

基于粒子群优化算法和博弈论的网络学习控制系统带宽调度

严翔¹⁾, 李洪波²⁾, 王立德¹⁾✉, 申萍¹⁾

1) 北京交通大学电气工程学院, 北京 100044 2) 清华大学计算机科学与技术系, 北京 100084

✉ 通信作者, E-mail: ldwang@bjtu.edu.cn

摘要 研究了双层网络学习控制系统的带宽调度优化问题. 为了合理分配子系统的带宽, 引入了网络定价体系和动态带宽调度方法, 建立了非合作博弈模型, 从而将网络控制系统的网络资源分配问题转换为非合作博弈竞争模型下的 Nash 均衡点求解问题. 在此基础上, 采用粒子群优化算法得到此框架下的纳什均衡解, 并进一步给出了网络控制系统的时间片调度方法. 仿真结果表明了所提方法的有效性.

关键词 网络控制系统; 定价; 博弈论; 粒子群优化算法

分类号 TP 302.7

Bandwidth scheduling of a networked learning control system using particle swarm optimization and the game theory

YAN Xiang¹⁾, LI Hong-bo²⁾, WANG Li-de¹⁾✉, SHEN Ping¹⁾

1) School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

2) Department of Computer Science & Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China

✉ Corresponding author, E-mail: ldwang@bjtu.edu.cn

ABSTRACT The optimal bandwidth scheduling problem was studied for a two-layer networked learning control system (NLCS). A dynamic bandwidth scheduling methodology based on the network pricing mechanism was proposed to allocate the bandwidth for each subsystem, so the network resource allocation problem was transformed into the solution of the Nash equilibrium with a non-cooperation game model. Under this framework, particle swarm optimization (PSO) was used to obtain the Nash equilibrium for NLCS, and the time slice scheduling method was also provided. Simulation results were given to demonstrate the effectiveness of the proposed approach.

KEY WORDS networked control systems; pricing; game theory; particle swarm optimization

网络控制系统(networked control systems, NC-Ss)是一种通过网络形成闭环反馈,集通信网络和控制于一体的分布式控制系统.网络控制系统结构有两大类,分别为直接结构和分级结构^[1].前者在应用中,多个控制器可能被封装在一个控制单元来管理多个闭环回路,典型应用包括远程学习实验室和直流电机调速等^[2-3];后者在应用中由于远程控制器的存在,分级结构有更好的实时性,典型应用

包括移动机器人、汽车控制以及航天器等^[4-6].无论采取哪种结构,与传统的点对点直接控制系统相比,网络控制系统的最大特点是系统中的传感器、控制器和执行器并不是直接的点对点连接,而是通过公共网络交换数据和控制信息.此种特性的优势在于可以实现信息资源共享和远程分布控制,减少系统布线、支持模块化设计、配置灵活、安装成本低和易于维护,广泛应用于国防、航空航天、设备制造、智

收稿日期: 2013-05-08

基金项目: 中央高校基本科研业务费资助项目(E11JB00310, E12JB00140); 国家重点基础研究发展计划资助项目(2012CB821206); 国家自然科学基金资助项目(61004021, 61174069, 61004023); 北京市自然科学基金资助项目(4122037)

DOI: 10.13374/j.issn1001-053x.2014.07.019; http://journals.ustb.edu.cn

能交通、过程控制及经济管理领域^[7]。

近年来,网络控制系统已成为国内外学术界的前沿方向和研究热点,相关文献层出不穷,如网络协议^[8-9]、网络诱导时延^[10-11]、数据丢包^[12-13]、网络架构^[14-15]、网络调度^[16-17]以及网络安全^[18-20]。然而上述研究对象多是基于单层的网络结构,对更复杂结构的网络控制系统和非线性系统研究得比较少。本文引入一种双层结构的网络学习控制系统(networked learning control system, NLCS)。研究表明,这种结构的网络控制系统具有更好的控制性能和鲁棒性,适用于复杂的非线性控制系统^[21-22]。当然,在网络资源有限条件下的网络学习控制系统中,不确定的网络诱导时延将严重影响系统的控制性能和系统稳定性。因此,网络服务质量(QoS)和控制系统性能(QoC)不仅依赖于控制算法和体系结构,而且依赖于对共享网络资源的分配和调度。一种优化的调度算法将有助于更合理地分配带宽,是提高网络服务质量和控制系统性能的关键。

