

DOI: 10.7652/xjtuxb201609014

制冷系统自抗扰解耦控制

薛洪武, 吴爱国, 董娜

(天津大学电气与自动化工程学院, 300072, 天津)

摘要: 针对制冷系统具有非线性、强耦合、大时滞且难以建立精确数学模型等特点,设计了一种改进的自抗扰解耦控制器。首先,通过引入线性修正项设计了非齐次有限时间收敛的扩张状态观测器,保证了观测器误差在有限时间内能够快速收敛到 0,进而通过构造 Lyapunov 函数证明了其有限时间收敛的特性;采用静态解耦方法将制冷系统解耦为两个单输入、单输出系统,实现了制冷系统过热度 and 蒸发温度的独立控制;最后,利用改进的扩张状态观测器估计动态耦合和其他扰动并补偿到非线性误差反馈控制中,实现了制冷系统的动态解耦并改善了控制效果。仿真结果表明,该控制器不仅能较好实现解耦并具有良好的动态特性,而且具有更好的抗扰性和较强的鲁棒性,同时约有 2% 的节能效果。

关键词: 制冷系统;自抗扰控制;扩张状态观测器;非齐次有限时间收敛;解耦

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)09-0085-06

Active Disturbance Rejection Decoupling Control for Refrigeration Systems

XUE Hongwu, WU Aiguo, DONG Na

(School of Electrical Engineering & Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Because the refrigeration systems are normally with such features as nonlinearity, strong coupling and large delay and it is difficult to establish precise mathematical models for them, an improved active disturbance rejection controller (ADRC) with decoupling control algorithm is proposed. First, a non-homogeneous finite-time convergent extended state observer (ESO) is designed by adding linear correction terms to the algorithm to ensure that the observer error converges to 0 quickly in a finite time. Then its finite-time convergent property is proved by using a Lyapunov function. A static decoupling process is applied to decouple the refrigeration system into two single-input and single-output systems, realizing the independent control over the superheat and evaporation temperature of the refrigeration system. The dynamic coupling and other disturbances are estimated by the improved ESO and compensated to the nonlinear error feedback control, which achieves the dynamic decoupling of the refrigeration system and improves the control results. Simulation results reveal that the proposed method realizes a better decoupling control with good dynamic characteristics, better disturbance rejection and robustness. Moreover, it saves about 2% energy.

Keywords: refrigeration system; active disturbance rejection control; extended state observer; non-homogeneous finite-time convergence; decoupling

收稿日期: 2015-12-27。 作者简介: 薛洪武(1991—),男,硕士生;吴爱国(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61403274);天津市应用基础及前沿技术研究计划资助项目(13JCQNJC03600)。

网络出版时间: 2016-07-14 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20160714.1117.002.html>

制冷系统能耗约占建筑总能耗的60%，制冷系统的稳定控制对于制冷系统的节能降耗具有重要意义。一般来说，应用到制冷系统中的控制方法主要用于跟踪控制过热度 and 蒸发压力的变化^[1]。Shah等提出了一个离散的状态变量模型并采用LQR控制器对制冷系统的参考信号进行跟踪和扰动抑制^[2]。Rasmussen等建立了低阶非线性的蒸发器模型，并设计了反步自适应控制器以适应系统参数变化对控制效果的影响^[3]。Schurt等设计了基于卡尔曼滤波器状态观测器的LQG控制器^[4]。Zhang等通过机理建模得到了制冷系统的六阶模型并在操作点附近线性化得到线性模型，采用滑模观测器和滑模控制器对制冷系统进行跟踪控制^[5]。田健等提出了一种模糊神经网络控制器，在线调整模糊规则，实现了制冷系统的多变量控制^[6]。白建波等设计了Smith预估的自校正控制算法，通过在线辨识空调的对象模型，进而用Smith预估器补偿时滞，并用PI控制器进行控制^[7]。

