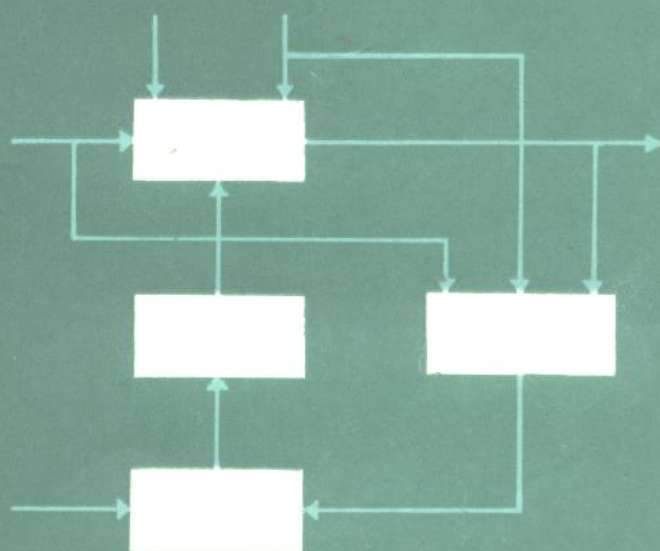


自适应控制

模型参考方法

〔法〕 I.D.朗道 著

吴百凡 译



国防工业出版社

自适应控制

——模型参考方法

〔法〕 I. D. 朗道 著
吴百凡 译

国防工业出版社

内 容 简 介

本书是自适应控制方面一本内容丰富的专著。全书原有八章和四个附录,除了对局部参数最优化设计方法和利用李雅普诺夫稳定性理论的设计方法作简略的介绍外,还全面地阐述了利用超稳定性理论设计模型参考自适应系统的原理与方法,分别对连续时间和离散时间的情况进行了讨论,并对模型参考自适应系统应用的三个方面:自适应模型跟随控制、自适应参数辨识以及自适应状态观测分章进行详述,此外还介绍了在工业控制中应用的一些工程实例。增篇“模型参考自适应控制器与随机自校正调节器的统一处理”是著者为中译版添加的补充新内容。各章末附有习题和参考文献。

本书供从事现代控制工程研究与设计的科学工作者和工程技术人员阅读,同时也适宜于高等院校作为控制专业的研究生或高年级的教学参考书。

ADAPTIVE CONTROL
The Model Reference Approach
I. D. LANDAU
MARCEL DEKKER, INC. 1979年

自 适 应 控 制
——模型参考方法

〔法〕I. D. 朗道 著
吴百凡 译

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
国防工业出版社印刷厂印装

787×1092¹/₁₆ 印张17 384千字

1985年3月第一版 1985年3月第一次印刷 印数: 0,001—4,250册

统一书号: 15034·2761 定价: 3.15元

中译版前言

自从本书英文版问世以来，自适应控制已经成为控制中一个最活跃的领域，无论从理论的观点还是从实用的观点来看都是这样。部分地由于价格相对低廉且具有高性能的微型与小型计算机的可用性，所以自适应控制的应用在数量上正在迅速发展。

对于在确定性和随机环境中的自适应控制，现在已有较好的理解，因此在中译版中加了一个增篇，从统一的观点来叙述模型参考自适应控制系统和随机自校正控制系统。

经过同济大学吴百凡先生的努力，本书的翻译出版得以实现。在这一工作中我们之间建立了极为有益的合作关系。对于他精细的工作，我以很愉快的心情在这里向吴百凡先生表示感谢。

本书中译版的出版使它的读者面得到扩大，我希望本书在研究与应用两方面将对读者有所裨益。

I.D. 朗道

译者的话

设计高性能的控制系统在很多情况下需要采用自适应控制技术。模型参考自适应系统是当今理论比较成熟、应用最为广泛的一类自适应系统；它不仅用于自适应控制，而且还能用来实现自适应在线和实时辨识以及自适应状态观测。

本书著者沃昂·多莱·朗道 (I. D. Landau) 为法国国家科学研究中心研究大师 (Maître de Recherche au CNRS)、国立格勒诺布尔理工学院教授。在他从事自适应控制长达十五年的开创性研究中，成功地建立了在超稳定性理论上设计模型参考自适应系统的整套体系的方法和理论分析，并应用于工程实践取得了卓著的成效。本书是 I. D. 朗道根据他自己的研究、包括他与他的学生们合作获得的理论成果与工程研制经验著述而成。到目前为止，本书是现代控制工程领域内模型参考自适应技术方面唯一的一部内容丰富的学术性专著。鉴于自适应控制是我国国家科学规划中自动化学科方面列为优先重视发展的分支之一，开设此课的高等院校日益增多，因此把本书译成中文出版无疑是很有价值的。

