

磁通门信号处理电路的优化设计与实验研究

黎安伟, 刘云峰

(清华大学 精密仪器系 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

摘要:磁通门信号处理电路作为磁通门磁场测量的重要组成部分,其电路参数的设计选择直接影响了测量的精度、时效性和稳定性。在分析磁通门测量原理的基础上,设计制作了磁通门信号处理电路;在综合考虑探头灵敏度和功耗下,得到在 6.25 kHz 的正弦激励下,较优的激励电压峰峰值为 14.5 V;通过对信号处理电路各环节的建模及简化分析,得出信号处理电路系统为一个二阶 I 型系统,并通过实验方法测定了开环比例系数,然后按最优二阶模型,对其进行了优化设计。最后,对所设计制作电路进行了稳定性和重复性实验,得到稳定性精度为 6.1 nT(1 σ),重复性精度为 13.05 nT(1 σ),精度满足多数磁导航应用要求。

关键词:磁通门;二次谐波法;激励电路;最优模型;闭环系统;相敏检波

中图分类号:U666.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-8829(2014)11-0137-04

Optimal Design and Study of Fluxgate Sensor Signal Processing Unit

LI An-wei, LIU Yun-feng

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: As an important part of fluxgate magnetic field measurement, the fluxgate signal processing circuit directly influences the effectiveness, stability and precision of measurement. On the basis of analyzing the fluxgate principles, the fluxgate signal processing circuit is designed and realized. Considering the probe sensitivity and consumption, the near optimal peak to peak of sinusoidal excitation voltage is 14.5 V, with the 6.25 kHz frequency. According to the simplified analysis and modeling for each circuit link, it is concluded that the signal processing system is a second-order system, and the open loop proportional coefficient is determined by experimental methods. Then according to the optimal second-order model, the optimization design is carried on. Finally, the designed circuit is statically tested, and the results show that stability precision is 6.1 nT (1 σ), repetitive precision is 13.05 nT (1 σ), which can satisfy the requirements of many magnetic navigation applications.

Key words: fluxgate; second harmonic detecting method; excitation circuit; optimal model; closed-loop system; phase-sensitive detection

磁通门磁强计作为一种弱磁场测量传感器,其灵敏度高,稳定性好,在航空、航天、航海、地质勘探等领域有着广泛的应用^[1]。

磁通门信号处理电路是磁通门磁场测量的重要组成部分,其主要包括两部分:电源激励电路和探头输出信号处理电路。电源激励电路通过产生不同频率幅值

和不同波形的激励电压,来控制探头铁芯内的交变磁场,从而影响探头的灵敏度和功耗^[2-3]。现在广泛应用的电源电压激励波形为正弦波、方波和三角波,但在一定频率下,电压波形幅值对探头灵敏度和功耗影响的综合研究较少。信号处理电路采用较成熟的二次谐波法,并设计为闭环系统^[4]。闭环系统内电路部分建模比较简单成熟,由电路参数直接决定,但探头部分参数却不能直接获取,所以现在处理电路设计时普遍缺乏对整个闭环系统性能的综合考虑。为此,在设计制作磁通门信号处理电路后,将对电源激励电压和闭环系统探头部分参数进行实验研究,然后进行闭环系统

收稿日期:2013-11-20

作者简介:黎安伟(1987—),男,贵州人,硕士研究生,主要研究方向为仪表技术及应用研究;刘云峰(1974—),男,四川人,副研究员,主要研究方向为惯性仪表研究。

的优化设计,最后对所制作电路进行实验测试。

1 磁通门测量原理

磁通门探头是一种变压式器件,一般采用双铁心结构,由激磁线圈、感应线圈和铁芯构成,其中激磁线圈反向串联,如图 1 所示^[5]。

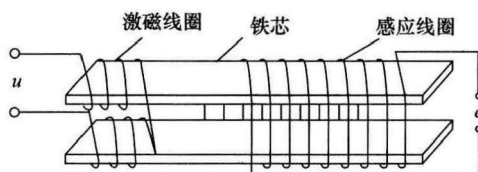


图 1 磁通门探头结构示意图

当激磁线圈上输入频率为 f_1 的正弦激磁电压时,在铁芯中产生激磁磁场,可设其磁场强度为 $H_e = H_m \cos(2\pi f_1 t)$,且上下两铁芯中激磁磁场方向在任一时刻都是相反的。考虑环境磁场 H_0 ,则上下铁芯中磁场强度分别为 $H_0 + H_e$ 和 $H_0 - H_e$ 。设铁芯横截面积为 S ,磁导率为 μ ,感应线圈在上下铁芯上的有效匝数相同,为 W_1 。根据法拉第电磁感应定律,其中一个铁芯中磁场的变化在感应线圈中产生的感应电势为

$$e = -\frac{d}{dt}[(H_e + H_0)SW_1\mu] = -\frac{d}{dt}(H_e SW_1\mu + H_0 SW_1\mu) \quad (1)$$

