

文章编号: 1671-6612 (2008) 05-035-04

制冷剂饱和状态热力性质的计算

何伟慷 赵兰萍

(同济大学机械学院制冷与低温研究室 上海 200092)

【摘要】 为了提高制冷剂饱和状态的热力特性简化计算公式的精度, 提出新的简化计算模型, 采用数值计算和分析的方法推导一些常用制冷剂饱和状态的热力特性的简化计算公式, 验证提出的公式模型在一定范围内的可行性, 并为制冷剂饱和状态热力性质参数的计算提供方便。

【关键词】 拉格朗日插值; 制冷剂; 饱和状态; 热力性质

中图分类号 T861+2 文献标识码 A

The thermal character calculation of refrigerant in saturated condition

Heweikang Zhaolanping

(The College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai.)

【Abstract】 In order to increase the accuracy in the thermal calculation of the saturated refrigerant, a new simplified calculation model is suggested in the text. Simplified formulas of the thermal character calculation are deduced by analysis and calculation, their use value can be tested in a specific range by the practical figure. All these can be taken advantages in the thermal character calculation of the saturated refrigerant.

【Keywords】 Lagrange interpolation; refrigerant; saturated condition; thermal character

0 引言

随着空调和制冷技术发展, 很多学者提出了制冷剂热力性质的计算公式, 主要有状态方程方法和简化的多项式函数拟合方法。其中简化多项式函数拟合方法适用于工程计算, 特别是在装置和过程的仿真、优化等需要大量物性计算场合, 目前简化计算公式中 Cleland 在 1986 年提出的制冷剂简化计算模型得到较多人的认可。已经有很多研究者^[3, 4]利用该模型对 R12、R22、R134a、R407C、R410A 等一系列常用制冷剂工质的热力性质曲线进行拟合, 并给出了对应不同制冷剂的 Cleland 计算公式的常系数项, 给人们计算这些制冷剂工质的热力性质带来很大方便。但在实际应用 R12、R22 的 Cleland 公式中发现在 0℃ 附近, 该模型的饱和压力和饱和温度之间转换公式计算结果与 [1][2] 表中的值相差较大 (公式及常系数均从 [3] 得到), 其他饱

和状态液态焓、气态焓值的绝对误差也有点不尽人意。为此本文提出制冷剂饱和状态的热力性质的另一种简化计算模型, 并采用拉格朗日插值方法对制冷剂 R12、R22、R134a、R410A 计算模型的常系数进行求解, 验证计算模型, 得出这些制冷剂在规定区域内的简化计算公式。希望使用得出的公式进行热力性质计算时, 能减少简化计算带来的误差, 同时满足数值计算的快速和简单要求。

1 计算模型的提出

根据数值计算数学可知, 在一定区间内采用多项式对已知曲线进行拟合时, 多项式的次数在 5 次以下 (含 5 次), 一般是次数越高越能比较接近所拟合的曲线; 5 次以上 (不包含 5 次) 容易出现较大的波动, 因此本文提出的是 5 次的多项式形式。在计算中发现若压力、比容直接采用插值法拟合,

作者简介: 何伟慷 (1979.11—), 男, 在读硕士研究生。

收稿日期: 2008-03-13

结果出现较大偏差, 本文建议将压力、比容取自然对数值后再进行插值求解饱和压力和温度、饱和气态比容与温度之间计算公式。对于饱和液态比焓、饱和气态比焓计算, Cleland 公式采用的是三次多项式, 本文采用五次多项式形式主要是为了减少计算误差。而五个方程统一采用五次多项式还可以给编程计算带来方便。以下是提出的简化计算模型:

$$\ln p = a_1 + a_2 t + a_3 t^2 + a_4 t^3 + a_5 t^4 + a_6 t^5 \quad (1)$$

$$t = a_7 + a_8 \ln p + a_9 (\ln p)^2 + a_{10} (\ln p)^3 + a_{11} (\ln p)^4 + a_{12} (\ln p)^5 \quad (2)$$

$$h_l = a_{13} + a_{14} t + a_{15} t^2 + a_{16} t^3 + a_{17} t^4 + a_{18} t^5 \quad (3)$$

$$h_v = a_{19} + a_{20} t + a_{21} t^2 + a_{22} t^3 + a_{23} t^4 + a_{24} t^5 \quad (4)$$

$$\ln v_v = a_{25} + a_{26} t + a_{27} t^2 + a_{28} t^3 + a_{29} t^4 + a_{30} t^5 \quad (5)$$

