

文章编号:0253-4339(2013)02-0038-06  
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2013.02.038

# 非绝热毛细管快速计算方法

赵丹 丁国良 任滔

(上海交通大学制冷与低温工程研究所 上海 200240)

**摘要** 为了满足制冷系统仿真对非绝热毛细管建模在计算速度、精度、应用范围三方面的要求,提出了非绝热毛细管的一种快速计算方法。对非换热毛细管内流动可能出现的过冷、两相、过热三种流动区域分别建立物性的近似关系式,然后采用积分的方法得出不同流动区域长度的近似分析解。对于难以求解的两相区,通过拟合方法得到物性的近似关系式,并采用格林公式求解两相区的长度。对 R134a, R600a, R12, R410A 和 R407C 等工质的计算结果表明,提出的方法相对于分布参数模型的计算偏差小于 2%,计算速度提高 1000 倍以上。提出的非绝热毛细管快速计算方法满足了制冷系统仿真的要求。

**关键词** 毛细管;非绝热;计算;制冷剂

**中图分类号**:TK124;TB64

**文献标识码**:A

## Fast Calculation Method for Modeling Non-adiabatic Capillary Tube

Zhao Dan Ding Guoliang Ren Tao

(Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China)

**Abstract** To meet the requirements on computation speed, accuracy, application range for modelling non-adiabatic capillary tube for refrigeration system simulation, a fast calculation method for a non-adiabatic capillary tube is proposed. The approximation correlations for thermodynamic properties of refrigerant are proposed for subcooled zone, two-phase zone and superheated zone, respectively, and then the explicit approximate analytic solutions for the three zones are obtained using integral method. In the solution for two-phase zone, approximation correlation for thermodynamic properties is obtained by curve-fitting method, and the length is obtained using Green's theorem. Case studies on R134a, R600a, R12, R410A and R407C show that the deviation between the predicted results of the proposed method and those of the existing distributed parameter model is less than 2% while the computation speed of the proposed method is 1000 times faster. The proposed method can meet the requirements for refrigeration system simulation.

**Keywords** capillary tube; non-adiabatic; calculation; refrigerant

非绝热毛细管作为节流装置,广泛应用于制冷系统中,特别是在冰箱系统中。非绝热毛细管和压缩机的吸气管以逆流的方式捆绑在一起,这样来自吸气管的冷量就可以冷却毛细管,使毛细管内制冷剂的焓值沿流动方向逐渐降低和闪点向后推移,从而提高了蒸发器的制冷量。同时,由于管内变焓过程的复杂性,非绝热毛细管的建模比绝热毛细管的建模更加复杂。相对于单纯地在正常工况下对毛细管的建模,应用于整个系统的毛细管模型需要至少同时满足下面三个要求:1)模型需要覆盖实际蒸汽压缩制冷系统的所有可能工况;2)模型的计算需要绝对稳定和快速,因为制冷系统的仿真中需要对毛细管模型成千上万次调用,一次计算失误就会导致整个仿真的失败<sup>[1]</sup>。3)为了保证整个系统仿真的准确性,毛细管模型需要足够准确。

现存的非绝热毛细管模型包括有:分布参数模

型<sup>[2]</sup>、经验关联式<sup>[3]</sup>、半经验关联式<sup>[4]</sup>、神经网络方法<sup>[5]</sup>。分布参数模型应用范围广,精度高,但由于它包括很多控制单元的计算,所以计算速度缓慢。经验关联式,简单,快速,在实验拟合的范围内计算精度高,但它的应用范围不能外推到系统所有可能的运行工况,所以该方法不能应用于系统仿真。半经验关联式,和大多数模型精度相当,但是应用范围仍然受限于实验数据选取的范围,所以也不能应用于系统仿真。神经网络方法,预测精度最高,但计算精度也完全取决于实验数据的选取,所以仍然不能应用于系统仿真。以上分析和比较显示现存的非绝热毛细管模型都不能同时满足系统仿真中在精度、应用范围、速度方面的要求。

