

文章编号: 1000-8055(2004) 04-0577-04

航空发动机的一种 Volterra 级数 非线性动态模型

宋志平¹, 程 礼², 魏瑞轩¹

(1. 西安交通大学 电子与信息工程学院, 陕西 西安 710049;
2. 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要: 研究航空发动机的非线性动态模型的建立问题。利用 Volterra 级数对航空发动机的动态过程进行描述, 建立非线性模型, 提出了模型的辨识算法。利用某型涡扇发动机的动态仿真, 进行了发动机 Volterra 模型辨识及验证。结果表明, Volterra 模型可以描述发动机从慢车与最大间的动态过程。
关键词: 航空、航天推进系统; 航空发动机; 非线性模型; Volterra 级数
中图分类号: V 233. 7 **文献标识码:** A

A Volterra Progression Model of Nonlinearity Dynamic Response of Aero Engine

SONG Zhi-ping¹, CHENG Li², WEI Rei-xuan¹

(1. Electron and Information Engineering College, Xi'an Jiaotong University,
Xi'an 710049, China;
2. Engineering college, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Modeling of nonlinearity dynamic response of the aero engine was studied. The dynamic process of the aero engine was described by using the Volterra progression model. And identification arithmetic of the Volterra progression model for aero engines was proposed. It was applied to a certain turbofan engine by imitating the dynamic response. The Volterra progression model can describe the dynamic process from low to high rotating speed of aeroengine.

Key words: aerospace propulsion system; aero engine; nonlinearity dynamic model; Volterra progression

航空发动机是一种典型的非线性系统, 其动态非线性模型的建立, 是尚未解决的难点问题。近年来, 出现了一些发动机动态非线性模型的研究^[1, 2], 但是这些模型的实用性还有所不足, 其模型准确性通常存在一定的约束。因而, 小偏差线性

模型还是常用模型^[3]。
Volterra 级数模型是非线性系统的一种输入输出模型, 是线性脉冲响应函数对非线性系统的扩展。近年来, 出现了 Volterra 级数模型的理论分析和基于它的控制算法研究^[4]。本文中, 将

收稿日期: 2003- 12- 17; 修订日期: 2004- 05- 13
基金项目: 青年自然科学基金资助项目(60304004)(2004)
作者简介: 宋志平(1973-), 男, 山东荣成人, 西安交通大学电子与信息工程学院博士后, 主要从事航空发动机控制与系统可靠性研究。

Volterra 模型应用于对航空发动机的动态描述, 建立非线性模型, 提出了辨识算法, 并进行了仿真验证。

1 发动机的 Volterra 级数模型

1.1 Volterra 级数模型

对于单输入输出、连续、因果的非线性系统, 其输入输出关系就可表示成如下的 Volterra 泛函级数形式:

$$y(k) = \sum_{n=1}^N \sum_{m_1=0}^{M-1} \cdots \sum_{m_n=0}^{M-1} h_n(m_1, m_2, \cdots, m_n) \prod_{i=1}^n u(k - m_i) + e(k) \quad (2)$$

对于多输入输出系统, 输入为 $u_j(k) \{j=1, \cdots, J\}$, 则对于任一输出 $y^{(z)}(k)$ 可表示为:

$$y^{(z)}(k) = \sum_{n=1}^N \sum_{q_1=1}^J \cdots \sum_{q_n=1}^J \sum_{m_1=0}^{M-1} \cdots \sum_{m_n=0}^{M-1} h_n^{(z)}(m_1, \cdots, m_n, q_1, \cdots, q_n) \cdot \prod_{i=1}^n u_{q_i}(k - m_i) + e(k) \quad (3)$$

式中, $h_n^{(z)}(m_1, \cdots, m_n, q_1, \cdots, q_n)$ 为输出 $y^{(z)}(k)$ 的 n 阶 Volterra 核。

1.2 发动机的 Volterra 模型

双涵道涡扇发动机, 考虑以供油量 w_f 、进气总温 T_1^* 为输入, 不妨选高压转速 n_H 为输出, 则 n_H 与输入间的 Volterra 模型为:

$$n_H(k) = \sum_{n=1}^N \sum_{q_1=1}^2 \cdots \sum_{q_n=1}^2 \sum_{m_1=0}^{M-1} \cdots \sum_{m_n=0}^{M-1} h_n^{(n_H)}(m_1, \cdots, m_n, q_1, \cdots, q_n) \cdot \prod_{i=1}^n u_{q_i}(k - m_i) + e(k) \quad (4)$$

其中, $u_1(k) = w_f(k)$, $u_2(k) = T_1^*(k)$ 。则, $h_n^{(n_H)}(m_1, \cdots, m_n, q_1, \cdots, q_n)$ 为高压转子转速与输入间的第 n 阶 Volterra 核。对于其它输出, 如低压转子转速 n_L 、涡轮后温度等, 也可以建立它们与输入间的 Volterra 模型。

