

◇ 研究报告 ◇

大气声传播通道的声源当量估计方法*

程 巍^{1,2} 滕鹏晓^{1†} 吕 君¹ 张天予^{1,2}

(1 中国科学院噪声与振动重点实验室 北京 100190)

(2 中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 提出了一种基于大气声传播通道的爆炸声源能量估计方法, 通过将计算大气声学的传播能量分布结果与大气中传播的声压幅度衰减模型相结合, 使用平流层通道与热层通道传播损失能量比例作为修正量, 提高了对爆炸声源能量的估计精度。在多次地面爆炸实验得到的数据中, 使用观测距离 800 km 以上且同时存在平流层通道与热层通道的次声接收信号, 对比了平流层顶风速修正的能量估计方法与该文提出的基于大气声传播通道的能量估计方法。实验结果验证了相对于传统风速修正的能量估计方法, 该方法可显著降低估计误差。

关键词: 次声传播; 声源能量估计; 大气声传播通道; 通道能量分布修正

中图法分类号: O425+.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2023)01-0012-06

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2023.01.002

Energy estimation of explosion sound source based on the ratio of the energy of different tube

CHENG Wei^{1,2} TENG Pengxiao¹ LYU Jun¹ ZHANG Tianyu^{1,2}

(1 Key Laboratory of Noise and Vibration, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A method based on the ratio of the energy of different tube (REDT) is proposed to estimate the energy of explosive sound source in this paper. The error of estimation can be reduced significantly through combining the energy distribution of calculating acoustic and the attenuation model of sound pressure in the atmosphere. The infrasound wave which propagates over 800 km is used to compare the proposed method and the estimation method based on the vertical wind in mesosphere pause. The results of experiment verify the improvement of this method compared with former methods.

Keywords: Infrasound propagation; Energy estimation of sound source; Wave propagation in atmospheric waveguide; Modification based on the ratio of the energy of different tube

2021-10-10 收稿; 2022-02-16 定稿

*国家自然科学基金项目 (11774372, 11874389)

作者简介: 程巍 (1995-), 男, 江苏扬州人, 博士研究生, 研究方向: 信号与信息处理。

†通信作者 E-mail: px.teng@mail.ioa.ac.cn

0 引言

次声是频率低于 20 Hz 的声波, 由于其频率低的特性, 可在大气中进行远距离传播而被有效观测。次声在大气中的传播包含声源的能量信息, 因此经常被用于进行声源能量的估计。1971 年, Pierce 等^[1]将大气中的次声信号传播近似为 Lamb 波边缘模态, 给出了使用地面传播距离与接收信号幅度和周期对声源能量进行估计的方法, 但此方法由于其估计的假设条件, 仅适用于较大能量声源的状况^[2]。1998 年, Clauter 等^[3]通过对接收信号周期的独立性假设得到了基于观测数据的半经验声源能量估计方法, 该公式未考虑大气中不同传播通道的影响。1995 年, 美国洛斯阿拉莫斯国家实验室 (Los Alamos National Laboratory, LANL) 的 Whitaker^[4]通过对稳定位置声源全方位全年观测信号的幅值变化状况进行研究, 在传统声源衰减模型中添加了基于平流层顶水平风速作为修正量, 得到了基于观测数据的半经验声源能量估计方法, 并在数千吨能量化学爆炸声源的估计中获得良好的效果。Stevens 等^[5]分别从接收次声信号的幅度、周期和频域特性出发对衰减规律进行建模, 并根据传播方向与大气水平风方向的关系对数据进行分类, 获得对声源能量的半经验估计方法。传统的声源能量估计方法存在较大的问题, 部分方法忽视了传播通道模式带来的影响, 部分方法只使用大气中单一的直接物理量基于数据对估计值进行修正。本文提出一种在平流层通道与热层通道同时存在情况下, 使用两者能量比修正的声源能量估计方法。

1 大气模型

1.1 大气传播通道

大气是一种分层非均匀介质, 在垂直尺度由低至高分分别为对流层、平流层、中间层和热层。平面声波在均匀介质中沿直线传播, 而在分层非均匀介质中受到介质参数分布 (如声速等) 的影响发生折射而呈曲线传播。通过射线声学的研究, 声波在非均匀介质中的传播轨迹向声速较小的区域弯曲^[6]。

