

刘艺璇, 余俊辉, 董晨龙, 等. 基于声学层析成像的温度场和流速场重构[J]. 智能计算机与应用, 2024, 14(4): 123-127.
DOI: 10.20169/j.issn.2095-2163.240418

基于声学层析成像的温度场和流速场重构

刘艺璇¹, 余俊辉^{1,2}, 董晨龙^{1,2}, 徐涛², 王海麟², 周新志¹

(1 四川大学 电子信息学院智能控制研究所, 成都 610065;

2 中国核动力研究设计院, 核反应堆系统设计技术重点实验室, 成都 610213)

摘要: 为有效重构三维管道内液体的温度场和流速场, 提出了一种超声飞渡时间计算表征, 并基于此求解温度场和流速场反演模型。同时考虑温度梯度导致的声线弯曲效应, 采用正四面体前向展开法, 追踪超声弯曲路径; 开展“华龙一号”反应堆主管道冷却剂温度场和流速场重构实验。实验结果表明, 所提方法能有效重构管道冷却剂温度场和流速场, 且考虑弯曲效应能进一步提高重构精度。

关键词: 声学层析成像; 耦合场; 温度场重构; 流速场重构; 弯曲效应

中图分类号: TK311

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2024)04-0123-05

Reconstruction of temperature and flow velocity fields based on acoustic tomography

LIU Yixuan¹, YU Junhui^{1,2}, DONG Chenlong^{1,2}, XU Tao², WANG Hailin², ZHOU Xinzhil¹

(1 College of Electronics and Information, Sichuan University, Intelligent Control Institute, Chengdu 610065, China;

2 Key Laboratory of Reactor System Design Technology, Nuclear Power Institute of China,
Chengdu 610213, China)

Abstract: In order to effectively reconstruct the temperature and flow velocity fields of the liquid in a three-dimensional pipeline, a formula of the sound wave travel-time is proposed, and the temperature and flow velocity fields are solved based on it. At the same time, the sound wave refraction effect caused by the temperature gradient is considered to track the sound wave bending path. Experiments are carried out to reconstruct the temperature and flow velocity fields in the main pipe of the HPR1000 reactor. It is verified that the proposed method can effectively reconstruct temperature and flow velocity fields in the pipeline, and the accuracy of the reconstruction can be further improved by considering the bending effect.

Key words: acoustic tomography; coupled fields; temperature field reconstruction; flow field reconstruction; refraction effect

0 引言

核反应堆一回路冷却剂的温度和流量可直接反应堆芯核能功率, 准确获得管道冷却剂温度和流量, 对于核反应堆功率控制和安全十分重要。由于冷却剂流经不同通道汇入一回路, 存在明显的温度分层和流速紊乱现象, 因此现有点式测温 and 差压测流方法难以准确反映冷却剂的温度和流量。

声学测量作为一种非接触的测量方式, 具有响

应速度快、安全性高、布置灵活等特点, 该技术已应用于许多领域, 如火焰测温^[1]、大气测温测速^[2]和极端环境测温^[3]等。现有超声测量应用中, 主要集中在单参数领域。在温度场的测量与重构中, Jia 等^[4]利用马尔可夫径向基函数 (Markov Radical Basis Function, Markov-RBF) 在最小二乘法 (Least Squares Method, LSM) 的基础上进行插值, 克服了温度场边缘的温度信息损失, 有效提高了温度场的重构精度。Shen 等^[5]利用超声换能器构建三维温度

基金项目: 核反应堆系统设计技术重点实验室基金资助 (KFKT-05-FW-HT-20220019); 中国核动力研究设计院联合基金资助 (SCU&NPIC-LHCX-20)。

作者简介: 刘艺璇 (1999-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 温度场和流速场的测量与重建; 余俊辉 (1981-), 男, 博士研究生, 研究员, 主要研究方向: 反应堆过程测量; 董晨龙 (1995-), 男, 博士研究生, 研究员, 主要研究方向: 反应堆过程测量; 徐涛 (1991-), 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向: 反应堆过程测量; 王海麟 (1998-), 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向: 反应堆过程测量。

