

文章编号:1674-8190(2022)06-160-06

水陆两栖飞行器汲水系统结构改进设计与仿真验证

叶庆龙,杜秀军,李文源

(航空工业庆安集团有限公司 航空设备研究所,西安 710077)


摘要: 汲水系统是飞行器灭火系统实现汲水功能的主要系统,改进汲水系统的设计可以缩短汲水时间,提高灭火效率。对某型水陆两栖飞行器的原始汲水系统进行基于计算流体力学的仿真分析,发现其出口位置设置不合理,导致两个出口流量差别过大,汲水时间过长,不满足汲水要求。为了缩短汲水时间,提出两种不同出口位置的汲水结构形式,并通过仿真分析得到出口流量差别较小的出口位置模型,在该模型基础上增加挡板并提出三种不同挡板位置模型。结果表明:当挡板距离管道中线10 mm时,两个出水口流量大致相同,汲水时间较原始汲水系统构型缩短了50%,上述结构改进对后续该型两栖飞行器汲水管路设计具有参考价值。

关键词: 水陆两栖飞行器;汲水系统;计算流体力学;结构改进

中图分类号: V271.5

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2022.06.17

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Improved Design and Simulation Verification of Water Pumping System Structure for Amphibious Aircraft

YE Qinglong, DU Xiujun, LI Wenyuan

(Aviation Equipment Research Institute, AVIC Qing'an Group Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: The water scooping system is the main part of the extinguishing aircraft system for realizing the water scooping function. Improving the design of water scooping system can shorten the time of water scooping and improve fire extinguishing efficiency as soon as possible. CFD-based simulation analysis is performed on the original water scooping system of a certain type of amphibious aircraft. The results show that the unreasonable position of the outlets of the original water scooping system makes the flow rate difference between the two outlets too large and the water scooping time is too long, which is not conform to the water scooping requirements. In order to reduce the scooping time, two structural forms of water scooping system at different outlet positions are designed, and obtain the outlet position model with small volume flow difference by simulation analysis, and design the baffle model with three different position based on the outlet model with small volume flow difference. when the baffle is 10 mm from the center line of the water scooping pipe, the flow rate of the two outlets is roughly the same, and the water scooping time is 50% shorter than that of the original configuration of water scooping system, which is of great significance to the subsequent design of the water scooping pipeline of amphibious aircraft.

Key words: amphibious aircraft; water scooping system; computational fluid dynamics; structural improvement

收稿日期: 2021-07-29; 修回日期: 2022-03-31

通信作者: 叶庆龙, yeql@avic.com

引用格式: 叶庆龙,杜秀军,李文源. 水陆两栖飞行器汲水系统结构改进设计与仿真验证[J]. 航空工程进展, 2022, 13(6): 160-165,183.

YE Qinglong, DU Xiujun, LI Wenyuan. Improved design and simulation verification of water pumping system structure for amphibious aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(6): 160-165,183. (in Chinese)

0 引言

森林火灾严重威胁人民群众生命、财产安全和森林生态环境^[1],传统的消防灭火系统无法满足森林灭火的需求。目前,大型灭火飞机已成为森林航空消防体系不可或缺的装备^[2-3]。相比于无法水面起降的吊舱放水灭火直升机^[4-5],水陆两栖灭火飞行器在森林火灾和其他重大火灾救援中具有明显的优势,包括机动性强、速度快、载水量大等^[6]。其中,我国研制的某型水陆两栖飞行器采用汲水和投放的方法单次可载12 t水,一次性灭火覆盖区域可达4 000余平方米^[7-8]。

当有灭火任务时,水陆两栖飞行器将汲水斗放下,在水面上快速飞行进行汲水,水由汲水斗通过汲水管道借助惯性进入飞机内部水箱,水箱注满水后,飞行器飞往指定地点投水完成灭火任务。该过程涉及复杂的流体分析,目前大多数研究集中于水面飞行的气动情况与投水过程的研究^[9-10],虽然也有部分文献采用计算流体力学(CFD)方法研究了两栖飞机飞行和泵送水的性能关系^[11],但是针对其结构和汲水效果的研究却鲜有报道。

本文根据水面飞行器汲水系统的设计需要,基于CFD方法,针对原始汲水系统构型提出两种不同出口位置模型,对这两种模型进行仿真分析,得到出口流量差别较小的出口模型,在该模型的基础上增加挡板,根据已掌握的工程数据和经验提出三种不同位置挡板模型,通过仿真分析得到出口流量差别较小的挡板模型,以期达到缩短汲水时间,提高灭火效率的目的。

