

# 北极冰下瞬态声源激发的跨冰层低阶导波

陈晟<sup>1,2</sup>, 周鸿涛<sup>1,2</sup>, 文洪涛<sup>1,2,3</sup>, 潘煜<sup>1,2</sup>, 阮海林<sup>1,2</sup>

(1. 自然资源部第三海洋研究所, 福建 厦门 361005; 2. 福建省海洋物理与地质过程重点实验室, 福建 厦门 361005; 3. 极地海洋声学与技术应用教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**为掌握冰下声源低频信号的跨冰层传播特性,更好地支持跨冰声定位和声通信工作,本文运用单端覆水海冰的频散特征方程,推导了冰层低阶导波;建立了冰-水耦合二维有限元仿真模型,模拟冰下瞬态声源激发跨冰层低阶导波水平和垂直方向传播过程,探究了跨冰层低阶导波的频率-波数特征、传播路径、传播速度、位移峰值等,并在北极开展了验证实验。研究表明:在理想冰层条件下,低阶导波QS模态在垂直和水平方向上均可与 $S_0$ 模态分离;在北极冰层条件下,跨冰层接收的低阶导波QS模态在垂直方向上可与 $S_0$ 模态分离。其传播路径可设为先垂直后水平方向分布,传播速度随水平距离增加而趋于常数。声源深度一定时,相比 $S_0$ 波, QS波的位移峰值在垂直方向上更强,在水平方向上则更弱。本文结果将为冰下声源定位、通信等提供理论支撑。

**关键词:** 北极; 瞬态生源; 冰层导波; 传播路径; 检波器; 跨冰层; 特征方程; 频率-波数

DOI: 10.11990/jheu.202506009

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1390.U.20250625.1633.015>

中图分类号: O427.9 文献标志码: A 文章编号: 1006-7043(2025)08-1538-09

## Low-order guided waves across-ice layers excited by transient acoustic sources beneath Arctic ice

CHEN Sheng<sup>1,2</sup>, ZHOU Hongtao<sup>1,2</sup>, WENG Hongtao<sup>1,2,3</sup>, PAN Yu<sup>1,2</sup>, RUAN Hailin<sup>1,2</sup>

(1. Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Xiamen 361005, China; 2. Fujian Provincial Key Laboratory of Marine Physical and Geological Processes, Xiamen 361005, China; 3. Key Laboratory for Polar Acoustics and Application of Ministry of Education, Harbin 150001, China)

**Abstract:** Understanding the characteristics of the propagation of low-frequency signals emitted by an acoustic source across ice layers enables the effective performance of cross-ice acoustic positioning and acoustic communication tasks. The characteristic equation of sea ice covered with water on one side was used, and the expression for the low-order guided waves of the ice layer was derived. By establishing a two-dimensional finite element simulation model of ice-water coupling, the horizontal and vertical propagation processes of low-order guided waves across ice layers excited by a transient acoustic source were simulated. Furthermore, the frequency-wavenumber characteristics, propagation path, propagation velocity, displacement peak, etc., of low-order guided waves crossing the ice layers were analyzed. The verification experiment was conducted in the Arctic. The results of the study indicate that, ideally, the QS mode of the low-order guided wave can be distinguished from the  $S_0$  mode in vertical and horizontal directions. In contrast, in the Arctic, the QS mode of the low-order guided wave moving across the ice can be distinguished from the  $S_0$  mode in the vertical direction. Its propagation path can be set to initially exhibit a vertical distribution, and subsequently, a horizontal distribution. The propagation speed tends to be constant with increasing horizontal distance. When the depth of the sound source is at certain values, compared with that observed in  $S_0$  waves, the displacement peak of QS waves is stronger in the vertical direction and weaker in the horizontal direction. These findings will provide theoretical support for underwater sound source localization, communication, and related applications.

**Keywords:** Arctic; transient acoustic source; ice-guided wave; transmission path; geophone; across-ice layer; characteristic equation; frequency-wavenumber

随着北极海冰的持续变化、“冰上丝绸之路”的

兴起,我国在北极的利益逐步由资源和经济利益向经济安全和国家战略安全扩展。因此,有必要开展极地声学研究<sup>[1-3]</sup>。与开阔大洋海域不同,北极海冰的覆盖阻碍了冰上、冰下信息的传输与交互,也为冰下水声目标定位带来困难,因此,跨冰层的声信息传输成为近年国内极地声学的研究热点之一<sup>[4-9]</sup>。

北极冰层是天然声波导,声波在其中可以进行

收稿日期: 2025-06-05.

网络出版日期: 2025-06-25.

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC2801202); 福建省自然科学基金项目(2023J011382); 国家自然科学基金项目(42276192); 自然资源部第三海洋研究所基本科研业务项目(2022020).

作者简介: 陈晟,女,高级工程师,博士;  
文洪涛,男,研究员,博士生导师.

通信作者: 文洪涛, E-mail: wenht\_1@163.com.

反射、折射等多模态复杂传播。Stein 等<sup>[10-11]</sup>通过冰层检波实验,认为一般厚度的海冰冰层导波在低频条件下(小于 100 Hz)主要有 3 种:纵板波、横向极化横波(shear-Horizontal, SH 波)和弯曲波。Yang 等<sup>[12]</sup>通过对冰上检波数据的频率-波数分析,发现了冰层中存在类似于板中 Lamb 波的频散导波。自由板中的 Lamb 波<sup>[13]</sup>主要分为对称族波和反对称族波,由于冰下为液态水,导波在它们的界面处发生强耦合而使能量向水中泄漏,从而使冰层中自由 Lamb 波产生变化。Moreaul 等<sup>[14]</sup>在实验室测量了冰层中的多个导波模式,证实冰层由于下方液体水的影响,将附加产生准斯高利特波(Quasi-Scholte, QS),并进一步认为当声源频率及冰层厚度积小于 50 Hz·m 时,冰层中的导波主要表现为 QS 波、准 Lamb 波及 SH 波。Chen 等<sup>[7]</sup>梳理了极地海冰声波导建模关键技术的发展历程与研究现状,分析了冰声传播研究进展,讨论并展望了冰声波导建模技术的未来研究重点。陈晟等<sup>[4]</sup>通过对比北极科考中冰层检波器及水听器对水下声源信号的同步接收数据,认为跨冰层声能量部分转化为冰层 Lamb 波。刘胜兴等<sup>[5]</sup>分析了北极冰-水 2 层复合结构中导波,认为与水层和冰层中导波频散曲线相比,复合结构中导波频散曲线除第 1 阶模式外,其余高阶模式均发生了很大变化。

