

迭代学习控制的研究现状*

郝晓弘¹, 胡振邦¹, 朱洁¹, 秦睿²

(1. 兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050;

2. 甘肃电力科学研究所, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 迭代学习控制经历了二十多年的发展历程, 已经取得了很多研究成果, 现已成为智能控制的一个重要研究方向, 并得到越来越广泛的应用。本文对迭代学习控制的基本原理和主要研究问题从发展的角度作了详细阐述, 并对其应用作了细致介绍。

关键词: 迭代学习控制; 学习算法; 应用

中图分类号: TP13

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2010)11-0001-03

The present situation of research on iterative learning control

HAO Xiao Hong¹, HU Zhen Bang¹, ZHU Jie¹, QIN Rui²

(1. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Gansu Electronic Power Research Institute, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Until now, the iterative learning control has been experienced the course of development more than two decades, having so many results of study in this area at present. Now iterative learning control has become an important research direction of Intelligent control, and it has been used more and more widely in many fields. In this paper, the basic principle and main research questions of iterative learning control are introduced in detail from the perspective of development, and made a detailed introduction to the applications.

Key words: iterative learning control; learning algorithm; application

基于 1978 年日本学者 Uchiyama^[1]针对高速运动机械手提出的控制思想的进一步发展, S. Arimoto 等人^[2]在 1984 年提出迭代学习控制 ILC (Iterative Learning Control) 的概念。这种离线的学习控制过程是利用系统的实际输出和期望输出的偏差, 通过迭代学习算法寻找优化的输入信号, 以使得系统的输出不断收敛于期望值。学习控制是智能控制中最具严格数学描述的一个方法, 而其控制过程不需要依赖动态系统的精确数学模型就可以用非常简单的方法处理不确定、强耦合、非线性、难以建模的复杂系统。少量的先验知识就可以使迭代学习控制得以实现, 并且重复运行的次数越多控制精度越高。因此, 学习控制一经提出就成为自动控制领域最受关注的热点之一, 并随其发展已在很多需要重复运行的场合得到了应用。

1 迭代学习控制的基本原理

迭代学习控制是对给定控制系统在时间区间 $t \in$

* 基金项目: 甘肃省国际合作项目 (0708WCGA145) 资助

$[0, T]$ 内, 利用被控对象的期望输出 $y_d(t)$, 通过迭代学习算法寻找优化的控制信号 $u_k(t)$, 使得系统响应 $y_k(t)$ 相对于 $y_0(t)$ 有所改善。寻找 $u_k(t)$ 的过程就是系统学习的过程, 且使得当 k 趋于 ∞ 时, 满足 $y_k(t)$ 与 $y_d(t)$ 的偏差为零, 即系统实现实际输出完全跟踪期望输出。

迭代学习控制系统基本原理如图 1 所示。其中 u_k 、 u_{k+1} 分别是系统第 k 次、第 $(k+1)$ 次的控制信号, y_d 是期望输出, y_k 、 y_{k+1} 分别是系统第 k 次、第 $(k+1)$ 次的实际输出。

迭代学习控制的目的是在系统结构不变的情况下, 通过当前的系统输入和输出偏差来寻找下次运行的控制信号。由此可得出迭代学习控制的学习算法为:

$$\begin{cases} u_{k+1}(t) = L(u_k(t), e_k(t)) \\ e_k(t) = y_d(t) - y_k(t) \end{cases} \quad (1)$$

其中 L 为线性或非线性算子。在这种思想的指导下, S. Arimoto 于 1984 年提出 D 型学习算法, 并利用范数理论对其收敛性作了详细论证。随后 P 型、PI 型、PD 型学习