1 CFD方法

1.1 流体控制方程

流体流动要遵循流体连续性方程、动量守恒方程与能量守恒方程,由于飞行器汲水过程不考虑热交换,故管道内水的流动满足流体连续性方程与动量方程。

流体连续性方程即质量守恒方程(Mass Conservation Equation)^[12],其微分形式为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度; u_x 、 u_y 、 u_z 为 x 、 y 、 z 方向上的速

度分量。

动量守恒方程(Momentum Conservation Equation)通过牛顿第二定律推导而出,其本质是流体微元上的合力等于动量对时间的导数。流体微元 x 、 y 、 z 方向上的动量守恒方程^[12]为

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_x \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho u_y)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_y \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho u_z)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_z \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (4)$$

式中: p 为流体微元所受压强; σ_{xx} 、 σ_{yy} 、 σ_{zz} 为分子黏性作用产生的分别作用于微元体在 x 、 y 、 z 方向上的正应力; σ_{xy} 、 σ_{yx} 、 σ_{xz} 、 σ_{zx} 、 σ_{yz} 、 σ_{zy} 分别为微元体在 x 、 y 、 z 方向上的切应力,根据切应力互等定理, $\sigma_{xy} = \sigma_{yx}$ 、 $\sigma_{xz} = \sigma_{zx}$ 、 $\sigma_{yz} = \sigma_{zy}$; f_x 、 f_y 、 f_z 为单位质量力在 x 、 y 、 z 方向上的分量。

1.2 湍流模型

高速水流在管道内的流动为湍流,需要选择合适的湍流模型。1972年,标准 k - ϵ 模型(standard k - ϵ model)由B. E. Launder等^[13]提出,该模型适用范围广,稳定性较好并且具有合适的精度,可用于管道内流体流动计算。由于管道内流动的水可看作不可压缩流体,标准 k - ϵ 模型运输方程^[14-15]可表示为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} G_k \frac{\epsilon}{k} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

式中: k 为湍流动能; μ 为流体动力黏度; μ_t 为湍流动力黏度; G_k 为由平均速度梯度引起的湍流动能产生项; ϵ 为湍流耗散率; $C_{1\epsilon}$ 、 $C_{2\epsilon}$ 、 σ_k 、 σ_ϵ 为常数^[14]。

2 汲水系统结构改进设计流程

原始汲水系统构型由汲水斗、安装座、汲水管、注水管、水阀座组成,如图 1 所示。

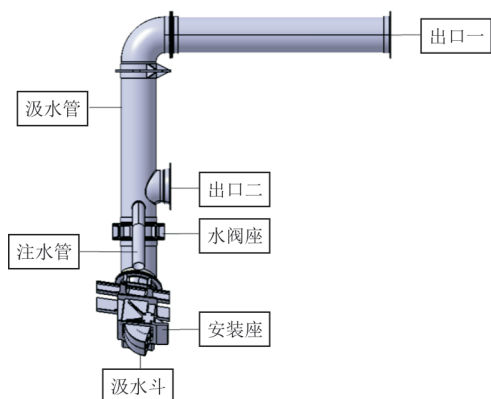


图 1 原始汲水系统构型

Fig. 1 Original configuration of water scooping system

针对原始汲水系统构型,基于 CFD 方法,改进设计思路如下:

(1) 对原始汲水系统构型进行简化处理,得到汲水系统简化模型,对该模型进行基于 CFD 的仿真分析,计算得到两个出口的流量,分析导致出口流量差别过大的原因;

(2) 基于原始汲水系统,提出两种不同出口位置模型,设置相同的边界条件,经过计算找到出口流量差别较小的出口位置模型,作为后续挡板设计的基础模型;

(3) 基于流量差别较小的出口模型,在该模型汲水管内增加挡板,提出三种挡板位置模型,经过计算得到出口流量差别最小的挡板模型,为后续汲水管道的的设计提供思路。

3 原始汲水系统构型仿真分析

3.1 简化模型

为了提高仿真效率,对原始汲水系统构型进行简化处理,处理内容如下:

(1) 飞机在汲水过程中注水口是处于关闭状态的,因此可将原始构型注水口封闭并且将注水管去除;汲水过程中水阀处于打开状态,其对出口流量影响较小,故可将水阀与水阀座去除。

