

# 多功能墙体探测仪的设计方法<sup>\*</sup>

徐逢秋, 许贤泽, 乐意, 李忠兵

( 武汉大学电子信息学院 武汉 430072)

**摘 要:** 针对墙体中水管、电线、金属物体的探测问题, 设计了 3 种无源传感器, 并设计了相关数据处理方法以确定被测物体的中心位置。利用 PCB 覆铜, 制作了用于探测水管的电容极板以及用于探测电线的金属天线。建立了水管检测模型, 得到输出信号随被测物体位置的变化规律。基于差分探头模型, 提出了一种利用 PCB 线圈作为敏感单元的金属探测方法, 通过数值计算, 保证了差分线圈的平衡。最后, 针对上述传感单元, 设计了被测物体的中心检测算法。测试数据表明, 各传感单元均具有较大的探测深度, 中心检测误差均在合理范围之内。

**关键词:** 墙体探测仪; 电容极板; 金属极板; 差分探头; 中心检测

**中图分类号:** TH761.2    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 460.40

## Design method of multifunctional wall detector

Xu Fengqiu, Xu Xianze, Le Yi, Li Zhongbing

( School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Aiming at the issue of detecting the water pipes, electric wires and metallic objects in wall, this paper designs three kinds of passive sensors, and also designs the corresponding data processing method used to detect the center position of the detected objects. With the cladded copper of PCB, the capacitance plate for detecting water pipe and the metallic antenna for detecting electric wire are produced. What's more, the water pipe detecting model is built, and the relationship between the output signal and the position of the detected object is obtained. Based on the differential probe model, a metallic object detection method using PCB coil as the sensor unit is proposed. The balance of the differential coil is guaranteed with the numerical computation of the receiving coil parameters. The center searching algorithm of the detected object is designed with these kinds of sensor units. The measurement data show that the designed sensor units have large detecting depth, and the error of center searching is acceptable.

**Keywords:** wall detector; capacitance plate; metallic plate; differential probe; center detecting

## 1 引 言

墙体探测仪作为一种新型的房屋建筑装潢辅助工具, 可以探测水管、电线和钢筋, 这能有效防止因对墙体结构的不确定, 给施工带来不便。

墙体探测仪设计难点在于传感器。目前在工业控制

领域, 具有专门针对金属、电线等物体的产品, 但其强调的性能指标和墙体探测仪是不同的。例如, 在工业控制中, 为了检测金属部件的缺陷, 常常采用涡流传感器, 这种涡流传感器具有很好的分辨率和线性度<sup>[1]</sup>。但是, 墙体探测仪的设计, 注重的却是金属探测的探测范围和中心定位精度。因此, 需要设计不同种类的传感器应用于该类仪器中。

收稿日期: 2013-05    Received Date: 2013-05

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家 973 计划( 2011CB707904)、武汉市科技局应用基础研究计划( 2013010501010121) 资助项目

本文采用导电板完成水管和电线探测,差分线圈完成金属探测,分析各传感单元的设计原理,利用印刷电路板制作传感单元。采用印刷电路板的设计方法会使仪器具备设计成本低、生产过程简单且复现性高的特点。本文论述的一个侧重点在于如何通过计算,优化传感器的设计尺寸。

电容极板可以实现水管和电线的探测。相比于墙体的介电常数,水的介电常数很大,利用一对开式电容极板,测量墙体介电常数变化。通过大面积覆铜,可实现电容极板的设计。极板的尺寸和排列方式需进行论证。很多电线检测方法采用接收线圈探测电线产生交变磁场<sup>[2]</sup>。然而本设计为了简化设计步骤,采用一组覆铜板作为金属天线。交变的磁场产生涡流,此时导体不再是一个等势体,通过测量导体上某点电势可以确定其附近是否存在电线。

金属检测方法主要是通过电磁传感器实现<sup>[3]</sup>。金属置于变化磁场中时,将产生附加磁场抵抗原始磁场的变化,这种变化可以通过感应线圈获取<sup>[4]</sup>。差分感应线圈抵消了接收线圈中的静态分量,对环境的变化十分敏感。差分线圈的拓扑结构比较成熟,一般采用一对大小相同、绕向相反的线圈串联而成,两线圈对称的分布在激励线圈两侧<sup>[5-6]</sup>。然而,接收线圈不在同一平面不利于印刷电路板的实现。一些设计中也将2个面积相等的半圆形或者圆形线圈置于同一平面制作差分线圈<sup>[7-8]</sup>。然而这种设计方法对设计面积有较大的浪费。本文提出的拓扑结构将一组同心圆环串联而成,能够有效地节省线圈设计面积,并提高探测范围。另外,通过输出信号的相位差值,可以判断被测物体是否属于铁质金属<sup>[9]</sup>。

