

对稳定的模糊自适应控制方案 的研究与改进¹⁾

张乃尧 金 晖

(清华大学自动化系 北京 100084)

摘 要 对美国加州伯克利大学 Li-Xin Wang 1993年提出的模糊自适应控制方案的稳定性条件进行了研究,证明了两个新的结论:1)原来的监督控制可以取消;2)渐近稳定的条件可由 $w(t)$ 平方可积放宽到 $w(t) \rightarrow 0$. 在此基础上,提出并证明了一种模糊自适应控制的新方案,它能在任何情况下保证闭环渐近稳定,并在一定条件下还能保证参数收敛. 对一阶不稳定与二阶混沌两个控制对象的仿真实验结果表明,新方案的控制效果比 Wang 的方案有很大提高.

关键词 模糊自适应控制, 稳定性, 非线性系统.

1 引言

近年来,在模糊控制系统的稳定性方面发表了一些重要成果^[1-4],但文献[2-4]都是假设已知对象的模型,而这恰恰与模糊控制不需要对象数学模型的优点相矛盾. 唯有 Wang 在文献[1]中提出的稳定的模糊自适应控制方案不需要对象模型,而且可在线运行,尤为引人注目. 但此方案也存在以下问题:

1)为了保证系统闭环渐近稳定,要求同时加入模糊自适应控制项与监督控制项,而监督控制项取值很大,给实用造成困难.

2)闭环渐近稳定的条件是最优控制误差 $w(t)$ 平方可积,这个条件不仅很难满足,而且既无法观测也无法事先检验,限制了此方案的应用.

3)此方案只保证闭环跟踪误差 $e(t)$ 收敛到零,并不能保证模糊控制器参数也收敛到最优值.

本文针对文献[1]论及的一类非线性对象,提出了一种稳定的模糊自适应控制的新方案,较好地克服了 Wang 方案的三个缺点.

2 对 Wang 方案的研究与改进

本文所研究的控制对象是一类控制作用可分离的 SISO n 阶非线性系统^[1]

$$x^{(n)} = f(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}) + bu, \quad y = x, \quad (1)$$

1)国家自然科学基金、清华大学科学基金资助项目.

收稿日期:1995-08-28

其中 f 是一个未知的连续函数, b 是一个未知的正常量, $u \in \mathbb{R}$ 与 $y \in \mathbb{R}$ 分别是系统的输入与输出, 假设状态 $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)^T = (x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)})^T \in \mathbb{R}^n$ 可量测. 控制目标是使 y 跟踪一个有界参考信号 $y_m(t)$, 具体地说, 就是要设计模糊控制律 $u_c(\mathbf{x}|\theta)$ 与可调参数矢量 θ 的自适应律, 使得闭环系统全局稳定并使跟踪误差 $e = y_m - y$ 在 $t \rightarrow \infty$ 时收敛到零.

设 $\mathbf{e} = (e, \dot{e}, \dots, e^{(n-1)})^T$, 有 $\mathbf{k} = (k_n, \dots, k_1)^T$, 使多项式 $h(s) = s^n + k_1 s^{n-1} + \dots + k_n$ 的根都在左半开平面. 若函数 f 与常数 b 已知, 则理想的控制律

$$u^* = \frac{1}{b} [-f(\mathbf{x}) + y_m^{(n)} + \mathbf{k}^T \mathbf{e}], \quad (2)$$

代入(1)式得

$$e^{(n)} + k_1 e^{(n-1)} + \dots + k_n e = 0, \quad (3)$$

即可满足 $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$. 由于 f 与 b 未知, 理想控制 u^* 无法实现. 为了达到控制目标, Wang 提出的控制律为^[1]

$$u = u_c(\mathbf{x}|\theta) + u_s(\mathbf{x}), \quad (4)$$

其中 $u_c(\mathbf{x}|\theta)$ 是模糊自适应控制, $u_s(\mathbf{x})$ 为监督控制. 采用单点模糊化、中心平均解模糊以及和-积模糊推理,

$$u_c(\mathbf{x}|\theta) = \left[\sum_{l=1}^M \bar{y}_l \left(\prod_{i=1}^n \mu_{F_i^l}(x_i) \right) \right] / \left[\sum_{l=1}^M \left(\prod_{i=1}^n \mu_{F_i^l}(x_i) \right) \right], \quad (5)$$

其中 $\mu_{F_i^l}$ 为第 l 条规则中状态 x_i 对模糊子集 F_i^l 的隶属度, n 为状态个数, M 为规则数, \bar{y}_l 为第 l 条规则中结论隶属度为1对应的输出值. 若只将 \bar{y}_l 当成可调参数, 上式可以写为

$$u_c(\mathbf{x}|\theta) = \theta^T \boldsymbol{\xi}(\mathbf{x}), \quad \boldsymbol{\xi}^l(\mathbf{x}) = \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{F_i^l}(x_i)}{\sum_{l=1}^M \left(\prod_{i=1}^n \mu_{F_i^l}(x_i) \right)}, \quad (6)$$

