



一种对象具有未建模动态时的间接式 混合自适应极点配置方案

朱志刚 李言俊 强文鑫

(西北工业大学航天工程学院, 西安 710072)

摘 要

本文提出了一种对象具有未建模动态时的间接式混合自适应极点配置方案。在此方案中利用规范化技术和带遗忘因子的协方差重置递推最小二乘法估计对象参数,并直接根据连续对象设计离散自适应控制律,保证了闭环系统的鲁棒稳定性。理论分析和数字仿真均表明此方案优于相类似的全连续和全离散方案。

关键词: 未建模动态,混合自适应极点配置,协方差重置,规范化。

一、引 言

1985年 Elliott 在文献[1]中曾提出一种混合自适应极点配置方案,其缺点是仅适合于理想对象,并且对理想值的跟踪性能很差。本文利用规范化技术将 Elliott 方案推广到对象具有未建模动态情况,提出了一种适用于对象具有相加和相乘未建模动态时的间接式混合自适应极点配置方案。可以证明,当对象的未建模动态在低频范围内较小时,文中方案可保证闭环系统中所有信号有界,并且系统输出值与理想值的误差均值很小。

二、对象模型与控制器结构

考虑单输入单输出对象

$$y(t) = G(S)u(t) = \{G_0(S)[1 + \mu\Delta_m(S)] + \mu\Delta_a(S)\}u(t), \quad (1)$$

式中 $G_0(S) = Z_p(S)/R_p(S)$ 是对象已建模部分传递函数, $G(S)$ 严格真, $\mu\Delta_a(S)$, $\mu\Delta_m(S)$ 分别是对象的相加和相乘未建模动态, $\mu > 0$ 表示其变化率。 $R_p(S)$ 为 n 阶首一多项式, $Z_p(S)$ 为 $n-1$ 阶 Hurwitz 多项式, $R_p(S)$, $Z_p(S)$ 互质。对于未建模动态,假设, (i) $\Delta_a(S)$ 为严格真稳定传递函数; (ii) $\Delta_m(S)$ 为稳定传递函数; (iii) 使 $\Delta_a(S-p)$, $\Delta_m(S-p)$ 的极点稳定的稳定域 $p > 0$ 的下界 p_0 已知。

选取控制策略

$$q(S)u(t) = K(t, S)u(t) + H(t, S)y(t) + q(S)v(t), \quad (2)$$

式中 $q(S)$ 为任选的 $n-1$ 阶 Hurwitz 多项式, $K(t, S)$, $H(t, S)$ 为 $n-1$ 阶多项式, $v(t)$ 为一致有界参考输入.

控制目的是在未建模动态满足假设 (i)–(iii) 的条件下, 利用设计的混合自适应控制器, 使得对于某一 $\mu^* > 0$ 和任意的 $\mu \in [0, \mu^*)$, 闭环系统的极点趋于 n 阶 Hurwitz 多项式 $R_m(S)$ 的相应零点, 输出 $y(t)$ 尽可能紧密跟踪隐参考模型

$$R_m(S)y_m(t) = Z_p(S)v(t) \quad (3)$$

的输出 $y_m(t)$.

三、间接式混合自适应极点配置方案

定义滤波信号 $\bar{y}(t) \triangleq y(t)/f(S)$, $\bar{u}(t) \triangleq u(t)/f(S)$, $f(S)$ 为任选的至少为 n 阶的 Hurwitz 多项式, 则(1)式可写为

$$S^n \bar{y}(t) = \theta^{*T} \bar{\varphi}(t) + \mu \bar{\eta}(t), \quad (4)$$

式中 θ^* 为 $G_0(S)$ 的系数向量, $\bar{\varphi}(t)$ 为信号向量, $\bar{\eta}(t)$ 为未建模动态引起的干扰项.

选取参数辨识采样时间序列

$$t_{k+1} - t_k = N\tau_k, \quad t_k^i = t_k + i\tau_k, \quad 0 \leq i \leq N. \quad (5)$$

式中 t_k 为参数调整时刻, τ_k 为采样周期, N 的选择可参考文献[1]. 则误差测度函数序列为

$$e_k^i = S^n \bar{y}(t_k^i) - (\theta_k^i)^T \bar{\varphi}(t_k^i). \quad (6)$$

引入规范信号 $m(t)$, $m(t)$ 满足微分方程

$$\dot{m}(t) = -\delta_0 m(t) + \delta_1 (|u(t)| + |y(t)| + 1), \quad m(0) \geq \delta_1 / \delta_0. \quad (7)$$

式中 δ_0 和 δ_1 为设计常数, 其选择方法可参考文献[2].