当铁芯工作在饱和状态时,铁芯磁导率 μ 随磁场强度而变,且无正负之分,即铁芯磁导率 μ 是磁场强度 H 的偶函数;又由于激励磁场 $H_e = H_m \cos(2\pi f_1 t)$,是时间 t 的周期偶函数,而环境磁场 H_0 比铁心饱和磁场强度 H_s 和激励磁场强度幅值 H_m 都小得多,故可忽略其对磁导率 $\mu(t)$ 的影响。这样就有:

$$\begin{aligned} \mu(-t) &= \mu(H(-t)) = \mu(H(t)) = \mu(t) \\ \mu(t \pm \frac{T}{2}) &= \mu(H_e(t \pm \frac{T}{2})) = \mu(-H_e(t)) = \mu(t) \end{aligned}$$

即磁导率 $\mu(t)$ 是时间 t 的周期偶谐函数,周期为 $1/f_1$,其傅里叶级数只有偶次谐波分量,将其展开为傅里叶级数,有

$$\mu(t) = \mu_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \mu_n \cos(4n\pi f_1 t) \quad (2)$$

将式(2)和 $H_e = H_m \cos(2\pi f_1 t)$ 代入式(1),化简可得

$$\begin{aligned} e &= 2\pi f_1 W_1 S H_m [(\mu_0 + \frac{1}{2}\mu_1) \sin(2\pi f_1 t) + \\ &\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{2} (\mu_n + \mu_{n+1}) \sin((2n+1)2\pi f_1 t)] + \\ &2\pi f_1 W_1 S H_0 \sum_{n=1}^{\infty} 2n\mu_n \sin((2n)2\pi f_1 t) \end{aligned} \quad (3)$$

从式(3)可以看出,偶次谐波分量的幅值与环境磁场强度的大小成正比。据此,任意偶次谐波分量幅值均可作为被测环境磁场的量度,但由于二次谐波幅值最大,故通常选取其二次谐波电压幅值量度被测磁场,即二次谐波法^[6]。

采用二次谐波法,设计电路闭环系统功能原理图如图 2 所示。在前向通道设置积分环节后,探头可处于零场工作状态,探头和前向通道电路对输出模拟量 E 的影响将减至最小。此时,系统的测量精度主要由反馈通道精度决定。

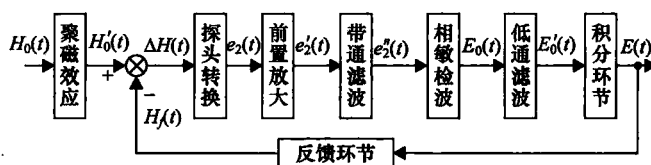


图 2 闭环系统功能原理图

2 电路设计

由闭环系统功能原理(图 2)知,磁通门电源激励及信号处理电路主要包括如下环节:电源激励电路、前置放大器、带通滤波器、相敏检波、积分电路及反馈电路。对其中较为复杂的电路设计进行探讨。

2.1 电源激励电路

激励电路包括频率源、分频、带通滤波、功率放大等电路。频率源采用集成芯片 LTC6906 产生 100 kHz 的方波信号,然后用计数器进行 8 分频和 16 分频,得到 12.5 kHz 和 6.25 kHz 的信号,将 6.25 kHz 的方波信号进行带通滤波,再经功放后,即得到激励磁通门的正弦信号。而 12.5 kHz 的方波信号作为参考基准信号,对磁通门探头输出的二次谐波信号进行相敏检波。

2.2 前置放大器

从传感器出来的信号主要包括基波、二次谐波和三次谐波,采用二次谐波法时,二次谐波为有用信号,其余为噪声。所以前置放大器的作用即是二次谐波分量尽量放大,同时抑制基频和三次谐波分量,提高信噪比。

