第 19 卷 第 12 期 控 制 与 决 策 2004 年 12 月
Vol 19 No. 12 Control and Decision Dec 2004

文章编号: 1001-0920(2004)12-1349-05

线性混合系统的可观性分析

莫以为, 萧德云
(清华大学 自动化系, 北京 100084)

摘　要: 线性混合系统的控制输入(包括离散控制和连续控制)会影响混合系统的状态可观性 混合系统的可观性包括初始的离散状态和连续状态, 以及离散状态的切换时间 对此, 分析了系统的控制输入对线性混合系统状态(主要是离散状态)的影响, 并论述这将有助于改善某些线性混合系统状态的可观性 通过分析给出了在这种情形下比较宽松的线性混合系统状态可观性条件及其秩检验条件, 并给出说明性示例

关键词: 线性混合系统; 可观性; 控制输入
中图分类号: TP13　　**文献标识码**: A

Observability analysis of linear hybrid systems

MO Yi-wei, XIAO De-yun
(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China. Corrospondent: XIAO De-yun, E-mail: xiaody@mail tsinghua edu. cn)

Abstract: The observability of linear hybrid system may be affected by control inputs, which include discrete and continuous control inputs The observability of hybrid system involves initial discrete states, continuous states and discrete state switched time. The control inputs effect on system states (mainly effect on discrete states) are analyzed. The switching of discrete states may help to improve the observability of some linear hybrid system which is unobservable before discrete switch. And the weaker condition of hybrid system observability and rank test rules are given. An illustrative example is given at last.

Key words: linear hybrid system; observability; control inputs

1 引　　言

状态可观性是动态系统的一个重要性质, 对其深入研究有助于了解系统和状态重构, 对于系统分析和控制具有重要意义 混合系统状态的可观性研究要比一般线性系统复杂得多. 对混合系统的状态可观性研究已取得了一些研究成果

Ezzine 等[1]较早地讨论了混合系统状态可观性和可控性问题 Soh 等[2,3]针对周期离散时间切换线性混合系统, 提出了其可观性和可控性的充分必要条件, 但假定离散状态切换已知且对象是周期性的, 这便限制了其应用范围 Bemporad 等[4]利用混合逻辑动态系统来分析混合系统的可观性, 使用范数进行比较, 给出了关于初始状态的控制递增可观性定义, 以及基于类似验证方法的判断算法, 但没有给出由模型解析式进行判断的准则 Vidal 等[5,6]应用系统理论, 给出了线性混合系统状态可观性定义和秩判决结论, 具有较强的可操作性 由于离散状态迁移可使混合系统的不同动态特性体现在输出中, 从而可能使在某离散状态下不可观状态变成可观状态, 这与传统系统状态可观性分析是不同的 本文基于 Vidal 的结果, 分析了(离散和连续)控制输入对混合系统状态可观性的影响

收稿日期: 2003-10-08; **修回日期**: 2003-12-25.
基金项目: 国家 863 计划资助项目(2002AA412510, 2002AA412420).
作者简介: 莫以为(1966—), 男, 广西凭祥人, 博士生, 从事混合系统, 故障诊断等研究; 萧德云(1945—), 男, 福建仙游人, 教授, 博士生导师, 从事辨识建模, 故障诊断等研究

2 相关基本概念

2 1 线性混合系统模型

研究混合系统状态可观性只能从较简单的线性混合系统开始, 即便如此, 其范围仍然较大, 因此需要进一步简化 一般将线性混合系统 Σ_h 简化为两部分: 一部分是简单的切换线性系统; 另一部分是控制前者的离散状态切换机制 当离散状态为 q 时, 切换线性系统为

$$\Sigma_q: \begin{cases} x(k+1) = A_q x(k) + B_q u_c(k), \\ y(k+1) = C_q x(k). \end{cases} \tag{1}$$

其中: 切换线性系统的连续状态 $x \in R^n$; $\forall q \in Q$ 是切换线性系统的离散状态, Q 是大小为 N 的有限状态集; 控制集 $U \triangleq U_c \times U_d \subseteq R^{m_c} \times \{0, 1\}^{m_d}$, U_c 是连续控制域 $u_c \in U_c$, U_d 是离散控制域; 输出 $y \in R^p$; 系统初始状态为 $\{x_{q0}(k_0), q_0\}$.

