

# 分布式控制系统一致性控制方法研究

田 屏, 刘彦宾

(遵义师范学院 计算机科学与技术系, 贵州 遵义 563002)

**摘 要:** 针对大型分布式控制系统在控制过程中由于节点信号冲突, 造成控制延迟, 不同步的问题, 提出一种带非线性耦合的控制一致性算法, 通过节点通信模型对不同模块之间通信进行一致性计算. 运用关联决策理论对通信结果进行预估计, 在通信出现延时的状态下, 可以保证通信信号的一致性. 使得多系统能够在延时允许的误差内进行通信. 有效解决通信过程中出现的延迟、和信号不一致问题. 实验表明, 带非线性耦合的一致性算法, 使得群体中的所有个体可以达到一个预先指定的值. 解决带非线性耦合的一致性问题的, 取得了不错的结果.

**关键词:** 一致性算法; 带非线性耦合; 关联控制

**中图分类号:** TP311

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-7180(2012)03-0147-04

## Distributed Control System Consistency Control Method Research

TIAN Ping, LIU Yan-bin

(Department of Computer Science and Technology, Zunyi Normal College, Zunyi 563002, China)

**Abstract:** For large distributed control system in the process control signal node conflict, cause delay, not synchronous control. Put forward a kind of nonlinear coupled with the control algorithm, through the node consistency of different module, communication model between the consistency of communication is calculated. By relational decision theory of communication results in communication appear to estimate, time delay of state, can ensure the consistency of communication signals. Make many system can delay allowed in the error in communication. Effectively solve the communication appeared in the process of delay, and signal with the problem. Experiments show that the nonlinear coupling with the consistency of the algorithm of the group, make all the individual can achieve a specified value in advance. To solve nonlinear coupling with the consistency of the problems, has made the good results.

**Key words:** consistency algorithm; nonlinear coupling; association control

### 1 引言

分布式控制系统中, 对不同子系统进行一致性控制, 保证无延迟是一项极为重要的工作<sup>[1]</sup>. 因为协同控制的一致性在保证系统顺利运行的前提. 例如分布式控制系统(DCS)网络的信息融合、相关协作算法的设计等等. 随着相关技术的快速发展, 人们对于基于网络的协调控制系统的需求越来越大. 例如在核电、火电、化工等行业中, 人们希望能够用一些价格低廉、可拆分的小型设备代替造价昂贵、不便于维护的大型设备<sup>[2-4]</sup>. 基于分布式控制多智能系统控

制理论的发展, 为实现这种愿望提供了一条可以实现的途径.

### 2 分布式一致性控制原理

一致性问题的基本思想是: 多个子系统能够根据主控的命令随时进行通信, 保证无延时. 使得子系统能够同时收到同一个来自于主控的命令信号. 对于单一信号来说, 这个要求很容易满足, 因为没有信号冲突, 但是大型系统中, 往往出现多信号同时出现的情况, 这就需要引入点强制的概念<sup>[5-7]</sup>. 很多学者都提出过这个思想. 通过系统节点间信息互换, 选举

出一个主节点作为主控信号的发送者,它只接受主控的信息而不接受其他节点的信息.在这种情况下,单一信息可以被很容易的推广到多信息,可以利用多主节点的方法,保证信息的一致性.该方法实现简单,应用性强.其控制原路如下:

首先,需要采集由主控制器发出的现场信号,方式如下:

$$L(U) = [g; \int_U |g(x)|^2 dx < \infty]$$

其中,  $g(x)$  为现场控制算法函数,如 PID 函数,  $L(U)$  为处理之后得到的新的信号,为了保证现场信号的有效性,需要进行滤波,数模转换等处理工作.

得到优化后的现场控制信号之后,就可以进行上位机通信了,传递的环境一般是光纤和 DP 总线,或者其他的需要这些信号的控制站,传递原理如下:

$$J = \min \left[ \frac{\sum_{U=1}^h (L(U) - L^*(U))^2}{h} \right]^{\frac{1}{2}}$$

网络传递可选择信道数量不固定,选取合适的传输信道进行传递,上式中,  $y(p)$  为传递的实际花费,  $h$  为信道选择参数,  $J$  为最终决策信道,计算出实际的传输信道,传递控制信号,完成通信.在通信过程中,信号的一致性有着极其重要的作用.

