

1-3-2019

Research of Turbulence Model Parameters Correction for Oil Flow of Pipeline

Jisen Wang

1. School of Automation, Northwestern Poly technical University, Xi'an 710072, China;; ;

Jia Qian

1. School of Automation, Northwestern Poly technical University, Xi'an 710072, China;; ;

Chen Chen

1. School of Automation, Northwestern Poly technical University, Xi'an 710072, China;; ;

Yaping Zhang

2. Aircraft R&D Center, Xi'an 710089, China;;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Research of Turbulence Model Parameters Correction for Oil Flow of Pipeline

Abstract

Abstract: Because of the limitation of the parameters in the Realizable $k-\varepsilon$ two equations model, the model is no longer suitable to simulate the pressure loss of the turbulent oil flow of pipelines. A *mathematical model of the oil flow of pipeline is built, and the Realizable $k-\varepsilon$ model default parameters are modified according to the test results of YH-15 aviation hydraulic oil to obtain new parameters used to simulate the pressure loss in other conditions. Compared to the model with default parameters, numerical simulations and experimental results show that the maximum relative error is reduced to 3.15% from 7.76% when the new parameters is used.* This research can provide a theoretical basis for the prediction of the turbulent oil flow of hydraulic lines on aeronautical engineering.

Keywords

hydraulic fluids, turbulence models, tube flow, numerical simulation, parameters correction

Authors

Jisen Wang, Jia Qian, Chen Chen, Yaping Zhang, and Du Jiang

Recommended Citation

Wang Jisen, Jia Qian, Chen Chen, Zhang Yaping, Du Jiang. Research of Turbulence Model Parameters Correction for Oil Flow of Pipeline[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(5): 1665-1671.

液压管路油液流动的湍流模型参数修正研究

王纪森¹, 贾倩¹, 陈晨¹, 张亚平², 杜疆¹

(1. 西北工业大学自动化学院, 陕西 西安 710072; 2. 中航飞机研发中心, 陕西 西安 710089)

摘要: 由于 Realizable $k-\varepsilon$ 两方程湍流模型原参数的局限性, Realizable $k-\varepsilon$ 模型不再适宜于模拟液压管路油液流动的压力损失。建立管路中油液流动的数学模型, 根据液压管路中 YH-15 航空液压油流动的试验结果对 Realizable $k-\varepsilon$ 两方程模型中的原参数进行了修正, 得到适用于模拟油液流动的湍流模型新参数, 模拟了其他工况下液压管路油液流动的压力损失, 与原参数模型进行了对比, 结果证明数值模拟与试验结果的相对误差最大值从 7.76% 降为 3.15%, 新参数模型与试验结果吻合较好。研究结果为航空工程上液压管路的湍流运动预测提供理论基础。

关键词: 液压流体; 湍流模型; 管流; 数值模拟; 参数修正

中图分类号: V317.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 05-1665-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201805006

Research of Turbulence Model Parameters Correction for Oil Flow of Pipeline

Wang Jisen¹, Jia Qian¹, Chen Chen¹, Zhang Yaping², Du Jiang¹

(1. School of Automation, Northwestern Poly technical University, Xi'an 710072, China; 2. Aircraft R&D Center, Xi'an 710089, China)

Abstract: Because of the limitation of the parameters in the Realizable $k-\varepsilon$ two equations model, the model is no longer suitable to simulate the pressure loss of the turbulent oil flow of pipelines. A mathematical model of the oil flow of pipeline is built, and the Realizable $k-\varepsilon$ model default parameters are modified according to the test results of YH-15 aviation hydraulic oil to obtain new parameters used to simulate the pressure loss in other conditions. Compared to the model with default parameters, numerical simulations and experimental results show that the maximum relative error is reduced to 3.15% from 7.76% when the new parameters is used. This research can provide a theoretical basis for the prediction of the turbulent oil flow of hydraulic lines on aeronautical engineering.

