

文章编号: 1673-5196(2007)04-0077-06

# 基于在线时延辨识的网络控制系统调度

郭 戈<sup>1,2</sup>, 杨琳琳<sup>2</sup>

(1. 大连海事大学 自动化与电气工程学院, 辽宁 大连 116026; 2. 兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 基于在线网络时延的辨识方法, 提出一种对网络控制系统的周期信息、非周期信息和消息的实时动态调度算法. 所提出的利用一种滤波器的辨识方法能够实时在线辨识网络时延, 而且基于该时延辨识的调度算法能够动态地调整采样周期和分配带宽, 并保证系统的性能和提高网络资源的利用率. 仿真实例说明了辨识方法的有效可行性.

**关键词:** 网络控制系统; 调度; 采样周期; 网络时延

**中图分类号:** TP273 **文献标识码:** A

## Scheduling of networked control systems based on online time delay identification

GUO Ge<sup>1,2</sup>, YANG Linlin<sup>2</sup>

(1. College of Automation and Electrical Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China; 2. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** In this paper, a real time dynamic scheduling algorithm for periodic data, sporadic data, and messages in networked control systems was proposed based on the method for online network time delay identification. The identification was implemented by using a kind of filtering operation, and it could perform online real time identification and, then, dynamically adjust the sampling period and allocate the bandwidth on the basis of foregoing identification, guaranteeing the system performance and increasing network resources. It was illustrated by a simulation example that the identification method was valid and feasible.

**Key words:** networked control system; scheduling; sampling period; network induced delay

随着控制科学和飞速发展的计算机网络及通信技术, 控制系统朝着更加分散化、智能化、网络化的方向发展. 网络控制系统(NCS)<sup>[1~3]</sup>是指在某个区域现场的传感器、控制器及执行器等组件通过实时网络构成闭环的一种全分布式、网络化实时反馈控制系统. 由于网络的引入不可避免地会产生网络时延, 另外, 网络有限的带宽资源和承载能力由多个控制回路共享, 导致控制系统动态性能下降甚至不稳定, 给控制系统的分析、设计带来了很大困难.

网络控制系统的性能不仅与控制算法有关, 还与网络资源的合理调度有关. 目前, 针对NCS中的网络调度方法主要有2种: 1) 把成熟的实时系统的

任务调度方法推广到网络传输中<sup>[4,5]</sup>; 2) 对NCS中各个控制回路中数据传输节点采样周期和采样时刻的调度<sup>[6~9]</sup>. 在系统设计过程中, 一个更直接的方法就是将系统控制与调度结合起来<sup>[6~10]</sup>, 通过对有限资源的优化调度, 最小化网络时延, 以提高系统实时性, 从根本上改善控制性能. 其中, Hong<sup>[6,9]</sup>借助“窗口”概念, 提出了基于令牌网的多控制闭环NCSs的带宽配置和采样周期调度算法, 通过将各个控制闭环的采样周期调整为基准周期(最小周期)的 $2^k$  ( $k$ 为整数)倍实现了理想条件下的无抖动调度, 但这种方法虽然简单并有效地避免了周期抖动, 却是以过度占用带宽资源为代价的. Seto<sup>[7]</sup>提出了将控制性能指标用于多任务的调度中, 给出了控制系统的性能与采样周期的关系, 即在所有任务都可调度的前提下, 通过优化采样频率提高系统的性能, 但没有考

收稿日期: 2007-03-13

基金项目: 国家自然科学基金(50274003)

作者简介: 郭戈(1972-), 男, 甘肃庄浪人, 博士, 教授.

考虑执行时间的变化与扰动问题. Cervin<sup>[8]</sup> 在 Seto 研究的基础上, 考虑了具有时延变化的控制系统采样周期的选择问题, 对低于一个采样周期的时延系统的采样周期进行了分析. 以上的控制与调度集成研究只针对单处理器系统和周期性信息调度问题, 对网络控制中存在的周期信息、非周期信息和非实时性信息综合起来的优化采样周期和带宽分配的调度方法未作考虑. Kim 等<sup>[10]</sup> 针对将 3 种类型的数据(周期数据、突发数据、消息), 提出了一种基于现场总线的网络控制系统的调度算法, 该方法在使用 MADB (maximum allowable delay bound) 的基础上设置数据的传输顺序. 但这种方法仅仅依据最大允许时延来选取采样周期, 是一种保守的静态调度方法, 且没有考虑带宽资源的优化问题.

本文通过在线辨识出网络时延, 在保证控制系统稳定性和网络可调度条件下, 根据周期信息、非周期信息和非实时性消息的特性, 动态地选取合适的采样周期并进行带宽分配, 提出了在线时延辨识的方法和调度算法.

