

冷热水混合器出水温度控制系统参数估计方法

孟庆龙¹, 王元¹, 闫秀英²

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 西安建筑科技大学
信息与控制工程学院, 710055, 西安)

摘要: 采用基于计算流体力学(CFD)的系统辨识方法,对冷热水混合器出水温度控制系统进行了建模. 结合CFD技术与系统辨识理论,将递推参数估计算法嵌入CFD数值模拟软件FLUENT中,实现了基于CFD的“虚拟”控制系统的在线参数估计. 结果表明:该方法利用CFD模拟被控对象,不受物理实验限制,可以有效地估计控制系统参数;用计算模拟时间步长决定采样时间,而数值模拟实际计算时间对参数估计的实时性没有影响,即参数估计相对于被模拟的控制对象永远是实时的;特别是针对流体流动过程的系统建模,该方法是一种可行的选择.

关键词: 计算流体力学;温度控制;系统辨识;参数估计;冷热水混合器

中图分类号: TP273; TP271 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)11-1398-05

Computational Fluid Dynamics Based Parameter Estimation of Hot and Cool Water Mixture Control System

MENG Qinglong¹, WANG Yuan¹, YAN Xiuying²

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Department of Information and Control Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: A computational fluid dynamics(CFD) based system identification approach was used to model the outlet water temperature control system of a hot and cool water mixture bank. A recursive square method for parameter estimation was embedded in the commercial CFD software, FLUENT, for on-line parameter estimation of the virtual control system. The result shows that the method proposed can estimate the parameters of the control system without the limitation of physical experiments, the sample time is determined by the time step while the computation time of CFD does not influence the real-time performance of parameter estimation. The present approach is viable for controlled systems involving fluid flow and heat transfer.

Keywords: computational fluid dynamics; temperature control; system identification; parameter estimation; hot and cool water mixture

系统辨识是基于被控系统输入输出数据的物理实验技术,而计算流体力学(CFD)可以认为是针对流体流动过程进行的以机理建模为基础的“虚拟”实验. 依赖实验研究获取流动数据进行模型辨识耗时且成本高昂,利用CFD进行瞬态模拟并将其产生的时间序列代替真实的物理实验数据,用于流体流动

过程的控制系统的辨识,是一种可行的方法.

将计算流体动力学与系统辨识理论结合进行控制系统建模,是近几年兴起的一种新建模方法:1994年,美国NASA的Chicattelli等人^[1]首次将CFD技术与控制理论相结合,提出一种用于飞行器推进控制系统的建模方法;1998年,Peng等人^[2]利用CFD

的模拟结果,并结合系统辨识方法得到房间温度控制系统状态空间方程形式的区域模型;2003年,Yang 等人^[3]针对垃圾焚烧炉内部温度难以测量和控制的问题,将 CFD 数值模拟结果作为控制系统信息数据库供实际过程控制在线调用,为实施前馈控制提供有价值的过程信息;Gerber 等人^[4]在 Yang 的基础上,提出一种基于 CFD 数值模拟的塑体成型温度系统预测控制方案;2004年,Desta 等人^[5]研究房间温度场控制问题时,受实验区内测点布置的限制,采用 CFD 数值模拟和系统辨识技术相结合结合的方法,建立了房间温度场控制系统模型;2005年,Huisman^[6]提出一种基于 CFD 降阶模型的玻璃熔体温度控制方法;2006年,Rizzo 等人^[7]将 CFD 技术用于基于 ARMARKOV 干扰抑制方法的自适应流体控制。以上学者采用的基于 CFD 的系统辨识多是离线建模方法,而对于时变系统或非线性系统,目前的基于 CFD 的离线建模方法将不再适用。

本文针对基于 CFD 的系统辨识建模方法,将递推辨识算法嵌入 CFD 数值模拟软件 FLUENT 中,实现了系统参数的在线实时估计,并以冷热水混合器出水温度控制为例,说明了该方法的可行性。

