虚拟未建模动态补偿与数据驱动的非线性广义预测控制

张亚军^{1*}, 牛宏², 陶金梅², 李旭生²

1. 东北大学流程工业综合自动化国家重点实验室, 沈阳 110819

2. 辽宁石油化工大学理学院, 抚顺 113001

* 通信作者. E-mail: yajunzhang@mail.neu.edu.cn

收稿日期: 2020-08-13; 修回日期: 2020-11-18; 接受日期: 2021-01-07; 网络出版日期: 2021-05-26

国家自然科学基金 (批准号: 61773107, 61991402, 61866021, 61890923, 61833004, 61973202) 和流程工业综合自动化国家重点实验室开放基金 (批准号: PAL-N201808) 资助项目

摘要 针对一类离散时间非线性动态系统, 把常规广义预测控制与数据驱动控制相结合、反馈控制与前馈补偿相结合、信号补偿与调节器原理相结合, 提出了一种数据与虚拟未建模动态及其增量补偿的非线性广义预测控制方法. 推导了闭环系统的输入输出动态方程, 并分析了所提控制算法的性能. 对比实验的研究体现出本文所提控制算法的优越性和有效性.

关键词 调节器, 数据, 虚拟未建模动态, 数据驱动, 广义预测控制

1 引言

广义预测控制 (generalized predictive control, GPC)^[1] 是一种特殊的模型预测控制, 自提出以来得到了长足的发展^[2], 然而最初的广义预测控制算法对模型参数敏感. 为此, 近年来国内外学者相继提出了改进的广义预测控制算法, 如文献 [3] 提出了一种新型感应电机转速和转子的线性多变量广义预测控制系统的设计方法. 文献 [4] 提出了一种用于并网电压源逆变器的线性广义预测电流控制方法. 文献 [5] 提出了一种用于弹性执行器的非参数不确定广义动态预测控制方法, 但上述方法属于线性广义预测控制算法.

伴随着人工智能与计算机技术的飞速发展, 智能非线性广义预测控制近年来得到了深入研究. 文献 [6~9] 研究了不同类型神经网络的 GPC 方法, 并应用到了氧化铝回转窑制粉系统^[7]、余热回收系统^[8]、湿法炼锌厂的除铁过程^[9]等. 文献 [10~12] 提出了模糊广义预测控制方法, 并应用于抽水蓄能机组系统^[10]、水轮机时滞调节系统^[11]、光电跟踪系统^[12]. 文献 [13~15] 提出了广义预测迭代学习控制算法, 并应用于高炉铁水质量控制^[13]、无人车系统^[14]、超声电机系统^[15]. 文献 [16] 提出了基于粒

引用格式: 张亚军, 牛宏, 陶金梅, 等. 虚拟未建模动态补偿与数据驱动的非线性广义预测控制. 中国科学: 信息科学, 2021, 51: 1146–1155, doi: 10.1360/SSI-2020-0253
Zhang Y J, Niu H, Tao J M, et al. Virtual unmodeled dynamic compensation and data-driven nonlinear generalized predictive control (in Chinese). Sci Sin Inform, 2021, 51: 1146–1155, doi: 10.1360/SSI-2020-0253

子群优化的多变量广义预测控制,并应用于起重机载荷过程.上述广义预测控制算法均取得了理想的应用效果,但缺少充分利用被控对象历史可测数据进行控制器设计的问题,可进一步完善和改进.

另一方面,采用非智能手段的非线性广义预测控制算法也得到了广泛的研究^[17~23],并不断有新的理论和方法被提出.特别地,文献[24]提出了一种基于广义区域跟踪的模型预测控制新框架,提出了预测控制稳定性分析的新理论.值得注意的是,上述广义预测控制算法在系统出现未建模动态时,如何利用系统的动态误差信息设计消除该误差信号的补偿控制器并未被涉及.因此,充分利用被控对象的动态误差信息进行广义预测控制算法设计是一个具有潜在研究价值的切入点.

