

制冷剂饱和热力性质的通用简化计算模型

邵亮亮, 李则宇, 张春路

(同济大学 机械工程学院, 上海 201804)

摘要: 制冷剂热力性质的简化计算是保证制冷空调系统仿真与优化计算的稳健性与快速性的关键之一. 制冷剂热力性质简化计算模型的研究目标是函数形式上的通用性和较大参数范围内的准确性. 提出了一种适用于制冷剂饱和热力性质的六系数通用简化计算模型, 对多种常见制冷剂进行了数据拟合. 在制冷空调工况范围内, 与国际标准制冷剂物性计算软件 REFPROP 9.0 相比, 该简化计算模型对各种饱和热力性质的最大计算误差均小于 $\pm 0.6\%$, 计算速度可以提高两个数量级以上.

关键词: 制冷; 制冷剂; 热力性质; 饱和; 模型

中图分类号: TB 65

文献标识码: A

A Generalized Simple Model for Saturated Thermodynamic Properties of Refrigerants

SHAO Liangliang, LI Zeyu, ZHANG Chunlu

(College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Simple and fast evaluation of refrigerant thermodynamic properties is one of the key factors to the robustness and speed of refrigeration system simulation and optimization. The investigation aimed to find a generalized simple model to be accurate enough in a wider range of parameters. A new six-coefficient simple model was proposed for refrigerant saturated thermodynamic properties. The data of some typical refrigerants were used for data regression. In the common refrigerating and air-conditioning operating conditions, the comparison between the present model and the international standard refrigerant database REFPROP 9.0 shows that the maximum deviations of refrigerant saturated thermodynamic properties fall into $\pm 0.6\%$. The calculation speed can be therefore improved two orders of magnitude or more.

Key words: refrigeration; refrigerant; thermodynamic property; saturation; model

随着人民生活水平的提高, 制冷空调系统已成为能耗大户, 在总耗电量中占有的比例逐年提高. 因此, 制冷空调行业也是节能减排的重点行业之一. 制冷空调系统的节能主要通过两种途径: 一是设备能效的提高, 二是系统运行的优化. 由于设备或系统的复杂性, 引入制冷空调系统仿真技术可以更加有效地提高设备能效和优化系统运行^[1-2]. 此外, 环保是制冷空调系统的另一主要发展方向, 为了研究制冷剂替代对设备及系统设计的影响, 也需要借助制冷空调系统仿真技术加速研发的过程.

稳健、快速和准确是对制冷空调系统仿真技术的三个基本要求. 作为底层核心模块之一的制冷剂热物性计算是达到上述三个基本要求的关键, 因为制冷剂的热物性模块在仿真计算中会被上层模型成千上万次地调用.

常用的制冷剂热力性质计算方法有三种. 第一种是状态方程法. 这是最常用的一种方法, 其原理在工程热力学教材中有广泛而深入的介绍. 这种方法的优点是计算精度高、参数范围广. 缺点是计算速度慢(特别是对于混合工质)、计算稳健性一般(由迭代计算造成). 美国技术与标准局(NIST)提供的 REFPROP 软件^[3]是这种方法的典型代表, 已成为国际通用的制冷剂标准数据库. 第二种方法是简化模型法. 在相对较窄的参数范围内, 基于 REFPROP 提供的数据, 采用多项式或者类多项式等比较简单的经验方程进行近似计算. 这类方法的优点是计算速度快、计算稳健性高. 缺点是参数范围较窄、计算精度有不同程度的下降, 且对于不同的热力性质, 为了提高精度, 往往采用不同函数形式的经验方程, 通用性一般. Cleland 提出的类多项式模型^[4-6]和张春路等提出的隐式多项式模型^[7-9]是这类方法中的典型代表. 其中隐式多项式模型对所有热力性质都追

收稿日期: 2011-09-29

基金项目: 上海市教育委员会科研创新项目(11ZZ30); 中央高校基本科研业务费专项

第一作者: 邵亮亮(1981—), 男, 工学博士, 博士后, 主要研究方向为制冷空调系统仿真. E-mail: llshao@139.com

通讯作者: 张春路(1971—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为制冷空调系统仿真与控制.

E-mail: chunlu.zhang@gmail.com

求基于反函数的可逆计算,但事实上由于很多热力性质在较大参数变化范围内并不是单调函数,所以反函数法不具备通用性.第三种方法是表格插值法.通过 REFPROP 按一定顺序生成数据表格,采用某种搜索和插值方法(通常是线性或双线性插值)完成估算.这类方法的优点是计算速度较快、计算稳健性较高、通用性好.缺点是为了保证计算精度需要存储比较密集的数据,导致数据文件很大,普通的数据文件读取方法会比较耗时.此外,线性/双线性插值方法会导致一阶导数不连续,影响导数相关计算的稳健性.

