

一种线性辨识系统动态模型的自寻优算法

王文栋¹, 张生良¹, 李 剑², 谢寿生¹

(1. 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038;

2. 空军第八研究所, 北京 100076)

摘要: 基于静态特性已知的线性时变系统, 通过对其动态响应数据的分析, 建立了随时间跳变的动态参数模型, 提出了一种新的线性自寻优辨识算法。该算法在静态特性约束条件下, 可估计模型的跳变时刻及结构参数。经对某航空发动机电子综合调节器燃油通道动态过程参数模型辨识的实例, 验证了该算法精确快速。

关键词: 航空、航天推进系统; 动态模型; 静态特性; 系统自寻优; 系统辨识; 电子综合调节器

中图分类号: V233.7

文献标识码: A

An Automatic Optimization Algorithm for the Linear Identification of System's Dynamic Model

WANG Wen-dong¹, ZHANG Sheng-liang¹, LI Jian², XIE Shou-sheng²

(1. Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. Air Force Eighth Institute, Beijing 100076, China)

Abstract: Aiming at linear time-varying systems of which the static state characteristic is known, and through the analysis of the dynamic response data, a new linear model jumped by time is set up and an automatic optimization identification algorithm is programmed. And through this automatic optimization identification algorithm, jumping-times and parameters of the model are estimated. Through the analysis of a system identification example of X aero-engine EEC (engine electronic controller), the result shows this method is effective.

Key words: aerospace propulsion; dynamic model; static state characteristic; system automatic optimization; system identification; EEC

1 引言

广义地说, 在控制过程(或瞬态过程)中, 系统结构(或叫模型)可发生变化的系统, 叫变结构系统^[1]。在工程设计中, 有些系统为了提高其性能指标, 而广泛采用了变结构控制。

而其中线性时变系统是变结构系统中最基本的一种。因此, 如何对模型未知的线性时变系统进行辨识, 就具有很高的工程价值^[2]。

现代控制理论中, 自适应控制不宜于时变结构系统的辨识, 应用人工神经网络辨识要求大量样本, 且多为非参数模型, 不利于分析设计系统结构^[3]。本文对某型航空涡扇发动机综合调节器主燃油控制通道的半实物仿真, 其动态响应结果表明该系统是线性时变系统。本文针对该系统, 建立了具有一般意义的随时间跳变的参数模型, 并应用该模型提出了一种新的系统自寻优辨识算法。该算法通过自寻优, 可依次辨识得到系统的跳变

收稿日期: 2002-07-03; **修订日期:** 2002-11-06

作者简介: 王文栋(1980-), 男, 山东泰安人, 空军工程大学工程学院硕士生, 主要从事航空宇航推进系统专业发动机控制与状态监控研究。

时刻及模型参数。实践证明,该方法较传统的最小二乘法^[3,4],具有快速性、准确性等优点。

2 参数模型假设及系统自寻优辨识算法

最小二乘法是线性系统辨识中最基本的,也是应用最广泛的一种方法,本文所采用的参数模型就是以最小二乘法所采用的模型为基本依据,通过跳变模型阶次,对原线性辨识算法进行了推广,并在算法中采用多次自寻优的方法以提高辨

识的精度。以下是关于参数模型假设及系统自寻优辨识算法的介绍。

假设被辨识因果系统的阶次为 n 阶,系统依次从 n 阶跳变到 1 阶,初始响应时刻为 t_0 ,跳变时刻依次为 $t_i (i=1, 2, \dots, n-1)$,并假定终止响应时刻 $t_n = t_0 + N$ 。

对于时刻 $k=1, \dots, (N+m)$ s. t. ($m > n$) 进行观测,得到一系列输入输出数据,过程输出量 $z(k)$ 是 N 维列向量,观测矩阵 $\varphi_{k,n}$ 是 $(t_i - t_{i-1}) \times 2n$ 的矩阵,其表达式如下:

$$\varphi_{k,n} = \begin{bmatrix} -z(n+t_{i-1}-1), \dots, -z(t_{i-1}), & u(n+t_{i-1}), \dots, u(t_{i-1}) \\ \vdots & \vdots \\ -z(n+t_i-2), \dots, -z(t_i-1), & u(n+t_i-1), \dots, u(t_i-1) \end{bmatrix}$$

$$\text{s. t. } (t_{i-1} \leq k < t_i)$$

定义跳变函数 $q(t_i)$ 为 $1 \times n$ 的广义矩阵:

$$q(t_i) = [0, \dots, I, \dots, 0]$$

$$\text{s. t. } (t_{i-1} \leq k < t_i)$$

此时广义矩阵 $q(t_i)$ 的第 i 列为 $(t_i - t_{i-1})$ 维单位矩阵,其余为零矩阵。跳变函数 $q(t_i)$ 为泛函数,其跳变时刻 t_i 是由给定系统的特性决定的。

