

文章编号:1674-8190(2014)04-515-06

# 民用飞机水系统管路流动的数值模拟

朱翀, 雷美玲, 张雪苹

(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:** 水系统是民用客机中不可缺少的重要系统。在水系统的设计过程中, 管路的设计占据着非常关键的位置, 而对管路流动性能的数值模拟能够很好地指导管路的设计与优化。选取民用客机水系统中的加水管路作为研究对象, 采用 FLOWMASTER 管网系统和 CFD 两种方法对加水管路在不同压差、不同壁面粗糙度条件下进行数值模拟, 并对两种方法的计算结果进行比较分析。结果表明: FLOWMASTER 管网系统能够快速、准确和可靠地获得流量等管路主要性能; 而 CFD 方法则能够提供管路流动的流场细节信息。在水系统管路的设计过程中, 应当充分利用这两种方法, 发挥其各自优势, 更好地完成水系统管路设计。

**关键词:** 民用飞机; 水系统; 加水管路; FLOWMASTER 管网系统; CFD 方法

中图分类号: V244.1<sup>+</sup>4

文献标识码: A

## Numerical Simulation of Water System Pipe Flow in Civil Aircraft

Zhu Chong, Lei Meiling, Zhang Xueping

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

**Abstract:** Water system is an important system in civil aircraft. During the design of water system, the design of pipe is a key part. The numerical simulation of pipe flow can help the design and optimization of pipe. Selecting the water supply pipe in the civil aircraft water system as the research object, the water supply pipe is simulated with FLOWMASTER pipe network system and CFD under different conditions of pressure differential and wall roughness and the results of the two methods are analyzed. Comparing the simulation of the two methods, result shows that FLOWMASTER pipe network system can obtain the main performance of pipe rapidly, accurately and reliably, such as flow rate; while CFD can get detailed information of pipe flow field. In the design of water system pipe, the two methods should be used in conjunction, playing their respective advantages, to finish the work better with the help of complementary advantages of the two methods.

**Key words:** civil aircraft; water system; water supply pipe; FLOWMASTER pipe network system; CFD method

## 0 引言

水系统是民用飞机中不可缺少的重要系统, 该系统是指在机内贮藏并提供足够量的水, 为机上厨房及盥洗室提供饮用水、冷热盥洗用水和马桶冲洗用水, 以满足乘客机上生活的需要, 让乘客享受舒

适旅途的必备供水系统<sup>[1-2]</sup>。

民用飞机水系统将水贮藏在水箱中, 在压差条件下将水通过管路输送到厨房与盥洗室使用, 水系统管路的设计直接影响系统的整体性能。在系统设计过程中, 可以通过数值模拟来计算、分析管路流动情况, 以达到优化设计的目的。虽然目前国内针对民用飞机水系统管路的数值模拟研究较少, 但是在相近领域的管路设计方面数值模拟方法均得到了充分使用, 例如黄小玲<sup>[3]</sup>使用 FLOWMASTER 软件研究了叠压供水系统的性能, 陈江林<sup>[4]</sup>

收稿日期: 2014-04-10; 修回日期: 2014-05-02

通信作者: 朱翀, zhuxiaoxiaochong@126.com

使用 CFD 方法研究了输水管网中三通管道的水力特性,这些研究都给民用飞机水系统管路数值模拟以启发。

本文选取民用飞机水系统中的加水管路作为研究对象,分别采用 FLOWMASTER 管网系统和 CFD 方法进行数值模拟,研究两种方法在管路两端不同压差、管壁不同粗糙度下的模拟结果,并基于 CFD 方法模拟结果研究分析弯管附近的流动特性。

## 1 计算方法

### 1.1 FLOWMASTER 管网系统建模原理

在管路内,粘性流体运动时的能量损失主要是由流体在等截面直管内的摩擦阻力所引起的沿程压力损失和由于流道形状改变、流速受到扰动、流动方向变化等引起的局部阻力损失组合而成。通常认为每种损失都能充分地显示出来,并且独立地不受其他损失的影响,因此压力损失或由阻力引起的能量损失可以叠加。管路中的总能量损失可以看作各个不同阻力单独作用所引起的能量损失之和。

