不确定时滞的无线网络控制系统的故障检测*

陈志明，崔宝同
（江南大学 物联网工程学院，江苏 无锡 214122）

摘　要：研究了一类具有不确定时滞的无线网络控制系统的故障检测的问题。由于时滞是不确定的，可以通过增广向量法将系统建模为马尔科夫跳变系统。在此基础上，设计了观测滤波器，满足了滤波器在没有扰动的情况下均方指数稳定，在有扰动时，满足一定的 $H\infty$ 鲁棒性能。当系统发生故障时，故障检测系统立即检测出故障。所得结果通过仿真示例得到了验证。

关键词：无线网络控制系统；不确定时滞；增广向量法；马尔科夫跳变系统；滤波器；稳定性；故障检测
中图分类号：TP273；TP393　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1001-3695(2012)11-4235-03
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.11.059

Fault detection for wireless networked control systems with uncertain time delay

CHEN Zhi-ming, CUI Bao-tong
(*School of IoT Engineering*, *Jiangnan University*, *Wuxi Jiangsu* 214122, *China*)

Abstract: This paper addressed the problem of the fault detection for a class of wireless networked control systems with uncertain time delay. Since the delay is uncertain, the system can be modeled as a Markov jump systems through augmented vector method. On the basis of the model above, this paper designed a observer-based filter, by choosing the appropriate filter gain, the filter was mean square convergent if there was no disturbance, and the filter would satisfy certain $H\infty$ robust performance if disturbance exists. When a fault occurs, the fault detection system would detect the fault rapidly. Simulation examples verify all results.

Key words: wireless networked control systems; uncertain time delay; augmented vector method; Markov jump systems; filter; stability; fault detection

无线网络控制系统是利用无线网络进行数据传输的网络控制系统。与有线网络控制系统相比，无线网络控制系统布线方便，简化了硬件架构并且维护比较方便。但是，无线网络控制系统也有着时滞长、信息传输易受干扰等较之有线网络控制系统更甚的缺点[1~3]。近年来，对有线网络控制系统已有了相当多的研究成果[4~8]。文献[4]考虑了网络控制系统中时滞的不确定性，结合系统状态不能被完全观测的情况下，研究了这类系统的 $H\infty$ 鲁棒控制问题。文献[5]研究了经过网络传输数据时存在时滞和数据包丢失的网络控制系统的稳定性，并设计了相应的控制器。文献[6]研究了时滞不是采样周期的整数倍且控制端、执行端都存在数据包丢失情况下的系统的故障检测问题。文献[7]利用多速率采样及增广向量法将不确定时滞的网络控制系统建模为马尔科夫跳变系统并设计了相应的故障检测滤波器进行系统的故障检测的研究。文献[8]将不确定时滞转换成时变多面体的不确定性，通过模型匹配的方法设计残差发生器进行故障检测。较之有线网络控制系统的丰富研究成果，无线网络控制系统的研究还处于初始阶段，但也有了一些研究成果[9~11]。文献[9]介绍了无线网络控制系统的建模问题。文献[10]对同时使用无线网络和有线网络的控制系统的稳定性问题进行了研究。文献[11]假设系统通过无线网络传输数据且被控对象模型是非线性的，将系统作模糊化处理结合无线网络传输数据时的特点，利用增广向量法将系统建模为模糊切换系统，再设计观测器进行状态观测并检测故障。本文提出了不确定时滞的无线网络控制系统的故障检测问题。

1　问题描述

考虑如图 1 所示的无线网络控制系统，连续线性时不变系统的状态空间模型可以写成如下的标准形式：

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + E_1 f(t) + D_1 w(t) \tag{1}$$

$$y(t) = Cx(t) + E_2 f(t) + D_2 w(t) \tag{2}$$

其中：$x \in R^n$ 表示状态向量；$u \in R^m$ 是系统的控制输入向量；$y \in R^r$ 是可测的输出向量；A、B、C、D_1、D_2、E_1、E_2 为适当维数的实矩阵，且 C 为行满秩；未知输入项 $w(t) \in R^l$ 包含有建模的不确定性和外部干扰，且 $w(t) \in L_2[0,\infty)$；$f(t) \in R^g$ 是系统发生故障时的故障向量。

