



当代
杰出青年
科学文库

迭代学习控制的 理论与应用

谢胜利 田森平 谢振东 著



科学出版社
www.sciencep.com

当代杰出青年科学文库

迭代学习控制的理论与应用

谢胜利 田森平 谢振东 著

本书得到了如下资助:

国家杰出青年科学基金(60325310)

教育部跨世纪优秀人才基金(教技函[2002]48号)

广东省自然科学创新团队研究项目(04205783)

国家自然科学基金(60274006)

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书较系统地介绍了迭代学习控制的基本理论和近年来的新方法、新成果. 书中对连续系统的迭代学习控制、离散系统的迭代学习控制、分布参数系统的迭代学习控制、退化系统的迭代学习控制、滞后广义系统的迭代学习控制、具有遗忘因子的迭代学习控制、迭代学习控制的几何分析方法及非最小相位系统的最优迭代学习控制等进行了较详细的阐述. 最后介绍了迭代学习控制在各方面的应用.

本书可作为高等院校自动控制专业或数学系的大学生、研究生的参考书或教材, 也可供相关领域的科研及工程技术人员参阅.

图书在版编目(CIP)数据

迭代学习控制的理论与应用/谢胜利, 田森平, 谢振东 著. —北京: 科学出版社, 2005

(当代杰出青年科学文库)

ISBN 7-03-015472-X

I. 迭… II. ①谢… ②田… ③谢… III. 迭代法—自动控制理论 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005) 第 044586 号

责任编辑: 吕 虹/责任校对: 钟 洋

责任印制: 钱玉芬/封面设计: 王 浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005 年 5 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2005 年 5 月第一次印刷 印张: 18 1/2

印数: 1—3 000 字数: 349 000

定价: 46.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈新欣〉)

前 言

学习是人类的基本智能行为之一. 让控制器本身具有某种智能, 使得它在控制过程中能不断地完善自己, 以使控制效果越来越好, 这种具有学习能力的控制器一直是控制工程师们追求的目标. 自 Arimoto 在 1984 年针对机器人系统的特点, 模拟人类学习技能过程, 开创性地提出迭代学习控制的概念及其基本的研究方法以来, 迭代学习控制一直是控制的研究热点之一, 受到国内外控制界的广泛重视, 并正逐渐发展成为智能控制领域的重要分支之一.

迭代学习控制的适用对象是诸如工业机器人那样的具有重复运动性质的被控系统, 它的目标是实现有限区间上的完全跟踪任务. 迭代学习控制采用“在重复中学习”的学习策略, 具有记忆和修正机制. 它通过对被控系统进行控制尝试, 以输出轨迹与给定轨迹的偏差修正不理想的控制信号, 以产生新的控制信号使得系统的跟踪性能得以提高. 迭代学习控制的研究, 对具有较强的非线性耦合、较高的位置重复精度、难以建模和高精度轨迹跟踪控制要求的动力学系统有着非常重要的意义.

迭代学习控制理论与应用研究 20 年来受到了国内外控制界的普遍重视, 人们针对不同类型的对象, 提出了形式多样的迭代学习控制律, 并在一定的前提假设条件下, 利用各种数学工具, 分析得到了迭代学习控制的收敛性条件. Moore 教授于 1993 年出版了迭代学习控制方面的第一本专著之后, 又于 1998 年再次撰写论文, 详细评述和归纳了截止到 1997 年的迭代学习控制研究的进展. 目前国内外都有着多个迭代学习控制的研究小组, 近十几年来, 每届 CDC(IEEE Conference on Decision and Control)、ACC(American Control Conference)和 IFAC(International Federation of Automatic Control)等控制方面的大会都设有迭代学习控制的专题小组. 国际著名的控制类杂志“International Journal of Control”在 2000 年出版了迭代学习控制的专辑, 介绍了一些新的研究成果. 这些都说明了迭代学习控制研究的意义和活跃性, 同时也表明了迭代学习控制的理论还不能认为已经完善.

