

动态数据校正技术用于 GMVC 控制器性能评估的改进

祝旺旺, 张正江, 闫正兵, 朱志亮, 黄世沛

(温州大学 电气数字化设计技术国家地方联合工程实验室, 浙江 温州 325035)

摘要: 在实际工业生产过程中, 控制器性能的好坏直接影响了系统的收益; 事实上, 由于工作环境的复杂性, 控制器容易受到各种干扰信号的影响, 这通常会导致控制效果不符合预期; 因此, 对控制器的性能进行评估显得尤为重要; 针对反馈系统中测量噪声的干扰问题, 分析了测量噪声对基于广义最小方差控制 (GMVC) 的控制器性能评估 (CPA) 结果的影响; 为了提升 CPA 的精度, 提出了一种动态数据校正 (DDR) 方法来降低测量噪声对系统性能的影响; 首先, 在 SISO 和 MIMO 系统中引入基于 GMVC 的 CPA; 接着讨论了测量噪声对 CPA 结果的影响; 最后, 采用 DDR 滤波器来提升 CPA 结果的准确性; 仿真中系统在不同情况下输出的比较验证了 DDR 滤波器的良好性能。

关键词: 广义最小方差控制; 测量噪声; 性能评估; 动态数据校正

Improvement of Dynamic Data Reconciliation on GMVC-based Controller Performance Assessment

Zhu Wangwang, Zhang Zhengjiang, Yan Zhengbing, Zhu Zhiliang, Huang Shipei

(State-Local Joint Engineering Laboratory of Electrical Digital Design Technology,

Wenzhou University, Wenzhou 325035, China)

Abstract: In the actual industrial production process, the performance of the controller directly affects the revenue of the system. In fact, due to the complexity of the working environment, the controller is susceptible to various interference signals, which usually causes the control effect is not as expected. Therefore, it is particularly important to assess the performance of the controller. Aiming at the interference problem of measurement noise in feedback system, the effect of measurement noise on the results of controller performance assessment (CPA) based on generalized minimum variance control (GMVC) is analyzed. In order to improve the accuracy of CPA, a dynamic data reconciliation (DDR) method is proposed to reduce the impact of measurement noise on the system performance. Firstly, GMVC based CPA is introduced in SISO and MIMO systems, and then the influence of measurement noise on CPA results is discussed. Finally, DDR filter is used to improve the accuracy of CPA results. The comparison of the output of the system under different conditions in the simulation verifies the significant performance of DDR filter.

Keywords: generalized minimum variance control; measurement noise; performance assessment; dynamic data reconciliation

0 引言

随着生产要求的提高, 现代工业生产过程变得越来越复杂, 这对控制系统的控制精度提出了更加苛刻的要求。由于实际工况的复杂性, 一个大型的系统往往包含很多小的控制回路^[1], 一旦某个环节出现问题, 对生产过程造成的影响不可估量, 轻则造成财产损失, 重则危及生命; 调查显示, 一半以上的工业控制器都存在各种各样的问题^[2]。基于这样一种现实, 需要寻求一种对控制器进行监

测的控制器性能评估准则来保障实际工业过程安全有效地进行。

为了满足日益增长的系统收益需求, 控制器的设计方法一直以来都是研究热点^[3]。20 世纪 70 年代, Astrom 首先提出采用最小方差控制 (MVC) 的思想来控制纸张的厚度, 该方法将控制信号与输出信号联系起来, 得出相应的控制规律来最小化输出信号的方差^[4]。在这之后, MVC 思想被广泛运用到各种实际生产过程中并取得了良好的效

收稿日期:2020-10-27; 修回日期:2020-11-19。

基金项目:国家自然科学基金项目(61703309);浙江省自然科学基金项目(LY18F030014);浙江省科技计划项目(LGG18F010016)。

作者简介:祝旺旺(1995-),男,安徽省阜阳市人,硕士研究生,主要从事控制器性能评估方向的研究。

张正江(1982-),男,江西乐平人,副教授,硕士研究生导师,主要从事光伏发电系统建模与控制方向的研究。

引用格式:祝旺旺,张正江,闫正兵,等. 动态数据校正技术用于 GMVC 控制器性能评估的改进[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(5): 241-246.

