第21卷 第12期 控 制 与 决 策 2006年12月
Vol 21 No. 12 Control and Decision Dec 2006

文章编号: 1001-0920(2006)12-1321-05

行为系统理论的现状与展望

谢世杰[1], 徐泳奉[2], 段广仁[1]
(1. 哈尔滨工业大学 控制理论与制导技术研究中心, 哈尔滨 150001;
2. 釜山国立大学 机械工程学院, 韩国 釜山 609-735)

摘 要: 行为方法是研究动态系统的一种重要手段, 在处理系统建模和控制设计中都有广泛而灵活的应用. 为此, 简述了20多年来行为方法理论和应用的发展历史, 介绍了近年来利用行为方法处理耗散系统分析与设计问题的最新研究成果, 并对行为理论的一些难点问题作了简要评述.

关键词: 行为; 动态系统; 建模; 耗散系统
中图分类号: TP271 **文献标识码**: A

Developments and Prospect of Behavior System Theory

XIE Shi-jie[1], *SEO Young-bong*[2], *DUAN Guang-ren*[1]
(1. Center of Control Theory and Guidance Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea. Correspondent: XIE Shi-jie, E-mail: xieshijie0031@sina.com)

Abstract: Behavioral approach as an important method in the study of dynamical system has extensive applications in system modeling and control design. The developments of the theory and applications of behavioral approach in the last twenty years are reviewed. New research results on analysis and design of dissipative systems by behavioral approach are stated briefly with some remarks on the some difficult problems of behavioral theory.

Key words: Behavior; Dynamical systems; Modeling; Dissipative systems

1 引 言

行为方法是由荷兰学者Willems[1]提出的, 其开创性研究工作有文献[2~4]. 行为方法认为控制纯粹是对系统变量施加的一个新的限制法则. 控制问题相当于寻求一个控制器, 当它以某种规定的方式与系统(对象)互联时, 产生期望的行为[5~7].

20多年来, 行为方法作为动态系统建模的一种手段, 越来越广泛地被接受, 以至于现在它被认为是系统分析和设计的一个令人信服的框架. 基于这种方法, 经典系统理论的许多重要问题已被“翻译”和解决, 并得到了奇妙的结果[8~13].

本文的目的是基于行为方法理论和应用的发展历史, 系统地总结行为理论的骨架内容, 阐述近年来行为方法在控制、镇定、耗散系统设计等前沿领域的研究进展, 并对行为理论的未来发展趋势作出展望.

2 行为方法的数学描述[14~16]

一个子集$\mathcal{B} \subset C^{\infty}(\mathbb{R}, \mathbb{R}^{\bullet})$定义了一个线性时不变微分系统(简称微分系统或微分行为), 是指存在一个多项式矩阵$R \in \mathbb{R}^{\bullet \times \bullet}[\xi]$, 使得

$$\mathcal{B} = \{w \in C^{\infty}(\mathbb{R}, \mathbb{R}^{\bullet}) \mid R(\mathrm{d}/\mathrm{d}t)w = 0\}.$$

通常, 人们借助于$\mathcal{L}^{\bullet}$表示线性时不变微分系统的集合, 借助于$\mathcal{L}^{w}$表示那些具有w个变量($\mathcal{B} \subset C^{\infty}(\mathbb{R}, \mathbb{R}^{w})$)的线性时不变微分系统的集合. 当$\mathcal{B} \in \mathcal{L}^{w}$由

$$R(\mathrm{d}/\mathrm{d}t)w = 0 \tag{1}$$

描述时, 则称定义了$\mathcal{B}$为微分算子的核. 另一种描述方式是借助于多项式矩阵R和M的潜在变量描述

$$R(\mathrm{d}/\mathrm{d}t)w = M(\mathrm{d}/\mathrm{d}t)l, \tag{2}$$

这样得到的行为表示为

收稿日期: 2005-08-04; **修回日期**: 2005-11-30.
基金项目: 国家杰出青年基金项目(69925308); 韩国学术振兴财团资助项目(KRF-2005-214-D00271).
作者简介: 谢世杰(1966—), 男, 湖南常德人, 博士后, 从事行为方法、鲁棒控制的研究; 段广仁(1962—), 男, 黑龙江桦川人, 教授, 博士生导师, 从事广义系统、鲁棒控制等研究.

$$B = \{w \in C^{\infty}(R, R^{w}) \mid \exists\, l \in C^{\infty}(R, R^{l}),$$
$$\text{s. t. } R(\mathrm{d}/\mathrm{d}t)w = M(\mathrm{d}/\mathrm{d}t)\, l\}.$$

基于基本原则建模得到的模型大都具有这种形式. 其中w 是模型致力于刻画其行为的变量, l是建模过程引进的辅助变量. 此时, 行为B 称为明显行为, 行为

$$B_{\text{full}} = \{(w, l) \in C^{\infty}(R, R^{w+l}) \mid R(\mathrm{d}/\mathrm{d}t)w = M(\mathrm{d}/\mathrm{d}t)\, l\}$$

称为完全行为.

