

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.03.022

新型微型电磁继电器活动衔铁的设计方法研究^{*}

朱家伟, 刘润洲, 李地科, 谢 迅, 倪 旭, 李海旺^{*}
(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘要:针对三维线圈式微型电磁继电器活动衔铁的设计方法问题,基于微机电系统(MEMS)技术,设计了一种应用三维线圈的新型微型电磁继电器。分析了该继电器中活动衔铁的弹性对微型电磁继电器吸合时间、超程等整体性能参数的影响,基于有限元模拟研究了基于三维线圈的微型电磁继电器的活动衔铁的结构设计方法,考察了常用参数与活动衔铁弹性的关系,最后给出了在设计活动衔铁结构时的基本方法和准则。研究表明:微型电磁继电器的整体性能与活动衔铁的弹性正相关;硅弹簧的结构设计对活动衔铁弹性和继电器性能有重要影响。

关键词:微机电系统;微型电磁继电器;三维线圈;活动衔铁;结构设计

中图分类号:TM58;TN602

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)03-0338-05

Design method of armature of novel electromagnetic micro relay

ZHU Jia-wei, LIU Run-zhou, LI Di-ke, XIE Xun, NI Xu, LI Hai-wang
(School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Aiming at the problems on designing armature of three-dimensional-coil electromagnetic micro relays, a novel electromagnetic micro relay with three-dimensional coil was designed based on MEMS technology. Influence of the micro relay armature elasticity on the overall performance of the electromagnetic micro relay, such as response time and overtravel, was analyzed. Structural design methods for the armature of this kind of electromagnetic micro relays based on finite element simulation were carefully studied. Relationships were studied between the elasticity of the armature and some commonly-used parameters. At last basic methods and criteria for designing the armature were given. The results indicate that the overall performance of the electromagnetic micro relay has a positive correlation with the armature's elasticity, and that the elasticity depends significantly on the design parameters of the silicon spring.

Key words: micro-electro-mechanical system(MEMS); electromagnet micro relay; three-dimensional coil; armature; structural design

0 引 言

作为电路中一种基础性控制元件,继电器广泛应用于各种机械电控系统中。如今电子及机械产品已视微型化为其长远发展目标;在航空领域,微型航空发动机的尺寸也在不断缩小;但继电器在此方面的研究及发展速度远远不够,这已成为相关系统元件想要进一步提高工作能力的极大障碍。近年来,微机电系统(MEMS)技术的迅速发展,使得微型电磁继电器的开

发实现了巨大突破^[1]。

目前,采用 MEMS 制造的平面线圈式微型电磁继电器的设计和制造已经较为成熟^[2]。上海交通大学刘亮等人^[3]研制的微型电磁继电器将活动触点放置在线圈正上方,线圈通电后产生磁场,吸引悬臂梁,使其活动触点与固定触点接触,实现继电器接通。李浩群等人^[4]研究了平面线圈式电磁继电器衔铁结构的动态结构设计,分析了衔铁结构对电磁继电器响应时间、强度等方面的影响,对微执行器的动态分析有一定

收稿日期:2018-09-19

基金项目:国防科工局重点实验室专项基金项目(6142702ZX05011811)

作者简介:朱家伟(1996-),男,山东济南人,主要从事 MEMS 和微流体技术方面的研究。E-mail:zhu_eng@outlook.com

通信联系人:李海旺,男,博士,教授。E-mail:09620@buaa.edu.cn

的指导意义。

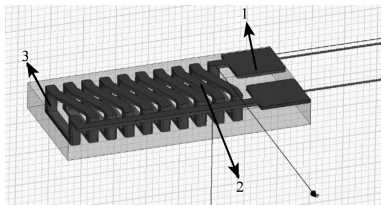
平面线圈在两个方向上的较大尺寸限制了其微型化,而随着加工工艺的进步,三维线圈以其更小的尺寸、更高的电感密度和能量利用效率,越来越多地受到关注^[5]。Lei Gu 等人^[6]在硅片上刻出了一个凹陷的空腔,将螺线管电感嵌在空腔里。衬底的损耗大大减少,制作方法与 CMOS 工艺兼容。除此之外,也有很多机构在研究类似的三维线圈结构设计^[7-8]。相比于平面线圈,三维线圈应用于微型电磁继电器具有很大优势,由于结构形式的巨大差异,与之相适应的电磁继电器活动衔铁结构必然与平面线圈式的有很大不同,但是却几乎没有相关的研究。

