

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306445

手推式电子叉车秤倾角与称重误差补偿算法研究

蒋爽¹ 邓岚¹ 彭澳² 王家卿¹ 孔伟丰¹ 相子忠³

(1. 河海大学机电工程学院 常州 213000; 2. 河海大学物联网工程学院 常州 213000;

3. 梅特勒托利多(常州)精密仪器有限公司 常州 213000)

摘要:针对电子叉车秤在使用过程中出现的车体倾斜导致称重误差精度下降等问题,提出了一种有效的称重误差补偿算法。首先,分析电子叉车秤倾斜角度对称重性能的影响,搭建一个多方向可变角度倾斜的实验平台,以模拟叉车秤的倾斜状态并获取精确的称重数据。其次,根据所获得的数据与称重误差补偿原理,建立倾斜状态下电子叉车秤的称重误差补偿算法模型,并运用最小二乘法及多层感知机非线性回归方法识别模型参数。最后,本文对具有1 500 kg量程和0.02 kg感量的电子叉车秤进行了倾斜测试实验,结果表明,在地面倾角不超过1.5°的范围内,在任意倾斜方向仪器最大允许误差MPE<0.75 kg,具有3 000分度数的精度。

关键词: 电子叉车秤; 称重误差补偿; 三轴加速计

中图分类号: TH715.1⁺94; TN925 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Research on electronic hand pallet truck forklift scale tilt angle and weighting error compensation algorithm

Jiang Shuang¹ Deng Lan¹ Peng Ao² Wang Jiaqing¹ Kong Weifeng¹ Xiang Zizhong³

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou 213000, China;

2. College of Internet and Things Engineering, Hohai University, Changzhou 213000, China;

3. METTLER TOLEDO, Changzhou 213000, China)

Abstract: To address the issue of low weighing accuracy caused by the tilt angle of the scale body during the use of electronic hand pallet truck forklift scales, a multi-directional variable-angle tilt simulation and measurement experiment platform was constructed to simulate the different tilt states of the forklift scale. By analyzing the weight and tilt angle change data measured by the experiment platform, a compensation algorithm model for the weighing error of the electronic forklift scale under the tilt state was established, and the model parameters were identified using both the least squares method and the multilayer perceptron non-linear regression. The compensated forklift scale with a range of 1 500 kg and sensitivity of 0.02 kg was tested under tilt experiment, and the results showed that within a ground tilt angle not exceeding 1.5°, the instrument achieves an accuracy of 3 000 divisions with a maximum permissible error (MPE) of less than 0.75 kg in any tilt direction.

Keywords: electronic hand pallet truck forklift scale; weighing error compensation; 3-axis accelerometer

0 引言

电子叉车秤是一种将压力传感器嵌入叉车叉齿,称重数值显示在仪表上的可移动式电子衡器,因其使用方便、读数迅速等特点,被广泛应用于物流、仓储、港口、建筑及铁路运输等行业。然而,电子叉车秤因其机械结构

在使用过程中容易发生形变和多方向倾斜,普遍存在称重精度不高的问题。例如,承受大重量载荷时,内置压力传感器的叉齿会产生扭转变形和挠度变形,叉车油缸抬升时会引起秤体机械结构的弹性形变。同时,叉车秤在使用过程中可能会受地面的坡度和摩擦力以及重型车辆经过时产生的地面震动等外部干扰因素影响。这些外部环境 and 叉车秤自身形变会导致叉车秤秤体倾斜和称台平

整度变化,使得称重准确性下降^[1-3]。

针对由倾斜造成的称重误差,传统电子秤通常根据物理水泡等倾斜指示仪器手工调节水平,调节过程繁琐且效果不佳^[4-5],此外,部分电子秤的指示仪器在安装时就存在一定的倾斜^[6]。电子叉车秤通常通过调整垫片数量来调节传感器水平状态^[7-8],也有通过调整调节电阻以改变压力传感器输出^[9],但是这些操作都需要专业技术人员进行,且调节步骤较为繁琐。

针对传感器倾斜造成衡器称重能力下降,文献[10]提出一种采用三轴加速计传感器测量计算秤体倾角误差,并对该误差进行补偿,但只能补偿角度较小幅度的倾角误差。文献[11]采用三轴加速计检测姿态角,并利用加权移动平均滤波修正误差,最终达到一定精度的姿态角测量功能,但并不适用于电子秤。文献[12]对叉车秤利用温度传感器和角度传感器获取温度与角度,进而对叉车秤温度和角度进行双重补偿,但补偿方法略微粗糙,最终补偿精度只达到称重能力的 1/500。

目前市面上能达到商用的高精度电子秤如 RAVAS 公司的 RAVAS-3200 系列手动电子叉车秤,最大允许在地面倾斜 1°,称重精度达到 2 000 分度数,本文旨在实现更严格环境下更高的精度要求,即在地面倾斜角度为 1.5°条件下,使倾斜精度达到 3 000 分度数,即 3 000e(检定分度值 $e^{[13]}$ 与实际刻度间隔 $d^{[13]}$ 相同)。为此,本文搭建一个多方向可变角度倾斜的实验平台,以模拟叉车秤的倾斜状态并获取精确的称重数据。在分析叉车秤装载货物重量引起的测量角度误差基础上,首先校正三轴加速计测量的角度误差,再考虑叉车秤倾角对称重精度影响,建立倾斜角度与称重精度误差之间的数学模型,采用最小二乘法 and 多层感知机非线性回归的方法对模型参数进行辨识,提出了一种倾斜状态称重误差补偿算法。最后,将补偿算法在嵌入式设备实现,通过实验台对算法补偿效果进行实验验证。