本文研究提出一种新的类多项式模型,对于制冷剂的饱和热力性质具有通用性,且计算精度较高.

1 制冷剂饱和热力性质的通用简化模型

制冷剂饱和热力性质可以表达为温度或压力的函数.当饱和温度(露点温度和泡点温度)低于临界温度较多且变化范围较小时,饱和热力性质可以用多项式较好地近似^[4-6].但是,当饱和温度比较接近临界温度时,饱和热力性质的变化会比较剧烈,多项式近似模型的精度因此变差.针对这一问题,经过反复对比研究不同的函数形式,提出如下对各种饱和性质都适用的通用简化模型.

$$y = a_1 + a_2 T + a_3 T^2 + a_4 T^3 + a_5 \left(1 - \frac{T}{T_{cr}}\right)^{a_6}$$

(1)

式中: y 代表某种饱和热力性质; T 为露点温度或泡点温度,K; T_{cr} 是临界温度,K; $a_1 \sim a_6$ 是系数,通过对热力性质数据的拟合获得.

上述模型可以看作是由两部分构成,第一部分是关于温度 T 的三次多项式,反映了远离临界点的饱和热力性质的变化特性;第二部分是近临界温度的修正项.该修正项的加入使得整个模型变成非线性函数,需要通过非线性拟合方法获得 6 个系数,可以采用 MATLAB 软件完成.

在饱和热力性质中,温度与压力之间的关系,即饱和蒸气压方程是最为常用、也是较为特殊的,因为经常要在两者之间进行转换.两者之间的单调函数关系是两者相互转换的数学基础. Antoine 方程是工程上最常用的一种蒸气压方程,如式(2)所示.但是 Antoine 方程的精度不是很高,其优点是很容易导出反函数,如式(3)所示.如果采用式(1)形式的函数,精度明显优于 Antoine 方程,但无法获得反函数的

解析式.为此,可以对精度相对更高的式(5)做牛顿迭代获得压力值.如果先通过式(4)获得精度较高的压力初值,那么一步牛顿迭代就可以达到足够高的精度,即式(6)可以作为式(5)的高精度的近似反函数.

$$\ln p = b_1 + \frac{b_2}{T + b_3}$$

(2)

式中: b_1, b_2, b_3 是系数,通过对热力性质数据的拟合获得.

$$T = \frac{b_2}{\ln p - b_1} - b_3$$

(3)

$$\ln p = a_1 + a_2 T + a_3 T^2 + a_4 T^3 + a_5 \left(1 - \frac{T}{T_{cr}}\right)^{a_6}$$

(4)

$$T = c_1 + c_2 \ln p + c_3 (\ln p)^2 + c_4 (\ln p)^3 + c_5 \left(1 - \frac{\ln p}{\ln p_{cr}}\right)^{c_6}$$

(5)

式中: $a_1 \sim a_6$ 和 $c_1 \sim c_6$ 是两组不同的系数,通过对热力性质数据的拟合获得; p_{cr} 为临界压力.

$$\ln p = \ln p_0 - \frac{c_1 + c_2 \ln p_0 + c_3 (\ln p_0)^2 + c_4 (\ln p_0)^3 + c_5 \left(1 - \frac{\ln p_0}{\ln p_{cr}}\right)^{c_6} - T}{c_2 + 2c_3 \ln p_0 + 3c_4 (\ln p_0)^2 - \frac{c_5 c_6}{\ln p_{cr}} \left(1 - \frac{\ln p_0}{\ln p_{cr}}\right)^{c_6 - 1}}$$

(6)

式中: p_0 或 $\ln p_0$ 是先按式(4)计算所得的 p 或 $\ln p$ 值.

式(2)~(6)中,压力都是以对数形式出现的,这样做更符合物理意义,可以提高拟合精度.

2 结果与分析

目前制冷空调设备使用的制冷剂种类众多,既有常用的如 R123, R134a, R22, R404A, R407C, R410A, R600a, R717 等,又有在研究推广中的如 R1234yf, R290, R32, R417A, R744 等.本文采用式(1)对上述制冷剂的饱和热力性质进行建模,而饱和压力与温度则按式(4)~(6)建模.上述制冷剂的饱和热力性质数据都是通过最新版本的 REFPROP 9.0^[3]计算得到.

