

网络化运动控制系统的动态带宽分配策略

赵维佳^{1,2}, 李 迪¹

(1. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640; 2. 东莞理工学院, 广东 东莞 523808)

摘要: 针对网络化运动控制系统带宽限制和静态分配无法有效利用带宽资源的问题, 提出了基于控制性能指标和当前网络状态的动态带宽分配策略. 在保证各控制环最小可用带宽的前提下, 根据定义的代价函数优化分配剩余带宽资源, 实现带宽使用的最小化和系统性能的最大化. 从算法实现的角度, 按平衡状态、扰动状态和最大需求状态给出了3种典型的带宽分配方案, 仿真结果证明了方案的有效性.

关键词: 网络化运动控制系统; 带宽分配; 动态优化

中图分类号: TP302.7 **文献标识码:** A

Dynamic bandwidth-allocation for networked motion control systems

ZHAO Wei-quan^{1,2}, LI Di¹

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China;
2. Dongguan University of Technology, Dongguan Guangdong 523808, China)

Abstract: To improve the static allocation of the limited bandwidth in networked motion control systems, we propose a dynamic bandwidth-allocation method based on the control-performance and the current network status. Under the constraint of the minimal available bandwidth of all loops, the residual bandwidth is optimally allocated by the user-defined cost function. This maximizes the system performance by minimal bandwidth consumption. Three typical bandwidth allocation schemes are given respectively for the equilibrium status, the disturbed status and the maximal-demand status. Simulation results validate the effectiveness of the proposed dynamic bandwidth allocation algorithm.

Key words: networked motion control systems; bandwidth allocation; dynamic; optimization

1 引言(Introduction)

作为一类特殊的网络控制系统(NCS), 网络化运动控制系统(NMCS)是构建在控制器与多轴电机驱动器之间, 能够实时、同步地传送运动控制指令和接收运动状态的控制系统. NMCS已经广泛应用于大范围分布式系统(如工厂或车间的自动化生产线、过程控制等)和小型装备系统(高性能汽车、飞机、机器人和各类生产设备等)中. 为满足系统控制性能, 通信的角度要求网络必须提供确定性的实时通信, 从而使实时网络的速率受到一定限制, 尽管目前出现了有前景用于运动控制的总线(如Sercos, Synqnet和Powerlink等), 但由于大部分是国外产品, 高成本和相对的技术封闭限制了其广泛使用, 因此实际应用中所使用的网络都受到带宽的限制. 另外, 实际工业环境中, 为适应柔性生产和敏捷制造的需要, 系统结构可能需要改变、负载时常

出现波动. 网络带宽受限和负载波动的最直接后果就是可用资源(处理器和网络)的不确定, 这种状态上的不确定性会引起不可预测的网络时延、数据丢包及其抖动, 最终影响系统控制性能QoC(quality of control), 严重时会导致系统失稳. 所以NMCS工作于带宽受限和负载波动环境时, 系统的性能不仅取决于控制算法的设计, 而且与受限资源(处理器时间和网络带宽)的调度密切相关.

减小采样周期可以改善网络化运动控制系统的性能, 但是过小的采样周期意味着需要更多的网络带宽来传输传感器数据和控制数据, 从而增加了网络通信量, 如果超过了最大的网络可用带宽, 可能会影响控制环性能甚至危及系统稳定性. 所以在网络化运动控制系统设计和分析中, 应该将网络性能QoS和控制性能QoC有机结合, 即采用调度与控制协同设计, 真实反映系统整体性能需求.

传统的静态带宽分配方法中,资源分配在系统运行前确定,只能保证平均控制性能.而多数情况下,并不是所有的预分配带宽都能用于改善系统性能,无法按需分配带宽资源来提供最佳控制性能.一些学者提出了动态带宽分配策略,典型的如LEF(large error first)^[1]和MEF-TOD(maximum-error-first with try-once-discard)^[2],LEF算法通过来自应用的反馈信息为各节点分配带宽,但未考虑各闭环在整个系统中的相对重要性,并且没有提及具体的算法实现;MEF-TOD算法保证具有最大误差的控制环获准访问网络.但是,二者都没有考虑具体的通信协议,而且两个算法用于现有网络应用中都需要消耗过多的时间和资源用于系统更新.

