

一种连续系统辨识方法及其在飞控规律辨识中的应用

吴 剑, 孙秀霞

(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘 要:针对某型飞机控制系统的规律辨识问题,对文献[2,3]提出的连续系统辨识方法进行了改进,给出了该方法可以适用的辨识对象的一般模型,同时通过对误差模型和极小化指标的改进,把原方法推广至时变参数辨识领域。数值仿真结果表明该方法成功的解决了该飞控系统的辨识问题。该方法还很容易推广到一类具有相同特征的线性、非线性、时变或时不变的参数辨识中。

关键词:飞控系统;连续系统辨识;跟踪-微分器;扩张状态观测器;时变参数

中图分类号:V24 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2002)05-0004-05

在某型飞机的控制系统中,大量采用了分段线性的非线性环节,这一类环节参数的变化一般受到动压信号和静压信号的控制,用以保证飞控系统的控制规律随着飞机的高度和速度的变化而变化。对这种变化规律进行辨识,一种方法是固定静压和动压信号,使辨识对象转化为线性时不变系统,然后再采用常规的辨识方法进行辨识。其缺点是辨识的次数多,数据采集与处理的工作量大,准确性差。另一种方法是,在一次数据采集的过程中,固定静压信号,连续调节动压信号,使之取遍整个取值范围。这时,进行一次或较少的几次辨识,就可以得出被辨识参数在当前静压下的变化规律。由于动压连续变化,被辨识参数也连续变化,这时的辨识对象实际上是一个时变系统,需要考虑时变参数的辨识问题。

由于被辨识对象的控制规律本身是连续的,对于连续系统采用离散的辨识方法会存在一些问题^[1],例如,如果离散系统的延迟不是采样时间的整数倍,则获得的离散模型可能具有非最小相位特性等等。而采用连续的辨识方法则可以较好的解决这样的问题。文献[2,3]提出了一种基于跟踪-微分器(TD)和扩张状态观测器(ESO)的连续系统辨识方法,用来解决一些非线性时不变系统的辨识问题。

在实际应用中,我们对文献[2,3]提出的方法进行适当修改,并适当选择辨识对象的模型和被辨识参数,就可以把这种方法推广至时变参数辨识领域,从而可以用来解决飞行控制系统的辨识问题。

1 问题描述

已知某飞机的飞行控制系统工作在自主方式下时,其纵向通道的部分控制规律的结构图如图1所示。

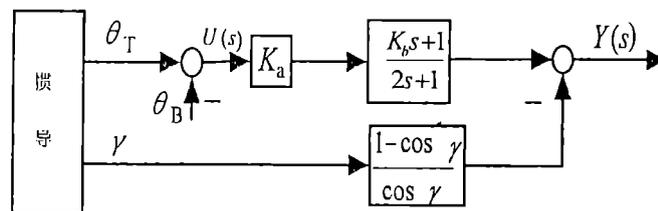


图1 某型飞机纵向通道的部分结构图

图1中, y 为纵向通道输出的过载信号, $u = \theta_T - \theta_B$ 。其中 θ_T 为俯仰角的当前值, θ_B 为俯仰角的给定值。 γ 为倾斜角信号, $(1 - \cos \gamma)/\cos \gamma$ 为掉高补偿信号。 K_a 为俯仰角传动比, K_b 为滤波时间常数。 $K_b s + 1/2s$

收稿日期:2001-09-07

作者简介:吴 剑(1975-),男,江西九江人,博士生,主要从事系统辨识研究;

孙秀霞(1962-),女,山东潍坊人,教授,博士生导师,主要研究方向是鲁棒控制及 H^∞ 控制、系统辨识、自适应控制及其应用。

+1 为低通滤波器,用于滤除高频干扰信号。 K_a 和 K_b 为待辨识参数。 K_a 和 K_b 都是动压 q_{cx} 的分段线性化函数。 K_a 和 K_b 按照图 2 所示规律变化。

图 2 中, q_{cx} 为动压信号, P 为静压信号。由图可知, K_a 和 K_b 随动压和静压在不同的段内线性变化。当动压和静压都固定时,此时的系统相当于一个线性时不变系统。此时的辨识需要进行多次数据采集才能获知整个变化规律。当静压固定,动压随时间变化时, K_a 和 K_b 也会随时间变化,此时的系统为一个时变系统。如果能采用时变系统辨识的方法,那么进行一次辨识就可以得出参数在当前静压下的变化规律。