对于上述的无线网络控制系统，需要作如下假设：

假设 1　无线网络控制系统的采样周期为 T，其中传感器采用时间驱动的方式，控制器及执行器则采用时分驱动的方式。本文用 τ_{sc} 和 τ_{ca} 分别代表传感器端到控制器端的时滞以及控制器端到执行器端的时滞。为了进行后续分析，这里令 $\tau_{sc} < h_1 T$，$\tau_{ca} < h_2 T$，其中 h_1、h_2 都为非负整数。因此，总的传输时滞即为 $\tau = \tau_{sc} + \tau_{ca} < h_1 T + h_2 T = h_0 T$，其中 $h_0 = h_1 + h_2$ 也是一个非负整数。

收稿日期：2012-03-29；**修回日期**：2012-05-07　　**基金项目**：国家自然科学基金资助项目(61174021)

作者简介：陈志明(1986-)，硕士研究生，主要研究方向为无线网络控制系统故障检测(timmyzm@sina.cn)；崔宝同(1960-)，教授，博导，主要研究方向为控制理论及其应用、复杂系统控制理论与应用.

假设 2　为了得到不确定长时滞，可以将采样时间间隔 $[kT,(k+1)T]$ 分为 M 小段。这样就可以近似地得到传输时滞。传感器端到控制器端的时滞 τ_{scd} 属于集合 $\kappa\{d\times(T/M)\}$，$d=0,1,\cdots,p$，$p=h_1M$；总传输时滞 τ_s，$s=0,1,\cdots,q$ 属于集合 $\chi\{s\times(T/M)\}$，$s=0,1,\cdots,q$，$q=h_0M$；显然，这里有集合 $\kappa\subseteq\chi$。

根据假设 1 和 2，并考虑通过网络时，有时滞的影响，上述的连续系统可以离散化成下面的形式[12]：

$$x(k+1)=\widehat{A}x(k)+\sum_{s=0}^{m}B_su(k-s)+\widehat{E}_1f(k)+\widehat{D}_1w(k) \tag{3}$$

$$y(k)=\widehat{C}x(k-d)+\widehat{E}_2f(k)+\widehat{D}_2w(k) \tag{4}$$

其中：$\widehat{A}=e^{AT}$，$\widehat{B}_s=\int_{\tau_{s-1}}^{\tau_s}e^{A(T-t)}dtB(s=0,1,\cdots,q,q=h_0M)$，$\widehat{D}_1=\int_0^Te^{A(T-t)}dtD_1$，$\widehat{E}_1=\int_0^Te^{A(T-t)}dtE_1$　$\widehat{C}=C$，$\widehat{D}_2=D_2$，$\widehat{E}_2=E_2$。

这里采用增广向量法，令

$$z(k)=[u^{\mathrm T}(k-1),u^{\mathrm T}(k-2),\cdots,u^{\mathrm T}(k-s),x^{\mathrm T}(k),x^{\mathrm T}(k-1),\cdots,x^{\mathrm T}(k-d)]^{\mathrm T}$$

这样就可以得到如下的增广系统：

$$z(k+1)=\overline{A}z(k)+\overline{B}u(k)+\overline{D}_1w(k)+\overline{E}_1f(k) \tag{5}$$

