

集值系统的辨识与适应控制^{*}

赵延龙 张纪峰 郭金

(中国科学院数学与系统科学研究院系统控制重点实验室, 北京 100190)

摘要 研究集值系统的辨识与适应控制, 这是在随着网络化和信息化发展的过程中遇到的新兴热点问题. 集值系统有着广泛的实际应用背景, 但其研究才刚刚起步, 主要原因是其辨识和控制的可用信息非常少, 只是系统输出是否属于某个集合, 从而使得已有方法无法适用. 总结了近年来关于集值系统的研究工作: 在辨识方面, 从不同的系统结构、不同的噪声情况和不同的集值情形等方面进行了深入的研究. 针对性地提出了参数解耦、比例满秩输入设计、联合可辨识、经验分布函数、在线递推等有效的辨识和控制方法, 得到了一系列重要结果; 在适应控制方面, 实现了一类集值增益系统的适应跟踪控制. 所得成果从正面回答了集值系统研究的核心科学问题: 即使利用极为粗糙的集值信息, 仍然可以精确地估计和控制系统, 而且可以构造渐近最优的算法.

关键词 集值系统, 系统辨识, 适应控制, 最优算法.

MR(2000) 主题分类号 93E12

1 引言

集值系统是在网络化和信息化环境下涌现出来的一类新型系统, 现已被广泛应用到实际生产生活中. 这类系统的可用信息只是系统输出是否属于某个集合, 使得辨识或控制系统时的可用信息非常少, 理论研究的难度很高. 因此, 关于集值系统的研究才刚刚起步. 如何利用这种粗糙的集值信息做到对系统的精确辨识与控制是亟待解决的核心问题?

集值系统的可用数据不再是其精确值, 而只是它是否属于某个集合中, 比如, 在每一时刻可用的数据信息为温度是否高于 10°C , 我们称这类数据为集值数据. 集值数据随着工业化、网络化、信息化和生物技术的不断提高而诞生的, 且越来越广泛地存在于关系国计民生的生产和生活中. 综合来讲, 产生集值数据的原因主要有如下四个.

1) 生物体的固有特征或工程设备的局限

神经元是生物体的基本元素, 它由一个细胞体和突触两部分组成. 突触分轴突和树突. 轴突把本神经元的输出发送至其它相连接的神经元; 树突与其它神经元的轴突相连, 以接收

^{*} 国家自然科学基金 (61174042) 资助课题.

收稿日期: 2012-09-10.

来自其它神经元的生物信号. 轴突和树突共同作用, 实现了神经元间的信息传递. 神经元把所有接收到的信息加权求和得到一个总效应, 并与其内部的阈值电平相比较. 如果总效应大于该阈值电平, 那么神经元表现为兴奋状态, 反之则为抑制状态. 在外部看来, 可用数据只是神经元处于兴奋状态还是抑制状态, 其内部电位的具体值是不知道的. 可见, 神经元就是一个典型的集值系统.

另外, 在汽车工业和化工产业中也有大量的集值系统. 比如, 受生产成本和市场竞争力的影响, 用来测量尾气的元件——氧传感器只能比较出尾气中氧气的含量超标还是不超标, 产生的都是集值数据.

2) 数据传输、储存和保密的要求

在数据传输时, 数字信号比模拟信号抗干扰能力更强、更不易失真, 而且便于硬件实现. 另外, 计算机中的数据也是以数字信号的形式存储的. 因此在数据传输和存储之前首先要将模拟信号转化为数字信号. 量化是由模拟信号转化为数字信号的必要手段. 量化后的数据经过编码后, 得到的也只能是低精度的集值数据了.

智能传感器网络逐渐成为理论研究和应用领域的热点. 智能传感器网络中传感器数量巨大, 可能达到几百, 几千万, 甚至更多, 这些传感器在传输数据时共同使用一个信道来传输数据, 因此, 每一个传感器传输数据时所用的带宽非常小. 众所周知, 在数据传输过程中, 越小的集值步长会产生越大的数据量, 而数据传输会受到传输带宽的限制, 在一定带宽下, 过多的数据会造成信道的拥塞, 使数据传输产生很大的延时甚至失真. 在这种情况下, 即使每个传感器得到的数据很精确, 由于受传输带宽的影响, 在传输之前也不得不将信号进一步转换成精度非常低的集值数据.

