

# 生物滤波器的等效电路模型

赵玉平<sup>1\*</sup>, 宋宏伟<sup>2</sup>, 仇惠婷<sup>3</sup>

<sup>1</sup>宁夏工商职业技术学院, 宁夏 银川

<sup>2</sup>清华大学, 北京

<sup>3</sup>台湾高雄空中大学, 台湾 高雄

收稿日期: 2024年3月17日; 录用日期: 2024年4月23日; 发布日期: 2024年4月30日

## 摘要

本文通过研究鸟类羽毛的耦合结构, 构建并推导出: 鸟类活体羽毛的“n字型”微观耦合结构与电子电路之间的耦合电路的一种新型等效电路模型。该等效电路模型是由无数个相邻羽枝(等效电感L)与羽小枝(等效电容C)组成的“n”字型结构, 等效为无数个LC并联回路, 构建出了由羽枝与羽小枝组成滤波器的微基本单元, 使其具有生物微型滤波器功能。这些研究成果为研发低频率生物滤波器(截止频率 $f = 1$  Hz, 100 Hz, 1 kHz)提供了理论依据, 弥补了低频生物滤波器的研究领域空白。

## 关键词

羽毛结构耦合, 等效电路模型, 微基本单元, 低频率, 生物滤波器

# Equivalent Circuit Model of Biofilter

Yuping Zhao<sup>1\*</sup>, Hongwei Song<sup>2</sup>, Huiting Qiu<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ningxia Vocational Technical College of Industrial and Commerce, Yinchuan Ningxia

<sup>2</sup>Tsinghua University, Beijing

<sup>3</sup>Open University of Kaohsiung, Kaohsiung Taiwan

Received: Mar. 17<sup>th</sup>, 2024; accepted: Apr. 23<sup>rd</sup>, 2024; published: Apr. 30<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

This paper constructs an equivalent circuit model of feathers by studying the coupling structure of bird feathers. A new equivalent circuit model of the coupling circuit between the “n” shaped micro-coupling structure of bird feathers and the electronic circuit is constructed and derived. The equivalent circuit model is an “n” shaped structure composed of an infinite number of adjacent pinnacles (equivalent inductance L) and pinnacles (equivalent capacitance C), which is equivalent to an infinite number of LC parallel circuits. The micro basic unit of the filter composed of pin-

\*通讯作者。

文章引用: 赵玉平, 宋宏伟, 仇惠婷. 生物滤波器的等效电路模型[J]. 机械工程与技术, 2024, 13(2): 179-186.

DOI: 10.12677/met.2024.132022

nacles and pinnacles is constructed, so that it has the function of biological micro filter. These research results provide a theoretical basis for the research and development of low-frequency biological filters (cutoff frequency  $f = 1 \text{ Hz}, 100 \text{ Hz}, 1 \text{ kHz}$ ), filling the gap in the research field of low-frequency biological filters.

## Keywords

Feather Structure Coupling, Equivalent Circuit Model, Micro-Basic Unit, Low Frequency, Biological Filter

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

生物滤波器，是指把高频率电磁波过滤到与生物体身体产生的低频率电磁波相同(或接近)的滤波器，称为生物滤波器[1]。鸟类羽毛的多层叠加[2] [3]复合结构，具有滤波效果，输出低频滤波信号，对于低频滤波器的设计制造和应用开发，具有一定的工程应用价值。任露泉课题组在研究生物耦合功能特性方面，指出了生物功能是依靠耦合体(生物体、生物群(落))与生存环境的相互作用，获得某些生存所需要的功能，耦合运动学和动力学是生物耦合体[4]在其所处的时间、空间与对应的环境相互作用，取得有效的过程和结果。例如，长耳鸮(Long-eared Owl)皮肤和覆羽，具有耦合吸声降噪[5]的生物耦合特性功能，使其完成捕食猎物。

羽毛纤维表面，含有铜、锌、锰、镍、铬、铁、钼 7 种元素[6] [7]，这些元素与表面粗糙度、电磁场相关，能提高电磁场内部间隙[8]，铜的介电常数是 2~5 [9]，结构的介电函数表征羽毛(覆盖)区域[10]。很多生物信号都在 20 Hz~20,000 Hz，这些信号的频率，与人类听力频率，保持在相同的范围[11]。当鸟类翅膀扇动空气粒子时，进入羽毛微结构、多通道、自适应滤波，无噪声的期望信号，意味着最大的信号互相关和最小的噪声互相关[12]，同时降低翅膀扇动产生的噪声。

