

时滞控制及其应用

钟庆昌, 谢剑英

(上海交通大学 自动化系, 上海 200030)

摘要: 时滞控制研究的是如何有意识地、合理地在控制器中引入时滞来改善控制系统的性能, 主要由时滞滤波、时滞观测、时滞学习控制三个分支组成。时滞滤波器利用时滞来滤除按指数衰减的正弦信号, 主要应用于抑制柔性机构的残留颤抖; 时滞观测器利用时滞来观测系统存在的不确定性以及受到的外部干扰, 从而实现系统的鲁棒控制; 时滞学习控制器利用时滞来学习任意周期的周期信号, 实现对任意周期信号的无差跟踪。系统地提出了时滞控制的概念, 阐明了时滞控制的研究目的和主要研究内容, 综述了时滞控制的研究现状、应用实例, 并提出了一些值得深入研究的问题。

关键词: 时滞; 时滞控制; 时滞系统; 时滞滤波器; 时滞观测器; 时滞学习控制器; 输入整形; 重复控制

中图分类号: TP271; TN713

文献标识码: A

Time delay control and its applications

ZHONG Qing-chang, XIE Jian-ying

(Department of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Time delay control (TDC) is to, intentionally and reasonably, use delay in controller to improve the system performances. It mainly consists of time delay filter (TDF), time delay observer (TDO), and time delay learning control (TDL). Time delay filter, using delay to attenuate or eliminate the damped exponential sinusoidal signals, is mainly applied to reduce the residual vibration of flexible structures. Time delay observer is a method of robust control that uses time delay to observe the uncertainties and disturbances. Time delay learning control, using delay to learn the periodic signal, is applied to track the periodic signal without error. Firstly, the concept of time delay control is presented in this paper to cover all the cases which delay is used in the controller (mainly for delay-free processes). Secondly, the research aim and main subjects of TDC are introduced. Thirdly, the current research situation and the applications are summarized. Lastly, some prospective subjects are proposed for reference.

Key words: time delay; time delay control; time delay system; time delay filter; time delay observer; time delay learning controller; input shaping; repetitive control

时滞是自然界中广泛存在的一种物理现象。对象的固有时滞给系统分析和控制器设计带来了很大困难, 时滞对象被认为是很难控制的对象。如何抑制对象固有时滞造成的系统性能下降得到了广泛深入的研究。然而, 任何事物都有其两面性, 时滞也不例外。如何发掘时滞潜在的优点, 有意识地、合理地利用时滞来改善系统的控制性能也是一个值得深入研究的课题。本文研究的就是如何在控制器之中引入适当的时滞来改善控制系统的性能, 而不是研究如何控制通常所说的含有时滞的对象。

1 时滞控制及其主要研究内容 (Time delay control & its main subjects)

1.1 时滞对象、时滞控制与时滞系统 (Process with dead time, time delay control and time delay system)

时滞 (time delay) 是指信号传输的延迟。从频率特性的角

度来说, 它是指相频特性对频率导数的负值。时滞是自然界中广泛存在的一种物理现象, 例如带式运输机中物料传输的延迟, 卫星通讯中信号传递的延迟, 原水多级泵送系统中水流传输的延迟等等, 都是典型的时滞现象。

时滞对象 (process with dead time) 是指含有固有时滞特性的控制对象, 如前所述带式运输机、卫星通讯系统、原水多级泵送系统等都是典型的时滞对象。所对应的系统称为时滞对象系统。

时滞有时是对象固有的, 如时滞对象中的时滞; 有时是无意识中引入系统的, 如采样控制系统中采样保持器的引入便无意识地引入了时滞。如何发掘时滞潜在的优点, 合理地利用时滞来改善系统的控制性能也应该是一个值得深入研究的课题。这就是时滞控制的研究内容。

时滞控制 (time delay control, TDC) 是指在控制器中有意

识地引入时滞的一种新颖的控制方法^[1]。虽然时滞控制的一些理论与方法也适用于时滞对象,但是时滞控制主要针对非时滞对象,所对应的系统称为时滞对象系统。

时滞系统(time delay system, TDS)是指内部含有时滞环节的系统。显然,时滞控制系统和时滞对象系统都属于时滞系统的范畴。时滞系统可以由时滞微分方程(DDE)来描述,是分布参数系统的一种。这里有必要强调:通常所说的时滞系统仅仅指时滞对象系统。

