

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。

计算方法: 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:

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

其中, λ 、 μ 为弹性体拉梅系数, λ' 、 μ' 为粘滞系数。

沥青混合料满足线弹性粘弹性力学方程:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} &= \nabla \cdot \mathbf{S} + \mathbf{F}_v \\ \mathbf{S}_q &= 2\eta_v \dot{\epsilon}_{el,dev} \\ \eta_v &\rightarrow \alpha_T \eta_v \end{aligned}$$

瞬态模式下声压方程:

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

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, 具体结果见下图。

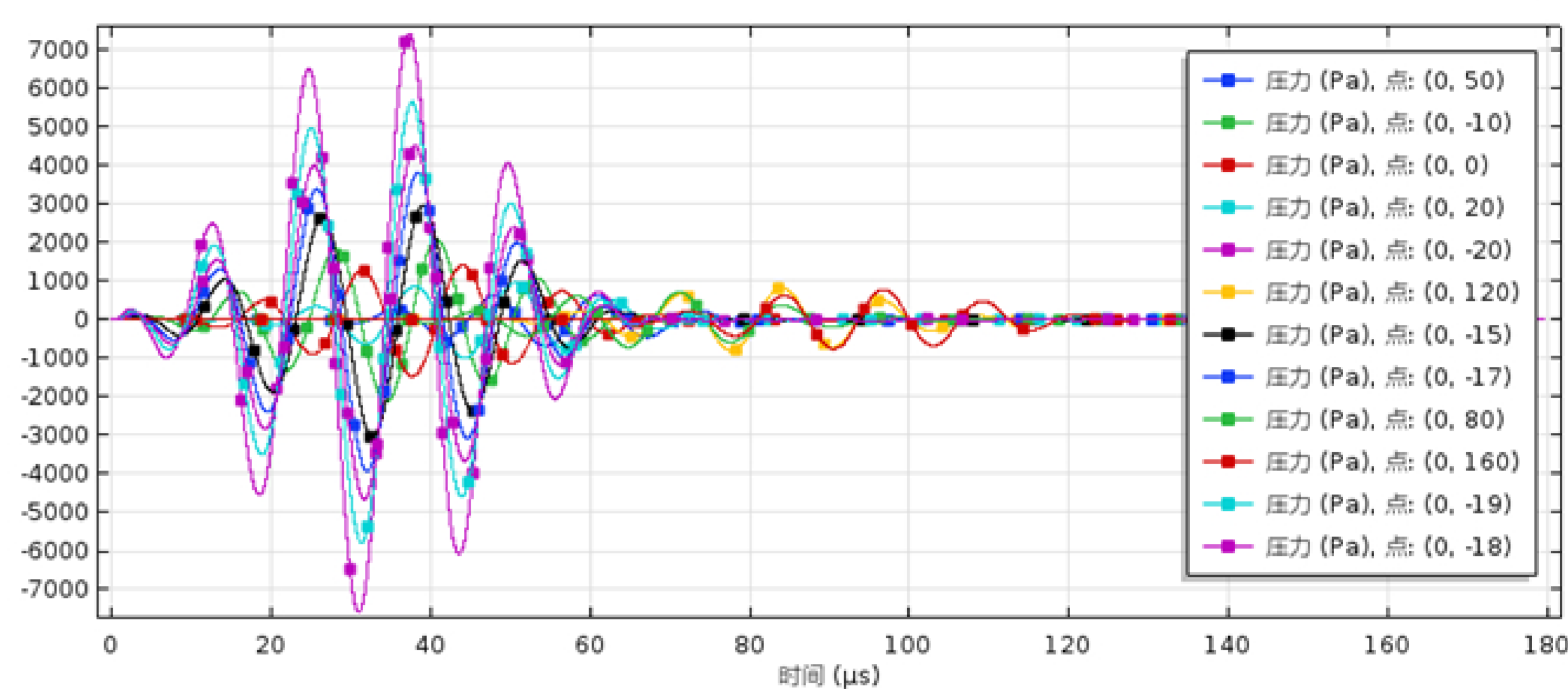


图 2. $f=75.25\text{kHz}$ 的振幅 (每条曲线代表不同的传播距离)

