

基于状态空间模型和线性控制技术的 动态带宽分配策略

马 克¹, 赵海军²

(1 青海师范大学 网络中心, 青海 西宁 810008; 2 西华师范大学 计算机学院, 四川 南充 637009)

摘 要: 提出一种动态策略来实现网络化控制系统中的带宽分配管理. 具体实现是首先得到 NCS 中每个设备的状态空间模型, 然后通过状态空间模型参数的动态性分析, 并结合每个控制回路的带宽分配动态性状态变量, 从而得到扩展后的状态空间模型; 最后通过采用合适的自适应控制规则, 使得每个控制回路能根据其局部动态性使用带宽, 同时使整个网络的控制性能最优化. 采用 ball & beam 过程的仿真结果表明, 本文提出的动态带宽分配算法相对于传统的静态带宽分配算法来说, 不但提高了带宽利用率, 而且还可以提高整个网络的控制性能.

关键词: 状态空间模型; 带宽分配; 控制规则; 利用率; 控制性能

中图分类号: TP368. 5

文献标识码: A

文章编号: 1000—7180(2016)12—0025—05

The Dynamic Bandwidth Allocation Strategy Based on State Space Model and Linear Control Technology

MA Ke¹, ZHAO Hai-jun²

(1 Network Center of Qinghai Normal University, Qinghai 810008, China;

2 School of Computer, China-West Normal University, Nanchong 637009, China)

Abstract: A dynamic strategy is proposed to realize the bandwidth allocation management in networked control systems in this paper. The concrete way is that the state space model of each device is obtained in networked control system. Then, the extended state space model is obtained by the dynamic analysis of the state space model parameters, together with the state variable with the dynamic of the bandwidth allocation for each control loop. In the end, each control loop can use the bandwidth according to its local dynamic and the control performance for the whole network is optimized by the appropriate adaptive control rule. The simulation results through the ball & beam process show that the proposed dynamic bandwidth allocation algorithm not only increase the bandwidth utilization, but also improve the control performance of the whole network with respect to the static traditionally bandwidth allocation algorithm.

Key words: state space model; bandwidth allocation; control rule; utilization; control performance

1 引言

网络化控制系统(Networked Control System, NCS)是一类特殊的嵌入式系统, 是采用总线将传感器、控制器和执行机构相互连接在一起的一种网络

结构^[1].

近年来, 关于 NCS 的控制和带宽分配的协同设计引起了人们的广泛研究. 对于 NCS 来说, 通常带宽分配和调度都基于静态策略^[2-3]. 然而, 当控制应用级或网络级条件发生变化时, 静态策略就无能力了, 因为预先分配的带宽不能被充分利用, 从而导致

收稿日期: 2016—04—27; 修回日期: 2016—05—30

基金项目: 国家自然科学基金(61450006); 青海自然科学基金(2014-ZJ-724); 西华师范大学基本科研业务费专项资金资助项目(14C002)。

网络性能下降.

文献[4-7]针对 NCS 的带宽管理和控制协同设计提出了动态调度算法策略. 文献[4]提出的调度算法允许调整采样周期来把带宽分配给其他类型的消息,但不能根据控制回路的动态性来执行;文献[5]提出了采用死区来降低 NCS 的带宽消耗算法,这种算法实际是用流量来换取控制性能.

本文提出了一种动态策略来实现 NCS 控制系统中的带宽分配管理. 通过对每个控制过程的初始状态空间模型的扩展,采用一个新的状态变量来描述网络的动态性;通过对状态空间模型(包括网络动态性)进行扩展后来设计控制算法,就可以直接采用经典控制设计技术来设计每个控制器,从而保证系统稳定性并达到要求的控制性能指标.

2 系统结构和问题描述

图 1 所示为本文考虑的 NCS 结构原理图,有 n 个控制回路 $c_1, c_2, \dots, c_n$, 每个控制回路负责控制 1 个设备(或控制过程),回路 c_i 中的每个设备可以用式(1)的线性离散时域系统模型来描述:

$$x_{i,n+1} = \Phi_i(h_i)x_{i,n} + \Gamma_i(h_i)u_{i,n} \quad (1)$$

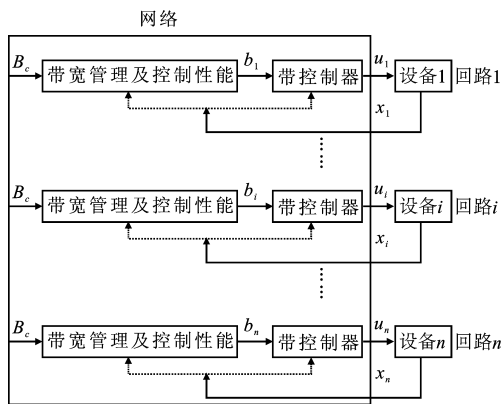


图 1 本文考虑的 NCS 原理结构图

如果输入 $u_{i,n}$ 由按照式(1)设计的状态反馈控制规则给定,则新的系统动态性(即闭合回路系统的过程和控制规则)就可以由式(2)的状态空间模型给出:

$$x_{i,n+1} = \Phi_i(h_i)x_{i,n} + \Gamma_i(h_i)L_i(h_i)x_{i,n} \quad (2)$$

式中 $L_i(h_i)$ 为控制规则, h_i 为采样周期,可以从按式(3)分配给每个控制回路的带宽 b_i 得到:

$$b_i = \frac{m_i}{h_i} \quad (3)$$

式中 m_i 为完成每个闭合回路操作(包括从传感器到控制器和从控制器到执行机构的数据交换)需

要发送的信息所花费的时间. 这个时间通常为常数,可见 b_i 的任何变化都将直接导致 h_i 的变化,或者反之. 因此,以下用 b_i 或 h_i 来表示带宽或采样周期.

对于每个控制回路,假设实现全部传感器-控制器-执行机构的信息传输在每个采样周期内完成(即这个时限就等于采样周期).

对于图 1 中的带宽分配问题,采用分布式方法来把带宽 b_i 分配给每个控制回路,带宽分配时基于每个设备的状态 x_i 和下列规则:

当一个控制过程处于平衡时,则控制回路只要求很小的带宽,而当控制过程受到扰动干扰时,分配带宽就有一个增量以促使系统恢复,提高控制性能.

为了求解这个问题,对每个控制回路来说,唯一已知的是当前的网络带宽利用 B_c . 因此,采用 B_c 和 x_i ,每个节点必须由此得出合适的采样周期 h_i (或者说消耗的带宽 b_i)来提高全局控制性能. 假设不是全部闭合回路可以同时工作在最高采样频率,即最好的可能控制性能对于每个节点都有一个专用的网络来提供.

3 局部动态带宽分配算法的实现

3.1 状态空间模型的扩展

把每个设备的状态空间模型进行扩展,从而使得带宽的分配管理能够在局部动态地进行,即在网络节点上进行.

如果采用一个描述带宽分配管理动态性的新的状态变量 b 来扩展式(1)所描述的系统状态向量,则新的过程就可以用式(4)建模:

$$\begin{bmatrix} x_{n+1} \\ b_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi(h) & \alpha \\ \beta & \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_n \\ b_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Gamma(h) \\ \delta \end{bmatrix} u_n \quad (4)$$

式中 α, β, γ 和 δ 为维数合适的矩阵,用以确定带宽分配的动态性 b_n 与初始状态变量 x_n 的关系,分别由式(5)和(6)给出:

$$x_{n+1} = \Phi(h)x_n + \alpha b_n + \Gamma(h)u_n \quad (5)$$

$$b_{n+1} = \beta x_n + \gamma b_n + \delta u_n \quad (6)$$

如果输入 u_n 由按照式(4)设计的新的状态反馈增益 $L = [l_x, l_b]$ (如式(7))给定:

$$u_n = [l_x, l_b] \begin{bmatrix} x_n \\ b_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

则扩展后的闭合回路系统动态性模型就可以由式(4)和(7)得到. 注意,式(7)中的增益设计既要考虑控制过程 x_n ,也要考虑带宽动态性 b_n . 因此,2 类变量(式(5)和式(6))的变化是由 2 类变量所给定的控制器增益的组合来确定的.

3.2 模型设计

式(4)的模型可以使得每个控制回路在每一个执行时获得带宽 b_{n+1} , 即它的下一次带宽请求(或采样周期). 为了根据初始状态变量来得到所期望的带宽分配管理的动态性, 式(4)中的矩阵 α, β, γ 和 δ 必须进行适当的设计. 下面对依赖这些矩阵的扩展模型的特性进行分析.

