

DOI:10.11784/tdxbz202408020

用于火焰成像的 ECT 系统导纳测量精度分析

王 超, 王健宇, 金 硕

(天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072)

摘要: 火焰的导纳包括介电和导电特性, 可从不同角度反映燃烧状态, 火焰导纳的精确测量对于获取燃烧状态具有重要意义。电容层析成像(ECT)在火焰检测中获得了成功的应用, 也正因为测量介电常数单一参数向测量导纳虚部和实部参数发展, 但同时也对导纳的测量精度提出了更高的要求。本文使用电探针测量了火焰不同位置的相对介电常数和电导率, 以此为基础, 建立 ECT 测量火焰导纳的仿真模型, 发现火焰导纳虚部和实部的差距随着频率的升高而增大。在经典 ECT 系统中使用的 500 kHz 激励频率条件下, 火焰导纳的虚部约比实部大 5 个数量级, 使火焰导纳信息难以精确测量。对不同频率下火焰和空气导纳的差值进行分析, 结果表明, 为了保障系统测量精度, 应使得导纳实部采集分辨率不超过 0.207。导纳实部采集分辨率与模拟数字转换器(ADC)采样位数和激励频率都有关。在 ADC 采样位数一定的情况下, 降低激励频率能够获得更小的导纳实部信号采集分辨率, 从而提高系统的测量精度。对于 14 位 ADC, 应采用 26.4 kHz 以下的激励频率。激励频率为 500 kHz 的经典 ECT 系统, 其电流转电压(C/V)电路简化为以电容反馈为主导。针对降低激励频率使得经典 ECT 系统的 C/V 电路简化的输入输出关系不再适用的问题, 在电路中考考虑反馈电容和反馈电阻的综合作用, 给出了测量火焰导纳的前端电路方案。

关键词: 火焰; 电容层析成像; 导纳; 测量精度

中图分类号: TP271.4

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2025)04-0387-08

Analysis of Admittance Measurement Accuracy for ECT System Used in Flame Imaging

Wang Chao, Wang Jianyu, Jin Shuo

(School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Flame admittance reflects dielectric and conductive properties and can represent the combustion state from various perspectives. Accurate measurement of flame admittance is crucial for achieving the combustion state. Electrical capacitance tomography (ECT) has been successfully applied in flame detection, and it evolves from measuring a single parameter of permittivity to measuring the imaginary and real parts of admittance. However, this evolution also requires high admittance measurement accuracy. This study uses an electric probe to measure the relative permittivity and conductivity of a flame at various spatial locations, based on which a simulation model for the ECT-based measurement of flame admittance is established. Notably, the difference between the imaginary and real parts of flame admittance increases with increasing frequency. At an excitation frequency of 500 kHz, which is used in classical ECT systems, the imaginary part of flame admittance is approximately five orders of magnitude larger than the real part, thereby making it difficult to accurately measure the flame admittance information. The analysis results of the difference between flame and air admittances at various frequencies show that the acquisition resolution of the real part of the admittance should not exceed 0.207 to ensure the measurement accuracy of the system. The resolution of the real part of the admittance acquired is related to the sampling bit number and excitation frequency of the analog-to-

收稿日期: 2024-08-22; 修回日期: 2024-10-17.

作者简介: 王 超 (1973—), 男, 博士, 教授.

通信作者: 王 超, wangchao@tju.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62271343); 天津市研究生科研创新资助项目(2022BKY080).

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 62271343), the Tianjin Research Innovation Project for Postgraduate Students (No. 2022BKY080).

digital converter (ADC). With a fixed number of ADC sampling bits, a reduction in the excitation frequency can result in a small acquisition resolution of the real part of the admittance, thereby increasing the measurement accuracy of the system. An excitation frequency less than 26.4 kHz should be used for a 14-bit ADC. For classical ECT systems with an excitation frequency of 500 kHz, the current-to-voltage (C/V) circuit can be simplified to a model where the capacitor feedback is the primary factor. To address the issue, wherein the simplified input-output relationship of the C/V circuit of the classical ECT system ceases to hold when the excitation frequency is reduced, the combined effect of feedback capacitance and feedback resistance is considered in the circuit, and accordingly, a front-end circuit scheme for measuring flame admittance is proposed.

Keywords: flame; electrical capacitance tomography (ECT); admittance; measurement accuracy

电容层析成像 (electrical capacitance tomography, ECT) 具有非侵入、低成本和环境适应性强等优点, 已被成功应用于火焰检测领域^[1-2].