### 1 网络控制系统模型

具有分布时延的多输入多输出网络控制系统(NCSs)结构如图 1 所示, 由多个分布的传感器、执行器和控制器组成. 传感器时钟驱动, 控制器和执行器事件驱动.

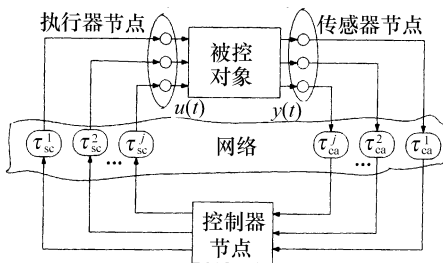


图 1 网络控制系统结构图

Fig. 1 Structure of networked control systems

在网络控制系统中, 将控制器计算延时归入控制器到执行器网络延时, 忽略各传感器和执行器节点的处理延时. 假设网络控制系统有  $R$  个控制回路, 被控对象是线性时不变连续系统, 各个控制回路相互独立, 则控制回路  $j$  的被控对象描述为

$$\begin{cases} \dot{x}_p^j(t) = A_p^j x_p^j(t) + B_p^j u_p^j(t) \\ y_p^j(t) = C_p^j x_p^j(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $u_p^j(t) \in \mathbb{R}^{N_s^j}$ ,  $y_p^j(t) \in \mathbb{R}^{N_a^j}$ ,  $x_p^j(t) \in \mathbb{R}^{N_p^j}$  分别为被控对象的输入、输出和状态;  $N_s^j$ ,  $N_a^j$  和  $N_p^j$  分别为回路  $j$  中执行器、传感器和被控对象的维数;  $A_p^j$ ,  $B_p^j$  和  $C_p^j$  为回路  $j$  中具有相应维数的向量矩阵.

回路  $j$  的控制器状态方程表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_c^j(t) = A_c^j x_c^j(t) + B_c^j e_c^j(t) \\ u_c^j(t) = C_c^j x_c^j(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $e_c^j(t) \in \mathbb{R}^{N_s^j}$ ,  $u_c^j(t) \in \mathbb{R}^{N_a^j}$ ,  $x_c^j(t) \in \mathbb{R}^{N_p^j}$  分别为控制器的输入、输出和状态;  $A_c^j$ ,  $B_c^j$  和  $C_c^j$  为回路  $j$  中具有相应维数的向量矩阵.

假设  $\tau_c$  为传感器到控制器延时,  $\tau_a$  为控制器到执行器延时,  $r^j(t)$  为参考输入, 则有  $e_c^j(t) = y_p^j(t) - r^j(t)$ ; 传感器的输出经过网络时延  $\tau_s$  后输入到控制器, 则  $e_c^j(t) = e_p^j(t - \tau_s)$ ; 控制器的输出经过网络时延  $\tau_a$  后输入到被控对象, 则  $u_p^j(t) = u_c^j(t - \tau_a)$ . 故式(1)和式(2)可表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_p^j(t) = A_p^j x_p^j(t) + B_p^j u_c^j(t - \tau_a) \\ y_p^j(t) = C_p^j x_p^j(t) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_c^j(t) = A_c^j x_c^j(t) + B_c^j e_p^j(t - \tau_s) \\ u_c^j(t) = C_c^j x_c^j(t) \end{cases} \quad (4)$$

### 2 NCS 的网络时延在线辨识

网络控制系统的时延对控制系统性能有着重要的影响, 将会导致被控系统性能的降低甚至使系统不稳定. 因此, 需要找出网络时延在线辨识方法, 为进一步对网络控制系统的性能分析和调度提供有效的依据. 下面就此问题详细论述.

传感器到控制器时延  $\tau_s$  和控制器到执行器时延  $\tau_a$  的辨识方法是一致的, 故在此只考虑控制器到执行器时延  $\tau_a$  的辨识. 则将式(3)的参数和时延辨识以传递函数的形式表示为

$$y(t) = G(p)u(t - \tau) \quad (5)$$

式中:  $y(t)$  和  $u(t)$  分别代表被控对象的输出  $y_p(t)$  和实际执行的控制信号  $u_c(t)$ , 且有

$$G(p) = \frac{b_m p^m + \dots + b_1 p + b_0}{a_n p^n + \dots + a_1 p + a_0} \quad (6)$$

