

两种基于 Narendra 方案的混合自适应修正方案

李言俊 江 勇 朱志刚

(西北工业大学航天工程学院·西安, 710072)

摘要: 本文在 Narendra 等人所提出的适用于理想对象的混合自适应控制方案的基础上提出了两种混合自适应方案. 本文首先将 Narendra 等人提出的仅适合于理想对象的控制器方案利用规范化方法推广到对象具有未建模动态情况, 提出了一种修正方案, 然后又针对修正方案在某些情况下收敛速度缓慢这一缺点进行分析, 发现是 Narendra 方案的固有缺点, 于是又提出了一种变换误差模型方案, 采用两种不同的敏感函数和误差测度模型交替使用的方法去估计控制参数, 既利用了 Narendra 方案的优点, 也克服了 Narendra 方案的固有缺点, 使系统的跟踪性能有很大改进.

关键词: 混合自适应控制; 未建模动态; 规范化; 参数估计

1 前 言

随着计算机的发展, 人们对于离散系统的自适应控制理论进行了大量的研究, 取得了许多重要研究成果. 但是, 越来越多的学者注意到, 根据将实际连续对象人为离散化所得到的数学模型而设计的离散自适应控制器往往不能与实际的连续对象紧密耦合. 很明显的一个例子就是一个最小相位连续对象经 z 变换所得到的离散对象往往具有单位圆之外的零点, 给自适应控制系统的综合设计带来困难. 为了解决这一问题, 一些学者认为最好的方法是建立混合自适应控制系统, 就是说在设计自适应控制器时, 连续时间对象始终保持连续状态, 仅仅是控制参数进行离散时间调整. 混合自适应控制系统由于具有连续系统和离散系统二者的优点, 并且对于系统中的非线性等有害因素具有一定的抑制作用, 因而是一种值得深入研究的有效控制方法.

1985 年 Narendra 等人在参考文献[1]中介绍了适用于理想对象的混合自适应控制方案. 当对象中含有干扰或未建模动态时, 这种方案却无法保证闭环系统的稳定性. 这种方案的另一个特点是, 当系统的跟踪误差较大时, 参数的自适应调整速度很快, 系统的跟踪误差也迅速减小. 但是, 当跟踪误差减小到一定程度之后, 参数的自适应调整速度变得极其缓慢, 甚至使系统的性能指标无法达到技术条件要求. 为了利用 Narendra 方案的优点并弥补其不足, 本文中我们在 Narendra 方案的基础上提出了两种修正方案.

2 Narendra 混合自适应方案

对于理想对象, 当采用类似于参考文献[2]中的模型参考自适应控制方案时, 往往可导出混合自适应控制系统的误差模型

$$\Phi_{\text{TE}}^T(t) = e(t), \quad (1)$$

式中 Φ_K 为控制参数误差向量, $\xi(t)$ 为敏感函数向量, $e(t)$ 为系统跟踪误差, K 表示时刻 t_K , 控制参数仅仅在 $t_K (K=0, 1, 2, \dots)$ 时刻进行调整, 在区间 $[t_K, t_{K+1})$ 上, Φ_K 为常值向量。

Narendra 等人在参考文献[1]中研究理想对象的混合自适应控制理论时, 曾提出下述方案:

将(1)式两边同乘以 $e(t)$ 可得

$$\Phi_K^T e(t) \xi(t) = e^2(t), \quad (2)$$

对(2)式两边在区间 $[t_K, t_{K+1})$ 上积分可得

$$\Phi_K^T \int_{t_K}^{t_{K+1}} e(t) \xi(t) dt = \int_{t_K}^{t_{K+1}} e^2(t) dt. \quad (3)$$

令

$$\xi_K = \int_{t_K}^{t_{K+1}} e(t) \xi(t) dt, \quad e_K = \int_{t_K}^{t_{K+1}} e^2(t) dt, \quad (4)$$

则构成了与(3)式等价的离散形式误差模型

$$\Phi_K^T \xi_K = e_K. \quad (5)$$

然后便可根据(5)式采用离散方法估计控制参数. 参考文献[1]所采用的估计算法为

$$\Delta \Phi_K = - \frac{\xi_K \xi_K^T}{1 + \xi_K^T \xi_K}. \quad (6)$$

式中 $\Delta \Phi_K = \Phi_{K+1} - \Phi_K$, $\Phi_K = \theta_K - \theta$, θ 为理想控制参数向量, θ_K 为控制参数向量在 t_K 时刻的估值。

