

doi:10.16055/j.issn.1672-058X.2015.0002.012

网络控制系统多时延模型及切换策略研究*

张 春, 徐星星

(安徽工程大学 电气工程学院, 安徽 芜湖 241000)

摘 要:针对一类具有时变时延的网络化控制系统,为有效减少网络诱导时延对系统的影响,提出了一种网络控制系统多时延模型,基于切换系统理论提出了切换控制策略,并运用李雅普诺夫稳定判据分析了切换策略的稳定性;仿真结果表明:多时延切换模型能取得良好的暂态性能和稳态性能,具有很好的实时性.

关键词:网络化控制系统;多模型;切换;时延

中图分类号:TP391

文献标志码:A

文章编号:1672-058X(2015)02-0058-04

网络控制系统(Networked Control Systems,简称 NCS)是以网络作为信息传输通道的闭环控制系统,NCS在空间上是分布式的,传感器、执行器与控制器之间通过网络交换信息,这必然会引起网络诱导时延和丢包,时延和丢包的产生不但降低了系统的实时性,甚至会引起系统的不稳定,使得整个系统的分析和设计变得困难.因此,关于网络控制系统时延问题的研究始终是近年来国际控制领域的热点之一^[1,2].近期,针对时延问题,一些文献从多模型的不同角度进行研究并设计了相关控制器.文献[3]针对一类具有外加扰动的多时延网络控制系统,将采样率、网络诱导时延和丢包转化成系统的时变状态时延,建立系统在连续时域里的多输入多输出数学模型,讨论了其稳定性条件和鲁棒 H_∞ 控制器设计问题;文献[4]针对一类具有时变时延和丢包的网络化控制系统,同时考虑模型参数不确定性和外界扰动的影响,基于一种状态多时延模型,以时滞依赖的方法,推证出了确保闭环系统在执行器或传感器发生失效故障时具有鲁棒 H_∞ 完整性的判据;文献[5]针对多层次多模型预测控制系统的模型切换问题,在分析各通道非线性程度对模型层次切换以及层次间模型切换过程对系统动态特性的影响的基础上,提出了一种新的模型切换方法.

考虑网络控制系统不同对网络诱导时延的影响,将网络控制系统中的时延分为短时延(小于 1 个采样周期)情形和长时延(大于 1 个采样周期)情形,建立状态多时延模型,基于切换理论提出切换控制策略,分析系统稳定性.最后,通过仿真实验验证了多时延模型的有效性.

1 多时延系统模型建立

图 1 给出了系统闭环结构图,图 1 中 τ_{ca} 为控制器与执行器之间的时延, τ_{sc} 为传感器与控制器之间的时延,因控制器计算时延 τ_c 相比较于 τ_{ca} 和 τ_{sc} 很小,在处理中忽略不计.考虑被控对象状态方程为

收稿日期:2014-06-05;修回日期:2014-07-06.

* 基金项目:安徽省自然科学基金项目(1208085MF115).

作者简介:张春(1972-),男,安徽望江人,教授,从事电气传动、智能控制研究.

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

其中, $x_p(t), u_p(t), y_p(t)$ 分别为被控对象状态变量、输入变量和输出变量, A_p, B_p, C_p 为被控对象常系数矩阵.

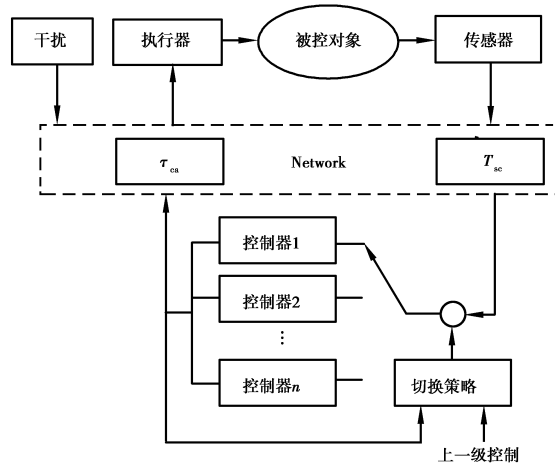


图 1 基于多时延模型的网络控制系统结构图

控制器 i 的状态方程为

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

其中, $x_c^i(t), u_c^i(t), y_c^i(t)$ 为第 i 个控制器的状态变量、输入变量和输出变量, $A_c^i, B_c^i, C_c^i, D_c^i$ 为第 i 个控制器常系数矩阵.