近年来, 对迭代学习控制的研究, 无论是方法上, 还是在所适应的系统类型

及应用场合上都又有了新的发展,如基于向量图分析的几何方法、基于小波的逼近方法以及滞后广义系统、分布参数系统、退化系统、非最小相位系统等复杂受控对象。目前,国内外所出版的专著中还没能反映出与这些有关的新方法及相应的新成果,鉴于此,作者感到十分有必要撰写一本参考书,向读者介绍有关的基本理论和近年来的新方法和新成果。但是,由于迭代学习控制理论与应用的范围很广,作者在本书中只能以介绍自身的研究小组近年来的相关研究成果为主线,穿插介绍国内外的情况,尤其在迭代学习控制的应用上,书中也给出了较多的介绍。由于作者的水平和研究范围有限,书中缺点和不足在所难免,作者真诚地欢迎读者批评指正。

作者要特别地感谢指引我们走向迭代学习控制研究的启蒙老师——中国科学院数学与系统科学研究院的郭雷院士,他以对迭代学习控制理论及技术的重要性的敏锐意识,指导作者开展了有关的研究工作,并为作者的前期研究提供了良好的学术环境。同时也要感谢作者的导师刘永清教授,是他一直鼓励和培养我们在这方面进行研究,他为我们的进步和成长费尽了心血。本书中作者的成果分别获得了国家自然科学基金(60274006)、教育部跨世纪优秀人才基金(教技函[2002]48号)、国家杰出青年科学基金(60325310)及广东省自然科学创新团队研究项目(04205783)的资助。这些对本书的形成奠定了坚实的基础。作者对他们表示衷心的感谢。

作 者

2004年11月于华南理工大学

目 录

第一章 绪论	1
1.1 迭代学习控制概述	1
1.2 迭代学习控制的研究背景	3
1.3 研究现状及存在的问题	5
1.4 本书的主要内容安排	12
参考文献	14
第二章 连续系统的迭代学习控制	19
2.1 引言	19
2.2 PID 型迭代学习控制算法	19
2.3 具有全局收敛的迭代学习算法	21
2.4 基于小波逼近的迭代学习控制	32
2.5 具有初始误差的迭代学习算法	41
2.6 时滞非线性系统的采样迭代学习控制	43
2.7 小结	50
参考文献	50
第三章 离散系统的迭代学习控制	54
3.1 引言	54
3.2 非线性离散系统的学习控制算法	54
3.3 高阶迭代学习控制算法	60
3.4 基于下三角矩阵理论的学习算法	65
3.5 基于 2-D 系统理论的学习算法	71
3.6 基于算子谱理论的学习控制算法	76
3.7 小结	79
参考文献	79
第四章 分布参数系统的迭代学习控制	82
4.1 引言	82
4.2 定义与引理	82

4.3 不确定线性分布参数系统的迭代学习控制	83
4.4 非线性分布参数系统跟踪控制的学习算法	92
4.5 小结	101
参考文献	101
第五章 退化系统的迭代学习控制	103
5.1 引言	103
5.2 问题的提出	103
5.3 解决问题的基本思路	104
5.4 稳定流形的设计	106
5.5 流形的吸引力	113
5.6 简单讨论	116
5.7 小结	117
参考文献	117
第六章 滞后广义系统的迭代学习控制	119
6.1 引言	119
6.2 问题的提出与转化	119
6.3 误差估计	122
6.4 收敛性分析	129
6.5 简单讨论	132
6.6 小结	133
参考文献	133
第七章 具有遗忘因子的迭代学习控制	135
7.1 不确定初始条件学习控制的遗忘因子算法	135
7.2 机器人系统跟踪控制的遗忘因子算法	138
7.3 鲁棒输出跟踪的遗忘因子算法	142
7.4 关于几类遗忘因子算法的讨论	149
7.5 基于信息综合的遗忘因子算法	151
7.6 小结	159
参考文献	160
第八章 迭代学习控制的几何分析方法	161
8.1 基于几何分析的迭代学习控制算法 I	161

8.2 基于几何分析的迭代学习控制算法Ⅱ	170
8.3 基于几何分析的迭代学习控制算法Ⅲ	181
8.4 小结	191
参考文献	191
第九章 非最小相位系统的最优迭代学习控制	194
9.1 引言	194
9.2 问题描述	195
9.3 基于稳定逆的迭代学习控制	197
9.4 仿真研究	201
9.5 小结	204
参考文献	205
第十章 迭代学习控制的各类应用	206
10.1 在倒立摆控制上的应用	206
10.2 在机器人系统上的应用	208
10.3 在均热炉温度控制上的应用	231
10.4 在高速热处理系统中晶片温度控制上的应用	235
10.5 在无缝钢管张减过程壁厚控制上的应用	245
10.6 在工业过程控制中的应用	255
10.7 在功能神经电刺激系统上的应用	267
10.8 在注塑机控制中的应用	271
10.9 在烟叶发酵系统中的应用	277
10.10 小结	281
参考文献	281

第一章 绪 论

1.1 迭代学习控制概述

从根本上看,控制系统设计中的问题可以归纳为两大类:调节问题和跟踪问题.而调节问题也可以看成是跟踪问题的特殊情况.尽管对于跟踪问题,控制理论已提供了各种设计方法,并取得了良好的效果,但绝大多数控制技术都是渐近地实现跟踪任务的.如果希望实现被控系统的输出零误差地完全跟踪期望轨迹,无疑是一个具有挑战性的控制任务.迭代学习控制技术就是针对这种控制任务提出来的,它从不同的角度构造控制律,能够克服一些传统控制方法难以逾越的困难.

