

参数化温盐模型驱动的声速剖面 EOF 交互实验设计与 HarmonyOS 实现

林晓杰 黄佳鸿

广东创新科技职业学院 广东 东莞 523000

【摘要】：本文研究参数化声速剖面集合中的 EOF 截断重构问题，并将实验过程实现为 HarmonyOS 交互原型。模型以温度、盐度和深度为输入：在 0–2000 m、10 m 间隔的深度网格上，用平滑温跃层和盐度指数函数生成温盐剖面，再由 Mackenzie (1981) 九项式计算声速。固定随机种子 20260805 生成 1200 条剖面，按 840/180/180 划分训练集、验证集和测试集。EOF 模态只由训练集提取；含噪条件下在 $K=1-40$ 中以验证集平均 RMSE 最小者为推荐阶数，无噪声时选择第一个使验证集 RMSE 不超过 0.01 m/s 的 K 。

无噪声测试中，前 3 个模态累计解释训练集 94.68% 的方差； $K=3$ 和 $K=10$ 的测试集 RMSE 分别为 2.361 m/s 和 0.153 m/s。加入标准差为 0.5、1.0 和 2.0 m/s 的独立高斯噪声后，验证集推荐 K 分别为 15、12 和 10，对应测试集重构 RMSE 为 0.140、0.258 和 0.469 m/s。结果显示， K 增加可以降低当前模拟集合的截断误差，但噪声增强时保留过多高阶模态会削弱重构效果。HarmonyOS 端读取 Python 离线提取的均值剖面 and EOF 模态，并使用 ArkTS 完成在线剖面计算、噪声模拟和截断重构，支持物理参数调节、噪声模拟、EOF 重构和误差反馈。本文的结论限于给定参数范围、深度网格和噪声设定，不等同于真实海域声速剖面反演。

【关键词】：声速剖面；经验正交函数；截断重构；参数化模拟；HarmonyOS

DOI:10.12417/3041-0630.26.12.018

1 引言

声速剖面是海洋声传播计算中的基础输入。温度、盐度和深度共同影响声速，海洋水文观测中的温度、盐度与深度记录具有统一的观测规范^[4-5]，温跃层位置和厚度会改变剖面的梯度与低速区。本文用 Mackenzie 九项式把温盐剖面换算为声速^[1]。对于一组剖面，EOF 可以把剖面变化表示为少数正交模态的线性组合^[2]；模态数过少会留下截断误差，保留较多高阶模态又可能把输入噪声带入重构。有限样本下，EOF 模态本身还存在采样误差和稳定性问题^[3]。

已有 EOF 研究常以观测剖面或反演问题为对象；本文不处理声学到达时间反演，也不把模拟数据解释为某一真实海域。本文关注一个较窄、但可复现的问题：在物理参数受控的声速剖面集合中，EOF 模态数、噪声水平与重构误差如何变化，以及这些关系能否在移动端被直接观察。近期声速剖面重构研究还涉及真实观测资料 and 全深度外推，但这些工作与本文的参数化模拟实验并不等价。

本文完成三项工作。第一，建立温盐参数驱动的声速剖面生成流程，并固定随机种子和数据划分。第二，比较不同 K 在无噪声和独立高斯噪声下的重构误差，分析 EOF 系数与物理参数的相关性。第三，将训练得到的均值剖面 and EOF 模态封装为 JSON 模型，在 HarmonyOS 中实现在线剖面计算与交互展示。本文的贡献属于实验组织和系统实现，不是新的 EOF 分解算法。

2 模型与方法

(1) 参数化温盐剖面：为构造可控样本，本文自行设定一组参数化温盐函数。它们不是海洋状态方程，也不是由实测剖面拟合得到的区域模型。本文所称“物理机制驱动”仅指温盐参数通过经验声速公式参与剖面生成，不表示已由实测资料验证。

$$T(z)=T_d+(T_s-T_d)/[1+\exp((z-z_c)/h)]。$$

其中 T_s 和 T_d 分别为表层、深层温度， z_c 为温跃层中心， h 为跃层尺度。盐度剖面写为：

$$S(z)=S_s+(S_d-S_s)[1-\exp(-z/h_s)]。$$

S_s 、 S_d 为表层和深层盐度， h_s 为盐度变化尺度。7 个参数分别在预设区间内独立均匀抽样： T_s 为 18–30°C， T_d 为 2–6°C， S_s 为 33–36 PSU， S_d 为 34.5–35.5 PSU， z_c 为 100–500 m， h 为 20–100 m， h_s 为 300–1000 m。该构造只为产生形态可控的样本；独立均匀分布和函数形式本身都是实验假设，不描述特定海域的真实联合分布。

