文章编号: 1001-0920(2002)03-0328-04

区间时滞组合系统的鲁棒分散 H_∞ 控制

关新平[1], 张群亮[1], 段广仁[2]
(1. 燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 哈尔滨工业大学 控制工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 研究一类区间时滞组合系统的鲁棒分散 H_∞ 控制问题。基于LMI方法, 给出了该系统可分散控制的充分条件及相应控制器的设计方法。通过构造分散控制律, 使得闭环系统鲁棒稳定且具有一定的 H_∞ 性能。分散控制器的设计可通过求解一组LMIs得到。数值算例说明了所给方法的有效性。

关键词: 区间组合系统; 时滞; 分散镇定; 鲁棒 H_∞ 控制
中图分类号: O 175.21 文献标识码: A

Robust decentralized H_∞ control for interval time-delay interconnected systems

GUAN Xin-ping[1], *ZHANG Qun-liang*[1], *DUAN Guang-ren*[2]
(1. Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;
2. Department of Control Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The problem of robust decentralized H_∞ control for a class of interval interconnected time-delay systems is studied. Based on the LMI approach, a sufficient condition for decentralized stabilization and a method for the design of corresponding controllers are given. The controller can not only stabilize the controlled system, but also guarantee H_∞ properties. The decentralized controller can be obtained by solving a set of LMIS. A numerical example illustrates the effectiveness of the method.

Key words: interval interconnected systems; time-delay; decentralized stabilization; robust H_∞ control

1 引 言

实际的控制系统经常受到各种干扰和不确定因素的影响, 造成了系统的状态模型中常常含有不确定项。不确定性系统的控制方法的研究具有重要的理论意义和实用价值。目前, 这方面已有很多研究成果[1~6], 其中不确定项的处理方法大致可分为三种: 文献[1～3]研究了一类满足匹配条件的不确定性系统的鲁棒控制问题; 文献[4]用秩-1分解的方法对不确定项进行了处理; 而文献[5,6]则考虑了一类不确定项满足范数有界条件的不确定性系统的鲁棒控制问题。最近, 一些学者开始研究更为一般意义下的不确定系统, 即区间系统的鲁棒控制问题。这类系统的研究是将各种未知干扰和不确定因素对系统的影响转化为系统矩阵各个元素值的变化。实际中有很多控制系统可以用区间系统加以描述, 例如, 飞机运动系统、电机控制系统以及各种T-S型模糊控制系统均可视为区间控制系统[7]。因此, 区间系统的鲁棒控制具有很好的应用价值。文献[8,9]分别研究了连续和离散情形下区间系统的鲁棒 H_∞ 控制问题, 并以Riccati方程的形式给出了控制器的设计方法。

收稿日期: 2001-04-02; 修回日期: 2001-06-18
作者简介: 关新平(1962—), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 教授, 博士生导师, 从事大系统控制、时滞系统的鲁棒控制等研究; 张群亮(1978—), 男, 河北隆尧人, 硕士生, 从事时滞系统和广义系统的鲁棒控制等研究。

另外,组合系统的分散控制由于实现起来简单、经济而越来越受到人们的广泛关注[10]。有很多学者研究了组合系统的分散控制问题,并取得了一些有意义的研究成果[11~13],而有关区间组合系统分散镇定方面的结果却鲜有报道。本文从实用角度出发,综合考虑了干扰、不确定因素以及时滞对系统稳定性的影响,研究一类区间时滞组合系统的分散鲁棒 H_∞ 控制问题,给出了这类系统鲁棒分散控制器设计的一种方法,并将最后的结果化为 LMI 形式。

2　系统描述及引理

考虑由 N 个子系统组成的区间时滞组合系统,每个子系统的状态方程如下

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = A_i x_i(t) + \sum_{j=1}^{N} A_{ij} x_j(t-\tau_{ij}) + \\ \qquad B_{i1}\omega(t) + B_{i2}u_i(t) \\ z_i(t) = C_{i1}x_i(t) + D_{i1}\omega(t) \\ y_i(t) = C_{i2}x_i(t) \\ i,j = 1,2,\cdots,N \end{cases} \tag{1}$$

