

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2005554

基于超宽带步进频 GPR 和 EMI 的钢筋检测*

戢沁楠^{1,2,3} 周斌^{1,2} 钟景阳⁴ 赵迪^{1,2} 方广有^{1,2}

(1. 中国科学院空天信息创新研究院 北京 100190; 2. 中国科学院电磁辐射与探测技术重点实验室 北京 100190;
3. 中国科学院大学电子电气与通信工程学院 北京 100049; 4. 广州大学土木工程学院 广州 510006)

摘要:为更好评估建筑物质量保障建筑安全,对混凝土中钢筋的检测进行了研究,以实现在没有先验信息的情况下对钢筋保护层厚度和直径的准确检测。研制了超宽带步进频探地雷达和电磁感应检测模块。提出了一种相对介电常数估算方法,结合雷达数据可以得到准确的保护层厚度。进行了不同钢筋直径和保护层厚度的电磁感应标定实验,得到标定数据库。将检测所得电磁感应数据和保护层厚度与标定数据库进行匹配得到准确的钢筋直径。在混凝土试块上进行了实验,可以实现在没有先验信息下钢筋的检测,保护层厚度估计相对误差在 2% 以内,钢筋直径检测无误差。证实了系统和方法的有效性和准确性,可以为建筑质量评估提供有效的技术支持。

关键词:钢筋检测;步进频探地雷达;电磁感应;无损检测

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

Reinforcing bar detection based on ultra-wideband stepped frequency GPR and EMI

Ji Qin'nan^{1,2,3} Zhou Bin^{1,2} Zhong Jingyang⁴ Zhao Di^{1,2} Fang Guangyou^{1,2}

(1. Institute of Space Information Innovation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Key Laboratory of Electromagnetic Radiation and Detection Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. School of Electronics, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: In order to better evaluate the building quality and guarantee the building safety, this paper studies the detection of reinforcement in concrete to realize the accurate detection of the thickness of the protective layer and diameter of reinforcement without prior information. Ultra wideband stepped frequency ground penetrating radar and electromagnetic induction detection modules are developed. A relative permittivity estimation method is proposed, and the accurate thickness of protective layer can be obtained by combining radar data. The electromagnetic induction calibration experiments with different diameters and thickness of reinforcement were carried out, and the calibration database was obtained. The measured electromagnetic induction data and the thickness of protective layer are matched with the calibration database to obtain the exact diameter of reinforcement. The experiment on concrete test block shows that the steel bar can be detected without prior information, and the relative error of the thickness of the protective layer is less than 2%, and the diameter of the steel bar is detected without error. The system and method are proved to be effective and accurate, and can provide effective technical support for building quality evaluation.

Keywords: reinforcement inspection; step frequency ground penetrating radar; electromagnetic induction; nondestructive testing

0 引言

混凝土结构中钢筋参数的检测对于建筑质量检验和安全评估具有重要意义^[1]。钢筋的参数包括钢筋的数量,位

置,直径,保护层厚度及腐蚀情况。其中钢筋的直径和保护层厚度是钢筋检测中的重点和难点。标准的钢筋直径对保障钢筋混凝土承重力有重要作用。钢筋的保护层厚度指混凝土表面到钢筋的垂直距离。钢筋保护层厚度过薄会影响

收稿日期:2020-12-18

* 基金项目:自然科学基金面上项目(41874120)资助

• 34 •

混凝土结构的力学性能和锈蚀速度,减短建筑结构的使用寿命。钢筋保护层厚度过厚容易降低钢筋的承重力,增加建筑结构的安全风险^[2]。2002 年发布的 GB 50204—2002《混凝土结构工程施工质量验收规范》中,把钢筋的保护层厚度列为必须检测验收项。钢筋直径和保护层厚度的检测具有重要意义。