令 $\varepsilon_k^i = e_k^i / m(t_k^i)$, $\varphi_n(t_k^i) = \bar{\varphi}(t_k^i) / m(t_k^i)$, 则可采用下述带遗忘因子的协方差重置递推最小二乘法获得对象参数 θ^* 的估值序列 θ_k^i

$$\theta_k^i = \theta_k^{i-1} + \frac{P_k^{i-2} \varphi_n(t_k^{i-1})}{1 + \varphi_n^T(t_k^{i-1}) P_k^{i-2} \varphi_n(t_k^{i-1})} \varepsilon_k^{i-1}, \quad (8a)$$

$$P_k^{i-1} = \frac{1}{\lambda_k^{i-1}} \left[P_k^{i-2} - \frac{P_k^{i-2} \varphi_n(t_k^{i-1}) \varphi_n^T(t_k^{i-1}) P_k^{i-2}}{1 + \varphi_n^T(t_k^{i-1}) P_k^{i-2} \varphi_n(t_k^{i-1})} \right], \quad (8b)$$

$$\lambda_k^{i-1} = 1 - \frac{\varphi_n^T(t_k^{i-1}) P_k^{i-2} P_k^{i-2} \varphi_n(t_k^{i-1})}{\text{tr} P_0 [1 + \varphi_n^T(t_k^{i-1}) P_k^{i-2} \varphi_n(t_k^{i-1})]}, \quad (8c)$$

$$P_k^{-1} = P_{k-1}^{N-1} = \frac{1}{\sigma_0} I > 0, \quad \theta_k^0 = \theta_{k-1}^N = \theta_k, \quad \theta_{-1}^N = \theta_0 (\text{任选}). \quad (8d)$$

控制器增益在 t_k 时刻的估值可以通过求解 Diophantine 方程

$$\hat{H}_k(S) \hat{Z}_{p,k-1}(S) + \hat{K}_k(S) \hat{R}_{p,k-1}(S) = q(S) [\hat{R}_{p,k-1}(S) - R_m(S)] \quad (9)$$

来确定, 式中 $\hat{R}_{p,k-1}(S)$, $\hat{Z}_{p,k-1}(S)$ 分别是 $R_p(S)$, $Z_p(S)$ 在 t_{k-1} 时刻的估值.

整个混合自适应控制系统的稳定性分析, 可归结为下述定理的证明.

定理. 存在一个标量 $\mu^* > 0$ 使得对于任意的 $\mu \in [0, \mu^*)$, 以及任何有界初始条件, 由方程(1), (2), (8), (9)组成的自适应闭环系统所有信号有界, 并且系统跟踪误差

$e_1(t) = y(t) - y_m(t)$ 属于残差集

$$D_e = \left\{ e_1: \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} |e_1(\tau)| d\tau \leq \mu q_2, \forall t_1 > 0, T > 0 \right\}, \quad (10)$$

式中 q_2 为一正常数。

有关此定理的证明可参考文献[2]。

四、数字仿真结果

作者曾进行了大量数字仿真来验证文中方案的可行性。仿真时取控制对象为

$$y(t) = \frac{20}{S^2 + 4S + 26} \left(1 + 0.1 \frac{1}{S + 20} \right) u(t), \quad (11)$$

