

# 谷物干燥实时在线智能水分测量系统

张永林, 王旺平, 郑长征, 张胜全, 肖 慧

(武汉工业学院机械工程系, 武汉 430023)

**摘 要:** 采用电阻法在线测量谷物干燥过程中的实时水分, 针对测量信号质量差采用测频电路进行测量信号的阻- 频转换, 对于谷物水分强温度依赖性和测量本构非线性, 应用基于单片机的智能数据融合方法和智能非线性处理算法, 所构建的水分测量系统克服了传统电阻法水分测量误差大、信号抗干扰能力和传输性差、测量数据的温度影响大以及硬件非线性电路处理能力差等方面缺陷, 具有测量精度高、测量适应性强、信号质量好、测量装置结构简单等优点。

**关键词:** 谷物干燥; 水分测量; 电阻水分仪; 数据融合; 智能算法

**中图分类号:** S379

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2007)9-0137-04

张永林, 王旺平, 郑长征, 等. 谷物干燥实时在线智能水分测量系统[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 137- 140.

Zhang Yonglin, Wang Wangping, Zheng Changzheng, et al. Intelligent real-time on-line measuring system for moisture content during grain drying[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(9): 137- 140. (in Chinese with English abstract)

## 0 引 言

谷物含水率是决定储粮安全性的关键指标, 也是谷物加工过程中的重要工艺控制指标。新收获谷物含水率一般都超出储粮安全含水率, 须进行谷物干燥。干燥过程中实时测定的谷物动态含水率便成为监控干燥作业过程和判定干燥目标实现的依据。无论是大型塔式干燥还是中小型台式、筒式或移动式内循环干燥机, 准确而快捷地测定谷物含水率是实现干燥作业自动化的前提。

水分测量的电测方法主要有电阻(电导)法, 电容法, 微波法, 中子法, 红外法和核磁共振法等<sup>[1]</sup>。真正适用于谷物在线水分测量的主要是前 3 种方法。电阻法和电容法因其原理简明, 装置简单, 价格低廉而应用最广。但是, 电阻法和电容法在测定粮食含水率时存在许多缺点, 电容法属于容积式测量, 测量值不仅对温度敏感, 还对谷物容重十分敏感。电阻法所测为谷物籽粒内部水分, 但因谷物电阻很大, 特别在谷物含水率较低时, 使得测量信号弱、信噪比低、不利于信号传输。围绕解决电阻法水分测量的技术缺陷, 近年来出现了许多基于电阻测量原理的创新方法, 如两量程直流电阻法<sup>[2]</sup>, 交流阻抗法<sup>[3]</sup>, 脉冲电阻法<sup>[4]</sup>, 复阻抗分离法<sup>[5]</sup>等, 这些测量方法都各有其测量对象和测量方式上的具体性。与电阻法、电容法相比, 微波水分测量具有精度高、速度快、非接触

非介入式测量而不损伤被测物料、易于实现体积内部水分测量等优点, 但微波测量装置较为复杂, 价格较高。

同样是基于电阻水分测量原理, 通过构建信号转换电路实现电阻测量向频率测量或周期测量的转化<sup>[6]</sup>, 极大地提高信号质量。同时, 采用集成温度传感器 AD590 对干燥过程中变温度进行实时测量(AD590 是 AD 公司利用 PN 结正向电流与温度的关系制成的电流输出型温度传感器)。在测温电路设计中, 首先将测量电流转换成电压, 然后用集成芯片 LM331 完成与温度相关的电压- 频率转换。将分别测量并经转换后的两路频率信号送单片机进行数据融合, 而对于水分测量的本构非线性问题, 改变传统对数电路的线性化方法, 建立智能化的人工神经网络算法, 可以实现谷物水分的实时在线高精度测量。