FLOWMASTER 软件是基于上述原理的流体管网系统仿真工具,被广泛地应用于各种水输送系统<sup>[5]</sup>、燃油系统<sup>[6]</sup>等的设计、优化和性能仿真中。在进行流体网络计算时,组件模型是由一系列流体管路组件组成的,主要基于压力-流量关系。管路组件之间以节点相连,网络中各组件的流动满足质量守恒定律和能量守恒定律。在水系统的管路流动数值模拟中,主要采用 FLOWMASTER 软件中的刚性直管模型与弯管模型。

#### 1.1.1 刚性直管模型

刚性直管模型主要考虑由流体在等截面直管内的摩擦阻力所引起的沿程压力损失,其数学模型为<sup>[7]</sup>

$$p_2 - p_1 = f \frac{L}{d} \frac{\dot{m}_1 | \dot{m}_1 |}{2\rho A^2} \quad (1)$$

式中: $p_2$  为管路出口压力值; $p_1$  为管路入口压力值; $f$  为沿程阻力系数; $L$  为管路长度; $d$  为管路直径; $\dot{m}_1$  为管路中的质量流量; $A$  为管路横截面积; $\rho$  为流体密度。

沿程阻力系数  $f$  通过目前普遍采用的

Colebrook-White(以下简称 C-W)经验公式获得,其适用范围为  $Re = 4 \times 10^3 \sim 4 \times 10^8$ ,  $\Delta/d = 5 \times 10^{-2} \sim 5 \times 10^{-6}$ <sup>[8]</sup>。该公式由科列勃洛克根据实用管路的实验结果提出,考虑了较多的影响因素,适用于光滑区、过渡区和粗糙区,故又称之为湍流沿程阻力系数的综合公式<sup>[9-10]</sup>,具体数学形式为

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \lg \left( \frac{\Delta}{3.7d} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (2)$$

式中: $\Delta$  为管路的绝对粗糙度; $Re$  为管路内流体的雷诺数。

#### 1.1.2 弯管模型

弯管模型主要考虑由于流动方向变化所引起的局部阻力损失,其数学模型为<sup>[7]</sup>

$$p_2 - p_1 = K \frac{\dot{m}_2 | \dot{m}_2 |}{2\rho A^2} \quad (3)$$

式中: $K$  为弯管损失系数; $\dot{m}_2$  为弯管中的质量流量。

弯管损失系数  $K$  的数学形式为

$$K = \left[ 0.131 + 0.163 \left( \frac{d}{r} \right)^{3.5} \right] \frac{\theta}{90^\circ} \quad (4)$$

式中: $\theta$  为弯管的方向变化角; $r$  为弯管轴心线的曲率半径。

## 1.2 CFD 方法

CFD 方法是目前主流的数值模拟方法,能够详细地模拟出流场细节,但是由于其所需的计算资源较多,计算耗时较长,该方法在管路流动模拟工程方面的应用较少。相比于工程中应用较多的 FLOWMASTER 管网系统,CFD 方法能够获得更精确的流场信息,进行更深入的流场细节分析。

水系统管路流动是典型的不可压有粘流动,因此本文 CFD 方法的控制方程为三维不可压 Navier-Stokes 方程,具体形式如下:

连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (5)$$

动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \mathbf{F} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{v}$  为惯性坐标系下的速度矢量; $t$  为时间; $p$  为静压; $\bar{\tau}$  为应力张量; $\mathbf{F}$  为体积力动量源项。

本文采用对边界层湍流和自由剪切湍流都有

较好模拟效果的 SST<sup>[7]</sup>  $k-\omega$  模型<sup>[11]</sup> 来计算湍流粘性。

## 2 计算模型与计算条件

水系统加水管路是飞机蒙皮上水服务板到水舱内水箱的一段管路,用于飞机在地面维护时,给水系统水箱加水。飞机地面维护时,通过加水车给水箱加水,加水时间是考量水系统地面维护的一个重要指标,而加水管路的设计直接影响加水时间和加水车加水压力的选择。在设计阶段如果能够通过数值模拟方法获得加水管路的性能,将会大大减少后期试验成本以及对管路布置的重大修改。本文以加水管路作为研究对象进行数值模拟。

某型民用飞机的加水管路如图 1 所示。加水管路的一端通过飞机蒙皮上水服务板连接到加水车,加水车根据设定好的压力来给水箱加水,而加水管路的另一端连接水箱底部,水箱内部与大气相连。因此加水管路连接加水车的一端(加水管路入口端)可以认为是恒定压力,而连接水箱的一端(加水管路出口端)理论上来说,由于加水过程中水箱内水位不断升高,该端口的压力是一直增加的,但水箱高度约为 0.5 m,加水过程中由于水箱水位的增加而引起的出口压力变化相对于入口压力是可以忽略不计的,因此加水管路出口端压力可以认为是恒定的大气压力。

