

基于电磁感应和超宽带雷达的新型探测系统

高云泽^{1,2} 叶盛波¹ 张晓娟¹ 方广有¹

(1. 中国科学院电子学研究所 北京 100190; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 超宽带探地雷达是近年来迅速发展起来的一种高新无损检测技术,可对地下目标进行高分辨率成像,但很难直接判断目标是金属或非金属的,而且无法得到准确的探测深度。针对地下目标材质识别和获取准确探测深度的需求,研制了一种将电磁感应与超宽带雷达相结合的新的探测系统。该系统可以直接分辨金属和非金属目标,并能反演出介质的介电常数,从而得到目标的准确深度。将该探测系统在测试模型上进行了实验,取得了很好的效果。

关键词: 无损检测;探地雷达;电磁感应;材质识别

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.70

Novel detection system based on EMI and UWB

Gao Yunze^{1,2} Ye Shengbo¹ Zhang Xiaojuan¹ Fang Guangyou¹

(1. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Ground penetrating radar (GPR) is a recently developed technology for nondestructive examination (NDE). It can be used to image the buried objects with high resolution. But GPR can't directly tell an object metallic or not, and can't give accurate depth of detected object. We developed a device based on electromagnetic induction (EMI) and GPR. This device can discriminate metallic object from others easily and give its accurate depth. We tested the device on a modal and got a satisfied result.

Keywords: nondestructive examination (NDE); ground penetrating radar (GPR); electromagnetic induction (EMI); discrimination

1 引言

探地雷达(ground penetrating radar, GPR)是近些年来迅速发展起来的一种高新无损检测技术,目前国内外已经应用得非常广泛,利用介电常数差异对地下物体成像。利用GPR技术可对地下目标成像,但无法直接判别地下目标是金属或非金属,由于不能获取介质的准确介电常数,探测深度误差较大。

电磁感应(electromagnetic induction, EMI)也是常用的无损探测方法。其探测原理是利用发射线圈向周围空间发射交变磁场(称为一次场),如果邻近空间存在电导率较高的物体,则在该物体内会形成涡流,涡流又在周围空间形成同频交变磁场(称为二次场),根据二次场的变化即可对物体的位置和深度进行准确探测。这种方法对金属物体比较敏感,探测深度也很准确,但是很难探测电导率低的物体。

在地下管线普查和建筑物结构探测中,常需要查明所

测目标是否为金属,但常用勘察手段GPR与EMI很难单独解决该问题,必须联合两种方法来共同完成^[1]。在军事上地雷探测常用的技术手段是金属探测器即EMI方法,但随着非金属质地雷的出现,单独使用EMI方法已经不能很好地解决问题,必须联合GPR共同探测^[2-3]。环保领域有时也需要联合两种方法来共同解决问题,如M. Van Meirvenne等利用GPR和EMI联合探测土壤污染物, Cameron W. Toy等联合GPR和EMI探测土壤含水量随季节的变化^[4-6]。但是,目前两种方法的联合是用两种仪器各自单独测量,这种方式存在一些问题,如数据融合难度较大,两种方法存在定位偏差,工作效率低等。如果能将上述两种探测方法结合在一起,研制一款GPR和EMI同时工作并且数据实时融合的探测系统,将显著提高地下探测的能力和效率^[7]。

针对上述多传感器联合探测的需求,研发了一种将GPR和EMI结合在一起的小型探测系统。该系统可以直接判定所探测的目标是金属或非金属,并得出电磁波在介质中的传播

速度,从而获得地下目标的准确深度。首先介绍了该探测系统的设计原理和技术指标,然后提出了探测目标是否为金属和目标准确深度反演的原理,最后进行了实验验证。

2 系统原理

整个系统分为3个模块:主控模块、电磁感应模块和超宽带雷达模块。其中雷达模块包括雷达脉冲发射机、雷达模拟接收机和雷达收发天线;电磁感应模块包括信号发射电路、信号采集电路和感应线圈,系统原理如图1所示。

主控系统基于可编程逻辑门阵列(FPGA)和嵌入式ARM系统。FPGA是整个系统时序和控制逻辑产生的核心^[8]。发射机、采样门以及电磁感应模块所需的触发时钟信号均由FPGA来产生。同时FPGA通过控制可编程延迟芯片来实现最小为16 ps的步进时延,提供给采样门从

