

文章编号:1005-4642(2018)08-0009-04

基于有限元模拟与数值计算的 微电磁继电器结构与性质研究

吴雅苹,陈晓航,吴志明

(厦门大学 物理科学与技术学院 物理系,福建 厦门 361005)

摘要:运用 ANSYS 有限元模拟、Mathematica 数值计算与 OriginPro8.6 图像处理等软件对多重弯曲的平面磁芯线圈电磁场分布以及活动电极在电磁场所受电磁力情况进行仿真分析,从而合理设计励磁电流、活动电极材料、结构尺度、活动电极与固定电极的位置间距等。

关键词:微电磁继电器;平面磁芯线圈;活动电极;有限元模拟

中图分类号: TM581.3

文献标识码: A

DOI:10.19655/j.cnki.1005-4642.2018.08.003

电磁继电器是一种电子控制器件,是电铃、电话和自动控制电路装置中的重要部件。电磁继电器实际上是用较小的电流、较低的电压去控制较大电流、较高电压的“自动开关”,在电路中起着自动调节、安全保护、转换电路等作用^[1-2]。电磁继电器与其他控制元件配合使用还可以实现远程管制、自动控制、逻辑控制等功能,可实现生产自动化,在安全及功耗上可最大满足工程需要,因而被广泛应用于自动控制(如冰箱、汽车、电梯、机床的控制电路)和通信领域。随着微机电系统(MEMS)技术的快速发展,基于 MEMS 技术研制的微电磁继电器应运而生。微电磁继电器不仅保留了传统电磁继电器绝缘阻抗大、接触电阻小、价格低等优点,同时也克服了传统继电器转换深度低、载流能力差的缺点,而且体积小、质量轻,易于集成,拓展了其在高频信号处理电路、微执行通信等领域的应用^[3-5]。

本文基于微电磁继电器的工作原理,采用有限元 ANSYS 和 Mathematica 等计算模拟软件对多重弯曲的平面磁芯线圈电磁场分布以及活动电极在电磁场所受电磁力情况进行仿真分析^[6-7],从而提出励磁电流参量、活动电极材料、结构尺度以及活动电极与固定电极的位置间距的设计依据。

1 微电磁继电器的工作原理及结构设计

微电磁继电器通常由励磁线圈、绝缘层、导磁体层、活动电极(衔铁)、固定电极和硅基底等构成^[8]。工作时对励磁线圈两端施加一定电压,由此在线圈中形成一定电流,从而产生电磁效应。活动电极在电磁力吸引作用下克服返回弹簧的拉力而吸向固定电极,使其动触点与静触点吸合。当励磁线圈断电后,电磁力随之消失,活动电极在弹簧作用下返回原位,使动触点与静触点分离。如此吸合与分离循环往复,达到电路的导通与切断的目的^[6,8]。

励磁线圈是微电磁继电器的关键结构,其材料选择、结构与工作方式须满足以下条件^[9]:

- 1) 气隙开距在 μm 量级范围内保持足够的耐压强度;
- 2) 在保证接触电阻很小的情况下提供足够稳定的接触力;
- 3) 保证足够磁场强度的情况下提高线圈载流能力。

传统电磁继电器的励磁线圈一般采用三维的立体线圈,工艺较为复杂,对于微电磁继电器而言,多重弯曲的平面磁芯线圈结构是较好的选择,其结构由线圈与副磁线圈构成^[10],如图1~2所示。

“第 10 届全国高等学校物理实验教学研讨会”论文

收稿日期:2018-06-09;修改日期:2018-07-12

基金项目:国家自然科学基金面上项目(No. 61674124);厦门大学校长基金项目(No. 20720160122)