其中 P 为饱和压力, 为了和后边基本参考点数据相统一, 此处规定单位为 bar; t 为饱和温度, 单位 $^{\circ}\text{C}$; h_l 为饱和液态比焓, 单位 kJ/kg ; h_v 为饱和气态比焓, 单位 kJ/kg ; v_v 为饱和气态比容, 单位为 L/kg 。

2 几种常用制冷剂计算模型常系数的确定

五次多项式有六个待定的常系数, 因此首先需要选取六个基本参考 (不能重复)。基本参考点对于该公式的使用范围和计算准确度都是有直接影响的, 本文在制冷剂一般使用的温度范围 $[-40^{\circ}\text{C}$, $60^{\circ}\text{C}]$ 内分散选取, 以保证推导出的常系数引入后, 计算公式能有温度 $[-40^{\circ}\text{C}$, $60^{\circ}\text{C}]$ 的使用范围, 并在该范围内能有较高的精度。确定基本参考点后, 根据解线性方程的克莱姆法则, 多项式中的各个常系数就已经被确定, 并且这些常系数是唯一的, 因而就可使用拉格朗日插值方法对公式中的常系数进

行求解。

数值数学与计算中的拉格朗日插值法具体如下所示: 对于 $y-x$ 函数曲线, 已知通过 6 个不同点 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 、 (x_3, y_3) 、 (x_4, y_4) 、 (x_5, y_5) 、 (x_6, y_6) , 则可以得到五次插值多项式如下:

$$L_5(x) = l_1(x)y_1 + l_2(x)y_2 + l_3(x)y_3 + l_4(x)y_4 + l_5(x)y_5 + l_6(x)y_6 \quad (6)$$

其中有

$$l_1(x) = \frac{(x-x_2)(x-x_3)(x-x_4)(x-x_5)(x-x_6)}{(x_1-x_2)(x_1-x_3)(x_1-x_4)(x_1-x_5)(x_1-x_6)}$$

$$l_2(x) = \frac{(x-x_1)(x-x_3)(x-x_4)(x-x_5)(x-x_6)}{(x_2-x_1)(x_2-x_3)(x_2-x_4)(x_2-x_5)(x_2-x_6)}$$

$$l_3(x) = \frac{(x-x_1)(x-x_2)(x-x_4)(x-x_5)(x-x_6)}{(x_3-x_1)(x_3-x_2)(x_3-x_4)(x_3-x_5)(x_3-x_6)}$$

$$l_4(x) = \frac{(x-x_1)(x-x_2)(x-x_3)(x-x_5)(x-x_6)}{(x_4-x_1)(x_4-x_2)(x_4-x_3)(x_4-x_5)(x_4-x_6)}$$

$$l_5(x) = \frac{(x-x_1)(x-x_2)(x-x_3)(x-x_4)(x-x_6)}{(x_5-x_1)(x_5-x_2)(x_5-x_3)(x_5-x_4)(x_5-x_6)}$$

$$l_6(x) = \frac{(x-x_1)(x-x_2)(x-x_3)(x-x_4)(x-x_5)}{(x_6-x_1)(x_6-x_2)(x_6-x_3)(x_6-x_4)(x_6-x_5)}$$

$L_5(x)$ 就是对应 y 的 5 次插值多项式计算公式, 通过代入参考点的值就可以逐步把该公式推导出来, 再把它化简为一般形式:

$$L_5(x) = c_0 + c_1 x + c_2 x^2 + c_3 x^3 + c_4 x^4 + c_5 x^5$$

其中 c_0 、 c_1 、 c_2 、 c_3 、 c_4 、 c_5 为常系数。

本文采用的基本参考点详细如下 (单位: 压力 bar, 温度 $^{\circ}\text{C}$, 比焓 kJ/kg , 比容 L/kg), 注意各制冷剂的状态参数出处不同。

