

# 飞行器系统辨识

蔡金辉等 著

国防工业出版社

V47  
05

# 飞行器系统辨识

蔡金狮 等 著

HK28/28



05



宇航出版社

· 北京 ·



C0316538

(京)新登字 181 号

### 内容简介

本书将系统辨识理论应用于飞行器动力学系统,阐述如何应用飞行试验数据或地面试验数据辨识飞行器动力学系统的本质参数,建立飞行器各动力学分系统的数学模型。重点辨识气动力数学模型、气动热数学模型、惯性仪表误差数学模型、弹性结构动力学数学模型、颤振数学模型和液体晃动数学模型。全书分理论与应用两大部分。理论部分论述全面、系统,重点突出;应用部分突出实用,密切结合飞行器设计、试验、研制实践中的实际问题,给出实例、具体算法和算式。这是一部理论与实践相结合的系统辨识专著。

本书读者对象为在航空、航天领域从事系统辨识、系统仿真、系统分析、动力学系统特性研究及实验研究的研究员、工程师、实验师和高校教师、研究生;也可作为系统控制、系统仿真、系统辨识研究的专业人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

飞行器系统辨识/蔡金狮等著. —北京:宇航出版社,1995.4

ISBN 7-80034-699-4

I. … I. 蔡… II. 飞行器-动力学系统-系统辨识-数学模型 IV. V47

中国版本图书馆 CIP 数据核字(94)第 14632 号

责任编辑 李明观

宇航出版社出版发行

北京市和平里滨河路 1 号(10013)

发行部地址:北京阜成路 8 号(100830)

航空工业出版社印刷厂印刷

新华书店经销

1995 年 6 月第 1 版 1995 年 6 月第 1 次印刷

开本:850×1168 1/32 印张:19.125 字数:514 千字

印数:1~1000 册 定价:25.00 元

# 序

系统辨识是一门通过观测系统试验过程的输入—输出关系来建立系统数学模型的技术学科,也是一门基于现代控制理论发展起来并已开拓到自然科学、社会科学和应用技术科学众多领域的交叉学科。

70年代以来,系统辨识理论在我国航空航天领域得到广泛的应用。首先,气动参数辨识已成功地应用于建立各种飞机、各类导弹和航天器的气动力数学模型;其次,结构动力学系统的模态参数辨识在飞机、导弹设计中得到广泛应用,还发展了基于有限元数学模型的结构参数辨识算法;液体晃动、颤振和跷振参数的参数辨识也取得成效;另外,系统辨识还用于导弹惯性仪表误差系数辨识,以提高命中精度。

系统辨识在飞行器研制过程中的成功应用,逐步形成了飞行器系统辨识学。“飞行器系统辨识”一书正是总结作者和国内外在该领域的研究成果,加以归纳、系统化。本书作者皆为长期在航空航天高科技领域第一线从事飞机、导弹动力学系统动态分析、动态特性实验和动力学系统辨识的专家、博士,书中论述的问题来源于型号设计和研究实践,有实用价值。书中的解题方法和结果已由设计和试验实践所验证。无疑,本书的出版将对系统辨识在我国飞行器研制中的应用起积极推动作用,相信它对于我国从事飞行器系统仿真、系统辨识和系统动态分析的科研人员和工程技术人员将是一本有价值的参考书。

陈士椿

1994.11.25

# 前 言

飞行器动力学系统辨识在飞行器研制的设计、试验、定型鉴定全过程中,特别是在飞行器系统仿真建模中,有着广泛的应用前景。我国开展此项研究工作已有多多年,目前还处于开发发展阶段。为总结多年来国内外在这一领域中的研究成果和经验,进一步促进系统辨识理论在我国各类飞机、导弹、再入飞行体的总体设计、结构设计和系统仿真中的推广应用,以达到继往开来之目的,特邀请了航空航天界在第一线直接从事系统辨识理论研究和实验研究的专家撰稿出版这本专著。

本书是蔡金狮所著《动力学系统辨识与建模》一书的续篇和扩展。除理论论述更为精练和扩充了一些新研究成果外,重点突出了系统辨识在飞行器研制过程中的应用。主要是气动力参数辨识、气动热参数辨识、结构动力学参数辨识、跷振辨识、液体晃动参数辨识和用于落点精度分析的惯性仪表误差系数辨识等。问题有实际工程背景,算法有实际应用价值。全书分理论与应用两部分。前七章为理论部分,包括绪论、模型辨识、状态估计、参数估计、辨识准度与系统验证、试验设计、试验数据的预处理及相容性检验。后五章为应用部分,分别为飞行器气动参数辨识、结构动力学参数辨识、跷振辨识与参数估计、液体晃动参数辨识和惯性仪表误差系数辨识。

