

基于三次样条拟合模型的喷雾加油装置油位检测算法改进

陈为政¹, 彭来湖^{1,2}, 唐麒麟¹

(1.浙江理工大学浙江省现代纺织装备技术重点实验室, 浙江 杭州 310018;

2.杭州旭仁自动化有限公司, 浙江 杭州 310018)

✉936753998@qq.com; 43233212@qq.com; 765834836@qq.com



摘要: 针对针织圆纬机^[1]喷雾加油装置^[2]无法精准预测和受控计量问题, 设计了基于ARM平台的喷雾加油系统, 实现信号采样、信号处理、人机交互及润滑控制等功能。由于圆纬机振动引起装置油桶液面波动, 导致油位检测精度下降, 虽已开发出基于最小二乘法的线性回归模型的油位检测算法, 但为进一步提高精度, 开发出基于三次样条拟合的油位检测算法。通过残差分析、测试对比, 表明三次样条拟合模型优于线性回归模型, 三次样条拟合优度达0.9921, 较之线性回归模型, 拟合优度同比提升0.674%, 能够进一步提高喷雾加油装置的工作准确性及稳定性。

关键词: 喷雾加油装置; 三次样条拟合; 残差分析

中图分类号: TP311 **文献标识码:** A

Improvement of Oil Level Detection Algorithm for Spray Fueling Device based on Cubic Spline Fitting Model

CHEN Weizheng¹, PENG Laihu^{1,2}, Tang Qilin¹

(1. Key Laboratory of Modern Textile Equipment Technology, Zhejiang Sci-tech University, Hangzhou 310018, China;

2. Hangzhou Xuren Automation Limited Company, Hangzhou 310018, China)

✉936753998@qq.com; 43233212@qq.com; 765834836@qq.com

Abstract: Aiming at the problem that the spray refueling device^[1] of the circular weft knitting machine^[2] is unable to accurately predict and control the measurement, this paper proposes to design a spray refueling system based on ARM platform to realize functions of signal sampling, signal processing, human-computer interaction and lubrication control. Due to the vibration of the circular weft knitting machine, the oil tank liquid level of the device fluctuates, which leads to the decline of the oil level detection accuracy. Although an oil level detection algorithm based on the linear regression model of the least squares method has been developed, an oil level detection algorithm based on cubic spline fitting is developed in order to further improve the accuracy. The residual analysis and test comparison show that the cubic spline fitting model is better than the linear regression model, and the cubic spline fitting goodness reaches 0.9921. Compared with the linear regression model, the fitting degree has increased by 0.674% over the same period of last year, which can further improve the accuracy and stability of the spray refueling device.

Keywords: spray refueling device; cubic spline fitting; residual analysis

1 引言(Introduction)

针织圆纬机运行过程中, 采用喷雾加油装置实现受控润滑油以延长成圈机件使用寿命, 同时能够减少或消除织物表面产生油针等布品瑕疵。针对这一问题, 现提供一种基于单片机LPC54608开发的智能喷雾式加油控制调节系统, 具有

对液位信号进行采样及处理、人机交互及润滑控制等功能。由于圆纬机运行时的机械振动, 导致油桶内液面波动, 降低了液位传感器的检测精度。针对这一问题, 虽已研发出基于最小二乘法的线性回归模型的油位检测算法^[3], 但由于油桶容积为非线性变化, 与实际情况仍存在一定差距。针对线性回

归模型的不足，进一步提出三次样条曲线拟合模型，提高液位、油耗信息等的监控精度。通过残差分析、测试对比，三次样条曲线拟合模型优于线性回归模型。基于ARM平台，实现成圈机件的润滑控制，进一步提高加油控制、受控计量的准确性及稳定性。

2 总体设计概述(Overview of overall design)

现提供一种基于ARM芯片LPC54608开发的智能喷雾式加油控制调节系统，包括LCD显示屏、薄膜按键、PCB电路板、一体式电磁阀过滤组件、气压调压阀、气压传感器和液位传感器等。基于LPC54608芯片的ARM处理器，结合三次样条拟合算法和嵌入式控制技术^[4]，可以实时显示当前油位和油耗信息，帮助使用者直观地了解机器状态；通过键盘输入可以设定喷油速度；在故障发生时能及时停机并报警，保证机器安全运行。该检测方法主要包括信号采集、信号处理、人机交互和控制输出。针对机械振动导致的油位波动问题，通过三次样条拟合求出两个小时油位数据的拟合曲线，得到当前油位的预估值。人机交互设计包括机器状态信息输出、系统参数录入等。通过测试对比，系统能够精确控制喷油时间，准确显示油耗信息，及时对异常情况进行报警，具有较高的准确性和稳定性。智能喷雾式加油控制调节系统的系统框图如图1所示。

