

基于自适应事件触发的交通网络预测控制

赵刚, 王梦灵, 薛斌强, 严怀成

(华东理工大学信息科学与工程学院, 上海 200237)

摘要: 交通信号控制过程可以抽象为典型的网络控制系统。为了降低网络控制系统的通信资源占用率, 提出了一种自适应事件触发模型预测控制策略, 实现自适应状态传输并保证系统稳定。在自适应机制下, 只有当满足触发条件时, 系统状态和控制器控制律才由无线网络发送, 自适应触发参数决定当前采样数据发送的频率。设计了一种鲁棒的预测控制器, 保证网络控制系统的闭环稳定性。通过仿真实例说明了本文方法的有效性。

关键词: 事件触发; 模型预测控制; 网络控制系统

中图分类号: TP273+.5

文献标志码: A

随着智能交通系统 (Intelligent Transportation System, ITS) 和计算机网络技术的发展, 使得对路网交通信号灯进行控制成为可能。假设在控制过程中道路状态的采集以及对信号灯的调节信息是通过计算机网络进行传输的, 那么可以将交通信号控制过程看成是一个典型的网络控制系统 (Networked Control Systems, NCSs)。由于网络控制系统具有信号传输速度快、易于维护和安装等优点, 已在智能交通系统、工业控制系统、电力系统等领域得到了广泛的应用^[1-6]。针对 NCSs 常见的网络延迟、丢包、信号量化和多包传输等问题, 许多研究者采用事件触发 (Event-Triggered) 控制方案, 以节省网络的带宽资源。然而, 在实际应用中, 由于网络带宽的限制, 数据在传输前必须经过量化器量化, 这使得网络控制系统变为参数不确定系统, 给网络控制系统的鲁棒稳定性带来了很大的挑战。目前, 已有许多工作研究了不确定性系统或具有数据丢失的 NCSs 的量化稳定性。徐胜元等^[7] 研究了不确定性系统的鲁棒控制, 通过引入广义可镇定的 H_∞ 指标, 使得控制律能满足系统鲁棒稳定并满足性能指标。张凌波等^[8] 讨论了控制器失效情况下, 具有不确定性系统的鲁棒

H_∞ 控制问题。

与许多流行的控制方法相比, 模型预测控制 (Model Predictive Control, MPC) 以其在处理强约束和不确定性方面的便利性而受到了广泛的研究和关注。针对具有输入和状态硬约束的加性有界扰动线性系统, Dai 等^[9] 提出了一种鲁棒自触发模型预测控制算法。Li 等^[10] 提出了一种基于模型预测控制的框架, 通过约束优化问题解决控制包的设计问题, 并基于传输控制协议提出了一种有效的包传输和补偿机制。Liu 等^[11] 提出了一种新的随机网络诱导时延和数据丢失的控制方案——具有最优估计的网络预测控制, 利用无序或有延时的测量数据来提高估计精度。李德伟等^[12] 研究了具有有界扰动的不确定系统, 通过椭圆不变集方法设计出一种有效的鲁棒预测控制器。由此可见, MPC 控制策略可以有效地解决量化引起的系统不确定性问题。而且, 在网络控制系统中引入事件触发机制更能充分利用有限的网络带宽、降低网络延迟、减少网络带宽堵塞。

事件触发 MPC 机制的触发条件和优化设计是控制器设计需要解决的问题。本文提出了一种基于量化的自适应事件触发 MPC (Event-Triggered MPC,

收稿日期: 2019-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(61673177); 上海市“科技创新计划”人工智能专项(19DZ1209003); 上海市经济和信息化委员会人工智能创新发展专项资金计划(2019-RGZN-01015)

作者简介: 赵刚(1995—), 男, 湖北人, 硕士生, 主要研究方向为交通状态预测、交通大数据挖掘、预测控制。E-mail: 17092842067@163.com

通信联系人: 王梦灵, E-mail: wml_ling@ecust.edu.cn

ET-MPC) 方法, 保证具有量化的 NCSs 在闭环稳定下有良好的控制性能。通过求解线性矩阵不等式 (LMI) 得到事件触发矩阵, 基于事件触发时的控制律的预测性能计算, 给出自适应事件触发条件, 仿真实验结果验证了 ET-MPC 方法的有效性。

