

网络控制系统的时延在线估计与时延补偿策略研究

朱孔阳

(青岛科技大学 自主导航与智能控制研究所, 山东 青岛 266042)

摘要: 针对网络控制系统中的网络时延问题, 引入了一种时延在线估计算法, 并根据动态矩阵控制的特点, 提出了一种基于分段动态矩阵控制算法的网络时延补偿策略, 利用分段动态矩阵控制算法对网络控制系统中的时延信号进行预测, 以补偿其在网络传输中的时延。

关键词: 网络控制系统; 网络时延; 在线估计; 动态矩阵控制

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2010)12-0075-03

Compensating strategy based on dynamic matrix control for networked control system

ZHU Kong Yang

(Autonomous Navigation and Intelligent Control Institute, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China)

Abstract: Aiming at the network delay problems in networked control systems, an online evaluation technology for network induced time delay is proposed. According to the characteristics of dynamic matrix control, a new compensating strategy is proposed in this paper based on the segmented time-stamped dynamic matrix control method. This strategy can predict the future situation of the delay signals in the networked control systems, using segmented time-stamped dynamic matrix control algorithm to compensate for the delay in network transmission.

Key words: networked control system; network delay; online evaluation; dynamic matrix control

网络控制系统是通过网络形成的反馈控制系统, 在该类系统中, 被控对象与控制器以及控制器与驱动器之间通过一个公共的网络平台连接, 这种网络化的控制模式具有信息资源能够共享、连接线数少、易于扩展、易于维护、高效率、高可靠性及灵活等优点, 但是由于网络带宽是有限的, 因此资源竞争和网络拥塞等现象在网络控制系统中是不可避免的。网络时延会降低系统的性能, 甚至影响系统的稳定性, 所以如何解决网络控制系统中存在的时延问题已成为学术界研究的热点。目前针对网络时延的研究有多种, 如 Rogelio 针对模型(时间驱动)提出了基于观测器的分布延迟补偿器, 其优点是可用已有的确定性系统设计和分析方法对闭环网络控制系统进行设计和分析, 不受延迟特性变化的影响; 其缺点是将所有延迟都转化为最大延迟, 人为地将传输延迟扩大化, 因此降低了系统应有的控制性能。对于具有随机传输延迟的闭环控制系统, 若按最大传输延迟来设计控制器, 则所得闭环控制系统不一定稳定^[1]。熊远生、俞立、徐建明将时间延迟通过引入一个信息接收缓冲区实现

不确定性, 得出的时间延迟可以大于一个采样周期^[2]。Ray 对随机时变分布延迟下的输出反馈时延网络系统进行研究, 采用基于最小方差滤波器和动态规划原理, 得到了具有随机延迟补偿的 LQR 控制器, 但不满足确定性等价原理^[3]。

动态矩阵控制 DMC (Dynamic Matrix Control) 是一种典型的预测控制算法, 它采用易于测取的对象阶跃响应做模型, 算法简单, 计算量小, 鲁棒性强。本文利用分段 DMC 算法来设计网络控制系统中的控制器, 不仅为网络控制系统的控制器设计提供了一条新途径, 同时通过基于分段 DMC 算法的控制器对网络传输中的信息进行时延补偿, 更好地解决了网络控制系统中的时延问题。

1 ARTT 时延在线估计技术

ARTT 技术是一种基于以太网的时延在线估计技术, 相比于普通的时间戳方法, 它较好地克服了利用时间戳方法测量网络时延所带来的远程节点与本地节点之间的时钟同步问题。ARTT 技术通过在数据包中增加 ICMP 包头, 类似于时间戳方法, 每个数据包包括采样

技术与方法 Technique and Method

值、控制器的输出值、检验码等信息,本地节点与远程控制器的数据包结构如图 1 所示。已有研究表明,传输过程中数据包的网络时延主要表现在数据包在路由器(交换机)的缓冲队列上的等待时延^[5],因此可以用式(1)和式(2)分别估计数据包在路由器上的最大、最小等待时延。

ICMP	Error code	;	Measurement #1	...	;	Measurement #8
ICMP	Access code	;	Control#1	;	Control#2	

图 1 ARTT 数据包结构

$$\tau_{\max} = \sum_{i=1}^n \tau_{\max}^i = \sum_{i=1}^n \left[\delta_i + \frac{8p(\beta_i+1)}{\eta_i} \right] \quad (1)$$

$$\tau_{\min} = \sum_{i=1}^n \tau_{\min}^i = \sum_{i=1}^n \left[\delta_i + \frac{8p}{\eta_i} \right] \quad (2)$$

