

一类非线性自适应容错 GMC 控制的研究

王东 谢晓清 周东华 金以慧

(清华大学自动化系 北京 100084)

摘要 本文提出了一种基于强跟踪滤波器(STF)的自适应容错一般模型控制(SAFTGMC)的新方法,并在三容水箱装置上做了实验研究.根据实验结果,SAFTGMC 对有传感器故障同时伴随过程参数时变扰动的非线性过程能够进行较好的控制,它能够准确判断传感器故障同时又能实时地跟踪时变参数,降低了误报率,是一种极具实用价值的容错控制方法.

关键词 非线性时变系统,一般模型控制,自适应控制,容错控制,强跟踪滤波器

1 引言

目前,对于非线性时变系统的自适应容错控制在国际上还是一个富有挑战性的课题,自适应容错控制要求算法在对故障具有容错性能的同时,对时变过程参数还具有自适应跟踪的能力.参数估计是 FDD 领域中所用的重要方法之一^[1].为了得到好的故障检测和诊断结果,通常需要准确的过程动态模型.在工程实际中,非线性时变过程的准确模型是很难获得的.因此,为了把故障诊断和容错控制技术应用于时变过程,基于参数估计的自适应技术是其中可能有效的途径.

为解决时变非线性过程故障诊断的鲁棒性问题,我们基于强跟踪滤波器(STF)理论^[2],充分运用 STF 的状态-参数的联合估计能力,并结合自适应一般模型控制(AGMC)方法,提出了一种适用于非线性过程的传感器故障自适应容错控制方法.该方法在用 STF 实时监控传感器偏差向量的同时,又可以实时跟踪过程的时变参数,并快速修正 FDI 模块和 GMC 模块中所用的非线性过程模型,不仅使得控制算法能够自适应地补偿时变参数对控制性能的影响,而且也使得传感器故障检测具有对扰动、模型不确定性和时变参数的更强的鲁棒性.

本文第一节是引言,第二节将 STF 用于非线性过程时变参数的在线跟踪,并在此基础上综合出 GMC 控制律,提出了一种传感器自适应容错一般模型控制(SAFTGMC)新方法.第三节详细列出了 SAFTGMC 方法的实验研究结果,并与传感器容错一般模型控制(SFTGMC)^[3]做了比较.最后,第四节是本文结论.

2 自适应容错一般模型控制的基本原理

2.1 传感器偏差故障模型

文献[3]提出了传感器容错一般模型控制(SFTGMC)方法,它针对的是仿射非线性时不变系统.与其类似,可以将非线性时变过程的传感器故障模型写成如下形式:

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{x}(k) + \Delta t \cdot (\mathbf{f}(\mathbf{x}(k), \boldsymbol{\theta}(k)) + \mathbf{g}(\mathbf{x}(k), \boldsymbol{\theta}(k)) \cdot \mathbf{u}(k)) + \Gamma(k)\mathbf{v}(k) \\ \mathbf{y}(k+1) = \mathbf{h}(\mathbf{x}(k+1), \boldsymbol{\theta}(k+1)) + \mathbf{D} \cdot \mathbf{y}_0(k+1) + \mathbf{e}(k+1) \end{cases} \quad (1)$$

其中 $\boldsymbol{\theta} \in \mathbf{R}^l$ 是时变参数向量, $\mathbf{y}_0 \in \mathbf{R}^{m_l}$ 是传感器偏差向量, $\mathbf{y}_0(0) = \mathbf{0}$, m_l 是 m 个传感器中容易发生故障的传感器个数, $m_l \leq m$. $\mathbf{y}_0 = [y_{0,j_1}, y_{0,j_2}, \dots, y_{0,j_{m_l}}]^T$ 表示只有传感器 $j_1, j_2, \dots, j_{m_l} \in \{1, 2, \dots, m\}$ 是可能发生故障的, 并且 $j_1 < j_2 < \dots < j_{m_l}$. $\mathbf{D} = \mathbf{I}_{m \times m_l}$, 它的第 (j_i, i) 个元素为 1, 其它元素为 0. 假设该非线性过程是局部可观的.

