DOI:10.13878/j.cnki.jnuist.2020.03.014

丁淑芬[1]　刘凯[2]　杨荣妮[1]

分布式传感器网络系统的网络预测控制

摘要

本文针对分布式传感器网络系统的Fornasini-Marchesini（FM）状态空间模型,对系统的预测控制器设计问题进行研究.特别是针对所考虑的二维FM传感器网络系统,提出了一种新的网络预测控制方案来补偿通信时滞.首先,根据李雅普诺夫稳定性理论,给出了二维系统保持稳定的充分条件;然后利用稳定性条件,提出了一种新的预测控制器设计策略并保证系统的控制性能;最后,通过一个数值实例验证了所设计控制器的有效性.

关键词

分布式传感器网络;FM状态空间模型;网络预测控制;通信时滞

中图分类号 TM464

文献标志码 A

收稿日期 2020-02-09

资助项目 国家自然科学基金(61873147);山东大学青年学者未来计划(2017WLJH27)

作者简介

丁淑芬,女,硕士生,研究方向网络化控制.shufending@163.com

杨荣妮(通信作者),女,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为网络化控制及多维系统.rnyang@sdu.edu.cn

1　山东大学 控制科学与工程学院,济南,250061

2　山东第一医科大学(山东省医学科学院)山东省职业卫生与职业病防治研究所,济南,250002

0　引言

随着计算机网络和传感器技术的发展,人们对分布式传感器网络产生了浓厚的兴趣[1].分布式传感器网络由大量位于不同区域的智能传感器节点组成[2],巨大的智能传感器网络在生活中有着广泛的应用,如农业、制造业、土木工程和其他许多领域.值得注意的是,分布式传感器网络在实际中常常建模为二维系统[3],其动态更新发生在两个独立的方向.二维系统作为一个新兴的领域,在实践和理论中都具有大量的应用,如图像与信号处理、迭代学习、二维数字数据滤波等方面,因此受到了广泛的关注[4-6],对其进行研究具有重要的意义[7-9].众所周知,两个变量使得二维系统的稳定性分析和控制设计问题比一维系统更加困难和复杂.虽然二维系统可以看作是一维系统的扩展,但是由于两个变量之间的耦合,一些稳定性分析和控制器设计的结果并不能直接应用到二维系统.因此,研究人员对二维系统的稳定性分析产生了浓厚的兴趣,Paszke等[10]研究了二维离散系统的鲁棒稳定性,Ahn等[11]实现了二维系统的耗散控制.

网络化控制系统通过引入通信网络,具有了闭环反馈控制结构,包含传感器、控制器和执行器等部件.与传统的点对点控制系统相比,网络控制系统具有布线少、资源共享、可靠性高等优点,在模型工程中有着广泛的应用[12].网络化控制系统在促进工业制造业发展的同时,也带来了通信网络的一些后续问题和挑战,如数据包丢失、网络引起的延迟和量化.通信时滞和数据丢失是网络通信系统最重要的问题,造成了网络通信系统性能下降.到目前为止,已经有许多和网络化控制系统相关的结论[13-17],如Lin等[13]研究了具有扰动和时滞的切换系统,Wang等[15]研究了故障估计和有限层位随机最优控制.

然而,这些控制方法只能被动地处理网络引起的时滞,而不能有效地补偿它们.为了消除通信时滞对系统稳定性的不利影响,Liu提出了一种有效的控制方案,即网络预测控制方法[18].上述文献的共同之处在于它们都关注于一维系统,而需要指出的是,二维系统的复杂特性使得网络预测控制方法与一维系统有很大的不同.分析二维系统最常用的方法是基于模型的状态空间方法,二维系统的模型包括FM模型、Roesser模型、Attasi模型等.本文采用了更具一般性的FM状态空间模型,由于基于FM模型的网络化预测控制问题还没有解决,因此本文的研究具有重要的理论和实践意义.

符号说明:对于矩阵 $\boldsymbol{A}$,$\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}$ 表示其转置矩阵,$\boldsymbol{P}>0$ 表示 $\boldsymbol{P}$ 为对称正定矩阵,$\lambda_{\min}(\boldsymbol{A})$,$\lambda_{\max}(\boldsymbol{A})$ 分别表示矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的最小、最大特征值,在对称块矩阵中,用 $*$ 表示矩阵元素的对称项.

1 问题描述

考虑以下二维系统 FM 状态空间模型[19]:

$$\boldsymbol{x}(n,t+1)=\boldsymbol{A}_1\boldsymbol{x}(n-1,t)+\boldsymbol{A}_2\boldsymbol{x}(n,t)+\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(n,t), \tag{1}$$

其中,$\boldsymbol{x}(n,t)$ 表示状态向量,$\boldsymbol{u}(n,t)$ 表示控制输入向量,$n\in\{0,1,\cdots,M\}$ 表示节点数目,t 代表离散时间,$\boldsymbol{A}_1$,$\boldsymbol{A}_2$,$\boldsymbol{B}$ 代表已知的系统矩阵.系统(1)的边界条件表示为$\{\boldsymbol{x}(n,0),\boldsymbol{x}(0,t)\}$.