$R_m(S) = S^2 + 40S + 800$ 。图 1 示出了系统的跟踪曲线, 可见文中方案在对象具有未建模动态时, 跟踪性能良好。

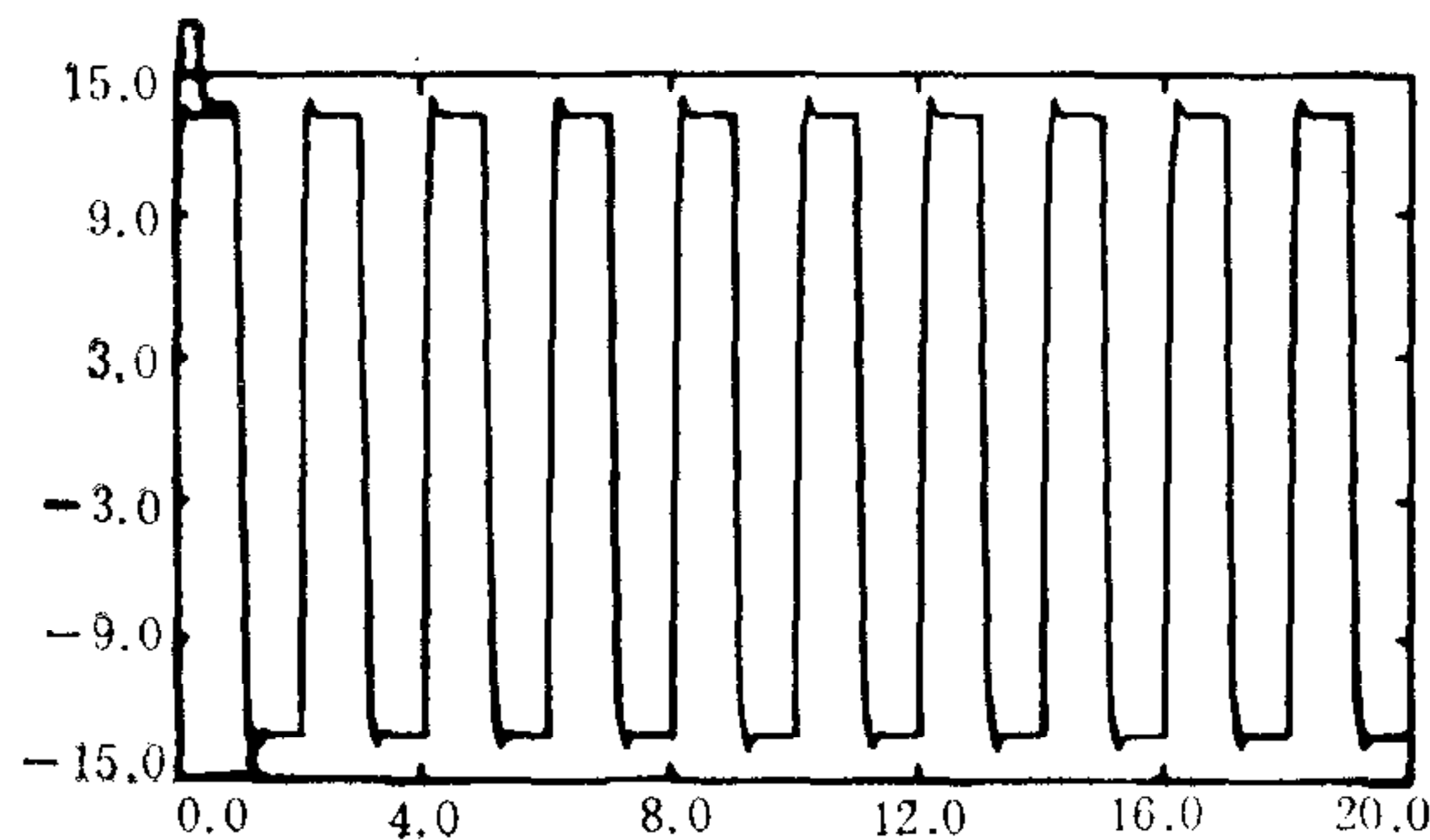
