一类新非线性控制方法: 基于演算子理论的控制方法综述

温盛军 [1] 毕淑慧 [2] 邓明聪 [3]

摘 要 以基于演算子理论的鲁棒右互质分解 (Operator-based robust right coprime factorization, RRCF) 为基础, 提出了一种较新的非线性鲁棒控制方法. 本文将简述此方法的概念、基本理论及其应用. 具体地说, 本文首先介绍此方法的起源与基本概念; 然后, 讨论此方法在系统的鲁棒稳定性、输出跟踪与故障检测方面的设计等问题; 最后, 介绍此方法的实际应用从而进一步证明其有效性.

关键词 演算子理论, 右互质分解, 多变量, 非线性系统, 不确定性, 鲁棒控制

引用格式 温盛军, 毕淑慧, 邓明聪. 一类新非线性控制方法: 基于演算子理论的控制方法综述. 自动化学报, 2013, **39**(11): 1812−1819

DOI 10.3724/SP.J.1004.2013.01812

Survey of A New Nonlinear Control Technique: An Operator-based Approach

WEN Sheng-Jun[1] BI Shu-Hui[2] DENG Ming-Cong[3]

Abstract This paper introduces some concepts, theories and applications of operator-based robust right coprime factorization (RRCF) approach, which is a small new method in robust nonlinear control field. In details, the origin and basic concepts of this approach is introduced firstly. Then, the system designs on robust stability, tracking performance and fault detection using the operator-theory-based approach are discussed. Finally, the applications of this method in engineering are shown to validate its effectiveness.

Key words Operator theory, robust right coprime factorization (RRCF), multi-input multi-output, nonlinear systems control, uncertainty, robust control

Citation Wen Sheng-Jun, Bi Shu-Hui, Deng Ming-Cong. Survey of a new nonlinear control technique: an operator-based approach. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(11): 1812−1819

在实际的工业过程中, 一般的受控系统都具有非线性特性, 并且完全精确的模型几乎是无法得到的. 因为系统工况的改变、参数的扰动、各种故障或其他外界干扰等不稳定性因素都会对系统的建模造成一定的影响, 有些系统还存在不能或无法进行数学建模的部分. 因而, 非线性系统的鲁棒控制一直是控制领域的研究热点.

截至目前很多控制方法被相继提出, 如自适应控制、滑模控制、PID 控制、神经网络控制、Lyapunov 方法等[1−2]. 这些方法都有自己的优缺点: 自适应控制能在运行过程中不断测量被控对象的特性, 自动改变控制的参数和结构使系统达到满意的控制品质, 但是, 此方法对实时性要求严格, 当存在不确定性因素时, 很难保证系统的稳定性; 滑模控制对系统参数的摄动、外界的干扰、系统的不确定性等具有鲁棒性, 但是它本身的不连续性以及控制器频繁切换动作能够引起抖动, 容易造成机械磨损甚至能够激励未建模的高频动态响应使控制失效; PID 控制是常用的一种控制方法, 但是当模型不精确或者存在不确定性时, 很难取得良好的控制效果; 神经网络控制具有快速并行运算能力, 很强的容错性和自适应学习能力, 能够处理系统的非线性、不确定性问题, 但是它本身存在自学习的特性, 当环境发生变化时, 需要重新训练网络. 基于演算子理论的鲁棒右互质分解方法是一种新颖的方法, 它可被用来处理系统分析、设计、稳定和控制[3−25].

收稿日期 2013-07-01 录用日期 2013-08-28
Manuscript received July 1, 2013; accepted August 28, 2013
国家自然科学基金 (61074022, 61203229), 科技部国际科技合作与交流项目 (2010DFA22770), 山东省自然科学基金 (ZR2012FQ022) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (61074022, 61203229), Program for International Science Cooperation and Communication (2010DFA22770), Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2012FQ022)
庆祝《自动化学报》创刊 50 周年专刊约稿
Invited Articles for the Special Issue for the 50th Anniversary of Acta Automatica Sinica
1. 中原工学院电子信息学院 郑州 450007 中国 2. 山东省科学院自动化研究所 济南 250014 中国 3. 国立东京农工大学电气电子工学科 东京 184-8588 日本
1. Department of Electronic and Information Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China 2. Institute of Automation, Shandong Academy of Science, Jinan 250014, China 3. Department of Electrical and Electronic Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology, Tokyo 184-8588, Japan