1994 年, He 等^[3]首次利用六电极的 ECT 获得了火焰的横截面图像. Waterfall 等^[2]采用基于充/放电电容测量的 ECT 系统, 开关频率为 1 MHz, 获得了多簇火焰的数量和位置信息. 刘石等^[4]、陈琪等^[5]使用交流激励的 ECT 实现了多孔介质中单火焰、边壁双火焰、三火焰以及大面积火焰的成像, 并可观测火焰随空气流量、孔隙密度等的变化规律. Gut 等^[6]设计了 3 层电极结构的 ECT 传感器, 实现了火焰三维图像重建. Huang 等^[7]设计了多频 ECT 系统, 激励频率范围为 75 ~ 600 kHz, 并实现了对本生灯火焰点火过程的实时捕捉. 上述研究只是对火焰介电常数进行单一参数的测量.

燃烧发生电离反应, 产生正离子、负离子和电子, 使得火焰在呈现介电性的同时, 也呈现导电性^[8]. 综合两种电学特性的复数形式导纳可从不同角度反映火焰的燃烧特性. Hu 等^[9]利用 ECT 系统测量火焰导纳, 实现了火焰相对介电常数和电导率分布的重构, 并根据相对介电常数和电导率与火焰温度的映射关系, 获得了火焰的温度分布^[10].

对比充/放电电容测量的 ECT 系统, 交流激励 ECT 系统具有低漂移和高信噪比的优势. 其系统构架来源于 Yang 等^[11]的方案. 在该方案中, 前端电路采用电流转电压 (current-to-voltage, C/V) 电路实现电容到电压的转换, 为了保证电压与电容为线性关系, 系统要求在较高的激励频率下运行, Yang 等^[11]采用了 500 kHz. 用于火焰测量的 ECT 系统也延续了该思路, 多频 ECT 系统的最低激励频率也为 75 kHz^[7], 在导纳测量的 ECT 系统中, 采用的激励频率为 100 kHz^[9].

基于导纳测量的 ECT 系统可为火焰检测提供更丰富的信息, 但较高的激励频率会使得火焰导纳实部和虚部差距较大, 在有限的模拟数字转换器 (analog

to digital converter, ADC) 位数条件下, 存在导纳的虚实部测量精度相差悬殊的问题.

本文测量了火焰在不同频率下的介电常数和电导率, 以此为基础, 分析了 ECT 的导纳测量值在不同激励频率条件下系统测量精度的影响, 并给出了提高 ECT 系统火焰导纳测量精度的前端电路方案.

1 火焰导纳及其测量原理

火焰的相对介电常数 ϵ_r 和电导率 σ 计算式^[12]为

$$\begin{cases} \epsilon_r = 1 + \frac{q^2 n_0}{m \epsilon_0 (\omega^2 + \gamma_m^2)} + \frac{q^2 n_1}{M \epsilon_0 (\omega^2 + \gamma_M^2)} \\ \sigma = \frac{q^2 n_0 \gamma_m}{m (\omega^2 + \gamma_m^2)} + \frac{e^2 n_1 \gamma_M}{M (\omega^2 + \gamma_M^2)} \end{cases} \quad (1)$$

式中: q 为单位电荷量; n_0 为电子数量密度; n_1 为正离子数量密度; m 为电子质量; M 为正离子质量; γ_m 为电子的有效碰撞频率; γ_M 为正离子的有效碰撞频率; ω 为激励角频率; ϵ_0 为真空介电常数.

其中 γ_m 和 γ_M 计算式^[13]为

$$\begin{cases} \gamma_m = pd^2 \sqrt{\frac{\pi}{2mkT}} \\ \gamma_M = pd^2 \sqrt{\frac{\pi}{2MkT}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: p 为压力; d 为中性粒子的直径; T 为热力学温度; k 为玻耳兹曼常数. 式 (1) 和式 (2) 显示, 火焰正离子和电子的数量密度以及温度同时影响介电常数和电导率. 测量火焰介电常数和电导率, 能够进一步获得燃烧信息.

火焰呈现出介电性和导电性, 可建立电容和电阻并联的等效模型^[9], 如图 1 所示.

该等效模型中电容 C_x 和电阻 R_x 并联构成了待测导纳 Y_x , 可以建立关系为

$$Y_x = \frac{1}{Z_x} = \frac{1}{R_x} + j\omega C_x \propto (\sigma + j\omega \epsilon_r \epsilon_0) \quad (3)$$

式中: Y_x 为待测阻抗 Z_x 的倒数; σ 为火焰电导率.

由式(3)可知,利用火焰导纳 Y_x 的实部和虚部即可得到火焰电导率和介电常数.