果^[5]。Harris 于 1989 年提出一个标准化的性能指标用于最小方差控制的控制器性能评估^[6]，这很快成为了控制器性能评估 (CPA) 的研究重点。现阶段的 MVC 方法已经变得非常成熟，但是这种方法还是存在一定的局限性，首先就是在设计最小方差控制器时存在的实际问题，如增益高、带宽大、噪声放大等，甚至会导致非常激进的控制行为^[7-9]；其次，MVC 不适用于非最小相位系统。为了解决 MVC 方法的不足，一些学者提出基于广义最小方差 (GMVC) 的控制器性能评估方法来评价系统的性能。GMVC 的基本思想是同时考虑系统输出信号和控制器输出信号^[10-11]，通过加上一定的误差权重来评估控制器性能的好坏。其优点在于它给了控制器一个约束，从而避免了执行器的过度饱和。另外，GMVC 还可以对系统的动态特性进行评估，这在其它控制准则中往往无法实现。

在传统的性能评估过程中，反馈过程中由测量传感器引入的测量噪声往往容易被忽视^[12]。然而，实际生产中测量噪声对控制系统的影响是不容忽视的，它会使系统的性能严重偏离预期值，直接影响控制器的性能评估结果。本文以理想情况下基于 GMVC 的性能评估过程为切入点，考虑并分析了测量噪声对评估结果的影响，然后提出采用 DDR 滤波技术来对控制系统性能以及 CPA 结果进行改善。最后，通过相应的仿真实例验证了本文的理论分析结果。

1 基于 GMVC 的控制器性能评估

在自动控制理论中，控制系统性能的评价涉及多方面因素；因此，控制系统的性能可以通过不同的指标来反映。传统的性能评价主要分为暂态性能分析和稳态性能分析两部分，下面对这两种分析方法进行分别介绍。

暂态性能指标包括超调量、超调时间、上升时间、调节时间等^[13]；其中，超调量是描述系统性能的关键性能指标，它反映了系统输出在控制器调节过程中与稳态值的偏离程度。不同系统对超调量的要求也不尽相同，对一般系统来说，适当的超调量可以提高系统的快速性，而对于不可逆过程来说，却不允许出现超调量。一般来说，系统的暂态性能指标主要通过阶跃响应来反映，通过观测系统的阶跃输出可以比较容易地被计算得到。

稳态性能主要用于描述系统在稳态时的输出与期望值的差距，它反映了系统控制器的控制精度。由于系统大部分时间都是在稳定状态下工作，因此系统的稳态性能指标同样不可忽视。系统的误差可以从输入端和输出端分别定义，而稳态误差一般根据输入端定义的误差来分析，输入端误差是指反馈量与输入量的偏差，控制器在这一过程中对偏差信号的抑制作用也间接的反映了控制器的性能。系统的稳态误差可以通过对误差信号取拉氏反变换进行分析。

上述的性能指标在传统性能评估被广泛采用，然而，作为一种直观描述系统当前状态的指标，方差在当前的主流评估方法（如 MVC、GMVC 等）中往往有着不可替代的

地位。因此，采用方差作为性能指标，本章首先对基于 GMVC 的性能评估进行简单地复现。

1.1 SISO 系统的性能评估

理想情况下 SISO 随机控制系统如图 1 所示，图中各变量为 MIMO 情况下的矩阵或向量，作为 MIMO 的特殊情况，当图中各部分中的变量为标量函数时，图 1 所示的系统模型也可用于表示 SISO 系统。此时， $r(t)$ 、 $y(t)$ 分别表示系统的输入信号和输出信号； $e(t)$ 为误差信号， $u(t)$ 为控制信号； $P_e(z^{-1})$ 、 $F_c(z^{-1})$ 、 $B(z^{-1})$ 分别表示误差权重、控制权重和干扰权重； $C_0(z^{-1})$ 为控制器模型； $T = z^{-k}G(z^{-1})$ 为被控对象，其中， $G(z^{-1}) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})}$ ； k 表示控制信号经 k 个采样周期后影响输出信号。 $d(t) \sim N(0, \sigma^2)$ 表示服从高斯分布的外部扰动信号，扰动模型 $B_0(z^{-1}) = \frac{C(z^{-1})}{A(z^{-1})}$ ， $f(t)$ 表示广义输出。

