

采用计算流体力学数值模拟的比例积分控制器

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: 为解决流体力学试验中控制器设计耗时与成本高等问题, 提出一种基于计算流体力学 (CFD) 的控制器设计新方法. 该方法利用 CFD 软件 FLUENT 模拟被控对象, 以用户自定义函数 (UDF) 完成控制算法, 实现了基于 CFD 的闭环控制, 并以冷热水混合器内部温度场的非线性控制系统为例, 设计了基于 CFD 的比例积分 (PI) 控制器. 结果表明, 该方法无需进行物理试验即可获得被控系统的控制特性, 且利用 CFD 技术进行控制器设计并不局限于系统某一控制点的研究, 可以同时获得系统整场内各点特性, 进行分布式的控制器设计. 为涉及流体流动、热传导等过程的控制系统提供一种控制器设计的参考思路.

关键词: 计算流体力学; 控制器; FLUENT; 用户自定义函数

中图分类号: TP273, TP271+.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)05-0090-04

Design of Computational Fluid Dynamics-Based Proportional Integral Controller

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
& Control Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology Xi'an 710055, China)

Abstract: A new approach was proposed which embeds a PI controller in computational fluid dynamics (CFD) mode to reduce time consumption and cost in physical fluid experiments. The plants controlled are simulated by commercial CFD software—FLUENT, and control algorithms are incorporated into the CFD model with its User-Defined Functions (UDF). To examine the performance of the new method, an internal temperature field nonlinear control of a hot and cool water mixer was explored for PI controller design. The results show that the system performance could be obtained without implementing physical experiment. Moreover, the character of each point in the entire field could be understood and thus the distributed controller could be designed by this approach. It appears that the present method is feasible in the controller design for systems involving fluid flow and heat transfer.

Keywords: computational fluid dynamics; controller; FLUENT; user-defined function

对于基于大量物理试验的流体流动或热传导系统, 其控制器设计往往耗时费力. 目前, 利用仿真方法研究各种控制算法的控制效果, 通常需要研究对象的确定性数学模型, 但确定性模型并不能反映对象的整体特性, 限制了其与实际研究对象的相似性. 基于计算流体力学 (CFD) 的方法不直接给出确定的

数学模型, 而是提供更更能体现研究对象特性的数值模型, 并且系统被控量既不局限于某一点, 可以是模拟范围内的任意一个或多个点, 也不局限于某种特定量, 可以同时研究多个温度、速度和压力等. 因此, 对于涉及非稳态、非线性过程流体流动及热传导过程的控制系统, 采用适当的基于 CFD 的方法更易获

得系统有价值的信息,有利于控制器设计。

目前,将 CFD 应用于控制理论的研究在国外已开展多年,涉及多个应用领域,且在不断拓宽。针对某些极端条件下物理试验代价高的问题,1994 年美国 NASA 的 Chicatelli 等人^[1]首次将 CFD 技术与控制理论相结合,用于飞行器推进系统的建模与控制。Bezzo 等人^[2]提出一种应用 CFD 软件 FLUENT 和过程仿真软件 gPROMs 的协同仿真方案,FLUENT 提供了 gPROMs 进行控制律设计所需的流体流动数据。Yang 等人^[3]针对垃圾焚烧炉内部温度难以测量的问题,提出将 CFD 作为控制系统离线建模工具,并将 CFD 数值模拟结果作为控制系统信息数据库,为实施前馈控制提供有价值的过程信息。此后,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。Desta 等人^[5]结合 CFD 数值模拟和系统辨识技术,离线建立房间温度场控制系统模型,并在此模型的基础上设计了模型预测控制器。这些研究成果为 CFD 与控制的结合打下了坚实的基础。

以上研究中 CFD 的作用是为控制系统设计提供详细的系统信息,其控制器并未嵌入 CFD 中。因此,本文提出一种基于 CFD 数值模拟的控制器设计方法,将控制算法嵌入 CFD 软件 FLUENT 中,实现了基于 CFD 的闭环控制,并以冷热水混合器内部温度场的控制为例,验证了该方法的可行性。

1 基于 CFD 的控制器设计原理

1.1 CFD 原理

计算流体力学是通过计算机数值计算和图像显示,对包含有流体流动和热传导等相关物理现象的系统所做的分析。工程上广泛应用的 CFD 商用软件(如 FLUENT, CFX, Phoenix, STAR-CD 等)的一般模拟过程如图 1 所示^[6]

