

# 基于声学方法的舰船烟囱红外辐射强度计算影响因素分析

初云涛<sup>1</sup>, 华志刚<sup>1</sup>, 谈 锋<sup>2</sup>

(1. 中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430064; 2. 上海江南造船(集团)有限公司, 上海 200023)

**摘 要:**利用舰船红外辐射强度数学模型,对基于声学方法的舰船烟囱红外辐射强度测量技术的影响因素进行了仿真研究,结果表明:烟气的热物性参数,红外辐射源的辐射特性以及环境噪声是影响红外辐射强度监测的主要因素。其中烟气的比热比的影响最大,其次是辐射源的发射率和环境噪声。准确确定烟气比热比,辐射源的发射率以及设法降低环境噪声是提高舰船红外辐射强度的重要手段。

**关键词:**声波法;红外辐射强度监测;影响因素;舰船

**中图分类号:**TN215

**文献标识码:**A

## Numerical analysis of effecting factors on radiation intensity monitoring method for naval ship exhaust based on acoustic temperature measure method

CHU Yun-tao<sup>1</sup>, HUA Zhi-gang<sup>1</sup>, TAN Feng<sup>2</sup>

(1. China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China;

2. Shanghai Jiangnan Shipbuilding( Group) Co., Ltd, Shanghai 200023, China)

**Abstract:** A simulation study was made to analyze the effecting factor on the infrared radiation calculation for naval ship chimney using the mathematical model of the infrared radiation intensity. The simulation results indicated that there are three main effecting factors on radiation intensity, including thermal parameters of flue gas, radiative parameter of infrared radiation object and noises of environments. The ratio of specific heat has the most effect followed by emissivity of radiative object and noises. To reduce infrared radiation, it was necessary to confirm the ratio of specific heat, emissivity and depressing noise.

**Key words:** acoustic method; infrared radiation intensity; effecting factor; naval ship

### 1 引 言

烟囱部位是水面舰船3~5 μm波段内最主要的红外辐射源。利用红外辐射制导的导弹对舰船的生存构成了严重威胁,为了提高舰船的隐蔽性,必须采取一系列有效的红外辐射控制技术缩减舰船尤其是烟囱部位的辐射强度,减小被红外导弹锁定的距离<sup>[1-3]</sup>。

目前国内外对水面舰船红外辐射控制技术进行了多方面的研究,出现了一些有效控制红外辐射的技术。然而对于烟囱部位这类辐射源,其红外辐射强度随着工况、大气环境等因素的变化而变化,因此为了达到隐身性能所需要的红外辐射指标,必须将实际辐射强度反馈给红外辐射控制系统,实时调整

控制策略和手段,进行红外辐射动态控制,以达到最佳的控制效果。

作者提出了一种基于声波法测量排气温度进而求取烟囱部位辐射强度的方法,旨在利用该方法开发一种可用于舰船红外辐射强度实时监测系统,为实现舰船红外辐射智能化管理提供必要条件<sup>[4]</sup>。由于这种方法还处于预研阶段,为充分了解该方法的有效性,本文将影响辐射强度计算的影响因素进行分析。

**作者简介:**初云涛(1979-),男,博士,从事舰船动力及红外隐身研究。E-mail:chuyuntao@tom.com

**收稿日期:**2009-08-05

## 2 影响因素分析

### 2.1 模型分析

基于声学方法的红外辐射强度监测主要利用的基本原理包括:声学测温原理以及气体辐射原理。目前,国内外对声波法测温技术已经进行了广泛理论和试验研究<sup>[5-11]</sup>,但均还未在舰船上采用。本文在重建舰船排气温度场时将烟囱排气作为完全气体处理。此时,声速与温度的关系可用下式表示:

$$c = \sqrt{\gamma RT} \quad (1)$$

其中, $c$ 为声速; $\gamma$ 为比热比; $R$ 是气体常数; $T$ 是气体温度。对不同气体 $\gamma, R$ 取不同的值。

监测区域的声速由声波传播路径长度和时间确定,对于传感器( $A, B$ )之间发射的声波:

$$\frac{t_{AB} + t_{BA}}{2} = \int_{L_{AB}} \frac{1}{c(x, y, z)} ds \quad (2)$$

其中, $t_{AB}$ 为声波由 $A$ 至 $B$ 的传递时间; $t_{BA}$ 为声波由 $B$ 至 $A$ 的传递时间; $L_{AB}$ 为 $A, B$ 之间的声速传播路径。可据此重建出声速 $c(x, y, z)$ 的分布,进而根据公式(1)求得温度分布,具体过程见文献[4]。