Rapisarda[17] 将上述潜在变量视为状态变量, 讨论了状态模型的构造: 具有式(2) 的潜在变量描述是一个状态模型(此时潜在变量用 x 表示), 是指存在矩阵 E, F 和G, 使得

$$Gw + Fx + E\mathrm{d}x/\mathrm{d}t = 0, \tag{3}$$

在状态意义下等价于式(2). 式(3) 称为行为B 的状态描述, 是指

$$B = \{w \in C^{\infty}(R, R^{w}) \mid \exists\, x \in C^{\infty}(R, R^{n}),$$
$$\text{s. t. (3) is satisfied}\},$$

其中n 表示向量x 的维数. 式(3) 的一个重要特征是它是一个隐含微分方程, 其中 x 导数的阶数至多为 l, w 导数的阶数为 0.

在对系统进行分析和综合时, 一个重要的特性就是可控性, 可控性是指从一个运动模态转移到另一个运动模态的能力. 将一个运动模态视为不期望的模态, 另一个视为期望的运动模态. 原则上, 如果系统具有可控性, 则人们总能驾驭系统到达期望的轨迹, 故认为可控性是一种值得期望的特性.

可控性的概念最早由 Kalman 引入状态空间系统. 那时, 衡量系统可控与否在很大程度上依赖于系统的描述. 如标量传递函数描述系统, 如果分子和分母有非常数的公因子, 则按可观标准性实现时系统是不可控的. 但Willems[14] 认为系统可控与否是系统本身的一种固有特性.

设 $\Sigma = (T, W, B)$ 是一个动态系统, $T = R$ 或 Z, 假设它是时不变的, 则 Σ 是可控的是指对于所有的$w_1, w_2 \in B$, 存在一个$\Delta \in T$ ($\Delta \geq 0$) 和一个$w \in B$, 使得

$$w(t) = \begin{cases} w_1(t), & t < 0; \\ w_2(t - \Delta), & t \geq \Delta \end{cases} \tag{4}$$

换言之, 可控性是指系统在其允许一个时间延迟 Δ 的情况下, 行为能从一个轨迹切换到另一个轨迹.

Willems[15] 强调了可控系统允许有这样一种描述: 如果其潜在变量描述的系统的明显行为为如下形式:

$$w = M(\mathrm{d}/\mathrm{d}t)\, l, \tag{5}$$

则称上式为具有明显行为

$$B = \{w \mid \exists\, l, \text{s. t. } w = M(\mathrm{d}/\mathrm{d}t)\, l\} \tag{6}$$

的系统的像描述. 从消除定理[16] 可以推得, 每个以像描述所描述的系统是可控的.

在经典系统理论中, 可控性与可观测性是相伴的. 从行为的角度说, 这一概念可以更一般化. 令 $\Sigma = (T, W, B)$ 是动态系统, 假设W 是一个积空间: $W = W_1 \times W_2$, 则$w_1 (\in W_1)$ 是从$w_2 (\in W_2)$ 可观测的, 是指$(w_1, w_2') \in B$, $(w_1, w_2'') \in B$ 蕴含着$w_2' = w_2''$. 于是, 可观测性是指从w_2 的观测和系统的法则推导出w_1 的可能性. Willems[14] 得到下列结论: 设$R_1[\xi] \in R^{g \times q_1}[\xi]$, $R_2[\xi] \in R^{g \times q_2}[\xi]$, B 是由等式 $R_1(\mathrm{d}/\mathrm{d}t)w_1 = R_2(\mathrm{d}/\mathrm{d}t)w_2$ 定义的行为, 则变量w_2 是(从w_1) 可观测的, 当且仅当对于所有的 λ, $\operatorname{rank} R_2(\lambda) = q_2$.

3 控制与互联[6, 16, 18]

与传统上把控制器看成信号处理器不同, Willems 等[18] 把控制器看作与对象互联的系统. 在互联发生前, 对象变量的轨迹仅仅要求属于对象的行为; 当控制器连接后, 对象变量要求同时遵循对象和控制器的法则. 人们可以根据这种方式设计控制器, 使得能从对象行为的所有轨迹中保留期望的行为, 抑制不期望发生的行为.

