

水箱液位系统多模型控制方法

李晓理, 石陇辉, 丁大伟

(北京科技大学 自动化学院; 北京科技大学 钢铁流程先进控制教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 针对水箱液位系统存在的大惯性、大时滞和非线性等特点, 采用多模型控制思想设计控制律, 以改善控制品质. 对于三级水箱液位控制系统, 设计多个基于一级水箱的等价控制器, 简化控制问题. 将水箱液位的设定值跟踪问题转化为多个设定值跟踪问题, 并由此构成多模型控制器, 避免输入达到上限, 从而达到优化控制的目的. 采用华晨公司的A3000过程控制系统进行实验研究, 结果显示, 本文提出的多模型控制方案可以极大地改善控制品质.

关键词: 水箱液位系统; 多模型; 设定值

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Multi-model control for water level system

LI Xiao-li, SHI Long-hui, DING Da-wei

(School of Automation and Electrical Engineering; Key Laboratory of Advanced Control of Iron and Steel Process(Ministry of Education), University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: To deal with the dynamic properties of big inertia, big time-delay and nonlinearities of a water level system, we propose a multi-model control strategy to improve the control performances. For a water level system with three tanks, we design three similar controllers based on the dynamical properties of one tank to simplify the design procedures. The tracking problem of set-point value of the water level system is divided into the tracking problem of three set-point values of the multi-model controller to prevent the inputs from exceeding the upper limits and optimize the control performances. In an experiment using the process controller A3000 of Hua Sheng Co., the results show that the proposed control strategy greatly improves the control performances.

Key words: water level system; multiple models; set-point value

1 引言(Introduction)

三容水箱液位系统作为一个典型的过程控制试验设备, 具有大惯性、大时滞和非线性等特点, 很多实际过程控制系统都可以用单容或双容水箱系统的动态特性来描述. 又由于液位便于直接观察, 也容易测量, 液位试验系统可进行灵活的过程组态, 因此三容水箱常常被用来验证各种先进控制方法的有效性. 近些年来, 国内外学者针对水箱液位系统的研究主要集中在以下几个方面:

1) 预测控制. 根据工业上易于获取的阶跃响应模型设计预测控制算法, 对有约束的三容水箱进行模型预测控制^[1];

2) 故障检测与容错控制. 由于三容水箱有挡板泄漏、传感器失真等问题, 所以常被用来研究故障检测和容错控制问题^[2];

3) 解耦控制. 国内外三容水箱实验系统大多通过阀门或挡板相互连通, 三容水箱之间存在一定耦合, 需要通过系统解耦, 才能进行有效的控制^[3,4];

4) 智能控制. 由于液体本身的属性及控制机构

的摩擦、噪声等的影响, 三容水箱的精确数学模型难以建立, 采用模糊、神经网络、自适应策略和智能推理方法进行建模和控制器设计, 往往可以取得较好的控制效果^[4~7];

5) 建模研究. 基于不同的模型, 如模糊模型、线性模型、Hammerstein模型等不同模型对水箱系统进行建模研究也是针对三容水箱的主要研究内容之一^[8~10]. 已上研究多在传统的经典控制方法的基础上进行深化研究, 但过于复杂的控制方法常常会缺乏鲁棒性. 本文将多模型控制思想应用到水箱液位系统, 为水箱液位系统的控制提供一种基于传统PID控制的, 工程上易于实现的智能控制方法.

多模型控制是一种起源于20世纪70年代, 又兴起于90年代的一种智能控制方法^[11,12], 其研究领域大体上可以分为两部分: 1) 改进瞬态响应的多模型自适应控制器, 利用多个初值相互切换, 改进自适应控制器中参数辨识的收敛速度. 这种研究方法多基于线性系统, 甚至含有扰动的线性系统; 2) 利用多种简单模型逼近非线性系统的不确定性, 基于多个简单

模型设计多个简单控制器, 进而基于切换机制构成多模型控制器^[13]. 本文研究多基于第2)种设计方案. 对于二级、三级水箱, 高阶模型和高品质的控制系统常常很难建立, 设计多个基于一级水箱的等价控制器往往能够起到很好的控制效果. 针对水箱液位系统存在的阀门开度限制, 设计控制器的时候常常要考虑到输入受限, 造成控制系统复杂. 采用多个阶梯状输出设定值, 设计多个局部稳定控制器可以避免输入量过大, 改善控制品质. 本文按照以下步骤进行研究. 首先给出水箱液位控制系统的工作原理及数学模型, 然后介绍实际的三容水箱控制系统A3000, 并在此基础上研究多模型控制策略的应用, 最终给出实际的控制效果.

