

虚拟参考反馈校正时变控制的规范设计

王建宏^{1,2}, 熊朝华¹

(1. 中国电子科技集团公司第二十八研究所, 南京 210007; 2. 景德镇陶瓷学院机电系, 江西 景德镇 333403)

摘要: 为折衷线性控制器和非线性控制器间的差距, 采用虚拟参考反馈校正控制策略研究线性时变控制器的设计问题。对于两控制器中未知时变参数矢量的辨识, 在原代价函数的基础上通过增加一项关于两未知时变参数矢量的规范项, 来约束时变参数矢量的跳变特性。对于未知时变参数矢量的优化过程, 采用可分离非线性最小二乘法重复迭代以得到全局最优解。借助凸优化理论, 推导出一个关键规范值, 以此值作为规范值合适选取过程中的初始值。最后用仿真算例验证了辨识方法的有效性。

关键词: 虚拟参考反馈校正控制; 模型匹配; 时变参数; 规范系数; 迭代辨识算法

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)08-0077-06

Regularization Design of Virtual Reference Feedback Tuning Time Varying Control

WANG Jian-hong^{1,2}, XIONG Zhao-hua¹

(1. The 28th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210007, China;

2. School of Mechanical and Electronic Engineering, Jingdezhen Ceramic Institute, Jingdezhen 333403, China)

Abstract: To compromise the gap between the linear and nonlinear controllers, we made a study on how to design a linear time varying controller using virtual reference feedback tuning strategy. To identify the unknown time varying parameter vectors in the two linear time varying controllers, we added a new regularization term about the two unknown time varying parameter vectors to the formal cost function. So we could constrain the time varying parameter vectors' jump property in virtue of this regularization term. An iterative separable nonlinear least-squares identification method was proposed to estimate the unknown time varying parameter vectors. Through iterating, the global optimum of the time varying parameter vectors could be obtained. By means of the convex optimization theory, we derived a critical value, and take it as the starting point for finding the appropriate regularization coefficient. Finally, the simulation example results verified the validity of the identification method.

Key words: virtual reference feedback tuning control; model matching; time varying parameters; regularization coefficient; iterative identification algorithm

0 引言

大多数闭环控制器的设计都是围绕已知的系统模型展开的,但在实际过程中,系统模型的数学描述很难获得,因此控制器的设计只能依赖于可观测到的输入-输出观测数据。基于输入-输出观测数据的控制器设

计从40年代开始吸引了大量学术界和工程界的控制工作者。

虚拟参考反馈校正(VRFT)控制是一种基于输入-输出观测数据,直接对控制器进行设计的方法,无需建立系统模型的中间过程。当假设控制器的结构为一个参数形式时,控制器的设计转化为利用观测数据直接校正控制器结构中的未知参数矢量。VRFT方法的思想来源于文献[1];文献[2]对VRFT方法进行了详细和全面的理论阐述,并将该方法成功用于单自由度的控制器设计;文献[3]将VRFT方法推广到二自由度的控制器设计;文献[4]分析了某具有特殊结构的非线性

收稿日期:2013-07-17

修回日期:2013-09-17

基金项目:江西省科技厅青年科学基金(20122BAB211012);江西省教育厅科技项目(GJJ13638)

作者简介:王建宏(1980—),男,江西吉安人,博士,副教授,研究方向为系统辨识和凸优化。

性系统的 VRFT 直接非线性控制设计;文献[5]将经典的 VRFT 推广到二自由度的闭环控制器设计中,并从优化的角度分析了两类未知参数矢量的辨识。至此,其他关于对 VRFT 方法的研究较少出现。

在使用 VRFT 方法时需要假设未知参数矢量具有时不变特性,即任何一个参数都不随时间的变化而改变,各自对应一个常数^[6]。但这种常数的假设是一种理想状态,因为在自然界和任何工业生产实践过程中,出现的都是非线性系统和非线性控制器。对于非线性系统或非线性控制器的直接辨识及控制较难,但线性系统的辨识和控制理论和工程上已经研究得甚为成熟。在传统的工程实践中,都是将非线性系统在其平衡点附近的吸收域做二次泰勒级数展开,进而忽略高阶项的存在,用一个二次线性式来近似地替换原非线性系统。高阶项的忽略不可避免地带来近似误差的影响,从而使得众多的控制工作者引入小波分析、神经网络和正交基函数等逼近方法来减小近似误差^[7]。本文避开传统非线性系统的线性化,在非线性和线性之间选择一种折衷方法,将原假设控制器常参数改变为时变参数,即本文出现的两闭环控制器为时变参数的线性参数化形式,并且在某种程度上描述了某种非线性特性的存在。时变参数表明控制器线性参数形式中的未知参数会随着时间的进程而改变,这恰好能体现非线性特性的饱和、跳变和分段非线性,因此时变参数的假设推广了原常参数的特例,进一步缩短与非线性系统间的逼近误差间距。

