

# 指导型协作学习组间竞争机制模拟\*

徐小双<sup>1</sup>, 梁开亮<sup>1</sup>, 王锋<sup>1</sup>, 张俊<sup>1</sup>, 张纯<sup>2</sup>

(1. 黄冈师范学院教育科学与技术学院, 湖北黄冈 438000; 2. 华中师范大学信息技术系, 武汉 430072)

**摘要:** 基于网络的指导型协作学习已广泛应用于教学实践中。在小组间开展竞争能促进协作学习, 为了研究基于网络的组间竞争机制, 给出了指导型协作学习三元组模型, 提出了衡量学生亲和力与教师指导效率的方法; 建立了指导型协作学习的组间竞争机制方程, 以此促进学生在组间迁移, 该方程包含的激励因子和抑制因子来调节组间竞争程度。随后描述了组间竞争的算法, 通过实验模拟了组间竞争的过程, 验证了算法有效性和自适应性。最后得到组间竞争模型能有效应用于基于网络的指导型协作学习教学实践。

**关键词:** 协作学习; 指导者; 竞争; 亲和力; 激励因子; 抑制因子

**中图分类号:** TP301.6      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-3695(2012)11-4238-04

**doi:** 10.3969/j.issn.1001-3695.2012.11.060

## Simulation of competitive mechanism among tutor-guided collaborative learning

XU Xiao-shuang<sup>1</sup>, LIANG Kai-liang<sup>1</sup>, WANG Feng<sup>1</sup>, ZHANG Jun<sup>1</sup>, ZHANG Chun<sup>2</sup>

(1. School of Educational Science & Technology, Huanggang Normal University, Huanggang Hubei 438000, China; 2. Dept. of Information Technology, Huazhong Normal University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Tutor-guided collaborative learning based on the network has been already widely applied into teaching practice. It was well known that reasonable competition among groups may improve learning efficiency. In order to research the competitive mechanism, firstly this paper presented a three-tuple of tutor-guided collaborative learning, and gave methods for calculating both learner affinity and tutor efficiency. Subsequently it built an equation for the collaborative learning, which aroused students to transfer among groups. In the equation both incentive factor were inhibiting factor were used to control competition degree among groups. After describing competitive mechanism algorithm, processes of competition among groups was simulated by a series of experiments, which verified the algorithm was available and adaptive. Finally it is concluded that the model can be applied into practice of tutor-guided collaborative learning based on the network.

**Key words:** collaborative learning; tutor; competition; affinity; incentive factor; inhibiting factor

## 0 引言

协作学习(collaborative learning)通过小组形式组织学生进行学习,指导型协作学习是其重要的学习模式之一。指导型协作学习强调学习过程中教师的指导作用,要求组内异质,以求组内开展协作,要求组间同质,以便组间激发竞争。互联网的发展推动了指导型协作学习实践的深度和广度,指导教师基于网络开展师资培训、课程教学、网上答疑都是其具体应用案例。

目前指导型协作学习侧重于组织策略<sup>[1,2]</sup>、协作模式<sup>[3,4]</sup>和应用实践<sup>[5-7]</sup>的研究和探索。利用网络引入竞争机制,自动管理学生成绩、测算教师指导效率和管理学生组间变动,根据指导者的动态控制小组的规模自动评价业绩,将会有效激发指导者的工作热情和各个小组间的竞争,提高小组成员的学习效果,但这方面还缺乏深入研究。另一方面,进化免疫算法<sup>[8]</sup>,多平台的协同感知控制<sup>[9]</sup>采用竞争合作机制来优化过程和结

果。这些算法都建立在有效存取历史数据和感知当前状态的基础上,但在指导型协作学习中无法收集指导者和成员的学习过程,更不能检/推测他们的心理动态。因此上述多种竞争合作机制不适合引入指导型协作学习过程中。著名的 Lotka-Volterra<sup>[10]</sup>方程刻画了生态系统的种群竞争的数量变化而导致生物个体总量变化,虽然协作学习小组能看做一个种群,但全组学生总和保持不变,因此该方程也不适宜描述组间竞争机制。