3 基于 Narendra 方案的混合自适应修正方案

当对象中含有未建模动态时, 所得到的混合自适应控制系统误差模型为

$$e(t) = \Phi_K^T \xi_K + \mu \eta(t). \quad (7)$$

式中 $\mu \eta(t)$ 为对象未建模动态所引起的误差项, μ 是很小的未知常数. 在低频段, $|\mu \eta(t)|$ 可能很小. 但是, 当系统中存在高频寄生时, 尽管 μ 很小, 而 $|\mu \eta(t)|$ 可能变得很大. 在这种情况下, 如果采用上一节所述 Narendra 方案, 有可能导致整个闭环系统的不稳定。

为了解决这一问题, 可采用信号规范化方法, 即将(7)式两边分别先乘以 $e(t)$, 再除以 $m^2(t)$, 然后在区间 $[t_K, t_{K+1})$ 上积分, 则有

$$\int_{t_K}^{t_{K+1}} \frac{e^2(t)}{m^2(t)} dt = \Phi_K^T \int_{t_K}^{t_{K+1}} \frac{e(t) \xi(t)}{m^2(t)} dt + \mu \int_{t_K}^{t_{K+1}} \frac{e(t) \eta(t)}{m^2(t)} dt. \quad (8)$$

式中 $m(t)$ 称之为规范信号, 其具体的选择方法可参考[3, 4]. 令

$$\xi_K = \int_{t_K}^{t_{K+1}} \frac{e(t) \xi(t)}{m^2(t)} dt, \quad \eta_K = \int_{t_K}^{t_{K+1}} \frac{e(t) \eta(t)}{m^2(t)} dt. \quad (9)$$

则可得与方程(8)等价的离散形式方程

$$e_K = \Phi_K^T \xi_K + \mu \eta_K. \quad (10)$$

根据方程(10)便可采用参考文献[5]中的任何一种离散辨识方法估计控制参数。

这种混合自适应控制方案的系统稳定性分析方法与参考文献[4]中的闭环系统稳定性分析相类似, 因分析过程长而复杂, 此处不再详述。

但是, 在对关系式(9), (10)进一步分析时可以看到, 上述修正方案中所采用的控制参数误差测度序列实际是相当于 $e(t)$ 的三次方序列, 当 $|e(t)|$ 大于 1 时, 这种方案对控制参数误差相当敏感, 参数估计的收敛速度较快. 但是, 当 $|e(t)|$ 小于或等于 1 时, 这种方案对

控制参数误差的灵敏度变得极差,参数估计的收敛速度变得极其缓慢,甚至无法接近理想控制参数.这是 Narendra 方案所固有的缺点,根据 Narendra 方案所导出的修正方案的这一缺点在进行数字仿真时显得十分突出.

为了利用 Narendra 方案的优点并弥补其不足,可以采用两种不同的敏感函数和误差测度模型交替使用的方法,构成一种变换误差模型方案,即

$$e_K = \Phi_K^T \xi_K + \mu \eta_K. \quad (11)$$

当 $|e(t)| > b$ 时,取

$$e_K = \int_{t_K}^{t_{K+1}} \frac{e^2(t)}{m^2(t)} dt, \quad \xi_K = \int_{t_K}^{t_{K+1}} \frac{e(t)\xi(t)}{m^2(t)} dt, \quad \eta_K = \int_{t_K}^{t_{K+1}} \frac{e(t)\eta(t)}{m^2(t)} dt. \quad (12)$$

当 $|e(t)| \leq b$ 时,取

$$e_K = \int_{t_K}^{t_{K+1}} \frac{e(t)}{m(t)} dt, \quad \xi_K = \int_{t_K}^{t_{K+1}} \frac{\xi(t)}{m(t)} dt, \quad \eta_K = \int_{t_K}^{t_{K+1}} \frac{\eta(t)}{m(t)} dt. \quad (13)$$

式中 b 为由设计者所选择的常数.当采用估计算法(6)时, b 可取 1.1~1.3,但收敛速度较慢.为了改善估计算法的收敛速度,可增加设计常数 a_K ,构成后面所给出的估计算法(18).当采用算法(18)时, b 的取值应与 a_K 的取值综合进行考虑,建议用数字仿真的方法来选取 a_K 和 b 的最佳值.

