

文章编号: 1000-8055(2009)02-0465-05

基于 Volterra-Laguerre 扩展模型的 发动机加速过程辨识

王海涛, 谢寿生, 胡金海, 彭靖波
(空军工程大学 工程学院, 西安 710038)

摘 要: 提出了航空发动机的动态非线性 Volterra-Laguerre 扩展模型的辨识建模方法. 应用 Laguerre 序列简化线性系统的原理, 将 Volterra 级数模型拓展为 Volterra-Laguerre 扩展模型, 该模型较传统 Volterra 级数模型减少了辨识量, 提高了辨识速度. 采用航空发动机地面试车数据辨识建立了其加速过程非线性 Volterra-Laguerre 扩展模型, 通过递推最小二乘法辨识了模型参数. 仿真结果表明, 模型精度高, 高低压转子相对转速误差均小于 1%, 涡轮后燃气温度误差小于 3℃, 满足发动机控制仿真的需要.

关 键 词: 航空发动机; 仿真; Volterra-Laguerre 扩展模型; 非线性模型
中图分类号: V235.1 **文献标识码:** A

Dynamic acceleration process identification for turbofan engine using Volterra-Laguerre expansion model

WANG Haitao, XIE Shousheng, HU Jinhai, PENG Jingbo
(The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: The problem of modeling the nonlinear dynamic response of aeroengine was studied based on the volterra-laguerre expansion. The structure of Volterra-Laguerre expansion was described and the identification arithmetic of the volterra-laguerre progression model of aeroengine was proposed using the theory of laguerre progression. The comparison between the result of volterra model, the volterra-laguerre expansion and the true shows that the volterra-laguerre expansion can better describe the dynamic process from low to high rotating speed of aeroengine with less parameters that should be identified, and the dynamic simulation error of high and low rotors is less than 1% and the error of temperature exit of high pressure turbine is less than 3℃. The model is suitable for aeroengine and control system simulation.

Key words: aeroengine; simulation; Volterra-Laguerre expansion; nonlinear model

航空发动机是一个复杂的非线性系统, 研究发动机动态过程模型对于数控仿真和状态监控有着重要作用^[1]. 目前, 发动机建模主要有基于发动机部件特性的气动热力学模型和基于实际数据的辨识模型两类, 如文献[2]基于发动机机理过程建立了某型发动机的气动热力非线性动态模型, 文

献[3]则根据气动热力模型的小偏差动态响应建立了小偏差状态空间模型; 文献[4]以实测飞行数据作样本建立了不同高度的 RBF (Radial basis function) 神经网络模型, 文献[5]则基于部分数据样本建立了支持向量机模型等. 然而气动热力模型对发动机的部件特性依赖很大, 由于发动机

在制造和装配上存在误差,在使用过程中会出现性能蜕变,而且在模型平衡方程求解时常常因初猜值不在真实解附近而导致迭代算法不收敛,引起模型的发散.而神经网络存在局部极小值,且在隐层神经元结构选取等问题中没有理想的解决方法,受到结构的限制.

近年来,Volterra 级数模型在非线性过程描述和发动机辨识建模方面应用广泛.如文献[6]采用气动热力模型的仿真数据建立了发动机的低转速时的 Volterra 级数模型,该方法在精度方面较小偏差状态空间模型有所提高,但在巡航状态以上的高转速时仍有着较大误差.针对该问题可以采用较长的记忆长度,然而这将直接导致辨识量加剧和计算量增加.为此,本文应用 Laguerre 序列描述线性系统的原理,将 Volterra 级数模型简化为 Volterra-Laguerre 扩展模型,采用某发动机地面试车数据辨识建立了航空发动机加速过程非线性 Volterra-Laguerre 扩展模型.

