DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905254

基于仿生平衡棒结构的共振隧穿导航传感器研究*

沈 翔,赵立业
(东南大学仪器科学与工程学院 南京 210096)

摘 要:家蝇等飞行昆虫利用后翅棒状平衡器检测哥氏力,实现了在空中飞行过程中的快速航行控制。本文基于家蝇后翅微球杆结构建立了一种仿生机械平衡器的运动学模型,并采用 MATLAB 分析了该模型的航行控制原理。结合家蝇的微球杆平衡结构原理和共振隧穿薄膜微结构(resonant tunneling membrane structure, RTS)的力电耦合效应,设计了一种新型的高精度仿生微型棒状导航传感器(bionic micro-stick-shaped navigation sensor, BMSSNS),并研究了 BMSSNS 的加工工艺、信号检测方式与路径解算方法。基于 ANSYS 对该 BMSSNS 结构进行仿真分析,仿真结果表明,给定初始边界条件下,通过测量平衡棒的哥氏力信息和驱动力信息,可积分解算出运动路径。进一步的路径实验研究结果表明,该 BMSSNS 能有效检测传感器的俯仰,翻滚和偏航的姿态和路径信息,其短时水平和垂直路径定位精度分别达 1.5 mm 和 0.5 mm。该传感器能够在小空间、高定位精度要求的场所中实现精确路径定位。

关键词: 家蝇后翅;航行控制;仿生微型棒状导航传感器;共振隧穿薄膜微结构;仿真与实验
中图分类号: TP212 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 410.40

Research on the navigation sensor with resonant tunneling membrane based on the bionic stick-shaped structure

Shen Xiang, Zhao Liye
(*School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China*)

Abstract: The hind wings of some two-winged insects, such as houseflies, utilize the stick-shaped mechanosensory halteres, which detect Coriolis forces to achieve rapid course control during aerial maneuvers. In this paper, a kinematic model of stick-shaped mechanosensory halteres navigation is proposed based on the structure of the bionic wing of the houseflies. Maneuvers navigation principle of this model is analyzed by MATLAB. The mechanosensory halteres of houseflies and the electro-mechanical coupling effect of resonant tunneling membrane structure (RTS) are combined. In this way, a novel bionic micro-stick-shaped navigation sensor (BMSSNS) is designed. The processing technology, signal detection method and path solving method of BMSSNS are studied simultaneously. The structure of BMSSNS is simulated by ANSYS. Simulation results show that the motion path can be calculated by integrating the Coriolis and the driving force information of the stick-shaped structure under the initial boundary conditions. The further path experiment results show that the BMSSNS can effectively detect the path and posture information (e.g., pitch, roll and yaw). Its horizontal and vertical path positioning accuracy can reach 1.5 mm and 0.5 mm in short time. The sensor enables precise path location in occasions where small spaces and high positioning accuracy are required.

Keywords: the rear wings of houseflies; navigation control; bionic micro-stick-shaped navigation sensor; resonant tunneling membrane structure; simulation and experiment

0 引 言

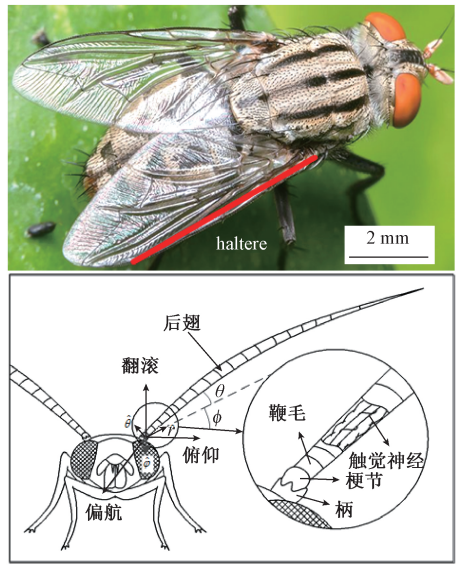
自然界生物经过亿万年的进化,形成了许多结构精巧、性能高效的组织器官,为人类进行科学创新提供丰富的灵感[1-3]。诸如家蝇及其亲属等两翼昆虫发展了复杂的感官能力,以在空中飞行期间实现快速航向控制。它们后翅进化成棒状的应力感受平衡器,通过检测哥氏力

收稿日期:2019-06-11 Received Date:2019-06-11
*基金项目:国家自然科学基金(61101163)、中央高校基本科研业务费专项资金(2242018k1G006)、装备预研教育部联合基金(6141A02022333)项目资助

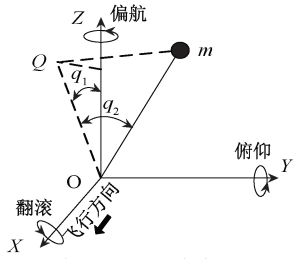
来调节机动过程中的飞行稳定性。另外,在微纳米技术的快速发展下,导航传感器从传统的机械结构向微机电系统发展。微机电系统传感器具有体积小、功耗低、响应快、成本低等优点。

陈健等[4]基于有限元方法对昆虫毛状感触器的微型流速传感器进行研究,并初步探讨基于悬臂梁的薄膜的尺寸对于根部应变的影响。Sane 等[5]对基于仿生触角的机械天线传感器飞行控制原理进行研究,得到了机械天线传感器的飞行控制规律;Alexander 等[6]对仿生触角的角速度测量方法进行研究,设计了基于仿生触角原理的陀螺仪。Guan 等[7]对仿生导航传感器的解算算法进行研究,设计了仿生信号的提取方法。家蝇仅依靠后翅棒状的应力感受平衡器可完成三维空间的导航,这对研究和设计具有三维导航的新型传感器具有很好的借鉴作用。

