

网络控制系统反馈调度器的设计

王 艳, 蔡 骅, 陈庆伟, 胡维礼

(南京理工大学自动化学院, 江苏南京 210094)

摘 要: 本文提出一种基于反馈机理的网络控制系统动态调度器的设计方法. 首先利用网络监测器在线获取当前的网络带宽和网络传输误差, 预测下一监测器采样周期内可利用的网络带宽. 然后利用网络带宽预测值和网络传输误差确定各控制回路采样周期的调节规律, 并给出反馈调度器的可调度性约束. 当数据包传输发生冲突时, 采用 MEF (Maximum Error First) 作为辅助调度策略, 确定数据包的发送优先级. 最后通过一组仿真结果验证了所设计的反馈调度器的有效性.

关键词: 网络控制系统; 调度; 反馈调度器; 网络带宽; 网络传输误差

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 02-0379-06

Feedback Scheduler Design of Networked Control Systems

WANG Yan, CAI Hua, CHEN Qing-wei, HU Wei-li

(School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract: A dynamic scheduler based on feedback control is designed to solve the problem of limited network resource sharing in networked control systems (NCSs). Current network bandwidth and network-induced transfer error is obtained by a network QoS (Quality of Service) monitor. Then the new bandwidth is computed based on the known QoS. The sample periods are dynamically changed according to the network-induced error. At the same time, MEF scheduling policy is adopted to decide the priority of data packets when there has conflicts. Finally, the simulation validates the effectiveness of the proposed co-design method.

Key words: networked control systems; schedule; feedback dynamic scheduler; network bandwidth; network-induced error

1 引言

网络控制系统 (Networked Control Systems, NCS) 中各控制单元通过网络交换信息, 以分时复用的方式共享网络资源. 对于空间分布广、复杂程度高的 NCS, 网络带宽的限制以及信息调度算法的不当会造成数据包在传输过程中发生时延、丢失和乱序, 不仅降低了信息传输的实时性和可靠性, 而且恶化了 NCS 的控制性能. NCS 中的信息调度策略通过网络用户层或者网络传输层的上层分配网络各节点的发送的优先级、发送时刻以及时间间隔, 减少数据传输冲突的发生, 提高数据的实时性和可靠性.

Branicky 等^[1]提出 RM (Rate Monotony) 调度策略, 根据各控制回路的采样周期离线分配好各节点的发送优先级; Hong^[2]等针对循环服务型 NCS 提出基于“时间窗”的调度算法, 将基本传输周期划分为多个时间段, 即“时间窗”, 控制回路产生的数据在相应的时间窗内传输. 以上两种调度算法均是静态调度算法, 考虑到其灵活性差等局限性, 动态调度算法逐渐成为研究的重点. Otanez 等^[3]提出通过给各节点设置传输死区以控制网络中的通信量; Raja 等^[4]提出优先级循环服务和动态时间窗的带宽配置策略; Kewon 等^[5]通过在 Ethernet 网的 UDP

层和 MAC 层插入“定速率业务平滑器”和“自适应业务平滑器”以控制网络中的通信量, 并保证网络诱导时延有界. Luo^[6]将 CPU 调度中经典的 EDF (Earliest Deadline First) 动态调度策略推广到网络控制系统中.

上述的调度策略均为开环调度模式, 在设计时未将网络当前的服务质量作为参考量. 然而网络中的信息流是时变和不确定的, 一方面静态调度策略难以满足信息流时变性的要求, 另一方面开环动态调度虽然可以缓解网络的负荷, 但是环境适应能力较差, 对信息流的控制具有一定的盲目性. 因此, 本文提出一种基于反馈机理的闭环调度策略, 利用获取的网络带宽和网络传输误差在线调节各控制回路的采样周期, 以控制网络中的通信量. 当信息在传输中发生冲突时, 采用 MEF 决策信息发送的优先级. 通过仿真试验研究了该闭环调度策略对网络服务质量和网络利用率的影响及其优越性.