本文首先设计一种基于三维线圈的微型电磁继电器的结构,然后对其中活动衔铁的设计进行分析,研究不同结构尺寸对电磁继电器性能的影响。

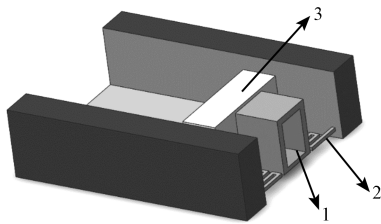
1 电磁继电器结构与原理

微型电磁继电器一般由平面励磁线圈、上磁路、下磁路、活动衔铁和固定电极等组件构成。

基于 MEMS 技术制作的三维线圈式电磁继电器结构有很大不同,三维线圈在厚度只有几毫米的硅板上通过刻蚀通孔、电镀等手段制造而成。三维线圈和电磁继电器示意图如图 1 所示。



1 - 焊盘;2 - 导线槽;3 - 通孔
(a) 三维线圈结构示意图



结构1 - 质量块;结构2 - 硅弹簧;结构3 - 固定电极
(b) MEMS 电磁继电器结构示意图

图1 三维线圈和电磁继电器示意图

图1中,由于三维线圈产生的磁场在水平平面内,可以在体积增加很小的情况下,通过增加匝数显著增强磁场,相比平面线圈其匝数越多,磁感应强度增强越明显。三维线圈的磁场相对集中,故为了有效利用强磁场区域,相应的活动衔铁要与三维线圈在同一水平面内,并在其轴线方向移动。

硅弹簧和带有永磁体的质量块合称为活动衔铁,可利用 MEMS 技术制成一体。线圈通电后产生磁场,质量块1和内部的永磁铁在磁场作用下,带动硅弹簧产生位移,并与固定电极3接触,1、3分别与外部电路相连,便可实现外部电路的导通。线圈断电后,在硅弹簧的弹性恢复力作用下,1、3分离,外部电路断开。相比平面线圈式电磁继电器,三维线圈可以显著减小漏磁,增大能量利用效率。

2 电磁继电器性能指标与影响因素

电磁继电器的时间参数可以用来定性地反映电磁继电器的灵敏度^[9]。与活动衔铁相关的参数主要为超程和吸合时间。

通电后产生电流和磁场的时间与活动衔铁运动的时间相比为高阶小量,故吸合时间由活动衔铁在电磁力、弹性恢复力和阻尼力作用下的振动方程决定。

动力学振动方程为:

$$F_i(t) + F_e(t) + F_f(t) = m\ddot{x}(t) \quad (1)$$

式中: $F_i(t)$ —活动衔铁自身的弹性恢复力; $F_e(t)$ —衔铁在磁场中受到的电磁驱动力; $F_f(t)$ —阻尼力; m —衔铁质量; $x(t)$ —衔铁位移。

弹性恢复力为:

$$F_i(t) = -kx(t) \quad (2)$$

式中: k —衔铁刚度系数,可由第4节中仿真模拟的数据得出。

由于衔铁靠近线圈的均匀磁场区,且其位移仅为微米量级,可以假设在振动中电磁驱动力为定值,即:

$$F_e(t) = F \quad (3)$$

阻尼力在低雷诺数下可表示为:

$$F_f(t) = -d\dot{x}(t) \quad (4)$$

式中: d —阻尼系数。

由于阻尼力相比前两项较小,先将其忽略。将式(2,3)代入式(1),并列初始条件:

$$m\ddot{x}(t) + kx(t) = F \quad (5)$$

$$t = 0; x(0) = 0, \dot{x}(0) = 0$$

此为二阶常系数非齐次线性微分方程,其通解为:

$$x(t) = C_1 \cos \sqrt{\frac{k}{m}}t + C_2 \sin \sqrt{\frac{k}{m}}t + C_3 \quad (6)$$

