

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107309

基于电磁感应的钢筋定位及埋深检测方法研究^{*}于津¹ 卢纯义¹ 余忠东¹ 丁双松¹ 张占龙² 袁科成²(1. 国网浙江省电力有限公司 兰溪市供电公司 金华 321100; 2. 重庆大学 输配电装备及系统安全与
新技术国家重点实验室 重庆 400044)

摘要: 钢筋混凝土结构广泛应用于电力基础设施中,对其内部钢筋参数进行检测能够有效判断其结构耐久性,对保障电力系统安全稳定运行有重要的意义。针对传统钢筋混凝土检测方法无法判断混凝土内钢筋走向及埋深测量不够精确的问题,通过对钢筋测量原理分析和霍尔传感器布局设计,提出了一种基于电磁感应的钢筋定位及埋深检测方法。该方法用于判断钢筋的中心位置并测量其偏转角度,同时利用拟合得到的函数反应检测值与钢筋埋深之间的关系。实验表明,埋深检测值受到相邻钢筋的影响而存在较大误差,间距越小误差越大,因此通过BP神经网络对不同间距下的检测值进行了数据修正,有效地提高了混凝土中钢筋埋深的检测精度。

关键词: 钢筋混凝土;钢筋走向;钢筋埋深;电磁感应;BP神经网络

中图分类号: TM937 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 470.4017

Research on detection method of rebar location and buried depth
based on electromagnetic inductionYu Jin¹ Lu Chunyi¹ Yu Zhongdong¹ Ding Shuangsong¹ Zhang Zhanlong² Qiu Kecheng²(1. Lanxi Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Jinhua 321100, China; 2. State Key Laboratory of
Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Reinforced concrete structures are widely used in the power infrastructure, and the detection of rebar can effectively judge the durability of the structure, which is of great significance to ensure the stable operation of the power system. Aiming at the problem that the traditional reinforced concrete detection method cannot determine the direction of the rebar and the measurement of the buried depth is not accurate enough, a method of positioning and buried depth detection based on electromagnetic induction is proposed, through the analysis of the measurement principle of the rebar and the layout design of the Hall sensor. This method is used to judge the center position of the rebar and measure its deflection angle, and the relationship between the detection value and the buried depth is reflected according to the fitting function. Experiments show that the buried depth detection value is affected by the adjacent rebar, the smaller the spacing, the greater the error. Therefore, the detection value under different spacing is corrected by the back propagation neural network, which effectively improves the detection accuracy of the buried depth of the rebar.

Keywords: reinforced concrete; rebar orientation; rebar buried depth; electromagnetic induction; BP neural network

0 引言

钢筋混凝土广泛应用于电力基础设施中,其内部钢筋结构的规范与否对钢筋混凝土耐久性有较大影响。根据国家标准《混凝土结构设计》GB 50010-2010 设计要求,根据不同环境气候的差异,最外层钢筋埋深应为 15~40 mm 不等,且不能小于规定的 1.4 倍。但在目前的钢筋混凝土生

产过程中,尤其是梁、柱、杆类建筑设施,由于厂家生产工艺水平的限制,内部钢筋通常无法均匀分布甚至会出现并筋的现象,当钢筋结构严重不合理时将直接导致混凝土结构抗压、抗冲击等能力大打折扣^[1]。因此,准确掌握混凝土内部钢筋的结构信息以及埋深精确值,能够对各类钢筋混凝土设施进行质量评估,对保障电力系统安全稳定运行有着重要的意义^[2]。

收稿日期:2021-07-19

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(52077012)项目资助

对钢筋埋深进行测量,首先需要将混凝土中钢筋进行精确定位^[3]。传统钢筋定位多采用差动式连接线圈传感器,将两个检测线圈反向串联,当钢筋处于两个线圈中间位置时,产生方向相反、大小相同的响应信号,因而总输出信号为零^[4],然而这种方法只能判断钢筋是否处于中心,无法判断其是否存在偏转。也有研究机构对混凝土电杆表面进行多次检测判断内部钢筋走向^[5],但操作过于繁琐,且引入了多次误差。完成定位后可进一步对钢筋混凝土的埋深进行测量,现阶段检测方法主要为电磁感应测量法^[6-7],文献[8]通过建立钢筋磁测量数据库,并利用查表法来进行钢筋埋深的判断,测量误差较大;文献[9]通过检测钢筋在不同距离下的脉冲涡流瞬态响应衰减时间测量钢筋埋深,测量精有所提高,但其以未偏转的单钢筋为检测对象,未考虑实际工程中钢筋偏转时和多钢筋时相邻钢筋对测量结果的影响。

