

# 动圈式扬声器低频驱动下稳态 温度场数值分析研究

滕越<sup>1</sup>, 陆晓<sup>1</sup>, 温周斌<sup>1,2</sup>, 徐楚林<sup>1</sup>

(1. 浙江中科电声研发中心, 浙江嘉善 314115; 2. 中国科学院声学研究所东海研究站, 上海 200032)

**摘要:** 为了预测动圈式扬声器的稳态温度场, 提出了一种数值分析方法。通过有限元法实现对低频信号驱动下动圈式扬声器稳态温度场数值模型的求解, 可得到扬声器中任意点的温度值。同时设计了温度测量系统, 通过测量该扬声器磁路系统中某些特殊点的温度值来验证数值分析的结果。实验结果表明数值分析结果与测量结果基本一致。

**关键词:** 扬声器; 磁路; 温度; 数值分析; 有限元

中图分类号: TB54

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2014)-02-0141-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2014.02.009

## Research on a numerical simulation method of steady-state temperature field in moving-coil loudspeaker under low frequency driving

TENG Yue<sup>1</sup>, LU Xiao<sup>1</sup>, WEN Zhou-bin<sup>1,2</sup>, XU Chu-lin<sup>1</sup>

(1. Zhejiang Electro-Acoustic R&D Center, Jiashan 314115, Zhejiang, China;

2. Shanghai Acoustics Laboratory, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200032, China)

**Abstract:** A numerical simulation method which can predict the steady-state temperature field of moving-coil loudspeaker is proposed. Steady-state temperature is calculated by the finite element method under low frequency signal driving, and the temperature value in any place of loudspeaker can be obtained. A temperature measurement system is also designed and set up to get the actual temperature values at some special points. The experimental results are generally consistent with the numerical results.

**Key words:** loudspeaker; magnetic circuit; temperature; numerical simulation; finite element

## 0 引言

一般扬声器工作时的大部分能量都转化为了热能, 其电声转换效率通常不足 10%。音圈长时间工作在高温下有可能发生音圈变形、脱胶和漆包线老化等现象, 继而造成音圈“擦圈”, 甚至“烧圈”等严重后果<sup>[1]</sup>。磁钢温度过高也有可能造成磁钢退磁, 特别是近年来广泛使用的钕铁硼材料磁钢。一旦磁钢退磁将导致其没有足够的磁力推动音圈及悬吊系统形成有效振动, 温升情况进一步加剧。

Henricksen<sup>[2]</sup>依据扬声器重放信号频率不同将扬声器的热效应模型分为低频模型和高频模型。在低频模型下, 由于不计磁路中的交变磁场产生的涡流热, 音圈被视作唯一热源, 但此时需要考虑悬吊系统的强迫对流换热过程; 而在高频模型下, 虽无

需考虑强迫对流换热过程, 但却不能忽略涡流热。郭宁等<sup>[3]</sup>以不同扬声器的三倍谐振频率为临界频率点, 将非线性热模型分为低频模型和高频模型。

近年来, 国内外均有采用有限元法建立扬声器数值传热模型报道。Lonescu<sup>[4]</sup>将动圈式扬声器的内部空间简化为“空气”和“实体”两个轴对称部分, 提出了扬声器“耦合传热”的数值模型, 并基于流体热仿真方法模拟了音圈及其周围温度场, 其分析过程未考虑音圈辐射散热过程, 而当音圈温度较高时, 辐射散热是音圈的一种主要散热手段。李海峰<sup>[5]</sup>根据文献[4]所述分析方法比较了有无极芯柱对音圈温度的影响。其建模和分析过程未指明驱动信号的频率特性对分析结果的影响, 因而也没有考虑不同频率信号驱动下数值分析方法的不同。

本文运用数值分析的方法, 研究动圈式扬声器在低频正弦信号驱动下扬声器的稳态温度场, 在分析过程中考虑了传导、对流和辐射三种热传递方式, 得到扬声器中任意点的稳态温度的数值解。同时, 作者设计和搭建了测量系统来测量所对应实际工作状态下扬声器磁路系统中的某些特殊点的稳