根据需求,设计前置放大器如图 3 所示,反馈环节采用双 T 型网络,设置好电路参数,使得中心频率接近二次谐波频率,即 12.5 kHz。双 T 型网络可以看成是一个陷波器。前置放大器的整体增益也不能设置太大,否则容易造成信号阻塞。

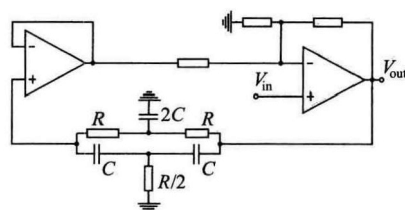


图 3 前置放大器电路图

2.3 开关相敏检波电路

相敏检波采用模拟开关相敏检波,其原理图如图 4 所示。输入信号模拟反向后与原信号一起接入模拟

选择开关,模拟开关由分频器输出的基准参考信号控制,当输入信号与基准参考信号同相时,即可实现对二次谐波的全波整流。当输入信号与基准参考信号不同相时,需对输入信号进行移相,由于两者的相位是固定的,不随环境磁场的变化而变化,所以可以在相敏检波电路前设置移相电路,对二次谐波信号进行移相。

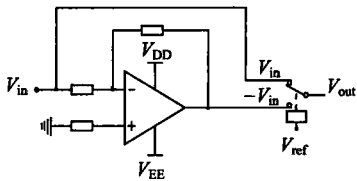


图4 开关相敏检波原理图

3 激励电压实验研究

激励电压代表了激励磁场强度,若太小,则磁通门探头铁芯未达到饱和状态,磁通门探头不能正常工作,若太大,则功耗巨大且易导致铁芯处于过饱和状态,反而降低输出的二次谐波成分。故在所选激励频率 6.25 kHz 下,需对激励电压幅值进行实验研究,以获取较佳的激励电压幅值。

3.1 激励电压与二次谐波分量

磁通门探头输出的二次谐波分量为有效的信号,其幅值可衡量磁场大小,若在噪声水平一定的情况下,二次谐波分量的幅值越大,则探头输出信号的灵敏度及信噪比就越高。

激励电压与二次谐波分量的峰峰值关系如图5所示,图中, \$E_{pp}\$ 为带通滤波器输出的二次谐波信号的峰峰值, \$V_{pp}\$ 为激励电压的峰峰值。由图可看出,在所测试的电压范围内,随着激励电压的升高,二次谐波分量迅速增大。

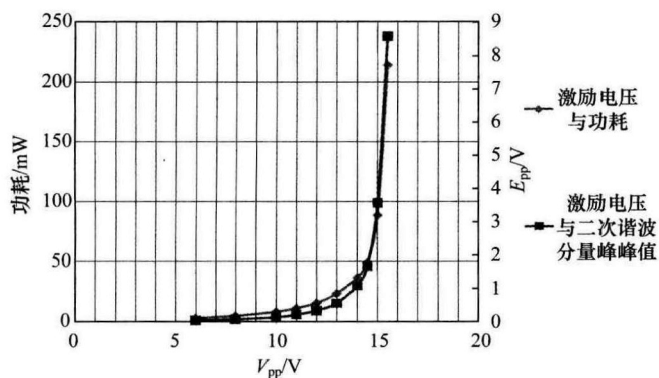


图5 激励电压与二次谐波分量及功耗关系图

3.2 激励电压与功耗

当激励电压较小时,探头铁芯未饱和,所以阻抗较大,激励电流较小,功耗较小;但随着激励电压增大,铁芯饱和,阻抗减小,激励电流变大,功耗也增大,实验结

果见图5。从图中可以看出,当激励电压峰峰值大于 15 V 后,功耗急剧增加,所以,应选择激励电压小于 15 V,以避免过大的功耗。

根据图5,可以选择激励电压为 14.5 V,此时二次谐波分量的输出的电压为 1.66 V,而激励电流的有效值为 9.56 mA,探头功耗为 49 mW。

4 系统优化设计

根据闭环系统功能原理(见图2),可以画出系统方块图如图6所示,其中, \$G_1 \sim G_7\$ 分别为探头聚磁效应、探头转换、前置放大器、带通滤波器、相敏检波、低通滤波和积分电路的传递函数, \$G_f\$ 为反馈通道的传递函数。