在一致性的处理中,关联控制是研究分布式多系统一致性的有效技术.在很多大型的网络控制系统现场有着实际应用.例如军事上的无线电干扰、雷达定位等等.关联控制不受应用空间参数维度的现在,对硬件的要求也不是很高.值得说明的是:对于一个大型的网络化分布式控制系统来说,对所有节点都实施监控几乎是不可能的事情.为了减少节点监控器的数目,节约成本.只需对一部分的节点进行监控,已达到控制网络分布式系统这个目的.这里需要特别说明的是随机网络与非随机网络的关联控制问题,不同的关联控制策略与受控网络的结构之间的关系是不确定的.因此只需要在网络中部分节点上安装监控装置,监视网络运行情况,可以保证监控的准确性和一致性的问题.基于以上情况,本文主要分析带非线性耦合的一致性算法,使得群体中的所有分布式子系统可以达到时域内的一致性.

### 3 基于带非线性耦合的一致性算法

带非线性耦合的一致性算法的第一步是:假设分布式系统初始值为  $n_0$  个节点,存在  $m_0$  条边,具体的计算步骤如下:

(1) 关联偏好计算:通过计算相关概率  $p$ ,动态

改变节点的数目,选取其中一个节点,与其他节点相连.这里  $m \leq m_0$ . 节点能否被选择成为主节点与其关联程度有关,关联程度计算公式为:

$$\prod (k_i) = \frac{k_i}{\sum_j k_j} \quad (1)$$

(2) 节点互联:在第一步中,如果从一个节点出发,与其他节点相连,需要计算连接其他节点的概率.因为对主节点来说,每个节点对其意义都是一样的,因此,每个与之相邻节点被选中的概率是相同的.

(3) 节点断线重连:以计算出的概率为基础,随机选择一个相邻的节点  $i$ ,并且将它的某条边  $(i, j)$  变为  $(k, j)$ . 当选择另一个节点的时,其他节点被选中的概率也服从正态分布.相关的方法可以进行迭代计算  $m$  次.

当计算出的相关概率为 100% 或者 0 时,本章的模型可以近似的认为是 BA 模型.注意这里得到的 BA 模型与 EBA 模型有着很大的区别.最大的区别在于,当替代旧边  $(i, j)$  时,保留了  $j$ ,而原来模型只是保留了  $i$ .为了保证模型的增长时效性,可以令  $p > \frac{1}{2}$ ,以及  $0 \leq q \leq 1$ .考虑在不同的子系统中,可以拥有  $n$  个控制节点,每个控制节点的维度设为  $m$ .分布式子系统的状态方程为:

$$\dot{x}_i = \sum_{j \in N_i} h_{i,j}(x_j - x_i), \quad i = 1, \dots, n \quad (2)$$

这里用向量  $x_i = [x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,m}]^T$  表示节点不同时刻内的状态;  $N_i$  表示第  $i$  个节点的连接节点总和.函数  $h_{i,j}(x_j - x_i)$  表示不同控制节点之间的关系.当  $x_i - x_j = 0$  的时候,该函数可以忽略,即  $h_{i,j}(x_j - x_i) = 0$ .可以看出,  $h_{i,j}(\cdot)$  不能保证对任何节点都是线性的,并且当且仅当  $J \in N_i$  时,  $h_{i,j}(\cdot)$  有效.假设要把一个正态分布的系统转化到如下的状态:

$$x_1 = x_2 = \dots = \bar{x} \quad (3)$$

如果公式(2)实现的话,那么可以认为  $\bar{x}$  与系统中节点的状态时一致的.为了满足这一结果,算法可以对  $p(0 < p \leq 1)$  部分的节点运用关联控制策略.假设在分布式系统中有  $n_c$  个节点可以成为主节点,满足  $n_c$  是不大于并且最接近于  $pn$  的整数.系统中随机分布的主节点可以表示为:

$$\dot{x}_i = \sum_{j \in N_i} h_{i,j}(x_j - x_i) + u_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (4)$$

输入  $u_i$  被设计为:

$$u_i = -d_i(x_i - \bar{x}) \quad (5)$$

这里控制增益  $d_i \geq 0$ . 如果  $d_i = 0$ , 那就表示在第  $i$  个节点上不施加控制. 定义误差量为

$$e_i = x_i - \bar{x}$$

那么公式(3)可改写为

$$e_i = \sum_{j \in N_i} h_{i,j}(e_j - e_i) - d_i e_i \quad (6)$$

为了优化得到的控制模型, 可以对信号在时域内进行优化控制, 方法如下:

$$\dot{x}(t) = (A_i + \Delta A_i)x(t) + (A_{i1} + \Delta A_{i1})x(t - \tau) + (B_i + \Delta B_i)u(t)$$

