

基于 ANSYS CFX 的电子膨胀阀冷媒相变分析研究

Analysis and Research on Phase Change of Electronic Expansion Valve

Based on ANSYS CFX

张克鹏

(浙江盾安人工环境股份有限公司 浙江 杭州 310053)

摘要: 利用SolidWorks建立电子膨胀阀三维模型,采用商用CFD软件ANSYS CFX对空调电子膨胀阀在制冷工况下阀体内冷媒的两相流动进行数值模拟,得到电子膨胀阀内压力分布和相速度分布。结果表明:制冷工况下,电子膨胀阀的压降集中在阀口出,其他区域压力变化平缓;出口管的进口左下侧区域气相和液相都显示出回流区。仿真分析结果可以为空调电子膨胀阀在性能提升中提供有效理论支持。

关键词: ANSYS CFX, 空调, 电子膨胀阀, 冷媒, 相变

Abstract: SolidWorks was used to establish the three-dimensional model of electronic expansion valve. CFD software ANSYS CFX was used to simulate the two-phase flow of refrigerant in the valve body of air-conditioner electronic expansion valve under the refrigeration condition, and the pressure distribution, phase velocity and temperature distribution in the electronic expansion valve were obtained. The results show that the pressure drop of the electronic expansion valve is concentrated in the valve outlet under the refrigeration condition, and the pressure changes gently in other regions. Both the gas and liquid phases at the lower left side of the outlet pipe inlet show reflux zones. The simulation results can provide effective theoretical support for the performance improvement of electronic expansion valve.

Keyword: ANSYS CFX, Air conditioning, Electronic expansion valve, Refrigerant, Phase change

1 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。在一些负荷变化剧烈或运行工况范围较宽の場合,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,而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。

电子膨胀阀在空调各方面性能提升过程中,起到很大作用的同时,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,在相变过程中产生的噪声是其中的一种,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^[1-4]。

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电子膨胀阀设计过程中进行结构改进。

2 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,需要求解质量守恒方程和动量守恒方程,由于同时具有相变及温度的变化,因此还要求解相守恒方程和能量守恒方程,在膨胀阀下部出口位置的湍流流动,需要求解质量输运方程^[5-7]。

2.1 多相流模型中的守恒方程

(1) 质量守恒方程，在混合多相流模型中表示为：
$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = 0 \quad (1)$$

(2) 动量方程表示为：

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

(3) 能量方程表示为：

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

$$E_k = h_k - \frac{p}{\rho_k} + \frac{v_k^2}{2} \quad (3-2)$$

式中：

ρ_m ——混合密度，kg/m³；

t ——时间，s；

$\vec{v}_m$ ——平均质量速度，m/s；

p ——流体静压，Pa；

μ_m ——混合物动力粘度，N s/m²；

F ——源项，N；

α_k ——第 k 相所占的体积比率，无量纲；

ρ_k ——第 k 相密度，kg/m³；

$v_{dr,k}$ ——第 k 相的漂移速度，m/s；

E_k ——第 k 相的能量，J；

h_k ——第 k 相的焓值，J；

v_k ——第 k 相的速度，m/s；

k_{eff} ——有效导热率, w/m k ;

S_E ——能量交换相, $\text{J}^{[8-9]}$ 。

2.2 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。雷诺平均 N-S 方程是一个关于流场平均值作为变量的控制方程, 它的理论基础是假定流场中的任一参数包含一个时均量和一个脉动量, 并以此对 N-S 方程进行计算得到雷诺平均 N-S 方程 (简称 RNS 方程)。雷诺平均 N-S 方程包括零方程、一方程以及两方程模型。其中的两方程模型又包括 $k-\varepsilon$ 湍流模型组 (包括标准 $k-\varepsilon$ 模型、RNG $k-\varepsilon$ 模型和可实现 $k-\varepsilon$ 模型) 和 $k-\omega$ 湍流模型组 (包括标准的 $k-\omega$ 模型和 SST $k-\omega$ 模型)。两方程模型可以计算从低雷诺数到高雷诺数的大部分流体流动问题, 它的稳定性好, 计算精度高, 并且对于旋转流动、射流、尾迹流动等特殊的流动问题有很好的解决措施。本文中数值模拟所采用的是 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型^[10-17]。

3 模型建立及边界条件

3.1 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、阀座、及上下盖等部件组成。电子膨胀阀的开度调节范围一般为 0~500 脉冲, 当电子膨胀阀的脉冲数为 0 时, 流道为关闭状态, 无流体流过, 当脉冲数为 500 时, 电子膨胀阀处于全开状态。正常运行过程中, 开度一般在 100~300 脉冲范围调节。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。文中模型为 100~300 脉冲之间的某种状态, 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。