Keywords: hydraulic fluids; turbulence models; tube flow; numerical simulation; parameters correction

引言

湍流是一种高度复杂的三维非稳态的不规则流动。由于湍流本身的复杂性, 直到现在仍有一些基本问题尚未解决^[1]。文献[2-4]认为非稳态的

Navier-Stokes 方程对于湍流的瞬时运动仍然适用。目前工程湍流计算中所采用的基本方法是 Reynolds 时均方程法, 即建立湍流模型来使方程组封闭。文献[5]应用 $k-\varepsilon$ 模型对某直圆管湍流稳态进行模拟并与理论分析比较, 证明 $k-\varepsilon$ 模型对于内部稳态的充分发展湍流很适用; 文献[6]应用几种不同的湍流模型, 模拟计算光滑直圆管中空气的沿程阻力系数, 结果表明 S-A 湍流模型与尼古拉茨试验结果吻合最好; 文献[7]采用标准 $k-\varepsilon$ 模型对直圆



收稿日期: 2016-07-14 修回日期: 2016-09-13;
作者简介: 王纪森(1966-), 男, 陕西渭南, 博士, 教授, 博导, 研究方向为液压加载与飞控电液伺服加载系统研制等; 贾倩(1992-), 女, 陕西西安, 硕士生, 研究方向为机电液一体化; 陈晨(1990-), 男, 陕西商洛, 硕士生, 研究方向为液压加载。

<http://www.china-simulation.com>

• 1665 •

管道内燃料油的内部流场进行了数值模拟,得到管道直径和温度对内部压力场的影响;文献[8]采用计算流体力学软件对蝶阀阀体后双弯管道模型中的复杂流动现象进行了数值模拟;文献[9]采用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型分别对弯管中油水两相流流场进行了定常与非定常数值模拟;文献[10]采用修正的 $k-\varepsilon$ 模型,通过修正耗散率输运方程中的经验常数模拟了三维弯道水流的水力特性;文献[11]对海洋管道在单相流中阻力数值进行了计算和分析,湍流模型选用 RNG $k-\varepsilon$ 模型,对壁面的处理选用壁面函数法;文献[12]对突扩管、T型三通管和 90° 弯管中的流动进行数值模拟,给出了3种典型阀件的内部流场特性,分析了其局部阻力特征;文献[13]使用了单相流的 $k-\varepsilon$ 两方程湍流模型对搅拌器中的气液两相三维湍流进行了模拟计算,计算结果与实测结果存在一定差距;文献[14]采用 $k-\varepsilon$ 两方程湍流模型,对一旋转的管道的气液两相湍流进行了研究,计算获得的压力和气泡分布情况与实测结果基本一致。这些文献对管道内流场变化规律以及两相流研究较多,且大多数都以水为研究对象,采用湍流模型默认经验常数进行数值模拟,其经验常数是水为试验对象得到的。

本文在前人研究的基础上,采用 CFD^[15]对液路管路的压力损失进行了数值模拟,根据试验结果对 Realizable $k-\varepsilon$ 模型参数进行修正,得到适用于模拟液路管路的参数。研究结果可为工程上液路管路的湍流运动预测提供理论依据。

1 数学模型

直角坐标系中不可压缩流体的时均控制方程^[16]如下:

连续性方程

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u'_i u'_j} \right) \quad (2)$$

式中: ρ 为流体的密度; t 为时间; x_i 为沿 i 方向的空间坐标 ($i=1, 2, 3$); u_i 为沿 i 方向的时均速度分量; p 为压强; μ 为流体时均粘度。

根据湍流粘性的概念,雷诺应力表示为:

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij} \quad (3)$$

式中: k 为湍动能; μ_t 为湍流粘性系数; δ_{ij} 是 Kronecker 函数: $\delta_{ij} = 1 (i=j)$, $\delta_{ij} = 0 (i \neq j)$ 。

Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型较标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型适合于描述流线弯曲流体的运动,因此,这里选取 Realizable 模型封闭雷诺时均方程。对于 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型,稳态不可压缩流体的湍动能和耗散率方程分别为:

$$\rho u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\rho u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + c_1 \frac{\varepsilon}{k} G_k - c_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (5)$$

