

Design of High Frequency Magnetic Field Detection Device

Jiawei Wang, Lei Tian*, Zhi Qin, Shaonan Zheng, Xiaolong Xue, Bo Li

School of Life Sciences, Tianjin Polytechnic University, Tianjin
Email: *tjgydxtl@163.com

Received: Apr. 2nd, 2020; accepted: Apr. 17th, 2020; published: Apr. 24th, 2020

Abstract

In order to study the influence of high-frequency excitation source on the characteristics of magnetic field produced by transcranial magnetic stimulation coil, and to solve the problem that the current general Tesla meter can only detect the constant medium strong magnetic field, and a few Tesla meters can only detect the alternating magnetic field below 200 Hz. Therefore, based on Faraday's law of electromagnetic induction, a detection device for detecting alternating high frequency magnetic field above 70 kHz is designed. The magnetic field detection device is composed of ad8130 module circuit and two ne5532 module circuits, which can detect the alternating signal with the frequency of 10 khz - 60 mhz and the amplitude of 0 - 25 v almost without distortion; ad8130 module is the differential amplifier module, ne5532 module is the operational amplifier, and the two modules jointly use to amplify the induced electromotive force received by the detection coil by 6615 times.

Keywords

Magnetic Field Measurement, Power Amplifier, Operational Amplifier, Coil

高频磁场检测装置的设计

王佳伟, 田磊*, 秦治, 郑少男, 薛晓龙, 李波

天津工业大学, 生命科学学院, 天津
Email: *tjgydxtl@163.com

收稿日期: 2020年4月2日; 录用日期: 2020年4月17日; 发布日期: 2020年4月24日

*通讯作者。

摘要

为了研究高频激励源对经颅磁刺激线圈产生的磁场特性的影响,同时为解决目前通用特斯拉计只能检测恒定中强磁场、少数特斯拉计也仅能检测200 Hz以下的交变磁场的问题。因此,基于法拉第电磁感应定律,研究设计了用于检测70 kHz以上的交变高频磁场的检测装置。该磁场检测装置由AD8130模块电路与两个NE5532模块电路级联而成,可几乎无失真地检测到频率10 kHz~60 MHz、幅度0~25 V的交变信号;AD8130模块是差分放大模块,NE5532模块是运算放大器,这两个模块联合使用将检测线圈接收到的感应电动势大小放大6615倍输出。

关键词

磁场测量, 功率放大器, 运算放大器, 线圈

Copyright © 2020 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

随着科技的发展,交变磁场的应用日益广泛。其应用已深入到工业技术、农业技术、国防科技、实验技术以及生物医学等各个领域。在生物医学领域,尤其是重复经颅磁刺激(transcranial magnetic stimulation, TMS)的应用中,常涉及的磁场为高频交变磁场[1]-[6]。交变磁场测量的方法有:电磁感应法、霍尔效应法、磁阻效应法、磁饱和法、磁共振法、磁光法等[7]。本设计采用较为简单的电磁感应法,当一线圈中的电流发生变化时,在临近的线圈中会产生感应电动势,叫做互感现象,通过互感,可以实现信息的远距离传输、记录、显示和控制,并在精密尺寸检测、精密位移测量、机械运动的测量和控制、航空航天等许多领域有广泛的应用[8] [9]。由于我们用的线圈激励源为交流电,所以产生的磁场为变化的磁场。对于交流高频磁场目前没有有效测量的仪器,由于大部分线圈通交流电产生的是变化的磁场,可以利用互感原理测量互感线圈的电压大小来衡量被刺激线圈产生的磁场大小。因此,此交流磁场检测装置的设计对推动微磁刺激装置的研究具有重要意义。

2. 系统组成与测量原理

2.1. 系统框架

交流磁场检测装置主要由接收线圈、AD8130 模块、NE5532 模块三部分组成,如图 1 所示。由高频激励源给微磁线圈通电,通电线圈就会产生高频磁场,检测电路将检测线圈接收到的感应电动势通过由 AD8130 差分运算放大器和 NE5532 双运算放大器为主控芯片的信号检测模块,得到放大约 100 倍的电压信号。

