

[文章编号] 1003—4684(2020)04-0048-04

# 基于模糊 PID 的小型冷库过热度控制方法

杨 磊<sup>1,2</sup>, 马志艳<sup>1,2</sup>, 石 敏<sup>1</sup>, 李江华<sup>1</sup>

(1 湖北工业大学农机工程研究设计院, 湖北 武汉 430068; 2 湖北省农业机械工程研究设计院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 常规 PID 难以满足过热度的控制要求。为提高小型冷库过热度控制品质,采用模糊 PID 控制对小型冷库过热度控制方法进行了改进。通过最小二乘法对基于过热度的控制模型进行了辨识,设计模糊 PID 控制器。仿真结果表明,相较于常规 PID 控制器,采用模糊 PID 控制方法的过热度控制系统具有更小的超调量、更强的抗干扰能力与鲁棒性,但响应速度更慢。

[关键词] 小型冷库; 过热度; 模糊 PID; 最小二乘法

[中图分类号] TP273 [文献标识码] A

冷库蒸发器出口处过热度控制的好坏不仅影响蒸发器的换热效率,而且对冷库制冷系统运行的安全性具有重要意义<sup>[1]</sup>。过热度过低,不仅会降低蒸发器的换热效率,而且还会使压缩机出现液击现象;过热度过高,压缩机零部件之间的润滑油性能降低,会缩短压缩机的使用寿命<sup>[2-3]</sup>。制冷系统中过热度变化具有时变、非线性、大时滞等特点,而且难以建立精确的数学模型。目前商用制冷系统中,大多采用具有结构简单、技术成熟等特点的常规 PID 对过热度进行控制,其控制过程依赖数学模型,而且参数的确定容易受人为因素的影响,当制冷系统工况发生变化,由于参数仍保持不变,系统容易出现超调量大、震荡剧烈等现象<sup>[4-5]</sup>。模糊控制作为一种非线性控制策略,控制过程不依赖精确的数学模型,与 PID 构成的模糊 PID,通过模糊控制规律对 PID 控制参数进行实时整定,可提高变工况下过热度的控制性能<sup>[6-7]</sup>。为提高小型冷库制冷系统的过热度控制品质,本文采用模糊 PID 对过热度控制进行改进,并进行了仿真实验。

## 1 控制模型辨识

目前,对于冷库蒸发器出口处过热度的控制,主要通过调节节流机构阀门开度来改变制冷剂流量实现。由于制冷系统容易受内外影响因素的干扰,能量传递过程复杂,机理分析得出的过热度控制模型大多是在特定条件下建立的,难以全面反映过热度

的内在机理过程。模型辨识法依据实际过热度控制系统的输入、输出数据建立一个与实际系统逼近的模型<sup>[8]</sup>,可利用采集的数据建立过热度控制模型。本文使用电子膨胀阀作为节流机构,不仅其具有调节精度高、反应灵敏等特点,还能通过接收 PC 机指令改变阀门开度<sup>[9]</sup>,目前已逐渐替代了热力膨胀阀、毛细管等节流机构在冷库制冷系统的应用<sup>[10]</sup>。过热度对节流机构开度的响应模型可以近似为一阶加延迟环节<sup>[11]</sup>,传递函数

$$G(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{1 + Ts} \quad (1)$$

式中:  $K$  为增益系数,℃/脉冲;  $T$  为时间常数, s;  $s$  为拉普拉斯算子;  $\tau$  为延迟时间, s。

为建立过热度控制模型,通过 PC 机指令将电子膨胀阀开度从 20% 阶变为 16%,记录过热度随时间变化的数据后,在 Matlab 平台上采用最小二乘法对系统参数进行辨识,辨识结果:  $K$  为 0.253℃/脉冲,  $T$  为 43.2 s,  $\tau$  为 -15 s,误差为 1.5584。因为在过热度的阶跃响应中,电子膨胀阀开度减少,过热度增大,所以  $K$  为 -0.253℃/脉冲,则

$$G(s) = \frac{-0.253e^{-15s}}{1 + 43.2s}$$

模型辨识的准确性采用阶跃响应的方式进行验证。在相同的条件下,电子膨胀阀开度从 20% 阶跃变成 16%,时间取 200 s,实际系统与模型辨识下的过热度响应曲线进行对比结果如图 1 所示。由图 1 可见,电子膨胀阀开度发生阶跃变化后,实际系统下

