

文章编号:1673-9469(2025)03-0075-07

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.03.010

EIP 钢筋锈蚀量监测装置的设计与误差校正

王辉¹, 田砾¹, 许哲涛², 杜振兴¹, 孙晓光³, 王鹏刚^{1*}

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266520; 2. 山东省建筑工程质量检验检测中心有限公司, 山东 济南 250100; 3. 山东京博环保材料有限公司, 山东 滨州 256500)

摘要: 为了研究电磁法在检测钢筋锈蚀时存在的误差大、难定量问题, 通过钢筋与其锈蚀产物间的磁导率差异, 基于电磁感应原理开发了一套钢筋锈蚀量监测装置。该监测装置采用永磁体来提供闭合磁场, 用硅钢片传输磁场, 同时在硅钢片两端镶嵌霍尔元件来感应钢筋锈蚀产生的磁导率变化。通过标定, 基于法拉第公式得出了混凝土内部钢筋理论计算锈蚀率与实际锈蚀率间的修正公式, 通过该修正公式计算得到的钢筋锈蚀量与通过失重法实测的钢筋锈蚀量数值间的最大误差为 1.044%。通过混凝土内埋传感器试验, 基于线性回归模型得到了钢筋锈蚀量与霍尔电压变化量之间的精确关系, 为钢筋混凝土结构耐久性监测提供了科学方法。

关键词: 无损检测; 锈蚀率; 法拉第定律; 磁导率

中图分类号: TU528.01

文献标识码: A

Design and Error Correction of EIP Steel Bar Corrosion Monitoring Device

WANG Hui¹, TIAN Li¹, XU Zhetao², DU Zhenxing¹, SUN Xiaoguang³, WANG Penggang^{1*}

(1. Department of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266520, China;
2. Shandong Construction Engineering Quality Inspection and Testing Center Co., Ltd., Jinan, Shandong 250100, China;
3. Shandong Chambroad Eco-friendly Materials Co., Ltd., Binzhou, Shandong 256500, China)

Abstract: In order to study the problems of large errors and difficulty in quantification when using electromagnetic methods to detect steel corrosion, this paper developed a set of steel corrosion monitoring device based on the principle of electromagnetic induction by utilizing the difference in magnetic permeability between the steel bars and their corrosion products. This monitoring device uses permanent magnets to provide a closed magnetic field, transmits the magnetic field using silicon steel sheets, and embeds Hall elements at both ends of the silicon steel sheets to sense the changes in magnetic permeability caused by steel corrosion. Through calibration, a correction formula for the theoretical calculated corrosion rate of the internal steel bars in concrete and the actual corrosion rate was obtained based on Faraday's formula. The maximum error between the corrosion amount of the steel bars calculated by this correction formula and the actual corrosion amount measured by the weight loss method was 1.044%. Through the concrete internal sensor test, an accurate relationship between the corrosion amount of the steel bars and the change in Hall voltage was obtained based on the linear regression model, providing a scientific method for the durability monitoring of reinforced concrete structures.

Key words: nondestructive testing; corrosion rate; Faraday's law; magnetic permeability

收稿日期: 2024-03-25

基金项目: 山东省自然科学基金面上项目(ZR202103020358)

第一作者: 王辉(1997—), 男, 山东菏泽人, 硕士, 从事混凝土结构耐久性方向研究。

* 通信作者: 王鹏刚(1982—), 男, 山东青岛人, 博士, 教授, 从事混凝土结构耐久性方向研究。

钢筋的锈蚀程度是影响混凝土结构耐久性的关键因素,也是判定混凝土结构剩余寿命的重要依据^[1-3]。因此,动态监测钢筋的锈蚀参数,精准甄别钢筋关键锈蚀时间点,及时对混凝土结构劣化进行预警、修复,是提高混凝土结构耐久性、安全性的有效方法^[4-5]。钢筋的主要成分是强磁性的铁,发生锈蚀后生成铁的氧化物,这些锈蚀产物的磁导率与原钢筋的磁导率相差几千倍^[6-10],会导致电磁场强度的改变。基于电磁感应原理能够检测混凝土内部钢筋的锈蚀程度,但相关传感器标定试验大多在模拟孔溶液中进行,然而,也很难准确反映钢筋实际服役环境下的锈蚀状态^[11-13]。钢筋锈蚀传感器可以检测混凝土内部钢筋的位置、直径等信息或定性检测钢筋锈蚀概率,很难定量反映钢筋锈蚀量、甄别关键锈蚀点^[14-18]。此外,基于电磁感应原理的传感器大多用来短时间检测,很难进行长时间原位监测,导致检测信息传递不及时、误差较大^[19-23]。