2 NCS 反馈调度器的设计

若网络控制系统由 n 个控制回路组成, 网络仅存在于传感器与控制器之间 (如图 1 所示). 传感器根据采样周期信息采集被控输出, 通过网络传输到控制器. 控制器与被控对象之

间直接通过点对点连接. 传感器数据采用单包传输模式, 网络中各节点时钟同步.

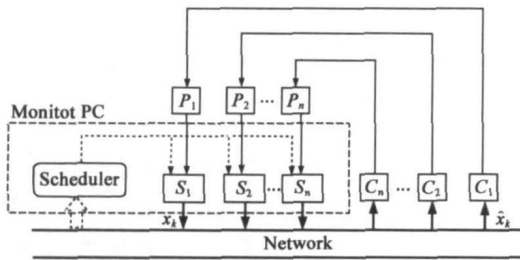


图 1 NCS 结构图

NCS 中信息调度的基本参数定义如下:

- $T_i(k)$ —第 k 次采样, 回路对应的采样周期;
- T_i^{\max} —使回路 i 保持稳定的最大采样周期;
- $C_i(k)$ —回路 i 第 k 个数据包的执行时间;
- $\hat{C}_i(k)$ —回路 i 第 k 个数据包传输执行时间的估计值;
- $U_i(k)$ —第 k 个周期内回路 i 所利用的网络带宽, $U_i(k) = \frac{C_i(k)}{T_i(k)}$;
- $U(k)$ —第 k 个周期内总的所利用网络带宽, $U(k) = \sum_{i=1}^n U_i(k)$;
- $\hat{U}_i(k)$ —第 k 个周期内回路 i 可利用网络带宽的估计值;
- $\hat{U}(k)$ —第 k 个周期内总的可利用网络带宽的估计值, $\hat{U}(k) = \sum_{i=1}^n \hat{U}_i(k)$;
- $\hat{U}(k)$ —第 k 个周期内网络带宽调节量的预估值;
- $U(k)$ —第 k 个周期内网络带宽调节量的实际值;
- $e_i(k)$ —第 k 个周期内, 回路 i 的网络传输误差, 定义为 $e_i(k) = |x_i(k) - \hat{x}_i(k)|$, $\hat{x}_i(k)$ 为 $x_i(k)$ 在控制器端的网络镜像, 网络诱导时延、丢包、乱序等引起的传感器输出与控制器输入之间的误差均归为网络传输误差内.

2.1 NCS 反馈调度器的结构

反馈调度器由网络监测器、QoS(Quality of Service)控制器和 QoS 执行器组成, 基本结构如图 2 所示. 在 QoS 执行器端设置缓存, 存储每个回路数据包的传输时间, 即 $\{C_i(1), \dots, C_i(k)\}, i = 1, \dots, n$.

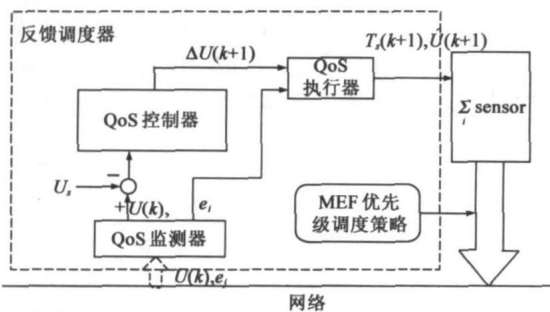


图 2 反馈调度器结构图

网络监测器以固定的时间间隔获取网络当前时刻的 QoS

状态, 包括当前所利用的网络带宽 $U(k)$ 和网络传输误差 $e_i(k)$. 当反馈信息中的网络带宽与带宽设定值之间存在偏差时, QoS 控制器根据偏差计算网络带宽的调节量, 并传送到 QoS 执行器. 此处的调节量是理论值, 它与实际的网络带宽调节量之间通常具有一定的偏差. QoS 执行器首先采用新的网络带宽调节量预测下一周期内可利用的网络带宽 $\hat{U}(k+1)$, 然后根据网络带宽估计值和反馈信息中的网络传输误差计算新的采样周期以满足网络负荷动态变化的要求. 然而, 即便如此, 信息在传输过程中仍有可能发生冲突, 如某一时刻两个或两个以上的回路同时采样并请求发送数据, 此时需要辅助的优先级调度策略以确定各数据包发送的优先级. 由于采样周期的调节考虑了网络传输误差, 为了与采样周期调节算法保持一致, 本文采用 MEF 调度作为辅助的优先级调度策略. 当信息在传输过程中未发生冲突时, MEF 调度器处于休眠状态, 一旦有冲突发生, 将立即激活 MEF 调度器.