表 1 R12 基本参数^[1]

饱和压力	饱和温度	饱和液体比焓	饱和气体比焓	饱和气体比容
0.642	-40	163.85	334.07	242.72
1.51	-20	181.7	343.48	109.34
3.089	0	200	352.54	55.68
5.682	20	218.88	361.01	30.94
9.634	40	238.61	368.6	18.26
15.3	60	259.61	373.29	11.12

表 2 R22 基本参数^[2]

饱和压力	饱和温度	饱和液体比焓	饱和气体比焓	饱和气体比容
1.0495	-40	155.413	388.611	205.75
2.4483	-20	177.142	397.469	92.843
4.9759	0	200	405.364	47.135
9.0993	20	224.084	411.921	26.003
15.335	40	249.686	416.563	15.135
24.266	60	277.595	418.092	9

表 3 R134a 基本参数^[2]

饱和压力	饱和温度	饱和液体比焓	饱和气体比焓	饱和气体比容
0.5122	-40	148.57	374.16	360.95
1.3268	-20	173.82	386.66	147.44
2.9269	0	200	398.68	69.35
5.7159	20	227.4	409.84	36.03
10.165	40	256.35	419.58	19.99
16.815	60	287.49	426.86	11.46

表 4 R410A 基本参数^[3]

饱和压力	饱和温度	饱和液体比焓	饱和气体比焓	饱和气体比容
1.762	-40	142.04	406.34	142.48
4.026	-20	170.61	415.63	64.71
8.041	0	200	423.34	32.78
14.53	20	231.14	428.85	17.78
25.559	42	270.57	430.27	9.29
37.667	59	310.6	422.9	5.3

对于几种常用制冷剂, 利用以上原理进行拟合计算, 得出 $\ln p$ - t 、 t - $\ln p$ 、 h_f - t 、 h_g - t 、 $\ln v_g$ - t 这 5 个五次多项式计算公式。然后把计算饱和压力、饱和比容的自然对数的公式转化为计算饱和压力、饱和

比容的公式。

以下是各个公式的形式、常系数, 误差范围是根据公式常系数确定后, 再在其他各个温度进行校核计算得出:

表 5 饱和压力 ($p=\exp(a_1+a_2t+a_3t^2+a_4t^3+a_5t^4+a_6t^5)$)

	R12	R22	R134a	R410A
a_1	1.12784741	1.60460626	1.07394384	2.08455345
a_2 ($\times 10^{-2}$)	3.28872386	3.25907782	3.62385782	3.18394446
a_3 ($\times 10^{-4}$)	-1.31973646	-1.31164284	-1.51237180	-1.24166714
a_4 ($\times 10^{-7}$)	6.06886588	5.70199926	6.80029030	6.15876552
a_5 ($\times 10^{-9}$)	-2.19680221	-2.15530316	-2.73796261	-2.45228429
a_6 ($\times 10^{-13}$)	-9.52573593	76.9573822	90.8485044	16.1573640

与参考数据源相比, 得出的饱和压力相对误差绝对值在 0.05% 以内。

表 6 饱和温度 ($t=a_7+a_8t+a_9(\ln p)^2+a_{10}(\ln p)^3+a_{11}(\ln p)^4+a_{12}(\ln p)^5$)

	R12	R22	R134a	R410A
a_7	-30.0876302	-41.0308840	-26.3563745	-51.9673667
a_8	23.3809323	21.2206640	21.8210708	20.3204308
a_9	2.49391686	2.40955580	2.26267331	1.03392485
$a_{10} (\times 10^{-2})$	43.2578609	6.09719155	21.6026214	74.8312798
$a_{11} (\times 10^{-2})$	-6.63918749	9.18337892	3.57097686	-11.2395843
$a_{12} (\times 10^{-3})$	17.5161937	-7.95893312	-2.08397355	11.6744984

