



国防科技图书出版基金

*Theory and Method for  
Multiple-model Modeling and Control*

# 多模型建模与控制的 理论和方法

■ 雷虎民 邵雷 杨遵 著



国防工业出版社  
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

# 多模型建模与控制的 理论和方法

Theory and Method for Multiple-model  
Modeling and Control

雷虎民 邵雷 杨遵 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

多模型建模与控制的理论和方法/雷虎民,邵雷,杨遵  
著. —北京:国防工业出版社,2017.3

ISBN 978-7-118-11057-9

I. ①多… II. ①雷… ②邵… ③杨… III. ①非线性  
性系统(自动化) — 系统建模 — 研究 IV. ①TP271

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第037892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100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

\*

开本 710×1000 1/16 印张 14¼ 字数 238 千字  
2017年3月第1版第1次印刷 印数 1—2000册 定价 89.00元

---

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

## 致 读 者

本书由中央军委装备发展部国防科技图书出版基金资助出版。

为了促进国防科技和武器装备发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。这是一项具有深远意义的创举。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在中央军委装备发展部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由中央军委装备发展部国防工业出版社出版发行。

国防科技和武器装备发展已经取得了举世瞩目的成就,国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。开展好评审工作,使有限的基金发挥出巨大的效能,需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金  
评审委员会

## 国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员 潘银喜

副主任委员 吴有生 傅兴男 赵伯桥

秘书长 赵伯桥

副秘书长 邢海鹰 谢晓阳

委员 才鸿年 马伟明 王小谟 王群书

(按姓氏笔画排序) 甘茂治 甘晓华 卢秉恒 巩水利

刘泽金 孙秀冬 芮筱亭 李言荣

李德仁 李德毅 杨伟 肖志力

吴宏鑫 张文栋 张信威 陆军

陈良惠 房建成 赵万生 赵凤起

郭云飞 唐志共 陶西平 韩祖南

傅惠民 魏炳波

# 前 言

控制工程领域广泛存在着这样一类复杂非线性系统,由于非线性因素的作用,系统运行模态过于复杂,或者工作环境非常恶劣,造成系统结构和参数随着工况的改变而呈现出很强的不确定性。此时,采用传统的全局建模方法建立单一的高精度数学模型就显得比较困难。因为多数建模方法的使用效果与使用者的经验有很大关系,要想确定合适的模型结构,获得高精度的参数估计,通常需要花费大量的时间和精力来选择建模算法,调整建模参数。有时候,即使得到了系统的精确模型,也往往由于模型本身过于复杂而难以进行稳定性分析和控制器设计。为了解决该问题,控制界的专家和学者们进行了大量的理论和技术探索,最终发现基于“分而治之”思想的多模型方法是解决问题的一种有效途径。

多模型方法自 20 世纪 70 年代出现以来,已经走过了 40 余年的发展历程,无论是在理论、技术还是在应用方面都取得了广泛的成功。该方法以“分解-合成”原理作为解决问题的自然之道,将复杂系统的建模与控制问题按照某种确定性准则进行分解,然后分别建立局部模型和控制器,由于局部模型常常是线性的,因此可利用成熟的线性系统理论进行控制器的设计。在问题分解并获得解答后,即可按照相应的合成准则或调度机制协调各局部模型或控制器,在保证稳定性的同时,实现对原复杂非线性系统的精确控制。这种建模与控制方法能够将复杂的非线性问题转化为可用成熟且相对简单的理论来解决的问题,这对简化控制器设计、提高系统在复杂环境下的控制性能具有重大意义。当前,多模型方法主要有多模型建模方法、多模型控制方法和交互式多模型滤波方法等,但无论哪类方法,需要解决的关键问题无外乎两点:一是在特定的分解准则下选择恰当的模型集;二是选择恰当的合成准则确保模型调度的稳定性。

本书内容是雷虎民教授及其研究团队长期研究成果的结晶。作者近十年来一直从事非线性系统多模型建模与控制理论和方法的研究工作,在国家自然科学基金“基于局部多模型的高超声速飞行器在线轨迹生成研究(61503408)”、航空科学基金“基于数据的飞控系统多模型建模与控制方法研究(20100196002)”以及“空空导弹控制系统非线性设计研究(2006ZC12004)”的资助下对飞行器的多模型建模与控制问题做了深入的研究和探索,取得了一批成果,本书内容大部分就来源于此。本书的另外一部分内容则来源于作者的硕博士研究生所撰写的学位论文和研究团队所发表的学术文章。

