

基于集中参数模型的冷凝器稳态仿真改进算法

赵静姝¹, 黄 虎¹, 张忠斌¹, 戴亚东²

(1. 南京师范大学能源与机械工程学院, 江苏 南京 210042)
(2. 江苏永昇空调有限公司, 江苏 泰兴 225400)

[摘要] 根据目前冷凝器的稳态集中参数法仿真算法流程简化出一种改进的算法流程,新算法减少了迭代层数,降低了计算量,缩短了收敛时间,同时提高了程序的稳定性和健壮性. 将新算法应用于某壳管式水冷冷凝器的仿真计算中,仿真结果与实验结果的对比表明,新算法在简化仿真流程的同时,精度也能得到保证.
[关键词] 冷凝器,仿真,稳态,集中参数法,算法流程
[中图分类号] TB657; TK172 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2013)03-0040-05

An Improved Steady-state Simulation Algorithm Based on Lumped Parameter Model for Condensers

ZhaoJingshu¹, Huang Hu¹, Zhang Zhongbin¹, Dai Yadong²

(1. School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)
(2. Jiangsu Yongsheng Air Conditioning Co., Ltd., Taixing 225400, China)

Abstract: An improved simulation algorithm is proposed to simplify the steady-state lumped parameter model for condenser. In the improved algorithm, iterations, calculation amount and convergence time are reduced. Meanwhile, the stability and robustness of the program are improved. This improved algorithm can be applied in the simulation for a shell and tube water cooled condenser. Through the comparison of simulation result and experiment result, we can see that the improved algorithm is very accurate as well as succinct.
Key words: condenser, simulation, steady-state, lumped parameter, algorithm process

冷凝器是制冷空调装置的高温换热器,对空调冷凝器进行仿真计算,可以研究冷凝器的换热特性,预测冷凝器的工作性能,为产品设计提供依据,从而减少样机制作、节省开发成本、缩短开发周期^[1]. 从 20 世纪 80 年代以来,制冷空调系统仿真技术得到了迅速发展^[2],取得了大量的研究成果. Klein 建立了制冷系统主要部件的稳态集中参数模型^[3],Joll 等利用分段稳态集中参数模型对船舶冷藏箱制冷系统进行了仿真研究^[4],Chi 等采用动态集中参数法建立了制冷系统各部件的数学模型^[5],Mithraratne 等人则建立了制冷系统换热器的动态分布参数模型^[6]. 在国内,朱瑞琪等建立了制冷系统的多输入多输出模型^[7],丁国良等人研究了部件和系统仿真模型,并提出了智能仿真的概念,在国内率先完成了一套较为成熟的理论成果^[8~10]. 总的来说,制冷空调仿真技术经历了从稳态仿真到动态仿真、从集中参数法到分布参数法、从传统仿真到智能仿真的发展,其中稳态集中参数法因其计算量小、稳定性高、实用性强而得到广泛应用^[11~13].

笔者在对某单元式空调冷凝器进行稳态集中参数法仿真计算时发现,目前广泛使用的仿真流程可以进一步改进,以减少冗余计算,加快收敛速率. 笔者按照新流程编制了上述冷凝器的仿真程序,将仿真计算出的结果与实验数据进行了对比,结果表明误差均在 2.5% 以内,验证了新流程的可用性和准确性.

1 现有冷凝器稳态集中参数仿真算法流程分析

现有的冷凝器稳态集中参数仿真算法流程如图 1 所示^[8]. 该算法需要分别假设制冷剂出口过冷度和

冷却介质出口温度两个参数,然后对这两个假设值进行迭代计算才可以得出结果,双层迭代增加了程序编写的复杂度,影响了计算效率,降低了收敛速度,同时迭代层数的增加会导致误差的逐层传递,影响程序的稳定性与健壮性,甚至可能导致计算失败^[14].而笔者在对现有算法流程进行分析时发现,现有算法中迭代计算的制冷剂出口过冷度和冷却介质出口温度这两个参数并非相互独立,可以通过换热器两侧换热流体按流动焓差计算的换热量相等这个条件相互计算,只需假设一个参数就可以计算出另一个参数,不需要各自单独假设初值后迭代求解,同时现有算法的这两层迭代都是通过比较按流动焓差计算的换热量和按换热温差计算的换热量来迭代计算出换热流体的出口温度,迭代算法的核心思想和判据完全一致,将两层迭代合并为一层迭代只会减少冗余计算,不会降低算法的计算精度.