1 问题描述

图 1 示出了一种典型的智能交通信号控制系统框图^[13]。车辆检测节点检测包括车流量和道路信息, 通过无线或有线网络传送给路口信号控制节点, 控制节点根据传送过来的信号进行处理, 输出信号改变信号灯的持续时间, 从而达到对交通流的调节, 进而改变路面状况。假定交通网络系统对象是一个离散时间线性时不变系统, 我们可以将图 1 抽象为图 2 所示的具有量化的网络控制系统, 如式 (1) 所示。

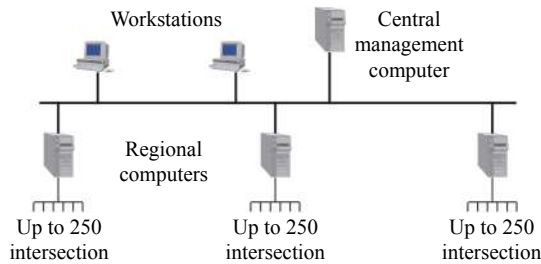


图 1 典型的交通信号网络控制系统框图

Fig. 1 Diagram of typical traffic signal network control system

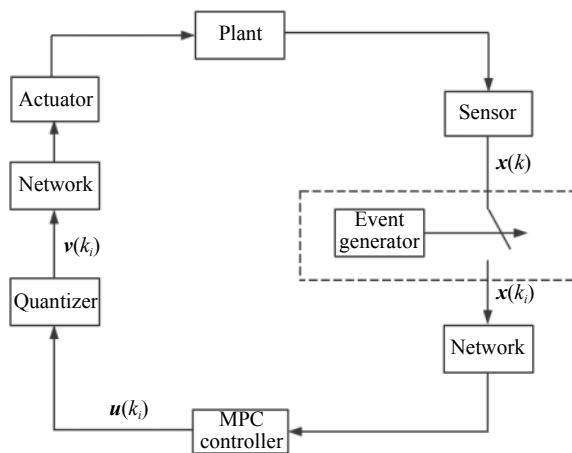


图 2 具有量化的事件触发预测控制网络控制系统框图

Fig. 2 Diagram of event-triggering predictive control for NCSs

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{v}(k) \quad (1)$$

其中: $\mathbf{x}(k)$ 为系统状态; $\mathbf{v}(k)$ 为控制对象的输入, 也是量化器的输出; \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 分别为系统矩阵; 图 2 中 k_i 为系统状态传输时刻, 是离散时刻 k 的子集。

本文的主要目的是设计一种合适的基于事件触发机制的状态反馈 MPC 控制器, 以保证 NCSs 在控制输入量化时系统能够稳定, 并且减少网络带宽资源的浪费。

1.1 基于扇形定界法的量化问题表示

量化器的输出可以表示为 $\mathbf{v}(k)=q(\mathbf{u}(k))$, 其中 $q(\mathbf{u}(k)) = [q_1(u_1(k)), q_2(u_2(k)), \dots, q_l(u_l(k))]^\top$, $q_l(\cdot)$ 表示量化器 $q(\cdot)$ 的第 l 个元素。值得注意的是, 文中使用的量化器是简单的静态时不变对数量化器。量化器集的量化级数可以表示为 $\beta_i = \rho_B^i \beta_0, \beta_0 > 0, 0 < \rho_B^i < 1$; 量化密度 $\alpha_q = \frac{1-\rho_B}{1+\rho_B}, 0 < \rho_B < 1$ 。文献 [14] 提出了一种有效的扇形定界法, 用以描述量化器输入与输出之间的关系:

$$\mathbf{v}(k) = q(\mathbf{u}(k)) = (\mathbf{I} + \mathbf{\Lambda}(k))\mathbf{u}(k) \quad (2)$$

基于式 (1) 和式 (2), 可以得到

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}(\mathbf{I} + \mathbf{\Lambda}(k))\mathbf{u}(k) \quad (3)$$

其中 $\mathbf{\Lambda}(k)$ 是对角矩阵且

$$\mathbf{\Lambda}(k) = \text{diag}\{\lambda_1(k), \lambda_2(k), \dots, \lambda_l(k)\}, \quad |\lambda_j(k)| \leq \alpha_q^j \quad (4)$$

在进一步的理论分析之前, 假设如下:

假设 1 传感器周期性地采样系统状态, 状态成功传输的时间由集合 $\{k_i | i \in N\}$ 给出。系统状态第一次成功传输的时刻 $k_0=0$ 。

假设 2 为了便于分析, 假设网络中没有延迟。显然, 传送成功的时刻 $\{k_i | i \in N\}$ 是 $\{mh | m \in N\}$ 的子集, 其中 h 是采样时间间隔。