本书共 10 章,主体内容由 3 个板块构成:第一板块包括第 2~4 章,主要论述非线性系统的多模型建模理论与方法,介绍了基于分段仿射方法的多模型离线建模、基于局部模型方法的多模型在线建模、基于即时学习方法的多模型在线建模等内容;第二板块包括第 5~8 章,主要论述非线性系统的多模型控制理论与方法,介绍了非线性系统的多模型自适应控制、基于在线建模的多模型预测控制、基于在线建模的预测 PID(Proportion Integration Differentiation)控制、基于在线建模的滑模预测控制等内容;第三板块包括第 9 章和第 10 章,主要论述非线性系统多模型建模与控制的理论和方法在飞行器控制系统设计中的应用,介绍了基于多模型的飞机容错控制方法、基于多模型的导弹飞行控制方法等内容。

作者所在单位对课题研究和本书撰写给予了大力支持,西安电子科技大学焦李成教授、火箭军工程大学胡昌华教授对本书的出版给予了热情推荐和帮助,李炯副教授和作者的硕博士研究生参与了课题的研究,为本书提供了大量素材,在此一并表示谢意。另外,需要说明的是,本书撰写过程中参阅并引用了国内外大量文献资料,这些成果包含了领域专家学者们的智慧和汗水,对他们的创造性劳动表示敬意!

感谢国家自然科学基金委员会在青年科学基金项目、航空科学基金委员会在航空科学基金项目(自由探索类)和航空制导武器航空科技重点实验室项目(实验室类)研究中给予的资助,感谢国防科技图书出版基金对本书的资助和国防工业出版社对本书出版提供的帮助。

目前,非线性系统多模型的建模与控制领域已经取得了十分丰富的理论成果,正有全面深入展开之势。作为国内关于该主题的第一部系统性专著,本书的出版恰逢其时,我们希望本书能够起到抛砖引玉的作用。如果能够为推动国内在这一领域的研究尽一份绵薄之力,我们将不胜荣幸。由于我们的理论水平有限,书中难免有遗漏、谬误和不尽人意之处,恳切希望读者提出宝贵意见。

雷虎民  
2016.5

## Preface

There widely exist complicated nonlinear systems in control engineering field. The structure and parameters of the system demonstrate obvious uncertainties due to the complex operation mode of the system and the severe working circumstance. Therefore, it is very difficult to accurately model the system by single mathematical model with high-precision based on the traditional modeling approach. Most modeling approaches usually require a certain level of experience, which results in that it would consume massive time for the model structure confirmation, high-precise parameters estimation and modeling parameters tuning. Thus, even though the accurate system model is built, it fails to analyze the stability and design the controller because of the excessively complexity. To solve this problem, experts and scholars in the field have made a lot of explorations in theory and technology. Finally, a conclusion has been made that the effective solution is the divide-and-conquer principle based multiple-model method.

With forty years of development since its first appearance in the seventies of the 20th century, the multiple-model method has achieved wide success in theory, technology and application. Based on the divide-and-conquer principle, a complex system modeling and control problem is decomposed according to a sort of certainty rule; and then, corresponding local models and controllers are established respectively. Since local model is usually linear, the developed theory of linear system could be used to design the controller, thus simplifying the problem effectively. With each local model and controller coordinated according to corresponding composition rule or management mechanism, the precise controller for the primary complex nonlinear system is realized with ensured stability. This modeling and control method can convert complex nonlinear problem to the one that could be solved by the mature and less complicated theory. It is significant in simplifying the controller design and improving the system control performance under complex circumstances. Up to this moment, multiple-model method could mainly be divided into multiple-model modeling method, multiple-model control method and interactive multiple-model filtering method etc. Despite of the applied method, key problems lay at two points: the proper model set selection with a certain disintegration rule and the proper composition rule to ensure the stability of model management.



The contents of this book are research achievements of the author and the research team who have been engaged in the research of theory and method for nonlinear system multiple-model modeling and control over the past decade. And with the support of National Natural Science Foundation of China “Research on Local Multiple Model Based On-line Trajectory Generation for Hypersonic Vehicles(NO. 61503408)”, the support of Aeronautical Science Foundation of China “Research of Data Based Multiple-model Modeling and Control Method for Flight Control System ( NO. 20100196002 )” and “Nonlinear Control System Design for Air-to-air Missile ( NO. 2006ZC12004 )”, the multiple-model modeling and control problems of aircraft were deeply researched and explored with fruitful achievements which contributed to the accomplishments of the book. The other parts of the book come from the master and doctoral academic dissertations of the author and the scientific publications of the students in the research team.