表 1 列举了各种制冷剂的临界温度 T_{cr} 、三相点温度 T_{tr} 、简化计算模型适用的饱和温度的下限 $T_{s,min}$ 与上限 $T_{s,max}$.其中,简化计算模型适用的饱和温度的下限与上限,是在综合了一般制冷空调工况饱和温度范围、低于临界温度、高于三相点温度等条件后得出的.混合工质不存在一般意义下的三相点温度.

表 1 饱和温度范围

Tab.1 Saturation temperature range

制冷剂	$T_{cr}/^{\circ}\text{C}$	$T_{tri}/^{\circ}\text{C}$	$T_{s,min}/^{\circ}\text{C}$	$T_{s,max}/^{\circ}\text{C}$
R134a	101.06	-103.30	-60	65
R22	96.15	-157.42	-60	65
R32	78.11	-136.81	-60	65
R123	183.68	-107.15	-60	65
R290	96.74	-187.63	-60	65
R600a	134.66	-159.42	-60	65
R1234yf	94.70	-53.15	-50	65
R717	132.25	-77.66	-60	65
R744	30.98	-56.56	-50	27
R410A	71.35		-60	65
R417A	87.14		-60	65
R404A	72.05		-60	65

表 2 给出了各种制冷剂的饱和温度计算式(5)的系数,以及按式(5)和式(7)分别计算的结果与 REFPROP 相比的绝对误差绝对值的最大值 e 和标准差 s ,其中下标 1 和 2 分别代表按式(5)和式(7)计

算的结果.表 3 给出了各种制冷剂的饱和压力计算式(4)的系数,以及按式(4)和式(6)分别计算的结果与 REFPROP 相比的相对误差绝对值的最大值 e_1 , e_2 和标准差 s_1,s_2 ,其中下标 1 和 2 分别代表按式(4)和式(6)计算的结果.对于混合工质,同一压力下的饱和和气体温度(露点温度)和饱和液体温度(泡点温度)是不同的,所以表 2 和 3 中分别给出了相应的结果,下标 BP 和 DP 分布表示泡点和露点.相比之下,制冷剂按式(5)及其近似反函数式(6)计算的精度更高.表中所列制冷剂按式(5)计算的饱和温度的最大误差仅 0.1 K,而饱和压力的最大误差为 0.6%.

表 4 和表 5 分别给出了各种制冷剂的饱和液体比焓和饱和气体比焓计算式(1)的系数,以及与 REFPROP 相比的绝对误差绝对值的最大值 e_1 、相对误差绝对值的最大值 e_2 和标准差 s .结果表明,采用式(1)拟合饱和液体比焓和饱和气体比焓的精度

表 2 饱和温度计算式(5)的系数

Tab.2 Saturation temperature(Equation 5)

制冷剂	$c_1/10^{-2}$	c_2	c_3	c_4	$c_5/10^{-2}$	c_6	e/K	$s/\%$
R134a	5.049 484	-21.132 2	-1.089 8	0.214 341	-3.328 078	0.916 744	0.070	0.013
R22	3.843 743	-4.355 7	-2.158 7	0.292 211	-2.342 003	0.914 077	0.085	0.012
R32	0.945 105	25.164 4	-2.890 4	0.332 845	0.396 623	0.000 328	0.108	0.012
R123	12.007 522	-89.326 9	-0.213 6	0.053 081	-9.849 455	0.848 988	0.076	0.009
R290	4.676 302	-13.764 4	-2.534 7	0.335 907	-3.243 586	0.941 799	0.071	0.011
R600a	7.411 094	-45.569 2	-0.651 0	0.169 080	-5.605 722	0.872 325	0.040	0.009
R1234yf	2.918 220	5.663 6	-1.992 2	0.303 536	-1.328 700	0.913 037	0.047	0.008
R717	6.166 167	-25.924 3	-0.953 0	0.150 924	-4.471 921	0.842 585	0.060	0.009
R744	0.286 009	49.793 6	-6.449 1	0.486 252	0.262 703	0.802 008	0.005	0.001
R410A _{BP}	0.197 798	25.534 0	-2.996 4	0.343 030	1.142 345	0.000 902	0.094	0.013
R410A _{DP}	0.132 154	25.334 7	-2.965 3	0.341 786	1.212 988	0.001 276	0.090	0.012
R417A _{BP}	3.276 578	0.592 9	-2.046 9	0.296 199	-1.750 704	0.936 592	0.059	0.013
R417A _{DP}	3.038 124	2.487 7	-1.778 8	0.279 747	-1.417 919	0.944 551	0.072	0.017
R404A _{BP}	-0.846 778	24.343 0	-2.819 3	0.353 139	2.246 788	0.000 555	0.087	0.013
R404A _{DP}	-1.340 917	23.680 1	-2.727 0	0.347 999	2.764 787	0.000 606	0.084	0.013

