

迭代学习控制新进展*

方 忠¹ 韩正之¹ 陈彭年²

(1. 上海交通大学自动化系·上海, 200030; 2. 中国计量学院数学组·杭州, 310034)

摘要: 从学习算法、收敛性、鲁棒性、收敛速度、2-D 模型以及实际应用等方面对迭代学习控制的最新进展作了比较详尽的总结, 最后讨论了迭代学习控制存在的问题及有前景的研究方向。

关键词: 迭代学习控制; 学习算法; 收敛性; 收敛速度; 鲁棒性; 2-D 模型

文献标识码: A

Recent Developments of Iterative Learning Control

FANG Zhong¹, HAN Zhengzhi¹ and CHEN Pengnian²

(1. Department of Automation, Shanghai Jiaotong University · Shanghai, 200030, P. R. China;

2. Division of Mathematics, China Institute of Metrology · Hangzhou, 310034, P. R. China)

Abstract: This paper presents some results on iterative learning control achieved in recent years as a survey. The results are presented in five categories: learning algorithm, robustness analysis, convergence rate analysis, 2-D system model, and real application. Existing problems and prospect are discussed in the end.

Key words: iterative learning control; learning algorithm; convergence; convergence rate; robustness; 2-D system model

1 引言 (Introduction)

迭代学习控制 (iterative learning control, ILC) 最初是由 Uchiyama^[1] 提出的, 但一直没有引起注意, 直到 1984 年 Arimoto 等人^[2] 提出一种新的迭代学习控制算法后才得到控制界的广泛关注。

迭代学习控制为具有强非线性、强耦合、建模困难、有高精度轨迹控制要求的对象, 特别是具有重复运动特性的对象 (如工业机器人、数控机床等) 提供了一种很好的控制方法。由于迭代学习控制系统只需输入输出信号即可重复运行, 因而可以将被控对象复杂的动态描述和参数估计进行简化甚至忽略。

目前, 迭代学习控制的研究已取得巨大的进展。在迭代学习控制算法及收敛性、鲁棒性、收敛速度、实际应用等方面已取得丰富成果。本文主要针对迭代学习控制最近十几年的研究概况作一总结, 早期的研究情况可参看文献^[3]。

2 迭代学习控制的算法 (ILC algorithms)

设被控对象的动态过程由下式表示:

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

其中 $x \in \mathbb{R}^n$, $y \in \mathbb{R}^m$, $u \in \mathbb{R}^l$, f, g 为相应维数的向量函数, 则迭代学习控制问题可以描述为: 给定期望输出 $y_d(t)$ 和每次运行的初始状态 $x_k(0)$, 要求通过多次重复运行, 在给定的学习律下使系统在时间 $t \in [0, T]$ 内, 控制输入 $u_k(t) \rightarrow$

$u_d(t)$, 而系统输出 $y_k(t) \rightarrow y_d(t)$ 。

迭代学习控制的算法研究就是确定如何用当前的输入和输出误差来构造下次运行的输入, 即确定

$$u_{k+1}(t) = L(u_k(t), e_k(t)) \quad (2)$$

的算子 $L(\cdot)$ (其中 $e_k(t) = y_d(t) - y_k(t)$ 为第 k 次运行的输出误差), 同时还需分析算法的收敛性。

2.1 开、闭环 PID 型学习算法 (Open and closed loop PID-type ILC algorithms)

这是最常见的一类迭代学习控制算法, 大部分的迭代学习控制算法都是 PID 型的, 其基本形式为:

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + \Gamma_P e_k(t) + \Gamma_I \int_0^t e_k(\tau) d\tau + \Gamma_D \frac{de_k(t)}{dt}. \quad (3)$$

其中 $\Gamma_P, \Gamma_I, \Gamma_D$ 为学习增益矩阵。

Arimoto 等人^[2] 提出了 D 型学习算法: $u_{k+1}(t) = u_k(t) + \Gamma e_k(t)$, Γ 为一常矩阵, 并证明了系统在满足一定条件时的收敛性。由于 D 型学习算法中误差的导数项对噪声的抑制不利, 后来有学者提出其它形式的学习算法, 如 P 型^[4-6]、PI 型^[7]、PD 型^[7-9]、PID 型^[10, 11]。

以上文献中构造第 $k+1$ 次运行的控制输入 $u_{k+1}(t)$, 使用的是第 k 次运行的误差信息 $e_k(t)$, 这种学习算法称为开环的迭代学习控制算法, 如果利用 $e_{k+1}(t)$ 来构造 $u_{k+1}(t)$, 则为闭环算法^[12], 如闭环 P 型学习算法^[13-15]。对于本身不稳

* 基金项目: 国家自然科学基金(69674004)资助项目。

收稿日期: 1999-11-26; 收修改稿日期: 2000-12-18。

定的系统,采用开环学习算法的迭代学习控制器不能使整个系统稳定,即使迭代学习算法是收敛的,而采用闭环学习算法有助于改善整个系统的稳定性.