饱和温度误差在 $\pm 0.05^\circ\text{C}$ 之间。用相对误差来衡量, 由 0°C 存在, 须按开氏温度, 绝对值在 0.03%以内。

表 7 饱和液态焓 ($h_l=a_{13}+a_{14}t+a_{15}t^2+a_{16}t^3+a_{17}t^4+a_{18}t^5$)

	R12	R22	R134a	R410A
$a_{13} (\times 10^2)$	2	2	2	2
a_{14}	0.927850000	1.17243250	1.33736667	1.50369336
$a_{15} (\times 10^{-4})$	7.10416667	15.1218750	15.2083333	20.1952693
$a_{16} (\times 10^{-6})$	4.11458333	2.47916667	5.05208333	20.8214249
$a_{17} (\times 10^{-8})$	3.64583333	5.07812500	1.04166667	41.9932674
$a_{18} (\times 10^{-11})$	2.60416667	78.6458333	70.3125000	767.544105

液态焓误差: R12、R22、R134a 在 $\pm 0.07\text{kJ/kg}$ 之间; R410A 在 $\pm 0.12\text{kJ/kg}$ 之间。相对误差绝对值在 0.06%以内。

表 8 饱和气态焓 ($h_v=a_{19}+a_{20}t+a_{21}t^2+a_{22}t^3+a_{23}t^4+a_{24}t^5$)

	R12	R22	R134a	R410A
$a_{19} (\times 10^2)$	3.52540000	4.05364000	3.98680000	4.23340000
$a_{20} (\times 10^{-1})$	4.37658333	3.64568333	5.82916667	3.34129614
$a_{21} (\times 10^{-4})$	-7.32291667	-16.5145833	-10.5625000	-26.4153842
$a_{22} (\times 10^{-6})$	3.22916667	-7.73437500	-8.22916667	-5.40183908
$a_{23} (\times 10^{-8})$	-1.30208333	-5.26041667	-4.68750000	-27.1153951
$a_{24} (\times 10^{-10})$	-43.7500000	-10.9114583	-7.81250000	-91.8049282

气态焓误差: R12、R22、R134a 在 $\pm 0.06\text{kJ/kg}$ 之间; R410A 在 $\pm 0.2\text{kJ/kg}$ 之间。相对误差绝对值在 0.09%以内。

表 9 饱和比容 ($v_v=\exp(a_{25}+a_{26}t+a_{27}t^2+a_{28}t^3+a_{29}t^4+a_{30}t^5)$)

	R12	R22	R134a	R410A
a_{25}	4.01962102	3.85301582	4.23916615	3.48981857
$a_{26} (\times 10^{-2})$	-3.13173128	-3.15630107	-3.49244878	-3.20102835
$a_{27} (\times 10^{-5})$	10.8223161E	10.3312754	12.3480814	8.58972867
$a_{28} (\times 10^{-7})$	-5.96946060	-6.27787965	-7.48249524	-6.68889842
$a_{29} (\times 10^{-9})$	2.16118033	1.37486693	2.05091697	-1.14061517
$a_{30} (\times 10^{-11})$	-2.63745940	-2.07723712	-1.84196069	-11.3741149

饱和比容误差: R12 在 $\pm 0.05\text{L/kg}$ 之间, 相对误差绝对值在 0.2%以内; R22 在 $\pm 0.02\text{L/kg}$ 之间, 相对误差绝对值在 0.15%以内; R134a 在 $\pm 0.04\text{L/kg}$

之间, 相对误差绝对值在 0.22%以内; R410A 在 $\pm 0.04\text{L/kg}$ 之间, 相对误差绝对值在 0.35%以内。

(下转第 34 页)

个重要方向^[1, 10]。但就应用于超市用陈列柜的 R404A/R744 复叠制冷系统, 低温级 CO₂ 系统中节流元件用膨胀阀即可。

5 结论

(1) 论证了 R404A/R744 复叠制冷系统在超市陈列柜中应用的可行性;

