黄酒发酵过程中物位测量技术的研究与改进

范雪[1]，张爱良[1]，孙顺远[2]

（1.无锡工艺职业技术学院电子信息系，江苏宜兴 214206）（2.江南大学物联网工程学院，江苏无锡 214122）

摘要：对大罐黄酒发酵工艺过程中物位测量技术进行了研究，采用射频导纳技术实现在导电介质中物位测量技术的实现，分别针对前后酵发酵过程中物料的不同属性特征，进行数据模型的算法设计，并对挂料问题进行了分析与改进，以保证发酵过程中物料物位的测量精准度，提高黄酒品质。针对物位测量技术设计一套物位控制系统，对物位测量系统硬件部分的电源电路进行了设计，提出了单片机 PWM 输出时钟与取样积分电路两种方案，进一步提高了物位测量技术的准确率；并提出了前后酵发酵导纳数学模型，并采用 visual studio 2015 设计了上位机监控系统，可以在线实时查看发酵罐内的物位；采用 RFID 技术实现发酵罐之间、发酵罐与监控系统之间的无线通信，不仅提高了数据传输的可靠性，也填补了国内在测量黄酒发酵物位测量技术方面的空白。

关键词：黄酒发酵；物位变化；射频导纳；取样积分；物位测量

文章篇号：1673-9078(2018)08-219-224 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2018.8.032

Research on Level Measurement Technology of Rice Wine Fermentation

FAN Xue[1], ZHANG Ai-liang[1], SUN Shun-yuan[2]

(1.Wuxi Institute of Arts & Technology, Electronic information system, Yixing 214206, China)

(2.School of IoT Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: The material level measurement technology in the fermentation process of big pot rice wine was studied, using radio frequency admittance technology to achieve the measurement of material level, and the hanging problem was analyzed and improved to ensure the accuracy of fermentation process and to improve the quality of rice wine. The design of the material level measurement system, the accurate clock setting system scheme, and the sampling integral circuit and measurement circuit were performed to further improve the accuracy of level measurement technology. This technology fills the gap in measurement of the level measurement technology of rice wine fermentation. For level measurement technology to design a set of material level control system, the hardware part of the material level measuring system power circuit was designed by the microcontroller PWM output clock and sampling integral circuit two options, to further improve the accuracy of material level measuring technology. The mathematical model of fermentative admittance before and after the fermentation was proposed, and the monitoring system of upper computer was designed using visual studio 2015, so that the content in fermentation tank could be viewed online in real time. The linkage between fermentation tank was realized by using RFID technology and wireless communication between the monitoring system, not only improved the reliability of data transmission, also to filled the domestic blank in yellow wine yeast a measurement technology.

Key words: Wine fermentation; level change; radio frequency admittance; sampling integral; level measurement

随着人们对黄酒需求的逐年增加，黄酒发酵工业化程度逐渐提高，大罐黄酒发酵技术已逐渐取代传统坛装发酵技术。黄酒的生产按生产工艺可分为大罐法、淋饭法等，传统的黄酒发酵过程完全依赖工人的经验来控制发酵过程，往往会造成生产批次不稳定、口感风味差异大等问题，使黄酒的品质得不到保证。目前，黄酒发酵过程控制已逐渐向工业化与智能化方向发展，从前酵蒸饭、风冷控制、温度控制和溶氧控制到后酵冷凝等过程均已逐渐实现现场工业化控制。由于人们对黄酒品质及口感的要求大幅提升，黄酒发酵精细控制已势不可挡。

黄酒发酵多以大罐发酵为主，粳米等原材料经过浸泡、蒸煮冷却后，与酵母或酒曲搅拌后呈半固半液状态落罐发酵，在落罐或出罐时罐内混合物物位会发生变化。目前，物位测量技术在黄酒发酵过程中应用并不广泛，笔者在研究射频导纳物位计原理的基础上，与罐内传感器相结合，通过实时监测罐内混合物的介电常数来求混合物物位，并对算法进行改进以降低黄酒混合物的挂料影响；由于射频导纳中挂料阻抗的实部与虚部相等，在 $t=\pi/4$ 相位点处，采用定点取样积分电路实现微弱信号的快速采集提取，可以有效地消