式中: G_k 是由于平均速度梯度引起的应力源项,

$G_k = \mu_t S^2$, $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$, C_μ 的确定公式参考文献[17],

$$S = (2S_{i,j}S_{i,j})^{1/2}, \quad S_{i,j} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right);$$

$$\sigma_\varepsilon = 1.2, \quad \sigma_k = 1.0, c_2 = 1.9;$$

$$c_1 = \max \left\{ 0.43, \frac{\tilde{\eta}}{5 + \tilde{\eta}} \right\}, \quad \tilde{\eta} = \frac{Sk}{\varepsilon}.$$

2 管路及油液的参数

本文以 3 根由直管和弯管组合成的硬管管路为研究对象,根据 1 号管路的试验结果对模型参数进行修正,并通过对 2 号和 3 号管路进行试验来验证新模型参数的效果。

3 根硬管管材均为 0Cr18Ni9, 外径×壁厚^[18]均为 $\Phi 10 \times 1$ mm, 管长及弯曲角度 θ 如表 1, 液压介质为 YH-15 航空液压油^[19], 密度为 833.3 kg/m^3 , 根据黏温公式^[20]:

$$\lg \lg(\nu + a) = b + m \lg T \quad (6)$$

计算出油液运动粘度 ν ; T 为绝对温度; a, b, m 为随油品性质而异的常数。选取经验常数 $a=0.6$, 每一个温度范围内的常数 b, m 见表 2。

表 1 硬管长度及弯曲角度
Tab. 1 Tube length and bending angle

管路序号	管长/mm	$\theta_1/^\circ$	$\theta_2/^\circ$	$\theta_3/^\circ$	$\theta_4/^\circ$
1	2 690	22	7	13	8
2	2 690	22	7	13	8
3	3 610	12	8	90	90

表 2 YH-15 航空液液压油黏温特性曲线常数^[20]
Tab. 2 Viscosity temperature curve coefficients of YH-15 aviation hydraulic oil

温度范围/ $^\circ\text{C}$	常数 m	常数 b
[-55, -40)	-3.207 6	8.008 1
[-40, -20)	-2.863 1	7.192 5
[-20, 0)	-2.948 5	7.397 7
[0, 20)	-2.586 3	6.515 3
[20, 40)	-2.415 3	6.093 4
[40, 60)	-2.191 5	5.534 8
[60, 80)	-2.279 2	5.754 7
[80, 100)	-2.060 3	5.197 0
[100, 120)	-2.220 3	5.608 5
[120, 135]	-1.524 7	3.803 7

3 数值模拟

3.1 边界条件与求解方法

本文采用 Fluent 14.5 对液压管路的压力损失进行数值模拟, 计算中液压介质为 YH-15 航空液液压油, 进口条件为速度进口, 通过进口流量和截面积得到进口速度; 出口条件为压力出口, 相对压强为 0; 固体壁面上采用静止无滑移条件, 壁面流动区采用壁面函数法处理。控制方程的离散采用有限体积法, 控制方程的求解使用了速度与压力耦合的半隐 SIMPLEC^[21]算法。

3.2 计算区域网格划分与网格无关性验证

在对管路流体域进行网格划分时, 本文选用尺度化壁面函数^[22]来处理近壁区。根据下式来预估近壁面网格尺寸:

$$\Delta y/y^+ \approx 5.06d_h \text{Re}_{d_h}^{-7/8} \quad (7)$$

式中: Δy 为壁面到第一层流体单元的中心点的距离, d_h 为管道的水力直径, 圆管的水力直径即为管道内径 d , Re_{d_h} 为流体的雷诺数, $30 < y^+ < 30\text{-}500$, 且 $y^+ \geq 15$ 。