研究具有学习能力的控制器一直是控制工程师们探索的问题.早在 20 世纪 60 年代,就有学者对此问题进行了研究^[1~3],70 年代初 Fu^[4,5]总结了早期在自适应控制领域里的学习控制问题,提出了学习控制的概念,并从发展学习控制的角度首次正式提出智能控制这一新兴的学科领域,从此对学习控制的研究一直很活跃.在此后的十几年间,学习控制技术随着与其相关的学科(如:计算机技术、人工智能及神经网络)和它的应用领域(如机器人等)的发展而发展,如今,智能控制已经在控制界中占有相当重要的地位.

人们在研究高速运动的工业机械手的控制问题时,提出了这样一个思想:不断重复一个同样轨迹的控制尝试,并以此修正控制律,可能可以得到非常好的控制效果. Arimoto 等人^[6]于 1984 年正式提出了迭代学习控制(iterative learning control, 简称 ILC)方法,其实迭代学习控制的概念最早(1978 年)由日本学者 Uchiyama^[7]在一篇有关机器人控制的论文中提出,因文章是以日文发表,当时并未引起人们的重视.直到 1984 年 Arimoto 和他的合作者们^[6,8,9]将 Uchiyama 的初步研究思想加以完善,建立了实用的算法,从理论上证明了这种算法的可行性而成为更为正规的迭代学习控制理论,并以英文发表了他们研究成果,迭代学习控制才逐渐成为令人关注的课题.

迭代学习控制的适用于具有重复运动性质的被控系统,它的目标是实现有限区间上的完全跟踪任务.它通过对被控系统进行控制尝试,以输出信号与给定目标的偏差修正不理想的控制信号,使得系统的跟踪性能得以提高.迭代学习控制的研究对具有较强的非线性耦合、较高的位置重复精度、难以建模和高精度轨迹跟踪控制要求的动力学系统有着非常重要的意义.

迭代学习控制是智能系统中具有严格数学描述的一个分支.考虑重复运行的动力系统如下表示

$$\begin{cases} \dot{x}_k(t) = f(x_k(t), u_k(t), t), \\ y_k(t) = g(x_k(t), u_k(t), t), \end{cases} \quad (1.1.1)$$

其中 x_k, y_k 和 u_k 分别为系统的第 k 次运行的状态, 输出和输入变量. 系统的期望轨迹为给定时间区间 $[0, T]$ 上的期望轨迹 $y_d(t)$. 记第 k 次运行时系统的输出误差为 $e_k(t) = y_d(t) - y_k(t)$, 则迭代学习控制的学习律一般可由递推的形式表示为

$$u_{k+1}(t) = L(u_k(t), e_k(t)). \quad (1.1.2)$$

当 k 趋于无穷时, 如果 $e_k(t)$ 在 $[0, T]$ 上一致趋于零, 则称上述迭代学习控制是收敛的. 收敛性问题是迭代学习控制中最重要的问题, 只有迭代学习过程是收敛的, 迭代学习控制才有实际应用意义.

迭代学习控制的基本原理如图 1.1.1 所示. 在实际应用中, 系统下一次运行的新的控制既可以在上一次运行结束后离线计算得到, 也可以在上一次运行中在线计算得到; 新的控制量存入存储器, 刷新旧控制量; 在施加控制时, 需从存储器中取出控制量. 可以看到, 迭代学习控制算法可利用的信息要多于常规的反馈控制算法, 它包括以前每次运行的所有时间段上的信息和当次运行的当前时刻之前时间段的信息.