$$y(k)=\overline{C}z(k)+\overline{E}_2f(k)+\overline{D}_2w(k) \tag{6}$$

其中：

$$\overline{A}=\begin{bmatrix} [0_{m\times m}\ \cdots\ 0_{m\times m}]_{1\times q} & [0_{m\times n}\ \cdots\ 0_{m\times n}]_{1\times(p+1)} \\ \begin{bmatrix} I_{m\times m} & \cdots & 0_{m\times m} & 0_{m\times m} \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0_{m\times m} & \cdots & I_{m\times m} & 0_{m\times m}\end{bmatrix}_{(q-1)\times q} & \begin{bmatrix} 0_{m\times n} & \cdots & 0_{m\times n} \\ \vdots & & \vdots \\ 0_{m\times n} & \cdots & 0_{m\times n}\end{bmatrix}_{(q-1)\times(p+1)} \\ [\widehat{B}_1\ \widehat{B}_2\ \cdots\ \widehat{B}_q]_{1\times q} & [\widehat{A}\ 0_{n\times n}\ \cdots\ 0_{n\times n}]_{1\times(p+1)} \\ \begin{bmatrix} 0_{n\times m} & \cdots & 0_{n\times m} \\ \vdots & & \vdots \\ 0_{n\times m} & \cdots & 0_{n\times m}\end{bmatrix}_{p\times q} & \begin{bmatrix} I_{n\times n} & \cdots & 0_{n\times n} & 0_{n\times n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0_{n\times n} & \cdots & I_{n\times n} & 0_{n\times n}\end{bmatrix}_{p\times(p+1)} \end{bmatrix}$$

$$\overline{B}=\begin{bmatrix} I_{m\times m} \\ 0_{(q-1)m\times m} \\ \widehat{B}_0 \\ 0_{pn\times m}\end{bmatrix},\ \widehat{D}_1=\begin{bmatrix} 0_{qm\times l} \\ \hat{D}_1 \\ 0_{pn\times l}\end{bmatrix},\ \overline{E}_1=\begin{bmatrix} 0_{qm\times g} \\ E_1 \\ 0_{pn\times g}\end{bmatrix}$$

$$\overline{C}=[[0_{m\times m}\ \cdots\ 0_{m\times m}]_{1\times p}\ [0_{n\times n}\ \cdots\ C]_{1\times(q+1)}]\quad \overline{D}_2=\widehat{D}_2,\overline{E}_2=\widehat{E}_2$$

可以看出式中 $\overline{A}$、$\overline{B}$、$\overline{C}$ 都是根据时滞的不同而变化的，假设时滞 τ_{scd}，$d=0,1,\cdots,p$ 和 τ_s，$s=0,1,\cdots,q$ 具有有限状态马尔科夫链性质，通过实验可以得到转移概率矩阵 $P=[\rho_{ij}]$，令

$$\rho_{ij}=\{\tau_{s+1}=i\,|\,\tau_s=i_0\ \&\ \tau_{scd}=j\,|\,\tau_{scd}=j_0\} \tag{7}$$

其中：$0\leqslant\rho_{ij}\leqslant1$，$\sum_{j=1}^{p}\rho_{ij}=1$。

这样，可以设计如下的状态观测器：

$$\hat{z}(k+1)=\overline{A}\hat{z}(k)+\overline{B}u(k)+L(y(k)-\hat{y}(k))$$
$$y(k)=\overline{C}z(k) \tag{8}$$

令 $e(k)=z(k)-\hat{z}(k)$，$\varepsilon(k)=H(y(k)-\hat{y}(k))$，由于 $\overline{A}$、$\overline{B}$、$\overline{C}$ 都是根据时滞的不同而变化的，而时滞的变化可以认为是具有马尔科夫链性质，那么误差方程就可以写成马尔科夫跳变系统的形式：

$$e(k+1)=\widetilde{A}e(k)+\widetilde{B}\upsilon(k)$$
$$\varepsilon(k)=\widetilde{C}e(k)+\widetilde{D}\upsilon(k) \tag{9}$$

其中：　$\widetilde{A}=(\overline{A}+L\overline{C})$，$\widetilde{B}=[L\overline{D}_2+\overline{D}_1,L\overline{E}_2+\overline{E}_1]$

$$\widetilde{C}=H\overline{C},\widetilde{D}=[D_2,E_2H],\upsilon(k)=[w(k)\quad f(k)]^{\mathrm T}$$