表 3 饱和压力计算式(4)的系数

Tab.3 Saturation pressure(Equation 4)

制冷剂	a_1	a_2	$a_3/10^3$	$a_4/10^6$	a_5	a_6	$e_1/\%$	$e_2/\%$	$s_1/\%$	$s_2/\%$
R134a	-48.445 1	0.363 5	-0.977 09	1.082 88	13.112 4	0.639 0	0.39	0.48	0.121	0.114
R22	-38.027 8	0.304 7	-0.817 00	0.891 97	9.075 5	0.649 8	0.37	0.47	0.108	0.091
R32	-31.448 9	0.278 5	-0.742 48	0.780 18	4.978 7	0.766 9	0.98	0.60	0.560	0.097
R123	-164.909 6	0.574 0	-1.363 68	1.761 16	113.654 4	0.421 0	1.13	0.60	0.653	0.189
R290	-33.147 8	0.273 6	-0.735 97	0.800 33	7.221 3	0.613 6	0.83	0.37	0.469	0.070
R600a	-63.317 8	0.369 7	-0.962 26	1.130 19	28.542 4	0.514 4	0.28	0.20	0.087	0.073
R1234yf	-34.126 2	0.289 6	-0.778 27	0.815 79	4.753 5	0.563 6	0.16	0.27	0.074	0.054
R717	-59.353 1	0.370 0	-0.975 62	1.125 58	24.336 7	0.480 8	0.27	0.38	0.088	0.083
R744	-20.773 4	0.231 6	-0.651 36	0.692 82	1.166 4	0.916 1	0.49	0.08	0.285	0.007
R410A _{BP}	-31.334 0	0.277 4	-0.729 77	0.754 98	5.044 4	0.852 8	1.05	0.52	0.596	0.097
R410A _{DP}	-30.236 2	0.274 7	-0.7313 8	0.754 92	3.894 2	0.819 9	0.43	0.49	0.147	0.093
R417A _{BP}	-35.172 7	0.298 9	-0.808 09	0.864 40	6.105 2	0.671 3	0.36	0.33	0.123	0.093
R417A _{DP}	-40.287 0	0.340 8	-0.938 26	1.010 21	6.603 8	0.651 8	0.39	0.40	0.145	0.146
R404A _{BP}	-30.182 9	0.274 7	-0.737 51	0.763 67	3.535 0	0.796 0	0.45	0.52	0.223	0.097
R404A _{DP}	-34.355 5	0.293 0	-0.769 13	0.803 34	6.735 8	0.865 3	0.49	0.46	0.152	0.095

表 4 饱和液体比焓计算式(1)的系数

Tab.4 Enthalpy of saturated liquid(Equation 1)

制冷剂	$a_1/10^{-5}$	$a_2/10^{-3}$	a_3	$a_4/10^3$	$a_5/10^{-5}$	a_6	$e_1/(J \cdot kg^{-1})$	$e_2/\%$	$s/\%$
R134a	1.106 450	0.700 624	-0.077 369	0.304 234	-2.272 647	0.608 629	0.7	0.000 6	0.000 1
R22	0.327 044	1.302 691	-1.698 153	2.934 474	-1.412 428	0.111 060	9.4	0.005 6	0.001 8
R32	-0.460 474	1.689 045	-2.182 134	3.018 504	-2.060 096	0.393 467	4.5	0.002 9	0.000 6
R123	-0.622 647	0.881 324	-0.114 599	0.894 553	0.176 875	0.439 513	7.1	0.005 0	0.001 2
R290	-1.740 983	2.074 759	-2.143 409	5.296 423	-2.056 123	0.283 168	0.5	0.000 6	0.000 1
R600a	-1.075 478	1.496 676	-0.317 301	2.665 684	-1.998 192	0.374 717	1.3	0.001 8	0.000 3
R1234yf	0.797 728	0.432 775	1.456 343	-0.246 657	-1.180 510	0.110 496	9.1	0.004 0	0.001 5
R717	4.343 674	0.724 041	7.741 757	-12.370 821	-12.216 827	0.426 511	36.7	0.037 2	0.006 6
R744	-1.947 602	2.615 510	-4.946 129	6.564 479	-2.049 274	0.388 282	4.7	0.003 8	0.001 2
R410A	-0.987 779	2.069 346	-3.952 803	6.220 773	-1.250 192	0.160 465	11.5	0.010 0	0.002 5
R417A	-0.246 604	1.333 976	-1.432 082	2.671 580	-1.104 738	0.196 895	3.7	0.002 9	0.000 6
R404A	-0.237 026	1.218 242	-1.347 329	2.483 749	-1.165 738	0.417 099	4.7	0.003 9	0.000 8

