

文章编号: 1006-9941(2014)03-0417-05

# 火药水分检测的偏最小二乘法回归分析与建模

杨顺民<sup>1</sup>, 韩民园<sup>2</sup>, 郑建利<sup>2</sup>, 宋文爱<sup>1</sup>

(1. 中北大学信息与通信工程学院, 山西 太原 030051; 2. 山西北方兴安化学工业有限公司, 山西 太原 030008)

**摘要:** 针对扁球状火药颗粒 1%~3% 的含水量和 0.1% 的检测精度要求, 采用变介质电容式传感器和自平衡交流电桥测量电路, 研制了电容式火药水分检测系统。在分析影响含水量的温度、湿度、重量和电压幅值等因素的基础上, 建立了偏最小二乘法多参数多元线性回归模型。经实验验证, 该模型下的水分检测系统测量最大误差为 0.12%, 且最大误差出现在含水量为 0.3%~1% 之间, 在含水量 1%~3% 之间误差均小于 0.087%, 满足 0.1% 的测量精度要求。

**关键词:** 信号与信息处理; 电容式传感器; 自平衡交流电桥; 偏最小二乘法; 多元线性回归

**中图分类号:** TJ55

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.03.027

## 1 引言

水分含量是火药类产品的重要技术指标之一, 是产品出厂检验的必测项目。火药水含量超标, 会导致爆炸性能下降, 甚至半爆或不爆, 直接影响火药类产品的性能<sup>[1]</sup>。生产过程中, 每一道加工工序对火药类产品水分含量的要求都有一定的限制, 前一道工序, 水分含量超标, 接下来的加工将成为“无用功”。以往对火药水分的测量采用人工干燥法, 以含水量 1% 的 5 g 样本为例, 干燥过程至少需 2 h。以每小时 90 kg 的生产速度计算, 待检测完毕, 水分含量超标将会产生至少 180 kg 水分含量不合格的火药物料, 需要重新进行造粒<sup>[2]</sup>。因此, 进行火药水分快速、准确测定势在必行。电容式水分传感器以结构简单、灵敏度高、动态响应好、抗过载能力强、信号获取方便、测量速度快而得到广泛的应用<sup>[3]</sup>。从近五年的研究文献中可以看出, 其应用主要集中在土壤<sup>[4]</sup>、谷物<sup>[5]</sup>、火药<sup>[6]</sup>、农作物茎秆<sup>[7]</sup>和型砂<sup>[8]</sup>等方面的水分检测。但此法易受堆积密度、物料温度、物料表面湿度等因素影响<sup>[9]</sup>, 因此分析电容式水分传感器的影响因素, 建立电容式水分传感器测量的数学模型, 对提高生产效率, 保证火药产品质量十分重要。

收稿日期: 2013-12-02; 修回日期: 2014-03-08

基金项目: 火炸药科研专项

作者简介: 杨顺民(1978-), 男, 讲师, 主要从事测试技术研究及设备研制。e-mail: ysmsoft@126.com

## 2 检测原理及方法

目前检测水分方法主要有直接法和间接法。直接法一般为干燥法和化学法, 间接法分为电测法、红外法、微波法和中子法等<sup>[10]</sup>。在比较各种方法的优缺点的基础上, 选用变介电常数平行极板电容器测量水分含量。平行板电容器的结构如图 1 所示。

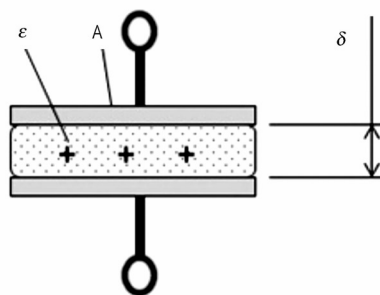


图 1 平行板电容结构

Fig.1 Diagram of parallel plate capacitor

电容计算公式见式(1):

