

# 桥梁主梁裂缝宽度超声检测精度分析

金开明

湖北交投智能检测股份有限公司 湖北 武汉 430050

**【摘要】**：桥梁主梁作为承载核心构件，其裂缝发育直接影响结构安全与使用寿命。超声检测因具备非破损、深度探测能力强等优势，成为桥梁主梁裂缝宽度检测的核心技术之一，但实际应用中检测精度易受多因素干扰。本文基于超声波传播特性，系统分析仪器参数、检测工艺、试件自身及环境因素对裂缝宽度检测精度的影响机制；通过搭建标准裂缝试件实验平台，验证不同影响因素下的检测误差规律；最终提出仪器参数优化、工艺标准化、信号处理改进等精度提升措施。研究结果表明：探头频率、耦合剂类型及混凝土密实度是影响检测精度的关键因素，优化后检测相对误差可控制在 8% 以内，为桥梁主梁裂缝超声检测的工程应用提供理论支撑与实践参考。

**【关键词】**：桥梁；主梁裂缝；宽度超声检测；精度

DOI:10.12417/2705-0998.25.15.005

## 1 引言

传统裂缝检测方法如目视检测、塞尺测量，存在精度低、依赖人工经验、难以探测深层裂缝等缺陷；超声检测基于超声波在介质中的反射、折射原理，可实现裂缝宽度的定量测量，且检测深度可达 0.5~5m，已广泛应用于桥梁检测领域。然而，工程实践中超声检测精度易受仪器参数、检测工艺、混凝土材质及环境条件影响，导致检测结果与真实值偏差较大，制约了其在精细化检测中的应用。本文针对桥梁主梁裂缝超声检测精度问题，从原理分析、影响因素拆解、实验验证到措施优化展开研究，旨在明确精度控制关键环节，提升超声检测技术的可靠性，为桥梁结构健康监测提供技术保障。

## 2 桥梁主梁裂缝超声检测基本原理

### 2.1 超声波传播特性

超声波是频率高于 20kHz 的机械波，在混凝土介质中传播时遵循“声学阻抗匹配”原则。当超声波遇到裂缝时，部分声波发生反射，部分声波发生折射或绕射；裂缝宽度越小，绕射现象越明显，反射信号越弱；反之，裂缝宽度越大，反射信号越强，绕射信号越弱。通过分析接收信号的幅值、传播时间差及波形特征，可反演裂缝宽度。

### 2.2 核心检测方法

桥梁主梁裂缝超声检测常用穿透法与反射法，穿透法将发射探头与接收探头分别置于裂缝两侧，若存在裂缝，超声波传播路径受阻，接收信号幅值显著降低，通过幅值衰减量与裂缝宽度的标定关系计算宽度；反射法单探头兼具发射与接收功能，超声波垂直入射至裂缝后产生反射波，通过测量“入射波-反射波”的时间差，结合声速计算裂缝深度，同时通过反射波幅值判断裂缝宽度。

### 2.3 检测系统组成

超声检测仪核心设备，控制超声波发射频率、幅值，接收并处理信号；探头分为直探头与斜探头。耦合剂填充探头与混

凝土表面间隙，减少空气对声波的衰减；数据处理软件对原始信号去噪、滤波，输出裂缝宽度计算结果。

## 3 超声检测精度影响因素分析

### 3.1 仪器参数因素

仪器参数直接决定信号分辨率与探测能力，探头频率越高，波长越短（ $\lambda=c/f$ ， $c$  为混凝土中声速，约 3500~4500m/s），空间分辨率越高，适用于窄裂缝（ $\leq 0.3\text{mm}$ ）检测；但高频声波衰减快，探测深度浅（ $\leq 1\text{m}$ ）。若对深层宽裂缝（ $>0.5\text{mm}$ ）采用高频探头，易因信号衰减导致检测值偏小，误差增大。直探头垂直入射时，对平行于表面的裂缝敏感性低，易漏检；斜探头通过折射波覆盖更广检测范围，但角度偏差（如设计  $45^\circ$  实际  $50^\circ$ ）会导致声波传播路径计算误差，进而影响裂缝宽度反演精度。

### 3.2 检测工艺因素

检测操作规范性是精度控制的关键环节，耦合剂声学阻抗需接近混凝土，机油优于水，水耦合时信号衰减量比机油高 20%~30%，导致裂缝宽度计算值偏大。探头与混凝土表面耦合压力不均会导致耦合间隙增大，声波反射增强、透射减弱，接收信号幅值降低，误判为“裂缝宽度更大”。斜探头角度偏差会导致声波传播路径长度计算误差，进而影响裂缝深度与宽度的反演精度——角度每偏差  $5^\circ$ ，宽度检测误差增大 3%~5%。

