

基于模型参数辨识的网络化系统控制策略

李美莲

(安徽三联学院,安徽合肥 230033)

摘要:针对网络控制系统中普遍存在的有限带宽问题,提出了基于模型参数辨识的网络化系统控制策略.该系统由多个子系统构成,各子系统包括辨识模块、更新模块和控制器模块等.系统在闭环更新周期内,通过辨识模块在线辨识系统参数以构造被控对象的动态模型并重构其状态,更新模块利用已辨识参数更新被控对象模型参数,最后由控制器模块输出控制量.系统通过合理地设计闭环更新周期,调节模型与被控对象的匹配程度,达到减小系统对网络带宽的需求及提高网络的使用率,进而实现基于模型的控制策略.结合直流电机的网络化控制系统进行的 Matlab 仿真实验,结果证明了所提方法的有效性.

关键词:网络控制系统;有限带宽;基于模型;参数辨识

中图分类号:TP273+.5 **文献标识码:**A doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2014.07.012

引用格式: Li Meilian. Control scheme for networked systems based on model parameter identification[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2014,44(7):618-622.

李美莲. 基于模型参数辨识的网络化系统控制策略[J]. 中国科学技术大学学报,2014,44(7):618-622.

Control scheme for networked systems based on model parameter identification

LI Meilian

(Anhui Sanlian University, Hefei 230033, China)

Abstract: In view of the limited bandwidth issues prevalently existing in the network control system (NCS), a system control scheme based on model parameter identification was presented. The system consists of several subsystems, each subsystem including an identification module, an update module and a controller module. In the closed-loop system update cycle, NCS constructed a dynamic model of the controlled object and reconstructed its state through online identification by the identification module, the update module updated the model parameter of the controlled object by the identified parameters, and finally the controller module output control variables. By designing rational cycle time and adjusting the matching degree of the module with the controlled object, the system's requirement for network bandwidth was reduced, and network utilization was improved, and thus the model-based control scheme was achieved. Matlab simulation was conducted in combination with the networked system of DC motors and the result shows the effectiveness of the proposed method.

Key words: networked control system; limited bandwidth; model-based; parameter identification

收稿日期:2014-03-06;修回日期:2014-05-17

基金项目:安徽省教育厅自然科学基金(KJ2013B089)资助.

作者简介:李美莲,女,1979年生,硕士/讲师.研究方向:信号处理. E-mail: 136172013@qq.com

0 引言

网络控制系统 (networked control system, NCS) 是由通信网络组成闭环回路的空间分布式控制系统^[1]. 该系统将闭环控制回路分散于实时网络上, 突破了传统控制系统在空间物理位置上的限制以及信息的封闭和局限性. 一方面, 在控制系统中引入网络, 网络资源实现了共享, 网络化系统则具有了传统控制系统无法具备的优点; 另一方面, 由于网络带宽资源的有限性以及通信网络本身固有的特征, 将网络引入控制系统不可避免地会引起数据包丢失、网络诱导时延、数据包错序和量化等问题^[2-5].

网络控制系统的实质是多系统共享网络资源, 有限的网络带宽一直是 NCS 中的瓶颈^[6]. 针对这一问题, 国内外学者从不同的角度和领域进行了大量的研究, 并已取得了一系列的研究成果. 文献[7-8]提出了基于模型的网络控制系统结构(model-based networked control systems, MB-NCS), 是以控制器使用被控对象模型, 来重构被控对象的状态, 使其在低速网络情况下保持稳定, 减少控制系统对网络带宽的需求, 降低网络的利用率. 以此为基础, 文献[9-10]采用了基于模型策略, 研究了网络化输入多采样率来控制系统的稳定性; 文献[11-12]针对网络控制系统中的脉冲时滞和量化参数, 分析了丢包对状态估计的影响, 给出了网络控制系统模型稳定的量化设计方法.

本文提出了一种改进的基于模型的网络化系统控制策略. 根据系统的可测量信息, 通过在线辨识估计系统参数构造系统模型, 并用参数的估计值不断更新模型参数, 以实现基于模型的控制策略, 减少系统对网络带宽的需求.