网络资源的有限性迫使网络中各节点对网络资源的需求形成一种竞争,各个节点为了获取各自最大的网络效用,将会独立、理性地选择一种优化调度策略抢占网络资源,从而形成节点间的非合作博弈。事实上,网络中各节点、各类数据对网络资源的需求和竞争都可以归结为博弈问题。将经济学模型和博弈理论应用到网络资源分配是研究的一个热点问题。博弈方法已经在网络流量控制、资源计费、网络调度和路由算法设计等方面^[23-24]得到应用。采用定价理论的网络资源分配也取得了不少成果,因为网络定价机制是一种仲裁资源分配的有效手段^[24-26]。影子价格能够将网络负荷和带宽容量关联起来。其中文献[24]提出了一种价格迭代和利率自适应的算法使得用户设定的价格能保证其自身效益的最大化;在文献[25]中,提出了一种基于拥塞控制的定价策略,根据影子价格和分组评估价值调整发送速率;文献[26]提出一种基于拍卖的带宽分配机制来解决在无线自组织网络流争用问题。鉴于此,本文基于网络定价的非合作博弈模型采用粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO),实现网络学习控制系统的带宽调度优化。仿真结果表明了所提方法的有效性。

1 问题描述

1.1 网络学习控制系统的结构

一种典型的双层网络学习控制系统架构如图 1

所示。下层通信网络(lower layer communication network, LLN)根据网络调度负责实时控制。假设下层网络控制系统有 M 个控制闭环子系统,由于执行器(actuator)一般不发送数据,每个控制闭环设有两个数据传输节点,传感器(sensor)节点和控制器(controller)节点,则网络总数据传输节点为 $2M$ 。其中执行器是事件驱动式,而控制器和传感器是时间驱动式,有相同的采样周期 h ,且大于系统轮询周期。各控制闭环的传感器根据各自的采样周期将各自信息(包括采样数据、节点标识和相关信息)打包发送到控制器;控制器根据各自的传感器信息计算控制指令并打包发送到相应的执行器;执行器根据所得最新控制命令更新内部控制算法。

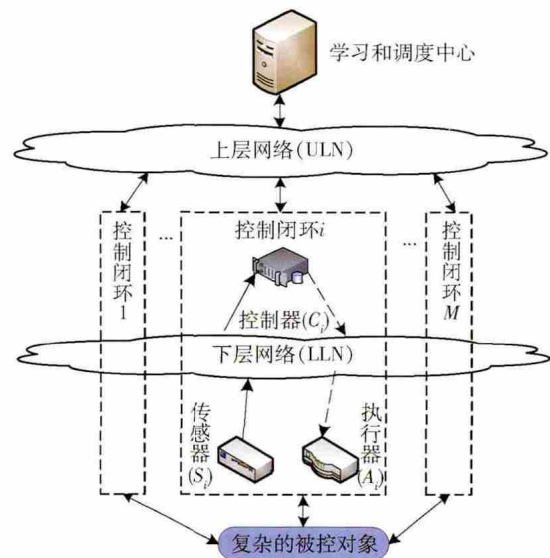


图 1 双层网络学习控制系统的架构图

Fig. 1 Structure of the double-layer NLCS

与此同时,学习和调度中心通过上层通信网络(upper layer communication network, ULN)对子系统进行带宽分配和调度,带宽分配时序如图 2 所示。一次完整的带宽调度操作周期称为 T_0 。首先在带宽轮询周期 T_p 期间,各闭环控制器向中心提交带宽需求;接着在分配周期 T_A 内,中心根据收集的信息计算并分配带宽;最后在剩下的数据传输周期 T_T 中,各控制闭环按照分配到的时间片交替发送数据,直到新周期的开始。

1.2 直流电机系统建模

不失一般性,电机控制系统的动态过程可由如下连续时间状态方程描述^[27-28]:

$$\dot{f}_p(t) = Af_p(t) + Bu(t). \quad (1)$$

其中: $f_p(t) \in \mathbf{R}^q$ 为状态向量, $u(t) \in \mathbf{R}^g$ 为控制输入, A 和 B 为具有适当维数的常数矩阵。考虑控制信号零阶保持的情况下,式(1)所示的网络电机控

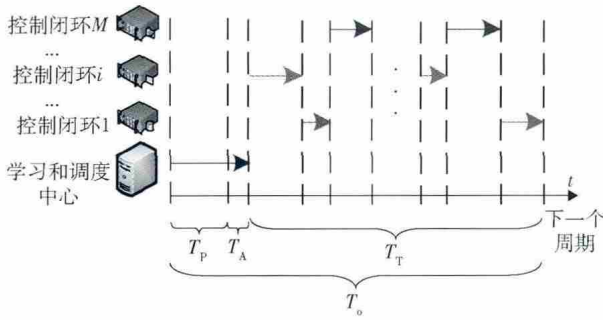


图 2 带宽分配时序图

Fig. 2 Timing diagram of bandwidth allocation

制系统模型可被离散化为下式:

$$f(k+1) = Ff(k) + Gu(k). \quad (2)$$

计算如下:

$$F = e^{Ah}, G = \int_0^h e^{A\tau} d\tau B. \quad (3)$$

1.3 网络学习控制系统的性能分析

网络学习控制系统的系统性能可以由该系统中所有控制闭环子系统联合描述,而各控制闭环子系统的性能则可以采用某个取值域的性能函数来描述,如误差函数.文献[29]指出,可以采用绝对误差积分(integral absolute error, IAE)来评估网络学习控制系统的系统性能,且带宽分配越少控制性能越差(误差越大),但带宽分配越多并不意味着控制性能能够无限提升.事实上,在允许采样周期变化范围内和网络非过载情况下,系统绝对误差积分 e 与采样周期 t 之间可以获得如下近似关系:

$$e_i(t_i) = \alpha_i + \beta_i t_i. \quad (4)$$

其中 α_i 和 β_i 取决于各自控制闭环子系统.

文献[30]指出,对于控制闭环 i ,其采样周期 t_i 和所分配带宽 x_i 之间的关系如下式所示:

$$t_i = \frac{c_i}{x_i}. \quad (5)$$

式中: x_i 为控制闭环 i 所分配到的带宽比例; c_i 表示控制闭环的控制操作时间,包括数据在传感器和控制器之间,控制器和执行器之间的传输时间,以及控制器处理数据所花时间.

本文一方面需要尽量为每个控制闭环提供服务以提升其控制系统性能,另一方面又需要尽量平衡每个控制闭环的带宽需求从而使得各个控制闭环的控制系统性能能够得到保证.因此,对于带宽资源有限的网络学习控制系统而言,上述问题可描述成如下多目标优化问题:

$$\begin{cases} \min & \delta J_1 + (1 - \delta) J_2, \\ \text{s. t.} & \sum_{i=1}^M x_i \leq 1 - \omega, x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max}. \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{式中: } J_1 = \sum_{i=1}^M (\alpha_i + \beta_i t_i) = \sum_{i=1}^M (\alpha_i + \beta_i c_i / x_i),$$

$J_2 = \sum_{i=1}^M x_i, \rho < \delta < 1$; 优化求解过程中常量 α_i 可忽略不计; 比例因子 ω 的引入是为了保留部分带宽以应对意外过载情况,从而避免系统性能的突然恶化; x_i^{\min} 和 x_i^{\max} 可通过相应控制闭环的资源约束条件以及最大允许时延界(maximum allowable delay bound, MADB)得到^[31].

2 主要结果

2.1 网络定价

本节讨论基于网络定价体系的博弈建模问题.定价体系可以被当成网络服务提供者和多个用户或者数据流的有限集合的博弈.定价策略主要包括不基于使用的定价机制(none-usage-based pricing, NBP)和基于使用的定价机制(usage-based pricing, UBP)两种模式^[32-33].不基于使用的定价机制虽然定价简单,操作方便,但是无法利用价格杠杆调节用户的资源分配,影响资源利用率,且容易导致网络拥塞;而基于使用的定价机制的单位带宽价格可以随着用户对网络资源使用情况的不同而跟踪变化,这种动态定价机制以用户总体满意度最大为目标,可实现网络资源的高效利用和用户公平性.

本文应用基于使用的定价机制建立动态定价模型,以系统总体收益最优为目标,计算出相应的动态价格.将前文提到的每个控制闭环子系统称为一个用户,每个用户并不知道其他用户的存在以及他们目前的状态,各自根据自己的控制系统性能需求提出自己的带宽策略,记为 x_i .显然,在网络带宽资源受限的网络学习控制系统中,所有控制闭环子系统形成了一种非合作博弈.每个用户的收益由该用户对一个给定网络服务质量下得到的相应控制系统性能和其对此网络服务质量所付出之差决定.用户 i 需要支付的金额 $y_i = \lambda x_i$, λ 为单位带宽价格.每位用户的收益函数表述如下式:

$$S_i(x_i) = \begin{cases} U_i(x_i) - y_i, & y_i > 0; \\ U_i(0), & y_i = 0. \end{cases} \quad (7)$$

而基于网络定价结合以绝对误差积分评估系统性能的方法,用户收益函数可变化为下式:

$$S_i(x_i) = \ln(1 + x_i / \beta_i c_i) - y_i = \ln(1 + x_i / \beta_i c_i) - \lambda x_i. \quad (8)$$

每位用户根据自己的收益独立制定自己的报价策略,显然每位用户都不会离谱地报高价,因为过高的报价只会降低自己的最终收益.