本书的翻译工作始终受到朗道教授热情的支持与协助。一九八〇年秋我在同济大学讲授研究生课程“自适应控制”时，即蒙朗道教授寄赠他新出版的这本书给我备课使用。随后即在朗道教授充分支持下着手把本书译成中文。后来他又接受我建议，为本书中译版增加了新的内容——“模型参考自适应控制器与随机自校正调节器的统一处理”。这部分内容是本书原版问世后新近几年内自适应控制在理论上的新发展，也是著者近年中进行的重要研究成果；它作为本书原有篇幅的扩充，使本书更臻完美。

科学院学部委员、中国自动化学会付理事长、上海交通大学张锺俊教授对本书翻译给予很多指导与帮助，厦门大学计算机科学系主任李文清教授为本书四个数学性附录和增篇的译稿进行了精细的校阅和修改，这些对提高本书的翻译质量起了重要作用。

对原书中些微笔误和印刷错误，译者在译本中已予改正。并把所有这些更正抄送著者审核，故不再加译注。本书中出现欧洲诸国人名较多，为便利阅读，对于出自法、德、英、俄语的人名按该语发音加了汉译；对于其它北欧、东欧国家的人名则参照西德 Der Große Buden 第六卷发音辞典加了切合原音的汉译。

前 言

当对被控过程的参数了解得不多或者这些参数在正常运行期间有变化时,设计高性能的控制系统通常需要使用自适应控制技术。在各种可以选用的方法中,模型参考自适应系统(MRAS)看来是能够实现自适应控制系统的最可行的方法之一。这种自适应控制系统的首要特征就是有一个所谓参考模型构成系统的一个组成部分,参考模型能以各种形式在系统中出现。

本书详细论述了各类模型参考自适应系统、相应的设计方法(用统一的观点)及其在有关场合下的应用。

可能使用模型参考自适应系统的基本控制问题是:(1)自适应模型跟随控制,(2)在线和实时参数辨识,以及(3)自适应状态观测。在第一种情况中,参考模型规定了所要求的控制特性。在第二种和第三种情况中,参数需要辨识的过程或者状态需要观测的过程起参考模型的作用。

当把稳定性考虑作为问题表述的基础时,无论在哪种情况下,各种设计问题都能够从统一的观点来处理。在解这些问题时,突出的重点放在正性和超稳定性概念的应用,这些概念在系统理论中是比较新的和成功的概念。为了保持叙述的完整性,对模型参考自适应系统的其他设计方法也作了简略的回顾和评价。在处理各种具体问题时,作者试图让读者分享他对各种设计的阐述和合理性分析两方面的实践经验。

作者希望本书对那些面临设计自适应控制系统任务的工程师将引起特殊的兴趣,在本书中详细介绍的设计举例及实例研究对他们会有所帮助。本书也打算作为研究生学习自适应控制技术课程的教科书。由于本书论述了模型参考自适应系统领域内的大部分新近的发展,所以作者希望,研究人员能感到把本书作为一本基本参考书以及作为在自适应控制领域中进一步研究的出发点都是有益的。

作者假定读者熟悉线性控制系统理论、线性系统的状态空间表示、线性微分方程和差分方程,以及矢量和矩阵运算。对非线性时变系统理论和基本的稳定性概念有些了解将是有帮助的,但并非绝对必须。为完备起见,理解本书所需要的稳定性、正性及超稳定性等专门的基础知识包括在本书的附录内。

在叙述本书所涉及的题材时,我们不得不在归纳法和演绎法之间作出选择。归纳法是从简单的例子出发,然后叙述通常不是显而易见的、高维问题的一般结果。演绎法是首先用正规的格式导出一般结果,然后用例子进行解释。最后,作者选取了一个折衷的立场。当认为有必要时,首先讨论一些例子,以此来说明主要步骤和这些步骤的企图。本书的许多重要结果以正式定理的形式给出或归纳在表中。这样,它们能够很容易地从课文中查找出来。

每章之末所附的习题(除第一章外)使本书的材料更为完整,这样做的用意是使读者能够:(1)通过解数字例子对设计技术更为熟悉,(2)把概念和设计方法扩充到不很标准但却是实际的情况。

本书始终着重于模型参考自适应系统的解析设计方法并不意味着：(1) 这些方法在解决实际问题时是完全自足的，(2) 针对具体的应用场合，自适应算法的特定简化是不可能的。为了指导读者，本书包括了对模型参考自适应系统各种实际应用的详细评述。然而，如果没有从解析上对自适应技术有扎实的理解，在试图把自适应技术用于有困难的新场合时，使用者就不可能对自适应算法作出修改。