1 电子叉车秤倾角与称重精度分析

1.1 倾角对电子秤称重精度影响

电子叉车秤包含抬升把手、液压油缸、叉齿、接线盒、锂电池、压力传感器、终端显示仪表和三轴加速计。4 个压力传感器对称安装在叉车秤的两条叉齿处,锂电池则为加速计和仪表提供电源,其结构如图 1 所示。叉车秤在使用时,叉齿通过液压油缸抬升叉起货物,此时叉齿内部的压力传感器受到货物重力发生应力形变从而获取货物重量,接线盒内部的加速计根据重力加速度变化,实时计算倾斜角度,重量数据与角度数据通过串口通信发送给终端仪表,若角度数据超出许可倾斜角度范围,仪表则显示相应的警报。称重结束后将货物运送到指定地点放

下货物,从而完成一次货物搬运和称重操作。

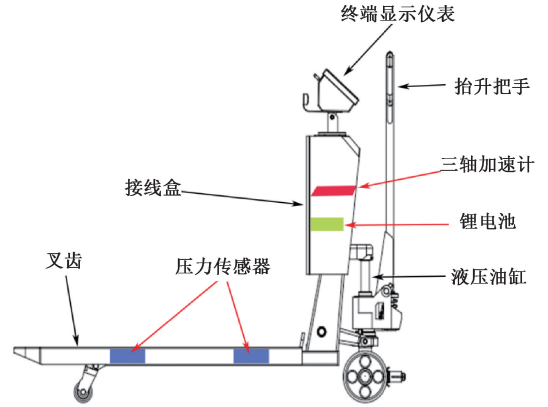


图 1 叉车秤结构

Fig. 1 Structure of electronic forklift scale

当电子秤静止处于倾角为 0°的地面时,加载货物载荷重量 W_m 作用于秤台,此时传感器输出 W_{sensor} 与实际加载重力 W_m 大小相等,如图 2(a)所示。当电子秤所处地面与水平面存在倾角 α 时,秤体处于倾斜称重状态,如图 2(b)所示。倾斜状态下,载荷对秤传感器作用为:

$$\begin{cases} F_{g2} = W_m \cdot \cos \alpha \\ F_{g3} = W_m \cdot \sin \alpha \end{cases} \quad (1)$$

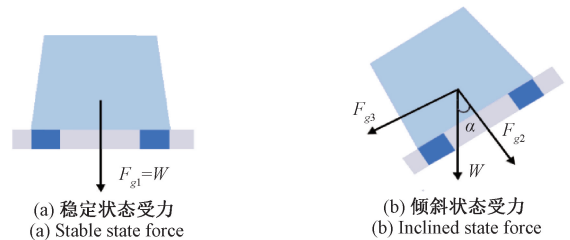


图 2 倾斜角度对称重精度的影响

Fig. 2 Influence of tilt angle on weighing accuracy

其中, F_{g2} 为压力传感器垂直方向所受应力, F_{g3} 为压力传感器水平方向所受应力。对处于倾斜称重状态的压力传感器受力分析可知, F_{g2} 是传感器的主受力方向,垂直于压力传感器,并且具有良好的线性关系。而 F_{g3} 是与压力传感器平行的受力方向,其输出受到电子秤倾斜方向、载荷重量 W_m 大小、倾角 α 变化等因素的影响, F_{g3} 使得压力传感器的受力结构和支撑点发生变化,进而导致输出非线性。因此,压力传感器输出为:

$$W_{sensor} = F_{g2} + f(F_{g3}) = W_m \cdot \cos \alpha + f(W_m \cdot \sin \alpha) \quad (2)$$

式中: $f(F_{g3})$ 为影响压力传感器输出的非线性函数。

由式(1)、(2)可得,在倾斜称重条件下,电子秤称重误差为:

$$W_{error} = W_m - W_{sensor} = W_m(1 - \cos \alpha) - f(F_{g3}) \quad (3)$$

1.2 倾角测量计算

所选用的三轴加速计型号为 ADXL355B,其范围配置为±2 g,精度为 4 mg/LSB。加速计工作时,它测量不同状态下的重力加速度 g ,并分解成 XYZ 三轴加速度分量 A_x, A_y, A_z ,且 $A_x^2 + A_y^2 + A_z^2 = g^2$ 。图 3 为物体在不同倾斜情况下,加速度与倾角的关系示意图,物体的 X 和 Y 轴与水平面的倾角分别为 θ 和 ψ , α 为 Z 轴与重力加速度 g 的夹角,当物体水平放置时, $A_x = A_y = 0, A_z = -g$; 将物体绕 Y 轴倾斜 ψ° 后,传感器加速度变化如图 3(b) 所示,此时 $\theta = 0$; 将物体绕 X 轴倾斜 θ 度后,传感器的加速度变化如图 3(c) 所示, $\alpha = \psi$; 图 3(d) 为物体绕 X 轴旋转 θ 度后绕 Y 轴旋转 ψ 后的姿态,此时 Z 轴与重力加速度的夹角为 α 。

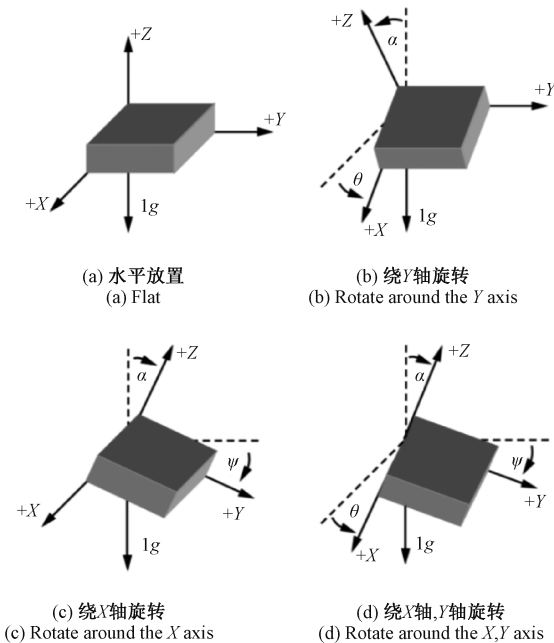


图 3 三轴投影与倾角关系

Fig. 3 Relationship between acceleration of three axis and inclination

将根据重力加速度在三轴分量 A_x, A_y, A_z 的三角函数关系,可以得出三轴夹角:

$$\begin{cases} \theta = \arctan\left(\frac{A_x}{\sqrt{A_z^2 + A_y^2}}\right) \\ \psi = \arctan\left(\frac{A_y}{\sqrt{A_x^2 + A_z^2}}\right) \\ \alpha = \arctan\left(\frac{\sqrt{A_x^2 + A_y^2}}{A_z}\right) \end{cases} \quad (4)$$

