

● 军队院校“2110工程”建设项目

Adaptive Parameters Identification Based on
Lyapunov Function and Chaotic Excitation

基于Lyapunov与混沌激励的 自适应参数辨识

雷军委 晋玉强 王 宏 ● 著



河南理工大学出版社

● 军队院校“2110工程”建设项目

Adaptive Parameters Identification Based on
Lyapunov Function and Chaotic Excitation

基于Lyapunov与混沌激励的 自适应参数辨识

雷军委 晋玉强 王宏○著

西南交通大学出版社
· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

基于 Lyapunov 与混沌激励的自适应参数辨识 / 雷军委, 晋玉强, 王宏著. —成都: 西南交通大学出版社, 2016.7

ISBN 978-7-5643-4831-1

I. ①基… II. ①雷… ②晋… ③王… III. ①自适应控制 IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 172039 号

基于 Lyapunov 与混沌激励的自适应参数辨识

雷军委 晋玉强 王 宏 著

责任编辑	张宝华
封面设计	何东琳设计工作室
出版发行	西南交通大学出版社 (四川省成都市二环路北一段 111 号 西南交通大学创新大厦 21 楼)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮政编码	610031
网 址	http://www.xnjdcbs.com
印刷	成都蓉军广告印务有限责任公司
成品尺寸	165 mm × 230 mm
印 张	9
字 数	153 千
版 次	2016 年 7 月第 1 版
印 次	2016 年 7 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-4831-1
定 价	38.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

参数辨识为系统参数计算提供了解决手段,进而为对象的表征、分析、优化、控制等应用提供模型基础,它和状态估计、控制理论构成现代控制论的三个互相渗透的领域.基于自适应控制的参数辨识理论经过几十年的发展,目前已在国内科研、生产中得到了广泛应用,而相关理论也形成了论文,应用于本科与研究生的教学中.

基于Lyapunov函数的自适应控制与参数辨识是自适应参数辨识的一个小分支,其中参数可辨识性问题是参数辨识研究的基础.实际上,针对简单的一阶系统含有多个未知参数的情况,采用基于Lyapunov能量函数自适应方法进行参数辨识,是难以得到好的辨识结果的.目前,该问题并未引起足够的重视,进而导致对很多复杂多参数系统直接进行基于Lyapunov能量函数方法的参数辨识控制器设计,没有获得令人满意的效果.

本书在一般的自适应参数辨识方法之上,研究了混沌激励对参数辨识的作用,并针对相当复杂的控制方向未知系统,采用Nussbaum增益方法进行了混沌参数辨识,这一点是比较新颖的.因此,本书的出版不仅对参数辨识的理论研究者具有吸引力,同时对广大工程实践者也具有启发意义.它不仅可以作为自动化、机械、仪器仪表、认知科学、生物信息学等专业系统辨识、建模和参数估计课程的研究生教材,也可以供相关专业的高年级本科生、教师和科技工作者作参考书籍.

本书的编写具有以下一些特点:

(1) 理论易读性.为了增加本书的可读性,本书分章节对内容进行编排,而且对每一节的问题,均按照模型描述、理论设计、仿真实验分析与

结论的模式进行。读者如果对前面章节内容不熟悉，也不影响对后续章节的阅读。

(2) 举例简单化。为了便于读者理解，本书在进行严密理论推导的同时，按照从简单到复杂的学习过程，所举例子以及采用的模型也尽量简单化，部分问题的研究的甚至从一阶系统开始，而且所研究的问题也是由简单到复杂逐层深入，如多参数辨识研究之前以单参数和双参数辨识研究为铺垫，便于这一领域的入门级爱好者理解与接受。

(3) 程序指导性。本书附有大量的程序，以保障读者能够通过程序来验证每一节所提的理论方法，也能够通过程序来还原书中所有的仿真曲线，尤其是通过程序 来了解笔者的研究思想。

本书的出版得到了海军航空工程学院控制工程系的大力支持，在此对控制工程系周文松主任、张贵硕政委、赵国荣主任与周绍磊主任、胡云安主任表示诚挚的谢意。最后，感谢飞行器控制教研室的吴华丽、王玲玲、梁勇、梁国强与施建洪，他们完成了本书部分内容的编辑与书稿修订工作，使得本书得以顺利出版。

