



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 114001636 A

(43) 申请公布日 2022. 02. 01

(21) 申请号 202111263243.0

(51) Int. Cl.

(22) 申请日 2021.10.28

G01B 7/06 (2006.01)

(71) 申请人 广西新祥高速公路有限公司

地址 530025 广西壮族自治区南宁市青秀区民族大道146号中国东盟国际商贸物流中心B座9层01A号

申请人 广西欣港交通投资有限公司  
重庆交通大学

(72) 发明人 张洪 廖福勇 贾利强 周建庭

廖棱 张森华 陈琳 张广照  
李玉彬 冉崇伟

(74) 专利代理机构 重庆博凯知识产权代理有限公司 50212

代理人 项晓丹

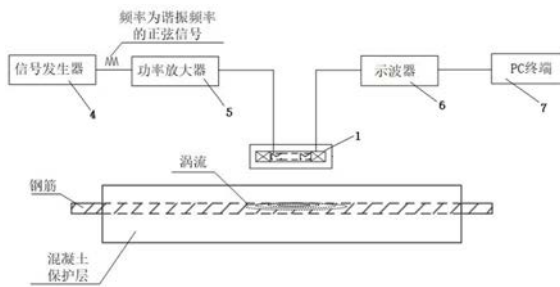
权利要求书2页 说明书9页 附图2页

(54) 发明名称

钢筋混凝土保护层厚度检测方法、检测装置及使用方法

(57) 摘要

本发明公开了一种钢筋混凝土保护层厚度检测方法、检测装置及使用方法,该检测方法以涡流效应理论为基础,采用具有初级线圈和次级线圈的传感器,并使得传感器工作于磁耦合谐振状态,利用传感器分别在不同脱离高度下对裸筋进行检测,并得到次级线圈上的电压数据 $U_1$ ,同时利用传感器对待测钢筋混凝土的表面进行检测,并得到次级线圈上的电压数据 $U_2$ ,通过将电压数据 $U_1$ 和电压数据 $U_2$ 进行比较以判断待测钢筋混凝土保护层厚度,实现对待测钢筋混凝土保护层厚度的检测。本方案检测成本低、检测精度高且不会对钢筋混凝土结构产生损害。



1. 钢筋混凝土保护层厚度检测方法,其特征在于,以涡流效应理论为基础,采用具有初级线圈和次级线圈的传感器,并使得所述传感器工作于磁耦合谐振状态,利用工作于磁耦合谐振状态下的所述传感器分别在不同提高高度下对裸筋进行检测,并得到所述传感器在不同提高高度下对裸筋进行检测时所述次级线圈上的电压数据 $U_1$ ,同时利用工作于磁耦合谐振状态下的所述传感器对待测钢筋混凝土的表面进行检测,并得到所述传感器在对待测钢筋混凝土表面进行检测时所述次级线圈上的电压数据 $U_2$ ,通过将所述传感器对裸筋进行检测时次级线圈上的电压数据 $U_1$ 和所述传感器对待测钢筋混凝土表面检测时次级线圈上的电压数据 $U_2$ 进行比较以判断待测钢筋混凝土保护层厚度,实现对待测钢筋混凝土保护层厚度的检测。

2. 根据权利要求1所述的钢筋混凝土保护层厚度检测方法,其特征在于,所述传感器距离钢筋表面的提高高度 $d$ 与所述次级线圈的电压 $U$ 之间的关系为:

$$U=U(\sigma, \mu, A, f, d)$$

式中: $\sigma$ 为钢筋的电导率; $\mu$ 为钢筋的磁导率; $A$ 为传感器激励电压的幅值; $f$ 为传感器的激励频率; $d$ 为传感器距离钢筋表面的提高高度; $U$ 为次级线圈的电压。

3. 根据权利要求1所述的钢筋混凝土保护层厚度检测方法,其特征在于,所述传感器在对钢筋进行检测时所述次级线圈的电流 $I'_2$ 与钢筋涡流效应产生的涡流电流 $I'_0$ 之间的关系为:

$$\frac{1}{I'_2} = \frac{1}{U_s} \left( \frac{Z_1 Z_2}{j\omega M_{12}} - j\omega M_{12} + I'_0 \right)$$

$$\text{其中: } I'_0 = \frac{-3j\omega^2 M_{12}^2 M_{23} M_{13} + Z_1 \omega M_{23}^2 M_{12} + Z_2 \omega M_{12} M_{13}^2 - jM_{13} M_{23} Z_1 Z_2}{-\omega M_{12} M_{13} M_{23} + jM_{12}^2 Z_3}$$

式中: $I'_2$ 为传感器在对钢筋进行检测时次级线圈的电流; $I'_0$ 为钢筋涡流效应产生的涡流电流; $U_s$ 为传感器的激励电压; $Z_1$ 为初级线圈回路阻抗; $Z_2$ 为次级线圈回路阻抗; $\omega$ 为角频率; $M_{12}$ 为初级线圈和次级线圈之间的互感; $M_{13}$ 为初级线圈和钢筋之间的互感; $M_{23}$ 为次级线圈和钢筋之间的互感; $Z_3$ 为涡流短路环阻抗。

4. 根据权利要求1所述的钢筋混凝土保护层厚度检测方法,其特征在于,向所述传感器的初级线圈内通入激励频率与所述初级线圈的固有频率相同的激励电流,以使得所述初级线圈产生高频变化磁场,并使所述次级线圈的固有频率与所述初级线圈产生的高频变化磁场的频率相同,以使得所述初级线圈与所述次级线圈之间发生耦合谐振,所述传感器工作于磁耦合谐振状态。

5. 一种实现如权利要求1所述的钢筋混凝土保护层厚度检测装置,其特征在于,包括检测装置、信号采集装置和后处理装置,所述检测装置包括激励组件、传感器和位移控制器,所述传感器包括初级线圈和次级线圈,所述位移控制器与所述传感器连接,以带动所述传感器沿钢筋混凝土移动,所述激励组件的输出端与所述初级线圈电连接,以向所述初级线圈提供激励电流,所述信号采集装置的输入端与所述次级线圈电连接,以对所述次级线圈的感应电压进行采集,所述后处理装置的输入端与所述信号采集装置的输出端连接,以获取所述次级线圈的感应电压数据。

