

# 论自适应控制

(法)I. D. 郎道 著

康景利 译 吴宏鑫 校

北京理工大学出版社

# 论自适应控制

[法] I. D. 郎道 著

康景利 译

吴宏鑫 校

北京理工大学出版社

(京)新登字 149 号

## 内 容 简 介

I. D. LANDAU 先生 1979 年出版的《自适应控制——模型参考方法》一书已成为世界各国从事自适应控制工作的经典著作。本书是他的又一本简洁而精辟地论述自适应控制的著作。主要内容有自适应控制原理、计算机自适应控制、参数的自适应算法、过程模型的实时辨识和线性系统的自适应控制。

本书可作为中高级研究人员的参考书,更适合作为学习自适应控制的本科生和研究生的参考书。

I. D. LANDAU

Commande adaptative

• aspects pratiques et théoriques

MASSON

Paris

1986

## 论自适应控制

[法] I. D. 郎道 著

康景利 译 吴宏鑫 校

\*

北京理工大学出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京理工大学印刷厂印刷

\*

850×1168 毫米 32 开本 2.5 印张 63 千字

1992 年 2 月第一版 1992 年 2 月第一次印刷

ISBN7-81013-487-6/TP·43

印数:1—2300 册

定价:2.75 元

## 译者前言

本书作者是法国的 I. D. LANDAU 先生,他是世界自动控制界的知名学者。译者 1989 年 5 月至 11 月在法国从事学术交流和技術合作期间,与 LANDAU 先生有很多交往,他送给译者两本他近期出版的书。其中的《论自适应控制》是他多年来从事自适应控制研究工作的心得所现。写得深入浅出,言简意赅。译者提出要将这本书译成中文出版时,他对此举非常高兴。译稿于 1989 年 8 月底就已完成,因故拖至今日才出版。但书中的内容对中国读者,特别是对学习和从事自适应控制的青年读者来说仍然很有参考价值。

法国的自适应控制理论和技术研究一直处于世界的前列,他们在如下两个方面取得了重大进展:一方面,理论研究的方向是发展高性能的自适应控制算法和新的分析方法;另一方面,在实践领域中已愈来愈广泛地将小型和微型计算机应用于自适应控制。普通自适应控制系统、自适应控制系统的实施和多变量自适应控制、如何将研究成果向工业界转移、如何使硬件和软件配合起来发展等都是他们的重要研究课题。LANDAU 先生在本书的开头特意引用了一句名言:“简单的东西总是好的,繁琐的东西是不能用的。”这涉及自适应控制研究的方法论问题,也关系到自适应控制的发展方向问题,很值得我们深思。

航空航天部 502 所吴宏鑫研究员对全书做了认真审校。北京理工大学蔡季冰教授对译稿做了全面审读。北京理工大学王丽萍老师、研究生张志勇和刘民同学为本书的出版做了很多工作,在此表示衷心感谢。

康景利

1991 年 1 月 10 日

## 主要符号说明

$t$ ——连续时间或规整化离散(就采样周期而言)时间

$k$ ——规整化离散时间

$u(t), y(t)$ ——过程的输入和输出

$e(t)$ ——高斯白噪声

$q^{-1}$ ——延时算子( $q^{-1}[y(t+1)]=y(t)$ )

$z$ —— $z$  变量

$A(q^{-1}), B(q^{-1}), C(q^{-1})$ ——用变量  $q^{-1}$  表示的多项式

$d$ ——采样系统的延时(是采样周期的整数倍)

$\hat{A}(t, q^{-1}), \hat{B}(t, q^{-1}), \hat{C}(t, q^{-1})$ ——在  $t$  时刻多项式  $A(q^{-1}), B(q^{-1})$  和  $C(q^{-1})$  的估计量

$\hat{a}_j(t), \hat{b}_j(t), \hat{c}_j(t)$ ——多项式  $A(q^{-1}), B(q^{-1}), C(q^{-1})$  的系数估计值(它们构成了多项式  $\hat{A}(t, q^{-1}), \hat{B}(t, q^{-1}), \hat{C}(t, q^{-1})$  的系数)