(2) 声速计算：在参数化温盐剖面上，声速采用 Mackenzie (1981) 九项经验公式计算^[1]：

$$c=1448.96+4.591T-0.05304T^2+0.0002374T^3+1.34(S-35)+0.0163z+1.675\times10^{-7}z^2-0.01025T(S-35)-7.139\times10^{-13}Tz^3。$$

式中 T 单位为°C， S 单位为 PSU， z 按米计， c 单位为 m/s。

本文所有模拟结果使用同一公式，避免在模型生成和重构评价中混用声速计算方法。

(3) EOF 截断重构：EOF 部分采用标准 PCA/EOF 重构流程^[2]。设训练剖面矩阵为 X ，平均剖面为 μ 。脚本对中心化矩阵 $Xc=X-\mu$ 执行奇异值分解，右奇异向量构成正交模态 ϕ_k 。对输入剖面 x ，系数 $ak=(x-\mu)^T\phi_k$ ， K 阶重构为 $\hat{x}K=\mu+\sum(k=1\dots K)ak\phi_k$ 。训练集只用于估计 μ 和 ϕ_k ；验证集用于选择 K ，测试集只报告最终误差。评价指标采用 $RMSE=\sqrt{\text{mean}((\hat{x}K-x)^2)}$ 。

3 实验设计

(1) 数据集与流程：固定随机种子 20260805 生成 1200 条模拟剖面，其中 840 条用于训练、180 条用于验证、180 条用于测试。训练集提取 EOF 模态后，对每个候选 K 计算验证集重构误差；选择验证误差最小的 K ，再在测试集上报告结果。该流程避免用测试集反复调参。

项目	设置
深度网格	0 - 2000 m，间隔 10 m，201 点
样本数	1200 条参数化模拟剖面
数据划分	训练/验证/测试=840/180/180
噪声	$\sigma=0、0.5、1.0、2.0$ m/s 独立高斯噪声
指标	累计方差贡献率、RMSE、最大绝对误差

(2) 实验组：实验一考察无噪声条件下 K 从低阶到高阶的重构变化。实验二对每个噪声水平重复 20 次：验证集噪声使用随机种子 20260806，测试集噪声使用 20260807；对 $\sigma>0$ 的噪声条件，选择验证集平均 RMSE 最小的 K ；对 $\sigma=0$ ，选择验证集 RMSE 首次低于 0.01 m/s 的最小 K 。实验三计算训练集前 3 个 EOF 系数与 7 个生成参数的 Pearson 相关系数。真实 Argo 外部验证尚未完成，不进入结果。

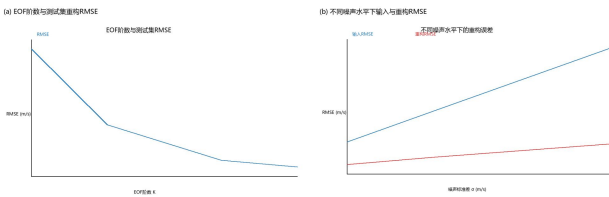


图 1 Python 数值实验结果：（a）不同 EOF 阶数 K 下的测试集重构 RMSE；（b）不同噪声水平下含噪输入与 EOF 重构相对于干净真值的 RMSE。图中曲线为离线实验统计结果。

4 HarmonyOS 交互实现

论文实验以 Python 脚本为数值来源，本文开发的 HarmonyOS 原型应用 SSPEOFLab 是结果的交互展示端。Python 生成的 model_data.json 被原样复制到工程 rawfile 目录；两份文件的 SHA-256 一致。文件包含 201 点深度网格、训练均

