第21卷 第4期 自 动 化 学 报 Vol. 21, No. 4
1995年7月 ACTA AUTOMATICA SINICA July, 1995

短文

随机多变量系统的自适应容错控制

柴天佑 谢守烈
(东北大学自动化研究中心 沈阳 110006)

摘 要

为保证控制系统在正常和故障状态下都能可靠安全地运行，本文将自适应控制方法和容错技术结合，提出了一种适于随机多变量系统的新型自适应容错控制器. 该控制器不仅适于开环不稳定的非最小相位系统，而且当执行机构卡死或失效时仍能稳定工作，仿真结果验证了本文算法的有效性.

关键词: 自适应控制，容错技术，多变量系统，执行机构卡死.

1 引言

在复杂控制系统运行过程中，往往会出现一些意想不到的故障，如执行器或传感器中断、卡死等，因此为保证系统的高可靠性和安全性，必需设计一种容错控制器，使系统在正常和故障状态下均能保证获得良好效果.

当系统发生故障，系统仍能保持稳定的特性称为系统的整体性，是一种稳定意义下的容错控制. 以前设计的容错控制器大多数是针对确定性多变量状态空间模型在执行器或传感器中断时设计的[1]. 本文对参数未知的随机多变量 ARMA 模型在执行器卡死的情况下设计了一种自适应容错控制器.

2 具有整体性的广义最小方差控制

被控对象数学模型为

$$A(z^{-1})y(t) = B(z^{-1})x(t) + C(z^{-1})w(t), \tag{1}$$

式中 $y(t), x(t)$ 分别是 n 维对象输出和 m 维对象输入，$A(z^{-1})$、$B(z^{-1})$、$C(z^{-1})$ 为 $n\times n, n\times m, n\times n$ 多项式矩阵，$C(0)=I, \det C(z^{-1})$ 的所有零点均在单位圆内，$w(t)$ 为 n 维随机噪声向量，满足下面条件:

假设 A. (i) $E(w(t)/F_{t-1}) = 0$, a.s. $t \geqslant 1$

本文于1993年1月11日收到

$$\text{(ii)}\ E(\boldsymbol{w}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{w}(t)/F_{t-1}) = Q_w < \infty, \quad \text{a.s. } t \geqslant 1$$

$$\text{(iii)}\ \lim_{N\to\infty}\sup \frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N}\|\boldsymbol{w}(t)\|^2 < \infty, \qquad \text{a.s. } t \geqslant 1$$

其中 F_t 为非降子 σ-代数簇.

控制系统结构图如图 1，当所有的执行机构正常时 $\boldsymbol{x}(t) = \boldsymbol{u}(t)$，当某些执行机构发生故障时 $\boldsymbol{x}(t) \neq \boldsymbol{u}(t)$. 本文只研究执行机构卡死的情况，即有 $r(r < m)$ 个被控对象输入是定常的. 为描述方便，引入开关矩阵 $L = \mathrm{diag}(\delta_1\delta_2\cdots\delta_m)$ 和向量 $\boldsymbol{l}_1 = [l_1 l_2 \cdots l_m]^{\mathrm{T}}$，当 $\delta_i = 0, l_i = a_i$ (常数)时为第 i 个执行机构卡死，当 $\delta_i = 1, l_i = 0$ 时为第 i 个执行机构正常，显然 $\delta_i = l_i = 0$ 时为中断，则有