当然，由于笔者的水平有限，书中错漏或不足之处在所难免，敬请读者批评指正，诚恳邀请您在笔者邮箱之中指出，或者提出您的宝贵意见进行深入交流。

作者邮箱：leijunwei@126.com

雷军委

2016年2月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 参数辨识的研究现状	1
1.2 基于 Lyapunov 函数的自适应参数辨识方法归类	2
1.3 参数可辨识问题	3
1.4 基于 Lyapunov 函数的自适应控制与参数辨识问题	4
1.5 本书的研究目的	4
1.6 本书的构成	5
第 2 章 基于常值与周期激励的简单系统自适应控制与参数辨识	6
2.1 前 言	6
2.2 一阶系统的自适应控制与单参数辨识	7
2.3 一阶系统的自适应控制与多参数辨识	11
2.4 小 结	23
第 3 章 基于混沌激励的自适应控制与参数辨识	24
3.1 前 言	24
3.2 模型描述	24
3.3 误差系统分析	25
3.4 自适应控制律设计	25
3.5 参数辨识结果分析	29
3.6 仿真分析	30
3.7 结 论	70
第 4 章 基于混沌激励的方向未知系统参数辨识	71
4.1 前 言	71
4.2 Nussbaum 增益的定义与相关引理	71

4.3	模型描述	72
4.4	Nussbaum 增益自适应方法设计	73
4.5	参数辨识分析	76
4.6	5 个仿真实验设计	77
4.7	实验结果与仿真分析	80
4.8	结 论	85
第 5 章	基于 Nussbaum 增益与相似混沌激励的自适应参数辨识尝试	86
5.1	前 言	86
5.2	模型描述	86
5.3	误差系统分析	87
5.4	Nussbaum 增益自适应控制律设计	87
5.5	参数辨识分析	93
5.6	结 论	97
第 6 章	基于 Nussbaum 增益与异构混沌激励的自适应参数辨识尝试	98
6.1	前 言	98
6.2	模型描述	98
6.3	误差系统分析	99
6.4	自适应控制律设计	99
6.5	参数辨识分析	105
6.6	定步长仿真分析	109
6.7	变步长仿真分析	123
6.8	结 论	134
总 结		136
参考文献		137

第1章 绪论

1.1 参数辨识的研究现状

参数辨识为系统参数计算提供了解决手段,进而为对象的表征、分析、优化、控制等应用提供模型基础,它和状态估计、控制理论构成现代控制论的三个互相渗透的领域.系统参数辨识和建模是现代控制理论的一个分支,它是用观测过程的输入、输出数据来建立生产过程中数学模型的一种理论和方法.

1962年,Zadeh首次提出系统辨识(System Identification)这个词.Zadeh给出的定义是^[1]:“系统辨识就是在输入和输出数据的基础上,从一组给定的模型类中,确定一个与所测系统等价的模型”.

根据辨识理论,辨识方法可分为经典辨识法和现代辨识法两类.经典辨识法与经典控制理论是相对应的,其建立的数学模型有时域脉冲响应、频域幅频/相频特性等;现代辨识法适用于现代控制理论,其建立的数学模型有状态空间方程和差分方程等^[2].

无论是经典辨识法还是现代辨识法,都必须借助一定的算法来实现.实现辨识的算法有很多,目前应用较多的离线辨识方法有加减速法、空载、堵转、阶越等实验方法.常用的在线辨识算法有以下几类:

- (1) 基于频域法的参数辨识.
- (2) 最小二乘法.
- (3) 基于极大似然法的参数辨识.
- (4) 状态观测器辨识方法.
- (5) 基于扩展卡尔曼滤波(EKF)的参数辨识方法.
- (6) 基于分段线性多项式函数法的参数辨识.
- (7) 基于模型参考自适应(MRAS)的参数辨识方法.
- (8) 人工智能方法.