从是否含有时滞的角度来说,一般控制系统可以分解为如图 1 所示。时滞对象的控制器中可以包含时滞环节,也可以不包含时滞环节;非时滞对象也是如此。

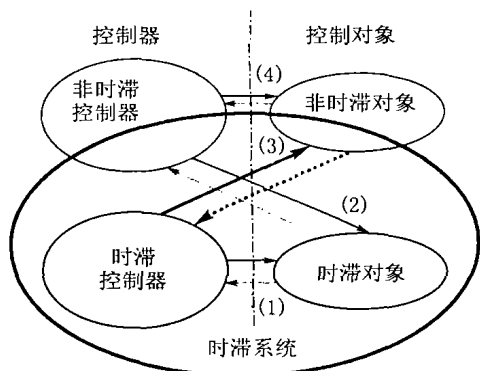


图 1 一般控制系统
Fig. 1 The general control system

从图 1 可以看出,时滞系统有三种类型:

- 1) 时滞控制器控制时滞对象;
- 2) 非时滞控制器控制时滞对象;
- 3) 时滞控制器控制非时滞对象。

第 1)、2)种时滞系统,也就是通常所说的时滞系统,已经得到了广泛研究,例如 Smith 预估控制和 PID 控制。第 3)类时滞系统,即时滞控制器 + 非时滞对象,才是时滞控制研究的重点。

1.2 主要研究内容(Main subjects of TDC)

控制系统由控制对象、(反馈)控制器、传感器及滤波器组成,其一般结构如图 2 所示,控制对象与传感器构成广义控制对象。时滞控制的研究在控制系统的分析和设计中,尤其是反馈控制器、滤波器的设计两方面得到了相当的重视。

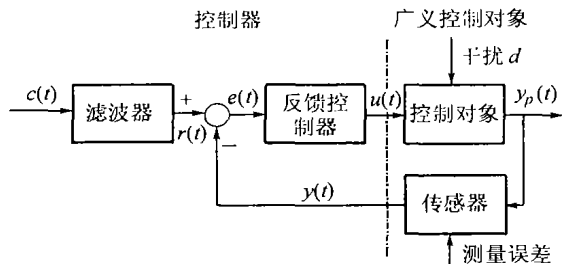


图 2 控制系统的一般结构
Fig. 2 General structure of control system

在反馈控制器设计方面的研究主要有两个分支:一是麻省理工学院 Youcef-Toumi 教授为首的研究人员提出的时滞

控制方案,最初称为基于时滞的模型参考控制(MRC/TD)^[2],之后被称为时滞控制(TDC)。这一方案主要是利用时滞来观测和估计系统的不确定性因素及外部干扰。从统一的角度出发,本文将之称为时滞观测器(time delay observer, TDO),或者基于时滞的观测器。另一个分支是以中野道雄为首的日本学者提出的重复控制方案。该方案将时滞引入到控制器之中构成重复补偿器,利用时滞环节的记忆性实现重复学习,使得系统能够无稳态静差地跟踪一定周期的任意目标信号。从统一的角度出发,本文将之称为时滞学习控制(time delay learning control, TDL)或者基于时滞的学习控制器。

在滤波器的设计方面,最初的方案当推 50 年代 O. J. Smith 提出的 Posicast Control 方案^[3]以及 Calvert 关于使用时滞环节消除颤抖的一项专利,用比例-时滞环节来对消对象的二阶小阻尼振荡极点从而消除输出的残留颤抖。但是由于鲁棒性较差,未能象 Smith 预估器一样得到应有的重视。直到 80 年代末期,麻省理工学院的 N. C. Singer 等学者改进了这种方法的鲁棒性,并将之称为输入整形技术(input shaping technique, IST)之后,这种方法才得到广泛的研究,并在 Singhose^[4], Magee, Tuttle 等的深入研究下获得了广泛的应用。这种方案的侧重点在于利用时滞环节设计合适的滤波器(文献中也称之为整形器)来避免激活对象的振动模态,属于开环控制的范畴。从统一的角度出发,本文将这一方案称为时滞滤波器(TDF)。