(2) 在 R404A/R744 复叠制冷系统中, 在相同的高温级冷凝温度和低温级蒸发温度下, 系统存在一个最佳中间温度使 COP 最大, 且最佳中间温度随高温级冷凝温度的降低而降低;

(3) R404A/R744 复叠制冷系统的两级压缩机的输气系数均远远高于相同运行参数下单级 R22 系统中压缩机的输气系数。

参考文献:

- [1] 张仙平, 王凤坤, 马富芹, 等. 制冷空调领域 CO₂ 替代合成工质可行性分析[J]. 低温与超导, 2007, 35(3): 257-261.
- [2] 宁静红, 马一太. R290/CO₂ 制冷循环的能效分析与节

能探讨[J]. 流体机械, 2005, 33(7): 70-72.

- [3] 顾兆林, 刘红娟, 李云. NH₃/CO₂ 低温制冷系统研究[J]. 西安交通大学学报, 2002, 36(5): 536-540.
- [4] 马一太, 王景刚. 自然工质在制冷空调领域里的应用分析[J]. 制冷学报, 2002, (1): 1-5.
- [5] 宁静红, 查世彤, 李慧宇, 等. 利用熵产最小法分析 R290/CO₂ 复叠式制冷循环[J]. 制冷与空调, 2007, 21(1): 85-88.
- [6] 缪道平, 吴业正. 制冷压缩机[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 14-27.
- [7] 赵志刚, 周彬彬, 张超甫, 等. R404A 制冷剂在商用制冷设备中的应用分析[J]. 制冷, 2004, 25(4): 76-80.
- [8] 管海清, 马一太, 李敏霞, 等. 制冷空调用 CO₂ 摆动活塞膨胀压缩机的设计与参数计算[J]. 机械设计, 2004, 21(12): 25-27.
- [9] 张兰, 李红旗. 全封闭转子式 CO₂ 压缩机的开发[J]. 家电科技, 2004, (12): 31-32.
- [10] 刘军朴, 陈江平, 陈芝久. 跨临界二氧化碳制冷系统节流降压形式研究[J]. 流体机械, 2002, 30(4): 41-43.

(上接第 38 页)

以上所有公式如果使用表中的常系数, 则应用范围为温度在 -40℃~60℃ 之间, 所有误差和相对误差都是根据与参考点的出处文献中该制冷剂热力性质数据对比得出。

其他制冷剂可采用类似方法得出简化公式。

3 结论

(1) 在选用合适的参考点后推导出简化计算公式, 使用该简化计算公式得出的其他饱和状态点的热力性质数值与参考文献相比, 在温度区间 [-40℃, 60℃] 范围内温度、压力、饱和液态焓、饱和气态焓相对误差绝对值可控制在 0.1% 以下, 一般在 (0.01—0.04)% 之间; R12、R22、R134a 饱和气态比容的相对误差绝对值均可控制 0.25% 以下; R410A 在 50℃ 时饱和气态比容的相对误差绝对值较大, 但也在 0.35% 以下。保证误差在工程应用的许可范围内。拉格朗日插值法作为数值分析和计算的常用方法, 总的说来使用该方法求解出本文提出

的制冷剂热力性质简化计算公式的常系数是可靠的。

(2) 本文提出的计算模型是适合制冷剂饱和状态点的热力性质计算的。当然对于同种制冷剂假如选取的基本参考点不同, 得出的常系数数值会有所不同, 要使简化公式对其他饱和状态点的计算结果与参考文献比较接近, 应当根据实际需要来合理取参考点。

参考文献:

- [1] 岳孝方, 陈汝东. 制冷技术与应用[M]. 上海: 同济大学出版社, 1992.
- [2] 郭进堂, 吴进发. 简明空调制冷设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [3] 丁国良. 制冷空调新工质[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2003.
- [4] 赵斌. R410A 和 R407C 热力性质简便计算[J]. 节能, 2005(11): 48-51.