1.2 具有量化的 NCSs 事件触发机制

本文将事件发生器置于传感器和 MPC 控制器之间, 给出了事件触发方案,

$$[\mathbf{x}(k_n) - \mathbf{x}(k_i)]^\top \mathbf{\Psi} [\mathbf{x}(k_n) - \mathbf{x}(k_i)] \geq \sigma \mathbf{x}(k_i)^\top \mathbf{\Psi} \mathbf{x}(k_i) \quad (5)$$

其中: $\mathbf{x}(k_i)$ 和 $\mathbf{x}(k_n)$ 是最后传输的状态和当前采样的状态; $\mathbf{\Psi} > 0$ 是待设计的正定权矩阵; $\sigma > 0$ 是 $[0, 1]$ 范围内给定的参数; k_n 是当前采样时间; k_i 是上次事件触发的时刻。为了更有效地利用网络资源, 参数 σ 在一定范围内改变, 由此得到了一种更为自适应的事件触发方法。从式 (5) 可以看出, 一个相对较小的 σ 使得事件驱动机制相对容易触发, 并且系统状态成功传输的数量将会增加。也就是说, 如果要使得触发事件数量较少, 需要相应地增大 σ 值, 但在最坏的情况下, 即 σ 的临界值应能保证网络控制系统的稳定性。

显然, 只有当当前采样时刻的状态信息与最新传输采样时刻的状态之间的差异超过某个阈值时, 才会传输当前状态。因此, 下一次的触发时刻可以

通过式 (6) 得到。

$$k_{i+1} = k_i + \inf_m \{mh|e(k_n)^T \Psi e(k_n) \geq \sigma x(k_i)^T \Psi x(k_i)\} \quad (6)$$

其中: $e(k_n) = x(k_n) - x(k_i)$; k_{i+1} 是下一次触发时刻; \inf 代表集合的下界。

在触发时刻 k_i , 对象状态 $x(k_i)$ 将通过网络从事件触发器传输到预测控制器。同样, 当不满足事件触发条件时, 当前状态将不被发送, 控制律保持不变。因此, 在 k_i 时刻, 可得 $v(k_i) = (I + \Lambda(k_i)) K x(k_i)$ (K 是控制器的状态反馈增益矩阵)。同时在时间间隔 $[k_i, k_{i+1})$ 之间, 由于事件没有触发, 控制输出保持不变。因此, 控制器输出如下:

$$u(k) = u(k_i) = K x(k_i), k \in [k_i, k_{i+1}) \quad (7)$$

具有控制输入量化和事件触发机制的 NCSs 模型表示如下:

$$x(k+1) = A x(k) + B(I + \Lambda(k_i)) K x(k_i), \quad k \in [k_i, k_{i+1}) \quad (8)$$

因此, 在式 (1) 中具有控制输入量化的 NCSs 被转换为具有结构不确定性和事件触发方案 (式 (8)) 的线性系统。不确定性给系统的稳定性和控制器的设计带来了很大的挑战, 常规的状态反馈方法不能直接应用于控制器的设计。模型预测控制具有控制效果好、鲁棒性强、能克服不确定性等优点, 可以用来解决上述问题。模型预测控制通常是基于一个预测模型和一个无限时域二次型性能指标的滚动时域优化算法。在触发时刻 k_i , 系统的状态预测可以描述为

$$x(k_i + l + 1|k_i) = A x(k_i + l|k_i) + B(I + \Lambda(k_i)) u(k_i + l|k_i), l \geq 0 \quad (9)$$

控制器的预测输出序列 $U_0^\infty(k_i)$ 表示为

$$U_0^\infty(k_i) = \{u(k_i|k_i), u(k_i + 1|k_i), \dots, u(k_i + l|k_i), \dots\}, l \geq 1 \quad (10)$$

其中: $x(k_i + l|k_i)$ 为 $k_i + l$ 时刻系统的状态, 它是根据 k_i 时刻系统状态估计得到的; $u(k_i + l|k_i)$ 是根据 k_i 时刻控制器的输出估计得到的在 $k_i + l$ 时刻控制器的输出; $u(k)$ 是 $U_0^\infty(k_i)$ 的第一个元素, 且有 $u(k) = u(k_i|k_i)$ 。同时 $u(k_i + l|k_i)$ 可以由 $u(k_i + l|k_i) = K x(k_i + l|k_i)$ 推出。