归纳起来,时滞控制的研究内容(目前)主要有三个分支:

- 1) 时滞滤波器 TDF,也称输入整形,属于前馈控制的范畴,是一种开环控制方法;
- 2) 时滞观测器 TDO,属于观测器的范畴,是一种鲁棒控制方法;
- 3) 时滞学习控制器 TDL,也称重复控制器,属于内模控制的范畴,是一种学习控制方法。

2 时滞滤波器(Time delay filter)

时滞滤波器的研究源于抑制小阻尼伺服系统振动模态的残留颤抖。Smith 从相隔半周期的两个正弦信号可以互相抵消这一原理出发,引入了 Posicast Control 来消除残留颤抖,并指出可以应用于电子、机械,甚至气动系统中。它实际上就是一种滤波器,

$$C_{TDF}(s) = K + (1 - K)e^{-ds} \quad (1)$$

如果选择其参数满足如下条件:

$$\begin{cases} d = \frac{\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}\omega_0}, \\ K = \frac{e^{\zeta\pi/\sqrt{1-\zeta^2}}}{1 + e^{\zeta\pi/\sqrt{1-\zeta^2}}}, \end{cases} \quad (2)$$

那么在指数衰减信号 $e^{-\zeta\omega_0 t} \sin(\sqrt{1-\zeta^2}\omega_0 t)$ 的激励下,其响应为 0,其中 ω_0 是自然频率, ζ 是阻尼系数。从而完全滤除这一信号。

虽然 Posicast Control 得到了一定的研究,但由于鲁棒性问题没有解决,几乎一直处于停滞状态。1986 年, Cook 提出

将其用于柔性机构的定位.先将无限维的柔性机构近似为有限维的常微分方程,并分解为二阶子系统,分别设计控制器后予以级联.仿真结果表明,这是一种控制柔性机构的极好方法.从此,时滞滤波器才开始获得重视.

N.C.Singer等解决了 Posicast 控制的鲁棒性,并将之称为输入整形技术.通过增加滤波器的阶数,可以提高抑制系统自然频率或阻尼系统不确定性引起的系统性能下降.随后,其他学者开始研究这种方法的实用技术.

鲁棒性解决之后,时滞滤波器得到了广泛的应用,涉及到各种高精尖设备,如空间机构、坐标测量机、桥式起重机、机器人等多方面.

3 时滞观测器(Time delay observer)

3.1 研究现状(Current researches)

对于非线性系统,目前常用的控制方法是将对对象在工作点附近直接线性化或反馈线性化后实施控制,对于大范围的非线性系统,常用的方法是增益调度法(gain schedule).对于不确定性,研究的重点在自适应控制、 H_∞ 控制、变结构控制等.

时滞观测器从另一个角度给出了一种用于非线性、不确定系统的鲁棒控制方法,将非线性系统的主要部分线性化后,直接利用时滞观测器来观测系统的未建模动态、不确定性及外部干扰.换句话说,时滞观测器利用系统过去的响应及激励信息直接改变控制信号,而不是改变控制器的增益,也不是辨识系统的参数修改控制器.因此,这是一种不依赖模型的控制方法.时滞观测器的立足之处在于连续系统的状态变量是时间的连续函数.因此,可以假设在足够小的时间间隔 L 内,系统的状态变量几乎保持不变.

文献[5]中分析了时滞观测器的结构、算法与实现.随后, Youcef-Toumi 和 Reddy^[6]分析了线性时不变系统采用时滞观测器以后的稳定性问题,指出了闭环系统对输入收敛的条件,给出了系统稳定的必要条件,而且当时滞足够小时这一条件也是充分的.在连续的情况下,由于控制器采用了一定的近似且系统含有未建模动态,因此不是指数稳定的.但是,当采用数字控制器时高频信号被滤除,就不存在指数稳定问题.相应地,对于一些线性系统来说,当时滞学习控制器中的时滞 L 足够小时,时滞学习控制器相当于时滞观测器.