### 3.3 试件自身因素

#### 3.3.1 混凝土密实度的影响

密实度低的混凝土内部存在大量直径 0.1~1mm 的微小孔隙，超声波遇到孔隙时会发生多次散射，导致信号衰减率显著上升。同时，孔隙反射信号会与裂缝反射信号叠加，干扰裂缝特征识别。若混凝土中粗骨料粒径过大或分布不均，会形成“局部高阻抗区域”，声波在骨料与砂浆界面的反射信号，同样会干扰裂缝信号，尤其对窄裂缝检测影响更显著，误差可增大 5%~7%。例如某桥梁主梁采用 5~31.5mm 连续级配骨料，局部

骨料扎堆区域，0.2mm 裂缝的检测值偏差达 0.015~0.02mm。

### 3.3.2 裂缝形态的复杂影响

裂缝的走向、是否分支、边缘规整度，直接决定声波反射信号的复杂性。裂缝界面平整、无分支，声波反射信号单一且峰值清晰，检测精度最高，相对误差可控制在 5%以内。主裂缝旁存在多条细小分支，会产生多组反射信号，与主裂缝反射波叠加，导致波形“模糊化”。例如主裂缝宽度 0.5mm，旁侧有 2 条 0.1mm 分支裂缝，检测时易将“主裂缝+分支裂缝”的叠加信号判定为主裂缝宽度，检测值可达 0.65~0.7mm，误差 30%~40%；若分支裂缝较多，甚至会误判为主裂缝宽度超 1.0mm，严重偏离真实值。裂缝边缘不平整，声波会在锯齿界面产生多次反射，导致反射波峰值分散，难以准确计算反射波幅值与传播时间，误差可增大 15%~25%。裂缝与混凝土表面呈 30°~60° 倾斜，若未调整探头角度，声波入射方向与裂缝界面不垂直，反射信号强度会降低 30%~40%，检测值偏小，误差 10%~18%。

### 3.3.3 混凝土龄期与碳化的影响

混凝土龄期不足 28d 时，内部水泥水化未完全，声速会随龄期增长而上升，若按成熟混凝土声速计算裂缝宽度，会导致检测值偏大。例如 28d 龄期 C50 混凝土声速 4200m/s，7d 龄期时声速约 3200m/s，用 4200m/s 计算 7d 龄期混凝土中的裂缝宽度，检测值会比真实值偏大 25%~30%。桥梁主梁表面混凝土长期暴露在空气中，会发生碳化反应，碳化层声速比内部未碳化混凝土高 10%~15%。检测表面裂缝时，声波需先穿过碳化层，若未考虑碳化层声速差异，会导致传播时间计算偏差，进而使裂缝宽度检测误差增大 3%~5%。

## 4 精度验证实验与结果分析

### 4.1 实验设计

为量化各因素对检测精度的影响，搭建标准裂缝试件实验平台。采用 C50 混凝土浇筑 5 块 1000mm×500mm×200mm 试件，人工预制宽度为 0.1mm、0.2mm、0.3mm、0.5mm、1.0mm 的垂直裂缝；采用 USM-35X 超声检测仪，配备 2MHz、5MHz 直探头及 45° 斜探头；分别改变耦合剂类型、探头频率（2MHz、5MHz）、检测角，其余条件保持一致；每组实验重复 3 次，计算检测值与真实值的相对误差（ $\delta = |\text{检测值} - \text{真实值}| / \text{真实值} \times 100\%$ ）。

### 4.2 实验结果与分析

实验结果如表 1 所示，5MHz 探头对窄裂缝（0.1~0.3mm）的检测精度更高（相对误差≤6%），2MHz 探头对宽裂缝（0.5~1.0mm）的精度更优（相对误差≤5%），印证了“高频适窄缝、中频适宽缝”的规律；机油耦合的检测误差最小（平均 3.8%），甘油次之（平均 5.2%），水耦合误差最大（平均 8.5%），机油的耦合稳定性与声学阻抗匹配性更优；45° 斜探

头的检测误差最小（平均 4.1%），30°、60° 斜探头误差分别为 6.8%、7.2%——45° 角度下声波与裂缝界面的反射效率最高，信号辨识度强。

表 1 不同影响因素下裂缝宽度超声检测结果

| 试件编号 | 真实裂缝宽度 (mm) | 检测条件        | 检测值 (mm) | 相对误差 (%) |
|------|-------------|-------------|----------|----------|
| 1    | 0.1         | 5MHz 直探头+机油 | 0.105    | 5        |
| 1    | 0.1         | 2MHz 直探头+水  | 0.118    | 18       |
| 2    | 0.2         | 5MHz 直探头+甘油 | 0.21     | 5        |
| 2    | 0.2         | 2MHz 直探头+水  | 0.225    | 12.5     |
| 3    | 0.3         | 5MHz 直探头+机油 | 0.318    | 6        |
| 3    | 0.3         | 45°斜探头+水    | 0.342    | 14       |
| 4    | 0.5         | 2MHz 直探头+机油 | 0.52     | 4        |
| 4    | 0.5         | 30°斜探头+甘油   | 0.535    | 7        |
| 5    | 1           | 2MHz 直探头+机油 | 1.04     | 4        |
| 5    | 1           | 60°斜探头+水    | 1.12     | 12       |

