

基于受力分析的落水人员漂移轨迹预测研究

刘同木^{1,3}, 张炜², 曹永港^{1,3}, 林冠英^{1,3}

(1. 国家海洋局南海调查技术中心, 广东 广州 510310; 2. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081;
3. 国家海洋局南海维权技术与应用重点实验室, 广东 广州 510310)

摘 要: 介绍了一种基于受力分析的预报海上搜救落水人员漂移轨迹的理论方法。对落水人员进行受力分析, 得出落水人员在风、波浪、海流作用下的漂移轨迹数学模型, 利用龙格库塔数值方法求解漂移轨迹。通过48 h海上仿真人员漂移试验进行验证, 结果表明: 落水人员理论计算漂移轨迹与海上试验实际漂移轨迹吻合良好, 说明该理论计算方法可靠。同时, 通过理论计算分析了波浪对落水人员漂移轨迹的影响, 发现波浪对落水人员漂移轨迹的影响相对较小, 但是考虑波浪的情况下更接近实际漂移轨迹, 预报精度提高2.86%。

关键词: 海上搜救; 落水人员; 漂移轨迹; 风致漂移; 受力分析; 波浪影响

中图分类号: U676.8⁺3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2017)01-0066-06

1 引言

快速、准确、动态地预测海上落水人员的漂移轨迹, 可以大大缩小搜救范围, 提高搜救效率, 节约搜救成本, 对海上搜救具有重要意义。国内外很多学者在海上落水人员漂移轨迹预测领域开展了大量的研究工作。目前, 关于落水人员的漂移轨迹预测方法主要有海上试验方法和力学分析方法。海上试验方法引入风致漂移(leeway)的概念, 风致漂移是指在风作用下物体产生的相对水流的漂移速度^[1]。海上漂移物体在风的作用下会沿着与风向成一定夹角的方向漂移, 可以将风压漂移速度分为与风风向一致的DWL和垂直风向的CWL两部分^[2-3]。Allen等^[4-8]通过海上漂移试验数据线性回归求取落水人员风致漂移系数, 认为落水人员的漂移速度由风致漂移速度和流致漂移速度线性叠加而成, 根据漂移速度采用拉格朗日追踪法进行漂移轨迹预报。李云等^[9]介绍了国家海洋环境预报中心发展的海上失事目标搜救应急预报系统, 该系统基于四阶精度的拉格朗日漂移路径模型预报了落水人员的

漂移轨迹。Breivik等^[10]建立了挪威海和北海的搜救模型, 其流场计算采用POM(Princeton Ocean Model)模式, 并采用了蒙特卡洛算法确定搜寻区域, 计算效果较好。Breivik等^[11]介绍了获取小型物体(0.1~25 m)漂移特性的标准化海上试验方法。海上试验方法对于风致落水人员的漂移影响研究比较有效, 但是对于波浪对落水人员漂移的影响有一定经验性。此外, 海上试验求取经验系数的方法需要耗费大量的人力、物力和财力, 不同的落水姿态、不同的衣着情况需要重新进行试验, 因此亟需建立一种数学模型采取力学理论的方法预报落水人员的漂移轨迹。

海上落水人员的漂移运动是在风、浪、流等外力作用下的复杂合成运动。理论上, 只要精确分析落水人员的受力情况, 就可以通过动力学原理预测其漂移轨迹。Anderson等^[12]综述了海上搜救漂移物体数学模型的研究进展, 提出了通过受力分析建立预报模型的理论框架。Su^[13]研究了落水人员的漂移特性, 通过水槽实验测得了不同衣着、不同姿态落水人员的阻力系数。Su等^[14]通过简化的受力平衡

收稿日期: 2016-06-24; 修回日期: 2016-09-05。

基金项目: 国家海洋局南海分局局长基金项目(1416); 国际海底区域资源研究开发基金项目(1511410312035)。

作者简介: 刘同木(1980-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事海上搜救、海洋观测技术研究。E-mail: liutongmu@smst.gz.cn

分析研究了落水人员的漂移特性,并设计实验获得了落水人员的风阻、流阻系数,但是由于没有准确测量海流且海试时间仅几个小时,因此海上试验的验证效果不够理想。理论分析方法的难点在于简化受力分析,确定受力系数,并通过海上试验进行验证。

本文对落水人员进行受力分析,得出落水人员在风、浪、流作用下的漂移轨迹数学模型,利用龙格库塔数值方法求解漂移轨迹,并与中国近海海上搜救应急辅助决策系统海上漂移水文气象观测试验结果进行对比。