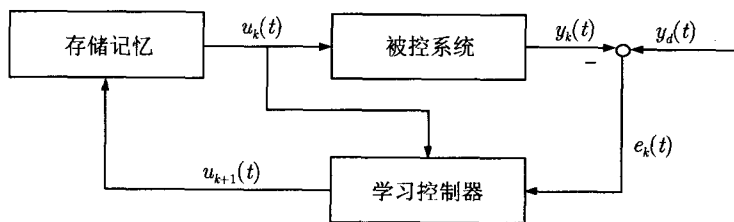


图 1.1.1 迭代学习控制基本结构

在传统的迭代学习控制研究中, 一般总是假定下述假设条件满足:

- 系统每次运行时间间隔是有限的固定间隔, 即 $t \in [0, T]$;
- 系统的期望轨迹总是预先给定且已知的;
- 系统的初始条件重复, 即每次运行前, 系统的初始状态 $x_k(0)$ 都相同;
- 系统的动态结构在每次运行中保持不变;
- 系统每次运行的输出 $y_k(t)$ 可测;
- 存在惟一的理想控制 $u_d(t)$ 使得系统的状态和输出为期望的状态 $x_d(t)$ 和输出 $y_d(t)$.

最后一个假设条件与系统的逆密切相关, 它等价于要求系统可逆, 这显然是一个非常强的假设条件. 不幸的是, 实际上许多动态系统不满足可逆的条件, 因此,

有时我们不得不降低完全精度跟踪的要求, 而代之以寻求使系统输出最接近期望输出的系统输入这一合理的要求. 这等价于在某种范数意义下, 迭代学习控制算法构造了一系列迭代控制序列 $\{u_k\}$, 它收敛于一个可实现的控制信号 $u_*(t)$, 且 $u_*(t)$ 是如下最优问题的解

$$\min_{u(t)} \|y_d(t) - y(t)\|, \quad (1.1.3)$$

其中 $y(t)$ 是系统的输出.

一个成功的迭代学习控制算法, 不仅应该在每次控制作用于系统后, 能使得系统的输出误差变小, 还需要有较快的收敛速度以保证算法的实用性. 另外, 迭代学习控制算法的收敛性应与具体的期望轨迹无关, 如果给出一个新的期望轨迹, 迭代学习律应该无需作任何改变即可适用.

自 1984 年 Arimoto 针对机器人系统的特点, 模拟人类学习技能的过程, 开创性地提出迭代学习控制概念以来, 迭代学习控制一直是控制界的研究热点领域之一. 研究人员针对不同类型的对象^[10~14], 提出了形式多样的迭代学习控制律^[15~19], 并在一定的前提假设条件下, 利用各种数学工具, 分析得到了迭代学习控制的收敛性条件^[20~23]. 1992 年, Moore 对初期的迭代学习控制作了较全面的综述^[24], 1993 年, 他写了迭代学习控制方面的第一本专著^[25]之后, 迭代学习控制研究又取得了大量的成果, 1998 年, Moore 再次撰写了一篇以 254 篇迭代学习控制方面的研究论文作为参考文献的总结性综述论文, 详细评述和归纳了截止到 1997 年的迭代学习控制研究的进展^[26]. 迭代学习控制方面的总结性综述文章还包括文献^[27], ^[28]及^[29]等, 分支专题的综述文章包括文献^[30], ^[31]及^[32]等, 而专著^[33], ^[34], ^[35]及^[36]则更全面和详细地介绍了迭代学习控制方面的研究成果. 国内外都存在着多个迭代学习控制的研究小组, 近年来, 他们的努力使得新的研究成果仍然层出不穷. 近十几年来, 每届 CDC、ACC 和 IFAC 等控制方面的大会都有迭代学习控制的分专题. 国际著名的控制类杂志之一 “International Journal of Control” 在 2000 年出版了一期迭代学习控制的专辑^[37], 介绍了一些新的研究成果. 这一切都说明了迭代学习控制研究的意义和活跃性, 同时也表明了迭代学习控制的理论还不能认为已经完善.

1.2 迭代学习控制的研究背景

迭代学习控制的思想最初的起源是有关机器人控制的问题而提出的, 后来人们发现, 对具有重复运动特征的被控系统, 都可以利用迭代学习控制技术改善其控制系统的动态性能, 故对迭代学习控制的应用例子不断涌现, 这样又导致了促使迭代学习控制的不断深入发展. 在下面我们 will 列举出一些应用的例子, 而这些例子在本章我们不会具体的讨论如何用迭代学习控制的方法来解决它们, 而只是展示迭

代学习控制的应用背景, 真正的解决方法将在本书的第十章论述.