作者自 1971 年起发表的关于模型参考自适应系统的几篇综述论文[●]，以及作者自 1970 年起在国立格勒诺布尔综合工艺学院自动化系讲授的非线性以及自适应系统的研究生课程，是本书大部分材料从中发展出来的基础。此外，本书取材的某些重要部分是作者自 1969 年起在格勒诺布尔 ALSTHOM 研究管理处（自动化与电子学部）和国立格勒诺布尔综合工艺学院（自动化实验室）研究活动的成果。两处的研究都受到科学技术研究总评议会的部分资助。而基础性的预备研究是在 1971~1972 年期间，在国家研究委员会和国家科学院支持下，于国家航空与宇宙航行局 Ames 研究中心（系统分析部）作出的。本书是在格勒诺布尔综合工艺学院的自动化实验室完成的，在准备打印稿时，实验室也提供了宝贵的帮助。

沃昂·多莱·朗道

-
- [1] Les systèmes adaptifs avec modèle-théorie, mise en oeuvre, *Automatisme*, Vol. 15, no. 5, pp. 272-292, mai 1971.
 - [2] Model reference adaptive systems. A survey (MRAS-what is possible and why?), *Trans. ASME, Dym. Syst. Meas. Control*, Vol. 94, series G, pp. 119-132, June 1972.
 - [3] A survey of model reference adaptive techniques-theory and applications, *Automatica*, Vol. 10, pp. 353-379, July 1974.

目 录

引言	1
第一章 模型参考自适应系统引论	3
1.1 模型参考自适应系统的需要	3
1.2 自适应控制系统概述 (一些例子和定义)	7
1.3 模型参考自适应系统	11
1.4 结束语	22
参考文献	23
第二章 模型参考自适应系统的设计问题	25
2.1 模型参考自适应系统的数学描述	25
2.2 设计的假设	28
2.3 设计问题的提法	29
2.4 模型参考自适应系统等价表示为非线性时变反馈系统	30
2.5 结束语	32
习题	33
参考文献	33
第三章 解模型参考自适应系统设计问题的基本方法	34
3.1 以局部参数最优化理论为基础的设计方法	34
3.2 以使用李雅普诺夫函数为基础的设计方法	41
3.3 模型参考自适应系统设计中的超稳定性与正性概念	44
习题	50
参考文献	50
第四章 使用超稳定性和正性方法的连续时间模型参考自适应系统设计	52
4.1 用状态方程描述的模型参考自适应系统设计	52
4.2 仅利用输入与输出测量的模型参考自适应系统设计	61
4.3 各种模型参考自适应系统设计方法的比较	80
习题	82
参考文献	84
第五章 离散时间模型参考自适应系统的设计	86
5.1 引言	86
5.2 离散时间模型参考自适应系统的设计——一个例子	87
5.3 用差分方程描述的离散模型参考自适应系统	92
5.4 用状态空间方程描述的离散模型参考自适应系统	111
5.5 仅利用输入与输出测量的离散时间模型参考自适应系统设计	114
5.6 结束语	115
习题	115
参考文献	117

第六章	自适应模型跟随控制系统	118
6.1	引言	118
6.2	线性模型跟随控制系统 (完全模型跟随控制问题)	119
6.3	用状态空间方程描述的自适应模型跟随控制系统	122
6.4	仅利用输入与输出测量的自适应模型跟随控制系统设计	131
6.5	自适应模型跟随控制系统的实施问题	142
6.6	实例研究: 直流电传动的自适应速度控制器	144
6.7	实例研究: 飞机的纵向控制问题	148
6.8	结束语	149
	习题	151
	参考文献	152
第七章	使用模型参考自适应系统的参数辨识	155
7.1	引言	155
7.2	使用模型参考自适应技术的连续时间辨识器	157
7.3	离散时间过程的递归辨识器	167
7.4	实例研究: 静态直流-交流变流装置的实时辨识与自适应控制	177
7.5	实例研究: 离散线性定常过程辨识的几种递归算法的比较	179
7.6	结束语	183
	习题	184
	参考文献	185
第八章	同时进行自适应状态观测和参数辨识	187
8.1	引言	187
8.2	线性渐近状态观测器	187
8.3	自适应状态变量观测器和辨识器的设计	190
8.4	结束语	202
	习题	203
	参考文献	205
附录 A	稳定性	206
	参考文献	208
附录 B	正性动态系统	209
B.0	引言	209
B.1	复变量的正实函数 (矩阵)	209
B.2	连续的线性定常正性系统	211
B.3	连续的线性时变正性系统	214
B.4	离散的线性定常正性系统	215
B.5	离散的线性时变正性系统	217
	参考文献	219
附录 C	超稳定性	221
C.1	超稳定性问题	221
C.2	超稳定性的一些定义	222
C.3	超稳定性的主要结果	223