上述变换误差模型方案显然是利用混合自适应控制系统的控制参数误差向量 Φ_K 在区间 $[t_K, t_{K+1})$ 上为常数这一特点,并结合开关原理所构成的.仿照此方案,我们甚至可以构造出多种误差模型方案的叠加方案,这也是混合自适应控制系统的优点之一,而对于全连续或全离散系统,则无法做到这一点.

4 数字仿真结果

为了对文中根据 Narendra 方案所提出的两种混合自适应修正方案进行验证,我们曾进行了大量数字仿真.仿真时所用的对象模型传递函数为

$$\frac{y(s)}{u(s)} = \frac{1}{s(s-1)}(1 - \mu s). \quad (14)$$

式中 $0 < \mu < 1$,对象已建模部分的传递函数为

$$G_0(s) = \frac{1}{s(s-1)}, \quad (15)$$

为具有不稳定极点的非最小相位系统,对象的未建模部分用 $-\mu s$ 表示.所选取的参考模型为

$$y_m = \frac{1}{(s+1)(s+2)^2}, \quad (16)$$

选用的规范化信号 $m(t)$ 满足微分方程

$$\dot{m}(t) = -0.7m(t) + |u(t)| + |y(t)| + 1, \quad m(0) = 2. \quad (17)$$

为了便于方案间的相互比较,仿真时采用了统一估计算法

$$\theta_{K+1} = \theta_K - \frac{a_K e_K \xi_K}{1 + \xi_K^T \xi_K}. \quad (18)$$

式中 a_K 为设计参数,用于调整估计算法的收敛速度. a_K 可以选为常数,也可根据需要选为变量.估计算法(6)即是算法(18)当 $a_K=1$ 时的一种特殊情况.

数字仿真结果表明,当闭环系统中不含高频信号时,尽管对象具有建模误差,但只要这种建模误差在低频段的影响较小,则 Narendra 方案仍具有良好的跟踪性能。

但是,当外参考输入信号 $r(t)$ 为方波信号时,由于方波中含有高频谐波,则 Narendra 方案的跟踪性能变得很差。图 1,图 2 和图 3 分别示出了 Narendra 方案、修正方案和变换误差模型方案在 $r(t)$ 是周期为 0.08 秒的方波信号时的仿真曲线。可以看出, Narendra 方案无法使对象的输出跟踪参考模型的输出,修正方案有较好的跟踪能力,但有一定的跟踪误差,变换误差模型方案在初始段有较大的跟踪误差,但经过一段时间的调整之后,跟踪误差变得很小。

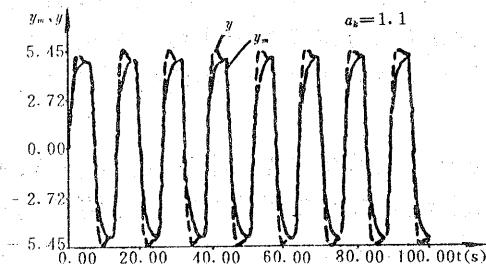


图 2 $r(t)$ 为方波信号时,修正方案跟踪曲线

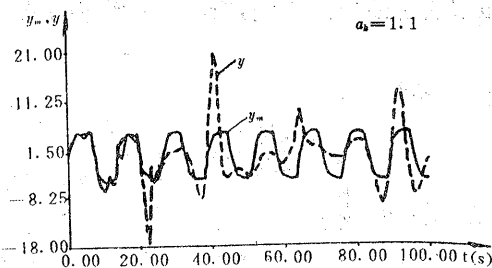


图 1 $r(t)$ 为方波信号时, Narendra 方案跟踪曲线

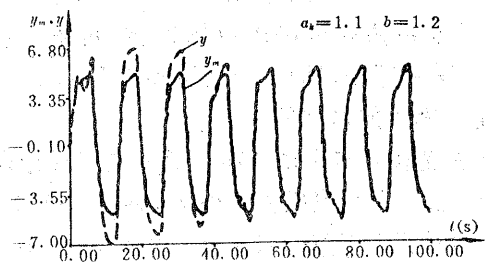


图 3 $r(t)$ 为方波信号时,变换误差模型方案跟踪曲线

图 4,图 5 和图 6 分别示出了当 $r(t)$ 为正弦信号时三种方案的跟踪误差曲线。在相同的条件下, Narendra 方案很快就发散了。修正方案虽然没有发散,但当跟踪误差 $|e(t)|$ 小于 1 时,收敛速度很慢,尽管适当加大 a_K 值使收敛速度加快了一点,但在调整时间长达 500 秒时,系统的最大跟踪误差仍大于 0.7。而变换误差模型方案在 45 秒时就已经使跟踪误差减小到一个很小的范围,而且在 45 秒后仍在继续进行自适应调整。由于采用了积分器,系统的跟踪误差可以逐渐趋于零。