非线性演算子的定义在文献 [3] 中由 de Figueiredo 等给出. 而右互质分解鲁棒性的概念是由 Chen 等在文献 [4] 中提出, 在该文献里, 作者还讨论了非线性系统的右互质分解鲁棒性以及反馈控制系统稳定性鲁棒性, 并指出系统如果具有鲁棒稳定性, 那么就具有鲁棒互质分解性. 而文献 [5] 的重要意义在于建立了系统的鲁棒右互质的分解性与鲁棒稳定性之间的关系. 在对非线性系统进行互质分解时, 通常需要满足一个 Bezout 恒等式, 但仅满足 Bezout 恒等式不能保证右互质分解的鲁棒性. 对此, Chen 等利用 Lypschitz 算子对一类非线性系统给出了存在鲁棒右互质分解的充要条件, 得出了鲁棒右互质分解与反馈控制器系统鲁棒稳定性之间的联系[4]. Deng 等在文献 [6] 中对该充要条件进行了扩展, 给出了更一般的解的范围. 在文献 [7−8] 中, 应用同构理论探讨了非线性系统右互质分解的可实现性条件. 文献 [9] 给出了基于演算子理论的鲁棒跟踪控制条件. 在文献 [10−11] 的研究说明对于非线性系统的执行机构故障可以通过基于演算子理论的鲁棒右互质分解方法来诊断和控制. 通过使用压缩映射原理来弱化非线性系统多输入多输出之间的耦合影响, 文献 [12−13] 显示了基于演算子理论的方法可扩展到多输入多输出系统中. 这些研究结果在实际对象的应用[14−25], 进一步了证明这类新方法的有效性.

基于演算子理论的鲁棒右互质分解方法在处理非线性不确定系统的鲁棒控制问题时, 其优点在于: 应用的演算子是定义在扩展的 Banach 空间上更一般的 Lipschitz 演算子, 能够更好地处理演算子的逆、因果性、稳定性问题; 所用的演算子可以是线性的也可以是非线性的, 可以是有限维的也可以是无限维的, 可以是频域也可是时域的, 应用范围广; 对于不确定性的控制用一个范数不等式来限定, 对设计反馈控制系统保持鲁棒稳定性提出了新概念; 对于跟踪控制问题, 设计的控制系统能够在保持鲁棒稳定性的同时实现输出跟踪控制. 目前, 此方法已经被逐步拓展到复杂系统的研究, 如: 时滞系统、含有磁滞的系统、多输入多输出系统等, 其理论有效性和实际应用性得到了较好的验证. 本综述将分别介绍演算子理论的基本概念, 基于演算子理论的控制方法及三个工程实例应用研究.

1 综述概要

本文将主要讨论非线性控制领域中基于演算子理论的鲁棒控制方法及其应用.

第 2 节将简要介绍基于演算子理论的右互质分解方法的基本思想. 通过本节可了解到演算子的基本概念, 其可用于描述任意非线性系统. 基于演算子的右互质分解设计使演算子理论成为解决非线性系统控制问题的工具, 尤其右互质分解方法提出的简单的鲁棒稳定与跟踪条件使得该方法的实际应用变得可行.

第 3 节将讨论应用演算子理论解决非线性系统的控制问题. 从理论角度探讨非线性系统的鲁棒右互质分解、跟踪控制、故障检测及其多输入多输出控制等. 我们将应用演算子理论的方法给出相应的设计条件.

第 4 节将提供一些基于演算子理论的应用实例, 进一步说明该方法对非线性控制系统的有效性. 第 4.1 节应用演算子理论, 针对网络化控制系统中信号在网络传输过程造成一定时间延迟导致的稳定性和控制性能的下降, 将研究其相应地稳定及跟踪控制设计. 随着网络在反馈回路中的应用不但促进了网络化控制系统的研究, 而且使得发展大规模分布式控制系统变得可行。第 4.2 节研究该方法在分布式控制系统中的应用. 第 4.3 节针对具有智能材料的非线性系统, 设计一个非线性算子补偿器来消除磁滞的影响, 并给出鲁棒跟踪控制条件.

第 5 节总结了全文, 并提出了需要进一步研究的几个方向.

2 基于演算子理论的右互质分解方法的基本概念

何谓演算子? 何谓右互质分解方法? 两者又如何结合成为解决非线性系统控制问题的工具?

所谓演算子, 就是一个映射, 在数学及相关领域即等同于函数. 它对应的空间是巴拿赫 (Banach) 空间的扩展线性空间, 比一般的线性空间更适合应用于工程实际中[3]. 非线性系统的右互质分解方法引自线性系统的相关方法, 尽管如此, 由于非线性系统与线性系统存在着本质区别, 两者间的研究方法仍有较大的差异.

一个系统总是和它的输入输出映射 (演算子) Q 相对应, $Q: X \to Y$, X 和 Y 分别是输入空间和输出空间, 其稳定的子空间分别取 $X_s = \{x \in X : \|x\| < \infty\}$ 和 $Y_s = \{y \in Y : \|y\| < \infty\}$. 一般的, Q 是 (输入输出) 稳定的, 如果 $Q(X_s) \subseteq Y_s$.

定义 1. 取 $\mathcal{S}(X,Y)$ 为从 X 映射到 Y 的稳定演算子的集合, 则 $\mathcal{S}(X,Y)$ 包含一个子集:

$$\mathcal{U}(X,Y) = \{Q : Q \in \mathcal{S}(X,Y), \text{ 且 } Q^{-1} \in \mathcal{S}(Y,X)\} \tag{1}$$

$\mathcal{U}(X,Y)$ 的因子称为单模 (Unimodular) 演算子.