全书作者:

蔡金狮 第1,2,4,6,8章和全书统稿;

程光显 第12章和4.3节,6.3节;

张德文 第9章和7.3节; 李乃宏 第5,7章和3.1.6条;

方良玉 第11章和6.5节; 崔平远 第3章和4.1.8条;

黄友仙 6.4 节和 9.3 节; 王其政 第 10 章;  
戴淑静 9.6 节; 高庆芬 8.2.1 条;  
赵明珍 8.2.3 条; 黎中伟 8.3.3 条。

希望本书的出版对我国飞行器动力学系统辨识的研究工作和  
实际应用有所促进。

**姜殿元**

1994. 7. 30

# 目 录

|                             |      |
|-----------------------------|------|
| <b>第一章 绪论</b> .....         | (1)  |
| 1.1 系统辨识与建模 .....           | (2)  |
| 1.2 系统辨识基本思想 .....          | (3)  |
| 1.3 系统辨识主要内容 .....          | (5)  |
| 1.4 系统辨识主要功用 .....          | (8)  |
| 1.5 飞行器系统辨识.....            | (10) |
| 1.5.1 气动力参数辨识 .....         | (10) |
| 1.5.2 气动热参数辨识 .....         | (11) |
| 1.5.3 结构动力学参数辨识 .....       | (12) |
| 1.5.4 液体晃动模态参数辨识与跷振辨识 ..... | (13) |
| 1.5.5 惯性仪表误差系数辨识 .....      | (14) |
| <b>第二章 模型辨识</b> .....       | (15) |
| 2.1 飞行器动力学系统数学模型.....       | (15) |
| 2.1.1 飞行器刚体动力学系统 .....      | (16) |
| 2.1.2 飞行器弹性体的动力学系统 .....    | (18) |
| 2.1.3 含液体的飞行器动力学系统 .....    | (24) |
| 2.2 空气动力数学模型.....           | (26) |
| 2.2.1 代数模型.....             | (26) |
| 2.2.2 积分方程模型 .....          | (31) |
| 2.2.3 微分方程模型 .....          | (36) |
| 2.3 推力与环境数学模型.....          | (41) |
| 2.3.1 推力数学模型 .....          | (41) |
| 2.3.2 重力数学模型 .....          | (43) |
| 2.3.3 标准大气密度 .....          | (43) |

|                            |       |
|----------------------------|-------|
| 2.3.4 大气湍流模型 .....         | (44)  |
| 2.4 建模准则与优选算法 .....        | (47)  |
| 2.4.1 最大信息量准则 .....        | (47)  |
| 2.4.2 最大可信度准则 .....        | (48)  |
| 2.4.3 F 统计检验 .....         | (50)  |
| 2.4.4 最小预测误差平方和准则 .....    | (51)  |
| 参考文献 .....                 | (52)  |
| <b>第三章 状态估计</b> .....      | (54)  |
| 3.1 卡尔曼滤波算法 .....          | (55)  |
| 3.1.1 最小方差估计 .....         | (56)  |
| 3.1.2 卡尔曼滤波 .....          | (57)  |
| 3.1.3 广义卡尔曼滤波 .....        | (62)  |
| 3.1.4 增广的广义卡尔曼滤波 .....     | (64)  |
| 3.1.5 修正增益广义卡尔曼滤波 .....    | (65)  |
| 3.1.6 平方根分解滤波 .....        | (68)  |
| 3.2 分割算法 .....             | (76)  |
| 3.2.1 分割定理 .....           | (77)  |
| 3.2.2 广义分割算法 .....         | (80)  |
| 3.2.3 广义多分割算法 .....        | (85)  |
| 3.2.4 广义分割辨识算法 .....       | (89)  |
| 参考文献 .....                 | (94)  |
| <b>第四章 参数估计</b> .....      | (96)  |
| 4.1 时域最大似然法 .....          | (97)  |
| 4.1.1 最大似然准则 .....         | (97)  |
| 4.1.2 非线性动力学系统最大似然算法 ..... | (100) |
| 4.1.3 线性动力学系统最大似然算法 .....  | (105) |
| 4.1.4 修正最大似然准则 .....       | (108) |
| 4.1.5 输出误差法 .....          | (110) |
| 4.1.6 方程误差法 .....          | (111) |

