

基于频域特征相似的仿真模型置信度分析

张起

(海装项目管理中心, 北京 100039)

摘要 为评估重构舰船辐射噪声模型置信度, 提出了一种基于频域特征相似的重构舰船辐射噪声仿真模型置信度评估方法。先对舰船辐射噪声实测数据与重构舰船辐射噪声数据的线谱和功率谱值进行一致性分析后, 再采用证据理论综合线谱、功率谱值一致性结果, 量化重构舰船辐射噪声模型置信度, 为重构舰船辐射噪声模型应用提供了理论支撑。

关键词 线谱; 功率谱; 改进灰色关联分析法; 一致性

中图分类号 P391.9 **文献标识码** A **文章编号** 2096-5753(2020)06-0472-05

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2020.06.005

Analysis of Simulation Model Confidence Based on Frequency Domain Feature Similarity

ZHANG Qi

(Project Management Office, Naval Equipment Department, Beijing 100039, China)

Abstract In order to evaluate the confidence of reconstructed ship-radiated noise, a method based on frequency domain feature similarity is proposed to evaluate the confidence of the reconstructed ship-radiated noise simulation model. Firstly, this paper analyzes the consistency of line spectrum and power spectrum values between measured ship-radiated noise data and reconstructed ship-radiated noise data. Then, it uses the evidence theory to integrate the consistency results of line spectrum and power spectrum, so as to quantify the confidence of the reconstructed ship-radiated noise model, providing theoretical support for the application of the reconstructed ship-radiated noise model.

Key words line spectrum; power spectrum; improved grey relative analysis method; consistency

0 引言

在现代水雷装备研制过程中, 水雷引信是装备最为关键的分系统, 它通过感知水中的物理场来实现探测、识别、定位、打击等功能; 而舰船辐射噪声是在海水中传播距离远、衰减慢的物理场^[1], 在实验室中常被作为信号源用来验证水雷引信性能。由于海上工况复杂, 在实际中难以获得大样本舰船辐射噪声数据。因此, 如何获取置信度高的舰船辐

射噪声数据是水雷引信研制过程中需要重点克服的难题。在工程中, 通过重构舰船辐射噪声数据^[2]可获得各工况的舰船辐射噪声数据, 但重构的舰船辐射噪声数据的置信度是影响验证水雷引信性能的关键因素, 因此, 本文开展了重构舰船辐射噪声模型置信度分析。

舰船辐射噪声的频域特性(线谱、功率谱值)是舰船分类和识别的重要基准^[3]。基于此, 本文对实测舰船辐射噪声数据和重构舰船辐射噪声数据

的线谱和功率谱值进行了一致性分析。

1 舰船辐射噪声线谱一致性分析

舰船辐射噪声线谱中包含舰船航速、舰船类型等信息,工程中通过分析舰船辐射噪声线谱特征可以对舰船进行分类与识别。本章节对实测舰船辐射噪声和重构舰船辐射噪声线谱进行一致性分析。

设舰船辐射噪声时间序列为 $x(n)$, 数据长度为 N , 将 $x(n)$ 分为 M 段 (分段的时间序列之间可以重叠), 则每段的数据长度 $L \geq N/M$, 得到的分段数据为 $x^{(i)}(n)$, 对 $x^{(i)}(n)$ 加窗函数 $w(n)$, 则该段序列的功率谱 $P_M^{(i)}$ [4-7] 为

$$P_M^{(i)} = \frac{1}{LU} \left| \sum_{n=0}^{L-1} x^{(i)}(n)w(n)e^{-j\omega n} \right|^2, \quad i=1,2,\dots,L \quad (1)$$

式中:

$$U = \frac{1}{L} \sum_{n=0}^{L-1} w^2(n) \quad (2)$$

则舰船辐射噪声信号的功率谱 $P(\omega)$ 为

$$P(\omega) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M P_M^{(i)}(\omega) \quad (3)$$