上述冰上检波实验和冰层波导研究中,给出了冰层中低阶导波类型,但也说明冰-水复合结构下,导波可能发生变化。而且,激发的声源多数在冰上,对冰下声源激发的跨冰层导波的研究还存在不足。北极高纬度地区冰下水中拥有众多的大型海洋哺乳动物<sup>[15]</sup>,如蓝鲸和须鲸等,经常发出各种低频段的瞬态声波,另外,各种水下潜器、甚至海底地震、远方的风暴也会产生低频声波。因此,掌握低频导波的跨冰介质传播特性对冰下目标探测、定位、通信等领域有重要应用。当声源在冰下时,不同频段水声信号作用到冰层,激发冰层导波,传播后到达冰上检波器,被其接收,从而完成导波的跨冰介质传输。跨冰层导波在声速、传播路径,以及冰上检波器不同方向的能量分布均会发生变化,还会存在不同模式的分离问题。另外,当声源频段在 200 Hz 以下,声信号与冰层频厚积大于 50 Hz·m 时,导波的低阶模式也可能发生变化。本文将结合非对称耦合的 Lamb 波理论、有限元仿真软件以及北极冰上检波实验数据,对冰下瞬态声源激发的跨冰层低阶导波的传播特征进行详细分析,并解决低阶导波模式的分离问题。

## 1 非对称耦合的 Lamb 理论

由于海冰下方的水层不存在与冰层中横波耦合

的横向运动,不会改变海冰中的 SH 波,因此,本文重点考虑与冰层垂直方向振动相关的 Lamb 波模式。在冰-水界面,法向位移和应力连续,而剪切应力为零。因此单端覆水的海冰冰层的频散特征方程可以表示为<sup>[16]</sup>:

$$\begin{vmatrix} k_s^2 - \xi^2 & k_s^2 - \xi^2 & -2k_s\xi & 2k_s\xi & 0 \\ 2k_L\xi & -2k_L\xi & k_s^2 - \xi^2 & k_s^2 - \xi^2 & 0 \\ (k_s^2 - \xi^2)g_L & \frac{k_s^2 - \xi^2}{g_L} & -2k_s\xi g_s & \frac{2k_s\xi}{g_s} & \frac{\omega^2 \rho_\omega}{\mu} \\ 2k_L\xi g_L & \frac{-2k_L\xi}{g_L} & (k_s^2 - \xi^2)g_s & \frac{k_s^2 - \xi^2}{g_s} & 0 \\ k_L g_L & \frac{-k_L}{g_L} & -\xi g_s & \frac{-\xi}{g_s} & \gamma \end{vmatrix} = 0 \quad (1)$$

式中:  $k_L = \sqrt{\omega^2/c_L^2 - \xi^2}$  为冰层纵波在垂向上的波数分量, rad/m;  $k_s = \sqrt{\omega^2/c_s^2 - \xi^2}$  为冰层横波在垂向上的波数分量, rad/m;  $\xi = 2\pi/\lambda$  为水平方向上的波数分量, rad/m;  $g_L = e^{ik_L d}$ ;  $g_s = e^{ik_s d}$ ;  $c_L$  为冰层纵波声速, m/s;  $c_s$  为冰层横波声速, m/s;  $d$  为冰层厚度, m;  $\omega$  为角频率, rad/s;  $\lambda$  为波长, m;  $\rho$  为密度, kg/m<sup>3</sup>。

另外,依据文献[17-18]以及实测情况,可获得冰层纵波、横波声速,冰层厚度的可能范围,详细可设海冰冰层及水层的材料属性如表 1 所示。

表 1 材料属性

Table 1 Material property

材料参数	数值
海冰密度/(kg/m <sup>3</sup> )	910
海冰厚度/m	3
海冰纵波声速/(m/s)	3 500
海冰横波声速/(m/s)	1 800
水层密度/(kg/m <sup>3</sup> )	1 000
水层声速/(m/s)	1 500

依据式(1)及材料属性表 1,应用数值分析方法<sup>[5,9,16]</sup>,获得冰-水耦合后冰层中 Lamb 波在低阶模式的波数曲线,如图 1 所示。

从图 1(a)中可以看出,对于冰厚为 3 m 的冰-水耦合系统,当频率低于 200 Hz 时,理论上可激发出冰层 QS 波、 $A_0$  和  $S_0$  这 3 种模式的导波。但从图 1(b)中可以看出 QS 波和  $S_0$  波的虚波数几乎为 0,而  $A_0$  波的虚波数远远大于  $S_0$  波和 QS 波,虚波数代表着衰减,虚波数越大,意味着衰减越大,因此,低频段内的  $A_0$  波在传播过程中会快速耗散,即低频条件下(频率小于 200 Hz),冰层的低阶导波主要为 QS 波和  $S_0$  波,这些与 Moreaul 等<sup>[14]</sup>的研究(频厚积小

于  $50 \text{ Hz}\cdot\text{m}$  是一致的。另外,依据相速度为频率和波数的比值关系,从图 1(a) 中可知,在该频段内, QS 波的声速小于  $S_0$  波的声速。

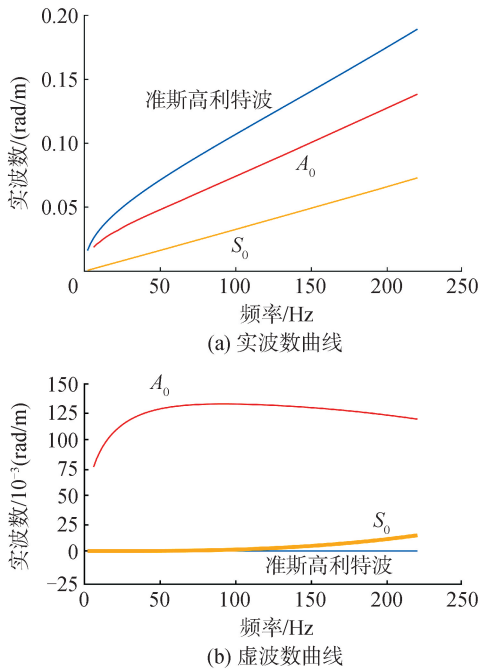


图 1 波数曲线

Fig. 1 Wavenumber curves

## 2 数值仿真实验与分析

### 2.1 仿真实验设计

为进一步探究和验证冰层低阶导波特性和运用有限元仿真软件,建立冰-水耦合仿真模型,仿真实验方案如图 2 所示。冰层及水层的材料属性与表 1 一致。由于仿真条件下,不考虑冰层衰减,为理想冰层,故材料属性中无冰层衰减系数。