表 5 饱和气体比焓计算式(1)的系数

Tab.5 Enthalpy of saturated vapor(Equation 1)

制冷剂	$a_1/10^{-5}$	$a_2/10^{-3}$	a_3	$a_4/10^2$	$a_5/10^{-5}$	a_6	$e_1/(J \cdot kg^{-1})$	$e_2/\%$	$s/\%$
R134a	1.041 490	-0.014 126	3.179 397	-0.415 322	1.762 256	0.145 116	10.0	0.002 8	0.000 9
R22	1.173 800	0.151 595	2.321 000	-0.360 726	1.816 618	0.159 336	4.9	0.001 3	0.000 4
R32	-0.833 667	1.232 396	1.474 896	-0.237 703	4.347 089	0.514 945	6.2	0.001 3	0.000 4
R123	2.138 802	-0.057 620	2.447 353	-0.255 278	0.741 114	0.373 770	1.2	0.000 4	0.000 1
R290	-0.133 624	0.597 483	3.721 323	-0.422 655	3.225 920	0.240 949	0.9	0.000 2	0.000 1
R600a	0.465 960	0.280 849	3.930 498	-0.342 250	2.609 989	0.206 936	6.7	0.001 0	0.000 3
R1234yf	0.624 369	0.148 621	2.959 459	-0.292 663	1.799 646	0.439 693	6.4	0.001 8	0.001 0
R717	11.864 826	0.309 411	10.629 818	-2.219 753	-0.011 138	-1.550 440	14.4	0.001 0	0.000 3
R744	-0.867 222	1.388 339	0.987 707	-0.320 851	3.449 146	0.426 903	3.6	0.000 8	0.000 3
R410A	-0.236 560	0.848 622	1.498 908	-0.183 367	3.013 750	0.487 335	26.6	0.006 5	0.002 2
R417A	0.442 094	0.373 868	2.233 970	-0.231 949	1.946 874	0.408 915	6.1	0.001 8	0.000 5
R404A	0.565 821	0.248 828	2.839 734	-0.331 000	1.854 674	0.424 546	7.6	0.002 0	0.001 0

都非常高,表中所列制冷剂的饱和液体比焓的最大误差仅为 36.7 J·kg⁻¹或 0.037%,而饱和气体比焓的最大误差仅为 26.6 J·kg⁻¹或 0.006 5%。

表 6 和表 7 分别给出了各种制冷剂的饱和液体比熵和饱和气体比熵计算式(1)的系数,以及与 REFPROP 相比的绝对误差绝对值的最大值 e_1 、相对误差绝对值的最大值 e_2 和标准差 s 。结果表明,采用式(1)拟合饱和液体比熵和饱和气体比熵的精度都很高,表中所列制冷剂的饱和液体比熵的最大误差仅

为 0.9 J·kg⁻¹·K⁻¹或 0.072%,而饱和气体比熵的最大误差仅为 1.392 J·kg⁻¹·K⁻¹或 0.023%。

表 8 和表 9 分别给出了各种制冷剂的饱和液体密度和饱和气体密度计算式(1)的系数,以及与 REFPROP 相比的相对误差绝对值的最大值 e 和标准差 s 。结果表明,采用式(1)拟合饱和液体密度和饱和气体密度的精度都很高,表中所列制冷剂的饱和液体密度的最大误差仅为 0.013 6%,而饱和气体密度的最大误差为 0.5%。

表 6 饱和液体比熵计算式(1)的系数

Tab.6 Entropy of saturated liquid(Equation 1)

制冷剂	$a_1/10^{-3}$	$a_2/10^{-1}$	$a_3/10^1$	$a_4/10^4$	a_5	a_6	$e_1/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	$e_2/\%$	$s/\%$
R134a	-1.241 647	1.361 813	-0.274 550	0.279 537	0.052 863	-1.850 31	0.035	0.005	0.001
R22	-1.059 329	1.317 533	-0.291 926	0.313 251	6.795 88×10 ⁻³	-2.471 69	0.093	0.013	0.003
R32	-2.182 487	1.997 113	-0.453 196	0.481 709	95.543 1	-0.189 344	0.199	0.014	0.005
R123	-0.668 308	1.044 586	-0.206 406	0.211 773	-40.759 1	-0.691 717	0.074	0.010	0.002
R290	-2.905 018	2.357 309	-0.486 976	0.538 843	0.114 557	-1.778 69	0.075	0.018	0.003
R600a	-2.453 959	1.995 037	-0.367 807	0.382 778	-20.480 2	-0.383 568	0.087	0.019	0.004
R1234yf	-0.740 275	0.901 877	-0.132 312	0.128 816	0.229 115	-1.369 25	0.025	0.002	0.001
R717	-6.555 903	4.219 410	-0.698 599	0.548 577	65.785 9	-0.572 108	0.060	0.016	0.003
R744	-4.776 728	3.891 172	-1.167 521	1.447 243	837.237	-0.036 295	0.900	0.072	0.025
R410A	-1.789 933	1.735 210	-0.399 788	0.432 636	191.922	-0.092 750	0.122	0.009	0.003
R417A	-1.218 376	1.440 985	-0.311 299	0.331 062	0.834 203	6.370 9×10 ⁻⁵	0.100	0.013	0.003
R404A	-4.065 302	1.444 516	-0.313 935	0.333 933	2 817.05	-6.422 7×10 ⁻³	0.253	0.018	0.005