例 1.2.1 两连杆机器人运动轨迹控制^[38], 其示意图如图 1.2.1 所示, 臂长为 l , 两杆质量分别为 m_1, m_2 , 则其动态方程可表示为

$$U(t) = J(\theta)\ddot{\theta} + H(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) \quad (1.2.1)$$

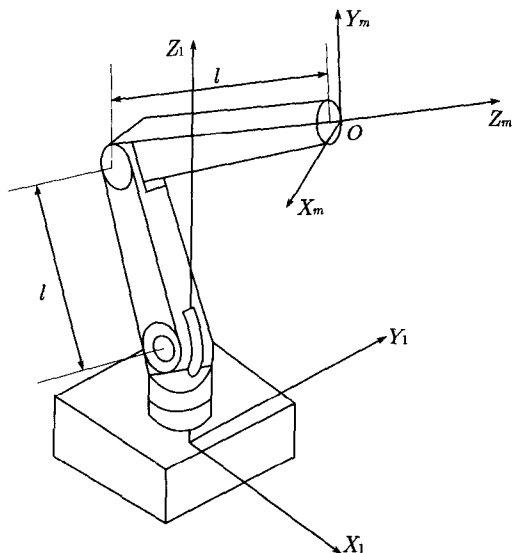


图 1.2.1 两连杆机器人示意图

对此可用指数变增益闭环 D 型学习来进行轨道跟踪控制.

例 1.2.2 倒立摆控制, 其示意图如图 1.2.2.

微分方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = \frac{g \sin x_1 - \frac{m_w l}{m_w + m_p} \sin x_1 \cos(x_1 x_2^2) - \frac{1}{m_w + m_p} u \cos x_1}{\frac{3}{4}l - \frac{m_w l}{m_w + m_p} \cos^2 x_1}, \end{cases} \quad (1.2.2)$$

其中

$$\begin{cases} x_1 = \varphi, \\ x_2 = \dot{\varphi}. \end{cases}$$

倒立摆控制的任务是施加控制 u , 在一时间区间上倒摆杆的稳定直立, 即 $\varphi = 0$, $\dot{\varphi} = 0$. 对此可用闭环 D 型学习控制来得到解决.

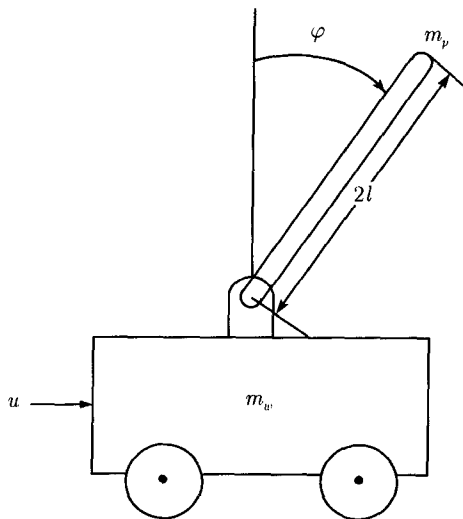


图 1.2.2 倒立摆示意图

除此以外, 迭代学习控制还在工业生产线上的机械手 [26]、数控机床 [27]、直线电机 [39]、塑料挤出机 [40]、半导体晶片生产 [41]、过程工业中的批处理过程 [42]、均热炉温度控制 [43]、阀控缸电液位置伺服刀架 [44]、无缝钢管张减过程壁厚控制 [45]、烟叶发酵系统 [46]、功能神经电刺激系统 [47,48] 等问题中有着很好的应用。由于迭代学习控制的这些应用背景, 也促使人们对其完整的理论体系进行探讨。

1.3 研究现状及存在的问题

迭代学习控制理论研究的内容包括: 学习算法的稳定性和收敛性、学习律和学习系统的具体结构形式、学习速度、学习控制过程的鲁棒性、迭代学习控制的分析方法 (频域、时域、连续系统及离散系统、2-D 分析方法)、初始值问题及迭代学习控制的应用等等, 而且这些内容都是相互关联的。在近十几年, 各方面的研究取得了许多重要的成果。

1.3.1 学习算法的稳定性和收敛性

学习算法的稳定性是保证迭代学习控制能够运行的基本前提, 它保证随着学习次数的增加, 控制系统不会发散。但对于学习控制系统而言, 仅仅稳定是没有实际意义的, 只有使学习过程收敛到真值, 才能保证得到的控制为某种意义下最优的控制。收敛是对学习控制最基本的要求, 多数学者在提出新的学习律的同时, 基于被控对象的一些假设, 给出了收敛的条件。在收敛性证明中所使用的数学工具主要有: 微积分不等式、Lyapunov 理论、2-D 理论、算子理论等。Arimoto 在最初提出