## 1 谷物含水率的电测特性与测量模型

试验研究表明, 谷物水分与电阻之间存在显性函数关系。谷物的电阻特性表现为<sup>[7]</sup>: 在谷物湿基含水率 9% ~ 20% 范围内, 电阻的对数与含水率近似呈线性关系, 而低于或超过该范围, 其对数线性化的误差较大。其次, 在上述含水率范围内电阻的量值变化很大, 随含水率增加, 电阻从低于 1 兆欧直到高达几十兆欧, 特别在更低的谷物含水率情况, 其阻值急剧上升。第三, 温度对电阻的影响显著, 性质上表现为谷物的等效电阻随温度的升高而减小, 量化规律基本符合在 -10℃ ~ +50℃ 条件下温升 1℃ 对电阻的影响相当于其含水率增大 0.1%。

由此看出, 谷物的水分电阻相关特性为电阻法测量水分在原理上给出了依据。同时, 用电阻法测量水分要

收稿日期: 2006-10-20 修订日期: 2007-03-06

基金项目: 湖北省教育厅重点科技计划项目(D200618002)

作者简介: 张永林(1962-), 男, 教授, 硕士生导师, 长期从事机械产品创新设计的科研和教学工作。武汉 武汉工业学院机械工程系, 430023。Email: ylz22@whpu.edu.cn

注重解决阻值大、温度影响显著这两个关键问题<sup>[8]</sup>。第一, 谷物水分分布范围较广, 尤其是梅雨季节收获的谷物的含水率甚至超过 25%, 这使得对数线性化不能保证测量精度。第二, 电阻随水分变动的范围过大, 会带来不利于测量的影响, 特别是阻值过高使测量信号微弱, 不利于信号处理和传输。第三, 温度对测量的影响显著, 尤其在干燥作业过程中, 谷物温度动态变化且变化幅度大, 因此实时的水分和温度测定及其基于多传感器测量的数据融合处理是干燥过程中谷物水分测量的合理方案。电阻含水率测量的传感元件是与被测谷物直接接触的两个电极, 两电极间谷物的电导率( $\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ )为:

$$\gamma = G \frac{d}{S}$$

式中  $G$ ——谷物电导,  $1/\Omega$ ;  $d$ ——极板距离,  $\text{cm}$ ;  $S$ ——极板有效面积,  $\text{cm}^2$ 。

由取样器从干燥通道中分流取出的被测谷物置于两测量电极之间, 对电极施加恒定压力, 其电阻  $R_x$  与含水率  $M$  的关系即测量的数学模型为对数模型,  $M = a_1 + a_2 \ln R_x$ 。式中,  $a_1, a_2$  为常数, 由仪器标定时获得。电导率随温度上升而按指数关系  $\gamma = A e^{-B/T}$  增加, 相反, 电阻率随温度降低而增加。式中,  $A, B$  为常数,  $B = \frac{\Delta E}{K}$ ,  $\Delta E$  为活化能,  $K$  为 boltzmann 常数<sup>[9]</sup>。

## 2 测量原理和系统构成

基于电阻原理的测频测周等效的含水率测量的基本思想是, 将传感器测得的电阻随含水率变化的关系转换成频率或周期信号随含水率变化的关系, 把频率或周期信号送到单片机, 与同时测量的温度信号一起进行数据处理后, 输出所对应的实时在测谷物含水率。究竟选用频率测量还是周期测量, 这取决于所测谷物含水率分布和所用单片机系统主频, 一般而言, 测频法在低频端、测周法在高频端的误差远大于其相应的另一端。因谷物储藏安全含水率为 14% 左右, 干燥谷物终端控制含水率一般应大于 12%, 故选用测频法可满足要求。

频率测量属于基本参数的测量, 由于频率量特有的优点以及电阻频率转换集成电路的方便应用, 已有将许多参数的测量转换成频率量来进行测量和处理的应用实例<sup>[10]</sup>。测频法将被测的频率信号加到计数器的计数输入端上, 让计数器在标准时间内进行计数, 从而得到被测信号的频率与计数器所计数之值的关系。图 1 是谷物干燥含水率在线测量系统框图, 系统由传感器单元(水分测量取样电极和温度传感器)、信号转换电路、单片机及键盘与显示电路、控制信号输出接口等构成。