家蝇后翅平衡器系统因解决了在视觉困难的条件下快速控制航线的问题受到关注[1]。本文通过对家蝇后翅导航原理进行分析,建立平衡棒导航的运动学模型,提出了基于家蝇后翅平衡器模型的仿生微型棒状导航传感器(bionic micro-stick-shaped navigation sensor, BMSSNS)。该微机电系统传感器将克服当前导航系统结构复杂、体积和质量较大的缺点,在载体运动过程中实现载体的精确定位和姿态调节。该 BMSSNS 适用于小空间、高定位精度要求的需求场所中,并可以为研制三维仿生传感器提供新思路。



(a) 家蝇及其后翅平衡棒结构
(a) Schematic diagram of houseflies and their halteres of hind wings



(b) 家蝇后翅平衡棒模型
(b) Haltere model of hind wings of houseflies

图 1　家蝇的飞行运动学原理示意图

Fig.1　Schematic diagram of flight kinematic principle of houseflies

1　家蝇后翅导航的运动学模型与仿真分析

1.1　家蝇后翅导航的运动学模型

家蝇是通过从后翅进化衍生的棒状感应结构的摆动振荡来快速获取自我运动信息。其平衡器内潜在的感觉神经元将关于俯仰、翻滚和偏航运动的信息传递给中枢神经系统。尽管平衡器的摆动由后翅根部的肌肉组织提供能量,但平衡器的运动所需驱动力大小由其固有频率决定。在翻滚运动过程中,平衡器上的哥氏力会在运动平面上产生横向偏差。因为左右两个平衡器的振动平面是非正交的,所以这个系统可以明确区分俯仰,翻滚和偏航行为[5-6]。家蝇的飞行运动学原理如图 1 所示。

1.2　家蝇后翅导航的数学模型

家蝇后翅驱动力来源于其根部的肌肉组织,肌肉对后翅提供的拉力近似为一恒定值并且其频率与翅膀的振动频率 ω 相同,可用一个方波信号表示。

$$F_0(t)=\begin{cases}F_0(t+nT)\\ A(0<T\leqslant T/2 & (T,t>0)\\ -A(-T/2<T\leqslant 0)\end{cases} \tag{1}$$

式中:T 为驱动信号周期;A 为驱动力幅值。在忽略阻力的情况下,对驱动力进行傅里叶展开,然后进行二次积分,可得到 θ_1、θ_0 与时间的关系:

$$\theta_i=\frac{4\theta_{i0}}{\pi}\left(\sin\omega t+\frac{1}{27}\sin 3\omega t+\frac{1}{125}\sin 5\omega t+\frac{1}{(2n+1)^2}\sin(2n+1)\omega t+\mathrm{L}\right)\quad n=0,1,2,3\cdots \tag{2}$$

式中:θ_{i0}为 θ_i 的最大幅值,且 $i=1,2$。从上式可以看出 θ_1,θ_2 的振动频率为 ω 的奇数倍。通过平衡棒与平面和坐标轴所成的角度可以得到质心所在位置:

$$P=r\sin\theta_1\cos\theta_2\bar{x}+r\sin\theta_2\bar{y}+r\cos\theta_1\cos\theta_2\bar{z} \tag{3}$$

式中:$\bar{x},\bar{y},\bar{z}$ 分别表示沿 X、Y、Z 轴的正向矢量方向,其中 r 为平衡棒质心到根部的距离。

对 P 求导可以得到平衡棒质心沿 X、Y、Z 方向的速度分量:

$$P'=(r\cos\theta_1\cos\theta_2\theta_1'-r\sin\theta_1\sin\theta_2\theta_2')\bar{x}+(r\cos\theta_1\theta_2')\bar{y}+(r\sin\theta_1\cos\theta_2\theta_1'-r\cos\theta_1\sin\theta_2\theta_2')\bar{z} \tag{4}$$

考虑到频率阶数越高幅值越小，所以 $n>1$ 的影响忽略，可以得到 ω 频率下，速度与时间的关系：

$$\nu_{\omega} = \omega r\theta_{10}\frac{4}{\pi}\cos(\omega t)\bar{x} + \omega r\theta_{20}\frac{4}{\pi}\cos(\omega t + \varphi_{21})\bar{y} - \omega r\left[\theta_{10}^2\frac{8}{\pi^2}\sin(\omega t) + \theta_{20}^2\frac{8}{\pi^2}\sin(\omega t)\right]\bar{z} \tag{5}$$

基于以上运动学模型仿真，本文对家蝇后翅导航模型的运动学模型进行分析，主要包括棒状感应结构的哥氏力和驱动力分析，其哥氏力 F_c 和驱动力 F_d 特征分别表达为：

$$F_c = 2mv \times \Omega \tag{6}$$

$$F_d = mv' \tag{7}$$

式中：m 为平衡棒的质心质量；v'为平衡棒振动时的加速度；v 为平衡棒的振动速度。

结合式(5)~(7)，可得 ω 频率下根部所受哥氏力和驱动力的具体表达式：

$$F_{c,\omega} = 2\omega r\cos(\omega t)\left[\Omega_3\theta_{20}\frac{4}{\pi}\bar{x} - \Omega_3\theta_{10}\frac{4}{\pi}\bar{y} + \left(\Omega_2\theta_{10}\frac{4}{\pi} - \Omega_1\theta_{20}\frac{4}{\pi}\right)\bar{z}\right] \tag{8}$$

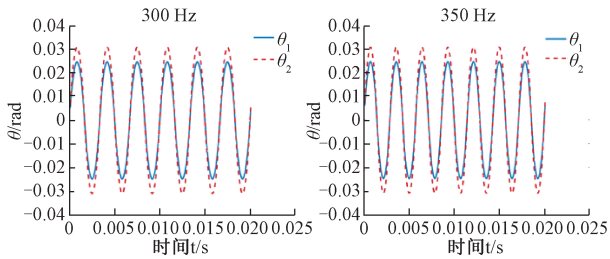
$$F_{d,\omega} = -mr\omega^2\sin(\omega t)\left(\theta_{10}\frac{4}{\pi}\bar{x} + \theta_{20}\frac{4}{\pi}\bar{y}\right) \tag{9}$$