2.2 NCS 反馈调度器的数学模型

网络带宽的参考值 U_s 根据具体的应用背景而定, 反馈输入为当前所利用的网络带宽 $U(k)$.

2.2.1 可利用网络带宽的预测

记 QoS 控制器输入为 $D_u(k)$, QoS 控制器采用比例控制策略, 则有:

$$D_u(k) = U_s - U(k)$$

$$\hat{U}(k+1) = K_u D_u(k) \tag{1}$$

式中, K_u 为比例调节器增益, $\hat{U}(k+1)$ 为可利用网络带宽调节量的估计值.

QoS 执行器根据 $\hat{U}(k+1)$ 预估下一监测器周期内可利用的网络带宽:

$$\hat{U}(k+1) = U(k) + \hat{U}(k+1) \tag{2}$$

2.2.2 网络带宽的配置

网络传输误差反映数据包在网络中传输的实时性和可靠性, 是网络运行性能的重要衡量指标. 带宽分配算法根据网络传输误差和可利用网络带宽的估计值, 对各回路所占用的带宽进行动态的调整. 针对当前时刻网络传输误差的不同情况, 带宽分配算法设计如下:

(1) 当前时刻所有回路的网络传输误差均为 0, 即 $\sum_{i=1}^n |e_i(k)| = 0$

此时各控制回路对网络资源的需求是均等的, 因此可将预估的可利用网络带宽平均分配给各回路,

$$\hat{U}_i(k+1) = \frac{1}{n} \hat{U}(k+1)$$

(2) 当前时刻所有控制回路的 $e_i(k)$ 均不为 0

此时各回路对网络资源的需求是不同的, $|e_i(k)|$ 越大的回路对网络资源的需求就越迫切. 因此, 在这种情形下网络带宽配置的原则是: $e_i(k)$ 越大的回路分配到的网络资源就越多, 将预估的可利用网络带宽按比例进行分配,

$$\hat{U}_i(k+1) = \frac{|e_i(k)|}{\sum_{i=1}^n |e_i(k)|} \hat{U}(k+1)$$

(3) 当前时刻部分回路的网络传输误差为 0, 其余回路的网络传输误差不为 0

考虑到网络传输误差为 0 的回路对网络资源的需求相对较低, 在保证稳定的前提下, 尽量地降低采样频率, 此时可以选择 T_i^{\max} 为回路 i 的采样周期. 若 q 表示网络传输误差为零的回路的数目, z_j 表示网络传输误差为零的回路, 即 $e_{z_j} = 0, z_j \in \{1, 2, \dots, n\}, j = 1, \dots, q$. 由网络带宽的定义有

$$\bar{\nu}_{z_j}(k+1) = \frac{C_{z_j}(k+1)}{T_{z_j}^{\max}}$$

而对于 $e_i(k) \neq 0$ 的回路, 记为 $e_s, s \in \{1, 2, \dots, n\}, s = 1, \dots, n - q$, 按照 $e_i(k)$ 越大分配网络资源越多的原则, 按下式分配网络带宽, 即

$$\bar{\nu}_s(k+1) = \frac{\sum_{i=1}^q |e_i(k)|}{\sum_{i=1}^n |e_i(k)|} (\bar{\nu}(k+1) - \sum_{j=1}^q \bar{\nu}_{z_j}(k+1))$$

由网络带宽的定义, 各控制回路的采样周期为

$$T_i(k+1) = \frac{C_i(k+1)}{\bar{\nu}_i(k+1)}, i = 1, \dots, n \quad (3)$$

其中, $C_i(k+1)$ 由以下方法计算.