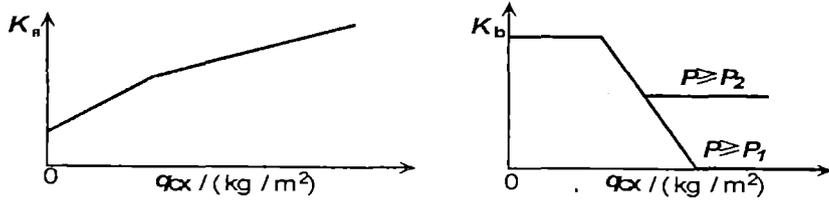


图 2 K_a 和 K_b 的变化规律

2 问题的建模

首先,由图 1 可知,前向通道的传递函数为

$$Y(S) = K_a \cdot \frac{K_b s + 1}{2s + 1} U(s) \tag{1}$$

由式(1),有

$$y + 2y = K_a K_b u + K_a u \tag{2}$$

固定静压,令 $q = q_{cx}/1\ 000$ 。由于在 K_a 和 K_b 变化的每个线性段内,斜率和截距都保持不变,所以可以选择各个线性段内的斜率和截距作为被辨识参数。

在 K_a 、 K_b 的每一个线性段内可设:

$$\left. \begin{aligned} K_a &= aq + b \\ K_b &= cq + d \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

设 $\theta^T = \theta(q) = (a, b, c, d)$, θ 为待辨识参数,它随 q 在不同的变化段内取不同的固定值。

由式(2)~(3)有

$$y + 2y = (aq + b)[(cq + d)u + u] = h^T \cdot f \tag{4}$$

其中:

$$h^T = (a, b, ac, bd, ad + bc) \tag{5}$$

$$f^T = F(u, y, q) = (qu, uq^2 \dot{u}, \dot{u}, qu) \tag{6}$$

h 为待辨识参数 θ 的各个分量的函数,与系统的输入输出 u, y 及 q 无关。而 f 仅与系统的 u, y 和 q 有关,与 θ 无关。等式左边仅与 u, y 有关,与 q 和 θ 无关。可以看出,式(4)具有文献[2,3]中所解决问题类似的典型形式,即可以实现被辨识参数 θ 和系统输入、输出 u, y 的分离。可以想象,只要参数 a, b, c, d 在辨识过程中分段稳定,那么由系统的输入 $u(t)$ 和输出和 $y(t)$ 就可以辨识出该段对应的 a, b, c, d 值。为此,对文献[2,3]的方法的进行改进。

3 对基于跟踪 - 微分器和扩张状态观测器的连续系统辨识方法的改进

3.1 辨识模型

在文献[2,3]所提出方法的基础上,可以归纳出文献[2,3]所提出的方法的一般模型为

$$g(Y, U) = h^T[\theta(q)] \cdot f(Y, U) + e(t) \tag{7}$$

其中, Y 是系统输出 y 及其各阶导数组成的向量, U 是系统输入 u 及其各阶导数组成的向量。 Y 和 U 可以由 v, u 的测量值经跟踪 - 微分器^[4-6]等状态观测器处理后得出,记为 \hat{Y} 和 \hat{U} 。 $g(\cdot)$ 及 $f(\cdot)$ 是已知函数。 θ

是待辨识参数组成的向量, q 是外部的控制信号(如本文前述的动压和静压信号)。 θ 是 q 的函数, $h(\theta)$ 是 θ 的函数。 $e(t)$ 为噪声。

这种模型的特征是:在模型的数学表达上,可以实现被辨识参数和输入输出信号的分离。式(7)实际上是一种最小二乘形式。由于其中的函数 $g(\cdot)$ 和函数 $f(\cdot)$ 几乎可以为任意形式的非线性函数,因此,任何非线性系统,只要可以建立符合该式的模型,都可以考虑采用本文所论述的方法来进行辨识。文献[6]在对非线性参数估计的方法进行论述时,提出的几个例子符合这种形式,就可以考虑采用本文所述的方法来进行辨识。

从式(4)可以看出,本文的辨识对象的模型也具有式(7)所对应的形式,同时从式(3)可以看出,被辨识参数随着动压连续变化,在不同的时间段内为不同的常值。所以在采用最小二乘法求解的过程中,对文献[2.3]所提出的方法做如下修改。