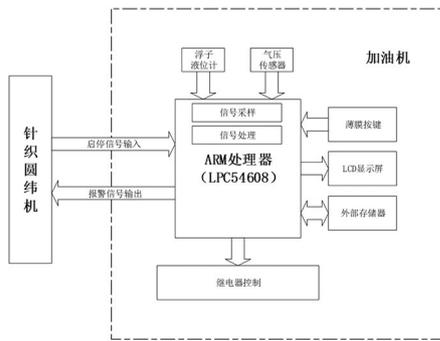


图1 系统框图

Fig.1 System framework

3 数据采样及处理(Data sampling & processing)

浮子液位计根据油位变化转化成模拟电信号。微控制单元(MCU)进行系统初始化后，通过模数转化器(ADC)对模拟电信号进行采样，每采样120个信号数据，通过冒泡算法^[5]对数据从小到大排序处理，除去大小两端各30个数据，以尽量减小液面波动引起浮子模拟电信号及干扰信号的影响，并对剩下的60组数据计算一次平均值，以此作为一次油位采样实际值。在喷雾加油装置运行时的2小时内，每分钟获取一次油位采样实际值，根据120个油位采样实际值进行拟合分析，以真实反映喷油机油位的实际变化。

4 数据拟合原理(Data fitting principles)

4.1 线性拟合

该方法基于最小二乘法^[6]建立线性回归方程 $\hat{y} = ax + b$ 。具体推导过程如下：

设 x_i 为采样时间， y_i 为 x_i 对应的一次油位采样实际值(其中 $i = 1, 2, \dots, 120$)， \hat{y}_i 为油位拟合值， $y_i - \hat{y}_i$ 为一次油位采样实际值与线性拟合回归方程的偏差，偏差越小，则线性拟合越精确。通过偏差的平方和作为总偏差的 Q 来评价拟合曲线的准确性。

$$Q = \sum_{i=1}^{120} (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^{120} (y_i - a - bx_i)^2$$

当 Q 值最小时，线性回归拟合直线在总体上最为接近。通过公式计算得 a 、 b 后，进而可求得拟合直线方程。

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2} (n = 120)$$

$$a = \bar{y} - b \bar{x}$$

其中， \bar{x} 、 \bar{y} 为 x_i 和 y_i 的均值。该方法虽然使总偏差 Q 最小，但在局部区域可能存在偏差较大，进而在油位检测过程中产生失真现象。为了让拟合曲线在非采样点更加贴近实际值，本文尝试提出采用三次样条插值法进行三次样条曲线拟合，并与线性回归拟合直线进行比较。

4.2 三次样条拟合

为进一步提高拟合优度，采用三次样条曲线拟合模型^[7]。其基本思想是设计一个以油位采样实际值为变量的三次多项式，使经过多项式计算后的输出数据逼近真实情况。三次样条曲线的多项式可以表示为：

$$\hat{y} = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3$$

当曲线方程与油位采样实际值的均方误差为最小时，可求解三次样条曲线方程的系数。由多项式计算得到的拟合值 \hat{y}_i 与油位采样实际值 y_i 之间必然存在误差 Δ_i 。其方差为：

$$\Delta_i^2 = [y_i - \hat{y}_i]^2$$

式中， i 为采样次数， $i = 1, 2, \dots, k$ ， k 为总采样次数。

误差 Δ_i 的均方误差 R 可以表示为：

$$R = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k [y_i - (a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3)]^2 = R(a_0, a_1, a_2, a_3)$$

为使均方误差 R 最小，对其四个变量求偏导，并使其等于0。

$$\frac{\partial R}{\partial a_0} = \frac{\partial R}{\partial a_1} = \frac{\partial R}{\partial a_2} = \frac{\partial R}{\partial a_3} = 0$$

