

文章编号: 0253-987X(2002)05-0461-04

制冷系统的综合优化控制模型

朱瑞琪, 谢家泽, 吴业正

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 建立了制冷系统的多输入多输出模型. 系统模型中包含了用集总参数和相移动边界法建立的热交换器动态模型, 以及压缩机和膨胀阀的稳态流动模型. 在以模型为基础的各种智能控制方式中, 所建立的系统模型对制冷机控制具有通用性. 它能完整地反映制冷系统的多输入多输出关系, 并能从模型仿真中获得系统参数之间的动态关联, 从而根据分析结果采取相应的控制对策, 因此它不仅是进行整个系统综合优化控制的基础, 也可以针对所选定的受控参数和控制方式对制冷系统实施最佳控制.

关键词: 制冷系统; 控制; 模型

中图分类号: TB6 **文献标识码:** A

Model of Refrigeration System for Optimizing Control

Zhu Ruiqi, Xie Jiaze, Wu Yezheng

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A multi-input multi-output (MIMO) model of refrigeration system is proposed. The system model comprises the dynamic heat exchanger model based on the lumped-parameter method and moving phase boundary method, and the stable flow models of compressor and expansion valve. Of the various intelligent controlling methods based on model, the proposed model is general for refrigeration machine control. It could be used to describe the relations between multi-input and multi-output parameters of refrigeration system, and to obtain the dynamic link among system parameters, so as to take control measures correspondently according to its analysis results. It is applicable to the optimizing control of whole refrigeration system, and to the optimizing control of the refrigeration system with given parameters and control method.

Keywords: refrigeration system; control; model

为了实现制冷系统的综合优化控制, 建立系统模型是必须的. 就控制目的而言, 模型应以最简捷的方式反映控制输入量与输出量之间的关系, 运算上须满足实时控制的要求. 常见的制冷系统模型采用分布参数描述制冷系统内部的热物理过程, 是部件

和系统优化设计的有力工具, 但模型较复杂, 计算工作量大, 不适宜实时控制, 也不能直接反映控制操作的输入、输出变量间的关系. 因此, 本研究采用集总参数法^[1]建立制冷系统多输入多输出(MIMO)模型, 作为制冷系统综合优化控制之用.

收稿日期: 2001-09-10. 作者简介: 朱瑞琪(1946~), 女, 副教授. 基金项目: 教育部“教育振兴行动计划”资助项目.

1 制冷系统各部件的模型

受控制对象是图1所示的蒸气压缩式制冷系

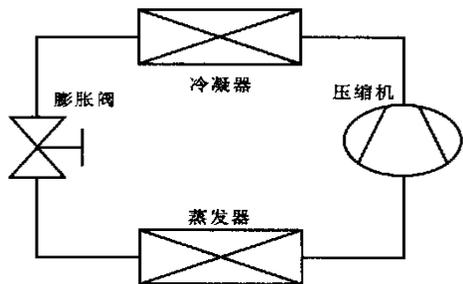


图1 制冷系统简图

统,由压缩机、冷凝器、蒸发器和膨胀阀4个基本部件组成.制冷剂在压缩机和膨胀阀中的流动过程迅速,可采用稳态模型.制冷剂在冷凝器和蒸发器中的流动传热模型用一组非线性偏微分方程描述,并做如下简化假定:换热器为细长薄壁水平管;制冷剂在管中沿轴向一维流动,沿径向传热;忽略不凝性气体、油膜等对传热的影响.简化后热交换器中的过程可由以下基本方程描述:

质量平衡
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

能量平衡
$$\frac{\partial(\rho h - p)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u h)}{\partial z} = \frac{4}{D_i} \alpha_i (T_w - T_f) \quad (2)$$

式中: u 为制冷剂沿管长方向的流速, m/s ; p 为管内制冷剂的压强, Pa ; D_i 为管的内径, m ; h 为制冷剂的比焓, kJ/kg ; t 为时间, s ; z 为管的长度, m ; T_w 为管壁的温度, K ; T_f 为制冷剂的温度, K ; μ 为制冷剂的动力粘性系数, kg/s ; α_i 为制冷剂与管内壁的单位面积换热系数, $kW/(m^2 \cdot K)$; ρ 为制冷剂的密度, kg/m^3 .