3.2 优化指标的选择

为了简便起见,可以把式(7)简写为如下形式:

$$g = h^T \cdot f \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} \hat{g} &= g(\hat{Y}, \hat{U}, t) \\ \hat{f} &= f(\hat{Y}, \hat{U}, t) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: \hat{g} 、 \hat{f} 分别为函数 $g(\cdot)$ 和 $f(\cdot)$ 的估计。

取方程式误差(equation error)^[2] $e = \hat{g} - g$, 考虑到参数时变,加入遗忘因子 λ 和所限定记忆的时间长度 δ , 取极小化指标为

$$J = \int_{t-\delta}^t e^2(\tau) \cdot \lambda^{t-\tau} d\tau \quad (10)$$

式中, t 为辨识时间, λ 为遗忘因子($0 < \lambda \leq 1$), δ 为辨识所限定记忆的时间长度($0 < \delta \leq t$), τ 为积分变量。由式(8)~(10), 有

$$A \cdot h(\theta) = B \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} A &= \int_{t-\delta}^t \lambda^{-\tau} (\hat{f} \cdot \hat{f}^T) d\tau \\ B &= \int_{t-\delta}^t \lambda^{-\tau} (\hat{g} \cdot \hat{f}^T) d\tau \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

A 、 B 可以采用下式求解。

$$\int_{t-\delta}^t (\cdot) d\tau = \int_0^t (\cdot) dt - \int_0^{t-\delta} (\cdot) d\tau \quad (13)$$

当 $\lambda = 1, \delta = t$ 即为文献[2,3]所采用的方法。如果取 $\lambda < 1, \delta < t$, 则可使参数的辨识过程对以前的数据不敏感,从而可以辨识参数随时间分段变化的情况。适当选择参数 λ 、 δ 和各种外部输入,则可以在一次辨识过程中就辨识出 \hat{h} 来。再由 $h(\cdot)$ 的逆函数 $\theta = \theta(q) = h^{-1}[h(\theta)]$ 可得出 $\hat{\theta}(q)$ 。

4 数值仿真结果

假设 K_a 和 K_b 按照如下规律变化(其中 $q = q_{ex}/1000$):

$$\left. \begin{aligned} K_a &= \begin{cases} 2q+1, & \text{当 } 0 \leq q < 2 \text{ 时} \\ q+3, & \text{当 } q \geq 2 \text{ 时} \end{cases} \\ K_b &= \begin{cases} 2, & \text{当 } 0 \leq q < 2 \text{ 时} \\ -0.5q+3, & \text{当 } 2 \leq q < 4 \text{ 时} \\ 1, & \text{当 } q \geq 4 \text{ 时} \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

若所得的辨识参数为 $\theta^T = (a, b, c, d)$ 。由(14)式可知, θ 的真值的变化规律见式(15)。由式(5), h 的真值的变化规律见式(16)。

$$\theta^1 = \begin{cases} (2, 1, 0, 2), & 0 \leq q < 2 \text{ 时} \\ (1, 3, -0.5, 3), & 2 \leq q < 4 \text{ 时} \\ (1, 3, 0, 1), & 4 \leq q < 10 \text{ 时} \end{cases} \quad (15)$$

$$h^T = \begin{cases} (2, 1, 0, 2, 4), & 0 \leq q < 2 \text{ 时} \\ (1, 3, -0.5, 9, 1.5), & 2 \leq q < 4 \text{ 时} \\ (1, 3, 0, 3, 1), & 4 \leq q < 10 \text{ 时} \end{cases} \quad (16)$$

下面是采用不同的方法所得的结果。

4.1 分段辨识

令 $\lambda = 1, \delta = t$, 此时即可进行分段辨识。其它参数取为: $q = 0.1t, u = 2\sin 10t$, 采样周期为 0.001 s 。参数收敛曲线如图 3 所示。

由图 3 可知在 $0 \sim 20 \text{ s}$ 内 $h(\theta)$ 快速收敛至真值 $(2, 1, 0, 2, 4)$ 附近。查寻数据, 可得 $t = 15 \text{ s}$ 时 $\hat{h}^T = (2.000, 1.395, 0.001, 1.994, 3.999)$ 。其中第二项误差较大, 这是因为跟踪 - 微分器的误差而产生的稳态误差。可以通过降低信号的坡度从而降低辨识对象输出信号的变化速度来提高跟踪 - 微分器的跟踪精度。如果取 $q_i = 0.01t$, 其它参数保持不变, 重新进行辨识。在 $t = 10 \text{ s}$ 时有: $\hat{h}^T = (2.000, 1.039, 0.001, 1.994, 3.999)$ 。

