

电动三通比例阀三维湍流数值分析及优化控制

吴熙,王卫英,姜荣飞

(南京航空航天大学机电学院,江苏南京210016)

摘要:为分析管路系统中三通比例阀的流量特性,对三通比例阀进行了三维流场数值计算。当三通阀用作分流时,分析了出口流量比和出口水头损失率随入口雷诺数及阀芯位置的变化规律;当用作合流时,分析了入口流量比随进出口压力差及阀芯位置变化规律。结果表明:比例阀的各口流量比主要受阀芯位置影响,在三通比例阀腔体形状、壁面糙度一定的情况下,降低入口雷诺数可减小局部阻力损失。实现了基于流量比特性曲线的优化控制。

关键词:三通比例阀;计算流体力学;流量比例;优化控制

中图分类号:TV134

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2014)06-0222-04

Numerical analysis and control optimization of 3D turbulent for 3-way proportional valve

WU Xi, WANG Weiying, JIANG Rongfei

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to analyze the issue of flow characteristics of 3-way proportional valve in pipeline system, the paper carried out the numerical simulation of three-dimensional flow field to the actual size of 3-way proportional valves, and analyzed the variation law of the proportion of outlet flow and head loss ratio with the change of inlet Re and position of valve core. While the 3-way valve is used to mix flow, it analyzed the variation law of inlet flow with pressure difference of outlet and in let. The conclusion are that the flow rate of proportion valve is mainly affected by valve core position and the better way to reduce the local resistance is to reduce Re of the inlet in the condition of certain mid-stream forms and wall roughness. The method realized optimization control based on characteristics curve of flow proportion.

Key words: 3-way proportional valve; computational fluid dynamics (CFD); proportion of flow rate; control optimization

电动三通比例阀具有结构简单、重量轻、动作灵敏、流量特性精确的优点,配有电动机对阀芯定位,可实现对管路流体介质的自动调节控制,广泛应用于管路压力、流量、温度、液位的精确控制。为正确反映温控系统中电动三通比例阀流量特性,计算出电动三通比例阀内流体的流场及压力场的分布情况、阀芯在各工作位置时的阻力特性,对管路的设计、电动三通比例阀的设计具有重要作用。已有不少学者对分水器、三通管等进行了研究^[1-9],但对电动三通比例阀的研究还很少有报道。本文采用计算流体力学(CFD)仿真软件,对电动三通比例阀进行了三维流场数值计算,分别研究了比例阀用作分流

及合流时,进出口流量所占比与阀芯位置的关系。计算结果为电动三通比例阀使用及供管路系统的阻力计算提供了有效依据,并对电动三通比例阀的控制提出了一种改进方案。

1 模型建立与仿真分析

1.1 模型的建立

图1给出一种三通比例阀内部腔体三维几何结构图。口A、口B、口AB直径为20 mm,腔体内带有折流板。阀芯为两底面带有圆锥的圆柱。工作时阀芯由电机通过细长杆带动(由于细长杆对流场的影响较小,未画出),运动到不同的位置以调节两出口

收稿日期:2014-07-01; 修回日期:2014-09-24

作者简介:吴熙(1990-),男,江苏苏州人,在读硕士研究生,研究方向为机电控制及自动化。

通讯作者:王卫英(1966-),女,湖南湘潭人,博士,硕士生导师,研究方向:仿生学与机械仿生、机械传动、柔性生产系统。

的比例。用作分流时,水从口 AB 进入,从口 A、口 B 流出;用作合流时,水从口 A、口 B 流入,口 AB 流出。设阀芯由口 A 侧向另一侧运动为开度增大,研究阀门开度范围为 7 % ~ 87 %。

使用 ICEM 软件对内部腔体进行网格划分,采用非结构化四面体网格 Tetra/Mixed。

采用三维单精度求解器求解。湍流模型选用 $k-\xi$ 模型,采用分离式求解器, SIMPLE 压力耦合算法,求解连续性方程、动量方程。离散格式选择二阶迎风格式,假设壁面为无滑移边界条件,近壁区的处理采用壁面函数法,不考虑重力,内部工作介质为水,作不可压缩处理。