定义 1 如果 $\lim\limits_{n+t\to\infty}\|\boldsymbol{x}(n,t)\|^2=0$,则称系统(1)在输入为零的情况下是渐近稳定的.

以下假设贯穿全文:

假设 1 通过网络传输的数据是有时间戳的.

注 1 与一维系统相比,二维系统有两个变量,信息在两个独立的方向上传播.近年来,有许多关于一维系统网络化预测控制的研究.在已有研究成果的基础上,还存在一些重要的、具有挑战性的问题,如二维系统的网络化预测控制问题.

2 稳定性分析

首先,我们关注在输入为零时系统(1)的稳定性,给出保证系统渐近稳定的充分条件.

假设 $\boldsymbol{u}(n,t)=0$,则系统(1)表示为

$$\boldsymbol{x}(n,t+1)=\boldsymbol{A}_1\boldsymbol{x}(n-1,t)+\boldsymbol{A}_2\boldsymbol{x}(n,t). \tag{2}$$

定理 1 如果存在矩阵 $\boldsymbol{P}_1>0,\boldsymbol{P}_2>0$,使得

$$\boldsymbol{\Psi}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{\Psi}_{11} & \boldsymbol{\Psi}_{12}\\ * & \boldsymbol{\Psi}_{22}\end{bmatrix}<0, \tag{3}$$

其中

$$\boldsymbol{\Psi}_{11}=\boldsymbol{A}_1^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{P}_1+\boldsymbol{P}_2)\boldsymbol{A}_1-\boldsymbol{P}_1,$$
$$\boldsymbol{\Psi}_{12}=\boldsymbol{A}_2^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{P}_1+\boldsymbol{P}_2)\boldsymbol{A}_1,$$
$$\boldsymbol{\Psi}_{22}=\boldsymbol{A}_2^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{P}_1+\boldsymbol{P}_2)\boldsymbol{A}_2-\boldsymbol{P}_2.$$

则称离散时间二维系统(2)是渐近稳定的.

证明

首先,构造如下指标函数:

$$J\triangleq\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(n,t+1)(\boldsymbol{P}_1+\boldsymbol{P}_2)\boldsymbol{x}(n,t+1)-\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(n-1,t)\boldsymbol{P}_1\boldsymbol{x}(n-1,t)-\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(n,t)\boldsymbol{P}_2\boldsymbol{x}(n,t), \tag{4}$$

根据式(2)和(4)可得:

$$J\triangleq[\boldsymbol{A}_1\boldsymbol{x}(n-1,t)+\boldsymbol{A}_2\boldsymbol{x}(n,t)]^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{P}_1+\boldsymbol{P}_2)[\boldsymbol{A}_1\boldsymbol{x}(n-1,t)+\boldsymbol{A}_2\boldsymbol{x}(n,t)]-\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(n-1,t)\boldsymbol{P}_1\boldsymbol{x}(n-1,t)-\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(n,t)\boldsymbol{P}_2\boldsymbol{x}(n,t)=\boldsymbol{\eta}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Psi}\boldsymbol{\eta},$$

其中

$$\boldsymbol{\eta}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}(n-1,t)\\ \boldsymbol{x}(n,t)\end{bmatrix}.$$

根据 $\boldsymbol{\Psi}<0$,则对于任意的 $\boldsymbol{\eta}\neq0$ 均有 $J<0$.因此可以得到下列式子:

$$\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(n,t+1)(\boldsymbol{P}_1+\boldsymbol{P}_2)\boldsymbol{x}(n,t+1)<\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(n-1,t)\boldsymbol{P}_1\boldsymbol{x}(n-1,t)+\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(n,t)\boldsymbol{P}_2\boldsymbol{x}(n,t). \tag{5}$$

通过式(5),我们可以知道存在一个标量 $0<\delta<1$ 使得下列不等式成立:

$$\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(n,t+1)(\boldsymbol{P}_1+\boldsymbol{P}_2)\boldsymbol{x}(n,t+1)\leqslant\delta[\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(n-1,t)\boldsymbol{P}_1\boldsymbol{x}(n-1,t)+\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(n,t)\boldsymbol{P}_2\boldsymbol{x}(n,t)]. \tag{6}$$

根据式(6)可得:

$$\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(n,0)(\boldsymbol{P}_1+\boldsymbol{P}_2)\boldsymbol{x}(n,0)=\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(n,0)(\boldsymbol{P}_1+\boldsymbol{P}_2)\boldsymbol{x}(n,0),$$
$$\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(n-1,1)(\boldsymbol{P}_1+\boldsymbol{P}_2)\boldsymbol{x}(n-1,1)\leqslant\delta[\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(n-2,0)\boldsymbol{P}_1\boldsymbol{x}(n-2,0)+\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(n-1,0)\boldsymbol{P}_2\boldsymbol{x}(n-1,0)]\leqslant\delta[\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(n-2,0)(\boldsymbol{P}_1+\boldsymbol{P}_2)\boldsymbol{x}(n-2,0)+\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(n-1,0)\boldsymbol{P}_2\boldsymbol{x}(n-1,0)],$$
$$\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(n-2,2)(\boldsymbol{P}_1+\boldsymbol{P}_2)\boldsymbol{x}(n-2,2)\leqslant\delta[\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(n-3,1)\boldsymbol{P}_1\boldsymbol{x}(n-3,1)+\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(n-2,1)\boldsymbol{P}_2\boldsymbol{x}(n-2,1)],$$
$$\vdots$$
$$\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(1,n-1)(\boldsymbol{P}_1+\boldsymbol{P}_2)\boldsymbol{x}(1,n-1)\leqslant\delta[\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(0,n-2)\boldsymbol{P}_1\boldsymbol{x}(0,n-2)+\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(1,n-2)\boldsymbol{P}_2\boldsymbol{x}(1,n-2)]\leqslant\delta[\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(0,n-2)(\boldsymbol{P}_1+\boldsymbol{P}_2)\boldsymbol{x}(0,n-2)+\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(1,n-2)\boldsymbol{P}_2\boldsymbol{x}(1,n-2)],$$
$$\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(0,n)(\boldsymbol{P}_1+\boldsymbol{P}_2)\boldsymbol{x}(0,n)=\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(0,n)(\boldsymbol{P}_1+\boldsymbol{P}_2)\boldsymbol{x}(0,n).$$