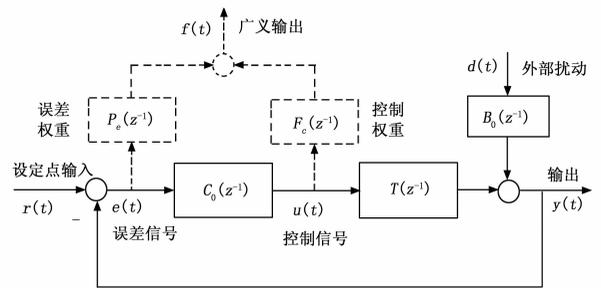


图 1 理想随机系统结构图

根据图 1 所示的模型可得该系统的输出表达式为：

$$y(t) = B_0 d(t) + z^{-k} G u(t) \tag{1}$$

式中， t 表示当前采样时间， k 取正整数。广义输出表达式为：

$$f(t+k) = -P_e y(t+k) + F_c u(t) \tag{2}$$

将 (1) 式代入 (2) 式得：

$$f(t+k) = (F_c - P_e G) u(t) - B_0 P_e d(t+k) \tag{3}$$

分别令 $D = F_c - P_e G$ ， $E = -B_0 P_e$ ，则：

$$f(t+k) = D u(t) + E d(t+k) \tag{4}$$

对 E 进行丢番图分解，即令 $E = H + z^{-k} L$ ，式 (4) 可表示为：

$$f(t) = D u(t-k) + L d(t-k) + H d(t) \tag{5}$$

对式 (5) 进行整理并取方差可得：

$$\begin{aligned} \sigma_f^2 &= E[f^2(t)] = \\ E[(D u(t-k) + L d(t-k) + H d(t))^2] &= \\ \sigma_0^2 + \sigma_{gmvc}^2 & \end{aligned} \tag{6}$$

其中： σ_0^2 为可控部分，理想情况下其值为零； σ_{gmvc}^2 表示系统的不可控部分。对于实际中的系统而言，控制器的性能不能满足可控部分为零这一理想条件，在非理想环境下，设非最佳控制器额外输出部分方差为 σ_{soc}^2 ，则实际广义输出方差表达式：

$$\sigma_f^2 = \sigma_{soc}^2 + \sigma_{gmvc}^2 \quad (7)$$

定义评估指数 $\eta = \frac{\sigma_{gmvc}^2}{\sigma_{soc}^2 + \sigma_{gmvc}^2} \in [0, 1]$ 来评价控制器性能, $\eta = 1$ 表示广义最小方差控制器, 显然 η 越大表明控制器性能越好。

1.2 MIMO 系统的性能评估

MIMO 系统情况下, $r(t)$ 、 $y(t)$ 分别为系统的输入向量和输出向量; $e(t)$ 为误差向量, $u(t)$ 为控制向量; $C_0(z^{-1})$ 为控制器传递函数矩阵; $T(z^{-1})$ 为被控对象传递函数矩阵; $d(t) \sim N(0, \sum_d)$ 表示外部扰动向量, 假设为协方差 \sum_d 的零均值多维噪声信号; $B(z^{-1})$ 为扰动传递函数矩阵; $f(t)$ 表示广义输出, 此时系统输出表达式:

$$y(t) = B_0 d(t) + Tu(t) \quad (8)$$

系统的广义输出为:

$$f(t) = -P_e y(t) + F_c u(t) \quad (9)$$

将式 (8) 代入 (9) 中化简得:

$$f(t) = (F_c - P_e T)u(t) - P_e B_0 d(t) \quad (10)$$

对式 (10) 同乘 z^{-d} 消除内部误差并进行丢番图分解得:

$$\tilde{f}(t) = z^{-d}(D(F_c - P_e T)u(t) - Ld(t)) - Hd(t) \quad (11)$$

式中, $\tilde{f}(t) = z^{-d}Df(t)$ 。取式 (11) 协方差矩阵的迹:

$$\begin{aligned} tr\{\text{cov}[\tilde{f}(t)]\} = & tr\{\text{cov}[(D(F_c - P_e T)u(t) - Ld(t))]\} + \\ & tr\{\text{cov}[Hd(t)]\} \end{aligned} \quad (12)$$

与 SISO 系统类似, 设非最佳控制器条件下系统额外输出部分的协方差为 \sum_{soc} , 定义评估指数 $\eta = \frac{tr(\sum_{mgmvc})}{tr(\sum_{mgmvc}) + tr(\sum_{soc})} \in [0, 1]$, η 越小表明控制器的性能越差。

2 测量噪声对评估结果的影响

对于实际的工业过程来说, 为了确定系统偏差的大小, 需要对系统的实时输出进行监测。测量行为一般发生在反馈环, 由于测量传感器中物理元件特性的影响, 测量到的系统输出信息很可能已经偏离过程的真实状态, 它会干扰系统的性能使系统性能评估的结果变得不再可靠。测量信息与系统真实输出信息的偏差一般称为测量噪声, 本章考虑了反馈过程中的测量噪声, 从理论上分析了测量噪声对系统性能及评估结果的影响。

