

DOI: 10.7652/xjtuxb201601013

模糊控制技术在 SIMPLER 算法中的应用 及求解性能分析

王艳宁¹, 孙东亮², 苗政¹, 陈家庆², 蔡晓君²

(1. 华北电力大学可再生能源学院, 102206, 北京; 2. 北京石油化工学院机械工程学院, 102617, 北京)

摘要: 为了提高 SIMPLER 算法在三维流动问题上的求解性能, 引入模糊控制方法来自动调控速度亚松弛因子的大小. 在数值计算过程中, 将相邻两个迭代层次上的最大动量残差比值作为模糊控制输入量, 速度亚松弛因子的变化量作为模糊控制输出量, 基于最大动量残差的变化趋势可实现速度亚松弛因子的自动调控, 从而达到加快收敛的目的. 最后, 通过 3 个经典的流动问题验证了模糊控制方法的优越性. 研究表明: 当初始亚松弛因子为最不利值时, 模糊控制方法的收敛速度约是固定松弛因子方法的 5~30 倍; 当初始亚松弛因子为最佳值时, 模糊控制方法迭代次数与固定松弛因子方法迭代次数之比为 0.7~2.0, 收敛速度相差不大; 采用模糊控制方法后, SIMPLER 算法在不同初始亚松弛因子下均能得到高速收敛的解, 同时健壮性也显著提高. 研究工作将为大幅提升 SIMPLER 算法在三维流动问题上的求解性能起到重要作用.

关键词: 模糊控制; SIMPLER 算法; 三维流动问题; 亚松弛因子; 收敛速度; 健壮性

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)01-0078-07

Application of a Fuzzy Control Method in SIMPLER Algorithm and Its Solving Performance Analysis

WANG Yanning¹, SUN Dongliang², MIAO Zheng¹, CHEN Jiaqing², CAI Xiaojun²

(1. School of Renewable Energy, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China)

Abstract: In order to enhance the solving performance of the SIMPLER algorithm for three-dimensional fluid flow problems, a fuzzy control method was introduced to automatically adjust the value of the velocity under-relaxation factor. The ratio of the maximum momentum residuals of two successive iteration levels is used as the input variable of the fuzzy control, and the variation of the velocity under-relaxation factor is taken as the output variable of the fuzzy control. Based on the changing trend of the maximum momentum residual, the velocity under-relaxation factor could be adjusted for accelerating the iteration convergence. Finally, the fuzzy control method was evaluated by solving three classic fluid flow problems. It could be concluded that when the initial under-relaxation factor is set at its most unfavorable value, the convergence rate of the fuzzy control method is about 5-30 times of the fixed relaxation factor method; however, when the initial under-relaxation factor is at its optimum value, the ratio of the iteration number of the fuzzy control method to the fixed relaxation factor method is 0.7-2.0 and

收稿日期: 2015-03-22。 作者简介: 王艳宁(1992—), 男, 硕士生; 孙东亮(通信作者), 男, 教授。 基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(51476054); 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-13-0792); 北京市自然科学基金资助项目(3132010)。

网络出版时间: 2015-10-13

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20151013.1134.008.html>

there is a little difference for the convergence rates between the two methods. The SIMPLER algorithm using fuzzy control method could not only always get solutions with high convergence rate under different initial under-relaxation factors, but also possess much better robustness. Therefore, this research is of great significance in improving the solving performance of the SIMPLER algorithm for three-dimensional fluid flow problems.

Keywords: fuzzy control; SIMPLER algorithm; three-dimensional fluid flow problem; under-relaxation factor; convergence rate; robustness

求解流动与传热问题的压力修正算法首次由著名学者 Patankar 和 Spalding 提出,并被命名为 SIMPLE 算法^[1]。为了克服 SIMPLE 算法中初始压力和速度场单独进行设定的缺点,随后 Patankar 提出了改进算法 SIMPLER^[2]。目前, SIMPLE 系列算法已被广泛应用于求解流动与传热问题^[3-7]。