式中:  $p = d/dt$ ,  $m, n$  是被控对象的阶次, 假定  $m \leq n$ . 式(6)可进而描述为

$$A_n Y^{(n)}(t) = B_m U^{(m)}(t - \tau) \quad (7)$$

其中

$$\begin{aligned} A_n &= [a_n \quad a_{n-1} \quad \dots \quad a_0] \\ B_m &= [b_m \quad b_{m-1} \quad \dots \quad b_0] \\ Y^{(n)}(t) &= [y^{(n)}(t) \quad y^{(n-1)}(t) \quad \dots \quad y^{(0)}(t)]^T \\ U^{(m)}(t) &= [u^{(m)}(t) \quad u^{(m-1)}(t) \quad \dots \quad u^{(0)}(t)]^T \end{aligned}$$

对上式进行拉氏变换, 并且使用如下的滤波器:

$$F(s) = \frac{\beta^n}{s(s + \lambda)^n} \quad (8)$$

则有

$$A_n \Gamma_n F(s) Y(s) = B_m \Gamma_m F_n(s) U(s) e^{-\tau s} +$$

$$C_{n-1} \Gamma_{n-1} F_n(s) \tag{9}$$

其中

$$C_{n-1} = [c_{n-1} \quad c_{n-2} \quad \dots \quad c_0]$$

$$c_{n-i} = \mathbf{h}_i \mathbf{Y}^{(n-1)}(0)$$

$$\mathbf{h}_i = [0^{1 \times (n-i)} \quad a_n \quad \dots \quad a_{n-i-1}]$$

$$\mathbf{Y}^{(n-1)}(0) = [y^{(n-1)}(0) \quad y^{(n-2)}(0) \quad \dots \quad y^{(0)}(0)]^T$$

$\Gamma_k$  满足以下关系式:

$$s^k F(s) = \Gamma_k F_n(s) \quad (k = 0, 1, 2, \dots) \tag{10}$$

其中

$$F_n(s) = \left[ \frac{1}{(s+\lambda)} \quad \frac{1}{(s+\lambda)^2} \quad \dots \quad \frac{1}{(s+\lambda)^n} \frac{1}{s} \right]^T$$

详细推导见文[11]. 现对式(9)进行拉氏反变换, 则

$$\mathbf{A}_n \Gamma_n \mathbf{Y}_{F_n}(t) = \mathbf{B}_m \Gamma_m \mathbf{u}_{F_n}(t - \tau) + C_{n-1} \Gamma_{n-1} F_n(t) \tag{11}$$

其中

$$\mathbf{Y}_{F_n}(t) = [y_{f_1}(t) \quad \dots \quad y_{f_n}(t) \quad y_l(t)]^T$$

$$\mathbf{u}_{F_n}(t - \tau) = [u_{f_1}(t - \tau) \quad \dots \quad u_{f_n}(t - \tau) \quad u_l(t - \tau)]^T$$

$$y_{f_i}(t) = L^{-1} \left[ \frac{Y(s)}{(s+\lambda)^i} \right], \quad y_l(t) = L^{-1} \left[ \frac{Y(s)}{s} \right]$$

$$u_{f_i}(t - \tau) = L^{-1} \left[ \frac{U(s) e^{-\tau s}}{(s+\lambda)^i} \right]$$

$$u_l(t - \tau) = L^{-1} \left[ \frac{U(s) e^{-\tau s}}{s} \right]$$

$F_n(t)$  是  $F_n(s)$  的拉氏反变换:

$$F_n(t) = [f_1(t) \quad \dots \quad f_n(t) \quad f_l(t)]^T$$

其中

$$f_i(t) = L^{-1} \left[ \frac{1}{(s+\lambda)^i} \right] = \begin{cases} \frac{t^{i-1} e^{-\lambda t}}{(i-1)!} & (i > 1) \\ e^{-\lambda t} & (i = 1) \end{cases}$$

$$f_l(t) = L^{-1} \left[ \frac{1}{s} \right] = 1$$

最后, 假定  $a_0 = 1$ , 则有

$$\Gamma_n \mathbf{Y}_{F_n}(t_k) = -\mathbf{A}_n \Gamma_n \mathbf{Y}_{F_n}(t_k) + \mathbf{B}_m \Gamma_m \tilde{\mathbf{u}}_{F_n}^+(t_k - \tau) + \mathbf{B}_m \Gamma_m \tilde{\mathbf{u}}_{F_n}^+(t_k - \tau) + C_{n-1} \Gamma_{n-1} F_n(t_k) \tag{12}$$