其中 τ_{\max}^i 和 τ_{\min}^i 是数据包通过第 i 个路由器的最大、最小时延; n 表示数据包在传输过程中经过的路由器个数; p 表示数据包的大小,单位为 B/s; δ_i 表示第 i 个路由器处理时间; β_i 表示第 i 个路由器缓冲区的所缓存的数据包的个数; η_i 表示第 i 个路由器的传输带宽,单位为 bit/s。因此,如果数据包在传输过程中经历的路由器的带宽和所配置的缓冲区的大小都相同并且数据包传输过程中无丢包现象,则数据包从源节点到目标节点的网络时延的估计可以转换为计算数据包在传输过程中所经历的路由器的数量,然后通过式(1)和式(2)在线估计时延的大小。另一方面,由 TCP/IP 协议可知,数据包每通过一个路由器,TTL 的值就会减 1,由此可以利用 ARTT 数据包结构,通过对 ICMP 报头 TTL 字段设置合适的值,通过式(3)和式(4)来在线估计数据包传输的网络时延。

$$\tau_{\max} = \sum_{i=1}^J \tau_{\max}^i = \sum_{i=1}^J \left[\delta_i + \frac{8p(\beta_i+1)}{\eta_i} \right] \quad (3)$$

$$\tau_{\min} = \sum_{i=1}^J \tau_{\min}^i = \sum_{i=1}^J \left[\delta_i + \frac{8p}{\eta_i} \right] \quad (4)$$

其中 $J=(N_{TTL}^S - N_{TTL}^C)$, N_{TTL}^S 表示源节点的 TTL 的值, N_{TTL}^C 表示目标节点的 TTL 的值。

2 动态矩阵控制

DMC 是一种基于对象阶跃响应的预测控制算法,通过预测模型、滚动优化和反馈校正实施实现对控制系统的优化控制。一般单输入输出对象的阶跃响应模型为:

$$\tilde{y}_{PM}(k) = \tilde{y}_{r0}(k) + A\Delta u_M(k) \quad (5)$$

其中, $\tilde{y}_{PM}(k) = \begin{bmatrix} \tilde{y}_M(k+1|k) \\ \vdots \\ \tilde{y}_M(k+P|k) \end{bmatrix}$ $\tilde{y}_{r0}(k) = \begin{bmatrix} \tilde{y}_0(k+1|k) \\ \vdots \\ \tilde{y}_0(k+P|k) \end{bmatrix}$

$\tilde{y}_{PM}(k)$ 是未来 P 个采样周期的预测数据, $\tilde{y}_{r0}(k)$ 是未来 P 个采样周期在没有控制增量情况下的预测数据, $\Delta u_M(k)$ 是未来 M 个采样周期的控制增量, A 是由系统阶跃响应

参数 a_i 组成的动态矩阵。通过滚动优化目标函数,使未来优化时域内的预测输出值尽可能接近期望输出,优化性能指标为:

$$\min J(k) = \left\| \omega_p(k) - \tilde{y}_{PM}(k) \right\|_Q^2 + \left\| \Delta u_M(k) \right\|_R^2 \quad (6)$$

其中, $\omega_p(k) = [\omega(k+1) \cdots \omega(k+P)]^T$

$Q = \text{diag}(q_1, \dots, q_p)$ 和 $R = \text{diag}(r_1, \dots, r_M)$ 分别称为误差权矩阵和控制权矩阵。

将式(5)带入式(6),得:

$$\min J(k) = \left\| \omega_p(k) - \tilde{y}_{r0}(k) - A\Delta \tilde{u}_M(k) \right\|_Q^2 + \left\| \Delta u_M(k) \right\|_R^2 \quad (7)$$

使 $J(k)$ 取极小的 $\Delta u_M(k)$ 可通过极值必要条件 $dJ(k)/d\Delta u_M(k) = 0$ 求得:

$$\Delta u_M(k) = (A^T Q A + R)^{-1} A^T Q [\omega_p(k) - \tilde{y}_{r0}(k)] \quad (8)$$

它给出了 $\Delta u(k), \dots, \Delta u(k+M-1)$ 的最优值,DMC 取其中的即时控制增量 $\Delta u(k)$ 构成实际控制 $u(k) = u(k-1) + \Delta u(k)$ 作用于对象,到下一时刻,它又提出类似的优化问题求出 $\Delta u(k+1)$ 。根据式(8),可以求出:

$$\Delta u(k) = c^T \Delta u_M(k) = c^T (A^T Q A + R)^{-1} A^T Q [\omega_p(k) - \tilde{y}_{r0}(k)] \quad (9)$$