## 1 协作学习的模型

### 1.1 问题描述

在基于网络开展师资培训、课程教学等具体应用中,有多名指导教师,每个教师可以指导多名学生。在每一个知识点学习完成后,都对学生进行单元测验。单元测验的分数不仅是衡量学生知识掌握程度,而且是下一轮学习开始前对学生在组间

**收稿日期:** 2012-03-12; **修回日期:** 2012-04-30      **基金项目:** 教育部人文社会科学研究一般项目(11YJA880125);湖北省教育科学规划课题(2010A051);黄冈师院博士基金资助项目(2011CD224)

**作者简介:** 徐小双(1970-),男,湖北天门人,副教授,系统分析师,博士,主要研究方向为计算机支撑的协作学习、XML数据库(xxsh99@hgnu.edu.cn);梁开亮(1981-),男,讲师,硕士,主要研究方向为数字化学习环境与资源;王锋(1965-),男,湖北黄冈人,教授,博士,主要研究方向为协同通信、移动学习;张俊(1971-),女,湖北黄冈人,讲师,主要研究方向为智能信息处理;张纯(1986-),女,湖北武汉人,硕士研究生,主要研究方向为教学设计与绩效技术。

迁移,完成小组动态分配的依据。

例如,在图 1 中某一时刻教师  $g_1$ 、 $g_2$  分别指导三个学生;当经过几轮指导学习后,由于  $g_1$  指导效率高于  $g_2$ ,学生  $S_3$  从  $g_1$  组迁入到  $g_2$  组,引起指导教师所在小组的人数变化,但两组学生总数保持不变,如图 1 所示。

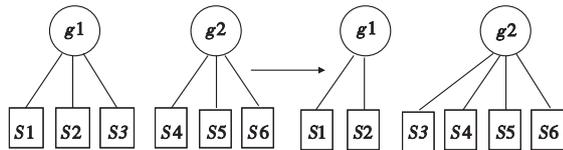


图1 组间竞争引起指导组内人数变化

在整个过程中,每个教师指导学生的平均数量作为业绩考核的重要依据,每个学生的系列得分作为成绩评价的主要组分。为此,教师需要指导更多学生,学生需要得到更好成绩作为指导型协作学习组间竞争的核心动力,反过来,在学习小组内的教师和学生为完成各自目标将开展有效合作。

指导型协作学习组间竞争机制就是根据指导教师的教学效果,在每轮学习完成后计算进出小组的学生,动态确定小组组成和规模,以求教师能力与指导规模匹配,以求组内异质,组间同质,便于开展协作竞争学习。

### 1.2 指导型协作学习的建模

定义 1 指导型协作学习由三元组  $(G, S, C)$  组成,其中,  $G$  代表指导教师的集合,  $S$  代表学生的集合,  $C$  代表学习的总轮次。

设  $g \in G, s \in S, 0 < i \leq C, i \in N$ , 引入函数  $P: G \times N \rightarrow 2^S$ , 对于任意  $(t, i)$ , 用  $P(g, i)$  表示教师  $g$  在第  $i$  轮指导的学生的集合, 且有  $P(g, i) \subseteq S$ ; 引入函数  $Q: S \times N \rightarrow G$ , 对于任意  $(s, i)$ , 用  $Q(s, i)$  表示学生  $s$  在第  $i$  轮的指导教师, 且有  $Q(s, i) \in G$ ; 引入函数  $R: S \times N \rightarrow N$ , 用  $R(s, i)$  表示学生  $s$  在第  $i$  轮的学习成绩。

在每轮指导型协作学习中,指导教师者可以指导多名学生,每个学生只能有一名指导教师,不存在多个教师指导一个学生的事件发生。在第  $i(0 < i \leq C, i \in N)$  轮中,对于任意  $g, g' \in G, g \neq g'$  有  $P(g, i) \cap P(g', i) = \emptyset, \cup_{g \in G} P(g, i) = S$ 。

定义 2 给定指导型协作学习三元组  $(G, S, C)$ , 在第  $i(0 < i \leq C)$  轮学习结束后,对于任意学生  $s, s' \in S, s \neq s'$ , 它们的亲和度函数为

$$\text{Affinity}(s, s', i) = \sqrt{\sum_{j=1}^i (R(s, j) - R(s', j))^2} / i \quad (1)$$