式中:  $\Gamma_n$  为  $\Gamma_n$  最后一行,  $\Gamma_n$  为  $\Gamma_n$  除去最后一行的剩余部分,  $\Gamma_m$  是  $\Gamma_m$  的最后一列,  $\tilde{\mathbf{u}}_{F_n}^+(t_k - \tau)$  是  $\mathbf{u}_{F_n}^+(t_k - \tau)$  除去最后一行的剩余部分,  $\tilde{\mathbf{u}}_{F_n}^+(t_k - \tau)$  是  $\mathbf{u}_{F_n}^+(t_k - \tau)$  的最后一行, 且有

$$\tilde{\mathbf{u}}_{F_n}^+(t_k - \tau) = \begin{bmatrix} u_{f_1}(t_k - \tau) \\ \dots \\ u_l(t_k) - \sum_{j=k-d}^{k-1} (u_j - u_{k-1})T - (u_{k-d-1} - u_{k-1})\alpha T \\ \dots \\ -u_{k-1}\tau \end{bmatrix}$$

式中: 时延  $\tau = (d + \alpha)T$ ,  $d$  是整数,  $\alpha$  是纯小数.

假设  $\zeta(t_k) = \Gamma_n \mathbf{Y}_{F_n}(t_k)$ , 通过计算可得出

$$\Gamma_m(1:m, n+1) = 0$$

则

$$\mathbf{B}_m \Gamma_m = b_0 \Gamma_m(m+1, n+1)$$

故得出以下最小二乘估计:

$$\zeta(t_k) = \Phi_+^T(t_k) \theta_+ \tag{13}$$

其中

$$\Phi_+(t_k) = \begin{bmatrix} -\Gamma_n \mathbf{Y}_{F_n}(t_k) \\ \Gamma_m \tilde{\mathbf{u}}_{F_n}^+(t_k - \tau) \\ -\Gamma_m(m+1, n+1)u_{k-1} \\ \Gamma_{n-1} F_n(t_k) \end{bmatrix}$$

$$\theta_+ = [\mathbf{A}_n \quad \mathbf{B}_m \quad b_0 \tau \quad C_{n-1}]^T$$

$k = d+1, d+2, \dots, d+N$ ,  $N$  是整数, 则式(13)可以表示为

$$\Psi = \Phi_+ \theta_+ \tag{14}$$

其中

$$\Psi = [\zeta(t_{d+1}) \quad \zeta(t_{d+2}) \quad \dots \quad \zeta(t_{d+N})]^T$$

$$\Phi_+ = [\varphi_+(t_{d+1}) \quad \varphi_+(t_{d+2}) \quad \dots \quad \varphi_+(t_{d+N})]^T$$

所以,  $\theta_+$  的最小二乘估计为

$$\theta_+^S = [\Phi_+^T \Phi_+]^{-1} \Phi_+^T \Psi \tag{15}$$

因此, 容易得到网络时延的估计为

$$\hat{\tau} = \theta_+^S(n+m+2) / \theta_+^S(n+m+1) \tag{16}$$

$\hat{\tau}$  为当前时刻控制器到执行器时延  $\tau_{ca}$  的估计值.

同理, 利用以上方法可以辨识出传感器到控制器时延  $\tau_{sc}$ . 则系统中的总体时延为  $\hat{\tau} = \hat{\tau}_{sc} + \hat{\tau}_{ca}$ .

### 3 基于在线时延辨识的调度算法

#### 3.1 采样周期调度方法

利用上述在线网络时延辨识方法得到各个控制回路的网络时延  $\hat{\tau} = \hat{\tau}_{sc} + \hat{\tau}_{ca}$  后, 即进行采样周期的调度. 当  $\hat{\tau}$  大于该控制回路的最大允许时延  $\tau_{max}^i$  时, 采取丢包等方法保证系统的性能和可调度性<sup>[3]</sup>. 下面主要针对  $\hat{\tau}$  小于控制回路的最大允许时延  $\tau_{max}^i$  时, 提出一种采样周期小于  $\hat{\tau}$  的网络调度算法.

按照各个控制回路的网络时延大小对控制回路进行编号, 网络时延越小则控制回路编号越小, 网络时延最小的控制回路的编号为 1. 设定所有控制回路中最小的采样周期  $T^1$  为基本采样周期, 其调度准则为

$$T^1 \leq \tau^1, \quad T^j \leq \tau^j \tag{17}$$

下面计算一个基本采样周期  $T^1$  所需的时间. 首先, 分析传输非实时性信息的时间段  $T_N$  的大小. 在一个基本采样周期中非实时性消息的利用率  $U_N$

=  $T_N / T^1$ , 为了保证非实时性信息的最小带宽利用率  $U_N^M$ , 必须满足

$$U_N \geq U_N^M \tag{18}$$

故可以得出  $T_N$  的大小:

$$T_N \geq U_N^M \cdot T^1 \tag{19}$$

式中:  $T_N$  包含消息额外开销时间  $T_{0\beta}^M$  和协议额外开销时间  $T_{0\beta}^P$ .