在网络学习控制系统框架下,下层通信网络中的每个用户都希望最大化自己的最终收益. 一般而言,在给定其他用户调度策略的情况下,如果没有任何一个用户有动力选择其他调度策略(此时该策略所得的效用已经是最大),那么网络中就没有一个用户有动力打破这种均衡,称这样的均衡为 Nash 均衡. 兼顾个体与整体最佳性能的资源调度方式就是在 Nash 均衡点分配带宽. 为了方便得到非合作网络学习控制博弈(NNLCG)模型中 Nash 均衡存在性和唯一性的证明,先给出如下两个定义:

定义 1 有 N 个用户的非合作网络学习控制博弈 $NG = (\Gamma, \{X_i\}, \{S_i(\cdot)\})$, 其中 $\Gamma = \{1, 2, \dots, N\}$ 是参与用户的索引集合, $X_i = \{x_i^{\min}, x_i^{\max}\}$ ($x_i^{\min} > 0$) 是用户 i 的策略空间, $S_i(\cdot)$ (如式(8)所示)是节点的收益函数.

定义 2 在凸集 X_i 上的函数 $S_i(\cdot) : X_i \rightarrow \mathbb{R}_+^1$ 定义为在 x_i 上是拟凹,当且仅当下式成立:

$$S_i(\xi x_i + (1 - \xi) x'_i) \geq \min(S_i(x_i), S_i(x'_i)). \quad (9)$$

其中 $x_i, x'_i \in X_i, \xi \in [0, 1]$.

定理 1 在 N 人博弈 $NG = (\Psi, \{P_j\}, \{u_j(\cdot)\})$ $j \in \Psi$ 中,若策略空间为 $\{P_j\}$ 是欧几里德空间的一个非空紧致凸子集,且其收益函数 $u_j(\sigma)$ 是在 σ 上连续且在 σ_j 上拟凹,则此博弈 NG 存在 Nash 均衡.

证明:定理 1 的推导可利用经典 Kakutani 固定点理论完成,关于该定理的详细证明可参考文献 [34].

定理 2 非合作网络学习控制博弈 $NG = (\Gamma, \{X_i\}, \{S_i(\cdot)\})$ $i \in \Gamma$ 中存在 Nash 均衡.

证明:本定理可以通过验证非合作网络学习控制博弈 $NG = (\Gamma, \{X_i\}, \{S_i(\cdot)\})$ $i \in \Gamma$ 满足定理 1 的两个条件来证明. 其中每个用户的策略空间定义在区间 $[x_i^{\min}, x_i^{\max}]$ ($x_i^{\min} > 0$). 假设 $x_i^{\min} \leq x_i^{\max}$ 总是成立的,显然满足了第一个条件. 下面证明对于每个用户 i , 收益函数 $S_i(x)$ 在 x_i 上是拟凹的.

收益函数 $S_i(x)$ 对 x_i 的一阶微分为

$$\frac{\partial S_i(x_i)}{\partial x_i} = \frac{1}{\beta_i c_i + x_i} - \lambda. \quad (10)$$

收益函数 $S_i(x)$ 对 x_i 的二阶微分为

$$\frac{\partial^2 S_i(x_i)}{\partial x_i^2} = -\frac{1}{(\beta_i c_i + x_i)^2} < 0. \quad (11)$$

由上式可知收益函数 $S_i(x)$ 在 x 上连续可微,且在 x_i 上是凹的,一个凹函数同样也是拟凹的,第二个条件也成立,至此该定理证明完毕.

定理 3 非合作网络学习控制博弈的 Nash 均衡是唯一的.

证明: Nash 均衡唯一性的证明可以参考定理 2, 详细的推导可参看文献 [35], 为行文简洁, 本文不再赘述.

至此,本文成功地将网络学习控制系统的网络资源分配问题转换为非合作博弈竞争模型下的 Nash 均衡点求解问题. 然而除了一些现代启发式优化算法(如遗传算法等),传统的数值计算方法对于精确求解 Nash 均衡点比较困难,因此本文又引入粒子群优化算法来快速寻找 Nash 均衡点.

2.2 粒子群优化算法设计

粒子群优化算法^[36]源于对鸟群捕食行为的模拟,是一种基于群智能(swarm intelligence)的随机优化启发式搜索技术. 最早由 Kennedy 和 Eberhart 于 1995 年提出,因其实现简单、全局搜索能力强且计算高效,目前已发展出各种改进算法,并广泛应用于各种优化问题,如函数优化、神经网络训练^[37-38].