设$\Sigma_1 = (T, W, B_1)$ 和$\Sigma_2 = (T, W, B_2)$ 是两个具有相同时间轴和相同信号空间的动态系统. Σ_1 和 Σ_2 的互联 $\Sigma_1 \wedge \Sigma_2$ 定义为

$$\Sigma_1 \wedge \Sigma_2 = (T, W, B_1 \cap B_2), \tag{7}$$

即互联系统 $\Sigma_1 \wedge \Sigma_2$ 的行为由同时相容于 Σ_1(即$w \in B_1$) 和Σ_2(即$w \in B_2$) 法则的行为构成. 假定对象即动态系统$\Sigma_P = (T, W, B_P)$ 给定, 设C 是一个动态系统族, 该系统族中所有系统具有相同的时间轴 T 和相同的信号空间W, 则称C 是容许控制器的集合. 元素 $\Sigma_C \in \mathrm{C}$, $\Sigma_C = (T, W, B_C)$ 称为容许控制器, 互联后的系统$\Sigma_P \wedge \Sigma_C$ 称为受控系统. 控制器Σ_C 的选择应使 $\Sigma_P \wedge \Sigma_C$ 满足一定的设计规范. 则控制问题可描述如下: 1) 描述容许控制器的集合; 2) 描述受控系统应具有的(期望) 特性; 3) 寻求容许控制器 Σ_C, 使得 $\Sigma_P \wedge \Sigma_C$ 具有期望的特性.

假设$R(\xi) \in R^{g \times q}[\xi]$, 对象描述为

$$R(\mathrm{d}/\mathrm{d}t)w = 0, \tag{8}$$

它实际上诱导动态系统 $\Sigma_R = (R, R^{q}, B_R)$, 其中$B_R$ 是式(8) 的弱解集[16]. 假设容许控制器类由线性时不变微分系统构成, 则容许控制器可由多项式矩阵 $C(\xi) \in R^{g' \times q}[\xi]$ 描述为

$$C(\mathrm{d}/\mathrm{d}t)w = 0. \tag{9}$$

设 $\Sigma_C = (R, R^{q}, B_C)$ 是式(9) 诱导的一个动态系统,

则 Σ_C 是一个控制器. 受控系统定义为

$$\Sigma_R \wedge \Sigma_C = (R, R^q, B_R \cap B_C). \tag{10}$$

显然, 本质上它可由式(8) 和(9) 联合定义, 即

$$\begin{bmatrix} R(\mathrm{d}/\mathrm{d}t) \\ C(\mathrm{d}/\mathrm{d}t) \end{bmatrix} w = 0. \tag{11}$$

上述控制问题可具体描述为: 给定 $R(\xi)$, 寻求一个 $C(\xi)$, 使得受控系统(11) 具有期望的特性.

4　耗散系统的综合[7, 9, 10]

上节论述的方案常常用于系统的镇定等情形[12, 18～20]. 除此之外, Willems 等[7, 9, 10] 利用与系统行为紧密相关的二次微分形式, 得到了使系统一些重要性质得以改良的结果, 即使受控系统行为是耗散的. 这一问题基本上可以称为 H_∞ 问题.

Willems[9] 讨论了控制器实现问题: 对于一个系统, 通过设计控制器能实现什么行为?即预先规定的行为, 是否总能通过系统与一个设计好的子系统互联来实现. 这样便回答了控制理论中的一个基本问题: 控制究竟能做什么[14]?

在控制器发生作用之前, 存在两种与对象有关的行为: 完全行为 $P_{\mathrm{full}} \in L^{V+C}$ 和对象行为 P. 它们分别表示如下:

$$P_{\mathrm{full}} = \{(v, c) \in C^\infty(R, R^{V+C}) \mid (v, c) \text{ satisfies the plant equations}\}, \tag{12}$$

$$P = \{v \in C^\infty(R, R^V) \mid \exists\, c \in C^\infty(R, R^C) \text{ such that } (v, c) \in P_{\mathrm{full}}\}. \tag{13}$$

借助于消除定理, $P \in L^V$. 控制器对控制变量 c 的限制表现为一个控制器行为

$$C = \{c \in C^\infty(R, R^C) \mid c \text{ satisfies the controller equations}\}. \tag{14}$$

当控制器与对象连接后, 得到受控行为

$$K = \{v \in C^\infty(R, R^V) \mid \exists\, c \in C \text{ such that } (v, c) \in P_{\mathrm{full}}\}. \tag{15}$$

借助于消除定理, $K \in L^V$. 如果上述 C 和 K 关系成立, 则称 C 实现了 K.

