doi:10.3772/j.issn.1002-0470.2015.10-11.017

电动堆高车货叉偏载检测研究①

王成振②* 贠海涛③* 曹爱霞** 赵玉兰* 董 心* 曹俊业* 周学军***

(* 青岛理工大学汽车与交通学院 青岛 266520)

(** 青岛黄海学院交通与船舶工程学院 青岛 266427)

(*** 浙江诺力机械股份有限公司 湖州 313100)

摘 要 为了防止电动堆高车货叉偏载造成安全事故,设计了基于载荷传感器的电动堆高车货叉偏载检测系统,并提出了一种计算电动堆高车货叉偏载的算法。该算法根据传感器的检则值快速计算出反映货叉偏载状况的偏载距离,操作者据此进行操作,避免事故发生。对计算误差的分析验证结果表明,该偏载检测算法可以将误差控制在 15mm ~ 21mm,能够满足电动堆高车货叉偏载检测的设计要求。

关键词 电动堆高车, 货叉偏载, 最小二乘法, sigmoid 函数

0 引 言

现代仓储物流朝着信息化、自动化的方向快速发展,电动堆高车是仓储物流业的主要生产工具。电动堆高车由于没有可靠的辅助安全作业系统,时常会发生存取货的安全问题。在电动堆高车的货叉装载货物时,由于货物存放在货架的高处或者要装载的货物没有规则的形状,人的肉眼很难判断出货叉装载是否发生偏载。假若没有对货叉的偏载进行安全提示,当负载出现严重的偏载时,非常容易造成货物损伤事故,严重时可能造成人身伤亡。如果设计一个基于左右偏载传感器的电动堆高车货叉偏载检系统,并根据货叉左右偏载距离算法[1]得到的偏载结果进行有效的安全提示,就会有效地避免安全事故和人身伤亡的发生,从而大大提高电动堆高车货叉在存取货时的安全性[2,3]。本研究给出了电动堆高车货叉偏载检测系统的设计方法的货叉偏载距离算法,并通过试验验证了所提方法的可用性。

1 电动堆高车货叉偏载检测系统设计

1.1 货叉偏载检测系统方案

图 1 所示为货叉偏载检测系统方案及其信号输入输出关系示意图。

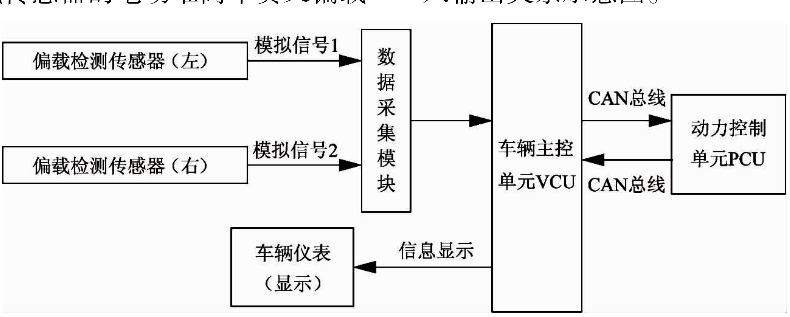

图 1 控制系统总体结构及输入输出关系图

---

① 国家自然科学基金(51205215),青岛开发区科技计划(2014-1-63)和青岛理工大学名校工程建设(MX4-042)资助项目。
② 男,1990 年生,硕士生;研究方向:从事汽车电子与电动汽车研究;E-mail: wcz9001@yeah.net
③ 通讯作者,E-mail: yunht@163.com

(收稿日期:2015-06-01)

传感器采集到的模拟信号通过数据采集板进行滤波、放大、模数转化等处理后,以数字信号(串口或 CAN 总线)形式发送给车辆主控单元(vhicle cntrol uit, VCU),VCU 接收传感器信号后一方面向动力控制单元(power control unit, PCU)发送命令,另一方面控制液晶屏显示安全提示信息[4,5]。

1.2 电动堆高车货叉偏载检测模块

如图 2 所示,在左右门架外侧各安装一个应变式载荷检测传感器,载荷传感器通过检测应变来估算货叉货物的左右偏载情况,如果发生较大的偏心情况(预先设定偏载距离的精度范围为 ±25mm),则会提出警告以及提示[6]。