2.1 测量噪声对 SISO 系统评估结果的影响

图 2 为带有传感器测量噪声的随机系统结构图, 设 $\epsilon(t) \sim N(0, \rho^2)$ 为高斯分布的测量噪声, 其余变量与理想情况下的 SISO 系统相同。

考虑测量噪声时系统的测量输出为:

$$y_m = y(t) + \epsilon(t) \quad (13)$$

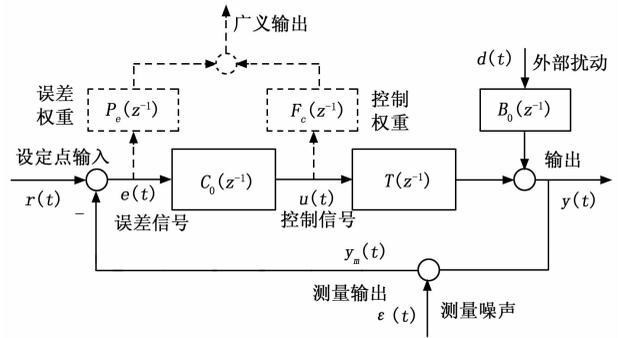


图 2 实际随机系统结构图

式 (13) 表明, 由于测量噪声的存在, 系统的反馈信息已经不再是系统当前时刻的真实输出。由图 2 可得:

$$u(t) = -C_0 y_m(t) \quad (14)$$

将式 (13) 和式 (14) 代入到式 (5) 中化简并取方差可得:

$$\begin{aligned} E[f^2(t)] = & E[(Du(t-k) + Ld(t-k))^2] + \\ & E[(Hd(t))^2] + E[-DC_0 \epsilon(t)]^2 \end{aligned} \quad (15)$$

注意, 为了方便比较, 式 (15) 中的 $u(t-k)$ 与理想情况 SISO 系统相同, 从而使得不同情况下系统输出的可控部分不发生变化。令 $\sigma_{m-gmvc}^2 = E[(Hd(t))^2] + E[-DC_0 \epsilon(t)]^2$, 显然 $\sigma_{m-gmvc}^2 > \sigma_{gmvc}^2$, 则性能评估的指标比较结果为:

$$\eta_m = \frac{\sigma_{gmvc}^2}{\sigma_{soc}^2 + \sigma_{m-gmvc}^2} < \eta \quad (16)$$

由式 (16) 可知, 测量噪声的引入会使得性能评估结果减小, 即测量噪声会降低系统性能。

2.2 测量噪声对 MIMO 系统评估结果的影响

讨论测量噪声对 MIMO 系统的影响, 此时 $\epsilon(t) \sim N(0, \sum_\rho)$ 为多维高斯测量噪声信号, $y_m(t)$ 为实际测量反馈, 其余变量均与理想情况下 MIMO 系统相同。此时系统的测量输出为:

$$y_m(t) = y(t) + \epsilon(t) \quad (17)$$

系统的广义输出为:

$$f(t) = (F_c - P_e T)u(t) - P_e B_0 d(t) \quad (18)$$

同理, 对式 (18) 两边同乘以 z^{-d} 消除内部误差并进行丢番图分解得:

$$\tilde{f}(t) = z^{-d}(D(F_c - P_e T)u(t) - Ld(t)) - Hd(t) \quad (19)$$

再将 $u(t) = -C_0 y_m(t)$ 代入并化简得:

$$\begin{aligned} \tilde{f}(t) = & z^{-d}(D(F_c - P_e T)u(t) - \\ & Ld(t)) - Hd(t) - C_0 \epsilon(t) \end{aligned} \quad (20)$$

对式 (20) 取协方差再取迹可得:

$$\eta_m = \frac{tr(\sum_{mgmvc})}{tr(\sum_{m-gmvc}) + tr(\sum_{soc})} < \eta \quad (21)$$

