

自适应逆控制

ADAPTIVE INVERSE CONTROL

[美] B. 威德罗
[以色列] E. 瓦莱斯

全新版权引进

Adaptive Inverse Control

刘树棠 韩崇昭 译

西安交通大学出版社

945

77276
W44

自适应逆控制

[美] B. 威德罗
[以色列] E. 瓦莱斯

刘树棠 韩崇昭 译

西安交通大学出版社
·西安·

内 容 简 介

自适应逆控制在控制系统和调节器系统设计与分析中是一种很新颖的方法。本书主要通过很多例子来说明对于系统中稳定的和不稳定的,线性的非线性的,最小相位和非最小相位以及多输入多输出和单输入单输出等控制对象,是如何应用自适应逆控制这种方法的。全书共 12 章,内容主要涉及控制和信号处理两个领域,对正文中的一些专门论题在书末通过 8 个附录做了介绍。

本书既可供从事控制系统和信号处理系统的科技人员使用,也可作为大专院校师生自适应逆控制课程和自适应信号处理课程的参考书。

“Authorized translation from the English language edition published by Prentice-Hall, Inc.

Copyright © 1996

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from the Publisher.

Chinese Simplified language edition published by Xi'an Jiaotong University Press

Copyright © 2000”

(Adaptive Inverse Control / Bernard Widrow, Eugene Walach)

本书中文简体字版由美国 Prentice-Hall 出版公司授权西安交通大学出版社出版发行,未经出版者书面许可,不得以任何方式复制和抄袭本书的任何部分。

版权所有,翻印必究。

图书在版编目(CIP)数据

自适应逆控制/(美)威德罗(B. Widrow),(以色列)瓦莱斯(E. Walach).
刘树棠,韩崇昭译. —西安:西安交通大学出版社,2000.5
书名原文:Adaptive Inverse Control
ISBN 7-5605-1219-4

I. 自… II. ①威…②瓦…③刘…④韩… III. 自适应控制 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 60661 号

*

西安交通大学出版社出版发行

(西安市咸宁西路 28 号 邮政编码:710049 电话:(029)2668316)

西安正华印刷厂印装

各地新华书店经销

*

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:27 字数:674 千字

2000 年 5 月第 1 版 2000 年 5 月第 1 次印刷

印数:0001~3000 定价:40.00 元

陕版出图字:25—1999—086 号

若发现本社图书有倒页、白页、少页及影响阅读的质量问题,请去当地销售部门调换或与我社发行科联系调换。发行科电话:(029)2668357,2667874

译者前言

“自适应逆控制”(Adaptive Inverse Control)是由美国斯坦福大学著名教授 B. Widrow 于 1986 年首次命名提出来的,当时在学术界引起很大的反响。在控制系统和调节器设计中这是一种很新颖的途径。它用被控对象传递函数的逆作为串联控制器来对系统的动态特性作开环控制,从而避免了因反馈而可能引起的不稳定问题;同时又能做到对系统动态特性的控制与对象扰动的控制分开处理而互不影响。这是一个十分可贵的特点。因此在系统动态特性的控制原理上自适应逆控制与传统的控制是截然不同的,反馈仅在自适应过程本身采用,但并不控制系统中的信号流动,从而在动态控制性能上得到改善。

这是集作者近 20 年的潜心研究成果,并在实际应用中获得很大成功之后于 1996 年出版的一本专著[其中最为成功的应用是美国能源部设在斯坦福大学的斯坦福直线加速器中心(SLAC)的电子束控制中的自适应噪声消除系统]。译者于 1998 年 9 月初在北京举办的“第七届北京国际图书博览会”上发现此书,随即索要到样书。我们发现,就基本理论和方法而言,自适应逆控制涉及到数字信号处理和控制两个学科领域;或者,更简单一些说,就是用数字信号处理的理论和方法来研究控制问题。我们两位译者就这两个领域来说都各自有所侧重,但都一致认为这两者之间应该是互通的,所以决定联手将该书译出奉献给读者,以期对自适应逆控制的研究能引起关注,尤其是在实际应用中能获得成功。

该书共分 12 章,内容涉及自适应逆控制原理与结构、对象扰动消除原理和方法,多输入多输出自适应逆控制系统和非线性自适应逆控制等,范围很广。为适应不同读者的需要,就正文中的一些专门论题附有 8 个附录。该书前言,第 1 至第 8 章由刘树棠译,其余 4 章和 8 个附录由韩崇昭译。全书由刘树棠负责统稿。

考虑到阅读本书读者的层次,全部专用名词、缩写词、文中所列人名等均不译出,书末附有缩写词对照表。全书专业术语的译名虽尽力作了统一,但毕竟出自两个人,且在各自的领域都有一些约定俗成的译法,难免有挂一漏万之处,敬请原谅。

该书所涉内容覆盖领域相当宽,加之文中所列举的诸多应用方面,更是多种多样。翻译过程中,译者曾尽力就有关专门领域的问题请教过该领域的专家学者,但限于译者水平,译文恐有不妥之处,欢迎读者批评指正。

刘树棠 韩崇昭
于西安交通大学
1999 年 9 月 1 日

前 言

自适应逆控制在控制系统和调节器的设计中是一种很新颖的方法。在美国斯坦福大学(Bernard Widrow)研究室历经 20 多年的研究所形成的想法,提出了利用一个其传递特性是欲被控制对象特性的逆的串联控制器来达到系统动态特性的开环控制问题。该控制器是自适应的,并将其调节到使对象及其控制器的总体动态响应达到最优。在其中是要用到反馈的,但仅限于自适应过程本身。和传统的控制不一样,自适应逆控制采用反馈不是为了控制系统中的信号流动,而是用于控制系统中的可变参数。不管怎样,传统的控制和自适应逆控制都利用反馈使对象输出的误差减到最小。

因为对象参数发生变化总是要比通过它的信号产生的变化慢得多,因此在一个自适应逆控制系统中的反馈其动作就可以相对地比较慢,仅仅需要与对象参数的变化速度保持一致就够了。其结果就是用自适应逆控制,系统的稳定和调节在许多情况下要比传统的反馈控制在整个控制信号带宽内实施反馈容易实现。

采用自适应逆控制对给定动态响应的实现往往比较容易;如果需要的话,甚至一些特殊的响应也可以得到。例如,能够控制一个稳定的振荡型对象,使整个系统对一个阶跃输入的响应,除了一个很小的延迟外,仍是一个非常好的阶跃,即具有很陡的上升前沿且无过冲;而这样一类响应是很难用传统的方法来获取的。

然而,对象动态特性的开环控制没有限制住或衰减掉内部对象扰动的影响。倘若对象遭到扰动,可以应用业已证明是最优的自适应噪声抵消技术使得该扰动的影响减到最小。为此目的已经设计出了一种特别的反馈结构,它可以消除对象的扰动而不改变对象的动态特性。动态特性控制和对象扰动控制成为两个单独的过程,一种控制的最优并没有牺牲掉另一种控制的最优。

这本书并不想去讨论控制中的所有问题,它只是处理在自适应控制和调节器系统设计和分析中的各种问题。在这样一个广泛的领域内,给出很多例子来说明对于如下的诸多控制对象:不稳定的^①和稳定的;非最小相位和最小相位;非线性和线性;以及多输入多输出(MIMO)和单输入单输出(SISO)等是如何应用自适应逆控制的。自适应逆控制以一种很自然的方式对各种对象类型都可给出模型参考控制(model-reference control)。

随着这项研究工作的深入进行,对我们来说重要的一点是,为了获得同行们的认可而需要向他们提出自适应逆控制的一系列构思和想法,尤其是因为这一方法对我们来说似乎是非常规的! 1983 年 6 月在美国旧金山市举行的第一届有关“控制和信号处理中的自适应系统”的 IFAC 专题研讨会(First IFAC Workshop on Adaptive Systems in Control and Signal Processing)上,我们宣读了一篇论文,题目是“Adaptive Signal Processing for Adaptive Control”。论文宣讲以后,就被 Karl Johan Åström, Jose Cruz 以及其他同行提出了一些问题,并作了一些评述和讨论。几天之后,我们在斯坦福大学应 Åström 教授的邀请,并与他以及 Gene Franklin 教授一起

