

“信息科学技术学术著作丛书”序

21 世纪是信息科学技术发生深刻变革的时代，一场以网络科学、高性能计算和仿真、智能科学、计算思维为特征的信息科学革命正在兴起。信息科学技术正在逐步融入各个应用领域并与生物、纳米、认知等交织在一起，悄然改变着我们的生活方式。信息科学技术已经成为人类社会进步过程中发展最快、交叉渗透性最强、应用面最广的关键技术。

如何进一步推动我国信息科学技术的研究与发展；如何将信息科学技术发展的新理论、新方法与研究成果转化为社会发展的推动力；如何抓住信息科学技术深刻发展变革的机遇，提升我国自主创新和可持续发展的能力；这些问题的解答都离不开我国科技工作者和工程技术人员的求索和艰辛付出。为这些科技工作者和工程技术人员提供一个良好的出版环境和平台，将这些科技成就迅速转化为智力成果，将对我国信息科学技术的发展起到重要的推动作用。

“信息科学技术学术著作丛书”是科学出版社在广泛征求专家意见的基础上，经过长期考察、反复论证之后组织出版的。这套丛书旨在传播网络科学和未来网络技术，微电子、光电子和量子信息技术、超级计算机、软件和信息存储技术，数据知识化和基于知识处理的未来信息服务业、低成本信息化和用信息技术提升传统产业，智能与认知科学、生物信息学、社会信息学等前沿交叉科学，信息科学基础理论，信息安全等几个未来信息科学技术重点发展领域的优秀科研成果。丛书力争起点高、内容新、导向性强，具有一定的原创性，体现出科学出版社“高层次、高水平、高质量”的特色和“严肃、严密、严格”的优良作风。

希望这套丛书的出版，能为我国信息科学技术的发展、创新和突破带来一些启迪和帮助。同时，欢迎广大读者提出好的建议，以促进和完善丛书的出版工作。

中国工程院院士
中国科学院计算技术研究所原所长



前 言

迭代学习控制是一种模仿人类学习行为的智能控制方法。它针对有限时间区间上可重复的动态系统,利用系统以前的输入和输出信号以及目标轨线,构造适当的学习控制律,通过迭代使得系统跟踪性能逐步提高。迭代学习控制本质上可看作一种无模型的控制方法,结构简单,却能够处理具有非线性、不确定性等特点的复杂系统。与其他大多数控制方法显著不同的是,迭代学习控制可以在有限时间区间内达到完全跟踪。经过 40 多年的发展,迭代学习控制在理论和应用两方面都取得了丰硕成果。

分布参数系统迭代学习控制主要以偏微分方程描述的分布参数系统为研究对象,通过设计各种迭代学习控制算法实现完全跟踪。由于分布参数系统本身具有无穷维特性,需要借助较多的数学工具进行分析。相较于集中参数系统迭代学习控制,分布参数系统迭代学习控制的研究起步较晚,目前已有的成果也不多。为建立与集中参数系统类似平行的迭代学习控制理论,本书利用分布式控制方法进行一系列研究。

本书共 8 章。第 1 章对近年来分布参数系统迭代学习控制的研究现状和基本方法作简要概述,为方便读者阅读,本书还给出需要用到的几个重要引理。第 2~4 章主要对含有非线性、时滞、广义等特性的抛物分布参数系统的迭代学习控制进行深入研究。包括不确定非线性抛物分布参数闭环学习控制算法设计与分析、非线性状态时滞\输入时滞抛物分布参数系统迭代学习控制、线性广义抛物分布参数系统迭代学习控制等。第 5 章主要研究多输入多输出二阶双曲线性分布参数系统、二阶双曲非线性脉冲分布参数系统的迭代学习控制问题。第 6 章主要集中于学习条件改变情况下,分布参数系统的迭代学习控制。包括参考轨迹随迭代次数慢变化、系统矩阵随迭代次数变化等情形下分布参数系统的迭代学习控制问题。第 7 章结合事件触发研究了几类分布参数系统采样的迭代学习控制。第 8 章围绕复值分布参数系统迭代学习控制展开,进行初步探索与研究。全书着重对不同的系统对象或在不同的学习条件下,设计相应的学习控制算法并进行收敛性分析,每章都给出相应的数值算例来说明其有效性。

本书的出版得到国家自然科学基金(62363002, 62173151, 61863004, 61364006, 61374104)、广西自然科学基金(2017GXNSFAA198179)的大力支持,在此表示诚挚的谢意。衷心感谢我的导师邓飞其教授一直以来对我的鼓励和支持。

持；由衷感谢在迭代学习控制领域给予我指导和帮助的前辈和同行。特别感谢吴文军博士在偏微分数值仿真方面完成的大量工作。另外，感谢研究生汪村、赵婷婷、张帆、吴静、蔡柳池、柳业晖、姚闯、王言雪等在本书出版过程中的辛勤付出。