然后, 分析传输非周期信息的时间段  $T_s$  的大小. 为了传输基本采样周期  $T^1$  中产生的所有非周期性信息, 必须满足以下条件:

$$T_s \geq N_s^M \cdot T_s^M \tag{20}$$

式中:  $T_s^M = T_s^M + T_{0s}$ ,  $N_s^M$  表示传输非周期信息所需的最大时间,  $T_s^M$  表示在基本采样周期中一个非周期性信息的数据传输时间的最大值,  $T_{0s}$  表示传输非周期信息的最大额外开销时间. 式(20)表明  $N_s^M \cdot T_s^M$  是在基本采样周期中传输所有非周期性信息所需的最大时间.

基本采样周期  $T^1$  由网络节点的采样延时、周期性信息的传输时间、非周期性信息的传输时间和非实时消息的传输时间组成, 故可以表示为

$$T^1 = (B_{s_i}^j) + \sum_{j \in U_L} \left[ \sum_{i=1}^{N_s^j} (T_{s_i}^j + T_{op}) + \sum_{i=1}^{N_s^j} (T_{c_i}^j + T_{op}) \right] + \sum_{j \in U_L^*, i \in U_s^*} (T_{s_i}^j + T_{op}) + T_s + T_N + T_0^* + T_{cd} \tag{21}$$

式中:  $U_L$  表示在给定基本采样周期中所有节点都进行信息传输的控制回路集合;  $U_L^*$  表示在给定基本采样周期中只有部分节点进行信息传输的控制回路集合;  $U_s^*$  表示  $U_L^*$  中的传感器节点的集合;  $T_0^*$  表示附加的额外开销时间;  $(B_{s_i}^j)$  表示开始传输传感器测量数据所需的最大时间;  $T_{cd}$  表示控制器计算时间.

假设  $N_R$  是  $U_L$ 、 $U_L^*$  和  $U_s^*$  中传感器与执行器节点的总个数, 则

$$N_R = N_s^b + N_a^b \tag{22}$$

式中:  $N_a^b$  表示在  $U_L$  中执行器节点的总个数, 而  $N_s^b$  表示在  $U_L^*$  和  $U_s^*$  中传感器节点的总个数. 同时令

$$T_P = \sum_{j \in U_L} \left[ \sum_{i=1}^{N_s^j} (T_{s_i}^j + T_{op}) + \sum_{i=1}^{N_s^j} (T_{c_i}^j + T_{op}) \right] + \sum_{j \in U_L^*, i \in U_s^*} (T_{s_i}^j + T_{op}) \tag{23}$$

则基本采样周期满足下式:

$$T^1 \geq (B_{s_i}^j) + T_P + N_s^M \cdot T_s^M + U_N^M \cdot T^1 + T_0^* \tag{24}$$

由式(24)可得

$$T_P \leq (1 - U_N^M) \cdot T^1 - N_s^M \cdot T_s^M - T_0^* - T_{cd} - (B_{s_i}^j) \tag{25}$$

式中:  $(x)$  表示如果  $x$  的值大于 0 则取  $x$  的值, 如果  $x$  的值小于或者等于 0 则取值为 0.

现在分析系统的可调度性. 如果  $T_P \leq 0$ , 网络控制系统就是不可调度的, 这种情况下, 必须选择其他的高速网络协议或者减少网络中节点的数目. 如果传感器节点的数据传输时间为  $t_s$ , 而控制器节点的数据传输时间为  $t_c$ , 则式(24)可以表示为

$$N_s^b (t_s + T_{op}) + N_a^b (t_c + T_{op}) \leq (1 - U_N^M) \cdot T^1 - N_s^M \cdot T_s^M - T_0^* - T_{cd} - (B_{s_i}^j) \tag{26}$$

假设传感器节点与控制器节点的传输时间均为  $t$ , 则式(26)可以表示为

$$N_R \leq \lfloor (1 - U_N^M) \cdot T^1 - N_s^M \cdot T_s^M - T_0^* - T_{cd} - (B_{s_i}^j) / (t + T_{op}) \rfloor \tag{27}$$

式中:  $\lfloor X \rfloor$  表示小于或者等于  $X$  的最大整数,  $N_R^M$  是  $N_R$  的最大整数. 式(27)说明在一个基本采样周期中, 控制网络要传输的周期性信息的数目  $N_R$  不能超过  $N_R^M$  个.