Chen 和 Zhuang 等^[7]利用时滞滤波器研究了一类非线性系统的输入/输出线性化问题,在此基础上,设计了线性补偿器实现输出跟踪.文中导出了一系列与输入无关的非线性系统能够实现全局输入/输出线性化的条件,并推广到了与输入有关的非线性系统.

Youcef-Toumi 和 Fuhlbrigge 研究了时滞观测器的分布控制形式^[8],并将其应用于 SCARA 二自由度机器人的控制,获得了满意的结果.

Lee 和 Oh 将时滞观测器与神经网络相接合,利用神经网络对非线性的拟合能力对非线性对象进行建模,结合时滞观测器提高系统对不确定性、外部扰动的抑制能力.由于时滞观测器具有抑制不确定性的能力,在系统投运前不必根据系统的行为完全训练好神经网络.这种结构中,时滞观测器抑

制短时间的系统变化或不确定性,神经网络抑制长时间的系统变化或不确定性.

Corradini 和 Orlando 利用时滞观测器来观测切换区域内系统的扰动作用,针对连续系统提出了一种离散的变结构控制器^[9,10].仿真结果表明系统对参数变化和外部扰动具有相当好的鲁棒性能,而且,调节控制算法的参数可以方便地改变系统的时域响应.

时滞观测器中很重要的一个环节是对时滞状态微分的估计,常用的方法是后向差分法. Youcef-Toumi 和 McMahon 提出了用基于滑动窗口的插补法来估计微分^[4],性能优于后向差分的情况. Youcef-Toumi 和 Huang^[11]用卷积积分来抑制估计时滞状态微分带来的噪声放大,并用外推法 ($L = nT_s$) 来改善性能.文中还分析了这种方法的准确性和系统的稳定性.时滞状态微分项的近似精度不但与时滞大小有关,也与计算方法有关.

由于时滞环节的正反馈以及时滞状态微分的近似,控制信号容易出现振铃.作者提出了基于低通滤波的时滞观测器来削弱以致消除控制信号的振铃.

对于一类相对阶低于系统阶次的系统,作者提出了一种降阶时滞观测器,可以选择阶次低于系统阶次的参考模型来实现时滞观测器控制.

时滞观测器具有一系列优点,是一种性能优良的鲁棒控制方法.它的优点有:

- 1) 不象状态反馈控制等需要建立系统准确的数学模型,允许系统存在一定的未建模动态;
- 2) 不象自适应控制一样需要在线辨识系统的参数;
- 3) 抗干扰能力强;
- 4) 结构简单,易于实现.

3.2 时滞观测器的基本原理(Basic principle of TDO)

考虑线性时不变不确定系统

$$\dot{x} = Ax + Fx + Bu + D(t). \quad (3)$$

其中,状态变量 $x \in \mathbb{R}^n$,控制输入 $u \in \mathbb{R}^r$, A 是已知的动态, F 是未建模动态或不确定动态, B 是控制矩阵, D 是不可预知的外部干扰.假设系统完全能控,各状态可测.

根据性能指标的要求选定参考模型

$$\dot{x}_m = A_m x_m + B_m r, \quad (4)$$

求取控制作用 u 使系统状态跟踪参考模型状态的误差

$$e = x_m - x, \quad (5)$$

满足误差动态方程

$$\dot{e} = (A_m + K)e. \quad (6)$$

其中, K 是误差反馈增益矩阵, r 为系统的给定信号.随着时间的推移,误差 $e \rightarrow 0$.

将式(3)、式(4)代入式(5),有

$$\dot{e} = A_m e + A_m x - Ax + B_m r - Bu - Fx - D(t). \quad (7)$$

与式(6)比较,要求

$$A_m x - Ax + B_m r - Bu - Fx - D(t) = Ke, \quad (8)$$

解出

$$u = B^+ [A_m x - Ax + B_m r - Fx - D(t) - Ke], \quad (9)$$

$B^+ = (B^T B)^{-1} B^T$ 是 B 的伪逆. 由于 u 是最小二乘解, 而不是精确解, 因此, 式(8)、式(6)并不是在任何情况下都能得到满足的. 将式(9)代入式(8), 得到结构约束条件,

$$(I - BB^+)(A_m x - Ax + B_m r - Fx - D - Ke) = 0. \quad (10)$$

只有这一条件得到满足时, 才能获得满意的误差动态性能和状态跟踪能力.