由式 (21) 可知, 测量噪声同样会影响 MIMO 系统的性能从而降低 MIMO 系统的性能评估结果。

3 DDR 滤波器对评估结果的改进

为了抑制测量噪声对系统性能的不利影响,许多滤波方法已经被应用于工业控制系统,但这些滤波技术在提升系统性能的同时也有其自身的缺陷。例如,传统指数滤波器的输出与当前输入信号、前一刻的输出信号及权重均有关,故指数滤波器在改善噪声影响的同时可能会引入时间延迟,这对于具有显著动态的系统过程来说往往难以接受;扩展卡尔曼滤波器(EKF)对系统的模型要求较高,并且它能处理的噪声类型也较为单一。作为一种能平稳滤波且可以实时跟踪的鲁棒滤波方法,DDR技术可以有效地避免以上问题^[14]。DDR滤波器综合考虑了测量信息以及模型预测值信息,通过将模型预测作为附加信息考虑进来使用贝叶斯公式,然后根据最大后验概率估计不断调节模型预测值和测量值,使得滤波后的结果能更加真实地反映过程的实时状况。本章将讨论DDR滤波器对基于GMVC的CPA结果的改善作用。

3.1 DDR 滤波器对 SISO 系统评估结果的改进

图3为引入DDR滤波器之后的系统结构图,其中 $y_{ddr}(t)$ 为经过DDR滤波后的反馈信号,即对实际系统输出 $y(t)$ 的估计值, $\hat{y}(t)$ 表示基于模型的预测输出,其余变量与图2相同。

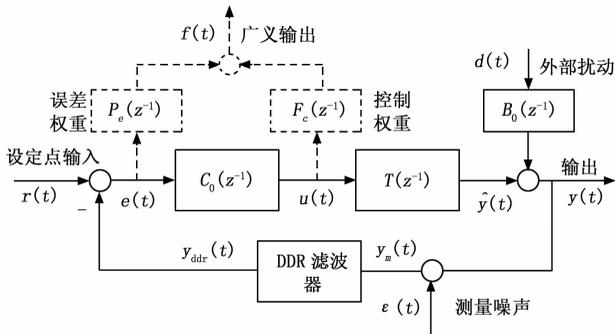


图3 引入DDR滤波器的随机系统结构图

设模型预测输出与实际系统输出的误差为 $\delta(t) \sim N(0, \delta^2)$, 那么:

$$y(t) = \underbrace{z^{-1}Gu(t)}_{\hat{y}(t)} + \underbrace{B_0d(t)}_{\delta(t)} \quad (22)$$

式(22)可用于描述系统模型的不确定性,即系统输出由模型预测输出及预测误差共同组成,模型预测误差主要用于表示模型不精确带来的不确定性;当系统出现一些非预期的干扰使得模型不够精确时,预测误差的存在仍然可以保证系统的鲁棒稳定性。

使用测量信息及模型预测信息对输出进行估计,首先利用测量信息和模型预测信息使用贝叶斯公式:

$$p(y(t) | \hat{y}(t), y_m(t)) \propto$$

$$L(y(t) | \hat{y}(t))L(y(t) | y_m(t))p(y(t)) \quad (23)$$

则待估参数的后验分布为:

$$p(y(t) | \hat{y}(t), y_m(t)) \propto$$

$$\frac{1}{2\pi\rho\delta} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{(y_m(t) - y(t))^2}{\rho^2} + \frac{(\hat{y}(t) - y(t))^2}{\delta^2} \right] \right\} \quad (24)$$

由最大后验概率估计,上式取最大值时的 $y(t)$ 即为估计值 $y_{ddr}(t)$,求解可得 $y_{ddr}(t)$ 为:

$$y_{ddr}(t) = \hat{y}(t) + K(y_m(t) - \hat{y}(t)) \quad (25)$$

$$K = (1 + \rho^2\delta^{-2})^{-1}$$

设实际输出估计值与真实输出的误差为 $\xi(t)$,即:

$$\xi(t) = y_{ddr}(t) - y(t) \quad (26)$$

将式(13)、(22)、(25)代入到式(26)中并取方差可得:

$$E[\xi(t)^2] = (\rho^{-2} + \delta^{-2})^{-1} \quad (27)$$

由式(27)可知:

$$E[\xi(t)^2] < \min(\rho^2, \delta^2) \quad (28)$$

将 $u(t) = -C_0y_{ddr}(t)$ 代入到式(5)中得:

$$f(t) = Du(t - k) + Ld(t - k) + Hd(t) - C_0\xi(t) \quad (29)$$

取方差并根据式(28)可知:

$$\eta_{ddr} = \frac{\sigma_{gmvc}^2}{\sigma_{soc}^2 + \sigma_{ddr-gmvc}^2} > \eta_m \quad (30)$$

