

文章编号: 1674-8190(2022)02-114-08

民用飞机废水系统非定常三相流动特性研究

张贺磊^{1,2}, 许常悦¹, 张玉莹³, 吴惠祥¹

(1. 南京航空航天大学 飞行器环境控制与生命保障工信部重点实验室, 南京 210016)

(2. 郑州航空工业管理学院 航空工程学院, 郑州 450046)

(3. 中国商用飞机有限责任公司 上海飞机设计研究院, 上海 201210)

摘要: 废水系统属于民用飞机机载系统的重要组成部分, 污水排放的有效性直接关系到乘客的乘坐舒适性与健康。因此, 有必要对民用飞机废水系统中的气液固三相流动进行研究。采用欧拉方法模拟废水管路的气液固三相流动, 对飞行高度、马桶工作状态因素对废水排放的影响进行分析。结果表明: 仅最远端马桶工作时, 随着飞行高度的增加, 废水流动的核心峰值时间提前, 废水完全排出所需时间从 3.31 s 缩短至 1.87 s, 废水均能快速排入废水箱; 当三个马桶同时工作时, 靠近废水箱的马桶开启会减小废水管路中的负压, 不同横截面流速平均下降了 66.5%, 导致最远端马桶废水无法快速排出, 排放效率有所降低; 当靠近废水箱的马桶冲洗时间调整为 2 s, 同时将最远端马桶单独开启时, 可以保证最远端马桶中的废水完全排入废水箱。

关键词: 民用飞机; 多相流; 数值模拟; 废水系统; 马桶

中图分类号: V244

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2022.02.17

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Researches on Unsteady Three-phase Flow Characteristics of Wastewater System of Civil Aircraft

ZHANG Helei^{1,2}, XU Changyue¹, ZHANG Yuying³, WU Huixiang¹

(1. Key Laboratory of Aircraft Environment Control and Life Support, MIIT, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

(2. School of Aeronautical Engineering, Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450046, China)

(3. Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Commercial Aircraft Corporation of China Ltd., Shanghai 201210, China)

Abstract: The wastewater system is an important part of civil aircraft. The effective sewage discharge is closely related to the ride comfort and health of passengers. Euler method is used to simulate the gas-liquid-solid three-phase flow in wastewater system, and the effect of flight height and working condition of toilet on wastewater emission is analyzed. Results show that: when only the farthest toilet works, with the increase of flight altitude, the core peak time of waste water flow is brought forward, and the time required for wastewater to be completely discharged are significantly shortened from 3.31 s to 1.87 s, and the wastewater can be quickly discharged into the wastewater tank. When the three toilets work at the same time, the negative pressure in the wastewater pipeline will be reduced, and the flow rate of different cross sections will decrease by 66.5% on average, the toilet close to the wastewater tank will reduce the discharge efficiency of the farthest toilet, resulting in the wastewater cannot be discharged quickly. When the flushing time of toilet close to wastewater tank is adjusted to 2 s, and the farthest toilet needs to be opened separately, the wastewater in the farthest toilet can be fully discharged into the wastewater tank.

Key words: civil aircraft; multi-phase flow; numerical simulation; wastewater system; toilet

收稿日期: 2021-06-13; 修回日期: 2021-11-01

基金项目: 民用飞机专项科研项目(MJ-2017-S-47); 江苏高校优势学科建设工程资助项目

通信作者: 许常悦, cyxu@nuaa.edu.cn

引用格式: 张贺磊, 许常悦, 张玉莹, 等. 民用飞机废水系统非定常三相流动特性研究[J]. 航空工程进展, 2022, 13(2): 114-121.

ZHANG Helei, XU Changyue, ZHANG Yuying, et al. Researches on unsteady three-phase flow characteristics of wastewater system of civil aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(2): 114-121. (in Chinese)

0 引言

飞机水/废水系统属于民用客机机载系统上的重要系统,旨在满足机组人员和乘客的生活和生理需求。目前,我国国产飞机上的水/废水系统还依赖国外供应商提供,成为国产大飞机研制中存在的“卡脖子”问题。为了保证我国大飞机研制的健康良性发展,提高自主产权化率和国际竞争力,与飞机水/废水系统设计相关的技术问题亟待解决。