对于 VRFT 控制器时变参数的辨识,在原 VRFT 性能准则函数的基础上,增加一项对该两类未知时变参数矢量的规范项。此规范项的增加不仅体现了原 VRFT 控制设计思路中的模型匹配问题,同时保证了用较小幅度和个数的跳变参数来表征两闭环控制器。对于此带有规范项的性能准则函数,借助相互迭代的可分离非线性最小二乘法递推地辨识两类未知时变参数矢量,经过不断的相互迭代求解,可保证估计序列最终会收敛于带有规范项的性能准则函数的全局最优值,从中明确规范项在时变参数递推辨识过程中起到的校正作用。对于规范项前的规范系数的合适选择问题,利用凸分析理论知识^[8],推导出一个关键的规范系数值,此值可作为规范系数寻找过程的初始点,且该关键规范值可使得两闭环控制器的参数为常数值,即当所选择的规范系数值大于此关键规范值时,控制器的时变参数会退化成常参数的特例。

1 问题描述

假设闭环系统的被控对象为一线性时不变离散时

间的单输入单输出过程,系统模型用一个未知的有理传递函数形式 $P(z)$ 来表示。

在整个试验过程中只有一系列的输入-输出观测数据 $\{u(t), y(t)\}_{t=1}^N$ 可采集。带有加性扰动 $d(t)$ 的输入-输出过程可描述为

$$y(t) = P(z)u(t) + d(t) \quad (1)$$

式中: z 表示前移算子 $zu(t) = u(t-1)$, $u(t)$ 为控制输入; $y(t)$ 为观测输出; $d(t)$ 为观测噪声。

考虑如图 1 所示二自由度的闭环控制系统结构。

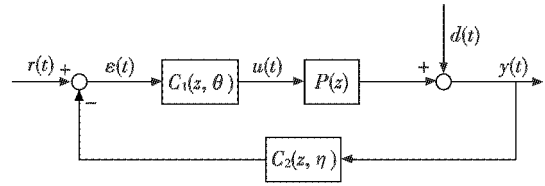


图 1 二自由度的闭环控制系统

Fig. 1 The 2 DOF closed control system

被控对象的输入输出观测量可表示为

$$\begin{cases} y(t) = P(z)u(t) + d(t) \\ u(t) = C_1(z, \theta(t)) [r(t) - C_2(z, \eta(t))y(t)] \end{cases} \quad (2)$$

式中: $r(t)$ 为输入参考信号;二自由度的闭环控制器为 $(C_1(z, \theta(t)), C_2(z, \eta(t)))$, 其属于给定的线性参数化控制器形式。即两控制器的形式都可表示为

$$\begin{cases} C_1(z, \theta(t)) = \alpha^T(z) \theta(t) \\ C_2(z, \eta(t)) = \beta^T(z) \eta(t) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\alpha(z) = [\alpha_1(z) \ \alpha_2(z) \ \cdots \ \alpha_n(z)]^T$; $\beta(z) = [\beta_1(z) \ \beta_2(z) \ \cdots \ \beta_n(z)]^T$; $\theta(t) = [\theta_1(t) \ \theta_2(t) \ \cdots \ \theta_n(t)]^T$; $\eta(t) = [\eta_1(t) \ \eta_2(t) \ \cdots \ \eta_n(t)]^T$; $\alpha(z)$ 和 $\beta(z)$ 表示两已知的线性离散时间传递函数矢量; $\theta(t)$ 和 $\eta(t)$ 表示两个 n 维的未知待求时变参数矢量。对式(2)进行基本的整理可得

$$y(t) = \frac{P(z)C_1(z, \theta(t))}{1 + P(z)C_1(z, \theta(t))C_2(z, \eta(t))} r(t) + \frac{1}{1 + P(z)C_1(z, \theta(t))C_2(z, \eta(t))} d(t) \quad (4)$$

以下研究在给定期望已知闭环传递函数 $M(z)$ 条件下,设计两控制器 $(C_1(z, \theta(t)), C_2(z, \eta(t)))$, 使得由 $r(t)$ 到 $y(t)$ 的闭环传递函数能充分接近于期望的闭环传递函数 $M(z)$ 。因两控制器具有线性参数化形式,控制器设计问题可通过求解如下优化问题解决。

$$\min_{\theta(t), \eta(t)} J_{MR}(\theta(t), \eta(t)) = \left\| \left(\frac{P(z)C_1(z, \theta(t))}{1 + P(z)C_1(z, \theta(t))C_2(z, \eta(t))} - M(z) \right) \right\| \quad (5)$$