假设网络控制系统中最大采样周期为  $N_E \cdot T^1$ , 即第  $R$  控制回路的采样周期  $T^R = N_E \cdot T^1$ ,  $T^R \leq \tau^R$ . 在最大采样周期中, 第  $i$  个基本采样周期表示为  $T_B^i (i = 1, 2, \dots, N_E)$ , 同时假定传感器与控制器需要传输的周期性信息的总个数为  $N_R^T$ , 则

$$N_R^T = \sum_{j=1}^R Q(N^j) \cdot N^j \tag{28}$$

式中:  $Q(N^j) = (N_E \cdot T^1) / T^j, j = 1, 2, \dots, R$ . 因为  $T^j (j = 1, 2, \dots, R)$  被设为  $T^1$  的 2 阶次方, 则  $Q(N^j) (j = 1, 2, \dots, R)$  为整数. 这样, 系统的可调度性可以通过比较  $N_R^T$  和  $N_R^M \cdot N_E$  得到<sup>[9]</sup>.

下面给出各个控制回路采样周期  $T^j (j = 1, 2, \dots, R)$  的调度算法:

- 1) 某一刻, 根据在线时延辨识方法求出每个控制回路的网络时延  $\tau^j$ .
- 2) 根据各个控制回路的网络时延大小对控制回路进行编号, 网络时延越小则控制回路编号越小, 网络诱导时延最小的控制回路的编号为 1.
- 3) 利用式(28)和第 2)步的结果计算  $N_R^T$ .
- 4) 令  $T^1 = \tau^1, T_L = 0$  和  $T_U = T^1, k = 0$ .
- 5) 选取第  $j$  个控制环的采样周期  $T^j$ , 使得  $T^j \leq \tau^j$ , 并且  $T^j = \max(2^k \cdot T^1), k = 0, 1, 2, \dots$ .
- 6) 利用式(27)计算  $N_R^M$ .

7) 网络可调度判定:

情况 1:如果  $\lceil N_R^T/N_E \rceil = N_R^M$  或者  $(N_R^M - \lceil N_R^T/N_E \rceil)$  的值小于给定范围,说明所选的采样周期合适,则  $T_B^j = T^j, j = 1, 2, \dots, R$ , 继续下一步;

情况 2:如果  $\lceil N_R^T/N_E \rceil < N_R^M$ , 则  $T_U = T^1, T^1 = (T_U + T_L)/2, k = k + 1$ , 回到第 5) 步;

情况 3:如果  $\lceil N_R^T/N_E \rceil > N_R^M$  且  $k \neq 0$ , 则  $T_L = T^1, T^1 = (T_U + T_L)/2, k = k + 1$ , 回到第 5) 步;

情况 4:如果  $\lceil N_R^T/N_E \rceil > N_R^M$  且  $k = 0$ , 则算法结束,调度失败.需重新选择控制网络或者减少网络控制系统的节点数.

8) 在每个基本周期  $T_B^j (j = 1, 2, \dots, N_E)$  中,为传感器节点和控制器节点分配带宽.

9) 下一时刻,按照 1~8 步再进行动态选取采样周期和带宽的分配.

### 3.2 带宽分配方法

网络控制系统中存在多个反馈控制回路,每个回路互不干扰,但是都通过同一网络交换信息,这时要根据各个回路的特点及其所选择的每个回路的采样周期,为网络中所存在的 3 种信息分配带宽.

基本采样周期中传感器节点与控制器节点的带宽分配原则如下:第  $j$  个控制回路中的传感器采样数据通过网络传输给相应的控制器节点,当第  $j$  个控制回路中传感器节点的采样数据传输到控制器,则第  $j$  个控制回路中的控制器开始计算控制量,同时假设控制量的计算时间(即控制器延时)小于传输延时,则在这段延时中,第  $j + 1$  个控制回路开始进行传感器采样数据的传输.所以第  $j$  个控制回路的控制器延时与第  $j + 1$  个控制回路的传感器采样数据的传输时间重叠.经过这段控制器延时,第  $j$  个控制回路的控制器开始传输控制量给执行器.在该控制器传输完所有的控制量给执行器后,利用与上述相同的过程传输其他回路的信息.如果周期性信息的传输时间段  $T_P$  结束,则开始安排非周期性信息,最后是非实时性消息.