网络控制系统调度策略的研究中通常假设数据包在网络中的执行时间是固定的, 实际上, 它是随网络负荷和传输路径的选择而随机变化的, 根据已经得到的前 k 个时刻的执行时间 $\{C_i(1), \dots, C_i(k)\}, i = 1, \dots, n$, 构造执行时间的自回归 (Autoregressive, 简称 AR) 模型. 采用如下 AR(m) 模型^[7]

$$C_i(k+1) = a_i^1 C_i(k-1) + \dots + a_i^m C_i(k-m+1) + \varepsilon_i(k+1)$$

其中, a_i^1, \dots, a_i^m 是未知量, ε_i 为残差, 假设 ε_i 是均值为零, 方差未知的白噪声.

记 $\bar{C}_i^T(k) = [C_i(k) \dots C_i(k-m+1)]$, $A_i^T = [a_i^1 \dots a_i^m]$, 则 AR(m) 模型可表示为

$$C_i(k+1) = \bar{C}_i^T(k) A_i + \varepsilon_i(k+1)$$

记 \hat{A}_i 为 A_i 的估计, 使得残差平方和 $J_i = \sum_{j=1}^{k-m} \bar{C}_i^T(j) A_i^T (0 < \lambda < 1$ 为遗忘因子, 其大小反映 J_i 与新数据的关联程度) 最小的指数加权 RLS 参数估值公式为^[7]:

$$\hat{A}_i(k) = \hat{A}_i(k-1) + \frac{P_i(k-1) \bar{C}_i(k) [C_i(k) - \bar{C}_i^T(k) \hat{A}_i(k-1)]}{\lambda + \bar{C}_i^T(k) P_i(k-1) \bar{C}_i(k)}$$

$$P_i(k) = \frac{1}{\lambda} \left\{ P_i(k-1) - \frac{P_i(k-1) \bar{C}_i(k) [C_i(k) - \bar{C}_i^T(k) \hat{A}_i(k-1)]}{\lambda + \bar{C}_i^T(k) P_i(k-1) \bar{C}_i(k)} \right\}$$

$$\hat{A}_i(0) = 0, P(0) = I_m, \lambda > 0$$

利用估计的 AR(m) 模型预估 $k+1$ 时刻数据包的执行时间 $\hat{C}_i(k+1)$,

$$\hat{C}_i(k+1) = \bar{C}_i^T(k) \hat{A}_i$$

2.2.3 反馈调度器的闭环系统模型

在利用上述算法计算采样周期时, 执行时间和带宽调节量均采用估计值, 从而网络带宽的预估调节量与实际调节量之间存在偏差. 考虑实际调节量与预估调节量之间的比值 $\bar{g}(k) = \frac{U(k)}{\bar{\nu}(k)}$ 是时变的, 假设其在区间 $(0, \bar{g}_{\max}]$ 内变化和取

值, 若 $\frac{U(k+1)}{\bar{\nu}(k+1)} = \bar{g}(k+1)$, 则实际网络带宽方程为:

$$U(k+1) = U(k) + \bar{g}(k+1) \bar{\nu}(k+1) \quad (4)$$

将式(1)代入式(4), 可得反馈调度器的闭环系统方程为:

$$D_u(k+1) = (1 - \bar{g}(k+1) K_u) D_u(k) \quad (5)$$

记 $a(k+1) = (1 - \bar{g}(k+1) K_u)$, 则

$$D_u(k+1) = a(k+1) D_u(k) \quad (6)$$

3 NCS 反馈调度器的可调度性

定理 1(可调度性) 对于所研究的网络控制系统和式(1)所示的 QoS 控制器, 若 QoS 控制器的比例增益 K_u 满足

$$0 < K_u < \frac{2}{g_{\max}} \quad (7)$$

则式(6)所描述的反馈调度系统是指收敛的, 网络带宽能够指数收敛到期望值, 此时称 NCS 在反馈调度器下可调度.