其中人工智能方法有可细分为以下几种：

- ① 遗传算法；
- ② 进化策略；
- ③ 人工神经网络算法；
- ④ Prony 算法；
- ⑤ 粒子群算法；
- ⑥ 鱼群算法；
- ⑦ 支持向量机等其他算法。

辨识算法的选择一般有以下几个方面的考虑^[3]：

- (1) 算法实现的难易程度；
- (2) 可辨识性问题，也就是多参数辨识时能否辨识出正确的参数值；
- (3) 算法的计算量和实时性；
- (4) 算法对先验知识的依赖程度；
- (5) 算法的辨识精度；
- (6) 收敛性和收敛速度；
- (7) 算法的抗干扰能力；

近年来，参数辨识的研究已经取得了突飞猛进的发展，开始由最初的离线辨识向在线辨识发展^[3]。最新的辨识研究动向包含辨识与控制的配合、鲁棒辨识、融入专家系统与人工智能的集成辨识方法、采用并行计算机而实现的并行辨识方法等。

1.2 基于 Lyapunov 函数的自适应参数辨识方法归类

由上述目前文献所公认的经典参数辨识方法分类可以看出，本书所研究的基于 Lyapunov 函数的自适应参数辨识方法，尽管已有不少文献进行研究，但由于此方法还处于理论研究阶段，取得的研究成果未被工程界所广泛采用，也并未被完全纳入以上各典型分类中。

考虑到基于 Lyapunov 函数的自适应参数辨识方法与模型参考自适应方法有异曲同工之妙，本书将其纳入上述分类的第七类，并改为基于自适应或自校正理论的参数辨识方法，其中包含以下四小类：基于模型参考自适应

(MRAS)的参数辨识方法(见图1.1);基于自校正理论的参数辨识方法;基于Lyapunov函数的自适应参数辨识方法;基于模型参考自适应的参数辨识方法,它又可分为基于Lyapunov稳定与基于波波夫超稳定的两类自适应参数辨识方法。

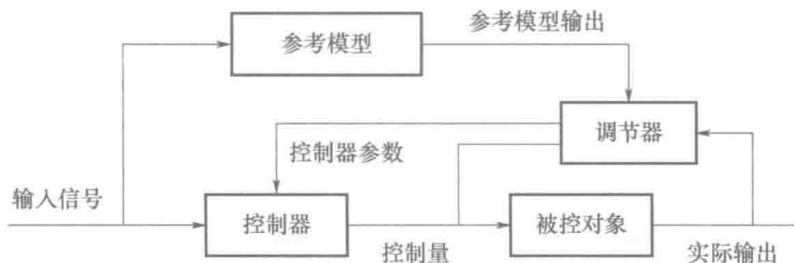


图 1.1 模型参考自适应的结构框图

1.3 参数可辨识问题

在电力系统参数辨识研究过程中常常发现,有时模型参数变化很大,但是系统动态响应相差却不大,而且与实测的输入/输出数据也吻合得很好,这说明几组模型参数均可描绘系统的动态行为。然而,研究者在根据测量数据进行辨识的时候,往往很关心模型参数能否被唯一地辨识出来。如果模型本身的结构决定了参数不可唯一辨识,那么仅仅通过量测数据来进行参数辨识通常是不会成功的^[4]。

1995年,河海大学的鞠平等首次提出电力系统模型参数的可辨识性问题^[5]。随后,鞠平等对三阶感应电动机综合模型进行了可辨识性分析^[6],黄梅等将可辨识性分析的概念引入励磁系统参数辨识中^[7]。

以往的研究和经验表明,参数的可辨识性与参数灵敏度有密切关系。一般而言,从时域上看,灵敏度同相或者反相的参数可能是不可唯一辨识的;从频域上看,灵敏度低频段高参数比较容易辨识。不可唯一辨识的参数往往构成隐函数对系统动态响应的共同作用。伍双喜将系统中多个隐函数以关联性参数的概念加以推广,并在此基础上进行了关联性参数的识别与估计^[8]。

1.4 基于 Lyapunov 函数的自适应控制与参数辨识问题

基于 Lyapunov 函数的自适应控制与参数辨识方法近年来广泛应用于单个混沌系统的同步与参数辨识中,同时,很多学者还将该方法进一步扩展并应用于多个系统组成的动力学网络系统的参数辨识与控制中^[9-15].

Y. Yang^[16]利用参数自适应控制方法研究高维离散混沌系统的同步与参数辨识.作者指出,当未知参数个数大于方程个数时,此方法是不稳定的,也就是说,这个方法无法辨识未知参数个数大于状态变量个数的系统.最后,作者考虑到超混沌映射,给出了数值例子以说明此方法是有效的.

