

钢筋直径和钢筋间距对钢筋保护层厚度测试的影响分析

文 / 邱惠娴 广东省有色工业建筑质量检测站有限公司

摘要：文章阐述基于电磁感应原理的钢筋保护层厚度测试原理，分析不同钢筋直径条件下保护层厚度测试数据的变化规律，探讨不同钢筋间距条件下的测试结果差异。研究揭示了两者的影响机制，即大直径钢筋会增强二次磁场并改变混凝土电磁特性，小间距钢筋会引发磁场叠加干扰，二者共同作用时干扰效应显著增强。最后，结合实际工程案例验证了理论分析，并从改进检测仪器、规范检测操作、优化数据处理等方面提出提升测试准确性的建议，为主体结构检测提供理论与实践参考。

关键词：钢筋直径；钢筋间距；钢筋保护层厚度；测试影响

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.18.036

引言

在建筑主体结构中，钢筋保护层厚度是衡量结构耐久性和安全性的重要指标，其厚度是否合适直接关系到钢筋锈蚀防护、钢筋与混凝土粘结力维持及建筑结构使用寿命。钻芯法、回弹法等可用于评估混凝土强度，而楼梁板钢筋保护层厚度检测、梁板柱钢筋间距检测等则聚焦于钢筋相关参数测定。实际检测发现，钢筋直径和钢筋间距对钢筋保护层厚度测试结果影响显著。深入探究二者的影响机制，对提高检测准确性、保障建筑工程质量具有重要意义。

一、钢筋保护层厚度测试原理

目前，国内外工程上普遍采用的是利用电磁感应原理进行的无损检测法来测量钢筋保护层厚度^[1]。其基本工作原理是根据电磁感应定理：如果将一个交变磁通以一定的速度穿过导体，那么就会在线圈内产生感应电动势；并且，只要线圈中有变化的电流流过或有变化的磁通量穿过它所包围的空间，就可以在这个闭合回路里形成涡旋电场（即感生电场）。当探头与混凝土中的钢筋接触并施加一定大小的交流电压时，钢筋表面会产生一个交变的次级磁场。由于混凝土是非铁磁性介质且具有较大的电阻率，损耗较小，可忽略不计。而作为铁磁性的钢筋则会发生较大程度的损耗现象，导致在其周围形成了非均匀分布的次级磁场。同时，次级磁场的方向还受混凝土是否为饱和状态及混凝土材料性能等因素影响。因此，深入了解钢筋直径和间距对磁场特性的影响规律，对于提高检测结果的准确性至关重要。

二、钢筋直径对钢筋保护层厚度测试的影响分析

（一）电磁学理论视角下的影响机制

根据电磁学的基本原理可知：（1）钢筋直径与感应电流、二次磁场的关系。由电磁感应定律知，在相同的电磁场条件下，钢筋截面越大，则有效切割磁力线的面积也越大，所产生的感应电流也越大；而感应电流是产生二次磁场的主要因素之一（其他如混凝土电阻率等），因此钢筋直径越大则二次磁场强度越高。若采用基于电磁感应原理工作的钢筋扫描仪来测量保护层厚度的话，

较大的二次磁场会导致扫描仪测得的钢筋位置比真实位置要远离一些，从而造成实测结果大于理论值的现象。

（2）钢筋直径对磁场的影响。大直径钢筋所形成的磁场在空间中衰减速率较低，其影响区域较大。这样就会使扫描仪接收到的磁场信号有较强的变化幅度以及不同的分布特征，并且扫描仪内置于硬件或软件中的处理方法很难准确识别这些变化，从而会造成最终测量结果偏离实际值。

