

# 基于反馈的时间差磁通门随机共振研究

卢 浩<sup>1,2</sup>,程德福<sup>1,2</sup>,王言章<sup>1,2</sup>,赵兰霞<sup>1,2</sup>

(1. 吉林大学仪器科学与电气工程学院, 吉林长春 130061; 2. 吉林大学地球信息探测仪器教育部重点实验室, 吉林长春 130061)

**摘 要:** 时间差型磁通门具有随机共振效应,合理利用其随机共振效应可以提高其输出性能.将反馈控制环节应用于时间差型磁通门,提出应用反馈控制对随机共振特性进行调节的方法.以郎之万方程为模型对输出时间差量进行仿真观察,分别研究线性反馈以及立方反馈对系统参数以及噪声响应的影响,得到线性反馈可以降低矫顽力大小,立方反馈可以调整随机共振最适噪声值的结论.对模型进行的 MATLAB 仿真证明,为时间差型磁通门添加反馈控制环节有利于系统参数的调节、使系统可以主动调整随机共振特性.灵敏度相比未添加反馈时提高了 50%.

**关键词:** 反馈控制; 时间差型磁通门; 随机共振

**中图分类号:** O211.6      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2012)08-1701-04

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.08.033

## A Study on the Stochastic Resonance Model of Time-Difference Fluxgate System with Feedback Control

LU Hao<sup>1,2</sup>, CHENG De-fu<sup>1,2</sup>, WANG Yan-zhang<sup>1,2</sup>, ZHAO Lan-xia<sup>1,2</sup>

(1. College of Instrumentation and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130061, China;

2. Key Laboratory of Geo-Exploration Instrumentation, Ministry of Education, Jilin University, Changchun, Jilin 130061, China)

**Abstract:** In this paper, a method for adjusting parameters of Time-Difference Fluxgate system is proposed, where feedback module is applied. Based on the observation of time-difference output of simulated Langevin equation, research is conducted on the influence of both linear feedback and cubic feedback on system parameters and stochastic resonance effect, and conclusions that linear feedback lowers coercivity, and cubic feedback adjusts optimal stochastic resonance noise are drawn. Numerical simulations of the models with MATLAB shows that addition of feedback module makes it more convenient for the Time-Difference Fluxgate system to adjust its internal parameters and control the stochastic resonance effect, which improves the performance of the system considerably. Compared with no feedback module, the sensitivity is enhanced by 50%.

**Key words:** feedback control; time-difference fluxgate; stochastic resonance

## 1 引言

磁通门传感器具有体积小、重量轻、功耗低等特点,其在磁场检测方面具有极为广阔的应用.作为仅有的几类矢量传感器之一,当前磁通门研究的首要问题是如何提高磁通门传感器的灵敏度.

提高现有的磁通门传感器灵敏度的难点在于如何降低因结构不对称、材料不均匀等因素而产生的奇次谐波噪声.国内外尝试多种方法对奇次谐波进行压制:改进探头结构、PCB 探头、改进驱动方式等,取得了一定的效果,但是并没有从根本上解决奇次谐波噪声问题.2003年由美国海军与瑞典国防部联合立项研制的以滞留时间差(Residence Time Difference, RTD)为检测参数的时间差型磁通门,因基于时间差检测原理的磁通门不受

奇次谐波噪声的影响,因此有望进一步提高当前磁通门的灵敏度<sup>[1]</sup>.

L. Gammaitoni 等人提出时间差型磁通门依赖于矩形比大的磁芯,使用尽量简化的电路设计以减小随机噪声对输出特性的影响<sup>[2]</sup>,但这种设计只能被动适应噪声环境.

本文在研究时间差型磁通门结构及其噪声响应特性的前提下<sup>[3]</sup>,根据随机共振理论,设计利用反馈控制调节时间差型磁通门系统参数的仿真模型,可通过调整其噪声响应特性来提高灵敏度.仿真研究表明,时间差型磁通门的噪声响应特性受系统参数的影响较大,对其进行反馈控制有着积极的意义.本方法的提出可以减小时间差型磁通门对磁芯特性的依赖,扩展了时间差型磁通门的使用范围,有利于时间差型磁通门的后续研究.