结合广义预测控制已有的研究工作,本文立足于复杂工业过程存在各种扰动,且扰动机理未知、无法直接测量又不易消除的现状,结合目前大数据工业过程的海量数据信息,把基于模型的控制思想与数据驱动思想相结合、反馈与前馈相结合、信号补偿与调节原理相结合,研究了一种非线性广义预测控制方法.在此基础上,推导了闭环系统的输入输出动态方程,并分析了系统性能.最后,通过实例验证,实验结果体现了算法的优越性.

2 控制问题描述

一般而言,一类复杂被控过程可表示如下:

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})u(k-1) + v[\mathbf{x}(k-1)], \quad (1)$$

其中, $A(z^{-1})$ 和 $B(z^{-1})$ 是多项式,其阶次分别为 n_A 和 n_B ,且非线性被控对象的零动态渐近稳定.

由式(1)可知:

$$v[\mathbf{x}(k-2)] = A(z^{-1})y(k-1) - B(z^{-1})u(k-2), \quad (2)$$

虚拟未建模动态可表示为

$$v[\mathbf{x}(k-1)] = v[\mathbf{x}(k-2)] + \Delta v[\mathbf{x}(k-1)], \quad (3)$$

其中,

$$\Delta = 1 - z^{-1}, \quad (4)$$

则系统(1)可进一步表示为

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})u(k-1) + v[\mathbf{x}(k-2)] + \Delta v[\mathbf{x}(k-1)]. \quad (5)$$

假设1 对任意的 k , $v[\mathbf{x}(k)]$ 全局有界^[25],即

$$|v[\mathbf{x}(k)]| \leq M, \quad (6)$$

其中, M 为已知正数.

控制目标为设计控制器使得

- (1) 闭环系统的输入输出信号有界;
- (2) 系统输出渐近跟踪预先给定的有界参考信号的变化.

3 非线性广义预测控制器设计

3.1 广义预测控制器设计

本文把反馈、前馈、数据驱动控制以及广义预测控制的优势深度融合, 提出的非线性广义预测控制器可表示为

$$u(k) = u_1(k) + u_2(k) + u_3(k), \quad (7)$$

其中, $u_1(k)$ 为常规的广义预测控制器, $u_2(k)$ 为前一时刻的 $v[\mathbf{x}(k-1)]$ 补偿控制器, $u_3(k)$ 为信号补偿控制器.

以式 (5) 的低阶线性部分设计常规广义预测控制器 $u_1(k)$ 为

$$H_c(z^{-1})u_1(k) + F_c(z^{-1})y(k) = P_c(z^{-1})w(k+N), \quad (8)$$

其中, $H_c(z^{-1})$, $F_c(z^{-1})$ 和 $P_c(z^{-1})$ 为关于 z^{-1} 的加权多项式, $w(k+N) \in \mathbb{R}$ 是已知有界的参考输入信号.

针对前一时刻虚拟未建模动态的数据信息, 设计消除其对闭环系统影响的补偿控制器 $u_2(k)$, 即

$$u_2(k) = -M_c(z^{-1})v[\mathbf{x}(k-1)], \quad (9)$$

其中, $M_c(z^{-1})$ 为补偿器加权多项式.

将式 (8) 中的 $u_1(k)$ 和式 (9) 中的 $u_2(k)$ 代入式 (8) 得到非线性广义预测控制器 $u(k)$ 为

$$H_c(z^{-1})u(k) + F_c(z^{-1})y(k) = P_c(z^{-1})w(k+N) - H_c(z^{-1})M_c(z^{-1})v[\mathbf{x}(k-1)] + H_c(z^{-1})u_3(k). \quad (10)$$

引入如下性能指标^[26]:

$$J_1(N, N_u) = \min \sum_{j=1}^N \{y(k+j) - r_j w(k+j) + S_j(z^{-1})v[\mathbf{x}(k+j-2)]\}^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda_j u(k+j-1)^2, \quad (11)$$

其中, N, N_u 分别为预测和控制时域的长度, λ_j 为加权常数, $S_j(z^{-1})$ 为加权多项式, r_j 为加权常数.