此外, 还定义了控制变量等于零时对象轨迹构成的行为

$$N = \{v \in P \mid (v, 0) \in P_{\mathrm{full}}\}, \tag{16}$$

其中 N 称为隐藏行为.

于是前面提及的问题则变为: 对什么样的 $K \in L^V$, 存在一个 $C \in L^C$ 使之能得以实现? Willems[9] 得出了下列结论:

定理 1 (控制器实现定理)　设 $P_{\mathrm{full}} \in L^{V+C}$ 是完全对象行为, $P \in L^V$ 是明显对象行为, 则 $K \in L^V$ 可通过作用在控制变量上的控制器来实现, 其充分必要条件是

$$N \subset K \subset P. \tag{17}$$

根据上述结论, 控制问题转化为寻求一个可嵌入隐藏行为 N 和明显对象行为 P 之间的行为问题, 即控制器的设计相当于子行为的设计.

基于此, Willems 等[9, 15] 采用行为语言及其相关的二次微分形式运筹理论, 得到了设计一个受控行为并使其为耗散的充分必要条件.

在 $R^\bullet$ ($\bullet$ 表示维数是任意的) 上由矩阵 $S = S^{\mathrm{T}} \in R^{\bullet \times \bullet}$ 诱导的二次型表示为: $q_S(x) = |x|_S^2 = x^{\mathrm{T}} S x$, S 的符号差表示为

$$\mathrm{sign}(S) = (\sigma_-(S), \sigma_+(S)). \tag{18}$$

其中 $\sigma_-(S)$ 和 $\sigma_+(S)$ 分别表示 S 的负特征值和正特征值的数目.

设 $\Phi \in R^{w_1 \times w_2}[\zeta, \eta] = \sum_{k, l \in Z_+} \Phi_{k,l} \zeta^k \eta^l$, 它诱导映射 $L_\Phi: C^\infty(R, R^{w_1}) \times C^\infty(R, R^{w_2}) \to C^\infty(R, R)$, 定义为

$$L_\Phi(w_1, w_2) = \sum_{k, l \in Z_+} \left(\frac{\mathrm{d}^k}{\mathrm{d}t^k} w_1\right)^{\mathrm{T}} \Phi_{kl} \left(\frac{\mathrm{d}^l}{\mathrm{d}t^l} w_2\right). \tag{19}$$

这个映射称为 Φ 诱导的双线性微分形式. 当 $w_1 = w_2 = w$ 时, L_Φ 变成 $Q_\Phi: C^\infty(R, R^W) \to C^\infty(R, R)$, 定义为

$$Q_\Phi(w) = \sum_{k, l \in Z_+} \left(\frac{\mathrm{d}^k}{\mathrm{d}t^k} w\right)^{\mathrm{T}} \Phi_{kl} \left(\frac{\mathrm{d}^l}{\mathrm{d}t^l} w\right). \tag{20}$$

这个映射称为 Φ 诱导的二次微分形式(QDF). 若以 $\Phi^*(\zeta, \eta)$ 表示 $\Phi^{\mathrm{T}}(\eta, \zeta)$, 则当 $\Phi = \Phi^*$, 即对于所有的 $k, l \in Z_+$, $\Phi_{kl} = \Phi_{lk}^{\mathrm{T}}$ 成立时, Φ 是对称的. 此时, $Q_\Phi = Q_{\Phi^*} = Q_{\frac{1}{2}(\Phi + \Phi^*)}$.

令 $\Phi = \Phi^*$, $B \in L_{\mathrm{cont}}^w$ (可控), 系统 B 关于 Q_Φ 是耗散的(简称 Φ- 耗散的), 是指 $\int_{-\infty}^{\infty} Q_\Phi(w)\,\mathrm{d}t \geq 0$ 对于所有的 $w \in B \cap D$ 成立(D 表示具有紧支持的 C^∞ 函数); 系统 B 在 R_- 上关于 Q_Φ 是耗散的(简称在 R_- 上 Φ- 耗散的), 是指 $\int_{-\infty}^{0} Q_\Phi(w)\,\mathrm{d}t \geq 0$ 对于所有的 $w \in B \cap D$ 成立. 系统 B 在 R_- 上的耗散性包含了在整个 R 上的耗散性和稳定性[15].