收稿日期: 2012-11-12; 修回日期: 2013-01-18

作者简介: 滕越(1986—), 男, 黑龙江鸡西人, 硕士, 研究方向为电声技术。

通讯作者: 滕越, E-mail: tengyue@mail.ioa.ac.cn

态温度值，以验证动圈式扬声器低频驱动下稳态温度场的数值分析方法。

## 1 原理概述

### 1.1 热量的产生

扬声器是一种电声转换器，图 1 是一款典型的动圈式扬声器示意图。

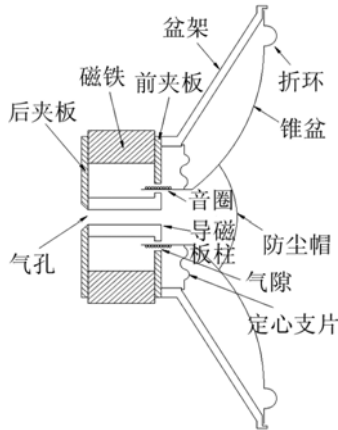


图 1 动圈式扬声器示意图

Fig.1 Schematic diagram of a moving-coil loudspeaker

当音圈通入电流在磁场中振动，只有小部分电能转换为了机械能，很大部分电能都转换为了热能，表现为音圈发热。单位时间内音圈产生的热量  $J$  与自身直流电阻  $R$  和有效电流  $I$  的关系为

$$J = I^2 R \tag{1}$$

当扬声器工作时，音圈通入交变电流，其外围将产生一个变化的磁场，磁路系统中将产生感应电流，这种感应电流就是涡流。涡流热效应在单位时间内产生的热量  $J'$  与频率  $f$  密切相关：

$$J' = I_2^2 R_2, \quad I_2 = \frac{I}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_2}{L_2 2\pi f}\right)^2}} \tag{2}$$

式中， $I_2$ 、 $R_2$  和  $L_2$  分别是涡流电流、涡流电阻和涡流电感。当扬声器在低频驱动下，即频率  $f$  较小时，热量  $J'$  可忽略不计。本文着重研究低频驱动下的扬声器散热模型，暂忽略涡流的热效应。

### 1.2 热量的传递

音圈产生的热能将通过多种方式传递给扬声器的其他部件，图 2 为扬声器中的热传递示意图。

音圈作为热源将一部分热能通过传导的方式传递至音圈骨架等组件中，传递的热量与表面的温度变化率  $\frac{dt}{dx}$  和表面积  $A$  成正比：

$$Q = -\lambda A \frac{dt}{dx} \tag{3}$$

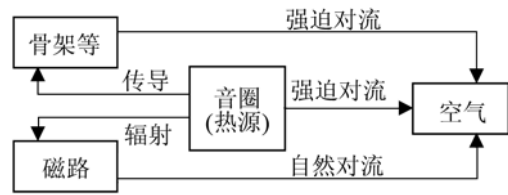


图 2 扬声器中的热传递

Fig.2 Heat transfer in loudspeaker

式中， $\lambda$  为热导率。另一部分热能通过辐射的方式传递给磁路系统，物体辐射热流量  $\Phi$  与温度  $T$  相关：

$$\Phi = \varepsilon A \sigma T^4 \tag{4}$$

式中： $\varepsilon$  为辐射率； $\sigma$  为辐射常数，其数值为  $5.67e^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$ ； $A$  为辐射表面积。还有一部分热能通过对流的方式传递给空气，对流换热的基本计算式是

$$q = h \Delta t \tag{5}$$

式中： $\Delta t$  为流体与壁面的温度差； $h$  为对流换热系数，它不仅与流体的性质、换热表面的形状、大小与布置有关，还与流体的流速有关。同时，音圈骨架和磁路系统又都通过对流的方式将热能传递给空气。其中，音圈和音圈骨架等部件在扬声器工作时产生较大幅度振动，与空气形成强迫对流，而磁路表面与空气则形成自然对流。