采用类似于文献 [6, 21] 中设计广义预测控制器的策略, 得到非线性广义预测控制器方程为

$$H(z^{-1})u(k) = P(z^{-1})w(k+N) - F(z^{-1})y(k) - M(z^{-1})v[\mathbf{x}(k-2)], \quad (12)$$

其中,

$$P(z^{-1}) = \mathbf{p}^T \cdot \mathbf{R} \cdot [z^{-N+1}, z^{-N+2}, \dots, 1]^T = p_N r_N + p_{N-1} r_{N-1} z^{-1} + \dots + p_1 r_1 z^{-N+1}, \quad (13)$$

$$F(z^{-1}) = \sum_{k=1}^N p_k F_k(z^{-1}), \quad (14)$$

$$H(z^{-1}) = 1 + z^{-1} \sum_{k=1}^N p_k H_k(z^{-1}). \quad (15)$$

把式 (12) 带入式 (5) 可得

$$[A(z^{-1})H_c(z^{-1}) + z^{-1}B(z^{-1})F_c(z^{-1})][A(z^{-1})H_c(z^{-1}) + z^{-1}B(z^{-1})F_c(z^{-1})]y(k)$$

$$= z^{-1}B(z^{-1})P_c(z^{-1})w(k+N) + [H_c(z^{-1}) - z^{-1}B(z^{-1})H_c(z^{-1})M_c(z^{-1})]v[\mathbf{x}(k-2)] \\ + z^{-1}H_c(z^{-1})B(z^{-1})u_3(k) + H_c(z^{-1})\Delta v[\mathbf{x}(k-1)]. \quad (16)$$

为了使闭环系统稳定同时消除稳态偏差, 选择 $H_c(z^{-1})$, $F_c(z^{-1})$ 必须满足以下约束^[26]:

$$T(z^{-1}) = A(z^{-1})H_c(z^{-1}) + z^{-1}B(z^{-1})F_c(z^{-1}) \neq 0, \quad |z| \geq 1, \quad (17)$$

选择 $M_c(z^{-1})$ 须满足

$$H_c(z^{-1}) - z^{-1}H_c(z^{-1})B(z^{-1})M_c(z^{-1}) = 0. \quad (18)$$

根据式 (18), 则式 (16) 变为

$$[A(z^{-1})H_c(z^{-1}) + z^{-1}B(z^{-1})F_c(z^{-1})][A(z^{-1})H_c(z^{-1}) + z^{-1}B(z^{-1})F_c(z^{-1})]y(k) \\ = z^{-1}B(z^{-1})P_c(z^{-1})w(k+N) + z^{-1}H_c(z^{-1})B(z^{-1})u_3(k) + H_c(z^{-1})\Delta v[\mathbf{x}(k-1)]. \quad (19)$$

对阶跃输入信号, 离线选择 $P(z^{-1})$ 的方法为

$$P_c = \left. \frac{A(z^{-1})H_c(z^{-1})}{B(z^{-1})} + F_c(z^{-1}) \right|_{z=1}. \quad (20)$$

3.2 消除跟踪误差补偿器设计

从方程 (19) 还可以看出, $\Delta v[\mathbf{x}(k-1)]$ 未知, 无法在闭环系统中予以消除. 为此, 首先根据被控对象的过程大数据信息获得其对闭环系统造成的动态跟踪误差信号, 记为 $e(k)$, 定义为

$$e(k) = w(k) - y(k). \quad (21)$$

其次, 将闭环系统 (19) 表示为以 $u_3(k)$ 为输入, 以 $e(k)$ 为输出的误差动态系统, 即

$$[A(z^{-1})H_c(z^{-1}) + z^{-1}B(z^{-1})F_c(z^{-1})][A(z^{-1})H_c(z^{-1}) + z^{-1}B(z^{-1})F_c(z^{-1})]e(k) \\ = [A(z^{-1})H_c(z^{-1}) + z^{-1}B(z^{-1})F_c(z^{-1}) - z^{-1}B(z^{-1})P_c(z^{-1})]w(k+N) \\ - z^{-1}H_c(z^{-1})B(z^{-1})u_3(k) - H_c(z^{-1})\Delta v[\mathbf{x}(k-1)]. \quad (22)$$

