

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210192

# 基于磁通门传感器的铁磁探测系统设计

马成功 李丕丁

(上海理工大学健康科学与工程学院 上海 200093)

**摘要:** 在核磁共振检查前需要进行无磁化确认,针对核磁共振检查所处的环境背景磁场复杂、干扰较多,系统出现误报警高、探测失效等问题,设计了基于磁通门传感器的铁磁探测系统。系统使用二次谐波法测量磁场信号,设计模拟电路进行信号相敏检测。通过积分反馈提高闭环系统的线性度和抗干扰性,探头工作在稳定的状态。采用卡尔曼滤波对背景磁场和磁异信号进行处理,提高信号信噪比,同时设计能量检测器对磁异信号进行检测。试验测试结果表明,系统在核磁共振室外复杂磁场环境可以减少设备工作时的误报警,有效探测出铁磁性物质。

**关键词:** 磁通门;二次谐波法;卡尔曼滤波;磁异信号;能量检测

**中图分类号:** TP301 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

## Design of ferromagnetic detection system based on fluxgate sensor

Ma Chenggong Li Piding

(School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** No magnetization confirmation is required before the magnetic resonance imaging. In view of the complex background magnetic field and large interference in the environment where the magnetic resonance imaging equipment is located, the system has problems such as high false alarm, detection failure, a ferromagnetic detection system based on fluxgate sensor is designed. The system uses fluxgate sensor and second harmonic method to measure magnetic field signal, and the analog circuit is designed for phase sensitive detection. The closed-loop system improves the linearity and anti-interference through integral feedback to make the probe work in a stable state. Kalman filter is used to process the background magnetic field and magnetic anomaly signal to improve the signal-to-noise ratio, and the energy detector is designed to detect the magnetic anomaly signal. The test results show that the system can reduce the false alarm when the magnetic resonance imaging equipment is working in the complex magnetic field environment outside the magnetic resonance imaging room, and effectively detect ferromagnetic substances.

**Keywords:** fluxgate; second harmonic method; Kalman filter; magnetic anomaly signal; energy detection

## 0 引言

磁异信号探测具有重要的应用价值,现已经被广泛应用于航空航天、国防军事、工业生产和生物医学等领域<sup>[1-2]</sup>。现实生活中,一些区域需要进行铁磁探测来实现无磁化,特别是铁磁性物质会产生干扰的环境,如核磁共振检查区域。在医疗器械领域,核磁共振仪(magnetic resonance imaging, MRI)是临床上普遍应用的医学成像设备,但是由于MRI所在的空间存在强磁场,铁磁性物质误入造成的人员受伤、干扰成像、中断工作和设备损坏成为MRI安全的一大隐患。目前,在MRI检查前需要对患者进行无磁化确认,专用的铁磁性探测仪器尚未大规模普及。传统的金属探测仪和基于同原理的安检设备无法探测出铁磁性的非金

属物质,对非铁磁性的金属物质产生误报,探测对象和精确度受到限制,并不适用在MRI检查所处的工作环境。

在运动目标的磁信号探测领域,多种磁场探测传感器被用于信号检测。霍尔传感器适合磁场、位置和速度测量;磁阻传感器常用于导航和地磁场测量,应用广泛;磁通门传感器适合空间弱磁场测量,具有较高的分辨率;超导量子干涉仪适用于生物弱磁场测量,灵敏度高<sup>[3-4]</sup>。磁异信号检测方法包括目标检测和噪声检测。目标检测方法中,基于标准正交基函数算法通过求解基函数系数,得到能量函数检测磁异信号<sup>[5]</sup>。噪声检测方法中,有学者提出最小熵滤波法、高阶交叉法、小波变换法和经验模态法等<sup>[6-9]</sup>。各种自适应检测以及应用传感器网络的方法也被提出,用于提升磁异目标的探测能力<sup>[10-11]</sup>。在MRI室外,原有铁磁探测系

