第19卷 第4期 自动化学报 Vol. 19, No. 4
1993年7月 ACTA AUTOMATICA SINICA July, 1993

矩文

随机系统自适应控制的完整性设计

汤清 王孝武 顾绳谷
(合肥工业大学电气系，230009)

摘要

本文在文献[1]提出的自适应算法基础上，引入了加权阵 Λ，使修改后的自适应算法在进行完整性设计时，不但设计方法更简便，而且具有更强的收敛性。

关键词：完整性（Integrity），自适应控制，加权阵。

一、问题的提出

实际工程中一些过程控制，其被控系统的参数常常是未知的，而且随着运行状态的改变，参数是时变的；另外系统中存在随机干扰．为了能够自动整定控制器的参数，获得较好的系统性能，采用自校正控制方法．而在这种自校正控制系统的容错分析中[1)]，把参数辨识与控制分开讨论，对于任一传感器或执行器失效故障，只要参数辨识收敛，那么通过选择适当的加权阵可保证整个系统稳定．但由于在不同故障情况下不一定保证最小二乘法收敛，因此在容错设计中不仅要兼顾辨识的收敛与控制中加权阵的选择两方面，而且整个方法的收敛性也不强．本文通过改进得到了一个新的自适应算法，该算法是在文献[1]提出的算法基础上引入一个加权阵 Λ，把参数估计和控制作为一个整体来研究． 文献[1] 中利用鞅的定理证明了算法的收敛性．在此基础上得到的自适应算法在任一传感器或执行器失效故障下，其参数辨识保证收敛．这样在进行完整性设计时只需考虑选择适当的加权阵 Λ 就行了，使自适应控制的完整性设计更简便．

二、自适应算法

考虑 MIMO 系统

$$y_n + A_1 y_{n-1} + \cdots + A_p y_{n-p} = B_1 u_{n-1} + \cdots + B_q u_{n-q} + w_n \tag{1}$$

式中 w_n 为一白噪声序列． 初始条件： $y_n = 0$，$u_n = 0$，$w_n = 0$，$n < 0$． y_n'、u_n 和 w_n 是 m、l 和 m 维向量．令

$$\theta^T = [-A_1, \cdots, -A_p, B_1, \cdots, B_q], \qquad m \times (pm + lq),$$

$$\phi_n^T = [y_n^T, y_{n-1}^T, \cdots, y_{n-p+1}^T, u_n^T, \cdots, u_{n-q+1}^T], \quad 1 \times (pm + ql),$$

本文于1991年10月24日收到．

1) 汤清，多变量系统容错控制研究，合肥工业大学硕士论文，1991年．

则

$$y_n = \theta^T \phi_{n-1} + w_n \tag{2}$$

采用 MLS 参数辨识法[1]，通过求解下列方程得到自适应控制律 u_n：

$$\theta_n^T \phi_n = y_{n+1}^* + \Lambda u_n,\quad n \geqslant 0 \tag{3}$$

文献[1]中已经证明，对于逆稳定系统，当 y_{n+1}^* 为任一有界确定的参考序列且控制律 u_n 由方程 $\theta_n^T \phi_n = y_{n+1}^*$ 求得时，该自适应算法收敛．由(3)式可知，引入了加权阵 Λ 后，对于逆稳定及非逆稳定系统，选择加权阵 Λ，使满足逆稳定系统的条件，那么此算法同样可保证收敛．

把系统方程(1)改写为

$$Ay_n = z^{-1}Bu_n + w_n, \tag{4}$$

式中 $A = I + A_1z^{-1} + \cdots + A_pz^{-p}$，$B = B_1 + B_2z^{-1} + \cdots + B_qz^{-q+1}$，$z^{-1}$ 为延迟算子．(3)式变为

$$(I - A)y_n + z^{-1}Bu_n = y_n^* + z^{-1}\Lambda u_n, \tag{5}$$

由(4),(5)两式得．

$$[I - \Lambda B^{-1}A]y_n = y_n^* - (\Lambda - B)B^{-1}w_n, \tag{6}$$

或

$$[A - B(\Lambda - B)^{-1}(I - A)]y_n = -B(\Lambda - B)^{-1}y_n^* + w_n. \tag{7}$$

由于 θ 是未知的，通过辨识得到 θ_n，因此可用 θ_n 代替 θ 进行计算．因为参数估计是收敛的，为了保证闭环系统稳定，(6)式或(7)式描述的系统闭环极点必须在 z 平面单位圆内，这是选择加权阵 Λ 的另一依据．当矩阵 B 奇异时，只能用(7)式进行分析．

三、完整性设计

引入了加权阵 Λ 后的自适应算法，既可适用于 B_1 满秩的逆稳定系统，也能用于 B_1 不满秩的非逆稳定系统，扩大了该算法的使用范围．为了表示传感器或执行器失效故障，在(6),(7)两式中引入切换阵 $L = \mathrm{diag}\{l_1, l_2, \cdots\}$，

$$l_i = \begin{cases} 1, & \text{第 } i \text{ 个执行器或传感器正常,} \\ 0, & \text{第 } i \text{ 个执行器或传感器失效,} \end{cases}$$

