

扬声器中涡流的热效应^{*}邬宁[†] 沈勇 徐小兵 董永政

(南京大学声学研究所 近代声学国家重点实验室 南京 210093)

摘要 通过分析和比较两种扬声器涡流电学模型和两种扬声器热模型, 提出一种分频段的非线性热模型类比线路, 给出了对应的音圈稳态温度公式, 并在高频段运用逐点测温的方法研究, 论证了扬声器涡流随频率变化的规律及其对扬声器热效应的影响。

关键词 涡流, 热效应, 扬声器, 功率

The thermal effect of eddy current in a loudspeaker

WU Ning SHEN Yong XU Xiao-Bing DONG Yong-Zheng

(Institute of Acoustics, State Key Laboratory of Modern Acoustics, Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract Two electrical models of loudspeaker eddy current and two thermal models of loudspeaker are analyzed and compared. A frequency-divided nonlinear analogy circuit of the thermal model is proposed. The corresponding steady-state temperature expression of the voice coil is given and studied by measuring the temperature spot by spot in the high frequency range. So we can discuss the way with which the eddy current in the loudspeaker changes with frequency and its effect on the thermal performance of loudspeakers.

Key words Eddy current, Thermal effect, Loudspeaker, Power

1 引言

随着大型体育场馆、音乐厅、剧院、会堂等建筑的不断兴建, 汽车、通信等行业的飞速发展, 专业音箱(如扬声器阵列等)、汽车扬声器、家庭影院、手机扬声器的研究也倍受人们关注。作为放音器件的扬声器正朝着大功率

和高保真的方向发展。虽然扬声器在有些方面的性能已有很大改进, 但其电-声转换效率仍然很低, 普通的直接辐射式扬声器换能效率仅为1%~5%, 绝大部分能量转化为了热能。这部分热能导致音圈温度升高、音圈直流阻增大、功率压缩甚至大功率下音圈过热损坏等后果。扬声器的大功率和热效应问题一直都是一个热

2004-11-01 收稿; 2005-09-05 定稿

^{*} 国家自然科学基金项目(10474046)

作者简介: 邬宁(1979-), 男, 江苏镇江人, 硕士研究生, 在读, 主要从事扬声器大功率和热效应研究。

沈勇(1965-), 男, 教授, 博士, 博士生导师。徐小兵(1980-), 男, 硕士研究生, 在读。董永正(1979-), 男, 北京明基公司手机研发部, 工程师。

[†] 通讯联系人 Email: wuning@nju.org.cn

点。长期以来, 国内外专家学者开展了不懈的研究。较早期的扬声器热研究^[1]已经注意到扬声器的热效应与其重放的信号频率成分有关。最近的研究^[2,3]发现, 扬声器中对音圈温度起作用的热能不仅包括音圈的焦耳热, 还包括铁芯中的高频涡流导致的焦耳热。但至今没有人深入研究扬声器热效应与信号频率的关系, 而关于涡流对热效应影响的研究也不够准确^[2,3]。

本文探索了扬声器热效应与频率间关系的规律, 特别是与铁芯里的高频涡流的联系, 并提出了一种分频段的扬声器非线性热模型, 利用其中的高频段热模型研究涡流的热效应, 给出了对应的音圈稳态温度公式, 论证了扬声器涡流随频率变化的规律。采用以单频信号在高频范围逐点测音圈稳态温度的实验方法, 发现实验结果与理论相吻合。

2 基本理论

2.1 扬声器涡流原理

当扬声器放音时, 音圈中有交变的电流通过。由电磁感应规律可知^[4], 此时在音圈附近会产生一个变化的磁场, 铁芯就处于这个变化的磁场中。铁芯可看作是由一系列半径逐渐变化的圆柱状薄壳组成的, 每层薄壳自成一个闭合回路, 沿着壳壁将产生感应电流。从铁芯上端俯视, 电流的流线是闭合的涡旋状, 这种感应电流叫做涡电流, 简称涡流。涡流具有热效应和电磁阻尼效应(感应电流反抗引起它的磁场变化即交流电变化)。

2.2 涡流的两种电学模型

将涡流对扬声器的影响等效到电路中, 就是在传统的扬声器电学类比线路中添加相应的阻抗元件, 包括电阻部分和电抗部分。

John Vanderkooy 利用电磁场理论, 以 Maxwell 方程和理想的无限长圆柱体模型计算出的涡流电学模型中^[5], 等效为与音圈直流阻 R_e 串联的涡流阻元件与频率的平方根成正比。