收稿日期：2018-04-23

基金项目：国家自然科学基金项目（21276111）；江苏省前瞻性联合研究项目（BY2016022-12）

作者简介：范雪（1986-），女，中级工程师，硕士，研究方向：物联网应用技术与嵌入式系统应用

除传感器中由于挂料造成的误差，并对硬件电路部分进行了重新设计，通过与数据模型结合，可得到相对准确的混合物物位。采用软件 visual studio 2015 设计了黄酒物位上位机监控系统界面，可以实时在线查看各个发酵罐的物位，并针对罐内物料的当前物位及实时状态特征，预选不同方案进行处理，直观有效地对黄酒发酵过程进行控制。

1 射频导纳在黄酒发酵中的应用

射频导纳是利用电容传感器将被测介质物位的变化转变为电容量的变化，然后应用测量电容量的方法来求得物位的数值。在黄酒发酵前酵过程中，发酵罐内主要成分有蒸饭、酵母、麦曲和水等物质，呈半固半液状态，并且物料状态随发酵过程的推移也在变化；发酵后酵过程中，发酵罐中主要成分为酒精。前酵发酵罐中物质是导电介质，并且随着介质液位由高到低变化时，会有物料挂在电极上；后酵发酵罐中酒精含量较高，导电性强，但流体不易挂料。在研究发酵罐中射频导纳时，要充分考虑前后酵物料的区别，并考虑介质导电性。

当物位计测量发酵罐中导电介质液位时，若物位由低到高或由高到低变化时，此时传感器的电容正好反应真实液位引起的电容变化；而当非纯液体物位由高到低变化时，电极上会附有被测介质挂料。黏附在传感电极上的物料层只是很薄的一层，比物料位下面的物料要少得多，横截面积和物料位以下的物料相比几乎可以忽略；而物料的横戴面积远远大于挂料层的横截面积，且物料具有较好的导电性，因而可以认为物料的电阻非常小，可以忽略。因此在测量时认为物料的电位和发酵罐的电位一样，从而可以把物料当作电容的一个极板。但挂料层的电阻却很大，从电学的角度看，挂料层相当于一条由无穷多个无穷小的电容元件和无穷小的电阻元件组成的传输线。如图 1 所示。

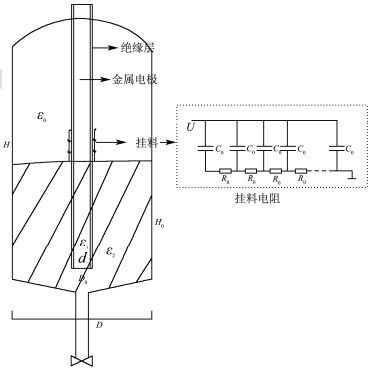

图 1 黄酒发酵罐射频导纳电阻示意图

Fig.1 Rice wine fermentation radio frequency admittance resistance diagram

当物位高度由 H 降低至 H_0 时，金属电极上可能会有黏附有米饭和酒曲等物质，极容易造成虚假物位，影响测量精度。

2 射频导纳在发酵过程中的工作原理

2.1 黄酒发酵物位测量原理

将金属电极置入发酵罐内，与发酵罐金属罐内壁构成电容器的极板，无论两者之间是空气或是发酵物料、酒精等物质，均可根据其介电常数求得物料高度。由于在黄酒发酵过程中的中间物质与产物均为导电介质，因此，金属电极周围必然要覆盖一层绝缘物质，只要根据发酵过程中发酵罐内物质的介电常数，即根据图 1，可得出物料位以下总电容为：