收稿日期:2022-06-02

统在复杂磁场环境下工作误报警率高,并且易输出饱和。针对原有系统存在的不足,本文设计基于磁通门传感器的铁磁探测系统,实现 MRI 检查前无磁化稳定探测。

### 1 系统总体方案设计

铁磁探测系统总体方案如图 1 所示,主控芯片为 DSP TMS320F28335,使用磁通门传感器作为系统磁场探测的探头。系统主要包括激励信号产生部分、感应信号处理部分、AD 采集部分、数据处理算法部分,探测的磁场数据通过蓝牙串口实时传至上位机显示。在均匀分布的磁场中,铁磁性物质进入会破坏周围的磁场产生磁异常信号<sup>[12]</sup>,系统通过解析异常信号,实现对铁磁性物质探测。

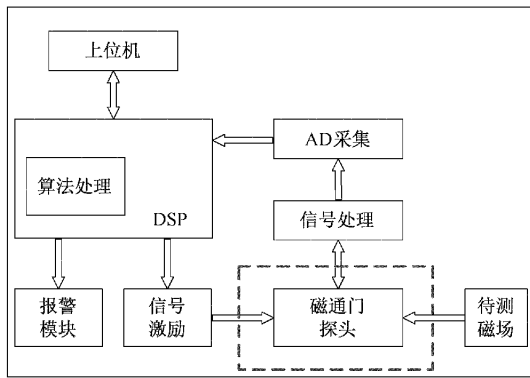


图 1 系统总体方案

系统进行磁场探测的传感器是平行式结构的双磁芯磁通门传感器,如图 2 所示。对磁通门传感器施加激励信号,当探头磁芯达到饱和时,待测的磁场信号被调制,从而产生反映环境磁场强度的感应电动势,通过解析感应信号来表征环境磁场的强度。设计平行放置的两个单磁芯探头,反相串联激励线圈,同相串联感应线圈,从而抵消变压器效应产生的感应电动势,同时叠加磁通门信号。谐波选择法中,偶次谐波与磁场强度成比例关系,信号处理部分完成对谐波的检测和提取。

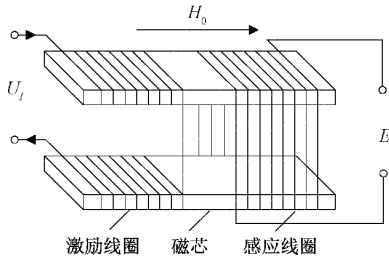


图 2 双磁芯磁通门传感器

方波信号的幅值和相位稳定性较好,通过 DSP 产生激励方波信号并调节相位,在激励信号后加入功率放大器芯片 MIC4428 进行功率放大。MIC4428 为推挽结构 MOSFET 驱动芯片,功率高且失真小。系统激励方波信号为 10 kHz,激励信号从两路输入后,输出信号加载在磁通

门激励线圈两端,激励线圈使磁芯进入饱和区。

### 2 系统信号数据处理方案设计

#### 2.1 信号滤波与放大电路

磁通门探头输出阻抗主要为电感,在放大电路之前设置并联电容,构成了 LC 串联谐振电路。激励信号频率为 10 kHz,谐振频率为 20 kHz,探头输出信号中二次谐波分量处于谐振状态。谐振电路抑制了感应信号中的其它谐波分量和噪声,提高了前置放大电路的输入端信噪比。磁通门探头感应线圈输出信号微弱,因此先设计前置放大器电路,同时在信号入口设置了电容进行信号隔直。传感器输出信号二次谐波的频率为 20 kHz,在进行相敏检测提取信号前设计了中心频率 20 kHz 的带通滤波电路。

#### 2.2 相敏检测方案的设计

当  $x(t)$  为输入的正弦信号且有含宽带噪声和高次谐波分量,  $r(t)$  为输入的参考方波信号,待测的调制信号  $x(t)$  为:

$$x(t) = V_s \cos(\omega_0 t + \theta) + n(t) \tag{1}$$

$n(t)$  包含宽带噪声和  $x(t)$  的高次谐波分量。

将输入的参考方波信号  $r(t)$  进行傅里叶级数展开得到:

$$r(t) = \frac{4V_r}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \cos(2n-1)\omega_0 t \tag{2}$$

