

用虚拟目标值和支持向量机直接设计非线性控制器

李益国, 沈炯

(东南大学 能源与环境学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 对于复杂被控对象, 通常采用间接方法设计控制系统. 由于必须首先辨识对象模型, 因此这类方法往往耗时较多. 本文基于虚拟目标值反馈调整(VRFT)方法的思想, 利用支持向量机(SVM), 给出一种非线性控制器直接设计方法. 论文首先分析了VRFT方法与内模控制的关系, 接着给出了基于虚拟目标值(VR)和SVM的非线性控制器的结构和设计步骤. 仿真结果表明, 该方法具有良好的处理非线性和噪声的能力, 并且能消除稳态误差. 与经典基于神经网络(NN)的间接模型参考控制方法相比, 计算量大大降低.

关键词: 非线性控制器设计; 虚拟目标值反馈调整; 支持向量机

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A

Direct nonlinear controller design using virtual reference and support vector machine

LI Yi-guo, SHEN Jiong

(School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China)

Abstract: Indirect methods are usually employed to design control systems for complicated industrial processes, which is often time-consuming because the process model must be obtained first by identification methods. Motivated by the virtual reference feedback tuning (VRFT) method, we propose a new direct nonlinear controller design method using virtual reference (VR) and support vector machine (SVM). Firstly, the relation between VRFT and internal model control (IMC) is analyzed; and then, the structure and design procedure of the proposed nonlinear controller are given. Simulation results demonstrate that this method can effectively deal with the noise and nonlinearity, and can eliminate the steady-state error. Moreover, the amount of calculation is reduced significantly in comparison with the normal indirect model reference control method using neural networks.

Key words: nonlinear controller design; virtual reference feedback tuning; support vector machine

1 引言(Introduction)

实际生产过程中存在许多复杂的被控对象, 难以通过理论分析方法获得数学模型. 针对这类被控对象, 通常采用间接方法设计控制系统, 即首先采集被控对象的输入输出数据, 通过系统辨识方法获得对象的数学模型, 然后再根据该模型设计控制器^[1,2]. 但是当所得的模型比较复杂时(尤其在很多情况下获得的可能是黑箱模型), 会给控制器设计带来很大困难. 另外这类方法往往耗时较多.

与此不同, 虚拟目标值反馈调整方法(virtual reference feedback tuning, VRFT)是近年来发展起来的一种直接控制器设计方法^[3~7], 即无需辨识对象模型, 直接根据输入输出数据设计反馈控制器. VRFT最早由文献[3]针对线性系统明确提出;

文献[4,5]对其进行了进一步完善, 考虑了滤波器设计和噪声的影响; 文献[6,7]试图将其推广到非线性系统, 但并未给出明确的非线性控制器实现方法, 其在仿真算例中采用的仍然是PID控制器. 本文首先分析了VRFT与内模控制的关系; 在此基础上, 基于虚拟目标值(VR)和支持向量机(SVM)提出一种非线性控制器设计直接方法. 论文最后用两个仿真算例证实了其有效性.

2 虚拟目标值反馈调整方法(Virtual reference feedback tuning method)

VRFT本质上是一个如图1所示的模型参考控制问题. 图中, $C(z)$ 为反馈控制器, $M(z)$ 为期望的参考模型. 通常模型参考控制采用的方法是: 首先选定目标值信号, 然后调整控制器 $C(z, \theta)$ 的参数 θ , 使得实

际输出与参考模型输出之间的偏差尽量小,即极小化性能指标(1). 这样当对象未知时,该问题求解只能采用间接方法,即需首先辨识对象模型

$$J_{MR}(\theta) = \left\| \left(\frac{G(z)C(z, \theta)}{1+G(z)C(z, \theta)} - M(z) \right) W(z) \right\|_2^2 \quad (1)$$

式中 $W(z)$ 为由用户选定的加权函数.