$$C_1 = \frac{2\pi\varepsilon_1 H_0}{\ln\left(D_1/d\right)} \tag{1}$$

物料以上介电常数包含两部分，分别为绝缘层与空气，则有：

$$C_2 = \frac{2\pi\varepsilon_1 (H - H_0)}{\ln\left(D_1/d\right)}$$

$$C_3 = \frac{2\pi\varepsilon_0 (H - H_0)}{\ln\left(D/D_1\right)} \tag{2}$$

空气中部电容为：$C_{air} = \dfrac{C_2 C_3}{C_2 + C_3}$

空气中电容与物料电容为并联连接，总电容为：

$$C = C_1 + C_{air} = C_1 + \frac{C_2 C_3}{C_2 + C_3} \tag{3}$$

因为黄酒发酵的周期比较长，发酵过程中间产物成分复杂且不稳定，导致物料介电常数不固定，因此，若需计算准确的液位，需配合罐内在线监测介电常数的传感器，并需控制器将两者采集数据统一。

2.2 黄酒发酵物位测量算法的改进

黄酒发酵前酵过程物料为半固半液状态，罐内产物在出罐时会有一部分物料挂在射频导纳杆上，对公式（2）中介电常数有非常大的影响，导致虚假液位。

由于黄酒发酵罐中挂料的横截面积较小，因此，挂料的等效电阻很大，相当于一条由无穷多个无穷小的电容元件和无穷小的电阻元件组成的传输线。只要挂料黏附层足够长，根据均匀传输线原理可以得出挂料层等效阻抗的实部与虚部在数值上相等，这就是射

频导纳定理。若单位长度上的电阻为 R_0，电容为 C_0，激励电压的角频率为 ω，挂料的等效阻抗 Z_g 可表示为：

$$Z_g=\sqrt{\frac{R_0}{\omega C_0}}\angle 45^\circ$$

金属电极的等效电路如图 2 所示。其中 R_g 为挂料部分的等效电阻，C_g 为挂料部分的等效电容，C_w 为物位的等效电容。且：

$$1/R_g=\omega C_g$$

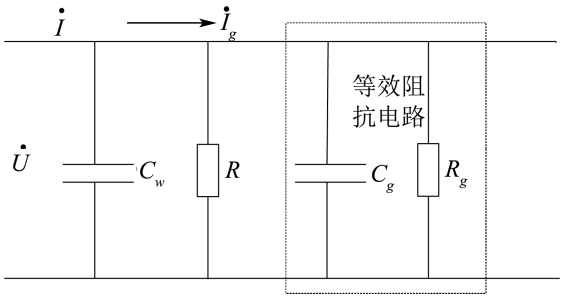

图 2 挂料阻抗等效电路

Fig.2 Hanging impedance equivalent circuit

测量外加激励电压 $\dot{U}$ 的频率为 ω，$\dot{I}_w$ 为流过被测实际物位电容的电流，$\dot{I}_g$ 为流过黏附层的电流，$\dot{I}$ 为总电流。则 $\dot{I}=\dot{I}_w+\dot{I}_g$。

设 $\dot{U}$ 的初相为 0，则 $\dot{U}=U\angle 0^\circ$，则

$$\dot{I}_w=j\omega C_w\dot{U}=\omega CU\angle 90^\circ \tag{4}$$

$$\dot{I}_g=\frac{\dot{U}}{R_g}+j\omega C_g\dot{U}=(1+j)\omega C_g\dot{U}=\sqrt{2}\omega C_gU\angle 45^\circ$$

$$\left(\frac{1}{R}=\omega C_g\right) \tag{5}$$

由此可见，在激励信号作用下，挂料电流 $\dot{I}_g$ 的相位落后于物位电流 $\dot{I}_w$ 的相位 π/4 如图 2 所示。设 $\dot{I}_w$ 的相位为 0，如果在 π/4 处对 $\dot{I}$ 进行测量，则此时黏附层电流 $\dot{I}_g$ 的幅值为零，测得的电流中只包含物位电流 $\dot{I}_w$，而 $\dot{I}_w$ 与实际物位电容 C_w 之间存在线性关系，因此，在 $\omega t=\frac{\pi}{4}+2k\pi(k=1,2,3...n)$ 时对电流 I 进行测量，可以得到实际的物位值，而且不会因此挂料而对物位造成虚假计算。

