

压缩式制冷系统预测自抗扰控制

李冬辉, 高亚男

(天津大学电气自动化与信息工程学院, 300072, 天津)

摘要: 针对压缩式制冷系统在运行过程中存在的大时滞、强耦合以及外部干扰等问题, 提出一种基于有限时间扩张状态观测器的预测自抗扰控制策略。通过对压缩式制冷系统进行模型辨识, 得到双输入双输出的传递函数矩阵。采用 Smith 预估控制器对制冷系统的实际输出进行预测, 减少运行过程中时滞特性的影响。通过串联解耦控制器, 将制冷系统解耦为两个单输入单输出系统。为了提高系统的抗干扰能力和响应速度, 提出一种有限时间收敛的扩张状态观测器, 并通过构造 Lyapunov 函数证明了其有限时间收敛性。采用有限时间收敛的扩张状态观测器和控制律对解耦后的系统进行状态估计和扰动补偿, 并利用比例控制器进行控制, 进而实现过热器和蒸发温度的独立控制。将所提控制策略与基于线性扩张状态观测器的预测自抗扰控制策略进行比较。仿真结果表明, 所提控制策略使得调节时间减少 50% 左右, 动态降落减少 30% 左右, 且在参数摄动时具有良好的鲁棒性。实验结果表明, 所提控制策略使得调节时间减少 30% 左右, 动态降落减少 12% 左右, 制冷系统的动态性能和抗干扰性能得到有效提高。

关键词: 压缩式制冷系统; 自抗扰控制; Smith 预估控制; 扩张状态观测器

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202011012 **文章编号:** 0253-987X(2020)11-0098-08



OSID 码

Predictive Auto Disturbance Rejection Control for Compression Refrigeration System

LI Donghui, GAO Yanan

(School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Aiming at large time delay, strong coupling and external disturbance in compression refrigeration system, a predictive auto disturbance rejection control strategy with finite time extended state observer is proposed. Via model identification of compression refrigeration system, the transfer function matrix of double input and double output is obtained. The Smith predictor is used to predict the actual output of the refrigeration system, so as to reduce the influence of time delay in the operation process. Then the refrigeration system is decoupled into two single input and single output systems by series of decoupling controller. To improve the disturbance rejection ability and response rate of this system, a finite time convergent extended state observer is introduced, and its finite time convergence is proved by the constructing Lyapunov function. The state estimation and disturbance compensation of the decoupled system are carried out by the finite time convergent extended state observer and control law, and the proportional controller is used to control the system, thus the independent control of superheat

and evaporator temperature is realized. Compared with the predictive auto disturbance rejection control based on the linear extended state observer, the simulation results show that this strategy can reduce the regulation time by about 50%, the dynamic landing by about 30%, and has good robustness when the parameters are perturbed; the experimental results show that this strategy can reduce the regulation time by about 30%, and the dynamic landing by about 12%. The dynamic performance and disturbance rejection performance of refrigeration system are significantly improved.

Keywords: compression chiller system; active disturbance rejection control; Smith predictor; extended state observer

近年来,随着能源的消耗和环境问题的日益严重,节能降耗受到了人们广泛的关注。在工业和商业建筑中,空调系统是能源消耗的重要部分,而制冷系统消耗的能量占空调消耗总能量的 40% 以上^[1]。压缩式制冷系统的稳定性控制对节能降耗和保证系统可靠运行具有重要意义。该系统的控制方案主要是通过控制膨胀阀开度和压缩机频率,分别对蒸发器过热度和蒸发温度的设定值进行跟踪^[2]。在传统控制方法中,PID 控制器的使用十分广泛。Zhao 等提出了一种自适应 PI 控制策略,有效改善了空调的功率跟踪性能^[3];Carreño-Zagarra 等设计了广义 PI 观测器来控制内环,并根据定量反馈理论设计了 PID 控制器来控制外环,与传统 PID 控制相比,该控制器能快速响应设定值^[4];李兆博等将 PID 与改进的 Smith 预估器相结合,实现了制冷系统双回路的 Smith 预估解耦控制,改善了系统的动态性能^[5]。

此外,更先进的技术也被应用于压缩式制冷系统的控制中。李冬辉等设计了基于扰动观测器的 Smith 预估控制器,提高了制冷系统的鲁棒性和抗干扰性^[6];Schurt 等设计了基于线性二次高斯技术的多变量控制器,解决了过热振荡的问题,提高了响应速度^[7-8];Zhang 等建立了空调系统的降阶线性模型,设计了滑模控制器对压缩机频率和膨胀阀开度进行调节,仿真结果表明,该方法具有较强的鲁棒性,能有效地跟踪设定值^[9];田健等将模糊控制与神经网络相结合,设计了模糊神经网络控制器,实现了过热度和蒸发温度的同时控制^[10];Wallace 等提出了一种无偏差模型预测控制器,实现了蒸汽压缩循环的无偏差跟踪,与经典的 PI 控制相比,该方法降低了蒸汽压缩循环的能耗,提高了跟踪性能^[11];Tesfay 等提出了一种新的自适应模型预测控制机制,采用自适应设定点搜索算法,使模型预测控制达到最佳过热响应^[12]。

近些年,韩京清提出的自抗扰控制理论成为了

研究热点^[13]。由于非线性自抗扰控制器参数复杂,Gao 等将非线性自抗扰控制器的非线性部分线性化,提出线性自抗扰控制,促进了自抗扰控制器的推广和应用^[14]。自抗扰控制器具有不依赖于精确的数学模型、抗干扰性强、结构简单等特点。同时,自抗扰控制技术在时滞系统的控制中有着广泛的应用前景^[15-16]。

压缩式制冷系统的结构复杂,运行过程中各个部件相互关联,难以建立精确的数学模型,且具有大时滞的特性。因此,本文设计了一种基于有限时间收敛扩张状态观测器的预测自抗扰控制策略,对制冷系统进行控制。首先,使用 Smith 预估器对系统的输出进行预估;然后,使用改进的扩张状态观测器估计系统的状态和系统受到的总扰动,并反馈到状态误差反馈控制律,从而实现制冷系统的预测自抗扰控制;同时,通过构造 Lyapunov 函数对改进扩张状态观测器误差的有限时间收敛性进行证明。仿真和实验证明了本文方法的有效性。

