

水下缩比航行体热尾流的红外探测实验*

杨卫平, 张志龙, 李吉成

(国防科技大学 自动目标识别国防科技重点实验室, 湖南 长沙 410073)

摘要:根据缩比模型,建立缩比红外成像实验测试系统,对水下航行体的体积、航行深度、运动速度、尾流排放等进行缩比设计,设计多种实验工况,可实现缩比目标模型红外尾流的静态和动态测试。一方面明确红外尾流的可探测性,另一方面掌握红外尾流可探测性的影响因素以及红外尾流的变化规律,为下一步工作奠定基础。缩比实验结果表明,利用区域灰度均值和均方差的起伏变化可有效探测水下航行体水面尾迹。

关键词:缩比模型;航行体;相似性;静态测试;动态测试

中图分类号:TP391 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2016)04-107-06

Experimental test system design for thermal wakes of submerged vehicle based on scale model

YANG Weiping, ZHANG Zhilong, LI Jicheng

(National Key Laboratory of Automatic Target Recognition, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: According to similarity principles, an infrared imaging experimental test system based on scale model was set up, such work conditions as scale model based vehicle volume, submerged depth, movement, wake discharging, and etc, were designed so that the static and dynamic thermal wake detection tests of scaled vehicle were realized. The detectability of submerged vehicle thermal wakes on one side was determined, and the influencing factors at thermal wakes detection and changing rules of the wakes were found, which lays a foundation for future work. Scale model experimental tests show that the thermal wakes from submerged vehicle can be effectively detected out via the substantial changes of regional gray mean and gray mean variation.

Key words: scale model; submerged vehicle; similarity; static test; dynamic test

水下航行体探测在军民领域均具有重要的地位。为了有效发现水下航行体,研究其探测手段和方法具有重要的军事意义。目前,水下航行体的探测技术除了传统的声呐探测外,还有多种非声探测技术^[1-15],如激光雷达探测、磁探测以及热红外探测等技术,但各种探测技术都有其各自的局限性和适用场合。红外探测以其探测范围大、昼夜工作、被动探测、隐蔽性强等优点获得了广泛关注^[11-15]。然而,由于海洋自身的复杂性,实验条件的限制等,直接对实际目标进行实验研究不仅成本高、各方面影响因素较多,而且实施起来相当困难。为了摸索航行体目标尾流探测的可行性,往往要先在室内进行实验研究,利用缩比模型开展系统的实验测试,发现探测边界条件、尾流形成的影响因素以及实现可探测的成像规律等,具有明显的优势。因此,为了探索尾流红外探测的可行性,本文设计实现了红外尾流探测缩比实

验验证系统,便于开展红外尾迹探索研究。

1 相似性原理

在流体力学中,构成力学相似的两个流动系统,一个指实际的流动现象,称为原型;另一个指在实验中进行重演的流动现象,称为模型。所谓力学相似,是指两个流动系统中相应点处的各种物理量构成各自的固定比例关系。对于一般的流体运动,力学相似要求满足:几何相似、运动相似和动力相似等。

当模型的边界形状和原型的边界形状相似时,称为几何相似。设 L_p 为原型特征长度, L_m 为模型特征长度,称 δ_L ($\delta_L = L_p/L_m = \text{常数}$)为模型比尺。一般情况下,模型比尺越小越能反映原型的流动情况。但是,在现实中往往由于实验条件的限制,模型比尺不能做得太小。

当两个流动现象的运动状态与运动轨迹呈几

* 收稿日期:2015-04-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61101185);部委探索基金资助项目(7131222)

作者简介:杨卫平(1968—),男,陕西西安人,副教授,博士,硕士生导师,E-mail:wpyang@126.com

何相似,或原型与模型流动中对应点处的速度和加速度的大小维持各自固定的比例关系且方向相同时,称为运动相似。当两个流动现象达成运动相似时,他们之间相应质点的运动轨迹也呈几何相似,并且通过相应线段的时间也呈固定的比例,即时间比尺 $\delta_t = t_y/t_m = \text{常数}$,这时速率比尺 $\delta_v = V_y/V_m = \delta_L/\delta_t = \text{常数}$ 。