如果计算不收敛或模拟结果不正确,需重新进行分析和模拟。因此,整个模拟过程是不断完善与修正的过程。一般来说,在 CFD 数值模拟中,控制方程(Navier-Stokes 方程或 Euler 方程)是高度非线性的偏微分方程,通常采用有限容积法、有限差分法、有限元法或谱方法等对其进行离散,转化为代数方程并使用迭代法进行求解。当问题本身是非稳态的,需对时间导数项选取各种隐式或显式的离散格式。

CFD 商用软件 FLUENT 的显著特点之一就是带有能够进行二次开发的基于 C 语言的用户自定义函数(UDF)^[7],这为各种控制算法的实现提供了

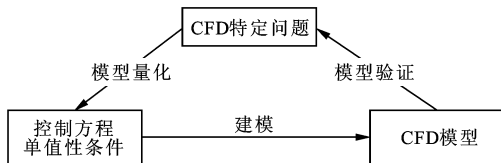


图 1 CFD 数值模拟过程

一个开发平台。而且,调试过程中利用 FLUENT 提供的 Journal 文件,对重复性工作批处理执行,以提高效率。

1.2 基于 CFD 的控制器设计原理

CFD 可以提供试验研究中无法测量或难以测量的被控点的信息,在控制系统的相关研究方面具有优势。计算流体力学能取得大量的计算结果,提供流场信息,相当于实现大量测量,从而为控制器设计提供丰富的系统信息。同时,对于具有相近特性的系统,可以利用 CFD 计算能力强、易“复制”的特点,实现并行运行,即只要利用正确的 CFD 数值模拟,就可以形象地再现流动及传热过程,能够在很大程度上替代耗资巨大的流体动力学试验^[8]。图 2 给出了基于 CFD 的控制器设计的工作原理。基于 CFD 的控制器实现分为 2 部分:第 1,被控对象由 FLUENT 数值模拟实现;第 2,控制器采用 UDF 编程完

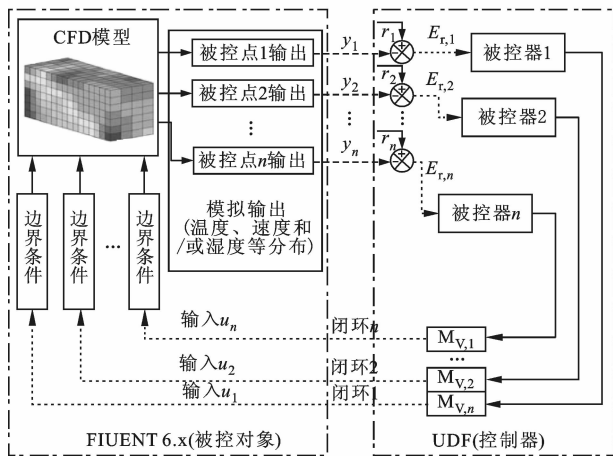


图 2 基于 CFD 的控制器工作原理图

成。图 2 中被控对象为 n 输入 n 输出(MIMO)系统,其联合 n 个控制器,形成了 n 个闭环回路。在整个计算过程中,UDF 实时“采集”FLUENT 的数值模拟结果 y_i ,该结果与设定值 r_i 比较后,得到偏差信号 $E_{r,i} = r_i - y_i$,控制器 i 按照控制律计算得出控制量 $M_{v,i}$,即被控对象输入 u_i ,FLUENT 实时接收 u_i 信

号并更新边界条件,使得 CFD 的模拟结果 y_i 按照设定值 r_i 变化. 这里将 CFD 模拟中的边界条件看作被控系统的输入,CFD 的模拟结果作为被控系统的输出. 为保证非稳态模拟过程的计算收敛精度,尽量选取较大(一般大于 15 步)的最大迭代步数. 控制律可为 PID 控制、自适应控制和模型预测控制等基于模型的控制算法等. 本文以 PI 控制为例说明控制器的设计.