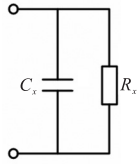


图1 等效模型

Fig.1 Equivalent model

ECT系统测量火焰导纳的过程如图2所示.其中, C_x 和 R_x 并联构成火焰待测导纳 Y_x ,在激励电极上设置正弦电压 V_i 之后,测量电极上产生电流 I_{CV} ,经过C/V电路转换为电压 V_{CV} ,进一步通过ADC转换为数字信号 V_o .通过在ECT系统中常用的数字正交解调方法^[14-17],获得 V_o 的幅值和相位.

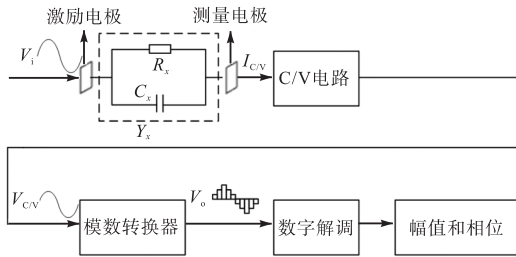


图2 ECT系统测量火焰导纳的过程

Fig.2 Process of measuring flame admittance using ECT system

C/V电路一般指的是通过运算放大器将电流信号转换为电压信号的电路^[18],其电路结构如图3所示.

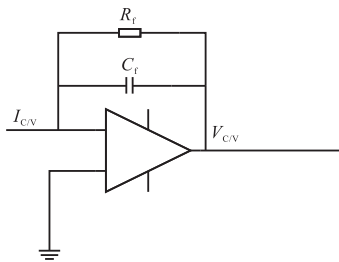


图3 电流转电压(C/V)电路结构

Fig.3 Current-to-voltage (C/V) circuit structure

其中, I_{CV} 和 V_{CV} 分别是待转换的电流和转换后的电压, R_f 和 C_f 分别为反馈电阻和反馈电容.

综合图2和图3,可以得到 Y_x 和 V_o 之间的关系为

$$Y_x = -\frac{V_o}{V_i} \left(\frac{1 + j\omega R_f C_f}{R_f} \right) \quad (4)$$

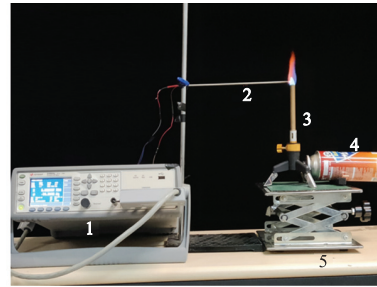
通过式(4)可以看出,由解调获得的 V_o 可以获得

导纳的实部和虚部,进而获得 C_x 和 R_x

2 基于探针的火焰介电和导电特性测量

2.1 实验方法与设置

电探针法是一种侵入式检测火焰的方法,通过测量阻抗来实现对火焰局部电导率和相对介电常数的测量.本文使用LCR表连接电探针测量阻抗幅值和相位.基于电探针的火焰测量实验系统由5部分组成,分别是LCR表、电探针、本生燃烧器、燃气罐和位移台.实验系统如图4所示.



1—LCR表;2—电探针;3—本生燃烧器;4—燃气罐;5—位移台

图4 实验系统

Fig.4 Experimental system

所用LCR表为Keysight公司的E4980A型号,测量精度为 $\pm 0.05\%$.电探针结构示意图如图5所示.电探针由两个电极、包裹电极的氧化铝管和最外层的不锈钢外壳构成.不锈钢外壳接地,屏蔽外部干扰信号.氧化铝管固定电极,并使得电极与不锈钢外壳绝缘.电极由钨制成,两电极之间距离为1mm,电极伸出氧化铝管的长度为2mm.

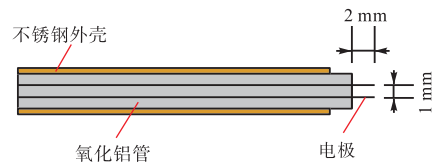


图5 电探针结构示意图

Fig.5 Schematic of electric probe structure

基于测量的阻抗,计算电导率 σ^* 和相对介电常数 ϵ_r^* ^[19]为

$$\begin{cases} \sigma^* = \text{Re} \left(\frac{1}{Z' - R_0} - \frac{1}{Z - R_0} \right) \frac{\ln[(D-a)/a]}{\pi L_w} \\ \epsilon_r^* = 1 + \text{Im} \left[\frac{1}{(Z' - R_0)} - \frac{1}{(Z - R_0)} \right] \frac{\ln[(D-a)/a]}{\omega \pi L_w} \end{cases} \quad (5)$$

式中: Z' 为探针接触火焰时所测阻抗; Z 为探针不接

触火焰时所测阻抗; R_0 为连接探针的导线电阻; D 为两电极之间的距离; a 为电极的半径; L_w 为电极伸出氧化铝管的长度.