表 7 饱和气体比熵计算式(1)的系数
Tab.7 Entropy of saturated vapor(Equation 1)

制冷剂	$a_1/10^{-3}$	$a_2/10^{-1}$	$a_3/10$	$a_4/10^4$	a_5	a_6	$e_1/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	$e_2/\%$	$s/\%$
R134a	3.518 790	-2.167 064	0.707 269	-0.785 548	442.393 01	-0.015 57	0.419	0.023	0.007
R22	4.203 512	-2.231 781	0.700 397	-0.776 504	-6.3715×10^{-10}	-8.537 07	0.357	0.019	0.005
R32	6.501 462	-3.805 745	1.178 097	-1.327 219	-17.958 79	-0.477 22	0.306	0.013	0.004
R123	3.295 608	-2.134 523	0.696 174	-0.831 614	466.241 33	-0.445 50	0.215	0.012	0.004
R290	6.366 883	-3.840 586	1.245 276	-1.371 513	-6.0148×10^{-8}	-7.094 72	0.514	0.020	0.005
R600a	5.209 226	-3.684 863	1.211 966	-1.361 240	716.246 81	-0.190 68	0.510	0.022	0.006
R1234yf	3.221 538	-1.685 368	0.575 193	-0.643 585	-0.002 102	-2.825 75	0.080	0.005	0.001
R717	31.613 279	-15.089 25	4.174 758	-4.974 368	-9 577.045 9	0.525 65	1.392	0.021	0.007
R744	5.049 389	-3.406 751	1.099 625	-1.223 559	837.593 60	0.333 89	0.073	0.004	0.001
R410A	4.101 950	-2.606 586	0.829 324	-0.916 609	658.326 56	0.081 09	0.222	0.011	0.003
R417A	2.367 640	-1.977 519	0.656 183	-0.722 382	1 345.341 5	0.016 63	0.335	0.019	0.006
R404A	1.171 101	-1.961 594	0.662 005	-0.742 895	2 478.316 1	0.011 62	0.261	0.015	0.005

表 8 饱和液体密度计算式(1)的系数
Tab.8 Density of saturated liquid(Equation 1)

制冷剂	$a_1/10^{-2}$	a_2	$a_3/10^3$	$a_4/10^5$	$a_5/10^{-3}$	a_6	$e/\%$	$s/\%$
R134a	8.093 496	-1.685 913	3.610 894	-0.277 628	1.252 740	0.409 287	0.001 6	0.000 6
R22	8.195 751	-2.351 078	3.091 399	-0.578 496	1.196 161	0.139 542	0.002 6	0.000 9
R32	6.870 274	-0.913 678	0.325 493	0.059 693	1.032 819	0.382 262	0.003 8	0.000 7
R123	12.897 931	-1.988 949	2.134 475	-0.315 270	0.852 331	0.240 524	0.001 1	0.000 4
R290	3.827 592	-0.711 268	1.239 778	-0.144 108	0.441 424	0.347 486	0.000 1	0.000 0
R600a	3.547 796	-0.536 573	0.683 133	-0.040 600	0.493 762	0.364 580	0.000 1	0.000 0
R1234yf	8.257 128	-2.860 413	5.667 190	-0.929 754	1.081 560	0.136 631	0.013 6	0.002 7
R717	0.026 528	1.090 392	-4.448 437	0.711 418	0.830 038	0.408 932	0.003 7	0.001 4
R744	9.692 858	-3.444 939	10.146 506	-1.367 068	0.980 889	0.370 613	0.001 9	0.000 7
R410A	12.120 103	-5.925 058	17.460 179	-2.639 738	1.028 530	0.150 401	0.007 0	0.003 2
R417A	9.489 277	-3.282 936	7.535 867	-0.914 314	1.185 480	0.257 790	0.000 9	0.000 3
R404A	8.346 442	-2.573 577	7.293 528	-0.732 451	1.193 600	0.414 529	0.004 4	0.000 8