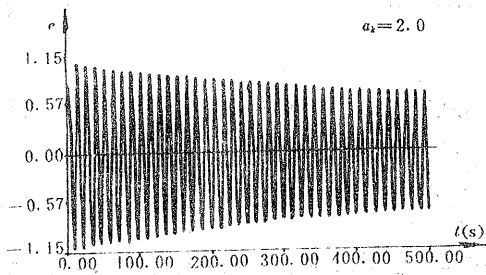


图 5 $r(t)$ 为正弦信号时,修正方案跟踪误差曲线

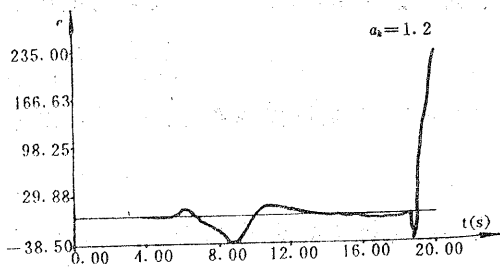


图 4 $r(t)$ 为正弦信号时, Narendra 方案跟踪误差曲线

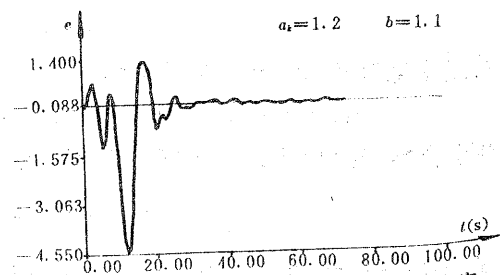


图 6 $r(t)$ 为正弦信号时,变换误差模型方案跟踪误差曲线

结束语

本文介绍了两种在 Narendra 方案的基础上所导出的适用于对象具有未建模动态情况的混合自适应控制方案。虽然对于具体的工程应用来说,这两种方案还有待于进一步的探索和验证,但数字仿真结果表明,这两种方案都具有许多优点。

当然,任何一种方案都有一定的适用范围,因而我们不能只凭在一定范围内的研究成果就作出结论说哪一种方案最好或哪一种方案最差,因为各有各的特点。例如,对于理想对象,在三种方案中 Narendra 方案也许是最好的一种方案。但当对象具有未建模动态时,本文中所提出的两种方案对于系统的跟踪性能都有很大的改进。当系统存在未建模动态且要求跟踪精度很高,但对初始段的过渡过程要求又不太严格时,采用变换误差模型方案较好。而当系统存在未建模动态时,若对系统的跟踪精度要求不高,但对系统的超调量有较严格要求,则应选用文中的第一种修正方案。

参 考 文 献

- [1] Narendra, K. S., Khalifa, I. H. and Annaswamy, A. M.. Error Model for Stable Hybrid Adaptive Systems. IEEE Trans. Automat. Contr., 1985, AC-30(3), 339—347
- [2] Narendra, K. S. and Valvani, K. S.. Stable Adaptive Controller Design—Direct Control. IEEE Trans. Automat. Contr., 1978, AC-23(5), 570—583
- [3] Ioannou, P. and Tsakalis, K.. A Robust Direct Adaptive Controller. IEEE Trans. Automat. Contr., 1986, AC-31(10), 1033—1043
- [4] 李言俊. 连续对象具有未建模动态时的一种鲁棒混合自适应控制器. 西北工业大学学报, 1989, 7(1), 57—66
- [5] 李言俊, 陈新海. 一种积分式混合自适应控制器. 控制与决策, 1990, 5(6), 46—48

Two Kinds of Modified Hybrid Adaptive Schemes Based on Narendra's Scheme

LI Yanjun, JIANG Yong and ZHU Zhigang

(College of Astronautics, Northwestern Polytechnical University • Xi'an, 710072, PRC)

Abstract: In this paper we proposed two kinds of modified hybrid adaptive control schemes based on the scheme for ideal plant proposed by Narendra and others. First, using normalization we extend Narendra's scheme only adapted to ideal plant to the plant which contains unmodeled dynamics, and propose a modified scheme. Then, we analyse the cause of low convergence rate of modified scheme, and discover that it is an inherent shortcoming of Narendra's scheme. So we propose an interchanging error model scheme, in which two sorts of sensitive functions and error measure models are interplaced to estimate the control parameters. This scheme not only has the advantages of Narendra's, but also overcomes the inherent shortcoming of Narendra's scheme, and it evidently improves the tracking performance of the system.

