果

2 周期滑动平均卡尔曼滤波算法

当船舶由于波浪激励而产生运动时,称重传感器的输出信号由真实信号、随机误差和波浪激励误差组成,传统的卡尔曼滤波可以很好的处理信号中的随机误差,但不能有效的处理由于波浪激励所产生的周期性误差,所以本文给出一种 PMAKF 算法,该算法在传统的卡尔曼滤波中引入了周期的概念,通过对同一周期内的数据进行均值滤波来消除由于波浪激励所产生的周期性误差。

首先,设定一个滑动窗口函数 $H(t)$,该窗口可包含的数据长度 n 根据船舶所在海域的波浪周期的先验数据来确定。

其次,假设系统的状态方程为:

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{A}\mathbf{X}(t-1) + \mathbf{R} \quad (1)$$

$$\mathbf{Z}(t) = \mathbf{C}\mathbf{X}(t) + \mathbf{W} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{X}(t)$ 、 $\mathbf{X}(t-1)$ 分别为 t 时刻和 $t-1$ 时刻的状态量, $\mathbf{Z}(t)$ 为 t 时刻的观测量, \mathbf{R} 为过程噪声向量, \mathbf{W} 为观测噪声向量, \mathbf{R} 和 \mathbf{W} 都是高斯白噪声,且满足 $\mathbf{R} \sim (0, \mathbf{Q})$, $\mathbf{W} \sim (0, \mathbf{E})$, 其中 \mathbf{Q} 为过程噪声向量 \mathbf{R} 的协方差矩阵, \mathbf{E} 为观测噪声向量 \mathbf{W} 的协方差矩阵, \mathbf{A} 为状态转移矩阵, \mathbf{C} 为观测矩阵。

则传统的卡尔曼滤波过程可分为预测步和更新步两个阶段,其中预测阶段的实现过程为:

状态预测:

$$\mathbf{X}(t|t-1) = \mathbf{A}\mathbf{X}(t-1) \quad (3)$$

误差协方差预测:

$$\mathbf{P}(t|t-1) = \mathbf{A}\mathbf{P}(t-1)\mathbf{A}^T + \mathbf{Q} \quad (4)$$

更新阶段的实现过程为:

卡尔曼增益更新:

$$\mathbf{K}(t) = \frac{\mathbf{P}(t|t-1)\mathbf{C}^T}{\mathbf{C}\mathbf{P}(t|t-1)\mathbf{C}^T + \mathbf{E}} \quad (5)$$

误差协方差更新:

$$\mathbf{P}(t) = (\mathbf{I} - \mathbf{K}(t)\mathbf{C})\mathbf{P}(t|t-1) \quad (6)$$

状态更新:

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{X}(t|t-1) + \mathbf{K}(t)(\mathbf{Z}(t) - \mathbf{C}\mathbf{X}(t|t-1)) \quad (7)$$

在式(4)~(8)中, $\mathbf{X}(t)$ 是 t 时刻的状态值, $\mathbf{Z}(t)$ 是 t 时刻的观测值, $\mathbf{X}(t|t-1)$ 是根据 $t-1$ 时刻计算出的 t 时刻的状态估计值, $\mathbf{P}(t)$ 是 t 时刻的误差协方差矩阵, $\mathbf{P}(t|t-1)$ 是根据 $t-1$ 时刻计算出的 t 时刻的误差协方差矩阵估计值, $\mathbf{K}(t)$ 是 t 时刻的卡尔曼增益。

然后,对 $\mathbf{X}(t)$ 进行短时傅里叶变换:

$$STFT(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{X}(T) H(T-t) e^{-2\pi j \omega T} dT \quad (8)$$

式中: $\mathbf{X}(T)$ 为 t 时刻经过传统卡尔曼滤波处理后的状态值, $H(T-t)$ 为滑动窗口函数。

定义短时傅里叶变换的能量谱分布为:

$$SPEC(t, \omega) = |STFT(t, \omega)|^2 \quad (9)$$

对短时傅里叶变换的能量谱分布图进行分析可以得到由于波浪激励所造成的周期性误差的信号频率 ω_{MAX} , 其表示为:

$$\omega_{MAX} = \text{MAX}(SPEC(t, \omega)) \quad (10)$$

式中: ω_{MAX} 为当 $SPEC(t, \omega)$ 取得最大值时的 ω 。

最后,根据信号的采集频率 F 和周期性误差信号频率 ω_{MAX} 进行滑动窗口均值滤波,则 t 时刻的信号值 $\mathbf{X}(t)$ 为:

$$\mathbf{X}(t) = \frac{\omega_{MAX}}{F} \sum_{T=t-\frac{1}{\omega_{MAX}}}^{T=t} \mathbf{X}(T) \quad (11)$$