J.R. Wright 根据实验数据提出了一种经验性的、电阻值电抗值分别与频率成幂函数关系的模型^[6], 涡流等效阻元件和等效抗元件与 R_e 串联, 分别为:

$$R_{ed} = K_r \omega^{X_r}, \quad X_{L_{ed}} = j K_i \omega^{X_i} \quad (1)$$

其中 K_r , X_r , K_i , X_i 为待定常数, ω 为输入信号角频率。从 Wright 涡流电学模型考虑, 涡流的热效应可表示为其等效阻元件的焦耳热功率:

$$P_{ed} = I^2 R_{ed} \quad (2)$$

式中的 I 为流过扬声器的电流有效值。

2.3 扬声器散热简述

扬声器的散热方式^[1]有热传导、热对流和热辐射三种方式, 可以用热阻元件来模拟; 扬声器的热通路主要包括音圈→磁体和磁体→周围空气这两部分, 而音圈和磁体都具有质量, 能储热, 可以用热容元件来模拟。

P.J. Chapman 于 1998 年提出, 用一个线性阻容级联线路可以模拟扬声器中的热过程^[7]; Douglas J. Button 于 1992 年提出用额定阻抗 Z_{min} 代替直流阻 R_e 以计入涡流的热效应^[8]。无论是传统的线性热模型或是用额定阻抗代替其中的直流阻, 都不能准确地描述现实中的扬声器在高频段产生的涡流的热效应。

Klippel 和 Blasizzo 于 2004 年发表在 J. Audio Eng. Soc 上的文章都指出^[2,3], 要想更精确计算和描述扬声器的热行为, 必须考虑高频时铁芯涡流的热效应和低频时音圈大振幅带来的空气强迫对流。

3 分频段模型和温度公式

扬声器重放信号时, 高频的音圈振幅和振速相当小, 而低频的涡流效应也可以忽略。Vanderkooy 在他的扬声器涡流理论研究^[5]中指出, 涡流效应只存在于高频区, 低频区则忽略不计。Blasizzo 则认为, 涡流效应和强迫对流分别在高频区和低频区单独起作用, 并提出 250Hz 的分界频率^[3]。但这是不合理的, 高频和低频

的界定必然与具体的扬声器、特别是它的谐振频率有关, 本文建议采用三倍谐振频率作为高频区和低频区的分界。可见, 如果要分别研究涡流效应和强迫对流这两种非线性因素, 可以采用一种分频段模型, 如图 1。

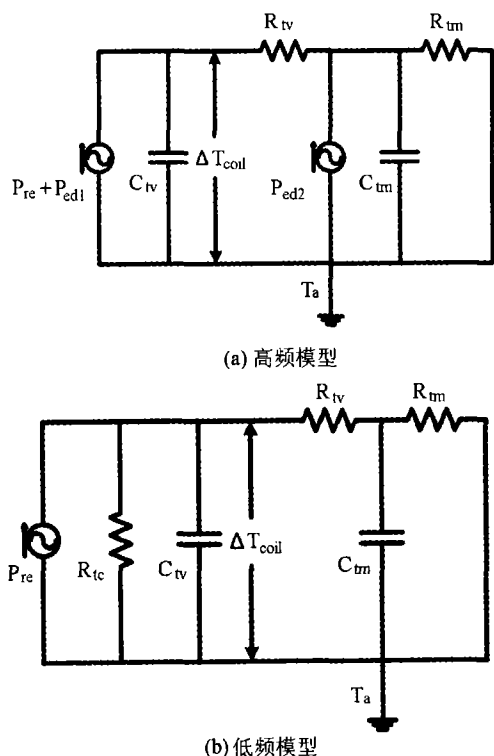


图 1 分频段的非线性热模型

本文将对图 1(a) 所示的分段模型的高频部分进行实验验证, 探讨铁芯里的涡流的热效应及其随频率变化的规律。

图 1 中 P_{re} 为音圈的热功率, R_{tv} , R_{tm} 分别为音圈到磁体和磁体到周围空气的总热阻, C_{tv} , C_{tm} 分别为音圈和磁体的总热容, ΔT_{coil} 为音圈变化的温度, T_a 为环境温度。

低频段中新增的非线性元件 R_{tc} 是音圈振动引起的强迫对流所对应的总热阻, 随音圈振幅和振速变化; P_{ed} 是式 (2) 定义的涡流热效应所对应的热功率, 被功率分割因子 α (常数) 分为两部分 P_{ed1} 和 P_{ed2} , P_{ed1} 对音圈和磁体温度都有影响, P_{ed2} 仅对磁体温度有影响, 图