而实现等效采样的功能。雷达接收机中的A/D转换也是通过FPGA进行控制,转换后的数据缓存在FPGA中,部分数据处理的功能包括数据平均,滤波等也在FPGA中完成。雷达和电磁感应的数据在FPGA内进行打包,按照特定的数据协议传送给ARM系统进行进一步的处理及显示。测量轮用于测量探测仪移动的距离,便于探测图像上目标的距离定位。通过对电源进行遥测,可实时获取当前电源的电量值,而激光可引导雷达进行直线轨迹运动。获取到的距离信息和电量信息都被打包在数据帧中。

系统的应用界面在嵌入式Linux系统中完成,包括采集界面和图像显示界面。当雷达采集完数据后,FPGA将打包数据传送给嵌入式ARM系统,ARM系统将数据存储在SD卡中,同时在LCD中进行实时成像显示,采集过程中数据也可通过Wi-Fi接口传送到电脑上实时显示。

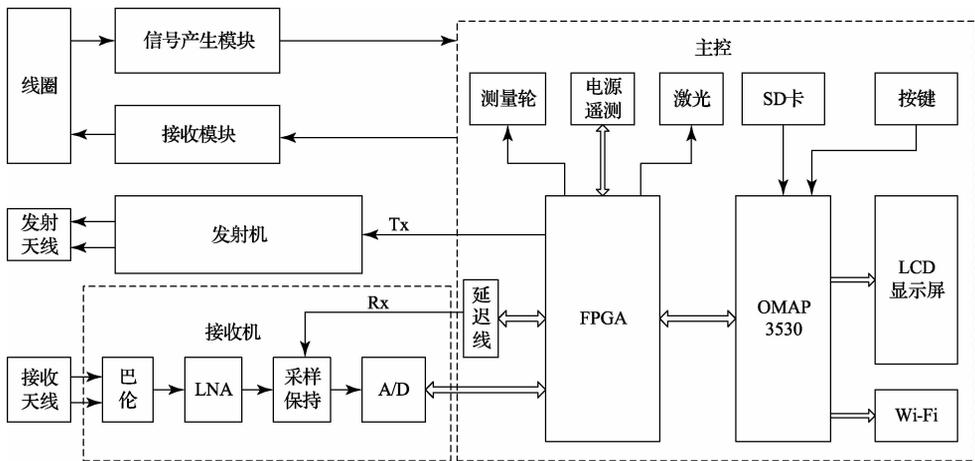


图1 系统原理

2.1 雷达模块

雷达模块包括发射机、接收机以及收发天线。雷达发射机用于产生窄脉冲信号,发射天线将发射机产生的脉冲信号辐射出去,接收天线接收目标对雷达的反射波并送给接收机进行采样数字化,主控单元产生雷达系统各单元所需的时序、控制信号。

雷达发射机利用阶跃恢复二极管来产生波形为高斯的脉冲信号。发射机在主控系统产生的触发时钟信号的控制下,产生一对平衡窄脉冲。天线频率设计为1.6 GHz,采用平面蝶形偶极子天线,该天线具有良好的阻抗特性、紧密的介质耦合能力,同时采取一定加载技术能够有效地削弱天线末端的二次反射,保持天线具备良好的时域特性^[9-10],如图2所示。

接收机由宽带巴伦、低噪声放大器(LNA)、模拟采样保持电路和低速A/D组成。接收天线接收到的雷达回波信号首先经过宽带巴伦转为单端信号,信号幅度约为100 mV,为改善雷达系统的动态范围,需要使用LNA对信号进行

