

基于 ANSYS CFX 的电子膨胀阀冷媒相变分析研究

文 | 浙江盾安人工环境股份有限公司 张克鹏

一、引言

电子膨胀阀是目前变频空调中重要的节流部件,通过与压缩机的有效结合,可以提高空调系统的舒适性和节能性。在运行工况多变的场合,毛细管和热力膨胀阀等传统的节流元件不能精确控制冷媒的流量,不能满足节能方面的要求,而电子膨胀阀结合压缩机变容量技术能很好地控制冷媒在不同工况下的流量需求,满足空调系统节能需求,目前已得到广泛应用。

空调系统的节能性能在利用电子膨胀阀之后得到提升的同时,膨胀阀阀体本身的噪声问题也越来越受到重视,电子膨胀阀阀体内噪声引起的原因有多种,而冷媒在膨胀阀内由于节流而产生相变,在相变过程中产生噪声是其中的一种,因此研究电子膨胀阀内冷媒相变对于提升电子膨胀阀舒适性有很大的意义。

本文通过对空调电子膨胀阀进行计算流体力学分析,并对计算结果进行分析,判断设计方案是否合理,在后续电子膨胀阀设计过程中,根据这种方法进行结构和方案的改进。

二、电子膨胀阀内流动物理数学模型

使用 ANSYS CFX 计算电子膨胀阀内流体流动时,有工质流动和温度变化,需要求解质量守恒方程、动量守恒方

程及能量守恒方程,因为在电子膨胀阀阀口位置,伴随有冷媒相变,因此需要求解相守恒方程。需要在膨胀阀下部出口位置求解质量输运方程。

1、多相流模型中的守恒方程

(1) 在混合多相流模型中,质量守恒方程表示为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = 0 \quad (1)$$

(2) 动量方程表示为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \vec{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = \\ -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T)] + \rho_m \vec{g} + F \\ + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k v_{dr,k}^2 \right) \end{aligned} \quad (2)$$

(3) 能量方程表示为:

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^n (\alpha_k \rho_k E_k) + \nabla \cdot \sum_{k=1}^n [\alpha_k v_k (\rho_k E_k + p)] = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_E \quad (3)$$

$$E_k = h_k - \frac{p}{\rho_k} + \frac{v_k^2}{2} \quad (4)$$

式中, ρ_m 是混合密度,单位为 kg/m^3 ; t 是时间,单位为 s ; $\vec{v}_m$ 是平均质量速度,单位为 m/s ; p 是流体静压,单位为 Pa ; μ_m 是混合物动力粘度,单位为 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$; F 是源项,单位为 N ; α_k 是第 k 相所占的体积比率,无量纲; ρ_k 是第 k 相密度,单位为 kg/m^3 ; $v_{dr,k}$ 是第 k 相的漂移速度,单位为 m/s ; E_k 是第 k 相的能量,单位为 J ; h_k

是第 k 相的焓值, 单位为 J ; v_k 是第 k 相的速度, 单位为 m/s ; k_{eff} 是有效导热率, 单位为 $W/m \cdot K$; S_E 是能量交换相, 单位为 J 。

2、多相流湍流模型

ANSYS CFX 根据不同的流动问题, 提供多种湍流模型。本文中数值模拟所采用的是 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型。

三、数模建立及边界设定

1、三维模型建立

采用 SOLIDWORKS 建立某空调电子膨胀阀三维模型, 电子膨胀阀的中心剖面图如图 1 所示, 电子膨胀阀由阀座、针阀、进出口管及上下盖等部件组成。电子膨胀阀的开度调节范围一般为 $0 \sim 500$ 脉冲, 当电子膨胀阀的脉冲数为 0 时, 流道的状态为关闭, 无冷媒通过; 当脉冲数为 500 时, 电子膨胀阀状态为全开。正常运行过程中, 开度一般在 $100 \sim 300$ 脉冲范围调节。针阀的开度依靠回气过热度 (通过回气温度和压力检测得到) 来控制, 过热度与开度成正比。文中模型为 $100 \sim 300$ 脉冲之间的某种状态, 在 SOLIDWORKS 中生成几何模型后, 将其导出为 .STP 格式文件, 方便在 CFD 软件中进行流体仿真模型的建立。