基于电磁感应原理,本文自主研发了一套钢筋锈蚀量监测装置,能够对混凝土内部钢筋进行锈蚀程度无损检测,并通过混凝土结构原位锈蚀试验校正了设备误差,修正了法拉第定律,提高了其在混凝土环境中的适用性。此外,该装置克服了电磁法无法精确定量表示钢筋锈蚀量、无法精准甄别锈蚀关键点以及检测误差大的问题,为实现混凝土内部钢筋锈蚀的原位精准定量检测提供了可行方法,为工程耐久性评估、防护与修复提供了科学决策依据。

1 钢筋锈蚀量监测装置介绍

1.1 钢筋锈蚀量传感器

钢筋锈蚀量传感器基于电磁感应原理设计,采用永磁体提供稳定的闭合磁场,硅钢片(易导

磁、损耗小)传输磁场,磁场方向与钢筋垂直并给出初始磁场强度值,磁感线传输示意图如图1所示。在硅钢片一端开口处镶嵌霍尔元件,能够精准识别与接收穿过该区域的钢筋、锈蚀产物及混凝土的磁感应强度变化,并以霍尔电压的形式呈现出来。通过配合在混凝土环境下的钢筋锈蚀量标定试验,可以实现混凝土内部钢筋锈蚀情况的高精度定量检测,钢筋锈蚀量传感器如图2所示。同时,为保证钢筋锈蚀量传感器自身的测量灵敏度,在传感器内部还集成了永磁体磁场变化监测元件,当永磁体磁场强度受到外界干扰导致与最初标定的磁场强度相差5%以上时,则认为此时的钢筋锈蚀量传感器监测结果产生了偏差,需重新标定后使用或不宜继续使用。在钢筋锈蚀量传感器内部还集成了GPS模块,可通过配套设备查找、识别传感器工作位置。在软件Solid Work中按传感器尺寸设计监测探头的三维模型,并利用3D打印设备对传感器外壳进行打印,打印材料为聚丙烯酸酯。

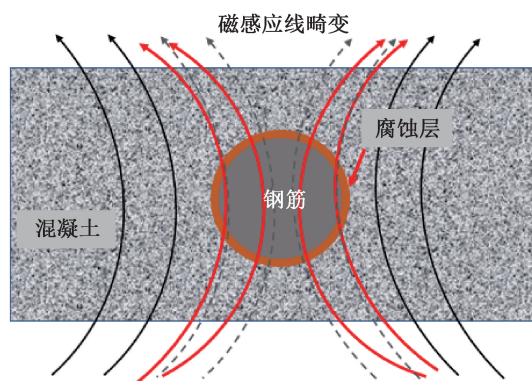
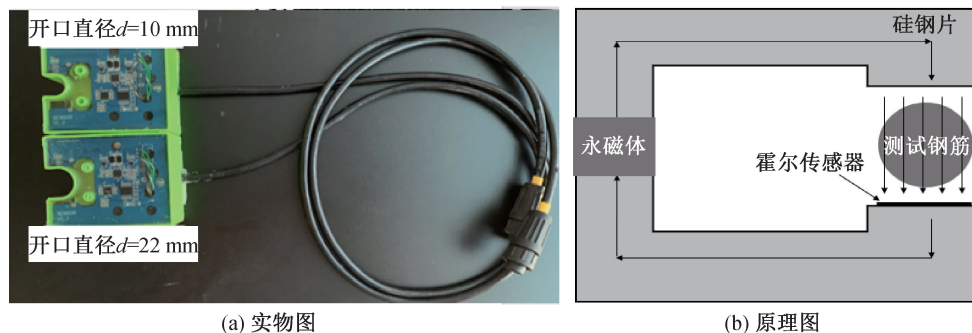


图1 磁感线传输示意图

Fig. 1 Schematic diagram of magnetic induction line transmission

1.2 钢筋电磁响应采集仪

钢筋电磁响应采集仪^[24]为课题组自主研发,设备内部由单片机和电路板等电子设备组成,显



(a) 实物图

(b) 原理图

图2 钢筋锈蚀量传感器

Fig. 2 Steel corrosion sensor

示屏为 2K 高分辨率高灵敏度触摸电容屏幕,可以识别传感器监测到的信号并反映到屏幕上。监测设备搭载 GPS 识别设备,能够定位传感器探头的工作位置,设备内部预留 4G SIM 卡插口,可将数据经无线网络传输到远程服务器。该采集设备小巧轻便,充电后能够连续工作 12 h,便于随身携带、随时随地采集数据。钢筋电磁响应采集仪如图 3 所示。