（二）材料学与电磁耦合效应的影响

混凝土是一种具有一定的导电性、磁性等性质的复合材料，而钢筋是构成其基本组成部分之一，在一定条件下混凝土和钢筋会产生一种电磁场耦合作用（即电磁感应）^[2]。因此当钢筋直径变化时，钢筋周围的混凝土中产生的磁场也会随之发生相应的变化；且由于受到外荷载的作用使钢筋和混凝土间的距离发生变化，则又会对混凝土中的电磁场起到一个屏蔽或增强的作用。上述两种情况都会造成钢筋和混凝土间电磁耦合效应的存在，并且这一现象也必然会严重影响到钢筋截面处传感器所测得的电磁信号以及后续对钢筋所在位置进行定位的过程。另外，钢筋直径的不同还会影响到钢筋周边混凝土内应力状态。对于较大直径的钢筋而言，它在承受外部荷载的过程中会在自身及相邻部位产生较大的拉伸应力，这势必会引起混凝土内部应力分布状态的变化，而在一定程度上会导致钢筋周边混凝土内的电磁特性的变化。例如，应力集中区域的混凝土可能会出现微小裂缝，这些裂缝会改变混凝土的介电常数和磁导率，进而影响钢筋与检测仪器之间的电磁信号传递。

三、钢筋间距对钢筋保护层厚度测试的影响分析

（一）磁场相互作用的理论剖析

影响钢筋间距的主要因素是钢筋之间的磁场互相作用问题：当钢筋间距较小的时候，相邻钢筋所产生的磁场互相叠加并且发生干涉现象。因为电磁场具有叠加性特点，在一个区域内同时存在多条带电导体，各条电流线产生电磁场之后，由于所处的空间相同，因此会产生相互叠加或者抵消的现象，并且这种现象还会随着距离

的变化而变化，如果使用探头去测量这个区域的话，那么就会得到由多根钢筋共同引起的总磁场，而不是某一根单独引起的结果。意味不能够通过测得的数据来推断出这根被探测钢筋的实际位置信息，也就没有办法求取该根钢筋所在部位混凝土保护层厚度的具体数值^[3]。在这种复杂磁场环境下，检测仪器接收到的信号相位和幅值都会发生变化。不同钢筋产生的磁场在某些位置可能会相互加强，而在另一些位置则可能相互削弱，导致信号出现畸变。仪器在分析处理这些畸变信号时，容易将混合信号当作单根钢筋的信号进行处理，进而导致对钢筋位置的误判，使得计算出的保护层厚度出现偏差。

(二) 电磁环境变化与信号识别难题

若钢筋间距很小，则由于相邻钢筋间的互相作用使得钢筋附近的电场、磁场均会产生相应的变化，在一定范围内产生电磁耦合作用；同时也会使混凝土内的电磁场发生变化。因为混凝土是介于导体与绝缘体之间的电磁介质，其电磁参数受钢筋的影响很大，如果钢筋间距太小，会使混凝土内电磁场发生畸变而不均匀，进而造成测量仪器难以分辨出各个钢筋所发出的信号，并且会造成被测物中每个钢筋位置不能正确判定等。另外，钢筋间距也会影响到仪器探测的分辨率问题。当钢筋间距比较小的时候，而且又接近甚至小于仪器所能达到的最小分辨距离的话，那么就会很容易把两根或多根钢筋当成是一根来处理或者是错位，大大增加了计算出来的保护层厚度值的误差。而当钢筋间距较大时，各钢筋产生的磁场相对独立，相互之间干扰较小，检测仪器能够更清晰地识别每根钢筋的信号，从而提高保护层厚度测试的准确性^[4]。

四、综合影响分析及案例研究

(一) 综合影响的理论模型构建

从现场工程的实际应用情况来看，在进行钢筋保护层厚度测试的过程中，被测钢筋的直径及钢筋间距并不是单一地作用于保护层厚度测量的结果上，它们是同时

存在的，并且二者之间还存在着一定的关系，如果被测钢筋为大直径（如 20mm）并且其钢筋间距很小，则由于大直径钢筋所激发的大强度磁场所引起的磁场对小间距所激发出的小强度磁场的的影响具有累加性；即大的钢筋直径所产生的强磁场会对其他小直径钢筋的磁场产生较大的干扰，这将使接收机接收到的电磁波场信息更加错综复杂，而这种复杂的场信息不但会使接收机无法区分由不同大小钢筋所激励出来的不同的电磁波场信号，还会使其无法正确判定各种不同大小的钢筋的位置分布情况，这样就会造成利用接收机计算得到的钢筋保护层厚度偏大。相反，当钢筋直径较小且间距较大时，小直径钢筋产生的磁场较弱，大间距又使得各钢筋磁场相互独立，检测仪器能够更准确地识别信号。在这种情况下，仪器接收到的信号相对简单、清晰，更容易准确判断钢筋位置和计算保护层厚度，测试值与实际值较为接近，偏差相对较小。