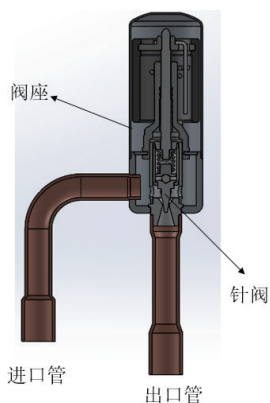


图 1 电子膨胀阀的中心剖面图

2、网格模型建立

在利用 ANSYS CFX 进行计算前, 需要将计算域分割成多个网格单元。ICEM 作为 ANSYS CFD 模块专用的流体前处理模块, 与 CFX 有非常好的接口, 因此整个电子膨胀阀的几何处理和网格划分是在主流 CFD 前处理软件 ICEM 中进行的, 电子膨胀阀模型较为复杂, 且局部特征较小, 因此采用非结构四面体网格, 整个模型网格数量为 108 万, 流体计算域模型如图 2 所示。

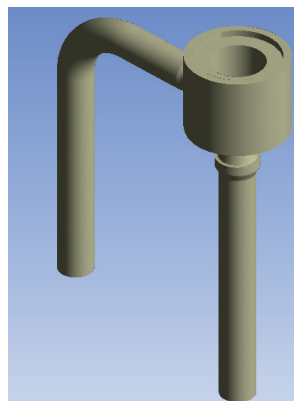


图 2 电子膨胀阀流体计算域模型

图 3 显示了电子膨胀阀计算模型网格质量检查情况, 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 0.3 以上, 网格质量较好, 满足计算要求。

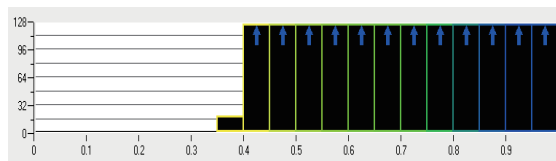


图 3 电子膨胀阀计算模型网格质量

3、边界设定

边界条件定义了进行计算的输入参数, 定义不同的边界条件 (输入参数) 计算所得到的结果就会各不相同。电子膨胀阀的内部流场由其进出口的边界条件决定, 具体设置如下:

(1) 总体设置: 流体为冷媒 R134a, R134a 制冷剂气态和液态物性根据实际气体 Peng-Robison 状态方程计算。该研究考虑冷媒相变, 进行流场、温度场以及压力场的分析。计算工具为商用 CFD 软件 ANSYS CFX, 湍流模型采用 Reliable $k-\varepsilon$, 表面强度系数设置为 $7.5 N \cdot m^{-1}$, 相变传输模型选择均匀混合欧拉多相连模型 Mixture Model, 采用 Cavitation (空化模型) 来描述计算在相变过程中的气液两相之间的质量转换, 空化蒸发系数设置为 240 , 换热系数为 $1e^{+10} W \cdot m^2 K^{-1}$ 。控制方程采用有限体积法进行离散, 使用耦合求解器 (Coupled Solver) 求解压力 - 速度耦合流场。对流项离散格式设置为二阶迎风格式, 各方程收敛标准均设置为 10^{-5} 。

(2) 传热模型采用假定汽液相之间传热系数无限大。假设气相为连续相, 气泡平均直径 $1mm$, 制冷剂饱和压力 $1MPa$ 。

(3) 进口边界条件的湍流定义方法为湍流强度 + 水力

直径, 压力进口设置为 $P=1.32\text{MPa}$, 湍流强度为 5%, 水力直径为 0.006m , 进口温度为 323K , 液相组分为 1, 气相组分为 0。出口边界条件除了出口压力设置为 $P=0.32\text{MPa}$, 其他设置与进口保持一致。

(4) 管壁设置为绝热边界条件。

四、CFD 计算结果分析

制冷工况下, 冷媒从图 1 进口管进入, 从图 1 出口管流出。图 4 为制冷工况下, 电子膨胀阀模型内部截面压力等值云图。

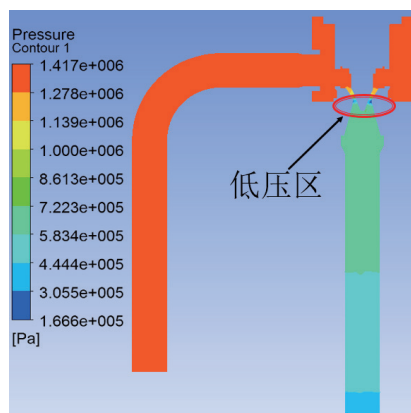


图 4 电子膨胀阀内部截面压力等值云图 (压力 /Pa)

