非线性系统的能观性和状态观测器*

韩正之　潘丹杰　张钟俊
(上海交通大学自控系)

摘要　本文首先介绍了非线性系统能观性的各种定义，探讨了这些定义的背景，叙述了在各种定义下的研究成果，指出了尚未解决的问题，并介绍了Morse—Smale系统的能观性. 其次，叙述了非线性系统设计状态观测器的五种方法，详细介绍了各种方法的假设条件和设计步骤.

关键词：非线性系统；能观性；非线性系统的状态观测器

1. 引　　言

可以认为非线性系统的现代理论是以线性系统的结论为蓝本的临摹开始的，从而能观性自然成为最先被研究的课题之一. 由于缺少了线性这个条件，关于能观性的研究便极大地复杂起来了. 进一步，系统的能观性不再直接蕴含状态观测器的存在，它只是一个很起码的必要条件. 尽管对于非线性系统能观性的研究也有二十多年的历史了，可是“还远没有达到完善的地步”[1].

这里，作者将自己看到的材料和心得奉献给读者，希望能对推动非线性理论的进展有所帮助.

2. 非线性系统的能观性

2.1 能观性问题的提出

能观性是指在掌握了系统的模型之后要求从系统的输入输出数据(外部特征)来推断其内部的状态运动. 而这种推断又可归结为确定状态的初始值. 采用数学记号可以描述如下：

U 和 X 是系统的输入和状态集合，它们分别是 n 维和 m 维的. $z(t,x_0,u(t))$ 是初始值为 x_0 输入为 $u(t)$ 的状态轨线. $y(t,x_0,u(t))$ 是相应的输出轨线. x_{01} 和 x_{02} 是 X 中两个不同的元素. 如果存在 $u(t)\in U$，使得 $y(t,x_0,u(t))\neq y(t,x_{02},u(t))$，那末称 x_{01} 和 x_{02} 是可区分的. 否则称它们是不可区分的.

例1　给定非线性系统

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_1\\ \dot{x}_2\end{bmatrix}=u\begin{bmatrix}-1 & 1\\ 0 & -1\end{bmatrix}\begin{pmatrix}x_1\\ x_2\end{pmatrix},$$

$$y=x_1.$$

不难验证对于所有形为 $\begin{bmatrix}x_1\\ x_{20}\end{bmatrix}$ 和 $\begin{bmatrix}x_1\\ x_{21}\end{bmatrix}$ 的初始状态当 $u=0$ 时是不可区分的. 而当 $u\neq0$ 时，任意两

* 国家自然科学基金赞助项目.
本文于1989年4月28日收到. 1989年9月30日收到修改稿.

个状态都是可区分的了.

例1说明两个状态是否可分与输入函数有关.

由定义出发不难证明不能区分关系是等价关系，从而可以诱导出一个商集. 记 $\bar{x}$ 是 x 所在的那个等价类. 那末，当对一切 $x\in X$ 都有 $\bar{x}=\{x\}$（$\{x\}$是只含 x 的单元素集），则称系统是能观的.

例1说明，在考察系统的能观性时，必须仔细选择输入函数.

既然早期对非线性系统能观性的研究是效仿线性系统而进行的，那末早期有关能观性的结论也与线性系统相似[23]. 下面的定义是一个典型的例子.

考虑时变的非线性系统：

$$(NL_1)\qquad \begin{aligned} \dot{x} &= f(x,u,t), \\ y &= h(x,u,t). \end{aligned}$$

N 是沿着 NL_1的全微分算子，即对任意 C^∞函数 g，

$$Ng=\frac{\partial}{\partial t}g+\left(\frac{\partial}{\partial \hat{u}}g\right)^T\dot{\hat{u}}+\left(\frac{\partial}{\partial x}g\right)^Tf,$$

其中 $\hat{u}=[u\quad \dot{u}\cdots u^{(n-1)}]^T$，记号 $u^{(n-1)}$表示$\frac{\mathrm{d}^{n-1}}{\mathrm{d}t^{n-1}}u$. 记 r 是 y 的维数.