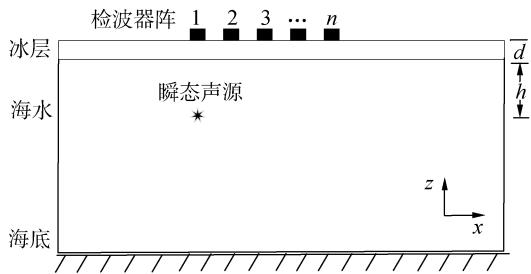


图 2 仿真实验方案示意

Fig. 2 Schematic diagram of simulation experiment plan

图 2 中海水层的下方和两侧添加了平面波辐射,类似增加完美匹配层以满足海水层的半无限空间性质。冰层两侧设置了低反射边界模拟冰层在水平方向上的无限延伸。另外,冰下激励信号选择高斯瞬态声源,声源深度为  $h$ ,冰层厚度为  $d$ ,冰层上方进行探针接收,类似布放二维检波器阵,个数为  $n$ ,记瞬态声源正上方布放的检波器序号为 1,其他检波器依序为  $2, 3, \dots, n$ 。检波器间距为  $10 \text{ m}$ 。采样

频率为  $2 \text{ kHz}$ 。

### 2.2 仿真结果与分析

#### 2.2.1 仿真声源

当仿真高斯声源振幅  $A=1$ ,频率  $f_0=200 \text{ Hz}$ ,脉冲峰值时间  $t_p=0.005 \text{ s}$  时,若在水下声源附近设置 1 个水听器,则可获得归一化声压的时域信号,如图 3(a) 所示。经傅里叶变换,对时域信号进行频域分析,得到频域信号,如图 3(b) 所示。

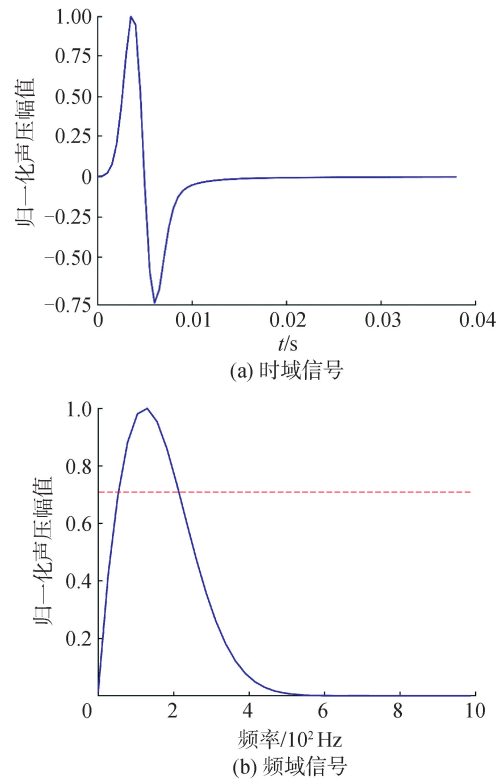


图 3 仿真声源的时域和频域信号

Fig. 3 Time domain and frequency domain signals of simulated sound source

从图 3(a) 可以看出,冰下声源信号主要波形在  $0.01 \text{ s}$  内,发声时间短,为瞬态信号;从图 3(b) 可以看出,当归一化声压幅值在  $0.707$  以下(图示虚线),即声能量为  $0 \sim 3 \text{ dB}$ ,对应的频段约在  $40 \sim 220 \text{ Hz}$ 。因此,该仿真声源属于冰下瞬态低频声源。

#### 2.2.2 跨冰导波在检波器垂直和水平方向的位移分布

在图 2 仿真模型中,如果取检波器个数  $n=16$ ,声源深度  $h=30 \text{ m}$ ,冰层厚度  $d=3 \text{ m}$  时,可获得不同检波器接收到的水平和垂直方向的位移。设声源正上方冰层检波器序号为 1,则可得到不同检波器水平方向位移  $x$  及垂直方向位移  $z$ 。当声源发声后,第 14 个检波器(距离声源水平位置  $130 \text{ m}$ )水平和垂直方向位移如图 4 所示。

从图 4 可以看出,第 14 个检波器在水平和垂直方向位移上出现 2 个较为明显的波形,在水平方向

上先到的位移  $x$  振幅较大,在垂直方向上后到的位移  $z$  振幅较大。这说明声源深度一定时,该距离处的 2 个波,在水平和垂直方向上不仅在时间上可以分开,而且还具有明显振幅大小不同的特征。将不同检波器接收到的水平和垂直方向的位移进行归一化,并分别适当向上平移(为方便图示,以下多通道作图与此类似,不再说明),得到的结果如图 5 所示。

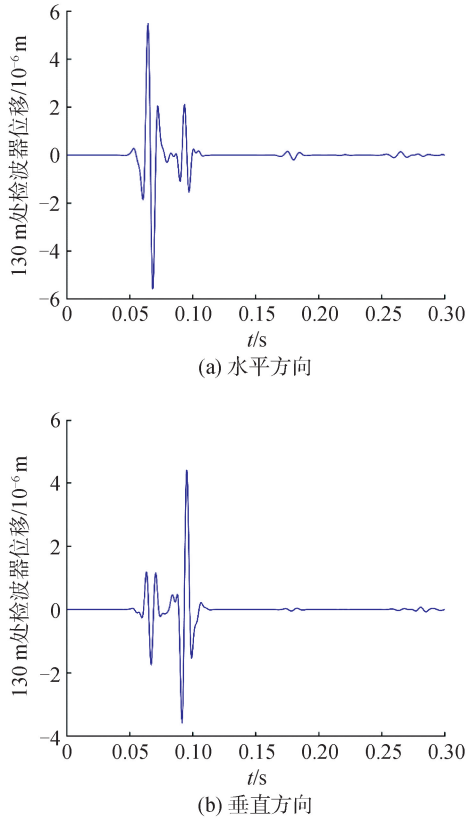


图 4 第 14 个检波器的水平和垂直方向位移

Fig. 4 The horizontal and vertical displacement of the 14th geophone

图 2(a) 中,检波器 1 在声源的正上方,由于其在水平方向没有分量,归一化后,将弱反射信号显示出来,实际上可忽略不计。从图 5 可以看出,在检波器 6 后,即与声源水平距离大于 60 m,检波器阵在水平和垂直方向位移上同时出现 2 列较为明显的导波。这与冰层 Lamb 理论分析一致,即冰层中的低阶导波 QS 波和  $S_0$  波。依据 2 列波到达时间的先后顺序,前面到达的导波声速大,应为  $S_0$  波,后面到达则为 QS 波。因此,当检波器与声源的水平距离大于一定值后,可以利用到达时间的差异将这 2 种导波进行模态分离。另外,与图 4 一样,图 5 中不同的检波器水平方向上,  $S_0$  波的峰值明显大于 QS 波峰值,在检波器垂直方向上, QS 波的峰值明显大于  $S_0$  波峰值。因此,通过不同方向的峰值分布特点,也可以将 QS 波和  $S_0$  波的模态分离开。