为有效检测混凝土内钢筋位置并测量其埋深,基于钢筋磁化效应对空间磁场产生的影响,对传感器进行多测点布局设计,利用 5 个霍尔元件构成的阵列传感器,采集不同位置的磁场强度变化情况,提出了一种钢筋定位及偏转角度判断的方法;在对钢筋精确定位的基础上,进一步根据检测数据拟合出埋深与磁场检测值之间的关系;最后,分析了不同间距的相邻钢筋对测量结果的影响,利用 BP(back propagation)神经网络对测得的埋深进行修正,已得到更加精确的结果。

1 检测原理分析

1.1 钢筋电磁测量原理

基于磁化效应基本原理,当铁磁物质处在外磁场中,其内部所含有的大量的磁畴会转向与外磁场的方向一致,有非常大的饱和磁化磁感应强度 B_m ^[10],根据电磁场的矢量恒等式及斯托克斯定理,可得:

$$B_m = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{\nabla' \times M}{r^2} \vec{r}' dV' + \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{S'} \frac{M}{r^2} \vec{r}' dS' \quad (1)$$

式中: M 为铁磁物质磁极化强度, μ_0 为真空磁导率, r 为磁化区域到空间某点的矢量。磁化磁场极大地增强了原磁场,增强后的磁感应强度 B' 可以看成原磁场 B_0 与 B_m 相叠加的结果,即:

$$B' = B_0 + B_m = \mu_0(H + M) = \mu_0\mu_r H \quad (2)$$

式中: H 为原磁场强度,大小为 $4\pi \times 10^{-7}$ H/m, μ_r 为介质相对磁导率。

因此,当钢筋埋深越小,距离线圈越近时,矢量 r 的模越小,霍尔传感器检测得到的叠加磁场 B' 也越大。如图 1 所示, x 、 y 、 z 表示霍尔传感器距离钢筋表面最近点的 3 个方向上的距离, d 为霍尔传感器距离混凝土表面的距离, L 为混凝土内钢筋埋深。

假设霍尔传感器检测值为 s ,其大小与钢筋和传感器相对位置有关,即 $s = f(x, y)$ 。又因为 $y = d + L$,当检测过程中固定 d 的值不变,可以得到如下函数关系:

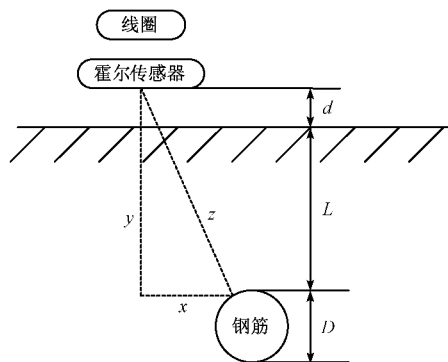


图 1 钢筋磁测量原理

$$s = f(x, y) = f(x, d + L) = g(x, L) \quad (3)$$

因此,根据检测数据可以通过算法构建非线性映射函数或算法模型可以对钢筋相关参数进行反演,检测数据越稳定、数据量越大,通过函数或算法模型反演的结果越精确。

1.2 传感器布局方法

根据钢筋电磁测量原理可知,磁化磁场强度在空间不同位置大小不同,但当钢筋处于原磁场中心时,其磁化磁场和原磁场的对称轴重合,此时对称两点的叠加磁场强度大小相同,如图 2 所示,图中 A、B 两检测点磁场强度理论值相同。

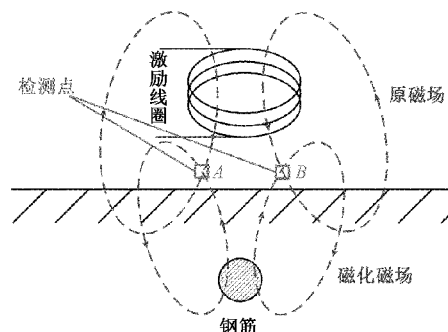


图 2 叠加磁场示意图

基于该检测原理,为了提高钢筋定位效率同时对钢筋走向进行有效判断,对霍尔元件进行了布局设计,构建了霍尔阵列传感器,其模型如图 3 所示。

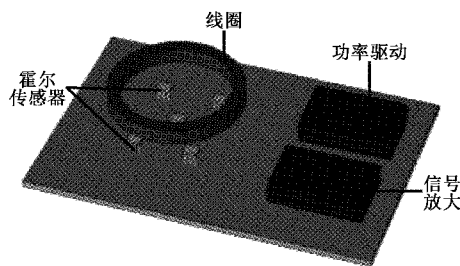


图 3 霍尔传感器阵列模型

霍尔传感器阵列由编号①~⑤的 5 个 UNG3503 高灵敏度线性霍尔元件构成,其位置保持严格对称,如图 4 所

示。其构成的长为40 mm、宽为30 mm长方形处于外径为58 mm、内径52 mm的激励线圈正下方,且⑤号霍尔元件处于长方形的中心位置。霍尔传感器阵列在同一时间采集5个不同空间位置的磁场强度值,根据4个对称边角上的磁场强度大小对比可以进一步判断钢筋中心位置及角度偏转情况,根据中心位置磁场强度变化情况可以进一步拟合出钢筋埋深与检测值之间的函数关系。