整理可得：

$$\begin{cases} a_0 k + a_1 A + a_2 B + a_3 C = V \\ a_0 A + a_1 B + a_2 C + a_3 T = X \\ a_0 B + a_1 C + a_2 T + a_3 E = Y \\ a_0 C + a_1 T + a_2 E + a_3 F = Z \end{cases}$$

式中, $A = \sum_{i=1}^k x_i$; $B = \sum_{i=1}^k x_i^2$; $C = \sum_{i=1}^k x_i^3$; $T = \sum_{i=1}^k x_i^4$;
 $E = \sum_{i=1}^k x_i^5$; $F = \sum_{i=1}^k x_i^6$; $V = \sum_{i=1}^k y_i$; $X = \sum_{i=1}^k x_i y_i$;
 $Y = \sum_{i=1}^k x_i^2 y_i$; $Z = \sum_{i=1}^k x_i^3 y_i$ 。

通过滤波算法, 确定油位采样实际测量值后, 求解非齐次线性方程组即可求出 a_0 — a_3 。一般来讲, 非齐次线性方程组中, 方程的个数与未知量的个数相等, 且系数行列式 D 不为零, 则方程组有唯一解, 可以使用克莱姆法则求解。

$$D = \begin{pmatrix} k & A & B & C \\ A & B & C & T \\ B & C & T & E \\ C & T & E & F \end{pmatrix}$$

D_i 为把 D 中的第 i 列的各元素换成常数项 $[V, X, Y, Z]^T$ 的行列式, $i = 1, 2, 3, 4$ 。例如, D_1 为:

$$D_1 = \begin{pmatrix} V & A & B & C \\ X & B & C & T \\ Y & C & T & E \\ Z & T & E & F \end{pmatrix}$$

5 数据拟合算法设计(Data fitting algorithm design)

5.1 三次样条数据拟合

由于喷雾加油装置内结构布局不同, 油箱各个截面面积具有差异。在理想状态下, 喷雾加油装置内的油位并不是均匀变化的。同时, 由于圆纬机振动导致油桶液面波动, 干扰浮子液位计的实际测量, 从而使ADC采样得到的数据产生随机误差。采用最小二乘法进行线性拟合, 将油位变化简单看成是均匀、恒定的变化, 与实际情况有较大偏差。针对这一问题, 本文提出了一种新的数据拟合方法, 即在喷雾加油装置开启后的120分钟内, ADC每分钟采样120次, 通过冒泡法对120个数据由小到大排序, 去除前后各30个数据, 并对剩余60个数据求和取平均值, 以减小液面波动引起的采样误差。平均值则作为一次采样油位实际值, 喷油机运行120分钟内, 每分钟获取一次采样油位实际值, 共计120组数据。根据120组数据建立三次样条拟合曲线, 求解三次样条曲线函数并计算当前的油位拟合值。

5.2 油耗计算

当获得油位数据后, 需要对数据进行存储和计算。本设计使用平均油耗、瞬时油耗和剩余油量这三个变量来衡量油耗信息^[8]。喷雾加油装置开机油位校准时, 分别记录液位最低位及最高位的ADC采样值 $ADCBaseVal_L$ 和 $ADCBaseVal_H$ 作为校准值。由于ADC的最大分辨值为4,096, 则油箱内最

低油位和最高油位对应的数字量为 $4,096 \times ADCBaseVal_L$ 和 $4,096 \times ADCBaseVal_H$ 。根据获取的离散油位数据, 进行三次样条曲线拟合, 得到ADC油位数据随时间 t 的变化三次曲线方程 $ADCGetVal(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3$ 。再结合浮子液位计的结构尺寸, 可得下列关系:

$$\frac{h(t)}{H} = \frac{4096 \times ADCGetVal(t)}{4096 \times ADCBaseVal_H - 4096 \times ADCBaseVal_L}$$

即

$$h(t) = \frac{ADCGetVal(t) \times H}{ADCBaseVal_H - ADCBaseVal_L}$$

其中, H 为油箱最高液位高度, h 为油箱实际液位高度。

又由于油箱的截面面积 $S(h)$ 是随油箱液位高度的变化而变化的, 因此, 可知油箱容积随液位高度变化的函数为:

$$Val[h(t)] = \int_0^{h(t)} S(h) dh$$

油位最高时油箱容积为:

$$Val_{\max} = \int_0^H S(h) dh$$

设开机运行 t 时刻, ADC采样值为 $ADCGetVal(t)$, 则平均油耗 $Cons_{ave}$ 为:

$$Cons_{ave} = \frac{Val_{\max} - Val[h(t)]}{t}$$

瞬时油耗 $Cons_{ins}$ 为:

$$Cons_{ins} = \frac{dVal[h(t)]}{dt}$$

剩余油量 Val_{Re} 为:

$$Val_{Re} = Val_{\max} - \int_{h(t)}^H S(h) dh$$

6 软件设计(Software design)