2 理论模型

为简化海上落水人员的受力计算,仅考虑其在海面风、海流、波浪及科氏力的共同作用下的漂移运动,运动方程如下:

$$m \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{F}_c = \vec{F}_a + \vec{F}_w + \vec{F}_{wa} \quad (1)$$

式中: m 为落水人员质量; V 为漂移运动速度; t 为时间; F_c 为科氏力; F_a 为风作用力; F_w 为海流作用力; F_{wa} 为波浪作用力。建立平面直角坐标系,东向为 x 轴正方向,西向为 x 轴负方向,北向为 y 轴正方向,南向为 y 轴负方向,假设落水人员在水平和垂向速度分别为 u 和 v ,将风、浪、流作用力及科氏力分别投影至水平方向和垂直方向,则式(1)可变换为:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= u \\ \frac{dy}{dt} &= v \\ \frac{du}{dt} &= \frac{1}{m} (F_a^x + F_w^x + F_{wa}^x - F_c^x) \\ \frac{dv}{dt} &= \frac{1}{m} (F_a^y + F_w^y + F_{wa}^y - F_c^y) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

2.1 风作用力

风作用力为:

$$F_a = \frac{1}{2} \rho_a C_a S_a |V_a - V| (V_a - V) \quad (3)$$

式中: ρ_a 为空气密度, C_a 为风作用系数, S_a 为风作用横截面积, V_a 为风速。

假设风速为 v_a , 风向角为 φ_a , 根据式(3)有:

$$F_a^x = \frac{1}{2} \rho_a C_a S_a \sqrt{(-v_a \sin \varphi_a - u)^2 + (-v_a \cos \varphi_a - v)^2}$$

$$(-v_a \sin \varphi_a - u) \quad (4)$$

$$F_a^y = \frac{1}{2} \rho_a C_a S_a \sqrt{(-v_a \sin \varphi_a - u)^2 + (v_a \cos \varphi_a - v)^2} \quad (5)$$

$$(v_a \cos \varphi_a - v)$$

2.2 海流作用力

海流作用力为:

$$F_w = \frac{1}{2} \rho_w C_w S_w |V_w - V| (V_w - V) \quad (6)$$

式中: ρ_w 为海水密度; C_w 为海流作用拖曳系数; S_w 为海流作用横截面积; V_w 为海流速度。假设流速为 v_w , 流向角为 φ_w , 根据式(6)有:

$$F_w^x = \frac{1}{2} \rho_w C_w S_w \sqrt{(v_w \sin \varphi_w - u)^2 + (v_w \cos \varphi_w - v)^2} \quad (7)$$

$$(v_w \sin \varphi_w - u)$$

$$F_w^y = \frac{1}{2} \rho_w C_w S_w \sqrt{(v_w \sin \varphi_w - u)^2 + (v_w \cos \varphi_w - v)^2} \quad (8)$$

$$(v_w \cos \varphi_w - v)$$

2.3 波浪作用力

波浪作用力为:

$$F_{wa}^x = \frac{1}{8} \rho_w g L C_{wa} H_w^2 \sin \theta \quad (9)$$

$$F_{wa}^y = \frac{1}{8} \rho_w g L C_{wa} H_w^2 \cos \theta \quad (10)$$

式中: ρ_w 为海水密度; g 为重力加速度; C_{wa} 为波浪作用系数; L 为特征长度; H_w 为平均波高; θ 为浪向角。

2.4 科氏力

科氏力为:

$$F_c^x = -mf(v - v_w \cos \varphi_w) \quad (11)$$

$$F_c^y = -mf(u - v_w \sin \varphi_w) \quad (12)$$

式中: $f = 2\Omega \sin \psi$ 为科氏参数; Ω 为地球自转角速度; ψ 为漂移位置纬度。

2.5 求解算法

运用四阶 Runge—Kutta 方法对微分方程组(2)求解, Runge—Kutta 方法经典格式如下:

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= f(x_i, y_i) \\ k_2 &= f\left(x_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{h}{2} \cdot k_1\right) \\ k_3 &= f\left(x_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{h}{2} \cdot k_2\right) \\ k_4 &= f\left(x_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{h}{2} \cdot k_3\right) \\ y_{i+1} &= y_i + \frac{h}{6} \cdot (k_1 + 2 \cdot k_2 + 2 \cdot k_3 + k_4) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