证明 由反馈调度系统方程式(6)递推可得,

$$D_u(k) = a(k) a(k-1) \dots a(1) D_u(0)$$

由矩阵理论,

$$|D_u(k)| = |a(k) a(k-1) \dots a(0) D_u(0)| = |a(k-1)| \dots |a(0)| |D_u(0)| \quad (8)$$

由定理中的条件式(7)和 $\bar{g}(k) \in [0, \bar{g}_{\max}]$, 有

$$|1 - \bar{g}_{\max} K_u| |a(k)| < 1 \quad (9)$$

由式(9)可知, 对于任意的 k , 总存在一个标量 $\rho, 0 < \rho < 1$, 使得 $|a(k)| < \rho$, 代入式(8)有

$$|D_u(k)| \leq \rho^k |D_u(0)| < e^{-(k/2) \ln \rho} |D_u(0)|$$

因此, 在定理条件下, 可以证得反馈调度系统是指收敛的, 即在反馈调度器下网络带宽能够指数收敛到期望值. 定理得证.

4 仿真

若考虑如下网络控制系统如图 3, 两个相同的 DC 马达通过 CAN 网分别与两个 PD 控制器相连, 输入信号 r 为方波信号. 假设控制器结构相同, 并且控制器和执行器均为事件驱动.

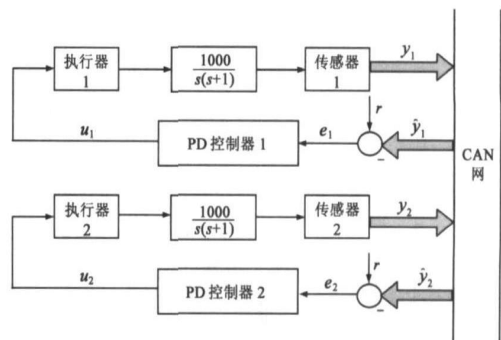


图 3 仿真示例 NCS 结构图

控制器: $e(k) = r(k) - y(k)$; $P(k) = K e(k)$; $D(k) = K_d (e(k-1) - e(k))$; $u(k) = P(k) + D(k)$

其中, $K=1.5, K_d=5.25$

参数取值: 在可调度性约束下, 选取反馈调度器比例增益

$K_u = 0.12$; 使回路保持稳定的最大采样周期为 $T_1^{\max} = T_2^{\max} = 10\text{ms}$; 两个控制任务的时限与最大采样周期相同, 仿真时间为 6s.

网络参数: CAN 网, 速率 $B = 160\text{kb/s}$, 网络带宽参考值 $U_s = 35\%$.

利用 Truetime 仿真软件对 NCS 进行仿真研究. 若两个对象的初始采样周期分别为 $T_1 = 8\text{ms}$, $T_2 = 10\text{ms}$, 则在反馈调度器下, 网络带宽实际值的变化曲线如图 4 所示. 并且考虑到采样周期变化时间比较频繁, 变化的时间间隔比较短, 为了能够清晰地反映采样周期的变化, 截取时间段 $[0.2\text{s}, 2\text{s}]$ 之间采样周期的变化曲线, 如图 5 和图 6.