1 压缩式制冷系统的模型辨识

压缩式制冷系统的实验平台主要由变频压缩机、风冷冷凝器、电子膨胀阀和蒸发器组成。制冷系统装置如图 1 所示。

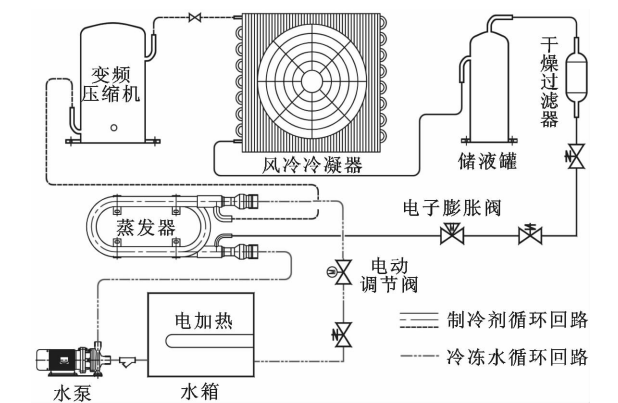


图 1 压缩式制冷系统实验装置

1.1 模型辨识

本文采用的控制方案如下:使用制冷系统的电子膨胀阀开度 v_a 控制蒸发器过热度 T_s ,使用压缩机频率 f_{com} 控制蒸发温度 T_e 。在压缩式制冷系统稳定运行后,分别采集压缩机频率和电子膨胀阀开度发生阶跃变化后至达到新稳态时的实验数据。将实验平台直接测量的压缩机吸气温度 T_1 和压缩机吸气压力 P_1 进行数据处理。在实验中测量到的压力 P_1 为表压力,而饱和蒸汽温度压力对照表中的是绝对压力 P_{abs} ,因此需要进行变换,公式为

$$P_{abs} = P_1 + P_a \tag{1}$$

式中大气压力 $P_a = 0.101\ 3\ \text{MPa}$ 。根据制冷剂 R410a 的饱和蒸汽温度压力对照表,即可将测得的吸气压力转化为蒸发温度 T_e 。根据压缩机吸气温度和蒸发温度,可以得到蒸发器过热度为

$$T_s = T_1 - T_e \tag{2}$$

本文使用 MATLAB 系统辨识工具箱对处理过的数据进行辨识,因此还需对输入输出数据进行增量化处理。压缩机频率阶跃变化下,过热度响应数据如表 1 所示。

表 1 压缩机频率阶跃变化下的过热度响应数据

t/s	0	20	40	60	80	100
$T_s/^\circ\text{C}$	17.85	17.85	13.01	8.29	6.69	5.78
$\Delta T_s/^\circ\text{C}$	0	0	-4.84	-9.56	-11.16	-12.07

t/s	120	140	160	180	200	220
$T_s/^\circ\text{C}$	5.39	4.96	4.62	4.37	4.20	4.15
$\Delta T_s/^\circ\text{C}$	-12.46	-12.89	-13.23	-13.48	-13.65	-13.70

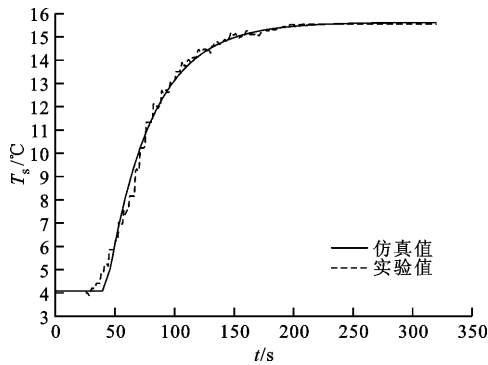
t/s	240	260	280	300	320	340
$T_s/^\circ\text{C}$	4.15	4.15	4.15	4.15	4.15	4.15
$\Delta T_s/^\circ\text{C}$	-13.70	-13.70	-13.70	-13.70	-13.70	-13.70

将表 1 数据导入 MATLAB 的系统辨识工具箱进行模型辨识,可得压缩机频率-过热度的传递函数模型。对其他数据采用相同方法进行处理,得到压缩式制冷系统的双输入双输出传递函数矩阵为

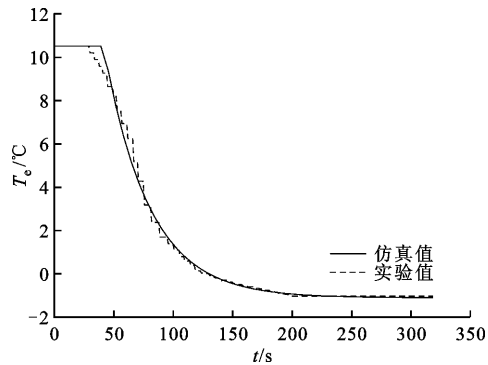
$$\begin{bmatrix} \Delta T_s \\ \Delta T_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-7.695}{37s+1}e^{-22s} & \frac{1.043}{29s+1}e^{-7s} \\ \frac{0.775}{37s+1}e^{-21s} & \frac{-1.206}{41s+1}e^{-4s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta v_a \\ \Delta f_{com} \end{bmatrix} \tag{3}$$

1.2 模型验证

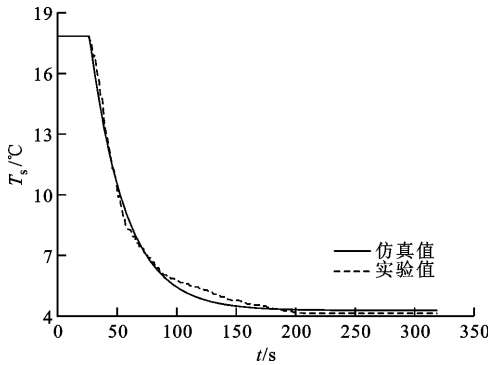
将压缩式制冷系统运行时采集的实验数据和辨识模型的响应曲线进行对比,以验证辨识得到的数学模型的准确性。对膨胀阀开度和压缩机频率阶跃变化下的过热度 and 蒸发温度响应曲线分别进行对比,结果如图 2 所示。可以看出,辨识模型仿真得到