3) 关注的对象是集值

绒孢菌决策实验: 食物和光照是影响绒孢菌的主要因素, 研究表明绒孢菌是厌光并且喜欢食物丰富的环境. 为了考察两者中哪一个对绒孢菌的影响更大, 设计了一个决策实验, 选取了两个区域, 一个是光照强但食物丰富的区域, 另一个是光照弱但食物缺乏的区域. 随后, 将绒孢菌均匀地分散到两个区域中, 经过一段特定时间之后, 考察两边绒孢菌的个数, 从而反映食物和光照对绒孢菌的影响强弱度.

从这个实验不难看出, 我们关心的是绒孢菌最终选择了哪个区域, 而不是它选择的快慢, 或者运行的轨迹, 也就是说我们关心的是一个集合信息. 其他诸如聚类分析等, 考察的也是对不同的集值信息, 采取不同的控制策略.

4) 追求精确数据存在弊端

精确数据对人们更好地了解系统和控制系统是很帮助的, 但是为了测量精确数据有可能会对系统造成破坏, 比如光合作用实验和量子系统.

为了精确地测量叶片在光合作用的内部数据, 现有技术是对叶片进行切片处理, 测量叶片内部的反应物和生成物的浓度. 不难看出, 这种实验对叶片是一种破坏且不可恢复, 为了测量每个时间的实验数据, 需要给很多叶片相同的培养环境, 在所需时间的节点对其中一部分做切片, 从而描绘出反应的变化过程. 然而, 考虑到叶片个体的差异, 这种做法的实验效果一直不理想, 且无法对同一叶片重复实验. 再如量子系统, 为了测量量子系统的精确状态, 需要对系统进行测量. 然而每次测量都会引起量子态的变化, 也就是遵循海森堡测不准

原理，因此是否测量，如何测量一直是研究关注的焦点。

这两个例子都是由于精确测量对系统造成了破坏，如果仅利用叶片毛孔的开关、叶片吸入氧气还是呼出二氧化碳、量子处于哪一类状态等集值数据就可以分析系统内部特征的话，那就会减小这一破坏。

总之，低精度的集值数据在实际应用中起到了越来越重要的作用，从研究的角度而言，以上诸多例子都可以归结为图 1 中的系统。

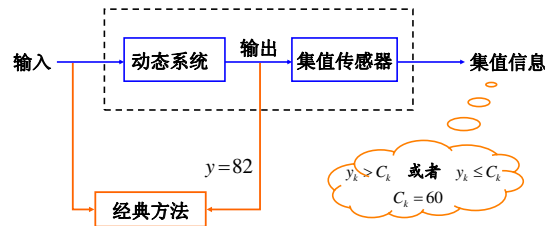


图 1 集值系统结构图

仅从结构上看，集值系统与经典系统最大的不同就是多了传感器这个模块，它可以是实际工业中的氧传感器、智能传感器，也可以是虚拟的集值器以及生物中的比较器。对于这种系统，我们在辨识和控制系统时只能用到低精度的集值信息。与传统系统不同，集值系统每次量测数据所含信息量少，量测到的信号与系统的输入、状态以及被控输出等是非一一映射的本质非线性关系，以往针对传统的线性系统、非线性系统等发展起来的辨识与控制方法，如最小二乘、极大似然估计等经典方法都不适用于集值系统。然而，在实际工程中，即使可用的数据不再满足经典方法的要求，依然套用经典方法，这样为了满足辨识和控制目标的需求，只能通过不断提高测量技术。这种做法不仅花费较大，而且往往无法做到精确的辨识与控制。

研究低精度的集值数据下的精确辨识和控制问题，必须从全新的角度出发。这就需要针对集值数据的特点，发展一套适用于这类系统的辨识、控制器设计和综合分析的方法。涉及的具体问题包括：如何选取输入才能达到比较理想的辨识和控制效果？系统的未建模动态和未知干扰对辨识精度、控制性能有何影响？与常规系统相比，信息的减少对辨识和控制算法的收敛速度有何影响？能否估计系统状态？能否在参数未知的情况下设计反馈控制律，其闭环性能如何？等等。