|                            |                       |              |
|----------------------------|-----------------------|--------------|
| 4.1.7                      | 最大似然近似算法 .....        | (112)        |
| 4.1.8                      | 灵敏度矩阵的递推算法 .....      | (115)        |
| 4.1.9                      | 最大似然递推算法 .....        | (118)        |
| 4.2                        | 频域最大似然法 .....         | (121)        |
| 4.2.1                      | 频域最大似然准则 .....        | (122)        |
| 4.2.2                      | 最大似然算法 .....          | (124)        |
| 4.2.3                      | 离散型最大似然算法 .....       | (128)        |
| 4.2.4                      | 频域输出误差法 .....         | (130)        |
| 4.2.5                      | 传递函数法 .....           | (131)        |
| 4.2.6                      | 方程误差法 .....           | (132)        |
| 4.2.7                      | 零添补技术 .....           | (133)        |
| 4.3                        | 线性模型参数估计 .....        | (134)        |
| 4.3.1                      | 最小二乘法 .....           | (135)        |
| 4.3.2                      | 贝叶斯法 .....            | (139)        |
| 4.3.3                      | 岭估计法 .....            | (140)        |
| 4.3.4                      | 超椭球法 .....            | (141)        |
| 4.3.5                      | 逐步回归法 .....           | (142)        |
| 4.3.6                      | 主成份法 .....            | (147)        |
| 4.3.7                      | 特征根法 .....            | (148)        |
| 4.3.8                      | 贝叶斯主成份法(PB 回归法) ..... | (149)        |
|                            | 参考文献 .....            | (150)        |
| <b>第五章 辨识准度与系统验证 .....</b> |                       | <b>(152)</b> |
| 5.1                        | 参数估计准度评价准则 .....      | (152)        |
| 5.1.1                      | 估计偏差 .....            | (152)        |
| 5.1.2                      | 估计分散度 .....           | (153)        |
| 5.1.3                      | 克拉马-罗不等式 .....        | (154)        |
| 5.1.4                      | 不确定度椭球 .....          | (155)        |
| 5.2                        | 估计准度评价的简化算法 .....     | (156)        |
| 5.2.1                      | 灵敏度 .....             | (156)        |

|            |                       |              |
|------------|-----------------------|--------------|
| 5.2.2      | 相关性 .....             | (156)        |
| 5.2.3      | 克拉马-罗界 .....          | (158)        |
| 5.2.4      | 修正克拉马-罗界 .....        | (159)        |
| 5.3        | 参数的置信区间估计 .....       | (159)        |
| 5.3.1      | 线性系统置信区间估计 .....      | (160)        |
| 5.3.2      | 非线性系统置信区间估计 .....     | (162)        |
| 5.3.3      | 非线性因子估计算法 .....       | (163)        |
| 5.4        | 准度的工程判断 .....         | (166)        |
| 5.5        | 系统验证 .....            | (166)        |
|            | 参考文献 .....            | (167)        |
| <b>第六章</b> | <b>试验设计 .....</b>     | <b>(169)</b> |
| 6.1        | 刚体动力学系统输入与输出设计 .....  | (169)        |
| 6.1.1      | 刚体动力学系统激振输入设计 .....   | (170)        |
| 6.1.2      | 刚体动力学系统输出设计 .....     | (172)        |
| 6.1.3      | 几何、物理和环境参数测量 .....    | (175)        |
| 6.2        | 最优输入设计 .....          | (176)        |
| 6.2.1      | 最优输入设计准则 .....        | (177)        |
| 6.2.2      | 最优输入时域算法 .....        | (180)        |
| 6.3        | 惯性仪表误差系数辨识的试验设计 ..... | (185)        |
| 6.3.1      | 惯性仪表误差数学模型 .....      | (185)        |
| 6.3.2      | 惯性仪表误差的地面试验 .....     | (186)        |
| 6.3.3      | 惯性仪表误差的飞行试验 .....     | (187)        |
| 6.4        | 弹性动力学系统试验设计 .....     | (193)        |
| 6.4.1      | 系统的支承 .....           | (194)        |
| 6.4.2      | 弹性系统输入设计 .....        | (194)        |
| 6.4.3      | 弹性系统输出设计 .....        | (198)        |
| 6.5        | 液体晃动试验设计 .....        | (200)        |
| 6.5.1      | 相似律及试件设计 .....        | (200)        |
| 6.5.2      | 液体晃动试验输入设计 .....      | (201)        |