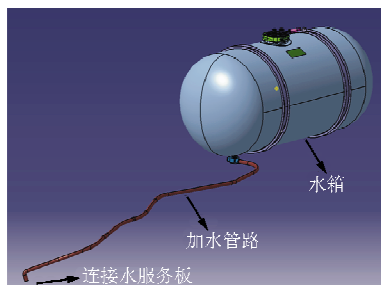


图 1 某型民用飞机的加水管路

Fig. 1 Water supply pipe of one civil aircraft

### 2.1 FLOWMASTER 管网系统模型

FLOWMASTER 管网系统模型如图 2 所示,主要涉及到该软件中的刚性直管模型、弯管模型和压力源模型。刚性直管模型用于模拟加水管路中的直线段;弯管模型用于模拟加水管路中的弯管,由于加水管路的布置原因,在某些区域弯曲并不是

非常规则,为了建模的方便进行一定的合理简化;压力源模型主要用于模拟加水管路入口端和出口端的压力边界条件,给加水管路两端一个恒定的压力。

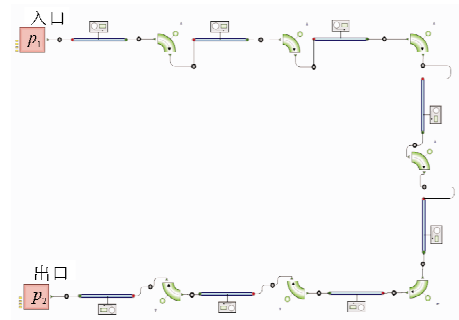


图 2 FLOWMASTER 管网系统模型

Fig. 2 FLOWMASTER pipe network system model

### 2.2 CFD 方法计算模型

CFD 方法是根据加水管路几何模型生成网格,通过商业求解器 FLUENT 进行求解,获得加水管路流场详细信息。采用六面体结构网格进行划分,网格单元数为 300 万左右。网格划分细节如图 3 所示,为了保证 CFD 方法数值模拟的合理性,管路壁面附近布置了足够密度的附面层网格,以准确模拟附面层流场;而为了尽量减少 CFD 方法所需的计算资源,在管路流向方向,流场较为简单的直线段网格布置较为稀疏,流场较为复杂的弯管段网格布置较密,以达到网格合理分布的目的。

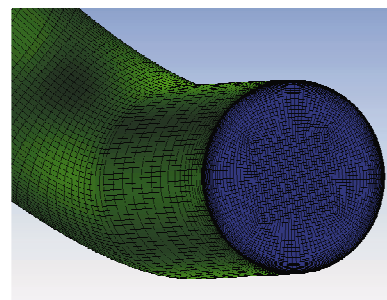


图 3 加水管路网格划分

Fig. 3 Mesh of water supply pipe

## 3 计算结果比较与分析

管路流动性能主要取决于管路长度、管路走向、管路内径、管路两端压差、管路壁面粗糙度等因素。本文主要分析管路两端压差和管路壁面粗糙度对加水管路流动性能的影响。根据加水管路设

计经验,加水管路两端压差分别模拟 15、20、25、30、35 psig 五种;管路壁面粗糙度模拟  $5.08 \times 10^{-5}$ 、 $5.08 \times 10^{-4}$ 、 $5.08 \times 10^{-3}$ 、 $5.08 \times 10^{-2}$ 、 $5.08 \times 10^{-1}$  mm 五种,所选取的加水管路的壁面粗糙度实际为  $5.08 \times 10^{-3}$  mm。

### 3.1 加水管路流量比较

加水管路流量是加水管路流动性能最直接的体现,直接影响水箱的加水时间,不同入口压力条件下(出口压力条件都为大气压),FLOWMASTER 管网系统和 CFD 方法数值模拟获得的加水管路的流量比较分别如图 4 和表 1 所示。