2 改进的冷凝器稳态集中参数仿真算法流程

笔者对现有冷凝器稳态集中参数仿真算法流程进行了改进,改进后的算法流程见图 2.从图中可以看出,改进后的算法流程的仿真方法与原算法几乎一致,仅将原有的两层迭代改为一层迭代,减少了冗余计算,提升了编程效率,加快了计算速度,提高了计算精度.

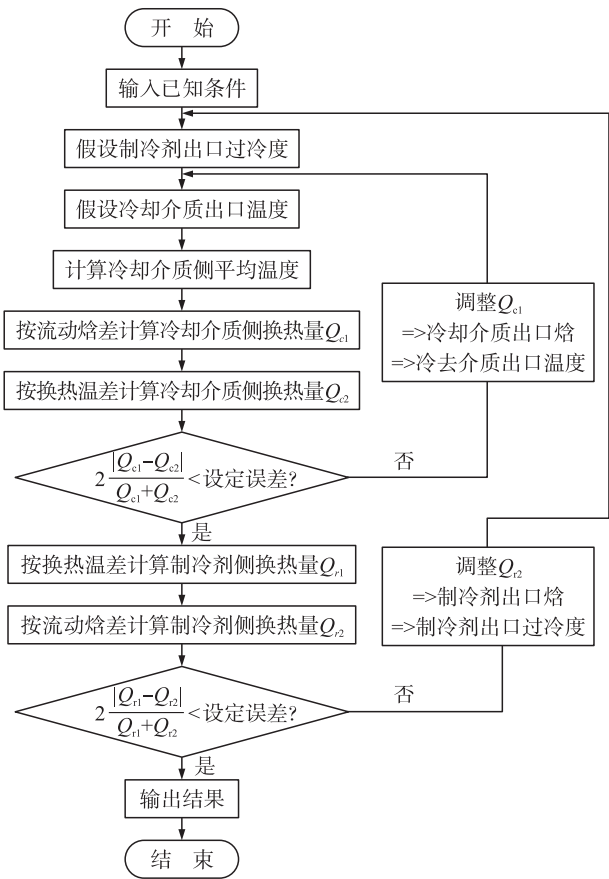


图 1 现有冷凝器稳态集中参数仿真算法流程图

Fig.1 The flow chart of original Steady-state Simulation Algorithm Based on lumped parameter model for condenser

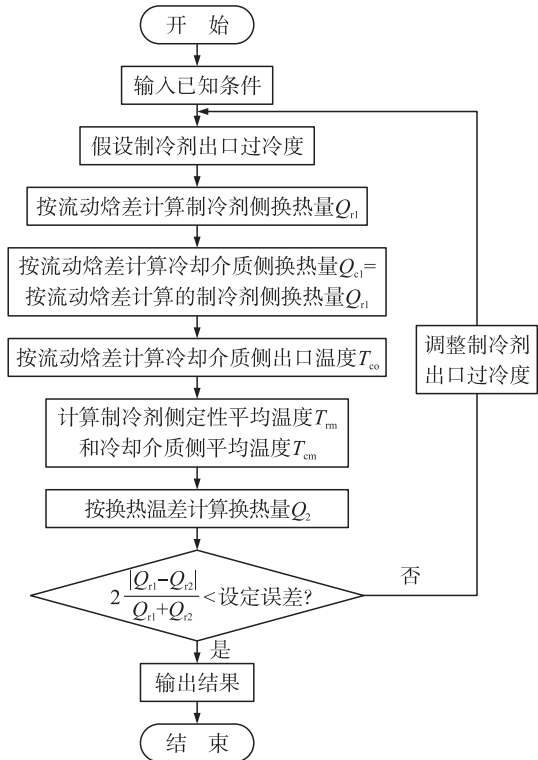


图 2 改进后冷凝器稳态集中参数仿真算法流程图

Fig.2 The flow chart of new Steady-state Simulation Algorithm Based on lumped parameter model for condenser

3 改进算法的应用

笔者使用 MATLAB 软件对某壳管式水冷冷凝器进行了仿真建模计算,并用实验数据验证了算法的可行性.