代入非齐次特解条件和初始条件,可解得振动方程的解为:

$$x(t) = \frac{F}{k} \left(1 - \cos \sqrt{\frac{k}{m}}t \right) \quad (7)$$

在衔铁运动并接触固定电极后,就可以看作吸合,衔铁动能突变为零,并在此处达到静力平衡,使外电路

持续导通。由式(7)可以看出,吸合时间 t 与电磁力 F 、衔铁刚度系数 k 、质量 m 、衔铁与固定电极之间的距离 x 等因素有关,故式(7)可变化为:

$$\frac{F - kx}{F} = \cos \sqrt{\frac{k}{m}} t \quad (8)$$

若衔铁质量 m 、电磁力 F 和衔铁与固定电极之间的距离 x 固定,则可以列出吸合时间与衔铁刚度系数之间的关系。代入本组实验的数据后,吸合时间与刚度系数关系如图 2 所示。

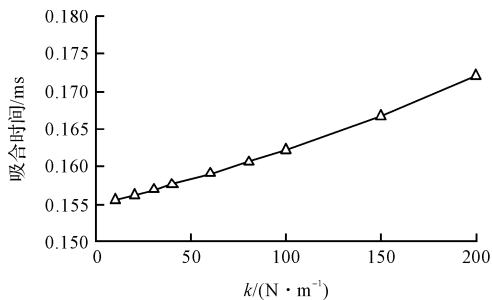


图 2 吸合时间与刚度系数关系

由图 2 可以看出,随着刚度系数的增大,吸合时间增大。因此,在衔铁的设计中,刚度越小,继电器性能越好。由数值仿真得出:线圈磁场可以产生毫牛级别的电磁力驱动活动衔铁产生位移,其吸合时间为毫秒量级^[10]。

因此,在固定的电磁力驱动下,不同结构的活动衔铁在无静触点且静力平衡时的位移(下简称活动衔铁位移)是衡量电磁继电器性能的重要指标,它与超程正相关,与刚度系数负相关。因此,位移大小可以近似体现电磁继电器性能的好坏。

3 电磁继电器活动衔铁结构分析

目前的活动衔铁类型为两端固支梁结构,涉及到的物理量主要有:硅弹簧的总长度 L 和总宽度 W 、硅弹簧弯折区域的起始长度 $x_s L$ 、终止长度 $x_e L$ 、每一侧的弯折数 m 等。

