

文章编号: 1001-0920(2001)02-0129-05

多层递阶方法理论与应用的进展

韩志刚

(黑龙江大学 应用数学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 多层递阶方法把非线性模型化成与之输入输出等价的多层线性模型, 并强调其模型参数的时变性, 所以在解决预报问题方面取得了较好的效果。对这一方法的理论与应用研究的进展情况进行介绍。

关键词: 多层递阶方法; 辨识; 预报; 控制

中图分类号: O 123 **文献标识码:** A

The Progress of Theory and Application of Multi-level Recursive Method

HAN Zhi-gang

(Institute of Application Mathematics, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

Abstract: In the sense of input-output equivalence, nonlinear model can be changed into multi-level linear model by multi-level recursive method. The time-varying property of model parameters has been emphasized at the same time. The progress case of theory and application investigation of this method is introduced and reviewed.

Key words: multi-level recursive method; identification; prediction; control

1 引言

多层递阶方法这一概念^[1]已引起有关领域学者的兴趣, 并逐渐被人们所接受。多层递阶方法在输入输出等价的意义下, 能把一大类非线性模型化成多层线性模型, 由于其充分注意到参数可能的时变特性, 因而更利于解决某些预报问题。

多层递阶方法是以时变参数模型的辨识方法为基础的^[2], 所以首先为控制理论界所接受; 由于其应用的广泛性, 又很快引起许多领域学者的关注。控制理论界、石油界和气象界的一些学者^[3,4], 对多层递阶方法的发展做出了重要的贡献。多层递阶方法正

逐渐成为控制科学和预测科学中的一个新的研究方向。

本文的目的是对多层递阶方法的理论研究和近期应用的成果进行系统的介绍。

2 多层递阶方法

多层递阶方法包括多层递阶辨识、多层递阶预报和多层递阶控制。

2.1 多层递阶辨识

多层递阶辨识为非线性系统的建模提供了一条有效的途径。该辨识方法的根本点在于, 很广泛的一

收稿日期: 2000-06-02

作者简介: 韩志刚(1934—), 男, 河北乐亭人, 教授, 博士生导师, 从事复杂系统的建模、预报、智能控制与无模型控制器等研究。

类非线性模型,可以在输入输出等价的意义下被一个多层的线性模型所代替。

定义 1 设 S_1 和 S_2 是两个动态系统,如果过去时刻的输入输出数据相同,现在时刻的同一个输入在 S_1 和 S_2 中产生相同的输出(如果是随机的,则要求输出的期望值相同),则说系统 S_1 和 S_2 是输入输出等价的;如果不管过去的输入输出如何,现在的同一个输入在 S_1 和 S_2 中都产生相同的输出(或输出期望值),则说 S_1 和 S_2 是输入输出强等价的。

设 S 是一个动态系统,不妨设其时滞为 1,用 $\{u(k-1), y(k)\}$ 表示 S 的一组输入输出数据,其中 $u(k)$ 为输入, $y(k)$ 为输出, k 表示时间。则 k 时刻和 $k+1$ 时刻的两组输入输出数据 $\{u(k-1), y(k)\}$ 和 $\{u(k), y(k+1)\}$ 称为系统 S 的两组相邻时刻的数据。于是有:

定义 2 设 S 是一个动态系统, $F = \{S_j; j = 1, \dots, J\}$ 是一族动态系统,如果对于 S 的任何两组相邻时刻的数据,皆有 F 中的一个系统 S_i ,使得它也以这两组数据为相同相邻时刻的数据,则说 S 能被嵌入到 F 中。进一步,如果 F 中的任何一个动态系统 S_i 的两组相邻时刻的数据,必为 S 的相同相邻时刻的数据,则说系统 S 和系统族 F 是输入输出等价的。

关于多层递阶辨识有下述基本结论:

结论 1 设动态系统 S_1 可被下列模型所描述

$$y(k) = \Psi(k)^T \eta(k) + v(k) \quad (1)$$

其中, $y(k)$ 是输出, $\Psi(k)$ 是由观测数据构成的向量, $\eta(k)$ 是时变参数向量, $v(k)$ 是模型的未知随机部分。则必存在随机时变参数向量 $\theta(k)$,使得如下描述的系统 S_2

