

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2017.03.011

大型客机辅助冷却系统稳态仿真模型

A Steady-state Simulation Model of Auxiliary Cooling System for Airliner

吴静玮¹ 孙浩然¹ 胡海涛¹ 李革萍² 吴成云² 吕中原²

WU Jingwei¹ SUN Haoran¹ HU Haitao¹ LI Geping² WU Chengyun² LÜ Zhongyuan²

(1. 上海交通大学, 上海 200240; 2. 上海飞机设计研究院, 上海, 201210)

(1. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

摘要:

为指导大型客机辅助冷却系统的设计, 针对机载蒸发循环和液体冷却循环相结合的辅助冷却系统, 开发了系统稳态仿真模型。建立了适用于系统仿真的压缩机、换热器、电子膨胀阀等部件模型; 对系统各单元之间的相互关系进行分析与解耦, 建立了适用的系统求解算法。对系统性能随制冷剂充注量的变化趋势进行了预测分析, 分析结果表明, 辅助冷却系统稳态仿真模型对系统性能变化趋势的预测符合理论分析结果, 模型可靠。

关键词: 大型客机; 辅助冷却系统; 稳态仿真; 模型

中图分类号: V245.3

文献标识码: A

[Abstract] In order to guide the design of the auxiliary cooling system, a steady-state simulation model of the auxiliary cooling system for airliner consisting of airborne vapor cycle and liquid cooling cycle was developed. The component model of compressor, heat exchanger and electronic expansion valve suitable for system simulation was established; the relationships among the units of the system were analyzed and decoupled, and an appropriate system solving algorithm is established among. The performance of the system with the variation of refrigerant change was predicted and analyzed. The analysis results show that the prediction of the auxiliary cooling system performance accords with the theoretical analysis results by the steady-state simulation model of the auxiliary cooling system, and the model is reliable.

[Keywords] airliner; auxiliary cooling system; steady-state simulation; model

0 引言

辅助冷却系统是为客机电子设备、餐车厨房等用冷单元提供冷量的系统, 是民用客机商务运行的关键。随着客机性能的不不断提升及电子元器件集成化的迅速发展, 机载电子设备及用冷单元不断增多、功率越来越大的同时体积却不断缩小, 导致热载荷急剧上升, 控温需求日益提升, 使得辅助冷却系统的设计更为重要^[1-3]。

对于大型客机的辅助冷却系统, 随着多电化的发展, 机载电子设备散热量急剧增大, 且热流密度

不断升高, 风冷形式已经无法满足设备的冷却需求^[4]。目前国外先进的机载辅助冷却系统较多采用液体冷却系统和蒸发循环系统相结合的方式进行冷却降温, 例如, 美国的 F-22 采用机载蒸发循环和液体冷却系统相结合的一体化综合能量管理系统 (ECS/TMS)^[5-9], A-50、E-3C 和 SU-27 等也都采用了液冷系统。主要原因是液体的换热系数和比热均比空气大^[3], 具有较高的冷却效率和稳定工作特性。对于蒸发循环和液体冷却循环组成的辅助冷却系统, 一般由冷量产生单元、冷量运输单元和用冷单元三部分组成, 用冷单元通过冷却液进行冷

量运输,其组成与原理如图1所示。

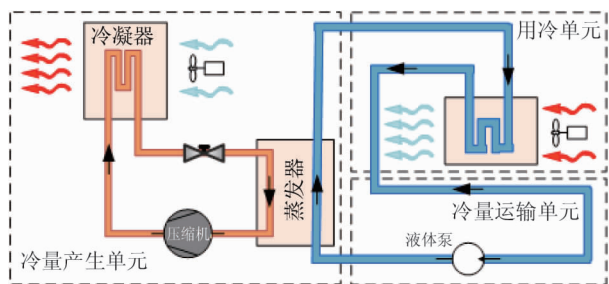


图1 大型客机辅助冷却系统结构示意图

Upadhy 等人^[10]对应用于高热流密度电子设备的液体冷却系统进行了实验研究,结果表明该系统具有冷却效率高、噪声小且造价低等优点;朱春玲和宁献文^[3]在提出的新型飞机液冷环控系统基础上,通过实验确定了冷板换热器的 Q-p 性能曲线和流量分配实验中限流环的尺寸。由于大型客机的辅助冷却系统内部结构复杂,采用传统的实验方法费时费力,难以满足大型客机辅助冷却系统的设计需求,计算机仿真技术已成为系统设计的主要方法^[11]。