测量位置如图 6 所示. 本生燃烧器喷口上方 5 mm 处设置为高度 1, 喷口上方 25 mm 处设置为高度 2, 喷口上方 45 mm 处设置为高度 3. 每个高度上, 将本生燃烧器中轴线位置向外 4 mm 处设置为测量点 1, 中轴线位置向外 2 mm 处设置为测量点 2, 中轴线位置设置为测量点 3. 3 个高度共有 9 个测量点. 在 5 ~ 1 000 kHz 的频率范围内, 在 LCR 表上设置 126 个等间距的激励频率值, 对火焰 9 个位置进行测量.

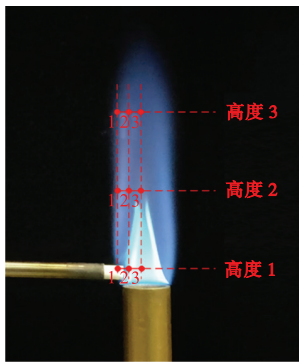


图 6 测量位置
Fig.6 Measurement position

2.2 测量结果与分析

基于测得的实验数据, 通过式 (5) 计算电导率和相对介电常数. 为了便于展示, 将激励频率为 5.00 kHz、12.96 kHz、52.76 kHz、100.52 kHz、204.00 kHz、307.48 kHz、403.00 kHz、506.48.00 kHz、602.00 kHz、705.48 kHz、801.00 kHz、904.48 kHz 和 1 000.00 kHz 的测量结果做图, 高度 1、高度 2 和高度 3 的电导率和相对介电常数结果如图 7 ~ 图 9 所示.

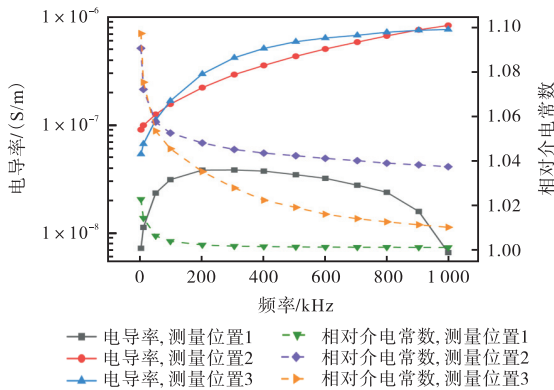


图 7 高度 1 的电导率和相对介电常数
Fig.7 Conductivity and relative permittivity at height 1

图 7 ~ 图 9 中, 每个高度上的 3 组电导率和相对介电常数结果分别对应图 6 中每个高度上的“1、2、3”的 3 个测量位置. 在不同激励频率条件下, 火焰电导率和相对介电常数的数值存在差别. 并且, 在火焰的不同高度以及同一高度处的不同测量位置上的电导率和相对介电常数也存在差异.

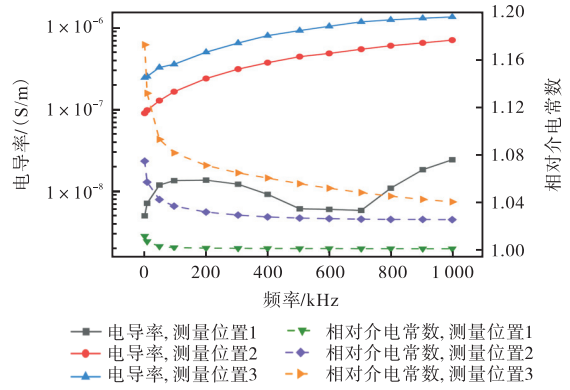


图 8 高度 2 电导率和相对介电常数
Fig.8 Conductivity and relative permittivity at height 2

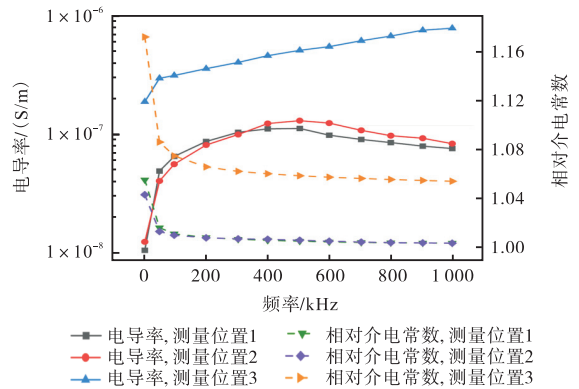


图 9 高度 3 的电导率和相对介电常数
Fig.9 Conductivity and relative permittivity at height 3

由式 (1) 和式 (2) 可知, 火焰电导率和相对介电常数与温度有关, 文献[20]表明温度越高, 相对介电常数和电导率越大. 为了验证探针测量数据的可靠性, 使用热电偶在图 6 所示的各测量位置对火焰进行温度测量, 将该温度测量结果作为火焰电导率和相对介电常数测量结果的对照参考. 以图 7 ~ 图 9 中激励频率为 12.96 kHz 的测量结果为例, 火焰在各测量位置的温度测量结果如表 1 所示.

