# 基于声暴露级向量的海洋工程噪声信号自动提取方法

张小康，钟双莲，黄身钦，苏颖，童峰

（厦门大学水声通信与海洋信息技术教育部重点实验室 厦门 361005）

**摘要：**为从海量的海洋原始噪声数据中快速和准确地提取海洋工程噪声信号，完善大型海洋工程的海洋噪声评估方法，文章提出基于声暴露级向量的海洋工程噪声信号自动提取方法，并进行实验验证。研究结果表明：基于声暴露级向量的信号自动提取方法实现的核心是计算疑似信号与样本信号声暴露级向量（包括声暴露级和有效时间长度）的标准化欧氏距离，结合变步长截取分析、半波包络双阈值触发和中心位置触发等方法，提高信号提取的效率和准确率；与传统的人工提取方法相比，该自动提取方法具有稳健、准确和高效的性能，可替代人工提取方法并广泛应用。

**关键词：**信号自动提取；声暴露级向量；双阈值触发；标准化欧氏距离；海洋噪声

**中图分类号：**P75；P733.22 **文献标志码：**A **文章编号：**1005－9857(2022)02－0034－05

# Automatic Extraction Method of Marine Engineering Noise Signal Based on Sound Exposure Level Vector

ZHANG Xiaokang，ZHONG Shuanglian，HUANG Shenqin，SU Ying，TONG Feng

（Key Laboratory of Underwater Acoustic Communication and Marine Information Technology Ministry of Education，Xiamen University，Xiamen 361005，China）

**Abstract：**In order to extract the ocean engineering noise signal quickly and accurately from the massive ocean original noise data，this paper proposed an automatic signal extraction method based on acoustic exposure level vector. The results showed that the core of the method was to calculate the standardized Euclidean distance of the acoustic exposure level vector between the suspected signal and the sample signal. By combining the techniques of variable step size interception analysis，double-threshold trigger based on half-wave envelope and center position trigger，the method could effectively improve the efficiency and accuracy of signal extraction. Compared with the traditional manual extraction method，this automatic extraction method was robust，accurate and efficient，which could replace the manual extraction method and be widely used.

**Keywords：**Automatic signal extraction，Sound exposure level vector，Dual-threshold trigger，Standardized Euclidean distance，Ocean noise

**收稿日期：**2021-04-22；**修订日期：**2022-01-21

**基金项目：**国家重点研发计划项目（2018YFE0110000）；福建省自然科学基金资助项目（2018J05071）.

**作者简介：**张小康，高级工程师，博士，研究方向为水声探测和海洋环境噪声监测

**通信作者：**童峰，教授，博士，研究方向为水声通信和水下遥测遥控

## 0　引言

随着人类开发利用海洋进程的日益加快，船舶航行、海洋资源开发和海洋工程建设等活动产生的水下噪声对海洋生态产生的负面影响引起广泛关注[1-2]。世界自然保护联盟(IUCN)曾表达对海洋噪声危害问题的关切，联合国《生物多样性公约》(CBD)在墨西哥召开缔约方大会(COP)时对减少海洋噪声以保护海洋生物多样性的提案进行讨论[3-5]。相关国家和国际组织的高度重视使海洋噪声被列为海洋环境影响评价新的重要指标[5-6]。

跨海大桥、海底隧道、港口航道和海上风电场等大型海洋工程建设往往涉及打桩和爆破等暴烈的水下施工活动，所产生的宽频、高强度和连续性的冲击波噪声对周边海域海洋生物造成严重的不利影响，是海洋噪声评估的重点监控对象，须开展持续性监测[6-8]。

大型海洋工程建设通常具有施工周期长和涉海面积大等特点。为有效评估其产生的海洋噪声对周边海域海洋生物的影响程度，通常须开展多站位和多水层的同步和连续监测，由此记录海洋原始噪声数据。从海量的海洋原始噪声数据中提取有效噪声信号是准确评估海洋噪声影响的前提，同时是繁琐而繁重的任务。目前水声信号自动提取的研究热点是机器学习方法，即提取信号的时域、频域和听觉等参数特征，利用特征信息训练神经网络、隐马尔科夫、K 邻近和向量机等分类器，从而实现信号自动识别[9-11]。本研究在深入分析大量海底隧道爆破、跨海大桥桥墩打桩和海上风机桩基打桩等海洋工程噪声信号特点的基础上，提出基于声暴露级向量的信号自动提取方法，实现从海量的海洋原始噪声数据中快速和准确地提取海洋工程噪声信号，为海洋噪声的评估或研究提供有利条件。