PID 型学习控制律时, 仅针对线性系统在 D 型学习律下的稳定性和收敛条件作了证明, 后来的许多学者对其他系统 (非线性连续系统、离散系统、分布参数系统、广义系统以及相应的滞后系统等) 作了相应的研究, 其中较早研究非线性系统的是 Hauser^[49] 和曾南等^[50]. 文献 [49] 将控制系统推广到较为一般的非线性系统:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t), t) + B(x(t), t)u(t), \\ y(t) = g(x(t), t), \end{cases} \quad (1.3.1)$$

得到了 D 型学习律收敛的充分条件. 文献 [50] 给出了一类非线性系统:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x, t) + B(t)u(t), \\ y(t) = g(x, t) + D(t)u(t) \end{cases} \quad (1.3.2)$$

在开环和闭环 P 型学习律下稳定和收敛的条件.

随后, Padieu 等^[51] 应用 H_∞ 方法分析线性时不变系统迭代学习控制的收敛性, 给出了迭代学习控制算法收敛的充分条件. Owens^[52] 针对线性时不变系统分析了高增益反馈学习律的收敛性. Ishihara 等^[53] 基于系统的脉冲响应构造学习律, 证明了输出误差沿迭代轴的单调衰减性质. Park 等^[54] 提出适应学习控制, 给出了一种分析算法收敛性的方法: 构造一正定函数, 它与系统参量 (状态误差, 控制误差等) 有关, 通过证明该函数沿迭代轴的单调递减性质证明算法的收敛性. Qu 等^[55,56] 基于 Lyapunov 直接法分析了机器人迭代学习控制系统的收敛性. Arimoto 等^[57~59] 基于无源分析证明了刚性关节机器人、终端受限机器人迭代学习控制的一致有界性和收敛性. 对于 LTI 离散时间系统, Geng 等^[60] 以 2-D 系统统一描述迭代学习控制沿时间轴和沿迭代轴两个方向的运动, 给出了以矩阵秩表达的收敛条件. 对于连续非线性系统, 史忠科^[61] 提出了一般性的迭代学习控制方法, 给出了 PID 型学习控制算法的收敛条件, 该方法可以逼近任意轨线. 谢胜利等^[62] 讨论了滞后非线性离散系统的迭代学习控制问题, 所给的迭代学习控制算法不仅收敛, 而且还保证了对期望目标在通常意义下的轨道跟踪.

皮道映等^[63~65] 讨论了连续非线性系统和离散非线性系统开闭环 P 型和 PI 型迭代学习控制问题的收敛条件, 他们给出的条件既可判断开环 P 型和 PI 型迭代学习控制问题的收敛性, 也可用来判断闭环 P 型和 PI 型迭代学习控制问题的收敛性. 理论研究和仿真结果均表明: 开闭环 P 型和 PI 型迭代学习控制学习律的收敛条件与所描述的状态方程的具体形式无关. 谢振东等^[66,67] 讨论了一类线性离散系统和非线性离散系统的状态跟踪控制问题, 通过将所考虑的学习控制问题转化为一个下三角动力系统的平凡解全局稳定性问题, 获得了对系统理想状态跟踪的结果. Wang^[68] 和谢胜利等^[69] 也讨论了离散非线性系统的收敛性问题.

谢胜利等^[70] 首次将迭代学习控制方法应用于滞后广义系统的状态跟踪控制上, 给出了跟踪控制的学习算法, 并对算法的收敛性及状态跟踪的可能性进行了讨论.

1.3.2 初始值问题

运用迭代学习控制技术设计控制器时, 只需要通过重复操作获得的受控对象的误差或误差导数信号. 在这种控制技术中, 迭代学习总要从某初始点开始, 初始点指初始状态或初始输出. 几乎所有的收敛性证明都要求初始条件是相同的, 解决迭代学习控制理论中的初始条件问题一直是人们追求的目标之一. 目前已提出的迭代学习控制算法大多数要求被控系统每次运行时的初始状态在期望轨迹对应的初始状态上, 即满足初始条件:

$$x_k(0) = x_d(0), \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (1.3.3)$$