式(4)中, 若 N 取 1, 则为线性的脉冲响应模型, 是发动机的小偏差模型。随着 N 的阶次的增加, 其模型准确描述的范围增大, 因而从理论上讲在发动机的工作范围内, 存在一个最高的阶次 N , 使得模型对发动机的描述是准确的。

最高阶次 N 越低, 则发动机的 Volterra 模型更简洁, 辨识算法更简单。实际的模型建立中, 需要选取一个平衡点 $(n_{H_0}, w_{f0}, T_{1_0}^*)$ 为基准点, 以 $n_H(k) - n_{H_0}$ 为输出, 以 $w_f(k) - w_{f0}, T_1^*(k) - T_{1_0}^*$ 为输入, 建立如式(4)的模型。基准点选取的恰当, 可以降低最高阶次 N , 而不增大截尾误差。通常可以选取发动机的中间转速, 如巡航状态转速为基准点。

1.3 辨识方法

定义发动机的输入矩阵:

$$y(t) = \sum_{n=1}^{\infty} y^n(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \cdots \int_{-\infty}^{\infty} h_n(\tau_1, \tau_2, \cdots, \tau_n) \prod_{i=1}^n u(t - \tau_i) d\tau_i \quad (1)$$

其中, $y^n(t)$ 称为非线性系统的输出的第 n 阶分量, $h_n(\tau_1, \cdots, \tau_n)$ 称为非线性系统的第 n 阶 Volterra 时域核。

将(1)式离散化, 考虑记忆长度 M 、Volterra 核的最高阶次 N 及截尾误差 $e(k)$, 可得:

$$P = [U(k), U(k+1), \cdots, U(k+n-1)]^T$$

其中 $U(k)$ 为 k 时刻的输入向量:

$$U(k) = [T_1^*(k), w_f(k), \cdots, T_1^*(k-M+1), w_f(k-M+1), T_1^*(k) \cdot T_1^*(k), T_1^*(k) \cdot w_f(k), \cdots, w_f(k-M+1) \cdot w_f(k-M+1), \cdots, w_f^N(k-M-1)]$$

定义系统的输出向量:

$$Y = [n_H(k), n_H(k+1), \cdots, n_H(k+n)]^T$$

定义发动机的截断 Volterra 核向量:

$$\theta = [h_1(0, T_1^*), h_1(0, w_f), \cdots, h_1(M-1, T_1^*), h_1(M-1, w_f), h_2(0, 0, T_1^*, T_1^*), h_2(0, 0, T_1^*, w_f), \cdots, h_2(M-1, M-1, w_f, w_f), \cdots, h_n(M-1, \cdots, M-1, w_f, \cdots, w_f)]^T$$

则有:

$$Y = P\theta + e \quad (5)$$

根据输入输出序列 $n_H(n), T_1^*(n), w_f(n)$, 利用最小二乘法求解方程组(5), 可以辨识 Volterra 核向量 θ 。

当最高阶次 N 较高时候, 辨识的计算量很

大, 由于高阶核在输出中的影响趋于收敛, 通常比较小, 因而其核的辨识密度可以降低, 选取适当的辨识步长, 以减少计算量。

2 仿 真

对于某型涡扇发动机, 为简化仿真结果(不影响方法的应用), 假设进气条件不变, 考虑燃油流量为输入, 高压转子转速为输出。利用发动机动态模型的仿真方法^[5], 得到输入输出序列, 进行 Volterra 级数模型的辨识。过程及结果如下:

- (1) 设计输入序列 $w_f[k]$, 输入步长 0.01 s, 仿真^[5]得到发动机的高压转子转速序列 $n_H[k]$ 。
- (2) 取发动机 Volterra 最高阶次为 3, 三阶 Volterra 核的辨识边长 M 分别取值为 30, 12, 7, 根据高阶 Volterra 的对称性^[6], 各阶核的辨识量为 (30, 78, 84) 利用 1.3 中的方法, 以巡航转速 ($n_H = 0.88$) 为基准点, 辨识发动机的三阶 Volterra 核。图 1 为一阶核曲线, 二阶核为曲面, 图 2 分别为 2 阶核曲面的对角线 $h_2(0, 12) \sim h_2(12, 0)$ (图 2a) 和对角线 $h_2(0, 0) \sim h_2(12, 12)$ (图 2b)。
- (3) 重新选取输入序列 $w_f'[k]$ (图 3a 所示)。

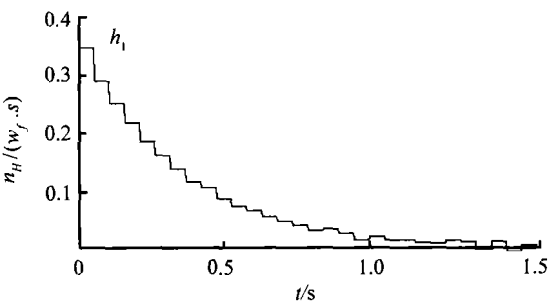


图 1 高压转子与燃油流量间一阶 Volterra 核曲线

Fig. 1 The one rank Volterra nucleus of high rotor to oil rate of areoengine

仿真得到输出序列 $n_H'[k]$, 同时根据辨识的 Volterra 核, 利用式 (2) 求解输出序列 $n_H''[k]$, 对比两个序列 (图 3b 所示), 两者比较吻合, 其差别在平衡点附近更小, 而小偏差线性模型的输出序列则与仿真结果有较大的偏差 (图 3b 所示)。表明 3 阶 Volterra 核可以较好的描述发动机在慢车到最大之间的动态工作过程, 对巡航转速附近的过程则可以精确描述。