其中,$x_i(t) \in R^n$,$u_i(t) \in R^m$,$z_i \in R^p$ 和 $y_i \in R^q$ 分别为第 i 个子系统的状态、控制输入、被控输出和输出向量;$\omega \in R^r$ 为平方可积的干扰信号;$B_{i1}, B_{i2}, C_{i1}, C_{i2}, D_{i1}$ 为具有适当维数的常数矩阵;A_i 为第 i 个子系统的状态矩阵,A_{ij} 为第 j 个子系统对第 i 个子系统的关联作用矩阵;τ_{ij} 表示关联项中的滞后时间。A_i, A_{ij} 中的元素值是不确定的,但属于某一给定的区间,即

$$A_i \in [D_i, E_i], \quad A_{ij} \in [M_{ij}, N_{ij}]$$
$$i,j = 1,2,\cdots,N \tag{2}$$

为了研究问题方便,令

$$A_{i0} = \frac{D_i + E_i}{2}, \quad A_{ij0} = \frac{M_{ij} + N_{ij}}{2}$$
$$\Delta A_{i0} = A_i - A_{i0}, \quad \Delta A_{ij0} = A_{ij} - A_{ij0}$$
$$S_i = \frac{E_i - D_i}{2}, \quad T_{ij} = \frac{N_{ij} - M_{ij}}{2} \tag{3}$$

则

$$|\Delta A_{i0}| < S_i, \quad |\Delta A_{ij0}| < T_{ij}$$
$$i,j = 1,2,\cdots,N \tag{4}$$

$|\Delta| < \bar{\Delta}$ 的含义是 $|s_{ij}| \le \bar{s}_{ij}(i,j = 1,2,\cdots,N)$,$s_{ij}$ 和 $\bar{s}_{ij}$ 分别为矩阵 Δ 和 $\bar{\Delta}$ 的第 ij 个对应元素。根据式(3),系统(1) 可改写为如下形式

$$\dot{x}_i(t) = (A_{i0} + \Delta A_{i0})x_i(t) + \sum_{j=1}^{N}(A_{ij0} + \Delta A_{ij0})x_j(t-\tau_{ij}) + B_{i1}\omega(t) + B_{i2}u_i(t) \tag{5}$$

本文的主要目的是,对每一个子系统设计一个线性无记忆状态反馈控制律

$$u_i(t) = K_i x_i(t) \tag{6}$$

使得区间系统(1) 渐近稳定,并满足给定的 H_∞ 性能指标。

在给出本文主要定理之前,先给出如下引理:

引理 1　若 $n \times m$ 阶矩阵 ΔA 满足 $|\Delta A| < D$,则 $\Delta A \Delta A^{\mathrm{T}} \le \Omega(D)$,$\Delta A^{\mathrm{T}}\Delta A \le \Gamma(D)$,这里

$$\Omega(D) = \begin{cases} \|DD^{\mathrm{T}}\| I_{n\times n}, & \|DD^{\mathrm{T}}\| I_{n\times n} < n\mathrm{diag}(DD^{\mathrm{T}}) \\ n\mathrm{diag}(DD^{\mathrm{T}}), & \text{其　它} \end{cases}$$

$$\Gamma(D) = \begin{cases} \|D^{\mathrm{T}}D\| I_{m\times m}, & \|D^{\mathrm{T}}D\| I_{m\times m} < m\mathrm{diag}(D^{\mathrm{T}}D) \\ m\mathrm{diag}(D^{\mathrm{T}}D), & \text{其　它} \end{cases}$$

矩阵 $\|M\|$ 的范数定义为 M 的最大奇异值。

引理 2　设 z 和 y 是具有适当维数的向量或矩阵,则对于任意正定对称矩阵 Q,下述不等式成立。

$$\pm 2x^{\mathrm{T}}y \le x^{\mathrm{T}}Qx + y^{\mathrm{T}}Q^{-1}y$$

引理 3　设 A 和 ΔA 分别为 $n \times n$ 的实矩阵,如果有 $\Delta A^{\mathrm{T}}\Delta A \le \bar{A}^2$ 成立,其中 $\bar{A}$ 是一个对称矩阵,则对于任意的 $\xi > 0$,$P > 0$ 和 $P - \xi I > 0$,有下式成立。

$$(A + \Delta A)P(A + \Delta A)^{\mathrm{T}} \le$$
$$APA^{\mathrm{T}} + AP(\xi I - P)^{-1}PA^{\mathrm{T}} + \xi\bar{A}^2$$