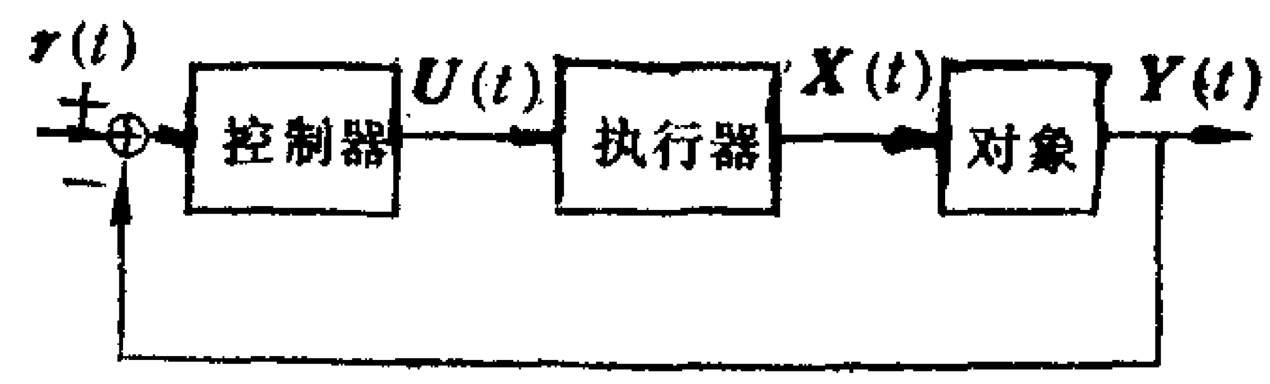

图 1　控制系统结构图

$$\boldsymbol{x}(t) = L\boldsymbol{u}(t) + L_1. \tag{2}$$

假设 B. 传递函数阵 $T(z^{-1}) = A^{-1}(z^{-1})B(z^{-1})$ 为严格正则的，且几乎满秩.

由文[2]知，存在关联矩阵 $\xi(z)$，使得

$$\lim_{z\to\infty}\xi(z)T(z^{-1}) = \boldsymbol{M}\ (\text{常数阵且满秩}).$$

引入下列性能指标

$$J = E\{\|P(z^{-1})\xi(z)y(t) - R(z^{-1})\boldsymbol{r}(t)\|^2 + \|Q(z^{-1})x(t)\|^2/F_t\}, \tag{3}$$

式中 $P(z^{-1}), Q(z^{-1}), R(z^{-1})$ 是多项式加权阵且 $P(0) = I$，$\boldsymbol{r}(t)$ 是 n 维有界参考输入向量.

由文[2]知，广义最小方差控制律为

$$\beta_0^{\mathrm{T}}\phi^*(t+k/t) = \beta_0^{\mathrm{T}}R(z^{-1})r(t) - Q_0^{\mathrm{T}}Q(z^{-1})X(t), \tag{4}$$

其中 $\phi^*(t+k/t)$ 是 $\phi(t) \triangleq P(z^{-1})\xi(z)y(t)$ 的最优预报，即

$$\phi^*(t+k/t) = \alpha(z^{-1})y(t) + \beta(z^{-1})X(t) + \bar{\bar{G}}(z^{-1})\phi^*(t/t-k), \tag{5}$$

这里 $\alpha(z^{-1}) = \alpha_0 + \alpha_1 z^{-1} + \cdots + \alpha_{n_1}z^{-n_1}, \beta(z^{-1}) = \beta_0 + \beta_1 z^{-1} + \cdots + \beta_{n_2}z^{-n_2}$,

$\bar{\bar{G}}(z^{-1}) = \bar{\bar{g}}_0 + \bar{\bar{g}}_1 z^{-1} + \cdots + \bar{\bar{g}}_{n_3}z^{-n_3}$.

令

$$\begin{aligned}&\psi(t) \triangleq [y^{\mathrm{T}}(t)y^{\mathrm{T}}(t-1)\cdots y^{\mathrm{T}}(t-n_1)x^{\mathrm{T}}(t)x^{\mathrm{T}}(t-1)\cdots\\&x^{\mathrm{T}}(t-n_2)\phi^{*\mathrm{T}}(t/t-k)\phi^{*\mathrm{T}}(t-1/t-k-1)\cdots\\&\phi^{*\mathrm{T}}(t-n_3/t-k-n_3)]^{\mathrm{T}},\\&\theta \triangleq [\alpha_0\alpha_1\cdots\alpha_{n_1}\beta_0\beta_1\cdots\beta_{n_2}\bar{\bar{g}}_0\bar{\bar{g}}_1\cdots\bar{\bar{g}}_{n_3}]^{\mathrm{T}},\end{aligned}$$