定义 1[4] 如果存在 r 个正整数 $k_1,\cdots k_r$，使得$\sum_{i=1}^{r}k_i=n$，且

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ \dot{y}_1 \\ \vdots \\ y_1^{(k_1-1)} \\ \vdots \\ y_r \\ y_r^{(k_r-1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 \\ Nh_1 \\ \vdots \\ N^{k_1-1}h_1 \\ \vdots \\ h_r \\ \vdots \\ N^{k_r-1}h_r \end{bmatrix} \triangleq Q(x,\hat{u},t) \tag{1}$$

满足 $\frac{\partial}{\partial x}Q(x,\hat{u},t)$ 的秩等于 n，则称(NL_1) 是能观的.

定义1已经失去了能观性的原始意义，然而它在非线性系统设计中经常被采用. 由于 $\frac{\partial}{\partial x}Q(x,\hat{u},t)$ 是非异矩阵，根据隐函数定理便能从(1)中解出 x 来. 而$\frac{\partial}{\partial x}Q(x,\hat{u},t)$的满秩只是隐函数存在的充分条件，从而定义1只是可区分性的充分条件. 它与原始能观含义不等价.

2.2 微分几何方法

微分几何方法使得“对于非线性性系统的了解有显著的进步”[5]. 早期的文献[6]成功地用李代数研究了双线性系统；文献[7]研究了一般非线性系统的能控性. 在能观性方面的重要工作是由 Hermann 和 Krener 完成的[8].

非线性系统的能观性不再是能控性严格的对偶概念（参阅例1）. 而文[8]却发现了一些相应的结论. 考虑如下系统：

$$(NL_2)\qquad \begin{aligned} \dot{x} &= f(x,u), \\ y &= h(x). \end{aligned}$$

这里假设 X 是连通的 n 维 C^∞流形. F 表示由 $f(x,u^i)$（u^i 是任意常数）生成的最小对合分布. h

$=[h_1,\cdots,h_r]^T$，h_i 都是 C^∞ 类的. H 是包含 $h_1,\cdots h_r$ 且关于 F 的李微分不变的最小函数空间. dH 是它在 X 上的余分布，dH 关于 F 也是不变的.

定义 2　任给 x_0的邻域 U，当 $x_1\in U, x_1\neq x_0$时，总有 $u(t)$和 $T(>0)$，使得在$0\leqslant t\leqslant T$ 时，$x(t,x_0,u(t))\subset U$，$x(t,x_1,u(t))\subset U$，而且 $y(t,x_0,u(t))\neq y(t,x_1,u(t))$. 即末称 x_0是局部可区分的. 如对一切 $x\in X$ 都是局部可区分的，那末称系统是局部能观的.

定义 3　存在 x_0的邻域 U，当 $x_1\in U, x_1\neq x_0$时，总有 $u(t)$使得 $y(t,x_0,u(t))\neq y(t,x_1,u(t))$，那末称 x_0是弱可区分的. 如果对一切 $x\in X$ 都是弱可区分的，那末称系统是弱能观的.

局部能观性比能观性强，而弱能观则比能观性弱.

例 2　有非线性系统

$$\dot{x}=u,\qquad y=\sin x.$$

该系统是弱能观的，只要取含 x_0的区间长度小于2π，但它不是能观的，x_0和 $x_0+2n\pi$(n 整数)的输出总是一样的.

至今为止研究较多的还是局部弱能观性. 顾名思义，它是对弱能观加以局部性的限制. 关于局部弱能观性有以下结论.

定理 1　$x\in X$，如果 $\dim dH(x)=n$，那末 x 是局部弱可区分的.

对于线性系统 dH 就是 $\mathrm{Im}C^T+A^T\mathrm{Im}C^T+\cdots+(A^T)^{n-1}\mathrm{Im}C^T$.

下面的定理给出应用局部弱能观性得的弱能观分解，它与线性系统的结论也颇相象.

