

机电类研究生用规划教材

迭代学习控制 理论及应用

于少娟 齐向东 吴聚华 编著



机电类研究生用规划教材

迭代学习控制理论及应用

于少娟 齐向东 吴聚华 编著



机械工业出版社

本书全面系统地介绍了迭代学习控制的理论、方法及其实现技术。突出反映了该领域国内外的最新研究成果及其大量应用实例,并将作者的研究成果融汇其中。

全书共分6章,第1章介绍迭代学习控制技术的发展概况、研究现状等,第2章介绍迭代学习控制的数学工具,第3章介绍迭代学习控制的研究内容,第4章介绍迭代学习与先进控制技术的结合,第5章介绍迭代学习控制的应用成果,第6章对迭代学习控制的研究方向进行展望。

本书取材广泛,结构严谨,深入浅出,理论联系实际。可作为相关专业研究生或高年级本科生的教材。亦可帮助科技人员了解并更好地应用迭代学习控制。

图书在版编目(CIP)数据

迭代学习控制理论及应用/于少娟等编著. —北京:机械工业出版社, 2005.7

机电类研究生用规划教材

ISBN 7-111-16541-1

I. 迭... II. 于... III. 迭代法—自动控制理论—研究生—教材 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 046776 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:刘丽敏 版式设计:霍永明 责任校对:樊钟英

封面设计:王伟光 责任印制:陶湛

北京铭成印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2005 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

1000mm×1400mm B5·9.25 印张·327 千字

定价:26.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010) 68326294

封面无防伪标均为盗版

前 言

自 20 世纪 80 年代以来,随着科学技术突飞猛进的发展,智能控制的研究也揭开了其新的篇章。其中,迭代学习控制的研究一直是热点之一。它是自动控制理论中的一门新兴学科,适用于具有重复运动性质的被控对象,与其他的控制方式相比,迭代学习控制的特点是能够充分利用前几次的控制信息构成当前的控制输入信号,且不依赖被控系统的详细模型,由于它的算法简捷、控制效果显著而受到各国科研工作者的极大关注,早期的研究集中在学习控制律的构成及其特性的分析上,许多相关的论文陆续发表。近几年,这一控制技术在许多领域内相继得到广泛应用。充分显示了迭代学习控制的巨大应用潜力。作者多年来致力于迭代学习控制的研究,深感该控制技术的理论与应用获得了迅速的发展,为了及时反映这一领域的理论与应用的新成果特编写此书。

本书结合国内外学者的分析方法,同时还吸收了国内外许多典型应用成果,突出近几年该领域其他学者及作者自身研究成果。重点把握迭代学习控制最新动态,强调了迭代学习作为一种控制技术的广泛实用性及其与其他现代控制技术的有机结合。这是迭代学习控制的研究热点,也是今后学者广泛关注的研究方向。本书的特点是注重迭代学习控制的实用性,而不是泛泛地谈理论、方法,具有鲜明的针对性。有助于工程技术人员及其他科学研究者熟悉迭代学习控制技术及其最新发展动态。

全书共分 6 章,第 1 章介绍迭代学习控制技术发展概况、研究现状等。第 2 章介绍迭代学习控制的数学工具,约占全书的十分之一。第 3 章介绍迭代学习控制的研究内容约占全书的十分之三。第



4 章介绍迭代学习控制与先进控制技术的结合, 约占全书的五分之一。第五章介绍迭代学习控制的应用成果, 约占全书的三分之一。第六章对迭代学习控制的研究方向进行展望。其中第 1 章、第 2 章、第 4 章、第 5 章由于少娟副教授编写。第 3 章由齐向东副教授编写。第 6 章由吴聚华教授编写。