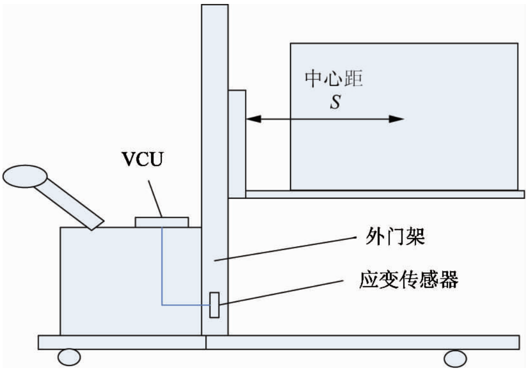

图 2 货叉偏载检测方案示意图

2 电动堆高车货叉左右偏载计算算法

电动堆高车货叉装载一定重量的负载,当负载左右偏载时,托盘的重力与偏心距能够形成一定的力矩作用在门架上,引起门架的微小变形[7],通过对左右门架外侧底部各安装的一个应变式载荷检测传感器的信号处理来估算左右偏载的偏心距。从图 2 可以看到负载的中心距为 S。

在左右偏载试验中,采集到负载在不同的质量(1500kg、1400kg、1300kg、1200kg、1100kg、1000kg、900kg、800kg、700kg、600kg、500kg、400kg、300kg)、不同的中心距(500mm、600mm、700mm、800mm)所对应的不同的偏载距离(重心左偏 100mm、重心左偏 50mm、正中 0mm、重心右偏 50mm、重心右偏 100mm)时的数据。表 1 为 1500kg 的负载在正中位置不同中心距下所对应的传感器采集的数据。

当货叉空载时,由于货叉的自身的重量,左右传感器存在初始的标定值。如表 1 可知,令左传感器的标定值为 L_0,则 $L_0 = 0.232$;令右传感器的标定值为 R_0,则 $R_0 = 0.223$。当负载未偏载时,左右负载变量存在差值,令这个差值为基差,本次试验组

表 1 1500kg 的负载在正中位置时传感器采集的数据

重量(kg)	空载 / 中心距(mm)	正中				
		左(275mm)		右(275mm)		基差
		0.232	变量	0.223	变量	右 - 左
1500	500	0.501	0.269	0.506	0.283	0.014
	600	0.524	0.292	0.527	0.304	0.012
	700	0.546	0.314	0.546	0.323	0.009
	800	0.567	0.335	0.570	0.347	0.012

(取≥500kg)平均基差为0.007 。试验车辆没有发生偏载时,右边变量均大于左边变量,平均值为0.007,说明这个车在负载状况下右脚受力大。负载发生偏载时,计算变量差值时,需要将0.007去掉,即变量差 =(左变量 +0.007) - 右变量。表 2 把实际左偏与右偏的距离分别用正数和负数形式来表示。

表 2 实际偏载距离的表示 (mm)

左偏 100	-100
左偏 50	-50
未偏载	0
右偏 50	50
右偏 100	100

2.1 建立力矩与左右偏载传感器变量和的函数关系

提取特征量

$$X_1 = L^1 + R^1 \quad (1)$$

建立力矩 T 与 X_1 的函数关系：

$$T = a + bX_1 \quad (2)$$

变量定义：L 为左偏载传感器数值；R 为右偏载传感器数值；L^1 为左传感器标定值，$L^1 = L - L_0$；R^1 为右传感器标定值，$R^1 = R - R_0$；T 为自定义力矩，$T = W \times S$(kg. m)；W 为负载重量(kg)；S 为偏载距离(m)。表 3 中给出了 1500kg 时，力矩 T 与特征量 X_1 数值以及提取特征量 X_1 的左右偏载传感器的变量数值。

表 3 1500kg 时力矩 T 与特征量 X_1 数值

变量值 / 力矩(kg. m)	L^1	R^1	X_1
750	0.269	0.283	0.552
900	0.292	0.304	0.596
1050	0.314	0.323	0.637
1200	0.335	0.347	0.682