当系统的初始状态不在期望轨迹上, 而在期望轨迹的某一很小邻域内时, 通常把这类问题归结为学习控制的鲁棒性问题研究. Heinzinger 等^[71]曾专门对初值偏差问题与学习的稳定性作了研究, 并给出了迭代学习控制算法稳定性的结论, 但不能保证收敛. Arimoto^[72]进一步给出了当初始状态偏差不大时, 学习控制收敛于期望轨迹某一邻域, 但也不能保证收敛到真值, 且当初始状态的偏差较大时, 学习过程也会有较大的误差, 因而使控制不能跟踪期望轨迹. Lee 等^[73]针对连续线性系统, 分两种情况讨论了具有非零初始偏差的 D 型和 PD 型迭代学习控制问题: 每次迭代的初始状态与期望轨迹对应的初始状态不同, 但初始误差保持不变, 即 $x_k(0) - x_d(0) = x_0$; 每次迭代的初始误差是变化的. 结果表明, 具有不变初始误差的迭代学习控制系统的性质优于具有变化初始误差的迭代学习控制系统. 孙明轩等^[74]讨论了具有初始偏差的非线性系统的 PD 型迭代学习控制时指出, 在 D 型学习律作用下, 非线性系统的迭代输出会收敛于一极限轨迹, 它与期望输出轨迹存在一恒定偏差, 而在 PD 型学习律作用下的极限轨迹表明, 通过在学习律中增加了 P 型项, 可有效地减少这种偏差. 进一步地, 初始输出满足渐近严格重复时, 可保证系统迭代输出误差的一致收敛性. 它放宽了现有文献中对每一次迭代所要求的一致性初始条件. 因此, 采用这种学习律可有效地抑制初始偏差的影响. Park 等^[75]讨论了线性系统和一类非线性系统具有初始状态误差的迭代学习控制问题, 结果表明, 初始状态误差的影响可通过学习增益的选取来控制. 谢胜利等^[76]讨论了由 n 个传动器所驱动的 n 个关节机器人系统的跟踪控制问题, 通过变换将相应系统转化为低阶系统, 然后针对低阶系统进行设计. 该方法消除了 Kawamara 等^[77]在学习过程中要求每次学习都经过相同的初始值的限制, 从而克服了 Kawamara 方法难以应用到“学习过程中存在初态误差”的困难. 任雪梅等^[78]给出了任意初始状态下的迭代学习控制, 通过对系统的控制输入和初始状态同时学习:

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + L\dot{e}_k(t), \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (1.3.4)$$

$$x_{k+1}(0) = x_k(0) + BL e_k(0), \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (1.3.5)$$

来实现系统的完全跟踪. 该方法在学习开始时对初始状态无要求, 即不需要假设在每次循环过程中系统的初始状态和期望跟踪轨迹的初始状态都相等, 在一定程度上可以解决任意初始状态下学习控制系统的跟踪问题. Chen 等^[79] 针对线性系统 and 非线性系统, 利用文献 [78] 中相同的控制策略, 讨论了迭代学习控制问题, 得到了跟踪误差的一致有界性, 且跟踪误差的界只与系统的不确定项和扰动项有关, 而与初始误差无关.

1.3.3 鲁棒性问题

由于迭代学习控制理论的提出有着浓厚的工程背景, 因此人们注意到仅仅在无干扰条件下讨论收敛性问题是不足的, 还应讨论存在各种干扰的情形下系统的跟踪性能. 一个实际运行的迭代学习控制系统除了存在初始偏移外, 还或多或少存在状态扰动、测量噪声、输入扰动等各种干扰. 鲁棒性问题讨论存在各种干扰时迭代学习控制系统的跟踪性能. 具体地说, 一个迭代学习控制系统是鲁棒的, 是指系统在各种有界干扰的影响下, 其迭代轨迹能收敛到期望轨迹的邻域内; 而当这些干扰消除时, 迭代轨迹会收敛到期望轨迹. 由此看来迭代学习控制系统的鲁棒性问题是比稳定性问题更广泛一些的问题. 从目前已获得的鲁棒性结果来看, 有些学习律作用下的系统是鲁棒的, 但也确实存在一些学习律, 在干扰的影响下, 系统的迭代轨迹与期望轨迹的偏差不是有界的. 例如, Heinzinger^[80] 给出了由初始偏差造成系统迭代发散的例子.