$$C = \frac{\varepsilon A}{\delta} = f(\delta, A, \varepsilon) \quad (1)$$

式中,  $C$  为被测物料电容值, F;  $\varepsilon$  为被测火药介电常数,  $F \cdot m^{-1}$ ;  $A$  为两极板相对面积,  $m^2$ ;  $\delta$  为两极板的距离, m。当采用变介质型工作方式时, 式(1)即为被测火药介电常数的函数, 如式(2)所示。

$$C = f(\varepsilon) \Big|_{A, \delta = \text{常数}} \quad (2)$$

若被测火药充满两极板之间, 此时的初始电容( $C_0$ )为:

$$C_0 = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 A}{\delta} \quad (3)$$

若  $\varepsilon_r \rightarrow \varepsilon_r + \Delta\varepsilon_r$ , 则  $C \rightarrow C + \Delta C = C_{er}$ , 即

$$C_{er} = C_0 + \Delta C = \frac{(\varepsilon_r + \Delta\varepsilon_r) \varepsilon_0 A}{\delta} = C_0 + \frac{\Delta\varepsilon_r \varepsilon_0 A}{\delta} \quad (4)$$

$$\text{因此, } \Delta C = \frac{\Delta\varepsilon_r \varepsilon_0 A}{\delta} \quad (5)$$

式中,  $\Delta C$  为电容变化量,  $F$ ,  $\varepsilon_r$  为火药的介电常数,  $F \cdot m^{-1}$ ;  $\Delta\varepsilon_r$  为不同含水量火药的介电常数,  $F \cdot m^{-1}$ ;  $\varepsilon_0$  为空气的介电常数,  $F \cdot m^{-1}$ 。其中  $A$ ,  $\varepsilon_0$ ,  $\delta$  均为常数, 电容变化量  $\Delta C$  仅与不同含水量火药的介电常数  $\Delta\varepsilon_r$  有关。可通过构建与电容传感器相关的交流电桥和测量电路来测量电容的变化, 交流电桥如图 2 所示。由于两个传感器中充满相同的标准火药时, 其桥路输出并不为零, 因此设计了补偿电路<sup>[11]</sup>, 使桥路在输入为零时输出也为零。桥路输出信号通过放大、相敏检波后, 以电压形式采集, 通过测量输出电压, 计算出含水量。图 2 中  $C_1$ 、 $C_2$  为两个电容传感器, 测量过程中须首先在两个电容传感器中加入标准的干燥火药, 然后触发单片机产生补偿信号, 使桥路输出尽可能接近零, 之后保持一个传感器中火药不变, 另一个传感器中加入不同含水量的相同火药即测出其含水量。

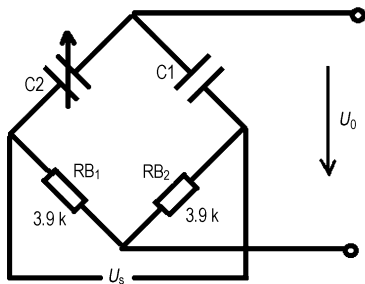


图 2 交流电桥电路

Fig. 2 Circuit of alternating current bridge

### 3 实验数据分析

#### 3.1 实验结果

实验过程中的振动采用 5 ~ 300 Hz 正弦波, 振动 90 s 后用物料充满平板电容器, 以获取较稳定的物料堆积重量。平板电容器  $B_1$  的重量为 37.69 g, 平板电容  $B_2$  的重量为 438.01 g, 平板电容  $B_1$ 、 $B_2$  体积均为  $810 \text{ cm}^3$ 。实验过程中平板电容  $B_1$  充满干燥标准物料, 平板电容  $B_2$  中充满待测物料; 实验测量数据见表 1, 其测量数据是在  $28 \text{ }^\circ\text{C}$  获得的, 且均为相同条件下经 5

次重复实验的均值。

表 1 火药水分测量数据 ( $T \approx 28 \text{ }^\circ\text{C}$ )