PMAKF 算法的流程如图3所示,具体的算法步骤如下所示:

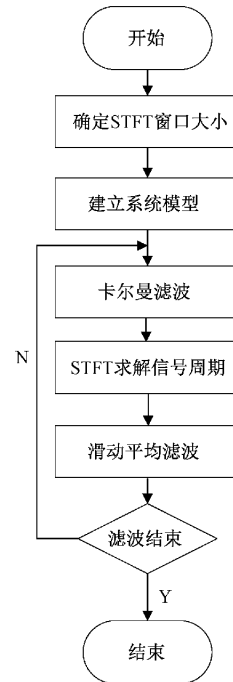


图3 周期滑动平均卡尔曼滤波算法流程

步骤1)根据先验知识确定 STFT 滑动窗口的大小;建立系统模型,列出离散状态下的受到随机误差干扰和波浪激励干扰的称重系统观测方程和状态方程,并对初始状态向量和误差协方差矩阵进行初始化;

步骤 2) 通过建立的称重系统模型进行传统卡尔曼滤波;

步骤 3) 对通过传统卡尔曼滤波的称重数据进行短时傅里叶变换, 并通过对其能量谱分布图进行分析并确定由于波浪激励造成的周期性误差的信号频率;

步骤 4) 对周期内的称重数据进行滑动窗口均值滤波, 窗口的大小由步骤 3) 中求得的周期性误差的信号频率和信号的采集频率来共同确定;

步骤 5) 重复步骤 2)~4)。

3 实验分析

图 4 所示为本次实验的实验平台, 其中包括 6 自由度实验平台、三点秤和船舶姿态测量仪, 其中 6 自由度实验平台可以模拟真实波浪激励船舶进行升沉、横摇、纵摇、横荡、纵荡的复合运动; 三点秤由 3 个相同的称重传感器组成, 采集频率为 100 Hz, 可以进行称重计量实验; 船舶姿态测量仪可以检测当前 6 自由度实验平台的运动状态。



图 4 6 自由度实验平台

本次实验通过 6 自由度实验平台模拟存在波浪激励时船舶的运动情况并通过三点秤进行计量称重, 分别记录原始称重数据、经过卡尔曼滤波降噪处理后的称重数据和经过周期滑动平均卡尔曼滤波降噪处理后的称重数据, 通过对比分析原始称重数据以及不同算法处理后的称重数据来验证本文所给出算法对于提高混凝土搅拌船计量系统精度的有效性和优越性。

本文令自由度实验平台分别进行了横纵摇和横荡、横纵荡和横摇、横纵摇和升沉、横纵荡和升沉的复合运动并进行了称重实验, 实验结果表明当横摇、纵摇、横荡、纵荡和升沉参数不变时, 其不同组合的复合运动对称重结果造成的影响基本相同, 因此本文选择横摇、横荡和纵荡的复合运动进行实验分析。

在本次实验中, 通过三点秤对总重为 78.15 kg 的砝码进行称重, 其中横摇运动的幅值为 1° , 频率为 0.125 Hz, 横荡和纵荡的幅值均为 200 mm, 频率为 0.125 Hz。图 5 所示为 6 自由度实验平台处于运动状态时三点秤中 3 个称重传感器的称重结果, 图 6 所示为 3 个称重传感器原始数据

的频谱图, 如图 5 所示, 当实验平台模拟船舶在波浪激励下进行周期性运动时, 3 个称重传感器的称重结果存在较大误差且不是平均分布, 产生该结果的原因主要是由于波浪激励所造成的周期性误差。