1.2 仿真分析

1.2.1 分流时 管路系统中水流速度通常在 0.3 m/s 以上,往往为湍流状态,考虑到阀门阻力受不同流速影响,比例阀入口 AB 的边界条件分别取水流

雷诺数 Re 为 19904、9952、5971 (对应入口速度为 1、0.5、0.3 m/s),温度 300 K,密度 996.6 kg/m^3 ,湍流强度 4.64 %、5.06 %、5.39 % 进行计算。

入口 $Re = 9952$ 阀门开度 47 % 时的速度分布如图 2 所示 (图中速度单位为 m/s)。可以看出:入口流体流至阀芯处被分为两股,在开度较小的位置及阀体拐角处速度较高。

出口 A 流量所占比如图 3 所示 (口 B 流量所占比与口 A 流量所占比之和为 1,为了更直观地表示,仅列出口 A 流量所占比)。可以看出:用作分流时,在所计算的 3 种雷诺数情况下,口 A 的出口流量所占比基本相同,可见,此时比例阀的出口流量比主要受阀芯位置影响。在阀门开度在 20 % ~ 87 % 时口 A 的出口流量所占比成较好的线性,在阀门开度 7 % ~ 20 % 亦可看做成线性,且与阀门开度 20 % ~ 87 % 斜率不同。

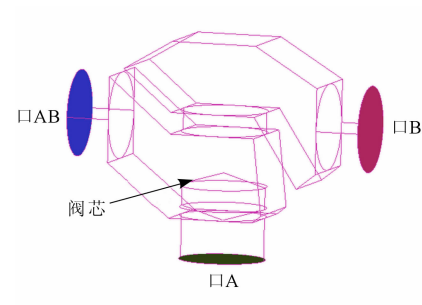


图 1 三通比例阀内部腔体透视图

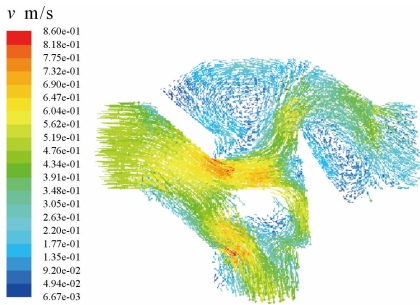


图 2 入口 $Re = 9952$ 阀门开度 47 % 时的速度图

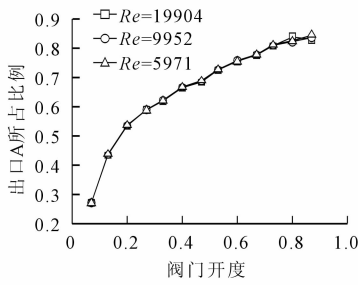


图 3 出口 A 流量比

不同出入口压力差情况下各口的水头损失率如图 4 所示。可以看出:比例阀用作分流时,口 A 的水头损失率随着入口 Re 的增大而增大,且随阀门开度增大成下降趋势;而在 3 种不同入口 Re 的情况下,口 B 的水头损失率曲线几乎重合,在 86 % ~ 98 % 之间,且随阀门开度增大成缓慢上升趋势,当开度大于 73 % 时,随入口 Re 的增大而增大,在开度为 73 % 时,口 B 水头损失达到最大值约 97.6 %。

