

MEMS 磁力线聚集和垂动调制磁场传感器*

田武刚, 胡佳飞, 潘孟春, 赵建强, 胡靖华
(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:针对巨磁阻和磁隧道结等磁阻元件的 $1/f$ 噪声, 提出一种采用微机电系统的磁力线聚集和垂动调制磁场传感器。通过将被测磁场从低频转移到几 kHz, 实现对磁场的 DC/AC 转化, 从而减小了磁阻元件的 $1/f$ 噪声。基于该方案采用多层膜巨磁阻元件 AA002 制作了磁场传感器样品, 并进行了实验测试, 结果表明: 磁传感器样品的调制效率达到了 19.3%, 超过了已有的其他各种调制方案, 同时低频磁场的探测能力达到 $120\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$, 相比巨磁阻元件 AA002 提高了 40 多倍。

关键词: $1/f$ 噪声; 调制效率; 磁力线聚集器; 磁场传感器; 微机电系统

中图分类号: TP212.13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2014)04-0129-05

Magnetic field sensors with MEMS magnetic flux concentration and vertical motion modulation

TIAN Wugang, HU Jiafei, PAN Mengchun, ZHAO Jianqiang, HU Jinghua

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: $1/f$ noise is one of the main noise sources of giant magnetoresistance (GMR) and magnetic tunnel junction (MTJ), which can cause intrinsic detection limit at low frequency. Based on this fact, a sort of magnetic field sensor using microelectromechanical system (MEMS) flux concentrator and flux vertical motion modulation is proposed. The frequency of the measurement magnetic field was shifted from low to kHz ranges, which realized the translation of measurement magnetic field from DC to AC, thus $1/f$ noise of magnetoresistance element was mitigated. A prototype sensor was fabricated using multi-layered GMR element AA002, and the test was done. The results showed that the modulation efficiency achieves the level of 19.3%, which exceeds the efficiency of most existing sensors with other modulation schemes, and the low frequency magnetic detection ability is improved to $120\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$, which is enhanced by 40 times compared with that of the GMR element AA002.

Key words: $1/f$ noise; modulation efficiency; magnetic flux concentrator; magnetic field sensor; microelectromechanical system (MEMS)

近年来,高分辨力(1pT至1nT)磁传感器在医疗、军事、交通、航空航天和信息技术等方面具有广泛需求,尽管对于一些应用需求,可以选择磁通门、质子磁力仪、光泵磁力仪和超导量子干涉磁力仪以满足高分辨力的要求,但是这些传感器难以同时满足小体积和低功耗^[1-2]。在过去的三十几年中磁阻(Magnetoresistance, MR)传感器得到了快速发展,被认为是最有希望用来研发探测 pT 级弱磁场的低功耗小型磁传感器。磁阻传感器被引起极大兴趣的部分原因在于它们与标准的硅微电子处理相兼容并且具有较大的磁阻效应^[3]。例如,相比各向异性磁阻(Anisotropic magnetoresistance, AMR),巨磁阻(Giant magnetoresistance, GMR)和磁隧道结(Magnetic tunnel junctions, MTJ)在低磁场(<10G)下可以提供更大的输出信号^[4]。其

中,2006年制作成功的MgO基MTJ在室温下磁阻效应达到了410%^[5],2007年MTJ磁传感器探测能力达到了在500kHz时 $2\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的水平(在2.5Hz时为 $330\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$)^[6]。但是由于热磁化波动造成其固有的 $1/f$ 噪声^[7-9],使得磁传感器在低频(大约0.1Hz)探测能力相比于高频(1kHz以上)下降了2到3个数量级。因此,减小 $1/f$ 噪声已成为实现MR磁传感器pT级分辨力的一个重要挑战。

MR磁传感器的电子 $1/f$ 噪声一般可以通过调制电源得到减小,但是这种方法对于减少 $1/f$ 电阻磁噪声没有效果。近年,磁力线调制方案已经被提出用于减小 $1/f$ 电阻磁噪声。Jander等将斩波技术用于MTJ传感器^[10],低频磁场的探测能力只有微小的提高,原因在于外围设备引入较

* 收稿日期:2013-12-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51175507);教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20124307120012)

