

基于 ANSYS Fluent 的空调电子膨胀阀仿真分析与研究

浙江盾安人工环境股份有限公司 张克鹏

一、引言

电子膨胀阀是一种可按预设程序进入制冷装置的制冷剂流量的节流元件。在一些负荷变化剧烈或运行工况范围较宽的场所，传统的节流元件（如毛细管、热力膨胀阀等）已不能满足舒适性及节能方面的要求，电子膨胀阀结合压缩机变容量技术已得到越来越广泛的应用。

电子膨胀阀的优点：流量控制范围大、反应灵敏、动作迅速、调节精细、动作稳定、可以使制冷剂往、返两个方向流动，弥补了毛细管和热力膨胀阀不能调节的缺点等，是空调系统中一种高档的降压节流元件。

由于电子膨胀阀属于精密件，其阀体内制冷剂的流动情况一定程度上影响整个空调系统的制冷效果，阀体内制冷剂流动越均匀，流动越稳定，制冷效率越高。本文利用流体力学仿真的方法对空调电子膨胀阀进行 CFD 分析，根据分析结果判定设计方案的合理性，并以此为基础在后续膨胀阀设计上进行结构改进。

二、流体力学方程

计算流体力学是把描述空气运动的连续介质数学模型离散成大型代数方程组，并在计算机上求解。通过微分方程的离散化和代数化，把偏微分方程转化为代数方程，再通过适

当的数值计算方法求解方程组，得到流场的数值解，然后通过不同的拟合方法把节点解拟合到网格的对应区域。

流体流动时所有介质满足物理守恒定律：质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律。在流体流动处于湍流状态时，整个体系还要遵循湍流运输方程。以上这些守恒定律的数学描述，统称为控制方程。文中选用 CFD 软件中提供的 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型进行数值计算。

湍流控制方程为三维不可压缩雷诺时均 Navier-Stokes 方程：

(1) 质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

(2) 动量方程

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x \quad (2a)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y \quad (2b)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z \quad (2c)$$

(3) 能量方程

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u} T) = \text{div}\left(\frac{k}{c_p} \text{grad} T\right) + S_T \quad (3)$$

其中 div 为矢量符号， $\text{div}(\mathbf{a}) = \partial a_x / \partial x + \partial a_y / \partial y + \partial a_z / \partial z$ ，

grad 为梯度符号。

式中： ρ 为流体密度， kg/m^3 ； t 为时间， s ； u 为速度矢量， m/s ； u 、 v 、 w 是速度矢量 u 在 x 、 y 、 z 方向的分量； x 、 y 、 z 为流体流动方向； p 为流体微元体上的压力， N ； τ 为粘性应力， Pa ； F_x 、 F_y 、 F_z 为 x 、 y 、 z 三个方向上微元体体力， N ； T 为温度， K ； k 为流体换热系数， $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ； c_p 为流体比热容， $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ； S_T 为流体内热源和由粘性作用引起流体机械能转变为热能， J 。

三、模型建立及边界条件

1、三维模型建立

计算模型为某空调电子膨胀阀，采用 SolidWorks 进行三维模型，图 1 为三维模型中心剖面图，电子膨胀阀由针阀、磁体、及上下盖等部件组成。针阀的开度大小靠回气过热度（通过回气温度和压力检测得到）控制，过热度越大开度越大，过热度越小开度也就越小。几何模型生成后，为了建立流体仿真模型，需要将电子膨胀阀模型从 SolidWorks 中导出为 .STP 格式。

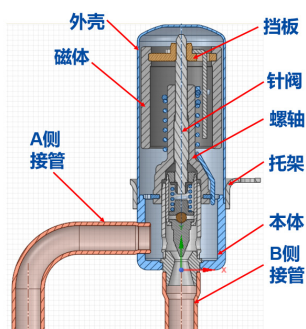


图 1 电子膨胀阀三维模型中心剖面图

2、网格模型建立

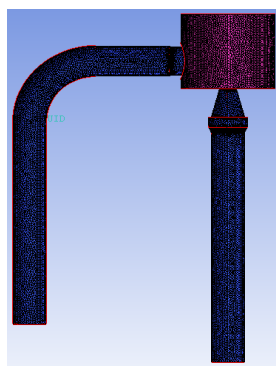


图 2 电子膨胀阀网格模型

针对该电子膨胀阀，文章采用主流 CFD 前处理软件

ICEM CFD 进行几何清理和网格划分，由于模型较为复杂，考虑实际的计算资源的限制，需要对膨胀阀三维 CAD 模型进行简化，去除对流动影响不是很大的倒角和间隙，确保模型完全封闭，然后提取流体计算域。电子膨胀阀的三维数模和流体计算域模型如图 2 所示。

由于流道形状不规则，对流体计算域模型采用非结构四面体网格划分方式，计算域网格数量约为 100 万。

图 3 为两个模型网格检查情况，其中横坐标为网格质量，1 代表最好，0 代表最差，纵坐标为网格数量。从图中可以看出，模型网格质量都在 0.4 以上，网格质量较好，满足计算要求。

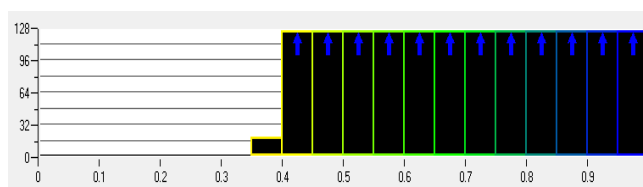


图 3 电子膨胀阀网格质量

3、边界条件的设定

由于制冷剂液体在节流过程中，流动比较复杂，这里暂不考虑相变，本文从流动和压力角度进行仿真计算，考察结构设计的合理性。计算设置流动工质为液态的 R410A 制冷剂，粘性系数 $\eta = 0.000107 (\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s})$ 密度 $\rho = 1.002 \times 10^3 (\text{kg}/\text{m}^3)$ 。具体设置如下：