为了在线估计过程时变参数 $\boldsymbol{\theta}(k)$ 以及时变的传感器偏差向量 $\mathbf{y}_0(k)$, 我们定义扩展状态向量 $\mathbf{x}_e = [\mathbf{x} \ \mathbf{y}_0 \ \boldsymbol{\theta}]^T$, 并在系统方程上加上新的状态方程 $\mathbf{y}_0(k+1) = \mathbf{y}_0(k)$, 可以把传感器故障模型 (1) 转换到以下的等价形式:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_e(k+1) = \mathbf{f}_e(\mathbf{x}_e(k)) + \mathbf{g}_e(\mathbf{x}_e(k)) \cdot \mathbf{u}(k) + \Gamma_e(k)\mathbf{v}(k) \\ \mathbf{y}(k+1) = \mathbf{h}_e(\mathbf{x}_e(k+1)) + \mathbf{e}(k+1) \end{cases} \quad (2)$$

其中,

$$\mathbf{f}_e(\mathbf{x}_e(k)) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}(k) + \Delta t \cdot \mathbf{f}(\mathbf{x}(k), \boldsymbol{\theta}(k)) \\ \mathbf{y}_0(k) \\ \boldsymbol{\theta}(k) \end{bmatrix}, \mathbf{g}_e(\mathbf{x}_e(k)) = \begin{bmatrix} \Delta t \cdot \mathbf{g}(\mathbf{x}(k), \boldsymbol{\theta}(k)) \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}, \Gamma_e(k) = \begin{bmatrix} \Gamma(k) \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{h}_e(\mathbf{x}_e(k+1)) = \mathbf{h}(\mathbf{x}(k+1), \boldsymbol{\theta}(k+1)) + \mathbf{D} \cdot \mathbf{y}_0(k+1)$$

比较模型 (2) 和强跟踪滤波器模型^[2], 容易看出 STF 能够直接应用于模型 (2), 来估计作为扩展状态变量的时变的传感器偏差. 由于强跟踪滤波器的优秀的状态跟踪能力, 我们可以得到准确的状态和传感器偏差的估计值.

在正常的操作状态, 非线性过程处于自适应 GMC (AGMC) 控制算法^[3]的控制下, 同时故障检测模块在实时地监控该过程的传感器是否有故障. 用 STF 滤波器的状态估计值来代替非线性过程中可能不完全可测的状态变量, 并用 STF 对过程时变参数的估计值代替模型标称参数值, 即用 $\hat{\mathbf{x}}(k|k)$ 代替 $\mathbf{x}(k)$, 用 $\hat{\boldsymbol{\theta}}(k|k)$ 代替 $\boldsymbol{\theta}(k)$, AGMC 控制律可以写为:

$$\mathbf{u}(k) = \left(\frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{g}(\hat{\mathbf{x}}(k|k), \hat{\boldsymbol{\theta}}(k|k)) \right)^{-1} \cdot \left(\mathbf{K}_1(\mathbf{y}^*(k) - \mathbf{y}(k)) + \mathbf{K}_0 \Delta t \cdot \sum_j^k (\mathbf{y}^*(j) - \mathbf{y}(j)) - \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}(k|k), \hat{\boldsymbol{\theta}}(k|k)) \right) \quad (3)$$

此外, STF 还作为系统的监控单元, 在每一个控制周期在线估计传感器偏差, 用来检测传感器故障. $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 为事先选定的故障检测的门槛值. 当第 i 个传感器偏差估计值大于 ε_1 时, 我们可以判定第 j_i 个传感器处于故障状态, 其中 $j_i \in \{1, 2, \dots, m\}$. 从而控制器能够自动切换到基于状态估计和输出软测量的 GMC 控制律上来, 用输出软测量值 $\hat{\mathbf{y}}(k)$ 来代替 (3) 中的输出测量值 $\mathbf{y}(k)$, 即可得到如下控制律.

