

[文章编号] 1003—4684(2020)04-0020-05

微型扬声器线圈温度测量系统设计

段志杰, 刘凌云

(湖北工业大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 为实现对微型扬声器线圈温度的实时监控,设计了一套线圈温度测量系统。使用 Audacity 软件在测试音频中叠加 50Hz 低频信号,使用 STM32H7 的 DUAL ADC 模式实现扬声器电压电流值的同步采样,使用改进型 Goertzel 算法计算出 50Hz 频率对应的直流阻抗,利用直流阻抗与线圈温度的对应关系得到线圈温度;将扬声器置于温箱中作为温度传感器,对比温箱设定温度及扬声器计算所得温度。结果显示两者基本一致,相对偏差不超过 2%,绝对偏差不超过 2℃,说明所提出的测量系统能有效实现扬声器线圈温度的实时监控。

[关键词] 线圈温度; 同步采样; 改进型 Goertzel 算法; 直流阻抗

[中图分类号] TN912.2 **[文献标识码]** A

工作中的微型扬声器 90% 以上的电能转化为了热能,因此在对扬声器进行声学测试时需要监控线圈温度,防止温度过高导致热损坏^[1-2]。文献[3]提出一种光纤频域反射法(OFDR)对工作中的线圈温度进行直接测量,但是测量设备价格昂贵,而且由于扬声器线圈本身密封结构等问题,线圈温度无法通过温度计或者热电偶等常规方法^[4]以及 OFDR 直接测得,大多采用间接测量或者通过模型仿真计算的方式,并且在获取结果后并没有对结果给出可靠的验证方案。文献[5]提出一种有限元流体热仿真的方式计算线圈温度,计算复杂且偏差较大;文献[6]提出一种功率-线圈温度模型,将功率与环境温度作为输入,线圈温度作为输出,但是需要实时监控环境温度的变化否则会产生较大偏差;目前间接的测量方法通常是在测量信号中叠加低频信号,测量扬声器在该低频下对应的直流阻抗,根据直流阻抗与线圈温度对应关系计算出线圈温度^[7-11]。其中低频信号大多使用芯片 AD9850 产生,信号叠加均使用加法电路,低频信号的测量均使用有效值测量芯片。间接测量方法中基本都是硬件实现方式,成本较高且不能根据实际需要进行灵活改变。针对上述问题,本文提出在低频信号的产生、叠加、有效值测量均以软件的方式实现,可以按需随意产生、叠加、测量多个低频信号,还可以对多个低频信号下温度计算结果求取平均值,进一步提高测量精度,不受硬

件实现上的约束,节约了成本,灵活性高。并且创造性的提出了一种温箱测试实验对系统测量结果进行验证,还可以对未知型号扬声器的线圈温度系数进行测量,此前并无相关文献提出此种验证方案,解决了间接测量方案测量结果的可靠性问题。

1 改进型 Goertzel 算法

1.1 改进型 Goertzel 算法介绍

Goertzel 算法单频选择性强,可以计算特定频点的 DFT,相比于 FFT 算法计算效率更高^[12]。在传统 Goertzel 算法的基础上,改进型 Goertzel 算法令传递函数分子分母同乘以相同的因子,省去了很多不必要的复数运算,进一步提高了计算效率,近些年广泛应用于通讯领域,比如电话拨号、对讲机等^[13-15]。根据上述特性,引入改进型 Goertzel 算法对线圈中叠加的低频信号幅值进行测量。对于传统 Goertzel 算法有

$$X(k) = W_N^{-kN} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{kn} = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{-k(N-n)} = x(n) * W_N^{kn} = y_k(n) \quad (1)$$

式中, $X(k)$ 可以看作是有限长序列 $x(n)$ 与 W_N^{kn} 的卷积,也可以看作是一个传递函数为 $H_k(z) = \frac{1}{1 - W_N^{-k} z^{-1}}$ 的滤波器,滤波器输出为 $y_k(n)$ (图 1)。

[收稿日期] 2019—12—06

[基金项目] 政府间国际科技创新合作重点专项(2016YFE0124300); 太阳能高效利用湖北省协同创新中心开放基金资助项目(HBSKFZD2014004)

[第一作者] 段志杰(1995—),男,湖北武汉人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为音频芯片应用设计