2　滤波器设计

这一部分将要进行滤波器的设计。首先介绍一些相关的定义及引理。

定义 1　对于式(8)所示的滤波器，若 $\upsilon(k)=0$ 时，$E\{\sum_{k=0}^{\infty}e^{\mathrm T}(k)e(k)\}\to0$ 成立，则系统均方指数稳定。若 $\upsilon(k)\neq0$，且存在标量 $\gamma>0$ 时，有不等式

$$E\{\sum_{k=0}^{\infty}\varepsilon^{\mathrm T}(k)\varepsilon(k)\}\leqslant\gamma^2E\{\sum_{k=0}^{\infty}\upsilon^{\mathrm T}(k)\upsilon(k)\} \tag{10}$$

成立，则系统满足一定的 $H\infty$ 鲁棒性能。

引理 1[13]　给定一个标量 γ 大于 0 和一个随机系统

$$x(k+1)=\overline{A}_ix(k)+\overline{B}_iw(k)$$
$$y(k)=\overline{C}_ix(k)+\overline{D}_iw(k) \tag{11}$$

其中：　$\overline{A}_i=A(\sigma(k))|_{\sigma(k)=i}$，$\overline{B}_i=B_i(\sigma(k))|_{\sigma(k)=i}$

$\overline{C}_i=C_i(\sigma(k))|_{\sigma(k)=i}$，$\overline{D}_i=D_i(\sigma(k))|_{\sigma(k)=i}$

可以将 $\sigma(k)$ 看成具有有限状态马尔科夫链条件的性质，其概率转移矩阵为 $\Delta=[\lambda_{ij}]$，$\lambda_{ij}=\mathrm{prob}\{\lambda(k+1)=j\,|\,\lambda(k)=i\}$。

系统(11)均方指数稳定且在有扰动时能满足一定的 $H\infty$ 性能可定义为

$$\sup_{w\in l_2,w\neq0,x(0)=0}\frac{E[\|z\|_2]}{\|w\|_2}<\gamma \tag{12}$$

其等价条件可写为：存在矩阵 P_i 和 G_i 满足式(13)的线性矩阵不等式。

$$\begin{bmatrix} \overline{P}_i & \overline{A}_i^{\mathrm T}G_i^{\mathrm T} & 0 & \overline{C}_i^{\mathrm T} \\ G_i\overline{A}_i & G_i+G_i^{\mathrm T}-\overline{P}_i & G_i\overline{B}_i & 0 \\ 0 & \overline{B}_i^{\mathrm T}G_i^{\mathrm T} & \gamma I & \overline{D}_i^{\mathrm T} \\ \overline{C}_i & 0 & \overline{D}_i & \gamma I\end{bmatrix}>0 \tag{13}$$

其中：$P_i=\sum_{i=0}^{h}\lambda_{ij}P_j$，$i=0,\cdots,h$。

于是，通过引理 1 可以来设计系统(8)及其增益矩阵。

定理 1　给定标量 H，γ 均大于零，若存在适维的对称正定矩阵 $P_i>0$，$G_i>0$，以及任意矩阵 R_i 使得下面的不等式成立：

$$\begin{bmatrix} \overline{P}_i & \overline{C}^{\mathrm T}R_i^{\mathrm T}+G_i^{\mathrm T}\overline{A}^{\mathrm T} & 0 & 0 & H^{\mathrm T}\overline{C}^{\mathrm T} \\ * & G_i+G_i^{\mathrm T}-\overline{P}_i & R_i\overline{D}_2+G_i\overline{D}_1 & R_i\overline{E}_2+G_i\overline{E}_1 & 0 \\ * & * & \gamma I & 0 & H^{\mathrm T}\overline{D}_2^{\mathrm T} \\ * & * & * & \gamma I & H^{\mathrm T}\overline{E}_2^{\mathrm T} \\ * & * & * & * & \gamma I\end{bmatrix}>0 \tag{14}$$

其中：$P_i=\sum_{i=0}^{h_0M}\rho_{ij}P_j$，$i=0,\cdots,h_0M$；$*$ 表示矩阵的对称部分，则系统(9)均方指数稳定且满足一定的 $H\infty$ 鲁棒性能。