由于网络诱导时延的引入,若系统切换至控制器 i ,则各部分变量之间的关系可表示为

$$u_c^i(t) = y_p(t - \tau_{sc}) \quad (3)$$

$$y_p(t) = y_c^i(t - \tau_{ca}) \quad (4)$$

引入增广矩阵 $z_k = [x_p \quad x_c^i]^T$, 综合式(1)-(4), 系统多时延模型可描述为

$$\dot{x}(t) = \Xi^i x(t) + \sum_{l=1}^3 \Xi_l x(t - \tau_l(t)) \quad (5)$$

式(5)中, $\Xi^i = \begin{bmatrix} A_p + B_p D_c^i C_p & B_p C_c^i \\ B_c^i C_p & A_c^i \end{bmatrix}, \Xi_1 = \begin{bmatrix} B_p D_c^i C_p & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \Xi_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ B_c^i C_p & 0 \end{bmatrix}, \Xi_3 = \begin{bmatrix} 0 & B_p C_c^i \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, 0 < \tau_l(t) \leq h,$

$\tau_1(t) = \tau_{sc} + \tau_{ca}, \tau_2(t) = \tau_{sc}, \tau_3(t) = \tau_{ca}.$

2 多时延模型切换控制

2.1 多时延模型选择原则

多时延模型控制方法将系统的时延变化区域分成两个或多个不同的子区域, 在每个区域内设计相应的控制器来提高系统的暂态响应, 任一采样时刻基于切换准则选出最优模型. 此处根据网络控制系统中的时变时延特性提出短时延模型和长时延模型, 并设计适应不同时延特性的控制器, 为减小网络诱导时延的不利影响, 使系统的动态性能尽可能满足设计要求, 多时延模型选择原则是在系统运行过程中根据网络诱导时延选择合适的控制器, 当网络诱导时延较小时选控制性能较好的控制器, 当网络诱导时延较大时选择控制

性能较差的控制器,这样既减小了控制器设计中的保守性,又改善了系统整体性能^[6].

2.2 切换策略

切换系统可以看作是由一组连续微分方程子系统和作用在其中的切换规则构成的.由 m 个子系统构成的自治切换系统可由如式(6)的微分方程来描述^[7]

$$\dot{x} = f_{\zeta}(x, t) \quad (6)$$

其中 $\zeta: [0, \infty) \rightarrow M = \{1, 2, \dots, m\}$ 表示分段常值的切换信号,对每一个 $\zeta \in M, f_{\zeta}: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ 表示充分光滑的非线性函数.相应地,当 f_{ζ} 为线性函数时,得到如下的线性切换系统

$$\dot{x} = A_{\zeta}x(t) \quad (7)$$

基于多时延的模型自适应控制是通过在多个控制器之间切换来实现的.假定 T 为网络诱导时延超出当前控制器最大允许时延的时刻, $i(t)$ 为 t 时刻系统运行中的控制器的序号, R 为控制器序号的集合,则有

$$i(t) = \min \{j; \max \{\tau_{\zeta}(t)\} < \tau_{\max}^j, j \in R\} \quad (\forall t > T) \quad (8)$$

式(8)中, τ_{\max}^j 是第 j 个系统模型的最大允许时延,在 T 时刻,系统根据式(8)切换到相应的控制器.在多时延模型控制系统中,如何进行切换(也即切换的原则)是算法的关键.

3 稳定性分析

与通常连续系统或离散动态系统相比,切换系统具有这样的特殊性质:尽管每个子系统 f 都是不稳定的,但通过构造一个适当的切换策略可能会使整个切换系统是稳定的;反过来,对每个子系统 f 都存在 Lyapunov 函数,仍需对切换策略进行限制才能保证切换系统的稳定性.将系统(5)写成含有多时延系统模型的一般形式

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_{\zeta}x(t) + \sum_{i=1}^k A_{\zeta i}x(t - \tau_i) \\ \zeta(t) = s(x(t), \zeta(t^-)) \end{cases} \quad (9)$$

其中, s 为切换方案, $A_{\zeta}, A_{\zeta i}$ 为对应第 ζ 个子系统的常数矩阵, $\tau_i > 0$ 表示滞后时间.对于任意切换策略下的稳定,首先需要假设切换系统的每一个子系统都是稳定的,但是这还不足以保证系统在任意切换下都是稳定的,解决这类问题的一个可行的方法是找到使各个子系统存在共同 Lyapunov 函数的充分条件,如果各子系统存在共同 Lyapunov 函数导数都小于零,就可以保证切换系统对任意切换均渐近稳定,或者找到单值正定标量函数共同 Lyapunov 函数,使得共同 Lyapunov 函数沿着各个子系统的导数存在,存在一定的切换率,使状态空间每个区域,至少存在一个子系统使共同 Lyapunov 函数的能量递减,那么存在切换方案 s 保证系统渐近稳定^[7,8].