在本书的编写过程中, 太原科技大学的领导给予了热情的帮助和支持。中北大学郭圣权教授仔细审阅了全部书稿, 提出不少宝贵意见, 在此由衷的表示感谢。

此外, 书中部分内容引用了国内外专家、学者的最新研究成果, 在此谨向他们致以诚挚的谢意。

由于我们水平有限, 缺点和错误在所难免, 恳切希望同行专家和广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 迭代学习控制技术及发展概况	1
1.2 研究内容及现状	3
1.3 迭代学习控制原理	6
1.4 各章节内容简介	9
第2章 迭代学习控制理论的数学基础	11
2.1 定义	11
2.2 定理	15
2.3 Roesser 模型	28
第3章 迭代学习控制理论	32
3.1 迭代学习律	32
3.2 2-D 分析法	68
3.3 初值问题	82
3.4 鲁棒性	89
3.5 学习速度	103
第4章 迭代学习控制与其他先进控制技术的结合	111
4.1 先进控制技术发展概况	111
4.2 模糊学习控制	113
4.3 迭代学习控制与最优化原则	118
4.4 迭代学习控制与神经网络控制	123
4.5 迭代学习滑模控制	133



4.6 自适应迭代学习控制	139
第5章 迭代学习控制技术的应用	146
5.1 迭代学习控制在机器人控制中的应用	146
5.2 迭代学习控制在伺服系统中的应用	169
5.3 迭代学习控制在倒立摆系统中的应用	184
5.4 迭代学习控制在工业过程控制中的应用	190
5.5 迭代学习控制在生产机械中的应用	209
5.6 迭代学习控制在医学方面的应用	242
5.7 迭代学习在化学过程控制中的应用	244
5.8 迭代学习控制在电力系统中的应用	248
5.9 迭代学习控制在电子产品中的应用	263
第6章 迭代学习控制技术研究方向展望	279
6.1 理论的完善	279
6.2 智能迭代学习控制技术的发展	282
6.3 推广与应用	282
参考文献	284

第1章

绪论

1.1 迭代学习控制技术与发展概况

智能控制自 20 世纪 70 年代形成至今研究势头异常迅猛。学习控制是广义智能控制（包括学习控制、认知控制与联想决策等）的一个高级分支。它相对于其他典型的智能控制方法而言，具有自动知识获取能力即学习能力，是美国学者 Fu 在 1970 年最先提出，他是在对线性再励学习控制系统的研究中率先使用了人工智能中的启发式方法。学习控制的研究热点之一是迭代学习控制（Iterative Learning Control，简称 ILC），它于 20 世纪 80 年代由日本兴起，1978 年日本学者内山（Uchiyama、东北大学）最先提出这一方法，并于 1984 年由日本学者本卓（Arimoto、大阪大学）等明确其概念，后由川村、宫崎（大阪大学）等学者进一步研究并促进了这种理论的发展与完善。

迭代学习控制研究的动机，来源于从经验学习知识的这种深刻认知。设计一种控制器，让控制器本身具有某种“智能”，即能在系统运行中估计未知的信息并基于这个估计的信息确定最优控制，使它在控制过程中能不断地完善自己，也就是不断训练控制器，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。换句话说，当我们重复完成某一控制任务的时候，我们从过去的控制输入和跟踪误差数据中获得额外的信息，这种信息我们把它看成是一种经验，一种关于动态过程模型的经验知识。利用这样的经验知识，我们降低了对过程模型的依赖，并且提供了改进跟踪控制性能的可能性。