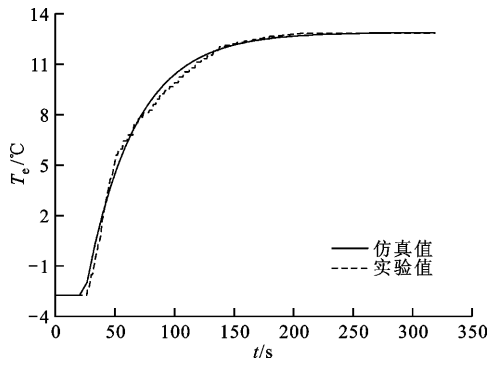
(a)膨胀阀开度阶跃变化下的过热度响应曲线



(b)膨胀阀开度阶跃变化下的蒸发温度响应曲线



(c)压缩机频率阶跃变化下的过热度响应曲线



(d)压缩机频率阶跃变化下的蒸发温度响应曲线

图 2 膨胀阀开度和压缩机频率阶跃变化下的过热度 and 蒸发温度响应曲线

的响应曲线和实际采集到的响应曲线相近,验证了辨识模型的准确性。

2 预测自抗扰控制策略

针对压缩式制冷系统具有的大时滞、耦合等问题,本文提出了一种预测自抗扰控制(PADRC)策略,结构如图 3 所示。首先,利用 Smith 预估器将模型中的时滞环节转移到闭环外部,减少控制过程中时滞性带来的影响。然后,采用解耦控制器将双输入双输出的模型转化为两个单输入单输出的形式。两个单回路分别为膨胀阀开度控制过热度回路和压缩机频率控制蒸发温度回路,后文分别简称为 T_s 回路和 T_e 回路。在自抗扰控制理论中,可将参数摄动和未建模动态产生的扰动以及外界扰动视为总扰动。最后,利用有限时间收敛的扩张状态观测器(FESO)对系统的状态和总扰动进行估计,并反馈给状态误差反馈(SEF)控制律,从而实现制冷系统的预测自抗扰控制。

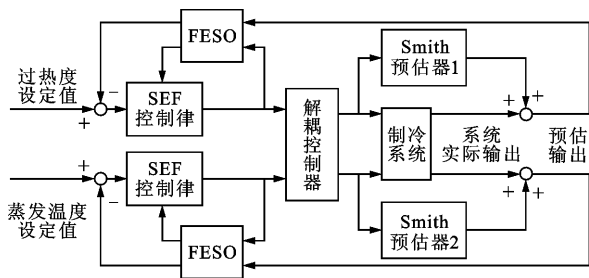


图 3 预测自抗扰控制策略

2.1 Smith 预估器

由制冷系统的数学模型可以看出,每一个传递函数都具有不同的时滞系数,时滞不仅使系统响应缓慢,还会影响系统输出的稳定性。因此,本文为制冷系统设计了 Smith 预估器,对压缩式制冷系统的输出进行预估,其结构如图 4 所示。

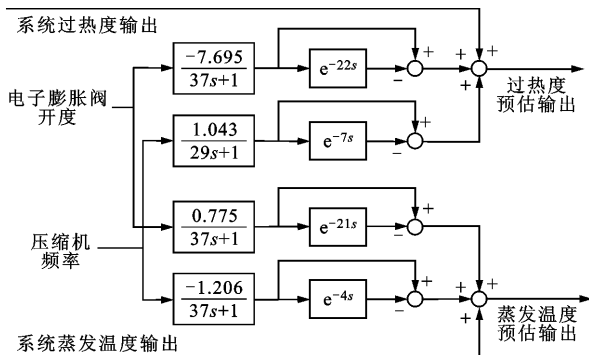


图 4 制冷系统的 Smith 预估器

分别为 T_s 回路和 T_e 回路控制闭环的反馈信号。

图 4 中的传递函数 $G_1(s)$ 为

$$G_1(s) = \begin{bmatrix} \frac{-7.695}{37s+1} & \frac{1.043}{29s+1} \\ \frac{0.775}{37s+1} & \frac{-1.206}{41s+1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

通过图 4 和式(4)可以看出,压缩式制冷系统的时滞环节由闭环内移到闭环外。过热度预估输出和蒸发温度预估输出比制冷系统的实际输出反应更快,减少了控制过程中时滞环节对系统动态性能的影响。

2.2 解耦控制器

压缩式制冷系统结构复杂,各个部件相互影响,存在耦合性。系统的耦合性影响了过热度和蒸发温度的独立控制,因此需要串联解耦控制器对压缩式制冷系统进行解耦。解耦后的函数矩阵 $F(s)$ 为对角矩阵,公式为

$$F(s) = G_1(s)G_N(s) = \begin{bmatrix} \frac{-7.695}{37s+1} & 0 \\ 0 & \frac{-1.206}{41s+1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中 $G_N(s)$ 为解耦控制器的传递函数。

由式(4)可知:由于 $\det(G_1(s)) \neq 0$,故 $G_1(s)$ 存在逆矩阵 $G_1^{-1}(s)$ 。在式(5)左右两边同时左乘 $G_1^{-1}(s)$,即可求得 $G_N(s)$ 为

$$G_N(s) = G_1^{-1}(s)F(s) = \begin{bmatrix} G_{N11} & G_{N12} \\ G_{N21} & G_{N22} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} G_{N11} &= \frac{42.2s^2 + 2.595s + 0.039}{37s^2 + 2.328s + 0.036} \\ G_{N12} &= \frac{8.086s^2 + 0.416s + 0.005}{41s^2 + 2.472s + 0.036} \\ G_{N21} &= \frac{30.05s^2 + 1.769s + 0.025}{37s^2 + 2.328s + 0.036} \\ G_{N22} &= \frac{46.76s^2 + 2.753s + 0.039}{41s^2 + 2.472s + 0.036} \end{aligned} \right\}$$

