

控制与决策

Control and Decision

基于HJB方程的无线传感器网络系统Minimax控制器设计

石元博, 王建辉, 方晓柯, 黄越洋, 顾树生

引用本文:

石元博, 王建辉, 方晓柯, 等. 基于HJB方程的无线传感器网络系统Minimax控制器设计[J]. 控制与决策, 2021, 36(4): 947–952.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0634>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

具有不确定丢包率和时变采样周期的Delta算子系统故障检测

Fault detection for delta operator systems with uncertain packet dropout rate and time-varying sampling periods

控制与决策. 2021, 36(5): 1101–1109 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1154>

基于T-S模糊模型的多时滞非线性网络切换控制系统非脆弱 H_∞ 控制

Non-fragile H_∞ control for multi-delay nonlinear network switching control system based on T-S model

控制与决策. 2021, 36(5): 1087–1094 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1098>

测量数据丢失的随机不确定系统滚动时域估计

Moving horizon estimation for stochastic uncertain system with missing measurements

控制与决策. 2021, 36(2): 450–456 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0648>

基于超级节点的分布式传感器节点定位算法

A distributed sensor nodes localization algorithm based on super nodes

控制与决策. 2020, 35(12): 2898–2906 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0219>

事件触发机制下分布时滞网络化控制系统 H_∞ 故障检测

Event-triggered H_∞ fault detection for networked control systems with distributed delays

控制与决策. 2020, 35(12): 3059–3065 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0456>

基于HJB方程的无线传感器网络系统Minimax控制器设计

石元博^{1,2†}, 王建辉¹, 方晓柯¹, 黄越洋³, 顾树生¹

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110004; 2. 辽宁石油化工大学 计算机与通信工程学院, 辽宁 抚顺 113001; 3. 辽宁石油化工大学 信息与控制工程学院, 辽宁 抚顺 113001)

摘要: 针对工业环境下无线传感器网络系统在受到外部较大干扰时的系统稳定性问题, 提出 Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) 方程与 Minimax 控制相结合的方法. 首先, 针对无线传感器网络在复杂工况环境下出现的网络时延和连续丢包有界的情况, 给出具有时延和丢包的无线传感器网络系统模型; 然后, 在 Minimax 性能指标函数下, 利用 HJB 方程设计系统的 Minimax 最优控制器, 进一步通过检验函数得出有关最大干扰的表达形式, 从而推导出系统稳定的充分条件; 最后, 通过数值算例和仿真验证系统在突发较大干扰时采用所提方法的可行性和有效性.

关键词: 无线传感器网络; 外部较大干扰; HJB 方程; Minimax 控制; 时延; 丢包

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.0634

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 石元博, 王建辉, 方晓柯, 等. 基于 HJB 方程的无线传感器网络系统 Minimax 控制器设计[J]. 控制与决策, 2021, 36(4): 947-952.

Design of Minimax controller for wireless sensor network systems based on HJB equation

SHI Yuan-bo^{1,2†}, WANG Jian-hui¹, FANG Xiao-ke¹, HUANG Yue-yang³, GU Shu-sheng¹

(1. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. College of Computer and Communication Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China; 3. College of Information and Control Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China)

Abstract: For solving the problem of stability of wireless sensor network (WSN) systems under greater external disturbance in industrial environment, this paper proposes a method that combines the Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) equation with the Minimax control method. Firstly, for solving the problem of that WSN has boundary of the delay and continuous packet loss in complex working conditions, the model of wireless sensor network systems with time delay and packet loss is given. Then, under the performance index function of Minimax, the Minimax optimal controller of the system is designed by using the HJB equation. Furthermore, a checking function is constructed to estimate the maximum disturbance that the system can withstand, and a sufficient condition for the stability of the system is proposed. Finally, the feasibility and effectiveness of the method are verified by numerical examples and simulation when the system is subject to sudden greater external disturbance.