在精度、速度、应用范围方面,用于绝热毛细管仿真的近似分析方法<sup>[6-8]</sup>具有综合优势。但是,非绝热毛细管中变焓过程的复杂性,阻碍了绝热毛细管的近

似分析方法直接应用于非绝热毛细管。在绝热毛细管的近似分析方法中,制冷剂被假设为同质等焓流体,比容近似为压力的函数,然后将这个近似函数代入动量方程并求积分,就得到了毛细管长度的近似关系式。对于非绝热毛细管,制冷剂流不是等焓流,比容是压力和焓值的函数,所以没有简单的近似关系式用于毛细管长度的积分求解。因此,绝热毛细管的近似分析方法不能直接应用于非绝热毛细管求解。

绝热毛细管的近似分析方法的建模思路将被用于非绝热毛细管的建模,从而非绝热毛细管的快速计算方法将被开发,这个方法同时满足系统仿真中精度、速度、应用范围方面的要求,适用于整个制冷系统仿真。

## 1 非绝热毛细管长度的快速求解思路

对于实际非绝热毛细管,通常分为:进口绝热段、中间非绝热段、出口绝热段,如图1所示。

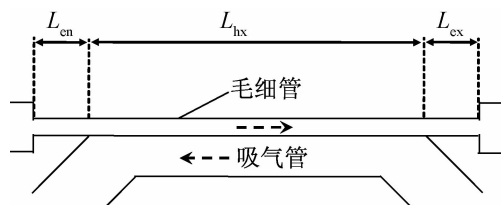


图1 非绝热毛细管结构

Fig.1 Structure of non-adiabatic capillary tube

基于非绝热毛细管的结构,非绝热毛细管的长度的求解思路如下:

1) 计算非绝热段长度(图1中 $L_{hx}$ )。因为毛细管内制冷剂可以是过热气体、两相流体、过冷液体、或它们的共存状态,所以每个相区的长度都应该计算(详细方法见2.2~2.4节),这样非绝热段的总长度可以通过对各相区长度的叠加获得。对于各相区的长度的求取,首先需要得到物性的近似关联式,然后代入控制方程求积分得到相区长度的显式分析解。其中,为了确定相区边界,需要考虑换热对相变点的影响。

2) 计算绝热段长度(图1中 $L_{en}$ 和 $L_{ex}$ )。绝热段长度计算方法可参照已有的近似分析方法<sup>[8]</sup>。

3) 将非绝热段长度和绝热段长度相加得出非绝热毛细管的总长度(具体方法详见2.6节)。

## 2 非绝热毛细管长度的近似分析解

### 2.1 控制方程

控制方程由动量方程和比容全微分方程组成:

$$G^2 dv + dp + \frac{1}{2D} f G^2 v dL = 0 \quad (1)$$

$$dv = \left( \frac{\partial v}{\partial h} \right)_p dh + \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_h dp \quad (2)$$

将公式(2)代入公式(1)中得到公式(3),对公式(3)积分就可以得到毛细管长度的隐式计算公式(公式(4)):

$$dL = \frac{-2D \left[ 1 + G^2 \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_h \right] dp}{f v G^2} - \frac{2D \left( \frac{\partial v}{\partial h} \right)_p dh}{f v} \quad (3)$$

$$L = \int_L \frac{-2D \left[ 1 + G^2 \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_h \right] dp}{f v G^2} - \frac{2D \left( \frac{\partial v}{\partial h} \right)_p dh}{f v} \quad (4)$$

在公式(1)~(4)中, $L$ 是管长; $D$ 是内径; $G$ 是质量流量; $f$ 是摩阻因子; $v$ , $p$ 和 $h$ 分别是比容,压力和比焓。