2 水箱液位控制系统的工作原理及数学模型(Working principle and model of water level control system)

考虑如图1所示的单容水箱, 其中: Q_1 为水箱流入量; Q_2 为水箱流出量; A 为水箱截面积; V 为进阀门开度; H 为水箱液位. 对于一定的挡板开度, 当水箱的流入量和流出量相等时, 水箱的液位将保持不变. 此时若增大流入量会导致液位上升, 上升后的液位会增大出水压力, 从而会使流出量增加, 当流入量与流出量再次相等, 液位将在某一新高度上保持稳定; 反之减小流入量, 液位会下降, 并最终稳定在另一较低的液位高度上. 由于水箱的流入量可以调节, 流出量随着液位的变化而变化, 所以只需建立流入量与液位之间的数学关系就可以建立该水箱对象的数学模型^[14].

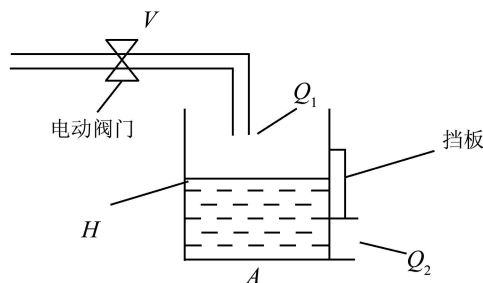


图1 单容水箱液位调节示意图

Fig. 1 A schematic of single tank water level control system

若 H_0 为水箱初始液位; K_1 为阀体流量比例系数; K_2 为压力流量比例系数. 下面将对单容水箱的数学模型进行推导. 假设系统初始状态 (V_0, H_0) 为稳定状态, A, K_1, K_2 为非时变参数, 则由图1可得

$$Q_1 - Q_2 = A \frac{dH}{dt}, \quad (1)$$

$$Q_1 = K_1 V, \quad (2)$$

$$Q_2 = K_2 \sqrt{H}. \quad (3)$$

显然该系统为非线性系统, 为便于利用经典控制理

论对其实施有效的控制, 将系统在平衡点 H_0 附近进行线性化, 则式(3)近似写为

$$\frac{Q_2}{H} \approx \frac{K_2}{\sqrt{H_0}} = K_3, \quad (4)$$

所以近似的有

$$Q_2 = K_3 H. \quad (5)$$

对式(1)(2)(5)进行拉普拉斯变化得

$$Q_1(s) - Q_2(s) = sAH(s), \quad (6)$$

$$Q_1(s) = K_1 V(s), \quad (7)$$

$$Q_2(s) = K_3 H(s). \quad (8)$$

考虑系统输入为 V , 输出为 H , 由式(6)~式(8)可以得出系统在平衡点 (V_0, H_0) 附近的模型的近似模型:

$$G(s) = \frac{H(s)}{V(s)} = \frac{K_1}{sA + K_3}. \quad (9)$$

水箱液位系统存在着一些固有延迟, 主要由于阀门传动机构, 传感器的反应时间, 信号的传输时间等方面都存在滞后. 考虑系统的固有延迟 τ , 并令 $K = \frac{K_1}{K_3}$, $T = \frac{A}{K_3}$, 单容水箱的模型可以近似为下面的一阶惯性滞后环节:

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s}. \quad (10)$$

传递函数(10)只是单容水箱在不同平衡点附近近似的数学模型, 在不同液位高度的多个线性模型可以用来近似描述水箱的动态特性. 对于三容水箱, 如果每个水槽对应阀门打开, 将构成多输入多输出系统, 又由于上端水槽的输出也将作为下端水槽的输入, 整个三容水箱系统将形成多输入多输出的耦合系统(三容水箱结构如下面的图2所示), 它的控制问题将更难解决.

3 三容水箱的多模型控制(Multi-model control of three-tank water system)

考虑如图2的A3000水箱液位控制系统, 其右端的储水池、2#水泵、电动调节阀及上、中、下3个水箱和相应的压力变送器构成了三容水箱液位控制系统. 系统启动后, 打开2#水泵, 储水池中的水将会被抽入到上、中、下3个水箱当中, 它们的液位将由其底部的压力变送器获得, 并通过现场总线送入控制系统PLC当中. PLC计算出实际液位和设定值之间的误差, 并利用预先设定好的PID控制算法计算出控制量, 再将控制量由现场总线反馈到电动调节阀, 通过控制电动调节阀的开度来改变流入水箱的流量, 从而控制了水箱的液位. 本文工作只考虑有一个阀门打开情况下的液位控制问题, 需要说明的是, 在实验中, 为了数据处理的方便, 系统输出并不是液位的实际高度, 而是液位与水箱高度相比后得出的比例

值. 针对图2所示的三级水箱液位系统进行多模型控制器的研究. 整个研究过程都是研究通过控制阀门的开度, 控制底层一级水箱的液位达到60%.