## 2 时间差型磁通门原理及随机共振现象

时间差型磁通门的工作原理为:当对称的激励磁场周期性过饱和激励磁芯时,磁芯的工作状态即周期性往返于其正负饱和状态.定义磁芯状态处于正负饱和状态的时间分别为  $T_+$ 、 $T_-$ ,其差值为  $\Delta T$ .被测磁场的存在会改变正负饱和状态的时间,通过对时间差值  $\Delta T$  的测量可表征被测磁场.

为理解时间差型磁通门的噪声响应特性,首先考虑其在无噪声环境下的输出特性.设激励磁场  $A \sin(\omega t)$ ,被测磁场为  $\epsilon$ ,磁芯对应的矫顽力为  $H_c$ .若磁芯状态在稳态间迁移时间可以忽略,可得出此条件下的时间差表达式<sup>[1]</sup>,如式(1)所示:

$$\Delta T = \frac{2}{\omega} \left[ \sin^{-1} \left( \frac{H_c + \epsilon}{A} \right) - \sin^{-1} \left( \frac{H_c - \epsilon}{A} \right) \right] \quad (1)$$

其中  $A > H_c$ .

在保证被测磁场不变的条件下,依据式(1),分别取  $f = 1\text{Hz}$ ,  $H_c = 0.5\text{A/m}$ ,  $\epsilon = 0.1\text{A/m}$  所得的时间差随激励幅度变化图,如图 1 所示.

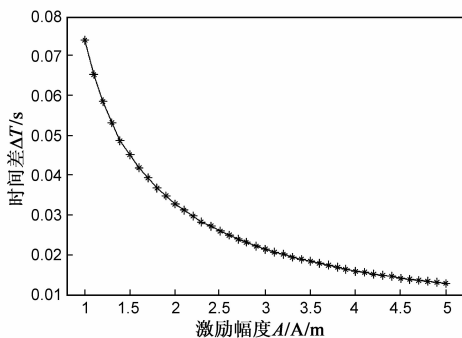


图1 无噪声条件下,时间差随激励幅度变化图

由图 1 可见,随着激励幅度  $A$  降低,表征被测磁场的时差有着近指数式上升变化.这不仅能提高时差磁通门灵敏度,而且可以极大地降低时差型磁通门的功耗.

当被测磁场含有不同强度噪声时,即  $\epsilon = C + \xi(t)$ ,  $C$  为常量,  $\xi(t)$  为高斯白噪声信号,且  $[\xi(t)\xi(0)] = 2D\delta(t)$ .时间差型磁通门的输出特性如图 2 所示.在后文中,将激励幅度、被测磁场与噪声相关幅度进行归一化处理,使用无量纲量进行仿真.令  $f = 1\text{Hz}$ ,  $C = 0.1$ .

由图 2 可知,时差的输出会受噪声的影响而达不到无噪声时的理想值.即使低强度噪声也将使输出的时差相比无噪声条件时下降约 20% ~ 40%,且激励幅度越小,时差量受噪声的影响越大.同时在噪声强度轴上存在最适噪声强度值,使  $\Delta T$  受噪声影响最小,约为无噪声条件下的 70% ~ 90%.不同激励幅度激励的时差型磁通门输出均存在类似现象.

图 2 为时间差型磁通门的随机共振现象.根据 An-

ishchenko 等人的理论<sup>[4]</sup>,改变时间差型磁通门系统参数可以改变其噪声响应特性.但是时间差型磁通门的系统参数为与磁芯特性相关的固定参数,无法直接进行调节,因此现有的时间差型磁通门只能对噪声环境被动适应.

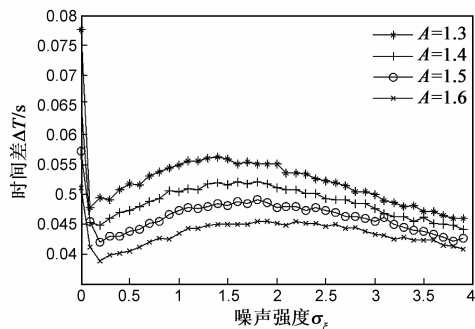


图2 噪声环境下,不同激励幅度的时间差型磁通门输出特性曲线

## 3 时间差型磁通门的反馈控制

近些年随机共振相关的研究表明<sup>[5,6]</sup>,对于难以直接改变参数的随机共振系统,可以通过设计适当的反馈对系统参数进行间接调节,达到改善系统参数,进而改善其性能的目的.本文设计使用反馈结构对时间差型磁通门进行改进,用以解决其在噪声环境只能被动适应的问题.