假设在 n 维连续搜索空间(解空间)中粒子群的第 i 个粒子或个体 ($i = 1, 2, \dots, m$) 位置表示为 $x_i(k) = [x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,n}]^T$, 粒子的速度用 $v_i(k) = [v_{i,1}, v_{i,2}, \dots, v_{i,n}]^T$ 表示,该粒子迄今所获得的具有最优适应度值的位置称为最优位置,记为 $p_i(k) = [p_{i,1}, p_{i,2}, \dots, p_{i,n}]^T$, 粒子之间局部信息的相互交流将产生整个粒子群的迄今最优位置,记为 $p_g(k) = [p_{g,1}, p_{g,2}, \dots, p_{g,n}]^T$. 对于每一代,粒子寻优遵循以下基本公式:

$$v_{i,j}(k+1) = v_{i,j}(k) + C_1 \text{rand}(0, a_1) [p_{i,j}(k) - x_{i,j}(k)] + C_2 \text{rand}(0, a_2) [p_{g,j}(k) - x_{i,j}(k)], \quad (12)$$

$$x_{i,j}(k+1) = x_{i,j}(k) + v_{i,j}(k+1). \quad (13)$$

式中: $j = 1, 2, \dots, n$ 为 n 维向量的第 j 个分量; k 为迭代次数; C_1 和 C_2 为加速常数,均为非负值; $\text{rand}(0, a_1)$ 与 $\text{rand}(0, a_2)$ 分别产生 $[0, a_1]$ 和 $[0, a_2]$ 之间均匀分布的随机数,其引入将增加认知和社会搜索方向的随机性和算法的多样性. 算法的中止条件是最大迭代次数或粒子群已搜索到的最优位置满足预定最小适应阈值.

2.3 调度算法

确定了网络学习控制系统非合作博弈竞争模型下的 Nash 均衡点,就要根据 Nash 均衡点的带宽分配进行网络调度,这里上层通信网络采用轮询调度机制来完成一次系统数据传输周期 T_T . 假设每个时间片的长度为 T_L , 且 $T_L \geq c_i^{\max}$, 即在一个时间片内可

以完成一个控制闭环的数据传输, 则在一个 T_T 时间段内, 共有 $l = T_T/T_L$ 个时间片 L 为当前可用时间片序列集合, 每个用户将拥有一组以时间序列表示所占时间片的序列集合 L_i . 例如, 对于一个有 $|L| = 10$ 个时间片的分配, 其中用户 i 的 $L_i = \{1, 4, 9\}$, 表示它占据了第一、第四和第九个时间片, 剩余可用的时间片序列集为 $\{2, 3, 5, 6, 7, 8, 10\}$. 具体的网络调度算法过程如下:

Step 1 对于给定的带宽分配策略 x^* , 按降序对各个用户所得带宽进行排序.

Step 2 计算每个用户占有的时间片数量为 $l_i = \lfloor lx_i \rfloor$, 其中 l 为 T_T 时间段内的时间片总数.

Step 3 设定索引序号 $i = M$.

Step 4 计算用户 i 的时间片间隔 $d_i = \lceil 1/x_i \rceil$.

Step 5 初始化计数器 $r = \min h, h \in L, b = 0, L_i = \{\}$.

Step 6 当 $b \leq l_i$ 和 $m = r + bd_i \leq l$ 有一个条件不满足, 转 Step 8, 否则转 Step 7.

Step 7 如果 $m \notin L$ 且 $m \leq l$ 时, 更新 $m \leftarrow m + 1$ 直到得到一个 $m \in L$ 的值, 并将这个 m 放入 L_i 的时间序列集, 更新 $b \leftarrow b + 1, L \leftarrow L - \{m\}$, 然后转 Step 6; 否则结束此用户的时间片调度, 转 Step 8.

Step 8 更新 $i \leftarrow i - 1$, 如果此时 $i = 0$, 结束算法; 否则转 Step 4.

3 实验与结果分析

为了验证算法的有效性, 本文采用 MATLAB 实现上述优化算法, 并针对网络电机控制系统进行仿真实验. 仿真测试系统包括三个网络电机控制子系统, 各子系统模型均采用公式 (1) 描述, 具体系统参数如表 1 所示. 其余参数设置如下: $\omega = 0.1, T_0 = 0.5 \text{ s}, T_L = 0.005 \text{ s}, T_p = 0.03 \text{ s}$, 剩余时间即为 T_T . 值得指出的是, 带宽分配周期 T_A 相对于轮询周期 T_L 非常小, 可忽略不计.