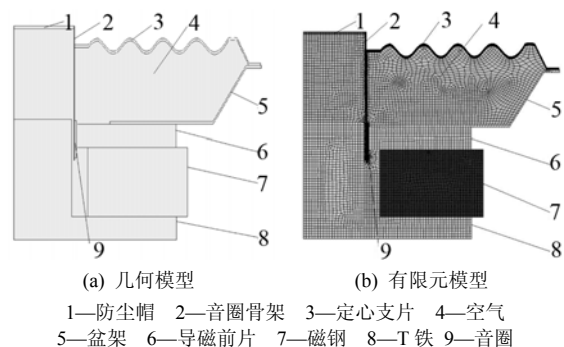
## 2 稳态温度场数值分析及实际测量

### 2.1 数值分析

#### 2.1.1 建立模型

作者针对不同类型的动圈式扬声器做了大量的数值分析研究，本文仅选择一款扬声器作数值分析。由于所分析的扬声器是轴对称的圆型扬声器，故可将该扬声器磁路系统简化为图 3(a)所示的平面半剖几何模型，图 3(b)则是对应的有限元模型。

分析该扬声器所需热参数见表 1<sup>[6]</sup>，按照表 1 中的数据定义模型中各个部件参数。



(a) 几何模型 (b) 有限元模型

1—防尘帽 2—音圈骨架 3—定心支片 4—空气  
5—盆架 6—导磁前片 7—磁钢 8—T 铁 9—音圈

图 3 扬声器稳态温度场分析模型

Fig.3 Steady-state temperature analysis model of loudspeaker

表 1 扬声器中不同部件的热参数  
Table 1 Thermal parameters of loudspeaker parts

序号	部件	热导率 /(W/m·°C)	比热容 /(J/kg·°C)	密度 /(kg/m <sup>3</sup> )
1	音圈	380	385	8920
2	T 铁等	48	450	7840
3	防尘帽	0.18	1340	900
4	音圈骨架	180	1256	2600
5	磁钢	3.2	750	4400

2.1.2 施加边界条件与载荷

在数值分析过程中，不同频率信号驱动下的数值模型有不同的边界条件与载荷。低频信号驱动下的数值模型的特征主要体现为两点：(1) 音圈是唯一的热源；(2) 对流换热包含强迫对流和自然对流，不同的对象须分别施加不同的对流换热条件。

根据焦耳定律，单位时间单位体积由音圈产生的热量(生热率)为：

$$q_i = J/V \tag{6}$$

其中： $q_i$  为音圈的生热率； $V$  为音圈的体积。本文所分析的扬声器谐振频率为 55Hz，额定电压为 7V，参考文献[3]以 3 倍谐振频率作为分频点，低频驱动信号的频率须满足  $f < 165\text{Hz}$ ，选取 7V、100Hz 的正弦电压作为驱动信号。结合式(1)和式(6)将计算结果以热生成率的形式施加在音圈单元上。

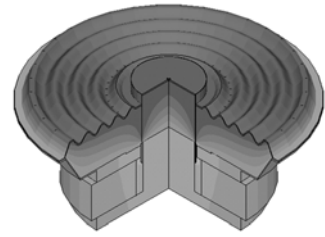
在悬吊系统部件(定心支片、音圈骨架、音圈)的边界上加载强迫对流换热边界条件，而在其余与环境接触的边界上加载自然对流换热边界条件，由于辐射作用在音圈及与音圈相对的磁路内表面，因此将相应的辐射率施加在音圈和磁路内表面相对的边界上，更详细的仿真分析流程可参阅相关专利<sup>[7]</sup>。

2.1.3 仿真结果

图 4 是分析得到的扬声器稳态温度场。由图可知，到达热稳态以后，音圈的温度最高，平均温度约为 41.1°C。同时，音圈产生的热量由内向外逐渐扩散，且热量主要集中在磁路(导磁前片、磁钢、T 铁)内表面。而介于音圈和定心支片之间的空气区域温度梯度较为明显，表明空气区域的热量流通较缓慢，定心支片的温度最低，约为 16 °C，接近室温(15°C)，可见，定心支片明显阻隔了热量的交换，在扬声器设计时应充分考虑定心支片的散热能力。T 铁底面中心温度高于底面边缘温度，其中中心点的平均温度约为 31.7°C。磁钢和磁路外表面温度较为均匀，平均温度为 27.7°C，这表明热量通过 T 铁底面相比磁钢的传递速度更快。

