

两栖艇消防炮喷射反力研究

蒋旭东 施巍 钟琳 贾文龙

(应急管理部上海消防研究所 上海 200032)

摘要: 文章采用理论计算与仿真分析的方法, 研究两栖救援艇消防炮喷射时的反力。基于 Creo 软件建立了消防炮的三维模型, 并将模型导入 Fluent 中, 分析不同流量下消防炮喷射反力的大小。建立了两栖艇消防炮喷射自稳定系统, 以解决两栖艇在进行水上灭火作业时稳定性变差和消防炮喷射落点产生偏差等问题, 为消防炮在额定工况下对两栖艇喷射反力的实际测量提供技术方案。

关键词: 理论计算; 仿真分析; Fluent; 消防炮喷射反力

0 引言

近年来, 随着河流、湖泊等沿岸基础设施的建设和水运行业的快速发展, 船只、码头和水上休闲中心等交通工具或建筑设施火灾频发, 给人们的生命财产安全带来严重威胁。两栖艇具有水陆通过性好、机动性高和环境适应能力强等特点, 能够在最短时间内抵达灾害事故现场, 开展灭火救援作业。然而, 两栖艇在进行消防灭火作业时, 由消防炮喷射产生的反力会作用在两栖艇本身, 易造成艇体的姿态和位置发生改变。特别是在消防炮处于压力高、流量大的工况下, 必将产生较大的喷射反力, 导致两栖艇稳定性变差和消防炮的喷射落点产生偏差, 严重影响灭火救援效率。如何准确分析消防炮喷射时产生的反作用力大小, 对于研究两栖艇灭火作业的安全性具有重要意义。

1 船用消防炮的结构特点

消防炮是一种以射流形式喷射灭火剂的装置^[1], 主要由底座、喷嘴、流道管路、控制部件和连接附件等部分组成。GB 19156-2019《消防炮》中规定, 消防炮连续喷射时水、泡沫混合液流量大于 16L/s 或干粉平均喷射速率大于 8kg/s, 脉冲喷射时单发喷射水、泡沫混合液量不低于 8L^[2]。消防炮按照使用场合不同有陆用和船用之分, 按照使用灭火剂的不同又可以分为消防水炮、消防泡沫炮、消防干粉炮和两用消防炮。对于小型水陆两栖救援艇, 主要装配有固定式消防水炮, 利用艇内安装的船用消防泵或

大功率手抬机动泵从所处水域直接取水。消防炮将水泵输送的具有一定压力和流量的水通过能量转换(压力能转化为动能), 使其以很高的速度从炮口喷出, 形成射流以扑灭一定距离外的火灾^[3]。船用消防炮按照炮头结构的不同可以分为直流式消防炮和导流式消防炮。直流式消防炮普遍采用圆台收缩型喷嘴, 其造型简单、加工方便, 但只能喷射直流水柱, 作业方式比较单一; 导流式消防炮的喷嘴结构相对复杂, 主要由喷嘴体、喷嘴芯和芯座等组成, 可以通过调节喷嘴体和喷嘴芯的间隙来控制流量的大小, 实现直流或喷雾(即开花)两种不同的作业方式, 应用范围更加广泛。某公司生产的直流式消防水炮和导流式消防水炮分别如图 1、图 2 所示。两种不同类型的消防水炮喷嘴结构见图 3。

