

基于 FLUENT 和集群对扩压器流场的 并行数值模拟及分析

蒋光彪, 钟海, 阳杰, 殷水平, 谢洁飞

(1. 中南林业科技大学土木工程与力学学院, 湖南长沙 410004)

(2. 中南林业科技大学工程流变学湖南省重点实验室, 湖南长沙 410004)

[摘要] 在边界条件和初始条件相同的情况下, 分别改变锥形扩压器的扩散角及渐扩管的长宽比, 基于 FLUENT 软件和高性能集群对扩压器内流速的衰减特性及扩压性能进行了数值模拟及分析. 研究表明: 在渐扩管长宽比一定的情况下, 渐扩管效率随着扩散角的增大先增大后减小; 在扩散角不变的情况下, 渐扩管效率随着渐扩管长宽比增大而增大. 因此, 用适当的扩散角或增大渐扩管长宽比的方法可得良好的压力恢复. 关于并行计算, 当核数目不变时, 随着网格数量的增加, 并行效率呈增加趋势但增大的幅度越来越小; 当网格数不变时, 随着核数目的增加, 并行计算效率呈减小的趋势. 本预测结果可为扩压器的优化设计及工程应用提供参考.

[关键词] FLUENT, 扩压器, 紊流, 并行计算, 压力恢复效率

[中图分类号] Q242.1 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2016)02-0047-07

Parallel Numerical Simulation and Analysis of the Flow Field of Diffuser Based on FLUENT Software and Cluster

Jiang Guangbiao, Zhong Hai, Yang Jie, Yin Shuiping, Xie Jiefei

(1. College of Civil Engineering and Mechanics, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

(2. Key Laboratory of Engineering Rheology of Hunan Province, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: At the same situation of boundary and initial conditions, changes are made for diffusion angle of conical diffuser and aspect ratio respectively. Study on the performance of the conical diffuser has been made by using of the simulation based on FLUENT software and cluster. The results show that when aspect ratio is certain, the efficiency of conical diffuser first increases and then decreases with the increase of diffusion angle. When the diffusion angle is certain, the efficiency of diffuser is increasing with the increase of aspect ratio. Thus, good pressure recovery can be obtained with an appropriate spread angle or increase the aspect ratio of the diverging tube method. For parallel computing, when the cores number remains changed, the parallel efficiency is improved with an increase in the number of grids. When the grid number remains the same, parallel computing efficiency shows a trend of decrease with the increase of the number of processor cores. The predicted results can serve as reference of diffuser for optimizing design and engineering applications.

Key words: FLUENT, diffuser, turbulent flow, parallel computation, pressure recovery efficiency

在工程中, 许多流体机械、装置使用管路系统, 把流体所具有的速度能转换为压力能, 为了尽量减少压力损失, 使用渐扩管连接异径管路. 作为压力恢复装置的扩压器(如图 1 所示)在科学技术和工程应用中起着重要的作用. 扩压器内紊流场与顺压梯度流动不同, 它是具有逆压梯度流动, 壁面附近伴有各向异性的复杂紊流场^[1-2]. 具有不同总扩散角及长度的扩压器扩压性能不一样, 其内部的紊流场特性也不一样. 在相同的流体介质、初始条件的前提下, 要研究各种几何参数对扩压器内紊流流场性能的影响, 需要做大量的实物实验, 实验过程复杂. 同时, 实验数据均需经过人工分析, 工作量很大. 在相应的条件下结合应用算例利用 CFD 软件进行计算机仿真, 可节省大量的工作量. FLUENT 软件是基于有限体积法离散的流行商业 CFD 软件, 其最大特点是可以处理复杂几何区域的流动^[3-5].

收稿日期: 2015-09-20.

基金项目: 湖南省自然科学基金(14JJ2103)、湖南省重点学科建设项目(2012ZDXK012)、中南林业科技大学人才引进项目(104-0096).

通讯联系人: 钟海, 硕士研究生, 研究方向: 工程流变学. E-mail: feiyang1991618@163.com

本文借助于 CFD 软件 FLUENT 和高性能计算集群,选用标准 $k-\varepsilon$ 紊流模型,利用有限体积法对雷诺平均 Navier-Stokes 方程进行数值离散,压力速度耦合采用 SIMPLE 算法求解^[6-10],对扩压器在不同工况下的内部紊流场进行并行数值模拟,分析其内部的速度和压力分布特征.通过数值模拟预测壁面压力系数和轴心线上速度分布及扩压性能,计算相应条件下扩压器的压力恢复系数,为探索影响扩压器性能的因素、优化扩压器设计及工程应用提供参考.