为方便阅读，本书提供部分彩图，读者可扫描封底左上方防伪码查阅。

限于作者水平，书中难免存在不妥之处，请读者不吝批评指正。

广东金融学院

戴喜生

目 录

“信息科学技术学术著作丛书”序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 迭代学习控制概述	1
1.1.1 迭代学习控制基本思想	1
1.1.2 传统和非传统迭代学习控制	2
1.1.3 迭代学习控制应用研究	3
1.2 分布参数系统迭代学习控制	4
1.2.1 分布参数系统迭代学习控制模型	4
1.2.2 抛物分布参数系统迭代学习控制	5
1.3 预备知识	7
1.3.1 常用符号说明	7
1.3.2 相关引理	8
1.4 本书主要内容及结构安排	8
参考文献	9
第 2 章 非线性抛物分布参数系统闭环 P 型迭代学习控制	19
2.1 引言	19
2.2 问题描述	20
2.3 算法的收敛性分析	22
2.4 数值仿真	27
2.5 本章小结	31
参考文献	31
第 3 章 时滞抛物分布参数系统迭代学习控制	33
3.1 引言	33
3.2 状态时滞抛物分布参数系统的迭代学习控制	34
3.2.1 状态含有时滞的抛物分布参数系统	34
3.2.2 收敛性分析	36
3.2.3 数值仿真	42
3.3 输入含时滞非线性抛物分布参数系统的迭代学习控制	45

3.3.1	输入含有时滞的抛物分布参数系统	45
3.3.2	收敛性分析	47
3.3.3	数值仿真	50
3.4	本章小结	52
	参考文献	53
第 4 章	广义分布参数系统迭代学习控制	55
4.1	引言	55
4.2	问题描述	56
4.3	基于固有函数法的模型简化	57
4.4	算法设计与收敛性分析	59
4.4.1	低维模态控制器设计及收敛性分析	60
4.4.2	高维模态收敛性分析	63
4.5	仿真实例	68
4.6	本章小结	75
	参考文献	75
第 5 章	多输入多输出二阶双曲分布参数系统迭代学习控制	77
5.1	引言	77
5.2	多输入多输出二阶双曲线性分布参数系统迭代学习控制	78
5.2.1	系统描述	78
5.2.2	算法设计与收敛性分析	79
5.2.3	数值仿真	84
5.3	多输入多输出二阶双曲非线性脉冲分布参数系统迭代学习控制	87
5.3.1	系统描述	87
5.3.2	算法设计与收敛性分析	89
5.3.3	数值仿真	96
5.4	本章小结	100
	参考文献	101
第 6 章	非重复分布参数系统的迭代学习控制	103
6.1	引言	103
6.2	参考轨迹慢变化的抛物分布参数系统迭代学习控制	104
6.2.1	系统描述	104
6.2.2	学习算法设计	104
6.2.3	系统跟踪误差收敛性分析	105
6.2.4	仿真分析	111
6.3	非重复系统矩阵及扰动下抛物分布参数系统迭代学习控制	115

6.3.1 系统描述和算法设计	115
6.3.2 跟踪误差收敛性分析	117
6.3.3 仿真分析	128
6.4 本章小结	133
参考文献	133
第 7 章 基于事件触发的分布参数系统采样迭代学习控制	136
7.1 引言	136
7.2 非线性抛物分布参数系统事件触发采样迭代学习控制	137
7.2.1 学习系统描述	137
7.2.2 算法设计与收敛性分析	138
7.2.3 仿真分析	145
7.3 反应扩散 Cohen-Grossberg 神经网络的事件触发采样迭代学习 同步控制	151
7.3.1 学习系统描述	151
7.3.2 算法设计与收敛性分析	153
7.3.3 仿真分析	159
7.4 复值反应扩散神经网络的事件触发采样迭代学习同步控制	166
7.4.1 学习系统描述	166
7.4.2 算法设计与收敛性分析	169
7.4.3 仿真分析	176
7.5 本章小结	183
参考文献	183
第 8 章 复值金兹堡-朗道系统的迭代学习控制	186
8.1 引言	186
8.2 线性复值金兹堡-朗道系统分布式迭代学习控制	187
8.2.1 学习系统描述	187
8.2.2 算法设计与收敛性分析	188
8.2.3 仿真分析	196
8.3 本章小结	198
参考文献	199

第 1 章 绪 论

迭代学习控制(iterative learning control, ILC)发展 40 多年以来,取得了丰硕的研究成果,但大部分是关于由常微分方程描述的集中参数系统。研究由偏微分方程描述的分布参数系统的迭代学习控制研究结果相对较少。本章简要介绍迭代学习控制基本思想以及传统和非传统迭代学习控制,并对迭代学习控制的应用研究作简要概括,综述分布参数系统迭代学习控制的研究现状及发展趋势。