6.1 初始化

系统初始化后, 会自动从铁电MB85RS16中读取之前设置好的喷油机的设备参数, 并设置好设备工作所需的工作参数。ADC需要获取六个基准值: 第一个是气压为0时的基准值, 第二个是气压最高时的基准值, 第三个是油位最低时的基准值, 第四个是油位最高时的基准值, 第五个是吹气气压最低的基准值, 第六个是吹气气压最高时的基准值。如果这些基准值没有被设置, 将被设置为默认值。还会读取四路气阀通气时间的设定值, 通过此函数, 设备会将开机时间以及总油耗初始化, 将各种设备状态设为开机默认状态, 读取吹气高报警是否开启, 吹气低报警是否开启, 腔体气压高报警是否开启, 腔体气压低报警是否开启。

6.2 采样及滤波算法

LPC54608处理器自带12位模数转换器, 系统初始化后, MCU通过传感器获取油位、油箱内气压以及吹气气压等参数, 将采集的数据通过ADC采样到MCU上, 每分钟采样

120 个数据。MCU对数据从小到大排序后取中间的60次做平均数，这个平均数作为一次采样的值，采样结束后数据会保存起来。通过三次样条拟合曲线方程来计算设备当前的油耗值以及油箱内剩余油量。

6.3 报警检测

报警检测模块实时获取气压、液位、油温等参数，经与设定参数比较后，通过LCD显示屏弹窗、LED报警灯、蜂鸣器进行异常报警，提示异常信息。

喷雾加油装置开机进行初始检测，当传感器检测到油箱液位小于设定最高液位值的10%时，警报LED红灯闪烁，蜂鸣器报警，LCD显示屏弹窗报警，喷雾加油装置进入待机状态；当检测到当前喷雾加油装置油箱液位值介于设定最高液位的10%—20%时，预警LED黄灯闪烁，蜂鸣器报警，LCD显示屏弹窗报警，喷雾加油装置进入运行状态；当检测到当前喷雾加油装置油箱液位值大于喷雾加油装置油箱最高液位值的20%时，正常运转指示绿灯常亮，喷雾加油装置正常运行。

在喷雾加油装置待机阶段，当传感器检测到当前油箱液位值小于设定最高液位值的10%时，LCD显示屏油位读条闪烁，弹窗提示加油；蜂鸣器报警。当检测到油箱液位值大于设定最高液位值的90%时，控制LCD显示屏油位读条闪烁，弹窗提示停止加油；蜂鸣器报警。

喷雾加油装置正常运行时，当传感器检测到当前油箱液位值在20分钟内未发生变化，或者液位低于设定的最低液位值，或者液位高于设定的最高液位值时，蜂鸣器报警。其中，最低液位值是指浮子液位计所能检测到的最低液位；设定的最高液位值是指当油箱加满油后，浮子液位计所能检测到的最高液位。报警反馈程序的流程图如图2和图3所示，其中图2为油位报警流程图，图3为气压报警流程图。