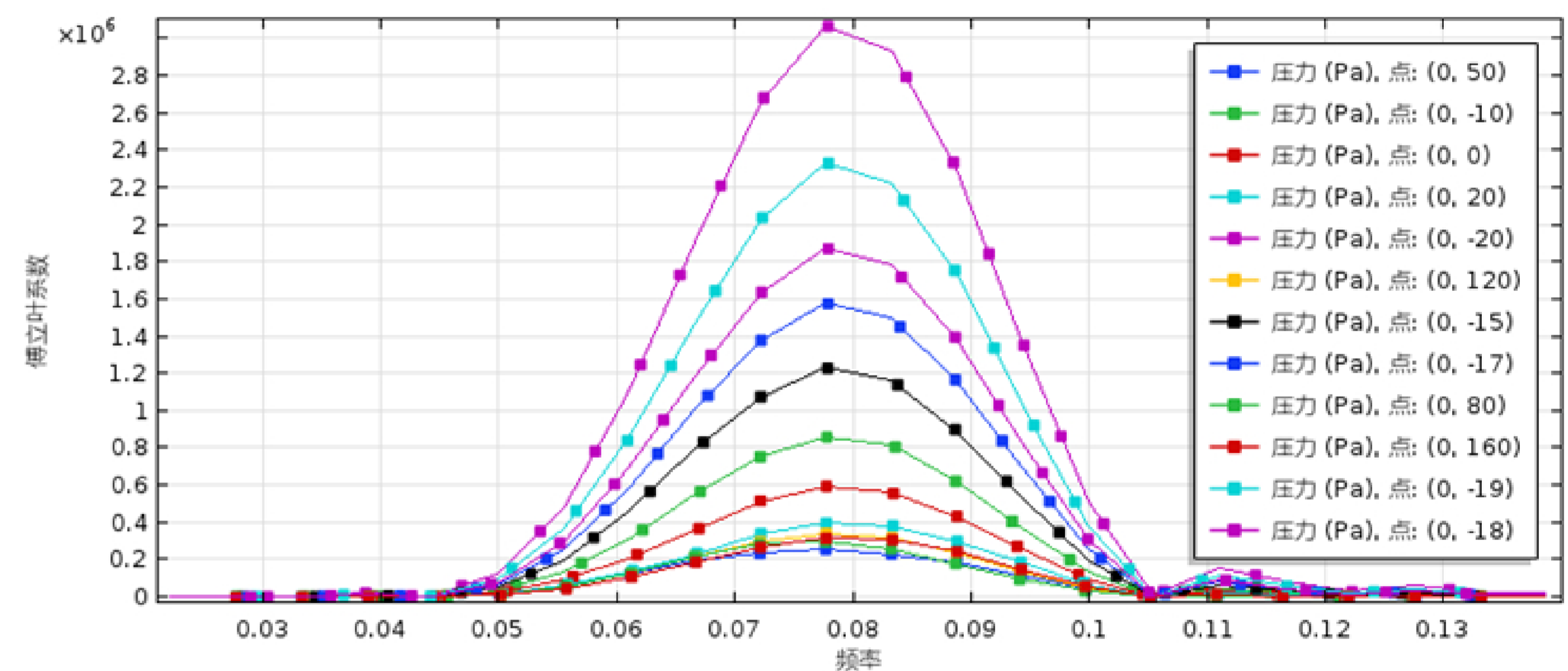


图 3. $f=75.25\text{kHz}$ 的频谱 (每条曲线代表不同的传播距离)