This book has ten chapters. The major contents consist of three sections. Section One that includes Chapter Two, Three and Four, discusses multiple-model modeling theories and approaches of nonlinear system. The piecewise affine approach based off-line multiple-model modeling, local model approach based on-line multiple-model modeling and lazy learning based on-line multiple-model modeling are introduced respectively. Section Two that includes Chapter Five, Six, Seven and Eight, discusses multiple-model control theories and approaches of nonlinear system. The multiple-model adaptive control theory of nonlinear system, multiple-model predictive control, multiple-model predictive PID control, and sliding mode predictive control based on the on-line modeling are introduced respectively. Section Three that includes Chapter Nine and Ten, discusses the application of theories and approaches of nonlinear system multiple-model modeling and control on the design of the aircraft control system. The fault tolerant control of airplane and the flight control of missile based on multiple-model modeling are introduced.

The author acknowledges everyone who has supported the writing and revision of this book. Namely a few who have done more. Professor Jiao Licheng of Xidian University, and Professor Hu Changhua of Rocket Force Engineering University provided great helps and beneficial advices for this book. Associate professor Li Jiong and the students of the author provided abundant document materials for the research. Thanks them all. In addition, for further gratitude, thanks to the experts and scholars in this domain, for their wisdom, sweat and creative work.

Finally, thanks for the support of National Natural Science Foundation of China, Aeronautical Science Foundation of China on Free Exploring Project and National Defense Key Laboratory Project for Aviation Guidance Weapon. The same gratitude should

also be acknowledged to National Defense Science and Technology Publishing Fund and National Defense Industry Press for their fund and publishing.

At present, the field of multiple-model modeling and control for nonlinear system has achieved plenty of accomplishments, and keeps developing with fast speed. As the first systematic monograph about it in China, the publication of this book is exactly at the right time, and would start a discussion. It would be our great pleasure to promote the progress of researches in this studying field. Because of our limited knowledge, it may contain some omissions and fallacies. Valuable suggestions from the readers are highly welcomed.

Lei Humin  
May 2016

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 非线性系统的多模型建模 .....	2
1.1.1 模块化建模 .....	2
1.1.2 局部化建模 .....	5
1.2 非线性系统的多模型控制 .....	6
1.2.1 模型集的优化 .....	7
1.2.2 多模型控制器设计 .....	8
1.2.3 多模型控制的稳定性 .....	9
1.3 多模型建模与控制的发展及应用 .....	9
1.4 多模型建模与控制的难点及热点 .....	10
1.4.1 模型集的构造 .....	10
1.4.2 模型调度策略 .....	11
1.4.3 控制系统稳定性 .....	11
参考文献 .....	11
<b>第 2 章 基于分段仿射方法的多模型离线建模</b> .....	15
2.1 引言 .....	15
2.2 非线性系统的分段仿射模型 .....	17
2.2.1 分段仿射系统模型 .....	17
2.2.2 区域划分与平衡点确定 .....	18
2.3 分段仿射离线建模算法 .....	19
2.3.1 问题描述 .....	19
2.3.2 模型阶次确定 .....	22
2.3.3 模型数量与参数协同优化 .....	24
2.3.4 划分曲面确定 .....	29
2.4 建模特性分析 .....	32
2.4.1 算法收敛性分析 .....	32
2.4.2 计算复杂性分析 .....	33
2.5 关于建模参数的若干讨论 .....	33

2.6	建模实例	34
2.6.1	PWA 模型辨识	34
2.6.2	非线性系统 PWA 辨识	36
	参考文献	38
<b>第3章</b>	<b>基于局部模型方法的多模型在线建模</b>	<b>40</b>
3.1	引言	40
3.2	局部模型方法建模原理	41
3.2.1	非线性系统的局部多模型描述	41
3.2.2	局部模型方法基本原理	42
3.3	局部模型在线建模算法	45
3.3.1	输入空间模糊划分	45
3.3.2	局部模型在线生成	47
3.3.3	数据边界动态调整	50
3.3.4	在线建模算法流程	53
3.4	建模特性分析	54
3.4.1	逼近特性分析	54
3.4.2	可辨识性分析	55
3.4.3	计算复杂性分析	57
3.4.4	算法特点分析	58
3.5	关于建模参数的若干讨论	58
3.6	建模实例	59
3.6.1	非线性系统建模	59
3.6.2	时变非线性系统建模	62
	参考文献	64
<b>第4章</b>	<b>基于即时学习方法的多模型在线建模</b>	<b>65</b>
4.1	引言	65
4.2	即时学习方法建模原理	66
4.3	即时学习在线建模算法	69
4.3.1	输入邻域数据窗口确定	69
4.3.2	学习过程在线递归形式	72
4.3.3	数据库搜索与更新策略	74
4.3.4	在线局部建模算法流程	76
4.4	建模特性分析	77
4.4.1	逼近特性分析	77
4.4.2	自适应性分析	78
4.4.3	计算复杂性分析	79