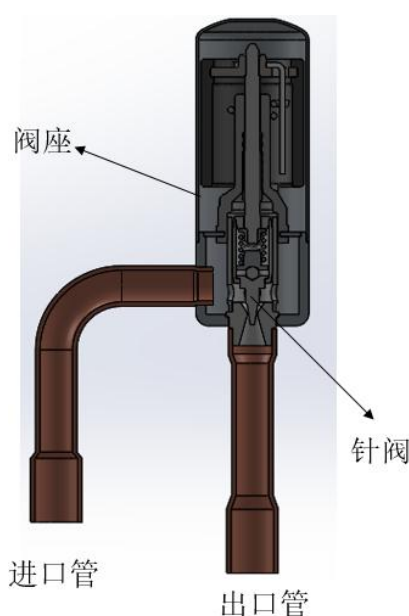


图 1 电子膨胀阀三维模型中心剖面图

3.2 网格模型建立

ANSYS-CFX 是基于有限元的有限体积法有进行流场的计算, 在进行计算前, 要先将流体计算域分割成有限多个网格单元, 网格类型包括结构网格和非结构网格两类。结构化网格适用于形状较为规则的流体域, 其网格质量较好, 且计算收敛较快; 非结构网格适用于形状较为复杂, 不方便划分结构化网格的区域, 且非结构网格对模型具有良好的自适应性, 进行网格划分的工作量较小。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。

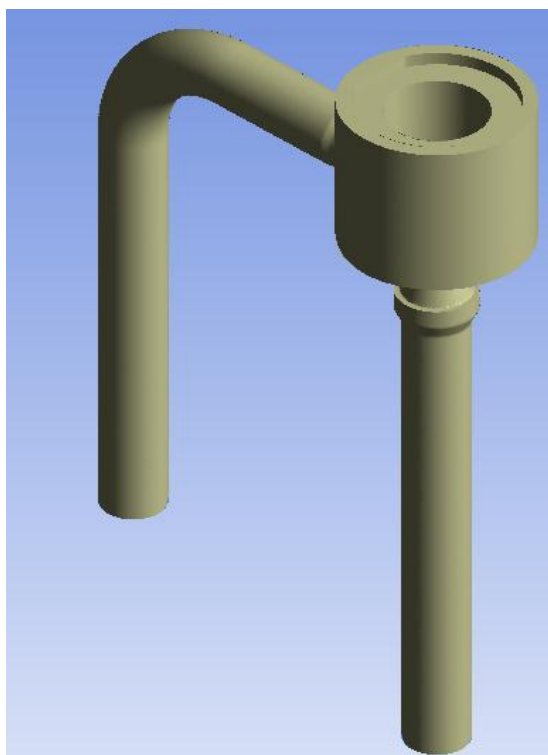


图 2 电子膨胀阀流体计算域模型

图 3 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 0.3 以上, 网格质量较好, 满足计算要求。

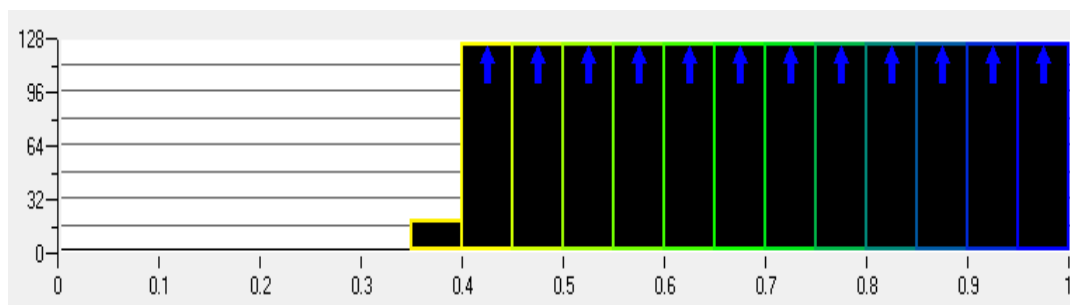


图 3 电子膨胀阀网格质量

3.3 边界条件的设定

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。初始条件是进行迭代计算的初始值，稳态计算中初始值虽然不能够影响计算结果，但是较准确的初始条件能够加快计算速度，缩短计算周期。而且在进行瞬态计算时，初始条件跟边界条件一样，都是非常重要的因素。电子膨胀阀结构比较稳定，内部流场取决于进出口边界条件，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。考虑能量转化及冷媒相变，进行流场、压力及温度分析。计算软件为大型 CFD 商用软件 ANSYS CFX，湍流模型采用 *Reliable k- ϵ* ，表面强度系数设置为 7.5N 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 $1\text{e}^{+10}\text{W m}^2\text{K}^{-1}$ 。控制方程采用基于有限元的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。对流项离散格式采用二阶迎风格式，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 0.0061m，进口温度为 323K，液相组分为 1，气相组分为 0。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 $P=0.32\text{MPa}$ ，湍流强度为 5%，水力直径为 0.0061m。