为了得到公式(4)中管长的显式解,首先需要简化比容的关系式以便于积分,然后需要找到合理的积分方法得到公式(4)的显式解。

### 2.2 非绝热段两相区长度的近似分析解

两相区的比容根据定义,可由公式(5)表示,并且通过定义公式(6b)和(6c),公式(5)还可以再转换成公式(6a)。

$$\begin{aligned} v &= x v_g(p) + (1-x) v_l(p) \\ &= \frac{h - h_l(p)}{h_g(p) - h_l(p)} v_g(p) + \frac{h_g(p) - h}{h_g(p) - h_l(p)} v_l(p) \end{aligned} \quad (5)$$

$$v = \frac{h + s(p)}{r(p)} \quad (6a)$$

$$r(p) = \frac{h_g(p) - h_l(p)}{v_g(p) - v_l(p)} \quad (6b)$$

$$s(p) = \frac{h_g(p) v_l(p) - h_l(p) v_g(p)}{v_g(p) - v_l(p)} \quad (6c)$$

公式(6b)中,变量 $r$ 和压力近似成正比例关系,如图2所示,所以公式(6b)可以近似成压力的线性函数,如公式(7)所示。公式(6c)中,变量 $s$ 和压力近似成二次函数关系,如图3所示,所以公式(6c)可以近似成压力的二次函数,如公式(8)所示。因此,公式(6a)可以近似为压力和焓的函数,如公式(9)所示。

$$r(p) \approx k_1 p + k_2 \quad (7)$$

$$s(p) \approx c_1 p^2 + c_2 p + c_3 \quad (8)$$

$$v \approx \frac{h + c_1 p^2 + c_2 p + c_3}{k_1 p + k_2} \quad (9)$$

在公式(5)~(9)中, $x$ 是制冷剂干度, $h_l$ 和 $h_g$ 分别是饱和液体焓和饱和气体焓; $v_l$ 和 $v_g$ 是饱和液体比容和饱和气体比容; $k_1$ , $k_2$ , $c_1$ , $c_2$ 和 $c_3$ 都是根据制冷剂物性数据源拟合的系数。

通过公式(10b)和(10c),公式(4)写成公式

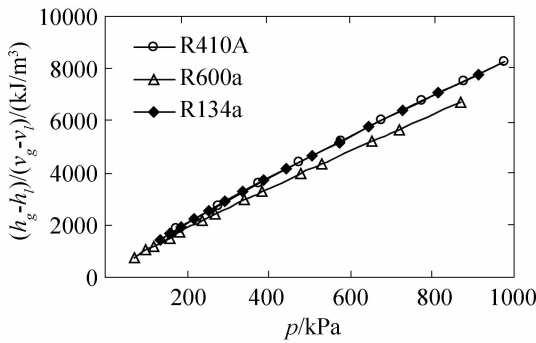


图2 公式(6b)的示意图  
Fig. 2 Illustration of Eq. (6b)

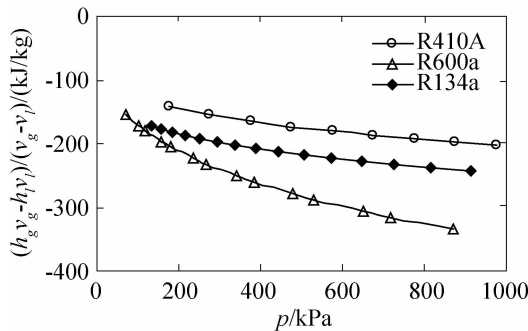


图3 公式(6c)的示意图  
Fig. 3 Illustration of Eq. (6c)

(10a),

$$L_{\text{non-ad, tp}} = \int_L M dp + N dh \quad (10a)$$

$$M = -2D[1 + G^2 (\partial v / \partial p)_h] / f v G^2 \quad (10b)$$

$$N = -2D (\partial v / \partial h)_p / f v \quad (10c)$$

为了求解两相区(如图4中直线1-2)长度,根据格林公式,公式(10a)可以转化成公式(11a)。公式(11a)中有三个积分项。第一和第二积分项可分别由公式(11b)和(11c)获得,第三项可以根据已有的近似分析方法<sup>[8]</sup>得到,其中的中间变量列于公式(11e), (11f)和(11g)中。这样公式(11a)就可以转化为公式(12)。