迭代学习控制作为在时域中发展的学习控制,相对于在频域中发展的重复学习控制而言应用较广、成果较多,引起了更多的注意。

在迭代学习控制理论形成期的研究集中于新算法的构成以及它的特性分析,迭代学习控制的特点是具有严格数学描述和定义,学习算法简单,且不依赖被控系统的详细模型,这种理论对解决传统控制难以控制的复杂不确定性系统有独到之处,尤其适用于具有重复运动性质的被控对象,从“迭代”二字就可看出,这是要求动态过程是可以重复的一种行为,其目标是在一定时间间隔内按期望输出找到期望输入控制,可充分利用前几次的控制信息构成当前的控制输入信号。在这一时期研究中,迭代学习控制一般作为离线计算方法,主要由以下三个基本元素构成:学习控制适用的系统、输入的迭代控制算法及保证算法收敛的条件。1973年美国和日本以学习控制和智能控制为题召开了专题讨论会,在20世纪70年代发表了大量有关学习控制和智能控制的文章。1977年Sa-tadis发表了他著名的专著《随机系统的自组织控制》,总结了这些理论成果。在20世纪80年代,由Arimoto与其同事Kawamura, Miyazaki等人对开环的P型、PI型、PID型以及D型,PD型的学习算法的理论与应用做了大量的研究工作,取得了相当一批理论成果,并取得了在机器人上应用的成功,其研究工作带动了当时国际学术界对迭代学习控制的研究。最初,关于其他类型控制系统的研究结果远不如机器人迭代学习控制的研究结果多。它的使用区别于常规控制方法。古典或者现代控制理论对具有在一定时间内循环往复运动的机器人的应用难以收到令人满意的效果,尤其在机器人高速运动时,主要是因为这些理论应用时在每次循环中对系统的响应总是需要一定的时间才能达到期望值。只有系统经历一段时间后好的性能才能得以保证。这样对机器人短暂的重复运动的控制显然是不可取的。由于迭代学习控制自身的特点,如对系统需要较少的先验知识和较少的计算量,一般不需要辨识系统的参数,从而能处理未知参数和不确定性问题,具有一定的鲁棒性等,决定其可作为一类机器人或机械装置基于自主训练来调整运动性能的一种较好的方法。它的研究对诸如机器人等有着非线性、强耦合、难建模且对运动控制有着高速、高精度要求的对象有着重要的意义。

在此后的十几年间,迭代学习控制技术随着与其相关的学科及应用领域,如计算机技术、现代智能控制、机器人技术等的发展而发展。

自1992年以来,迭代学习控制的研究出现了新飞跃,在国内外颇具影响的期刊以及在连续几年的国际控制与决策大会上都发表了不少的研究成果。其代表性的成果是迭代学习算法结构研究、鲁棒性研究、尤其是工程实

际应用方法, 研究成果多集中于将迭代学习控制应用于各种具有某种重复运动(运行)性质的受控对象, 它们扩大了迭代学习控制理论的适用范围。例如, 将这种控制技术应用具有某种重复运行性质的工业过程极具前景。其控制目的在于改善控制系统的瞬态性能; 或实现控制系统的稳态补偿; 或抑制系统的不确定性干扰。其基本做法是在反馈控制环基础上, 增加一个学习控制环。迭代学习控制能处理未知参数。在许多工业过程中, 这样的问题是经常遇到的, 如自来水生产过程、间歇式反应器过程、集成电路焊接过程和各种装配线或生产线。它通过多种方式实现对适用系统进行卓有成效的智能控制。迭代学习控制已广泛应用于数控加工、坐标测量、光盘驱动系统、化工间歇过程等领域。

近几年, 自适应、模糊控制、神经网络、变结构控制等先进的控制技术越来越多地运用于迭代学习控制, 由此产生了各种新算法, 获得了用单一控制方式难以实现的期望特性, 还可以克服传统控制方法所固有的特性设计方面的缺陷。另外, 它还渗透到非控制领域, 用于参数、模型辨识和曲线拟合等方面。

迭代学习控制理论是以工业机器人为背景提出的, 可以看出它的提出本身有着浓厚的工程背景。这种理论的建立、发展与完善着重围绕不确定因素, 较多的动力学对象的重复操作任务的快速、高精度、高性能得以实现。可以预见, 迭代学习控制的发展前景随着其在各种工程领域应用的不断扩展, 将变得更为广阔。

1.2 研究内容及现状

近几年来, 迭代学习控制的研究逐步深入, 其研究的具体内容包括学习律和学习系统的研究, 学习控制的收敛性、学习控制过程的鲁棒性, 收敛速度及初值问题、分析方法及应用等。

学习律的研究是迭代学习控制的基础, 也是其研究最广、相对最成熟的问题之一。它包括提出新算法, 放宽收敛条件, 加快收敛速度等。主要内容有研究各种不同的迭代学习算法, 如 P 型、D 型、PI 型、PD 型、PID 型学习算法, 沿时间轴方向与沿学习迭代方向的学习算法或其组合形式的学习算法, 以及其他形式的迭代学习算法; 研究不同的学习系统的结构形式, 即被控系统 with 学习控制器的构成形式, 如开环学习和闭环学习, 开闭环结合算法, 以及其他形式的学习算法。目前学习律的研究中, 主要是一些针对特殊系统提出的控制律。例如, 由于测量手段的限制, 在快速热处理的控制过程中, 只能测量端点输出