无损检测技术在建筑结构监测和诊断中发挥着重要作用。当前的钢筋无损检测技术主要有基于探地雷达 (ground penetrating radar, GPR) 和电磁感应 (electromagnetic, EMI) 两种。基于探地雷达的检测方法主要利用电磁波的传播与反射,电磁波在传播过程中遇到介质突变情况,会在介质突变位置反射部分能量。在钢筋混凝土结构中体现为在混凝土中传播的电磁波在钢筋表面发生反射,可以得到从发射天线经反射到接收天线进行接收的雷达波双程走时。在雷达剖面图中通过双曲线顶点的坐标获得双程走时。结合电磁波的传播速度可以计算出钢筋的保护层厚度^[3]。有学者尝试通过提取钢筋反射双曲线与仿真双曲线拟合来估算钢筋直径和保护层厚度^[4]。但研究发现双曲线形状对钢筋直径并不敏感,很难通过双曲线的拟合推断钢筋直径^[5]。电磁感应是常用的钢筋直径检测方法,大多数钢筋仪都是基于电磁感应的原理^[6-7]。电磁感应传感器由磁线圈组成,激发向混凝土方向的时变磁场,接收来自导电体的二次感生磁场^[8-9]。在钢筋混凝土结构中,混凝土具有弱磁性,钢筋就有强磁性,二次感生磁场对钢筋直径和保护层厚度很敏感。在已知其中一个变量的情况下可以通过与提前校准的数据库拟合得到另一变量的估值^[10-11]。这种方法需要提供一个先验信息。有研究指出可以使用两组不同线圈进行测量,读取两组不同的电磁感应数据在没有先验信息的条件下同时获得钢筋直径和保护层厚度的估值。但这种方法不便于在金属密集的区域扫描检测,很难避免两组线圈的相互干扰^[12]。

本文提出一种基于步进频探地雷达结合电磁感应模块的钢筋检测方法,可以在没有先验信息的情况下,同时实现钢筋直径和保护层厚度的检测,并达到良好的精度。首先介绍了研制的超宽带步进频探地雷达和电磁感应探测模块。然后提出了钢筋直径和保护层厚度的检测方法,最后进行了实验验证了系统和方法的有效性。

1 系统原理

1.1 超宽带步进频探地雷达模块

步进频探地雷达的工作频率为一系列等间隔频点,发射端分时发送不同频率的单频信号,接收端在频域获取不同频点的回波信号,通过逆傅里叶变换重建时域脉冲响应得到探测目标信息^[13]。步进频体制探地雷达用较小的瞬时带宽合成大带宽,降低了对接收机和 A/D 采样的带宽要求,可以同时满足大带宽和较大功率,可以同时实现高分辨率和大探测深度。

矢量网络分析仪 (vector network analyzer, VNA) 具有信噪比高,收发频带宽,易校准等特点,基于矢量网络分析仪搭建了一套步进频探地雷达系统。如图 1 所示,该系统主要由 VNA 模块,PC 控制单元和对拓 Vivaldi 天线组成。其中 VNA 模块是型号为 R60 的单端口矢量网络分析仪,搭配一个对拓 Vivaldi 天线组成自发自收的步进频率探地雷达。VNA 的频率覆盖范围为 1 MHz~6 GHz,可通过配套的软件对其起止频率,步进频率间隔,接收机中频带宽等进行设置。PC 控制单元可实现对 VNA 的控制,实现自动测量及数据存储。使用 VNA 测量前对其进行校准,消除 VNA 本身及传输线的损耗和时延,使测量结果更加精确^[14]。

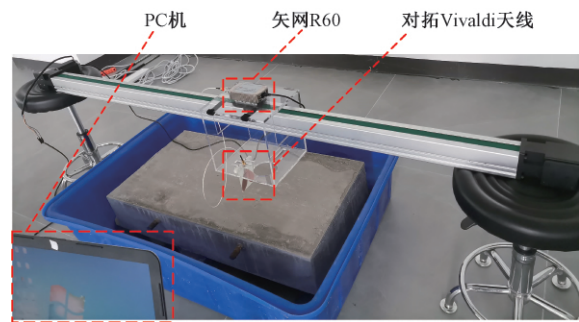


图 1 超宽带步进频雷达

采用的对拓 Vivaldi 天线是一种综合性能优良的超宽带天线,具有超宽带、中等增益、体积小、重量轻、易加工等优点。理论上讲,这种天线的带宽可以无限宽,其低频性能由天线开口宽度决定,高频性能理论上无上限。实际上,天线的馈电结构,辐射体结构和加工工艺会限制其带宽。天线实物如图 2 所示,靠近轴线的两条指数型渐变线决定其电磁波的发射,金属面大小影响其接收性能。对天线进行了仿真测试,其增益图和方向图如图 3、4 所示,可以看出,天线的辐射能量集中于 X 轴正前方,有良好的方向性。在 1~6 GHz 频段内,增益情况良好。

