

文章编号:0253-4339(2019)06-0078-04
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2019.06.078

适用于制冷系统泄漏探测的制冷剂质量计算模型

李 浩¹ 孙浩然¹ 胡海涛¹ 吴成云² 王旭阳² 吕中原²

(1 上海交通大学制冷与低温工程研究所 上海 200240; 2 上海飞机设计研究院 上海 201210)

摘 要 本文提出一种适用于制冷系统泄漏探测的制冷剂质量计算模型。通过该模型可以实时计算出制冷系统内部各部件内的制冷剂质量,并实现对制冷系统的泄漏探测。在制冷剂质量计算模型中,开发了基于温度信号进行相区划分的换热器分区制冷剂质量计算模型,提出了基于理论和显式表达式的压缩机及连接管路的制冷剂质量计算模型。验证结果表明,该模型对制冷剂质量的最大计算误差为 3.18%。

关键词 制冷系统;泄漏探测;制冷剂质量

中图分类号:TB61⁺2;TP391.9

文献标识码:A

Calculation Model of a Refrigerant Mass for Leak Detection in a Refrigeration System

Li Hao¹ Sun Haoran¹ Hu Haitao¹ Wu Chengyun² Wang Xuyang² Lü Zhongyuan²

(1. Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China; 2. Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai, 201210, China)

Abstract A leakage monitoring method in a refrigeration system based on a theoretical model of refrigerant charge is proposed. In this method, a theoretical model based on a temperature signal is developed, and the refrigerant mass in each component of the refrigeration system can be calculated and the leakage in the refrigeration system can be monitored. For the theoretical model of refrigerant charge, a division criterion of control volumes and governing equation of the phase zone are established using the multi-zone method for the heat exchanger. A temperature-based calculation model of refrigerant mass in the heat exchanger is developed; the refrigerant mass models for the compressor and the connecting pipe are developed by establishing theory-based explicit equations. The validation results show that the maximum deviation is 3.18%.

Keywords refrigeration system; leakage monitoring; refrigerant mass

制冷空调产品随着使用年限的增加,系统内的制冷剂可能会发生泄漏,直接影响制冷系统的工作性能^[1]。制冷剂泄漏 10%,产品性能最多可下降 27%^[2-4]。对于飞机等民航领域的制冷系统,其电子设备功率不断提高,导致电子设备的工作温度不断上升^[2],制冷剂泄漏会导致电子设备无法冷却^[5],可能造成机组停机等严重后果^[6-7]。因此,为了避免因制冷剂泄漏引起的系统故障,需要针对飞机等民航领域的制冷系统制定制冷剂泄漏探测方法^[8]。

已有的制冷剂泄漏探测方法主要为基于数据融合的方法,包括基于神经网络^[9]、支持向量机^[10]等。该类方法通过采集大量数据、模型学习进行制冷剂泄漏的分类判断。基于数据的监测方法需要较大的数据量及较好的超参数选择才能建立误差较低的模型^[11]。而对于实际故障运行数据少、数据获取代价

高等特定领域制冷系统,可获得的数据集较小,已有方法无法满足上述需求。

本文建立了用于制冷系统制冷剂泄漏探测的制冷剂质量计算模型,并对模型进行验证。

1 基于模型的制冷剂泄漏探测方法

本文提出了基于制冷剂充注量理论模型的制冷系统泄漏探测方法,通过建立各部件制冷剂充注量的理论模型,根据采集到的温度信号进行系统内制冷剂充注量的实时计算,从而判断制冷系统是否发生泄漏。在实际系统中可在各部件的进出口及换热器沿程布置温度测点,以获取仿真计算所需的温度信号,测点布置如图 1 所示。

在系统运行中,可根据测量得到的温度信号实时计算出系统内的制冷剂充注量;通过对比当前制冷剂

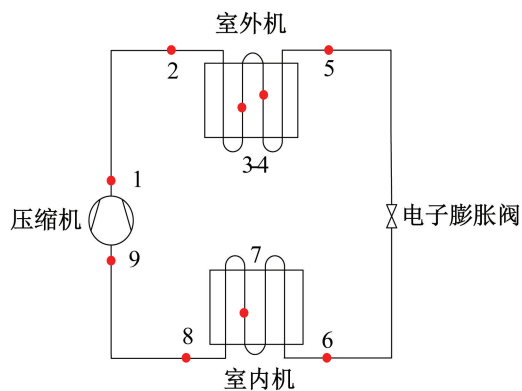


图 1 制冷系统温度测点布置

Fig.1 Temperature test points layout of refrigeration system

总质量与系统初始充注量,即可判断系统是否发生制冷剂泄漏。基于模型的制冷剂泄漏探测流程如图 2 所示。

当制冷剂充注量计算值相比系统初始充注量变化超过设定阈值时(一般可取 5%),判断制冷系统发生制冷剂泄漏。具体判断依据如下:

$$\left| 1 - \frac{\sum m_i}{m_{\text{充}}} \right| \geq 5\% \quad (1)$$

$$\sum m_i = m_{\text{comp}} + m_{\text{cond}} + m_{\text{evap}} + \sum_{j=1}^M m_{\text{pipe},j} = f_t(T_1, T_2, \dots, T_n) \quad (2)$$

式中: $\sum m_i$ 为各部件中制冷剂质量之和, g; $m_{\text{充}}$ 为制冷系统充注量, g; m_{comp} 为压缩机内制冷剂质量, g; m_{cond} 为冷凝器内制冷剂质量, g; m_{evap} 为蒸发器内制冷剂质量, g; $m_{\text{pipe},j}$ 为第 j 个管路内制冷剂质量, g; t 为当前监测时刻; n 为温度测点总数; T 为温度测点温度值, $^{\circ}\text{C}$ 。

2 基于温度信号的制冷剂质量模型

2.1 换热器制冷剂质量理论模型

本文采用兼具精度与速度的分相模型^[12-13]对换热器的制冷剂质量进行计算,将根据温度信号进行相区划分并建立控制方程。换热器制冷剂的总质量包括冷凝器和蒸发器内的制冷剂质量:

$$m_{\text{HX}} = m_{\text{cond}} + m_{\text{evap}} = f_t(T_i, T_j, \dots, T_{j+M}, T_k) + f_t(T_x, \dots, T_{x+N}, T_y) \quad (3)$$

式中: T_i 和 T_k 分别为冷凝器进口和出口处温度, $^{\circ}\text{C}$; T_{j+M} 为冷凝器两相区第 $M+1$ 个测点处温度信号, $^{\circ}\text{C}$; T_x 为蒸发器进口处温度, $^{\circ}\text{C}$; T_{x+N} 为蒸发器两相区第 $N+1$ 个测点处温度, $^{\circ}\text{C}$; T_y 为蒸发器出口处温度, $^{\circ}\text{C}$; m_{HX} 为换热器中制冷剂质量, g。

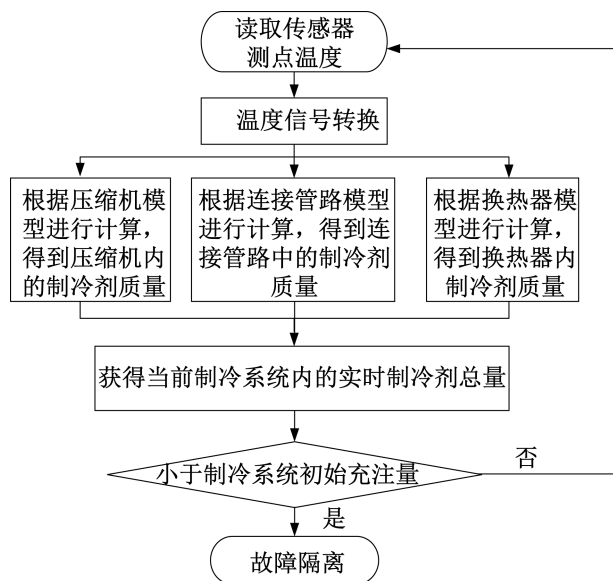


图 2 基于模型的制冷剂泄漏探测流程

Fig.2 Model-based detection algorithm for refrigerant leak

1) 换热器中的温度测点布置

蒸发器中具有两相区和过热区,进口测点测量蒸发温度,再加上出口测点测量出口温度,则最少布置 2 个温度测点即可通过温度信号计算得到蒸发器内的相区划分,温度测点布置如图 3(a) 所示,划分依据如式(4)和式(5)所示。冷凝器中一般存在过热区、两相区和过冷区,中间靠后位置的测点测量冷凝温度,再加上进出口测点测量进出口温度,则最少布置 3 个温度测点即可通过温度信号计算得到冷凝器内的相区划分,温度测点布置如图 3(b) 所示,划分依据如式(6)和式(7)所示。