3　主要结果

本节要考虑的问题是,对于区间时滞组合系统(5),给每一个子系统设计一个分散控制律 $u_i(t) = K_i x_i(t)$,使得闭环系统渐近稳定,并满足一定的 H_∞ 性能指标。首先考虑 $\omega(t) = 0$ 的情况,此时系统状态方程可写为

$$\dot{x}_i(t) = \tilde{A}_{i0}x_i(t) + \sum_{j=1}^{N}\tilde{A}_{ij0}x_j(t-\tau_{ij}) \tag{7}$$

其中

$$\tilde{A}_{i0} = A_{i0} + \Delta A_{i0} + B_{i2}K_i$$
$$\tilde{A}_{ij0} = A_{ij0} + \Delta A_{ij0}$$

则我们有如下定理:

定理 1　对于闭环系统(5),如果存在对称矩阵 $X_i > 0$,$Q_{ij} > 0$,矩阵 Y_i,以及常数 $\beta_i > 0$,$\epsilon_{ij} > 0(i, j = 1,2,\cdots,N)$,使得下面的 LMI

$$\begin{bmatrix} \hat{A}_i & X_i\Gamma^{1/2}(S_i) & \Lambda_i^{\mathrm{T}} \\ \Gamma^{1/2}(S_i)X_i & -\beta_i I & 0 \\ \Lambda_i & 0 & -J_i \end{bmatrix} < 0 \tag{8}$$

成立，则闭环系统是可以分散镇定的，且 $u_i(t) = Y_i X_i^{-1} x_i(t)$ 是系统的一个分散控制律。其中

$$\hat{A}_i = A_{i0}X_i + X_i A_{i0}^{\mathrm{T}} + Y_i^{\mathrm{T}} B_{i2}^{\mathrm{T}} + B_{i2}Y_i + \beta_i I + \sum_{j=1}^{N}(A_{ij0}Q_{ij}A_{ij0}^{\mathrm{T}} + \epsilon_{ij}\Omega(T_{ij}))$$

$$\Lambda_i = [A_{i10}Q_{i1}, X_i, A_{i20}Q_{i2}, X_i, \cdots, A_{iN0}Q_{iN}, X_i]^{\mathrm{T}}$$

$$J_i = \mathrm{diag}(\epsilon_{1i} - Q_{i1}, Q_{1i}, \epsilon_{i2}I - Q_{i2}, Q_{2i}, \cdots, \epsilon_{iN}I - Q_{iN}, Q_{Ni}) \quad (9)$$

证明　构造 Lyapunov 泛函

$$V(x(t),t) = \sum_{i=1}^{N}\left[x_i^{\mathrm{T}}P_i x_i + \sum_{j=1}^{N}\int_{-\tau_{ij}} x_j^{\mathrm{T}}(\theta)Q_{ij}^{-1}x_j(\theta)\mathrm{d}\theta\right] \quad (10)$$

其中，$P_i, Q_{ij}(i,j = 1,2,\cdots,N)$ 是正定对称矩阵，显然 $V(x(t),t)$ 是正定的。

对式(10)求导，并根据引理 2 可得

$$\mathring{V}(x(t),t) = \sum_{i=1}^{N}\left[\mathring{x}_i^{\mathrm{T}}P_i x_i + x_i^{\mathrm{T}}P_i\mathring{x}_i + \sum_{j=1}^{N}(x_j^{\mathrm{T}}(t)Q_{ij}^{-1}x_j(t) - x_j^{\mathrm{T}}(t-\tau_{ij})Q_{ij}^{-1}x_j(t-\tau_{ij}))\right] \le$$

$$\sum_{i=1}^{N}x_i^{\mathrm{T}}\Big(\tilde{A}_{i0}^{\mathrm{T}}P_i + P_i\tilde{A}_{i0} + \sum_{j=1}^{N}P_i\tilde{A}_{ij0}Q_{ij}\tilde{A}_{ij0}^{\mathrm{T}}P_i + \sum_{j=1}^{n}Q_{ji}^{-1}\Big)x_i \quad (11)$$