在 Drude 模型中，铜的模型参数是  $\epsilon_{\infty} = 6.7, \omega_p (eV) = 8.8$  [13]，空间滤波技术，提供的低信噪比的环境[14]，为羽枝、羽小枝多层重叠网格空间，构造了自适应空间滤波[15]效果。

羽毛的近似对称几何形状，有利于羽毛表面形成电磁耦合结构和传输线网络[16]。在生物传感领域，组成、大小、形状、周围的介电介质以及与其他纳米结构的接近度、对介电环境局部变化的敏感性[17]，是主要的传感影响因素。用于测量生物磁性的磁传感器芯片，采用 0.18  $\mu\text{m}$  CMOS 技术实现，磁传感器芯片由小型高电感线圈传感器和仪表放大器(IA)组成。高电感线圈传感器，使用电磁场仿真设计了适合于测量生物磁信号的灵敏度和带宽[18]；通带滤波器，可以测量生物体的动作频率[19]，自然电磁振荡被同步化，可以用作信息的稳定性指标，减少电磁干扰，考虑影响生物信号的处理电路，极点频率选择为 150 赫兹，具有 0~150 Hz 的通带低通滤波，这是重要的生物学信号频率，低于 500 Hz [20] [21]。

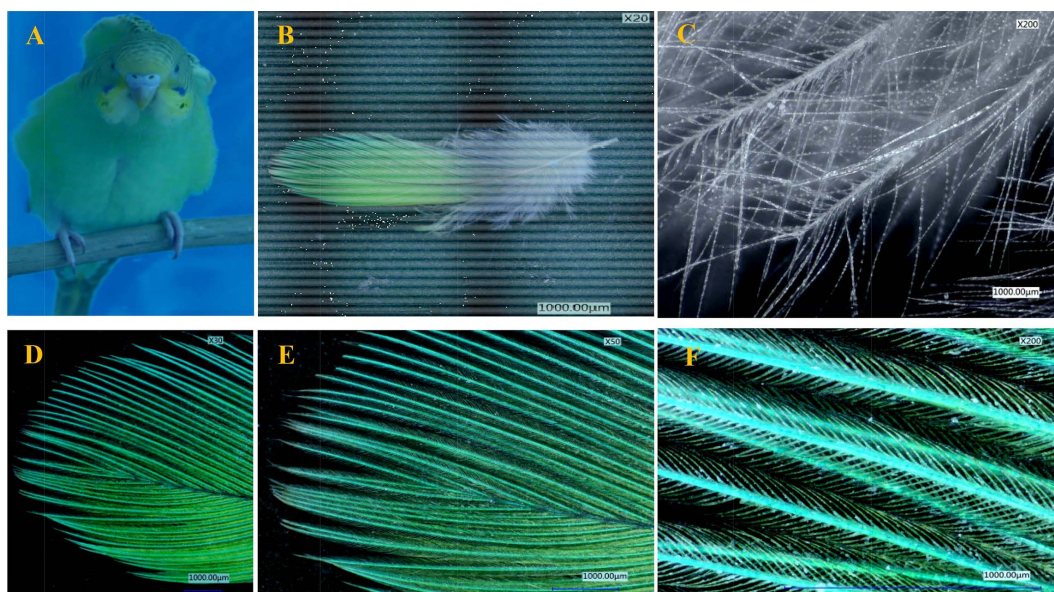
为了进一步揭示羽毛滤波的自然现象，从鸟类翅膀及其羽毛形态学与生物滤波器之间的关系问题，以虎皮鹦鹉为例，开展了本课题的研究。

## 2. 虎皮鹦鹉羽毛在数字显微镜下的宏观与微观形态结构实验观察

以虎皮鹦鹉的初级飞羽为例，其宏观与微观形态结构，见图 1 所示。

实验材料：75%酒精消毒过的虎皮鹦鹉初级飞羽羽毛 1 枝；

实验设备：型号 VHX-6000 数字显微镜，日本制造。



**Figure 1.** Macroscopic and microscopic morphological structures of bird feathers. (A) Parrot; (B) Primary flight feathers of a parrot (magnification: 20×); (C) Barbs of primary feathers of a parrot (magnification: 200×); (D) Tip of primary feathers of a parrot (magnification: 30×); (E) Tip of primary feathers of a parrot (magnification: 50×); (F) Barbules and barbs of primary feathers of a parrot (magnification: 200×)