采用计算机仿真技术设计大型客机的辅助冷却系统的关键是开发能够预测系统稳态运行性能的仿真模型。Chang J Y 等人^[12]通过数值仿真技术,分析了微通道液冷系统中不同类型泵、流量等对电子设备温度分布的影响;Tybrandt^[13]研究了液冷系统中不同控制参数对系统性能的影响;南国鹏和王浚^[14]在流程图的基础上对定工况液冷系统采用动态仿真,并对比实测数据验证了仿真模型的可靠性。目前的计算机仿真大多以液冷系统和部件建模为主,还没有针对大型客机辅助冷却系统建立稳态仿真模型。

本文将针对典型大型客机辅助冷却系统建立稳态仿真模型,并对模型的可靠性进行验证。

1 部件数学模型

建模对象为图1所示系统中的各单元主要部件,冷量产生单元包含压缩机、电子膨胀阀和换热器,其中换热器类型主要为板翅式换热器。

1.1 压缩机模型

对于大型客机辅助冷却系统仿真用的压缩机模型,主要是要建立压缩机的流量与功率、蒸发器和冷凝器的关系,以及计算出其他影响装置性能的

参数,如排气温度、溶解制冷剂质量等^[15]。

压缩机内制冷剂流量的计算模型^[16]见式(1):

$$\dot{m} = \frac{\dot{V}}{v_i} f \left(a + b \frac{p_c}{p_e} \right) \quad (1)$$

式中,变量 \dot{m} 为质量流量,单位为 kg/s; \dot{V} 为压缩机气缸容积,单位为 m^3/rev ; f 为频率,单位为 Hz; v 为吸气比容,单位为 m^3/kg ; p 为压力,单位为 kPa; a 、 b 为拟合系数。角标 e 代表蒸发器, c 代表冷凝器。

压缩机功率的计算模型^{[15][17]}见式(2)、式(3):

$$W_e = c + d \dot{W}_{th} \quad (2)$$

$$\dot{W}_{th} = \dot{m} \cdot p_e \cdot v_i \cdot \left(\frac{n}{n-1} \right) \left[\left(\frac{p_c}{p_e} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad (3)$$

式中, c 为电机的摩擦功率,单位为 W; d 为指示效率; n 为多变指数;角标 th 代表理论值。

将压缩机看成仅有一个单结点集中温度 T_{com} , 由能量方程:

$$Q_1 = \pi D_h^2 [\alpha_1 (T_{com} - T_{ar}) + \epsilon \sigma (T_{com}^4 - T_{ar}^4)] \quad (4)$$

$$Q_2 = N_{in} - m_{com} (h_{out} - h_{in}) \quad (5)$$

$$Q_1 = Q_2 \quad (6)$$

式中, Q_1 为压缩机壳体与近壳体环境 T_{ar} 之间的换热, Q_2 为内部生成热; D_h 为压缩机的当量球体直径; α_1 为压缩机壳体与近壳体环境的换热系数; ϵ 为压缩机壳体的黑度; 玻尔兹曼常数 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$; 下标 in, out 分别指压缩机机壳的进出口状态。

排气温度:

$$T_d = T_{com} \quad (7)$$

压缩机内的制冷剂分布在冷冻油中、储液器内和壳体空腔内,制冷剂质量的计算见式(8):

$$m_r = m_{r_{oil}} + m_{r_{shell}} + m_{r_{accum}} \quad (8)$$

式中, m_r 为压缩机内的制冷剂总质量; $m_{r_{oil}}$ 为溶解在冷冻油中的制冷剂质量,由式(9)计算; $m_{r_{shell}}$ 为壳体空腔中的制冷剂质量,由式(10)计算; $m_{r_{accum}}$ 为储液器中的制冷剂质量,由式(11)计算。