中心检测也是本设计中的一个重要功能。通过对各类传感器输出信号的分析可知,传感单元越接近被测物体中心,传感器输出信号会出现峰值。因此,可以通过这一特性进行被测物体的中心检测。

## 2 墙体探测仪传感器设计方法

### 2.1 电容极板设计

#### 1) 水管探测

本文电容极板探测示意图如图1所示,图中给出了极板长、宽尺寸代号。3块电容极板分布于YZ平面,中间的极板1为电容器的一极,极板2和极板3连在一起,构成电容器的另外一极。采用此传感器探测前方的圆柱形水管,水管半径为 $r$ 。分析电容极板电容值的计算方法,以及水管处于不同位置下电容值的变化情况。

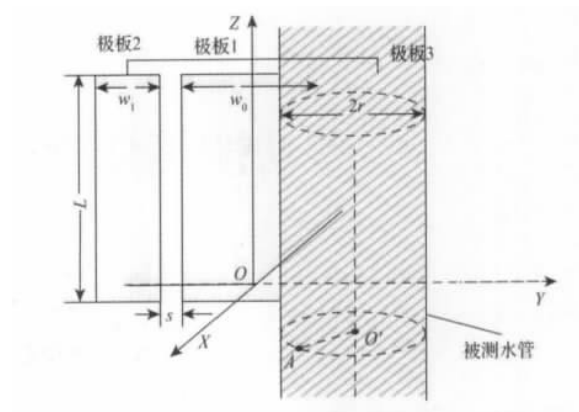


图1 电容极板探测示意图

Fig. 1 The schematic diagram of capacitance plate detection

根据电容值的计算公式:

$$C = Q/U \quad (1)$$

现假设电容极板的电势差为 $U_0$ ,极板2和极板3接地。此时极板会带上确定的电荷,并产生电场。为计算电容极板上所带电荷量,需解算空间电场模型。空间电场和电势在真空中满足下列方程:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

$$\vec{E} = \frac{\partial V}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial V}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial V}{\partial z} \vec{k} \quad (3)$$

$$(\vec{E}_{x+} - \vec{E}_{x-}) \times s = q_{\text{total}}/\epsilon_0 \quad (4)$$

式(2)中的区域不包括电容极板,式(4)由高斯公式推导而来。 $q_{\text{total}}$ 为电容极板上的电荷总量。探测模型具有的边界条件见式(5)。其中,region1代表极板1,region2代表极板2和3。

$$V_{\text{region1}} = U_0, V_{\text{region2}} = 0 \quad (5)$$

利用松弛迭代解算模型。表1给出了松弛迭代的相关计算参数,包括电容极板尺寸、水管尺寸以及格点大小和迭代次数。在圆柱表面,法向电场强度满足:

$$E_{\perp \text{ inner}} \epsilon_{\text{inner}} = E_{\perp \text{ external}} \epsilon_{\text{external}} \quad (6)$$

以图1所示水管上A点为例,设圆柱半径 $AO'$ 与 $x$ 方向的夹角为 $\theta$ ,该点与电势计算公式为:

$$V(x, y) = \frac{1}{3 + \epsilon_r} [\epsilon_r V_1 + V_2 + V_3 + V_4] \quad (7)$$

$$\begin{aligned} V_1 &= \sqrt{(\cos \theta \cdot V_{x-\Delta \delta})^2 + (\sin \theta \cdot V_{x \delta-\Delta})^2}, \\ V_2 &= \sqrt{(\cos \theta \cdot V_{x+\Delta \delta})^2 + (\sin \theta \cdot V_{x \delta+\Delta})^2}, \\ V_3 &= \sqrt{(\sin \theta \cdot V_{x-\Delta \delta})^2 + (\cos \theta \cdot V_{x \delta-\Delta})^2}, \\ V_4 &= \sqrt{(\sin \theta \cdot V_{x+\Delta \delta})^2 + (\cos \theta \cdot V_{x \delta-\Delta})^2}. \end{aligned}$$

表 1 用于松弛迭代的相关参数

Table 1 related parameters used in relaxation iteration

意义	符号	数值/mm	意义	符号	数值/mm
极板 1 宽度	$w_0$	36	空气介电常数	$\varepsilon_{\text{air}}$	$\varepsilon_0$
极板 2,3 宽度	$w_1$	12	水介电常数	$\varepsilon_{\text{water}}$	$80\varepsilon_0$
极板间隙	$s$	4	格点大小	$\Delta$	0.5
极板长度	$L$	56	迭代次数	$N$	1 000
被测水管半径	$r$	16	电压幅度	$U_0$	1 V