2 消防炮喷射反力理论计算

为适应火场情况的变化和灭火救援的要求, 消防炮的炮身通常会被设计成一个或多个弯管结构, 通



图 1 直流式消防水炮



图2 导流式消防水炮

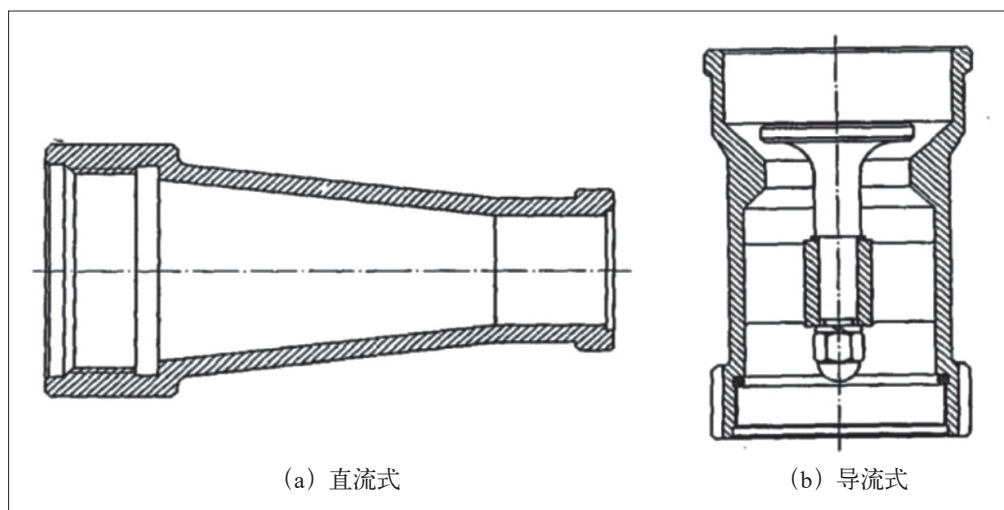


图3 两种不同类型的消防水炮喷嘴结构

过安装在炮身上的蜗轮蜗杆机构实现水平回转和上下俯仰运动，以改变消防炮的喷射方向和角度。当消防炮工作时，压力流体流经消防炮内腔的各个弯管，随着流道形状和方向的变化，流体被迫改变流动姿态，相应的流道固体壁面会受到流体的反作用力^[4]。消防炮弯管受力分析图如图4所示。在计算消防炮喷射的反作用力时，可以采用动量定理或高压腔内外表面压力分布进行理论分析^[5]。以S形回转结构的单流管消防水炮为例进行研究，取离消防炮出口处最后一个弯管作为研究对象，为了简化计算，视消防水炮流道内水的运动为稳定不可压缩流动，以平均流速代替实际水流各质点的变化流速。

根据水力学恒定总流的动量方程可以得到消防炮的喷射反力：

$$\Sigma \vec{F} = \rho q_v (\beta_2 \vec{v}_2 - \beta_1 \vec{v}_1) \quad (1)$$

式中： $\vec{F}$ —消防炮受到的喷射反力(N)；

ρ —水的密度，取 998.2kg/m^3 ；

q_v —水的体积流量(m^3/s)；

$\vec{v}_1$ 、 $\vec{v}_2$ —消防炮截面1和截面2的平均流速(m/s)。

由于消防水炮存在弯管、稳定器和喷嘴等结构，其内部流道结构复杂，水的压力、流速和方向时刻发生较大的改变，并且水的压力高、速度快，属于非定常流动，雷诺数大于临界雷诺数，属于紊流状态^[6]。因此，动量修正系数 β 取值为1。

其分量式为：

$$\Sigma F_x = \rho q_v (v_{2x} - v_{1x}) \quad (2)$$

$$\Sigma F_y = \rho q_v (v_{2y} - v_{1y}) \quad (3)$$

$$\Sigma F_z = \rho q_v (v_{2z} - v_{1z}) \quad (4)$$

为了简化计算，视消防炮流道的横截面积基本不变，由连续性方程可以得到水在流道内的流速基本不变。当消防炮水平喷射时，流速的大小 $v_{1x}=v_1$ —消防炮入口流速， $v_{2x}=v_2$ —消防炮出口流速，此时产