Keywords: wireless sensor network; greater external disturbance; Hamilton-Jacobi-Bellman equation; Minimax control; time delay; packet loss

0 引言

无线传感器网络作为当今备受关注的复杂网络表现形式,具有节点密集、拓扑结构灵活等特点.在实际应用中,无线传感器网络被广泛应用于各个控制领域,如工业生产、智能机器人控制以及航空航天等领域^[1].与传统的网络相比,无线传感器网络具有更加灵活的体系结构和自由度^[2].在工业生产中,为了实现对复杂工况的生产过程进行控制,大多数工业网络

采用一种多跳形式的无线传感器网络将数据由传感器节点经汇聚节点传输到控制器节点,但是由于无线传感器网络传输中信道环境复杂、信道衰弱、传感器能耗降低以及工业干扰所带来的传感器时钟漂移等因素,使得无线传感器网络存在时延和丢包现象.另外,在工业环境下,控制系统大多数处于强电电路和电磁设备所形成的电磁环境中,例如在渣油加氢化工生产过程中包含大量的高温高压反应器,当反应器进

收稿日期: 2019-05-09; 修回日期: 2019-11-10.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61433004).

†通讯作者. E-mail: syb2011@yeah.net.

行工作时会产生大量的磁场,从而影响热电偶等传感器和PLC控制器等设备的正常使用.因此,在工业环境下来自空间的电磁辐射、电源、接地系统等都会带来突发性、瞬时干扰,这种干扰会对无线传感器网络控制的稳定性产生一定影响^[2-3].

目前,对于无线传感器网络的稳定性研究主要集中在考虑系统自身时延和丢包的影响,对于系统受到外界干扰时的稳定性研究较少.文献[4]针对具有随机网络时延和丢包的无线传感器网络设计了最优分散状态反馈控制器,每个控制器的最优控制律通过目前对象的状态和所有过去的控制信号获得;文献[5]针对同时具有网络诱导时延和数据丢包现象的Zigbee无线传感器网络控制系统,采用多Lyapunov方法设计状态反馈控制器,并对网络时延周期的不同情况,给出了系统指数均方稳定的充分条件;文献[6]针对无线网络控制系统丢包和时延同时存在的情况,建立时延变化的离散时间切换系统模型,并设计 H_∞ 控制器;文献[7]研究了具有扰动的不确定多变量网络控制系统的 H_∞ 控制;文献[8]针对离散时间系统的时延问题进行研究,并且所设计的静态控制器考虑了状态反馈和输出反馈两个方面的问题;文献[9]针对一类具有随机网络诱导时延、随机丢包和概率传感器故障的非线性离散网络控制系统设计混合 H_∞/H_2 控制器,以保证闭环系统的随机稳定性和 H_∞ 、 H_2 控制性能指标.上述研究对于系统的稳定性研究具有一定的贡献,但是并没有考虑到外部干扰的影响.系统受到外部干扰时,往往采取的方法是:当系统干扰较小时,采用滤波方法^[10-11];当系统干扰较大时,对系统受到的干扰定义一个上界^[12-13],但是干扰往往难以精确测量,因此这种做法具有一定的保守性.

考虑到工业环境下无线传感器网络在遇到较大突发干扰时,对系统的稳定性造成较大的影响,本文采用Minimax方法对无线传感器网络进行控制.为了获得系统模型的最优控制器,在Minimax性能指标函数下构建HJB(Hamilton-Jacobi-Bellman)方程.通过检验函数得到最大干扰的表达形式,推导出系统稳定的充分条件.数值算例和仿真结果表明,所设计的控制器具有较好的控制效果,能够解决存在时延和丢包的无线传感器网络系统在较大干扰下的稳定性问题.