2.2. 通电线圈产生的交流磁场的检测原理

根据法拉第电磁感应定律,把匝数为 N ,截面积为 S 的探测线圈放在磁感应强度为 B 的目标磁场中,保持线圈中心轴线与待测磁场磁力线方向平行,当通过探测线圈的磁通量 Ψ 发生变化,线圈中就会产生感应电动势。采集探测线圈的感应电动势信号 ξ 或其积分信号 Ψ ,进行处理和分析就能得出待测磁场的

磁感应强度 B 。基于测量原理，探测线圈应尽量满足以下要求：

- 1) 线圈截面积尽可能小，以使线圈所覆盖范围内的磁场能近似均匀，测量结果近似反映线圈所处位置的轴向点磁场值；
- 2) 探测线圈对测量点磁场产生影响应尽可能小；
- 3) 探测线圈平面应垂直于磁场方向[10]。



Figure 1. System structure diagram

图 1. 系统结构图

由于线圈磁场的频率太高，目前没有测量高频交变磁场的装置，为了得到可靠的接收数据，通过互感的原理来检测线圈产生的磁场大小。自制接收线圈作为接收被激励线圈产生的磁场信号的“天线”，如图 2 所示。接收到的感应电动势通过差分放大电路、多级运算放大电路大的放大后输出。

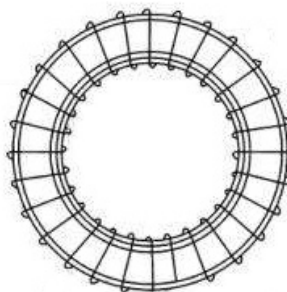


Figure 2. Spiral ring

图 2. 螺绕环

利用线圈互感，当负载线圈中通过变化的电流时，会在周围产生磁场，通过测量线圈的磁通量发生变化，从而产生感应电动势。因为磁场与电流大小成正比，当负载一定时，电流与电压成正比，即可通过感应电动势的大小来衡量负载线圈中的磁场大小，测量线圈中的感应电动势小，说明负载线圈产生的磁场小，反之亦然。图 2 感应电压计算过程如下：

取线圈匝数： $N = 20$

负载线圈中的电流： $i = 0.1 \sin 20000\pi t$

线圈有限半径： $r = 5.25 \times 10^{-3} \text{ m}$

即频率： $f = 10 \text{ KHz}$ ；

$$B = \frac{n_0 Ni}{2\pi r}$$

$$\begin{aligned} \text{磁场: } &= \frac{n_0 \times 20 \times 0.1 \sin 20000\pi t}{2\pi \times 5.25 \times 10^{-3}} \\ &= 7.62 \sin 20000\pi t \times 10^{-2} \text{ mT} \end{aligned}$$

测量线圈的半径： $R = 0.01 \text{ m}$

测量线圈的有效面积： $S = 2\pi \times 0.01^2 \text{ m}^2$

测量线圈中的磁通量： $\varphi_{21} = NBS$

$$\text{互感系数: } M = \frac{NBS}{i}$$

$$\varepsilon = M \times \frac{di}{dt}$$

$$\text{感应电动势: } = \frac{NBS}{i} \times \frac{di}{dt}$$

$$= \frac{20 \times 7.62 \sin 20000\pi t \times 10^{-5} \times 2\pi \times 0.01^2}{0.1 \sin 20000\pi t} \times \frac{di}{dt}$$

$$= 6.02 \times \cos 20000\pi t \text{ mV}$$

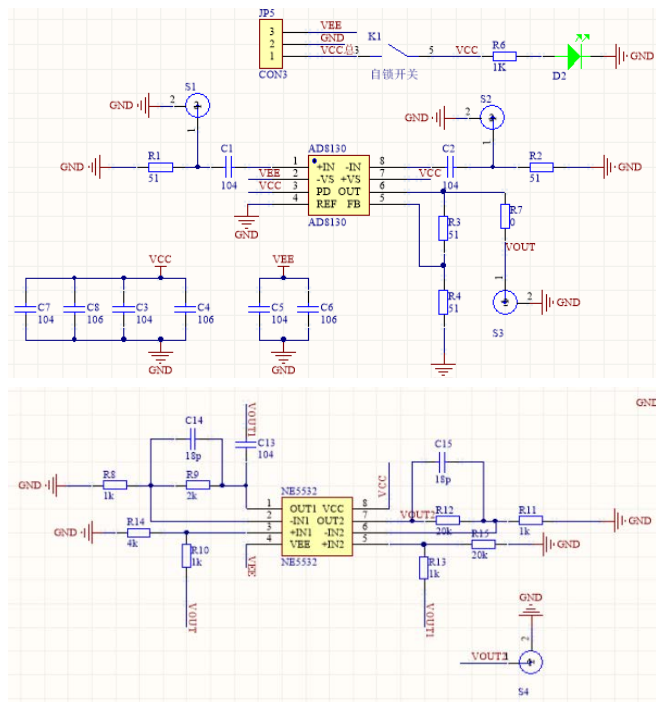
$$\text{螺绕环: 环内磁场 } B = \frac{n_0 Ni}{2\pi r}$$