[收稿日期] 2020—01—14

[基金项目] “十三五”国家重点研发计划子课题(2018YFD0701002)

[第一作者] 杨 磊(1993—),男,湖北武汉人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为农机智能化

[通信作者] 马志艳(1976—),男,湖北武汉人,湖北工业大学副教授,研究方向为农机智能化

的过热度变化过程有多次轻微波动,辨识模型下的过热度变化平稳、光滑,模型辨识下过热度与实际过热度的误差在容许误差范围内。

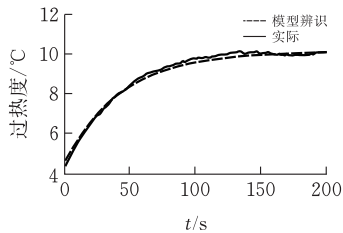


图 1 过热度响应曲线

## 2 模糊 PID 控制器设计

### 2.1 过热度控制原理

过热度模糊控制器采用两输入三输出的结构形式,结合 PID 控制器,构成的过热度闭环控制回路如图 2 所示。模糊控制器的输入量过热度偏差  $e$ 、偏差变化率  $e_c$  由过热度设定值与传感器采样得到,输出量为 PID 控制参数的三个修正量即:比例参数修正量  $\Delta K_p$ 、积分参数修正量  $\Delta K_i$ 、微分参数修正量  $\Delta K_d$ 。为满足制冷系统不同工况下 PID 控制参数的整定需求,输入量  $e$ 、 $e_c$  经过模糊控制逻辑解算出的修正量实时调整 PID 控制参数  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ ,电子膨胀阀因 PID 参数  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  的变化实时改变其阀门的开度大小,实现蒸发器出口处过热度的调节,以满足 PID 控制参数的整定需求,其中 PID 控制参数的整定公式为:

$$\begin{cases} K_p = K'_p + \Delta K_p \\ K_i = K'_i + \Delta K_i \\ K_d = K'_d + \Delta K_d \end{cases} \quad (2)$$

式中  $K'_p$ 、 $K'_i$ 、 $K'_d$  分别为  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  的初始值。