取在这 5 个不同的偏载距离的左右偏载传感器的变量和的平均值：

$$X = \frac{1}{5}\sum_{i=-100}^{100}(L_i^1 + R_i^1) \quad (3)$$

其中 $i = -100, -50, 0, 50, 100$。

将在不同的偏载距离的左右传感器的变量和的平均值与所对应的实际负载力矩在 X-Y 坐标系上描绘，如图 3 所示。

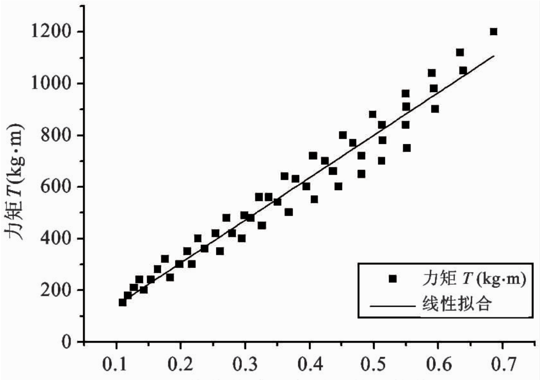

图 3 不同偏载距离时偏载传感器变量和的平均值与力矩关系图

线性拟合法是用连续曲线近似地刻画或比拟平面上的离散点组所表示的坐标之间的函数关系，也就是用解析表达式逼近离散数据；最小二乘参数估计法是通过最小误差的平方和寻找数据的最佳函数匹配，利用最小二乘参数估计法可以简便地求得未知数据，并使得这些求得的数据与实际数据之间的误差的平方和为最小。采用线性拟合和最小二乘参数估计方法[8,9]对在不同的偏载距离的左右传感器的变量和的平均值与所对应的实际负载力矩进行线性拟合，如图 3 所示，从而得到偏载传感器变量和的平均值与力矩的关于函数(式(2))关系。式(2)中的参数 $a = -23.73146$，$b = 1649.11153$。

计算误差计算公式：

$$e = Y_{count} - Y_{real} \quad (4)$$

其中 e 为计算误差，Y_{count} 为算法计算值或估计值，Y_{real} 为实际值。

平均计算误差计算公式：

$$e = \frac{1}{n}\sum_{1}^{n} | Y_{count} - Y_{real} | \quad (5)$$

其中 n 为试验数据的数目。

得到力矩的平均误差为48.48447kg. m，最大误差为128.33255kg. m。计算误差与实际力矩的关系如图 4。

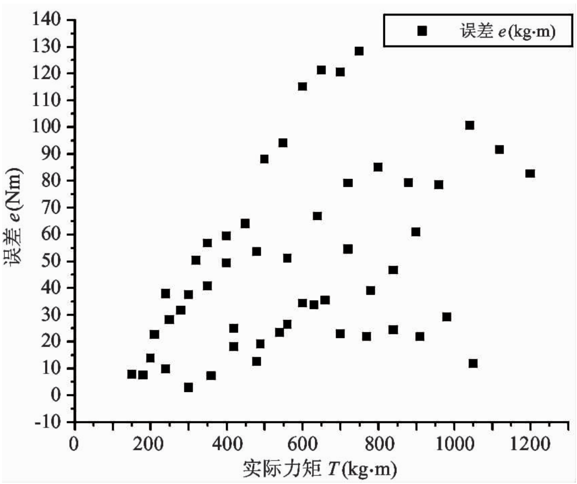

图 4 计算误差与实际力矩的关系图

计算误差率计算公式：

$$\varepsilon = \frac{| Y_{count} - Y_{real} |}{Y_{real}} \times 100\% \quad (6)$$

平均计算误差率计算公式：

$$\varepsilon = \frac{1}{n}\sum_{1}^{n}\frac{|Y_{\mathrm{count}} - Y_{\mathrm{real}}|}{Y_{\mathrm{real}}} \times 100\% \tag{7}$$