为了进一步得到简单实用的控制模型,热交换器建模时采用“移动边界法”.其要点是:①引入“平均空泡系数(γ)”的概念,认为在制冷剂管内流动的状态变化过程中,虽然当地空泡系数是时间和空间的函数,但是当地空泡系数沿管程积分得到的平均空泡系数则是固定不变的;②在换热器管内按照制冷剂的相态划分成不同的计算区域,如蒸发器划分成两相区和过热区,冷凝器划分成过热区、两相区和过冷区,每个区按照集总参数方法处理.从传热学的角度说,上述分区各代表了一种传热特征,所以将每

一区作为集总热容处理兼顾了模型对过程描述的真实性及模型简化性的要求,就控制目的而言,这种建模方法既现实可行,又合理可靠.

1.1 蒸发器模型

蒸发器建模示意图见图2.图中1代表移动的相边界, m 为制冷剂的质量流量, α 为表面传热系数,下标 e 代表蒸发器, w 代表管壁, i 代表入口, o 代表出口.将前述的热交换器基本方程和建模方法分别运用于两相区和过热区,然后综合,得到蒸发器动态模型

$$\dot{X}_e = D_e^{-1} f_e(X_e, u_e) \quad (3)$$

式中: $X_e = [l_{e1}, p_e, h_{eo}, T_{ew1}, T_{ew2}]^T$ 为蒸发器的输出状态向量; $u_e = [m_e, h_{ei}, m_{eo}, n_{ef}]^T$ 为蒸发器的输入状态向量,下标 f 代表风扇;

$$D_e = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & 0 & 0 & 0 \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{44} & 0 \\ d_{51} & 0 & 0 & 0 & d_{55} \end{bmatrix}$$

为蒸发器的输入输出关系矩阵.

1.2 冷凝器模型

冷凝器建模示意图见图3.图中1、2代表移动的相边界,下标 c 代表冷凝器.将前述的热交换器基本方程和建模方法分别运用于过热区、两相区和过冷区,然后综合,得到冷凝器动态模型

$$\dot{X}_c = D_c^{-1} f_c(X_c, u_c) \quad (4)$$

式中: $X_c = [l_{c1}, l_{c2}, p_c, h_{co}, T_{cw1}, T_{cw2}, T_{cw3}]^T$ 为冷凝器的输出状态向量; $u_c = [m_{ci}, h_{ci}, m_{co}]^T$ 为输入参数向量;

$$D_c = \begin{bmatrix} d_{11} & 0 & d_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & 0 & 0 & 0 \\ d_{41} & d_{42} & d_{43} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ d_{51} & 0 & 0 & 0 & d_{55} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{66} & 0 \\ d_{71} & d_{72} & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{77} \end{bmatrix}$$

为冷凝器的输入输出关系矩阵.

作者在文献[2]中给出了蒸发器和冷凝器模型的详细推导过程,以及关系矩阵 D_e 和 D_c 中各元素的表达式.