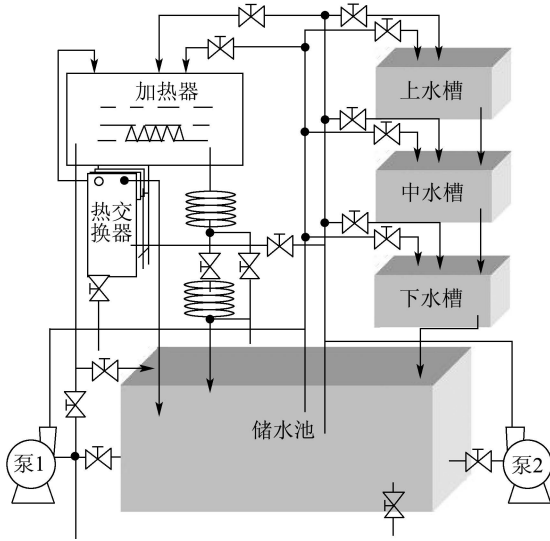


图2 A3000三容水箱结构图
Fig. 2 Structure of three-tank water system

3.1 PID控制器设计(Design of PID controller)

整个控制过程将在基本控制算法PID基础上进行. 针对对象模型(10), 一旦模型参数通过辨识算法获得, 可以采用如下PID控制器:

$$U(s) = G_c(s)E(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right) E(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s\right) E(s), \quad (11)$$

其中: $E(s)$ 为输出误差, $U(s)$ 为输入阀门开度, $K_i = K_p/T_i$, $K_d = K_p T_d$.

考虑控制系统反应的快速, 其中参数可以采用如下Ziegler-Nichols公式进行整定(也可以采用液位控制系统工程上常用的PI控制参数). 采用Ziegler-Nichols公式有如下参数:

$$K_p = \frac{1.2T}{K\tau}, \quad T_i = 2\tau, \quad T_d = 0.5\tau. \quad (12)$$

3.2 双容及三容水箱的单容简化控制策略(Simplified control strategy of two-tank and three-tank water system)

对于双容水箱, 控制目标仍然考虑控制底层水箱的液位, 但控制输入为二级水箱进水阀处的进水量. 为简化问题, 进行如下分析. 如果要下水箱稳定在液位 H , 这时下水箱的进水量应该保持一个稳定值, 即中水箱的出水量要保持稳定. 在这种情况下, 中水箱的液位必定会稳定在某一个高度 H' . 如果此时直接对中水箱进行控制, 使它最终稳定在 H' , 那么在稳定状态下, 下水箱必然会稳定于 H . 这样双容

水箱的控制问题就转化为单容水箱的控制问题. 正是基于这样的考虑, 经过多次实验可得出, 稳态时, 当中水箱电动调节阀的开度为在65%时, 中水箱的液位将会保持在50%左右, 这时下水箱液位可以稳定在60%. 针对中水箱输入输出, 采集中水箱在平衡点(65%, 50%)附近的数据, 为其建立模型得

$$G(s) = \frac{0.72701}{95.186s + 1} e^{-5s}. \quad (13)$$

对式(13), 有Ziegler-Nichols PID控制器参数($K_p = 31.42$, $K_i = 3.142$, $K_d = 94.26$), 应用于双容水箱系统, 可得如图3所示实验结果. 图中: 1为下水箱液位, 2为中水箱液位. 可以看出当中水箱液位稳定于50%后, 下水箱的液位也逐渐稳定于60%.