(1) 如果 $\alpha \neq 0$, 则初始系统的动态性将被改变(比较式(1)和式(5)), 这不是所需要的, 因此 α 必须等于 0. 然而, 这并不意味着带宽动态性不影响过程的变化. 而采用扩展模型设计的控制规则要考虑过程和带宽, 而且式(7)的激励输入 u_n 依赖于控制规则和 2 个变量 x_n, b_n ;

(2) 如果 $\delta \neq 0$, 则闭合回路的输入 u_n 将由反馈控制给定, 而且将影响 b_n 的变化(见式(6)). 然而, 由于控制规则仅用于控制过程(初始系统(1)), 则须置 $\delta = 0$. 如果希望控制规则对新的状态变量也起作用, 则须重新考虑.

以下设 $\alpha = 0, \delta = 0$;

(3) 如果 $\beta = 0$ 且 $\gamma = I$, 则对每个 n 来说, 则有 $b_{n+1} = b_n$ (见式(6)). 这就是说, 不需要确定网络带宽的动态性;

(4) 如果 $\beta = 0$ 且 $\rho(\gamma) < 1$ ($\rho(\cdot)$ 为谱半径), 则在每次迭代中带宽将减少, 直至趋近于 0. 这样将导致系统没有带宽, 这是无意义的结果;

(5) 如果 $\beta = 0$ 且 $\rho(\gamma) > 1$, 则在每次迭代中带宽将在增加, 直至趋近于 ∞ . 这将导致系统有无限大带宽, 这也是不现实的;

(6) 如果 $\beta \neq 0$ 且 $\gamma = 0$, 则带宽的改变将仅仅依赖于初始状态变量; 这样, 这些变量变化越快, 则带宽动态变化就越快, 导致连续带宽分配之间的突变和频繁变化, 这对于控制系统来说, 不是所期望的, 因为这样会导致性能下降和不稳定;

(7) 如果 $\beta \neq 0$ 且 $\gamma \neq 0$, 则网络中每个控制回路的变化(按照初始过程变化和带宽分配管理)将依赖于 β 和 γ 的特定选取值, 这是最期望的结果; 所以为了保证在连续带宽分配之间平滑过渡, 必须合理选取 β 和 γ .

为此, 考虑式(8)的模型:

$$\begin{bmatrix} x_{n+1} \\ b_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi(h) & 0 \\ \beta & \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_n \\ b_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Gamma(h) \\ 0 \end{bmatrix} u_n \quad (8)$$

扩展模型式(8)的灵活性足以满足不同的动态性, 但如果 β 和 γ 的任何线性组合不能满足带宽分配管理(新的状态变量)所期望的动态性, 则可以采

用非线性来实现, 以稍微增加控制规则复杂性为代价, 原理如下.

3.3 带宽分配管理动态性的实现

带宽分配管理机制必须遵循下列条件:

(1) 对于每个控制回路, 误差(定义为状态变量的范数, 见式(9))越大

$$e_i = |x_{i,n}| \quad (9)$$

则分配的带宽 $b_{i,n}$ 就越多, 或者说采样周期 $h_{i,n}$ 就越小;

(2) 对于 NCS 回路集来说, 给定的带宽利用约束因子必须满足:

$$\sum_{i=1}^n b_{i,n} \leq B_g \quad (10)$$

式中 B_g 为全局带宽利用因子(或者说网络容量), 可以为全部可用带宽, 或者为期望的带宽部分.

这两个条件可能是相互矛盾的, 因为第一个条件试图使局部具有更多的带宽分配, 而第二个条件又从全局上限制了总的带宽.

如果用式(8)中给出的矩阵 β 和 γ 的线性关系来表示这两个条件则相当困难. 于是, 我们定义一个启发式函数, 从数学上来表示包含在式(8)中的条件.

对于每个控制回路, 定义在每个闭合回路运行时, 下一个采样周期 h_{n+1} (或带宽分配):

(1) 是初始状态变量 x_n 的指数函数, 这是为了保证平滑过渡为正值;

(2) 要考虑当前和全部带宽利用因子, 即 B_c 和 B_g , 这是为了满足由式(10)限制的带宽利用. 考虑到这些因素, 可用带宽 B_a 就可以按式(11)计算:

$$B_a = B_g - (B_c - \frac{m}{h_n}) = B_g - (B_c - b_n) \quad (11)$$

利用式(11), 则分配给一个控制回路的最短可能采样周期 h_{short} 为:

$$h_{\text{short}} = \frac{m_n}{B_a} \quad (12)$$

这样, 下一个采样周期就可以按式(13)计算:

$$h_{n+1} = (h_{\text{long}} - h_{\text{short}}) e^{-c|x_n|} + h_{\text{short}} \quad (13)$$

式中 h_{long} 和 c 分别为最长可能采样周期和临界系数, 由每个控制回路决定. 临界系数决定一个控制回路根据误差以多快增加或减少其采样周期. c 值越大, 意味着采样周期突变越利害. 因此, 通过式(13)可以看出:

如果没有误差(即 $|x_n| = 0$), 则 $h_{n+1} = h_{\text{long}}$; 如果误差增加, 则采样周期就减小或者反之.

