国外工业控制与智能制造丛书

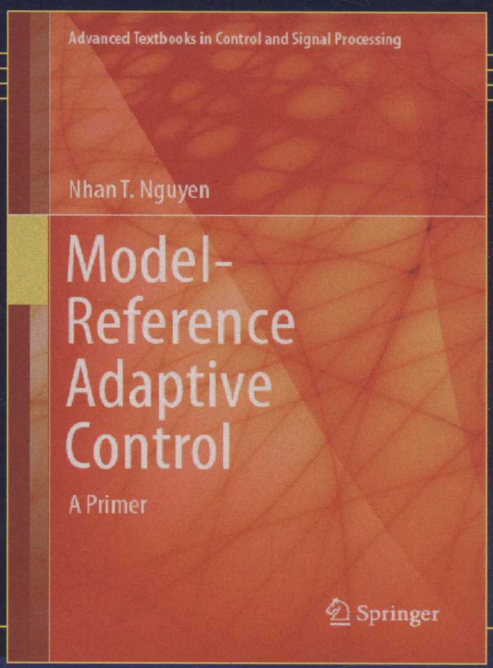
HZ BOOKS
华章教育

Springer

模型参考自适应控制导论

[美] 尼汉·T. 阮（Nhan T. Nguyen）著
赵良玉 石忠佼 译

Model-Reference Adaptive Control
A Primer

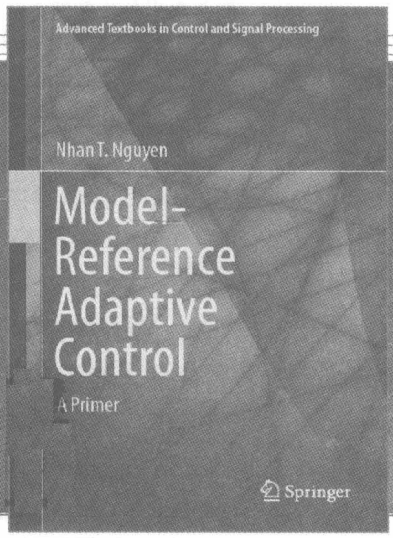


机械工业出版社
China Machine Press

模型参考自适应控制导论

[美] 尼汉·T. 阮（Nhan T. Nguyen）著
赵良玉 石忠佼 译

Model-Reference Adaptive Control
A Primer



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目（CIP）数据

模型参考自适应控制导论 /（美）尼汉·T. 阮（Nhan T. Nguyen）著；赵良玉，石忠佼译．
—北京：机械工业出版社，2020.1
（国外工业控制与智能制造丛书）
书名原文：Model-Reference Adaptive Control: A Primer

ISBN 978-7-111-64339-5

I. 模… II. ①尼… ②赵… ③石… III. 参考模型自适应控制 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2019）第 279152 号

本书版权登记号：图字 01-2018-8786

Translation from the English language edition:
Model-Reference Adaptive Control: A Primer
by Nhan T. Nguyen
Copyright © Springer International Publishing AG 2018
This work is published by Springer Nature
The registered company is Springer International Publishing AG
All Rights Reserved
本书中文简体字版由 Springer 授权机械工业出版社独家出版。未经出版者书面许可，不得以任何方式复制或抄袭本书内容。

本书是作者结合 30 多年来的主要研究成果及教学经验编写而成的。第 1 章简要介绍了模型参考自适应控制理论的研究进展及目前遇到的一些挑战。第 2 ~ 4 章介绍了本书用到的基础数学知识，包含非线性系统的基本概念以及用于稳定性分析的李雅普诺夫方法。第 5 章介绍模型参考自适应控制的基本理论。第 6 章和第 7 章分别介绍最小二乘参数辨识和函数近似及其在模型参考自适应控制中的应用。第 8 章和第 9 章阐述自适应控制的鲁棒性问题并给出了多种有效提升鲁棒性的设计方法。第 10 章介绍多种自适应控制方法在航空航天飞行控制中的应用实例。

本书既可以作为高等院校相关专业高年级本科生、硕士研究生和低年级博士研究生的教材，也可以作为相关领域工程技术人员的参考书。

出版发行：机械工业出版社（北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码：100037）
责任编辑：赵亮宇　　责任校对：殷　虹
印　　刷：大厂回族自治县益利印刷有限公司　　版　　次：2020 年 1 月第 1 版第 1 次印刷
开　　本：185mm × 260mm　1/16　　印　　张：23
书　　号：ISBN 978-7-111-64339-5　　定　　价：139.00 元

客服电话：（010）88361066　88379833　68326294　　投稿热线：（010）88379604
华章网站：www.hzbook.com　　读者信箱：hzjsj@hzbook.com

版权所有 • 侵权必究
封底无防伪标均为盗版
本书法律顾问：北京大成律师事务所　韩光 / 邹晓东

出版者的话

文艺复兴以来，源远流长的科学精神和逐步形成的学术规范，使西方国家在自然科学的各个领域取得了垄断性的优势；也正是这样的优势，使美国在信息技术发展的六十多年间名家辈出、独领风骚。在商业化的进程中，美国的产业界与教育界越来越紧密地结合，信息学科中的许多泰山北斗同时身处科研和教学的最前线，由此而产生的经典科学著作，不仅擘划了研究的范畴，还揭示了学术的源变，既遵循学术规范，又自有学者个性，其价值并不会因年月的流逝而减退。