1.3 事件触发时刻预测控制率的计算

本文将事件触发方法引入到网络控制系统中, 使 MPC 控制器的控制律只在事件触发的情况下才得以更新, 即只在触发时刻计算控制器的输出, 然后在保证系统稳定性的前提下导出事件触发参数 Ψ 。

在事件触发时刻 k_i , 考虑了以下预测控制性能指标:

$$\min_{u_0^\infty} \max_{\Lambda(k_i)} J(k_i) = \min_{u_0^\infty} \max_{\Lambda(k_i)} \sum_{l=0}^{\infty} [x(k_i + l|k_i)^T Q x(k_i + l|k_i) + [(I + \Lambda(k_i)) u(k_i + l|k_i)]^T R [(I + \Lambda(k_i)) u(k_i + l|k_i)]] \quad (11)$$

其中: Q 和 R 是正定的对称权矩阵。

将 MPC 优化问题描述为一个 Min-Max 优化问题, 那么式 (11) 可以改写为

$$\min_{U_0^\infty} \max_{\Lambda(k_i)} \sum_{l=1}^{\infty} [J_0(k) + J_1(k)] \quad (12)$$

其中: $J_0(k) = \|x(k_i|k_i)\|_Q^2 + \|(I + \Lambda(k_i)) u(k_i|k_i)\|_R^2$; $J_1(k) = \sum_{l=1}^{\infty} [\|x(k_i + l|k_i)\|_Q^2 + \|(I + \Lambda(k_i)) u(k_i + l|k_i)\|_R^2]$ 。

本文选择 Lyapunov 函数 (式 (13)), 并假定 Lyapunov 函数满足鲁棒稳定性约束 (式 (14))。

$$V(x(k_i + l|k_i)) = x(k_i + l|k_i)^T P x(k_i + l|k_i), \quad l \geq 1, P > 0 \quad (13)$$

$$V(x(k_i + l + 1|k_i)) - V(x(k_i + l|k_i)) < -(\|x(k_i + l|k_i)\|_Q^2 + \|(I + \Lambda(k_i)) u(k_i + l|k_i)\|_R^2) \quad (14)$$

其中, P 是正定的对称矩阵。当系统 (式 (1)) 渐近稳定时, 根据 Lyapunov 稳定性定理, 可以很容易地导出 $x(\infty|k_i) = 0$ 且 $V(0|k_i) = 0 (V(k) > 0)$ 。

$$\sum_{l=1}^{\infty} [V(x(k_i + l + 1|k_i)) - V(x(k_i + l|k_i))] = \lim_{l \rightarrow \infty} [V(x(k_i + l + 1|k_i)) - V(x(k_i + 1|k_i))] = -V(x(k_i + 1|k_i)) \quad (15)$$

对式 (15) 从 $l=1$ 到 ∞ 累加求极限, 使得

$$V(x(k_i + 1|k_i)) > \max_{\Lambda(k_i)} J_1(k_i) \quad (16)$$

假定 $\zeta(k) = \sup\{J_0(k) + V(x(k_i + 1|k_i))\}$ (\sup 表示集合的上界), 那么 MPC 优化问题可以进一步描述为

$$\min_{u(k_i|k_i), K, P} \zeta(k_i) \quad (17)$$

同时满足式 (14) 以及式 (18) 两个条件。

$$\max_{\Lambda(k_i)} [\|x(k_i|k_i)\|_Q^2 + \|(I + \Lambda(k_i)) u(k_i|k_i)\|_R^2 + \|x(k_i + 1|k_i)\|_P^2] < \zeta(k_i), |\Lambda(k_i)| < \alpha_q \quad (18)$$

引理 1 (舒尔补引理) 给定对称矩阵 S , 以下 3 个条件是等价的。

- (1) $S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ * & S_{22} \end{bmatrix} < 0$
- (2) $S_{11} < 0, S_{22} - S_{12}^T S_{11}^{-1} S_{12} < 0$
- (3) $S_{22} < 0, S_{11} - S_{12} S_{22}^{-1} S_{12}^T < 0$

引理 2 给定适当维度的矩阵 D, E, F, R, F 和 R 是对称阵且 $R > 0$, 对于任意 F 满足 $F^T F \leq R$, 那么存在某个数 $\varepsilon > 0$ 使得

$$DFE + E^T F^T D^T \leq \varepsilon^{-1} E R E^T + \varepsilon D D^T$$

2 事件触发机制的预测控制器设计及稳定性分析

定理 1 给定对数量化器的给定量密度 α_q , 则

网络控制系统(式(11))渐近稳定,系统具有一定的控制性能 $\zeta(k_i)$,且MPC控制器增益为 $K=YX^{-1}$ 的条件是,如果存在正定矩阵 X 、 Y 、 L 、 M 、控制器输出 $u(k_i|k_i)$ 以及标量 $\zeta(k_i)$,使得

$$\min_{u(k_i|k_i), X, Y, L, M} \zeta(k_i) \quad (19)$$

并满足式(20)和式(21)

$$\begin{bmatrix} W_{11} & * \\ W_{21} & W_{22} \end{bmatrix} < 0 \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} < 0 \quad (21)$$