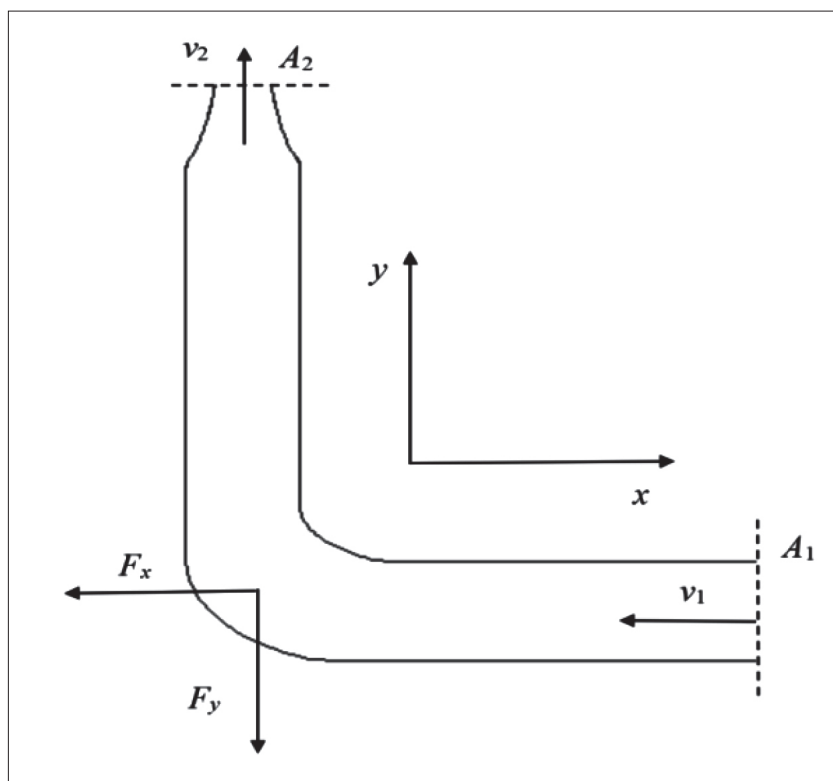


图4 消防炮弯管受力分析图

生的喷射反力最大, 即

$$F = \sqrt{(\rho q_v v_1)^2 + (\rho q_v v_2)^2} \quad (5)$$

由流体的连续性方程可以得到:

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad (6)$$

式中: A_1 、 A_2 —消防炮入口和出口的截面积 (m^2)。

3 消防炮喷射反力仿真分析

3.1 控制方程的建立

由于受到消防炮弯管弯曲程度、流体的流动马赫数和流体运动方向等诸多因素的影响, 压力水在管道内的流动十分复杂。例如, 在管道内壁附近形成分离区, 管道横截面上产生二次流动, 管道方向的突然改变导致局部压力损失增大等现象, 造成了流体总压和能量的损失^[7]。本文选用适用于复杂剪切流、旋流、射流等流动的 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型, 以适应流道内水的复杂流动。

流体在空间直角坐标系下连续方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

动量方程:

$$\frac{\partial \rho \mu_i}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \mu_i \mu_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\mu + \mu_t) \left[\frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \mu_j}{\partial x_i} \right] \right\} + \rho g_i \quad (8)$$

RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型中, 通过大尺度和修正后的粘度项体现小尺度的影响, 而使小尺度运动系统地控制方程中去除。所得 k 方程和 ε 方程分别如式 (9)、式 (10) 所示^[8]:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k \mu_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{\text{eff}} + \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + \rho \varepsilon \quad (9)$$

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k \mu_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} + \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{G_{1\varepsilon}^* \varepsilon}{k} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (10)$$

式中:

$$\begin{aligned} \mu_{\text{eff}} &= \mu + \mu_t; \\ C_u &= 0.0845; \\ \alpha_k &= \alpha_\varepsilon = 1.39; \\ \eta_0 &= 4.377; \\ C_{1\varepsilon} &= 1.42; \\ \beta &= 0.012; \\ G_{1\varepsilon}^* &= C_{1\varepsilon} - \frac{\eta(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\mu^3}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \eta &= (2E_{ij} \cdot E_{ij})^{1/2} \frac{k}{\varepsilon}; \\ E_{ij} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \mu_i}{\partial \mu_j} + \frac{\partial \mu_j}{\partial \mu_i} \right). \end{aligned}$$