这些问题的解决具有理论和实际的双重重要意义。从理论角度来看，低精度数据下的系统辨识和控制研究可以建立一套与现代控制理论平行的系统建模、辨识和适应控制的完整理论体系，是控制论在新时代环境下的发展。同时，可以定量描述数据精度与系统辨识和控制的相互关系，从控制的角度研究数据精度，得到最优测量方法以提高数据的使用效率。从应用角度来看，集值信息能够极大减弱系统辨识和控制对数据精度的依赖，从而可以有效提高数字传输的效率、降低工业中测量元件的成本、为生物实验和量子系统等与集值信息相关的新兴技术提供新思路。

2 主要作品介绍

近年来,我们深入地研究了集值系统,在集值系统辨识方面得到了一系列重要的结果,与国内外同行逐步开启了一个新的研究方向,并受到了广泛的关注.集值系统的控制问题是理论界的难题,在国内外的研究中尚属空白,我们实现了一类集值增益系统的跟踪控制,迈出了集值系统控制的第一步.

2.1 集值系统的辨识方面

针对不同的系统噪声、不同的阈值信息,分别构造了几种典型系统的辨识算法,分析了算法的收敛性、时间复杂性以及最优性,得到了如下结果.

1) 基于二集值输出的线性系统辨识及输入设计方法^[1-4]

针对集值数据,我们提出了满秩输入设计方法和经验分布函数法,给出了输入信号充分丰富的条件,并且构造了强一致收敛的辨识算法.进而,研究了其它更复杂的情形,例如,系统不仅有输出噪声还有输入测量噪声以及输入激励噪声,二集值传感器的阈值未知,噪声的分布函数未知等.

考虑有限脉冲(FIR)系统

$$y(k) = \sum_{i=0}^{n-1} a_i u(k-i) + d(k), \quad k = 1, 2, \dots, \quad (1)$$

其中 $\{u(k)\}$ 是系统输入, $\{y(k)\}$ 是系统输出, $\{d(k)\}$ 是噪声,系统输出 $\{y(k)\}$ 被阈值为 C 的二集值传感器测量,其数学表达式为

$$s(k) = S(y(k)) = I_{\{y(k) \leq C\}} = \begin{cases} 1, & \text{如果 } y(k) \leq C, \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (2)$$

假设 1 噪声序列 $\{d(k)\}$ 是独立同分布(i.i.d)的随机变量序列. $d(1)$ 满足 $\sigma_d^2 = E|d_1|^2 < \infty$, 分布函数 $F(\cdot)$ 连续可导, 密度函数 $f(\cdot)$ 有界, 且分布函数的反函数 $F^{-1}(\cdot)$ 存在.

对以上最为基本带输出随机噪声的二集值输出的线性系统(图 2), 辨识的基本困难在于二集值的输出信息少, 我们提出了满秩输入设计和经验分布函数法, 给出了输入信号充分丰富的条件, 并且构造了强一致收敛的辨识算法.

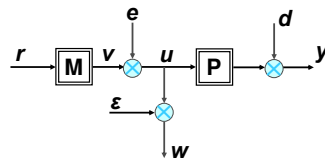


图 2 集值输出的线性系统

另外,对于系统不仅存在输出噪声 d , 而且存在输入噪声 e 和输入量测噪声 w 的情况下, 以及阈值 C 未知或噪声的分布函数 F 未知时, 均可以构造强一致收敛的辨识算法.

2) 二集值输出的 Wiener 系统辨识^[5]

对具二集值输出的典型非线性系统——Wiener 系统, 提出了比例满秩信号和联合可辨识性的方法, 克服了二集值输出信息少以及非线性给系统辨识带来的困难, 构造了辨识算法, 并分析了算法的最优性.

Wiener 系统的结构如图 所示, 它是由动态线性部分后面接静态的非线性部分组成的. 在实际中, Wiener 系统被广泛应用, 比如生物系统、信号处理、通信系统等.

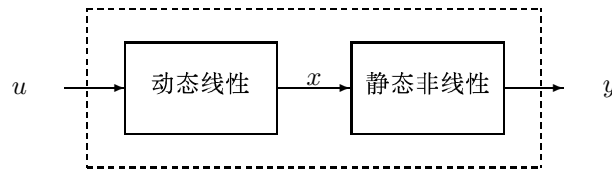


图 3 Wiener 系统

由于一般的集值可以看作是有限个二集值的组合, 所以二集值输出系统的研究对于集值系统的研究也是具有指导意义的. 当 Wiener 系统的输出被二集值传感器测量, 或者输出信息来自数字通信网络时, 就可以看作基于二集值输出或者量化输出的 Wiener 系统辨识. 因此基于二集值输出的 Wiener 系统辨识的研究不仅对非线性辨识, 而且对基于集值输出的系统辨识都有重要作用.