本文仅考虑离散时间系统 系统离散状态迁移包括受控迁移和自治迁移, 分别因外界输入控制指令和连续状态达到某个多面体边界(即 $x_q \in G_q(e) \subset \partial X(q)$) 时引起离散状态(模式) 的变化, 其中: $G_q(e)$ 表示事件 e 发生的连续状态条件, $\partial X(q)$ 表示离散状态 q 的连续状态集合边界 换言之, 离散状态迁移事件包含控制输入事件 $e \in E_c$ 和自治事件 $e \in E_a$, 即 $q^+ = f(q^-, e)$, 其中: "+ "和"- "分别表示事件 e 之后与之前的瞬间 为简单起见, 这里忽略一般离散状态迁移可能引起的连续状态发生跳变, 即连续状态在离散状态迁移时是等值映射 假设在任意时段内系统迁移事件数有限, 即不存在 Zeno 现象 混合系统状态由离散状态 q 和连续状态 x 组成, 记为 (x, q), 其运动轨迹包含了离散状态和连续状态的变化

2 2 线性混合系统状态可观性

对于状态可观性的概念有不同的定义, 例如 Vidal 通过定义不可识别性来定义状态的可观性[5]. 实际上, 状态可观性等同于状态到输出映射关系的单射性 所谓混合系统状态可观性, 就是能否由输出唯一确定混合系统初始的离散状态和连续状态, 以及离散状态的迁移时间

定义 1(混合系统状态时间 T 可观) 令 $\mathbf{X}(0) \times \mathbf{Q}(0) \subseteq R^{n_c} \times \{1, 2, \cdots, N\}$ 是初始状态集, $\mathbf{U} \triangleq U_c \times U_d$, $\mathbf{U}(0) \subseteq R^{m_c} \times \{0, 1\}^{m_d}$ 是控制输入集 称混合系统对 $\mathbf{X}(0) \times \mathbf{Q}(0)$ 在时刻 T 上关于 $\mathbf{U}$ 一致逐渐可观, 如果存在 T 对输出范数 $\|\cdot\|_a$ 和状态范数 $\|\cdot\|_b$ 以及一个正标量 w, 使 $\forall\{(q_1, x_1), (q_2, x_2)\} \in \mathbf{X}(0) \times \mathbf{Q}(0)$, 输入序列 $\{u(k)\}_{k=0}^{T-1} \subseteq \mathbf{U}$, 有

$$\sum_{k=0}^{T-1} \| y(k, x_1, q_1, u) - y(k, x_2, q_2, u) \|_b \geq w \| x_1 - x_2 \|_a. \tag{2}$$

定义 1 的含义是初始状态的差异在输出观测上将引起明显的差别, 由此可推断出初始状态 若该条件不满足, 则等价于文献[5, 6] 的状态不可分辨性, 它们都表示两个不同初始状态在 $[0, T]$ 上输出是不可分辨的 称不存在不可分辨状态的系统是状态可观的 它与 Vidal 提出的概念是等价的, 但它与所考虑时段 T 及对系统对象的控制有关, 这正是本文所关心的问题

3 线性混合系统的状态可观性分析

如前所述, 对线性混合系统状态可观性分析可简化为对切换线性系统的状态可观性研究 本节首先对切换线性系统状态和输出进行分析, 然后讨论控制输入对混合系统状态可观性的影响, 最后给出线性混合系统状态可观性条件

3 1 切换线性系统状态与输出分析

假设混合状态初始值为 $(x(k_0), q)$ (时刻 k_0), 在离散状态迁移前, 系统状态和输出为

$$\begin{cases} x(k) = A_q^{k-k_0} x(k_0) + \sum_{i=k_0}^{k+k_0-1} A_q^{k-i-1} B_q u_c(i), \\ y(k) = C_q x(k). \end{cases} \tag{3}$$