考虑包含角度传感器的 PCB 板的平整度和焊接技术等多种原因,安装角度传感器时可能存在系统误差,偏离其初始位置^[14-15],因此,在获取角度时候,需要考虑

加速计各轴的初始值: $\theta_0, \psi_0, \alpha_0$ 。从图 3 可以看出, X-Y 轴与 Z 轴正交,且式(4)表明, α 与 θ, ψ 存在反比关系,因此在消除初始值时,用 $\theta' = \theta - \theta_0$ 和 $\psi' = \psi - \psi_0$ 校正 X 轴与 Y 轴误差,而 Z 轴校正数值则根据 θ, ψ, α 三轴角度的关系得出,如下所示:

$$\alpha' = \arcsin\left(\frac{\frac{\tan^2 \theta'}{\tan^2 \theta' + 1} + \frac{\tan^2 \psi'}{\tan^2 \psi' + 1}}{1 - \frac{\tan^2 \theta'}{\tan^2 \theta' + 1} - \frac{\tan^2 \psi'}{\tan^2 \psi' + 1}}\right) \quad (5)$$

叉车秤倾角 α 为 X-Y 平面法向量 Z 与重力加速度 g 的夹角,用于描述 X-Y 轴所在平面与水平面之间的平面夹角。此外,为了研究叉车秤在相同倾斜角度值,不同倾斜方向的称重精度差异,将电子叉车秤叉齿开口方绕 X 轴顺/逆时针旋转定义为上翘/下压方向,绕 Y 轴顺/逆时针方向旋转定义为右倾/左倾方向,如图 4 所示。

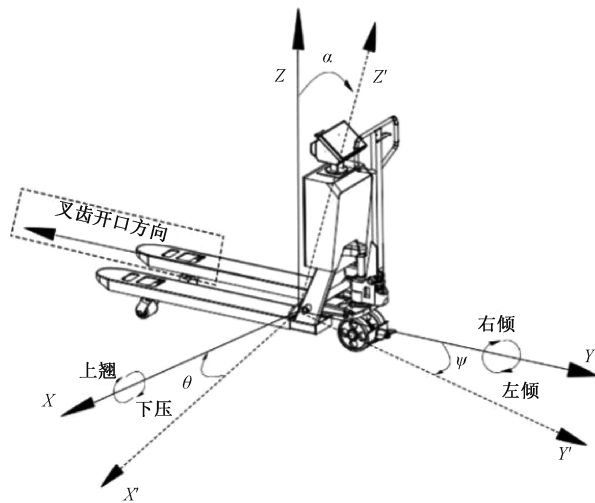


图 4 叉车秤倾斜角度

Fig. 4 Forklift scales tilt angle

1.3 多方向固定倾角称重实验

为了获取电子叉车秤在倾斜状态下称重误差数据,利用倾斜实验台,对承重 1 500 kg,感量 0.02 kg 的电子叉车秤在上下左右 4 个方向,选取 0.5°、1°、1.5° 与无倾斜共计 13 个标定点,每个标定点进行 10 组加卸载实验。

该倾斜实验台由倾斜平台、千斤顶、行车、砝码、水平角度尺和激光位移传感器组成,角度尺分辨率为 0.05°,放置在工装互相正交的两边用于检测平面倾斜角度,激光位移传感器测量实验过程中叉齿高度变化。在进行实验前,首先根据角度尺显示将工装调整至水平,再利用行车将叉车秤吊至倾斜平台上,进行重量标定。标定完重量后,通过千斤顶调整不同倾斜方向垫高倾斜角度,实验台如图 5 所示。调整好角度后,由行车加卸载砝码并通过仪表内置串口,输出重量、角度数据,单个方向倾斜实