本文所指的演算子为一般的利普西茨 (Lyps-

chitz) 演算子, 其范数定义为

$$\|Q\|_{Lip} := \|Q(x_0)\|_Y + \|Q\| = \|Q(x_0)\|_Y + \sup_{T\in[0,\infty)} \sup_{\substack{x,\tilde{x}\in X \\ x_T \neq \tilde{x}_T}} \frac{\|[Q(x)]_T - [Q(\tilde{x})]_T\|_Y}{\|x_T - \tilde{x}_T\|_X} \tag{2}$$

基于演算子理论的非线性控制系统一般设计如图 1 所示, U 和 V 代表一个给定的系统演算子 P 的输入和输出空间, 即 $P: U \to V$.

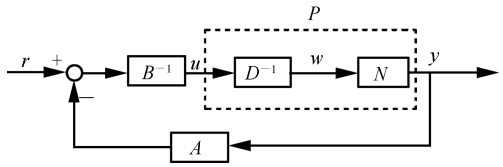

图 1 基于演算子理论的非线性控制系统

Fig. 1 An operator-based nonlinear control system

定义 2. 称 P 存在一个右分解, 如果其在其定义域上有一个右分解 $P = ND^{-1}$ 满足: $N: W \to V$ 和 $D: W \to U$ 稳定, 且 D 可逆, 其中, W 称为准状态空间 (Quasi-state space).

定义 3. P 称为存在右互质分解, 如果存在两个稳定的演算子 $A: V \to U$ 和 $B: U \to U$, 满足 Bezout 等式:

$$AN + BD = M, \quad M \in \mathcal{U}(W, U) \tag{3}$$

其中, M 是 Unimodular 演算子, B 可逆.

关于如何根据已知系统信息进行右分解的问题, Bu 等[7] 提出了同构的概念给出了右互质分解的方法, 这里就不再一一介绍.

定义 4. 图 1 中的系统称为适定的 (Well-posed), 如果对于任意的 $r \in U$, 系统的所有信号 (u, w, y, b) 都是唯一确定的.

定义 5. 图 1 中的非线性系统称为整体稳定 (Overall stable), 如果对于输入 $r \in U_S$, 则 $y \in V_s$, $u \in U_S$, $w \in W_s$.

引理 1[4]**.** 假设图 1 中的系统是适定的. 如果系统存在右分解且满足 Bezout 等式, 则系统是整体稳定的当且仅当式 (3) 中的 M 是 Unimodular 演算子.

根据引理 1, 图 1 的系统可以等价为图 2 所示系统. 如果 $NM^{-1} = I$, 则系统的跟踪问题可以实现.

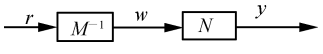

图 2 图 1 的等价系统

Fig. 2 Equivalent system of Fig. 1

3 基于演算子理论的鲁棒非线性控制方法

基于演算子理论的方法已经被逐步应用于非线性控制系统的设计等, 从理论角度主要对以下几个方面进行了研究.

3.1 鲁棒右互质分解

对于存在不确定性的非线性系统, 文献 [4] 研究了鲁棒右互质分解问题, 用空集的概念提出一个充分条件来抵消不确定性而产生的影响. 然而, 由于不确定性的未知性, 此条件很难实现. 鉴于此, Deng 等[6] 在右互质分解的基础上提出了一个利普西茨范数不等式, 首次把系统的鲁棒稳定性与右互质分解条件的鲁棒性相结合.

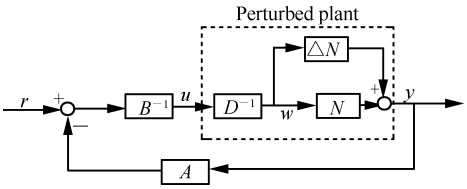

图 3 具有未知扰动的非线性系统

Fig. 3 A perturbed nonlinear feedback system

对于含有不确定性的非线性系统, 基于演算子的控制系统设计如图 3 所示, P 和 ΔP 分别为标称系统 (Nominal plant) 和不确定部分. 假设标称系统 P 和实际系统 $P + \Delta P$ 存在右分解 $P = ND^{-1}$, $P + \Delta P = (N + \Delta N)D^{-1}$, 其中, N、ΔN 和 D 是稳定的, D 可逆, ΔN 未知但其上下界已知, 则系统的鲁棒稳定条件如下所示

定理 1[6]**.** 取 D^e 为拓展线性空间 U^e 的子空间, 若 $(A(N + \Delta N) - AN)M^{-1} \in Lip(D^e)$, 且

$$AN + BD = M \tag{4}$$

$$\|(A(N + \Delta N) - AN)M^{-1}\| < 1 \tag{5}$$

则图 3 中的系统是鲁棒稳定的, 其中, $Lip(D^e)$ 代表一般化的非线性利普西茨演算子的自映射.

如果条件 (5) 成立, 演算子 $A(N+\Delta N)+BD = \tilde{M}$ 可以证明是 Unimodular 演算子, 此条件隐含了图 3 系统满足:

$$y(t) = (N + \Delta N)\tilde{M}^{-1} r(t) \tag{6}$$

因此, 如果条件 $(N + \Delta N)\tilde{M}^{-1} = I$ 成立, 则可以实现跟踪性能. 然而事实上, ΔN 是未知的, 仅仅通过已知的信息设计 A 和 B 得到的 Unimodular 演算子 M 很难满足此条件. 因此, 如何设计控制器使其实现跟踪性能需要进一步考虑.