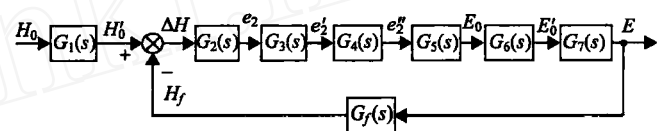


图6 闭环系统方块图

4.1 系统基本环节建模及简化

图6中, \$H_0'\$ 为外界环境磁场 \$H_0\$ 经聚磁效应后的磁场强度,也是此闭环系统所测量的磁场。

忽略聚磁效应,闭环系统传递函数为

$$G(s) = \frac{G_2(s)G_3(s)G_4(s)G_5(s)G_6(s)G_7(s)}{1 + G_2(s)G_3(s)G_4(s)G_5(s)G_6(s)G_7(s)G_f(s)}$$

对于二次谐波分量来说,探头转换、前置放大、带通滤波及相敏检波均可以看作是比例环节,即可记

$$G_2(s)G_3(s)G_4(s)G_5(s) = k_1$$

RC 组成的低通滤波环节为一阶惯性环节,其传递函数为

$$G_6(s) = \frac{1}{R_1 C_1 s + 1}$$

而积分环节传递函数为

$$G_7(s) = -\frac{1}{R_2 C_2} \cdot \frac{1}{s}$$

反馈环节传递函数为

$$G_f(s) = W_f / L_f (R_f' + R_f)$$

式中, \$W_f\$ 为反馈线圈匝数; \$L_f\$ 为等效铁芯长度,两者为定值; \$R_f\$ 为反馈电阻; \$R_f'\$ 为反馈线圈内阻,相对反馈电阻非常小,可以忽略不计。这样对于选定的反馈电阻 \$R_f\$,则反馈环节相对于一个比例环节,可记 \$G_f(s) = k_f\$。

所以闭环系统传递函数可以简化为

$$G(s) = k_1 \cdot \frac{1}{R_1 C_1 s + 1} \cdot \frac{-\frac{1}{R_2 C_2}}{s} / (1 + k_1 \cdot k_f \cdot \frac{1}{R_1 C_1 s + 1} \cdot \frac{-\frac{1}{R_2 C_2}}{s})$$

由传递函数可知,此闭环系统为一个 I 型系统,系统达到稳定时,积分环节前的输入信号为 0,故系统输出值完全由反馈系数决定。所以,反馈通道的精度直

接决定整个系统的精度,故反馈电阻应选择高精度低温漂的电阻。

4.2 系统二阶最优模型设计

系统开环传递函数为

$$G'(s) = k_1 \cdot k_f \cdot \frac{1}{R_1 C_1 s + 1} \cdot \frac{-\frac{1}{R_2 C_2}}{s} = \frac{K_v}{s(T_1 s + 1)}$$

其中, $K_v = k_1 \cdot k_f \cdot \frac{-1}{R_2 C_2}$, $T_1 = R_1 C_1$ 。

由此可知,该系统为典型的二阶 I 型系统。按照系统稳定性和准确性的要求,可以得到,当 $1/T_1 = 2K_v$ 时,系统达最优,此时,系统稳定储备大,静态位置误差系数无穷大,并且 K_v 大小决定快速性,其越大,系统反应速度越快^[7]。

由于 k_1 和 k_f 都包含了探头参数,无法通过电路参数直接获得,所以需要实验获取。系统简化方块图如图 7 所示。

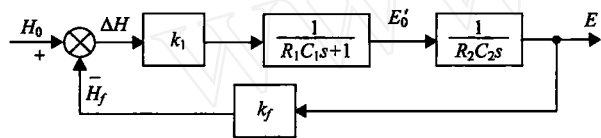


图 7 系统简化方块图

图 7 中,系统闭环时,输出为 E ;若从图中标识处断开,且将反馈通道输入接地,系统开环,此时低通滤波之后的输出为 E'_0 。对于同一外界磁场输出有:

闭环时: $H_0 = E \times k_f$;

开环时: $E'_0 = H_0 \times k_1$ 。

等式两边相乘,可以得到: $k_1 \cdot k_f = E'_0/E$ 。

按照此方法,可以对三轴磁通门探头与处理电路组成的系统进行开环比例系数的测定,对每一个轴分别选择两个位置,测试结果如表 1 所示。

表 1 三轴磁通门开环比例系数测定结果

x 轴测定结果			
位置	E'_0/V	E/V	$k_1 \cdot k_f$
1	0.39	-1.115	-0.35
2	-0.451	1.265	-0.356
y 轴测定结果			
位置	E'_0/V	E/V	$k_1 \cdot k_f$
1	0.348	-1.166	-0.298
2	-0.364	1.167	-0.312
z 轴测定结果			
位置	E'_0/V	E/V	$k_1 \cdot k_f$
1	0.316	-1.174	-0.269
2	-0.33	1.259	-0.262