C.4	超稳定方框组合后的性质	224
	参考文献	225
附录D	一个积分不等式的解	226
D.1	连续情况	226
D.2	离散情况	231
	参考文献	232
增篇	模型参考自适应控制器与随机自校正调节器的统一处理	233
	摘要	233
	1. 引言	233
	2. 模型参考自适应控制器和随机自校正调节器的基本原理	234
	3. 在确定性与随机环境中结合讨论线性跟踪与调节	237
	4. 确定性与随机模型参考自适应控制的结构与目标	242
	5. 参数自适应算法	244
	6. 确定性和随机模型参考自适应控制的收敛性分析	248
	7. 应用	254
	8. 结论	255
	附录	255
	参考文献	257

引 言

第一章是模型参考自适应系统的引论。这一章的第一个意图是使读者熟悉将在本书中使用的各种概念、术语和方框图。这一章的第二个意图是诱导读者研究模型参考自适应系统，为此我们概括地指出了这些系统是如何发展的以及在什么地方已获得应用。

在第二章中叙述模型参考自适应系统的设计问题，开始时提出各种类型模型参考自适应系统的数学描述，接着就设计的假设，以及将模型参考自适应系统等价表示为一个非线性时变反馈系统等问题作出讨论。

第三章借助于一些例子简略地介绍了设计模型参考自适应系统的三种基本方法。按照它们出现的年代次序为：（1）以局部参数最优化理论为基础的设计法、（2）以李雅普诺夫函数为基础的设计法、以及（3）以正性与超稳定性概念为基础的设计法。

第四章中详细讨论了应用正性与超稳定性概念设计连续时间模型参考自适应系统。分别在状态矢量能够利用或者只有输入和输出测量能够利用的情况下提出了各种设计方案。本章也包括了这种方法与应用李雅普诺夫函数的设计方法及应用局部参数最优化理论的设计方法的比较。

由于模型参考自适应系统是时变的非线性系统，将连续型的模型参考自适应系统的设计方法引伸到离散型不是显而易见的。此外，数字计算机的应用提供的潜力促进了发展特有的自适应算法，在实践中连续时间模型参考自适应系统中没有与之相配对的算法。由于这缘故，第五章专门用来叙述离散时间模型参考自适应系统的设计，也是应用正性与超稳定性概念。在这里详细讨论了具有时变增益的一类自适应算法，因为这类自适应算法在出现测量噪声时解自适应问题具有实际的吸引力。

在对各种类型模型参考自适应系统的基本设计作了介绍后，我们继续介绍这些设计在各种控制问题中的应用。

在第六章中，我们讨论自适应模型跟随控制系统的设计。由于我们把自适应模型跟随控制系统看作是线性模型跟随控制系统在被控过程的参数知道得很少或在运行中发生变化情况下的一种自然推广，所以，我们对每种情况总是从简要地回顾线性问题开始。我们讨论了在被控过程的状态矢量能够利用或者只有输入与输出测量能够利用的情况下的自适应跟踪的情况，以及自适应状态调节的情况，并把设计推广到离散的情况。我们也考察了实施方面的问题以及有关飞机控制问题和电驱动的自适应速度控制器两个实例研究。

第七章的主题是模型参考自适应技术在参数辨识上的应用，我们讨论了动态过程的连续时间模型和离散时间模型的辨识。我们细致地探讨了参数收敛对输入的要求的问题和测量噪声的影响。从辨识的角度对各种设计进行了比较。本章介绍了两个实例研究。

第八章专为叙述自适应状态观测器的设计。这种自适应观测器是线性渐近观测器的推广，它们还能够同时提供出参数的辨识。我们对几种设计作了介绍和评价。

本书备有四个附录。附录A对一些稳定性概念和李雅普诺夫函数作了简要回顾。附

录B整理了正性动态系统理论的一些基本结果。附录C整理了超稳定系统理论的一些基本结果。附录D给出了一种积分不等式的解,这些解是导出自适应算法的基石。

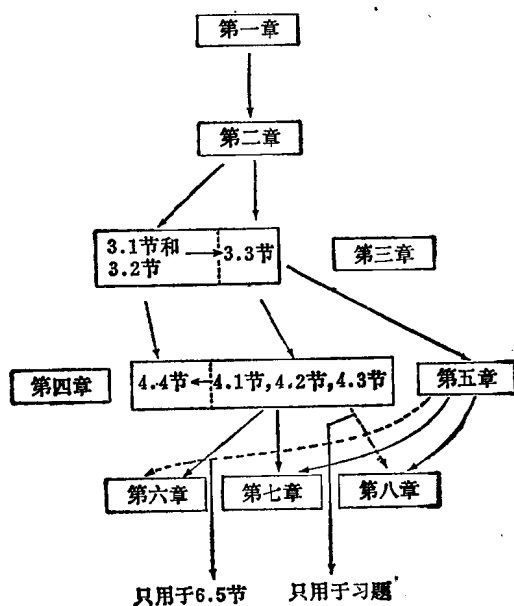
在每章的末尾列出了与正文直接有关的参考文献(在正文中加有方括号的文献编号)。

因为本书是作为这个领域的一部全面论著而写成的,所以对某些特殊问题有兴趣的读者不必阅读课文所有各部分。事实上,从第三章开始,每一章可以独立地阅读,虽然有时要作一些参考,例如在读第六、七、八章时要参考第四章或第五章的结果。