1 问题提出及模型建立

考虑图1所示的工业环境下无线传感器网络控制系统结构^[14],假定控制器和执行器为事件驱动,传

感器为时间驱动,系统受到外部扰动的影响,其模型^[15]可以描述为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + EW(t), \\ y(t) = Cx(t) + FW(t). \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T \in R^n$ 为系统的状态向量; $u(t) \in R^m$ 为系统的控制输入; $W(t) \in R^k$ 为系统的扰动输入向量; $y(t) \in R^l$ 为系统的输出向量; A 、 B 、 C 、 E 、 F 为常数矩阵.

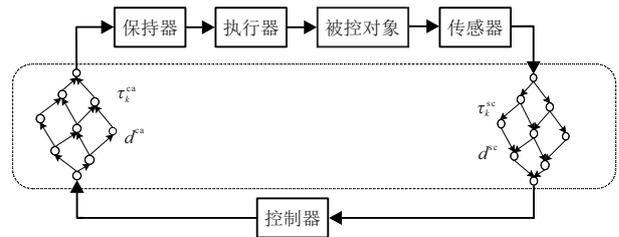


图1 无线传感器网络控制系统

如图1所示,无线传感器网络在经过多跳形式的数据传输后,容易存在时延和丢包现象,因此根据无线传感器网络控制系统的特点,作以下假设.

假设1 无线传感器网络控制系统中的控制器、执行器和保持器为事件驱动,传感器为时间驱动.

假设2 每个采样状态都是单包传递,每个包在传输过程中都有特定的时间戳.保持器接收最近时刻到达的数据包,即新数据包的时间戳大于目前保持器中数据包的时间戳.

假设3 在双边无线传感器网络中,从传感器经过多跳后到达汇聚节点的时延为 τ_k^{sn} ,从汇聚节点到控制器之间的时延为 τ_k^{nc} ,从控制器到无线传感器网络中汇聚节点的时延为 τ_k^{cn} ,由汇聚节点到执行器的时延为 τ_k^{na} ,则整个无线传感器网络控制系统的总时延可以表示为

$$\tau_k = \tau_k^{sn} + \tau_k^{nc} + \tau_k^{cn} + \tau_k^{na} + o,$$

其中 o 为网络中传感器节点时钟之间的漂移.由于采用较为可靠的通信网络,从传感器到汇聚节点的时延 τ_k^{sn} 和从汇聚节点到执行器的时延 τ_k^{na} 可以忽略不计,并假设网络时钟同步时钟漂移量 o 为零,则无线传感器网络总的时延可以写成

$$\tau_k = \tau_k^{nc} + \tau_k^{cn}.$$

从汇聚节点到控制器连续丢包的个数为 d^{nc} ,从控制器到汇聚节点连续丢包的个数为 d^{cn} ,整个系统数据包丢失的个数为

$$d = d^{nc} + d^{cn}.$$

传感器和保持器端的数据更新时序如图2所示.假设传感器的采样周期为 h ,采样时刻用 k 表示,保持器的更新时间为 $t_k, k = 1, 2, \dots$

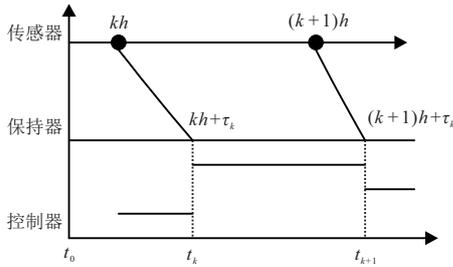


图2 传感器和保持端的数据更新时序图

如果不考虑丢包现象, kh 时刻的采样信号经过保持器到达控制器的时刻则为 $kh + \tau_k$, 所以控制器可以写成下面的形式:

$$u(t) = Kx(kh), t \in [kh + \tau_k, (k + 1)h + \tau_{k+1}]. \quad (2)$$

进一步定义

$$\beta(t) = t - kh, \quad (3)$$

则有

$$kh = t - \beta(t). \quad (4)$$

其中: 时滞 $\beta(t) \in [\min \tau_k, h + \max \tau_{k+1}] = [\min \tau_k, h + \bar{\tau}]$, $\min \tau_k$ 为网络的最小时延, $\bar{\tau}$ 为网络的最大时延.