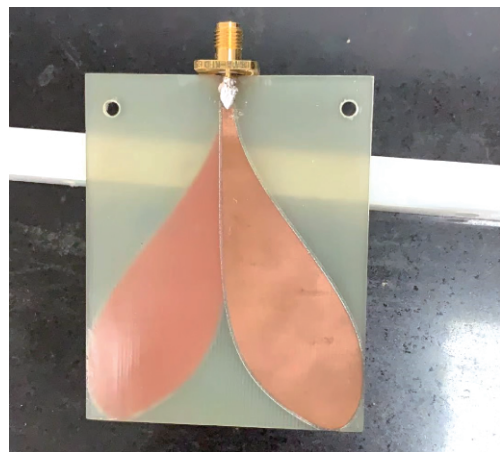


图 2 天线实物图

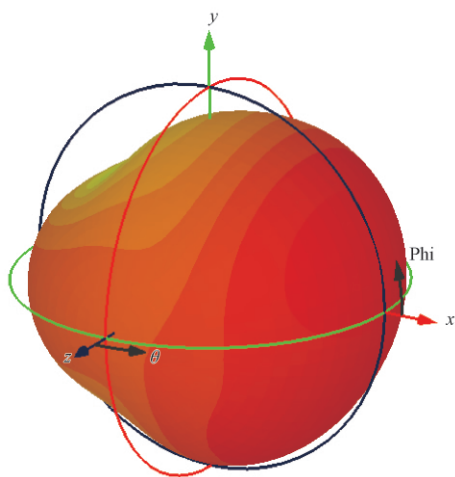


图 3 天线方向图

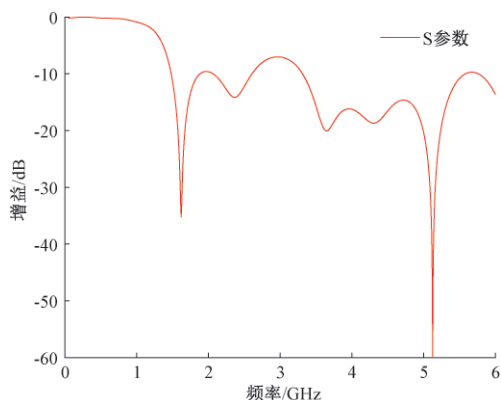


图 4 天线增益

1.2 电磁感应模块

电磁感应模块的基本理论依据是法拉第电磁感应定律。线圈是严格磁偶极子,当给激励线圈通交变电流时,根据电磁场理论,线圈会产生交变电磁场并向外辐射。处在交变电磁场中的金属导体会产生沿自身分布的感应电流,感应电流产生感生电磁场(即二次电磁场)并向外辐射。原激励线圈在二次电磁场的作用下产生感生电动势,进而使线圈的输出电压发生变化^[15]。当激励信号一定时,二次电磁场大小与钢筋的保护层厚度和直径有关,因此可根据线圈输出电压的变化情况对钢筋的保护层厚度和直径进行测量。

电磁感应模块主要由信号发生电路、感应线圈、信号采集电路和主控系统组成,如图 5 所示。在主控系统的控制下,信号发生电路产生频率为 1.6 kHz 的激励电流激励感应线圈。激励电流频率的选择综合考虑探测深度和功耗。根据电磁感应定律,电流频率越大,感应电磁场强度越大可使探测深度越深。但频率越高品质因数越大,二次感生电流强度反而会减弱,也会造成大的功耗。综合考虑功耗和探测深度,选择 1.6 kHz 的激励信号。感应线圈的自谐振频率为 40 kHz,直径为 3 cm,匝数为 120 匝。信号采集电

路对线圈输出电压进行采样滤波转换为数字信号。

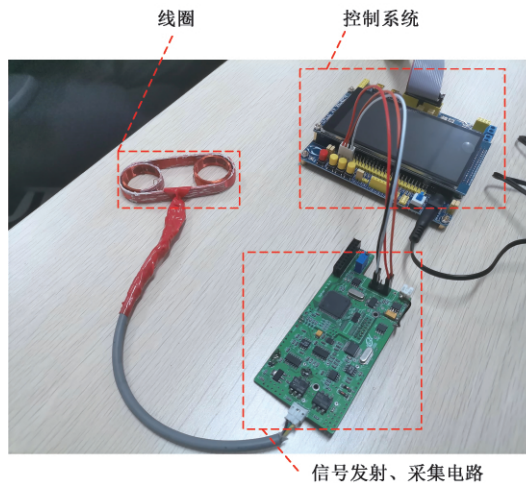


图 5 电磁感应模块

2 钢筋检测方法

基于探地雷达和电磁感应进行钢筋检测的总体思路如下:1)对超宽带步进频探地雷达回波信号进行距离旁瓣抑制,直达波消除,背景去除等预处理。2)用距离多普勒(range doppler, RD)算法结合最小熵准则对混凝土相对介电常数进行估值。3)对雷达图像的对双曲线顶点进行定位得到双程回波时间,结合估算的相对介电常数计算保护层厚度。4)以提前标定的电磁感应数据作为标定库,将检测的感应数据和步骤 3)得到的保护层厚度与标定数据库进行匹配,得到钢筋直径。检测方法流程如图 6 所示。