作者简介:田武刚(1978—),男,陕西扶风人,讲师,博士,E-mail:wgtian@nudt.edu.cn

大的附加噪声。目前最有发展前途的方案是 Edelstein 等提出的基于 MEMS 的磁力线聚集器调制方案^[11],分别制造了采用静电梳、热调制、扭梁和悬臂梁的几种原型传感器,磁力线聚集器调制方案使 $1/f$ 噪声显著减小得到了实验验证^[12-16]。然而,高调制效率与简单的 MEMS 磁力线聚集调制结构似乎是相互冲突的。薄膜悬臂梁驱动结构简单,只获得了 0.11% 的调制效率^[14]。而超过 10% 的调制效率依赖于磁力线聚集器和复杂的 MEMS 执行器,例如静电梳和扭梁驱动^[15-16]。

1 磁力线聚集和垂动调制原理

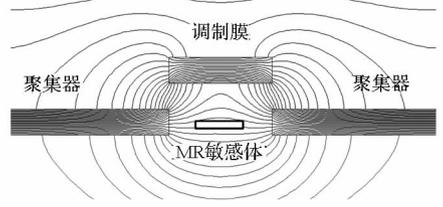
磁力线聚集器被广泛用于增强小型磁传感器的灵敏度,许多已有的调制方案是基于 MEMS 执行器驱动磁力线聚集器运动的思路设计的。类似地,磁力线聚集和垂动调制方案源于已有的方案,如图 1(a)和图 1(b)所示,采用了一对磁力线聚集器和一片软磁性调制膜,MR 磁敏感体位于一对磁力线聚集器中间的空气间隙中,调制膜位于 MR 敏感体的上方,并被一个垂直运动的 MEMS 执行器驱动^[17-18]。

调制膜在 MEMS 执行器驱动下做上下振动,对于一个被测量的外部静态磁场来说,当调制膜远离 MR 磁敏感体时,大部分磁力线从 MR 磁敏感体处的空气间隙中通过,如图 1(a)所示;相反地,当调制膜靠近 MR 磁敏感体时,磁力线大都从调制膜中通过,MR 磁敏感体处磁通密度急剧下降。因此,当调制膜周期性振动时,位于空气间隙中的 MR 敏感元件探测的是一个交变磁场,如图 1(c)所示,交变磁场的频率与 MEMS 执行器振动频率一致。通过这种方式,外部静态磁场 B_{DC} 被转换为高频磁场 B_{AC} ,实现对磁场的 DC/AC 转化,使 MR 磁敏感体的 $1/f$ 噪声得到极大抑制,如图 1(d)所示,信噪比得到提高,从而使 MR 传感器的静态磁场探测能力可以得到大幅提高。

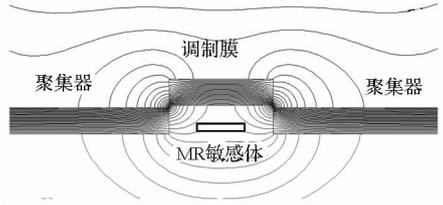
磁力线垂动调制方案中,由于调制膜高度的位置和 MR 磁敏感体处的磁感应强度不是一个严格的正弦函数关系,因此调制后的高频磁场信号中包含一系列谐波分量,但是其基波信号具有最大的信噪比,可以用来感应磁场信号。因此,磁力线垂动调制方案中 MR 传感器输出电压信号滤除谐波分量后可以表示为 V_o :

$$V_o = eGV_sSB_e \sin(2\pi ft + \varphi) \quad (1)$$

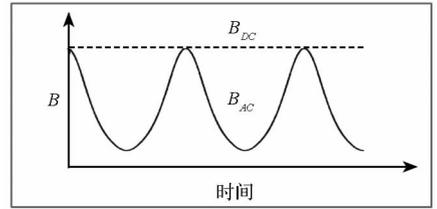
其中, e 为调制效率, G 为磁力线聚集器的磁场放大倍数, V_s 为 MR 敏感元件的供电电压, S 为 MR 传感器没有磁力线聚集器时的灵敏度, B_e 为外部



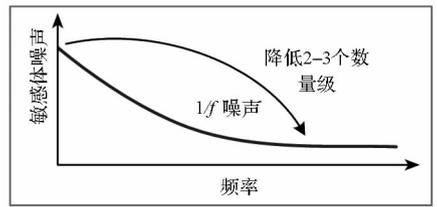
(a) 调制膜远离敏感体时的磁力线分布
(a) Magnetic flux distributions when modulation film leaving MR