在不同大气分层中, 温度随高度的变化趋势不同, 如图 1 所示。由于声速与温度线性相关, 则声速随高度的变化与温度的变化趋势一致。在运动分层

大气中, 水平风对声波的传播产生影响, 通常使用 $c_{\text{eff}} = c + v$ 作为静止分层大气中的等效声速, 其中 c_{eff} 为有效声速, c 为静止声速, v 为水平风在传播方向分量, 单位均为 m/s。在中纬度地区, 大气中水平风速随四季变化, 导致不同季节有效声速随高度分布存在差异。在分层大气中, 假设初始声波为地面附近水平声波, 则其在大气中传播的轨迹称为声波传播通道。通常使用经验大气模型获取有效声速随高度的分布, 其中声速可通过 NRLMSISE-00 模型获取的温度计算获得, 水平风速可通过 HWM14 模型获取^[7-8]。在图 1 中, 可以观察到, 在夏季时, 平流层顶存在的极大值小于地面有效声速 $c_{\text{eff},0}$, 根据传播通道存在判据^[9], 在地面和平流层顶之间不存在声波传播通道; 在 85 km 以上的热层中必然存在大于地面有效声速 $c_{\text{eff},0}$ 的高度, 则在地面和热层之间存在声波传播通道, 记为热层通道。在冬季时, 平流层顶存在的极大值大于地面有效声速 $c_{\text{eff},0}$, 则在地面和平流层顶之间存在声波传播通道, 记为平流层通道, 而热层通道依旧存在。

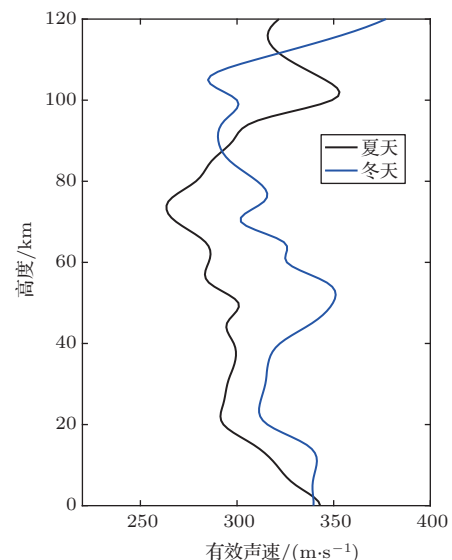


图1 冬季与夏季北京地区有效声速随高度分布对比
Fig. 1 The profile of effective sound speed at Beijing in summer and winter

假设地面附近存在一个各项同性的爆炸声源, 则初始声波存在于竖直平面的各个方向。通过射线追踪方法^[10]模拟不同初始俯仰角下的声波传播轨迹 (如图 2 所示), 可以观察到平流层通道与热层通道的存在状况。

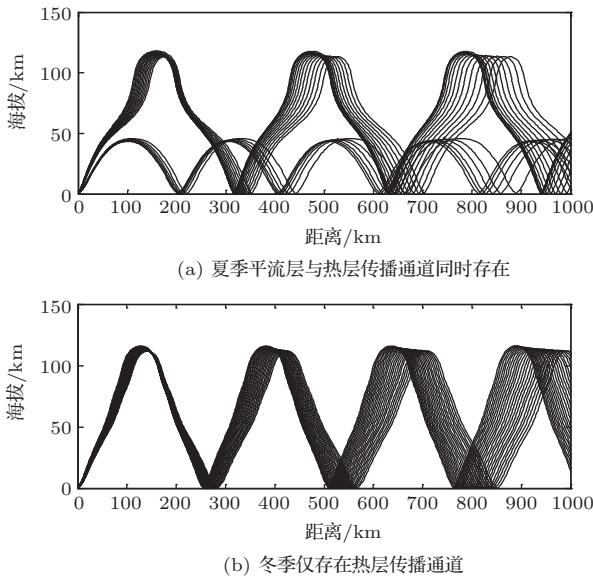


图2 声波在大气中传播的平流层通道与热层通道
Fig. 2 The troposphere tube and thermosphere tube in atmosphere

在图2中可以观察到显著的地面接收声影区,在300 km范围内声影区的影响较大,而更远的距离的地面接收信号幅度主要受到传播通道类型的影响。

1.2 不同传播通道大气对声波的吸收

声波在大气中传播时,除了由球面传播与传播路径长度导致的能量密度衰减,介质对声波的吸收也会造成声波能量的衰减^[11]。大气对声波能量的吸收主要可以分为“经典吸收”和“弛豫吸收”。“经典吸收”来自声波振动引起大气分子振动而产生的分子间内摩擦,同时大气局部受压升温导致温差的产生,导热过程可等同于将声波能量转化为大气分子的无规则热运动^[12]。“弛豫吸收”来自声波振动能量转化为大气分子双原子结构中分子内的转动与振动的过程,分子平动能量的减少导致了声波能量的衰减^[13]。