近年，在全球信息化大潮的推动下，我国的信息产业发展迅猛，对专业人才的需求日益迫切。这对我国教育界和出版界都既是机遇，也是挑战；而专业教材的建设在教育战略上显得举足轻重。在我国信息技术发展时间较短的现状下，美国等发达国家在其信息科学发展的几十年间积淀和发展的经典教材仍有许多值得借鉴之处。因此，引进一批国外优秀教材将对我国教育事业的发展起到积极的推动作用，也是与世界接轨、建设真正的世界一流大学的必由之路。

机械工业出版社华章公司较早意识到“出版要为教育服务”。自 1998 年开始，我们就将工作重点放在了遴选、移译国外优秀教材上。经过多年的不懈努力，我们与 Pearson、McGraw-Hill、Elsevier、John Wiley & Sons、CRC、Springer 等世界著名出版公司建立了良好的合作关系，从它们现有的数百种教材中甄选出 Alan V. Oppenheim、Thomas L. Floyd、Charles K. Alexander、Behzad Razavi、John G. Proakis、Stephen Brown、Allan R. Hambley、Albert Malvino、Peter Wilson、H. Vincent Poor、Hassan K. Khalil、Gene F. Franklin、Rex Miller 等大师名家的经典教材，以“国外电子与电气工程技术丛书”和“国外工业控制与智能制造丛书”为系列出版，供读者学习、研究及珍藏。这些书籍在读者中树立了良好的口碑，并被许多高校采用为正式教材和参考书籍。其影印版“经典原版书库”作为姊妹篇也越来越多被实施双语教学的学校所采用。

权威的作者、经典的教材、一流的译者、严格的审校、精细的编辑，这些因素使我们的图书有了质量的保证。随着计算机科学与技术专业学科建设的不断完善和教材改革的逐渐深化，教育界对国外计算机教材的需求和应用都将步入一个新的阶段，我们的目标是尽善尽美，而反馈的意见正是我们达到这一终极目标的重要帮助。华章公司欢迎老师和读者对我们的工作提出建议或给予指正，我们的联系方法如下：

华章网站：www.hzbook.com
电子邮件：hzjsj@hzbook.com
联系电话：（010）88379604
联系地址：北京市西城区百万庄南街 1 号
邮政编码：100037



华章科技图书出版中心

译 者 序

诞生于 20 世纪 50 年代初期的自适应控制技术是一类在不确定性条件下试图改善控制系统性能的先进控制技术，该技术目前已经得到了广泛而深入的研究，并取得了令世人瞩目的研究成果，在航空航天、机器人、工业控制等领域也得到了一定程度的应用和试验验证。但一个无法回避的事实是，目前还没有任何自适应控制技术应用于安全至上或人在回路的实际系统。正因为如此，国内外专家学者对自适应控制技术的研究仍然如火如荼，一些新的自适应控制技术也层出不穷。

本书的作者 Nhan T. Nguyen 是自适应控制技术（尤其是模型参考自适应控制技术）领域的著名学者，同时是美国航空航天局（NASA）艾姆斯研究中心的首席科学家。他从业超过 30 年，领导并参与了自适应控制技术在 NASA 先进柔性飞机方面的应用和飞行试验，积累了丰富的理论知识和实践经验，提出了最优控制修正和双目标最优控制修正等先进鲁棒自适应控制技术。本书除了简要介绍李雅普诺夫稳定性理论等非线性系统分析的基础数学知识之外，还详细介绍了模型参考自适应控制的核心知识及诸多已被广泛接受和应用的自适应控制技术，逐一介绍了常用的提高自适应控制系统鲁棒性的改进方法，如死区法、投影法、σ 修正、e 修正等，同时介绍了自适应回路重构和 $\mathcal{L}_1$ 自适应控制这两种现今比较著名的自适应控制方法。难能可贵的是，书中专门用一章内容介绍自适应控制技术在航空航天领域的应用实例，详细介绍多种典型自适应控制技术在 NASA 刚性/柔性飞机上的应用过程，并从多个角度对比分析其优劣势，相信对于提高我国同类飞行器的控制系统设计水平具有重要的参考价值和推动作用。

翻译本书的目的是为国内从事自适应控制技术，尤其是从事模型参考自适应控制技术研究的专家学者提供一本有益的参考书和工具书，为从事自适应控制技术教学的同行提供一本优秀教材。衷心感谢作者、Springer 出版社及机械工业出版社的信任，尤其感谢机械工业出版社朱捷编辑的大力支持。在翻译本书的过程中，北京理工大学飞行器控制系统实验室的研究生荆家玮做了大量符号、公式和图表的校对工作，在此对她的付出表示感谢。