(b) 调制膜靠近敏感体时的磁力线分布
(b) Magnetic flux distributions when modulation film getting close to MR



(c) 敏感体处的磁感应强度波形
(c) Waveform of the magnetic flux density in MR place



(d) 通过调制敏感体噪声的下降示意图
(d) MR noise

图 1 磁力线聚集和垂动调制原理
Fig. 1 Principle of magnetic flux concentration and vertical motion modulation

测量磁场, f 为垂动 MEMS 执行器振动频率,即调制频率, φ 为初相角。另外 G 和 e 分别定义为:

$$G = B_{nf}/B_e \quad (2)$$

$$e = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{2B_{nf}} \times 100\% \quad (3)$$

这里, B_{nf} 为有磁力线聚集器没有调制膜时空气间隙中的磁感应密度, B_{\max} 和 B_{\min} 分别为空气隙中的最大和最小磁感应密度。

MR 磁传感器的静态探测能力在没有调制时定义为:

$$B_{\text{detect}} = \frac{V_{\text{noise}}}{V_s S} \quad (4)$$

这里, V_{noise} 是 MR 固有的低频等效噪声电压。

对于磁力线垂动调制磁传感器, 静态磁场探测能力为:

$$B_{\text{detect-M}} = \frac{V_{\text{noise-f}}}{eGV_s S} \quad (5)$$

这里, $V_{\text{noise-f}}$ 是 MR 在调制频率处固有的等效噪声电压。

一般, V_{noise} 是 $V_{\text{noise-f}}$ 的几百倍, 假设 V_{noise} 是 $V_{\text{noise-f}}$ 的 100 ~ 1000 倍, 磁场放大倍数 G 和调制效率 e 分别为 10 和 20%, 那么 B_{detect} 将是 $B_{\text{detect-M}}$ 的 200 ~ 2000 倍。即通过磁力线聚集调制使 MR 传感器的静态探测能力急剧提高。

2 磁传感器设计和制作

2.1 磁传感器设计

采用 MEMS 磁力线聚集和垂动调制的磁场传感器主要组成部分包括: MR 敏感体、MEMS 磁力线聚集器、MEMS 驱动结构、软磁性调制膜、固定基底等。磁传感器结构如图 2 所示, 可以看出主要组成部分的相对位置关系。

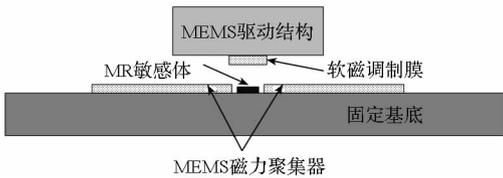


图 2 磁传感器结构示意图

Fig. 2 Structure sketch of magnetic filed sensor

2.1.1 MR 敏感体选型

为了简化垂动调制传感器样机结构, MR 敏感元件使用了 NVE 公司的多层膜 GMR 传感器裸片 AA002^[19], 它内部包含由 4 个 GMR 电阻构成的一个全电桥, 且含有一对磁力线聚集器用于放大被测磁场, 磁场放大倍数约为 10, 其中两个电阻位于一对磁力线聚集器中间的空气隙中用来测量外部磁场, 另外两个电阻被磁力线聚集器所屏蔽。GMR 传感器 AA002 在 5V 供电工作时, 在频率 1Hz 附近噪声约为 $1000\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$, 但当频率大于 5kHz 时, 噪声降至约 $10\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

2.1.2 磁力线聚集器

为了进一步增大磁场放大倍数, 提高磁传感器的探测能力, 在 GMR 传感器 AA002 裸片的外部又设计了一对外部磁力线聚集器, 如图 3 所示。外磁力线聚集器镂空的地方主要是为了引出

AA002 的电极, 它对磁场放大倍数影响不大。

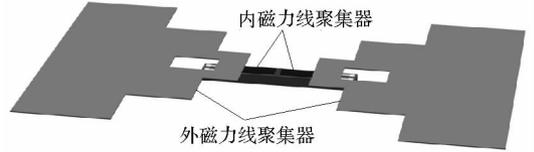


图 3 磁力线聚集器结构

Fig. 3 Structure of magnetic flux concentrators

2.1.3 MEMS 驱动结构

MEMS 驱动结构的谐振频率直接决定了磁场 DC/AC 转换后交变磁场的频率, 振动幅度则主要影响调制效率。磁力线聚集和垂动调制方案的仿真研究表明: 当驱动结构的振动幅度达到 $10\mu\text{m}$, 磁场调制效率将大于 20%^[18]。为了达到较高的磁场调制频率和调制效率, 要求 MEMS 驱动结构谐振频率大于 5kHz 且振动幅度达到 $10\mu\text{m}$ 。