$$\mathbf{u}(k) = \left(\frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{g}(\hat{\mathbf{x}}(k|k), \hat{\boldsymbol{\theta}}(k|k)) \right)^{-1} \cdot \left(\mathbf{K}_1(\mathbf{y}^*(k) - \hat{\mathbf{y}}(k)) + \mathbf{K}_0 \Delta t \cdot \sum_j^k (\mathbf{y}^*(j) - \hat{\mathbf{y}}(j)) - \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}(k|k), \hat{\boldsymbol{\theta}}(k|k)) \right) \quad (4)$$

STF 将一直处于工作状态用来检测该故障传感器是否已经恢复. 当 STF 发现估计得到的传感器偏差小于 ε_2 时, 就可以判定第 j_i 个传感器已经恢复正常工作, 则控制器就自动切换到 AGMC 方式.

2.2 传感器自适应容错一般模型控制 (SAFTGMC) 算法

Step 1: 定义偏差向量 $y_0(k)$, 为非线性过程建立传感器故障模型 (1).

Step 2: 定义扩展状态, 把传感器故障模型 (1) 转化为 STF 模型 (2).

Step 3: 令 $k=1, u(k) = u_0, \hat{x}(k|k) = x_0$

Step 4: 通过 STF 来获得扩展状态估计值 $\hat{x}_e(k|k)$.

Step 5: 运用以上给出的故障检测逻辑, 判断过程是否处于传感器故障状态. 如果处于正常工况, 则选择 AGMC 控制律 (3), 否则就说明有传感器处于故障状态, 则重构控制律, 切换到基于状态参数估计和输出软测量的 GMC 控制律 (4).

Step 6: 令 $k+1 \rightarrow k$, 转 Step3.