跟踪误差而不是整个输出轨迹的跟踪误差,由此产生了端点对端点的迭代学习算法。其特点是仅端点的状态和输出可测,整个控制目标也是端点的状态和输出,而不是系统的整个轨迹,该方法适用于不确定时变系统。还有一种最优学习算法,通过某一种指标函数来优化学习因子,采用优化原则构成迭代学习算法的主要目的是使满足某种优化条件下的跟踪误差最小化。这种优化方式必须对系统的结构及参数有一定的先验知识。滤波型学习算法也是较为常见的学习律,如在频域内实现的优化迭代学习算法,迭代学习的输入信号表示为滤波器的运算,可由系统模型和满足优化条件的变量得到,适用于线性 SISO 离散系统。也可采用以优化原则为前提,带有反馈的迭代学习算法,此时优化原则为某种范数意义下的优化,通过取极值可得优化控制输入。在时滞标量系统的迭代学习方案中可以使用单层神经元计算时域响应中的积分项,以减少计算量。采用神经网络还能使收敛条件能更好地得到满足,神经网络的作用有两个,提供离线训练过程以估计系统的动态特性,给以迭代控制器为基础的神经网络设定初值;每次迭代时,通过调整神经网络可以改善近似精度。有学习能力的综合预测控制 GPCL (General Prediction Control with Learning) 可以改善综合预测控制 GPC (General Prediction Control) 的标准性能,适用于具有重复特性,受到重复性干扰,并在运行点上可以局部线性化的系统,它可以与在线的自适应控制结合使用,提前学习或补偿干扰的可重复部分。模型参考学习算法则能使动态系统跟踪指定的参考模型,而不局限于轨迹跟踪。另外,以前的研究大多集中在仿射型系统的研究上,对无仿射型系统的研究甚少,主要障碍在于存在大量的无仿射映射,目前有关文献对此提出了新算法,推导得到了 P 型、牛顿型、修改后的牛顿型等多种迭代学习律。研究表明:如果希望改善收敛率或放宽收敛条件,则必须详细了解目标系统的情况。常规的迭代学习算法中采用的因果逆变换法不适用于非最小相系统,由此出现了用于非线性系统的稳态逆变换法,它可以保证在满足一般假设条件下学习算法的收敛性,并且出现未知结构及不确定性时能实现渐近跟踪。Bone 提出把广义预测控制和迭代学习控制结合起来的算法,能补偿系统的重复扰动,明显改善系统性能。在系统跟踪误差线性时变模型基础上, Lee 研究了非受限和受限的模型预测迭代学习控制算法,其优点是随着迭代次数的增加跟踪误差快速降为零。

收敛性是迭代学习控制理论的中心问题。学习算法的稳定性是保证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控制。学习稳定性与收敛性问题是

研究当学习律与被控系统满足什么条件时迭代学习控制过程是稳定或收敛的。提出新的学习算法必须解决与之相对应的迭代收敛性问题。目前从最初的时不变系统到线性时变系统、非线性系统、从连续系统到离散系统都有大量的具有稳定性和收敛性的学习律。

鲁棒性问题讨论包括系统中存在各种干扰时,如不确定输入、状态扰动、测量误差、初始条件误差、期望轨迹变动及学习区间偏移时,在各种学习律下,被控系统控制过程的稳定与收敛问题。即学习系统的跟踪性能。这一问题最早是由 Arimoto 提出的,是针对线性系统而言,后由 Saab, Chien 等推广至非线性系统。频域鲁棒性研究方法能有效解决被控对象模型不确定性和外界扰动不确定性问题。由此 H_∞ 控制方法和结构奇异值 μ 方法被用于迭代学习控制的分析与设计以增强其鲁棒性。一些鲁棒性较强的控制如变结构控制也用于和迭代学习控制相结合解决其鲁棒性问题。

