

沥青路面中入射频率对超声波传播衰减的影响

李树伟¹ 章天杰¹ 顾兴宇¹

1 交通学院, 东南大学, 江苏, 南京

简介

超声波, 作为机械波, 在弹性介质中满足弹性动力学的理论, 研究相对完善; 而在粘弹性介质中, 诸如沥青路面, 由于沥青等材料复杂的粘弹性, 导致超声波传播衰减明显, 传播距离有限。其中, 超声波能量的衰减与入射频率关系密切, 考虑到无损检测设备主要采用低频超声波, 本文从 30-200kHz 中, 选取入射频率 $f=31.85\text{kHz}$ 、 50.64kHz 、 75.25kHz 、 100.25kHz 、 151.48kHz 及 200.33kHz 等 6 种情况, 采用 Kelvin-Voigt 模型表征沥青路面的粘弹性, 以振幅、频率幅值及频域面积等来量化能量, 探究入射频率对超声波传播衰减的影响。

理论

超声波在沥青路面中的传播, 满足粘弹性介质中的波动方程, 即基于 Kelvin-Voigt 模型的波动方程, 与弹性介质中的波动方程相比, 其增加了与应变变化率成比例的表征模型粘滞性的附加项, 得到

$$[(\lambda + \mu) + (\lambda' + \mu') \frac{\partial}{\partial t}] \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}) + \left(\mu + \mu' \frac{\partial}{\partial t} \right) \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{F} = \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2}$$

其中, λ 、 μ 为弹性体拉梅系数, λ' 、 μ' 为粘滞系数。

数值模型

对于整体的模型, 施加汉宁窗调制的正弦电信号, 激发压电换能器振动产生超声波, 超声波进入沥青路面传播, 通过“压力声学”来实现电学、声学和力学的耦合。

该模型只考虑面层, 采用 4cmAC-13 + 6cmAC-16 + 8cmAC-20 三层的结构, 并在 AC-13 顶部放置压电换能器, 其材料采用 PZT-5H, 见图 1。

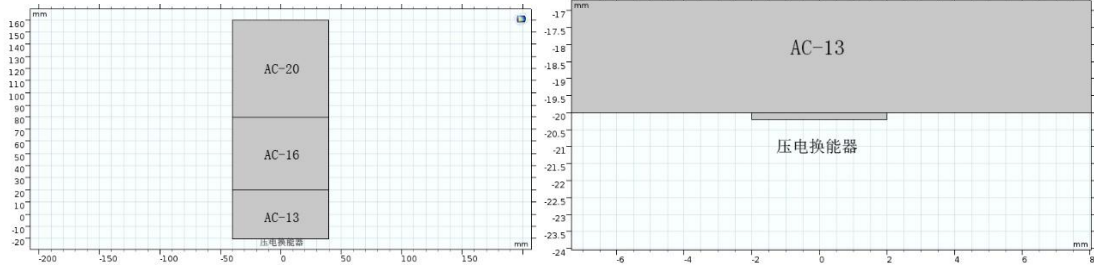


图 1 模型示意图 (左) 整体 (右) 局部

对于沥青路面, 材料特征符合线弹性粘弹性力学方程, 由下式易知, 位移与应变变化率成正比, 与粘弹性介质波动方程的关系一致。

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = \nabla \cdot \mathbf{S} + \mathbf{F}_v$$

$$\mathbf{S}_q = 2\eta_v \dot{\epsilon}_{el, dev}$$

$$\eta_v \rightarrow \alpha_T \eta_v$$

由于研究变量是入射频率, 只能采用瞬态模式研究声压的问题, 下式为瞬态声学压力方程:

$$\frac{1}{\rho c^2} \frac{\partial^2 p_t}{\partial t^2} + \nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho} (\nabla p_t - \mathbf{q}_d) \right) = Q_m$$

$$p_t = p + p_b$$

为了从时域 (瞬态) 转换到频域, 借助傅里叶变换, 进行频谱分析。其中, 傅里叶变换方程如下:

$$F(\omega) = \mathcal{F}[f(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt$$

模拟结果

对 6 种不同入射频率的情况进行瞬态及频谱研究，并以 $f=75.25\text{kHz}$ 为例进行详细分析，比较了时域中超声波振幅及振幅衰减率与传播距离的关系，频域中主频率幅值、幅值衰减率及频域面积、频域面积衰减率与传播距离的关系，具体结果见图 2 至 10。

