

一类双线性 Hammerstein 模型的集成辨识方法*

孔金生

(郑州工业大学电子与信息学院·郑州, 450002)

万百五

(西安交通大学系统工程研究所·西安, 710049)

摘要: 对于一类静态非线性增益具有原点对称特性的双线性 Hammerstein 模型, 提出了一种稳态与动态辨识相结合的集成辨识方法。该方法利用稳态信息获取稳态模型的强一致性估计, 并通过稳态模型获得非线性增益的估计, 再利用动态信息辨识获取双线性 Hammerstein 模型的双线性系统未知参数的一致性估计。仿真结果表明了该方法的有效性和实用性。

关键词: 双线性 Hammerstein 模型; 集成辨识; 非线性增益

文献标识码: A

Integrated Identification Method for a Class of Bilinear Hammerstein Model

KONG Jinsheng

(College of Electronic and Information, Zhengzhou Industry University · Zhengzhou, 450002, P. R. China)

WAN Baiwu

(Institute of Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University · Xi'an, 710049, P. R. China)

Abstract: In this paper, for a class of bilinear Hammerstein model which has characteristic of static nonlinear gain zero point symmetry, an integrated identification method combined steady-state with dynamic identification is introduced. The strong consistent estimates of steady-state model are obtained by using steady-state data. The estimates of nonlinear gain are obtained by using steady-state model. The consistent estimates of the bilinear unknown parameter of the bilinear Hammerstein model are obtained. The efficiency and applicability of this estimate technique is demonstrated by simulation results.

Key words: bilinear Hammerstein model; integrated identification; nonlinear gain

1 引言(Introduction)

Hammerstein 模型及双线性模型的辨识已经有了较多的研究, 文[1]对双线性稳态模型进行了研究。目前, 有关 Hammerstein 模型的辨识已提出几种方法^[2-4]。双线性 Hammerstein 模型是一类较为广泛的非线性系统, 它不仅可以描述某些实际对象, 而且可以近似某些复杂非线性系统, 如: 化学反应器、近似非线性奇异摄动系统等, 因而研究双线性 Hammerstein 模型的辨识具有一定的实际意义^[5]。在一定条件下, 双线性 Hammerstein 模型可退化为双线性模型或 Hammerstein 模型, 因此, 双线性 Hammerstein 模型更具一般性。双线性 Hammerstein 模型能用一个无记忆的非线性增益和一个双线性系统来表示^[5]。

离散时间双线性 Hammerstein 模型可用如下差分方法来描述:

$$v(k) = f(u(k)), \quad (1)$$

$$\sum_{i=0}^n a_i y(k-i) = \sum_{j=0}^m b_j f(k-d-j) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \beta_{ij} y(k-i) v(k-d-j) + e(k), \quad (2)$$

式中 $y(k)$ 、 $u(k)$ 和 $e(k)$ 分别是 k 时刻系统的输出、输入和噪声, $e(k)$ 为正态白噪声, $v(k)$ 为 k 时刻非线性部分的输出, 是不可测量的, $f(\cdot)$ 为无记忆非线性增益, 具有原点对称特性, n, m 分别为双线性部分输出和输入的阶次, d 为系统的时延, $a_0 = 1$ 。

本文采用稳态与动态辨识相结合的集成辨识方法辨识一类静态非线性增益具有原点对称特性的双线性 Hammerstein 模型, 能获得稳态模型、非线性增益和双线性系统参数的一致性估计。

2 辨识算法(Identification algorithm)

2.1 稳态辨识(Steady-state identification)

在一定的条件下, 利用系统的输入、输出数据可

* 基金项目: 国家自然科学基金(69674003)资助项目。

收稿日期: 1998-06-15; 收修改稿日期: 1999-03-15。

获得系统的稳态模型:

$$y = f(u)/(\lambda_1 - \lambda_2 f(u)). \quad (3)$$

式中

$$\lambda_1 = \sum_{i=0}^n a_i / \sum_{j=0}^m b_j, \quad \lambda_2 = \sum_{j=1}^n \sum_{j=1}^m \beta_{ij} / \sum_{j=0}^m b_j.$$

为此作如下假设:

假设 1 m, n 和 d 已知.