飞机水/废水系统主要由两部分组成,即饮用水系统和废水系统。饮用水系统的主要功能是向厨房、洗手池等区域提供饮用水;废水系统的主要功能是收集并初步处理马桶、洗手池以及厨房所排出的废水,为乘客和机组人员提供一个干净卫生的飞行环境。现代客机上的废水系统主要为真空废水系统,由真空废水箱、真空马桶、真空泵、地面排污操作面板、废水管路、阀门及控制系统等部件组成。废水系统的原理是利用座舱与真空废水箱之间的压力差,将废水经真空废水管道输送并存储至废水箱。

水/废水系统的研究始于20世纪50年代。美国 Monogram 公司研制了最早的自循环式马桶^[1],随后研制出第一台真空马桶并被应用于波音客机。此后,真空废水系统便在民用客机上大量使用,如 B737、B767、B747、A320、A330、A340 等机型均使用了真空废水系统。迄今,水/废水处理系统已成为民用飞机上的独立新系统。该系统包含真空泵、供水系统、加热系统、废水管路、废水箱、马桶和机电控制单元等。据调研发现,国外关于水/废水系统的研究报道较少,这可能与技术保密有关,现有文献主要涉及飞机排水和消防用水^[2-3]、飞机水系统中臭氧处理^[4]、飞机真空排污系统^[5]、飞机排水系统^[6]、飞机用水加热^[7]等。

国内民用飞机的研制远落后于欧美发达国家,最早的民用飞机水系统与传统居家用水原理类似,即依靠重力进行供水。20世纪70年代初期,我国第一架自主研制的大型客机 Y10 上的饮用水系统就是依靠重力供水,而废水系统则是电动循环处理系统。在之后的很长时间内,我国民航事业发展缓慢,水/废水系统的研究基本处于停滞状态。直至近年,我国的支线客机 MA60 上所用的水/废水系统依然十分落后,不具备完整的系统性

功能。

21世纪以来,国内已陆续开展了水/废水系统的相关研究。在水/废水系统内部流动方面,聚焦点主要有:清水和废水系统管路的静态计算^[8],水/废水系统的动态仿真^[9]、管路内流动性能仿真与几何数据的提取^[10]、废水输运过程的流动性能仿真^[11]等。除流场仿真外,研究人员还关注了水/废水系统设计及机电综合控制技术的应用。例如,孙鉴非等^[12]提出了一种全新的电气结构,用于水/污水处理系统的机电一体化研究;赵健等^[13]采用自适应模糊PID控制和模糊/PID开关控制对管道式热水器进行控制模拟,并提出了水温控制的优化方法;陈志东等^[14]在飞机污水箱内加装反馈液位的传感器,并利用真空泵或飞机内外的压力差来实现污水的及时处理;朱菁雅^[15]研究了 C919 水/废水机载系统的热载荷并进行了数值仿真分析。

目前,鲜有关于飞机废水系统中非定常气液固流动特性的相关研究,因此,本文针对该问题开展研究,旨在深入分析废水系统中的非定常气液固流动特性,并研究飞行高度、马桶工作状态对废水排放的影响。

1 数值计算方法

1.1 控制方程

民用飞机废水系统中的流动属于典型的气液固三相流动,本文采用欧拉—欧拉—欧拉方法对该三相流动进行模拟。在欧拉—欧拉—欧拉方法中,每一相均可以视为充满整个流体的连续介质,各相均分别求解质量、动量和能量方程。相间的耦合作用可以通过相间作用力模型进行计算。

民用飞机废水系统中的三相流动温度变化较小,温度对流动的影响可以忽略。因此,控制方程可以不考虑能量方程,只需考虑连续性方程和动量方程。对于任意相 q ,包含连续性方程和动量方程的控制方程可以写成如下形式:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q) = \sum_{p=1}^n \dot{m}_{pq} \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q \mathbf{v}_q) = -\alpha_q \nabla p + \nabla \bar{\tau}_q + \sum_{p=1}^n (\mathbf{R}_{pq} + \dot{m}_{pq} \mathbf{v}_{pq}) + \alpha_q \rho_q (\mathbf{F}_q + \mathbf{F}_{l,q} + \mathbf{F}_{V,m,q}) \quad (2)$$

式中: ρ_q 为第 q 相的密度; v_q 为第 q 相的速度张量; m_{pq} 为 p 相和 q 相的质量传递速率; p 为所有相共享的压力; $\bar{\tau}_q$ 为第 q 相的压力应变张量; R_{pq} 为相之间的互相作用力; v_{pq} 为相间的速度; F_q 为外部体积力; $F_{l,q}$ 为升力; $F_{vm,q}$ 为虚拟质量力; a_q 为相含率, 各相相含率之和为 1。