关于输出可精确测量的非线性系统辨识已经取得了一些重要的研究成果. 由于 Wiener 系统结构简单, 而且与线性系统联系密切, 因此关于 Wiener 系统的辨识一直被广泛关注. 总体上讲, 关于 Wiener 系统辨识的经典方法主要有: 迭代算法, 相关性分析方法, 最小二乘和奇异值分解方法, 随机递推算法等, 已有的这些方法都是建立在输出被精确测量的基础上的.

对二集值输出的 Wiener 系统辨识的研究与以往研究相比, 不仅有本质区别, 而且有其自身的难点. 难点主要有两个: 输出信息少和系统的非线性. 输出信息少使得经典辨识方法不再适用, 而非线性的存在使得二集值输出线性系统的已有工具也不再有效.

考虑图 中的 Wiener 系统

$$\begin{cases} x(k) = \sum_{i=0}^{n-1} a_i u(k-i), \\ y(k) = H(x(k), \eta) + d(k), \end{cases} \quad (3)$$

其中 $\{u(k)\}$ 是输入, $\{x(k)\}$ 是中间变量, $d(k)$ 是噪声. $H(\cdot, \eta): \mathcal{D}_H \subseteq \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, 是 \mathcal{D}_H 上的参数化静态非线性函数, 含未知参数 $\eta \in \Omega_\eta \subseteq \mathbb{R}^m$. 另外, n 和 m 是已知的.

系统输出 $y(k)$ 被阈值为 C 的二集值传感器测量, 即通过传感器的输出 $s(k) = \mathcal{S}(y(k))$, 我们只知道 $y(k) \leq C$ 还是 $y(k) > C$, 其数学表达式为

$$s(k) = \mathcal{S}(y(k)) = I_{\{y(k) \leq C\}} = \begin{cases} 1, & \text{若 } y(k) \leq C, \\ 0, & \text{否则,} \end{cases} \quad (4)$$

其中阈值 C 是已知的.

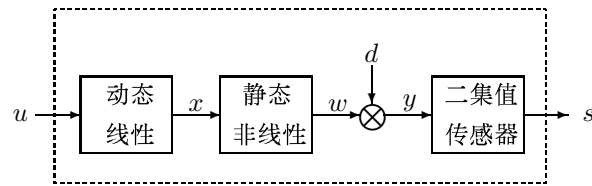


图 4 基于二集值输出的 Wiener 系统

针对非线性, 我们提出了比例满秩信号和联合可辨识性的概念. 输入信号的比例特性使得系统的中间变量具有相同的比例性质. 结合成比例的状态和二集值的输出信息就构成了关于非线性部分辨识的“核心辨识问题”, 而联合可辨识性则保证了核心辨识问题的解决, 可以证明关于核心辨识问题的算法是渐近最优的. 这样, 就把非线性部分的参数辨识出来了. 利用已有的非线性部分参数的估计, 结合输入信号的比例特性, 就可以把线性部分的参数也估计出来.

3) 集值输出的 Hammerstein 系统辨识^[6]

对具集值输出以及多项式形式静态非线性的 Hammerstein 系统, 在不要求非线性部分单调的前提下, 针对系统的结构特点, 提出了比例强满秩信号的概念, 构造了辨识算法, 分析了算法的最优性.

继 Wiener 系统之后, 我们研究了另一类典型的非线性系统——Hammerstein 系统, 其结构分为两部分: 静态非线性部分加动态线性部分. Hammerstein 系统在实际中的很多领域都有应用.

同 Wiener 系统一样, 已有的关于 Hammerstein 系统的方法都是以输出精确测量为基础的, 而且要研究二集值输出的 Hammerstein 系统辨识, 同样要克服输出信息少和系统的非线性两个困难.