本文提出基于系统当前状态的动态网络带宽优化分配算法,通过调度与控制的协同设计实现一个网络资源调度器,能够根据网络QoS和控制QoC自适应更改控制参数,满足系统动态性能需求.其中,第2部分阐述了动态带宽分配的基本思想和可实现性;第3部分提出了算法的具体实现方法和实现步骤;最后对算法中的实现问题进行了说明和总结.

2 动态带宽分配的基本思想(Basic idea of dynamic bandwidth allocation)

网络控制系统中QoS主要的评价指标包括:时延、丢包、网络效率和网络利用率等,这些指标可以用来确定网络传输能力和为确定如采样周期等控制参数提供必要信息.网络效率是指用于传输信息的时间占整个传输时间的比率,包括排队时间、阻塞时间等^[3].如果网络效率接近1,表示整个网络时延等于传输时延;如果网络效率接近0,表示大部分时延是由信息竞争或冲突引起的.网络利用率定义为网络传输时间和整个系统运行时间的比率.如果网络利用率接近0,表示有可用网络带宽可用于其他节点;如果网络利用率接近1,表示网络趋于饱和,无法增加控制节点采样率或添加网络节点.用于评价控制性能QoC的指标主要有:相位裕度、上升时间、稳态误差、误差绝对值积分IAE、时间乘以误差绝对值积分ITAE等.

传统的静态带宽分配方法主要通过持续占用可用带宽来实现,只能保证平均控制性能.从控制的观点看,静态带宽分配方法因为在系统建立时分配策略就已经确定,属于开环方法,无法实现运行时的调整.然而,在某些情况下由于网络带宽受限,并不是所有的控制环都能够同时获得足够带宽来提供预期的最好控制性能.因为预先分配的带宽可能得不到充分利用,所以当应用类型或网络条件发生变化时,静态技术无法适应实际情况,很难实现网

络资源的高效利用.理想情况是将这些未充分利用的带宽资源提供给其他节点使用以提高系统整体性能.基本思路就是基于各控制环性能信息,采取合适的调度策略分配有限资源,即闭环方法.如果能够设计一个网络调度器,它能够根据网络QoS变化(时延、丢包)适当调整采样周期,那么控制环性能QoC一定能够改善.文献[4]初步提出了该设计思路,通过设计网络中间件获取网络QoS,并根据当前网络的QoS(如网络的吞吐率,网络时延)状况决定控制系统采样周期,同时通过调节控制器的增益以获得可能的最优系统性能.然而,该方法中QoS的调整需要人工进行,费时耗力,影响了算法的实际效果.

采样周期可以由控制环分配的可用带宽求得

$$h_i = c_i / b_i, 0 \leq b_i \leq 1. \quad (1)$$

其中: c_i 表示控制环在最好情况下完成控制操作需要的时间,仅包括如传感器采样 t_s 、控制器计算 t_c 和触发器触发 t_a 所需要的数据处理时间,还有数据包由传感器到控制器 t_{sc} 和由控制器到触发器 t_{ca} 的传输时间.可用带宽 b_i 表明分配给该控制环的网络带宽比例,定义为用于传输数据的总时间占整个运行时间(包括信息传输时间额定值和所有设备的信息周期的总和)的比率.如果实时网络对带宽的分配可以保证数据传输时间在一定范围内为常量;传输死限等于采样周期(即信息经传感器、控制器和触发器的传输时间在采样周期内完成),那么带宽的变化和采样周期的变化可以建立起直接联系.如前所述,如果网络利用接近0,则表示有可用带宽可用于其他功能和控制目的;如果网络利用接近1,网络趋于饱和,很难增加控制设备的采样周期或增加网络节点,此时就需要重新分配网络带宽来调整通信负载或重新设计网络来满足要求.