由表 1 可知, 火焰不同测量位置的温度与电导率和相对介电常数之间的关系与文献[20]结论一致, 说明探针测量结果是可靠的. 根据探针实验测量的电导率和相对介电常数的数据建立测量火焰导纳的 ECT 仿真模型.

表1 火焰各位置温度测量结果

Tab.1 Temperature measurement results at various positions of the flame

高度	测量点	温度/°C	电导率/(10 ⁻⁸ S/m)	相对介电常数
1	1	775	1.15	1.015
	2	956	10.00	1.072
	3	877	6.74	1.076
2	1	694	0.72	1.008
	2	913	9.91	1.051
	3	1109	25.70	1.116
3	1	818	2.96	1.029
	2	801	2.67	1.021
	3	1050	25.00	1.110

3 测量火焰导纳的 ECT 仿真

3.1 仿真设置

为了得到 ECT 在不同激励频率下的火焰导纳测量值,从而确定合适的激励频率.在 COMSOL 中建立二维 ECT 仿真模型,设置火焰高度截面的电导率和相对介电常数分布,由此得到 ECT 测量火焰的导纳值.仿真模型如图 10 所示.传感器内径 50 mm,外径 60 mm,在内侧设置 16 个电极.图 10 中,设置两相对电极,其中一个为激励电极,另一个为测量电极.

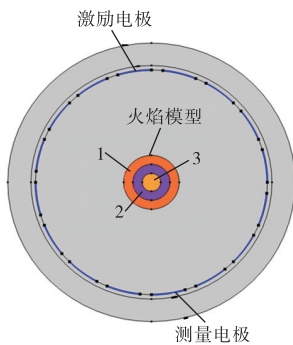


图 10 仿真模型

Fig.10 Simulation model

根据第 2 节探针实验的结果,火焰各测量位置的电导率和相对介电常数不同,因此应在不同的测量位置设置相应的电导率和相对介电常数.由于火焰中的参数为轴对称分布,采用探针在一个位置测量的参数近似表示火焰轴对称区域的参数.

将仿真中火焰模型设置为两个圆环区域和 1 个圆形区域,分别记为 1、2、3 三个区域,这分别对应第 2 节探针实验中同一高度测量的 1、2、3 三个点,以此设置火焰模型中 1、2、3 三个区域的电导率和相对介电常数.将火焰模型和电极间的区域设置为空气.空气的相对介电常数设为 1,电导率设为 1×10^{-9} S/m.

在 COMSOL 中对模型设置电流场和静电场两个物理场,基于所设置的电导率和相对介电常数,计

算得到两电极之间的电导值和电容值.将电容值结合激励频率,由此分别得到该电极测量导纳的实部和虚部.

3.2 仿真结果分析

13 个激励频率下、3 个高度上测量导纳的实部和虚部如图 11 ~ 图 13 所示.