综合考虑驱动结构的谐振频率、频率稳定性、振幅大小和可控性以及使用方便性等因素, 本文设计了一种压电桥 MEMS 驱动结构, 如图 4 所示。MEMS 压电桥驱动结构的一阶谐振模态为沿垂直方向的振动, 如图 5 所示, 可用于磁力线垂动调制方案。设计的压电桥驱动结构尺寸为: 硅长度 10mm, 宽度 1mm, 厚度 $100\mu\text{m}$; 电压陶瓷片长度 8mm, 宽度 1mm, 厚度 $50\mu\text{m}$ 。压电桥一阶谐振模态频率值约为 8kHz。



图 4 设计的 MEMS 压电桥驱动结构

Fig. 4 MEMS piezoelectric bridge driving structure



图 5 MEMS 压电桥的一阶谐振模态

Fig. 5 First order resonance mode of MEMS piezoelectric bridge

2.1.4 软磁调制膜

在磁力线聚集和垂动调制磁场传感器中, 软磁调制膜附着在 MEMS 驱动结构上 (如图 2 所示), 上下振动实现磁场的 DC/AC 转化, 是垂动调制的核心结构。要求调制膜的相对磁导率较高 (大于 1000), 并且要有一定的厚度 (大于 $2\mu\text{m}$)。软磁性调制膜的形状为长方形, 大小与 GMR 传感器 AA002 裸片内部磁力线聚集器中间的空气隙尺寸接近, 调制膜位于 MEMS 压电桥驱动结构中心, 且位于硅结构的底部。

2.2 磁传感器制作

磁传感器制作过程中采用分层制作再键合的方式,如图 6 所示,主要分成三层,底层包括 GMR 敏感元件和电极;中间层为连接框架,主要用于调整传感器垂直方向的连接高度;上层包括 MEMS 驱动结构、外磁力线聚集器和调制膜。

MEMS 驱动结构中硅结构采用光刻和湿法腐蚀工艺制作,然后在硅桥结构上键合压电片即可。

采用镍铁(NiFe)合金作为调制膜材料,这是因为 NiFe 膜的软磁性能好,相对磁导率较高,可以用电镀法制备,且可以达到较厚的厚度。调制膜的制备工艺过程如表 1 所示。外磁力线聚集器的制备工艺与调制膜的完全一致。

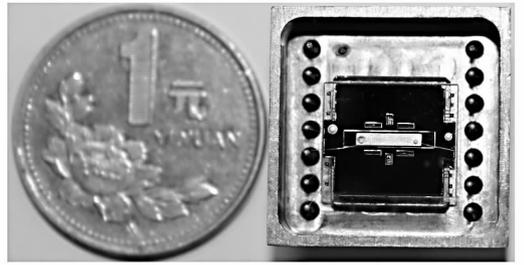


图 7 磁场传感器样品照片

Fig. 7 Picture of magnetic field sensor sample

3 磁传感器测试

采用磁阻型弱磁传感器特性自动测试系统^[20]对制作的磁传感器样品进行了测试。如图 8 所示,该测试系统中磁传感器被放置在三层磁屏蔽桶中,以消除周围环境的磁干扰,亥姆霍兹线圈可以产生 -24 ~ 24G 的可调磁场。磁传感器的输出信号通过前置放大器后连接到 DSP 系统和频谱分析仪,分别测量传感器的响应曲线和噪声谱。