在 ICEM CFD 中采用 O 型块剖分对圆面进行结构网格划分, 以 1 号管路为例, 得到的局部流体域网格图见图 1。

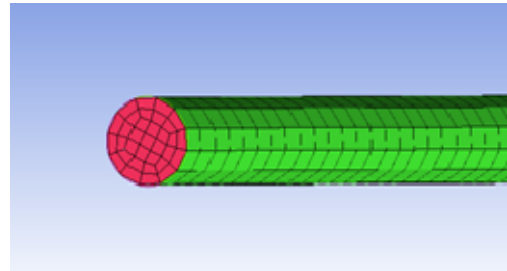


图 1 1 号管路局部流体域的网格
Fig. 1 No. 1 pipeline local fluid domain grid

2 号、3 号管路流体域网格划分与 1 号管路类似, 3 根管路的流体域网格参数如表 3。

表 3 3 根管路的流体域网格参数
Tab. 3 Fluid domain grid parameters for 3 pipelines

参数	1 号	2 号	3 号
节点	36 200	36 200	48 600
单元	29 832	29 832	40 062

从理论上讲, 网格点布置得越密集, 计算结果也越精确, 但是网格越密, 所需计算资源也越大, 而且随着网格的加密, 计算机浮点运算造成的舍入误差也会增大。因此在实际应用中, 一般在计算精度与计算开销间寻求一个比较合适的点, 这个点所处的位置就是达到网格无关的阈值。

以 2 号管路为例, 通过比较分析两次划分网格后管路的压力损失来验证网格无关性, 流量为 8.09 L/min, 温度为 40 $^\circ\text{C}$ 时的对比结果见表 4。

表 4 2 号管路对比结果
Tab. 4 Comparison results of No. 2 pipeline

参数	加密前	加密后
节点	36 200	77 634
单元	29 832	65 328
压力损失/kPa	54.620	54.796

从表4可以看出,当网格数从3万增加至6.5万时,管路压力损失变化很小,可认为加密前的网格已达到网格无关,因此加密前的3万网格可作为计算网格。

4 试验结果

压力损失试验的试验原理图和试验现场图(以1号管路为例)见图2、图3。图2中序号分别为:1.油箱;2.液位计;3.电机;4.液压泵;5.单向阀;6.压力表;7.进油过滤器;8.温度传感器;9.蓄能器;10.流量传感器;11.压差传感器;12.压力表;13.压力传感器;14.1、14.2:调速阀;15.1、15.2:节流阀;16.冷却器;17.溢流阀。

通过调节溢流阀17、调速阀14.1、14.2和节流阀15.1、15.2来调节流量和背压。采集数据得到的试验曲线如图4。

选取试验过程中稳定的一段曲线求平均值得到更准确的试验数据,1号管路的试验结果见表5。

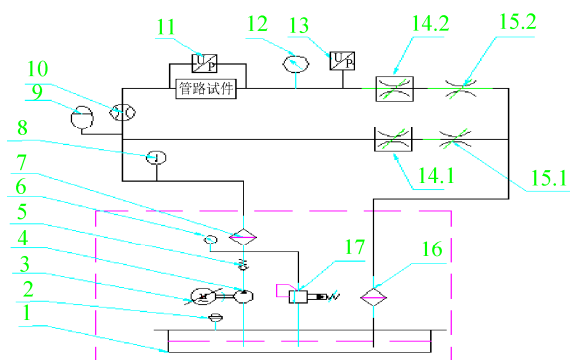


图2 管路试验原理图
Fig. 2 Piping test schematic



图3 试验现场图
Fig. 3 Test site

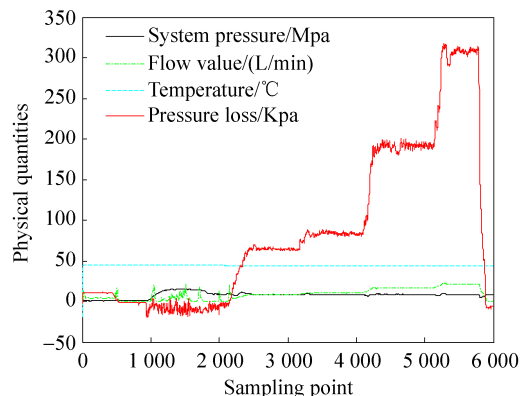


图4 试验曲线
Fig. 4 Test curves

表5 1号管路的试验结果
Tab. 5 Test results of No. 1 pipeline

背压/MPa	温度/℃	流量/(L·min ⁻¹)	压力损失/kPa
8.36	43.95	16.26	191.34
13.0	45.50	16.16	186.72
8.09	37.71	16.21	191.12
13.03	40.35	16.35	185.90