从图 3 中还可以看出在 $t = 20 \text{ s}$ 以后 \hat{h} 的收敛曲线都发生了异常的波动, 可以断定在 $t = 20 \text{ s}$ 附近 K_a 和 K_b 进入了另一个线性区。即 $q = 0.1t|_{t=20} = 2$ 在第一个转折点的附近。

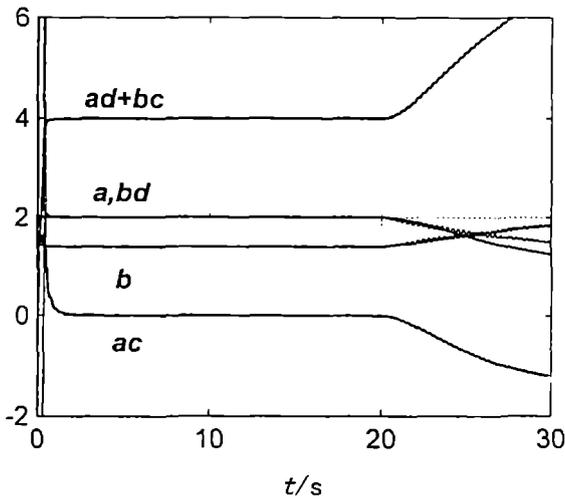


图 3 对第一个线性段的辨识结果

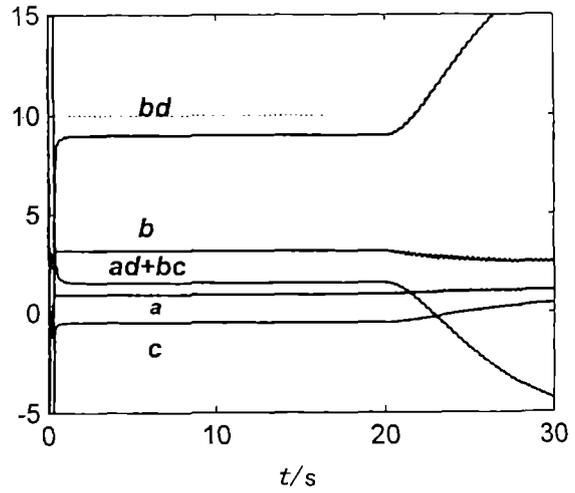


图 4 对第二个线性段的辨识结果

由第一次辨识所给出的转折点的信息, 取 $q = 0.1t + 2, u = 2\sin 10t$, 其它参数设置同前。把 q 的起始段定在第一次辨识得到的转折点, 重新开始辨识, 又可得出新的线性段内的参数估计值和下一个转折点的信息, 结果见图 4。如此重复, 直到辨识结果中看不到转折点, 这样可得到全部线性区内的参数。

以上对转折点的辨识还是粗略的估计, 在已知所有线性段的参数值后, 还可以反过来求各段的交点, 得出转折点的精确值。

这种方法的优点是可以同时辨识所有待辨识的参数, 精度高, 抗干扰能力强, 缺点是仍需分多次辨识。

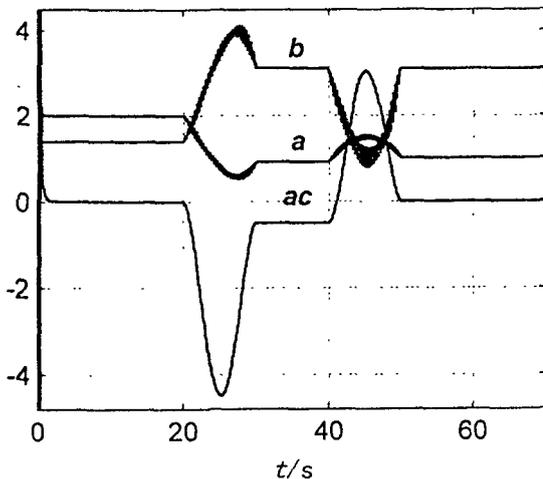
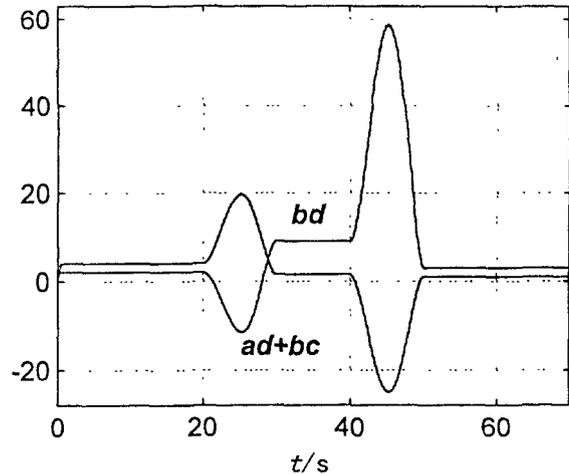
4.2 带遗忘因子或限定记忆的方法