时间差磁通门系统特性可以用郎之万方程进行近似描述:

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{dV(x)}{dx} + u(t) \quad (2)$$

其中,  $V(x) = -\frac{1}{2}ax^2 + \frac{1}{4}bx^4$ ,  $a, b$  为正数,本文取 1, 2;  $u(t)$  为输入信号,  $u(t) = s(t) + \epsilon$ ,  $s(t)$  是激励信号.

由式(2)可见,系统方程最直接的反馈项是线性反馈和立方反馈<sup>[7]</sup>.

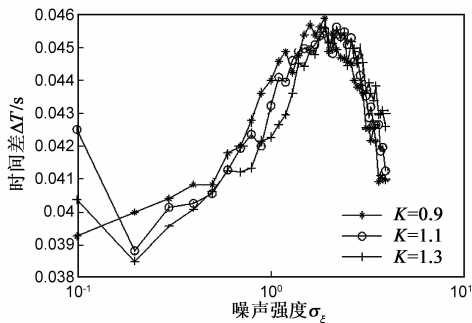
当反馈函数为线性反馈  $px$  时,仿真模型相对应的系统方程为:

$$\dot{x} = Kx - bx^3 + u(t) \quad (3)$$

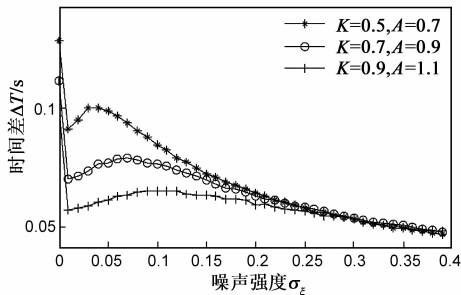
其中,  $K = a - p$ .

线性反馈对应的直接表现为磁芯的矫顽力会随反馈系数的改变而改变.在保持激励幅度以及被测磁场不变的情况下,不同线性反馈系数对应的噪声响应如图 3 所示.可见在一定范围内仅改变矫顽力对时间差型磁通门的噪声响应特性影响较小.超过特定范围的线性反馈调整将会使系统噪声响应特性发生根本变化,无随机共振现象出现.

然而,通过线性反馈降低矫顽力的积极意义在于随着矫顽力的降低可以进一步降低激励幅度,进而得到改善的输出特性,并提高时间差型磁通门的灵敏度.

图3 不同非线性反馈的时间差型磁通门输出特性曲线( $A=1.6$ )

保持被测磁场不变,依据不同的反馈系数及激励幅度得到的时间差型磁通门噪声响应特性如图4所示。

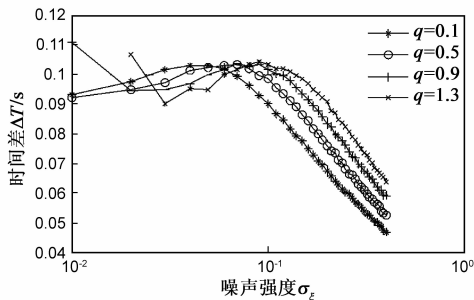
图4 不同 $K, A$ 时的时间差型磁通门噪声响应特性曲线

由图4可见,当激励幅度的降低至原激励幅度的63%,其随机共振峰值可以上升至原峰值的1.57倍左右.因此,线性反馈配合调整激励幅度可以改善噪声响应特性,使时间差型磁通门在最适噪声条件下的灵敏度相比原条件提高了50%左右。

当反馈函数为立方反馈  $qx^3$  时,对应的系统方程为:

$$\dot{x} = ax - (b - q)x^3 + u(t) \quad (4)$$

引入立方反馈可以有效的改变噪声响应特性曲线的最适噪声强度值,进而达到对噪声主动适应的目的.如图5所示的是不同立方反馈系数时的时间差型磁通门噪声响应曲线。

图5 不同立方反馈的时间差型磁通门随机共振曲线( $A=0.7$ )

由图5可见,通过控制立方反馈的系数,可以控制时间差型磁通门的最适噪声在一定范围(0.04~0.1)内变化,而且可以保证在不同的噪声强度下的噪声响应特性曲线形状保持基本一致.这是因为当其他参数不变时,立方反馈直接作用于系统方程的势阱距离及深