5 Realizable $k-\epsilon$ 模型参数修正

以1号管路的第一组试验条件为例,用fluent验证背压对油液压力损失数值模拟的影响,背压分别取为0以及试验中调节的8.36 MPa, 13 MPa左右,结果如表6。表6中括号内的百分数是以试验结果为基准,分别表示各组试验条件下,采用原参数的Realizable $k-\epsilon$ 模型数值模拟结果同试验结果比较的相对误差。

表6 1号管路第一组试验条件下不同背压的数值模拟结果
Tab. 6 Numerical simulation results of different back pressures under the first set of test conditions for No. 1 pipeline

背压/MPa	数值模拟/kPa
0	175.932 (-8.0%)
8.36	175.936 (-8.0%)
13.0	175.934 (-8.0%)

从表6中可看出,背压对数值模拟结果基本没影响,为了使数值模拟收敛更快,本文中的出口背压都选为0。

1号管路第一组试验条件下不同背压的管路压力云图如图5~7所示,从图中可以看出,入口处压力最大,随着油液流经管路,压力损失减小,

出口处压力最小, 且压力损失与背压无关。

根据上述试验条件对 1 号管路油液压力损失进行相应的数值模拟, 将进、出口面平均压力作差得到油液压力损失, 结果见表 7。

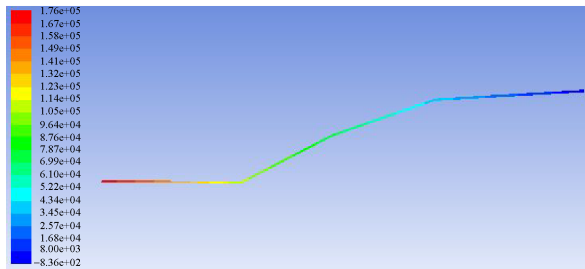


图 5 背压为 0 时的管路压力云图

Fig. 5 Line pressure cloud at 0 back pressure

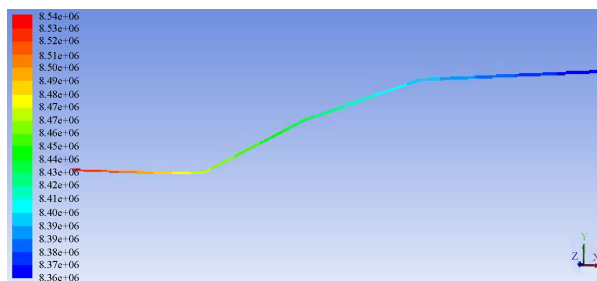


图 6 背压为 8.36MPa 时的管路压力云图

Fig. 6 Line pressure cloud at 8.36MPa back pressure

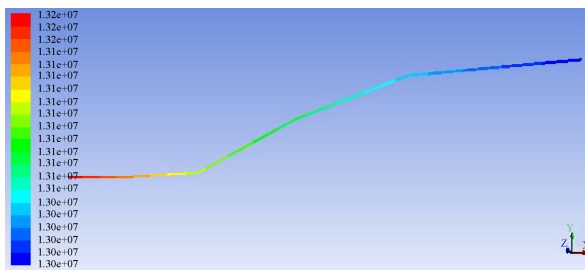


图 7 背压为 13.0MPa 时的管路压力云图

Fig. 7 Line pressure cloud at 13.0MPa back pressure

表 7 1 号管路的压力损失结果对比

Tab. 7 Comparison of pressure loss for No. 1 pipeline

试验结果/kPa	数值模拟/kPa
191.34	175.936 (-8.0%)
186.72	172.562 (-7.6%)
191.12	181.930 (-4.8%)
185.90	181.402 (-2.4%)

从表 7 可以看出, 用原参数的 Realizable $k-\varepsilon$ 模型对液压管路的压力损失计算结果同试验结果误差较大, 原因在于 Realizable $k-\varepsilon$ 模型的经验常数是以为水为试验对象得到的, 对油液的流动不再适用。下

面根据 1 号管路的试验结果对模型参数进行修正得到适应于液压管路油液流动的 Realizable $k-\varepsilon$ 模型。Realizable $k-\varepsilon$ 模型中的参数默认值如表 8。