通讯作者: 周新志 (1966-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 智能计算与控制, 水利信息化。Email: xz.zhou@scu.edu.cn

收稿日期: 2023-11-22

分布,重构4种温度场分析验证,能够实时监测瞬态温度分布。Zhou等^[6]为解决传统声热法算法对温度场边缘重构精度低的问题,提出了一种基于反射型径向基函数与正交三角分解相结合的温度场重构算法。实验结果表明,该算法能有效提高温度场的平均和边缘信息重建精度。

当被测区域温度梯度较大时,声线会产生明显的弯曲效应,导致重构的温度场产生极大误差。颜华等^[7]采用三角形前向展开法追踪声线,可明显提高温度场重建精度。Kong等^[8]通过求解费马/变分原理微分方程,对具有折射效应的曲线进行了数值计算,结果表明声波向高温区弯曲,重建更优的温度场。之后,该研究人员进一步在炉膛三维空间考虑弯曲效应,并提出了一种径向基函数近似多项式^[9]重建温度场并实现了有效重建。

在流速场的重构中,Barth等^[10]介绍了一种能够在指定测量区域内解析二维流场的算法,并对不同的流场进行了模拟,证明了该方法能有效解析流场的速度和方向特征。Li等^[11]研究了一种用于监测涡流风速剖面的声学层析成像系统,实现了对室外移动涡旋风场的监测。针对同时测温测流展开的研究,大多数是在二维气体环境中。Jovanovic等^[12]从声音射线的到达角度,推导出所得场的横向分量,提出一种重建二维温度场和流场的新技术,在精度和时间代价方面表现出良好的性能。Zhang等^[13]采用RBF来恢复零空间分量,将交替方向乘法器方法(Alternating Direction Method of Multipliers, ADMM)用于解决逆声层析成像任务,能精确地重建非对称温度场和双涡速度场,之后^[14]进一步研究通过消除正则化参数,将反问题转化为具有4个目标的多目标优化,减轻病态问题,用于重建任意非均匀炉内温度场和流速场。

目前,针对三维管道液体环境研究较少,因此本文聚焦非均匀温度场与紊乱流场耦合的液体环境,优化声波飞渡时间计算公式,构建待测区域的声线弯曲路径分布模型,提高核反应堆热管段超声测温测流精度。

1 声学测量技术

基于IF97公式^[15],对核反应堆热管段冷却剂中温度与超声声速的关系进行拟合,得到函数关系式如下:

$$c = -0.0145T^2 + 10.6844T - 475.9474 \quad (1)$$

其中, c 是声速, T 是温度。测量到声速后,通

过式(1),可以反演确定温度值。

在流热耦合场中,声信号的传播速度 c 会与流速在传播方向上的流速分量 $\vec{v}(x,y,z) \cdot \vec{n}_{AB}$ 叠加,使得超声信号上下游传播时间产生差异。 A 、 B 两点之间的上游传播时间 t_{AB} 表示为

$$t_{AB} = \int_{l_{AB}} \frac{1}{c(x,y,z) + \vec{v}(x,y,z) \cdot \vec{n}_{AB}} dl \quad (2)$$

其中, \vec{n}_{AB} 为 A 、 B 两点之间的单位方向向量。通过式(2)可以得到流热耦合场下声波路径飞渡时间。

1.1 温度场反演模型

考虑声速远大于流速,则由式(2)可得到第 k 条路径超声飞渡时间与声速之间的关系:

$$t_k = \frac{t_{AB} + t_{BA}}{2} = \int_{l_k} \frac{1}{c(x,y,z)} dl_k = \int_{l_k} a(x,y,z) dl_k \quad (3)$$