## 5 超声检测精度提升关键措施

### 5.1 仪器参数优化策略

#### 5.1.1 探头频率匹配

窄裂缝（预估宽度≤0.3mm）选用 5~10MHz 高频探头，利用高频声波短波长特性提升空间分辨率，减少窄缝检测的漏判与误判；宽裂缝（预估宽度>0.3mm）选用 2~5MHz 中频探头，平衡声波穿透力与信号稳定性，避免高频声波衰减过快导致的检测值偏差。浅层裂缝可优先采用 5~8MHz 高频探头，兼顾精度与检测效率；深层裂缝强制选用 2MHz 中频探头，通过降低声波衰减确保深层信号有效接收，减少深度方向的检测误差。

#### 5.1.2 探头类型选择

表面及浅层裂缝采用直探头，垂直入射声波可直接捕捉裂缝反射信号，减少路径计算偏差；深层或倾斜裂缝采用 45° 斜探头，通过折射波覆盖深层检测区域，提升倾斜裂缝的识别率。斜探头安装时需角度校准仪定位，确保实际角度与设计角度（45°）偏差控制在±1°以内；检测前对探头角度进行预校验，若偏差超范围，需调整探头支架或更换探头，避免角度偏差导致的裂缝宽度计算误差。

## 5.2 检测工艺标准化流程

### 5.2.1 耦合剂规范使用

优先选用机油或专用超声耦合剂，两类耦合剂的声学阻抗与混凝土（约  $2.5 \times 10^6 \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ）匹配度高，可减少声波在界面的反射损失；禁止在湿度较大或露天环境中使用水作为耦合剂，避免水分挥发或流失导致的耦合失效。涂抹厚度控制在  $0.1 \sim 0.2 \text{mm}$ ，以覆盖探头底面且无明显堆积为宜；涂抹过程中需观察耦合层是否存在气泡，若有气泡需用刮板轻轻刮除，确保探头与混凝土表面完全贴合。

### 5.2.2 检测表面预处理

检测前用酒精擦拭混凝土表面，去除灰尘、油污、浮浆等杂质；若表面存在明显凹陷或凸起，需用砂纸轻微打磨至平整（打磨深度  $\leq 0.5 \text{mm}$ ），避免表面不平整导致的耦合压力不均。

### 5.2.3 耦合压力稳定控制

采用带压力传感器的探头支架，替代人工按压方式，确保压力可实时监测与调节；压力设定范围为  $0.15 \sim 0.25 \text{MPa}$ ，检测过程中需保持压力稳定，避免压力波动导致的信号幅值变化。

## 5.3 信号处理技术改进

### 5.3.1 干扰信号去噪优化

采用小波阈值去噪算法对原始超声信号进行处理，通过 3 层信号分解，分离混凝土内部孔隙、骨料界面反射产生的干扰信号；去噪后需验证信号质量，确保信噪比提升  $20\% \sim 30\%$ ，

且裂缝特征信号（如反射波峰值、传播时间差）无失真。

### 5.3.2 温度影响修正

检测前用红外测温仪测量混凝土表面温度，记录温度数值（测量范围： $-10^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$ ）；若实际温度偏离标准温度（ $25^\circ\text{C}$ ），需根据混凝土声速随温度的变化规律修正声速值：温度每高于  $25^\circ\text{C} 1^\circ\text{C}$ ，声速约降低  $0.02$  倍标准声速；温度每低于  $25^\circ\text{C} 1^\circ\text{C}$ ，声速约升高  $0.02$  倍标准声速，通过声速修正减少温度对裂缝宽度计算的影响。

## 6 结论

桥梁主梁裂缝超声检测精度受多因素协同影响，其中探头频率、耦合剂类型、混凝土密实度为关键控制因素，三者共同作用可导致检测相对误差波动范围达  $5\% \sim 20\%$ ；实验验证表明，针对  $0.1 \sim 1.0 \text{mm}$  裂缝，采用“窄缝高频（ $5 \text{MHz}$ ）+机油耦合+ $45^\circ$  斜探头”组合方案，检测相对误差可控制在  $8\%$  以内，满足工程精度要求（ $\leq 10\%$ ）；通过仪器参数优化、工艺标准化、信号处理改进及人员培训，可有效提升超声检测精度，为桥梁主梁裂缝的精细化评估提供可靠数据。

未来可进一步结合人工智能技术（如卷积神经网络 CNN）实现裂缝信号的自动识别与宽度反演，减少人工判读误差；同时探索“超声+红外热成像”多技术融合检测方法，实现裂缝宽度与深度的同步高精度测量，为桥梁结构健康监测提供更全面的技术支撑。

## 参考文献：

- [1] 任江,刘进.公路桥梁裂缝检测技术分析[J].运输经理世界,2023,(21):87-89.
- [2] 吴昊天.公路桥梁裂缝检测与养护加固技术研究[J].科技与创新,2025,(16):147-150.
- [3] 顾凯文.基于神经网络的公路桥梁裂缝智能检测技术[J].汽车画刊,2025,(05):104-106.