其中

$$W_{11} = \begin{bmatrix} -X & \\ AX+BY & -X+B\alpha_q L\alpha_q B^T \end{bmatrix}$$

$$W_{21} = \begin{bmatrix} Y & \alpha_q L\alpha_q B^T \\ Q^{1/2} X & 0 \end{bmatrix}$$

$$W_{22} = \begin{bmatrix} \alpha_q L\alpha_q - R^{-1} & * & * \\ 0 & -L & * \\ 0 & 0 & -I \end{bmatrix}$$

$$T_{11} = \begin{bmatrix} -\zeta(k_i) & * & * \\ Ax(k_i|k_i)+Bu(k_i|k_i) & B\alpha_q M\alpha_q B^T - X & * \\ Q^{1/2}x(k_i|k_i) & 0 & -I \end{bmatrix}$$

$$T_{21} = \begin{bmatrix} R^{1/2}u(k_i|k_i) & R^{1/2}\alpha_q M\alpha_q B^T & 0 \\ u(k_i|k_i) & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$T_{22} = \begin{bmatrix} R^{1/2}\alpha_q M\alpha_q R^{1/2} - I & * \\ 0 & -M \end{bmatrix}$$

证明 根据式(9)、式(13)、式(14)可以得到

$$\|x(k_i+l|k_i)\|_{\Theta}^2 - \|x(k_i+l|k_i)\|_P^2 + \|x(k_i+l|k_i)\|_Q^2 + \|(I+\Lambda(k_i))Kx(k_i+l|k_i)\|_R^2 < 0 \quad (22)$$

其中, $\Theta = [A+B(I+\Lambda(k_i))K]^T P [A+B(I+\Lambda(k_i))K]$ 。

定义 $\hat{\Lambda}(k_i) \triangleq \operatorname{argmax}_{\Lambda(k_i) \in [-\alpha_q, \alpha_q]} [J_0(k_i) + J_1(k_i)]$, $P = X^{-1}$, 对式(22)用舒尔补引理,可化为

$$\begin{bmatrix} Q-P & * & * \\ A+B(I+\Lambda(k_i))K & -P^{-1} & * \\ (I+\Lambda(k_i))K & 0 & R^{-1} \end{bmatrix} < 0 \quad (23)$$

然后,对式(23)左右两边同乘以块对角矩阵 $\operatorname{diag}\{P^{-1}(k), I, I\}$,便得到

$$\begin{bmatrix} 0 \\ B \\ I \end{bmatrix} \Lambda(k_i) [Y \ 0 \ 0] + [Y \ 0 \ 0]^T \Lambda(k_i) \begin{bmatrix} 0 \\ B \\ I \end{bmatrix}^T \leq \begin{bmatrix} 0 \\ B \\ I \end{bmatrix} \alpha_q L \alpha_q [0 \ B^T \ I] + \begin{bmatrix} Y^T \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} L^{-1} [Y \ 0 \ 0] \quad (24)$$

如果上述矩阵不等式满足

$$\begin{bmatrix} XQX-X & * & * \\ AX+BY & -X & * \\ Y & 0 & -R^{-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ B \\ I \end{bmatrix} \alpha_q L \alpha_q [0 \ B^T \ I] + \begin{bmatrix} Y^T \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} L^{-1} [Y \ 0 \ 0] < 0 \quad (25)$$

那么,利用舒尔补引理,就可以很容易地知道不等式(25)等价于式(20)。同样地,式(21)可以遵循上述过程推导得出,证毕。

根据定理1, MPC控制器是在触发时刻 k_i 求得的,即MPC控制器增益 K 仅在满足事件触发条件(式(5))时计算,从而减少计算量,节省网络带宽。

定理2 给定MPC控制器增益 K ,基于事件触发(式(5))的网络控制系统(式(8))是渐近稳定的,如果存在适当维度的正定对称矩阵 Ψ 和 P ,使得以下矩阵不等式成立。

$$\begin{bmatrix} \sigma\Psi - P & * & * \\ 0 & -\Psi & * \\ -PB(I+\Lambda(k_i))K - PA & PB(I+\Lambda(k_i))K & -P \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, \dots \quad (26)$$