1 问题的描述

在该网络化控制系统中, 网络服务于 N 个子系统, 各子系统的传感器数据经通信网络发送至控制器, 如图 1 所示. 网络化系统结构中, 每个子系统都要占用一定的带宽用来保证各自控制器及被控对象的各项性能, 当子系统同时传输数据时, 有限的网络资源(即网络带宽和设备处理能力)会承受巨大的网络负载. 如果负载量超出网络的处理能力, 网络延迟和数据包的丢失率将会增大, 不可避免地导致网络性能下降.

由于网络带宽资源有限, 在保证通信网络的服

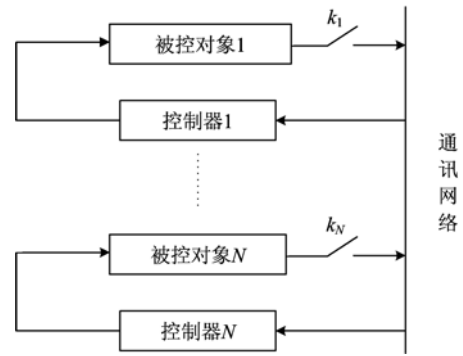


图 1 网络化系统结构图

Fig. 1 Structure of NCS

务质量和控制系统的性能指标的前提下, 网络不能同时为所有子系统提供服务, 同一时刻只有 $M(M < N)$ 个系统可以通过网络进行通信. 本文采用切换控制方法, 让各子系统工作在闭环与开环相切换的模式下, 分时利用网络来传输数据, 并用开关 $k_i (i=1, 2, \dots, N)$ 的开闭表示各子系统的工作模式, 即当网络服务于子系统 i 时, 相当于 $k_i = 1$, 系统工作在闭环模式下; 当网络服务于其他子系统时, 相当于 $k_i = 0$ 打开, 系统工作在开环模式下. 本文的主要目的就是在上述的切换工作方式下, 寻求某种控制策略, 一方面保证网络具有较高的吞吐率, 另一方面保证各子系统的性能指标, 使 NCS 表现良好.

2 控制策略

2.1 基于模型的控制策略

基于模型的网络控制系统结构如图 2 所示.

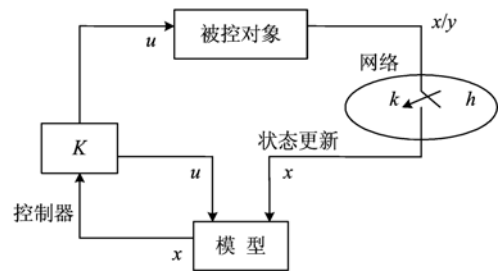


图 2 基于模型的网络化系统结构图

Fig. 2 Structure of model-based NCS

设离散化后系统的状态空间描述为 $x(n+1) = Ax(n) + Bu(n)$, 系统模型为 $\hat{x}(n+1) = \hat{A}\hat{x}(n) + \hat{B}u(n)$, 定义状态误差 $e = x - \hat{x}$, 模型误差 $\tilde{A} = A - \hat{A}$, $\tilde{B} = B - \hat{B}$, 增广状态为 $z = [x]^T$, 则有:

$$\begin{bmatrix} x(n+1) \\ e(n+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A + BK & -BK \\ \tilde{A} + \tilde{B}K & \hat{A} - \tilde{B}K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(n) \\ e(n) \end{bmatrix}$$

$n \in [n_k, n_{k+1}), n_{k+1} - n_k = h, e(n) = 0.$

定义 $z = \begin{bmatrix} x \\ e \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} A+BK & -BK \\ \tilde{A}+\tilde{B}K & \hat{A}-\tilde{B}K \end{bmatrix}$, 则系统

可写为:

$$z(n+1) = \mathbf{A}z(n), n \in [n_k, n_{k+1}) \quad (1)$$

定理 2.1 当且仅当 $\mathbf{M} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{A}^h \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ 的所有特征根在单位圆内时, 系统(1)的解 $z = [x]^T = [0]^T$ 全局指数稳定.