1.2 相间曳力模型

在求解多相流动的动量方程时, 需要考虑多种相间作用力, 如升力、虚拟质量力和相间曳力等。其中, 升力是指粒子(液滴或气泡)受主相的影响。对于较大粒子而言, 升力需要考虑, 而对于民用飞机废水系统中的小粒子而言, 升力可忽略。受主相惯性影响, 加速的粒子会产生一个虚拟质量力, 该力通常可忽略。因此, 多相流计算需要重点考虑相间曳力的影响。

在相间曳力的计算模型中, 流体相间的动量交换系数可由式(3)得出^[16]:

$$K_{pq} = \frac{\alpha_p \rho_p f}{\tau_p} \quad (3)$$

式中: ρ_p 为 p 相密度; f 为曳力函数, 可由 Schiller-Naumann 模型进行计算; τ_p 为颗粒弛豫时间。

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu_q} \quad (4)$$

式中: d_p 为 p 相液滴或气泡的直径; μ_q 为 q 相的动力黏度。

$$f = \frac{C_D Re}{24} \quad (5)$$

式中: C_D 为曳力系数; Re 为主相 q 和第二相 p 的相对雷诺数。

$$C_D = \begin{cases} 24(1 + 0.15Re^{0.687})/Re & (Re \leq 1000) \\ 0.44 & (Re > 1000) \end{cases} \quad (6)$$

$$Re = \frac{\rho_q |v_p - v_q| d_p}{\mu_q} \quad (7)$$

对于流体与固体之间, 采用 Gidaspow 模型计算, 其流一固之间的交换系数 K_{sl} 计算公式为

$$K_{sl} = \begin{cases} 0.75 C_D \frac{\alpha_s \alpha_1 \rho_1 |v_s - v_1|}{d_s} \alpha_1^{-2.65} & (\alpha_1 > 0.8) \\ 150 \frac{\alpha_s (1 - \alpha_1) \mu_1}{\alpha_1 d_s^2} + 1.75 \frac{\rho_1 \alpha_s |v_s - v_1|}{d_s} & (\alpha_1 \leq 0.8) \end{cases} \quad (8)$$

其中,

$$C_D = \frac{24}{\alpha_1 Re_s} \left[1 + 0.15 (\alpha_1 Re_s)^{0.687} \right] \quad (9)$$

式中: Re_s 为固体颗粒雷诺数。

1.3 计算物理模型

民用飞机废水系统由废水箱、废水管路、冲洗控制阀、真空系统、地面服务面板等部件组成, 如图 1(a) 所示。为了便于对废水系统中的三相流动进行模拟, 需要对图 1(a) 中的物理模型进行合理简化, 如去除废水管道外壁、马桶附件、接头、真空系统、地面服务面板等。为了便于分析与讨论, 本文对马桶作如下编号: 左前方卫生间内的马桶记为“马桶 1”, 通往其支路为短支路 1, 长约 2 m; 右前方卫生间内的马桶记为“马桶 2”, 通往其支路为短支路 2, 长约 2 m; 后卫生间内的马桶记为“马桶 3”, 通往其支路为长支路, 长约为 26 m。简化后的废水系统计算物理模型如图 1(b) 所示。

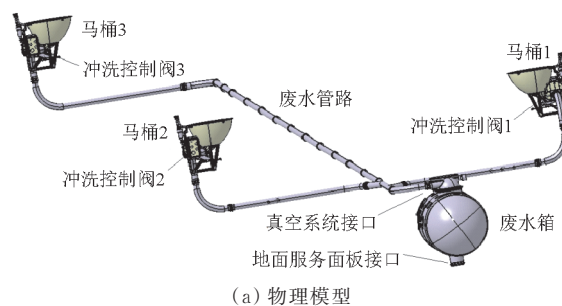


图 1 废水系统的物理和计算物理模型

Fig. 1 Physical and computational physical models of wastewater system

2 计算结果分析与讨论

2.1 计算细节

为了模拟废水系统中的三相流动, 采用基于

结构网格的有限体积方法求解控制方程(1)~方程(2)。计算网格数约为 165 万,近壁最小网格尺寸为 1×10^{-4} m。在废水系统的三相中,空气为主相,液相为水,固相为密度 1200 kg/m^3 、直径 1×10^{-4} m 的颗粒。液固比按 1:2 进行计算,即液相体积为 0.236 L,固相颗粒体积为 0.474 L。