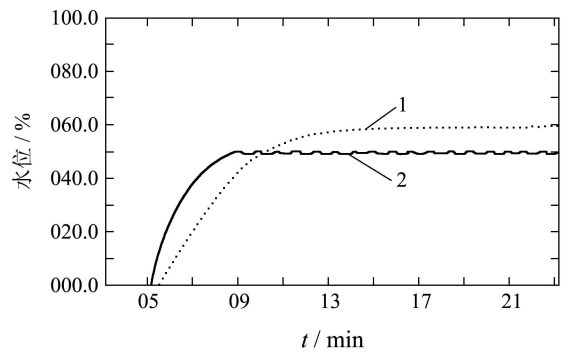


图3 双容水箱液位控制实际效果图
Fig. 3 The realtime curve of two-tank water level system

同样的控制策略, 可以应用到三级水箱的控制当中. 同样控制底层水箱的液位, 但控制输入为三级水箱进水阀处的进水量. 通过多次实验发现, 稳态时, 当上水箱调节阀开度保持在85%左右时, 上水箱的液位会基本稳定在50%, 中水箱的液位会基本稳定在55%, 这时下水箱液位将会保持在60%左右. 通过同样的控制策略并利用 $K_p = 19.21$, $K_i = 2.4$, $K_d = 76.84$ 的PID控制参数, 可以得到如图4所示的实际控制效果. 图中: 1为下水箱液位, 2为中水箱液位, 3为上水箱液位. 从图中可以看出, 当上水箱液位稳定于50%时, 中水箱和下水箱的液位也逐渐趋于稳定, 下水箱的液位最终稳定于60%.

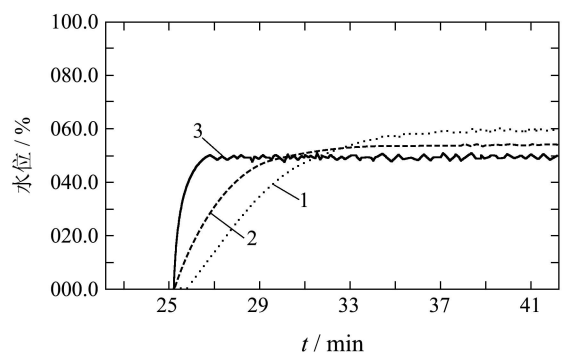


图4 三容水箱液位控制实际效果图
Fig. 4 The realtime curve of three-tank water level system

通过这种模型的转换,省去了二、三级水箱复杂模型的辨识过程,把二、三阶系统的控制问题简化为一阶系统的控制问题,简化了控制器的设计难度.

3.3 采用多设定值的多模型控制策略(Multi-model control strategy according to multiple setting point values)

若对工作在(85%, 60%)附近的一级水箱,采集输入输出数据,并基于模型结构(10)进行参数辨识,可以获得平衡点(85%, 60%)附近的单一模型

$$G(s) = \frac{0.71258}{90.201s + 1} e^{-11s}. \quad (14)$$

针对模型(14),采用工程上常用的对输出误差敏感度较低,输出幅值变化比较缓慢的PI控制方案($K_p = 2, K_i = 0.1$),会有如图5的仿真结果.图中: u 为输入, y 为输出, y_r 为设定值.仿真曲线当中输出最终能够达到期望液位,但同样的控制策略在得到的实验曲线却如图6所示,输入早已经被限制在输入上限,这是笔者非常不希望的.图中:1为水箱液位,2为控制量,3为设定值.

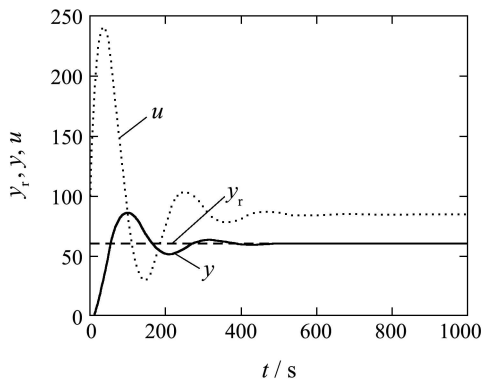


图5 单容水箱单模型控制器仿真曲线

Fig. 5 Simulation of single tank water system by using single model controller

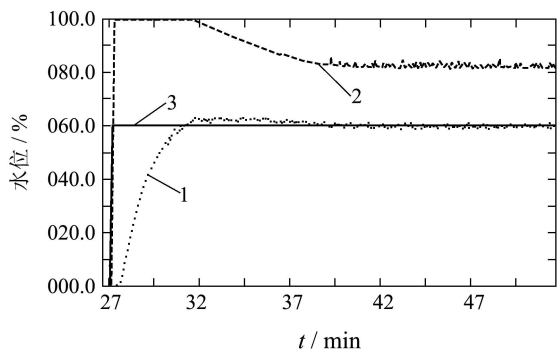


图6 单容水箱单模型控制器的实验曲线

Fig. 6 Realtime curve of single tank water system by using single model controller