其中 $\theta = (\bar{y}_1, \dots, \bar{y}_M)^T$ 是参数向量, $\boldsymbol{\xi}(\mathbf{x}) = (\boldsymbol{\xi}^1(\mathbf{x}), \dots, \boldsymbol{\xi}^M(\mathbf{x}))^T$ 是回归向量, 而 $\boldsymbol{\xi}^l(\mathbf{x})$ 称为模糊基函数. 按照 Wang 的定义

$$A_c = \begin{bmatrix} 0 & \vdots & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \cdots & 1 \\ -k_n & -k_{n-1} & \cdots & \cdots & -k_1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b}_c = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ b \end{bmatrix}. \quad (7)$$

设 $\theta^* \equiv \arg \min_{\theta} [\sup_{\mathbf{x}} |u_c(\mathbf{x}|\theta) - u^*|]$ 为最优参数矢量, $\boldsymbol{\varphi} \equiv \theta^* - \theta$ 为参数误差矢量, $w \equiv u_c(\mathbf{x}|\theta^*) - u^*$ 为最优控制误差. 取 Lyapunov 函数为

$$V = \frac{1}{2} \mathbf{e}^T P \mathbf{e} + \frac{b}{2\gamma} \boldsymbol{\varphi}^T \boldsymbol{\varphi}, \quad \gamma > 0, \quad (8)$$

其中 P 为一个对称正定阵, 满足 Lyapunov 方程

$$A_c^T P + P A_c = -Q, \quad Q > 0. \quad (9)$$

在以上定义下, Wang 提出的参数向量 θ 的自适应律是

$$\dot{\theta} = \begin{cases} \gamma \mathbf{e}^T P_n \boldsymbol{\xi}(\mathbf{x}), & \text{若 } |\theta| < M_\theta \text{ 或 } |\theta| = M_\theta \text{ 且 } \mathbf{e}^T P_n \theta^T \boldsymbol{\xi}(\mathbf{x}) \leq 0, \\ \gamma \mathbf{e}^T P_n \boldsymbol{\xi}(\mathbf{x}) - \gamma \mathbf{e}^T P_n \frac{\theta \theta^T \boldsymbol{\xi}(\mathbf{x})}{|\theta|^2}, & \text{若 } |\theta| = M_\theta \text{ 且 } \mathbf{e}^T P_n \theta^T \boldsymbol{\xi}(\mathbf{x}) > 0, \end{cases} \quad (10)$$

其中 P_n 为 P 的最后一列, $M_\theta > 0$ 是设计者给定的常量. 下面将证明, 在 Wang 定义的上述

条件下,取消监督控制项 u , 仍可使系统闭环渐近稳定.

定理1. 对于一个形如(1)式的非线性对象,控制律 $u = u_c(x|\theta)$ 由(6)式给出, θ 由自适应律(10)来调节. 若 $w(t) \in L_2$, 则 $\lim_{t \rightarrow \infty} |e(t)| = 0$.

证明. 证明分以下三步:

1) 首先证明 $|\theta| \leq M_\theta$. (11)

令 $V_\theta = \frac{1}{2} \theta^T \theta$. 当(10)式第一行满足时, $|\theta| < M_\theta$ 或 $|\theta| = M_\theta$ 且 $\dot{V} = \gamma e^T P_n \theta^T \xi(x) \leq 0$,

因此 $|\theta| \leq M_\theta$. 当(10)式第二行满足时, $|\theta| = M_\theta$ 且 $\dot{V} = \gamma e^T P_n \theta^T \xi(x) - \gamma e^T P_n \frac{|\theta|^2 \theta^T \xi(x)}{|\theta|^2} = 0$, 也有 $|\theta| \leq M_\theta$. 故(11)式得证.

2) 再证明 $V \leq \max \left\{ V(0), M_\varphi + \frac{\lambda_{\max} |Pb_c w_{\max}|^2}{2(\lambda_{Q\min} - 1)} \right\}$, (12)

其中 $V(0)$ 为 V 的初值, w_{\max} 为 $|w|$ 的上确界, λ_{\max} 为正定阵 P 最大的特征值, $\lambda_{Q\min}$ 为正定阵 Q 最小的特征值. 由于 Q 是设计者确定的, 可以取合适的 Q 使 $\lambda_{Q\min} > 1$. $M_\varphi = \max \left(\frac{b}{2\gamma} \varphi^T \varphi \right)$ 是一个正的常值. 由(11)式知 $|\theta| \leq M_\theta$, 而 θ^* 是一个有界值, 故 M_φ 是一定存在的. 利用(8)式 V 的定义以及(9)式, 得

$$\dot{V} = -\frac{1}{2} e^T Q e + \frac{b}{\gamma} \varphi^T [\gamma e^T P_n \xi(x) + \dot{\varphi}] - e^T P b_c w. \quad (13)$$