2 仿真实例

以文献[9]中的小型冷热水混合器内部温度场的控制为例,说明基于 CFD 的控制器设计方法的可行性. 混合器及其控制点如图 3 所示. 图中给出 5 个控制点和 5 个控制器 C1~C5,可按对关心的温度点进行控制. 有 2 种方法可实现对温度的控制,即通过改变冷热水温度和改变冷热水流量. 本例研究“热水流量-出水温度”控制方式,即控制输入为热水流量,系统输出为冷热混合后的温度. 首先,建立 CFD 模型,冷水入口边界为定常速度入口边界条件,即温度为 290 K,流速为 1 m/s. 采用 UDF 按要求给定非定常的热水速度入口边界条件,即将变化的热水流量作为系统的输入,其温度固定为 350 K. 冷热水混合后的出口设为自由出流,其他壁面为绝热边界条件. 求解器设为非耦合求解法,并设置标准 $k-\epsilon$ 湍流模型. 最后,进行 CFD 模拟得到数值响应结果,模拟时设定的时间步长为 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.

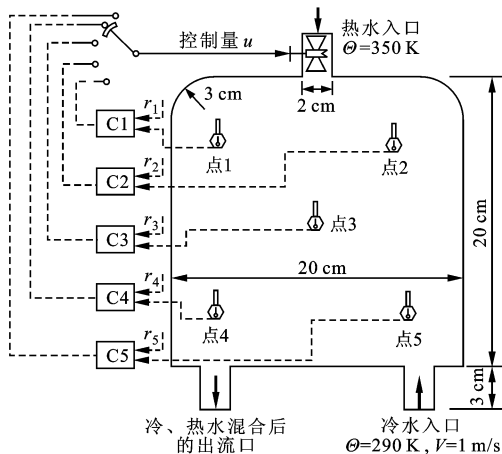


图3 冷热水混合器出水温度控制简图

中点1~5 分别代表 5 个被控点的温度阶跃响应. CFD 共计算 200 个时间步长,考虑初始条件对计算真值的影响,系统响应从第 21 个时间步计,分 4 个运行阶段,其控制输入 M_V 分别为

$$\left. \begin{aligned} M_{V,1}(t) &= 1, & \text{for } t \in \langle 21, 50 \rangle \\ M_{V,2}(t) &= 2, & \text{for } t \in \langle 51, 100 \rangle \\ M_{V,3}(t) &= 4, & \text{for } t \in \langle 101, 150 \rangle \\ M_{V,4}(t) &= 6, & \text{for } t \in \langle 151, 200 \rangle \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

根据系统阶跃响应可以得到系统开环增益和系统时间常数. 由下式可计算各点开环系统增益时间常数^[10]

$$K_i = \frac{\Delta\theta}{\Delta M_{V,i}} \quad (2)$$

$$T_i = 1.5(t_2 - t_1) \quad (3)$$

式中: $\Delta\theta$ 和 $\Delta M_{V,i}$ 分别为 i 点阶跃响应下温度 θ_{emp} 和控制量 $M_{V,i}$ 的变化量; t_1 、 t_2 分别为到达系统阶跃响应稳态输出的 28.3% 和 63.2% 时所需的时间.

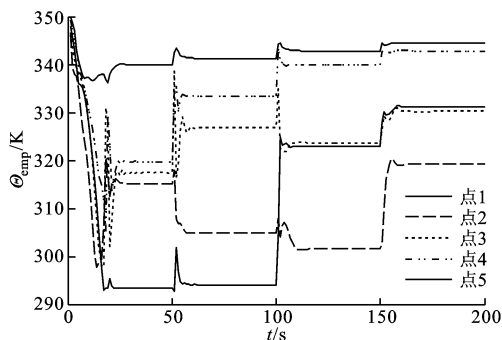


图4 阶跃响应曲线

表 1 给出了 5 个控制点在 3 次阶跃响应下系统的开环增益和时间常数, $\Delta M_{V,i}$ 为工作点 $M_{V,i}$ 附近的阶跃变化量. 由表 1 可知, 每个控制点在不同工作点有不同的开环增益和时间常数, 对于点 2 和点 3 (见图 4), 开环增益甚至出现正负符号变化, 说明系统是非线性的.

由以上分析可知, 该系统是一个非线性系统, 这就要求不同工作点的控制器参数不同, 以达到有效控制的目的. 通常点 4 的温度值最受关注, 其值代表了出水温度的变化, 因此这里仅给出点 4 的温度控制器设计.

