

基于发动机非线性响应的辨识线性模型方法^{*}

宋志平, 韩崇昭, 魏瑞轩

(西安交通大学 电子与信息工程学院, 陕西 西安 710049)

摘 要: 研究利用航空发动机的非线性响应, 辨识多个基准状态下线性模型的方法。将发动机的非线性动态模型描述为 Volterra 级数模型, 利用一种鲁棒的自适应辨识算法实现它的辨识, 将模型的高阶部分去掉, 就得到了发动机的小偏差脉冲响应函数模型, 然后可将其转化为其它形式的线性动态模型。利用某型涡扇发动机仿真对方法进行检验, 求出若干基准状态下的线性模型, 对比表明, 得到的线性模型比较准确。可实现利用飞参数据辨识发动机多状态的线性模型。

关键词: 航空发动机; 控制系统; 线性动态模型[†]; Volterra 级数

中图分类号: V233.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2005) 02-0155-03

Method to identify the multimode linear model of aeroengine based on nonlinear response

SONG Zhiping HAN Chong-zhao WEI Ruixuan

(Coll. of Electron and Information Engineering Xi'an Jiaotong Univ., Xi'an 710049, China)

Abstract The dynamic process of aeroengine is nonlinear. The linear model cannot be identified from the response directly. So the method was studied to identify the linear model in multimode based on nonlinear response. The nonlinear dynamic model of aeroengine was described as the Volterra series model. An adaptive arithmetic was carried out to identify the Volterra series model robustly. Cutting off the model's high rank, the linear pulse response model of engine would be built. Then it can be converted into other linear dynamic models. It was applied in a turbofan engine through the simulation. The linear models of some standard states were found. According to the contrast, it is evident that the model is accurate. It can be used to identify the linear model in multimode based on the actual flight data.

Key words Aircraft engine; Control system; Linear dynamic model[†]; Volterra series

1 引言

航空发动机是非线性系统, 其动态过程是典型的非线性响应, 但是对这一非线性系统的很多控制方法和故障诊断方法, 是利用小偏差线性模型进行的。如常用的多状态气路分析法^[1]及线性二次型控制^[2]等。这些方法需要求解多个基准状态下的线性模型^[3]。在发动机的实际工作中, 飞参系统记录的发动机状态参数是非线性响应参数。需要利用这些参数辨识线性模型, 用于进行故障诊断或状态趋势分析。尽管在某些情况下, 可以相对稳定的一些状态中

截取到小偏差响应, 实现些状态的线性模型辨识, 但是对战斗机而言, 其环境条件和控制输入变化较快, 在多个状态下进行小偏差截取是难以实现的。因而需要研究如何根据发动机的非线性响应, 辨识各个基准状态下线性模型。

2 辨识方法

2.1 小偏差线性模型

考虑供油量 w_f , 进气温度 T_1^* 为输入, 不妨选取 n_L 为输出变量。以任一输入状态 w_{f0}, T_{10}^* 为基准点, 则输入输出间的动态小偏差线性模型可以表示为脉

* 收稿日期: 2004-07-12 修订日期: 2004-11-09。

基金项目: 青年自然科学基金资助 (60304004)。

作者简介: 宋志平 (1973—), 男, 博士后, 研究领域为航空发动机控制。Email: zhaozhougou@263.net

冲响应函数的形式

$$n_L'(t) = n_{L0} + \int_0^{\tau_M} h_{w_f}(\tau) (w_f(t-\tau) - w_{f0}) d\tau + \int_0^{\tau_M} h_{T_1}(\tau) (T_1^*(t-\tau) - T_{10}^*) d\tau \quad (1)$$

考虑系统的记忆长度 τ_M , 并且, 由于进气温度为慢变低的低频信号, 在记忆长度内可认为不变, 模型简化为

$$n_L'(t) = n_{L0} + \int_0^{\tau_M} h_{w_f}(\tau) (w_f(t-\tau) - w_{f0}) d\tau + h_{T_1}^*(T_1^*(t) - T_{10}^*) \quad (2)$$