设 t_j 时刻, 各参数值为 u_j, v_j, x_j, y_j , 则在 $t_{j+1} = t_j + h$ 时刻, 各参数值的标准四阶 Runge—Kutta 格式为:

$$\left. \begin{aligned} u_{j+1} &= u_j + \frac{h}{6} (k_{11} + 2k_{12} + 2k_{13} + k_{14}) \\ v_{j+1} &= v_j + \frac{h}{6} (k_{21} + 2k_{22} + 2k_{23} + k_{24}) \\ x_{j+1} &= x_j + \frac{h}{6} (k_{31} + 2k_{32} + 2k_{33} + k_{34}) \\ y_{j+1} &= y_j + \frac{h}{6} (k_{41} + 2k_{42} + 2k_{43} + k_{44}) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中: 各 k 值如下:

$$\left. \begin{aligned} k_{i1} &= f_i(t_j, u_j, v_j, x_j, y_j, v_{aj}, \varphi_{aj}, v_{wj}, \varphi_{wj}, H_{wj}, \theta_j) \\ k_{i2} &= f_i\left(t_j + \frac{h}{2}, u_j + \frac{h}{2}k_{11}, v_j + \frac{h}{2}k_{21}, x_j + \frac{h}{2}k_{31}, y_j + \frac{h}{2}k_{41}, v_{aj}, \varphi_{aj}, v_{wj}, \varphi_{wj}, H_{wj}, \theta_j\right) \\ k_{i3} &= f_i\left(t_j + \frac{h}{2}, u_j + \frac{h}{2}k_{12}, v_j + \frac{h}{2}k_{22}, x_j + \frac{h}{2}k_{32}, y_j + \frac{h}{2}k_{42}, v_{aj}, \varphi_{aj}, v_{wj}, \varphi_{wj}, H_{wj}, \theta_j\right) \\ k_{i4} &= f_i\left(t_j + \frac{h}{2}, u_j + \frac{h}{2}k_{13}, v_j + \frac{h}{2}k_{23}, x_j + \frac{h}{2}k_{33}, y_j + \frac{h}{2}k_{43}, v_{aj}, \varphi_{aj}, v_{wj}, \varphi_{wj}, H_{wj}, \theta_j\right) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中 $i=1, 2, 3, 4$ 。通过以上算法即可计算出各个时刻落水人员的漂移速度及漂移位置坐标。

渔船装载有 300 kHz 带底跟踪声学多普勒海流剖面仪 (美国 RDI 公司制造) 和船舶用自动气象站, 对仿真人员漂移轨迹线的海流和风进行连续观测。300 kHz ADCP 安装于船舷侧水面下, 垂向测量间隔为 1 m, 每 2 s 自动记录一次海面以下 5 m 至海底的流速、流向; 船舶用自动气象站距离海面 7 m, 每 10 min 采集一组风速、风向、气温和气压等海面气象要素数据。波浪采用国家海洋局在粤东 QF301 大型浮标锚定观测。

3.3 试验数据

试验期间, 海面风矢量随时间变化见图 1, 2 月 17 日 7:00 至 15:00 时, 刮轻微东北风, 15:00 时后逐渐转为西北风, 风力 3 级, 2 月 18 日 00:00 时至 2 月 19 日 8:

3 海上模拟人漂移试验

2011 年 2 月 17—19 日, 国家海洋局南海工程勘察中心在广东粤东沿海海域 (114°30'—115°E, 22°13'—22°30'N) 开展模拟人漂流试验, 试验海域水深浅于 40 m, 漂移试验连续进行 48 h。

3.1 模拟人漂流浮标

模拟人漂流浮标体黄色、配有标识及灯光 (红色, 在夜间能闪烁) 警示; 浮标身長 1.88 m, 体重 80 kg, 结构及在水中姿态与落水后的人体相仿, 身体沉于水下, 仅头部露出水面, 头顶装有自动定位系统, 主要用于落水人员漂流路径预报的验证, 每 10 min 采集并发送一次定位信息。

3.2 海流、风、波浪观测

试验过程中安排一艘渔船对仿真人员进行跟踪,

00 时, 持续刮东北风, 风力 3—5 级, 平均风速 5.2 m/s, 最大风速 8.9 m/s。图 2 为试验海区流矢量随时间变化的曲线图, 从图中可以看出, 平均流速为 0.5 m/s, 最大为 0.8 m/s, 流向在西—南之间变动, 以西南向为主。图 3 为试验海区波浪随时间变化的曲线图, 平均波高 1.6 m, 最大波高 2.2 m, 浪向以东北向为主。