式中：Ω 表示角速度，包括翻滚角速度 Ω_1、俯仰角速度 Ω_2 和偏航角速度 Ω_3。

1.3 家蝇后翅导航模型的 MATLAB 仿真

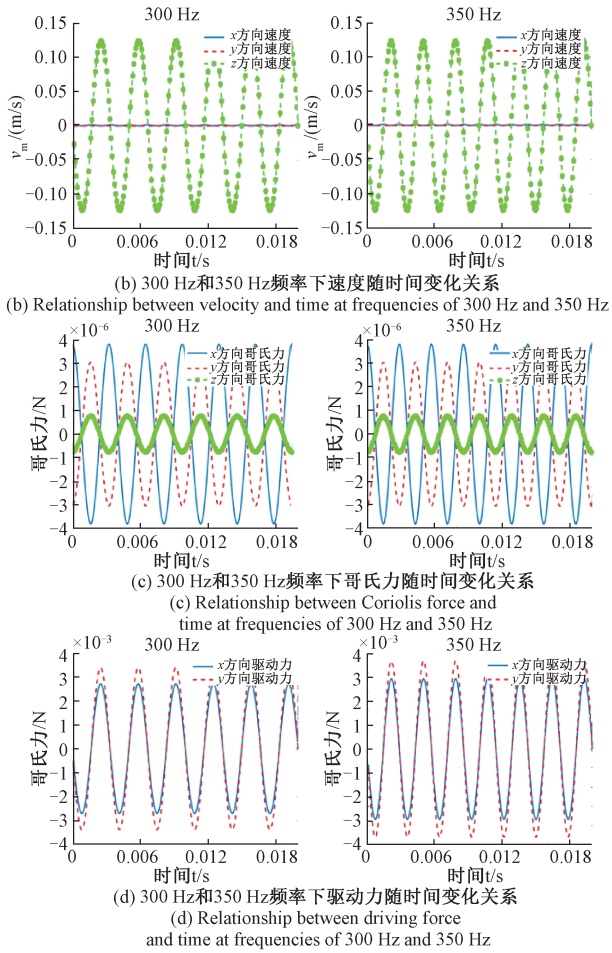
基于家蝇后翅导航的数学模型，采用 MATLAB 对其进行仿真分析，其仿真的基本参数取值如下：家蝇平衡棒质心到根部的距离 r 取 5 mm；θ_{10}、θ_{20}取 0.02 rad；翅膀的振动频率 ω 分别取 300 Hz 和 350 Hz；家蝇平衡器质点质量 m 取 6×10^{-6} kg；俯仰角速度 Ω_2、偏航角速度 Ω_3、翻滚角速度 Ω_1 均取 2 rad/s。

根据数学模型仿真，可得到 300 Hz 和 350 Hz 两种翅膀振动频率下，θ、速度、哥氏力、驱动力等参数随时间的变化关系分别如图 2(a)~(d)所示。



(a) 300 Hz和350 Hz频率下θ随时间变化关系

(a) Relationship between θ and time at frequencies of 300 Hz and 350 Hz



(b) 300 Hz和350 Hz频率下速度随时间变化关系

(b) Relationship between velocity and time at frequencies of 300 Hz and 350 Hz

(c) 300 Hz和350 Hz频率下哥氏力随时间变化关系

(c) Relationship between Coriolis force and time at frequencies of 300 Hz and 350 Hz

(d) 300 Hz和350 Hz频率下驱动力随时间变化关系

(d) Relationship between driving force and time at frequencies of 300 Hz and 350 Hz

图 2 300 Hz 和 350 Hz 频率下关键参数随时间变化关系

Fig.2 Relationship between key parameters and time at frequencies of 300 Hz and 350 Hz

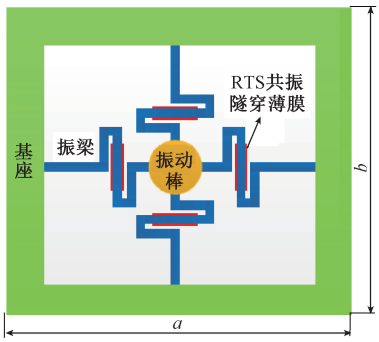
比较 300 Hz 和 350 Hz 频率下根部所受哥氏力与驱动力可得：两种频率下根部所受哥氏力远小于驱动力；350 Hz 频率下的驱动力幅值是 300 Hz 频率下的约 1.25 倍；哥氏力幅值：X 方向>Y 方向>Z 方向，X 方向和 Y，Z 方向相位相反；驱动力幅值：X 方向>Y 方向，相位相同。

根据哥氏定理可知，由偏航角速度引起的哥氏力沿 Y，X 方向，通过测量惠斯通半桥的输出，提取沿 X，Y 方向上的驱动力和哥氏力信息，通过放大、滤波、相位解调电路将哥氏力与驱动力进行分离。由于沿 X 和 Y 方向上的哥氏力只与翻滚角速度相关，通过提取定频率下的 X 和 Y 方向上的哥氏力信息解算出偏航角速度。由于翻滚角速度产生哥氏力在 Y 方向，俯仰角速度产生的哥氏力在 X 方向，所以提取惠斯通半桥的输出得到沿 X 方向上的哥氏力信息，解算出俯仰角速度。给定初始边界条件，通过积分运算，可解算出运动路径。