注:  $\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ 。

计算图 1 所示水管沿  $y$  方向移动电容的变化大小, 计算结果绘于图 2 中。

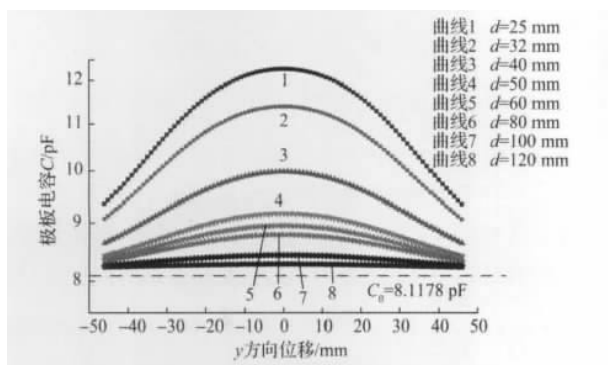


图 2 电容值随被测物移动距离的变化关系曲线

Fig. 2 The relationship curve of capacitance value vs. the displacement of the detected object

图 2 中不同曲线表示水管中心轴线与电容极板在不同距离  $d$  的情况下, 电容值的变化情况。不存在被测物体时, 电容极板理论值为 8.1178 pF。被测水管在移动过程中, 电容值不断变化, 并可以通过电容值出现的峰值, 判断水管的中心位置。

## 2) 电线探测

在印刷电路板上的空余位置进行覆铜, 构成探测电线用的金属天线。靠近电线时, 覆铜板上会产生相应的感应电动势。为了准确探测电线的中心, 金属天线分布图如图 3 所示。由于一块单独的金属天线难以准确地确定电线的位置, 因此, 通过 3 块金属天线构成传感器组进行检测。类似于长度测量中双丝夹单丝, 该方法可有效的提高电线定位精度。

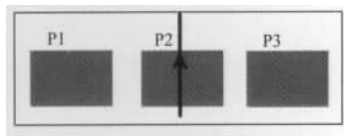


图 3 金属极板布局图

Fig. 3 The distribution of the clad copper

## 2.2 金属探测差分线圈设计方法

差分线圈的平衡对金属探测的范围有较大影响, 本文给出的设计方法, 通过数值计算的方法, 保证了差分线圈的平衡。

图 4 为探测模型, 发射线圈采用电流谐振, 接收线圈在同一平面上。图中给出了差分接收线圈的拓扑结构。接收线圈分为 3 个部分: 第 1 部分绕线方向为顺时针, 第 2 部分方向为逆时针, 第 3 部分为顺时针。该探测模型的等效电路见图 4(b)。在没有被测物体情况下, 接收线圈感应电压计算公式:

$$U_0 = \left[ \sum_{i=1}^{n_1} P(r_i) - \sum_{i=n_1+1}^{n_1+n_2} P(r_i) + \sum_{i=n_1+n_2+1}^{n_1+n_2+n_3} P(r_i) \right] k dI/dt \quad (8)$$

$I$  是激励线圈的电流,  $r_i$  是每一个接收线圈的半径,  $P(r_i)$  是每一个接收线圈输出电压与激励线圈电流变化率的比值, 不同半径的接收线圈, 有不同的感应电压。本设计主要目的是要保证差分线圈的平衡, 为了达到这一目的,  $P(r_i)$  的求解是必不可少的。 $P(r_i)$  将在下面进行重点讨论。

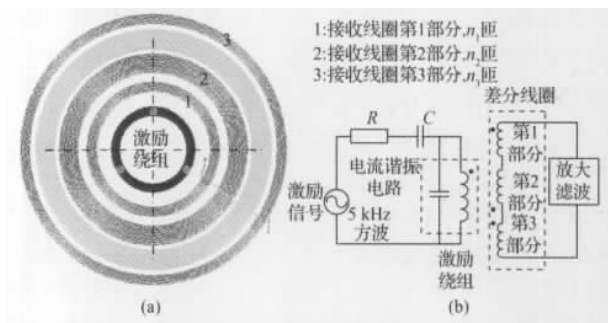


图 4 探头的拓扑结构及其等效电模型

Fig. 4 The topology structure and equivalent electrical model of the probe

本设计需要保证差分接收线圈的平衡。下面运算的目的不在于求出接收线圈的精确输出电压, 而是给出线圈的尺寸信息, 如半径、圈数等, 在不存在被测物体的情况下与输出信号的关系。通过这一关系对尺寸信息进行验证, 保证接收线圈的平衡。