**图 1.** 鸟类羽毛的宏观与微观形态结构。(A) 鹦鹉；(B) 鹦鹉初级飞羽(放大倍数：20×)；(C) 鹦鹉初级羽毛的节状羽小枝(放大倍数：200×)；(D) 鹦鹉初级羽毛的羽尖(放大倍数：30×)；(E) 鹦鹉初级羽毛的羽尖(放大倍数：50×)；(F) 鹦鹉初级羽毛的羽枝与羽小枝(放大倍数：200×)

对于低频生物滤波器的技术参数的确定(截止频率  $f = 1 \text{ Hz}$ ,  $100 \text{ Hz}$ ,  $1 \text{ kHz}$ )和设计开发都具有重大意义。众所周知，目前在市场上，广泛使用的是高频滤波器(截止频率高于  $1 \text{ GHz}$ )，其使用的电子元件体积小、标准化，已经形成了规模化生产。但是，对于低频滤波器而言，截止本论文的撰写时间为止，通过查阅文献资料和专利发现，除了本人的研究成果以外，涉及这么低的截止频率滤波器，目前尚无相关资料查询和报道。对于技术参数的提出与确定，是该低频生物滤波器的设计创新点和难点。

### 3. 生物滤波器等效电路模型的建立

#### 3.1. 鹦鹉羽毛功能仿生确定的生物滤波器频率响应的传递过程

将鹦鹉飞羽羽毛，浸放于盛 75%酒精烧杯中，消毒 15 分钟，拿镊子取出，放在空气中，自然晾干。使用数字显微镜，调整放大到 20 倍，观察羽毛羽丝形态，并拍摄记录下来。羽毛的耦合结构，决定了其滤波功能，根据功能仿生，确定的生物滤波器频率响应的传递过程，见图 2 所示。

图 2(A)，表示鸟类羽毛羽尖是连续的点(Pointedness) [22] [23]，从而形成了点与点连接的三维闭合的羽毛滤波器生物结构，将高通频率降到到低通频率。

图 2(B)，表示生物滤波器频率响应的传递过程。为了实现降低频率的目标，先假设从羽毛羽根的一端开始，到另外一端结束，整个过程的羽毛末梢部位，都对对应着一个点。这些点与点之间，连续连接在一起，这些点输入了高通与低通频率，总体求和以后，得到了输出频率，完成了一轮次频率的降低，这样的过程连续重复，达到了减少或者完全消除羽毛在高电磁波对鸟类身体的损伤与影响。

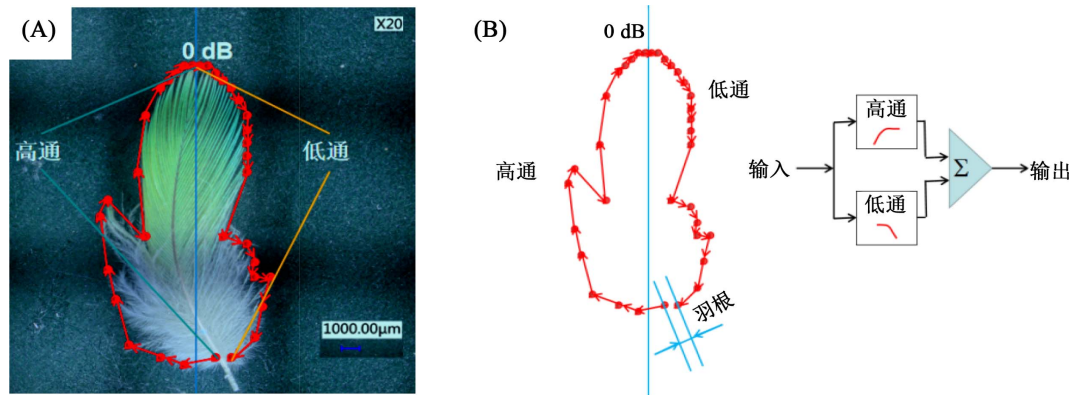


Figure 2. Transmission process of frequency response of biological filter  
图 2. 生物滤波器频率响应的传递过程

### 3.2. 生物滤波器等效电路模型的建立

例如, 心血管系统的电路建模及电磁生物效应[24], 是心血管的弹性纤维与血流在心脏结构与材料上, 完成连续功能耦合的动力学特性, 维持心脏的正常跳动, 供应输送营养物质, 到达人的全身各个器官。