式中: $a(x,y,z)$ 表示声速倒数分布函数, l_k 为特定声波传播路径, t_k 为该路径对应的声波飞行时间理论值。

超声换能器两两间共产生 I 条有效超声路径,将管道划分为 J 个子区域。将式(3)中 $a(x,y,z)$ 用 J 个径向基函数的线性组合表示,如式(4)所示:

$$t_k = \sum_{j=1}^J \varepsilon_j \int_{l_k} \phi_j(x,y,z) dl_k = \sum_{j=1}^J A_{kj} \varepsilon_j \quad (4)$$

式中: $\phi_j(x,y,z)$ 为径向基函数, ε_j 为待定系数。

当超声波收发阵列位置确定后,给定径向基函数及其形状参数,计算每条声波路径上的飞渡时间矩阵 \mathbf{t} ,便可根据式(4)确定参数向量 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 。根据式(4)求得声速倒数分布 $a(x,y,z)$,将其带入式(1)中,即可重构出温度场。

1.2 流速场反演模型

由式(2)可以得到超声波飞渡时间与流速之间的关系为:

$$\Delta t_k = \frac{t_{BA} - t_{AB}}{2} = \int_{l_k} \frac{\vec{v}(x,y,z) \cdot \vec{n}_{AB}}{c^2(x,y,z)} dl_k = \int_{l_k} \frac{v(x,y,z) \cos \alpha_k}{c^2(x,y,z)} dl_k = \cos \alpha_k \int_{l_k} a'(x,y,z) dl_k \quad (5)$$

其中, $v(x,y,z)$ 表示沿 z 正轴方向流速大小; α_k 表示传播路径方向与 z 正轴的夹角; $a'(x,y,z) = \frac{v(x,y,z)}{c^2(x,y,z)}$ 。

与重构温度场同理,通过径向基函数可计算得到 $a'(x,y,z)$,代入重构的温度场 $c(x,y,z)$,得到流速的分布函数,实现流速场的重构。

2 弯曲效应

核反应堆一回路具有非均匀温度场与复杂流速场耦合的特点,会导致声线存在弯曲效应,影响重构的精度。由于本文流速在 10 m/s 左右,相对于声速影响较小,因此忽略流速场导致的弯曲现象。采用正四面体前向展开法,以几何声学为基础,对管道中的超声路径进行追踪。

在追踪声线路径的前方,取一个正四面体,以入射点 A 为顶点,沿入射方向 \vec{A} 作高 AH ,并计算其他 3 个顶点坐标。当该正四面体足够小时,可将其近似为线性声场,表示为

$$c(x, y, z) = c_x x + c_y y + c_z z + c_0 \quad (6)$$

由正四面体 4 个顶点处的声速,确定这个线性声场的 4 个参数 c_x, c_y, c_z, c_0 。在线性声场中,超声路径为圆弧曲线,找到圆弧曲线所在平面,利用三角形前向展开法^[16],求取该平面内的圆弧曲线方程。

线性声场的等声速面为法线向量 \vec{n}_c, \vec{n}_c 和 \vec{A} 所决定的平面,就是声线轨迹所在平面。旋转坐标系,将声线轨迹所在平面旋转新的 $x' o' y'$ 平面,在该新平面上通过三角形前向展开法求解弯曲路径,并将求解结果旋转回原三维坐标系,不断迭代计算到达终点后,便可获得声线的弯曲路径。

3 仿真实验

本文采用有限元数值仿真方法,建立了“华龙一号”反应堆与上腔室相连的 3 个热管段的仿真实验。由于篇幅有限,以管道一为例展开介绍。截取管道一数据为:管道半径 0.3 m,长 1.5 m。

管道一温度场信息如图 1(a)所示,出现了明显的温度分层现象,温差达 12 K;流速场信息如图 1(b)所示,流速的大小主要集中在 8~12 m/s 的范围内,且中间流速快,靠近管壁周围的流速较小。