定理 1 对于系统(9),若存在 $\delta_{\zeta} \in \mathbb{R}, \delta_{\zeta} \geq 0, \sum_{\zeta=1}^m \delta_{\zeta} = 1$, 对称正定矩阵 $P, s \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 满足下述条件

$$\sum_{\zeta=1}^m \delta_{\zeta} \begin{bmatrix} A_{\zeta}^T P + P A_{\zeta} + \sum_{i=1}^k s_i & P A_{\zeta 1} & P A_{\zeta 2} & \cdots & P A_{\zeta k} \\ A_{\zeta 1}^T P & -s & 0 & \cdots & 0 \\ A_{\zeta 2}^T P & 0 & -s_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{\zeta k}^T P & 0 & 0 & \cdots & -s_k \end{bmatrix} < 0 \quad (10)$$

则存在切换方案 s , 可使多时延切换系统(9)渐近稳定.

证明 定义能量函数 $V(x(t), t) = x^T(t) P x(t) + \sum_{i=1}^k \int_{t-\tau}^t x^T(\tau) s x(\tau) d\tau$, 其中, P, s 为正定对称矩阵,故

$V(x(t), t)$ 是正定的. 由于切换系统的状态轨迹连续, 所以 $V(x(t), t)$ 连续. 沿式 (10) 的任意轨迹, $V(x(t), t)$ 关于时间的导数是

$$\dot{V}(x(t), t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ x(t - \tau_1) \\ x(t - \tau_2) \\ \vdots \\ x(t - \tau_k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{\zeta}^T P + PA_j + \sum_{i=1}^k s_i PA_{\zeta i} & PA_{\zeta 1} & PA_{\zeta 2} & \cdots & PA_{\zeta k} \\ A_{\zeta 1}^T P & -s_1 & 0 & \cdots & 0 \\ A_{\zeta 2}^T P & 0 & -s_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{\zeta k}^T P & 0 & 0 & \cdots & -s_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ x(t - \tau_1) \\ x(t - \tau_2) \\ \vdots \\ x(t - \tau_k) \end{bmatrix} \quad (11)$$

因矩阵不等式 (10) 对于所有 $\zeta = 1, 2, \dots, m$ 都成立, 那么对于任意切换方案, 都有 $V(x(t), t) < 0$. 因此 $V(x(t), t)$ 是一个 Lyapunov 能量递减泛函, 根据 Lyapunov 稳定判据, 系统 (9) 是渐近稳定的.

4 仿真实验与分析

为验证多时延模型及其切换策略的有效性, 图 1 中以直流电机为被控对象设计了基于多时延模型的网络化控制系统, 并进行了仿真研究, 直流电机模型为

$$G_p(s) = \frac{800}{s^2 + s} \quad (12)$$

为便于模拟长时延和短时延情形的不同, 对于控制器和执行器采用事件驱动方式, 传感器采用时间驱动方式. 短时延情形下控制器 1 采用 PI 控制器, 长时延情形下控制器 2 采用广义预测算法. 设采样周期为 0.001 s, 在 1 s 左右网络诱导时延由 0.000 5 s 变为 0.005 5 s, 当系统输入为矩形波时, 图 2 给出了系统输出响应曲线, 从图 2 中可以看出, 当时延发生变化 (即控制器模型发生变化) 时系统具有较好的实时性, 在控制器 1 作用下, 系统超调量为 10.796 9%, 调节时间为 3.864 0 s, 上升时间为 0.058 s; 在控制器 2 作用下, 系统超调量为 23.982 8%, 调节时间为 1.909 8 s, 上升时间为 0.018 s. 从仿真结果可以看出, 当网络诱导时延较小时, 系统暂态性能较好, 而当网络诱导时延较大时, 系统性能变差, 通过不断优化控制器的参数可进一步改善系统暂态性能和稳态性能.

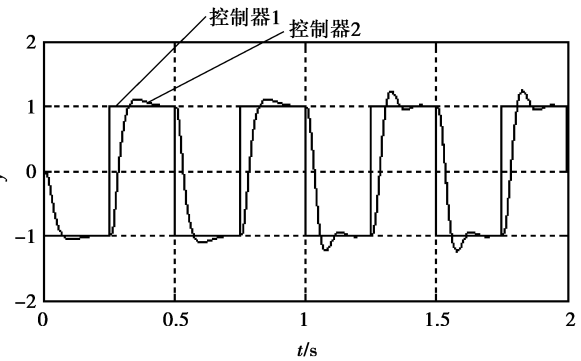


图 2 系统输出响应曲线

5 结 论

针对网络化控制系统具有时变时延和丢包的特点, 提出了多时延模型切换的控制方法, 分析了系统稳定性和可行性. 仿真结果表明, 引入的多模型切换控制策略能保证时延变化时系统具有良好的实时性和暂态性能. 下一步工作将进一步优化和设计不同时延情况下的控制器, 以获得更好的静态和动态性能.

参考文献:

[1] HESPANHA J P, NAGHSHTABRIZI P, XU Y. A Survey of Recent Results in Networked Control Systems [J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(1): 138-162
 [2] WALSH G C, YE H, BUSHNELL L. Stability Analysis of Networked Control Systems [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2002, 10(3): 438-446