为设计信号补偿控制器 $u_3(k)$, 引入如下性能指标 $J_2(e(k))$:

$$J_2(e(k)) = \min [e(k)]^2, \quad (23)$$

令

$$A(z^{-1})H_c(z^{-1}) + z^{-1}B(z^{-1})F_c(z^{-1}) + z^{-1}K_c(z^{-1}) = 1, \quad (24)$$

其中, $K_c(z^{-1})$ 为加权多项式, 根据式 (24) 获得.

将式 (24) 代入式 (22) 得

$$e(k) = K_c(z^{-1})e(k-1) + [1 - z^{-1}K_c(z^{-1}) - z^{-1}B(z^{-1})P_c(z^{-1})]w(k+N) \\ - z^{-1}H_c(z^{-1})B(z^{-1})u_3(k) - H_c(z^{-1})\Delta v[\mathbf{x}(k-1)], \quad (25)$$

则误差 $e(k)$ 为

$$e(k) = K_c(z^{-1})e(k-1) + [1 - z^{-1}K_c(z^{-1}) - z^{-1}B(z^{-1})P_c(z^{-1})]w(k+N)$$

$$-z^{-1}H_c(z^{-1})B(z^{-1})u_3(k) - H_c(z^{-1})\Delta v[\mathbf{x}(k-2)], \quad (26)$$

其中 $\Delta v[\mathbf{x}(k-2)] = v[\mathbf{x}(k-2)] - v[\mathbf{x}(k-3)]$.

将式 (26) 代入式 (23) 并使 $J_2(e(k)) = 0$ 可得信号补偿控制器 $u_3(k)$ 为

$$\begin{aligned} z^{-1}H_c(z^{-1})B(z^{-1})u_3(k) &= K_c(z^{-1})e(k-1) + [1 - z^{-1}K_c(z^{-1}) \\ &\quad - z^{-1}B(z^{-1})P_c(z^{-1})]w(k+N) - H_c(z^{-1})\Delta v[\mathbf{x}(k-2)]. \end{aligned} \quad (27)$$

由 $e(k)$ 的定义式 (21) 以及单位后移算子 z^{-1} , 可将信号补偿控制器 (27) 写成如下等价形式:

$$\begin{aligned} H_c(z^{-1})B(z^{-1})u_3(k) + K_c(z^{-1})y(k) \\ = [z + (z^{-N} - 1)K_c(z^{-1}) - B(z^{-1})P(z^{-1})]w(k+N) - zH_c(z^{-1})\Delta v[\mathbf{x}(k-2)], \end{aligned} \quad (28)$$

其中 $K_c(z^{-1})$ 由式 (24) 获得.

4 稳定性和收敛性分析

引理1 当非线性广义预测控制算法 (7)~(28) 作用于被控对象 (1) 时, 系统的输入输出动态方程分别为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & z^{-1}B(z^{-1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y(k) \\ u(k) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 - z^{-1}(1 - z^{-N})K_c(z^{-1}) \\ [1 - z^{-1}K_c(z^{-1})(1 - z^{-N})]A(z^{-1}) \end{bmatrix} w(k+N) \\ &+ \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} v[\mathbf{x}(k-2)] + \begin{bmatrix} H_c(z^{-1})(1 - z^{-1}) \\ A(z^{-1})H_c(z^{-1})(1 - z^{-1}) \end{bmatrix} \Delta v[\mathbf{x}(k-1)]. \end{aligned} \quad (29)$$

定理1 当被控对象 (1) 满足如下假设条件时具有稳定性和收敛性:

- (1) 被控对象的零动态渐近稳定;
- (2) 虚拟未建模动态满足假设条件 1;
- (3) 离线选择加权常数 λ_j, r_j 和加权多项式 $M_c(z^{-1})$, 使式 (17) 成立, 选择加权多项式 $K_c(z^{-1})$ 使式 (24) 成立.