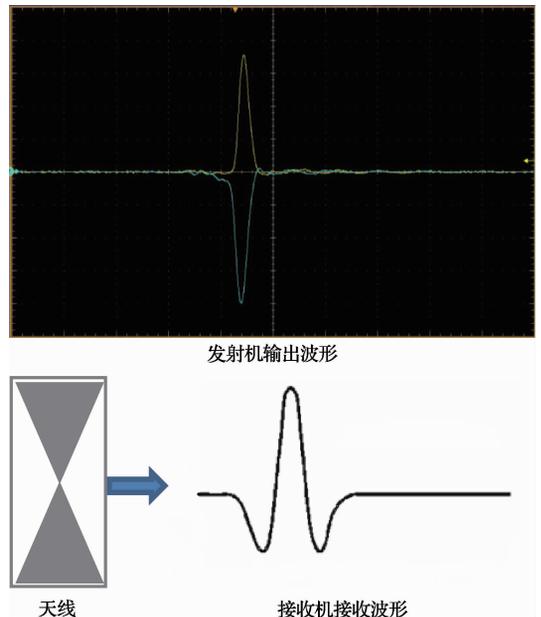


图2 发射与天线接收波形

放大以达到后级采样保持电路的输入范围要求^[11]。放大后的回波信号再经过模拟采样保持电路,利用基于采样相位检测器(SPD)的模拟采样门,并结合等效采样的技术将射频信号转换为音频信号。经过采样保持电路转换后的音频信号通过 A/D 进行模数转换,转换后的数字信号送到主控系统进行数据存储和处理^[12-14]。

2.2 电磁感应模块

电磁感应模块由信号发生电路、感应线圈和采集电路组成,信号发射系统在主机的控制下,产生重复频率为 1.6 kHz 的激励信号激励线圈,感应线圈感应被测金属的感应电流重新向外界辐射出电磁场(即二次场),使原激励线圈产生感生电动势,从而使线圈的输出电压产生变化,输出的信号经信号采集系统转换为数字信号,送入主控系统进行处理,并得出相应的结果。感应线圈设计频率为 40 kHz、匝数为 120 和直径 3 cm。

感应线圈和雷达天线的布置受多种因素的影响^[13]。为了使雷达模块和感应模块同时采集到同一目标的反射信号,采取了共中心点的布局方式,如图 3 所示。左右两侧为雷达发射和接收天线,中间的感应线圈包括两个小线圈和一个大线圈,分别对应小量程和大量程。因为天线与线圈之间存在相互干扰,需要采用一种特殊的屏蔽材料使其互相隔离。

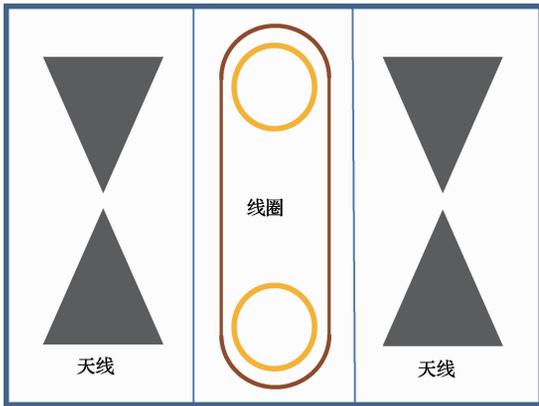


图 3 天线与线圈

根据电磁场理论,线圈是严格磁偶极子,当信号源供给交变电流时,它向外界辐射出电磁场。金属导体接收外界电场,从而产生沿自身分布的感应电流,感应电流重新向外界辐射出电磁场(二次场),使原激励线圈产生感生电动势,从而使线圈的输出电压产生变化,电磁感应模块正是根据这一变化来确定金属导体所在的位置及其深度的。

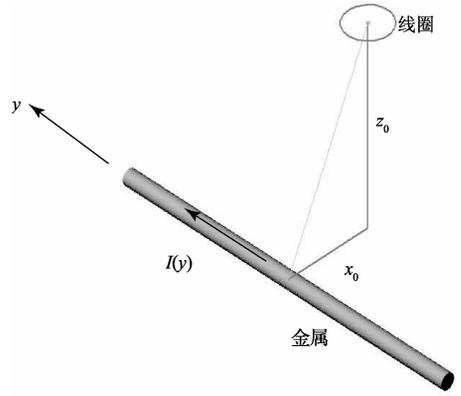


图 4 电磁感应

在图 4 所示坐标中,设金属导体轴沿 y 方向,它与线圈的水平和垂直距离分别为 x_0 和 z_0 。在准静态近似下,它在金属导体某处激发的切向电场为:

$$E_y(y) = \frac{K_1 x_0}{(x_0^2 + z_0^2 + y^2)^{3/2}} \quad (1)$$

式中: K_1 为激发系数,与线圈半径和输入线圈的电流成正比。金属导体上电流元 $I(y)dy$ 在线圈中心位置激励的垂直磁场为:

$$E_y(y) = \frac{K_2 x_0}{(x_0^2 + z_0^2 + y^2)^{3/2}} \quad (2)$$

式中: K_2 为激发系数,与金属导体的电导率和介电常数有关。金属导体元 dy 在线圈中心引起的二次磁场垂直分量为:

$$E_y(y) = \frac{K_1 K_2 x_0^2}{(x_0^2 + z_0^2 + y^2)^2} \quad (3)$$

积分各段电流元在线圈上的贡献后,线圈中心的二次场的垂直磁场分量为:

$$E_y(y) = \frac{K_1 K_2 x_0^2}{(x_0^2 + z_0^2)^{5/2}} \quad (4)$$

B_z 与 X_0 的关系如图 5 所示,其中横坐标以金属导体深度 Z_0 为单位。

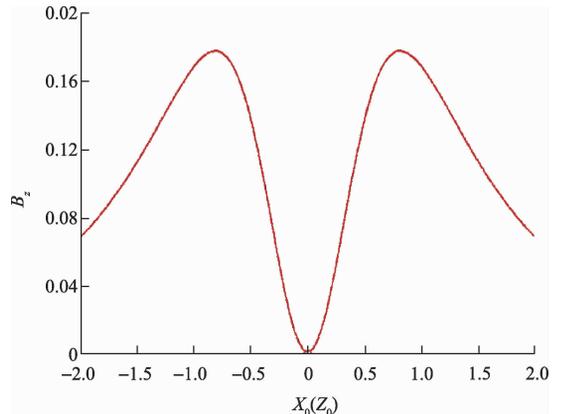


图 5 线圈中心二次场磁场分量

线圈由二次场产生的电动势正比于二次场的磁通量,对线圈的面积积分后,二次场磁通量与 x_0 的关系如图6所示,当 $x_0 = 0$ 时,即线圈位于金属目标正上方时,二次场电动势具有极大值,这时线圈的输出电压受金属导体的影响最大。

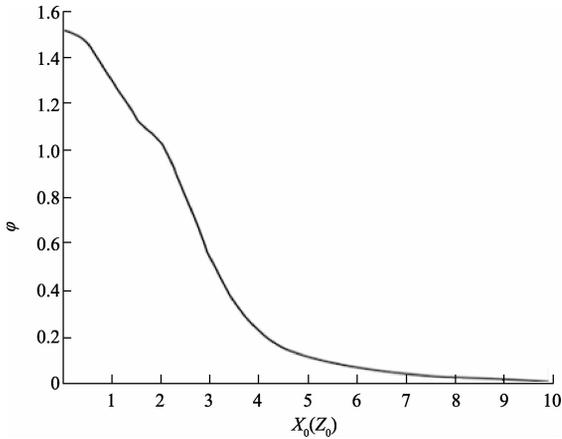


图6 二次场磁能量与目标位置的关系

2.3 技术指标

开发的GPR和EMI能同时工作的小型探测系统技术指标如表1所示。

表1 系统设计指标

指标名称	指标值	指标名称	指标值
天线频率/GHz	1.6	A/D位数/bit	16
采样频率/GHz	64、32、16	采样点数	256、512、1024
重复频率/GHz	500	平均次数	1~256
线圈匝数	120	线圈频率/kHz	40
供电方式	7.4 V 锂电池	功耗/W	<7

2.4 探测方法

开始探测前,先要对电磁感应模块进行校准。校准方法是将设备对空采集背景数据,为正式测量提供参照信号。校准后即可开始正式探测,雷达数据以剖面形式显示,电磁感应信号以曲线形式在雷达剖面下方显示,两种数据按制定好的协议保存在同一个数据文件里。

探测结束后,需要做一些数据处理工作,为识别不同类型的目标做准备。首先,对雷达图像进行处理,由于雷达波束宽度的影响,地下目标在雷达图像上会形成拖尾,必须使用偏移成像算法使信号拖尾聚焦到目标真实位置。由于空间干扰的影响,感应信号会有一些毛刺,容易将其误判为真实目标,可对感应信号进行空间滤波,在不损失