定理 2　如果对一切 $x\in X$，$\dim dH(x)=n'<n$，那末必有一个 n'维流形 X'和 X' 上的一个 n'维局部弱能观系统. 这个系统具有和原系统完全一样的输入输出特性.

定理1的逆命题一般不成立，只有稍弱的结论：如果系统是局部弱能观的，那末在 X 的某个开稠集上成立 $\dim dH(x)=n$. 这是局部弱能观的一个不足. 此外，在能观性上强调局部这个限制似无必要，由此出发文[9]提出了 Lyapunov 能观性.

定义 4　任给 x_0的开集 W 总有另一开集 U，$x_0\in U\subset W$，当 $x_1\in U, x_1\neq x_0$，存在 $u(t)$和 $T(>0)$使得在$0\leqslant t\leqslant T$ 时，$x(t,x_0,u(t))\subset W$，$x(t,x_1,u(t))\subset W$，且 $y(t,x_0,u(t))\neq y(t,x_1,u(t))$那末称 x_0是 L 能区分的. 如对一切 $x\in X$ 都是 L 能区分的，那末称系统是 L 能观的.

从此定义出发已经建立一个等价条件：系统是 L 能观的充要条件是在 X 的一个开稠集上成立 $\dim dH(x)=n$.

上面五种能观性之间的关系可以用图表示如右，对于线性系统这五个定义是等价的.

$$\begin{tikzcd}
\text{局部能观} \arrow[rr, Rightarrow] \arrow[d, Rightarrow] & & \text{能观} \arrow[d, Rightarrow] \\
\text{局部弱能观} \arrow[r, Rightarrow] & L\text{能观} \arrow[r, Rightarrow] & \text{弱能观}
\end{tikzcd}$$

五种能观性之间的关系

此后，文[10]针对镇定问题提出了“可检测”概念，文[11]在纤维丛上讨论非线性系统的能观性. 文[12]讨论单输入非线性系统判别不同初始状态的统一输入函数，例1说明这也是一个相当重要的课题.

Casti 曾经这样描写道：“寻找一套非线性系统的一般理论有点近乎寻找圣器：一场艰巨的，充满着愉快、刺激和失望的，但最终却是没有成效的活动”[1]. 他奉劝人们把注意力转向一些具体的、特殊的系统.

2.3 Morse－Smale 系统的能观性

对 Morse－Smale 系统的研究可以算是注意力转移的一种尝试. 这是一类非常广泛的系

统.在2维紧流形上的非线性系统中,它是稠密的.在高维流形中它也是广泛存在的.

流形 M 上的一个向量场称为 Morse—Smale 的,如果满足:

(Ⅰ)驻点和闭轨的个数都是有限的;

(Ⅱ)所有稳定和不稳定的子流形是横截的;

(Ⅲ)游荡集仅由驻点和闭轨组成.

Morse—Smale 系统的性质可参阅[10,11].下文考虑自主系统(NL_3).

$$(NL_3)\qquad \begin{aligned}\dot{x} &= f(x),\\ y &= h(x).\end{aligned}$$

如果 x 在 $\dot{x}=f(x)$的闭轨上或是驻点,那末称 x 是一个判别元素,一个闭轨只需要取一个判别元素.

定理 3[12]　给定紧流形上的 Morse—Smale 系统(NL_3),如果该系统存在驻点或闭轨,那末当下列条件同时满足时,系统是能观的.

(Ⅰ)所有的判别元素都满足秩条件;

(Ⅱ)不同判别点经过 h 的象也不相同;

(Ⅲ)不同闭轨经过 h 的象也不相同,而且一个闭轨对应的输出轨线最小正周期等于闭轨的周期.

很显然,定理3中的条件(Ⅱ)和(Ⅲ)是必要的,而(Ⅰ)必勉强了些.至今还没有看到该定理的逆形式.