证明：将 $\widetilde{A}=(\overline{A}+L\overline{C})$，$\widetilde{B}=[L\overline{D}_2+\overline{D}_1,L\overline{E}_2+\overline{E}_1]$，$\widetilde{C}=H\overline{C}$，$\widetilde{D}=[D_2,E_2H]$ 代入式(13)可以得到

$$\begin{bmatrix} \overline{P}_i & \overline{C}^{\mathrm T}L^{\mathrm T}G_i^{\mathrm T}+G_i^{\mathrm T}\overline{A}^{\mathrm T} & 0 & 0 & H^{\mathrm T}\overline{C}^{\mathrm T} \\ * & G_i+G_i^{\mathrm T}-\overline{P}_i & G_iL\overline{D}_2+G_i\overline{D}_1 & G_iL\overline{E}_2+G_i\overline{E}_1 & 0 \\ * & * & \gamma I & 0 & H^{\mathrm T}\overline{D}_2^{\mathrm T} \\ * & * & * & \gamma I & H^{\mathrm T}\overline{E}_2^{\mathrm T} \\ * & * & * & * & \gamma I\end{bmatrix}>0 \tag{15}$$

再令 $R_i=LC_i$，即得

$$\begin{bmatrix} \overline{P}_i & \overline{C}^{\mathrm T}R_i^{\mathrm T}+G_i^{\mathrm T}\overline{A}^{\mathrm T} & 0 & 0 & H^{\mathrm T}\overline{C}^{\mathrm T} \\ * & G_i+G_i^{\mathrm T}-\overline{P}_i & R_i\overline{D}_2+G_i\overline{D}_1 & R_i\overline{E}_2+G_i\overline{E}_1 & 0 \\ * & * & \gamma I & 0 & H^{\mathrm T}\overline{D}_2^{\mathrm T} \\ * & * & * & \gamma I & H^{\mathrm T}\overline{E}_2^{\mathrm T} \\ * & * & * & * & \gamma I\end{bmatrix}>0 \tag{16}$$

定理得证。

3　故障检测

系统残差信号 $\varepsilon(k)$ 得到后,为了进一步优化性能,减少故障的误报率,可以设计如下的残差评价函数和阈值:

$$J(k)=E\{(\sum_{k=0}^{L}\varepsilon^{\mathrm{T}}(k)\varepsilon(k)^{1/2}\}\tag{17}$$

$$J_{th}=\sup_{w\in L_2,f=0}E\{(\sum_{k=0}^{L}\varepsilon^{\mathrm{T}}(k)\varepsilon(k))^{1/2}\}\tag{18}$$

其中:L 为最大时间窗。

于是,可以按如下的规则判断系统是否发生故障:

$$\begin{cases}J(k)>J_{th} & \text{发生故障}\\ J(k)\leqslant J_{th} & \text{未发生故障}\end{cases}\tag{19}$$

4　仿真示例

考虑如下的连续时间线性系统:

$$x(t)=\begin{bmatrix}1 & 1\\ -2 & -3\end{bmatrix}x(t)+\begin{bmatrix}1\\ 2\end{bmatrix}u(t)+\begin{bmatrix}0.1\\ 0.5\end{bmatrix}w(t)\tag{20}$$

$$y(t)=[1\quad 1]x(t)+0.1w(t)\tag{21}$$

无线网络控制系统采样周期为 $T=0.1$ s。若时分采样区间数为 $M=2,h_1=0,h_0=2$,这样就可以容易地得到 $\tau_{\max}=2T$,$\tau_{scd}=0$,时滞集为 $\{0,0.05,0.1,0.15\}$。若输入激励为 $u(t)=\sin(t)$。且令 $E_1=-B,E_2=0$,概率转移矩阵假设为

$$P_a=\begin{bmatrix}0.15 & 0.25 & 0.4 & 0.2\\ 0.5 & 0.15 & 0.1 & 0.25\\ 0.2 & 0.35 & 0.15 & 0.3\\ 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0.2\end{bmatrix}\tag{22}$$