假设 2 $f(\cdot)$ 为连续映射, 具有原点对称特性, 且不恒为常数.

假设 3 任取 $k_0, k \geq k_0$ 时, 取 $u(k) = c, c \in [u_1, u_2]$.

假设 4 方程 $z^n + \sum_{i=1}^n (a_i - \sum_{j=1}^m \beta_{ij} \sigma) z^{n-i} = 0$ 之根严格位于单位圆内, 且 $a - \beta \sigma \neq 0, b \neq 0, \sigma$ 为非线性部分稳态输出.

假设 5 $\{e(k)\}$ 为正态白噪声, $E(e(k)) = 0$,

$$E(e(k)e(k+\tau)) = \begin{cases} \varphi^2 < +\infty, & \tau = 0, \\ 0, & \tau \neq 0. \end{cases}$$

假设 6 存在 $M_1 > 0$ 和 k_1 , 使得

$$Ey^2(k_1) \leq M_1.$$

定理 1 若假设 1 ~ 6 成立, 则系统的输出 $y(k)$ 是一个渐近平稳过程, 且均值与协方差具有各态遍历性.

证 记

$$g_1 = a_1 - \sum_{j=1}^m \beta_{1j} f(c), \quad x(k) = \sum_{i=0}^m b_i f(c) + e(k),$$

$$Y(k) = (y(k) \cdots y(k-n+1))^T,$$

$$w = [1 \ 0 \ \cdots \ 0]^T,$$

$$A = \begin{bmatrix} -g_1 & -g_2 & \cdots & -g_{n-1} & -g_n \\ 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

则当 $k \geq k_2 = k_0 + m + n + d$ 时, 式(2)等价于下面的状态空间模型:

$$\begin{cases} Y(k) = AY(k-1) + wx(k), \\ y(k) = w^T Y(k). \end{cases} \quad (4)$$

因为

$$E(e(k)) = 0,$$

$$R_e(\tau) = E(e(k)e(k+\tau)) =$$

$$\begin{cases} \varphi^2 < +\infty, & \tau = 0, \\ 0, & \tau \neq 0. \end{cases}$$

所以

$$E(x(k)) = E\left(\sum_{j=0}^m b_j f(c) + e(k)\right) = \sum_{j=0}^m b_j f(c), \quad (5)$$

$$\lim_{N \rightarrow +\infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(k+i) =$$

$$\lim_{N \rightarrow +\infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\sum_{j=0}^m b_j f(c) + e(k+i) \right] =$$

$$\sum_{j=0}^m b_j f(c) = E(x(k)). \quad (6)$$

故 $x(k)$ 为平稳过程且具有均值各态遍历性.

可以证明在假设 1 ~ 6 成立下, 当双线性系统的输入是平稳各态遍历性过程时, 系统的输出也是平稳各态遍历过程.

$$\lim_{k \rightarrow +\infty} Ey(k) = \lim_{k \rightarrow +\infty} Ew^T Y(k) =$$

$$w^T \sum_{i=0}^n (A^i w \cdot (\sum_{j=0}^m b_j f(c))) =$$

(a.s.)

$$w^T (I - A)^{-1} w \sum_{j=0}^m b_j f(c) =$$

$$f(c)/(\lambda_1 - \lambda_2 f(c)). \quad (7)$$

式中 I 为单位矩阵.

$$\lim_{N \rightarrow +\infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y(k+i) = \lim_{N \rightarrow +\infty} w^T \sum_{i=1}^N Y(k+i) =$$

$$w^T (I - A)^{-1} w \sum_{i=0}^m b_i f(c),$$

(8)

$$\lim_{k \rightarrow +\infty} E(y(k+t)y(k)) =$$

$$\lim_{k \rightarrow +\infty} w^T EY(k+t)Y^T(k)w =$$

$$\lim_{N \rightarrow +\infty} \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N y(k+t+s)y(k+s).$$

$$(a.s.) \quad (t \geq 0) \quad (9)$$

由(7)~(9)式可知定理 1 成立. 证毕.