当原型和模型流动中对应点处各种作用力的大小维持各自固定的比例关系且方向相同时,称为动力相似。设 F_y 和 F_m 分别为原型和模型的外力,则力的比尺为 $\delta_F = F_y/F_m$ 。由牛顿第二定理可知: $F = \rho W a$, 其中 ρ 为密度, W 为体积, a 为加速度。由此可得, $\delta_F = (\rho_y/\rho_m) (W_y/W_m) (a_y/a_m) = \delta_\rho \delta_L^3 \delta_a$, 其中 $\delta_a = \delta_L/\delta_t^2 = \text{常数}$ 为加速度比尺, δ_ρ 为密度比尺。因此,力的比尺也可写为 $\delta_F = \delta_\rho \delta_L^2 \delta_v^2$ 。

牛顿相似定律是判定两个流动动力相似的一般规律。牛顿相似定律中的外力 F 是作用于流体的所有外力之和。在本文考虑的问题中,两个相似水流中起主要作用的是重力。因此,在模型实验中,只要使起主要作用的重力满足相似条件,就能够基本反映出流体的运动状态。这种只考虑重力的动力相似条件称为重力相似准则。

设 G_y 和 G_m 分别为原型和模型的重力,则重力比尺为 $\delta_G = G_y/G_m$ 。由于 $G = \rho W g$, 其中 g 为重力加速度。由此可得, $\delta_G = (\rho_y/\rho_m) (W_y/W_m) \cdot (g_y/g_m) = \delta_\rho \delta_L^3 \delta_g$ 。

要使在重力作用下原型和模型水流相似,同样必须满足动力相似的一般规律。由于在作用力 F 中仅考虑重力 G , 因而 $F = G$, 即 $\delta_F = \delta_G$ 。由此可得, $\delta_\rho \delta_L^3 \delta_g = \delta_\rho \delta_L^2 \delta_v^2$, 化简得 $\delta_v^2/(\delta_L \delta_g) = 1$, 即 $V_y^2/(g_y L_y) = V_m^2/(g_m L_m)$ 。

定义 $Fr = V/\sqrt{gL}$, 该无量纲常数表示惯性力与重力的比值,称为弗劳德数,则重力相似准则为 $(Fr)_y = (Fr)_m$, 即两个几何相似的水流在重力作用下达成动力相似,则它们的弗劳德数相等,反之亦然。在该重力相似准则下,可得相关的比尺换算关系为: $\delta_t = \delta_L^{0.5}$, $\delta_v = \delta_L^{0.5}$, $\delta_F = \delta_L^3$ 。

对于几何相似的流场,还需要温度场相似和热流量相似,即要求对应点的温度成比例,并且在对应点上通过其相互对应的微元上的热流量方向相同、大小成比例。如用 θ 表示温度,用 q 表示热流量,则有 $\delta_\theta = \theta_y/\theta_m = \text{常数}$, 而 $\delta_q = q_y/q_m = \text{常数}$ 。在密度分层流体的情况,对于几何相似的流场,同时还需要密度场相似,即要求对应点的密度

成比例,如用 ρ 表示背景密度,则有 $\delta_\rho = \rho_y/\rho_m = \text{常数}$ 。

2 缩比目标热尾流的红外探测实验

2.1 模型实验系统的构成

根据相似性原理,对航行体的缩比模型进行了设计,建立了如图 1 所示的航行体尾流探测缩比实验系统,从而可以有针对性地开展实验研究。一方面探索尾流可探测的影响因素,另一方面探索缩比模型下尾流的可探测性,为实际尾流的可探测性研究奠定方法基础。