将自适应律(10)式代入(13)式得

$$\dot{V} = -\frac{1}{2} e^T Q e - e^T P b_c w + I e^T P_n b \frac{\varphi^T \theta \theta^T \xi(x)}{|\theta|^2}, \quad (14)$$

其中当(10)式中第一(或第二)行成立时, $I=0$ (或1). 下面证明上式的最后一项是非正的. 当 $I=0$ 时, 结论显然成立; 当 $I=1$ 时, 则 $|\theta| = M_\theta$ 且 $e^T P_n \theta^T \xi(x) > 0$, 而 $\varphi^T \theta = (\theta^* - \theta)^T \theta = \frac{1}{2} [|\theta^*|^2 - |\theta|^2 - |\theta - \theta^*|^2] \leq 0$ (这里用到 $|\theta| = M_\theta \geq |\theta^*|$)^[1], 因此(14)式最后一项是非正的. 所以(14)式可简化为

$$\dot{V} \leq -\frac{1}{2} e^T Q e - e^T P b_c w \quad (15)$$

$$\begin{aligned} &\leq -\frac{\lambda_{Q\min} - 1}{2} |e|^2 - \frac{1}{2} [|e|^2 + 2e^T P b_c w + |P b_c w|^2] + \frac{1}{2} |P b_c w|^2 \\ &\leq -\frac{\lambda_{Q\min} - 1}{2} |e|^2 + \frac{1}{2} |P b_c w|^2. \end{aligned} \quad (16)$$

当 $V < \max \left\{ V(0), M_\varphi + \frac{\lambda_{\max} |Pb_c w_{\max}|^2}{2(\lambda_{Q\min} - 1)} \right\}$ 时, (12)式成立.

当 $V = \max \left\{ V(0), M_\varphi + \frac{\lambda_{\max} |Pb_c w_{\max}|^2}{2(\lambda_{Q\min} - 1)} \right\} = M_\varphi + \frac{\lambda_{\max} |Pb_c w_{\max}|^2}{2(\lambda_{Q\min} - 1)}$ 时, 由于 $\frac{1}{2} \lambda_{\max} |e|^2 \geq \frac{1}{2} e^T P e = V - \frac{b}{2\gamma} \varphi^T \varphi \geq V - M_\varphi$, 故 $|e|^2 \geq \frac{2}{\lambda_{\max}} (V - M_\varphi)$, 将其代入(16)式得 $\dot{V} \leq -\frac{\lambda_{Q\min} - 1}{\lambda_{\max}} (V - M_\varphi) + \frac{1}{2} |P b_c w|^2 \leq 0$, 仍有(12)式成立.

当 $V = \max \left\{ V(0), M_\varphi + \frac{\lambda_{\max} |Pb_c w_{\max}|^2}{2(\lambda_{Q\min} - 1)} \right\} = V(0)$ 时, 由于 $V = V(0) > M_\varphi +$

$\frac{\lambda_{\max} |Pb_c w_{\max}|^2}{2(\lambda_{Q_{\min}} - 1)}$, 由上面的证明可知 $\dot{V} < 0$, 仍有(12)式成立.

以上证明了 V 有界, 根据(8)式, $e \in L_{\infty}$.

3) 最后证结论. 将(16)式两边积分得

$$\int_0^t |e(\tau)|^2 d\tau \leq \frac{2}{\lambda_{Q_{\min}} - 1} [|V(0)| + |V(t)|] + \frac{1}{\lambda_{Q_{\min}} - 1} |Pb_c|^2 \int_0^t |w(\tau)|^2 d\tau. \quad (17)$$

由2)的结论已知 V 有界, 故上式右边第一项有界, 而第二项的系数是常数. 若 $w(t) \in L_2$, 由(17)式可知 $e \in L_2$. 再由误差方程 $\dot{e} = A_c e + b_c \varphi^T \xi(x) - b_c w$, (18) 知 $\dot{e} \in L_{\infty}$ (因为(18)式右边每一项都有界). 根据 Barbalat 定理有 $\lim_{t \rightarrow \infty} |e(t)| = 0$.

下面将证明, 系统渐近稳定的条件可由 $w(t) \in L_2$ 减弱为 $w(t) \rightarrow 0$.

定理2. 对于一个形如(1)式的非线性对象, 控制律 $u = u_c(x|\theta)$ 由(6)式给出, θ 由自适应律(10)来调节. 若 $\lim_{t \rightarrow \infty} w(t) = 0$, 则 $\lim_{t \rightarrow \infty} |e(t)| = 0$.