这是由于实际系统输入受限所致,此时控制系统的非线性增强,增加了控制的难度,有些情况下

甚至很使系统失控,如图6所示,输入已经达到上限,输出有一定的超调和较长的过渡过程.为解决此类问题,避免控制量超限,采用多个局部模型,在多个局部模型的有效范围内建立多个输出设定值,使得系统的输出阶梯状的上升,减少输入量的波动.分别在20%, 30%, 40%, 50%, 60%的5个平衡点处如式(14)建立5个线性模型,并针对5个模型设计相应的PI控制器,得到如图7的控制效果.图中:1为水箱液位实际值,2为实际控制量,3为水箱液位设定值.

$$\begin{aligned} & \frac{0.57664}{65.4062s + 1} e^{-11s} \rightarrow \frac{0.7547}{93.9268s + 1} e^{-11s} \rightarrow \\ & \frac{0.8562}{92.5273s + 1} e^{-11s} \rightarrow \frac{0.8378}{91.8904s + 1} e^{-11s} \rightarrow \\ & \frac{0.7872}{82.2939s + 1} e^{-11s}, \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} & (K_p = 1.5, K_i = 0.1) \rightarrow (K_p = 2, K_i = 0.1) \rightarrow \\ & (K_p = 2, K_i = 0.1) \rightarrow (K_p = 2.5, K_i = 0.1) \rightarrow \\ & (K_p = 2.5, K_i = 0.1). \end{aligned} \quad (16)$$

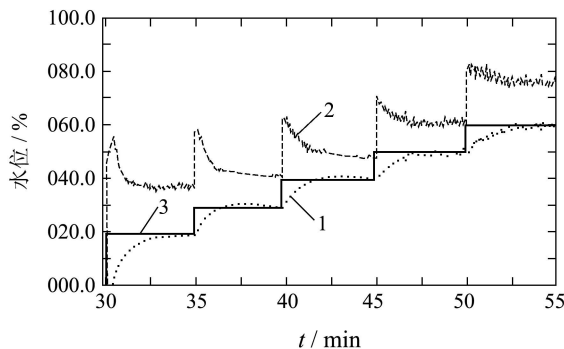


图7 采用多模型控制器单容水箱时的实验曲线

Fig. 7 Realtime curve of single tank water system by using multi-model controller

对比单模型控制器的控制效果,从图7可以看出,采用多个平衡点处的多个线性模型进行PI控制,减小了输入量的大幅度波动,输入量未达到上限.由于线性模型只是非线性系统在平衡点处的近似模型,因此多个平衡点处的线性模型比单一的线性模型增加了模型的有效逼近性,输出的超调也明显减小.当然,由于输出是阶梯状的上升,上升时间要比单模型控制器长,但从实际控制效果可以看出,只要模型个数选择适当,当对每一个局部设定值已经进行了有效的跟踪,便进行适当切换,便可以得到很好的控制品质.模型之间切换可以保证线性模型的有效性,保证每一个模型控制器可以在线性模型的有效区域工作,当模型个数适当多时,控制效果会更好.但模型过多会造成计算量大,模型之间竞争等问题影响控制品质.模型过少,达不到多模型控制器的效果,不能避免输入的大的波动.本文中若选择在(20%, 40%, 60%)处建立3个模型,仍然会发现控制输入和

输出的较大波动,选择5个模型是从计算量和控制效果综合考虑的一种最佳选择.模型个数的选择可以以离线仿真结果作为参考(考虑输入的波动小,输出的超调小),适当增加模型的个数,达到最佳效果.切换可以采用基于输出误差的指标切换函数,也可以适当加长每一个局部模型的使用时间,保证对局部设定值的有效跟踪.本文中采用每间隔5 min切换一次,在局部设定值被基本跟踪上以后再进行下一个模型的切换.

4 结论(Conclusion)

本文针对A3000过程控制系统,研究三容水箱的液位控制问题.考虑到三容水箱存在的大惯性、大滞后和非线性等特点,采用多模型控制方法进行控制.将二、三级水箱的液位控制转化为等价的一级水箱液位控制问题,简化控制器的设计.考虑到控制阀门存在的上下限制,为了减少输入的不确定性和输出的波动,采用基于多个平衡点的多个局部模型,使得对象的输出阶梯状的达到设定值,提高控制品质.本文的研究为多模型控制方法的实际应用提供了一个有效的研究平台,同时为水箱的液位控制提供了一个有效的智能控制方法.