设实测舰船辐射噪声功率谱和重构舰船辐射噪声功率谱分别为 $P_{\text{ref}}(\omega)$ 、 $P_{\text{sim}}(\omega)$, 可构成以下假设:

$$H_0: S_{\text{sim}}(\omega) = P_{\text{sim}}(\omega)$$

$$H_1: S_{\text{sim}}(\omega) \neq P_{\text{sim}}(\omega)$$

通过公式 (1) - (3) 得到舰船辐射噪声功率谱估计值, 设实测舰船辐射噪声功率谱估计和重构舰船辐射噪声功率谱估计分别为 $\hat{P}_{\text{ref}}(\omega)$ 、 $\hat{P}_{\text{sim}}(\omega)$, 由文献[8]可知, r 为等价自由度, 以下构成的统计量服从 F 分布, 有:

$$\frac{r\hat{P}_{\text{ref}}(\omega)/P_{\text{ref}}(\omega)/r}{r\hat{P}_{\text{sim}}(\omega)/P_{\text{sim}}(\omega)/r} \sim F(r,r)$$

α 为显著性水平, 由此可以进一步得到:

$$P\left\{\frac{\hat{P}_{\text{sim}}(\omega)}{\hat{P}_{\text{ref}}(\omega)} F_{\frac{\alpha}{2},r,r} \leq 1 \leq \frac{\hat{P}_{\text{sim}}(\omega)}{\hat{P}_{\text{ref}}(\omega)} F_{1-\frac{\alpha}{2},r,r} \mid H_0\right\} = 1 - \alpha \quad (4)$$

如果实测舰船辐射噪声与重构舰船辐射噪声的频率点满足公式 (4), 则可认为该频率点下的

实测舰船辐射噪声与重构舰船辐射噪声功率谱值相等, 即表示该频率点的功率谱通过了相容性检验。否则, 认为该频率点的功率谱未通过相容性检验。

本节主要对舰船辐射噪声实测数据与重构舰船辐射噪声数据的线谱进行一致性分析。先采用 Welch 法求取舰船辐射噪声实测与重构舰船辐射噪声数据的功率谱, 再提取舰船辐射噪声实测数据的线谱与重构舰船辐射噪声数据的线谱, 然后对舰船辐射噪声实测数据与重构舰船辐射噪声数据的线谱所在的频率区间进行相容性检验; 来判断该线谱所在的频段功率谱值是否相等, 从而得到重构舰船辐射噪声数据的相容性检验结果。最后, 通过以下公式得到舰船辐射噪声线谱一致性结果。

设舰船辐射噪声数据线谱频段数为 L_p , 某频段实测数据的线谱频段 K_i , 未通过相容检验的频段为 M_i , 则舰船辐射噪声的线谱一致结果为 C_L [9-12]:

$$C_L = 1 - \sum_{i=1}^{L_p} \frac{1}{L_p} \left(1 - \frac{M_i}{K_i}\right) \quad (5)$$

2 舰船辐射噪声功率谱值一致性分析

在对舰船识别与分类过程中, 不同类型的舰船辐射噪声数据的幅值大小及幅值变化趋势差异较大, 因此, 舰船辐射噪声的功率谱值大小及功率谱值变化趋势是舰船分类、识别的重要物理量。基于此, 本章节对实测舰船辐射噪声数据和重构舰船辐射噪声数据的功率谱值 (大小及变化趋势) 进行一致性分析。

在工程中, 根据一组数据之间的幅值大小进行一致性分析法有 TIC 法; 根据一组数据之间的变化趋势一致分析法有灰色关联分析法, 但 TIC 法一般只能定性分析, 准确度不高。灰色关联分析法是根据 1 组数据在空间中的几何形状的相似程度来判断该组数据的一致性程度。但是灰色关联法存在一定的缺陷, 它只考虑 1 组数据之间的相似程度, 而未考虑 1 组数据之间的幅值接近程度 [13-16]。本文对舰船辐射噪声实测数据与重构舰船辐射噪声数据的功率谱进行一致性分析, 要同时考虑到功率谱幅

值大小接近程度及功率谱幅值的发展趋势一致性。改进的灰色关联分析法不仅考虑到了 1 组数据之间的发展变化趋势接近程度，而且考虑到了 1 组数据之间的幅值大小接近程度。基于此，本文将采用改进的灰色关联分析法^[17]对实测舰船辐射噪声数据和重构舰船辐射噪声功率谱幅值进行一致性分析。