2.2 高阶迭代学习控制算法(Higher-order ILC algorithms)

高阶迭代学习控制算法与普通学习算法相比,不仅只利用前一次迭代过程的输入输出信息,而是利用了以前多次迭代过程的输入输出信息来构造新的控制输入^[16],即

$$u_{k+1}(t) = L(u_k(t), e_k(t), u_{k-1}(t), e_{k-1}(t), \dots, u_{k-N+1}(t), e_{k-N+1}(t)). \quad (4)$$

其中整数 $N > 0$ 即为算法的阶数.由于高阶迭代学习控制算法对学习过程中以往信息的充分利用,在存在扰动时可使系统有更好的跟踪性能,同时算法收敛速度也有一定程度的提高^[16].

高阶迭代学习控制算法最初是由 Z. Bien 等人^[16]提出来的.他们首先研究了针对线性时不变系统的二阶迭代学习控制算法($N = 2$),然后又将其推广到 N 阶($N \geq 2$)的情况,并证明了应用于一类非线性系统时的收敛性.文^[14, 17, 18]对不同形式的高阶学习算法进行了研究.

2.3 带遗忘因子的迭代学习控制算法(ILC algorithms with forgetting factor)

P型迭代学习控制算法对初始状态或输出误差的扰动比较敏感,为了克服这一缺点,许多学者引入遗忘因子的概念^[4, 13, 17, 19].此时PID型学习算法的形式一般为:

$$u_{k+1}(t) = (1 - \beta)u_k(t) + \Gamma_P e_k(t) + \Gamma_I \int_0^t e_k(\tau) d\tau + \Gamma_D \frac{de_k(t)}{dt}, \quad (5a)$$

或

$$u_{k+1}(t) = (1 - \beta)u_k(t) + \beta u_0(t) + \Gamma_P e_k(t) + \Gamma_I \int_0^t e_k(\tau) d\tau + \Gamma_D \frac{de_k(t)}{dt}. \quad (5b)$$

其中 $\beta = [0, 1]$ 即为遗忘因子.可以看出,引入遗忘因子后随着迭代次数的增加,越早的控制作用越小,这样可以使控制信号的变化比较平滑.

Chen 等人^[17]在高阶学习算法引入遗忘因子,以便在迭代过程的初期,控制输入不至于波动太大.Wang^[19]在将迭代学习控制应用于机械手轨迹控制时,也采用了带遗忘因子的迭代学习算法,并给出了保证收敛的充分条件.

2.4 与其他控制理论、技术相结合的迭代学习控制算法(ILC algorithms combined with other control theories and techniques)

一般的迭代学习控制是开环的,因此如果被控对象本身是不稳定的,那么迭代学习控制器并不能使整个系统稳定,因而经常使用一个反馈控制器使系统稳定,然后再设计一个迭代学习控制器使系统获得良好的跟踪性能.Kuc 等人^[20]改进了文^[21]中加速度反馈带来的不足,提出一种不带加速度反馈的迭代学习控制系统,利用固定增益的PD反馈控制器使整个闭环系统稳定,并且基于Lyapunov稳定性理论证明了

迭代学习控制系统的收敛性.他们还提出了一种与上述方法类似但考虑到系统模型的迭代学习控制系统^[22].Jang 等人^[23]指出反馈控制器对学习控制器的收敛条件没有影响,却可以显著地改进学习控制器的收敛速度.

近年来,Amann 等人^[24-26]将优化技术引入迭代学习控制中.文^[24]对 Buchheit 等人^[27]的开环算法做了改进,提出一种基于优化原理的闭环学习算法,具有自动选择步长和无需凭经验选择学习参数等优点.文^[25]则在 Hilbert 空间中详细地分析了基于优化原理的迭代学习控制算法的收敛性.文^[26]提出了一种基于最优化技术和误差预测原理的迭代学习控制,其性能指标是预测的误差和控制增量的函数,可以保证每次运行后都使输出误差最小.Pandit 等人^[28]将基于优化技术的迭代学习控制应用于实际工业过程,取得令人满意的效果.