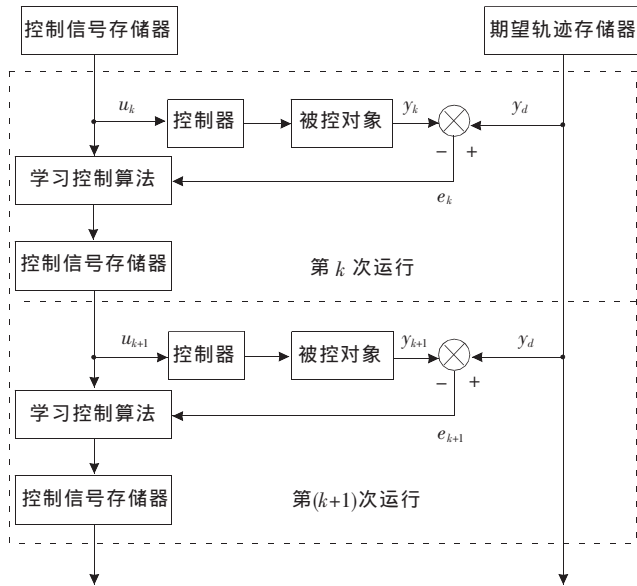


图1 迭代学习控制系统基本原理

算法应运而生。同年 S.Arimoto 又提出开环 PID 型学习算法：

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + (\Gamma \frac{d}{dt} + \Phi + \Psi \int dt) e_k(t) \quad (2)$$

式中 Γ 、 Φ 、 Ψ 为学习增益矩阵。

在此基础上学者们又提出了闭环迭代学习算法：

$$\begin{cases} u_{k+1}(t) = L(u_k(t), e_{k+1}(t)) \\ e_{k+1}(t) = y_d(t) - y_{k+1}(t) \end{cases} \quad (3)$$

其中 L 为线性或非线性算子，这种方法是利用先前控制经验和当前输出误差对系统期望输出实现实时跟踪，并对控制信号加以修正，同时对系统进行镇定，使系统更快速收敛。

2 迭代学习控制的研究问题

2.1 学习算法的稳定性和收敛性问题

学习算法的稳定性是学习控制系统能够运行的先决条件，但不只需要稳定运行，还需要使学习过程收敛于期望值，这样学习控制才更具实际应用性。因此如何使学习过程稳定收敛成为学习控制最为重要的研究问题，目前主要的研究分析方法有 Lyapunov 稳定理论、范数理论、2-D 稳定理论、算子理论。继 S.Arimoto 对线性 D 型学习算法的稳定性和收敛条件作了系统的论述之后，学者们对控制系统的稳定性和收敛条件的论证在不断发展，研究对象也有所扩展，现已对非线性系统、线性时不变系统、广义系统等系统的稳定性和收敛条件作了研究，并且提出了既能够提高系统稳定性，又能够放宽收敛条件的基于反馈的迭代学习控制算法^[3]：

$$\begin{cases} u_{k+1}^{fb}(t) = u_{k+1}^{ff}(t) + u_{k+1}^{fb}(t) \\ u_{k+1}^{ff}(t) = L(u_k(t), e_k(t)) \\ u_{k+1}^{fb}(t) = H(e_{k+1}(t)) \end{cases} \quad (4)$$

图2为基于反馈的迭代学习控制系统拓扑图。控制系统在学习控制算法的作用下实现对期望轨迹的完全跟踪，在反馈控制器的作用下实现系统镇定，抑制外部扰动。

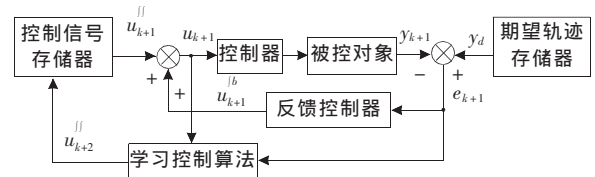


图2 基于反馈的迭代学习控制系统

2.2 学习速度问题

迭代学习控制的收敛性是基于迭代次数 k 趋于无穷时得到的，但实际应用中应在较少的迭代次数下使系统稳定收敛。因此，如何使学习控制算法更快速地收敛于期望值的问题越来越受到关注。但目前对收敛性的分析较多，而对于学习速度的研究成果较少，主要通过设计新的迭代学习算法来提高系统收敛速度，如 Z.Bien 等人^[4]在 1989 年提出了高阶学习算法：

$$u_{k+1}(t) = \sum_{i=1}^N (P_i u_{k-i+1}(t) + Q_i e_{k-i+1}(t)) \quad (5)$$

其中 N 为学习阶次，即利用系统前 N 次控制经验， P_i 、 Q_i

($i=1, 2, 3 \dots N$) 为增益矩阵，且需满足 $\sum_{i=1}^N P_i = I$ 。

高阶学习算法利用了较多的历史控制信息，使控制精度更高并能更快速收敛，并且在扰动存在的情况下抑制扰动的能力更强。但学习阶次 N 越大计算量也就越大，同时存储量也会相应增加，因此在实际应用中应选取适当的阶次。