1 基于 CFD 数值模拟的在线系统参数估计

基于 CFD 数值模拟的系统辨识建模方法兼顾了系统内部和外部的特性。CFD 模型基于质量守恒、动量守恒、能量守恒定律和传热传质原理,反映了被控系统的内部特征,系统辨识提取 CFD 数值模拟的数据,经过必要的数据处理得到反映被控系统外部特征的模型,可以说基于 CFD 的系统辨识建模方法是一种“灰箱”建模方法(亦称作基于数据的机理建模法)。

将 CFD 数值模拟的边界条件或源项看作是控制系统的控制量, u 、 v 、 w 、 T 等求解变量看作是控制系统的被控量。利用 CFD 的数值模拟可以完成系统辨识的第 1 步和第 2 步,即通过 CFD 数值模拟对被控系统进行预测,获得先验知识,再按照人为给定的输入获得系统的输出(响应)数据。

本文采用 CFD 商用软件 Fluent^[8],该软件具有丰富的物理模型、先进的数值方法和并行处理能力以及强大的前后处理功能,目前已成为最流行的 CFD 软件之一,其显著的特点之一就是带有能够进行二次开发的用户自定义函数(UDF),从而为在线

辨识算法的实现提供了一个开发平台。采用的实时参数估计算法为自适应遗忘因子递推最小二乘法^[9]。该算法适用于时变系统参数估计,且可以保证即使系统输入为欠激励时,也能得到可靠的参数估计值。

图 1 给出了基于 CFD 数值模拟的系统参数在线估计方法的实现流程。由图 1 可以看出,该建模实现方法可以分为两大部分,即被控对象数值模拟和系统实时参数估计实现,前者由 FLUENT 实现,后者由用户自定义函数 UDF 来实现。实现过程如下:在 UDF 中给定系统输入 $u(t)$ 和干扰信号 $\omega(t)$,将其作为 CFD 数值模拟的边界条件;设定 CFD 模型的各种参数(物性参数,求解器参数,湍流模型等)后进行数值模拟;在模拟过程中,UDF 按照设定的采样周期(即 FLUENT 中的时间步长)实时采集数值模拟输出 $y(t)$ 和时变输入 $u(t)$,将采集得到的原始输入输出数据送入数据处理单元进行滤波、去趋势项等处理后得到输入输出对 $\{\bar{u}(t), \bar{y}(t)\}$,在线辨识算法单元接受 $\{\bar{u}(t), \bar{y}(t)\}$ 进行实时系统参数估计,并将参数估计值 $\theta(t)$ 输出保存为文本文件,供控制器设计用。