^① 如果对象是不稳定的,首先就必须用反馈来镇定它。只要对象能被镇定,选择什么反馈不是一个关键问题。

用了几个小时仔细地审视了自适应逆控制的一些基本想法。这些讨论是极为有益的,并且从这些同行和朋友们所表现出的关注,对我们确是一个很大的鼓舞。

其后,Widrow 应 Åström 教授的邀请就这一论题写一篇文章,在他正筹划的于 1986 年 7 月在瑞典 Lund 举行的 The Second IFAC Workshop on Adaptive Systems in Control and Signal Processing 会上宣读,会上 Widrow 作了给“自适应逆控制”命名的主导性发言。会议期间,再次就这一论题所提出的问题,评述和讨论都是极为有益的。

在那个时期,Walach 在斯坦福大学已经完成了他的为期两年的 Chiam Weizmann 博士后基金项目,并回到了以色列,在 Haifa 的 IBM Scientific Center 供职。相距太远使得我们之间的合作实际上暂时搁置起来。因为我们都忙于其他的课题研究,所以大量的工作都没有做完而留在那里。

与此同时,在学术的范畴内,有关自适应逆控制的某些兴趣又兴起了。Brian Anderson 关注于自适应控制器的收敛问题,最初见于他 1981 年发表在 IFAC Conference on Systems Identification 上与 R.M. Johnstone 合写的论文“Convergence Results for Widrow's Adaptive Controller”。工作在以色列 Haifa 的 Technion 航空部的 Shmuel Merhav 教授其时正从事自适应逆控制在飞行控制问题中的应用。其他方面的研究项目也都随时引起我们的注意。

几年过去了。到了 1989 年,Walach 作为访问科学家在加州圣约瑟的 IBM Almaden Research Center 接受了一项临时性的任务,这才使得我们有可能利用许多周末和夜晚重新开始我们的合作。最初我们决定要写一篇关于自适应逆控制方面的“开创性”文章,但是这篇文章是愈写愈大,最后竟膨胀成这本书。这本书的内容包括了一些构思、数学方法和仿真结果。数学和仿真的目的是为了支撑这些构思。我们力求推理清晰而简单,有时是带启发性的,有用性和实用性都是至关重要的。

很多例子和仿真都涉及到扰动(噪声)的控制问题,这些基本上都属于信号处理方面的问题。然而,在控制领域也会遇到类似的问题。从数学的角度来看,这两者之间几乎没有什么不同。因此,这本书是既为控制领域的工程师们写的,也是为从事信号处理方面工作的工程师们写的;它既可以用作自适应控制课程的一本参考书,也可用作关于自适应信号处理课程的一本参考书。读这本书要求具备统计学和线性代数方面的一些知识。

只要浏览一下已有的自适应控制方面的文献资料,就不得不使人们对该方面研究中所用到的高深数学和问题的复杂性产生极深的印象;同时,也不得不让人怀疑这方面研究的大部分成果能否被需要设计和构造实际工作系统的广大控制领域的工程师们所理解和接受!在写这本书的过程中,我们既想到了那些科学家们,又考虑到那些将来要读这本书的工程师们。科学家们将拓宽他们的视野,并写出他们自己的远比我们更好的书和文章。我们希望工程师们拿起这本书,然后读一读它,并且在午后到实验室去,完成一个自适应控制系统并让该系统动起来,但愿你大彻大悟,受益匪浅!

在此,我们愿向这项研究工作的诸多赞助者表示感谢,他们是:Office of Naval Research (N00014-86-k-0718)的 Bill Miceli, The Department of the Army, Belvoir RD&E Center 的 David Poole 和 The Army Research Laboratory (DAAK70-92-k-0003)的 Don Torrieri, NASA (NCA2-389)的 Ellen Ochoa, The Electric Power Research Institute (RP8016-07)的 John Maulbetsch, Marty Wildberger 和 Dan Sobajic, National Science Foundation (IRI91-1253)的 Paul Werbos 和 Howard Moraff,以及 IBM 公司。非常感谢众多的、未知姓名的本书原稿的评阅者,

他们所给出的大部分建议都已被接受,这些对本书都是极为有益的。Steve Piche 仔细地阅读过这本书,并提出过很多有价值的意见,对此表示感谢。也要谢谢 Michel Bilello,他非常热衷于逆控制,并完成了大量的试验和仿真。Christine Lincke 为本书打印了原稿,Gregory Plett 为本书做了版面设计,Ming-Chang Liu 画了本书的全部用图,对他们的所有贡献都表示衷心地感谢。

Bernard Widrow

Eugene Walach

Stanford, California

Haifa, Isral

第 1 章 自适应逆控制一般概念

1.0 引言

自适应滤波技术已经成功地应用于自适应天线系统^[1~20],诸如信道均衡^[21~30]和远距离电话线路回波抵消^[31~39]的通信问题、干扰消除^[40~46]、谱估计^[45~47]、语音分析与合成^[58~60]以及许多其他的信号处理问题。这本书的目的是要表明如何利用自适应滤波算法来完成对未知的,甚至是时变系统的自适应控制的。

通常称之为“对象”的欲被控制的系统可能是具有噪声的,也就是说受到扰动,而且这些扰动在大多数情况下其属性可能是不清楚的。^①对象及其内部扰动可能是以一种未知的方式时变的;在某些情况下,对象可能甚至是不稳定的。对于这样一类对象,自适应控制系统要比固定不变的系统优越得多,因为自适应系统的参数可以调整到满足被控制对象的未知和时变的要求。自适应在控制领域找到了一个很自然的应用领域^[88]。

在过去的 20 多年中,在 Transaction of the IEEE Control systems Society, Automatica, I-FAC(International Federation for Automatic Control)期刊和会议论文集以及其他场合,有关自适应控制系统方面已经发表了几百篇文章。与此同时,大量的有关自适应信号处理和自适应阵列处理方面的文章出现在 Transaction of the IEEE Signal Processing Society, Antennas and Propagation Society, Communications Society, Circuits and Systems Society, Aerospace and Electronics Society, the Proceedings of the IEEE 等其他地方。在这些方面还出版了很多著作。这两种学派,自适应控制和自适应信号处理,几乎是各自独立地在发展着。大体说来,控制理论家们研究自适应控制是经由可变参数网络利用状态变量反馈来调节未知对象并控制它们的扰动。从事信号处理工作的人们一直致力于这些方面的研究,其绝大部分是涉及利用梯度算法对横向滤波器的权系数进行自适应,并将所得到的自适应滤波器应用到系统中去而不用反馈(在自适应过程本身的反馈除外)。从事信号处理研究的人们已经找到了对于他们研究成果的大量实际应用场所,而从事自适应控制方面研究的人们也是一样。

本书的目的不是要去填补这两大学派之间的缝隙,而是要用自适应信号处理的一套方法从另外一种角度来触及自适应控制中的某些问题。这一结果就是我们所说的“自适应逆控制”。

首先利用简单的自适应滤波方法对未知对象的特性进行直接建模(或辨识)作为入手来展开讨论,然后将所用方法稍作一点变化但以不同的结构来说明,类似的方法是怎样被用来作为逆建模(或者均衡,或者解卷积)使用的。可以用逆对象的模型来控制对象的动态特性。接下

^① 为了建立适当的控制,对于对象及其内部扰动特性的某些先验知识是需要知道的。例如,为了建立自适应模型,至少要求知道该对象暂态响应的大致情况。对象特性随时间变化快慢如何的一些设想也是需要的。对象扰动的某些知识,如在对象输出端扰动的功率电平也是有用的。但是,不需要知道对象及其扰动的详细情况。

来要说明在同一个自适应过程中如何利用正向模型和逆模型来使得对象扰动的影响减小到最小。在这一讨论中都假定对象是完全可控和可观察的,而且在一种准静态的意义上,对象是可以由输入-输出传递函数(尽管是一个未知数)来表示的,并且对象是稳定的(如果不稳定,事前就应施加镇定性反馈)。该对象既可以是具有最小相位的,也可以是非最小相位的。