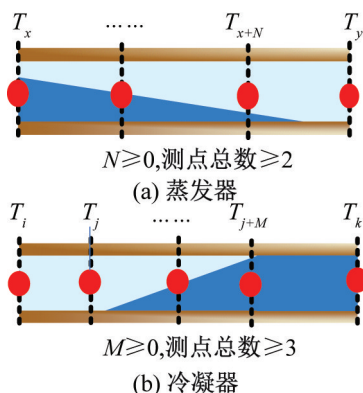


图 3 换热器温度测点

Fig.3 Temperature test points for heat exchangers

$$T_e = T_x < T_y \quad (4)$$

$$T_e = f(T_x, \dots, T_{x+N}) = \arg\min(T_{x+b} - T_{x+b-1}) = (T_{x+b} + T_{x+b-1})/2 \quad (5)$$

$$T_i > T_e > T_k \quad (6)$$

$$T_c = f(T_j, \dots, T_{j+M}) = \operatorname{argmin}(T_{j+a-1} - T_{j+a}) \\ = (T_{j+a-1} + T_{j+a})/2 \quad (7)$$

式中: T_e 和 T_c 分别为蒸发和冷凝温度, $^{\circ}\text{C}$; T_{x+b} 和 T_{j+a} 分别为蒸发器中, 与相邻测点温度差值最小的测点温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

2) 换热器内制冷剂质量计算模型

对于冷凝器, 制冷剂质量由 4 个典型状态点的物性计算得到, 包括冷凝器进出口状态点和冷凝器内两相区起始及终止状态点, 制冷剂质量如式 (8) 所示; 对于蒸发器, 制冷剂质量由 3 个典型状态点物性计算得到, 包括蒸发器进出口状态点和蒸发器内两相区终止状态点, 如式 (9) 所示。各状态点的参数包括温度、焓值、密度等, 如式 (10) 所示。

$$m_{\text{cond}} = f_i(T_i, T_j \dots T_{j+M}, T_k) = f_i(X_1, X_2, X_3, X_4) \quad (8)$$

$$m_{\text{evap}} = f_i(T_x \dots T_{x+N}, T_y) = f_i(X_5, X_6, X_7) \quad (9)$$

$$X_i = (T_i, h_i, x_i, \rho_i), i = 1, 2, \dots, 7 \quad (10)$$

式中: X_1, X_2, X_3 和 X_4 分别为冷凝器进口状态点、两相区起始状态点、两相区终止状态点和出口状态点; X_5, X_6 和 X_7 分别为蒸发器进口状态点、两相区终止状态点和出口状态点; h 为状态点焓值, kJ/kg ; x 为状态点干度; ρ 为状态点密度, kg/m^3 。

X_1 与 X_2 之间、 X_6 与 X_7 之间为过热区, X_3 与 X_4 之间为过冷区, 制冷剂质量计算式为:

$$m_{\text{sh}} = \int_0^V \rho_{\text{sh}} dV \quad (11)$$

$$m_{\text{sc}} = \int_0^V \rho_{\text{sc}} dV \quad (12)$$

式中: m_{sh} 和 m_{sc} 分别为过热区和过冷区制冷剂质量, g ; ρ_{sh} 和 ρ_{sc} 分别为过热区及过冷区制冷剂密度, kg/m^3 ; V 为相区体积, m^3 。

对于两相区内的制冷剂质量计算, 采用制冷剂质量计算模型^[14-15], 如式 (13) 所示。

$$\bar{\rho}_{\text{tp}} = \bar{\gamma}_{\text{tp}} \rho_g + (1 - \bar{\gamma}_{\text{tp}}) \rho_l \quad (13)$$

式中: $\bar{\rho}_{\text{tp}}$ 为两相区平均密度, kg/m^3 ; $\bar{\gamma}_{\text{tp}}$ 为平均空泡系数; ρ_g 为两相区气态密度, kg/m^3 ; ρ_l 为两相区液态密度, kg/m^3 。

2.2 压缩机制冷剂质量理论模型

压缩机内制冷剂主要分布于冷冻油、储液器和壳体空腔内, 制冷剂质量计算式为:

$$m_{\text{comp}} = m_{\text{r-oil}} + m_{\text{r-shell}} + m_{\text{r-accum}} \\ = f_i(T_p, T_q) \quad (14)$$

式中: m_{comp} 为压缩机制冷剂总质量, g ; $m_{\text{r-oil}}$ 为冷冻油中溶解的制冷剂质量, g ; $m_{\text{r-shell}}$ 为壳体空腔内制冷剂质量, g ; $m_{\text{r-accum}}$ 为储液器内制冷剂质量, g ; T_p 为压缩机