本书针对连续混沌自适应同步与参数辨识的问题,提出了最大可辨识参数个数的问题,并给出结论:在连续系统中,采用基于 Lyapunov 函数的自适应控制方法进行参数辨识时,可辨识参数个数可以大于方程个数,应该等于方程中独立不相关函数的个数.但考虑到算法数字仿真的实现问题,当未知参数个数等于方程个数时,参数辨识最容易实现,而且辨识效果又快又好;而当一个方程含有两个未知参数或多个未知参数时,即使此时系统满足可辨识的独立不相关函数要求,对算法的仿真步长提出了更高的要求,即辨识算法实现的难度急剧增大,辨识时间急剧增加,辨识精度有所下降.

1.5 本书的研究目的

综上所述,本研究的基于 Lyapunov 的自适应控制与参数辨识是经典参数辨识中在线辨识的一个小分支.本书的研究目的之一在于明确给出采用该方法进行参数辨识的可辨识条件,从而针对不满足辨识条件的系统,避免广大研究者进行参数辨识的深入实验而浪费精力.研究目的之二在于说明参数辨识的结果与输入激励有很大关系,尤其是混沌系统,由于具有丰富而无规则的动态特性,非常适用于参数辨识,因此本书也采用部分篇幅对此加以研究.

同时本书给出了以下四大问题的明确结论:

- (1) 采用基于 Lyapunov 函数的自适应参数辨识的可辨识定性分析问题;
- (2) 最多可辨识参数的定量分析问题;
- (3) 常值跟踪激励、周期函数跟踪激励与无规则的混沌激励下参数辨识效果比较问题;

(4) 控制方向未知情况下的参数辨识设计与可辨识性问题. 因此, 以上问题与结论对广大读者具有一定的启发与参考价值.

1.6 本书的构成

本书围绕上述四大问题, 共分如下 6 章进行介绍.

其中第 1 章为绪论, 说明本书所讨论基于 Lyapunov 与混沌激励的自适应参数辨识问题在整个参数辨识问题中的地位, 以及本书的研究目的与价值.

第 2 章分析了基于常值激励与周期激励的自适应参数辨识方法的辨识效果.

第 3 章分析了基于混沌激励的自适应参数辨识的可辨识性问题与辨识效果.

第 4 章分析了方向未知情况下, 基于 Lyapunov 函数与混沌激励的参数辨识问题的设计分析方法.

第 5 与第 6 章分别对相似与相异两种结构混沌激励下的自适应参数辨识效果进行了尝试性研究.

第 2 章 基于常值与周期激励的简单系统自适应控制与参数辨识

2.1 前 言

为了说明单个方程识别多个未知参数问题的难度,本章按照从易到难的原则,循序渐进,并辅以丰富的仿真程序以及仿真结果曲线对该问题进行翔实的阐述.

首先,以一类简单的仅含一个未知参数的一阶系统进行说明,给出了典型的基于 Lyapunov 函数法设计的基本步骤,然后通过仿真说明. 尽管该类情况的参数辨识的理论分析比较简单,但在仿真中仍然存在控制增益与辨识增益相匹配的问题,如果匹配不当,则控制目标可以实现,而参数辨识则无法完成. 以上简单例子说明,控制与辨识两者之间相辅相成,但大部分时候辨识的难度要大于控制的难度.

在此基础之上,还是以简单一阶系统为例,仅仅将该问题升级至含两个未知参数的辨识上,通过理论设计与翔实的仿真分析表明,在该类情况下,参数辨识问题的难度成倍增加. 我们尝试了常值输入激励与周期函数输入激励两种情况,在满足所谓不相关条件时,理论上参数均应当能够被辨识出来,但仿真表明,理论算法的完全实现是非常困难的. 常值输入激励会导致误差过早收敛到零,而参数辨识陷入正负抵消的平衡中难以实现;周期函数输入激励反而导致误差收敛到零比较困难,大部分情况是在零附件的小区间震荡,因此参数难以实现辨识.

仅针对简单一阶系统为例,当处理双未知参数时,就出现了以上难以解决的问题,因此在本章抛砖引玉之后,后文第 3 章进行了混沌输入激励的参数辨识研究,以此说明混沌输入激励在参数辨识中具有其他方法所不具有的独特效果.