注意到切换线性系统(1) 中包含了控制 $u_c(k)$, 由式(3) 得到输出信息并重新组合为

$$y(k) = C_q A_q^{k-k_0} x(k_0) + \sum_{i=k_0}^{k+k_0-1} A_q^{k-i-1} B_q u_c(i). \tag{4}$$

假设系统离散状态序列为 $\{q_i\}$, $q_i \in Q$, $i \in \{0, 1, \cdots\}$, 且离散状态切换到 q_i 的时刻为 $\{k_i\}$, 系统处于离散状态 q_i 的逗留时间为 $\tau_i = k_{i+1} - k_i$, 则系统状态为

$$x(k) = \begin{cases} A_{q_0}^{k-k_0} x(k_0) + \sum_{i=k_0}^{k-k_0-1} A_{q_0}^{k-i-1} B_{q_0} u_c(i), \; k \in [k_0, k_1]; \\ A_{q_1}^{k-k_1} A_{q_0}^{\tau_0} x(k_0) + A_{q_1}^{k-k_1} \sum_{i=k_0}^{k_1-k_0-1} A_{q_0}^{k_1-i-1} B_{q_0} u_c(i) + \\ \sum_{i=k_1}^{k-k_1-1} A_{q_1}^{k-i-1} B_{q_1} u_c(i), \; k \in [k_1, k_2]; \\ \vdots \end{cases} \tag{5}$$

系统输出可由式(3) 计算. 将与控制输入有关项移到输出处, 定义广义输出为

$$\tilde{y}(k) \triangleq \begin{cases} y(k) - \sum\limits_{i=k_0}^{k-k_0-1} C_{q_0} A_{q_0}^{k-i-1} B_{q_0} u_c(k-i),\ k \in [k_0, k_1]; \\ y(k) - \Big(C_{q_1} A_{q_1}^{k-k_1} \sum\limits_{i=k_0}^{k_1-k_0-1} A_{q_0}^{k_1-i-1} B_{q_0} u_c(i) + \\ \sum\limits_{i=k_1}^{k-k_1-1} C_{q_1} A_{q_1}^{k-i-1} B_{q_1} u_c(i) \Big),\ k \in (k_1, k_2]; \\ \vdots \end{cases} \tag{6}$$

于是, 广义输出与初始状态之间的关系为

$$\begin{bmatrix} \tilde{y}_{k_0} \\ \vdots \\ \tilde{y}_{k_1-1} \\ \tilde{y}_{k_1} \\ \vdots \\ \tilde{y}_{k_2-1} \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{q_0} x_{k_0} \\ \vdots \\ C_{q_0} A_{q_0}^{k_1-1} x_{k_0} \\ C_{q_1} A_{q_0}^{k_1} x_{k_0} \\ \vdots \\ C_{q_1} A_{q_1}^{k_2-k_1-1} A_{q_0}^{k_1} x_{k_0} \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathrm{obs}_{\tau_0}(q_0) x_{k_0} \\ \mathrm{obs}_{\tau_1}(q_1) A_{q_0}^{k_1} x_{k_0} \\ \vdots \end{bmatrix}. \tag{7}$$

其中 $\mathrm{obs}_{\tau_i}(q_i) = [C_{q_i}^{\mathrm{T}} \cdots (C_{q_i} A_{qi}^{k_{i+1}-k_i-1})^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$ 是对 (A_{q_i}, C_{qi}) 的可观测阵. 因此得到与无控制输入情形下输出和初始状态相同的关系, 所不同的是使用广义输出信息来替代实际输出信息.

3.2　控制输入对混合系统状态可观性影响分析

在线性系统理论中, 分析状态可观性时并不考虑控制输入, 而混合系统的情形则比较复杂. 首先, 混合系统本质上是一种非线性系统, 而非线性系统状态可观性与控制输入是相关的[7]; 其次, 当控制输入使得混合系统模式变化而展现系统动态特性的不同侧面时, 有可能确定在某一离散状态下不可观的状态. 因此混合系统状态可观性与输入控制是相关的.