将式(2)和(4)代入系统(1)中, 则系统(1)可以改写为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + BKx(t - \beta(t)) + EW(t), \\ y(t) = Cx(t) + FW(t). \end{cases} \quad (5)$$

由于数据包传输过程中的丢失以及数据传输乱序现象, 不是所有数据包都能够被保持器所接受, 因此, 当考虑到数据在传输的过程中存在丢包现象时, 时滞 $\beta(t)$ 将扩大范围^[15-16], 可以定义为

$$\beta(t) \in [\min \tau_k, (\bar{d} + 1)h + \max \tau_{k+\bar{d}+1}] = [\min \tau_k, \bar{\beta}]. \quad (6)$$

其中 $\bar{\beta} = (\bar{d} + 1)h + \bar{\tau}$, \bar{d} 为丢包的个数, $\bar{\tau}$ 为考虑丢包时网络的最大时延. 这里存在两个正常数 τ_m, τ_M , 有 $\tau_m \leq \min \tau_k \leq \bar{\beta} \leq \tau_M$.

2 基于HJB方程的Minimax控制器设计

定义Minimax性能指标函数如下:

$$J = \int_0^\infty (x^T Qx + u^T Ru - \gamma^2 W^T W) dt. \quad (7)$$

其中: $Q = Q^T \geq 0, R = R^T \geq 0, \gamma$ 为常数.

根据文献[17-18]对HJB方程的定义, 假设存在一个最优值函数 $v(t)$, 则可以构造系统(1)的HJB方程如下:

$$\frac{\partial v[x(t), t]}{\partial t} = -\min \left[x^T Qx + u^T Ru - \gamma^2 W^T W + \frac{\partial v[x(t), t]}{\partial x(t)} \dot{x} \right]. \quad (8)$$

将式(1)代入(8), 有

$$\frac{\partial v[x(t), t]}{\partial t} + x^T Qx + u^T Ru + \frac{1}{2} T_r \left\{ E^T \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} E \right\} + [Ax(t) + Bu] \frac{\partial v[x(t), t]}{\partial x} = 0. \quad (9)$$

根据最优性原理, 对式(9)中的 u 进行求导, 令

$$\frac{\partial v[x(t), t]}{\partial u(t)} = 0,$$

可得最优控制 $u(t)$ 具有如下形式:

$$u^*(t) = -\frac{1}{2} R^{-1} \left(\frac{\partial v}{\partial x} B \right)^T = -R^{-1} B^T P x(t), \quad (10)$$

其中 $v(x(t)) = x^T(t) P x(t)$. 将式(2)代入(10)中可得

$$u^*(t) = -R^{-1} B^T P x(t - \beta(t)). \quad (11)$$

定理1 考虑系统(5)和Minimax性能指标(7), 对于任意给定的常数 $\gamma > 0$, 若在极大干扰 W 条件下, 有以下不等式成立:

$$\begin{bmatrix} A^T P + PA + Q_1 & -R^{-1} PB & PE \\ -R^{-1} B^T P & R^{-1} P B B^T P - Q_1 & 0 \\ E^T P & 0 & -\gamma^2 I \end{bmatrix} \leq 0, \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} A^T P + PA + Q_1 & PB & PE \\ B^T P & -R^{-2} Q_1 & 0 \\ E^T P & 0 & 2\gamma^2 I \end{bmatrix} \leq 0. \quad (13)$$

则系统是渐近稳定的, 并且系统性能指标存在上界有如下形式:

$$\min \max J(u, W) = x^T(0) P x(0) + \int_{0-\beta(t)}^0 x^T(s) Q_1 x(s) ds. \quad (14)$$