取样器如图 2 所示, 即测量电极, 是具有固定压力

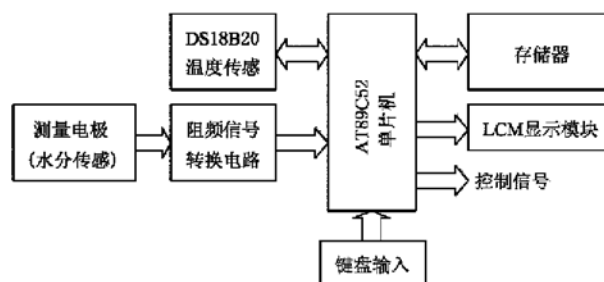


图 1 测量系统框图

Fig. 1 Schematic diagram of the measuring system

的压碎式电极, 采用压碎式电极目的在于对在测谷物颗粒施加一定压力使颗粒压碎, 这样, 电极检测到的信号能够反映谷物内部水分。此外, 如果不对颗粒压碎处理, 则在低水分含量时谷物电阻特别大, 所测得的信号就特别弱。两电极滚轮安装在干燥通道的旁通取样支路中, 在接受到测量指令后, 谷物颗粒被两滚轮夹持并被施加恒定压力, 测量系统同时启动, 所测电阻值经阻频转换后得到的频率信号送单片机。谷物实时温度同时由测温传感器测出, 所测电流转换成电压并经压频转换后得到的频率信号也一并送单片机。

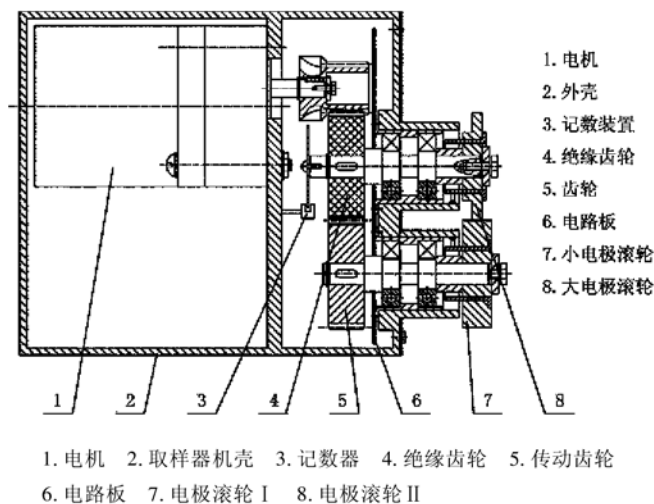


图 2 取样器结构

Fig. 2 Sampling mechanical device

测量信号阻频转换电路如图 3。图中  $R$  即为所测谷物电阻值。脉宽的测量由单片机的外中断和定时中断完成, 因 EXT1 和 EXT2 均为负跳沿触发中断, 因此在 555 的输出端加一级反相器, EXT1 中断采样输出信号的上跳沿, 然后再经过一级反相器, EXT2 采样输出信号的下跳沿。两者采样的时间差就是脉冲宽度。时间差的计算可由单片机的定时中断来实现, 在 EXT1 的中断程序里开启定时中断, 在 EXT2 的中断程序里关闭定时中断。

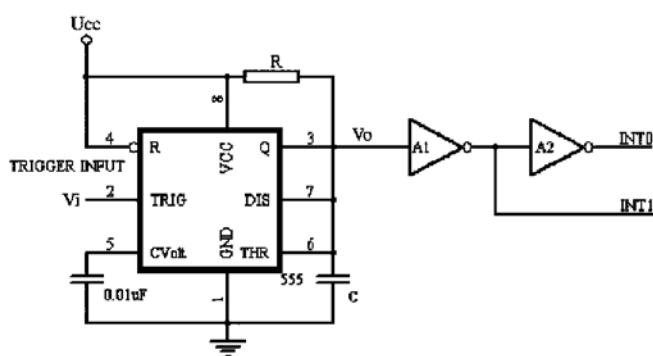


图3 含水率传感测量阻频转换电路

Fig. 3 Resistance-frequency converting circuit for measuring moisture content by sensor

系统中单片机作为主控电路部分的控制器, 不仅对显示电路、键盘电路、测电阻和测温电路、电机控制电路进行控制, 还可与主控主机通讯。此外, 由单片机通过继电器对取样机构的驱动器进行控制, 以实现取样机构的快速动作。