$$\begin{aligned} L_{\text{non-ad, tp}} &= \int_{1-2} M dp + N dh \\ &= \iint_{1-2-3-1} \left( \frac{\partial M}{\partial h} - \frac{\partial N}{\partial p} \right) dp dh - \\ &\quad \int_{2-3} (M dp + N dh) - \int_{3-1} (M dp + N dh) \end{aligned} \quad (11a)$$

$$\begin{aligned} \iint_{1-2-3-1} \left( \frac{\partial M}{\partial h} - \frac{\partial N}{\partial p} \right) dp dh &= \frac{2D}{fG^2} \left\{ M_1 k_2 - M_2 k_2 + \right. \\ &\quad \frac{k_1}{2c_1} \left[ \ln \frac{|c_1 p_{1p1}^2 + (c_2 + b_1)p_{1p1} + b_2 + c_3|}{|c_1 p_{1p2}^2 + (c_2 + b_1)p_{1p2} + b_2 + c_3|} - \right. \\ &\quad \left. \left. (c_2 + b_1)M_1 \right] - \right. \end{aligned}$$

$$\left. \frac{k_1}{2c_1} \left[ \ln \frac{|c_1 p_{1p1}^2 + c_2 p_{1p1} + h_{1p1} + c_3|}{|c_1 p_{1p2}^2 + c_2 p_{1p2} + h_{1p1} + c_3|} - c_2 M_2 \right] \right\} \quad (11b)$$

$$\int_{2-3} M dp + N dh = -\frac{2D}{f} \ln \left[ \frac{h_{1p2} + c_1 p_{1p2}^2 + c_2 p_{1p2} + c_3}{h_{1p2} + c_1 p_{1p2}^2 + c_2 p_{1p2} + c_3} \right] \quad (11c)$$

$$\begin{aligned} \int_{3-1} M dp + N dh &= -\frac{2D}{f} \ln \left( \frac{p_{1p2}}{\beta p_{1p1} + (1 - \beta)p_{1p2}} \right) + \\ &\quad \frac{2D p_{1p1}}{f G^2 v_{1p1} (1 - \beta)} \left\{ \frac{p_{1p2}}{p_{1p1}} - 1 - \right. \\ &\quad \left. \frac{\beta}{1 - \beta} \ln [\beta + (1 - \beta) \frac{p_{1p2}}{p_{1p1}}] \right\} \end{aligned} \quad (11d)$$

$$\begin{aligned} M_1 &= \frac{2}{\sqrt{4c_1(b_2 + c_3) - (c_2 + b_1)^2}} \\ &\quad \left( \arctan \frac{2c_1 p_{1p1} + c_2 + b_1}{\sqrt{4c_1(b_2 + c_3) - (c_2 + b_1)^2}} - \right. \\ &\quad \left. \arctan \frac{2c_1 p_{1p2} + c_2 + b_1}{\sqrt{4c_1(b_2 + c_3) - (c_2 + b_1)^2}} \right) \end{aligned} \quad (11e)$$

$$\begin{aligned} M_2 &= \frac{2}{\sqrt{4c_1(h_{1p1} + c_3) - c_2^2}} \\ &\quad \left( \arctan \frac{2c_1 p_{1p1} + c_2}{\sqrt{4c_1(h_{1p1} + c_3) - c_2^2}} - \right. \\ &\quad \left. \arctan \frac{2c_1 p_{1p2} + c_2}{\sqrt{4c_1(h_{1p1} + c_3) - c_2^2}} \right) \end{aligned} \quad (11f)$$

$$\beta = \frac{(1.63 \times 10^5 / p_4^{0.72})(p_4 / p_{1p1})}{1 + (1.63 \times 10^5 / p_4^{0.72})(p_4 / p_{1p1} - 1)} \quad (11g)$$