同时得到相敏检测的输出为:

$$u_p(t) = x(t)r(t) = \frac{2V_s V_r}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \cos[(2n-1)\omega_0 t - \theta] + \frac{2V_s V_r}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \cos(2n\omega_0 t + \theta) + n(t) \frac{4V_r}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \cos(2n-1)\omega_0 t \tag{3}$$

再经过 LPF,滤除上式的和频项分量,同时也滤除信号中  $n > 1$  的差频项分量。

对于  $n(t)$  中的宽带噪声和  $x(t)$  的高次谐波分量中频率为  $\omega_n$  的信号:

$$n_n(t) = V_n \cos(\omega_n t + \varphi) \tag{4}$$

信号与方波相乘的结果为:

$$u_{an}(t) = V_n \cos(\omega_n t + \varphi) \cdot \frac{4V_r}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \cos(2n-1)\omega_0 t = \frac{2V_r V_n}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \cos[(\omega_n + (2n-1)\omega_0)t + \varphi] + \frac{2V_r V_n}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \cos[(\omega_n - (2n-1)\omega_0)t + \varphi] \tag{5}$$

对信号进行 LPF 滤除和频项分量,对于输出含有信号的差频项分量:

$$u'_{an}(t) = \frac{2V_r V_n}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \cos[(\omega_n - (2n-1)\omega_0)t + \varphi] \tag{6}$$

可以得到系统相敏检测谐波响应,幅频响应曲线如

图 3 所示,曲线相当于一个梳状滤波器,频率满足  $(2n - 1)\omega_0$  的谐波分量和噪声通过相敏检测产生直流输出,即信号分量在  $\omega(n) = (2n - 1)\omega_0, (n = 1, 2, 3, \dots)$  处出现,其中  $\omega_0$  处的信号幅值分量最大,整体幅值以  $1/(2n - 1)$  的规律下降。

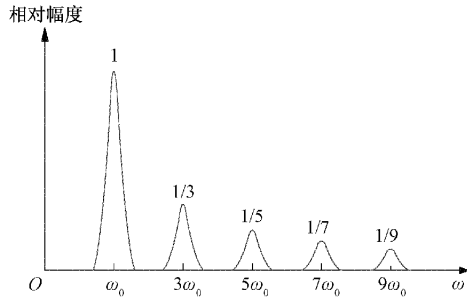


图 3 相敏检测器的谐波响应曲线

将系统相敏检测电路基准信号频率设为  $2f_1$ , 得到频率为  $2f_1$  的各偶次谐波分量在周期内输出为 0; 基准频率  $2f_1$  的各奇次谐波分量, 在周期内输出信号幅值相应衰减为基准频率的奇次数分之一; 激励信号频率  $f_1$  的奇次数谐波分量  $f_1, 3f_1, 5f_1$  等输出也为 0。磁通门探头输出的此类谐波分量和二次谐波  $2f_1$  相比较小, 经过滤波后较微弱, 不会影响探测精度。频率  $2f_1$  通过相敏检测效率最高, 且被测信号与参考信号同频同相, 得到二次谐波最大的直流信号。

信号处理电路采用调制解调芯片 AD630 对二次谐波进行相敏检测<sup>[13]</sup>, 输入信号为经前置放大的信号, 参考信号为经功率放大的方波, 电路如图 4 所示。在 AD630 信号输出通道处设计了快速积分电路, 改善系统的动态特性, 提高系统前向通道增益, 同时利用积分电路构成磁场负反馈的闭环探测系统<sup>[14]</sup>。电信号经 24 位模数转换器 ADS124S06 采集到 DSP 进行处理。