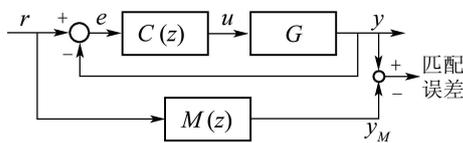


图1 模型参考控制

Fig. 1 Model reference control

与此相反,VRFT首先测得一组对象的开环输入输出数据 $(u(k), y(k)), k = 1, \dots, N$,针对实际测得的输出信号 $y(k)$ 人工构造出其“虚拟目标值” $\bar{r}(k)$ (实际上并不存在,使得 $M(z)\bar{r}(k) = y(k)$).这意味着 $y(k)$ 是目标值为 $\bar{r}(k)$ 时的理想输出信号,而要实现该理想输出的理想控制作用 $u(k)$ 是已知的.显然一个好的控制器应当使控制器输入为偏差信号 $e(k) = \bar{r}(k) - y(k)$ 时,输出尽量接近理想控制作用 $u(k)$.由于 $e(k)$ 和 $u(k)$ 都是已知的,从而将原问题转化为极小化式(2)的控制器辨识问题.

$$J_{VR}^N(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (u(k) - C(z, \theta)e(k))^2 \quad (2)$$

3 VRFT与内模控制的关系(Relations between VRFT and internal model control)

当采用相同的前馈滤波器和反馈滤波器时,内模控制结构可用图2表示.

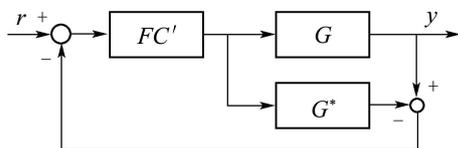


图2 内模控制结构图

Fig. 2 Internal model control

图中: F 为滤波器, C' 为内模控制器, G^* 为对象模型.

显然当不存在建模误差,即 $G = G^*$ (相当于开环),同时取 $C' = (G^*)^{-1}$ (假定对象可逆)时,内模控制是使式(1)极小化问题的一个理想实现,滤波器 F 就相当于参考模型 M .图2经框图变换可以变换为图3.

因此该问题的理想控制器为

$$C^0 = \frac{FC'}{1 - FC'G^*} = \frac{F(G^*)^{-1}}{1 - F} = \frac{M(G^*)^{-1}}{1 - M}, \quad M \neq 1 \quad (3)$$

因此VRFT极小化式(2)实际上是通过调整控制器参数,使其尽量接近理想控制器 C^0 .

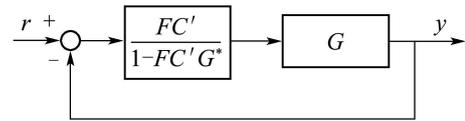


图3 内模控制变换图

Fig. 3 Transformation of internal model control

VRFT与直接辨识对象逆模型,并作为控制器的直接逆控制方法相比,优势在于它是一种闭环反馈控制,因此对扰动和不确定性有更好的适应能力.同时它也不同于内模控制,因为它是一种直接方法,无需辨识对象模型.

4 基于VR和SVM的非线性控制器设计(Nonlinear controller design based on VR and SVM)

4.1 控制系统结构(Structure of the control system)

由以上分析可知,VRFT中控制器设计问题最终被转化为一个辨识问题.本文引入SVM求解该辨识问题,从而给出非线性VRFT的一种具体实现方法.之所以选择SVM是由于其具有以下特性:1)良好的非线性逼近能力和泛化能力;2)在样本确定的情况下,其解是唯一的,因此设计结果是完全可复现的;3)适合小样本学习;4)对样本噪声有很好的适应能力.这是因为其采用了 ϵ -不敏感损失函数,对样本点来说,存在一个不为目标函数提供任何损失值的区域;5)便于通过调节相关参数调整设计结果.

这些特性决定了SVM比BP神经网络更适合于本问题的求解和构成控制器.作者所做的大量仿真研究也证实了这一点.

实际应用中,参考模型通常设置为由式(4)表示的传递函数模型,即:

$$M(s) = \frac{1}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + 1} \quad (4)$$

因此理想控制器

$$C^0 = \frac{M(G^*)^{-1}}{1 - M} = \frac{(G^*)^{-1}}{s(a_n s^{n-1} + a_{n-1} s^{n-2} + \dots + a_1)} \quad (5)$$

由式(5)知理想控制器 C^0 中隐含了积分作用,由此设计图4所示的离散控制系统.即把 C^0 中的积分作用独立出来,用SVM逼近其余部分.这样做有以下好处:1)便于消除稳态误差;2)把无自平衡能力对象的辨识问题转变为有自平衡能力对象的辨识问题,降低了辨识难度.该控制器可以看作一种变增益的积分调节器.