根据高海拔次声吸收模型,在图3中可以展示海拔0~160 km范围内大气对0.1 Hz次声信号的吸声系数。振动吸收在海拔0~100 km范围内为主要吸收方式,经典吸收与转动吸收在80 km高度以上逐渐增加为声波能量的主要吸收方式,并随高度快速增加。总吸收系数在100 km以下维持在 10^{-3} dB/km以下,而在100~120 km之间增加了两个数量级。

对于平流层通道和热层通道两种传播方式在大气中的声吸收,通过平流层通道传播的声波在水平传播1000 km距离处的声吸收小于5 dB,而通过热层通道传播的声波在水平传播相同距离时的声吸收大于40 dB。次声在大气中传播的声道类型对于接收点信号幅度有决定性影响,当声波传播方向为顺风方向,则声道类型中包含平流层通道,接收到的信号幅度相对较大;当声波传播方向为逆风方向,则声道类型主要为热层通道,接收到的信号幅度相对较小。因此使用远距离接收次声幅度进行声源能量估计需要考虑大气通道的影响。

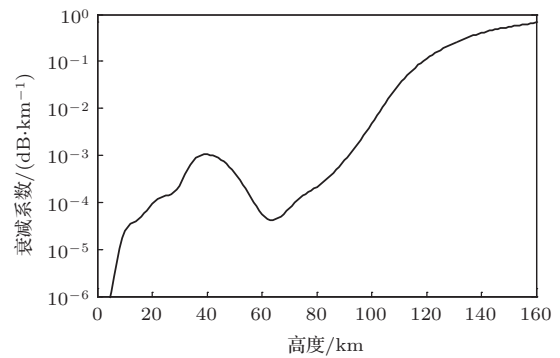


图3 声波在大气中的吸收

Fig. 3 The absorption of sound wave in atmosphere

2 基于大气声传播通道的声源能量估计方法

对于声波在大气中传播的能量变化特性,使用非线性渐进方程(Nonlinear progressive equation, NPE)进行仿真分析。由于声波在大气中的传播受大气流体特性的影响,因此将介质黏度项添加至声压方程组中,并将声压展开至二阶^[14]:

$$\begin{cases} \rho \left[\frac{v}{\partial t} + (v \cdot \nabla)v \right] \\ = -\nabla P + \left(\eta + \frac{4}{3}\mu \right) \nabla(\nabla \cdot v) - \eta \nabla \times \nabla \times v, \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0, \\ P = c^2 \rho' + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 P}{\partial \rho^2} \right)_s \rho'^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_s s', \end{cases} \quad (1)$$

其中, P 为声压, ρ 为大气密度, s 为热力学中的熵, η 为体积黏度, μ 为剪切黏度。相对于抛物方程等声场仿真方法,NPE对绝热方程的展开保留二阶项,以考虑声波在大气中传播的非线性效应。将

$$\begin{cases} \left(\frac{\partial^2 P}{\partial \rho^2}\right)_s = 2(\beta - 1) \frac{c^2}{\rho_0}, \\ \left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_\rho s' = \kappa \left(\frac{1}{C_v} - \frac{1}{C_p}\right) \nabla \cdot V, \end{cases} \quad (2)$$

代入方程组(1)中物态方程,得到方程

$$\begin{aligned} & (D_t - c_0 \partial_x)^2 \\ & = \partial_x^2 (c_0 + c_1)^2 + \left(\rho' + \beta \frac{\rho'^2}{\rho_0}\right) (\partial_y^2 + \partial_z^2) \\ & \quad \times \left[(c_0 + c_1)^2 \left(\rho' + (\beta - 1) \frac{\rho'^2}{\rho_0}\right) \right] \\ & \quad - \xi \cdot \nabla^2 (\partial_x (c_0 + c_1) \rho'), \end{aligned} \quad (3)$$

其中,热黏滞系数 ξ 为

$$\xi = \rho_0^{-1} \left[\kappa \left(\frac{1}{C_v} - \frac{1}{C_p}\right) + \left(\eta + \frac{4}{3}\mu\right) \right], \quad (4)$$