得到故障后闭环系统方程为

$$[I - \Lambda(BL)^{-1}AL]y_n = y_n^* - (\Lambda - BL)(BL)^{-1}w_n, \tag{8}$$

或

$$[AL - BL(\Lambda - BL)^{-1}(I - AL)]y_n = -BL(\Lambda - BL)^{-1}y_n^* + w_n. \tag{9}$$

在(8)式或(9)式中，选择适当的 Λ 阵，保证系统在传感器或执行器失效前后系统极点位于 z 平面单位圆内，并满足引入 Λ 阵后系统逆稳定的条件，那么系统就具有完整性．

考虑如下 MIMO 系统：

$$y_n + A_1y_{n-1} = B_1u_{n-1} + B_2u_{n-2} + w_n,$$

式中 w_n 为一白噪声序列，方差为 $0.1I$，参数矩阵为

$$A_1=\begin{bmatrix}-0.9 & 0.5\\ 0.5 & 0.2\end{bmatrix},\quad B_1=\begin{bmatrix}2 & 1\\ 1 & 2\end{bmatrix},\quad B_2=\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix}.$$

对此系统进行仿真,当传感器发生故障时,取加权阵 $\Lambda=\begin{bmatrix}0.8 & 0\\ 1 & 0.01\end{bmatrix}$,仿真输出曲线见图1, 图2. 当执行器失效时,取加权阵 $\Lambda=\begin{bmatrix}0.5 & 1\\ 1 & 0.01\end{bmatrix}$, 仿真输出曲线较图1, 图2效果