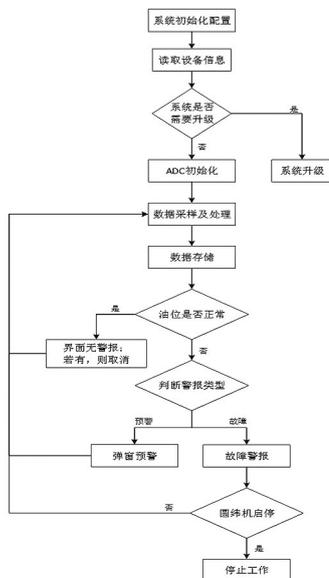


图2 油位报警流程图

Fig.2 Flowchart of oil level alarm

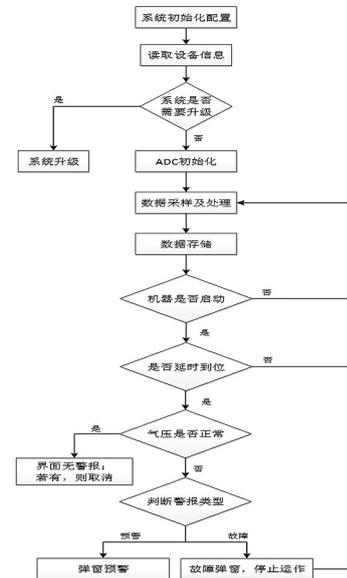


图3 气压报警流程图

Fig.3 Flowchart of pneumatic alarm

6.4 主界面开发

UI界面开发采用emWin，为图形LCD设计提供高级支持，极大简化了LCD设计。人机界面设计如图4所示，系统在设备上电后就会运行，液晶屏会实时显示喷油机的工作状态。显示分为五个部分，上方从左到右分别为油箱气压表、油箱液位显示表盘以及吹气气压表，下方是当前油耗和剩余使用时间，实时显示吹气管路单路的档位情况。

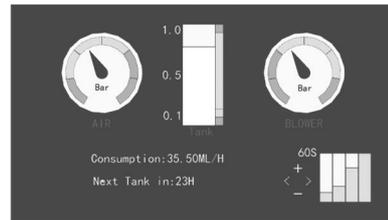


图4 人机界面

Fig.4 Human-machine interface

7 评价及测试验证(Evaluation & test verification)

7.1 残差分析

为验证分析拟合效果，本文对线性回归拟合模型和三次样条拟合模型进行残差分析^[9]，对比模型的拟合优度R平方，进一步说明三次样条拟合模型优于基于最小二乘法的线性回归拟合模型。

7.2 线性拟合残差分析

对油位数据进行线性拟合，线性回归拟合如图5所示。线性回归方程 $\hat{y} = ax + b$ 中各个参数及检验分析如表1所示。为进一步对线性拟合模型进行量化分析，通过残差分析确定油位采样数据的可靠性与分布情况，通过拟合优度分析量化拟合效果。线性拟合残差分析如图6所示，其线性拟合优度分析如表2所示。

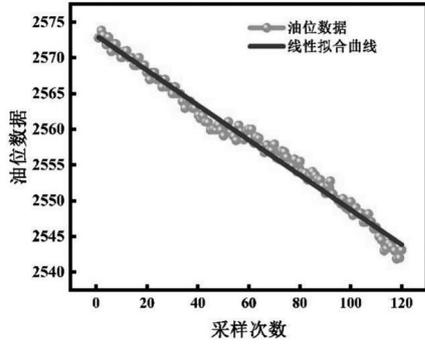


图5 线性回归拟合图

Fig.5 Linear regression fitting plot

表1 线性拟合参数

Tab.1 Linear fitting parameters

数据	数值	标准误差	t值	概率> t
斜率a	-0.24405	0.00273	-89.44063	2.83508E-110
截距b	2,573.12561	0.18903	13,612.60547	0

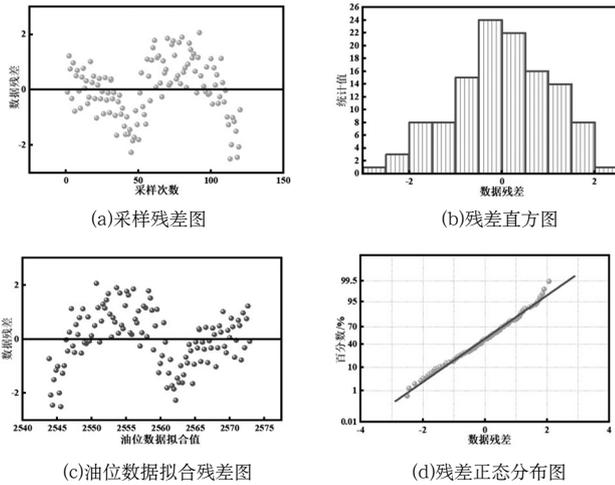


图6 线性拟合残差分析图

Fig.6 Linear fitting residual analysis plot

表2 线性拟合优度分析

Tab.2 Linear fitting goodness analysis

点数	自由度	残差平方和	皮尔逊相关系数	R平方	调整后R平方
120	118	126.52075	-0.99271	0.98546	0.98534

7.3 三次样条拟合残差分析

对油位数据进行三次样条拟合，拟合效果如图7所示。拟合曲线方程 $\hat{y} = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3$ 中各个参数及检验分析如表3所示。为进一步对三次样条拟合效果进行量化分析，同样采用残差分析确定油位采样数据的可靠性与分布情况，通过拟合优度分析量化拟合效果。三次样条拟合残差分析如图8所示，其三次样条曲线拟合优度分析如表4所示。