④ 管壁设置为绝热边界条件。

4 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 分别为制冷工况下，电子膨胀阀模型内部截面压力等值云图。

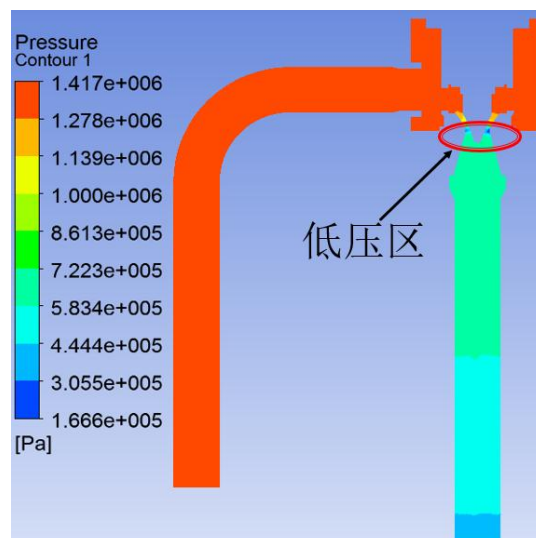
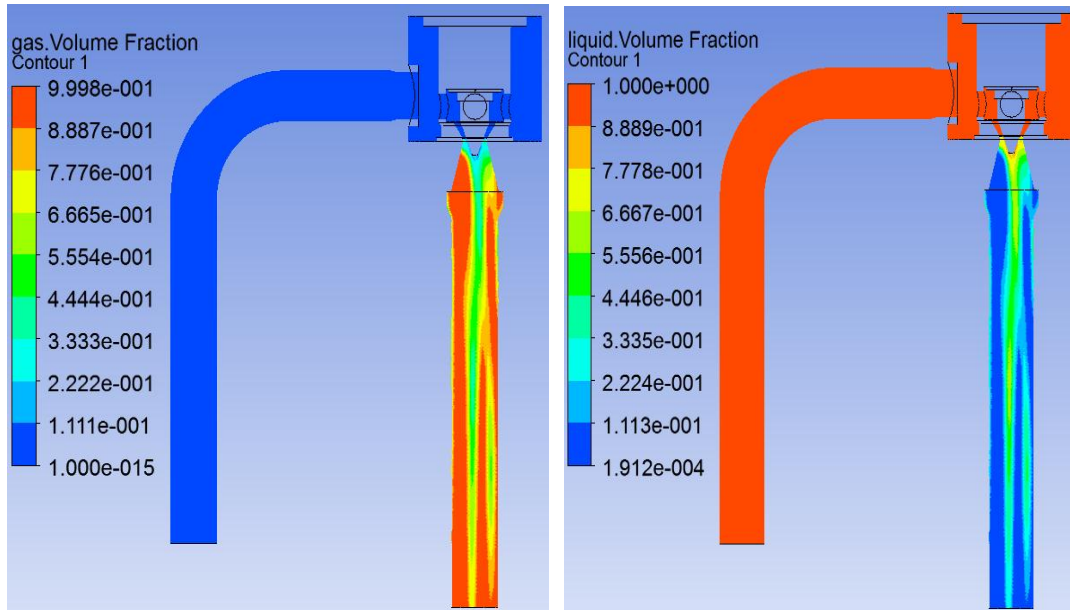


图 4 电子膨胀阀内部截面压力等值云图 (压力/Pa)

从图中可以看出：冷媒从进口管进入时，在喉部很短一段距离内，压力骤然变化，同时在壁面处出现了压力极小值，当流体流过针阀，压力开始逐步回升，从截面上可以看到两处很小的压力值分布在针阀左右两侧，从该处往下，压力逐渐下降，直到与周围压力达到平衡。