$$\begin{aligned} L_{\text{non-ad, tp}} &= \frac{2D}{fG^2} \left\{ M_1 k_2 - M_2 k_2 + \right. \\ &\quad \frac{k_1}{2c_1} \left[ \ln \frac{|c_1 p_{1p1}^2 + (c_2 + b_1)p_{1p1} + b_2 + c_3|}{|c_1 p_{1p2}^2 + (c_2 + b_1)p_{1p2} + b_2 + c_3|} - \right. \\ &\quad \left. (c_2 + b_1)M_1 \right] - \\ &\quad \frac{k_1}{2c_1} \left[ \ln \frac{|c_1 p_{1p1}^2 + c_2 p_{1p1} + h_{1p1} + c_3|}{|c_1 p_{1p2}^2 + c_2 p_{1p2} + h_{1p1} + c_3|} - c_2 M_2 \right] \left. \right\} + \\ &\quad \frac{2D}{f} \ln \left[ \frac{h_{1p2} + c_1 p_{1p2}^2 + c_2 p_{1p2} + c_3}{h_{1p1} + c_1 p_{1p2}^2 + c_2 p_{1p2} + c_3} \right] + \\ &\quad \frac{2D}{f} \ln \left( \frac{p_{1p2}}{\beta p_{1p1} + (1 - \beta)p_{1p2}} \right) - \frac{2D p_{1p1}}{f G^2 v_{1p1} (1 - \beta)} \\ &\quad \left\{ \frac{p_{1p2}}{p_{1p1}} - 1 - \frac{\beta}{1 - \beta} \ln [\beta + (1 - \beta) \frac{p_{1p2}}{p_{1p1}}] \right\} \end{aligned} \quad (12)$$

在公式(10)~(12)中,  $p_{1p1}$ 、 $h_{1p1}$ 、 $v_{1p1}$ 分别是两相区进口压力、比焓、比容;  $p_{1p2}$ 、 $h_{1p2}$ 、 $v_{1p2}$ 分别是两相区出口的压力、比焓、比容。

### 2.3 非绝热段过热区长度的近似分析解

在非绝热段内过热区,制冷剂可以近似为理想气

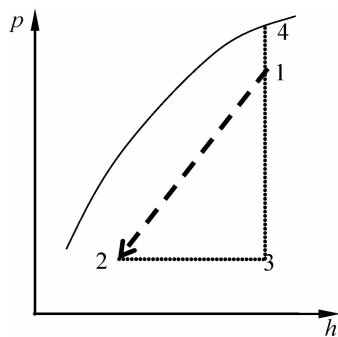


图 4 非绝热毛细管内两相区的热力曲线

Fig. 4 Thermodynamic states of two-phase zone  
in a non-adiabatic capillary tube

体,这样比容按照理想气体方程,

$$pv = RT \quad (13)$$

通过将公式(13)代入公式(4),非绝热段过热区长度的近似分析解可以得到,

$$L_{\text{non-ad,sh}} = \frac{2D}{G^2 f} \left( \frac{p_{\text{sh1}}^2 - p_{\text{sh2}}^2}{p_{\text{sh1}} v_{\text{sh1}} + p_{\text{sh2}} v_{\text{sh2}}} + G^2 \ln \frac{p_{\text{sh2}}}{p_{\text{sh1}}} \right) \quad (14)$$

式中: $p_{\text{sh1}}$ 、 $h_{\text{sh1}}$ 、 $v_{\text{sh1}}$ 分别是过热区进口压力、比焓、比容; $p_{\text{sh2}}$ 、 $h_{\text{sh2}}$ 、 $v_{\text{sh2}}$ 分别是过热区出口的压力、比焓、比容。

## 2.4 非绝热段过冷区长度的近似分析解

在非绝热段内过冷区,制冷剂可以近似为不可压缩流体<sup>[8]</sup>,这样比容可看作为定值,非绝热段内过冷区可以由公式(4)得到,

$$L_{\text{non-ad,sc}} = \frac{D(p_{\text{sc1}} - p_{\text{sc2}})}{fG^2(v_{\text{sc1}} + v_{\text{sc2}})} \quad (15)$$