3.1 冷凝器仿真模型的建立

冷凝器仿真模型的输入参数为压缩机排气压力、压缩机排气温度、冷凝器制冷剂流量、冷凝器进水温度、冷凝器水流量;输出参数为冷凝器换热量、冷凝器制冷剂出口温度、冷凝器出水温度.

3.1.1 模型假设

- 冷凝器的稳态集中参数模型的建立主要基于以下假设^[8]：
- (1)冷凝器为逆流换热器(流程数为 4,可近似看作纯逆流^[15])；
 - (2)将管内水的流动视为一维流动；
 - (3)管壁热阻对换热器的换热效果影响不大,因此忽略管壁热阻.

3.1.2 物性计算

冷凝器使用的制冷剂物性可直接在 MATLAB 中调用某制冷剂物性计算软件提供的 m 文件获得. 而作为冷却介质的水的物性则可以使用文献[16]中的水物性计算方程,在 MATLAB 中编写计算程序并建立 m 文件以方便调用.

3.1.3 模型基本换热方程组

冷凝器稳态集中参数模型基本换热方程组.

制冷剂侧流动换热方程：

$$Q_r = m_r(h_{r,in} - h_{r,out}) = \alpha_r A(T_{rm} - T_{pipe}).$$

水侧流动换热方程：

$$Q_c = m_c(h_{c,out} - h_{c,in}) = \alpha_c A\left(T_{pipe} - \frac{T_{c,in} + T_{c,out}}{2}\right).$$

其中:制冷剂侧定性平均温度 T_{rm} 的定义见文献[1].

管内外换热平衡方程：

$$Q_r = Q_c.$$

制冷剂侧表面换热系数(式中符号的物理意义可参见文献[15]):

$$\alpha_r = 0.729 \left[\frac{\gamma_r g \lambda_{r,l}^3 \rho_{r,l}^2}{\mu_{r,l} d (T_{rm} - T_{pipe}) n_m} \right]^{1/4}.$$

水侧表面换热系数^[4]：

$$\alpha_c = 0.23 Re^{0.8} Pr^{0.4} \frac{\lambda_c}{d}.$$

式中: Q 为换热量/ W ; m 为质量流量/(g/s); h 为比焓/(kJ/kg); α 为表面换热系数/[$W/(m^2 \cdot K)$]; A 为换热面积/ m^2 ; T 为温度/ K ; Re 为雷诺数; Pr 为普朗特数; λ 为导热系数/[$W/(m \cdot K)$]; d 为换热管管径/ m ; 下标 r 表示制冷剂侧, c 表示水侧, in 表示进口, out 表示出口, m 表示平均, $pipe$ 表示换热管, l 表示液相.

3.2 冷凝器实验情况介绍

实验台在南京师范大学人工环境实验室内搭建而成,实验室各项仪器的精度均能达到 GB17758—2010- T 《单元式空气调节机》附录 A(单元式空气调节机制冷(热)量的试验方法)的要求. 实验样机为某公司单元式空调产品,充注制冷剂为 R404A,冷凝器为某壳管式水冷冷凝器,具体结构参数如表 1 所示. 实验过程中,实验室监测软件可自动测量并计算输出冷凝器进出水温度、水流量等实时数据,另外,本文作者还设置了压缩机吸气、压缩机排气、冷凝器进口、冷凝器出口 4 个制冷剂压力和温度测点.

表 1 冷凝器结构参数
Table 1 Structural parameters of condenser

换热管数量	换热管长度/mm	换热管管径/mm	换热管型式	管程流程数	筒体直径(mm)
102	1 050	$\phi 16 \times 2$	双面强化换热管	4	$\phi 299 \times 8$

本文作者共对 9 种工况下冷凝器的运行情况进行了测试,测试工况点设置见表 2.

表 3 列出了冷凝器仿真模型所需输入参数的测试数据,其中,制冷剂质量流量难以准确测量,可根据压缩机吸气温度、压力和排气压力,使用压缩机选型软件计算得出.