$$m_{r_{oil}} = \frac{s}{1-s} \cdot m_{oil} \quad (9)$$

$$m_{r_{shell}} = \frac{1}{v_{out}} \cdot V_{shell} \quad (10)$$

$$m_{r_{accum}} = \frac{1}{v_{in}} \cdot V_{accum} \quad (11)$$

式中, s 为冷冻油中的制冷剂溶解度^[18]; T_{com} 为压缩机壳体温度; P_c 为冷凝压力; V_{shell} 为壳体空腔容

积; V_{accum} 为储液器内容积; v_{in} 为进口制冷剂比体积; v_{out} 为出口制冷剂比体积。

1.2 换热器模型

对于大型客机辅助冷却系统仿真用的板翅式换热器模型,主要是要建立制冷剂与冷却液、空气侧的关系,以及计算出其他影响系统性能的参数,如制冷剂出口温度、制冷剂充注量、空气出口温度、换热量等。

冷却液侧控制方程:

$$Q_l = \sum_{j=1}^N \dot{m}_{l,j} (h_{l,j,in} - h_{l,j,out}) = \sum_{j=1}^N k_{l,j} F_{l,j} (T_{l,j} - T_{w,j}) \quad (12)$$

制冷剂侧控制方程:

$$Q_r = \sum_{j=1}^N \dot{m}_{r,j} (h_{r,j,in} - h_{r,j,out}) = \sum_{j=1}^N k_{r,j} F_{r,j} (T_{r,j} - T_{w,j}) \quad (13)$$

能量平衡方程:

$$Q_r = Q_l \quad (14)$$

式中,变量 Q 为换热量, K 为换热系数, F 为换热面积, T 为温度, h 为焓值, \dot{m} 为质量流量;脚标 j 为 S 相区编号(1:过热,2:两相,3:过冷), N 为相区个数(1~3), r 为制冷剂, l 为冷却液, w 为流道壁面, in 为进口, out 为出口, h 为焓差, ex 为换热。

制冷剂质量计算公式如下:

$$m = \sum_{j=1}^N m_j = \sum_{j=1}^N \rho_j L_j A_j \quad (15)$$

式中, L 为相区长度; ρ 为制冷剂密度; A 为相区横截面积。

1.3 电子膨胀阀模型

对于大型客机辅助冷却系统仿真用的电子膨胀阀模型,主要是要建立其与冷凝器和蒸发器的关系,以及计算出其他影响系统性能的参数,如制冷剂流量、制冷剂出口状态等。

由于电子膨胀阀与外部环境的换热面积积极小、且其内部没有能量传递,因此可将系统中的电子膨胀阀看做绝热元件,即制冷剂的节流过程为等焓节流过程:

$$h_{out} = h_{in} \quad (16)$$

流量特性可以采用经典水力公式来计算:

$$\dot{m} = C_D A \sqrt{2\rho(p_{in} - p_{out})} \quad (17)$$

式中, \dot{m} 为制冷剂流量; C_D 为流量系数; A 为阀的流通面积; ρ_{in} 为进口制冷剂的密度; p_{in} 为制冷剂

进口压力; p_{out} 为制冷剂出口压力; h_{in} 为制冷剂进口焓值; h_{out} 为制冷剂出口焓值。

2 系统求解算法

2.1 冷量产生单元求解算法

对于冷量产生单元的求解,本文采用基于质量引导的解耦求解算法^[19],如图2所示。具体步骤如下所述。

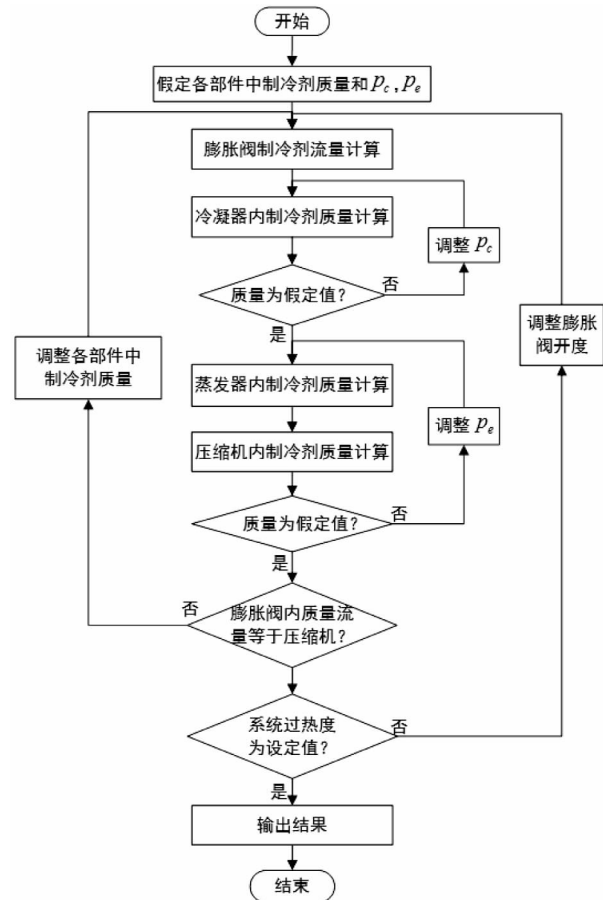


图2 冷量产生单元仿真算法图

- 1) 假定各部件中的制冷剂质量,假定冷凝压力 P_c 、蒸发压力 P_e ;
- 2) 计算此工况下的电子膨胀阀流量;
- 3) 计算冷凝器中含有的制冷剂质量;
- 4) 判断冷凝器中制冷剂质量的计算值是否等于假定值,若是,则转入步骤5),否则,调整 P_c ,转入步骤3);
- 5) 计算蒸发器中含有的制冷剂质量;
- 6) 计算压缩机中含有的制冷剂质量;
- 7) 判断蒸发器和压缩机中制冷剂质量的计算

值是否等于假定值,若是,则转入步骤8),否则,调整 P_c ,转入步骤5);

8)判断压缩机质量流量是否等于电子膨胀阀质量流量,若是,则转入步骤9),否则,调整各部件中的制冷剂质量,转入步骤2);

10)判断系统过热度的计算值是否等于设定值,若是,输出结果,否则,调整电子膨胀阀开度,重复步骤2)~10)。

2.2 机载辅助冷却系统求解算法

辅助冷却系统中冷量产生单元与用冷单元两部分互相耦合,系统模型需要建立各部分之间的关系,通过解耦计算求得系统的性能。仿真流程如图3所示,具体步骤如下:

1)假定用冷单元冷却液出口温度 T_{out} ;

2)计算冷量产生单元,得到冷却液进入用冷单元的温度 T'_{in} ;

3)计算用冷单元,得到用冷单元的冷却液出口温度 T'_{out} ;

4) T'_{out} 是否等于 T_{out} ,若是,输出结果,否则,更新参数 T_{out} ,重复步骤2)~4)。

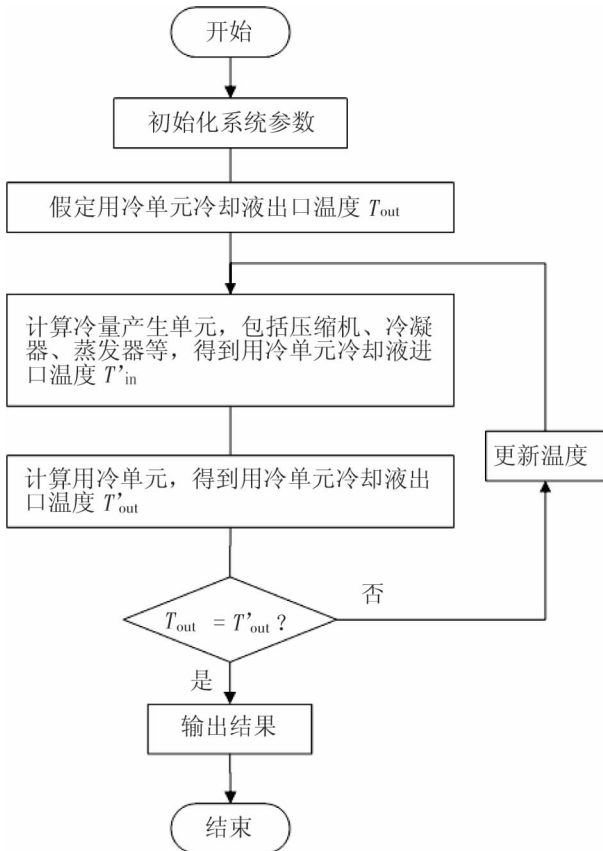
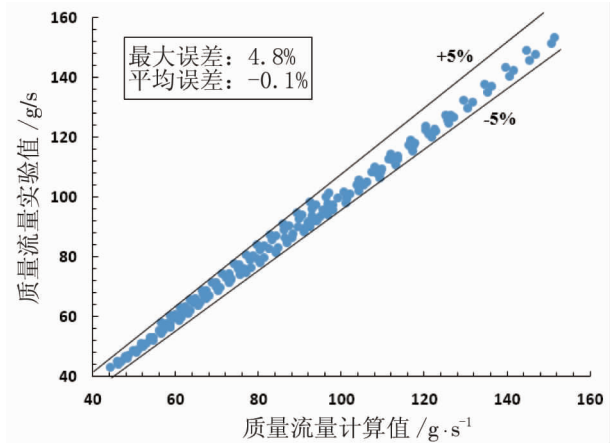


