

916041

I.D. 郎道  
富塚诚義  
俞安然  
葛祖光

著  
译

# 适 应 控 制 系 统

## 理 论 与 实 际

华东化工学院出版社

# 适应控制系统理论与实际

I.D. 郎道 著  
富塚诚義

俞安然 译  
葛祖光  
杨德林 校

华东化工学院出版社

## 内 容 简 介

本书是参考模型适应控制方面的一本内容丰富的专著。全书共分六章四个附录。第一章是适应控制系统和参考模型适应系统(MRAS)的概述。第二章及第三章分别介绍了利用超稳定性理论设计连续和离散系统 MRAS 的方法。第四、五、六章分别介绍了 MRAS 在参数辨识、状态观测以及模型参考适应控制(MRAC)三个方面的应用。全书重点放在离散系统。因此,特别适合于计算机控制。附录主要介绍了正动态系统和超稳定性理论以及有关定理的证明。

本书供从事现代控制工程研究、设计与应用的科学工作者和工程技术人员阅读,也可作为高等院校控制专业高年级学生和研究生的教材和教学参考书。

责任编辑: 范荷英

## 适应控制系统理论与实际

Shiying Kongzhi Xitong Lilun yu Shiji

I. D. 郎道 富塚诚义 著

俞安然 葛祖光 译

杨德林 校

华东化工学院出版社出版

(上海市梅陇路 130 号)

新华书店上海发行所发行

商务印书馆上海印刷厂印刷

开本 850×1168 1/32 印张 6.875 字数 185 千字

1990 年 5 月第 1 版 1990 年 5 月第 1 次印刷

印数 1-3,000 册

---

ISBN 7-5628-0086-3/TP·9 定价 1.70 元

## 译 者 的 话

适应控制系统随着工业等各个领域日新月异的发展所提出的日益提高的控制要求而越来越受到人们的重视。而自适应技术本身也随着上述要求以及科学技术(其中尤以控制理论和计算机技术)的发展而迅速发展。适应系统中的参考模型适应系统更为迅速、成熟,在实际中得到广泛的应用。本书作者之一,法国国立格勒诺布尔理工学院教授、法国国家科学研究中心研究大师郎道先生,在很长时间里从事适应控制的开创性研究,形成了模型参考适应控制系统的一整套理论方法。另一位作者富塚教授在计算机控制技术实用化方面做出了显著成绩,本书由这样两位学者结合所编写,不仅在理论上极为完备,而且对计算机应用于实际带来极大方便。因而本书是参考模型适应控制理论及应用方面的一本极好的著作。对此,高桥安人先生评价为“世界最高水平的人写的书”是十分恰当的。从另外意义上也可以如寺尾满教授所说的,本书原版作者是奠定超稳定性理论的波波夫教授和在美国、日本对数字控制发展起指导作用的高桥安人先生。

原版虽然出版了许多年,但是在模型参考适应方面仍为一本适用性极好的著作。译者在讲授研究生自适应选修课课程时感到了这一点。因此,有幸把几年前译稿重新整理翻译出来出版以飨读者。并期待能使各位在为自适应理论的发展和应用方面取得进展起到一定的作用。

本书第一章、第二章及附录 A, B, C, D, E 由葛祖光翻译,其余各章由俞安然翻译,全书最后由俞安然审阅。杨德林先生对译稿进行了认真细致的校核,在翻译过程中得到了邵惠鹤教授、杜仰光副教授的鼓励,此外还得到许多同事的帮助,在此一并表示深切感谢。

由于译者水平等原因，译本中若有不妥之处，谨表示歉意，并热忱欢迎指正。

译 者  
于上海，华东化工学院

## 前 言

对于特性尚未被充分认识的控制对象,或者在操作中特性变化的控制对象,用调节器自动地适应,以获得比通常的反馈控制有更高性能为目的的控制方式,就是适应控制。适应控制的设想虽然很早就有,但以前理论处理困难。被称为模型参考适应系统(Model reference adaptive systems: MRAS)的适应方法,在过去 15 年左右的时间里,理论体系相当完备,其实用也被承认。本书从确定性和随机性出发,对 MRAS 的设计理论和实际进行论述。