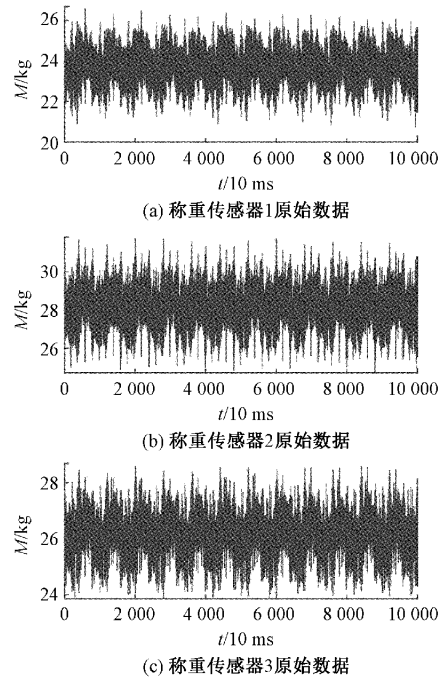


图 5 称重传感器原始数据

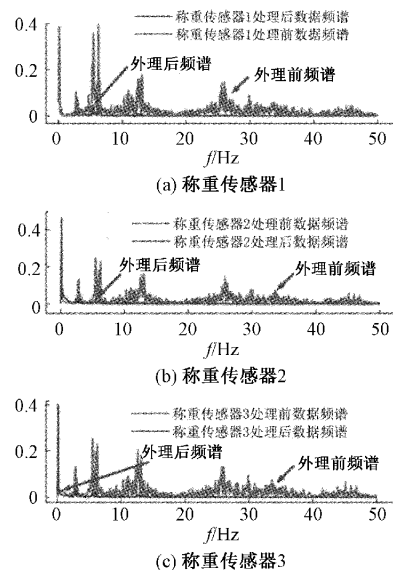


图 6 PMAKF 算法数据频谱分析

图 6 所示为 PMAKF 算法中经过传统卡尔曼滤波算法处理后数据的频谱分析和原始数据的频谱分析对比图, 从图 5 中可以分析出原始称重数据是由真实数据、高频噪声和波浪周期激励噪声组合而成, 但是从图 6 中原始数据的频谱图中并不能分辨出周期性波浪激励的频率和噪声频率, 从 PMAKF 算法处理原始数据后的频

谱图中可以看出,该算法可以很好的消除原始数据中的随机误差,仅保留周期性波浪激励的频率特征,进而通过该特征对称重传感器的称重数据进行进一步的优化处理。

图7所示为称重传感器的原始数据、传统卡尔曼滤波算法和 PMAKF 算法处理称重传感器原始数据的结果对比图,从图中可以看出称重传感器原始数据经过传统卡尔曼滤波处理后可以消除其中大部分的随机误差,但该算法无法处理由于周期性波浪激励造成的周期性误差,经过该算法处理后的数据呈现出明显的周期性特征;从图中可以看出采用 PMAKF 算法处理原始数据不仅可以消除系统中的随机误差,使数据变的平滑稳定,也可以消除由于周期性波浪激励所造成的周期性误差,进一步提高数据精度,保证数据的可用性和稳定性。

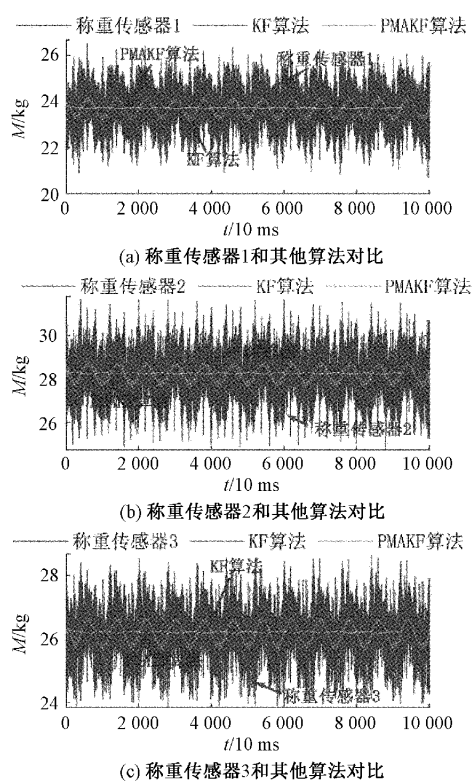


图7 不同算法称重结果对比

分别计算原始数据、卡尔曼滤波处理后数据和周期滑动平均卡尔曼滤波处理后数据与真实值之间的误差,本次实验中所称砝码的真实重量为 78.15 kg。表1所示为各方法对砝码称重的误差统计分析,采用周期滑动平均卡尔曼滤波算法进行称重时,其最大误差和均方根误差相较于原始数据和卡尔曼滤波算法均进一步降低,均方根误差仅有 0.07 kg,能够满足称重的精度要求。实验数据表明周期滑动平均卡尔曼滤波算法对于周期性波浪激励所造成的周期性误差和随机误差有较好的抑制效果。