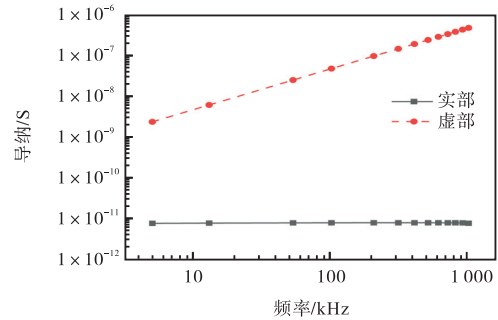


图 11 高度 1 导纳实部和虚部

Fig.11 Real and imaginary parts of admittance at height 1

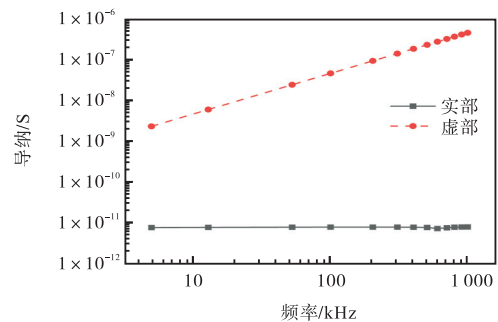


图 12 高度 2 导纳实部和虚部

Fig.12 Real and imaginary parts of admittance at height 2

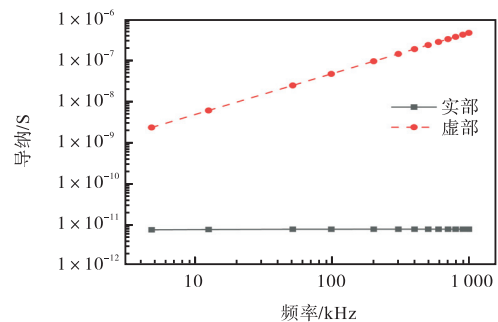


图 13 高度 3 导纳实部和虚部

Fig.13 Real and imaginary parts of admittance at height 3

由图 11 ~ 图 13 可知,导纳实部在不同频率下基本保持不变,导纳虚部随着频率的升高而线性增大,导纳实部和虚部的数值差距随着频率升高而增大.在各个激励频率下,导纳实部与虚部数值差距最小相差 3 个数量级,因此可以使用导纳虚部的大小作为导纳幅值的大小.

经典的 ECT 常采用 500.00 kHz 的激励频率,对激励频率为 506.48 kHz 时的仿真结果进行分析,该

激励频率下所测火焰导纳的实部和虚部如表 2 所示。

由表 2 可知, 3 个高度下, 火焰导纳的虚部约比实部大 5 个数量级。

表 2 火焰导纳的实部和虚部

Tab.2 Real and imaginary parts of flame admittance

高度	实部/(10 ⁻¹² S)	虚部/(10 ⁻⁷ S)
1	7.96	2.36
2	7.74	2.36
3	7.99	2.35

将仿真中全部被测介质均设为空气的相对介电常数和电导率, 定义为空场, 可以得到各激励频率下空场的导纳值。将火焰各激励频率下每个高度导纳的实部和虚部分别和空场导纳的实部和虚部做差, 可以得到 3 个高度上实部和虚部差值如图 14 所示。

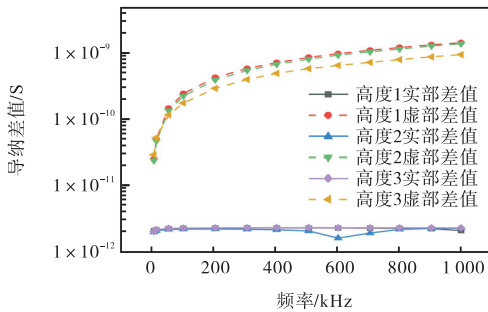


图 14 3 个高度上导纳实部和虚部差值

Fig.14 Difference between real and imaginary parts of admittance at three heights

由图 14 可知, 3 个高度的火焰导纳和空场导纳实部差值在各个激励频率下均小于虚部差值, 因此, 为了使导纳的实部和虚部信息都能在 ECT 重构图像中反映出来, 至少要保证最小的实部差值 ΔR_{\min} 能被检测到。根据 3 个高度上实部和虚部差值数据, $\Delta R_{\min} = 1.65 \times 10^{-12}$ S。

将 ΔR_{\min} 与火焰导纳实部的比值 λ_r 作为导纳实部信号采集分辨率。在火焰 3 个高度上导纳实部信号采集分辨率如图 15 所示。

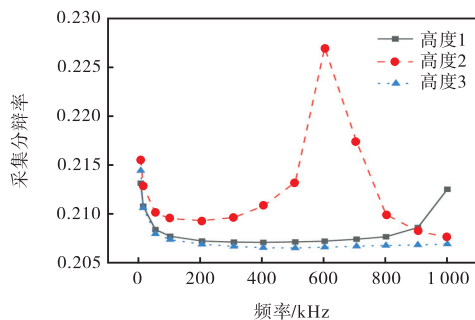


图 15 火焰 3 个高度上的导纳实部信号采集分辨率

Fig.15 Acquisition resolution of real part signal of admittance at three heights of flame

由图 15 可知, 要使系统能检测到待测导纳实部与虚部的差值, 导纳实部信号的采集分辨率应满足

$$\lambda_r \leq 0.207 \quad (6)$$

4 系统测量精度的分析

4.1 ADC 和激励频率对系统测量精度的影响

检测火焰的 ECT 系统中, ADC 采集包含待测火焰导纳 Y_x 信息的模拟信号, 并将其转换为数字信号进行输出。

设 ADC 采集的信号 V_d 为

$$V_d = A \sin(\omega t + \varphi) \quad (7)$$

V_d 并不是待测导纳 Y_x , 而是 Y_x 经调理电路处理后的信号。如果 Y_x 的幅值为 A_x , 相位为 φ_x , Y_x 到 V_d 幅值和相位上发生的变化分别为 A_G 和 φ_G , 那么式 (7) 可以表示成

$$V_d = A_x A_G \sin(\omega t + \varphi_x + \varphi_G) \quad (8)$$

Y_x 的幅值 A_x 与 V_d 的幅值 A 之间存在比例关系, Y_x 的实部和虚部被等比例地反映到 ADC 采集的信号上。 Y_x 实部信号的采集分辨率与 ADC 的采样位数紧密相关。