6. 根据权利要求5所述的钢筋混凝土保护层厚度检测装置,其特征在于,所述激励装置

包括信号发生器和功率放大器,所述信号发生器的输出端与所述功率放大器的输入端连接,以将所述信号发生器产生的激励电流输入到所述功率放大器中进行放大处理,所述功率放大器的输出端与所述初级线圈连接,以将放大后的激励电流输入到所述初级线圈。

7. 根据权利要求5所述的钢筋混凝土保护层厚度检测装置,其特征在于,所述初级线圈和所述次级线圈同轴心设置并固定于刚性支承上,所述移动控制器与所述刚性支承连接,以通过所述刚性支承带动所述传感器移动。

8. 根据权利要求7所述的钢筋混凝土保护层厚度检测装置,其特征在于,所述刚性支承采用不导电且相对磁导率为0.9-1.1的非金属材料制成。

9. 根据权利要求5所述的钢筋混凝土保护层厚度检测装置,其特征在于,所述信号采集装置包括示波器,所述示波器的输入端与所述次级线圈电连接,以对所述次级线圈上的电压进行采集,所述后处理装置为PC终端。

10. 一种如权利要求5所述的钢筋混凝土保护层厚度检测装置的使用方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤1) 连接所述检测装置、所述信号采集装置和所述后处理装置;

步骤2) 所述激励组件向所述初级线圈提供激励电流,所述信号采集装置对所述次级线圈的电压信号进行采集,改变所述激励组件提供的激励电流的频率,直到所述信号采集装置采集到的所述次级线圈的电压信号达到最大值,此时所述激励组件提供的激励电流的频率为所述传感器的谐振频率;

步骤3) 所述激励组件向所述初级线圈提供谐振频率的激励电流,所述位移控制器带动所述传感器运动,使得所述传感器在不同提高高度对裸筋进行检测,所述信号采集装置采集所述传感器在不同提高高度下对裸筋进行检测时所述次级线圈上的电压数据 $U_1$ ;

步骤4) 所述激励组件向所述初级线圈提供谐振频率的激励电流,所述位移控制器带动所述传感器沿待测钢筋混凝土的表面运动,所述传感器对待测钢筋混凝土的不同位置进行检测,所述信号采集装置采集所述传感器在待测钢筋混凝土不同位置处的所述次级线圈上的电压数据 $U_2$ ;

步骤5) 所述后处理装置获取所述步骤3)中所述信号采集装置采集的电压数据 $U_1$ 和步骤4)中所述信号采集装置采集的电压数据 $U_2$ ,并通过将电压数据 $U_1$ 和电压数据 $U_2$ 进行对比以判断待测钢筋混凝土保护层的厚度,实现对待测钢筋混凝土保护层厚度的检测。

## 钢筋混凝土保护层厚度检测方法、检测装置及使用方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及土木工程结构监测技术领域,具体涉及一种钢筋混凝土保护层厚度检测方法、检测装置及使用方法。

### 背景技术

[0002] 目前,钢筋混凝土结构是土木工程领域中应用最为广泛的结构形式之一。混凝土保护层厚度是钢筋混凝土结构的重要设计指标,对结构起着至关重要的作用:确保钢筋与周围的混凝土能共同工作,以充分发挥钢筋强度;保护钢筋防止其发生腐蚀,确保构件在设计使用年限内不出现因钢筋腐蚀而降低结构整体的可靠度。因此,为避免钢筋混凝土结构在使用过程中因混凝土保护层厚度不符合要求而导致混凝土碳化、钢筋锈蚀、出现结构裂缝等病害,进而降低结构承载力、耐久性、安全性,因此有效地检测并控制混凝土保护层厚度显得尤为重要。

[0003] 目前,钢筋混凝土保护层厚度的检测分为有损检测和无损检测两大类。有损检测法是采用电锤钻或水钻进行钻孔取芯,清孔处理后便可用内窥镜观察内部钢筋结构,通过游标卡尺可直接测得保护层厚度大小;这种方法优点在于对保护层厚度的检测较为准确,但同时也对结构产生了不可逆的损害。无损检测方法主要是采用雷达探测法,雷达探测法是利用发射天线向目标物发射声波,根据钢筋和混凝土对声波的回弹反馈量的不同,通过分析接收装置接收到的返回声波成分即可计算混凝土保护层厚度,但是这种无损检测方法的检测成本高,检测精度较低。

### 发明内容

[0004] 针对现有技术存在的上述不足,本发明要解决的技术问题是:如何提供一种检测成本低、检测精度高且不会对钢筋混凝土结构产生损害的钢筋混凝土保护层厚度检测方法。

[0005] 另外,本发明还提供一种钢筋混凝土保护层厚度的检测装置及使用方法,以实现钢筋混凝土的低成本、高精度检测,同时不对钢筋混凝土结构产生损害的目的。

[0006] 为了解决上述技术问题,本发明采用如下技术方案:

[0007] 一种钢筋混凝土保护层厚度检测方法,以涡流效应理论为基础,采用具有初级线圈和次级线圈的传感器,并使得所述传感器工作于磁耦合谐振状态,利用工作于磁耦合谐振状态下的所述传感器分别在不同提离高度下对裸筋进行检测,并得到所述传感器在不同提离高度下对裸筋进行检测时所述次级线圈上的电压数据 $U_1$ ,同时利用工作于磁耦合谐振状态下的所述传感器对待测钢筋混凝土的表面进行检测,并得到所述传感器在对待测钢筋混凝土表面进行检测时所述次级线圈上的电压数据 $U_2$ ,通过将所述传感器对裸筋进行检测时次级线圈上的电压数据 $U_1$ 和所述传感器对待测钢筋混凝土表面检测时次级线圈上的电压数据 $U_2$ 进行比较以判断待测钢筋混凝土保护层厚度,实现对待测钢筋混凝土保护层厚度的检测。