显然, 如果 B 满秩且可逆, 则结构约束条件自然满足, 能够实施时滞观测. 否则, 参考模型、误差反馈增益的选取要受到结构的约束, 甚至要受到不确定模态、外部扰动的影响, 不能任意选取. 可以证明, 表示为能控规范型系统满足这一结构约束条件.

式(9)中, 除了反馈系统不确定性、外部干扰的 $-Fx - D(t)$ 部分未知外, 其余部分都已知. 假设对于足够小的时间 L , 系统的不确定因素及外部干扰变化不大, 则可以应用过去时刻 $t-L$ 的信息来估计时刻 t 的不确定因素及外部干扰, 得到基于时滞的不确定性、外扰观测器为:

$$\begin{aligned} -Fx - D(t) &\approx -Fx(t-L) - D(t-L) = \\ &= -\dot{x}(t-L) + Ax(t-L) + Bu(t-L). \end{aligned} \quad (11)$$

可以看出时滞观测器利用系统过去的状态信息、状态变化的信息以及过去的激励信息来估计当前系统存在的不确定性、外部扰动. 显然, 时滞观测器是将不确定性和外部扰动一样处理的, 并不加以区分.

将式(11)代入式(9), 得到基于时滞观测器的控制律为:

$$u(t) = B^+ [A_m x(t) - Ax(t) + B_m r(t) - \dot{x}(t-L) + Ax(t-L) + Bu(t-L) - Ke(t)]. \quad (12)$$

控制信号 $u(t)$ 包含有四种作用:

- 1) 系统激励 $r(t)$ 的作用 $B_m r(t)$;
- 2) 跟踪误差负反馈作用 $-Ke(t)$, 为了简化控制器的设计一般取 $K=0$;
- 3) 参考模型与对象确定性部分不一致引起的调节作用 $(A_m - A)x(t)$;
- 4) 补偿不确定性、外部扰动的作用

$$\begin{aligned} -Fx(t-L) - D(t-L) = \\ = -\dot{x}(t-L) + Ax(t-L) + Bu(t-L). \end{aligned}$$

3.3 应用实例(Applications)

研究时滞观测器的典型实例是各种各样的伺服系统. 如系弹簧的直流电机伺服系统, 气动伺服系统, 电液伺服系统等.

机器人控制是时滞滤波器得到广泛应用的又一个领域. 如两关节机械手、2 自由度 SCARA 机器人等.

Reddy, Bobbett 将时滞观测器用于五自由度磁悬浮轴承系统的控制. 高速旋转的转轴由一个磁悬浮推力轴承和两个磁悬浮径向轴承支撑. 系统参考模型的带宽为 200rad/s, 采样频率为 4~5kHz. 时滞观测器的控制效果明显优于相当复杂的模拟控制器, 推力轴承控制系统抗低频干扰的能力提高了 70 倍, 径向轴承控制系统抗低频干扰的能力提高了 40 倍, 而且转轴速度在相当大的范围内变化时系统的性能不会恶化.

Cheng 和 Chen 将时滞观测器与反馈线性化相接合用于

塔式起重机的控制, 提高了塔式起重机的鲁棒性和生产效率.

Youcet-Toumi 等^[12]将时滞观测器应用到车辆的智能驾驶系统中. 车辆装有距离传感器以测量其与前面车辆的距离, 两车距离是控制输出, 前车的动态是系统的干扰. 系统控制器分为上下两级, 在 1/5 模型车上的实验表明时滞观测器能够快速估计系统受到的外部干扰, 实现高性能的控制.

4 时滞学习控制器(Time delay learning controller)

阶跃信号在控制系统的分析与设计中得到普遍应用, 阶跃响应的指标是评价大多数系统性能的常用指标. 但是, 有一类系统, 例如, 工业机器人, 其输入信号却具有周期性性质. 按照阶跃输入设计的系统能否很好地适应这种场合? 获得很好的控制精度?