式中 $h_{T_1}^* = \int_0^{\tau_M} h_{T_1}(\tau) d\tau$

同样, 也可以建立高压转速 n_H 或涡轮前温度 T_4 等参数的线性脉冲模型。利用脉冲模型, 可以设计输入, 仿真得到输出, 采用仿真辨识的间接转化方法, 易于得出其它形式的模型, 如状态空间模型等。

2.2 Volterra模型

发动机的动态非线性过程可以描述为 Volterra 模型^[4]

$$n_L(t) = \sum_{k=1}^{\infty} n_L^k(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{q_1=1}^2 \cdots \sum_{q_k=1}^2 \int_0^{\tau_M} \cdots \int_0^{\tau_M} h_{q_1 \cdots q_k}(\tau_1, \cdots, \tau_k) + \prod_{i=1}^k u_{q_i}(t-\tau_i) d\tau_i \quad (3)$$

式中 $u_1(t) = w_f(t) - w_{f0}$, $u_2(t) = T_1^*(t) - T_{10}^*$, $h_{q_1 \cdots q_k}(\tau_1, \cdots, \tau_k)$ 为低压转子转速与输入间的第 k 阶 Volterra 核, 若 $k=1$, 则 $n_L^1(t)$ 为 $n_L(t)$ 中的线性分量, 即 $n_L^1(t) = n_L'(t)$ 。

由于高阶的 Volterra 核收敛, 通常取三阶的 Volterra 核为最高阶次, 对系统记忆长度为 M , 截尾误差为 $e(k)$ 。考虑进气温度为慢变低频的特性, 则可假设记忆长度内 T_1^* 不变, 令 $w_f(t) = w_f(t) - w_{f0}$, $T_1^*(t) = T_1^*(t) - T_{10}^*$, 则可建立以 w_{f0} , T_{10}^* 为基准点的离散简化发动机 Volterra 模型

$$n_L(k) = n_{L0} + n_L^1(k) + n_L^2(k) + n_L^3(k) + e(k) \quad (4)$$

$$\text{式中 } n_L^1(k) = \sum_{m=0}^{M-1} h_{w_f}(m) \bar{w}_f(k-m) + h_{T_1^*} \bar{T}_1^*$$

$$n_L^2(k) = \sum_{m_1=0}^{M-1} \sum_{m_2=0}^{M-1} h_{w_f w_f}(m_1, m_2) \bar{w}_f(k-m_1) \bar{w}_f(k-m_2) + \sum_{m=0}^{M-1} h_{w_f T_1^*}(m) \bar{w}_f(k-m) \bar{T}_1^* + h_{T_1^*, T_1^*}^f \bar{T}_1^* \cdot \bar{T}_1^*$$

$$n_L^3(k) = \sum_{m_1=0}^{M-1} \sum_{m_2=0}^{M-1} \sum_{m_3=0}^{M-1} h_{w_f w_f w_f}(m_1, m_2, m_3) \prod_{i=1}^3 \bar{w}_f(k-m_i) +$$

$$\sum_{m_1=0}^{M-1} \sum_{m_2=0}^{M-1} h_{w_f w_f T_1^*}(m_1, m_2) \prod_{i=1}^2 \bar{w}_f(k-m_i) \cdot \bar{T}_1^* + \sum_{m=0}^{M-1} h_{w_f T_1^*, T_1^*}(m) \bar{w}_f(k-m) \cdot \bar{T}_1^* + h_{T_1^*, T_1^*, T_1^*} \bar{T}_1^* \cdot \bar{T}_1^* \cdot \bar{T}_1^*$$

需要指出, 假设在系统记忆长度内 T_1^* 不变, 进行模型简化, 既可满足精度要求、符合实际情况, 又是系统模型可辨识的必要条件。因为这一假设使模型简化, 否则, 在实际的低频的变化 T_1^* 条件下, 激励不够充分, 难以辨识系统的模型。