在第 1 章节中，采用 Welch 法获取舰船辐射噪声实测数据和重构舰船辐射噪声数据的功率谱后，

$$\gamma(S_{\text{ref}}(k), S_{\text{sim}}(k)) = \left(\frac{\min_i \min_k |S_{\text{ref}}(f) - S_{\text{sim}}(f)| + \xi \max_i \max_k |S_{\text{ref}}(f) - S_{\text{sim}}(f)|}{|S_{\text{ref}}(f) - S_{\text{sim}}(f)| + \xi \max_i \max_k |S_{\text{ref}}(f) - S_{\text{sim}}(f)|} \times e^{-\lambda(k)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

2) 求取 $\lambda(k)$ 值：

$$\lambda(k) = \frac{2 \times |S_{\text{ref}}(k) + S_{\text{sim}}(k)|}{|S_{\text{ref}}(k)| + |S_{\text{sim}}(k)|} \quad (7)$$

3) 设实测舰船辐射噪声数据与重构舰船辐射噪声功率谱幅值一致性结果为 $\eta(S_{\text{ref}}, S_{\text{sim}})$ ，则可通过以下公式得到：

$$\eta(S_{\text{ref}}, S_{\text{sim}}) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \gamma(S_{\text{ref}}(k), S_{\text{sim}}(k)) \quad (8)$$

如果得到的 $\eta(S_{\text{ref}}, S_{\text{sim}})$ 数值越大，表示舰船辐射噪声实测数据与重构舰船辐射噪声数据的功率谱幅值相似程度越高。反之，则表示舰船辐射噪声实测数据与重构舰船辐射噪声数据的功率谱幅值相似程度越低。

3 舰船辐射噪声数据一致性分析实例

下面对 1 组典型的实测舰船辐射噪声数据和重构舰船辐射噪声数据进行一致性分析。

采用第 1 章节介绍的 Welch 法对舰船辐射噪声实测数据和重构舰船辐射噪声数据进行功率谱估计，得到舰船辐射噪声实测数据与重构舰船辐射噪声数据的功率谱如图 1 所示。

本文认为超过连续谱 10 dB 的为线谱。基于此，先提取实测舰船辐射噪声数据和重构舰船辐射噪声的线谱，而后根据公式 (4) 对舰船辐射噪声实测数据与重构舰船辐射噪声数据的线谱进行相容性检验，相容性检验结果如图 2 所示。

本章节采用改进的灰色关联分析法对实测舰船辐射噪声数据和重构舰船辐射噪声功率谱进行一致性分析。改进灰色关联分析法的流程如下。

1) 设实测舰船辐射噪声数据和重构舰船辐射噪声数据的功率谱值 $S_{\text{ref}}(f)$ 、 $S_{\text{sim}}(f)$ ， n 为数据长度， $k = 1, 2, 3 \dots n$ ， ξ 为分辨系数，通常在 0~1 之间取值， $S_{\text{ref}}(k)$ 和 $S_{\text{sim}}(k)$ 进行关联计算可得该数据序列的关联程度 $\gamma(S_{\text{ref}}(k), S_{\text{sim}}(k))$ ，公式^[17]如下：

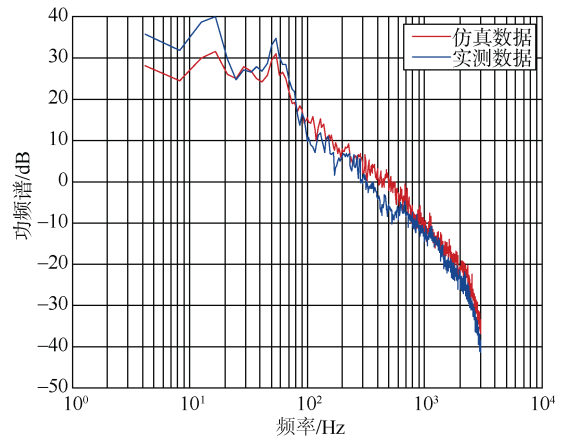


图 1 舰船辐射噪声实测数据和仿真数据功率谱图
Fig. 1 Power spectrum of measured data and simulation data of ship-radiated noise