图 3 钢筋电磁响应采集仪

Fig. 3 Electromagnetic response acquisition instrument for rebar

2 钢筋锈蚀量传感器信号标定试验

钢筋锈蚀量传感器初始检测信号为霍尔电压信号,数据输出时需要将该电压信号转化为钢筋锈蚀量信息,进而量化混凝土内部钢筋的锈蚀程度。为了准确描述霍尔电压信号 V 与钢筋锈蚀量 Δm 之间的关系,需要对监测设备进行标定。

2.1 试验方案

采用恒电压法(30 V)加速混凝土中的钢筋锈蚀,利用破损检测方法(失重法)检测不同时间节点下钢筋的实际锈蚀量,以此修正法拉第定律计算钢筋在混凝土环境中锈蚀的理论锈蚀量的方法。同时,将钢筋锈蚀量传感器埋入混凝土内部。采用相同的试验方法,通过电磁响应采集仪实时监测钢筋锈蚀过程中的霍尔电位变化,与采用上述修正后的法拉第定律计算得到的钢筋锈蚀量进行相关性拟合,进而得到霍尔电压信号和钢筋锈蚀量之间的精确转换关系。

2.2 原材料及配合比

采用中国建筑材料科学研究总院生产的 P·I 42.5 普通硅酸盐水泥;粗骨料为潍坊正诚矿产材料加工厂配良好的花岗岩碎石,粒径为 5~25 mm;细骨料为青岛大沽河砂场的天然河砂,含泥量为 1.7%,细度模数为 2.70,拌合用水为自来水;减水剂为江苏博特新材料有限公司生产的 JM-PCA(1)

型聚羧酸高效减水剂,减水率 31%左右,氯离子含量 0.02%左右,碱含量 1.85%左右;采用直径为 16 mm、长度为 330 mm 的 HRB400 光圆钢筋。混凝土配合比见表 1,设计强度等级为 C40 混凝土。

表 1 混凝土配合比

Tab. 1 Mix ratio of concrete

水灰比	水泥/kg	石子/kg	砂/kg	水/kg	减水剂/kg
0.4	445	730	1 100	178	7.0

2.3 试件制作

试块浇筑前,先将钢筋进行除油、酸洗、除锈、钝化,并在钢筋一端绑扎导线。导线绑扎完成后在钢筋两端分别涂覆长度 15 mm 环氧树脂并用绝缘防水胶带缠绕密封,防止裸露在混凝土外部的钢筋发生锈蚀。全部处理完成的钢筋用去离子水清洗后进行烘干并称重记录。制作 100 mm×100 mm×300 mm 长方体钢筋混凝土试件 33 块,混凝土保护层厚度设置为 25 mm,其中 3 组试块内部埋置钢筋锈蚀量传感器。同时制作立方体试件 3 块,用来进行养护后的力学性能测试。为尽可能保证各试块材料性能的均匀性,本试验所有试块均由同批次原材料一次性搅拌制成。试块制作过程、具体尺寸及钢筋、传感器布置方式如图 4 所示。试块制作完成后,放入标准养护室养护 28 d 后进行后续试验。

2.4 电加速腐蚀试验装置与试验方法

为模拟实际工况下的钢筋锈蚀环境及锈蚀量传感器工作方式,设计了如图 5 所示的试验装置,其中容器由亚克力板制成,容器内为 NaCl(3.5%)溶液。将连接钢筋的导线与电源正极相连,连接不锈钢棒的导线与电源负极相连,电源输出电压恒定为 30 V,定期均匀搅动溶液保证浓度不变并记录电流变化,直至混凝土出现大于 0.2 mm 的锈胀裂缝。进行钢筋锈蚀量检测时,接入电磁响应采集仪,每隔 1 h 记录钢筋锈蚀量检测仪数值。同时,为防止电流的磁效应干扰检测结果,检测时断开电源。试验环境温度(26±2)℃,相对湿度(60±5)%。