混合系统的控制输入一般包含离散控制 u_d 和连续控制 u_c, 其中 u_d 直接影响系统离散状态, 而 u_c 则可能改变系统连续状态, 也可能使其发生自治迁移. 连续控制输入 u_c 对连续状态和输出的影响反映在式(5) 和(7) 中, 其中与初始连续状态的联系体现在广义输出(7) 中.

定义 1 中参数 T 与以下条件有关: 若各子系统均可观且联合可观阵的秩满足可观要求[5], 则系统可观, 即 T 没有太大作用; 否则, T 与许多因素相关, 关键因素是系统是否经历了离散状态. 这里关心的是在何种控制输入作用下能确保离散迁移发生. 即在时间区间 T 内考虑以下两种情形: 1) 系统是否存在离散控制 u_d, 使得在所考虑的时段内控制迁移事件 $\{E_c\}$ 为空集; 2) 对于连续控制输入, 判断切换曲面(平面) 是否可达, 即自治迁移事件 $\{E_c\}$ 是否为空集. 前者与混合系统的控制设计有关, 后者与混合系统的状态可达性分析有关.

考虑以下两方面因素: 1) 若系统存在离散控制 u_d, 则在 $T < \infty$ 区间内 u_d 发生变化(即离散状态的变化) 是正常的; 2) 若无离散控制 u_d, 则系统正常运行状态会存在离散自治迁移, 否则系统只能运行于某离散状态下的不变子空间, 这违背了混合系统描述的目的. 因此可得出结论: 在通常的控制输入作用下, 混合系统在区间 $T < \infty$ 内必存在离散状态迁移, 即迁移事件集 $E = E_c \cup E_d$ 为非空.

借鉴系统辨识中要求输入信号必须是持续激励的概念, 这里按对系统产生的影响来划分控制输入类型, 并要求控制能使混合系统离散状态发生迁移. 此要求虽较简单, 但对于混合系统的可观性分析却是十分重要的. 因此, 这里给出充分激励的控制输入的概念:

定义 2(充分激励的控制输入)　对于混合系统 Σ_h, 若系统控制输入 U 使得系统在区间 $T < \infty$ 内必定发生离散状态迁移, 则称 U 对于系统 Σ_h 是充分激励的.

根据以上分析及定义, 可得到以下命题:

命题 1　若混合系统 Σ_h 的控制输入是充分激励的, 则必定存在 $\bar{T} \in \mathbb{N}$, 且 $\bar{T} < \infty$, 使得 Σ_h 的离散状态在区间 $[0, \bar{T}]$ 内发生迁移.

命题 1 的证明从以上分析中容易得到. 其意义在于它可确保混合系统存在离散状态迁移, 并使以下讨论和结论对于混合系统具有一般性.

3.3　线性混合系统状态可观条件

Vidal 给出了切换线性系统状态可观性条件[5], 为保证发生离散切换之前初始状态可观, 不仅要求各子系统是可观的, 而且要求每一子系统的可观性空间交集为平凡子空间. 本文关心的是可否放松条件, 仅讨论不满足上述条件的情形, 并考虑混合系统控制输入在其中所起的作用. 定义 1 中对于混合系统状态可观, 要求在时段 T 上由输出可区分不同初

始状态, 但并不要求在首个离散切换之前实现状态可观. 因此存在离散状态切换前其状态不可观, 但若离散状态发生切换, 则混合系统状态可变为可观测的情形. 这里从离散状态及其切换时间可观问题入手进行分析. 由 $\tilde{y}$ 的定义(6) 可得到输出阵

$$\tilde{y}_i \triangleq [\tilde{y}_{k_0}^{\mathrm{T}} \cdots \tilde{y}_{k_0+i-1}^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}} = \mathrm{obs}_i(q_0)\,x_{k_0}. \tag{8}$$