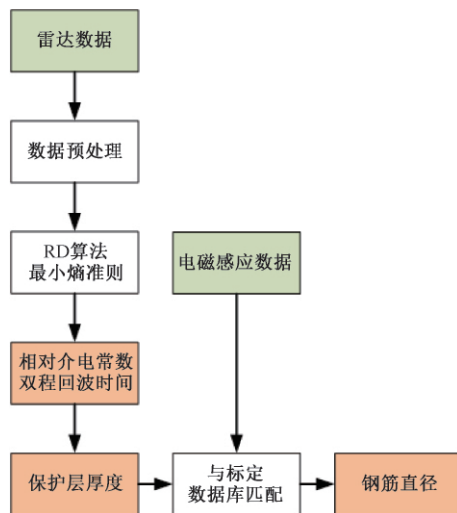


图 6 检测方法流程

2.1 钢筋保护层厚度检测

钢筋保护层厚度 H 与电磁波双层回波时间 t , 电磁波在混凝土中的传播速度 v 之间的关系为:

$$H = \frac{vt}{2} \tag{1}$$

电磁波在混凝土中的传播速度 v 与相对介电常数 ϵ_r 和真空中光速 c 的关系为:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

则:

$$H = \frac{ct}{2\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3)$$

保护层厚度的准确检测依赖于准确的双程回波时延和相对介电常数。

当被测介质内部含有柱状目标时,探地雷达回波剖面中会呈现双曲线特征,为了给目标更准确的定位和更好的成像,常常会用偏移算法对雷达信号进行处理^[16]。RD 算法是经典的 SAR 成像算法。RD 算法需要介质中电磁波传播速度。波速与相对介电常数间存在直接关系,因此不同介电常数预设值会影响 RD 算法成像效果。成像效果可以用最小熵准则进行评判。可以遍历不同相对介电常数应用于 RD 成像,以最小熵为准则,估算出准确的相对介电常数。

RD 算法通过距离和方位向的频域操作,达到良好的成像效果。在距离向和方位向这两个一维空间进行操作之间使用距离徙动校正,对距离和方位向进行近似分离处理。所有的运算都针对一维数据进行,使数据处理过程更加简便高效,提高了数据处理速度。为提高处理效率,所有匹配滤波器卷积都通过频域相乘实现。匹配滤波器及距离徙动都与距离向可变参数有关^[17]。

针对步进频探地雷达回波信号,RD 算法的步骤为:

1)在距离向通过与匹配滤波器频域相乘进行匹配滤波,再利用距离 IFFT 完成距离压缩。2)通过方位向 FFT 将数据变换至距离多普勒域。3)在距离多普勒域进行距离徙动,距离徙动随距离时间和方位频率变化。在距离多普勒域,统一距离上的目标曲线重合。距离徙动将曲线拉直与方位向频域轴平行。4)利用频域匹配滤波器实现方位压缩。5)最后通过方位向 IFFT 将数据变换至时域,得到压缩后的二维图像。

最小熵准则的物理意义可以理解为:对于探地雷达剖面图而言,熵值越大,表现在剖面图上的地下特征越混乱;熵值越小,剖面图上的地下目标就越清晰^[18-19]。雷达二维图像可表示为:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1N} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{M1} & x_{M1} & \cdots & x_{MN} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中 x_{ij} 为第 j 道数据的第 i 个点,雷达二维图像的熵为:

$$S = \sum_{j=1}^N \left[\frac{\sum_{i=1}^M x_{ij}^4}{\left(\sum_{i=1}^M x_{ij}^2\right)^2} \right] \quad (5)$$

计算 RD 算法处理后雷达剖面图的熵值,取熵值最小时的相对介电常数为估算的最佳相对介电常数。定位双曲线顶点坐标,得到雷达双程回波时间。计算出钢筋的保护层厚度。

2.2 钢筋直径检测

当激励线圈通以交变电流时,根据电磁场理论,线圈会产生交变电磁场并向外辐射。如图 7 所示设钢筋轴线沿 x 方向,与感应线圈水平距离为 y_0 ,垂直距离为 z_0 。线圈在钢筋某处激发的切向电场为:

$$dE(x) = \frac{K_1 y_0}{(y_0^2 + z_0^2 + x^2)^{3/2}} \quad (6)$$

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。钢筋产生沿自身轴线分布的感应电流,钢筋上电流元 $I(x)dx$ 在线圈中心位置激励的磁场垂直分量为:

$$dB(x) = \frac{K_2 y_0}{(y_0^2 + z_0^2 + x^2)^{3/2}} \quad (7)$$

式中: K_2 为激发系数,与钢筋的电导率和介电常数有关。那么,钢筋元 dx 在线圈中心引起的二次磁场垂直分量为:

$$dB(x) = \frac{K_1 K_2 y_0^2}{(y_0^2 + z_0^2 + x^2)^3} \quad (8)$$

沿 x 轴方向积分,得到钢筋在线圈处的二次感应磁场垂直分量为:

$$B = \int dB(x) = \int \frac{K_1 K_2 y_0^2}{(y_0^2 + z_0^2 + x^2)^3} \quad (9)$$