值、40 个 EOF 模态、累计方差贡献率和离线实验得到的推荐 K 。HarmonyOS 端不训练 EOF，而是读取该模型，用 ArkTS 重新计算声速、叠加一次随机噪声、完成模态投影和截断重构。

App 提供“物理机制”和“EOF 重构”两个页面状态。物理机制页面允许调节表层温度、表层盐度、温跃层中心和尺度；EOF 页面允许选择 $\sigma=0、0.5、1.0$ 或 2.0 m/s 以及 $K=1-20$ ，显示真值、含噪剖面、重构剖面、输入 RMSE、重构 RMSE 和累计贡献率。界面中的单次 RMSE 会随随机噪声刷新而变化，不能替代论文表格中的 20 次平均值；推荐 K 则直接读取离线实验写入的模型文件。实际运行界面如图 2 所示。图 1 给出 Python 离线实验的总体统计关系，图 2 则展示同一参数化模型和 EOF 模型在 HarmonyOS 端的可交互复现；两者的数值评价口径不同，图 2 中的 RMSE 是一次随机噪声刷新得到的单次值。实验一使用表层温度 24.0°C 、表层盐度 35.0 PSU、温跃层中心 250 m 和温跃层尺度 50 m，界面计算的最小声速为 1475.18 m/s，对应深度为 480 m。实验二使用 $\sigma=1.0$ m/s、 $K=12$ ；本次随机噪声下输入 RMSE 为 1.049 m/s，重构 RMSE 为 0.273 m/s。该值是单次交互结果，论文表中的 0.258 m/s 是 20 次重复实验的平均值。

阶段材料另行生成了固定跨平台样例，参考输入 RMSE 为 0.5311643209757724 m/s， $K=12$ 时参考重构 RMSE 为 0.2948281977662288 m/s。但当前 SSPEOFLab 主工程的 rawfile 目录只包含 model_data.json，页面源码中也未找到固定样例读取或“一致性验证”按钮。因此，这组参考值暂不作为 HarmonyOS 验证结果；论文只报告现有模型接入和交互计算，待固定样例真正合入工程并运行后再补误差表。



图 2 HarmonyOS 原型应用 SSPEOFLab 在 DevEco Studio 预览器中的交互界面：（a）物理参数调节与声速剖面生成；（b）含噪观测的 EOF 截断重构与单次误差反馈。该图展示代表性单次交互状态，不替代图 1 的重复实验统计结果。

5 结果与讨论

(1) 模态压缩与无噪声误差：训练集前 3 个 EOF 模态累计解释 94.68% 的方差，说明在当前参数范围内，剖面变化主要集中在少数方向。该比例反映的是样本集合的协方差结构，不

是 EOF3 对所有海域剖面的普适结论。

K	累计方差贡献率	测试 RMSE(m/s)
3	0.9468	2.361
5	0.9917	0.943
8	0.9993	0.275
10	0.9998	0.153

K=3 时测试集 RMSE 为 2.361 m/s, 增加到 K=10 后降至 0.153 m/s。低阶重构保留了剖面的主体变化, 但跃层附近的细节仍未被充分表达; 随着模态增加, 截断误差下降。K=20 时无噪声测试误差进一步接近 0, 但这只说明当前模拟集合可以被更多模态精确表示, 并不代表实际应用中应无条件提高 K。

(2) 噪声条件下的 K 选择

σ (m/s)	推荐 K	含噪输入 RMSE	重构 RMSE	误差降低率
0.5	15	0.500	0.140	72.02%
1.0	12	1.001	0.258	74.23%
2.0	10	2.000	0.469	76.53%

噪声标准差从 0.5 增至 2.0 m/s 时, 验证集推荐 K 由 15 降至 10。较高阶模态携带更多剖面细节, 也更容易响应输入噪声; 在当前设定下, 减少 K 反而得到更低的验证误差。重构 RMSE 仍随噪声增大而上升, 说明 EOF 截断只能抑制部分噪声, 不能恢复噪声已经掩盖的细节。