气体辐射是一个非常复杂的过程,建模往往需要建立在一定假设的基础上,下式是一种以灰体假设为基础的 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段烟气红外辐射、烟囱内壁和排烟管辐射的简化模型<sup>[12]</sup>:

$$I_g = A_g \frac{1}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon_g \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/(\lambda T)} - 1} d\lambda \quad (3)$$

$$I_s = A_s \frac{1}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon_s \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/(\lambda T)} - 1} d\lambda \quad (4)$$

式中, $A_g, A_s$ 分别为气体辐射源和固体辐射源的有效辐射面积; $\epsilon_s$ 和 $\epsilon_g$ 分别为气体和固体辐射源的黑度; $c_1$ 为第一辐射常量,其值为 $3.742 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$ ; $c_2$ 为第二辐射常数,其值为 $1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ , $\lambda$ 为波长; $T$ 为热力学温度。

由公式(1)可知,比热比是声速方程的重要系数。由于不同工况下,烟气成分会发生变化,所以烟气比热比是变化的,即使不考虑工况变化因素,也不可能准确的获取其数值,因此需要考虑比热比对辐射强度的影响;由公式(2)可知,传递时间的精确性也将影响到声速的计算。考虑到声波传感器必然具有测量误差,因此还需要考虑测量误差的影响;由公式(3)、式(4)可知,气体以及固体的发射率直接影响到辐射强度的计算,因此需要考虑气体和固体发射率的影响。通过以上的模型分析,可知影响声波法监测舰船排气辐射强度的影响因素主要包括三方面:①烟气的比热比;②声波传感器的测量误差;③烟气及壁面发射率。

以某一烟囱出口为矩形的烟囱排气为例,讨论以上三种因素对辐射强度监测准确性的影响。仿真对象的基本参数如表1所示。

表1 研究对象的基本参数

截面尺寸 /m × m	网格划分	温度分布 T/K	比热比 $\gamma$	气体发射率 $\epsilon_g$	壁面发射率 $\epsilon_s$	传感器数目
10 × 10	4 × 4	$T = 230 - 15^2(x - 0.5)^2 - 12^2(y - 0.5)^2$ <sup>[4]</sup>	1.4	0.5	0.9	8 <sup>[4]</sup>

### 2.2 测量误差的影响

测量误差仅考虑由于环境噪声产生的随机测量误差,并假设随机测量误差为正态分布。通过解算温度场模型和辐射方程,计算各种随机测量误差水平下的红外辐射强度,得到如图1所示的关系。由

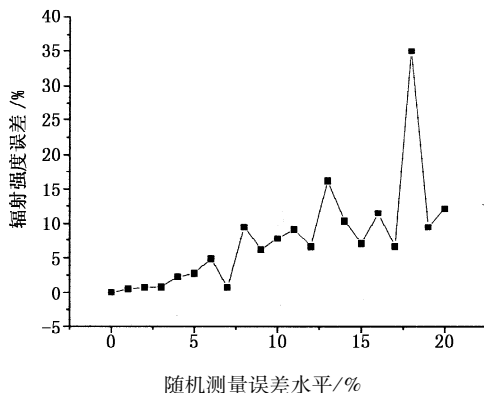


图1 测量随机误差的影响

该图可知:随着随机测量误差的增大,辐射强度的计算误差也增大,两者可近似为线性关系。在10%的随机测量误差下,辐射强度的误差也大约为10%。可知,在随机噪声不太大的环境,声波法监测烟囱辐射强度是有效、可靠的。

### 2.3 烟气比热比的影响

图2为烟气比热比的误差与辐射强度计算误差的对应关系。由图可知,当烟气比热比的误差达到10%时,辐射强度的计算误差可达到100%左右,比热比对辐射强度计算的准确性具有显著的影响。因此在应用声波法监测排气辐射强度时,必须对烟气性质准确标定,以获取准确的烟气比热比,从而保证监测技术的良好应用效果。

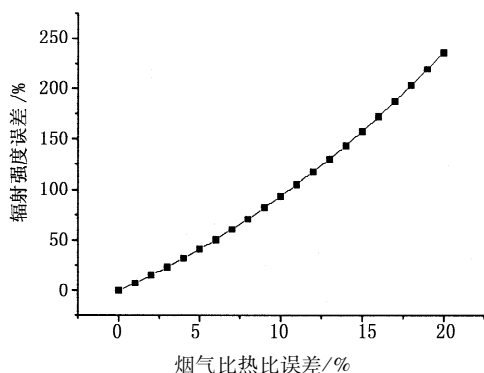


图2 烟气比热比的影响

#### 2.4 发射率的影响

图3和图4分别为气体发射率和壁面发射率对辐射强度计算的影响。由图可知,发射率与辐射强度可近似为线性关系,但相同误差水平下,壁面发射率对辐射强度计算的影响比气体发射率大。这是因为,排烟管和烟囱内壁等固体壁面的红外辐射的比重比烟羽辐射的比重大的缘故。从以上的分析可知,虽然烟囱部位辐射的诱因是因为高温的排气,但是烟气的辐射特性对总体辐射的影响相对于气体因素是最小的。因此不必花费更大的精力用于对烟气辐射特性参数的研究上。