3.2　跟踪控制

对于已经稳定的非线性系统, 为实现跟踪功能, 我们设计了一个非线性反馈跟踪系统如图 4 和图 5 所示, 其中, T 为空间转换演算子, 主要用于当输入空间与输出空间不一样的情况, C 是跟踪控制器. 虚线内为已经稳定的部分, 用 $\tilde{P}$ 代表. 则误差信号为

$$\tilde{e}(t) = (I + \tilde{P}C)v(t) \tag{7}$$

非常明显, $\tilde{e}$ 和 y 的空间是一样的. 而且, C 的设计使开环部分 $\tilde{P}C$ 由一个积分器与一个系统 P_T 的串联 (如图 5 所示), 且满足:

1) $\forall t \in [0,T]$, C 稳定, 且 $P_T(\cdot) \geq K_1 > 0$ 当 $T \geq t \geq t_1 \geq 0$, $r > 0$;

2) $\tilde{P}C(0) = 0$;

3) 对于任意的 $x, y \in V_s$ 和 $t \in [0,T]$, $\|\tilde{P}C(x) - \tilde{P}C(y), t\| \leq h\int_0^t \|x - y, t_1\|\mathrm{d}t_1$, h 是 P_T 的增益 (Gain), 可以为任意的常数.

定义一个从 v 到 y 的演算子 G, 则 $G = \tilde{P}C(I - G)$. 根据指数迭代定理 (Exponential iteration theorem), 如果条件 2) 和 3) 成立, 存在一个唯一解在 $[0,T]$ 上一致收敛. 此条件隐含了系统的输出有界, 且 $(I + \tilde{P}C)^{-1}$ 是存在的.

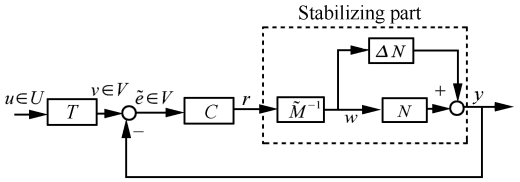

图 4　非线性反馈跟踪系统

Fig. 4　A nonlinear feedback system for tracking

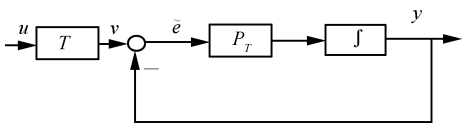

图 5　图 4 的等价系统

Fig. 5　Equivalent blockdiagram of Fig. 4

定理 2[6]**.** 如果 $t < T$ 足够大, 则控制器 C 能够使得误差信号 $\tilde{e}$, 即 $y(t) - v(t)$ 任意小.

3.3　故障检测

把基于演算子理论的方法用来检测故障, 其系统设计如图 6 所示. 如果

$$AN + BD = I \tag{8}$$

$$A(N + \Delta N) + BD = I \tag{9}$$

$$A_0N + B_0D = I \tag{10}$$

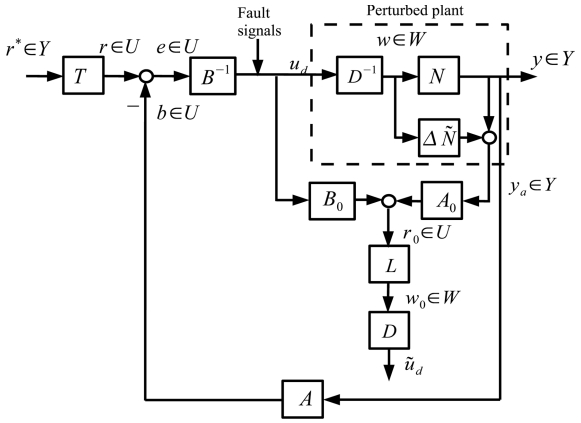

图 6　故障检测系统

Fig. 6　Fault detection system

其中, L 为空间转换器, 则得到故障信号为

$$\text{Detected fault signal} = \mathrm{abs}(B^{-1}(e)(t) - \tilde{u}_d(t)) \tag{11}$$

其中, $\tilde{u}_d$ 为检测到的输入信号.

用基于演算子理论的方法设计故障检测系统, 一个优点就是故障信号的获得不需要大量的传感器[10].

3.4　多输入多输出系统

第 3.1 节 ∼ 第 3.3 节的研究可扩展到多输入多输出系统.

基于演算子理论的多输入多输出非线性系统设计如图 7 所示, 对于系统中存在的耦合影响, 大概分为以下 4 类:

$$z_i(t) = u_i(t) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} G_{ij}(u_j(t)), \quad y_i = P_i(z_i(t)) \tag{12}$$

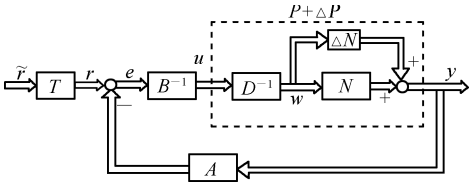

图 7　多输入多输出系统

Fig. 7　Multi-input multi-output system

$$z_i(t) = u_i(t) + \sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{n} H_{ij}(y_j(t)),\quad y_i = P_i(z_i(t)) \tag{13}$$

$$y_i(t) = P_i(u_i(t)) + \sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{n} J_{ij}(u_j(t)) \tag{14}$$

$$y_i(t) = P_i(u_i(t)) + \sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{n} Q_{ij}(y_j(t)) \tag{15}$$