中:

$$P_{ed1} = \alpha P_{ed}, \quad P_{ed2} = (1 - \alpha) P_{ed} \quad (3)$$

$$P_{re} = I^2 R_{eTc} \quad (4)$$

式中 R_{eTc} 是音圈温度升高了 ΔT_{coil} 后的直流阻, 应根据音圈线材料的温升公式计算:

$$R_{eTc} = R_{eTa}(1 + \delta \Delta T_{coil}) \quad (5)$$

式中 R_{eTa} 是音圈常温下的直流阻, δ 为音圈材料的热敏系数, 对于常用的铜线^[1],

$$\delta = 0.00393 \quad (6)$$

下面考虑稳态时的音圈温度。之所以说稳态, 是由于对由热阻和热容组成的热回路存在一个类似于电路中电容充电的动态过程。音圈和磁体的热时间常数分别定义为:

$$\tau_v = R_{tv} C_{tv}, \quad \tau_m = R_{tm} C_{tm} \quad (7)$$

考虑热效应时, 电流是更重要直观的参数。对于图 1(a) 的高频段热模型, 为了更直接研究涡流的热效应及其随频率变化的规律, 我们采用恒流源。考虑用电流 I (恒定) 来表示稳态音圈温度, 可根据电路叠加原理和式 (3)(4)(5) 列出如下方程:

$$\Delta T_{css} = (R_{tv} + R_{tm})[I^2 R_{eTa}(1 + \delta \Delta T_{css}) + \alpha P_{ed}] + R_{tm}(1 - \alpha) P_{ed} \quad (8)$$

式中的 ΔT_{css} 是音圈温度达到稳态时与室温相比所增加的温度。

解得:

$$\Delta T_{css} = \frac{(R_{tv} + R_{tm})I^2 R_{eTa} + (\alpha R_{tv} + R_{tm})I^2 R_{ed}}{1 - I^2 \delta R_{eTa}(R_t + R_{tm})} \quad (9)$$

式中 R_{ed} 是式 (1) 所定义的涡流等效阻。于是可写出磁体稳态温度与室温相比所增加的温度 ΔT_{mss} 的表达式:

$$\Delta T_{mss} = R_m(P_{re} + P_{ed})$$

$$= R_{tm} I^2 [R_{eTa}(1 + \delta \Delta T_{css}) + R_{ed}] \quad (10)$$

而音圈实时温度的表达式如下:

$$\Delta T_{coil}(t) = \Delta T_{css} - (\Delta T_{css} - \Delta T_{mss}) e^{-\frac{t}{\tau_v}} - \Delta T_{mss} e^{-\frac{t}{\tau_m}} \quad (11)$$

关注式 (9) 中的 R_{ed} 值就可以研究涡流的热效应及其随频率变化的规律。

4 实验和结果分析

为了研究涡流的热效应, 下面将从实验测量音圈的稳态温度研究图 1(a) 中的高频热模型, 来验证式 (9) 特别是其中的 R_{ed} 。

4.1 实验方法

根据式 (5), 我们可以通过测量音圈的直流阻来得到音圈的实时温度:

$$\Delta T_{coil} = \frac{R_{eTc} - R_{eTa}}{R_{eTa} \delta} \quad (12)$$

采用附加一个直流源的方法以测量音圈直流阻^[1], 本文用以下电路实现, 如图 2 所示:

电路中采用了一个串接电容和一个接地电容将直流信号和交流信号隔开, 三阶低通滤波后的毫伏表测量扬声器的音圈 (加上水泥电阻) 分得的直流电压 $V_{测}$ 。根据分压原理:

$$\frac{V_{测}}{5} = \frac{R_{eTc} + 0.2}{200 + R_{eTc} + 0.2} \quad (13)$$

于是可以计算出音圈的直流阻:

$$R_{eTc} = \frac{200V_{测}}{5 - V_{测}} - 0.2 \quad (14)$$

为了保持恒流, 电路中给扬声器串联了一个受温度影响很小的 0.2Ω 水泥精密电阻, 通过监测它两端的交流电压有效值, 就可以实时微调功放以保证电流近似不变。

根据音圈实时温度的表达式 (11), 音圈达到其稳态温度要求 $t > 5\tau_m \gg \tau_v$, 才有 $\Delta T_{coil}(t) \approx \Delta T_{css}$ 。因此必须先测扬声器的温升曲线, 再根据曲线的上升趋势选取合适的实验时间。这样, 对于图 1(a) 的高频热模型的稳态音圈温度表达式 (9), 在电流保持不变的情况下, 当频率变化时, 唯一不同的只有 R_{ed} , 通过观察 ΔT_{css} 随频率变化的规律就可以知道 R_{ed} 与频率的关系。