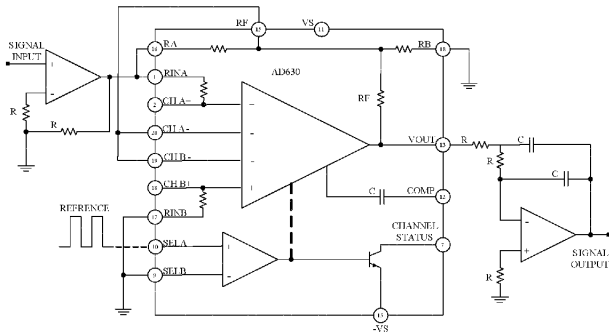


图 4 AD630 相敏检测电路

### 3 信号处理算法设计

#### 3.1 卡尔曼滤波

卡尔曼滤波基于一种高效的递推估计方法, 在估计的均方误差最小条件下, 来对过程的状态进行估计预测<sup>[15]</sup>。

卡尔曼滤波的基本方法是: 通过信号和噪声的状态空间模型, 构造时间更新方程和测量更新方程。算法利用测量值对系统的噪声干扰进行消除, 进而重现信号的真实值。在微弱信号检测领域, 可以利用卡尔曼滤波算法从噪声环境中提取信号。

定义状态变量  $\mathbf{X} \in \mathbf{R}^n$ , 用以估计离散时间过程,  $\mathbf{U}_k$  为输入或者控制信号,  $\mathbf{A}$  为增益矩阵,  $\mathbf{B}$  为控制输入的增益。离散时间过程的差分方程如下:

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{A}\mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{B}\mathbf{U}_{k-1} + \boldsymbol{\omega}_{k-1} \quad (7)$$

定义观测变量  $\mathbf{Z}_k \in \mathbf{R}^m$ , 系统的观测方程:

$$\mathbf{Z}_k = \mathbf{H}\mathbf{X}_k + \mathbf{v}_k \quad (8)$$

式(7)和(8)中随机信号  $\boldsymbol{\omega}_k$  和  $\mathbf{v}_k$  分别表示相互独立的过程激励噪声和观测噪声:

$$p(\boldsymbol{\omega}) \sim N(0, \mathbf{Q}) \quad (9)$$

$$p(\mathbf{v}) \sim N(0, \mathbf{R}) \quad (10)$$

时间更新方程中, 通过当前状态变量计算先验估计值  $\hat{\mathbf{X}}_k^-$  和先验误差协方差值  $\mathbf{P}_k^-$ :

$$\hat{\mathbf{X}}_k^- = \mathbf{A}\hat{\mathbf{X}}_{k-1} + \mathbf{B}\mathbf{U}_{k-1} \quad (11)$$

$$\mathbf{P}_k^- = \mathbf{A}\mathbf{P}_{k-1}\mathbf{A}^T + \mathbf{Q} \quad (12)$$

测量更新方程中, 先计算卡尔曼增益  $\mathbf{K}_k$ :

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T (\mathbf{H}\mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (13)$$

再通过先验估计值  $\hat{\mathbf{X}}_k^-$  和观测变量  $\mathbf{Z}_k$  的线性组合, 计算后验估计值  $\hat{\mathbf{X}}_k$  和后验误差协方差  $\mathbf{P}_k$ :

$$\hat{\mathbf{X}}_k = \hat{\mathbf{X}}_k^- + \mathbf{K}_k (\mathbf{Z}_k - \mathbf{H}\hat{\mathbf{X}}_k^-) \quad (14)$$

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}) \mathbf{P}_k^- \quad (15)$$

系统在预测和校正之间循环更新, 通过递归计算得到最优估计。在环境磁场噪声和传感器测量噪声下, 系统会出现探测误差和误报警, 卡尔曼滤波可以即时修正, 降低误差干扰。卡尔曼滤波结构框图如图 5 所示。

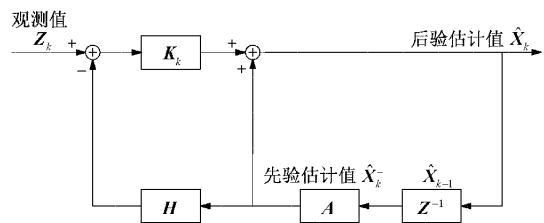


图 5 卡尔曼滤波结构框图

#### 3.2 能量检测器

检测理论中, 定义  $s(n)$  为磁场信号,  $\omega(n)$  为噪声信号, 磁场信号与噪声信号相互独立。定义  $H_0$  代表仅有噪声的假设,  $H_1$  为信号含有噪声的假设。