目前，制冷系统仍未能通过机理建模得到用于控制器设计的精确数学模型，而自抗扰控制器^[8]不需要依赖精确模型，只需知道被控对象的大概阶数，根据对象的阶数设计控制器的阶数，而制冷系统模型一般采用一阶时滞模型近似表示，在工程实际中当模型参数和工作点变化时只需调整控制器参数即可满足控制要求，自抗扰控制器在实际研发中具有巨大优势。因此，本文利用自抗扰控制器不依赖系统模型的特点设计了一个改进的自抗扰控制器，用于制冷系统的跟踪控制。根据文献[9-12]所提非齐次有限时间收敛算法，本文通过引入线性修正项设计了非齐次的有限时间收敛的扩张状态观测器，使观测器的误差在有限时间范围内收敛到0，然后通过Lyapunov函数证明了其有限时间收敛的特性，继而设计了制冷系统的自抗扰解耦控制器，将制冷系统的未建模动态、不确定项、动态耦合以及外部扰动作为总的扰动进行估计补偿。

1 模型辨识

目前，通过机理建模得到的制冷系统数学模型普遍为高阶系统，难以满足常规控制方法的设计要求，为了简化控制系统的设计过程，采用系统辨识的方法获得制冷系统的数学模型。制冷系统实验平台由活塞式压缩机、电子膨胀阀、板式换热器、气液热交换器和储液器等设备构成，制冷系统装置如图1所示。

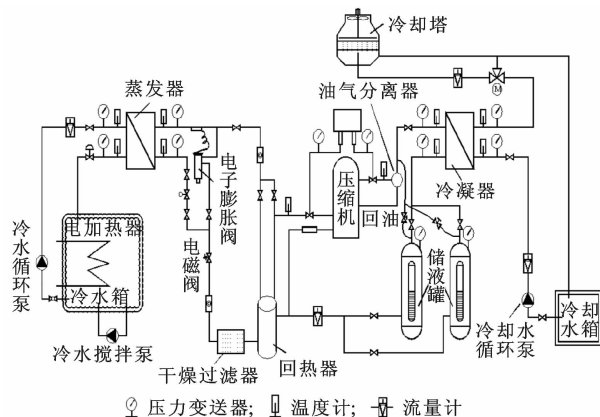


图1 制冷系统装置

运行实验平台采集系统辨识所需的实验数据，根据最小二乘法ARX模型原理，用MATLAB系统辨识工具箱辨识得到制冷系统的数学模型。对比分析辨识模型的仿真响应曲线和系统实际输出响应曲线，验证了辨识模型的实用性。辨识得到的制冷系统传递函数矩阵为^[13]

$$\begin{bmatrix} \Delta T_s \\ \Delta T_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-0.825}{38s+1}e^{-9s} & \frac{1.84}{35s+1}e^{-26s} \\ \frac{0.778}{35s+1}e^{-10s} & \frac{-0.752}{41s+1}e^{-28s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta v \\ \Delta f \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： v 、 f 为电子膨胀阀的开度、活塞式压缩机的频率； T_s 、 T_e 为制冷剂的过热度 and 蒸发温度。

2 扩张状态观测器设计

引理1^[14] 对于非线性系统 $\dot{x} = f(x, t)$, $f(0, t) = 0$, $x \in \mathbb{R}^n$, 如果存在连续正定函数 $V(t)$ 满足不等式

$$\dot{V}(x) + \alpha V(x) + \beta V^\tau(x) \leq 0 \quad (2)$$

则非线性系统在有限时间内稳定到原点，且调节时间 T 满足

$$T \leq \frac{1}{\alpha(1-\tau)} \ln \frac{\alpha V^{1-\tau}(x_0) + \beta}{\beta} \quad (3)$$

其中 $\alpha > 0$, $\beta > 0$, $0 < \tau < 1$ 。

对于具有外部扰动和未建模动态的单输入单输出系统

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= f(x_1, x_2, t) + bu + w \\ y &= x_1 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

令 $L = f(x_1, x_2, t) + w$, 且假设 $|\dot{L}| \leq L_2$, 则式(4)可转换为

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= x_3 + bu \\ \dot{x}_3 &= \dot{L} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