定理 2 若假设 1 ~ 6 成立, 则用 $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y(k+i)$ 估计 $f(c)/(\lambda_1 - \lambda_2 f(c))$ 具有强一致性, 且估计残差服从渐近正态分布.

证 由(7)和(8)可知, 用 $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y(k+i)$ 估计 $f(c)/(\lambda_1 - \lambda_2 f(c))$ 具有强一致性.

由假设 5 有

$$\lim_{N \rightarrow +\infty} \sum_{i=1}^N e(k+i)/\sqrt{N} \sim N(0, \varphi^2), \quad (10)$$

所以

$$\lim_{N \rightarrow +\infty} \eta(N) = \lim_{N \rightarrow +\infty} \sqrt{N} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y(k+i) - f(c)/(\lambda_1 - \lambda_2 f(c)) \right) =$$

$$w^T(I-A)^{-1}w \cdot \lim_{N \rightarrow +\infty} \sum_{i=1}^N e(k+i)/\sqrt{N} \sim N(0, \varphi^2/((\lambda_1 - \lambda_2 f(c)) \sum_{j=0}^m b_j^2)). \quad (11)$$

由此可见定理 2 成立。证毕。

因此, 利用 $|u(k) = c, \lim_{N \rightarrow +\infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y(k+i)|$

可以辨识稳态模型 $\frac{f(c)}{\lambda_1 - \lambda_2 f(c)}$ 。

2.2 动态辨识(Dynamic identification)

由稳态辨识得到稳态模型 $y = f(u)/(\lambda_1 - \lambda_2 f(u)) = F(u)$ 后, 利用稳态输出 $F(u)$ 可以求得参数 λ_2 , 从而可以得到静态非线性增益 $f(u)/\lambda_1$ 的估计。

分别选择 $u = c_1$ 及 $u = c_2 = -c_1$ 作为输入, 可得到稳态输出如下:

$$F(c_1) = f(c_1)/(\lambda_1 - \lambda_2 f(c_1)), \quad (12)$$

$$F(c_2) = f(c_2)/(\lambda_1 - \lambda_2 f(c_2)). \quad (13)$$

由假设 $f(\cdot)$ 具有原点对称特性可知:

$$f(c_1) = -f(c_2). \quad (14)$$

于是由(12)~(14)式可得到参数 λ_2 :

$$\lambda_2 = -\frac{(F(c_1) + F(c_2))}{2F(c_1)F(c_2)}. \quad (15)$$

求得参数 λ_2 后, 重新考虑(3)式可得

$$\frac{f(u)}{\lambda_1} = \frac{F(u)}{1 + \lambda_2 F(u)}. \quad (16)$$

由于稳态输出 $F(u)$ 及参数 λ_2 已知, 由(16)式

可以得到非线性增益 $f(u)/\lambda_1$ 的估计, 并利用 BP 神经网络进行逼近, 得到的非线性增益估计与原系统静态非线性增益 $f(u)$ 仅差一个常数 λ_1 . 令 $\Phi(u) = f(u)/\lambda_1$, 选择输入 u 使 $\Phi(u)$ 为充分激励信号, 利用动态信息 $\Phi(u(k))$ 及 $y(k)$ 通过最小二乘法可以辨识得到双线性系统未知参数的一致性估计。

辨识步骤如下:

1° 利用稳态数据获得稳态模型的强一致性估计;

2° 通过稳态模型获取非线性增益 $f(u)/\lambda_1$ 的估计;