$$H_0: x(n) = \omega(n) \quad (16)$$

$$H_1: x(n) = s(n) + \omega(n) \quad (17)$$

定义概率密度函数, 分别为  $H_1$  成立的  $p(x, H_1)$  和  $H_0$  成立的  $p(x, H_0)$ , 得到  $H_1$  成立判定式:

$$L(x) = \frac{p(x; H_1)}{p(x; H_0)} > \gamma \quad (18)$$

其中,  $L(x)$  为似然比, 指比较在观测数据集  $x$  已知时  $H_1$  成立和  $H_0$  成立的可能性大小, 判决域含义为判定式成立的数据集  $x$ 。当判定式成立, 判定  $H_1$  为真, 信号存在。

能量检测器的表达式为:

$$T(X) = \sum_{n=0}^{N-1} x^2[n] \quad (19)$$

当数据的总能量超过仅有噪声时的期望, 能量检测器结果为信号存在。仅存在噪声时和检测信号中含有噪声时的期望表达式分别为:

$$E[x^2[n]] = \sigma^2 \quad (20)$$

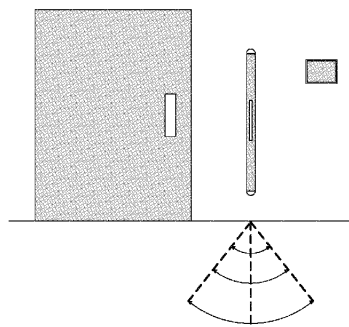
$$E[x^2[n]] = s^2[n] + \sigma^2 \quad (21)$$

阈值根据虚警概率进行设置, 当计算结果超过设置的阈值, 判定检测信号存在即含有探测对象。随着信号信噪比的改善, 检测概率随之提高。

#### 4 系统试验分析

在核磁共振室(MRI)外, 存在磁场噪声干扰, 其中最主要是 MRI 设备产生的梯度磁场、射频电子脉冲以及其它电磁噪声, 这些因素会影响感应信号的输出, 使采集的信号存在随机性。

在铁磁探测过程中, 运动的铁磁物体会破坏均匀磁场产生磁异信号, 系统将磁通门探头输出的环境背景磁场信号和磁异信号转换为电信号。出现铁磁性物质时, 磁异信



(a) 系统安装位置示意图

号会大于平稳的磁场值, 呈现正负异常峰值。探测目标先在与系统测量  $x$  轴方向一致进行移动, 磁场会出现两个峰值相反、先减小后增大的磁异信号; 再与测量  $y$  轴测量方向一致性移动, 得到先减小后恢复的磁异信号, 经卡尔曼滤波后系统输出的两种磁异信号如图 6 所示。卡尔曼滤波中  $\hat{x}_0$  和  $P_0$  分别为实测环境磁感应信号的前 1 000 个点的平均值和均方值误差。

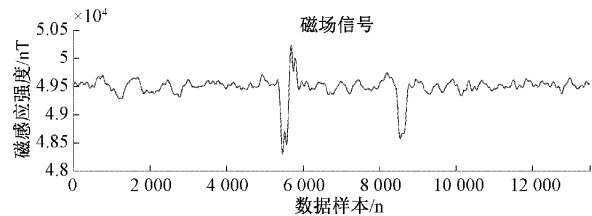
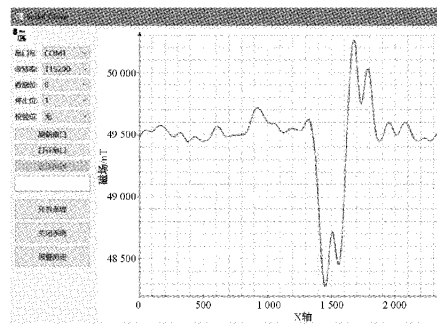


图 6 卡尔曼滤波信号

卡尔曼滤波利用前一时刻的预测值和现在时刻的观测值进行更新, 平滑输出信号的同时减小信号噪声, 滤波后输出信号信噪比提高至 24 dB。磁异信号通过卡尔曼滤波处理后, 适合后续的特征分析与检测判定。