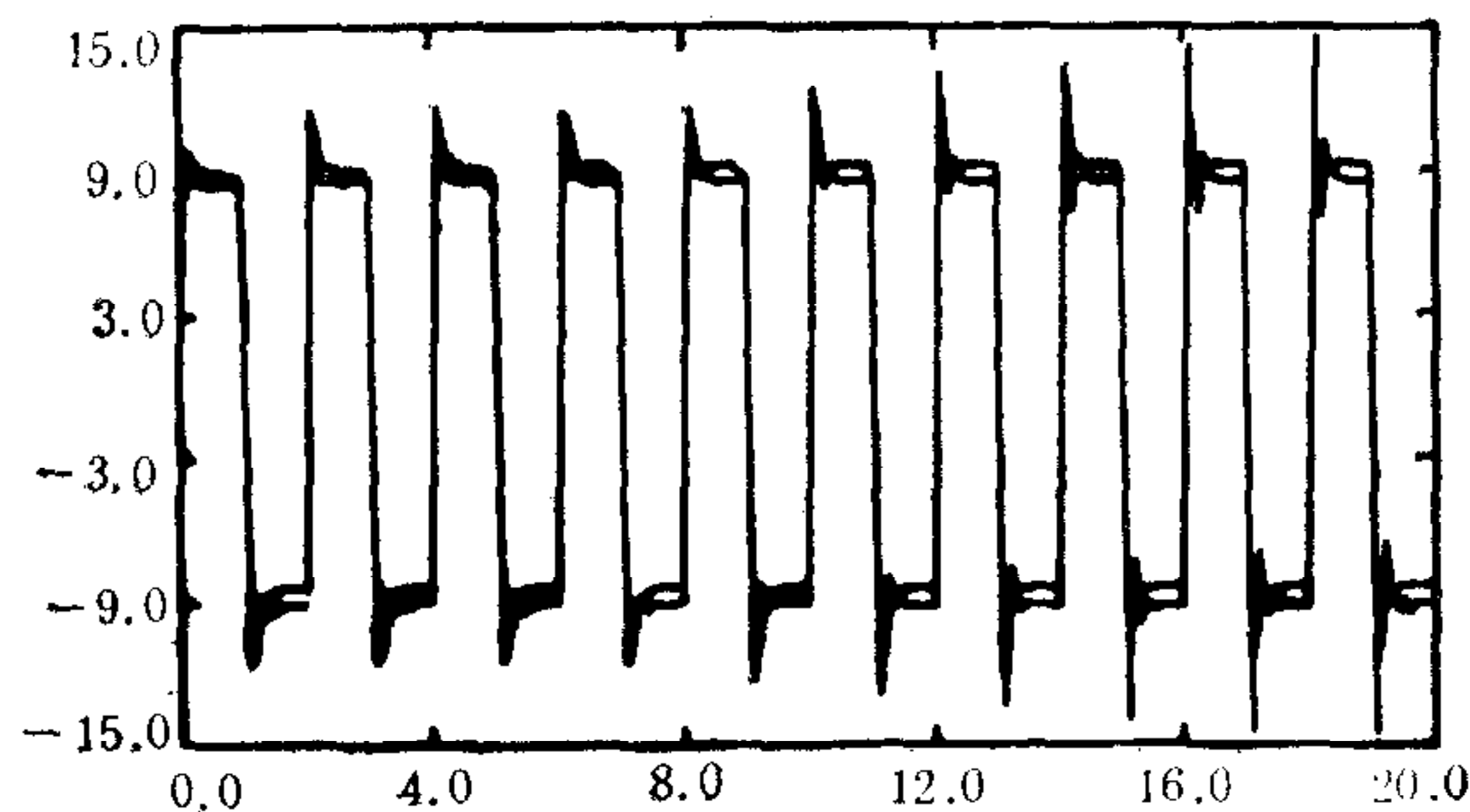
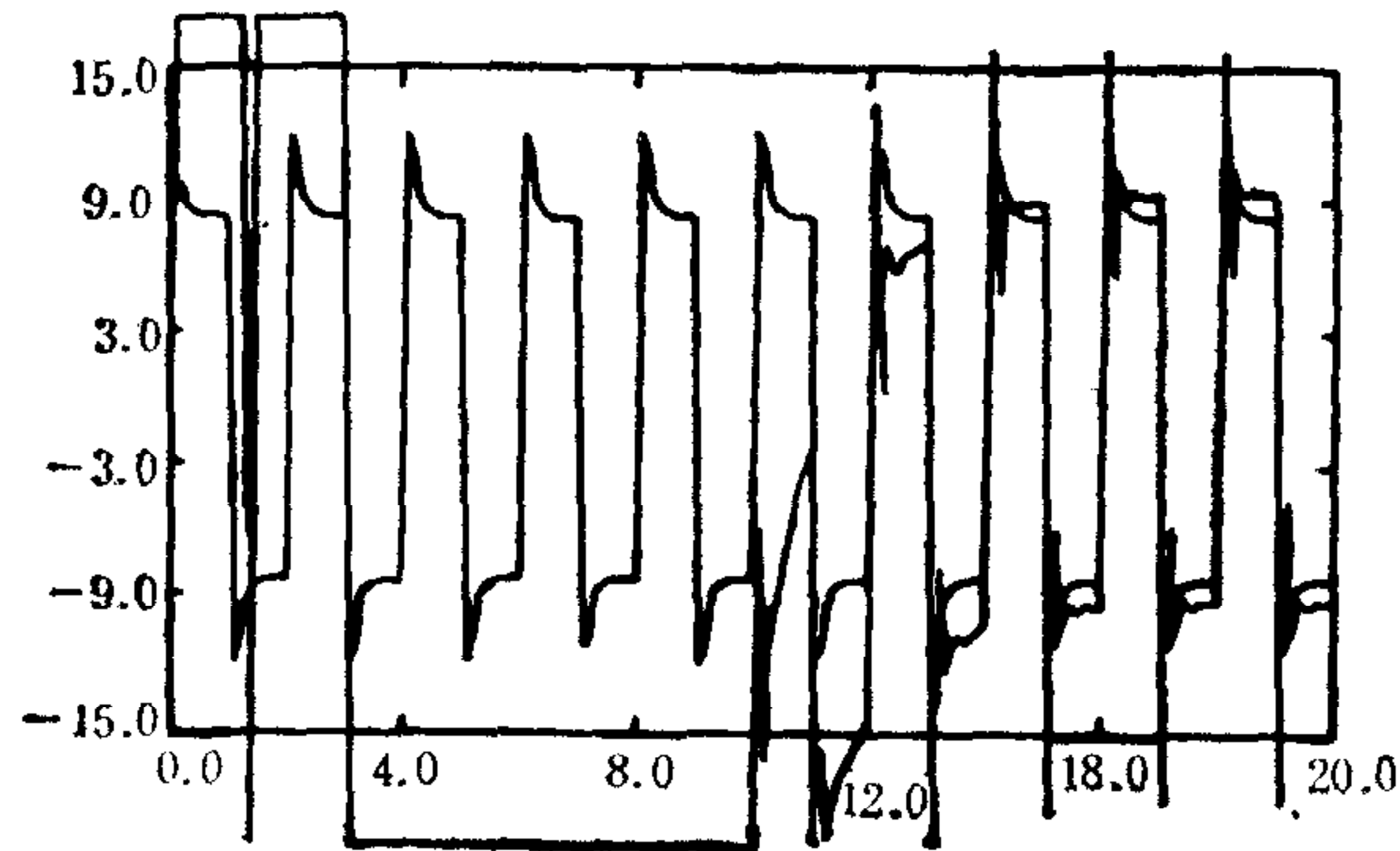