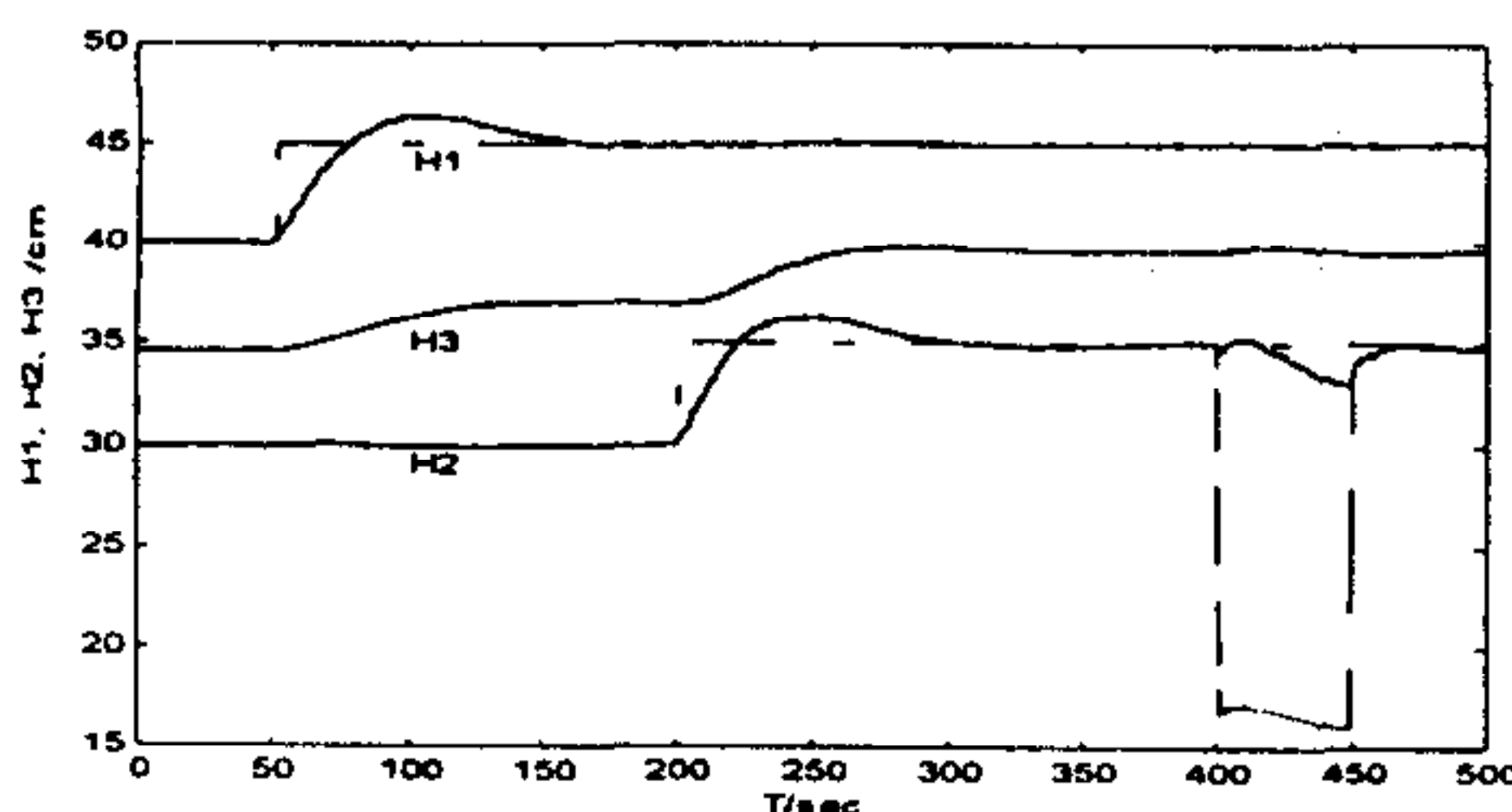
3 实验结果

本实验装置为三容水箱 DTS200, 它包括三个圆柱形的有机玻璃水箱, 从左到右依次为罐 1、罐 2 和罐 3, 相临两者之间有连接管, 中间装有球阀, 最右边的罐 2 的水通过管道流向底部的贮水池, 而泵 1 和泵 2 又从该贮水池把水打入罐 1 和罐 2. 所有三个水箱均安装了差压变送器来测量液位, 通过控制泵 1 和泵 2 的流量 Q_1 和 Q_2 来控制罐 1 和罐 2 的液位, 而罐 3 的液位不予以控制. 其实物及数学模型请参见文献[4].