表 8 Realizable $k-\varepsilon$ 模型中的系数

Tab. 8 Coefficients in the Realizable $k-\varepsilon$ model

c_2	σ_k	σ_ε
1.9	1.0	1.2

文献[16]表明, 对计算结果影响最大的是 c_2 的值。因此, 在对 Realizable $k-\varepsilon$ 模型的参数进行修正时, 保持 $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ 的默认值不变, 逐渐改变 c_2 来计算压力损失, 使其接近试验结果。

由 1 号管路的试验结果可知, 共有 4 组数据, 改变 c_2 的值, 并对 4 组工况进行计算, 得到每个 c_2 值对应的 4 组工况的计算结果及同试验结果的相对误差, 将这 4 组相对误差进行平方和记为对应 c_2 值下的整体误差, 整体误差最小时的模型参数即为所求参数。

c_2 值及对应整体误差如表 9(经模拟后计算可知, 由于将 c_2 值从 1.9 逐渐增加到 2.8 时, 整体误差逐渐增大, 因此表 9 中只给出了 c_2 值大于等于 2.8 时的取值及对应的整体误差)。从表 9 中得到 c_2 的最优值在 3.2 附近, 对 c_2 值进行优化, 如表 10(经模拟后计算可知, 当 c_2 值大于 3.14 时, 整体误差是逐渐增大的, 因此表 10 中略去了 c_2 值大于 3.14 时的取值及对应的整体误差)。

表 9 c_2 值及对应的整体误差

Tab. 9 c_2 and corresponding overall error

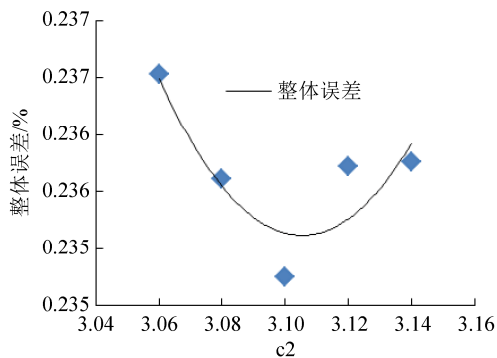
c_2	整体误差/%
2.8	0.277 3
3.0	0.250 1
3.2	0.237 1
3.4	0.245 0
3.6	0.273 6

将表 10 中的整体误差随 c_2 的变化规律拟合合成图 8 所示的曲线, 从图中可以看出, 整体误差最小时对应的 c_2 值为 3.10。

用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型对液压管路的湍流运动进行模拟时, 可取参数为 $c_2=3.10$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\varepsilon=1.2$ 。

表10 优化后 c_2 值及对应的整体误差
Tab.10 Optimized c_2 and corresponding overall error

c_2	整体误差/%
3.06	0.236 53
3.08	0.235 61
3.10	0.234 75
3.12	0.235 72
3.14	0.235 76

图8 整体误差随 c_2 的变化规律
Fig. 8 Overall error varies with c_2

6 新模型参数验证

根据 1 号管路的试验结果对模型参数进行修正后得到新模型参数为 $c_2=3.10$ ， $\sigma_k=1.0$ ， $\sigma_\varepsilon=1.2$ ，下面通过 2 号和 3 号管路对新模型参数的效果进行验证。2 号、3 号管路的试验工况如表 11，试验结果以及采用原参数和新参数进行的数值计算结果如表 12，表 12 中括号内的数是以试验结果为基准，分别表示各组试验条件下，数值计算结果同试验结果比较的相对误差(%)。

表11 2号、3号管路的试验工况
Tab. 11 Test conditions for No. 2 and No. 3 pipelines

管路序号	背压 / kPa	温度 / °C	流量 / L·min ⁻¹
2	7.99	39.29	15.86
	13.34	49.02	16.37
	13.05	50.09	15.98
	13.01	42.42	16.26
3	8.04	39.25	16.00
	12.98	41.89	16.13
	8.25	36.36	16.45
	13.14	39.92	16.16

从表 12 中可以看出，同使用原参数的 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型相比，采用新参数的