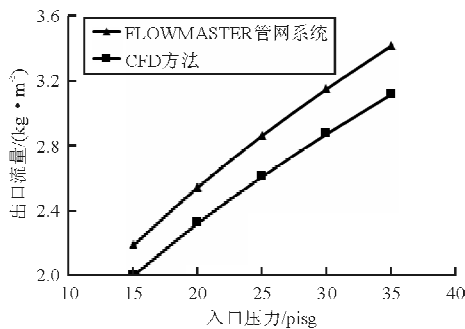


图 4 不同入口压力下的管路流量

Fig. 4 Flow rate under different inlet pressures

表 1 不同入口压力下的管路流量对比

Table 1 Flow rate under different inlet pressures

入口压力/psig	绝对粗糙度/ $(10^{-3}\text{mm})$	出口流量/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )		误差/%
		FLOWMASTER 管网系统	CFD 方法	
15	5.08	2.191 51	2.001 8	9.48
20	5.08	2.552 34	2.328 4	9.62
25	5.08	2.871 55	2.617 6	9.70
30	5.08	3.160 22	2.881 6	9.67
35	5.08	3.427 02	3.126 9	9.60

从图 4 和表 1 可以看出:两种方法计算获得的流量都是随着入口压力的增加而不断增大的,且增大幅度相当;FLOWMASTER 管网系统计算获得的流量大于 CFD 方法,因为 FLOWMASTER 管网系统是基于经验公式的各种模块来进行模拟的,而 CFD 方法则是通过求解不可压 Navier-Stokes 方程对管路流场直接进行模拟,两种方法从根本上是不同的,理论上来说 CFD 方法更准确一些。而 FLOWMASTER 管网系统计算结果与 CFD 方法

计算结果的误差均在 9.5% 左右,表明 FLOWMASTER 管网系统在模型搭建完成之后,不同的边界条件并不会影响模型的可靠性,其计算结果是可靠的。在管路设计过程中,FLOWMASTER 管网系统能够快速、可靠地计算出管路的性能,在工程应用中是非常有价值的。

流体在管路中作湍流运动时,流断面上的速度分布大致可分为三个区域。在靠近管壁处的一薄层流体中,由于受管壁的牵制,流体质点的横向脉动受到限制,流体的粘性起主导作用,流动呈层流状态,在这一薄层流体中,流体沿径向存在较大的速度梯度,在管壁处速度为 0,这一层流体称为粘性底层。由于湍流脉动的结果,在离壁面不远处到中心的大部分区域流速分布比较均匀,这部分流体处于湍流运动状态,称为湍流核心区。在粘性底层与湍流核心区之间存在着范围很小的过渡区域,由于过渡区域很小且很复杂,一般将其并入湍流核心区处理<sup>[12]</sup>。

由于材料、加工方法以及使用条件等因素的影响,管壁表面不会绝对平整光滑,存在各种不同程度的凹凸不平,凹凸不平的平均尺寸就是管壁的绝对粗糙度。

当粘性底层厚度大于管壁绝对粗糙度时,管壁的凹凸不平部分完全淹没在粘性底层中,此时粗糙度对湍流核心区几乎没有影响,流体好似在完全光滑的管中流动。而当粘性底层厚度小于管壁绝对粗糙度时,管壁凹凸不平部分暴露在粘性底层之外,粘性底层被破坏,湍流核心区的流体冲击在凸起部分,会产生旋涡,加剧湍动程度,增大能量损失,粗糙度的大小对管路中湍流产生直接影响,从而影响管路的流动特性。

在同样压差、不同壁面粗糙度下,FLOWMASTER 管网系统和 CFD 方法数值模拟获得的加水管路的流量比较(加水管路直径为 19.05 mm)分别如图 5 和表 2 所示。两种方法的计算结果均符合上述规律的,在绝对粗糙度比较小时,粗糙度的变化对管路流量的影响不大,即管壁绝对粗糙度为  $5.08 \times 10^{-5}$ 、 $5.08 \times 10^{-4}$  mm 时,管路流量几乎相同;而在绝对粗糙度比较大时,粗糙度的变化对管路流量的影响比较大,即管壁绝对粗糙度为  $5.08 \times 10^{-2}$ 、 $5.08 \times 10^{-1}$  mm 时,管路流量相差较大。