1 Volterra-Laguerre 扩展模型原理

离散型 Laguerre 函数在线性系统的描述中有着广泛的应用^[7].考虑一个开环稳定的 Volterra 一阶系统即线性系统

$$y(k) = G(z)U = \sum_{i=0}^{\infty} h(i) \cdot u(k-i) \quad (1)$$

其中传递函数为 $G(z)$, 则存在数列 $\{\theta_k\}$ 使得

$$G(z) = \sum_{k=1}^{\infty} \theta_k \frac{\sqrt{1-a^2}}{z-a} \left(\frac{1-az}{z-a} \right)^{k-1}, k=1,2,\dots,$$

其中 $z < 1$, 时间比例因子 $a < 1$.

$$\left\{ \frac{\sqrt{1-a^2}}{z-a} \left(\frac{1-az}{z-a} \right)^{k-1} \right\}, k=1,2,\dots$$
 是一个标准正交的 Laguerre 序列.

令 $L_k(i) = Z^{-1} \left[\frac{\sqrt{1-a^2}}{z-a} \left(\frac{1-az}{z-a} \right)^{k-1} \right] (i)$, 则该

序列具有如下特性:

$$\sum_{i=0}^{\infty} L_{k1}(i) L_{k2}(i) = 0, \quad \forall k1 \neq k2 \quad (2)$$

$$\sum_{i=0}^{\infty} L_{k1}(i) L_{k2}(i) = 1, \quad \forall k1 = k2 \quad (3)$$

由于 Laguerre 序列构成了 $L^2(R^+)$ 函数空间上一组完备的归一化正交基.因此,对于 $L^2(R^+)$ 函数空间中 $\forall f(k) \in L^2(R^+), k=1,2,3,\dots$ 满足 $f(0) = 0$ 且 $\sum_{k=0}^{\infty} f^2(k) < \infty$, 则 $f(k)$ 可展开成 Laguerre 级数形式

$$f(k) = \sum_{i=1}^{\infty} \theta_i \cdot L_i(k) \quad (4)$$

其中 $\theta = \sum_{k=0}^{\infty} f(k) \cdot L_i(k)$, 如系统取 N 阶近似, 则

$$\theta = \sum_{k=0}^N f(k) \cdot L_i(k) \quad (5)$$

对于(1)式的线性系统分别取数据记忆长度为 m 和 Laguerre 基函数次数为 r , 作如下定义:

$$\Theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_J]^T \quad (6)$$

$$B = \begin{bmatrix} L_1(0) & L_2(0) & \dots & L_r(0) \\ L_1(1) & L_2(1) & \dots & L_r(1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ L_1(m-1) & L_2(m-1) & \dots & L_r(m-1) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$U_k = [u(k), u(k-1), \dots, u(k-m+1)]^T \quad (8)$$

则该线性系统可以近似表示为一个截断 Laguerre 扩展表达式

$$y(k) = U_k \cdot B \cdot \Theta \quad (9)$$

将上述的一阶系统分析方法推广到第 N 阶部分.该 N 阶部分的离散的表达式如下:

$$y(t) = \sum_{i_1=0}^{\infty} \dots \sum_{i_n=0}^{\infty} h^n(i_1, i_2, \dots, i_n) u(t-i_1) \dots u(t-i_n) \quad (10)$$

其中 $h^n(i_1, i_2, \dots, i_n)$ 是 n 阶 Volterra 级数核, 与一阶类似, 它可以用 Laguerre 序列描述如下:

$$h(i_1, i_2, \dots, i_n) = \sum_{j_1=1}^{\infty} \dots \sum_{j_n=1}^{\infty} \theta(j_1, j_2, \dots, j_n) L_{j_1}(i_1) \dots L_{j_n}(i_n) \quad (11)$$

其中

$$\theta(j_1, j_2, \dots, j_n) = \sum_{i_1=1}^{\infty} \dots \sum_{i_n=1}^{\infty} h(i_1, i_2, \dots, i_n) L_{j_1}(i_1) \dots L_{j_n}(i_n) \quad (12)$$

因此,稳定的 Volterra 泛函级数非线性系统可以表示成 Volterra-Laguerre 扩展序列式,对于连续 Volterra 泛函级数形式如式(13)的非线性系统^[8].

$$y(t) = h_0 + \int_0^{\infty} h_1(\tau_1) u(t-\tau_1) d\tau_1 + \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} h_2(\tau_1, \tau_2) u(t-\tau_1) u(t-\tau_2) d\tau_1 d\tau_2 + \dots \quad (13)$$