3. 非线性系统的状态观测器

对非线性系统状态观测器的研究是从70年代开始的.在80年代获得了很大的进展,屈指数来现在至少已提出了五种设计方法:早期提出的 Lyapunov 方法[13,14]和80年代提出的李代数方法[4,15—18],扩展线性化方法[19],子流形浸入方法[20]和变结构方法[21].这些方法各具千秋.连绵不断地提出这么些方法本身说明,与非线性系统的能观性一样,观测器设计理论远没有达到完善的境界.

对于最普通的非线性系统(NL_1),如果存在另一系统(NO)

$$(NO)\qquad \dot{z} = g(z,u,y,t),$$

其输入是 u 和 y,输出是 z,使得

(Ⅰ)当 $x(0)=z(0)$ 时,$x(t)\equiv z(t)\quad (t\geqslant 0)$;

(Ⅱ)当 $x(0)\neq z(0)$ 时,$\lim\limits_{t\to\infty}\|z(t)-x(t)\|=0$,

那末称(NO)是(NL_1)的一个渐近状态观测器,简称观测器.

下文将分别介绍观测器设计的各种方法与各自的前提,在下面文章中总假设系统具有定义1给出的能观性.

3.1 Lyapunov 方法

观测器的条件(Ⅰ)提示:$g(z,u,y,t)$必能写成 $g(z,u,y,t)=f(z,u,t)+p(z,y,t)$,其中 $p(z,y,t)$满足;当 $z(0)=x(0)$时 $p(z,y,t)\equiv 0$.

设 $e(t)=z(t)-x(t)$是状态估计误差,那末　(2)

$$\dot{e} = f(x+e,u,t) - f(x,u,t) + p(x+e,h(x+e,x,u,t),t).$$

$e=0$总是方程(2)的驻点.

观测器的条件(Ⅱ)则要求对 $e(t)$来说,原点总是(2)的渐近稳定的驻点.从而可以利用 Lyapunov 第二方法构造函数 $V(e)$进行判别.根据上述叙述这种方法主要用在验证,而不能提示构造 $p(z,y,t)$的方法.

Lyapunov 方法对下列系统(NL_4)有较深入的研究[13,14].

$$(NL_4)\quad \begin{aligned} \dot{x}(t) &= f_1(x,t) + A(t)x(t) + B(t)u(t), \\ y(t) &= C(t)x(t). \end{aligned}$$

先讨论非时变情形.假定(C,A)是能观的,于是必有 $K(\in R^{n\times r})$使得 $\sigma(A_0)\subset C^-$,其中 $A_0=A+KC$. 再假定 $f_1(x)$满足 Lipschitz 条件,L 是 Lipschitz 常数.那末可构造如下系统:

$$\dot{z} = f_1(z) + A_0 z + Ky + Bu. \tag{3}$$

因为 $\sigma(A_0)\subset C^-$,所以对任意正定矩阵 Q 总有唯一正定矩阵 P 使得 $A_0^TP+PA_0=-2Q$,其中"T"表示转置.用 P 构造 V 函数

$$V(e) = e^TPe.$$

直接验证知道

$$\begin{aligned} \dot{V}(e) &= -2e^TQe + 2e^TP[f(x+e) - f(x)] \\ &\leqslant -2e^TQe + 2L\|P\|\|e\|. \end{aligned}$$

用 $\lambda_{\min}Q$ 和 $\lambda_{\max}P$ 表示 Q 和 P 的最小和最大特征值.假如$(\lambda_{\min}Q/\lambda_{\max}P)>L$,那末 $\dot{V}(e)<0$,(3)就是(NL_4)的观测器.

这种方法已被推广到时变系统(NL_4)[22]和 $A(t)$、$C(t)$都是非线性函数的情形[23].这种方法的缺点在于非构造的.例如在上述过程中,我们不知道应该怎样选择 Q 是较妥当的.