因式(5)中需使用到被控对象的数学模型 $P(z)$, 而 $P(z)$ 是未知的。为避免对 $P(z)$ 建模,采用规范化虚拟参考反馈校正控制。

2 规范化下的虚拟参考反馈校正控制

对给定的两控制器 $\{(C_1(z, \boldsymbol{\theta}(t)), C_2(z, \boldsymbol{\eta}(t)))\}$, 控制系统式(2)恰好满足由 $r(t)$ 到 $y(t)$ 的闭环传递函数为 $M(z)$, 则对闭环系统施以任意的参考信号 $r(z)$ 且 $d(t) = 0$, 闭环系统的输出为 $y(t) = M(z)r(t)$, 因而集中考虑某给定的特定参考输入信号 $\bar{r}(t)$, 闭环系统恰有类似于参考模型 $M(z)$ 的闭环传递函数的必要条件: 两闭环系统在给定参考信号下具有相同的输出 $y(t)$ 。

虚拟参考反馈校正控制包括合理地选择参考输入信号 $\bar{r}(t)$, 对 $\bar{r}(t)$ 的构造过程如下所述。

通过闭环或开环试验, 采集存储关于系统模型 $P(z)$ 的输入-输出观测数据对 $\{u(t), y(t)\}_{t=1}^N$, 定义虚拟参考信号 $\bar{r}(t)$, 使得

$$y(t) = M(z) \bar{r}(t) \quad (6)$$

此参考输入信号 $\bar{r}(t)$ 在实际中并不存在, 也不用于产生实际的观测输出数据 $y(t)$ 。但 $\bar{r}(t)$ 却可以在计算机上通过式(6)的方程 $y(t) = M(z) \bar{r}(t)$ 来生成。 $y(t)$ 可解释为当参考信号为 $\bar{r}(t)$ 且 $d(t) = 0$ 时, 闭环控制系统的期望输出。

因 $p(z)$ 未知, 但由于当 $p(z)$ 施以输入信号 $u(t)$ 激励时, 其输出信号为 $y(t)$, 因此, 可要求通过合适地选择两控制器 $\{(C_1(z, \boldsymbol{\theta}(t)), C_2(z, \boldsymbol{\eta}(t)))\}$, 使得当闭环系统施以虚拟参考信号 $\bar{r}(t)$, $d(t) = 0$ 和 $y(t)$ 时, 该闭环系统可生成期望的 $u(t)$ 。其中, 虚拟参考输入信号 $\bar{r}(t)$ 的构造如图 2 所示。

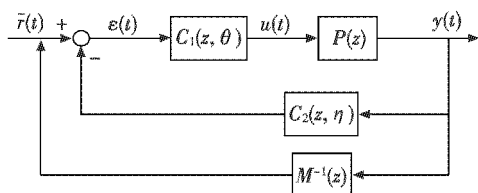


图 2 虚拟参考输入信号的构造

Fig. 2 The construction of virtual reference input signal

由图 2 可定义参考跟踪误差为

$$\varepsilon(t) = (M^{-1} - C_2(z, \boldsymbol{\eta}(t)))y(t) \quad (7)$$

从而由图 2 可得到, 当闭环系统施以 $\bar{r}(t)$, $d(t) = 0$ 和 $y(t)$ 时, 该闭环系统生成的 $u(t)$ 为

$$u(t) = C_1(z, \boldsymbol{\theta}(t))(M^{-1}(z) - C_2(z, \boldsymbol{\eta}(t)))y(t) \quad (8)$$

利用关系式(8), 求解两控制器中的未知时变参数矢量为

$$\min_{\boldsymbol{\theta}(t), \boldsymbol{\eta}(t)} J_{VR}^N(\boldsymbol{\theta}(t), \boldsymbol{\eta}(t)) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [u(t) - C_1(\boldsymbol{\theta}(t))[M^{-1} - C_2(\boldsymbol{\eta}(t))]y(t)]^2 +$$

$$\frac{1}{N} \lambda \sum_{t=1}^N [(\boldsymbol{\theta}(t) - \boldsymbol{\theta}(t-1))^2 + (\boldsymbol{\eta}(t) - \boldsymbol{\eta}(t-1))^2] \quad (9)$$