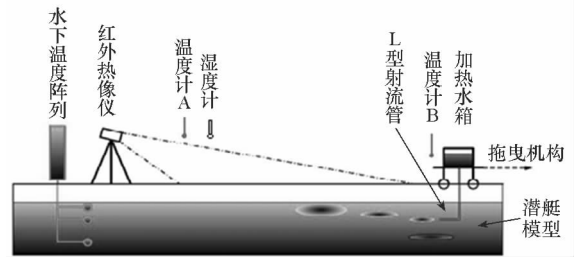


图 1 水下航行体红外尾流探测缩比实验系统构成
Fig. 1 Infrared imaging experimental test system based on scale model for under-water vehicle wake detection

该实验系统主要由以下要素构成:

- 1) 密度分层风生波水槽: 用来模拟航行体目标排热过程。
- 2) 加热水箱: 用来模拟目标排热过程。
- 3) L 型射流管: 用来模拟排热过程。
- 4) 目标模型: 按照缩比模型制作的标准航行体模型。
- 5) 红外热像仪: 用来探测热尾流在水面上的红外特征。
- 6) 温度计: 用来测量空气温度和水体温度。
- 7) 湿度计: 用来测量空气湿度。

2.2 模型实验的关键参数设计

由于实验水槽水深深度有限,为了模拟航行体航行深度,选取 1:200 的几何相似比。在该几何相似比下,假设实验水深 $h = 0.2 \text{ m}$, 则相当于实际水深为 40 m。

由于热射流主要为浮升运动,因此实验水槽底部对热射流浮升的影响可以忽略。

在弗劳德数相似的条件,如果热浮升主要是浮力的作用,则动力学相似意味着模型与原型的弗劳德数一致。

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (1)$$

密度弗劳德数一致可以表示为:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL \frac{\Delta\rho}{\rho_a}}} \quad (2)$$

其中: ρ_a 为周围水的密度, $\Delta\rho$ 为密度差。

温度弗劳德数一致可以表示为:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL \frac{\Delta T}{T_a}}} \quad (3)$$

其中: T_a 为周围水的密度, ΔT 为密度差。

按照上述相似性可以得到相似关系为:

尺度比: $L_r = L_p/L_m$;面积比: L_r^2 ;体积比: L_r^3 ;

速度比: $V_r = \sqrt{L_p/L_m}$;时间比: $T_r = L_r/V_r = \sqrt{L_r}$;流量比: $Q_r = V_r \cdot L_r^2 = L_r^{2.5}$ 。

以某航行体的相关参数为参照,按照1:100的比例尺对实验系统进行设计,此时 $L_r = 200$,则速度比 $V_r = 14.1$,时间比 $T_r = 14.1$,流量比 $Q_r = 565\ 685$ 。表1是按照相似比为200时某航行体和模型的主要参数对比情况。

表1 相似比200时实艇参数与模型参数

Tab.1 Parameters of prototype and model with similarity ratio 200

参数项	相似比	实艇参数	模型参数
艇长	200	107.6 m	0.538 m
艇宽	200	12.9 m	0.064 5 m
艇高	200	10.9 m	0.054 5 m
航行深度	200	20 m	0.40 m
		25 m	0.50 m
		30 m	0.60 m
		35 m	0.70 m
		40 m	0.80 m
航行体极速	14.1	25 nod (46.3 km/h)	0.91 m/s
航速	14.1	5 nod	0.18 m/s
		10 nod	0.36 m/s
排水管直径	200	0.5 m	2.5 mm
排水流速	14.1	1.411 m/s	0.1 m/s
排水量	565 685	1000 t/h	0.491 047 mL/s

2.3 模型实验的工况设计

在不考虑密度跃层的条件下,主要研究目标的水面红外特征,并分析其不同工作状态下红外探测的可行性。为此,设计了如下5个工况:

1) 工况1:固定深度30 cm,固定流量(按照相似比设计,参见表1中的数据,取射流管直径2.5 mm),改变射流温度差(ΔT 从10℃至65℃),研究红外尾迹的可探测性。