3.2 李代数方法

线性系统的状态观测器设计最早是在 Luenberger 标准型下进行的,在非线性系统的反馈线性化问题解决后,人们开始研究将系统(NL_1)转化成下列观测器标准型的可能性.

$$NO^*\quad \begin{aligned} \dot{x}^* &= [\text{block diag}(E_1,\ldots,E_r)]x^* + \alpha(\tilde{x}_r^*,t) + B(\tilde{x}_r^*,u,t), \\ y &= [\text{block diag}(e_1^T\ldots e_r^T)]x^*, \end{aligned}$$

其中 $E_i = \begin{bmatrix} 0 & & & & 0 \\ 1 & 0 & & & \\ & \ddots & \ddots & & \\ & & & 0 & \\ 0 & & & 1 & 0 \end{bmatrix}_{k_i\times k_i}$, $e_i^T = [0\ldots0\quad 1]_{1\times k_i}$, $\alpha(\tilde{x}_r^*,t) = \begin{bmatrix} \alpha_0(\tilde{x}_r^*,t) \\ \alpha_1(\tilde{x}_r^*,t) \\ \vdots \\ \alpha_{n-1}(\tilde{x}_{r_1}^*,t) \end{bmatrix}$,

$\tilde{x}_r^*=y$. 所采用的变换是 $x^*=T(x,t)$.

先考虑单输出的自主系统(NL_5):

$$(NL_5)\quad \begin{aligned} \dot{x} &= f(x,t), \\ y &= h(x,t). \end{aligned}$$

其中 $y\in R$. 根据定义 1,$\frac{\partial}{\partial x}Q(x,t)$是可逆矩阵.用 $q(x,t)$表示 $Q^{-1}(x,t)$的最后一列,文[15]证明了

$$\frac{\partial T}{\partial x^*} = [\frac{\partial T}{\partial x_1^*},\frac{\partial T}{\partial x_2^*},\cdots\frac{\partial T}{\partial x_n^*}] = [q(x,t)\ ,\tilde{N}q(x,t)\cdots\tilde{N}^{n-1}q(x,t)], \tag{4}$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial x_n^*} = -\left(\frac{\partial T}{\partial x^*}\right)^{-1}\widetilde{N}^n q(x,t), \tag{5}$$

其中 $\widetilde{N}q(x,t) = -\frac{\partial}{\partial t}q(x,t) - [\frac{\partial}{\partial x}q(x,t)]f + \frac{\partial f}{\partial x}q(x,t)$. 由(4)能确定$\frac{\partial T}{\partial x^*}$,但却无法解出 $T(x,t)$ 来.

一个实用的充要条件是文[17]给出的. 记

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x^*}\right)^{-1}\widetilde{N}^n q(x,t) = b(x,t) = [b_0(x,t), b_1(x,t), \cdots, b_{n-1}(x,t)]^T,$$

$$\lambda(x,t) = \frac{d^n}{dt^n}h(x,t) + \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}}\alpha_{n-1}(x,t) + \cdots + \frac{d}{dt}\alpha_1(x,t).$$

定理 4[17] 存在变换 $T(x,t)$将(NL_5)转换成 NO^* 的充分必要条件是在足够光滑的可逆函数域上成立

$$\operatorname{rank}\frac{\partial}{\partial x}\begin{bmatrix}\lambda(x,t)\\ b_1(x,t)\\ \vdots\\ b_{n-1}(x,t)\\ h(x,t)\end{bmatrix} = 1.$$

当定理 4 的条件满足时,由(5)式可得 $\alpha(x,t)$,然后

$$x_n^* = h(x,t),$$

$$x_{n-1}^* = \frac{d}{dt}x_n^*(x,t) + \alpha_{n-1}(x,t),$$

$$\cdots\cdots$$

$$x_1^* = \frac{d}{dt}x_2^*(x,t) + \alpha_1(x,t),$$

就是 $x^* = T(x,t)$.

与[15]同时,文[16]独立地研究了非时变单输出系统转换成(NO^*)的条件. 也得到充要条件与实际算法. 在非时变情形,偏微分算子 $\widetilde{N}$ 就是沿着 f 的李微分,即 $\widetilde{N}q = L_f q$.

