

用于粘性流场计算的一种改进的模糊控制方法

刘训良¹, 陶文铨¹, 何雅玲¹, 郑平²

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 香港科技大学机械工程系, 香港)

摘要: 在原来研究工作的基础上, 提出了一种改进的模糊控制方法, 用以调整粘性流场迭代计算中亚松弛因子的值. 该方向选取的控制输入量为: 相邻两次迭代所有内节点上物理量的平均相对改变值; 相邻两次迭代间这一平均相对改变值的变化量. 亚松弛因子的变化量为输出量, 根据经验制定出一组控制规则并通过数值计算实践进行了调整, 实现了亚松弛因子的模糊控制. 改进后的方法物理意义明确, 包含较多的信息, 控制规则更加完善. 通过 4 个二维层流的流动和传热问题的计算表明, 它可以加快迭代计算的收敛速度, 使迭代次数减少到接近甚至小于采用固定亚松弛因子时的最小值. 该方法的控制效果优于原来的模糊控制方法.

关键词: 模糊控制; 亚松弛因子; 收敛

中图分类号: O537.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2003)09-0962-04

Revised Fuzzy Control Algorithm Used in Computational Fluid Dynamic Simulation

Liu Xunliang¹, Tao Wenquan¹, He Yaling¹, Zheng Ping²

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Department of Mechanical Engineering, Hong Kong University of Science & Technology, Hong Kong, China)

Abstract: A revised fuzzy control algorithm was developed to accelerate iteration convergence in numerical fluid dynamic simulation by adjusting the value of the under-relaxation factor. The averaged relative change of the dependent variables between two successive iterations and the variation of this averaged change were selected as two input variables. The increment of the relaxation factor was used as output variable. The control rules were devised according to the fuzzy logic theory and experience, and improved by the numerical practice. The algorithm was tested by four benchmark problems. The results show that the convergence of the revised algorithm is significantly accelerated in all cases considered.

Keywords: fuzzy control; under-relaxation factor; convergence

采用迭代方法求解粘性流场时, 一般都进行亚松弛处理, 以利于计算的收敛. 亚松弛因子的选取对迭代收敛的速度有很大的影响, 但是如何选择合适的亚松弛因子, 一直是一个令人困惑的问题. Ryoo 采用模糊控制方法改变亚松弛因子以加速收敛^[1], 作者曾对该方法进行了改进^[2], 但是由于其控制模式简单, 控制规则较少, 因而仍然不够完善. 本文提出了一种改进的模糊控制方法, 采用双输入、单输出的控制模式, 控制规则增加且物理意义明确. 将其转

化为模糊控制算法, 应用于粘性流场的迭代求解, 通过对 4 个流动问题的计算表明, 该方法具有更佳的控制效果.

Ryoo 等认为动量方程和能量的残差减小是迭代收敛的象征^[1], 因此选取相邻两次迭代残差范数的比值作为控制输入量, 松弛因子的变化量为输出量. 若残差范数比值较大, 迭代可能趋于发散, 应减小松弛因子, 反之应增大松弛因子, 以加速收敛. 作者曾采用该方法, 对输入量的隶属函数作了改进,

收稿日期: 2003-01-21. 作者简介: 刘训良(1973~), 男, 博士生; 陶文铨(联系人), 男, 教授, 博士生导师. 基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G2000026303); 国家自然科学基金资助项目(50236010; 50276046).

完成模糊控制算法的设计,并将其应用于4个典型的流动问题的数值求解,给出了亚松弛因子取固定值和采用模糊控制两种方法收敛时所需迭代次数的对比情况.结果表明,采用文献[1]中提出的模糊控制方法可以加速收敛^[2].本文中通过改变输入量和增加控制规则等手段进一步提高了采用模糊控制来加速收敛的性能.