式(1)反映  $s, s'$  学生的知识结构的差异性。  $\text{Affinity}(s, s', i)$  越大,说明  $s, s'$  掌握的知识具有互补性强,根据组内异质的要求,适宜在同组内协作学习;反之,  $\text{Affinity}(s, s', i)$  越小,说明  $s, s'$  掌握的知识具有趋同性强,根据组间同质的要求,可将它们分配在不同组学习。

定义 3 给定指导型协作学习三元组  $(G, S, C)$ , 在第  $i(0 < i \leq C)$  轮学习结束后,令  $\mu = \sum_{s \in S} R(s, i) / \|S\|, \sigma^2 = \sum_{s \in S} (R(s, i) - \mu)^2 / \|S\|, \bar{x}(g, i) = \sum_{s \in P(g, i)} R(s, i) / \|P(g, i)\|$ , 其中  $\|S\|, \|P(g, i)\|$  分别为集合  $S, P(g, i)$  元素的个数,即学生总人数和第  $i$  轮教师  $g$  指导学生的人数。对于指导教师  $g \in G$ , 它的指导效率函数为

$$\eta(g, i) = \Phi((\bar{x}(g, i) - \mu) / \sigma) = \int_{-\infty}^{\bar{x}(g, i)} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (2)$$

教育统计学统计规律表明,学生的学习能力、实际动手能

力、正常的考试成绩等呈正态分布。若把学生  $s$  的第  $i$  轮成绩  $R(s, i)$  看成独立的随机变量,则该随机变量服从正态分布,且有  $R(s, i) \sim N(\mu, \delta)$ 。可以证明  $\bar{x}(g, i) \sim N(\mu, \delta)$ 。从式(2)可看出  $0 \leq \eta(g, i) \leq 1$ , 当教师  $g$  组内学生平均分越大时,则  $\eta(g, i)$  的值也越大,教师  $g$  的指导效率越高。

## 2 组间竞争机制

### 2.1 组间竞争机制方程

生态学理论认为,当生态系统单独存在某种种群时,其种群数量按照 Logistic 方程增长<sup>[11]</sup>。当存在多种竞争性的种群时,由于受生态环境、种群内部原因、种群间的竞争影响,各自的种群数量按照 Lotka-Volterra 模型增长,并导致生态系统的所有个体总数变化。把指导型协作学习看做一个生态系统,指导教师营造生态环境、小组内的学生构成一个种群,种群间的竞争通过种群密度变化,即小组内的学生人数变化来体现。

在指导型协作学习三元组  $(G, S, C)$  的学生可以在组间迁移,引起组内学生人数变化,但学生总人数为定值。所以 Lotka-Volterra 模型并不能直接适用于指导型协作学习,于是本文提出了如式(3)的组间竞争机制方程:

$$\begin{cases} \frac{dM(g, i)}{di} = \alpha M(g, i) \left( \frac{\eta(g, i) - \bar{\eta}(i)}{\eta(i)} \right) - \beta L \left( \frac{M(g, i) - \bar{L}}{L} \right) \\ \bar{\eta}(i) = \sum_{g \in G} \eta(g, i) M(g, i) / \|S\|, L = \|S\|, \bar{L} = \|S\| / \|G\| \end{cases} \quad (3)$$

在式(3)中,第  $i(0 < i \leq C)$  轮学习结束后,每个指导教师  $g \in G$  都对应一个式(3);  $M(g, i)$  表示教师  $g$  在第  $i$  轮中指导的学生人数,  $M(g, i) = \|P(g, i)\|, \frac{dM(g, i)}{di}$  为该组学生人数的变化量,  $\eta(g, i)$  为其该轮指导效率;  $\bar{\eta}(i)$  为教师的平均加权指导效率,  $L$  为理论上每组应分配的平均人数。