3.3.1 确定初始离散状态

对于 $\forall q \neq q' \in \{1, 2, \cdots, N\}$, 所有使 $[\mathrm{obs}_i(q)\ \ \mathrm{obs}_i(q')]$ 秩不增加的最小整数 i 中最大者记为 v. 由定义 1 知, 在时间 T 内(相当于在 v 时间内), 不可观的条件是不同初始状态 (x_{k_0}, q_0) 与 $(\overline{x_{k_0}}, \overline{q_{k_0}})$ 的输出是相同的, 即若 $\sum_{i=0}^{T-1} \| y(i, x_{k_0}, q_0, u) - y(i, \overline{x_{k_0}}, \overline{q_0}, u) \| = 0$, 则在时刻 $k_1(T < k_1)$ 前初始状态是不可区分的, 即有

$$\tilde{y}_v = \mathrm{obs}_v(q_0)\,x_{k_0} = \mathrm{obs}_v(\overline{q_0})\,\overline{x_{k_0}}. \tag{9}$$

这等价于初始离散状态是不可分辨的. 当任一可观子空间的交集是非平凡的, 即

$$\mathrm{rank}[\mathrm{obs}_v(q)\ \ \mathrm{obs}_v(q')] < \mathrm{rank}(\mathrm{obs}_v(q)) + \mathrm{rank}(\mathrm{obs}_v(q')), \tag{10}$$

则存在连续状态是不可观的. 因此要确定离散状态, 就要求满足

$$\mathrm{rank}([\mathrm{obs}_v(q)\ \ \mathrm{obs}_v(q')]) = \mathrm{rank}(\mathrm{obs}_v(q)) + \mathrm{rank}(\mathrm{obs}_v(q')). \tag{11}$$

如果式(11) 满足, 则根据输出与模型的因果关系, 可唯一确定离散状态

$$q_0 = \{q: \mathrm{rank}([\mathrm{obs}_v(q)\ \ \tilde{y}_v]) = \mathrm{rank}(\mathrm{obs}_v(q))\}. \tag{12}$$

3.3.2 确定切换时间

应用定义 1, 考虑在发生离散切换时间后, T 时间区间内从系统输出中能否有所反映. 假设离散状态切换发生在时刻 k_1, 如果已判断出切换, 则在区间 $i \in [k_1, T + k_1]$, 输出可表示为 $\tilde{y}(i) = C_{q_1} A_{q_1}^{i-k_1} A_{q_0}^{k_1-k_0} x_{k_0}$; 如果没有判断出发生离散状态切换, 则输出可写成 $\tilde{y}'(i) = C_{q_0} A_{q_0}^{i-k_1} A_{q_0}^{k_1-k_0} x_{k_0}$. 当 $\tilde{y}(i) = \tilde{y}'(i), \forall i \in [k_1, T + k_1]$ 时, 即

$$\begin{bmatrix} C_{q_1} \\ \vdots \\ C_{q_1} A_{q_1}^{i-k_1} \end{bmatrix} A_{q_0}^{k_1-k_0} x_{k_0} = \begin{bmatrix} C_{q_0} \\ \vdots \\ C_{q_0} A_{q_0}^{i-k_1} \end{bmatrix} A_{q_0}^{k_1-k_0} x_{k_0}, \tag{13}$$

称切换时间 k_1 在时间 T 内是不可观的. 由此可知, 若 $\mathrm{rank}(\mathrm{obs}_i(q_0) - \mathrm{obs}_i(q_1)) = n, q_0, q_1 \in \{1, 2, \cdots, N\}$, 则在时间 T 内可检测出离散状态切换, 切换时间可确定为

$$k_1 = \min\{i: \mathrm{rank}([\mathrm{obs}_i(q_0)\ \ \tilde{y}_i]) = n + 1\} + k_0 - 1. \tag{14}$$

3.3.3 确定初始连续状态

由于 $\mathrm{rank}(\mathrm{obs}_v(q_0)) < n$, 不能由 $[k_0, k_1]$ 的输出唯一地重构出连续状态. 若 $k_1 < k_0 + T$, 即在充分激励控制作用下, 在所考虑时段内系统至少发生一次离散切换, 则根据区间 $[k_0, k_0 + T]$ 的输出可唯一确定出连续初始状态. 观察式(7) 可得

$$\begin{bmatrix} \mathrm{obs}_{\tau_0}(q_0) \\ \mathrm{obs}_v(q_1) A_{q_0}^{\tau_0} \end{bmatrix} x_{k_0} = \begin{bmatrix} \tilde{y}_{\tau_0} \\ \tilde{y}_{v+\tau_0} \end{bmatrix}. \tag{15}$$