在斯坦福大学经多年讲授这门课的基础上,自适应逆控制的基本思想已经确立。最早期的有关工作是在 Widrow 关于血压调节^[61]的一篇文章中提到的,稍后的工作见于在 Asilomar 会议上报道的几篇文章^[62,63]。由 Shmuel Schaffer 完成的博士论文是有关模型参考自适应逆控制的^[64]。Widrow 和 Stearns 合写过有关这方面的专门著作^[65]。包括自适应对象扰动消除在内的有关自适应逆控制方面的第一篇文章是由 Widrow 和 Walach 于 1983 年在旧金山市举行的 The First IFAC Workshop in Control and Signal Processing 会上发表的^[66]。第二篇文章是由 Widrow 于 1986 年在瑞典的 University of Lund 举行的 The Second IFAC Workshop on Adaptive Systems in Control and Signal Processing 会上作为主导性发言出现的。直到最近,有关逆控制和扰动消除方面几乎再也没有什么文章出现。近来,在神经网络文献中见到了几篇有关非线性自适应逆控制方面的文章^[95,96,97]。

1.1 逆控制

图 1.1 示出一种应用反馈的传统控制系统。系统自动检测被控对象的响应,将该响应与某一个期望响应相比较,再利用这个比较后的差去激励一个控制器,该控制器的输出用作对象的输入,以使得对象的输出紧紧跟随着这个期望响应。

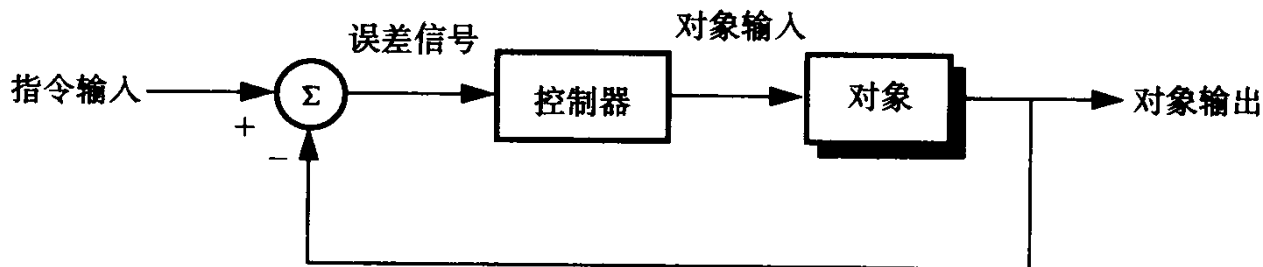


图 1.1 一种传统的反馈控制系统

图 1.1 系统具有单位反馈,往往称之为跟随系统,因为该系统的目的就是要求对象输出跟随着输入信号或指令输入。对象输出和指令输入信号之间的任何差别就是一个误差信号,它被控制器检测到,经由放大和过滤之后去驱动对象以减小误差。

采用反馈必须要很仔细,以防止不稳定并获得满意的动态响应。当对象特性是时变的或非平稳时,有时就有必要设计随对象而变的控制器。在进行这项任务中一个共同的目标就是要使误差的均方值最小。但是做到这一点一般是很困难的。如果已经知道了该对象随时间的变化特性,那么就有可能确定出最好的控制器随时间的变化特性。如果对对象一无所知,那么可能就要用一种辨识过程来估计出对象随时间的变化特性,然后再用这些特性来确定控制器随时间的变化特性。另外一种想法是将控制器参量化,改变这些参数直接使均方误差最小。用这种办法的困难是:无论控制器如何参量化,均方误差随参数值的变化会是一个没有唯一极值的函数;并且,如果控制器的参数增大到超过稳定边界的话,还很容易变成无界。

现在要做的工作的目的是要从另外一种角度来看自适应控制问题。要建立的自适应逆控制的方法在某种意义上涉及的是开环控制问题,并且是很不同于图 1.1 中的反馈控制方法的。我们试图要建立一种自适应控制的形式,它是简单的、鲁棒的、而且是精确的。借助于自适应滤波方面的一些知识,自适应逆控制是很容易理解、并在实际中是很容易应用的。

自适应逆控制的基本思想就是要用一个来自控制器的信号去驱动对象,而该控制器的传递函数就是该对象本身传递函数的逆。图 1.2 的系统说明了这一想法。该系统的目的就是要使得对象的输出跟随着指令输入。因为对象一般是未知的,这就要自适应或调节控制器的参数以得到一个真正的对象的逆。按照某一种自适应算法,用对象输出和指令输入之差的误差信号来调节控制器的参数以使该误差信号的均方误差最小。

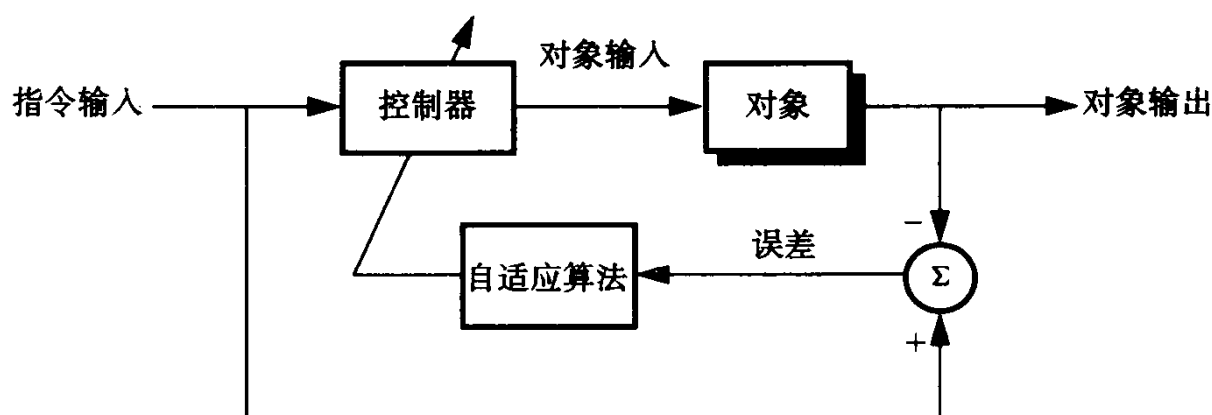


图 1.2 自适应逆控制的基本概念

参照图 1.2,该方框图中的控制器可以看作是一个具有输入和输出的滤波器。这个控制器具有可供调节的参数,其可调节性用横穿该方框的箭头来表示。可调参数的控制是用某一“自适应算法”来完成的,而该自适应算法又是由误差信号来驱动的。对自适应算法来说,其通常的一个目的就是使均方误差最小,而这个误差就是对象输出和指令输入之差。

比较一下图 1.1 和图 1.2 这两个系统,在第一种情况下,使均方误差最小是直接利用在形成对象输入信号的一个反馈过程中的误差信号来完成的,而在第二种情况下,误差信号则是在一个反馈过程中用来控制该控制器的参数,而且它并不直接反馈到对象的输入。第一种情况是反馈控制,而第二种情况则是前馈控制。在两种情况下,反馈都用来确保精确的系统响应。

如果将图 1.2 中的控制器自适应是为了使误差最小,那么该控制器就应该是对对象的逆,因此控制器和对象的级联就应具有一个组合传递函数,其增益为 1。

假设对象是线性的,而且变化很慢,所以可认为是准静态平稳的,还假设控制器已经收敛,并且也是线性的和准静态平稳的。对象和控制器的动态特性都可以用传递函数来表示,而这个控制器的传递函数就应是该对象传递函数的倒数。

如果对象含有内部延迟,那么在克服这一点上逆控制器可能有些难处,因为这就要求控制器是一个预测器。再者,如果对象是非最小相位(传递函数的零点在 s 平面的右半平面,或者在 z 平面的单位圆外)的话,那么逆控制器会要求有极点在 s 平面的右半平面,或者在 z 平面的单位圆外,这样的逆控制器一般是不稳定的。解决这些问题的方法将在第 5 章讨论。

图 1.2 的系统说明了自适应逆控制的基本概念。至于怎样让自适应算法去控制控制器的参数则是下面要讨论的问题。

有时要求的不是对象输出跟踪指令输入本身,而是要跟踪一个经延迟或平滑过的指令输

人,这时系统设计者一般应知道所用的平滑特性。这个平滑模型是很容易地能合并到自适应逆控制的概念中去的,这可以用图 1.3 来说明。在控制理论领域,平滑模型一般称为**参考模型**,因此图 1.3 的系统可以称为**模型参考自适应逆控制系统**。模型参考的思想是由 Whitaker 提出的,较早的参考文献是[89],最近的是[88]。