1.1 迭代学习控制概述

1.1.1 迭代学习控制基本思想

迭代学习控制是一种模仿人类,具有学习能力的智能控制方法^[1-4]。其基本思想可以用一个通俗的例子来说明:人们在学习写字时,时常会使用字帖进行模仿练习。例如在学习写自己的名字时,如果对照字帖有意识地反复多次练习,写出来的字理论上将会和字帖上一样完美漂亮。即学习控制就是对控制目标(写自己名字),采用一定的具有迭代收敛的控制方法去不断地修正系统输出偏差(比对字帖字形不断模仿练习),从而最终达到理想的控制效果(写出字形漂亮的名字)。综合到控制理论上,以一个最简单的线性系统来阐述如下多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)时不变线性系统^[5,6],有

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) \end{cases} \quad (1.1)$$

式中, $t \in [0, T]$ 为时间变量, T 为固定常数; 矩阵 $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times r}$, $C \in \mathbb{R}^{m \times n}$, $D \in \mathbb{R}^{m \times r}$, $x(t) \in \mathbb{R}^n$, $u(t) \in \mathbb{R}^r$, $y(t) \in \mathbb{R}^m$ 分别为系统的状态、控制输入及输出; $\dot{x}(t)$ 为对时间变量 t 的导数。

记系统(1.1)为 $\Sigma(A, B, C, D)$, 其控制目标是使得输出 $y(t)$ 在整个时间区间 $[0, T]$ 上都和期望轨线 $y_d(t)$ 完全一致。大多数控制方法往往需要调整一段时间,且调整期误差在某些情况下可能不被接受,因此不能完成一致跟踪的目标任务。迭代学习控制为达到这一目标,通过多次尝试的方法,首先给出任意控制输入 $u_1(t)$, 经过系统运行输出 $y_1(t)$, 如若与期望轨线 $y_d(t)$ 不一致,则调整控制输出

为 $u_2(t)$ 。类似地, 设第 k 次输入为 $u_k(t)$, 对应输出为 $y_k(t)$, 从而有如下学习系统, 即

$$\begin{cases} \dot{x}_k(t) = Ax_k(t) + Bu_k(t) \\ y_k(t) = Cx_k(t) + Du_k(t) \end{cases} \quad (1.2)$$

利用输出误差信息和前次所给控制输入, 式(1.2)中控制输入调整机制可简写为

$$u_k(t) = f(u_{k-1}(t), e_{k-1}(t)) \quad (1.3)$$

由式(1.3)可知, 下一次的控制输入为包含上一次的控制输入和输出误差的某一种映射关系 f , 如比例-积分-微分(proportional-integral-derivative, PID)型的迭代学习控制算法^[7], 即

$$u_k(t) = u_{k-1}(t) + K_P e_{k-1}(t) + K_I \int_0^t e_{k-1}(s) ds + K_D \dot{e}_{k-1}(t) \quad (1.4)$$

式中, K_P , K_I , K_D 为适当维数且满足收敛条件的学习增益矩阵。最终可使得控制输出 $y_k(t)$ 和期望输出 $y_d(t)$ 在某个度量下在 $[0, T]$ 上一致收敛, 即

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \|y_k(t) - y_d(t)\| = 0, \forall t \in [0, T] \quad (1.5)$$

式(1.5)达到前述要求的一致跟踪或完全跟踪要求。图 1.1 为典型的迭代学习控制算法流程。

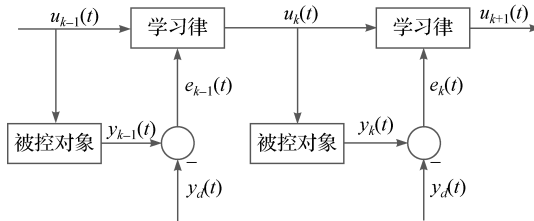


图 1.1 迭代学习控制算法流程

1.1.2 传统和非传统迭代学习控制

迭代学习控制概念自被提出已有 40 多年^[8,9], 迭代学习控制理论研究的主要问题集中在以下方面。

- (1) 设计何种学习控制算法可以使得系统输出一致收敛到期望输出。
- (2) 学习控制算法在数学上严格的收敛性分析方法。
- (3) 各种不同的系统或模型的学习控制问题。

针对第一个方面的问题, 国内外许多专著^[4,6,7]、综述文章^[10-14]及研究论文都有详细的报道。这些算法包括开环、闭环^[15]、P 型^[16]、D 型^[17]、PD 型^[18-21]、PID 型^[1,3,4,22]、高阶^[23]、前馈-反馈^[24]、遗忘因子^[25]、几何分析^[26]、变增益^[7,27]、滤波

器型^[28]、最优迭代学习控制^[29]等各种学习控制算法。也有一些将迭代学习控制与其他智能控制算法、人工智能算法融合起来的新算法,如自适应迭代学习控制^[30,31]、模糊迭代学习控制^[32,33]、神经网络迭代学习控制^[34-36]、内模迭代学习控制^[37-39]、模型预测迭代学习控制^[40-42]等。