证明 选择Lyapunov函数为

$$V(x(t)) = x^T(t) P x(t) + \int_{t-\beta(t)}^t x^T(s) Q_1 x(s) ds, \quad (15)$$

其中 P 为对称正定矩阵. 设计如下检验函数 $\Phi(t)$, 有如下形式:

$$\Phi(t) = \dot{V}(t) + u(t)^T R u(t) - \gamma^2 W^T W. \quad (16)$$

对于式(16)中的 $\Phi(t)$ 关于 W 求一阶导, 并令

$$\frac{\partial \Phi(t)}{\partial W} = 0,$$

有

$$W^* = \gamma^{-2} E^T P x. \quad (17)$$

再对 $\Phi(t)$ 关于 W 求二阶导, 可得

$$\frac{\partial^2 \Phi(t)}{\partial W^2(t)} = -\gamma^2 I < 0. \quad (18)$$

由式(18)可知

$$\frac{\partial^2 \Phi(t)}{\partial W^2(t)} < 0,$$

显然 Φ 关于 W 有极大值, 并且在此干扰的作用下, 对

系统造成最大影响.

将式(11)和(17)代入(16)中,可得如下矩阵的形式:

$$\begin{aligned} \min \max \Phi = \\ X^T \begin{bmatrix} A^T P + PA + \gamma^{-2} PEE^T P + Q_1 & & \\ & -R^{-1} B^T P & \\ & & -R^{-1} PB \\ & & & R^{-1} PBB^T P - Q_1 \end{bmatrix} X = \\ -X^T QX, \end{aligned} \quad (19)$$

其中 $X^T = [x^T, x^T(t - \beta(t))]$. 为了保证 $Q = Q^T \geq 0$, 由Schur补引理可知式(19)可以写为

$$\begin{bmatrix} A^T P + PA + Q_1 & -R^{-1} PB & PE \\ -R^{-1} B^T P & R^{-1} PBB^T P - Q_1 & 0 \\ E^T P & 0 & -\gamma^2 I \end{bmatrix} \leq 0. \quad (20)$$

将式(11)和(17)代入(16),有

$$\dot{V} = X^T \begin{bmatrix} A^T P + PA + 2\gamma^{-2} PEE^T P + Q_1 & -R^{-1} PB \\ -R^{-1} B^T P & -Q_1 \end{bmatrix} X. \quad (21)$$

为了满足 $\dot{V} < 0$, 应该满足下面条件:

$$\begin{bmatrix} A^T P + PA + Q_1 & PB & PE \\ B^T P & -R^{-2} Q_1 & 0 \\ E^T P & 0 & 2\gamma^2 I \end{bmatrix} \leq 0. \quad (22)$$

由定理1可知,若满足上述条件使得 $\dot{V} < 0$, 则系统是渐近稳定的, 因此, 若式(20)和(22)成立, 则闭环系统(5)是渐近稳定的.

根据式(16)和(19)有

$$\begin{aligned} \min \max J(u, W) = \\ - \int_0^\infty \dot{V} dt = \\ - \left[x^T(t) P x(t) + \int_{t-\beta(t)}^t x^T(\theta) Q_1 x(\theta) d\theta \right]_0^\infty. \end{aligned} \quad (23)$$

由时滞系统是渐近稳定的可知

$$x(\infty) = 0,$$

则相应的系统性能指标上界为

$$\begin{aligned} \min \max J(u, W) = \\ x^T(0) P x(0) + \int_{0-\beta(0)}^0 x^T(s) Q_1 x(s) ds. \end{aligned} \quad (24)$$

证明成立. \square

3 数值算例及仿真

算例1 考虑不受外部扰动的具有时延和丢包的无线传感器网络控制系统. 被控对象如下:

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t), \quad y(t) = [0 \ 1]x.$$