实验做完后,重复其余方向倾斜的称重加载实验。倾斜实验流程图如图 6 所示。

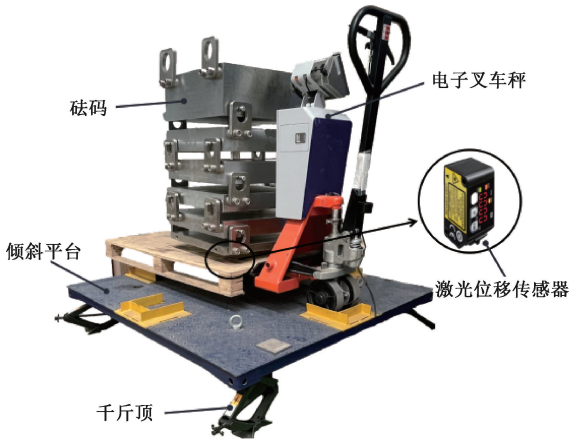


图 5 倾斜实验台

Fig. 5 Tilt weighing simulation bench

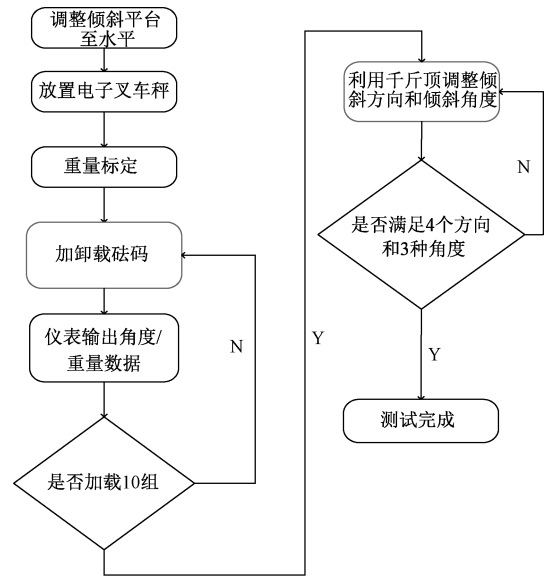


图 6 倾斜加载流程

Fig. 6 Inclination experiment process flow char

由倾斜实验测得的称重精度数据如图 7 所示,该图横轴为加载重量,纵轴为称重误差,对“上翘”、“下压”、“左倾”、“右倾”4 个方向和 0.5°、1°、1.5°3 个倾斜角度

测量称重误差,其中边框加粗的称重数据为正误差数据,非加粗的为负误差数据。

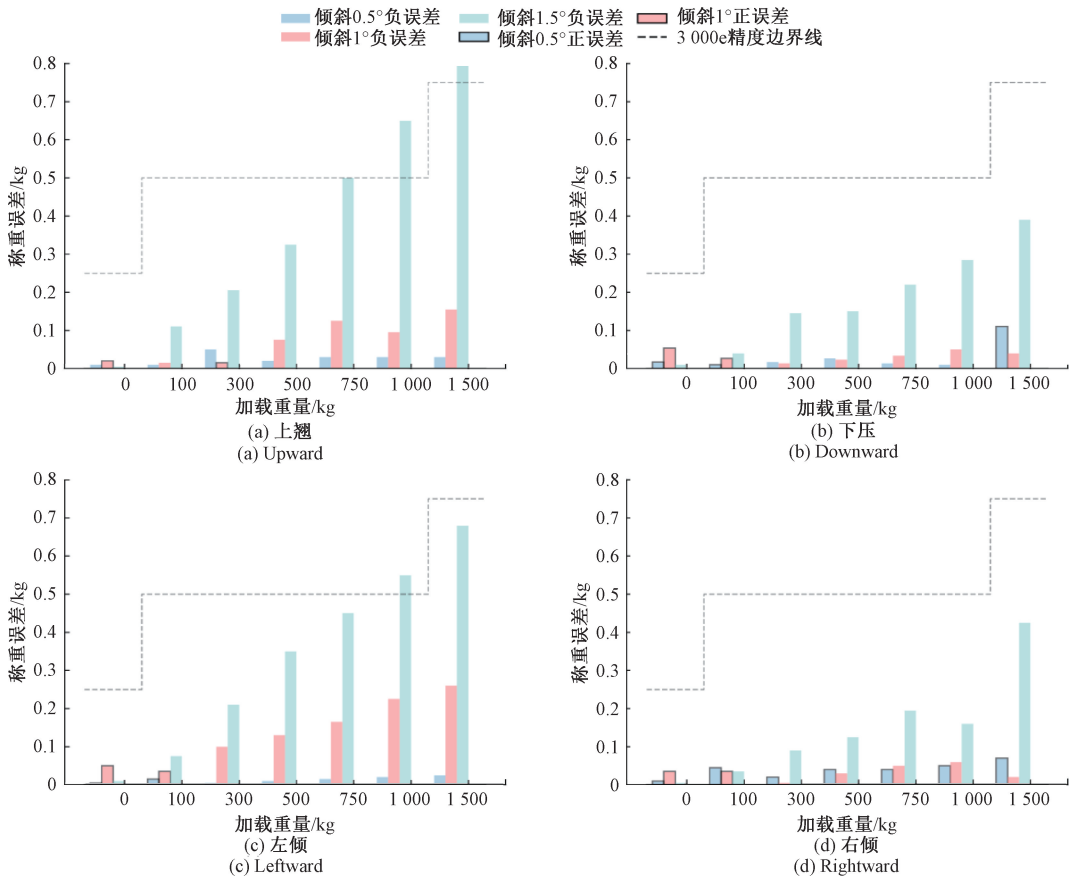


图 7 4 个方向和 3 组角度倾斜的称重误差

Fig. 7 Weighing errors for combine of the four directions at three inclination angles

从图中可以发现,倾斜角度在 0.5° 时,称重误差贴近 0 误差,而当倾斜角度到达 1.5° 时,4 个方向的称重误差远远大于 0.5° 和 1° 时的称重误差,特别是,当倾斜方向为“上翘”和“左倾”时,电子叉车秤的称重精度超出 3 000e,当倾斜方向为“下压”和“右倾”,倾斜 1.5° 时,称重精度高于另外两个方向,此外,当这两个方向倾斜角度为 0.5° 时,称重精度呈现正误差,而正值的称重误差是在传感器受力平面处于水平状态时,由于标定误差造成的,这说明,不同倾斜方向下,压力传感器受力不同。为了使得电子叉车秤在地面倾斜 1.5° 内,称重状态达到 3 000e 精度,本文在式(3)的基础上,提出电子叉车秤的称重误差补偿算法。

2 倾斜称重误差补偿模型的建立

当叉车秤倾斜角度为 α 时,对式(3)进行泰勒分解近似有:

$$W_{\text{error}} = W_m \left(\frac{1}{2} \alpha^2 + o(\alpha^2) \right) - f(F_{g3}) \quad (6)$$