3 发酵控制系统的实现

基于射频导纳原理中挂料阻抗的实部与虚部相等，在与真实物位 π/4 相位点取值，可以有效地消除传感器中由于挂料造成的误差，常用的方法是精确延时，在 π/4 相位点启动模数转换器高速采样。

3.1 硬件系统的设计

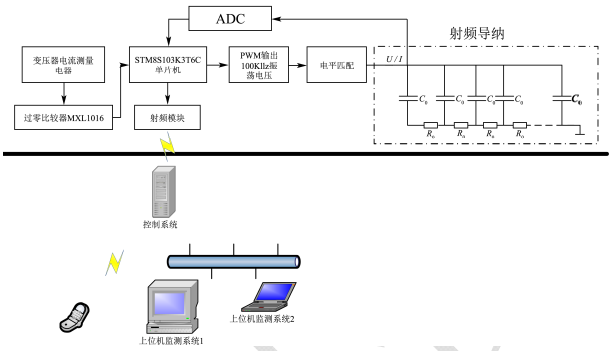

图 3 系统硬件电路图

Fig.3 The system hardware circuit diagram

本系统控制单元采用 STM8S 单片机，通过 PWM 功能控制输出 100 KHz 方波，再接入运放电路作为射频导纳电源电路的输入信号；射频导纳将采集信号经单片机处理，转换为 4~20 mA 信号。10 位 ADC 可精确测量罐内液位，控制单元也可其他传感模块进一点精确测量并报警，使整个发酵过程与智能控制过程结合起来。电路的硬件结构如图 3 所示，电路输入输出信号频率相同但相位相差 π/4，这个信号通过同步采集模块，在真实物位信号的 π/4 相位处采集，就可以消除挂料的影响，实现精确的物位测量。

该系统采用的测量信号是 100 KHz，则周期为 10 μs，滞后 π/4 相位即 1.25 μs，因此该方案要求有速度较快的单片机和高速 A/D 转换器配合使用。

3.2 数据模型的实现

3.2.1 前酵发酵导纳数据模型

在前酵发酵过程中，由于罐内是蒸饭、酒曲、酵母和水混合而成的半固半液形态类物质，若罐内液位变化时，必然会导致某些物质粘附在导纳表面，而挂料是具有阻抗的，因此单片机测得的导纳电容值是包含挂料阻抗部分的。为提高液位测量精确度，在导纳计算过程中，可通过改进算法来提高液位测量精度，提高信噪比。射频导纳在工作时，实际物位电容流经的总的电流值 I 在 t 时刻为：

$$C_n=\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}C\cos(n\omega t)d(\omega t)=\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}\frac{C_0}{\left(1-\frac{V_0+V\cos\omega l}{v_\varepsilon}\right)^{1/2}}\cos(n\omega t)d(\omega t)=\frac{1}{2\pi}C_0\int_0^{2\pi}\frac{\cos n\theta}{(1-\frac{V_0+V\cos\theta}{v_\varepsilon})}d\theta \tag{6}$$

其中，α，β 为电流参数，由射频导纳电极及挂料特性决定。

此时，根据傅里叶级数展开公式，可得粘附挂料射频导纳 g 为：

$$g(\omega t)=\frac{dI}{dV}=\beta I_0\varepsilon e^{\varepsilon V}=g_0+2\sum_{i=1}^{\infty}g_n\cos n\omega t \tag{7}$$

$$C=\frac{C_0}{\left(1-V/v_\varepsilon\right)^{\frac{1}{2}}} \tag{8}$$

其中，I_0 为电容初始电流，一个周期结束后电流达到最高值，C_0 是初始化电压，v_ε 为物位电容和与其并联的容抗的电位差。电容值可以通过公式 9-11 推导得出。

由一个周期的电流变化可将 α，β 求出，初始电流已知，通过求解公式（10）可将粘附有挂料的总导纳求出，根据控制芯片 AD 端采集的电压值，即可求出当前导纳，再由公式（1）~（3）可求得罐内液位。