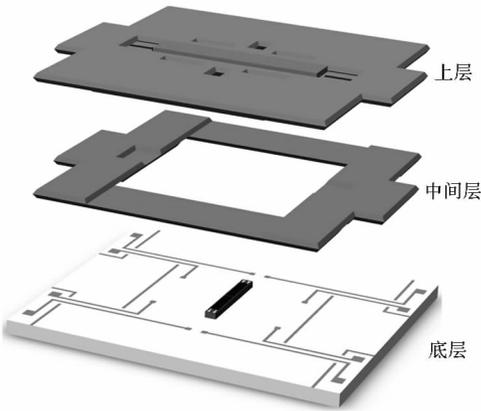


图 6 传感器分层制作

Fig. 6 Sensor manufacture by layering

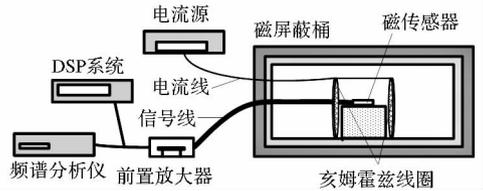


图 8 磁传感器测试系统示意图

Fig. 8 Testing system schematic of magnetic sensor

表 1 调制膜的制备工艺流程

Tab. 1 Fabrication process of flux modulation film

主要步骤	示意图	工艺过程
1		制备导电种子层
2		光刻调制膜形状
3		电镀调制膜
4		去掉光刻胶

注: 硅 Cr/Cu 光刻胶 NiFe 膜

GMR 传感器 AA002 裸片固定在底层的玻璃底基上。三层结构制作完成后,通过控制中间层的厚度;最后将三层结构通过键合固定到玻璃基底上,这样便实现了传感器的组装。组装完成后,再进行引线 and 传感器封装,图 7 所示为制作的传感器样品。

GMR 传感器 AA002 裸片和制作的传感器样品在同样的条件下进行了响应曲线和噪声谱测试。同时比较了一个只有外部磁力线聚集器没有调制的磁传感器的输出响应曲线,这样就可以得到外磁力线聚集器的放大倍数。

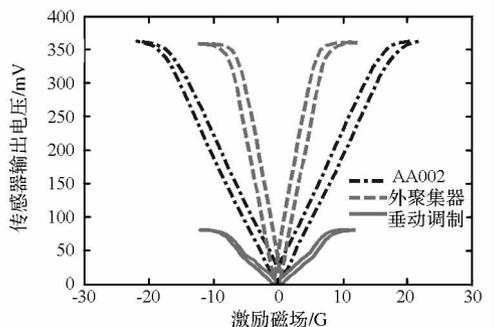


图 9 三种类型传感器的响应曲线

Fig. 9 Response curve of three type sensors

图 9 给出了三种类型传感器(AA002 裸片、只有外部磁力线聚集器没有垂动调制传感器、带有外磁力线聚集器件和垂动调制的磁传感器),采用直流 5V 供电在外部激励磁场下(0 → -22G → 0 → 22G

→0)的响应曲线,根据曲线可以计算传感器的灵敏度。其中,AA002裸片灵敏度 $S_{AA002} = 3.88\text{mV/V/G}$,带有外部磁力线聚集器但没有垂动调制的传感器灵敏度 $S_{\text{EFC}} = 9.98\text{mV/V/G}$,同时带有磁力线聚集器和垂动调制传感器灵敏度 $S_{\text{VMM}} = 1.93\text{mV/V/G}$ 。

因此,外部磁力线聚集器的磁场放大倍数为 $G_{\text{EFC}} = S_{\text{EFC}}/S_{AA002} \approx 2.6$ 。垂动调制效率 $e = 100\% \times (S_{\text{VMM}}/S_{\text{EFC}}) \approx 19.3\%$,这已经超过了已有的其他各种调制方案^[12-16]。