作者简介:吴雅苹(1983—),女,福建漳州人,厦门大学物理科学与技术学院高级工程师,博士,研究方向为半导体材料与器件。



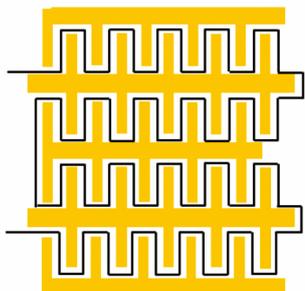


图 1 多重弯曲的平面磁芯线圈的结构

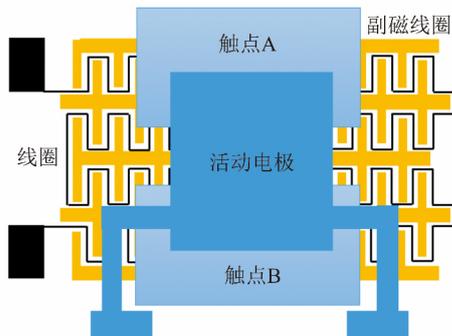


图 2 基于平面磁芯线圈的微电磁继电器结构

2 仿真结果分析与讨论

认识励磁线圈产生的电磁场分布及活动电极在电磁场中所受电磁力,对于设计励磁电流、活动电极材料、结构尺度、活动电极与固定电极的位置间距等,从而实现性能稳定可靠的微电磁继电器功能而言十分重要.下面运用 ANSYS 有限元模拟、Mathematica 数值计算与 OriginPro8.6 图像处理等软件对多重弯曲的平面磁芯线圈电磁场分布以及活动电极在电磁场中所受电磁力情况进行仿真分析,并获得较为合理的设计方案.

2.1 多重弯曲的平面磁芯线圈的电磁场分布

对于多重弯曲的平面磁芯线圈,一般可用于制作图 2 所示的微电磁继电器.基于平面磁芯线圈的微电磁继电器仿真结构模型如图 3 所示,由活动电极(紫色区域)、线圈(蓝色区域)、副磁线圈(红色区域)和空气(浅蓝色区域)组成,并截取其纵向剖面进行分析.线圈周围的磁感线与磁场分布如图 4~5 所示.

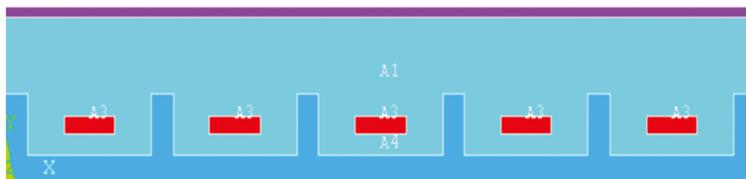


图 3 多重弯曲的磁芯线圈仿真模型

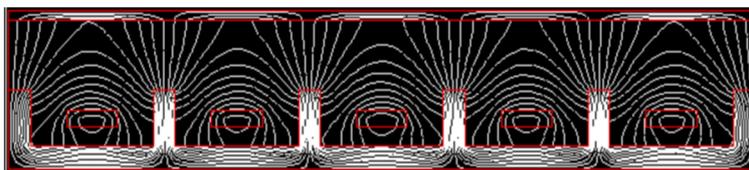


图 4 多重弯曲的磁芯线圈周围磁感线分布

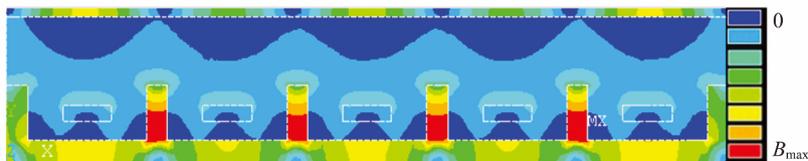


图 5 多重弯曲的磁芯线圈周围磁场密度分布

从仿真的结果可以看出,当励磁线圈通入一定的电流后,在线圈中将产生集中的磁通量,磁通流经磁隙(包括活动电极和固定电极之间的气隙)

沿上部磁极流到临近的外磁芯,再次经过磁隙向下一个外磁芯传播.而磁通的流动产生了电磁吸引力驱动活动电极向下运动与固定电极接触,从

而将 2 个电极接通形成闭合回路. 从线圈周围磁场密度的分布情况可知:磁场密度较为集中地分布在线圈当中,从而可以对活动电极产生较强的吸引力,这有利于活动电极与固定电极之间的稳定接触.

2.2 励磁线圈的电磁力计算

当励磁线圈中有电流通过时,活动电极在洛仑兹力的作用下,在励磁线圈产生的磁场中做垂直运动. 为了获得足够大的位移量,励磁线圈所产生的电磁场应当足够可以驱动活动电极向下运动并与固定电极接触.