3 自抗扰控制器

自抗扰控制器由跟踪微分器、扩张状态观测器以及状态反馈控制律共 3 部分组成。由于制冷系统具有时滞特性,因此本文设计的自抗扰控制器中不含有跟踪微分器。本文使用结构简单、参数易调整的一阶自抗扰控制器对压缩式制冷系统进行控制。

根据式(5)可知,解耦后的被控对象为单输入单输出系统,其传递函数用一阶惯性的形式表示为

图 4 中,过热度预估输出和蒸发温度预估输出

$$G_p(s) = \frac{K}{Ts + 1} \quad (7)$$

式中 T 为惯性时间常数。

式(7)的微分方程为

$$\dot{y}_p = -\frac{1}{T}y_p + \frac{K}{T}u \quad (8)$$

式中: y_p 为被控对象的输出; u 为控制量。令 $f = -\frac{1}{T}y + \frac{K}{T}u - b_0u + w$ 表示系统受到的总扰动, w 表示系统受到的外部扰动, b_0 表示不确定的模型参数, 则式(8)可以写成

$$\dot{y}_p = f(y, w) + b_0u \quad (9)$$

其状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + b_0u; \dot{x}_2 = \dot{f} \\ y_p = x_1 \end{cases} \quad (10)$$

假设式(10)的任意可行解在扰动 f 下一致有界, 且对其导数有界, 则有 $|\dot{f}| \leq f_m^{[17]}$ 。

引理 1^[18] 对于非线性系统 $\dot{x} = f(x, t)$, $f(0, t) = 0$, $x \in \mathbf{R}^n$, 若存在连续正定函数 $V(x): D \rightarrow \mathbf{R}$, 使

$$\dot{V}(x) + c(V(x))^\delta \leq 0, \quad x \in v \setminus \{0\} \quad (11)$$

成立, 则原点是非线性系统的有限时间稳定平衡点。式(11)中: $c > 0$; $\delta \in (0, 1)$; $v \subset D$ 是位于原点的开邻域; $\setminus \{0\}$ 表示除 0 以外成立。调节时间 $T_t(x)$ 为

$$T_t(x) \leq \frac{1}{c(1-\delta)} V^{1-\delta}(x) \quad (12)$$

若 $D = \mathbf{R}^n$, $V(x)$ 是正则函数, 且在 $\mathbf{R}^n \setminus \{0\}$ 上 $\dot{V} < 0$, 则原点是非线性系统的全局有限时间稳定平衡点。

3.1 有限时间收敛的扩张状态观测器

本文根据超螺旋算法^[19]对扩张状态观测器的误差项进行改进, 提出了 FESO, 公式为

$$\begin{cases} e = z_1 - y_p \\ \dot{z}_1 = z_2 + b_0u - k_1 |e|^{\frac{\alpha+1}{2}} \operatorname{sgn} e \\ \dot{z}_2 = -k_2 |e|^{\frac{\alpha+1}{2}} \operatorname{sgn} e \end{cases} \quad (13)$$

式中: $k_i (i=1, 2)$ 为常数; $z_i (i=1, 2)$ 为扩张状态观测器对系统状态和总扰动的观测值。

令 $\varepsilon_i = z_i - x_i (i=1, 2)$, 则扩张状态观测器式(13)的误差方程为

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}_1 = \varepsilon_2 - k_1 |\varepsilon_1|^{\frac{\alpha+1}{2}} \operatorname{sgn} \varepsilon_1 \\ \dot{\varepsilon}_2 = -k_2 |\varepsilon_1|^{\frac{\alpha+1}{2}} \operatorname{sgn} \varepsilon_1 - \dot{f} \end{cases} \quad (14)$$

定理 1 系统在满足假设的情况下, 若存在常数 $k_1 > 0, k_2 > 0, t_s > 0$, 以及 $0 < \alpha < 1$, 使

$$\|\boldsymbol{\theta}\|_2 \leq \left(\frac{2If_m}{\lambda_{\min}(\boldsymbol{\Omega})} \right)^{\frac{\alpha+1}{2\alpha}} \quad (15)$$

在有限时间 t_s 内成立, 选取合适的 k_1, k_2 使 $2If_m <$

$\lambda_{\min}(\boldsymbol{\Omega})$, 则观测器误差 $\|\boldsymbol{\theta}\|_2$ 在有限时间 t_s 内充分小, 即改进的扩张状态观测器式(13)是有限时间收敛的。式(15)中: $\lambda_{\min}(\boldsymbol{\Omega})$ 表示求 $\boldsymbol{\Omega}$ 的最小特征值;

$$\boldsymbol{\Omega} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} k_1 & -1 \\ k_2 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{P} = \begin{bmatrix} \frac{2k_1}{\alpha+1} + k_2^2 & -k_2 \\ k_2 & 2 \end{bmatrix}; I = \sqrt{k_2^2 + 4}; \boldsymbol{\theta} = [\varepsilon_1 \mid \varepsilon_2]^T \cdot \operatorname{sgn} \varepsilon_1, \varepsilon_2]^T。$$

证明 构造 Lyapunov 函数, 并将定理 1 中的参数带入, 得到

$$\begin{aligned} V(\boldsymbol{\theta}) &= \boldsymbol{\theta}^T \mathbf{P} \boldsymbol{\theta} = \frac{2k_1}{\alpha+1} |\varepsilon_1|^{\alpha+1} + \varepsilon_2^2 + \\ &(\varepsilon_2 - k_2 |\varepsilon_1|^{\frac{\alpha+1}{2}} \operatorname{sgn} \varepsilon_1)^2 \geq 0 \end{aligned} \quad (16)$$

