

事件触发机制下网络控制系统的时延补偿算法

付伟

(重庆工业职业技术学院, 重庆 401120)

摘要: 构建工业云的基础和核心是网络控制系统。在工程实际应用中如何应对网络带来的影响、提升系统性能和稳定性, 这方面的研究具有重要意义。本文设置数据触发条件, 降低网络数据传输量, 提升网络效率。在触发条件下引入预测控制理论预估系统状态, 并采用滚动优化策略设计变增益的触发控制算法, 动态调整控制器反馈增益以获得更好的控制性能, 具有更小的保守性。最后通过仿真实验验证了方法的有效性。

关键词: 事件触发; 网络控制系统; 时延补偿

随着新一代信息技术与制造业的融合, 制造工程出现了云制造、云控制的新模式。网络控制系统 (Networked control systems, NCS) 进一步拓展和云化就成为云控制系统, 它是云控制系统的基础与核心。对网络控制系统的研究仍具有重要的理论和工程应用价值。在工程实际应用中控制系统往往很复杂, 调控参数非常多, 数据传输量也越来越多。然而, 网络存在传输时延、数据拥塞和数据丢包等问题, 对系统的性能和稳定性带来严峻的挑战。如何应对网络造成的影响, 采用合理的传输策略和控制算法以提升系统性能和稳定性是网络控制系统研究的重点。很多文献提出将时间驱动的周期性数据传输机制改为依据数据触发条件的事件触发机制可以有效降低系统数据的网络传输量。陈焯等在异步光电探测传感网络中采用事件触发机制, 减少了传感数据融合过程中的信息交互量。文献 [3, 4] 利用 Lyapunov 泛函和 LMI 方法获得了事件触发机制下系统稳定的充分条件。李艳辉等对事件触发机制下

具有 Bernoulli 随机特性的故障检测网络控制系统进行建模分析, 并用凸优化问题设计了故障检测滤波器。然而, 实际系统中传感数据传送的触发间隔, 以及数据在网络中传输的时延是复杂多变的, 控制器采用固定增益值难免带来一定的保守性。本文设计一种数据传送的触发规则, 并以此为条件, 结合预测控制理论预估多步系统状态和系统输出, 采用滚动优化策略动态调整反馈控制器增益, 动态补偿时延的影响。经过仿真实验验证了此方法具有较小的保守性, 能更好地获得系统性能。

一、系统说明

在图 1 所示的网络控制系统结构中, 传感器至控制器 (S-C 通道) 以及控制器至执行器 (C-A 通道) 均通过网络连接。被控对象为线性系统, 其状态空间模型由下式给出:

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \\ y(k) = Cx(k) \end{cases} \quad (1)$$

(1) 式中 A、B、C 为相应维数的常量矩阵。 $x(k)$ 、 $u(k)$ 、 $y(k)$ 分别表示系统状态向量、系统输入向量和系统输出向量。传感器采用时间驱动, 以固定采样周期对数据进行采集。不失一般性, 将采样周期 T 规范化为 1 表示。网络中传输的数据包带有时间戳, 并以单包形式进行传输。在执行器端设置延迟补偿器, 补偿器具有数据缓存区, 用以保存收到的最新时序的数据包, 并与下一次收到数据包的时间戳作比较, 留下最新时序的数据包。补偿器根据时间戳计算 C-A 通道的时延, 并根据时延从数据包中选择相应控制量作用于被控对象。记 S-C 通道的数据时延为 τ_{sc} , $0 < \tau_{sc} \leq d_1$; C-A 通道数据时延为 τ_{ca} , $0 < \tau_{ca} \leq d_2$ 。