2.2 一阶系统的自适应控制与单参数辨识

2.2.1 模型描述

考虑如下的一阶系统，即

$$\dot{x} = ax + u \quad (2.1)$$

式中： a 为未知定常参数，控制目标为设计控制器 $u = h(x, \hat{a})$ ，使得系统状态 x 跟踪期望常值 x^d ，而 $\hat{a}$ 能够逼近未知参数 a 。

2.2.2 基于 Terminal 吸引子与 Sigmoid 函数的自适应辨识控制器设计

下面采用普通的自适应控制方法，设计辨识控制一体化控制器。首先定义误差变量 $z_1 = x_1 - x_1^d$ ，则有

$$\dot{z}_1 = \dot{x}_1 - \dot{x}_1^d = ax + u \quad (2.2)$$

设计状态反馈控制律为

$$u = -\hat{a}x - \sum_{i=1}^n k_i f_i(z_1) \quad (2.3)$$

其中选取 $n = 5$ ，

$$f_1(z_1) = z_1, \quad f_2(z_1) = z_1^3, \quad f_3(z_1) = z_1^{1/3} \quad (2.4)$$

$$f_4(z_1) = \frac{z_1}{|z_1| + \varepsilon}, \quad \varepsilon = 0.2 \quad (2.5)$$

$$f_5(z_1) = \frac{1 - e^{-\tau z_1}}{1 + e^{-\tau z_1}}, \quad \tau = 0.5 \quad (2.6)$$

式中： $f_3(z_1)$ 为 Terminal 控制的吸引子； $f_5(z_1)$ 为 Sigmoid 函数； $f_4(z_1)$ 与 $f_5(z_1)$ 均具有有界性。显然， $f_i(z_1)$ 满足 $z_1 f_i(z_1) \geq 0$ ，把控制律代入上述系统，则有

$$\dot{z}_1 = \tilde{a}x - \sum_{i=1}^n k_i f_i(z_1) \quad (2.7)$$

其中误差变量 $\tilde{a}$ 定义为

$$\tilde{a} = a - \hat{a} \quad (2.8)$$

设计自适应权值调节规律为

$$\dot{\hat{a}} = \Gamma z_1 x \quad (2.9)$$

式中： $\hat{a}$ 为未知参数的估计值，选取初始值 $\hat{a}(0) = 0$ ，则有

$$\dot{\tilde{a}} = -\dot{\hat{a}} \quad (2.10)$$

选取 Lyapunov 函数为

$$V = \frac{1}{2} z_1^2 + \frac{1}{2\Gamma} \tilde{a}^2 \quad (2.11)$$

求其导数得

$$\dot{V} = z_1 \dot{z}_1 + \frac{1}{\Gamma} \tilde{a} \dot{\tilde{a}} \quad (2.12)$$

进一步化简得

$$\dot{V} = z_1 \tilde{a} x - \sum_{i=1}^n k_i z_1 f_i(z_1) - \frac{1}{\Gamma} \tilde{a} \Gamma z_1 x = - \sum_{i=1}^n k_i z_1 f_i(z_1) \leq 0 \quad (2.13)$$

根据不变集理论可得 $z_1 \rightarrow 0$ 。

2.2.3 参数辨识结果分析

当 $z_1 \rightarrow 0$ 时， $u = -\hat{a}x$ ，此时有

$$\dot{z}_1 = ax - \hat{a}x = \tilde{a}x$$

当 $z_1 \rightarrow 0$ ，有 $\dot{z}_1 \rightarrow 0$ ，则有 $\dot{z}_1 = ax - \hat{a}x = \tilde{a}x = 0$ ，此时 $\dot{z}_1 = ax - \hat{a}x = \tilde{a}x = 0$ ，当 $x \neq 0$ 时， $\tilde{a} \rightarrow 0$ 。

2.2.4 仿真分析

根据上述模型，选取未知参数 $a = 5$ ，设定状态期望值 $x_1^d = 2$ ，编写程序如下：

```

clc;clear;a=5;xld=2;ag=0;x=0;u=0;tf=15;dt=0.001;
for i=1:tf/dt
    t=i*dt;dx=a*x+u;x=x+dx*dt;
    k1=5;k2=0.2;k3=1;k4=1;k5=1;esten=0.2;tao=0.5;
    z1=x-xld;f1=z1;f2=z1^3;f3=z1^(1/3);f4=z1/(abs(z1)+esten);
    f5=(1-exp(-tao*z1))/(1+exp(-tao*z1));
    ta=30;dag=ta*x*z1;ag=ag+dag*dt;
    u=-ag*x-k1*f1-k2*f2-k3*f3-k4*f4-k5*f5;
    tp(i)=t;xp(i)=x;agp(i)=ag;
end
figure(1);plot(tp,xp);xlabel('t/s');ylabel('state x');
figure(2);plot(tp,agp);xlabel('t/s');ylabel('state ag');

```

仿真结果如图 2.1 和图 2.2 所示.