对 $\boldsymbol{\theta}$ 求导可得

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{\theta}} &= \begin{bmatrix} \frac{\alpha+1}{2} |\varepsilon_1|^{\frac{\alpha-1}{2}} (\varepsilon_2 - k_1 |\varepsilon_1|^{\frac{\alpha+1}{2}} \operatorname{sgn} \varepsilon_1) \\ -k_2 |\varepsilon_1|^{\frac{\alpha+1}{2}} \operatorname{sgn} \varepsilon_1 - \dot{f} \end{bmatrix} = \\ &-\mu \begin{bmatrix} \gamma k_1 & -\gamma \\ k_2 & 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{\theta} - \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \dot{f} \stackrel{\text{def}}{=} -\mu \mathbf{A}(\gamma, \mu) \boldsymbol{\theta} - \mathbf{B} \dot{f} \end{aligned} \quad (17)$$

式中: $\mu = |\varepsilon_1|^{(\alpha-1)/2} > 0$; $\gamma = (\alpha+1)/2 > 0$ 。

对 Lyapunov 函数 $V(\boldsymbol{\theta})$ 求导, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(\boldsymbol{\theta}) &= \dot{\boldsymbol{\theta}}^T \mathbf{P} \boldsymbol{\theta} + \boldsymbol{\theta}^T \mathbf{P} \dot{\boldsymbol{\theta}} = \\ &-|\varepsilon_1|^{\frac{\alpha+1}{2}} \boldsymbol{\theta}^T (\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}) \boldsymbol{\theta} - 2\mathbf{B}^T \mathbf{P} \dot{f} \boldsymbol{\theta} = \\ &-|\varepsilon_1|^{\frac{\alpha+1}{2}} \boldsymbol{\theta}^T \boldsymbol{\Omega} \boldsymbol{\theta} + 2\mathbf{C}^T \dot{f} \boldsymbol{\theta} \end{aligned} \quad (18)$$

式中: $\boldsymbol{\Omega} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}$; $\mathbf{C}^T = -\mathbf{B}^T \mathbf{P}$; $I = \|\mathbf{C}\|_2 = (k_2^2 + 4)^{1/2}$ 。

由 $0 < \alpha < 1$, $\|\boldsymbol{\theta}\|_2^2 = |\varepsilon_1|^{\alpha+1} + \varepsilon_2^2$, 可以得到

$$\mu = |\varepsilon_1|^{\frac{\alpha-1}{2}} \geq \|\boldsymbol{\theta}\|_2^{(\alpha-1)/(\alpha+1)} \quad (19)$$

根据式(16)可以得到

$$\lambda_{\min}(\mathbf{P}) \|\boldsymbol{\theta}\|_2^2 \leq V(\boldsymbol{\theta}) \leq \lambda_{\max}(\mathbf{P}) \|\boldsymbol{\theta}\|_2^2 \quad (20)$$

从而得到

$$|\varepsilon_1|^{\frac{\alpha+1}{2}} \leq \|\boldsymbol{\theta}\|_2 \leq \frac{V(\boldsymbol{\theta})^{1/2}}{\lambda_{\min}(\mathbf{P})} \quad (21)$$

根据式(18)(19)(21), 有

$$\begin{aligned} \dot{V}(\boldsymbol{\theta}) &\leq -\lambda_{\min}(\boldsymbol{\Omega}) \|\boldsymbol{\theta}\|_2^{\frac{2\alpha}{2}(\alpha+1)} \|\boldsymbol{\theta}\|_2^2 + \\ &2If_m \|\boldsymbol{\theta}\|_2 \leq \\ &-(\lambda_{\min}(\boldsymbol{\Omega}) \|\boldsymbol{\theta}\|_2^{\frac{2\alpha}{2}(\alpha+1)} - 2If_m) \|\boldsymbol{\theta}\|_2 \leq \\ &-(\lambda_{\min}(\boldsymbol{\Omega}) \|\boldsymbol{\theta}\|_2^{\frac{2\alpha}{2}(\alpha+1)} - 2If_m) \frac{V^{1/2}(\boldsymbol{\theta})}{\lambda_{\min}(\mathbf{P})} \end{aligned} \quad (22)$$

当 $\lambda_{\min}(\boldsymbol{\Omega}) \|\boldsymbol{\theta}\|_2^{\frac{2\alpha}{2}(\alpha+1)} - 2If_m \geq 0$ 时, 有 $\dot{V}(\boldsymbol{\theta}) \leq 0$ 。根据引理 1 可知, 误差式(14)是有限时间稳定的, 且收敛到

$$\|\boldsymbol{\theta}\|_2 \leqslant \left(\frac{2If_m}{\lambda_{\min}(\boldsymbol{\Omega})}\right)^{\frac{\alpha+1}{2\alpha}} \quad (23)$$

选取合适的 $k_1、k_2$,使 $2If_m<\lambda_{\min}(\boldsymbol{\Omega})$ 。因为此时 $0<\alpha<1,(\alpha+1)/2\alpha$ 充分大,所以 $\|\boldsymbol{\theta}\|_2$ 在有限时间内充分小。由此,定理 1 得证。

3.2 状态误差反馈控制律

状态误差反馈控制律对扩张状态观测器实时估计的总扰动进行补偿,从而实现系统的自抗扰控制。本文采用的线性误差反馈控制律为

$$u = \frac{u_0 - z_2}{b_0}; \quad u_0 = k(r - z_1) \quad (24)$$

式中: u_0 为比例控制器的输出; k 为比例控制器的增益; r 为设定值。

4 仿真对比分析

本节通过 MATLAB 仿真来说明所提控制策略的有效性。将基于线性扩张状态观测器的预测自抗扰控制(LADRC)策略和本文 PADRC 策略进行对比。LADRC 策略的线性扩张状态观测器结构为

$$\left. \begin{aligned} e(t) &= z_1(t) - y_p(t) \\ \dot{z}_1(t) &= z_2(t) + b_0 u(t) - l_1 e(t) \\ \dot{z}_2(t) &= -l_2 e(t) \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