其中, κ 为热传导系数, C_v 为定容比热, C_p 为定压比热。热黏滞项的计算主要估计了经典衰减对于声波在大气中传播吸收量的贡献。

将方程(3)展开后,忽略高阶小量后可化简得到NPE在笛卡尔坐标下的标准形式:

$$\begin{aligned} & D_t R + \frac{\partial}{\partial x} \left(c_1 R + \frac{c_0}{2} \beta R^2 \right) - \frac{1}{2} \xi \partial_x^2 R \\ & + \frac{c_0}{2} \int_{x_f}^x (\partial_y^2 + \partial_z^2) R dx = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $D_t = \partial_t + c_0 \partial_x$ 为运动框算子,使得计算域随着声波传播而运动, $R = \rho'/\rho_0$ 为归一化密度扰动, c_0 为静态大气中声速, c_1 为声速扰动, β 为非线性系数。实际处理中,由于大气各项参数呈层状分布,通常使用圆柱坐标系进行数值模拟^[15]:

$$\begin{aligned} & D_t R + \frac{c_0 R}{2} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial r} \left(c_1 R + \frac{c_0}{2} \beta R^2 \right) \\ & - \frac{1}{2} \xi \left(\frac{\partial^2 R}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial R}{\partial r} \right) + \frac{c_0}{2} \int_{x_f}^x \left(\frac{\partial^2 R}{\partial z^2} \right) dr = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

设定地面为刚性边界条件,使用完美匹配层^[16]将大气上边界处理为吸收边界条件,通过运动框滑动叠加计算出声源在设定传播方向随距离的能量损失分布。

对于公式(6)使用算子分裂法^[17]分解为4个步骤,并分别使用不同处理进行数值求解,其中,

$$D_t R = -\frac{c_0 R}{2} \frac{\partial}{\partial r} \quad (7)$$

为圆柱扩散效应项,使用Crank-Nicolson差分格式进行数值计算。圆柱扩散项对应传统声源能量估计

方法中随距离增加的衰减模型,其衰减模型为

$$P^B \sim W \cdot R^{-2}, \quad (8)$$

其中, W 为声源能量, R 为传播距离。为了研究统一规格声源下声压幅值与传播距离之间的关系,需要使用声源能量 W 规格化传播距离 R 。本文使用声源能量的相关量 $W^{0.5}$ 作为规格化因子,则传播距离 R 可以转化为比例距离 $Z = R/W^{0.5}$ ^[18]。则方程(8)可以化简为

$$P^B \sim Z^{-2}. \quad (9)$$

声波在大气中传播还受到各种大气特性参数的影响,其中

$$D_t R = -\frac{\partial}{\partial r} \left(c_1 R + \frac{c_0}{2} \beta R^2 \right) \quad (10)$$

为折射与非线性效应项,将此两项使用通量校正法^[19]进行数值计算以高效计算;

$$D_t R = -\frac{1}{2} \xi \left(\frac{\partial^2 R}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial R}{\partial r} \right) \quad (11)$$

为热黏滞吸收效应项^[20];

$$D_t R = -\frac{c_0}{2} \int_{r_f}^r \left(\frac{\partial^2 R}{\partial z^2} \right) dr \quad (12)$$

为衍射效应项,均使用Crank-Nicolson差分格式与Thomas算法结合求解。这些效应导致当接收传感器布设于平流层通道首次回到地面高度时的水平距离更远处时,声波在大气中通过不同传播通道的能量比例对于接收信号的幅度有影响。图2表明大气中各向同性点声源在不同俯仰角下通过不同的大气声道进行传播,而大气的垂直参数分布影响了声源释放能量通过平流层与热层通道传播的比例。则NPE方法模拟得到声源发生信号在大气中远距离传播时空间中传播损失的分布状况如图4所示。

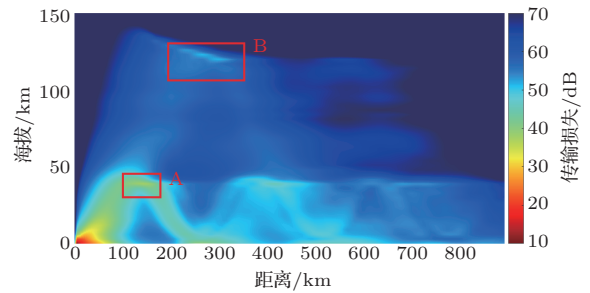


图4 使用NPE方法模拟大气中的声传播损失分布
Fig. 4 Distribution of the transportation loss of infrasound signal in atmosphere with NPE method