利用 MRAS 进行控制对象参数辨识,状态估计或适应模型跟踪控制,能构成各种适应控制系统。MRAS 的特色是把称作为参考模型(reference model)动态系统的特性作为目标,实行适应动作。将 MRAS 应用在控制对象的参数辨识和状态估计时,控制对象成为参考模型,而用在适应模型跟踪控制时,模型成为参考模型。

在实施 MRAS 时,考虑到多数场合必须使用数字计算机。所以本书以离散时间形式的 MRAS 作为主要内容。第一章中对适应系统进行一般概述,在阐明 MRAS 特点的同时,叙述利用 MRAS 的各种方法。第二章介绍 MRAS 的数字处理方法和立足于超稳定性理论的设计方法,并列举了连续时间系统情况的实例。从第三章开始,则以离散时间形式的 MRAS 作为对象。第三章作为离散时间形式 MRAS 基础理论的出发点,在第四章叙述利用 MRAS 的参数辨识,第五章叙述适应观测器,第六章叙述适应模型跟踪控制。由于第四~第六章是相互独立的,也可以根据读者的兴趣,从第三章直接跳到第五章或第六章。第三章的基础理论是从确定性观点论述 MRAS 的,而第四~第六章是从随机方面对 MRAS 进行探讨。

本书不仅在理论方面进行论述,而且致力于对使用上的注意

事项、应用和数值例子等方面进行了探讨。不言而喻,将本书讲述的 MRAS 一般理论应用到实际问题中时,要按照问题的性质进行必要的调整、简化。笔者切望本书有助于 MRAS 理论更进一步发展和实际应用。

最后,谨对经常给以指导、鞭策和鼓励选写本书的高桥安人先生,在出版方面给以种种尽力帮助的寺尾满先生表示由衷的谢忱。本书在许多地方有劳于 H. Medeiros-Silveira, R. Lozano-Real 和 L. Dugard 三位博士。对本书编写给以各种协助的喔姆(オム)社出版部各位先生致以深切的感谢。

1981 年夏于伯克利

I. D. 郎道, 富塚誠義

## 本书的诞生

适应控制是现代控制的一个重要课题。其具有魅力的理论正在形成。它的算法因数字化而进入直接应用于实际的时代。现在,没有通过翻译直接以日文版形式出版是令人高兴的事。而且沃昂(loan. D. Landan), 富(富塚誠義)两位作者和推进本书出版的寺尾满教授三位都是我的朋友。

我在 1968 年格勒诺布尔大学(法国)和沃昂初次相遇,他在罗马尼亚向波波夫教授学习超稳定性理论,想把它应用到模型参考适应系统中去。第二年他去美国,应邀在加利福尼亚大学伯克利学院(UCB)进行特别讲演。这个讲演使我了解了 MRAS。他从此时起不断地发表 MRAS 的论文。1973 年他在格勒诺布尔大学的培兰教授指导下完成了博士学位论文。

1973 年,他在东京开始与富相识的。在回国的一段时间里,把运用 MIT 方法的最优预估控制理论收集在 Ph. D. 论文里。这时,UCB 的机械教研组公开招聘有关控制专业副教授。他在 50 多人应聘者中以首位资格被选中。第二年 9 月到任,1980 年 7 月升为副教授。富对超稳定性理论和 MRAS 理论抱有浓厚兴趣,不久弄清了它的本质,一边指导学生的论文研究,一边在大学里进行讲课。

这时沃昂完成了英文著作书稿,考虑把该书在美国、日本同时出版。1977 年在东京开始了寺尾满、沃昂、喔姆社之间的接触。但是,不仅同时出版发生了困难,而且在美国出版也不顺利。这时期,沃昂开始积累脱稿后的研究成果。因此,他决定了由喔姆社出版、并由他和富共同写作这样一本书的方针。这本书包括了他最新成果,特别是各种离散时间形式的 MRAS 随机处理方法。