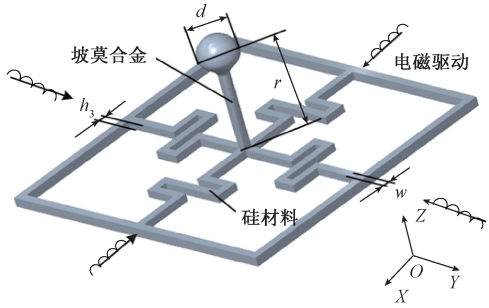
2　BMSSNS 的结构设计与仿真

2.1　BMSSNS 的结构设计

BMSSNS 以家蝇后翅棒状结构平衡器为仿真模型,其结构主要分为上层平衡棒部分和下层振梁基座部分,如图 3 所示。BMSSNS 的上层棒体材料选用坡莫合金,根部的敏感结构采用硅材料加工的折叠梁结构,在折叠梁的应力敏感处通过贴片的形式注入 4 个共振隧穿薄膜微结构(resonant tunneling membrane structure, RTS),并将 RTS-X+、RTS-X-、RTS-Y+与 RTS-Y-分别连接成惠斯通半桥,用来检测折叠梁在 X,Y 方向的应力变化,并通过振动应力变化值,分解出哥氏力和驱动力信号。由合金棒引起的沿 3 方向的振动,使得 4 个薄膜阻值变化相同,在惠斯通半桥的输出会相互抵消,可减小梁 Z 轴方向上的应力变化对检测 X,Y 方向上应力的影响。



(a) BMSSNS的平面结构示意图
(a) Schematic diagram of the planar structure of BMSSNS



(b) BMSSNS的三维结构示意图
(b) Schematic diagram of 3-D structure of BMSSNS

图 3　BMSSNS 结构示意图
Fig.3　Structure diagram of BMSSNS

BMSSNS 工作时,由偏航角速度引起的哥氏力沿 Y,X 方向,通过测量惠斯通半桥电路的输出,提取沿 X,Y 方向上的驱动力和哥氏力信息,通过放大、滤波、相位解调电路将哥氏力与驱动力进行分离。给定初始边界条件(包括初始位置和运动速度),通过积分运算,可解算出运动路径,其工作原理如图 4 所示。

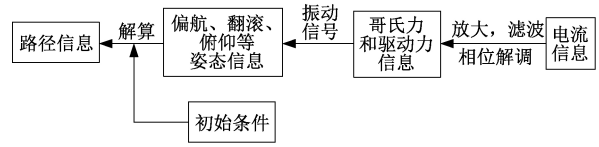


图 4　BMSSNS 的工作原理
Fig.4　Working principle of BMSSNS

BMSSNS 采用电磁驱动[8]的方式,将绕有铜丝的 4 个软磁铁放置在+X,−X,+Y,−Y 方向上,通过在线圈导线内通入电流,对坡莫合金棒产生电磁力,使合金棒沿着放置着电磁驱动器的方向移动,通过控制驱动电压,从而改变输入电流的大小和相位,来控制合金棒的运动。

2.2　RTS 结构的设计

BMSSNS 采用 RTS 的力电耦合效应来敏感振动信号。RTS 是一种超晶格纳米薄膜,它的核心是纳米级宽带隙材料中夹着窄带隙材料。将 RTS 应用于 BMSSNS 中,利用 RTS 的力电耦合效应来实现导航控制,具有体积小,精度高等优点[9-13]。RTS 能带图与 I-V 特性曲线如图 5 所示。

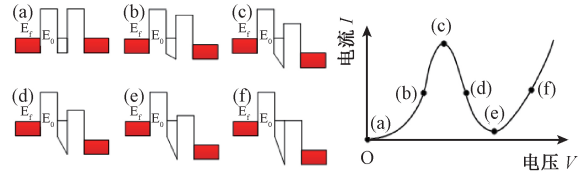


图 5　RTS 的能带图与 I-V 特性曲线
Fig.5　Band diagram and I-V characteristic curve of RTS

RTS 在导带上形成了两垒一阱的双势垒结构。两端是发射极与集电极。E_0 是势阱的第一量子化能级,E_f 是发射极的费米能级,E_c 为发射极导带底能级。对双势垒薄膜加偏压后 $E_c<E_0<E_f$,双势垒薄膜发生共振,随着偏压的增大,E_0 不断减小透射几率增大,电流不断增大。当 $E_0=E_c$,电流达到最大值。随电压进一步增大,$E_0<E_c$ 双势垒薄膜透射几率不断减小,电流随电压增大而减小,出现负阻效应。

2.3　BMSSNS 的 ANSYS 仿真

1)仿真模型的建立

在三维建模软件 Creo 中建立如图 4 所示的 BMSSNS 结构模型。家蝇后翅平衡棒的质心简化成一个质量块,通过改变质心直径 d 形成 5 种不同参数结构,如表 1 所示。

2)边界条件及仿真结果分析

在 ANSYS 中施加边界条件,在 X,Y 方向施加驱动工况,4 种工况施加的驱动频率均为 300 Hz,其驱动力大小分别为 4×10^{-4}、8×10^{-4}、1.6×10^{-3}、3.2×10^{-3} N。通过仿真,得到质量块直径 d 与前三阶固有频率的关系,如表 2 所示。

表 1 BMSSNS 结构模型参数

Table 1 Structural model parameters of BMSSNS

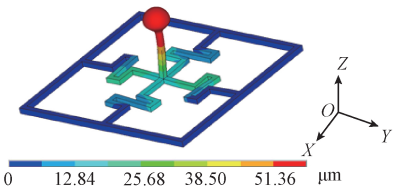
结构	Y 方向尺寸 a/μm	X 方向尺寸 b/μm	梁宽 w/μm	梁厚 h3/μm	棒体长度 r/μm	质量块直径 d/μm
1	2 000	2 000	100	100	1 270	400
2	2 000	2 000	100	100	1 270	450
3	2 000	2 000	100	100	1 270	500
4	2 000	2 000	100	100	1 270	550
5	2 000	2 000	100	100	1 270	600

表 2 质量块直径 *d* 与前三阶固有频率的关系

Table 2 The relationship between the mass diameter *d* and the first three natural frequencies