Key words: hybrid adaptive control; unmodeled dynamics; normalization; parameter estimation

本文作者简介

李富俊 1944年生. 1967年西北工业大学本科毕业, 1981年于西北工业大学获硕士学位, 1985年至1987年在美国南加州大学进修学习, 1989年于西北工业大学获博士学位. 1990年评聘为副教授, 1991年晋升为教授. 目前主要研究领域为时变系统参数辨识, 不确定系统的自适应控制理论, 导弹及航天器的制导与控制等.

江 勇 1937年生. 1961年毕业于西北工业大学, 1978年担任西北工业大学导弹制导与控制教研室讲师, 1987年晋升为副教授. 研究工作兴趣为数字技术、微机控制方面的研究及软、硬件的开发. 目前研究领域主要是计算机控制及其在导弹制导系统中的应用.

朱志刚 1968年生. 1991年于西北工业大学获硕士学位, 现为西北工业大学航天工程学院博士研究生. 1988年至1991年期间从事混合自适应控制理论及其应用研究. 现在的研究方向为变结构自适应控制理论及其应用.

智能机器人'93 学术研讨会 会 议 纪 要

中国人工智能学会智能机器人专业委员会成立大会暨首届学术研讨会于1993年7月20日至26日在四川成都-松潘召开. 会议主要议程为: 1) 交流智能机器人研究成果, 探讨智能机器人研究应用与发展方向; 2) 选举产生首届专业委员会及其主任和副主任. 智能机器人专业委员会的成立和首届学术研讨会的召开, 是我国智能机器人科技学术界的一件大事, 必将对我国智能机器人的研究和应用产生积极影响.

四川省人大常委会副主任兼省科协主席康根黄、成都科技大学党委书记赵静桂到会讲了话. 成都科技大学常务副校长唐登高教授及该校计算机与自动化系主任由克伟教授等到会祝贺. 筹备委员会主任蔡自兴教授就本专业委员会的筹备情况作了报告.

本次会议收到应征论文70多篇, 其中56篇收入本会议论文集. 国务委员兼国家科委主任宋健教授, 中国科学院副院长胡启恒研究员, 以及学部委员张仲俊、高为炳、李衍达教授和中国人工智能学会理事长涂序彦教授为本会议题了词; 学部委员、浙江大学校长路甬祥教授和中南工业大学校长何继善教授等15位同志发来贺信或贺电, 对大会表示热烈祝贺.

有5位代表就智能机器人的研究与展望、体系结构、装配作业控制技术、智能机器人与人类社会等问题作了大会报告. 其它代表分别就智能机器人的控制、神经网络方法、规划与算法、视觉与传感以及应用等专题宣读了论文, 并进行认真热烈的讨论.

与会全体代表经过充分酝酿和民主协商后, 以无记名投票方式选举产生了中国人工智能学会智能机器人专业委员会首届委员会委员共37名: 蔡自兴、曹作良、陈辉堂、龚振邦、顾国昌、洪炳荣、黄心汉、霍伟、黎亚龙、李敏、林尧瑞、罗公亮、罗瑞璋、毛宗源、彭嘉雄、彭商贤、钱文瀚、石焱、苏士权、宋国宁、孙迪生、唐少先、田耕欣、王昆翔、夏凯、许维健、许晓鸣、严学高、杨淮清、杨静宇、张国荣、张彭、张铨、郑南宁、郑文波、周西苓、朱焱良. 经首届委员会第一次委员会议选举产生了常务委员13名: 蔡自兴、黄心汉、黎亚龙、罗公亮、彭商贤、许维健、杨淮清、杨静宇、张彭、郑南宁、郑文波、周西苓、朱焱良. 并由到会常委推举蔡自兴教授为主任委员, 黄心汉、杨静宇、张彭、郑南宁和朱焱良教授以及杨淮清工程师为副主任委员, 黎亚龙副教授为秘书长. 主任会议讨论了专业委员会成立后的工作, 并讨论决定下届学术研讨会将于1995年秋季在长沙-大庸召开, 由中南工业大学、国防科技大学和湖南大学联合承办.

与会代表对各级领导和科学家的热情鼓励、对筹委会的辛勤奋工作、对成都科技大学的会务工作和中南工业大学的支持表示衷心感谢.