由于 K_v 决定了系统的反应速度,所以根据实际要求可以先设定其值,在此磁通门闭环系统中,设定剪切频率值 ω_c ,即 K_v 为 30 Hz,开环比例系数取两次测量

的均值,则可以算出积分电路的积分常数,计算如下:

$$R_2 C_2 = k_1 \cdot k_f \cdot \frac{-1}{K_v}$$

分别求得三轴的积分常数后,取积分电容均为 $1 \mu F$,则可求得三轴各自的积分电阻,计算结果如表 2 所示。

表 2 积分常数及积分电阻计算结果

	x	y	z
$k_1 \cdot k_f$	-0.353	-0.305	-0.266
$R_2 C_2$	0.011767	0.010167	0.008867
$R_2/k\Omega$	11.8	10.2	8.9

再设计惯性环节积分常数,根据二阶最优模型的要求, $\frac{1}{T_1} = 2K_v$, 即 $R_1 C_1 = \frac{1}{2K_v} = \frac{1}{60}$, 若滤波电容均取 $1 \mu F$,则滤波电阻为 $16.7 k\Omega$ 。

5 实验测试

在实验室环境下,选用 NANO TESLA 公司的 TRI-MAG 18525 型传感器,对所设计制作信号处理电路进行稳定性和重复性精度测试。以三轴磁通门的 Y 轴测量结果为例,先测量其标度和零偏,测量结果为:标度为 18898.61 nT/V ,零偏为 -0.01397 V 。

稳定性测试时,采样率为 1 Hz,时长为 10 min,测试结果如图 8 所示。其测量值最大为 697.3 nT ,最小为 648.6 nT ,标准差为 $6.1 \text{ nT}(1\sigma)$ 。

重复性测试结果如表 3 所示,将测试电压值转换为磁场强度后,标准差为 $13.05 \text{ nT}(1\sigma)$ 。

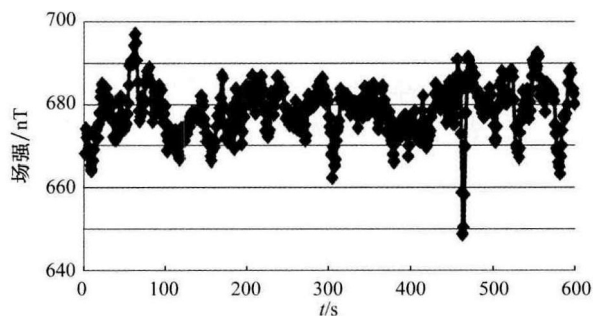


图 8 稳定性测试结果

表 3 重复性测试结果

	电压值/V	磁场强度/nT
第 1 次	-1.30120	-24326.72
第 2 次	-1.30040	-24311.67
第 3 次	-1.30096	-24322.16
第 4 次	-1.29925	-24289.87
第 5 次	-1.29990	-24302.12
第 6 次	-1.30088	-24320.77
第 7 次	-1.30078	-24318.85
标准差(1σ)	0.00069	13.05

(下转第 143 页)

当开关 K1 连接到 1 时,测量直流母排正负极分别对地的绝缘电阻值;当开关 K1 连接到 2 时,测量动力电池正负母线分别对地的绝缘电阻值。

3 实验分析

此实验是基于直流母线电压为 510 V,动力电池电压为 480 V 的混合动力实验室完成的。选用 $R_1 = R_2 = 5\text{ M}\Omega$, $R_0 = R_U = 49\text{ k}\Omega$ 为参数,在直流系统正负母线与地之间分别接入标准的已知电阻,与测量结果进行比较并计算出误差,由于篇幅有限只给出了一部分的实验数据,测量结果如表 1 和表 2 所示。表 1 是正负极一端对地电阻不变,另一端对地电阻变化的情况;表 2 是正负极两端对地电阻同时变化的情况。

此处的误差主要是由计算过程中四舍五入取近似值造成的,从两个表格中可以看出,无论是正负母线中的其中一端出现绝缘值变化,还是两端都出现绝缘值变化,都能够测量出来,并且误差不是很大,符合船舶使用的要求。