入口测点温度, $^{\circ}\text{C}$; T_q 为压缩机出口测点温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

冷冻油内溶解的制冷剂质量计算式为:

$$m_{\text{r-oil}} = \frac{s}{1-s} m_{\text{oil}} \quad (15)$$

$$s = f(T_{\text{com}}, p_c) = f_i(T_p, T_q, T_c) \quad (16)$$

$$m_{\text{oil}} = \rho_{\text{oil}} V_{\text{oil}} = f_i(T_p, T_q) \quad (17)$$

式中: s 为制冷剂溶解度, g ; m_{oil} 为冷却油质量, g ; T_{com} 为压缩机温度, $^{\circ}\text{C}$; p_c 为冷凝压力, Pa ; ρ_{oil} 为冷却油密度, kg/m^3 ; V_{oil} 为冷却油体积, m^3 。

储液器和壳体空腔制冷剂质量计算式为:

$$m_{\text{r-accum}} = \rho_{\text{in}} V_{\text{accum}} = f_i(T_p) \quad (18)$$

$$m_{\text{r-shell}} = \rho_{\text{out}} V_{\text{shell}} = f_i(T_q) \quad (19)$$

式中: V_{accum} 和 V_{shell} 分别为储液器和壳体空腔容积, m^3 ; ρ_{in} 和 ρ_{out} 分别为压缩机进、出口制冷剂密度, kg/m^3 。

2.3 连接管制冷剂质量理论模型

管内制冷剂的质量计算式为:

$$m_{\text{pipe}} = \sum_{j=1}^M m_{\text{pipe},j} \quad (20)$$

$$m_{\text{pipe},j} = f_i(\rho_{\text{pipe},j}) = f_i(T_{\text{pipe},j}) \\ = \rho_{\text{pipe},j} L_{\text{pipe},j} (\pi d^2)/4 \quad (21)$$

式中: m_{pipe} 为连接管路内的制冷剂总质量, g ; L_{pipe} 为连接管长度, m ; d 为连接管直径, m ; $\rho_{\text{pipe},j}$ 为第 j 个连接管制冷剂密度, kg/m^3 。

3 模型精度验证

采用制冷系统实际运行数据对模型进行验证, 如图 4 所示。验证机型包括单冷机及冷暖机, 运行模式包括制冷及制热运行模式。模型对于系统中制冷剂充注量的预测误差在 $\pm 3\%$ 以内。

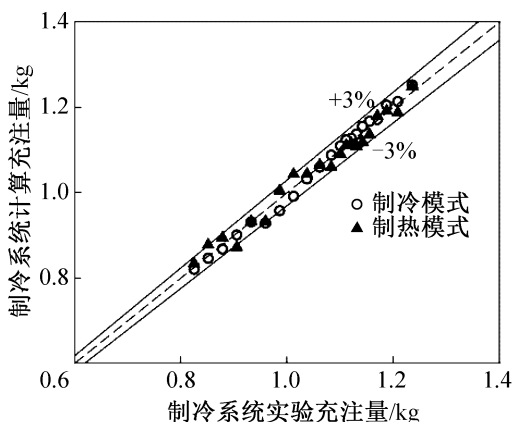


图 4 模型精度验证

Fig.4 Prediction accuracy validation of model

4 结论

本文提出一种适用于制冷系统泄漏探测的制冷

剂质量计算模型,在实际故障数据少的情况下,可基于温度信号对制冷系统进行泄漏探测;模型对制冷系统制冷剂质量预测最大误差为 3.18%。

本文受上海市工业强基专项 (GYQJ-2017-5-09) 项目资助。(The project was supported by Shanghai Special Project for Strengthening Industrial Foundation (No. GYQJ-2017-5-09).)