还有很多学者对其他控制理论与迭代学习控制的结合进行了研究,如结合神经网络的迭代学习控制^[29, 30]、基于预测技术的迭代学习控制^[26, 31]、基于频域分析的迭代学习控制^[32-34]等等.

3 迭代学习控制系统鲁棒性(Robustness of ILC)

在实际应用中,不仅要求控制系统是稳定的,而且要求对系统的参数不确定性、结构不确定性和外部扰动具有一定的鲁棒性.迭代学习控制的鲁棒性问题一般考虑系统存在初态偏差、状态干扰和输出测量噪声时系统的收敛性、稳定性问题,特别是初态偏差带来的问题是迭代学习控制特有的,我们将单独列出.

3.1 初态偏差问题(Problem of error in initial state)

迭代学习控制算法的收敛性证明很大程度上依赖于每次运行的初始状态都与期望初始状态相同这一假设,但在实际系统中,这一假设较难成立,因而对初态偏差的鲁棒性研究具有非常重要的意义.Lee^[35]着重对初态偏差对系统稳定性的影响做了研究,讨论了两种情况:1)每次运行的初始状态相同,但与期望轨迹的初始状态不同;2)每次运行的初始状态都不同,并针对第2)种情况提出了一种“多模式输入迭代学习控制”,以降低文^[40]中得到的跟踪误差上确界.Park^[11]将文^[35]的PD型算法扩展成PID型,研究了初态偏差对系统稳定性的影响.文^[36]给出一种反复学习方案,对初态偏差具有较强的鲁棒性.文^[37, 38]都是在D型学习算法中引入初始状态学习机制,不需每次迭代的初始状态与期望轨迹的初始状态相同这一假设.文^[19, 39]针对文^[35]中的第(1)种初态情况,分别在PD型和D型学习算法中引入一个初始修正项,以克服初态偏差对收敛性所带来的影响.

3.2 迭代学习控制的鲁棒性(Robustness of ILC)

鲁棒性问题的Arimoto 等人^[2]最初提出迭代学习控制时就已提及.后来Arimoto^[7]应用机器人动力学的无源分析方法分别讨论了PD型和PI型迭代学习算法的鲁棒性问题.Heininger 等人^[40]分析了一类简单学习算法的鲁棒性,得到有界的轨迹跟踪误差.文^[17]扩展了文^[40]中一阶学习算法的结果,指出只要初态偏差、系统不确定性、扰动是有界的,

则可保证控制器的稳定性,且系统跟踪误差的上确界是系统存在的状态扰动、输出测量噪声、初态偏差的上确界的K类函数.在Chien等人^[13]提出的方法中,若系统不确定性的上确界小于遗忘因子的大小,系统跟踪误差的上确界将是遗忘因子的K类函数.

随着鲁棒控制近些年来的迅速发展,将迭代学习控制与鲁棒控制相结合以提高系统的鲁棒性已成为一个新的研究方向^[41-44].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.

由于迭代学习控制系统在具体实现时本质上是离散系统,因此研究离散系统的迭代学习控制鲁棒性问题具有重要意义.Ishihara等人^[45]在考虑离散时间系统脉冲响应的不确定性基础上,应用误差概率模型设计了一种鲁棒迭代学习控制器,但该方法只适用于不确定性大小限制在较小范围内的情况.Saab^[46]提出了一个针对MIMO线性离散系统的D型学习算法全局鲁棒性的充分条件.Wang^[47]分析了一类非线性离散时间系统在存在状态扰动、输出测量误差和初态偏差情况下迭代学习控制系统的鲁棒性问题.

4 迭代学习控制的收敛速度 (Convergence rate of ILC)

对迭代学习控制算法不仅要考虑其收敛性,而且要考虑其收敛速度.Kawamura和Arimoto等人^[48]很早以前就开始考虑迭代学习控制的收敛速度问题,他们考虑了如何利用对多个轨迹的学习过程中得到的知识来改进后续学习过程的速度.Bien等人^[16]提出高阶迭代学习控制算法时也指出,利用以前多次学习的知识可以显著加快学习速度.最近,Arif等人^[49]研究了通常被忽略的初始控制 $u_0(t)$ 对收敛速度的影响,提出一种借助信息数据库的迭代学习控制方法,可以利用对以往轨迹的学习过程中得到的关于初始控制的信息来适当地构造新的初始控制以加快收敛速度.他们在文^[31]的开闭环D型算法中,用预测第 $k+1$ 次运行的误差 $e_{k+1}^*(t)$ 的方法来构造 $u_{k+1}(t)$,改进了算法的收敛速度.