用扩展后的模型式(8)代替线性关系就得到 b_{n+1} (通过 β 和 γ), 用新的方程式来得到带宽分配管理动态性式(13)的采样周期, 于是得到式(14):

$$\begin{bmatrix} x_{n+1} \\ h_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi(h) \cdot x_n \\ (h_{\text{long}} - h_{\text{short}})e^{-c|x_n|} + h_{\text{short}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Gamma(h) \\ 0 \end{bmatrix} u_n \quad (14)$$

式(14)是非线性的, 因此, 应用扩展后的模型就需要采用线性控制设计技术, 下面用例子来说明.

3.4 应用实例

这部分给出扩展模型式(14)关于 ball & beam 过程的实例, 可以用式(15)的线性离散非时变状态空间模型表示:

$$\begin{bmatrix} x_{n+1}^1 \\ x_{n+1}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & h \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_n^1 \\ x_n^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2}h^2 \\ h \end{bmatrix} \cdot u_n \quad (15)$$

在式(15)中, x_n^1 和 x_n^2 为初始状态变量, 也就是说, 在式(4)中, $x_n = [x_n^1, x_n^2]^T$, h 为采样周期. 系统的采样周期和在离散化过程中得到的输入矩阵假设不变.

3.4.1 扩展后的模型

对于 ball & beam 过程并考虑(1) 它的初始模型为式(15); (2) 通用的扩展模型为式(14); (3) 由式(13) 确定带宽分配管理的动态性, 则扩展后的模型如式(16):

$$\begin{bmatrix} x_{n+1}^1 \\ x_{n+1}^2 \\ h_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_n^1 + x_n^2((h_{\text{long}} - h_{\text{short}})e^{-c|x_n|} + h_{\text{short}}) \\ x_n^2 \\ (h_{\text{long}} - h_{\text{short}})e^{-c|x_n|} + h_{\text{short}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2}((h_{\text{long}} - h_{\text{short}})e^{-c|x_n|} + h_{\text{short}})^2 \\ (h_{\text{long}} - h_{\text{short}})e^{-c|x_n|} + h_{\text{short}} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot u_n \quad (16)$$

为在下面部分简化记号, 对式(16) 简化如下:

$$\begin{bmatrix} x_{n+1}^1 \\ x_{n+1}^2 \\ h_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(x^1, x^2, h) \\ f_2(x^1, x^2, h) \\ f_3(x^1, x^2, h) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_1(x^1, x^2, h, u) \\ g_2(x^1, x^2, h, u) \\ g_3(x^1, x^2, h, u) \end{bmatrix} \quad (17)$$

3.4.2 控制器的设计

在平衡点附近, 采用线性化把非线性系统关于平衡点进行近似. 尽管这是最简单的方法, 但不能保证系统在平衡点附近外是稳定的. 因而控制器设计过程如下:

(1) 通过构建系统的雅克比矩阵和非线性模型

(17) 的输入矩阵, 并求出它们在平衡点的值, 就可以得到关于平衡点 $x^1 = 0, x^2 = 0$ 和 $h = h_{\text{long}}$ 的线性化状态空间模型为:

$$\begin{cases} \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x^1} & \frac{\partial f_1}{\partial x^2} & \frac{\partial f_1}{\partial h} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x^1} & \frac{\partial f_2}{\partial x^2} & \frac{\partial f_2}{\partial h} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x^1} & \frac{\partial f_3}{\partial x^2} & \frac{\partial f_3}{\partial h} \end{bmatrix}_{(0,0,h_{\text{long}})} = \begin{bmatrix} 1 & h_{\text{long}} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial u} \\ \frac{\partial g_2}{\partial x^1} \\ \frac{\partial g_3}{\partial x^2} \end{bmatrix}_{(0,0,h_{\text{long}})} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}h_d^2 \\ h_d \\ 0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (18)$$

(2) 利用线性化矩阵 $\mathbf{A}$ 和 $\mathbf{B}$, 就可以采用传统技术如极点配置(这里采用最长周期 h_{long}) 来设计控制规则.

