

文章编号: 1001-0920(2003)02-0207-03

时滞系统的状态预测观测器及预测控制器设计

唐功友, 于忠清, 孙朝晖

(青岛海洋大学 计算机系, 山东 青岛 266003)

摘 要: 研究基于状态空间模型的时滞控制系统的状态预测观测器及最优预测控制器的设计问题。针对控制项含有时滞的系统, 设计一种全维状态预测观测器, 并将其用于时滞控制系统的最佳状态预测反馈控制。通过该状态预测观测器可将闭环系统的时滞项移至系统闭环结构之外, 从而使其优化控制规律完全可按无时滞系统进行设计。所给出的性能指标计算公式表明, 该预测控制器关于二次型性能指标是次优的。

关键词: 时滞系统; 预测控制; 状态观测器; 最优控制; 状态反馈

中图分类号: TP13

文献标识码: A

Design of state predictive observer and predictive controller for systems with time-delay

TANG Gong-you, YU Zhong-qing, SUN Zhao-hui

(Department of Computer Science, Ocean University of Qingdao, Qingdao 266003, China)

Abstract: Designing approach of a predictive controller for systems with control time-delay based on a state predictive observer is studied. A state predictive observer is first designed, then it is applied to optimal state feedback predictive control for systems with control time-delay. Using this state predictive observer, the time-delay term of closed-loop systems can be transferred to the outside of the systems closed-loop structure. Therefore, control laws can be designed according to optimal control methods of systems without time-delay. Computing formula of performance indexes shows that this predictive controller is suboptimal with respect to quadratic performance indexes.

Key words: Time-delay systems; Predictive control; State observer; Optimal control; State variable feedback

1 引言

近年来, 计算机应用技术有力地推动了先进控制技术的发展, 其中最具有代表性的先进控制技术之一——模型预测控制(MPC)技术取得了很大的进展。模型预测控制方法主要包括 Richult^[1]和 Mahra^[2]等提出的建立在脉冲响应基础上的模型启发控制(MPHC)或称模型算法控制(MAC); Cutler^[3]等提出的建立在阶跃响应基础上的动态矩

阵控制(DMA); Clarke^[4,5]等提出的具有长时段多步预测优化的广义预测控制等。由于模型预测控制具有对模型的宽容性、有限时域滚动优化的有效性以及在设计中考虑各种软、硬约束的可能性, 从而引起了众多科研和科技开发工作者的兴趣。20世纪90年代以来, MPC无论在理论上还是在实际应用中都得到了迅猛的发展^[6,7], 模型预测控制已广泛应用于线性、非线性、时滞等过程控制系统。

收稿日期: 2002-01-11; 修回日期: 2002-05-21。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60074001); 山东省自然科学基金资助项目(Y2000G02)。

作者简介: 唐功友(1953—), 男, 山东烟台人, 教授, 博士生导师, 博士, 从事控制理论与应用、计算机控制等研究; 于忠清(1962—), 男, 山东乳山人, 副教授, 博士生, 从事软件工程、计算机控制等研究。

本文研究用状态空间模型描述的控制项含有时滞的控制系统的状态预测观测器及最优预测控制器的设计问题。利用构造预测模型得到的被控对象预测输出向量和系统的控制向量,设计一种全维状态预测观测器,并将其用于时滞控制系统的最优状态反馈控制。从复域的分析看,应用该状态预测观测器可将闭环系统的时滞项移至系统闭环结构之外,从而使其优化控制规律完全可按无时滞系统进行设计。本文给出的二次型性能指标计算公式表明,该预测控制器关于二次型性能指标是次优的。

2 预测控制系统设计

考虑用状态空间数学模型描述的控制项含有时滞的线性定常控制系统

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t - \tau) \\ t > 0, \quad x(0) = x_0 \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x \in R^n, y \in R^p, u \in R^q$ 分别为状态向量、输出向量和控制向量; A, B 和 C 分别为相应维数的常量矩阵; $\tau > 0$ 为时滞项。假设 A 为稳定矩阵, (A, B) 和 (A, C) 分别是能控和能观测的。

式(1)所描述的系统在实际过程控制系统中大量存在,在时滞 τ 不能忽略的情况下,采用常规控制很难达到满意的控制效果。

本文建立的预测控制系统模块包括状态预测观测器、预测及校正模型和最优状态反馈控制器。下面分别讨论预测控制系统各模块的设计问题。

2.1 状态预测观测器设计

令 $\tilde{y}(t + \tau)$ 为被控对象的预测输出。本文选择被控对象的预测输出 $\tilde{y}(t + \tau)$ 和系统的控制向量 $u(t)$ 作为状态预测观测器输入,构造全维状态预测观测器模型为

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}(t + \tau) = (A - KC)\tilde{x}(t + \tau) + Bu(t) + K\tilde{y}(t + \tau), \quad t > -\tau \\ \tilde{x}(0) = \tilde{x}_0 \end{cases} \quad (2)$$

