

# 网络控制系统的模糊权重变采样周期调度策略

田中大<sup>1</sup>,李树江<sup>1</sup>,王艳红<sup>1</sup>,高宪文<sup>2</sup>,石 彤<sup>3</sup>

(1. 沈阳工业大学信息科学与工程学院, 辽宁沈阳 110870; 2. 东北大学信息科学与工程学院, 辽宁沈阳 110819; 3. 辽宁林业职业技术学院人文学院, 辽宁沈阳 110101)

**摘要:** 网络控制系统的性能受到采样周期的影响. 针对多回路网络控制系统, 根据系统控制回路误差和误差变化率, 利用模糊推理计算各回路的动态权重, 同时根据当前网络运行状况预测新的网络利用率, 然后利用 ARIMA 算法对数据包传输时间进行预测, 最后在网络带宽一定的条件下, 利用模糊动态权重系数、网络利用率、数据包传输时间, 不断的改变系统中各控制回路的采样周期, 达到优化网络控制系统性能的目的. 利用 True Time 工具箱进行的仿真验证了本文方法的有效性.

**关键词:** 网络控制系统; 调度; 变采样周期; 模糊

**中图分类号:** TP273      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2015)05-0980-07

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.05.022

## A Fuzzy Weight Variable Sampling Period Scheduling Strategy for Networked Control System

TIAN Zhong-da<sup>1</sup>, LI Shu-jiang<sup>1</sup>, WANG Yan-hong<sup>1</sup>, GAO Xian-wen<sup>2</sup>, SHI Tong<sup>3</sup>

(1. College of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang, Liaoning 110870, China; 2. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China; 3. Department of Humanities, Liaoning Forestry Vocational-Technical College, Shenyang, Liaoning 110101, China)

**Abstract:** Performance of the networked control system is affected by the sampling period. For the networked control system with multi loop, according to the system control loop error and error rate, dynamic weights are calculated by using fuzzy inferential for each control loop, new network utilization is predicted based on the current network status. Then ARIMA algorithm is used to predict the packet transmission time. Finally, under the conditions of the network bandwidth is limited, fuzzy dynamic weight coefficient, network utilization, packet transmission time is used for constantly changing sampling period of the system control loop, to optimize the performance of networked control system. True Time toolbox simulation result demonstrates the effectiveness of this method.

**Key words:** networked control system; scheduling; variable sampling period; fuzzy

### 1 引言

网络控制系统中的节点以分时复用的方式共享网络资源, 从而不可避免地在控制回路中引入时延、数据包丢失、时序错乱等问题, 影响系统的控制性能<sup>[1]</sup>. 采样周期的变化密切的影响着网络控制系统的控制性能和网络服务质量. 从控制性能角度希望采样周期尽可能的小, 但是采样周期过小会增加网络传输的负担, 影响网络的服务质量. 因此, 动态的改变控制系统采样周期, 寻求在控制性能和网络服务质量之间取得折中, 是目前网络控制系统调度与控制协同设计的主要思想<sup>[2,3]</sup>.

目前对于变采样周期调度策略的研究取得了一定的进展, 尹逊和等人<sup>[4]</sup>利用神经网络根据误差设计了一种变采样周期算法, 但是其算法假设回路数据传输时间为定值. 王艳等人<sup>[5]</sup>考虑了回路数据包的传输时间, 通过自回归 (Auto Regressive, AR) 模型预测未来时刻的数据包传输时间, 通过结合网络利用率来计算各回路的采样周期. Zhang 等人<sup>[6]</sup>采用一种主动变采样周期方法, 其采样周期在一个有限集内切换, 主动变采样周期方法能够保证网络带宽的充分利用. Wang 等人<sup>[7]</sup>给出了一个采样周期与优先级调整的级联反馈调度模块来最大化网络控制系统的控制质量 (Quality of Control, QoC). Chen

等人<sup>[8]</sup>同时考虑了服务质量(quality of service, QoS)与性能质量(Quality of Performance, QoP)来寻求每个回路优化的采样周期,但是文中并未讨论采样周期的上下限问题.Xia 等人<sup>[9]</sup>基于调度与控制的协同设计,设计了一个采样周期调整的变级联反馈调度模块,仿真实验表明,该方法改善了欠载和过载的网络条件下的 QoC 指标.戴小溪等<sup>[10]</sup>提出一种多输入多输出支持向量机的变采样周期策略,根据负载变化动态的调节控制回路的采样周期,但是文献中并未提及支持向量机最佳参数如何确定.