就 SIMPLER 算法而言,为有利于迭代计算的收敛,一般均需进行亚松弛处理,以限制相邻两层次之间待求物理量的变化。亚松弛因子对 SIMPLER 算法的收敛速度具有极大影响,通常在最佳和最不利亚松弛因子情况下收敛速度相差高达几十倍,因此为加快收敛速度,选择合适的亚松弛因子是一个关键因素。由于非线性问题迭代求解过程的复杂性,如何选择合适的亚松弛因子,具有很大的不确定性,很难为其建立数学模型,因而可以考虑引入模糊控制技术。

目前,已有学者将模糊控制技术应用在了求解二维流动问题的 SIMPLER 算法中。Liu 和 Ryoo 等利用基于残差的单变量模糊控制方法实现了二维流动模拟求解的加速^[8-9]。随后, Ryoo 等又提出了一种 ANFIS 方法来控制松弛因子的变化,该方法采用了双变量模糊控制方法,并实现了良好的收敛效果^[10]。最近,文献[11-14]以傅里叶分析为基础,提出了一种新的模糊控制方法来实现求解过程的加速,并且在二维流动问题上取得了加速收敛的效果,大量节省了求解时间。

目前,大部分研究主要集中在二维问题的求解,对于三维问题的研究报道却非常少。与二维问题相比,三维问题数值节点成倍甚至成百倍增加,在 PC 机上至少需要几天甚至几个月的时间才能获得一个收敛结果,因此提高求解算法在三维流动问题上的收敛速度具有更加重要的意义。本文拟将模糊控制技术应用到求解三维流动问题的 SIMPLER 算法中,并对其求解性能进行系统的分析研究。

1 控制方程及其离散

本文所研究的三维问题为稳态不可压缩层流

动,其守恒形式的控制方程如下。

连续性方程

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v u)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w u)}{\partial z} = \\ -\frac{\partial p}{\partial x} + \eta \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + S_u \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w v)}{\partial z} = \\ -\frac{\partial p}{\partial y} + \eta \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + S_v \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u w)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v w)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w w)}{\partial z} = \\ -\frac{\partial p}{\partial z} + \eta \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + S_w \end{aligned} \quad (4)$$

式中: u, v, w 为 x, y, z 方向上的速度分量; p 为压力; ρ 为密度; η 为动力黏度; S 为源项。

数值传热学中常用的数值方法有:有限差分法、有限元法、有限分析法和有限容积法^[15],其中有限容积法通过将守恒形式的控制方程对控制容积做积分来导出离散方程,从而可以保证离散方程具有守恒特性,而且离散方程系数具有明确的物理意义,因此本文采用有限容积法对控制方程(1)~(4)在三维直角坐标系交错网格上进行离散。以下仅给出动量方程的离散形式,其中对流项采用至少二阶精度、绝对稳定的 SGSD 格式^[16],扩散项采用中心差分格式。离散的动量方程为

$$\frac{a_e}{\alpha_u} u_e = \sum a_{nb} u_{nb} + b_e \quad (5)$$

$$\frac{a_n}{\alpha_v} v_n = \sum a_{nb} v_{nb} + b_n \quad (6)$$

$$\frac{a_t}{\alpha_w} w_t = \sum a_{nb} w_{nb} + b_t \quad (7)$$

式(5)~(7)中:系数 a 和源项 b 的具体推导过程见文献[15]; α 为速度亚松弛因子;下标 e, n, t 分别表示主网格的东界面、北界面和上界面;下标 nb 表示

相邻节点。

本文采用的模糊控制方法需分别对速度亚松弛因子 α_u 、 α_v 和 α_w 的大小进行自动调节,但针对 α_u 、 α_v 和 α_w 的调控方法完全相同,因此为了表达方便,以下给出方程(5)~(7)通用的离散动量方程表达形式