2) 工况2:固定深度30 cm,固定射流温差(按照典型目标实际情况设计,即冷却水与海水的温差 $\Delta T = 30$ ℃),改变流量(按相似比设计,参考表1,通过改变射流管直径来达到改变流量的目的,设计了若干种不同管径的L型射流管),探索不同流量下红外尾迹的可探测性。

3) 工况3:按照典型目标实际情况设定固定的射流温差(如 ΔT 取30℃)、固定的流量(如射流管径取2.5 mm),改变航行深度(如 H 取30 cm,35 cm等),探索不同航行深度下航行体红外尾迹的可探测性。

4) 工况4:固定航行深度30 cm,固定射流温差(ΔT 取为30℃),固定流量(缩比模型射流管径为2.5 mm),带缩比模型(按照相似比设计,参见表1),改变拖曳速度,探索不同航速下航行体红外尾迹的可探测性。

5) 工况5:按照典型目标实际情况,设定固定的温度差($\Delta T = 30$ ℃)和流量(缩比模型射流管径2.5 mm,出水速度1.41 m/s),固定拖曳速度,改变航行深度(如 $H = 20$ cm, $H = 30$ cm等),探索不同深度航行体红外尾迹的可探测性。

3 实验结果与分析

在相似性原理的基础上,设计的缩比实验系统在实际实施过程中面临着诸多困难和需要解决的问题,如航行体的设计、射流流量和流速的控制、尾流浮升规律的建立、尾流浮升路径的探测、水面尾迹的探测等。为此在相似模型设计时综合考虑了可实现性和可操作性,在不影响实验系统参数的情况下,对模型设计进行了适当简化,通过加热水箱及其高度、L型射流管及其管径实现了射流流量和流速的控制。通过拖曳结构和典型航行体的缩比实现航行体的运动控制。通过在加热水箱中加入颜料实现尾流浮升路径的探测以及水体温度阵列测量的部署。通过对红外热像仪获取的红外图像的现场实时增强便于对水面尾迹的观察和探测等,从而使得缩比实验系统得以顺利展开。

根据上述构建的系统和模型参数,在实验室密度水槽中对5种工况设计了各种不同航深、热射流温度、出流时间、航速等100多个组合工况,对热射流浮升过程中轨迹特性、面温度变化特性、表面红外特征等问题,开展了系统的实验测试。可以看出,这5种工况主要考虑了两种情况:第一种是密度均匀流体中静止热射流水面红外特征,第二种是密度均匀流体中拖曳热射流水面红外特征。

为了判断是否有尾流出现,可根据红外图像

区域灰度值和区域灰度均方差随时间的变化来判断。当区域灰度均值起伏(绝对灰度差)大于 10 或者区域灰度均方差起伏大于 1.5 时,可以认为尾流出现,水面出现红外尾迹特征,且绝对差(起伏)越大,尾迹越明显。

通过实验测试表明,无论是静止热射流测试还是拖曳运动热射流测试,在实验室环境下均取得了比较好的实验效果。在设定的温差、流量、航深、航速下水面均有较明显的红外尾迹特征,也就是说,在这种特定缩比模型下红外尾迹是可探测的。表 2、表 3 分别给出了密度均匀流体中静止热射流水面红外特征实验测试结果和密度均匀流体中拖曳热射流水面红外特征实验测试结果。表 2 中的数据含义同表 3,均表示绝对灰度差/灰度均方差起伏值。可以看出,在表中所列实验工况下,由于区域灰度绝对差大于 10 或者区域灰度均方差起伏大于 1.5,使得水面红外尾迹可探测。

表 2 密度均匀流体中静止热射流浮升特性实验测试

Tab. 2 Test results of thermal wake of vehicle under static jet flow in uniform density fluid