假设气流在进入鸟类覆羽之前的压力、流速、飞行距离、鸟类距离地面的高度参数, 分别是  $p_1$ 、 $v_1$ 、 $s$  和  $h_1$ , 气流在进入鸟类覆羽后的压力、流速、鸟类距离地面的高度参数, 分别是  $p_2$ 、 $v_2$  和  $h_2$ , 根据不可压缩流体的伯努利方程,

则有:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + h_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + h_2 + \Delta h$$

$$\Rightarrow p_1 - p_2 = 2s + (h_2 - h_1 + \Delta h)$$

总压力损失(公式 1):

$$\Delta p = p_1 - p_2 = 2s + (h_2 - h_1 + \Delta h) = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \dots + \Delta p_i \quad (1)$$

式中的  $\Delta p_1$ 、 $\Delta p_2$  直到  $\Delta p_i$ , 分别代表气流进入  $i$  个由羽枝 - 羽小枝组成的“n”字型结构的基本单元前后的压力差。

另一方面, 图 3(A)~(D)所示, 是羽毛的等效电路模型的建立过程。从图 3(C)中的羽毛“n”字型结构分析中, 可以看出羽毛羽枝 - 羽小枝“n”字型结构的每个基本单元, 不是完全一样的, 本文使用弹性纤维的体积弹性模量  $E$  来考虑总压力损失(公式 2)。应变

$$\text{体积应变} = \frac{\text{体积减少量}}{\text{原来的体积}} = \frac{-dV}{V}$$

根据体积弹性模量公式:

$$\text{体积弹性模量} = \frac{\text{体积应力}}{\text{体积应变}}$$

$$\Rightarrow E = \frac{p}{\frac{-dV}{V}} \quad (2)$$

$$\Rightarrow p = E \left( -\frac{dV}{V} \right) = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \dots + \Delta p_i$$



式中的  $\Delta p_1$ 、 $\Delta p_2$  直到  $\Delta p_i$ ，分别代表气流进入  $i$  个由羽枝 - 羽小枝组成的“n”字型结构的基本单元前后的压力差。使用“不可压缩流体的伯努利方程”与“体积弹性模量公式”两种不同的推导方法，得到了总压力损失(1)、(2)的结论，是完全相同的，二者是殊途同归。羽小枝(等效电容 C)的等效电路模型，见图 4 所示。