我们十分珍惜翻译此书的机会，但由于水平有限，书中难免有疏漏和不妥之处，欢迎读者批评指正。

译 者

2019 年 5 月于北京

前　言

本书根据作者所讲授研究生课程的一系列讲义编写而成，囊括了作者在 NASA 艾姆斯研究中心工作期间开发的全新研究素材，面向的读者主要是硕士研究生和低年级博士研究生。目前已有很多非常优秀的先进自适应控制教材，它们为博士和博士后研究人员提供了深入严谨的数学控制理论。本书旨在介绍应用控制理论及其应用案例，特别是通过应用案例向读者提供充分理解自适应控制理论的相关知识，同时通过一些例题和问题集来帮助读者更好地理解这些研究素材。对于选用本书作为教材进行授课的老师，可通过链接 http://www.springer.com/book/9783319563923 免费下载很多相关问题的解决方案。在教学过程中，这样的教材可以帮助刚刚开始研究生学习生涯的同学更好地理解并认识自适应控制的丰富知识，而不会被自适应控制理论所要求的真实分析数学所吓倒。正是出于这个目的，笔者决定撰写这本书。

自适应控制是一个已经得到较为充分研究的主题方向，也正因为如此，该领域存在大量研究文献，而且许多新成果目前仍在不断发展。本书无意将自适应控制理论的所有最新研究进展都结合起来，因为这是巨大的工作量，远远超出了本书的范畴。但是，本书将努力提供模型参考自适应控制的基础知识与已被广泛接受的自适应控制技术，包括基于最小二乘法的参数估计和基于神经网络的不确定性近似。本书的后半部分主要讨论鲁棒自适应控制，包括模型参考自适应控制的鲁棒性问题。提高系统鲁棒性的标准方法也同样在本书后半部分介绍，除了一些已经较为完善的方法 (如死区、投影、σ 修正、e 修正等) 以外，还涵盖了一些最新的鲁棒自适应控制方法。这些新方法涉及作者在最优控制修正和双目标最优控制修正方面的研究工作，以及比较著名的两种自适应控制方法 —— 自适应回路重构和 $\mathcal{L}_1$ 自适应控制。笔者深刻地认识到几乎没有办法对鲁棒自适应控制理论的所有最新研究成果做一次完整的探索，关于其他自适应控制方法，读者可以阅读各章末尾“参考文献”部分列出的相关文献。最后，本书包含专门的应用案例一章，特别需要说明的是，这些自适应飞行控制的应用案例正是来自笔者所在的本领域研究机构。

致谢

衷心感谢 NASA 航空研究任务局在航空安全研究过程中为笔者提供了投身自适应控制理论研究的机会，感谢 NASA 艾姆斯研究中心和 NASA 阿姆斯特朗（原德莱顿）飞行研究中心的所有同事，他们在自适应飞行控制器研究和测试期间给予了大力支持。特别感谢 NASA

艾姆斯研究中心的 Joseph Totah 和 Kalmanje Krishnakumar，他们使笔者可以从事这项研究。衷心感谢 NASA 阿姆斯特朗飞行研究中心的 John Bosworth、Curtis Hanson 以及 John Burken，感谢他们在自适应控制飞行测试验证期间提供帮助。同时感谢 Anthony Calise 教授、Naira Hovakimyan 教授和 Kumpati Narendra 教授，感谢他们允许笔者将他们非常优秀的研究成果纳入本书。还要感谢 NASA 艾姆斯研究中心的 Stephen Jacklin，感谢其在自适应控制验证过程中深入而有见地的指导。最后，向家人致以崇高的谢意，正因为有了家人的支持，笔者才可以自由地从事本书的写作及相关工作的研究。

Nhan T. Nguyen
美国加利福尼亚圣克拉拉
2016 年 12 月

关于作者

Nhan T. Nguyen 博士是一名在 NASA 艾姆斯研究中心从业长达 31 年的高级研究科学家。他是 NASA 智能系统部先进控制与可进化系统研究组的技术小组组长，该智能系统部有 22 位从事航空航天飞行控制领域研究的专家学者。他目前正领导一个项目组为柔性飞行器研究和开发先进的气动伺服弹性控制技术。2007—2010 年，他在年预算为 2100 万美元的 NASA 一体化柔性飞机控制（Integrated Resilient Aircraft Control，IRAC）项目中担任项目科学家，这是一个由 NASA、工业界和学术界共同发起和资助的先进自适应控制研究项目。在 2005—2006 年，他担任 IRAC 项目的执行项目负责人。2010 年，他在最优控制修正自适应控制方面的研究成果，通过 NASA F-18 研究型飞机的一次成功飞行试验得到终极验证。他曾获得 NASA 杰出科学成就奖章、NASA 杰出成就奖章、两次 NASA 艾姆斯优秀工程师荣誉称号以及其他超过 50 个 NASA 职业奖项。他拥有 4 个美国专利授权以及其他两个正在审查期的专利申请，拥有超过 15 个 NASA 发明，发表了 200 多篇由同行评审的技术论文。他还是拥有 50 位教授会员的美国航空航天学会（AIAA）智能系统技术委员会的主席，并两次获得 AIAA 卓越服务奖。

关于译者



赵良玉，北京理工大学宇航学院副教授，主要从事飞行动力学与控制等领域的研究工作，承担和参与国家自然科学基金、国防973、航空科学基金等项目10余项，发表SCI/EI检索论文30余篇，出版专著1部，获国防科技进步一等奖1项。



石忠佼，博士，就读于北京理工大学航空宇航科学与技术学科，2017—2019年美国圣母大学电子信息工程系访问学者。主要从事自适应控制、随机优化及其应用研究，参与国家自然科学基金、国防973等项目多项，发表SCI/EI检索论文10余篇。

