

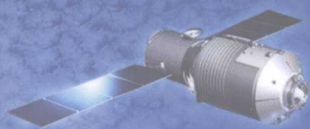



国家“十一五”出版规划重点图书  
空间飞行器设计专业系列教材  
航天一线专家学术专著

# 基于特征模型的 智能自适应控制

吴宏鑫 胡军 解永春 著

CHARACTERISTIC MODEL-BASED  
INTELLIGENT ADAPTIVE CONTROL



 中国科学技术出版社

- 国家“十一五”出版规划重点图书
- 空间飞行器设计专业系列教材
- 航天一线专家学术专著

# 基于特征模型的智能 自适应控制

吴宏鑫 胡 军 解永春 著

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

## 图书在版编目(CIP)数据

基于特征模型的智能自适应控制/吴宏鑫,胡军,解永春著.  
—北京:中国科学技术出版社,2008.6  
(空间飞行器设计专业系列教材)

ISBN 978-7-5046-4884-6

I. 基... II. ①吴...②胡...③解... III. 航天器-智能控制:自适应控制-高等学校-教材 IV. V448.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 050965 号

自 2006 年 4 月起本社图书封面均贴有防伪标志,未贴防伪标志的为盗版图书。

中国科学技术出版社出版

北京市海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码:100081

电话:010-62103210 传真:010-62183872

<http://www.kjpbbooks.com.cn>

科学普及出版社发行部发行

北京国防印刷厂印刷

\*

开本:787毫米×960毫米 1/16 印张:25.25 字数:500千字

2009年1月第1版 2009年1月第1次印刷

印数:1—2000册 定价:48.00元

ISBN 978-7-5046-4884-6/V·39

---

(凡购买本社的图书,如有缺页、倒页、  
脱页者,本社发行部负责调换)

# 总 序

我国航天技术走过了40多年的光辉历程,正面临着21世纪更加蓬勃发展的形势,需要人才,需要知识。

空间飞行器即航天器,包括卫星、飞船、空间站、深空探测器,等等。空间飞行器设计专业是航天技术领域的一门主要学科,它所涵盖的知识面很宽,涉及光、机、电、热和系统工程等,是一门多学科交叉综合和工程性很强的新型学科。

本丛书是根据空间飞行器设计专业培养研究生的课程教学需求,同时考虑到空间技术领域的在职中、高级技术人员研究生水平进修的需要而编写的。因此,本丛书全面讲授空间飞行器设计专业领域的基础理论和系统的专门知识,在内容上具有足够的纵深度和宽广度、前沿性和前瞻性。

本丛书的作者都是从事了几十年航天工程的高级设计师和研究员,他们把自己丰富的知识和经验很好地融入这套丛书中,理论与实践密切结合,使本丛书具有很高的学术水平和工程实用价值。

本丛书将陆续出版。它的出版是非常值得祝贺的,相信它不仅是一套不错的研究生教材,能够为培养高级航天技术人才服务;同时又是一套优秀的学术专著,将对我国航天科学与技术的发展作出贡献。

阎桂荣

2001年9月

## 序

《基于特征模型的智能自适应控制》一书是作者近三十年来从事航天和工业过程控制的经验总结和学术成果汇总。

本专著系统地阐述了特征建模理论和方法,并基于此使针对高阶复杂控制对象设计低阶控制系统和智能控制系统的工作大大简化。常规控制系统的前提是系统性能指标要求和无控时控制对象特性模型的建立。各种优化指标的实现和精确算法基础都在于对象性状动力学特性的确知。所谓特征建模就是结合对象动力学、环境特征和控制性能要求而进行的建模。根据定义要求,特征模型的输出与实际对象在动态过程中保持在容差之内,在稳态情况下是相等的。但在特征建模时,模型考虑了控制要求,比原对象动力学模型简单。特征建模有别于通常如模态截断等方法中把高阶模态舍去的做法,它是把高阶模型的有关信息压缩融入特征模型中,并不丢失信息。

作者自 20 世纪 80 年代起从事具有时变、不确定性的大型复杂控制对象的实际控制问题,研究发展了全系数自适应控制、黄金分割自适应控制,以及逻辑积分、逻辑微分、维持与跟踪控制等设计方法。基于特征建模的自适应控制和智能控制的结合是作者团队开辟的又一创新领域。