[0008] 本发明的工作原理是：涡流效应指出，由于电磁感应现象，通有正弦电压或电流的初级线圈将产生一个变化磁场 $B_1$ ，被测金属试件（钢筋）在变化磁场 $B_1$ 的作用下，将产生感应涡流 $I_0$ ，感应涡流 $I_0$ 又将在空间中产生一个与 $B_1$ 方向相反的涡流磁场 $B_2$ ，此时空间中将存在一个变化磁场 $B_1$ 和涡流磁场 $B_2$ 的叠加磁场，感应涡流不仅受被测金属试件（钢筋）的电导率 $\sigma$ 、磁导率 $\mu$ 的影响，还与初级线圈激励电压的幅值 $A$ 、频率 $f$ 以及被测金属试件（钢筋）与传感器的距离 $d$ 有关，当其中一个因数改变时，叠加磁场也将发生改变，进而使的线圈的磁通发生改变，最终表现为次级线圈上的感应电压发生改变，当在其余参数不变的条件下，改变传感器与被测金属试件（钢筋）的相对位置 $d$ ，此时，次级线圈的感应电压仅与传感器与被测金属试件（钢筋）的相对位置 $d$ 相关，此时可对钢筋混凝土的保护层厚度进行检测。

[0009] 本方案在利用上述涡流效应原理进行检测时，先利用传感器在不同提离高度下对裸筋进行检测，提离高度即为传感器与裸筋之间的相对位置 $d$ ，不同提离高度即为传感器与裸筋之间的相对位置 $d$ 发生变化，此时可以得到传感器在不同提离高度下对裸筋进行检测时次级线圈上对应的电压数据 $U_1$ ，然后再利用传感器对待测钢筋混凝土的表面进行检测，此时钢筋混凝土上的保护层厚度即可看作是传感器检测时的提离高度 $d$ ，获得此时传感器在对待测钢筋混凝土表面进行检测时次级线圈上的电压数据 $U_2$ ，最后通过对传感器两次检测的电压数据 $U_1$ 和电压数据 $U_2$ 进行对比，电压数据 $U_1$ 和电压数据 $U_2$ 相同时对应的提离高度 $d$ 即为此时待测钢筋混凝土保护层的厚度，由此实现对待测钢筋混凝土保护层厚度的检测。

[0010] 综上，本发明结合涡流效应和磁耦合谐振效应，提出了一种基于磁耦合谐振涡流的混凝土保护层厚度的检测方法，可有效提高混凝土保护层厚度检测的线性度及检测深度；检测成本低、检测精度高且不会对钢筋混凝土结构产生损害。

[0011] 优选的，所述传感器距离钢筋表面的提离高度 $d$ 与所述次级线圈的电压 $U$ 之间的关系为：

$$[0012] \quad U=U(\sigma, \mu, A, f, d)$$

[0013] 式中： $\sigma$ 为钢筋的电导率； $\mu$ 为钢筋的磁导率； $A$ 为传感器激励电压的幅值； $f$ 为传感器的激励频率； $d$ 为传感器距离钢筋表面的提离高度； $U$ 为次级线圈的电压。

[0014] 优选的，所述传感器在对钢筋进行检测时所述次级线圈的电流 $I'_2$ 与钢筋涡流效应产生的涡流电流 $I'_0$ 之间的关系为：

$$[0015] \quad \frac{1}{I'_2} = \frac{1}{U_s} \left( \frac{Z_1 Z_2}{j\omega M_{12}} - j\omega M_{12} + I'_0 \right)$$

$$[0016] \quad \text{其中：} I'_0 = \frac{-3j\omega^2 M_{12}^2 M_{23} M_{13} + Z_1 \omega M_{23}^2 M_{12} + Z_2 \omega M_{12} M_{13}^2 - jM_{13} M_{23} Z_1 Z_2}{-\omega M_{12} M_{13} M_{23} + jM_{12}^2 Z_3}$$

[0017] 式中： $I'_2$ 为传感器在对钢筋进行检测时次级线圈的电流； $I'_0$ 为钢筋涡流效应产生的涡流电流； $U_s$ 为传感器的激励电压； $Z_1$ 为初级线圈回路阻抗； $Z_2$ 为次级线圈回路阻抗； $\omega$ 为角频率； $M_{12}$ 为初级线圈和次级线圈之间的互感； $M_{13}$ 为初级线圈和钢筋之间的互感； $M_{23}$ 为次级线圈和钢筋之间的互感； $Z_3$ 为涡流短路环阻抗。

[0018] 这样，通过上式可以知道，钢筋涡流效应产生的涡流电流 $I'_0$ 项使得次级线圈上的感应电流 $I'_2$ 变小， $I'_0$ 的作用结果表现为次级线圈感应电压减小；同时，钢筋的磁效应会影响传感器耦合系统周围介质的磁场分布，减弱系统耦合程度，使得传感器初级线圈和次级

限位之间的互感 $M_{12}$ 减小,也将导致次级线圈的电流 $I'_2$ 的减小;不仅如此,钢筋的存在还会改变初级线圈与次级线圈等效阻抗 $Z_1$ 和 $Z_2$ ,造成谐振频率偏移,导致系统失谐解耦、能量传输效率降低。因此,只要调节激励频率使双线圈涡流传感器产生磁耦合谐振,则系统能量传输效率将会最高,次级线圈上的感应电压也将最大,在钢筋介入后,不仅由钢筋的涡流效应引起次级线圈感应电压减小,而且钢筋的磁效应、磁耦合谐振系统的解耦偏移都会导致次级线圈的感应电压减小,钢筋介入引起的次级线圈感应电压变化幅度增大,从而增强钢筋的涡流效应。

[0019] 优选的,向所述传感器的初级线圈内通入激励频率与所述初级线圈的固有频率相同的激励电流,以使得所述初级线圈产生高频变化磁场,并使所述次级线圈的固有频率与所述初级线圈产生的高频变化磁场的频率相同,以使得所述初级线圈与所述次级线圈之间发生耦合谐振,所述传感器工作于磁耦合谐振状态。

[0020] 这样,通过使激励电流的激励频率与初级线圈的固有频率相同,且次级线圈的固有频率与初级线圈产生的高频变化磁场的频率相同,这样可以使得传感器工作于磁耦合谐振状态,工作于磁耦合谐振状态的传感器的初级线圈和次级线圈的磁耦合作用最强。

