

基于电容式微机械超声换能器的白酒乙醇浓度检测

赵晨雅¹, 王任鑫^{*}

(1. 中北大学仪器与电子学院省部共建动态测试技术国家重点实验室 太原 030051)

Email: S202206163@st.nuc.edu.cn

摘要: 本文提出了一种基于电容式微机械超声换能器 (CMUT) 的乙醇浓度检测方式。该系统采用一组 2×4 CMUT 控元进行发射和接收超声波信号, TR6601 温度传感器实时监测待测溶液温度。采集后的电信号依次进行超声波飞行时间 (TOF)、超声波速度计算和温度补偿, 从而得到乙醇的浓度。本文分析了不同浓度的乙醇溶液, 最后得到了基于声速与溶液温度的浓度测量计算模型, 并将测试结果显示在应用上。该系统能很好地测定白酒中乙醇的体积浓度, 测定范围为 30%-70%, 误差精度提升到 0.2%, 具有测试稳定性以及具有高灵敏度。

关键词: 微机电系统 (MEMS); 电容微机械超声换能器 (CMUT); 乙醇浓度检测; 温度补偿; 飞行时间 (TOF)

An Ethanol Concentration Detection Method Based on Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducer

(The State Key Laboratory of Dynamic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China.)

Abstract: This paper presents a method for ethanol concentration detection based on capacitive micromachined ultrasonic transducer (CMUT). The system utilizes a pair of 2×4 CMUT transducers to transmit and receive ultrasonic signals, while a TR6601 temperature sensor continuously monitors the temperature of the solution under test. The acquired electrical signals undergo successive processing steps, including ultrasonic time-of-flight (TOF) measurement, ultrasonic velocity calculation, and temperature compensation. This paper analyzes the ultrasonic velocity of ethanol solutions with varying concentrations and establishes a concentration measurement model based on sound velocity and solution temperature, with the test results presented in the application.

Keywords: Capacitive micromachined ultrasonic transducer (CMUT); Chemical sensor; ethanol concentration detection; Microelectromechanical systems (MEMS); time-of-flight (TOF)

1、研究背景

中国白酒的是以小麦、高粱等为原料进行发酵而成的, 主要成分包括水和乙醇, 含量约占

98%，以及决定白酒的口感和类型的芳香型微量物质，仅占 2%，主要包括酯类、酚类、有机酸等，具有抗氧化、降低心脑血管疾病的风险等功效 [1]。乙醇本身也是一种重要的工业原料 [2]。酒精浓度检测市场有很高的需求，随着工业的快速发展，迫切需要一种快速准确的酒精浓度测量方法。超声波检测能够满足这一需求：提供无损测量、快速响应。时间和便携性 [3]。超声波检测的核心部件是超声波换能器，它在将电能转换为超声机械能方面发挥着至关重要的作用。本工作设计并开发了 2x4-CMUT 阵列，可用于白酒酿造、调配和销售等场景中的实时快速浓度监测。该系统提供了一种检测解决方案，用于大规模行业，有效提高生产效率，并避免原材料损耗，从而保持显著的重要性 用于白酒的评价和开发。

2、研究内容

超声飞行时间 (TOF) 现在广泛地应用在超声测量领域中 [4]。在固定介质中，声速 c 可以通过 TOF 计算得到

$$c = dt / (1)$$

其中 d 表示固定超声路程， t 即为超声飞行时间。在溶液中，超声波以纵波形式进行传播 [5]，在纯液体条件下，也就是线性声学条件下 [6]，其声速满足

$$c = \sqrt{1k\rho} / (2)$$

其中 k 是指液体的绝热压缩系数， ρ 为测试液体的密度。假设溶液中的乙醇与水完全互溶，计算混合溶液的乙醇体积百分数浓度 φ_a ，可以由式 (3) 表述

$$\varphi_a = V_a V_a + V_w / (3)$$

在上式中，在酒精体积为 0 时，酒精的体积百分数浓度 φ_a 为 0，那么此时溶液为蒸馏水溶液，记录此时的声速为 $c(T, \varphi_a=0)$ 。

在水和乙醇的混合溶液中的声速 $c(T, \varphi_a)$ 与蒸馏水溶液的声速 $c(T, \varphi_a=0)$ 相比，增加了由溶质乙醇影响的声速，因此混合溶液声速可以由等式 (5) 来表述：