本书适合于从事控制技术的专业人员和研究生作参考。书中涉及不少工程实际应用问题,如卫星、飞船、空间站及月

球车等控制问题,以及航天地面工程及工业过程控制问题。本书立论严谨,内容新颖而实际,特别重视在实际工程应用中所提炼出来的技术实现要点。本书的出版将为控制技术的发展作出重要贡献。

詹善澄

2008年6月

# 前 言

为了对那些参数、阶数未知和难以用精确数学模型描述的复杂对象进行有效的高性能控制,20世纪50年代和60年代有人分别提出了自适应控制和智能控制。50多年来,从事这方面研究的人员发表了大量论文和专著,丰富和发展了自动控制学科。但是到目前为止,还没有一本以复杂航天器控制和工业过程控制为目标,以自适应控制为基础,引入人工智能和专家经验等智能控制思想为指导的基于特征模型的智能自适应控制理论与应用的专著。

本书作者及其合作者继1990年出版专著《全系数自适应控制理论及其应用》之后,就开始从事智能自适应控制理论的研究与实际应用工作。本书将系统介绍在智能自适应控制方面的理论、方法及其实际工程应用,特别是在实际工程应用中提炼和总结的研究成果。本书内容包括在这期间已发表的“黄金分割自适应控制”、“特征建模”和“基于特征模型的全系数自适应控制方法及应用”等有关研究论文和在各种学术会议上的报告,当然还包括尚未发表的研究成果。到目前为止,本书所介绍的理论、思想、方法和工程设计要点已在航天工程、国防工程和工业系统等多种类型实际工程中取得了成功应用(本书将介绍其中四种类型对象控制的实际应用情况)。多年来所发表的论文和应用成果引起了业内人士的关注和讨论,为进一步满足广大同行的要求,为促进学术和技术交流,并满足本专业研究生教材需求,我们决

定撰写本书,以求共同进步,为自动控制的发展作一点贡献,为航天控制和工业控制的发展提供一种新的思路和途径。

本书分四个部分,共 20 章。第一部分是基本概念、理论和方法,其中第 1 章为绪论,介绍智能自适应控制的概念、发展和产生背景;第 2 章和第 3 章分别介绍了智能控制与全系数自适应控制的一些重要结果;第 4~7 章重点介绍特征建模、黄金分割控制(特别是其中的黄金分割自适应控制)、特征建模与 PID 控制和航天器变结构变系数智能控制,这是本书的核心和基础。第二部分主要介绍以航天器为对象的智能自适应控制设计方法及应用研究和实际应用情况,这也是本书的重点内容和特色所在。这部分内容是由第 8~16 章组成的,主要介绍本理论方法和技术要点在飞船返回再入控制中的应用,介绍空间交会对接、空间站、月面巡视探测器和卫星控制等应用研究结果。第三部分是由第 17~19 章组成的,对航天地面工程及工业过程控制等应用情况进行介绍,通过这部分可以更好地理解本理论和方法。第四部分(第 20 章)是全书总结及对今后研究的展望。

本书是 20 多年的研究成果和实际应用经验的总结,在研究中得到杨嘉墀院士和屠善澄院士的指导,参加过研究和应用工作的有张洪华、袁斌、倪茂林、周军、李勇、刘一武、孙庆、余四祥、全良、李季苏、马有礼、马慧、白金英、周世安、梁斌、袁军、黄献龙、李捷、张效华、王景、王昊瀛、王平、李鹏、何英姿、张兵、王颖、王晓磊、刘忠汉、曾海波、孙东昌、余志杰、滕宝毅、张湛、王新升、熊勇、胡海霞、邢琰、孙多青、刘洁、杨扬、沈少萍、张国琪和刘建军等同志。对研究工作提出过宝贵意见和帮助的有梁思礼、戴汝为、侯朝焕、李衍达、张钹、黄琳、童世璜、徐福祥、吕振铎、萨支天、柯受全、张国富、冯学