以上的变采样周期调度策略的研究成果都未考虑每个控制回路权重的影响,文献<sup>[11]</sup>虽提出控制回路的权重问题,但是其在仿真中各回路权重都为 1,也未明确给出如何确定各回路的权重.而在实际的情况中,对于整个控制系统来说,每个控制回路可能存在不同的相对重要性.根据一定的性能指标会意味着某些回路会比其他回路相对更重要一些.本文根据各回路的误差以及误差变化率引入模糊推理而提出一种模糊权重调整策略,并通过自回归求和滑动平均(Auto Regressive Integrated Moving Average, ARIMA)方法<sup>[12]</sup>预测数据包的不确定传输时间,通过网络利用率、传输误差以及模糊权重系数动态调整各回路的采样周期.通过仿真验证了本文方法的有效性.

## 2 变采样周期反馈调度器

图 1 为变采样周期反馈调度器的结构图,本文讨论的网络为 CAN 网络.在系统中引入反馈调度器,用于采样周期的实时调节.反馈调度器采用时间驱动的方式,周期性的更新采样周期.反馈调度器主要包括网络利用率预测、网络带宽配置和采样周期计算三个部分.网络利用率预测环节根据当前网络利用率与设定值之间的差值来预测下一时刻的网络利用率;网络带宽配置环节根据得到的新的网络利用率和回路传输误差,同时考虑回路的权重系数,重新配置各回路的带宽;采样周期计算环节根据各回路的网络利用率和传输时间动态地调节各控制回路的采样周期.

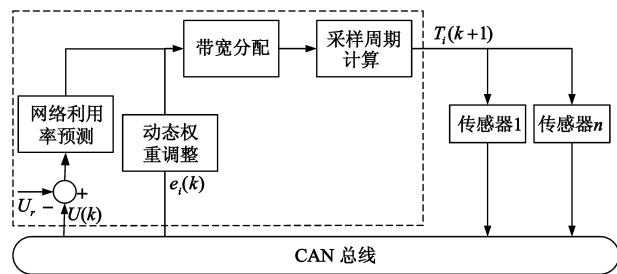


图1 变采样周期反馈调度器结构图

## 2.1 网络利用率预测

网络利用率预测过程如图 2 所示.

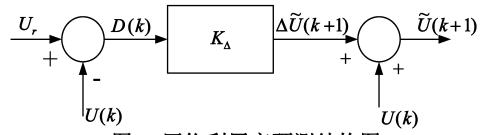


图2 网络利用率预测结构图

网络利用率的定义如下:

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_N = \sum_{i=1}^N \frac{c_i}{T_i} \quad (1)$$

其中  $U_i$  为第  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) 个回路的网络利用率,  $c_i$  为第  $i$  个回路的数据传输时间,  $T_i$  为第  $i$  个回路的采样周期. 设网络带宽利用率的预设值为  $U_r$ , 网络带宽利用率的实际值为  $U(k)$ , 因此可得到网络带宽的实际值与预设值之间的差值为:

$$D(k) = U_r - U(k) \quad (2)$$

使用比例控制来获得调节增量:

$$\Delta \tilde{U}(k+1) = K_D D(k) \quad (3)$$

其中  $K_D$  为比例调节增益,  $\Delta \tilde{U}(k+1)$  为网络带宽调节量. 则下一周期的网络利用率预测值为:

$$\tilde{U}(k+1) = \tilde{U}(k) + \Delta \tilde{U}(k+1) \quad (4)$$

文献<sup>[13]</sup>中给出了网络利用率收敛到  $U_r$  的条件,

$$0 < k_D < \frac{2}{g_{\max}} \quad (5)$$

其中  $g_{\max}$  为所有调节周期内, 网络利用率真实值与预测值之间比值的最大值.