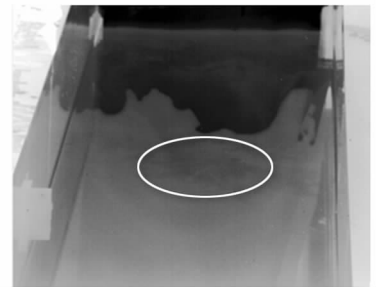
温差 $\Delta T/$ °C	缩比水深/cm							
	20	25	30	35	35	35	40	
管径	管径	管径	管径	管径	管径	管径	管径	
2.5 mm	2.5 mm	2.5 mm	2.5 mm	3.5 mm	5 mm	5 mm	2.5 mm	
60	—	—	—	50/5.0	—	—	—	
55	—	—	—	50/3.0	—	—	—	
50	—	—	—	40/6.0	—	—	—	
40	—	—	—	30/5.0	—	—	—	
30	12/ 1.5	15/ 3.0	20/ 4.5	16/ 3.0	60/ 5.0	60/ 10.0	20/ 2.0	
25	—	—	—	—	36/5.0	—	—	
20	—	—	—	—	15/1.5	—	—	
15	—	—	—	—	15/1.5	—	—	
10	—	—	—	—	20/5.0	—	—	

表 3 密度均匀流体中拖曳热射流浮升特性实验测试

Tab. 3 Test results of thermal wake of vehicle under towing jet trial in uniform density fluid

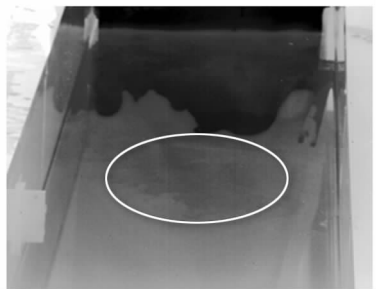
航深/ cm	速度/ (m/s)	绝对灰度差/ 灰度均方差起伏	可探 测性	备注
30	0.516	10/ 1.5	明显	热尾迹
35	0.516	12/ 1.5	明显	热尾迹
40	0.516	15/ 2.0	明显	热尾迹
45	0.516	20/ 1.5	明显	热尾迹
50	0.516	15 / 1.5	明显	热尾迹
55	0.26	15 / 1.5	明显	热尾迹
	0.516	15 / 1.5	明显	热尾迹

图 2 为静止热射流实验测试典型实验图像数据,图 2(a)为尾流出现 14 s 后的中波红外图像,图 2(b)为尾流出现 35s 后的中波红外图像,可以看出,相比图 2(a),图 2(b)的尾迹有所放大,图中曲线所指示的区域即为水面红外特征出现和发生变化的区域。图 2(c)、图 2(d)为中波红外图像目标区域灰度均值与均方差随时间的变化曲线,由图中可以看出,当尾迹出现时,区域灰度均值和区域灰度均方差均出现了较大的起伏。图 3 则给出了动态拖曳热射流实验测试典型实验图像数据,图 3(a)和图 3(b)给出了间隔 39 s 的中波红外图像(由于对比度较小,图像清晰度不高,展示



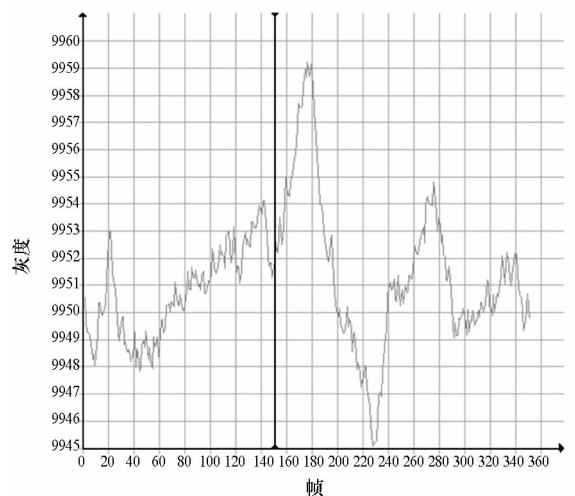
(a) 中波红外图像(14 s 后)

(a) Mid-wave infrared image (14 seconds later)