其中, G_{ij}, H_{ij}, J_{ij}, Q_{ij} 分别是内部的演算子, 分别代表所有与此相关联的耦合影响的和. 以 G_{ij} 为例, 作者主要从以下几个方面考虑:

1) 把内部的耦合当作是系统本身的一部分, 即

$$x_i(t) + \sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{n} G_{ij}(x_j)(t) = (D_i + \Delta D_i)(w_i)(t),\quad i = 1, 2, \cdots, n \tag{16}$$

此时, 整个系统可以分为多个子系统, 用一般的基于演算子的方法可以处理系统的鲁棒稳定性、跟踪等问题[12].

2) 用演算子 B 来控制耦合影响. 一方面用微分算子的概念, 把演算子 B 分为两部分, 微分部分用来控制系统中的耦合, 其余部分跟一般的基于演算子的控制方法相似[12]. 另一方面, 也可以把耦合影响右分解, 一部分划为系统右分解的部分, 另一部分作为控制算子 B 的一部分[12].

3) 假设耦合算子与系统的右分解部分 D 的关系为

$$v(t) = F(w)(t) = F \cdot w(t) + f(t) \tag{17}$$

其中, v 为 D^{-1} 的输出信号, 则可设计一个反馈控制器使耦合关系分离, 即把其余子系统对当前系统的影响转化为与自身变量的一个非线性关系:

$$u_i(t) = D_i(f_i(t)) + R_i(w_i(t)) \tag{18}$$

然后, 可设计控制器使系统鲁棒稳定并消除此影响实现输出跟踪控制, 设计的系统如图 8 所示.

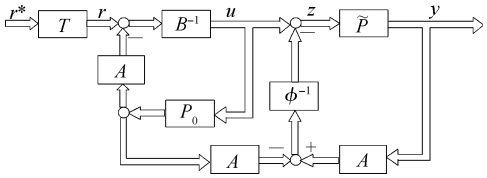

图 8 多输入多输出跟踪系统

Fig. 8 Multi-input multi-output system for tracking

其中, $\tilde{P}_i = N_i R_i$ 为分离耦合之后的系统, $\tilde{P}_{0i} = N_{0i} R_i$ 为 $\tilde{P}_i$ 的模型, ϕ 是线性演算子满足: 对任意的有界信号 $\alpha(t)$, 有 $\phi_i(\alpha(t)) \to 0$, 且 ϕ_i^{-1} 也是线性的. 如果

$$B_i R_i + A_i N_{0i} = \tilde{M}_i \tag{19}$$

$$N_i \tilde{M}_i^{-1} T_i = I \tag{20}$$

则系统的跟踪性能能够实现, 其中, $\tilde{M}_i$ 是 Unimodular 演算子.

4 研究与应用现状

目前, 基于演算子理论的鲁棒右互质分解方法已在很多实验对象上得到具体应用[14−25], 例如, 基于铂尔帖的制热和制冷过程, 带时滞的网络化热过程, 具有多输入多输出的分布式控制系统, 含有磁滞的智能驱动系统和人工肌肉系统等. 下面主要介绍 3 个典型的应用实例.

4.1 网络控制系统应用研究

网络化铝板热过程除了包含模型本身的不确定性以外, 还存在不确定的网络延迟. 因而, 带时滞的网络化热过程是一个典型的非线性不确定性系统. 文献 [14] 通过 ΔD 和 ΔN 分别表示网络延迟导致的不确定性和模型本身的不确定性, 并依据右互质分解来设计鲁棒稳定控制器, 结构框图如图 9 所示.

网络化热过程的模型和相应的右互质分解控制器如下式所示:

$$y(t) = \frac{1}{cm} \mathrm{e}^{-L_p t} \int \mathrm{e}^{L\tau} u_d(\tau) \mathrm{d}\tau \tag{21}$$

$$B(u_d)(t) = \frac{K_p K_b - K_p + 1}{cm} u_d(t) \tag{22}$$

$$A(y)(t) = K_p(1 - K_b)\left[\frac{\mathrm{d}y(t)}{\mathrm{d}t} + L_p y(t)\right] \tag{23}$$

这里, y 和 u_d 分别表示过程输出和相应的控制输入, L_p、c 和 m 是模型参数, K_b 和 K_p 是设计参数. 在满足文献 [6] 提出的鲁棒稳定条件和文献 [9] 设计的跟踪控制器时, 实验结果如图 10 所示.