将上述不等式两端求和得到:

$$\sum_{t=0}^{n}\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(n-t,t)(\boldsymbol{P}_1+\boldsymbol{P}_2)\boldsymbol{x}(n-t,t)\leqslant\delta\sum_{t=0}^{n-2}[\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(n-2-t,t)(\boldsymbol{P}_1+\boldsymbol{P}_2)\boldsymbol{x}(n-2-t,t)+\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(n,0)(\boldsymbol{P}_1+\boldsymbol{P}_2)\boldsymbol{x}(n,0)+\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(0,n)(\boldsymbol{P}_1+\boldsymbol{P}_2)\boldsymbol{x}(0,n)].$$

迭代利用上式,我们得到:

$$\sum_{t=0}^{n}\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(n-t,t)(\boldsymbol{P}_1+\boldsymbol{P}_2)\boldsymbol{x}(n-t,t)\leqslant\sum_{t=0}^{n}\delta^t[\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(n-t,0)(\boldsymbol{P}_1+\boldsymbol{P}_2)\boldsymbol{x}(n-t,0)+$$

$$\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(0,n-t)(\boldsymbol{P}_1+\boldsymbol{P}_2)\boldsymbol{x}(0,n-t)].$$

因此我们有:

$$\sum_{t=0}^{n}\|\boldsymbol{x}(n-t,t)\|^2\leqslant\gamma\sum_{t=0}^{n}\delta^t(\|\boldsymbol{x}(n-t,0)\|^2+\|\boldsymbol{x}(0,n-t)\|^2),$$

其中,$\gamma=\dfrac{\lambda_{\max}(\boldsymbol{P}_1+\boldsymbol{P}_2)}{\lambda_{\min}(\boldsymbol{P}_1+\boldsymbol{P}_2)}$.

令 $\Delta_n=\sum_{t=0}^{n}\|\boldsymbol{x}(n-t,t)\|^2$,我们得到:

$$\begin{aligned}
&\Delta_0\leqslant\gamma(\|\boldsymbol{x}(0,0)\|^2+\|\boldsymbol{x}(0,0)\|^2),\\
&\Delta_1\leqslant\gamma[\delta(\|\boldsymbol{x}(0,0)\|^2+\|\boldsymbol{x}(0,0)\|^2)+\\
&\quad(\|\boldsymbol{x}(0,1)\|^2+\|\boldsymbol{x}(1,0)\|^2)],\\
&\Delta_2\leqslant\gamma[\delta^2(\|\boldsymbol{x}(0,0)\|^2+\|\boldsymbol{x}(0,0)\|^2)+\\
&\quad\delta(\|\boldsymbol{x}(0,1)\|^2+\|\boldsymbol{x}(1,0)\|^2)+\\
&\quad(\|\boldsymbol{x}(0,2)\|^2+\|\boldsymbol{x}(2,0)\|^2)],\\
&\quad\vdots\\
&\Delta_M\leqslant\gamma[\delta^M(\|\boldsymbol{x}(0,0)\|^2+\|\boldsymbol{x}(0,0)\|^2)+\\
&\quad\delta^{M-1}(\|\boldsymbol{x}(0,1)\|^2+\|\boldsymbol{x}(1,0)\|^2)+\\
&\quad\cdots+(\|\boldsymbol{x}(0,M)\|^2+\|\boldsymbol{x}(M,0)\|^2)].
\end{aligned}$$

将上述不等式两端求和得到:

$$\begin{aligned}
\sum_{n=0}^{M}\Delta_n&\leqslant\gamma(1+\delta+\cdots+\delta^M)(\|\boldsymbol{x}(0,0)\|^2+\\
&\|\boldsymbol{x}(0,0)\|^2)+\gamma(1+\delta+\cdots+\delta^{M-1})\cdot\\
&(\|\boldsymbol{x}(1,0)\|^2+\|\boldsymbol{x}(0,1)\|^2)+\\
&\cdots+\gamma(\|\boldsymbol{x}(M,0)\|^2+\|\boldsymbol{x}(0,M)\|^2)\leqslant\\
&\gamma(1+\delta+\cdots+\delta^M)(\|\boldsymbol{x}(0,0)\|^2+\\
&\|\boldsymbol{x}(0,0)\|^2)+\gamma(1+\delta+\cdots+\delta^M)(\|\boldsymbol{x}(1,0)\|^2+\\
&\|\boldsymbol{x}(0,1)\|^2)+\cdots+\gamma(1+\delta+\cdots+\\
&\delta^M)(\|\boldsymbol{x}(M,0)\|^2+\|\boldsymbol{x}(0,M)\|^2)\leqslant\\
&\gamma\frac{1-\delta^{M+1}}{1-\delta}\sum_{n=0}^{M}(\|\boldsymbol{x}(n,0)\|^2+\|\boldsymbol{x}(0,n)\|^2).
\end{aligned}$$