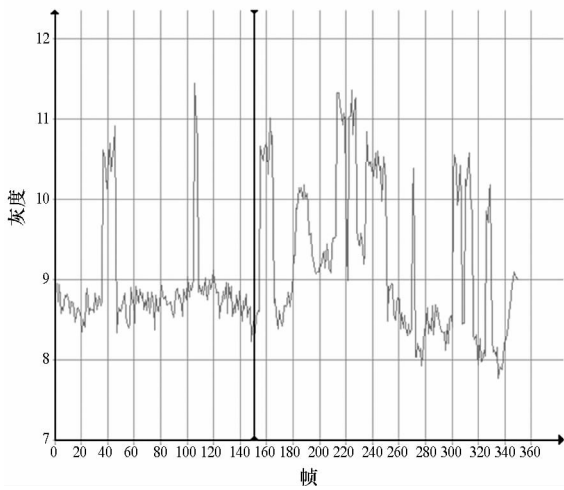


(b) 中波红外图像(35 s 后)

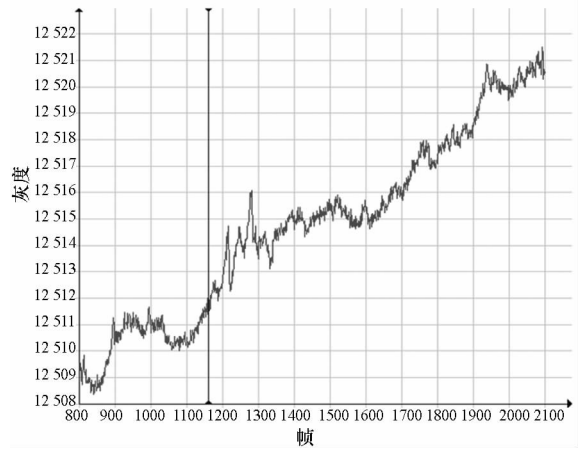
(b) Mid-wave infrared image (35 seconds later)



(c) 中波红外图像目标区域灰度均值随时间的变化
(c) Time varying curve of target regional gray mean in mid-wave infrared image



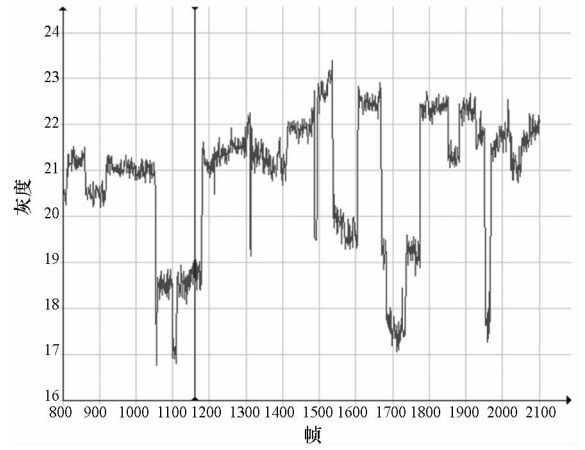
(d) 中波红外图像目标区域灰度均方差随时间的变化
(d) Time varying curve of target regional gray deviation in mid-wave infrared image



(c) 中波红外图像区域灰度均值的变化曲线
(c) Time varying curve of target regional gray mean in mid-wave infrared image

图2 静止热射流实验测试典型实验图像数据
Fig.2 Typical experimental image data of static jet trial
效果欠佳), 矩形标示区域图像发生的变化情况可由图3(c)和图3(d)给出的中波红外图像目标区域灰度均值与均方差随时间变化的曲线体现。可以看出, 区域的均值持续增加, 而区域的均方差则发生了起伏变化, 表明水面出现了红外尾迹。

此外, 本缩比实验测试系统的构建, 还可以为尾流浮升特性及规律等研究提供条件。在相应工况设计下, 也进行了大量实验探索研究, 限于篇幅, 对此将不再讨论。



(d) 中波红外图像区域灰度均方差的变化曲线
(d) Time varying curve of target regional gray mean deviation in mid-wave infrared image