2.3 初始状态问题

在迭代学习控制的实际应用中，假设系统每次重复运行时的初始状态与期望初态相等是保证迭代学习控制算法具有收敛性的前提条件，但由于迭代学习控制是采用多次重复操作的方式得以实现的，因此难免在重复定位操作时不产生初始状态误差，而系统初始状态误差会直接影响学习算法的收敛性，导致系统无法实现完全跟踪期望轨迹，因此对初始状态误差的研究对迭代学习控制的应用有着非常重要的实际意义。继 Heinzinger 等在参考文献[5]中提出了采用 D 型学习算法时由于系统初始状态误差而导致学习算法发散的实例之后，学者们对迭代学习控制初始状态误差问题越来越重视，并做了大量研究。针对系统初态误差的问题，S.Arimoto 等^[6]提出带遗忘因子的 P 型学习算法目前带遗忘因子的 PID 学习算法的一般形式为：

$$u_{k+1}(t) = (1 - \alpha) u_k(t) + \alpha u_0(t) + \Phi(y_d(t) - y_k(t)) \quad (6)$$

其中 $\alpha \in [0, 1)$ 。可见带遗忘因子的迭代学习算法可使控制系统随迭代次数增加，先前的控制作用逐渐减小，使控制信号变化平稳，减小初始状态误差对系统造成的影

响。任雪梅^[7]提出以 D 型学习算法为基础的任意初始状态下的迭代学习控制算法,无需假设每次重复运行的初始状态和期望初始状态相等,而通过使控制信号和初始状态同时学习的方式来实现对期望轨迹的完全跟踪,之后的学者^[8]对此方法进行了改进和完善。此后黄宝健等^[9]及 Sun^[10]在学习控制算法中引入初态误差校正量,以解决初态误差对系统收敛性产生影响的问题。Chen 等^[11]成功将遗忘因子引入高阶学习算法,通过遗忘因子与高阶学习算法的结合,使得初始状态误差控制在系统的迭代初期,避免控制信号有较大波动。

2.4 鲁棒性问题

迭代学习控制的鲁棒性问题在 S.Arimoto 提出迭代学习控制这一概念伊始就已提及,鲁棒性问题对工程实现有着重要意义,其主要研究的是当迭代学习控制系统存在初始状态误差、测量噪声和其他不确定扰动的情況下系统的跟踪性能,也就是当各种扰动存在时的学习控制系统能否收敛到期望轨迹。Heinzinger 对存在初态误差和状态扰动的非线性系统的鲁棒性进行了分析,并提出带遗忘因子的 D 型学习控制算法以提高学习控制系统的鲁棒性。Saab^[12]对存在初态误差、状态扰动、测量噪声以及期望轨迹变动的控制系统,采用带遗忘因子的 D 型学习算法对系统的鲁棒性进行了讨论。孙明轩^[13]对 P 型和 D 型迭代学习算法的鲁棒性进行了分析,并给出了学习算法的鲁棒性条件以及算法收敛性所要求的渐进干扰条件。

从系统性能上来看,迭代学习控制可以保证控制系统在重复运行方向的收敛性,而鲁棒控制可以保证控制系统在时间轴方向的收敛性,并且迭代学习控制可以很好地解决控制系统的结构不确定性,鲁棒控制可以解决控制系统的非结构不确定性,因而采用迭代学习控制和鲁棒控制相结合的方法可以有效提高控制系统的收敛性和鲁棒性。

3 迭代学习控制研究的应用

迭代学习控制凭借其适合高精度控制场合的优点,在很多具有重复运行特性的实际控制系统中得到了广泛的应用。工业机器人就是非线性、强耦合、具有重复运行特性的复杂控制系统,因此工业机器人成为迭代学习控制在应用领域的典型代表,同时涌现出大量的研究成果,并且利用其他控制理论与迭代学习控制相结合的方法在机器人领域也得到了长足的进展。迭代学习控制不仅在机器人控制中得到了应用,还在电力系统暂态稳定问题分析、励磁控制器、液压系统等具有实际工程意义的控制系统中取得了较好的控制效果。石阳春等^[14]将迭代学习控制应用于长行程直线电机的控制中,并提出了一种采用开闭环 D 型迭代学习控制器与前馈补偿相结合的方法对永磁直线同步电动机(PMLSM)进行运动控制,可以有效地降低系统位置跟踪误差。黄攀雄等^[15]则