3.2 流场仿真

在 Creo 软件中对消防炮建模 (图 5), 然后导入 Fluent 中, 进行喷射反力的仿真分析。消防炮炮身为 S 形流道, 底座内径 100mm, 消防炮流道进口直径 60mm, 消防炮出口直径 56mm。选择流量作为入口边界条件, 出口条件设置为自由出口。固定壁面条件为无滑移边界条件, 采用标准壁面函数处理近壁面区域^[9]。在 Fluent 的材料库中选择流体材料为水, 对 20L/s、30L/s、40L/s、50L/s 和 60L/s 不同的入口流量进行仿真。



图 5 消防炮三维模型

通过流场的仿真, 得到不同水流量消防炮内部水流速的分布情况如图 6 所示。

代入消防炮模型尺寸参数, 得到消防炮喷射反力理论计算与仿真分析结果 (表 1)。

表 1 消防炮喷射反力理论计算与仿真分析结果

流量 / (L/s)	入口速度 / (m/s)	仿真出口速度 / (m/s)	仿真喷射反力 / N
20	2.55	8.64	222.92
30	3.82	12.93	500.88
40	5.09	17.25	890.76
50	6.37	21.56	1391.72
60	7.64	25.87	2003.99

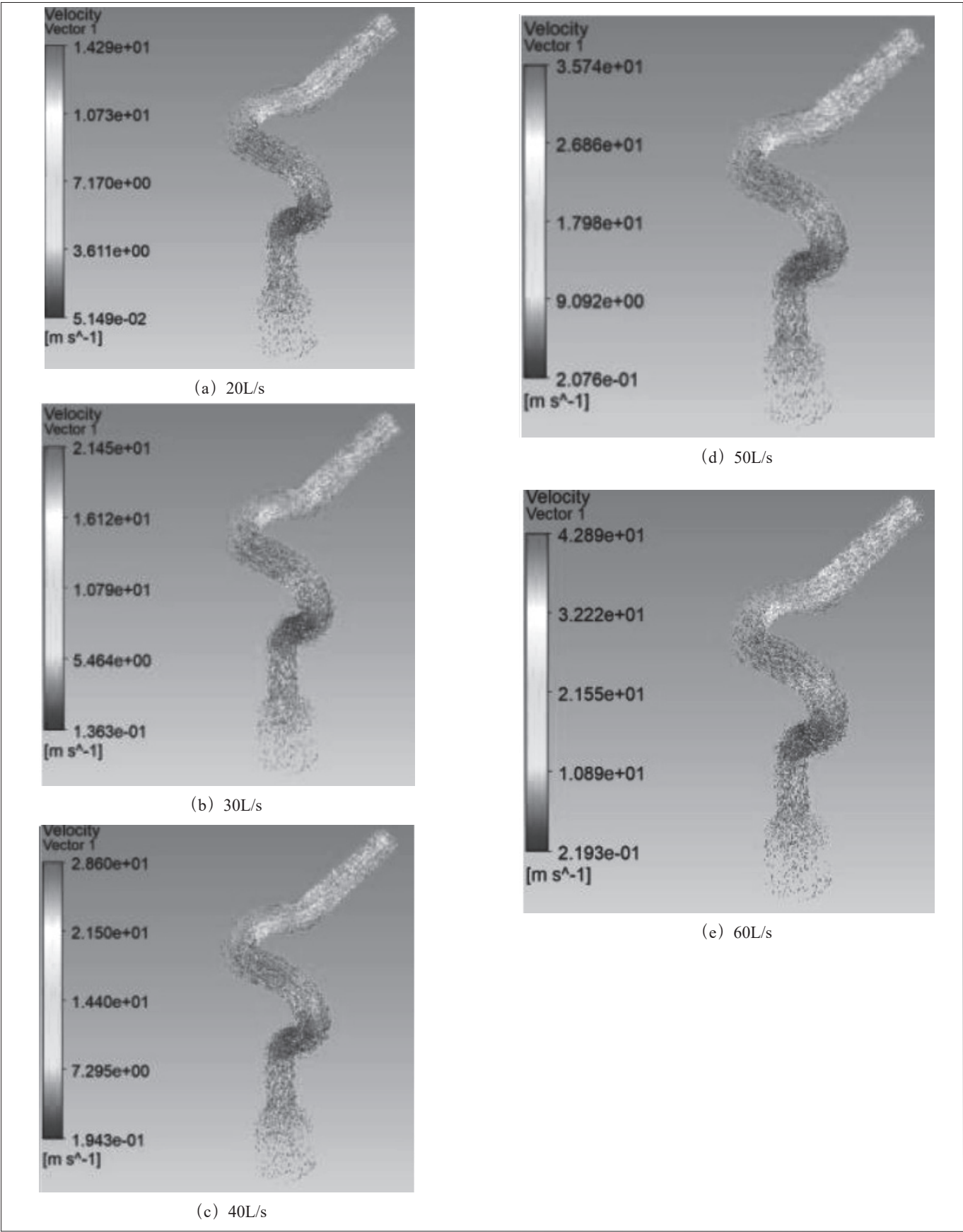


图 6 不同水流量下消防炮内部水流速分布

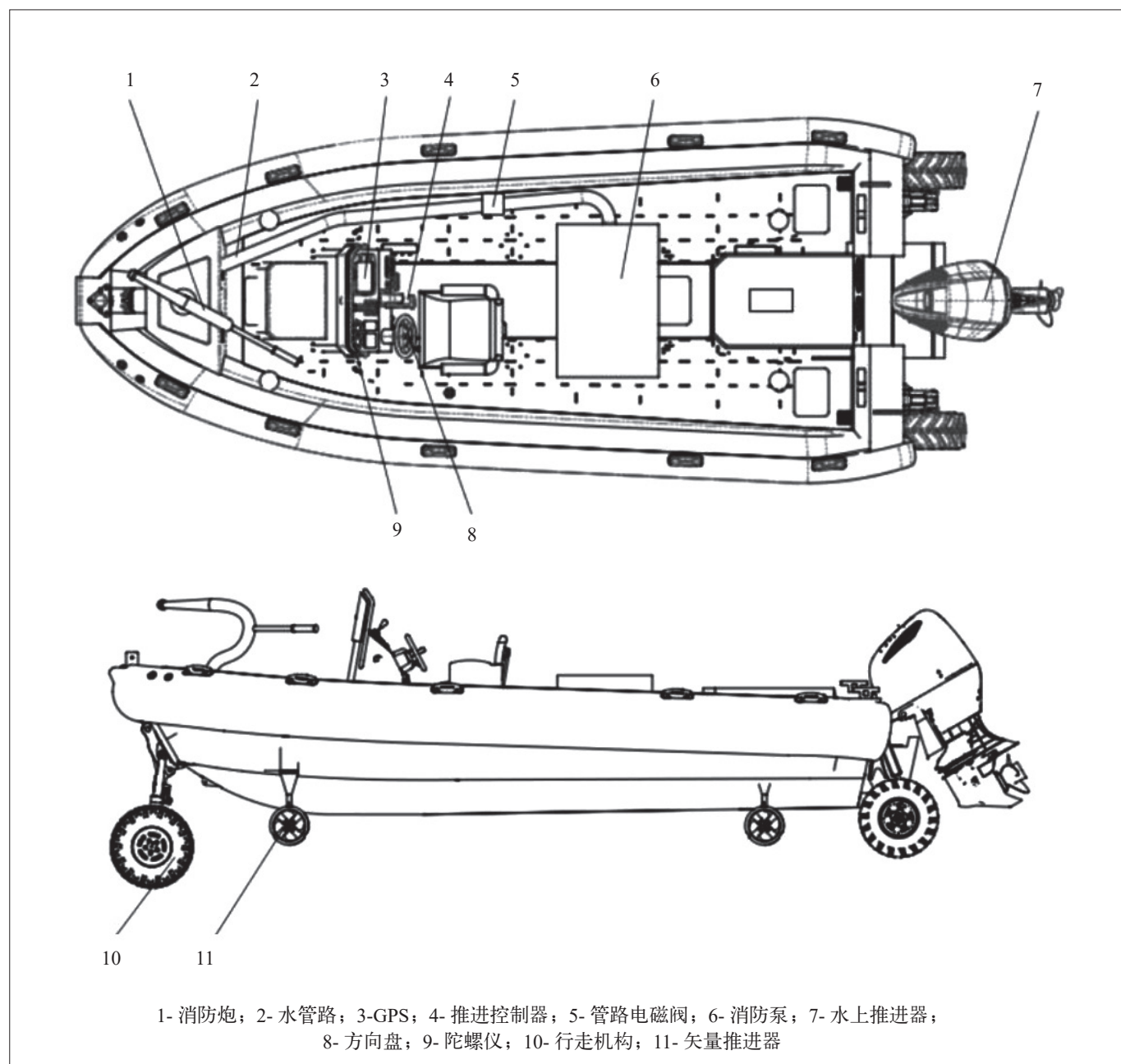