$$c(T, \varphi_a) = c(T, \varphi_a=0) + \Delta c(T, \varphi_a) / (5)$$

根据等式 (5) 与等式 (2)， $\Delta c(T, \varphi_a)$ 可以表述为

$$c(T, \varphi_a) = \sqrt{1k\rho} - c(T, \varphi_a=0) / (8)$$

在固定温度下， $c(T, \varphi_a=0)$ 是个常数。 $\Delta c(T, \varphi_a)$ 对于浓度的梯度为

$$d \Delta c(T, \varphi_a) / d\varphi_a = d \Delta c(T, \varphi_a) / dk \times dk / d\varphi_a + d \Delta c(T, \varphi_a) / d\rho \times d\rho / d\varphi_a / (9)$$

由等式 8，得到

$$d \Delta c(T, \varphi_a) / d\varphi_a = -(k/3\rho) - 1/2 \times dk / d\varphi_a - (k\rho^3) - 1/2 \times d\rho / d\varphi_a / (10)$$

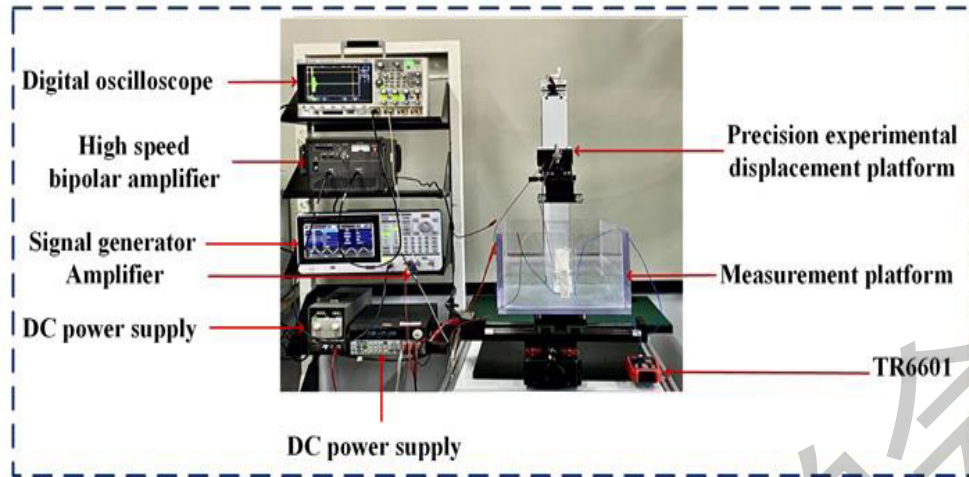


图 1 基于 CMUT 的白酒乙醇浓度检测系统示意图

Fig. 1. Schematic diagram of the CMUT-based alcohol concentration detection system for Baijiu.

3、结论

最后对购买的白酒做该项工作的可行性验证，与白酒折光仪在同样条件下进行浓度检测实验。总共购买了酒精浓度为 56%vol 的牛栏山二锅头。图 2 给出了根据示波器测得的接收信号飞行时间 (TOF)，从而转换得到白酒中的乙醇浓度。在测量酒精浓度 56%vol 的牛栏山二锅头得到的测试结果中可以得到，折光仪测试均值为 55.63%，CMUT 的超声测试结果为 56.17%。