(a) 9 s 后中波红外图像及兴趣区放大图
(a) Mid-wave infrared image after 9 seconds



(b) 39 s 后中波红外图像
(b) Mid-wave infrared image after 39 seconds

图3 拖曳热射流实验测试典型实验图像数据
Fig.3 Typical experimental image data of towing jet trial

为了确定红外成像灰度与温度的对应关系, 对所用的红外热像仪进行了一系列的黑体标定, 图4给出了一组未考虑机芯芯温度时中波红外热像仪的定标曲线(其中积分时间设定为8 ms, 宽视场)。由图4可知, 温差1℃大致相当于100个灰度等级, 也就是说, 10个灰度等级相当于0.1℃左右。但考虑到各方面的因素, 确定判定准则为灰度起伏超过10个灰度级或者灰度均方差变化超过1.5, 对应区域温度差0.15℃。随后采用测温仪和红外热像仪进行了实验对比, 进一步验证了灰度等级与温度之间的换算关系。根据上述实验结果, 验证了文献[11]中理论分析的结果。相应的数值仿真实验也验证了缩比模型试验的正确性。限于篇幅, 这里仅给出了缩比模型下红外尾迹可探测性实验的结果与分析。

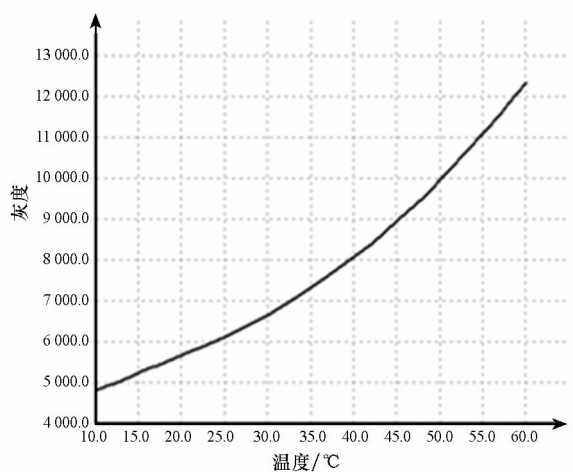


图 4 未考虑机芯温度时中波红外热像仪的定标曲线

Fig. 4 Calibrated curve of mid-wave infrared imager without considering camera temperature

4 结论

在相似性原理的基础上,为了系统地研究目标尾迹浮升特性及水面红外特征,建立了缩比红外成像实验测试系统。在此基础上,设计了静止热射流和拖曳热射流两种情况下的五类工况,在实验室水槽环境下利用缩比模型对目标红外尾迹的可探测性进行了比较全面深入的探索研究,发现了缩比目标尾迹水面的红外可探测性。当区域灰度均值起伏超过 10 或者灰度均方差变化超过 1.5 以上(对应区域的温度差大于 0.15 °C 左右)时,目标红外尾迹可探测,为进一步开展目标尾迹红外可探测性研究积累了经验。然而,由于环境温度、水槽中水体温度、空气湿度以及红外热像仪的工作状态等因素对红外尾迹的可探测性有较大影响,实验结果仍需深化,加之实际海洋环境情况更加复杂,对水下航行体红外尾迹可探测性研究仍有很长的路要走。

参考文献 (References)

- [1] Swain S K, Trinath K, Tatavarti. Non-acoustic detection of moving submerged bodies in ocean [J]. *International Journal of Innovative Research and Development*, 2012, 1 (10): 361 - 372.
- [2] Wren G G, May D. Detection of submerged vessels using remote sensing techniques [J]. *Australian Defence Force Journal*, 1997, 127: 9 - 15.
- [3] Zou N, Nehorai A. Detection of ship wakes using an airborne magnetic transducer [C]//*Proceedings of the 32nd Asilomar Conference on Signals, Systems & Computers*, 1998, v2: 1316 - 1321.
- [4] Kawahara T, Toda S, Mikami A, et al. Automatic ship recognition robust against aspect angle changes and occlusions [C]//