图7 两栖艇消防炮喷射自稳定系统

4 两栖艇消防炮喷射自稳定系统

在压力高、流量大的工况下,消防炮喷射产生的反作用力会很大,影响两栖艇自身的稳定性,并且容易导致消防炮喷射落点的改变。为了解决上述问题,构建了两栖艇消防炮喷射自稳定系统(图7)。该系统主要由控制器、GPS模块、两对矢量推进器、方向角度传感器、矢量推进器、陀螺仪、管路电磁阀和消防炮等部分组成。其中,GPS模块用来把两栖艇的位置偏差信号传输给控制器。两对矢量推进

器分别设置于两栖艇前后位置,对称地分布在两栖艇的左右两侧,能在控制器的控制下将两栖艇稳定地维持在预设位置。陀螺仪、方向盘(方向角度传感器)和水压等数据能修正控制器输出的控制信号。设置在消防炮输水管路中的压力传感器能监测管路中的水压,并将压力信号传输到控制器,作为消防炮喷射反力的参考数据。

5 结语

本文采用理论计算与Fluent仿真的方法得到某

消防炮模型不同流量下的喷射反力,介绍了一种在消防炮喷射时保持两栖艇稳定性的方法。后续需要根据几种不同规格现有产品的结构参数进行理论计算和建模仿真,并通过消防炮喷射反力测试试验做进一步分析。

参考文献:

- [1] 王晶晶. 消防水炮的射流特性研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- [2] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 消防炮: GB 19156-2019[S]. 北京: 中国质检出版社, 2019.
- [3] 史兴堂. 消防炮射程及影响因素研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2001.
- [4] 何猛. 城市主战消防车安全作业研究 [D]. 徐州: 中国矿

业大学, 2018.

[5] 杨友胜, 朱玉泉, 李壮云. 中高压水射流反推力测量 [J]. 机床与液压, 2005(08): 65-66+26.

[6] 俞毓敏. 大射程水炮设计与研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2010.

[7] 江山, 张京伟, 吴崇健, 等. 基于 FLUENT 的 90° 圆形弯管内部流场分析 [J]. 中国舰船研究, 2008(01): 37-41.

[8] 胡国良, 董灵军, 梁炬星. 一种降低水力自摆式消防水炮后坐力的设计方法 [J]. 机械设计与制造, 2010(12): 42-44.

[9] 廖小东. 消防炮机构设计与水力学性能分析 [D]. 南昌: 华东交通大学, 2014.

作者简介: 蒋旭东 (1970.12-), 男, 汉族, 上海人, 本科, 副研究员, 研究方向: 消防装备研究及检测工作。