义、郑大钟、涂序彦、于景元、吴麒、邹广瑞、刘良栋、陈祖贵、孙承启、陈义庆、杨孟飞、李果、王南华、李铁寿、李宝绶、孙宝祥、孙增圻、毛剑琴、霍伟等教授。

本书的研究成果得到了总装、国防科工委、国家自然科学基金、国家 863 和国家 973 计划、中国航天科技集团公司、中国空间技术研究院、北京控制工程研究所和“空间智能控制技术”国防科技重点实验室的大力支持。

本书由中国自动化学会智能自动化专业委员会主任、清华大学孙增圻教授和北京控制工程研究所吕振铎研究员主审，他们仔细审阅了本书，并提出了宝贵意见。

参加本书撰写的作者为：吴宏鑫负责撰写第 1~7 章、第 17 章、第 19 章和第 20 章；胡军负责撰写第 8 章和第 18 章，参加第 3 章撰写；解永春负责撰写第 9 章和第 12 章，并撰写第 5 章的 5.2 节和 5.5 节；陈建新负责撰写第 10 章和第 11 章；齐春子负责撰写第 13 章；雷拥军负责撰写第 14 章；邱志成负责撰写第 15 章；李智斌负责撰写第 16 章；王佐伟负责撰写第 11 章中部分内容；孟斌撰写第 4 章的 4.6 节；第 17 章是引用袁斌等撰写并发表在自动化学报(1999 年 5 月)上的论文，由吴宏鑫修改而成；王迎春参加了第 19 章撰写。

全书由吴宏鑫、胡军和解永春统稿。

由于篇幅限制，还有不少同志对本研究成果与本书做了不少工作，谨向所有同志致以衷心的感谢！

由于作者水平所限，书中错误和缺点在所难免，欢迎读者批评指正。

吴宏鑫  
2008 年 9 月

# 目 录

<b>第1章 绪论</b> .....	(1)
1.1 基本概念 .....	(1)
1.2 基于特征模型的智能自适应控制方法的产生 .....	(2)
1.3 本书内容安排 .....	(5)
<b>第2章 智能控制概述</b> .....	(6)
2.1 智能控制的产生 .....	(6)
2.2 智能控制的基本概念 .....	(7)
2.3 智能控制与传统控制的主要区别 .....	(8)
2.4 几类智能控制方法 .....	(9)
2.5 智能控制需要进一步研究的问题 .....	(10)
<b>第3章 全系数自适应控制</b> .....	(12)
3.1 引言 .....	(12)
3.2 全系数之和等于1 .....	(12)
3.3 参数估计值范围的计算 .....	(15)
3.4 参数估计的新递推算法 .....	(28)
3.5 输出误差预报 .....	(32)
3.6 控制器设计 .....	(33)
3.7 系统基本结构 .....	(40)
3.8 工程设计技术要点 .....	(41)
3.9 小结 .....	(43)
<b>第4章 特征建模</b> .....	(45)
4.1 引言 .....	(45)
4.2 特征建模的基本概念和分类 .....	(47)
4.3 线性定常系统的特征模型 .....	(49)
4.4 线性时变系统的特征模型 .....	(62)
4.5 非线性定常系统的特征模型 .....	(66)

4.6	一类变参数非线性系统的特征模型	(70)
4.7	特征建模的机理及工程应用	(76)
<b>第5章</b>	<b>黄金分割控制</b>	<b>(79)</b>
5.1	引言	(79)
5.2	二阶线性定常系统的黄金分割控制	(80)
5.3	黄金分割自适应控制	(93)
5.4	非线性黄金分割自适应控制	(108)
5.5	黄金分割自适应控制器的鲁棒稳定性	(114)
5.6	多变量黄金分割自适应控制系统的稳定性	(131)
<b>第6章</b>	<b>特征建模与PID控制</b>	<b>(139)</b>
6.1	引言	(139)
6.2	PID控制器设计的理论依据	(140)
6.3	基于对象特征模型的PID控制器设计方法	(142)
6.4	二阶系统最优化PID控制仿真	(149)
6.5	小结	(154)
<b>第7章</b>	<b>航天器变结构变系数智能控制</b>	<b>(155)</b>
7.1	航天器控制的特点和要求	(155)
7.2	航天器变结构变系数智能控制系统的总体结构	(158)
7.3	航天器控制的特征模型	(162)
7.4	特征模型的参数估计	(172)
7.5	基于特征模型的多变量黄金分割自适应控制	(173)
7.6	学习与推理	(175)
7.7	复杂航天器控制的发展方向	(179)
<b>第8章</b>	<b>载人飞船全系数自适应再入升力控制</b>	<b>(183)</b>
8.1	引言	(183)
8.2	载人飞船返回再入动力学方程	(185)
8.3	基于落点预报的全系数自适应纵向升力控制	(192)
8.4	神舟载人飞船再入升力制导规律设计简介	(201)
8.5	小结	(202)
<b>第9章</b>	<b>在空间交会对接控制中的应用研究</b>	<b>(204)</b>
9.1	引言	(204)
9.2	交会对接动力学模型	(204)