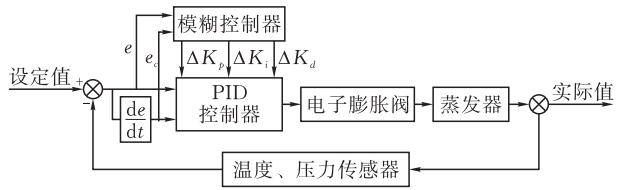


图 2 过热度闭环控制回路

### 2.2 模糊 PID 控制器设计

模糊 PID 控制通过模糊逻辑推理实时调整 PID 控制参数,以满足不同工况下过热度的控制需求。

**2.2.1 模糊化** 在过热度控制中,过热度设定值为  $6^{\circ}\text{C}$ ,模糊控制器的输入量为过热度偏差  $e$ 、偏差变化率  $e_c$ ,实际论域分别为  $[-6, 6]$ 、 $[-0.3, 0.3]$ ,输出量为  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$ ,实际论域分别为  $[-12, 12]$ 、 $[-0.3, 0.3]$ 、 $[-6, 6]$ 。考虑到电子膨胀阀阀门开度变化的平稳性与过热度的控制精度,输入量的模糊语言变量为 7 级,即  $\{\text{NB(负大)}, \text{NM(负中)}, \text{NS(负小)}, \text{ZO(零)}, \text{PS(正小)}, \text{PM(正中)}, \text{PB(正大)}\}$ ,模糊论域分别为  $e'[-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6]$ 、 $e'_c[-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6]$ ,则量化因子分别为  $k_e = 1$ 、 $k_{e_c} = 20$ ;同理,模糊控制器的输出量的模糊语言变量也为 7 级,模糊论域分别为  $\Delta K'_p[-12, -8, -4, 0, 4, 8, 12]$ 、 $\Delta K'_i[-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3]$ 、 $\Delta K'_d[-60, -40, -20, 0, 20, 40, 60]$ ,则比例因子分别为  $k_p = 1$ 、 $k_i = 0.1$ 、 $k_d = 0.1$ 。模糊化过程中的隶属度函数选用两边 S 型、中间三角形的隶属度函数。

**2.2.2 控制规则与模糊推理** 模糊控制规则是控制过热度的核心。结合实际过热度变化特性,控制规则的制定原则为:当  $|e|$  较大时,为将过热度尽快恢复到设定值,  $\Delta K'_p$  取较大,为防止积分饱和,  $\Delta K'_i$  取较小,为避免过热度发生超调,  $\Delta K'_d$  取较小;当  $e \cdot e_c < 0$  时,为保持系统稳定性,  $\Delta K'_d$  取中等大小,若  $|e|$  较大,则  $\Delta K'_i$  取较小,  $\Delta K'_p$  取中等大小,考虑到系统稳定性,若  $|e|$  较小,应逐渐增大  $\Delta K'_p$ 、 $\Delta K'_i$  的取值;当  $e \cdot e_c > 0$  时,  $\Delta K'_p$  取较小,为减少过热度的超调量,  $\Delta K'_i$ 、 $\Delta K'_d$  取中等大小;当  $|e_c|$  较大时,  $\Delta K'_p$  取较小,应适量增加  $\Delta K'_i$ 、 $\Delta K'_d$  取值,减小系统响应速率。

控制规则以 “If  $e'$  and  $e'_c$  THEN  $\Delta K'_p$  and  $\Delta K'_i$  and  $\Delta K'_d$ ” 的语言形式进行描述,结合实际控制经验,根据 Mandani 推理法以及控制规则的设计原则,设计出 49 条模糊控制规则(表 1)。

表 1  $\Delta K'_p$ 、 $\Delta K'_i$ 、 $\Delta K'_d$  的模糊控制

$e'_c$	$e'$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PM	PB/NB/PB	PM/NM/PM	PM/NSZO	PS/NS/PB	PS/ZO/PM	ZO/ZO/PM
NM	PB/NB/NS	PB/NB/NM	PM/NM/NS	PS/NS/NS	PS/NS/ZO	ZO/ZO/NS	PS/ZO/ZO
NS	PM/NS/NM	PM/NM/NS	PM/NS/NS	PS/NS/ZO	ZO/ZO/PS	ZO/PS/PS	NS/PS/ZO
ZO	PM/NM/NM	PM/NM/ZO	PS/NS/NS	ZO/ZO/NS	NO/PS/ZO	NM/PS/ZO	NM/PM/ZO
PS	PS/NM/NM	PS/NS/NS	ZO/ZO/NS	NS/PS/ZO	NS/PS/ZO	NM/PM/PS	NM/PB/ZO
PM	NS/ZO/NM	NS/ZO/NM	PS/ZO/NM	NS/PM/NS	NM/PM/PS	NM/PS/PS	NB/PB/PB
PB	ZO/ZO/PB	NM/ZO/PM	NM/PS/NB	NM/PM/ZO	NM/PM/PS	NB/PB/PM	NB/PB/PB