证明. 由于 $\lim_{t \rightarrow \infty} w(t) = 0$, 故 $\forall \epsilon > 0, \exists t_0$, 当 $t > t_0$ 时满足

$$|w(t)| < (\frac{1}{2} \lambda_{Q_{\min}} \epsilon^2) / (\max |e^T P b_c|). \quad (19)$$

若 $|e(t)| \geq \epsilon$, 则将(19)式代入(15)式得

$$\dot{V} < -\frac{1}{2} e^T Q e + |e^T P b_c| \frac{\frac{1}{2} \lambda_{Q_{\min}} \epsilon^2}{\max |e^T P b_c|} \leq -\frac{1}{2} e^T Q e + \frac{1}{2} \lambda_{Q_{\min}} \epsilon^2 \leq 0,$$

会使 $e(t)$ 衰减. 因此, $\exists t_1 > 0, \forall t > t_1$, 将有 $|e(t)| \leq \epsilon$. 由于 ϵ 的任意性有 $\lim_{t \rightarrow \infty} |e(t)| = 0$.

3 一种稳定的模糊自适应控制的新方案

为了达到所要求的控制目标, 设计控制律为

$$u = u_c(x|\theta) + u_d, \quad (20)$$

其中 $u_c(x|\theta)$ 为形如(6)式的模糊自适应控制, u_d 为补偿控制, u_d 的算式如下:

$$u_d(t) = \text{sgn}(e^T(t) P b_c) \left[\frac{1}{b_L} |e^{(n)}(t-1) + k^T e(t-1)| + |u(t-1) - u_c(t)| + \delta \right], \quad (21)$$

其中 $0 < b_L \leq b$, $e^{(n)}(t-1)$ 可以通过 $e^{(n-1)}(t-1)$ 和 $e^{(n-1)}(t)$ 经过一阶数值运算求出, 而 $\delta \geq \sup_{t'} |u^*(t) - u^*(t-1)|$. 由于 $u^*(t)$ 一般来说是一个一致连续的函数, 当采样间隔很小时, δ 也很小. 对于模糊自适应控制项中的可调参数 θ , 采用如下的自适应律:

$$\dot{\theta} = \gamma e^T P_n \xi(x) + \gamma \xi(x(t-1)) [u(t-1) - \theta^T(t-1) \xi(x(t-1))]. \quad (22)$$

定理3. 考虑一个形如(1)式的非线性对象, 控制律由(20)式给出, u_c 与 u_d 分别由(6), (21)式给出, θ 由自适应律(22)式来调整, 则该控制方案可保证如下性质:

- 1) $\lim_{t \rightarrow \infty} |e(t)| = 0$;
- 2) 重新定义 $\theta^* \equiv \text{argmin}_{\theta} [\sup_{t > T} |u_c(x|\theta) - u^*(t)|]$, (23)

其中 T 是系统闭环稳定后的某个时刻. 只要 $\lim_{t \rightarrow \infty} w(t) = 0$, 且 $R \equiv \xi(x(t)) \xi^T(x(t)) > 0$, 则

$\lim_{t \rightarrow \infty} \theta = \theta^*$.

证明. 1)由(1),(2),(20)式经过简单的加减、移项可以得到闭环系统误差方程

$$e^{(n)} = -k^T e + b(u^* - u_c - u_d) = -k^T e + b(u^* - u), \quad (24)$$

$$u^*(t-1) - u(t-1) = \frac{1}{b} [e^{(n)}(t-1) + k^T e(t-1)]. \quad (25)$$

令 $V_c = \frac{1}{2} e^T P e$, 由(9)式得到 $\dot{V}_c = -\frac{1}{2} e^T Q e + e^T P b_c (u^* - u)$. (26)

将(20),(21),(25)式代入(26)式得

$$\begin{aligned} \dot{V}_c &= -\frac{1}{2} e^T Q e + e^T P b_c (u^*(t) - u_c(t)) - |e^T P b_c| \left[\frac{1}{b_t} |e^{(n)}(t-1) \right. \\ &\quad \left. + k^T e(t-1) + |u(t-1) - u_c(t)| + \delta \right] \\ &\leq -\frac{1}{2} e^T Q e + e^T P b_c (u^*(t) - u_c(t)) - |e^T P b_c| \left[|u^*(t-1) \right. \\ &\quad \left. - u(t-1)| + |u(t-1) - u_c(t)| + \delta \right] \\ &\leq -\frac{1}{2} e^T Q e + e^T P b_c (u^*(t) - u_c(t)) - |e^T P b_c| \left[|u^*(t) - u_c(t)| \right] \\ &\leq -\frac{1}{2} e^T Q e \leq 0, \end{aligned}$$

所以 $\lim_{t \rightarrow \infty} |e(t)| = 0$ 成立.