学习速度对于各类学习系统而言都是一个重要的概念,学习速度是研究迭代学习控制对给定的被控系统在各种不同的学习律下,系统的输出收敛到给定的性能指标与哪些因素有关,在迭代学习控制中,采取一些有效措施,可以加快收敛速度,提高算法的稳定性等,使算法的性能得到改善。期望以最优的学习律和最佳的系统构成,以获得最快的收敛速度。不少学者做了许多努力,有结果表明,采用高阶学习律可提高收敛速率。Togai 给出了离散系统优化的 D 型学习律,优化方法为梯度法、牛顿-拉夫逊法和高斯法,LEE H 指出用 sup 范数比 λ 范数可大大改善学习的动态过程。可选择最优范数和 H_∞ 范数。

初值问题是指控制过程中系统初始状态与收敛性的关系,目前大多数研究的迭代学习控制都是假定系统的初始状态位于期望轨迹上才得出收敛条件,例如 Arimoto 对于一阶非正则系统给出初始条件, Sugie 对正则系统提出一初始条件。Porter 对部分非正则连续系统给出初始条件。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。许多文献提出系统初始条件不在期望轨迹上时,如何保证迭代学习控制收敛的问题,但其收敛条件相对严格。所以这一问题还有待于进一步研究。如 Heinzinger 得出当初态可重复时初始偏差不影响学习控制系统的稳定和收敛,收敛误差与初始偏差成正比,但没有给出如何减小收敛误差的方法。任雪梅等首先采用初始状态学习方法解决了仿射非线性系统在 D 性学习律作用下的初态问题,但需要系统的输入矩阵 $B(t)$ 来确定下次迭代时系统的初始状态。LEE、HS 等人指出在 PD 和 PLD 性学习律作用下,由于初始误差引起系统在时间轴 t 上的跟踪误差,可以通过选择学习矩

阵 ϕ 和 ψ 尽快减小。孙明轩等人用补偿项消除了在 PD 型学习率控制下的仿射非线性系统初始误差引起的跟踪误差。

迭代学习控制的分析方法是指用于分析控制过程的理论方法，包括时域、频域分析法、二维系统分析法等。分析收敛性大多使用 λ 范数，Padieu 应用了 H_∞ 方法，Kuc 等提出通过证明一所构造的正定函数沿迭代轴的单调递减性质以证明算法的收敛性。

迭代学习控制的应用研究是其重点之一，早期主要集中于离线应用，目前大力研究在线应用则是趋势之一，不断拓宽其应用领域也是研究的主要任务之一。

1.3 迭代学习控制原理

1.3.1 迭代学习控制基本描述

迭代学习过程对于具有可重复性的被控对象，即该被控系统的向量函数在每一次重复运行时所表示的函数关系不变，利用控制系统先前的控制经验，根据测量系统的实际输出信号和期望信号，来寻找一个理想的输入特性曲线，使被控对象产生期望运动。“寻找”过程是对被控制对象作反复训练的过程。这一过程的数学描述为：在有限的时间 $t \in (0, T)$ 内，已知被控对象的期望响应 $r(t)$ ， $t \in (0, T)$ 和相应的期望初态 $x_d(0)$ ，求解某种给定的 $u_k(t)$ ， $t \in (0, T)$ ，使其响应在某种意义上比 $y_k(t)$ ， $t \in (0, T)$ 有所改善，其中 k 为迭代学习次数。

通过举例可以让读者对迭代学习控制的概念有更好的理解。假设 $r(t)$ 是有限时间内的一个期望输入信号。通过多次学习可以准确地跟踪这个期望输入信号。迭代学习的典型应用是机械手。本文后面也介绍了迭代学习在机械手中的应用。考虑期望输入信号和图 1-1 中描述的系统。假设期望输入信号是机器人的关节位置，系统 G_c 可以看成是单输入单输出离散时间