证明 当 $n \in [n_k, n_{k+1})$, 系统响应为:

$$z(n) = \begin{bmatrix} x(n) \\ e(n) \end{bmatrix} = \mathbf{A}^{n-n_k} \begin{bmatrix} x(n_k) \\ 0 \end{bmatrix} = \mathbf{A}^{n-n_k} z(n_k) \quad (2)$$

由于在 n_k 时刻, 即传输开始时刻, 状态误差 $e(n)$ 被复位, 则有:

$$z(n_k) = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{A}^h z(n_{k-1}),$$

由式(1)及初始条件可得:

$$\begin{aligned} z(n) &= \mathbf{A}^{n-n_k} z(n_k) = \\ & \mathbf{A}^{n-n_k} \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{A}^h z(n_{k-1}) = \\ & \mathbf{A}^{n-n_k} \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{A}^h \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{A}^h z(n_{k-2}) \\ & \dots \\ & = \mathbf{A}^{n-n_k} \left(\begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{A}^h \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \right)^k z(n_0) = \\ & \mathbf{A}^{n-n_k} \mathbf{M}^k z(n_0) \end{aligned} \quad (3)$$

对式(3)两边取范数, 有:

$$\|z(n)\| = \|\mathbf{A}^{n-n_k} \mathbf{M}^k z_0\| \leq \|\mathbf{A}^{n-n_k}\| \cdot \|\mathbf{M}\|^k \cdot \|z_0\|.$$

因为 $\|\mathbf{A}^{n-n_k}\| \leq \lambda(\mathbf{A})^{n-n_k} < \lambda(\mathbf{A})^{n_{k+1}-n_k} = \lambda(\mathbf{A})^h = K_1$, 其中 $\lambda(\mathbf{A})$ 为 \mathbf{A} 的最大奇异值; 又 \mathbf{M} 的所有特征根在单位圆内, 则 $\|\mathbf{M}\|^k \leq K_2 e^{-\alpha_1 k} \leq K_3 e^{-\alpha_2 n}$, 其中 $K_2, K_3, \alpha_1, \alpha_2 > 0$, 可得 $\|z(n)\| \leq K_1 \cdot K_3 e^{-\alpha_2 n} \cdot \|z_0\|$. 定理 2.1 的充分性得证.

定理 2.1 的必要性用反证法证明. 假设系统(1)稳定, 且 $\begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{A}^h \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ 的特征根至少有一个在单位圆外. 因为系统是稳定的, 从而保证了系统响应的周期采样也稳定, 即在 n_{k+1} 时刻采样, 系统响应的序列乘积 $z(n_{k+1})$ 会随时间收敛到 0. 而当 $n = n_{k+1}$ 时, 因为 \mathbf{M} 至少有一个特征根不在单位圆内, 则 $z(n_{k+1})$ 将随着 k 的增大而增大, 即当 $k \rightarrow \infty$ 时,

$\|z(n_{k+1})\| \rightarrow \infty$, 显然系统不能稳定, 这与假设矛盾, 定理 2.1 的必要性得证.

定理 2.1 给出了系统全局指数稳定的充要条件, 从中可以看出, 系统的稳定性取决于更新时间 h 和模型与被控对象的匹配程度. 在保证系统稳定的前提下, 模型越精确, 保证系统稳定的通信间隔 h 越大, 即系统工作在开环状态下的时间越长. 基于上述分析, 若能够通过可获取的系统信息在系统闭环时进行模型参数辨识, 并对模型参数进行不断更新, 则可减小系统对于网络的需求以及网络的使用率.

2.2 基于模型参数辨识的网络化系统控制策略

对于该 NCS 中的任意一个子系统, 构造如图 3 所示的基于模型参数辨识的控制系统结构. 其中 u, x, y 分别为系统的输入、状态及输出; \hat{x}, \hat{y} 为模型状态和输出; $\tilde{y} = y - \hat{y}$ 为预报误差; h 为开关 k 的闭合时间. 假设传感器为时间驱动, 以固定的采样周期对系统进行采样, 控制器、执行器为事件驱动, 并假设系统完全能控能观.