在医院核磁共振室(MRI)外搭建测试环境, 系统安装在 MRI 外门一侧, 磁通门传感器以及系统垂直地面安装。磁通门传感器的探测数据经过 DSP 处理后, 通过蓝牙串口模块实时传至上位机, 并且显示磁场信号曲线, 系统安装位置示意图和上位机界面如图 7 所示。系统探测到铁磁性物质时, 实时显示磁异信号。



(b) 上位机显示界面

图 7 系统工作示意图

在 MRI 室外对常见随身携带的铁磁性物体如小刀、手机、钥匙、铁片和硬币等物品进行测试, 小刀代替手术刀测试, 钥匙为铁合金材质, 铁片尺寸为 6 cm×2 cm, 硬币为钢芯镀镍材质, 试验测试在中心测量轴的一 45°~45°角度范围进行, 得到常见铁磁性物体能量检测值如图 8 所示。对于环境地磁场信号, 能量趋于平稳且幅值较小, 运动铁磁性物质产生的磁异信号存在峰值。通过能量计算, 检测磁异信号输出值明显高于背景环境信号能量值。在同一探测距离范围, 对于尺寸较大即铁磁物质含量较高的测试物如手机、铁片等, 计算的能量检测值较高。通过设定检测

阈值, 磁异信号能量计算值大于阈值时, 判定铁磁性物质存在, 系统可以在检测距离内进行有效探测。

系统测试方案包括稳定性测试和灵敏度测试。稳定性测试分别在 MRI 未工作和工作时进行, 包括携带非铁磁性金属和没有携带铁磁性物体对系统进行测试。测试分成 5 个时间段, 每种情况分别测试 50 次, 统计在环境磁场干扰下造成的系统误报。误报率等于当前时间段测试的误报警次数除以当前时间段测试总数, 误报率越低则表明系统抗干扰性和稳定性越好。AI 是指携带非铁磁性的金属铝片, T 是没有携带铁磁性物体和金属物体, 测试结果

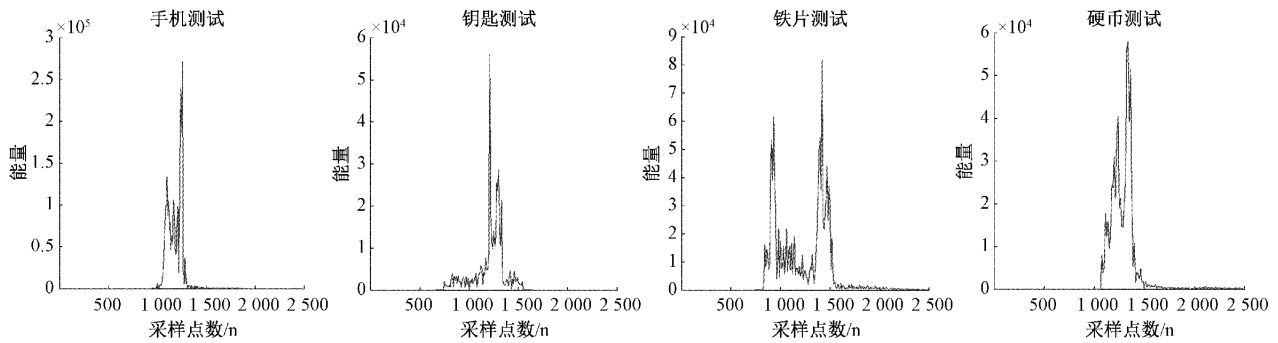


图 8 能量检测器计算值

如表 1 所示。当 MRI 未工作时,非铁磁性金属物体不会对探测产生干扰,每个时间段系统最高只出现了一次误报警,可能为周围电子设备影响产生。但当 MRI 工作时,可以发现设备产生的磁场对系统的影响较大,环境中较强的梯度磁场和电子脉冲会干扰系统并触发报警。在 MRI 工作时,一共在 10 个时间段分别进行 2 种情况的试验测试,测试在距系统的同一距离处进行且速度保持一致,每个时间段最多出现 4 次误报警,系统的平均误报率下降到 5.8%。