式中: $p_{\text{sc1}}$ 、 $h_{\text{sc1}}$ 、 $v_{\text{sc1}}$ 分别是过冷区进口压力、比焓、比容; $p_{\text{sc2}}$ 、 $h_{\text{sc2}}$ 、 $v_{\text{sc2}}$ 是过冷区出口的压力、比焓、比容。

## 2.5 非绝热段相区边界确定

计算各相区的长度需要确定相区边界。但目前还没有如何确定非绝热毛细管相区边界的相关研究,所以下面具体介绍相区边界的确定方法。

确定相区边界也是要确定相变点的位置。在非绝热毛细管中,相变点会向下游推移。来自吸气管的冷量会延缓相变的发生。所以相变点的位置应该是制冷剂物性的饱和线和毛细管内制冷剂的非等焓曲线的交点,并可以通过求解如下方程组得到:

$$\begin{cases} h = b_1 p + b_2 \\ h_{\text{sat}} = f(p_{\text{sat}}) \end{cases} \quad (16)$$

式中: $h_{\text{sat}}$ 和 $p_{\text{sat}}$ 是饱和线上的点, $h_{\text{in}}$ 和 $p_{\text{in}}$ 是进口比焓和压力; $h_{\text{out}}$ 和 $p_{\text{out}}$ 是出口比焓和压力; $b_1 = (h_{\text{in}} - h_{\text{out}})/(p_{\text{in}} - p_{\text{out}})$ ;  $b_2 = h_{\text{out}} - p_{\text{out}}(h_{\text{in}} - h_{\text{out}})/(p_{\text{in}} -$

$p_{\text{out}})$ 。毛细管出口的状态可以根据 Hermes 的模型<sup>[4]</sup>计算。基于换热段压力和焓都沿管内制冷剂流动方向降低的事实,这里我们引入了非绝热毛细管内压力和焓值成线性关系的假设。

## 2.6 带有绝热段的非绝热毛细管长度的近似分析解

非绝热毛细管总长度可以通过绝热段和非绝热段长度的叠加获得。

$$L_{\text{total}} = L_{\text{non-adiabatic}} + L_{\text{adiabatic}} \quad (17)$$

其中,非绝热段长度可有公式(12)、(14)和(15)获得;绝热段的长度可以根据已有方法<sup>[8]</sup>得到,如公式(18)和(19)所示。

$$L_{\text{adiabatic}} = \begin{cases} \frac{2(p_{\text{in}} - p_{\text{out}})D}{fG^2 v_{\text{in}}(p_{\text{in}}, h_{\text{in}})} & \text{过冷} \\ \frac{2D}{f} \ln \left( \frac{p_{\text{out}}}{\beta' p_{\text{in}} + (1 - \beta') p_{\text{out}}} \right) - \frac{2D p_{\text{in}}}{fG^2 v_{\text{in}}(p_{\text{in}}, h_{\text{in}})(1 - \beta')} \times \left\{ \frac{p_{\text{out}}}{p_{\text{in}}} - 1 - \frac{\beta'}{1 - \beta'} \ln \left[ \beta' + (1 - \beta') \frac{p_{\text{out}}}{p_{\text{in}}} \right] \right\} & \text{两相} \\ \frac{2D}{fG^2} \left\{ \frac{p_{\text{in}}^2 - p_{\text{out}}^2}{p_{\text{in}} v_{\text{in}}(p_{\text{in}}, h_{\text{in}}) + p_{\text{out}} v_{\text{out}}(p_{\text{out}}, h_{\text{in}})} + G^2 \ln \frac{p_{\text{out}}}{p_{\text{in}}} \right\} & \text{过热} \end{cases} \quad (18)$$

$$\beta' = 1.63 \times 10^5 / p_{\text{in}}^{0.72} \quad (19)$$

式中: $p_{\text{in}}$ 、 $h_{\text{in}}$ 、 $v_{\text{in}}$ 为绝热段进口压力、比焓、比容; $p_{\text{out}}$ 、 $h_{\text{out}}$ 、 $v_{\text{out}}$ 为出口压力、比焓、比容。