$\theta$ ——参数向量

$\hat{\theta}(t)$ ——参数向量的估计值

$\phi(t)$ ——量测或观测矩阵

$F, F(t)$ ——自适应增益

$\varepsilon^0(t), \varepsilon(t)$ ——分别是先验和后验误差

$v^0(t), v(t)$ ——分别是先验和后验自适应误差

$A, M, F$ ——矩阵

$F > 0$ —— $F$  是正定阵

“简单的东西总是好的，繁琐的东西是不能用的”。

——Paul Valery

# 目 录

## 主要符号说明

<b>第一章 自适应控制原理</b> .....	1
§ 1-1 “自适应控制”的含意是什么? .....	1
§ 1-2 带反馈的常规控制和自适应控制的相似与差别 .....	3
§ 1-3 自适应控制技术 .....	4
<b>第二章 计算机自适应控制, 一个例子</b> .....	13
§ 2-1 引言 .....	13
§ 2-2 控制的计算(参数已知) .....	15
§ 2-3 自适应控制 .....	18
§ 2-4 与PI调节器的联系 .....	23
<b>第三章 参数的自适应算法(A. A. P.)</b> .....	25
§ 3-1 引言 .....	25
§ 3-2 问题的表述 .....	25
§ 3-3 递推的最小二乘算法 .....	26
§ 3-4 适应增益 .....	29
§ 3-5 参数自适应算法反馈作用的等效表示 .....	31
§ 3-6 参数自适应算法的一般结构和特征 .....	32
<b>第四章 过程模型的实时辨识</b> .....	36
§ 4-1 引言 .....	36
§ 4-2 模型的类型 .....	37
§ 4-3 递推辨识方法 .....	38
§ 4-4 输入信号的类型 .....	40
§ 4-5 被辨识模型的有效性 .....	41
<b>第五章 线性系统的控制</b> .....	42
§ 5-1 引言 .....	42

§ 5-2	控制模型	42
§ 5-3	独立指标的跟踪和调节	43
§ 5-4	与二次控制指标的联系	47
§ 5-5	最小方差调节和跟踪	49
§ 5-6	非最小相位的线性系统控制	52
<b>第六章</b>	<b>线性系统的自适应控制</b>	<b>58</b>
§ 6-1	引言	58
§ 6-2	直接自适应控制	59
§ 6-3	间接自适应控制	64

**结束语**

**参考文献**



# 第一章 自适应控制原理

## § 1-1 “自适应控制”的含意是什么？

自适应控制是一类应用技术的总称,它用于控制回路调节器的在线实时自动调节,为的是在控制过程的参数未知或变化(或既未知又变化)的情况下实现某些性能指标。

能够由自适应系统实现的典型任务如下:

- (1) 实施调节器的自动调节(效果:减少调节时间和改善一些性能)。
- (2) 在过程的不同作用点上调节器的最佳参数的自动确定。
- (3) 当过程的特性变化时,保持控制系统的某些特性。
- (4) 有可能实现比PID更完善、性能更好的调节器(这是作为自动调节的结果)。
- (5) 检测过程特性的非正常变化。这种变化反映在由自适应算法提供的参数值中。
- (6) 使用自适应控制系统形成新的工艺过程的设想以保证过程的正确功能。自适应控制技术已成功地应用在以下方面(列举的还不完全):
  - 原始材料的处理(粉碎机,搅拌机)
  - 干燥炉的控制和热处理
  - 水泥厂
  - 化学反应器
  - 蒸馏塔

- 造纸机
- 热交换器
- PH* 值调节
- 能源系统
- 船的自动驾驶
- 电机伺服系统
- 武器系统
- 机器人控制

当今形成的自适应控制“热”，一方面是由于它的完善性，另一方面是由于微处理器能支持它的实施。

目前一种实施自适应控制的方法论正在日趋成熟。尽管已有一些成功的、有意义的应用，但是这种技术的推广还是非常受限制的。

如果要问：什么时候使用自适应控制？我们可以回答：

- (1) 当在技术上是必要的时候。
- (2) 当在经济上是合算的时候。

涉及效益评价的问题时，要考虑如下的因素：

- 产品质量的改善
- 产量的增加
- 能量的节省
- 维修间歇的长短
- 能否避免非正常的过早检测
- 易于出售

## § 1—2 带反馈的常规控制和 自适应控制的相似与差别

人们经常提到如下的问题：

带有反馈的常规控制系统和自适应控制系统之间的区别是什么？

在使用固定参数调节器时，过程参数的不可测或未知的变化影响反馈控制系统的性能。引起这种变化，除了与调节变量的扰动有关外，还与作用在过程中的参数扰动有关。因此，我们应区分如下两种扰动：