信号原貌的情况下使其平滑。最后,将雷达剖面 and 感应曲线结合起来判断所测目标是否金属或非金属^[16-17]。

目标识别的具体方法是:在雷达剖面的有反射目标位置,对照感应信号曲线,如果曲线存在由小变大再变小的拐点,那么可以判断该目标为金属,如果感应曲线上没有拐点,则可判定该目标为非金属。拐点判断法的原理是对曲线连续求导,求导后某点之前3个导数连续为正,该点之后3个导数连续为负,即存在拐点,则判定该点对应金属目标;如果只在雷达剖面上有双曲线特征,而在感应曲线上没有拐点且信号值很低,则可确定为非金属目标,如图8所示。实测感应曲线在局部可能存在小的波动,此时直接用上述算法判定拐点误判率较高,可以在判断拐点之前,对感应信号做零相位滤波处理。

为了获取所探测目标的准确深度,需要反演电磁波在介质中的准确传播速度,先由雷达数据自动识别出所有目标,然后由感应模块得到金属目标的深度,从雷达数据得出电磁波到目标的传播时间,进而计算出电磁波传播速度。目标自动识别的方法是:先对偏移处理后的雷达数据按设定好的阈值进行二值化处理,然后使用扫描线算法得到数据中高于阈值的连通区域,根据区域的大小和形状判断其是否为探测目标^[18-19]。

将目标深度 h 和时间 t 结合起来计算传播速度 v 和介电常数 ϵ 的公式如下:

$$v = \frac{2h}{t} \quad (5)$$

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} \quad (6)$$

$$v = \frac{c^2 t^2}{4h^2} \quad (7)$$

式中: c 为电磁波在空气中的传播速度, t 为电磁波到目标的双程传播时间, h 为目标的埋藏深度。

3 系统测试

为了测试所研制的探测系统的性能,对掩埋在混凝土中的钢筋和PVC管进行了测试,测试结果如图7所示。从图中可以看出钢筋和PVC管在雷达图像中都呈现双曲线的特征,只靠雷达数据无法直接判断哪一个目标是PVC管,必须结合电磁感应数据综合分析。图8为使用测试数据中的感应信号绘制的曲线,可发现图7蓝色圆圈标注的双曲线反射在图8感应曲线对应位置上没有凸起,感应信号值很小,故可推断其为非金属目标PVC管。