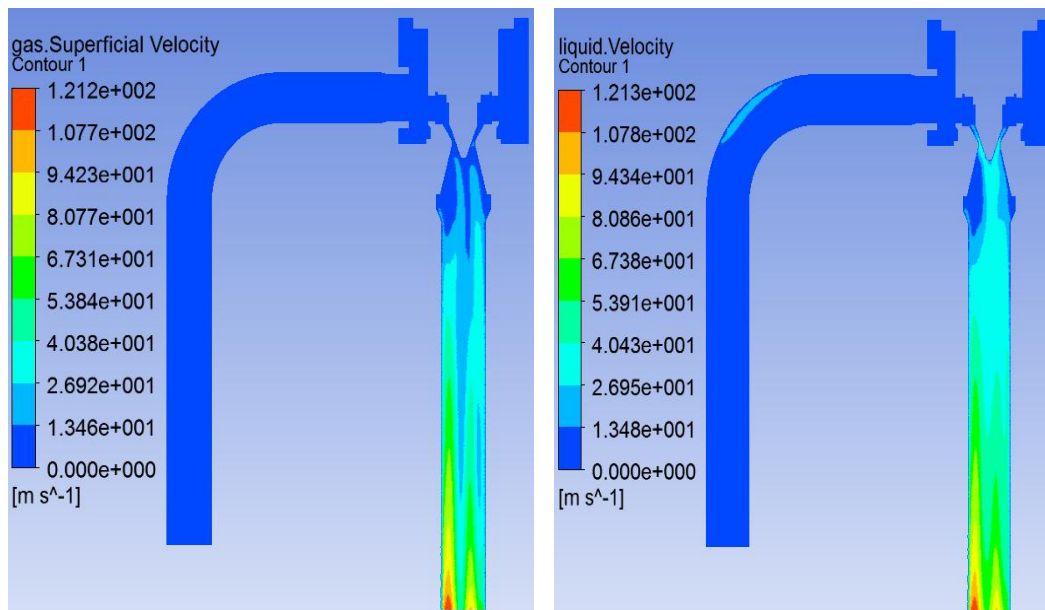


5 (a) 气态冷媒体积份数 5 (b) 液态冷媒体积份数

图5 气液冷媒体积份数云图 (比例/-)

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。从图5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，接近99%以上，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。



6 (a) 气态冷媒速度等值云图 6 (b) 液态冷媒速度等值云图

图6 电子膨胀阀内部截面速度等值云图 (速度/m/s)

从图中可以看出,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,靠近针阀位置速度梯度比阀口壁面处大,主流区域始终平行且靠近针阀壁面向下游发展,在针阀下端可以清晰地看到两个方向相反的漩涡彼此相互作用形成回流。在三维实物图中表现为类似于圆环的形状,同时在圆环中间由于速度的相互抵消,出现一个小范围的低流速区域。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。

5 结论及展望

(1) 利用计算流体力学仿真技术对冷媒在空调电子膨胀阀内部的流动进行分析,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。

(2) 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。

6 参考文献

- [1] 徐亮亮. 基于 CFD 调节阀内部流场数值模拟[D]. 上海: 华东理工大学: 2016
- [2] 孔海利. 两段式喷嘴引射器性能模拟及系统实验研究[D]. 天津: 天津商业大学: 2014
- [3] 姚兴. 变频空调器电子膨胀阀开度控制方案分析[J]. 制冷与空调, 2016, 16 (7) : 31-35
- [4] 樊超超, 晏刚, 鱼剑琳. 电子膨胀阀开度及制冷剂充灌量对家用空调器性能影响的研究[J]. 制冷与空调, 2017, 17 (2) : 5-10
- [5] 黄皓, 王志毅, 任夫磊等. 电子膨胀阀射流噪声数值模拟[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2014, 31 (5) : 512-516
- [6] 罗坚, 张波, 陈定千. 基于 CFX 的蒸汽蓄热器放汽闪蒸过程数值模拟[J]. 节能, 2015, (2) : 35-38
- [7] 张生昌, 张玉林, 方志明等. 基于 CFD 的球阀三维流场数值模拟[J]. 流体工程, 2013, 31 (2) : 158-161
- [8] O. Garcia-Valladares and E. Santoyo. Numerical simulation and validation of HFC-134a fluid flow through short-tube orifices considering metastable conditions [J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 62 (1) : 267-276
- [9] V. P. Koverda, V. N. Skokov and A. V. Reshetnikov. Statistics of low-frequency pulsations in critical regimes of heat mass exchange with phase transitions [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 16 (3) : 130-138.
- [10] 黄皓. 电子膨胀阀节流噪声数值模拟[D]. 杭州: 浙江理工大学: 2014
- [11] 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
- [12] 李添龙. R134a 两相流引射器性能模拟及试验研究[D]. 天津: 天津商业大学: 2013
- [13] 陆亮. 液压节流阀中的空化流动与噪声[D]. 杭州: 浙江大学: 2012
- [14] 李阳, 胡斐. 扩散式方形分离器数值模拟湍流模型比较研究[J]. 建筑热能通风空调, 2013, (2) : 97-100
- [15] 樊盼盼. 喷射器内部流动特性建模分析研究[D]. 南京: 东南大学: 2015

- [16] 王福军. 计算流体动力学分析-CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 7-10.
- [17] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 1-5.