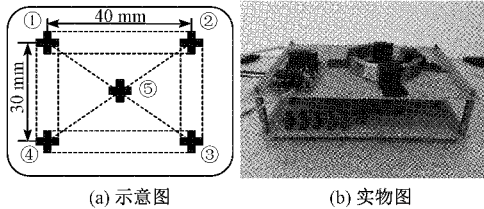


图4 霍尔阵列传感器

2 钢筋定位方法

2.1 定位方法

钢筋的精确定位是钢筋埋深检测的前提,利用霍尔阵列传感器,通过对检测得到不同空间位置的磁场强度值进行对比分析,建立了一种能够直接判断钢筋中心位置和走向的钢筋定位方法。钢筋的中心位置定义为钢筋中心轴所处的位置,判断成功的具体表现为阵列传感器中心位于钢筋中心轴的正上方。

如图5(a)所示,当传感器阵列中心不在钢筋正上方时,可知靠近钢筋侧的霍尔元件(图中为①和②)受磁化磁场强度 B_m 影响更明显,相应磁场强度检测值更大;而当传感器阵列中心处于钢筋正上方时,如图5(b)所示,此时无论是否存在偏转,处于对角的两组霍尔元件(图中为①和③、②和④)与钢筋的距离保持一致,对角所测得的磁场强度也相同。假设①~④号霍尔元件的检测值分别为 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 ,此时有:

$$\begin{cases} S_1 = S_3 = a \\ S_2 = S_4 = b \end{cases} \quad (4)$$

根据这一特性,令 $Y_1 = S_1 + S_2$, $Y_2 = S_3 + S_4$,可以得到如下的钢筋中心位置的判断依据:

$$\begin{cases} Y_1 > Y_2, & \text{钢筋偏右} \\ Y_1 = Y_2 = a + b, & \text{钢筋处于正下方} \\ Y_1 < Y_2, & \text{钢筋偏左} \end{cases} \quad (5)$$

根据判断结果,将检测装置朝着钢筋偏离方向缓慢移动,并保持与混凝土表面的距离不变,直到传感器检测值得到 $Y_1 = Y_2$,即可判断钢筋此时处于传感器中心正下方,确定主筋的中心位置。

在完成对钢筋的中心位置判断的前提下,利用霍尔传感器阵列可进一步实现对钢筋偏转方向的判断和偏转角度的测量。如图5(b)所示,传感器中心处于钢筋中心轴正上方,且存在偏转角度 θ ($\theta \neq 0$)。由式(4)可知,此时处于对

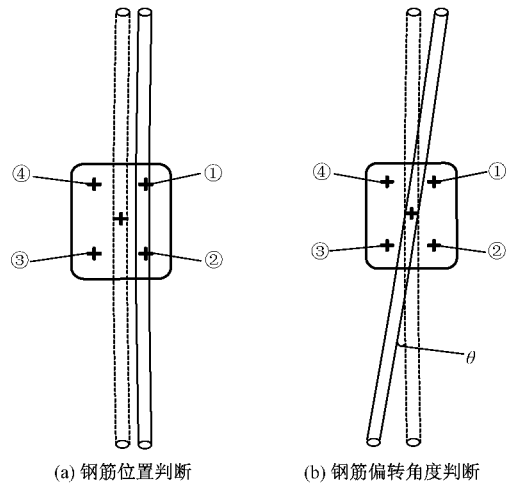


图5 钢筋位置及偏转角度判断方法

角的两组检测值分别相等,且钢筋距离较近的霍尔元件(图中为元件①和③)所处位置具有较大的空间磁场,因此有:

$$S_1 = S_3 = a > S_2 = S_4 = b \quad (6)$$

而当且仅当钢筋与垂直方向平行无偏转时,磁化效应对①~④号霍尔元件所处位置的磁化效应影响相同,得到的磁场强度检测值也相同。因此,令 $Y_3 = S_1 + S_3$, $Y_4 = S_2 + S_4$,则可以得到如下钢筋偏转方向的判断依据:

$$\begin{cases} Y_3 > Y_4, & \text{钢筋顺时针偏转} \\ Y_3 = Y_4, & \text{钢筋无偏转} \\ Y_3 < Y_4, & \text{钢筋逆时针偏转} \end{cases} \quad (7)$$