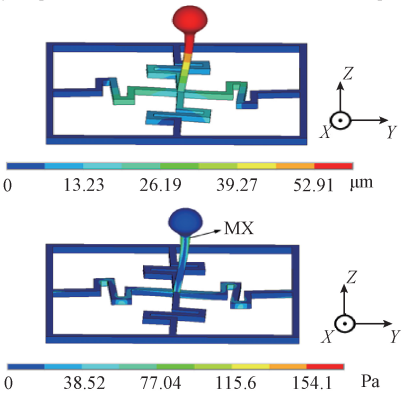
结构	一阶固有频率/Hz	二阶固有频率/Hz	三阶固有频率/Hz
1	631.87	634.83	1 692.77
2	809.92	811.31	1 893.20
3	993.18	996.96	2 003.42
4	1 073.64	1 077.13	2 061.95
5	1 139.75	1 142.54	2 175.04

由表 2 可以看出，质量块直径 *d* 取 500 μm 时，三阶固有频率为 2 003.42 Hz，更符合设计要求。针对结构 3，在 1.6×10^{-3} N 驱动力条件下，同时通过仿真，得到一阶到三阶模态的振型，如图 6(a)～(c)所示。



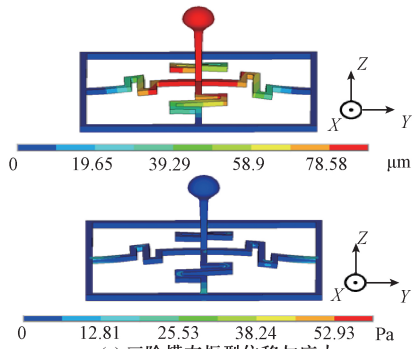
(a) 一阶模态振型位移与应力

(a) Displacement and stress for first-order mode shape



(b) 二阶模态振型位移与应力

(b) Displacement and stress for second-order mode



(c) 三阶模态振型位移与应力

(c) Displacement and stress for third-order mode shape

图 6 不同模态振型下的位移与应力

Fig.6 Displacement and stress for different mode shapes

在模态分析中可以看出，在一阶固有频率处，合金棒主要是沿着 *X* 方向摆动，二阶固有频率处，合金棒沿 *Y* 方向摆动，三阶固有频率处，沿 *Z* 方向上下振动，符合设计的要求，通过进一步分析得到驱动力与质心振幅关系，如表 3 所示。

表 3 棒体的振幅与驱动力的关系

Table 3 The relationship between vibration amplitude and driving force of the halteres

工况	驱动力/N	三阶模态振幅/μm
1	4×10^{-4}	22.11
2	8×10^{-4}	41.72
3	1.6×10^{-3}	88.45
4	3.2×10^{-3}	161.58

根据表 2 和 3 仿真结果，工况 3 条件下的结构 3 的 BMSSNS 更符合设计要求。此时，驱动频率为 350 Hz，驱动力为 1.6×10^{-3} N，质量块直径为 500 μm，合金棒沿 *X*，*Y* 的三阶模态振幅为 88.45 μm，三阶固有频率为 2 003.42 Hz。

3 BMSSNS 的工艺设计

3.1 BMSSNS 整体结构的加工工艺

BMSSNS 整体采用微加工工艺进行加工，其上层棒体材料选用坡莫合金材料，根部的敏感结构采用硅材料加工的折叠梁结构，在折叠梁的应力敏感处通过贴片的形式注入 4 个 RTS，并将 RTS-X+、RTS-X-、RTS-Y+与 RTS-Y-分别连接成惠斯通半桥，用来检测折叠梁在 *X*，*Y* 方向的应力变化，并通过振动应力变化值，分解出哥氏力和驱动力信号。

BMSSNS 整体结构加工流程及电镜实物照片如图 7

所示,主要分为以下 7 步:

1）对硅片背面进行氧化,沉积氧化绝缘层;

2）在 $X+$、$X-$、$Y+$和 $Y-$ 4 个方向分别光刻贴片形成 RTS 薄膜,并溅射 Al 引线;

3）光刻、溅射形成 Cr/Cu 电镀种子层与连接种子层外部电极引线层;

4）通过二次甩胶,光刻、电镀、抛磨形成坡莫合金棒;

5）去除背面氧化层、刻蚀形成背面空腔;

6）甩胶、光刻形成折叠梁图形区,以 SF6 为刻蚀气体,进行 ICP 刻蚀,穿透硅片形成折叠梁结构;

7）换用 Cl_2 为刻蚀气体进行 ICP 刻蚀,去除作为电镀的引线层,去除光刻胶,得到 BMSSNS 结构。

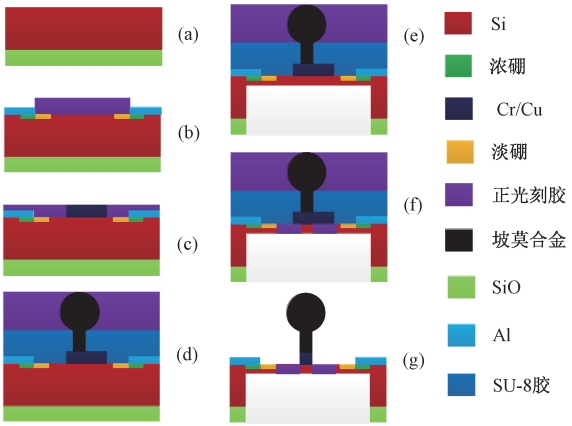


图 7　BMSSNS 的加工流程

Fig.7　Flow chart of the BMSSNS processing

3.2　RTS 薄膜结构的加工工艺

RTS 薄膜结构剖面示意图如图 8 所示,上层台面为发射区(E 区)接触,下层台面是集电区(C 区)接触,下层台面上沉积一层 Si_3N_4 薄膜,它具有钝化表面和隔离电极与其下面材料短路的作用,压焊垫(Pad)位于 Si_3N_4 薄膜上。为提高 RTS 的最高振荡频率,该结构采用空气桥结构[14-15],同时在可能的工艺条件下,尽量减小 E 区面积 A_E。