|                                 |              |
|---------------------------------|--------------|
| 6.5.3 液体晃动试验输出设计 .....          | (206)        |
| 参考文献 .....                      | (211)        |
| <b>第七章 试验数据的预处理及相容性检验 .....</b> | <b>(213)</b> |
| 7.1 飞行试验数据的预处理 .....            | (213)        |
| 7.1.1 测量数据由电量到物理量的转换 .....      | (214)        |
| 7.1.2 零位修正 .....                | (215)        |
| 7.1.3 野点的识别、剔除与补正 .....         | (215)        |
| 7.1.4 数据加密与采样时刻校正 .....         | (216)        |
| 7.1.5 传感器安装位置校正 .....           | (217)        |
| 7.1.6 数据的低通数字滤波 .....           | (218)        |
| 7.1.7 实测数据数值微分 .....            | (220)        |
| 7.1.8 不同观测量间的时延修正 .....         | (221)        |
| 7.2 飞行试验数据的相容性检验 .....          | (222)        |
| 7.2.1 六自由度飞行数据相容性检验数学模型 .....   | (223)        |
| 7.2.2 相容性检验问题的一般描述 .....        | (226)        |
| 7.2.3 飞行数据相容性检验实用算法 .....       | (228)        |
| 7.3 结构测量模态参数预处理 .....           | (231)        |
| 7.3.1 由复模态提取实模态 .....           | (232)        |
| 7.3.2 插值扩阶 .....                | (234)        |
| 7.3.3 统一标定 .....                | (237)        |
| 7.3.4 模态的相关性分析 .....            | (238)        |
| 7.4 气动参数可辨识性分析 .....            | (240)        |
| 7.4.1 参数相关性分析 .....             | (241)        |
| 7.4.2 可辨识性的工程分析 .....           | (243)        |
| 参考文献 .....                      | (244)        |
| <b>第八章 飞行器气动参数辨识 .....</b>      | <b>(247)</b> |
| 8.1 概述 .....                    | (247)        |
| 8.2 战术导弹气动力参数辨识 .....           | (249)        |
| 8.2.1 飞航导弹气动力参数辨识 .....         | (249)        |

|       |                       |       |
|-------|-----------------------|-------|
| 8.2.2 | 地空导弹气动力参数辨识 .....     | (264) |
| 8.2.3 | 空空导弹气动力参数辨识 .....     | (283) |
| 8.2.4 | 反坦克导弹气动力参数辨识 .....    | (288) |
| 8.2.5 | 自旋导弹气动力参数辨识 .....     | (294) |
| 8.3   | 飞机气动力参数辨识 .....       | (298) |
| 8.3.1 | 飞机短周期运动气动力参数辨识 .....  | (299) |
| 8.3.2 | 飞机大攻角非定常气动力参数辨识 ..... | (306) |
| 8.3.3 | 飞机颤振系统辨识 .....        | (310) |
| 8.3.4 | 直升机气动力参数辨识 .....      | (320) |
| 8.4   | 再入体气动力参数辨识 .....      | (329) |
| 8.4.1 | 再入体气动力矩导数辨识 .....     | (329) |
| 8.4.2 | 小不对称气动参数辨识 .....      | (332) |
| 8.4.3 | 再入攻角和气动力导数估计 .....    | (337) |
| 8.5   | 弹丸气动力参数辨识 .....       | (340) |
| 8.5.1 | 太阳方位计的姿态测定 .....      | (341) |
| 8.5.2 | 弹丸气动力参数辨识数学模型 .....   | (342) |
| 8.5.3 | 气动力参数辨识对测试准度的要求 ..... | (345) |
| 8.6   | 鱼雷动力学系统参数辨识 .....     | (347) |
| 8.6.1 | 鱼雷动力学系统基本方程 .....     | (347) |
| 8.6.2 | 水动力参数辨识基本方程 .....     | (354) |
| 8.6.3 | 辨识仿真算例 .....          | (358) |
| 8.7   | 地面试验的气动力参数辨识 .....    | (359) |
| 8.7.1 | 模型自由飞气动力矩参数辨识 .....   | (360) |
| 8.7.2 | 模型自由飞气动力导数辨识 .....    | (363) |
| 8.7.3 | 风洞三自由度天平的参数辨识 .....   | (365) |
| 8.8   | 再入体气动热参数辨识 .....      | (369) |
| 8.8.1 | 气动热参数辨识的问题提出 .....    | (370) |
| 8.8.2 | 非线性热导率辨识 .....        | (372) |
| 8.8.3 | 再入体热流率时间历程辨识 .....    | (375) |