为了唯一地确定 x_{k_0}, 要求

$$\mathrm{rank}\begin{bmatrix} \mathrm{obs}_v(q_0) \\ \mathrm{obs}_v(q_1) A_{q_0}^{k_1-k_0} \end{bmatrix} = n. \tag{16}$$

由于假设已知 $\mathrm{rank}(\mathrm{obs}_v(q_1) - \mathrm{obs}_v(q_0)) = n$, 条件(16) 很容易满足. 由式(15), 定义 $\mathrm{obs}(q_0, q_1) \triangleq [\mathrm{obs}_{\tau_0}^{\mathrm{T}}(q_0)\ \ (\mathrm{obs}_v(q_1) A_{q_0}^{\tau_0})^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$, 则

$$x_{k_0} = \mathrm{obs}(q_0, q_1)^{+}\,[\tilde{y}_{\tau_0}^{\mathrm{T}}\ \ \tilde{y}_{v+\tau_0}^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}, \tag{17}$$

其中 $M^{+} = (M^{\mathrm{T}} M)^{-1} M^{\mathrm{T}}$. 若存在有限次切换, 则处理方法相似. 总结以上讨论, 可有如下定理:

定理 1(线性混合系统的可观性) 考虑混合系统 $\sum_h$, 如果系统控制输入是充分激励的, 即混合系统在有限时间 $T < \infty$ 内肯定发生离散切换, 且切换时间满足 $\tau_i \triangleq k_{i+1} - k_i \geq \tau, \forall i \geq 0$, 并令 $\sum_q = \{A_q, C_q\}_{k=1}^{N}$ 是与之相关的跳变线性系统, 则有以下结论:

1) 首切换时间可观性: 若任两对矩阵的差是非奇异的, 即对所有 $q \neq q' \in \{1, 2, \cdots, N\}$, 均有 $\mathrm{rank}(\mathrm{obs}_v(k) - \mathrm{obs}_v(k')) = n$, 则可唯一确定的切换时间为式(14), 在时间区间 $[t_0, t_0 + T]$ 上的切换次数记为 j.

2) 离散初始状态可观性: 若系统任一对可观性矩阵的可观子空间交集是平凡的, 即对所有 $q, q' \in \{1, 2, \cdots, N\}$, 均有 $\mathrm{rank}[\mathrm{obs}_v(q)\ \ \mathrm{obs}_v(q')] = \mathrm{rank}(\mathrm{obs}_v(q)) + \mathrm{rank}(\mathrm{obs}_v(q'))$, 则离散状态轨迹可唯一确定为式(12).

3) 初始连续状态可观: 在如上条件下, 初始连续状态可唯一确定为式(17).

如果混合系统 $\sum_h$ 满足以上定理的 3 个可观性, 且系统输入控制是充分激励的, 则混合系统状态在时间 T 均是可观的且可唯一确定. 定理 1 中提及的系统控制输入是充分激励的条件, 它们会影响混合

系统状态的可观性

4　说明示例

本文主要讨论系统控制输入对可观性的影响,这里给出的示例用于说明控制输入是如何影响线性混合系统状态可观性的.