5 迭代学习控制的2-D模型(2-D model for ILC)

2-D系统是指输入、输出及状态变量的变化依赖于两个独立坐标的系统,即2-D系统的动态特性在两个独立的方向进行.由于迭代学习控制系统的学习按两个互相独立的方向进行:时间轴方向和迭代学习方向,因此迭代学习控制系统本质上是两维的.一般的迭代学习控制系统没有数学模型可以同时描述控制系统本身的动态特性和迭代学习过程的动态特性,而如果采用2-D系统模型^[50](Roesser模型)来描述迭代学习控制系统,就可以很好地表征迭代学习控制系统的2-D特性.利用Roesser模型建立迭代学习控制系统的2-D系统方程,就可以应用2-D系统理论来分析系统性能.一般的迭代学习控制系统动态方程如式(1)、(2)所示,表示成2-D形式则为(假设为离散系统):

$$\begin{cases} x(t+1, k) = f(t, x(t, k), u(t, k)), \\ y(t, k) = g(t, x(t, k), u(t, k)), \\ u(t, k+1) = L(u(t, k), e(t, k)), \\ e(t, k) = y_d(t, k) - y(t, k). \end{cases} \quad (6)$$

其中 t, k 为代表时间和迭代次数的两个变量,再根据具体情况恰当地选取2-D状态变量可以建立起2-D系统方程.

2-D系统理论经过三十几年的发展,已建立起多种成熟的理论,例如其稳定性理论可以为迭代学习控制系统的收敛性证明提供非常有效的方法.2-D系统理论目前已成为迭代学习控制的一种非常重要的分析方法,而Roesser模型也已成为迭代学习控制中使用的最基本的2-D模型.

Z. Geng等人^[51-53]首先将2-D系统理论应用于迭代学习控制系统的分析.Kurek等人^[54]则将文^[52]的算法扩展到高阶的线性多变量离散系统,提出了一个简单的迭代学习算法,并针对算法收敛性给出比文^[52]的收敛条件更加宽松的一个充分必要条件,该文还提出一种改进学习算法,可使学习系统运行一次即使输出跟踪误差达到零.由于Kurek的改进算法^[54]构造新的控制输入时需要由它本身产生的系统状态信息,因此只能利用观测器来估计这个系统状态来构造需要的输入信息,从而使系统的控制性能有所下降.针对这个问题,Fang等人^[55]做了改进,提出一种可以经过一次运行即可使系统输出精确跟踪期望输出的学习算法,并给出了学习收敛的充要条件.与文^[54]算法不同的是,该算法的控制输入信号的构造不是利用估计的状态信息,而是利用状态反馈闭环系统的状态信息.文^[56]针对线性离散系统以开环P型学习算法为例,给出了迭代学习稳定与收敛的充分条件,并且提出直接应用2-D系统理论必须是时间区间为 $[0, +\infty)$ 的情况.

由于上述文献在将2-D系统理论应用于迭代学习控制时,都使用了Roesser的离散2-D模型,因此上述文献都只是将2-D系统理论应用于离散时间系统的迭代学习控制.对连续时间系统来说,传统的2-D离散Roesser模型不再适用.如何将2-D系统理论推广到连续时间系统,是目前一个新的研究方向,至今还少有文献报道.Chow等人^[57]在线性连续系统方面作了初步的工作,他们采用了2-D连续-离散Roesser线性模型^[58],对一类连续多变量系统的迭代学习控制问题进行了研究,给出了三种不同的学习算法及相应的收敛性条件.

6 迭代学习控制的应用(Applications of ILC)

迭代学习控制理论的迅速发展与其在工程应用中取得的成功是相辅相成的.迭代学习控制适合于解决强非线性、强耦合、建模难、运动具有重复性的对象的高精度控制问题.机器人轨迹控制是这种对象的典型代表,大量文献都把机器人轨迹控制作为应用对象,如柔性关节机器人控制^[8,19],终端受限或不受限机械手/位置混合控制^[59-61]等等.除了机器人轨迹控制外,迭代学习控制也可以应用于其它很多工程控制领域.

Geng等人^[53]将迭代学习控制应用于由三个级联水箱、

一个蓄水池、四个阀门组成的对象,很好地解决了水位控制问题.最近, Pandit 等人^[28]将迭代学习控制应用于铝压机的周期生产控制,可以使产量增长 10%.文^[62]研究了迭代学习在有扰动力矩伺服电机转速的精确控制中的应用问题.文^[63]将迭代学习控制应用于自动汽车速度跟踪,以解决汽车纵向动力学中存在的严重非线性和不确定性带来的问题.