4 算法性能仿真及分析

仿真设置: 设网络有 2 个控制回路, 采用 ball & beam 过程, 自适应执行通过线性化技术得到的控制规则.

对于 2 个控制回路来说, 期望的全局带宽利用率为 $B_g = 97\%$ (保留 3% 的带宽容量), 每个控制回路:

(1) 负责控制一个按式(16)建模的 ball & beam 过程;

(2) 对于不同的运行, 分配不同的临界值即 $c = 0.5, 5$;

(3) 对于每个传感器-控制器-执行器操作来说, 需要 $m_i = 0.15$ s 的信息传输时间(包括计算);

(4) 允许的采样周期在 1~5 s 之间.

为了得到与传统静态分配算法的比较结果, 设全部控制器都均等地分享可利用带宽, 也就是说, 每个控制回路都分配给 $97\%/2$ 的带宽; 对 2 个控制回路运行 100 s 的时间, 这样可以捕获全部可能情形.

4.1 控制性能仿真分析

图 2 所示为在一个闭合回路中, 采用本文提出的算法得到的控制规则在 ball & beam 过程下获得的控制性能结果. 从图 2 可见, 信号跟踪不仅依赖于控制规则的设计, 而且也依赖于临界参数 c 的取值. 对于较小的 c 值(图 2(a)), 控制规则能较好地跟踪输入信号, 从而实现控制性能的提高; 对于较大的 c

值(图 2(b)),跟踪过程中的突变就越明显,这就会造成采样周期的动态变化突变,不利于动态带宽分配,这在后面的仿真结果中还会看到.可见,独立于网络运行的控制规则会改变其运行周期,也就是输出变化依赖于控制过程,所以选择较好的控制规则直接影响 NCS 的控制性能.

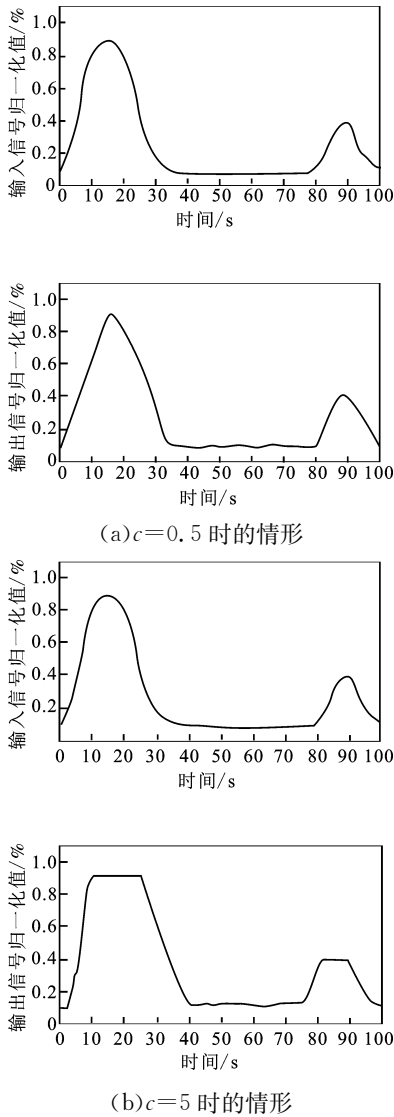


图2 采用线性化方法设计的控制器所得到的信号跟踪情况

4.2 带宽动态性分配仿真分析

图 3 所示为本文提出的控制规则所实现的动态带宽分配算法与静态带宽分配算法对于不同临界参数 c 值的带宽利用率比较.

从图 3 可以看出,动态带宽分配与控制规则紧密相关.从图 3(a)可以看到,对于较小的 c 值,由于控制性能较优,故带宽利用率更高,而且线性性更好,不会出现突变现象;而从图 3(b)可见,对于较大的 c 值,带宽利用率不但有所下降,而且在 30 s 处还出现了突

变现象;所以对于控制回路来说,控制规则的设计显得尤为重要.但不管在 c 取何种值情况下,动态带宽分配算法下的带宽利用率总是高于静态带宽分配算法下的带宽利用率.在较小 c 值情况下,动态带宽分配算法的带宽利用率比静态带宽分配算法的带宽利用率平均提高约 30%;在较大 c 值情况下,尽管有突变,但动态带宽分配算法的带宽利用率比静态带宽分配算法的带宽利用率也要平均提高约 26%.因为动态带宽分配算法考虑了整个网络的动态性变化,能够对控制回路的动态性及时作出反应和调整,从而提高整个控制回路的带宽利用率和控制性能.