Krener 和 Respondek 用[16]的方法去研究多输出非线性系统的观测器问题[4]. 他们立即感到:由于输出增多,问题极大地复杂起来了. 该文犯了一相当"初等"的错误,产生错误的原因很可能是忽略了 $h, L_f h, \cdots, L_f^{n-1}h$ 和 $L_f^n h$ 不再线性相关这个事实. [18]指出了这个错误,并沿着[17]的方法给出了多输出情形下的秩判据. 而对于(5)的求解依然没有解决.

总之,李代数方法理论上是严密的,而实际计算相当复杂. 特别对多输出系统还有不少计算问题有待于解决.

3.3 扩展线性化方法

经典的线性化方法只在一个工作点对原系统作近似,因而有较大局限性. 扩展线性化则在一族工作点进行线性化,然而再通过反馈使得近似模型在这族工作点上有相同特征值.

考虑非线性系统(NL_2). 假设(0,0)是平衡的,即 $f(0,0)=0$,和 $h(0)=0$. 只需对 f 作些假设便可用隐函数定理证明,对于充分小的 x_e,总有 u_e,使得

$$f(x_e, u_e) = 0. \tag{6}$$

采用 3.1 中记号,取 $p(z,y) = g(h(z)) - g(y)$,其中 g 待定. 那末

$$\dot{e} = f(x+e, u) - f(x,u) - g(y) + g(h(z)). \tag{7}$$

$y=u_e, x=x_e$ 和 $e=0, y=h(z)$ 是(7)的平衡点. 在平衡点上作线性逼近,得到

$$\dot{e} = \left[\frac{\partial}{\partial x}f(x_e,u_e) - \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}y}g(y)\cdot\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x}h(x_e)\right]e. \tag{8}$$

如果能找到 $g(y)$ 使得一切满足(6)的 x_e 和 u_e,方程(8)具有不变的负实部特征值,那末线性模型(8)在较大范围内有很好的近似. 文[19]证明了下列结论并给出了 $g(y)$ 的构造方法.

定理 5[19] 如果 $\left(\frac{\partial}{\partial x}f(0,0), \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x}h(0)\right)$ 是能观的,那末存在满足条件的 $g(y)$.

扩展线性化方法便于计算,但是观测范围受限还是较大.

3.4 浸入方法

浸入方法是非线性系统等价线性化的深入,它将一个非线性系统嵌入到一个较高维的线性系统,而输出保持不变. 这里讨论仿射非线性系统(NL_6)

$$(NL_6)\quad \begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + \sum_{i=1}^{m} g_i(x)u_i, \\ y &= h(x). \end{aligned}$$

假设它在零点满足局部弱能观的秩条件:din $\mathrm{d}H(x)=n$. U_0 是零点的弱可区分邻域,我们给出下面结论:

定理 6[20] (NL_6)在 U_0 中能够浸入到一个线性系统的充分必要条件是

(Ⅰ) 记 $E_0=\mathrm{span}\{L_f^k h_j, 1\leqslant j\leqslant r, k\geqslant 0\}$,当 $x\in U_0$ 时,E_0 是 $\boldsymbol{R}$ 上的有限维向量空间;

(Ⅱ) 对任意的 $\lambda\in E_0$ 和 $j\in\underline{m}$, $L_{g_j}\lambda$ 是常数.

当定理6的条件满足时,系统能浸入到一个具有 Luenberger 型的能观性系统. 且输出还是 y. 下一步的设计就很容易了. 但这样获得的观测器可能维数较高.

3.5 变结构方法

在上述四种方法中,只有 Lyapunov 方法允许系统的参数有摄动. 这是一种重要的优势. 因为从实际看,建立一个完全精确的模型是不大可能的. 变结构办法可以认为是在 Lyapunov 方法中揉进了变结构技术.