优化式(9)的目标函数第一项中的各个量都是已知的, 仅 $\{(C_1(z, \boldsymbol{\theta}(t)), C_2(z, \boldsymbol{\eta}(t)))\}$ 两控制器是未知的。因数据 $\{u(t), y(t)\}_{t=1}^N$ 可通过传感器采集, 期望传递函数 $M(z)$ 已知, 且第一项已不再出现 $P(z)$ 。第二项为关于两时变参数矢量的规范项, λ 为规范系数, 应选为正常数, 用以折衷第一项的模型匹配和第二项的时变参数更新误差。此处的规范项表示为范数和的形式, 并易于估计那些不经常发生跳变的参数, 其原因在于发生跳变的频率可通过规范系数 λ 来粗略地予以控制^[9]。再次观察式(9)中的规范项的范数和形式, 最为理想的状态应是 $\boldsymbol{\theta}(t) = \boldsymbol{\theta}(t-1)$, $\boldsymbol{\eta}(t) = \boldsymbol{\eta}(t-1)$, $t = 1, \dots, N$, 此时的规范项为 0, 表明两控制器中的两时变参数都退化成常数, 进而优化问题式(9)也同样退化成文献[9]中的特例。对于虚拟参考反馈校正时变控制的优化设计, 分两方面分别从理论上进行分析: 1) 介绍优化式(9)中两时变控制器参数的规范辨识; 2) 从凸分析角度介绍规范系统 λ 的选取。

3 时变控制器参数的规范辨识

对式(9)中两控制器时变参数 $\{\boldsymbol{\theta}(t), \boldsymbol{\eta}(t)\}_{t=1}^N$ 的辨识, 采用可分离的非线性最小二乘法递推地求解。在关于时变参数求偏导时已不再出现有连加和项。另外还多出了一项规范项, 此规范项势必会给估计值带来校正的作用。将式(3)的线性参数控制器形式代入到式(9)可得

$$\min_{\boldsymbol{\theta}(t), \boldsymbol{\eta}(t)} J_{VR}^N(\boldsymbol{\theta}(t), \boldsymbol{\eta}(t)) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [u(t) - \boldsymbol{\alpha}^T(z)\boldsymbol{\theta}(t)M^{-1}y(t) + \boldsymbol{\alpha}^T(z)\boldsymbol{\theta}(t)\boldsymbol{\beta}^T(z)\boldsymbol{\eta}(t)y(t)]^2 + \frac{1}{N} \lambda \sum_{t=1}^N [(\boldsymbol{\theta}(t) - \boldsymbol{\theta}(t-1))^2 + (\boldsymbol{\eta}(t) - \boldsymbol{\eta}(t-1))^2] \quad (10)$$

可分离非线性最小二乘法首先是在当其中一个时变参数 $\boldsymbol{\eta}(t)$ 已知条件下, 求解另一个时变参数。按照此思路不妨把式(10)中的 $\boldsymbol{\eta}(t)$ 当作已知或已被辨识估计出来, 此时需要通过最小化来求解 $\boldsymbol{\theta}(t)$ 。根据最优性的必要条件应该满足: $\frac{\partial J_{VR}^N(\boldsymbol{\theta}(t))}{\partial \boldsymbol{\theta}(t)} = 0$ 。

将其展开可得

$$\frac{2}{N} [u(t) - \boldsymbol{\alpha}^T(z)\boldsymbol{\theta}(t)M^{-1}y(t) + \boldsymbol{\alpha}^T(z)\boldsymbol{\theta}(t)\boldsymbol{\beta}^T(z)\boldsymbol{\eta}(t)y(t)] \times [\boldsymbol{\beta}^T(z)\boldsymbol{\eta}(t)\boldsymbol{\alpha}^T(z)y(t) - M^{-1}y(t)\boldsymbol{\alpha}^T(z)] + \frac{2\lambda}{N} [2\boldsymbol{\theta}(t) - \boldsymbol{\theta}(t-1) - \boldsymbol{\theta}(t+1)] = 0 \quad (11)$$

整理可得

$$\boldsymbol{\theta}(t+1) = \left[\frac{(\boldsymbol{\beta}^T(z)\boldsymbol{\eta}(t) - M^{-1})y(t)\boldsymbol{\alpha}^T(z)}{\lambda} + 2I \right] \boldsymbol{\theta}(t) -$$

$$\theta(t-1) + \frac{1}{\lambda} u(t) (\beta^T(z) \eta(t) - M^{-1}) y(t) \alpha^T(z) \quad (12)$$