$$\frac{a}{\alpha}\phi = \sum a_{nb}\phi_{nb} + b \tag{8}$$

式中: ϕ 可分别表示为速度 u 、 v 、 w 。下面基于通用的离散动量方程(8)对模糊控制方法进行介绍。

2 模糊控制方法

2.1 模糊控制输入量和输出量

通常在计算过程中当动量残差逐渐变大,说明求解过程趋于发散,需减小亚松弛因子,以防止计算过程发散;当动量残差逐渐变小,说明求解过程趋于收敛,可适当增大亚松弛因子,以加快收敛速度。基于以上分析,本文选取的模糊控制输入量为最大动量残差比值,其表达式为

$$e = \frac{d_n}{d_{n-1}} \tag{9}$$

其中 d_n 为当前迭代层次 n 上的最大动量残差

$$d_n = \max \left\{ \left| \frac{a}{\alpha}\phi - \left[\sum a_{nb}\phi_{nb} + b \right] \right| \right\}_n \tag{10}$$

d_{n-1} 为上一迭代层次 $n-1$ 上的最大动量残差

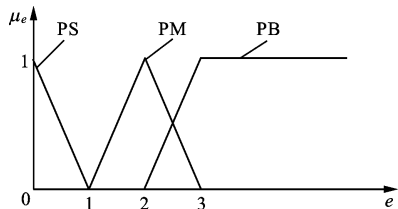
$$d_{n-1} = \max \left\{ \left| \frac{a}{\alpha}\phi - \left[\sum a_{nb}\phi_{nb} + b \right] \right| \right\}_{n-1} \tag{11}$$

模糊控制输出量为亚松弛因子的变化量 $\Delta\alpha$ 。

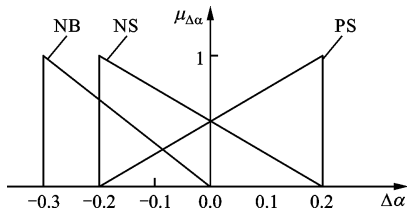
2.2 隶属函数和控制规则

模糊集合是通过隶属函数来表征的,隶属函数描述元素对该集合的隶属程度,可取 $[0,1]$ 闭区间上的无穷多个值。模糊控制输入量 e 设定为 3 个模糊子集:PS(正小)、PM(正中)和 PB(正大),这 3 个模糊子集对应的隶属函数为 μ_e^{PS} 、 μ_e^{PM} 、 μ_e^{PB} ,如图 1a 所示;模糊控制输出量 $\Delta\alpha$ 也设定为 3 个模糊子集:PS(正小)、NS(负小)和 NB(负大),这 3 个模糊子集对应的隶属函数为 $\mu_{\Delta\alpha}^{PS}$ 、 $\mu_{\Delta\alpha}^{NS}$ 、 $\mu_{\Delta\alpha}^{NB}$,如图 1b 所示。图 1 中选取的模糊子集及其对应的隶属函数是以文献[8-9]为参考,并经过多次数值实验优化得到的。

控制规则如表 1 所示,它由 3 条规则组成,第 1 条规则可描述为“若 e 为 PS,则 $\Delta\alpha$ 为 PS”,表示本次迭代最大动量残差小于上次迭代之值,方程趋于收敛,为了加快收敛,可小幅增大亚松弛因子;第 2 条规则可描述为“若 e 为 PM,则 $\Delta\alpha$ 为 NS”,表示本



(a)输入量 e 的隶属函数



(b)输出量 $\Delta\alpha$ 的隶属函数

图 1 输入量和输出量的隶属函数

次迭代最大动量残差大于上次迭代之值,方程趋于发散,则需小幅减小亚松弛因子;第 3 条规则可描述为“若 e 为 PB,则 $\Delta\alpha$ 为 NB”,表示本次迭代最大动量残差远大于上次迭代之值,方程极剧发散,则应大幅减小亚松弛因子。