即DDR滤波器可以减小测量噪声的影响,使得评估结果更加接近于理想情况。

3.2 DDR 滤波器对 MIMO 系统评估结果的改进

分析图3所示的带DDR滤波器的MIMO系统,此时测量噪声 $\epsilon(t) \sim N(0, \sum_\rho)$,模型预测的误差 $\delta(t)$ 设为 $\delta(t) \sim N(0, \sum_\delta)$,则:

$$y(t) = \underbrace{Tu(t)}_{\hat{y}(t)} + \underbrace{Bd(t)}_{\delta(t)} \quad (31)$$

待估参数后验分布表示为:

$$p(y(t) | y(t), y_m(t)) \propto \frac{1}{(2\pi)^N \left| \sum_\delta \sum_\rho \right|^{1/2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[(y_m(t) - y(t))^T \sum_\rho^{-1} (y_m(t) - y(t)) + (y(t) - y(t))^T \sum_\delta^{-1} (y(t) - y(t)) \right] \right\} \quad (32)$$

式中, N 表示向量维数。同SISO的分析过程,得到的估计值表达式为:

$$y_{ddr}(t) = \hat{y}(t) + K(y_m(t) - \hat{y}(t)); \quad K = \left(\sum_\rho^{-1} + \sum_\delta^{-1} \right)^{-1} \quad (33)$$

同样有:

$$\text{cov}[\xi(t)] = \text{cov}[\delta(t) + K(\epsilon(t) - \delta(t))] = \left(\sum_\rho^{-1} + \sum_\delta^{-1} \right)^{-1} \quad (34)$$

由式(34)可知:

$$\text{tr}\{\text{cov}[\xi(t)]\} < \min\{\text{tr}[\sum_\rho, \sum_\delta]\} \quad (35)$$

将 $u(t) = -C_0y_{ddr}(t)$ 代入式(19)中可得:

$$\begin{aligned} \tilde{f}(t) = & z^{-d}(D(F_c - P_c T)u(t) - \\ & Ld(t)) - Hd(t) - C_0 \xi(t) \end{aligned} \quad (36)$$

对式 (36) 取协方差再取迹并由式 (35) 有:

$$\eta_{ddr} = \frac{tr(\sum_{mgmvc})}{tr(\sum_{ddr-mgmvc}) + tr(\sum_{soc})} > \eta_m \quad (37)$$

结论与 SISO 情况类似, 即 DDR 滤波器可以改善测量噪声影响下 MIMO 系统的性能表现使得 CPA 结果得到提升。

4 仿真结果与分析

根据上述理论分析过程可知, 测量噪声会影响基于 GMVC 的控制器性能评估结果, 而 DDR 滤波技术可以减小测量噪声对评估结果的影响。因此, 本章将结合仿真实例对不同情况下的 SISO 和 MIMO 系统输出进行比较, 并得出不同测量噪声方差下的评估结果以验证理论推导得出的结论。为了更好地突出 DDR 滤波器的优点, 仿真时引入了指数滤波器作为对比。指数滤波器在一些工业过程中被广泛使用, 它主要根据测量信息和滤波器的前一时刻信息来实现其滤波作用。然而, 指数滤波器的性能与其滤波参数有关。若滤波参数过大, 过多的测量信息会使得滤波性能较差; 若滤波参数过小, 过多的前一时刻信息会导致其输出出现较大的时间延迟。如第 3 章所述, DDR 滤波器可以利用系统当前时刻的信息采用贝叶斯估计来得到最优估计值, 这在避免参数选取问题的同时也不会对系统引入时间延迟。

4.1 SISO 系统的仿真验证

对应图 3 的 SISO 系统仿真模型如下:

$$P_c(z^{-1}) = \frac{1-0.2z^{-1}}{1-z^{-1}}; F_c(z^{-1}) = -z^{-2}(1-$$

$0.5z^{-1})$;

$$C_0 = \frac{2.44-1.44z^{-1}}{(1-z^{-1})(2+1.8z^{-1})}; B_0(z^{-1}) = \frac{1}{1-0.8z^{-1}};$$

被控对象传递函数取 $\frac{z^{-2}}{1-0.8z^{-1}}$, 则系统输出:

$$y(t) = \frac{z^{-2}}{1-0.8z^{-1}}u(t) + \frac{1}{1-0.8z^{-1}}d(t) \quad (38)$$

设测量噪声方差为 0.3, 外部扰动方差为 0.1, SISO 系统的广义输出比较如图 4 所示。

由图 4 可以看出, 与理想情况相比, 测量噪声的存在明显增加了广义输出的波动, 这表明测量噪声会削弱控制系统的性能。指数滤波器和 DDR 滤波器都可以降低测量噪声的影响; 然而, 与指数滤波器相比, 使用 DDR 滤波器后的广义输出明显更接近理想情况, 这表明提出的 DDR 滤波器在滤波效果上明显优于指数滤波器。