(2) 在汲水斗周围建立方形水域。水域前后左右面至汲水斗壁面距离均至少大于一倍汲水斗尺寸,设置水域的入口和出口边界。

处理后的汲水系统简化模型如图 2 所示。

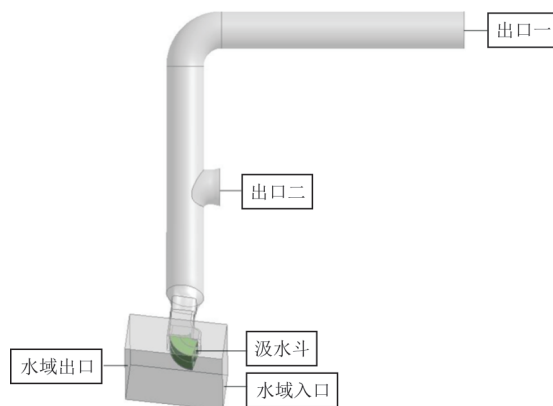


图 2 汲水系统简化模型

Fig. 2 Simplified model of water scooping system

3.2 设置边界条件

(1) 设置方形水域入口的速度为 52.78 m/s (190 km/h),水体积分数为 1。

(2) 出口设置为压力出口边界条件,设置湍流强度为 2%,水力直径为 0.19 m。

(3) 将管道、汲水斗设置为壁面。

3.3 仿真分析

通过 CFD 计算得到出口一、出口二流量曲线,如图 3 所示。

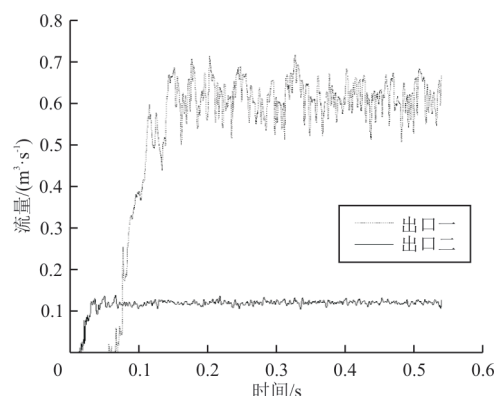


图 3 原始汲水系统模型出口流量图

Fig. 3 The volume flow of outlet in original scooping system model

从图 3 可以看出:稳定时出口一的流量大于出口二,水流稳定时出口一平均流量为 $0.615 \text{ m}^3/\text{s}$,注满 3 t 水箱需要 4.87 s,出口二平均流量为 $0.126 \text{ m}^3/\text{s}$,注满 3 t 水箱需要 23.81 s,两出口流量差异过大,导致汲水时间较长,不满足汲水时间要求。原因是出口二截面与水流速度方向平行,水

流不能通过出口二流出。

4 出口位置改进设计

出口位置对出口流量有着非常大的影响,本文提出两种不同出口位置模型,验证不同出口位置对流量的影响,为后续选择出口位置提供依据。

4.1 建立模型

建立两种不同出口位置模型,如图 4 所示,设置入口边界条件速度为 190 km/h。

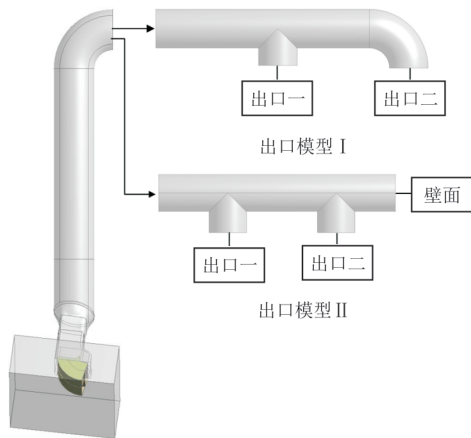


图 4 出口模型
Fig. 4 Outlet model

4.2 仿真结果

两种出口模型的平均流量和流量差如表 1 所示。

表 1 出口流量表
Table 1 The volume flow of outlet table

出口模型	出口一流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	出口二流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	流量差/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
模型 I	0.088	1.398	1.310
模型 II	0.521	0.958	0.437

从表 1 可以看出:对于出口模型 I,两个出口流量差距过大,出口一几乎没有水流流出;出口模型 II 两个出口流量差较小。因此,设计使用应优先考虑以出口模型 II 为基础的汲水管路结构。