|                      |       |
|----------------------|-------|
| 参考文献                 | (382) |
| <b>第九章 结构动力学参数辨识</b> | (384) |
| 9.1 概述               | (384) |
| 9.2 结构刚体模态参数辨识       | (386) |
| 9.2.1 准刚体模态          | (387) |
| 9.2.2 刚体惯性量辨识        | (388) |
| 9.2.3 支承刚度辨识         | (390) |
| 9.2.4 迭代校正           | (392) |
| 9.3 结构弹性模态参数与动态载荷辨识  | (393) |
| 9.3.1 模态参数频域辨识       | (394) |
| 9.3.2 模态参数时域辨识       | (403) |
| 9.3.3 捆绑式火箭模态辨识      | (410) |
| 9.3.4 结构动态载荷辨识       | (415) |
| 9.4 结构物理参数辨识         | (418) |
| 9.4.1 矩阵型辨识算法        | (418) |
| 9.4.2 元素型辨识算法        | (424) |
| 9.4.3 子矩阵型辨识算法       | (431) |
| 9.4.4 设计参数型辨识算法      | (433) |
| 9.4.5 缩聚模型辨识算法       | (436) |
| 9.4.6 准完善模型辨识算法      | (442) |
| 9.4.7 完备空间模型辨识算法     | (443) |
| 9.4.8 阻尼辨识           | (448) |
| 9.5 建模错误诊断           | (451) |
| 9.5.1 单纯诊断法          | (451) |
| 9.5.2 模修型诊断法         | (453) |
| 9.6 飞行器连接刚度辨识        | (457) |
| 9.6.1 连接刚度辨识算法       | (459) |
| 9.6.2 导弹连接刚度辨识       | (469) |
| 9.6.3 连接刚度辨识的模型与初值选取 | (477) |

|                                  |              |
|----------------------------------|--------------|
| 9.7 结构辨识常用数学算式 .....             | (479)        |
| 9.7.1 约束最小二乘法 .....              | (479)        |
| 9.7.2 特征矢量导数算法 .....             | (480)        |
| 9.7.3 对于误差因子的特征导数 .....          | (484)        |
| 参考文献 .....                       | (486)        |
| <b>第十章 跷振(POGO)辨识与参数估计 .....</b> | <b>(490)</b> |
| 10.1 概述 .....                    | (490)        |
| 10.2 跷振系统动力学方程 .....             | (493)        |
| 10.2.1 输液管路系统 .....              | (493)        |
| 10.2.2 泵系统 .....                 | (505)        |
| 10.2.3 发动机推力系统 .....             | (507)        |
| 10.2.4 结构系统 .....                | (508)        |
| 10.3 跷振参数估计 .....                | (514)        |
| 10.3.1 跷振试验 .....                | (514)        |
| 10.3.2 跷振系统参数估计 .....            | (517)        |
| 10.3.3 跷振飞行试验辨识 .....            | (525)        |
| 参考文献 .....                       | (527)        |
| <b>第十一章 液体晃动的参数辨识 .....</b>      | <b>(528)</b> |
| 11.1 概述 .....                    | (528)        |
| 11.2 液体晃动位势流解 .....              | (531)        |
| 11.2.1 平底直圆柱贮箱 .....             | (532)        |
| 11.2.2 圆环形平底贮箱 .....             | (534)        |
| 11.3 液体晃动的等效力学模型 .....           | (536)        |
| 11.3.1 平底圆柱贮箱 .....              | (539)        |
| 11.3.2 平底圆环形贮箱 .....             | (539)        |
| 11.3.3 平底“+”字分隔贮箱 .....          | (540)        |
| 11.4 常阻尼液体晃动等效力学模型参数辨识 .....     | (541)        |
| 11.4.1 常阻尼的频域法 .....             | (542)        |
| 11.4.2 波高法 .....                 | (547)        |