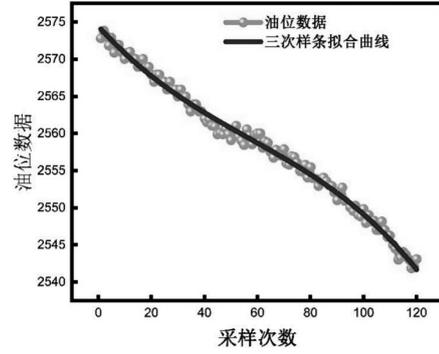


图7 三次样条曲线拟合图

Fig.7 Cubic spline curve fitting plot

表3 三次样条拟合参数

Tab.3 Cubic spline fitting parameters

参数	数值	标准误差	t值	概率> t	相关性
a_0	2,574.44107	0.28947	8,893.534	0	0.94103
a_1	-0.3957	0.02058	-19.2265	7.21528E-38	0.99757
a_2	0.00343	3.94477E-4	8.69763	2.62032E-14	0.99924
a_3	-2.00416E-5	2.1437E-6	-9.34905	7.96263E-16	0.99753

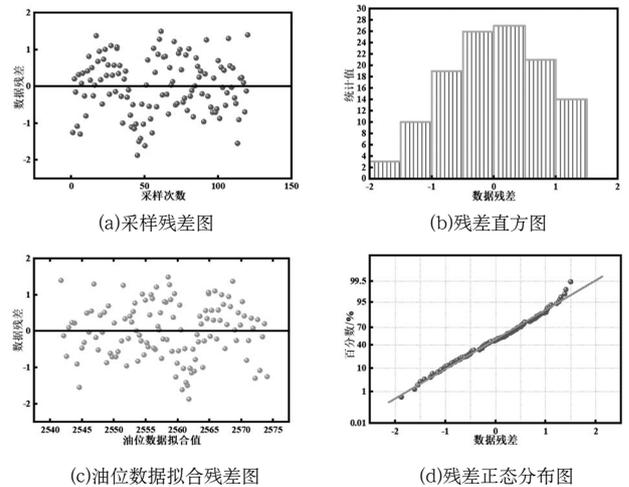


图8 三次样条拟合残差分析图

Fig.8 Cubic spline fitting residual analysis plot

表4 三次样条拟合优度分析

Tab.4 Cubic spline fitting goodness analysis

点数	自由度	残差平方和	简化的卡方检验	R平方	调整后R平方
120	116	68.78753	0.593	0.9921	0.99189

在进行拟合分析时，拟合优度R平方为回归平方和与总离差平方和的比值，表示总离差平方和中可以由回归平方和解释的比。这一比例越大越好，模型越精确，回归效果越显著。拟合优度R平方介于0—1，越接近1，回归拟合效果越好。从表2和表4可知，三次样条拟合优度可达0.9921，较之线性拟合模型0.98546，拟合优度同比提升0.674%，并且能够

在一定程度上反映喷雾加油装置油箱截面的变化。此外，在测试过程中，用仪表实时检测油箱的重量，可以测算油量的变化速度。将该速度与拟合曲线变化率相比较，经过多次测试，两者误差在10%以内，满足实际生产要求。

7.4 故障报警测试

为了避免故障发生时工作人员不能及时解决，设计了故障预警和故障报警两种机制。当油位或气压达到预警值时，人机界面上弹出故障预警弹窗，提醒工作人员当前油位或气压可能会发生故障，但不干涉机器的运行。当油位或气压超过警戒值时，人机界面上弹出故障报警弹窗，警告工作人员已经发生故障，同时控制喷雾加油装置停机并向大圆机发送报警信号。在预警值与报警值边界处设置了缓冲区间，防止误触发的发生。通过手动调节传感器，让油位和气压处于不同的区间。界面弹窗的测试结果如图9所示。经过测试，在不同情况下，界面弹窗能够准确快速地切换。