根据判断结果,将检测装置沿其中心朝着钢筋偏转方向缓慢旋转,直到得到 $Y_3 = Y_4$,即可以确定此时的钢筋偏转角度即为检测装置旋转角度。根据以上推断结果,可以得到在理想条件下,当且仅当 $Y_1 = Y_2 = Y_3 = Y_4$ 时,钢筋正好处于检测装置的正下方且无偏转。

2.2 仿真实验

为验证该钢筋定位方法的可行性,在COMSOL Multiphysics中搭建如图6所示的钢筋混凝土模型,分别由激励线圈、钢筋及混凝土构成,其中钢筋直径16 mm,长500 mm,倾角 $\theta = 5^\circ$,线圈距钢筋中心距离35 mm。

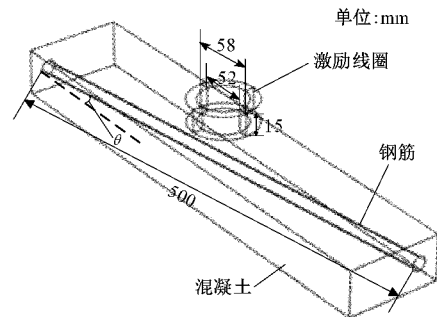


图6 仿真模型图

激励线圈匝数为1000匝,外径58 mm,内径52 mm,

长度为 15 mm, 设置输入电流为 1 A。分别对钢筋不同偏离情况及不同偏转角度进行仿真分析。

将仿真得到的结果在二维坐标中显示, 如图 7 所示。根据仿真结果可以看出钢筋磁化效应对磁场的影响与理论分析相符合, 与钢筋距离越近的空间磁场变化越大。

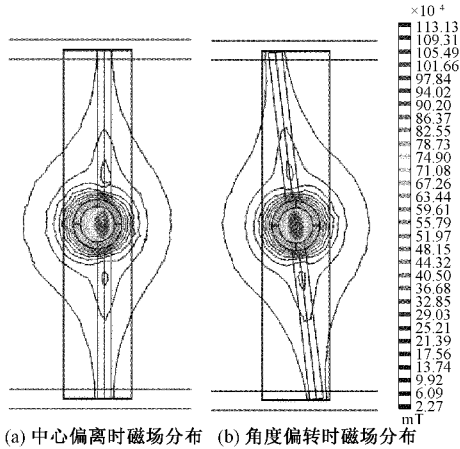


图 7 仿真结果

进一步改变钢筋距离线圈中心的偏离程度 d 和偏转角度 θ 大小, 测量霍尔元件①~④所处位置的磁场强度并计算 Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 如表 1、2 所示。

表 1 钢筋偏离时的磁场强度 μT

d/mm	-20	-10	0	10	20
Y_1	5 568.3	5 907.0	6 248.5	6 585.6	6 828.8
Y_2	6 927.5	6 590.8	6 217.0	5 857.7	5 486.1

表 2 钢筋偏转时的磁场强度 μT

θ	-10°	-5°	0°	5°	10°
Y_3	5 923.9	6 130.6	6 251.8	6 379.6	6 477.8
Y_4	6 478.3	6 376.3	6 190.3	6 131.2	5 924.5

由表 1 可以看出, 在钢筋从左向右平行移动过程中, Y_1 逐渐变大, Y_2 逐渐变小, 当钢筋处于线圈正下方时, $Y_1 \approx Y_2$; 由表 2 可以看出, 在钢筋顺时针旋转的过程中, Y_3 逐渐变大, Y_4 逐渐变小, 当钢筋偏转角度为 0° 即钢筋垂直时, $Y_3 \approx Y_4$, 均符合 2.1 节中对钢筋中心位置个偏转角度的判断依据。

在仿真中可以发现, 当钢筋中心位置处于阵列传感器正下方中心且无偏转时, $Y_1 - Y_2$ 及 $Y_3 - Y_4$ 的绝对值并不等于 0, 这是仿真中由于网格剖析不够精细导致的误差。而在实际测量过程中, 由于霍尔元件和空间磁场不一定处于完全对称的状态, 且霍尔元件存在个体检测差异, 同样会导致检测结果存在误差。由于测量误差和硬件误差的存在, 本文提出偏离判定系数 K_1 和偏转判定系数 K_2 :

$$\begin{cases} K_1 = \frac{|Y_1 - Y_2|}{Y_1 + Y_2} \times 100\% \\ K_2 = \frac{|Y_3 - Y_4|}{Y_3 + Y_4} \times 100\% \end{cases} \quad (8)$$