4 漂移轨迹模型验证

为了验证仿真人员漂移轨迹理论模型, 通过漂移试验测量了试验海区的风、海流、波浪等海洋环境参数, 同时通过北斗卫星定位自动记录仿真人的实际漂移轨迹。将实测的海洋环境参数代

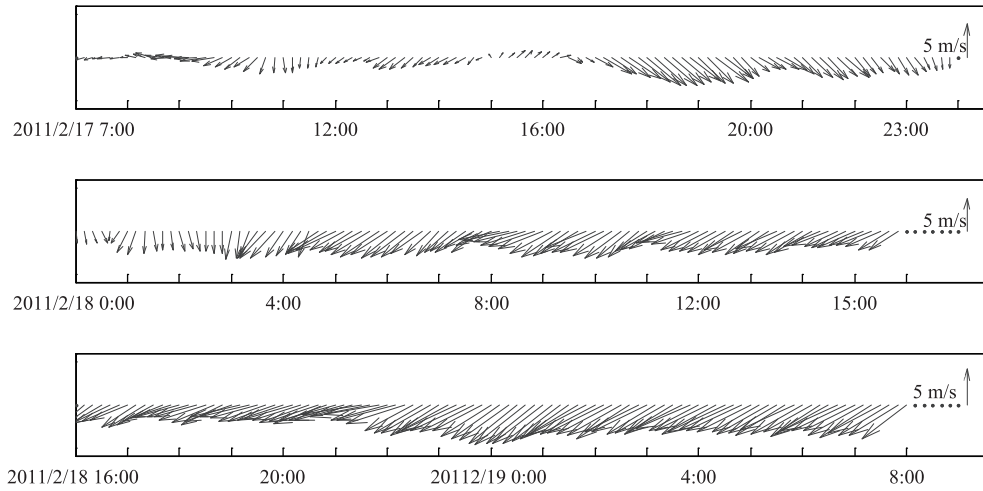


图1 风速风向过程矢量图

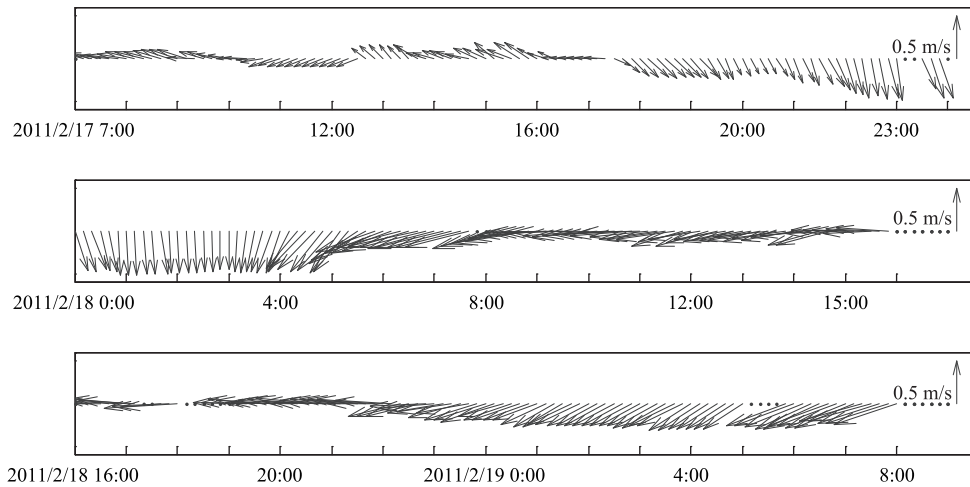


图2 海流过程矢量图

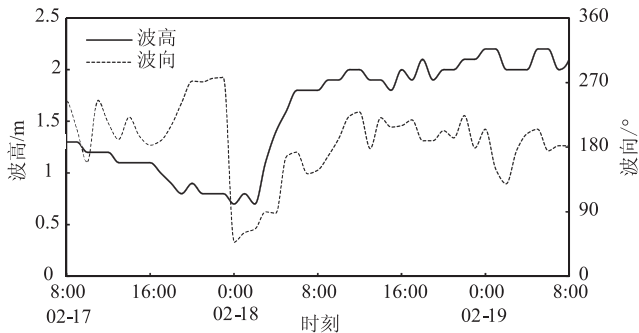


图3 波浪过程曲线

入理论模型进行迭代计算得到仿真人的理论漂移轨迹。由于观测风的高度与作用在仿真人上风的

高度不一致,必须进行订正。

假设海面风速垂向分布满足 1/7 衰减定律,即:

$$V_w(z) = (z/z_r)^{1/7} V_{wr} \quad (16)$$

式中: V_{wr} 为海平面某高度的风速; z_r 为距离海平面的高度,仿真入漂移试验中风传感器里海平面高度 z_r 为 7 m,取仿真入露出海面高度为 0.2 m,根据式(16)即可得出作用在仿真入上的真实风速,取风向与观测风向一致。