[0021] 一种实现上述钢筋混凝土保护层厚度检测装置,包括检测装置、信号采集装置和后处理装置,所述检测装置包括激励组件、传感器和位移控制器,所述传感器包括初级线圈和次级线圈,所述位移控制器与所述传感器连接,以带动所述传感器沿钢筋混凝土移动,所述激励组件的输出端与所述初级线圈电连接,以向所述初级线圈提供激励电流,所述信号采集装置的输入端与所述次级线圈电连接,以对所述次级线圈的感应电压进行采集,所述后处理装置的输入端与所述信号采集装置的输出端连接,以获取所述次级线圈的感应电压数据。

[0022] 这样,在采用本检测装置对待测钢筋混凝土的保护层厚度进行检测时,先连接检测装置、信号采集装置和后处理装置;然后由激励组件向初级线圈提供激励电流,信号采集装置对次级线圈的电压信号进行采集,改变激励组件提供的激励电流的频率,直到信号采集装置采集到的次级线圈的电压信号达到最大值,此时激励组件提供的激励电流的频率为所述传感器的谐振频率。

[0023] 激励组件向初级线圈提供谐振频率的激励电流,位移控制器带动传感器运动,使得传感器在不同提高高度对裸筋进行检测,信号采集装置采集传感器在不同提高高度下对裸筋进行检测时次级线圈上的电压数据 $U_1$ ;然后传感器再对待测钢筋混凝土的不同位置进行检测,信号采集装置采集传感器在待测钢筋混凝土不同位置处的次级线圈上的电压数据 $U_2$ ;后处理装置获取信号采集装置采集的电压数据 $U_1$ 和电压数据 $U_2$ ,并通过将电压数据 $U_1$ 和电压数据 $U_2$ 进行对比,电压数据 $U_1$ 和电压数据 $U_2$ 相同时对应的提高高度 $d$ 即为此时待测钢筋混凝土保护层的厚度,以此判断出待测钢筋混凝土保护层的厚度,实现对待测钢筋混凝土保护层厚度的检测。

[0024] 优选的,所述激励装置包括信号发生器和功率放大器,所述信号发生器的输出端与所述功率放大器的输入端连接,以将所述信号发生器产生的激励电流输入到所述功率放大器中进行放大处理,所述功率放大器的输出端与所述初级线圈连接,以将放大后的激励电流输入到所述初级线圈。

[0025] 这样,信号发生器用于产生激励电流,功率放大器用于将激励电流放大后输出给

初级线圈,使得初级线圈能产生较大的激励磁场。

[0026] 优选的,所述初级线圈和所述次级线圈同轴心设置并固定于刚性支承上,所述移动控制器与所述刚性支承连接,以通过所述刚性支承带动所述传感器移动。

[0027] 这样,次级线圈与初级线圈同轴心设计可以达到最好的耦合效果,并有利于拾取钢筋产生的磁场信号,同时利用刚性支承对初级线圈和次级线圈起到支撑效果,保证移动过程中初级线圈和次级线圈的稳定使用。

[0028] 优选的,所述刚性支承采用不导电且相对磁导率为0.9-1.1的非金属材料制成。

[0029] 这样,刚性支承采用相对磁导率为0.9-1.1的非金属材料制成一方面可以防止外界磁场的影响,另一方面也可以减少传感器产生的感应磁场向外扩散。

[0030] 优选的,所述信号采集装置包括示波器,所述示波器的输入端与所述次级线圈电连接,以对所述次级线圈上的电压进行采集,所述后处理装置为PC终端。

[0031] 这样,利用示波器对次级线圈的电压进行采集,并将采集的电压数据传递给PC终端进行进一步的处理。

[0032] 一种如上述钢筋混凝土保护层厚度检测装置的使用方法,包括以下步骤:

[0033] 步骤1) 连接所述检测装置、所述信号采集装置和所述后处理装置;

[0034] 步骤2) 所述激励组件向所述初级线圈提供激励电流,所述信号采集装置对所述次级线圈的电压信号进行采集,改变所述激励组件提供的激励电流的频率,直到所述信号采集装置采集到的所述次级线圈的电压信号达到最大值,此时所述激励组件提供的激励电流的频率为所述传感器的谐振频率;

[0035] 步骤3) 所述激励组件向所述初级线圈提供谐振频率的激励电流,所述位移控制器带动所述传感器运动,使得所述传感器在不同提高高度对裸筋进行检测,所述信号采集装置采集所述传感器在不同提高高度下对裸筋进行检测时所述次级线圈上的电压数据 $U_1$ ;

[0036] 步骤4) 所述激励组件向所述初级线圈提供谐振频率的激励电流,所述位移控制器带动所述传感器沿待测钢筋混凝土的表面运动,所述传感器对待测钢筋混凝土的不同位置进行检测,所述信号采集装置采集所述传感器在待测钢筋混凝土不同位置处的所述次级线圈上的电压数据 $U_2$ ;

[0037] 步骤5) 所述后处理装置获取所述步骤3) 中所述信号采集装置采用的电压数据 $U_1$ 和步骤4) 中所述信号采集装置采用的电压数据 $U_2$ ,并通过将电压数据 $U_1$ 和电压数据 $U_2$ 进行对比以判断待测钢筋混凝土保护层的厚度,实现对待测钢筋混凝土保护层厚度的检测。

[0038] 与现有技术相比,本发明结构简单,方法新颖,响应速度快,适用面广,利用这种磁耦合谐振的双线圈结构传感器,可将检测信号转换为易于测量、分析的电信号,探测距离和线性度得到了有效改善,十分利于混凝土保护层厚度检测。

## 附图说明

[0039] 图1为传感器等效电路模型;

[0040] 图2为带金属导体(钢筋)时的传感器等效电路模型;

[0041] 图3为钢筋混凝土保护层厚度检测装置的连接框图;