对于那些对应用有兴趣的读者,初次阅读时我们建议按下列顺序:第一章、第六章和第七章的实例研究,然后读第二章,第三章(3.3节);随后是第四章或第五章,这取决于读者对连续型问题还是对离散型问题有兴趣;然后,根据读者所要解决的实际控制问题阅读第六章或者第七章、第八章。

对于一学期的研究生或高年级大学生课程,我们建议按下列次序:第一、二、三章(略去部分材料);4.1、4.2、5.1、5.5、6.1、6.2、6.3、7.1、7.2-1、7.3-1和8.3诸节(最后一节作为5.5节的应用)。

对于自适应控制的研究科目可以把四、五、六、七、八诸章作为参考。



各章节之间的逻辑关系

第一章 模型参考自适应系统引论

我们即将研究的自适应控制技术，既可以作为一类特有的自适应技术来引出，也可以作为通常的反馈控制为了能满意地解决某些具体实际问题的一种发展而引出。从作者的观点看来，这第二种做法更容易使人接受。为什么要提出**参考模型**和**模型参考自适应系统**的概念，以及这些概念是如何发展起来的，这将在 1.1 节中着重讲述。然后，为了能够把模型参考自适应系统纳入更广泛的自适应控制系统的范畴内，我们将在 1.2 节中对自适应控制系统作个非常简略的论述。并将突出普通的反馈控制系统和自适应控制系统之间的类似处与不同处。

在 1.3 节，我们将回过头来对模型参考自适应系统作更为详细的介绍。将给出它的基本定义、结构和分类。我们还将强调存在用于控制的模型参考自适应系统与用于参数辨识或自适应状态估计的模型参考自适应系统之间的对偶性。而有关模型参考自适应系统解决自适应控制问题的可能性则通过对遍及各个领域的若干应用的简介来加以说明。

1.1 模型参考自适应系统的需要

在一个很长时期内，如果不考虑**反馈原理**的应用，物理过程的自动控制是一门经验技术，它较多地从实践技巧而不是从科学基础得出。对更复杂和更高性能的控制系统的需要推动了系统化控制理论的发展。即使有了这样一个系统化的控制理论，在设计一个实际控制系统时往往仍然缺少某些其他的知识，例如对控制对象动态特性的清楚了解（即使是在统计意义上的了解）。

当对象的动态特性知道很少或是有大的不可预测的变化发生时，为了构成高性能的控制系统，已经发展了一类称为**自适应控制系统**的新的控制系统，它对这个问题提供了可能的解决办法。自适应控制的概念看来也是一个老概念，或许就像反馈概念本身一样古老，但是对这种类型的系统发生浓厚的兴趣还是从五十年代早期才开始。

为了使一个控制系统能“自适应”（就是说，当对象的动态特性发生大的并且不可预测的变化时，保证系统有良好的性能），已经提出了许多解决办法。其中有一类特殊的自适应系统——**模型参考自适应系统**（英文缩写为 MRAS）是在五十年代后期发展起来的。这类系统的主要革新之一是**参考模型**的出现，这模型规定了所要求的性能。在好几年里，参考模型曾是一个非常有争议的概念。然而，只要对线性控制系统设计问题和自适应控制问题作个细致的考察，就会很自然地引出参考模型的概念。事实上，参考模型的概念在很多情况下显出是非常有用的。为了对这些方面进行评论，现在让我们简略地回顾一下控制理论的发展。

在发展的第一阶段，控制理论（随同动态现象的数学描述）是通过在确定性环境下导出的线性定常微分方程发展起来的。在早期，许多重要结果是通过线性积分变换技术把控制问题变换到频域中而得到的。后来，在确定**最优控制策略**方面获得了辉煌的理论成果。在这个阶段，**状态变量**的概念在描述动态过程时显出是非常有用的。

我们来简单地介绍最优控制理论, 注意如果一个被控对象是由状态矢量微分方程

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (1.1-1)$$

所描述, 式中 $\mathbf{x}$ 是状态矢量, $\mathbf{u}$ 是控制输入, $\mathbf{A}$ 和 $\mathbf{B}$ 是适当维数的常数矩阵。则在某些假设下找到最优控制量 $\mathbf{u}$ (作为 $\mathbf{x}$ 的函数) 是可能的, 这最优控制量 $\mathbf{u}$ 使二次性能指标

$$J = \int_0^{t_1} (\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}) dt \quad (1.1-2)$$