Table 1 Measured data of moisture-bearing gunpowder

No.	$M_1^{1)}/\text{g}$	$M_2^{2)}/\text{g}$	$U^{3)}/\text{mV}$	$H^{4)}/\%$	$F^{5)}/\%$
1	855.08	902.27	2.236	0	0
2	854.94	900.74	14.1245	49.73	0.348
3	852.61	901.53	25.9422	55.03	0.366
4	855.70	901.33	28.1780	61.26	0.494
5	853.54	899.57	49.4065	65.71	0.643
6	854.37	901.33	63.7809	67.37	0.937
7	848.52	899.52	80.4301	70.62	1.269
8	850.92	901.22	137.4118	68.12	1.358
9	854.87	902.05	152.5418	72.28	1.925
10	859.66	902.29	204.3155	76.42	2.138
11	850.94	900.77	206.6519	80.32	2.818
12	855.35	903.91	238.7174	82.53	3.154

Note: 1) mass of gunpowder before vibration; 2) mass of gunpowder after vibration; 3) measured voltage; 4) humidity of gunpowder; 5) moisture content of gunpowder.

#### 3.2 火药含水量与测量重量(振动前)的关系

图 3 为振动前火药含水量与测量质量的关系, 从图 3 中可以看出二者是非线性的、非正比的关系。造成这种现象的原因为: 测量物料为扁球状的火药颗粒, 随着含水量的增加火药颗粒有很小的体积膨胀, 再加上人工装载时不同操作人员对装载物料的紧实度、装载量判断的差异, 影响了测量质量与含水量的非线性、非正比的关系(在实际生产应用中采用机械系统自然堆积和固定时长的振动方式可实现每次物料装载的紧实度、装载量的一致性)。实验过程中电容传感器为  $18 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$  的长方体结构, 传感器体积一定, 物料的重量反映了装载物料的堆积密度。因此含水量的测量中物料堆积密度是一个不可忽略的因素。

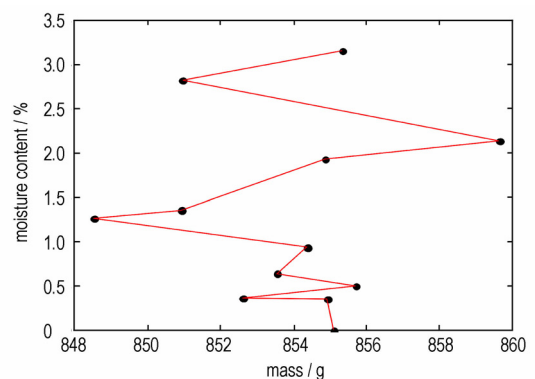


图 3 火药测量质量与水含量的关系(振动前)

Fig. 3 Relationship between mass of gunpowder and moisture content before vibration

### 3.3 火药含水量与测量质量(振动后)的关系

为了减小人为因素对装载物料堆积密度的影响,采用振动 90 s 后人工补填物料的方式来装载物料。测量结果如图 4 所示,从图 4 可以看出,在火药为含水量 0%~1.3% 时,随物料含水量增加,物料质量有增加,也有减少,呈现非线性的关系;含水量大于 1.3% 后,虽然也有单点测试结果的波动,但从总体趋势上看,物料质量随着物料含水量增加而增加,二者呈现一定的线性关系。这是因为振动后物料的体积相对稳定,物料含水量大于 1.3% 的火药比小于 1.3% 的火药物料孔隙率要稳定,而火药颗粒随含水量增加的体积膨胀率很小,因此,物料含水量增加带来了物料质量的增加。

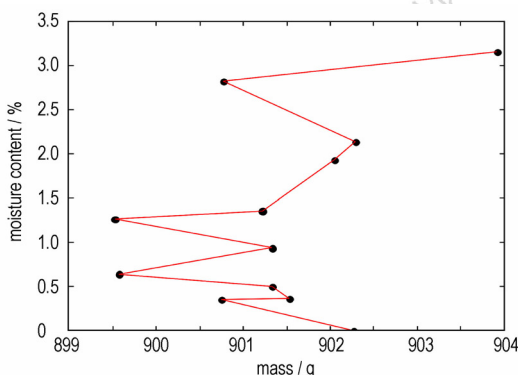


图 4 火药测量质量与含水量的关系(振动后)