## 2.2 模糊权重调整策略

在本文的多回路控制系统中, 权重可以看作是各回路之间的相对重要性或价值, 也可以看成是对目标的贡献率. 在大多数的研究中, 权重在大部分是由决策者给出, 但是决策者往往很难或者根本无法确定各个目标权重的准确值, 只能给出一个相对的权重系数, 因此本文采用一种模糊控制的方法对各回路的权重进行动态调节. 图 3 为本文所采用的模糊权重算法的系统结构图. 其中  $r_i$  为参考输入,  $y_i$  为各回路的输出反馈信号,  $w_i$  是模糊推理根据各回路的误差、误差变化率确定的权重系数. 干扰节点占用一定的带宽, 用来实现带宽受限的条件.

### 2.2.1 模糊推理输入与输出

对于图 4 的采用双输入单输出的二维模糊控制器. 输入变量为控制回路的误差  $e_i(k) = r_i(k) - y_i(k)$ , 误差变化量  $ec_i = e_i(k) - e_i(k-1)$ , 输出为各回路的权重  $w_i$ . 其中  $r_i(k)$  为  $k$  时刻第  $i$  回路的参考输入,  $y_i(k)$  为  $k$  时刻第  $i$  回路的输出.

选取  $E_i$  和  $EC_i$  为输入变量  $e_i, ec_i$  的模糊集,  $W_i$  为

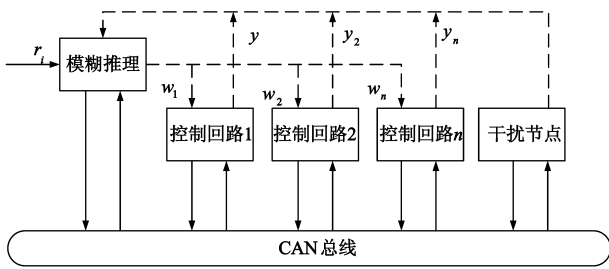


图3 模糊权值算法结构图

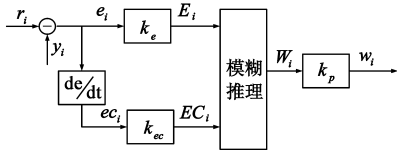


图4 二维模糊反馈调节器结构

输出变量优先级  $w_i$  的模糊集. 设  $e_i$ ,  $ec_i$  和  $w_i$  的实际变化范围为:  $[-1, 1]$ 、 $[-1, 1]$  和  $[1, 5]$ . 输入变量  $E_i$ 、 $EC_i$  的量化等级为:  $\{-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4\}$ , 输出变量  $w_i$  的量化等级为:  $\{1, 2, 3, 4, 5\}$ . 比例因子为  $k_e = 4$ ,  $k_{ec} = 4$ ,  $k_p = 1$ .

2.2.2 变量隶属度函数

定义  $e_i$  和  $ec_i$  的模糊子集数为 5 个, 即  $\{NB, NS, ZO, PS, PB\}$ ; 优先级  $w_i$  的模糊子集为 5 个, 即  $\{PS, S, M, B, PB\}$ . 其中 NB, NS, ZO, PS, PB, S, M, B 分别表示负大, 负小, 零, 正小, 正大, 小, 中, 大. 图 5 为输入语言变量  $E_i$  和  $EC_i$  的隶属度函数曲线, 采用三角形隶属度函数. 图 6 为输出变量  $w_i$  的隶属度函数, 采用高斯型隶属度函数.

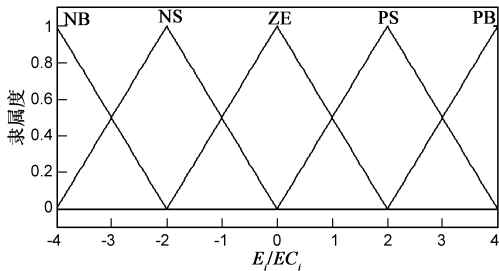


图5  $E_i$  和  $EC_i$  的隶属度函数曲线

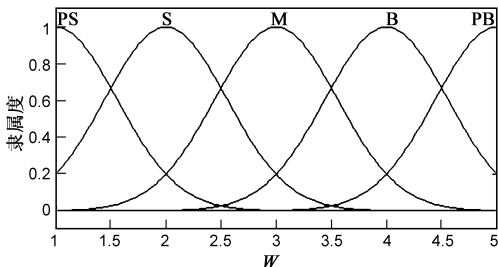


图6  $w_i$  的隶属度函数曲线

表 1 和表 2 是由隶属度函数得到的  $E_i$ ,  $EC_i$ ,  $w_i$  的隶属度表.