则通过当前一时刻时滞与上一采样时刻时滞的关系比进行离散化计算得到如式(5)和(6)的系统,且有

$$z(k)=[u^{\mathrm{T}}(k-2),u^{\mathrm{T}}(k-1),x^{\mathrm{T}}(k)]^{\mathrm{T}}$$

$$A_0=\begin{bmatrix}0 & 0 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0\\ 0.0606 & -0.0606 & 1.0955 & 0.0908\\ 0.0725 & -0.0725 & -0.1816 & 0.7323\end{bmatrix}$$

$$A_1=\begin{bmatrix}0 & 0 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0\\ 0.1142 & 0.0998 & 1.0955 & 0.0908\\ 0.1628 & 0.2008 & -0.1816 & 0.7323\end{bmatrix}$$

$$A_2=\begin{bmatrix}0 & 0 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0\\ -0.0998 & -0.0536 & 1.0955 & 0.0908\\ -0.2008 & -0.0904 & -0.1816 & 0.7323\end{bmatrix}$$

$$A_3=\begin{bmatrix}0 & 0 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0\\ -0.0461 & 0.0461 & 1.0955 & 0.0908\\ -0.1104 & 0.1104 & -0.1816 & 0.7323\end{bmatrix}$$

$$B_{00}=\begin{bmatrix}1\\ 0\\ 0.0606\\ 0.0725\end{bmatrix},B_{01}=\begin{bmatrix}1\\ 0\\ 0.1142\\ 0.1628\end{bmatrix}$$

$$B_{02}=\begin{bmatrix}1\\ 0\\ -0.0606\\ -0.0725\end{bmatrix},B_{03}=\begin{bmatrix}1\\ 0\\ 0.0998\\ 0.2008\end{bmatrix}$$

$$E_{1c}=\begin{bmatrix}0\\ 0\\ -0.1142\\ -0.1628\end{bmatrix},D_{1c}=\begin{bmatrix}0\\ 0\\ 0.0128\\ 0.0421\end{bmatrix}$$

$$C_0=C_1=C_2=C_3=[0\quad 0\quad 1\quad 1]$$

假定

$$\gamma=1.1,S=1$$

根据定理 1 及 feasp 求解器即可求得 L_i 的解:

$$L_0=\begin{bmatrix}0\\ 0.0001\\ -0.6172\\ 0.2457\end{bmatrix},L_1=\begin{bmatrix}0.0001\\ 0.0007\\ -0.6172\\ -0.2668\end{bmatrix},$$

$$L_2=\begin{bmatrix}-0.0001\\ -0.0007\\ -0.6172\\ -0.2817\end{bmatrix},L_3=\begin{bmatrix}0\\ 0\\ -0.6141\\ -0.2459\end{bmatrix}$$

若故障信号为

$$f(k)=\begin{cases}\cos(4\pi k) & k=30,\cdots,100\\ 0 & k=0,\cdots,30\end{cases}\tag{23}$$

未知扰动 $w(k)=\cos(k)$。

通过仿真得到误差信号、残差信号及残差评价信号如图 2 ~4所示。从图 4 可以看出,当时间 $t=30$ s 时系统发生故障,信号迅速超过阈值,系统检测到故障的发生。