在图4中可以观察到明显的平流层通道与热层通道,当两种通道同时存在时,可以通过图中A、B区域内传播损失的均值分别作为平流层通道与热层通道损失能量的估计值,记为 TL_S 与 TL_T ,单位为dB。区域A为平流层通道与热层通道第一次分离后,第一个平流层通道轨迹顶部的区域,用以估计此通道的能量数值。区域B为分离后第一个热层通道轨迹顶部的区域,使用此区域估计热层通道能量的优点为,相比于在分离后在平流层顶高度附近的热层轨迹区域,此区域可以计及热层高度的水平风速对入射至热层的入射角的影响。由于 TL_S 与 TL_T 均为能量取对数后的值,因此使用 $TL = TL_S - TL_T$ 作为通道修正因子,用以修正大气参数对远距离接收到声压幅度的影响。

根据上述大气中的声波传播衰减模型与传统数据处理方法,结合衰减关系式(9),可以建立以下模型:

$$A \cdot P^B Z^2 10^{C \cdot TL} = 1. \quad (13)$$

对方程(13)两侧做对数处理得到:

$$\lg A + B \cdot \lg P + 2 \lg Z + C \cdot TL = 0, \quad (14)$$

其中, A 、 B 、 C 分别为待定半经验系数,通过实际测量数据拟合获得。

本文使用来自美国NTS实验与美国Sayarim实验的数据集,确定等式(14)中的声压幅度衰减模型系数,整理后获得以下声源能量估计方法:

$$W = 2.76 \times 10^{-6} \cdot P^{1.478} \cdot R^2 \cdot 10^{-0.0168 \cdot TL}. \quad (15)$$

3 实验验证

由于本方法仅适用于平流层通道与热层通道同时存在的声波传播模式,则使用数据集中满足条件的13条数据将LANL提出的声源能量估计方法与本文提出的大气声传播通道声源能量估计方法进行对比,LANL的估计方法为

$$W = 1.105 \times 10^{-5} \cdot P^{1.47} \cdot R^2 \cdot 10^{-0.0279 v_c}, \quad (16)$$

其中, v_c 为大气中声源位置50 km海拔处风速在次声传播方向的分量。两种估计方法的估计结果对比见表1,其中大气声传播通道能量估计方法记为REDT估计方法。

在表1中使用的误差估计方法为 $e = \left| \lg \frac{\hat{W}}{W} \right|$,该误差估计方法用于在估计误差较大的情况下进

行有效对比,排除单个大误差估计值对估计效果的过大影响。可以观察到REDT估计方法的平均误差量小于LANL估计方法。在13组实验数据中,有9组数据使用REDT估计方法的误差更小,1组数据估计误差相似,3组数据LANL估计方法误差较小,相对误差关系见图5。

表1 REDT估计方法与LANL估计法效果对比
Table 1 Comparison between REDT method and LANL method

序号	声源能量	LANL估计值	LANL估计误差	REDT估计值	REDT估计误差
1	24.4	27	0.0439	13.5	0.2561
2	0.2	5.3	1.4212	1.72	0.9355
3	42.7	188.3	0.6444	29	0.1679
4	0.019	0.0196	0.0135	0.0134	0.1516
5	0.019	0.0326	0.2345	0.0263	0.1412
6	0.096	0.582	0.7825	0.295	0.4880
7	0.096	0.705	0.8662	0.384	0.6015
8	0.096	0.130	0.1303	0.071	0.1310
9	0.096	0.087	0.0448	0.044	0.3368
10	0.0768	1.39	1.2587	0.467	0.7843
11	0.0768	1.33	1.2371	0.452	0.7693
12	0.0768	2.22	1.4603	1.07	1.1441
13	0.0768	0.91	1.0728	0.53	0.8369
平均误差量			0.6859		0.5616