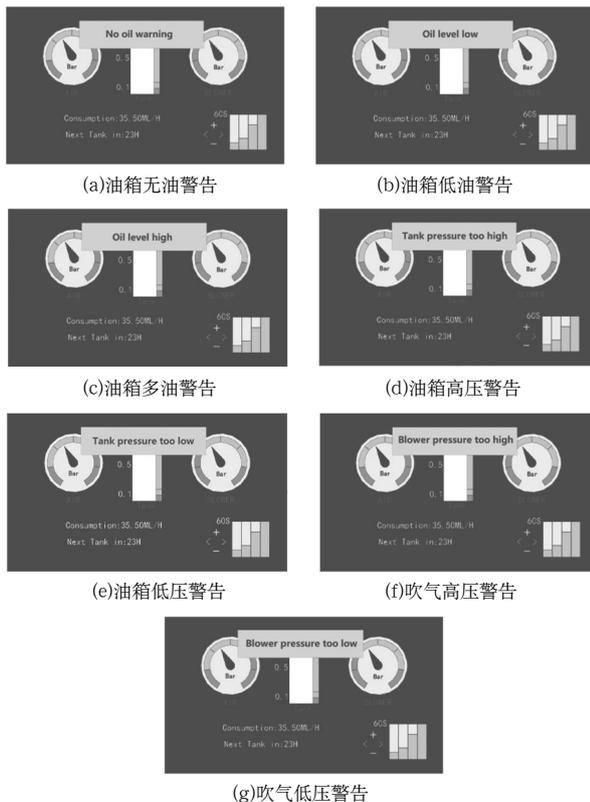


图9 界面弹窗报警测试图

Fig.9 Test diagram of interface pop-up alarm

8 结论(Conclusion)

针对针织圆纬机喷雾加油装置无法精准预测和受控计量问题，基于ARM控制器，结合三次样条拟合算法和嵌入式控制技术，设计了一种新型喷雾加油装置系统。该系统可以实

时显示当前油位和油耗信息，帮助使用者直观地了解机器状态；通过键盘输入可以调节系统信息参数；在故障发生时能及时停机并报警，保证机器安全运行。

测试结果表明，本设计提出的三次样条拟合模型能够进一步提高喷雾加油装置油耗计算的准确性以及喷油控制的稳定性，人机交互的设计方便了工作人员的使用，在喷雾加油装置领域具有广阔的应用前景。目前本设计已经在苏州某公司得到应用。本文着重研究了机械振动引起的油位波动对系统的影响及应对措施，对于如何减小或消除机械振动的影响是后续需要深入研究的内容。

参考文献(References)

- [1] 戴宁,胡旭东,彭来湖.针织大圆机运动实时控制技术[J].纺织学报,2019,40(12):134-139.
- [2] 张庆军,侯月云,杨效青,等.浅析棉纺设备的润滑管理[J].纺织器材,2020,47(01):53-56.
- [3] 郑明航,彭来湖,史伟民.基于线性回归方程的加油机油耗计算研究[J].软件工程,2021,24(07):21-23,20.
- [4] 王祥.嵌入式系统的实时性设计研究[J].国外电子测量技术,2009,04:31-35.
- [5] 涂艳,杨有,余平.冒泡排序算法及其改进算法的实验分析[J].重庆三峡学院学报,2011,27(03):53-57.
- [6] 田垆,刘宗田.最小二乘法分段直线拟合[J].计算机科学,2012,39(S1):482-484.
- [7] MCKINLEY S, LEVINE M. Cubic spline interpolation[J]. College of the Redwoods, 1998, 45(1):1049-1060.
- [8] 孙新城.汽车油耗测试系统的研究与开发[D].咸阳:西北农林科技大学,2007.
- [9] 施亮星,何楨.残差分析在计量型测量系统分析中的应用[J].工业工程,2008(03):108-111.

作者简介:

陈为政(1994-),男,硕士生,二级建造师.研究领域:智能检测与应用,嵌入式开发.

彭来湖(1980-),男,博士,副教授.研究领域:智能装备与嵌入式控制技术,工业互联网通信.

唐麒麟(1996-),男,硕士生.研究领域:智能检测与应用,软件开发.