2.2.3 去模糊化 经过模糊推理得到的  $\Delta K'_p$ 、 $\Delta K'_i$ 、 $\Delta K'_d$  是模糊论域上的子集,需转化为实际论域中的值才能作用于 PID 控制器,此过程被称作去模糊化过程。去模糊化采用重心法,处理后的值为集合面积重心的横坐标,集合面积由隶属度函数与横坐标包围形成,即:

$$u_0 = \frac{\sum a_k b(a_k)}{\sum b(a_k)} \tag{3}$$

式中:  $b(a_k)$  为第  $k$  条语言变量值对应的隶属度;  $a_k$  为第  $k$  条语言变量值;

重心法处理后的值经过比例因子尺度变化为实际论域中 3 个修正量  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  后,结合式 (2),不断对 PID 参数进行整定,最后作用于电子膨胀阀,达到控制蒸发器出口处过热度的目的。

3 仿真实验与性能评价

为对比不同控制器下过热度的控制效果,在 Matlab/Simulink 平台上进行仿真实验,仿真时间为 600 s,步长为 1 s,PID 控制器参数的初始值根据比例临界法确定,分别为:  $K'_p = 12.2$ 、 $K'_i = 0.26$ 、 $K'_d = 52.6$ ,以响应时间、调节时间,振荡次数、超调量等作为控制性能参数,并对仿真结果进行分析。

实验一:6℃的过热度阶跃信号作为系统输入,PID 控制器和模糊 PID 控制器下的过热度响应曲线如图 3 所示;6℃的过热度阶跃信号作为系统输入时,PID 控制器下的系统在 24 s 后开始响应,最大波动约为 2.3℃,超调量约 38.3%,调节时间约 172 s,期间发生了 4 次震荡,而模糊 PID 控制器下的系统在 28 s 后开始响应,响应超调量约 21.7%,调节时间约 143 s,共发生 3 次震荡。

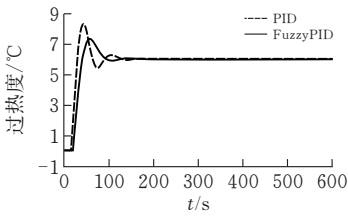


图 3 过热度阶跃响应曲线

实验二:在制冷系统实际运行过程中,自然因素会给过热度的控制带来一些干扰,使实际过热度控

制系统产生一定的波动。为使仿真条件更接近实际,在阶跃信号中加入高斯噪声来模拟实际运行过程中的随机干扰,获得的响应曲线如图 4 所示。过热度阶跃信号中加入噪声后,PID 控制器下的阶跃响应超调量约 38.3%,发生了 14 次震荡,模糊 PID 控制器下的系统响应超调量约 21.6%,一共发生了 9 次震荡,而且震荡幅度整体上小于 PID 控制器下的系统。

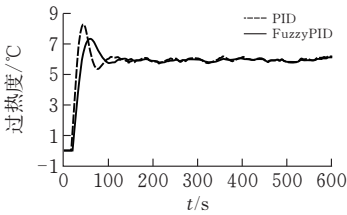


图 4 过热度高斯噪声响应曲线

实验三:实际冷库制冷系统的运行过程中,进出货、操作人员设备检查等原因都会影响过热度的控制带来干扰,为比较不同控制器的抗干扰性能,在 300 s 时加入持续 15 s 的锯齿波,用于模拟实际控制过程中控制器的恢复能力,获得的响应曲线见图 5。在 300 s 时加入持续 15 s 的锯齿波干扰信号,PID 控制器下的系统在 18 s 后开始响应,最大波动约为 0.2℃,约 112 s 后系统恢复稳态,震荡了 4 次,而模糊 PID 控制器下的系统响应时间约 22 s,最大波动约为 0.1℃,约 96 s 后系统恢复稳态,发生 3 次震荡。