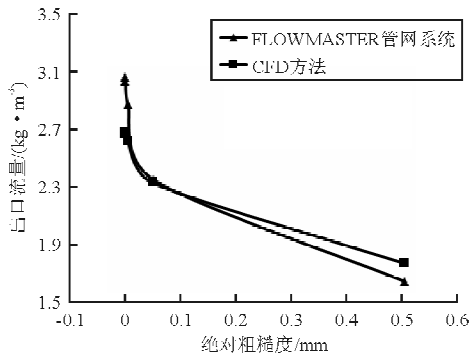


图 5 不同粗糙度下的管路流量比较

Fig. 5 Flow rate under different absolute roughness

表 2 不同粗糙度下的管路流量对比

Table 2 Flow rate under different absolute roughness

入口压力/psig	绝对粗糙度/mm	出口流量/(kg·m <sup>-3</sup> )		误差/%
		FLOWMASTER 管网系统	CFD 方法	
25	$5.08 \times 10^{-5}$	3.064 98	2.676 6	14.51
25	$5.08 \times 10^{-4}$	3.042 06	2.669 4	13.96
25	$5.08 \times 10^{-3}$	2.871 55	2.617 6	9.70
25	$5.08 \times 10^{-2}$	2.351 06	2.325 8	1.09
25	$5.08 \times 10^{-1}$	1.635 98	1.763 3	-7.22

CFD 方法对不同管壁绝对粗糙度的模拟结果符合理论规律,表明该方法确实能够很好地模拟流场的流动信息;FLOWMASTER 管网系统也能很好地模拟出不同管壁绝对粗糙度下的管路流量则是得益于经典的 Colebrook-White 公式,该公式是基于一系列实验总结出来的,为工程中快速计算管路性能提供了极大便利。两种方法计算结果之间的误差是因为它们的计算理论基础不同,经验公式难以完美地表示物理现象,但两种方法在五个不同粗糙度下的误差仍保持在 15% 以内,并且在管壁真实粗糙度  $5.08 \times 10^{-3}$  mm 下两者误差在 10% 以内,表明 Colebrook-White 公式在工程应用中还是相当可靠的。

### 3.2 管路流动流场分析

FLOWMASTER 管网系统可准确、快速和可靠的获得管路流动的性能,但其不能获得管路流动的流场细节信息,而这正是 CFD 方法的优势所在。

流体在流经弯管时被迫改变流动方向,干扰了流体的正常运动,产生撞击、分离脱流、旋涡等现象,带来了附加阻力,增加了能量损失,在弯管位置

流体的运动比较复杂,其影响因素较多,因此选取管路流动的两个典型截面流场进行分析,如图 6 所示,一个为管路弯管的流向截面,另一个为弯管之后的管路横截面。

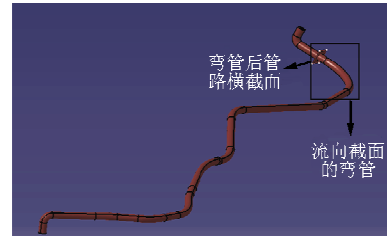


图 6 选择的截面

Fig. 6 The chosen section

管路弯管的流向截面压力云图及流线图如图 7 所示,弯管之后的管路横截面压力云图及流线图如图 8 所示。

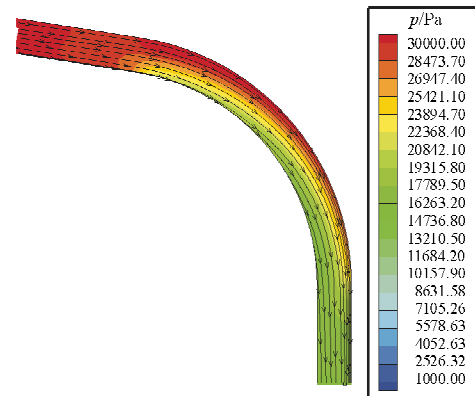


图 7 管路弯管的流向截面压力云图及流线图

Fig. 7 Pressure cloud picture and stream lines in the flow section of bend

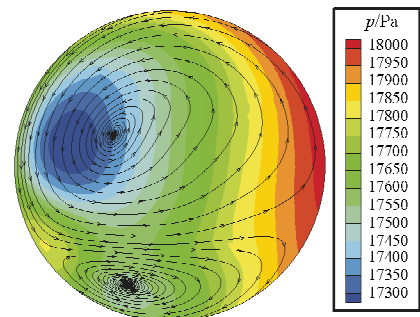


图 8 弯管之后的管路横截面压力云图及流线图

Fig. 8 Pressure cloud picture and stream lines in the cross-section of bend

从图 7 可以看出,中心部分的流体会向弯管外侧移动,这是因为沿着弯管运动的流体质点在离心

惯性力作用下,使得弯管外侧流体的压强高于内侧。在外侧和内侧的压强差作用下,弯管内会产生一对涡流,该二次流和主流的叠加,在弯管内形成一对螺旋流,加大弯管的能量损失。由于主流速度较大,在图7中很难看出螺旋流,而从图8中则可以很清晰地看出这对螺旋流。