Fig. 4 Relationship between mass of gunpowder and moisture content after vibration

### 3.4 火药含水量与测量电压的关系

通过实验测量数据建立了火药含水量与电压的关系,如图 5 所示。测量电压为自平衡电桥电路 X 方向和 Y 方向桥路输出电压的均值。从图 5 中可以看出,随着物料含水量的增加,其桥路输出电压幅值不断变大,且含水量低于 1.5% 时接近于线性变化。以电压为自变量  $x$ ,火药含水量为因变量  $y$ ,采用 regress 函数进行一元线性回归分析,结果表明:参数的估计值  $\hat{\beta}_0 = 0.0908, \hat{\beta}_1 = 0.0119$ ;  $\hat{\beta}_0$  的置信区间为  $[-0.1369, 0.3184]$ ,  $\hat{\beta}_1$  的置信区间为  $[0.0102, 0.0137]$ ; 相关系数为 0.9575,接近于 1,且统计量值  $F = 225.2030$ ,与统计量对应的概率  $P = 0.0000 < 0.05$ ,误差方差估计值  $\hat{\sigma}^2 = 0.0490$ ,故回归模型  $y = 0.0908 + 0.0119x$  成立,自变量  $x$  的取值范围为:  $0 \sim 250$  mV,因变量  $y$  的取值范围为:  $0\% \sim 3.5\%$ 。因此,初步预测物料含水量与电压幅值成线性正比关系。

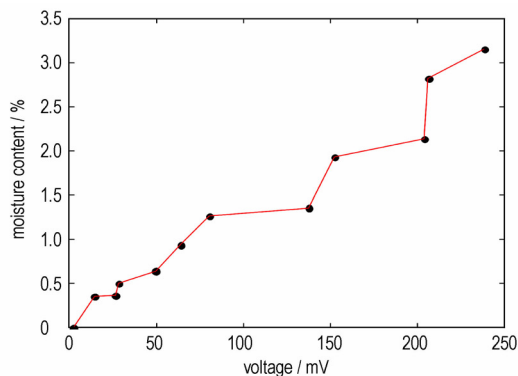


图 5 火药测量电压与含水量的关系

Fig. 5 Relationship between voltage and moisture content of gunpowder

### 3.5 火药含水量与物料湿度的关系

由于电容式火药水分在线检测系统实际应用的生产环境湿度大于 80%,因此,物料表面的湿度对实际的测量结果必然有一定的影响。实验中为了获取近似于实际生产环境的湿度条件,采用加湿器对水分子雾化、均匀搅拌的方式对测量物料表面进行加湿,使水分子附着在物料表面,测量结果如图 6 所示。从图 6 中可以看出,随着物料表面湿度的增加,物料含水量的明显变大,以物料表面湿度为自变量  $x$ ,火药含水量为因变量  $y$ ,采用 regress 函数进行一元线性回归分析,结果表明:参数的估计值  $\hat{\beta}_0 = -0.8415, \hat{\beta}_1 = 0.0341$ ;  $\hat{\beta}_0$  的置信区间为  $[-2.3274, 0.6444]$ ,  $\hat{\beta}_1$  的置信区间为  $[0.0115, 0.0566]$ ; 相关系数为 0.5314,小于常数 1,且统计量值  $F = 11.3388$ ,与统计量对应的概率  $P = 0.0072 < 0.05$ ,误差方差估计值  $\hat{\sigma}^2 = 0.5398$ ,故回归模型  $y = -0.8415 + 0.0341x$  成立,自变量  $x$  的取值范围为:  $0\% \sim 90\%$ ,因变量  $y$  的取值范围为:  $0\% \sim 3.5\%$ 。二者呈正比关系。