假设活动电极为各向同性的磁性介质,则其在垂直方向上所受电磁力为^[11]

$$F_z = \int_V M_z \frac{dB_z}{dz} dV, \quad (1)$$

其中, B_z 为线圈通电后产生的磁感应强度的垂直分量, M_z 为活动电极被磁化后的磁化强度的垂直分量, V 是活动电极的体积. M_z 可以表示为^[11]

$$M_z = X_m H_z = \frac{\mu_r - 1}{\mu_0 \mu_r} B_z, \quad (2)$$

其中, X_m 为各向同性磁性介质的磁化系数, μ_0 和 μ_r 分别为真空磁导率和相对磁导率, H_z 为线圈通电后产生磁场强度的垂直分量. 将式(2)代入式(1),可得:

$$F_z = \frac{\mu_r - 1}{\mu_0 \mu_r} \int_V B_z \frac{dB_z}{dz} dV. \quad (3)$$

通过毕奥-萨伐尔定律分析可知,对于平面励磁线圈,其磁感应强度是关于电流密度与距离的函数. 假设面积为 $500 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$ 的励磁线圈,长 $L=500 \mu\text{m}$,宽 $a=500 \mu\text{m}$,厚 $t=3 \mu\text{m}$,相对磁导率为 300 的活动电极,通过代数积分及 Mathematica 编程作图可得到图 6~7 所示函数曲线.

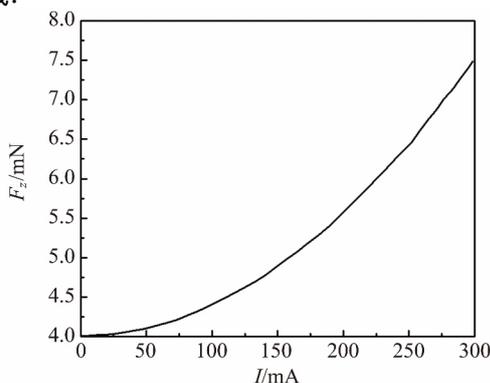


图 6 $z=30 \mu\text{m}$ 时 F_z-I 函数关系曲线

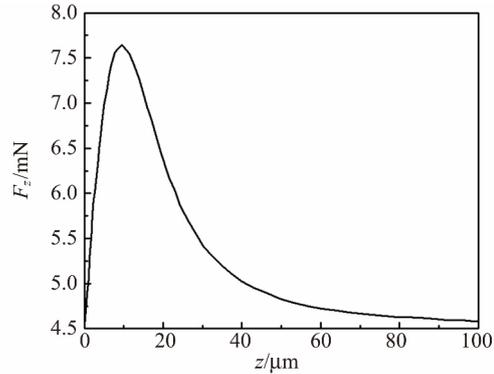


图 7 $I=200 \text{ mA}$ 时 F_z-z 函数关系曲线

由图 6~7 可见随着电流的增大电磁力呈现单向的超线性增加趋势,因此增大电流有利于活动电极的接通动作,但电流的增加会增大励磁线圈的功率. 而在 $I=200 \text{ mA}$ 时, z 约在 $15 \mu\text{m}$ 处 F_z 达到最大值 7.7 mN . 应综合考虑励磁电流参量、活动电极与固定电极的间距,以及励磁线圈的功率等多方面因素来设计器件结构与工作参量.

2.3 活动电极的受力应变分析

活动电极可视为悬臂梁模型,若考虑均匀受力情况,其沿 z 方向位移的挠曲线方程为^[12]

$$W(p, x) = \frac{px^2}{24EI_0} (6L^2 - 4Lx + x^2), \quad (4)$$

其中, W 为活动电极在 z 方向位移量, $p = \frac{F_z}{aL}$ 为电磁力作用于活动电极而产生的压强, E 为活动电极材料的杨氏模量, $I_0 = \frac{at^3}{12}$ 为活动电极的惯性矩, x 为活动电极上某点距离固定端的位置.

假设活动电极材料的杨氏模量 $E=230 \text{ GPa}$, 将 $I=200 \text{ mA}$, $z=15 \mu\text{m}$ 处的 F_z 代入式(4),并采用 OriginPro8.6 软件可做出活动电极在 z 方向位移量 W 与 x 的函数关系,如图 8 所示.