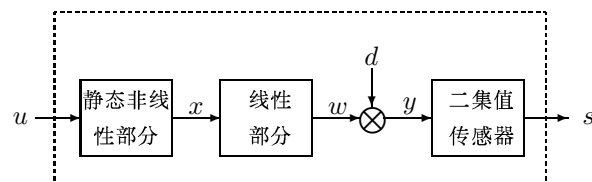


图 5 集值输出的 Hammerstein 系统

特别值得一提的是, 在二集值输出观测的前提下, 辨识 Hammerstein 系统比辨识 Wiener 系统还要难, 这是因为 Hammerstein 系统与二集值传感器这种非线性元件结合之后, 非线性同时存在于输出端和输入端, 这为系统辨识带来了一定的难度. 为了研究二集值输出的 Hammerstein 系统辨识, 就需要探索新的思路和方法.

考虑图 中的 Hammerstein 系统

$$\begin{cases} y(k) = \sum_{i=0}^{n-1} a_i x(k-i) + d(k), \\ x(k) = b_0 + \sum_{j=1}^m b_j u^j(k), \quad b_m = 1, \end{cases} \quad (5)$$

其中 $\{u(k)\}$ 是输入, $\{y(k)\}$ 是输出, $\{x(k)\}$ 是中间状态变量, $\{d(k)\}$ 是随机噪声, 系统阶数 n 和 m 都是已知的.

系统输出 $y(k)$ 被阈值为 C 的二集值传感器测量, 也就是说, 传感器输出 $s(k) = \mathcal{S}(y(k))$ 提供的输出信息只有 $y(k) \leq C$, 或是 $y(k) > C$. 其数学表达式为

$$s(k) = \mathcal{S}(y(k)) = I_{\{y(k) \leq C\}} = \begin{cases} 1, & \text{若 } y(k) \leq C, \\ 0, & \text{否则.} \end{cases} \quad (6)$$

我们研究的 Hammerstein 系统具有多项式形式的非线性部分, 且系统的输出被二集值传感器测量. 为了克服输出信息少的困难, 本节继续采用周期输入的方法; 为了克服两端非线性这个难点, 针对系统的结构特点, 提出了强满秩周期信号的概念; 利用强满秩周期输入, 有效地克服了两端非线性给辨识带来的困难; 构造了辨识算法, 分析了算法的最优性.

以上关于集值系统辨识的成果已总结整理为专著《System Identification with Quantized Observations》^[7], 并由著名专业书籍出版社 Springer 出版发行.

2.2 集值输出系统的适应控制方面^[8-11]

我们研究了一类单参数二集值输出系统的适应跟踪控制, 构造了系统参数的辨识算法, 根据“必然等价原则”设计了控制律; 利用集值信息关于估计值的条件期望, 证明了辨识算法是几乎处处收敛和均方收敛的, 得到了算法的收敛速度, 证明了闭环系统的稳定性和跟踪的渐近最优性.

集值输出系统的适应控制问题与单纯的参数辨识和参数已知时的镇定控制相比要困难得多, 原因之一是适应控制与参数辨识算法相互依赖, 已有文献中关于集值输出系统的辨识算法的良好性质是以周期输入为前提的, 而适应控制中的控制律是根据控制目标和参数估计值而确定的, 因此, 一般来讲是随机的且不具周期性; 原因之二是适应控制下闭环系统更为复杂, 表现为 (即使对简单的线性定常系统) 闭环系统的高度非线性和输入、输出的复杂随机性, 输出端的集值信息和估计值的关系也相应地更为复杂.

随着集值系统辨识方面的积累和所得成果系统化, 集值系统逐步受到国内外著名学者的关注和研究. 代表性的工作有: 1) 扩展的极大似然方法解决集值系统的辨识问题, 提出了固定数据长度下的无穷步迭代算法; 2) 量化滤波算法, 该方法是以量化误差从正态分布为基础的; 3) 鲁棒辨识的方法研究有界噪声下的参数估计问题. 然而已有针对集值系统方法由于自身限制均无法做到适应控制.

针对集值系统的适应控制, 一个可能可行的思路是: 首先将已有工作中的周期输入推广为一般的持续激励输入, 在不限制集值信息与参数估计值的相关性的前提下, 直接构造在线

的面向控制的辨识算法, 然后以这些算法为基础去设计适应控制器, 进而借鉴传统的自校正调节思想, 完成集值输出系统的适应控制设计和闭环系统的性能分析.