## 3 精度和速度验证

为了验证提出的快速方法的有效性,方法的计算精度和速度分别被验证。

选取非绝热毛细管的典型尺寸和工况(表1所示),采用 R134a、R600a、R12、R410A、R407C 作为验证工质,根据提出的快速方法对非绝热毛细管内制冷剂流量进行计算。

计算非绝热毛细管内质量流量的步骤如下:

第一步:回归公式(9)中的系数。回归采用广泛应用的物性软件<sup>[9]</sup>作为数据源。回归结果见表2。

第二步:根据工况,选取合适的长度计算公式。如测试工况进口是过冷出口是两相情况,就需要选取过冷和两相的长度计算公式。

第三步:迭代长度的计算公式得出质量流量。预测结果如表3所示。

表 1 测试工况和结构参数

Tab. 1 Operating conditions and geometry for case study		
	参数	数值
工况	毛细管进口饱和温度	328.15 K
	毛细管进口过冷度	3 K
	毛细管出口饱和温度	249.85 K
	吸气管进口温度	249.85 K
结构	毛细管进口绝热段长度	1 m
	毛细管中间非绝热段长度	3 m
	毛细管出口绝热段长度	1 m
	毛细管内径	0.65 mm
	吸气管内径	7.65 mm

表 2 非绝热段两相区比容近似关系式(公式(9))系数

Tab. 2 Coefficients of approximation correlation (Eq. (9)) for specific volume of two-phase flow in non-adiabatic section					
工质	$k_1$	$k_2$	$c_1$	$c_2$	$c_3$
R134a	7.627	679.4	0.00003425	-0.1221	-162.7
R600a	7.438	360.6	0.0002143	-0.4102	-134.6
R12	6.960	628.3	0.00002768	-0.09371	-170.4
R410A	7.034	1279	0.000008197	-0.06394	-143.4
R407C	7.351	1027	0.00001524	-0.08554	-147.2

表 3 快速计算方法和分布参数模型计算结果对比

Tab. 3 Computation results of approximate analytic method (AA) and distributed parameter model (DP)						
工质	流量/(g/s)		误差/%	速度/s		
	$m_{AA}$	$m_{DP}$		$t_{AA}$	$t_{DP}$	$t_{DP}/t_{AA}$
R134a	0.72	0.73	-1.04	0.006	8.09	1423
R600a	0.33	0.33	-0.27	0.006	7.55	1238
R12	0.72	0.73	-1.23	0.002	7.16	3728
R410A	1.12	1.13	-1.18	0.002	8.12	4304
R407C	0.93	0.91	1.42	0.002	8.57	4080

因为提出的快速计算方法是对于分布参数模型的近似,所以选取分布参数模型作为基准方法来验证提出的方法的有效性。因为分布参数模型的预测值在选取 1000 个控制单元后基本保持不变,所以选取 1000 个控制单元作为基准结果。

提出的快速计算方法的计算精度和速度与分布参数模型的精度和速度做比较,比较结果见表 3。比较结果显示提出的快速计算方法的计算结果与分布模型的结果误差小于 2%,同时计算速度是分布参数模型的 1000 倍以上。提出的快速计算方法又跟 R600a 和 R134a 公开的实验数据<sup>[3,10]</sup>对比,如图 5 所示,结果显示 80% 的预测点误差在 10% 以内,100% 的预测点误差在 30% 以内。