则采用本文的非线性广义预测控制算法 (7)~(28) 作用于被控对象 (1) 时, 闭环系统输入输出有界 (BIBO 稳定). 而且, 当 $k \rightarrow \infty$ 时, 系统的跟踪误差有界, 即

$$\lim_{k \rightarrow \infty} |e(k)| < \varepsilon, \quad (30)$$

其中 $\varepsilon > 0$, ε 为任意小的正数.

证明 采用类似于文献 [26, 27] 的方法可证明定理 1 的结论成立, 这里不再赘述.

5 仿真实验

采用如下的算例进行仿真验证:

$$y(k) = 0.9899y(k-1) + 0.0068y(k-2) - 0.0149u(k-1) + 0.0169u(k-2)$$

图 1 (网络版彩图) 参考输入信号 $w(k)$ 与闭环系统的输出 $y(k)$

Figure 1 (Color online) The desired input signal $w(k)$ and the outputs $y(k)$ of the system

图 2 (网络版彩图) 非线性广义预测控制器输出

Figure 2 (Color online) The output of nonlinear generalized predictive controller

$$+ \frac{u(k-1) + u(k-2)}{1 + u(k-1)^2 + u(k-2)^2} + \frac{y(k-1) + y(k-2)}{1 + y(k-1)^2 + y(k-2)^2}. \quad (31)$$

显然, 该非线性系统在原点处 Taylor 展开后可表示为系统 (1) 的形式, 其中, 系统的阶次 $n_A = 2$, $n_B = 1$.

控制目标为设计广义预测控制器使闭环系统的输出 $y(k)$ 跟踪周期为 500、幅值为 13~15 的有界方波信号.

图 1~7 为仿真对比结果.

根据图 1, 本文所提的算法考虑了虚拟未建模动态的影响, 使得系统输出跟踪设定值很好, 并且系统的响应速度快.

图 2~5 分别是本文提出的非线性广义预测控制器、常规广义预测控制器、前一时刻虚拟未建模动态补偿控制器以及虚拟未建模动态变化率补偿器的输出曲线; 图 6 为虚拟未建模动态. 根据图 6, 虚拟未建模动态呈复杂非线性变化特性.

图 3 (网络版彩图) 广义预测控制器 $u_1(k)$

Figure 3 (Color online) The output of generalized predictive controller $u_1(k)$

图 4 (网络版彩图) 补偿控制器输出 $u_2(k)$

Figure 4 (Color online) The output of compensation controller $u_2(k)$

图 5 (网络版彩图) 信号补偿控制器输出 $u_3(k)$

Figure 5 (Color online) The output of signal compensation controller $u_3(k)$

图 6 (网络版彩图) 虚拟未建模动态 $v[x(k)]$ Figure 6 (Color online) The virtual unmodeled dynamics $v[x(k)]$ 图 7 (网络版彩图) 采用常规方法时的参考输入 $w(k)$ 与闭环系统的输出 $y(k)$ Figure 7 (Color online) The desired input signal $w(k)$ and the outputs $y(k)$ of the system using the conventional method

将本文所提的控制算法与常规的控制算法进行比较. 图 7 是对比实验结果.

从图中可以看出, 当采用常规的算法时, 输出与参考输入之间存在一定误差, 且输出有一定波动. 通过计算两种控制算法的均方误差 (mean square error, MSE) 可知, 当采用常规控制算法时, 系统输出的 MSE 为 20.3794, 而采用本文的控制算法时, 系统输出的 MSE 为 4.8204, 比常规控制器降低了 76.35%. 可见本文的方法优于常规控制算法.