1 扩压器内流场数值模拟方法

根据扩压器内流场特点,对流场进行如下假设:流体为不可压粘性无旋流,各向同性,忽略重力影响,不考虑能量方程.控制方程的离散采用有限体积法,流场的计算方法采用基于结构网格的 SIMPLE 方法.

1.1 模型方程

使用 Reynolds 时均 Navier-Stokes 方程描述渐扩管内紊流(为方便略去时均符号):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0, \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}, \tag{2}$$

其中, τ_{ij} 为雷诺应力张量,可表示为: $\tau_{ij} = -\rho u_i' u_j' = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$. 要使雷诺方程封闭,需引入适当的紊流模型.考虑 Boussinesq 涡粘性假设,采用二方程紊流模型:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G - \rho \varepsilon, \tag{3}$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \tag{4}$$

式中, $C_1, C_2, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ 为已知的模型常数.

1.2 几何尺寸及网格生成

利用 FLUENT 软件对扩压器进行参数设置.所模拟的扩压器的几何尺寸及网格图如图 1 所示.对于图 1 左所示锥形扩压器,其主要几何参数是扩散角 α ($\alpha = 2\theta$, θ 为半扩散角)、扩散度 n ($n = A_1/A_0$, 即渐扩管的出口与入口面积之比)及渐扩段长度 L_D .整个流场的几何尺寸为 $D_0=0.5\text{ m}, D_1=1.0\text{ m}, L_1=3.0\text{ m}, L_D=7.0\text{ m}, L=15.0\text{ m}$,其关系为:

$$\frac{L_D}{D_0} = \frac{\sqrt{n-1}}{2 \tan(\alpha/2)}, \tag{5}$$

式中, D_0 为锥形渐扩管之前接管入口直径.

由于渐扩管内紊流场关于轴线中心对称,所以可由三维简化为二维模拟.再考虑到壁面附近紊流参数的变化梯度大,采用近壁密集型结构网格.生成的网格如图 1 右所示.

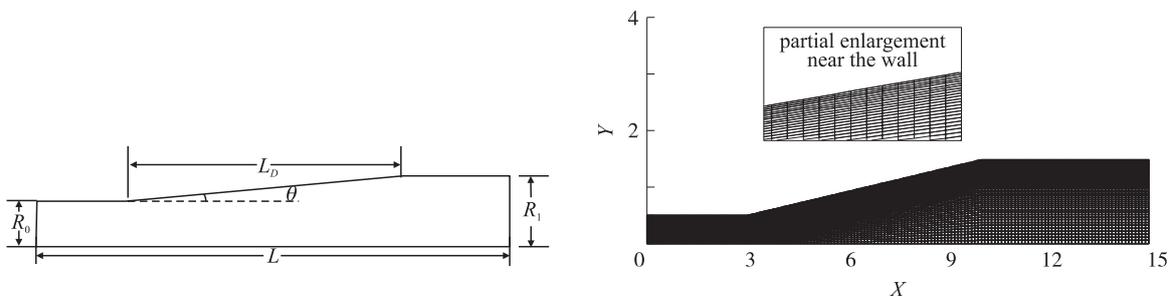


图1 锥形扩压器模型流路及网格图
Fig.1 Conical diffuser flow model and grid system

1.3 边界条件

(1)进口边界条件:在计算域的进口边界上给定初始速度及相应标量值,分别为 $u_{in}=1\text{ m/s}, k_{in}=0.003\text{ 2}$

$m^2/s^2, \epsilon_{in}=0.00071 m^2/s^3$.

(2)出口边界条件:取流动充分发展条件,即设为 outflow 边界条件,假设所有变量的扩散通量为 0.

(3)壁面边界条件:在壁面上,速度满足无滑移条件,对固壁附近流动采用标准壁面函数法确定.

(4)中心轴边界条件:在计算区域内,由于流场关于轴线中心对称,故此边界设为轴对称边界条件.