5 基于出口模型 II 的挡板模型设计

5.1 挡板模型 I 仿真分析

出口模型 II 两个出口的流量差较小,故出口

位置采用出口模型 II 的模式。在出口一的上方增加挡板,其目的是使流体分流。挡板模型如图 5 所示。

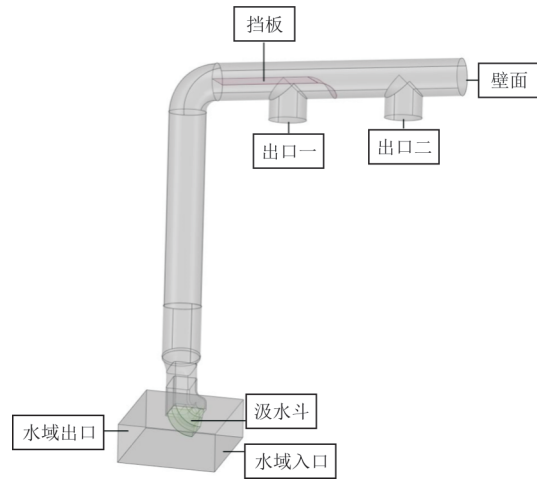


图 5 挡板模型
Fig. 5 Baffle model

设挡板与水平管道中线的距离为 d ,取 d 分别为 0、29、10 mm 挡板模型进行仿真分析。为了提高仿真效率,将模型拆分为上下两个部分进行分析,若拆分后的挡板模型出口一、出口二流量与未拆分的挡板模型误差小于 5%,则可验证该方法的有效性。选取 $d=0$ mm 时挡板模型 I,未拆分挡板模型 I 如图 6 所示。

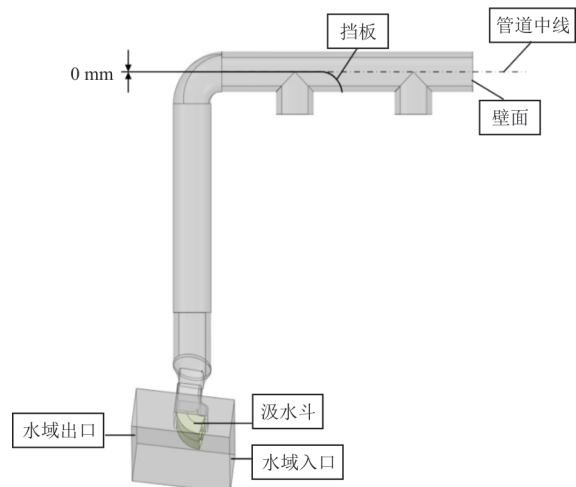


图 6 挡板模型 I
Fig. 6 Baffle model I

未拆分的挡板模型 I 的瞬时流量如图 7 所示,可以看出:流量相对稳定时,出口一的平均流量为 $0.292 \text{ m}^3/\text{s}$,出口二的平均流量为 $0.389 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