上式右端有界,则 $\lim_{n\to\infty}\Delta_n=0$,即当 $n+t\to\infty$ 时,$\|\boldsymbol{x}(n,t)\|^2\to0$.

系统渐近稳定,证毕.

3 镇定控制器设计

基于以上结果,我们设计系统(1)的稳定控制器,状态反馈控制器的设计如下:

$$\boldsymbol{u}(n,t)=\boldsymbol{K}\boldsymbol{x}(n,t),\tag{7}$$

其中,$\boldsymbol{K}$ 是控制器增益矩阵.

定理2 如果存在矩阵 $\bar{\boldsymbol{P}}>0,\bar{\boldsymbol{Q}}>0$ 和 $\boldsymbol{X}$,使得下列线性矩阵不等式成立:

$$\begin{bmatrix}\bar{\boldsymbol{Q}}-\bar{\boldsymbol{P}}&0&\boldsymbol{A}_1\bar{\boldsymbol{P}}*&-\bar{\boldsymbol{Q}}&\boldsymbol{A}_2\bar{\boldsymbol{P}}+\boldsymbol{B}\boldsymbol{X}*&*&-\bar{\boldsymbol{P}}\end{bmatrix}<0,\tag{8}$$

则系统(1)可以通过控制器(7)达到稳定状态.另外,如果上述不等式有可行解,控制器增益矩阵可以表示为

$$\boldsymbol{K}=\boldsymbol{X}\bar{\boldsymbol{P}}^{-1}.\tag{9}$$

证明

对式(3)运用 Schur 定理可得:

$$\begin{bmatrix}-\boldsymbol{P}_1&0&\boldsymbol{A}_1*&-\boldsymbol{P}_2&\boldsymbol{A}_2*&*&-(\boldsymbol{P}_1+\boldsymbol{P}_2)^{-1}\end{bmatrix}<0.\tag{10}$$

令 $\bar{\boldsymbol{P}}=(\boldsymbol{P}_1+\boldsymbol{P}_2)^{-1},\bar{\boldsymbol{Q}}=(\boldsymbol{P}_1+\boldsymbol{P}_2)^{-1}\boldsymbol{P}_2(\boldsymbol{P}_1+\boldsymbol{P}_2)^{-1}$,通过 $\mathrm{diag}\{(\boldsymbol{P}_1+\boldsymbol{P}_2)^{-1},(\boldsymbol{P}_1+\boldsymbol{P}_2)^{-1},\boldsymbol{I}\}$ 对式(10)做全等变换得到:

$$\begin{bmatrix}\bar{\boldsymbol{Q}}-\bar{\boldsymbol{P}}&0&\boldsymbol{A}_1\bar{\boldsymbol{P}}*&-\bar{\boldsymbol{Q}}&\boldsymbol{A}_2\bar{\boldsymbol{P}}*&*&-\bar{\boldsymbol{P}}\end{bmatrix}<0.\tag{11}$$

用 $\boldsymbol{A}_2+\boldsymbol{B}\boldsymbol{K}$ 替换式(11)中的 $\boldsymbol{A}_2$ 我们可以得到式(8),证毕.

4 网络预测控制

在网络控制系统中,网络引起的延迟是不可避免的,它会影响网络控制系统的性能指标,甚至导致整个系统的不稳定.因此,近几十年来,许多学者针对一维系统提出了不同的解决通信时滞的方法,使得所处理的系统具有所需的系统性能.文献[18]中提出的网络化预测控制方案可以有效地补偿丢包、通信时滞,并取得了令人满意的控制性能.然而,目前的研究仅限于一维系统.由于二维分布式传感器网络系统的两个变量和复杂性,将其应用于二维系统非常具有挑战性.

针对所考虑的分布式传感器网络的 FM 状态空间模型,我们假设传感器到控制器通道存在时滞.然后结合二维 FM 系统的特点,提出了网络化预测控制方案.具体来说,考虑到控制器端的可用信息,时刻 t 之前的状态预测为

$$\begin{aligned}
&\hat{\boldsymbol{x}}(n,t-d+1)=\boldsymbol{A}_2\boldsymbol{x}(n,t-d)+\boldsymbol{A}_1\boldsymbol{x}(n-1,t-d)+\\
&\quad\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(n,t-d),\\
&\hat{\boldsymbol{x}}(n,t-d+2)=\boldsymbol{A}_2\hat{\boldsymbol{x}}(n,t-d+1)+\\
&\quad\boldsymbol{A}_1\boldsymbol{x}(n-1,t-d+1)+\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(n,t-d+1)=\\
&\quad\boldsymbol{A}_2^2\boldsymbol{x}(n,t-d)+\boldsymbol{A}_2\boldsymbol{A}_1\boldsymbol{x}(n-1,t-d)+
\end{aligned}$$