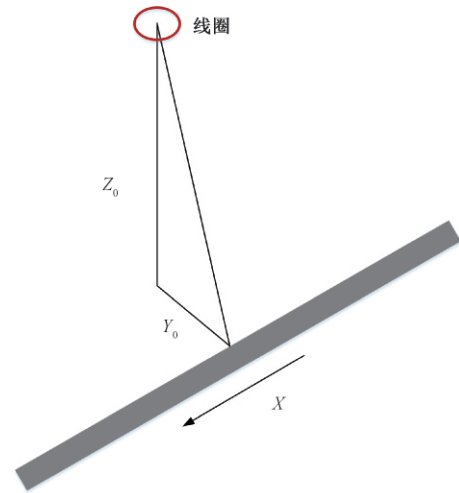


图 7 电磁感应原理

由式 9 可知,当 I, z_0 一定时, $y_0 = 0$ 时二次感生磁场强度最大,即当线圈处于钢筋正上方时,二次感生磁场强度为最大值,依据此可以判断钢筋的水平位置。

二次感应电磁场使线圈的磁通量发生变化,从而使线圈的感应电动势发生变化。感应电动势正比于二次场的磁通量。则线圈的输出电压是关于 y, z 和钢筋直径 D 的函数,可表示为:

$$E = f(y, z, D) \quad (10)$$

当线圈位于钢筋正上方时, $y = 0$, E 有极大值 E_{\max} , 可表示为:

$$E_{\max} = g(z, D) \quad (11)$$

E_{\max} 是关于钢筋直径 D 和钢筋距线圈垂直距离 z 的函数。则可以对不同保护层厚度和不同钢筋直径情况下的电磁感应数据进行测量建立标定数据库, 建立电磁感应数据-钢筋直径-钢筋保护层厚度的映射关系。实际检测时, 结合测量的电磁感应数据和由雷达回波所得的保护层厚度信息, 与标定数据库进行匹配, 查表得到钢筋直径大小。

3 实验及结果

为验证系统和检测方法的有效性, 进行了相关实验, 包括电磁感应数据的标定实验和混凝土试块中钢筋直径和保护层厚度检测实验。

电磁感应标定实验基于电磁感应原理对已知的不同保护层厚度和不同钢筋直径情况下的电磁感应数据进行测量, 建立“钢筋直径-保护层厚度-电磁感应数据”一一对应的标定数据库, 在后续检测时, 将实际检测数据同标定数据库进行拟合匹配得到检测结果。为方便调整保护层厚度, 电磁感应标定实验在干沙中进行。有研究表明用干燥稳定的沙进行电磁感应标定和用混凝土进行标定实验效果相同, 主要原因是, 与埋在其中的钢筋相比, 这两个背景材料都具有极低的导电性和磁导率^[20]。实验平台如图 8 所示, 待测钢筋埋在干燥稳定的细沙中, 薄木板紧贴细沙放置用作电磁感应模块移动测量的平台。实验中, 参照中国工业建筑标准选取 9 条钢筋作为标定样品。钢筋直径分别为 8、10、12、14、16、18、20、22、25 mm。每个直径的钢筋埋在干砂中, 深度从 12 mm 逐渐增加到 65 mm, 步进间隔为 1 mm, 对每个保护层厚度和直径的钢筋进行横切面电磁扫描。标定实验记录 9 个钢筋直径 54 个保护层厚度共 486 条电磁感应标定数据。图 9 所示为固定保护层厚度 $H = 17$ mm 时不同钢筋直径对应的电磁感应曲线, 由上至下曲线对应的直径依次为 25、22、20、18、16、14、12、10、8 mm。图 10 所示为固定直径 $D = 14$ mm 时不同保护层厚度对应的电磁感应曲线, 由上至下曲线对应的保护层厚度依次为 12、18、24、30、36、42、48、54、60 mm。