可认为 $Q_\Phi(w)(t)$ 是在时间 t 时刻输送到系统的功率, 即能量率; $\int_{-\infty}^{\infty} Q_\Phi(w)\,\mathrm{d}t$ 表示输送到系统的总能量. 耗散性表明, 系统 B 从静止开始沿着轨迹 w 回到静止状态的整个过程中, 系统吸收能量. 以下仅仅考虑可控系统耗散性的情形. 设 $B \in L^\bullet$, $m(B)$ 表示 B 的输入基数, 即自由变量的数目或 B 中的输入数. 当 $\Sigma = \Sigma^{\mathrm{T}} \in R^{V \times V}$ 时, QDF Q_Σ 定义了描述控制性能的加权泛函, 符号差表示为: $\mathrm{sign}(\Sigma) = (\sigma_-(\Sigma), \sigma_+(\Sigma))$. 于是所要解决的问题可以描述为:

设 $N, P \in L^{V}_{\mathrm{cont}}, \Sigma = \Sigma^{\mathrm{T}} \in R^{V \times V}$ 非奇异; P 称为对象行为, N 称为隐藏行为, Q_{Σ} 是加权泛函. 需要求解的问题等价于寻求 $K \in L^{V}_{\mathrm{cont}}$, 使得:

1) $N \subset K \subset P$ (可实现性);

2) K 在 R_{-} 上是 Σ-耗散的(耗散性);

3) $m(K) = \sigma_{+}(\Sigma)$ (活跃度).

其中要求 2) 的受控行为 K 必须为 Σ-耗散的是基本的设计目标. Σ 蕴含着干扰衰减或无源性, 在 R_{-} 上的 Σ-耗散性蕴含着受控行为的稳定性. 活跃度要求 V 的 $\sigma_{+}(\Sigma)$ 个分量在受控行为中必须是自由的, 即受控系统必须能接受外部输入. 受控行为并不直接限制外部输入, 它仅用来改良外部输入对内部输出造成的影响. 易证活跃度条件等价于在受控系统行为中要求有尽可能多的自由向量. 于是问题可重新表述为: 何时存在一个受控行为, 使它在 R_{-} 上是 Σ-耗散的且具有最大的输入基数.

为了给出上述问题的解, 还需要两个更精细的概念: 存储函数和行为的正交性. 系统的存储函数与状态一样, 都是对系统记忆的刻画. 关于存储函数的讨论最早见文献[21], 因为它在耗散系统分析与设计过程中一直起着重要作用, 故 Trentelman[21, 22] 进行了更为深入的讨论.

令 $B \in L^{W}, \Phi = \Phi^{*}, \Psi = \Psi^{*} \in R^{W \times W}[\zeta, \eta]$, 则 Q_{Ψ} 是 B 关于供给率 Q_{Φ} 的存储函数是指耗散不等式

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} Q_{\Psi}(w) \leq Q_{\Phi}(w) \tag{21}$$

对于所有的 $w \in B$ 成立. 即当 $B \in L^{W}_{\mathrm{cont}}$ 且 $\Phi = \Phi^{*}$ 时, B 是 Φ-耗散的, 当且仅当存在一个 $\Psi = \Psi^{*}$, 使得 Q_{Ψ} 是 B 关于供给率 Q_{Φ} 的存储函数.

设 $\Phi \in R^{W \times W}, B_1, B_2 \in L^{W}_{\mathrm{cont}}$, 则 B_1 和 B_2 是关于 L_{Φ} 正交的(简称 Φ-正交), 是指 $\int_{-\infty}^{\infty} L_{\Phi}(w_1, w_2)\mathrm{d}t = 0$ 对于所有的 $w_1 \in B_1 \cap D, w_2 \in B_2 \cap D$ 都成立, 表示为 $B_1 \perp_{\Phi} B_2$. 设 $B \in L^{W}_{\mathrm{cont}}$, 定义 B 的 Φ-正交补

$$B^{\perp_{\Phi}} = \{w \in C^{\infty}(R, R^{W}) \mid \int_{-\infty}^{\infty} L_{\Phi}(w, w')\mathrm{d}t = 0 \ \text{for all } w' \in B \cap D\}.$$

易证[15] $B^{\perp_{\Phi}} \in L^{W}_{\mathrm{cont}}$.