1.4 数值方法

采用有限体积法(Finite Volume Method)离散基本方程组(1)-(4),为减少数值扩散,针对流动控制方程的特点,设流体为不可压,连续性方程、动量方程、紊动能方程和紊动能耗散方程均采用二阶迎风格式离散计算.压力和速度耦合方式选用压力速度校正方法即 SIMPLE 算法;求解器选用隐式分离式求解器(Implicit Segregated Solver).对有限体积法离散后的大型代数方程组,迭代过程以欠松弛方式求解,各欠松弛因子分别取压力项为 0.3,速度项为 0.7,紊动能项和紊流耗散率项为 0.8.

2 数值模拟结果与分析

2.1 并行计算软硬件环境

本文并行计算硬件条件为工程流变学湖南省重点实验室拥有的可用于并行计算的 DELL 高性能计算工作站.数值模拟软件为 FLUENT 6.3.26 版本,其具有并行计算功能^[11-13].该高性能并行计算系统硬件环境由 5 台 DELL 工作站通过以太网连接而成,由 1 个管理节点、4 个计算节点组成,共计有 96 个核.为使数值模拟结果更具有实际意义,根据扩压器工程应用来选择扩压器参数及流体物性参数,如表 1 所示.

表 1 流体物性参数

Table 1 Fluid physical parameters

流体介质	入口雷诺数(Re)	入口压力 p/Pa	密度 $\rho/(kg \cdot s^2/m^4)$	粘度 $\mu/(kg/(m \cdot s))$
空气	0.68×10^5	101 325	1.225	1.7894×10^{-5}

可用压力恢复系数 C_p 和效率 η 表示渐扩管压力恢复. C_p 是实际压力增量 Δp 对入口动压 $ru_{in}^2/2$ 之比,而效率 η 是 Δp 对理想压力增量 $r(u_{in}^2 - u_{out}^2)/2$ 之比,其中 u_{in} 为渐扩段入口平均速度, u_{out} 为渐扩段出口平均速度,可表示为:

$$C_p = \frac{\Delta p}{ru_{in}^2/2}, \tag{6}$$

$$\eta = \frac{\Delta p}{r(u_{in}^2 - u_{out}^2)/2} = C_p [1 - (A_{in}/A_{out})^2].$$

2.2 扩散角对渐扩管内紊流的影响

保持入口半径($D_0/2$)及渐扩管长度($7D_0$)不变,在边界初始条件相同的情况下,改变渐扩管的扩散角,基于 FLUEN 软件和集群对锥形扩压器的压力恢复系数及效率等参数进行数值模拟及分析,考察扩散角对渐扩管内紊流的影响.数值算例如表 2 所示.

表 2 扩散角影响的算例

Table 2 The cases of diffusion angle

算例	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8
扩散角 α	4°	8°	12°	16°	20°	24°	28°	32°
扩散度 n	2.21	3.92	6.11	8.81	12.03	15.80	20.16	25.14

渐扩管压力恢复系数及渐扩管效率的比较情况如表 3 所示.从表 3 中可以看出,随着扩散角的增大,压力恢复系数先增大后减小.

表 3 渐扩管压力恢复系数及效率的比较

Table 3 The comparison about pressure recovery coefficient and diffusion efficiency

算例	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8
压力恢复系数 C_p	0.68	0.84	0.87	0.85	0.81	0.76	0.69	0.63
渐扩管效率 η	0.54	0.79	0.85	0.84	0.80	0.76	0.69	0.63

扩散角对壁面压力系数及轴心线上速度分布的影响如图 2、图 3 所示.从图 2 可以看出,在渐扩管长

宽比一定的情况下,渐扩管壁面压力系数随着扩散角的增大先增大后降低;由图3可以看出,随着扩散角的增大,速度先减小后增大,因而转化为压力能的动能先增大后降低,扩压性能先变强后变弱。