(3) 参数相关性: EOF1 与温跃层中心的相关系数约为 0.927, EOF2 与深层温度的相关系数约为 0.959, EOF3 与表层温度的相关系数约为 -0.485。该相关关系仅表示当前参数化数据集中的线性统计关联, 不表示 EOF 模态与物理参数之间存在唯一因果对应关系。跃层位置和深层背景温度是当前样本集中影响主要模态的因素。但这种解释依赖参数的抽样范围和分布; 改变参数相关结构、深度网格或声速公式后, 模态排序和相关系数都可能变化。

(4) 研究边界: 本文结果来自参数化模拟数据, 尚未使用真实 Argo 剖面进行外部测试。噪声实验采用独立高斯模型, 尚未覆盖深度相关噪声、系统偏差和随机缺测。HarmonyOS

部分已完成统一模型接入和交互页面, 并已在 DevEco Studio 预览器中运行; 但尚未完成真实设备验证和固定样例的跨平台误差报告。本文不对真实海域泛化能力、跨设备性能或教学效果作结论。

(5) 可复现性与解释边界: 为保证实验结果具有可追溯性, 本文对数据生成、模型训练和移动端部署过程进行了统一约束。首先, 参数化剖面由固定随机种子生成, 七个物理参数在预设区间内独立均匀抽样, 训练集、验证集和测试集按照固定索引划分, 避免因随机划分变化导致结果无法复现。其次, 均值剖面 and EOF 模态仅由训练集计算, 含噪实验中的推荐阶数由验证集确定, 测试集仅用于最终性能报告。需要说明的是, 本文的模拟数据用于研究参数变化、模态截断和噪声水平之间的关系, 并不代表任何特定海域的真实联合分布。HarmonyOS 端读取与 Python 端一致的模型文件, 但当前界面只开放表层温度、表层盐度、温跃层中心和温跃层尺度等部分参数, 深层温度、深层盐度及盐度变化尺度采用固定默认值, 因此移动端结果主要用于展示计算流程和交互现象, 不等同于对全部训练样本的逐条复现。此外, Python 端噪声实验报告的是 20 次重复实验的平均结果, 而 HarmonyOS 界面显示的是单次随机噪声刷新后的 RMSE, 两者的统计口径不同, 不能直接进行一一比较。未来应通过固定输入剖面、固定噪声向量和固定 EOF 阶数开展 Python 与 ArkTS 的逐点一致性验证, 并使用公开 Argo 剖面检验模拟模型和 EOF 截断规律在真实数据上的适用范围。

6 结论

本文建立了一个由温盐参数驱动的声速剖面模拟与 EOF 截断重构实验。1200 条样本在固定数据划分下表现出明显低维结构: 前 3 模态解释 94.68% 的训练集方差, K 从 3 增加到 10 时测试 RMSE 由 2.361 m/s 降至 0.153 m/s。加入独立高斯噪声后, 验证集推荐 K 随噪声增强由 15 降至 10, 重构仍能降低输入误差, 但改善幅度取决于噪声水平。SSPEOFLab 已经读取与 Python 输出一致的模型文件, 并在 ArkTS 端实现剖面生成、EOF 重构和误差显示。它是实验结果的交互载体, 不是 1200 条样本统计结果的来源。下一步应先把固定验证样例合入当前工程并留下实际运行记录, 再考虑深度相关噪声、缺测和 Argo 外部验证。

参考文献:

- [1] MACKENZIE K V.Nine-term equation for sound speed in the oceans[J].The Journal of the Acoustical Society of America,1981,70(3): 807-812.
- [2] PREISENDORFER R W.Principal component analysis in meteorology and oceanography[M].Amsterdam:Elsevier,1988.
- [3] NORTH G R,BELL T L,CAHALAN R F,et al.Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions[J].Monthly Weather Review,1982,110(7):699-706.
- [4] 海洋调查规范第 1 部分:总则:GB/T 12763.1—2007[S].北京:中国标准出版社,2007.
- [5] 海洋调查规范第 2 部分:海洋水文观测:GB/T 12763.2—2007[S].北京:中国标准出版社,2007.