上式表明,每一时刻的时变参数矢量 $\theta(t+1)$, $t \geq 1$, 都与其前两时刻的参数矢量有关, 并且还有一项是由前一时刻的输入输出观测数据对 $\{u(t), y(t)\}$ 构成的校正项。可分离非线性最小二乘法的第二步是将得到的估计值 $\theta(t)$ 代入到原目标函数 $J_{VR}^N(\theta(t), \eta(t))$ 中, 消去替换掉 $\theta(t)$, 只剩下含有以 $\eta(t)$ 为优化变量的目标函数 $J_{VR}^N(\eta(t))$ 。对 $J_{VR}^N(\eta(t))$ 关于 $\eta(t)$ 求最小化运算, 同样根据优化理论中的最优性必要条件, 需具备 $\frac{\partial J_{VR}^N(\eta(t))}{\partial \eta(t)} = 0$, 将其展开可得

$$\begin{aligned} & \frac{2}{N} [u(t) - \alpha^T(z) \theta(t) M^{-1} y(t) + \alpha^T(z) \theta(t) \beta^T(z) \eta(t) y(t)] \times \\ & [\alpha^T(z) \theta(t) \beta^T(z) y(t)] + \frac{2\lambda}{N} [2\eta(t) - \eta(t-1) - \eta(t+1)] = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

整理可得

$$\begin{aligned} \eta(t+1) = & \left[\frac{\alpha^T(z) \theta(t) \beta^T(z) y(t) \alpha^T(z) \theta(t) \beta^T(z) y(t)}{\lambda} + 2J \right] \eta(t) - \\ & \eta(t-1) + \frac{1}{\lambda} [u(t) - \alpha^T(z) \theta(t) M^{-1} y(t)] \alpha^T(z) \theta(t) \beta^T(z) y(t) \end{aligned} \quad (14)$$

结合上述推导和式(12)、式(14), 可得到虚拟参考反馈校正控制中两时变未知参数矢量的可分离非线性最小二乘法。

1) 采集一组可观测的输入-输出数据对 $\{u(t), y(t)\}_{t=1,2,\dots,N}$, 选取合适的正交基函数作为线性参数化形式中的 $\alpha(z)$ 和 $\beta(z)$, 根据某些先验知识选择合适的规范系数 λ , 并给出 4 个初始时刻的控制器参数值分别为 $\theta(0)$ 、 $\theta(1)$ 、 $\eta(0)$ 、 $\eta(1)$ 。

2) 将 $\theta(0)$ 、 $\theta(1)$ 、 $\eta(1)$ 和观测数据对 $\{u(1), y(1)\}$ 代入到式(12)中递推地计算时变参数估计值 $\theta(2)$ 。

3) 将 $\theta(1)$ 、 $\eta(0)$ 、 $\eta(1)$ 和观测数据对 $\{u(1), y(1)\}$ 代入到式(14)中递推地计算时变参数估计值 $\eta(2)$ 。

4) 将 $\theta(1)$ 、 $\theta(2)$ 、 $\eta(2)$ 和观测数据对 $\{u(2), y(2)\}$ 代入到式(12)中递推地计算时变参数估计值 $\theta(3)$ 。

5) 将 $\theta(2)$ 、 $\eta(1)$ 、 $\eta(2)$ 和观测数据对 $\{u(2), y(2)\}$ 代入到式(14)中递推地计算时变参数估计值 $\eta(3)$ 。

6) 循环上述递推计算各个时刻的时变参数估计值, 直至 $\theta(N)$ 和 $\eta(N)$ 。

7) 在统计概率意义下检查闭环系统的稳定性是否满足, 在时刻 N 处是否具备 $u(N) = C_1(\theta(N))(M^{-1} -$

$C_2(\eta(N)))y(N)$, 若否, 则重新选择 4 个初始时刻的参数估计值, 重新采集一组输入输出观测数据对, 重复上述递推计算过程; 若满足则算法结束。

4 规范系数的选择

从上节的递推计算算法可知, 时变参数估计值 $\{\theta(t), \eta(t)\}_{t=2}^N$ 均为规范系数 λ 的函数, 此函数关系式在凸优化理论中称为分段线性解图^[10]。从凸分析的角度来看, 总存在一个具体的规范系数值 λ^{\max} , 使得当 $\lambda > \lambda^{\max}$ 时, 式(9)中的参数估计值都退化为常系数, 即 $\theta(t)$ 和 $\eta(t)$ 都不随时间的变化而改变。