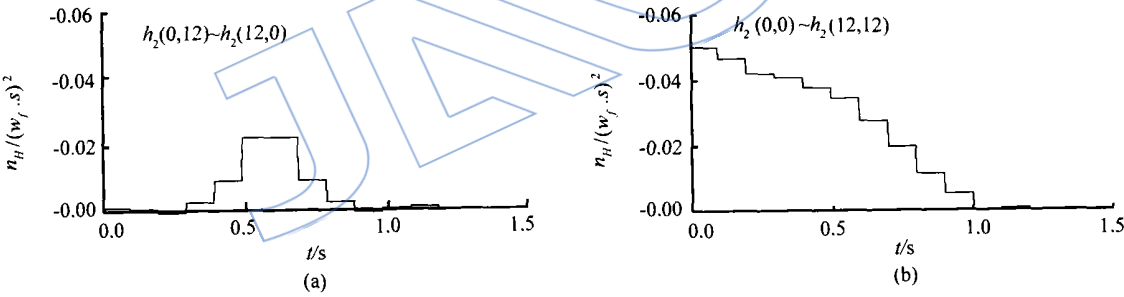


图 2 发动机二阶 Volterra 核的对角曲线

Fig. 2 The diagonal line of two rank Volterra nucleus of areoengine

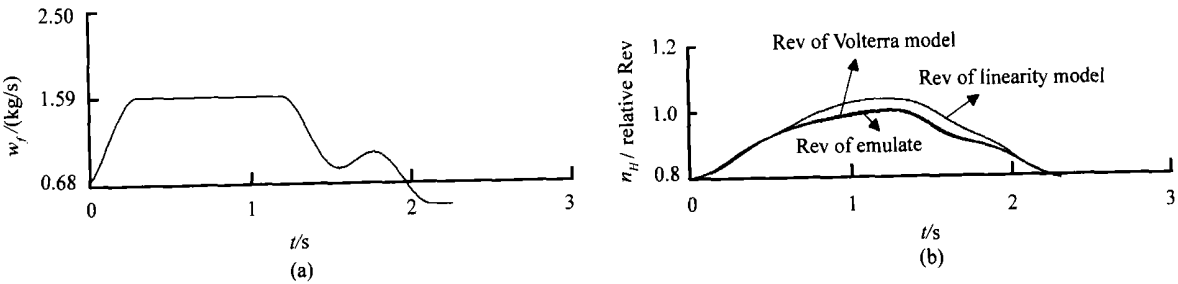


图 3 (a) 发动机仿真中供油量变化曲线; (b) Volterra 模型输出与仿真输出的对比曲线

Fig. 3 (a) The change of oil mass as input of areoengine;
(b) The contrast of high rotor change curve between Volterra model areoengine and the emulate model

3 结束语

本文提出了航空发动机的 Volterra 级数模型,它是脉冲响应模型在非线性领域的扩展。这种模型可以较好地描述发动机慢车到最大间的各种动态过程,模型准确描述的约束性小。这种模型对发动机控制及故障诊断有较好的应用前景。

参考文献:

[1] LI Song-lin, SU N Jian-guo. Application of Genetic Algorithm to Solving Nonlinear Model of Aeroengines[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2003, 16(2): 69–72.

[2] 于达仁, 郭钰锋. 涡喷发动机风车启动工况的神经网络建模[J]. *推进技术*, 2001, 22(3): 183–186.

[3] 冯正平, 孙健国. 航空发动机小偏差变量模型的建立方法[J]. *推进技术*, 2001, 22(1): 54–57.

[4] Bershad N J, Ibn kahla M, Castanie F. Statistical Analysis of a Two-Layer Backpropagation Algorithm Used for Modeling Nonlinear Memoryless Channels: The single Neuron Case[J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1997, 45(3): 747–756.

[5] 屈裕安, 谢寿生, 宋志平. 某型涡扇发动机动态特性仿真研究[J]. *航空动力学报*, 2003, 18(4): 530–533.

QU Yu-an, XIE Shou-sheng, SONG Zhi-ping. Simulation of Dynamic Performance of a Turbofan Engine[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2003, 18(4): 530–533.

[6] Ruixuan Wei, Chongzhao Han. A Robust Total Least Mean Squares Algorithm for Nonlinear Adaptive Filter[J]. *Processing of 4th Annual Conference on Information Fusion, Printed in Canada by LM Canada*, 2001, 2: FrA3–35~FrA3–40.

[7] Panicker T M, Mathews V J. Parallel-Cascade Realizations and Approximations of Truncated Volterra Systems[J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1998, 46(10): 2829–2832.