[通信作者] 刘凌云(1970—),男,湖北松滋人,湖北工业大学教授,研究方向为微电子与固体电子学

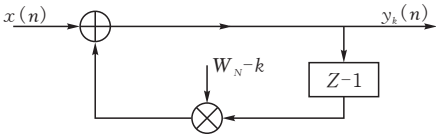


图 1 传递函数为 $H_k(z)$ 的滤波器结构图

当 $n=N$ 时,有 $X(k)=y_k(N)$,则该滤波器的第 N 个输出即为所要求的 $X(k)$ 。只需要 N 个点的数据即可算出所需 $X(k)$,相比于 FFT 运算时,将 N 条谱线全部算出,Goertzel 算法可以只计算 k 值所对应频率谱线,改变 k 值即可计算其他所需频率的谱线,运算量大幅减小。

对于改进型 Goertzel 算法,将传递函数 $H_k(z)$ 分子分母同时乘因子 $(1-W_N^k z^{-1})$ 得到改进后的滤波器的传递函数

$$H_k(z)=\frac{1-W_N^k z^{-1}}{1-2\cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right)z^{-1}+z^{-2}}$$

(2)

根据公式(2)进一步变换可得

$$\begin{cases} v_k(n)=2\cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right)v_k(n-1)-v_k(n-2)+x(n) \\ y_k(n)=v_k(n)-W_N^k v_k(n-1) \end{cases}$$

(3)

由公式(3)可知计算 $y_k(n)$ 仅有一次复数运算,又由于实际计算扬声器线圈温度只需要知道低频信号对应的幅度信息,进一步可得

$$\begin{aligned} |X(k)|^2 &= |y_k(N)|^2 = [v_k(n)-W_N^k v_k(n-1)] \times \\ &\quad [v_k(n)-W_N^k v_k(n-1)]^* = \\ &\quad v_k^2(n)+v_k^2(n-1)+2\cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right)v_k(n)v_k(n-1) \end{aligned}$$

(4)

由公式(4)可知计算 $y_k(n)$ 的幅值最后仅有实数运算,便于使用计算机编程实现,其中 $0 \leq n,k \leq N-1$, k 每取一个特定值时,其对应频率的幅值为 $\sqrt{|y_k(N)|^2}$,其对应频率在时域的振幅 $A=\frac{2\sqrt{|y_k(N)|^2}}{N}$ 。

1.2 改进型 Goertzel 算法编程实现

计算机编程时,求某一频率时域的幅值时,有

$$K=\frac{Nf_0}{R}$$

其中: K 表示目标频率 f_0 对应的谱线的编号; R 为信号的采样率; N 为采样的点数。预先计算如下常数

$$C=2\cos(\omega)=2\cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right)$$

其中: $\omega=\frac{2\pi k}{N}$ 变量; Q_1,Q_2 初始值均为 0;变量 S 为采样值。循环调用下述方程 N 次

$$\begin{cases} Q_0=CQ_1-Q_2+S \\ Q_2=Q_1 \\ Q_1=Q_0 \end{cases}$$

则可得频率 f_0 在时域的振幅

$$A=\frac{2\sqrt{Q_1^2+Q_2^2}-CQ_1Q_2}{N}$$

2 扬声器线圈温度测量整体设计方案

整体设计方案包括硬件设计方案、下位机软件设计方案、上位机软件设计方案。其中硬件设计部分主要是电压电流采样电路的设计,使用差分放大电路将扬声器两端的电压差分信号、测流电阻两端的电压差分信号转换为单端信号。下位机软件部分主要是对 STM32H7 内部 ADC 同步采样模式的配置,使用 DUAL ADC 模式对电压、电流实现同步采样。上位机软件部分主要是使用改进型 Goertzel 算法对电压、电流信号进行处理,计算扬声器线圈温度并进行显示和存储。上位机与下位机之间使用 USB 进行数据传输,使用队列缓存机制来防止数据丢帧。信号流向如图 2 所示。

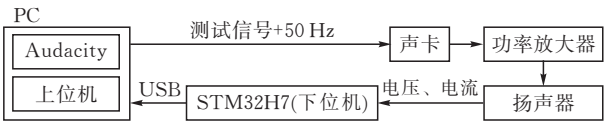


图 2 测量系统信号流向整体示意图

其中使用 AUDACITY 软件将待测的音源信号与 50 Hz 音频信号放入不同的音轨,电脑连接声卡后,使用 AUDACITY 软件同时播放这两路音轨的信号,即可将混合后的音频信号输出给功率放大器。

3 扬声器线圈温度测量硬件设计方案

如图 3 所示功率放大器,单声道信号由 INP 端输入,经过功率放大输出给扬声器,扬声器与测流电阻串联,其中 VOP、VON 为数字输出方式,即均为方波输出,在无输入信号的空闲状态时,VOP、VON 输出的方波相同。因此在测量扬声器两端电压时,需要分别使用一个 RC 低通滤波器将开关调制的方波信号滤除,方波信号的频率一般在几百 kHz 以上。