目　录

出版者的话
译者序
前言
关于作者
关于译者

第 1 章　绪论 ····· 1
1.1　背景介绍 ····· 1
1.2　自适应飞行控制系统的验证和确认 ····· 4
1.2.1　自适应飞行控制系统的仿真验证 ···· 5
1.2.2　自适应控制系统的评价指标 ····· 6
1.3　小结 ····· 6
参考文献 ····· 7

第 2 章　非线性系统 ····· 15
2.1　平衡点和线性化 ····· 18
2.2　局部稳定性和相平面分析 ····· 20
2.3　其他非线性现象 ····· 23
2.4　小结 ····· 24
2.5　习题 ····· 24
参考文献 ····· 25

第 3 章　数学基础 ····· 27
3.1　向量范数和矩阵范数 ····· 27
3.1.1　向量范数 ····· 27
3.1.2　矩阵范数 ····· 30
3.2　紧集 ····· 31
3.3　存在性和唯一性 ····· 32
3.3.1　Cauchy 定理 ····· 32
3.3.2　全局 Lipschitz 条件 ····· 33
3.3.3　局部 Lipschitz 条件 ····· 34
3.4　正定、对称和反对称矩阵 ····· 34
3.4.1　正定矩阵和函数 ····· 34
3.4.2　反对称矩阵 ····· 36
3.5　小结 ····· 37
3.6　习题 ····· 37

第 4 章　李雅普诺夫稳定性理论 ····· 39
4.1　稳定的概念 ····· 39
4.1.1　稳定性定义 ····· 40
4.1.2　渐近稳定 ····· 41
4.1.3　指数稳定 ····· 41
4.2　李雅普诺夫直接法 ····· 42
4.2.1　缘起 ····· 42
4.2.2　局部稳定的李雅普诺夫定理 ····· 46
4.2.3　指数稳定的李雅普诺夫定理 ····· 48
4.2.4　径向无界函数 ····· 49
4.2.5　全局渐近稳定的 Barbashin-Krasovskii 定理 ····· 49
4.2.6　LaSalle 不变集定理 ····· 50
4.2.7　微分李雅普诺夫方程 ····· 53
4.3　非自治系统的稳定性 ····· 55
4.3.1　一致稳定 ····· 56
4.3.2　一致有界 ····· 57
4.3.3　Barbalat 引理 ····· 59
4.4　小结 ····· 62
4.5　习题 ····· 62
参考文献 ····· 64

第 5 章　模型参考自适应控制 ····· 65
5.1　模型参考自适应控制系统的组成 ·· 67
5.1.1　不确定被控对象 ····· 67
5.1.2　参考模型 ····· 69
5.1.3　控制器 ····· 69
5.1.4　自适应律 ····· 69
5.2　一阶单输入单输出系统的直接模型参考自适应控制 ····· 69
5.2.1　案例 I: a 和 b 未知，但 b 的符号已知 ····· 70
5.2.2　案例 II: a 和 b 均已知 ····· 72
5.3　一阶单输入单输出系统的间接模型参考自适应控制 ····· 74
5.4　二阶单输入单输出系统的直接模型参考自适应控制 ····· 76
5.4.1　案例 I: A 和 B 未知，但 b 的符号已知 ····· 77
5.4.2　案例 II: A 和 B 均已知 ····· 81
5.5　二阶单输入单输出系统的间接模型参考自适应控制 ····· 82
5.6　多输入多输出系统的直接模型参考自适应控制 ····· 85
5.6.1　案例 I: A 和 Λ 未知，但 B 和 Λ 的符号已知 ····· 85
5.6.2　案例 II: A 和 B 都已知，且 $\Lambda = I$ ··· 90
5.7　多输入多输出系统的间接模型参考自适应控制 ····· 90
5.8　小结 ····· 92
5.9　习题 ····· 93
参考文献 ····· 95

第 6 章　最小二乘参数辨识 ····· 97
6.1　最小二乘回归 ····· 97
6.2　凸优化和最小二乘梯度法 ····· 99
6.3　持续激励和参数收敛 ····· 101
6.4　递归最小二乘 ····· 104
6.5　基于最小二乘参数辨识的间接自适应控制 ····· 106
6.6　信号微分的估计 ····· 113
6.7　小结 ····· 114
6.8　习题 ····· 114
参考文献 ····· 115

第 7 章　函数近似和非结构不确定性系统的自适应控制 ····· 117
7.1　基于最小二乘的多项式近似 ····· 117
7.2　神经网络近似 ····· 119
7.3　非结构不确定性自适应控制 ····· 123
7.3.1　需要矩阵逆的递归最小二乘直接自适应控制 ····· 124
7.3.2　不需要矩阵逆的修正递归最小二乘直接自适应控制 ····· 127
7.3.3　最小二乘梯度直接自适应控制 ···· 130
7.3.4　神经网络近似的最小二乘梯度直接自适应控制 ····· 135
7.3.5　神经网络近似的模型参考自适应控制 ····· 136
7.4　小结 ····· 142
7.5　习题 ····· 143
参考文献 ····· 143

第 8 章　自适应控制的鲁棒性问题 ····· 145
8.1　参数漂移 ····· 146
8.2　非最小相位系统 ····· 149
8.3　时滞系统 ····· 151
8.4　未建模动态 ····· 153
8.5　快速自适应 ····· 158
8.6　小结 ····· 161