硅弹簧结构参数示意图如图 3 所示。

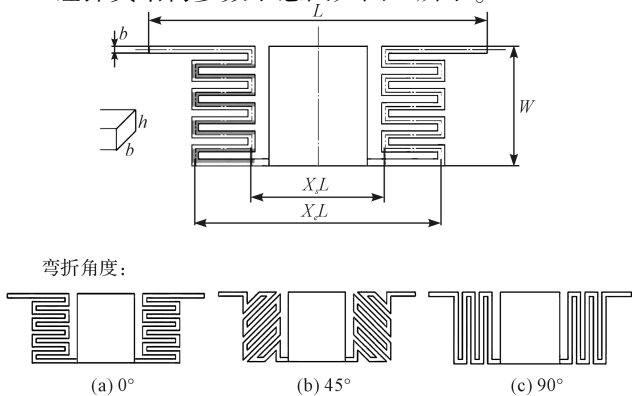


图 3 硅弹簧结构参数示意图

图 3 中,用阴影区分出了 8 个弯折区域。本文设计弯折角度分别为 0° 、 45° 和 90° 的 3 种硅弹簧。

4 实验及结果分析

4.1 硅弹簧弯折区域尺寸和位置与弹性的关系

本文选取了若干参数进行仿真模拟。选取的硅弹簧标准参数如表 1 所示。

表 1 硅弹簧标准参数

| 项目 | 测试数据 |
|-----------------------|------|
| 电磁力 F/mN | 1.0 |
| 总长度 L/mm | 2.4 |
| 总宽度 W/mm | 0.85 |
| 弹性模量 E/GPa | 170 |
| 硅弹簧宽度 b/mm | 0.05 |
| 硅弹簧高度 h/mm | 0.05 |
| 每侧弯折数 m | 8 |
| 起始长度系数 x_s | 0.40 |
| 终止长度系数 x_e | 0.73 |
| 弯折角度 $\theta/(\circ)$ | 0 |

本研究通过 COMSOL 进行有限元模拟,得到稳态时活动衔铁各部分的变形量,可以发现,硅弹簧越靠近中部变形越大,符合两端固支梁的基本模型,而活动衔铁的质量块则沿竖直方向产生了接近线性的位移。

为了分析弯折区域尺寸对弹性的影响,首先,固定 $x_s = 0.4$,令 x_e 在 $[0.4, 0.9]$ 之间变化,可以改变弯折区域尺寸;固定 $x_e = 0.9$,令 x_s 在 $[0.4, 0.9]$ 之间变化,同样可以达到目的。本研究采取这两种方案,分别通过 COMSOL 进行仿真模拟,得到位移与弯折区域尺寸变化规律如图 4 所示。

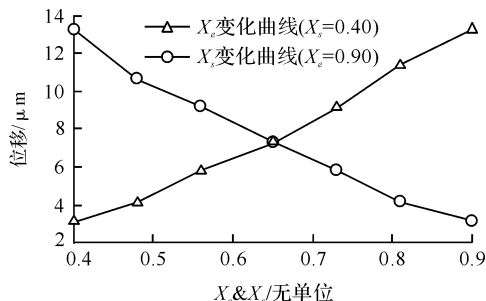


图 4 位移与弯折区域尺寸变化规律

图 4 中,标注的位移为活动衔铁所能达到的最大水平位移,包括了硅弹簧的水平位移和上方的质量块的水平位移。硅弹簧弯折区域尺寸越大,其弹性越好,并且二者几乎呈线性相关;而两条曲线几乎是对称的,说明该弯曲区域的尺寸影响远大于位置影响。

从图 4 还可以看出,两条曲线并不完全对称。在弯折区域尺寸一定时,弯折区域位置的变化对弹性的

影响是十分有限的,在给定区间内其变化幅度不超过10%。因此,实际设计中不必过多考虑其对硅弹簧弹性的影响。

令 $m = 2.4 \text{ mg}$, $d = 4.7 \times 10^{-7} \text{ kg/s}$, $F = 1 \text{ mN}$, 在标准参数 $k = 109.3 \text{ N/m}$ 下,标准参数响应曲线如图5所示。

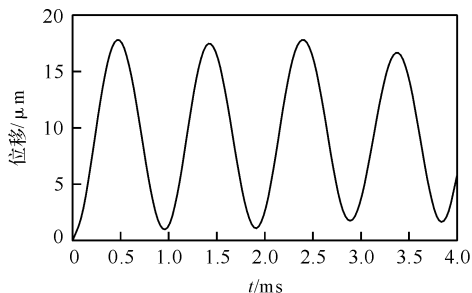
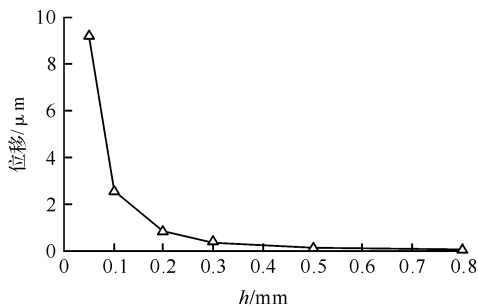