本文根据文献[9-12]中所设计的非齐次算法，

设计了一种非齐次有限时间内收敛的扩张状态观测器,即

$$\left. \begin{aligned} \dot{\hat{x}}_1 &= \hat{x}_2 - k_1 |e_1|^{\frac{a+1}{2}} \operatorname{sgn}(e_1) - k_2 e_1 \\ \dot{\hat{x}}_2 &= \hat{x}_3 + bu - k_3 |e_1|^{\frac{a+1}{2}} \operatorname{sgn}(e_1) - k_4 e_1 \\ \dot{\hat{x}}_3 &= -k_5 |e_1|^a \operatorname{sgn}(e_1) - k_6 e_1 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: $e_1 = \hat{x}_1 - y$; $0 < a < 1$, $k_n > 0$ ($n = 1, 2, \dots, 6$) 为可调参数; $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 为符号函数。

记 $e_m = \hat{x}_m - x_m$ ($m = 1, 2, 3$), 则扩张状态观测器的误差系统为

$$\left. \begin{aligned} \dot{e}_1 &= e_2 - k_1 |e_1|^{\frac{a+1}{2}} \operatorname{sgn}(e_1) - k_2 e_1 \\ \dot{e}_2 &= e_3 - k_3 |e_1|^{\frac{a+1}{2}} \operatorname{sgn}(e_1) - k_4 e_1 \\ \dot{e}_3 &= -k_5 |e_1|^a \operatorname{sgn}(e_1) - k_6 e_1 - \dot{L} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

构造 Lyapunov 函数

$$\begin{aligned} V &= \frac{2k_5}{a+1} |e_1|^{a+1} + k_6 e_1^2 + \frac{1}{2} e_2^2 + \frac{1}{2} e_3^2 + \\ &\quad \frac{1}{2} [k_1 |e_1|^{\frac{a+1}{2}} \operatorname{sgn}(e_1) + k_2 e_1 - e_2]^2 + \\ &\quad \frac{1}{2} [k_3 |e_1|^{\frac{a+1}{2}} \operatorname{sgn}(e_1) + k_4 e_1 - e_3]^2 \end{aligned} \quad (8)$$

$$V = \xi^T P \xi \quad (9)$$

式中: $\xi = [|e_1|^{\frac{a+1}{2}} \operatorname{sgn}(e_1) \quad e_1 \quad e_2 \quad e_3]^T$;

$$P = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \frac{4k_5}{a+1} + k_1^2 + k_3^2 & k_1 k_2 + k_3 k_4 & -k_1 & -k_3 \\ k_1 k_2 + k_3 k_4 & 2k_6 + k_2^2 + k_4^2 & -k_2 & -k_4 \\ -k_1 & -k_2 & 2 & 0 \\ -k_3 & -k_4 & 0 & 2 \end{bmatrix}.$$

由式(9)得

$$\lambda_{\min}\{P\} \|\xi\|_2^2 \leq V \leq \lambda_{\max}\{P\} \|\xi\|_2^2 \quad (10)$$

对 ξ 求导可得

$$\begin{aligned} \dot{\xi} &= \begin{bmatrix} \frac{a+1}{2} |e_1|^{\frac{a-1}{2}} [e_2 - k_1 |e_1|^{\frac{a+1}{2}} \operatorname{sgn}(e_1) - k_2 e_1] \\ e_2 - k_1 |e_1|^{\frac{a+1}{2}} \operatorname{sgn}(e_1) - k_2 e_1 \\ e_3 - k_3 |e_1|^{\frac{a+1}{2}} \operatorname{sgn}(e_1) - k_4 e_1 \\ -k_5 |e_1|^a \operatorname{sgn}(e_1) - k_6 e_1 - \dot{L} \end{bmatrix} = \\ &\quad \begin{bmatrix} -\beta \mu k_1 & -\beta \mu k_2 & \beta \mu & 0 \\ -k_1 & -k_2 & 1 & 0 \\ -k_3 & -k_4 & 0 & 1 \\ -k_5 \mu & -k_6 & 0 & 0 \end{bmatrix} \xi - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \dot{L} = A\xi - B\dot{L} \end{aligned} \quad (11)$$