证明 构造下列Lyapunov函数:

$$V[x(k)] = x(k)^T P x(k) \quad (27)$$

在时间间隔 $[k_i, k_{i+1})$ 内,可得

$$e(k) = x(k) - x(k_i), k \in [k_i, k_{i+1}) \quad (28)$$

式(8)可以改写为

$$x(k+1) = [A+B(I+\Lambda(k_i))K]x(k) - B(I+\Lambda(k_i))Ke(k) \quad (29)$$

那么在间隔 $[k_i, k_{i+1})$ 内,可得

$$\begin{aligned} \Delta V(x(k)) &= V(x(k+1)) - V(x(k)) = \\ & \|x(k+1)\|_P^2 - \|x(k)\|_P^2 \leq \\ & \|x(k+1)\|_P^2 - \|x(k)\|_P^2 + \sigma \|x(k)\|_{\Psi}^2 - \|e(k)\|_{\Psi}^2 = \\ & x(k)^T [(A+B\Gamma)^T P (A+B\Gamma) + \sigma\Psi - P] x(k) + \\ & x(k)^T [(A+B\Gamma)^T P B\Gamma] e(k) - e(k)^T [\Gamma^T B^T P (A+B\Gamma)] x(k) + e(k)^T (\Gamma^T B^T P B\Gamma - \Psi) e(k) = \\ & [x(k) \ e(k)]^T \Xi \begin{bmatrix} x(k) \\ e(k) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (30)$$

其中:

$$\Gamma = (I+\Lambda(k_i))K;$$

$$\Xi = \begin{bmatrix} \Xi_{11} & \Xi_{12} \\ \Xi_{21} & \Xi_{22} \end{bmatrix}$$

$$\Xi_{11} = [(A+B\Gamma)^T P (A+B\Gamma) + \sigma\Psi - P]$$

$$\Xi_{12} = -[(A+B\Gamma)^T P B\Gamma]$$

$$\Xi_{21} = -[\Gamma^T B^T P (A+B\Gamma)]$$

$$\Xi_{22} = [\Gamma^T B^T P B\Gamma - \Psi]$$

为了使不等式 $\Delta V(x(k)) < 0$ 成立, 只需确保 $\Xi < 0$ 成立。利用舒尔补引理, $\Xi < 0$ 等价于式 (26), 证毕。

具有量化的事件触发预测控制算法步骤如下:

(1) 给定采样时间 $\{mh|m \in N\}$, 采样长度为 m , 标量 $0 < v < 1$ (v 是步长增量), err_u 和 err_l 分别为系统采样状态和 MPC 预测的状态之间误差范数的上下限, 控制对象的系统矩阵 A, B ; 量化器常数 ρ_B, β_0 ; 正定对称矩阵 P, Q, R ; 控制器增益 K 和事件触发矩阵 Ψ 可由式 (20) 和式 (26) 计算得出。

(2) 系统状态第 1 次成功传输的时刻 $k_0=0$, 在每个当前采样时刻 k , 测量系统当前状态 $x(k)$, 根据式 (5) 判断事件触发条件是否满足。如满足事件触发条件, 则执行步骤(3); 如果不满足, 执行步骤(4)。

(3) 令 $i=i+1, k_i=k$, 计算控制输入 $v(k_i)$, 并将控制输入施加给系统。令 $k=k+1$, 返回步骤(2)继续。

(4) 控制律不变, 令 $v(k)=v(k_i)$ 并作用于系统, 令 $k=k+1$, 返回步骤(2)继续。

(5) 根据求得的控制律, 如果一步预测状态和当前采样状态之间的误差范数超过 err_u , 令 $\sigma=\sigma-v$, 并重复执行步骤(1)至步骤(4); 如果当前采样状态和上次传输状态的误差小于 err_l , 令 $\sigma=\sigma+v$, 并重复执行步骤(1)至步骤(4)。

3 数值仿真实验

为验证 ET-MPC 方法在具有量化的网络控制系统中的有效性, 假定交通信号网络控制系统可以抽象为式 (1) 对应的数学模型。选择 $Q=0.0001I_4$ (I_4 表示 4 阶单位矩阵), $R=0.001$, 量化器常数 $\rho_B=0.8$, $\beta_0=0.1$, 事件触发机制常数 $\sigma=0.1$, 状态向量初始值 $x_0=[2 \ -1 \ 0.5 \ -2]^T$, 式 (1) 中系统矩阵分别为^[15]