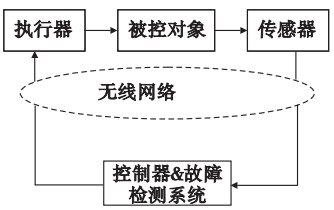

图1　无线网络控制系统结构

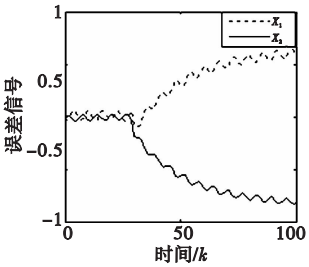

图2　滤波器误差信号

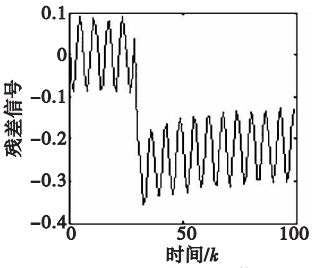

图3　系统残差信号

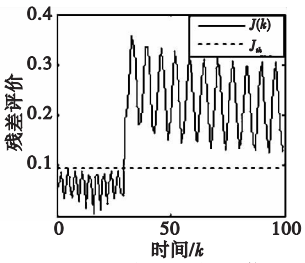

图4　系统残差评价信号

5　结束语

本文针对无线网络控制系统的传输时滞具有不确定性,将不确定时滞看成是具有马尔科夫链性质的随机过程,同时将系统建模为马尔科夫跳变系统。以此为基础,设计了观测滤波器。通过马尔科夫跳变系统理论,验证了上述系统的稳定性,并能够及时检测出故障的发生。但是利用无线网络传输数据时往往会发生数据包丢失,而且数据包的丢失是没有规律的。另外,无线网络控制系统中无线网络性能好坏也会对无线网络控制系统的性能产生极大的影响。因此,在以后的工作中将在综合考虑通信和控制两方面性能的前提下,对无线网络控制系统进行研究。

(下转第 4241 页)

时,根据式(3),系统不存在竞争,各组学生规模相同,没有迁入迁出发生,每组保持 25 个学生恒定不变。实际运用中,可以设定竞争激励因子和抑制因子来满足环境需求。

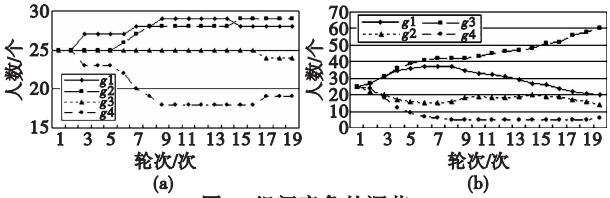

图4　组间竞争的调节

3)组间竞争机制的适应性分析。在图 5(a)中 $\alpha=0.4$, $\beta=4.0$,学生规模为 200 人;在图 5(b)中 $\alpha=0.8$, $\beta=2.9$,学生规模为 25 人,选取表 1 中的前两个指导教师的特征函数。结合图 2 所示情形,都反映了组间竞争机制能根据指导教师特征函数、学生学习结果和其他参数设定能较好调度组间学生人数,达到优化教学的目的。由此可得在学生规模增加的变化或指导教师数量的变化,组间竞争机制算法都具有很好的适应性。

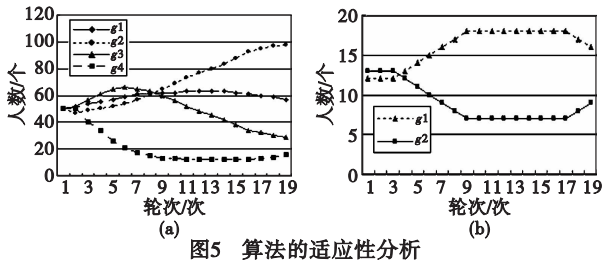

图5　算法的适应性分析

4　结束语

本文分析了指导型协作学习的特点,提出了一种组间竞争机制模型来促进协作学习,它按“组内异质、组间同质”原则促进学生在组间迁移,让效率高的教师指导更多学生;它采用竞争激励因子和抑制因子来调控竞争程度。通过实验,表明了组间竞争过程算法的有效性,还表明该算法能适应不同学生和指导教师的规模。因此,组间竞争模型能提升基于网络的指导型协作学习效果。如何在指导型协作学习中衡量和激活组内协作,探究组的生成、变化和解体将是下一步研究方向。

参考文献:

[1] JOHNSON D W, JOHNSON R T. Learning together and alone: cooperative, competitive, and individualistic learning [M]. New Jersey: Prentice Hall Press, 1991: 27-52.

[2] 葛秋芬,黄丽,李今朝,等. 合作学习研究的综述[J]. 社会心理科学,2011,26(4): 393-395.