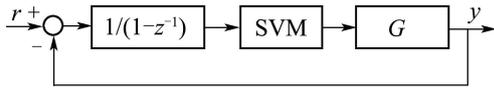


图4 基于VR和SVM的非线性控制系统结构图
Fig. 4 Structure of the nonlinear controller based on VR and SVM

4.2 控制器设计步骤(Procedures of controller design)

1) 针对未知的开环被控对象, 取得一组输入输出样本 $(u_k, y_k), k = 1, \dots, N$. 样本集应取到所有可能的工作区间;

2) 设定离散参考模型 $M(z) = M'(z)z^{-(d+1)} = \frac{z(b_1z^{n-1} + \dots + b_n)}{z^n + a'_1z^{n-1} + \dots + a'_n}z^{-(d+1)}$, 式中, d 为系统的纯时延时间. 即参考模型至少带有一阶纯时延;

3) 计算相应的虚拟目标值 $\bar{r}_k = M'^{-1}(z)y_{k+1}z^d$, 即 k 时刻的虚拟目标值至少是根据 $k+1$ 时刻的输出值构造的(当 $d=0$);

4) 求偏差信号 $e_k = \bar{r}_k - y_k$, 并积分得 $\text{Sum}e_k = \text{Sum}e_{k-1} + e_k$;

5) 以 $\mathbf{x}_k = [\text{Sum}e_{k-2} \text{Sum}e_{k-1} \text{Sum}e_k]^T$ 为输入变量, u_k 为输出变量组织SVM的训练样本($k = 1, \dots, l, (l = N - d - 1)$);

6) 设置SVM优化参数 C, σ (采用高斯核函数)和 ε (采用 ε -不敏感损失函数: $|f|_\varepsilon = \max\{0, |f| - \varepsilon\}$);

仿真结果表明, 权系数 C 和核参数 σ 对控制器设计结果都有重要影响, 其中 σ 影响更大一些. C 值过小会对训练数据造成欠学习现象, 而过大则容易对训练数据造成过学习现象. 参数 σ 对系统泛化性能的影响方向与参数 C 正好相反. 适当增大 ε 和 σ 的取值, 可以使控制器具有良好的适应噪声的能力.

7) 设

$$g(\mathbf{x}_k) = [\phi(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_k) \ \phi(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_k) \ \dots \ \phi(\mathbf{x}_l, \mathbf{x}_k) 1]^T.$$

$\phi(\cdot)$ 为高斯函数. 构造并求解以下优化问题:

$$\begin{aligned} \min I(\mathbf{w}, \xi_k^+, \xi_k^-) = \\ \min_{\mathbf{w}, \xi_k^+, \xi_k^-} \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 + \frac{C}{l} \sum_{k=1}^l (\xi_k^+ + \xi_k^-), \\ \text{s.t.} \begin{cases} u_k - \mathbf{w}^T g(\mathbf{x}_k) \leq \varepsilon + \xi_k^+, \\ \mathbf{w}^T g(\mathbf{x}_k) - u_k \leq \varepsilon + \xi_k^-, \\ \xi_k^+, \xi_k^- \geq 0. \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)的形式便于采用迭代算法直接对原问题进行迭代求解^[8], 避免了经典解法先转化为对偶问题, 然后用内点算法等凸优化算法求解, 当训练样本增多时所面临的维数灾问题.

求得 \mathbf{w} 后, 即得非线性控制器 $u(k) = \mathbf{w}^T g(\mathbf{x}(k)) = \sum_{i=1}^n w_i \phi(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}(k)) + b, n$ 为支持向量的个数.

5 仿真研究(Numerical simulations)

5.1 ARMAX系统串联非线性环节(Control of a ARMAX cascade with a nonlinear element)

研究式(7)表示的ARMAX系统

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})u(k) + C(z^{-1})\xi(k). \quad (7)$$

式中:

$$A(z^{-1}) = 1 - 0.45181z^{-1} - 0.47546z^{-2};$$

$$B(z^{-1}) = 0.04560z^{-1} + 0.00404z^{-2};$$

$$C(z^{-1}) = 1 - 0.35740z^{-1} - 0.03392z^{-2};$$

$\xi(k)$ 均值为零, 方差为 R 的白噪声, 采样周期 $T=8$ s.