表 1  $E_i, EC_i$  的隶属度

$E_i/EC_i$	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
NB	1	0.5	0	0	0	0	0	0	0
NS	0	0.5	1	0.5	0	0	0	0	0
ZE	0	0	0	0.5	1	0.5	0	0	0
PS	0	0	0	0	0	0.5	1	0.5	0
PB	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1

表 2  $w_i$  的隶属度

$w_i$	1	2	3	4	5
PS	1	0.2	0	0	0
S	0.2	1	0.2	0	0
M	0	0.2	1	0.2	0
B	0	0	0.2	1	0.2
PB	0	0	0	0.2	1

2.2.3 模糊规则

模糊控制规则是根据对控制性能的分析而得到的, 误差  $e_i$  越大, 说明该回路需要更多的带宽资源来传输数据, 以提高该回路的控制性能, 因此要被赋予较大的权值. 若  $e_i$  和  $ec_i$  的符号相同, 说明误差有增大的趋势, 该回路应赋予相对较大的权值. 若  $e_i$  和  $ec_i$  的符号相反, 则说明误差有减小的趋势, 应赋予相对较小的权值. 按照此思想得到表 3 所示的模糊控制规则.

表 3 模糊规则表

$w_i$	$E_i$					
	NB	NS	E	PS	PB	
$EC_i$	NB	PS	PS	S	PB	PS
	NS	PS	S	M	B	PS
	ZE	PS	M	PB	M	PS
	PS	PS	B	M	S	PS
	PB	PS	PB	S	PS	PS

2.3 带宽分配策略

本文的带宽分配策略考虑控制回路的传输误差以及各回路的权重值, 网络带宽的分配方法如下:

(1) 若当前各个回路的传输误差都为 0. 只需按照权重系数的大小来分配网络带宽.

$$\tilde{U}_i(k+1) = \frac{w_i(k)}{\sum_{i=1}^n w_i(k)} \times \tilde{U}(k+1) \quad (6)$$

(2) 若当前各个回路的传输误差都不为 0. 此时不但要考虑传输误差, 同时也要考虑权重系数的影响. 这

种情况下带宽分配的原则为:传输误差越大且该回路的权重系数越大,则该回路的网络需求度就越大,分配的网络资源就越大。

$$\tilde{U}_i(k+1) = \frac{\omega_i(k) \times |e_i(k)|}{\sum_{i=1}^n \omega_i(k) \times |e_i(k)|} \times \tilde{U}(k+1) \quad (7)$$

(3)若当前部分回路的传输误差为 0,余下回路的传输误差不为 0.则误差为 0 的回路,网络需求度相对低一些,因此可以采用较大的采样周期,一般选择  $T_i^{\max}$  为误差为 0 的回路的采样周期.对于误差不为 0 的回路的带宽则按照(2)中的原则分配.设误差为 0 的回路数目为  $m$ ,  $j$  表示误差为 0 的回路,  $1 \leq j \leq m$ .

$$\tilde{U}_j(k+1) = \frac{\tilde{C}_j(k+1)}{T_i^{\max}} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \tilde{U}_i(k+1) &= \frac{w_i(k) \times |e_i(k)|}{\sum_{i=m+1}^n w_i(k) \times |e_i(k)|} \\ &\times (\tilde{U}(k+1) - \sum_{j=1}^m \tilde{U}_j(k+1)) \end{aligned} \quad (9)$$