首先, 分析激励线圈所产生磁场对接收线圈的影响。取激励绕组中的一匝线圈, 求解其在线圈平面上产生的磁通。为便于分析, 建立平面直角坐标系, 如图 5 所示。激励线圈与  $x-y$  平面平行。线圈半径为  $R$  且中心位于  $(0, 0, h)$  处。接收线圈平面位于  $x-y$  平面上, 且所有接收线圈均以原点为圆心。

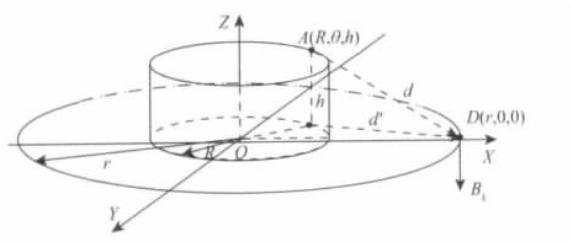


图5 用于分析单匝激励线圈对单匝接收线圈影响的坐标系  
Fig. 5 The coordinate system used to analyze the induced signal in single-turn receiving coil generated from one single-turn emitting coil

假设某一接收线圈半径为  $r$ , 则磁场在该线圈上产生的感应电动势可以用式(9)表示。 $\Phi$  为通过接收线圈所围成面积的磁通。

$$V_{\text{out}} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot \hat{\mathbf{n}} dS \quad (9)$$

接下来分析发射线圈在  $x-y$  平面上产生的磁通密度。由于激励线圈关于  $z$  轴中心对称, 因此, 在  $x-y$  平面上任意一个以原点为圆心的圆上, 磁通密度的大小是相等的。以接收线圈上一点  $D(r, \rho, \rho)$  为例, 根据比尔萨法尔定理, 磁密的表达式可以写成如下形式, 为了简化分析, 此处采用柱坐标的表示方法。

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{I R \hat{\boldsymbol{\theta}} \times \mathbf{d}}{|\mathbf{d}|^3} d\theta \quad (10)$$

式中:  $I$  为激励线圈上的电流幅值,  $\mu_0$  是真空磁导率, 两个数值为常量。 $\mathbf{d}$  是电流源  $A$  到  $D$  点的向量,  $\hat{\boldsymbol{\theta}}$  是柱坐标中极角的单位向量。为了进行叉乘运算, 将这两个向量转化至平面直角坐标系中。向量  $\mathbf{d}$  和向量  $\hat{\boldsymbol{\theta}}$  可以表示为如下形式:

$$\mathbf{d} = (r - R \cos \theta) \hat{\mathbf{i}} - R \sin \theta \hat{\mathbf{j}} - h \hat{\mathbf{k}} \quad (11)$$

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = -\sin \theta \hat{\mathbf{i}} + \cos \theta \hat{\mathbf{j}} \quad (12)$$

由于接收线圈平面方向为  $z$  轴方向, 现仅考虑  $x-y$  平面上磁通密度在  $z$  轴方向上的分量。该分量表达式为式(13)。由此可以给出磁通的表达式, 磁通的大小由式(14)给出, 其符号和接收线圈的绕向有关。将其代入式(9), 可以获得在  $x-y$  平面上, 半径为  $r$  的接收线圈感应电动势为式(15)。感应电动势的表达式中, 只有电流和时间是相关的, 另外磁导率是常量, 因此, 把和线圈设计参数有关的量构造一个新的函数  $P_0(r_i)$ , 该函数表达式为式(16), 其反映了感应电压和激励电流的关系。

$$\mathbf{B}_k = \hat{\mathbf{k}} \frac{\mu_0 I R}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{R - r \cos \theta}{(\sqrt{R^2 + r^2 - 2Rr \cos \theta + h^2})^3} d\theta \quad (13)$$

$$\Phi = \int_0^r |\mathbf{B}_k| [\pi(r + dr)^2 - \pi r^2] = 2\pi \int_0^r |\mathbf{B}_k| r dr \quad (14)$$

$$V_{\text{out}} = \frac{dI(t)}{dt} \frac{\mu_0}{2} \int_0^r \int_0^{2\pi} \frac{Rr(R - r \cos \theta)}{(\sqrt{R^2 + r^2 - 2Rr \cos \theta + h^2})^3} d\theta dr \quad (15)$$

$$P_0(r_i) = \int_0^r \int_0^{2\pi} \frac{Rr(R - r \cos \theta)}{(\sqrt{R^2 + r^2 - 2Rr \cos \theta + h^2})^3} d\theta dr \quad (16)$$