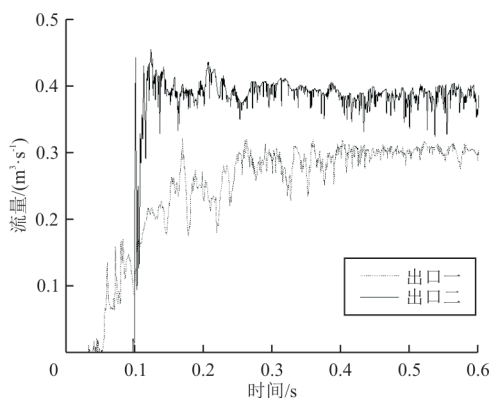


图 7 挡板模型 I 出口流量
Fig. 7 Outlet flow of baffle model I

将挡板模型 I 拆分成上下两个部分, 下半部分模型如图 8 所示, 上半部分模型如图 9 所示。

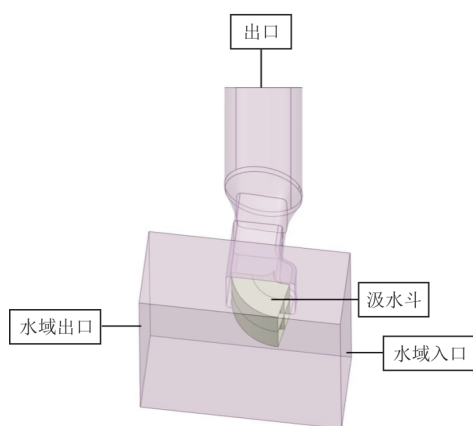


图 8 挡板模型 I 下半部分模型
Fig. 8 Lower part of baffle model I

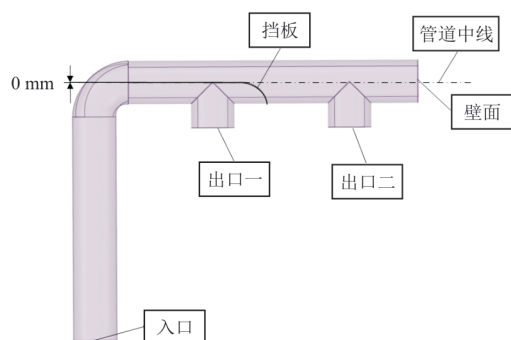


图 9 挡板模型 I 上半部分
Fig. 9 Upper part of baffle model I

将下半部分的出口速度分布作为上半部分入口的边界条件, 进行 CFD 计算。上半部分瞬时流量曲线如图 10 所示, 可以看出: 流量稳定时出口一平均流量为 $0.285 \text{ m}^3/\text{s}$, 出口二平均流量为 $0.375 \text{ m}^3/\text{s}$, 与没有进行拆分的汲水系统简化模型

的出口流量进行对比, 计算得到出口一平均流量相对误差为 2.4%, 出口二平均流量相对误差为 3.6%, 误差均小于 5%, 验证了该方法的有效性。

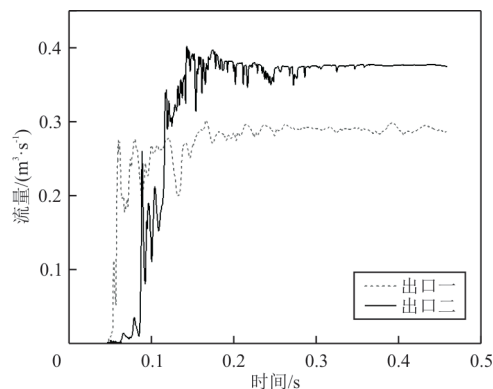


图 10 挡板模型 I 上半部分瞬时流量
Fig. 10 Instantaneous flow of upper part of baffle model I

5.2 挡板模型 II 仿真分析

$d=29 \text{ mm}$ 时挡板模型 II 上半部分如图 11 所示, 将图 8 下半部分的出口速度分布作为上半部分入口的边界条件, 出口流量图如图 12 所示。

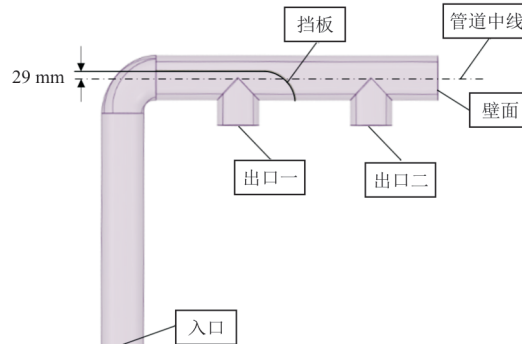


图 11 挡板模型 II
Fig. 11 Baffle model II

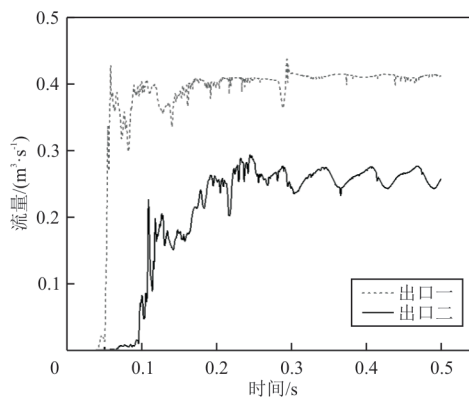


图 12 挡板模型 II 流量图
Fig. 12 The volume flow of outlet in baffle model II

从图12可以看出:流量相对稳定时出口一平均流量为 $0.412 \text{ m}^3/\text{s}$, 出口二平均流量为 $0.263 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

