

《国防科研试验工程技术系列教材》

空气动力系统

飞行器系统辨识学

中国人民解放军总装备部军事训练教材编辑工作委员会

国防工业出版社

《国防科研试验工程技术系列教材》

空气动力系统

飞行器系统辨识学

中国人民解放军总装备部
军事训练教材编辑工作委员会

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

飞行器系统辨识学/中国人民解放军总装备部军事训练教材编辑工作委员会编. —北京:国防工业出版社, 2003.5

国防科研试验工程技术系列教材·空气动力系统
ISBN 7-118-02971-8

I. 飞... II. 中... III. 系统辨识—应用—飞行器—空气动力学—教材 IV. V417

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 078321 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 18 $\frac{1}{4}$ 470 千字

2003 年 5 月第 1 版 2003 年 5 月北京第 1 次印刷

印数:1—2000 册 定价:41.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

《国防科研试验工程技术系列教材》

总编审委员会

名誉主任委员 程开甲 李元正

主任委员 胡世祥

副主任委员 段双泉 尚学琨 褚恭信 马国惠

委员 (以下按姓氏笔画排列)

王国玉 刘 强 刘晶儒 张忠华

李济生 邵发声 周铁民 姚炳洪

姜世忠 徐克俊 钱卫平 常显奇

萧泰顺 穆 山

办公室主任 任万德

办公室成员 王文宝 冯许平 左振平 朱承进

余德泉 李 钢 杨德洲 邱学臣

郑时运 聂 峰 陶有勤 郭淦水

钱玉民

《国防科研试验工程技术系列教材· 空气动力系统》编审委员会

主任委员 董臻东

副主任委员 陈作斌 乐嘉陵

委 员 张涵信 王 侃 张志成 萧泰顺
刘义信 范召林 郭隆德 杨祖清
桂业伟

主 编 张涵信

副 主 编 萧泰顺 张志成 王 侃

秘 书 赵志根 沈秀春

飞行器系统辨识学

主 编 蔡金狮

副主编 汪 清 王文正

主 审 陈士橹 曾颖超

著作人员

第 1 章 蔡金狮

第 2 章 蔡金狮

第 3 章 汪 清 董能力 蔡金狮

第 4 章 蔡金狮 王文正

第 5 章 王文正 蔡金狮

第 6 章 蔡金狮

第 7 章 蔡金狮

第 8 章 蔡金狮 王文正

第 9 章 蔡金狮 万宗国

第 10 章 汪 清 蔡金狮

第 11 章 董能力 蔡金狮

第 12 章 钱炜祺 蔡金狮

总 序

当今世界,科学技术突飞猛进,知识经济迅速兴起,国力竞争越来越取决于各类高技术、高层次人才的质量与数量,因此,作为人才培养的基础工作——教材建设,就显得格外重要和紧迫。为总结、巩固国防科研试验的经验和成果,促进国防科研试验事业的发展,加快人才培养,我们组织了近千名专家、学者编著了这套系列教材。

建国以来,我国国防科研试验战线上的广大科技人员,发扬“自力更生、艰苦奋斗、科学求实、大力协同、无私奉献”的精神,经过几十年的努力,建立起了具有相当规模和水平的科研试验体系,创立了一系列科研试验理论,造就了一支既有较高科学理论知识、又有实践经验,勇于攻关、能打硬仗的优秀科技队伍,取得了举世瞩目的成就。这些成就对增强国防实力,带动国家经济发展,促进科技进步,提高国家和民族威望,都发挥了重要作用。

编著这套系列教材是国防科研试验事业继往开来的大事,它是国防科研试验工程技术建设的一个重要方面,是国防科技成果的一个重要组成部分,也是体现国防科研试验技术水平的一个重要标志。它承担着记载与弘扬科技成就、积累和传播科技知识的使命,是众多科技工作者用心血和汗水凝成的科技成果。编著该套系列教材,旨在从总体的系统性、完整性、实用性角度出发,把丰富的实践经验进一步理论化、科学化,形成具有我国特色的国防科研试验理论与实践相结合的知识体系。一是总结整理国防科研试验事业创业 40 年来的重要成果及宝贵经验;二是优化专业技术教材体系,为国防科研试验专业技术人员提供一套系统、全面的教科书,满足人才培养对教材的急需;三是为国防科研试验提供有力的

技术保障;四是将许多老专家、老教授、老学者广博的学识见解和丰富的实践经验总结继承下来。

这套系列教材按国防科研试验主要工程技术范畴分为:导弹航天测试发射系统、导弹航天测量控制系统、试验通信系统、试验气象系统、常规兵器试验系统、核试验系统、空气动力系统、航天医学工程系统、国防科技情报系统、电子装备试验系统等。各系统分别重点论述各自的系统总体、设备总体知识,各专业及相关学科的基础理论与专业知识,主要设备的基本组成、原理与应用,主要试验方法与工作程序,本学科专业的主要科技成果,国内外的最新研究动态及未来发展方向等。