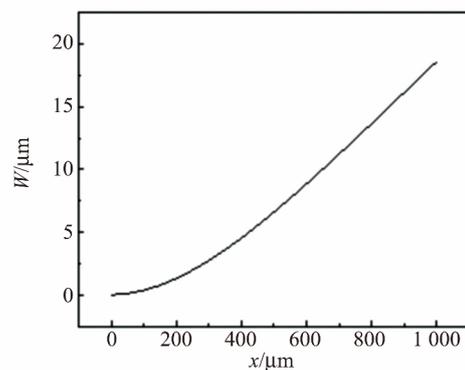


图 8 活动电极在 z 方向位移量 W 与 x 的函数关系

曲线在 x 较小时呈现缓慢上升的亚线性变化趋势,之后转变为近乎线性上升趋势. 在 $x=L$ 处,活动电极在 z 方向上可产生最大位移量

$$W_{\max} = \frac{\rho L^4}{8EI} = \frac{3\rho L^4}{2EaI^3} = 18.5 \mu\text{m},$$

最大位移量大于活动电极与固定电极的间距 $z=15 \mu\text{m}$,由此可见,该励磁线圈所产生的电磁场足够驱动活动电极向下运动,同时活动电极的材料、结构与尺度设计可产生足够的位移量,使之与固定电极接触,并保证具有足够稳定的接触力.

3 结束语

目前,仿真实验已作为研究型实验设计项目引入我校物理开放性实验教学体系,该实验课程的设置充分利用了本校开放研究型实验平台,克服了传统实验教学方式在时间和空间上的局限,促进了优质实验教学资源的共享. 将信息化技术引入实验教学,将学科专业与信息技术深度融合,拓展了实践领域,丰富了教学内容.

参考文献:

- [1] 刘本东,李德胜. 微机械继电器的研究及进展[J]. 微纳电子技术,2007,44(2):88-92.
- [2] 黄操军,李德胜,张宇峰. 微型继电器的研究现状及进展[J]. 黑龙江八一农垦大学学报,2000,12(1):59-64.
- [3] 尤政,李慧娟,张高飞. MEMS 微继电器及其关键问

- 题研究现状[J]. 压电与声光,2006,28(3):278-281.
- [4] Dellaert D, Doutreloune J. Design and characterization of a thermally actuated latching MEMS switch for telecommunication applications [J]. J. Micro-mech. Microeng., 2014,24(7):075022.
- [5] Miao X, Dai X, Huang Y, et al. Segmented magnetic circuit simulation of the large displacement planar micro-coil actuator with enclosed magnetic yokes [J]. Microelectron. Eng., 2014,129(C):38-45.
- [6] 吴雅苹,卢奕宏,柯聪明. 微电磁继电器磁场和力学性质模拟研究[J]. 物理实验,2017,37(1):29-32.
- [7] 李德胜,张宇峰,王东宏. 一种微型电磁继电器的制作和仿真[J]. 微细加工技术,2002,23(3):60-64.
- [8] 任万滨,梁慧敏,王其亚,等. 微机械电磁继电器三维磁场分析及其电磁系统优化设计[J]. 中国电机工程学报,2006,26(6):151-156.
- [9] 任万滨,翟国富,李德胜,等. MEMS 技术在微型电磁继电器应用中的探讨[J]. 机电元件,2004,24(3):3-5.
- [10] Li H, Li D, Liu B. Dynamic analysis of an electromagnetic microrelay with contact force [C]//Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. Changsha: ICICTA, 2009:58-61.
- [11] 张宇峰,李德胜. 一种使用平面线圈结构的微型电磁继电器[J]. 电子器件,2002,25(3):214-219.
- [12] 谢惠明. 梁挠曲线的递推计算[J]. 力学与实践,2009,31(6):74-75.

Structural design and properties of electromagnetic microrelay based on finite element simulation and numerical calculation

WU Ya-ping, CHEN Xiao-hang, WU Zhi-ming

(Department of Physics, College of Physical Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: The ANSYS finite element simulation, the Mathematica numerical calculation and the OriginPro8.6 image processing software were used to simulate the electromagnetic field distribution of the multiple curved planar magnetic core coils and the electromagnetic force exerting on the moving electrode in the electromagnetic field. Hence the excitation current, the material of the moving electrode, the scale of the structure, the spacing between the moving and fixed electrodes were reasonably designed.

Key words: electromagnetic microrelay; planar core coil; moving electrode; finite element simulation

[责任编辑:任德香]