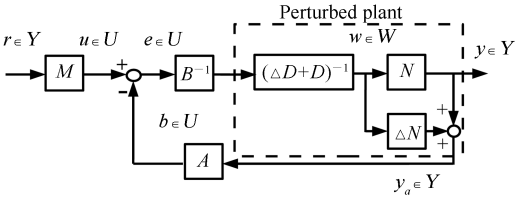

图 9　网络化热过程的鲁棒右互质分解

Fig. 9　Robust right coprime factorization of networked thermal process

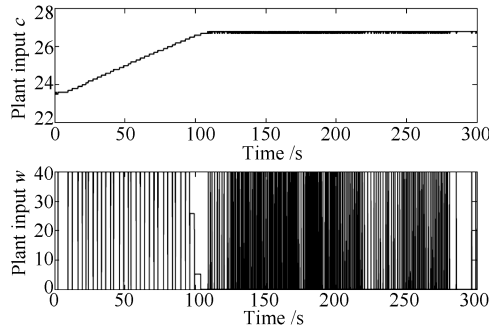

图 10　网络化热过程的实验结果

Fig. 10　Experimental result of networked thermal process

实验中, L_p 和 K_b 分别取 0.013 和 0.7. 从图 10 可看出, 大约 110 秒后温度达到了设定值, 并非常稳定.

4.2　分布式控制系统应用研究

大规模分布式控制系统是复杂控制系统发展的趋势, 这部分讨论基于演算子理论在多水箱分布式控制系统中的应用, 其中分布式控制系统采用横河 CENTUM CS 3000. 多水箱过程主要包括液位过程和流量过程, 且需要同时控制, 它们的模型分别如下所示:

$$\dot{y}_1(t) = \frac{1}{L_p}u_{d1}(t) - \frac{a}{L}\sqrt{2gy_1(t)} \tag{24}$$

$$y_2(t) = k\mathrm{e}^{bu_{d2}(t)} \tag{25}$$

这里, y_1 和 y_2 分别表示输出液位和流量, 而 u_{d1} 和 u_{d2} 是相应的控制输入, L_p、a、g、k 和 b 是模型参数. 可设计基于右互质分解的控制器如下:

$$\begin{aligned}
&B_1(u_{d1})(t) = K_1u_{d1}(t)\\
&A_1(y_1)(t) = y_1(t) - K_1[L_p\dot{y}_1(t) + a\sqrt{2gy_1(t)}]\\
&B_2(u_{d2})(t) = K_2u_{d2}(t)\\
&A_2(y_2)(t) = \frac{y_2(t)}{k} - \frac{K_2}{b}\ln\frac{y_2(t)}{k}
\end{aligned}$$

K_1 和 K_2 是设计参数. 由上式可看出, 控制器 A_1 中含有微分算子, 而 A_2 中含有对数算子. 这些在分布式控制系统中都不能直接实现, 需要近似处理来变得可行. 这将使控制器存在不确定性, 即控制系统的框图如图 11 所示.

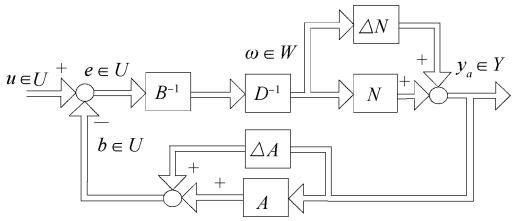

图 11　多水箱过程的鲁棒右互质分解

Fig. 11　Robust right coprime factorization of the multi-tank process

如果设计的控制器满足如下条件, 则系统的鲁棒稳定性能被保证[25].

$$A_iN_i + B_iD_i = M_i,\ \ i = 1, 2 \tag{26}$$

$$\begin{aligned}
&\|[(A_i + \Delta A_i)(N_i + \Delta N_i) -\\
&\quad A_iN_i]M_i^{-1}\| < 1
\end{aligned} \tag{27}$$

跟踪控制器依据文献 [9] 进行设计, 液位和流量控制系统的实验结果分别如图 12 和 13 所示.

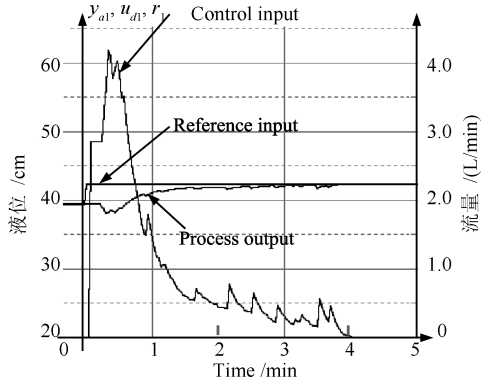

图 12　液位控制实验结果

Fig. 12　The control result of the water level process

图 13 中, 参考液位是 45 cm, 大约 4 min 后达到参考液位并稳定该状态. 图 13 中, 参考流量是 1.0 L/min, 大约 25 s 后达到参考流量并稳定该状态.