表1 误差统计分析

算法	最大误差/ kg	均方根误差/ kg	最大误差 百分比/%
原始数据	7.47	1.83	9.6
KF 算法	1.65	0.90	2.1
PMAKF 算法	0.24	0.07	0.3

4 结 论

当在船舶上进行称重时,由于周期性的波浪激励作用在船舶上,会导致称重结果中包含大量的周期性误差和随机误差,基于此本文给出了一种基于周期滑动平均卡尔曼滤波的船载式称重传感器误差抑制算法,该算法首先通过卡尔曼滤波算法对原始数据进行处理分析,进而消除系统中的随机误差并求得造成周期性误差的信号周期,最后通过所求的信号周期进行滑动窗口均值滤波来进一步消除信号中的周期性误差。

实验结果表明,采用周期滑动平均卡尔曼滤波算法获取的称重数据的最大误差百分比比原始数据和卡尔曼滤波算法获取的称重数据的最大误差百分比分别降低了 9.3% 和 1.8%。相比于单独使用卡尔曼滤波算法进行降噪处理,周期滑动平均卡尔曼滤波算法能够在其基础上消除由于周期性波浪激励所造成的周期性误差,从而进一步提高称重精度。本文仅针对船载式混凝土搅拌站骨料及粉料的计量系统进行了研究,未来需进一步研究船载式混凝土搅拌站外加剂及水的计量系统优化。

参考文献

- [1] 汪秋. 讨论移动式混凝土搅拌站的发展趋势[J]. 华东科技, 2014(11): 38-40,6.
- [2] 耿贵军,申明远. 2HZS90 型船载式搅拌站设计[J]. 建设机械技术与管理, 2018, 31(12): 47-49.
- [3] 苏召斌,陈九肖,林森,等. 深层水泥搅拌船搅拌机切削砂土过程数值模拟[J]. 水运工程, 2022(2): 29-32,38.
- [4] 刘修成,杨秀礼,程茂林. 搅拌船在波浪中运动响应物料计量精度的影响[J]. 水运工程, 2016, 518(8): 22-25.
- [5] BAZYDLO P, URBANSKI M, KAMINSKI M, et al. Influence of the environment on operation of checkweigher in industrial conditions[C]. International Conference on Automation, 2014: 567-577.
- [6] 黄永刚. 基于正交多项式拟合的称重传感器非线性校正[J]. 中国测试, 2018, 44(4): 91-95.
- [7] 王靖,高贵军,寇子明,等. 电阻应变式称重传感器迟滞性建模及实验研究[J]. 机电工程, 2021, 38(2): 191-197.
- [8] 刘燕琼,卢文科,左锋,等. 基于 GA-BP 的电涡流传

- 感器称重系统的温度补偿[J]. 自动化与仪表, 2021, 36(3): 55-59,75.
- [9] 卢志浩, 雷菊阳, 吴维华. 基于卡尔曼滤波的空气细颗粒物称重数据处理[J]. 电子测量技术, 2017, 40(2): 105-108.
- [10] 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.
- [11] TIBONI M, BUSSOLA R, AGGOGERI F, et al. Experimental and model-based study of the vibrations in the load cell response of automatic weight fillers[J]. Electronics, 2020, 9(6): 995.
- [12] NIEDZWIECKI M, MELLER M, PIETRZAK P. System identification based approach to dynamic weighing revisited[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 80(1): 582-599.
- [13] 陈荣生, 滕召胜, 孙彪, 等. 基于多加速度传感器的动态检重秤抗振方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 41(9): 141-150.
- [14] 刘宗宝. 混凝土搅拌站计量误差原因分析及控制措施[J]. 建筑机械化, 2016, 37(12): 88-90.
- [15] 蒋敦, 廖超, 张泽群, 等. 混凝土搅拌站计量传感器故障实时诊断研究[J]. 建设机械技术与管理, 2021, 34(2): 109-114.
- [16] 谢冉. 自航式混凝土搅拌船配料称量系统的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.

作者简介

程雪聪(通信作者), 硕士, 工程师, 主要研究方向为测控技术及数据处理。

E-mail: 531614485@qq.com

张益鹏, 硕士, 工程师, 主要研究方向为测控技术及数据处理。

E-mail: 648185010@qq.com

董奇峰, 硕士, 工程师, 主要研究方向为机械结构设计、液压系统控制。

E-mail: 335172822@qq.com

纪晓宇, 硕士, 工程师, 主要研究方向为机器人电液控制系统、机械设计。

E-mail: 1137105281@qq.com