进一步设 $\Phi \in R^{W \times W}, B_1, B_2 \in L^{W}_{\mathrm{cont}}$, 则存在一个 $\Psi \in R^{W \times W}[\zeta, \eta]$, 使得 $\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} L_{\Psi}(w_1, w_2) = L_{\Phi}(w_1, w_2)$ 对于所有的 $w_1 \in B_1, w_2 \in B_2$ 都成立, 当且仅当 $B_1 \perp_{\Phi} B_2$. 此外, Ψ 本质上是唯一的, 即当 $\Psi_1, \Psi_2 \in R^{W \times W}[\zeta, \eta]$ 满足上述等式时, 对于所有的 $w_1 \in B_1, w_2 \in B_2, L_{\Psi_1}(w_1, w_2) = L_{\Psi_2}(w_1, w_2)$ 成立. 此时称 L_{Ψ}(或简单地称 Ψ) 为 $[(B_1, B_2); \Phi]$-适应的.

基于上述准备工作, 问题的解可以表述如下: 问题描述中受控行为 $K \in L^{W}_{\mathrm{cont}}$ 存在的充分必要条件是满足下列条件:

1) N 是 Σ-耗散的.

2) $P^{\perp_{\Sigma}}$ 是 $(-\Sigma)$-耗散的.

3) 存在 $\Psi_N, \Psi_{P^{\perp_{\Sigma}}}, \Psi_{(N, P^{\perp_{\Sigma}})} \in R^{V \times V}[\zeta, \eta]$, 分别定义为:

① N (作为 Σ-耗散系统) 的存储函数 Q_{Ψ_N}, 即对于所有的 $v_1 \in N$, 有

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} Q_{\Psi_N}(v_1) \leq Q_{\Sigma}(v_1);$$

② $P^{\perp_{\Sigma}}$(作为 $(-\Sigma)$-耗散系统) 的存储函数 $Q_{\Psi_{P^{\perp_{\Sigma}}}}$, 即对于所有的 $v_2 \in P^{\perp_{\Sigma}}$, 有

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} Q_{\Psi_{P^{\perp_{\Sigma}}}}(v_2) \leq -Q_{\Sigma}(v_2);$$

③ $[(N, P^{\perp_{\Sigma}}); \Sigma]$-适应 BDF $L_{\Psi_{(N, P^{\perp_{\Sigma}})}}$, 即对于所有的 $v_1 \in N, v_2 \in P^{\perp_{\Sigma}}$, 满足

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} L_{\Psi_{(N, P^{\perp_{\Sigma}})}}(v_1, v_2) = L_{\Sigma}(v_1, v_2).$$

使得 QDF

$$Q_{\Psi_N}(v_1) - Q_{\Psi_{P^{\perp_{\Sigma}}}}(v_2) + 2L_{\Psi_{(N, P^{\perp_{\Sigma}})}}(v_1, v_2) \tag{22}$$

对于所有的 $v_1 \in N, v_2 \in P^{\perp_{\Sigma}}$ 都是非负的. 不难发现, 问题和解的描述是自由和解析的.

通过假设 N 和 $P^{\perp_{\Sigma}}$ 的耗散性, 以上各种存储函数都是适定的. 既然 $N \subset P$, 则 $L_{\Psi_{(N, P^{\perp_{\Sigma}})}}$ 也是适定的. 这里要求式(22) 非负, 习惯上称这一条件为耦合条件. 它尤其蕴含着 Q_{Ψ_N} 在 N 上是非负的, 即表明 N 在 R_{-} 上是 Σ-耗散的. 显然, 因为 $N \subset K$, 故可认为是满足要求的 K 存在的必要条件. 它同时蕴含着 $Q_{\Psi_{P^{\perp_{\Sigma}}}}$ 在 $P^{\perp_{\Sigma}}$ 上是非负的, 相当于 $P^{\perp_{\Sigma}}$ 在 R_{+} 上是 $(-\Sigma)$-耗散的.

不难证明, 它也是 K 存在的必要条件[15]. Q_{Ψ_N} 和 $Q_{\Psi_{P^{\perp_{\Sigma}}}}$ 通过 $L_{\Psi_{(N, P^{\perp_{\Sigma}})}}$ 的耦合以及 N 和 $P^{\perp_{\Sigma}}$ 耗散性的耦合, 前者加强了对 Q_{Ψ_N} 和 $-Q_{\Psi_{P^{\perp_{\Sigma}}}}$ 非负性要求, 后者与 DGKF 关于代数黎卡提方程的耦合解[24] 相似.

正如 Willems[9] 所言, 上述结论只是一个存在性结果. 存储函数本质上是非唯一的, 故它并未给出什么样的存储函数才是满足耦合条件(22) 的函数. Trentelman[10] 讨论了上述解所适用的几种重要特殊情形: 干扰衰减, 无源性设计, 完全信息情形, 滤波问题. 尤其是针对以状态空间方程给出的被控对象, 获得了通过两个耦合代数黎卡提方程的解所表达的使系统耗散控制器存在的充分必要条件, 并证明这种控制器是一种反馈系统, 其传递函数一般情况下不是严格正则的.