其中  $\tilde{C}_j(k+1)$  为数据包在网络中的传输时间,将在下节中进行求解。

## 2.4 数据传输时间预测

对于数据传输时间,很多研究都假定为固定的,而实际是随网络负载和传输路径等条件随机变化的,数据包传输时间可根据历史数据进行预测,本文采用 ARIMA 算法对未来时刻数据包传输时间进行预测. ARIMA 模型使用包括自回归项,单整项和移动平均项三种形式对扰动项进行建模分析,使模型同时综合考虑了预测变量的过去值、当前值和误差值,从而有效地提高了模型的预测精度. ARIMA 模型基本思想是对非平稳序列用若干次差分使其成为平稳序列,差分次数是参数  $d$ ,再用以  $p, q$  为参数的自回归滑动平均 (Auto Regressive Moving Average, ARMA) 模型对该平稳序列建模,之后经过反变换得到原序列.设得到的前  $p$  个时刻的数据包传输时间序列为  $\{C_i(1), \dots, C_i(p)\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ ,则以  $p, d, q$  为参数的 ARIMA 模型传输时间预测方程可表示为

$$C_i(k+1) = \theta_0 + \varphi_1 C_i(k) + \varphi_2 C_i(k-1) + \dots + \varphi_p C_i(k-p) + \dots + \varepsilon_k - \theta_1 \varepsilon_{k-1} - \theta_2 \varepsilon_{k-2} - \dots - \theta_q \varepsilon_{k-q} \quad (10)$$

其中  $C_i(k)$  为第  $i$  个控制回路在时刻  $k$  的数据包传输时间,  $\varphi_i$  和  $\theta_i$  为模型参数,  $\varepsilon_i$  为独立正态分布的白噪声.对不同的  $p, d, q$  参数进行组合,通过 AIC (Akaike Information Criterion) 准则可得到最优的参数模型. AIC 准则即赤池信息量准则,其特点为“吝啬原理”的具体化,定义如下:

$$AIC = -2\ln Z + 2g \quad (11)$$

其中  $Z$  为模型的极大似然参数,  $g$  为模型的独立参数格式。

## 2.5 采样周期计算

根据前面计算得到的网络利用率以及数据包传输时间,通过计算就可以得到各回路新的采样周期,其计算公式如下:

$$\tilde{T}_i(k+1) = \frac{\tilde{C}_i(k+1)}{\tilde{U}_i(k+1)} \quad (12)$$

其中  $\tilde{C}_i(k+1)$  与  $\tilde{U}_i(k+1)$  分别通过 2.3 节与 2.4 节计算得到。

要保证系统控制性能,系统的采样周期必须满足一定的约束条件.在调节采样周期的时候还要考虑各回路采样周期的上下限,以保证采样周期维持在期望的范围内.采样周期下限值  $T_{\min}$  可以通过系统中各回路消息总的传输时间之和  $T_{\text{tot}}$  进行估计.在系统充分可调度的情况下,  $T_{\min}$  可以表示为<sup>[13]</sup>:

$$T_{\min} = \frac{T_{\text{tot}}}{0.69} \quad (13)$$

其中 0.69 是当系统消息无限的情况下满足可调度性时的最大的比例系数,而采样周期的上限值  $T_{\max}$  可以描述如下<sup>[13]</sup>:

$$T_{\max} = T_s^d = T_s - 2T_d = \frac{T_{bw}}{20} - 2T_d \quad (14)$$

$T_d$  为时延,  $T_{bw}$  是根据控制系统的带宽  $\omega_{bw}$  可求得。

## 3 仿真

研究三回路的 CAN 总线网络控制系统,被控对象传递函数为:

$$G(s) = \frac{1000}{s(s+2)} \quad (15)$$

由于本文的研究重点是变采样周期调度策略,因此直接采用数字 PID 控制器, PID 控制器的参数:比例系数  $K = 0.96$ ,微分系数  $T_d = 0.094$ ,积分系数  $T_i = 0.12$ ,微分增益  $N = 10$ .数据传输速率为 80000bits/s,数据包大小为 40 比特,网络利用率设定值  $U_r = 0.9$ ,为影响数据包传输时间而将网络丢包率设为 5%.三个控制回路初始采样周期为  $h_1 = 8\text{ms}$ ,  $h_2 = 8\text{ms}$ ,  $h_3 = 8\text{ms}$ .在仿真系统中采集了 300 组数据包传输时间进行 ARIMA 预测模型的建立,利用 AIC 准则确定模型为 ARIMA(3, 1, 2).输入参考信号为方波,设置一干扰节点,其带宽占用率为 20%.仿真时间为 3 秒。

首先确定采样周期上下界,在不考虑丢包率与干扰的情况下,本文中  $T_{\text{tot}} = 2\text{ms}$ ,  $T_{bw} = 2.5\text{ms}$ ,  $T_d = 2\text{ms}$ ,不考虑各回路的处理时间的最大值  $T_{\text{proc}}$ ,由式(13)、式(14)可以计算得到:

$$T_{\min} = \frac{2}{0.69} \approx 3\text{ms}, T_{\max} = \frac{1}{2.5} \times \frac{1}{20} \times 1000 - 4 = 16\text{ms}$$

由此可确定本文的变采样周期变化范围为 3 到 16ms.