3.2.2 后酵发酵导纳数据模型

相较于前酵，后酵发酵过程罐内物质形态单一，主要为含有酒精的液体，是导电介质。射频导纳可与前酵罐内射频导纳一致，但液位变化时，导纳表面不粘带挂料，在求液位的计算过程中，其复杂度比前酵罐内液位计算简单得多。仅通过控制芯片将导纳电容求出后，用公式（1）~（3）即可求出当前液位。

3.3 黄酒发酵上位机监控系统

将基于射频导纳的黄酒液位测量技术应用于黄酒在线液位监测系统中，实现黄酒的液位、温度、溶氧等参数的在线实时监测，上位机界面采用 visual studio2015，通过 RS232 总线与图 3 中的控制系统进行连接，或采用无线方式与用户手机进行通信，及时将信息传输至用户。用户可通过电脑界面实时查看黄酒发酵过状态，并根据状态调整发酵过程的环境，保证黄酒发酵的品质。

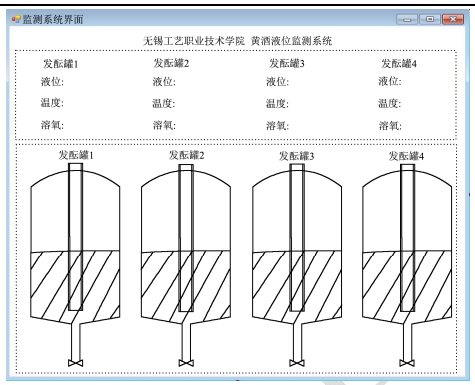

图 4 黄酒液位测量系统界面设计

Fig.4 Interface design of rice wine liquid level measurement

4 液位监测系统的改进

4.1 RFID 无线传输系统方案

黄酒发酵系统需要将现场测量值实时传输至后台控制系统，确保控制系统及时对数据进行处理。由于黄酒发酵液位测量现场与控制系统距离往往较远，传统的数据传输方法多采用有线传输，经济投入多，数据传输易受其他信号干扰，稳定性差；该套黄酒液位采集系统采用 RFID 无线传输的方法进行数据的传输，每个发酵罐内配置一个 RFID 模块，彼此之间相互通信，并均可与控制系统 RFID 模块进行通信；采集的数据经由发酵罐内 RFID 模块以单跳或多跳路由形式传输至控制系统，实现数据无线传输。

射频模块采用亿佰特公司生产的 E31-TTL-50 模块，是一款基于 AX5043 射频芯片的 433 MHz 直插式无线串口模块；采用半双工，收发一体，透明传输方式，发射功耗低，仅 50 mW；并且，该模块具有 4 种工作模式可供选择，发酵系统可根据其工作特点及状态选择组合不同工作模式，以尽量使系统功耗达到最低。

$$g_n=\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}g(\omega t)\cos(n\omega t)d(\omega t)=\frac{\beta I_0\varepsilon}{2\pi}\int_0^{2\pi}e^{\varepsilon V}\cos(n\omega t)d(\omega t)=\frac{1}{2\pi}\varepsilon I_0e^{\varepsilon V_0}\int_0^{2\pi}e^{\varepsilon V_1\cos\theta}\cos n\theta d\theta \quad (n=0,1,2...) \tag{9}$$

即可得导纳为：

$$g(wt)=g_0+2\sum_{i=1}^{\infty}\frac{\beta I_0\varepsilon\cos(nwt)}{2\pi}\int_0^{2\pi}e^{\varepsilon V_L}\cos(wt)d(wt) \tag{10}$$

将电容 C 做傅里叶展开级数，行当前电容值为：

$$C_n=\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}C\cos(n\omega t)d(\omega t)=\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}\frac{C_0}{\left(1-\frac{V_0+V\cos\omega l}{v_\varepsilon}\right)^{1/2}}\cos(n\omega t)d(\omega t)=\frac{1}{2\pi}C_0\int_0^{2\pi}\frac{\cos n\theta}{\left(1-\frac{V_0+V\cos\theta}{v_\varepsilon}\right)}d\theta \tag{11}$$