8.7 习题 ····· 162
参考文献 ····· 163

第 9 章 鲁棒自适应控制 ····· 165
9.1 死区法 ····· 166
9.2 投影法 ····· 167
9.3 σ 修正 ····· 173
9.4 e 修正 ····· 179
9.5 最优控制修正 ····· 183
9.5.1 最优控制 ····· 184
9.5.2 最优控制修正法的推导 ····· 189
9.5.3 李雅普诺夫稳定性分析 ····· 194
9.5.4 线性渐近特性 ····· 199
9.6 自适应回路重构修正 ····· 205
9.7 $\mathcal{L}_1$ 自适应控制 ····· 209
9.8 归一化法 ····· 215
9.9 自适应速率的协方差调节 ····· 220
9.10 具有控制输入不确定性系统的最优控制修正 ····· 224
9.11 具有控制输入不确定性系统的双目标最优控制修正 ····· 228
9.12 具有一阶慢执行机构动力学的奇异摄动系统自适应控制 ····· 240
9.13 具有未建模动态的线性不确定系统最优控制修正 ····· 246
9.14 相对阶为 1 的非最小相位系统自适应控制 ····· 252
9.14.1 最小相位系统 ····· 254
9.14.2 非最小相位系统 ····· 255
9.15 小结 ····· 266
9.16 习题 ····· 267
参考文献 ····· 270

第 10 章 航空航天应用案例 ····· 273
10.1 一级倒立摆 ····· 275
10.2 机器人应用中的双摆 ····· 277
10.3 飞机纵向动力学的自适应控制 ····· 281
10.4 递归最小二乘和神经网络俯仰姿态自适应飞行控制 ····· 288
10.5 柔性飞机自适应控制 ····· 295
10.6 自适应 LQG 颤振抑制控制 ····· 305
10.7 自适应飞行控制 ····· 321
10.8 混合自适应飞行控制 ····· 327
10.9 具有最优控制修正的 F-18 飞机自适应控制 ····· 330
10.10 小结 ····· 337
10.11 习题 ····· 337
参考文献 ····· 339
考试样题 ····· 343
索引 ····· 351

第1章
绪　论

引言　本章简要介绍了模型参考自适应控制理论的最新研究进展。自适应控制是一种颇具前景的控制技术，可以在系统老化或存在建模不确定性的情况下改善控制系统性能。在过去十年中，随着政府研究基金持续增加，研究人员在自适应控制理论和新型自适应控制方法方面均取得了一些进展。其中一些新提出的自适应控制方法不仅提升了系统的性能和鲁棒性，还进一步提高了模型参考自适应控制作为未来控制技术的可行性。全尺寸飞机和无人驾驶飞行器上的飞行测试验证，增强了人们将模型参考自适应控制作为未来飞行器飞行控制技术的信心。尽管在自适应控制方面的研究已经进行了五十年，但由于许多技术问题仍未得到妥善解决，目前还没有任何自适应控制系统应用于安全至上或者人在回路的生产系统。作为一种非线性控制方法，自适应控制系统设计缺乏公认的性能指标是其无法得到广泛认可的主要障碍。开发一种公认可信的自适应控制系统，是目前自适应控制领域亟须解决的技术挑战。

自适应控制是一个在控制理论界得到几十年深入研究的主题方法。可以在航空航天或其他诸多领域中发现很多自适应控制的应用案例，但在安全至上的生产系统中却很少或根本没有得到应用。本章的主要学习目标是：

- 了解自适应控制的发展历史以及当前的研究热点。
- 认识到尽管该领域取得了许多研究进展，但自适应控制技术的应用却并不普遍，且应用范围极其有限。
- 认识到验证、确认和认证是进一步提升自适应控制技术可信度、拓展其应用领域的重要技术手段。

1.1　背景介绍

自适应控制是一类处理不确定性系统的非线性控制方法。这些不确定性可能来自系统动力学自身无法预见的变化或者外部干扰。自适应控制系统可以广义地描述为能够基于被控对象所接收到的输入在线调整控制器设计参数，如控制增益，以适应系统不确定性的一种控制系统，如图 1-1 所示。其中，将可调参数称为自适应参数，将通过一组数学方程进行描述的调整机制称为自适应律。大多数情况下，典型的自适应律是非线性的。这种非线性使得许多传统线性时不变控制系统的设计和分析方法，如伯德图、相位裕度和增益裕度、特征根分析等，无法直接应用于自适应控制系统的设计和分析。

自适应控制的历史可以追溯到 20 世纪 50 年代初期，当时人们热衷于为高性能飞机设计一种可以适用于大空域飞行条件的先进自动驾驶仪 [1]。经过大量的研究和开发工作，增益调度控制由于可以根据飞机所处的飞行环境并利用现有的经典控制方法进行控制增益的选择，获得了人们的普遍认可，而自适应控制由于其固有的非线性特性并没有得到广泛应用。

20 世纪 60 年代，现代控制理论和李雅普诺夫稳定性理论的出现促成了自适应控制理论的发展。Whitaker 等人利用灵敏度方法和 MIT 法则设计出了模型参考自适应控制，但是缺乏对自适应控制自身特性的理解和稳定性证明。在 1967 年，NASA 将自适应控制器应用于三架名为 X-15 的实验性高超音速飞机上，并进行了飞行试验 [2–3]。在完成了几次成功的试飞之后，这款高超音速飞机遭遇了一次毁灭性的坠机事件，正是这次灾难性事件以及一些技术瓶颈削弱了人们对自适应控制的兴趣。