理论模型计算中,假设海区海水和密度为恒定值,取空气密度 ρ_a 为 1.224 kg/m^3 ,海水密度 ρ_w 为 1030 kg/m^3 。假设模拟人漂移时头始终垂直向上且姿态不变,根据模拟人结构尺寸可得风作用横截面

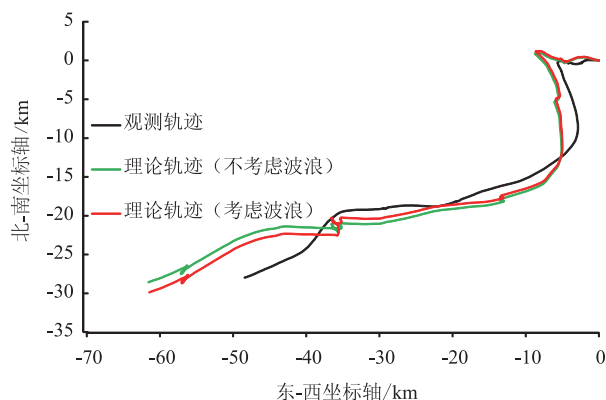


图4 理论漂移轨迹与观测漂移轨迹对比图

积 S_a 为 0.2 m^2 , 海流作用横截面积 S_w 为 1.0 m^2 , 波浪特征长度 L 取 1.88 m 。仿真质量取 80 kg , 重力加速度 g 为 9.81 m/s^2 , 地球自转角速度 Ω 取 $7.929 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$, 漂移位置纬度 ψ 取 22.3° 。

风作用系数 C_a 和海流作用系数 C_w 与模拟人外形、姿态及雷诺数有关, 一般通过实验测得。Su 等^[14] 通过水槽实验测得了模拟人在不同姿态和速度下的风作用系数 C_a 和海流作用系数 C_w 。根据实验结果, C_a 取 0.131 , C_w 取 0.989 。波浪作用系数 C_{wa} 可以通过水动力学软件 HydroStar 计算求得^[15], 取 C_{wa} 为 0.01 。

为方便迭代计算建立以漂移起点为原点、东西方向为横轴、南北方向为纵轴的平面直角坐标系, 将仿真北斗定位经纬度坐标转化为平面坐标。取迭代步长为 10 min , 假设初始漂移速度为 0 m/s , 利用 MATLAB 软件进行编程计算, 将仿真漂移理论计算结果与实际测量漂移轨迹进行对比, 理论计算中分考虑波浪和不考虑波浪两种情形, 对比结果见图4。

从图4可以看出, 落水人员理论漂移轨迹与海上试验实际漂移轨迹吻合良好, 通过 48 h 的海上试验验证结果表明该理论计算方法稳定可靠。波浪对落水人员漂移轨迹的影响相对较小, 但是考虑波浪的情况下更接近实际漂移轨迹。为了定量的描述波浪对预报精度的影响, 分别计算出每个时刻不考虑波浪的理论预测位置值与实际位置的距离 $D1$ 和不考虑波浪情况理论计算位置与实际位置距离 $D2$ 。定义波浪影响系数 I 如下:

$$I = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (D1_i - D2_i) / D1_i \times 100\% \quad (17)$$

I 为正值时为缩小搜救范围, I 为负值时为增加搜救范围。

通过计算可得落水人员波浪影响系数为 2.86% , 说明考虑波浪情况下较不考虑波浪可以提高 2.86% 的预报精度, 减小搜救范围。

5 结论

本文合理选取了落水人员的风浪流作用系数, 得出了落水人员在风、波浪、海流作用下的漂移轨迹数学模型, 利用龙格库塔数值方法求解了落水人员的漂移轨迹, 并通过 48 h 海上仿真漂移试验进行验证, 结果表明落水人员理论计算漂移轨迹与海上试验实际漂移轨迹吻合良好, 说明该理论计算方法可靠。研究表明, 考虑波浪比不考虑波浪作用下预报精度提高 2.86% 。