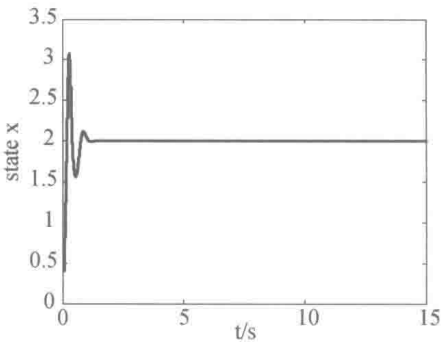


图 2.1 状态 x 曲线

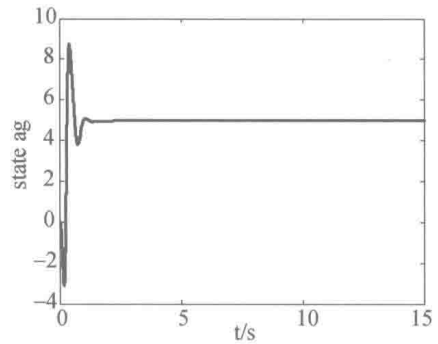


图 2.2 参数估计曲线

仿真结果表明,未知参数估计值能够趋近于真实值,而且系统状态能够逼近期望状态,表明本研究所设计方法是正确有效的,而且有关未知参数的逼近分析是正确的.但当控制增益与辨识增益匹配不当时,参数辨识结果花费时间很长,而且效果不理想,仿真程序如下:

```

clc;clear;a=5;xld=2;ag=0;x=0;u=0;tf=150;dt=0.001;
for i=1:tf/dt

```

```

t=i*dt;dx=a*x+u;x=x+dx*dt;
k1=5;k2=0.2;k3=1;k4=1;k5=1;esten=0.2;tao=0.5;
k1=5;k2=5;k3=5;k4=5;k5=5;
z1=x-x1d;f1=z1; f2=z1^3;f3=z1^(1/3);f4=z1/(abs(z1)+esten);
f5=(1-exp(-tao*z1))/(1+exp(-tao*z1));
ta=0.1;dag=ta*x*z1;ag=ag+dag*dt;
u=-ag*x-k1*f1-k2*f2-k3*f3-k4*f4-k5*f5;
tp(i)=t;xp(i)=x;agp(i)=ag;
end
figure(1);plot(tp,xp,'k');xlabel('t/s');ylabel('state x');
figure(2);plot(tp,agp,'k');xlabel('t/s');ylabel('state ag');
仿真结果如图 2.3 和图 2.4 所示.

```

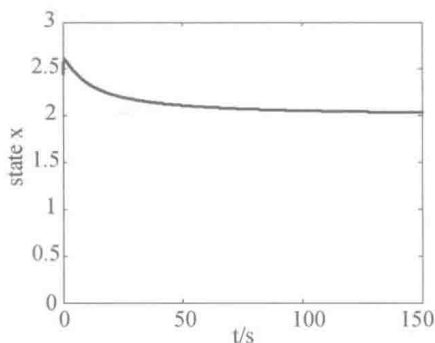


图 2.3 状态 x 曲线

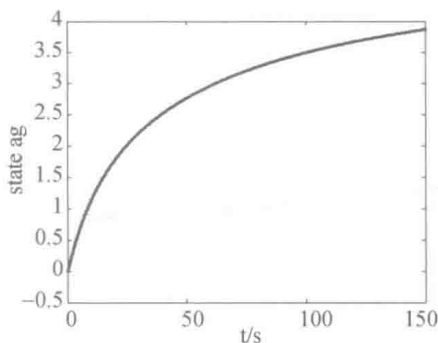


图 2.4 参数估计曲线

2.2.5 结 论

以上理论分析与仿真结果表明,本研究所提的 Terminal 与 Sigmoid 函数相结合的方法对参数辨识具有较好的效果,同时在控制增益与参数自适应速率匹配较好的情况下,未知参数的辨识是较容易取得成功的.然而也有匹配不当的情况,即使经过很长时间的辨识,效果也不理想,其结果是值得深思的.