- Proceedings of IEEE Radar Conference (RadarCon)*, 2012: 864 - 869.
- [5] Benny F D, Swain S K, Trinath K, et al. System for monitoring underwater turbulence [C]//*Proceedings of National Conference on Advanced Communication and Computer Technologies (ACCT)*, 2012: 381 - 385.
- [6] 赵长明, 黄杰. 未来激光探潜和对潜通信技术的发展 [J]. *光学技术*, 2001, 27(1): 53 - 56.
ZHAO Changming, HUANG Jie. Development of laser-submarine communication and detection technology in the future [J]. *Optical Technique*, 2001, 27(1): 53 - 56. (in Chinese)
- [7] 马治国, 王江安. 一种新的激光探潜方法 [J]. *海军工程大学学报*, 2002, 14(6): 77 - 79.
MA Zhiguo, WANG Jiangan. A new method for detecting submarine by laser [J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2002, 14(6): 77 - 79. (in Chinese)
- [8] 崔国恒, 于德新. 非声探潜技术现状及其对抗措施 [J]. *火力与指挥控制*, 2007, 32(12): 10 - 13.
CUI Guoheng, YU Dexin. Status quo of non-acoustics antisubmarine detecting technology and its countermeasures [J]. *Fire Control and Command Control*, 2007, 32(12): 10 - 13. (in Chinese)
- [9] 王祖典. 航空反潜非声探设备 [J]. *电光与控制*, 2006, 13(4): 6 - 9.
WANG Zudian. Airborne anti-submarine non-acoustic detection equipment [J]. *Electronics Optics & Control*, 2006, 13(4): 6 - 9. (in Chinese)
- [10] 万俊, 张晓晖, 饶炯辉, 等. 基于独立成分分析的舰船气泡尾流后向散射光信号处理 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(1): 244 - 250.
WAN Jun, ZHANG Xiaohui, RAO Jionghui, et al. Processing of backscattering signal of warship wake flow based on independent component analysis [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 244 - 250. (in Chinese)
- [11] 鲁新平, 沈振康. 红外热成像系统应用于反潜探测的分析 [J]. *红外与激光工程*, 2002, 31(3): 217 - 220.
LU Xinping, SHEN Zhenkang. Analysis of IR imaging system used in anti-submarine detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, 31(3): 217 - 220. (in Chinese)
- [12] 江传富, 杨坤涛, 王江安, 等. 机载红外热像探潜技术 [J]. *华中科技大学学报 (自然科学版)*, 2006, 34(7): 90 - 92.
JIANG Chuanfu, YANG Kuntao, WANG Jiangan, et al. Detection of submarines by air borne IR imaging system [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science)*, 2006, 34(7): 90 - 92. (in Chinese)
- [13] 于龙. 红外成像仪用于探潜技术的研究 [J]. *红外*, 2004, 4: 31 - 35.
YU Long. Study of IR imaging system used in anti-submarine detection [J]. *Infrared*, 2004, 4: 31 - 35. (in Chinese)
- [14] 王江安, 国妍, 顾建农. 红外探潜热流流的理论与试验研究 [J]. *激光与红外*, 2002, 32(3): 159 - 162.
WANG Jiangan, GUO Yan, GU Jiannong. The theoretical and trial study of thermal wake in the infrared detection of submarines [J]. *Laser & Infrared*, 2002, 32(3): 159 - 162. (in Chinese)
- [15] 吴猛猛, 陈伯义, 杨立. 水下运动体尾流水面特征的研究进展与应用 [J]. *红外技术*, 2009, 31(11): 639 - 646.
WU Mengmeng, CHEN Boyi, YANG Li. The study progress and application on the surface features of wake behind a going body underwater [J]. *Infrared Technology*, 2009, 31(11): 639 - 646. (in Chinese)