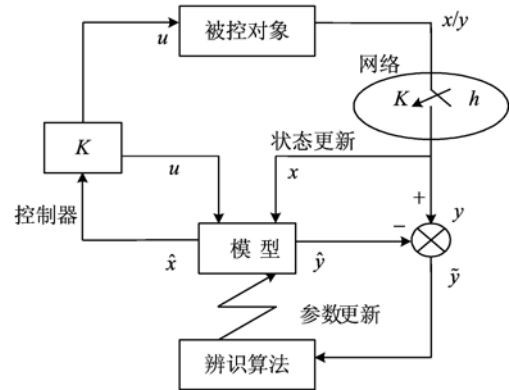


图 3 基于参数辨识的网络化系统结构图

Fig. 3 Structure of NCS based on parameter identification

该系统由三个模块组成: 辨识模块、更新模型和控制器模块. ①辨识模块的功能是根据被控对象的可测量信息, 在某种准则下, 采用递推辨识算法对系统参数进行估计, 直到参数的估计值达到满意的精确度为止. 由于子系统工作在切换模式下, 辨识过程仅在该子系统闭环时才进行参数辨识. ②更新模块主要实现模型参数的更新. 一方面, 用辨识模块获取的系统参数更新模型参数; 另一方面, 用系统状态更新更新模型状态. 更新模块同样仅在该子系统闭环时才进行, 其更新周期为 h . ③控制器模块生成控制指令. 当系统通过网络形成闭环时, $u = kx$; 开环时, 用模型状态实现反馈控制, $u = k\hat{x}$.

3 仿真研究

以网络化直流电机为研究对象, 直流伺服过程可描述为:

$$G(s) = \frac{1000}{s(s+1)}.$$

对上述传递函数进行 z 变换, 得:

$$G(z) = \frac{1000(1 - e^{-T})z}{z^2 - (1 + e^{-T})z + e^{-T}}.$$

建立如图 4 所示的辨识模型.

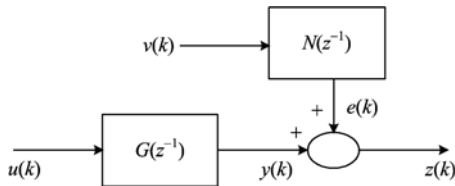


图 4 辨识模型
Fig. 4 Identification model

设系统采样周期为 $T=0.1$ s, 则待辨识系统为:

$$z(k) - 1.99z(k-1) + 0.99z(k-2) = 9.95u(k-1) + 0.0u(k-2) + v(k) \quad (4)$$

表 1 为参数辨识结果. 仿真结果表明, 大约在递推到第 8 步时, 参数辨识的结果基本上达到稳定状态, 此时参数的相对变化量 $E \leq 0.000\ 000\ 005$.

表 1 最小二乘递推算法的辨识结果

Tab. 1 Identification result of least square recurrence method

参 数	a_1	a_2	b_1	b_2
真值	-1.99	0.99	9.95	0.0
估计值 1	0.001 0	0.001 0	4.975 0	-4.973 0
估计值 2	-2.930 6	0.001 0	5.269 6	-4.678 4
估计值 3	-2.826 0	2.653 6	5.789 6	-4.158 4
估计值 4	-1.993 0	0.994 9	9.931 1	-0.016 9
估计值 5	-1.992 8	0.994 7	9.933 8	-0.015 3
估计值 6	-1.990 2	0.990 3	9.948 3	-0.001 5
估计值 7	-1.990 0	0.990 0	9.949 0	-0.000 1
估计值 8	-1.990 0	0.990 0	9.949 4	0.000 3

由式(4)写出被控对象的标准型为:

$$x(n+1) = \begin{bmatrix} 0 & -0.99 \\ 1 & 1.99 \end{bmatrix} x(n) + \begin{bmatrix} 0 \\ 9.95 \end{bmatrix} u(n).$$