本文对海上搜救落水人员进行风、浪、流的受力分析, 提供了一种仅需要通过实验室或数值软件求得漂移物的力学系数, 从动力学模型预测落水人员漂移轨迹的方法。该方法可以充分考虑波浪及漂移物外形特征等因素的影响, 可以推广致落水人员的其他姿态以及其他种类海上漂移物, 节约海上试验成本, 对业务化海上搜救模型的改进有积极意义。在后续研究中, 需要研究穿着不同种类救生衣和不同落水姿态情况下落水人员的风、浪、流力学特性, 进一步完善落水人员搜救模型。

参考文献:

- [1] Allen A A, Plourde J V. Review of Leeway: Field Experiments and Implementation[M]. Review of Leeway Field Experiments & Implementation, 1999: 1-351.
- [2] Allen A A. Leeway Divergence[R]. US Coast Guard Research and Development Center technical report CG-D-05-05. Groton: National Technical Information Service, 2005: 1-128.
- [3] Øyvind Breivik Ø, Allen A A, Maisondieu C, et al. Advances in Search and Rescue at Sea[J]. Ocean Dynamics, 2012, 63(1): 83-88.
- [4] Allen A A, Robe R Q, Morton E T. The Leeway of Persons-In-Water and Three Small Craft[J]. Available through the National Technical Information Service, 1999.
- [5] 周水华, 杨阳, 冯伟忠. 广东海域模拟人和无动力渔船海上漂移试验研究[J]. 热带海洋学报, 2013, 32(1): 87-94.
- [6] 肖文军, 堵盘军, 龚茂珣, 等. 上海沿海海上搜救预测模型系统的研究和应用[J]. 海洋预报, 2013, 30(4): 79-86.
- [7] 张娟, 杨阳, 周水华, 等. 莺歌海海域漂移物漂移特征分析[J]. 海

- 洋预报, 2013, 30(3): 73-77.
- [8] 黄娟, 徐江玲, 高松, 等. 基于海上试验对海上漂移物运移轨迹影响因素的分析[J]. 海洋预报, 2014, 31(4): 97-104.
- [9] 李云, 刘钦政, 王旭. 海上失事目标搜救应急预报系统[J]. 海洋预报, 2011, 28(5): 77-81.
- [10] Breivik Ø, Allen A A, Maisondieu C, et al. Wind-Induced Drift of Objects at Sea: The Leeway Field Method[J]. Applied Ocean Research, 2011, 33(2): 100-109.
- [11] Breivik Ø, Allen A A. An Operational Search and Rescue Model for the Norwegian Sea and the North Sea[J]. Journal of Marine Systems, 2011, 69(1-2): 99-113.
- [12] Anderson E, Odulo A, Spaulding M. Modeling of Leeway Drift [R]. Report No. CG-D-06-99. Springfield, VA: National Technical Information Service, 1998.
- [13] Su T C. A Study on the Drift Characteristics of Person-in-Water [J]. 해양환경안전학회지, 1997, 3(1): 85-92.
- [14] Su T C, Robe R Q, Finlayson D J. On Predicting the Leeway and Drift of A Survival Suit Clad Person In-Water[M]. PN, 1997.
- [15] 张峥, 王平. 二阶波浪漂移力的回归分析[J]. 中国造船, 2012, 53(1): 207-217.

Drift trajectory prediction of the person-in-water based on the force analysis

LIU Tong-mu¹, ZHANG Wei², CAO Yong-gang¹, LIN Guan-ying^{1,3}

(1. South China Sea Marine Survey and Technology Center of State Oceanic Administration, Guangzhou 510310 China; 2. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 10081 China; 3. Key Laboratory of Technology for Safeguarding of Maritime Rights and Interests and Application, State Oceanic Administration, Guangzhou 510310 China)

Abstract: Based on force analysis, a theoretical model predicting the person-in-water drift trajectory for search and rescue missions is presented in this work. The drift model is based on the law of force analysis which govern the motion of a floating body in a given wind, surface current and wave field. The result shows that the model predictions are in agreement with field test results. This illustrates that the presented models can provide reliable person-in-water drift trajectory for the search and rescue. At the same time, through the theoretical calculation of wave impact on people in the water drift trajectory, study found that the effect of wave on people in the water trajectory is relatively small, but considering the wave condition more close to the actual trajectory, improve the prediction accuracy of 2.86%.

Key words: search and rescue; person-in-water; drift trajectory; leeway; force analysis; wave affect