$$y(k) = \Psi(k)^T \theta(k) \quad (2)$$

与 S_1 输入输出等价。

结论 2 如果非线性系统的模型具有如下形式

$$y(k) = f\{Y_{k-1}^{k-n}, U_{k-1}^{k-m}, \xi(k), k\} + e(k) \quad (3)$$

其中

$$Y_{k-1}^{k-n} = \{y(k-1), y(k-2), \dots, y(k-n)\}$$

$$U_{k-1}^{k-m} = \{u(k-1), u(k-2), \dots, u(k-m)\}$$

$y(k)$ 是一维输出, $u(k)$ 是输入, $\xi(k)$ 是时变参数向量, $e(k)$ 是随机噪声, n 和 m 是模型阶数。则在输入输出等价的意义下,可将以上模型写成下列形式

$$y(k) = \mathcal{Q}(k)^T \theta(k) \quad (4)$$

其中 $\mathcal{Q}(k) = (y(k-1), \dots, y(k-n),$

$$u(k-1), \dots, u(k-m))^T$$

$\theta(k)$ 是相应适当维数的随机时变参数向量。

2.2 多层递阶预报

多层递阶方法的应用收到最明显效果的是多层递阶预报。这种预报方法的基本思想是充分注意到预报模型的时变特性。可将预报问题分成两部分,即预报模型时变参数的预报和在此基础上得出的对预报对象的预报。根据多层递阶辨识的结果,无论系统是线性的还是非线性的,总可以把向前一步的预报模型写成如下形式

$$\begin{aligned} \hat{y}(k+1|k) = & \alpha_0(k)y(k) + \alpha_1(k)y(k-1) + \dots + \\ & \alpha_n(k)y(k-n) + \beta_0(k)u(k) + \\ & \beta_1(k)u(k-1) + \dots + \beta_m(k)u(k-m) \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $y(k)$ 是预报对象在 k 时刻的观测值; $u(k)$ 是预报量影响因子在 k 时刻的观测值,不失一般性假定它们都是一维的; $\alpha_0(k), \alpha_1(k), \dots, \alpha_n(k)$ 和 $\beta_0(k), \beta_1(k), \dots, \beta_m(k)$ 是随机时变参数, n 和 m 是模型阶数; $\hat{y}(k+1|k)$ 是向前一步的预报结果。设

$$\theta(k) = (\alpha_0(k), \dots, \alpha_n(k), \beta_0(k), \dots, \beta_m(k))^T \quad (6)$$

则 $\{\theta(k)\}$ 形成一个新的多维随机序列。对该序列再建立一个向前一步的预报模型。例如

$$\begin{aligned} \hat{\theta}(k+1|k) = & \alpha_0(k)\theta(k) + \dots + \alpha_{n_1}(k)\theta(k-n_1) \end{aligned} \quad (7)$$

该预报模型称为第 2 层预报模型。如果其参数 $\alpha_0(k), \alpha_1(k), \dots, \alpha_n(k)$ 都是非时变的,则建模过程即终止。于是可依据这个两层模型进行预报;否则还须建立第 3 层,第 4 层, ... 预报模型。

应用实践表明,一般情况下建立两层预报模型就足够了。如果适当选择模型阶数 n, m 及 n_1 等,可使预报模型的层数减少。

关于用同样方法建立向前 h 步的预报模型,这里不再详述。

2.3 多层递阶控制

多层递阶控制方面的前期成果是得到了参数预报自适应控制律和稳定的参数自适应控制^[5,6]。

从 20 世纪 90 年代初开始,多层递阶控制的研究有了长足的进展。在多层递阶控制的基础上提出的无模型控制理论和技术引起了控制界的重视,目前已成为一个新的研究方向。

3 理论研究的一些进展

20 世纪 90 年代初,在多层递阶方法的基础上提出了具有引导变量的多层递阶预报模式。这种模式的提出主要是为了解决具有周期性、季节性变量的预报问题^[7]。该模式的要点在于:考虑具有周期性和

趋势性的预报对象(输出值) $y(k)$ 和预报因子(输入值) $u(k)$,用 p 表示 $\{y(k)\}$ 的周期长度。引入趋势性因子 β_{k+1} ,它是动态系统在第 $k+1$ 周期所有输出值总和与它在第 k 周期所有输出值总和的比值。在此基础上引入引导变量 G_k ,它有两种形式:

1) 滞后形式

$$G_k = \alpha y(k-p) + (1-\alpha)\beta_{k/p} y(k-2p) \quad (8)$$

其中 α 满足 $0 < \alpha < 1$;

2) 非滞后形式

$$G_k = \beta_{k/p} [\alpha y(k-p) + (1-\alpha)\beta_{k/p} y(k-2p)] \quad (9)$$

其中 $[k/p]$ 表示 k/p 的整数部分。于是具有引导变量的预报模型一般形式可写成

$$\hat{y}(k+1|k) = F(Y_k^{k-n}, U_k^{k-m}) + \alpha(k) \{G_k - F(Y_k^{k-n}, U_k^{k-m})\} \quad (10)$$