式中: $o(\alpha^2)$ 表示 α 的二阶无穷小。由于式(6)中 $o(\alpha^2)$ 对载荷重量值 W_m 影响远小于电子叉车秤最大允许误差,因此可以将其忽略,结合式(6)和(5)可以得出称重误差补偿公式:

$$W_m' = W_{\text{sensor}} + W_{\text{error}} = W_m \left(1 + \frac{1}{2} \alpha^2 \right) - f(F_{g3}) \quad (7)$$

其中, W_m' 为根据算法补偿后的重量。由于压力传感器受力平面变化复杂,且传感器水平方向力 F_{g3} 对压力传感器作用不敏感,因此,式(7)可以简化为:

$$W_m' = K \cdot W_{\text{sensor}} \cdot \alpha^2 + W_{\text{cal}} \quad (8)$$

其中, K 为补偿倾斜补偿系数, W_{cal} 为模型修正值。

与电子台秤不同,电子叉车秤多传感器和多受力平面,且叉车秤车体较长、车身较软,加载载荷会造成车体结构形变,进而导致压力传感器受力平面产生偏斜,这使得压力传感器受到载荷作用时,在地面倾斜角度相同的情况下,其受力平面在不同倾斜方向测量出的倾角值也不同,此外,由于加速计放置在接线盒内,无法准确地测量叉齿因加载造成的角度变化,因此,需要先修正加载重量对压力传感器倾角变化造成的影响。为了深入了解该电子叉车秤在货物加载造成的传感器受力平面的变化,需要利用激光位移传感器测量叉齿与水平地面高度差从而计算叉齿倾角值。

叉齿倾角与称重误差两者之间的关系如图 8 所示,其中横轴为叉齿倾斜角度,纵轴为称重误差,圆点为上翘/下压方向数据,三角为左倾/右倾方向数据,抛物虚线为叉齿倾角与称重误差趋势线,从图中可以发现,当加载至 1 500 kg 时,倾斜角度后 0.6°, 右 0.3° 时,产生了正数

值的称重误差,因此,传感器受力平面大约偏移至后 0.6°, 右 0.3°。根据对电子秤的受力分析可知,传感器“上下”倾斜与垂直方向分力 F_{g2} 相关,“左右”倾斜与水平方向分力 F_{g3} 相关。由于 F_{g3} 非线性,且叉车秤压力传感器对水平方向应力 F_{g3} 不敏感等特点,本文考虑简化模型,根据货物加载造成压力传感器“上翘/下压”方向倾斜角度变化,对绕 X 轴方向倾斜角度进行修正,再根据修正后的倾斜角度补偿称重精度。

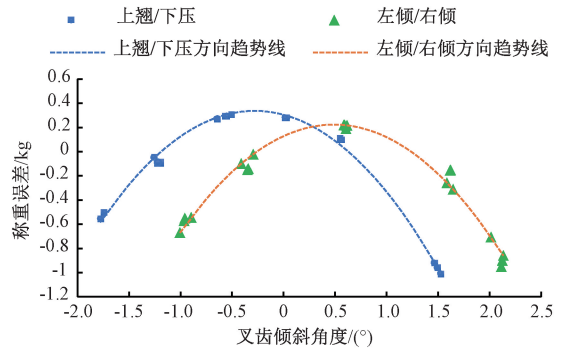


图 8 加载 1 500 kg 下叉齿在 4 个倾斜方向的倾斜角度与称重误差变化

Fig. 8 Tilt angle of Fork teeth in four direction and weighing error data under 1 500 kg load

加载重量与绕 X 轴方向叉齿倾角变化呈线性关系,如图 9 所示,当加载至 1 500 kg 时,倾角变化约为 0.6°, 对式(8)的修正如下所示:

$$W_m' = K \cdot W_{\text{sensor}} \cdot g(W_{\text{sensor}}, \alpha)^2 + W_{\text{cal}} = K \cdot W_{\text{sensor}} \cdot \alpha_{\text{real}}^2 + W_{\text{cal}} \quad (9)$$

其中, α_{real} 为修正后的倾斜角度, $g(W_{\text{sensor}}, \alpha)$ 为修正公式,可以看出, W_m' 与 W_{sensor} 和 α_{real} 成正比。

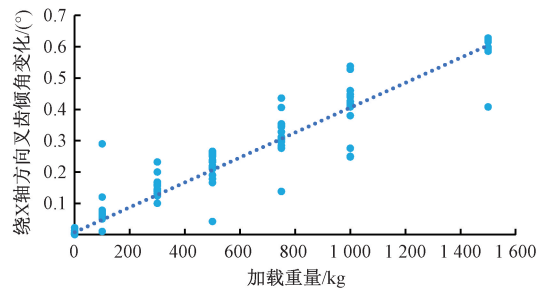


图 9 加载重量与叉齿倾斜角度变化

Fig. 9 Loading weight & fork tooth tilt angle change

3 误差模型参数建立及实验验证

3.1 最小二乘法拟合模型参数

为了拟合计算出式(8)、(9)的模型参数补偿倾斜补

偿系数 K , 和模型修正值 W_{cal} , 并对比两种算法的补偿能力以验证修正角度模型的效果, 本文利用称重实验台测得的倾斜状态电子叉车秤称重数据, 采用如下所示的最小二乘法算法拟合模型参数:

$$R(\delta) = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i, \delta))^2 \quad (10)$$

当 $R(\delta)$ 达到最小 $\hat{\delta}$ 时, 称为 δ 的最小二乘估计^[16]。其中, $f(x_i, \delta)$ 为式(7)、(8)描述的倾斜称重误差补偿模型, δ 为模型参数, y_i 为测量出的实际称重误差, n 为拟合数据总量, 这里为 1 690。利用最小二乘法分别对两种模型拟合, 拟合准确度 R^2 分别为 0.848 和 0.862。 R^2 是用来反映回归模型解释因变量变化的可靠性的统计指标^[17], 公式如下:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\bar{y} - y_i)^2} \quad (11)$$