为极小, 式中 $\mathbf{Q}$ 和 $\mathbf{R}$ 为正定矩阵 ($\mathbf{Q}$ 可以是非负定的), 上标 T 表示转置。必须随即作出下面几点评述:

1. 能够正确地用线性定常微分方程式描述的动态过程的数目是不多的。事实上, 对于线性定常假设, 例外的情况多于适用的情况。线性定常的描述仅是在状态矢量的稳态值附近对系统动态特性给出有价值的描述。

2. 我们已经假定, 控制系统所要求的性能可以由一个二次型性能指标完全确定, 表达式 (1.1-2) 中矩阵 $\mathbf{Q}$ 和 $\mathbf{R}$ 是给定的。在许多情况下, 这些假设远远不是显然可有的。

3. 方程 (1.1-1) 中引进了由矩阵 $\mathbf{A}$ 和 $\mathbf{B}$ 定义的动态参数的概念。这些参数极少能够直接地测得。

4. 构成最优控制规律需要得到全部状态矢量 $\mathbf{x}$ 。在许多情况下, 状态矢量的某些分量是不能够直接得到的 (或者这些测量的代价高得难以实现)。

为了讨论上面对控制系统设计的考虑所得出的结果, 让我们首先假定: 线性和定常这两个前提是有有效的, 对象的参数是已知的, 全部状态矢量是可以测得的。控制系统的设计者在具有计算最优控制律所必须的全部数学工具之后必须首先解决的一个重要问题是: 如何选取性能指标表达式 (1.1-2) 中的 $\mathbf{Q}$ 和 $\mathbf{R}$ 。当系统的维数增加时, 这个问题变得越来越复杂。而在大多数现实情况中, 除了使方程 (1.1-2) 所给出的性能指标极小之外, 我们还必须保证被控对象的状态和输入量随时间的变化满足某种动态性能。因为二次型性能指标表达式 (1.1-2) 没有包含被控对象的状态和输入量在每一瞬间变化的任何明显信息, 用 $\mathbf{Q}$ 和 $\mathbf{R}$ 来确定广泛采取的性能指标如上升时间、超调量和阻尼是很困难的。如果所希望的性能指标用一个称为参考模型[●]的理想化的控制系统的性能来规定, 我们就可以避免上述的困难。

如果 $\mathbf{x}_M$ 是接受控制信号 $\mathbf{u}_M$ 的参考模型的状态矢量, 我们需要设计一个控制系统, 使二次型性能指标

$$J = \int_0^{t_1} [(\mathbf{x}_M - \mathbf{x})^T \mathbf{Q} (\mathbf{x}_M - \mathbf{x}) + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}] dt \quad (1.1-3)$$

达到极小。从这个性能指标的表达式上, 权矩阵 $\mathbf{Q}$ 和 $\mathbf{R}$ 的意义显得更清晰了。依赖于对 $\mathbf{Q}$ 和 $\mathbf{R}$ 的选择, 对模型各个状态的跟随在精度上会有高有低, 但是对象各个状态的动态响应将由模型规定。

参考模型的使用可以是稳含的或是显含的方式。在第一种情况, 模型仅仅是用作控制规律的计算; 在第二种情况 (参阅图 1.1-1), 参考模型是控制系统本身的一个部分。我们可以看到, 在后一情况, 所要求的特性由参考模型状态的动态响应明显地规定; 定义为 $\mathbf{e} = \mathbf{x}_M - \mathbf{x}$ 的新状态矢量使我们得以在每一瞬间直接测量参考模型特性与被控对象

● 使用参考模型来实现线性最优控制系统的最早一篇可供利用的文献看来是参考文献[1]。

实际特性之间的差。即使在线性定常控制系统设计的早期阶段,在线性系统最优控制理论的范畴内,参考模型的概念已显示出是一个用来解决实际问题的很有用的工具。

现在,让我们把注意力转到状态测量的问题上。大家知道,如果有对象的参数为已知前提,那么不直接可测的状态能够用观测器技术重新构造出来。假定可以得到的测量(输出量)通过关系式

$$\theta_p = Cx \quad (1.1-4)$$

与对象的状态相联系,式中 θ_p 为输出矢量(其维数低于 x), C 不是方阵,图(1.1-2)给出了观测器的基本结构。事实上,在观测器技术中建造了一个对象的模型,模型与对象由同一个输入量所激励。用真实对象的输出与观测模型的输出之差经过适当的增益之后,作为一个附加的输入馈入观测模型以确保

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (x_M - x) = 0 \quad (1.1-5)$$