在式(3)中,  $\alpha \geq 0$  为竞争激励因子,当  $\eta(g, i) \geq \bar{\eta}(i)$  时,导致教师  $g$  的下次指导学生人数有上升趋势。为鼓励效率高的教师多指导学生,当  $\eta(g, i)$  越大,增加的学生人数就越多。  $\beta \geq 0$  为竞争抑制因子,当  $M(g, i) \geq \bar{L}$  时,导致教师  $g$  的下次指导学生人数有下降趋势。为平衡教师指导的学生人数,当  $M(g, i)$  越大,减少的学生人数就越多。

指导型协作学习组间通过竞争不断调整自身的规模,具体方法如下:如果教师  $g$  的指导小组的  $\frac{dM(g, i)}{di} > 0$ , 根据组内异质的原则,把其他组迁出的成员加入该组中,扩大组规模。反之,如果  $\frac{dM(g, i)}{di} < 0$ , 从该组中迁出成员,缩小组规模。依照式(3)调整后,下一轮学习中各组的规模由式(4)给出:

$$M(g, i+1) = M(g, i) + \frac{dM(g, i)}{di} \quad (4)$$

定理 1 给定指导型协作学习三元组  $(G, S, C)$ , 学生可以在组间迁移,每轮学生总人数为定值  $\|S\|$ 。

证明 1) 第  $i(0 < i \leq C)$  轮的学习结束后,给定教师  $g \in G$ , 根据式(3),  $\frac{dM(g, i)}{di}$  不恒定为零。当  $\frac{dM(g, i)}{di} > 0$  时,表明下次学习有学生迁入本组;反之,有学生迁出本组。

2) 对于第  $i(0 < i \leq C)$  轮的学习结束后,有

$$\sum_{g \in G} \frac{dM(g, i)}{di} = \sum_{g \in G} \alpha M(g, i) \left( \frac{\eta(g, i) - \bar{\eta}(i)}{\eta(i)} \right) -$$

$$\sum_{g \in G} \beta L \left( \frac{M(g,i) - \bar{L}}{L} \right) =$$

$$\left[ \frac{\alpha}{\eta(i)} \sum_{g \in G} M(g,i) \eta(g,i) - \alpha \sum_{g \in G} M(g,i) \right] -$$

$$\left[ \beta \frac{L}{L} \sum_{g \in G} M(g,i) - \sum_{g \in G} \beta L \right] = 0$$

再根据式(4),可得  $\sum_{g \in G} M(g,i+1) = \sum_{g \in G} M(g,i)$ 。从上面推导可看出,虽然下次各组学生人数依式(3)产生了变动,但各组迁入或迁出变化量总和为零,所以各组人数总和为定值。若在最初将  $\|S\|$  数量的学生分配到各组,即能保证以下每轮总人数为定值  $\|S\|$ 。证毕。

### 2.2 组间竞争算法实现

在实际应用中,学生成绩直接来自学习结果的评价。为了模拟每轮学生学习后的成绩,算法中引入了教师指导学生的特征函数来产生成绩主部。指导型协作学习( $G, S, C$ )的组间竞争算法的伪码描述如下:

a) 将  $S$  的所有学生成绩初始化为同一值,指派  $G$  内的教师指导学生特征函数, $S$  的所有学生平均分配给  $G$  内的所有教师;令迁出集合  $S_{out} = \emptyset$ ,迁入集合  $S_{in} = \emptyset$ ,学习轮次  $i = 1$ 。

b) 根据教师指导学生特征函数生成学生  $s \in S$  的成绩  $R(s,i)$ 。

c) 利用组间竞争机制方程式计算每组迁入或迁出学生的数量。

d) 计算迁出每组中的学生。

对于指导教师  $g \in G$ ,如果  $\frac{dM(g,i)}{di} = -n < 0$ ,计算  $S_{out} = S_{out} \cup \{s | \min\{Affinity(s,s',i)\}\}$ 。其中: $s, s' \in P(g,i), s \neq s', P(g,i) = P(g,i) - S_{out}$ 。直到选出  $n$  个学生为止。

e) 计算迁入每组中的学生。

对于指导教师  $g \in G$ ,如果  $\frac{dM(g,i)}{di} = n > 0$ ,计算  $S_{in} = \{s | \max\{Affinity(s,s',i)\}\}$ 。其中: $s \in S_{out}, s' \in P(g,i), P(g,i) = P(g,i) \cup S_{in}; S_{out} = S_{out} - S_{in}$ 。直到选出  $n$  个学生为止。

f)  $S_{out} = \emptyset; i = i + 1$ 。

g) 判断  $i$  是否等于  $C$ ,若是结束程序,否则转步骤 b)。

## 3 实验仿真

### 3.1 实验仿真环境

本实验采用 Windows XP 系统, Intel 赛扬双核 E3300 处理器, 2 GB DDR3 内存, 500 GB 硬盘, 仿真软件在 VS2008 环境下编写而成。