令随机序列误差:

$$\xi^T(k) = [\xi(n+1), \dots, \xi(n+N)]$$

系统参数向量 θ_n 为 $2n$ 维列向量:

$$\theta_n^T = [a_1, a_2, \dots, a_n, b_0, b_1, \dots, b_n]$$

则建立系统参数模型如下:

$$\left. \begin{aligned} z^{(i)}(k) &= z(k) |_{t_{i-1} \leq k < t_i} = q(t_i) \begin{bmatrix} \varphi_{k,n} \theta_n \\ \varphi_{k,n-1} \theta_{n-1} \\ \vdots \\ \varphi_{k,1} \theta_1 \end{bmatrix} \\ z(k) &= \begin{bmatrix} z^{(1)}(k) \\ z^{(2)}(k) \\ \vdots \\ z^{(n)}(k) \end{bmatrix} + \xi(k) \quad \text{s. t. } (t_0 \leq k < t_n) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

该模型的辨识参数有:

$$\theta_n (n=1, 2, \dots, n), t_i (i=1, 2, \dots, n-1)$$

令不同时刻的残差所构成的 N 维列向量为 $e(k)$,其表达式如下:

$$e^{(i)}(k) = [e(t_{i-1}), e(t_{i-1}+1), \dots, e(t_i-1)]^T$$

$$e(k) = \begin{bmatrix} e^{(1)}(k) \\ e^{(2)}(k) \\ \vdots \\ e^{(n)}(k) \end{bmatrix} \quad \text{s. t. } (t_0 \leq k < t_n)$$

于是与式(1)相应的向量矩阵方程为:

$$e(k) = z(k) - \begin{bmatrix} z^{(1)}(k) \\ z^{(2)}(k) \\ \vdots \\ z^{(n)}(k) \end{bmatrix}$$

取总观测样本与辨识结果的均方差为总准则函数:

$$\min(J) = \frac{1}{N} e^T(k) e(k) = \frac{1}{N} \|e(k)\|^2 \quad (2)$$

假设系统的静态特性是已知的,而辨识算法又要求辨识模型的静态特性和动态特性均满足,所以可将系统的静态特性化为模型约束条件:

$$\lim_{K \rightarrow \infty} |l \min z(k) - f(u(k))| < \epsilon \quad (3)$$

系统自寻优辨识算法中,输入为: $u(k), z(k)$, 系统的初始响应时刻为 t_0 。第 i 次自寻优过程,开始寻优时刻为 t_{i-1} ,终止寻优时刻为 $t_{i+1} = t_0 + N$,系统置跳变函数 $q(t_i)$ 后,对应阶次降低一阶,则进行一次自寻优,输出跳变时刻 $t_i^{(1)}$,使满足准则函数 $\min(J_i)$ 。其中:

$$\min(J_i) = \frac{1}{t_{i+1} - t_{i-1}} \begin{bmatrix} e^{(i)}(k) \\ e^{(i+1)}(k) \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} e^{(i)}(k) \\ e^{(i+1)}(k) \end{bmatrix}$$

$$s. t. (t_{i-1} \leq k < t_{i+1}, \quad i = 1, 2, \dots, n-1)$$

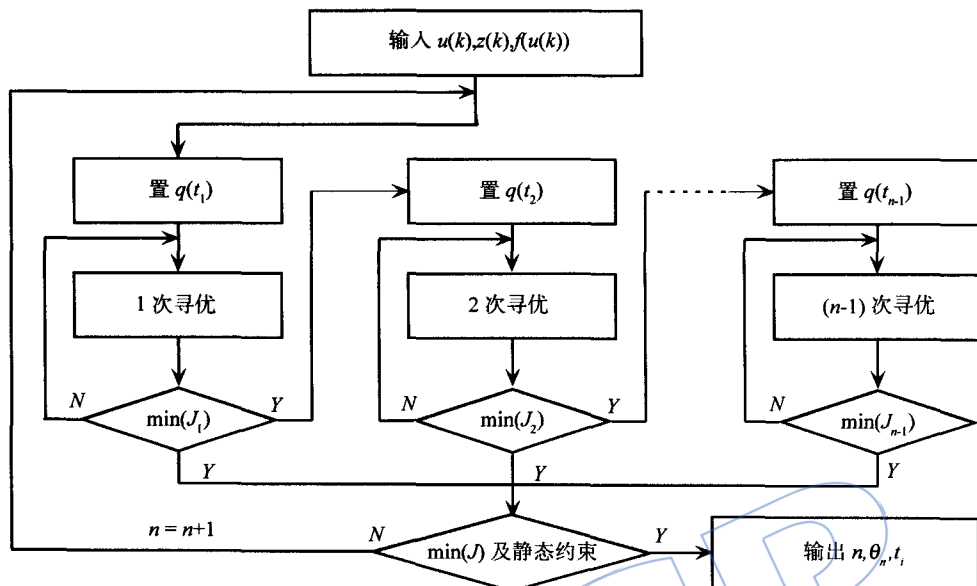


图 1 辨识算法流程

Fig. 1 Identification algorithm's flow chart

系统经过 $n-1$ 次跳变寻优过程, 可得到一组跳变时刻 $t_i^{(1)} (i=1, 2, \dots, n-1)$ 和 n 组参数 $\hat{\theta}_n^{(1)} (n=1, 2, \dots, n)$ 。最后, 判断总准则函数 $\min(J)$, 见式(2), 及静态特性约束条件 $f(u(k))$, 见式(3), 若不满足, 则提高系统辨识的阶次 n , 重新寻优。最后循环得到最终跳变时刻 $t_i (i=1, 2, \dots, n-1)$ 及辨识参数 $\hat{\theta}_n (n=1, 2, \dots, n)$, 其辨识算法流程如图 1。