图 7 为网络利用率曲线,计算得知其初始网络利用率为 1.2,网络不可调度,从图中可看出经 0.2 秒之后网络利用率收敛到设定值 0.9.

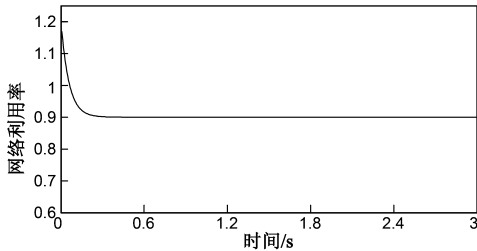


图7 网络利用率曲线

图 8 给出了权重变化曲线(文中对权重进行了归一化处理),由于回路 3 传输误差最大,因此调度系统将对回路 3 赋予更大的权重.

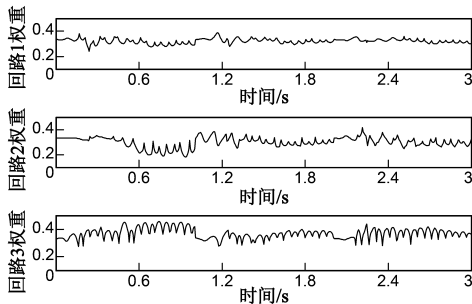


图8 权重变化曲线

图 9 为采样周期变化曲线,3 个控制回路的采样周期将随系统运行情况变化,图中曲线反映了  $h_1, h_2, h_3$  的变化规律,图中的峰值是该回路的误差为零的时刻.

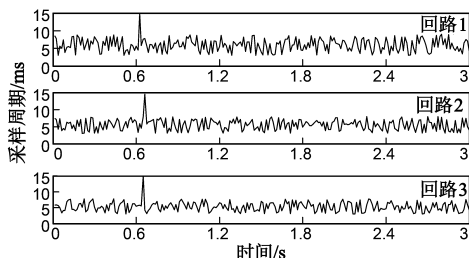


图9 采样周期变化曲线

为了进行系统控制性能的对比,与文献[11]中固定权重的变采样周期调度算法进行了对比,图 10 给出了采用固定权重的变采样周期调度策略的三个回路的输出响应曲线,图 11 为本文模糊权重变采样周期调度算法的三个回路的输出响应曲线,从图 10 可观察到回路 3 的传输误差最大,因此输出有较大的超调,系统性能

不佳,而图 11 显示经过本文的模糊权重调整改变采样周期,系统将会对回路 3 分配更多的资源,因此提高了回路 3 的性能,同时回路 1、2 的性能未受影响.

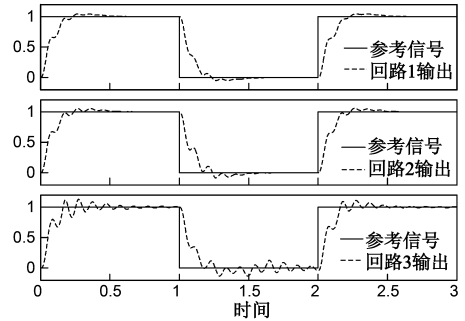


图10 固定权重变采样周期算法的输出响应曲线

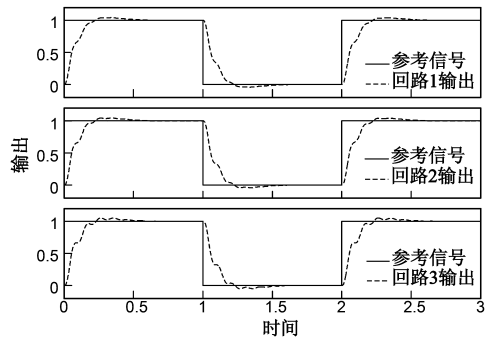


图11 模糊权重调整变采样周期算法的输出响应曲线

本文的控制性能采用 IAE(Integrated Absolute Error, 各回路绝对误差积分和)值来衡量,其计算公式为:

$$IAE_i = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (16)$$

经离散后得到:

$$IAE_i = \sum_k |e(k)| \cdot h_i \quad (17)$$

图 12 与图 13 分别给出固定权重与模糊权重调整变采样周期调度算法的三个回路的 IAE 值,表 4 为两种调度算法的 IAE 的对比.从图 12、图 13 与表 4 中的对比可知本文的方法显著的提高了回路 3 的 IAE.

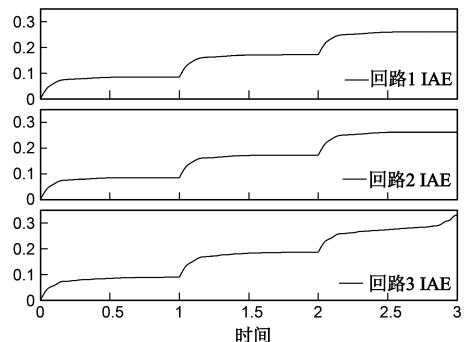


图12 固定权重周期调度算法的三个回路的IAE值

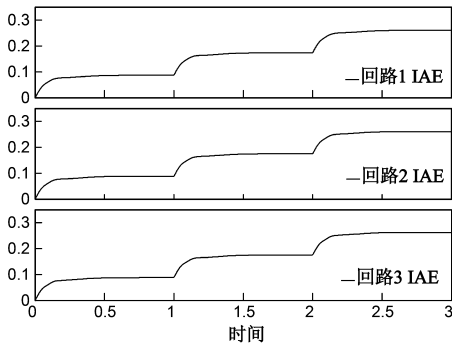


图13 模糊权重变采样周期调度算法的三个回路的IAE值

图 14 和图 15 分别为固定权重与模糊权重变采样周期调度算法的三个回路数据传输时延曲线. 从图 14 中可以看出采用固定权重变采样周期调度算法时,回路的网络时延主要集中在 4 至 4.5ms 左右,少数在 5ms 附近. 图 15 采用模糊权重变采样周期调度算法,可以看出回路的时延集中在 3ms 左右,只有个别时刻的网络时延达到 4ms. 因此在改善网络时延方面,本文的模糊权重变采样周期调度算法比固定权重的采样周期调度算法有一定程度上的改进.

表 4 调度方法的 IAE 值对比

调度算法	固定权重	模糊动态权重
回路 1	0.27	0.25
回路 2	0.26	0.24
回路 3	0.32	0.25
合计	0.85	0.74

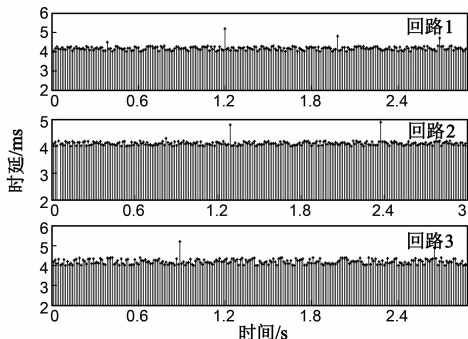


图14 固定权重变采样周期调度算法的回路传输时延

从上面的仿真对比可知,本文提出的模糊权重变采样周期调度策略提高了各个回路的输出性能,降低了各个回路的 IAE 值,同时减少了各回路的数据包的传输时间.

## 4 结论

本文提出了一种资源受限网络控制系统的基于模糊权重调整的变采样周期调度策略. 根据控制回路的误差与误差变化率,通过模糊推理动态调整每个回路

的权重,同时利用 ARIMA 算法预测数据包传输时间,结合网络利用率,不断地改变系统各控制回路的采样周期,优化网络控制系统的性能. 仿真结果表明,本文的方法可以使网络利用率收敛到设定值. 相对固定权重变采样周期方法,减少各个控制回路传输误差与数据包传输时延,提高了网络控制系统的性能.