从图 4 中可以看出, 冷媒在进口管后的喉部很短距离内, 压力发生剧变, 同时压力极小值在壁面处出现; 当冷媒流过针阀后, 压力逐步回升, 从截面图上可以看到, 在阀针左右两侧分布两处很小的压力值, 从该处往下, 压力逐渐下降, 直到与周围压力达到平衡。

图 5 是电子膨胀阀在制冷工况下的气相体积份数和液相体积份数云图。

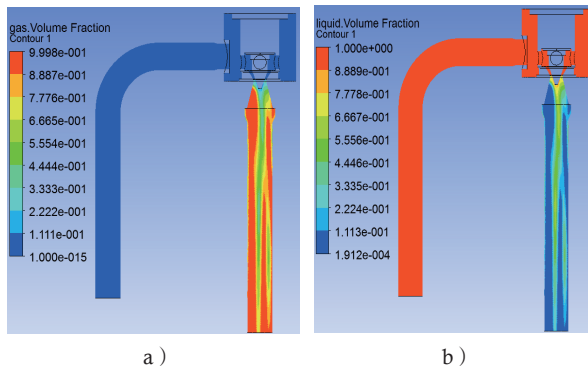


图 5 气液冷媒体积份数云图

a) 气态冷媒体积份数 b) 液态冷媒体积份数

从图 5 中可以看出, 冷媒在到达针阀之前, 全部为液态, 经过针阀处, 由于节流作用, 液态冷媒逐渐气化为气态冷媒, 在出口管靠近壁面的区域, 气态冷媒的比例较大, 超过 99%, 出口管中间区域气液比例相当, 气态冷媒占 55%, 液态冷媒占 45%, 在出口管出口处, 几乎所有冷媒都以气态形式存在。

图 6 是电子膨胀阀在制冷工况下的气相和液相速度分布云图。

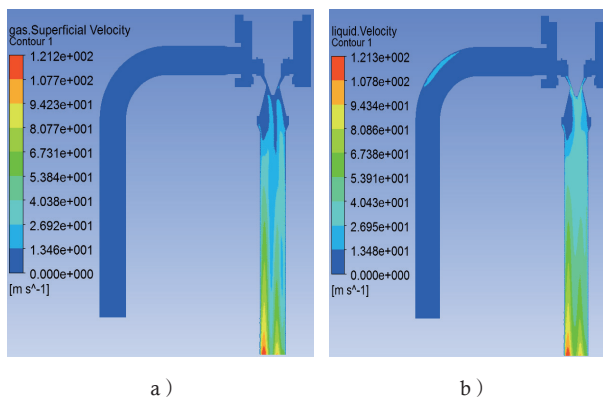


图 6 电子膨胀阀内部截面速度等值云图 (速度 /m/s)

a) 气态冷媒速度等值云图 b) 液态冷媒速度等值云图

从图 6 中可以看出, 冷媒在经过针阀后, 逐渐产生气态冷媒, 顺着针阀流向出口管的时候, 流速迅速提高到 40m/s , 针阀位置的速度梯度比阀口壁面处大, 主流区域靠近针阀壁面向下充分发展, 在针阀下端, 两个方向相反的涡流相互作用形成回流。气态冷媒从出口管入口开始, 速度逐渐增大, 在最后出口处最大速度可以达到 120m/s 。冷媒在经过针阀节流作用后, 气态和液态混合, 液态冷媒的流动趋势与气态冷媒类似, 在出口管的出口处最大流速也达到 120m/s 。

五、结论

利用 CFD 技术进行空调电子膨胀阀内部的冷媒流动分析, 其中考虑了冷媒在经过针阀后的相变情况, 得到膨胀阀内冷媒的气态和液态两相流动。

在电子膨胀阀开发过程中, 可以充分利用 CFD 仿真技术, 预测流场对电子膨胀阀流道设计影响, 尽量避免或减小冷媒在阀体内产生漩涡, 可有效降低湍动能, 进而降低冷媒噪声, 提升电子膨胀阀的舒适性。