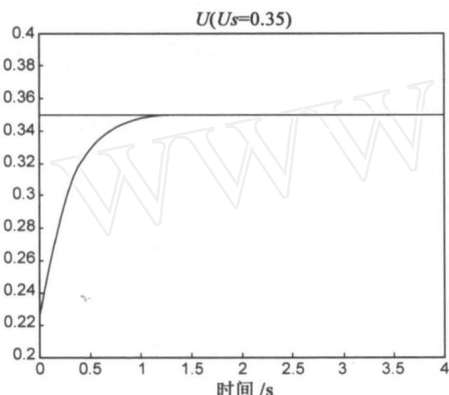


图 4 反馈调度器下网络带宽实际值的变化曲线

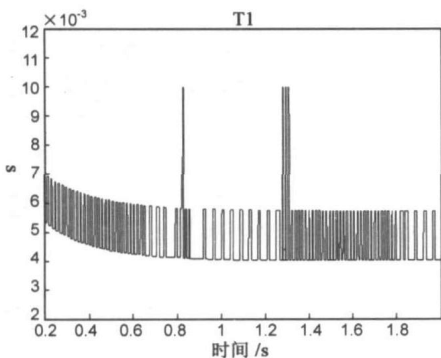


图 5 反馈调度器下对象 1 的采样周期变化曲线

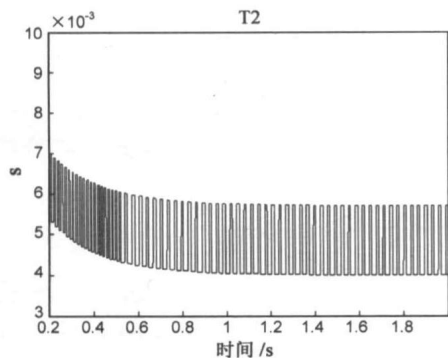


图 6 反馈调度器下对象 2 的采样周期变化曲线

图 4 表明两个任务实际所利用的网络带宽在经过 2s 后能够始终保持在网络带宽参考值 $U_s = 35\%$, 由可调度性定

义, 算例中的两个任务在反馈调度器下是可调度的. 图 5 和图 6 与图 4 相对应, 反映了 T_1, T_2 在运行过程中的动态变化规律, T_1 的变化范围为 $4\text{ms} \sim 10\text{ms}$, 图 5 中突出的四处峰值发生在控制回路 1 的网络传输误差为零的时刻. T_2 的变化范围为 $4\text{ms} \sim 7\text{ms}$.

下面通过对比说明反馈调度器的优越性, 讨论三种 NCS 的工作形式:

形式 1 假设两个对象的采样周期分别为 $T_1 = 8\text{ms}$, $T_2 = 10\text{ms}$, 传感器等间隔采样, 采用开环动态 EDF (Earliest Deadline First) 策略调度两个控制任务;

形式 2 假设两个对象的采样周期分别为 $T_1 = 5\text{ms}$, $T_2 = 7\text{ms}$, 传感器等间隔采样, 采用开环动态 EDF (Earliest Deadline First) 策略调度两个控制任务;

形式 3 假设两个对象的初始采样周期分别为 $T_1 = 8\text{ms}$, $T_2 = 10\text{ms}$, 采用反馈调度器调度两个控制任务.

说明: 形式 1 和形式 2 采样周期的选择考虑到 T_1, T_2 在反馈调度器下的变化范围, 选取了两种典型的情形. 形式 1 的采样周期是反馈调度器的初始采样周期值; 形式 2 选取使实际利用的网络带宽为左右的采样周期值.

首先比较三种形式下系统的控制性能. 不同工作形式下, 系统跟踪方波信号的曲线如图 7 ~ 图 12 所示.

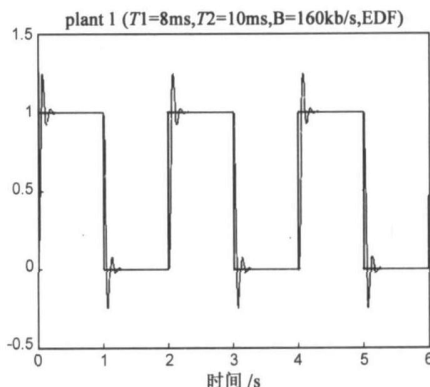


图 7 形式 1 下对象 1 的输出

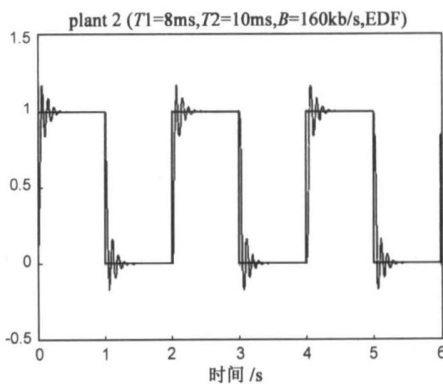


图 8 形式 1 下对象 2 的输出

图 7、8 表明在工作形式 1 下, 两个任务均能稳定, 受采样周期取值的影响, 对象 2 的性能比对象 1 的性能略差一些. 图 9、10 表明在形式 2 下, 对象 1 虽然能够稳定, 但是过渡过程比较长, 超调量大, 而对象 2 发散, 这是由于此时采样周期比较