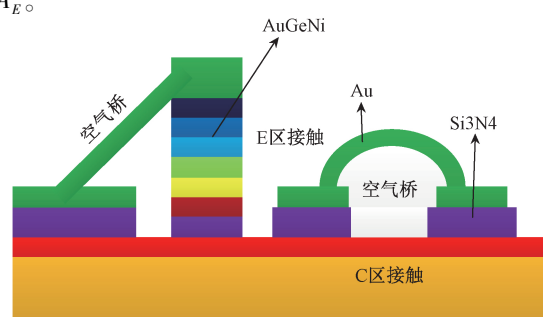
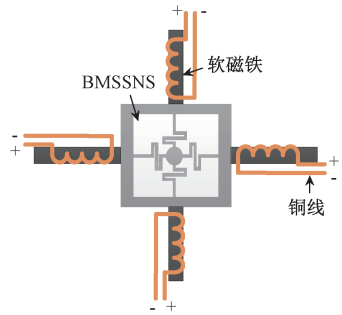


图 8　RTS 薄膜的剖面结构

Fig.8　Schematic of section structure of RTS membrane

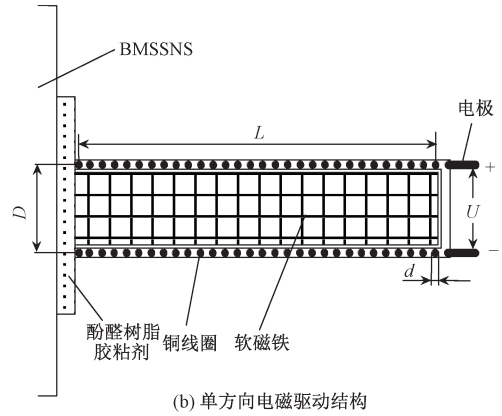
3.3　电磁驱动结构的设计

BMSSNS 采用电磁驱动的方式,将绕有铜丝的 4 个软磁铁放置在 $X+$,$X-$,$Y+$,$Y-$ 4 个方向,通过在线圈导线内通入电流,对坡莫合金棒产生电磁力,使合金棒沿着放置着电磁驱动器的方向移动,通过控制输入电流的大小和相位,来控制合金棒的运动,其具体结构如图 9(a)~(b)所示。



(a) BMSSNS的四方向电磁驱动排布方式

(a) Four-direction electromagnetic drive arrangement of BMSSNS



(b) 单方向电磁驱动结构

(b) Electromagnetic drive structure for single direction

图 9　BMSSNS 的电磁驱动结构

Fig.9　Electromagnetic drive structure of BMSSNS

驱动组件中,软磁铁采用铁镍合金材料,设计直径 D 为 0.8 mm,设计长度 L 为 4 mm。铜线线圈设计直径 d 为 0.1 mm,绕组匝数 W 为 40。电磁驱动与 BMSSNS 主结构之间通过绝缘材料酚醛树脂胶粘剂粘接。酚醛树脂胶粘剂具有优良的耐热性、耐老化性、耐水性、耐溶剂性、电绝缘性以及很高的粘结强度。

根据电磁力计算 BMSSNS 的驱动力:

$$F_t = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 S} \tag{10}$$

$$\Phi = \frac{IW}{R_n} \tag{11}$$

当软磁铁静止时:

$$F_t = \frac{1}{2\mu_0 S}\left(\frac{UW}{RR_n}\right) \tag{12}$$

式中:S 为工作气隙,即驱动截面的极面面积;Φ 为磁通;

μ_0 为真空磁导率;I 为电流;W 为绕组数目;R_n 为线圈磁阻;R 为线圈电阻。

基于电磁理论模型,可得到 BMSSNS 驱动力与驱动电压的关系。通过调整变压器驱动电压,可得到棒体在驱动器的作用下的受力情况,表 4 列出了上述 4 种工况下的驱动电压。

表 4 驱动电压与驱动力的关系

Table 4 The relationship between driving voltage and driving force

工况	所需驱动力/N	单驱动力/N	驱动电压/V
1	4×10^{-4}	2×10^{-4}	1.25
2	8×10^{-4}	4×10^{-4}	2.49
3	1.6×10^{-3}	8×10^{-4}	4.98
4	3.2×10^{-3}	1.6×10^{-3}	9.96

4 BMSSNS 的测控电路设计

基于建立的仿生数学模型,BMSSNS 的测控电路主要对采集的振动信号中的哥氏力和驱动力信息进行放大,滤波和解调,从而得到 BMSSNS 的姿态信息,再通过积分运算,得到其路径信息。算法主要包括如下步骤:

1)初始化,设置 BMSSNS 的初始位置(x、y、z)和假定的运动恒定速度 v;

2)基于惠斯通半桥检测电路采用 RTS 薄膜传感器分别提取 X 和 Y 方向的哥氏力和驱动力信息,并对进行差分运算;

3)对提取的哥氏力和驱动力信号采用放大电路进行运算放大,并采用双通道相关检测电路进行相敏检测和低通滤波,得到哥氏力和驱动力的幅值信息;

4)对处理的哥氏力和驱动力信号采用 AD 转换芯片进行数模转换;

5)基于家蝇后翅棒状的数学模型,在 DSP 中对数字化的哥氏力和驱动力信号采用解调算法进行解调,得到 BMSSNS 的翻滚角、俯仰角和偏航角等姿态信息;

6)基于 BMSSNS 的姿态信息,结合其初始位置和运动速度,通过积分运算,得到 BMSSNS 的路径信息。

BMSSNS 的测控电路主要由振动信号检测模块,RTS 接口电路模块,滤波电路模块,AD 转换模块和 DSP 解算模块组成,其总体框图如图 10 所示。

为了减少环境干扰,RTS 接口检测电路采用惠斯通半桥电路,对 X 方向和 Y 方向的振动信号分别进行差分运算,将两方向的信号分别相减,可消除环境干扰,另外,将两方向的信号分别叠加,可增强振动信号输出,其惠斯通半桥信号检测电路如图 11 所示。