对于所有的 $A_i \in [D_i, E_i], A_{ij} \in [M_{ij}, N_{ij}]$，如果

$$\tilde{A}_{i0}^{\mathrm{T}}P_i + P_i\tilde{A}_{i0} + \sum_{j=1}^{N}P_i\tilde{A}_{ij0}Q_{ij}\tilde{A}_{ij0}^{\mathrm{T}}P_i + \sum_{j=1}^{N}Q_{ji}^{-1} < 0 \quad (12)$$

成立，则 $\mathring{V}(x(t),t) < 0$，根据 Lyapunov 定理，闭环系统是可以分散鲁棒镇定的，且 $u_i(t) = K_i x_i(t)$ 是系统(5)的一个分散控制律。

对式(12)分别左乘和右乘矩阵 P_i^{-1}，并引进新的变量 $X_i = P_i^{-1}, Y_i = K_i X_i$，可得

$$X_i\tilde{A}_{i0}^{\mathrm{T}} + \tilde{A}_{i0}X_i + \sum_{j=1}^{N}\tilde{A}_{ij0}Q_{ij}\tilde{A}_{ij0}^{\mathrm{T}} + \sum_{j=1}^{N}X_iQ_{ji}^{-1}X_i < 0 \quad (13)$$

则式(12)成立当且仅当式(13)成立，根据引理 1 和引理 3，有

$$X_i\tilde{A}_{i0}^{\mathrm{T}} + \tilde{A}_{i0}X_i + \sum_{j=1}^{N}\tilde{A}_{ij0}Q_{ij}\tilde{A}_{ij0}^{\mathrm{T}} + \sum_{j=1}^{N}X_iQ_{ji}^{-1}X_i <$$

$$A_{i0}X_i + X_iA_{i0}^{\mathrm{T}} + Y_i^{\mathrm{T}}B_{i2}^{\mathrm{T}} + B_{i2}Y_i + \sum_{j=1}^{N}(A_{ij0}Q_{ij}A_{ij0}^{\mathrm{T}} + A_{ij0}Q_{ij}(\epsilon_{ij}I - Q_{ij})^{-1}Q_{ij}A_{ij0}^{\mathrm{T}} + \epsilon_{ij}\Omega(T_{ij})) + \beta_i I + \frac{1}{\beta_i}X_i\Gamma(S_i)X_i + \sum_{j=1}^{N}X_iQ_{ji}^{-1}X_i < 0 \quad (14)$$

根据 Schur 补定理，式(14)成立当且仅当式(8)成立。□

下面考虑区间时滞组合系统(5)的鲁棒 H_∞ 控制问题。当 $\omega(t) \ne 0$ 时，我们有如下定理：

定理 2　给定 H_∞ 性能指标 $\gamma_i > 0(i = 1,2,\cdots,N)$，如果存在对称矩阵 $X_i > 0, Q_{ij} > 0$，矩阵 Y_i，以及常数 $\beta_i > 0, \epsilon_{ij} > 0(i,j = 1,2,\cdots,N)$，满足

$$\begin{bmatrix} \tilde{A} & B_{i1} & X_iC_{i1}^{\mathrm{T}} & X_i\Gamma^{1/2}(S\setminus -i) & \Lambda^{\mathrm{T}} \\ B_{i1}^{\mathrm{T}} & -\gamma_i^2 I & D_{i1}^{\mathrm{T}} & 0 & 0 \\ C_{i1}X_i & D_{i1} & -I & 0 & 0 \\ \Gamma^{1/2}(S_i)X_i & 0 & 0 & -\beta_i I & 0 \\ \Lambda & 0 & 0 & 0 & -J \end{bmatrix} < 0 \quad (15)$$

则称系统(5)是可以分散鲁棒 H_∞ 控制的，且 $u_i(t) = Y_iX_i^{-1}x_i(t)$ 是系统(5)的一个分散控制律。其中

$$\tilde{A} = A_{i0}X_i + X_iA_{i0}^{\mathrm{T}} + Y_i^{\mathrm{T}}B_{i2}^{\mathrm{T}} + B_{i2}Y_i + \beta_i I + \sum_{j=1}^{N}(A_{ij0}Q_{ij}A_{ij0}^{\mathrm{T}} + \epsilon_{ij}\Omega(T_{ij})) + C_{i1}^{\mathrm{T}}C_{i1}$$