## 1　方法原理

大型海洋工程建设涉及的打桩、爆破和爆夯等活动所产生的冲击波是短时间内的能量释放。2 min时长的某海洋工程打桩噪声信号的时域波形如图 1 所示。

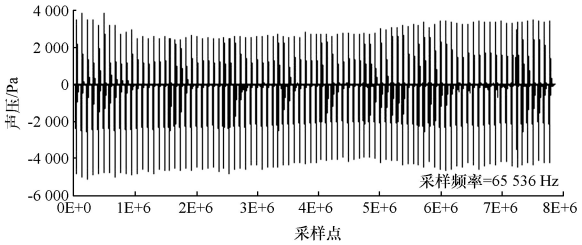


图 1　某海洋工程打桩噪声信号的时域波形

与海洋原始噪声信号相比，海洋工程噪声信号的强度较大，在一定持续时间内具有相对稳定的波形，且波形之间没有严格的周期性，不存在相互干扰，每个波形均可视为单次随机事件。

声暴露级可用于描述单次或离散噪声事件，表示每次噪声事件释放的能量对周边环境的噪声污染程度[12]。声暴露级的计算公式为：

$$L_E = 10\lg\left[\frac{1}{T}\int_{t_1}^{t_2}\frac{p(t)^2}{p_0^2}\right] \tag{1}$$

式中：$L_E$表示声暴露级；$E$ 表示声暴露量；$T$ 表示参考时间长度，通常取 1 s；$t_1$和 $t_2$分别表示对噪声事件的声暴露量有显著贡献的时间起点和终点；$p(t)$表示 $t$ 时刻的声压；$p_0$表示水中的参考声压。

式(1)表明声暴露级是某次噪声事件在指定测量时间间隔内的能量累积。为避免测量时间间隔的差异对声暴露级的计算结果产生影响，须设定选取“指定测量时间间隔”的标准。截取某海洋工程打桩噪声信号如图 2 所示。

由图 2 可以看出：与海洋工程噪声信号相比，海洋原始噪声信号的能量累积无明显变化；当海洋工程噪声信号出现时，其能量累积陡增；当海洋工程噪声信号结束后，其能量累积又趋近于恒定值。因此，“指定测量时间间隔”的选取可参照能量累积值，通常将最大能量累积值的 5%和 95%的时刻分别选为 $t_1$和 $t_2$，$t_1 \sim t_2$的时间长度即有效时间长度($\tau$)。将图 2(b)中选取的 $t_1$和 $t_2$对应到图 2(a)的疑似信号中，就能准确定位并提取海洋工程噪声信号。

本研究提出的信号自动提取方法就是将信号的声暴露级和有效时间长度作为联合约束条件，通过比较疑似信号与样本信号的相似性，判定疑似信号是否为样本信号的同类信号。为便于比较，将声暴露级和有效时间长度视为声暴露级向量的 2 个分

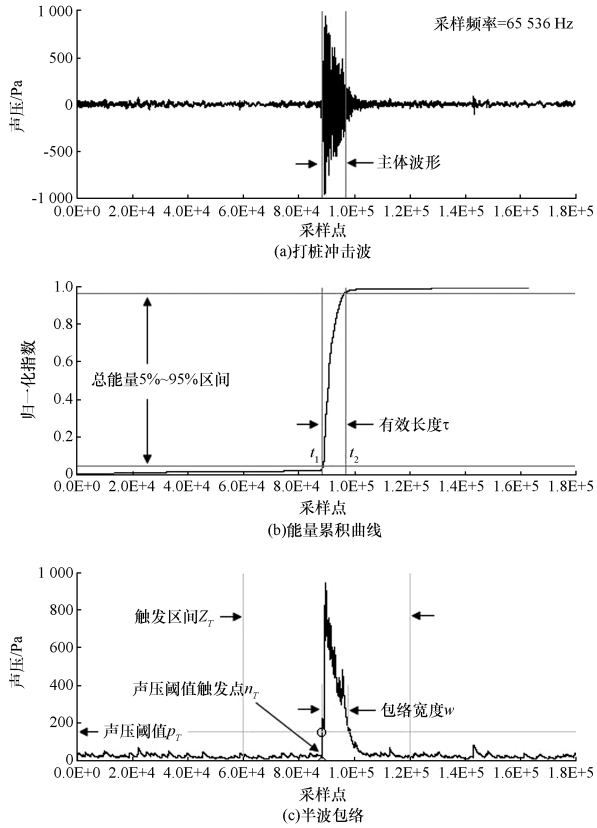


图 2 某海洋工程打桩噪声信号

量,样本信号和疑似信号的声暴露级向量分别为 $\overline{A}=(L_E,\tau)$ 和 $\overline{A'}=(L_E',\tau')$,通过计算二者的标准化欧氏距离,实现海洋工程噪声信号自动提取。