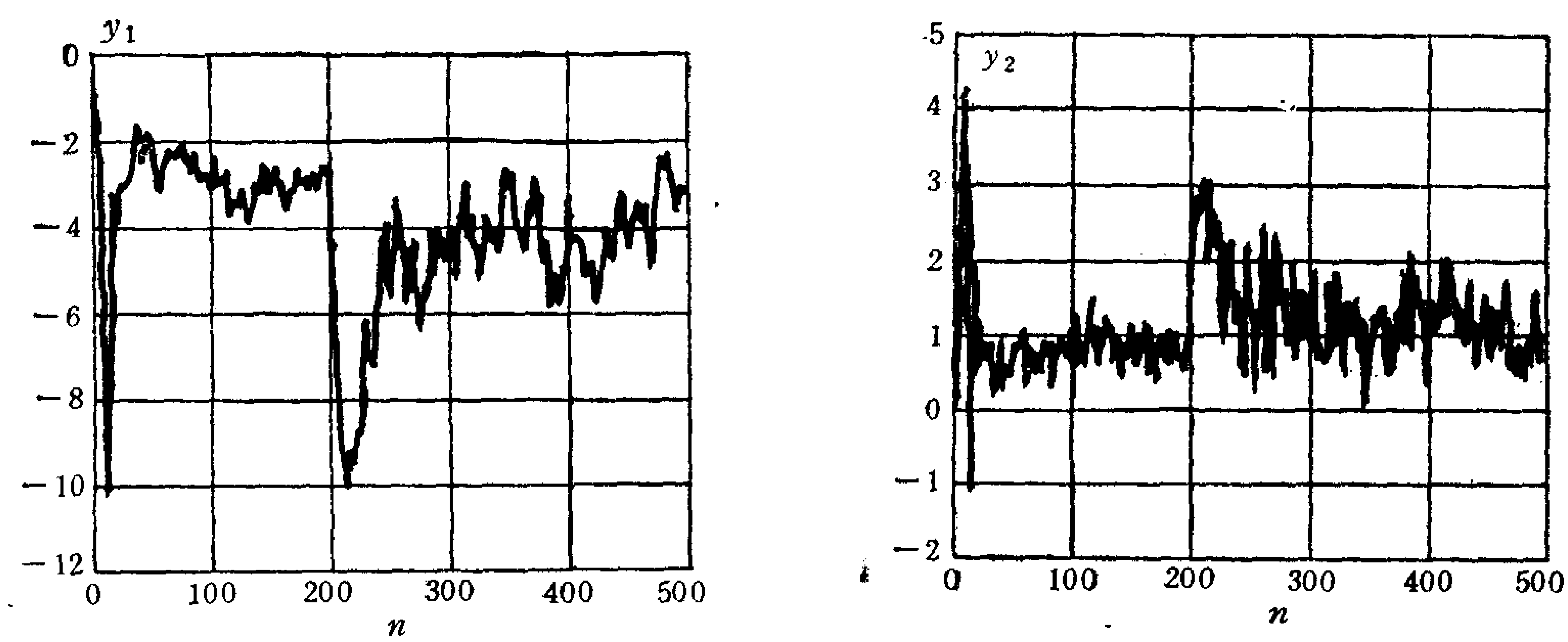

图1 系统在 $n=200$ 处出现传感器1失效故障

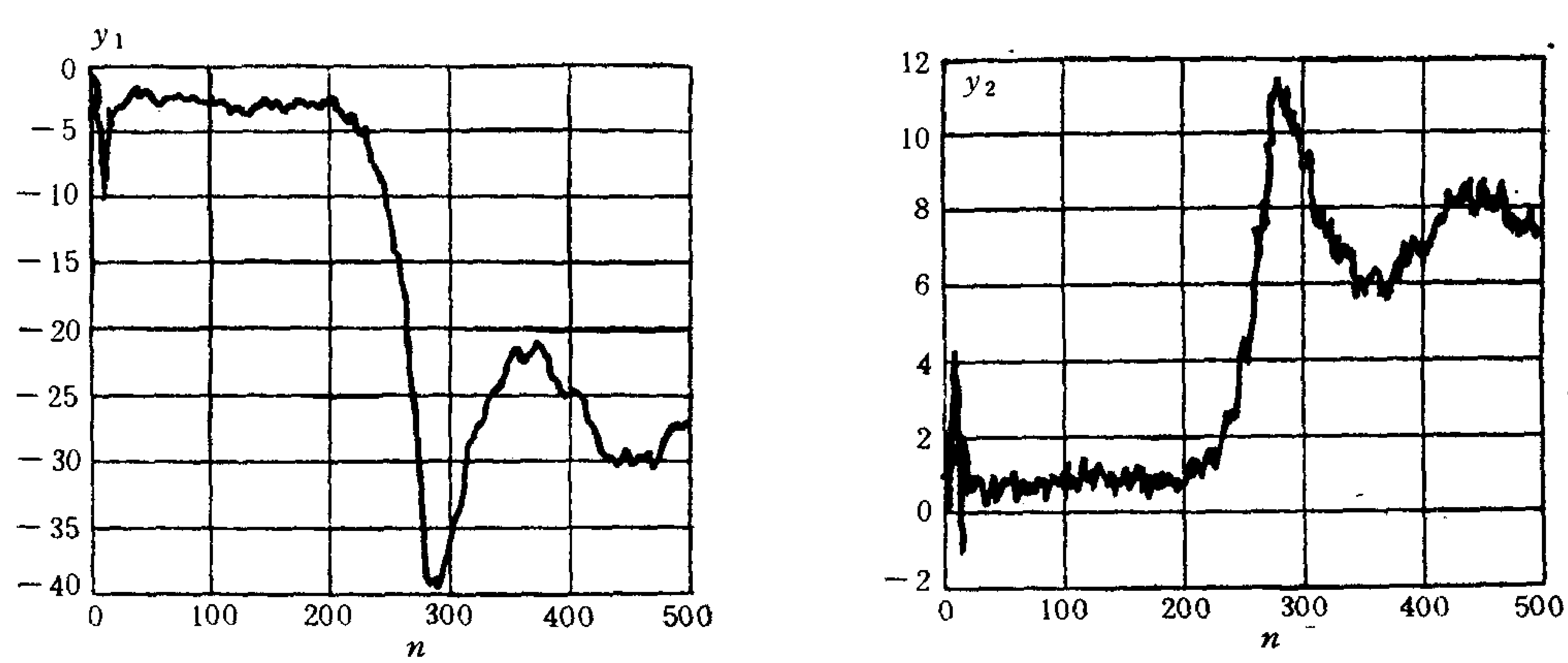

图2 系统在 $n=200$ 处出现传感器2失效故障

更好. 而当取 $\Lambda=\begin{bmatrix}0.5 & 1\\ -1 & 1\end{bmatrix}$ 时, 可保证系统在任一传感器或执行器失效情况下都能趋于稳定.

四、结　论

本文采用的自适应算法与自校正控制方法相比,在进行完整性设计时,不但设计方法更简便,而且收敛性更好,这一点在上面的完整性设计中得到了体现. 通过仿真可知, 同样的系统,若采用自校正控制,当传感器1失效时整个系统不稳定, 而由上面的结果可看

到，采用本文中的自适应算法可保证系统在任一传感器失效故障下都能稳定运行.

参　考　文　献

[1] Chen, H. F. and Caines, P. E., Adaptive Control and Identification for Stochastic Systems with Random Parameters, IFAC Adaptive Systems in Control and Signal. Processing, San Francisico, U. S. A., 1983, 179—184.

DESIGN OF ADAPTIVE CONTROL FOR STOCHASTIC SYSTEM PROSSESSING INTEGRITY

TANG QIN　WANG XIAOWU　GU SHENGGU

(Department of Electrical Engineering, Hefei Polytechnic University, Hefei· 230009)

ABSTRACT

A weighted matrix is introduced in this paper. With this matrix a modified adaptive algorithm based on reference [1] would be much simpler and faster convergence in the design of integrity, of adaptive algorithm.

Key words: Integrity; adaptive control; weighted matrix.