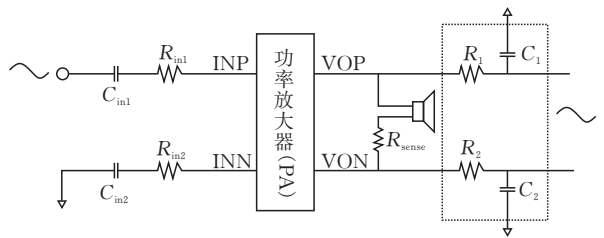


图 3 扬声器与功率放大器信号输入与输出示意图

由于功率放大器输出的音频信号是差分信号,

因此在使用 ADC 对电压进行采集时需要先将差分信号转换为单端信号,电压电流测量示意图见图 4,使用差分放大电路将扬声器两端电压 $SV+$ 、 $SV-$,与测流电阻两端电压 $RV+$ 、 $RV-$ 经过低通滤波器后的电压值进行差值后放大适当倍数,使用 ADC1 master,ADC2 slave 对电压电流进行同步采样。

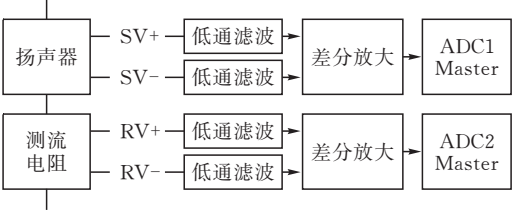


图 4 电压电流测量方案示意图

具体实现电路见图 5。

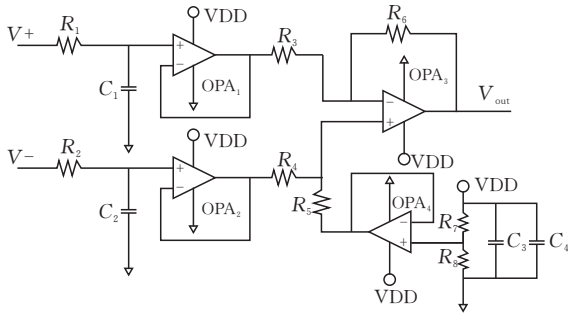


图 5 电压电流测量方案具体实现原理图

$V+$ 、 $V-$ 表示扬声器两端电压或者测流电阻两端电压,先经过由 R_1C_1 、 R_2C_2 组成的低通滤波器,低通滤波器的截止频率可以设置为 30 kHz,保证音频范围信号不损失又能滤除高频方波即可。再通过由 OPA_1 、 OPA_2 构成的电压跟随器实现隔离,输出后接入由 OPA_3 组成的差分放大电路,在差分放大电路中加入由 OPA_4 组成的电压跟随器产生的 $VDD/2$ 的电压偏置,防止差分放大电路输出 V_{out} 为负电压,其中 $R_3=R_4$ 、 $R_6=R_5$ 、 $R_7=R_8$ 。

4 扬声器线圈温度软件设计方案

4.1 下位机软件实现流程

下位机 STM32H7 需要对电压电流进行同步采样然后通过 USB 上传到 PC 端,由于音频范围上限为 20 kHz,因此采样率选择为 20 kHz 的两倍并留有一定裕量定为 50 kHz。STM32H7 单片机程序流程见图 6。

首先需要实现 ADC 初始化的配置,将 ADC 配置为 DUAL ADC 模式;然后对 USB 模块进行初始化,随后配置 Tim8 定时器实现 50 kHz 的触发事件,每次触发事件启动单次 ADC 转换,转换完成后的数据存入缓存中,数据量达到一定大小后使用 USB 进行上传。

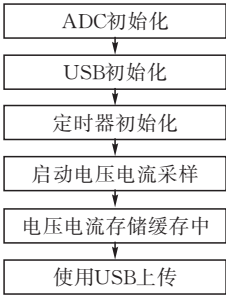


图 6 下位机软件实现流程图

4.2 电压电流同步采样方案

对扬声器电压电流的采样要求同步,采用 STM32 自带的 DUAL ADC 模式,配置 ADC1 为 master 模式,ADC2 为 slave 模式,使用 time8 定时器的 Trigger 事件作为定时触发源。ADC 同步采样见图 7。