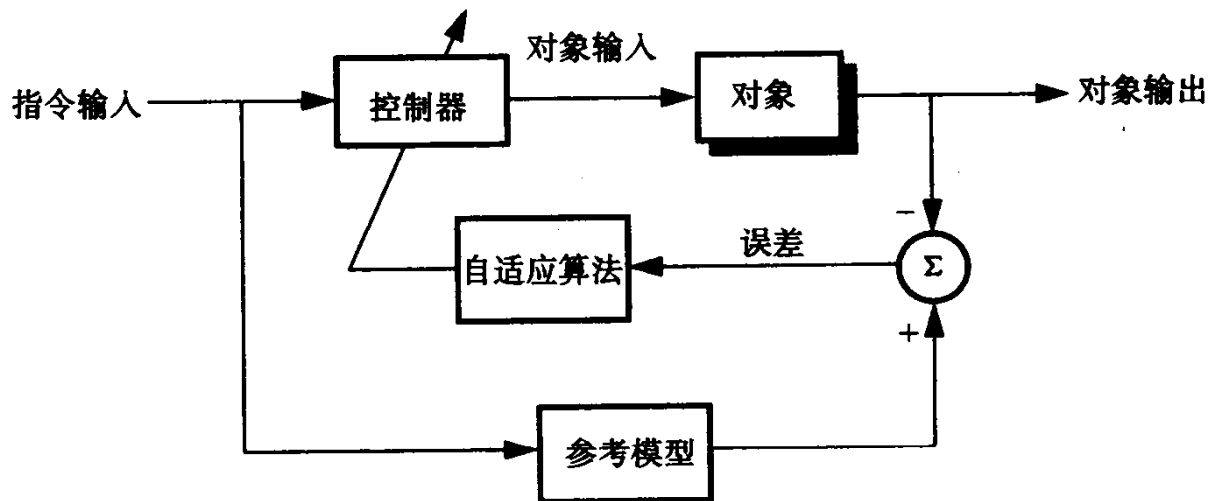


图 1.3 模型参考自适应逆控制

参考模型是要选择成达到设计者对整个系统所要求的相同的动态响应。由图 1.3 可见,这一结果还是将控制器自适应以使均方误差最小而得到。在这个情况下,控制器和对象的级联在收敛之后将有一个类似于参考模型特性那样的动态响应,控制器和对象传递函数的乘积将会非常近似于该参考模型的传递函数。

对自适应逆控制方法来讲,对象的噪声和扰动提出了一个问题。从对象输出回到对象输入没有反馈就会让内部对象噪声和扰动毫无抑制地出现在对象的输出端。对于消除噪声的各种信号处理方法都已成熟^[40~46],只要稍许作一些变化都可用于对象噪声和扰动的消除。图 1.4 给出了基本的方法。该方法既用了一个对象模型,又用了一个对象的逆模型。对象模型与对象具有相同的传递函数,而对象逆模型的传递函数则是对象传递函数的倒数。这些模型如何能得到将在以后讨论,暂且假设这些模型都存在。

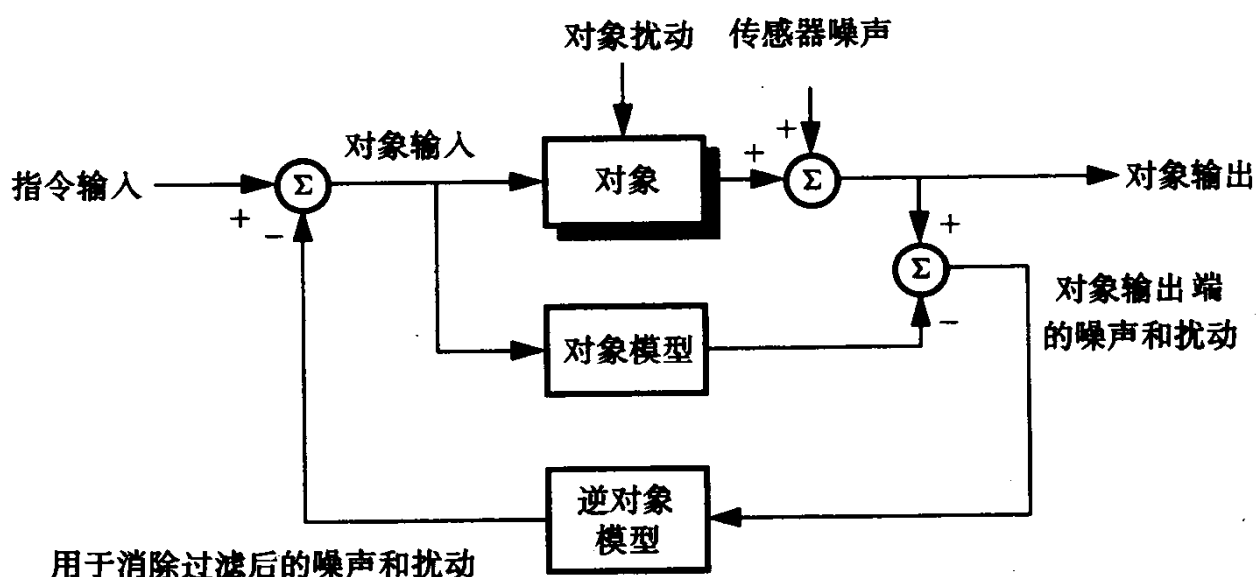


图 1.4 消除对象噪声和扰动

在控制方面的文献中,往往用在对象输入端的一个加性噪声来代表对象的扰动。用一个检测器或传感器来检测对象的输出,而该检测器或传感器也可能是带有噪声的。传感器的噪声往往用在对象输出端的一个加性噪声来代表。在图 1.4 的系统中,对象噪声和扰动是与对象的动态输出响应隔开的。对象输入既驱动对象,又驱动它的模型(它是没有噪声和扰动的),对象输出和对象模型输出之差就是对象的噪声和扰动,因为它们出现在对象的输出端。用对象输出噪声和扰动的和去驱动逆对象模型以产生经过滤后的噪声和扰动,并在对象输入中被减去,最终的效果就是在对象输出中消除噪声和扰动。

在差不多是理想的正向模型和逆模型条件下,可以证明,从对象传感器噪声的注入点到对象输出点的传递函数接近于零。这就意味着,对象噪声和对象扰动的和在对象输出端被大大衰减了。另外还能证明,甚至当对象噪声和扰动被扰动消除反馈消除的话,对象的动态响应还基本上保持不变。注意到这一点是很有趣的:利用理想的正向模型和逆模型,图 1.4 的系统将是一个非同寻常的反馈系统。当对象模型的动态特性完全与对象本身的动态特性一致时,主回路的直馈链路就将具有零增益。

图 1.5 示出的自适应逆控制系统同时包括了具有对象噪声和扰动消除特点的图 1.4 和具有模型参考控制特点的图 1.3。在一个这种类型的实际系统中,为了求得对象模型、逆对象模型和控制器,需要单独各自的自适应过程。