2.3 模型的辨识

令系统的一个非线性响应序列为 $[w_f[k], T_1^*[k]]$ 及 $[n_L[k]]$, 则存在如下的 Volterra 核的自适应辨识算法。定义发动机 k 时刻的输入向量

$$U(k) = [w_f(k), \cdots, w_f(k-M+1), \bar{T}_1^*(k), w_f(k) \cdot w_f(k), \cdots, w_f(k-M+1) \cdot w_f(k-M+1), \bar{T}_1^*(k) \cdot w_f(k), \cdots, \bar{T}_1^*(k) \cdot w_f(k-M+1), \bar{T}_1^*(k) \cdot \bar{T}_1^*(k), \cdots, \bar{T}_1^*(k) \cdot \bar{T}_1^*(k) \cdot \bar{T}_1^*(k)]$$

定义发动机的截断 Volterra 核向量

$$H = [h_{w_f}(0), \cdots, h_{w_f}(M-1), h_{T_1^*}, h_{w_f w_f}(0, 0), \cdots, h_{w_f w_f}(M-1, M-1), h_{T_1^*, w_f}(0), \cdots, h_{T_1^*, w_f}(M-1), h_{T_1^*, T_1^*}, \cdots, h_{T_1^*, T_1^*, T_1^*}]^T$$

定义增广输入向量 $Z(k) = [U(k) | n_L(k)]^T$, 增广 Volterra 核向量为 $W = [H^T | -1]^T$, 令 k 时刻的辨识误差为 $\varepsilon(k) = n_L(k) - U(k)H$, 则系统的鲁棒总体均方最小自适应辨识算法^[6]为

$$W(k+1) = W(k) - \frac{\mu \varepsilon(k) [Z(k)W^T(k)W(k) - \varepsilon(k-1)W(k)]}{[W^T(k)W(k)]^2} \quad (5)$$

式中 μ 是学习因子, 它控制着自适应过程的收敛速度和稳定性。为实现模型的光滑性, 也可以在辨识中增加连续光滑约束^[6]。

3 仿真实例

对于某型涡扇发动机, 设计输入序列 $w_f[k], T_1^*[k]$, 取输入步长 0.005 s。利用发动机的动态仿真方法及程序^[7], 可以仿真得到发动机的低转子转速序列 $n_L[k]$ 。

若取 $w_f = 1.1 \text{ kg/s}$, $T_1^* = 300\text{K}$ 为基准点, 利用仿真数据, 按照第 2 节的方法, 进行 Volterra 级数模型的辨识。得到基准低压转速 $n_{L0}^0 = 0.913$ 。

一阶核: 其中 $h_{w_f}(m)$ 如图 1 中线 ① 所示的, 其辨识步长为 $0.04s$ 而 $h_{T_1^*} = -1.44 \times 10^{-3} (n_L / T_1^*)$ 。

二阶核: 其中 $h_{w_f w_f}(m_1, m_2)$ 为曲面, 图 2 为它的两条对角线 (① 为 $h(0, 0) \sim h(16, 16)$ ② 为 $h(0, 16) \sim h(16, 0)$), 其辨识步长为 $0.0625s$ $h_{T_1^*, T_1^*} = -0.08 \times 10^{-3} (n_L / T_1^* / T_1^*)$, $h_{w_f T_1^*}(m)$ 量值很小, 可忽略。

分别设计此基准点下的发动机的小偏差阶跃输入 $\Delta w_f = 0.01$ 和 $\Delta T_1^* = 0.1$, 仿真输出后, 辨识发动机的小偏差线性脉冲模型, 得到 $h_{w_f}(m)$ 如图 1 中线 ④ 所示, 而 $h_{T_1^*} = -1.41 \times 10^{-3} (n_L / T_1^*)$ 。比较表明, 基于 Volterra 模型辨识得到的线性模型是很准确的。