为确保系统能耗最低，在黄酒发酵整个流程中，当发酵罐内液位达到设定阈值或其他状态达到要求需要数据传输时，发酵罐内 RFID 模块转换为发送模式；否则处于省电模式。由于发酵罐数据多，存在多个发酵罐 RFID 同时向控制系统传输数据的情况，为避免冲突，本系统采用控制系统 RFID 模块轮循查询的方式，对每个发酵罐进行逐次发送信息标志位，当射频导纳液位测量系统测量的数据有问题时，启动 RFID 模块工作模式，并接收控制系统标志位数据；当标志位数据接收成功后，RFID 模块发送数据至控制系统，完成一次数据的传输。图 5 为 RFID 系统在传输过程中的整个流程。

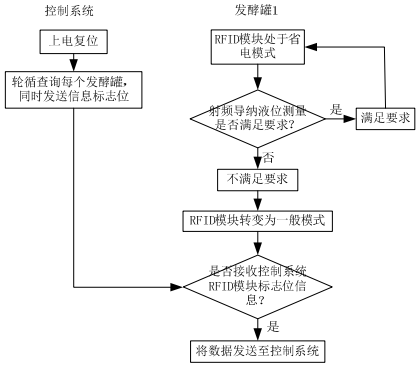

图 5 RFID 系统工作流程

Fig.5 Work flow of RFID system

4.2 比较器驱动方案

本系统也可采用高频波形发生器产生频率为 100 KHz 的正弦波激励信号，将该正弦波信号送入变压器电桥电路的原线圈，两个副线圈，一组用于测量桥路，具有中心抽头，另一组副线圈产生的信号作为同步信号，它与原线圈同频率同相位，用为 A/D 转换器的驱动信号。测量桥路的输出信号经过量程调整电路后成为 0~5 V 的正弦电路信号，被送到高速 A/D 转换器中进行模数转换，将结果送入单片机系统进行分析处理后进行显示，并送到 D/A 转换器和 *U*/*I* 变换模块变换成 4~20 mA 的信号输出。A/D 转换器的驱动信号是由同步信号 $U_r=A\sin\omega t$（频率为 100 KHz，幅值为 5 V），当相位为 π/4 时，$U_r=3.5V$，经比较器进行幅值比较后，输出为移相 π/4 的方波。

4.3 定点取样积分的测量方案

上述两种方案的共同点是对模数转换的速度要求很高，且抗干扰能力不强。对于微弱号来说定点取样积分是信号处理的方法之一，对于周期信号的固定相位点，每隔一个或都几个周期对该点进行取样，长时间累积并平均，能够得到该点准确的幅值信息，基本不受噪声的影响[5~7]。利用定点积分方法来解决射频导纳物位测量中对电桥输出信号的 π/4 相位点的取值，是微弱信号技术与射频导纳物位测量的巧妙结合，在获得真实信号、消除挂料影响的同时，还能够提高输出信号的噪比，改善系统性能，同时对 A/D 转换速度也大大降低。取样积分电路及测量原理框图如图 6 所示。

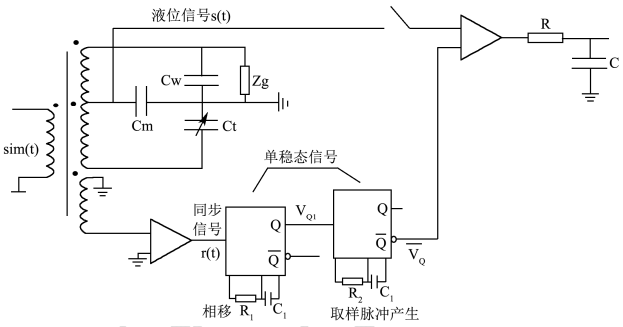

图 6 取样积分电路及测量电路原理

Fig.6 Sampling integral circuit and measurement circuit principle

激励信号源输出幅值为 1 V，频率为 100 KHz 的正弦波，进入交流电桥后输出两路信号，一路是与被测物位有关的正弦信号，另外一路是与激励信号同频同相的正弦信号，经过高速过零比较器后，输出与激励信号同频同相的同步方波信号，为取样脉冲的产生提供触发信号。取样脉冲由双路单稳态触发器产生，以同步方波作为第一个单稳态触发器的触发信号，选择合适的 R1C1 参数，输出与触发信号同周期的矩形波 *VQ*1，将 VQ1 作为第二个单稳态触发器的触发信号，同样可以得到一个同周期的矩形波信号 *VQ*（低电平持续时间由 R2C2 决定），*VQ* 的反相输出信号就是取样积分器的取样脉冲，延迟时间 *t* 和取样脉冲宽度 T_g 可调，从而实现对被测信号任意相位点的取样及取得最佳的取样效果。