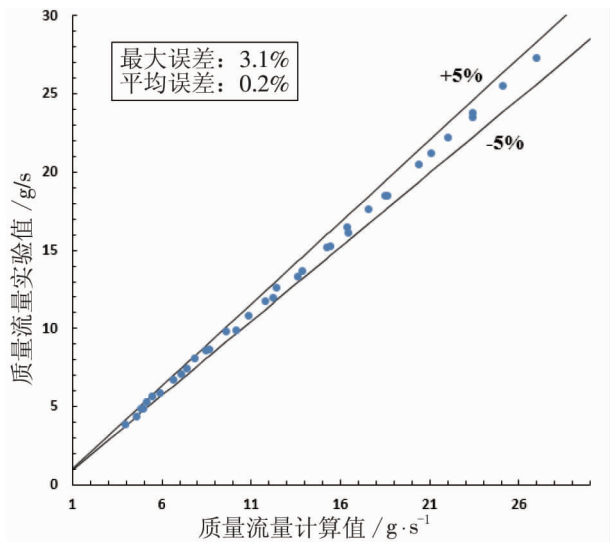
图3 机载辅助冷却系统模型算法图

3 模型可靠性验证

本文采用已有的辅助冷却系统的部件实验数据对部件模型进行精度验证,压缩机和电子膨胀阀模型质量流量的计算值与实验数据对比如图3所示。



(a) 压缩机模型精度验证



(b) 电子膨胀阀模型精度验证

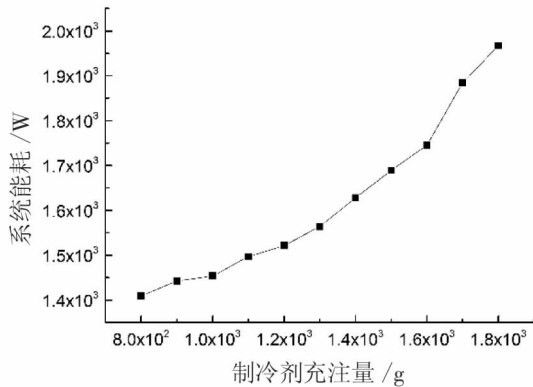
图3 关键部件模型精度验证

从图3中可以看出,关键部件模型质量流量的仿真最大误差和平均误差皆在5%以内,模型精度良好。

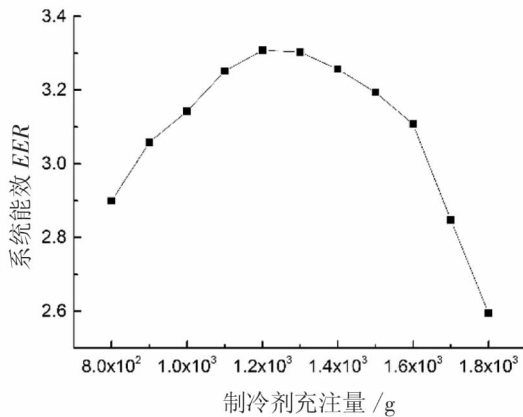
由于缺乏大型客机辅助冷却系统的实验数据,本文采用趋势合理性分析对模型可靠性进行验证。