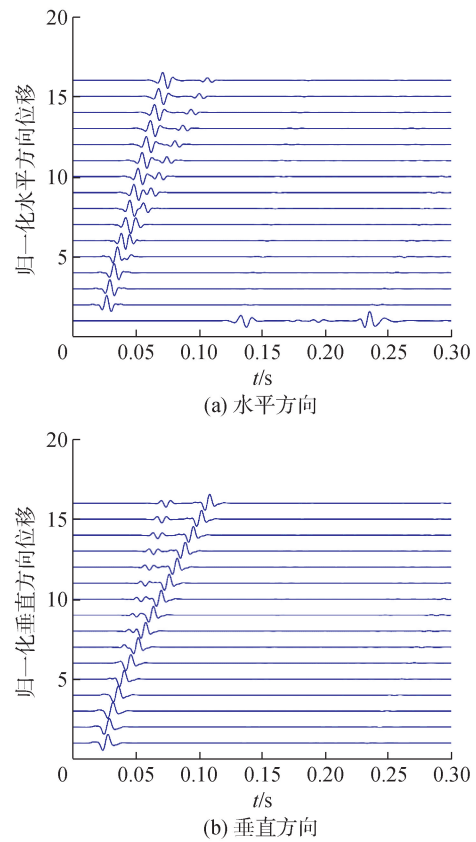


图 5 不同检波器水平和垂直方向的位移

Fig. 5 Displacement in horizontal and vertical directions of different geophones

可见,在仿真条件下,即理想冰层,不考虑冰层衰减时,这 2 种跨冰导波模态,既可以利用时间差进行模态分离,也可以利用在不同方向上峰值强度分布进行模态分离。

### 2.2.3 跨冰导波在检波器垂直和水平方向的频率-波数分析

频率-波数分析是导波模态识别和导波传播分析的有效手段<sup>[19-20]</sup>。通过二维傅里叶变换,可以将时间-空间波场数据  $u(t, x)$ ,转换为频率-波数表示  $U(f, \xi)$ ,其定义为:

$$U(f, \xi) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u(t, x) e^{-i(2\pi ft - \xi x)} dt dx \quad (2)$$

依据式(2),将不同检波器接收到的水平和垂直方向的位移信号数据进行二维傅里叶变换,得到冰层水平和垂直方向声波波数和频率的关系,其中色图为归一化声强幅值,如图 6 所示。

从图 6(a) 来看,在水平方向上,当声波在声源较强频段内时, QS 和  $S_0$  模态均清晰可见,且  $S_0$  模态的能量更强;从图 6(b) 来看,在垂直方向上, QS 模态清晰可见,  $S_0$  模态则在高于 150 Hz 频率,波数大于 0.3 rad/m 后出现。可见,在垂直方向上,  $S_0$  模态分离不仅与水平距离有关,而且与频率也有一定的关系。

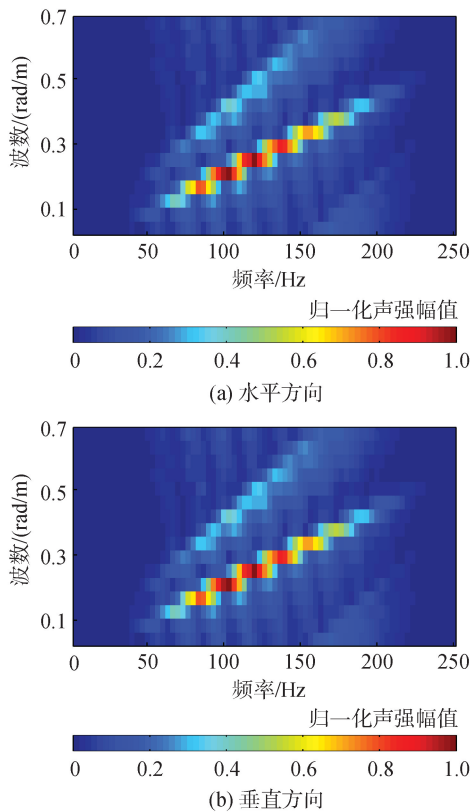


图 6 冰层导波不同方向波数和频率关系

Fig. 6 The relationship between wave number and frequency in different directions of ice sheet guided waves

2. 2. 4 跨冰层导波传播路径

跨冰层导波传播路径往往是跨冰层水下目标定位的关键<sup>[6,21]</sup>。从图 5 所示的检波器阵接收情况来看,无论  $x$  方向还是  $z$  方向,冰层的导波传播具有延续性,即依据检波器阵的水平布放方向传播。另外,声源信号从发出到接触冰面的路径,可通过水中传播的时间及水中声速来推断。

从图 5 看出,最先接收到跨冰声信号的是检波器 1 的垂直方向,依据仿真结果,垂直方向首先到达波所对应的时间为 0.019 2 s,再依据声源的深度和水中声速,可计算出水下声源声波垂直到达冰层下界面的最短时间为 0.02 s,比对这 2 个时间值可知它们非常接近。这说明水下声源声波垂直到达冰层下界面为水中传播的最可能路径,到达冰层下界面后再沿着垂直方向到达冰面上方的检波器 1。为证明这点,对声源的深度  $h$  进行多次调整,当  $h$  分别为 15、30、60 m 时,检波器 1 垂直方向的位移  $z$  如图 7 (a) 所示。

从图 7(a) 可以看出,随着深度的增加,到达冰层的时间也增加,经计算声源声波垂直到达冰层下界面的最短时间与到达冰面检波器 1 的时间几乎一致。因此,跨冰层导波的传播路径可简化设置为如图 7(b) 所示,其中箭头为传播方向,即冰下声源发