6 结论

本文提出了一种新颖的基于大数据信息的非线性广义预测控制方法. 所提的新型控制策略把被控过程的大数据信息与调节原理充分融合, 在保证闭环系统的稳定性和收敛性的同时具有良好的动静态性能. 仿真对比结果进一步体现了所提算法的优越性.

参考文献

- Clarke D W, Mohtadi C. Properties of generalized predictive control. *Automatica*, 1989, 25: 859–875
- Clarke D W, Mosca E, Scattolini R. Robustness of an adaptive predictive controller. *IEEE Trans Automat Contr*, 1994, 39: 1052–1056
- Alkorta P, Barambones O, Cortajarena J A, et al. Efficient multivariable generalized predictive control for sensorless induction motor drives. *IEEE Trans Ind Electron*, 2014, 61: 5126–5134
- Judewicz M G, Gonzalez S A, Echeverria N I, et al. Generalized predictive current control (GPCC) for grid-tie three-phase inverters. *IEEE Trans Ind Electron*, 2016, 63: 4475–4484
- Yan Y, Zhang C, Narayan A, et al. Generalized dynamic predictive control for nonparametric uncertain systems with application to series elastic actuators. *IEEE Trans Ind Inf*, 2018, 14: 4829–4840
- Shi Y J, Chai T Y. Neural networks and multiple models based nonlinear adaptive generalized predictive control. *Acta Autom Sin*, 2007, 33: 540–545 [石宇静, 柴天佑. 基于神经网络与多模型的非线性自适应广义预测控制. *自动化学报*, 2007, 33: 540–545]
- Zhang Y J, Chai T Y, Wang H, et al. An adaptive generalized predictive control method for nonlinear systems based on ANFIS and multiple models. *IEEE Trans Fuzzy Syst*, 2010, 18: 1070–1082
- Ren M, Gong M, Lin M, et al. Generalized correntropy predictive control for waste heat recovery systems based on organic rankine cycle. *IEEE Access*, 2019, 7: 151587–151594
- Xie S, Xie Y, Huang T, et al. Generalized predictive control for industrial processes based on neuron adaptive splitting and merging RBF neural network. *IEEE Trans Ind Electron*, 2019, 66: 1192–1202
- Zhou J, Zhang N, Li C, et al. An adaptive takagi-sugeno fuzzy model-based generalized predictive controller for pumped-storage unit. *IEEE Access*, 2019, 7: 103538–103555
- Tian Y, Wang B, Zhu D, et al. Takagi-Sugeno fuzzy generalised predictive control of a time-delay non-linear hydro-turbine governing system. *IET Renew Power Generation*, 2019, 13: 2338–2345
- Qu J, Xia Y, Xue S, et al. Novel generalized predictive control for photoelectric tracking system based on improved objective function and predictive value correction. *IEEE Access*, 2020, 8: 18893–18901
- Yi C M, Zhou P, Chai T Y. Data driven adaptive predictive control of blast furnace ironmaking process based on real time learning. *Control Theory Appl*, 2020, 37: 295–306 [易诚明, 周平, 柴天佑. 基于即时学习的高炉炼铁过程数据驱动自适应预测控制. *控制理论与应用*, 2020, 37: 295–306]
- Ma L L, Liu X J. Robust model predictive iterative learning control with iteration-varying reference trajectory. *Acta Autom Sin*, 2019, 45: 1933–1945 [马乐乐, 刘向杰. 变参考轨迹下的鲁棒迭代学习模型预测控制. *自动化学报*, 2019, 45: 1933–1945]
- Song L, Shi J Z. Novel generalized predictive iterative learning speed controller for ultrasonic motors. *IEEE Access*, 2020, 8: 29344–29353
- Smoczek J, Szpytko J. Particle swarm optimization-based multivariable generalized predictive control for an overhead crane. *IEEE/ASME Trans Mechatron*, 2017, 22: 258–268
- Li Z Q, Yang H, Zhang K P, et al. Distributed model predictive control based on multi-agent model for electric multiple units. *Acta Autom Sin*, 2014, 40: 2625–2631
- He W J, Zhang H T, Chen Z, et al. Generalized predictive control of temperature on an atomic layer deposition reactor. *IEEE Trans Contr Syst Technol*, 2015, 23: 2408–2415
- Castelló J, Espí J M, García-Gil R. A new generalized robust predictive current control for grid-connected inverters compensates anti-aliasing filters delay. *IEEE Trans Ind Electron*, 2016, 63: 4485–4494
- Pawlowski A, Guzman J L, Berenguel M, et al. Event-based GPC for multivariable processes: a practical approach with sensor deadband. *IEEE Trans Contr Syst Technol*, 2017, 25: 1621–1633
- Kim S H, Kim R Y, Kim S I. Generalized model predictive control method for single-phase N-level flying capacitor multilevel rectifiers for solid state transformer. *IEEE Trans Ind Applicat*, 2019, 55: 7505–7514
- Chen Z, Cui J, Lei Z, et al. Design of an improved implicit generalized predictive controller for temperature control systems. *IEEE Access*, 2020, 8: 13924–13936
- Shao M, Deng Y, Li H, et al. Robust speed control for permanent magnet synchronous motors using a generalized predictive controller with a high-order terminal sliding-mode observer. *IEEE Access*, 2019, 7: 121540–121551
- Liu S, Mao Y, Liu J. Model-predictive control with generalized zone tracking. *IEEE Trans Automat Contr*, 2019, 64:

4698–4704

- 25 Chen L J, Narendra K S. Nonlinear adaptive control using neural networks and multiple models. *Automatica*, 2001, 37: 1245–1255
- 26 Chai T Y, Yue H. Adaptive Control. Beijing: Tsinghua University Press, 2016 [柴天佑, 岳恒. 自适应控制. 北京: 清华大学出版社, 2016]
- 27 Chai T Y, Zhang Y J, Wang H, et al. Data-based virtual unmodeled dynamics driven multivariable nonlinear adaptive switching control. *IEEE Trans Neural Netw*, 2011, 22: 2154–2172

Virtual unmodeled dynamic compensation and data-driven nonlinear generalized predictive control

Yajun ZHANG^{1*}, Hong NIU², Jinmei TAO² & Xusheng LI²

1. *State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University, Shenyang 110819, China;*

2. *College of Sciences, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China*

* Corresponding author. E-mail: yajunzhang@mail.neu.edu.cn

Abstract For a class of discrete-time nonlinear dynamic systems, a nonlinear generalized predictive control method is proposed, which combines the conventional generalized predictive control with data-driven control, the feedback control with feedforward compensation, and the signal compensation with the regulator principle. The input-output dynamic equations of the closed-loop system are derived, and the performance of the proposed control algorithm is analyzed. The advantages and effectiveness of the proposed control algorithm are demonstrated through comparative experiments.

Keywords regulator, data, virtual unmodeled dynamics, data-driven, generalized predictive control

Yajun ZHANG is an associate professor at Northeastern University. His research interests include nonlinear fuzzy adaptive control theory, generalized predictive control, multiple models and switching systems, intelligent decoupling control, data-based driven control, big-data-driven modeling of intelligent control systems, big data modeling industries and their applications.

Hong NIU is a lecturer at Liaoning Shihua University. In 2012, she received her Ph.D. degree from Northeast University. Her main research interests include adaptive control and variable structure control for nonlinear systems.

Jinmei TAO is pursuing her master's degree at Liaoning Shihua University. Her main research interests include nonlinear adaptive control, system identification and data modeling.

Xusheng LI is pursuing his master's degree at Liaoning Shihua University. His main research interests include generalized predictive adaptive control and switching control.