日本的井上、中野等学者在研究 12GeV 内质子同步加速器主环电源的电磁石电流控制系统中, 发现当时已有的控制方法均不能达到要求的精度. 在研究过程中, 他们提出了重复控制这一新型控制方法, 本文称之为时滞学习控制. 学习是利用时滞环节的记忆功能来完成的. 在外部表现形式来看, 反映的是系统跟踪周期信号的能力.

学习控制本身也是一个得到广泛研究的分支, 但通常说的学习控制大多指迭代学习控制. 重复控制也是一种学习控制方法, 是一种基于时滞正反馈的控制方法, 时滞学习单元的基本结构如图 3 所示, 其中 L 等于参考输入的周期. 控制信号不但利用当前的误差信息, 而且利用一个周期 L 以前的学习信息, 以获得很好的跟踪性能.

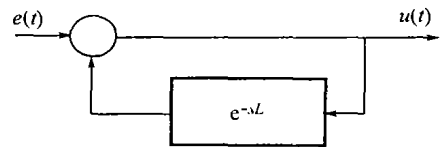


图 3 时滞学习单元

Fig. 3 Structure of time delay learning unit

时滞学习控制在提出以后, Tomizuka 在文献^[13]中分析了离散时间域中的时滞学习控制问题. 文献首次引用内模原理为时滞学习控制的数学基础, 时滞学习控制系统之所以能够很好地跟踪任意周期信号是因为其内部含有图 3 所示的时滞学习单元, 它正好是周期为 L 的任意信号的产生模型.

由于时滞学习控制系统引入了比对象本身的延迟可能要大得多的时滞, 系统的稳定性自然就是一个必须深入研究的问题. Hara 和 Yamamoto 等证明了某些系统中必须在时滞学习单元中引入低通滤波器以确保稳定性, 同时将时滞学习控制推广到了多变量系统中, 并提出了利用状态空间法和互质分解法来设计时滞学习控制系统.

自适应控制与时滞学习控制的结合是相当活跃的. Sun 和 Tsao 将自适应控制和时滞学习控制相接合, 应用内模原理对具有参数不确定性、未建模动态、外部干扰的系统实现高性能渐近跟踪周期信号. Kaneko 等将时滞学习控制和自适应控制相接合, 用于机械手的控制. Tzou 和 Yeh 利用自适应时滞学习控制实现了不间断电源 PWM 逆变器的控制, 其控

制器采用单片 DSP 芯片 TMS320C14. 系统能够自适应补偿由于周期干扰造成的波形畸变. 常规控制系统的设计采用了基于状态反馈的极点配置方法. 按这种方法设计的 2KVA 电源具有很好的动态性能, 能够在大负载扰动下获得很低的总谐波失真率 THD. 由于 CD 伺服机构盘片偏离中心会产生周期缓慢变化的周期干扰, Dotsch 引入递推辨识算法来估计周期的变化, 采用时滞学习控制器来抑制这种周期干扰获得了很好的效果, Hillerstrom 则利用梯度法来辨识旋转机械振动在不同旋转速度下的中心频率获得不同的模型参数, 实施时滞学习控制以抑制振动.

时滞学习控制的最优性和鲁棒性也得到了深入的研究. Kondo 等研究了线性时不变 SISO 系统的最优和次优时滞控制问题, 获得了最优解和次优解, 输出能够在有限步内无误差地跟踪周期输入信号. Peery 等就 SISO 有限维系统提出了一种二自由度 H_∞ 最优时滞学习控制系统, 获得了更一般的时滞学习控制系统结构^[14]. Hillerstrom 研究了离散时滞学习控制系统的鲁棒稳定性问题. 由于时滞学习单元在周期信号包含的各频率处具有无穷大的增益, 因此, 设计完好的系统对对象增益的变化不是相当敏感. 然而, 对象固有的时滞却是很大的问题. Curtelin 研究了离散时滞控制系统标称情况下的收敛条件, 并提出了一些新的时滞系统鲁棒性能评价指标. 可见, 时滞学习控制以其优良的跟踪周期信号的能力, 获得了广泛的应用.