通过积分计算  $P_0(r_i)$  是很困难的, 实际应用中, 可以通过离散求和的方法得到积分结果。将  $d\theta$  和  $dr$  分别替换成  $\Delta\theta$  和  $\Delta r$ , 计算时  $\Delta\theta$  和  $\Delta r$  应该足够小以保证计算的精度。这里, 取  $\Delta\theta = \pi/500$ ,  $\Delta r = 0.01$  mm。由于  $P_0(r_i)$  表示单一激励线圈的感应电压, 因此, 将所有激励线圈对单匝接收线圈的效果之和表示成  $P(r_i)$ , 表达式见式(17)。感应电压为式(18), 其中的  $\frac{dI}{dt}$  和  $\frac{\mu_0}{2}$  是常数项,

因此, 输出信号正比于  $P(r)$ 。图6指出了  $P(r)/10^3$  在不同半径  $r_i$  下的取值。本激励绕组结构见图6插图, 图中的计算公式可以计算每一个激励线圈的半径  $R_m$  和高度  $h_m$ 。图中曲线还标出了某些半径值下, 计算得到的  $P(r)$ 。

$$P(r_i) \approx \sum_{m=1}^M P_0(r_i) = \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^{r_i} \left[ \sum_{j=0}^{2\pi} \frac{R_m r (R_m - r \cos \theta)}{(\sqrt{R_m^2 + r^2 - 2R_m r \cos \theta + h_m^2})^3} \Delta\theta \right] \Delta r \quad (17)$$

$$V_{\text{out}} \approx P(r_i) \frac{dI}{dt} \frac{\mu_0}{2} \quad (18)$$

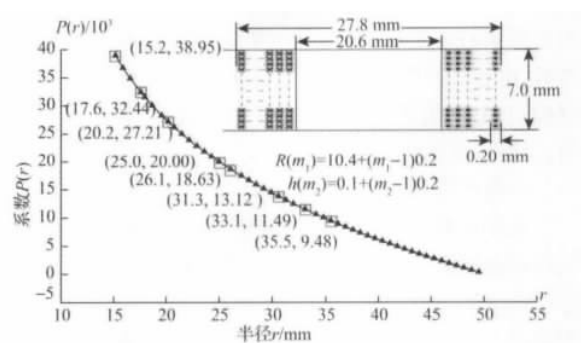


图6 系数  $P(r)/10^3$  与半径的关系曲线, 内置插图为激励线圈的几何尺寸和各圈高度和半径计算公式

Fig. 6 Relationship curve of the coefficient  $P(r)/10^3$  versus the radius in  $x-y$  plane, the inset diagram shows the geometry of the emitting coil and the calculation formulas for radius and height

组成差分接收线圈的3部分在图4(a)中已有表示。其圈数分别对应  $N_1$ 、 $N_2$  和  $N_3$ 。令各部分线圈半径成等差数列。等差数列的公差为3部分的间隙。各个部分的圈数、起始半径及公差如表2所示。代入数值计算得感应电压为式(19)。将输出电压的计算结果和由一个半径为35.5 mm的接收线圈上的感应电压进行对比。本差分

线圈的输出电压相比于单一线圈小 4 个数量级, 有理由认为设计达到了平衡状态。

表 2 接收线圈各部分尺寸参数

Table 2 The dimension parameters of different parts of the receiving coil

	圈数 / $N$	起始半径 $r_0$ / mm	公差 $a_r$ / mm
第 1 部分	9	15.2	0.3
第 2 部分	18	19.9	0.3
第 3 部分	9	33.1	0.3

注: 各圈半径的计算方法:  $r_n = r_0 + (n-1)a_r$ 。

$$U_0 = \frac{u_0}{2} \cdot \frac{dI}{dt} \left[ \sum_{i=1}^{n_1} P(r_i) + \sum_{i=n_1+1}^{n_1+n_2} P(r_i) - \sum_{i=n_1+n_2+1}^{n_1+n_2+n_3} P(r_i) \right] = -5.8 \frac{u_0}{2} \frac{dI}{dt} < V_{\text{out}1} r = 35.5 = 9886.3 \frac{u_0}{2} \frac{dI}{dt} \quad (19)$$

### 3 探测仪硬件与软件设计方法

#### 3.1 硬件电路设计方法

信号处理框图如图 7 所示。将电容极板接入单稳态触发电路中, 产生一路占空比随电容大小变化的脉冲信号, 其均值与直流参考电平作差分放大, 输出电压结果可以反映电容变化的大小。极板电容值变化越大, 输出信号的变化越大。输出信号为直流电平, 通过 A/D 采样获得数据。金属天线接入一个高阻抗放大电路, 通过 A/D 采样获得信号峰值。差分线圈获得的信号经过放大和滤波电路进行处理, 通过偏置电路后, 采用 A/D 转换获得电压信号进行分析。相关文献表明, 相位测量比幅度测量具有更大的探测范围。