表 1 模糊控制规则

e	PS	PM	PB
$\Delta\alpha$	PS	NS	NB

若令模糊集合 A_1 、 A_2 、 A_3 分别表示 e 设定的 3 个模糊子集 PS、PM、PB,模糊集合 B_1 、 B_2 、 B_3 分别表示 $\Delta\alpha$ 设定的 3 个模糊子集 PS、NS、NB,则表 1 所示的 3 条模糊控制规则构成的模糊关系为

$$R = (A_1 \times B_1) \cup (A_2 \times B_2) \cup (A_3 \times B_3) \tag{12}$$

式中:符号“ $\times$ ”表示直积运算,“ $\cup$ ”表示求并运算。

2.3 模糊控制方法的实施

本文采用单输入单输出的模糊控制方法^[17],具体实施过程如下。首先在迭代过程中计算得出某一确定的最大动量残差比值 E ,把它看作一个特殊的模糊集合,即模糊单点,并把该集合记为 A ,其对应的隶属函数为 μ_e^{input} 。输入模糊单点的隶属函数 μ_e^{input} 除去 E 点处的值为 1,其他点处的值均为 0。

然后,通过下式计算得出输出模糊集合

$$B = A \circ R \tag{13}$$

这是模糊推理的合成运算法则,“ $\circ$ ”为合成算子。

输出模糊集合 B 的隶属函数记为 $\mu_{\Delta\alpha}^{\text{output}}$ 。输出模糊集合的隶属函数要通过解模糊的过程转化为精确量 $\Delta\alpha^*$,这里解模糊采用重心法,可用下式表示

$$\Delta\alpha^* = \frac{\int \Delta q \mu_{\Delta\alpha}^{\text{output}} d\Delta\alpha}{\int \mu_{\Delta\alpha}^{\text{output}} d\Delta\alpha} \tag{14}$$

最终得出修正后的亚松弛因子 α_{n+1} ,可表示为

$$\alpha_{n+1} = \alpha_n + \Delta\alpha^* \tag{15}$$

式中:下标 n 表示当前迭代层次, $n+1$ 表示下一迭代层次。

3 算例分析

以下基于求解三维流动问题的 SIMPLER 算法,通过 3 个经典算例,对本文采用的模糊控制方法与传统固定松弛因子方法进行分析比较。

3.1 方腔顶盖驱动流动(算例 1)

在三维问题中,方腔顶盖驱动流动的数值基准解经常用来考核程序和比较算法。三维方腔顶盖驱动流动的结构如图 2 所示,其雷诺数定义为

$$Re = \frac{\rho u_{lid} H}{\mu} \tag{16}$$

式中: H 为方腔的边长; u_{lid} 为方腔顶盖的移动速度。

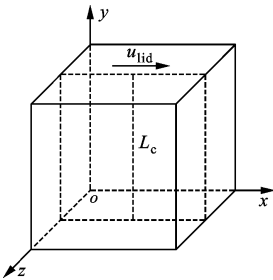
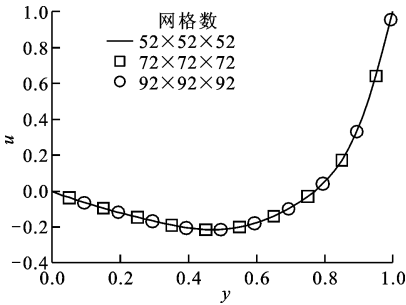


图 2 方腔顶盖驱动流动的结构图(算例 1)

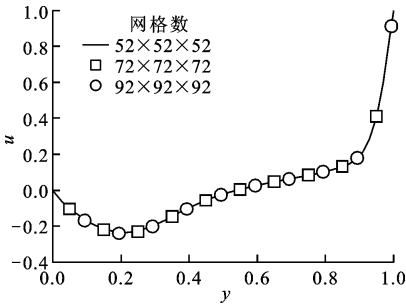
图 3 显示了不同网格数下 $z=0.5H$ 截面中心线 L_c 上的 u 速度分布,从图中可以看出,在 3 种不同网格数下模糊控制方法计算所得的结果基本一致,说明网格数为 $52\times 52\times 52$ 时可获得网格独立的解,因此本文选取 $52\times 52\times 52$ 为计算网格。图 4 对本文的计算结果与文献中的结果进行了比较,从图中可以看出,模糊控制方法计算所得的结果与 Tang 等提供的数值基准解^[18]相一致,证明了模糊控制方法的可行性。