2.5 试验结果

为区分埋入传感器的试块与普通试块,将普通试块定义为 A1—A30,埋入传感器的试块定义为 B1—B3。经测试,养护 28 d 后的三块立方体试块抗压强度分别为 43.2、42.5、43.3 MPa,可知本批次混凝土试块性质均一,状态良好。

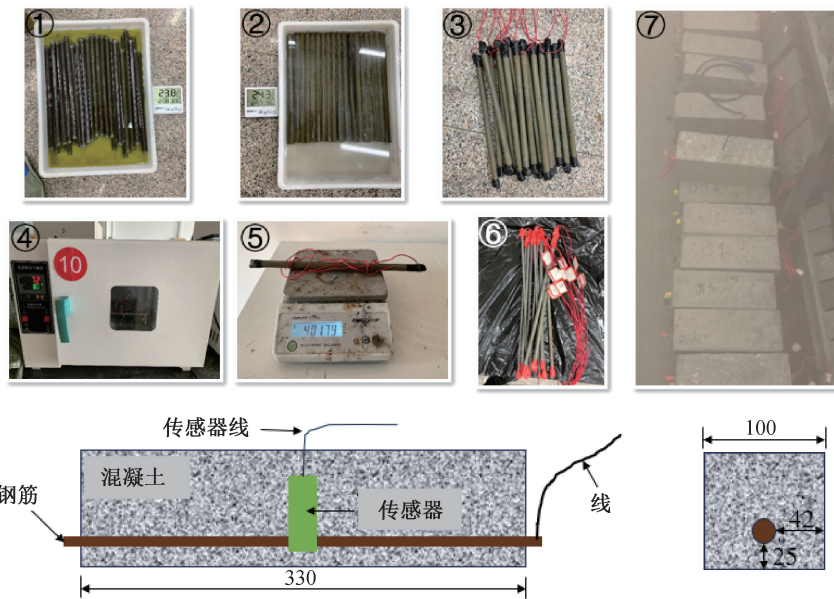


图4 试验试块制作步骤及尺寸(单位:mm)

Fig. 4 Procedure and dimensions for preparing test specimens (unit:mm)

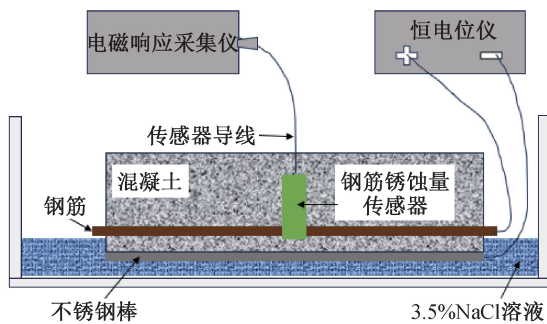


图5 电加速腐蚀试验装置及钢筋锈蚀量检测装置

Fig. 5 Electrical accelerated corrosion test device and steel bar rusting quantity detection device

为更加直观、准确地对比失重法(有损检测,检测后试块报废)计算出的实际锈蚀量和法拉第定律(无损检测)计算出的理论锈蚀量间的关系,本次试验首先将 A1 试块通电加速锈蚀 2 h,观察其电流变化,并在结束试验时利用法拉第定律计算 A1 试块中钢筋的理论锈蚀量,随后破损 A1 试块取出其中的钢筋,利用失重法计算其实际锈蚀量,并与理论锈蚀量进行对比,得出通电 2 h 时的理论锈蚀量与实际锈蚀量间的关系。以此类推,在相同条件对 A2—A30 试块分别通电加速锈蚀 4~60 h,通电时间间隔设置为 2 h(参考相关文献中的通电腐蚀曲线规律,该间隔设置可以在最大限度地还原腐蚀电流变化规律的基础上减少试验组数),直至得出通电 0~60 h 下的理论锈蚀量与实际锈蚀量之间的关系曲线。法拉第定律见公式(1),失重法见公式(2),试验结果如图 6—图 7

所示。

$$\Delta m = n \cdot M = \frac{Q \cdot M}{F \cdot |Z|} = \frac{M \cdot \int I(t) dt}{F |Z|} \quad (1)$$