度,这将引起系统对噪声强度反应的变化<sup>[8~10]</sup>.因此,通过立方项的调整可以在较大范围的噪声带内获得最大的时间差型磁通门性能。

图6为不同的立方项反馈系数对应的时间差型磁通门噪声响应曲线的最适噪声强度值.可见,通过调节立方反馈可以在一定范围内对噪声环境进行适应,而且反馈系数与最适噪声强度值近似成线性关系.这为时间差型磁通门在噪声环境中的快速调节立方项反馈提供依据。

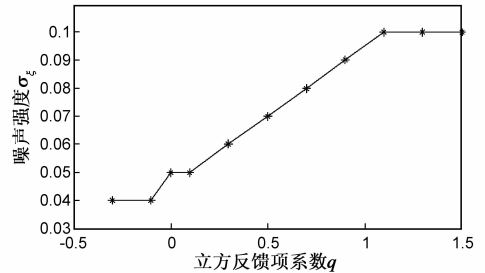


图6 不同立方项反馈系数下随机共振曲线峰值出现的位置曲线

## 4 结论

时间差型磁通门具有随机共振现象.因此可以通过反馈控制的方法,改变时间差型磁通门的系统参数,使其主动适应外界噪声强度,进而可以提高其灵敏度。

本文分别研究时间差型磁通门的线性反馈以及立方反馈对其噪声特性的影响,得到线性反馈可以降低系统的阈值,立方反馈可以调节系统的最适噪声强度的结论.仿真结果表明,相比无反馈控制时,两者配合可使时间差型磁通门的灵敏度提高了50%,且激励电流降低了37%.因此基于反馈控制的磁通门研究扩大了时间差型磁通门在材料选择方面的范围,降低了时间差型磁通门的功率损耗,提高了时间差型磁通门的灵敏度。

## 参考文献

- [1] Bruno Andò, Salvatore Baglio, Adi R Bulsara, et al. "Residence times difference" fluxgate [J]. *Measurement*, 2005, 38(2): 89 - 112.
- [2] L Gammaitoni, A R Bulsara. Noise activated nonlinear dynamic sensors [J]. *Physical Review Letters*, 2002, 88(23): 230601-1-230601-4.
- [3] 王友国, 吴乐南. 离散时间系统中的噪声辅助信号传输 [J]. *电子学报*, 2009, 37(10): 2273 - 2276.  
Wang You-guo, Wu Le-nan. Noise-assisted signal transmission in discrete-time systems [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(10): 2273 - 2276. (in Chinese)
- [4] V S Anishchenko, M A Safonova, L O Chua. Stochastic resonance in CHUA's circuit [J]. *Sciences and Engineering*, 1992,

2(2):397-401.

- [5] 张雷,宋爱国.随机共振在信号处理中应用研究的回顾与展望[J].电子学报,2009,37(4):811-818.  
Zhang Lei, Song Ai-guo. Development and prospect of stochastic resonance in signal processing [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(4): 811-818. (in Chinese)
- [6] 叶青华,黄海宁,张春华.用于微弱信号检测的随机共振系统设计[J].电子学报,2009,37(1):216-220.  
Ye Qing-hua, Huang Hai-ning, Zhang Chun-hua. Design of stochastic resonance systems in weak signal detection [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(1): 216-220. (in Chinese)
- [7] 林敏,黄咏梅,方立民.双稳系统随机共振的反馈控制[J].物理学报,2008,57(4):2041-2047.  
Lin Min, Huang Yong-mei, Fang Li-min. The feedback control of stochastic resonance in bistable system [J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(4): 2041-2047. (in Chinese)
- [8] P Jung. Stochastic resonance and optimal design of threshold detectors [J]. Physics Letters A, 1995, 207(1-2): 93-104.
- [9] Ting Zhou, Frank Moss. Analog simulations of stochastic resonance [J]. Physics Letters A, 1990, 41(8): 4255-4264.

- [10] Ting Zhou, Frank Moss. Escape-time distributions of a periodically modulated bistable system with noise [J]. Physical Review A, 1990, 42(6): 3161-3169.

#### 作者简介



卢浩 男,1984年3月生于吉林省吉林市.2009年取得吉林大学工学硕士学位.现为吉林大学仪器科学与电气工程学院博士.主要从事磁通门技术,信号处理等研究.

E-mail: howevero@gmail.com



程德福 男,教授、博士生导师.1959年8月生于辽宁朝阳.1983年、1988年于长春地质学院分别获得学士、硕士学位.2002年于吉林大学获得博士学位.主要从事弱信号检测、地下信息探测仪器等研究.

E-mail: chengdefu@jlu.edu.cn