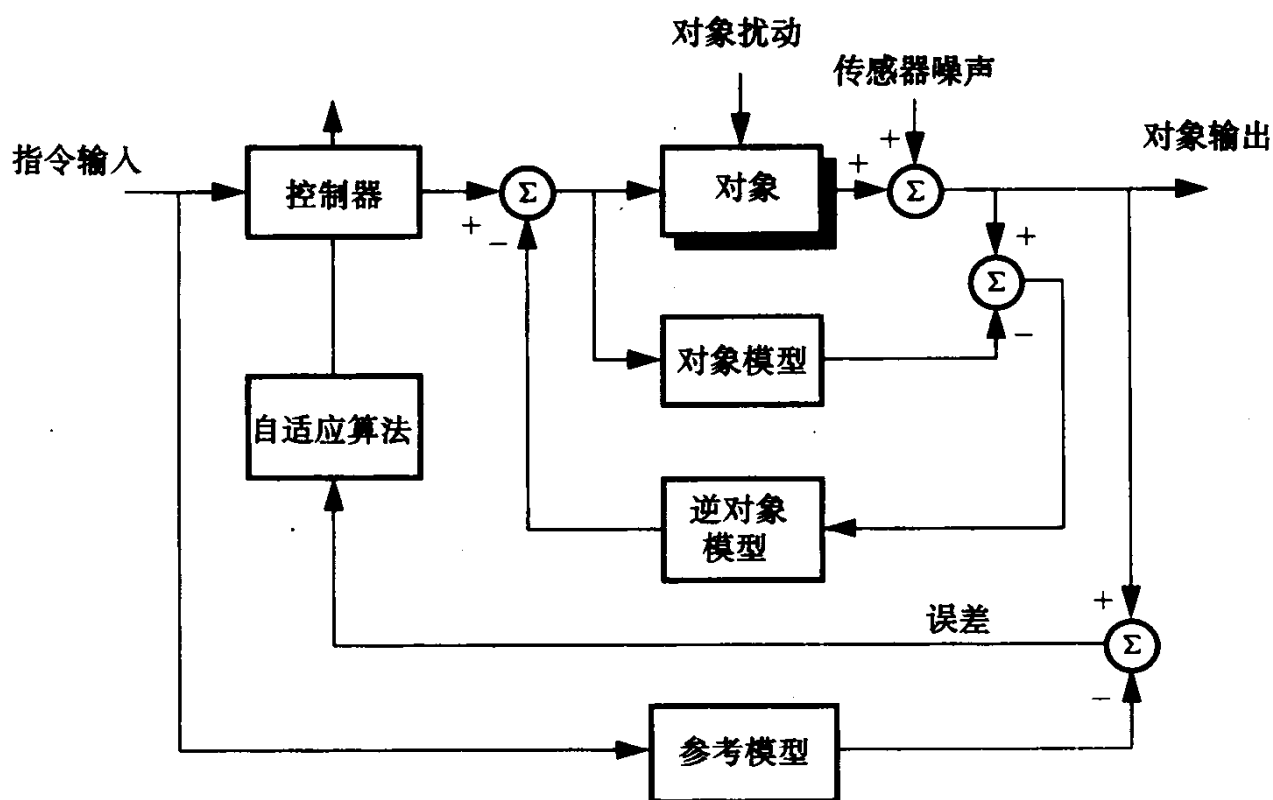


图 1.5 具有对象噪声和扰动消除的模型参考自适应逆控制系统

就传统的控制系统(如图 1.1 所示系统)而言,对象噪声和扰动的控制是用反馈来实现的。但是,一旦对噪声和扰动控制考虑反馈之后,对象的动态响应就必然要改变,因此在设计过程中为了既要得到好的动态响应,又要有好的噪声和扰动控制,一般总要求做一些折衷。

我们的方法是不同的,其中只涉及若干单独的自适应过程:(a)对对象动态响应的控制;(b)对对象噪声和扰动的控制,分别作自适应控制。以这种方式处理问题,相应的自适应子系统就相对比较简单,容易分析,并容易优化。

在总体的框架上,图 1.5 的系统代表了我们对自适应控制问题所采用的办法。在本书余下的部分,将对图 1.5 中各个子系统的实现建立各种实用的自适应算法,并在总的控制范畴内,分析它们的性能,以及研究它们之间的相互影响。各种仿真结果用来验证理论,并说明它们的切实可行性。

1.2 自适应逆控制的应用举例

这一节的目的是要说明自适应逆控制在几个控制问题中的应用。在某种意义上,这些问题本质上都是很典型的,并且在后续各章中都会从不同角度来讨论它们。这里我们不用做过多的解释就能看到,应用于几个典型问题的自适应逆控制技术的控制效果。

1.2.1 最小相位对象的动态控制

被控制的对象具有如下传递函数

$$\frac{s + 0.5}{(s + 1)(s - 1)} \quad (1.1)$$

这个对象是最小相位的,但是不稳定的。第一步是要用反馈来镇定它。图 1.6 示出了一个根轨迹图。从该图上很显然,采用图 1.7 的简单单位反馈系统,并将回路增益设置在 $\infty > k > 2$ 的稳定范围内就能使该对象稳定。对这个控制试验,回路增益设在 $k = 4$ 。这样,闭环传递函数是最小相位的,并在 s 平面的左半平面有两个极点。

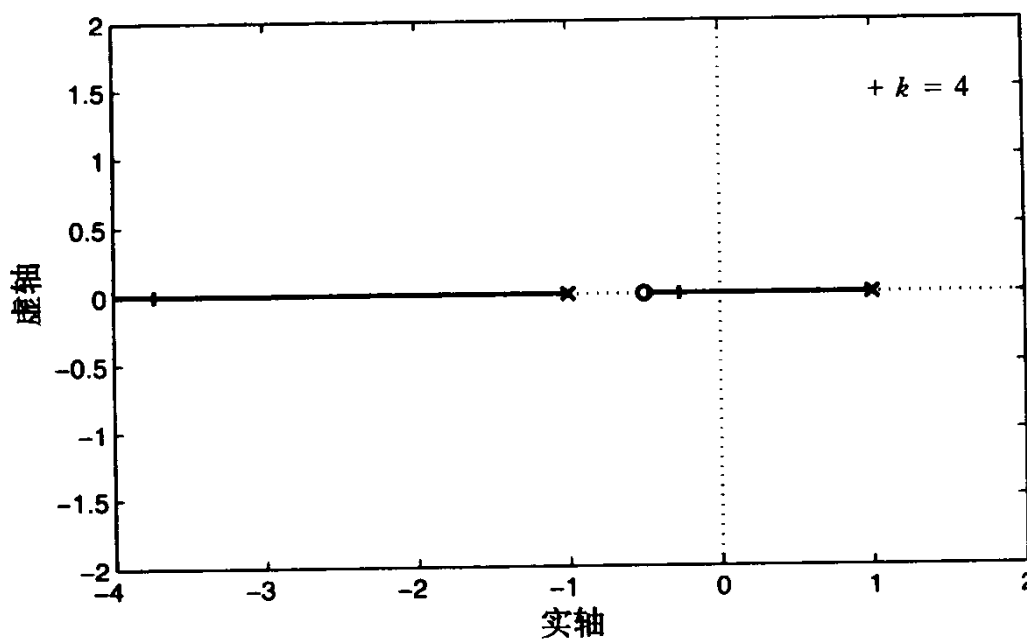


图 1.6 带有比例反馈的最小相位对象的根轨迹图

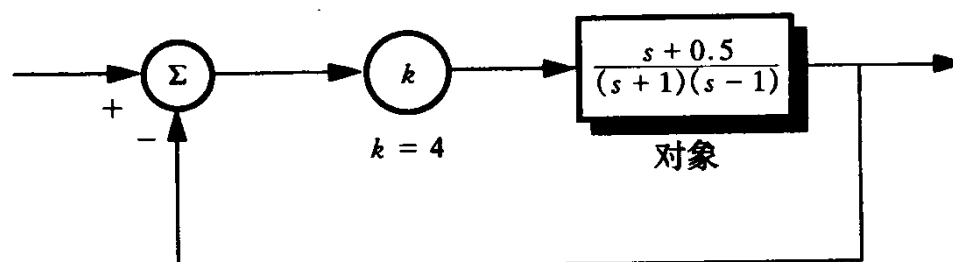


图 1.7 用 $k = 4$ 的比例反馈镇定的最小相位对象

这个对象以及它的镇定都是连续(模拟)系统,而在实际场合,自适应逆控制部分是离散(数字)的。一个完整的系统方框图如图 1.8 所示。它包括了必要的模拟到数字转换(ADC)和数字到模拟转换(DAC)部分。将指令输入采样,然后馈给逆控制器和参考模型。控制器的输出用一个零阶保持转换到模拟形式去驱动对象及其镇定回路。用于自适应逆控制器的误差信号是离散的,它就是参考模型输出和已采样的对象输出之差。图 1.8 的系统就是在图 1.3 系统的基础上进一步完善后的模型。