假定来自于控制器节点的周期性传感器数据被打包成相同的位长度 L_i .如果网络数据传输率表示为 R ,则理想情况下的单向传输时间为

$$T_{i,t} = \frac{L_i}{R}. \quad (2)$$

令 $T_{i,p}$ 为数据处理时间(理想情况下传感器采样、触发器触发和控制器计算控制数据的数据处理时间).数据传输时间可以表示为

$$c_i = 2T_{i,t} + T_{i,p}. \quad (3)$$

对每个已知控制环, $T_{i,t}$ 和 $T_{i,p}$ 在理想情况下可以测量和计算得到.因此,式(3)中,可以假定 c_i 为常量,那么由式(1)可得,采样周期 h_i 越小,带宽 b_i 越大.由式(1)可知:采样频率越高就需要越多的带宽来传输更多的数据.在此基础上,可以考虑式(1)的几种典

型情况:

1) 当采样周期与传输时间相等, 即 $h_i = c_i$ 时, 由 $b_i = c_i/h_i$ 得 $b_i = 1$, 意味着 100% 的网络带宽被控制环 i 使用, 其他控制环不能使用网络, 这种情况就是单个轴回路的 NMCS;

2) 当采样周期等于最大允许网络时延, 即 $h_i = D_i$, 其中 D_i 表示控制环的最大允许网络时延(maximum allowable delay bound), 则各轴控制环相应的最小可用网络带宽可以表示为

$$(b_i)_{\min} = c_i/D_i. \quad (4)$$

3) 设系统中存在 N 个轴控制闭环, 在保证除了控制环 i 的所有其他控制闭环取得最小可用网络带宽的条件下, 为了使控制环 i 取得最好的控制性能, 可以将剩余的最大可用网络带宽指定给它, 即

$$(b_i)_{\max} = 1 - \sum_{j \neq i}^N (b_j)_{\min}. \quad (5)$$

然而在多数情况下, 由于网络带宽限制等因素, 很难保证所有系统都能同时获得足够带宽传输数据和在最高采样频率下执行. 如何通过优化带宽分配来获得每个控制闭环最优的控制性能, 从而优化系统整体控制性能 QoC 是本文需要考虑的问题. 以文献[5]的结论为基础, 文献[6]得出了动态带宽分配的基本原理: 当控制闭环处于平衡状态时, 指定的执行率(采样周期)可能达不到, 也就是说, 分配的带宽可能被浪费. 为节省带宽使用并提高其他控制环带宽利用率, 可以减小该控制环执行率; 另一方面, 当控制闭环受到扰动影响, 通过将其其他处于平衡态的控制环没有充分利用的带宽用于该控制环来使系统快速从扰动状态恢复并改善系统性能, 系统结构图如图 1 所示. 这种网络带宽动态分配的策略在整个网络带宽资源有限时对 NMCS 整体性能改善尤为重要.

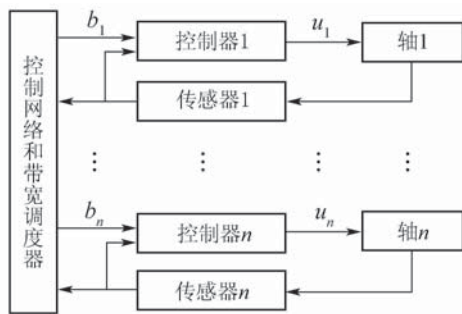


图 1 具有带宽调度器的 NMCS 结构图

Fig. 1 NMCS structure with bandwidth scheduler

文献[6]指出反馈控制行为直接依赖于控制环时延(定义为传感器节点采样时刻和触发器触发控制命令的时间间隔). 控制环的最大允许时延上

界 MADB 可以由传统的稳定性判据和性能分析等方法获得^[7]. 为了保证系统稳定和控制行为, 可以使用两种方法来决定最大允许控制环时延, 即相位裕度 ϕ 和闭环带宽 ω_{bw} . 为保证可接受的控制性能如响应快速性和平滑性, 可以使用选择采样频率的经验法则来估计控制环的 MADB, D_i 可以估计如下^[9,10]:

$$D_i \leq T_{i,bw}/20, \quad (6)$$

其中

$$T_{i,bw} = 2\pi/\omega_{i,bw}, \quad (7)$$

$\omega_{i,bw}$ 为控制环闭环带宽.

MADB 也可以通过系统上升时间估计:

$$D_i \leq t_{i,r}/4, \quad (8)$$

其中 $t_{i,r}$ 表示闭环系统上升时间. 用 e_k^i 表示控制环 i 的误差, 即在 k 时刻距离平衡点状态的距离, 采用该回路 n 维可观测向量 $x_i = (x_i^1, \dots, x_i^n)^T$ 在向量空间 $\mathbb{R}^n$ 上的欧几里德(Eucilidean)范数, 可以表示为

$$e_i = \|x_i(k)\|. \quad (9)$$

对控制环 i , 可以定义一个联系控制性能(如误差)和可用带宽的性能指标:

$$e_i = f(b_i). \quad (10)$$

如前所述, 带宽分配越少控制性能越差(误差越大), 因此, 为研究方便, 可以参考文献[7]提及的线性方法, 近似用线性关系表示:

$$e_i = f(b_i) \approx \frac{\beta_i}{b_i}, \quad (11)$$

其中 β_i 特定于每个轴控制环, 可以在 NMCS 实现前, 通过指定较宽范围的采样率和带宽来估计各控制环性能确定或根据各控制环紧急程度预估得到.

3 动态带宽分配算法(Dynamic bandwidth allocation algorithm)

假设在 t 时刻, 第 i 个轴的状态矢量可以表示为

$$x_i(t) = [x_i^1(t) \ \dots \ x_i^n(t)]^T,$$

$u_i(t)$ 为各轴的控制输入, 轴 i 的线性时不变连续时间状态方程可以描述为:

$$\dot{x}_i(t) = A_i x_i(t) + B_i u_i(t), \quad (12)$$

$$y_i(t) = C_i x_i(t) + D_i u_i(t), t \in \mathbb{R}^+. \quad (13)$$

其中 A_i, B_i, C_i, D_i 为系数矩阵. 如果控制采用的控制率表示为 $L_i(h_i)$, $u_i(t)$ 以离散形式给出, 则系统状态空间的离散化表示为

$$x_{i,n+1} = \Phi_i(h_i)x_{i,n} + \Gamma_i(h_i)L_i(h_i)x_{i,n}, \quad (14)$$

动态带宽分配问题可以描述为: 如何按照控制性能和可用网络带宽, 动态为各控制环指定带宽来优化整个系统控制性能. 很明显, 要实现带宽的动态调整, 需要控制器支持变采样周期, 控制器的采样周期应该满足 $h_i \in [h_i^{\min}, \dots, h_i^{\max}]$. 在系统级, 每个控制环可以通过带宽 b_i 、性能指标 p_i 和轴误差 e_i 反映, 即 $c_i = \{b_i, p_i, e_i\}$, 这样问题可以描述为: 给定 n 个轴的控制闭环 $\{c_1, \dots, c_n\}$, 确定相应网络带宽 $\{b_1, \dots, b_n\}$, 使各控制闭环可调度且最终通过调整采样周期, 实现对系统性能的优化. 带宽分配的基本约束条件是 $\sum_{i=1}^N b_i \leq 1$, 即整个带宽利用不能超过网络整体能力, 则当前的剩余可用网络带宽为

$$b_a = 1 - \sum_{i=1}^N b_i, \quad (15)$$

如果 $\sum_{i=1}^N b_i \geq 1$, NMCS 在当前网络情况下不可调度, 需要选择其他网络或减少控制环的数量.