1.3 压缩机模型

压缩机的输气量(以压缩机所处理的制冷剂质

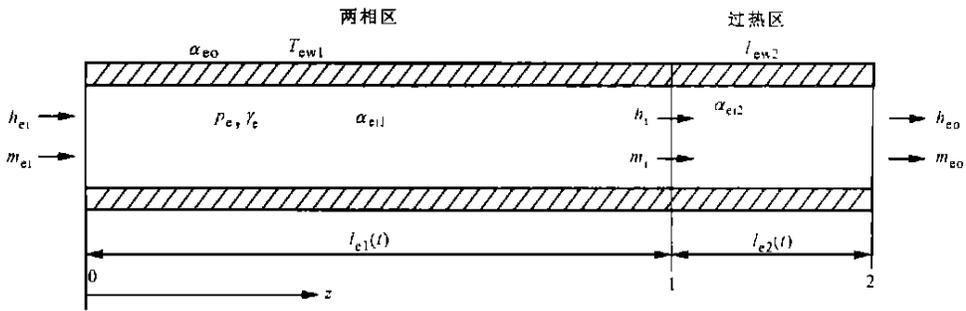


图 2 蒸发器建模示意图

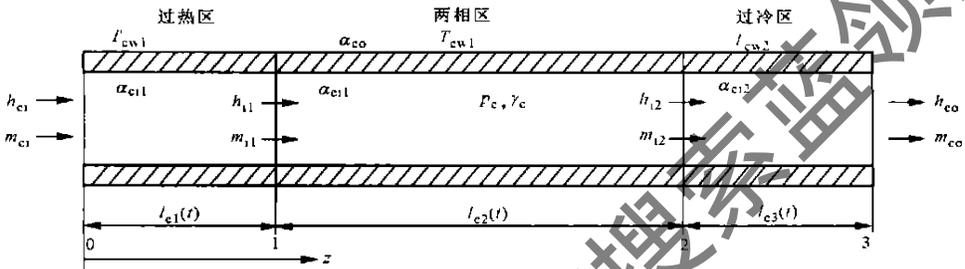


图 3 冷凝器建模示意图

量流量表示)用下式表示

$$m_j = \frac{n_j V_j \lambda}{v_s} \quad (5)$$

式中: m_j 为制冷剂质量流量, kg/s; n_j 为压缩机转速, r/s; V_j 为气缸行程容积, m^3 ; v_s 为吸气比体积, m^3/kg ; λ 为压缩机输气系数。

1.4 膨胀阀模型

步进电机驱动的电子膨胀阀具有线性流量特性, 即定压差下的阀流量与控制脉冲数成正比。膨胀阀所控制的制冷剂质量流量用下式计算

$$m_v = C_v A_v (\rho \Delta p)^{1/2} \quad (6)$$

式中: m_v 为制冷剂的质量流量, kg/s; C_v 为流量系数; A_v 为膨胀阀流通面积(与控制脉冲数成正比), m^2 ; ρ 为阀前制冷剂密度, kg/m^3 ; Δp 为阀前、后的压力差, Pa。

2 制冷系统总体模型

2.1 系统总体模型

联立系统各部件模型式(3)~式(6), 得到一个描述系统动态特性的 12 阶非线性微分方程, 简单表示如下

$$\dot{X} = g(X, u) = D^{-1} f(X, u) \quad (7)$$

方程左边为系统输出向量; 方程右边的 X 是系统结构特性, u 是控制输入向量。总体模型反映了系统控制中的多输入多输出关系, D 是关系矩阵。

$$X = \begin{bmatrix} X_e \\ X_c \end{bmatrix}; \quad D = \begin{bmatrix} D_e & 0 \\ 0 & D_c \end{bmatrix}$$

就制冷系统整体控制而言, 通常的控制方法是用压缩机变转速调节主机的制冷能力, 用膨胀阀开度变化调节制冷剂流量, 用蒸发器风扇变速(或改变冷媒流体的流量)调节蒸发器的热交换能力, 所以控制输入量为: 压缩机转速 n_j ; 电子膨胀阀开度(或电子膨胀阀的输入脉冲数) a_v ; 蒸发器风扇转速 n_{ef} 。于是, 定义控制输入向量

$$u = [n_c \quad a_v \quad n_{ef}] \quad (8)$$

需要指出的是, 压缩机与膨胀阀模型都采用了稳态流动模型, 这是由于压缩机和膨胀阀流量对转速和开度输入的响应脉冲很快, 稳态模型足以满足系统动态特性描述的要求。

2.2 模型的线性化及降阶处理

状态空间模型式(7)可以描述系统在整个运行过程中的动态特性。在实际情况下, 制冷机运行时的环境温度和负荷变化不大, 系统的状态参数仅在预

定的工作点附近变化,因此在这种情况下,将系统模型在该稳态运行工况点处进行线性化降阶处理,可以大大简化模型,便于进行系统的实时控制。

线性化过程是在工作点附近的局部范围内,利用泰勒级数将原系统模型函数展开,忽略二次以上的高阶项后得到线性化方程,用来代替原来的非线性方程。对方程(7)来说,可以在制冷系统运行工况点处做如下近似