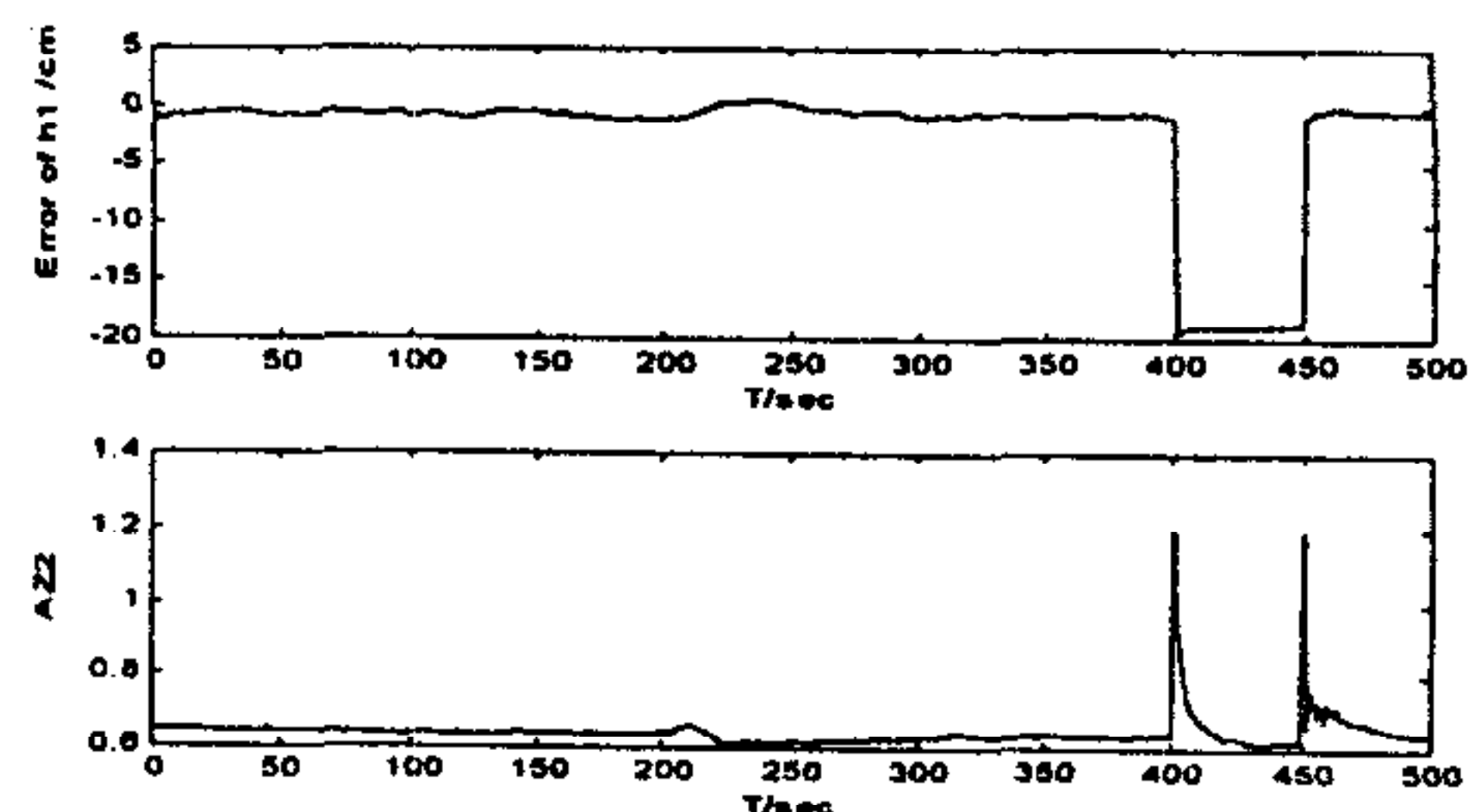
现在假设在罐 2 的传感器上可能会发生故障. 为该非线性过程建立传感器故障模型, 并用 STF 来估计传感器偏差. 同时又可能有罐 2 的出口流量的负荷扰动, 即过程参数 az_2 有时变.

在 GMC 算法中, 选择 $K_1 = 0.05I_2$, $K_0 = 0.002I_2$. 在强跟踪滤波器中, 选择过程噪声的方差 $Q(k) = 0$, 测量噪声的方差 $R(k) = 0.01I_3$, 弱化因子 $\beta = 10$, 以及系数 $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 1.0, \alpha_4 = 0.6$. 在故障检测逻辑中, 选择故障检测的阈值为 $\varepsilon_1 = 6.0cm$, $\varepsilon_2 = 3.0cm$.

在第一组实验中考虑没有负荷扰动, 即过程参数 az_2 不发生变化时的情况. 实验时间为 500 秒, 罐 1、罐 2 罐 3 的初始值分别为 $h_1 = 40cm$, $h_2 = 30cm$, $h_3 = 34cm$ 并且已达到稳定状态. 在时刻 50 秒, 把罐 1 的液位设定值提高为 45cm, 在时刻 200 秒, 把罐 2 的液位设定值提高为 35cm, 等到液位重新达到稳定之后, 在时刻 400 秒, 在罐 2 的液位传感器上制造故障 (罐 2 的液位传感器增益由 100% 降为 50% 左右), 并在 450 秒恢复正常.