讨论非线性系统(NL_7)

$$(NL_7)\quad \begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t)f(x,t) + B(u(t)+v(t)), \\ y(t) &= Cx(t). \end{aligned}$$

其中 $v(t)$ 是扰动. 假设(NL_7)满足

(Ⅰ) (A,C) 是可检测的,即存在 K 使得 $\sigma(A_0)\subset\sigma(A+KC)\subset C^-$;

(Ⅱ) 存在正定矩阵 P,使得

$$f(x,t) = P^{-1}C^T h(x,t),\quad Bv(t) = P^{-1}C^T w(t),\quad PA_0 + A_0^T P = -Q.$$

其中 $h(x,t), w(t)$ 是维数适当的向量值函数,Q 是正定矩阵.

(Ⅲ) 记 $l(x,t)=h(x,t)+w(t)$,存在正函数 $\rho(t)$,使得

$$\|l(x,t)\| \leqslant \rho(t),\ \text{对一切}\ x\in \boldsymbol{R}^n\ \text{和}\ t\in[0,\infty].$$

在这些假定之下,观测器为

$$\dot{z} = A_0 z + p(z,t,y) + Ky + Bu,$$

其中 $p(z,t,y)$ 采用变结构

$$p(z,t,y)=\begin{cases}-\dfrac{P^{-1}C^TCe}{\|Ce\|}\rho(t) & e\overline{\in}\ker C\\ 0 & e\in\ker C\end{cases}。$$

上述设计方案由[21]提出，该文还讨论了怎样应用“边界层”技术克服“颤动”.

4. 结 束 语

上文介绍了非线性系统的能观性和观测器设计问题.

能观性的研究主要是出于理论上的需要. 现在已经有了不少能观性的定义，但是无论哪个定义之后都留有大片的空白. 本文还总结了观测器设计的五种方法. 除了扩展线性化方法和浸入方法之外，其余的都不完善. 这五种设计都有局限性，而实际中的非线性可能要在一个较大范围内工作. 虽然五种方法具有不同的前提，有不同的适用范围，但文[24]的讨论说明五种方法适用范围的总和并不比每一种的大多少.

总之，对于非线性系统能观性和观测器研究还不够完善. 还有待于深入，有待于我们的共同努力.

References

[1] Casti, J. L., Recent development and Future Perspectives in Nonlinear Systems, SIAM REVIEW, 24, (1982), 301—331.

[2] Kou, S. K., D. Elliott & T. J. Tarn, Observability of Nonlinear Systems Inform. and Contr., 22, (1973), 89—99.

[3] Kostryukovskii, Y. M—L., Simple Conditions of Observability of Nonlineaar Systems, Automatic and Remote Control, 10, (1968), 1575—1584.

[4] Krener, A. J. & W. Respondek, Nonlinear Observer with Lineariable Error Dynamics, SIAM J. Contr. and Opti., 21, (1985), 197—216.

[5] 对于控制的挑战——集体的观点，专题讨论报告，1986.9(中译本，《控制与决策》编辑部，1987.5).

[6] Brockett, R. W., System Theory on Group Manifolds and Coset Spaces, SIAM J. Contr., 10, (1972), 265—284.

[7] Sussman, H. J. & V. Jurdjevic, Controllability of Nonlinear Systems, J. Differential Equations, 12, (1972), 313—329.

[8] Hermann, R. & A. Krener, Nonlinear Controllability and Observability, IEEE Trans. on Autom. Contr. AC—22, (1977), 728—740.

[9] Sontag, E. D., A Concept of Local Observability, Systems & Control Lett., 5, (1984), 41—47.

[10] Palis, J. Jr & W. de Melo, Geometric Theory of Dynamical Systems: An Introduction, Springer—verlag, (1982).

[11] S. Smale, Differentiable Dynamical Systems, Bull. Amer. Math, Soc., 73, (1969), 747—817.

[12] Aeyels, D., Global Observability of More—smale Vector Fields, J. Differential Equations, 45, (1982), 1—15.

[13] Thau, F. E., Observing the State of Nonlinear Dynamic Systems, Int. J. Contr., 17, (1973), 471—479.