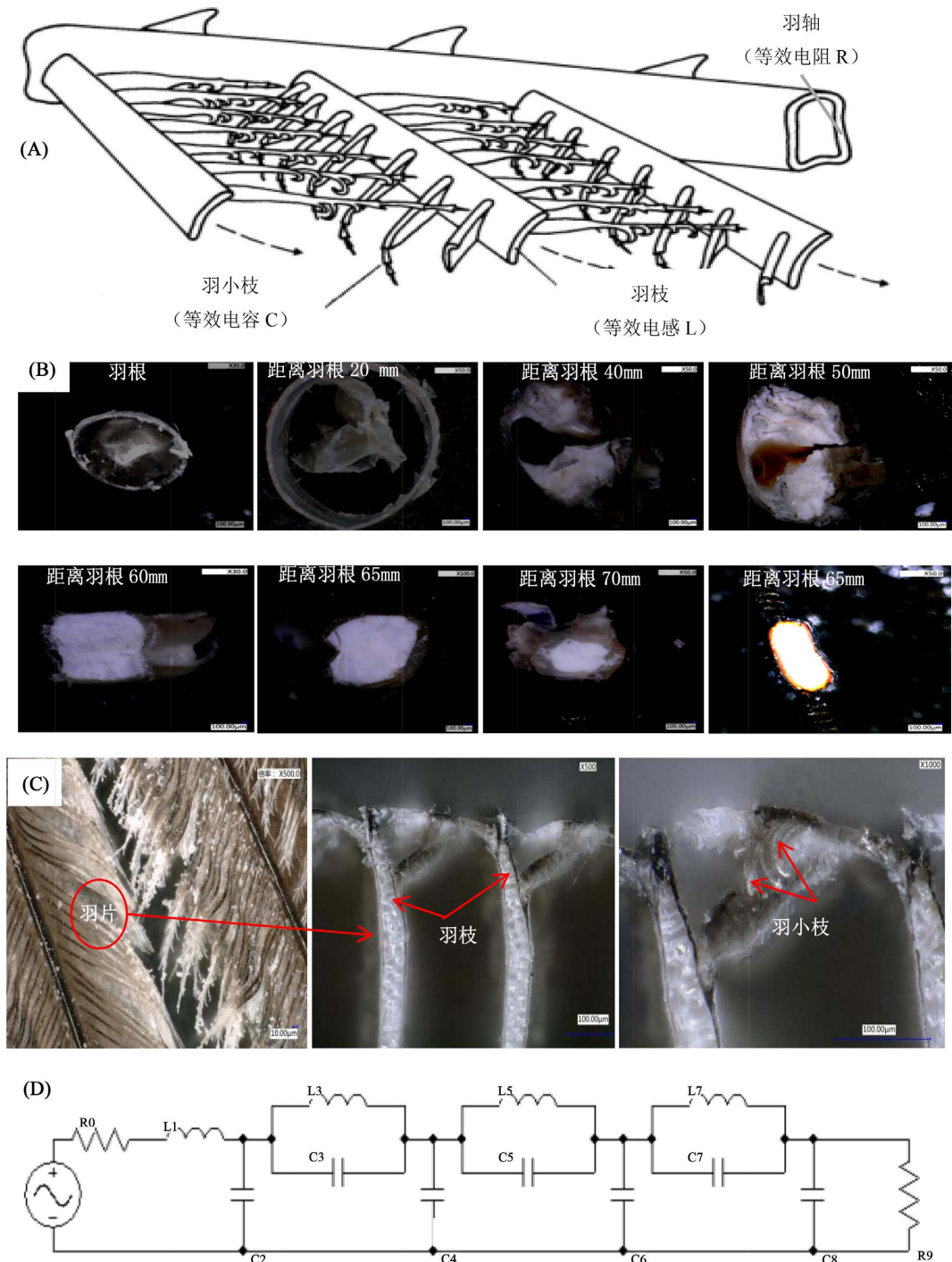


Figure 3. Construction of equivalent circuit model  
图 3. 等效电路模型

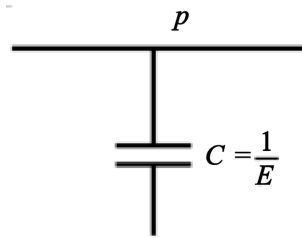


Figure 4. The equivalent circuit model of barbules

图 4. 羽小枝的等效电路模型

图 3(A)所示, 为了设计生物滤波器的等效电路模型, 将羽毛在气流作用下的动态特性, 用等效电路作为羽毛的模拟电路模型。在气流作用下, 将气流作用的阻尼(羽轴)等效为电阻, 羽根处气流作用的阻尼等效为输入电阻  $R_0$ , 羽尖处气流作用的阻尼等效为输出电阻  $R_9$ ; 气流惯性(羽枝)等效为电感, 羽毛弹性(羽小枝)等效为电容, 气压等效为电压, 气流等效为电流。羽枝接近平行分布在羽轴左右, 它们左侧之间、右侧之间等效为并联电路, 它们左侧与右侧之间等效为串联电路。相邻羽枝之间的羽小枝, 通过“自锁搭接”与“解锁脱离”建立网格电路耦合回路的“通”与“断”开关。这样, 由无数个相邻羽枝(等效电感  $L$ )与羽小枝(等效电容  $C$ )组成的“n”字型结构, 等效为无数个 LC 并联回路, 构建出了由羽枝与羽小枝组成滤波器的基本单元的层状滤波效果, 相邻羽枝之间的羽小枝, 构建的 LC 生物耦合回路, 是必然的过程与结果, 羽毛的滤波效果, 正是通过羽毛的微、宏观形态(形态质量相似有利于羽毛之间、羽枝之间的相互协同耦合)、结构(“n”字型羽枝-羽小枝结构)、材料(羽轴、羽枝的外表面凸缘不平整的表面耐磨、阻挡和吸收高频率的电磁波)的诸多因素耦合, 与气流之间的相互作用, 使其具有生物滤波器功能。