[0042] 图4为钢筋混凝土保护层厚度检测装置对钢筋混凝土进行检测时的工作示意图。

[0043] 附图标记说明:传感器1、初级线圈11、次级线圈12、刚性支承2、位移控制器3、信号

发生器4、功率放大器5、示波器6、PC终端7。

### 具体实施方式

[0044] 下面将结合附图及实施例对本发明作进一步说明。

[0045] 一种钢筋混凝土保护层厚度检测方法,以涡流效应理论为基础,采用具有初级线圈和次级线圈的传感器,并使得传感器工作于磁耦合谐振状态,利用工作于磁耦合谐振状态下的传感器分别在不同提离高度下对裸筋进行检测,并得到传感器在不同提离高度下对裸筋进行检测时次级线圈上的电压数据 $U_1$ ,同时利用工作于磁耦合谐振状态下的传感器对待测钢筋混凝土的表面进行检测,并得到传感器在对待测钢筋混凝土表面进行检测时次级线圈上的电压数据 $U_2$ ,通过将传感器对裸筋进行检测时次级线圈上的电压数据 $U_1$ 和传感器对待测钢筋混凝土表面检测时次级线圈上的电压数据 $U_2$ 进行比较以判断待测钢筋混凝土保护层厚度,实现对待测钢筋混凝土保护层厚度的检测。

[0046] 本发明的工作原理是:涡流效应指出,由于电磁感应现象,通有正弦电压或电流的初级线圈将产生一个变化磁场 $B_1$ ,被测金属试件(钢筋)在变化磁场 $B_1$ 的作用下,将产生感应涡流 $I_0$ ,感应涡流 $I_0$ 又将在空间中产生一个与 $B_1$ 方向相反的涡流磁场 $B_2$ ,此时空间中将存在一个变化磁场 $B_1$ 和涡流磁场 $B_2$ 的叠加磁场,感应涡流不仅受被测金属试件(钢筋)的电导率 $\sigma$ 、磁导率 $\mu$ 的影响,还与初级线圈激励电压的幅值 $A$ 、频率 $f$ 以及被测金属试件(钢筋)与传感器的距离 $d$ 有关,当其中一个因数改变时,叠加磁场也将发生改变,进而使的线圈的磁通发生改变,最终表现为次级线圈上的感应电压发生改变,当在其余参数不变的条件下,改变传感器与被测金属试件(钢筋)的相对位置 $d$ ,此时,次级线圈的感应电压仅与传感器与被测金属试件(钢筋)的相对位置 $d$ 相关,此时可对钢筋混凝土的保护层厚度进行检测。

[0047] 本方案在利用上述涡流效应原理进行检测时,先利用传感器在不同提离高度下对裸筋进行检测,提离高度即为传感器与裸筋之间的相对位置 $d$ ,不同提离高度即为传感器与裸筋之间的相对位置 $d$ 发生变化,此时可以得到传感器在不同提离高度下对裸筋进行检测时次级线圈上对应的电压数据 $U_1$ ,然后再利用传感器对待测钢筋混凝土的表面进行检测,此时钢筋混凝土上的保护层厚度即可看作是传感器检测时的提离高度 $d$ ,获得此时传感器在对待测钢筋混凝土表面进行检测时次级线圈上的电压数据 $U_2$ ,最后通过对传感器两次检测的电压数据 $U_1$ 和电压数据 $U_2$ 进行对比,电压数据 $U_1$ 和电压数据 $U_2$ 相同时对应的提离高度 $d$ 即为此时待测钢筋混凝土保护层的厚度,由此实现对待测钢筋混凝土保护层厚度的检测。

[0048] 综上,本发明结合涡流效应和磁耦合谐振效应,提出了一种基于磁耦合谐振涡流的混凝土保护层厚度的检测方法,可有效提高混凝土保护层厚度检测的线性度及检测深度;检测成本低、检测精度高且不会对钢筋混凝土结构产生损害。

[0049] 在本实施例中,传感器距离钢筋表面的提离高度 $d$ 与次级线圈的电压 $U$ 之间的关系为:

$$[0050] \quad U=U(\sigma, \mu, A, f, d) \quad (1)$$

[0051] 式中: $\sigma$ 为钢筋的电导率; $\mu$ 为钢筋的磁导率; $A$ 为传感器激励电压的幅值; $f$ 为传感器的激励频率; $d$ 为传感器距离钢筋表面的提离高度; $U$ 为次级线圈的电压。

[0052] 具体的,传感器包括初级线圈和次级线圈,其等效电路模型如图1所示。

[0053] 图1中: $U_s$ 为激励电压; $L_1$ 、 $L_2$ 为初级线圈和次级线圈电感; $R_1$ 、 $R_2$ 为初级线圈和次级



线圈内阻;  $C_1$ 、 $C_2$ 为初级线圈和次级线圈的谐振补偿电容;  $M_{12}$ 为线圈互感,反映两线圈的耦合强弱。

[0054] 初级线圈回路阻抗 $Z_1$ 与次级线圈回路阻抗 $Z_2$ 分别为:

$$[0055] \quad \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} \\ R_2 + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

[0056] 根据基尔霍夫定律,有方程组:

$$[0057] \quad \begin{bmatrix} Z_1 & -j\omega M \\ -j\omega M & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_s \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

[0058] 由式(2)、式(3)可得:

$$[0059] \quad \frac{1}{I_2} = \frac{1}{U_s} \left( \frac{Z_1 Z_2}{j\omega M_{12}} - j\omega M_{12} \right) \quad (4)$$

[0060] 磁耦合谐振是指:当高频电压激励源的激励频率与初级线圈固有频率相同时,将产生一个高频变化磁场,当初级线圈产生的高频变化磁场与次级线圈的固有频率相同时,初级线圈与次级线圈发生耦合谐振。谐振时,电路呈纯电阻性,有:

$$[0061] \quad j\omega L_1 + 1/j\omega C_1 = j\omega L_2 + 1/j\omega C_2 = 0 \quad (5)$$

$$[0062] \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} \quad (6)$$

[0063] 式中,  $\omega_0$ 称为谐振角频率,其对应的 $f_0$ 称为谐振频率,当工作频率为谐振频率 $f_0$ 时,涡流传感器发生磁耦合谐振,次级线圈两端感应电压将出现最大值。