(二) 实际工程案例分析

在实际工程中，钢筋直径和钢筋间距往往是同时存在且相互影响的。为了更全面地了解二者对钢筋保护层厚度测试的综合影响，选取某实际建筑工程的楼梁板结构进行检测分析。该工程楼梁板中使用了多种直径的钢筋，钢筋间距也存在不同的设置情况。

分别抽取不同的楼层、屋面、基础等构件内的受力主筋（主要指梁底及柱内箍筋），按规范要求对楼板中的纵向受拉钢筋采用电磁感应法测出其混凝土保护层厚度，并将实测结果与原设计计算值相比较，得到以下规律：当钢筋直径较粗而间距较小时，所测得的保护层厚度误差较大，多数情况下是保护层厚度过大；反之，在钢筋直径较细而间距较大的情况下，则基本符合实际情况，误差也较小^[5]。这进一步验证了钢筋直径和钢筋间距对保护层厚度测试的综合影响。通过对该案例的分析，明确了在实际工程检测中，需要同时考虑钢筋直径和间距两个因素，才能更准确地评估钢筋保护层厚度。

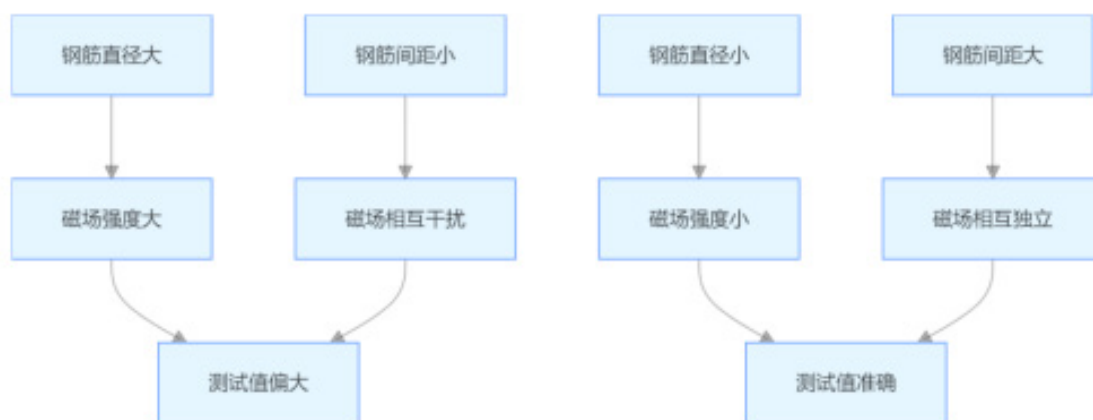


图 1 钢筋直径和间距对保护层厚度测试影响机制示意图

五、优化测试方法与建议

(一) 改进检测仪器

开发带有自适应调节功能的检测仪，在仪器内部安装高精度传感器，依据钢筋的电导率、磁导率等特征量来判断钢筋的实际尺寸及分布情况，并以此为依据自动调节仪器的工作频带宽度、工作电流大小及其相应的信号采集与处理程序（如滤波器组数），实现自适应调节的目的。对于检测出钢筋直径较大的情况，则使电磁场发射的中心频率向低频方向偏移；而对于检测出现有钢筋之间的距离较小的情况则增加滤波器的数量或增大其衰减系数，从而使系统更易于识别复杂的复合型信号。

(二) 规范检测操作

按照相应的规范及操作流程严格实施检测；针对不同的钢筋直径与间距，选用合理的检测方式及参数设定值（如增大扫描步距等）；根据需要适当缩小检测仪器的扫描步长，加大检测点数量，从而获得更多的磁场信号信息量来提高测试精度；提前做好检测设备的标定和调零工作，并使仪器保持良好工作状态；加强对检测人员的专业技能培训，提升检测人员的专业技术水平及其对检测仪器的操作能力。除了要学习钢筋保护层厚度测定的基本原理外还要学习如何正确地使用钢筋探测仪并能从专业的角度理解影响测试结果的各种因素，特别是各种钢筋配筋情况对应的不同测量方法，学会排除干扰现象的方法，遇到疑难问题时知道如何去分析解决等。此外，鼓励检测人员参加行业学术交流活动，及时了解最新的检测技术和方法，不断提升自身专业素养。