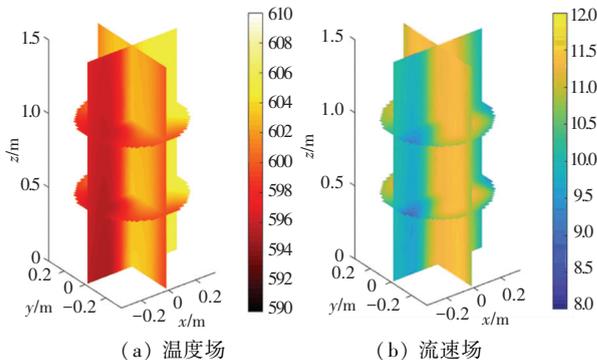
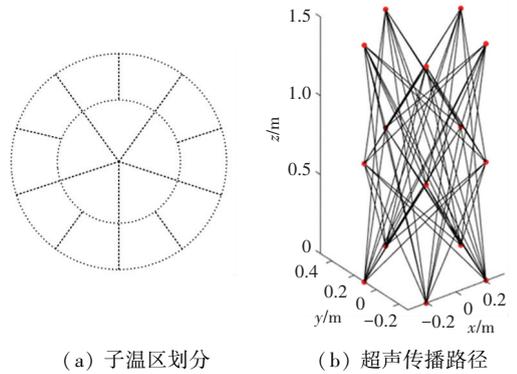


图1 原始温度场和流速场

Fig. 1 Original temperature and flow velocity field

3.1 仿真实验设计

图 2 显示了测量区域超声换能器的布局 and 子温区的划分。底面圆半径 0.3 m,圆柱高 1.5 m,底面圆中心点位于坐标原点。沿着 z 轴正方向每隔 0.5 m 取一个水平平面,即分别在 z 为 0、0.5、1、1.5 m 平面进行划分,均分为三层,每层划分为 15 个子温区(用黑色虚线划分),如图 2(a)所示。每层平面边界均匀布置 5 个换能器,超声传播路径有 60 条,如图 2(b)所示。



(a) 子温区分 (b) 超声传播路径

图2 超声换能器的布局和子温区示意图

Fig. 2 Layout of transceivers and division of area

采用正四面体前向展开法追踪声线,通过打靶法确定入射角,获取超声弯曲路径。采用多重二次函数(Multi-Quadrics, MQ)进行温度场和流速场重构,通过数值实验确定形状参数为 1 000。

将声波传播路径分为 k 段彼此相连的微元段,每段的传播时间可表示为

$$\Delta t_i \approx \frac{2\sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2}}{u(x_i, y_i, z_i) + u(x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1})}, \quad i = 1, 2, \dots, k - 1 \quad (7)$$

其中, $u(x, y, z)$ 是该点声速和流速分量叠加的实际速度; (x_i, y_i, z_i) 是当前位置坐标; $(x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1})$ 是下一位置坐标。每段的传播时间相加即为整条传播路径的传播时间,将每条传播路径的传播时间分别代入式(3)和式(5),可得到顺逆流平均时间和时间差,进而求解重建温度场和流速场。

3.2 路径分布仿真结果

在热管段冷却剂环境中,由式(1)可知,当温度高于 368.427 6 K 后,呈现出温度越高,声速越小的现象。在仿真的“华龙一号”反应堆主管道一回路中,冷却剂的温度范围 580~610 K,因此当冷却剂温度越高,对应的声速越小。根据费马原理,路径的弯

曲尽可能地经过声速较快的区域时,因此声线会朝着低温区域弯曲。

管道一直线重构后的温度场如图3(a)所示,温度范围595.9~605.6 K,且沿x轴从小到大,温度逐渐升高,分布趋势与原始温度场接近。重构的流速场如图3(b)所示,虽然流速没有呈现边缘慢,中间快的趋势,但是整体在10 m/s左右,接近原始流速场。因此,认为直线重构的温度场和流速场的误差在可接受范围内,基于此获取弯曲路径。