$$\boldsymbol{A}_2\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(n,t-d)+\boldsymbol{A}_1\boldsymbol{A}_2\boldsymbol{x}(n-1,t-d)+\boldsymbol{A}_1^2\boldsymbol{x}(n-2,t-d)+\boldsymbol{A}_1\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(n-1,t-d)+\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(n,t-d+1),$$

$$\hat{\boldsymbol{x}}(n,t-d+3)=\boldsymbol{A}_2\hat{\boldsymbol{x}}(n,t-d+2)+\boldsymbol{A}_1\boldsymbol{x}(n-1,t-d+2)+\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(n,t-d+2)=\boldsymbol{A}_2^3\boldsymbol{x}(n,t-d)+\boldsymbol{A}_2^2\boldsymbol{A}_1\boldsymbol{x}(n-1,t-d)+\boldsymbol{A}_2^2\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(n,t-d)+\boldsymbol{A}_1\boldsymbol{A}_2^2\boldsymbol{x}(n-1,t-d)+\boldsymbol{A}_1^2\boldsymbol{A}_2\boldsymbol{x}(n-2,t-d)+\boldsymbol{A}_1\boldsymbol{A}_2\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(n-1,t-d)+\boldsymbol{A}_2\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(n,t-d+1)+\boldsymbol{A}_1\boldsymbol{A}_2\boldsymbol{x}(n-1,t-d+1)+\boldsymbol{A}_1^2\boldsymbol{x}(n-2,t-d+1)+\boldsymbol{A}_1\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(n-1,t-d+1)+\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(n,t-d+2)=\boldsymbol{A}_2^3\boldsymbol{x}(n,t-d)+3\boldsymbol{A}_2^2\boldsymbol{A}_1\boldsymbol{x}(n-1,t-d)+3\boldsymbol{A}_1^2\boldsymbol{A}_2\boldsymbol{x}(n-2,t-d)+\boldsymbol{A}_1^3\boldsymbol{x}(n-3,t-d)+\boldsymbol{A}_2^2\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(n,t-d)+2\boldsymbol{A}_1\boldsymbol{A}_2\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(n-1,t-d)+\boldsymbol{A}_1^2\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(n-2,t-d)+A_2\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(n,t-d+1)+\boldsymbol{A}_1\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(n-1,t-d+1)+\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(n,t-d+2),$$

$$\hat{\boldsymbol{x}}(n,t-d+4)=\boldsymbol{A}_2\hat{\boldsymbol{x}}(n,t-d+3)+\boldsymbol{A}_1\boldsymbol{x}(n-1,t-d+3)+\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(n,t-d+3)=\boldsymbol{A}_2^4\boldsymbol{x}(n,t-d)+4\boldsymbol{A}_2^3\boldsymbol{A}_1\boldsymbol{x}(n-1,t-d)+6\boldsymbol{A}_1^2\boldsymbol{A}_2^2\boldsymbol{x}(n-2,t-d)+4\boldsymbol{A}_1^3\boldsymbol{A}_2\boldsymbol{x}(n-3,t-d)+\boldsymbol{A}_1^4\boldsymbol{x}(n-4,t-d)+\boldsymbol{A}_2^3\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(n,t-d)+3\boldsymbol{A}_2^2\boldsymbol{A}_1\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(n-1,t-d)+3\boldsymbol{A}_1^2\boldsymbol{A}_2\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(n-2,t-d)+\boldsymbol{A}_1^3\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(n-3,t-d)+\boldsymbol{A}_2^2\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(n,t-d+1)+2\boldsymbol{A}_1\boldsymbol{A}_2\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(n-1,t-d+1)+\boldsymbol{A}_1^2\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(n-2,t-d+1)+\boldsymbol{A}_2\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(n,t-d+2)+\boldsymbol{A}_1\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(n-1,t-d+2)+\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(n,t-d+3),$$

$$\vdots$$

迭代利用上式得到:

$$\hat{\boldsymbol{x}}(n,t-d+k)=\boldsymbol{A}_2\hat{\boldsymbol{x}}(n,t-d+k-1)+\boldsymbol{A}_1\boldsymbol{x}(n-1,t-d+k-1)+\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(n,t-d+k-1)=\sum_{m=0}^{k}\boldsymbol{C}_k^m\boldsymbol{A}_1^m\boldsymbol{A}_2^{k-m}x(n-m,t-d)+\sum_{i=0}^{k-1}\sum_{m=0}^{k-1-i}\boldsymbol{C}_{k-1-i}^m\boldsymbol{A}_1^m\boldsymbol{A}_2^{k-1-i-m}\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(n-m,t-d+i).$$

基于状态预测,控制器端的控制预测为

$$\boldsymbol{u}(n,t)=\boldsymbol{K}\hat{\boldsymbol{x}}(n,t),\tag{12}$$

其中 $\boldsymbol{K}$ 为控制器增益矩阵.