5　未来的研究方向

行为方法虽然在理论和应用方面都取得了很大的进展, 但就目前的研究状况看仍处在发展和完善阶段, 还有不少问题亟待解决, 这也是今后的研究目标和方向

1) 在耗散性的研究中, 总是假定系统是可控的, 其主要原因是因为至今还没有令人满意的不可控系统耗散性的定义 如何将已有的结果推广到不可控系统, 是一个很有价值的研究课题

2) 算法问题: 虽然根据完全对象行为给出了可实现的耗散性受控行为存在的充分必要条件, 但在实际应用中, 对象行为常常采用参数形式来刻画(如根据多项式矩阵或有理函数矩阵). 如何根据这些参数化形式构造存储函数并检验其存在性, 或更直接地构造控制器而不借助受控行为, 无疑是一个值得进一步研究的问题

3) 非线性: 基于目前非线性系统设计的复杂性, 如何将行为可实现性的结果和耗散系统综合的有关结论推广到非线性系统, 显然是一个倍受关注的研究方向

6　结　　语

行为方法理论历经 20 多年的发展, 已成为现代控制理论的一个重要分支 行为方法与基于物理学基本原则的建模具有极大的关联, 因此掌握这一理论对于每个控制理论工作者都具有重要的意义 可以期待, 行为方法的研究将会受到国内控制理论工作者的广泛关注

参考文献(References)

[1] Willems J C. System Theoretic Models for the Analysis of Physical Systems[J]. *Ricerche di Automatica*, 1979, 10(2): 71-106.

[2] Willems J C. From Time Series to Linear System — Part 1: Finite Dimensional Linear Time Invariant System[J]. *Automatica*, 1986, 22(5): 561-580.

[3] Willems J C. From Time Series to Linear System — Part 2: Exact Modeling[J]. *Automatica*, 1986, 22(6): 675-694.

[4] Willems J C. From Time Series to Linear System — Part 3: Approximate Modeling[J]. *Automatica*, 1987, 23(1): 87-115.

[5] Andrea R D. H_∞ Optimal Interconnection[J]. *System Control Letter*, 1997, 32(3): 313-322.

[6] Trentelman H L, Willems J C. H_∞ Control in a Behavioral Contex: The Full Information Case[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1999, 44(3): 521-536.

[7] Trentelman H L, Willems J C. Dissipative Differential Systems and the State Space H_∞ Control Problem[J]. *Int J of Robust Nonlinear Control*, 2000, 10(8): 1039-1057.

[8] Kuijper M. Why Do Stabilizing Controllers Stabilize[J]. *Automatica*, 1995, 31(4): 621-625.

[9] Willems J C, Trentelman H L. Synthesis of Dissipative System Using Quadratic Differential Forms: Part 1[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2002, 47(1): 53-69.

[10] Trentelman H L, Willems J C. Synthesis of Dissipative System Using Quadratic Differential Forms: Part 2[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2002, 47(1): 70-85.

[11] Van der Schaft A J. Achievable Behavior of General System[J]. *System Control Letter*, 2003, 49(2): 141-149.

[12] Julius A A, Willems J C, Belur M N, et al. The Canonical Controller and Regular Interconnection[J]. *System Control Letter*, 2005, 54(6): 787-797.

[13] Rapisarda P, Trentelman H L. Linear Hamiltonian Behaviors and Bilinear Differential Forms[J]. *SIAM J of Control Optimization*, 2004, 43(1): 769-791.

[14] Willems J C. Paradigms and Puzzles in the Theory of Dynamical Systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1991, 36(3): 259-294.

[15] Willems J C, Trentelman H L. On Quadratic Differential Forms[J]. *SIAM J of Control Optimization*, 1998, 36(10): 1703-1749.

[16] Polderman J W Willems J C. *Introduction to Mathematical System Theory: A Behavioral Approach*[M]. New York: Springer-Verlag, 1998.

[17] Rapisarda P, Willems J C. State Maps for Linear System[J]. *SIAM J of Control Optimzation*, 1997, 35(8): 1053-1091.

[18] Willems J C. On Interconnections, Control and Feedback[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1997, 42(3): 326-339.

[19] Belur M N, Trentelman H L. Stabilization, Pole Placement and Regular Implementability[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2002, 47(5): 735-744.