9.3	停泊点的非线性黄金分割自适应控制 .....	(209)
9.4	最后平移和靠拢段的黄金分割自适应控制 .....	(212)
9.5	小结 .....	(215)
<b>第10章</b>	<b>空间站控制技术</b> .....	(216)
10.1	背景 .....	(216)
10.2	具有两自由度太阳帆板的空间站动力学建模与控制 .....	(216)
10.3	变构形空间站的动力学建模与控制 .....	(224)
10.4	小结 .....	(231)
<b>第11章</b>	<b>月面巡视探测器的运动控制技术</b> .....	(232)
11.1	引言 .....	(232)
11.2	运动学建模与运动控制原理 .....	(233)
11.3	基于智能特征模型的运动控制方案 .....	(242)
11.4	基于特征建模的四轮主动转向控制 .....	(245)
11.5	小结 .....	(252)
<b>第12章</b>	<b>液体远地点发动机工作期间卫星姿态的 自适应控制</b> .....	(253)
12.1	引言 .....	(253)
12.2	大型三轴稳定地球同步轨道卫星的动力学特性 .....	(253)
12.3	带液体晃动和太阳帆板挠性振动的卫星姿态动力学方程 .....	(254)
12.4	建立特征模型 .....	(256)
12.5	充液卫星姿态的全系数自适应控制方案 .....	(258)
12.6	小结 .....	(268)
<b>第13章</b>	<b>大型复杂挠性卫星智能自适应控制</b> .....	(269)
13.1	复杂卫星的动力学模型 .....	(269)
13.2	自适应控制器设计 .....	(271)
13.3	数值仿真研究 .....	(274)
13.4	小结 .....	(281)
<b>第14章</b>	<b>基于特征模型的双柔性机械臂协调控制</b> .....	(282)
14.1	提出问题 .....	(282)
14.2	双柔性机械臂的运动学及动力学模型 .....	(282)
14.3	基于奇异摄动方法的双柔性机械臂模型分解 .....	(286)
14.4	系统模型确定时的协调控制器设计 .....	(287)

---

14.5	双臂协调操作的自适应控制器设计	(289)
14.6	仿真实例	(294)
<b>第15章</b>	<b>基于特征模型的智能结构振动主动控制</b>	<b>(303)</b>
15.1	引言	(303)
15.2	压电智能柔性旋转梁系统建模	(303)
15.3	控制算法	(307)
15.4	压电智能柔性旋转梁主动振动控制实验研究	(313)
15.5	小结	(327)
<b>第16章</b>	<b>带可伸缩挠性结构航天器姿态控制实验研究</b>	<b>(328)</b>
16.1	引言	(328)
16.2	带可伸缩挠性附件的单轴气浮台实验系统	(328)
16.3	系统模型及技术指标	(330)
16.4	姿态机动与振动抑制方法及实验	(332)
16.5	小结	(340)
<b>第17章</b>	<b>液压釜温度自适应预测控制</b>	<b>(341)</b>
17.1	引言	(341)
17.2	系统特性	(341)
17.3	液压釜温度模型预测控制方法	(343)
17.4	液压釜温度自适应预测控制算法	(352)
17.5	实际应用情况	(353)
<b>第18章</b>	<b>航天器瞬变热流全系数自适应控制</b>	<b>(354)</b>
18.1	引言	(354)
18.2	控制方案	(355)
18.3	应用	(360)
<b>第19章</b>	<b>基于智能特征模型的智能控制</b>	<b>(361)</b>
19.1	引言	(361)
19.2	综合智能特征模型	(361)
19.3	基于综合智能特征模型的智能控制	(368)
19.4	在电解铝生产过程中的应用	(370)
19.5	物理机理的特征参量模型建模的基本思想	(375)
19.6	小结	(376)