根据多次仿真分析, 得出钢筋中心位置处于阵列传感器正下方且无偏转时的判定系数 K_1 和 K_2 的最大值为 3%, 因此设定当 $K_1 \leq 3\%$ 时, $Y_1 - Y_2 \approx 0$, $K_2 \leq 3\%$ 时, $Y_3 - Y_4 \approx 0$ 而当判定系数大于 3% 时, 再对检测值进行对比分析, 进行钢筋定位。

3 实验分析

根据仿真结果, 进一步在搭建的实验平台中对钢筋角度偏转、中心偏离以及不同埋深分别进行数据测量。

3.1 钢筋定位实验

先令钢筋处于阵列传感器中心正下方, 并在单片机系统中对检测数据进行修正, 使得此时检测数值 $S_1 \sim S_4$ 基本保持一致; 然后保持阵列传感器位置不变, 将钢筋分别进行平行移动和绕中心点旋转来改变钢筋的对阵列传感器的相对位置, 图 8 为钢筋定位实验平台。

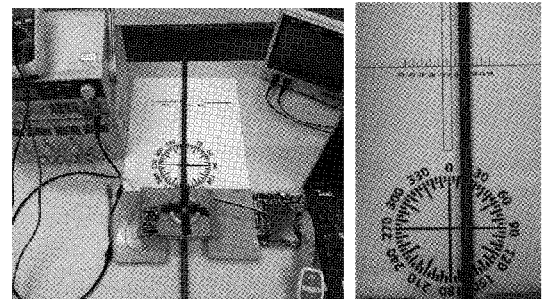


图 8 钢筋定位实验图

在保持阵列传感器位置不变的情况下, 调节传感器中心距离钢筋的距离, 模拟埋深为 20、30、40 mm 的情况, 并依次改变钢筋的中心偏离大小及偏转角度进行检测。

为更加直观地表现出钢筋偏离及偏转情况与检测值之间的关系, 利用作差来替代式(5)、(7)中检测值大小比较, 检测结果如图 9、10 所示。

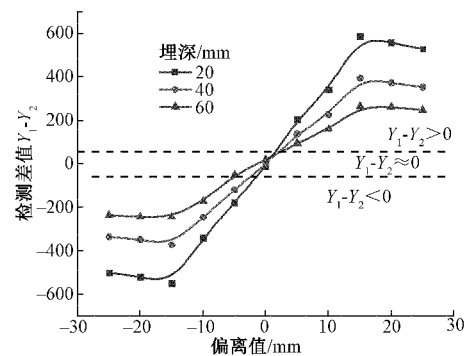


图 9 检测值与中心偏离情况关系图

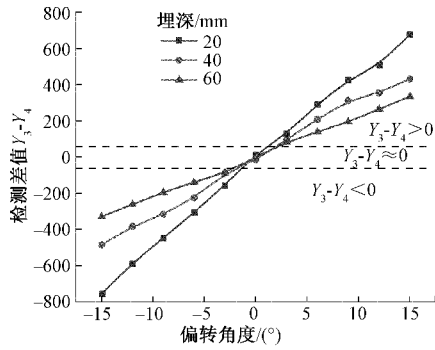


图10 检测值与中心偏离情况关系图

根据式(8)判定系数 K_1 , 当检测结果处于图9虚线中间时即可判定钢筋中心位置处于阵列传感器正下方。当钢筋右偏即偏离值大于0时, 钢筋靠近编号为①和②的霍尔元件, 此时检测值 $Y_1 = S_1 + S_2$ 明显大于检测值 $Y_2 = S_3 + S_4$, 检测差值大于0。同时, 由于霍尔阵列宽为30 mm, 两边霍尔元件离中心轴的距离为15 mm, 因此在偏离程度为15 mm时, 钢筋正好处于两边的霍尔元件下方, 其相应的检测值和检测差值均达到峰值。

同理, 在埋深为20、30、40 mm 情况下对钢筋偏转进行检测, 以差值 $Y_3 - Y_4$ 为判断指标, 结果如图10所示。根据判定系数 K_2 , 当检测结果处于图10虚线中间时即可判定钢筋角度无偏转。在钢筋发生偏转时, 其靠近钢筋的一对处于对角霍尔元件检测值增大, 另一对霍尔元件减小, 检测差值的绝对值增大, 实验结果与仿真结果相一致。

3.2 钢筋埋深测量

在钢筋精确定位的前提下, 阵列传感器中心位置的霍尔元件 S_5 检测值达到最大, 因此选择该检测值来反演钢筋埋深。由于设计规定最外层钢筋埋深为15~40 mm, 因此在实验室中以此作为埋深测试范围, 并以5 mm 为间隔进行测量, 如图11所示, 共有 $S_{51}、S_{52}、S_{53}、S_{54}、S_{55}、S_{56}$ 6个检测值, 对应 $L_1 \sim L_6$ 6个不同的埋深。实验平台如图12所示。