可看出, 所有的电磁干扰曲线在埋地钢筋上都表现出脉冲响应。电磁感应的峰值很明显随钢筋直径的增大而增大, 随保护层厚度的增大而减小, 反映了电磁干扰信号对钢筋直径和保护层厚度的高度敏感性。每条电磁干扰曲线的峰值振幅被提取出来, 其随钢筋直径和保护层厚度的变化如图 11 所示。由上至下各曲线对应的直径依次为 8、10、12、14、16、18、20、22、25 mm。一个峰值振幅可以对应于不同对钢筋直径和覆盖厚度, 所以需要整合雷达数据得到的保护层厚度得到钢筋直径的值。

实验室制作了一个简易钢筋混凝土浇筑样件, 如图 12 所示。实验中, 首先用游标卡尺对保护层厚度与钢筋直径

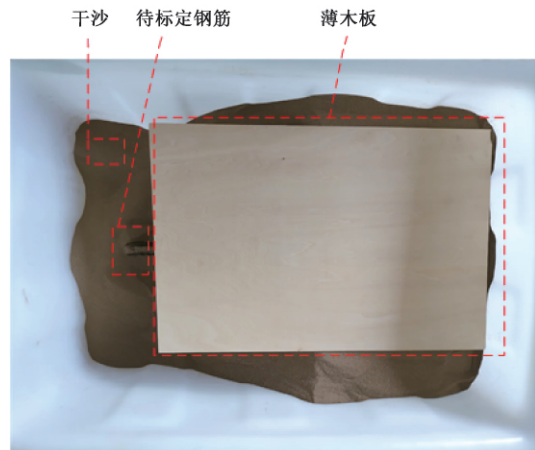


图 8 电磁感应实验标定平台

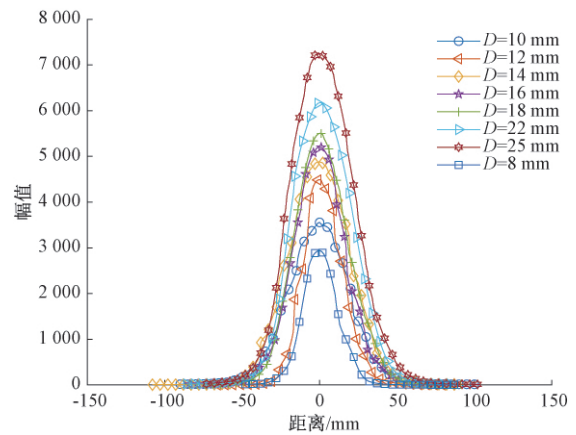


图 9 保护层厚度 $H = 17$ mm 时电磁感应曲线

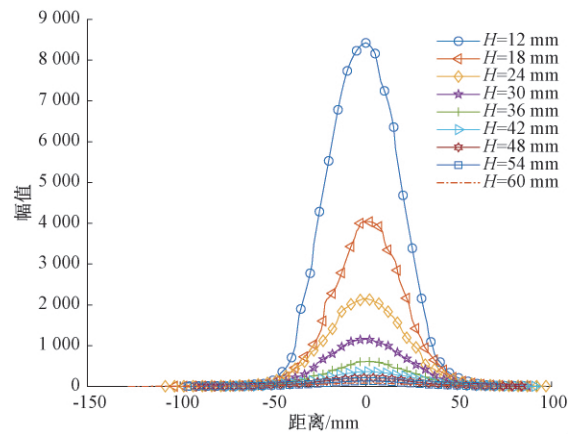


图 10 钢筋直径 $D = 14$ mm 时电磁感应曲线

进行精确测量, 然后利用 GPR-EMI 系统对实验室样件进行检测。对雷达回波进行距离旁瓣抑制, 直达波消除, 背景去除等预处理。用第二章提出的结合 RD 算法和最小熵准则估算最佳相对介电常数。处理后雷达图像如图 13 所示。电磁感应曲线如图 14 所示。