其中 $h_n(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)$ 是 Volterra 级数核, 其离散表达式如式(14)所示

$$y(k) = \sum_{n=1}^N \sum_{i_1=0}^{\infty} \cdots \sum_{i_n=0}^{\infty} h(i_1, i_2, \dots, i_n) u(k-i_1) \cdots u(k-i_n) \tag{14}$$

这种稳定的非线性系统, 其每阶 Volterra 核都属于 $L^2(R^+)$ 函数空间, 故可用 r 次 Laguerre 扩展表达式对其逼近. 因此, 非线性过程表达式可以表示为

$$y(k) = \sum_{n=1}^N \sum_{j_1=0}^{\infty} \cdots \sum_{j_n=0}^{\infty} \theta_n(j_1, j_2, \dots, j_n) \prod_{l=1}^n \sum_{i_l=1}^{\infty} L_{j_l}(i_l) u(k-i_l) \tag{15}$$

2 模型结构与辨识

为了更有利于辨识实现, 对 Volterra Laguerre 扩展式进行恰当的截断描述, 设定 $\hat{y}(k) \approx y(k)$, 阶数为 N , 记忆长度为 m 的 Volterra 级数模型可以描述如下:

$$\hat{y}(k) = \sum_{n=1}^N \sum_{i_1=0}^m \cdots \sum_{i_n=0}^m h_n(i_1, i_2, \dots, i_n) u(k-i_1) \cdots u(k-i_n) \tag{16}$$

使用前 r 个 Laguerre 函数 $L_1, L_2, \dots, L_r$ 去近似描述 $h_n(i_1, i_2, \dots, i_n), n = 1, 2, \dots, N$, 则由上式得到

$$\hat{y}(k) = \sum_{n=1}^N \sum_{j_1=1}^r \cdots \sum_{j_n=1}^r \theta_n(j_1, j_2, \dots, j_n) \prod_{l=1}^n \sum_{i_l=0}^m L_{j_l}(i_l) u(k-i_l) \tag{17}$$

由于该式有很多重复项, 因此通过合并重复项, 上式可以改进为

$$\hat{y}(k) = \sum_{n=1}^N \sum_{j_1=1}^r \sum_{j_2=1}^r \cdots \sum_{j_n=1}^r \theta_n(j_1, j_2, \dots, j_n) \prod_{l=1}^n \sum_{i_l=0}^m L_{j_l}(i_l) u(k-i_l) \tag{18}$$

定义直积运算如下:

$$a^{[2]} = a \otimes a = [a_1, a_2, \dots, a_n]^{[2]} = [a_1 \cdot a_1, a_1 \cdot a_2, \dots, a_2 \cdot a_2, a_2 \cdot a_3, \dots, a_n \cdot a_n] \\ a^{[i]} = a^{[i-1]} \otimes a, i \geq 2$$

则式 (18) 可以描述为

$$\hat{y}(k) = [U_k B, (U_k B)^{[2]}, \dots, (U_k B)^{[N]}] \cdot \Theta \tag{19}$$

其中 $\Theta = [\Theta^T, \Theta^T, \dots, \Theta^T]^T$, θ_n 与 $(U_k B)^{[n]}$ 具有相同的维数, B 和 U_k 定义分别如式 (7) 和 (8) 所述. 而 $(U_k B)^{[n]} \theta_n$ 对应为 Volterra 模型的第 n 阶部分.

在实际辨识过程中, 定义

$$Y = [y(1), y(2), \dots, y(M)]^T \tag{20}$$

$$\hat{Y} = [\hat{y}(1), \hat{y}(2), \dots, \hat{y}(M)]^T \tag{21}$$

$$X = \begin{bmatrix} U_1 B & (U_1 B)^{[2]} & \cdots & (U_1 B)^{[N]} \\ U_2 B & (U_2 B)^{[2]} & \cdots & (U_2 B)^{[N]} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ U_M B & (U_M B)^{[2]} & \cdots & (U_M B)^{[N]} \end{bmatrix} \tag{22}$$

$$Y \approx \hat{Y} = X \cdot \Theta \tag{23}$$

此时, 输入输出已经描述为准线性结构, 本文则采用改进递推最小二乘法对参数 Θ 进行辨识^[8-10].