---

---

<b>第20章 总结与展望</b> .....	(377)
20.1 概述 .....	(377)
20.2 在理论方法方面的成果 .....	(378)
20.3 在技术实现方面的要点 .....	(380)
20.4 工程应用的典型实例分析 .....	(380)
20.5 需进一步研究的问题 .....	(381)
<b>参考文献</b> .....	(382)

# 第1章 绪论

## 1.1 基本概念

“基于特征模型的智能自适应控制”是以航天器和工业过程控制为主要被控对象,以其特征模型为依据,将智能控制和自适应控制相结合的控制。由于本书在应用研究中是以航天器为主要被控对象,所以又可称为“航天器智能自适应控制理论和方法”。

基于特征模型的智能自适应控制理论和方法的基本特点是:从航天器和部分工业控制对象的物理机理、动力学特征和环境特征出发,结合控制目标与性能要求,建立其对象特征模型,以此特征模型为依据,利用已有的和新发展的控制理论和方法,特别是智能控制与自适应控制相结合的理论和方法,按照被控对象复杂程度和不同控制性能的要求,研究基于特征模型的智能自适应控制器设计理论和方法,研究由此控制器组成闭环系统的稳定性和目标可达性。

一般自适应控制、模糊控制和神经网络控制等,如果不具备自学习和自组织能力,从严格意义上讲,这些方法不能叫智能控制<sup>[1,2]</sup>,只有在这些控制中引入人工智能技术,特别是自学习、自主推理决策和自组织等智能特征的技术时方可称智能控制。本书所谓的“智能自适应控制方法”,是以自适应控制中的自适应控制器和自适应估计器为主,引入专家经验、自学习和人工智能等智能控制特征进行控制器设计的方法,所以定名为智能自适应控制,从而可避免一般化的智能控制,也区别于目前出现的一些智能控制方法如专家控制、神经网络控制和模糊控制等。这是具有一定特色的系统性和实用性很强的智能控制。又鉴于本方法的主要部分和理论基础是全系数自适应控制方法,所以在写此书之前曾叫“基于特征模型的全系数自适应控制方法”。

除全系数自适应控制方法之外,本书提出的最重要的新思想就是特征建模和黄金分割控制及其工程设计方法。所谓特征建模,就是结合对象动力学特征、环境特征和控制性能要求进行的建模,而不是仅以对象精确动力学分析建模。特征模型的特点如下:

(1)在同样输入控制作用下,对象特征模型和实际对象在输出上是等价的

(即在动态过程中能保持在允许的输出误差内),在稳定情况下,输出是相等的。

(2)特征模型的形式和阶次除考虑对象特征外,主要取决于控制性能要求。

(3)特征模型的形式应比原对象动力学方程简单,工程实现容易、方便。对于简单系统,特征模型与动力学方程在形式上是相同的。

(4)特征模型与高阶系统的降阶模型不同,它是把高阶模型的有关信息都压缩到几个特征参量之中,并不丢失信息,一般情况下,特征模型用慢时变差分方程描述。

特征建模的理论和方法为复杂高阶系统进行低阶控制器与智能控制器设计提供了理论依据,有助于智能控制理论体系的建立,它能较好地克服人为试凑控制器及在线调试参数的不足,更有利于自适应控制和智能控制的广泛应用。

所谓黄金分割控制,包括定常黄金分割控制、黄金分割自适应控制和非线性黄金分割自适应控制三方面内容。黄金分割控制不仅设计简单有效而且为参数未知对象在启动阶段的稳定控制,为自适应在工程中应用提供了有力保障,为控制人员设计提供了一条新的途径。