(a) 罐 1、罐 2 和罐 3 的液位



(b) 传感器偏差估计值和流量系数 az_2 估计值

图 1 SAFTGMC 的实验结果

图 1 给出了 SAFTGMC 方法的实验结果. 在图 1(a)中, 实线表示经过数据重建之后得到的真实液位值, 而虚线表示发生故障的传感器的测量输出. 从图 1(a)中可以看到, 在时刻 50 秒和 200 秒, 分别让罐 1 和罐 2 发生设定值阶跃扰动, SAFTGMC 方法能够让系统输出快速地趋向设定值, 而且两个输出之间没有任何耦合, 这是因为 GMC 算法本身具有解耦能力. 从图 1(b)中可以看到, 当时刻 400 秒, 罐 2 发生液位传感器故障时, 则由 STF 估计得到的传感器偏差迅速增大到大于 ϵ_1 , 这时把控制切换到基于状态估计和输出软测量的 GMC 控制上. 类似地, 当时刻 450 秒, 罐 2 的液位传感器恢复正常后, STF 估计的传感器偏差就迅速小于 ϵ_2 , 则控制律就切换回到传统的 GMC 控制上来.

与 SFTGMC 方法的实验结果^[3]比较可以发现, 在设定值阶跃扰动以及罐 2 传感器发生故障时, SAFTGMC 与 SFTGMC 的控制效果几乎完全相同.

第二组实验考虑有负荷扰动时的情况. 实验时间仍是 500 秒. 罐 1、罐 2 罐 3 的初始值分别为 $h_1 = 40\text{cm}$, $h_2 = 30\text{cm}$, $h_3 = 34\text{cm}$ 并且系统处于稳定状态, 在时刻 50 秒, 罐 2 发生负荷扰动, az_2 由 0.64 跳变到 0.95; 在时刻 300 秒, az_2 恢复为 0.64.