针对第二个方面的问题,目前的分析方法主要有基于 λ 范数的压缩映射方法^[4]、组合能量函数方法^[43-45]、算子理论方法^[7,46]、二维系统方法^[47-49]等。

针对第三个方面的问题,目前对离散时间系统^[50]、连续时间系统^[51]、非最小相位/非正则系统^[52,53]、脉冲系统^[54-57]、分数阶系统^[58-60]、切换系统^[61-63]、分布参数系统^[64-69]、随机系统^[70,71]、连续/离散时滞系统^[72-74]、广义系统^[75-78]、二维/多维系统^[79,80]、双线性系统^[81]等都有相应的成果报道。特别是文献^[82]对无模型迭代学习控制展开了系列研究,极大地拓展了学习控制理论与应用的研究范围和对象。

然而,在上述迭代学习控制研究过程中,人们逐渐发现“学习”这一智能特征本身要求对象具有重复性,具体要求如下。

- (1) 学习时间区间 $[0, T]$ 固定不变。
- (2) 系统模型结构 $\Sigma(A, B, C, D)$ 不变。
- (3) 参考轨线 $y_d(t)$ 不变。

上述三点要求大大限制了迭代学习控制的应用。因此,可将在上述三个条件下研究迭代学习控制称为传统迭代学习控制,而研究如何突破上述三条限制的迭代学习控制问题可称为非传统迭代学习控制,相关研究见文献^{[83]~文献[98]}。非传统迭代学习控制主要研究特点如下。

- (1) 学习区间长度随机变化的迭代学习控制。
- (2) 系统模型或模型结构随迭代次数变化的迭代学习控制。
- (3) 参考轨线可随迭代次数 k 变化的迭代学习控制。
- (4) 数据驱动/无模型的迭代学习控制。

可以看出,非传统迭代学习控制的研究大大拓宽了迭代学习控制的应用场合。

1.1.3 迭代学习控制应用研究

随着迭代学习控制理论体系日趋成熟,迭代学习控制的应用尝试也越来越多^[99-111]。如锅炉-汽轮机系统非线性优化^[99]、高速列车轨迹跟踪^[100,103]、康复机器人阻抗控制^[101]等。同时,迭代学习控制已在以下领域实现具体应用:①高端装备与精密制造,包括机电系统与能源控制-永磁/旋转电机-球形执行器鲁棒跟踪^[105];②激光扫描系统-振镜高速控制提升显微成像速度^[106];③晶圆载物台-稀疏学习控制实现资源-性能平衡^[46];④工业机器人^[108,109];⑤磁控微机器人^[110,111]。另外,也在新兴应用与前沿方向仿生机器人/机器鱼速度跟踪^[104]、网络化系统的数据丢

包学习^[48]等方面有较多研究成果。随着智能制造、精准医疗等场景的深化,迭代学习控制的应用正从单点技术突破走向系统级解决方案的整体构建。

1.2 分布参数系统迭代学习控制

1.2.1 分布参数系统迭代学习控制模型

考虑如下形式上与系统(1.1)类似的线性分布参数系统,即

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), x(0) = x_0 \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) \end{cases} \quad (1.6)$$

式中,系统状态 $x(t)$ 是 $x(\xi, t)$ 的简写, $t \in [0, T]$; 空间变量 $\xi \in \Omega$, Ω 为有界光滑区域; $\dot{x}(t)$ 为对时间变量 t 的导数。系统输入输出分别为 $u(t) \triangleq u(\xi, t)$, $y(t) \triangleq y(\xi, t)$, A 是定义在某个希尔伯特空间 X 上的强连续半群 $S(t)$ 的无穷小生成元^[112], $x_0(\xi) \in X$ 或 $x_0(\xi) \in D(A)$ 。 B, C, D 分别为算子空间 $L(U, X)$, $L(X, Y)$, $L(U, Y)$ 上的线性算子, U, Y 都是希尔伯特空间。

系统(1.6)虽然形式上仍然是 $\Sigma(A, B, C, D)$, 但系统状态和输入输出都同时是时间和空间的变量, 通常称为无穷维系统(固定一个自变量, 所得还是无穷维的函数空间), 其基本理论见文献[113]~文献[115]。无穷维系统的控制问题是公认的运用数学最多的控制分支, 因此其研究要复杂得多。但恰恰现实中很多物理、化学过程或自然现象都要用由偏微分方程描述的分布参数系统来建模或表达, 因此关于分布参数系统控制问题的研究得到广泛关注, 且取得了大量的研究成果^[116-121]。