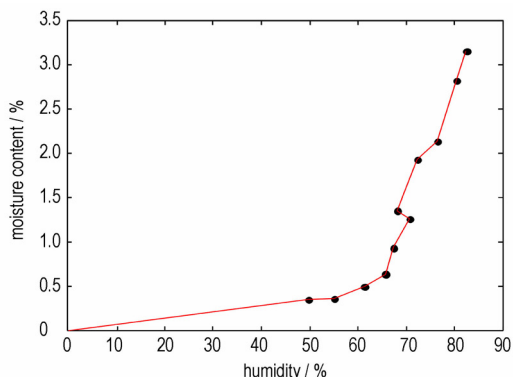


图 6 火药含水量与物料湿度的关系

Fig. 6 Relationship between humidity and moisture content of gunpowder

### 3.6 不同温度下火药含水量与物料温度的关系

由于要满足火药的在线检测,且生产出来的火药颗粒温度一般在 30~45 °C 之间,因此,必须考虑温度对检测结果的影响。实验研究了同种物料在 23.6, 28.3, 33.5, 41.2 °C 四个温度条件下含水量和电压幅值的关系,结果如图 7 所示。从图 7 中可以看出,同一种物料相同含水量所测电压幅值随温度的升高而稍微增加,此结果与文献[11]的结果相吻合。

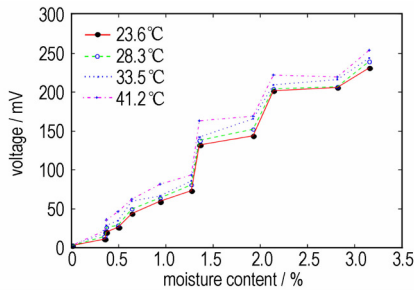


图 7 不同温度下火药含水量与电压幅值的关系  
Fig. 7 Relationship between moisture content and voltage under different temperature

## 4 偏最小二乘法数学模型的建立

### 4.1 偏最小二乘法分析

偏最小二乘回归分析法提供了一种多因变量对多自变量的回归建模方法,可以有效地解决变量之间的多重相关性,适合在样本容量为个数的情况下进行回归建模,可以实现多种多元统计分析方法的综合应用<sup>[12]</sup>。本研究采用偏最小二乘法进行自变量的分析,以温度  $T$ 、重量  $M$ 、电压幅值  $V$  和物料表面湿度  $H$  为自变量,以水分含量  $F$  为因变量进行了分析,得到了变量重要性投影(Variable Importance in the Projection, VIP)指标图(图 8)和因子载荷  $\alpha_i$  图(图 9)。从图 9 可以看出,温度  $T$  对于物料含水量的影响相对于其它变量来说要小得多,这是因为表 1 的数据是在约 28 °C 的条件下获取的,因此,温度  $T$  对物料含水量的影响很小,温度对含水率的影响系数仅为 0.0175,在模型中可以忽略,这一结果对实际生产过程中进行火药颗粒水分测量也是适用的。这是因为在实际生产过程中水分测量设备在生产线上中的工位是固定的,物料经传送带输送到水分检测工位时,其物料温度  $T$  是相对稳定的,而水分检测设备是实时在线检测,且检测时间在 2 min 即可完成,因此温度对物料含水量的影响很小,近似可以忽略。基于偏最小二乘法的火药水分检测模型可表示为:

$$F = \alpha_1 M + \alpha_2 V + \alpha_3 H \quad (6)$$

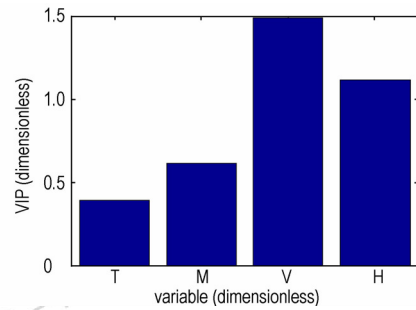


图 8 变量与 VIP 的关系  
Fig. 8 Relationship between Variable and Variable Importance in the Projection (VIP)