其中, $F(\bullet)$ 是模型的自回归部分,它可能是线性的,也可能是非线性的; $\alpha(k)$ 是时变参数,用多层递阶方法来确定。

实践表明对于预报问题而言,仅考虑模型参数的时变性是不够的,有时还要考虑模型结构的时变性,并且可能是随机的。所以文献[8]专门研究了“结构随机变化系统的多层递阶预报”问题,这一结果的关键技术是给出了检验结构改变的判据。

在预报实践中不难发现,有时对于同一个预报对象,在不同的时期应该用不同的预报模型,即同一个预报对象应该用多个预报模型来描述。对于同一个预报问题在不同的预报阶段所采用的辨识和预报方法,也可能不同,所以面临着一个辨识和预报方法的选择问题。这就促使我们在多层递阶方法的基础上,提出了多模型多方法综合预报模式^[9,10]。

这一模式的基本点包括:

1) 模型族

$$M = \{M_i, I\} \quad (11)$$

其中, M_i 表示某个具体的预报模型, I 是指标集。例如

$$M_1: A(q^{-1})y(k) = e(k) \quad (12)$$

$$M_2: A(q^{-1})y(k) = q^{-h}b(q^{-1})u(k) + e(k) \quad (13)$$

等。其中

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_nq^{-n}$$

$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1q^{-1} + \dots + b_mq^{-m}$$

$a_1, \dots, a_n, b_0, b_1, \dots, b_m$ 是模型参数, q^{-1} 是一步延迟算子。

2) 算法族

$$A = \{A_j, J\} \quad (14)$$

其中, A_j 表示具体的某种算法, J 是指标集。

算法族中包含时变参数的辨识算法集和时变参数估值序列的预报算法集。例如,辨识算法有递推最小二乘法,推广的递推梯度算法等;时变参数估值序列的预报算法族中包括:AR模型法、周期增量法、均值近似法、周期变量法等。应用这些方法时,预报模型只选两层就足够了。

3) 判据

为解决模型、算法与预报对象的最佳匹配问题,我们提出了预报准确度判别法。此外,解决这一问题也可应用F检验法等。

一些学者对多层递阶预报方法提出了某些改进。例如,王运格等^[11]发展了多层递阶方法,把离线算法改进为在线算法,这种方法不仅计算简便,且易于上机实现。张万诚等^[12]考虑了预报因子的突变性和时变参数的非平稳性,对多层递阶方法进行了有效的改进。李邦宪在文献[4]中对多层递阶理论和方法进行了详细的介绍。在近10年中,我们在多层递阶控制方面也进行了一系列的研究工作^[13-16]。

4 近年来应用研究的成果

从1997年至1999年,众多领域的学者在多层递阶预报方法的应用研究中取得了一系列令人鼓舞的成果。具体表现在以下几方面:

4.1 在气象领域中的应用

冯利华利用多层递阶预报方法对登陆台风进行了预报^[17]。他指出,在多层递阶方法中,时变参数的预报是至关重要的一环,应根据时变参数估值序列的变化特点,采用合适的预报方法。针对登陆台风预报模型的时变参数都具有一定的周期性变化,他采用多层递阶和逐步回归周期分析相结合的方法,使预报结果的相对误差仅为0.66%,而经典的自回归预报的相对误差为14.59%。

聂桂珍和任崇^[18]利用多层递阶周期分析对西沙海区热带气旋做了长期预报。他们也是采用逐步回归周期分析与多层递阶方法相结合的预报模型,用时间序列的显著周期分量取代经典模型的自回归部分,使其能更好地反映气象要素自身的演变规律。他们把这种多层递阶模型称为多层递阶周期分析。

周家斌和黄嘉佑^[19]列出了统计气象学的10个有意义的发展方向,其中包括多层递阶方法。并指

出: 由于在多层递阶方法中考虑了自回归方程系数的时变性, 推导出求时变系数公式. 该方法用于气象预报取得了较好的效果.

4.2 在水利方面的应用

王博等把多层递阶方法应用于河流月径流序列的预报. 月径流序列是一类具有周期变化的非平稳序列. 文献[20]根据其特点建立了多层递阶预报模型, 并对其进行了深入的探讨.