[14] Kou, S. R., D. Elliott & T. J. Tarn, Exponential Observers for Nonlinear Dynamic Systems, Int. J. Contr., 29, (1975), 204—216.

[15] D. Bestle & M. Zeitz, Canonical Form Observer Design for Nonlinear Time—variable Systems Int. J. Contr. D, 38, (1983), 419—431.

[16] Krener A. J., & A. Isidori, Linearization by Output Injection and Nonlinear Observers, Systems & Control Lett., 3, (1983), 47—52.

[17] C. W. Li & L. W. Tao, Observing Nonlinear Time—variable Systems Through a Canonical Form Observer, Int. J. Contr., 44, (1986), 1703—1713.

[18] Xiao—Hua Xia & Wei—bin Gao, Nonlinear Observers by Observer Canonical Form, Int. J. Contr., 47, (1988), 1081—1100.

[19] Bauman, W. T. & W. J. Rugh, Feedback Control of Nonlinear Systems by Extended Linearization, IEEE Trans. Autom. Contr., Ac—31, (1986), 40—46.

[20] Levine J. & R. Marino, Nonlinear System Immersion, Observers and Finite Dimensional Filters, Systems & Control Lett. 7, (1986), 133—142.

[21] Walcott, B. L. & S. H. Zak, State Observation of Nonlinear Uncertain Dynamical Systems, IEEE Trans. Autom. Contr., AC—32, (1987), 166—170.

[22] Banks, S. P., A Note on Nonlinear Observers, Int. J. Contr., 34(1981), 185—190.

[23] Birk, J. & M. Zeitz, Extended Luenberger Observer for Nonlinear Systems, Systems & Control Lett. 9, (1987), 149—156.

[24] Walcoh, B. L., M. J. Coeless & S. H. Zak, Comparative Study of Nonlinear State—observation Techniques, Int. J. Contr., 45, (1987), 2109—2132.

Observability and Observers of Nonlinear Systems

Han Zhengzhi, Pan Danjie, Zhang Zhongjun

(Department of Automatic Control, Shanghai Jiaotong University, Shanghai)

Abstract: This paper presents a survey of observability and observers of nonlinear systems. The background, conclusion and unsolved problems for the different definitions of observability are described. The conclusions regarding the observability of Morse—smale systems are also introduced. Five methods of designing observers for nonlinear systems, including assumptions, algorithms and demerits are discussed, respectively.

Key words: nonlinear systems; observability; state observer of nonlinear systems

---

《多变量反馈设计》简介

马东升

(北京理工大学自控系)

《多变量反馈设计》(Multivariable Feedback Design, Addison—Wesley Publishing Company, 1989 年 第 1 版, 424 页)是英国剑桥大学工程系 J. M. Maciejowski 根据在加里弗尼亚大学和圣巴白拉大学多年的教学实践编写的一本书.

该书是一部将现代多变量反馈理论和设计方法相结合的教科书. 主要内容包括单环反馈系统设计, 多变量反馈系统零极点和稳定性, 多变量反馈系统的性能和鲁棒性, 多变量设计的乃氏方法, 多变量设计的 LQG 方法, 尤拉参量化法和 H^{∞}最优控制, 参量优化设计, 计算机辅助设计.

该书从古典反馈设计的观点出发, 研究了多变量情况时系统的性能、稳定性和鲁棒性. 提供了多变量设计的多种方法: 频域多变量设计、古氏 QFT 法、LQG 法、H^{∞}法和参数优化法.

该书的主要特点是:

1. 有最新颖的多变量系统鲁棒性分析和控制结构设计等内容.
2. 为计算机辅助设计提供了多变量分析和设计的详细算法.
3. 结合飞行控制等实际应用的问题, 图示说明了各种设计方法并将各种设计方法进行了比较.
4. 每章的最后给出了大量的结合实际设计的练习题.

该书可作为大学高年级学生和研究生学习多变量反馈系统课的教材, 也可供科研工作者、工程技术人员及高等学校教师参考或自学.