## 1.2 基于特征模型的智能自适应控制方法的产生

基于特征模型的智能自适应控制方法是作者在 20 多年从事航天控制和工业过程控制的实际工程应用中,在研究与应用传统控制、自适应控制和智能控制的基础上,特别是在研究与发展全系数自适应控制的基础上,针对一般参数未知对象和具有不确定性大型复杂对象的实际控制问题,总结提炼出来的一套新型实用、系统性的控制理论和方法。本方法已通过卫星瞬态热流控制、液压釜控制、飞船返回再入控制、电解铝过程控制和某些国家重点工程的控制等多种类型对象上百个实际系统的实际应用验证。有关部分内容曾在国内外刊物和会议上发表的论文中介绍过。如“基于对象特征模型描述的智能控制”、“特征建模与挠性结构的控制”、“载入飞船全系数自适应再入升力控制”、“基于智能特征模型的智能控制”和“基于特征模型的全系数自适应控制方法及应用”等多篇论文。下面将重点论述为什么提出这套控制理论和方法。

(1)针对一般参数未知对象的控制问题,已有的控制方法在实际应用中遇到了困难。

对于一般参数未知的被控对象,从理论上讲很容易,而且很成熟,如用自适应控制,传统的 PID 控制均可解决。但是,如果控制过程不允许在线反复调试,必须要一次成功,或最多可调一两次即能达到希望结果,可以说上述哪一种控制



方法都会遇到很大困难。特别是对开环不稳定对象,哪怕是一个参数未知的二阶系统,当要开机成功也是不可能的。另一方面自适应控制需要对参数估计,在参数估计尚未收敛的情况下,此系统状态早已飞出界外。这种对象的控制如果从纯教学观点看似乎很简单,而实际工程应用其理论就成为不可能,这也是长期以来控制理论与实际应用严重脱节的一个重要原因。由于任务的需要,必须面对上述问题,从理论上、从工程应用角度寻找解决问题的办法,这是本方法产生的第一个动因。

(2)带有不确定性大型复杂对象的控制,已有传统方法和现有智能控制方法也在实际应用的控制过程中遇到了困难。

已有传统控制方法要依靠精确动力学模型,可是这种对象无法写出精确动力学模型,PID 控制可以不考虑对象模型,但对于一个大型复杂且有不确定性的对象,其控制也是无能为力的。从理论上讲,现有的一些智能控制方法可以解决这类对象的控制问题,但实际问题如何解决呢,很多智能控制的论文也提出了不少办法,但无严格的理论依据且非常复杂,工程上难以应用。所以尽管有关智能控制的论文很多,但实际工程应用甚少。即使有成功应用的实例,也是靠人在现场试凑其控制器参数。根本原因在于现有智能控制方法大多数也是从数学、从书本出发或者仅从实际经验出发,未抓住实际问题之要害。要解决这个问题必须从物理机理和特征出发,研究有实用价值的控制理论和方法,即必须进行应用基础研究。这是本书提出“智能自适应控制”的第二个动因。

(3)对大型复杂系统,人为地干扰中断、起停是常事,系统常处在过渡过程,而对于参数、阶数未知对象在过渡过程的控制是现有自适应控制、鲁棒控制和目前的智能控制都感到难办的事,然而这是工程控制中不可避免的事实,必须研究这种混杂状态的控制问题,这是本研究的第三个动因。

(4)从控制科学发展的角度考虑,目前控制界一般都认为智能控制是控制理论发展的第三个里程碑,然而从智能控制提出至今已有 40 多年的历史,智能控制的理论、数学工具、设计准则、稳定性和目标可达性的分析均未解决。真正需要智能控制的领域,如航天控制至今也没有真正的智能控制系统。控制科学是实用性很强的技术科学,因此控制科学发展必须从实际控制问题出发并提炼出新理论,从国家和人类重大控制工程需求出发研究控制科学问题,同时也必须从控制科学发展的趋势出发,对已有控制理论的一些基本问题进行总结,如建模问题是控制界首先要面对的问题,必须借助其他相关科学技术的发展如力学、物理学、计算机、人工智能及生命科学等来丰富和发展控制科学,并以实践来检验所研究的控制理论和方法。