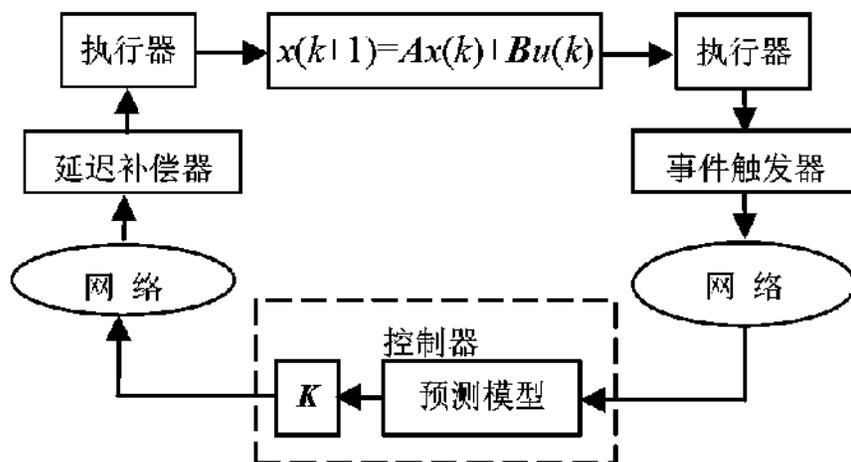


图 1 网络控制系统结构

事件触发器的触发规则设计为

$$\|x(k) - x(k-1)\| > \mu \|x(k-1)\| \quad (2)$$

(2) 式中 $0 < \mu < 1$ 为给定标量。 μ 的值越大, 触发的间隔时间越大, 传输的数据量越小。但 μ 值过大会影响系统的稳定性。设触发间隔时间有界, 即 $1 \leq \sigma(i) \leq M$, M 为正整数, $i \in \{1, 2, 3, \dots\}$ 。控制器采用状态反馈控制方法, 控制量以 $u(k) = Kx(k)$ 进行计算, K 为待设计的反馈增益。

二、变增益触发控制算法设计

设 k 时刻数据包经过网络时延 τ_{sc} 后从 S-C 通道到达控制器, 在传感器端数据包的触发间隔时间为 σ , 令 $\theta_k = \sigma(k) + \tau_{sc}(k)$ 。控制器根据时间戳可计算出延迟时间 θ_k , 并对系统状态作如下的多步计算:

$$\hat{x}(k - \theta_k + i | k - \theta_k) = (A^{\theta_k + i} + \sum_{j=0}^{\theta_k + i - 1} A^j BK)x(k - \theta_k) \quad (3)$$

(3) 式中 $i = 1, 2, \dots, d_2$ 。控制器根据式 (1) 和式 (3)

对系统输出做多步预测：

$$\hat{y}(k-\theta_k+i) = \mathbf{CA}^i \mathbf{x}(k-\theta_k) + \mathbf{C}(\mathbf{A}^i \mathbf{B} + \dots + \mathbf{A} \mathbf{B} + \mathbf{B}) \hat{u}(k-\theta_k) \quad (4)$$

定义系统输出预测向量 $\mathbf{Y}(k-\theta_k+1) = [\hat{y}(k-\theta_k+1) \dots \hat{y}(k-\theta_k+d2)]^T$ ，状态预测向量 $\mathbf{X}(k-\theta_k) = [x(k-\theta_k) \dots x(k-\theta_k+d2-1)]^T$ ，控制向量 $\mathbf{U}(k-\theta_k) = \mathbf{X}(k-\theta_k)$ 。将系统预测输出表示为下列方程：

$$\mathbf{Y}(k-\theta_k+1) = \mathbf{S}_x \hat{\mathbf{x}}(k-\theta_k) + \mathbf{S}_u \mathbf{U}(k-\theta_k) \quad (5)$$

(5) 式中 $\mathbf{S}_x = [\mathbf{CA} \ \mathbf{CA}^2 \ \dots \ \mathbf{CA}^{d2}]^T$

$\mathbf{S}_u = [\mathbf{CB} \ \mathbf{C}(\mathbf{A} \mathbf{B} + \mathbf{B}) \ \dots \ \mathbf{C}(\mathbf{A}^{d2-1} \mathbf{B} + \dots + \mathbf{A} \mathbf{B} + \mathbf{B})]^T$

为计算反馈增益 \mathbf{K} ，基于模型 (5) 设计以下优化问题：

$$\min_{\mathbf{U}} \mathbf{J}(\mathbf{Y}, \mathbf{U}, d_2) = \|\mathbf{QY}(k-\theta_k+1)\|^2 + \|\mathbf{RU}(k-\theta_k)\|^2 \quad (6)$$

其中加权矩阵 \mathbf{Q} 、 \mathbf{R} 为常数对角矩阵。将式 (6) 对 \mathbf{U} 求导并令其为 0，可以计算出优化问题的解：

$$\mathbf{U}(k-\theta_k) = -(\mathbf{S}_u^T \mathbf{Q}^T \mathbf{Q} \mathbf{S}_u + \mathbf{R}^T \mathbf{R})^{-1} \mathbf{S}_u^T \mathbf{Q}^T \mathbf{Q} \mathbf{S}_x \mathbf{X}(k-\theta_k) \quad (7)$$

因数据包到达控制器所经过的延迟时间为 $\theta_k = \tau_{sc}(k) + \sigma(k)$ 。因此，可定义状态反馈控制器的增益为：

$$\mathbf{K} = -[\mathbf{0} \ \dots \ \mathbf{0} \ \mathbf{1} \ \dots \ \mathbf{0}] (\mathbf{S}_u^T \mathbf{Q}^T \mathbf{Q} \mathbf{S}_u + \mathbf{R}^T \mathbf{R})^{-1} \mathbf{S}_u^T \mathbf{Q}^T \mathbf{Q} \mathbf{S}_x \quad (8)$$