4.2 结果及分析

实验先测量温度-时间曲线, 以确定合适的测稳态温度的时间; 然后在 $1\text{kHz} \sim 18\text{kHz}$ 的范围内选取一些合适的频点, 选取两种电流大小, 测量相对稳态温度。

本文作了大量的实验工作, 现选取两组较为典型的实验结果, 如图 3 和图 4 所示。

结合 §2.2 中提到的涡流的两种电学模型, 从实验数据随频率分布的规律来看, Wright 模型符合得更好。将这两组数据分别用最小二乘法拟合为形如 $\Delta T_{css} = a + bf^{X_r}$ 的幂函数, 得到的 X_r 标注于拟合出的温度-频率曲线旁边。

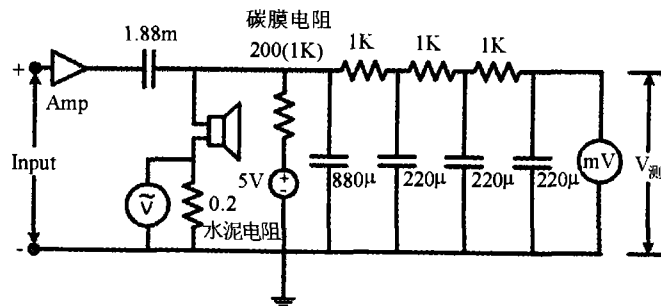


图 2 测温电路

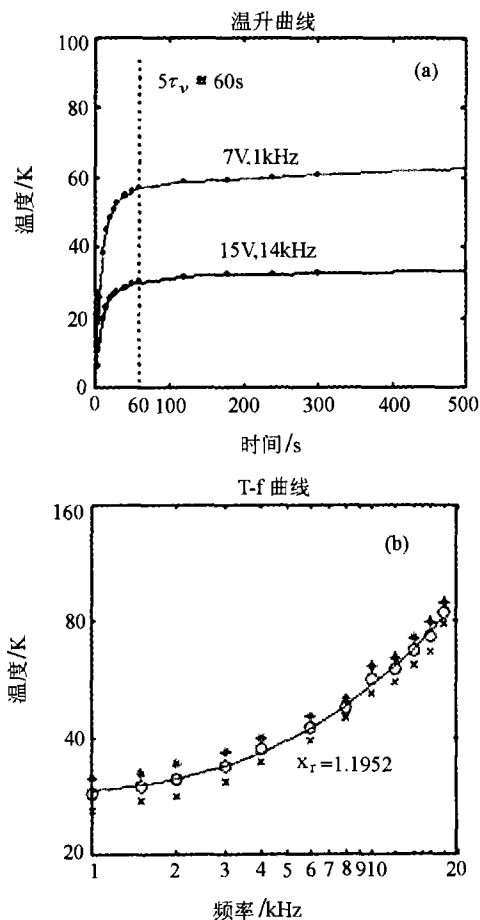


图 3 低音扬声器, 6Ω 20W, 谐振频率 94Hz. (a) 温升曲线, (b) T-f 曲线, $t = 100\text{min}$, 图中“×”代表 $I = 0.6\text{A}$, “*”代表 $I = 0.65\text{A}$. “o”代表两次实验的均值, 曲线是拟合的幂函数

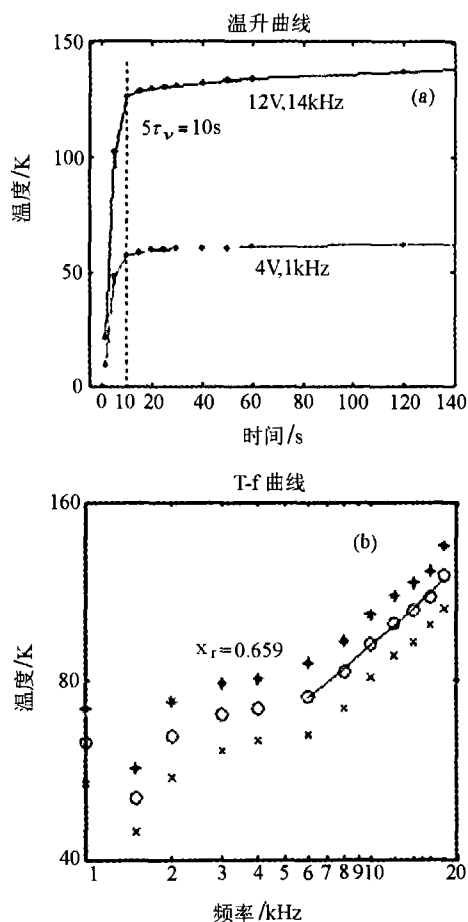


图 4 高音扬声器, 8Ω 10W, 谐振频率 1572Hz. (a) 温升曲线, (b) T-f 曲线, $t = 30\text{min}$, 图中“×”代表 $I = 0.4\text{A}$, “*”代表 $I = 0.45\text{A}$. “o”代表两次实验的均值, 曲线是拟合的幂函数