2)由(8)式 V 的定义及(9),(20),(21),(22)式得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -\frac{1}{2} e^T Q e + \frac{b}{\gamma} \varphi^T (\gamma e^T P_n \xi(x) + \dot{\varphi}) - e^T P b_c u_d - e^T P b_c w \\ &\leq -\frac{1}{2} e^T Q e + \frac{b}{\gamma} \varphi^T (\gamma e^T P_n \xi(x) + \dot{\varphi}) - e^T P b_c w \\ &= -\frac{1}{2} e^T Q e - b \varphi^T \xi(x(t-1)) [u(t-1) - u_c(t-1)] - e^T P b_c w. \quad (27) \end{aligned}$$

由1)已知 $\lim_{t \rightarrow \infty} |e(t)| = 0$, 所以 $\lim_{t \rightarrow \infty} e^{(n-1)}(t) = 0$. 因为 $\lim_{t \rightarrow \infty} e^{(n)}(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{e^{(n-1)}(t) - e^{(n-1)}(t-1)}{\Delta T}$ 中分子是分母的高阶无穷小, 所以 $\lim_{t \rightarrow \infty} e^{(n)}(t) = 0$. 因此, (27)式在 t

充分大时可以忽略所有的“ e ”与“ $e^{(n)}$ ”, 并用 $u^*(t)$ 代替 $u(t)$ (根据(24)式)

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -b \varphi^T(t) \xi(x(t-1)) [u^*(t-1) - u_c(x(t-1) | \theta(t-1))] \\ &= -b \varphi^T(t) \xi(x(t-1)) [u_c(x(t-1) | \theta^*(t-1)) - u_c(x(t-1) | \theta(t-1))] \\ &\quad + b \varphi^T(t) \xi(x(t-1)) [u_c(x(t-1) | \theta^*(t-1)) - u^*(t-1)] \\ &= -b \varphi^T(t) \xi(x(t-1)) \xi^T(x(t-1)) \varphi(t-1) + b \varphi^T(t) \xi(x(t-1)) w(t-1). \quad (28) \end{aligned}$$

当采样间隔很小时, (28)式可近似为

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -b \varphi^T(t-1) \xi(x(t-1)) \xi^T(x(t-1)) \varphi(t-1) \\ &\quad + b \varphi^T(t) \xi(x(t-1)) w(t-1). \quad (29) \end{aligned}$$

由于 $V_\varphi = V - V_c$, 且 t 充分大时 $V_c \approx 0, \dot{V}_c \approx 0$, 所以 $\dot{V}_\varphi \approx \dot{V}$. 又由于 $\lim_{t \rightarrow \infty} w(t) = 0$, 故(29)式

变为
$$\dot{V}_\varphi \leq -b \varphi^T(t) \xi(x(t)) \xi^T(x(t)) \varphi(t). \quad (30)$$

由于 $R \geq 0$, 所以 φ 有界; 若 $R > 0$, 则 $V_\varphi < 0$, 可使 $\lim_{t \rightarrow \infty} \theta = \theta^*$.

4 仿真实验

例1. 控制下面的一阶不稳定对象:

$$\dot{x}(t) = \frac{1 - e^{-x(t)}}{1 + e^{-x(t)}} + u(t), \quad x(0) = 1, \tag{31}$$

使它的状态回到原点,即 $y_m \equiv 0$. 显然在没有控制作用时,对象(31)是不稳定的.

选 $\gamma=1, Q=10, k_1=1$, 由(9)式解出 $P=5$. 取 $M=6$, 前提模糊子集的隶属函数为 $\mu_1(x) = 1/[1 + \exp(5(x+10))]$, $\mu_2(x) = \exp(-(x+9.9)^2)$, $\mu_3(x) = \exp(-(x+0.1)^2)$, $\mu_4(x) = \exp(-(x-0.1)^2)$, $\mu_5(x) = \exp(-(x-9.9)^2)$, $\mu_6(x) = 1/[1 + \exp(-5(x-10))]$. 模糊控制规则为

$$R_l: \text{IF } x \text{ is } F^l, \text{ THEN } u = \bar{y}_l, l = 1, 2, \dots, 6. \tag{32}$$

用定理2所述的方法,取 $M_\theta=10$,图1为一次仿真结果. 由图中可以看到,由于不满足 $\lim_{t \rightarrow \infty} w(t) = 0$ 的条件,闭环系统不稳定. 在相同实验条件下,用定理3的控制方案,闭环系统不到1秒就稳定了. 新控制方案在任何情况下可保证闭环渐近稳定,从而取消了 $w(t) \in L_2$ 或 $w(t) \rightarrow 0$ 的条件.