沃昂这本书 1979 年在美国出版,同年,富已经完成了这本合著的第一章。按照寺尾满意见,日文写得通俗易懂。这以后,两人



在美法之间频繁地交换文稿,于1981年春脱稿。对这本世界最高水平的人写的书在日本出版,我感到由衷高兴。

1981年夏于伯克利

高桥安人

## 推荐者的话

这是一本令人期待的适应控制方面的书籍。她大概是最早具体叙述适应控制设计方法的论著吧。

将适应规律重叠在一般控制规律上,构成称为二重结构控制,看来是构思巧妙,而又极自然引出的概念。这在自然界里能见到许多这样的实例。为此,笔者也想以直观方法进行尝试。

现在终于可以说是适应控制的时代。作为概念产生,已相当久远,而极为普通的适应控制,至今为什么在实用方面还不引人注目呢?一个原因是由于系统设计的基础理论还没有确立。现今的适应控制,可以说是为某个特定目的上临时想到而偶然提高效果。另一个原因,是把控制和适应算法集中在一个装置里,在实用上有困难。

后者的困难,众所周知,现已由于微电子学进展而得到了解决。现在的机器具有“语言”,人们能够生产出用语言的必要“机能”。不久,除功率部分外,控制装置大概要被它所替换了。

制造机器“语言”究竟有什么作用呢?可以想像,无论你怎么说,控制装置就按所说的动作起来。不过,这样的“语言”能获得的效果仍是有限的。产生具有效果的“语言”,即产生控制和适应的“语言”——程序,才是重要的。适应控制的概念虽然十分普遍,但要给出理论基础是不容易的。作者之一郎道博士,在近十余年时间里,正如众所周知那样,他在适应控制中,推进了占主要位置的参考适应系统的研究。不言而喻,这些成果成为本书的基础。另一位作者富塚博士,为适应最近微电子的发展,对数字程序的实用化做出了显著成绩。这些在本书的适应系统设计、实际注意事项中都有体现。

如屡次指出那样,由状态变量出发的控制理论,在现场不能很好应用,常常是因对实际过程的特性无明确了解,本书对此也给予

一种解决方法。控制和适应规律的重叠,看上去很复杂,实际上很容易进行,这点是饶有兴味的。

比适应系统设计更为重要的,是把奠定超稳定性理论的波波夫教授和在美国及日本最近对数字控制发展起指导作用的高桥安人的各自学说组合起来——这种组合虽是高桥先生作用结果,但将他们二位作为适应控制原版著作者是最合适不过了。

期望本书被更多人所阅读,并希望它能成为今后适应控制的起点。

1981年9月

寺尾满

# 目 录

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 第一章 适应系统的 MRAS          | 1   |
| 1.1 反馈控制和适应控制——参考模型的应用  | 1   |
| 1.2 适应控制系统概论            | 7   |
| 1.3 模型参考适应系统(MRAS)      | 11  |
| 1.4 小结                  | 23  |
| 第二章 MRAS 设计             | 25  |
| 2.1 MRAS 的数学描述          | 25  |
| 2.2 MRAS 设计前提           | 30  |
| 2.3 MRAS 的设计            | 31  |
| 2.4 等价非线性反馈系统           | 32  |
| 2.5 基于超稳定性理论的 MRAS 设计   | 35  |
| 2.6 小结                  | 41  |
| 习题                      | 42  |
| 第三章 离散时间形式的 MRAS        | 44  |
| 3.1 离散形 MRAS 的特点        | 44  |
| 3.2 离散形 MRAS 的设计示例      | 45  |
| 3.3 应用输入输出差分方程的离散形 MRAS | 52  |
| 3.4 小结                  | 69  |
| 习题                      | 70  |
| 第四章 基于 MRAS 的参数辨识       | 72  |
| 4.1 辨识问题和 MRAS          | 72  |
| 4.2 离散时间递推辨识器           | 75  |
| 4.3 输入信号具备的条件           | 80  |
| 4.4 测量噪声的影响             | 83  |
| 4.5 各种辨识算法的比较           | 90  |
| 4.6 小结                  | 105 |