在这里,我们可以看到在图 1.1-1 所示的线性模型跟随控制(LMFC)系统与图 1.1-2 所示的线性观测器之间存在着对偶性。尽管它们的目的不同,它们的结构却是相似的。在两种情况中,我们都可以区分两个子系统:一个真实的对象和一个人工创造的模型。在两种情况中,都要求两个状态矢量具有相似的动态性能。为了达到这一点,状

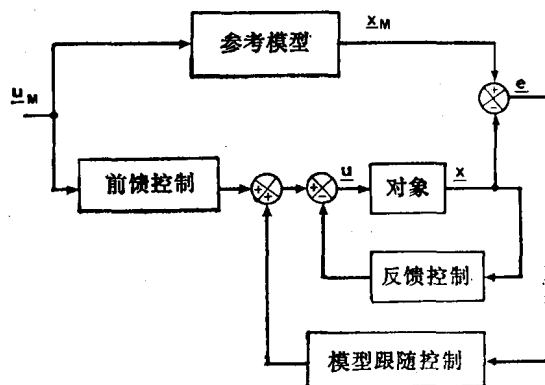


图1.1-1 线性模型跟随控制 (LMFC) 系统

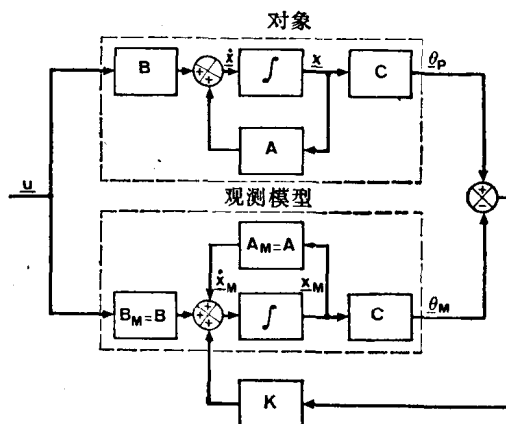


图1.1-2 线性状态观测器

态矢量或输出矢量之差被用来作为主要的信息来源。

现在,我们回到设计控制系统时更为重要的先决问题之一:如何决定被控对象的参数矩阵 A 和 B 。这就是众所周知的参数辨识问题。

假定 A 和 B 的结构是已知的,辨识的目的是找到 A 和 B 的数值,使得对于一组已知的输入量,具有这些参数的模型的性能(尽可能地接近)像真实对象的性能。我们容易看出,参考模型概念出现在辨识问题中时,对象对于被辨识的模型来说扮演了参考模型的角色。

从上面的考虑可以清楚看出,即使我们要设计一个最优线性控制系统,无论是对于规定所要求的特性或是对于不可达状态的观测,模型参考的概念都是非常有用的。而对系统辨识来说,模型参考的概念更显得是基本的。

事实上,正如早先指出的,在许多实际情况中,对象参数出现大的快的和不可预测的变化。当参数的平均值以足够精确度已知,参数可能的变化落在一个已知的随机模型

内,就能够用随机控制理论来设计控制系统。然而,实际上这种方法常常是难以使用的,这是由于:

对参数的平均值知道得很少;

找到参数变化的随机模型的困难、以及参数的变化太大,在这种情况下随机方法导致一个不良的特性。

现在让我们从设计者的观点来探讨参数变化的问题。目标是设计出一种控制系统,即使在动态参数变化时,这个系统也能保持它的额定特性。为做到这点,必须要:

或者设计一个反馈控制,使系统特性对参数变化不敏感;

或者在线测量(并且没有延迟)对象参数并相应修改控制规律的参数;

或者将所要求的性能指标(例如,这对应于参数的额定值)与实际的性能指标进行比较并由此信息来修改反馈控制规律。

第一种方法导致了在称为**控制系统敏感性**的领域内做了大量的工作。仅当对象参数相对于它们的额定值发生小的变化时,这种方法才能获得有价值的结果。第二种和第三种方法导致自适应控制系统的实现。

我们准备在这一点上详细讨论,却必须指出,第二种方法有几个限制,其中之一是在决定对象参数时存在延迟,(在大多数情况中)它将使自适应作用缓慢。

第三种方法使我们易于理解自适应控制的意义及其相对于惯用的反馈控制的特点。事实上,两者都是反馈系统,但是自适应控制系统具有一个附加的反馈环,它不是作用在状态变量上,而是作用在一个抽象变量上;这个抽象变量就是利用性能指标估算出的系统特性。要求的性能指标与测得的性能指标之间的差通过自适应规律作用到反馈控制环的参数或者到被控对象的输入,以保持实际的性能指标接近要求的性能指标。