表 2 测试工况点
Table 2 Experimental operating points

工况点	蒸发器进风			冷凝器进水	
	干球温度/℃	湿球温度/℃	风量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	进水温度/℃	冷却水流量
1	27	19		19	
2	27	19		23	
3	27	19		26	
4	27	19		30	
5	26	21.2	6 300	32	5℃温差
6	26	21.2		36	
7	23	18		36	
8	29	25		36	
9	32	27		36	

表 3 冷凝器仿真模型输入参数实测数据
Table 3 Experimental data of condenser simulation input parameters

工况点	排气压力/kPa	排气温度/K	制冷剂流量/(g/s)	进水温度/K	水流量/(g/s)
1	1 268.82	334.34	402.15	292.19	3 188.61
2	1 385.22	335.49	413.66	296.22	3 210.56
3	1 476.91	335.98	412.95	299.12	3 196.39
4	1 609.28	338.48	421.77	303.09	3 312.50
5	1 704.80	343.19	425.61	305.10	3 123.06
6	1 869.14	348.45	433.34	309.07	3 069.72
7	1 823.26	349.44	379.24	309.03	3 086.39
8	1 914.72	349.51	493.38	309.19	3 167.50
9	1 916.93	350.10	517.74	309.14	3 299.17

3.3 仿真结果与实验数据的对比

按照上文的仿真算法流程对冷凝器进行了 MATLAB 仿真编程,此处因换热系数计算方程的特殊性,还需迭代计算换热管壁温 T_{pipe} 方能求得按换热温差计算的换热量 Q_2 (见图 2). 计算过程中,制冷剂出口过冷度初值设为 2℃,换热管壁温 T_{pipe} 的初值设为制冷剂侧定性平均温度 T_{m} 与水侧平均温度 T_{cm} 的算术平均值,循环判定条件 $2 \frac{|Q_{\text{r1}}-Q_2|}{Q_{\text{r1}}+Q_2}$ 的计算结果小于 1% 时判定收敛. 将 9 种工况下仿真结果与实验数据进行对比发现误差在均在 2.5% 以内,这说明了改进算法不仅能简化仿真流程,也能保证仿真精度,具有良好的适用性. 表 4 列出了仿真结果与实验数据的对比情况.

表 4 冷凝器仿真结果与实验数据的对比
Table 4 Contract between simulation results and experimental results of condenser

工况	冷凝器换热量/kW			制冷剂出口温度/℃			出水温度/℃		
	实验值	仿真值	误差/%	实验值	仿真值	误差/%	实验值	仿真值	误差/%
1	73.53	74.73	1.63	296.55	294.59	-0.66	297.68	297.81	0.04
2	73.11	74.59	2.02	300.41	297.96	-0.81	301.65	301.79	0.05
3	70.88	72.54	2.34	302.95	300.48	-0.82	304.40	304.55	0.05
4	70.85	69.50	-1.90	305.92	307.86	0.64	308.19	308.12	-0.02
5	71.31	71.61	0.41	308.43	308.23	-0.07	310.54	310.59	0.02
6	71.95	70.37	-2.20	311.87	314.02	0.69	314.65	314.56	-0.03
7	64.30	62.92	-2.15	310.50	312.98	0.80	313.99	313.91	-0.03
8	81.18	81.96	0.95	313.04	312.23	-0.26	315.30	315.39	0.03
9	85.10	85.57	0.56	313.41	313.10	-0.10	315.29	315.36	0.02

4 结论

现有冷凝器稳态集中参数仿真算法存在流程过于繁琐的问题,本文提出了一种改进的简化流程,使用改进流程进行的某冷凝器仿真计算结果与实验数据的误差小于 2.5%,仿真流程大大简化,而精度也远远能够满足仿真需要,证明了该改进流程的可行性.