这套系列教材的使用对象主要是:具有大专以上学历的科技与管理干部,从事试验技术总体、技术管理工作的人员及院校有关专业的师生。

期望这套系列教材能够有益于高技术领域里人才的培养,有益于国防科研试验事业的发展,有益于科学技术的进步。

《国防科研试验工程技术系列教材》

总编审委员会

1999年10月

序

空气动力试验与研究是国防科研试验的重要组成部分。

新中国成立以来,我国从事航空、航天空气动力研究的科技人员坚持“自力更生、艰苦奋斗、团结协作、科学求实”的精神,建立了尺寸、速度、性能相配套的各类气动试验设备,开展了气动理论、数值计算、气动试验及模型自由飞研究,承担并完成了一系列航空、航天、兵器武器的试验、计算任务,为我国武器装备的发展作出了重要贡献。

中国空气动力研究与发展中心的广大科技人员,在空气动力试验设备的研制、空气动力试验、计算方法研究及完成航空、航天、兵器等各类武器的试验与设计中,积累了丰富的实践经验,取得了丰硕的科研成果。为了更有效地培养和造就新一代空气动力学研究人才,促进我国空气动力事业的不断巩固和发展,在总装备部的领导下,我们组织有关专家和科技人员编写了这套系统、全面总结几十年来理论与实践经验成果的空气动力系列教材。

本套教材是以具有大专以上学历,从事空气动力研究的科技人员为主要适用对象,既可作为空气动力试验研究的中、高级技术人员的学习指导用书,亦可作为院校空气动力学相关专业的师生参考用书。

本套教材共分 13 卷。包括:《分离流与旋涡运动的结构分析》、《计算流体力学及应用》、《低速风洞试验》、《高速风洞试验》、《高超声速气动力试验》、《高超声速气动热和热防护》、《再入物理》、《高低速风洞气动与结构设计》、《高低速风洞测量与控制系统设计》、《高超声速试验设备设计》、《飞行器系统辨识学》、《模型自由飞试验》和《流动显示技术》。

本套教材在编写过程中,得到了总装备部领导、机关,型号部门和国内空气动力研究单位的大力支持与协作,在此一并表示衷心的感谢。由于本套教材涉及专业面广,包含内容多,编者水平有限,书中难免有错误或疏漏之处,诚请读者予以指正。

《国防科研试验工程技术系列教材·

空气动力系统》编审委员会

2001年3月

前 言

飞行器系统辨识是将系统辨识理论应用于飞行器动力学系统,阐述如何从飞行器飞行试验的遥外测数据、风洞实验模型的动态实验数据和流场参数实测数据、弹道靶自由飞模型的光测、雷测数据以及飞行器模型测热实验的温度数据等诸多类实测数据中辨识出飞行器的气动力参数、气动热参数、工程湍流模型参数和惯性仪表误差系数等,以建立正确的飞行器动力学系统数学模型。它在飞行武器研制的设计、试验、定型鉴定的全过程,特别是在飞行器系统仿真建模与飞行故障分析中,有着广泛的应用前景。同时也是国防科研各试验系统进行飞行试验和风洞实验数据处理的有效工具。

本书是按国防科研试验工程系列教材的要求,在蔡金狮等所著《动力学系统辨识与建模》和《飞行器系统辨识》两本专著的基础上进一步充实、提高而成的。全书分理论与应用两大部分。理论部分在专著的内容上进行了精简,补充了部分新近发展的辨识方法;应用部分增补了大量本系统辨识研究组最近的研究成果。特别是汪清博士的非线性非定常气动力建模和神经网络建模,王文正博士的集员辨识和基于广义频率响应函数系统辨识,钱炜祺博士的分布参数系统辨识及气动热参数辨识和工程湍流模型辨识,董能力博士的正交最小二乘法应用及惯性仪表误差系数辨识等,都有其独到之处。王文正和董能力还介绍了新近发展的 H_∞ 辨识和小波分析辨识法。全书由蔡金狮、汪清、王文正负责统稿,并请陈士橐院士、曾颖超教授负责审稿。编著中突出了系统辨识理论的新发展,拓展了系统辨识在航空航天领域的应用范围,使本书既

具有较高的理论价值,又具有较高的实用价值。

书中未说明的符号均按中华人民共和国国家标准 GB/T 14410—93《飞行力学概念、量和符号》定义。

希望本书的出版,对我国特别是对国防科研各试验系统及有关研究院所的飞行器系统辨识研究和实际应用工作有所促进。

著 者

2002 年 4 月

内 容 简 介

本书将系统辨识理论应用于飞行器动力学系统,阐述如何从飞行试验的遥外测数据、风洞实验模型的动态实验和流场参数实测数据、弹道靶自由飞模型的光测数据以及飞行器模型测热实验的温度数据等各类数据中辨识出飞行器的气动力参数、气动热参数、工程湍流模型参数和惯性仪表误差参数,以建立正确的飞行器动力学系统数学模型。

全书分理论与应用两部分。理论部分简明论述系统辨识基本理论与方法;应用部分密切结合飞行器试验中实际问题,给出实例、具体算法和公式,是一部理论与实践密切结合的系统辨识教材。