环外磁场 $B = 0$ 。

2.3. 检测模块的硬件设计

监测模块硬件电路设计如图 3 所示。设计采用 AD8130 和 NE5532 组成。AD8130 为差分至单端放大器，在高频时具有极高的共模抑制比(CMRR) [11]。因此，这些器件也可以有效地用作高速仪表放大器，或用于将差分信号转换为单端信号。NE5532 是高性能低噪声双运算放大器(双运放)集成电路。与很多标准运放相似，但它具有更好的噪声性能，优良的输出驱动能力及相当高的小信号带宽，电源电压范围大等特点。

设计采用同向放大电路，同向放大电路具有输入阻抗足够大的优点。放大倍数为 $A = 1 + R_f/R$ 。前级采用以 AD8130 差分放大芯片为基础构成差分放大电路，差分放大电路放大倍数为 1。后级以 NE5532 集成运放为核心构成运算放大电路。放大电路总共用了 4 级放大。放大倍数依次为 3 倍、21 倍、5 倍、21 倍，共放大 6615 倍。



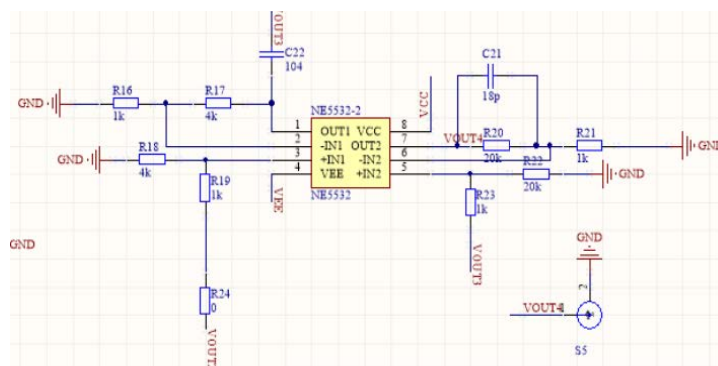


Figure 3. Detection circuit
图 3. 检测电路

3. 测试方案与测试结果

3.1. 测试结果

1) 当负载线圈的电感 $56 \mu\text{H}$ 、激励电压: $1.5 \text{ V}_{\text{pp}}$ 、激励源频率: 70 KHz 时检测线圈接受到的感应电动势如表 1 所示, (测量结果单位均为 V_{pp}), 图 4 为在同轴 1 mm 处测得的感应电动势, CH1 通道所示为激励电压的波形, CH2 表示的为感应电动势的波形, 由图可以看出, 测得的感应电动势频率误差极小, 幅值可达到 8.80 V 。且波形无失真。

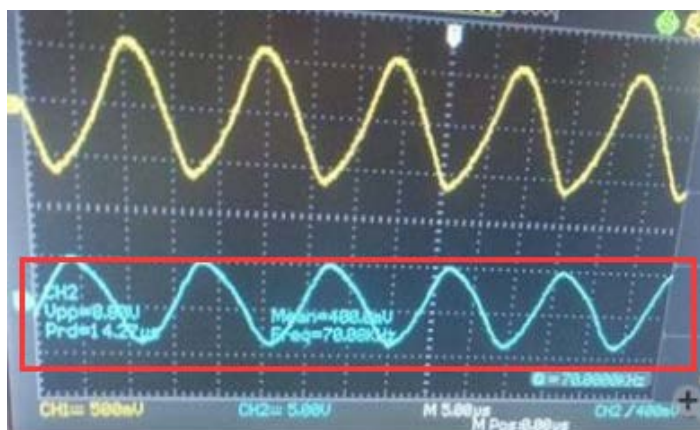


Figure 4. Induced electromotive force at 1 mm coaxial
图 4. 同轴 1 mm 处的感应电动势

Table 1. Induced electromotive force at different positions ($L = 56 \mu\text{H}$)