3 航空发动机数学模型描述

某发动机的非加力主控制系统, 表征发动机工作状态的参数主要有 3 个: 高压转子转速 N_h 、低压转子转速 N_l 和涡轮后燃气温度 T_6 . 其调节规律主要是根据发动机进气总温分段保持其中一个物理参数或者相似参数不变; 其被控参数主要包括 N_h, N_l 和 T_6 等, 控制参数主要是主燃烧室燃油消耗量 w_f , 调节参数为进口导流叶片角 α 和喷口临界截面积 A_e 等. 对于该发动机, 其喷口面积在 N_h 低于 80% 时处于预开位置, 而高于 80% 时, 喷口收小处于最小位置; 进口导流叶片角 α 主要在 $N_h \setminus \sqrt{T_1}$ 界于 4.51 和 5.3 之间的低转速时起调节作用, N_h 在 87% 以上时处于最大位置. 因此, 该发动机在 $N_h = 87\%$ 至最大状态过程中的主要控制参数为主燃烧室燃油消耗量 w_f .

分析地面试车数据可知, 发动机进口温度变化不大, 因此发动机高压转子转速模型可以描述为如式 (24) 所示, 其中输入为供油量 w_f , 输出为工作参数 N_h . 低压转子转速和涡轮后燃气温度与之类似.

$$N_h(k) \approx \hat{N}_h(k) = \sum_{n=0}^N \sum_{j_1=1}^r \sum_{j_2=1}^r \cdots \sum_{j_n=1}^r \theta_n^{N_h}(j_1, j_2, \dots, j_n) \prod_{l=1}^n \sum_{i_l=0}^m L_{j_l}(i_l) w_f(k-i_l) \tag{24}$$

4 仿真结果

4.1 数据归一化及辨识量分析

由于发动机参数间的绝对数值相差较大, 直接使用会让模型收敛困难, 产生较大误差, 因此为使得到的辨识结果更精确, 保证模型参数的稳定, 需要将输入输出数据归一化为 $[0, 1]$ 区间, 得到供

油量 $w_t[k]$ 、高低压转子转速 $N_h[k]$, $N_l[k]$ 和涡轮后燃气温度 $T_6[k]$ 序列. 发动机数据来自地面试车数据, 采样间隔时间为 0.033 s.

设定时间比例因子 a 为 0.87, 记忆长度 m 为 20, 则 B 矩阵计算结果如式 (25); 对于发动机模

$$B=\begin{bmatrix} 0.4931 & -0.4290 & 0.3732 & -0.3247 & 0.2825 \\ 0.4290 & -0.2533 & 0.1161 & -0.0103 & -0.0700 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0.0350 & 0.1553 & 0.1703 & -0.0808 & -0.0951 \end{bmatrix}$$

(25)

4.2 辨识模型及仿真

利用 2 节中的方法, 辨识得到对应模型参数值如表 1 所示, 限于篇幅只给出了部分参数值, 含有 1 阶和 2 阶.

表 1 Volterra Laguerre 扩展模型参数值
Table 1 Model parameters of the Volterra Laguerre expansion

序号	N_h	N_l	T_6
$\theta_1(1)$	1.3703	2.3137	1.1192
$\theta_1(2)$	-1.620	-3.5472	-1.1162
$\theta_1(3)$	-0.9362	-1.3341	-0.1987
$\theta_1(4)$	1.14430	1.5994	0.2764
$\theta_1(5)$	0.0451	0.3743	0.1270
$\theta_2(1,1)$	1.2248	0.8943	0.0659
$\theta_2(1,2)$	1.4935		
$\theta_2(1,3)$	0.8858		
$\theta_2(1,4)$	-0.906		
$\theta_2(1,5)$	0.2204		
$\theta_2(2,2)$	0.0488		
$\theta_2(2,3)$	-0.056		
$\theta_2(2,4)$	0.0304		
$\theta_2(2,5)$	0.1083		
$\theta_2(3,3)$	-0.178		
$\theta_2(3,4)$	0.0941		
$\theta_2(3,5)$	0.0217		
$\theta_2(4,4)$	-0.059		
$\theta_2(4,5)$	-0.047		
$\theta_2(5,5)$	0.0318		