迭代学习控制鲁棒性问题最早由 Arimoto 等^[81] 提出, 且在后来的文章中作了深入的讨论, 这些讨论基本上以线性化为前提. Heinzinger^[80] 未采用线性化手段, 首先深入地针对带遗忘因子的 D 型学习律分析了非线性系统 $\{f(x), B(x), g(x)\}$ 的鲁棒性, 文中只讨论了两类干扰: 初态偏移和状态扰动. 其结果指出: 当初态偏移和状态扰动有界时, 控制误差 $u_d - u_k$, 状态误差 $x_d - x_k$ 以及输出误差 e_k 渐近有界, 即由算法给出的跟踪轨迹会收敛到期望轨迹的某个邻域内, 并且该邻域的大小是关于两种干扰上界的连续函数; 当干扰不存在或被清除时, 该邻域宽度为零 (即算法收敛). Saab 等^[82] 仍然讨论这种带遗忘因子的 D 型学习律, 得到了同样的结果; 其干扰包括: 初态偏移、状态扰动、测量噪声以及期望轨迹变动. 谢胜利等^[83] 将迭代学习控制方法用于一类非线性分布参数系统的跟踪控制上, 分别获得了系统轨线于 $L_2(\Omega)$ 空间和 $W_{1,2}(\Omega)$ 空间中跟踪期望目标的结果. 所给的迭代学习算法避免了其收敛性要依赖于理想输入 $u_d(x, t)$ 这一不确定的条件, 且对系统的非线性要求只是定性的而不是定量的, 从而使得控制具有很强的鲁棒性能.

Arimoto 等^[57,58] 讨论 n 关节机器人的动力学特征, 在对动态方程增加一些约束条件的基础上, 通过在 P 型学习律中引进遗忘因子, 证明了带遗忘因子的 P 型学习律的鲁棒性. 其中讨论了三种干扰: 初态偏移、状态扰动和测量噪声. 谢胜利等^[76,84] 和 Wang^[85,86] 进一步将迭代学习控制用于提高终端受限机器人、弹性

关节机器人的跟踪性能。

Saab^[87] 将文献 [57] 的鲁棒性结果推广到非线性系统 $\{f(x), B(x), C\}$ 。其结果指出：当初态偏移、状态扰动和测量噪声有界时，带遗忘因子的 P 型迭代学习控制使得控制误差 $u_d - u_k$ 、状态误差 $x_d - x_k$ 以及输出误差 e_k 一致有界，当各种干扰消除时，系统输出一致收敛于期望轨迹。林辉等^[88] 和 Chien^[89] 等将鲁棒性问题的讨论推广到一般非线性系统 $\{f(x, t), B(x, t), g(x, t)\}$ ，以 P 型学习律为例，给出了鲁棒性分析的理论结果，表明迭代学习控制具有很好的鲁棒性。

Xu 等^[90,91] 和 Doh 等^[92] 也在他们相应的工作中讨论了迭代学习控制的鲁棒性。

1.3.4 快速收敛问题

对于迭代学习控制一个重要的研究问题就是如何使学习控制过程更快地收敛于期望值，对此不少学者作了多方努力，Gu^[93] 提出一种多步误差组合的学习律，仿真结果说明收敛过程加速了，但没有学习律增益的选择方法，仅仅只是一种经验的方法，因此不能适用于一般的被控对象。Togai^[94] 给出了学习优化方法，如梯度法、牛顿-拉夫逊法和高斯法，但这需要在已知动态过程精确的结构和参数时才有最优可言，这就失去了用迭代学习控制的意义了。更多的学者是在学习律上研究，以期得到最快的学习收敛速度。人们通过精心选择学习增益且从理论上也保证满足收敛性条件，但实际仿真中却看到发散的倾向，以至使人怀疑迭代学习控制的可行性^[95]。林辉等^[96] 从理论上分析了影响迭代学习控制学习速度的各种因素，并以开环 P 型学习律为例作了详细的推导，给出了理论结果。从目前已发表的文献看，研究迭代学习控制算法的快速收敛问题一般有以下几种方法：

一、优化学习算法

对于线性时不变离散系统，Togai^[97] 提出学习律

$$u_{i+1}(k) = u_i(k) + G e_i(k+1), \quad (1.3.6)$$

式中 G 通过下述最小化指标函数确定

$$J = \frac{1}{2} e_i^T(k+1) e_i(k+1). \quad (1.3.7)$$

应用 Newton-Raphson 法，则

$$G = -\frac{\|e_i(k+1)\|^2}{\|B^T e_i(k+1)\|^2} B^T, \quad (1.3.8)$$

式中 B 为状态方程中控制项的系数矩阵，这时 G 为时变的。

应用 Gauss-Newton 法可得

$$G = -(B^T B)^{-1} B^T. \quad (1.3.9)$$