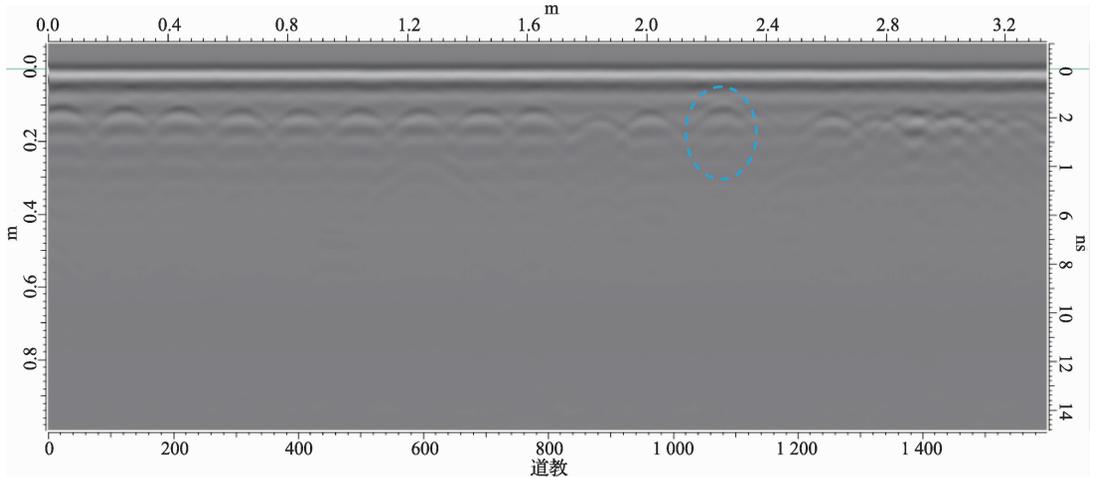


图7 原始雷达剖面

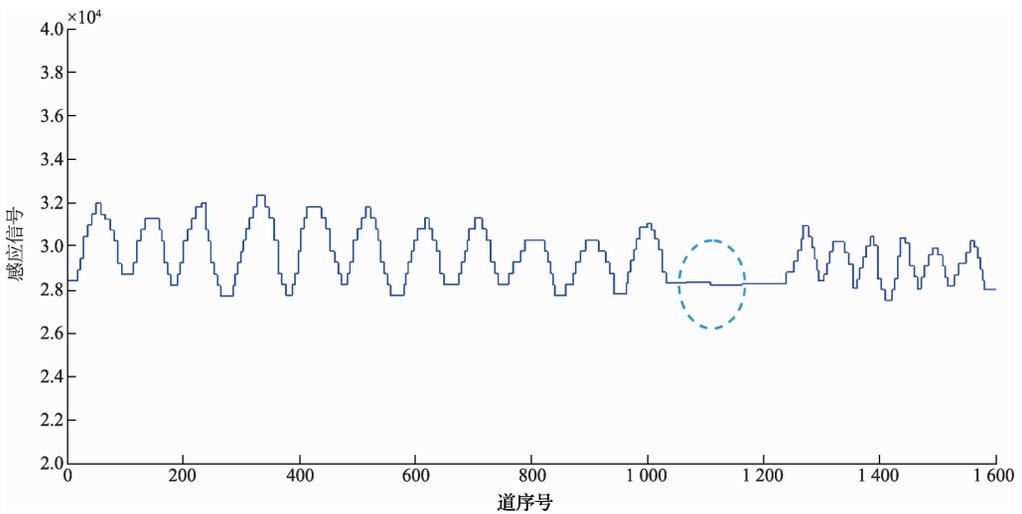


图8 电磁感应曲线

对数据进行时间零点校正、增益、滤波等预处理,然后设定一个经验介电常数做偏移成像处理,使目标的双曲线反射信号聚焦到双曲线顶点,真实反映目标的位置

和形状,如图9所示,图中圆圈标注的为雷达目标偏移成像后的结果,红色和蓝色圆圈分别代表钢筋和PVC管。

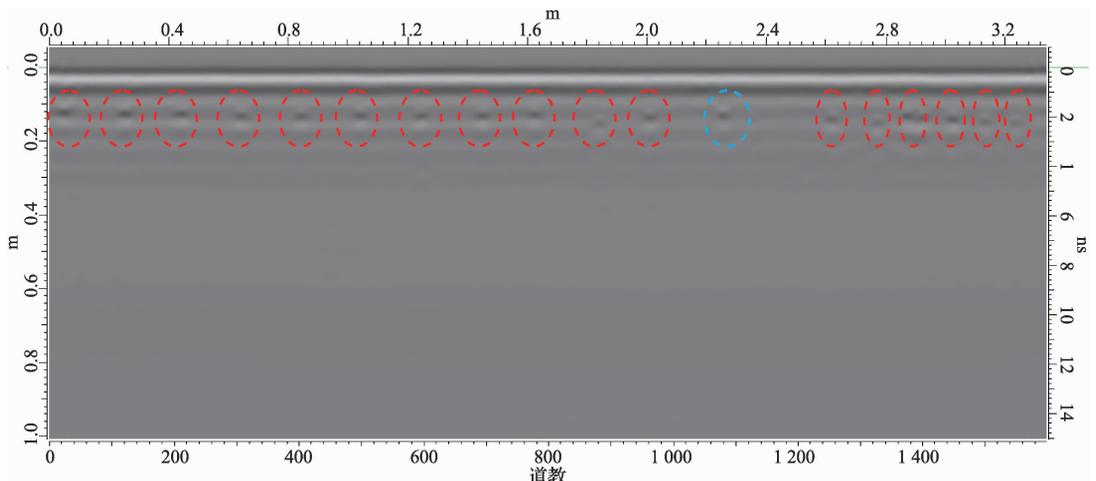


图9 道数偏移成像结果

在模型上布置了4条测线,测线互相平行,间距为20 cm,与钢筋延伸方向垂直,如图10所示,图中黑色圆点代表钢筋,白色代表PVC管。对4条测线均按上述方法处理,并进行三维成像,结果如图11所示,图中红色代表金属目标,白色代表非金属目标。