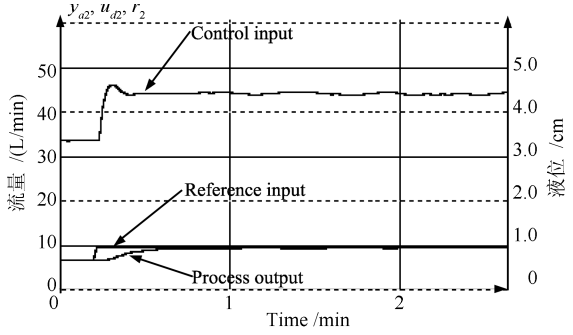

图 13　流量控制实验结果

Fig. 13　The control results of the water flow process

4.3 智能材料的非线性系统应用研究

智能材料非线性系统通常都包含有磁滞现象, 是典型的非线性系统. 由于磁滞特性较复杂, 其多值性、记忆性和非光滑性, 非常容易产生分岔、混沌等复杂的动力学行为, 影响系统的控制精度, 引起震荡, 甚至会造成系统不稳定. 为了消除磁滞对系统的不良影响, 通常需要建立磁滞的数学模型对其影响进行补偿, 常见的模型有 Preisach 模型、Duhem 模型、Bouc-Wen 模型、Prandtl-Ishlinskii (PI) 模型等. 对于压电驱动的柔性机械臂, 我们考虑用 PI 模型来描述磁滞现象, 在此基础上用演算子的形式重新描述磁滞的影响, 从而设计基于演算子理论的非线性控制器来处理磁滞, 设计的控制结构图如图 14 所示. 图中, P_I 是指磁滞的 PI 模型, T 是跟踪控制器, N_C 是磁滞补偿算子. 我们把磁滞分为可逆和不可逆两部分, 如式 (28) 所示, 把可逆部分 $D_{PI}(u)(t)$ 看作系统右分解可逆部分的一部分, 不可逆部分 $D_{PI}(\Delta(t))$ 看作不确定性因素的影响[16]. 跟踪控制器 T 被设计满足文献 [9] 所给条件来保证跟踪性能, 其中, 补偿算子 N_C 被包含来消除可逆和不可逆两部分的磁滞影响.

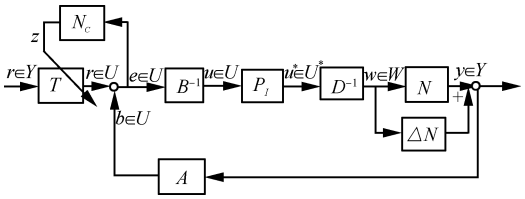

图 14 柔性机械臂的鲁棒右互质分解

Fig. 14 Robust right coprime factorization of the flexible arm

$$u^*(t) = PI(u)(t) = D_{PI}((u)(t) + \Delta(t)) \tag{28}$$

压电驱动柔性机械臂的数学模型如式 (29) 所示, J_1、α_1 和 β_1 是模型参数.

$$P(u^*)(t) = J_1 \int \mathrm{e}^{-\frac{\alpha_1}{2}(t-\tau)} \left(\sin\frac{\beta_1}{2}(t-\tau)u_d^*\right)(\tau)\mathrm{d}\tau \tag{29}$$

相应地右互质分解控制器如下:

$$B(u)(t) = Iu(t) \tag{30}$$

$$A(y)(t) = \left(\mathrm{e}^t - \frac{\mathrm{e}^{(1-\alpha_{\frac{1}{2}})t}}{K}\right)\mathrm{e}^{-t}w(t) \tag{31}$$

K 是可逆部分的常系数. 跟踪控制器 T 设计为

$$T(r(t), z) = \frac{1}{1-\mathrm{e}^t z_1}A(r(t)) - z_1 z_2 \tag{32}$$

z_1 和 z_2 是与磁滞相关的补偿算子, 分别表示是可逆部分的逆算子和不可逆部分算子. 所得控制实验结果如图 15 所示, 结果表明所提出方法在 6 s 之后能有效消除磁滞带来的影响.

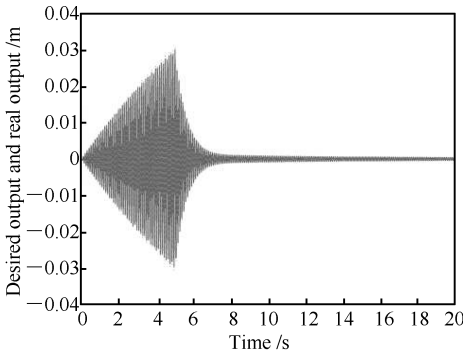

图 15 柔性机械臂的控制结果

Fig. 15 The control result of the flexible arm

5 结论

本文回顾了基于演算子理论的鲁棒右互质分解方法的发展状况, 对一些研究方向提出了设计方法, 并介绍了三个相应的应用实例. 读者可以从文中所提及的相应文献中找到更深层次的讨论. 通过本综述, 我们希望读者能从演算子理论的发展现状中发现新的问题, 并提出一些新的见解. 此外, 基于作者的理解, 本文最后给出该领域将来的几个重要研究方向:

1) 扩展文献 [25] 的设计方式, 研究非线性控制器的工程实现问题;

2) 深宇宙问题, 也就是说太阳系外发电系统的控制问题;

3) 无伤害微软执行机构的非线性补偿问题.