## 4 实例研究

考虑一个有 3 个直流电动机的物理对象<sup>[10]</sup>,每一个电动机都有一个位置控制器、一个传感器和一个执行器,并由共同的通信网络 CAN 总线相连.如果忽略电枢电感和粘性磁滞系数,电动机的动态模型为

$$\dot{x}_p(t) = \begin{bmatrix} \frac{-K_i K_b}{R_a J} & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} x_p(t) + \begin{bmatrix} \frac{K_i}{R_a J} \\ 0 \end{bmatrix} u_p(t)$$

$$y_p(t) = x_p(t)$$

式中:状态  $x_p(t) = [\omega \ \theta]^T$  分别为伺服电机的角位移(rad)和角速度(rad/s),  $u_p$  为给定电压(V). 3 个电动机的参数转矩常数  $K_i$  (N·m)、反电势常数  $K_b$  (V/rad/s)、转动惯量  $J$  (kg·m<sup>2</sup>) 都相同,分别是 10、0.075 和 0.006. 而 3 个电动机 DC servo 1, DC servo 2, DC servo 3 的电枢电阻  $R_a$  (Ω) 并不相同,分别为 14, 19, 21 Ω. 利用文献[9]的结果,根据稳定性分析得出的保证稳定性的最大允许时延  $\tau_{\max}^i$  分别为 1.800, 1.785, 1.780 s.

某一时刻,对于电动机  $R_a = 14 \Omega$ , 根据在线时延辨识方法得出该系统的动态特性和时延辨识结果,如图 2 和图 3 所示.

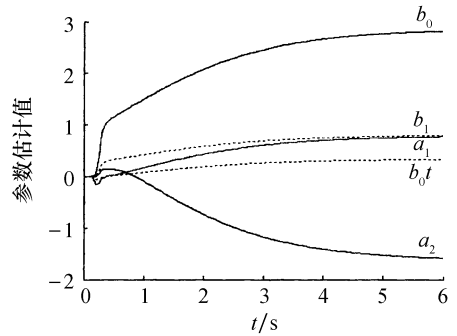


图 2 被控对象的参数辨识结果

Fig. 2 Parameter identification of controlled plant

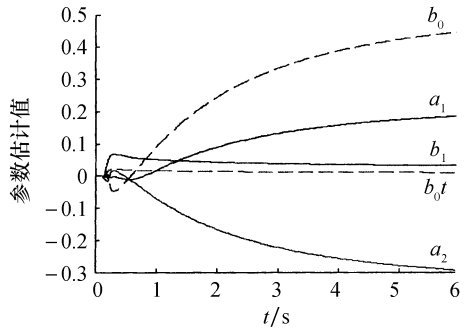


图 3 控制器的参数辨识结果

Fig. 3 Parameter identification of controller

由图 2 可以得出  $\tau_{ca}^i = 1.5 \text{ ms}$ , 根据图 2b 则  $\tau_c^i = 2.0 \text{ ms}$ , 所以  $\tau^i = \tau_{ca}^i + \tau_c^i = 3.5 \text{ ms}$ . 同理, 可得出另外两个电动机  $R_a$  分别为 19, 21 Ω 时, 网络时延分别为 5.2, 6.3 ms.

由于执行器节点只接收数据, 因此在  $N^j$  中并不将执行器节点计算在内. 假设传感器与控制器节点传输的周期性信息为 2 个字节, 非周期性信息为 4 个字节, 而非实时性信息为 8 个字节, 并且连有额外的节点  $N^* = 1$ , 其传输速率为 1 Mb/s, 传输一位数据需 1 μs, 忽略传播延时. 则:  $R = 3, N_c^j = N_a^j = 1,$

$$N_s^j = 1, N^j = 3 \quad (j = 1, 2, 3), N = N^* + \sum_{j=1}^3 (N_c^j + N_s^j) = 7, B_{S_j}^i = 0.1 \text{ ms}, T_{CD} = 0.1 \text{ ms}, N_S^M = 2, U_N^M = 0.2.$$

使用协议规范 CAN 2.0PART-A<sup>[12,13]</sup>, 不计算数据帧中数据域的长度, 而将填充位和 3 位的帧间距计算在内, 那么传送 2 个字节的数据需要额外附加 57 位, 传送 4 个字节的数据需要额外附加 60 位, 传送 8 个字节的数据需要额外附加 67 位. 并且在每一个基本采样周期的开始时刻传送一个字节的同步信息, 使各节点同步. 可以计算出下列参数:  $T_c^j = T_s^j = 16 \mu\text{s}$  ( $j = 1, 2, 3$ ),  $T_s^M = 32 \mu\text{s}$ ,  $T_{Op} = 57 \mu\text{s}$ ,  $T_{Os} = 60 \mu\text{s}$ ,  $T_{On} = 67 \mu\text{s}$ ,  $T_o^* = 65 \mu\text{s}$ ,  $T_s = N_S^M \times (T_s^M + T_{Os}) = 184 \mu\text{s}$ .