令:

$$\lambda_p = c^T (A^T Q A + R)^{-1} A^T Q \quad (10)$$

其中, c^T 的作用是获得控制增量的首项值,则 $\Delta u(k) = \lambda_k [\omega_p(k) - \tilde{y}_{r0}(k)]$ 。在 k 时刻把控制 $u(k)$ 实际加于对象时,相当于在对象输入端加上了一个幅值为 $\Delta u(k)$ 的阶跃,利用预测模型(5)可算出在其作用下未来时刻的输出预测值为:

$$\tilde{y}_M(k) = \tilde{y}_{N0}(k) + a\Delta u(k) \quad (11)$$

到下一采样时刻首先检测对象的实际输出 $y(k+1)$,并把它与式(11)算出的模型预测输出 $\tilde{y}_1(k+1|k)$ 相比较,构成输出误差 $e(k+1) = y(k+1) - \tilde{y}_1(k+1|k)$,并采用对 $e(k+1)$ 加权的方式修正对未来输出的预测: $\tilde{y}_{cor}(k+1) = \tilde{y}_M(k) + he(k+1)$ 。

其中, $\tilde{y}_{cor}(k+1)$ 为校正后的输出预测向量,由权系数组成的 N 维向量 $h = (h_1, \dots, h_N)^T$ 称为校正向量。在 $k+1$ 时刻,由于时间基点的变动,预测的未来时间点也将移到 $k+2, \dots, k+1+N$,因此 $\tilde{y}_{cor}(k+1)$ 的元素需要通过移位才能成为 $k+1$ 时刻的初始预测值,向量形式表示为:

$$\tilde{y}_{N0}(k+1) = S\tilde{y}_{cor}(k+1)$$

其中 S 为移位阵。

有了 $\tilde{y}_{N0}(k+1)$,就可进行 $k+1$ 时刻的优化计算,求出 $\Delta u(k+1)$ 。整个控制就是以这种结合反馈校正的滚动优化方式反复在线进行。

3 分段动态矩阵控制算法

通过 ARTT 时延在线估计技术来估算出网络时延,利用 $\tau = (\tau_{\min} + \tau_{\max})/2$ 来近似估计系统的网络时延^[5],假定

技术与方法 Technique and Method

第 k 个采样周期的控制时延为 τ_k 。

以网络时延小于一个采样周期的网络控制系统的建模为例,假设网络控制系统中的被控对象为线性定常系统,考虑了网络时延 τ 和系统外加干扰后,具有时延的系统可表示:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t - \tau) + v(t) \\ y(t) = Cx(t) + \omega(t) \end{cases}$$

式中, $v(t)$ 、 $\omega(t)$ 为互不相关的零均值白噪声,对系统在一个采样周期 T 内离散化,可得系统的离散状态方程为:

$$\begin{cases} x(k+1) = \varphi x(k) + \Gamma_0 u(k) + \Gamma_1 u(k-1) + v(k) \\ y(k) = Cx(k) + \omega(k) \end{cases} \quad (12)$$

$$\text{即} \begin{cases} x_{k+1} = \varphi x_k + \Gamma_0 u_k + \Gamma_1 u_{k-1} + v(k) \\ y_k = Cx_k + \omega_k \end{cases}$$

$$\text{其中 } \varphi = e^{AT}, \Gamma_0 = \int_T^{T-\tau} e^{As} ds B, \Gamma_1 = \int_{T-\tau}^T e^{As} ds B$$

参照标准 DMC 算法^[6],可得延迟离散系统(12)在第 k 个采样周期的阶跃响应系数向量为:

$$a = [a_1, a_2, \dots, a_N]^T = [a_1 - c^T \Gamma_1, a_1 - c^T \varphi^T \Gamma_1, \dots, a_1 - c^T \varphi^{N-1} \Gamma_1] \quad (13)$$

由于 λ_k 的计算过程要进行矩阵的求逆运算,如果每次都重新计算 λ_k ,则每次都要进行求逆运算,对控制器的运算能力要求很高,并且运算的时间较长。因此引入了一种分段近似算法,即分段动态矩阵控制算法。

假设 τ_k 在小于一个采样周期的某个延迟区间内变化,即 $\tau_k \in [\varphi_{\min}, \varphi_{\max}]h$,其中 $0 < \varphi_{\min} < \varphi_{\max} < 1$,将 $[\varphi_{\min}, \varphi_{\max}]$ 等分为 n 个子区间,利用式(13)和式(10)对应于每个子区间,分别离线计算出一组阶跃响应系数向量和控制系数向量。网络延迟参数取延迟子区间的中值(如表1所示),计算结果存储到控制器中。

表1 分段离线计算参数值

$[\varphi_{\min}, \varphi_{\max}]h$	\dots	$[\varphi_{n-1}, \varphi_{\max}]h$
$a_1 = a$	\dots	$a_n = a$
$\lambda_1 = \lambda$	\dots	$\lambda_n = \lambda$
$\tau = \frac{1}{2}(\varphi_{\min} + \varphi_1)h$	\dots	$\tau = \frac{1}{2}(\varphi_{n-1} + \varphi_{\max})h$
$\tau = \frac{1}{2}(\varphi_{\min} + \varphi_1)h$	\dots	$\tau = \frac{1}{2}(\varphi_{n-1} + \varphi_1)h$