References

1 Zhang W H, Zhang H S, Chen B S. Generalized Lyapunov equation approach to state-dependent stochastic stabilization/detectability criterion. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2008, **53**(7): 1630−1642

2 Wang Y G, Chai T Y, Fu J, Sun J. Adaptive decoupling control of the forced-circulation evaporation system using neural networks and multiple models. In: Proceedings of the 2011 American Control Conference. San Francisco, USA: IEEE, 2011. 5061−5066

3 de Figueiredo R J P, Chen G R. *Nonlinear Feedback Control Systems: An Operator Theory Approach*. New York: Academic Press, 1993

4 Chen G R, Han Z Z. Robust right coprime factorization and robust stabilization of nonlinear feedback control systems. *IEEE Transaction on Automatic Control*, 1998, **43**(10): 1505−1510

5 Anderson B D O, James M R, Limebeer D J N. Robust stabilization of nonlinear systems via normalized coprime factor representations. *Automatica*, 1998, **34**(12): 1593−1599

6 Deng M C, Inoue A, Ishikawa K. Operator-based nonlinear feedback control design using robust right coprime factorization. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2006, **51**(4): 645−648

7 Bu N, Deng M C. System design for nonlinear plants using operator-based robust right coprime factorization and isomorphism. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2011, **56**(4): 952−957

8 Deng M C, Bu N. Robust control for nonlinear systems using passivity-based robust right coprime factorization. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2012, **57**(10): 2599−2604

9 Deng M C, Inoue A, Ishikawa K, Hirashima Y. Tracking of perturbed nonlinear plants using robust right coprime factorization approach. In: Proceedings of the 2004 American Control Conference. Boston, MA: IEEE, 2004. 3666−3670

10 Deng Ming-Cong, Inoue Akira, Edahiro Kazunori. Fault detection system design for actuator of a thermal process using operator based approach. *Acta Automatica Sinica*, 2010, **36**(4): 580−585
(邓明聪, 井上昭, 枝广和宪. 基于演算子的热过程执行机构故障诊断系统设计. 自动化学报, 2010, **36**(4): 580−585)

11 Wen S J, Deng M C. Operator-based robust nonlinear control and fault detection for a Peltier actuated thermal process. *Mathematical and Computer Modelling*, 2013, **57**(1−2): 16−29

12 Deng M, Bi S, Inoue A. Robust non-linear control and tracking design for multi-input multi-output non-linear perturbed plants. *IET Control Theory and Applications*, 2009, **3**(9): 1237−1248

13 Deng M, Bi S, Wen S. Operator-based output tracking control for non-linear uncertain systems with unknown time-varying delays. *IET Control Theory and Applications*, 2011, **5**(5): 693−699

14 Deng M C, Inoue A. Networked non-linear control for an aluminum plate thermal process with time-delays. *International Journal of Systems Science*, 2008, **39**(11): 1075−1080

15 Deng M, Inoue A, Edahiro K. Fault detection in a thermal process control system with input constraints using a robust right coprime factorization approach. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2007, **221**(6): 819−831

16 Deng M C, Jiang C G, Inoue A. Operator-based robust control for nonlinear plants with uncertain non-symmetric Backlash. *Asian Journal of Control*, 2011, **13**(2): 317−327

17 Bi S H, Deng M C, Inoue A. Operator based robust stability and tracking performance of MIMO nonlinear systems. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 2009, **5**(10): 3351−3358

18 Deng M C, Bi S H. Operator-based robust nonlinear control system design for MIMO nonlinear plants with unknown coupling effects. *International Journal of Control*, 2010, **83**(9): 1939−1946

19 Deng M, Jiang C, Inoue A, Su C Y. Operator-based robust control for nonlinear systems with Prandtl-Ishlinskii hysteresis. *International Journal of Systems Science*, 2011, **42**(4): 643−652

20 Bi S H, Deng M C. Operator based robust control design for nonlinear plants with perturbation. *International Journal of Control*, 2011, **84**(4): 815−821

21 Deng M, Wang A. Robust non-linear control design to an ionic polymer metal composite with hysteresis using operator-based approach. *IET Control Theory and Applications*, 2012, **6**(17): 2667−2675

22 Bu N, Deng M. Isomorphism-based robust right coprime factorization of non-linear unstable plants with perturbations. *IET Control Theory and Applications*, 2010, **4**(11): 2381−2390

23 Deng M C, Bu N. Robust control for nonlinear systems with unknown perturbations using simplified robust right coprime factorisation. *International Journal of Control*, 2012, **85**(7): 842−850

24 Bi S H, Deng M C. Operator based robust control of MIMO aluminum plate thermal process. *International Journal of Computer Applications in Technology*, 2012, **44**(4): 249−256

25 Wen S J, Deng M C, Bi S H, Wang D Y. Operator-based robust nonlinear control and its realization for a multi-tank process by using a distributed control system. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2012, **34**(7): 891−902

温盛军 中原工学院电子信息学院副教授. 主要研究方向为非线性系统辨识, 非线性控制. E-mail: wsj@zut.edu.cn
(**WEN Sheng-Jun** Associate professor in the Department of Electronic and Information Engineering, Zhongyuan University of Technology, China. His research interest covers nonlinear systems identification and nonlinear control.)

毕淑慧 山东省科学院自动化研究所副研究员. 主要研究方向为非线性系统控制. E-mail: bishuhui0317@163.com
(**BI Shu-Hui** Associate professor at the Institute of Automation, Shandong Academy of Science, China. Her main research interest is nonlinear systems control.)

邓明聪 日本国立东京农工大学教授. 主要研究方向为非线性科学. 本文通信作者. E-mail: deng@cc.tuat.ac.jp
(**DENG Ming-Cong** Professor in the Department of Electrical and Electronic Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology, Japan. His main research interest is nonlinear science. Corresponding author of this paper.)