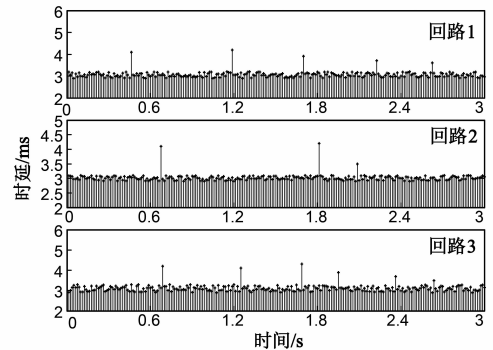


图15 模糊权重变采样周期调度算法的回路传输时延

## 参考文献

- [1] Liu J L. Event-based reliable H-infinity control for networked control system with probabilistic actuator faults [J]. Chinese Journal of Electronics, 2013, 22(4): 843 - 848.
- [2] Wang Z W, Sun H T. Bandwidth scheduling of networked control system based on time varying sampling period [A]. Proceedings of the 32nd Chinese Control Conference [C]. Washington, DC: IEEE, 2013. 6491 - 6495.
- [3] Fan J R, Fang H J. Guaranteed cost control for networked control systems with uncertain sampling period and time-delay [J]. ICIC Express Letters, Part B: Applications, 2012, 3(3): 501 - 506.
- [4] 尹逊和, 李斌, 宋永端, 等. 网络控制系统的变采样周期调度算法 [J]. 北京交通大学学报, 2010, 34(5): 135 - 141. Yin Xun-he, Li Bin, Song Yong-duan, et al. Research on variable sampling period algorithm in networked control system [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2010, 34(5): 135 - 141. (in Chinese)
- [5] 王艳, 蔡骅, 陈庆伟, 等. 网络控制系统反馈调度器的设计 [J]. 电子学报, 2007, 35(2): 379 - 384. Wang Yan, Cai Hua, Chen Qing-wei, et al. Feedback scheduler design of networked control systems [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(2): 379 - 384. (in Chinese)
- [6] Zhang H L, Jing Y W, Zhang S Y. Controller design for networked control systems with active varying sampling period [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(22): 7275 - 7280.
- [7] Wang J, Liu W D. Control and scheduling co-design of networked control system [A]. 2011 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing,

- ICSPCC 2011[C]. Piscataway, NJ: IEEE, 2011. 1 - 4.
- [8] Chen L, Zhang J M, Wang S Q. Scheduling and control co-design for delay compensation in the networked control system [J]. Asian Journal of Control, 2006(82): 124 - 134.
- [9] Xia F, Sun Y X, Tian Y C. Feedback scheduling of priority-driven control networks [J]. Computer Standards and Interfaces, 2009, 31(3): 539 - 547.
- [10] 戴小溪, 刘爱伦. 一种新的变采样周期策略在不确定负载 NCS 中的应用 [J]. 华东理工大学学报, 2012, 38(1): 95 - 101.  
Dai Xiao-xi, Liu Ai-lun. Application of a new variable sampling strategy in uncertain load NCS [J]. Journal of East China University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2012, 38(1): 95 - 101. (in Chinese)
- [11] Yang Y Z, Gui W H, Huang Z W. A multi-task real-time scheduling algorithm based on dynamic weight compensation and adaptive task Jumping [A]. 2009 International Conference on Networking and Digital Society, ICNDS 2009 [C]. Piscataway, NJ: IEEE, 2009. 229 - 232.
- [12] Tian Z D, Gao X W, Li K. A hybrid time-delay prediction method for networked control system [J]. International Journal of Automation and Computing, 2014, 11(1): 19 - 24.

- [13] Mohammad R J, Alireza S. Stabilization of distributed networked control systems with minimal communications network [A]. Proceedings of the 2011 American Control Conference, ACC 2011 [C]. Piscataway, NJ: IEEE, 2011. 515 - 520.

#### 作者简介



**田中大** 男, 1978 年生于辽宁沈阳. 博士, 沈阳工业大学信息科学与工程学院讲师. 研究方向为网络控制系统时延补偿、调度算法以及混沌时间序列预测等.

E-mail: tianzhongda@126.com



**李树江** 男, 1966 年出生, 博士, 沈阳工业大学信息科学与工程学院教授. 研究方向为智能控制技术的研究与应用、复杂工业过程建模与控制等.