式中: n 为被锈蚀溶解的物质的量, mol; M 为铁的摩尔质量, 55.8 g/mol; Q 为流过阳极的电量, C; $I(t)$ 为外加电流强度, A; t 为外加电流时间, s; F 为法拉第常数, 96 485 C/mol; Z 为金属离子价数, 此处铁为 +2 价。

$$\Delta m = \frac{(m_1 - m_2)}{m_1} \cdot 100\% \quad (2)$$

式中: m_1 为钢筋初始质量, g; m_2 为锈蚀除锈后的钢筋质量, g。

利用式(1)并根据腐蚀电流变化计算得出理论锈蚀量曲线,观察腐蚀电流差值曲线并参照理论锈蚀量曲线可知,腐蚀电流在 4 h 前基本处于水平状态,表明此时钢筋腐蚀状态以钝化膜脱落为主,钢筋未发生锈蚀;腐蚀电流在 4~20 h 内呈缓慢上升趋势,表示此时钢筋锈蚀量缓慢增加;腐蚀电流在 20 h 附近发生小范围波动,可能是此时混凝土产生微小裂缝,少量溶液渗透至钢筋表面所致;腐蚀电流在 40 h 附近发生,并产生较大波动,可能是此时钢筋锈蚀产物堆积产生的锈胀应力导致混凝土胀裂产生较大裂缝,大量腐蚀溶液到达钢筋表面造成的。由此判断钢筋混凝土结构在恒电压腐蚀下初裂时间为 20 h,形成较大裂缝时间为 40 h,结果如图 6 所示。

利用式(2)并根据钢筋锈蚀前后质量变化

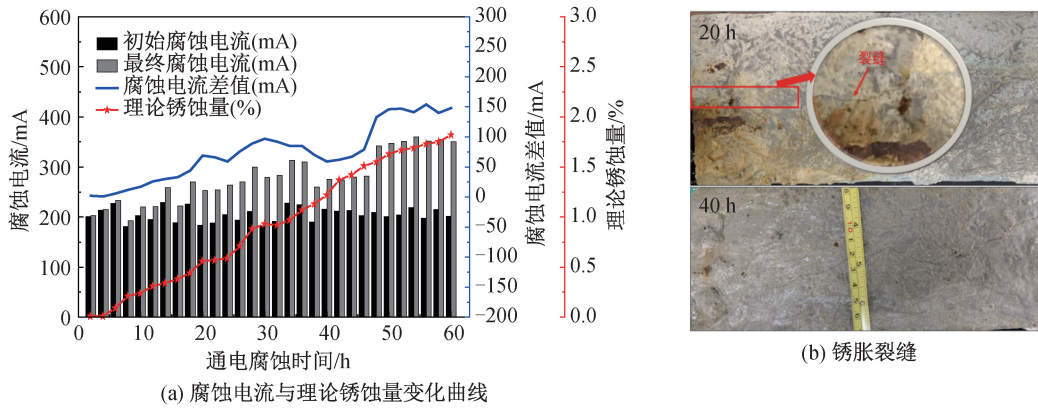


图6 法拉第定律计算理论锈蚀量变化图

Fig. 6 Plot of the variation of the theoretical amount of corrosion calculated by Faraday's law

计算得出实际锈蚀量变化曲线,观察对比实际锈蚀量与理论锈蚀量曲线可知,两者整体变化趋势大致相同,相同通电腐蚀时间的实际锈蚀量数值整体小于理论锈蚀量数值,差值大致为 10%,结果如图 7、图 8 所示。

用最小二乘法将上述关系拟合为一条直线 $\Delta \dot{m} = a \cdot \Delta \dot{m} + b$ 。其中, a 是斜率, b 是截距。然后使用 Python 中的 NumPy 库和 Scikit-learn 库,可以解得: $a = 0.89632; b = 0; R^2 = 0.994$ 。如图 9 所示,由此可以得出理论锈蚀量 ($\Delta \dot{m}$) 与实际锈蚀量 ($\Delta \dot{m}$) 之间的定量表示关系式为

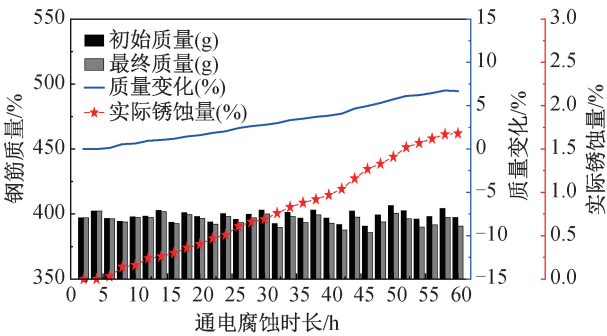


图7 失重法检测钢筋质量变化与实际锈蚀量图
Fig. 7 Mass change and actual corrosion of steel bar measured by weight loss method