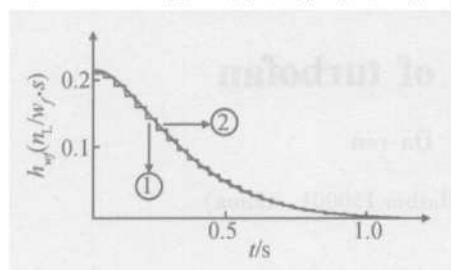


Fig. 1 Comparison between one rank nucleus and linear pulse model

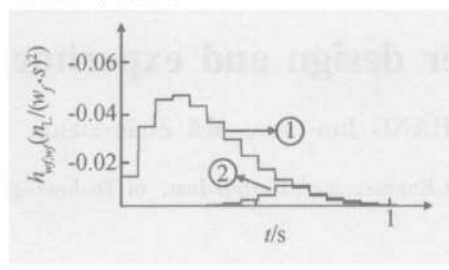


Fig. 2 Diagonal line of two rank Volterra nucleus of aeroengine

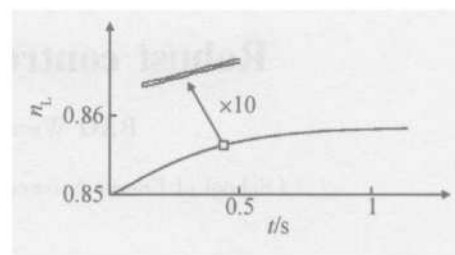


Fig. 3 Comparison of response between the identified model and the true

在利用发动机仿真数据的辨识中, 由于输入是可以设计的, 所以激励可以设定的相对充分。二阶核 (如图 2) 可以辨识的较准确。若在模拟实际输入的激励下, 二阶核则一般不易辨识很准确, 但是对一阶核的准确性却影响很小, 因为在 Volterra 核的辨识下, 阶次越高对输入的要求越苛刻^[5-8]。实际上, 即便是利用发动机仿真数据, 三阶核也不能辨识很准确, 因为要实现三阶核的精确辨识, 通常需要高频的近似伪噪声的激励, 这在发动机仿真中是不允许的。但是也不能忽略三阶核的辨识, 否则不能吸收截尾误差对二阶和一阶核的部分影响。

4 结束语

本文将 Volterra 模型及其辨识方法, 应用于发动机的多状态线性模型辨识中。实现了利用发动机非线性响应, 辨识多基准状态下的线性模型问题。利用发动机仿真程序, 对方法进行了验证, 表明了算法的可行性。

参考文献:

- [1] 陈大光, 韩凤学. 多状态气路分析法诊断发动机故障的分析 [J]. 航空动力学报, 1994 (4).
- [2] 樊思齐, 徐芸华. 航空推进系统控制 [M]. 西安: 西北工

另取一个基准点, 以低转速 0.85 进气温度 $T_1^* = 300K$ 为基准点, 同样可以辨识 Volterra 模型, 得到基准点的线性模型。图 3 为此线性模型在 $\Delta w_f = 0.05$ $\Delta T_1^* = 0.1$ 下的阶跃响应与仿真响应的对比曲线 (左上为放大 10 倍的曲线), 两者比较接近。若又求得高压转子与转速间得线性模型, 则可将 w_f 与 n_L 基于准点的线性关系转化为状态空间描述

$$\begin{aligned} \dot{n}_L &= -4.46n_L + 1.95n_H + 0.38w_f \\ \dot{n}_H &= -0.60n_L - 2.08n_H + 0.44w_f \end{aligned}$$

业大学出版社, 1995

- [3] 冯正平, 孙健国. 航空发动机小偏差状态变量模型的建立方法 [J]. 推进技术, 2001, 22(1). (FENG Zheng-ping SUN Jian-guo Modeling of small perturbation state variable model for aeroengines [J]. Journal of Propulsion Technology, 2001, 22(1).)
- [4] Bershad N J, Ibnkahla 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).
- [5] Luo F L, Unbehauen R, Cichocki A. A minor component analysis algorithm [J]. Neural Networks, 1997, 10(2).
- [6] 魏瑞轩. 基于 Volterra 级数模型的非线性系统辨识及故障诊断方法研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2002
- [7] 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 (4).
- [8] Ruixuan Wei, Chongzhao Han. The robust total least mean squares algorithm for adaptive signal processing [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1999, 47(8).
- [9] Panicker T M, Mathews V J. Parallel-cascade realizations and approximations of truncated Volterra systems [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1998, 46(10).