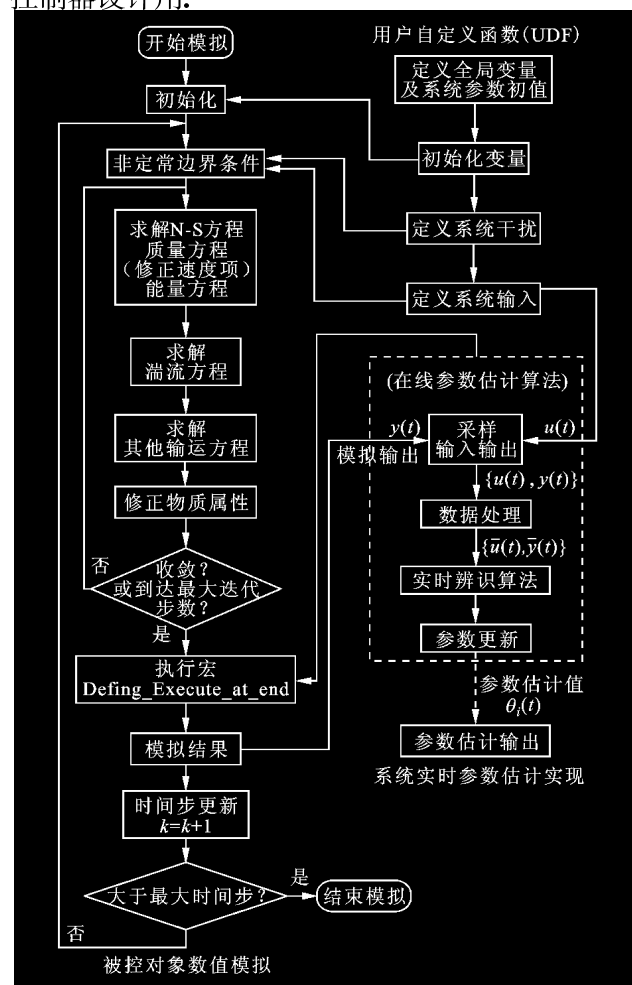


图 1 基于 CFD 数值模拟的系统参数在线估计原理图

对连续时间过程进行辨识时,输入输出信号需经过采样处理.采样周期的选择直接影响辨识模型的精度.由文献[10]可知,如果采样周期太大,信号的信息量损失太多,将直接影响模型的精度,有些高阶的过程也会自动退化成低阶的模型,大大降低模型的性能.如果采样时间太小,则除了可能碰到硬件速度和数值计算出现病态等麻烦外,还会显著影响模型静态增益的估计值.一般来说,采样周期太大和太小之间的范围是很宽的,可采用以下经验公式

$$T_s = T_{95}/(5 \sim 15) \quad (1)$$

式中: T_s 表示采用周期; T_{95} 是过程阶跃响应达到 95% 时的调节时间.

该方法的核心部分是合理地使用 UDF 实现在线辨识算法,因此要实时获得系统的输入输出对 $\{\bar{u}(t), \bar{y}(t)\}$, 并保存其前 k 步(大小视需要而定)数据.

2 仿真实例

下面以小型冷热水混合器出水温度控制为例,说明基于 CFD 数值模拟的系统参数在线估计方法的可行性.混合器简图^[11]如图 2 所示.

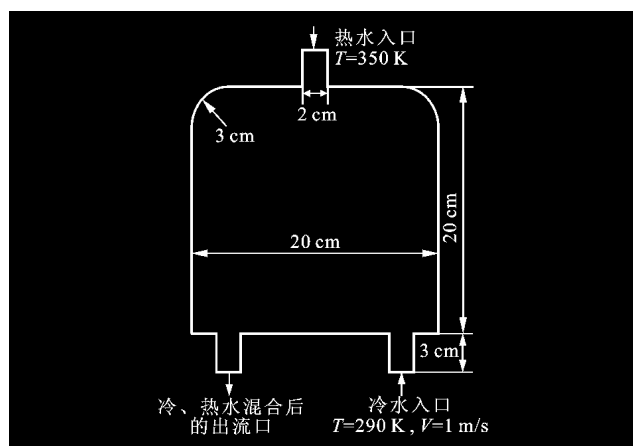


图2 混合器简图

有 2 种方法可实现对出水温度的控制,即变温度和变流量控制.本文将建立热水流量-出水温度之间的动态离散模型.首先,建立 CFD 模型,冷水入口边界为定常边界条件,即温度为 290 K,流速为 1 m/s.利用 UDF 按要求给定非定常的热水入口边界条件,即将变化的热水流量作为系统输入,其温度为 350 K.然后,进行 CFD 模拟得到数值响应结果,其中设定的时间步长为 1 s,为保证每个时间步内计算收敛,每个时间步的最大迭代步数定为 20 步.本文将出口温度作为系统输出.研究热水流量阶跃输入下水温度的响应发现,其动态过程具有二阶系统

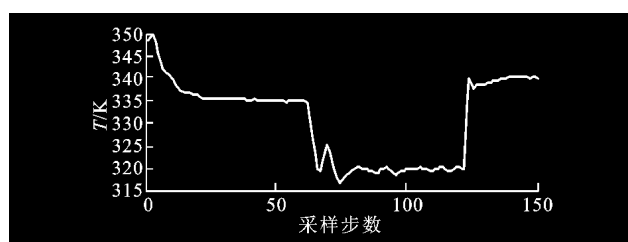
特性,故选择 ARX (2,2,1)模型,即

$$(1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2})y(t) = (b_1 q^{-1} + b_2 q^{-2})u(t) + e(t) \quad (2)$$