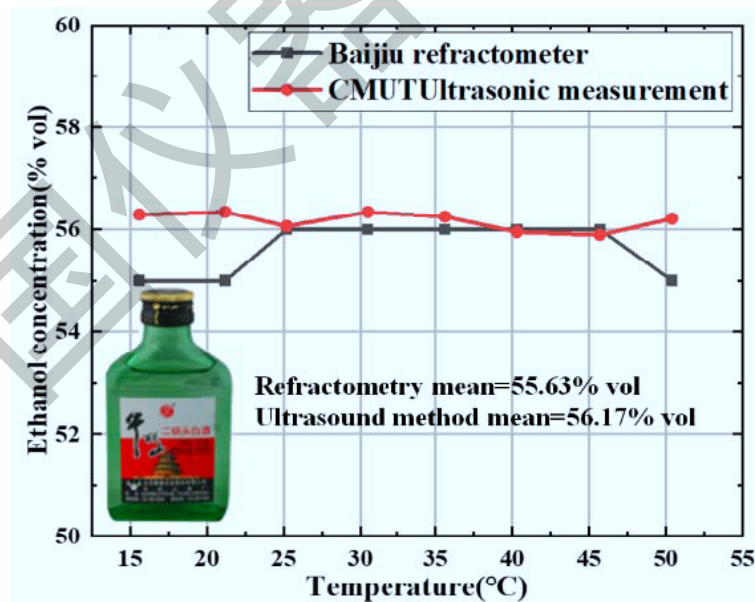


图 2 在不同温度下白酒通过 CMUT 超声测试与折光仪测试的乙醇浓度结果比较

Fig. 2. The ethanol concentration results obtained through CMUT ultrasound testing and refractometer testing for three types of white spirits at different temperatures are compared: Concentration detection results for 56%vol Niu Lan Shan Erguotou.

本文提出了一项基于 CMUT 的白酒浓度检测系统，通过系统可行性分析，认为其可以准确快速的测量出白酒中的乙醇浓度。乙醇浓度测量范围在 30%-70%，溶液温度范围在 15-50℃，在该区间内具有较好的温度补偿功能。通过测量购买白酒的乙醇含量，可以得出该系统的测量准确度为 0.2%。因此，该乙醇浓度检测系统可以很容易实现超声测量乙醇浓度。此外，CMUT 有小型化及易于集成的优势，该方案可能是检测白酒乙醇浓度的可替代方案。

参考文献

- [1] G. Wen, Z. Li, and M. M. Choi, "Detection of ethanol in food: A new biosensor based on bacteria," *Journal of food engineering*, vol. 118, pp. 56-61, Sep.2013, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2013.01.006
- [2] D. W. Lachenmeier, R. Godelmann, M. Steiner, B. Ansay, J. Weigel, and G. Krieg, "Rapid and mobile determination of alcoholic strength in wine, beer and spirits using a flow-through infrared sensor," *Chemistry Central Journal*, vol. 4, pp. 1-10, Mar.2010,doi: 10.1186/1752-153X-4-5
- [3] S. S. Kumar, and B. Pant, "Design principles and considerations for the 'ideal' silicon piezoresistive pressure sensor: a focused review," *Microsystem technologies*, vol. 20, pp. 1213-1247, Jul.2014,doi: 10.1007/s00542-014-2215-7
- [4] J. B. Robinson, M. Pham, M. D. Kok, T. M. Heenan, D. J. Brett, and P. R. Shearing, "Examining the cycling behaviour of Li-ion batteries using ultrasonic time-of-flight measurements," *Journal of Power Sources*, vol. 444, p. 227318, Sep.2019, doi: 10.1016/j.snb.2019.05. 003
- [5] J. Yuyang, "Design of Ultrasonic Range Finder Based on STM32 Single Chip Computer." in 2021 2nd International Conference on Electronics, Communications and Information Technology (CECIT), pp. 482-486. Jun.2021,doi: 10.2991/aetr-17. 2018.67.
- [6] S. Zhao, W. Tao, Q. He, H. Zhao, and W. Cao, "A non-invasive photoacoustic and ultrasonic method for the measurement of glucose solution concentration," *AIP Advances*, vol. 7, Mar. 2017, doi: 10.1063/1.4979110