表 1 系统稳定性测试误报率 %

测试环境	测试方式	时间				
		时间 1	时间 2	时间 3	时间 4	时间 5
MRI 关闭	AI	2	2	0	0	0
MRI 关闭	T	2	0	0	2	2
MRI 工作	AI	4	6	6	4	6
MRI 工作	T	6	6	6	8	6

灵敏度测试是指对不同的铁磁性物体,在有效探测距离内进行测试是否触发系统报警工作。参考 GB 15210-2018 通过式金属探测门的国标规定,测试物体的检测率大于等于 90%判定为检测成功,得到常见随身携带的测试样品有效探测距离如表 2 所示。对于铁磁性物质含量较高的物体,有效探测距离较远。

表 2 测试样品有效探测距离 m

物体	小刀	手机	钥匙	铁片	硬币
距离	1	0.6	0.5	0.5	0.25

### 5 结 论

设计基于磁通门传感器的铁磁探测系统,对运动铁磁性物体产生的磁异信号进行处理。针对原系统在 MRI 工作时易出现输出饱和导致探测失效等问题,设计积分电路构建了闭环反馈,降低外界参数改变对系统输出信号的影响,提高磁通门探头的线性度和动态性能。闭环系统改善

了探测的稳定性,卡尔曼滤波提高了信号的信噪比。通过试验测试,系统信号输出的幅值、能量值与测试物体的铁磁性含量和距离有关,铁磁性含量越大、距离越近,磁异信号幅值和能量检测值随之增加,系统对常见随身携带的铁磁性物体有效探测距离可以达到 1 m。原系统在 MRI 工作的环境下易产生误报警,现有系统的误报警得到改善,在 MRI 工作时平均误报警率下降到 5.8%。系统为 MRI 检查构建了安全的无磁环境,提高了设备检查效率。

### 参考文献

- [1] GAO J Q, WANG J Z, ZHANG L J, et al. Magnetic signature analysis for smart security system based on TMR magnetic sensor array [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(8): 3149-3155.
- [2] 陈方舟. 航磁异常探测数据采集及仿真技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2016.
- [3] 银鸿,文轩,杨生胜,等. 基于磁异常检测的磁性运动目标识别方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(3): 258-264.
- [4] 宋思璇,邓明,陈凯,等. 数字正交基模磁通门传感器电路[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(5): 97-102.
- [5] 赵越. 地磁背景下的磁异常信号探测方法探究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2021.
- [6] TANG Y, LIU Z Y, PAN M C, et al. Detection of magnetic anomaly signal based on information entropy of differential signal[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2018, 15(4): 512-516.
- [7] SHEINKER A, GINZBURG B, SALOMONSKI N, et al. Magnetic anomaly detection using high-order crossing method[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(4): 1095-1103.
- [8] 戴忠华,周德华,单珊. 基于小波能量谱的舰船磁异常检测算法[J]. 探测与控制学报, 2020, 42(3): 14-19.
- [9] 周晗. 巨磁阻抗磁传感器关键技术及应用研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2017.
- [10] 赵冠一. 面向航空磁异常探测的干扰抑制与目标检测技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2019.
- [11] ZHANG M Y, WANG H, GE L, et al. Automatic

- search algorithms for near-field ferromagnetic targets based on magnetic anomaly detection[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018(8):2130236.
- [12] 万成彪. 磁异信号检测理论与方法研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2018.
- [13] 杨行, 杨嵩, 刘艺. 微弱信号锁相检测的电路研究[J]. *压电与声光*, 2015, 37(3):529-532.
- [14] 陈武祥, 王劲东, 吕尚, 等. 基于 Sigma-Delta 调制技术的高精度数字磁通门磁强计仿真[J]. *空间科学学报*, 2022, 42(2):284-293.
- [15] 沈飞, 李荣冰, 刘建业, 等. 基于卡尔曼滤波的北斗接收机高灵敏度跟踪算法研究[J]. *电子测量技术*, 2017, 40(9):88-94.

#### 作者简介

马成功, 硕士研究生, 主要研究方向为医电仪器工程。

李丕丁, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要研究方向为生物医学信号处理、医电仪器工程等。

E-mail: Lipiding\_usst@qq.com