其中  $A_i, A_{i1}, B_i$  分别表示采集得到的控制信号矩阵,  $x(t) \in R^n$  是主控的采集时间的范围,  $u(t) \in R^m$  是主控现场控制信号, 根据得到的信号可以建立一定的补偿规则.  $i=1, 2, \dots, r$  是待补偿的信号的数量,  $R^i$  表示该网络控制系统的第  $i$  条规则. 假设补偿信号之间存在如下的控制关系:

$$[\Delta A_i \quad \Delta A_{i1} \quad \Delta B_i] = D_i F(t) [E_i \quad E_{i1} \quad E_{i2}]$$

其中,  $F^T(t)$  是采集得到的补偿偏移矩阵, 矩阵满足  $F^T(t)F(t) \leq I$ . 对单个点进行预测, 信号通过一些传统的运算规则后, 上式可以写成:

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(\xi(t)) [(A_i + \Delta A_i)x(t)]$$

其中

$$h_i(\xi(t)) = \frac{\mu_i(\xi(t))}{\sum_{i=1}^r \mu_i(\xi(t))}$$

$$\mu_i(\xi(t)) = \prod_{j=1}^n M_{ij}(\xi_j(t)) \geq 0$$

$$\sum_{i=1}^r h_i(\xi(t)) = 1 \quad (7)$$

运用以上的模糊估计策略, 可以很好的解决在大型分布式控制系统中, 通信不同步的问题, 防止信号延迟.

#### 4 基于一致性算法应用

为了验证本文提出算法的有效性, 可以构建大型网络分布式控制系统时变拓扑结构示意图, 如图1所示. 注意到该分布式网络控制系统含有20个节点, 形成串联关系. 这里, 一个节点被随机选中, 与主控进行通信控制. 初始时刻, 所有节点的状态都是固定的, 在区间  $[0, 1]$  随机产生.

实验中所使用的耦合函数可以表示为

$$h_{i,j}(x_j - x_i) = e^{x_j - x_i} - 1 + (x_j - x_i) \quad (8)$$

这里  $e^{x_j - x_i}$  是非线性的. 从图2看出, 系统可以在  $\bar{x}=1$  上达成一致.

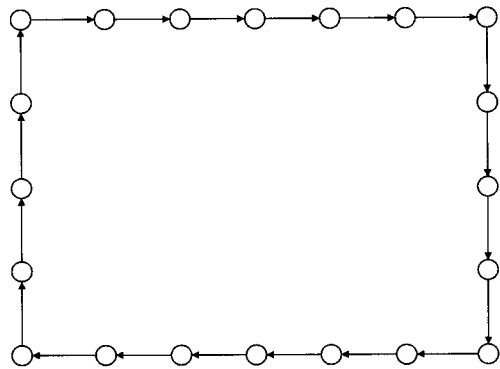


图1 包含20个节点的环向网络

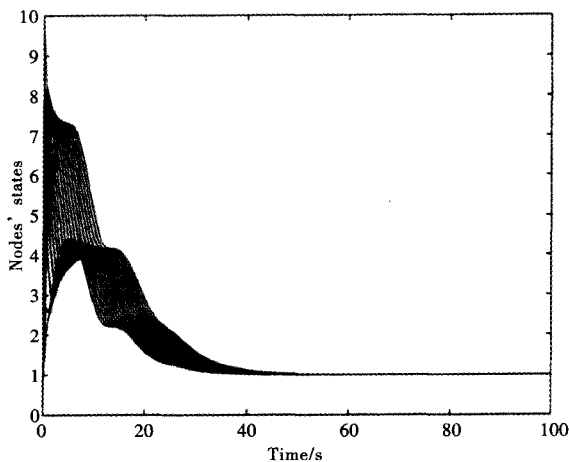


图2 耦合函数的系统曲线

在时变分布式控制系统拓扑结构中, 如图3, 给出了多种可以存在的拓扑结构, 记为  $G_a, G_b, G_c$  和  $G_d$ . 系统拓扑结构的切换规则由图4所描述. 所有节点的初始状态随机分布于区间为  $[0, 1]$ . 这里, 一个节点受控. 从图5可以看出, 系统可以在时域上达成一致.

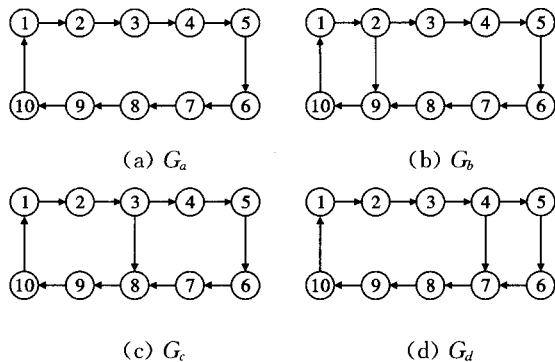


图3 四种可能的拓扑结构

通过应该可以看出, 本文提出的算法在大型分布式系统一致性控制方面取得了很好的控制效果, 大幅降低了系统的延时.