2.2 测量

作者设计并搭建了一个扬声器温度测量系统，



16.025 21.587 27.149 32.712 38.274  
18.806 24.368 29.931 35.493 41.055

图 4 扬声器稳态温度场

Fig.4 Steady-state temperature field of loudspeaker

该系统根据测量原理的不同将温度测量方法分为音圈温度测量和磁路温度测量两个部分，最后给出整合以后的磁路系统温度测量结果。

2.2.1 音圈温度测量方法

音圈温度不易直接测量，可通过实时测量音圈直流电阻，并根据金属导体温度与电阻的关系计算得到音圈温度。扬声器音圈温度与音圈直流电阻存在如下关系：

$$\Delta T = \frac{1}{\delta} \left( \frac{R_c(T_v)}{R_c(T_a)} - 1 \right) \tag{7}$$

其中， $R_c(T_a)$  为温度  $T_a$  时的音圈直流电阻值， $R_c(T_v)$  为温度  $T_v$  时的音圈直流电阻值， $\delta$  为温升系数。

基于以上公式，若已知音圈的直流电阻变化，便可计算得到音圈的温度变化。为此作者设计了一个测量扬声器音圈电阻的测量系统，如图 5 所示。其中，信号发生器 SS 产生一个如图 6 所示的周期为  $T(120\text{s})$  的信号， $T=T_1+T_2$ ，在  $T_1$  阶段(115s)，输入一个幅度为 7V、填充频率为 100Hz 的正弦信号  $S_1$  用来激励扬声器工作并促使其升温；在  $T_2$  阶段(5s)，输入一个幅度为 0.5 V、填充频率为 4 Hz 的正弦信号  $S_2$  近似代替直流信号用以获得音圈直流电阻阻值。 $R_0$  为阻值 1 Ω 的标准水泥电阻，其阻值受

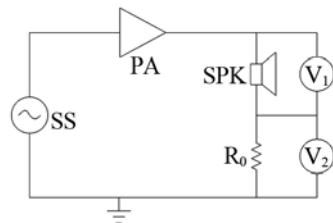


图 5 音圈温度测量系统原理图

Fig.5 Schematic diagram of test system of voice coil temperature

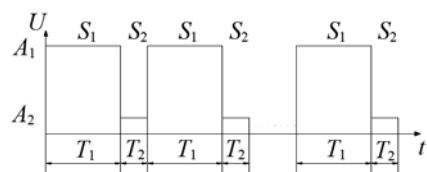


图 6 激励信号时序

Fig.6 Time sequence of driving signal

温度影响很小;  $V_1$  与  $V_2$  为电压表, 它们分别测得扬声器和标准电阻两端的电压  $U_1$  和  $U_2$ 。这样, 扬声器音圈直流电阻  $R_c(T_c) = U_1 / (U_2 / R_0)$ 。信号发生器 SS 和电压表  $V_1$ 、 $V_2$  是由美国 NI 虚拟仪器系统完成的。

### 2.2.2 磁路温度测量方法

磁路外表面的温度可利用温度传感器直接测量得到, 图 7 为测量原理框图。

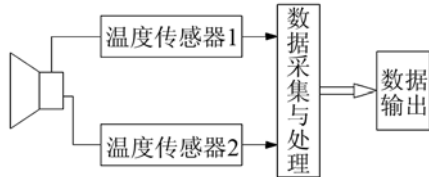


图 7 磁路温度测量系统原理框图

Fig.7 Schematic diagram of test system of magnetic circuit temperature

温度传感器 1 和 2 均为 k 型热电偶, 将两只热电偶分别固定在扬声器的 T 铁底面和磁钢侧面。热电偶将温度信号转换为电压信号, 数据采集与处理及数据输出功能由美国 NI 虚拟仪器系统完成。

### 2.2.3 温度测量结果

图 8 是扬声器音圈、T 铁底面中心和磁钢侧面的温度随扬声器工作时间的变化曲线。由图可知, 扬声器在给定的激励信号下工作约 90 min 以后, 三组测量结果曲线均不再变化, 可以认为磁路系统总体进入热稳态。