|                                          |     |
|------------------------------------------|-----|
| 习题 .....                                 | 101 |
| 第五章 适应观测器 .....                          | 103 |
| 5.1 适应观测器和 MRAS .....                    | 103 |
| 5.2 线性渐近状态观测器 .....                      | 104 |
| 5.3 适应观测器的设计 .....                       | 107 |
| 5.4 适应观测器的概率特性 .....                     | 123 |
| 5.5 小结 .....                             | 127 |
| 习题 .....                                 | 128 |
| 第六章 模型参考适应控制 (MRAC) .....                | 129 |
| 6.1 线性模型跟踪控制 .....                       | 129 |
| 6.2 显式模型参考适应控制 .....                     | 136 |
| 6.3 隐式模型参考适应控制 .....                     | 147 |
| 6.4 计算机仿真 .....                          | 149 |
| 6.5 MRAC 系统的概率特性 .....                   | 153 |
| 6.6 小结 .....                             | 158 |
| 习题 .....                                 | 159 |
| 附录 A 正动态系统 .....                         | 160 |
| A.1 复正实函数 .....                          | 160 |
| A.2 连续时间定常线性正系统 .....                    | 163 |
| A.3 离散时间定常线性正系统 .....                    | 166 |
| A.4 离散时间非定常线性正系统 .....                   | 169 |
| 附录 B 超稳定性理论 .....                        | 172 |
| B.1 超稳定问题 .....                          | 172 |
| B.2 定义 .....                             | 172 |
| B.3 主要结果 .....                           | 173 |
| B.4 超稳定块的结合 .....                        | 175 |
| 附录 C 定理 3.3 和推论 3.1 的证明 .....            | 176 |
| C.1 等价于式 (3.98)、式 (3.101) 的反馈系统 .....    | 176 |
| C.2 $L(\Delta)$ 集合和 $N(\Gamma)$ 集合 ..... | 176 |
| C.3 定理 3.3 和推论 3.1 的证明 .....             | 183 |

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 附录 D 式(6.20)的证明 .....   | 186 |
| 附录 E 辅助定理 6.1 的证明 ..... | 188 |
| 习题解答 .....              | 190 |
| 参考文献 .....              | 197 |

# 第一章 适应系统的 MRAS

在控制对象的特性变化时, 有可能把控制规律适应于对应的变化和维持高的控制性能。将这样的控制方式称作适应控制(adaptive control), 将具备适应机能的系统称作适应系统(adaptive system)。本书所研究的是对被称为模型参考适应系统(model reference adaptive system:MRAS)的设计及控制应用的问题。本章中, 首先在 1.1 节介绍以利用参考模型(reference model)为中心的 MRAS 和以往的反馈控制理论的关系。1.2 节是适应系统的一般概况。在 1.3 节, 明确 MRAS 的基本构成, 并论述作为控制目的的 MRAS 和作为辨识为目的的 MRAS 的对偶性。另外还介绍几个 MRAS 的具体应用例子。

## 1.1 反馈控制和适应控制——参考模型的应用

反馈的原理是古代纪元前希腊的水時計、17 世纪应用于瓦特蒸汽机的调速机、也是构成今日体系化自动控制的基础。但是, 仅仅是反馈控制理论, 在解决实际控制问题中往往是不够的。例如, 在应用反馈控制理论之前, 必须充分地把握控制对象的特性。另外, 控制对象的特性在随时间变化的场合, 仅用通常的反馈控制是不能维持高的性能的。作为提高控制性能的方法有:

(1) 使对于反馈控制系统参数变动的敏感度变小。

(2) 在线辨识控制对象的特性下, 修正基于辨识 (identify) 结果的控制规律的参数。

(3) 基于评价反馈控制系统性能的性能指标 (index of performance) 的实测值和理想值的比较结果, 直接修正控制规律。

关于第1个方法,在称为“控制系统的敏感度”的领域里的研究增多了。这个方法在参数变化较小时是有效的。第2、第3个方法虽然同是适应控制,但第2个方法在实用上有几个问题。其中一个问题是适应动作必须在辨识结束,时间上就迟了。