### 3.2 实验过程与分析

在实际应用中,第  $i(i > 1)$  轮次学生的成绩与指导教师和学生的精力投入,学生的历史成绩高度相关,由学习结果的评价直接体现。在本实验中,为了方便模拟学生成绩,采用教师指导学生的特征函数值、上次成绩的一半的继承值和 0~5 分的随机值三部分累加产生。表 1 列出了实验中使用的七个特征函数,  $R(s,i-1)$  为学生  $s$  的上一次成绩,函数  $\text{rand}()$  产生一个 -1~1 的随机数。以  $G1(s,i)$  为参照,  $G2(s,i)$ 、 $G4(s,i)$  分别表示高于和低于  $G1(s,i)$  的指导效率,  $G3(s,i)$  表示围绕  $G1(s,i)$  随机波动的指导特征函数。正是因为程序中引入了较

多的随机函数,实验结果不具有唯一性,但大量的实验表明总体变化趋势具有稳定性。

表 1 教师指导学生的特征函数  $G(s,i)$

指导教师(组别)	教师指导学生特征函数
$g1$	$G1(s,i) = 0.40 \times R(s,i-1)$
$g2$	$G2(s,i) = 0.42 \times R(s,i-1)$
$g3$	$G3(s,i) = (0.40 + 0.05 \times \text{rand}()) \times R(s,i-1)$
$g4$	$G4(s,i) = 0.38 \times R(s,i-1)$

1) 在指定学生规模下,指导型协作学习组间竞争过程分析。实验参数设置:结合大量的实验,考虑展示典型结果和对照后续实验,设学生规模为 100 个,每个学生初始分数都设置为 55;式(3)中的竞争激励因子  $\alpha = 0.4$ ,竞争抑制因子  $\beta = 4.0$ ,协作学习轮次 19 次。

从图 2 可看出,虽然 4 个特征函数差异不大,但经过 19 轮次竞争,每个教师指导学生的数量呈现明显的非线性变化,与特征函数呈现正相关关系趋势。

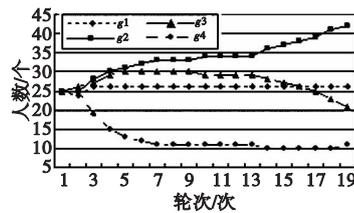


图 2 指导型协作学习的各组人数变化过程

图 3 从是否引入竞争角度分析了各轮次的学习结果比较。根据成绩生成方法,学生成绩在初值附近表现一定随机性。从图 3(a)可得,在引入竞争机制后,每轮次的全部学生平均分一般高于不引入竞争的情形,根据式(3),它鼓励指导效率较高的教师多带学生,这样导致了学生整体成绩提高,学生成绩也逐步倾向于高端分布,导致个体学生间分数差距扩大,使方差比不引入的对应方差大,如图 3(b)所示。图 3(c)展示了最后一轮学习后成绩分布的比较,横坐标第一个区间表示 0~10 分,其他依此类推,结果显示引入竞争后,学生的成绩变化范围增加,向高端分布的趋势明显,这也印证了图 3(a)(b)的变化趋势。