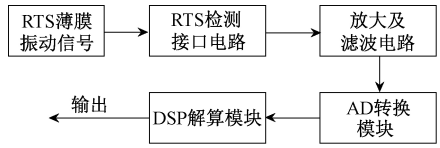


图 10 BMSSNS 的总体测控电路

Fig.10 Overall measurement and control circuit of BMSSNS

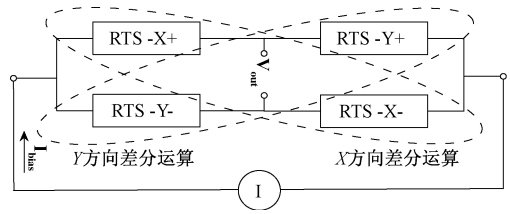


图 11 BMSSNS 的惠斯通半桥检测电路

Fig.11 Wheatstone half bridge detection circuit of BMSSNS

对惠斯通半桥输出的哥氏力,驱动力等振动信号,采用放大及滤波电路模块进行信号放大及滤波。该模块的核心检测器为放大器、相敏检测器(phase sensitive detector, PSD)和低通滤波器(low pass filter, LPF),如图 12 所示。

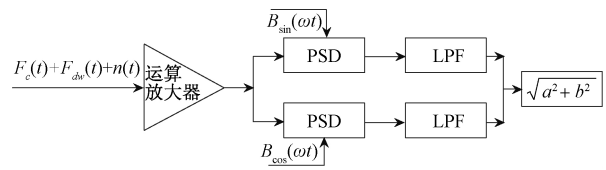


图 12 BMSSNS 的信号放大及滤波电路

Fig.12 Signal amplification and filter circuit of BMSSNS

图 12 中,$F_c(t)+F_{dw}(t)+n(t)$ 为被测信号,由有用信号 $F_c(t)+F_{dw}(t)$ 和随机噪声 $n(t)$ 组成,$B\sin(\omega t)$ 和 $B\cos(\omega t)$ 为一对正交的参考信号。被测信号分别与正交参考信号进行双通道互相关运算,即经过相敏检测器的相敏检测和低通滤波器的低通滤波后,上下两路的运算结果分别为:

$$V_{out1}=\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\int_0^T R_{xy}\mathrm{d}t=$$

$$\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\int_0^T(F_c(t)+F_{dw}(t)+n(t))B\sin(\omega t)\mathrm{d}t \tag{13}$$

$$V_{out2}=\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\int_0^T R_{xy}\mathrm{d}t=$$

$$\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\int_0^T(F_c(t)+F_{dw}(t)+n(t))B\cos(\omega t)\mathrm{d}t \tag{14}$$

将两路运算结果求均方根,当参考信号幅值为 1 时,可直接得到被测信号的幅值:

$$A=2\sqrt{(V_{out1})^2+(V_{out2})^2} \tag{15}$$

经过双通道互相关检测,其背景噪声得到抑制。而且,被测的哥氏力与驱动力信号不受参考信号相位波动的影响,具有较高的信噪比。

输出的哥氏力和驱动力信号经过 AD 模块的 AD 转换之后,输入 DSP 解算模块基于式(8)~(9)进行姿态解算,得到三方向的姿态角。同时,在该 DSP 解算模块,设置 BMSSNS 的初始位置(x、y、z)和假定的运动恒定速度 v,经过积分运算,可以得到 BMSSNS 的路径信息。

5　BMSSNS 的路径实验

在 350 Hz 驱动频率及 1.6×10^{-3} N 驱动力边界条件下,将具有 500 μm 质量块直径的 BMSSNS 按照预设路径以 2 m/s 的恒定速度移动,导出 RTS 数据,然后基于 MATLAB 软件对导出的数据信号进行处理,通过盲源分离和哥氏力驱动力解算,得到 BMSSNS 的解算路径,并与实际移动路径相比较,图 13 所示为 BMSSNS 采集的原信号与盲源分离信号曲线,图 14 所示为路径解算结果。

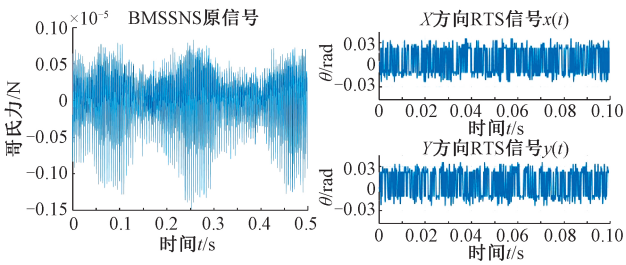


图 13　BMSSNS 采集的原信号与盲源分离信号

Fig.13　Original signal and blind source separation signal collected by BMSSNS

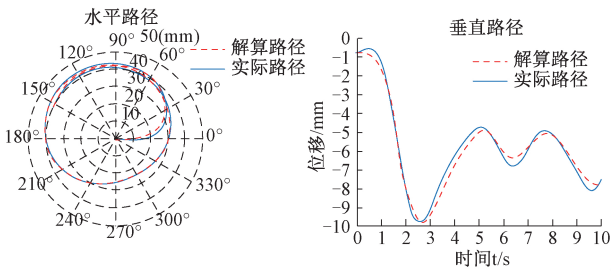


图 14　水平和垂直路径解算结果

Fig.14　Solution result of horizontal and vertical paths

路径实验研究结果表明,在 350 Hz 驱动频率及 1.6×10^{-3} N驱动力作用下,BMSSNS 通过哥氏力解算,其重标定后,短时水平和垂直路径定位精度可达 1.5 mm 和 0.5 mm,能有效检测传感器的运动路径。与传统惯导系统相比,该 BMSSNS 适用于小空间、高定位精度要求的需求场合。