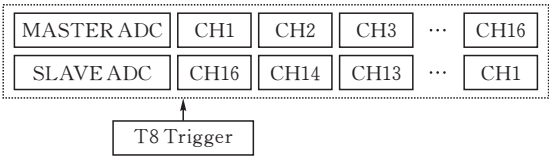


图 7 ADC 双通道同步采样模式示意图

Trigger 信号触发后,Master ADC 与 Slave ADC 会同时开始对 CH1 与 CH16 通道同步采样,当这一对通道扫描过后会继续扫描通道 CH2、CH14,直到将 16 对通道扫描完成。由于此处只需要测量一个扬声器电压与电流,因此只需要配置扫描通道参数为 1,使得每次只扫描 CH1、CH16 这一对通道即可。数据采集及存储过程见图 8。

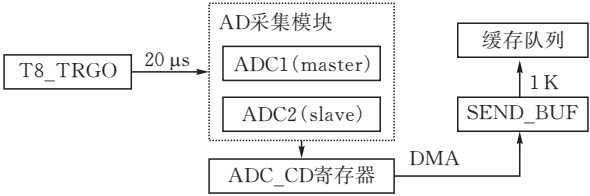


图 8 ADC 数据采集及存储过程

当每次转换完成后数据存储在 ADC_CDR 寄存器中,DMA 会自动将数据搬运到 1K 字节大小的 SEND_BUF 中,当 SEND_BUF 存满时会触发 DMA 中断,在中断处理函数中对数据进行入队处理。由于下位机的数据传输与上位机的数据接收并不能完全同步,因此上位机及下位机软件均需要使用队列缓存机制来防止数据丢失。

4.3 上位机软件实现流程

上位机软件实现流程见图 9,首先从下位机接收电压电流数据,使用改进型 Goertzel 算法计算出 50 Hz 电压电流信号的振幅,使用 50 Hz 频率下的阻抗作为扬声器的直流阻抗,根据扬声器直流阻抗与线圈温度的对应关系计算线圈温度,然后进行实

时显示及保存。

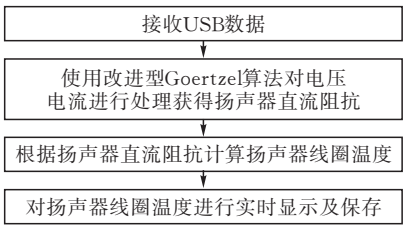


图 9 上位机软件实现流程

4.4 扬声器线圈温度计算方案

已知采样率 R 为 50 kHz,目标频率 f_0 为 50 Hz,选择采样点数 N 为 50 k,则 50 Hz 对应的谱线编号 K 为 50,即可计算出常数 C 为 2。使用改进型 Goertzel 算法计算出 50 Hz 电压与电流的振幅后,得到 50 Hz 条件下的阻抗作为扬声器的直流阻抗,根据直流阻抗与扬声器线圈温度对应关系计算线圈温度,对应关系如下

$$T_t = \frac{(R_t - R_0)}{T_{coeff} * R_0} + T_0$$

其中: R_t 是线圈温度为 T_t 时扬声器的直流阻抗; R_0 是在测试之前室温为 T_0 时的直流阻抗; T_0 为 25℃; T_{coeff} 是线圈的温度系数,一般取值 0.0034。

5 测量结果及结论

由于线圈温度为计算结果,因此需要对计算结果进行验证。设计如下验证方案:将扬声器放置于温箱之中,只播放 50 Hz 音频,将扬声器线圈视作温度传感器,设置不同的温箱温度,等待线圈温度与温箱温度相同时,读取记录上位机计算显示的线圈温度与温箱设置温度进行对比。

其中 50 Hz 音频信号作用到扬声器的电压有效值为 0.17 v,对线圈温度影响可以忽略不记。温箱从 25℃开始设置,每隔至少 30 min 读取记录一次上位机线圈温度读数,以读数趋于稳定作为最终读取温度时间间隔的标准,然后调整一次温箱温度。选用同一批次的 3 只温度上限值为 100℃、线圈温度系数为 0.0034 的扬声器进行测试。

第 1 只按照 10℃为间隔进行测试,测试结果见表 1。

第 2 只一开始按照 20℃为间隔进行测试,随后的 3 次测试随机选择温度点,测试结果见表 2。

第 3 只在 25℃条件下测试完成后,直接将温度设置到 65℃,测试结果见表 3。

实验结果显示,上位机计算所得同一批次 3 只线圈温度与温箱设定温度基本一致,偏差在 2 % 以内,绝对偏差温度不超过 2℃。

表 1 第一次实验测量结果

扬声器编号	温箱设定温度/℃	计算温度/℃	偏差/%
1	25	25.0	0.00
1	35	34.64	−1.03
1	45	45.63	1.40
1	55	55.13	0.24
1	65	66.17	1.80
1	75	76.2	1.60
1	85	85.75	0.88
1	95	96.26	1.33