将迭代学习控制应用在中药生产过程中的提取工段,设计了以迭代学习控制算法为核心的先进控制系统,并对控制系统做了仿真。结果表明该控制系统取得了令人满意的控制效果,在试验阶段的实际投入运行过程中取得理想的控制精度,提高了提取率,稳定了产品质量,降低了生产成本,提高了生产效率,取得了较好的经济效益。随着迭代学习控制理论的不断发展和工程实现难度的逐渐降低,迭代学习控制的实际应用领域一定会越来越广。

迭代学习控制对于具有重复运动特性的不确定控制系统具有很好的控制效果,并且以其高精度逼近期望轨迹、易于与其他控制方法相结合的特性使应用范围不断拓宽,在控制领域的地位必将越来越重要。

参考文献

- [1] UCHIYAMA M. Formulation of high-speed motion pattern of a mechanical arm by trial [C]. Trans of the SICE, 1978,14(6):706-712.
- [2] ARIMOTO S, KAWAMURA S, MIYAZAKI F. Bettering operation of robots by learning [J]. J. of Robotic Systems, 1984,1(2):123-140.
- [3] TAE J J, CHONG H C, HYUN S A. Iterative learning control in feedback systems[J]. Automatic, 1995,31(2):243-248.
- [4] BIEN Z, HUH K M. Higher-order iterative learning control algorithm[C]. IEE Proc. of Control Theory and Applications, 1989,136(3):105-112.
- [5] HEINZINGER G, FENWICK D, PADEN B, et al. Robust learning control [C]. Proc. of the 28th IEEE Conf. on Dec. Contr., Tampa, Florida, 1989:436-440.
- [6] ARIMOTO S, NANIWA T, SUZUKI H. Robustness of P-type learning control with a forgetting factor for robotic motions[C]. Proc. of the 29th IEEE Conf. on Dec. and Contr., Honolulu Hawaii, 1990:2640-2645.
- [7] 任雪梅,高为炳.任意初始状态下的迭代学习控制[J].自动化学报,1994,20(1):74-79.
- [8] 孙明轩.初态学习下的迭代学习控制[J].控制与决策,2007,22(8):848-852.
- [9] 黄宝健,孙明轩,张学智.带有初始误差修正的迭代学习控制[J].自动化学报,1999,25(5):716-718.
- [10] SUN M, WANG D. Initial condition issues on iterative learning control for non-linear systems with time delay[J]. Int. J. of Sys. Science, 2001,32(11):1365-1375.
- [11] CHEN Y, GONG Z, WEN C. Analysis of a high-order iterative learning control algorithm for uncertain nonlinear systems with state delays[J]. Automatic, 1998,34(3):345-353.
- [12] SAAB SS, VOGT WG, MICKLE MH. Iterative learning control algorithms for tracking "slowly" varying trajectories [C]. IEEE Trans. on SMC, 1997,27(4):657-632.

(下转第 9 页)

- and the vector-space model. IEEE Softwar, 1997,14(2).
- [3] XUE Gui Rong, LIN Chen Xi. Scalable collaborative filtering using cluster-based. In: Hong Kong University of Science and Technology, ACM, 2005.
- [4] Jun Wang, Arjen P. de Vries, Marce J. T. Reinders1: unifying user-based and item-based collaborative filtering approaches by similarity fusion. Faculty of Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science, Delft University of Technology, ACM, 2006.
- [5] 曾春,邢春晓,周立柱.基于内容过滤的个性化搜索算法[J].软件学报,2003,14(5):999-1004.
- [6] 曾春,邢春晓,周立柱.个性化服务技术综述[J].软件学报,2002,13(10):1952-1961.
- [7] 刘均,李人厚.一种面向个性化协同学习的任务生成方法[J].软件学报,2006,17(1).
- [8] 陈健,印鉴.基于影响集的协同过滤推荐算法.软件学报[J],2007,18(7).
- [9] 韩立新,陈贵海,谢立.一个面向 Internet 的个性化信息检索系统模型[J].电子学报,2002,30(2).
- [10] 邢春晓,高凤荣,战思南,等.适应用户兴趣变化的协同过滤推荐算法[J].计算机研究与发展,2007,44(2).
- [11] 张锋.使用 BP 神经网络缓解协同过滤推荐算法的稀疏性问题[J].计算机研究与发展,2006,43(4).
- [12] SRIVASTAVA J, COOLEY R, DESHPANDE M, et al.