其中, \hat{y} 为预测值, y 为真实值, \bar{y} 为真实均值, n 为拟合总量。

考虑当倾斜角度为 0.5° 和 1° 时, 称重精度完全在 3 000e 精度内, 因此, 本文只对倾斜角度为 1.5° 的称重数据进行称重误差补偿。此外, 本文将修正和未修正的倾斜角度下两种不同的补偿算法模型, 分别应用于实验台所测得的数据, 它们的补偿结果如图 10 所示。可以看出, 两种算法模型拟合结果都能使电子叉车秤在 4 个方向倾斜 1.5° 时达到 3 000e 的精度, 但未修正倾斜角度的模型在加载载荷增大后补偿精度和一致性有所下降, 而修正倾斜角度的模型补偿效果随着加载载荷增大逐渐增大, 当加载载荷在 300 和 500 kg 时, 补偿效果最差, 当加载至 1 500 kg 时, 4 个方向称重误差接近, 约为 0.05 kg, 远小于最大允许误差 $MPE < 0.75$ kg 的要求, 这说明修正倾斜角度的模型补偿称重精度的效果优于未修正角度的模型。

3.2 多层感知机非线性回归

Rumelhart 等^[18] 提出多层感知机 (multiple layer perceptron, MLP), 用于解决非线性数据多分类问题, 这种网络模型的结构由不同层的多结点组成, 每层结点与下一次层结点顺次相连并输出至后一层结点, 最终输出层根据连接权值放大或衰减, 每一结点的输出值由该结点输入、激励函数及偏置量决定^[19]。本文采用 MLP 网络进行非线性拟合^[20], 以对比模型准确性, MLP 输入为加载重量与修正后的倾斜角度, 输出为称重误差, 该网络由 1 个输入层、1 个隐藏层和 1 个输出层组成, 经过多次实验并观察产生的均方误差 (MSE) 后, 选取层数为 128、32、8, 步长 η 为 1×10^{-2} , 以及 Adam 优化器效果最好。采

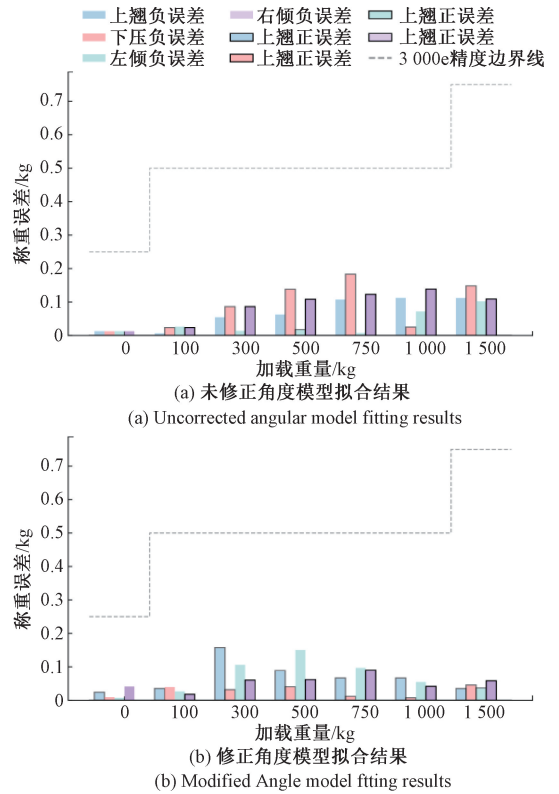


图 10 基于测量数据的修正角度与未修正角度模型最小二拟合算法误差补偿结果

Fig. 10 Effect of corrected and uncorrected tilt angles algorithm models least squares fitting result in measured data

用 MLP 非线性回归的准确率 $R^2 = 0.805$, 将测试数据带入拟合后的模型, 其结果如图 11 所示。

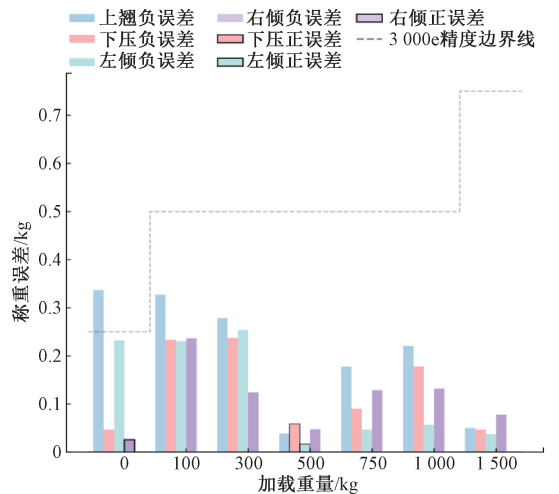


图 11 基于测量数据的 MLP 网络拟合结果

Fig. 11 MLP regression results in measured data

从图 11 中可以看出, 当加载超过 300 kg 后, MLP 回归结果能达到精度要求, 在满载 1 500 kg 时, 与未修正角

度模型最小二乘法拟合结果相比,MLP 的拟合结果更加准确,然而在小重量,特别在无加载情况下时,MLP 拟合能力无法达到 3 000e 精度要求。当变量之间存在函数关系时,采用复杂的回归技术能够比神经网络更好地拟合模型。复杂回归技术所得到的模型相对于神经网络来说更为简单且具有实际意义。此外,回归技术还具有生成每个自变量可解释系数的优点^[21]。因此,相比于神经网络回归,根据最小二乘法拟合出的参数模型,更适合在嵌入式设备中实现。

3.3 电子叉车秤称重误差补偿算法实验结果

为了验证根据测试数据计算结果的准确性,本文将未修正角度和修正角度补偿模型分别写入嵌入式仪表,利用倾斜实验台对包含称重误差补偿算法的电子叉车秤进行补偿效果对比实验。考虑倾斜角度在 0.5°和 1°时,叉车秤称重精度完全在 3 000e 精度范围内,不需要补