图 5 在不同雷诺数条件下对固定松弛因子方法与模糊控制方法进行了求解性能比较,其中横坐标为初始亚松弛因子 α_0 ,取值为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9 和 0.99。当采用固定松弛因子方法时,在迭代过程中初始亚松弛因子始终保持不变;当采用模糊控制方法时,初始亚松弛因子仅为初始值,在迭代过程中该数值会进行不断调整,以达

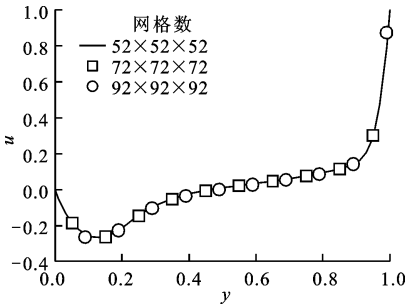
到快速收敛的目的。由图 5 可以发现:对于固定松弛因子方法,所需的最大迭代次数与最小迭代次数之比高达 58.5~63.0,例如当 $Re=100$ 时,所需的最大迭代次数为 16 291,最小迭代次数为 258;对于模糊控制方法,所需的最大迭代次数与最小迭代次



(a) $Re=100$



(b) $Re=500$



(c) $Re=1\ 000$

图 3 不同网格数下 $z=0.5H$ 截面中心线上的 u 速度分布比较(算例 1)

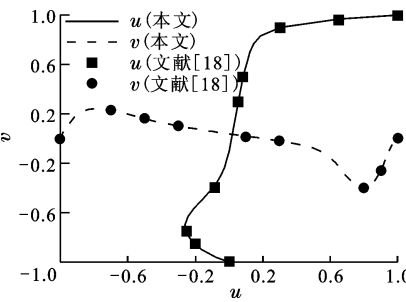


图 4 $Re=1\ 000$ 时 $z=0.5H$ 截面中心线上的速度分布(算例 1)

数之比仅为 2.45~2.65, 远远优于固定松弛因子方法, 说明即使初始亚松弛因子为最不利值时, 模糊控制方法也可以获得快速收敛的解; 当初始亚松弛因子为最不利值, 即 $\alpha_0 = 0.1$ 时, 模糊控制方法迭代次数与固定松弛因子方法迭代次数之比为 0.03~0.06, 说明在最不利值情况下模糊控制方法的收敛速度约是固定松弛因子方法的 17~34 倍; 当初始亚松弛因子为最佳值, 即 $\alpha_0 = 0.9$ 时, 模糊控制方法迭代次数与固定松弛因子方法迭代次数之比为 0.7~2.0, 相差不大; 在不同雷诺数情况下, 固定松弛因子方法仅可以在 $\alpha_0 \leq 0.9$ 区间内获得收敛的解, 而模糊控制方法可以在 $\alpha_0 \leq 0.99$ 区间内获得收敛的解, 说明与固定松弛因子方法相比, 模糊控制方法具有更好的健壮性, 其中健壮性是指是否可以在很宽的

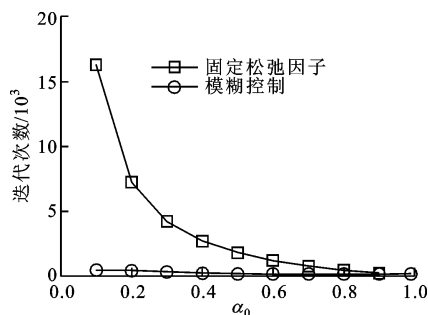
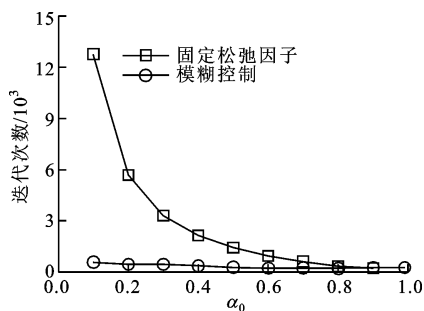
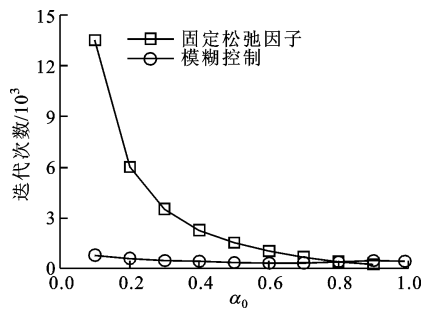
(a) $Re=100$ (b) $Re=500$ (c) $Re=1000$