## 4 结 论

(1) 以某型民用飞机水系统的加水管路作为研究对象,采用FLOWMASTER管网系统和CFD方法分别进行数值模拟。在加水管路不同压差条件下,两种方法均获得了较可靠的计算结果;在加水管路壁面不同粗糙度条件下,两种方法的计算结果也都与理论分析相符合,在一定程度上证明了这两种方法计算的可靠性。

(2) FLOWMASTER管网系统和CFD方法比较而言,在计算管路主要性能(例如流量)方面,二者的计算结果相差不大。

(3) FLOWMASTER管网系统建模简单、计算快捷、结果可靠,适用于管路设计中的性能计算。

(4) 相较于FLOWMASTER管网系统,CFD方法则相对复杂、耗时较长,但其能够提供管路流动的流场细节信息,用于分析管路流动的详细特性,这是FLOWMASTER管网系统所不具备的,因此其可以用于管路设计完成之后对管路流动状况进行详细分析以及优化的过程中。

(5) 在水系统管路的设计优化过程中,应该充分利用这两种方法,发挥它们各自的优势,更好地完成水系统的管路设计。

## 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] 肖佳, 杨波, 王云路. 飞机机电综合管理框架下的水系统建模与仿真[J]. 计算机工程与设计, 2012, 33(5): 1943-1947, 1972.  
Xiao Jia, Yang Bo, Wang Yunlu. Modeling and simulation of water system under framework of electromechanical integrated management[J]. Computer Engineering and Design, 2012, 33(5): 1943-1947, 1972. (in Chinese)
- [3] 黄小玲. 基于FLOWMASTER的叠压供水仿真研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2009.
- [4] 陈江林. 三通管道水力学特性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.  
Chen Jianglin. Study on hydraulic characteristics of tee pipeline[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2012. (in Chinese)
- [5] 杜延超. 城市供水管网优化设计计算[J]. 西南民族大学学报: 自然科学版, 2008, 34(3): 552-559.  
Du Yanchao. Optimized design and calculation of water supply network of Nanchong city[J]. Journal of Southwest University for Nationalities: Natural Science Edition, 2008, 34(3): 552-559. (in Chinese)
- [6] 李彦江, 张立圣, 刘永寿, 等. 飞机燃油管路压力脉动分析[J]. 飞机设计, 2009, 29(5): 37-42.  
Li Yanjiang, Zhang Lisheng, Liu Yongshou, et al. Analysis of pressure surge in aircraft fuel pipelines[J]. Aircraft Design, 2009, 29(5): 37-42. (in Chinese)
- [7] Miller D S. Internal flow system[M]. UK: BHIR Group Limited Technology Transfer Department, 1996.
- [8] 王勇, 阮奇. 计算管内湍流流体摩擦因数的显式新方程[J]. 中国工程科学, 2006, 8(6): 83-88.  
Wang Yong, Ruan Qi. A new explicit equation for calculating the friction factor for the turbulent flow in pipes[J]. Engineering Science, 2006, 8(6): 83-88. (in Chinese)
- [9] 闻德荪. 工程流体力学: 上册[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.  
Wen Desun. Engineering fluid mechanics: Volume 1[M]. Beijing: Higher Education Press, 2005. (in Chinese)
- [10] 严熙世, 刘遂庆. 给水排水管网系统[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.  
Yan Xishi, Liu Suiqing. Water supply and drainage network system[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese)
- [11] Menter F R. Two-equation Eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. AIAA Journal, 1994, 32(8): 1598-1605.
- [12] 林建忠. 流体力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.  
Lin Jianzhong. Fluid mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013. (in Chinese)

## 作者简介:

朱 翀(1988—),男,硕士。主要研究方向:民用飞机水废水系统设计。

雷美玲(1980—),女,高级工程师。主要研究方向:民用飞机水废水系统设计。

张雪苹(1987—),女,硕士。主要研究方向:民用飞机水废水系统设计。

(编辑:马文静)