式中 $l_1、l_2、b_0$ 为线性扩张状态观测器的参数。通过多次仿真和参考文献[20],得到自抗扰控制器的参数,如表 2 所示。

表 2 自抗扰控制器参数

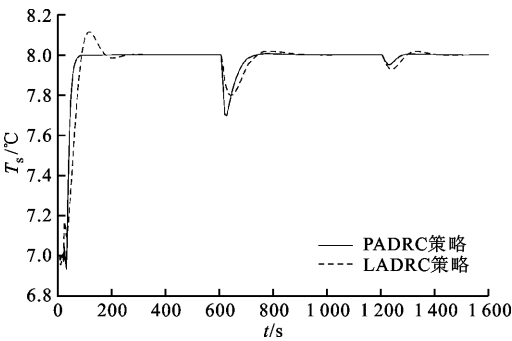
控制策略	回路类型	l_1 或 k_1	l_2 或 k_2	α	b_0	k
LADRC	T_s 回路	1	0.09		-10	10
	T_e 回路	1	0.10		-3	1
PADRC	T_s 回路	1	10	0.30	-10	10
	T_e 回路	1	10	0.34	-3	1

设定压缩式制冷系统的初始过热度为 7℃,蒸发温度为 5℃。在 10 s 时, T_s 回路加入阶跃信号,过热度从 7℃阶跃到 8℃;在 600 s 时, T_e 回路加入阶跃信号,蒸发温度从 5℃阶跃到 6℃;为了模拟制冷系统受到的外部扰动,系统稳定运行后,在1 200 s 时加入 0.1 的阶跃外部扰动。

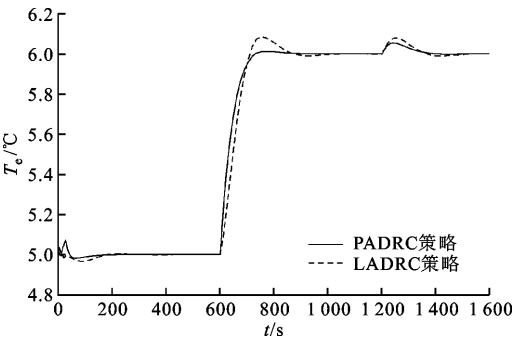
4.1 动态性能对比

将两种控制策略的过热度 and 蒸发温度的响应曲线进行对比,结果如图 5 所示。两种控制策略的跟踪性能和抗干扰性能如表 3 所示。

由图 5 和表 3 可以看出:在设定值阶跃变化时,PADRC 的上升时间和调节时间更短,超调量更小;



(a)过热度响应曲线



(b)蒸发温度响应曲线

图 5 两种控制策略的过热度 and 蒸发温度响应曲线

在出现外部扰动时,PADRC 的动态降落更小,恢复时间更短,且能够快速恢复稳定的输出。因此,本文 PADRC 策略具有良好跟踪性能和抗干扰能力。

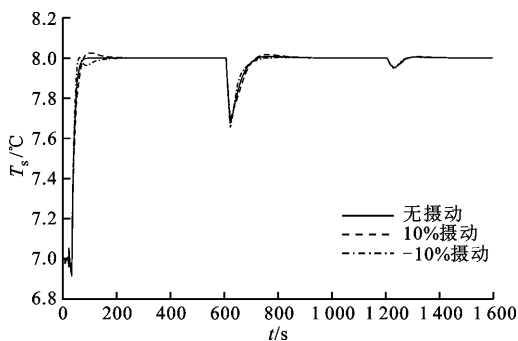
表 3 两种控制策略的跟踪性能和抗干扰性能

控制策略	回路类型	上升时间 /s	超调量/%	调节时间 /s	动态降落	恢复时间 /s
LADRC	T_s 回路	79	11	152	0.08	99
	T_e 回路	122	8	240	0.07	137
PADRC	T_s 回路	73	0	61	0.05	59
	T_e 回路	138	1	120	0.05	120

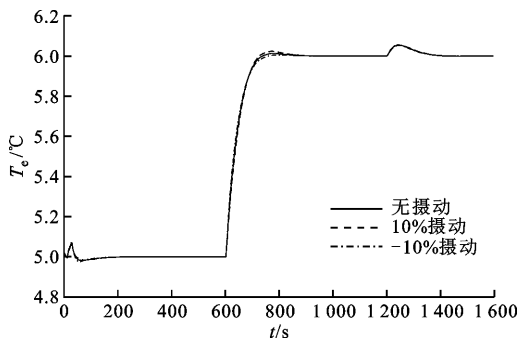
注:表中加粗数据为较优值。

4.2 鲁棒性对比

压缩式制冷系统在运行过程中受负荷、水温以及未建模动态等因素的影响,实际参数会产生摄动。本小节分别将系统的惯性时间和时滞时间改变 10%,在输入阶跃变化和外加扰动情况下,对比系统的响应曲线,结果如图 6 和图 7 所示。可以看出,在压缩式制冷系统的惯性时间或时滞时间存在摄动的情况下,本文 PADRC 控制策略均能快速准确地跟随设定值并抑制扰动。