3° 利用动态信息辨识得到双线性系统未知参数的一致性估计。

3 仿真实例(Illustrative examples)

仿真研究与动态辨识中, 采用高斯白噪声输入。表中给出了采用 9 对稳态数据辨识非线性增益 $f(u)/\lambda_1$ 利用神经网络逼近的均方根误差。

例 1

$$y(k) = -0.623y(k-1) - 0.421y(k-2) + 0.311v(k) + 0.194v(k-1) + 0.439v(k-1)y(k-1) - 0.257v(k-2)y(k-1) + 0.425v(k-1)y(k-2) - 0.316v(k-2)y(k-2) + e(k).$$

$$v(k) = \begin{cases} \sqrt{u(k)/2}, & u(k) \geq 0, \\ -\sqrt{-u(k)/2}, & u(k) < 0, \\ -2 < u(k) < 2. \end{cases}$$

$e(k)$ 为零均值, 方差为 0.1 的白噪声, 稳态辨识结果见表 1, 动态辨识结果见表 2

表 1 例 1 稳态辨识结果

Table 1 Steady-state identification result of example 1

c	-2.0	-1.5	-1.0	-0.5	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0
$\frac{f(c)}{\lambda_1 - \lambda_2 f(c)}$	-0.2163	-0.1905	-0.1587	-0.1153	0.0	0.1330	0.1943	0.2441	0.2881
$y_s(c)$	-0.2156	-0.1898	-0.1581	-0.1146	0.0007	0.1337	0.1950	0.2448	0.2889

表 2 例 1 动态辨识结果

Table 2 Dynamic identification result of example 1

参数	a_1	a_2	$\lambda_1 b_0$	$\lambda_1 b_1$	$\lambda_1 \beta_{11}$	$\lambda_1 \beta_{12}$	$\lambda_1 \beta_{21}$	$\lambda_1 \beta_{22}$	均方根误差
真值	0.623	0.421	1.2588	0.7852	1.7769	1.7202	-1.0402	-1.2790	
估计值	0.6247	0.4215	1.2473	0.7863	1.7465	1.7467	-1.0209	-1.2683	1.49×10^{-5}

4 结论(Conclusion)

本文对于一类静态非线性增益具有原点对称特性的双线性 Hammerstein 模型, 提出了一种稳态与动

态辨识相结合的集成辨识方法。稳态辨识获取稳态模型的强一致性估计, 并通过稳态模型得到了非线性增益的估计, 再利用动态辨识获得双线性系统参数的一

致性估计,本文提出的集成辨识方法实用、简单,仿真表明了其有效性和实用性。

参考文献(References)

- [1] 黄正良,万百五,韩崇昭. 辨识 Hammerstein 模型的两步法[J]. 控制理论与应用,1995,12(1):34-38
- [2] 黄正良,万百五. 双线性系统稳态模型估计及其强一致性分析[J]. 自动化学报,1995,21(5):562-569
- [3] 张平安,李人厚. 基于人工神经网络的 Hammerstein 模型辨识[J]. 控制与决策,1996,11(增1):193-197

- [4] AL-Duwaish H, Nazmal K M and Chandraskar V. Hammerstein model identification by multilayer feedforward neural networks[J]. Int. J. Syst. Sci., 1997, 28(1):49-54
- [5] 华向明. 双线性系统建模与控制[M]. 上海:华东工学院出版社,1990

本文作者简介

孔金生 1963年生,1999年12月在西安交通大学系统工程研究所获工学博士学位,现在郑州工业大学电信学院任职,研究方向为复杂系统智能控制理论及应用,非线性系统的辨识与优化控制。
万百五 见本刊2000年第2期第179页。

运动稳定性理论的新进展 ——评《运动稳定性量化理论》

杨成梧 邹云

(南京理工大学动力工程学院·南京,210094)