由式(12)可知,控制预测依赖于时间 $t-d$ 之前的状态和控制器端可用的控制输入.采用这种控制策略,通信时滞可以得到补偿.

实践证明,网络化预测控制方案能有效地解决通信时滞问题,进一步保证闭环系统的稳定性.由于二维系统的特点,该方案在二维系统中的应用要比一维系统复杂.目前,我们已经研究了以二维 FM 状态空间模型为代表的分布式传感器网络的预测控制方案,这是我们第一次尝试将该方案应用到二维系统中.由于二维系统理论在解决工业问题中的有效性以及预测控制在维持系统性能方面的重要性,还有很多需要探索的地方.

5 实例仿真

本节将通过一个数值实例来验证设计控制器的有效性.

例 1 考虑二维系统(1)的矩阵参数如下:

$$\boldsymbol{A}_1=\begin{bmatrix}-0.30 & 0.45 & -0.25\\ -0.15 & 0.35 & -0.40\\ 0.40 & 0.15 & 0.20\end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{A}_2=\begin{bmatrix}0.15 & 0.40 & -0.15\\ 0.15 & -0.35 & 0.25\\ -0.15 & 0.30 & 0.50\end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}-1\\ 4\\ 2\end{bmatrix}.$$

根据定理 2 中不等式(8)得到控制器的增益矩阵 $\boldsymbol{K}$ 为

$$\boldsymbol{K}=[-0.012\,9\quad 0.067\,8\quad -0.093\,1].$$

我们研究如下三种情形:

情形 1.没有引入通信网络的系统控制,仿真结果如图 1—3 所示.结果表明,所设计的控制器 $\boldsymbol{u}(n,t)=\boldsymbol{K}\boldsymbol{x}(n,t)$ 可以使系统(1)稳定.