式中: $\beta = \frac{a+1}{2}$; $\mu = |e_1|^{\frac{a-1}{2}}$ 。

对式(9)求导可得

$$\dot{V} = \xi^T P \dot{\xi} + \dot{\xi}^T P \xi = \xi^T (A^T P + P A) \xi - 2B^T P \dot{L} \xi \quad (12)$$

$$\dot{V} = -|e_1|^{\frac{a-1}{2}} \xi^T \Omega_1 \xi - \xi^T \Omega_2 \xi + \dot{L} \xi \quad (13)$$

由式(13)可得

$$\dot{V} \leq -|e_1|^{\frac{a-1}{2}} \lambda_{\min}\{\Omega_1\} \|\xi\|_2^2 - \lambda_{\min}\{\Omega_2\} \|\xi\|_2^2 + L_2 \|\Gamma\|_2 \|\xi\|_2 \quad (14)$$

由于 $|e_1|^{\frac{a-1}{2}} \geq \|\xi\|_2^{\frac{a-1}{2}}$, 故可得

$$\dot{V} \leq -\lambda_{\min}\{\Omega_1\} \|\xi\|_2^{\frac{a-1}{2}} \|\xi\|_2^{\frac{2}{2}} - \lambda_{\min}\{\Omega_2\} \|\xi\|_2^2 + L_2 \|\Gamma\|_2 \|\xi\|_2 \quad (15)$$

$$\dot{V} \leq -(\lambda_{\min}\{\Omega_1\} \|\xi\|_2^{\frac{2a}{2+1}} - L_2 \|\Gamma\|_2) \|\xi\|_2 - \lambda_{\min}\{\Omega_2\} \|\xi\|_2^2 \quad (16)$$

根据式(10)可求得

$$\frac{V}{\lambda_{\max}\{P\}} \leq \|\xi\|_2^2 \leq \frac{V}{\lambda_{\min}\{P\}} \quad (17)$$

则式(16)可写为

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -(\lambda_{\min}\{\Omega_1\} \|\xi\|_2^{\frac{2a}{2+1}} - L_2 \|\Gamma\|_2) \cdot \\ &\quad \frac{V^{0.5}}{(\lambda_{\max}\{P\})^{1/2}} - \frac{\lambda_{\min}\{\Omega_2\}}{\lambda_{\max}\{P\}} V \end{aligned} \quad (18)$$

根据引理 1, 如果 $\lambda_{\min}\{\Omega_1\} \|\xi\|_2^{\frac{2a}{2+1}} \geq L_2 \|\Gamma\|_2$, 则误差系统是有限时间稳定的, 且在有限时间内收敛到

$$\|\xi\|_2 \leq \left(\frac{L_2 \|\Gamma\|_2}{\lambda_{\min}\{\Omega_1\}} \right)^{\frac{a+1}{2a}} \quad (19)$$

因此, 可选择合适的参数使得 $L_2 \|\Gamma\|_2 / \lambda_{\min}\{\Omega_1\} < 1$, 由于 $0 < a < 1$ 充分小, $(a+1)/2a$ 充分大, 则误差系统 $\|\xi\|_2$ 在有限时间内充分小。

3 制冷系统自抗扰解耦控制

由于制冷系统为耦合系统, 若将上述所设计的控制方法应用到制冷系统的跟踪控制中, 需要通过引入虚拟控制量将制冷系统解耦为两个单输入单输出的控制系统。本文采用静态解耦方法对制冷系统进行解耦, 其动态耦合部分看成系统的外部扰动, 通过 FTESO 估计并补偿到反馈控制率中, 进而实现制冷系统的动态解耦。

制冷系统的静态解耦矩阵为

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix}^{-1} \quad (20)$$

故可对解耦后的每个 SISO 系统设计如式(6)所示的 FTESO

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_{i1} &= x_{i2} - k_1 |e_{i1}|^{\frac{a+1}{2}} \operatorname{sgn}(e_{i1}) - k_2 e_{i1} \\ \dot{x}_{i2} &= x_{i3} + bu_i - k_3 |e_{i1}|^{\frac{a+1}{2}} \operatorname{sgn}(e_{i1}) - k_4 e_{i1} \\ \dot{x}_{i3} &= -k_5 |e_{i1}|^a \operatorname{sgn}(e_{i1}) - k_6 e_{i1} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