时滞工业过程中很普遍,因而探讨时滞系统的迭代学习控制也很有必要.对于状态时滞,文^[9, 17, 36]分别做了讨论, Park 等人^[64]则对迭代学习控制在另一类时滞系统——具有控制时滞的系统中的应用情况进行了研究.

7 存在的问题与展望(Problems and prospect)

本文从迭代学习控制的学习算法、收敛性、鲁棒性、收敛速度、2-D 模型及应用等方面对近些年来取得的研究成果进行了总结.由于迭代学习控制具有很多优点,如算法简单、对被控系统的先验知识要求少、可以任意精度逼近期望轨迹、控制器可以自学习达到在线寻优等等,因此应用的前景非常广阔,吸引了众多学者在这个领域继续深入研究.

迭代学习控制的发展为机器人轨迹控制、变结构控制、模型参考自适应控制、最优控制等许多控制领域提供了一种新的方法,其理论成果已有不少,在实际应用中也有成功的例子.但就目前的研究状况来看,迭代学习控制理论正处于形成发展阶段,还存在许多问题有待解决:

1) 迭代学习控制的初值问题.目前大多数学习算法在收敛性证明过程中都假设系统状态是可恢复的,即 $x_i(0) = x_k(0)$, $k = 0, 1, 2, \dots$, 但在实际系统中由于各种不确定因素很难保证每次运行的初始状态都与期望轨迹的初始状态相同,而一旦不同则必须重新开始学习,因此算法对初值偏差的鲁棒性是一个重要的问题.

2) 迭代学习控制器的泛化能力问题.也就是对学习过程中获得的知识如何来利用的问题,由于现有的迭代学习控制算法都是针对某一特定轨迹来学习的,因而对这一轨迹可以实现很好的跟踪,但期望轨迹改变时就必须重新学习,缺乏足够的泛化能力,而如果能在以往轨迹的学习过程中获得的知识全部或部分利用起来,那么必须会在某些方面至少在收敛速度上有所改善.

3) 收敛速度问题.缓慢的收敛速度阻碍着迭代学习控制的实际应用,目前的收敛性分析较多,而收敛速度的分析则较少,一些重要的学习算法收敛速度慢的问题仍没有解决.

4) 如何对待被控对象已有的先验知识问题.一方面,迭代学习控制只需系统很少量的先验知识就可以很好地工作,但实际上并不是所有的被控对象都没有任何先验知识.如果能将被控对象已有的先验知识充分利用起来,必将对迭代学习控制的发展有所促进;另一方面,理论上迭代学习控制器运行时只需系统输入输出信号及期望信号,不需要系统动态过程的参数,但实际上为了设计一个收敛稳定的迭代学习控制器又需要系统模型参数.

5) 对于 2-D 系统理论用于迭代学习控制系统分析,基本上是基于 Roesser 离散状态模型的,因而 2-D 系统理论在连

续系统中的应用较为困难,虽然文^[57]做了尝试性的工作,但这还远远不够.同时 Roesser 模型是线性的,使得这一模型不可能在非线性系统中应用,解决的途径是寻求新的适合于非线性系统的 2-D 模型.

上述问题的研究与解决将大大促进迭代学习控制理论和应用的发展.

参考文献(References)