[0064] 而当耦合谐振系统周围存在金属导体(钢筋)时,整个系统的等效电路模型如图2所示:图2中: $U_s$ 为激励电压; $L_1$ 、 $L_2$ 为初级线圈和次级线圈等效电感, $L_3$ 为涡流短路环电感; $R_1$ 、 $R_2$ 为初级线圈和次级线圈等效电阻, $R_3$ 为涡流短路环电阻; $C_1$ 、 $C_2$ 为初级线圈和次级线圈的谐振补偿电容; $M_{12}$ 、 $M_{13}$ 、 $M_{23}$ 分别为初级线圈与次级线圈、初级线圈与钢筋、次级线圈与钢筋的互感,反应耦合强弱。

[0065] 由图2可得,初级线圈回路阻抗 $Z_1$ 、次级线圈回路阻抗 $Z_2$ 、涡流短路环阻抗 $Z_3$ 分别为:

$$[0066] \quad \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} \\ R_2 + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} \\ R_3 + j\omega L_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

[0067] 同样地,由基尔霍夫定律可得:

$$[0068] \quad \mathbf{Z} \cdot \mathbf{I}' = \begin{bmatrix} R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} & -j\omega M_{12} & j\omega M_{13} \\ -j\omega M_{12} & R_2 + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} & j\omega M_{23} \\ j\omega M_{13} & j\omega M_{23} & R_3 + j\omega L_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I'_1 \\ I'_2 \\ I'_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

[0069] 整理得：

[0070] 传感器在对钢筋进行检测时次级线圈的电流  $I'_2$  与钢筋涡流效应产生的涡流电流  $I'_0$  之间的关系为：

$$[0071] \quad \frac{1}{I'_2} = \frac{1}{U_s} \left( \frac{Z_1 Z_2}{j\omega M_{12}} - j\omega M_{12} + I'_0 \right) \quad (9)$$

$$[0072] \quad \text{其中：} I'_0 = \frac{-3j\omega^2 M_{12}^2 M_{23} M_{13} + Z_1 \omega M_{23}^2 M_{12} + Z_2 \omega M_{12} M_{13}^2 - jM_{13} M_{23} Z_1 Z_2}{-\omega M_{12} M_{13} M_{23} + jM_{12}^2 Z_3}$$

[0073] 式中： $I'_2$  为传感器在对钢筋进行检测时次级线圈的电流； $I'_0$  为钢筋涡流效应产生的涡流电流； $U_s$  为传感器的激励电压； $Z_1$  为初级线圈回路阻抗； $Z_2$  为次级线圈回路阻抗； $\omega$  为角频率； $M_{12}$  为初级线圈和次级线圈之间的互感； $M_{13}$  为初级线圈和钢筋之间的互感； $M_{23}$  为次级线圈和钢筋之间的互感； $Z_3$  为涡流短路环阻抗。

[0074] 这样，通过上式可以知道，钢筋涡流效应产生的涡流电流  $I'_0$  项使得次级线圈上的感应电流  $I'_2$  变小， $I'_0$  的作用结果表现为次级线圈感应电压减小；同时，钢筋的磁效应会影响传感器耦合系统周围介质的磁场分布，减弱系统耦合程度，使得传感器初级线圈和次级线圈之间的互感  $M_{12}$  减小，也将导致次级线圈的电流  $I'_2$  的减小；不仅如此，钢筋的存在还会改变初级线圈与次级线圈等效阻抗  $Z_1$  和  $Z_2$ ，造成谐振频率偏移，导致系统失谐解耦、能量传输效率降低。因此，只要调节激励频率使双线圈涡流传感器产生磁耦合谐振，则系统能量传输效率将会最高，次级线圈上的感应电压也将最大，在钢筋介入后，不仅由钢筋的涡流效应引起次级线圈感应电压减小，而且钢筋的磁效应、磁耦合谐振系统的解耦偏移都会导致次级线圈的感应电压减小，钢筋介入引起的次级线圈感应电压变化幅度增大，从而增强钢筋的涡流效应。

[0075] 在本实施例中，向传感器的初级线圈内通入激励频率与初级线圈的固有频率相同的激励电流，以使得初级线圈产生高频变化磁场，并使次级线圈的固有频率与初级线圈产生的高频变化磁场的频率相同，以使得初级线圈与次级线圈之间发生耦合谐振，传感器工作于磁耦合谐振状态。

[0076] 这样，通过使激励电流的激励频率与初级线圈的固有频率相同，且次级线圈的固有频率与初级线圈产生的高频变化磁场的频率相同，这样可以使得传感器工作于磁耦合谐振状态，工作于磁耦合谐振状态的传感器的初级线圈和次级线圈的磁耦合作用最强。

[0077] 如附图3所示，一种实现上述钢筋混凝土保护层厚度检测装置，包括检测装置、信号采集装置和后处理装置，检测装置包括激励组件、传感器1和位移控制器3，传感器1包括初级线圈11和次级线圈12，位移控制器3与传感器1连接，以带动传感器1沿钢筋混凝土移动，激励组件的输出端与初级线圈11电连接，以向初级线圈11提供激励电流，信号采集装置

的输入端与次级线圈12电连接,以对次级线圈12的感应电压进行采集,后处理装置的输入端与信号采集装置的输出端连接,以获取次级线圈12的感应电压数据。

[0078] 这样,在采用本检测装置对待测钢筋混凝土的保护层厚度进行检测时(如附图4),先连接检测装置、信号采集装置和后处理装置;然后由激励组件向初级线圈11提供激励电流,信号采集装置对次级线圈12的电压信号进行采集,改变激励组件提供的激励电流的频率,直到信号采集装置采集到的次级线圈12的电压信号达到最大值,此时激励组件提供的激励电流的频率为传感器1的谐振频率。