特别需要注意的是图 4 中的高音单元。由于其谐振峰位于 1572Hz, 对应的温度-频率曲线上的 1.5kHz 附近出现了一个谷, 这是由于音圈谐振时带来了空气的强迫对流, 使得温度

变低。也就是说这时图 1(a) 的高频热模型是不适用的。因此选取 6kHz 以上的频率范围作为它的高频区。于是可将 $R_{ed} = K_r \omega^{x_r}$ 代入式 (9) 得:

$$\Delta T_{css} = \frac{1}{1 - I^2 \delta R_{eTa} (R_{tv} + R_{tm})} [(R_{tv} + R_{tm}) I^2 R_{eTa} + (\alpha R_{tv} + R_{tm}) I^2 K_r \omega^{x_r}] \quad (15)$$

5 结论

馈给扬声器的电功率的绝大部分转化为热功率 (包括音圈热功率 P_{re} 和铁芯中涡流的热

功率 P_{ed}), 一小部分成为有效的声辐射功率, 剩余的消耗于空气阻尼、机械摩擦等阻尼项。线性热模型对扬声器热表现的描述是不精确的, 必须考虑低频时的强迫空气对流和高频时的涡

流热效应这两项非线性因素。据此, 本文提出了一种高频和低频分段的非线性热模型, 并推导出音圈的稳态温度公式, 结合在高频区逐点测稳态温度的实验方法, 发现铁芯中涡流的热功率与频率成单调上升的幂函数关系 (恒流情况下)。实验数据的拟合曲线符合 Wright 模型的理论。

下一步可以利用测音圈位移或速度的方法寻求低频区音圈稳态温度随频率变化的规律, 以及研究低频区与高频区之间的过渡区强迫对流和铁芯涡流各自对热效应所起的作用。

参 考 文 献

1 Clifford A Henricksen. *J. Audio Eng. Soc.*, 1987,

35(10):778~791.

2 Wolfgang Klippel. *J. Audio Eng. Soc.*, 2004, 52(1/2):3~25.

3 Fabio Blasizzo. *J. Audio Eng. Soc.*, 2004, 52(1/2):43~55.

4 赵凯华, 陈熙谋. 电磁学. 第二版. 北京: 高等教育出版社, 1985. 468~472.

5 John Vanderkooy. *J. Audio Eng. Soc.*, 1989, 37(3):119~128.

6 Wright J R. The 94th Convention of the Audio Engineering Society, Hamburg, 1989. Preprint 277.

7 Chapman P J. The 104th Convention of the Audio Engineering Society, Amsterdam, 1998. Preprint 4667.

8 Douglas J Button. *J. Audio Eng. Soc.*, 1992, 40(1/2):32~41.

《实用扬声器工艺手册》出版

王以真先生编著之《实用扬声器工艺手册》一书, 已于近日由国防工业出版社出版。全书 15 章、700 余页、100 余万字, 精装一大册。并附赠光盘一张。

《实用扬声器工艺手册》一书, 全面、详尽介绍扬声器各部分 (振膜、折环、定心支片、音圈、磁路、胶黏剂、防尘罩、号筒、盆架、引线 … 等) 的材料特点、工艺制作、检测方法、工装设备、性能要求, 以及扬声器装配、检测和质量控制, 并有专章讲述微形扬声器。本书试图对 1924 年电动式扬声器发明以来, 80 年间扬声器的工艺技术做一番梳理、归纳、小结。书中有相当部分内容是首次发表的。既有传统材料、基本原理、基础工艺方法的介绍, 更有近年发展的新材料、新

工艺、新技术、新设备以及新思路的叙述。

本书力图用深入浅出的语言、明白准确的叙述、图文并茂的格局, 丰富全面的内容, 设身处地为扬声器界的朋友奉献一部实用的、可操作性的、与时俱进的手册。本书可作为扬声器界的领导、设计工艺人员、生产销售管理人员 … 及班组长的案头手边常备之书, 也可供音响扬声器爱好者、使用者参考, 还可供相关大专院校师生使用。

本书邮购价 116 元 (书价 108 元, 挂号邮寄费 8 元)。并有作者王以真先生亲笔签名。联系方式: 汇款至天津市河西区白云路 21 号天歌音响 (邮编 300200, 电话 022-28270700)。

(天 歌)