- [1] Uchiyama M. Formation of high speed motion pattern of mechanical arm by trial [J]. Trans. of the Society of Instrument and Contr. Eng., 1978, 14(6): 706 - 712
- [2] Arimoto S, Kawamura S and Miyazaki F. Bettering operation of robots by learning [J]. J. of Robot. Syst., 1984, 1(2): 123 - 140
- [3] Moore K L, Dahich M and Bhattacharyya S P. Iterative learning control: A survey and new results [J]. J. of Robot Syst., 1992, 9(5): 563 - 594
- [4] Arimoto S, Naniwa T and Suzuki H. Robustness of P-type learning control with a forgetting factor for robotic motions [A]. Proc. of 29th Conf. on Decision and Control [C], Honolulu, Hawaii, USA, 1990: 2640 - 2645
- [5] Saab S S. On the P-type learning control [J]. IEEE Trans. Automat. Contr., 1994, 39(11): 2298 - 2302
- [6] Xu J X. Analysis of iterative learning control for a class of nonlinear discrete-time systems [J]. Automatica, 1997, 33(10): 1905 - 1907
- [7] Arimoto S. Learning control theory for robot motion [J]. Int. J. Adapt. Contr. Signal Processing, 1990, 4(4): 543 - 564
- [8] De Luca A and Stefano P. An iterative scheme for learning control gravity compensation in flexible robot arms [J]. Automatica, 1994, 30(6): 993 - 1002
- [9] Sun M, Huang B and Zhang X. PD-type iterative learning control for a class of uncertain time-delay systems with based initial state [J]. Control Theory and Applications, 1998, 15(6): 853 - 858
- [10] Shi Z. Iterative learning control method for nonlinear discrete-time systems [J]. Control Theory and Applications, 1998, 15(3): 327 - 332
- [11] Park K H, Bien Z and Hwang D H. A study on the robustness of a PID-type iterative learning controller against initial state error [J]. Int. J. Syst. Sci., 1999, 30(1): 49 - 59
- [12] Zeng N and Ying X. Iterative learning control algorithm for nonlinear dynamical system [J]. Acta Automatica Sinica, 1992, 18(2): 168 - 176
- [13] Chien C J and Liu J S. A P-type iterative learning controller for robust output tracking of nonlinear time-varying systems [J]. Int. J. Control, 1996, 64(2): 319 - 334
- [14] Chen Y, Sales D M and Sones T M. A robust high-order P-type iterative learning controller using current iteration tracking error [J]. Int. J. Control, 1997, 68(2): 331 - 342
- [15] Pi D and Sun Y. The convergence of iterative learning control with open-closed loop P-type scheme for nonlinear time-varying systems [J]. Acta Automatica Sinica, 1999, 25(3): 351 - 354
- [16] Bien Z and Huh K M. Higher-order iterative learning control algo-