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0.1 & -0.0124 & -0.0004 \\ 0 & 1 & -0.25 & -0.0124 \\ 0 & 0 & 0.0619 & 0.1021 \\ 0 & 0 & 1.2502 & 0.0619 \end{bmatrix}$$

$$B = [0.0013 \ 0.0251 \ -0.0013 \ -0.0255]^T$$

利用 Matlab LMI 工具箱求解式 (20) 和式 (26), 可得控制器增益 K 与事件触发矩阵 Ψ 分别为

$$K = [-0.5879 \ -2.5100 \ 0.8083 \ 0.1195]$$

$$\Psi = \begin{bmatrix} 0.1234 & 0.1525 & -0.0610 & -0.0549 \\ 0.1525 & 1.6479 & -0.2235 & -0.0395 \\ -0.0610 & -0.2235 & 4.4279 & -0.0919 \\ -0.0549 & -0.0395 & -0.0919 & 3.5848 \end{bmatrix}$$

图 3、图 4 分别示出了当事件触发机制参数为

$\sigma=0.100$ 时, 系统的控制输入和状态轨迹。从图 3 可以看出, 控制输入仅在事件触发时刻更新, 因此该方法可以节省大量通信资源。从图 4 可以看出, 状态向量收敛到 0, 意味着上述方法可以保证系统的闭环稳定性。图 5 示出了事件的触发时刻, 纵轴代表事件触发 (0.5 代表触发, 0 代表不触发)。不同 σ 值下的网络利用率如表 1 所示。从表 1 可以看出, 事件触发机制下的发送数据远小于时间触发方式下的发送数据, 而且成功传输数据的数量随着 σ 增加而减少, 事件触发机制的自适应参数 σ 是为了更好地利用网络带宽。给定 σ 初始值,

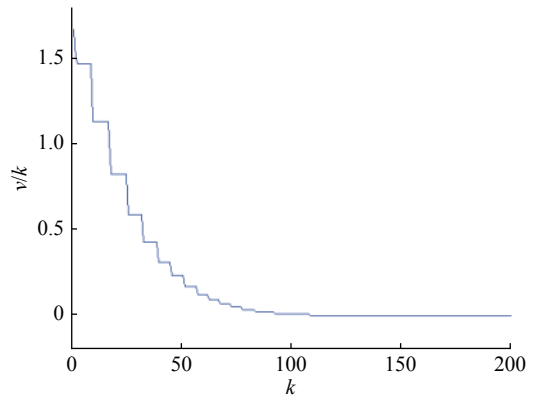


图 3 控制输入传输时刻

Fig. 3 Control input transmission times

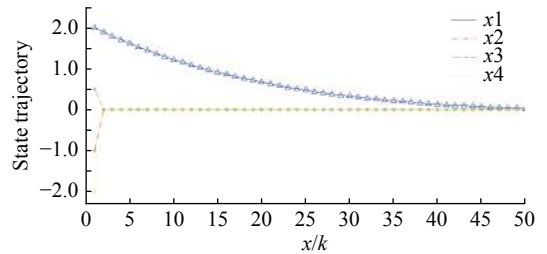


图 4 系统状态分量轨迹

Fig. 4 State trajectory of system

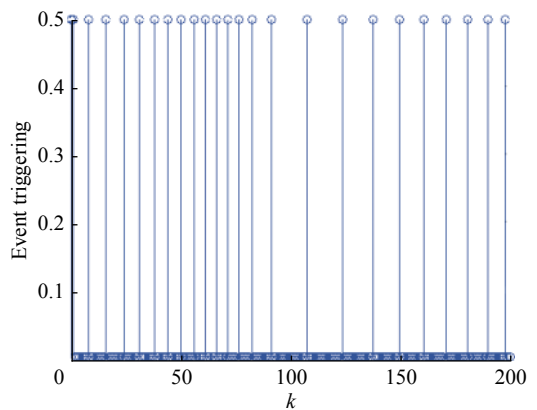


图 5 事件触发的时刻

Fig. 5 Triggering instants

表 1 自适应参数 σ 对触发事件的影响

Table 1 Effect of σ on even triggering times

σ	Triggering times	Triggering ratio%
0	200	100
0.001	175	87.5
0.070	30	15
0.100	25	12.5