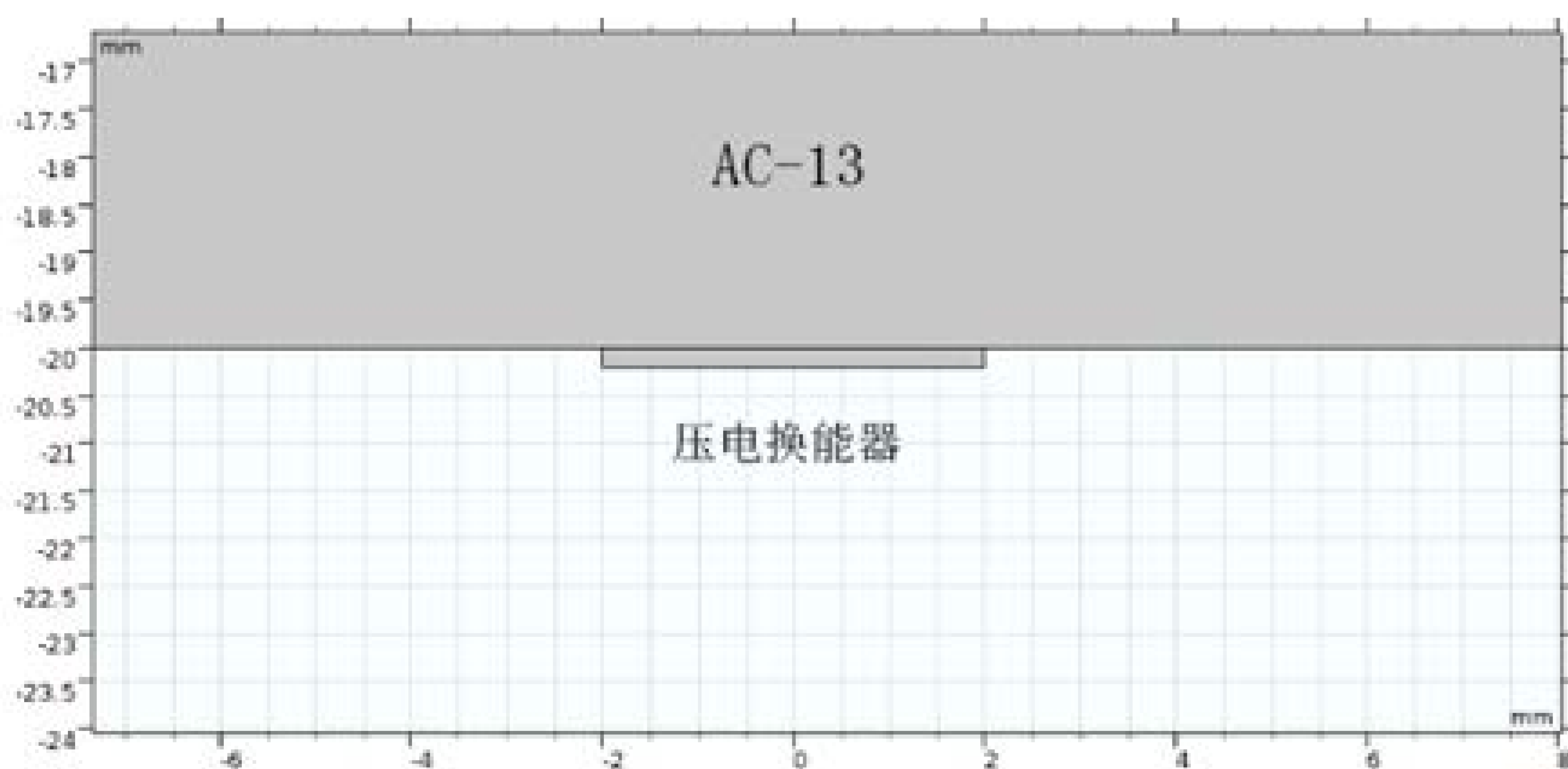
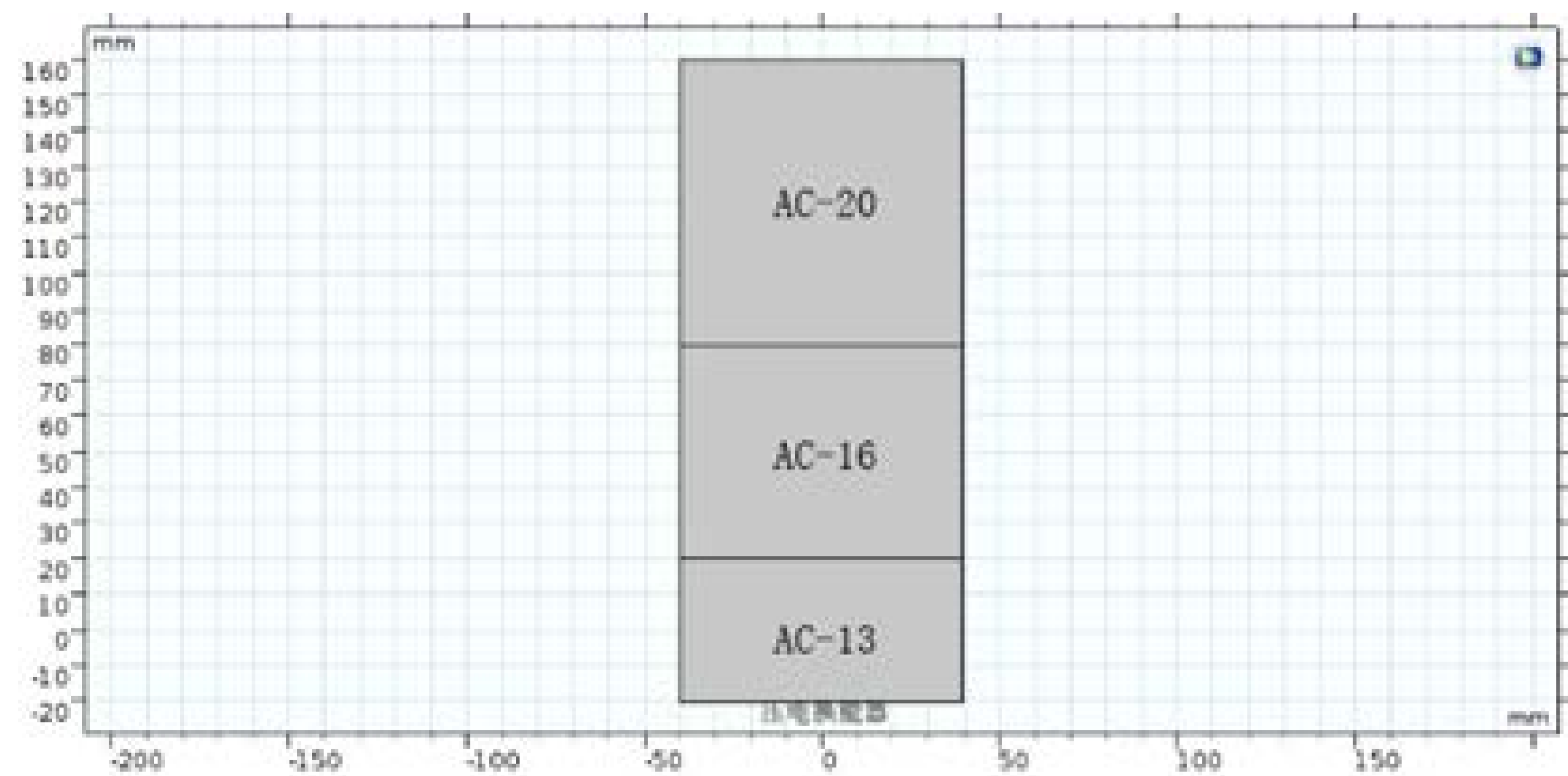