|             |                      |              |
|-------------|----------------------|--------------|
| 11.5        | 非线性阻尼参数的辨识           | (550)        |
| 11.5.1      | 单自由度衰减波形             | (550)        |
| 11.5.2      | 衰减拍波形问题              | (553)        |
| 11.6        | 单自由度非线性的模型参数辨识       | (560)        |
| 11.7        | 具有多个基阶晃动非线性阻尼的模型参数辨识 | (563)        |
|             | 参考文献                 | (567)        |
| <b>第十二章</b> | <b>惯性仪表误差系数辨识</b>    | <b>(568)</b> |
| 12.1        | 概述                   | (568)        |
| 12.2        | 惯性仪表的数学模型            | (569)        |
| 12.2.1      | 平台的数学模型              | (569)        |
| 12.2.2      | 陀螺仪的数学模型             | (570)        |
| 12.2.3      | 加速度表的数学模型            | (570)        |
| 12.2.4      | 灵敏度矩阵                | (571)        |
| 12.3        | 误差系数辨识的观测方程组         | (575)        |
| 12.4        | 观测量及其噪声特性            | (576)        |
| 12.4.1      | 观测量表达式               | (577)        |
| 12.4.2      | 测量噪声特性               | (579)        |
| 12.5        | 辨识仿真计算与实测数据处理        | (581)        |
| 12.5.1      | 辨识仿真计算               | (581)        |
| 12.5.2      | 飞行试验后误差系数辨识          | (583)        |

# CONTENTS

|                                                                                  |      |
|----------------------------------------------------------------------------------|------|
| <b>Chapter 1. Introduction</b>                                                   | (1)  |
| 1. 1 System Identification and Modelling                                         | (2)  |
| 1. 2 Basic Ideas of System Identification                                        | (3)  |
| 1. 3 Main Contents of System Identification                                      | (5)  |
| 1. 4 Main Functions of System Identification                                     | (8)  |
| 1. 5 System Identification for Flight Vehicles                                   | (10) |
| 1. 5. 1 Aerodynamic parameter identification                                     | (10) |
| 1. 5. 2 Aerodynamic thermal parameter identification                             | (11) |
| 1. 5. 3 Parameter identification of structure dynamics                           | (12) |
| 1. 5. 4 Parameter identification of liquid sloshing mode and POGO identification | (13) |
| 1. 5. 5 Error parameter identification of inertia instrument                     | (14) |
| <b>Chapter 2. Model Identification</b>                                           | (15) |
| 2. 1 Dynamic Mathematical Models of Flight Vehicles                              | (15) |
| 2. 1. 1 Dynamic system of rigid flight vehicles                                  | (16) |
| 2. 1. 2 Dynamic system of elastic flight vehicles                                | (18) |
| 2. 1. 3 Dynamic system of elastic flight vehicles with liquid                    | (24) |
| 2. 2 Mathematical Models of Aerodynamics                                         | (26) |
| 2. 2. 1 Algebra model                                                            | (26) |

|                                                                   |      |
|-------------------------------------------------------------------|------|
| 2. 2. 2 Integral equation model .....                             | (31) |
| 2. 2. 3 Differential equation model .....                         | (36) |
| 2. 3 Mathematical Models of Thrust and Circumstance<br>.....      | (41) |
| 2. 3. 1 Thrust model .....                                        | (41) |
| 2. 3. 2 Gravity model .....                                       | (43) |
| 2. 3. 3 Standard atmosphere density .....                         | (43) |
| 2. 3. 4 Atmosphere turbulence model .....                         | (44) |
| 2. 4 Modelling Criteria and Optimizing Algorithm<br>.....         | (47) |
| 2. 4. 1 Maximum information criterion .....                       | (47) |
| 2. 4. 2 Maximum confidence criterion .....                        | (48) |
| 2. 4. 3 F-statistics check .....                                  | (50) |
| 2. 4. 4 Square sum criterion of minimum prediction error<br>..... | (51) |
| References .....                                                  | (52) |
| <b>Chapters 3. State Estimation</b> .....                         | (54) |
| 3. 1 Kalman Filter Algorithm .....                                | (55) |
| 3. 1. 1 Least variance estimation .....                           | (56) |
| 3. 1. 2 Kalman filter .....                                       | (57) |
| 3. 1. 3 Extended Kalman filter .....                              | (62) |
| 3. 1. 4 Augmented extended Kalman filter .....                    | (64) |
| 3. 1. 5 Modified-gain extended Kalman filter .....                | (65) |
| 3. 1. 6 Covariance square-root factorization filter .....         | (68) |
| 3. 2 Partition Algorithm .....                                    | (76) |
| 3. 2. 1 Partition theorem .....                                   | (77) |
| 3. 2. 2 Generalized partition algorithm .....                     | (80) |
| 3. 2. 3 Generalized multi-partitioned algorithm .....             | (85) |
| 3. 2. 4 Generalized partition Algorithm for Identification        |      |