图10给出了AA002裸片与磁力线聚集和垂动调制磁传感器在1Hz~10kHz频率范围内的噪声和信号频谱。

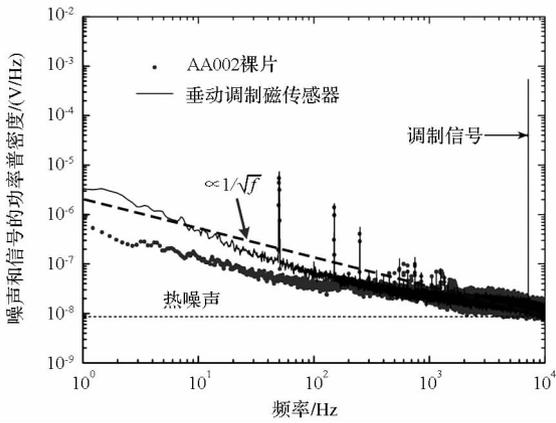


图10 传感器的噪声和信号功率谱密度曲线

Fig. 10 Noise and signal spectrum of sensors

图10中存在一些噪声突出部分,这些是50Hz电力线频率及其谐波干扰。AA002裸片的噪声水平是 $1000\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ (@1Hz) 小于垂动调制原型传感器的噪声水平 $2000\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ (@1Hz),但是AA002裸片与磁力线聚集和垂动调制传感器的噪声水平在调制频率7.15kHz附近是相同的,均为 $12\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ (大约为热噪声的水平)。因此,当磁场信号(例如地磁场)从1Hz调制到高频处,相比于AA002,磁力线聚集和垂动调制传感器的噪声大约下降了100倍。AA002裸片低频磁场探测能力为: $1000\text{nV}/(5\text{V} \cdot 3.88\text{mV/G}) \approx 5.2\text{nT}$ 。磁力线聚集器和垂动调制传感器样品的低频磁场探测能力为: $12\text{nV}/(0.193 \times 2.6 \times 5\text{V} \times 3.88\text{mV/G}) \approx 0.12\text{nT} = 120\text{pT}$ 。磁力线聚集和垂动调制原型传感器的磁场探测能力比AA002裸片高出40多倍。

4 结论

磁力线聚集和垂动调制方案可以大大减小

MR传感器的1/f噪声,目前基于AA002裸片制作的传感器样品低频探测能力得到了较大提高。可以预测,通过进一步提高垂动调制效率和磁力线聚集器的放大倍数,以及将AA002裸片换为灵敏度更高的敏感体,如磁隧道结,则有望使MEMS磁力线聚集和垂动调制磁阻传感器的低频探测能力提高至几个 $\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

参考文献 (References)

- [1] Edelstein A S. Advances in magnetometry [J]. Journal of Physics-Condensed Matter, 2007, 19: 165217.
- [2] Edelstein A S, Burnette J, Fischer G A, et al. Advances in magnetometry through miniaturization [J]. Journal of Vacuum Science & Technology A, 2008, 26(4): 757-762.
- [3] Wolf S A. Spintronics: a spin-based electronics vision for the future [J]. Science, 2001, 294(5546): 1488-1495.
- [4] Daughton J M. GMR and SDT sensor applications [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000, 36(5): 2773-2778.
- [5] Yuasa S, Fukushima A, Kubota H, et al. Giant tunneling magnetoresistance up to 410% at room temperature in fully epitaxial Co/MgO/Co magnetic tunnel junctions with bcc Co (001) electrodes [J]. Applied Physics Letters, 2006, 89: 042505.
- [6] Chaves R C, Freitas P P, Ocker B, et al. Low frequency picotesla field detection using hybrid MgO based tunnel sensors [J]. Applied Physics Letters, 2007, 91: 102504.
- [7] Ozbay A, Gokce A, Flanagan T, et al. Low frequency magnetoresistive noise in spin-valve structures [J]. Applied Physics Letters, 2009, 94: 202506.
- [8] Ingvarsson S, Gang X, Parkin S S P, et al. Low-frequency magnetic noise in micron-scale magnetic tunnel junctions [J]. Physical Review Letters, 2000, 85(15): 3289-3292.
- [9] Jiang L, Nowak E R, Scott P E, et al. Low-frequency magnetic and resistance noise in magnetic tunnel junctions [J]. Physical Review B, 2004, 69: 054407.
- [10] Jander A, Nordman C A, Pohm A V, et al. Chopping techniques for low-frequency nanotesla spin-dependent tunneling field sensors [J]. Journal of Applied Physics, 2003, 93(10): 8382-8384.
- [11] Edelstein A S, Fischer G A. Minimizing 1/f noise in magnetic sensors using a microelectro-mechanical system flux concentrator [J]. Journal of Applied Physics, 2002, 91(10): 7795-7797.
- [12] Edelstein A S, Fischer G A, Pedersen M, et al. Progress toward a thousand fold reduction in 1/f noise in magnetic sensors using an ac microelectromechanical system flux concentrator [J]. Journal of Applied Physics, 2006, 99, 08B317.
- [13] Wang W Z, Jiang Z Y. Thermally modulated flux concentrator for minimizing 1/f noise in magnetoresistance-based field sensors [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(11): 4003-4006.
- [14] Guedes A, Patil S B, Cardoso S, et al. Hybrid magnetoresistive microelectromechanical devices for static field modulation and sensor 1/f noise cancellation [J]. Journal of Applied Physics. 2008, 103: 07E924.