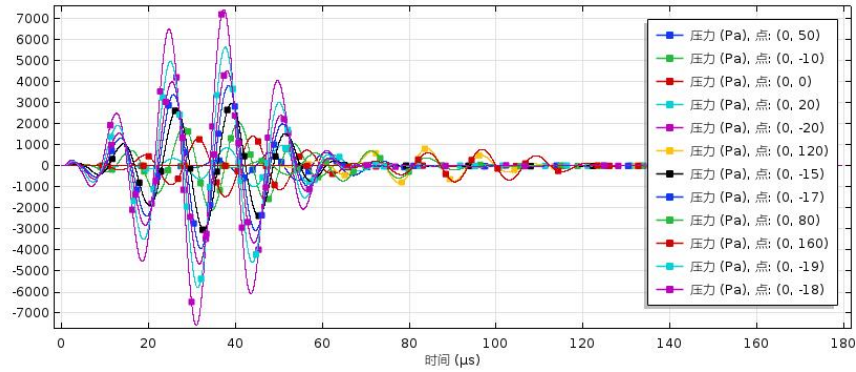


图 2 $f=75.25\text{kHz}$ 的振幅（每条曲线代表不同的传播距离）

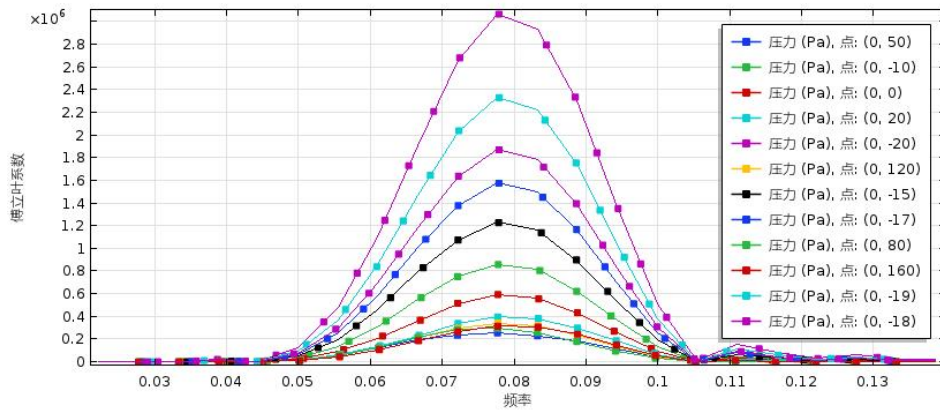


图 3 $f=75.25\text{kHz}$ 的频谱（每条曲线代表不同的传播距离）

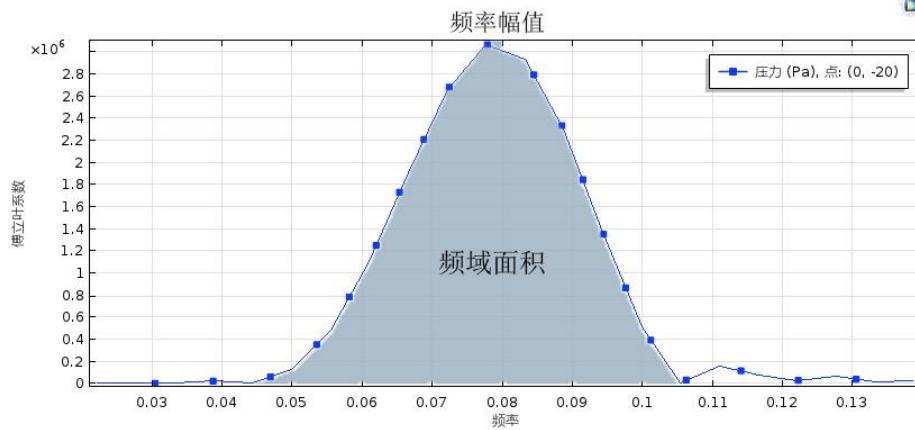


图 4 频率幅值及频域面积的定义

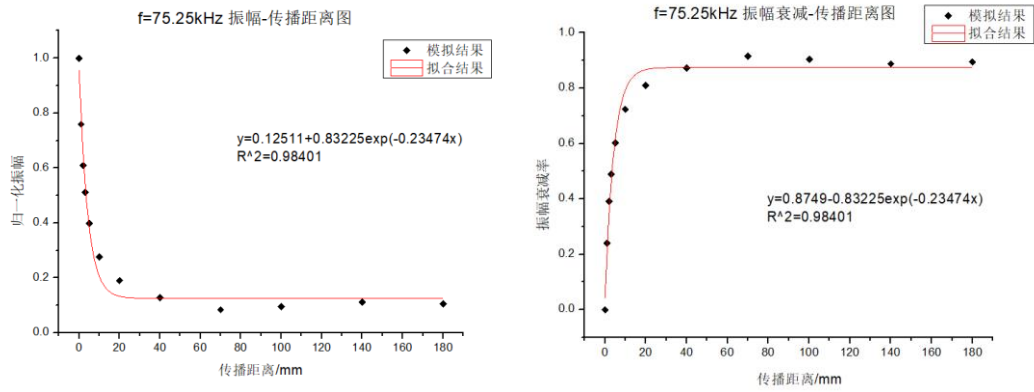


图5 f=75.25kHz 的模拟与拟合结果 (左) 振幅-传播距离 (右) 振幅衰减-传播距离

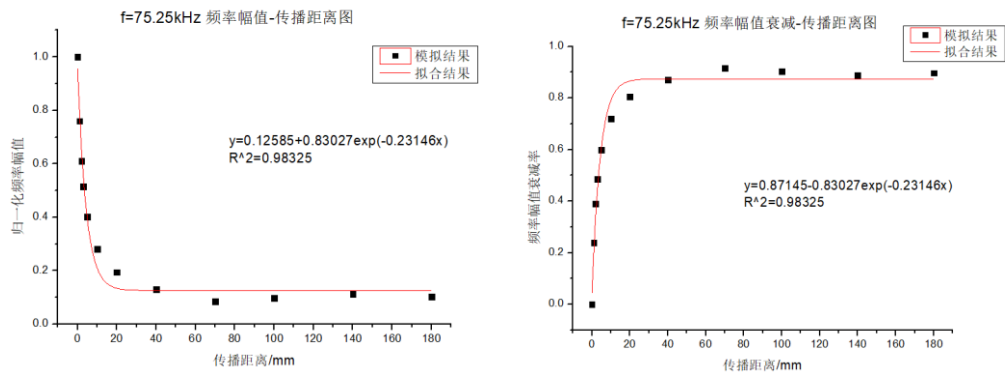