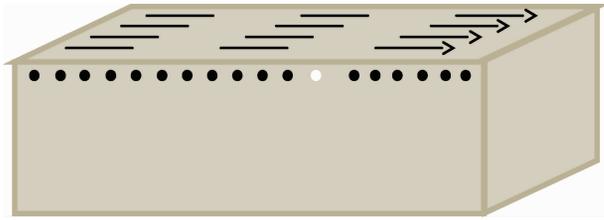


图10 模型示意

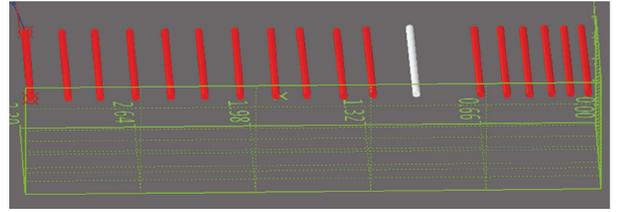


图11 三维识别与成像结果

对模型中的根钢筋分别按式(7)计算介电常数,取其平均值得到模型中混凝土的介电常数 $\epsilon = 9.5$,使用该介电常数计算非金属目标PVC管的深度为9.8 cm,所得结果与目标实际埋深相差2.0%,详细结果如表2所示,深度单位均为cm。

表2 实际深度与测试深度

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
实际深度	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
测试深度	9.6	9.7	9.8	9.9	10	9.9	9.9	10	9.9	10.3	10.2	9.8	10.1	10.2	10	10.1	10.2	10.3

4 结 论

针对地下目标材质识别与目标深度准确反演的需求,研制出一款电磁感应和超宽带雷达相结合的探测系统,该系统可以直接分辨金属和非金属目标,通过电磁感应模块和雷达模块的联合计算,反演出电磁波在介质中的传播速度和介质的介电常数,从而得到探测目标的准确深度。将该探测系统在实际模型上进行了实验,取得了理想的识别结果和深度反演结果。该款探测仪器的成功研制,为地下目标材质识别与深度反演提供了有力的技术手段。由于地下介质的复杂性和探测目标的多样性,地下目标的探测与识别任重道远,将寻找更为有效的解决方法。

参考文献

- [1] 葛铁洲, 张小蓓, 王大龙, 等. 基于DFT算法的地理金属管线探测仪研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(10): 986-991.
- [2] TAKAHASHI K, PREETZ H, IGEL J. Soil properties and performance of landmine detection by metal detector and ground-penetrating radar-soil characterization and its verification by a field test [J]. Journal of Applied Geophysics, 2011, 73(4): 368-377.
- [3] ISHIKAWA J, FURUTA K, PAVKOVIĆ N. Test and evaluation of japanese GPR-EMI dual sensor systems at the benkovac test site in croatia [M]. Anti-personnel Landmine Detection for Humanitarian Demining. Springer London, 2009: 63-81.
- [4] VAN MEIRVENNE M, VAN DE VIJVER E, VANDENHAUTE L, et al. Investigating soil

- pollution with the aid of EMI and GPR measurements [C]//2014 15th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR). IEEE, 2014: 1006-1010.
- [5] DE BENEDETTO D, CASTRIGNANÒ A, QUARTO R. A geostatistical approach to estimate soil moisture as a function of geophysical data and soil attributes [J]. Procedia Environmental Sciences, 2013, 19: 436-445.
- [6] TOY C W, STEELMAN C M, ENDRES A L. Comparing electromagnetic induction and ground penetrating radar techniques for estimating soil moisture content [C]//2010 13th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR). IEEE, 2010: 1-6.
- [7] SAEY T, DELEFORTRIE S, VERDONCK L, et al. Integrating EMI and GPR data to enhance the three-dimensional reconstruction of a circular ditch system [J]. Journal of Applied Geophysics, 2014, 101: 42-50.
- [8] 王伟, 张群英, 方广有. 浅表层伪随机编码超宽带探地雷达研制 [J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(8): 1902-1908.
- [9] XIA X, LIU L, GUAN H, et al. Balanced pulse generator for ultra-wideband radar application [J]. Electronics Letters, 2013, 49(4): 293-295.
- [10] LESTARI A A, BHARATA E, SUKSMONO A B, et al. A modified bow-tie antenna for improved pulse radiation [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, 58(7): 2184-2192.
- [11] 陈超, 孟升卫, 陈洁, 等. 超宽带生命探测雷达研制及