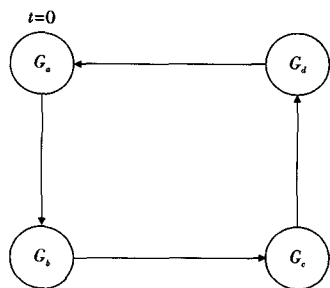


图4 拓扑结构切换规则

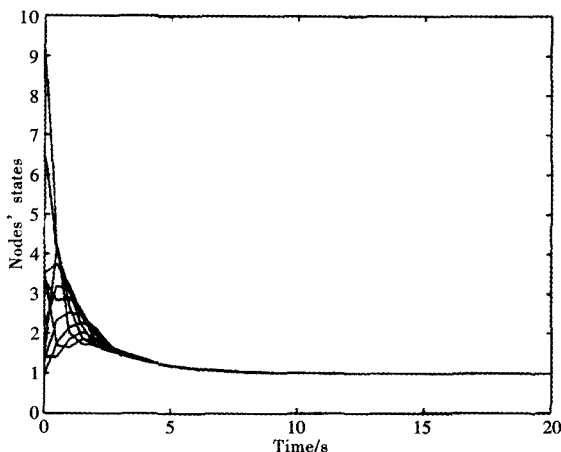


图5 可变拓扑结构下系统的曲线图

## 5 结束语

目前,关于多系统的分布式控制系统一致性问题的研究,大都基于单个信号,线性耦合情况为基础的.但是实际的系统,根据需求,并不能保证都是线性的.尽管这些系统可以用一个线性模型来近似的表示,但在很多种情况下,这种近似计算还存在着较

大的误差.

本文研究了非线性个体之间存在的一致性问题的,以及这种困难带来的问题;运用带非线性耦合的一致性,考虑了时不变拓扑结构以及时变拓扑结构的不同情况下的对应关系.对于前者,用紧缩分析来处理系统的非线性;对于后者,用多函数的思想来处理时变的拓扑结构.结果表明:在一些假设前提下,可以通过控制一个节点,来满足系统的一致性需求.

## 参考文献:

- [1] Watts DJ. Small worlds; the dynamics of networks between order and randomness [M]. Princeton: Princeton University Press, 1999;
- [2] Hernandez-Valencia EJ. Architectures for broadband residential IP services over CATV networks [J]. IEEE Network, 1997(11): 36-43.
- [3] Jasný B R, Ray L B. Life and the art of networks [J]. Science, 2003(301): 1863-1863.
- [4] Milgram S. The small world problem [J]. Psychology Today, 1967(2): 60-67.
- [5] Guare J. Six degrees of separation; a play [M]. New York: Vintage, 1990.
- [6] 徐淑萍, 苏小会. 基于 Internet 的远程控制系统网络时延分析研究[J]. 微电子学与计算机, 2011(07): 49-50.
- [7] 胡晓娅, 朱德森, 汪秉文. 网络控制系统仿真模型的网络数据传输[J], 计算机仿真, 2005(11): 93-94.

## 作者简介:

田 屏 女, (1974—), 硕士, 讲师. 研究方向为计算机软件与理论.

刘彦宾 男, (1966—), 研究生. 教授研究方向为信息安全.

(上接第 146 页)

- [2] He D, Goker A. Detecting session boundaries from Web user logs [C]// Proceedings of the 22nd Annual Colloquium of IR Research. Cambridge: [s. n.], 2005.
- [3] 陶剑文. 一种分布式 Web 日志挖掘系统的设计与实现 [J]. 计算机仿真, 2006(10): 55-56.
- [4] Cooley R, Mobasher B, Srivastava J. Grouping web page references into transactions for mining world Wide web browsing patterns [C]// proceedings of the 1997 IEEE knowledge and Data Engineering Exchange Workshop. Washinytion, DC, USA: IEEE Computer Society, 1997.

- [5] Zhang Bofeng, Su Jinshu, Xu Xin. A class-incremental learning method for multiclass support vector machines in text classification [C]// Proceeding of the Fifth International conference on Machine Learning and Cybernetics. Dalian: IEEE, 2006.
- [6] He D, Goker A. Detecting session boundaries from web user logs [C]// Proceedings of the 22nd Annual Colloquium of IR Research. Cambridge: [s. n.], 2005.

## 作者简介:

韩占柱 男, (1961—), 副教授. 研究方向为计算机科学与技术、计算机网络与技术、数字媒体技术、流媒体技术.