得到力矩的平均计算误差率为8.71316%,最大的计算误差率为19.17842%。计算误差率与实际力矩的关系见图5。

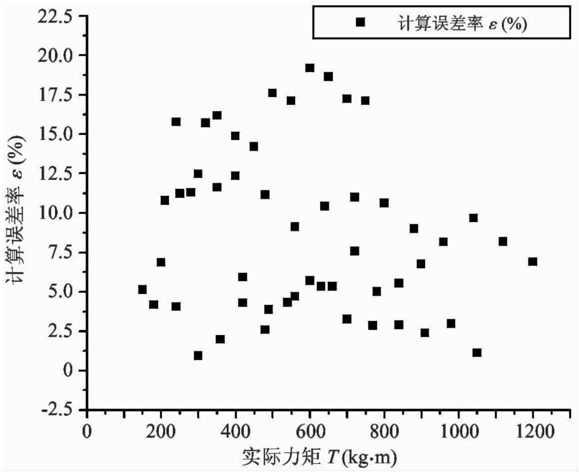

图5　计算误差率与实际力矩的关系图

误差率在预设允许的范围内(预设的力矩的误差率在10%内),把不同偏载距离时偏载传感器变量和的平均值与力矩的函数关系作为此算法的偏载传感器的数值与力矩的函数关系,即

$$T = -23.73146 + 1649.11153X_1 \tag{8}$$

2.2　建立偏载距离与左右偏载传感器变量差的函数关系

提取特征量

$$X_2 = L^1 + 0.007 - R^1 \tag{9}$$

建立偏载距离与特征量的关系

$$Y = c + kX_2 \tag{10}$$

以1500kg在中心距500mm的力矩 T=750kg.m时为例,表4给出了偏载距离 Y 与特征量 X_2 的数值以及建立特征量 X_2 的左右偏载传感器变量数值。

表4　750kg.m时偏载距离 Y 与特征量 X_2 数值

偏载距离(mm) \ 变量值	L^1	R^1	X_2
−100	0.288	0.271	0.024
−50	0.276	0.274	0.009
0	0.269	0.283	−0.007
50	0.261	0.281	−0.013
100	0.251	0.296	−0.038

建立偏载距离 Y 与特征量 X_2 的关系,如图6所示。

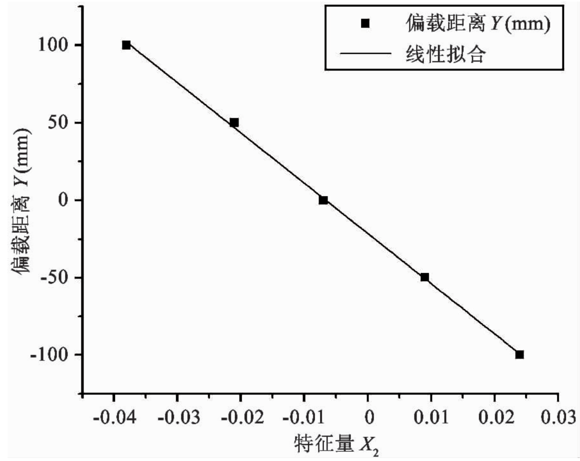

图6　力矩为750kg.m时偏载传感器变量差与偏载距离的关系图

采用线性拟合和最小二乘参数估计方法对上述关系进行线性拟合,得到力矩为750kg.m时偏载传感器的变量差与偏载距离的关系。即式(10)中 k = −3244.5643, c = −21.41412。

同理,可以采用相同的方法依次建立300−1500kg在500mm、600mm、700mm、800mm时,偏载距离 Y 与特征量 X_2 的关系。得到一系列 k 与 c 的数值。分别建立 k 与 c 关于力矩 T 的关系式,即 $k=f(T)$ 和 $c=f(T)$。