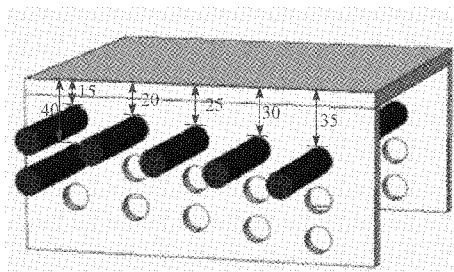


图11 不同埋深钢筋示意图

由于钢筋不同区域段的直径、截面形状存在细微的差异, 实验中前后移动钢筋, 对钢筋的3个不同区域段进行测量埋深检测值的标定。检测值与实际钢筋埋深关系如图13所示。

由检测结果分析可以得到, 随着埋深的增加, 磁化效应

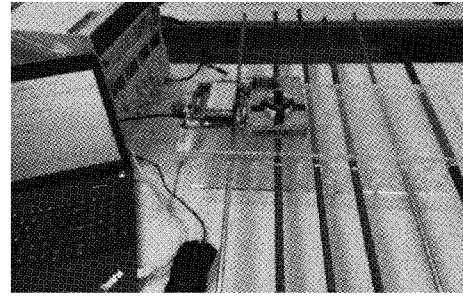


图12 钢筋埋深检测实验平台

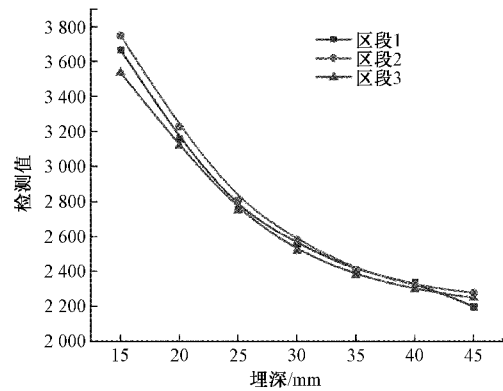


图13 钢筋埋深与检测值关系

减弱, 磁化磁场对原磁场的影响减小, 因此检测值也减小, 当埋深足够时, 检测值即为原磁场的磁场强度。检测值与埋深的关系呈现二次函数变化, 具有一定线性关系, 取3个区段的检测均值 $(S_{5i}, L_i) (i=1, 2, 3, 4, 5, 6)$ 采用最小二乘法进行拟合^[11-13], 可以得到方程式:

$$\begin{pmatrix} 6 & \sum S_{5i} & \sum S_{5i}^2 \\ \sum S_{5i} & \sum S_{5i}^2 & \sum S_{5i}^3 \\ \sum S_{5i}^2 & \sum S_{5i}^3 & \sum S_{5i}^4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum L_i \\ \sum L_i S_{5i} \\ \sum L_i S_{5i}^2 \end{pmatrix} \quad (9)$$

根据方程式可得到解 $a_0、a_1、a_2$ 及拟合函数如下:

$$L = f(S_5) = 215.5417 - 0.1115S_5 + 1.554 \times 10^{-3} S_5^2 \quad (10)$$

利用拟合函数式(10)对检测结果结果进行反演, 不同埋深的的预测值与误差如表3所示。

表3 钢筋检测预测值

编号	真实值/mm	预测值/mm	误差/%
1	15	15.66	4.40
2	20	18.94	5.30
3	25	24.74	1.04
4	30	31.36	4.53
5	35	36.76	5.03
6	40	40.54	1.35
7	45	45.14	0.31

4 误差分析及修正

在钢筋混凝土建筑设施中,钢筋间距往往需要按照设计要求而各有不同。本文设计的基于磁测量原理的霍尔阵列传感器,主要根据铁磁物质的磁化效应来进行测量,因此相邻钢筋的存在会影响埋深的测量,造成一定的误差。根据式(1)钢筋间距越大对原磁场影响越小,误差越小。在埋深不变的情况下,改变两边相邻钢筋的间距,埋深测试误差与相邻钢筋间距的关系图如图 14 所示。

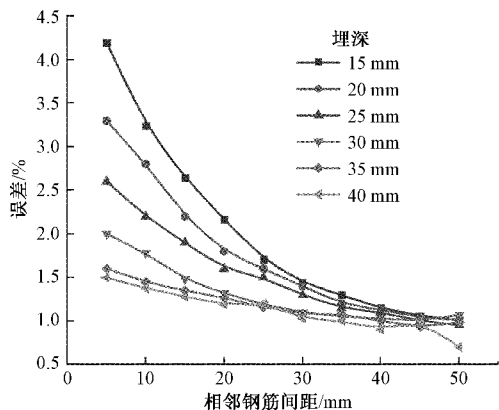


图 14 不同钢筋间距下的检测误差

由图 14 可知,当相邻钢筋间距较小时,其对检测结果有较大影响,随着间距的增加,其对检测结果影响逐渐减小。最终检测误差稳定在 1.5% 左右,可视作为实验测量误差。