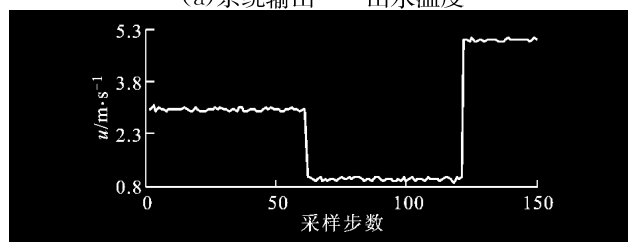
选择设定输入分为 3 个运行阶段,共 160 个时间步长.为保证输入的激励,在每个运行阶段的常值工作点上加入 0 均值高斯分布信号 $e_s(k)$,各阶段的输入如下

$$\left. \begin{aligned} u_1(t) &= 3 + e_s(t), & \text{for } t \in \langle 0, 60 \rangle \\ u_2(t) &= 1 + e_s(t), & \text{for } t \in \langle 61, 120 \rangle \\ u_3(t) &= 5 + e_s(t), & \text{for } t \in \langle 121, 160 \rangle \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

CFD 数值模拟的混合器出水温度控制系统响应曲线与系统输入如图 3 所示.



(a) 系统输出——出水温度



(b) 系统输入——热水流量

图3 系统的输入与输出

系统参数估计值和预测误差变化曲线分别如图 4 和图 5 所示.由图 4 可以看出,各参数很快收敛.参数 a_1 在第一阶段收敛后基本不变,参数 a_2 和 b_1 在系统输入变化时存在波动现象,参数 b_2 在不同的阶段有不同的值,说明系统是非线性的.由图 5 可知,随着系统各参数收敛到真值,预测误差 $\hat{e}(t)$ 很快趋于 0,表明预测输出与实际输出有较高的拟合度.

3 结 论

(1) 基于 CFD 的系统辨识方法,利用 CFD 来模拟被控对象,其信息并不局限于对象的某一点,可以得到模拟范围即场内的任意一个或多个点的信息,也不局限于某种特定量(如温度等),可以同时研究温度、速度和压力等.因此,对于涉及流体流动及热传导过程的控制系统,采用基于 CFD 的系统辨识方法可以获得系统更多有价值的信息,有利于控制器设计.