根据优化采样周期调度算法 1~6 步, 选取基本采样周期  $T^1 = 1.4 \text{ ms}$ , 可以得出:  $T^2 = T^3 = 2T^1 = 2.8 \text{ ms}$ ,  $T_N = U_N^M \cdot T^1 = 280 \mu\text{s}$ ,  $N_E = 2$ ,  $N_R^T = 12$ ,  $N_R^M = 8$ .

由于  $\lceil N_R^T / N_E \rceil \ll N_R^M$ , 因此系统是可以调度的. CAN 总线中, 控制回路中信息的优先级随控制回路编号的增加而减小. 在一个控制回路内, 传感器节点的信息优先级高于控制器节点的信息优先级. 设 3 个直流电动机  $R_a$  分别为 14, 19, 21  $\Omega$  的输出相应为  $y_1, y_2, y_3$ . 图 4 是该网络控制系统中 3 个直流电动机的实时调度时序图, 图 5 是网络控制系统中 3 个直流电动机的输出图, 结果表明该调度算法保证了

整个系统的稳定性.

### 5 结论

本文提出了基于在线网络时延辨识的网络控制系统中周期信息、非周期信息和非实时性消息的调度算法. 每一时刻, 根据在线辨识出各个控制回路的网络时延值  $\tau$ , 在  $\tau$  小于保证该控制回路稳定的最大允许时延  $\tau_{\max}$  情况下, 由  $\tau$  的大小动态地调节各个控制回路的采样周期. 所提出的方法能够真实地反映出控制回路的状态, 并且优化带宽的分配, 同时有效地提高网络控制系统的性能和网络资源的利用率, 是一种网络控制系统的实时性动态调度.

### 参考文献:

[1] WALSH G C, YE H. Scheduling of net worked control systems [J]. IEEE Control Magazine, 2001, 21(1): 57-65.

[2] ZHANG W, BRANICKY M S, PHILLIPS S M. Stability of net worked control system [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2001, 21(1): 84-99.

[3] 项林英, 郭 戈, 赵家黎. 网络控制系统的控制方法研究 [J]. 兰州理工大学学报, 2005, 31(6): 93-99.

[4] BRANICKY M S, PHILLIPS S M, ZHANG Wei. Scheduling and feedback co design for net worked control systems [J]. Decision and Control, 2002, 2(10-13): 1 211-1 217.

[5] LIANG Fengli, MOYNE J, TILBURY D M. Network design consideration for distributed control systems [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2002, 10(2): 297-307.

[6] HONG S H. Bandwidth allocation scheme for cyclic service fieldbus networks [J]. IEEE Trans on Mechatronics, 2001, 6(2): 197-204.

[7] Proc. of the IEEE Real Time Systems Symp [C]. Washington: IEEE Computer Society Press, 1996: 13-21.

[8] ANTON C. Integrated control and real time scheduling [D]. Sweden: Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, 2003.

[9] HONG S H. Scheduling algorithm of data sampling times in the integrated communication and control systems [J]. IEEE Trans on Control System Technology, 1995, 3(2): 225-231.

[10] KIM D S. Maximum allowable delay bounds of net worked control systems with multiple delays [J]. Control Engineering Practice, 2003, 11(11): 1 301-1 313.

[11] UNBEHAUEN H, RAO G. Continuous approaches to system identification - A survey [J]. Automatic, 1990, 26(1): 23-35.

[12] LAWRENZ W. CAN system engineering from theory to practical application [M]. New York: Springer-Verlag, 1997.

[13] 邬明宽. CAN 总线原理和应用系统设计 [M]. 北京: 航空航天大学出版社, 1996.

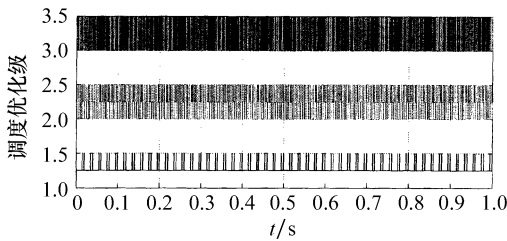


图 4 网络控制系统中 3 个直流电动机的调度时序  
Fig. 4 Scheduling of three DC servo motors in NCSs

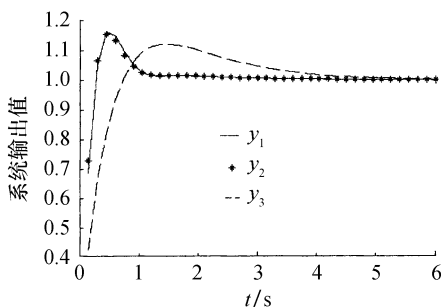


图 5 网络控制系统中 3 个直流电动机的输出  
Fig. 5 Output of three DC servo motors in NCSs