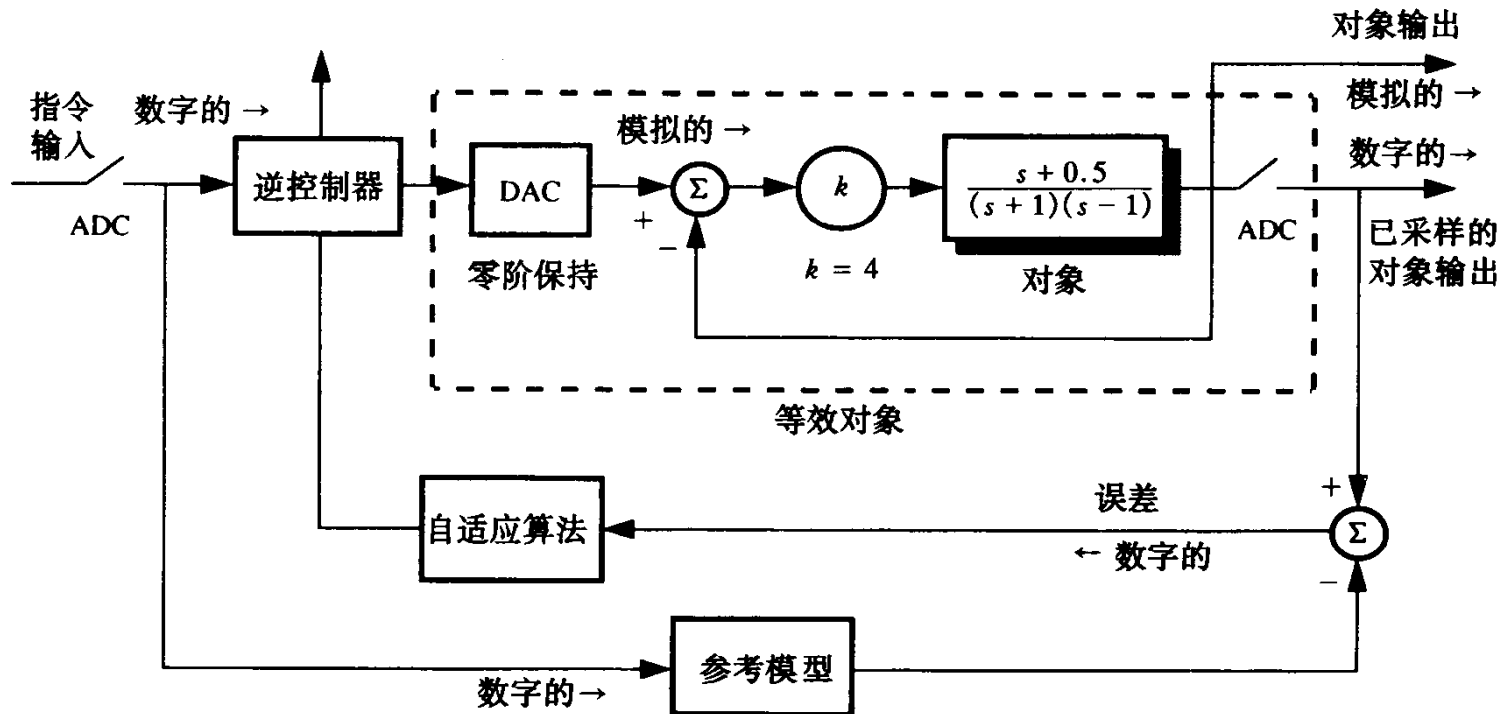


图 1.8 一个镇定了的最小相位对象的模型参考自适应逆控制

在图 1.8 中,从数字输入到 DAC,再到对象的已采样输出端,将它定义为离散化的等效对象,是一个离散传递函数。这包括示于图 1.7 的对象及其镇定回路,DAC 和在对象输出端的采样器。这个离散化的等效对象的脉冲响应示于图 1.9,选取的采样率是每秒 10 个样本。

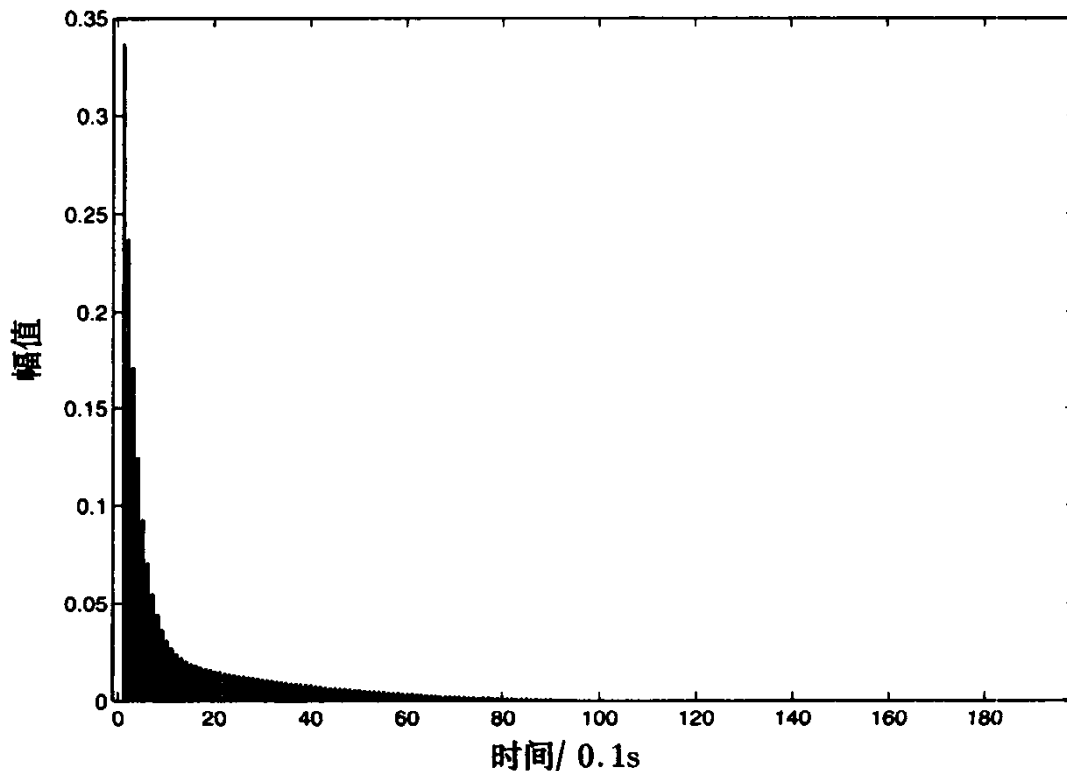


图 1.9 离散化等效最小相位对象的脉冲响应

本试验所选的参考模型是时间常数为 1s 的单极点数字滤波器, 它的脉冲响应如图 1.10 所示。这个系统的目的就是: 从指令输入的样本起到对象输出样本为止这样一个总的系统响应, 在最小均方的意义下, 尽可能地接近于参考模型的响应。已采样的指令输入是一个一阶 Markov 过程, 它由白噪声经时间常数为 1s 的单极点数字滤波器过滤而产生。控制器容许有 100 个权系数, 对于具有这么多权系数的控制器其理论上最优脉冲响应如图 1.11 所示。图 1.12 是逆控制器经学习过的脉冲响应, 注意一下它与最优脉冲响应之间的类似。