利用辨识所得模
原辨识数据进行验证,
另一次试车过程相似|
证, 仿真结果分别如图

型选定阶次为 3 的 Volterra 模型可以较精确描述该动态过程^[6]. 如果用记忆长度为 20, 次数为 3 的传统 Volterra 模型, 则核共有 1770 个; 而采用 Laguerre 基函数个数 r 为 5 的 Volterra-Laguerre 扩展模型则辨识参数为 55 个.

2 可知, Volterra-Laguerre 模型(点划线)较之传统 Volterra 模型(虚线)在稳态和动态过程中均更接近于试验值(实线). 从图 3 和图 4 来看, 两者区别更为明显, 传统 Volterra 模型在动态和稳态过程中均表现出较大误差, 偏离了真实曲线.

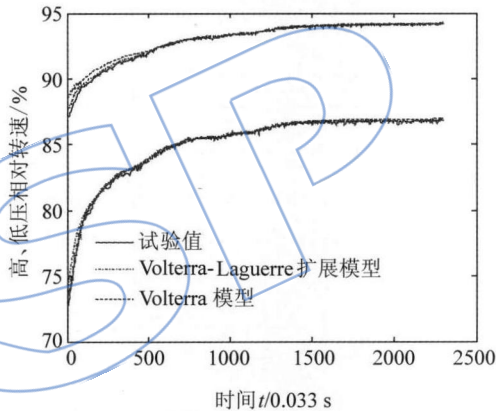


图 1 高低压转子转速的仿真结果(辨识用数据)
Fig. 1 Simulation result of high rotation speed and low
(Data used in identification)

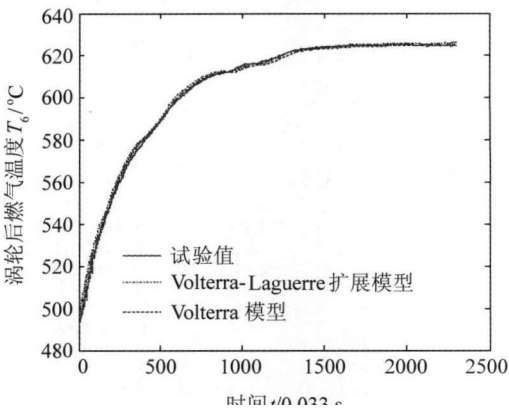


图 2 涡轮后燃气温度的仿真结果(辨识用数据)
Fig. 2 Simulation result of temperature exit of high
pressure turbine(Data used in identification)

分别将辨识用数据和推广用数据的仿真结果与真实值比较, 得到误差结果如表 2 所示. 从表 2 中可知, 高、低压转子转速动态 Volterra-Laguerre 模型误差小于 1%, 涡轮后燃气温度动态误差小

于 3℃, 较之传统 Volterra 模型更为有效, 更能精确地描述发动机的动态加速过程。

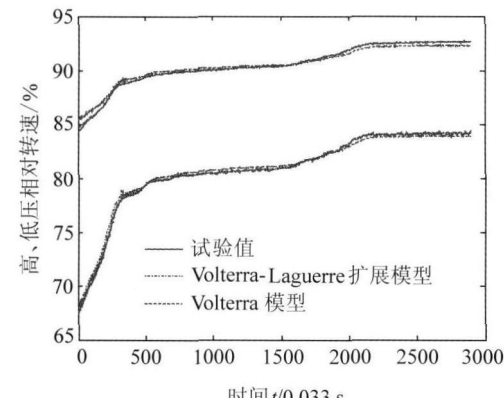


图 3 高、低压转子转速的仿真结果(推广用数据)
Fig. 3 Simulation result of high rotation speed and low pressure turbine (Data not used in identification)