(上接第 3 页)

- [13] 孙明轩.迭代学习控制系统的鲁棒性分析[J].科技通报,1996,12(4):198-203.
- [14] 石阳春,周云飞,李鸿,等.长行程直线电机的迭代学习控制[J].中国电机工程学报,2007,27(24):92-96.
- [15] 黄挚雄,罗安,黎群辉.迭代学习控制算法在中药生产过程提取工段的应用 [J]. 仪器仪表学报,2007,28(8):1434-1439.

(上接第 5 页)

2.2.4 IPv4 与 IPv6 的互通技术

在网络其他设备不支持双栈且不开启隧道的情况下,核心路由器通过静态 NAT-PT、动态 NAT-PT 实现 IPv4 网络与 IPv6 网络的互通;通过结合 DNS-ALG 实现 IPv4 网络与 IPv6 网络的 HTTP 访问;利用 ALG 应用层网关实现 IPv4 与 IPv6 在其他应用层面上的互通。

测试表明:IPv4 主机可以通过域名访问 IPv6 服务器;IPv6 主机可以通过域名访问 IPv4 服务器,但是 NE40 的 NAT-PT 子卡不支持 FTP-ALG 及其他 ALG。

ADSL、LAN、WLAN 多种接入方式都支持终端获得 IPv6 地址并实现 IPv6 通信;OSPFv3、MPBGp 及 IS-IS 都支持 IPv6 路由在校园网内的传递;各种隧道协议能在校园网的双栈设备上部署,除自动隧道协议不能实现 IPv6 报文的转发以外,其他隧道能实现在 IPv4 网络中传递 IPv6 报文;能通过 NAT-PT 与 DNS-ALG 的结合实现 IPv6 主机对 IPv4 网站的 http 访问。今后的工作将解决 IPv6 访问 IPv4 缺少其他的应用层网关及应用支持

Web usage mining: discovery and applications of usage patterns from Web data. In:Fayyad, U., ed. Proceedings of the ACM SIGKDD Explorations. New York: ACM Press, 2000,1(2):12-23.

- [13] 赵亮,胡乃静,张守志.个性化推荐算法设计[J].计算机研究与发展,2002,39(8):986-991.
- [14] 汪晓岩,胡庆生.面向 Internet 的个性化智能信息检索[J].计算机研究与发展,1999,36(9):1039-1046.
- [15] VOLOKH E. Personalization and privacy [J]. Communications of the ACM, 2000,43(8):84-88.
- [16] WU Y H, CHEN Y C, CHEN A L P. Enabling personalized recommendation on the web based on user interests and behaviors. In:Klas, W., ed. Proceedings of the 11th International Workshop on Research Issues in Data Engineering. Los Alamitos, CA: IEEE CS Press, 2001.
- [17] 沈云斐,沈国强,蒋丽华,等.基于时效性的 Web 页面个性化推荐模型的研究[J].计算机工程,2006,32(13):80-81,99.
- [18] 秦国,杜小勇.基于用户层次信息的协同推荐算法[J].计算机科学,2004,31(10):138-140.

(收稿日期:2010-02-02)

作者简介:

欧建斌,男,1984 年生,硕士研究生,主要研究方向:数据挖掘技术。

(收稿日期:2010-01-09)

作者简介:

郝晓弘,男,1960 年生,教授,博士生导师,主要研究方向:学习控制,电机控制技术,现场总线技术等。

胡振邦,男,1984 年生,硕士研究生,主要研究方向:学习控制,模糊控制。

朱洁,女,1985 年生,硕士研究生,主要研究方向:学习控制。

有限的问题。

参考文献

- [1] 吴建平,李星,李崇荣.CNGI 核心网 CERNET2 的设计[J].中兴通讯技术,2005,11(3):16.
- [2] TATIPAMULA M, GROSSETETE P, ESAKI H. IPv6 Integration and coexistence strategies for next-generation networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2004(1):88-96.
- [3] Benedikt Stockebrand.IPv6 in practice[M]. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2007:11-139.
- [4] 沈庆伟,杨寿保,孙伟峰.一种基于 UDP 的 IPv4 over IPv6 的隧道方案[J].电子科技大学学报,2007,6(3):608-610,624.
- [5] 秦丰林,葛连升,刘璐.基于 P2P 的 IPv6 虚拟网络构造[J].计算机工程,2009(22):97-99.

(收稿日期:2010-01-12)

作者简介:

唐飞岳,男,1973 年生,硕士研究生,讲师,主要研究方向:智能交通、网络技术。

邓向林,女,1979 年生,助理研究员,主要研究方向:计算机、高职教育。