[0079] 激励组件向初级线圈11提供谐振频率的激励电流,位移控制器3带动传感器1运动,使得传感器1在不同提高高度对裸筋进行检测,信号采集装置采集传感器1在不同提高高度下对裸筋进行检测时次级线圈12上的电压数据 $U_1$ ;然后传感器1再对待测钢筋混凝土的不同位置进行检测,信号采集装置采集传感器1在待测钢筋混凝土不同位置处的次级线圈12上的电压数据 $U_2$ ;后处理装置获取信号采集装置采集的电压数据 $U_1$ 和电压数据 $U_2$ ,并将电压数据 $U_1$ 和电压数据 $U_2$ 进行对比,电压数据 $U_1$ 和电压数据 $U_2$ 相同时对应的提高高度 $d$ 即为此时待测钢筋混凝土保护层的厚度,以此判断出待测钢筋混凝土保护层的厚度,实现对待测钢筋混凝土保护层厚度的检测。

[0080] 在本实施例中,激励装置包括信号发生器4和功率放大器5,信号发生器4的输出端与功率放大器5的输入端连接,以将信号发生器4产生的激励电流输入到功率放大器5中进行放大处理,功率放大器5的输出端与初级线圈11连接,以将放大后的激励电流输入到初级线圈11。具体的,信号发生器4要求能输出10MHz以内的任意频率的正弦电压信号。

[0081] 这样,信号发生器4用于产生激励电流,功率放大器5用于将激励电流放大后输出给初级线圈11,使得初级线圈11能产生较大的激励磁场。

[0082] 在本实施例中,初级线圈11和次级线圈12同轴心设置并固定于刚性支承2上,移动控制器与刚性支承2连接,以通过刚性支承2带动传感器1移动。具体的,初级线圈11和次级线圈12还可外接一定大小的高频电容、电阻等元件,以调整谐振频率。

[0083] 这样,次级线圈12与初级线圈11同轴心设计可以达到最好的耦合效果,并有利于拾取钢筋产生的磁场信号,同时利用刚性支承2对初级线圈11和次级线圈12起到支撑效果,保证移动过程中初级线圈11和次级线圈12的稳定使用。

[0084] 在本实施例中,刚性支承2采用不导电且相对磁导率为0.9-1.1的非金属材料制成;如塑料、玻璃等材料。

[0085] 这样,刚性支承2采用相对磁导率为0.9-1.1的非金属材料制成一方面可以防止外界磁场的影响,另一方面也可以减少传感器1产生的感应磁场向外扩散。

[0086] 在本实施例中,信号采集装置包括示波器6,示波器6的输入端与次级线圈12电连接,以对次级线圈12上的电压进行采集,后处理装置为PC终点7。

[0087] 这样,利用示波器6对次级线圈12的电压进行采集,并将采集的电压数据传递给PC终点7进行进一步的处理。

[0088] 在本实施例中,位移控制器3包括步进电机及步进电机控制器,步进电机控制器与步进电机电连接,以使得步进电机控制器能够带动步进电机动作,步进电机与刚性支承2连接,以使得步进电机能够带动刚性支承2移动。

[0089] 这样,位移控制器3采用步进电机和步进电机控制器,步进电机输出的线位移与输

入的脉冲数成正比,这样可以方便对传感器1沿钢筋混凝土移动的控制。

[0090] 一种如上述钢筋混凝土保护层厚度检测装置的使用方法,包括以下步骤:

[0091] 步骤1) 连接检测装置、信号采集装置和后处理装置;

[0092] 步骤2) 激励组件向初级线圈11提供激励电流,信号采集装置对次级线圈12的电压信号进行采集,改变激励组件提供的激励电流的频率,直到信号采集装置采集到的次级线圈12的电压信号达到最大值,此时激励组件提供的激励电流的频率为传感器1的谐振频率;

[0093] 步骤3) 激励组件向初级线圈11提供谐振频率的激励电流,位移控制器3带动传感器1运动,使得传感器1在不同提高高度对裸筋进行检测,信号采集装置采集传感器1在不同提高高度下对裸筋进行检测时次级线圈12上的电压数据 $U_1$ ;

[0094] 步骤4) 激励组件向初级线圈11提供谐振频率的激励电流,位移控制器3带动传感器1沿待测钢筋混凝土的表面运动,传感器1对待测钢筋混凝土的不同位置进行检测,信号采集装置采集传感器1在待测钢筋混凝土不同位置处的次级线圈12上的电压数据 $U_2$ ;

[0095] 步骤5) 后处理装置获取步骤3) 中信号采集装置采用的电压数据 $U_1$ 和步骤4) 中信号采集装置采用的电压数据 $U_2$ ,并通过将电压数据 $U_1$ 和电压数据 $U_2$ 进行对比以判断待测钢筋混凝土保护层的厚度,实现对待测钢筋混凝土保护层厚度的检测。

[0096] 与现有技术相比,本发明结构简单,方法新颖,响应速度快,适用面广,利用这种磁耦合谐振的双线圈结构传感器1,可将检测信号转换为易于测量、分析的电信号,探测距离和线性度得到了有效改善,十分利于混凝土保护层厚度检测。

[0097] 最后需要说明的是,以上实施例仅用以说明本发明的技术方案而非限制技术方案,本领域的普通技术人员应当理解,那些对本发明的技术方案进行修改或者等同替换,而不脱离本技术方案的宗旨和范围,均应涵盖在本发明的权利要求范围当中。