其中矩阵 K 的选择原则是使得 $(A - KC)$ 的特征值配置在要求的左半根平面内。

2.2 预测及校正模型设计

仿效系统(1),得状态预测模型为

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}(t + \tau) = A\tilde{x}(t + \tau) + Bu(t), \quad t > -\tau \\ \tilde{x}(0) = \tilde{x}_0 \end{cases} \quad (3)$$

系统的预测输出校正模型选择为

$$\tilde{y}(t + \tau) = C\tilde{x}(t + \tau) + F(y(t) - C\tilde{x}(t)) \quad (4)$$

其中 F 为校正加权矩阵。

2.3 最优状态反馈控制律设计

控制的目的是选择状态反馈控制规律,使性能指标

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [x^T(t)Qx(t) + u^T(t - \tau)Ru(t - \tau)] dt \quad (5)$$

取得极小值。其中: $Q = C^T H C, H$ 为 $p \times p$ 正定矩阵, R 为 $q \times q$ 正定矩阵。如果状态预测观测器的观测误差能按任意要求的指数规律趋于零,则最优预测反馈控制律为

$$u(t) = -R^{-1}B^T Px(t + \tau) \quad (6)$$

其中 P 是 Riccati 矩阵方程

$$A^T P + PA - PB R^{-1} B^T P + Q = 0 \quad (7)$$

的唯一正定解矩阵。

3 系统性能分析

3.1 复域分析

令系统的初始条件全部为零。系统(1)的拉氏变换表达式为

$$Y(s) = C(sI - A)^{-1} B e^{-\tau s} U(s) \quad (8)$$

由状态观测器(2)得

$$\begin{aligned} L(x(t + \tau)) &= \\ (sI - A + KC)^{-1} [BU(s) + KL(\tilde{y}(t + \tau))] \end{aligned} \quad (9)$$

其中 $L(w(t)) = W(s)$ 为 $w(t)$ 的拉氏变换。令 $F = I$, 由预测模型(3)和校正模型(4)得

$$\begin{aligned} L(\tilde{x}(t + \tau)) &= (sI - A)^{-1} BU(s) \\ L(\tilde{y}(t + \tau)) &= C(1 - e^{-\tau s})L(\tilde{x}(t + \tau)) + Y(s) \end{aligned}$$

从而有

$$\begin{aligned} L(\tilde{y}(t + \tau)) &= \\ C(1 - e^{-\tau s})(sI - A)^{-1} BU(s) + Y(s) \end{aligned} \quad (10)$$

由预测最优化反馈控制律(6)得

$$U(s) = R^{-1} B^T P (X_s(s) - L(x(t + \tau))) \quad (11)$$

综合式(8)~(11),可得到闭环控制系统结构如图1所示,其中 $x_s(t)$ 为外部给定状态向量,对于定值调节系统 $x_s(t) = 0$ 。

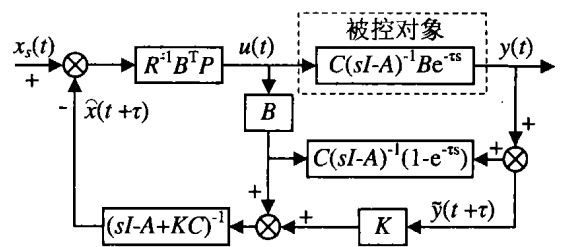


图1 闭环控制系统结构

由图 1 容易看出, 无模型失配时, 图 1 在原理上与图 2 等效。

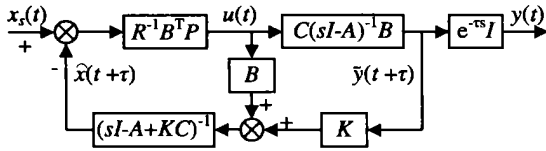


图 2 闭环控制系统的等效结构

从图 2 可知, 由该状态预测观测器构成的闭环系统可将系统的时滞项移至系统闭环结构之外, 因而该闭环系统的极点已与时滞项无关。

3.2 时域分析

令 $x_{oe} = x - \hat{x}$ 为状态观测误差, $x_{pe} = x - \tilde{x}$ 为状态预测误差, $y_{pe} = y - \hat{y}$ 为输出预测误差, 并令 $F = I$ 。则由式(1) ~ (4) 可得状态观测误差方程

$$\begin{aligned} \dot{x}_{oe}(t + \tau) &= (A - KC)x_{oe}(t + \tau) + Ky_{pe}(t + \tau) \end{aligned} \quad (12)$$

和预测误差方程

$$\begin{cases} \dot{x}_{pe}(t + \tau) = Ax_{pe}(t + \tau) \\ y_{pe}(t + \tau) = C(x_{pe}(t + \tau) - x_{pe}(t)) \end{cases} \quad (13)$$