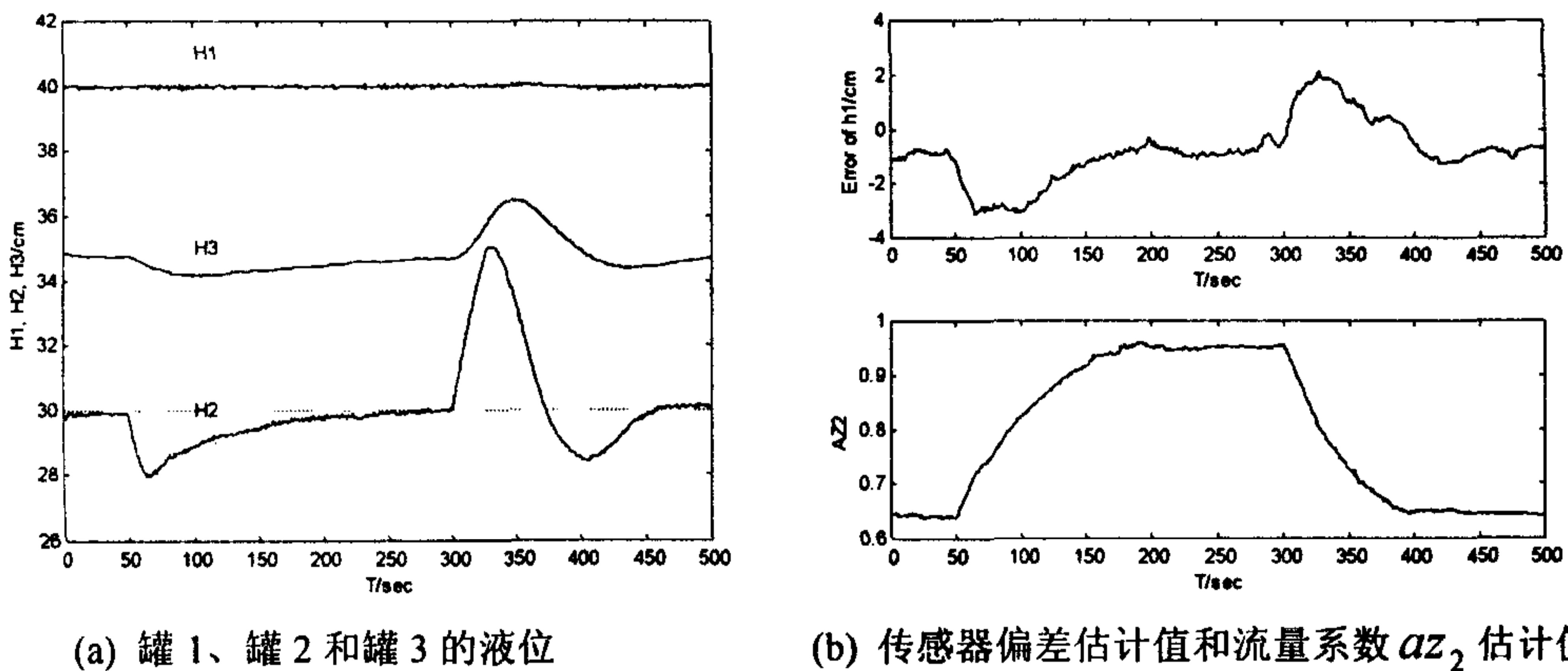


图 2 SAFTGMC 的实验结果

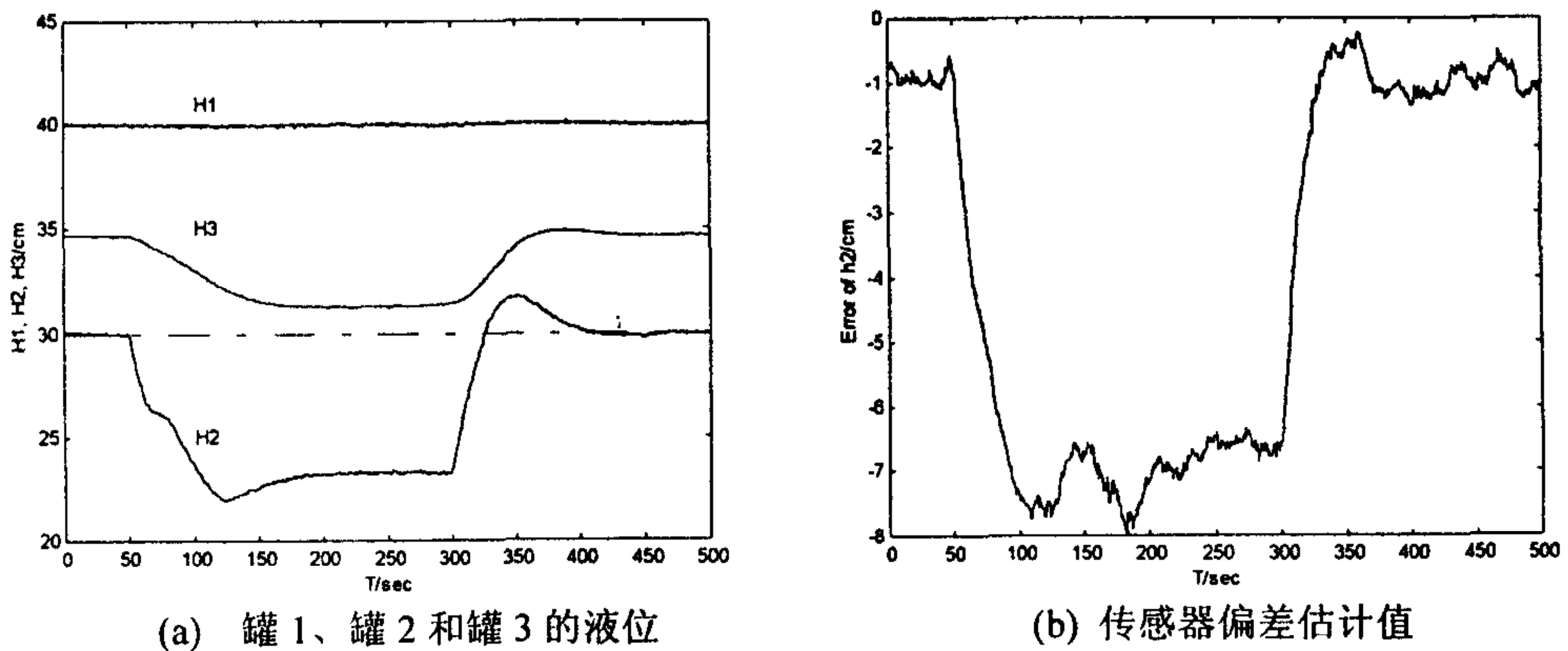


图 3 SFTGMC 的实验结果

从图 2(b)可以看出, 在时刻 50 秒, az_2 发生变化时, SAFTGMC 方法能够实时地估计参数 az_2 的变化, 并把估计值应用到 STF 算法中, 使得 STF 估计的输出与实际

输出相差不大,也就是正确判断出引起扰动的原因是过程参数发生时变,而不是传感器出现故障.从图 2(a)中,SAFTGMC 能够正确地将输出调回到设定值,调节时间较长的原因是输入 Q_2 已经达到了上限.同理,在时刻 300 秒, az_2 回到初始值,SAFTGMC 能够跟踪 az_2 的变化,并且迅速将输出稳定在设定值.在此过程中,罐 1 的液位基本不发生变化,罐 3 的波动也非常小.

与此相比较,图 3 是 SFTGMC 方法的实验结果,实验过程完全相同.从图 3(b)看出,在时刻 50 秒 az_2 发生变化后,由于这时所建立的模型与真实模型有较大的失配,导致罐 2 液位的估计值与真实值存在较大的偏差,使 SFTGMC 误认为这是由于传感器故障造成,将控制律切换到基于状态估计和软测量的 GMC 控制上,在图 3(a)中,罐 2 的液位明显的偏离了它的设定值.只有在 300 秒,当 az_2 回到初始状态,建立的模型与真实模型基本一致时,SFTGMC 才将罐 2 的液位调回设定值.

第二组实验结果的比较可以看出,对于非线性系统有时变参数时,采用 SAFTGMC 控制效果要比 SFTGMC 好的多.SAFTGMC 能够实时的跟踪时变参数,使得模型更加匹配,降低了故障误报率.