- (1) 作用在调节变量上的扰动。
- (2) 与控制系统性能有关的参数扰动。

从本质上说，反应用在常规调节系统中为的是减少或消除作用在调节变量上的扰动。为此，我们需量测变量，并与理想值比较，将其差值加到调节器的输入端，使调节器产生相应的控制；从概念上来说，当存在参数扰动时，与保持控制系统的期望性能问题也是相类似的。首先应该定义一个性能指标(I. P.)，它是系统性能的一个量度(例如二阶传函中的阻尼系数就是表征系统性能的一种量度)。应该在量测这个指标后，再同期望的指标相比较。期望指标函数与量测到的指标函数间的偏差将通过“自适应机构”来处理。自适应机构的输出将作用在调节器的参数上或直接加到控制信号上，以使用一种适当的方法修正系统的性能。

自适应控制系统的原理如图 1.1 所示。

对于自适应控制系统我们想这样定义：

一个自适应控制系统需量测控制系统的某一性能指标(I. P.)，根据期望性能指标和被量测的性能指标间的偏差，自适应机构修改可调调节器的参数或控制信号，以便系统的性能指标保

持在所期望的范围内。

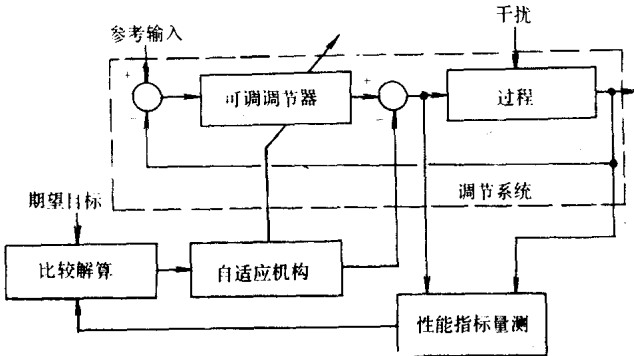


图 1.1

一个常规的反馈控制系统能减小作用在被调变量上的扰动作用。但是它的动态性能在参数扰动作用时将要变化。

一个自适应控制系统除了含一个有可调参数调节器的反馈控制回路外,还有一个涉及调节器参数的附加回路,为的是在出现过程的参数变化时保持系统的性能。这个附加回路也是一个反馈结构,其中被控变量就是控制系统本身的性能。

### § 1—3 自适应控制技术

当过程参数未知或随时间变化时,为了保证得到令人满意的性能,自适应系统的结构存在着不同的形式,但是其中必须要有量测性能的反馈回路。

例如:图 1.2 所示的具有“变增益”调节器的系统是处于开环状态。我们假设环境的变化与过程的参数之间存在着固定的关系,调节器的参数值是从环境量测中得到。在这个示意图中,由调节器参数改变产生的对性能的修正不是通过量测和与期望的性能的比

较而产生的。如果由于这样或那样的原因,环境的量测值与系统的动态参数间的关系变化了,则这个示意图中所示方案的性能可能就不行了。然而要注意到,这种类型的方案在大量的应用中是能满足要求的。同样应该强调指出,虽然原理简单,但它的实施却要付出很大代价,因为它要引入附加的传感器。相比之下,图 1.1 所介绍的闭环自适应系统就不要附加的量测,要求的只是附加的计算功能。

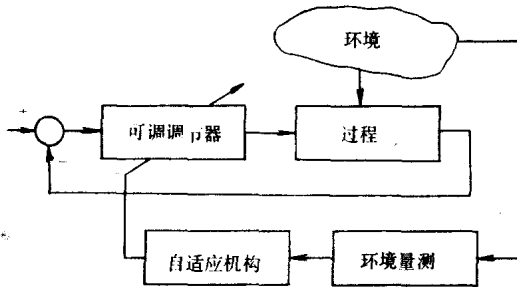


图 1.2

对于过程参数未知或时变的自适应控制策略的发展,有三种途径:

- (1) 最优随机对偶控制
- (2) 自校正控制 (*Self Tuning Control*——S. T. C.)
- (3) 模型参考自适应控制 (*Model Reference Adaptive Control*——M. R. A. C.)