图 1 混合自适应系统的跟踪曲线

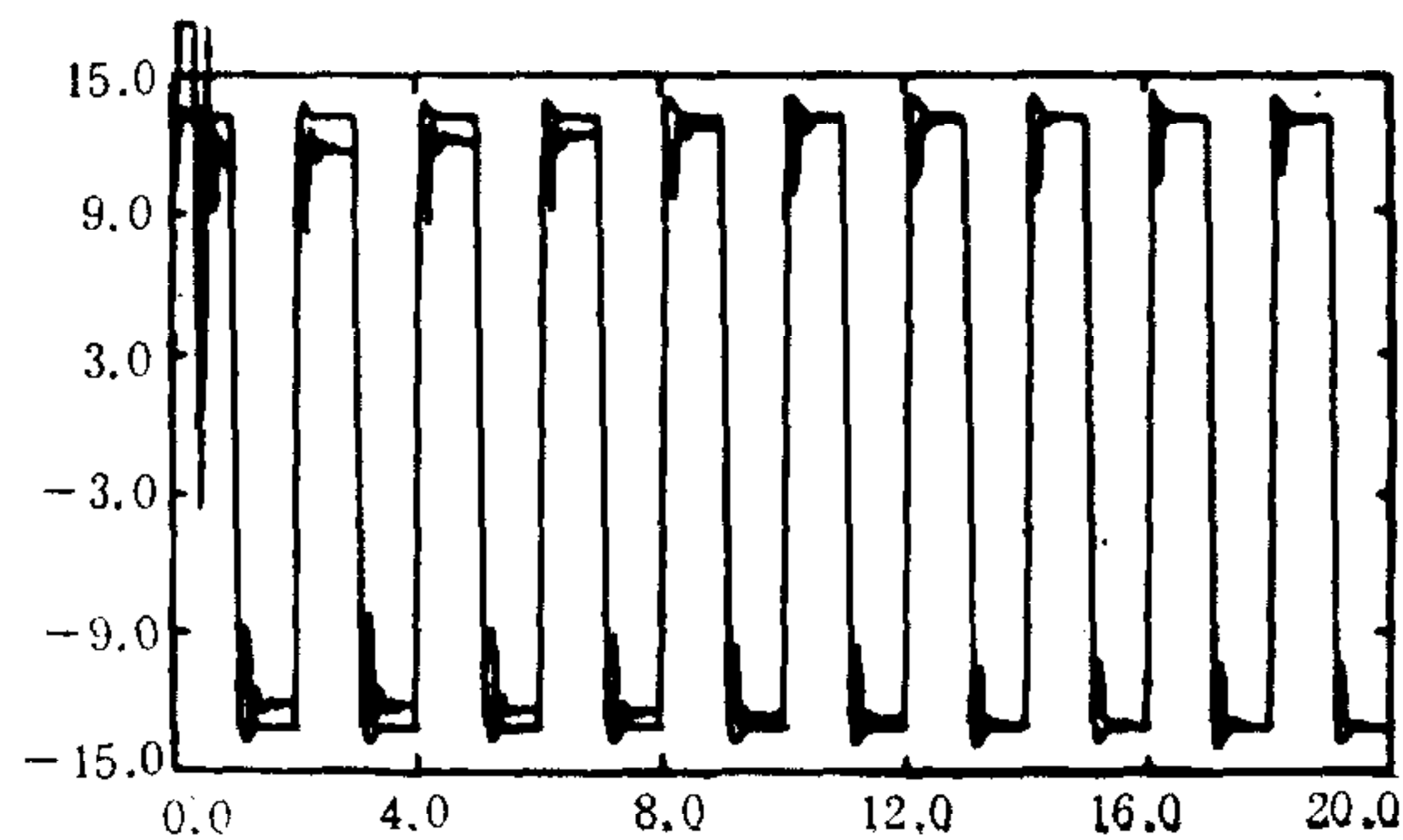
为了探讨文中方案的工程应用, 作者选择了地空导弹自动驾驶仪进行数字仿真, 并与相类似的全连续和全离散方案进行了对比。图 2 是将导弹参数冻结于某一特征点时的仿真曲线, 可看到全连续和全离散系统的跟踪性能变差, 而混合自适应系统仍具有良好的跟踪性能。