卢华友等^[21]利用多层递阶回归分析制定了水库优化调度函数. 他们采用多层递阶和回归分析相结合的方法, 建立了水库决策变量与其影响因素之间的动态调度函数模型, 即多层递阶回归分析模型, 并进行了实例研究, 取得了较为满意的成果.

4.3 在农业病虫害预报中的应用

汪四水等采用多层递阶方法对稻纵卷叶螟进行了长期预报, 所用的预报模型是CAR模型, 即

$$y(k) = \sum_{i=1}^n A_i(k)y(k-i) + \sum_{j=1}^m B_j(k)u_j(k) + e(k) \quad (15)$$

其中, $y(k)$ 是被预报量, $u_j(k)$ ($j = 1, 2, \dots, m$) 是 m 个预报因子, $e(k)$ 是随机噪声.

由于各预报因子之间绝对值差异很大, 量纲不同, 因而采用标准化方法将数据进行标准化. 应用多层递阶方法对 $y(k)$ 进行预报, 可减小误差, 并提高预报精度. 此方法应用于稻纵卷叶螟的长期预报, 结果较为准确^[22].

4.4 在经济和金融系统中的应用

闫冀楠等^[23]利用多层递阶方法对上海股市CA PM 进行实证研究, 并指出: 多层递阶方法对历史的拟合能力, 远强于目前使用的OLS方法, 对未来的预测能力也优于看似已超长发挥作用的OLS, 而且更为重要的是, 多层递阶方法建立了风险资产的系数时间序列. 这为进一步深入分析这一重要投资指标提供了极大方便, 为投资者实时监控各项资产的风险特性, 动态进行投资决策提供了有力工具.

徐纲等^[24]应用多层递阶预测与灰色预测综合预测法对汇率波动进行了预测. 他们提出运用多层递阶方法, 通过辨识时变参数, 建立时变参数动态预测模型; 在此基础上进一步运用灰色预测方法, 通过对时变参数的预测来预测汇率波动. 实例表明, 该法与非时变多项式回归预测比较, 有效地提高了预测精度.

此外, 还有人把多层递阶方法应用于预测矿坑

涌水量^[25].

5 结 语

正如一些学者所指出: 多层递阶方法是近几年提出并发展起来的含时变参数的新型统计预测理论. 其最显著的特点是采用时变参数, 能够对客观实际进行精确拟合, 准确地反映波动特征.

多层递阶方法在应用中取得了令人满意的效果, 但与之相比, 理论研究则显出一定的不足. 文献[26]把1996年以前的理论研究做了初步的总结. 目前, 多层递阶方法的理论与应用研究还在蓬勃发展中.

在本文结束时, 我们提出一个命题: 在一定的条件下, 多层线性模型可以将非线性模型逼近到任意的精确程度. 希望有人能给出这一命题的证明.

参考文献:

- [1] 韩志刚. 动态系统预报的一种新方法[J]. 自动化学报, 1983, 9(3): 161-168
- [2] 韩志刚. 动态系统时变参数的辨识[J]. 自动化学报, 1984, 10(4): 330-337
- [3] 汤兵勇, 张海涛. 环境系统工程[M]. 北京: 环境出版社, 1992
- [4] 李邦宪. 动态系统预测的多层递阶方法[M]. 北京: 气象出版社, 1996
- [5] 韩志刚, 汤兵勇. 参数预报自适应控制方法及其在农业中的应用[J]. 控制理论与应用, 1985, 2(4): 44-52
- [6] 韩志刚. 稳定的参数自适应控制系统及其应用[J]. 控制理论与应用, 1987, 4(4): 76-81
- [7] 韩志刚, 汤兵勇, 陈福厚, 等. 一类具有引导变量的模型的分析[J]. 控制与决策, 1993, 8(5): 385-388
- [8] 韩志刚. 结构随机变化系统的多层递阶预报[J]. 自动化学报, 1990, 16(5): 424-428
- [9] 韩志刚. 动态系统预报的多模型多算法综合模式[J]. 系统工程学报, 1991, 6(2): 27-33
- [10] Han Zhigang. The synthetic prediction pattern of multiple model systems [J]. Science and Systems Engineering, 1993, 2(1): 75-83
- [11] 王运格, 王群. 多层递阶预报方法及其改进[J]. 河北师范大学学报(自然科学版), 1998, 22(4): 459-461
- [12] 张万诚, 王崇. 非线性动态系统预报的一种方法初探[J]. 大气科学, 1997, 21(1): 118-123
- [13] 韩志刚. 多层递阶方法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1989

(下转第 185 页)