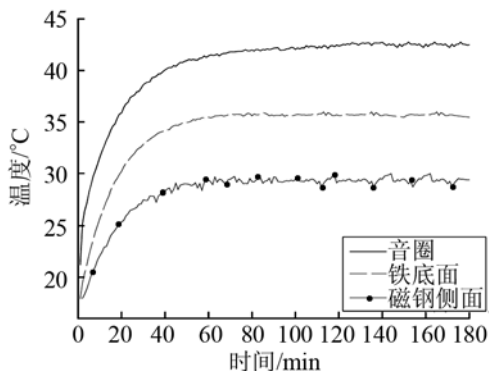


图 8 磁路系统特殊点的温度变化曲线

Fig.8 Temperature response at some special points of magnetic circuit

## 3 数据分析

表 2 给出了扬声器磁路系统稳态温度的数值分析结果和测量结果。由表 2 可知, 音圈温度最高, T 铁温度其次, 磁钢温度最低。音圈的分析值与测量值误差为 2.1%, 磁钢的误差稍大, 约为 5.5%, 而 T 铁底面的误差则为 11.2%, 且磁钢和 T 铁底面的测量值均大于分析值。

表 2 磁路系统稳态温度的数值分析结果和测量结果比较  
Table 2 Comparison between numerical simulation and test results of steady-state temperature of magnetic circuit

特殊点位置	测量值/°C	分析值/°C	误差/%
音圈	42.0	41.1	2.1
磁钢侧面	29.3	27.7	5.5
T 铁底面	35.7	31.7	11.2

导致数值分析和测量结果产生误差的原因是多方面的。在使用热电偶测量磁路温度时, 热电偶金属触头通过胶带固定在扬声器上, 一定程度上影响了金属触头与外界环境之间的传热, 从而导致测量值比实际值偏高。T 铁材料比热容小, 热导率大, 对热量的变化比其他部件敏感, 误差也偏大。同时, 数值分析过程中对物理模型的求解也有一定误差, 材料的热参数本身也具有一定的不确定性。

## 4 结语

本文提出了一种预测低频信号驱动下动圈式扬声器稳态温度场的数值分析方法, 并通过自行设计的扬声器温度测量系统测量了扬声器音圈及磁路外表面特殊点的稳态温度值, 实验结果表明, 数值分析结果与测量结果基本吻合。

动圈式扬声器在高频信号驱动下的温度特性需考虑涡流热效应的影响, 相关研究工作正在进行。

致谢: 感谢李宏斌、许丽媛、计敏君在扬声器温度特性测量工作中给予的大力支持。

### 参 考 文 献

- [1] Blasizzo F. A New Thermal Model for Loudspeakers[J]. Journal of the Audio Engineering Society, 2004, 52(1/2): 43-55.
- [2] Henriksen C A. Heat-Transfer Mechanism in Loudspeakers: Analysis, Measurement and Design[J]. Journal of the Audio Engineering Society, 1987, 35(10): 778-791.
- [3] 鄂宁, 沈勇, 徐小兵, 等. 扬声器中涡流的热效应[J]. 应用声学, 2006, 25(2): 96-101.  
WU Ning, SHEN Yong, XU Xiaobing, et al. The Thermal Effect of Eddy Current in Loudspeaker[J]. Applied Acoustics, 2006, 25(2): 96-101.
- [4] IONESCU C. Thermal simulation of a high power loudspeaker[C]// Proceedings of the 28th International Spring Seminar on Electronics Technology[S.I.]: IEEE Press, 2005.
- [5] 李海峰. 扬声器热仿真分析[J]. 电声技术, 2008, 32(5): 32-34.  
LI Haifeng. Thermal simulation of loudspeaker[J]. Audio Engineering, 2008, 32(5): 32-34.
- [6] 陶文铨. 传热学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006: 17-18.  
TAO Wenquan. Heat Transfer[M]. Xi'an: Press of Northwestern Polytechnical University, 2006:17-18.
- [7] 温周斌, 滕越, 陆晓, 等. 一种扬声器音圈及磁路温度数值模拟方法: 中国. 201210535880.3[P]. 2013-3-13.  
WEN Zhoubin, TENG Yue, LUXiao, et al. One numerical simulation method about temperature of voice coil and magnetic circuit of loudspeaker: China. 201210535880.3[P]. 2013-3-13.