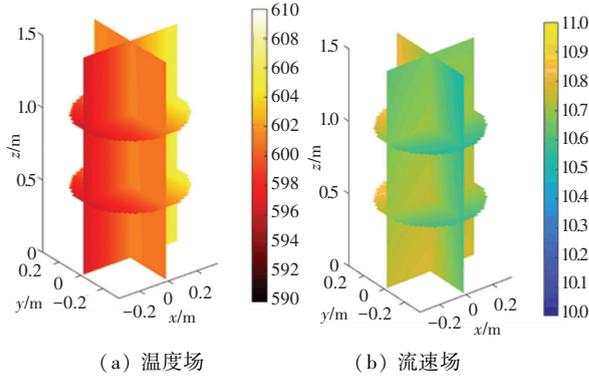


图3 直线重构的温度场和流速场结果

Fig. 3 Reconstruction of the temperature and flow velocity field based on straight lines

3.3 考虑弯曲效应温度场和流速场重构结果

基于直线重构下的流热耦合场,追踪弯曲路径,如图4所示。可以看到,路径都往温度低的区域弯曲,符合温度梯度导致的弯曲效应。

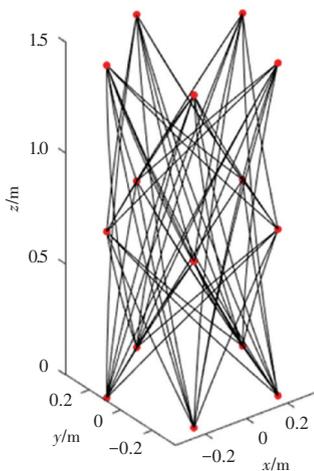
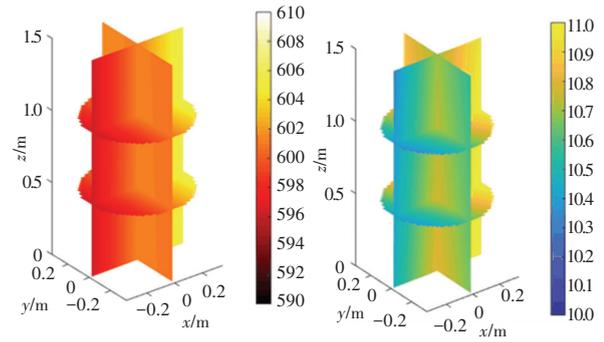


图4 弯曲路径

Fig. 4 Bending path distributions

图5展示了基于弯曲路径重构的温度场和流速场。可以看到,重构温度场沿x轴从小到大呈现温度从低到高的分层现象,流速场整体分布在10 m/s左右,能重构出原始温度场和流速场的变化趋势和分布。



(a) 温度场

(b) 流速场

图5 弯曲路径重构的温度场和流速场结果

Fig. 5 Reconstruction of the temperature and flow velocity field based on curved paths

3.4 误差分析

为了准确评估重构结果,本文采用最大绝对误差 E_{\max} 、最小绝对误差 E_{\min} 、平均绝对误差 E_{mean} 、和均方根误差 E_{RMSE} 作为评价指标,定义如下:

$$E_{\max} = \max |TR_i - T_i| \quad (8)$$

$$E_{\min} = \min |TR_i - T_i| \quad (9)$$

$$E_{\text{mean}} = \frac{\sum_{i=1}^n |TR_i - T_i|}{n} \quad (10)$$

$$E_{\text{RMSE}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (TR_i - T_i)^2}}{T_{\text{mean}}} \times 100\% \quad (11)$$

其中, n 为测量区域像素个数; T_i 为第 i 个像素中心点的原始温度值; TR_i 为第 i 个像素中心点的重构温度值; T_{mean} 为原平均温度。流速场评价指标同理。

对管道一的3个截面,采用不同声线追踪方法重构的温度场,分别计算评价指标的值,结果见表1和表2。可以看到,通过该反演模型能正确重构温度场和流速场,且考虑弯曲效应的重构结果,优于使用直线的重构结果。

表1 温度场重构误差

Table 1 Reconstruction errors for temperature fields				
	E_{\max} /K	E_{\min} /K	E_{mean} /K	E_{RMSE} /%
直线	3.522 5	6.108 0e-06	1.119 5	0.224 46
弯曲	3.578 1	8.195 8e-06	1.101 6	0.222 74