表 1 网络电机控制系统主要控制参数

Table 1 Parameters of the networked dc motor subsystem

网络电机控制子系统	参数 A	参数 B
控制闭环 1	$\begin{bmatrix} -1579.9 & -4.1 \\ 430.3 & -0.1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 318.473 \\ 0 \end{bmatrix}$
控制闭环 2	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & -217.4 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 1669.5 \end{bmatrix}$
控制闭环 3	$\begin{bmatrix} -579.9 & -4.1 \\ 30.3 & -0.01 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 18.4713 \\ 0 \end{bmatrix}$

基于网络定价的带宽分配 (network pricing-

based bandwidth allocation, NPBA) 方法的初始种群数为 100, 经过 10 代的进化, 整体适应度快速收敛并趋于稳定, 达到 Nash 均衡, 根据所得的均衡解 $x^* = [0.22 \ 0.37 \ 0.31]^T, |L| = 93$ 进行带宽分配和系统性能评估; 另外, 本文又采用了平均带宽分配 (equal bandwidth allocation, EBA) 方法进行了仿真实验对比, 每个子系统的所得带宽为 $x_i = (1 - \omega) / M$, 在可用总带宽相同的情况下, 分别采用两种策略所得的绝对误差积分和带宽分配比例 (ratio of bandwidth, RoB) 结果如图 3 所示, 相应各回路的阶跃响应如图 4 所示. 不难看出, 虽然采用平均带宽分配方法的个别子系统优于采用基于网络定价的带宽分配方法的相应子系统, 如控制闭环 1 中采用平均带宽分配方法的绝对误差积分低于基于网络定价的带宽分配方法, 且阶跃响应曲线也优于基于网络定价的带宽分配方法, 但采用平均带宽分配方法的平均绝对误差积分值却高于基于网络定价的带宽分配方法, 说明采用基于网络定价的带宽分配策略的网络控制系统具有更优越的整体系统性能. 其主要原因在于: 平均带宽分配方法虽然因个别子系统获得较高带宽分配而使其系统性能增强, 但平均带宽分配策略并未考虑带宽分配与系统性能提高之间的投入产出比, 忽略了经济效果的评价指标, 从而形成部分回路带宽不足而另一部分回路带宽过剩的局面; 相反基于网络定价博弈带宽调度策略可有效迫使各控制回路工作于 Nash 均衡点, 通过合理的分配带宽而使得网络控制系统达到整体性能最优.

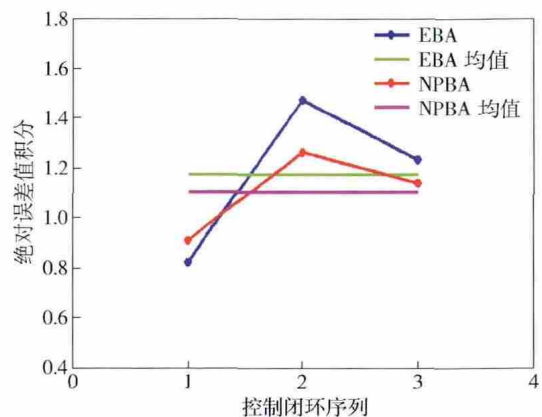


图 3 仿真实验结果对比

Fig. 3 Comparison of simulation results

基于网络定价的带宽分配策略的网络调度时序图如图 5 所示, 其中末端的空闲时间片为保留带宽. 不难看出, 各控制闭环的网络节点均获得了相应比例的带宽资源来发送数据, 且各子系统具有满意的控制性能. 上述仿真实验结果表明了本文所采用算

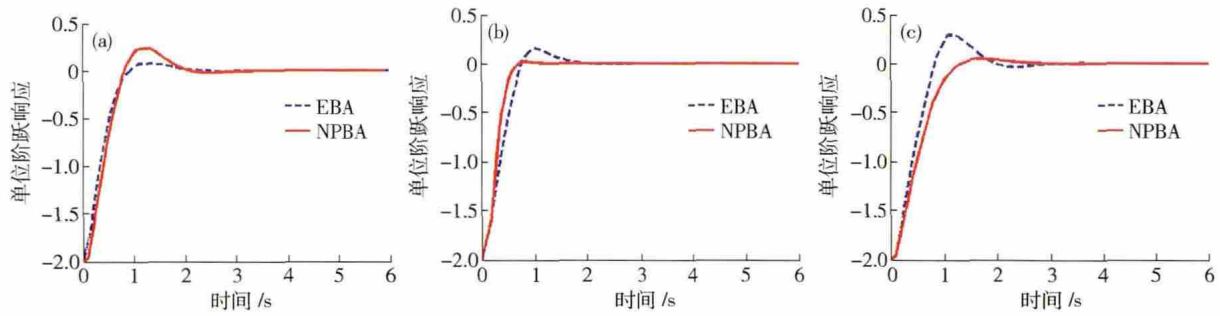


图 4 三组网络电机控制系统的单位阶跃响应: (a) 控制闭环 1 的单位阶跃响应; (b) 控制闭环 2 的单位阶跃响应; (c) 控制闭环 3 的单位阶跃响应