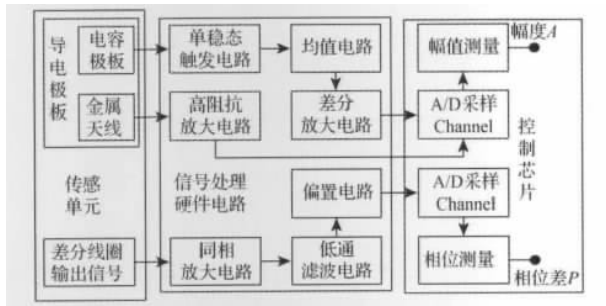


图 7 传感单元硬件处理电路

Fig. 7 Hardware processing circuit of the sensor unit

#### 3.2 测量软件设计方法

对探测原理分析可知, 被测物体距离仪器探头越近, 传感单元输出信号变化越大。为了进行被测物体中心指示, 需判断仪器运动过程中输出的信号峰值。通过对信号分析获得的输出数据, 包括相位差和幅度, 均为对仪器位置  $x$  的连续可导函数, 可用函数  $f(x)$  表示。峰值判断方法为:

$$\begin{cases} f'(x) = 0 \\ f'(x_+) f'(x_-) < 0 \end{cases} \quad (20)$$

因此, 对于获得的采样数据  $s(n)$ , 可通过下列方法进行峰值判断:

$$\begin{aligned} s(n) - s(n-1) &< \varepsilon \\ [s(n+1) - s(n)] \cdot [s(n-1) - s(n-2)] &< 0 \end{aligned} \quad (21)$$

用于比较的采样数据  $s(n)$  有下列信号处理通路获得。由于传感器输出信号的非线性和滞后性, 设计控制程序时, 需引入相应的自适应环节和微分环节<sup>[10]</sup>。另外, 考虑到仪器贴近被测物体移动过程中, 路径的不规则与不确定导致输出信号具有不确定的变化规律, 因此在信号通路中引入积分环节消除不确定扰动的影响。针对探测器不同的运动速度, 为了保证较好的测量效果, 必须采用合适的积分和微分参数。当探测器移动速度较快, 必须抑制微分环节的作用以保证响应的高频特性。当探测器移动速度缓慢, 为了减小测量噪声对被测物体进行中心判断的影响, 应当增加积分环节对系统引入的惯性作用。调节参数利用测量数据变化率的导数, 并通过相关自适应调节算法获取<sup>[11]</sup>。

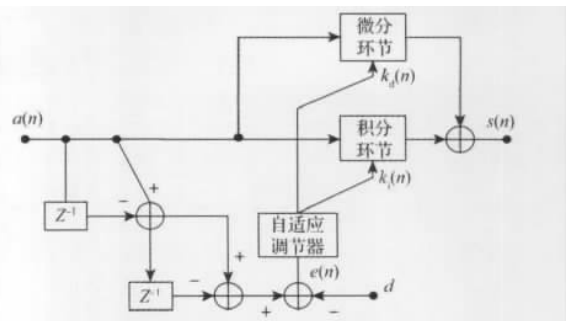


图 8 数据处理原理框图

Fig. 8 Data processing principle diagram

输入信号  $a(n)$  为系统通过 A/D 采样获得的输出, 可以是金属探测中的相位差信息  $P(n)$  或者是水管探测的幅度信息  $A(n)$ 。 $d$  为参考量, 与输入信号  $a(n)$  的二次导数比较获得误差信号输入自适应调节器, 获得自适应调节参数  $k_d(n)$  和  $k_i(n)$ 。积分环节和微分环节获得的输出叠加后获得最终的测量数据  $s(n)$ 。

针对电线的中心检测, 输入数据采用的是中间电容极板 P2 输出信号幅度。P1 和 P3 的输出可以增加另外一个辅助条件: 左右两侧的电容器板输出信号要十分接近。如式 (22) 所示,  $\varepsilon_w$  是一个设定的极小门限。该设计使电线的定位效果有极大的改善。