4.5	关于建模参数的若干讨论	79
4.6	非线性系统建模实例	80
	参考文献	83
<b>第5章</b>	<b>非线性系统的多模型自适应控制</b>	<b>84</b>
5.1	引言	84
5.2	多模型自适应控制的基本原理	85
5.2.1	多模型自适应控制结构	85
5.2.2	模型集的建立	86
5.2.3	控制器设计方法	86
5.2.4	控制系统的稳定性	87
5.3	典型多模型自适应控制方法	90
5.3.1	基于多模型切换算法的控制方法	90
5.3.2	基于多模型加权算法的控制方法	93
5.3.3	基于局部线性化模型的控制方法	95
5.4	LQ 最优多模型自适应控制器设计	96
5.4.1	问题描述	97
5.4.2	控制器设计方法	97
5.4.3	稳定性分析	99
5.4.4	Ball and Beam 系统控制实例	100
5.5	基于动态模型库的自适应控制器设计	102
5.5.1	控制器设计方法	103
5.5.2	稳定性分析	106
5.5.3	参数突变系统控制实例	107
	参考文献	108
<b>第6章</b>	<b>基于在线建模的多模型预测控制</b>	<b>110</b>
6.1	引言	110
6.2	基于在线建模的多模型控制原理	111
6.2.1	多模型控制系统的结构	111
6.2.2	确保稳定性的模型距离度量	111
6.3	SISO 系统多模型预测控制器设计	113
6.3.1	问题描述	114
6.3.2	控制器设计方法	115
6.3.3	控制算法步骤	118
6.3.4	稳定性分析	119
6.3.5	关于控制参数的若干讨论	120
6.4	MIMO 系统多模型预测控制器设计	121

6.4.1	问题描述 .....	121
6.4.2	控制器设计方法 .....	121
6.4.3	控制算法步骤 .....	124
6.4.4	稳定性分析 .....	124
6.5	CSTR 系统控制实例 .....	125
	参考文献 .....	129
<b>第7章</b>	<b>基于在线建模的预测 PID 控制 .....</b>	<b>131</b>
7.1	引言 .....	131
7.2	SISO 系统的预测 PID 控制器设计 .....	132
7.2.1	问题描述 .....	132
7.2.2	控制器设计方法 .....	133
7.2.3	PID 参数启发式调整规则 .....	135
7.2.4	控制算法步骤 .....	136
7.2.5	稳定性分析 .....	137
7.2.6	直流伺服系统控制实例 .....	138
7.3	MIMO 系统的预测 PID 控制器设计 .....	141
7.3.1	问题描述 .....	141
7.3.2	控制器设计方法 .....	141
7.3.3	控制算法步骤 .....	145
7.3.4	稳定性分析 .....	146
7.3.5	典型不确定系统控制实例 .....	147
	参考文献 .....	149
<b>第8章</b>	<b>基于在线建模的滑模预测控制 .....</b>	<b>150</b>
8.1	引言 .....	150
8.2	SISO 系统滑模预测控制器设计 .....	151
8.2.1	问题描述 .....	152
8.2.2	控制器设计方法 .....	152
8.2.3	控制算法步骤 .....	156
8.2.4	稳定性分析 .....	156
8.2.5	柔性机械臂控制实例 .....	158
8.3	MIMO 系统滑模预测控制器设计 .....	160
8.3.1	问题描述 .....	160
8.3.2	控制器设计方法 .....	161
8.3.3	控制算法步骤 .....	165
8.3.4	稳定性分析 .....	165
8.3.5	双关节刚性机械手控制实例 .....	165