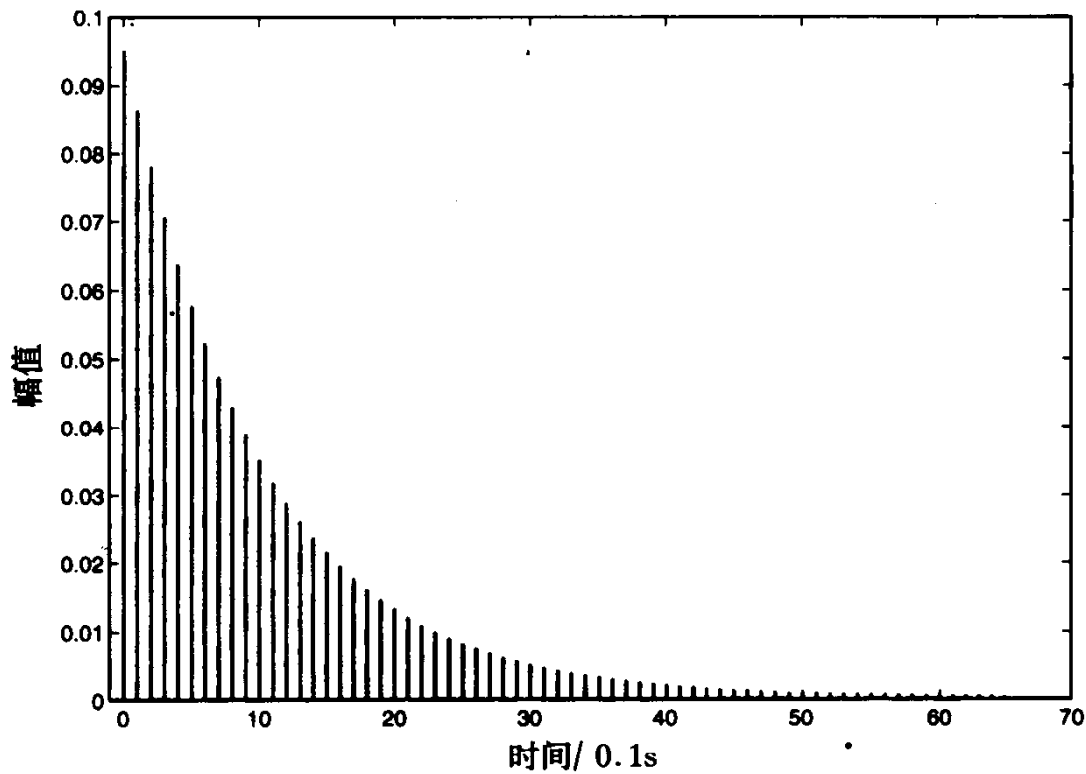


图 1.10 参考模型的脉冲响应

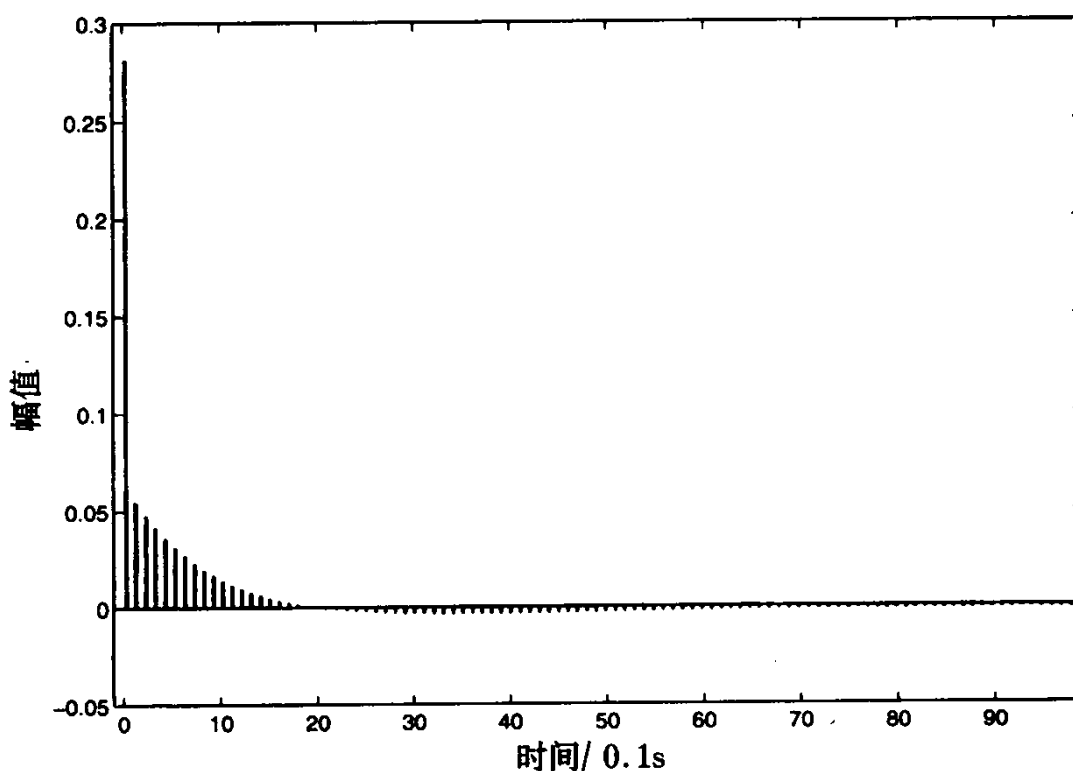


图 1.11 最优 100 个权系数逆控制器的脉冲响应

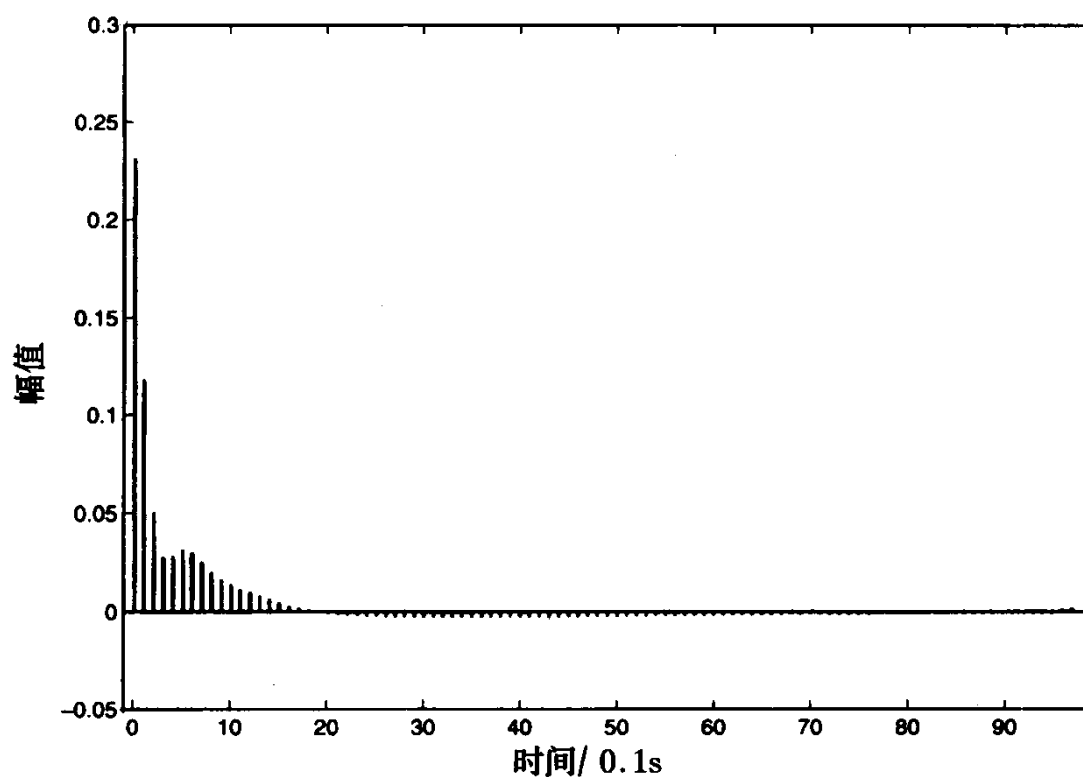


图 1.12 100 000 次学习迭代后自适应控制器的脉冲响应

将对象输出与参考模型输出作一对比是很有用的。在起始阶段,逆控制器正在学习,所以不是完成得很好。图 1.13 示出了在最初 200 个样本内的对象输出和参考模型输出。它们未能跟踪,因为在自适应过程中还太早。