## 2 方法实现

基于声暴露级向量的信号自动提取方法实现的核心是计算疑似信号与样本信号声暴露级向量的标准化欧氏距离。为提高信号提取的效率和准确率,还须结合变步长截取分析、半波包络双阈值触发和中心位置触发等方法(图 3)。

### 2.1 变步长截取分析

数字信号处理受限于计算机的运算能力,通常须将海量数据分割为若干片段并逐段分析,数据分割包括等步长截取和变步长截取 2 种分析方法。

等步长截取分析方法将偏移步长($\lambda$)设置为分析数据段长度($L$),这种"硬分割"方法在处理非周期信号时可能割断信号,导致信号波形提取不完整或漏提取等问题。为解决这些问题,本研究采用变步长截取分析方法。变步长截取分析方法的原理

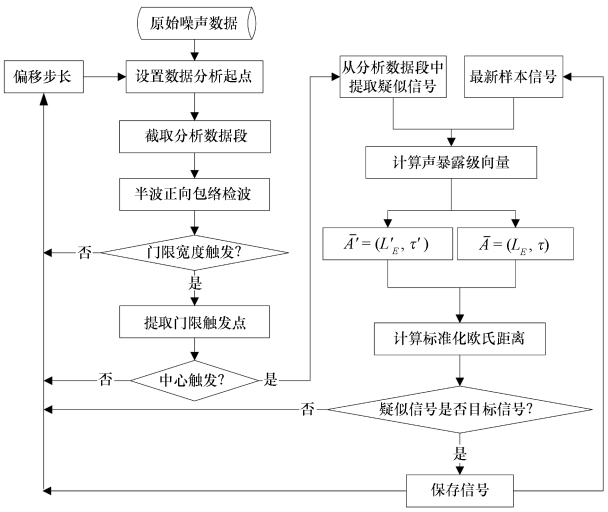


图 3 基于声暴露级向量的信号自动提取方法的实现流程

为:根据当前截取的分析数据段($X_i$)的分析结果,为下一分析数据段设置不同的偏移步长;若分析数据段为海洋背景噪声信号而不含海洋工程噪声信号,则将偏移步长设置为最近提取的海洋工程噪声信号的有效时间长度($\tau_j$);若分析数据段包含海洋工程噪声信号,则将偏移步长设置为分析数据段起点至有效时间长度终点的长度($T_i$)(图 4)。

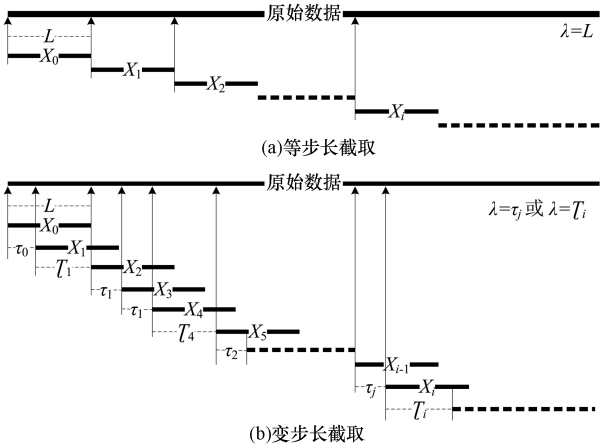


图 4 等步长和变步长截取分析方法

变步长截取分析方法将当前分析数据段的分析结果作为下一分析数据段的截取依据,会造成分析数据段数量的增加;但考虑到海洋工程噪声信号的非周期和时变性等特点,其与等步长截取分析方法相比能有效保证信号提取的完整性,并尽可能地避免信号的漏提取和重复提取。

### 2.2　半波包络双阈值触发

海洋工程噪声信号具有较高的声压和一定的宽度，适合采用声压和宽度的双阈值门限对海洋原始噪声信号进行初步筛选，可有效克服大幅度和窄宽度的海洋随机脉冲干扰，减少误触发，从而提高数据处理效率。