可以不必分段, 一次就得出辨识结果。图 5 为限定记忆时间长度为 10 s , 对 h 的元素 a, b 和 ac 的辨识结果。图 6 为对元素 bd 和 $ad + bc$ 的辨识结果。带遗忘因子的辨识方法可以得到同样的结果, 但要注意选择遗忘因子, 否则会降低辨识精度, 遗忘因子的选择没有精确规律, 需要反复试凑。

图 5 中, a 在各个线性段内的真值为: $2, 1, 1$ 。当 $t = 15, 35, 60 \text{ s}$ 时, a 的估计值分别为: $2.000, 0.913, 1.003$ 。 b 在各个线性段内的真值为: $1, 3, 3$ 。当 $t = 15, 35, 60 \text{ s}$ 时, b 的估计值为: $1.399, 3.120, 3.109$ 。 ac 在各个线性段内的真值为: $0, -0.5, 0$ 。当 $t = 15, 35, 60 \text{ s}$ 时, ac 的估计值为: $0.000, -0.499, 0.000$ 。

图 6 中, bc 在各个线性段内的真值为: $2, 9, 3$ 。当 $t = 15, 35, 60 \text{ s}$ 时, 其估计值为: $1.994, 8.996, 2.999$ 。 $ad + bc$ 在各个线性段内的真值为: $4, 1.5, 1$ 。当 $t = 15, 35, 60 \text{ s}$ 时, 其估计值为: $4.000, 1.501, 1.000$ 。

从图 5 ~ 图 6 可以清楚地看出参数随时间的变化规律, 同时可以看出, 辨识结果与真值非常接近。

图5 a, b 和 ac 的辨识结果图6 bd 和 $ad+bc$ 的辨识结果

5 结论

本文是对文献[2,3]方法的改进,给出了这种方法可以解决问题的一般模型,同时通过适当选择极小化指标和误差模型,把该方法推广至时变参数辨识领域。在此基础上,把这种方法用于某型飞机的飞行控系统控制规律辨识,数值仿真结果证明辨识精度高,结果可靠。这种方法对于其它符合式(5)的时变、非时变、线性、非线性模型的辨识问题都有参考价值。

参考文献:

- [1] UNBEHAUEN H, RAOS C P. Continuous-time approaches to system identification - A survey[J]. Automatica, 1990, 26(1): 23-35.
- [2] 张文革, 韩京清. 跟踪-微分器用于连续系统辨识[J]. 控制与决策, 1999, 14(S0): 557-560.
- [3] 黄远灿, 韩京清. 扩张状态观测器用于连续系统辨识[J]. 控制与决策, 1998, 13(4): 381-384.
- [4] 韩京清, 王伟. 非线性跟踪-微分器[J]. 系统科学与数学, 1994, 14(2): 177-183.
- [5] 韩京清. 一种新型控制器——NLPID[J]. 控制与决策, 1994, 9(6): 401-407.
- [6] 朱全民. 非线性系统辨识[J]. 控制理论与应用, 1994, 11(6): 641-652.
- [7] 韩曾晋. 自适应控制[M]. 北京:清华大学出版社, 1995.
- [8] 方崇智. 过程辨识[M]. 北京:清华大学出版社, 1988.

(编辑:姚树峰)

A Continuous System Identification Approach and Its Application in Flight Control Laws

WU Jian, SUN Xiu-xia

(The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: To aim at the identification of a certain type of flight control laws, an improvement is made on the method of continuous-time identification that is presented on the articles[2,3]. A general model of the identification target is given, which is suitable for this kind of method. And also, by improving the guideline of error model and minimum criterion, the original approach is extended to time-variable area. Numeric simulation results show that this method successfully solves the identification problems of flight control system. And, the method can be easily spread to some parameter identification that is linear, nonlinear, time-variable, or noontime-variable.

Key words: flight control system; continuous-time identification; Tracking Differentiator; Extended State Observer; time-variable parameter