假定混合系统由两个二维系统组成, 切换分别为

$$\Sigma_1:\begin{cases} x(k+1)=\begin{bmatrix}0.9 & 0\\ 0 & 0.9\end{bmatrix}x(k)+\begin{bmatrix}1\\0\end{bmatrix}u(k),\\ y(k)=[1\quad 0]x(k),\ x_1(k)\geq 0;\end{cases}$$

$$\Sigma_2:\begin{cases} x(k+1)=\begin{bmatrix}0.8 & 0\\ 0 & 0.7\end{bmatrix}x(k)+\begin{bmatrix}1\\0\end{bmatrix}u(k),\\ y(k)=[0\quad 1]x(k),\ x_1(k)<0.\end{cases}$$

因为 $obs_1=\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0.9 & 0\end{bmatrix}$, $obs_2=\begin{bmatrix}0 & 1\\ 0 & 0.7\end{bmatrix}$, 所以 $\mathrm{rank}(obs_1)=\mathrm{rank}(obs_2)=1$, 即每个子系统均为不可观; 而 $\mathrm{rank}([obs_1\ obs_2])=2$, $\mathrm{rank}(obs_1-obs_2)=2$. 因此若出现离散状态切换, 则可唯一确定系统初始状态及初次切换时间. 但应注意到, 若不存在控制输入, 即 $u(k)\equiv 0$; 则任意初始状态都要单调地收敛到原点, 且不会越过自治迁移平面 $x_1=0$, 即不会发生离散状态迁移. 只有存在充分激励控制输入, 离散状态迁移才会发生, 即连续状态越过 $x_1=0$. 事实上, 满足该条件的输入是可以确定的, 如取 $u(k)=\sin(\omega k)$, $\omega=0.05$ 即可.

5　结　　论

本文讨论控制输入对线性混合系统状态可观性的影响. 这类混合系统在发生离散状态切换之前, 不能完全确定系统的初始混合状态, 即混合系统状态不可观. 如果存在离散状态变化, 使得系统中不同的动态特性在输出中充分地得到表现, 则有可能使这样的混合系统的状态变为可观的. 混合系统的控制输入(无论是离散控制输入, 还是连续控制输入)会影响混合系统状态, 有可能使系统的离散状态发生变化, 称能引起这样变化的控制输入为充分激励的. 在充分激励的控制输入作用下, 混合系统必定要经历离散状态的切换. 本文通过研究确定混合系统状态的条件, 以秩检验规则给出了这类混合系统状态的可观条件.

参考文献(References):

[1] Ezzine J, Haddad A H. Controllability and observability of hybrid systems[J]. *Int J of Control*, 1989, 49(6): 2045-2055.

[2] Li Z, Soh C B. Robust controllability and observability of impulsive interval hybrid dynamic systems[J]. *Int J of Systems Science*, 1999, 30(10): 1109-1122.

[3] Soh C B. Controllability and observability of periodic hybrid interval systems[J]. *Int J of Systems Science*, 2000, 31(12): 1563-1571.

[4] Bemporad A, Ferrari G, Morari M. Obervability and controllability of piecewise affine and hybrid systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2000, 45(10): 1864-1876.

[5] Vidal R, Chiuso A, Soatto S. Observability and identifiability of jump linear systems[A]. *Proc of IEEE Conf on Decision and Control* [C]. Las Vegas, 2002. 3614-3619.

[6] Vidal R, Chiuso A, Soatto S, et al. Observability of linear hybrid systmes [A]. *Hybrid Systems-Computation and Cotnrol, 6th Int Workshop* [C]. Prague, 2003. 526-539.

[7] João H, Daniel L, Eduardo D S. Nonlinear observability and an invariance principle for switched systems [A]. *Proc of the 41th Conf on Decision and Control* [C]. Las Vegas, 2002. 4300-4305.

(上接第 1348 页)

[8] 蒋忠进, 林君, 陈祖斌, 等. 三阶累积量在可控震源地震时间剖面中压制旁瓣的应用[J]. 地学前缘, 2003, 1(1): 1431-1434.
(Jiang Z J, Lin J, Chen Z B, et al. The application of three-order cumulant on signal process for vibroseis exploration [J]. *System Engineering and Electronic Technique*, 2003, 10(1): 1431-1434.)

[9] Nigel A Anstey. *Vibroseis* [M]. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1991. 1-44.

[10] 朱崇灿, 黄景熙, 鲁述. 天线[M]. 湖北: 武汉大学出版社, 1996. 60-127.

[11] Adrian Garrod. Digital modules for phase array radar [A]. *IEEE Int Radar Conf* [C]. Alexandria, 1995. 726-731.