声后,产生的跨冰层导波先垂直入射冰面再沿水平方向到达不同的检波器。

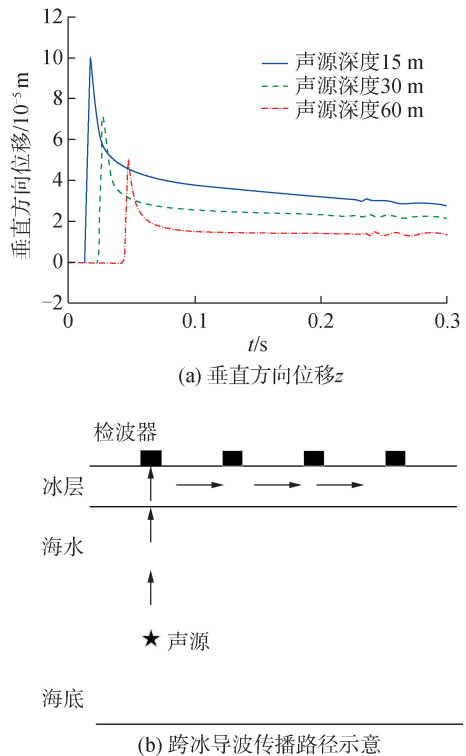


图 7 不同声源深度检波器 1 垂向位移  $z$  及跨冰导波传播路径示意

Fig. 7 Diagram of vertical displacement  $z$  and cross ice guided wave propagation path of geophone 1 at different sound source depths

2. 2. 5 跨冰层导波传播速度分析

在仿真实验设计示意图 6 中,若检波器个数  $n=16$ ,声源深度  $h=30$  m,冰层厚度  $d=3$  m 时,利用位移峰值,可获得不同距离时  $S_0$  波和 QS 波传播速度(群速度),如图 8(a) 所示,其中圆点为  $S_0$  波,星号为 QS 波。如果继续增加检波器的个数,并取检波器的间距为 20 m,则可获得距离更远处不同距离时  $S_0$  波和 QS 波的传播速度。如图 8(b) 所示,其中圆点为  $S_0$  波,星号为 QS 波。

从图 8(a) 可以看出,在近距离时,  $S_0$  波和 QS 波的传播速度时大时小,变化较大,随着距离的增大,  $S_0$  波和 QS 波传播速度变化逐渐趋于平缓,从图 8(b) 可以进一步看出,当距离大于 110 m 时,对于  $S_0$  波,其传播速度趋于常数 3 000 m;对于 QS 波,其传播速度趋于常数 1 520 m。可见,这 2 类导波声速有明显差异。另外,这 2 类导波在近距离处波速变化较大,意味着在该情况下导波之间的耦合复杂;随着距离增大,  $S_0$  波声速介于冰层纵波和横波之间,这说明  $S_0$  波在传播过程中主要受冰层影响, QS 波声速逐渐趋于水中声速,且略大于水中声速。这说明 QS 波在冰层传播过程中,受水层

影响增大。

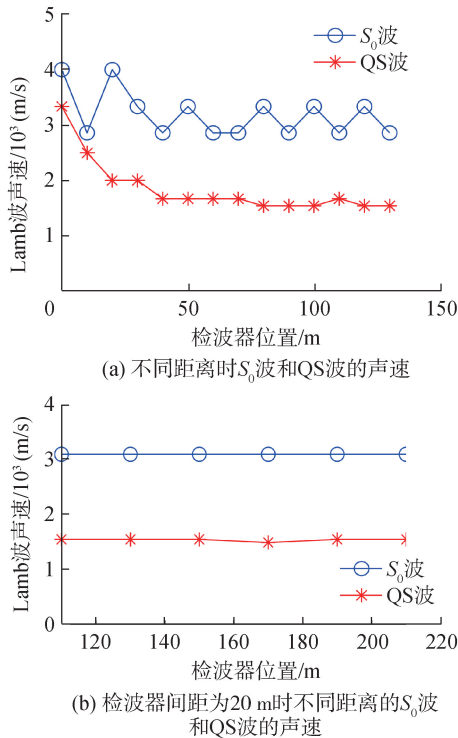


图 8 仿真条件下 Lamb 波不同距离传播速度

Fig. 8 The propagation speed of Lamb waves at different distances under simulation conditions

### 2.2.6 跨冰层导波位移峰值与距离关系

其他参数设置不变,若继续对 16 个检波器获得的不同跨冰层低阶导波的位移峰值进行观察,将它们与水平距离或水中距离进行比较,则可得到它们与 QS 波和  $S_0$  波的比值关系,如图(9)所示。

从图 9(a)、(b)可以看出,对于不同的检波器,当检波器位置离声源的水平位置大于一定值时,跨冰层低阶导波的位移峰值与水平距离或水中距离的比值接近常数。

## 3 北极实验及结果分析

### 3.1 实验方案

为验证冰下瞬态声源激发的跨冰层低阶导波的相关理论结果,在中国第 13 次北极科学考察期间,进行了跨冰层检波实验。在北冰洋中心区冰面,布放 2 台检波器,在冰面下方水中布放 1 台自容式水声信号记录仪,检波器能独立完成 3 个方向的位移测量,其工作频段为 0.01 ~ 200 Hz,采样率为 500 Hz,检波器的个数为 2,如图 10(b)所示。水声信号记录仪的水听器工作频段为 20 ~ 10 kHz,主要监测冰下声源是否正常工作。冰下声源为灯泡声源,内爆发声时间短,可视为瞬态声源。其声源级在 40 ~ 200 Hz 频段内近似均匀分布。灯泡声源附近安装 1 个深度仪 D,辅助测量声源深度。实验站位的

冰层厚度约为 1~3 m。实验方案及实验现场情况如图 10 所示。

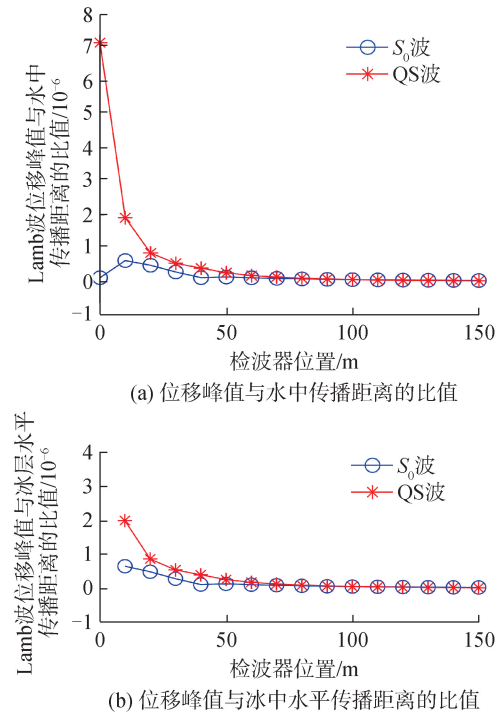


图 9 跨冰层导波位移峰值与距离关系 ( $n = 16, h = 30, d = 3$ )