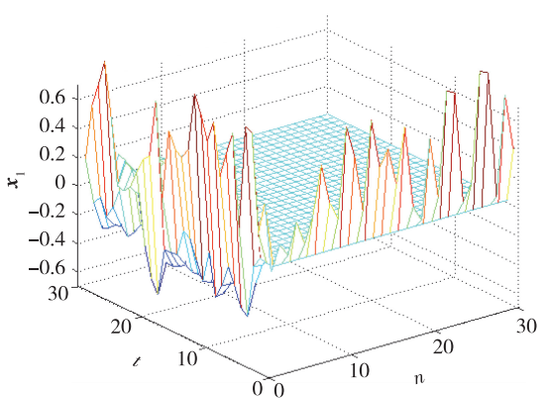


图 1 闭环系统的状态轨迹 $\boldsymbol{x}_1$

Fig. 1 State $\boldsymbol{x}_1$ of the closed-loop system

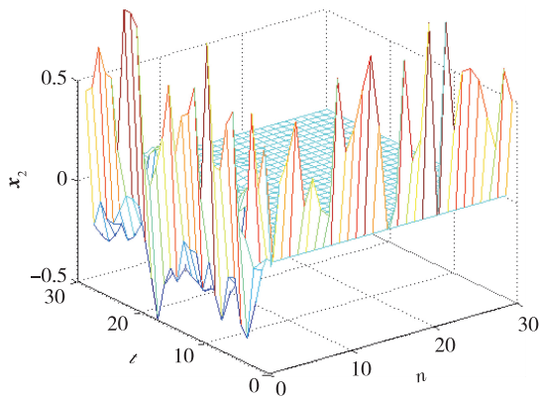


图 2　闭环系统的状态轨迹 $\boldsymbol{x}_2$

Fig. 2　State $\boldsymbol{x}_2$ of the closed-loop system

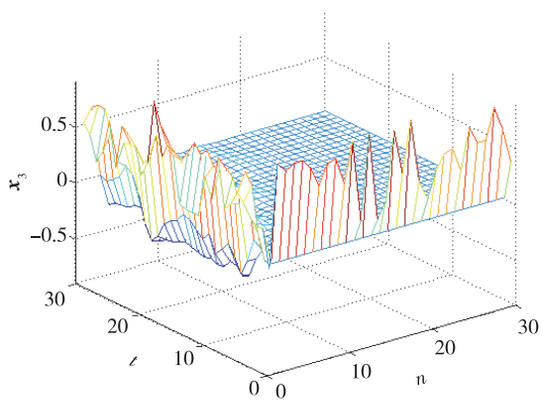


图 3　闭环系统的状态轨迹 $\boldsymbol{x}_3$

Fig. 3　State $\boldsymbol{x}_3$ of the closed-loop system

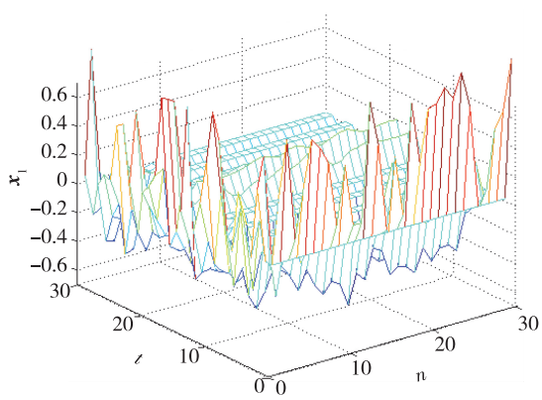


图 4　具有通信时滞的状态轨迹 $\boldsymbol{x}_1$

Fig. 4　State $\boldsymbol{x}_1$ with communication delay

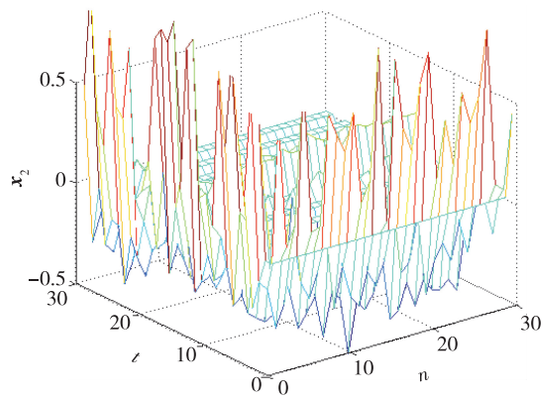


图 5　具有通信时滞的状态轨迹 $\boldsymbol{x}_2$

Fig. 5　State $\boldsymbol{x}_2$ with communication delay

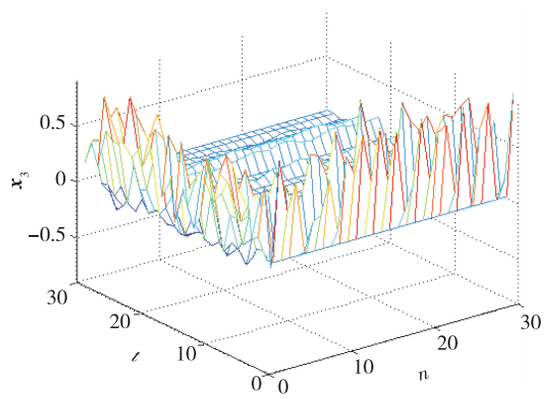


图 6　具有通信时滞的状态轨迹 $\boldsymbol{x}_3$

Fig. 6　State $\boldsymbol{x}_3$ with communication delay

情形 2.具有通信时滞的网络控制.假设反馈通道中从传感器到控制器存在两步时滞,即 $d = 2$. 首先,我们使用真实传输的数据来代替补偿的数据.从图 4—6 可以看出,系统不再稳定,意味着通信时滞使系统不稳定,降低了控制性能.

情形 3.具有时滞补偿的网络预测控制.引入网络化预测控制方案来补偿时滞,进一步稳定系统.控制器是由 $\boldsymbol{u}(n,t)=\boldsymbol{K}\hat{\boldsymbol{x}}(n,t)$ 给出.具有时滞补偿的二维网络化控制系统的状态轨迹如图 7—9 所示.结果表明,该方案可以有效地补偿通信时滞.

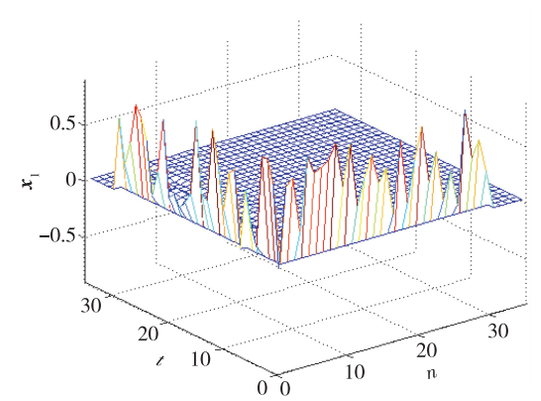


图 7　基于时滞补偿的状态轨迹 $\boldsymbol{x}_1$

Fig. 7　State $\boldsymbol{x}_1$ under NPC scheme

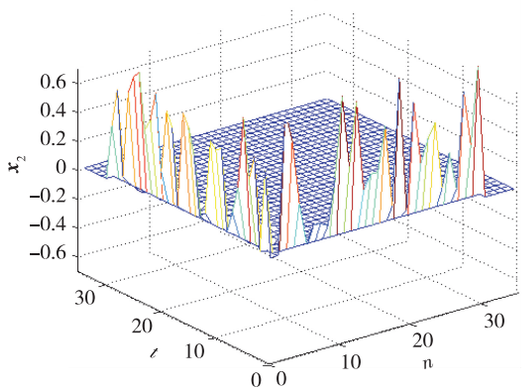


图 8　基于时滞补偿的状态轨迹 $\boldsymbol{x}_2$

Fig. 8　State $\boldsymbol{x}_2$ under NPC scheme

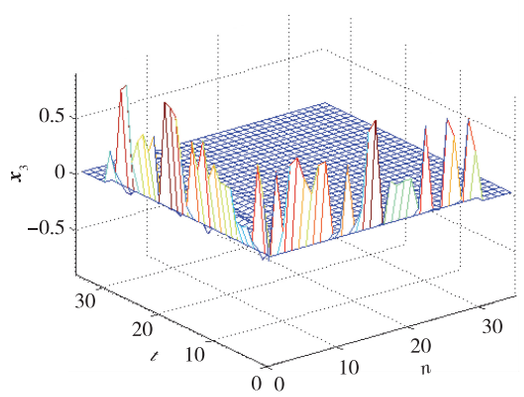


图 9　基于时滞补偿的状态轨迹 $\boldsymbol{x}_3$

Fig. 9　State $\boldsymbol{x}_3$ under NPC scheme

6　主要结论

本文主要研究了以二维 FM 模型为代表的分布式传感器网络的预测控制问题.在对闭环二维系统进行分析的基础上,采用一种新的二维网络预测控制方案对通信时滞进行补偿,保证了系统的稳定性,达到了预期的系统性能.最后通过实例验证了所提方法的有效性.