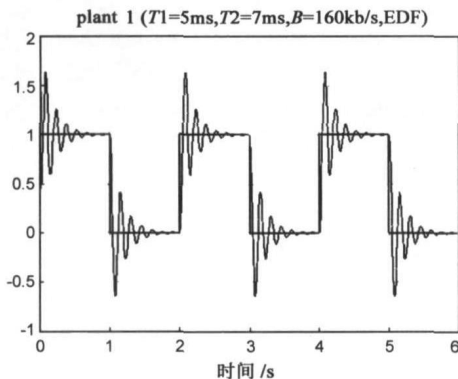


图 9 形式 2 下对象 1 的输出

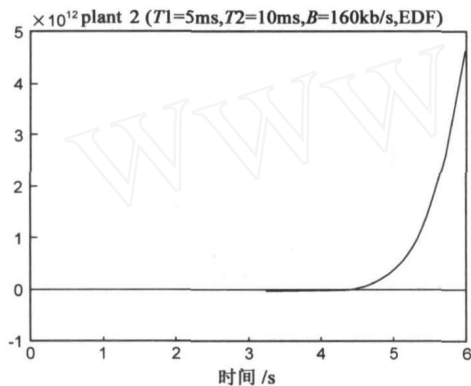


图 10 形式 2 下对象 2 的输出

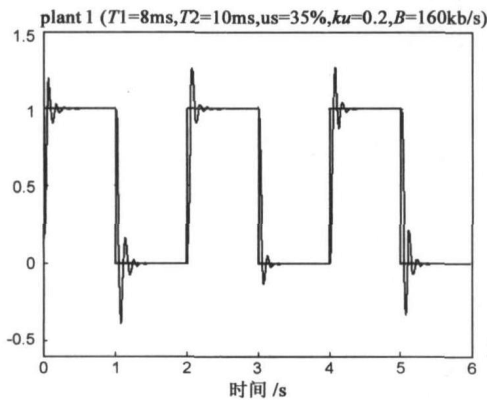


图 11 形式 3 下对象 1 的输出

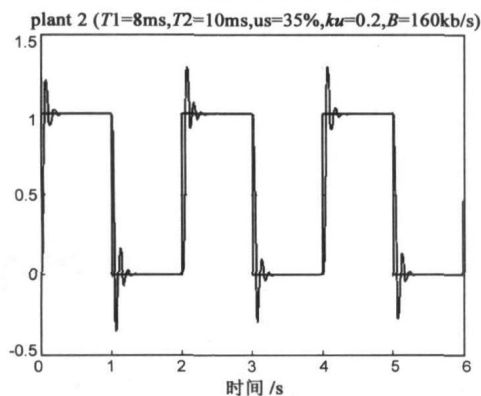


图 12 形式 3 下对象 2 的输出

小,网络负荷重,造成时延、丢包等问题加剧而引起的。图 11、

12 反映了在形式 3 下,对象 1 和对象 2 的均能稳定,两个控制回路的性能相当,并且优于其它两种形式下控制性能。因此,从 NCS 总体结构的角度看,反馈调度器下 NCS 的控制性能优越于开环 EDF 调度。