[3] 王坦. 合作教学导论[M]. 济南:山东教育出版社,2007.

[4] HUNG D, LILLL D, CHEN V, *et al*. Leveraging online communities in fostering adaptive schools[J]. International Journal of Computer-Supported Collaborative Learning, 2008, 3(4): 373-386.

[5] 郁晓华,祝智庭. CSCL 应用的新研究[J]. 中国电化教育,2009, 25(5): 25-31.

[6] KIENLE A, WESSNER M. Our way to Taipei: an analysis of he first ten years of the CSCL community[C]//Proc of Conference on Computer Support for Collaborative Learning. 2005: 262-271.

[7] LIU Jun, LI Ren-hou, ZHENG Qing-hua. A method of task generation for personalized collaborative learning [J]. Journal of Software, 2006, 17(1): 79-85.

[8] 刘朝华,章兢,张英杰,等. 竞争合作型协同进化免疫算法及其在旅行商问题中的应用[J]. 控制理论与应用,2010,27(10): 1322-1330.

[9] 段立,黄心汉,冯坤,等. 基于竞争—协作策略多平台协同感知算法[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2011,39(4): 77-81.

[10] LIUA Xian-ning, CHEN Lan-sun. Complex dynamics of Holling type: Lotka-Volterra predator-prey system with impulsive perturbations on the predator [J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2003, 16(2): 311-320.

[11] BORGES E P, TSALLIS C, GARÍN F J. Non-equilibrium probabilistic dynamics of the logistic map at the edge of chaos [J]. Phys. Rev. Lett, 2002, 89(25): 27-41.

[12] JIN Xin, LUO Jie-bo, YU Jie. Reinforced similarity integration in image-rich information networks[J]. IEEE Trans on Knowledge and Data Engineering, 2011, 11(99): 1-2.

(上接第 4237 页)

参考文献:

[1] WALSH G C, YE Hong, BUSHNELL L G. Stability analysis of networked control systems[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2002, 10(3): 438-446.

[2] YANG T C. Networked control system: a brief survey[J]. IEE Proceeding-Control Theory Application, 2006, 153(4): 403-412.

[3] GOMES H M, SILVA N R S. Some comparisons for damage detection on structures using genetic algorithms and modal sensitivity method [J]. Applied Mathematical Modelling, 2008, 32(11): 2216-2232.

[4] 王岩, 刘涛, 孙增圻,等. 不确定长时滞网络控制系统的 $H\infty$ 鲁棒控制[J]. 控制工程,2011,18(2): 210-214.

[5] 邱占芝, 张庆灵, 刘明. 有时滞和数据包丢失的网络控制系统控制器设计[J]. 控制与决策,2006,21(6): 625-630.

[6] WANG Yong-qiang, DING S X, YE Hao, *et al*. Fault detection of networked control systems subject to access constraints and random packet dropout[J]. Acta Automatica Sinica, 2009, 35(9): 1230-1234.

[7] SHI Peng. $H\infty$ fault detection filter design for networked control systems modeled by discrete Markovian jump systems[J]. IET Control Theory Application, 2007, 1(5): 1336-1343.

[8] WANG Yong-qiang, DING S X, YE Hao, *et al*. A new fault detection scheme for networked control systems subject to uncertain time-varying delay[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2008, 56(10): 5258-5267.

[9] 王艳, 张东彪, 纪志成. 无线网络控制系统建模与鲁棒控制分析[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(9): 85-89.

[10] TABBARA M, NESIC D, TEEL A R. Stability of wireless and wireline networked control systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2007, 52(9): 1615-1630.

[11] 张捷,薄煜明,吕明. 基于模糊模型的无线网络控制系统的故障检测[J]. 系统工程与电子技术,2010,32(4): 842-845.

[12] HU Shou-song, ZHU Qin-xin. Stochastic optimal control and analysis of stability of networked control systems with long delay[J]. Automatica, 2003, 39(11): 1877-1884.

[13] SEILER P, SEGUPTA P. A bounded real lemma for jump systems [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2003, 48(9): 1651-1654.