### 3 测量数据的智能处理

测量数据的智能处理主要解决两个问题, 测量本构非线性和测量温度补偿。含水率测量中的温度补偿实质上是多传感器测量数据的融合问题。改变传统电阻测量中的对数线性化电路和硬件温度补偿方法<sup>[11]</sup> (如利用硅半导体 PN 结正向压降的负温度特性补偿等), 采用人工神经网络来实现对于测量数据的非线性拟合和温度补偿<sup>[12, 13]</sup>。

送单片机的两路数字化离散测量信号分别为与水分对应的经阻频转换后的频率信号  $f_1$  和与温度对应的经压频转换后的频率信号  $f_2$ 。单片机要完成的任务是求得两路频率信号  $f_1$  和  $f_2$  所对应的目标物料的真实水分值。显然谷物含水率  $M$  与  $f_1, f_2$  之关系可以写成  $M = \mathcal{Q}(f_1, f_2)$ , 即谷物水分含量是频率信号  $f_1$  和  $f_2$  的非线性函数。

用径向基函数(RBF)神经网络来刻画上述非线性。如图4所示, 用2个输入分别表示  $f_1, f_2$  的测量值。采用3层网络构造, 网络输出  $M$  为被测物料的水分值。网络结构(包括隐层节点数)和网络参数(径向基函数的中心、基函数的宽度、阈值、权值等)的确定可参阅神经网络相关文献<sup>[14]</sup>。

RBF网络实现了含水率测量模型中的非线性映射。要确保得到满足精度要求的输出, 在网络构建完成后, 须对网络进行训练和检验。训练过程是网络的自学习过程, 这个过程类似于传统含水率仪的标定过程, 同时也是网络参数(主要是权值  $w_i$ ) 确定的过程。可以用

烘干法或其他方法获得被测谷物在不同温度下的真实含水率, 然后记录下按照测频法测得的对应的频率数据序列, 将这些数据序列分为两部分, 一部分用于网络学习, 另一部分用于对训练后网络的检测。网络的训练程度与误差控制有关, 常用均方误差来控制其训练程度。通过训练并检验后的网络具有强大的推广(泛化)能力, 网络此后就能按照训练获得的内部非线性规律对所有数据组集进行非线性处理, 实时输出谷物的当前含水率。

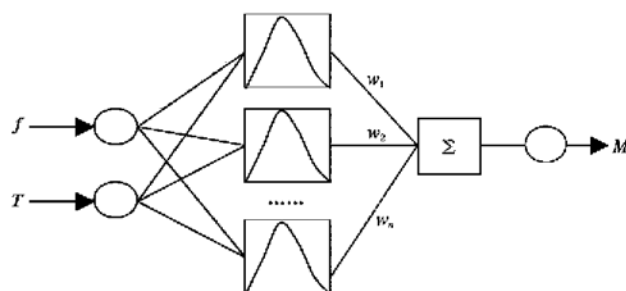


图4 非线性测量数据处理和温度补偿的神经网络结构

Fig. 4 Structure of artificial neural network for the nonlinear data fitting and temperature compensation

### 4 软件设计

水分测量系统中软件设计遵循结构化和模块化设计思想, 主要功能模块有: 主程序模块, 定时器中断和计数器中断模块, 显示模块, 键盘控制模块, 通讯模块和输出控制模块。其中主程序实现系统初始化, 定时器中断和计数器中断模块完成温度和水分值的计算, 显示模块完成温度和水分值的送显, 通讯模块实现与上位机的通讯及数据传送, 输出控制模块实现对干燥设备的控制。

### 5 案例

按照上述原理构建的谷物水分测量系统可应用于稻谷、小麦、大麦等谷物干燥在线水分测量, 系统按每间隔 15 min 进行新一轮取样测量, 每一轮测量按谷物品种不同取 20~100 粒谷物所测量水分的平均值作为测量示值。测量系统使用 220 V、50 Hz 电源, 功率消耗小于 50 W。