4 结束语

在本文中,我们提出了一类基于 SFT 的传感器自适应容错 GMC 控制(SAFTGMC)的新方法,并在三容水箱实验装置上进行了研究和验证.从实验结果看出,SAFTGMC 方法在实时地监控传感器偏差向量的同时,又实时地跟踪过程的时变参数,极大的增强了传感器故障检测对扰动、模型不确定性和时变参数的鲁棒性,降低了故障的误报率.SAFTGMC 的性能在传感器故障同时伴随过程参数时变扰动时要优于 SFTGMC,是一种极具实用价值的容错控制方法.

参 考 文 献

- 1 Isermann, R., Process fault detection based on modeling and estimation methods a survey. *Automatica*, 20, 1984, 387-404
- 2 周东华, 席裕庚, 张钟俊, 一种带多重次优渐消因子的扩展卡尔曼滤波器, 自动化学报, 1991, 17(6): 689-695
- 3 Xie, X. Q., Zhou, D. H., Jin, Y. H., Sensor Fault Tolerant Generic Model Control for Nonlinear Systems, *Tsinghua Science and Technology* (清华大学学报英文版)
- 4 王东, 非线性容错一般模型控制及实验研究, 清华大学硕士学位论文, 2000 年 3 月

王东 男, 1976 年生. 1997 年毕业于清华大学自动化系. 现在清华大学自动化系攻读博士学位, 主要研究方向为非线性鲁棒解耦控制, 非线性容错控制