偿,因此,验证实验只对 4 个方向倾斜 1.5°的倾斜工况进行实验验证,在验证过程中,先在仪表中设置关闭补偿功能,对叉车秤进行 3 组加卸载数据测试,再分别设置开启两种补偿模型算法,进行 3 组加卸载数据测试,验证结果如图 12 所示。可以看出,两组模型都能达到 3 000e 的精度,未修正角度补偿模型效果的数据在倾斜实验台“上翘”、“左倾”方向,加载 1 500 kg 时候,称重误差为负值,而在“下压”、“右倾”方向时,称重误差为正值,这说明压力传感器受力平面仍然处于“右下”偏移的状态,特别是,当倾斜方向为“左倾”时,未修正角度补偿模型补偿的称重精度低于无称重补偿结果。随着加载重量逐渐增大,修正角度补偿模型使得称重误差逐步收敛,而未修正角度补偿模型的称重精度逐步发散。因此,修正倾斜角度后的电子叉车秤称重误差补偿模型效果更好。

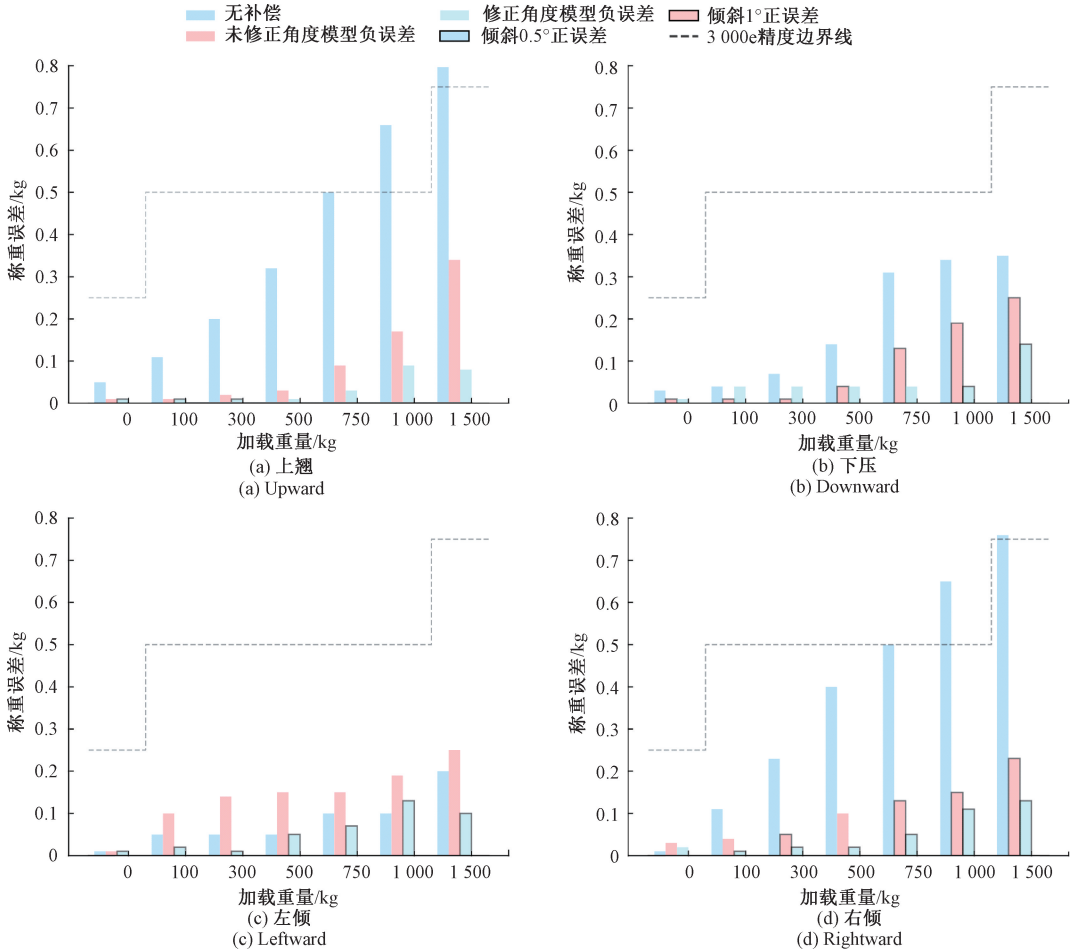


图 12 4 个倾斜方向下无补偿、未修正倾斜角度模型、修正倾斜角度模型补偿效果

Fig. 12 Results of four direction weighting error compensation in three states: uncompensated, uncorrected angle compensation, and corrected angle compensation

4 结 论

本文基于电子秤在倾斜状态下倾斜角度与称重误差之间的数学关系,利用一种可以模拟多角度多方向倾斜的实验台,对不同方向和不同倾斜角度下的称重误差数据进行了测量分析。根据实验数据和电子叉车秤的特点,对加载状态下加速计测量角度进行修正,并建立了修正后的角度与称重误差之间的数学模型,进而提出了基于叉车秤倾角的称重误差补偿算法。通过倾斜实验,验证了修正角度与未修正角度两种补偿模型的可行性,结果证明它们都能够使电子叉车秤在任意倾斜方向和倾斜角度为 1.5° 时,达到最大允许误差 $MPE < 0.75 \text{ kg}$ 的 3 000e 精度要求。在移动电子叉车秤领域,本文提出了一种经过实验证明的倾斜称重误差补偿算法,与传统电子叉车秤相比,具有更高的适应性和准确性。