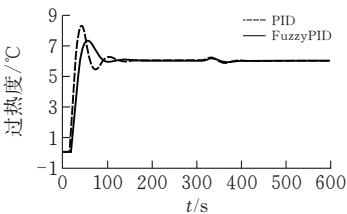


图 5 过热度干扰响应曲线

3 次仿真实验得到的控制性能参数如表 2 所示。分析表 2 可知,采用 PID 控制器的系统超调量更大,在加入噪声或者扰动时,系统容易受到干扰,而且震荡次数也较多,但是 PID 控制器下的系统对噪声或干扰响应更迅速;模糊 PID 控制器下的系统超调量更小,鲁棒性更强,抗干扰能力更强,但是系统响应速度更慢。

表 2 控制性能参数表

性能参数	常规 PID			模糊 PID		
	阶跃信号	加入高斯噪声	加入锯齿波	阶跃信号	加入高斯噪声	加入锯齿波
响应时间/s	24	24	18	28	28	22
调节时间/s	172	—	112	143	—	96
振荡次数	4	14	4	3	9	3
超调量/%	38.3	38.3	8	21.7	21.7	4

## 4 结 论

以小型冷库制冷系统中的过热度为研究对象,分别采用常规 PID 控制与模糊 PID 控制调节电子膨胀阀开度,对过热度的控制进行了研究。通过最小二乘法建立了过热度的控制数学模型,分析了过热度控制原理,进行了过热度控制仿真实验,相对于常规 PID 控制器,模糊 PID 控制器下过热度的控制性能具有更大的优势。

### [ 参 考 文 献 ]

[1] 田虎辉.中央空凋蒸气压缩式制冷机组自适应模糊控制应用研究[D].杭州:浙江大学,2014.

[2] HsiaoM J, Cheng C H, Huang M C, et al. Performance enhancement of a subcooled cold storage air condition system[J].Energy Conversion and Management, 2009,50(12):2992-2998.

[3] 窦伟,申江.冷库翅片管蒸发器性能测试实验研究[J].

低温与超导,2019,47(11):72-76.

[4] 杨晓,王健,刘丙磊,等.PID 调阀在变频空调器中的应用[J].制冷与空调,2019,19(4):76-80,93.

[5] 尚羽佳,王卫军,刘克冲.压缩式制冷系统双回路无模型控制方法[J].仪器仪表标准化与计量,2018(6):25-29.

[6] 赵英军.变频空凋电子膨胀阀的模糊 PID 控制[J].电子技术与软件工程,2019(13):60-61.

[7] 王珊珊.汽车废热驱动空凋电子膨胀阀模糊控制研究[D].济南:山东大学,2016.

[8] 张虎,孙安博,樊生文.改进的永磁电机参数辨识研究[J].电气传动,2016,46(7):8-11,15.

[9] 郭晓鹏,周大志.电子膨胀阀控制器优化研究[J].制冷技术,2019,39(2):72-75.

[10] 嵇天炜,陶乐仁,虞中畅,等.不同电子膨胀阀控制方式下空气源热泵热水器性能[J].制冷学报,2019,40(6):70-77.

[11] 陈文勇,陈芝久,朱瑞琪,等.电子膨胀阀调节蒸发器过热度的控制算法[J].上海:上海交通大学学报,2001(8):1228-1232.

# Research on Superheat Control Method of Small Cold Storage based on Fuzzy PID

YANG Lei<sup>1,2</sup>, MA Zhiyan<sup>1,2</sup>, SHI Min<sup>1</sup>, LI Jianghua<sup>1</sup>

(1 *Agricultural Machinery Institute, Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China*;  
2 *Hubei Agricultural Machinery Institute, Wuhan 430068, China*)

**Abstract:** In order to improve the quality of small cold storage superheat control, the conventional PID is difficult to meet the requirements of superheat, and fuzzy PID control is adopted to improve the superheat control system of small cold storage. The control model based on superheat is identified through the least square method, and a fuzzy PID controller is designed. The simulation results show that compared with the conventional PID controller, the superheat control system based on the fuzzy PID control method has smaller overshoot, stronger anti-interference ability and robustness, but the response speed is slower.

**Keywords:** small cold storage; superheat; fuzzy PID; the least square method

[责任编辑:张 众]