设ARMAX系统前串联有描述执行机构相关特性的死区和饱和非线性环节, 并用式(8)来表示.

$$u(k) = \begin{cases} 0, & |u_a(k)| < \text{dead_zone}, \\ u_a(k), & \text{dead_zone} \leq |u_a(k)| < U_{\max}, \\ U_{\max}, & |u_a(k)| \geq U_{\max}. \end{cases} \quad (8)$$

式中 $\text{dead_zone} = 5, U_{\max} = 10$.

假设对象未知, 以 ± 12 之间变化的随机数模拟控制输入, 采集得到125组输入输出样本. 根据4.2节的步骤设计控制器, 参考模型取 $M(z) = 0.1479/(z - 0.8521)$. 分两种情况进行仿真研究:

1) 线性系统加非线性环节, 不考虑噪声($R=0$).

取 $C = 10000, \varepsilon = 1, \sigma = 500$. 图5为目标值作连续阶跃变化时, 控制系统的响应曲线. 其中, 曲线1和曲线2分别为线性系统串联非线性环节前后的控制曲线. 可见该控制器设计方法具有较强的处理非线性环节的能力, 并实现了无差调节.

2) 线性系统加非线性环节及噪声($R=0.5$).

图6为同时考虑非线性环节及噪声时控制系统响应曲线. 仿真中取 $C = 10000, \varepsilon = 4, \sigma = 2000$. 可见适当增大 ε 和 σ 的取值, 可以使控制器具有良好的适应噪声的能力.

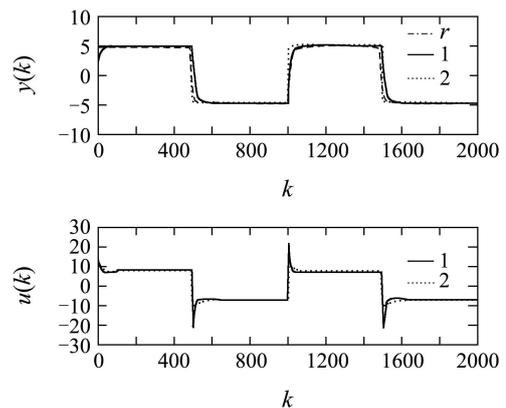


图5 线性系统加非线性环节仿真结果

Fig. 5 Simulation results of a linear system cascaded with a nonlinear element

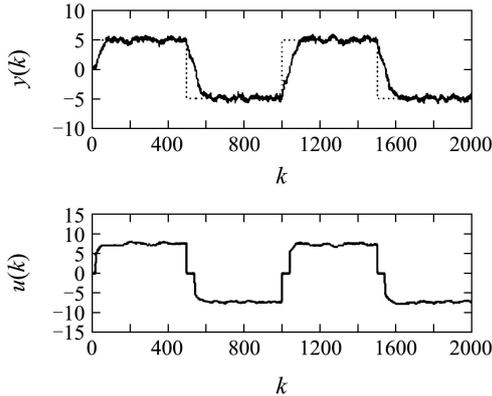


图6 线性系统加非线性环节及噪声仿真结果

Fig. 6 Simulation results of a linear system cascaded with a nonlinear element plus noise

5.2 非线性系统(Control of a nonlinear system)

以简单的单链接机器人手为仿真对象,其动态特性如式(9).

$$\frac{d^2\phi}{dt^2} = -10 \sin \phi - 2 \frac{d\phi}{dt} + u. \quad (9)$$

式中: ϕ 为机器人手转角, u 为直流马达的力矩.