1 改进的模糊控制方法

1.1 控制输入量和输出量

根据文献[3]中所述,非线性方程的迭代求解是一个非常复杂的过程,目前还没有完整的理论可用来判断其是否可以获得收敛的解,但实践表明,只要每一层次上的代数方程的系数都满足雅可比迭代和高斯迭代收敛的充分条件,且两个相邻层次间代数方程的系数变化不大(亦即未知量的变化不大),则多数情形下非线性问题的迭代求解是可以收敛的.为此,选取所有节点上的物理量相对改变量的平均值 e_r 及其变化量 e_c 作为控制的输入量,表达式如下

$$e_r(n) = \left[\frac{1}{N} \sum_{i,j} \left(\frac{\phi_{i,j}^n - \phi_{i,j}^{n-1}}{\phi_{i,j}^{n-1}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

$$e_c = e_r(n) - e_r(n-1) \quad (2)$$

式中: N 为总的内节点数; $\phi_{i,j}^n$ 、 $\phi_{i,j}^{n-1}$ 分别代表节点 (i,j) 第 n 次和第 $n-1$ 次迭代的值; $e_r(n)$ 、 $e_r(n-1)$ 分别为第 n 次和第 $n-1$ 次迭代后计算的 e_r 值.

模糊控制的输出量取亚松弛因子的变化量 $\Delta\alpha$, 修正后的亚松弛因子为

$$\alpha_{n+1} = \alpha_n + \Delta\alpha \quad (3)$$

1.2 隶属函数和控制规则

对于模糊控制输入量 e_r 、 e_c 和输出量 $\Delta\alpha$, 其相应的模糊集合是通过隶属函数来表征的, 模糊集合的运算也是通过其隶属函数的相应运算来实现的. 这里选取三角形和梯形两种隶属函数, 可以统一表示成梯形的形式(见图1), 其中 $\mu(x)$ 为隶属函数, x 为论域中的元素, 代表 e_r 、 e_c 或 $\Delta\alpha$ 的值, a 、 b 分别为梯形上边两端点的横向坐标值, c 、 d 分别为两斜边对应区间的长度, 相应的值如表1、2所示. 表1中, PB、PM、PS 分别表示模糊语言变量正大、正中、正小, NB、NM、NS 相应代表负大、负中、负小.

建立模糊控制规则的过程, 就是利用语言归纳手动控制策略的过程, 而手动控制策略是人们通过学习、试验以及长期经验积累而逐渐形成的. 利用模糊数学的知识, 可以把手动控制策略转化为模糊控

制算法, 由计算机来进行控制决策, 从而代替人的手动控制, 实现模糊自动控制.

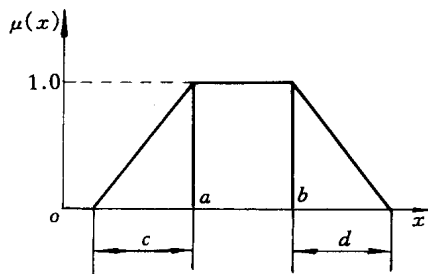


图1 隶属函数 $\mu(x)$ 示意图

在迭代计算过程中, 为保证收敛, 应使相邻两次迭代之间代数方程的系数变化不大, 亦即未知量的变化不大, 而调整亚松弛因子的大小能达到调节迭代中未知量变化的目的, 据此确定了12条控制规则, 如表3所示. 控制规则一般用条件语句加以描述, 如其中一条可描述为, “若 e_r 为 PS 且 e_c 为 PS, 则 $\Delta\alpha$ 为 PS”. 其物理意义是当相邻两次迭代之间物理量的变化量 e_r 较小, 同时 e_r 的增量也较小, 则可以稍微增大亚松弛因子以提高收敛速度; 另外一条规则可描述为, “若 e_r 为 PB 且 e_c 为 PB, 则 $\Delta\alpha$ 为 NB”, 其物理意义表示当相邻两次迭代间物理量的变化量 e_r 很大, 而且 e_r 的值增加很快, 那么就应该大幅度地降低亚松弛因子以减慢物理量的变化, 防止迭代计算趋于发散.