对第3个方法,明显地存在着适应控制和通常的反馈控制不一致的地方。适应控制系统和通常的反馈控制系统,同时含有状态或输出的反馈回路,这一点上虽然有共性,但是在适应控制系统中,存在性能指标这样抽象的目标变量,和与“系统性能”有关的反馈回路。为了使性能指标的理论值和实测值的差变小,利用两者的差反馈至适应规律,改变控制系数或者改变控制对象的输入。“适应规律”对应于反馈控制的“控制规律”。决定适应规律,是设计适应控制系统的主要课题。

对适应控制的关心日益高涨,许多适应控制方法的出现是进入50年代后开始的。模型参考适应系统(MRAS)的考虑方法,出现在50年代末。MRAS的特点是被称为参考模型(reference model)的动态系统是整个系统的一部分,并设定了性能指标的理想值。参考模型的考虑方法,不限于适应控制理论,即使线性控制理论使用得也很多。这里考虑一下在线性控制理论和适应控制理论中是怎样应用参考模型。

## 【1】 线性控制论中参考模型的应用

在线性二次形最优控制问题(linear quadratic optimal control problem)<sup>1)</sup>中,控制对象由以下状态方程式表示:

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu \quad (1.1)$$

式中,  $x$  为状态矢量;  $u$  为控制输入;  $A$ 、 $B$  分别为适当维元的常系数矩阵。

对于这个控制对象,求二次形式评价函数

$$J = \int_0^{t_f} [x^T Q x + u^T R u] dt \quad (1.2)$$



为最小的最优控制, 即是 **LQ** 问题。式中 **Q** 及 **R** 为正定对称矩阵(**Q** 也可半正定),  $T$  是转置的记号。

LQ 问题能够解析解, 最优控制即变成状态矢量的线性反馈控制:  $\mathbf{u} = -\mathbf{K}\mathbf{x}$ 。在此要注意以下事项:

(1) 式(1.1)的线性状态方程式, 作为控制对象的模型, 不切合的情况也有。

(2) 根据式(1.2)的二次形式评价函数最优性与从工程角度看的最优性不一致的情况很多。另外, 反馈控制增益 **K** 由于依赖于 **Q** 和 **R**, 即使在二次形目标函数是合适的场合, 在工程上要选择最优的 **Q** 和 **R** 是不容易的。

(3) 状态方程式中的 **A** 和 **B** 常常含有未知参数。

(4) 为了实现状态反馈控制, 一般地必须知道状态矢量的全部分量。而在许多情况下, 直接地测量状态矢量的全部分量是不可能的, 或者从成本观点看, 没有好的方法。

利用 LQ 问题, 设计控制系统时, 以上的问题如何处理好呢? 首先假定作为控制对象模型的式(1.1)是合适的: 参数全部已知、状态矢量完全而且直接地可以测量。余下问题是选择式(1.2)目标函数中的 **Q** 和 **R**。这个问题, 随着控制对象阶次增加变得越来越复杂。许多实际问题, 输入及状态变量的过渡响应特性在工程上虽可以满足, 但更为重要的是二次目标函数最小化。由于式(1.2)的目标函数是积分形式, 对于各瞬间的输入及状态变量是不明显的。例如把上升时间、超调量、衰减等用 **Q** 和 **R** 的形式来表示相当困难。在这种情况下, 可以考虑这样的控制输入: 把具有所要求的动态特性的理想模型作为“参考模型”, 使控制对象跟踪参考模型。

即用输入  $\mathbf{u}_M$ , 把被驱动的参考模型的状态矢量作为  $\mathbf{x}_M$ , 求使以下二次形目标函数为最小的控制输入:

$$J = \int_0^{t_f} \{[\mathbf{x}_M - \mathbf{x}]^T \mathbf{Q} [\mathbf{x}_M - \mathbf{x}] + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}\} dt \quad (1.3)$$

在这个目标函数中, 正定对称矩阵 **Q** 和 **R** 的意义很明确。 **Q**