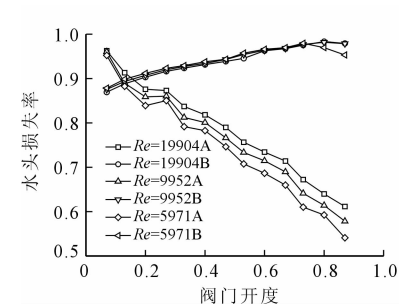


图 4 水头损失率

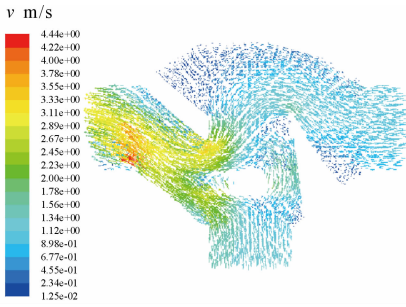


图 5 压差 0.01 MPa 阀门开度 47 % 时的速度图

1.2.2 合流时 由于用作合流时,比例阀有两个入口,为了研究其流量特性,入口边界条件不能使用速度入口。分别对比例阀入口 A、B 与出口 AB 压力差为 0.1、0.01、0.001 MPa 条件下进行计算。压差 0.01 MPa 阀门开度 47 % 时的速度如图 5 所示 (图中速度单位为 m/s),可以看出:两股流体通过阀芯后合并到一起,合并后流速增大。

入口 A 流量所占比如图 6 所示。可以看出:用

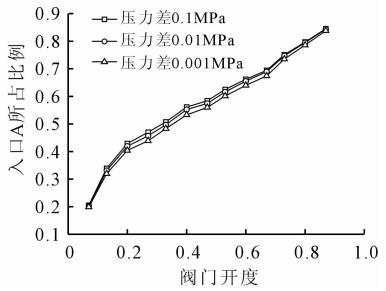


图 6 入口 A 流量所占比

作合流时,在所计算的 3 种入口压力差情况下,口 A

的入口流量所占比基本相同,可见不论在用作分

流或合流时,比例阀的入口流量比主要受阀芯位置影响。在阀门开度在 20% ~ 87% 时口 A 的入口流量所占比例成较好的线性,在阀门开度 7% ~ 20% 亦可看做成线性,且与阀门开度 20% ~ 87% 斜率不同,与用作分流时,情况类似。

2 编程控制方案

三通比例阀在工作时,例如用在温控的场合,常需要控制口 A、口 B 的流量比,以实现两路流体精密的比例控制。三通比例阀的控制常采用 4 ~ 20mA 的电流信号、0 ~ 5V 或 0 ~ 10V 的电压信号以线性关系对应 0 ~ 100% 的阀门开度,通过用户编写控制指令实现输出,即控制指令与阀门开度成线性。在执行控制时,若口 A 流量所占比与控制指令成非线性,采用相同的控制指令步长进行调节,则在斜率较小的位置调节过慢,响应时间过长;而在斜率较大的位置,灵敏度过高,出现超调使系统稳定性降低。因此,口 A 流量所占比若能成较好的线性,可使控制更为简便、精确。现根据上节对口 A 流量所占比的讨论提出一种可行的控制优化方案,使用户输入的开度指令与口 A 流量所占比成较好的线性,便于控制编程。

对用作分流时口 A 流量所占比以阀门开度 20% 为界限分两段用最小二乘法进行线性拟合^[10]。以 y 表示口 A 流量所占比, x 表示阀门开度,则阀门开度小于 20% 时,拟合得直线 $y = 2.007x + 0.146$, 直线度为 98.4%。阀门开度大于 20% 时,拟合得直线 $y = 0.451x + 0.477$, 直线度为 99.5%。两段直线斜率分别记为 k_{11}, k_{12} , 则 $k_{11} = 2.007, k_{12} = 0.451$ 。设分流时控制修正系数为 C_1 , 为使优化后用户输入的开度指令与口 A 流量所占比成线性,取 $C_1 = 0.225$, 则修正后阀门开度小于 20% 段对应的斜率 k'_{11} 与 k_{12} 相等,即

$$k'_{11} = C_1 \cdot k_{11} = k_{12} \tag{1}$$

修正前阀门开度 7% ~ 20% 所占跨度 $F_{11} = 13\%$, 阀门开度 20% ~ 87% 所占跨度 $F_{12} = 67\%$, 总跨度 $F_{13} = F_{11} + F_{12} = 80\%$, 修正后 k'_{11} 段对应的跨度为:

$$F'_{11} = F_{11}/C_1 \tag{2}$$

修正后 k_{12} 段对应的跨度 $F'_{12} = F_{12}$, 则总跨度 $F'_{13} = F'_{11} + F'_{12} = 124.8\%$, 修正后 k'_{11} 段对应的虚拟阀门开度的跨度

$$F''_{11} = F'_{11}F'_{13}/F'_{13} \tag{3}$$

设 X 为虚拟阀门开度,令实际阀门开度

$$x = \begin{cases} \frac{(X - 7\%)C_1F'_{13}}{F_{13}} + 7\% & 7\% \leq X \leq F''_{11} + 7\% \\ \frac{(X - F''_{11} - 7\%)F'_{13}}{F_{13}} + F_{11} + 7\%, & F''_{11} + 7\% < X < 87\% \end{cases} \tag{4}$$

代入数据后得

$$x = \begin{cases} 0.351X + 4.543\%, & 7\% \leq X \leq 44.1\% \\ 1.56X - 48.796\%, & 44.1\% < X < 87\% \end{cases} \tag{5}$$

得到用作分流时,虚拟阀门开度 X 与出口 A 流量所占比的关系如图 7 所示。

用作合流的情况下阀门开度小于 20% 时,拟合得直线 $y = 1.711x + 9.620$, 直线度为 98.8%。阀门开度大于 20% 时,拟合得直线 $y = 0.597x + 0.309$, 直线度为 99.7%。

同理,将数据代入式(1)、(2)、(3)、(4)后,得实际阀门开度 x 虚拟阀门开度 X 的关系式为:

$$x = \begin{cases} 0.455X + 3.815\%, & 7\% \leq X \leq 35.6\% \\ 1.303X - 26.395\%, & 35.6\% < X < 87\% \end{cases} \tag{6}$$

得到用作合流时,虚拟阀门开度 X 与入口 A 流量所占比的关系如图 8 所示。

修正后,在编程时只需将比例阀的入口流量比看做线性的,对数值指令按照虚拟阀门开度 X 进行赋值,再在程序内将 X 代入式(5)、式(6) 求出实际阀门开度 x 值,即可得到实际阀门开度对应的控制指令。实现编程数值指令与出口流量所占比成线性,使控制更简便。

3 实验结果与分析

以闭环冷热水混合温控实验为例,比例阀入口 A 接 40℃ 热水,入口 B 接 23.3℃ 冷水,出口连接有 18B24 温度传感器,使用单片机读取混合后温度,并采用相同的控制指令步长对比例阀开度进行调节,每步延迟 1s 等待比例阀响应执行。