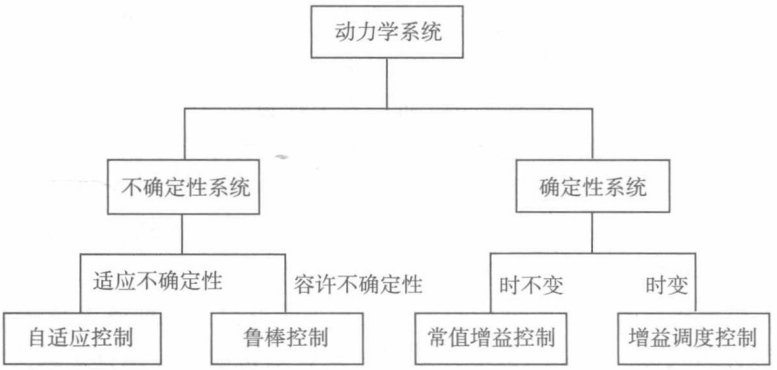


图 1-1　动力学系统的自动控制技术分类

在 20 世纪 70 年代，李雅普诺夫稳定性理论成为模型参考自适应控制的理论基础。李雅普诺夫稳定性理论与模型参考自适应控制的结合被视为自适应控制领域的一大突破。但好景不长，到了 20 世纪 80 年代就有人发现即使李雅普诺夫理论能够保证自适应控制的稳定性，但面对存在小扰动或未建模动态的情况时，自适应控制仍可能表现出不稳定的现象 [4]。这使得人们认识到模型参考自适应控制对系统建模精度及实际系统与所建模型之间的不匹配很敏感。这种缺乏鲁棒性的表现，催生了 σ 修正法 [5] 和 e 修正法，以提升自适应控制的稳定性 [6]，这些鲁棒修正模式也代表了一类新的“鲁棒自适应控制”。

从 20 世纪 90 年代至今，关于自适应控制的研究一直十分活跃。引入神经网络作为自适应机制 [7–12]，使得一类称为“智能控制”或者“神经网络自适应控制”的自适应方法得到了发展，虽然这些方法是基于神经网络来逼近模型不确定性，但其基本框架与模型参考自适应控制并无二致。[13–21]

在接下来的十年，自适应控制研究又迎来了新的发展时期，NASA [22] 和美国其他政府机构均增加了研究经费，NASA 一直是自适应控制技术发展的积极参与者，如图 1-2 所示。在此期间，随着研究经费的增加，研究人员在自适应控制理论和新的自适应控制方法等方面均取得了一些成果。由于篇幅有限，我们无法逐一列举所有取得的进展。读者可以发现，在这些新提出的自适应控制方法中，有相当一部分是在 NASA 的资助下完成的，包括 Santillo 和 Bernstein 提出的基于回溯成本优化的自适应控制 [23–24]，Stepanyan 和 Krishnakumar 提出的参考模型修正自适应控制 [25–26]，Calise 和 Yucelen 提出的自适应回路重构 [27–28]，Nguyen 提出的有界线性稳定性分析度量驱动自适应控制 [29–30]，Lavretsky 提出的组合/复合模型参考自适应控制 [31–32]，Yucelen 和 Calise 提出的无导数模型参考自适应控制 [33–34]，Nguyen 提出的混合自适应控制 [35–37]，Kim 等人提出的 K 修正 [38]，Yucelen 和 Calise 提出的卡尔曼滤波修正 [39–40]，Hovakimyan 和 Cao 提出的 $\mathcal{L}_1$ 自适应控制 [41–43]，Nguyen 提出的最小二

乘自适应控制 [44–45]，Chowdhary 和 Johnson 提出的并发学习最小二乘自适应控制 [46–47]，Balaskrishnan 提出的修正状态观测器的自适应控制 [48]，Guo 和 Tao 提出的多变量模型参考自适应控制 [49]，Nguyen 提出的最优控制修正 [50–51] 以及多目标最优控制修正 [52–53]，Volyanskyy 等人提出的 Q 修正 [54–55] 以及 Kim 等人提出的参数依赖黎卡提方程自适应控制 [56]。这些新的自适应控制方法大都可以提高系统的性能和鲁棒性，并进一步提高模型参考自适应控制作为未来控制技术的可行性。