(下转第168页)

即没有发现社区。但 LL 模型和 Q 模型对多种不同网络都获得了较高的 Q 模块度,表明采用这两种模型进行社区挖掘将具有较好的正确性。同时,LL 模型算法的计算复杂性为 $O(n)$,可适用于大规模复杂网络的社区挖掘。

4 总结

FDCD 算法在不增加计算复杂性的前提下,通过多种力导向模型对网络节点进行分类,从而发现复杂网络中的独立社区。实验表明,基于 FR、LL、KK、Q 这 4 种力导向模型的算法能较好地识别出各类实际社会网络中的社区,其中基于 LL 模型的算法不仅具有较小的计算复杂性,而且在各种复杂网络识别中获得最高的 Q 模块度。今后工作将围绕两个方面展开,一是如何定义更好的社区初始化策略,二是根据复杂网络特征,设计更优的节点与社区之间的力导向模型。

参考文献 (References)

- [1] Gimn M, Newman M E J. Community structure in social and biological networks[C]//Proceedings of the National Academy of Sciences, 2002;7821-7826.
- [2] Fortunato S. Community detection in graphs[J]. Physics Reports, 2010, 486(3): 75-174.
- [3] Michelle Girvan, Newman M E J. Fast algorithm for detection community structure in networks[J]. Physical Review E, 2004, 69(2): 66-113.
- [4] Newman M E J. Modularity and community structure in networks [C]//Proceedings of the National Academy of Sciences, 2006: 8577-8582.
- [5] Pons P, Latapy M. Computing communities in large networks using random walks[J]. LNCS 2005. 3733: 284-293.
- [6] Tamassia Eades. A heuristic for graph drawing[J]. Congressus Numerantium, 1984,42: 149-160.
- [7] Kamada T, Kawai S. An algorithm for drawing general undirected graphs[J]. Information Processing Letters, 1989. 31(1): 7-15.
- [8] Fruchterman T M J, Reigold E M. Graph drawing by force-directed placement [J]. Software-Practice and Experience, 1991, 21(11): 1129-1164.
- [9] Noack A. An energy model for visual graph clustering[C]//Graph Drawing, Lecture Notes in Computer Science, 2004;425-436.
- [10] Andreas Noack, Randolph Rotta. Multi-level algorithms for modularity clustering [J]. Experimental Algorithms, Lecture Notes in Computer Science, 2009. 5526: 257-268.
- [11] Bressan, Yi Song, Stéphane. Force-directed layout community detection [J]. Database and Expert Systems Applications, Lecture Notes in Computer Science, 2013. 8055: 419-427.
- [12] 水超, 李惠. 基于“次中心”的社区结构探寻算法[J]. 计算机应用, 2012, 8: 2154-2158.
- [13] SHUI Chao, LI Hui. A new community detection algorithm base on secondary point detecting [J]. Journal of Computer Applications, 2012, 8: 2154-2158. (in Chinese)
- [14] Noack A. Modularity clustering is force-directed layout [J]. Physical Review E, 2009, 79(2): 26-102.
- [15] Edelstein A S, Burnette J E, Fischer G A, et al. Validation of the microelectromechanical system flux concentrator concept for minimizing the effect of 1/f noise[J]. Journal of Applied Physics, 2009, 105, 07E720.
- [16] Guedes A, Patil S B, Wisniowski P, et al. Hybrid magnetic tunnel junction-MEMS high frequency field modulator for 1/f Noise suppression [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(11): 2554-2557.
- [17] Tian W G, Hu J F, Pan M C, et al. Flux concentration and modulation based magnetoresistive sensor with integrated planar compensation coils [J]. Review of Scientific Instruments. 2013, 84, 035004.
- [18] Pan M C, Hu J F, Tian W G, et al. Magnetic flux vertical motion modulation for 1/f noise reduction of magnetic tunnel junctions [J]. Sensors and Actuators A - Physical, 2012, 179, 92-97.
- [19] NVE Corporation. GMR Sensor Catalog [EB/OL]. <http://www.nve.com>.
- [20] 田武刚, 胡佳飞, 王伟, 等. 磁阻型弱磁传感器特性自动测试系统 [J]. 传感技术学报, 2013, 26(2): 200-204.
- Tian Wugang, Hu Jiafei, Wang Wei, et al. Automated testing system for characteristics of magnetoresistive weak magnetic field sensors [J]. Chinese Journal of Sensor and Actuators, 2013, 26(2): 200-204. (in Chinese)

(上接第 133 页)