式中的单位阵 \mathbf{I} 位置之前为 θ_k 个零矩阵。控制器可根据数据包的时间戳计算出延迟时间 θ_k ，然后滚动优化计算反馈增益 \mathbf{K} 。由于 θ_k 是时变的， \mathbf{K} 不为固定值。这种变增益的反馈触发控制能根据时延情况动态调节反馈增益，更好地补偿了网络时延和触发间隔对系统影响。控制器输出的控制向量 $\mathbf{U}(k) = \mathbf{X}(k)$ ，其包含了未来时刻的多步控制量。延迟补偿器根据控制数据包的时间戳计算出 C-A 通道的时延，从多步控制量序列中选取相应的控制量作用于被控对象，并在接收到新数据包之前保持控制量不变。

三、算例仿真

为验证本文算法的有效性，采用一个二阶直流伺服电机为实验对象来分析闭环系统的性能。给出此二阶直流电机的参数矩阵如下：

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1.6492 & -0.6703 \\ 1.0000 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = [0.0070 \ 0.0061]$$

设传感器的采样周期 $T = 0.04s$ ，S-C 通道和 C-A 通道的传输时延的上界均为 $3T$ 。系统输出 y 为电机转速，控制输入 u 为输入电压。设最大触发间隔为 3，参数 $\mu = 0.3$ ，取加权矩阵 $\mathbf{Q} = \mathbf{R} = \mathbf{I}$ 。将本文方法与其他研究文献方法进行对比，以方波为输入信号，观测系统输出响应，其结果如图 2 所示。可以看出，采用本文方法的系统响应的超调量更小，响应时间更短，说明本文提出的方法更有优越性。

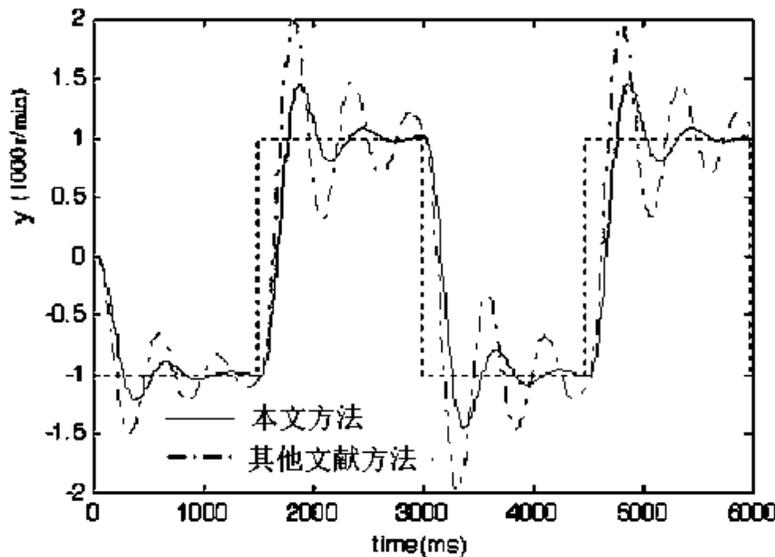


图 2 方波响应输出比较

四、结语

针对网络控制系统，本文提出一种时延补偿方法，在传感器端设置事件触发器，有效降低网络数据传输量，控制器预估多步系统状态和系统输出，采用滚动优化策略动态计算反馈增益。反馈增益不为固定值，而是根据时延和触发间隔时间动态调节，从而获得了更优的系统性能和较小的保守性。仿真实验验证了该方法的有效性。

参考文献：

[1] Losada M G. Contributions to networked and event-triggered control of linear systems[M]. Berlin: Springer, 2016: 13-18.
 [2] 陈焯, 盛安东. 事件触发异步融合算法及在光电传感网的应用[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(10): 182-186.
 [3] Suying Pan, Jin Zhou, Zhiyong Ye. Event-triggered dynamic

output feedback control for networked Markovian jump systems with partly unknown transition rates[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2021, 181(3): 539-561.

[4] Baoping Jiang, Hamid Reza Karimi, Yonggui Kao, et al. Takagi-Sugeno model based event-triggered fuzzy sliding mode control of networked control systems with semi-markovian switchings[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2020, 28(4): 673-683.

[5] 李艳辉, 陶莹莹. 事件触发机制下分布时滞网络化控制系统 H_∞ 故障检测[J]. 控制与决策, 2020, 35(12): 3059-3065.

作者简介: 付伟, 博士, 副教授。研究领域: 信息感知与控制、人工智能。

重庆市教委科学技术研究项目(KJQN201903202)。