Fig. 9 Relationship between peak-displacement and distance of guided waves across-ice layers ( $n = 16, h = 30, d = 3$ )

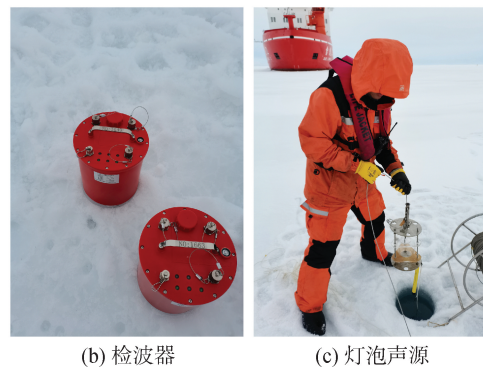
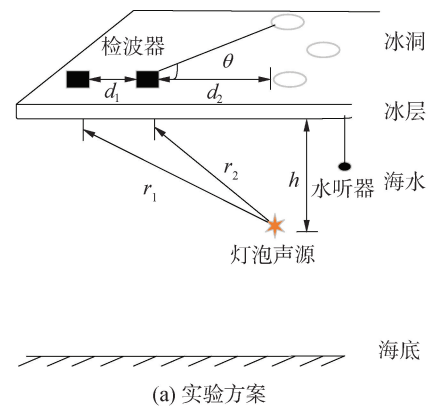


图 10 实验方案及实验现场

Fig. 10 Experimental plan and experimental site

如图 10(a) 所示, 2 个检波器间的距离  $d_1$  为定值 30 m, 但检波器与声源的水平距离则随着冰洞不同而变化, 检波器与声源间的方位角为  $\theta$ , 与声源的垂直距离为  $h$ 。设声源远端的检波器为检波器 1, 近端为检波器 2, 则检波器 2 与声源间的水平距离为  $d_2$ , 声源与检波器 1 的水中直线传播距离为  $r_1$ , 与检波器 2 的水中直线传播距离为  $r_2$ 。检波器的  $x$  轴与方位角  $\theta = 0^\circ$  时一致。

### 3.2 实验结果及分析

利用图 10(c) 所示的声源激发装置释放 1 枚声源。该枚声源深度  $h = 15$  m, 方位角  $\theta = 0^\circ$ , 远端检波器 1 的跨冰接收信号如图 11 所示。其中图 11(a) 为检波器 1 接收到的 3 个方向位移, 从上到下分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向位移; 图 11(b) 和图 11(c) 为  $x$  方向和  $z$  方向的在 40~200 Hz 频段内依据 1/3 倍频程进行分频段后的归一化位移。另外, 为方便比较, 提取出中心频率为 40 Hz 时  $x$  和  $y$  方向位移, 如图 11(d)。

从图 11(a) 可以看出, 跨冰检波信号中,  $z$  方向的位移强度最大,  $y$  方向位移强度最弱; 另外, 3 个方向均只有 1 种导波, 没有出现仿真条件下的 QS 波和  $S_0$  波 2 种导波; 从能量较大的  $x$  和  $z$  方向分频段位移图 11(b)、(c) 来看, 同样也只有 1 种导波, 没有出现 2 种分离波。在水平距离上, 检波器 1 离声源的水平距离为 60 m, 在仿真条件下, 2 列导波应该出现分离。没有出现分离的原因可能是因为灯泡声源的信号发声时间较长, 使得 2 种波的长度也较长, 从而混在一起。进一步观察图 11(d) 中  $x$  和  $z$  方向位移, 提取出的信号长度大于 0.1 s。已知检波器 1 的水平距离, 通过粗略计算, 可知该长度远大于 QS 及  $S_0$  波的时间差。可见, 除了考虑检波器与声源间的水平距离外, 灯泡声源的信号发声时长也是分离 QS 及  $S_0$  波的关键。

另外, 从图 11(d) 提取到的  $x$  和  $z$  方向的位移峰值对应相同的时间值来看, 说明  $x$  和  $z$  方向的位移峰值部分对应相同的低阶导波。依据前面的仿真实验,  $z$  方向的峰值对应 QS 波, 因此, 可初步推断该波为 QS 波。结合检波器 2 对相同声源的接收数据, 可获得 2 个检波器中心频率 40 Hz 时  $z$  方向位移波形, 如图 12(a) 所示。结合检波器 2 对相同声源的接收数据, 可获得 2 个检波器间垂直方向  $z$  位移峰值的时间差。又已知 2 个检波器间的距离, 从而可计算出该导波的传播速度, 即该导波的声速。将实验中共 8 枚不同深度声源的检波结果进行分析, 得到垂直方向导波声速结果如图 12(b) 所示。