废水管路中的流动为典型的非定常三相流,速度大小约为 $O(1) \text{ m/s}$ 。基于管路直径的气相和液相 Re 数分别为 3380 和 49220。因此,废水管路中的流动可视为湍流状态。在当前研究中,采用 RNG $k-\epsilon$ 模型进行湍流计算。为了模拟废水管路中的非定常流动过程,三相初始速度设置为滞止状态,气液固三相呈分离状态,且固相均匀沉积在马桶底部,如图 2 所示。

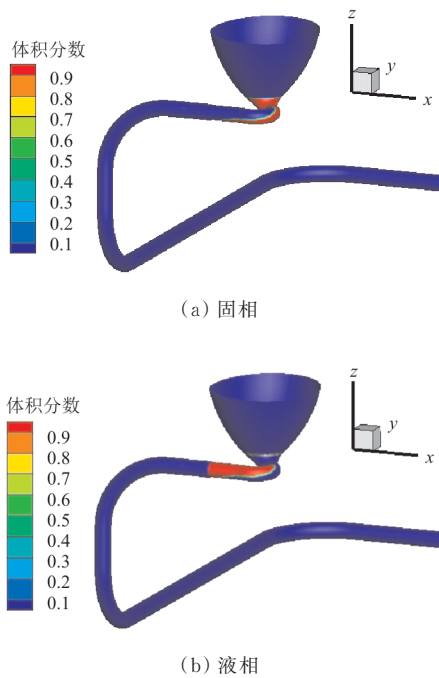


图 2 利用相体积分数表示的马桶底部固液相初始分布
Fig. 2 Initial distribution of solid and liquid phases at the bottom of toilet expressed by phase-volume-fraction

非定常模拟的时间步长取为 0.01 s。此外,为了分析飞行高度对管路流动的影响,本文计算 0、5.5、8.0 和 12.0 km 四种飞行高度下的管路流动。管路壁面设为无滑移无穿透条件,进出口处设为固定压力边界条件,且进出口压力差随飞行高度增加而增大,具体参数值如表 1 所示。

表 1 废水管路计算中的压力参数值

Table 1 Pressure parameter value for the calculation of wastewater pipe

飞行高度/ km	座舱高度/ km	进口压力/ kPa	出口压力/ kPa	进出口压 差/kPa
0	0	101.325	81.325	20.0
5.5	2.4	75.625	50.507	25.1
8.0	2.4	75.625	35.600	40.0
12.0	2.4	75.625	19.330	56.3

2.2 仅最远端马桶工作时的废水管路三相流动分析

民用飞机废水系统能否正常工作,关键在于废水管路能否将马桶中的固体和液体物顺利排入废水箱。因此,有必要分析废水管路出口处的固相和液相质量流量演化情况,如图 3 所示, \dot{m}_s 和 \dot{m}_l 分别为固相质量流量和液相质量流量。

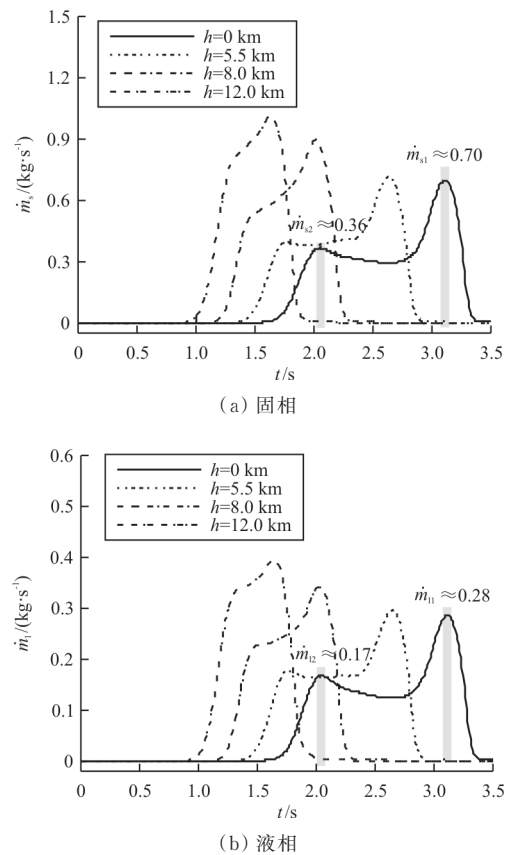
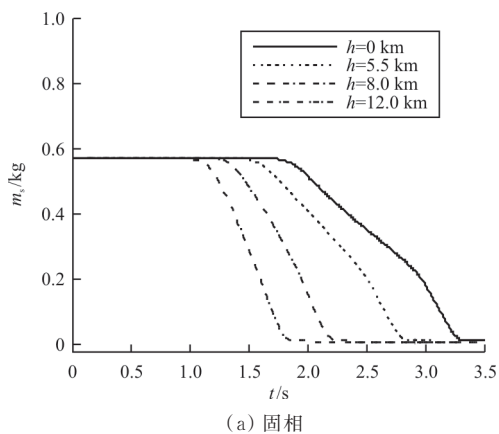