则有

$$\phi^*(t+k/t) = \theta\psi, \tag{6}$$

同时还可得

$$\phi(t+k) = \phi^*(t+k/t) + F(z^{-1})\boldsymbol{w}(t+k), \tag{7}$$

$$F(z^{-1}) = F_0 + F_1 z^{-1} + \cdots + F_{k-1}z^{-k+1}.$$

从(4)式中仅能求出 $\boldsymbol{x}(t)$，当正常运行时 $\boldsymbol{u}(t) = x(t)$，当执行机构卡死时，$\boldsymbol{u}(t)$ 不一定能由(4)式求出，将 $\psi(t)$ 中的 $x(t)$ 用 $\boldsymbol{u}(t)$ 代替，则有

$$\bar{\phi}(t)=[y^{\mathrm T}(t)y^{\mathrm T}(t-1)\cdots y^{\mathrm T}(t-n_1)\boldsymbol{u}^{\mathrm T}(t)x^{\mathrm T}(t-1)\cdots x^{\mathrm T}(t-n_2)$$
$$\phi^{*\mathrm T}(t/t-k)\phi^{*\mathrm T}(t-1/t-k-1)\cdots\phi^{*\mathrm T}(t-n_3/t-k-n_3)]^{\mathrm T},$$

从而由下面新的控制律可求出 $\boldsymbol{u}(t)$:

$$\beta_0^{\mathrm T}\theta\bar{\phi}(t)=\beta_0^{\mathrm T}R(z^{-1})r(t)-Q_0^{\mathrm T}Q_0\boldsymbol{u}(t)-Q_0^{\mathrm T}Q^*(z^{-1})x(t),\tag{8}$$

其中 $Q^*(z^{-1})=Q(z^{-1})-Q_0$.

由(1),(2),(4)—(8)式可得闭环系统方程

$$A_c\boldsymbol{x}_c(t)=B_cr_c(t)+C_c\boldsymbol{w}(t),\tag{9}$$

其中

$$A_c=\begin{bmatrix}A(z^{-1}) & -B(z^{-1}) & 0\\ 0 & I & L\\ \beta_0^{\mathrm T}P(z^{-1})\xi(z) & \beta_0^{\mathrm T}\beta_0+Q_0^{\mathrm T}Q^*(z^{-1}) & \beta_0^{\mathrm T}\beta_0+Q_0^{\mathrm T}Q_0\end{bmatrix},\quad B_c=\begin{bmatrix}0 & 0\\ L_1 & 0\\ 0 & \beta_0^{\mathrm T}R(z^{-1})\end{bmatrix},$$

$$C_c=[C^{\mathrm T}(z^{-1})\ 0\ z^kF^{\mathrm T}(z^{-1})\beta_0]^{\mathrm T},\quad x_c(t)=[y^{\mathrm T}(t)x^{\mathrm T}(t)U^{\mathrm T}(t)]^{\mathrm T},$$

$$r_c=[J^{\mathrm T}r^{\mathrm T}(t)]^{\mathrm T},\quad J=[1,1\cdots1]^{\mathrm T},$$

故而,只要选择好加权阵 $P(z^{-1})$, $Q(z^{-1})$, $R(z^{-1})$ 使得 $\det A_c\neq0,|z|\geqslant1$, 那么由文[2] B.3 引理知, $y(t),U(t),x(t)$ 有界, 即当执行机构卡死时系统具有整体性. 可取 $P(z^{-1})=I$, $Q(z^{-1})=\lambda(1-z^{-1})I$, $R(z^{-1})=\xi(1)$.

3 自适应控制算法

由(6),(7)式得控制器参数的辨识方程

$$\phi(t)=\theta\phi(t-k)+F(z^{-1})\boldsymbol{w}(t).\tag{10}$$

采用文[3]辨识方法可得参数 θ 的估计值 $\hat{\theta}$, 然后由(8)式求出控制律 $\boldsymbol{u}(t)$.