参考文献

- [1] 袁朝阳,陶乐仁,虞中暘,等.充注量对空气源热泵热水器性能的影响[J].制冷学报,2018,39(3):73-78. (YUAN Chaoyang, TAO Leren, YU Zhongyang, et al. Effect of refrigerant charge on the performance of air-source heat pump water heater [J]. Journal of Refrigeration, 2018, 39(3): 73-78.)
- [2] 赵同乐,吴静怡,张晋晋,等.充注量对水冷式环路热管性能影响的实验研究[J].制冷技术,2017,37(1):18-22. (ZHAO Tongle, WU Jingyi, ZHANG Jinjin, et al. Experimental research about influence of refrigerant charge on performance of water cooling loop heat pipe[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2017, 37(1): 18-22.)
- [3] 赵家威,张皓,施骏业,等.电动汽车热泵空调制冷剂充注量的试验研究[J].制冷技术,2017,37(2):60-63. (ZHAO Jiawei, ZHANG Hao, SHI Junye, et al. Experimental study on refrigerant charge of heat pump air conditioning system for electric vehicles [J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2017, 37(2): 60-63.)
- [4] 张良俊,吴静怡,王如竹.充注量对小型热泵热水器性能影响的实验及分析[J].上海交通大学学报,2006,40(8):1307-1311. (ZHANG Liangjun, WU Jingyi, WANG Ruzhu. Experimental study on the performances of small sized heat pump water heater at different R22 charge [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2006, 40(8): 1307-1311.)
- [5] 李超役.民用飞机空调系统健康评估与故障诊断方法研究[D].南京:南京航空航天大学,2018. (LI Chaoyi. The research of health assessment and fault diagnosis method of civil aircraft air conditioning system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.)
- [6] 史剑春.空调器制冷剂充注量和毛细管尺寸的确定方法[J].制冷技术,1986,6(1):32-39. (SHI Jianchun. Method for determining refrigerant charge and capillary size of air conditioner [J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 1986, 6(1): 32-39.)
- [7] 关震,姜燕成.核电厂冷冻机制冷剂泄露故障分析及处理方法探讨[J].自动化与仪器仪表,2015(3):149-150. (GUAN Zhen, JIANG Yancheng. Discussion on failure analysis and treatment of refrigerant leakage in refrigerator of nuclear power plant[J]. Automation & Instrumentation, 2015(3): 149-150.)
- [8] 马小骏.面向客户服务的民用飞机健康管理系统的若干问题研究[D].南京:南京航空航天大学,2014. (MA Xiaojun. Research on problems of civil aircraft health management system oriented to custom service[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.)
- [9] 袁玥,陈焕新,石书彪,等.基于主成分分析和神经网络相结合的制冷剂充注量故障诊断[J].制冷技术,2017,37(6):46-50. (YUAN Yue, CHEN Huanxin, SHI Shubiao, et al. Refrigerant charge fault diagnosis based on principal component analysis and neural network [J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2017, 37(6): 46-50.)
- [10] 黄倩云,陈焕新,孙劭波,等.基于支持向量机的多联机系统制冷剂充注量故障检测与诊断[J].暖通空调,2018,48(1):91-95,103. (HUANG Qianyun, CHEN Huanxin, SUN Shaobo, et al. SVM-based FDD method for refrigerant charge in variable refrigerant flow system [J]. Journal of HV & AC, 2018, 48(1): 91-95, 103.)
- [11] 陈焕新,孙劭波,刘江岩,等.数据挖掘技术在制冷空调行业的应用[J].暖通空调,2016,46(3):20-26. (CHEN Huanxin, SUN Shaobo, LIU Jiangyan, et al. Application of data mining technology to refrigeration and air conditioning industry [J]. Journal of HV & AC, 2016, 46(3): 20-26.)
- [12] DING Guoliang. Recent developments in simulation techniques for vapour-compression refrigeration systems [J]. International Journal of Refrigeration, 2007, 30(7): 1119-1133.
- [13] COATA M L M, PARISE J A R. A three-zone simulation model for a air-cooled condensers [J]. Heat Recovery Systems and CHP, 1993, 13(2): 97-113.
- [14] 赵丹,丁国良,胡海涛.质量和能量严格守恒的蒸发器动态仿真模型[J].制冷学报,2015,36(1):76-83. (ZHAO Dan, DING Guoliang, HU Haitao. An intrinsically mass and energy conservative model for transient simulation of evaporator [J]. Journal of Refrigeration, 2015, 36(1): 76-83.)
- [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. (DING Guoliang, ZHANG Chunlu. Simulation and optimization of refrigeration and air-conditioning units [M]. Beijing: Science Press, 2001.)

通信作者简介

胡海涛,男,副教授,博导,上海交通大学机械与动力工程学院,(021)34207062, E-mail: huhaitao2001@sjtu.edu.cn. 研究方向:制冷系统仿真、相变流动与强化传热。

About the corresponding author

Hu Haitao, male, associate professor, Ph. D. supervisor, School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, +86 21-34207062, E-mail: huhaitao2001@sjtu.edu.cn. Research fields: simulation and optimization for refrigeration system, multi-phase flow and enhanced heat transfer.