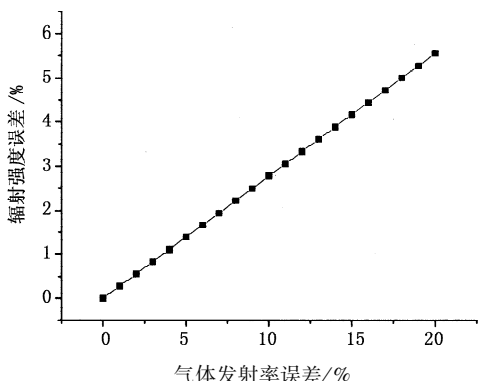


图3 气体发射率的影响

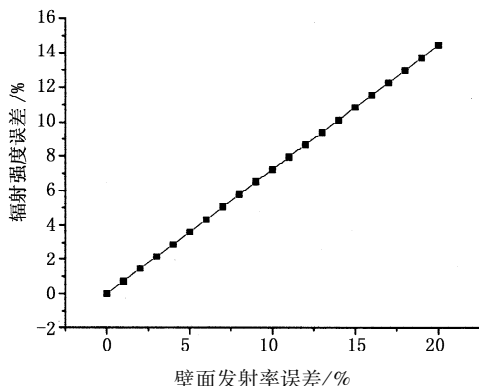


图4 壁面发射率的影响

### 3 结论

通过实例仿真对声波法监测舰船烟囱红外辐射

强度的影响因素进行研究的结果表明:烟气的热物性、辐射源的辐射特性参数以及环境因素是影响舰船红外辐射强度监测准确性的最主要的三种因素。其中,烟气比热比的影响程度最大,然后依次是壁面发射率、环境噪声、气体发射率。因此,提高红外辐射监测的准确性可从如下三个方面着手:准确确定烟气的热物性参数,准确掌握辐射源的辐射特性参数以及设法降低环境噪声。

#### 参考文献:

- [1] 蒋耀庭,王跃. 红外隐身技术与发展[J]. 红外技术, 2005, 25(5): 7-9.
- [2] 黄峰,汪岳峰,懂伟,等. 基于灰度相关的红外隐身效果评价方法研究[J]. 光子学报, 2006, 35(6): 928-931.
- [3] 陈翹,杨立. 海面舰艇红外隐身效能评估[J]. 激光与红外, 2006, 36(5): 335-337.
- [4] 初云涛,华志刚,刘元春. 基于声波法的舰船排气红外温度场的仿真重建研究[J]. 激光与红外, 2009, 39(5): 65-71.
- [5] Lu, K Wakai, et al. Acoustic computer tomographic pyrometry for two-dimensional measurement of gases taking into account the effect of refraction of sound wave paths [J]. Measurement Science & Technology, 2000, 11, (11): 692-697.
- [6] Sielschott H, Wübbeling F. Waveform inversion in acoustic pyrometry [C]. 1st World Congress on Industrial Process Tomography. Buxton, Greater Manchester, 1999: 14-17.
- [7] Fukayama Y, Imada N, Shimohira K, et al. A combustion control applying an acoustic gas temperature measuring technique [C]. JFRC 20th Anniversary. Osaka, Japan, 1997.
- [8] 沈国清,安连锁,姜根山,等. 基于声学CT重建炉膛二维温度场的仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(2): 48-53.
- [9] 李言钦,周怀春,何其伟. 采用声波法监测四角切圆流场二维分布特性的模拟研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, (11): 219-223.
- [10] 李言钦,周怀春,周红新. 声波法监测炉内二维速度场冷模实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, (13): 117-122.
- [11] Li Yanqin, Zhou Huaichun. Experimental study on acoustic vector tomography of 2-D flow field in an experiment-scale furnace [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2006, 17(2): 113-122.
- [12] 袁江涛,杨立,陈翹,等. 现代舰船红外辐射及其控制策略分析[J]. 激光与红外, 2006, 36(10): 943-947.