假设采样周期 $h = 0.02$ s, 网络时延大于一个采样周期, 最大网络时延 $\bar{\tau} = 0.2$, 最大连续丢包个数 $d = 38$, 根据式(6)中的关系, 输入时延的边界取 $\tau_m = 0.1, \tau_M = 0.99$. $R = 1, \gamma = 0.28, Q_1 = I$. 通过应用Matlab中的LMIs工具箱对定理1中的不等式进行寻优求解, 可得

$$P = \begin{bmatrix} 1.8850 & 0.4111 \\ 0.4111 & 1.3157 \end{bmatrix}.$$

控制器增益为

$$K = [0.4327 \ 1.3849].$$

假设系统的初始状态 $x_0 = [0.01 \ -0.01]^T$. 当系统不存在外部干扰时, 将本文所提出算法与文献[16]所提出改进的 H_∞ 算法(IH)进行比较. 该算法将网络时延划分为两个相等的子区间, 在此基础上构建新Lyapunov-Krasovskii函数, 为了降低算法的保守性, 新Lyapunov-Krasovskii函数微分交叉项的边界在不引入任何松弛矩阵变量的情况下进行估计. 状态响应曲线如图3和图4所示. 从图中可以看出本文所提算法状态 x_1, x_2 超调量较小, 并且响应速度较快, 能够快速达到稳定状态.

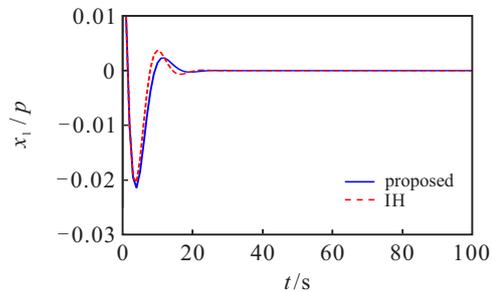


图3 系统状态 x_1 响应曲线

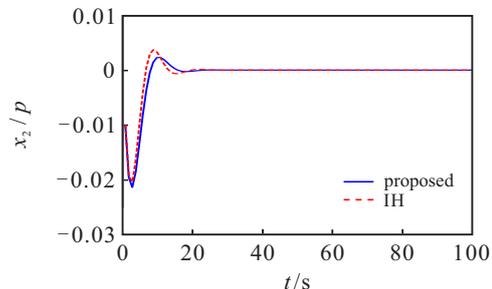


图4 系统状态 x_2 响应曲线

算例2 考虑存在外部扰动具有时延和丢包的无线传感器网络控制系统. 被控对象如下:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} W, \\ y(t) = [0 \ 1]x + 0.5W. \end{aligned}$$

假设在5s~15s期间,系统突然出现正弦干扰,干扰形式如下:

$$W(t) = \begin{cases} 0.2 \sin t, & 5 \leq t \leq 10; \\ 0, & t < 5 \text{ or } t > 10. \end{cases}$$

将本文所提出算法与文献[16]中的算法进行比较,系统的状态响应曲线如图5和图6所示.从曲线图中可以看出本文所提出算法与文献[16]中的算法状态曲线都存在波动,但是本文所提算法波动较小,并且响应速度更快.

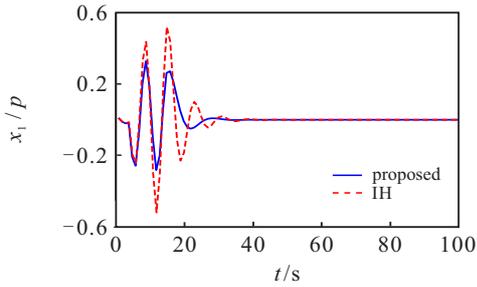


图5 正弦干扰下系统状态 x_1 响应曲线

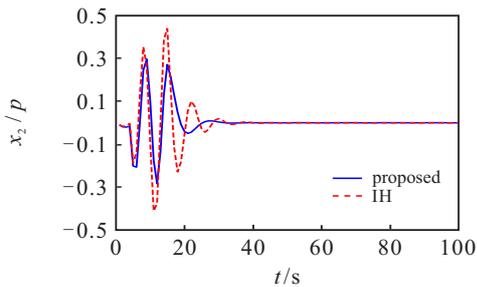


图6 正弦干扰下系统状态 x_2 响应曲线

假设在5s~15s期间,系统突然出现的外部干扰信号为随机干扰信号,形式如下:

$$W(t) = \begin{cases} \text{rand}(-1, 1), & 5 \leq t \leq 10; \\ 0, & t < 5 \text{ or } t > 10. \end{cases}$$

同样将本文所提出算法和文献[16]中的算法进行比较,系统的状态响应曲线如图7和图8所示.从曲线图中可以看出,本文所提出算法的鲁棒性较好,能够克服较大干扰对系统的影响,并且两状态最终收敛到零.文献[16]所提算法性能较差,受到干扰后状态波动比较大.

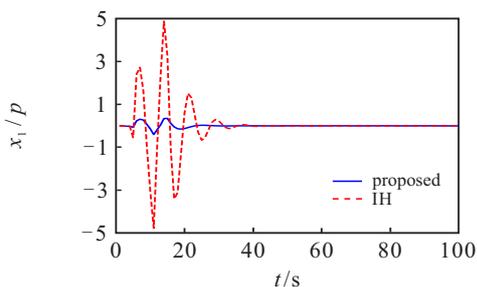


图7 随机干扰下系统状态 x_1 响应曲线

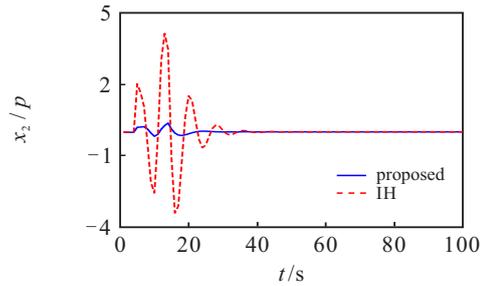


图8 随机干扰下系统状态 x_2 响应曲线

4 结论

本文研究了具有时延和丢包的无线传感器网络系统在面对外部较大干扰时系统稳定性问题.采用HJB方程和Minimax控制相结合的方式设计控制器,并求出系统的最优控制律.最后,通过数值算例与鲁棒控制器在正弦干扰和随机干扰两种情况下进行对比,说明了所设计控制器的有效性.

参考文献(References)

- [1] 马祖长, 孙怡宁, 梅涛. 无线传感器网络综述[J]. 通信学报, 2004, 25(4): 114-124.
(Ma Z C, Sun Y N, Mei T. Survey on wireless sensor networks[J]. Journal of China Institute of Communications, 2004, 25(4): 114-124.)
- [2] 邱占芝, 张庆灵, 刘明. 有时延和数据包丢失的网络控制系统控制器设计[J]. 控制与决策, 2006, 21(6): 625-630.
(Qiu Z Z, Zhang Q L, Liu M. Controller design for networked control systems with time-delay and data packet Dropout[J]. Control and Decision, 2006, 21(6): 625-630.)
- [3] 谢成祥, 胡维礼. 一类具有数据包丢失的长时延网络控制系统的分析与设计[J]. 控制理论与应用, 2010, 27(9): 1207-1213.
(Xie C X, Hu W L. Analysis and design of a class of networked-control systems with long time-delay and data-packet-dropout[J]. Control Theory & Applications, 2010, 27(9): 1207-1213.)
- [4] Wang X, Liu L, Wang Z. Stochastic optimal linear control of wireless networked control systems with delays and packet losses[J]. IET Control Theory & Applications, 2016, 10(7): 742-751.
- [5] Li J N, Su H Y, Wu Z G, et al. Modelling and control of Zigbee-based wireless networked control system with both network-induced delay and packet dropout[J]. International Journal of Systems Science, 2013, 44(6): 1160-1172.
- [6] Bai J J, Su H Y, Gao J F, et al. Modeling and stabilization of a wireless network control system with packet loss and time delay[J]. Journal of the Franklin Institute, 2012,