关键值 λ^{\max} 给出了两参数估计值不发生变化的一个上界值, 该关键值 λ^{\max} 在实际中发挥着较大的作用, 因为 λ^{\max} 给出了在寻找合适的规范系数 λ 过程中的一个较好的初始值。通常可选择实际的规范系数为 $0.01\lambda^{\max}$ 。设 θ^{const} 是如下正规方程的最优常参数矢量

$$\sum_{t=1}^N [u(t) - \alpha^T(z) \theta(t) M^{-1} y(t) + \alpha^T(z) \theta(t) \beta^T(z) \eta(0) y(t)] \times [\beta^T(z) \eta(0) \alpha^T(z) y(t) - M^{-1} y(t) \alpha^T(z)] = 0 \quad (15)$$

上式中的 $\eta(t)$ 全部用给定的初始估计值 $\eta(0)$ 来代替, 则关键值 λ^{\max} 可表示为

$$\lambda^{\max} = \max_{\tau=1, \dots, N-1} \left\| \sum_{t=\tau}^N 2[u(t) - \alpha^T(z) \theta(t) M^{-1} y(t) + \alpha^T(z) \theta(t) \beta^T(z) \eta(0) y(t)] \times [\beta^T(z) \eta(0) \alpha^T(z) y(t) - M^{-1} y(t) \alpha^T(z)] \right\|_{l_p} \quad (16)$$

上式中的符号 $\| \cdot \|_{l_p}$ 表示为 L_p 范数, 常参数矢量 $\theta = \theta^{\text{const}}$ 是优化问题式(9)的解的充要条件是 0 属于该优化函数的次微分集中。因式(9)中的第一项为模型匹配项, 且是可微的, 对其关于 $\theta = (t)$ 求偏导可得:

$$[u(t) - \alpha^T(z) \theta(t) M^{-1} y(t) + \alpha^T(z) \theta(t) \beta^T(z) \eta(0) y(t)] \times [\beta^T(z) \eta(0) \alpha^T(z) y(t) - M^{-1} y(t) \alpha^T(z)]$$

为了计算规范项的次微分, 由文献[11]可知, 范数 $\| \cdot \|_{l_p}$ 在 0 处的次微分是在位于其对偶范数的单位圆上。因此规范项的次微分是任何一种形如下式的矢量序列

$$\begin{cases} g(1) = -z(2), \\ g(2) = z(2) - z(3) \\ \vdots \\ g(N-1) = z(N-1) - z(N), \\ g(N) = -z(N) \end{cases} \quad (17)$$

式中, $z(2), \dots, z(N)$ 满足 $\|z(t)\|_{l_p} \leq \lambda$ 。求解式(17)可得

$$z(t) = -\sum_{\tau=1}^{t-1} g(\tau), \quad t = 2, \dots, N \quad (18)$$

最优性条件为

$$g(t) + 2[u(t) - \alpha^T(z) \theta(t) M^{-1} y(t) +$$

$$\begin{aligned} & \alpha^T(z)\theta(t)\beta^T(z)\eta(0)y(t) \times \\ & [\beta^T(z)\eta(0)\alpha^T(z)y(t) - M^{-1}y(t)\alpha^T(z)] = 0, \\ & t = 1, \dots, N \end{aligned} \quad (19)$$

综合以上凸优化理论知识可得最优性条件为

$$\theta = \theta^{\text{const}}, \quad \lambda \geq \lambda^{\text{max}}. \quad (20)$$

5 仿真算例

考虑如下离散时间线性系统,系统的传递函数为

$$P(z) = \frac{(z-1.2)(z-0.4)}{z(z-0.3)(z-0.8)}. \quad (21)$$

上式的真实传递函数在实际中是未知的,此处列出是为了验证文中未知时变参数辨识的有效性。采用的控制器都为 PID 控制器

$$\begin{aligned} C_1(\theta(t)) &= \alpha^T(z)\theta(t) = \begin{bmatrix} \frac{z}{z^2-z} & \frac{1}{z^2-z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1(t) \\ \theta_2(t) \end{bmatrix}; \\ C_2(\eta(t)) &= \beta^T(z)\eta(t) = \begin{bmatrix} \frac{z}{z^2-z} & \frac{1}{z^2-z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_1(t) \\ \eta_2(t) \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

两真实的控制器时变参数分别为

$$\begin{aligned} \theta_1(t) &= \begin{cases} 2, & 0 \leq t \leq 15 \\ 2.5, & 15 < t \leq 30 \\ 1, & 30 < t \end{cases}; \theta_2(t) = \begin{cases} 0.35, & 0 \leq t \leq 15 \\ 0.26, & 15 < t \leq 30 \\ 0.18, & 30 < t \end{cases}; \\ \eta_1(t) &= \begin{cases} 0.25, & 0 \leq t \leq 15 \\ 0.12, & 15 < t \leq 30 \\ 0.05, & 30 < t \end{cases}; \eta_2(t) = \begin{cases} -0.025, & 0 \leq t \leq 15 \\ -0.06, & 15 < t \leq 30 \\ -0.05, & 30 < t \end{cases}. \end{aligned}$$