图 3 仅最远端马桶工作时的出口处固相和液相质量流量时间演化曲线

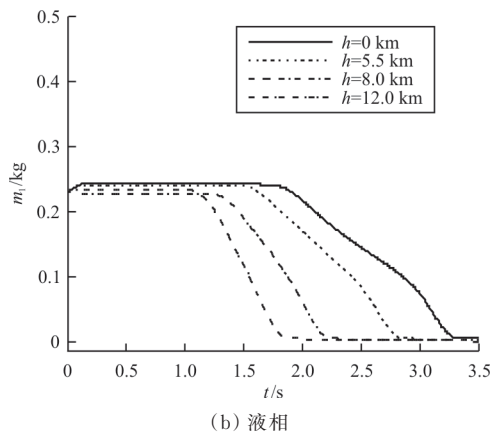
Fig. 3 Temporal evolution of solid and liquid mass flow at the outlet of the farthest toilet

从图3可以看出:固相和液相的质量流量演化曲线的变化趋势相似,这与固液两相之间的相互耦合影响密切相关。当飞行高度 $h=0$ km时,即地面停机时,废水管路出口处的固相和液相的质量流量存在两个峰值。固相的两个峰值分别为 $\dot{m}_{s1} \approx 0.7$ kg/s 和 $\dot{m}_{s2} \approx 0.36$ kg/s,液相的两个峰值分别为 $\dot{m}_{l1} \approx 0.28$ kg/s 和 $\dot{m}_{l2} \approx 0.17$ kg/s。随着飞行高度的增加(废水管路中的真空度也增加),废水管路出口处的质量流量第二个峰值逐渐消失,这意味着真空度的增加有利于固体和液体物的排出。当飞行高度分别为0、5.5、8.0和12.0 km时,废水核心流动时间分别为1.76~3.31 s、1.50~2.92 s、1.25~2.24 s和1.04~1.87 s,对应的峰值时间则分别为3.11、2.63、2.02和1.63 s。随着飞行高度的增加,即真空度的增加,废水流动的核心峰值时间缩短。

为了更深入地认识废水管中固相和液相流量的排出过程,给出废水管内固相和液相质量的时间演化曲线,如图4所示,可以看出:随着飞行高度的增加,即真空度的增加,废水排出废水管路的时刻提前,且废水完全排出所需的时间明显缩短。表明废水管内废水质量快速减小至0,意味着仅最远端马桶工作时,废水能够快速经废水管排入废水箱。



(a) 固相



(b) 液相

图4 仅最远端马桶工作时的管内固相质量时间演化曲线
Fig. 4 Time evolution curve of solid mass in the tube when only the farthest toilet works

为了认识废水管路的流动特性,给出靠近峰值时刻废水管路不同横截面处的流向速度分布,如图5~图6所示。

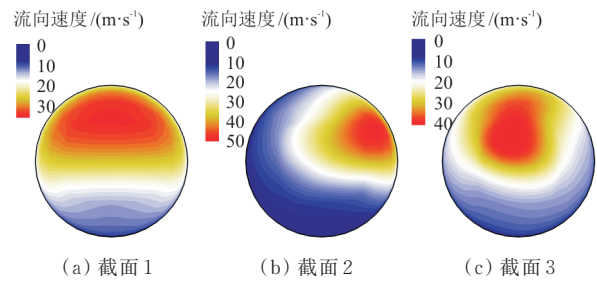


图5 仅最远端马桶工作时的废水管路不同横截面处的流向速度分布 ($h=0$)

Fig. 5 Velocity distribution at different cross-sections of wastewater pipe when only the farthest toilet works ($h=0$)