5 展望(Topics to be researched)

时滞控制展现了相当广阔、美好的应用前景. 在国内, 时滞控制是一个崭新的研究领域, 相关研究才刚刚起步. 还有大量的理论问题和实际问题有待研究. 比较迫切需要解决的问题有:

- 1) 商品化. 时滞控制的应用范围广, 针对不同的对象, 研究生产相应的时滞控制器, 转化为生产力, 直接为国民经济建设服务;
- 2) 加强时滞控制系统的稳定性研究;
- 3) 对时滞观测器系统、时滞学习控制系统的鲁棒稳定性研究;
- 4) 结合最优性能指标, 加强最优时滞控制系统的研究;
- 5) 研究与其它控制手段的关系与结合的可能, 如变结构控制、智能控制等;
- 6) 加强对多变量时滞控制系统的研究;
- 7) 寻求时滞的其它优点, 拓展时滞控制的研究内容, 等等.

参考文献(References)

- [1] Zhong Q C. Time delay control & its applications [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 1999
- [2] Singhose W E. Command generation for flexible systems [D].

Boston: MIT, 1997

- [3] Tallman G H, Smith O J M. Analog study of dead-beat posicast control [J]. Trans. Automat. Control, 1958, 3(1): 14 - 21
- [4] Youcef-Toumi K, McMahon E H II. Interpolation schemes in the control of systems with unknown dynamics [A]. Proceedings of the American Control Conference [C]. Green Valley, AZ, USA: American Automatic Control Council, 1990, 2784 - 2790
- [5] Youcef-Toumi K, Ito O. Model reference control using time delay for nonlinear plants with unknown dynamics [A]. Proc. of IFAC World Congress [C]. Munich, Germany, 1987
- [6] Youcef-Toumi K, Reddy S. Analysis of linear time invariant systems with time delay [J]. Journal of Dynamic Systems Measurement & Control-Transactions of the ASME, 1992, 114(4): 541 - 555
- [7] Chen W, Zhang H G, Yin C W. Input/Output linearization for nonlinear systems with uncertainties and disturbances using TDC [J]. Cybernetics & Systems, 1997, 28(7): 625 - 634
- [8] Youcef-Toumi K, Fuhlbrigge T. Application of decentralized time delay controller to robot manipulators [A]. Proceedings of 1989 IEEE Conf. on Robotics and Automation [C]. Scottsdale AZ, USA, 1989, 1786 - 1791
- [9] Corradini M L, Orlando G. Variable structure control for uncertain sampled data systems [A]. IEEE International Workshop on Variable Structure Systems, VSS, Proceedings 1996 [C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1996, 117 - 121
- [10] Corradini M L, Orlando G. Variable structure control of discretized continuous-time systems [J]. IEEE Trans. Automat. Control, 1998, 43(9): 1329 - 1334
- [11] Youcef-Toumi K, Huang S Y. Analysis of a time delay controller based on convolutions [A]. Proceedings of American Control Conference [C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE Service Center, 1993, 2582 - 2586
- [12] Youcef-Toumi K, Sasage Y, Ardini J, et al. Application of time delay control to an intelligent cruise control system [A]. Proceedings of the American Control Conference [C]. Chicago, IL, USA, 1992, 2, 1743 - 1747
- [13] Tomizuka M. Zero phase error tracking algorithm for digital control [J]. Journal of ASME Dynamic Systems, Measurement and Control, 1987, 109(1): 65 - 68
- [14] Peery E, Ozbay H. On H_∞ optimal repetitive controllers [A]. Proceedings of the IEEE Conf. on Decision and Control [C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE Service Center, 1993, 2, 1146 - 1151

本文作者简介

钟庆昌 1970 年生. 1997 年 4 月从湖南大学毕业并获工学硕士学位. 1999 年 12 月在上海交通大学获博士学位, 之后在 Technion-Israel Institute of Technology 做博士后研究. 研究领域为计算机过程控制, 运动控制, 时滞控制, 时滞系统, 鲁棒控制等.

谢剑英 1940 年生. 1964 年毕业于上海交通大学自动化系. 教授. 博士生导师. 研究领域为复杂工业过程建模、控制与优化.