表 1 正负极一端绝缘下降

实际值/k Ω		计算值/k Ω		误差/%	
R_+	R_-	R_+	R_-	R_+	R_-
20	1000	19.945	997	0.28	0.30
50	1000	49.946	999	0.11	0.10
100	1000	99.946	1000	0.05	0
200	1000	199.920	1000	0.04	0
500	1000	499.950	1000	0.01	0
1000	1000	1000	999	0	0.10
2000	1000	2000	1000	0	0
5000	1000	4999	999	0.02	0.10
10000	1000	10000	1000	0	0
20000	1000	19997	999	0.02	0.10

(上接第 140 页)

6 结束语

通过对磁通门电源激励电路的实验研究,得到在 6.25 kHz 频率的正弦波激励下,较优的激励电压峰峰值为 14.5 V。通过对信号处理电路各环节的建模及简化分析,得出闭环系统为一个二阶 I 型系统,再通过实验方法测定了开环比例系数,然后按最优二阶模型,对其进行了优化设计。最后,在实验室环境下,避开磁干扰,对所设计电路进行了稳定性和重复性实验,得到稳定性精度为 6.1 nT(1 σ),重复性精度为 13.05 nT(1 σ),可以满足大多数磁导航应用要求。

参考文献:

[1] 胡苗苗,刘海顺,李端明,等. 磁场测量方法及其应用[J].

表 2 正负极绝缘同时下降

实际值/k Ω		计算值/k Ω		误差/%	
R_+	R_-	R_+	R_-	R_+	R_-
20	20	19.819	19.819	0.91	0.91
50	50	49.811	49.811	0.38	0.38
100	100	99.919	99.919	0.08	0.08
200	200	199.940	199.940	0.03	0.03
500	500	499.960	499.960	0.01	0.01
1000	1000	1000	1000	0	0
2000	2000	2000	2000	0	0
5000	5000	4999	4999	0.02	0.02
10000	10000	10007	10007	0.07	0.07
20000	20000	19996	19996	0.02	0.02

4 结束语

介绍了一种适用于混合动力船舶直流系统的绝缘检测方法,电路结构简单,不仅能够检测直流母线的绝缘性能,同时还能够检测动力电池的绝缘性能,测量的精度也比较高,符合混合动力船舶的使用要求。

参考文献:

[1] 吴郑军,王丽芳. 电动汽车智能在线绝缘检测装置研究[J]. 低压电器,2009(5).
[2] 冯卓明,游大海. 直流系统接地检测方法比较[J]. 电测与仪表,1997,34(5).
[3] 赵保方,焦绍光,李红江. 船舶电力系统直流网络绝缘状态监测系统研究[J]. 船电技术,2009,29(11).
[4] Stimper K. Physical fundamentals of insulation design for low-voltage equipment[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation,1990,25(6):1097-1103.
[5] 张敏敏,康伟. 一种混合动力电动船舶能源管理系统的设计[J]. 中国水运,2011,11(12).

现代物理知识,2008,20(4):36-38.

[2] 王锋,焦国太,安晓红. 三端式磁通门传感器的数学建模及数值分析[J]. 探测与控制学报,2008,30(5):22-25.
[3] 刘诗斌,崔智军,刘昭元. 低剩磁误差磁通门的激励电路研究[J]. 传感技术学报,2009,22(12):1709-1712.
[4] 石志勇,王怀光,庞发亮. 磁通门信号处理电路分析与设计[J]. 兵工自动化,2006,25(6):82-83,88.
[5] 张学浮,陆怡良. 磁通门技术[M]. 北京:国防工业出版社,1995:1-4.
[6] Cruz J C,Trujillo H,Rivero M. New kind of fluxgate magnetometer probe with enhanced electronic processing[J]. Sensors and Actuators A:Physical,1998,71(3):167-171.
[7] 董景新,赵长德,熊沈蜀,等. 控制工程基础[M]. 2 版. 北京:清华大学出版社,2005.



论文写作，论文降重，
论文格式排版，论文发表，
专业硕博团队，十年论文服务经验



SCI期刊发表，论文润色，
英文翻译，提供全流程发表支持
全程美籍资深编辑顾问贴心服务

免费论文查重：<http://free.paperyy.com>

3亿免费文献下载：<http://www.ixueshu.com>

超值论文自动降重：http://www.paperyy.com/reduce_repetition

PPT免费模版下载：<http://ppt.ixueshu.com>