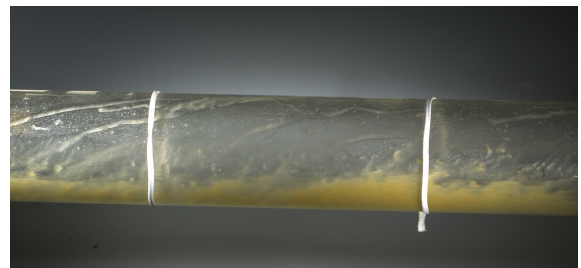


图6 仅最远端马桶工作时的截面1附近高速摄影图 ($h=0$)

Fig. 6 High speed photography near cross-section 1 when only the farthest toilet works ($h=0$)

截面 1 位于马桶 2 分支管岔口上游距岔口 1.8 m, 截面 2 位于马桶 2 和马桶 1 分支管岔口中间位置 ($x = -1$ m), 截面 3 位于马桶 1 分支管岔口下游距岔口 0.2 m。需要说明的是, 经仔细分析不同飞行高度的工况, 流动拓扑结构几乎一致。因此, 为了节省篇幅, 仅展示飞行高度为 0 工况时的流动结构。

从图 5(a) 可以看出: 截面 1 处的速度呈左右对称分布, 且管路上半部分流速明显大于下半部分流速。在气液固三相流动中, 气相密度低且流动黏性明显低于固液两相密度。因此, 固液混合物位于管路下半部分, 且流速偏低, 流动试验图片 (图 6) 可以验证该结论的可信性。当废水流经马桶 2 分支管路交叉口, 由于马桶 2 未工作且其分支管路中存在负压区, 因此废水管路中的固液两相出现向左偏斜的现象, 如图 5(b) 所示。然而, 当废水流经马桶 1 分支管路交叉口处, 废水管路中的固液两相又被马桶 1 分支管路中的负压向右吸。因此, 在马桶 1 分支管路交叉口处下游, 管路中的速度分布又恢复到几乎对称分布状态, 如图 5(c) 所示。

2.3 三个马桶同时工作时的废水管路三相流动分析

三个马桶同时工作时的废水管路出口处质量流量时间演化曲线如图 7 所示。

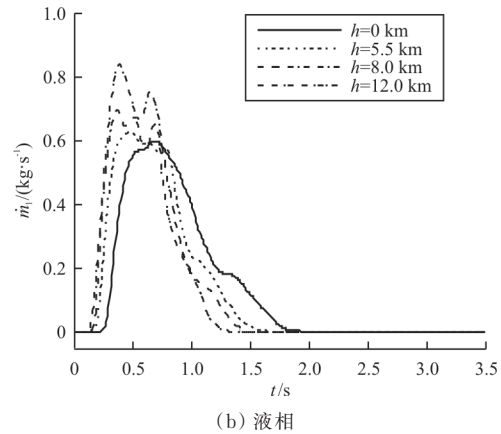
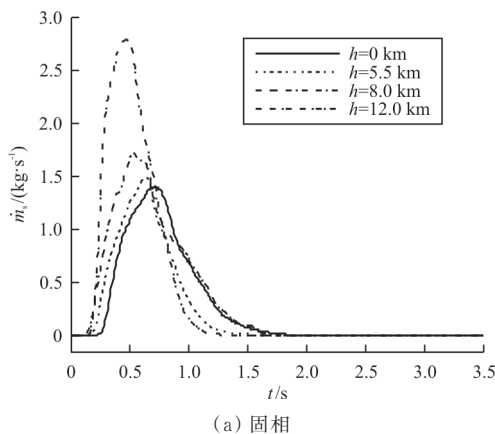


图 7 三个马桶同时工作时的出口处固相和液相质量流量时间演化曲线

Fig. 7 Temporal evolution for the mass of solid and liquid phases at the outlet with three closets working at the same time

从图 7 可以看出: 废水核心流动时间均在前 1.5 s 内。与仅最远端马桶工作时不同的是, 废水核心流动时间范围不随飞行高度的变化而出现明显的改变。马桶 1 和马桶 2 离废水箱较近 (如图 1 所示), 而马桶 3 距离废水箱较远, 在前 1.5 s 内, 马桶 1 和马桶 2 中的废水已经排入废水箱。1.5 s 后, 废水箱与座舱联通, 座舱内的空气从马桶 1 和马桶 2 入口直接流入废水管。这将减少废水管路中的负压, 降低系统对废水的输送效率, 进而影响马桶 3 中的废水排放。