表1 输入量的隶属函数

	e_r			e_c			
	PS	PM	PB	NB	NS	PS	PB
a	0	0.20	0.45	∞	-0.05	0	0.15
b	0.05	0.30	∞	-0.15	0	0.05	∞
c	0	0.10	0.10	0	0.10	0	0.10
d	0.10	0.10	0	0.10	0	0.10	0

表2 输出量的隶属函数

$\Delta\alpha$	NB	NM	NS	PS	PM
a	-0.005	-0.002	-0.000 375	0	0.001
b	-0.003 25	-0.001	0	0.000 375	0.002
c	0	0.001 25	0.000 625	0	0.000 625
d	0.001 25	0.000 625	0	0.000 625	0.001 25

表3 模糊控制规则

e_c	e_r		
	PS	PM	PB
PB	NS	NM	NB
PS	PS	NM	NB
NS	PS	NS	NM
NB	PM	PS	NS

1.3 模糊控制算法

本文方法采用双输入、单输出的模糊控制模式,

根据文献[4~6]介绍的推理方法,完成模糊推理。下面简单介绍模糊控制算法的实施。

模糊控制规则集全体构成的模糊关系为

$$R = \bigcup_{i=1}^{12} R_i \quad (4)$$

式中: R_i 是第 i 条规则所蕴涵的模糊关系;符号“ $\cup$ ”表示模糊集合求并运算。

若已求得某一次迭代计算后的 e_r 和 e_c , 将其模糊化后, 得到对应的模糊集合 A 和 B 。

根据模糊推理的合成运算法则, 可得控制输出量

$$C = (A \times B) \circ R \quad (5)$$

式中: “ $\times$ ”表示两个模糊集合的直积运算; “ $\circ$ ”为合成算子。

由此得到的控制输出量 C 是一个模糊集合, 它的隶属函数记作 $\mu_c(x)$, 这个模糊输出量要通过解模糊的过程转化为精确量。

输出的解模糊采用重心法, 可以用下式表示

$$x^* = \int \mu_c(x) dx / \int \mu_c(x) dx \quad (6)$$

式中: x^* 为输出量的精确量, 即亚松弛因子的变化量 $\Delta\alpha$ 。

将上述算法编制成程序, 作为一个独立的模块, 在粘性流场求解的迭代计算中, 每迭代一次, 分别计算 e_r 和 e_c , 然后调用该模块, 修正速度和温度的亚松弛因子, 以更新后的亚松弛因子进行下一次迭代, 直至计算收敛。

2 算 例

对4个二维层流的流动和换热问题进行数值计

算, 采用有限容积法和 SIMPLER 算法, 在亚松弛因子取固定值和使用模糊控制两种情况下, 分别求解。收敛的判据为: 连续性方程余量的代数和 R_{sum} 及节点余量的最大绝对值 R_{max} 对参考流量的相对值分别小于规定值, 即

$$\left. \begin{aligned} R_{\text{sum}}/q_m &\leq 1 \times 10^{-7} \\ R_{\text{max}}/q_m &\leq 1 \times 10^{-7} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

对于开口系统, 参考流量 q_m 可取为入口的质量流量; 对于闭口系统, 如顶盖驱动流, 可取流场中任一截面作如下数值积分

$$q_m = \int |u| dy \quad (8)$$

式中: u 为垂直于截面方向的流速。

算例1 方腔内自然对流, 上下壁绝热, 左右壁温恒定, 右壁温度较高, 在不同的 Ra 数下计算流场和温度场, $Ra = \rho^2 g \beta \Delta T L^3 Pr / \eta^2$, 网格数为 20×20 (见表4)。

算例2 顶盖驱动流, 顶盖以恒定的速度移动, 在不同的 Re 数下求解流场, 网格数为 20×20 (见表5)。

算例3 圆管突扩流动, 圆管壁和台阶温度恒定, 且高于进口的温度, 在不同的 Re 数下求解流场和温度场, 网格数为 40×10 (见表6)。

算例4 环形空间内自然对流, 内外壁温恒定, 且内壁温度高, 在不同的 Ra 数下计算流场和温度场, 网格数为 20×30 (见表7)。

将亚松弛因子取固定值以及采用文献[2]中的方法(方法1)和本文方法(方法2)3种情况下计算收敛所需的迭代次数列于表4~7中。

表4 算例1收敛所需迭代次数的对比

Ra	α							方法1	方法2
	0.10	0.30	0.50	0.70	0.90	0.95	0.98		
10^3	2 366	1 433	831	440	147	80	308	162	130
10^4	2 707	1 330	721	368	118	63	238	169	126
10^5	2 948	1 163	597	295	93	振荡	振荡	221	91
10^6	2 623	944	472	230	振荡	振荡	发散	238	138
10^7	3 207	1 133	565	振荡	发散	发散	发散	506	288