图5 标准参数响应曲线

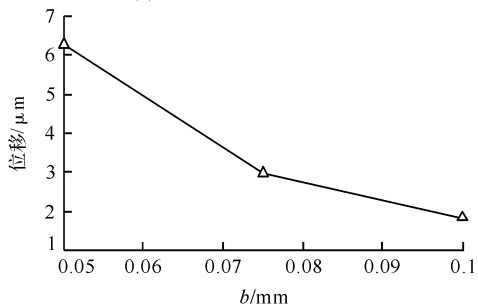
从图5可以看出,结果与理论推导基本吻合。对吸合时间进行测试后发现,模拟结果与推导基本相符,即衔铁刚度系数越大,吸合时间越长。

4.2 硅弹簧高度和宽度与弹性的关系

硅弹簧的高度和宽度决定着硅弹簧的惯性矩。位移与硅弹簧高度和宽度变化规律如图6所示。



(a) 位移与硅弹簧高度变化规律



(b) 位移与硅弹簧宽度变化规律

图6 位移与硅弹簧高度和宽度变化规律

从图6可以看出:随着硅弹簧高度增大,位移呈指数型减小。硅弹簧达到更小的高度意味着指数型增大的弹性,难度极大。

从图6还可以看出:宽度对弹性的影响也很大,近似指数关系。由于实际使用中宽度变化范围不会很

大,故不作过多讨论。

4.3 硅弹簧弯折区域弯折角度与弹性的关系

弯折角度分别为 0° , 45° 和 90° , 3种形式的硅弹簧的弯折区域尺寸、位置均相同,区域内密集程度也相同,以此比较其弹性大小。位移与弯折角度变化规律如表2所示。

表2 位移与弯折角度变化规律

| 弯折角度/ $^\circ$ | 水平位移/ μm |
|----------------|---------------------|
| 0 | 9.151 0 |
| 45 | 7.406 0 |
| 90 | 8.006 4 |

表2显示:3种结构中, 0° 弹性最好, 90° 次之, 45° 弹性最差,可见不同结构对弹簧弹性的较大影响。随着角度的变化,硅弹簧弹性呈先减后增的趋势。若设计不当,则会使结构刚性较高,很难变形,无法应用于微型电磁继电器中。在 0° 时,该结构在水平面内有较大的变形潜力,其弹性最好; 90° 结构不适合水平面内变形,但扭转变形能力较好; 45° 结构过于复杂,变形能力较弱,相比前两种没有明显优势。

4.4 硅弹簧弯折区域弯折数与弹性的关系

在宽度一定时弯折数描述了弯折区域内的材料密集程度。弯折数越大,则区域内排布越密集,加工难度也越大。所以弯折数不能太大,否则将给 MEMS 加工带来很大困难,本例选取的弯折数几乎就对应了目前的加工极限。

硅弹簧弯折区域尺寸位置不变,仅仅改变区域内的弯折数的情况下,位移与弯折数变化规律如表3所示。

表3 位移与弯折数变化规律

| 弯折数 | 水平位移/ μm |
|-----|---------------------|
| 2 | 4.87 |
| 4 | 6.27 |
| 6 | 7.65 |
| 8 | 9.15 |

由表3可以看出,硅弹簧弹性与弯折数为线性关系。这可能是因为弯折数的增加正比于弹簧长度的增加,硅弹簧长度越长就可以产生更大的变形,从而增强了弹性。

4.5 等效应力

在 $x_s = 0.4$ 情况下,计算了弯折区域尺寸变化时的最大等效应力。结果显示:在尺寸变化范围内,材料的最大等效应力水平很低,且变化幅度很小,在 20 MPa 左右,远低于其 165 MPa 强度极限,可见该电磁继电器安全性较高。