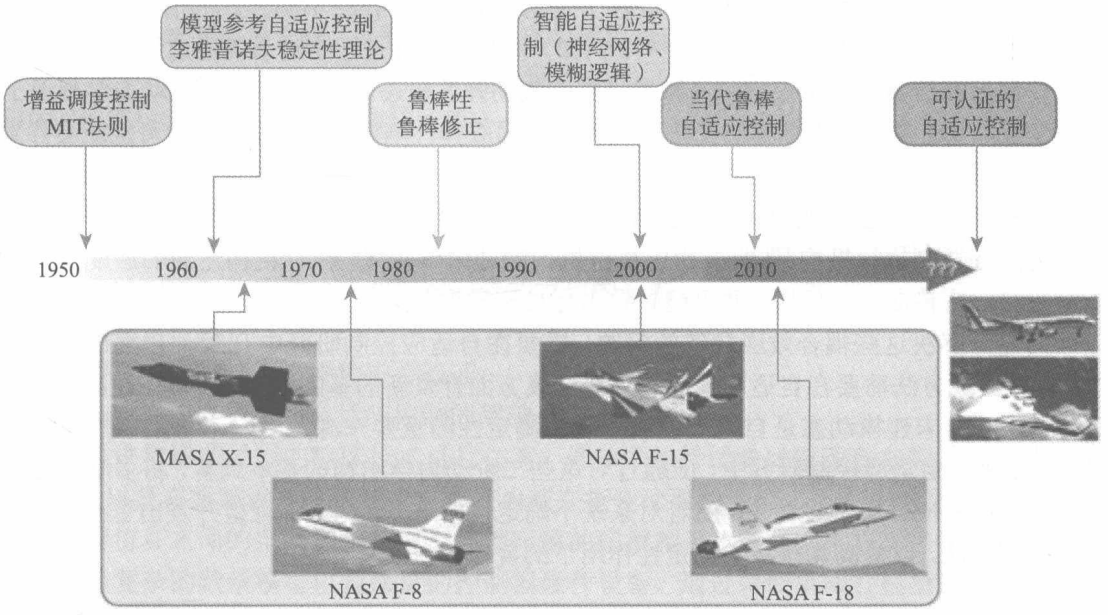


图 1-2 自适应控制研究的时间历程

在飞行验证方面，NASA 研制了一套基于 Calise 和 Rysdyk 所提出的 sigma-pi 神经网络自适应控制的智能飞行控制系统 [13]，并于 21 世纪初期在阿姆斯特朗（原德莱顿）飞行研究中心利用 F-15 飞机进行了飞行测试，展示了神经网络自适应控制的性能 [57–58]。2010 年，在 NASA 阿姆斯特朗飞行研究中心的一架 F/A-18 飞机上开展了另一项飞行测试，用于验证一种基于最优控制修正的新型简化自适应飞行控制器 [59–62]。2009 年，NASA 艾姆斯研究中心对几种自适应控制方法进行了一项飞行员在环的高精度飞行模拟研究 [63–64]。同年，在 NASA 兰利研究中心的 AirSTAR 飞机上进行了 $\mathcal{L}_1$ 自适应控制器的飞行试验 [65]，在海军研究生院（Naval Postgraduate School）的一架无人机上也进行了 $\mathcal{L}_1$ 自适应控制器的飞行试验 [66]。2010 年，通过在 Beechcraft Bonanza 电传飞行试验平台上进行飞行测试，对模型参考自适应控制进行了评估 [67]。这些飞行实验以及随后的许多试验都增强了人们对模型参考自适应控制作为一种潜在的航空飞行器飞行控制技术的信心。同时也可以看出，仍然需要进一步的飞行测试来完善自适应控制技术。

自适应控制的研究目前仍然如火如荼。介绍当前所有的研究进展超出了本书的讨论范围。感兴趣的读者可以在参考文献中找到更多的关于自适应控制在飞机 [68–79]、宇宙飞船 [21, 80–83]、无人机 [15, 47, 65–66, 84]、空间结构 [85–86]、机器人系统 [18, 87]、弹药系统 [88]、液压系统 [89] 等方面的应用。

目前，对自适应控制的研究普遍缺乏处理存在于多种系统设计和操作中的集成效应的

能力。这些效应包括但不限于：未建模动态造成的复杂不确定性[4,90]、意外操作和结构损坏引起系统动力学的显著变化[36,76,91]、未知的部件故障和异常[80,92-94]、高设计复杂度[59]、新型执行机构和传感器[79,95]、多场耦合[85-86,96-98]等。

自适应控制在航空航天领域发挥着重要作用。当飞行器在结构损坏、控制面失效或者非标称条件飞行时，飞行器会遭遇多种耦合效应，如空气动力学、飞行器动力学、结构动力学以及推力等之间的耦合。这些耦合效应会给飞行控制系统的性能带来多种不确定性。因此，即使自适应控制系统在标称飞行条件下是稳定的，但在存在不确定性的情况下，自适应控制可能无法提供足够的稳定性[99-100]。例如，传统的飞机飞行控制系统通过气动伺服弹性（ASE）陷波滤波器来防止控制信号激发机翼的气动弹性模态。然而，如果飞机动力学出现了显著变化，气动弹性模态频率的变化足以使气动伺服弹性陷波滤波器失效，这可能就会导致控制信号激发机翼的气动弹性模态，从而对飞行员操纵飞机造成困难。自适应控制面临的另一个问题是其容纳慢速或退化的飞行控制执行机构的能力，例如受损的飞行控制面或发动机作为飞行控制执行机构[79,101]。由于执行机构的动力学较慢，执行机构之间的速度不同可能会使自适应控制出现问题，并可能导致飞行员诱导振荡（PIO）[102]。

为充分解决这些耦合效应导致的问题，需要在自适应控制研究中开发一套集成设计方法。这些集成方法需要在自适应控制和系统建模方面开发新的基础多学科方法。在高增益自适应情况下，未建模动态是自适应控制系统不确定性的重要来源及诱发不稳定性的关键因素。在未来的自适应控制研究中，应通过对这些二阶动力学结构的基本理解，将多学科方法
5 纳入自适应控制系统的设计中。随着对系统不确定性的进一步理解，有望开发出更有效的自适应控制方法，以提高系统在不确定性作用下的鲁棒性。