图6 f=75.25kHz 的模拟与拟合结果 (左) 频率幅值-传播距离 (右) 频率幅值衰减-传播距离

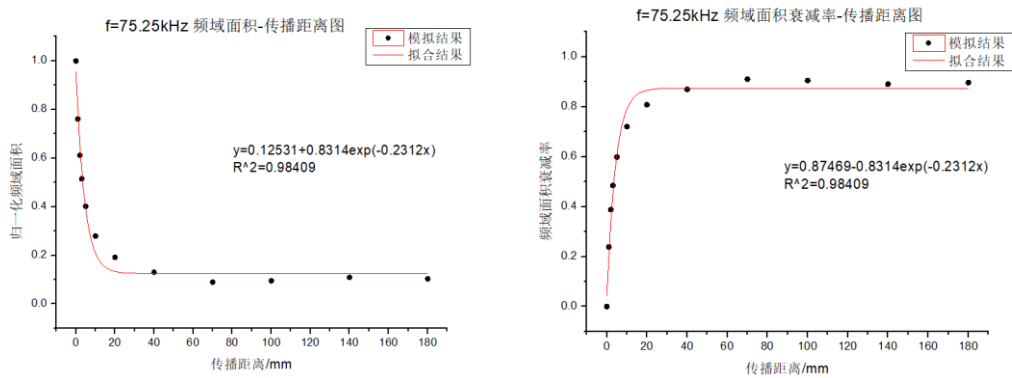


图7 f=75.25kHz 的模拟与拟合结果 (左) 频域面积-传播距离 (右) 频域面积衰减-传播距离

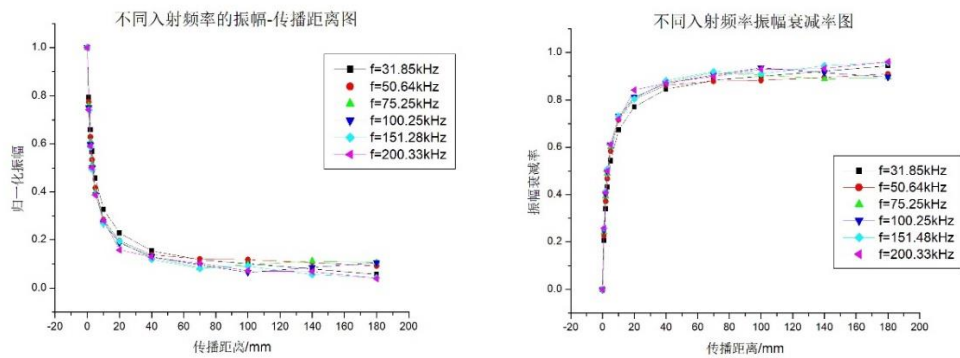


图8 6种入射频率的模拟与拟合结果 (左) 振幅-传播距离 (右) 振幅衰减-传播距离

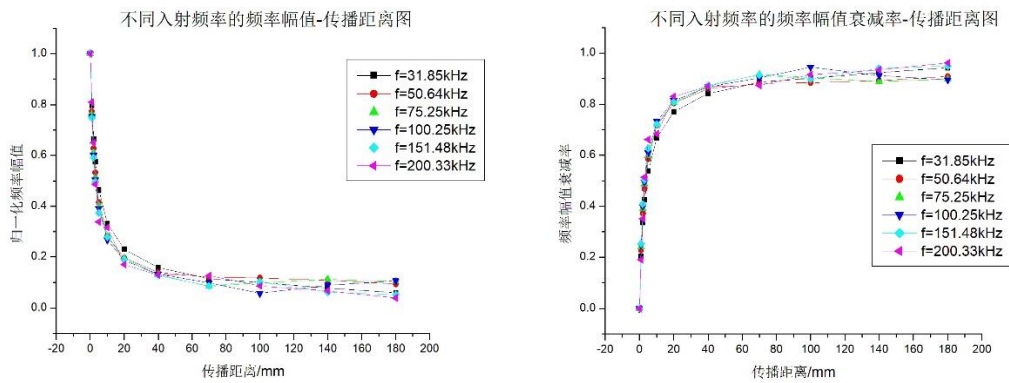


图9 6种入射频率的模拟与拟合结果（左）频率幅值-传播距离（右）频率幅值衰减-传播距离

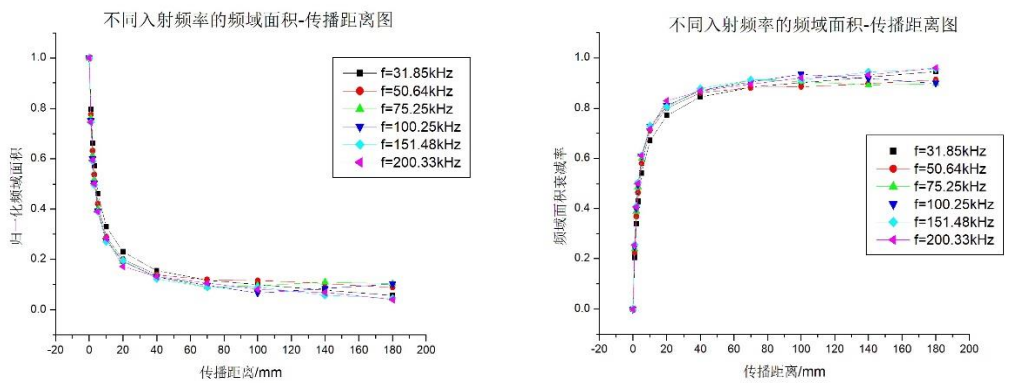


图10 6种入射频率的模拟与拟合结果（左）频域面积-传播距离（右）频域面积衰减-传播距离

结论

- 1.当入射频率一定时，随着传播距离增大，振幅、频率幅值和频域面积均呈现指数型减小，在0-2cm内降低80%左右，2-18cm内稳定在90%左右，对应的衰减率呈现指数型增大。
- 2.在低频率段(30-200kHz)，当传播距离一定时，随着入射频率增大，振幅、频率幅值和频域面积的衰减率均有小幅度增大，增幅小于5%，差异不显著。
- 3.振幅、频率幅值和频域面积三者随传播距离的变化规律基本一致，均能较好地表征超声波在传播过程中能量的变化情况。

参考文献

1. 洪莹，沥青混合料粘弹性本构模型与阻尼特性研究[D]，南京：东南大学，19-39 (2015)
2. 杜世通主编，地震波动力学理论与方法[M]，东营：中国石油大学出版社，151-154 (2009)
3. 田霜，基于黏弹特性的沥青损伤演化规律分析[D]，哈尔滨：哈尔滨工业大学，63-70 (2017)