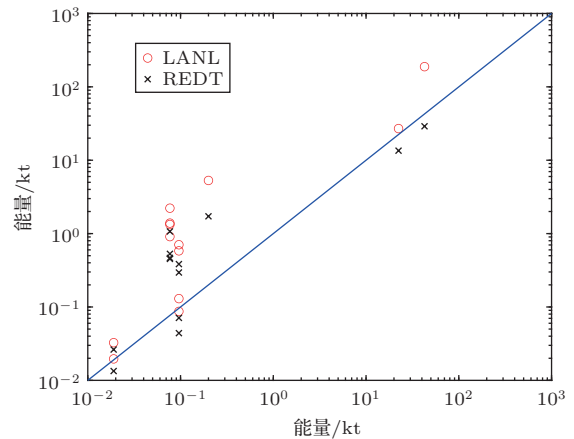


图5 LANL与大气通道估计结果对比

Fig. 5 Comparison between LANL estimation and REDT estimation

美国LANL声源能量估计方法使用声源位置50 km海拔处风速在次声传播方向的分量作为声源能量估计修正参数,简化了大气参数垂直分布对次

声在大气中传播的影响,忽略了有效声速剖面垂直结构中存在的其他极大值点对地面接收信号能量的影响。在上述实验中,均选取同时包含平流层传播通道与热层传播通道的接收次声信号,平流层顶水平风速为正值,则LANL估计方法修正因子预期修正效果为缩小估计值。在平流层与热层传播通道同时存在的条件下,本文提出的方法平均误差小于LANL声源能量估计方法。

4 结论

对于使用远距离次声信号的进行声源能量估计,传统方法使用直接大气参数修正进行估计,提高了估计精度。但是此修正参数并未充分使用大气参数剖面信息,且受大气模型精确度的影响很大,导致估计误差过大而不可用的情况产生。本文使用数值方法对声波在大气中传播的能量分布进行模拟,对于同时存在平流层与热层传播通道的状况,使用不同传播通道间的能量比例作为修正量,提出了基于此修正量的声源能量估计方法,结合传播过程中的大气参数垂直剖面进行声源能量估计,提高了声源能量估计精度。

参 考 文 献

- [1] Pierce A D, Posey J W. Theory of the excitation and propagation of Lamb's atmospheric edge mode from nuclear explosions[J]. *Geophysical Journal Royal Astronomical Society*, 1971, 26: 341-368.
- [2] Mckisic J M. Infrasound and the infrasonic monitoring of atmosphere nuclear explosions: PL-TR-97-2123[R]. *Tractor Applied Sciences Final Report to Phillips Laboratory*, 1997.
- [3] Clauter D A, Blandford R R. Capability modeling of the proposed international monitoring system 60-station infrasonic network[C]. *Proceedings of the Infrasound Workshop for CTBT Monitoring*, August 25-28, 1997, Santa Fe: 1998.
- [4] Whitaker R W. Infrasonic monitoring[C]. *Proceedings of the 17th Annual Seismic Research Symposium in Scottsdale*, September, 1995, AZ: 1995.
- [5] Stevens J L, Divnov I I, Adams D A, et al. Constraints on infrasound scaling and attenuation relations from Soviet explosion data[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2002, 159: 1046-1062.
- [6] Barry G. Ray tracing of acoustic waves in the upper atmosphere[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1963, 25(11): 621-629.
- [7] Picone J M, Hedin A E, Drob D P, et al. NRLMEISE-00 empirical model of the atmosphere: statistical comparisons and scientific issues[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2002, 107(A12): 1468.
- [8] Hedin A E, Spencer N W, Killeen T L. Empirical global model of upper thermosphere winds based on atmosphere and dynamics explorer satellite data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 93: 9959-9978.
- [9] 杨训仁, 陈宇. 大气声学[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 52.
- [10] Jones R M, Riley J P, Georges T M. A versatile three-dimensional Hamiltonian ray-tracing program for acoustic waves in the atmosphere above irregular terrain[R]. Boulder, Colorado: Wave Propagation Laboratory, 1986.
- [11] Bass H E, Sutherland L C, Piercy J, et al. Absorption of sound by the atmosphere//Mason W P, Thurston R N. *Physical acoustics*[M]. New York: Academic, 1984: 145-232.
- [12] Greenspan M. Rotational relaxation in nitrogen, oxygen and air[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1959, 31(2): 155-160.
- [13] 余师倩. 大气低频声波传播建模及可视化研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2012.
- [14] 钱祖文. 非线性声学[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 33-35.
- [15] McDonald B E. High-angle formulation for the nonlinear progressive-wave equation model[J]. *Wave Motion*, 2000, 31(2): 165-171.
- [16] Collino F. Perfectly matched absorbing layers for the paraxial equations[J]. *Computational Physics*, 1997, 131: 164-180.
- [17] 傅竹风, 胡友秋. 空间等离子体数值模拟[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1995: 103-104.
- [18] Kinney G F, Graham K J. *Explosive shocks in air*[M]. New York: Springer Science & Business Media, 2013.
- [19] Vedy E. Simulation of flows in porous media with a flux corrected transport algorithm[J]. *Noise Control Engineering Journal*, 2002, 50(6): 211-217.
- [20] Too G P, Ginsberg J G. Nonlinear progressive wave equation model for transient and steady-state sound beams[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1991, 91(1): 59-66.