表 1. 不同位置的感应电动势($L = 56 \mu\text{H}$)

同轴距离	正对	左	右	上	下	左上	左下	右上	右下
1 mm	7.440	2.320	4.160	3.120	3.60	2.680	2.100	2.320	4.800
1.5 cm	1.640	1.380	0.470	1.020	0.760	1.140	1.300	0.540	1.100
3 cm	0.972	0.592	0.536	1.140	0.700	0.860	0.480	0.592	0.608

2) 当负载线圈的电感 $33 \mu\text{H}$ 、激励电压: $1.26 \text{ V}_{\text{pp}}$ 、激励源频率: 70 KHz 时检测线圈接受到的感应电动势如表 2 所示。

Table 2. Induced electromotive force at different positions ($L = 33 \mu\text{H}$)

表 2. 不同位置的感应电动势($L = 33 \mu\text{H}$)

同轴距离	正对	左	右	上	下	左上	左下	右上	右下
1 mm	9.800	6.240	4.240	10.800	2.560	8.240	2.360	6.240	2.380
1.5 cm	1.300	1.500	3.400	1.100	0.840	2.180	2.960	1.200	1.260
3 cm	0.552	0.896	1.200	0.616	1.130	0.552	1.190	1.120	0.358

3.2. 结果分析

当负载线圈的电感 $56 \mu\text{H}$ 、激励电压: 1.5 Vpp 、激励源频率: 70 KHz 时检测线圈接受到的感应电动势折线图如图 5 所示。