$$\Delta \dot{m} = 0.89632 \cdot \Delta \dot{m} \quad (3)$$

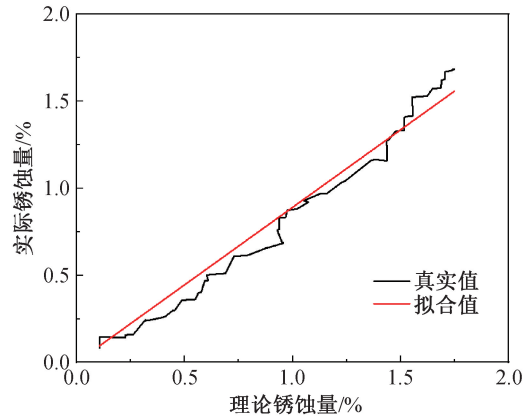


图9 理论锈蚀量与实际锈蚀量之间的线性关系
Fig. 9 Linear relationship between theoretical corrosion amount and actual corrosion amount

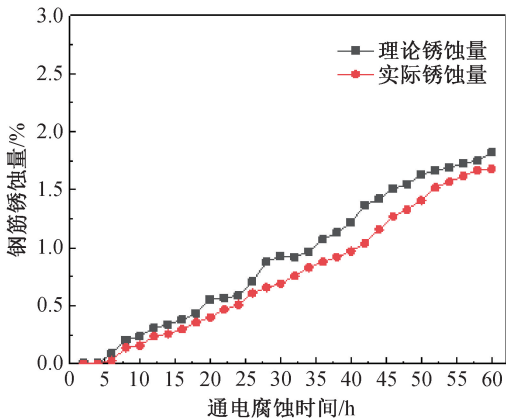


图8 理论锈蚀量与实际锈蚀量对比曲线
Fig. 8 Comparison curve between theoretical corrosion amount and actual corrosion amount

将式(1)与式(3)联立,对法拉第定律进行修正,得到适用于混凝土内部腐蚀环境下的钢筋真实锈蚀量公式:

$$\Delta m = \frac{0.9385661 \cdot M \cdot \int I(t) dt}{F |Z|} + 0.0251722 \quad (4)$$