使用估算的最佳介电常数计算保护层厚度, 根据电磁

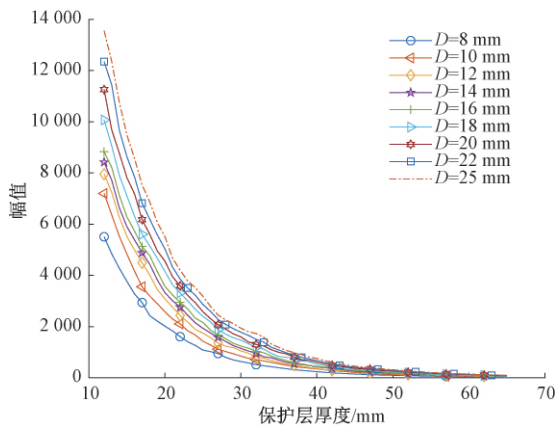


图 11 线圈位于钢筋正上方时,电磁感应峰值与保护层厚度和钢筋直径之间的关系

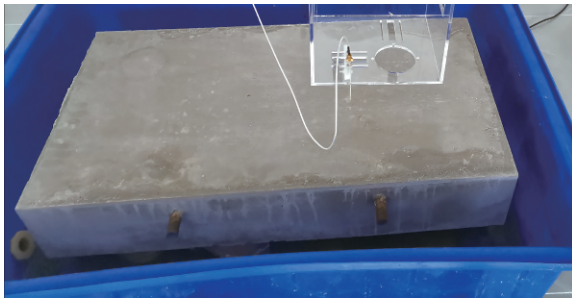


图 12 混凝土试块

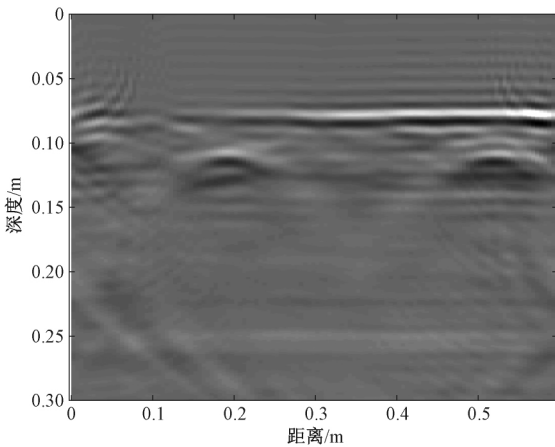


图 13 雷达图像

感应曲线峰值和保护层厚度匹配标定数据库,查表得到钢筋直径,结果如表 1 所示。

实验中,利用游标卡尺测量钢筋混凝土样件保护层厚度的真实值,从检测结果可以看出,混凝土保护层厚度估计误差不超过 1 mm,相对误差在 2% 以内,在工程检测的检测精度要求范围内。本文研制的 GPR-EMI 系统与提出的检测方法对于保护层厚度与钢筋直径检测是有效、可靠且满足精度需求的。相较于单用雷达原理的检测方法,本文提出的系统和方法可以实现钢筋直径的检测;相较于单用

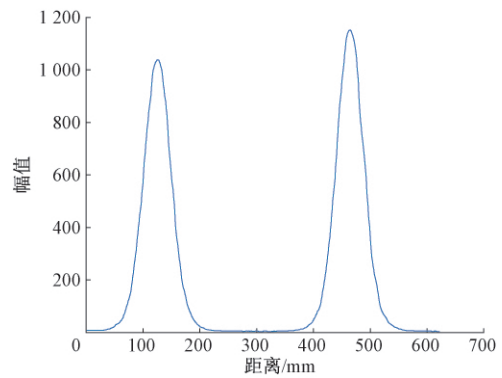


图 14 电磁感应曲线

表 1 钢筋直径与保护层厚度检测结果 mm

钢筋 编号	混凝土保护层厚度			钢筋直径		
	真实值	估计值	误差	真实值	估计值	误差
1	31.00	30.67	0.33	14.00	14.00	0
2	32.00	31.27	0.63	16.00	16.00	0

电磁感应原理的检测方法,本文提出的系统和方法的优势在于不需要先验信息即可得到准确的钢筋保护层厚度和直径信息。另外,本文提出结合 RD 算法和最小熵的方法估算介电常数,提高了检测的精确性。本文的工作主要对公称直径符合工业建筑标准的钢筋进行了标定和检测,下一步拟将锈蚀,破损等非标准直径的钢筋的检测纳入研究范围,优化检测方法,实现对各种情况的钢筋的检测。

4 结 论

本文提出一种基于步进频率探地雷达结合电磁感应模块的钢筋检测方法,可以在没有先验信息的情况下,同时实现钢筋直径和保护层厚度的检测,并达到良好的精度。基于矢量网络分析仪模块搭建了步进频探地雷达。研制了电磁感应模块。提出了一种基于 RD 偏移和最小熵准则的相对介电常数估计方法,对保护层的相对介电常数进行估计,结合回波时延计算钢筋保护层厚度。对不同保护层厚度和不同钢筋直径情况下的电磁感应数据进行标定并建立数据库。根据实测电磁感应数据结合由雷达数据得到的保护层厚度在数据库中拟合出最匹配的钢筋直径。实验证明,本文研制的系统和提出的检测方法可以有效检测混凝土中钢筋的直径和保护层厚度,可以为建筑质量评估提供有效的技术支持。本文的标定和检测工作未包含锈蚀破损等情况下非标准直径的钢筋,下一步将针对此类情况的钢筋完善系统和检测方法。

参考文献

- [1] 王锐. 建筑工程钢筋检测中存在的问题及解决对策[J]. 工程技术研究, 2020, 72(16):136-137.
- [2] 徐兴刚. 结合设计和验收规范对钢筋保护层厚度检测的分析与探讨[J]. 工程质量, 2016, 34(5):22-26.