本研究采用的半波包络双阈值触发方法通过数字检波提取正向信号包络，并设置声压阈值（$p_T$）和信号包络宽度阈值（$w_T$）作为双触发条件，触发过程如图 2(c)所示。①在提取分析数据段的正向信号包络后，计算正向信号包络的均方根值（$p_{\mathrm{rms}}$）。根据分析数据段和样本信号的特点，设置声压阈值为正向信号包络均方根值的若干倍。若未触发声压阈值，则将分析数据段视为海洋背景噪声信号；若触发声压阈值，则继续下一步的信号包络宽度阈值触发。②根据样本信号和海洋随机脉冲的宽度，设置合适的信号包络宽度阈值。在正向信号包络中获取声压阈值对应的包络宽度（$w$），当其大于信号包络宽度阈值时表示触发成功，否则将分析数据段视为海洋随机脉冲干扰。

半波包络数字检波的计算公式为：

$$Y(n)=\begin{cases}0 & n=0\\ X(n) & X(n)\geqslant Y(n-1)\\ Y(n-1)\times\dfrac{t_{\mathrm{RC}}}{t_{\mathrm{RC}}+1} & X(n)<Y(n-1)\end{cases}\tag{2}$$

式中：$Y(n)$表示数字检波输出的正向信号包络；$X(n)$表示分析数据段的数字采样序列；$t_{\mathrm{RC}}$表示检波器的阻容时间常数，最佳取值是在保留信号波形主要波峰的情况下尽可能平缓地描绘信号包络。

### 2.3　中心位置触发

由于海洋工程噪声信号具有非周期性，分析数据段中可能存在多个信号甚至不完整信号，为避免信号重复提取和保证提取信号波形的完整性，仍须在变步长截取分析方法和半波包络双阈值触发方法的基础上引入中心位置触发方法，通过不断偏移将海洋工程噪声信号的主体波形显示在分析数据段的指定触发区间（$Z_T$）内（图 2(c)）。

本研究根据某海洋工程打桩噪声信号的特点，设计分析数据段长度为 $1.8\times10^5$ 个采样点，触发区间为 $6.0\times10^4\sim1.2\times10^5$ 个采样点。当声压阈值在正向信号包络上的触发点（$n_T$）落在触发区间内时，就可提取触发区间内的疑似信号。

### 2.4　信号提取

根据标准化欧氏距离可比较包含不同量纲的多维向量的相似性。通过各分量的均值（$\mu$）和标准差（$\sigma$）将分量标准化为无量纲分量，由无量纲分量求得标准化欧氏距离[13]。

本研究提出的疑似信号提取方法即计算疑似信号与样本信号声暴露级向量的标准化欧氏距离，由此判定疑似信号是否为样本信号的同类信号。当标准化欧氏距离小于根据经验预设的判决阈值（$d_T$）时，疑似信号即样本信号的同类信号。疑似信号与样本信号声暴露级向量的标准化欧氏距离的计算公式为：

$$d=\sqrt{\left(\frac{L_E-L'_E}{\sigma_{L_E}}\right)^2+\left(\frac{\tau-\tau'}{\sigma_\tau}\right)^2}\tag{3}$$

式中：$d$ 表示标准化欧氏距离；$\sigma_{L_E}$ 和 $\sigma_\tau$ 分别表示声暴露级和有效时间长度的标准差，可通过预先提取定量的海洋工程噪声信号样本计算得到。

海洋工程噪声信号可被视为慢时变信号，在短时间内能保持相对稳定，但在整个施工周期内会有较大起伏，因此采用相同的样本信号不利于海洋工程噪声信号的准确提取。本研究的初始样本信号可从分析数据段中提取，其后将最近提取的海洋工程噪声信号作为新的样本信号，使样本信号的更新遵循分析数据段的变化特征，有效提高疑似信号与样本信号的相似度，从而提高信号提取的准确率。

## 3　实验验证

实验验证的原始数据来源于大连庄河海上风电场某风机机桩嵌岩施工监测，通过距桩机不同距离的 3 个站点和多水层的持续声学测量同步记录到 7 个通道、每个通道时长约为 55 min 的完整打桩噪声数据。分别对原始数据进行人工提取和自动提取，以评估本研究提出的信号自动提取方法的性能。

人工提取采用 Adobe Audition 软件，累计耗时高达 100 h。自动提取须在各路原始信号中提取并分析 10 个海洋工程噪声信号，确定 $t_{\mathrm{RC}}$、$\tau$、$\sigma_{L_E}$ 和 $\sigma_\tau$ 等参数，并设置 $p_T=3p_{\mathrm{rms}}$、$w_T=0.2\tau$ 和 $d_T=1.414$，累计耗时不足 30 min，极大地提高信号提取效率。2 种方法的提取结果如表 1 所示。