图5 固定松弛因子方法与模糊控制方法在收敛性和健壮性方面的比较(算例1)

亚松弛因子变化范围内得到收敛的解。

3.2 复杂方腔顶盖驱动流动(算例2)和外掠后台阶流动(算例3)

为了进一步验证模糊控制方法的优越性, 以下基于复杂方腔顶盖驱动流动(见图6)和外掠后台阶流动(见图7)对固定松弛因子方法和模糊控制方法进行分析比较。

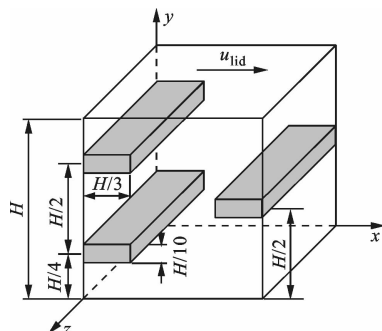


图6 复杂方腔顶盖驱动流动的结构图(算例2)

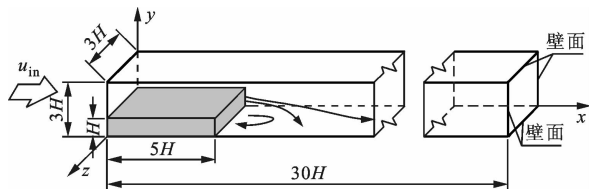


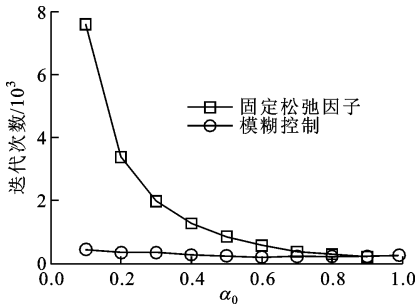
图7 外掠后台阶流动的结构图(算例3)

复杂方腔顶盖驱动流动的雷诺数定义见式(16), 经过网格独立性考核, 选取网格数为 $52 \times 52 \times 52$ 。外掠后台阶流动的雷诺数定义为

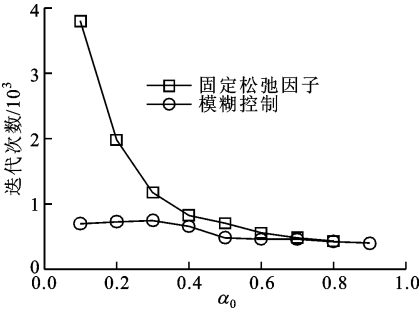
$$Re = \frac{\rho u_{in} H}{\mu} \quad (17)$$

式中: u_{in} 为流体的入口速度。经过网格独立性考核, 选取网格数为 $80 \times 20 \times 20$ 。

由图8可以看出, 与算例1相同, 在算例2和3中模糊控制方法的收敛性和健壮性均优于固定松弛因子方法。对于复杂方腔顶盖驱动流动, 当初始亚松弛因子为最不利值时, 模糊控制方法的收敛速度约是固定松弛因子方法的 17 倍; 当初始亚松弛因子为最佳值时, 模糊控制方法迭代次数与固定松弛因子方法迭代次数之比为 1.1, 相差不大; 与固定松弛因子方法相比, 模糊控制方法具有更好的健壮性。同样, 对于外掠后台阶流动, 当初始亚松弛因子为最不利值时, 模糊控制方法的收敛速度约是固定松弛因子方法的 5.5 倍; 当初始亚松弛因子为最佳值时, 模糊控制方法迭代次数与固定松弛因子方法迭代次数之比为 0.98, 相差不大; 与固定松弛因子方法相比, 模糊控制方法具有更好的健壮性。