即两控制器时变参数为关于时间 t 的分段函数,分段过程分为 3 段,分别在 $t = 15$ 和 $t = 30$ 两时刻处发生跳变。期望的闭环传递函数为 $M(z) =$

$$\frac{z^5 - 2.42z^4 + 1.612z^3 - 0.1056z^2 - 0.0864z}{z^7 - 3.1z^6 + 3.44z^5 - 1.53z^4 + 0.119z^3 + 0.0806z^2 - 0.0053z - 0.0043}$$

仿真实验中 $d(t)$ 采用零均值方差为 1 的白噪声序列,输入-输出数据对 $\{u(t), y(t)\}_{t=1,2,\dots,1000}$ 在闭环试验条件下获得,数据个数为 1000。为了利用本文中的 VRFT 方法来设计两参数矢量 $[\theta(t) \quad \eta(t)]$,对系统模型 $P(z)$ 施以 1000 个零均值高斯白噪声采样 ($\phi_u = 1$)。仿真试验中的输入采用图 3 中的三角波作为激励信号,对闭环系统的输出采用示波器等采集装置得到图 3 中的输出信号序列。

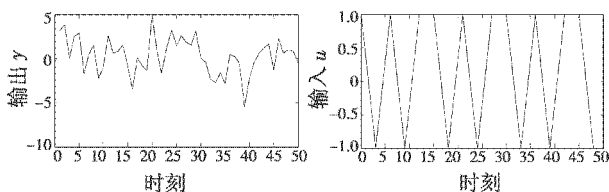


图 3 仿真试验中采用的输入输出观测信号

Fig.3 The input-output observed signals in simulation

两 PID 控制器中含有 4 个未知时变参数值需要辨识估计,对于由虚拟参考反馈校正控制下的优化问题式 (9),利用文中的可分离非线性最小二乘辨识估计算法来不断地进行迭代求解。在迭代算法初始化时,选取初始值为: $\theta(0) = [0 \quad 0]^T$, $\theta(1) = [0.5 \quad 0.1]^T$, $\eta(0) = [0 \quad 0]^T$, $\eta(1) = [0.1 \quad 0.1]^T$ 。优化目标函数中的规范系数 λ 选择为 $\lambda = 0.1\lambda^{\text{max}}$,其中 λ^{max} 为凸优化理论中的关键值。在运用文中可分离迭代非线性最小二乘辨识算法相互迭代 80 次运算后,式(9)中目标函数的递减曲线如图 4 所示。由图 4 可知,在迭代 80 次后,目标函数已逐渐地趋于零,算法即可终止,以此时的参数估计值作为最后的确定值。由虚拟参考反馈控制的原理可知,控制器的最终确定是转化为各自对应的时变参数来定义,故控制器的优劣应该由其对应时变参数的估计准确性来衡量。对于两 PID 控制器中四个时变未知参数值的估计仿真图形如图 5 所示,图中的黑色粗体线条表示真实参数值,虚线条表示迭代产生的参数估计值;4 个参数值分别在 $t = 15$ 和 $t = 30$ 两时刻处发生跳变,从而使得控制器也发生对应的改变。此对应变化类似于切换控制,但此处与切换控制的不同之处在于控制器的切换是通过参数值的改变来赋予的。由图 5 可见,在 $t = 15$ 时刻处,参数估计值的跳变要滞后于真实值的跳变,当 $t \geq 20$ 时刻之后,参数估计值的跳变已能紧紧跟随于真实值的跳变。