- nthm [J]. *IEEE Proc. - D: Control Theory and Applications*, 1989, 136(3):105 - 112
- [17] Chen Y, Gong Z and Wen C. Analysis of a high-order iterative learning control algorithm for uncertain nonlinear systems with state delays [J]. *Automatica*, 1998, 34(3):345 - 353
- [18] Chien C J. A discrete iterative learning control for a class of nonlinear time-varying systems [J]. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 1998, 43(5):748 - 752
- [19] Wang D. A simple iterative learning controller for manipulator with flexible joints [J]. *Automatica*, 1995, 31(9):1341 - 1344
- [20] Kuc T Y, Nam K and Lee J S. An iterative learning control of robot manipulator [J]. *IEEE Trans. Robot. Automat.*, 1991, 7(6):835 - 841
- [21] Bondi P. On the iterative learning control theory for robotic manipulator [J]. *IEEE Trans. Robot. Automat.*, 1988, 4(1):14 - 22
- [22] Kuc T Y, Lee J S and Nam K. An iterative learning control theory for a class of nonlinear dynamic systems [J]. *Automatica*, 1992, 28: 1215 - 1221
- [23] Jang T J, Choi C H and Ahn H S. Iterative learning control in feedback systems [J]. *Automatica*, 1995, 31(2):243 - 248
- [24] Amann N, Owens D H and Rogers E. Iterative learning control for discrete-time systems with exponential rate of convergence [J]. *IEEE Proc. - Control Theory and Applications*, 1996, 143(2):217 - 224
- [25] Amann N, Owens D H and Rogers E. Iterative learning control using optimal feedback and feedforward actions [J]. *Int. J. Control*, 1996, 65(2):277 - 293
- [26] Amann N, Owens D H and Rogers E. Predictive optimal iterative learning control [J]. *Int. J. Control*, 1998, 69(2):203 - 226
- [27] Buchheit K H, Pandit M and Befort M. Optimal iterative learning control of an extrusion plant [A]. *Proc. of IEEE Int. Conf. Contr. [C]*, Coventry, UK, 1994:652 - 657
- [28] Pandit M and Buchheit K H. Optimizing iterative learning control of cyclic production process with application to extruders [J]. *IEEE Trans. Contr. Syst. Tech.*, 1999, 7(3):382 - 390
- [29] Chow T W S, Li X and Fang Y. A real-time learning control approach for nonlinear continuous-time system using recurrent neural networks [J]. *IEEE Trans. Industrial Electronics*, 2000, 47(2):478 - 486
- [30] Zhan X and Wu S. Iterative learning control for nonlinear systems based on neural networks [A]. *Proc. of IEEE Conf. on Intell. Processing Syst. [C]*, Beijing, 1997, 517 - 520
- [31] Arif M, Ishihara T and Inooka H. Iterative learning control utilizing the error prediction method [J]. *J. Intell. Robot. Syst.*, 1999, 25(2):95 - 108
- [32] De Luca A, Paesano G and Ulivi G. A frequency-domain approach to learning control: implementation for a robot manipulator [J]. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 1992, 39(1):1 - 10
- [33] Kavli T. A frequency domain synthesis of trajectory learning controller for robot manipulators [J]. *Robot. Syst.*, 1992, 9(3):663 - 680
- [34] Goh C J. A frequency domain analysis of learning control [J]. *J. Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1994, 116(3):781 - 786
- [35] Lee H S and Bien Z. Study of robustness of iterative learning control with non-zero initial error [J]. *Int. J. Control*, 1996, 64(3):345 - 359
- [36] Sun M, Chen Y and Huang B. Robust higher order iterative learning control algorithm for tracking control of delayed repeated systems [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1994, 20(3):360 - 365
- [37] Ren X and Gao W. Learning control with an arbitrary initial state [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1994, 20(1):74 - 79
- [38] Chen Y, Wen C, Gong Z, et al. An iterative learning controller with initial state learning [J]. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 1999, 44(2):371 - 376
- [39] Huang B, Sun M and Zhang X. Iterative learning control algorithms with initial update action [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1999, 25(5):716 - 717
- [40] Heizinger G, Fenwick D, Paden B, et al. Stability of learning control with disturbances and uncertain initial conditions [J]. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 1992, 37(1):110 - 114
- [41] Amann N, Amann A and Owens D H. An H_{∞} approach to linear iterative learning control design [J]. *Int. J. Adapt. Contr. Signal Processing*, 1996, 10(6):767 - 781
- [42] Moon J H and Doh T Y. A robust approach to iterative learning control design for uncertain systems [J]. *Automatica*, 1998, 34(8): 1001 - 1004
- [43] Doh T Y, Moon T Y and Jin Y B. Robust iterative learning control with current feedback for uncertain linear systems [J]. *Int. J. Syst. Sci.*, 1999, 30(1):39 - 47
- [44] Xu J X and Qu Z. Robust iterative learning control for a class of nonlinear systems [J]. *Automatica*, 1998, 34(8):983 - 988
- [45] Ishihara T, Abe K and Takeda H. A discrete-time design of robust iterative learning controller [J]. *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics*, 1992, 22(1):74 - 80
- [46] Saab S S. A discrete-time learning control algorithm for a class of linear time-invariant systems [J]. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 1995, 40(6):1138 - 1142
- [47] Wang D. Convergence and robustness of discrete time nonlinear systems with iterative learning control [J]. *Automatica*, 1998, 34(11): 1445 - 1448
- [48] Kawamura S, Miyazaki F and Arimoto S. Intelligent control of robot motion based on learning method [A]. *Proc. of IEEE Int. Symp. on Intell. Contr. [C]*, Philadelphia, PA, 1987, 365 - 370
- [49] Arif M, Ishihara T and Inooka H. Iterative learning control using information database [J]. *J. Intell. Robot. Syst.*, 1999, 25(1):27 - 41
- [50] Roesser R P. A discrete state-space model for linear image processing [J]. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 1975, 20(1):1 - 10
- [51] Geng Z, Carroll R and Xies J. Two-dimensional model and algorithm analysis for a class of iterative learning control systems [J]. *Int. J. Control*, 1990, 52(4):833 - 862
- [52] Geng Z and Jashimi M. Learning control system analysis and design based on 2-D system theory [J]. *J. Intell. Robot. Syst.*, 1990, 3(1):17 - 26
- [53] Geng Z, Carroll R, Jamshidi M, et al. An adaptive learning control