Λ 和 J 的定义同式(9)。

证明　考虑系统(5)，显然式(15)包含了式(8)。因此，式(15)成立时保证了闭环系统是渐近稳定的。下面证明在零初始条件下，不等式 $\|z_i(t)\|_2 \le \gamma_i\|\omega(t)\|_2$ 成立，其中 $\omega(t) \in L_2[0,\infty)$。

为了证明 $\|z_i(t)\|_2$ 的上界为 $\gamma_i\|\omega(t)\|_2$，假设 $x_i(t) = 0, t \in [-\tau_{ij}\ \ 0]$，并引入如下泛函指标

$$J = \sum_{i=1}^{N}\left[\int^{\infty}(z_i^{\mathrm{T}}(t)z_i(t) - \gamma_i^2\omega^{\mathrm{T}}(t)\omega(t)\mathrm{d}t\right] \quad (16)$$

构造 Lyapunov 泛函

$$V(x(t),t) = \sum_{i=1}^{N}\left[x_i^{\mathrm{T}}P_ix_i + \sum_{j=1}^{N}\int_{-\tau_{ij}}x_j^{\mathrm{T}}(\theta)Q_{ij}^{-1}x_j(\theta)\mathrm{d}\theta\right] \quad (17)$$

对上式求导

$$\mathring{V}(x(t),t) = \sum_{i=1}^{N}\Big[\mathring{x}_i^{\mathrm{T}}P_ix_i + x_i^{\mathrm{T}}P_i\mathring{x}_i + 2x_i^{\mathrm{T}}(t)P_iB_{i1}\omega(t) + \sum_{j=1}^{N}(x_j^{\mathrm{T}}(t)Q_{ij}^{-1}x_j(t) -$$

$$x_j^{\mathrm{T}}(t-\tau_{ij})Q_{ij}^{-1}x_j(t-\tau_{ij}))] \tag{18}$$

而

$$J=\sum_{i=1}^{N}\left(\int_0^\infty(z_i^{\mathrm{T}}(t)z_i(t)-\gamma_i^2\omega^{\mathrm{T}}(t)\omega(t)+\right.$$

$$\left.\mathring{V}(x(t),t)\,\mathrm{d}t-x_i^{\mathrm{T}}(\infty)P_ix_i(\infty)-Q_{i\infty}\right) \tag{19}$$

显然

$$0\le x_i^{\mathrm{T}}(\infty)P_ix_i(\infty)<\infty$$

$$Q_{i\infty}=\lim_{t\to\infty}\sum_{j=1}^{N}\int_{-\tau_{ij}}x_j^{\mathrm{T}}(s)Q_{ij}^{-1}x_j(s)\,\mathrm{d}s\ge 0$$

所以有

$$J\le\sum_{i=1}^{N}\int_0^\infty\begin{bmatrix}x_i(t)\\ \omega(t)\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\times$$

$$\begin{bmatrix}\Xi & P_iB_{i1}+C_{i1}^{\mathrm{T}}D_{i1}\\ D_{i1}^{\mathrm{T}}C_{i1}+B_{i1}^{\mathrm{T}}P_i & -\gamma_i^2I+D_{i1}^{\mathrm{T}}D_{i1}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_i(t)\\ \omega(t)\end{bmatrix}\mathrm{d}t \tag{20}$$

由 Schur 补可知,$J<0$ 当且仅当式(15) 成立。其中

$$\Xi=\tilde{A}_{i0}^{\mathrm{T}}P_i+P_i\tilde{A}_{i0}+\sum_{j=1}^{N}P_i\tilde{A}_{ij0}Q_{ij}\tilde{A}_{ij0}^{\mathrm{T}}P_i+\sum_{j=1}^{N}Q_{ji}^{-1}+C_{i1}^{\mathrm{T}}C_{i1}$$