式中: $i = 1, 2$; $e_{i1} = x_{i1} - y_i$ 。根据引理 1, 观测器的

观测量在有限时间内 $x_{i1} \rightarrow y_i, x_{i2} \rightarrow \dot{y}_i, x_{i3} \rightarrow L_i$ 。

本文设计的自抗扰控制器中非线性误差反馈控制率采用最速控制综合函数 $\text{fhan}(\cdot)$, 引入 FTE-SO 估计的广义扰动进行补偿, 提高了控制系统对模型不确定性和外部扰动的抑制能力, 可表示为

$$\left. \begin{aligned} e_{i1} &= x_{i1} - y_i \\ e_{i2} &= -x_{i2} \\ u_{i0} &= -\text{fhan}(e_{i1}, ce_{i2}, r, h) \\ u_i &= (u_{i0} - x_{i3})/b \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

$$\text{fhan} = \begin{cases} -\frac{rz}{\delta}, & |z| \leq \delta \\ -\text{sgn}(z)r, & |z| > \delta \end{cases}$$

$$z = \begin{cases} x_2 + \frac{d}{h}, & |d| \leq \delta_0 \\ x_2 + \frac{1}{2}(z_0 - \delta)\text{sgn}(d), & |d| > \delta_0 \end{cases}$$

$$\delta = rh, \quad \delta_0 = rh^2, \quad d = x_1 + hx_2$$

$$z_0 = (\delta^2 + 8r|d|)^{1/2} \quad (23)$$

式中: c 为阻尼因子; h 为精度因子, 决定对设定值的跟踪精度。根据式(6)可知, 当 k_2, k_4, k_6 均为 0 时, 本文所设计的 FTESO 与文献[15]所提算法相同(本文记为 FESO)。为验证本文基于 FTESO 自抗扰控制器的有效性, 设计了基于 FESO 自抗扰控制器用来对比分析, 算法为

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_{i1} &= x_{i2} - k_1 |e_{i1}|^{\frac{a+1}{2}} \text{sgn}(e_{i1}) \\ \dot{x}_{i2} &= x_{i3} - k_3 |e_{i1}|^{\frac{a+1}{2}} \text{sgn}(e_{i1}) \\ \dot{x}_{i3} &= -k_5 |e_{i1}|^a \text{sgn}(e_{i1}) \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

4 仿真验证

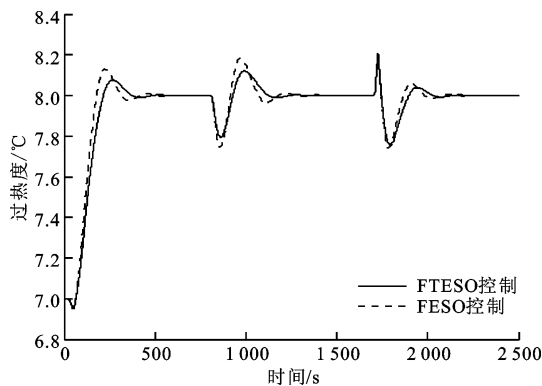
为了验证本文所设计自抗扰控制器的有效性, 本文分别对基于 FTESO 和基于 FESO 的控制器进行了对比仿真实验。自抗扰控制器调整好的参数为: $k_1 = 1, k_2 = 25, k_3 = 25, k_4 = 281, k_5 = 50, k_6 = 1581, a = 0.6, c = 2, r = 20, h = 5, b = 30$ 。

由于制冷系统的主要耗能部件为压缩机, 在产生相同制冷效果的情况下考察压缩机的输入功率大小, 对于评估制冷系统能耗具有重要的指导意义。根据压缩机的工作特性, 以能耗指标 $\int u^3$ 考察制冷系统的能耗大小, 其中 u 为压缩机的频率变化量^[16]。