- approach with application to water tank level control [J]. *Contr. Theory Advanced Tech.*, 1992, 8(3):577 - 592
- [54] Kurek J E and Zaremba M B. Iterative learning control synthesis based on 2-D system theory [J]. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 1993, 38(1):121 - 125
- [55] Fang Y and Chow T W S. Iterative learning control of linear discrete-time multivariable systems [J]. *Automatica*, 1998, 34(11):1459 - 1462
- [56] Lin H and Dai G. The iterative learning control and 2-D analysis [J]. *Control and Decision*, 1993, 8(6):437 - 443
- [57] Chow T W S and Fang Y. An iterative learning control method for continuous-time systems based on 2-D system theory [J]. *IEEE Trans. on Circuits and Systems - I*, 1998, 45(4):683 - 689
- [58] Kaczorek T. Reachability and controllability 2-D continuous-discrete linear system [A]. *Proc. of 1st Int. Symp. Math. Models Automat. Robot.* [C], Miedzzydroje, Poland, 1994, 24 - 28
- [59] Wang D, Soh Y C and Cheah C C. Robust motion and force control of constrained manipulators by learning [J]. *Automatica*, 1995, 31(2):257 - 262
- [60] Cheah C C and Wang D. Learning control for a class of nonlinear differential-algebraic systems with application to constrained robots [J]. *J. Robot. Syst.*, 1996, 13(3):141 - 151
- [61] Wei Q, Chang W and Zhang P. Hybrid force/position control of robot manipulators based on iterative learning [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1997, 23(4):468 - 474
- [62] Kim Y H, Han S H, Cho S H, et al. Learning approach to control of servomotors under disturbance torque dependent on time and states [J]. *IEE Proc. - D: Control Theory and Applications*, 1998, 145(3):251 - 258
- [63] Li G, Zhang L and Zhang P. An iterative learning PD longitudinal controller for unmanned land vehicles [J]. *Control Theory and Applications*, 1994, 11(6):713 - 719
- [64] Park K H, Ben Z and Hwang D H. Design of an iterative learning controller for a class of linear dynamic systems with time delay [J]. *IEE Proc. - D: Control Theory and Applications*, 1998, 145(6):507 - 512

本文作者简介

方忠 1974年生, 1998年毕业于西北工业大学, 现为上海交通大学控制理论与控制工程专业博士生, 主要研究方向为学习控制。

韩正之 1947年生, 上海交通大学控制理论与控制工程学教授, 博士生导师, 曾任上海交通大学研究生院副院长, 现任上海交通大学出版社总编辑, 主要从事控制理论与应用, 计算机控制和智能控制的研究。Email: zzh@mail.sjtu.edu.cn

陈彭年 1948年生, 中国计量学院教授, 目前主要研究方向是稳定性理论和非线性系统镇定。

(上接第 160 页)

- thm; adaptation in immune system as an evolution [A]. *Proc. International Conference on Evolutionary Computation* [C], Nagoya, Japan, 1996
- [11] Krishnakumar M, Sasaki M and Takahashi K. Adaptive learning method of neural network controller using an immune feedback law [A]. *6th Int. Conf. on Neural Information Processing* [C], CA, USA, 1999, 641 - 646
- [12] Jun J H, Lee D W and Sim K B. Realization of cooperative strategies and swarm behavior in distributed autonomous robotic systems using artificial immune system [A]. *IEEE Int. Conf. Systems, Man and Cybernetics* [C], Tokyo, Japan, 1999, 4:614 - 619
- [13] Ootsuki J T and Sekiguchi T. Application of the immune system reaction mechanism concept to sequential control [A]. *Proceedings of Emerging Technologies & Factory Automation* [C], France, 1999, 1391 - 1396
- [14] Takahashi K and Yamada T. A self-tuning immune feedback controller for controlling mechanism systems [A]. *IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics '97* [C], Tokyo, Japan, 1997, 101
- [15] Gerard W. A shape space approach to the dynamics of the immune system [J]. *J. Theor. Biol.*, 1990, 143(4):507 - 522
- [16] Ishida Y. The immune system as a prototype of autonomous decentralized systems; An overview [A]. *Third Int. Symposium on Autonomous Decentralized Systems* [C], Berlin, 1997, 85 - 92
- [17] Jeme N K. Clonal selection in a lymphocyte network [A]. Edelman, ed. *Cellular Selection and Regulation in the Immune Response* [M]. New York: Raven Press, 1974, 39
- [18] Kawafukumar K. *Immunized artificial neural systems* [A]. *World Congress on Neural Networks* [C], Portland, 1993, 11 - 15, 563 - 568
- [19] Dipankar Dasgupta. Artificial neural networks and artificial immune system: similarities and difference [A]. *Proceeding of the IEEE Int. Conf. Systems, Man and Cybernetics* [C], Orlando, Florida, USA, 1997, 873 - 878
- [20] Valera F J, Couunho A, Dupire B, et al. Cognitive networks: immune, neural, and otherwise [J]. *Theoretical Immunology*, 1988, 2(3):359 - 375

本文作者简介

韦巍 1964年生, 1994年获博士学位, 现为浙江大学电气工程学院教授, 博士生导师, 主要从事智能控制理论及应用, 神经网络和免疫系统理论, 机器人控制技术。Email: wwei@cee.zju.edu.cn

张国宏 1967年生, 1998年获硕士学位, 现为浙江大学电气工程学院工程师, 主要从事智能控制, 微处理器控制技术的研