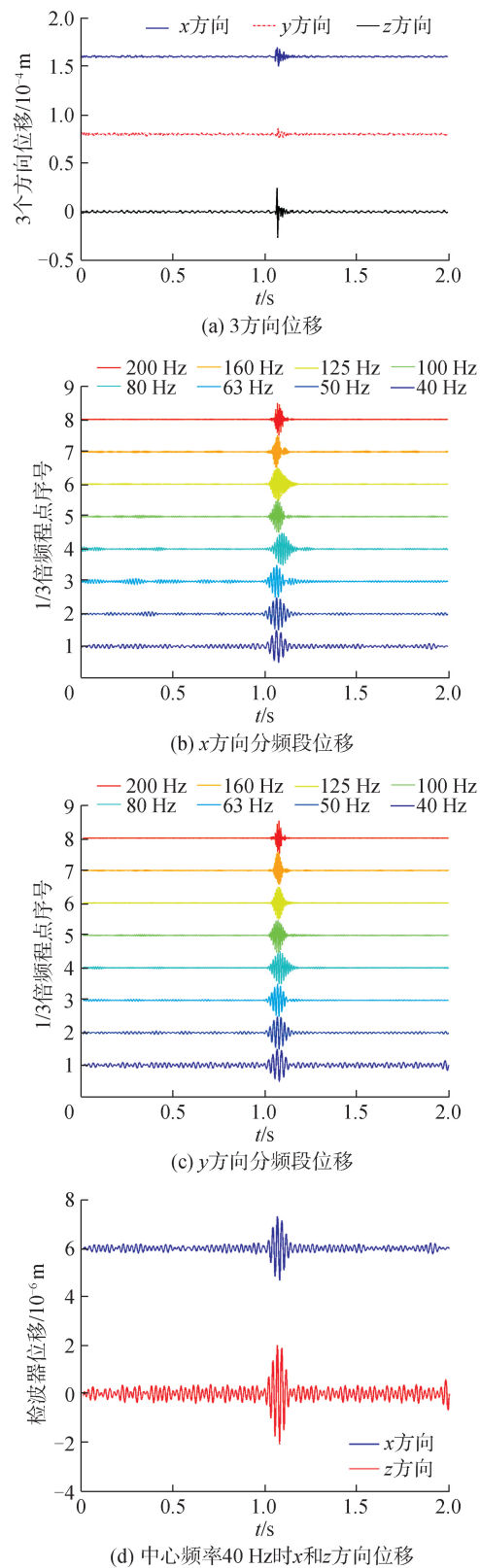


图 11 冰下瞬态声源激发的跨冰检波信号 ( $n = 1, h = 15, \theta = 0^\circ$ )

Fig. 11 Cross-ice detection signal excited by transient sound source under ice ( $n = 1, h = 15, \theta = 0^\circ$ )

从图 12(a) 中, 可以看出, 对于同一声源, 近距离检波器 2 中垂直方向位移峰值强度明显大于远距离检波器 1, 这与仿真实验中的冰层低阶导波的声

传播规律相符。从图 12(b)可以看出,该导波的声速约为 1 500 m,这与北极实验中现场实测的水中声速约 1 460 m/s 相近,且大于水中声速。该情况与仿真实验中垂直  $z$  方向计算得到的 QS 波声速与水中声速相近且略大于水中声速一致,因此,可再次确认,该导波应为冰层中的 QS 波。检波器垂直  $z$  方向上 QS 波和  $S_0$  波的混合波之所以能分离出 QS 波,重要的原因是,冰下声源从水中激发后在垂直  $z$  方向的  $S_0$  波较弱,微弱的  $S_0$  波相较更强的 QS 波可以忽略不计。依此原理,检波器  $x$  方向混合的 QS 波和  $S_0$  波中,之所以不能分离出  $S_0$  波,可能是因为冰层  $x$  方向衰减较强,从而使得  $x$  方向的  $S_0$  波较弱。这也说明,在北极冰层条件下, $S_0$  波和 QS 波的衰减可能不同,这方面的研究可以在今后的工作中进一步开展。

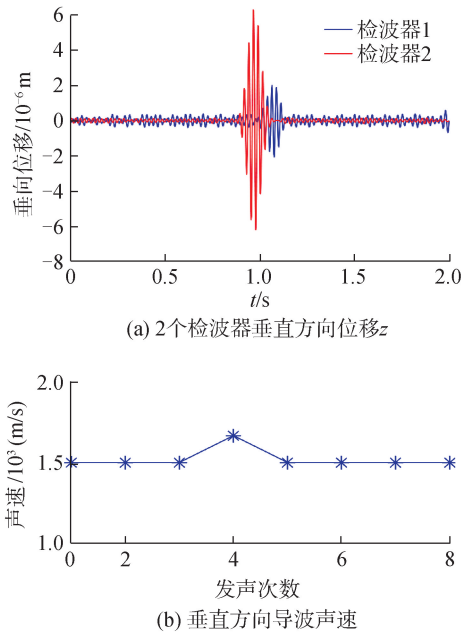


图 12 2 个检波器垂直方向位移  $z$  及声速计算结果  
Fig. 12 Calculation results of  $z$ -displacements and sound velocity of two geophones

针对实验中同一声源,距离不同时,检波器位移峰值不同的情况,进行进一步的分析。根据仿真实验, QS 波在检波器水平方向较弱,无法忽略  $S_0$  波的干扰,因此重点关注检波器垂直方向位移峰值。当声源不同时,对 2 个检波器间垂直方向位移峰值取  $e$  为底的对数,其与水平距离比值如图 13(a) 所示; 2 个检波器间  $z$  位移峰值比值与水中传播距离比值如图 13(b) 所示。由于在实验的过程中,声源的深度不一致,因此,难以进行检波器的位移峰值与水平距离的关系分析。但从图 13(a) 和图 13(b) 可以看出,在不同声源条件下,2 个检波器间垂直方向位移峰值与水中传播距离比值接近; 2 个检波器间垂直方向位移峰值比值与水中传播距离比值较为接近。

这 2 种情况均与仿真实验中,当检波器与声源的水平距离大于一定值时, QS 波的位移峰值与水中传播距离的比值接近常数一致。

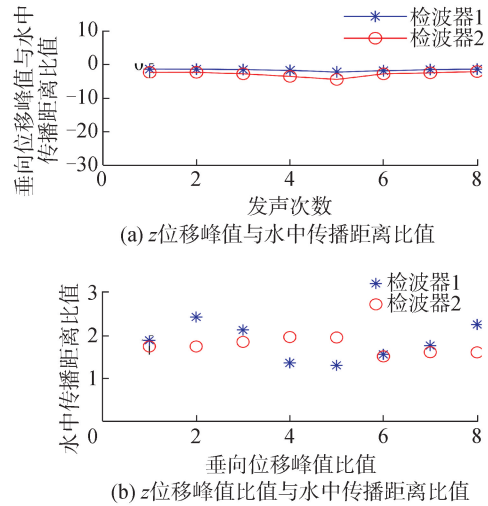


图 13 不同声源条件下 2 个检波器  $z$  位移峰值与水中传播距离的关系  
Fig. 13 The relationship between the peak displacement of two detectors and the propagation distance in water at different sound sources

#### 4 结论

1) 冰下瞬态声源激发冰层产生  $S_0$  和 QS 2 种低阶导波(频率小于 200 Hz),这 2 种低阶导波跨冰层传播路径可设置为先垂直到达冰面再进行水平传播。在与声源近距离冰面上水平传播时,两者产生复杂耦合,声速变化较大;当距离不断增大后,声速逐渐趋于稳定不变。其中  $S_0$  波的声速大小介于冰层纵波和横波声速之间, QS 波的声速大小趋于水中声速,且略大于水中声速。