(2) 参数估计算法总是在数值计算的每一个时

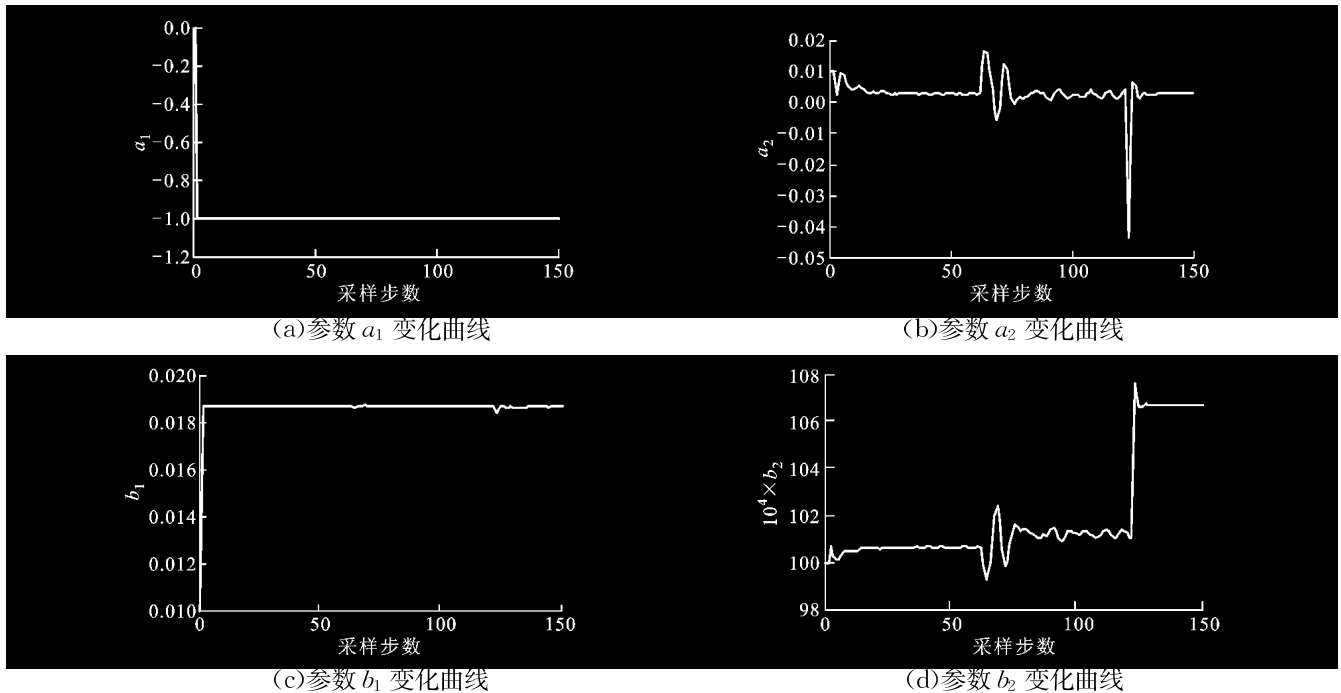


图4 系统参数变化曲线

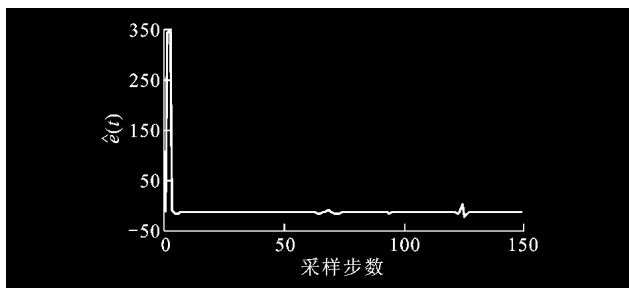


图5 预测误差

间步后进行,因此数值模拟实际计算时间对参数估计的实时性没有影响,即参数估计相对于被模拟的控制对象永远是实时的。

(3)数值模拟时间步长对辨识结果存在影响,模拟时间步长及最大迭代步数不同,造成采样时间不同,而不同的采样时间会造成系统参数估计值存在差异。为保证数值模拟提供统一的采样率,解决的方法是模拟若干次时间步进行一次辨识。

参考文献:

- [1] CHICATELLI A, HARTLEY T, COLE G, et al. Interdisciplinary modeling using computational fluid dynamics and control theory [C]//Proceedings of the American Control Conference. Baltimore, Maryland, USA: IEEE Press, 1994:3438-3443.
- [2] PENG X, PAASSEN A H C. A state space model for predicting and controlling the temperature responses of indoor air zones [J]. Energy and Buildings, 1998, 28 (2):197-203.
- [3] YANG Yongxiang, REUTER M A, HARTMAN D

T. CFD modelling for control of hazardous waste incinerator [J]. Control Engineering Practice, 2003, 11 (1):93-101.

- [4] GERBER A G, DUBAY R, HEALY A. CFD-based predictive control of melt temperature in plastic injection molding [J]. Applied Mathematical Modelling, 2006, 30 (9):884-903.
- [5] DESTA T Z, JANSSENS K, BRECHT A V, et al. CFD for model-based controller development [J]. Building and Environment, 2004, 39(6):621-633.
- [6] HUISMAN L. Control of glass melting processes based on reduced CFD models[D]. Eindhoven, the Netherlands: Eindhoven University of Technology, 2005.
- [7] RIZZO M A, SANTILLO M A, PADTHE A K, et al. CFD-based adaptive flow control using ARMARKOV disturbance rejection[C]//Proceedings of the 2006 American Control Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2006:3783-3788.
- [8] ANSYS Inc. FLUENT 6.2 UDF manual [M]. Southpointe, USA: Fluent Inc., 2005.
- [9] KULHAVY R. Restricted exponential forgetting in real-time identification [J]. Automatica, 1987, 23(5): 589-600.
- [10] 方崇智, 萧德云. 过程辨识[M]. 北京:清华大学出版社, 2001.
- [11] 韩占忠, 王敬, 兰小平. Fluent 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2004.

(编辑 王焕雪)