图 1. 模型整体(上) 局部放大(下)

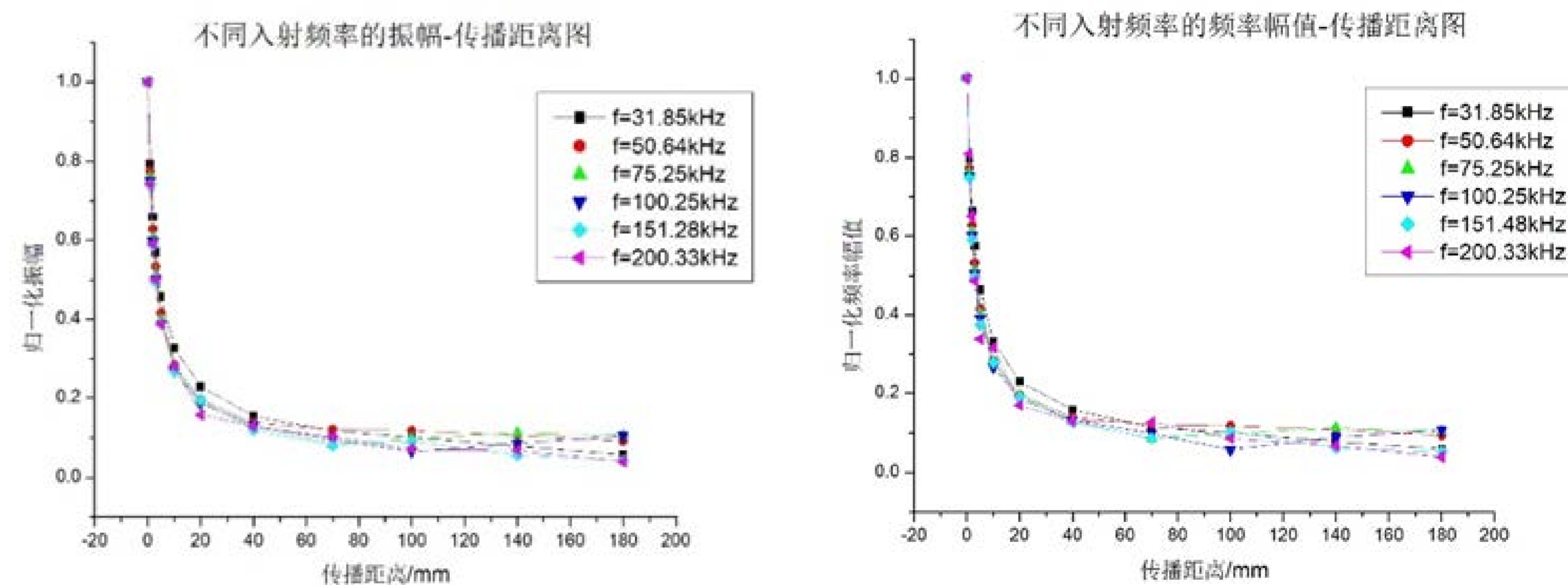


图 4. 6 种入射频率的模拟与拟合结果

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)