关于分布参数系统的迭代学习控制, 国内早期研究始于由华南理工大学系统工程研究所, 文献[122]研究了一类线性抛物分布参数系统二阶 P 型迭代学习控制算法; 谢胜利等^[123]考虑了利普希茨(Lipschitz)非线性分布参数系统的迭代学习问题。同时, 分布参数系统的学习控制也开始在国内外受到广泛关注。文献[64]考虑了一阶双曲偏微分系统的学习控制问题, 并尝试应用到湍流化学反应器。文献[65]研究了由二阶双曲偏微分方程描述的含有弹性机构运输系统的分布参数迭代学习控制。文献[46]基于算子半群理论对一类抛物分布参数系统给出了 P 型和 D 型学习算法收敛的充分条件。文献[67]利用边界控制研究了一类单输入单输出拟线性分布参数系统的稳态迭代学习控制问题。文献[66]专门用一章的篇幅讨论了分布参数系统的迭代学习控制问题。文献[45]也专门利用边界控制方法对几类弹性系统的迭代学习控制问题展开了系列研究。

总体上, 对分布参数系统迭代学习控制中的研究, 从系统上来分主要包括抛物型分布参数迭代学习控制与双曲型分布参数系统迭代学习控制两大类。针对热

传导、化工扩散等抛物型偏微分方程描述的动态过程,文献[26]、文献[27]、文献[124]、文献[125]采用开环或闭环P型分布式迭代学习控制算法,基于 λ 范数、压缩映射原理,通过迭代序列分析得到跟踪误差沿迭代轴在时间区间上一致收敛结果。文献[126]~文献[130]依托传感器-执行器网络实现空间域精准调控(多点传感控制、分段观测反馈)。文献[131]~文献[133]采用特征谱、高阶内模、事件触发等方法研究抛物分布参数系统迭代学习控制。

文献[134]~文献[139]对一阶/二阶、线性/非线性双曲型分布参数系统展开研究,其主要方法仍然是前述 λ 范数、压缩映射原理等方法。文献[140]~文献[151]借助迭代学习控制具有高精度跟踪特性,对柔性机械臂振动抑制和跟踪、Euler-Bernoulli梁等双曲型系统,利用易于实施的边界控制方法,通过设计适当的Lyapunov泛函、组合能量函数方法来处理系统含有执行器饱和、输入受限、间隙等非线性约束问题。

最近几年,随着研究对象向非线性、高维、强耦合系统拓展,分布参数系统迭代学习控制的相关研究也进一步拓展。对抛物分布参数多智能体、分数阶抛物分布参数系统、混合双曲-抛物系统、复值金兹堡-朗道(Ginzburg-Landau)系统、Korteweg-de Vries方程的迭代学习控制也有研究结果出现^[152-156]。近几年,随着研究的深入,笔者尝试采用时间、空间离散化方法对分布参数系统迭代学习控制的完全跟踪问题展开研究^[157,158]。

1.2.2 抛物分布参数系统迭代学习控制

下面举一个较为简单的分布参数迭代学习控制的例子,帮助读者对分布参数系统迭代学习控制有一个更为具体的认识。

例 1.1^① 考虑如下的线性抛物型分布参数系统,即

$$\begin{cases} \frac{\partial q(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 q(x,t)}{\partial x^2} - q(x,t) + u(x,t) \\ y(x,t) = q(x,t) + e^{-t}u(x,t) \end{cases} \quad (1.7)$$

设定期望输出为 $y_d(x,t) = 1.2e^x \sin t + 1.1e^{x-t} \cos t$, 期望状态 $q_d(x,t) = 1.2e^x \sin t$, 则 $u_d(x,t) = 1.1e^x \cos t$, 取迭代学习控制算法为