如果采用传统的开环方法, 为每个控制环分配固定的带宽, 可能会由于每个控制环有其自己的控制和通信需求, 某些控制环在平衡状态时可能根本不需要固定带宽, 而产生带宽资源浪费. 为了给最多的控制环提供服务并满足其 QoC 需求和取得带宽资源的高利用率, 每个控制环分配的带宽需要最小化. 因此定义下列代价函数:

$$f(p_i(b_i, e_i))_i = a_{i,1}e_i + a_{i,2}b_i, \quad (16)$$

其中 $a_{i,1}$ 和 $a_{i,2}$ 是控制环 i 的权系数, 分别反映了误差和带宽, 取值范围为 $(0,1]$, 两个系数相加之和不能超过 1. 优化带宽分配的目标是找到合适的带宽利用 b_i 来最小化网络带宽使用和最大化系统性能(误差最小). 当考虑所有控制环时, 整个系统的优化函数 $f(p_i(b_i, e_i))$ 可以表示为

$$f(p_i(b_i, e_i)) = \sum_{i=1}^N f(p_i(b_i, e_i))_i = \sum_{i=1}^N (a_{i,1}e_i + a_{i,2}b_i). \quad (17)$$

因为所有的控制环假定为独立的, 如果每个控制环的 $f(p_i(b_i, e_i))_i$ 都是最小, 那么整个 $f(p_i(b_i, e_i))$ 一定最小. 因此每个控制环的优化带宽分配可以使采用上式代价函数的 NMCS 取得整体控制性能的优化. 存在 3 种有典型的带宽分配方案需要考虑:

1) 控制环处于平衡状态时(即 $e_i = 0$)的控制环优化带宽分配方案:

$$(b_i)_{\text{opt}} = (b_i)_{\min} = c_i/D_i, \quad (18)$$

此处 $(b_i)_{\text{opt}}$ 表示控制环 i 的优化带宽利用. 将 $D_i \leq$

$T_{i,\text{bw}}/20$ 和 $D_i \leq t_{i,r}/4$ 带入上式得: $(b_i)_{\text{opt}} = 20c_i/T_{i,\text{bw}}$; $(b_i)_{\min} = 4c_i/t_{i,r}$, 相应的优化采样周期为

$$(h_i)_{\text{opt}} = T_{i,\text{bw}}/20, \quad (19)$$

或者

$$(h_i)_{\text{opt}} = t_{i,r}/4. \quad (20)$$

2) 控制环经历扰动(即 $e_i \neq 0$)条件下的带宽分配: 将式(11)和(13)联立, 可得: $(b_i)_{\text{opt}} =$

$$\sqrt{\frac{(1+a_{i,1})\beta_i}{a_{i,2}}}, \text{ 相应的优化采样周期为: } (h_i)_{\text{opt}} = c_i / \sqrt{\frac{(1+a_{i,1})\beta_i}{a_{i,2}}};$$

3) 有最高处理需求的控制环(即 $h_i \leq h_j, j = 1, \dots, N, j \neq i$)的带宽分配方案: 通过使用所有额外的可用带宽可进一步改善其控制性能,

$$\text{即 } (b_i)_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{(1+a_{i,1})\beta_i}{a_{i,2}}} + b_a, \text{ 此处 } b_a \text{ 表示当前额}$$

外可用的带宽利用, 因此 $(b_i)_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{(1+a_{i,1})\beta_i}{a_{i,2}}} +$

$$1 - \sum_{i=1}^n b_i = 1 - \sum_{j \neq i}^N b_j, \text{ 相应的优化采样周期可以表示为: } (h_i)_{\text{opt}} = \frac{c_i}{1 - \sum_{j \neq i}^N b_j}.$$

算法实现的基本步骤:

1) 确定各轴控制环基本参数: 控制环数量 N 、代价函数中权重系数 $a_{i,1}$ 和 $a_{i,2}$ 、控制环特定系数 β_i 、闭环带宽 ω_{bw} 和上升时间 $t_{i,r}$;

2) 选择网络基本参数: 数据包的位长度 L_i 、数据传输速率 R 、理想情况数据处理时间 $T_{i,p}$;

3) 计算单向传输时间 $T_{i,t}$, 估计 MADB 的值 D_i , 并确定带宽的范围 $[(b_i)_{\min}, (b_i)_{\max}]$;

4) 根据 $\sum_{i=1}^N b_i \leq 1$, 进行可调度性判定, 如果不足则回到步骤 2) 重新选择网络或改变网络参数以满足条件;

5) 根据公式 $(b_i)_{\text{opt}} = \sqrt[4]{a_{i,1}\beta_i/a_{i,2}}$ 确定各控制环的优化带宽分配, 进一步利用 $(h_i)_{\text{opt}} = c_i / \sqrt[4]{a_{i,1}\beta_i/a_{i,2}}$ 确定优化的采样周期;

6) 根据误差是否越界, 进一步计算优化采用周期, 如果未越界, 优化采样周期为 $(h_i)_{\text{opt}} = T_{i,\text{bw}}/20$ 或者 $(h_i)_{\text{opt}} = t_{i,r}/4$; 如果越界, 其值为 $(h_i)_{\text{opt}} = c_i / (1 - \sum_{j \neq i}^N b_k^j)$.

4 仿真验证(Simulation verification)

仿真平台由5个DC电机闭环回路组成, 各回路组成部分通过CAN网络连接, 组成如图2~4所示. 为研究方便, 各回路参数相同, 传感器采样周期 h , 微分增益为 N , 比例、积分系数分别为 K , T_d , 离散PD控制器如下:

$$P(k) = K \cdot (r(k) - y(k)),$$

$$D(k) = a_d D(k-1) + b_d (y(k-1) - y(k)),$$

$$u(k) = P(k) + I(k) + D(k).$$

其中:

$$a_d = \frac{T_d}{Nh + T_d}, b_d = \frac{NKT_d}{Nh + T_d}.$$

参数设置为:

$$K = 1.5, T_d = 0.035,$$

$$N = 100000, h = 0.010.$$

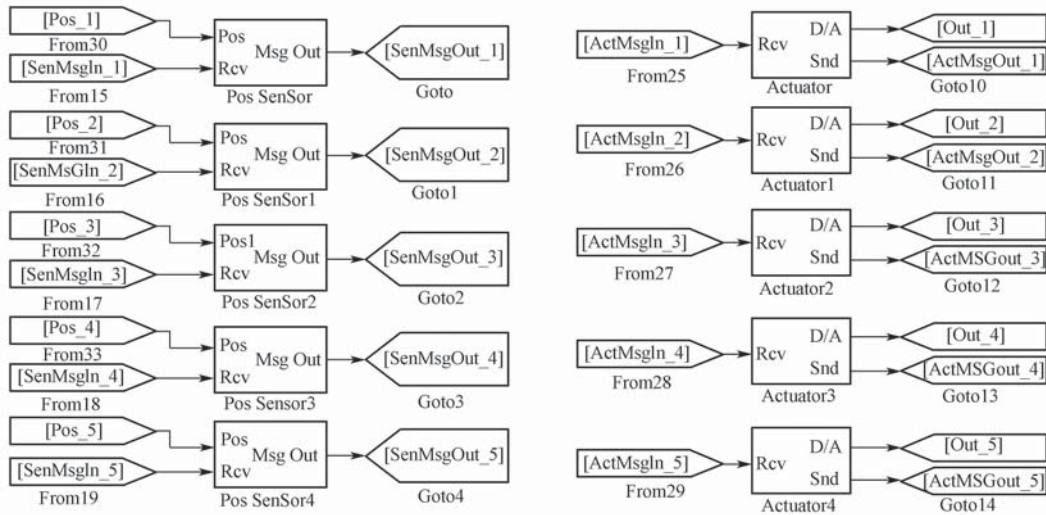


图 2 仿真平台传感器、触发器连接图

Fig. 2 Sensor and actuator linker in simulation platform

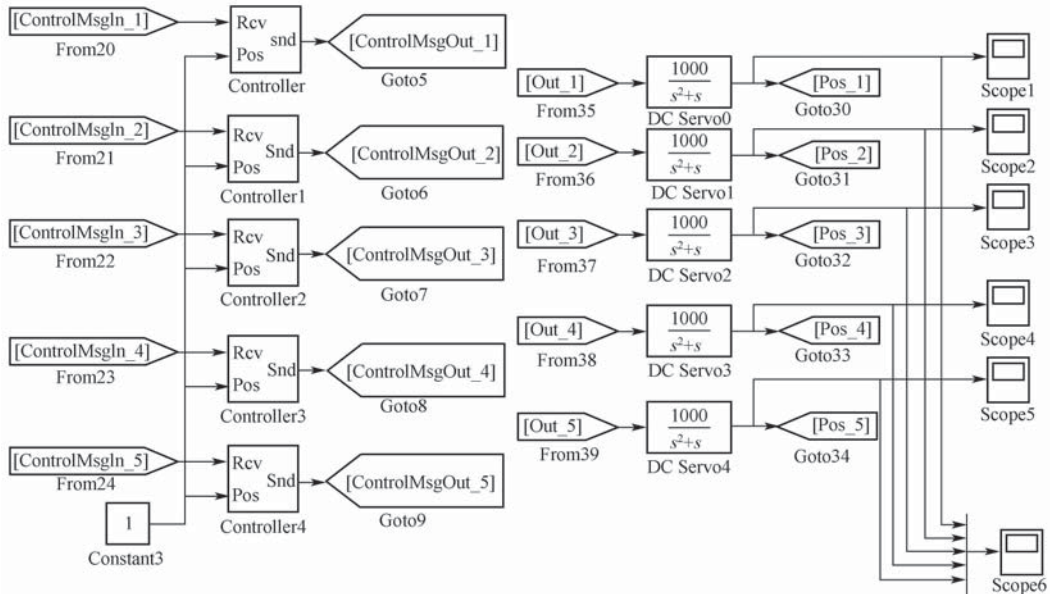


图 3 仿真平台控制器、被控对象连接图

Fig. 3 Controller and objects in simulation platform

法后, 由于对网络资源进行了合理的分配, 从调度曲线图6中可以看出, 各控制环的控制器都获得了网络资源, 正常发送数据, 相应的各回路阶跃响应也取得了良好的特性. 验证了算法的有效性.

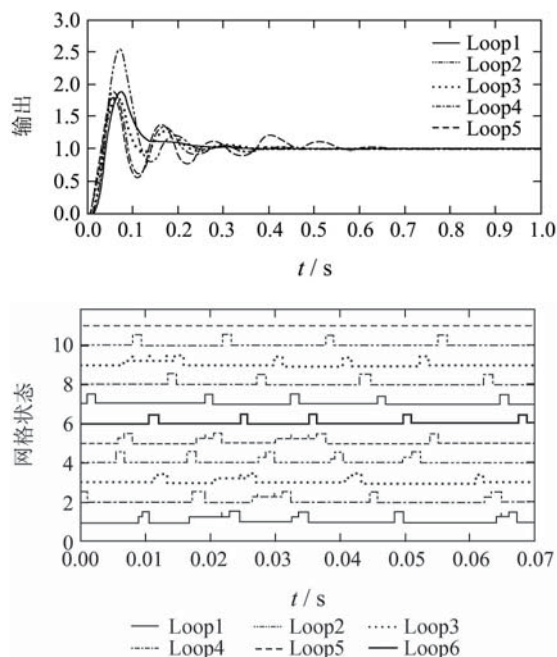


图6 加入调度算法的阶跃响应和网络调度结果

Fig. 6 Network scheduling and step response with scheduler

5 结束语(Conclusion)