参考文献	168
<b>第 9 章 基于多模型的飞机容错控制方法</b>	<b>170</b>
9.1 引言	170
9.2 执行器故障模型	170
9.3 基于多模型的飞控系统容错控制	172
9.3.1 故障系统的多模型描述	172
9.3.2 飞控系统容错控制结构	173
9.3.3 基于 IMM 的故障检测	174
9.3.4 局部重构控制器的设计	176
9.3.5 仿真研究	178
9.4 基于多模型的智能容错控制	181
9.4.1 智能容错控制结构	181
9.4.2 故障检测及智能决策机制	182
9.4.3 仿真研究	183
参考文献	185
<b>第 10 章 基于多模型的导弹飞行控制方法</b>	<b>188</b>
10.1 引言	188
10.2 导弹控制系统研究现状	189
10.3 导弹数学模型及其离散化	190
10.3.1 三通道数学模型	191
10.3.2 数学模型离散化	192
10.4 基于预测控制的自动驾驶仪设计	194
10.4.1 俯仰通道控制器设计	194
10.4.2 滚转通道控制器设计	195
10.4.3 仿真研究	196
10.5 基于预测 PID 的自动驾驶仪设计	199
10.5.1 俯仰通道控制器设计	200
10.5.2 滚转通道控制器设计	200
10.5.3 仿真研究	201
参考文献	205

# Contents

<b>Chapter 1 General</b> .....	1
1.1 Multiple-model Modeling for Nonlinear System .....	2
1.1.1 Modular Architectures .....	2
1.1.2 Local Model .....	5
1.2 Multiple-model Control for Nonlinear System .....	6
1.2.1 Optimization for Model Bank .....	7
1.2.2 Controller Design for Multiple Models .....	8
1.2.3 Stability of Multiple-model Control .....	9
1.3 Development and Application for Multiple-model Modeling and Control .....	9
1.4 Difficulty and Hot Problems for Multiple-model Modeling and Control .....	10
1.4.1 Construction of Model Bank .....	10
1.4.2 Scheduling Strategy for Models .....	11
1.4.3 Stability for Control System .....	11
References .....	11
<b>Chapter 2 Off-line Multiple-model Modeling Based on Piecewise   Affine Model</b> .....	15
2.1 Introduction .....	15
2.2 Piecewise Affine Model for Nonlinear System .....	17
2.2.1 Piecewise Affine Model .....	17
2.2.2 Region Partition and Equilibrium Point Choosing .....	18
2.3 Off-line Modeling Algorithm Based on Piecewise Affine Model .....	19
2.3.1 Problem Describing .....	19
2.3.2 Model Rank Choosing .....	22
2.3.3 Cooperative Optimization for Amount and Parameters of Model .....	24
2.3.4 Partition Curve Design .....	29
2.4 Modeling Characteristic Analysis .....	32



2.4.1	Convergence Characteristic Analysis for Modeling Algorithm	32
2.4.2	Complexity Analysis for Modeling Algorithm	33
2.5	Discussion About the Modeling Parameters	33
2.6	Modeling Instance	34
2.6.1	Identification for Piecewise Affine System	34
2.6.2	Piecewise Affine Model Identification for Nonlinear System	36
	References	38
<b>Chapter 3</b>	<b>On-line Modeling Method Based on Local Model</b>	<b>40</b>
3.1	Introduction	40
3.2	Modeling Principle for Local Model	41
3.2.1	Local Model Description for Nonlinear System	41
3.2.2	On-line Modeling Algorithm for Local Model	42
3.3	On-line Modeling Algorithm for Local Model	45
3.3.1	Fuzzy Departing for Input Space	45
3.3.2	On-line Construction of Local Model	47
3.3.3	Dynamic Boundary Adjustment for Data	50
3.3.4	Flow Path for On-line Modeling Algorithm	53
3.4	Modeling Characteristic Analysis	54
3.4.1	Approximation Characteristic Analysis	54
3.4.2	Identification Characteristic Analysis	55
3.4.3	Complexity Analysis	57
3.4.4	Peculiarity Analysis	58
3.5	Discussion about Modeling Parameters	58
3.6	Modeling Instance	59
3.6.1	Modeling for Nonlinear System	59
3.6.2	Modeling for Time Varying Nonlinear System	62
	References	64
<b>Chapter 4</b>	<b>On-line Modeling Method Based on Lazy Learning</b>	<b>65</b>
4.1	Introduction	65
4.2	Modeling Principle for Lazy Learning	66
4.3	On-line Modeling Algorithm based on Lazy Learning	69
4.3.1	Data Window Determination for Input Domain	69
4.3.2	Recursive Form for Learning Process	72
4.3.3	Searching and Updating Strategy for Data Base	74