4.4 实验结果

以前酵发酵罐内落米后发酵 5 h 后的半固半液溶液为例，因为溶液中存在固体物质，所以，当罐内溶液液位下降时，会有黏附物质挂料。罐内总高度 2 m，罐内初始液位高为 1.5 m，读取当前电容值与电压值；液位下降至 0.3 m 结束，再读取当前电容值与电压值；测量当前实时液位的高度，并与公式（1）~（3）求得的液位高度进行比较，发现测量结果的精度比较高，基本在可接受的范围内；由于液位越低，黏附在射频导纳上的挂料状态越复杂，因此，测量精度越低。

表 1 物位高度与电容电压的关系

Table 1 The relationship between level height and capacitance voltage

电容容量/pF	输出电压/V	实际高度/cm	测量高度/cm	精度/%
185	2.47	150	151	0.7
169	2.15	130	131.2	0.9
153	1.82	110	110.9	0.8
138	1.49	90	89.5	0.6
122	1.16	70	70.8	1.1
105	0.83	50	51	2
89	0.50	30	30.7	2.3

5 结论

黄酒发酵物位测量技术在黄酒发酵期间十分关键，其准确性直接影响了黄酒的品质与口感，文章将射频导纳技术与黄酒发酵结合起来，并通过分析前后酵发酵罐内物料的导电性及挂料的问题，提出了合理的解决方案。设计了前后罐发酵系统物位测量数据模型，并提出了两种电源电路输入方案，利用单片机 PWM 功能做为时钟信号的输入，并设计了硬件驱动电路及取样积分电路。通过实验对比分析，通过算法测量的液位高度与实际液位高度误差小，因此，该方案在处理黄酒发酵液位变化时存在的挂料问题有极大的优势，该技术不仅提高了黄酒发酵系统的精确度，也为黄酒发酵领域提出了一个新的解决方案。

参考文献

[1] 靳广伟.一种基于射频导纳式的油水面物位仪的设计选取与应用[J].数字技术与应用,2016,4:112-115
JIN Guang-wei. The design selection and application of a kind of oil-water surface level instrument based on rf admittance type [J]. Digital Technology and Applications, 2016, 4: 112-115

[2] 毛青钟,宣贤蕘,张水娟.机械化酿酒大罐发酵过程生物化学成份动态变化的研究[J].酿酒,2011,2(38):55-59
MAO Qing-zhong, XUAN Xian-rao, ZHANG Shui-juan. Study on the dynamic changes of biochemical components in the fermentation process of the mechanized fermentation process [J]. Wine, 2011, 2(38): 55-59

[3] 刘虎,赵建洋,周蕾.基于斩波时域积分射频导纳物位仪研究与设计[J].电子测量与仪器学报,2014,9(28):1005-1013
LIU Hu, ZHAO Jian-yang, ZHOU Lei. The research and design of radiofrequency admittance of radio-frequency admittance in chopper time domain [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 9(28): 1005-1013

[4] 曹振平.射频传输系统功率补偿研究[J].核电子学与探测技术,2016,1(36):48-52
CAO Zhen-ping. Research on power compensation of RF transmission system [J]. Nuclear Generation and Detection Technology, 2016, 1(36): 48-52

[5] 刘石磊,李宝刚.Capsense 技术在液位检测中的应用[J].电子测量技术,2013,36(7):67-70
LIU Shi-lei, LI Bao-gang. The application of capsense technology in liquid level detection [J]. Electronic Measurement Technology, 2013, 36(7): 67-70