为了比较不同测量噪声方差下的评估结果, 仿真时测量噪声的方差取值在 0.3~0.45 范围内逐渐增加, $d(t)$ 方差取 0.1, 得到的评估结果如表 1 所示。根据前文推导过程可

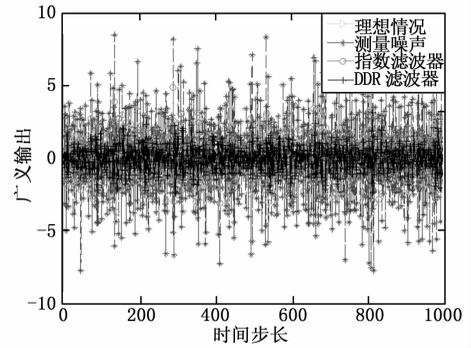


图 4 SISO 系统的广义输出比较

知, 由于理想情况下评估结果始终为 1 (控制器的参数无变化), 因此表中不再单独列出。从表 1 可以看出, 考虑测量噪声以后, 评估结果会大大降低, 并且评估结果还会随着测量噪声方差的增加而减小, 这说明测量噪声会使得系统性能变差从而不利于控制器性能评估。指数滤波器和 DDR 滤波器对控制器性能的评估结果都具有改善作用, 但是 DDR 滤波器情况下的性能评估结果已经接近于理想情况。综合图 4 和表 1 的对比结果不难发现, 测量噪声对系统性能的影响非常剧烈, 在 CPA 的过程中忽略测量噪声的影响可能会对生产造成难以估量的损失, 而 DDR 滤波器对系统性能的提升是显而易见的, 这使得 CPA 的结果变得相对可靠。

表 1 SISO 系统的性能评估结果比较

噪声方差	CPI		
	测量噪声	指数滤波器	DDR 滤波器
0.300	0.360 6	0.477 9	0.944 7
0.325	0.356 0	0.473 1	0.932 9
0.350	0.351 7	0.468 6	0.921 6
0.375	0.347 5	0.464 3	0.910 8
0.400	0.343 6	0.460 1	0.900 5
0.425	0.339 8	0.456 2	0.890 7
0.450	0.331 6	0.452 3	0.881 2

4.2 MIMO 系统的仿真验证

MIMO 系统的仿真模型如下:

$$\mathbf{T}(z^{-1}) = \begin{bmatrix} z^{-1} & z^{-2} \\ 1-0.4z^{-1} & 1-0.1z^{-1} \\ 0.3z^{-1} & z^{-2} \\ 1-0.1z^{-1} & 1-0.8z^{-1} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B}_0(z^{-1}) = \begin{bmatrix} 1 & -0.6 \\ 1-0.5z^{-1} & 1-0.5z^{-1} \\ 0.5 & 1 \\ 1-0.5z^{-1} & 1-0.5z^{-1} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{C}_0(z^{-1}) = \begin{bmatrix} 0.5-0.2z^{-1} & 0 \\ 1-0.5z^{-1} & 0 \\ 0 & 0.25-0.2z^{-1} \\ 0 & (1-0.5z^{-1})(1+0.5z^{-1}) \end{bmatrix};$$

$$P_c = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, F_c = -D^{-1} \begin{bmatrix} 3 & 0 \\ 0 & 5 \end{bmatrix};$$

其中: $D = \begin{bmatrix} -0.9578z & -0.2873z \\ 0.2873z^2 & -0.9578z^2 \end{bmatrix}$ 。测量噪声协方差

矩阵为 $\sum_p = \begin{bmatrix} 0.3 & 0 \\ 0 & 0.3 \end{bmatrix}$, $d(t)$ 的协方差取 $\sum_d = I$, MI-

MO 系统的广义输出比较如图 5 所示。同样比较测量噪声不同协方差下的 CPA 指数, 结果如表 2 所示。MIMO 系统情况下根据图 5 和表 2 得出的结论与 SISO 系统相似, 即测量噪声同样会对 MIMO 系统的性能产生显著不良影响, 而 DDR 滤波器可以在很大程度上提升 MIMO 系统的性能从而使得评估结果更接近于理想情况。