以表 1 中高度 1 的数据作为系统所测火焰导纳结果, 导纳 Y_x 的幅值表示为

$$|Y_x| = 2.36 \times 10^{-7} \quad (9)$$

以 14 位 ADC 为例, 其最高位为符号位。设导纳 Y_x 所对应的 ADC 采集信号 V_d 幅值为 ADC 可采集信号的最大值, 其输出数字信号 $CODE_{ADC}$ 可以表示为

$$CODE_{ADC} = 2^{14-1} = 8192 \quad (10)$$

Y_x 的实部对应的数字信号 $CODE_R$ 表示为

$$CODE_R = \frac{7.96 \times 10^{-12}}{2.36 \times 10^{-7}} \times CODE_{ADC} = 0.28 \quad (11)$$

Y_x 实部信号的采集分辨率 λ_r 为 ADC 转换数字信号的倒数, $\lambda_r = 3.57 > 0.207$, 不能满足系统分辨率要求。

激励频率越低, Y_x 实部与虚部的数值差距越小, 在 Y_x 幅值中占比越大。在保证 Y_x 所对应 V_d 为 ADC 可采集信号的最大值的前提下, Y_x 实部所对应的输出数字信号越大, 其采集分辨率 λ_r 越小。

保持 ADC 采样位数不变, 取导纳实部为 3 个高度上各激励频率下测得的最小值 7.27×10^{-12} , 为满足系统分辨率要求, 此时导纳的虚部最大值 Im_{\max} 的计算式为

$$Im_{\max} = 7.27 \times 10^{-12} \times CODE_{ADC} \times 0.207 = 1.23 \times 10^{-8} \quad (12)$$

由于导纳虚部随着频率增大而线性增大,根据表1中高度1的数据,可以计算导纳虚部为 Im_{\max} 时的激励频率 f_{\max} 为

$$f_{\max} = \frac{1.23 \times 10^{-8}}{2.36 \times 10^{-7}} \times 506.48 \text{ kHz} = 26.4 \text{ kHz} \quad (13)$$

由此可以确定,为保障系统测量精度,测量火焰导纳的ECT系统应采用26.4 kHz以下的激励频率。

4.2 降低频率对前端电路信号转换的影响

经典ECT系统中的C/V电路采用以电容反馈为主导的设计方案^[1],频率通常为500 kHz.当C/V电路中的 $C_f = 22 \text{ pF}$ 、 $R_f = 10 \text{ M}\Omega$ 、 $\omega = 2\pi \times 500 \text{ kHz}$ 时, $\omega C_f R_f = 691.15 \gg 1.00$.若将设计方案应用在测量火焰导纳的ECT系统中,将式(4)简化成

$$Y_x = -\frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} j\omega C_f \quad (14)$$

此时 R_f 不会影响输出,导纳 Y_x 的幅值和相位可以表示为

$$\begin{cases} |Y_x| = \left| \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} \right| \omega C_f \\ \angle Y_x = \angle V_{\text{out}} - \angle V_{\text{in}} - 90^\circ \end{cases} \quad (15)$$

但当激励频率降至26.4 kHz时,若 C_f 和 R_f 保持不变, $\omega C_f R_f = 36.49$, $\omega C_f R_f$ 不满足远大于1.00的条件,因此不能将 Y_x 的幅值和相位简化成式(15)的形式.根据式(4),导纳 Y_x 的幅值和相位可表示为

$$\begin{cases} |Y_x| = \left| \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} \right| \frac{\sqrt{(\omega R_f C_f)^2 + 1}}{R_f} \\ \angle Y_x = \angle V_{\text{out}} - \angle V_{\text{in}} + \arctan(\omega R_f C_f) - 180^\circ \end{cases} \quad (16)$$

由式(16)可知,待测导纳与电路的输入、输出、反馈电容和反馈电阻都有关。

若 $V_0 = V_{\text{or}} + jV_{\text{ol}}$, V_{in} 相位为0, C_x 和 R_x 可以表示为

$$\begin{cases} C_x = -\frac{V_{\text{or}} \omega R_f C_f + V_{\text{ol}}}{V_{\text{in}} R_f \omega} \\ R_x = -\frac{V_{\text{in}} R_f}{V_{\text{or}} - V_{\text{ol}} \omega R_f C_f} \end{cases} \quad (17)$$