- 349(7): 2420-2430.
- [7] Wei L S, Jiang M, Chen Q G, et al. H_∞ robust control methodology of multi-variable NCSs[J]. Advanced Materials Research, 2010, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.97-101.2373.
- [8] Ma J Q, Pan F, Zhou L W, et al. Modelling and stabilization of a wireless network control system with time delay[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2018: 40(2): 1-7.
- [9] Wang Y Q, Lu J W, Li Z, et al. Mixed H_∞/H_2 control for a class of nonlinear networked control systems[J]. International Journal of Control Automation and Systems, 2016, 14(3): 655-665.
- [10] 祁波, 孙书利. 带未知通信干扰和丢包补偿的多传感器网络化不确定系统的分布式融合滤波[J]. 自动化学报, 2018, 44(6): 1107-1114.
(Qi B, Sun S L. Distributed fusion filtering for multi-sensor networked uncertain systems with Unknown communication disturbances and compensations of packet dropouts[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(6): 1107-1114.)
- [11] 于之训, 陈辉堂, 王月娟. 具有随机通讯延迟和噪声干扰的网络系统控制[J]. 控制与决策, 2000, 15(5): 518-522.
(Yu Z X, Chen H T, Wang Y J. Control of network system with random communication delay and noise disturbance[J]. Control and Decision, 2000, 15(5): 518-522.)
- [12] Song J, Niu Y, Zou Y. Robust finite-time bounded control for discrete-time stochastic systems with communication constraint[J]. IET Control Theory and Applications, 2015, 9(13): 2015-2021.
- [13] Tuan L, Phat V N. Finite-time stability and H_∞ control of linear discrete-time delay systems with norm-bounded disturbances[J]. Acta Mathematica Vietnamica, 2016, 41(3): 481-493.
- [14] Hu Z P, Deng F Q. Robust H_∞ control for networked systems with transmission delays and successive packet dropouts under stochastic sampling[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2017, 27(1): 84-107.
- [15] 郭亚锋, 李少远. 网络控制系统的 H_∞ 状态反馈控制器设计[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(3): 414-420.
(Guo Y F, Li S Y. H_∞ state-feedback controller design for networked control systems[J]. Control Theory & Applications, 2008, 25(3): 414-420.)
- [16] Li B, Wu J F, Huang L. Improved H_∞ control for networked control systems with network-induced delay and packet dropout[J]. Journal of Central South University, 2016, 23(5): 1215-1223.
- [17] Liu Z Q. Design of nonlinear optimal control for chaotic synchronization of coupled stochastic neural networks via Hamilton-Jacobi-Bellman equation[J]. Neural Networks, 2018, 99: 166-177.
- [18] Zhu J. A feedback optimal control by Hamilton-Jacobi-Bellman equation[J]. European Journal of Control, 2017, 37: 70-74.

作者简介

石元博(1981—), 男, 讲师, 博士生, 从事无线传感器网络控制等研究, E-mail: syb2011@yeah.net;

王建辉(1957—), 女, 教授, 博士生导师, 从事复杂工业控制模型等研究, E-mail: wangjianhui@ise.neu.edu.cn;

方晓柯(1973—), 女, 讲师, 博士, 从事智能控制理论与应用的研究, E-mail: fangxiaoke@ise.neu.edu.cn;

黄越洋(1981—), 女, 讲师, 博士, 从事无线传感器网络定位的研究, E-mail: huangyueyang_1981@126.com;

顾树生(1939—), 男, 教授, 博士生导师, 从事现代集成控制系统等研究, E-mail: gushusheng@ise.neu.edu.cn.

(责任编辑: 齐 霖)