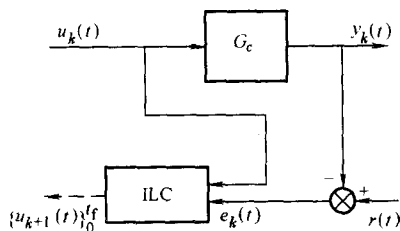


图 1-1 ILC 控制系统的举例

系统，机器人关节和控制器采用闭环模式。关节从起点开始运动，假设每个时间段这一运动从同一初始状态重复（如相同的初始位置，速度等）。假设存在

初始输入值 $U_0(t)$ 对应的输出信号为

$$y_0(t) = G_c(q)U_0(t) \quad (1-1)$$

其中, q 是时变算子。跟踪误差定义为

$$e_0(t) = r(t) - y_0(t) \quad (1-2)$$

图 1-1 中 y_k, u_k, e_k 的下标 k 表示迭代学习的次数。我们在下面将介绍 ILC 的算法。假设: 1. 初始条件在每次学习时都重新设定。

2. G_c 是时不变的。

为简单起见, 假设系统不存在干扰, 我们要找到系统的最佳输入 $u(t) = G_c^{-1}(q)r(t)$ 。一个可能的方法是更新系统的输入控制

$$u_1(t) = u_0(t) + L(q)e_0(t) \quad (1-3)$$

其中, $L(q)$ 是线性离散时间过滤器。这一公式是 ILC 中最常见的, 式 (1-2), 式 (1-1), 和式 (1-3) 的结果可概括为

$$e_k(t) = r(t) - y_k(t) \quad (1-4a)$$

$$y_k(t) = G_c(q)u_k(t) \quad (1-4b)$$

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + L(q)e_k(t) \quad (1-4c)$$

这是一个二维的时间和迭代问题, 后者被引入因为迭代时存在耦合作用。图 1-1 中, ILC 算法控制器以 u_k 和 e_k 作为输入。 $\{u_{k+1}(t)\}_0^t$ 作为输出, 输出 $u_{k+1}(t)$ 与 $u_k(t)$ 和 $e_k(t)$ 有关。 $t > t$, 由 (1-4a), (1-4b) 和 (1-4c) 知

$$e_{k+1}(t) = (1 - G_c(q)L(q))e_k(t) \quad (1-5)$$

使误差减小的条件为

$$|1 - G(e^{i\omega})L(e^{i\omega})| < 1, \omega \in [-\pi, \pi] \quad (1-6)$$

假设采样时间为 1。上面便是一个迭代学习控制的基本思路。

对于迭代学习轨迹跟踪控制的目标是要获得一个控制序列 $u_d(n)$, 使得系统输出 $y(n)$ 精确跟踪理想输出 $y_d(n)$ (其中 $n = 1, \dots, N$; $NT_0 = T$; T 表示系统的一个工作周期; T_0 表示系统的采样周期)。迭代学习的基本原理是利用上一次工作周期内的误差 $e_k(n)$, 对下一次工作周期的控制输入 $u_{k+1}(n)$ 进行修正, 经过多个工作周期学习, 逐渐使实际输出 $y(n)$ 收敛于理想输出 $y_d(n)$ 。其基本步骤是

第一步: 设置初次工作周期的控制序列 $u_1(n)$ 。

第二步: 得到本次工作周期的输出序列 $y_k(n)$ 及误差序列 $e_k(n)$ 。
 $e_k(n) = y_d(n) - y_k(n)$; 下标 k 表示工作周期的次数即迭代次数。

第三步: 利用目标准则判断系统输出 $y_k(n)$ 是否精确跟踪理想输出 $y_d(n)$ 。是, 则结束迭代学习; 否则进入下一步。

第四步：确定下一次工作周期的控制序列 $u_{k+1}(n) = u_k(n) + \phi[e_k(n)]$, ϕ 为学习算子。转入第二步。

目前迭代学习控制的中心问题是如何选择一种学习律, 使得系统既有良好的稳定性又有较快的收敛速度。

设被控对象的动态过程为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f[t, x(t), u(t)] \\ y(t) = g[t, x(t), u(t)] \end{cases} \quad (1-7)$$

式中, $x \in R^{n-1}$, $y \in R^{m-1}$, $u \in R^{l-1}$, f 、 g 为相应维数的向量函数, 其结构和参数都未知, 要求系统在时间 $t \in [0, T]$ 内的输出跟踪期望输出 $y_d(t)$ 。假定期望控制 $u_d(t)$ 存在, 即: 在给定状态初值 $x(0)$ 下 $u_d(t)$ 是式(1-7) 当 $y(t) = y_d(t)$ 的解, 则迭代学习控制的目的是通过多次重复的运动, 在一定的学习律下使 $u(t) \rightarrow u_d(t)$, $y(t) \rightarrow y_d(t)$ 。第 k 次运行时式(1-7) 可表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_k(t) = f[t, x_k(t), u_k(t)] \\ y_k(t) = g[t, x_k(t), u_k(t)] \end{cases} \quad (1-8)$$