为了修正钢筋间距造成的误差,引入 BP 神经网络。由于 BP 神经网络有良好的非线性映射能力,且能算法模型能够输入多元特征量,是经典的数据处理算法,因此本文利用 BP 神经网络对相邻钢筋的影响进行修正,降低检测结果的误差^[14-15]。在实验中得到不同相邻钢筋间距下的埋深样本数据共 225 组,其中随机选取 175 组数据用于训练,剩余 50 组数据用于测试。在避免过拟合出现的前提下为尽可能的增强模型描述能力选择,采用 3 层结构,其中隐含层为 3 个节点,输入层为 2 个神经元,分别为未修正的埋深检测值和相邻钢筋间距,输出层为实际埋深,激励函数采用 Sigmoid 函数^[16-17]。训练结果如图 15 所示。

由图 15 可以看出经模型训练,不同埋深的测量误差都得到了较大的改善,误差整体范围在 1% 以内,个别样本误差较大,但也在 1.5% 以内。利用训练模型对未修正的 10 组测试数据进行修正,修正前后对比如表 4 所示。

在埋深 L 的测量数据中,未进行修正的埋深误差最大达到了 5.375%,平均误差为 3.981%;而经过 BP 神经网络算法模型修正后的最大误差为 1.44%,平均误差为 0.727%,图 16 为 50 组测试样本在修正前后的误差对比情况。根据图 16 可以看出,经 BP 神经网络算法训练后,整体数据更加稳定,说明数据修正后传感器对存在相邻钢筋的埋深有着更加精确的测量。

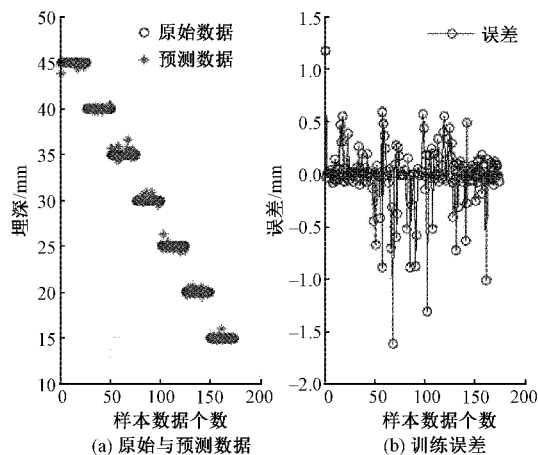


图 15 BP 神经网络训练结果

表 4 埋深 L 修正前后误差对比

编号	实际 L / 间距	修正前的 L	修正前的误差	修正后的 L	修正后的误差
1	35/20	36.44	3.257	35.23	0.657
2	15/40	14.73	1.800	14.89	0.733
3	30/20	31.18	3.933	30.31	1.033
4	40/15	42.15	5.375	40.31	0.775
5	20/20	18.97	5.150	19.87	0.650
6	35/5	33.56	4.114	34.88	0.343
7	15/30	14.32	4.533	14.91	0.600
8	20/25	20.89	4.450	20.19	0.950
9	25/35	24.15	3.400	24.64	1.440
10	30/30	28.86	3.800	29.71	0.096

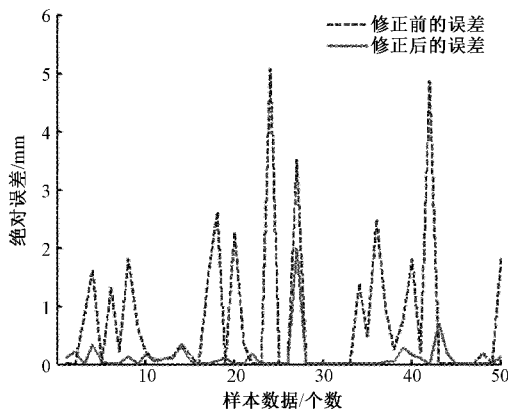


图 16 BP 神经网络训练结果误差

5 结 论

对混凝土内钢筋结构进行了检测,包括钢筋位置、走向及埋深等参数,通过 BP 神经网络对相邻钢筋影响下的检测值进行了修正,得到如下结论。

1) 基于磁测量原理的霍尔阵列传感器能够对钢筋位置

信息进行有效的判断。通过传感器检测数据之间的不同组合分析方式,结合提出的判定系数 K_1 、 K_2 ,准确地找到混凝土钢筋的中心位置,并有效判断钢筋的偏转角度,弥补了差动式线圈检测无法判断钢筋走向的缺点。