4　数值算例

这里给出一个数值算例用以说明本文方法的有效性。沿用前面的符号,系统的参数如下

$$A_{10}=\begin{bmatrix}[-6.2 & -3.8] & [0.5 & 1.5]\\ [-2 & 0] & [-4.6 & -3.4]\end{bmatrix}$$

$$A_{110}=\begin{bmatrix}[-0.1 & 0.5] & [0 & 1]\\ [-0.4 & 0.4] & [0.2 & 0.4]\end{bmatrix}$$

$$A_{120}=\begin{bmatrix}[-0.25 & 0.05] & [0.1 & 0.5]\\ [-0.1 & 0.1] & [0.5 & 0.1]\end{bmatrix}$$

$$B_{11}=\begin{bmatrix}1\\0\end{bmatrix},\quad B_{12}=\begin{bmatrix}0.24\\1\end{bmatrix},\quad C_{11}=\begin{bmatrix}1.2\\2\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$

$$A_{20}=\begin{bmatrix}[-2.5 & -0.5] & [0.5 & 1.5]\\ [-3.1 & -2.9] & [-7.6 & -6.4]\end{bmatrix}$$

$$A_{210}=\begin{bmatrix}[0.2 & 0.4] & [0 & 0.4]\\ [-1 & -0.6] & [-0.09 & 0.11]\end{bmatrix}$$

$$A_{220}=\begin{bmatrix}[0.02 & 0.22] & [0.1 & 0.5]\\ [-0.41 & -0.01] & [0 & 0.2]\end{bmatrix}$$

$$B_{21}=\begin{bmatrix}0.3\\0.2\end{bmatrix},\ B_{22}=\begin{bmatrix}0.8\\0\end{bmatrix},\ C_{21}=\begin{bmatrix}0\\1\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$

$$D_{11}=0.4,\quad D_{21}=0.2$$

将上述参数代入式(15),并选取 $\gamma_1=1$, $\gamma_2=1$, 利用 MATLAB 的 LMI 工具箱求解式(15),则可求得系统的一个分散控制器

$$u_1=-16.3386x_1-26.3316x_2$$

$$u_2=-6.2674x_1+4.5011x_2$$

从上述例子可以看出,当系统矩阵的各个元素在一较宽范围内变化时,利用本文方法设计出的分散控制器仍能使闭环系统内部稳定,且满足一定的 H_∞ 性能指标,说明了本文方法的有效性。

5　结　　论

本文针对一类区间时滞组合系统,考虑其鲁棒分散 H_∞ 控制问题,给出了该系统可分散控制的充分条件及相应控制器的设计方法。其存在性依赖于相应的 LMI 的解,而目前 LMI 的解法已比较成熟,这些不等式可直接由 MATLAB 的 LMI 工具箱求解,不需要调整任何参数,因此,设计过程简单、方便。值得一提的是,实际中很多控制系统都可以抽象为本文考虑的区间系统的模型,所以,本文结果具有很好的应用价值。

参考文献(References):

[1] Leitmann G. On the efficacy of nonlinear control in uncertain linear systems [J]. J Dynamic Syst Measurements Contr, 1981, 103(2): 95-102.

[2] Lee C S, Leitmann G. Continuous feedback guaranteeing uniform ultimate boundness for uncertain linear delay systems: An application to river pollution control[J]. Comp Math Appl, 1988, 16(10): 929-938.

[3] Cheres E S, Gutman S, Palmor Z J. Robust stabilization of uncertain dynamic systems including state delay [J]. IEEE Trans on Autom Contr, 1989, 34(11): 1199-1203.

[4] Chio H H. Memoryless stabilization of uncertain dynamic systems including time-varying delayed states and controls [J]. Automatica, 1995, 31(9): 1349-1351.

[5] Lie X, C E de Souza. Criteria for robust stability and stabilization of uncertain linear systems with state delay [J]. Automatica, 1997, 33(9): 1657-1662.

[6] Mahmoud M S, Al-Muthairi N F. Quadratic stabilization of continuous time systems with state-delay and norm-bounded time-varying uncertainties [J]. IEEE Trans on Autom Contr, 1994, 39(10): 2135-2139.

[7] Gao S G. Analysis and design of fuzzy control systems using dynamic fuzzy global models[J]. Fuzzy Set and System, 1995, 75(1): 47-62.