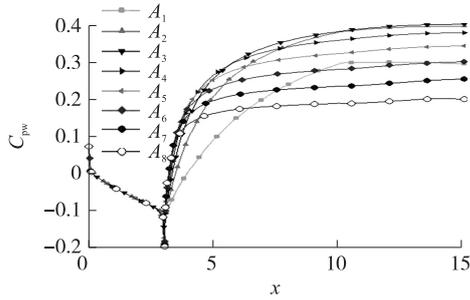


图2 扩散角对壁面压力系数的影响

Fig.2 The effect of diffusion angle on pressure coefficient

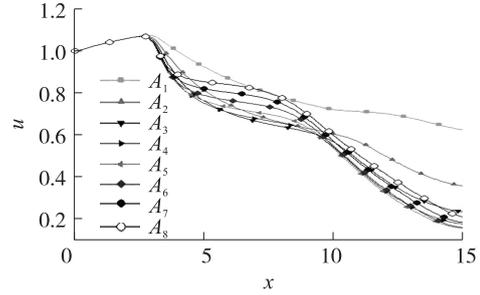


图3 扩散角对轴心线上速度分布的影响

Fig.3 The effect of diffusion angle on the axial velocity

2.3 长宽比对渐扩管内紊流的影响

保持入口半径 $D_0/2$ 和选取扩散角 $\alpha = 8^\circ$ 不变,在初边界条件相同的情况下,改变渐扩管段长度 L_D 与入口直径 D_0 之比(简称长宽比),基于 FLUENT 软件和集群对锥形扩压器的压力恢复系数及效率等参数进行数值模拟及分析.数值算例如表4所示,渐扩管压力恢复系数 C_p 及渐扩管效率 η 的比较如表5所示。

表4 长宽比影响的算例

Table 4 The cases about influence of aspect ratio

算例	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7	B_8
长宽比 L_D/D_0	2:1	3:1	4:1	5:1	6:1	7:1	8:1	9:1
扩散度 n	1.64	2.01	2.43	2.89	3.38	3.91	4.49	5.10

表5 渐扩管压力恢复系数及效率的比较

Table 5 The comparison about pressure recovery coefficient and diffusion efficiency

算例	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7	B_8
压力恢复系数 C_p	0.56	0.67	0.74	0.78	0.82	0.84	0.86	0.87
渐扩管效率 η	0.35	0.50	0.61	0.69	0.75	0.79	0.82	0.84

长宽比对壁面压力系数及轴心线上速度分布的影响如图4、图5所示.从图4可以看到,壁面压力系数随着长宽比的增大呈现增大趋势;由图5可以看出,随着渐扩管长度的增大,速度的降幅也增大,因而转化为压力能的动能将会增加,扩压性能变好.所以,在扩散角一定的情况下,压力恢复系数随着渐扩管长宽比的增大而增大.因此,增大渐扩管长度可以得到良好的压力恢复。

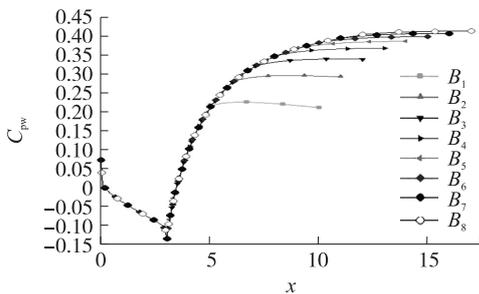


图4 长宽比对壁面压力系数的影响

Fig.4 The effect of aspect ratio on pressure coefficient

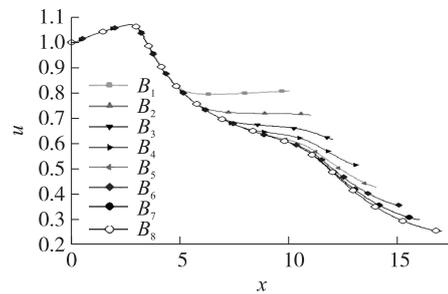


图5 长宽比对轴心线上速度分布的影响

Fig.5 The effect of aspect ratio on the axial velocity

3 并行计算效率分析

为检验本集群并行计算的性能,分析影响集群计算效率的因素,本文主要研究所建平台 CFD 并行计算能力,并用并行效率来衡量计算效率.定义并行加速比 S_n 为同一个任务在单处理器系统运行消耗的时间 t_0 与并行处理器系统中运行消耗的时间 t_n 之比 ($S_n = t_0/t_n$),定义并行效率 E_n 为加速比与并行系统中核心数之比 ($E_n = S_n/n$, n 为并行核心数).