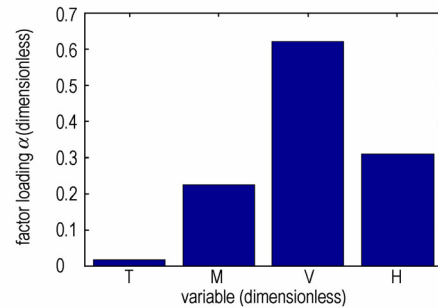


图 9 变量和载荷因子的关系  
Fig. 9 Relationship between variable and factor loading

### 4.2 电容式火药水分检测的偏最小二乘法回归模型

由表 1 数据,根据上述偏最小二乘法分析,以重量  $M$ 、电压幅值  $V$  和物料表面湿度  $H$  作为自变量,物料含水量  $F$  作为因变量,进行偏最小二乘法回归迭代计算<sup>[13]</sup>,求得偏最小二乘回归模型为:

$$F = 0.6184M + 1.4900V + 1.1153H \quad (7)$$

经过 10 次实验,测试结果见表 2。从表 2 中可以

表 2 回归模型测量数据 ( $T \approx 28$  °C)  
Table 2 Measured data of regression model

No.	$F/\%$	$E_{max}/\%$	$E_{min}/\%$	$\bar{E}/\%$
1	0	0	0	0
2	0.348	0.12	0.072	0.097
3	0.494	0.12	0.064	0.093
4	0.643	0.108	0.038	0.091
5	0.937	0.106	0.027	0.089
6	1.269	0.092	0.031	0.086
7	1.358	0.093	0.028	0.084
8	1.925	0.083	0.024	0.065
9	2.138	0.081	0.025	0.063
10	2.818	0.076	0.020	0.039
11	3.154	0.068	0.017	0.013

Note:  $F$  is moisture content of gunpowder;  $E_{max}$  is maximum measurement error;  $E_{min}$  is minimum measurement error;  $\bar{E}$  is average measurement error.

看出,该模型下的水分检测系统测量最大误差为 0.12%,且最大误差出现在含水量为 0.3%~1% 之间,在含水量 1%~3% 之间误差均小于 0.087%,基本达到测量精度要求。

## 5 结论与展望

通过偏最小二乘法回归,对电容式火药水分测量数据的分析和建模,达到了对扁球状火药颗粒 1%~3% 的含水量和 0.1% 的检测精度要求,经过多次实验验证,该系统性能稳定可靠,达到了火药水分检测的要求。本研究主要获得以下结论:

(1) 分析了物料重量、测量电压、物料湿度和环境温度对物料含水量的影响,其中测量电压、物料湿度与物料含水量的相关系数分别为 0.9575、0.5314,是物料含水量的主要影响因素。

(2) 由偏最小二乘法回归分析法建立了火药水分检测的模型,试验验证,该模型下的水分检测系统测量最大误差为 0.12%,且最大误差出现在含水量为 0.3%~1% 之间,在含水量 1%~3% 之间误差均小于 0.087%,满足了 0.1% 的测量精度要求。