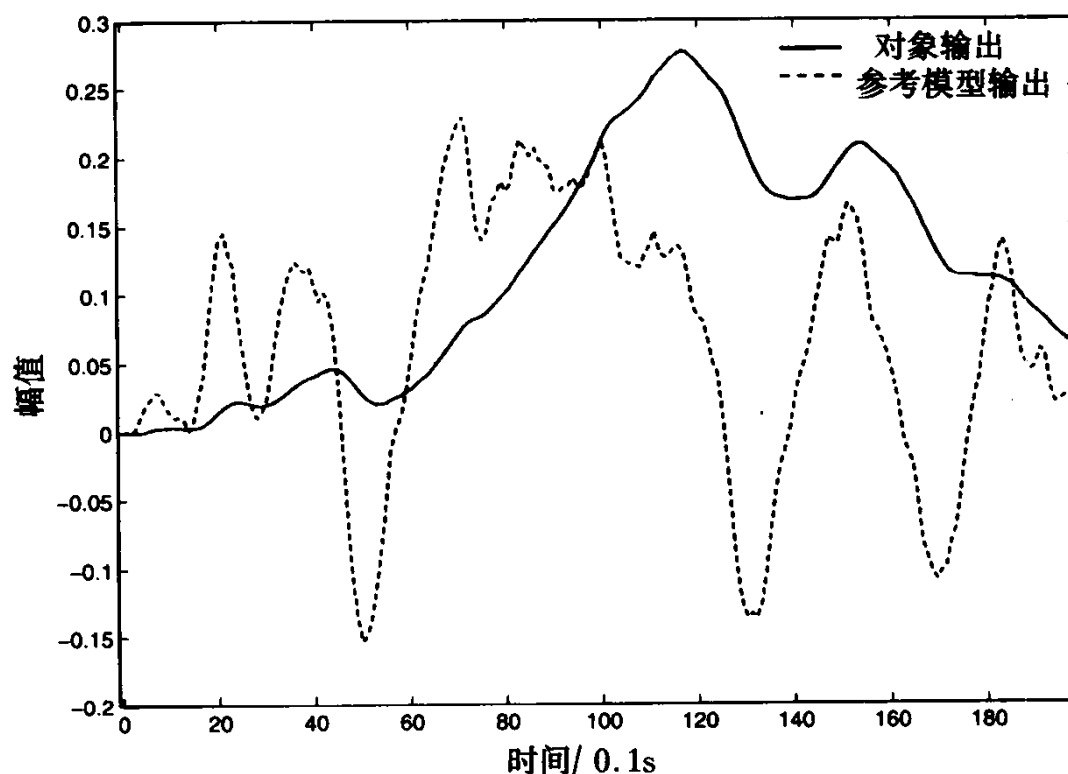


图 1.13 具有最小相位对象的在最初 200 个样本中的对象输出和参考模型输出

图 1.14 就可以看到学习的效果。对象输出在大约 3 000 个样本之后就跟踪,实时上相当于约 300s。整个序列有 100 000 个样本,相当于 10 000s。图 1.15 给出了两个输出在最后 200 个样本上的比较,可见跟踪基本上是很完美的。在这种情况下,模型参考逆控制确实在起作用。

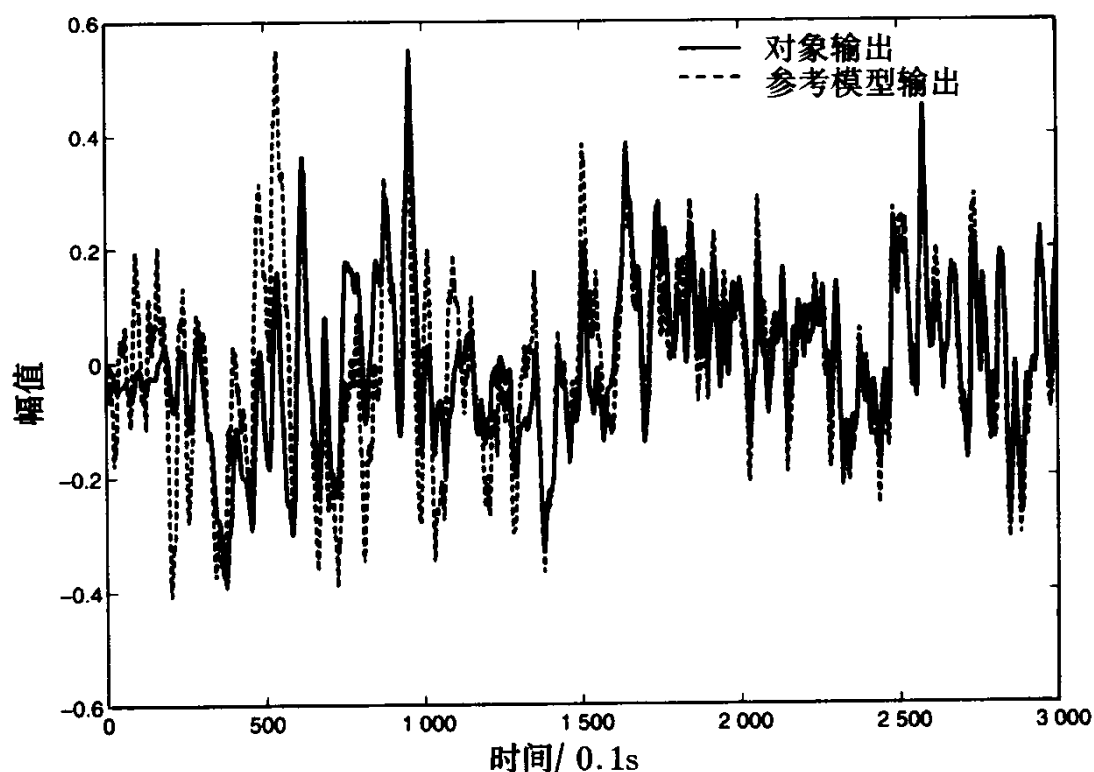


图 1.14 在 3 000 个样本序列上,说明控制器学习过程中的对象输出和参考模型输出

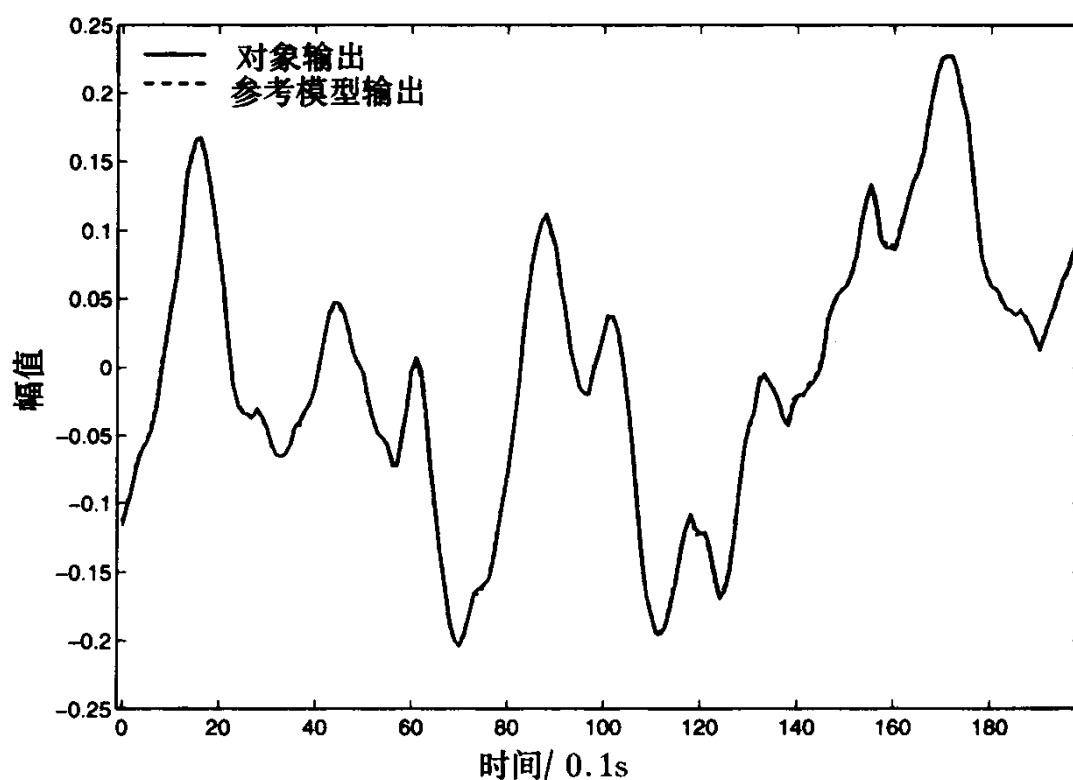


图 1.15 100 000 个样本序列中最后 200 个样本的对象输出和参考模型输出

1.2.2 非最小相位对象的动态控制

这是一个更富有挑战性的试验,被控对象具有如下传递函数

$$\frac{(s - 0.5)}{(s + 1)(s - 1)} \quad (1.2)$$

因为这个对象是不稳定的,所以第一步还是要采用反馈去镇定它。这个对象不能用像图 1.7 那样简单的比例反馈可以达到稳定,而是要用一个具有补偿网络的反馈才能镇定。在这个试验中,所用的补偿网络有下面传递函数