对于一般的集值输出系统, 设计这样的控制器是非常困难的. 作为这方面的初步性工作, 我们仅考虑一类单参数的二集值输出系统的适应跟踪控制. 我们用一类投影递推算法辨识系统的未知参数, 用参数估计和控制输入来调整系统输出的阈值, 根据“必然等价原则”构造适应控制律, 在较一般的未知参数先验信息、噪声统计特性和被跟踪信号等条件下, 给出了算法的收敛性和收敛速度, 证明了闭环系统的稳定性和跟踪的渐进最优性.

3 总结与展望

集值系统在网络化和信息化大环境下涌现出来并得到了广泛应用, 其系统辨识和控制研究可以建立一套与现代控制理论平行的系统建模、辨识和适应控制的完整理论体系, 是控制论在新时代环境下的发展. 从应用角度来看, 集值信息能够极大减弱系统辨识和控制对数据精度的依赖, 从而可以有效提高数字传输的效率、降低工业中测量元件的成本、为生物实验和量子系统等与集值信息相关的新兴技术提供新思路.

集值系统的辨识与适应控制是一个新兴的研究领域, 有很多有价值的问题亟待解决. 这些问题都具有一定的难度, 要解决它们不仅需要较长的时间, 而且需要众多科研工作者的广泛关注和积极参与. 本文的工作还只是抛砖引玉, 相信随着大家对有限信息系统研究重要意义认识的逐步深入, 此方向的研究必将得到更快的推进和发展.

参 考 文 献

- [1] Wang L Y, Zhang J F, Yin G. System identification using binary sensors. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 2003, **48**(11): 1892–1907.
- [2] Wang L Y, Yin G G, Zhang J F. Joint identification of plant rational models and noise distribution functions using binary-valued observations. *Automatica*, 2006, **42**(4): 535–547.
- [3] Wang L Y, Yin G G, Zhao Y L, Zhang J F. Identification input design for consistent parameter estimation of linear systems with binary-valued output observations. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 2008, **53**(4): 867–880.
- [4] Wang L Y, Yin G G, Zhang J F, Zhao Y L. Space and time complexities and sensor threshold selection in quantized identification. *Automatica*, 2008, **44**(12): 3014–3024.
- [5] Zhao Y L, Wang L Y, Yin G G, Zhang J F. Identification of Wiener systems with binary-valued output observations. *Automatica*, 2007, **43**(10): 1752–1765.
- [6] Zhao Y L, Wang L Y, Yin G G, Zhang J F. Identification of Hammerstein systems with quantized observations. *SIAM J. on Control and Optimization*, 2010, **48**(7): 4352–4376.
- [7] Wang L Y, Yin G, Zhang J F, Zhao Y L. System Identification with Quantized Observations. Theory and Applications, Springer, 2010.
- [8] Guo J, Zhang J F, Zhao Y L. Adaptive tracking control of a class of first-order systems with binary-valued observations and time-varying thresholds. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 2011, **56**(12): 2991–2996.
- [9] Guo J, Zhang J F, Zhao Y L. Adaptive tracking of a class of first-order systems with binary-valued observations and fixed thresholds. *Journal of Systems Science and Complexity* (Accepted).
- [10] Guo J, Zhao Y L. Identification of gain system with quantized observations and bounded persistent excitations. *Science in China Series F: Information Sciences* (Accepted).

- [11] Zhao Y L, Guo J, Zhang J F. Adaptive tracking control of linear systems with binary-valued observations and periodic target. *IEEE Trans. on Automatic Control* (Accepted).

SYSTEM IDENTIFICATION AND ADAPTIVE CONTROL OF SET-VALUED SYSTEMS

ZHAO Yanlong ZHANG Jifeng GUO Jin

(*Academy of Mathematics and Systems Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190*)

Abstract This paper studies the identification and adaptive control problems of the systems with set-valued observations. These systems are widely used in applications, but the research on identification and control of them is just started, since the set-valued information is only whether the system output is in some given sets. This paper gives a summary of the recent work on the subject. On the identification side, for different model structures, different system noises and different set cases, some effective methods such as parameter decoupling, full rank input design, joint identifiability and empirical measure method are introduced. Based on these methods, the results show that the accurate estimates of the parameters can be achieved even under set-valued information. On the adaptive control side, a class of gain systems is studied, the asymptotically optimal adaptive control law is designed, and the stability of the closed-loop system is proved.

Key words Set-valued observations, system identification, adaptive control, optimality.