5.3 挡板模型Ⅲ仿真分析

$d=10 \text{ mm}$ 时挡板模型Ⅲ上半部分如图13所示,出口流量图如图14所示。

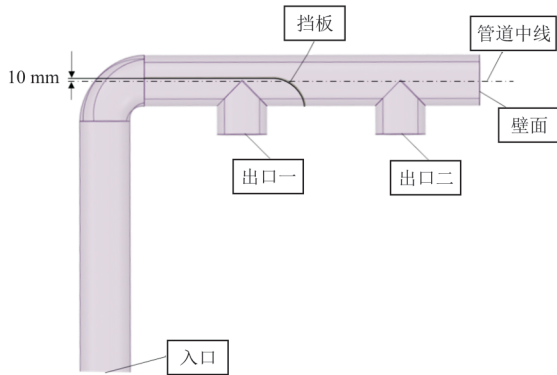


图13 挡板模型Ⅲ

Fig. 13 Baffle model III

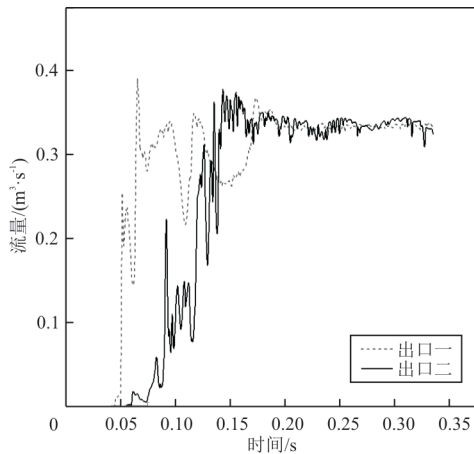


图14 挡板模型Ⅲ流量图

Fig. 14 The volume flow of outlet in baffle model III

从图14可以看出:该模型两出口流量基本一致,均为 $0.33 \text{ m}^3/\text{s}$,注满3 t水箱的时间均为9.09 s。汲水时间比原始汲水系统构型缩短了50%,有效地缩短了汲水时间。

6 结论

(1) 出口模型Ⅱ具有更小的出口流量差距,汲水时间小于出口模型Ⅰ,设计使用应优先考虑以出口模型Ⅱ为基础的汲水管路结构。

(2) 为增加分流导流效果,本文在汲水管路中创新性地增加了挡板结构,经过计算,将挡板置于距管道中线10 mm处时,两出口流量大致相同,此时,注满水箱的时间约为9.1 s,汲水时间较原始构型缩短了50%。

参考文献

- [1] 尚超,王克印. 森林航空灭火技术现状及展望[J]. 林业机械与木工设备, 2013, 41(3): 4-8.
SHANG Chao, WANG Keyin. Current state and prospect of aerial forest fire fighting technology[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2013, 41(3): 4-8. (in Chinese)
- [2] 孙伟,李楠.“蛟龙”出水——中航工业将研制大型灭火/水上救援水陆两栖飞机[J]. 国际航空, 2009(9): 42-43.
SUN Wei, LI Nan. "Jiaolong" out of water—AVIC will develop large-scale firefighting/water rescue amphibious aircraft[J]. International Aviation, 2009(9): 42-43. (in Chinese)
- [3] 张昊,雍明培,孙泽鹏,等. 灭火飞机灭火效能指标体系探讨[J]. 广东科技, 2015(10): 50-52.
ZHANG Hao, YONG Mingpei, SUN Zepeng, et al. Discussion on the index system of fire fighting effectiveness of fire fighting aircraft[J]. Guangdong Science and Technology, 2015(10): 50-52. (in Chinese)
- [4] 王永亮,蔡志勇,赵红军. 大型灭火飞机投水算法研究[J]. 微计算机信息, 2012, 28(9): 265-266, 276.
WANG Yongliang, CAI Zhiyong, ZHAO Hongjun. Study of the algorithm for dropping water with air tanker[J]. Microcomputer Information, 2012, 28(9): 265-266, 276. (in Chinese)
- [5] 石阳. 话说飞机灭火[J]. 中国军转民, 2019(5): 65-66.
SHI Yang. Talking about the plane extinguishing fire[J]. Defence Industry Conversion in China, 2019(5): 65-66. (in Chinese)
- [6] 褚林塘. 水上飞机水动力设计[M]. 北京: 航空工业出版社, 2014: 169-171.
CHU Lintang. Hydrodynamic design of seaplane[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2014: 169-171. (in Chinese)
- [7] 胡涛,刘妍,张睿琳,等. 水陆两栖飞机汲水灭火系统试验验证探究[J]. 航空标准化与质量, 2021(2): 24-26, 56.
HU Tao, LIU Yan, ZHANG Ruilin, et al. Research on the test verification of the water-scooping fire extinguishing system of the amphibious aircraft[J]. Aeronautics Standardization & Quality, 2021(2): 24-26, 56. (in Chinese)
- [8] 闫光巍,张昊,李宝仓. 大型水陆两栖飞机森林灭火任务覆盖分析[J]. 森林防火, 2020(1): 44-46.
YAN Guangwei, ZHANG Hao, LI Baocang. Analysis of forest fire fighting mission coverage of large amphibious aircraft[J]. Forest Fire Prevention, 2020(1): 44-46. (in Chinese)