因为 (A, C) 是可观测的, 从而由式(12) 知, 可通过选择矩阵 K , 使得 $(A - KC)$ 的特征值配置在任意要求的左半根平面内, 以保证状态观测误差按预先给定的指数速率趋于 $y_{pe}(t)$, 所以观测器的观测精度取决于预测模型输出预测误差 y_{pe} 。由式(13) 和积分中值定理可得到 y_{pe} 的估计为

$$\begin{aligned} y_{pe}(t + \tau) &= C(x_{pe}(t + \tau) - x_{pe}(t)) = \\ &C \int_t^{t+\tau} \dot{x}_{pe}(t) dt = CA \int_t^{t+\tau} x_{pe}(t) dt = \\ &\tau CA x_{pe}(t + \theta), \quad 0 < \theta < \tau \end{aligned} \quad (14)$$

由式(14) 知, y_{pe} 的值取决于 $x_{pe}(t + \tau) - x_{pe}(t)$ 或 x_{pe} 和 τ 的大小。因为已假设矩阵 A 是稳定矩阵, 所以由预测误差方程(13) 的第 1 式知, 状态预测误差满足 $x_{pe}(t) \rightarrow 0, t \rightarrow \infty$ 。然而, 由于开环系统即使稳定, 一般也只具有其自身的自衡能力, $x_{pe}(t)$ 趋于零的速度通常是较慢的, 因此只有这一条件很难达到满意的控制指标。输出预测误差 y_{pe} 取决于 $x_{pe}(t + \tau) - x_{pe}(t)$ 的值, 这说明并非一定要求 x_{pe} 很小, 只要 $x_{pe}(t)$ 变化缓慢或 τ 较小, 便可保证输出预测误差 y_{pe} 比较小。输出预测误差 y_{pe} 取决于 τ 的大小, 说明对小时滞系统效果较好, 因此在系统扰动源不太恶劣或在小时滞情况下, 本文的设计方法一般是可行的。

下面给出性能指标的计算结果:

定理 1 假设 A 为稳定矩阵, (A, B) 和 (A, C) 分别是能控和能观测的。由式(2) ~ (4) 及(6) 构成的带状态预测观测器的预测控制律关于时滞系统(1) 和二次型性能指标(5) 是次优的, 且有

$$J = \frac{1}{2} [x^T(0)Px(0) + x_{oe}^T(0)Gx_{oe}(0)] + \int_0^{\infty} y_{pe}^T(t)K^TGx_{oe}(t)dt \quad (15)$$

其中矩阵 G 是满足 Lyapunov 矩阵方程

$$(A - KC)^TG + G(A - KC) = -PBR^{-1}B^TP \quad (16)$$

的唯一正定解。

证明 将式(6) 代入(5), 并利用方程(7), 得

$$\begin{aligned} J &= \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [x^T(t)Qx(t) + x^TPBR^{-1}B^TPx(t)]dt = \\ &\frac{1}{2} \int_0^{\infty} \left[\frac{\partial^T(t)Px(t)}{\partial t} + x_{oe}^TPBR^{-1}B^TPx_{oe}(t) \right]dt = \\ &-\frac{1}{2} \int_0^{\infty} \frac{\partial}{\partial t} [x^T(t)Px(t) + x_{oe}^T(t)Gx_{oe}(t)]dt + \\ &\int_0^{\infty} y_{pe}^T(t)K^TGx_{oe}(t)dt = \\ &\frac{1}{2} [x^T(0)Px(0) + x_{oe}^T(0)Gx_{oe}(0)] + \\ &\int_0^{\infty} y_{pe}^T(t)K^TGx_{oe}(t)dt \end{aligned}$$

显然, 如果忽略输出预测误差 $y_{pe}(t)$ 和状态观测误差 $x_{oe}(t)$, 则系统的性能指标近似为

$$J = \frac{1}{2} [x^T(0)Px(0)] \quad (17)$$

定理 1 说明, 在一般情况下, 本文提出的预测控制器关于系统(1) 和性能指标(5) 是次优的。

4 结 论

本文利用构造预测模型得到的被控对象预测输出向量和系统的控制向量, 设计了一种全维状态预测观测器, 并将其用于时滞控制系统的最优状态预测反馈控制。从复域的分析看, 所提出的全维状态预测观测器可将闭环系统的时滞项移至系统闭环结构之外, 具有与 Smith 预估器^[8] 相同的功能。而该状态预测观测器利用了预测模型的系统输出预测值, 因此应用更为灵活, 且具有更强的鲁棒性。所给出的性能指标计算公式表明, 该预测控制器关于二次型性能指标是次优的, 从而为含有控制时滞的控制系统的预测控制律分析与设计提供了理论依据。

(下转第 216 页)