系统能耗随制冷剂充注量的变化曲线如图4(a)所示。从图中可以看出,系统能耗随着制冷剂充注量的增加而一直升高。这是由于制冷剂充注

量的增加将使冷凝压力升高且制冷剂质量流量增加,从而导致压缩机的能耗增加,系统能耗随之增加。



(a) 制冷剂充注量对系统能耗的影响



(b) 制冷剂充注量对系统能效的影响

图4 系统参数随制冷剂充注量的变化曲线

系统能效 EER 随制冷剂充注量的变化曲线分别如图4(b)所示。从图中可以看出,系统能效随着制冷剂充注量的增加而先增加后减小。这是由于系统存在最优充注量,当偏离最优充注量时,系统能效会降低,故呈现先增加后减小的趋势。

从图3中可以看出,模型对于系统能耗和能效 EER 的计算趋势符合理论分析结果,模型可靠。

4 结论

1) 本文建立了大型客机辅助冷却系统的部件仿真模型及系统求解算法,能够预测系统稳态运行性能;

2) 本文模型对于客机辅助冷却系统性能变化

趋势的预测符合理论分析结果,模型可靠。

参考文献:

- [1] 高峰,袁修干. 高性能战斗机燃油热管理系统[J]. 北京航空航天大学学报, 2009 (11): 1353 - 1356.
- [2] Steinberg D S. Cooling techniques for electronic equipment [J]. New York, Wiley-Interscience, 1980: 387.
- [3] 朱春玲, 宁献文. 用于机载大功率电子设备的新型液冷环控系统研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2005, 37 (2): 203 - 207.
- [4] 行艳红, 齐社红, 陶小将, 等. 基于 Matlab 的液体冷却系统仿真与试验验证[J]. 航空工程进展, 2015, 6(2): 189 - 194.
- [5] Im Sprouse. F-22 environmental control System/thermal management fluid transport optimization [R]. SAE Paper, 2000 -01 -2266, 2000.
- [6] Ghanekar M. Vapor cycle system for the F-22 raptor[R]. SAE Technical Paper, 2000.
- [7] Ashford R, Brown S. F-22 Environmental Control System/Thermal Management System (ECS/TMS) Flight Test Program-Downloadable Constants, an Innovative Approach [R]. SAE Technical Paper, 2000.
- [8] Baird D, Ferentinos J. Application of MIL-C-87252 in F-22 liquid cooling system[R]. SAE Technical Paper, 1998.
- [9] Lui C W, Lee C K, Schwan E. Integrated Environmental Control System and Liquid Cooling System for F/A-18 E/F Aircraft[R]. SAE Technical Paper, 1995.
- [10] Upadhyaya G, Munch M, Zhou P, et al. Micro-scale liquid cooling system for high heat flux processor cooling applications [C]//Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 2006 IEEE Twenty-Second Annual IEEE. IEEE, 2006: 116 - 119.
- [11] 陈强, 孙建红, 张书晔, 等. 机载多支路液体冷却系统仿真研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2016, 48(3): 389 - 395.
- [12] Chang J Y, Park H S, Jo J I, et al. A system design of liquid cooling computer based on the micro cooling technology [C]//Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronics Systems, 2006. ITherm06. The Tenth Intersociety Conference on. IEEE, 2006: 157 - 160.
- [13] Tybrandt O. Distribution of cooling to avionics[J]. 2012.
- [14] 南国鹏, 王浚. 基于流程图的飞机液冷系统组态建模及仿真[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(4): 714 - 716.
- [15] 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.
- [16] 孙浩然, 任滔, 丁国良, 宋吉, 高屹峰. 一种产品数据交

互式的变频压缩机理论模型[J]. 制冷学报,2015,36(03): 73 - 78.

[17] Li W. Simplified steady-state modeling for variable speed compressor[J]. Applied thermal engineering, 2013, 50(1): 318 - 326.

[18] 林恩新,丁国良,赵丹,胡海涛. 基于双膜理论润滑油溶解制冷剂质量计算模型[J]. 流体机械,2011,39(09):75 - 77.

[19] 孙浩然,任滔,李智强,等. 结合用户数据的空调器仿真平台构建[J]. 制冷技术, 2014, 34(4): 31 - 37.

作者简介:

胡海涛 男,博士,副教授、博导。主要研究方向:制冷系统仿真、相变流动与强化传热。Tel:021 - 34207062, E-mail: huhaitao2001@sjtu.edu.cn