随当前采样状态和最后传输状态的误差而变化。

4 结 论

由于交通信号控制系统可以抽象为典型的网络控制系统,针对网络控制系统存在量化以及有限的网络带宽等问题,本文提出了一种 ET-MPC 方法对交通信号控制过程进行探讨。采用 ET-MPC 算法可以利用事件触发方法的优点,节省了网络资源,通过在线优化计算可以及时补偿量化带来的不确定性。采用 LMI 方法对所述稳定性分析和控制器设计进行了研究,并给出了算法,通过仿真实例验证了该方法的有效性。

参考文献:

- [1] WANG J. A brief survey on networked control systems[C]// IEEE International Conference on Mechatronics & Automation. Beijing, China: IEEE, 2015: 212-216.
- [2] 石安伟. 具有随机长时延和不确定参数的网络控制系统稳定性研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2016.
- [3] 游科友, 谢立华. 网络控制系统的最新研究综述[J]. 自动化学报, 2013, 39(2): 101-118.
- [4] MAHMOUD M. S, SABIH M, ELSHAFEI M Event-triggered output feedback control for distributed networked systems[J]. *ISA Transactions*, 2016, 60: 294-302.
- [5] ZHAO Y B, KIM J, LIU G P. Error Bounded sensing for packet-based networked control systems[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 58(5): 1980-1989.
- [6] 张磊, 王思明. 网络化控制系统的非脆弱 H_∞ 控制[J]. *小型微型计算机系统*, 2019, 40(10): 2092-2096.
- [7] 徐胜元, 牛玉刚, 杨成梧. 参数不确定性奇异系统的鲁棒 H_∞ 控制[J]. *自动化学报*, 2004, 27(3): 397-400.
- [8] 张凌波, 顾幸生. 一类不确定广义系统的鲁棒可靠 H_∞ 控制[J]. *中南林学院学报*, 2006, 26(1): 106-108.
- [9] DAI L, XIA Y, GAO Y, *et al.* Distributed stochastic MPC of linear systems with additive uncertainty and coupled probabilistic constraints[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, 62(7): 3474-3481.
- [10] LI H, SHI Y. Network-based predictive control for constrained nonlinear systems with two-channel packet dropouts[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(3): 1574-1582.
- [11] LIU B, XIA Y, MAHMOUD M S, *et al.* New predictive control scheme for networked control systems[J]. *Circuits, Systems, and Signal Processing*, 2012, 31(3): 945-960.
- [12] 李德伟, 席裕庚. 有界扰动系统高效鲁棒预测控制器设计[J]. *控制理论与应用*, 2009, 26(5): 535-539.
- [13] LOWRIE P R. SCATS: The Sydney coordinated adaptive traffic system: Principles, methodology, algorithms[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Road Traffic Signaling. USA: IEEE, 1982: 67-70.
- [14] FU M, XIE L. The sector bound approach to quantized feedback control[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005, 50(11): 1698-1711.
- [15] ZOU Y, CHEN T, LI S. Network-based predictive control of multirate systems[J]. *IET Control Theory and Applications*, 2010, 4(7): 1145-1156.

Traffic Network Predictive Control Based on An Adaptive Event-Triggered Scheme

ZHAO Gang, WANG Mengling, XUE Binqiang, YAN Huaicheng

(School of Information Science and Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: The process of traffic signal control can be abstracted as a typical network control system. Network control systems have been extensively applied in many fields for its easy maintenance and installation. However, there are still some problems to be take care in practical analysis and design, such as network delay, packet loss, signal quantization and multi-packet transmission. Thus, the performance of the control system might decrease, which further leads to system instability. Dealing with these problems can help to promote its application. This paper presents an

adaptive event-triggered model predictive control strategy to reduce communication consumption of networked control systems. The resulting framework is used for the stabilization of uncertain NCSs subject to quantization adaptive state transmission. The system state and the predictive control law are sent by wireless network only when the triggering conditions are satisfied, where the adaptive triggering mechanism has more flexible and better performance. The adaptive triggering parameter decides how often to transmit the current sample data. Under this mechanism, a robust MPC is designed to ensure the closed-loop stability of NCS with quantized effects and achieve the desired control performance, which can reduce the energy consumption and improve the network congestion. An algorithm implementation of this method is given in the paper. Finally, an example is given to illustrate the effectiveness of the proposed results. The result shows that triggering parameter can save more communication resources on the basis of event-triggered mechanism. The proposed event-triggered model predictive control method can ensure the robust stability of the system.

Key words: event-triggered scheme; model prediction control; networked control system