表5 算例2收敛所需迭代次数的对比

Re	α							方法1	方法2
	0.10	0.30	0.50	0.70	0.90	0.95	0.98		
10^2	799	389	215	115	46	32	73	77	48
5×10^2	1 030	408	214	110	51	45	1 189	71	54
10^3	997	403	209	106	56	55	发散	77	58

表 6 算例 3 收敛所需迭代次数的对比

Re	α							方法 1	方法 2
	0.10	0.30	0.50	0.70	0.90	0.95	0.98		
10^2	801	244	118	60	27	91	振荡	81	27
10^3	1 450	572	322	174	81	66	838	97	88

表 7 算例 4 收敛所需迭代次数的对比

Ra	α							方法 1	方法 2
	0.10	0.30	0.50	0.70	0.90	0.95	0.98		
10^3	4 013	2 096	1 157	597	212	发散	发散	660	164
10^4	3 756	2 018	1 130	590	195	发散	发散	646	169
10^5	5 469	2 226	1 149	566	186	发散	发散	647	160
10^6	5 739	2 087	1 043	509	振荡	发散	发散	784	303
10^7	6 081	2 105	1 044	振荡	发散	发散	发散	1 360	723

由表 4~7 可见,对所计算的 4 个例子,采用改进后的模糊控制方法都可以加快收敛的速度,使迭代次数减少到接近甚至小于采用最佳亚松弛因子(固定值)时的迭代次数.与方法 1 相比,方法 2 收敛所需的迭代次数减少,最好的情况下仅是方法 1 的 1/4,加速收敛的效果非常明显.

3 结 论

应用模糊控制方法调整粘性流场迭代计算中亚松弛因子的大小,是解决亚松弛因子值选取困难的一种有效方案.改进后的模糊控制方法选取相邻两次迭代计算中物理量相对改变量的信息作为输入量,物理意义明确,并根据数值计算实践制定出一组相应的控制规则.通过对 4 个算例的计算表明,该方法能加快迭代计算的收敛速度,使得计算收敛所需的迭代次数接近甚至小于采用最佳亚松弛因子时的迭代次数,同时加速收敛的效果明显优于方法 1.

参考文献:

[1] Ryoo J , Kaminski D , Dragoilovic Z. A residual-based fuzzy logic algorithm for control of convergence in a computational fluid dynamic simulation[J]. ASME Journal of Heat Transfer ,1999,121:1 076~1 078.

[2] 刘训良,陶文铨,郑 平,等.模糊控制方法在粘性流场迭代计算中的应用[J].中国科学:E 辑,2002,32(4): 472~478.

[3] 陶文铨.数值传热学[M].第 2 版.西安:西安交通大学出版社,2000.1~5,211~220.

[4] 张乃尧,阎平凡.神经网络与模糊控制[M].北京:清华大学出版社,1998.189~193.

[5] 李友善,李 军.模糊控制理论及其在过程中的应用[M].北京:国防工业出版社,1993.56~74.

[6] 张曾科.模糊数学在自动化技术中的应用[M].北京:清华大学出版社,1997.130~137,159~162.

(编辑 荆树蓉 王焕雪)

[文摘预览]

压电驱动型电液伺服阀前置级驱动器实验研究

程光明, 沈传亮, 杨志刚
(吉林大学机械科学与工程学院, 130025, 长春)

针对电液伺服阀电磁式前置级驱动器频响低的问题,提出了一种压电驱动型电液伺服阀前置级驱动器.该驱动器以压电叠堆(积层式压电微位移器)为驱动元件,通过基于三角形放大原理的柔性铰链放大机构,放大压电叠堆的输出位移.同时,设计、研制了实验装置,并在试样机机对其静、动态特性进行了实验.研究表明,该驱动器具有线性良好、高分辨率、高频响等特点,有限元分析其固有频率达到 1.201 kHz,实际测量固有频率可达 1 kHz.