因泰勒公式从第 4 项开始, 已经影响不大, 所以选取前 3 项进行研究, 按照上述等效电路的假设“气压等效电压”, 公式(1)与(2)的等效电路的电压(公式 3)是:

$$U = \Delta u_1 + \Delta u_2 + \Delta u_3 + \cdots + \Delta u_n \quad (3)$$

这是一个逐级滤波的过程, 每个基本单元都是串联的关系, 独立的完成所处位置频率的滤波任务, 电容是高频率波通过, 电感是高频率波过滤掉, 让低频率波通过。

鸟类飞行受到瞬时高频电磁波的干扰, 一部分产生热效应使得身体发热, 一部分产生非热效应, 耗散掉, 在羽毛背面的羽轴根部与中部接连处的沟槽, 对调节气流、分散气流和非热效应的耗散, 起到了导流(气流、电流)的关键作用。因此, 鸟类在瞬时高频电磁波作用下, 能够减少和躲过身体伤害。

图 3(A)、图 3(B)所示, 是羽轴(等效电阻  $R$ )的逐段剖切结构; 在图 3(D)等效电路模型中, 等效电阻  $R_{\text{总}}$  (公式 4)的计算:

$$\frac{1}{R_{\text{总}}} = \frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_9} \Rightarrow R_{\text{总}} = \frac{R_0 R_9}{R_0 + R_9} \quad (4)$$

根据电阻定律, 在温度不变时, 导体(羽轴)的电阻  $R$  (公式 5)跟它的长度  $L$  成正比, 跟它的横截面积  $S$  成反比。即:

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (5)$$

假设等效电阻  $R_{\text{总}}$  等于导体(羽轴)总电阻, 即  $R_{\text{总}} = R$  (6)

则有公式 7:

$$\rho \frac{L}{S} = \frac{R_0 R_9}{R_0 + R_9} \Rightarrow \rho = \frac{S R_0 R_9}{L(R_0 + R_9)} \quad (7)$$

这里的  $\rho$  是导体(羽轴)材料的电阻率, 单位是欧·米。

需要说明的是: 图 3 构建的等效模型的准确性和科学性已由公式(1)、(2)、(3)的推导过程得到验证, 不需再次赘述。

#### 4. 结束语

本文通过“虎皮鹦鹉羽毛耦合结构的滤波功能测试”实验, 得到了活体鹦鹉生物波的波形信号, 验证了鸟类羽毛生物波的存在和差异性。本文构建了羽毛结构耦合形成的生物滤波器等效电路模型, 为研发低频率生物滤波器的核心元件——电路板的电路设计及功能仿生研发低频率生物滤波器(截止频率  $f = 1 \text{ Hz}, 100 \text{ Hz}, 1 \text{ kHz}$ )提供了研究方法和理论依据, 弥补了低频生物滤波器的研究领域空白。