**表 1 人工提取和自动提取的结果对比**

| 站点 | 距桩机的距离/m | 测量水深/m | 通道序号 | 人工提取 | | 自动提取 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 数量/个 | 准确率/% | 数量/个 | 准确率/% |
| 1 | 14 | 5 | 0 | 1 946 | 99.90 | 1 939 | 99.54 |
| | | 10 | 1 | 1 948 | 100.00 | 1 939 | 99.54 |
| | | 17 | 2 | 1 948 | 100.00 | 1 940 | 99.59 |
| 2 | 130 | 5 | 3 | 1 944 | 99.79 | 1 934 | 99.28 |
| | | 15 | 4 | 1 944 | 99.79 | 1 935 | 99.33 |
| 3 | 900 | 5 | 5 | 1 940 | 99.59 | 1 939 | 99.54 |
| | | 14 | 6 | 1 943 | 99.74 | 1 942 | 99.69 |

采用人工提取方法从 7 个通道中提取信号的数量略有差异，主要为 2 个原因。①不同距离和水深条件造成传输通道的差异，致使实际记录数据存在略微偏差；②人工提取出现遗漏。考虑到各通道信号提取数量的差异很小，可将其最大值即 1 948 个作为实际信号数量，以评估 2 种提取方法的准确率。

根据 7 个通道的信号提取结果，自动提取的准确率为 99.28%～99.69%，与人工提取相比略低，但偏差均控制在 0.5%以内，表明自动提取的结果可靠，且具有接近人工提取的性能。此外，相同的海洋工程噪声源在不同距离和水深条件下的信号幅度和信号波形存在较大差别，而各通道的自动提取准确率偏差均不超过 0.5%，表明自动提取方法针对不同幅度和波形的海洋工程噪声信号均具有稳健的提取性能。

## 4 结语

本研究针对海洋工程设计的基于声暴露级向量的信号自动提取方法具有稳健、准确和高效的性能，目前已广泛应用于课题组的海洋噪声评价，同时成为开展相关课题研究的基本工具，为多篇学位论文[14－15]的数据处理提供技术支持。该方法不仅适用于从已记录的海量数据中离线提取信号，而且适用于从在线监测的数据中实时提取信号，取代先记录数据后手动提取的传统信号提取方法，有效提高工作效率。

## 参考文献


[1] DI FRANCO E，PIERSON P，DI IORIO L，et al.Effects of marine noise pollution on Mediterranean fishes and invertebrates：a review[J].Marine Pollution Bulletin，2020，159：1－13.

[2] 张博.海上人为噪声及其对海洋鱼类影响的初步探究[D].上海：上海海洋大学，2015.

[3] 卢晓强，徐海根，丁晖，等.《生物多样性公约》海洋与沿海生物多样性保护[J].世界环境，2015(A01)：59－61.

[4] 李菡丹，周晋峰.还“地球之心”一片宁静[J].中华儿女，2019(12)：67－69.

[5] GUY D，TRISTAN O.Do the conventions on the law of the sea and biological diversity adequately protect marine biota from anthropogenic underwater noise pollution? [J]. Asia Pacific Journal of Environmental Law，2020，23(1)：6－38.

[6] 王勇.国际法视角下中国与东盟国家合作规制南海海洋噪音污染问题[J].东方法学，2017(3)：47－55.

[7] 张丹枫，陈吉钢，王春晖，等.水下爆炸损伤生物效应研究现状及展望[J].第二军医大学学报，2016，37(10)：1283－1286.

[8] 彭亚雄，吴立，李春军，等.水下钻孔爆破水击波特性及气泡帷幕削压效果研究[J].爆破，2019，36(1)：38－43.

[9] 李兰瑞，李鹏，刘天宇，等.水声信号检测与识别技术研究现状[J].通信技术，2020，53(12)：2904－2907.

[10] 王培兵，彭圆.深度学习在水声目标识别中的应用研究[J].数字海洋与水下攻防，2020，3(1)：11－17.

[11] 叶凯.基于机器学习的水声信号识别技术研究[D].哈尔滨：哈尔滨工程大学，2019.

[12] 国家标准化管理委员会.声学环境噪声的描述、测量与评价第 1 部分：基本参量与评价方法：GB/T 3222.1－2006[S].北京：中国标准出版社，2006.

[13] 李庆娜.多维标度方法[M].北京：科学出版社，2019.

[14] 张然.海上风电场水下打桩噪声研究[D].厦门：厦门大学，2019.

[15] 刘后秀.海底隧道爆破水中冲击波的监测和数值分析[D].厦门：厦门大学，2020.