为了直观说明流速对废水管路中废水输送效率的影响, 三个马桶同时工作时, 靠近排放峰值时刻的废水管路流向速度分布如图 8 所示。

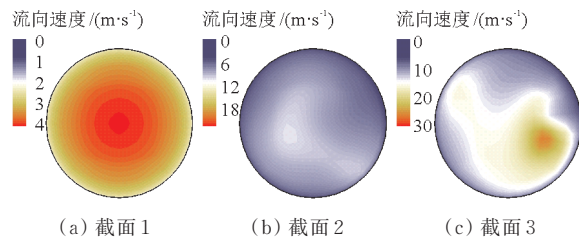
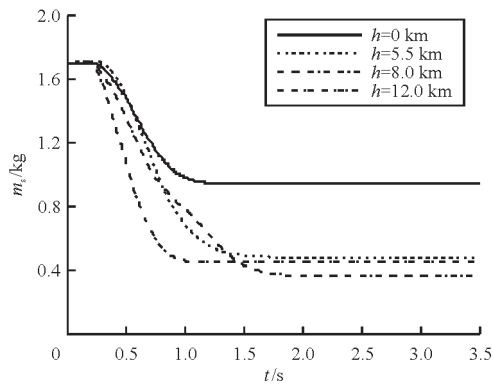


图 8 三个马桶同时工作时的废水管路不同横截面处的流向速度分布 ($h = 0$)

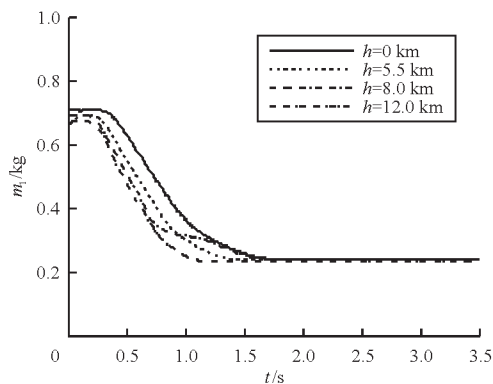
Fig. 8 Distribution of flow velocity at different cross-sections of waste-water pipe with three toilets working at the same time ($h = 0$)

从图 8 可以看出:与仅最远端马桶工作时相比(如图 5(a)所示),马桶 1 和马桶 2 上游的流速明显减低(如图 8(a)所示),表明马桶 1 和马桶 2 的开启确实会减弱马桶 3 中废水的排放效率。

为了进一步说明三个马桶同时工作对废水排放效率的影响,三个马桶同时工作时的废水管内固相和液相质量时间演化曲线如图 9 所示,可以看出:在前 1.5 s 以内,废水管内质量迅速减小,这与马桶 1 和马桶 2 内的废水顺利排入废水箱有关。在 1.5 s 之后,废水管内质量并未减小至 0,说明马桶 3 中的废水无法快速被排出。因此,建议将马桶 1 和马桶 2 的冲洗时间调整为 2 s,且马桶 3 需单独开启,否则会影响系统的正常工作。



(a) 固相



(b) 液相

图 9 三个马桶同时工作时的废水管内固相和液相质量时间演化曲线

Fig. 9 Temporal evolution of mass for solid and liquid phase in waste-water pipe with three toilets working at the same time

3 结 论

(1) 仅最远端马桶工作时,随着飞行高度的增

加,废水流动的核心峰值时间提前,废水完全排出所需时间从 3.31 s 缩短至 1.87 s,废水能够快速顺利地经废水管排入废水箱。

(2) 当三个马桶同时工作时,靠近废水箱的马桶开启会减小废水管路中的负压,不同横截面流速平均下降了 66.5%,降低了最远端马桶的排放效率,导致废水无法快速排出。