2)钢筋埋深与检测值之间呈现一定线性关系,利用最小二乘法拟合可得到其函数关系。根据实验发现相邻钢筋对检测值有较大影响,因此将不同间距下的检测值输入BP神经网络算法中进行了数据修正,修正后的检测数据较为稳定,且有效降低了检测误差。

3)霍尔阵列传感器在钢筋埋深较小时的敏感性较高,随着埋深的增大检测数据变化减小,后续工作将致力于线圈尺寸形状及激励信号的改变对传感器不同距离下电磁检测灵敏度的研究。

参考文献

- [1] 武乾,黄太兴,胡鑫,等. 钢筋混凝土工业文物建筑结构安全等级评定[J]. 土木工程与管理学报,2021,38(2): 9-16,38.
- [2] 张晋峰,孙彬,毛诗洋,等. 装配式混凝土结构内部缺陷无损检测试验研究[J]. 建筑结构,2020,50(9):26-31.
- [3] 应文武. 混凝土结构中钢筋无损检测技术的研究[D]. 杭州:浙江大学,2011.
- [4] 李满宏,王经天,吴玉,等. 电涡流传感器性能优化关键技术[J]. 仪器仪表学报,2019,40(7):233-243.
- [5] YE H R, ZHANG Z L, DAN Y H, et al. Novel method for measurement of rebar state of cement tower[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70:1-8.
- [6] 杨理践,郑文学,高松巍,等. 基于平衡电磁技术的钢板裂纹缺陷检测方法[J]. 仪器仪表学报,2020,41(10): 196-203.
- [7] 王成飞,刘泽,霍继伟,等. 电磁层析高铁空心轴缺陷检测方法研究[J]. 国外电子测量技术,2020,39(6): 132-136.
- [8] 鲁健捷. 基于磁测量的钢筋探测仪研制[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
- [9] EDDY I C, UNDERHILL P R, MORELLI J, et al. Pulsed eddy current response to liftoff in different sizes of concrete embedded rebar [J]. 2019 IEEE SENSORS, 2019, DOI: 10.1109/SENSORS43011.2019.8956833.
- [10] 张慧钱,肖丹,陈礼卿,等. 使用磁化率仪检测混凝土构件中钢筋的分布状况试验研究[J]. 工程地球物理学报,2013,10(3):333-337.
- [11] 刘昊,陈光武,魏宗寿,等. 改进的最小二乘自适应滤波陀螺仪去噪方法[J]. 仪器仪表学报,2018,39(4): 107-114.
- [12] 李志民,柳强,张新权,等. 基于最小二乘法的球杆系统输入输出建模研究[J]. 国外电子测量技术,2016, 35(1):65-69.
- [13] 何怡刚,李凯伟,朋张胜,等. 基于改进最小二乘支持向量机的IGBT模块键合线状态评估方法研究[J]. 电子测量与仪器学报,2019,33(9):170-176.
- [14] 朱晓青,马定寰,李圣清,等. 基于BP神经网络的微电网蓄电池荷电状态估计[J]. 电子测量与仪器学报, 2017,31(12):2042-2048.
- [15] 许浩源,李媛媛. GA-BP神经网络对SAW压力传感器测量数据的拟合[J]. 电子测量与仪器学报,2021, 35(4):7-14.
- [16] 任圆圆. 粒子群优化BP神经网络算法在公路形变预测中的应用分析[J]. 电子测量技术,2020,43(12):80-84.
- [17] 李禹剑,李剑,辛伟瑶. 一种基于BP神经网络的老旧桥梁健康诊断方法[J]. 国外电子测量技术,2020,39(2): 19-22.

作者简介

于津,本科,工程师,主要研究方向为电气工程及其自动化、电磁检测与数值分析。

E-mail:yujin_fish@126.com

卢纯义,高级工程师,主要研究方向为电气工程及其自动化。

E-mail:luchunyi@sohu.com

余忠东,高级工程师,主要研究方向为电力工程管理。

E-mail:15097063@qq.com

丁双松,本科,主要研究方向为电磁检测与数值分析。

E-mail:3271131@qq.com

张占龙,教授,主要研究方向为电磁测量、输电设备故障监测与计算、电气智能信息处理、配电系统节能降耗、接地技术和腐蚀诊断方面。

E-mail:1213613575@com

裘科成,硕士研究生,主要研究方向为电磁检测与数值分析。

E-mail:201911131074@edu.cqu.cn