利用线性回归模型来定量表示理论锈蚀量 ($\Delta \dot{m}$) 与实际锈蚀量 ($\Delta \dot{m}$) 之间的关系。首先使

将埋有钢筋锈蚀量传感器的 B1—B3 试块重复上述试验,分别监测腐蚀电流和霍尔电压随通电时间的变化,试验结果如图 10 所示。

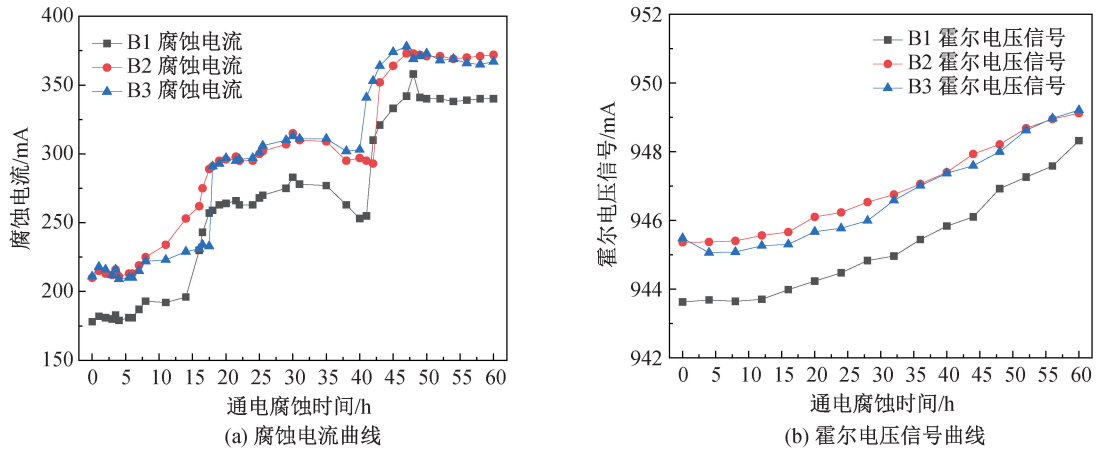


图 10 B1—B3 试块试验数据
Fig. 10 Experimental data of B1—B3 test block

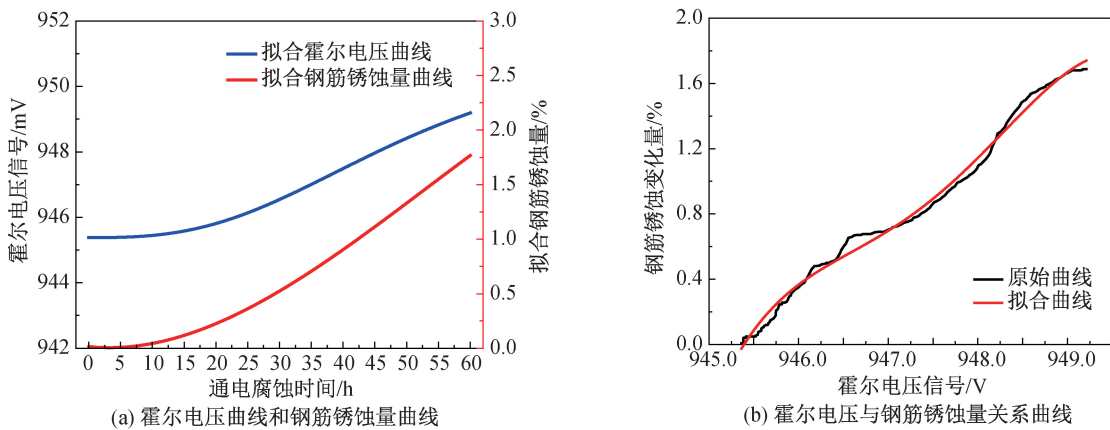


图 11 数据处理
Fig. 11 Data processing

利用式(4)计算实际锈蚀量后,分别使用 Gauss 函数和三次函数对实际锈蚀量数据和霍尔电压数据进行拟合,两条拟合曲线 R^2 分别为 0.998 和 0.992,对两条拟合曲线利用线性回归模型中的多项式回归^[25]进行相关性分析。结果如图 11 所示。

由于多项式回归在数据集较小或存在噪声的情况下可能出现过拟合现象,所以根据实际数据和拟合效果,使用三次多项式表达霍尔电压信号(V)与钢筋锈蚀量(Δm)之间的函数关系,如公式 5 所示:

$$\Delta m = 2.56 \times 10^{-5} \cdot V^4 - 0.073 \cdot V^3 + 68.857 \cdot V^2 - 21736.58V \quad (5)$$

结束 60 h 加速腐蚀试验后,利用公式(5)得出计算锈蚀量,同时利用公式(2)对 B1—B3 试块进行失重法检测得出实际锈蚀量,通过观察理论锈蚀量和实际锈蚀量发现,利用公式(5)计算得出的锈蚀量与失重法计算得出的实际锈蚀量之间

的最小误差为 0.510%,最大误差为 1.044%,说明本文研究的钢筋锈蚀量计算方法与实际锈蚀量间的误差较小,能够满足工程应用,对比结果如表 2 所示。

表 2 计算锈蚀量与实际锈蚀量对照表
Tab. 2 Comparison table between calculated corrosion and actual corrosion

编号	计算锈蚀量/%	实际锈蚀量/%	误差率/%
B1	1.724	1.706	1.044
B2	1.763	1.754	0.510
B3	1.768	1.753	0.848

3 结论

本文基于电磁感应原理,设计、开发了一种能够应用于混凝土结构中的钢筋锈蚀量原位精准监测传感器。借助深度学习中的线性回归方法,修正了法拉第定律在计算混凝土环境内钢筋锈蚀率

的计算公式,提高了法拉第公式在混凝土环境中应用的精度。通过标定试验,建立了混凝土环境中钢筋锈蚀量传感器与计算锈蚀量之间的关系模型,得到了霍尔电压与钢筋锈蚀量之间的精确关系。经对比验算,修正后的公式计算值在本试验中与失重法测得的钢筋实际锈蚀量之间的最大误差率为 1.044%。此外,该传感器配备了用来采集霍尔电压信号的电磁响应采集仪,能够通过钢筋锈蚀发展进程甄别混凝土耐久性劣化关键节点,为钢筋混凝土结构耐久性监测提供了可行的方法。

参考文献:

- [1] 赵现强. 平台式陆用惯性导航系统中控制回路的设计及实现[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2012.
- [2] HOU B R, LI X G, MA X M, et al. The cost of corrosion in China[J]. *npj Materials Degradation*, 2017, 1(1): 4.
- [3] 缪昌文, 穆松. 混凝土技术的发展与展望[J]. *硅酸盐通*, 2020, 39(1): 1-11.
- [4] 丁娅, 秦晓川, 周莹, 等. 氯离子侵蚀下钢筋混凝土结构耐久性寿命预测——经典模型对比与分析[J]. *混凝土*, 2020(12): 15-20.
- [5] 安新正, 杨莹莹, 陈科, 等. 腐蚀环境下再生混凝土结构耐久性设计研究[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2016, 33(2): 15-18+24.
- [6] LI Z, JIN Z Q, ZHAO T J, et al. Use of a novel electromagnetic apparatus to monitor corrosion of reinforced bar in concrete[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, 286: 14-27.
- [7] 施锦杰, 孙伟. 苯并三唑对模拟混凝土孔溶液中钢筋的阻锈作用[J]. *功能材料*, 2010, 41(12): 2147-2150.
- [8] LI Z, JIN Z Q, XU X B, et al. Combined application of novel electromagnetic sensors and acoustic emission apparatus to monitor corrosion process of reinforced bars in concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 245: 118472.
- [9] LI Z, JIN Z Q, SHAO S S, et al. Influence of moisture content on electromagnetic response of concrete studied using a homemade apparatus[J]. *Sensors*, 2019, 19(21): 4637.
- [10] LI Z, JIN Z Q, GAO Y, et al. Coupled application of innovative electromagnetic sensors and digital image correlation technique to monitor corrosion process of reinforced bars in concrete[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 113: 103730.
- [11] RUMICHE F, INDACOCHEA J E, WANG M L. Assessment of the effect of microstructure on the magnetic behavior of structural carbon steels using an electromagnetic sensor[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2008, 17(4): 586-593.
- [12] 金南国, 蒋昊宇, 田野, 等. MCD 钢筋锈蚀监测仪的设计与应用[J]. *建筑材料学报*, 2020, 23(3): 733-738.
- [13] ZHANG J R, LIU C, SUN M, et al. An innovative corrosion evaluation technique for reinforced concrete structures using magnetic sensors[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 135: 68-75.
- [14] 廖礼俊. 钢筋混凝土腐蚀监测系统若干技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2009.
- [15] ZHAO Q Y, ZHOU J T, XIA Q W, et al. Non-destructive testing of steel corrosion fluctuation parameters based on spontaneous magnetic flux leakage and its relationship with steel bar diameter[J]. *Materials*, 2019, 12(24): 4116.
- [16] 姜卫方, 万明浩, 谢雄耀, 等. 混凝土体内钢筋位置检测实例——高频地质雷达应用效果[J]. *上海地质*, 1999(1): 47-49+54.
- [17] 李运来. 钢筋保护层厚度测量仪校准装置的研制[D]. 内蒙古:内蒙古工业大学,2017.
- [18] 石杨, 苏畅. 钢筋保护层厚度检测精度影响因素及操作要点[J]. *住宅与房地产*, 2020(23): 181-182.
- [19] 冯升阳. 基于锈蚀电位的在役 PC 梁耐久性状态 Bayesian 评估[D]. 重庆:重庆交通大学,2023.
- [20] 洪舒贤, 黄祖铭, 陈鼎重, 等. 基于探地雷达的钢筋锈蚀检测机理[J]. *深圳大学学报(理工版)*, 2023, 40(4): 463-469.
- [21] 孙世栋, 秦磊, 任宏伟, 等. 基于电阻层析成像的混凝土钢筋锈蚀无损检测[J]. *无损检测*, 2020, 42(1): 37-40.
- [22] 孙亚东. 水工钢筋混凝土钢筋锈蚀的检测与处理新技术研究[D]. 大连:大连理工大学,2018.
- [23] 张洪, 尹昌华, 吉祥, 等. 基于自发漏磁的 RC 梁内钢筋锈蚀宽度检测[J]. *混凝土*, 2022(2): 182-186.
- [24] 李哲. 基于电磁场场变响应原理的海洋环境混凝土中钢筋锈蚀监测技术研究[D]. 青岛:青岛理工大学,2020.
- [25] 陶厚永, 曹伟. 多项式回归与响应面分析的原理及应用[J]. *统计与决策*, 2020, 36(8): 36-40.

(责任编辑 张爱丽)