参考文献

References

[1] Qi H R, Iyengar S, Chakrabarty K. Multiresolution data integration using mobile agents in distributed sensor networks[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), 2001, 31(3): 383-391

[2] Aboelfotoh H M F, Iyengar S S, Chakrabarty K. Computing reliability and message delay for cooperative wireless distributed sensor networks subject to random failures[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2005, 54(1): 145-155

[3] Lin Z Y, Han T R, Zheng R H, et al. Distributed localization for 2-D sensor networks with bearing-only measurements under switching topologies[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2016, 64(23): 6345-6359

[4] Liang J L, Wang Z D, Liu X H. Robust state estimation for two-dimensional stochastic time-delay systems with missing measurements and sensor saturation[J]. Multidimensional Systems and Signal Processing, 2014, 25(1): 157-177

[5] Wei Y L, Peng X Y, Qiu J B, et al. H_∞ filtering for two-dimensional continuous-time Markovian jump systems with deficient transition descriptions [J]. Neurocomputing, 2015, 167: 406-417

[6] Duan Z X, Xiang Z R, Karimi H R. Stability and l1-gain analysis for positive 2D T-S fuzzy state-delayed systems in the second FM model[J]. Neurocomputing, 2014, 142: 209-215

[7] Rogers E, Galkowski K, Paszke W, et al. Multidimensional control systems: case studies in design and evaluation [J]. Multidimensional Systems and Signal Processing, 2015, 26(4): 895-939

[8] Sumanasena M G B, Bauer P H. Realization using the Fornasini-Marchesini model for implementations in distributed grid sensor networks[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2011, 58(11): 2708-2717

[9] Knorn S, Middleton R H. Two-dimensional analysis of string stability of nonlinear vehicle strings[C] // 52nd IEEE Conference on Decision and Control, 2013, DOI: 10.1109/CDC.2013.6760814

[10] Paszke W, Lam J, Gałkowski K, et al. Robust stability and stabilisation of 2D discrete state-delayed systems[J]. Systems & Control Letters, 2004, 51(3/4): 277-291

[11] Ahn C K, Shi P, Basin M V. Two-dimensional dissipative control and filtering for roesser model[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2015, 60(7): 1745-1759

[12] Walsh G C, Ye H, Bushnell L G. Stability analysis of networked control systems[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2002, 10(3): 438-446

[13] Lin H, Antsaklis P J. Stability and persistent disturbance attenuation properties for a class of networked control systems: switched system approach [J]. International Journal of Control, 2005, 78(18): 1447-1458

[14] Mahmoud M S. Generalized control of switched discrete-time systems with unknown delays[J]. Applied Mathematics and Computation, 2009, 211(1): 33-44

[15] Wang Y, Ding S X, Xu D M, et al. An H_∞ fault estimation scheme of wireless networked control systems for industrial real-time applications[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2014, 22(6): 2073-2086

[16] Xu H, Jagannathan S. Neural network-based finite horizon stochastic optimal control design for nonlinear networked control systems [J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2015, 26(3): 472-485

[17] Ren M F, Zhang J H, Jiang M, et al. Minimum entropy control for non-Gaussian stochastic networked control systems and its application to a networked DC motor control system[J]. IEEE Transactions on Control Systems Tech-

nology,2015,23(1):406-411
[18] Liu G P.Predictive controller design of networked systems with communication delays and data loss[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2010, 57(6): 481-485
[19] Rogers E,Galkowski K,Paszke W,et al.Multidimensional control systems: case studies in design and evaluation [J]. Multidimensional Systems and Signal Processing, 2015,26(4):895-939

Networked predictive control of the distributed sensor networks

DING Shufen[1] LIU Kai[2] YANG Rongni[1]
1 School of Control Science and Engineering,Shandong University,Jinan 250061
2 Shandong Academy of Occupational Health and Occupational Medicine,Shandong First Medical University & Shandong Academy of Medical Sciences,Jinan 250002

Abstract This paper is concerned with the networked predictive controller design problem for the distributed sensor network represented by the well-known discrete-time two-dimensional (2-D) Fornasini-Marchesini (FM) state-space model.Particularly,a novel networked predictive control (NPC) scheme is employed for the considered 2-D distributed sensor networks in order to compensate for the communication delay actively.Firstly,by using the Lyapunov stability theory,sufficient conditions are established for such distributed sensor networks.Based on the stability analysis results,a new predictive controller design strategy is proposed to stabilize the addressed systems and also achieve the desired control performance.Finally,an example is given to demonstrate the effectiveness of the newly developed NPC strategy for the distributed sensor networks.

Key words distributed sensor networks;Fornasini-Marchesini (FM) state-space model;networked predictive control (NPC);communication delay