下面,分析三种形式下的网络调度性能。图 13 反映了三种形式下平均网络传输误差;图 14 为三种形式下实际所利用的网络带宽值。

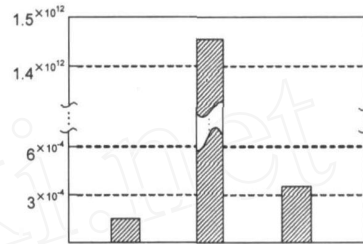


图 13 三种形式下的平均网络传输误差

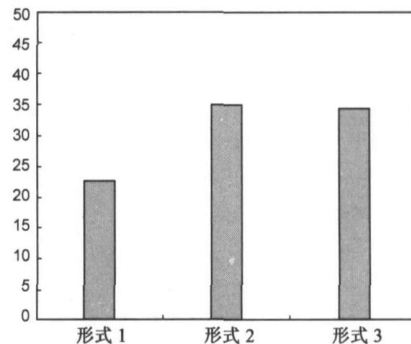


图 14 三种形式下平均利用的网络带宽

结合图 13 和图 14 分析,在形式 1 下,实际所利用的网络带宽最低,为 22.5%,网络负荷较轻,网络传输误差在该形式下最小,资源未得到充分的利用;形式 2 下实际所利用的网络带宽为 34.7%,与形式 3 下平均所利用的网络带宽 34.1%接近,但是两种形式下的网络传输误差相差非常大,在形式 2 下,网络传输误差非常大,而在反馈调度器下网络诱导误差却很小。形式 1 与形式 3 的网络传输误差相差很小,而所利用的网络带宽却相差了 11.6%。因此,通过三者的比较,表明反馈调度器既可以保证网络资源的充分利用,又可以控制网络传输误差,保证网络传输的可靠性和实时性。总的来说,三种形式下控制性能和调度性能的对比,充分说明文中提出的反馈调度器可以在充分利用网络资源的同时,提高网络传输的可靠性和实时性,保证网络控制系统的控制性能。它比传统的 EDF 开环动态调度具有更高的灵活性和自适应性,有利于提高 NCS 的总体性能。

5 小结

本文提出一种基于反馈机理的网络控制系统动态调度策略。方法利用反馈获得网络当前时刻的网络服务质量 QoS—网络诱导误差和网络当前利用的带宽预估下一周期的网络带宽,根据预估的网络带宽和网络诱导误差确定 NCS 中各回路新的采样周期。利用 TrueTime 仿真软件对方法进行了仿真,并且对反馈调度器与开环动态调度下控制性能和网络调度性能

进行比较,结果表明反馈调度器下系统比开环动态调度具有更好的控制性能和网络调度性能,既可以提高网络资源的利用率,又可以保证传输的可靠性和实时性。因此,反馈调度器灵活性和自适应能力更高,能够提高 NCS 的总体性能,具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] M S Branicky, S M Philips, Wei Zhang. Scheduling and feedback co-design for networked control systems [A]. IEEE Conference on Decision and Control [C]. Las Vegas: IEEE Press, 2002. 1211 - 1217.
- [2] Yong Ho Kim, Hong Seong Park, Wook Hyun Kwon. A scheduling method for network-based control systems [A]. American Control Conference [C]. Philadelphia, Pennsylvania: IEEE Press, 1998. 718 - 722.
- [3] P Otanez, J Moyne, D Tilbury. Using Deadbands to Reduce Communication in Networked Control Systems [A]. American Control Conference [C]. Anchorage AK: IEEE Press, 2002. 3015 - 3020.
- [4] P Raja, G Ulloa. Priority polling and dynamic time-window mechanisms in a multicycle fieldbus [A]. Proc Compeuro [C]. New York: IEEE Press, 1993. 452 - 460.
- [5] Kewon S K, Shin K G, Zheng Z. Statistical real-time communication over ethernet for manufacturing automation systems [A]. Proceeding of the 15th IEEE Real-Time Technology and Applications Symposium [C]. Vancouver, British Columbia, Canada: IEEE Press, 1999. 192 - 202.
- [6] Luo Lieheng, Zhou Chuan, Cai Hua, Chen Qingwei, Hu Weili. Scheduling and control co-design in Networked Control Systems [A]. Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation [C]. Hang Zhou, China: IEEE Press, 2004. 1088 - 1091.
- [7] 邓自立. 自校正滤波理论及其应用——现代事件序列分析方法 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2003. 22 - 44.

作者简介:



王艳女, 1978 年生于江苏盐城, 博士研究生。研究方向为网络控制系统研究。

E-mail: yanyan841@163.com



胡维礼 男, 1941 年生于江苏盐城, 南京理工大学自动化学院教授, 博士生导师, 江苏省自动化学会理事。研究方向为智能控制、网络控制系统、混合系统。