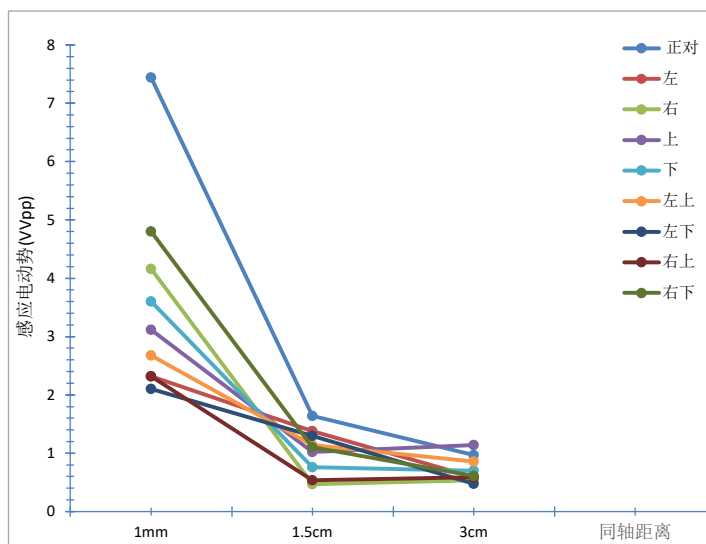


Figure 5. Distribution of induced electromotive force in different positions

图 5. 不同位置的感应电动势分布

当负载线圈的电感 $33 \mu\text{H}$ 、激励电压: 1.26 Vpp 、激励源频率: 70 KHz 时检测线圈接受到的感应电动势如图 6 所示。

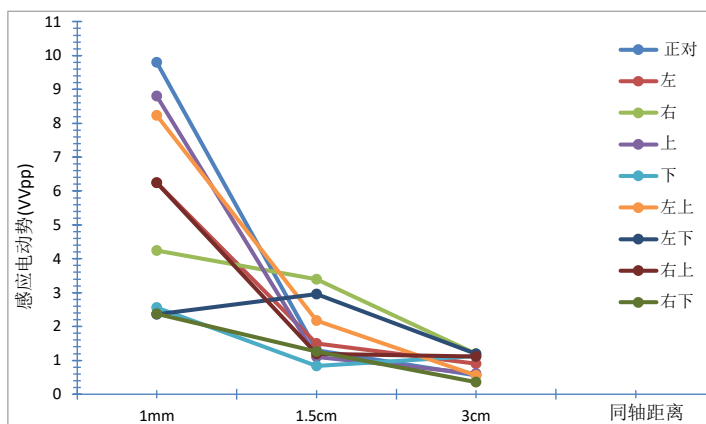


Figure 6. Distribution of induced electromotive force in different positions

图 6. 不同位置的感应电动势分布

由图 5, 图 6 结果可以看出感应电动势的分布规律为: 同一水平线上, 感应电动势与同轴距离成反比; 当同轴距离一定时, 正中心位置感应电动势最大, 周围减弱。当距离轴中心大于 1.5 cm 的距离时感应电动势趋近于 0 V。因为磁场与感应电动势成正比, 可得出结论: 负载线圈的磁场分布为中心位置向四周递减的磁场分布且基本集中在中心位置处, 线圈外部磁场几乎为 0。

经过对结果的数据分析, 测量感应电动势的误差大小在 9.7%~15.4% 不定, 究其原因主要有两个方面:

1) 放置距离精度不够精确, 导致测量的数值偏小, 为随机误差(可消除误差), 可采用多次测量取平均值的方法来减小或消除误差。

2) 由于检测线圈的结构引起的误差, 为系统误差。

此外, 还有实验环境, 人为误差等因素。

4. 结论

高频磁场检测在生物医学工程领域占有重要地位, 尤其在重复经颅磁刺激(transcranial magnetic stimulation, TMS)的应用中尤为明显。本文研究了电磁感应法测交变磁场, 自主设计的一套检测装置, 减少了误差、优化实验环境, 从而实现了高频磁场的监测(见图 7)。

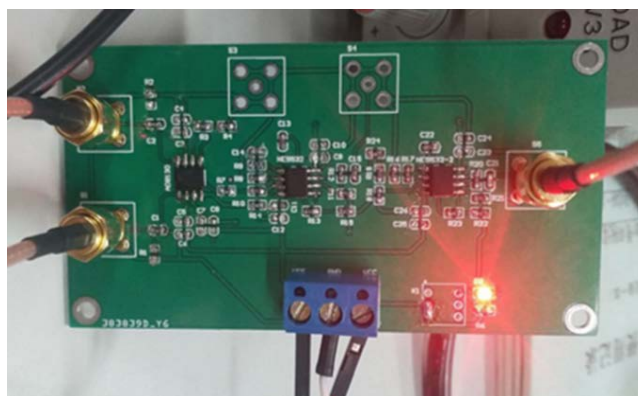


Figure 7. Detection circuit module

图 7. 检测电路模块

参考文献

- [1] 陈怡美, 刘志明, 殷涛. 高频脉冲弱磁场检测技术的研究[J]. 中国生物医学工程学报, 2012, 31(2): 190-197.
- [2] 黄剑平, 穆瑞珍, 林海峰. 基于电磁感应法的交变磁场测量电路设计[J]. 传感技术学报, 2018, 31(2): 202-206.
- [3] 郭中华. 时变磁场测量的研究[J]. 中国科技信息, 2008(13): 38-39.
- [4] Yan, M., Chen, G.Y., Chun, J., et al. (2011) A ns- μ s Duration, Millitesla, Exponential Decay Pulsed Magnetic Fields Generator for Tumor Treatment. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **18**, 1111-1118. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2011.5976103>
- [5] 李梦雪, 吴志煜, 王春燕. 交流磁场测量法在表面裂纹无损检测中的应用[J]. 计策测技术, 2016(2): 42-45.
- [6] 张宏亮, 曹立江. 射线管道爬行器用磁传感器[J]. 传感技术学报, 2015, 28(2): 284-289.
- [7] 姜智鹏, 赵伟, 屈凯峰. 磁场测量技术的发展及其应用[J]. 电测与仪表, 2008, 4(2): 1-5, 10.
- [8] 孟庆斌. 电感式传感器原理及在几何计量工具检定中的应用趋势[J]. 中国计量, 2010, 1(2): 63-64.
- [9] 余瑞芬. 传感器原理[M]. 北京: 航空工业出版社, 2004: 40-60.
- [10] 陈怡美, 刘志明, 殷涛. 高频脉冲弱磁场检测技术的研究[J]. 中国生物医学工程学报, 2012, 31(2): 190-197.
- [11] 陈心灵, 钱宁博, 王战中. 基于 STM32 单片机的嵌入式语音识别系统设计[J]. 机电工程技术, 2019(6): 135-137.