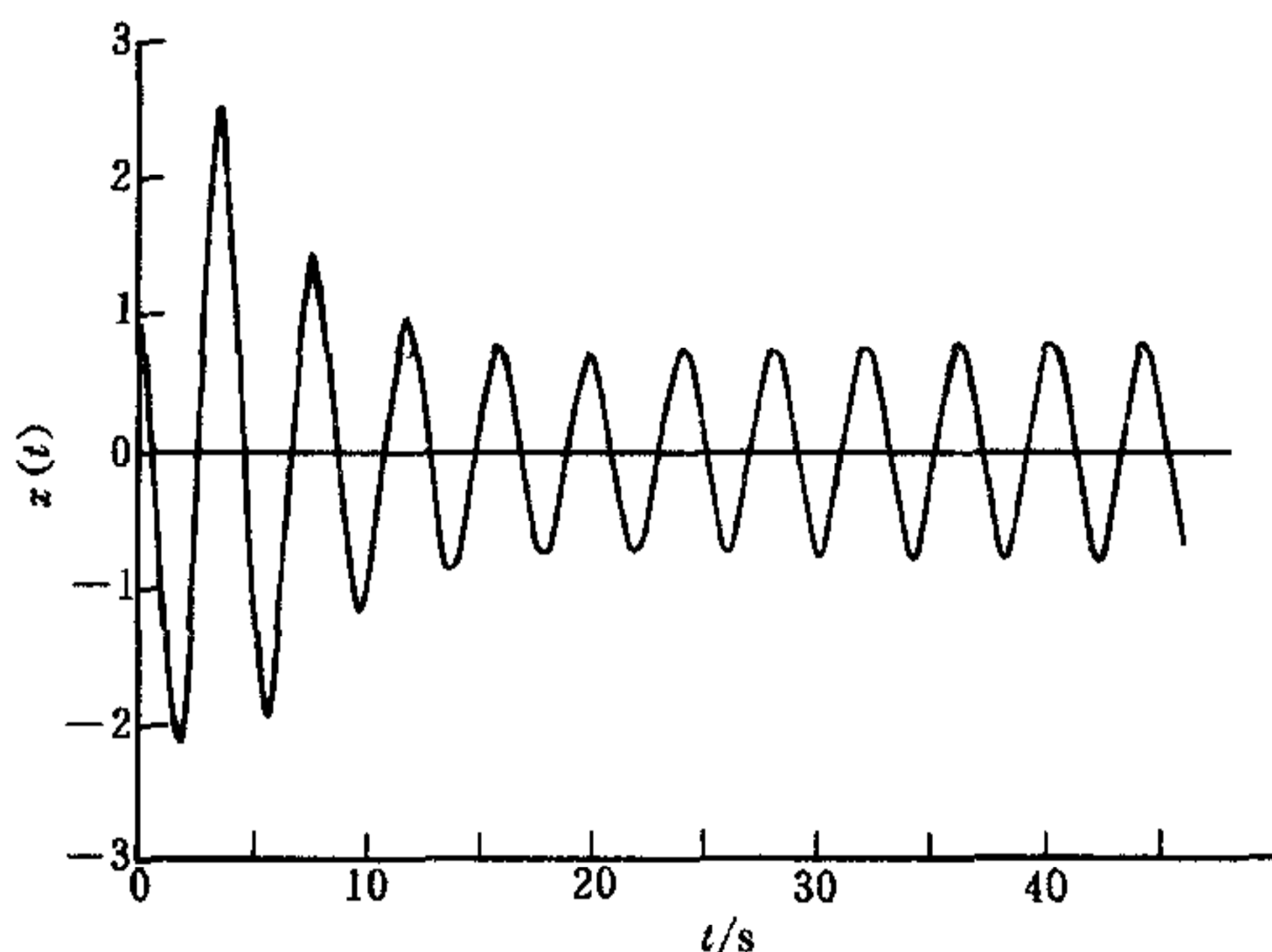


图1 定理2方案作用于一阶不稳定对象

例2. 考虑如下非线性对象:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= -0.1x_2 - x_1^3 + 12\cos(t) + u(t), \end{aligned} \tag{33}$$

初值 $x_1(0) = x_2(0) = 2$, 控制目标是使系统输出 x_1 跟随已知信号 $y_m(t) = \sin(t)$. 在相平面上这条轨迹是单位圆 $y_m^2 + \dot{y}_m^2 = 1$. 在没有控制时上述对象是一个混沌系统.

选 $\gamma=2, k_1=2, k_2=1, Q = \begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}$, 从(9)式

解出 $P = \begin{bmatrix} 15 & 5 \\ 5 & 5 \end{bmatrix}$, $b_l = 1$, x_1 与 x_2 分别取例1中的6个模糊子集. 模糊控制规则为

$$\begin{aligned} R_l: \text{IF } x_1 \text{ is } F_1^i \text{ and } x_2 \text{ is } F_2^j, \\ \text{THEN } u = \bar{y}_l, l = 1, 2, \dots, 36, \quad i, j = 1, 2, \dots, 6. \end{aligned} \tag{34}$$

定理2方案取 $M_\theta=30$. 图2与图3分别显示了定理2方案与定理3方案的控制效果. 由于 $y_m(t) = \sin(t)$, 不存在 θ^* 使 $\lim_{t \rightarrow \infty} w(t) = 0$, 定理2方案无法使闭环系统稳定, 而定理3的方案使跟踪误差很快趋于0.