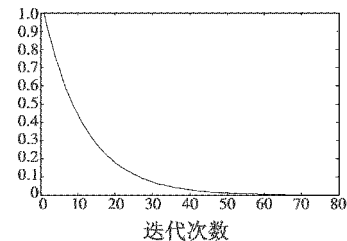


图 4 仿真试验中的目标函数值

Fig.4 The objective function value in simulation

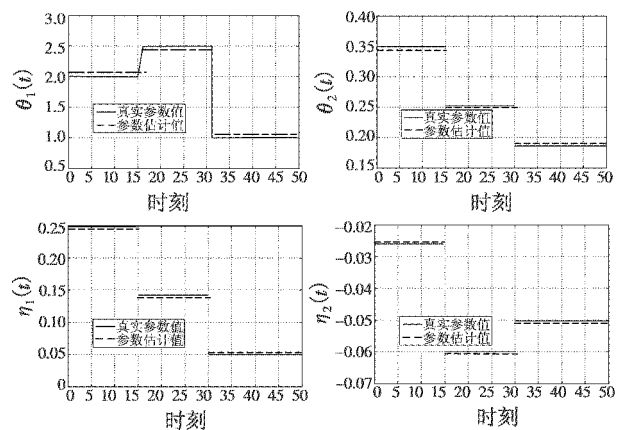


图 5 仿真试验中的参数估计值与真实值对比

Fig.5 Estimated and true values of the parameters in simulation

6 结语

本文针对二自由度闭环系统,采用虚拟参考反馈校正控制对控制器中的时变参数进行校正。对于控制器时变参数的辨识,通过增加一项规范项来约束两时变参数矢量的不跳变行为。利用可分离的非线性最小二乘辨识法不断迭代以得到全局解;从凸优化角度分析了规范系数的合适选取。因两时变参数矢量都是规范系数的函数,考虑规范系数变动下函数的分段线性解图是下步需要研究的主要内容。

参考文献

- [1] GUARDABASSI G. Virtual reference direct method; An off-line approach to data-based control system design [J]. IEEE Transactions of Automatic Control, 2002, 45(5):954-960.
- [2] CAMPI M C. Virtual reference feedback tuning; A direct method for the design of feedback controllers [J]. Automatica, 2002, 38(4):1337-1346.
- [3] CAMPI M C, LECHINI A. An application of the virtual reference feedback tuning method to a benchmark problem [J]. European Journal of Control, 2003, 9(2):66-76.
- [4] CAMPI M C. Direct nonlinear control design; The virtual reference feedback tuning approach [J]. IEEE Transactions of Automatic Control, 2006, 51(1):14-27.
- [5] 唐得志,王道波,王建宏. 闭环系统的虚拟参考反馈校正控制[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2011,39(2):48-52.
- TANG D Z, WANG D B, WANG J H. Virtual reference feedback tuning control design for closed-loop systems [J]. Journal of Huazhong University Science and Technology: Natural Science Edition, 2011, 39(2):48-52.
- [6] LJUNG L. Theory and practice of recursive identification [M]. Cambridge: The MIT Press, 1983.
- [7] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex optimization [M]. UK: Cambridge University Press, 2008.
- [8] JAKOB K. A design algorithm using external perturbation to improve iterative feedback tuning convergence [J]. Automatica, 2011, 47(2):2665-2670.
- [9] HILDERBRAND R. Prefiltering in iterative feedback tuning; Optimization of the prefilter for accuracy [J]. IEEE Transactions of Automatic Control, 2004, 49(8):1801-1805.
- [10] 王建宏. 基于先进辨识的控制策略研究及其应用 [D]. 南京:南京航空航天大学,2011.
- WANG J H. Research on control strategies based on advanced identification and their application [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.
- [11] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex optimization [M]. UK: Cambridge University Press, 2008.
- (上接第 76 页)
- [5] 冯为荣,王俊璞,田蔚风. 飞机飞行轨迹仿真系统设计与实现 [J]. 计算机仿真, 2010, 27(12):47-50.
- FENG W R, WANG J P, TIAN W F. Design and implementation of flight track simulation system [J]. Computer Simulation, 2010, 27(12):47-50.
- [6] 史志富,刘海燕,张安,等. 基于影响图的UCAV编队对地攻击战术决策研究 [J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(1):130-133.
- SHI Z F, LIU H Y, ZHANG A, et al. Research on tactical decision-making of UCAV teams air-to-ground attack based on influence diagrams [J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(1):130-133.
- [7] 徐海亮,李骏扬,费树岷. 全数字飞行仿真平台的设计与实现 [J]. 东南大学学报:自然科学版, 2011, 41(1):113-116.
- XU H L, LI J Y, FEI S M. Design and implementation of digital flight simulation platform [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2011, 41(1):113-116.
- [8] 卢惠民. 飞行仿真数学建模与实践 [M]. 北京:航空工业出版社, 2007.
- LU H M. Modeling and practical flight simulation [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2007.
- [9] TODD H. Advancement and analysis of a Gauss Pseudospectral transcription for optimal control problems [D]. Cambridge, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2007.
- [10] 岳超源. 决策理论与方法 [M]. 北京:科学出版社, 2003.
- YUE C Y. Decision theory and method [M]. Beijing: Science Press, 2003.