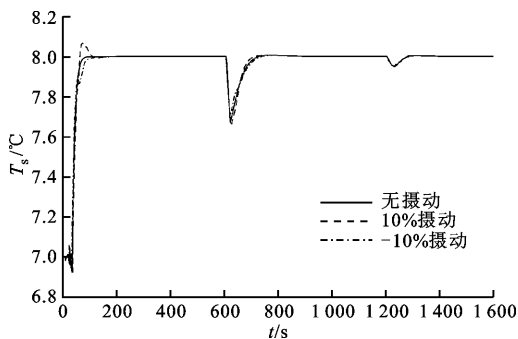


(a) 过热度响应曲线

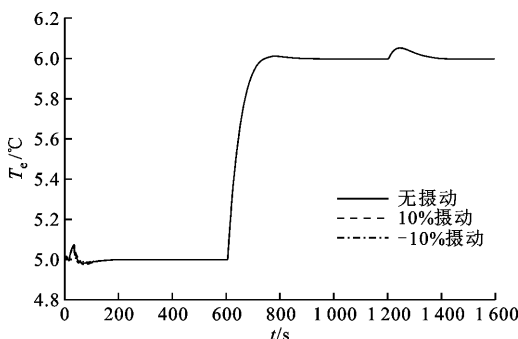


(b) 蒸发温度响应曲线

图6 惯性时间扰动下的过热度与蒸发温度响应曲线



(a) 过热度响应曲线



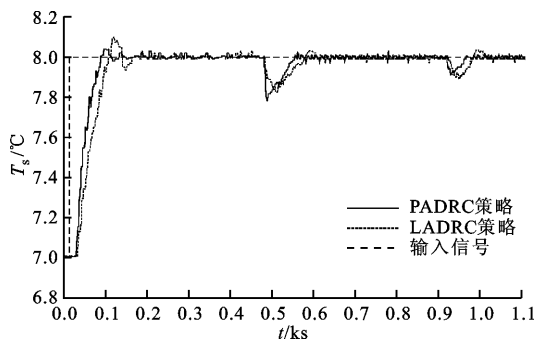
(b) 蒸发温度响应曲线

图7 时滞时间扰动下的过热度与蒸发温度响应曲线

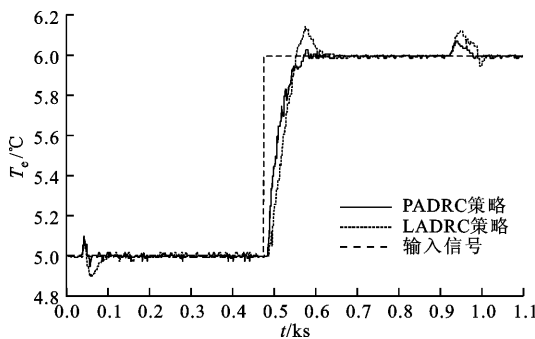
5 实验验证

为了进一步验证本文 PADRC 控制策略的控制

效果,将 PADRC 和 LADRC 策略在压缩式制冷系统实验平台上进行实验对比。实验时环境温度为 27.6℃,过热度为 7℃,蒸发温度为 5℃。实验过程如下:系统稳定运行后,设置起始时间为 0 s,10 s 时过热度设定值阶跃变为 8℃,480 s 时蒸发温度设定值阶跃变为 6℃,910 s 时突加负载扰动。实验得到的过热度与蒸发温度响应曲线如图 8 所示。



(a) 过热度响应曲线



(b) 蒸发温度响应曲线

图8 实验得到的过热度与蒸发温度响应曲线

因为制冷系统时滞特性的影响,在设定值突变时,过热度与蒸发温度经过时间延迟才开始变化。从图 8 可以看出:在设定值突变的情况下,采用 PADRC 策略,过热度与蒸发温度响应曲线的调节时间短,超调量小,与 LADRC 策略相比,PADRC 策略的调节时间减少了 30%左右,动态性能得到有效提高;在 910 s 时,蒸发温度与过热度受负载扰动的影响,产生振荡,PADRC 策略的过热度与蒸发温度响应曲线的动态降落减少了 12%左右,恢复稳定状态快,抗干扰性强。实验结果表明,本文提出的 PADRC 控制策略能够改善过热度与蒸发温度的跟踪性能和抗干扰能力。

6 结 论

本文提出一种基于有限时间收敛扩张状态观测

器的预测自抗扰控制策略,实现了对压缩式制冷系统蒸发器过热度 and 蒸发温度的独立控制。首先,通过系统辨识工具箱对采集的实验数据进行系统辨识,得到压缩式制冷系统的数学模型。然后,采用 Smith 预估控制器,将系统的时滞环节放在闭环之外,并通过串联解耦控制器对制冷系统进行解耦。最后,采用 PADRC 策略对解耦后的系统进行控制。仿真和实验结果表明,与 LADRC 策略相比,本文提出的 PADRC 策略响应更快,超调量更小,在扰动下恢复稳态更快。

本文提出的控制策略具有更快的跟踪性能和更优的抗干扰性能,在模型参数摄动的情况下,也有很好的鲁棒性。本文通过仿真和实验验证了 PADRC 控制策略具有良好的动态性能,却没有在节能方向进行探索和研究。除此之外,没有分析控制参数对系统的影响。因此,压缩式制冷系统的节能优化和控制参数分析将是未来研究的重点。

参考文献:

- [1] LI Ding, LI Donghui, LI Chengdong, et al. A novel data-temporal attention network based strategy for fault diagnosis of chiller sensors [J]. *Energy and Buildings*, 2019, 198: 377-394.
- [2] LIN Jinlong, YE H T J. Control of multi-evaporator air-conditioning systems for flow distribution [J]. *Energy Conversion and Management*, 2009, 50(6): 1529-1541.
- [3] ZHAO B Y, ZHAO Z G, LI Y, et al. An adaptive PID control method to improve the power tracking performance of solar photovoltaic air-conditioning systems [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 113: 109250.
- [4] CARREÑO-ZAGARRA J J, VILLAMIZAR R, MORENO J C, et al. Active disturbance rejection and PID control of a one-stage refrigeration cycle [J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2018, 51(4): 444-449.
- [5] 李兆博, 吴爱国, 何熠, 等. 制冷系统的改进 Smith 预估补偿和解耦控制 [J]. *控制理论与应用*, 2013, 30(1): 111-117.
LI Zhaobo, WU Aiguo, HE Yi, et al. Improved Smith predictive compensation and decoupling in refrigeration system. [J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(1): 111-117.
- [6] 李冬辉, 高峰. 基于扰动观测器的压缩式制冷系统改进 Smith 预估解耦控制 [J]. *上海交通大学学报*, 2019, 53(5): 593-599.