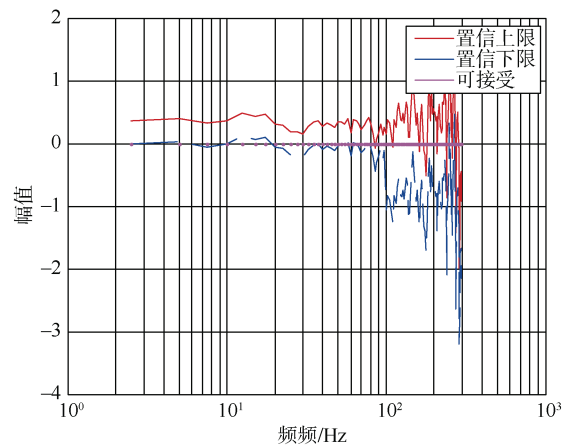


图 2 舰船辐射噪声实测数据和仿真数据相容性检验结果
Fig. 2 Consistency test results of measured data and simulation data of ship-radiated noise

根据图 2 的相容性结果, 依据公式 (5) 进行相容性结果及转换, 求得转换后的重构舰船辐射噪声数据的线谱一致性结果为 0.83。

同时, 对图 1 的舰船辐射噪声实测数据与重构舰船辐射噪声数据的功率谱值, 可根据公式 (6)–(8) 求得重构舰船辐射噪声功率谱值一致性结果, 结果为 0.78。

4 综合舰船辐射噪声线谱、功率谱值一致性结果

证据理论可以在有或无先验知识的情况下, 以简单的推理方式对多个证据进行融合, 广泛用于专家决策系统、多属性决策等领域^[18-20]。本节主要采用证据理论对线谱、功率谱值一致性结果进行综合, 其用法步骤如下。

1) 构成假设空间 (本文只有 2 个元素) $\theta = \{\theta_1, \theta_2\}$, θ 共有 4 个子集, $2^\theta = \{A | A \subset \theta\} = \{\{\theta_1\}, \{\theta_2\}, \{\theta\}, \{\Phi\}\}$ 。式中: θ 表示所有可能的结果; θ_1 表示检验结果一致; θ_2 表示检验结果不一致; Φ 表示空集。

2) 假设 2 个一致性检验结果分别为 m 、 n , 根据实际情况对 2 个检验结果分别赋予权值为 a 、 b , 设第 1 个证据的基本分配函数 m_1 , 则有:

$$\begin{aligned} m_1(\{\theta_1\}) &= ma \\ m_1(\{\theta_2\}) &= m(1-a) \\ m_1(\{\Phi\}) &= 1-a \end{aligned} \quad (9)$$

设第 2 个证据的基本分配函数为 m_2 , 则有:

$$\begin{aligned} m_2(\{\theta_1\}) &= nb \\ m_2(\{\theta_2\}) &= n(1-b) \\ m_2(\{\Phi\}) &= 1-b \end{aligned} \quad (10)$$

3) 对 2 个证据采用 D-S 理论进行合成, 其中 A_1 、 A_2 为假设空间 θ 中的元素, 设 K 为证据冲突量, 则有:

$$K = \sum_{\substack{A_1, A_2 \subset \theta \\ A_1 \cap A_2 = \emptyset}} m_1(A_1)m_2(A_2) \quad (11)$$

$$m(A) = \frac{1}{1-K} \left(\sum_{\substack{A_1, A_2 \subset \theta \\ A_1 \cap A_2 = A}} m_1(A_1)m_2(A_2) \right) \quad (12)$$

设证据一致量为 $H(E_1, E_2)$, 则通过以下公式求得:

$$H(E_1, E_2) = \sum_{A_i=B_j} m_1(A_i)m_2(A_j) \quad (13)$$

当证据冲突量小于证据一致量, 则可以按照合成规则进行证据合成。当证据冲突量大于证据一致量时, 需要使用冲突证据的合成方法来合成 2 个证据结果^[20]。

4) 设信任函数 $\text{Bel}(A)$ 和似然函数 $\text{pl}(A)$, 则有:

$$\text{Bel}(A) = \sum_{B \subset A} m(B), \forall A, B \in 2^\theta \quad (14)$$

$$\text{pl}(A) = \sum_{B \cap A \neq \emptyset} m(B) \quad (15)$$

设 S_{result} 为 2 个证据的综合一致性结果, 则可通过以下公式求得:

$$S_{\text{result}} = \frac{\text{Bel}(A) + \text{pl}(A)}{2} \quad (16)$$

第 3 节求得舰船辐射噪声线谱与功率谱幅值一致性结果分别为 0.83、0.78。文献[12]对舰船分类、识别研究中, 提取了多个舰船辐射噪声数据样本的线谱特征量和功率谱特征量进行分类、识别; 结果表明, 舰船辐射噪声线谱特征量与舰船辐射噪声功率谱特征量相比较而言, 利用线谱特征量来进行舰船分类、识别, 准确率更高。基于此, 本文对舰船辐射噪声数据线谱一致性结果与舰船辐射噪声功率谱值一致性结果分别赋予权重 0.7、0.6, 而后根据公式 (9)–(13) 可求得证据冲突量为 0.132 4, 证据一致量为 0.867 8。证据冲突量小于证据一致量, 因此可根据公式 (14)–(16) 求重构舰船辐射噪声模型置信度, 最后求得重构舰船辐射噪声模型置信度为 0.81。

5 结束语

重构舰船辐射噪声数据作为验证水雷引信性能的信号源, 其置信度是影响验证水雷性能最为关键的因素之一。为量化重构舰船辐射噪声模型置信度, 考虑到线谱和功率谱值是舰船分类、识别中两个重要的特征量, 因此, 提出了采用基于频域特征相似的重构舰船辐射噪声置信度研究, 结合现有的实测数据, 对重构舰船辐射噪声数据

的线谱和功率谱进行一致性分析。本文方法可为重构舰船辐射噪声数据作为信号源提供理论依据,同时,为舰船辐射噪声仿真模型验证提供了一种新的验证方法。

参考文献

- [1] 叶平贤, 龚沈光. 舰船物理场[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1992.
- [2] 唐兵, 朱艳, 陈卫东. 基于实测噪声信号的舰船辐射噪声重构[J]. 舰船科学技术, 2012, 11(34): 148-151.
- [3] 景志宏, 向德全, 王元一. 基于线谱特征的水下目标识别仿真实验研究[J]. 系统仿真学报, 2000, 12(6): 642-645.
- [4] 姚天任, 孙洪. 现代数字信号处理[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 1999.
- [5] 胡广书. 数字信号处理理论、算法与实现[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [6] 杨向锋, 张效民, 孙继红. 舰船辐射噪声功率谱特征提取方法研究[J]. 鱼雷技术, 2006, 14(1): 35-38.
- [7] 邹辽章. 舰船辐射噪声仿真模型置信度评估方法研究[D]. 宜昌: 宜昌测试技术研究所, 2018.
- [8] 刘鹏, 陈长兴, 白云. 使用窗谱估计法验证仿真系统模型[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2000, 1(2): 69-71.
- [9] 吴方. 时频域分析方法在仿真模型验证中的应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [10] 邓磊磊. 舰船辐射噪声的特征线谱提取[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
- [11] 周玉臣. 数据一致性分析结果向可信度转换方法及工具研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [12] 徐慧. 水声目标被动识别相关技术研究[D]. 武汉: 武汉数字工程研究所, 2013.
- [13] 傅惠民, 陈建伟. 仿真结果距离检验方法和 TIC 方法对比分析[J]. 航空动力学报, 2009, 24(12): 2784-2785.
- [14] 王曙钊, 刘兴堂, 卜志坤. 利用灰色关联度理论对仿真模型的评估研究[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2008, 8(1): 3-76.
- [15] 刘思峰, 蔡华, 杨英杰, 等. 灰色关联分析模型研究进展[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(8): 2041-2046.
- [16] 尹富. 基于灰色关联分析的航空装备技术保障能力评价模型[J]. 数学的实践与认识, 2013, 43(8): 104-109.
- [17] 孙勇成, 周献中, 李桂芳, 等. 基于灰色关联分析的仿真模型验证及其改进[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(3): 522-524.
- [18] 杨春, 李怀祖. 一个证据推理模型及其在专家意见综合中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 2001, 21(4): 43-48.
- [19] 杨风暴, 王肖霞. D-S 证据理论的冲突证据合成方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [20] 岳玉梅. 证据理论及其在不完全信息多属性决策中的应用[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009.

(责任编辑: 曹晓霖)