- [3] MECHBAL Z, KHAMLICHI A. Determination of concrete rebars characteristics by enhanced post-processing of GPR scan raw data [J]. *NDT & E International*, 2017, 89:30-39.
- [4] SHIHAB S, AL-NUAIMY W. Radius estimation for cylindrical objects detected by ground penetrating radar[J]. *Subsurface Sensing Technologies & Applications*, 2005, 6(2):151-166.
- [5] WIWATROJANAGUL P, SAHAMITMONGKOL R, TANGTERMSIRIKUL S, et al. A new method to determine locations of rebars and estimate cover thickness of RC structures using GPR data [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 140: 257-273, DOI:10.1016/j.conbuildmat.2017.02.126.
- [6] 刘泽, 王淑颖, 李伟, 等. 钢筋混凝土阴极保护极化曲线实时测试仪器设计 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2011, 25(5):474-478.
- [7] 黄河. 混凝土钢筋位置测定仪计量标准技术研究[D]. 大连:大连理工大学, 2015.
- [8] MAMUN K A, DEO R N, ISLAM F R, et al. A prototype of an electromagnetic induction sensor for non-destructive estimation of the presence of corrosive chemicals ensuing concrete corrosion [J]. *Sensors*, 2019, 19(9):1959.
- [9] 孙美林, 董全林, 罗国库. 电磁耦合式位移传感器耦合模型研究[J]. *国外电子测量技术*, 2018, 37(10): 51-55.
- [10] FENG Z, ZHONG C C, HAI L, et al. Simultaneous estimation of rebar diameter and cover thickness by a GPR-EMI dual sensor[J]. *Sensors*, 2018, 18(9):2969.
- [11] FERNANDES B T, SILVA I, GAYDECKI P A. Vector extraction from digital images of steel bars produced by an inductive scanning system using a differential gradient method combined with a modified Hough transform[J]. *Ndt & E International*, 2000, 33(2):69-75.
- [12] ALLDRED J C. Improvement to the orthogonal method for determining reinforcing bar diameter using a cover meter[C]. *Conference Proceedings of Structural Faults and Repair*, London, 1995: 11-15.
- [13] 方广有, 佐藤源之. 频率步进探地雷达及其在地雷探测中的应用[J]. *电子学报*, 2005(3):436-439.
- [14] 林禹全, 周斌, 方广有. 频率步进探地雷达的校准研究[J]. *电子测量技术*, 2019, 42(11):34-38.
- [15] 高云泽, 叶盛波, 张晓娟, 等. 基于电磁感应和超宽带雷达的新型探测系统 [J]. *电子测量技术*, 2015, 38(9):128-134.
- [16] 胡晓娥, 孙巍, 梁兴东. 一种高分辨率机载 SAR 实时运动补偿系统设计 [J]. *电子测量技术*, 2012, 35(6): 41-44.
- [17] CUMMING I G, WONG F H. *Digital processing of synthetic aperture radar data: Algorithms and implementation*[D]. Boston: Artech House, 2005.
- [18] 修志杰, 陈洁, 方广有, 等. 基于 F-K 偏移及最小熵技术的探地雷达成像法 [J]. *电子与信息学报*, 2007, 29(4):827-830.
- [19] 王星, 宗凯. 基于局部熵的图像分割算法研究与实现 [J]. *电子测量技术*, 2016, 39(12):168-171.
- [20] MECHBAL Z, KHAMLICHI A. Determination of concrete rebars characteristics by enhanced post-processing of GPR scan raw data [J]. *NDT & E International*, 2017, 89(JUL.):30-39.

作者简介

戴沁楠, 工程硕士, 主要研究方向为超宽带步进探地雷达系统设计, 信号处理及应用研究。

E-mail:1106088312@qq.com

周斌, 研究员, 主要研究方向为超宽带雷达系统设计与信号处理。

E-mail:zhh@mails.ie.ac.cn

钟景阳, 工学硕士, 主要研究方向为建筑结构健康检测。

E-mail:jingyang542@hotmail.com

赵迪, 研究实习员, 主要研究方向为探地雷达图像处理, 机器学习技术。

E-mail:zhaodi171@mails.ucas.ac.cn

方广有, 研究员, 主要研究方向为超宽带电磁学理论及其应用、超宽带成像雷达技术、太赫兹成像新方法新技术。

E-mail:gyfang@mail.ie.ac.cn