[6] 兰羽,汪晓鸿.基于 AT89C52 的超声波液位测量系统设计[J].国外电子测量技术,2013,32(10):30-33
LAN Yu, WANG Xiao-hong. Design of ultrasonic liquid level measurement system based on AT89C52 [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2013, 32(10): 30-33

[7] 陈为真,汪秉文,胡晓娅.基于时域积分的加速度信号处理[J].华中科技大学学报,2010,38(1):1-4
CHEN Wei-zhen, WANG Bing-wen, HU Xiao-ya. Acceleration signal processing based on time domain integrals [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2010, 38(1): 1-4

[8] 陈茉莉,李舜酩,饶新阳.基于时域特征识别微频差信号[J].仪器仪表学报,2012,33(6):1234-1239
CHEN Mo-li, LI Shun-ming, RAO Xin-yang. Identification of micro-frequency signals based on time domain characteristics [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(6): 1234-1239

[9] 李利品,党瑞荣,黄燕群.油水两相流中 2 种含水率计算模型比较[J].仪器仪表学报,2012,33(4):924-929
LI Li-pin, DANG Rui-rong, HUANG Yan-qun. Comparison of two water content models in the two phase flow of oil and water [J]. Journal of Instrument and Instrument, 2012, 33(4): 924-929

[10] 袁梅,陈松方,董韶鹏.新型射频电容式物位测量仪[J].自动化仪表,2011,32(10):75-78
YUAN Mei, CHEN Song-fang, DONG Shao-peng. New type rf capacitance measuring instrument [J]. Process Automation Instrumentation, 2011, 32(10): 75-78

[11] 刘虎,周蕾.数字式射频导纳物位仪的研究与开发[J].化工自动化及仪表,2014,7(41):819-823
LIU Hu, ZHOU Lei. Research and development of digital radio-frequency admittance meter [J]. Chemical Automation and Instrumentation, 2014, 7(41): 819-823

[12] 孟祥勇,冯东阳,毛健,等.循环超声波辅助黄酒后发酵风味

物质的变化分析[J],中国农业科技导报,2015,17(5):142-150
MENG Xiang-yong, FENG Dong-yang, MAO Jian, et al. The analysis of the change of fermentation flavor after the circulation of ultrasonic [J]. China Agricultural Science and Technology Guide, 2015, 17(5): 142-150

[13] 张严,赵忠盖,刘飞.近红外光谱法在黄酒发酵过程参数检测中的应用[J].食品工业科技,2015,36(17):290-296
ZHANG Yan, ZHAO Zhong-gai, LIU Fei. The application of nir spectroscopy in the parameter detection of rice wine fermentation process [J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(17): 290-296

[14] 胡杨,任梦,赵贺.高浓度米酒关键工艺技术的研究[J].江苏调味副食品,2016,16:36-41
HU Yang, REN Meng, ZHAO He. Research on key technology of high concentration rice wine [J]. Jiangsu Condiment and Subsidiary Food, 2016, 16: 36-41

[15] 钟强,周芸,徐保国.基于 SCL 的黄酒发酵湿度控制系统设计与应用[J].自动化与仪表,2012,27(10):34-37
ZHONG Qiang, ZHOU Yun, XU Bao-guo. Design and application of yellow wine fermentation humidity control system based on SCL [J]. Automation and Instrumentation, 2012, 27(10): 34-37

[16] 丁健,刘登峰,张许.基于差分进化算法的酵母培养在线自适应控制[J].食品发酵与控制,2016,42(11):40-48
DING Jian, LIU Deng-feng, ZHANG Xu, et al. Adaptive control of yeast based on differential evolution algorithm [J]. Food Fermentation and Control, 2016, 42(11): 40-48

[17] 赵梅,冷云伟,李鹏.黄酒发酵过程分析及关键点的控制[J].江苏调味副食品,2009,26(5):30-35
ZHAO Mei, LENG Yun-wei, LI Peng. Analysis of fermentation process and control of key points [J]. Jiangsu Condiment and Subsidiary Food, 2009, 26(5): 30-35