(3) 当三个马桶同时工作时,靠近废水箱的马桶冲洗时间调整为 2 s,且最远端马桶需单独开启,否则会影响废水系统的正常工作。

参考文献

- [1] 雷美玲. 新型民用客机水系统选型研究[J]. 航空工程进展, 2012, 3(2): 229-234.
LEI Meiling. Research on types of water system for new civil aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2012, 3(2): 229-234. (in Chinese)
- [2] LSTIBUREK J W. Understanding drainage planes [J]. ASHRAE Journal, 2006, 48(2): 30-35.
- [3] 温波. 民用飞机污水处理系统选型研究[J]. 军民两用技术与产品, 2017(2): 46.
WEN Bo. Research on selection of civil aircraft sewage treatment system[J]. Dual Use Technologies & Products, 2017(2): 46. (in Chinese)
- [4] 姚光生. 一种飞机臭氧转换器测试方法的研究与应用[J]. 机电信息, 2019(18): 57-61.
YAO Guangsheng. Research and application of a test method for aircraft ozone converter[J]. Mechanical and Electrical Information, 2019(18): 57-61. (in Chinese)
- [5] 张金娜, 王晓艳, 王可伟, 等. 飞机真空排污系统结垢原因及清洁解决方案[J]. 清洗世界, 2018, 34(12): 15-17.
ZHANG Jinna, WANG Xiaoyan, WANG Kewei, et al. Reasons for fouling of aircraft vacuum sewage system and cleaning solutions[J]. Cleaning World, 2018, 34(12): 15-17. (in Chinese)
- [6] 张秋, 李荣军, 李定坤. 一种飞机系统用排水装置: CN201921669673.0[P]. 2020-06-05.
ZHANG Qiu, LI Rongjun, LI Dingkun. A drainage device for aircraft systems: CN201921669673.0[P]. 2020-06-05. (in Chinese)
- [7] LEARY J, SIEVERS T J, LI R, et al. Aircraft water heating system: US2004057709A1[P]. 2004-03-25.
- [8] 陈海燕. 大型飞机清水系统仿真计算[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
CHEN Haiyan. A simulation technology research on the large-scale aircraft water system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.

- versity of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)
- [9] 张贺磊. 飞机废水系统仿真计算研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
ZHANG Helei. Research on simulation calculation of aircraft wastewater system [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese)
- [10] 张石磊. 一种飞机管路冻性能仿真几何数据自动提取方法: CN201510926939. 5[P]. 2016-04-13.
ZHANG Shilei. An automatic extraction method for simulation geometric data of aircraft pipeline flow performance: CN201510926939. 5[P]. 2016-04-13. (in Chinese)
- [11] 朱翀, 雷美玲, 张雪苹. 民用飞机废水处理系统流动性能仿真研究[J]. 航空计算技术, 2015, 45(6): 99-103.
ZHU Chong, LEI Meiling, ZHANG Xueping. Research on waste system flowability simulation of civil aircraft[J]. Aeronautical Computing Technique, 2015, 45(6): 99-103. (in Chinese)
- [12] 孙鉴非, 孙欢庆, 喻文韬, 等. 基于机电综合的民用飞机水/废水系统构架建模初步分析[J]. 科技视界, 2016(14): 151.
SUN Jianfei, SUN Huanqing, YU Wentao, et al. Preliminary analysis of architectural modeling of civil aircraft water/wastewater system based on electromechanical integration [J]. Science & Technology Vision, 2016(14): 151. (in Chinese)
- [13] 赵健, 葛红娟, 徐媛媛, 等. 民用飞机供水热技术仿真研究[J]. 计算机仿真, 2013, 30(5): 94-98.
ZHAO Jian, GE Hongjuan, XU Yuanyuan, et al. Simulation research on water supply and heat technology of civil aircraft [J]. Computer Simulation, 2013, 30(5): 94-98. (in Chinese)
- [14] 陈志东, 陈勇, 黄奕佳. 飞机机载排污系统: CN201711284366. 6 [P]. 2018-05-25.
CHEN Zhidong, CHEN Yong, HUANG Yijia. Aircraft on-board sewage system: CN201711284366. 6 [P]. 2018-05-25. (in Chinese)
- [15] 朱菁雅. C919水/废水系统热载荷仿真计算[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
ZHU Jingya. Numerical simulation of thermal load of water and wastewater system in C919 airplane [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019. (in Chinese)
- [16] SONG Feifei, LI Fei, WANG Wei, et al. A sub-grid EMMS drag for multiphase particle-in-cell simulation of fluidization [J]. Powder Technology, 2018, 327: 420-429.

作者简介:

张贺磊(1987—),男,博士,讲师。主要研究方向:飞机水/废水系统、浮空器热特性。

许常悦(1981—),男,博士,副教授。主要研究方向:计算流体力学、人机与环境工程。

张玉莹(1993—),女,硕士,助理工程师。主要研究方向:水/废水系统设计。

吴惠祥(1962—),男,博士,讲师。主要研究方向:人机与环境工程。

(编辑:马文静)