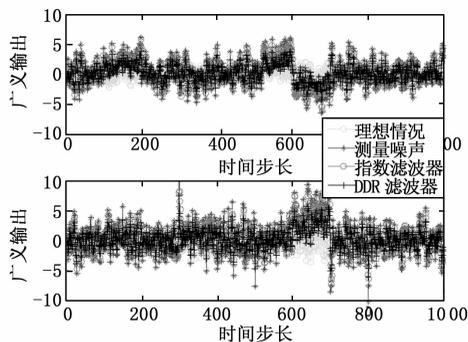


图 5 MIMO 系统的广义输出比较

表 2 MIMO 系统的性能评估结果比较

噪声方差	CPI		
	测量噪声	指数滤波器	DDR 滤波器
0.300	0.081 2	0.392 7	0.908 8
0.325	0.076 6	0.371 6	0.867 0
0.350	0.072 5	0.352 8	0.829 1
0.375	0.068 8	0.336 0	0.794 6
0.400	0.065 5	0.320 8	0.763 0
0.425	0.062 5	0.307 1	0.734 0
0.450	0.059 8	0.294 5	0.707 3

5 结束语

在绝大多数工业反馈系统中, 为了检测系统性能是否符合预期的标准, 通常会在反馈过程中引入频繁的测量行为。然而, 对于当前许多成熟的性能评估理论来说, 测量行为发生时由测量传感器引入的测量噪声还没有引起足够的重视, 测量噪声在增加控制器负担的同时还会使系统引入欺骗性的测量反馈。针对这一问题, 考虑了实际生产过程中的测量噪声, 通过理论分析指出了测量噪声对基于 GMVC 的控制器性能评估结果的影响; 为了降低测量噪声对反馈系统性能及控制器性能评估结果的不良影响, 提出采用 DDR 滤波技术来改进测量噪声影响下的控制器性能评估结果。最后, 采用常用的指数滤波器作为对比, 通过相应的仿真实例验证了 DDR 滤波器在测量噪声抑制及系统性

能提升方面的良好表现。DDR 技术是一种新型鲁棒滤波方法, 它的应用领域并不局限于本文中受高斯测量噪声影响的反馈系统。对于非高斯分布的测量噪声以及其它类型的系统模型, 若噪声的概率密度函数及系统模型已知, DDR 技术同样可以被拓展应用。

参考文献:

- [1] Paulonis M A, Cox J W. A practical approach for large-scale controller performance assessment, diagnosis, and improvement [J]. Journal of Process Control, 2003, 13 (2): 155-168.
- [2] Hoo K A, Piovoso M J, Schnelle P D, et al. Process and controller performance monitoring; overview with industrial applications [J]. Journal of Adaptive Control & Signal Processing, 2003, 17 (7-9): 635-662.
- [3] 孙金明, 左 信, 季德伟, 等. PID 控制器性能评价 [J]. 化工自动化及仪表, 2004, 31 (5): 21-23.
- [4] Astrom K J. Introduction to Stochastic Control Theory [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1972, 17 (3): 422-423.
- [5] 刘 胜, 姚 波. 船舶减摇鳍系统最小方差控制 [J]. 信息与控制, 1994, 23 (2): 178-184.
- [6] Harris T J. Assessment of control loop performance [J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 1989, 67 (5): 856-861.
- [7] 张 建, 张正江, 郑崇伟. 测量噪声对 GMVC 性能影响分析与改进方法 [J]. 控制工程, 2017, 24 (7): 1366-1370.
- [8] Zhao Y, Hongye S U, Chu J, et al. Multivariable Control Performance Assessment Based on Generalized Minimum Variance Benchmark [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2010, 18 (1): 86-94.
- [9] Hugo A J. Performance assessment of single-loop industrial controllers [J]. Journal of Process Control, 2006, 16 (8): 785-794.
- [10] Grimble M J. Generalized minimum variance control law revisited [J]. Optimal Control Applications & Methods, 2010, 9 (1): 63-77.
- [11] Grimble M J, Majecki P. Non-linear generalised minimum variance control using unstable state-dependent multivariable models [J]. Control Theory & Applications, IET, 2013, 7 (4): 551-564.
- [12] Zhang Z, Chen J. Enhancing performance of generalized minimum variance control via dynamic data reconciliation [J]. Journal of the Franklin Institute, 2019, 356 (15): 8829-8854.
- [13] Kozub D J. Monitoring and diagnosis of automated controllers in the chemical process industries [A]. Proceedings of AIChE Annual Meeting [C]. 1993.
- [14] Bai S, Thibault J, Mclean D D. Dynamic data reconciliation; Alternative to Kalman filter [J]. Journal of Process Control, 2006, 16 (5): 485-498.