稳定性理论作为各类系统理论的重要基石,一直受到数学、力学、控制理论以及工程物理界众多知名学者的极大关注,其中,大系统的稳定性分析不仅是重大的基础科学问题,同时也是现实生活和生产中所面临的重大课题,如何从系统的受扰轨迹中寻找临界稳定特征,定义和评估实际轨迹离开临界稳定的“距离”或“稳定裕度”,一直是数学界和控制理论界的难题之一。

近年来,中国工程院院士,著名电力系统暂态稳定控制专家薛禹胜教授创立和发展的、基于扩展等面积(extended equal-area criterion, EEAC)方法的运动稳定性的量化理论在这一领域取得了突破性的进展,该方法克服了李雅普诺夫方法通常仅能分析平衡点附近运动特性的弱点,通过将 n 维空间的受扰轨迹映射到一组平面像轨迹,深刻地刻画了非线性非自治系统受扰轨迹的稳定裕度,同时,基于该方法的国际化商品软件不仅成功地应用于我国的东北、山东、山西和福建等电网的暂态稳定监控,而且还被法国、美国和加拿大等国广泛应用于电力规划和分析之中,其中,东北电网的应用成果经国际大电网组织确认为世界上首例成功的在线暂态稳定分析工作,且其相关软件更是世界上目前唯一的能对电力系统大扰动稳定性作量化分析的商品软件,为此,该理论的核心内容之一:EEAC 方法获得了 1996 年度国家科技进步一等奖。

《运动稳定性量化理论》一书系统地总结和阐述了 EEAC 理论及其扩展,适用于一般多刚体力学运动系统稳定性量化分析的互补群群际能量壁垒准则(complementary-cluste energy-barrier criterion, CCEBC),应该说:这部 63 万字的著作是薛院士及其研究小组十多年来研究成果精华的汇集,它系统、清晰地形成和发展为稳定性理论家庭中一族新分支:稳定性量化理论,它不仅填补了稳定性定量分析的空白,也是为数不多见的既在理论上获得突破的同时,又在重要工业应用中获得广泛成功的重大学术研究成果。

全书共分两个部分:第 1 篇约 21 万字,分 10 个章节详细论述了 CCEBC 理论基本的概念和方法,该方法主要学术思想体现为如下两个方面:1) 将非自治多刚体在 $\mathbb{R}^n$ 空间中的运动轨迹约化为一组 $\mathbb{R}^2$ 中的像轨迹,从而将原系统的复杂运动稳定性的量化问题简化为一组单刚体的相应问题;2) 通过对著名的等面积定则(equal-area criterion, EAC)的扩展,建立了单刚体运动的稳定性量化理论,前者用于保证模型的精确性,后者用来指导稳定极限值的搜索,这样,这将多刚体运动系统稳定评估任务成功地分解为在 $\mathbb{R}^n$ 中求取受扰轨迹和在 $\mathbb{R}^2$ 中对像轨迹进行定量分析等两个相对简单的子任务,此外,该部分还将 CCEBC 方法应用于质点弹簧系统的稳定性分析,获得了十分明了的物理解释。

在第 2 篇中,该书用了余下的近 2/3 的篇幅评尽论述了 CCEBC 和 EEAC 理论在电力系统中的应用,电力系统是十分复杂的大系统,它不仅是强非线性、强非自治的广义系统(或奇异系统),而且其阶数也十分惊人,尽管以严格的数学观点来看 CCEBC 方法的理论基础还有待进一步深化和完善,但工业实际应用成果不仅说明其生命力十分强大,而且在理论上也蕴涵着稳定性理论基本方法上的重大突破,不过,由于该理论形成历史较短,且主要应用于电力系统,目前尚未引起数学界和控制理论界广泛注意。

纵观全书,内容丰富,结构系统完整,集作者十余年研究成果于一体,独树一帜,具有很高的学术价值和工程应用价值,是一部有志于攻克非线性、非自治广义系统的稳定域边界估计和控制理论难题的青年学者难得的、有重要参考价值的学术专著。