(a)复杂方腔顶盖驱动流动($Re=500$)



(b)外掠后台阶流动($Re=300$)

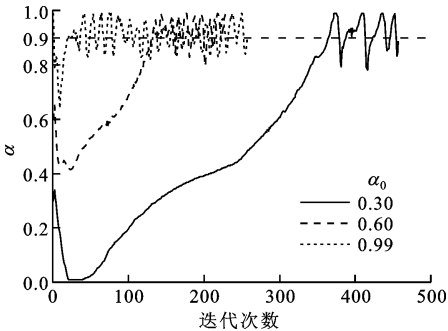
图 8 固定松弛因子方法与模糊控制方法在收敛性和健壮性方面的比较(算例 2 和 3)

3.3 模糊控制方法调控机理分析

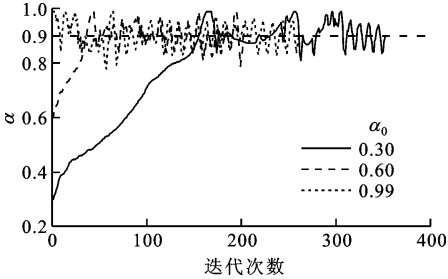
为了研究模糊控制方法加快求解收敛的内在机理,本文分别针对 3 个算例,给出不同 α_0 情况下亚松弛因子随迭代次数的变化过程,如图 9 所示。图中虚线表示一个接近最佳亚松弛因子的值。从图中可以看出,亚松弛因子随着迭代推进逐步向最佳亚松弛因子靠拢,到达后则在最佳亚松弛因子附近上下波动。由此可见,模糊控制调控机理主要体现在:当亚松弛因子较小时,增大亚松弛因子的值,可加快迭代收敛;当亚松弛因子较大时,减小亚松弛因子的值,可防止迭代发散。以上两方面的综合作用使得亚松弛因子最终控制在最佳亚松弛因子附近,因此可以加速迭代过程的收敛。从图中还可以看出,当初始亚松弛因子距离最佳亚松弛因子较远时,需经过一定次数的迭代,才能达到最佳亚松弛因子附近,因此不同的初始亚松弛因子对模糊控制方法所需的迭代次数具有一定的影响,但影响有限。

4 结 论

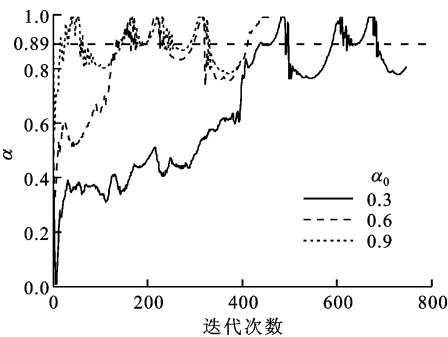
本文将模糊控制技术扩展到了求解三维流动问题的 SIMPLER 算法中,并通过方腔顶盖驱动流动、复杂方腔顶盖驱动流动和外掠后台阶流动 3 个经典算例,对本文采用的模糊控制方法与传统的固定松弛因子方法进行了分析比较,得出了以下主要结论:



(a)方腔顶盖驱动流动($Re=500$)



(b)复杂方腔顶盖驱动流动($Re=500$)



(c)外掠后台阶流动($Re=300$)

图 9 模糊控制方法中亚松弛因子随迭代次数的变化

- (1)当初始亚松弛因子为最不利值时,模糊控制方法迭代次数与固定松弛因子方法迭代次数之比仅为 0.03~0.18,模糊控制方法的收敛速度约是固定松弛因子方法的 5~30 倍,说明即使初始亚松弛因子为最不利值时,模糊控制方法也可以获得快速收敛的解;
 - (2)当初始亚松弛因子为最佳值时,模糊控制方法迭代次数与固定松弛因子方法迭代次数之比为 0.7~2.0,相差不大;
 - (3)与固定松弛因子方法相比,模糊控制方法可以在更宽的初始亚松弛因子范围内获得收敛的解,因此模糊控制方法具有更好的健壮性。
- 通过以上分析可以看出,本文所采用的模糊控制方法在收敛性和健壮性方面均优于传统的固定松弛因子方法,具有较好的应用前景。