[参考文献](References)

- [1] 王浩,刘何清,鲁孟群,等. 仿真技术在小型空气冷凝器设计中的应用[J]. 制冷与空调,2011,25(4):323-327.
Wang Hao,Liu Heqing,Lu Mengqun,et al. The using of simulation technique in the design of small-sized air condenser[J]. Refrigeration and Air Conditioning,2011,25(4):323-327. (in Chinese)
- [2] 周伟,曲云霞,方肇洪. 冷凝器换热模型与仿真[J]. 山东建筑工程学院学报,2003,18(1):18-22.
Zhou Wei,Qu Yunxia,Fang Zhaohong. Modeling and simulation of the heat pump condenser[J]. Journal of Shandong Institute of Architecture and Engineering,2003,18(1):18-22. (in Chinese)
- [3] Klein S A. Design consideration for refrigeration cycles[J]. International Journal of Refrigeration,1994,15(2):181-185.
- [4] Joll P G,Tso C P,Wong Y W,et al. Simulation and measurement on the full-load performance of refrigeration system in a shipping container[J]. International Journal of Refrigeration,2000,23(2):112-126.
- [5] Chi J,Didion D. Simulation model of the transient performance of a heat pump[J]. International Journal of Refrigeration,1982,5(3):176-184.
- [6] Mithrathat P,Wuelysundera N E,Bong T Y. Dynamic simulation of a isostatically controlled counter-flow evaporator[J]. International Journal of Refrigeration,2000,23(2):174-189.
- [7] 朱瑞琪,谢家泽,吴业正. 制冷系统的综合优化控制模型[J]. 西安交通大学学报,2002,36(5):461-464.
Zhu Ruiqi,Xie Jiaze,Wu Yezheng. Model of refrigeration system for optimizing control[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2002,36(5):461-464. (in Chinese)
- [8] 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. The Simulation and Optimization of the Refrigerating and Air-conditioning Equipments[M]. Beijing:Science Press,2001. (in Chinese)
- [9] 丁国良,张春路. 制冷空调装置智能仿真[M]. 北京:科学出版社,2001.
Ding Guoliang,Zhang Chunlu. Intelligent Simulation of Refrigeration and Air Conditioning Appliances[M]. Beijing:Science Press,2001. (in Chinese)
- [10] 顾中华. 空调器制冷系统性能仿真研究与软件开发[D]. 南京:南京理工大学计算机科学与技术学院,2002.
Gu Zhonghua. Performance simulation research and software development of air conditioning and refrigeration system[D]. Nanjing:Nanjing University of Science and Technology School of Computer Science and Technology,2002. (in Chinese)
- [11] 王金锋,陶乐仁,王永红,等. 家用空调冷凝器的仿真与实验研究[J]. 低温与超导,2008,36(2):47-50.
Wang Jinfeng,Tao Leren,Wang Yonghong,et al. Study on simulation and experiment of room air conditioner condenser[J]. Cryogenics and Superconductivity,2008,36(2):47-50. (in Chinese)
- [12] 谢淑萍,金苏敏,汤新敏. 板式冷凝器的稳态仿真模型[J]. 流体机械,2009,37(4):83-85.
Xie Shuping,Jin Sumin,Tang Xinmin. Steady model of simulation on plate condenser[J]. Fluid Machinery,2009,37(4):83-85. (in Chinese)
- [13] 张娟,张宝怀. 过冷度对直热式空气源热泵热水器性能的影响[J]. 建筑热能通风空调,2010,29(1):13-15.
Zhang Juan,Zhang Baohuai. The sub-cooling degree influence on performance of instantaneous air-source heat pump water heater[J]. Building Energy and Environment,2010,29(1):13-15. (in Chinese)
- [14] 张春路. 论制冷系统仿真技术的通用性与适用性[C]//走中国创造之路——2011 中国制冷学会学术年会. 南京:中国制冷学会,2011:1-5.
Zhang Chunlu. On flexibility and applicability of refrigeration system modeling and simulation[C]//The China creative road—2011 Chinese Association of Refrigeration Symposium. Nanjing:Chinese Association of Refrigeration,2011:1-5. (in Chinese)
- [15] 杨世铭,陶文栓. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社,2006:246-306.
Yang Shiming,Tao Wenshuang. Heat Transfer Theory[M]. Beijing:Higher Education Press,2006:246-306. (in Chinese)
- [16] 王双成,王倩. 水的物理性质的计算[J]. 河南电大,2000(1):31-32.
Wang Shuangcheng,Wang Qian. Calculation of physical properties of water[J]. Henan Radio and TV University,2000(1):31-32. (in Chinese)

[责任编辑:刘健]