2) 声源深度一定时,跨冰层低阶导波  $S_0$  和 QS 波在冰面同一位置的水平和垂直方向的位移峰值分布特征不同。在水平方向上,  $S_0$  波峰值明显大于 QS 波峰值;在垂直方向上, QS 波的峰值明显大于  $S_0$  波峰值。另外,这 2 类波在 2 个方向上的位移峰值与水平距离及水中传播距离的比值趋近常数。

3) 跨冰层低阶导波  $S_0$  和 QS 波的模态分离方法有 2 种,一种是利用  $S_0$  和 QS 波传播速度差异形成的时间差,此时需要瞬态声源发声时间小于时间差。另一种则是依据这 2 类波在同一位置的水平和垂直方向的位移峰值分布特征不同。在北极冰层条件下,  $S_0$  波较弱,会出现强度不明显的情况,该情况下,依然可以利用垂直方向上, QS 波的峰值明显大于  $S_0$  波峰值进行模态分离。由于我国的北极科学考察常常在夏季,实验站位中的海冰厚度相对较薄,

物理特性包括衰减特性会产生一定的变化。若条件允许,将进一步探索冬季条件下跨冰层低阶导波的传播特性和衰减变化情况。

## 参考文献:

- [1] 李启虎, 黄海宁, 尹力, 等. 北极水声学研究的新进展和新动向[J]. 声学学报, 2018, 43(4): 420-431.  
LI Qihu, HUANG Haining, YIN Li, et al. Progresses and advances in Arctic underwater acoustic study [J]. Acta acustica, 2018, 43(4): 420-431.
- [2] KWOK R. Arctic sea ice thickness, volume, and multiyear ice coverage: losses and coupled variability (1958—2018) [J]. Environmental research letters, 2018, 13(10): 105005.
- [3] 陈晟, 杨燕明, 周鸿涛, 等. 北极水下声信号跨冰层变化分析[J]. 声学学报, 2021, 46(3): 355-364.  
CHEN Sheng, YANG Yanming, ZHOU Hongtao, et al. Analysis of the variation of underwater acoustic signal across ice layer in the Arctic [J]. Acta acustica, 2021, 46(3): 355-364.
- [4] 刘胜兴, 汤立国, 李整林. 北极冰-水耦合系统中声波传播特性[J]. 声学学报, 2021, 46(4): 553-563.  
LIU Shengxing, TANG Ligu, LI Zhenglin. Propagation of acoustic waves in a coupled ice-water system for the Arctic Ocean [J]. Acta acustica, 2021, 46(4): 553-563.
- [5] 陈晟, 杨燕明, 周鸿涛, 等. 北极跨冰层水中声源方位估计实验与分析[J]. 声学学报, 2022, 47(2): 175-186.  
CHEN Sheng, YANG Yanming, ZHOU Hongtao, et al. Experiment and analysis on cross-ice bearing estimation for underwater acoustic source in the Arctic [J]. Acta acustica, 2022, 47(2): 175-186.
- [6] 殷敬伟, 马丁一, 张宇翔, 等. 极地海冰声波导建模综述[J]. 物理学报, 2022, 71(8): 162-172.  
YIN Jingwei, MA Dingyi, ZHANG Yuxiang, et al. Review on modeling polar sea-ice acoustics waveguide [J]. Acta physica sinica, 2022, 71(8): 162-172.
- [7] CHEN Sheng, WEN Hongtao, YANG Yanming, et al. Analysis of the variation in bearing estimation error with frequency bands for a source beneath the Arctic ice using a geophone [J]. Applied sciences, 2023, 13(23): 12585.
- [8] ZENG Qitian, LIU Shengxing, TANG Ligu, et al. Theoretical and numerical study on transient acoustic wave propagation across ice layers in the Arctic Ocean [J]. The journal of the acoustical society of America, 2024, 155(5): 3132-3143.
- [9] STEIN P J. Interpretation of a few ice event transients [J]. The journal of the acoustical society of America, 1988, 83(2): 617-622.
- [10] STEIN P J, EUERLE S E, PARINELLA J C. Inversion of pack ice elastic wave data to obtain ice physical properties [J]. Journal of geophysical research: oceans, 1998, 103(C10): 21783-21793.
- [11] YANG T C, GIELLIS G R. Experimental characterization of elastic waves in a floating ice sheet [J]. The journal of the acoustical society of America, 1994, 96(5): 2993-3009.
- [12] LAMB H. On waves in an elastic plate [J]. Proceedings of the royal society A, 1917, 93(648): 114-128.
- [13] MOREAU L, BOUÉ P, SERRIPIERRI A, et al. Sea ice thickness and elastic properties from the analysis of multimodal guided wave propagation measured with a passive seismic array [J]. Journal of geophysical research: oceans, 2020, 125(4): e2019JC015709.
- [14] 陈建伟. 逐鲸北极[J]. 森林与人类, 2016(1): 102-113.  
CHEN Jianwei. Whale-chasing Arctic [J]. Forest & humankind, 2016(1): 102-113.
- [15] YU Lingyu, TIAN Zhenhua. Case study of guided wave propagation in a one-side water-immersed steel plate [J]. Case studies in nondestructive testing and evaluation, 2015, 3: 1-8.
- [16] MCCAMMON D F, MCDANIEL S T. Application of a new theoretical treatment to an old problem; sinusoidal pressure release boundary scattering [J]. The journal of the acoustical society of America, 1985, 78(1): 149-156.
- [17] MILLER B E, SCHMIDT H. Observation and inversion of seismo-acoustic waves in a complex Arctic ice environment [J]. The journal of the acoustical society of America, 1991, 89(4): 1668-1685.
- [18] ALLEYNE D, CAWLEY P. A two-dimensional Fourier transform method for the measurement of propagating multimode signals [J]. Acoustical society of America journal, 1991, 89(3): 1159-1168.
- [19] TIAN Zhenhua, YU Lingyu. Lamb wave frequency-wavenumber analysis and decomposition [J]. Journal of intelligent material systems and structures, 2014, 25(9): 1107-1123.
- [20] DOSSO S E. Three-dimensional localization of transient acoustic sources using an ice-mounted geophone [J]. The journal of the acoustical society of America, 2014, 135(1): 124-133.

## 本文引用格式:

陈晟, 周鸿涛, 文洪涛, 等. 北极冰下瞬态声源激发的跨冰层低阶导波 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2025, 46(8): 1538-1546.  
CHEN Sheng, ZHOU Hongtao, WENG Hongtao, et al. Low-order guided waves across-ice layers excited by transient acoustic sources beneath Arctic ice [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2025, 46(8): 1538-1546.