$$|s_{p3}(n) - s_{p1}(n)| < \varepsilon_w \quad (22)$$

### 4 墙体探测仪的测试

依照本文的设计方法, 江苏某电子公司设计了一批原理样机。样机的功能主要是完成水管、电线和金属物

体的探测和定位。测试墙体为普通砖墙,各层墙体厚度为10 mm,测量时通过堆叠的方式模拟不同厚度的墙体。测试示意图如图9所示。水管采用直径为32 mm的PVC管,里面充满水;电线通入220 V交流电并带30 W负载;金属探测采用直径为60 mm,厚度为2 mm的铝板。仪器上的通孔用来标记中心位置,测试时需手持仪器在墙面上反复来回移动,探测到被测物体,以及寻找到中心位置时,仪器会进行不同的提示。当中心位置被检测到时,需停止移动仪器并标记出中心位置。进行水管和电线测量时,仪器有2个运动方向,如图9所示,方向1和方向2夹角为30°。最后的测量结果为标记点距离被测物轴线在墙面上投影的垂直距离。进行金属探测时,仪器移动方向是任意的,最后的测量结果为标记点距离金属板中心点在墙面上投影的距离。测量结果如表3所示。

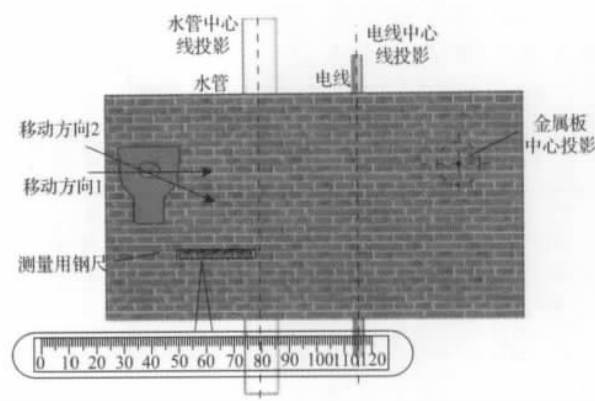


图9 测试原理图

Fig. 9 Test schematic diagram

表3 实验测试结果

Table 3 The experiment test result

			墙体厚度/mm											
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
样机 1	水管	方向 1	3.3	5.4	7.3	9.1	10.0	>10	>10	>10	>10	>10	>10	>10
	探测	方向 2	4.2	5.7	7.5	9.0	9.8	>10	>10	>10	>10	>10	>10	失败
	定位	电线	0.2	0.3	0.4	0.5	0.4	0.3	0.6	0.5	0.3	0.0	0.5	0.8
	偏差/mm	探测	0.4	0.3	0.4	0.6	0.4	0.4	0.6	0.7	0.2	0.3	0.4	0.7
	金属探测		0.7	0.9	0.8	0.6	1.1	0.7	0.9	1.2	0.8	0.9	1.8	2.4
样机 2	水管	方向 1	2.3	4.2	6.5	7.7	8.9	9.5	>10	>10	>10	>10	>10	>10
	探测	方向 2	3.0	5.1	7.5	8.0	9.6	>10	>10	>10	>10	>10	>10	>10
	定位	电线	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.3	0.6	0.5	0.6	0.4	0.3
	偏差/mm	探测	0.1	0.3	0.4	0.5	0.5	0.4	0.6	0.6	0.2	0.5	0.6	0.4
	金属探测		0.3	0.5	0.7	0.8	0.8	0.8	0.7	0.9	1.2	1.5	1.5	1.9
样机 3	水管	方向 1	2.9	4.4	6.8	8.2	9.8	>10	>10	>10	>10	>10	>10	>10
	探测	方向 2	3.8	5.2	6.5	9.7	10.0	>10	>10	>10	>10	>10	>10	>10
	定位	电线	0.3	0.1	0.4	0.4	0.4	0.5	0.2	0.2	0.4	0.8	0.4	0.5
	偏差/mm	探测	0.3	0.2	0.4	0.4	0.3	0.6	0.1	0.2	0.5	0.7	0.5	0.4
	金属探测		1.0	1.2	1.8	1.3	1.1	1.4	0.9	1.4	1.8	2.0	2.4	3.5

由表3中测量效果可知,仪器对水管探测功能探测范围可以达到120 mm,在50 mm的探测范围内,定位精度优于10 mm,超过50 mm,定位误差超过10 mm,但是仍然可以指示出水管的存在。电线探测范围可以超过120 mm且定位精度优于1 mm。中心定位精度主要与被测物体的尺寸有关,由于电线直径远小于水管,因此具有较好的探测效果。金属探测效果较为理想。探测极限为120 mm,中心定位误差在1 mm左右。不同的探测器效果具有一定差异,主要由PCB电容极板和探测线圈的设计误差造成。进行水管探测时,随着仪器距离被测水管越远,仪器移动过程中,极板电容变化变得十分微弱。探测仪虽然不能较好地反映被测水管的中心位置,但是可以探测出墙壁内部存在被测水管并进行报警。