3 辨识算法实例

某型航空发动机综合调节器某通道的动态过程参数模型是变结构的, 在最大“战斗”状态, 涡轮后燃气温度信号 $T_{4\max}^* = \text{Const}$ 调节规律下, 半实物仿真得到输出参数数据占空比信号 $s_1(\%)$, 在 T_4^* 1%阶跃量输入下的响应。选取滤波后数据进行观测, 应用上述参数模型, 进行系统自寻优辨识, 辨识结果如图 2。可以看到, 辨识模型在时刻从二阶系统跳变到一阶系统, 其响应与系统实际响应基本重合。输出参数如表 1, 采样周期 $T=0.01 \text{ s}$ 。

取总准则函数为系统辨识的误差指标, 即: δ

$= \min(J)$, 参见式(2)。则传统最小二乘辨识算法与系统自寻优辨识算法结果比较如图 3, 其中 a

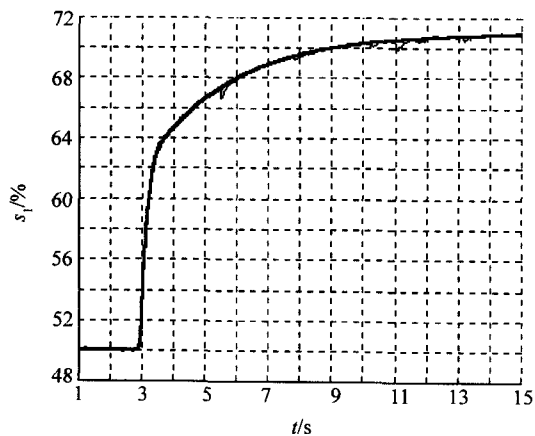


图 2 算法辨识结果

Fig. 2 Algorithm's identification result

表示系统的试验输出, b 表示二阶系统递推最小二乘算法辨识结果, c 表示采用基于系统静态特性的变结构辨识算法得出的结果。可以直观看到, 采用系统自寻优辨识算法的精度更高。

表 1 辨识模型参数

Table 1 Model parameters of identification

模型参数	n	$\hat{\theta}_2 = [a_1, a_2, b_0, b_1, b_2]$	$\hat{\theta}_1 = [a_1, b_0, b_1]$	$[t_0 T, t_1 T]$
估计值	2	$[-1.8298, 0.83581, 0.0000, 0.010547, 0.0000]$	$[-0.99636, 0.0000, 0.008909]$	$[2.93, 3.76]$

表 2 辨识算法误差比较

Table 1 Table 2 Identification error compare with other algorithms

辨识算法	最小二乘辨识	递推最小二乘辨识	系统自寻优辨识
$\delta = \min(J)$	0.654430	0.228862	0.010449

算法的误差比较如表 2, 可见, 该辨识算法的精度明显高于传统的最小二乘辨识算法。

用于系统的在线辨识。

4 结 论

本文基于静态特性已知的线性时变系统, 建立了随时间跳变的参数模型, 采用系统自寻优辨识算法, 能有效地寻优模型跳变时刻及结构参数。比较传统辨识算法, 该算法具有辨识精度高, 分辨率强, 快速性好等优点。并且, 通过对某型航空发动机电子综合调节器某通道动态过程参数模型辨识的实例, 验证算法快速有效。

参考文献:

- [1] 姚琼葵, 黄继起, 吴汉松. 变结构控制系统[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1997.
- [2] 高为炳. 变结构控制的理论及设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [3] Lennart Ljung, Sweden. System Identification—Theory for the User (Second Edition)[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001.
- [4] 方崇智, 萧德云. 过程辨识[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.

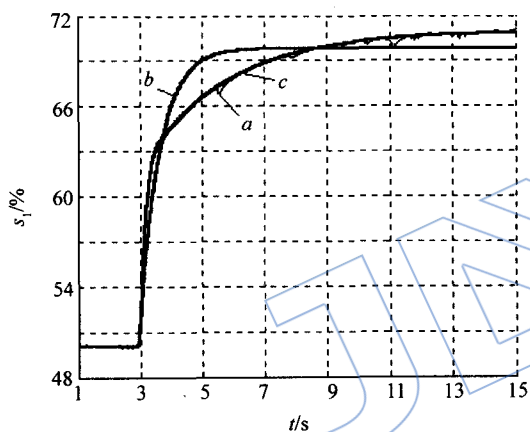


图 3 算法辨识精度比较

Fig. 3 Algorithm's identification precision contrast

而且, 该算法运用 MATLAB 软件包编程, 其运行时间 $t < 0.1$ s, 若采用更高级编码还可以进一步降低程序的运行时间, 因此该算法可广泛应