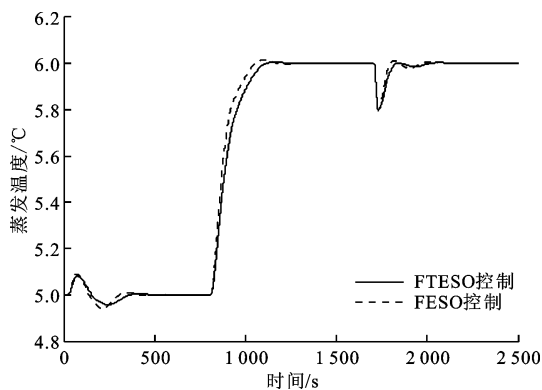
4.1 解耦和抗扰性能仿真

当制冷系统工作在过热度为 7°C 、蒸发温度为 5°C 时, 过热度的设定值在 15 s 时由 7°C 阶跃上升到 8°C , 蒸发温度的设定值在 800 s 时由 5°C 阶跃上

升到 6°C 。系统稳定运行后在 1 800 s 时同时给系统两个 SISO 端加入幅值为 0.2°C 的阶跃上升负载扰动信号, 验证该控制方法对外部扰动的抑制能力, 过热度跟踪响应曲线如图 2 所示。



(a) 过热度响应曲线



(b) 蒸发温度响应曲线

图2 过热度跟踪响应曲线

由图 2 可知, 基于 FTESO 的自抗扰控制器能显著减小系统的超调, 解耦效果更明显, 且具有更快的收敛时间, 同时对外部扰动的抑制能力更强。此外, 基于 FESO 的自抗扰控制器在跟踪蒸发温度设定值和解耦的动态过程中超调量较大, 而大的超调量势必会消耗额外的压缩机输入功率, 增大制冷系统能耗。当制冷系统参数发生摄动时, 两种控制方法在不考虑外部扰动情况下的能耗指标如表 1 所示。由表 1 可知, 与 FESO 控制相比, 基于 FTESO 控制的制冷系统能耗指标减小了 2%, 可知本文控制方法具有一定的节能效果。

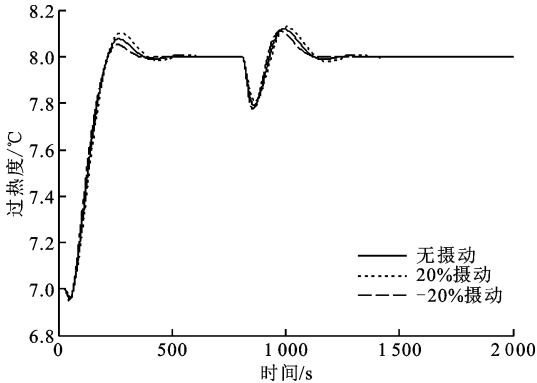
4.2 鲁棒性仿真

由于制冷系统的模型为辨识模型, 存在较大的未建模动态且制冷系统在运行过程中参数存在不确定性, 因此控制系统的鲁棒性对制冷系统的稳定工作至关重要。惯性时间摄动 20% 时, 控制器对阶跃

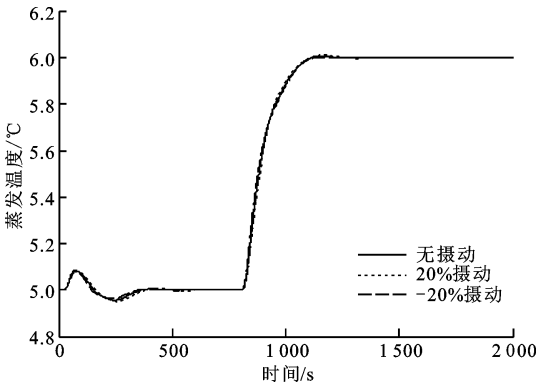
表 1 两种控制器的能耗指标对比

控制状况	FTESO 控制	FESO 控制
无扰动	1.307×10^4	1.334×10^4
惯性时间 20% 扰动	1.340×10^4	1.363×10^4
惯性时间 -20% 扰动	1.327×10^4	1.348×10^4
时滞时间 20% 扰动	1.341×10^4	1.365×10^4
时滞时间 -20% 扰动	1.323×10^4	1.343×10^4