参考文献

- [1] REBELLE J. Truck loading or unloading operations: Reduction of the whole-body vibration exposure of pallet truck drivers at the dock leveller location [J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2021, 83: 103127.
- [2] 尹雪,郝世豪,陈楠. 电子秤检定与称量误差补偿方法的分析[J]. *设备管理与维修*, 2021, 488(2): 23-24.
YI X, HAO SH H, CHEN N. Analysis of electronic scale calibration and weighing error compensation methods [J]. *Equipment Management and Maintenance*, 2021, 488(2): 23-24.
- [3] 顾滨. 计量检定电子秤的误差及改进措施探究[J]. *科技创新导报*, 2019(32): 82-83.
GU B. Exploring the errors and improvement measures of electronic scales for metrology verification [J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2019(32): 82-83.
- [4] 王建乐,裘国华,李青. 悬臂梁式电子秤全周倾斜称重技术研究[J]. *传感技术学报*, 2022, 35(7): 881-887.
WANG J L, QIU G H, LI Q. Research on full-circle tilting weighing technology of cantilever beam electronic scale [J]. *Journal of Sensing Technology*, 2022, 35(7): 881-887.
- [5] WANG J, LI Q, QIU G. Research on the whole cycle tilt weighing technology of cantilever beam electronic scale [C]. 2022 4th International Conference on Intelligent Control, Measurement and Signal Processing (ICMSP). *IEEE*, 2022: 562-567.
- [6] KWON J, KIM H, KIM K. A study on load cell calibration of forklift truck scales [J]. *Measurement*, 2006: 663-671.
- [7] MOMOYA Y, ITO K. Deformation characteristics of track structures for level crossings subjected to heavy forklift load [J]. *Procedia Engineering*, 2016, 143: 1085-1092.
- [8] CHEN C, LIAO H. Design of a forklift truck scale [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2018, 5(3): 345-352.
- [9] SHINGALA A V, SEDAMKAR R R. Raw milk collection using POS (point of sale) and GPRS technology [J]. *International Journal of Applied Information Systems (IJAIS)*, 2014: 31-36.
- [10] 马凯丽, 宋辉. 电子称重系统水平度自补偿方法的实现 [J]. *电气自动化*, 2013, 35(4): 76-78.
MA K L, SONG H. Implementation of self-compensation method for levelness of electronic weighing system [J]. *Electrical Automation*, 2013, 35(4): 76-78.
- [11] 唐玉发, 张合, 徐国泰, 等. 基于加权移动平均的姿态角测量技术实现 [J]. *仪器仪表学报*, 2012, 33(8): 1844-1849.
TANG Y F, ZHANG H, XU G T, et al. Implementation of attitude angle measurement technology based on weighted moving average [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(8): 1844-1849.
- [12] 陈大伟, 赵建明. 带角度测量补偿的叉车秤 [J]. *中国科技纵横*, 2014(5): 84-84, 86.
CHEN D W, ZHAO J M. Forklift scales with angular measurement compensation [J]. *China Science and Technology Vertical*, 2014(5): 84-84, 86.
- [13] LIN H, LIN Y, YU J, et al. Weighing fusion method for truck scales based on prior knowledge and neural network ensembles [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 2014, 63(2): 250-259.
- [14] 马新宇, 朱维斌, 黄垚, 等. 基于 Kalman 的动态角度测量方法研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(3): 119-127.
MA X Y, ZHU W B, HUANG Y, et al. Research on Kalman-based dynamic angle measurement method [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(3): 119-127.
- [15] 张强, 吴志强, 云启凡. 基于 MIMU/磁传感器/双天线 RTK 的姿态测量方法研究 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2023, 37(5): 230-239.
ZHANG Q, WU ZH Q, YUN Q F. Research on attitude measurement method based on MIMU/magnetic sensor/

- dual antenna RTK [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37 (5): 230-239.
- [16] MEHMOOD T, LILAND K H, SNIPEN L, et al. A review of variable selection methods in partial least squares regression [J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2012, 118: 62-69.
- [17] CHICCO D, WARRENS M J, JURMAN G. The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation [J]. PeerJ Computer Science, 2021, 7: e623.
- [18] RUMELHART D E, HINTON G E, WILLIAMS R J. Learning internal representations by error propagation [J]. Readings in Cognitive Science, 1988, 323 (6088): 399-421.
- [19] DESAI M, SHAH M. An anatomization on breast cancer detection and diagnosis employing multi-layer perceptron neural network (MLP) and Convolutional neural network (CNN) [J]. Clinical eHealth, 2021, 4: 1-11.
- [20] LI G, WANG J, JIA X, et al. A new piecewise linear representation method based on the R-squared statistic [C]. 2021 3rd International Conference on Machine Learning, Big Data and Business Intelligence (MLBDBI). IEEE, 2021: 515-519.
- [21] ACHITE M, FARZIN S, ELSHABOURY N, et al.

Modeling the optimal dosage of coagulants in water treatment plants using various machine learning models [J]. Environment, Development and Sustainability, 2022: 1-27.

作者简介



蒋爽, 2004 年于河海大学获得学士学位, 2007 年于河海大学获得硕士学位, 现为河海大学机电工程学院高级实验师, 主要研究方向为疏浚自动化与智能信息处理。

E-mail: 20071763@hhu.edu.cn

Jiang Shuang received his B. Sc. degree from Hohai University in 2004, M. Sc. degree from Hohai University in 2007. He is now a senior experimentalist at the College of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University. His main research interests include dredging automation and intelligent information processing.



邓岚(通信作者), 2019 年于盐城工学院获得学士学位, 现为河海大学机电工程学院机械工程专业硕士研究生, 主要研究方向为智能检测装备与智能信息处理。

E-mail: l.deng@hhu.edu.cn

Deng Lan (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Yancheng Institute of Technology in 2019. He is now a post-graduate in College of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University. His main research interests include intelligent inspection equipment and intelligent information processing.