表 9 饱和气体密度计算式(1)的系数
Tab.9 Density of saturated vapor(Equation 1)

制冷剂	$a_1/10^{-2}$	a_2	$a_3/10^3$	$a_4/10^6$	$a_5/10^{-1}$	$a_6/10$	$e/\%$	$s/\%$
R134a	-0.419 590	0.332 974	-0.944 240	1.041 525	0.586 191	5.372 064	0.39	0.13
R22	-0.327 941	0.275 827	-0.778 822	0.845 441	0.296 825	5.656 470	0.35	0.12
R32	-0.233 674	0.251 791	-0.712 408	0.750 776	-0.463 030	0.248 794	0.40	0.13
R123	-1.602 379	0.551 812	-1.355 865	1.752 233	10.806 277	3.896 456	0.31	0.10
R290	-0.300 757	0.248 943	-0.699 969	0.758 772	0.253 715	5.731 416	0.31	0.10
R600a	-0.582 251	0.343 457	-0.941 114	1.104 661	2.186 000	4.307 595	0.28	0.09
R1234yf	-0.313 203	0.269 686	-0.752 143	0.791 776	0.113 671	5.929 612	0.21	0.07
R717	-0.575 555	0.349 019	-0.953 935	1.105 358	1.972 574	4.356 544	0.28	0.09
R744	-0.201 899	0.220 340	-0.660 067	0.730 085	-0.187 384	2.553 450	0.04	0.01
R410A	-0.219 268	0.254 653	-0.722 724	0.760 922	-0.603 021	0.253 241	0.45	0.13
R417A	-0.349 230	0.311 257	-0.894 231	0.953 571	0.072 192	7.289 609	0.49	0.16
R404A	-0.224 799	0.263 100	-0.752 057	0.794 491	-0.626 534	0.225 560	0.50	0.15

表 10 和表 11 分别给出了各种制冷剂的饱和液体比定压热容和饱和气体比定压热容计算式(1)的系数,以及与 REFPROP 相比的相对误差绝对值的最大值 e 和标准差 s . 结果表明,采用式(1)拟合饱和液体比定压热容和饱和气体比定压热容的精度都很高,表中所列制冷剂的饱和液体比定压热容的最大误差仅为0.127%,而饱和气体比定压热容的最大误差为0.37%.

综上,本文模型的计算精度明显优于 Cleland 简

化模型^[4-6],与系数更多的隐式多项式模型^[7-9]相当. 此外,本文模型的函数形式简单,其平均计算速度与文献简化模型^[4-9]的计算速度相当,比 REFPROP 9.0提高了两个数量级以上.

3 结论

本文提出了制冷剂饱和热力性质的一种新的六系数通用简化计算模型. 与文献方法相比,该模型的

表 10 饱和液体比定压热容计算式(1)的系数

Tab.10 Constant-pressure specific heat of saturated liquid(Equation 1)

制冷剂	$a_1/10^{-3}$	$a_2/10^{-1}$	$a_3/10^2$	$a_4/10^5$	$a_5/10^{-2}$	a_6	$e/\%$	$s/\%$
R134a	1.023 804	-0.108 979	0.638 533	-0.896 668	1.228 661	-0.734 167	0.007	0.001 8
R22	2.047 500	-1.308 930	4.901 970	-5.952 323	0.747 675	-0.905 109	0.016	0.004 2
R32	2.094 149	-0.772 010	2.477 577	-2.437 765	0.981 205	-0.947 762	0.003	0.000 6
R123	1.236 944	-0.908 717	3.772 577	-5.542 114	2.971 059	-0.676 199	0.027	0.007 6
R290	2.175 768	-0.503 304	2.109 244	-1.223 941	0.988 423	-0.979 912	0.001	0.000 2
R600a	1.486 987	0.148 483	0.082 844	1.018 466	0.295 238	-1.271 175	0.002	0.000 5
R1234yf	1.351 182	-0.837 312	4.458 816	-6.373 167	0.559 686	-0.929 337	0.034	0.013 1
R717	-1.265 626	4.350 547	-14.562 926	14.428 984	9.378 172	-0.641 347	0.029	0.005 7
R744	-6.298 032	10.506 811	-46.138 786	67.658 603	0.673 236	-1.071 092	0.127	0.061 0
R410A	1.479 011	-0.052 991	-0.961 902	3.559 042	0.271 678	-1.194 467	0.054	0.031 4
R417A	1.576 014	-0.556 709	1.988 901	-1.823 158	0.357 788	-1.091 311	0.033	0.009 3
R404A	0.969 951	0.180 774	-1.044 427	2.473 919	0.408 395	-1.011 439	0.091	0.028 0