输入响应的仿真结果如图 3 所示。时滞时间扰动 20% 时,控制器对阶跃输入响应的仿真结果如图 4 所示。仿真结果表明,当制冷系统参数存在扰动情况下,本文控制方法仍能快速稳定跟随输入的变化,具有较强的鲁棒性,同时本文控制方法将压缩机能耗减少了约 2%,节能效果不因参数扰动而有太大的变化。



(a)过热度响应对比曲线

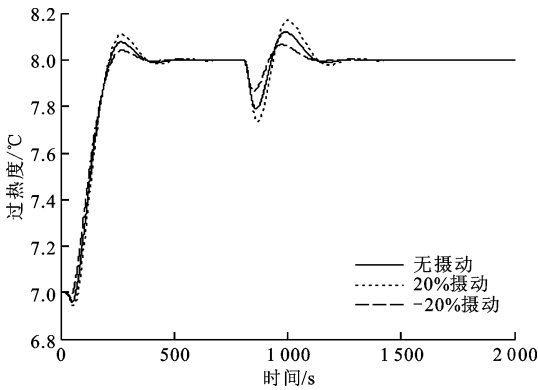


(b)蒸发温度响应对比曲线

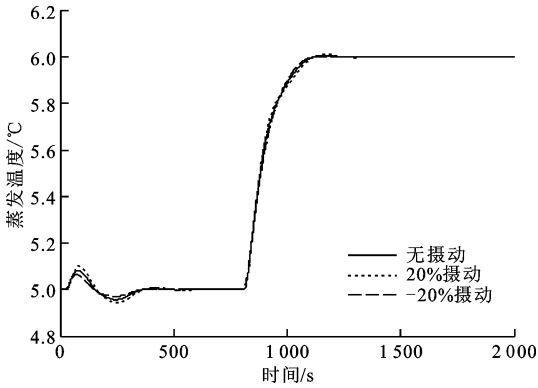
图 3 惯性时间扰动对控制效果的影响

5 结 论

本文针对制冷系统难以通过精确的数学模型进行控制器设计的难题,设计了一种非齐次有限时间收敛的扩张状态观测器,使观测器误差在有限时间范围内能快速收敛到 0,并利用静态解耦设计了制冷系统的自抗扰解耦控制器,实现了对制冷系统过



(a)过热度响应对比曲线



(b)蒸发温度响应对比曲线

图 4 时滞时间扰动对控制效果的影响

热度和蒸发温度的独立跟踪控制。仿真实验表明,与有限时间收敛的扩张状态观测器相比,该方法不仅具有更小的超调、更好的解耦效果且具有较快的收敛速度和较强的抗扰性,并有 2% 的节能提升,而且该方法能有效抑制制冷系统未建模动态和系统参数扰动对控制效果的影响。此外,该控制方法由于不依赖精确的对象模型,通过调整控制器参数能适应不同的制冷系统,为下一步工程实现提供了可能。

参考文献:

[1] RASMUSSEN B P, ALLEYNE A G. Gain scheduled control of an air conditioning system using the Youla parameterization [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2010, 18(5): 1216-1225.

[2] SHAH R, P RASMUSSEN B, ALLEYNE A G. Application of a multivariable adaptive control strategy to automotive air conditioning systems [J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 2004, 18(2): 199-221.