根据 ARTT 的测量值估计该采样周期的控制延迟 τ_k ,并确定其所属的某一个延迟子区间。通过查表操作,取出对应的阶跃响应系数向量和控制系数向量为该时刻的 a 和 λ 。根据式(9)可计算该时刻的控制增量 $\Delta u(k)$,它通过累加运算求出控制量 $u(k)$ 作用于对象,并与阶跃响应系数向量 a 相乘,计算控制量作用后系统的预测输出值向量 $\hat{y}_{N1}(k)$,如此循环进行,以实现在线控制。由于将阶跃响应系数向量和控制系数向量的校正工作改为离线进行,在线运算只需根据估计的该时刻控制延迟 τ_k 来选取相应的计算系数,大大减少了所需的在线计算量,通过增大子区间个数 n 可获得更优的控制品质。

4 仿真实例

为检验分段动态矩阵控制算法具有良好的控制性

能,以具有固定时延系统的模型为例,通过仿真来验证动态矩阵控制对网络控制系统中的网络时延进行补偿的有效性。

设系统传递函数 $G(s) = \frac{s+3}{15s^2+2s+1}$,则延迟系统表

示为:

$$G'(s) = \frac{s+3}{15s^2+2s+1} e^{-s}$$

取采样周期为 10,对于时延系统下的 DMC 算法,需要足够的预测步数,否则会导致系统不稳定。在该仿真中选取控制时域 $M=5$,优化时域 $p=8$,模型长度 $n=30$, $t=20$ ms。为进一步验证 DMC 对网络控制系统时延补偿的有效性,对被控对象分别采用动态矩阵控制和 PID 控制,其中 PID 控制器参数分别为 $k_p=0.0005$, $k_i=0.006$; $k_d=0.01$,仿真结果如图 2 所示。

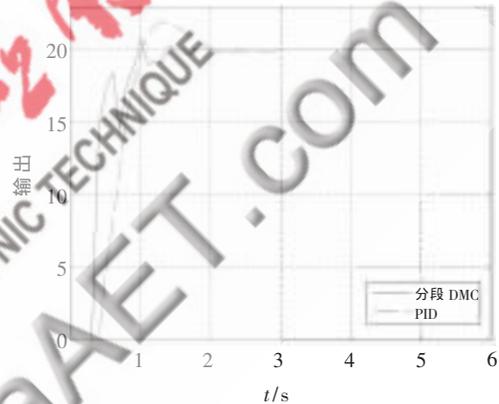


图2 采用分段 DMC 和 PID 控制的阶跃响应比较

通过仿真结果得知,采用基于 PID 控制的控制器,要经过更长一段时间的震荡才能收敛到稳定状态,而且超调量较大。而采用基于动态矩阵控制的控制器,系统响应速度快,趋于稳定的时间短,收敛性能更好,而且超调量相对较小,从而减少了时延对系统的影响,更好地实现了对网络控制系统中网络时延的补偿,提高了系统性能。

本文针对网络控制系统中网络传输中的时延问题,提出了一种基于分段动态矩阵控制算法的时延补偿策略,与传统的 PID 控制相比,采用基于分段动态矩阵控制算法的控制器,使得系统的响应速度快,趋于稳定的时间短,收敛性能优于 PID 控制,减少了时延对系统的影响,更好地实现了对网络控制系统中网络时延的补偿,提高了系统性能,并通过仿真验证了采用分段动态矩阵控制方法处理网络控制系统中时延问题的有效性和优越性。

参考文献

- [1] ROGELIO L, RAY A. An observe-based compensat for distributed delays[J]. Automatica, 1999(5): 903-908.
- [2] 熊远生,俞立,徐建明. 网络控制系统的滑模变结构预估控制器的设计[J]. 电气传动自动化, 2003, 25(4): 39-40, 54.

- [3] RAY A. Output feedback control under randomly varying distributed delays. Measurement and Control, 2004(4): 701-711.
- [4] 张奇智, 张彬, 张卫东. 随机延迟网络控制系统中的分段时戳动态矩阵控制[J]. 控制与决策, 2005, 20(8): 873-877.
- [5] 邵奇可, 俞立, 张贵军. 网络时延在线估计技术与控制器的

的协同设计[J]. 自动化学报, 2007, 33(7): 781-784.

- [6] 席裕庚. 预测控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.

(收稿日期: 2010-01-15)

作者简介:

朱孔阳, 男, 1983年生, 硕士研究生, 主要研究方向: 网络控制系统, 智能控制。