选择第 3 组辨识参数, 得到如下模型:

$$\hat{x}(n+1) = \begin{bmatrix} 0 & -2.6536 \\ 0.1000 & 2.8260 \end{bmatrix} \hat{x}(n) + \begin{bmatrix} -4.1584 \\ 5.7896 \end{bmatrix} u(n);$$

模型参数

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} 0 & -2.6536 \\ 0.1000 & 2.8260 \end{bmatrix}, \hat{B} = \begin{bmatrix} -4.1584 \\ 5.7896 \end{bmatrix}.$$

模型误差

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} 0 & -1.6636 \\ 0.9000 & -0.836 \end{bmatrix}, \tilde{B} = \begin{bmatrix} 4.1584 \\ 4.1604 \end{bmatrix}.$$

控制器增益

$$K = [-0.0984].$$

通过 Matlab 仿真, 可得出 M 矩阵的最大特征根与更新时间的关系如图 5 所示.

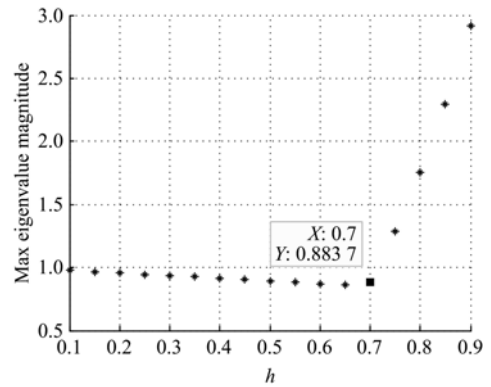


图 5 更新时间与 M 矩阵最大特征值的关系曲线

Fig. 5 Relation curve between refresh time and Max eigenvalue of M matrix

从图 5 可以看出, 当 $h > 0.7$ 时, M 的最大特征根的幅值大于 1, 保证系统稳定的 h 的最大值为 0.7.

减小模型误差, 选择第 8 组辨识参数, 则:

模型参数

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} 0 & -0.9900 \\ 0.9900 & 1.9900 \end{bmatrix}, \hat{B} = \begin{bmatrix} 0.0003 \\ 9.9494 \end{bmatrix}.$$

模型误差

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0100 & 0.0000 \end{bmatrix}, \tilde{B} = \begin{bmatrix} -0.0003 \\ 0.0006 \end{bmatrix}.$$

设控制器增益不变, 可得出 M 阵的最大特征根与 h 的关系, 如图 6 所示. 从图 6 可以看出, 由于辨

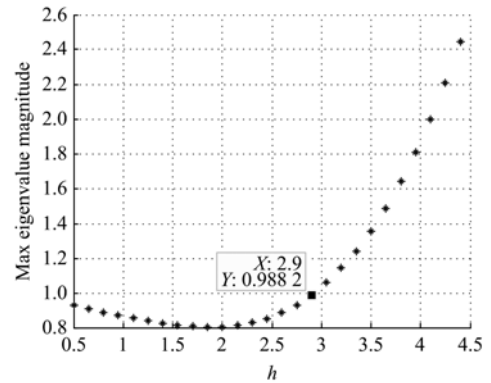


图 6 更新时间与 M 矩阵最大特征值的关系曲线

Fig. 6 Relation curve between refresh time and Max eigenvalue of M matrix

识到第 8 步时,模型的误差很小,因此保证系统稳定的 h 的最大值为 2.9.

图 7(a)、(b)所示分别为 $h=2$ 和 $h=3$ 时的系统状态响应曲线,可以看出 $h=2$ 时,系统是稳定的; $h=3$ 时,系统的状态运动明显是发散的.