#### 基金项目

宁夏工商职业技术学院 2023 年应用技术研发项目“羽毛材料的耐磨性实验研究”。

#### 参考文献

- [1] 赵玉平, 宋宏伟, 李京虎, 等. 一种生物滤波器的设计[J]. 上海电气技术, 2020, 13(3): 6-8, 24.
- [2] Thomas, B., Hermann, W., et al. (2012) Inner Vane Fringes of Barn Owl Feathers Reconsidered: Morphometric Data and Functional Aspects. *Journal of Anatomy*, **221**, 1-8. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7580.2012.01504.x>
- [3] Ennos, A.R., John, R.E.H., et al. (1995) Functional Morphology of the Vanes of the Flight Feathers of the Pigeon *Columba Livia*. *The Journal of Experimental Biology*, **198**, 1219-1228. <https://doi.org/10.1242/jeb.198.5.1219>
- [4] 任露泉, 梁云虹. 生物耦合功能特性及其实现模式[J]. 中国科学(技术科学), 2010, 40(3): 223-230.
- [5] 孙少明, 任露泉, 徐成宇. 长耳鸮皮肤和覆羽耦合吸声降噪特性研究[J]. 噪声与振动控制, 2008, 28(3): 119-123.
- [6] Wu, H.Y., Xu, Z.W., Liu, M.H., et al. (1996) Research Report on the Preparation of Acid-Hydrolyzed Feather Protein and Trace Elements (Laboratory Preparation). *Feed Industry*, **17**, 24-25.
- [7] Lee, J.H., Oh, J.W., Nam, S.H., et al. (2016) Synthesis, Optical Properties, and Multiplexed Raman Bio-Imaging of Surface Roughness-Controlled Nanobridged Nanogap Particles. *Small*, **12**, 4726-4734. <https://doi.org/10.1002/smll.201600289>
- [8] da Silva Santos, C.H., et al. (2009) Bio-Inspired Algorithms and 2D Finite Element Method Applied to Electromagnetic Band Gap Structures Design. *European Conference on Antennas & Propagation*, Berlin, 23-27 March 2009, 136-140.
- [9] Rosch, P.J. (2009) Bioelectromagnetic and Subtle Energy Medicine: The Interface between Mind and Matter. *Annals of the New York Academy of Sciences*, **1172**, 297-311. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.04535.x>
- [10] Williams, R.L. (1996) Time-Sequenced Adaptive Filtering Using a Modified P-Vector Algorithm. *Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering*, **2846**. <https://doi.org/10.1117/12.255428>
- [11] Seboka, C. (2014) Research on the Theory and Application of Metamaterials in the Field of Microwave and Optical Frequency. Master's Thesis, Huazhong Normal University, Huazhong.
- [12] Luan, F., Choi, J.H., Lee, C., et al. (2012) Comparison and Improvement of Inverse Techniques for MEG Source Connectivity Network Reconstruction. *IEEE Transactions on Magnetics*, **48**, 343-346. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2011.2172399>
- [13] Sekihara, K. and Nagarajan, S.S. (2008) Statistical Evaluation of the Spatial Filter Output. Springer, Berlin.
- [14] Arai, H. (2015) Free Access Transmission Line for Body Centric Communication (Invited). 2015 *IEEE MTT-S 2015 International Microwave Workshop Series on RF and Wireless Technologies for Biomedical and Healthcare Applications (IMWS-BIO)*, Taipei, 21-23 September 2015, 136-137. <https://doi.org/10.1109/IMWS-BIO.2015.7303816>
- [15] Tian, L. (2014) Plasmonic Paper as a Novel Chem/Bio Detection Platform. Dissertations & Theses-Gradworks, 1-163.
- [16] Lyu, H.J., Bae, Y.S., Nair, V.V., et al. (2014) High Inductance Coil Embedded on On-Chip Magnetic Sensor for Bio-magnetism Measurements. 2014 *IEEE Sensors Applications Symposium*, Queenstown, 18-20 February 2014, 79-82.

- 
- <https://doi.org/10.1109/SAS.2014.6798921>
- [17] Vázquez, L.A., Sosa, M., Córdova, T., *et al.* (2006) Measurements of Gastric Emptying by Biomagnetic Techniques. *MEDICAL PHYSICS: Ninth Mexican Symposium on Medical Physics*, Guadalajara, 18-21 March 2006, 138-141. <https://doi.org/10.1063/1.2356427>
- [18] Nikolaenko, N.N., Rybina, L.A. and Serov, I.N. (2002) Behavioral and Brain Activity Changes in Users of Optical Filters with Fractal Matrix Topology. *Doklady Biological Sciences*, **383**, 84-85. <https://doi.org/10.1023/A:1015361017698>
- [19] Babij, T.M., Heimer, M.L. and Costa, P. (1988) EMI Control for VLSI Biosensor Circuitry. *International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society*, New Orleans, 4-7 November 1988, 872-873. <https://doi.org/10.1109/IEMBS.1988.95205>
- [20] Hamid, L., Sarabi, M., *et al.* (2015) The Performance of the Spatiotemporal Kalman Filter and LORETA in Seizure Onset Localization. 2015 *37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, Milan, 25-29 August 2015, 2741-2744. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2015.7318959>
- [21] Jennifer, L.P., Malcolm, B.J. and Drobik, J. (2013) Design Elements of a Bio-Inspired Micro Air Vehicle. *IFAC Proceedings Volumes*, **46**, 235-241. <https://doi.org/10.3182/20130626-3-AU-2035.00041>
- [22] Jovani, R., Serrano, D., Frías, O., *et al.* (2006) Shift in Feather Mite Distribution during the Molt of Passerines: The Case of Barn Swallows (*Hirundo rustica*). *Canadian Journal of Zoology*, **84**, 729-735. <https://doi.org/10.1139/z06-042>
- [23] Prum, R.O. and Williamson, S. (2001) Theory of the Growth and Evolution of Feather Shape. *Journal of Experimental Zoology*, **291**, 30-57. <https://doi.org/10.1002/jez.4>
- [24] 郑莉. 心血管系统的电路建模及电磁生物效应研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2009.