[20] 谢世杰, 段广仁. 基于行为方法的同时镇定[J]. ***控制与决策***, 2006, 21(10): 1181-1184.
(Xie S J, Duan G R. Simultaneous Stabilization Based on Behavioral Approach[J]. *Control and Decision*, 2006, 21(10): 1181-1184.)

[21] Willems J C. Dissipative Dynamical Systems — Part 1: General Theory[J]. *Archive for Rational Mechanics and Analysis*, 1972, 45(4): 321-351.

(下转第 1331 页)

显提高, 说明本文提出的区间数回归模型具有较好的泛化性能

为了研究是否会出现区间数回归模型输出的下界大于上界的情况, 把本文方法与基于 RBF 网络方法的预测输出的上界减去下界, 其差值分别如图 3 和图 4 所示 从图中可以看出, 本文方法没有出现预测结果上界小于下界的现象, 而基于 RBF 网络方法却出现了, 说明本文方法能有效避免回归输出区间数的下界大于上界的现象

6　结　论

本文提出一种基于SVM 的精确数输入/区间数输出回归模型建模方法 该方法对区间数上下界回归模型共同建模, 克服了现有方法不能保证模型输出上界不小于下界的缺陷, 使回归模型具有良好的泛化性能, 并且容易从线性回归模型推广到非线性回归模型 文中研究了大规模样本下的模型求解算法, 以适应实际需要, 并通过仿真实例说明了本文方法的有效性

参考文献(References)

[1] Ferson S, Akcakaya H R, Dunham A. Using Fuzzy Intervals to Represent Measurement Error and Scientific Uncertainty in Endangered Species Classification [A]. *Fuzzy Information Processing Society* [C]. Nafips, 1999: 690-694.

[2] Lee Haekwan, Tanaka Hideo. Upper and Lower Approximation Models in Interval Regression Using Regression Quantile Techniques[J]. *European J of Operational Research*, 1999, 116(3): 652-666.

[3] Ishibuchi H, Tanaka H. Fuzzy Regression Analysis Using Neural Networks [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1992, 50(3): 57-65.

[4] Huang L, Zhang B L, Huang Q, et al. Robust Interval Regression Analysis Using Neural Networks[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1998, 97(2): 337-347.

[5] Jin-tsong Jeng, Chen-chia Chuang, Shun-feng Su. Support Vector Interval Regression Networks for Interval Regression Analysis[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2003, 138(2): 283-300.

[6] Moore R E. *Interval Analysis*[M]. New Jersey: Prentice Hall, 1966.

[7] Lai K K, Wang Y, Xu J P. A Class of Linear Interval Programming Problems and Its Application to Portfolio Selection[J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2002, 10(6): 698-703.

[8] Vapnik V N. *统计学习理论的本质*[M]. 张学工译. 北京: 清华大学出版社, 2001.
(Vapnik V N. *The Nature of Statistical Learning*[M]. Translated by Zhang X G. Beijing: Tsinghua University Press, 2001.)

[9] Vladimir C, Ma Y Q. Practical Selection of SVM Parameters and Noise Estimation for SVM Regression[J]. *Neural Networks*, 2004, 17(1): 113-126.

[10] Smola A J. *Learning with Kernels*[D]. Berlin: Technischen Universitsitat Berlin, 1998.

[11] 潘勋平, 杨杰. 连续退火技术机组辊冷技术及板温控制[J]. *宝钢技术*, 2001, 18(5): 39-44.
(Pan X P, Yang J. Roll Quench Technology and Strip Temperature Control in CAL [J]. *Baosteel Technology*, 2001, 18(5): 39-44.)

[12] 杨进. *带钢连续热镀锌退火技术及卧式连续退火炉数学模型研究*[D]. 北京: 北京科技大学, 2002.
(Yang J. *Study of Continuous Annealing Technology of Steel Strip and Mathematical Model of Horizontal Furnace*[D]. Beijing: Beijing University of Science and Technology, 2002.)

[13] Hao X F, Xu D. Time Series Prediction Based on Non-parametric Regression and Wavelet-fractal [A]. 2004 7*th Int Conf on Signal Processing Proc*[C]. Australia, 2004: 386-389.

(上接第 1325 页)

[22] Willems J C. Dissipative Dynamical Systems — Part 2: Linear System with Quadratic Supply Rates [J]. *Archive for Rational Mechanics and Analysis*, 1972, 45(4): 352-393.

[23] Trentelman H L, Willems J C. Every Storage Function is a State Function [J]. *System Control Letter*, 1997, 32(3): 249-259.

[24] Doyle J C, Glover K, Khargonekar P, et al. State Space Solution to Standard H_2 and H_∞ Control Problems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1989, 34(8): 831-847.