用时间和费用各不相同。若模型中再引入设备因素, 则不同设备也将有不同的处理时间和费用。

基于上述数据, 可对模型进行时间分析和成本分析(参见表 2)。

表 2 中, x_n 为流程 a 中可能的顺序引发序列的个数, $x_n \geq 1$; a_{ki} 为流程 a 的第 i 个顺序引发序列中第 k 个变迁所对应的变迁序号; $C_x(t_{a_{ki}})$ 为 $t_{a_{ki}}$ 在流程 a 的第 x 个执行例中的出现色; m_a 为流程 a 实际可能的互不相同的执行例个数, $m_a \geq 1$; γ_l 为流程 a 的第 l 个执行例实际出现的比率, $0 < \gamma_l < 1$, $\sum_{l=1}^{m_a} \gamma_l = 1$ 。

表 2 列出的各分析指标不同程度地体现了顾客接受服务的速度与质量, 是决定顾客满意度的重要因素。通过对其综合分析评价, 可对流程的优化重组提供有益的改进意见。

4 结 语

面向 BPR 的流程建模和仿真工具及方法是实施 BPR 的关键技术之一。本文提出的 BPR-PN 模型继承了 Petri 网对复杂过程关系的表达能力, 通过引入组织属性, 增强了对组织因素的表达能力; 通过引入时间和费用等与时间或经济效果有关的参数, 增

强了流程模型对仿真分析与评价的支持能力。针对 BPR-PN 的实际运用, 提出一种自顶而下的流程建模过程, 并探讨了其一般步骤及内容。

关于 BPR-PN 的流程仿真, 本文在基于仿真的 BPR 方法框架的基础上, 针对仿真运行管理和仿真数据分析等关键问题做了具体探讨。

参考文献:

- [1] Xue Huacheng, Hu Jian, Huang Lihu. Business process reengineering: A review [A]. Proc of the 4th Int Conf on Industrial Engineering and Engineering Management [C]. Hong Kong, 1997. 18-22
- [2] Andrew Kusiak, T Nick Larson, Juite Wang. Reengineering of design and manufacturing processes[J]. Computers Ind Engng, 1994, 26(3): 521-536
- [3] C A Petri. Kommunikation mit Automaten. PhD Thesis [D]. Bonn: Institute fuer instrumentelle Mathematik, 1962
- [4] W M P Van Der Aalst. The application of Petri nets to workflow management [J]. J of Circuits System and Computers, 1998, 8(1): 21-66
- [5] 乔非, 吴启迪, 沈荣芳. 面向企业过程重建的事务流程模型研究与应用[J]. 系统工程理论与实践, 1999, 19(1): 39-46

(上接第 132 页)

- [14] 韩志刚. 非线性自适应控制系统设计的一种方法[J]. 控制与决策, 1990, 5(6): 39-45
- [15] 韩志刚. 同参数估计对偶的自适应控制算法[J]. 控制理论与应用, 1992, 9(4): 374-379
- [16] 韩志刚. 自适应控制系统设计的参数辨识途径[J]. 自动化学报, 1992, 18(6): 712-715
- [17] 冯利华. 登陆台风的多层递阶预报[J]. 海洋预报, 1999, 16(1): 29-34
- [18] 聂桂珍, 任崇. 用多层递阶周期分析作西沙海区热带气旋长期预报[J]. 海洋预报, 1997, 14(2): 53-57
- [19] 周家斌, 黄嘉佑. 近年来中国统计气象学的新进展[J]. 气象学报, 1997, 55(3): 296-303
- [20] 王博, 马跃先. 月径流序列的多层递阶预报研究[J]. 系统工程理论与实践, 1999, (7): 132-135
- [21] 卢华友, 郭元裕. 利用多层递阶回归分析制定水库优化调度函数的研究[J]. 水利学报, 1998, (12): 71-77
- [22] 汪四水, 张孝羲. 多层递阶法在稻纵卷叶螟长期预报中的应用[J]. 西南农业大学学报, 1998, 20(5): 523-527
- [23] 闫冀楠, 张维. 利用 ML POM 对上海股市时变 CAPM 的实证研究[J]. 预测, 1998, (2): 60-62
- [24] 徐纲, 许志英. 汇率波动的预测研究[J]. 上海大学学报(自然科学版), 1999, 5(5): 441-444
- [25] 郭飞, 朱学愚. 多层递阶非平稳时间序列模型预测矿坑涌水量[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2000, 36(3): 300-304
- [26] 韩志刚, 蒋爱平. 自适应辨识、预报和控制多层递阶途径[M]. 哈尔滨: 黑龙江教育出版社, 1995