(三) 数据处理与分析

大数据平台构建：通过建立以大数据为基础的数据处理及分析平台，将大规模的实际工程现场检测数据（包含不同类型建筑物[住宅、商业、公共建筑等]、不同结构体系[框架结构、剪力墙结构、框架-核心筒结构等]以及不同的配筋条件下）的钢筋保护层厚度测量数据整合到该平台上，并运用大数据技术对该类数据进行存储管理并开展深入细致地数据分析工作，在此基础上寻找出钢筋直径尺寸、钢筋布置间距与实测保护层厚度之间存在的内在关联性或规律性；通过对海量数据的统计研究可得出各种工程背景中配筋情况与实测误差间存在的一般共性特征及其可能存在的特殊性问题，从而为后续更精确判定保护层厚度检测值的真实性奠定基础。

统计模型优化：应用多元回归分析、主成分分析法建立了钢筋直径、间距与保护层厚度测试偏差之间关系的数学模型；在建立模型的过程中，根据各试验参数的影响程度，综合运用了逐步回归、因子分析等多种方法选取主要影响因素，确定模型的构成要素并不断改进和完善其表达形式；并对所建模型进行了严格地检验和校正，在模型中引入各种可能存在的影响因素（包括混凝土强度等级、钢筋级别及材质、测量时的温度湿度等因

素），使最终得到的结果具有一定的代表性；对所得模型进行严密地验证，以工程实测数据为依据对模型的拟合优度进行检验、显著性水平进行检验以及误差估计量进行计算，从而达到进一步完善模型的目的。通过模型对不同钢筋配置条件下的测试结果进行预测，并与实际测试值进行对比，对偏差较大的结果进行修正，提高测试结果的准确性。

人工智能技术应用：采用人工智能技术（如机器学习算法）对检测的数据进行智能化处理。将机器学习算法应用于保护层厚度检测结果中，让其从数据自身出发，自主地学习出数据中的各种特性和规律来评价及判别检测结果。比如使用 SVM(Support Vector Machine) 分类器或 Random Forests(RF) 等建立基于历史数据集的学习模型，在此基础上对其进行预测并给出是否为正常值的结果判定；如果检测得到的是异常数据，则再根据该异常情况进行后续的详细分析与计算。机器学习模型可以根据历史检测数据和实际工程情况，自动判断测试结果的合理性，当检测到异常数据时，及时发出预警，并提供可能的原因分析，帮助检测人员快速定位问题，提高数据处理的效率和准确性。

结语

文章通过理论分析与工程案例研究，明确了钢筋直径和钢筋间距对保护层厚度测试的影响机制：钢筋直径通过改变感应电流、磁场强度及混凝土电磁特性影响测试结果，钢筋间距通过引发磁场叠加或独立分布改变信号识别难度，且两者共同作用时干扰效应更为复杂。研究表明，大直径与小间距组合会导致测试值显著偏大，而小直径与大间距组合更易获得准确结果。为提升检测精度，建议开发自适应调节检测仪器、规范检测操作流程，并通过大数据平台、统计模型及人工智能技术优化数据处理。未来研究可进一步拓展至更多影响因素（如混凝土湿度、钢筋锈蚀程度等），以完善保护层厚度测试理论与方法体系。

参考文献

- [1] 曲金辉. 混凝土中钢筋保护层厚度检测准确性分析[J]. 上海建设科技, 2020, (01): 59-62.
- [2] 杜晓庆, 葛潇峰, 朱炯亦, 等. 基于深度学习的混凝土结构钢筋工程质量图像视觉检测算法[J]. 建筑科学与工程学报, 2024, 41(06): 31-40.
- [3] 叶芳, 赵鹏, 施俊航, 等. 基于电磁感应原理的钢筋纤维混凝土无损检测方法研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2024, (04): 77-81.
- [4] 池娟. X射线透视成像检测钢筋间距及配置可行性探讨[J]. 广东建材, 2022, 38(03): 37-38.
- [5] 洪华, 徐建红. 考虑环境影响因子的钢筋混凝土保护层厚度检测[J]. 上海公路, 2021, (02): 99-103+168.