4.6 重力的影响

本研究在考虑质量块重力的情况下进行模拟,重力对位移的影响如表 4 所示。

表 4 重力对位移的影响

| 项目 | 水平位移/ μm | 相对误差/% |
|--------------|---------------------|---------|
| 不考虑重力影响 | 9.151 0 | 0 |
| 重力沿 z 轴负方向 | 9.162 2 | 0.122 4 |
| 重力沿 z 轴正方向 | 9.139 4 | 0.126 8 |

由表 4 可见,考虑重力与否所造成的误差小于 0.15%,故而在进行设计时可以忽略重力的影响。

5 结束语

本文用有限元方法对应用于三维线圈式微型电磁继电器的活动衔铁的结构形态进行了分析,通过仿真模拟考察了活动衔铁中的核心部件硅弹簧的尺寸、大小、高度、宽度等因素对衔铁位移的影响,结果表明:

(1)微型电磁继电器的性能与活动衔铁静力平衡时的最大位移相关,提高继电器性能就要尽可能提高硅弹簧弹性;

(2)硅弹簧的总长度与其弹性基本为线性关系,为了增大活动衔铁的位移,可以采取增大硅弹簧弯折区域尺寸、增大密集程度等方法。弯曲区域的位置对其弹性的影响小;

(3)硅弹簧的高度和宽度,与位移呈指数关系。设计时应尽量减小硅弹簧的高度和宽度;

(4)硅弹簧的结构对弹性有较大影响,活动衔铁本身的重力对位移影响很小;

(5)最佳的硅弹簧尺寸和结构如下:弯折区域尺寸 $X_s = 0.4$, $X_e = 0.9$,每侧弯折数为 8,宽度、高度均为 0.05 mm;硅弹簧弯折角度为 0° 。

参考文献(References):

- [1] ZHANG Y, LI D. Fabrication and Simulation of an Electromagnetic Microrelay[J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2002.
- [2] 刘本东,李德胜,杨晓波.一种单稳态微电磁继电器的研究[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(4): 543-549.
- [3] 刘 亮. MEMS 电磁继电器微型化的研究[D]. 上海:上海交通大学电子信息与电气工程学院, 2008.
- [4] 李浩群,李德胜,刘本东,等.微电磁继电器衔铁结构的动态结构设计和分析[C]//全国非线性动力学和运动稳定性学术会议. 2009.
- [5] FAN Y, LI Z, WANG X, et al. A novel design of micro-scale 3D helix inductor for terahertz applications[C]// International Conference on Integrated Circuits and Microsystems. IEEE, 2017: 149-153.
- [6] GU L, LI X. Concave-Suspended High-Q, Solenoid Inductors With an RFIC-Compatible Bulk-Micromachining Technology [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2007, 54(4): 882-885.
- [7] TIDA U R, MITTAPALLI V, ZHUO C, et al. "Green" On-chip Inductors in Three-Dimensional Integrated Circuits [C]// Vlsi. IEEE, 2014: 571-576.
- [8] TIDA U R, YANG R, ZHUO C, et al. On the Efficacy of Through-Silicon-Via Inductors [J]. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration Systems*, 2015, 23(7): 1322-1334.
- [9] 关 欣,李文华,沈江峰,等.电磁继电器动作时间参数测试与计算研究[J]. *中北大学学报:自然科学版*, 2016, 37(6): 593-600.
- [10] 江俊勤.有限长恒定电流密绕圆柱形螺线管磁场的空间分布[J]. *广东第二师范学院学报*, 2012, 32(5): 42-45.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

朱家伟,刘润洲,李地科,等.新型微型电磁继电器活动衔铁的设计方法研究[J]. *机电工程*, 2019, 36(3): 338-342.

ZHU Jia-wei, LIU Run-zhou, LI Di-ke, et al. Design method of armature of novel electromagnetic micro relay [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2019, 36(3): 338-342.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>