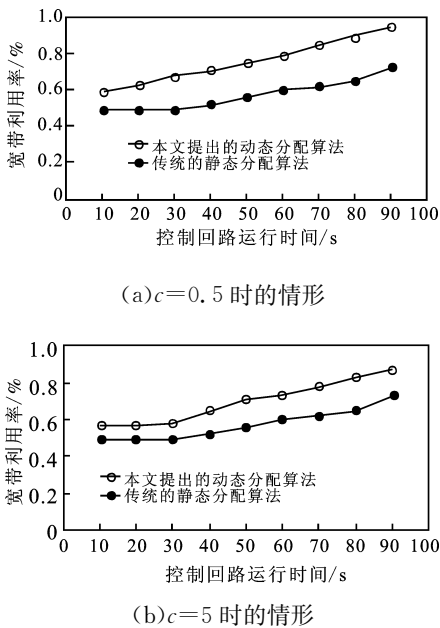


图3 动态带宽分配算法与静态带宽分配算法在不同临界参数 c 值情况下的带宽利用率比较

5 结束语

本文针对 NCS 提出了一种基于线性控制技术的动态带宽分配管理算法,算法的中心思想是决定每个分配的信息不需要集中控制,对于每个闭合回路来说,带宽分配在局部进行,这样既考虑了局部设备的动态性,也兼顾了全局网络的动态性.

仿真实验结果表明,本文提出的动态带宽分配算法相对于传统的静态分配算法,不仅可以提高带宽利用率,而且还可提高网络控制系统的整体控制性能.

参考文献:

[1] 赵海军,李敏,李明东,等.基于比例积分控制器的分布式动态带宽分配算法[J]. 计算机应用, 2015, 35(3): 615-619.

- 1714.
- [3] Kin J, Gupta M, Mangione-Smith W H. Filtering memory references to increase energy efficiency [J]. IEEE Transactions on Computers, 2000, 49(1): 1-15.
- [4] Bellas N, Hajj I N, Polychronopoulos C D, et al. Architectural and compiler techniques for energy reduction in high-performance microprocessors [J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration Systems, 2000, 8(3): 317-326.
- [5] Yang C L, Lee C H. HotSpot Cache: joint temporal and spatial locality exploitation for I-cache energy reduction [C]// Proceedings of the 2004 International Symposium on Low Power Electronics and Design. USA; California, 2004: 114-119.
- [6] Inoue K, Moshnyaga V G, Murakami K. A history-based I-cache for low-energy multimedia applications [C]// Proceedings of the 2002 International Symposium on Low Power Electronics and Design. USA, California, 2002: 148-153.
- [7] 龚帅帅, 吴晓波, 孟建熠, 等. 基于历史链接关系的指令高速缓存低功耗方法[J]. 浙江大学学报, 2011, 45(3): 467-471.
- [8] 杨名, 于立新. 基于标志压缩的低功耗指令 Cache 设计[J]. 微电子学与计算机, 2008, 25(5): 91-94.

作者简介:

李泉泉 男, (1987-), 博士, 工程师. 研究方向为嵌入式处理器体系结构、数字集成电路设计与验证.
E-mail: liquanquan2007@126.com.

(上接第 29 页)

- [2] Branicky M S, Phillips S M, Zhang W. Scheduling and feedback co-design for networked control systems [C]// IEEE Conference on Decision and Control. Las Vegas, 2002.
- [3] Ling Q, Lemmon M D. Soft real-time scheduling of networked control systems with dropouts governed by a markov chain [C]// American Control Conference. Denver, Colorado, 2003.
- [4] Park H S, Kim Y H, Kim D S, et al. A scheduling method for network-ased control systems [J]. IEEE Transactions on Control System Technology, 2002, 10(3): 318-330.
- [5] Otanez P, Moyne J, Tilbury D. Using deadbands to reduce communication in networked control systems [C]// American Control Conference. USA, Alaska, Anchorage, 2002.
- [6] 赵海军, 李敏, 崔梦天, 等. 按比例控制呼叫阻塞率的动态带宽分配算法 [J]. 西安电子科技大学学报, 2012, 39(3): 202-208.
- [7] 赵海军, 李敏, 崔梦天, 等. 采用分级策略和控制消息的一种动态带宽分配 [J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(33): 121-124.

作者简介:

马 克 男, (1964-), 硕士, 教授. 研究方向为网络通信技术. E-mail: makelucky@tom.com.

赵海军 男, (1966-), 硕士, 教授. 研究方向为网络通信技术.