检验阀门开度较小时优化算法的作用,设定目标温度为 27℃,由初始阀门开度为 0 启动,使用修正算法前后,温度随时间变化的图线如图 9 所示。

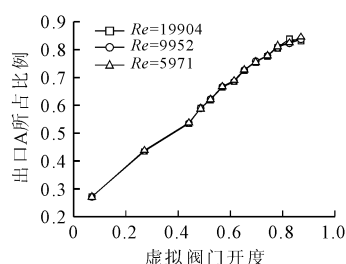


图7 修正后出口A流量所占比

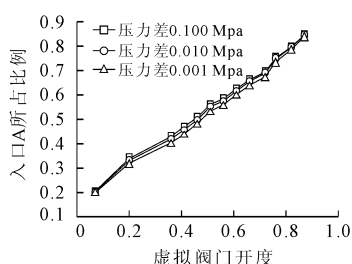


图8 修正后入口A流量所占比

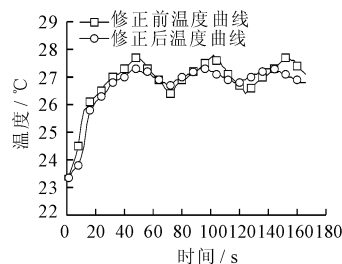


图9 开度较小时修正前后温度曲线

由图9可以看出,修正前后温度都在目标温度上下波动,而采用修正控制算法后波动幅度明显减小。可见,采用此修正算法,在阀门开度较小时可有效提高控制精度。

检验阀门开度较大时优化算法的作用,设定目标温度为35℃,由初始控温温度为30℃启动,使用修正算法前后,温度随时间变化的图线如图10所示。

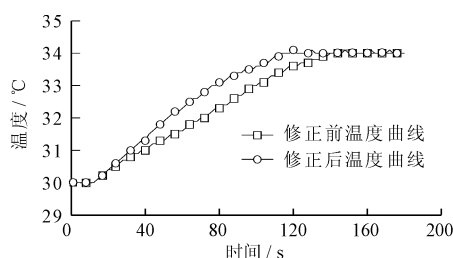


图10 开度较大时修正前后温度曲线

由图10可以看出,修正前后温度都在到达目标温度之后能较好地保持稳定,而采用修正控制算法后从起始温度到目标温度的变化所需时间减少了近20%。可见,采用此修正算法,在阀门开度较大时可有效提高响应速度。

4 结 语

对三通比例阀用作分流时,不同入口雷诺数情况及用作合流时,不同的入口与出口压力差情况进行了模拟分析,得到以下结论:

不论在用作分流或合流时,比例阀的入口流量比主要受阀芯位置影响,阀门开度在20%~87%时口A的入口流量所占比例成较好的线性,在阀门开度7%~20%亦可看做成线性,且与阀门开度20%~87%斜率不同;用作分流时,口A的水头损失率随着入口 Re 的增大而增大,且随阀门开度的增大成

下降趋势,口B的水头损失曲线率几乎重合,在86%~98%之间,且随阀门开度增大成缓慢上升趋势;在三通比例阀中腔体形状、壁面糙度一定的情况下,降低入口 Re 可减小局部阻力损失。

为使口A流量所占比成较好的线性,以达到控制更为简便、精确的目的。采用最小二乘法拟合,并提出了式(5)、式(6)两个修正公式分别用作分流及合流的场合,经实验验证可用于实现控制优化。

参考文献:

- [1] 杨伟,杨琳琳,孙跃,等. 分水器二维湍流数值模拟与分析[J]. 水资源与水工程学报, 2010,21(4):89-91+95.
- [2] 周承富,陈小榆,刘德生,等. 三通管二维湍流数值模拟[J]. 石油化工设备, 2008,37(2):37-40.
- [3] 杨康,刘吉普,马雯波. 基于Fluent软件的T型三通管湍流数值模拟[J]. 化工装备技术, 2008,29(4):33-36.
- [4] 朱正林,徐治皋,辛洪祥. T型三通性能优化[J]. 南京工程学院学报(自然科学版), 2007,5(2):60-63.
- [5] 刘飞,张栋梁. 基于FLUENT的某三通流动阻力系数研究[J]. 桂林航天工业高等专科学校学报, 2012(2):163-167.
- [6] 黄飞,陈兰. 基于Fluent的三通管内流体分析[J]. 才智, 2012(22):37-38.
- [7] 魏显达,王为民,徐建普. 基于fluent的三通管数值模拟及分析[J]. 当代化工, 2011,40(2):165-167.
- [8] 陈江林,吕宏兴,石喜,等. 特征线法分析考虑局部水头损失的三通管道的水击过程[J]. 节水灌溉, 2011(10):17-20.
- [9] 周云龙,杨美. 米列东. 微小三通管弹状流相分配的数值模拟[J]. 化学反应工程与工艺, 2013,29(4):358-363.
- [10] 黄富贵,崔长彩. 评定直线度误差的最小二乘法与最小包容区域法精度之比较[J]. 光学精密工程, 2007,15(6):889-893.