(a) 全连续自适应极点配置方案



(b) 全离散自适应极点配置方案



(c) 混合自适应极点配置方案

图2 地空导弹自动驾驶仪仿真曲线

由于在混合自适应方案中控制信号保持连续,但控制参数调整却是离散进行的,与全连续方案相比,它减弱了自适应方案的积分作用,因而减弱了系统中非线性和未建模动态的影响;与全离散方案相比,它又能更好地与实际对象耦合,因而跟踪性能优于相类似的全连续和全离散方案。

为了进行严格的数学证明,对于方案中的设计参数文中给出了最为保守的取值范围,在实际应用中,这些参数的选择是相当灵活的。

结 束 语

本文提出的方案具体应用于诸如地空导弹一类的快速时变系统还有一些工作要做,但理论分析和数字仿真结果都表明,若将这种方案用于战术导弹控制系统设计,会使战术导弹的性能有所改善。

参 考 文 献

- [1] Elliott, H., Cristi, R., Das, M., Global Stability of Adaptive Pole Placement Algorithms, *IEEE Trans. Auto. Contr.*, **AC-30** (1985), (4), 348—356.
- [2] 李言俊,连续对象具有未建模动态时的一种鲁棒混合自适应控制器,西北工业大学学报,第7卷第1期,57—66.

- [3] Elliott, H., Hybrid Adaptive Control of Continuous Time Systems, *IEEE Trans. Auto. Contr.*, **AC-27** (1982), (2), 419—426.
- [4] Goodwin, G. C., Sin, K. S., Adaptive Filtering, Prediction and Control, Prentice Hall, 1984.

AN INDIRECT HYBRID ADAPTIVE POLE PLACEMENT SCHEME FOR PLANT WITH UNMODELED DYNAMICS

ZHU ZHIGANG LI YANJUN AND QIANG WENXIN

(College of Astronautics, Northwestern Polytechnical University)

ABSTRACT

In this paper, we propose an indirect hybrid adaptive pole placement scheme for plant with unmodeled dynamics. Normalization technique and covariance reset least square method with forgetting factor are used for parameter estimation. We design the discrete adaptive control law directly from continuous plant, which guarantees the robust stability of the closed-loop system. Theoretical analysis and digital simulation results show that this scheme is superior to similar continuous scheme and discrete scheme.

Key words : Unmodeled dynamics; hybrid adaptive pole placement; covariance reset; normalization.