$$u_{k+1}(x,t) = u_k(x,t) + \gamma e_k(x,t)$$

① 本例可以求解出期望输入,但是对大多数偏微分方程,其控制输入是不易求得的。

学习增益取 $\gamma=1.2$ ，状态初值为 $q_k(x,0)=0$ ，利用差分格式离散化仿真，如图 1.2 和 1.3 所示。

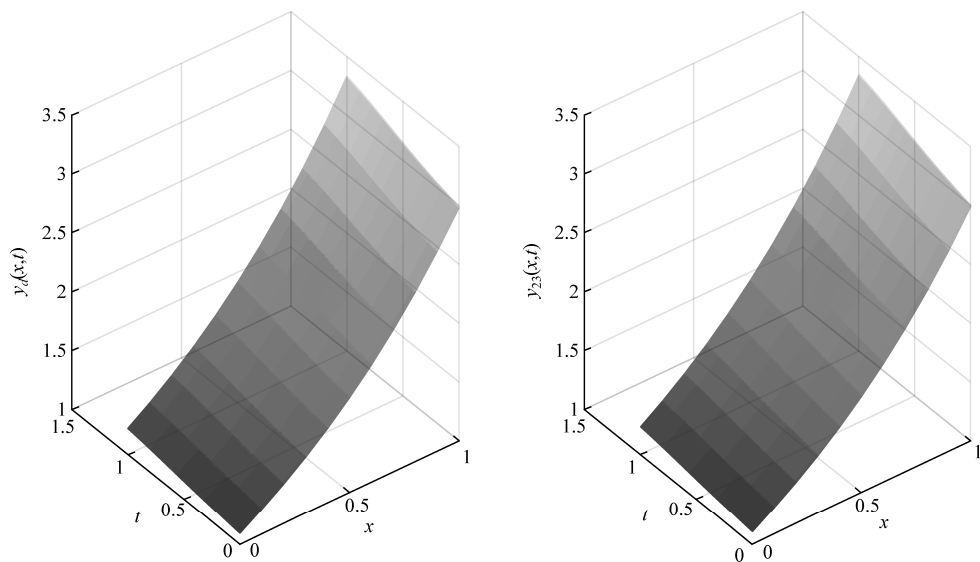


图 1.2 期望输出 $y_d(x,t)$ 与第 23 次迭代时系统输出 $y_{23}(x,t)$

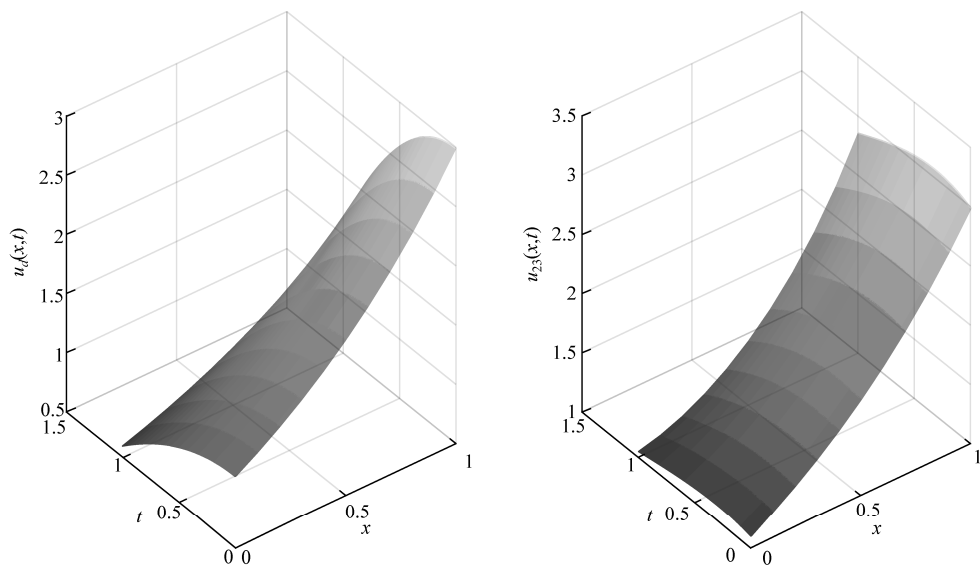


图 1.3 期望输出 $u_d(x,t)$ 与第 23 次迭代时系统输出 $u_{23}(x,t)$

1.3 预 备 知 识

1.3.1 常用符号说明

本书符号含义见表 1.1。

表 1.1 本书符号含义

符号	符号意义
$\mathbb{N}$	自然数集
$\mathbb{R}$	实数集
$\mathbb{R}^+$	非负实数集
$\mathbb{R}^n$	n 维欧几里得空间, 对 $x \in \mathbb{R}^n$ 其范数符号为 $\ x\ $
$\mathbb{R}^{m \times n}$	$m \times n$ 维实数矩阵构成的集合, 对 $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$, 其范数为 $\ A\ = \sqrt{\lambda_{\max}(A^T A)}$
$\mathbb{C}$	复数域
$A > (>, <, \leq) 0$	矩阵 A 是对称正定(半正定、负定、半负定)矩阵
A^T	矩阵 A 的转置
A^{-1}	矩阵 A 的逆
$\lambda_{\max}(A)(\lambda_{\min}(A))$	实对阵矩阵 A 的最大(最小)特征值
$A = \begin{bmatrix} B & C \\ * & D \end{bmatrix}$	“ $*$ ”代表 C^T , 即 $A = \begin{bmatrix} B & C \\ C^T & D \end{bmatrix}$
$\text{diag}\{d_1, d_2, \dots, d_n\}$	主对角线元素为 $d_1, d_2, \dots, d_n$ 的对角矩阵
I_n	n 阶单位矩阵
$C(0, T)$	$(0, T) \rightarrow \mathbb{R}$ 的连续函数空间
$L^2(\Omega)$	定义在具光滑边界 $\partial\Omega$ 的有界开集 Ω 上的所有平方可积函数 $q(x)(\in \mathbb{R}^n)$ 构成的函数空间, 且 $\ q\ _{L^2} = \sqrt{\int_0^1 q^T(x)q(x)dx} < \infty$
$L^p(\Omega)$	满足 $\ q\ _{L^p} = \left\{ \int_{\Omega} q(x) ^p dx \right\}^{1/p} < \infty$ 的全体可测函数组成的巴拿赫空间($1 \leq p < \infty$)
$L^\infty(\Omega)$	定义在 Ω 上满足 $\ q\ _\infty = \text{ess sup}_{x \in \Omega} q(x) < \infty$ 的全体可测函数(除去测度为 0 的集合, 函数 $q(x)$ 都有上确界, 或本性上有上确界函数集合)
$W^{1,2}([a,b]; \mathbb{R}^n)$	一次弱可微且平方可积的 n 维实值函数 $q(x): [a,b] \rightarrow \mathbb{R}^n$ 构成的索伯列夫空间 ($\ q\ _{W^{1,2}}^2 = \ q\ _{L^2}^2 + \ \nabla q\ _{L^2}^2 < \infty$, ∇ 表示梯度算子)