本文旨在给出一种新的控制设计实现方法, 并不对控制器算法及其整定方法做深入研究. 因此, 控制器采用比例积分 (PI) 控制器, 各工况下的参数 (K_P 、 K_I) 根据系统的开环增益和时间常数按文献

图 4 给出系统在不同工作点的阶跃响应, 曲线

表 1 阶跃响应试验计算的开环系统增益和时间常数

t/s	$M_{V,i}/m \cdot s^{-1}$	$\Delta M_{V,i}/m \cdot s^{-1}$	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5
51~100	2	1	1.3	-10.2	9.4	13.6	0.7	1.5	1.8	4.5	2.1	0.5
101~150	4	2	0.75	-1.65	-1.6	3.25	13.9	1.2	1.2	1.0	6.0	1.5
151~200	6	2	0.85	8.8	3.3	1.45	4.6	0.8	1.5	3.0	0.5	1.5

[11]中的平方误差积分最优整定方法计算得出。

PI 控制算法的表达式如下

$$M_V(t) = M_V(t - \Delta t) + K_P \{ E_r(t) - E_r(t - \Delta t) \} + K_I E_r(t) \tag{4}$$

式中： $M_V(t)$ 为 t 时刻的控制量； $E_r(t)$ 为 t 时刻设定值与测量值的误差量； Δt 为时间步长（即采样时间）； K_P 、 K_I 分别为 PI 控制器的比例增益和积分增益。考虑实际情况对控制器进行限幅，其范围为 $[0, 10]$ 。

为了对比控制效果，分别研究控制器变参数和定参数两种情况下的非线性系统的控制响应。表 2 给出各阶段的设定值、控制器参数 K_P 和 K_I 值。PI 控制器变参数由表 2 给出，定参数 PI 控制器 K_P 和 K_I 值均为常数 0.01。按图 1 原理进行 CFD 计算，其闭环控制响应结果见图 5。

表 2 各阶段的设定值、控制器参数 K_P 和 K_I

t/s	Θ_{set}/K	K_P	K_I
0~50	320.0	0.010	0.010
51~100	333.4	0.072	0.018
101~150	340.0	0.302	0.032
151~200	344.0	0.935	0.723

注： Θ_{set} 为设定温度。

图 5 给出变参数与定参数 PI 控制响应的结果对比曲线。可以看出，在不同阶段，变换控制器参数使系统能够快速跟踪设定值，且不存在超调，而固定 PI 控制器参数则只是在第 1 阶段系统具有快速的响应曲线，稳态误差为 0，而在其他 3 个阶段，由于控制器参数 K_P 和 K_I 保持第 1 阶段的值，且均小于相应阶段的实际整定值，造成系统在这 3 个阶段响应很慢，稳态误差较大。

由上述分析可知，基于 CFD 进行控制器设计的过程与传统设计方法原理是相同的，区别在于该方法是利用数值模拟试验代替了实际的物理试验。

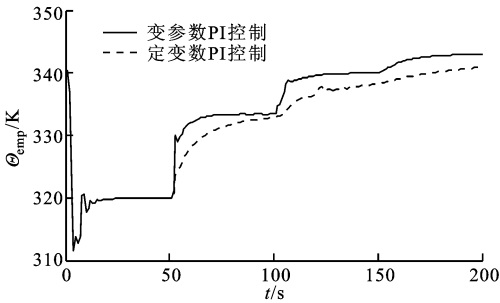


图 5 变参数与定参数 PI 控制响应对比

3 结 论

本文提出一种基于 CFD 的 PI 控制设计方法，该方法具有以下特色。

(1)无需进行物理试验即可获得被控系统的控制特性，节约时间，降低成本。

(2)充分利用 CFD 技术的优点，获得系统整场内各点的特性，可进行分布式的控制器设计。同时，该方法也可为其他涉及流体流动、热传导等现象的控制系统提供一种控制器设计的参考思路。

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] BEZZO F, MACCHIETTO S, PANTELIDES C C. A general framework for the integration of computational fluid dynamics and process simulation [J]. Computers and Chemical Engineering, 2000,24(6):653-658.

[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] CHEN Qingyan, SREBRIC J. A procedure for verification, validation, and reporting of indoor environment CFD analyses [J]. HVAC&R Research, 2002, 8(2): 201-216.
- [7] ANSYS INC. FLUENT 6.2 UDF manual [M]. Southpointe, Pennsylvania, USA: Fluent Inc., 2005.
- [8] 王福军. 计算流体力学分析: CFD 软件原理与应用 [M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- [9] 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.
- [10] SMITH C L. Digital computer process control [M]. Scranton, Pennsylvania, USA: Intext, 1972.
- [11] ZHUANG M, ATHERTON D P. Automatic tuning of optimum PID controllers [J]. IEE Proc: D, 1993, 140 (3): 216-224.
- (编辑 王焕雪)