取输入激励信号为 $u_1(t) = 8 \sin(0.5t) \sin t$, 采样周期 $T = 0.05$ s, 采集了400组输入输出数据. 参考模型选为:

$$\frac{d^2y_r}{dt^2} = -9y_r - 6 \frac{dy_r}{dt} + 9r. \quad (10)$$

式中: y_r 为参考模型输出, r 为参考输入. 取 $C = 10000$, $\varepsilon = 0.1$, $\sigma = 50$ 时, 控制系统对连续阶跃变化的目标值信号的跟踪曲线如图7曲线2. 作为比较, 图7同时给出了MATLAB7.1神经网络工具箱中, 采用5-13-1结构的神经网络(NN)控制器以及相同的参考模型时得到的响应曲线(曲线1). 可见两者取得了接近的控制效果.

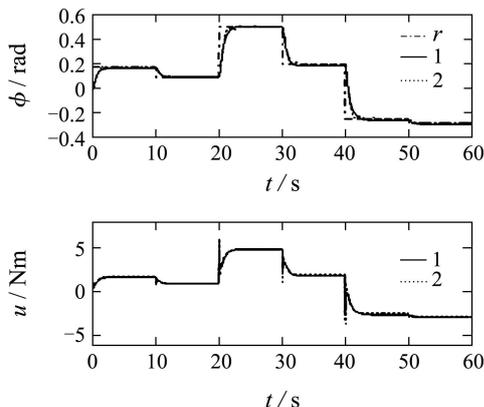


图7 本文方法与NN方法的比较

Fig. 7 Compare with indirect reference model method using NN

但是该NN控制器是采用经典的间接模型参考控制方法设计的, 即先采用一个NN辨识出对象

模型(其用于辨识的样本数多达10000组), 再用一个NN作为控制器(训练样本数为6000组). 由于必须采用动态BP算法对NN控制器进行训练, 因此该过程比其辨识过程更为耗时. 与之相比, 本文方法的计算量大为减少(仿真中仅用了400组样本, 直接优化得到控制器), 同时实现了无差跟踪, 而由图7可以看出, NN控制器无法完全消除稳态误差, 因为其本质属于一种开环控制.

6 结论(Conclusions)

基于VR和SVM的控制器设计方法的优点在于, 能够在对象未知的情况下, 利用采集到的开环对象输入输出数据直接设计非线性反馈控制器. 仿真结果表明, 该方法具有良好的处理非线性和噪声的能力, 并且能消除稳态误差. 与经典基于NN的间接模型参考控制方法相比, 计算量大大降低. 但是, 如何保证所得控制系统是稳定的等许多问题, 仍需要进一步研究.

参考文献(References):

- [1] 张日东, 王树青. 基于神经网络的非线性系统预测函数控制[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(6): 949-953.
(ZHANG Ridong, WANG Shuqing. Neural network based predictive function control for nonlinear systems[J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(6): 949-953.)
- [2] 王庆丰, 唐建中, 闭治跃. 疏浚系统泥浆浓度的自校正前馈控制[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(3): 578-582.
(WANG Qingfeng, TANG Jianzhong, BI Zhiyue. Self-tuning feedforward control of slurry concentration in a dredging system[J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(3): 578-582.)
- [3] GUARDABASSI G O, SAVARESI S M. Virtual reference direct design method: an off-line approach to data-based control system design[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2000, 45(5): 954-959.
- [4] CAMPI M C, LECCHINI A, SAVARESI S M. Virtual reference feedback tuning: a direct method for the design of feedback controllers[J]. *Automatica*, 2002, 38(8): 1337-1346.
- [5] SALA A, ESPARZA A. Extension to "Virtual reference feedback tuning: a direct method for the design of feedback controllers" [J]. *Automatica*, 2005, 41(8): 1473-1476.
- [6] CAMPI M C, SAVARESI S M. Virtual reference feedback tuning for non-linear systems[C]//*Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference 2005*. Seville: IEEE, 2005, 12: 6608-6613.
- [7] CAMPI M C, LECCHINI A, SAVARESI S M. Direct nonlinear control design: the virtual reference feedback tuning approach[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2006, 51(1): 14-27.
- [8] LESKI J M. Tsk-fuzzy modeling based on ε -insensitive learning[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2005, 13(2): 181-193.

作者简介:

李益国 (1973—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为热工过程控制, E-mail: lyg@seu.edu.cn;

沈炯 (1957—), 男, 教授, 博士生导师, 从事先进控制理论在热工过程控制中的应用研究, E-mail: shenj@seu.edu.cn.