Realizable 模型对液压管路油液的湍流运动模拟更接近实际试验，压力损失的数值模拟误差显著减小，同试验结果的相对误差在 4% 以内，吻合较好，可知新模型参数可为航空工程上液压管路油液的湍流运动预测提供参考。

表12 压力损失结果对比
Tab. 12 Comparison of pressure loss /KPa

管路序号	试验结果	默认参数	新参数
2	182.78	173.22 (-5.23)	182.00 (-0.43)
	187.23	172.69 (-7.76)	181.34 (-3.15)
	176.55	164.81 (-6.65)	173.06 (-1.98)
	190.60	177.20 (-7.00)	186.15 (-2.33)
3	257.74	239.49 (-7.08)	252.72 (-1.95)
	255.05	238.88 (-6.34)	252.01 (-1.19)
	265.15	255.94 (-3.48)	270.13 (1.88)
	255.88	242.49 (-5.20)	255.82 (-0.02)

7 结论

1) 由于 Realizable $k-\varepsilon$ 模型的参数是以水为试验对象得到的，因此用其模拟管路油液的湍流运动时，有一定的局限性。原 Realizable $k-\varepsilon$ 模型的数值模拟结果同试验结果比较，误差较大，压力损失存在 8% 的误差。根据液压管路试验结果对湍流模型进行修正后，得到符合液压管路油液的参数为 $c_2=3.10$ ， $\sigma_k=1.0$ ， $\sigma_\varepsilon=1.2$ 。据此模拟其他工况下管路压力损失时，误差降为 4%。

2) 本次试验的介质为 YH-15 航空液压油，硬管为用于装机的航空工程试件，对传感器检定后其精度均能满足试验要求，试验系统经过调试比较稳定，试验结果重复性好，试验数据具有充分的可信度。因此，得到的新模型参数对航空工程上液压管路油液的湍流运动预测有一定的指导意义。

在实际工程中，由于湍流的复杂性及模型参数的适用性，如何精确地模拟更复杂的管路中油液湍流运动，还需要进一步的深入研究。

参考文献:

- [1] 李福田, 倪浩清. 工程湍流模式的研究开发及其应用[J]. 水利学报, 2001, 5(5): 22-23.
Li F T, Ni H Q. Application and Development of Turbulence Model for Engineering Practice[J]. Journal of