## 5 结 论

本文介绍了3种传感器的设计方法和中心定位算法设计。实验结果证明,对3种被测物体的探测深度,均大于120 mm。电线和金属探测的中心定位精度良好。水管探测中,当被测水管大于50 mm,由于电容变化情况不是十分明显,中心定位精度受到了较大影响,将超过10 mm,但是仍然可以检测出水管的存在。用户对于墙体探测仪的要求主要在于仪器能否探测出被测物体的存在,因此,本仪器的设计效果,能够满足用户的需求。

## 参考文献

- [1] 周德强,田贵云,尤丽华,等.基于频谱分析的脉冲涡流缺陷检测研究[J].仪器仪表学报,2011,32(9):

- 1948-1953.
- ZHOU D Q ,TIAN G Y ,YOU L H et al. Study on pulsed eddy current defect signal detection technology based on spectrum analysis [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument 2011 ,32( 9) : 1948-1953.
- [ 2 ] CHEN Y C ,YU S C ,CHENG S H et al. A flexible inductive coil tag for household two-wire current sensing applications [J]. IEEE Sen. J. 2012 ,12( 6) : 2129-2134.
- [ 3 ] TUMANSKI S. Induction coil sensors-a review [J]. Meas. Sci. Technol. 2007 ,18( 3) : 31-46.
- [ 4 ] 刘慧娟 ,李志刚. 一种基于电压和频率的金属探测方法 [J]. 仪器仪表学报 2006 27( 7) : 769-772.
- LIU H J ,LI ZH G. Metal detection method based on voltage and frequency [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument 2006 27( 7) : 769-772.
- [ 5 ] TANG Z ,CARTER L J. Metal detector head analysis [C]. Proc. ICST Palmerston North ,New Zealand 2011: 93-96.
- [ 6 ] SHARAWI M S ,SHARAWI M I. Design and implementation of a low cost VLF metal detector with metal-type discrimination capabilities [C]. Proc. IEEE ICSPC ,Dubai , United Arab Emirates 2007: 24-27.
- [ 7 ] 王娜 ,万全. PCB 型 Rogowski 线圈的误差分析 [J]. 电子测量与仪器学报 2011 25( 1) : 50-55.
- WANG N ,WAN Q. Error analysis of PCB Rogowski coil [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument ,2011 , 25( 1) : 50-55.
- [ 8 ] 庞瑞帆 ,钟翔 ,胡泷 ,等. 双频金属探测器的研究 [J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版 2001 2( 2) : 1-8.
- PANG R F ,ZHONG X ,HU L et al. Research on dual frequency metal detector [J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science ,2001 ,2( 2) : 1-8.
- [ 9 ] 曹青松 ,周继惠. 基于电涡流的金属种类识别技术的理论与实验研究 [J]. 仪器仪表学报 ,2007 ,28( 9) : 1718-1722.
- CAO Q S ,ZHOU J H. Theoretical and experimental study on metal type identification based on eddy current [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument ,2007 ,28( 9) : 1718-1722.
- [10] 刘秉安. 电容式传感器寄生电容的抑制 [J]. 国外电子测量技术 2011 30( 3) : 46-49.
- LIU B AN. Research on the suppression of parasitic capacitance in capacitive sensor [J]. Foreign Electronic Measurement Technology 2011 30( 3) : 46-49.
- [11] 文玉梅 ,谢仁峰 ,杨进 ,等. 管道泄漏检测中的噪声自适应抑制 [J]. 仪器仪表学报 ,2012 ,33( 10) : 2228-2233.
- WEN Y M ,XIE R F ,YANG J et al. Adaptive noise suppression in pipeline leak detection [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument 2012 33( 10) : 2228-2233.

### 作者简介



徐逢秋 2011 年于武汉大学获得学士学位 现为武汉大学硕博连读研究生 ,主要研究方向为电磁传感器以及磁悬浮技术。

E-mail: hncxu@ whu. edu. cn

**Xu Fengqiu** received B. Sc. degree in engineering from Wuhan University in 2011. He is currently pursuing Ph. D. degree in Wuhan University. His research interests include electromagnetic sensor and magnetic suspension technology.



许贤泽 ,2002 年于武汉理工大学获得博士学位 ,现为武汉大学教授、博士生导师 ,主要研究方向为精密仪器及机械、精密测量与控制。

E-mail: xuxianze@ whu. edu. cn

**Xu Xianze** received his Ph. D. from Wuhan University of Technology in 2002. He is a professor and Ph. D. supervisor in Wuhan University. His research direction is precision instrument and machinery ,and precision measurement and control.