[3] RASMUSSEN H, LARSEN L F S. Non-linear and adaptive control of a refrigeration system [J]. IET Control Theory & Applications, 2011, 5(2): 364-

- 378.
- [4] 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.
- [5] ZHANG Q, CANOVA M, RIZZONI G. Sliding mode control of an automotive air conditioning system [C]// *American Control Conference*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2013: 5748-5753.
- [6] 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.
- [7] 白建波, 郑宇, 苗国厂. 暖通空调系统基于 SMITH 预估自校正控制算法 [J]. *化工学报*, 2012, 63(S2): 100-105.
- BAI Jianbo, ZHENG Yu, MIAO Guochang. Self-tuning control algorithm with SMITH predictor for HVAC systems [J]. *CIESC Journal*, 2012, 63(S2): 100-105.
- [8] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用 [J]. *控制与决策*, 1998, 13(1): 19-23.
- HAN Jingqing. Auto-disturbances-rejection controller and its applications [J]. *Control and Decision*, 1998, 13(1): 19-23.
- [9] LEVANT A. Non-homogeneous finite-time-convergent differentiator [C]// *The 48th IEEE Conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 16-18.
- [10] WANG X, LIN H. Design and analysis of a continuous hybrid differentiator [J]. *IET Control Theory & Applications*, 2011, 5(11): 1321-1334.
- [11] ORLOV Y, AOUSTIN Y, CHEVALLEREAU C. Finite time stabilization of a perturbed double integrator: I Continuous sliding mode-based output feedback synthesis [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2011, 56(3): 614-618.
- [12] DE LOZA A F, CIESLAK J, HENRY D, et al. Sensor fault diagnosis using a non-homogeneous high-order sliding mode observer with application to a transport aircraft [J]. *IET Control Theory & Applications*, 2015, 9(4): 598-607.
- [13] 李兆博, 吴爱国, 何熠. 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. Improved Smith predictive compensation and decoupling in refrigeration system [J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(1): 111-117.
- [14] YU S, YU X, SHIRINZADEH B, et al. Continuous finite-time control for robotic manipulators with terminal sliding mode [J]. *Automatica*, 2005, 41(11): 1957-1964.
- [15] 王世峰, 赵党军. 基于有限时间收敛 ESO 的四旋翼无人机控制 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2015, 46(7): 2494-2503.
- WANG Shifeng, ZHAO Dangjun. Quad-rotor vehicle control based on finite-time convergent ESO [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2015, 46(7): 2494-2503.
- [16] 王丽君, 童朝南, 李擎, 等. 实用自抗扰控制在大时滞厚度自动监控系统中的应用 [J]. *控制理论与应用*, 2012, 29(3): 368-374.
- WANG Lijun, TONG Chaonan, LI Qing, et al. Practical active disturbance rejection solution for monitoring automatic gauge control system with large time-delay [J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(3): 368-374.

[本刊相关文献链接]

- 王哲, 厉彦忠, 李正宇, 等. 液氮/超流氮制冷系统负压换热器仿真及优化设计. 2016, 50(8): 143-150. [doi: 10. 7652/xjtuxb201608023]
- 蔺彦虎, 赵宁, 彭艳军. 具有循环对称特点的耦合结构振动特性分析. 2016, 50(7): 68-74. [doi: 10. 7652/xjtuxb201607011]
- 邵卫东, 李军. 计算气动声学中的伽辽金波尔兹曼方法研究. 2016, 50(3): 134-140. [doi: 10. 7652/xjtuxb201603021]
- 乔亦圆, 杨东方, 曹锋, 等. R134a/R23 复叠制冷系统级间容量比的优化分析. 2016, 50(2): 104-110. [doi: 10. 7652/xjtuxb201602018]
- 秦友蕾, 曹毅, 陈海, 等. 两移动三转动完全解耦混联机器人机构型综合. 2016, 50(1): 92-100. [doi: 10. 7652/xjtuxb201601015]
- 何丽娟, 梁晶晶, 张少华. CO₂-[emim][Tf₂N]二元混合体系超额混合焓的预测. 2015, 49(9): 99-104. [doi: 10. 7652/xjtuxb201509017]
- 孙志超, 陶涛, 黄晓勇, 等. 车床主轴与进给轴耦合热误差建模及补偿研究. 2015, 49(7): 105-112. [doi: 10. /xjtuxb201507018]
- 乔亦圆, 王猛, 曹锋, 等. HFC410A 两级滑片膨胀机性能参数的模拟计算与实验研究. 2015, 49(6): 109-114. [doi: 10. 7652/xjtuxb201506018]

(编辑 赵炜)