3.1 不同网格数下的并行计算效率比较分析

为了比较不同的网格数量对集群计算效率的影响,设置 10 万个、20 万个、40 万个、80 万个和 100 万个 5 种不同网格数目工况,设置迭代次数为 5 000 次,通过 PBS 作业提交系统,向集群提交作业进行并行计算,分别得到 5 组工况下集群计算所需的时间,具体结果如表 6 所示.

表 6 并行计算的网格数工况及效率比较

Table 6 The cases of different grid numbers in parallel computing

工况	网格规模	节点数	每个节点核数目	总核数目	计算执行时间	单个核计算执行时间	并行效率/%
A ₁	10 万	2	4	8	00:01:36	00:02:55	22.8
A ₂	20 万	2	4	8	00:02:49	00:06:44	29.9
A ₃	40 万	2	4	8	00:03:56	00:14:00	44.5
A ₄	80 万	2	4	8	00:07:59	00:38:54	60.9
A ₅	100 万	2	4	8	00:09:41	00:47:49	61.7

图 6 是计算执行时间和并行效率与网格数量之间关系的曲线图.从图中可以看出,在总核数目相同的条件下,任务的计算执行时间随任务的网格数量的增多而变长;集群效率随任务网格数量的增多而更高效,但随网格数量的不断增大,集群效率增大的趋势越来越缓.

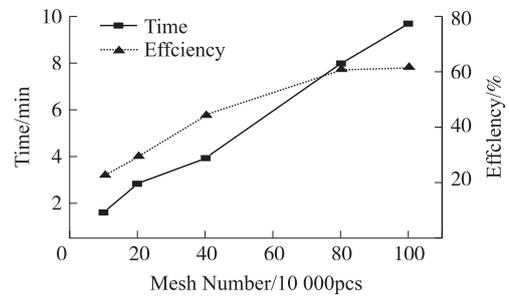


图 6 计算时间和并行效率与网格数量关系

Fig.6 The relationship of grid numbers and computation time as well as parallel efficiency

3.2 不同计算节点数下的并行计算效率比较分析

为了比较核数目对计算效率影响的分析,设定工况 B₁-B₈和工况 C₁-C₈的网格数分别为 40 万和 80 万,并选择 8 组不同的核数目工况,通过 PBS 向集群提交作业得到其并行计算的结果,具体计算结果如表 7、表 8 所示.

表 7 并行计算的核数目工况及效率比较(网格数 40 万)

Table 7 The cases of different CPU in parallel computing (grid numbers are 400,000)

工况	网格规模	节点数	每个节点核数目	总核数目	并行计算时间	并行效率/%
B ₁	40 万	1	1	1	00:15:12	100
B ₂	40 万	1	4	4	00:04:03	93.8
B ₃	40 万	2	4	8	00:03:33	53.5
B ₄	40 万	3	4	12	00:04:07	30.8
B ₅	40 万	4	4	16	00:07:12	13.2
B ₆	40 万	4	5	20	00:07:11	10.6
B ₇	40 万	4	6	24	00:08:01	7.9
B ₈	40 万	4	7	28	00:10:17	5.3

表 8 并行计算的核数目工况及效率比较(网格数 80 万)

Table 8 The cases of different CPU in parallel computing (grid numbers are 800 000)

工况	网格规模	节点数	每个节点核数目	总核数目	并行计算时间	并行效率/%
C ₁	80 万	1	1	1	00:38:02	100
C ₂	80 万	1	4	4	00:09:37	98.9
C ₃	80 万	2	4	8	00:08:16	57.5
C ₄	80 万	3	4	12	00:07:56	40.0
C ₅	80 万	4	4	16	00:09:51	24.1
C ₆	80 万	4	5	20	00:09:49	19.4
C ₇	80 万	4	6	24	00:10:02	15.8
C ₈	80 万	4	7	28	00:18:02	7.5

结合表7和表8的数值结果,将工况B和工况C中计算执行时间和总核数目在同一坐标轴中绘图描点得到计算运行时间与总核数目之间关系的曲线图,如图7所示.从图中可以看出,任务在40万网格和80万网格时,其运行计算时间随总核数目的增多具有相同的变化趋势.当网格数量不变时,任务的计算执行时间随总核数目的增多先快速减小而后有缓慢增多的趋势.因此,一个任务不会因为其所分配的核数目越多,计算执行时间就越短.