Feldbaum (1963) 提出了对偶控制。在这种控制情况下,未知参数被处理成为系统的附加状态变量,这样就吧一个非线性随机控制问题转换为一个非常简单的线性问题。调节器由一个非线性估计器组成,也就是它本身。对偶控制策略是在估计指标和控制指标最小化中间取一种折衷。不幸的是,这种技术太复杂,甚至各种不同的近似方法在使用时的计算也还是非常复杂的。然而这种方

法有一个技术上的好处：它可以用于理解和评价自校正控制和模型参考自适应控制的特性(请看 Åström 1983)。

#### 4. 自校正控制和模型参考自适应控制

模型参考自适应控制和自校正控制是用起来比较简单的两种自适应控制技术,在目前它们是唯一实用的。这两项技术很重要的共同点是在某些情况下它们有共同的方案。模型参考的方案最初是由 Whitaker (1958)提出来的,自校正控制方案是由 Kalman (1958)首先提出的。这些技术的早期应用要追溯到 70 年代初。它们发展的广阔基础是对各种线性控制策略的“代数学”观点的深入理解,并基于以下的基本假设:

对于所有的过程参数的可能值,我们假定存在一个结构形式给定的调节器,它能确保期望性能的调节。自适应环的作用就是为了在各种情况下确保找到这种调节器理想参数值。

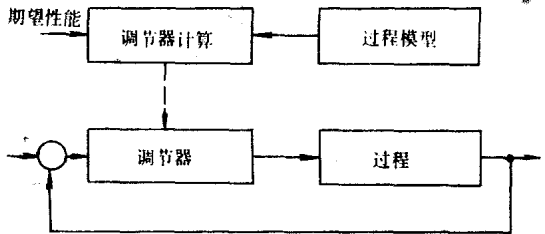


图 1.3

图 1.3 表示了一个调节器计算的基本原理(在确定性环境中)。我们假定了解过程的动态模型和所期望的性能,在很多情况下,反馈控制系统的预期性能可以用传递函数这样的术语详细说明(不论是为了跟踪还是调节)。在这种情况下调节器是针对给定过程模型进行计算,以使闭环系统用事先说明过的一个传递函数表征。但是这个传递函数是给定的,调节器的计算问题可以采用图 1.4 所示的形式。“参考模型”只是闭环控制系统的期望传递函数的一种体现。在这种情况下,计算为的是:

- (1) 在同样初始条件下,过程的输出和模型的输出之间的差同样是零。
- (2) 初始误差与一个预先设定的动态特性对消(这是调节器的动态特性)。

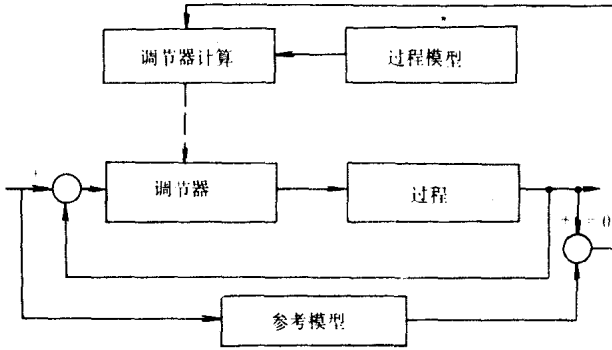


图 1.4

当过程参数是未知的或者是时变的时候,为了保证实现或保持期望的性能,由图 1.3 和图 1.4 的方案自然引出图 1.5 和图 1.6 所介绍的自适应控制方案。

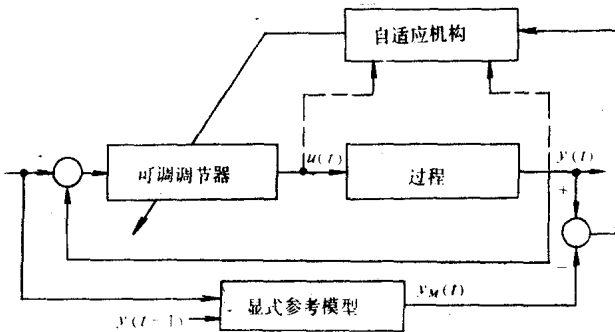


图 1.5

图 1.5 所给出的方案是图 1.4 中方案的一种扩展,把它叫做

“显式模型参考自适应控制”(显式 MRAC),过程输出和模型输出之间的差是实际性能和期望性能之间的差的一种量度。这个信息使得自适应机构(它还要得到其它信息)自动地调节调节器的参数。

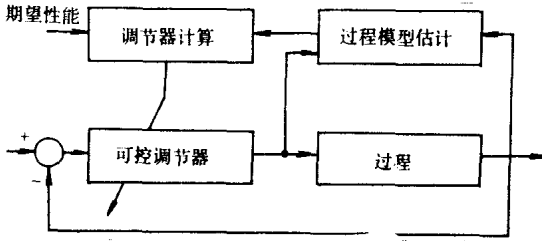


图 1.6

图 1.6 自校正控制的示意图是图 1.3 的自然扩展。为了计算,利用过程的输入和输出实时地估计(辨识)一个模型用以代替过程模型。考虑在线辨识方案结构时,图 1.7 给出了比较详细的示意图。事实上,为了估计过程参数,在每一时刻我们需要求出一个过程输出的预测值,预测的误差用于改变预报参数。每一步就是参数用于预报的计算。要注意到,自校正控制可作为分离定理的应用实例,或线性随机控制的确定性等价原理的应用实例。(Landau 1984)

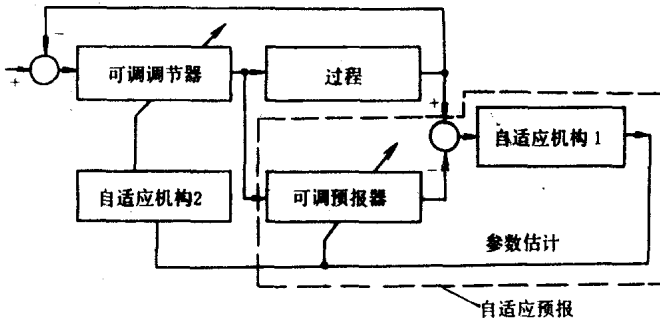


图 1.7



## B. 直接和间接自适应控制

图 1.5 给出的显式模型参考自适应控制示意图是直接自适应控制的一种方案,调节器的参数调节只是一个步骤;图 1.6 给出的自校正控制的方案是一种间接的自适应控制,因为调节器参数的适应要求经过两个步骤:

- (1) 过程模型的参数估计;
- (2) 根据估计的参数计算调节器的参数。

然而在很多种情况下,通过一种合适的推广的预报参数化法给出调节器参数。图 1.7 中的用于预报调节的参数自适应算法可直接估计预报器的参数。在推广的参数化法中,基本的思路是考虑了性能预报器参数和过程参数间的关系,为的是用预报器的参数项和预期的性能定出过程的模型方程,这样就得到图 1.8 给出的示意图。这种推广参数化方法,在第二章里将借助一个例子来说明。

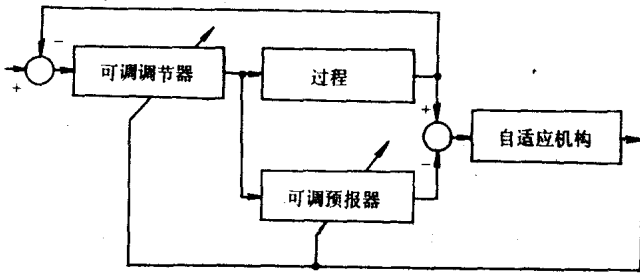


图 1.8

在间接自适应控制方案中,是根据过程的被估计的参数计算控制,这种控制同时用于过程和预报。如果我们推想预报器的输出与期望的性能应趋于一致,而不论估计的参数值是多少,那么预报误差就变成了实际特性与期望特性间的偏差的一个量度。在期望特性是以传递函数形式表征时,所求的控制将保证预报器的输出