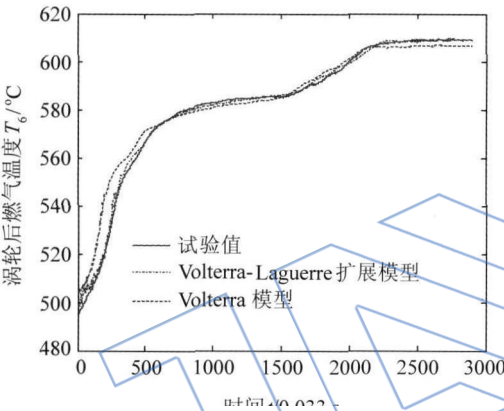


图 4 涡轮后燃气温度的仿真结果(推广用数据)
Fig. 4 Simulation result of temperature exit of high pressure turbine (Data not used in identification)

表 2 平均误差分析结果

Table 2 Average absolute error of identification results		
参数类型	Volterra-Laguerre 扩展模型	普通 Volterra 模型
N_h (辨识用) / %	0.0824	0.1648
N_1 (辨识用) / %	0.1464	0.1505
T_6 (辨识用) / °C	0.9047	1.3880
N_h (推广) / %	0.0974	0.2618
N_1 (推广) / %	0.1879	0.2236
T_6 (推广) / °C	2.1849	4.8929

5 结 论

本文提出了一种航空发动机动态非线性 Volterra-Laguerre 扩展模型的辨识建模方法。基于该方

法采用地面试车数据建立了某航空发动机 $N_h = 87\%$ 至最大状态的动态加速过程非线性模型, 该方法较传统 Volterra 级数提高了精度和推广泛化能力, 能够用于发动机仿真与状态监控。模型结构明确, 也适用其它一类非线性过程的模型辨识。

对于较低转速范围时的发动机动态模型辨识应考虑进口导流叶片的影响; 在加力过程还应考虑喷口的调节作用; 故多输入输出的全飞行包线的动态过程模型辨识是进一步研究方向。

参考文献

[1] 孙健国. 面向 21 世纪航空动力控制展望[J]. 航空动力学报, 2001, 16(2): 97-102.
SUN Jianguo. Prospects of aeroengine control development in the early time of the 21th century[J]. Journal of Aerospace Power, 2001, 16(2): 97-102. (in Chinese)
[2] 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.
FENG Zhengping, SUN Jianguo. Modeling of small perturbation state variable model for aeroengines[J]. Journal of Propulsion Technology, 2001, 22(1): 54-57. (in Chinese)
[3] 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 Yuan, XIE Shousheng, SONG Zhiping. Simulation of dynamic performance of a turbofan engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(4): 530-533. (in Chinese)
[4] 丁楷峰, 樊思齐. 基于 RBF 网络的航空发动机辨识模型[J]. 航空动力学报, 2000, 15(2): 205-208.
DING Kaifeng, FAN Siqi. An identification model of aeroengine based on the RBF network[J]. Journal of Aerospace Power, 2000, 15(2): 205-208. (in Chinese)
[5] 尉询凯, 李应红, 王剑影, 等. 基于支持向量机的航空发动机模型[J]. 航空动力学报, 2004, 19(5): 684-684.
WEI Xunkai, LI Yinghong, WANG Jianying, et al. A novel aero engine identification model based on support vector machines[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(5): 684-688. (in Chinese)
[6] 宋志平, 程礼, 魏瑞轩. 航空发动机的一种 Volterra 级数非线性动态模型[J]. 航空动力学报, 2004, 19(4): 577-580.
SONG Zhiping, CHENG Li, WEI Ruixuan. A Volterra progression model of nonlinearity dynamic response of aero engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(4): 577-580. (in Chinese)
[7] Wahlberg B. System identification using laguerre models[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1991: 36(5): 551-562.
[8] ZHENG Qingsheng, Zafiriou E. Nonlinear system identification for control using Volterra-Laguerre expansion[C]//Proc. of the American Control Conference. Seattle, Washington: 1995(6): 2195-2199.
[9] 方崇智, 萧德云. 过程辨识[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.
[10] 曹建福, 韩崇昭, 方洋旺. 非线性系统理论与应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.