本书读者对象是在航空、航天、兵器领域中从事系统辨识、动力学特性研究,特别是从事飞行器飞行试验和风洞实验的数据处理和分析的研究员、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、系统辨识研究专业人员的参考资料。

目 录

第 1 章 绪论	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 动力学系统辨识	10
1.5.1 集中参数系统辨识	12
1.5.2 分布参数系统辨识	12
1.6 飞行器系统辨识	13
1.6.1 气动力参数辨识	14
1.6.2 气动热参数辨识	15
1.6.3 工程湍流模型辨识	16
1.6.4 惯性仪表误差系数辨识	16
第 2 章 飞行器动力学系统模型	18
2.1 飞行器动力学系统数学模型	18
2.1.1 常用坐标系	19
2.1.2 飞行器刚体动力学方程	20
2.1.3 热传导方程	23
2.1.4 流体动力学方程	24
2.2 空气动力学数学模型	26
2.2.1 代数模型	26
2.2.2 积分方程模型	30
2.2.3 微分方程模型	32
2.3 推力与环境数学模型	34
2.3.1 推力数学模型	34

2.3.2 重力数学模型	36
2.3.3 标准大气密度	37
2.3.4 大气湍流模型	38
参考文献	40
第3章 模型辨识	42
3.1 概述	42
3.2 建模准则	42
3.2.1 最大信息量准则	43
3.2.2 最大可信度准则	44
3.2.3 F 统计检验	45
3.2.4 最小预测误差平方和准则	47
3.3 优选算法	48
3.3.1 逐步回归法	49
3.3.2 主成分分析法	52
3.3.3 正交最小二乘法	54
3.3.4 数据分割技术	60
3.4 神经网络建模方法	61
3.4.1 神经网络和学习算法	62
3.4.2 非线性系统建模	65
3.5 基于小波分析的系统辨识方法	67
3.5.1 小波分析方法	68
3.5.2 时变系统的辨识	71
3.5.3 分形信号的辨识	73
3.5.4 半参数模型的小波辨识	75
参考文献	76
第4章 飞行状态估计	79
4.1 概述	79
4.2 卡尔曼滤波算法	80
4.2.1 最小方差估计	81
4.2.2 卡尔曼滤波	82
4.2.3 广义卡尔曼滤波	87
4.2.4 增广的广义卡尔曼滤波	90

4.2.5 修正增益广义卡尔曼滤波	91
4.2.6 平方根分解滤波	94
4.3 分割算法	103
4.3.1 分割定理	104
4.3.2 广义分割算法	108
4.3.3 广义多分割算法	114
4.3.4 广义分割辨识算法	118
参考文献	123
第5章 参数估计	125
5.1 概述	125
5.2 线性模型参数估计	126
5.2.1 最小二乘法	127
5.2.2 递推最小二乘法	128
5.2.3 渐消记忆的递推估计法	129
5.2.4 贝叶斯法	130
5.2.5 岭估计法	131
5.2.6 超椭圆法	132
5.2.7 主成分法	134
5.2.8 特征根法	135
5.2.9 贝叶斯主成分法(PB回归法)	136
5.3 最大似然法	137
5.3.1 最大似然准则	137
5.3.2 非线性动力学系统最大似然算法	140
5.3.3 线性系统最大似然算法	145
5.3.4 修正最大似然准则	148
5.3.5 输出误差法	149
5.3.6 方程误差法	150
5.3.7 最大似然近似算法	152
5.3.8 最大似然递推算法	155
5.4 非统计类参数估计方法——集员辨识	157
5.4.1 线性系统参数估计的边界椭圆法	157
5.4.2 线性系统参数估计的改进凸多面锥法	167

5.4.3 非线性系统参数的集员辨识	175
5.5 基于广义频率响应函数(GFRF)的系统辨识	181
5.5.1 多项式类非线性连续模型的 GFRF 描述	181
5.5.2 多项式类非线性离散模型的 GFRF 描述	184
5.5.3 GFRF 的辨识方法	186
5.5.4 基于 GFRF 的 H_∞ 辨识	193
5.6 闭环系统辨识	204
5.6.1 闭环系统可辨识性的基本概念	204
5.6.2 闭环系统的辨识方法及可辨识性	206
5.6.3 最小二乘法在闭环辨识中的应用	211
5.6.4 辅助变量法在闭环辨识中的应用	216
参考文献	217
第 6 章 频域辨识算法	221
6.1 概述	221
6.2 频域分析的基础知识	222
6.2.1 傅里叶变换	222
6.2.2 离散傅里叶变换	223
6.2.3 复随机变量	225
6.2.4 随机过程	226
6.2.5 平稳随机过程	228
6.2.6 随机过程的傅里叶变换	229
6.2.7 随机过程的谱密度	230
6.3 最大似然法	232
6.3.1 似然准则推导	233
6.3.2 最大似然算法	235
6.3.3 离散型最大似然算法	240
6.3.4 输出误差法	242
6.3.5 方程误差法	243
6.3.6 零添补技术	244
参考文献	246
第 7 章 试验设计和最优输入	247
7.1 输入设计	247