采用自适应算法后可得闭环方程为

$$\hat{A}_cx_c(t)=\hat{B}_cr_c(t)+\hat{C}_cw(t)+\hat{D}_ce(t+k),\tag{11}$$

式中 $\hat{A}_c,\hat{B}_c$ 为 A_c,B_c 中的参数用估计值代替得到的.

$$\hat{C}_c=[C^{\mathrm T}(z^{-1})\ 0\ 0]^{\mathrm T},\quad \hat{D}_c=[0\ 0\ \hat{\beta}_0]^{\mathrm T},$$
$$e(t+k)=\phi(t+k)-\hat{\theta}(t)\phi(t).$$

假设 C. (i) $\xi(z)$ 已知.

(ii) $\alpha(z^{-1}),\beta(z^{-1}),\bar{\bar{G}}(z^{-1})$ 的阶次上界已知.

(iii) $\bar{\bar{C}}(z^{-1})-\frac{1}{2}I$ 严正实, $\bar{\bar{C}}(z^{-1})=I-z^{-k}\bar{\bar{G}}(z^{-1})$.

(iv) 离线选择 $P(z^{-1}),Q(z^{-1})$, 使得 $\det\hat{A}_c\neq0,|z|\geqslant1$.

在假设 A,B,C 下,类似文[3]有如下的收敛性和稳定性结论:

$$\limsup_{N\to\infty}\frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N}\|y(t)\|^2<\infty,\qquad \text{a. s.}$$

$$\limsup_{N\to\infty}\frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N}\|U(t)\|^2<\infty,\qquad \text{a. s.}$$

$$\lim_{N\to\infty}\sup \frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N}\|x(t)\|^2 < \infty, \qquad \text{a. s.}$$

$$\lim_{N\to\infty}\frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N}E(\|e(t+k)\|^2/F_t) = r^2 < \infty, \quad \text{a. s.}$$

4 仿真实例

仿真模型为双输入双输出系统

$$A(z^{-1})y(t) = B(z^{-1})x(t) + C(z^{-1})w(t)$$

$$A(z^{-1}) = \begin{bmatrix} 1-0.8z^{-1} & 0.3z^{-1} \\ 0.4z^{-1} & 1-0.7z^{-1} \end{bmatrix}, \quad B(z^{-1}) = \begin{bmatrix} 1.36z^{-1}+1.05z^{-2} & 0.92z^{-2} \\ 0.34z^{-1}-0.12z^{-2} & z^{-2} \end{bmatrix}$$

$$C(z^{-1}) = I, \quad E(w(t)w^{\mathrm{T}}(t)) = \mathrm{diag}(0.1, 0.1),$$

显然该系统是一非最小相位且开环不稳定系统。当第二个执行机构卡死在 0.5 处 ($t>200$) 时，仿真输出曲线见图 2，图 3，仿真结果表明，该算法使得闭环系统具有整体性。