因此问题就在于决定**自适应规律**(犹如在反馈控制中的“控制规律”),在环境出现变化时,自适应规律使我们能够保持性能指标接近于要求的性能指标。

一个自适应控制系统的行为依赖于用来度量系统性能的性能指标。例如,如果二次型积分判据用来作为性能指标,那末自适应作用就只能在估算性能指标所必须的某个滞后时间 ΔT 之后才被完成。在这里就产生了问题:

是否可能同时测量系统性能?这问题的回答是肯定的,只要采用包含一个参考模型的自适应控制系统。

这样的—个自适应系统示于图 1.1-3。我们已经在前面看到,参考模型(它是一个最优系统的显式实现)的状态与对象的状态之间的差在每个瞬间是要求特性与实际特性之差的一种量度。在这情况中,误差矢量 $e = x_M - x$ 不仅用来消除对象的状态变量与模型的状态变量之间的差,正如在线性情况中一样。当对象参数的值不同于在设计线性控

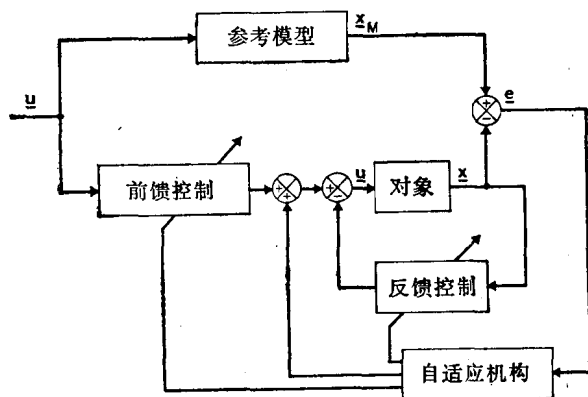


图1.1-3 含有一个参考模型的自适应控制系统
(自适应模型跟随控制系统)

制系统时所用的额定值时, 误差矢量也用来修改控制规律的参数, 或用来产生一个辅助的控制信号。

当对象的参数掌握得很少或者经受很大变化时, 在建立观测器时也需要采用自适应方案。对这种情况, 对象的输出与观测模型输出之差, 不仅像线性情况一样被用来构成观测模型的附加输入, 而且还用来调整观测模型的参数使得理想线性渐近观测器的性质

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (x_M - x) = 0 \quad (1.1-5)$$

得以保持。在这种情况下, 我们就有了具有模型参考自适应系统结构的一个自适应观测器, 它具有下面两个有趣的性质:

它确保被观测的状态矢量收敛于对象的状态矢量, 而与观测模型的初始值无关;

在某些条件下, 它允许我们能够决定对象的动态参数 (在自适应的作用下, 观测模型的参数将收敛于对象的参数)。

这种类型的自适应观测器称为具有可调模型的辨识器和观测器。我们得出结论: 模型参考自适应系统起了对使用积分二次型性能指标的最优线性控制系统的合理补充作用, 使我们得以更有效地对付实际问题。

事实上, 模型参考自适应系统是在使用积分二次型性能指标的线性最优控制理论充分发展之前出现的。

我们认为模型参考自适应系统的起源在于把人类行为的自适应反应以及因果律模型的概念移植到控制领域。因果律模型看来是清楚地显示出人的自适应特征的推理过程的一般模式。

例如, 为了描述物理的、社会的或生物的现象, 人们常常从唯象的模型结构出发, 而唯象的模型结构表征了原因与结果之间定性联系的特点。从这个结构出发, 人们尝试着决定能够使因果关系得到定量确定的那些参数。人们把这些模型与真实现象相比较, 而作为起着自适应机构作用的人修改这些参数值, 一直到获得一个符合客观真实的模型为止。这个工作过程 (一般模型的证实过程) 等价于具有可调模型的辨识。当人们期望对已经建立具有或多或少正确性的因果律模型的现象加以利用、或对这个现象施加作用时, 人们规定出一个要求的模型行为, 再对这些现象决定一个控制策略以使现象获得所要求的行为。充分掌握了这些模型的不完善性并充分掌握了可以改变所考虑模型有效性的扰动, 人们把获得的实际行为和所要求的行为进行比较。由这些观察, 人们试着修改控制策略以获得一个接近要求的行为。这种工作过程对应于自适应模型跟随控制系统。

1.2 自适应控制系统概述 (一些例子和定义)

自适应控制系统是作为避免当环境发生变化时, 控制系统的动态特性要变坏的一种尝试而发展起来的。反馈控制系统适合于消除状态扰动的作用, 而自适应控制系统适合于消除结构扰动对控制系统特性的作用。这些结构扰动实质上是由被控对象动态参数的变化所引起的。让我们来考虑这种情况的一些例子。

航空情况

一架飞机的动态特性依赖于高度、速度和飞机的构造。某些参数的变化率处在 10 (最小值) 到 50 (最大值) 之间。