k 与 T 的函数关系如图7所示。

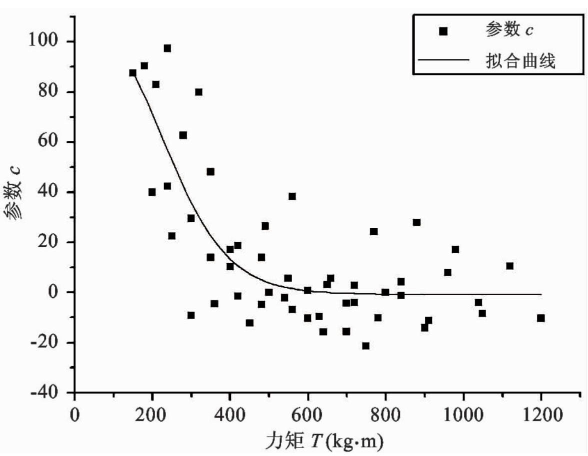

图7　k 与 T 的函数关系图

采用sigmoid函数对上述关系进行曲线拟合[10,11],如图7所示,从而得到参数 k 和力矩 T 的函

数关系为

$$k = \frac{A_{1b} - A_{2b}}{1 + e^{(T - X_{0b})/dx_b}} + A_{2b} \tag{11}$$

其中:$A_{1b} = -365245.68348$;$A_{2b} = -3573.27533$;$X_{0b} = -304.91187$;$dx_b = 157.71954$。

建立 c 与 T 的函数关系如图 8 所示。

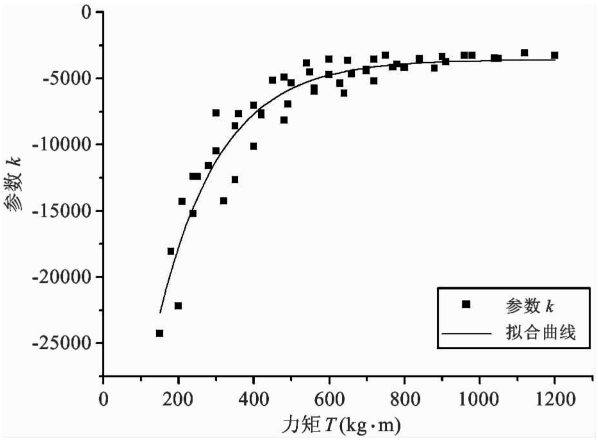

图 8 c 与 T 的函数关系图

采用 sigmoid 函数对上述关系进行曲线拟合,如图 8 所示,从而得到参数 c 和力矩 T 的函数关系为

$$c = \frac{A_{1b}^1 - A_{2b}^1}{1 + e^{(T - X_{0b}^1)/dx_b^1}} + A_{2b}^1 \tag{12}$$

其中:$A_{1b}^1 = 123.03567$;$A_{2b}^1 = -0.83563$;$X_{0b}^1 = 227.11709$;$dx_b^1 = 83.99580$。在已知偏载传感器采集到的数值后,力矩 T 可以由式 8 求得。将式(8)分别代入到式(11)及(12)中,那么分别得到参数 k 和 c 关于特征量 X_1 的函数方程;再将参数 k 和 c 代入式(10)中,那么就得到了偏载距离 Y 关于特征量 X_1 和 X_2 的函数方程。因此,由偏载传感器的变量值的关系,就可以求得偏载距离 Y。

由计算所得到的偏载距离 Y_{count} 与实际偏载距离 Y_{real} 的平均计算误差,最大计算误差,平均计算误差率与最大计算误差率见表 5。

表 5 计算误差与误差率

实际偏载距离 Y_{real}(mm)	平均计算误差(绝对值)(mm)	最大计算误差(绝对值)(mm)	平均计算误差率(%)	最大计算误差率(%)
-100	20.65077712	83.10881473	20.65077712	83.10881473
-50	15.39140247	73.59093433	30.78280493	147.1818687
0	15.69694086	56.46821971	∞	∞
50	16.28341053	50.69926421	32.56682107	101.3985284
100	17.95632225	99.37421491	17.95632225	99.37421491

计算出当前的偏载距离之后,根据预先设定并存储的偏载距离与偏载状况的对应关系,即可获知当前计算出的偏载距离所反映的负载的偏载情况。预先设定 $Y < -75$mm,对应的偏载状况为负载左偏;$-75\text{mm} \leqslant Y \leqslant -25$mm,对应的偏载状况为负载微左偏;$-25\text{mm} < Y < 25$mm,表示负载在中间位置,未偏置;$25\text{mm} \leqslant Y \leqslant 75$mm,对应的偏载状况为负载微右偏;$Y > 75$mm,对应的偏载状况为负载右偏。