续表

符号	符号意义
$D(A)$	算子 A 的定义域
$L(X,Y)$	X 到 Y 的有界线性算子空间
$\ e\ _{(L^2, \lambda)}^2$	$\ e\ _{(L^2, \lambda)}^2 = \sup_{0 \leq t \leq T} \left\{ \ e(\cdot, t)\ _{L^2}^2 e^{-\lambda t} \right\}, \lambda > 0$ 为常数

1.3.2 相关引理

引理 1.1^[159](Bellman-Gronwall 引理) 假设 $f(t)$ 为定义在 $[0, T]$ 上的非负实值连续函数, 且满足如下的不等式, 即

$$f(t) \leq c(t) + \int_0^t a(\tau) u(\tau) d\tau$$

那么有

$$f(t) \leq c(t) + \int_0^t a(\tau) c(\tau) e^{\int_0^t a(\sigma) d\sigma} d\tau$$

引理 1.2^[160](脉冲 Gronwall 不等式) 设 $t \geq 0$, $z(t), a(t)$ 为非负分段连续函数, 且 $a(t)$ 是单调非减, 若如下不等式成立, 即

$$z(t) \leq a(t) + b \int_0^t z(s) ds + \sum_{0 < t_j < t} \xi_j z(t_j)$$

其中, $b, \xi_j > 0$, 则有

$$z(t) \leq a(t) \prod_{0 < t_j < t} (1 + \xi_j) e^{bt}$$

1.4 本书主要内容及结构安排

除本书第一章外, 其他章节可分为三个部分。第一部分(第 2~4 章), 主要对含有非线性、时滞、广义等特性的抛物分布参数系统的迭代学习控制进行深入研究。包括不确定非线性抛物分布参数闭环学习控制算法设计与分析、非线性状态时滞\输入时滞抛物分布参数系统迭代学习控制、线性广义抛物分布参数系统迭代学习控制等。第二部分(第 5 章), 介绍双曲型分布参数系统迭代学习控制, 包含多输入多输出二阶双曲线性分布参数系统、二阶双曲非线性脉冲分布参数系统迭代学习控制问题。第三部分(第 6~8 章), 为本书作者团队近期

研究内容,第6章介绍学习条件迭代变化情况下分布参数系统的迭代学习控制;第7章介绍事件触发分布参数系统采样迭代学习控制;第8章介绍复值分布参数系统迭代学习控制。本书的结构如图1.4所示。