- LI Donghui, GAO Feng. Improved Smith predictive decoupling control based on disturbance observer for compression refrigeration system [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2019, 53(5): 593-599.
- [7] SCHURT L C, HERMES C J L, TROFINO NETO A. Assessment of the controlling envelope of a model-based multivariable controller for vapor compression refrigeration systems [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2010, 30(13): 1538-1546.
- [8] SCHURT L C, HERMES C J L, NETO A T. A model-driven multivariable controller for vapor compression refrigeration systems [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2009, 32(7): 1672-1682.
- [9] ZHANG Q S, CANOVA M, RIZZONI G. Sliding mode control of an automotive air conditioning system [C]// *Proceeding of the 2013 American Control Conference*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2013: 5748-5753.
- [10] 田健, 朱瑞琪, 冯全科. 风冷制冷机组的多变量模糊控制研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2006, 40(5): 514-517.
TIAN Jian, ZHU Ruiqi, FENG Quanke. Study on multi-variable fuzzy neural control for air cooled refrigeration system [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2006, 40(5): 514-517.
- [11] WALLACE M, DAS B, MHASKAR P, et al. Offset-free model predictive control of a vapor compression cycle [J]. *Journal of Process Control*, 2012, 22(7): 1374-1386.
- [12] TESFAY M, ALSALEEM F, ARUNASALAM P, et al. Adaptive-model predictive control of electronic expansion valves with adjustable setpoint for evaporator superheat minimization [J]. *Building and Environment*, 2018, 133: 151-160.
- [13] 韩京清. 从 PID 技术到“自抗扰控制”技术 [J]. *控制工程*, 2002, 9(3): 13-18.
HAN Jingqing. From PID to active disturbance rejection control. [J]. *Basic Automation*, 2002, 9(3): 13-18.
- [14] GAO Z Q. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning [C]// *Proceedings of the 2003 American Control Conference*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003: 4989-4996.
- [15] 王丽君, 李擎, 童朝南, 等. 时滞系统的自抗扰控制综述 [J]. *控制理论与应用*, 2013, 30(12): 1521-1533.

(下转第 120 页)

- [EB/OL]. (2019-02-27) [2020-06-07]. <https://www.qschina.cn/university-rankings/world-university-rankings/2019>.
- [13] 张军平, 王珏. 主曲线研究综述 [J]. 计算机学报, 2003, 26(2): 1-18.
ZHANG Junping, WANG Jue. An overview of principal curves [J]. Chinese Journal of Computers, 2003, 26(2): 1-18.
- [14] 冯江平, 张月, 赵舒贞, 等. 网络舆情评价指标体系的构建与应用 [J]. 云南师范大学学报(哲学社会科学版), 2014, 46(2): 75-84.
FENG Jiangping, ZHANG Yue, ZHAO Shuzhen, et al. Construction and application of the evaluation system of internet public opinion [J]. Journal of Yunnan Normal University (Humanities and Social Sciences), 2014, 46(2): 75-84.
- [15] 张一文, 齐佳音, 方滨兴, 等. 基于贝叶斯网络建模的非常规危机事件网络舆情预警研究 [J]. 图书情报工作, 2012, 56(2): 76-81.
ZHANG Yiwen, QI Jiayin, FANG Binxing, et al. Online public opinion risk warning based on Bayesian network modeling [J]. Library and Information Service, 2012, 56(2): 76-81.
- [16] FARIN G. Curves and surfaces for computer-aided geometric design: a practical guide [M]. San Francisco, USA: Morgan Kaufmann Publishers, 1988: 1-334.
- [17] HU B, MANN G, GOSINE R. Control curve design for nonlinear (or fuzzy) proportional actions using spline-based functions [J]. Automatica, 1998, 34(9): 1125-1133.
- [18] LI Chunguo, MEI Xing, HU Baogang. Unsupervised ranking of multi-attribute objects based on principal curves [J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2015, 27(12): 3404-3416.
- [19] MCLACHLAN G J, KRISHNAN T. The EM algorithm and extensions [M]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley and Sons, 2008: 1-400.
- [20] US News and World Report L. P. Quality of life country 2019 [EB/OL]. (2019-01-23) [2020-03-07]. <https://www.usnews.com/news/best-countries/quality-of-life-rankings>.
- [21] JÄRVELIN K, KEKÄLÄINEN J. IR evaluation methods for retrieving highly relevant documents [C] // Proceedings of the 23rd Annual International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval. New York, USA: ACM, 2000: 41-48.

(编辑 武红江)

(上接第 105 页)

- WANG Lijun, LI Qing, TONG Chaonan, et al. Overview of active disturbance rejection control for systems with time-delay [J]. Control Theory & Applications, 2013, 30(12): 1521-1533.
- [16] 王永帅, 陈增强, 孙明玮, 等. 一阶大时滞对象降阶自抗扰控制的鲁棒稳定性 [J]. 中国科学技术大学学报, 2019, 49(1): 55-62.
WANG Yongshuai, CHEN Zengqiang, SUN Mingwei, et al. Robust stability of reduced-order linear ADRC for first-order plants with large time-delay [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2019, 49(1): 55-62.
- [17] HOFFMANN G, HUANG Haomiao, WASLANDER S, et al. Quadrotor helicopter flight dynamics and control: theory and experiment [C] // Proceedings of the 2007 AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit. Reston, VA, USA: AIAA, 2007: 1670-1689.
- [18] BHAT S P, BERNSTEIN D S. Finite-time stability of continuous autonomous systems [J]. SIAM Journal on Control and Optimization, 2000, 38(3): 751-766.
- [19] WANG Xinhua, LIN Hai. Design and frequency analysis of continuous finite-time-convergent differentiator [J]. Aerospace Science and Technology, 2012, 18(1): 69-78.
- [20] 王永帅, 陈增强, 孙明玮, 等. 一阶惯性大时滞系统 Smith 预估自抗扰控制 [J]. 智能系统学报, 2018, 13(4): 500-508.
WANG Yongshuai, CHEN Zengqiang, SUN Mingwei, et al. Smith prediction and active disturbance rejection control for first-order inertial systems with long time-delay [J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2018, 13(4): 500-508.

(编辑 陶晴)