(1) 总体设置：流体为制冷剂 R410A，不考虑能量转化，仅作流场分析和压力分析。计算软件为大型 CFD 商用软件 ANSYS Fluent，采用稳态计算，湍流模型选择标准 $k-\epsilon$ 模型，进出口边界条件选择压力进口、压力出口边界条件。压力速度耦合采用 SIMPLE 算法，对流项离散格式采用二阶迎风格式，各方程收敛标准均设置为 10^{-5} 。

(2) 进口边界条件湍流定义方法为湍流强度 + 水力直径，压力进口设置为 $P=2.2\text{MPa}$ ，湍流强度为 5%，水力直径为 0.0061m。出口边界条件湍流定义方法也为湍流强度 + 水力直径，出口压力为 $P=0.9\text{MPa}$ ，湍流强度为 5%，水力直径为 0.0061m。

四、CFD 计算结果分析

1、制冷工况

制冷工况下，制冷剂从 A 侧接管进入，从 B 侧接管流出，设定阀的开度为全开状态。图 4、图 5 分别为制冷工况下，电子膨胀阀模型内部截面速度等值云图和速度矢量图。

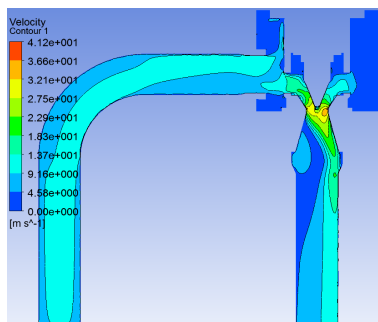


图4 制冷工况内部截面速度等值云图 (速度 /m/s)

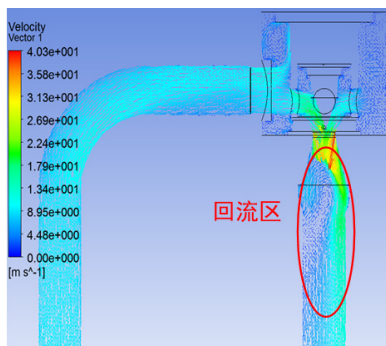


图5 制冷工况内部截面速度矢量图 (速度 /m/s)

从图中可以看出：制冷工况为制冷剂从 A 侧弯管进入，从 B 侧直管流出，最大速度约 41m/s，位于图 5 所示的针阀和阀口之间的区域，而在出口管进口左下侧区域存在涡旋回流区。

图 6 是电子膨胀阀在制冷工况下的压力分布等值云图。

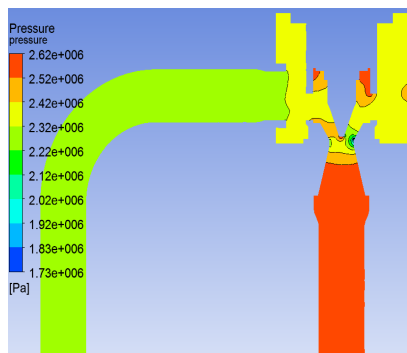


图6 制冷工况内部截面压力等值云图 (压力 /Pa)

对比图 4 和图 6 可以看出，电子膨胀阀内部的静压分布与速度分布相对应，即在速度高的区域静压较低，在速度低的区域静压较高，在针阀和阀口间隙区域压力较低。

2、制热工况

制热工况下，制冷剂从 B 侧接管进入，从 A 侧接管流出，设定阀的开度为 180 步。图 7、图 8 分别为制热工况下，电子膨胀阀模型内部截面速度等值云图和速度矢量图。

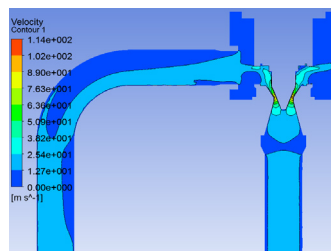


图7 制热工况内部截面速度等值云图 (速度 /m/s)

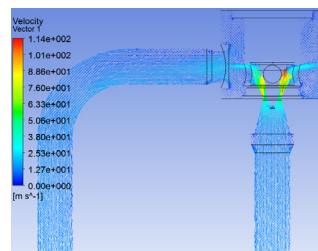


图8 制热工况内部截面速度矢量图 (速度 /m/s)

从上图电子膨胀阀模型内部截面速度等值云图和矢量图中可以看出：制热工况为制冷剂从 B 侧直管进入，从 A 侧弯管流出，最大速度约 114m/s，位于上图所示的阀针和阀口偏上区域，整个区域不存在流动回流区域。

图 9 是电子膨胀阀在制热工况下的压力分布等值云图。

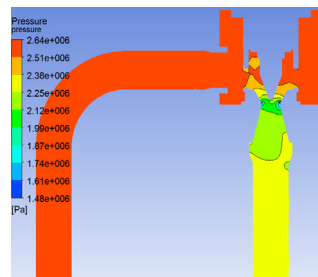


图9 制热工况内部截面压力等值云图 (压力 /Pa)

对比图 7 和图 9 可以看出，在制热工况下，电子膨胀阀内部的静压分布与速度分布相对应，即在速度高的区域静压较低，在速度低的区域静压较高，在针阀和阀口间隙区域压力较低。

五、结论及展望

利用计算流体力学仿真技术对制冷剂在空调电子膨胀阀内部的流动进行分析，发现在制冷工况下，出口管进口左下区域存在涡旋回流区。

在后续电子膨胀阀开发过程中，建议设计方案定型前，进行各工况充分的仿真分析验证，有效避免设计缺陷，提高产品可靠性和使用性能。