采用上述系统对温度分布为 25~50℃、含水率为 10%~30% 的小麦进行了测量实践, 采用 3 层 2-15-1 拓扑结构的 RBF 网络进行数据融合<sup>[15]</sup>。测量结果表明, 与原电阻法水分测量系统相比, 采用阻频转换和数据融合的水分测量系统, 其测量精度提高到  $\pm 0.4\%$ 。而且, 基于测量信号转换的测频方法抗干扰性强, 利于测量信号传输, 测量范围宽, 克服了传统电阻水分测量中模拟通道环节多、信噪比低的缺陷。

## 6 结 论

针对谷物干燥过程中所用的传统电阻法水分测量系统的局限, 构建的在线水分测量系统在硬件上采用了水分测量信号的阻-频转换电路和温度测量信号的压频转换电路设计, 在软件上应用了基于 RBF 神经网络的智能数据融合方法, 从而有效地提高了测量信号的质量、解决了水分测量的温度补偿问题和测量模型非线性问题。所构建的在线智能水分测量系统应用于粮食干燥过程中的实时水分测量, 具有测量精度高、测量适应性强、信号质量好、测量装置结构简单等优点。

### [参 考 文 献]

- [1] 张永林, 张胜全, 刘文生. 粮食含水率在线测量技术评述[J]. 武汉工业学院学报, 2003, 22(4): 36-40.
- [2] 郑颖航, 丁天怀, 李 勇. 基于电阻测量原理的新型棉花含水率在线自动测量仪[J]. 仪表技术与传感器, 2002, (7): 21-23.
- [3] 滕召胜, 周光俊. 新型油料种子含水率检测方法研究[J]. 中国油料作物学报, 1999, 21(2): 69-72.
- [4] 陈永平, 冯修功, 施明恒, 等. 一种改进的脉冲电导测湿传感器[J]. 东南大学学报, 1997, 27(3): 115-117.
- [5] 李玉忠. 中国湿度与含水率测量技术的现状[J]. 分析仪器, 2003, (1): 5-8.
- [6] 刘桂雄, 邝泳聪, 金军. 基于测频测周方法集成的高分子湿度仪[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2001, 29(3): 39-42.
- [7] 杨兆选, 鹿凯宁, 刘承玺. 智能粮食湿度测试仪设计[J]. 电子测量与仪器学报, 1996, 10(3): 64-66.
- [8] 张永林. 基于电阻原理的油料含水率在线测量技术[J]. 中国油脂, 2004, 29(8): 38-40.
- [9] 李家伟, 陈积懋. 无损检测手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002, 1: 521-575.
- [10] 江玉洁, 陈 辰, 周 渭. 新型频率测量方法的研究[J]. 仪器仪表学报, 2004, 1(2): 30-33.
- [11] 张 靖, 刘少强. 检测技术与系统设计[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002, 1: 288-299.
- [12] 刘东辉, 孙晓云, 孙会琴, 等. RBF 网络在实时在线检测系统中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(5): 445-448.
- [13] 袁明新, 张 勇, 张 雨. 基于 RBF 网络的动态称重系统设计[J]. 交通与计算机, 2003, 21(2): 60-63.
- [14] 魏海坤, 丁维明, 宋文忠, 等. RBF 网的动态设计方法[J]. 控制理论与应用, 2002, 19(5): 673-680.
- [15] 肖 慧. 粮食干燥过程中智能水分检测系统研究[D]. 武汉工业学院, 2007.

## Intelligent real-time on-line measuring system for moisture content during grain drying

Zhang Yonglin, Wang Wangping, Zheng Changzheng, Zhang Shengquan, Xiao Hui

(Department of Machinery Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

**Abstract:** Based on the measuring principle of electrical resistance method for moisture content, an innovative measuring system was proposed with some key technologies including improving the signal quality through a conversion from the resistance measurement to the frequency measurement, using data fusion to take the time-variable temperature effect into account and designing an intelligent algorithm to solve the nonlinear fitting to the measured data. The new system and correspondingly developed device can get rid of the disadvantages of conditional resistance method and find an optimum application to the grain drying. The intelligent real-time on-line measuring system is featured with high accuracy, good flexibility and simple architecture.

**Key words:** grain drying; measurement of moisture content; electrical resistance metering system; data fusion; intelligent algorithm