表 2 第二次实验测量结果

扬声器编号	温箱设定温度/℃	计算温度/℃	偏差/%
2	25	25.0	0.00
2	45	44.41	1.31
2	65	64.25	1.15
2	75	74.075	1.23
2	92	90.67	1.45
2	97	95.49	1.56

表 3 第三次实验测量结果

扬声器编号	温箱设定温度/℃	计算温度/℃	偏差/%
3	25	25.0	0.00
3	65	64.135	1.33

以上结果说明笔者所提出的系统设计方案对扬声器线圈温度能进行有效的实时监控,实用价值高。已发表研究中只能给出线圈温度计算结果,并不能对计算结果进行验证,本文设计的温箱实验可以对计算结果进行有力的验证,在此基础上还可以对未知型号扬声器的线圈温度系数进行测量。此外,文中只是进行了 50 Hz 条件下的测试,还可以更换为其他低频信号,寻找最佳低频点,或者叠加其他低频信号,使用不同低频组合计算出来的结果取平均值,进一步提高测量精度,再使用温箱实验对测量结果作进一步验证。

[参 考 文 献]

[1] 周静雷,董春君.热模型下扬声器音圈温度预测方法[J].西安工程大学学报,2019, 33(6):631-636.

[2] 周静雷,张倩云,李腾飞.用于寿命试验仪的扬声器热传递参数测量方法[J].国外电子测量技术,2019 (5):1-5.

[3] Gies S, Langolf A, Weddeling C, et al. Measurement of working coil temperature in electromagnetic forming processes by means of optical frequency domain reflectometry[J]. Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation, 2015, 3:15-20.

[4] 殷玉飞,丁杨.一种扬声器温升测试系统:中国,

ZL201520838186.8 [P]. 2016-03-23.

[5] 李海锋.扬声器热仿真分析[J].电声技术,2008, 32(5):32-34.

[6] Chapman P J. Thermal simulation of loudspeakers [C]//Audio Engineering Society Convention 104. Audio Engineering Society, 1998.

[7] 何梦龙,周静雷.基于功率试验仪的扬声器温度测试技术[J].产业与科技论坛,2014(21):41-42.

[8] Polleros R. Direct measurement of an input signal to a loudspeaker to determine and limit a temperature of a voice coil of the loudspeaker: U.S. Patent 9,226,071 [P]. 2015-12-29.

[9] 孙长城,高佳玲.基于 STM32 的扬声器音圈温度测量系统设计[J].信息通信,2017 (1): 121-122.

[10] Gautama T. Determining the temperature of a loudspeaker voice coil: U.S. Patent Application 14/520,090[P]. 2015-5-28.

[11] 王浩.多功能扬声器功率试验系统设计[D].西安: 西安工程大学,2018.

[12] 宋知用.MATLAB 数字信号处理 85 个实用案例精讲: 入门到进阶[M].北京:北京航空航天大学出版社, 2016:329-343.

[13] 虞正平,胡爱群.基于 Goertzel 算法的 DTMF 信号检测[J].通讯世界,2016(13):272-273.

[14] 陈君.改进型 Goertzel 算法的 DTMF 信号检测研究及仿真[J].煤炭技术, 2012(4):191-193.

[15] 邵明东.改进 Goertzel 算法的 DTMF 信号检测的仿真与应用[J].电声技术,2009,33(12):65-69.

The Design of Coil Temperature Measurement System for Micro Loudspeaker

DUAN Zhijie,LIU Lingyun

(School of Electrical and Electronic Engin., Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068,China)

Abstract: In order to realize the real-time monitoring of the coil temperature of micro loudspeaker, a coil temperature measurement system was designed. Audacity software was used to stack 50Hz low frequency signal in test audio, and dual ADC mode of stm32h7 was applied to realize synchronous sampling of loudspeaker voltage and current value. Improved Goertzel algorithm was utilized to calculate DC impedance corresponding to 50Hz frequency. By means of the corresponding relationship between DC impedance and coil temperature, coil temperature was tested. The loudspeaker was placed in the temperature box as temperature sensor to compare the set temperature of the temperature box and the calculated temperature of loudspeaker. The results show that the two are basically the same, the relative deviation is less than 2%, the absolute deviation is less than 2 degrees, which shows that the proposed measurement system can effectively realize the real-time monitoring of speaker coil temperature.

Keywords: coil temperature; synchronous sampling; improved Goertzel algorithm; DC impedance

[责任编辑: 张岩芳]