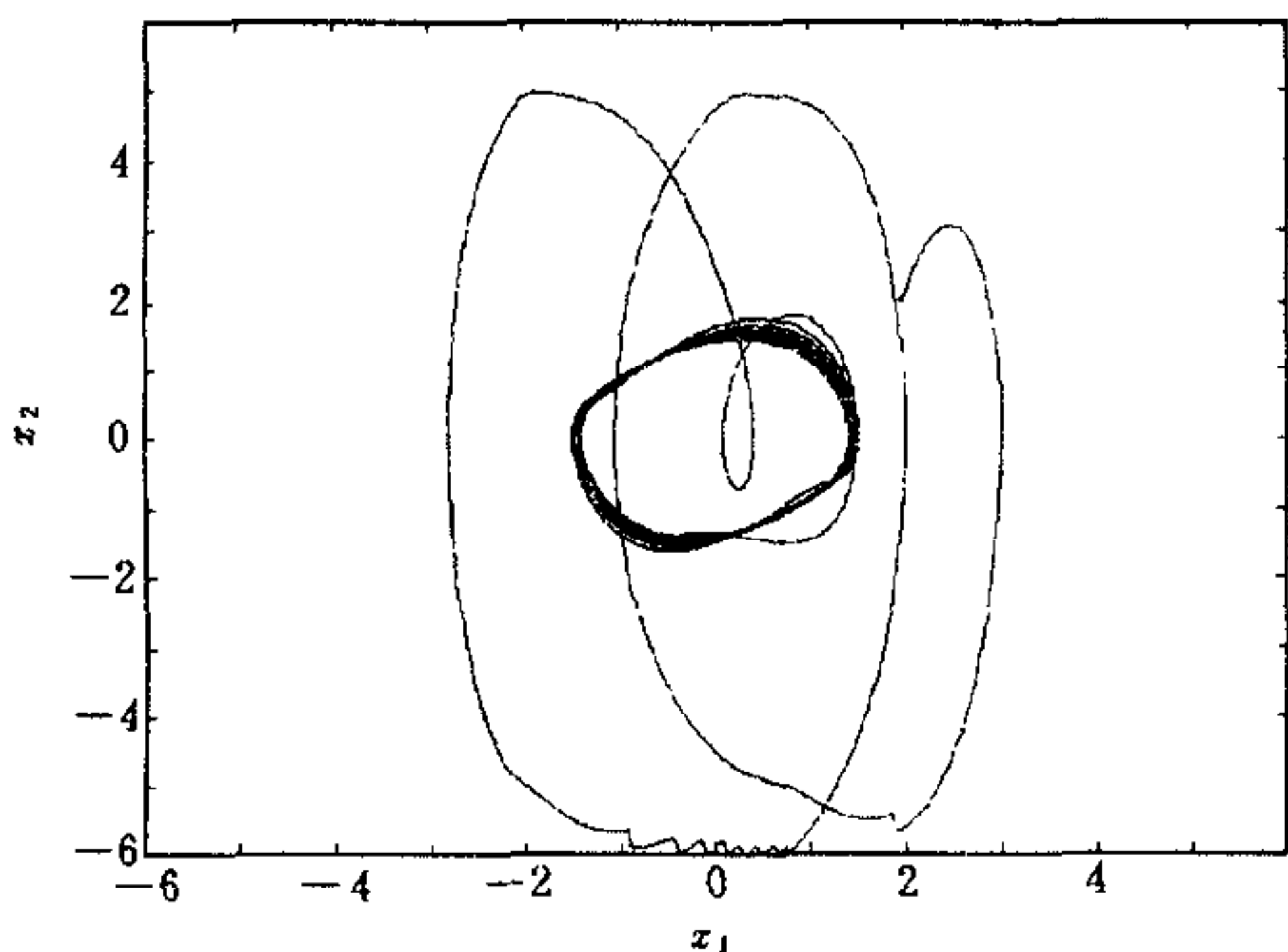


图2 定理2方案应用于二阶混沌对象

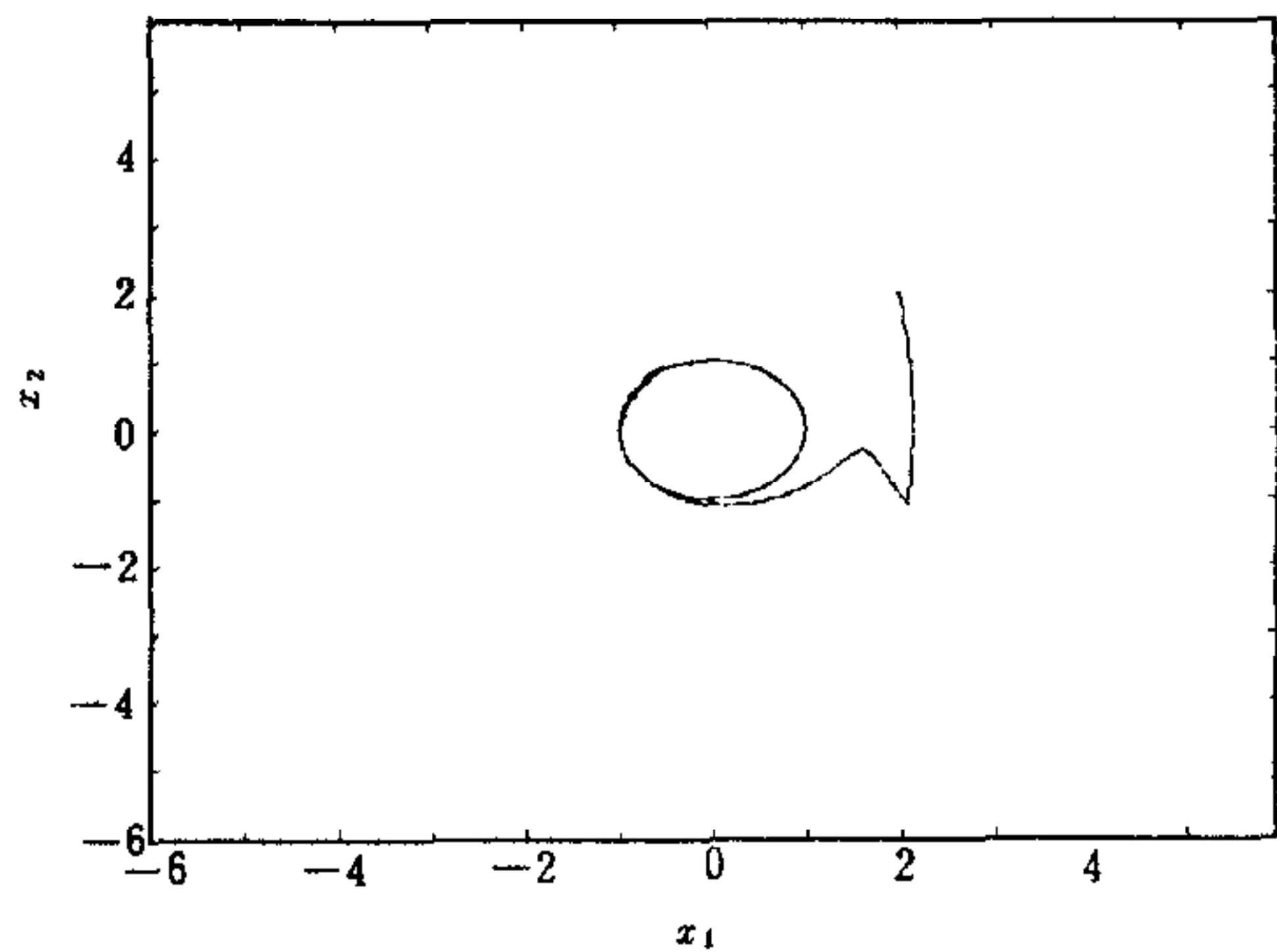


图3 定理3方案应用于二阶混沌对象

参 考 文 献

- [1] Wang L X. Stable adaptive fuzzy control of nonlinear systems. *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, 1993, 1(2):146—155.
- [2] Tanaka K, Sugeno M. Stability analysis and design of fuzzy control systems. *Fuzzy Sets and Systems*, 1992, 45(2): 135—156.
- [3] Tanaka K, Sano M. A robust stabilization problem of fuzzy control systems and its application to backing up control of a truck-trailer. *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, 1994, 2(2):119—134.
- [4] Johansen T A. Fuzzy model based control: stability, robustness, and performance issues. *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, 1994, 2(3):221—234.

STUDY AND MODIFICATION ON STABLE ADAPTIVE FUZZY CONTROL

ZHANG NAIYAO JIN HUI

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract This paper analyzes the stability of an adaptive fuzzy control scheme which was presented by Li-Xin Wang in 1993, and proves two new results. First, the supervisory control is unnecessary in the sense of stability; second, the asymptotical converging condition of tracking error can be weakened to $w(t) \rightarrow 0$. Furthermore, a new adaptive fuzzy control scheme is proposed, which not only can make the closed-loop system always asymptotically stable, but also can make the parameter vector θ converge to the optimum value under certain conditions. Simulation results for an unstable nonlinear system and a chaotic plant have demonstrated that the new adaptive fuzzy control scheme performs much superior to Wang's scheme.

Key words Adaptive fuzzy control, stability, nonlinear systems.

张乃尧 1970年毕业于清华大学电机系,现为清华大学自动化系副教授.曾获国家科技进步二等奖和国家教委科技进步一等奖.近期研究领域为:模糊控制,模糊神经网络,智能自动化.

金 晖 1995年毕业于清华大学自动化系,现在美国明尼苏达大学控制科学与动态系统中心攻读博士学位.