- 应用[J]. 电子测量技术, 2014, 37(3): 15-19.
- [12] YE SH B, ZHOU B, FANG G Y. Design of a novel ultra-wideband digital receiver for pulse ground penetrating radar[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(4): 656-660.
- [13] 叶盛波, 周斌, 方广有. 新型超宽带探地雷达数字采样接收机设计[J]. 电波科学学报, 2011, 26(4): 783-788.
- [14] LIU L H, FANG G Y. A novel UWB sampling receiver and its applications for impulse GPR system [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2010, 7(4): 690-693.
- [15] 苏庆丰, 李智, 牛军浩. 金属探测器的平衡式线圈最佳空间位置研究[J]. 国外电子测量技术, 2010, 29(3): 20-22.
- [16] 冯德山, 戴前伟, 何继善. 探地雷达小波域三维波动方程偏移[J]. 地球物理学报, 2008, 51(2): 566-574.
- [17] PASOLLI E, MELGANI F, DONELLI M. Automatic analysis of GPR images: A pattern-recognition approach[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(7): 2206-2217.
- [18] CUI Y, WANG L, XIAO J. Automatic feature recognition for GPR image processing [J]. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2010, 61: 176-179.
- [19] XIE X Y, QIN H, YU C, et al. An automatic recognition algorithm for GPR images of RC structure voids[J]. Journal of Applied Geophysics, 2013, 99: 125-134.

作者简介

高云泽, 1979 年出生, 副研究员。主要研究方向为超宽带穿透成像理论研究、超宽带雷达信号处理。

E-mail: gyze@163.com

叶盛波, 1982 年出生, 副研究员。主要研究方向为电磁场理论与应用, 超宽带雷达系统设计。

E-mail: shengboye@163.com

(上接第 127 页)

5 结 论

本文设计了新型 PWM 波故障保护与诊断电路, 该电路具有动作快、准确性高、成本低等优点。试验证明, 该电路在没有故障时不会误保护, 在 PWM 波中的一对波形同时为高时可起到故障保护的作用, 驱动芯片输出的波形与 PWM 波有很大差异时, 故障保护电路工作, 隔离故障部位, 可以保护功率器件。

参考文献

- [1] 雷鹏, 黄玉平, 于志远. 基于 1ED020I12-FA 的 IGBT 栅极驱动电路应用研究[J]. 微电机, 2011, 44(4): 91-94.
- [2] 廖明栋, 范镇煜, 董福庆. 基于 DSP 的直流伺服电机驱动电路研究与分析[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(8): 77-80.
- [3] 彭宇, 刘大同. 数据驱动故障预测和健康管理综述[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(3): 481-495.
- [4] 胡为, 高雷, 傅莉. 基于最优阶次 HMM 的电机故障诊断方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(3): 524-530.
- [5] 张磊, 赵晓光, 张爱瑜, 等. 小波包与神经网络在滚珠丝杠故障诊断中的应用[J]. 设备管理与维修, 2011, 39(2): 430-432.
- [6] 祝林. 数控镗床 X 轴进给故障的解决[J]. 华中科技大学学报, 2010(4): 68.
- [7] SMITH K S, RAN L, PENMAN J. Real-time detection of intermittent misfiring in a voltage-fed PWM inverter induction-motor drive [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1997, 44(4): 468-476.
- [8] 胡梅, 胡列峰, 明德祥. 模拟电路统一软故障诊断的研究[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(11): 1060-1066.
- [9] 郭捷. 基于 TMS320F28335 的交流伺服电机控制系统研究 [J]. 自动化与仪器仪表, 2012, 1: 38-39.
- [10] 王帅, 阴玉梅, 杨晓霞, 等. 直流电机型力促动器的控制系统设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(8): 38-39.
- [11] 胡雪峰, 侯漠. IGBT 集成驱动保护模块的分析、比较与选用[J]. 机床电器, 2010(3): 43-50.

作者简介

田冠枝, 1989 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为电机的驱动与控制。

E-mail: 18310281310@163.com