参考文献(References):

- [1] 陈薇, 吴刚. 非线性双容水箱建模与预测控制[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(8): 2078 – 2085.
(CHEN Wei, WU Gang. Modeling of nonlinear two-tank system and model predictive control[J]. *Journal of System Simulation*, 2006, 18(8): 2078 – 2085.)
- [2] 杨英华, 陆宁云, 江云波, 等. 一种基于非线性主成分回归的过程监测及故障诊断方法[J]. 信息与控制, 2002, 31(3): 274 – 276.
(YANG Yinghua, LU Ningyun, JIANG Yunbo, et al. Process monitoring and fault diagnosis based on a nonlinear principal component regression method[J]. *Information and Control*, 2002, 31(3): 274 – 276.)
- [3] 高兴泉, 刘淳, 马苗苗, 等. 基于非线性静态反馈解耦的三容系统PI控制[J]. 控制工程, 2004, 11(4): 352 – 355.
(GAO Xingquan, LIU Chun, MA Miaomiao, et al. PI control of three-tank system based on nonlinear static feedback decoupling[J]. *Control Engineering of China*, 2004, 11(4): 352 – 355.)
- [4] 崔桂梅, 郝智红, 赵利敏. 三容系统的自适应-模糊神经网络解耦及液位控制[J]. 自动化仪表, 2005, 26(7): 16 – 18.
(CUI Guimei, HAO Zhihong, ZHAO Limin. The self-adaptive fuzzy neural network decoupling and level control for the three-tank system[J]. *Automation and Instrumentation*, 2005, 26(7): 16 – 18.)
- [5] 张海潮, 吴云洁. 基于单容水箱控制的一种新的控制方法[J]. 控制与决策, 2002, 17(2): 130 – 132.
(ZHANG Haichao, WU Yunzhe. A new control method of single tank water system[J]. *Control and Decision*, 2002, 17(2): 130 – 132.)
- [6] DAVID CARTES, LEI WU. Experimental evaluation of adaptive three-tank level control[J]. *ISA Transactions*, 2005, 44(2): 283 – 293.
- [7] JAE HAK JUNG, MOONYONG LEE, JIETAE LEE, et al. A development of experimental education program: computer control of multi-stage level control system[J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2000, 24(2): 1497 – 1502.
- [8] 王志新, 谷云东, 李洪兴. 单水箱液位控制系统的模糊推理建模机仿真[J]. 模糊系统与数学, 2007, 21(2): 141 – 147.
(WANG Zhixin, GU Yundong, LI Hongxing. Fuzzy modeling and simulation of several level control experiments on single tank system[J]. *Fuzzy Systems and Mathematics*, 2007, 21(2): 141 – 147.)
- [9] LI X L, LI J, SHI L H. Modeling and simulation of water level system[C] // *Proceeding of IEEE International Conference on Automation and Logistics*. Piscataway, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Computer Society, 2008: 2856 – 2859.
- [10] GRAY G J, MURRAY-SMITH D J, LI Y, et al. Nonlinear model structure identification using genetic programming[J]. *Control Engineering Practice*, 1998, 6(11): 1341 – 1352.
- [11] 王伟, 李晓理. 多模型自适应控制[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
(WANG Wei, LI Xiaoli. *Multiple Model Adaptive Control*[M]. Beijing: Science Press, 2001.)
- [12] 李晓理, 王伟, 孙维. 多模型自适应控制[J]. 控制与决策, 2000, 15(4): 390 – 394.
(LI Xiaoli, WANG Wei, SUN Wei. Multiple model adaptive control[J]. *Control and Decision*, 2000, 15(4): 390 – 394.)
- [13] 席裕庚, 王凡. 非线性系统预测控制的多模型方法[J]. 自动化学报, 1996, 22(4): 456 – 461.
(XI Yugeng, WANG Fan. Nonlinear multi-model predictive control[J]. *Acta Automation Sinica*, 1996, 22(4): 456 – 461.)
- [14] 张晓华. 系统建模与仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
(ZHANG Xiaohua. *System Modelling and Simulation*[M]. Beijing: TsingHua University Press, 2006.)

作者简介:

李晓理 (1971—), 男, 教授, 博士生导师, 从事多模型控制和自适应控制等研究, E-mail: lixiaoli@hotmail.com;

石陇辉 (1985—), 男, 硕士研究生, 从事多模型自适应控制和水箱液位控制等研究;

丁大伟 (1980—), 男, 讲师, 从事切换控制、模糊控制等研究.