(下转第 335 页)

6　沉积微相识别

在油藏沉积微相模式识别中, 可表征沉积微相类型变化的测井特征参数有 20 余项[2]。经大量取心井岩心实验分析资料的相关分析和统计, 并结合专家经验, 最终选用地层厚度 h、电阻率 R、自然电位 SP、声波时差 AC 和微电位 R_m 等 5 个参数作为沉积微相识别特征参数, 而输出为沉积微相类型。

这里选择大庆萨北油田某油层段进行实际资料处理。根据萨北油田取心井分析资料和专家解释结果, 初步选取 5 类 376 个小层沉积微相样本, 采用按模糊隶属函数值相近样本向量类别矫正策略对其进行筛选, 确定出 208 个作为训练集学习样本。

样本举例如表 1 所示。

表 1　小层沉积微相训练集部分样本

h	R	SP	AC	R_m	微相类型
1.60	20.00	15.00	315.00	2.50	2
0.90	11.00	11.00	280.00	2.00	3
0.30	17.00	6.50	148.00	1.40	4
3.2	28.70	23.30	226.00	5.10	1
⋮					

表中微相类型 1, 2, 3, 4, 5 分别代表分流河道、小分流河道、废弃河道、席状砂和道间泥等类型。

正则化模糊神经网络的拓扑结构确定为 5-15-15-243-1 型, 即 5 个输入节点, 15 个模糊化层节点(对应每个输入取 3 个隶属函数) , 15 个正则化层节点, 243 个规则层节点和 1 个输出层节点。

网络的学习过程采用单样本循环误差修正方式, 即从样本集中随机抽取一个样本进行网络学习, 直到满足误差精度为止, 再选取下一个样本 …。学习参数选取如下: 最大学习次数 30 000, 学习速度 0.7, 惯性系数 0.5, 学习精度 0.1(每个样本实际输出与希望输出的最大偏差) 。实际中网络训练次数约为 5 819(每一次包含 208 个样本得到满足精度的修正) 。部分学习结果见表 2。

表 2　样本集部分样本学习结果

希望输出	实际输出	绝对偏差	判属类别
3	2.942 496 7	0.057 503 3	3
2	1.901 825 5	0.098 174 5	2
4	3.910 887 8	0.089 112 2	4
1	1.051 453 6	0.051 453 6	1
5	5.007 815 0	0.007 815 0	5
⋮			

将学习好的网络用于其它井的沉积微相类型识别。对同一区块 358 个小层的测井数据进行识别, 判对 312 个小层, 识别正确率达到 86.8%。这在沉积微相自动识别方面已属较高的精度。

7　结　　语

根据沉积微相自动识别的实际需要而构造的一类 5 层结构的正则化模糊神经网络, 较好地解决了原始资料信息完整、客观的提取和沉积微相学习及自动识别问题。同时, 针对样本未经筛选会在同一个训练集中出现样本矛盾或冗余现象, 按模糊隶属函数值相近样本向量类别矫正策略对样本集中样本进行有效筛选, 较好地解决了以往沉积微相识别模型的不完备及算法的不适应性问题。实际资料处理结果表明, 该方法对解决沉积微相识别问题具有良好的适应性和实用性, 为实现计算机自动识别沉积微相提供了一条有效途径。

参考文献(References) :

[1] 王士同. 神经模糊系统及其应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1998. 126-129.

[2] 张一伟, 熊琦华, 王志章. 陆相油藏描述[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998. 77-87.

(上接第 331 页)

[8] 吴方向, 史忠科, 戴冠中. 区间系统的 H_∞ 鲁棒控制[J]. 自动化学报(Acta Automatica Sinica), 1999, 25(5): 703-708.

[9] 吴方向, 史忠科. 离散区间系统的 H_∞ 鲁棒控制 [J]. 控制与决策(Control and Decision), 2000, 15(4): 479-481.

[10] Jamshidi M. Large-scale systems, modeling and control [M]. New York: Elsevier Science Publishing Co Inc, 1983.

[11] Y H Chen. Decentralized robust control for large-scale uncertain systems: A design based on the bound of uncertainty [J]. J Dynamic Syst Measurements Contr, 1992, 114(1): 1-9.

[12] G M Schoen, H P Geering. A note on robustness bounds for large-scale time-delay systems[J]. Int J Systems Sci, 1995, 26(2): 2441-2444.

[13] Gong Z. Decentralized robust control of uncertain interconnected systems with prescribed degree of exponential convergence [J]. IEEE Trans on Autom Contr, 1995, 40(4): 704-707.