6　结　　论

本文分析了家蝇的导航控制原理,并基于家蝇后翅微球杆结构和 RTS 微结构的力电耦合效应,设计了一种新型的仿生微型棒状导航传感器—BMSSNS。该传感器能够实现快速移动过程中的精确路径定位。针对设计的新型 BMSSNS 结构,本文采用微加工工艺进行加工、并对其电磁驱动结构进行设计。同时,设计了 BMSSNS 的测控电路,该电路采用 RTS 力电耦合效应的检测原理,对采集的振动信号中的哥氏力和驱动力信息进行放大,滤波和解调,从而得到 BMSSNS 的姿态信息,再通过积分运算,得到其路径信息。

基于 ANSYS 对该 BMSSNS 结构进行仿真分析。研究结果表明,在 350 Hz 驱动频率及 1.6×10^{-3} N 驱动力作用下,具有 500 μm 质量块直径的 BMSSNS 合金棒沿 X,Y 的三阶模态振幅为 88.45 μm,三阶固有频率为 2 003.42 Hz。该 BMSSNS 能有效检测传感器的俯仰,翻滚和偏航的姿态和路径信息,其短时水平和垂直路径定位精度分别达 1.5 和 0.5 mm。将 RTS 应用于该 BMSSNS 的哥氏力检测,提高其精度,缩小其体积,为设计新型航向控制传感器提供了新方向。

参考文献

[1] LIU G J, WANG A Y, WANG X B, et al. A review of artificial lateral line in sensor fabrication and bionic applications for robot fish [J]. Applied Bionics and Biomechanics, 2016, 2016:1-15.

[2] 张俊康, 孙广开, 李红, 等. 变形机翼薄膜蒙皮形状监测光纤传感方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(2): 66-72.
ZHANG J K, SUN G K, LI H, et al. Optical fiber shape sensing of polyimide skin for flexible morphing wing[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(2): 66-72.

[3] 陈国平, 王姝歆, 昂海松. 微扑翼飞行中的生物和仿生力传感器述评[J]. 传感器与微系统, 2008, 27(2): 14-18.
CHEN G P, WANG SH X, ANG H S. Review of biology and biomimetic force sensors for micro flapping wing flight[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2008, 27(2): 14-18.

[4] 陈健, 陈德勇, 王军波. 基于昆虫毛状感触器的微型流速传感器有限元模拟分析[J]. 传感技术学报, 2007, 20(4), 735-737.
CHEN J, CHEN D Y, WANG J B. Finite element

analysis of low-velocity gas flow microsensor based on trichoid sensillum of insects [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(4), 735-737.

[5] SANE S P, DIEUDONNE A, WILLIS M A, et al. Antennal mechanosensors mediate flight control in moths[J]. Science,2007, 315(5813): 863-866.

[6] ALEXANDER R M. Antennae as gyroscopes [J]. Science, 2007, 315(5813): 771-772.

[7] GUAN L, LIU SH, LI SH Q, et al. Study on polarized optical flow algorithm for imaging bionic polarization navigation micro sensor [J]. Optoelectronics Letters, 2018, 14 (3): 220-225.

[8] AFESOMEH O. Components and circuits for tunneling diode based high frequency[D]. Glasgow: University of Glasgow, 2016.

[9] 王哲, 于源华, 于占江, 等. 电磁振动式凝血过程动态测试传感器[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(1): 127-135.
WANG ZH, YU Y H, YU ZH J, et al. Blood coagulation dynamic testing sensor based on electromagnetic vibration[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(1):127-135.

[10] BATI M, SAKIROGLU S, SOKMEN I. Electron transport in electrically biased inverse parabolic double-barrier structure[J]. Chinese Physics B, 2016, 25(5):057307.

[11] BATI M. Resonant tunneling properties of inverted Morse double quantum barrier[J]. Chinese Journal of Physics, 2018, 56(2): 593-597.

[12] 李慧明, 邹璐, 菅傲群, 等. 基于共振光隧穿效应的角加速度传感器设计[J]. 计量学报, 2018, 39(5): 684-687.
LI H M, ZOU L, JIAN AO Q, et al. Design of angular accelerometer based on resonant optical tunneling effect[J]. Acta Metrologica Sinica, 2018, 39 (5): 684-687.

[13] 史建新. 超导量子比特的纠缠及宏观共振隧穿研究[D].南京: 南京大学, 2017.
SHI J X. Entanglement and macroscopic resonant tunneling research of superconducting qubit [D]. Nanjing: Nanjing University, 2017.

[14] ABDALLAH R M, DESSOUK A A S, ALY M H. The resonant tunneling diode characterization for high frequency communication systems [J]. Microelectronics Journal, 2018, 75:1-14.

[15] CHOI W S, LEE S A, YOU J H, et al. Resonant tunnelling in a quantum oxide superlattice [J]. Nature Communications, 2015, 6:7424.

作者简介

沈翔,2014 年和 2017 年于南京工业大学获得学士学位和硕士学位,现为东南大学仪器科学与工程学院博士研究生,主要研究方向为仿生导航传感器。
E-mail: shenxiang91@163.com

Shen Xiang received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Nanjing Tech University in 2014 and 2017, respectively. He is currently pursuing his Ph. D. degree in the School of Instrument Science and Engineering at Southeast University. His main research interest is bionic navigation sensor.

赵立业(通信作者),2006 年于东南大学获得博士学位,现为东南大学教授、博士生导师,主要研究方向为地球物理场辅助导航信息处理技术、新型传感器设计、智能系统及应用。
E-mail: liyezhao@seu.edu.cn

Zhao Liye (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Southeast University in 2006. He is currently a professor and Ph. D. supervisor at Southeast University. His main research interests include geophysical field-assisted navigation information processing technology, new sensor design and intelligent system and application.