参考文献:

- [1] PATANKAR S V, SPALDING D B. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three dimensional parabolic flows [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1972, 15(10): 1787-1806.
- [2] PATANKAR S V. A calculation procedure for two-dimensional elliptic situations [J]. Numerical Heat Transfer, 1981, 4(4): 409-425.
- [3] 刘小民, 李烁. 仿鸮翼前缘蜗舌对多翼离心风机气动性能和噪声的影响 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(1): 14-20.
LIU Xiaomin, LI Shuo. Effects of bionic volute tongue bioinspired by leading edge of owl wing on aerodynamic performance and noise of multi-blade centrifugal fan [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(1): 14-20.
- [4] 施东晓, 毕勤成, 周荣启. 磁性液体两相界面演变特性的数值研究 [J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(9): 123-129.
SHI Dongxiao, BI Qincheng, ZHOU Rongqi. Numerical investigation on the evolution characteristics of two-phase interface in ferrofluids [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(9): 123-129.
- [5] 周晓斯, 王元, 李志强. 近床面风沙流的颗粒拟流体大涡模拟分析 [J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(1): 60-66.
ZHOU Xiaosi, WANG Yuan, LI Zhiqiang. Granular pseudo-fluid large-eddy simulation study of aeolian sand transport near a bed surface [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(1): 60-66.
- [6] 文键, 杨辉著, 杜冬冬, 等. 螺旋折流板换热器换热强化的数值研究 [J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(9): 43-48.
WEN Jian, YANG Huizhu, DU Dongdong, et al. Numerical simulation for heat transfer enhancement of a heat exchanger with helical baffles [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(9): 43-48.
- [7] 赵曙, 朱惠人, 郭涛, 等. 旋转带肋回转通道流动换热数值模拟 [J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(2): 125-130.
ZHAO Shu, ZHU Hui ren, GUO Tao, et al. Numerical predictions of flow and heat transfer for rotating internal cooling channels with rib turbulators [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(2): 125-130.
- [8] LIU X L, TAO W Q, ZHENG P, et al. Control of convergence in a computational fluid dynamic simulation using fuzzy logic [J]. Science in China, 2002, 45(5): 495-502.
- [9] RYOO J, KAMINSKI D A, DRAGOJLOVIC 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(4): 1076-1078.
- [10] RYOO J, DRAGOJLOVIC Z, KAMINSKI D A. Control of convergence in a computational fluid dynamics simulation using ANFIS [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2005, 13(1): 42-47.
- [11] DRAGOJLOVIC Z, KAMINSKI D A, RYOO J, et al. Tuning of a fuzzy rule set for controlling convergence of a CFD solver in turbulent flow [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44(20): 3811-3822.
- [12] DRAGOJLOVIC Z, KAMINSKI D A. A fuzzy logic algorithm for acceleration of convergence in solving turbulent flow and heat transfer problems [J]. Numerical Heat Transfer: Part B, 2004, 46(4): 301-327.
- [13] JAIN A, KAMINSKI D A. Effect of fin number and position on thermal behavior of natural convection in enclosed cavity using fuzzy controller algorithm [C]// Proceedings of the 2007 IEEE Symposium on Foundations of Computational Intelligence. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 516-522.
- [14] JAIN A, KAMINSKI D A. Using cognitive computing to extend the range of Grashof number in numerical simulation of natural convection [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52(15): 3446-3455.
- [15] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [16] LI Z Y, TAO W Q. A new stability-guaranteed second-order difference scheme [J]. Numerical Heat Transfer: Part B, 2002, 42(4): 349-365.
- [17] 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.
- [18] TANG L Q, CHENG T, TSANG T T H. Transient solutions for three-dimensional lid-driven cavity flows by a least-squares finite element method [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1995, 21(5): 413-432.

(编辑 荆树蓉)