Fig. 4 Different step responses of three networked dc motor subsystems: (a) step response of Loop 1; (b) step response of Loop 2; (c) step response of Loop 3

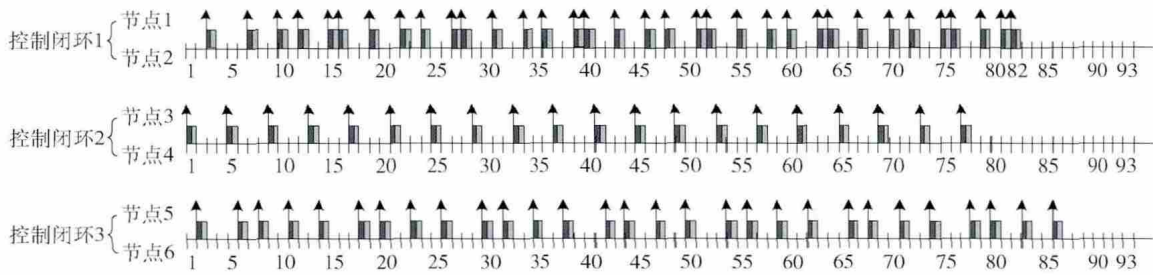


图 5 网络调度时序图

Fig. 5 Timing diagram of network scheduling

法的有效性.

4 结论

本文研究了双层网络学习控制系统架构下的带宽调度优化问题,引入网络定价和博弈思想,将网络学习控制系统的网络资源分配问题转换为非合作博弈竞争模型下的 Nash 均衡点求解问题.在此基础上给出了基于粒子群优化算法的 Nash 均衡解求解算法和时间片调度方法.与已有研究成果最大的不同之处在于,所提的基于网络定价博弈带宽调度策略可有效迫使各控制回路工作于 Nash 均衡点,通过合理的分配带宽而使得网络控制系统达到整体性能最优且各控制回路的竞价带宽不会高于自身的实际需求.仿真结果验证了所提方法的有效性.

参 考 文 献

[1] Li H B, Sun Z Q, Sun F C. Networked control systems: an overview of state-of-the-art and the prospect in future research. *Control Theory Appl*, 2010, 27(4): 239
(李洪波,孙增圻,孙富春.网络控制系统的发展现状及展望.控制理论与应用,2010,27(4):239)

[2] Tipsuwan Y, Chow M Y. Control methodologies in networked control systems. *Control Eng Pract*, 2003, 11(10): 1099

[3] Liu G P, Xia Y Q, Rees D, et al. Design and stability criteria of networked predictive control systems with random network delay in

the feedback channel. *IEEE Trans Syst Man Cybern Part C*, 2007, 37(2): 173

[4] Zhang L, Gao H, Kaynak O. Network-induced constraints in networked control systems: a survey. *IEEE Trans Ind Inf*, 2013, 9(1): 403

[5] Chow M Y, Tipsuwan Y. Gain adaptation of networked dc motor controllers based on QoS variations. *IEEE Trans Ind Electron*, 2003, 50(5): 936

[6] Anvari M. Telesurgery: remote knowledge translation in clinical surgery. *World J Surg*, 2007, 31(8): 1545

[7] Islam M N, Mandayam N, Kompella S. Optimal resource allocation and relay selection in bandwidth exchange based cooperative forwarding // *10th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks (WiOpt)*, 2012: 192

[8] Hespanha J P, Naghshtabrizi P, Xu Y. A survey of recent results in networked control systems. *Proc IEEE*, 2007, 95(1): 138

[9] Bai T, Wu Z M, Yang G K. A new scheme of bandwidth allocation for networked control systems. *Acta Autom Sin*, 2004, 30(6): 961
(白涛,吴智铭,杨根科.网络化控制系统带宽配置的一种新策略.自动化学报,2004,30(6):961)

[10] Zhang L Q, Shi Y, Chen T W, et al. A new method for stabilization of networked control systems with random delays. *IEEE Trans Autom Control*, 2005, 50(8): 1177

[11] Tipsuwan Y, Chow M Y. Gain scheduler middleware: a methodology to enable existing controllers for networked control and teleoperation: Part I. Networked control. *IEEE Trans Ind Electron*,