5 结论

本文通过电探针测量了火焰不同位置的电导率和相对介电常数,建立了测量火焰导纳的ECT仿真模型,并对ECT测量火焰的导纳值的实部和虚部值进行了分析,主要结论如下。

(1) ECT系统测量火焰导纳,激励频率越高,火焰导纳的实虚部差距越大,从而降低导纳实部信息的

测量精度.在ADC的采样位数一定的前提下,降低激励频率可提高系统测量精度。

(2) 但降低ECT的激励频率时,经典的ECT中的C/V电路线性输出关系不再成立,应考虑C/V电路中反馈电容和反馈电阻的综合作用。

参考文献:

- [1] Liu S, Chen Q, Xiong X, et al. Preliminary study on ECT imaging of flames in porous media[J]. Measurement Science and Technology, 2008, 19(9): 94017.
- [2] Waterfall R, He R, Wolanski P, et al. Flame visualizations using electrical capacitance tomography(ECT) [C]// Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering. San Jose, USA, 2001: 242-250.
- [3] He R, Xie C, Waterfall R, et al. Engine flame imaging using electrical capacitance tomography[J]. Electronics Letters, 1994, 30(7): 559-560.
- [4] 刘石, 陈琪, 李志宏, 等. 多孔介质中燃烧火焰的ECT成像研究[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(12): 2164-2166.
Liu Shi, Chen Qi, Li Zhihong, et al. ECT imaging of flames in porous material[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(12): 2164-2166(in Chinese).
- [5] 陈琪, 刘石. 新型ECT传感器在燃烧检测中的应用研究[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(11): 1885-1888.
Chen Qi, Liu Shi. Applied research of a novel ECT sensor in high temperature environment[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(11): 1885-1888(in Chinese).
- [6] Gut Z, Wolanski P. Flame imaging using 3D electrical capacitance tomography[J]. Combustion Science and Technology, 2010, 182(10/12): 1580-1585.
- [7] Huang A, Cao Z, Sun S J, et al. An agile electrical capacitance tomography system with improved frame rates[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(4): 1416-1425.
- [8] Wang C, Jin S, Cao X N, et al. Improvement of flame complex permittivity model considering positive ions and electrons[C]//IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). Ottawa, Canada, 2022: 1-5.
- [9] Hu D, Cao Z, Sun S J, et al. Dual-modality electrical tomography for flame monitoring[J]. IEEE Sensors Jour-

- nal, 2018, 18(21): 8847-8854.
- [10] Hu D, Tian Y, Chang L Y, et al. Estimation of combustion temperature field from the electrical admittivity distribution obtained by electrical tomography[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(9): 6271-6280.
- [11] Yang W Q, York T A. New AC-based capacitance tomography system[J]. IEE Proceedings—Science, Measurement and Technology, 1999, 146(1): 47-53.
- [12] Wang C, Jin S, Zhen Z Z, et al. Flame complex permittivity model considering electrons and positive ions[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 1501810.
- [13] Belcher H, Sugden T, Norrish R. Studies on the ionization produced by metallic salts in flames I. The determination of the collision frequency of electrons in coal-gas/air flames[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, 1997, 201(1067): 480-488.
- [14] Zhang X H, Wang H X. Digital phase-sensitive demodulation in electrical capacitance tomography system[C]// The 7th World Congress on Intelligent Control and Automation(WCICA). Chongqing, China, 2008: 6730-6733.
- [15] 马敏, 刘慧洁. 基于平面阵列电极传感器的 ECT 系统设计[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(2): 82-83, 87.
- Ma Min, Liu Huijie. Design of ECT system based on planar array electrode sensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2017, 36(2): 82-83, 87(in Chinese).
- [16] Ji H F, Tan W H, Gui Z B, et al. A new dual-modality ECT/ERT technique based on(CD)-D-4 principle[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2016, 65(5): 1042-1050.
- [17] Wang H X, Cui Z Q, Xu Y B, et al. Digital signal processing in electrical capacitance tomography[C]// IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems (APCCAS). Macao, China, 2008: 465-468.
- [18] Cui Z Q, Wang H X, Chen Z Q, et al. A high-performance digital system for electrical capacitance tomography[J]. Measurement Science and Technology, 2011, 22(5): 55503.
- [19] Hu D, Xu L J, Cao Z, et al. Verification for electrical tomography in flame monitoring by ion probe[C]// IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference(I2MTC). Auckland, New Zealand, 2019: 1-6.
- [20] Jin S, Wang C, Zhen Z Z, et al. Estimation of temperature for premixed flame by relative permittivity and conductivity[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 4502810.

(责任编辑:孙立华)