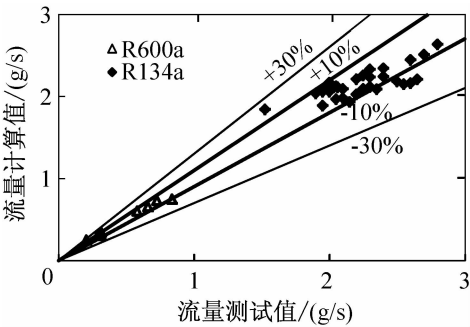


图 5 快速计算方法的实验验证结果  
Fig.5 Validation results with measured data

因此,提出的快速计算方法在计算速度上相对于分布参数模型有明显的优势,同时该方法的计算精度和分布参数模型相当。

4 结论

1)提出了非绝热毛细管快速计算方法,该方法可以用于非绝热毛细管的长度计算,同时满足了系统仿真中对毛细管模型的精度、速度和通用性各方面的要求。

2)将所有相变情况统一成过冷、两相和过热区叠加的模式,然后得出统一模式下的通解,这样快速计算方法可以覆盖所有相变情况,保证了方法的通用性;在确定各相区的界限中,同时考虑了换热对相区界限的影响;在对各相区的控制方程求解中,引入了精度高同时容易积分的比容的近似关系式,以上两项处理保证了方法的精度;对于毛细管长度计算,直接给出了显式近似分析解,方法中没有控制单元的计算,这样在机理上就保证了方法的计算速度。

3)选取 R134a、R600a、R12、R410A、R407C 作为验证工质,比较结果显示提出的快速计算方法的计算结果与分布模型的结果误差小于 2%,同时计算速度是分布参数模型的 1000 倍以上。提出的快速计算方法的预测结果又跟 R600a 和 R134a 公开的实验数据对比,结果显示 80% 的预测点误差在 10% 以内,100% 的预测点误差在 30% 以内。

参考文献

[1] Ding G L. Recent developments in simulation techniques for vapour-compression refrigeration systems[J]. International Journal of Refrigeration, 2007, 30(7): 1119-1133.  
[2] Yang C, Bansal P. Numerical investigation of capillary tube-suction line heat exchanger performance[J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25, 2014-2028.  
[3] Melo C, Vieira L A T, Pereira R H. Non-adiabatic capillary tube flow with isobutane[J]. Applied Thermal Engineer-

- ing, 2002, 22(14):1661-1672.
- [4] Hermes C J L, Melo C, Knabben F T. Algebraic solution of capillary tube flows. Part II: Capillary tube suction line heat exchangers[J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(6/7):770-775.
- [5] Islamoglu Y. Performance prediction for non-adiabatic capillary tube suction line heat exchanger: an artificial neural network approach[J]. Energy Conversion and Management, 2005, 46(2): 223-232.
- [6] Yilmaz T, Unal S. General equation for the design of capillary tubes[J]. Trans. ASME, 1996, 118(2): 150-154.
- [7] Ding G L, Zhang C L, Li H, et al. An approximate analytic model for flow through capillary tubes[J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(7): 668-670.
- [8] Zhang C L, Ding G L. Approximate analytic solutions of adiabatic capillary tube[J]. International Journal of Refrigeration, 2004, 27(1): 17-24.
- [9] Lemmon E W, Huber M L, McLinden M O. NIST Reference fluids Thermodynamic and Transport properties-REF-

PROP 8, Standard Reference Database 23. [DB] National Institute of Standard and Technology, Gaithersburg, MD, USA,. 2007.

- [10] Dirik E, Inan C, Tanes M Y. Numerical and experimental studies on adiabatic and non-adiabatic capillary tubes with HFC-134a[C] // International Refrigeration Conference at Purdue, West Lafayette, USA, 1994:365-370.

#### 通信作者简介

丁国良,男(1966-),教授,博导,上海交通大学机械与动力工程学院制冷所,(021) 34206378,E-mail:glding@sjtu.edu.cn。研究方向:制冷空调装置的仿真、优化与新工质应用。

#### About the corresponding author

Ding Guoliang (1966-), male, Ph. D./Professor, Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, (021) 34203278,E-mail:glding@sjtu.edu.cn. Research fields: Simulation and optimization research for room air conditioner and utilization of new refrigerant.