表2 流速场重构误差

Table 2 Reconstruction errors for flow velocity fields				
	E_{\max} / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	E_{\min} / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	E_{mean} / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	E_{RMSE} / %
直线	2.162 7	1.069 5e-05	0.470 2	5.231 9
弯曲	1.899 5	2.089 3e-06	0.452 7	5.007 0

4 结束语

针对核反应堆冷却剂温度分层和流态紊流特点,本文建立适用于流热耦合场超声路径飞渡时间的计算表征,并通过该表征求解温度场和流速场重构的反演模型,同时考虑温度梯度导致的声线弯曲效应,追踪超声弯曲路径。

基于飞渡时间计算表征和超声弯曲路径分布模型,开展重构“华龙一号”反应堆主管道冷却剂温度场和流速场重构实验。实验结果表明,所提方法能有效重构温度场和流速场,且考虑弯曲效应相对于直线重构,能进一步提高精度。

参考文献

- [1] SRINIVASAN K, SUNDARARAJAN T, NARAYANAN S, et al. Acoustic pyrometry in flames[J]. *Measurement*, 2013, 46(1): 315-323.
- [2] KOLOURI S, AZIMI-SADJADI M R, ZIEMANN A. A statistical-based approach for acoustic tomography of the atmosphere[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2014, 135(1): 104-114.
- [3] SKLIAR M. In-situ acoustic measurements of temperature profile in extreme environments[R]. Salt Lake City: University of Utah, 2015.
- [4] JIA R, XIONG Q. Two-dimensional temperature field distribution reconstruction based on least square method and radial basis function approximation[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017, 2017(10): 1-7.
- [5] SHEN X, CHEN H, SHIH T M, et al. Construction of three-dimensional temperature distribution using a network of ultrasonic transducers[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 12726.
- [6] ZHOU X, DONG C, ZHAO C, et al. Temperature - field reconstruction algorithm based on reflected sigmoidal radial basis function and QR decomposition[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 171: 114987.
- [7] 颜华,王善辉,刘丽钧,等. 一种考虑声线弯曲的温度场重建算法[J]. *声学学报*, 2014, 39(6): 705-713.
- [8] KONG Q, JIANG G, LIU Y. Research on temperature field reconstruction based on RBF approximation with polynomial reproduction considering the refraction effect of sound wave paths[J]. *Sound and Vibration*, 2018, 52(4): 1-12.
- [9] KONG Q, JIANG G, LIU Y, et al. 3D high-quality temperature-field reconstruction method in furnace based on acoustic tomography[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 179: 115693.
- [10] BARTH M, RAABE A, ARNOLD K, et al. Flow field detection using acoustic travel time tomography[J]. *Meteorologische Zeitschrift*, 2007, 16(4): 443-450.
- [11] LI H, TERADA H, YAMADA A. Real-time monitoring system of vortex wind field using coded acoustic wave signals between parallel array elements[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2014, 53(7S): 07KC18.1-07KC18.7.
- [12] JOVANOVIĆ I, SBAIZ L, VETTERLI M. Acoustic tomography method for measuring temperature and wind velocity[C]// *Proceedings of 2006 IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing*. IEEE, 2006. DOI: 10.1109/ICASSP.2006.1661175
- [13] ZHANG J, QI H, REN Y, et al. Acoustic tomography of temperature and velocity fields by using the radial basis function and alternating direction method of multipliers[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 188(1): 122660.
- [14] ZHANG J, QI H, WU J, et al. Numerical and experimental investigation of many-objective optimization for efficient temperature and velocity fields reconstruction via acoustic tomography[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2023, 193: 108536.
- [15] PowerPlant, Chemistry, Group. International association for the properties of water and steam[J]. *PowerPlant Chemistry: The Journal of All Power Plant Chemistry Areas*, 2014, 16(4): 250-252.
- [16] 王明吉,王瑞雪. 利用三角形前向展开法追踪温度梯度场中的声线路径[J]. *中国电机工程学报*, 2007, 232(5): 29-33.