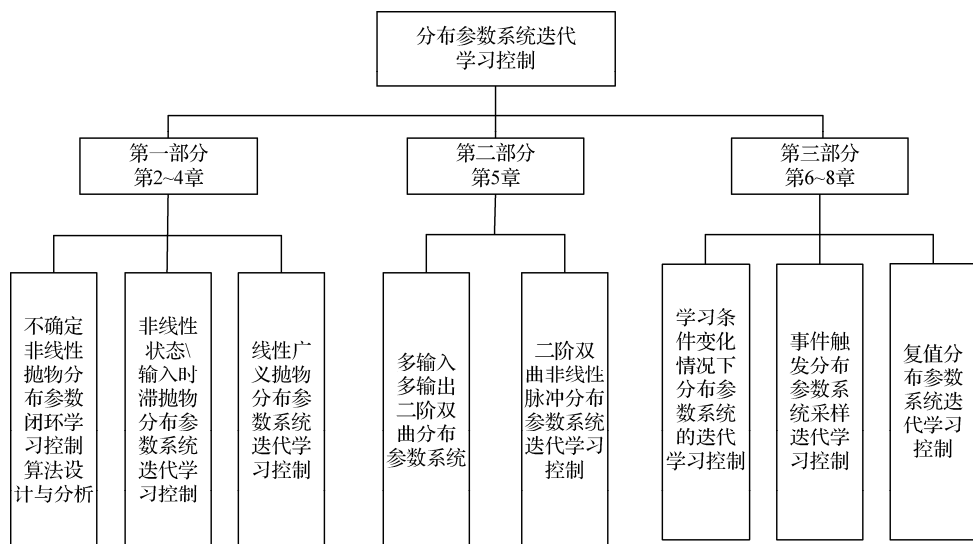


图 1.4 本书结构图

参 考 文 献

- [1] 刘金琨. 智能控制. 4 版. 北京: 电子工业出版社, 2017.
- [2] 孙增圻. 智能控制理论与技术. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [3] 王飞跃, 陈俊龙. 智能控制方法与应用. 北京: 中国科学技术出版社, 2020.
- [4] 孙明轩, 黄宝健. 迭代学习控制. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [5] 段广仁. 线性系统理论. 2 版. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004.
- [6] 郑大钟. 线性系统理论. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [7] 林辉, 王林. 迭代学习控制理论. 西安: 西北工业大学出版社, 1998.
- [8] Uchiyama M. Formulation of high-speed motion pattern of a mechanical arm by trial. Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, 1978, 14(6): 706-712.
- [9] Arimoto S, Kawamura S, Miyazaki F. Bettering operation of robots by learning. Journal of Robotic Systems, 1984, 1(2): 123-140.
- [10] Bien Z, Xu J X. Iterative Learning Control: Analysis, Design, Integration and Applications. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [11] Chen Y Q, Wen C Y. Iterative Learning Control: Convergence, Robustness and Applications. London: Springer-Verlag, 1999.
- [12] 许建新, 侯忠生. 学习控制的现状与展望. 自动化学报, 2005, 31(6): 943-955.
- [13] 池荣虎, 侯忠生, 黄彪. 间歇过程最优迭代学习控制的发展: 从基于模型到数据驱动. 自动化学报, 2017, 43(6): 917-932.

-
- [14] Wang Y Q, Gao F R, Doyle I I I F J. Survey on iterative learning control, repetitive control, and run-to-run control. *Journal of Process Control*, 2009, 19(10): 1589-1600.
- [15] 皮道映, 孙优贤. 离散非线性系统开闭环 P 型迭代学习控制律及其收敛性. *控制理论与应用*, 1997, 14(2): 157-161.
- [16] Liu Q, Tian S, Gu P. P-type iterative learning control algorithm for a class of linear singular impulsive systems. *Journal of the Franklin Institute*, 2018, 355(9): 3926-3937.
- [17] Huang D, Li X. Improved D-Type anticipatory iterative learning control for a class inhomogeneous heat equations. *Asian Journal of Control*, 2013, 49(8): 2397-2408.
- [18] 杨晓峰, 樊晓平, 杨胜跃, 等. 非线性系统开闭环 PD 型迭代学习控制及其在机器人中的应用. *长沙铁道学院学报*, 2002, (1): 78-84.
- [19] 张秀赞, 陶洪峰, 杨慧中. 非线性间歇过程 PD 型变增益迭代学习控制. *控制工程*, 2021, 28(9): 1754-1758.
- [20] 刘芬, 张克军. 基于分数阶线性系统初态学习的 PD^α 型迭代学习控制. *西北工业大学学报*, 2021, 39(2): 400-406.
- [21] 代明光, 齐蓉, 李兵强, 等. 具有自适应非线性增益的开环 PD 型迭代学习控制. *系统工程与电子技术*, 2020, 42(3): 660-666.
- [22] Memon F, Chengc S. Data-driven optimal PID type ILC for a class of nonlinear batch process. *International Journal of Systems Science*. 2020, 52(2): 263-276.
- [23] Chi R H, Huang B A, Hou Z S, et al. Data-driven high-order terminal iterative learning control with a faster convergence speed. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*. 2018, 28(1): 103-119.
- [24] Hou Z S, Xu J. A new feedback-feedforward configuration for the iterative learning control of a class of discrete-time systems. *Acta Automatica Sinica*, 2007, 33(3): 323-326.
- [25] Bouakrif F. Iterative learning control with forgetting factor for robot manipulators with strictly unknown model. *International Journal of Robotics and Automation*, 2011, 26(3): 264-271.
- [26] 戴喜生, 李政, 田森平. 基于向量图分析的分布参数系统迭代学习控制. *控制理论与应用*, 2009, 26(6): 619-623.
- [27] Dai X S, Zhang H, Wu Q Q, et al. Closed loop variable gain ILC for a class of nonlinear parabolic distributed parameter systems with moving boundaries. *Optimal Control Applications and Methods*. 2023, 44(3): 1200-1214.
- [28] Deutschmann-Olek A, Stadler G, Kugi A. Stochastic iterative learning control for lumped and distributed parameter systems: A wiener-filtering approach. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2021, 66(8): 3856-3862.
- [29] Chu B, Owens D H. Accelerated norm-optimal iterative learning control algorithms using successive projection. *International Journal of Control*, 2009, 82(8): 1469-1484.
- [30] Zhang R K, Hou Z S, Chi R H, et al. Adaptive iterative learning control for nonlinearly parameterised systems with unknown time-varying delays and input saturations. *International Journal of Control*, 2015, 88(6): 1133-1141.
- [31] Li D, Li J M. Adaptive iterative learning control for nonlinearly parameterized systems with unknown time-varying delay and unknown control direction. *International Journal of*