### 参考文献:

- [1] 任务正,王泽山. 火炸药理论与实践[M]. 北京:中国北方化学工业总公司,2001:928-929.
- [2] GB/T 6284-2006,化工产品中水分测定的通用方法干燥减量法[S]. 中国标准出版社,2007.
- [3] 张洪润,傅瑾新,吕泉,等. 传感器技术大全(下册)[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2007:1282-1283.
- [4] 徐燕,易卫东,卓国文. 基于信号波形幅度检测放大技术的电容式土壤水分传感器研究[J]. 传感器技术学报,2013,26(6):779-784.  
XU Yan, YI Wei-dong, ZHUO Guo-wen. Development of a capacitive soil moisture sensor based on wave amplitude detection and amplification[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2013, 26(6):779-784.
- [5] 张红霞. 电容式玉米水分测量系统研究[D]. 山东:山东理工大学,2012:31-42.  
ZHANG Hong-xia. Research on Capacitive Corn Moisture Measurement System[D]. Shandong: Shandong University of Technology, 2012:31-42.
- [6] 韩民国,郑建利,宋文爱,等. 电容法火药水分在线检测技术[J]. 含能材料,2011,19(1):102-105.  
HAN Min-yuan, ZHENG Jian-li, SONG Wen-ai, et al. On-line testing technique for moisture-bearing powder by capacitor method[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2011, 19(1):102-105.
- [7] 缪鹏程,曹成茂,业红玲,等. 基于作物茎秆生理电容式水分传感器的研究[J]. 电子技术,2010(4):61-63.  
MIAO Pen-cheng, CAO Cheng-mao, YE Hong-ling, et al. Research on moisture sensor based on physiological capacitance of crop's stem[J]. *Electronic Technology*, 2010(4):61-63.
- [8] 徐冉,傅增明,朱世根. 三角形面插值在电容式型砂水分传感器温度补偿中的应用[J]. 科学技术与工程,2009,9(6):1504-1507.  
XU Ran, FU Zeng-ming, ZHU Shi-gen. Application of gore interpolation in temperature compensation for capacitance sensor of green sand moisture[J]. *Science Technology and Engineering*, 2009, 9(6):1504-1507.
- [9] 腾召胜,刘坤华,唐瑞明,等. 粮食水分快速检测技术综述[J]. 中国粮油学报,1999,14(3):53-57.  
TENG Zhao-sheng, LIU Kun-hua, TANG Rui-ming, et al. Comments on quick measurement of grain moisture content[J]. *Journal of The Chinese Cereals And Oils Association*, 1999, 14(3):53-57.
- [10] 赵晓东. 多参数水分在线检测技术及系统研究[D]. 山西:中北大学,2012:44-45.  
ZHAO Xiao-dong. Research on technology and system of multi-parameter online moisture measurement[D]. Shanxi: North University of China, 2012:44-45.
- [11] 陈磊,汪春. 在线谷物水分测试精度影响因素的试验研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报,2009,21(2):48-50.  
CHEN Lei, WANG Chun. Research on factors influencing grain on-line moisture sensor[J]. *Journal of Heilongjiang August First Land Reclamation University*, 2009, 21(2):48-50.
- [12] 王惠文. 偏最小二乘回归方法及其应用[M]. 北京:国防工业出版社,1999.
- [13] 汪洋. PLS 回归应用实例[J]. 安徽大学学报(自然科学版),2001,25(3):18-22.  
WANG Yang. Application of PLS regression[J]. *Journal of Anhui University Natural Science Edition*, 2001, 25(3):18-22.

## Partial Least-Squares Regressive Analysis and Mode on Detection of Gunpowder Moisture

YANG Shun-min<sup>1</sup>, HAN Min-yuan<sup>2</sup>, ZHENG Jian-li<sup>2</sup>, SONG Wen-ai<sup>1</sup>

(1. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Shanxi North Xi'an Chemical Industry Co. LTD., Taiyuan 030008, China)

**Abstract:** According to the requirement of moisture content (1%~3%) and detection precision(0.1%) for the flat gunpowder, the capacitive sensor of varied dielectric was adopted, and the system of capacitive sensor for the moisture detection of gunpowder was developed. On the basis of the analysis for temperature, moisture, mass and voltage amplitude, the multi-linear regression model of partial least-squares was established. Results show that the maximal measurement error of moisture content (0.3%~1%) is 0.12%, and the maximal error of moisture content (1%~3%) is less than 0.087%, which meeting the accuracy requirement for the moisture detection (0.1%) of gunpowder.

**Key words:** signal and information processing; capacitive sensor; self-balanced measuring circuit of alternating current (AC) bridge; partial least-squares; multi-linear regression model

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.03.027