1.2　自适应飞行控制系统的验证和确认

尽管人们在自适应控制领域已进行了五十余年的研究，但事实仍然是，目前还没有任何自适应控制系统应用于安全至上或人在回路的生产系统中，如民航客机等[99,103-106]。但是，自适应控制已经成功应用于武器系统中[88]。造成这一现状的问题就在于自适应控制系统很难进行认证，并且现有的线性时不变（LTI）控制系统的认证方法无法直接应用于非线性自适应控制系统。于是，在21世纪的第一个十年里，人们开始研发一套适用于自适应控制系统的评价指标[14,107-115]。这项研究的目标是为自适应控制建立一套类似于线性时不变系统中的超调、调节时间、相位裕度和增益裕度的性能和稳定性指标。这些指标如果被大家接受，可能会为自适应控制系统的认证铺平道路，并使得自适应控制有可能成为安全至上和人在回路生产系统的未来控制技术。

建立一套适用于自适应控制系统的认证体系是一项亟须解决的瓶颈问题。对于具有学习算法的自适应控制系统来说，在能够证明它们是高度安全和可靠的之前，它们并不会成为未来的主流发展方向。因此，必须建立一套严格的自适应控制软件验证和确认的方法，以确保自适应控制系统不会发生软件故障，从而说明自适应控制系统能够按要求运行并消除意外情况，同时能够满足美国联邦航空管理局（FAA）等监管机构的认证要求[104-105]。

自适应控制系统能够对预先设计的飞行控制系统进行修改，这既是它的一大优势，同时也是一大劣势。一方面，自适应控制系统具备容纳系统退化的能力是其主要优点，因为传统的增益调度控制方法往往无法对在飞行包线之外的非标称飞行状态进行控制。另一方面，未

建模动态和高增益自适应过程会给自适应控制带来严重的问题，因为自适应控制系统对这些潜在的问题以及许多诸如执行机构动力学和外部干扰等问题非常敏感。为通过认证，自适应飞行控制系统必须能够证明在上述因素以及其他因素 —— 如时间延迟、系统约束以及测量噪声的作用下，仍然可以保证令人满意的全局性能。 6

1.2.1 自适应飞行控制系统的仿真验证

仿真是自适应控制系统验证的一个组成部分[104-105,116-117]。自适应控制系统的许多方面，特别是收敛性和稳定性，只能通过在仿真中模拟重要的非线性动力学特性来进行系统性能分析。例如，飞机的失速过程无法表示为线性模型，因为这种效应是高度非线性以及不稳定的。仿真技术是一种能够快速完成以下任务的方法：

- 不同自适应控制算法的评估和比较。
- 调整控制增益和更新律的权重。
- 确定每一步长下的适应过程。
- 评估过程噪声和测量噪声对自适应参数收敛的影响。
- 确定稳定边界。
- 使用真实飞行计算机硬件进行验证。
- 在飞行模拟器中进行自适应控制的驾驶评估。
- 对改进自适应过程的特殊技术进行仿真，例如添加持续激励以改善参数识别和收敛特性，以及在跟踪误差收敛到指定容差内或在指定次数的迭代之后停止自适应过程。

不同仿真之间的主要区别体现在被控对象的建模精度上。高精度仿真需要自适应控制系统更为复杂的数学模型以及昂贵的控制器硬件设备。通过将简单线性模型的仿真结果与高精度非线性模型的仿真结果进行对比，以确保使用线性模型进行的性能分析仍然适用。为了节省成本，通常会尽量使用较低精度的测试平台。

在台式机上进行的仿真通常是最低精度的仿真，因为这种仿真通常只包括控制律以及被控对象的线性或者非线性动力学。在早期的控制律设计和分析中，或者计算线性增益裕度和相位裕度时，通常采用线性模型。将系统传递函数由一个矩阵变换为另一个具有不同频率的矩阵来模拟被控对象模型的变化。通过改变每次的变化量可确定系统的稳定边界。与此同时，可以对自适应控制算法中的系统参数进行评估。台式机仿真环境为比较不同的自适应控制算法和控制器结构提供了一种快速、便捷的方式，只有最有希望得到应用的设计才需要高精度的仿真模拟。

在控制回路的仿真中，高精度的仿真测试平台通常需要真实的飞行硬件设备（甚至是真实的飞机），且往往运行在带有驾驶舱和舱外图形显示的专用计算环境中[117-118]。这种仿真可能包括一个与飞行员进行交互的固定基座或运动基座驾驶舱。运动基座模拟器为飞行员额外提供了实际飞行中的物理（运动及视线）信息[63]。通常来说，这种仿真包含了非线性飞 7
机动力学的软件模型、执行机构模型以及传感器模型。真实机载计算机的使用是这类仿真的一大优势，因为不同的计算设备在处理异常以及计算过程中都会有所不同。真实的飞机或者测试专用飞机都可以为高精度仿真提供真实的执行机构动力学、传感器噪声、实际飞行电传以及一些结构之间的交互作用。这些测试平台允许对飞行硬件的所有接口、时序测试以及各种故障模式和影响分析（FMEA）测试进行完整的检查，这在低精度仿真中是不可能实现的。