- Hydraulic Engineering, 2001, 5(5): 22-23.
- [2] CHEN C J, JAW S Y. Fundamentals of Turbulence Modeling[M]. Washington DC: Taylor&Francis, 1998.
- [3] MARKATOS N C. The Mathematical Modeling of Turbulence Flows[J]. Applied Mathematical Modelling (S0307-904X), 1986, 10(3): 190-220.
- [4] ESSERS J A. Computational Methods for Turbulent Flows, Transonic and Viscous Flows[M]. Washington DC: hemisphere, 1983: 93-182.
- [5] 熊莉芳, 林源, 李世武. $k-\varepsilon$ 湍流模型及其在 Fluent 软件中的应用[J]. 工业加热, 2007, 36(4): 13-15.
XIONG L F, LIN Y, LI S W. $k-\varepsilon$ Turbulent Model and its Application to the FLUENT[J]. Industrial Heating, 2007, 36(4): 13-15.
- [6] 周志军, 林震, 周俊虎, 等. 不同湍流模型在管道流动阻力计算中的应用和比较[J]. 热力发电, 2007(1): 18-22.
ZHOU Z J, LIN Z, ZHOU J H, et al. Application of Different Turbulent Models in Calculation of Flow Resistance in Pipelines and Comparison[J]. Thermal Power Generation, 2007(1): 18-22.
- [7] 张宇, 栾江峰, 张斯亮. 基于 Fluent 的压力管道内部流场分析[J]. 当代化工, 2014, 43(6): 1106-1108.
Zhang Y, Luan J F, Zhang S L. Analysis on Flow Field in Pressure Pipeline Based on FLUENT[J]. Contemporary Chemical Industry, 2014, 43(6): 1106-1108.
- [8] 惠伟, 刘应征, 王少飞. 蝶阀阀体后双弯管道流场的数值模拟[J]. 动力工程学报, 2014, 34(6): 450-457.
Hui W, Liu Y Z, Wang S F. Numerical Simulation on Turbulent Flow in a Dual-elbow Channel Behind Butterfly Valve[J]. Chinese Journal of Power Engineering, 2014, 34(6): 450-457.
- [9] 纪宏超, 李耀刚. 基于 Realizable 湍流模型的弯管流动模拟分析[J]. 机械工程与自动化, 2013(4): 46-47.
Ji H C, Li Y G. Bend Flow Simulation Analysis Based on Realizable Turbulence Model[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2013(4): 46-47.
- [10] 戎贵文, 魏文礼, 刘玉玲. 分岔管道三维湍流水力特性数值模拟[J]. 水利学报, 2010, 41(4): 398-405.
Rong G W, Wei W L, Liu Y L. 3D Numerical Simulation for Hydraulic Characteristics of Turbulent Flow in Bifurcated Duct[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(4): 398-405.
- [11] 王健. 基于 FLUENT 的 CFD 方法在船海工程中的实用性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012: 5-14.
Wang J. Practical Research of CFD Method Based on FLUENT in Ship-Sea Engineering[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012: 5-14.
- [12] 赵月. 基于 CFD 的管道局部阻力的数值模拟[D]. 大庆: 东北石油大学, 2011: 28-57.
Zhao Y. Numerical Simulation of Pipeline Local Resistance Based on CFD[D]. DA QING: Northeast Petroleum University, 2011: 28-57.
- [13] Gao Z X, Deng J, Ge X F. Simulation of Bubbly Two-phase Turbulent Flow in Circular Pipe Bend[J]. Journal of Hydraulic Engineering (S0733-9429), 2009, 40(6): 696.
- [14] WU J C, MINEMURA K. Numerical Prediction of Turbulent Bubbly Two-phase Flow in a Rotating Complicated Duct[J]. Int. J. for Numerical Methods in Fluids (S1097-0363). 1999, 29(7): 811-826.
- [15] 翟建华. 计算流体力学(CFD)的通用软件[J]. 河北科技大学学报, 2005(6): 160-163.
ZHAI J H. Review of Commercial CFD Software[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2005 (6): 160-163.
- [16] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 337-351.
TAO W Q. Numerical Heat Transfer[M]. 2nd Edition. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001: 337-351.
- [17] 魏文礼, 李盼盼, 洪云飞, 等. 有限尾水深波浪底板壁面射流水力特性的数值模拟研究[J]. 应用力学学报, 2016, 33(2): 234-240.
Wei W L, Li P P, Hong Y F, et al. Numerical simulation of the hydraulic characteristics of jets on the bottom wave wall of a limited tail water[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2016, 33(2): 234-240.
- [18] 《飞机设计手册》总编委会. 飞机设计手册 第2册 标准与标准件(上) [M]. 北京: 航空工业出版社, 2000.
《Aircraft Design Manual》Chief editorial board. Aircraft Design Manual Volume 2 Standards and Standard Parts (I)[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2000.
- [19] 《飞机设计手册》总编委会. 飞机设计手册 第12册 飞行控制系统和液压系统设计[M]. 北京: 航空工业出版社, 2003.
《Aircraft Design Manual》Chief editorial board. Aircraft Design Manual Volume 12 Flight Control System and Hydraulic System Design [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2003.
- [20] 黄河, 毛阳, 孙永宾, 等. YH-15 航空液压油的黏温特性测试与分析[J]. 兵工自动化, 2015, 34(5): 42-43.
Huang H, Mao Y, Sun Y B, et al. Test and Analysis of YH-15 Aviation Hydraulic Oil Viscosity-temperature Characteristics[J]. Ordnance Industry Automation, 2015, 34(5): 42-43.
- [21] VAN DOORMAAL J P, RAITHBY G D. Enhancement of the SIMPLE Method for Predicting Incompressible Fluid Flow[J]. Numerical Heat Transfer (S1040-7782), 1984, 7(2): 147-163.
- [22] LAUNDER B E, SPALDING D B. The Numerical Computation of Turbulent Flows[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering (S0045-7825), 1974, 3(2): 269-289.