$$\Delta x_i = \sum_{j=1}^{12} \left. \frac{\partial g_i(\mathbf{x}, \mathbf{u})}{\partial x_j} \right|_{x^0, u^0} \Delta x_j + \sum_{j=1}^4 \left. \frac{\partial g_i(\mathbf{x}, \mathbf{u})}{\partial u_j} \right|_{x^0, u^0} \Delta u_j \quad (9)$$

式中: $\Delta x_i = x_i - x_i^0$; $\Delta u_i = u_i - u_i^0$; x_i^0, u_i^0 为系统在稳态点处的状态参数和控制量, $i = 1, 2, \dots, 12$ 。这样构造新的状态变量可以得出下面的线性化模型

$$\Delta \mathbf{x}(t) = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x}(t) + \mathbf{B} \Delta \mathbf{u}(t) \quad (10)$$

式中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_{12}} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial g_{12}}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_{12}}{\partial x_{12}} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial u_4} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial g_{12}}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial g_{12}}{\partial u_4} \end{bmatrix}$$

对于不同装置的制冷系统,将有不同的主控制内容,根据控制内容的不同可选择不同的输出参数。比如,当我们要控制冷凝压力、蒸发压力和蒸发器出口过热度(ΔT)时,系统的输出向量便是

$$\Delta \mathbf{y} = [\Delta p_c, \Delta p_e, \Delta T]^T$$

系统的动态模型为

$$\Delta \mathbf{y}(t) = \mathbf{C} \Delta \mathbf{x}(t) \quad (11)$$

式中

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A & \frac{1}{c_p} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: $A = (-dh_{eg}/dp_e)/c_p$, c_p 为制冷剂的定压比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

可见,经过线性化和降阶处理后,模型在实际控制中运用时相当简便、实用。

3 结 论

本文以制冷系统控制为目标,建立了制冷系统的多输入多输出模型。系统模型中包含用集总参数和相移动边界法建立的热交换器动态模型,以及压缩机和膨胀阀的稳态流动模型。在以模型为基础的各种智能控制方式中,本文所建立的系统模型对制冷机控制具有通用性。由于它完整地反映了制冷系统的多输入多输出关系,从模型仿真中可以获得系统参数之间的动态关联,能够具体地分析一个或多个控制输入量对一个或多个受控参数的影响,并根据分析结果采取相应的控制对策,所以它不仅是进行整个系统综合优化控制的基础,也可以针对所选定的受控参数和控制方式,对制冷系统实施最佳控制。

参考文献:

- [1] He X D, Liu S, Asada H. Modeling of vapor compression cycles for multivariable feedback control of HVAC systems [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1997, (119): 183~191.
- [2] 谢家泽. 制冷系统的多输入多输出模型与解耦控制 [D]. 西安: 西安交通大学能源与动力工程学院, 2001.

(编辑 葛赵青 王焕雪)

[文摘预览]

基于知识的敏捷 workflow 系统建模方法的研究

舒 斌, 殷国富, 戈 鹏, 龙红能

(四川大学制造科学与工程学院, 610065, 成都)

为了提高企业的敏捷性,增强 workflow 管理系统对业务流程变化的适应性,提出了一种基于知识的敏捷 workflow 系统模型,并对该模型的框架构造和知识表示进行了详细讨论。通过使用知识表示模式和相关谓词建立了系统的更改传播机制,增强了系统的可靠性和柔性。该建模方法在某大型汽轮机厂的工艺设计过程管理系统的软件开发实践中得到了应用。实际应用表明,基于知识的工作流系统模型对于实现业务流程的自动化具有一定的应用价值。