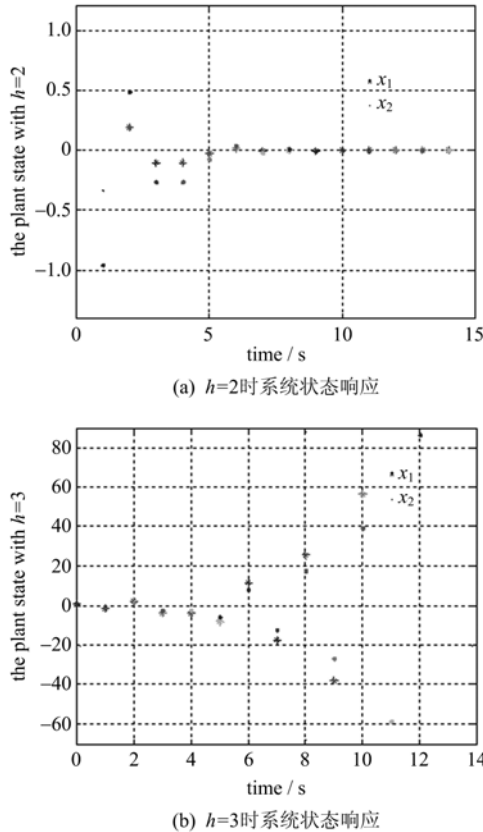


图 7 系统的状态响应曲线

Fig. 7 The state response curve of system

4 结论

本文考虑了网络控制系统中的有限带宽问题,采用基于模型的控制策略,给出了系统全局指数稳定的充分必要条件,指出系统的稳定性取决于更新时间和模型与被控对象的匹配程度,进而,提出了一种基于模型参数辨识的控制策略.该策略根据系统的可测量信息,通过在线辨识估计系统参数构造系统模型,并用参数的估计值不断更新模型参数,实现基于模型的控制策略,减少了系统对网络带宽的需求.

参考文献(References)

- [1] You K Y, Xie L H. Survey of recent progress in network control systems[J]. Acta Automation Sinica, 2013, 39(2): 101-118.
- [2] Feisheng Yang, Huaguang Zhang, Guotao Hui, Shenquan Wang. Mode-independent fuzzy fault-tolerant variable sampling stabilization of nonlinear networked systems with both time-varying and random delays[J]. Fuzzy Sets and Systems. 2012, 207(11): 45-63.
- [3] Liu G P, Sun J, Zhao Y B. Design, analysis and real-time implementation of networked predictive control systems[J]. Acta Automation Sinica, 2013, 39(11): 1 769-1 777.
- [4] Feng J, Wang S Q. Reliable fuzzy control for a class of nonlinear networked control systems with time delay[J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(7): 1 091-1 099.
- [5] Ma H, Yuan Z K, Tang G Y, et al. Time delay dependent optimal control of networked control system [C]// 32nd Chinese Control Conference. Xi'an, China: IEEE Press, 2013: 6 634-6 637.
- [6] Wang Z W, Guo G, Luo D S. Stability analysis of NCS with quantized state feedback[J]. Control Engineering of China, 2009, 16(4): 495-497. 王志文,郭戈,骆东松. 量化状态反馈网络化系统的稳定性分析[J]. 控制工程, 2009, 16(4): 495-497.
- [7] Zhang X R, Lu, Han Y D. Expectative modeling of wide-area damping networked control systems with long stochastic time delay [C]// 25th Control and Design Conference. Guiyang, China: IEEE Press, 2013: 3 103-3 108.
- [8] Wang Z W, Guo G. On model-based networked control systems with multi-rate input sampling [J]. International Journal of Modelling, Identification and Control, 2010, 10(1/2): 160-166.
- [9] Tian Z D, Gao X W, Li K. A hybrid time-delay prediction method for networked control system[J]. International Journal of Automation and Computing, 2014, 11(1): 19-24.
- [10] Tang X M, Ding B C. Design of networked control systems with bounded arbitrary time delays [J]. International Journal of Automation & Computing, 2012, 9(2): 182-190.
- [11] Zhao X L, Fei S M, Lin J X. Impulsive controller design for nonlinear networked control systems with time delay and packet dropouts[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2012, 23(3): 414-418.
- [12] Che W W, Wang J L, Yang G H. Quantized H_{∞} fault-tolerant control for networked control systems [J]. International Journal of Automation & Computing, 2012, 9(4): 352-357.
- 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.