由预先设定并存储的偏载距离与偏载情况的对应关系可知,表 5 中的平均计算误差在 15mm ~ 21mm 之间,在预先设定的允许范围内。

为方便工作人员及时、直观地了解到负载的当前放置状况,在判定堆高车的偏载状况后,将优选偏载状况显示在堆高车的显示屏上。作为更优选的实施方式,当判定叉车的偏载状况达到报警状况时,发出声或/和光报警信号,提示工作人员及时停止运输、处理偏载情况。

3 结 论

本文提出了一种计算电动堆高车货叉偏载距离的算法。由线性拟合和最小二乘法确立了力矩与左右偏载传感器变量和的函数关系,由 sigmoid 函数确立参数 k 和 c 与实际力矩的函数关系,最终确立了货叉偏载距离的算法。通过利用前期传感器的实验数据检验可知,此算法的误差在预先设定允许的范围内,可以做为电动堆高车货叉偏载检测的一种算法,对于后期进一步研究电动堆高车货叉的辅助安

全问题，提供了一定的借鉴意义。

采用上述方法，只需要在堆高车门架上设置两个载荷传感器，根据两个载荷传感器的检测值即可计算出反映负载偏载状况的偏载距离，检测结构简单，处理速度快，从而实现了对堆高车负载的自动、快速、准确检测。而且将偏载状况通过显示屏显示，声/光报警等进行提示，使得相关人员能够根据检测结果直观、准确地了解负载是否发生偏载，提高了电动堆高车运输货物的安全性。

参考文献

[1] 王敏良. 一种精确定位及位址确认方法. 中国专利，200910242937.9，2009-12-21

[2] 张志宇，冯平，章建东. 起重系统称重报警装置. 中国专利，202099019U，2012-01-04

[3] Schiebel Hans, Meinhardt Michael, Mebert Ralf. Lifting device for an industrial truck. US patent: 2004045745, 2004

[4] 黄学飞. 中小型自动化立体仓库的智能管理控制系统研制：[硕士学位论文]. 杭州：浙江大学，2007. 9-20

[5] 刘丹. 基于自动化立体仓库堆垛机的运动仿真研究：[硕士学位论文]. 西安：西安科技大学，2010. 29-40

[6] 蔡忠杭，周学军. 工业车辆货叉动作自动控制方法. 中国专利，200810062832.0，2008-12-17

[7] 孙永吉，邹雪梅，邹雪娟. 巷道式堆垛机货叉的力学模型及研究. 兰州工业高等专科学校学报，2009，16(2)：33-35

[8] 邹乐强. 最小二乘法原理及其简单应用. 科技信息，2010(23)：282-283

[9] 陈希孺，王松佳. 线性模型中的最小二乘法. 上海：上海科学技术出版社，2003. 1-17

[10] Alez, Gaby. Logistic Regression: Introduction, Formal Mathematical Specification, Sigmoid Function, and More. Charleston: Webster's Digital Services, 2012. 52-84

[11] 张晓有. 基于 sigmoid 函数的概率约束优化问题的光滑近似：[硕士学位论文]. 辽宁：辽宁师范大学，2013. 11-20

Research on fork's partial load detection for electric stacker truck

Wang Chengzhen*, Yun Haitao*, Cao Aixia**, Zhao Yulan*, Dong Xin*, Cao Junye*, Zhou Xuejun***

(* School of Automobile and Traffic, Qingdao Technological University, Qingdao 266520)

(** School of Traffic and Marine Engineering, Qingdao Huanghai University, Qingdao 266427)

(*** Zhejiang Noblelift equipment Joint Stock Co. Ltd, Huzhou 313100)

Abstract

To prevent an electric stacker truck from a safety accident arising from the partial load of its fork, a partial load measuring system using load sensors was designed, and an algorithm for partial load detection was proposed. The algorithm performs fast calculation of the partial distance reflecting the status of the fork's partial load based on sensors' measurements, thus the operator can operate according to the given calculation results to secure the truck's safe working. The calculation error analysis was conducted by simulation, and the results showed that the proposed algorithm's error of partial distance detection was 15mm ~ 21mm, meeting the design requirements of electric stacker trucks' partial distance detection was forks, which gives feasible control results.

Key words: electric stacker truck, partial load of forks, the least square method, sigmoid function