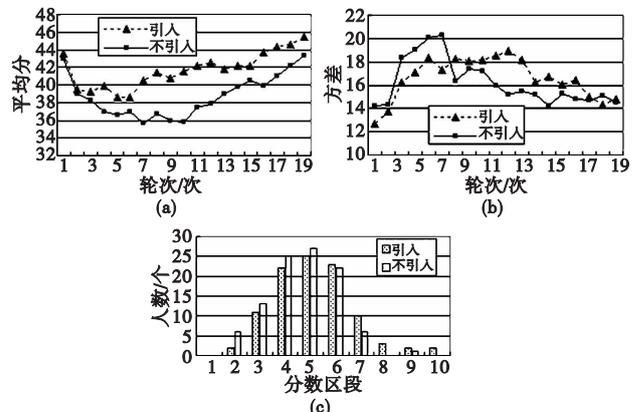


图 3 组间引入竞争与不引入竞争的比较

2) 在同等指导教师和学生规模下,测试竞争激励因子和抑制因子的影响。实验参数设置基本同上。图 4(a)中  $\alpha = 0.15, \beta = 4.0$ ,图 4(b)中  $\alpha = 0.5, \beta = 2.0$ 。在其他条件相同情况下,结合图 3 可得,随着  $\alpha$  增加,  $\beta$  减小,竞争加强,导致小组中学生个数随着教师的指导效率明显分化。若继续加强竞争,从实验得到,当  $\alpha = 1.6, \beta = 1.0$  时,在第 17 轮次后,  $g2$  拥有 94 个学生,其他各组则均分到 2 个学生;反之,当  $\alpha = 0.0, \beta = 0.0$

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。

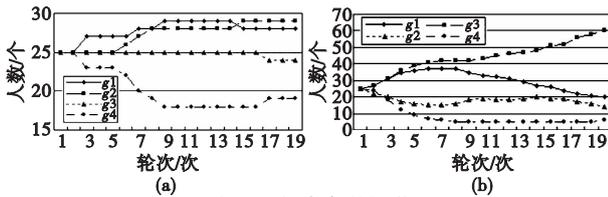


图4 组间竞争的调节

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。

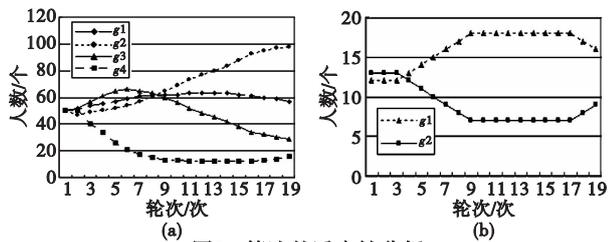


图5 算法的适应性分析

#### 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, LILLI 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] 郝晓华, 祝祝庭. 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 the 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.

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:

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

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

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:

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

### 4 仿真示例

考虑如下的连续时间线性系统:

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

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

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  $\tau_{\max}=2T, \tau_{\text{scd}}=0$ ,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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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。

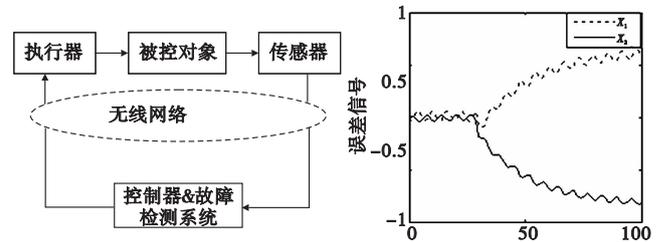


图1 无线网络控制系统结构

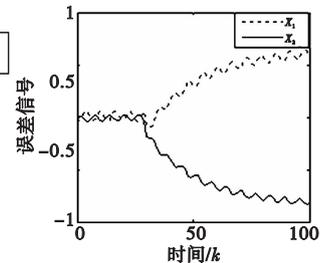


图2 滤波器误差信号

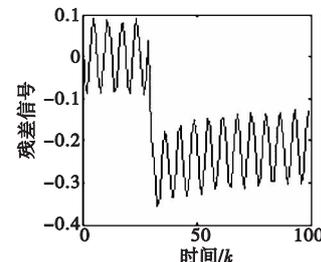


图3 系统残差信号

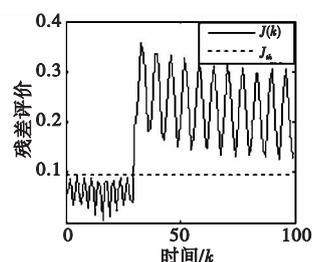


图4 系统残差评价信号

### 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。