输出误差为

$$e_k(t) = y_d(t) - y_k(t) \quad (1-9)$$

1.3.2 开、闭环迭代学习控制算法

迭代学习控制分为开环学习和闭环学习。开环 PID 型学习算法是: 第 $k+1$ 次的控制等于第 k 次的控制加上第 k 次输出误差的 PID 校正项, 即

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + k_p e_k(t) + k_d \frac{de_k(t)}{dt} + k_i \int_0^t e_k(s) ds \quad (1-10)$$

其中, k_p 、 k_i 、 k_d 分别为 PID 学习增益矩阵。

闭环 PID 迭代控制律是取第 $k+1$ 次运行的误差作为学习的修正项, 即

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + k_p e_{k+1}(t) + k_d \frac{de_{k+1}(t)}{dt} + k_i \int_0^t e_{k+1}(s) ds \quad (1-11)$$

两种迭代学习的结构图如图 1-2、图 1-3 所示。

由式(1-10)和式(1-11)比较得知: 开环迭代学习只利用了系统前次运行的信息, 而闭环迭代学习则在利用系统当前运行信息改善控制性能的同时, 舍弃了系统前次运行的信息。因此总的说来, 闭环迭代学习控制的性能要优于开环迭代学习。

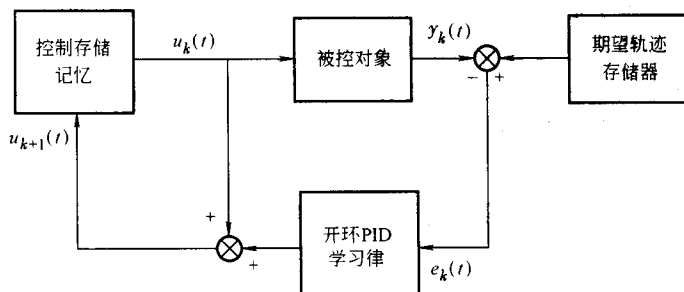


图 1-2 开环 PID 迭代学习控制的结构图

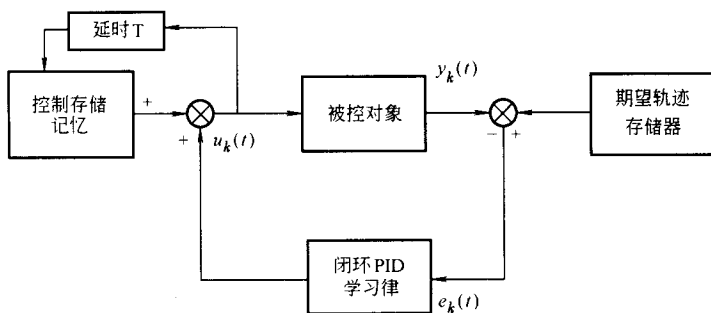


图 1-3 闭环 PID 迭代学习控制的结构图

1.4 各章节内容简介

本书系统、全面、深入地阐述了迭代学习控制这一新兴控制技术的理论研究成果。综合了国内外对这一控制不同的分析方法。把握这一控制领域最新研究动态，重点突出了这一控制技术与其他先进的控制技术相结合，加入了实际应用的典型例证，本书重点强调了迭代学习控制技术的实用性。

第 1 章就迭代学习控制的特点、发展状况、研究现状、研究内容等做一概述。

第 2 章介绍了迭代学习控制分析方法中所用到的数学基础，即一些主要的定义和定理。

第 3 章讨论了迭代学习控制理论的各项研究内容，诸如迭代学习律、收敛性、鲁棒性、学习速度、初值问题、迭代学习二维分析法等。



第4章讨论了迭代学习与模糊控制、最优化原则、神经网络、滑模变结构控制、自适应控制等先进控制技术的结合。

第5章着重讨论了迭代学习控制的一些典型应用，诸如在机器人、伺服系统、倒立摆、工业过程控制、生产机械、医学、化学、电子产品等方面的应用。

第6章展望了迭代学习控制的发展前景及发展方向。