表 11 饱和气体比定压热容计算式(1)的系数

Tab.11 Constant-pressure specific heat of saturated vapor(Equation 1)

制冷剂	$a_1/10^{-3}$	$a_2/10^{-1}$	$a_3/10^2$	$a_4/10^5$	$a_5/10^{-2}$	a_6	$e/\%$	$s/\%$
R134a	0.477 744	-0.083 055	0.675 206	-0.122 647	0.361 129	-1.172 285	0.03	0.008
R22	0.494 389	-0.181 005	0.760 095	-0.302 954	0.555 006	-1.068 062	0.02	0.004
R32	0.599 827	-0.640 828	3.729 285	-5.512 458	1.844 459	-0.926 391	0.13	0.031
R123	0.068 935	0.338 240	-0.786 058	1.089 317	0.057 414	-1.497 137	0.01	0.002
R290	0.738 971	-0.077 406	1.104 024	-0.925 636	1.562 213	-0.972 993	0.03	0.008
R600a	0.639 373	0.132 889	0.299 722	0.731 476	0.805 571	-1.000 000	0.01	0.003
R1234yf	0.760 236	-0.898 678	4.882 764	-7.890 883	2.288 820	-0.692 254	0.06	0.036
R717	3.765 246	-2.128 675	5.357 565	-0.254 892	1.905 084	-1.262 980	0.04	0.011
R744	4.330 337	-4.696 994	18.644 963	-23.853 514	1.141 587	-1.069 668	0.11	0.033
R410A	-0.105 821	0.168 821	1.056 139	-2.591 451	1.073 575	-1.000 152	0.37	0.118
R417A	1.407 722	-1.431 672	6.640 984	-9.476 958	1.110 310	-0.889 667	0.06	0.021
R404A	0.236 657	0.025 360	0.880 629	-1.517 436	0.730 719	-0.993 765	0.14	0.058

函数形式对所有饱和热力性质都是通用的. 在更大的参数范围、特别是近临界点处该模型具备更高的拟合精度,对各类制冷剂的各種热力性质的最大拟合误差(与 REFPROP 9.0 相比)均小于±0.6%. 由于函数形式简单,计算速度平均比 REFPROP 9.0 提高两个数量级以上.

参考文献:

[1] 丁国良,张春路. 制冷空调装置仿真与优化 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
DING Guoliang, ZHANG Chunlu. Simulation and optimization of refrigeration and air conditioning appliances [M]. Beijing: Science Press, 2001.

[2] 丁国良,张春路. 制冷空调装置智能仿真 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
DING Guoliang, ZHANG Chunlu. Intelligent simulation of refrigeration and air conditioning appliances [M]. Beijing: Science Press, 2002.

[3] Lemmon E W, Huber M L, McLinden M O. NIST reference fluid thermodynamic and transport properties REFPROP 9.0 [DB]. Gaithersburg: NIST, 2010.

[4] Cleland A C. Computer subroutines for rapid evaluation of

refrigerant thermodynamic properties [J]. International Journal of Refrigeration, 1986, 9(6): 346.

[5] Cleland A C. Polynomial curve-fits for refrigerant thermodynamic properties: extension to include R134a [J]. International Journal of Refrigeration, 1994, 17(4): 245.

[6] 张春路,于兵,冯寅山,等. 碳氢制冷剂热力性质的快速计算 [J]. 流体机械, 1997, 25(11): 57.
ZHANG Chunlu, YU Bing, FENG Yinshan, et al. Fast calculation of thermodynamic properties of hydrocarbon refrigerants [J]. Fluid Machinery, 1997, 25(11): 57.

[7] 张春路,丁国良,李灏. 制冷剂饱和热力性质的隐式拟合方法 [J]. 工程热物理学报, 1999, 20(6): 673.
ZHANG Chunlu, DING Guoliang, LI Hao. An implicit curve-fitting method for refrigerant thermodynamic saturation properties [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1999, 20(6): 673.

[8] 张春路,丁国良,李灏. 制冷剂过热气体热力性质的隐式拟合方法 [J]. 工程热物理学报, 2000, 21(5): 533.
ZHANG Chunlu, DING Guoliang, LI Hao. An implicit curve-fitting method for thermodynamic properties of refrigerant gas [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2000, 21(5): 533.

[9] Ding G, Wu Z, Liu J, et al. An implicit curve-fitting method for fast calculation of thermal properties of pure and mixed refrigerants [J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(6): 921.