优化带宽分配算法可以作为每个控制环的控制算法的一部分或者运行于主节点来实现. 对每个控制环, 在实现前设计3种不同的采样周期. 在系统运行期间, 每个控制环监视系统误差是否为0(或在某门限值内, 即采用死区方法), 选择3种采样周期中的一种. 若系统误差为0(或在某门限值内), 则为每个回路分配最小的网络带宽利用(最大采样周期); 当系统误差变大(经历扰动时), 按照另外两种情况分配带宽.

该算法要求控制器能够运行在不同的采样周期下. 对给定系统, 优化采样周期可以按照上述3种方法指定, 为保持闭环稳定性和性能需求, 需要通过适当调整控制增益或相关参数实现. 相应的3个控制器可以在系统运行前提前设计. 因为不需要复杂的计算, 所以带宽分配算法的实现不会占用额外的系统资源, 是可行的. 另外, 该算法可以很容易扩展到多个控制环同时经历由引入优

先级机制产生的扰动. 每个控制环可以按照处理需求和控制性能QoS指标指定一个优先级. 可以基于控制环的优先级来指定额外带宽给相应的控制环, 获得系统整体性能优化.

参考文献(References):

- [1] YEPEZ J, MARTI P, FUERTES J M. Control loop scheduling paradigm in distributed control systems[C] // *Proceedings of the 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Roanoke, USA: IEEE, 2003: 1441 – 1446.
- [2] WALSH G C, YE H. Scheduling of networked control systems[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, 21(1): 57 – 65.
- [3] LIAN F L, MOYNE J R, TILBURY D M. Performance evaluation of control networks: ethernet, controlnet and devicenet[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, 21(1): 66 – 83.
- [4] TIPSUWAN Y, CHOW M Y. Network-based controller adaptation for network QoS negotiation and deterioration[C] // *The 27th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society*. Denver: IEEE, 2001: 1794 – 1799.
- [5] VELASCO M, MARTI P, FRIGOLA M. Bandwidth management for distributed control of highly articulated robots[C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Barcelona, Spain: [s.n.], 2005: 266 – 271.
- [6] HALEVI Y, RAY A. Integrated communication and control systems: Part I-analysis[J]. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 1988, 110(4): 367 – 373.
- [7] MARTI P, FOHLER G, RAMAMRITHAM K, et al. Improving quality-of-control using flexible timing constraints: metric and scheduling issues[C] // *Proceedings of the 23rd IEEE Real-Time System Symposium*. Austin, TX, USA: [s.n.], 2002: 91 – 100.
- [8] KIM D S, LEE Y S, KWONW H, et al. Maximum allowable delay bounds of networked control systems[J]. *Control Engineering Practice*, 2003, 11(11): 1301 – 1313.
- [9] 郑萌, 张庆灵. 网络控制系统的最大允许时延界[J]. *控制理论与应用*, 2008, 25(6): 1128 – 1130.
(ZHENG Meng, ZHANG Qingling. Maximum allowable delay bound of networked control systems[J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(6): 1128 – 1130.)
- [10] LIAN F L, MOYNE J, TILBURY D. Network design consideration for distributed control systems[J]. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 2002, 10(2): 297 – 307.

作者简介:

赵维伦 (1972—), 男, 副教授, 博士, 主要从事嵌入式控制系统设计与应用、网络化运动控制系统方面的研究, E-mail: zhao.weiqlan@mail.scut.edu.cn, zhaowq@dgut.edu.cn;

李迪 (1965—), 女, 博士, 华南理工大学机械与汽车工程学院教授, 博士生导师, 光机电一体化研究所所长, 主要研究领域为高性能嵌入式控制系统的设计方法、嵌入式数控技术等.