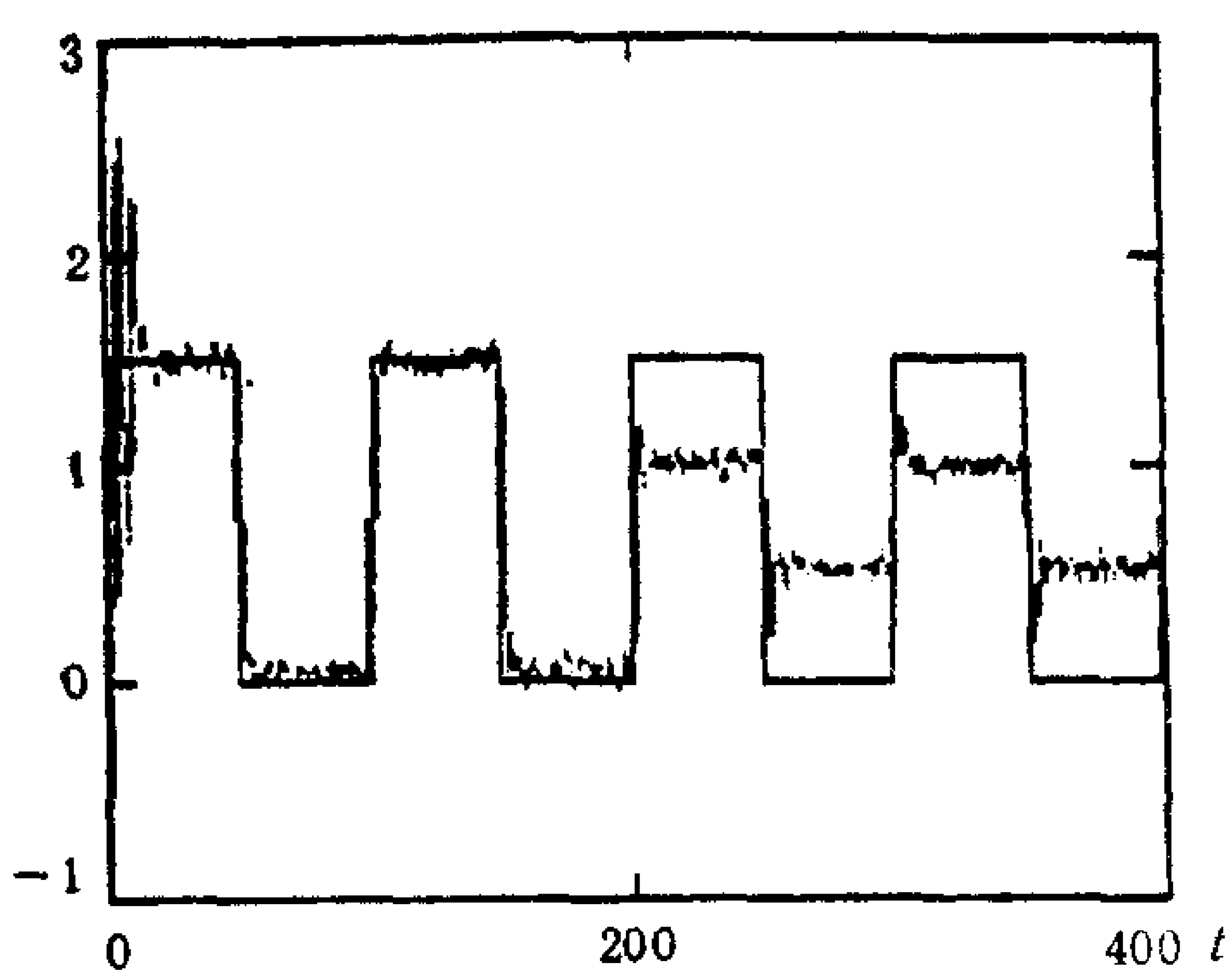

图 2　参考输入 $r_1(t)$ 及输出 $y_1(t)$

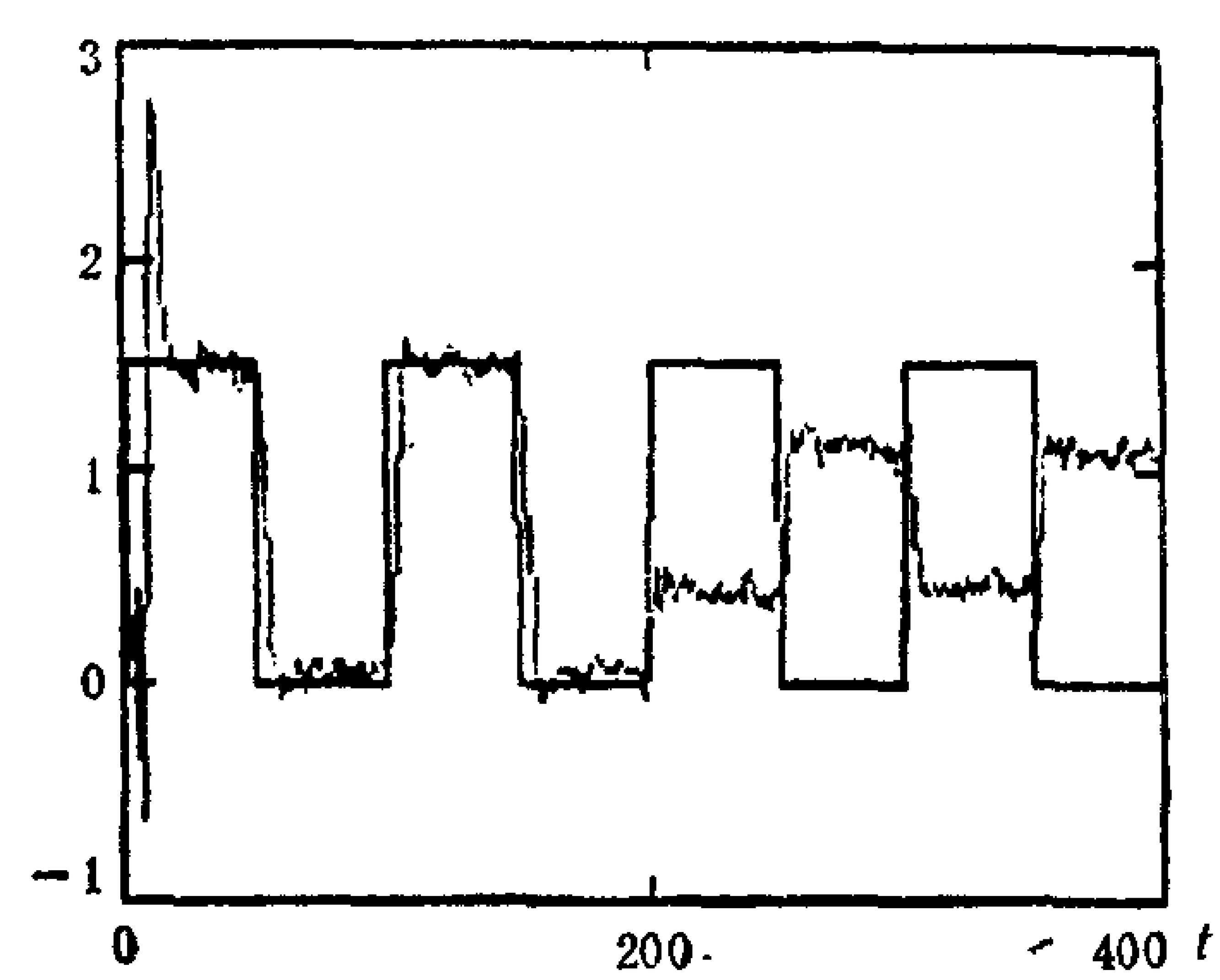

图 3　参考输入 $r_2(t)$ 及输出 $y_2(t)$

本文对参数未知的随机多变量系统的执行机构卡死情况提出了一种简单的自适应容错控制算法。对传感器的卡死情况，以及加权阵的在线选取，系统性能优化等还有待于研究。

参　考　文　献

[1] Cheng Yi. Design of state feedback law possessing against actuator failures, 控制理论与应用, 1989, 6(3).

[2] Goodwin G C and Sin K S. Adaptive filtering prediction and control, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1984.

[3] Chai TY and He S J. A simple adaptive controller with fault-tolerance for stachastic multivarable systems, Proc. 30th IEEE CDC. 1991.

AN ADAPTIVE FAULT-TOLERANCE CONTROLLER FOR STOCHASTIC MULTIVARIABLE SYSTEMS

CHAI TIANYOU XIE SHOULIE
(*Research Center of Automation, Northeastern University Shenyang* 110006)

ABSTRACT

By incorporating adaptive control method into fault-tolerance technique, a new adaptive fault-tolerance controller is presented in this paper so that the control system works reliably and safely in all circumstances. The controller is not only available for the open-loop unstable and non-minimumphase systems, The simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Key words: adaptive control, fault-tolerance techniques, multivariable system.