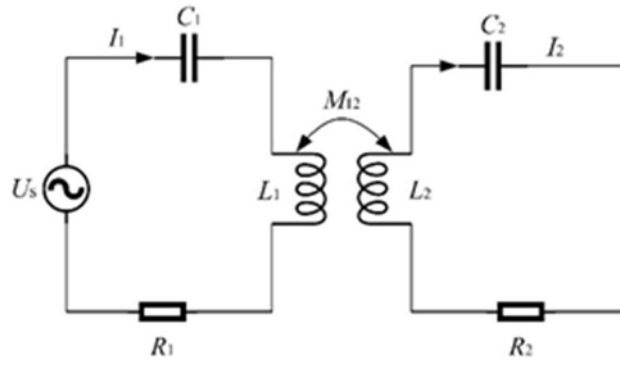


图1

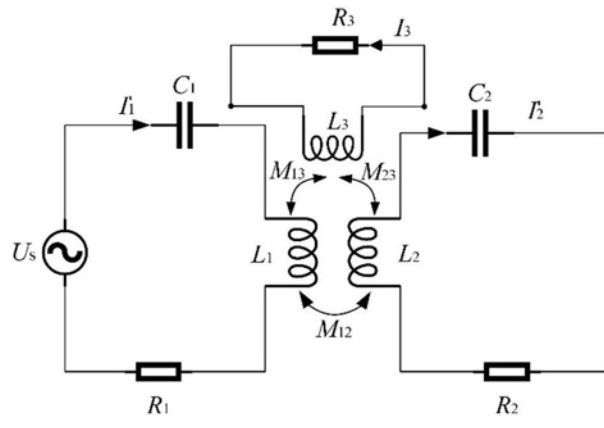


图2

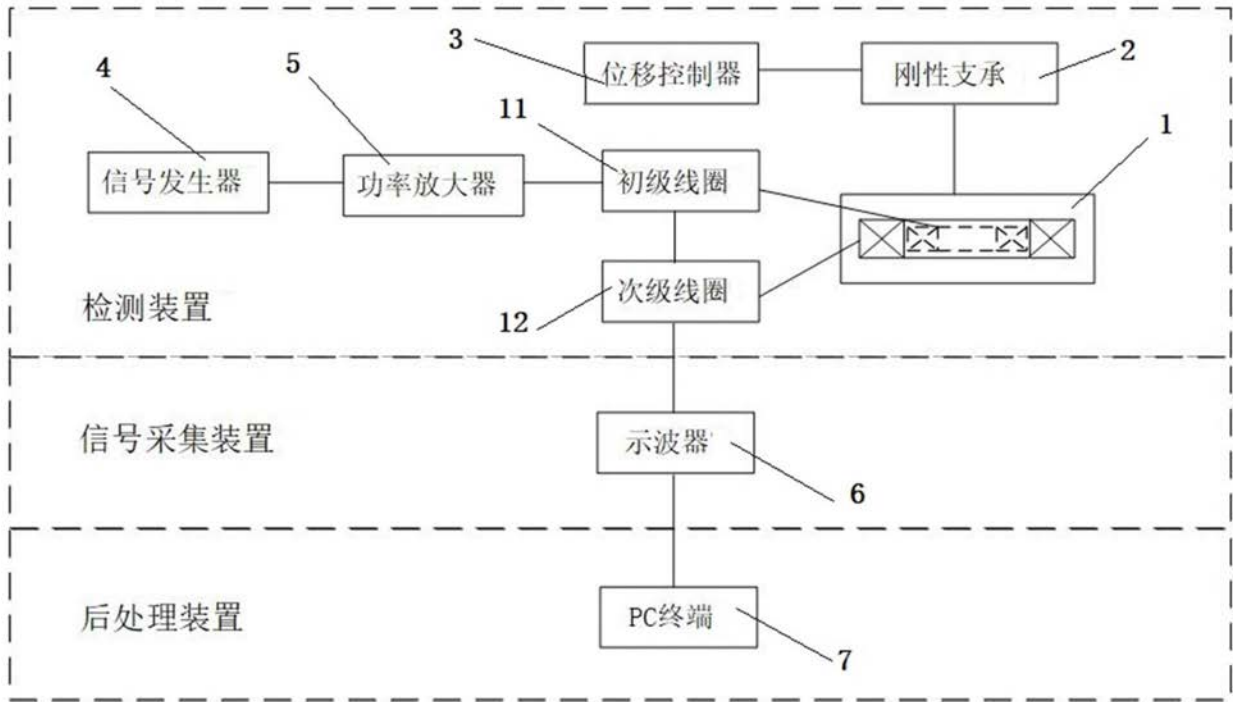


图3

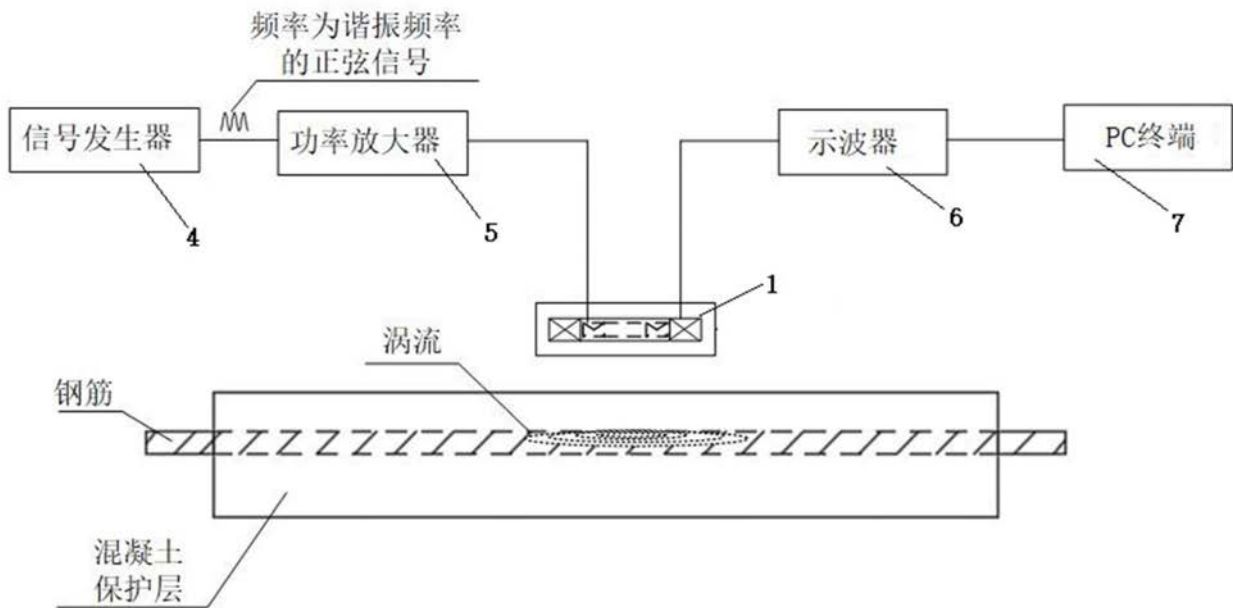


图4