- 2004, 51(6): 1218
- [12] Li H B, Chow M Y, Sun Z Q. Optimal stabilizing gain selection for networked control systems with time delays and packet losses. *IEEE Trans Control Syst Technol*, 2009, 17(5): 1154
- [13] Shi L, Epstein M, Murray R M. Kalman filtering over a packet-dropping network: a probabilistic perspective. *IEEE Trans Autom Control*, 2010, 55(3): 594
- [14] Du D J, Fei M R. A two-layer networked learning control system using actor-critic neural network. *Appl Math Comput*, 2008, 205(1): 26
- [15] Postoyan R, Netic D. A framework for the observer design for networked control systems. *IEEE Trans Autom Control*, 2012, 57(5): 1309
- [16] Hong S H. Scheduling algorithm of data sampling times in the integrated communication and control systems. *IEEE Trans Control Syst Technol*, 1995, 3(2): 225
- [17] Xu D, Eric J, Liu X. Efficient and fair bandwidth allocation in multichannel cognitive radio networks. *IEEE Trans Mob Comput*, 2012, 11(8): 1372
- [18] Zeng W T, Chow M Y. Optimal tradeoff between performance and security in networked control systems based on coevolutionary algorithms. *IEEE Trans Ind Electron*, 2012, 59(7): 3016
- [19] Vasudevan S, Goeckel D, Towsley D F. Security-capacity tradeoff in large wireless networks using keyless secrecy // *Proceedings of the Eleventh ACM International Symposium on Mobile ad Hoc Networking and Computing*. ACM, 2010: 21
- [20] Clark A, Bushnell L, Poovendran R. A passivity-based framework for composing attacks on networked control systems // *50th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing*, 2012: 1814
- [21] Xu L J, Fei M R, Jia T G, et al. Bandwidth scheduling and optimization using non-cooperative game model-based shuffled frog leaping algorithm in a networked learning control system. *Neural Comput Appl*, 2012, 21(6): 1117
- [22] Du D J, Fei M R, Hu H S, et al. Two-layer networked learning control using self-learning fuzzy control algorithms. *Chin J Sci Instrum*, 2007, 28(12): 2124
- [23] Gabriel G C M, Belmega E V, Debbah M. Pricing and bandwidth allocation problems in wireless multi-tier networks // *IEEE Proceedings Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*, 2012: 1
- [24] Xue Y, Li B, Nahrstedt K. Optimal resource allocation in wireless ad hoc networks: a price-based approach. *IEEE Trans Mob Comput*, 2006, 5(4): 347
- [25] Qiu Y, Marbach P. Bandwidth allocation in ad hoc networks: A price-based approach // *INFOCOM 2003, Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications*, 2003: 797
- [26] Kao B R, Tu N N, Hwang I S, et al. Auction-based bandwidth allocation in multi-hop wireless ad hoc networks. *Wireless Pers Commun*, 2012, 71(2): 929
- [27] Li H B, Chow M Y, Sun Z Q. EDA-based speed control of a networked DC motor system with time delays and packet losses. *IEEE Trans Ind Electron*, 2009, 56(5): 1727
- [28] Li H B, Sun Z Q, Chow M Y, et al. State feedback controller design of networked control systems with time delay and packet dropout // *Proceeding IFAC World Congress*, 2008: 6626
- [29] Xu L J, Fei M R. A hybrid quantum clone evolutionary algorithm-based scheduling optimization in a networked learning control system // *Control and Decision Conference (CCDC)*, 2010: 3632
- [30] Velasco M, Martí P, Frigola M. Bandwidth management for distributed control of highly articulated robots // *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2005: 265
- [31] Kim D S, Lee Y S, Kwon W H, et al. Maximum allowable delay bounds of networked control systems. *Control Eng Pract*, 2003, 11(11): 1301
- [32] Stidham S Jr. Pricing and congestion management in a network with heterogeneous users. *IEEE Trans Autom Control*, 2004, 49(6): 976
- [33] Liu Z, Wynter L, Xia C. Usage-based versus flat pricing for e-business services with differentiated QoS // *IEEE International Conference on E-commerce*, 2003: 355
- [34] Hsu S P, Hsu S L, Tsai A S. A game-theoretic analysis of bandwidth allocation under a user-grouping constraint. *J Appl Math*, 2013, 2013: article ID 480962
- [35] Saraydar C U, Mandayam N B, Goodman D J. Efficient power control via pricing in wireless data networks. *IEEE Trans Commun*, 2002, 50(2): 291
- [36] Liu J H, Liu G M, Yang R H, et al. Analysis of interactivity and randomness in particle swarm optimization. *Acta Autom Sin*, 2012, 38(9): 1471
(刘建华, 刘国买, 杨荣华, 等. 粒子群算法的交互性与随机性分析. *自动化学报*, 2012, 38(9): 1471)
- [37] Mehta M H. Hybrid genetic algorithm with PSO effect for combinatorial optimization problems. *Int J Adv Comput Res*, 2012, 2(4): 300
- [38] Hamta N, Fatemi Ghomi S M T, Jolai F, et al. A hybrid PSO algorithm for a multi-objective assembly line balancing problem with flexible operation times, sequence-dependent setup times and learning effect. *Int J Prod Econ*, 2012, 141(1): 99