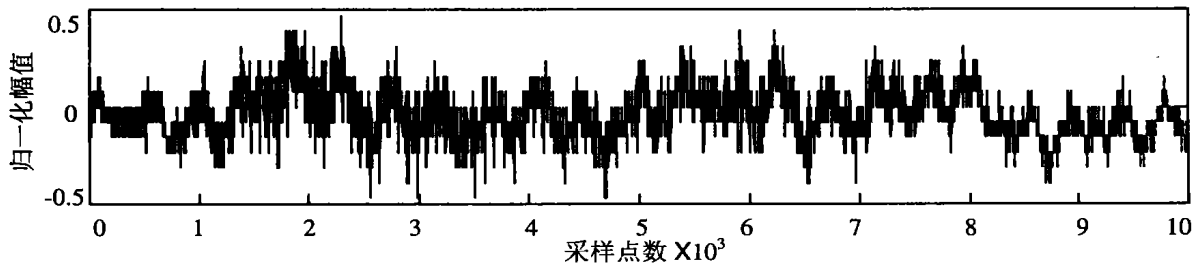


图5 电话线的波形

方法比传统神经网络融合方法的识别率提高 7%。在高噪音的影响下(如信噪比为 6 dB),模糊神经网络融合方法的识别率提高 11%。由此可见,在信噪比较低的情况下,模糊神经网络融合方法的鲁棒性更加突出。

4 结 论

本文提出一种模糊神经网络语音数据融合模型,并对经不同传感器记录的语音数据采用该模型进行识别。仿真结果显示,采用该模型比传统单一话筒的识别率提高了十多个百分点,并且鲁棒性更强,说明采用模糊神经网络进行语音数据融合可以有效地提高语音识别的准确率。

参考文献(References):

- [1] Leida E, Fernandez J, Masgrau E. Robust continuous speech recognition system based on a microphone array [A]. *IEEE ICA SSP-P roc* [C]. Seattle, 1998 1: 241-244
- [2] Yamada T, Nakamura, Shikano K. Hands-free speech recognition based on 3-D viterbi search using a micro-

phone array [A]. *IEEE ICA SSP-P roc* [C]. Seattle, 1998 1: 245-248

- [3] Hall D L, Llinas J. An introduction to multisensor data fusion[J]. *Proc IEEE*, 1997, 85(1): 6-23
- [4] Russo F, Ramponi G. Fuzzy methods for multisensor data fusion[J]. *IEEE Trans M*, 1994, 43(2): 288-293
- [5] Choi J, Dickerson J A. Adaptive data fusion using the expected output membership function[J]. *Proc SPIE*, 1999, 3719: 26-33
- [6] Nikola K. Evolving connectionist systems: A theory and a case study on adaptive speech recognition [A]. *Proc Int Joint Conf Neural Networks* [C]. Washington, 1999 3002-3007.
- [7] Francesco B, Salvatore C, Marco R. Pattern recognition approach to robust voiced/unvoiced speech classification using fuzzy logic[J]. *Int J Pattern Recog Artif Intell*, 1999, 13(1): 109-132
- [8] Wu G D, Lin C T. Word boundary detection with mel-scale frequency bank in noisy environment [J]. *IEEE Trans Speech Audio Proc*, 2000, 8(5): 541-554

(上接第 209 页)

参考文献(References):

- [1] Richalet J. Model predictive heuristic control: Applications to industrial process[J]. *Automatica*, 1978, 14(5): 413-428
- [2] Mahra R K. Model algorithmic control (MAC), basic theoretical properties[J]. *Automatica*, 1982, 18(4): 401-404
- [3] Cutler C R, Ramaker B L. Dynamic matrix control — A computer control algorithm [A]. *Proc of the Joint Automatic Control Conf* [C]. San Francisco, 1980 W P5-B.
- [4] Clarke D W, Mohtadi C, Tuffs P S. Generalized predictive control— I: The basic algorithm [J]. *Automatica*, 1987, 23(2): 137-148
- [5] Clarke D W, Mohtadi C, Tuffs P S. Generalized pre-

dictive control— II: Extension and interpretations [J]. *Automatica*, 1987, 23(2): 149-160

- [6] Qin S J, Badgwell T A. An overview of industrial model predictive control technology [A]. *AIChE Symposium Series — 5th Int Conf on Chemical Process Control* [C]. Tahoe, 1996 316(93): 232-256
- [7] 席裕庚, 耿晓军, 陈虹. 预测控制性能研究的新进展 [J]. *控制理论与应用*, 2000, 17(4): 469-475
(Xi Y G, Geng X J, Chen H. Recent advances in research on predictive control performance [J]. *Control Theory and Applications*, 2000, 17(4): 469-475.)
- [8] Smith D J M. Closer control of loops with dead time [J]. *Chemical Engineering Progress*, 1957, 53(5): 271-280