结合表7和表8的数值结果,将工况B和工况C中的并行效率和总核数目在同一坐标轴中绘图描点得到并行效率与总核数目之间关系的曲线图,如图8所示.从图8可以看出,任务在40万网格和80万网格时,其并行效率随核数目的增多而下降,且具有相同程度的下降趋势.

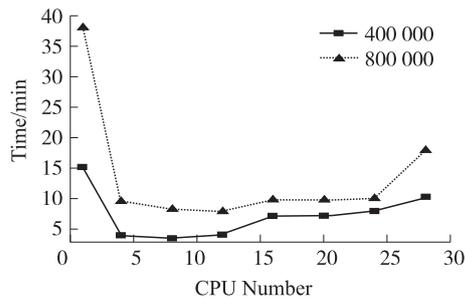


图7 执行时间与核数目之间关系

Fig.7 The relationship of execution time and CPU

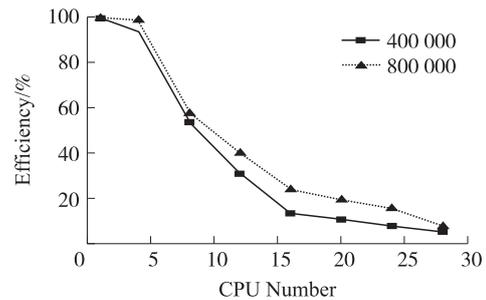


图8 并行效率与核数目之间的关系

Fig.8 The relationship of parallel efficiency and CPU

4 结论

在边界条件和初始条件相同的情况下,保持渐扩管的其他几何参数相同,分别改变扩散角及渐扩管的长宽比,用FLUENT软件对渐扩管内紊流场进行了数值模拟,得出如下结论:

- (1)在渐扩管长度一定的情况下,用适当的扩散角($8^{\circ}\sim 12^{\circ}$)可得到良好的压力恢复.
- (2)在扩散角一定的情况下,压力恢复系数随着渐扩管长度而增大.因此,增大渐扩管长度可以得到良好的压力恢复.
- (3)关于集群的并行计算,增加网格数量会增加其计算时间,但其并行效率也随之提高.
- (4)随着集群并行计算总核数的增加,总计算时间先是逐渐快速减少,然后慢慢增加;而并行效率呈下降趋势.

[参考文献](References)

- [1] 何永森,舒适,蒋光彪,等.管路内流体数值计算与仿真[M].湘潭:湘潭大学出版社,2012.
HE Y S, SHU S, JIANG G B, et al. Numerical prediction of fluid flows through pipelines[M]. Xiangtan: Xiangtan University Press, 2012. (in Chinese)
- [2] 何永森,刘邵英.机械管内流体数值预测[M].北京:国防工业出版社,1999.
HE Y S, LIU S Y. Numerical prediction of turbulent flows through pipelines of machinery[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999. (in Chinese)
- [3] 温正,石良辰,任毅如.FLUENT流体计算应用教程[M].北京:清华大学出版社,2009.
WEN Z, SHI L C, REN Y R. FLUENT applications tutorial about fluid computing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009. (in Chinese)
- [4] 王瑞金,张凯,王刚.FLUENT技术基础与应用实例[M].北京:清华大学出版社,2007.
WANG R J, ZHANG K, WANG G. Technology foundation of FLUENT software and its applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007. (in Chinese)
- [5] 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.
HAN Z Z, WANG J, LAN X P. Engineering examples and application of fluid simulation calculation by using FLUENT[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2004. (in Chinese)
- [6] 陶文铨.计算传热学的近代进展[M].北京:科学出版社,2001.

- TAO W Q. Recent progress of computational heat transfer[M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese)
- [7] 帕坦卡. 传热与流体流动的数值计算[M]. 张政, 蒋章焰, 译. 北京: 科学出版社, 1984.
PATANKAR S V. Heat transfer and fluid flow in the numerical calculation[M]. ZHANG Z, JIANG Z Y, translated. Beijing: Science Press, 1984. (in Chinese)
- [8] SPALDING D B. A general purpose computer program for multi-dimensional one-and two-phase flow[J]. Mathematics and computers in simulation, 1981, 23(3): 267-276.
- [9] PATANKAR S V. A calculation procedure for two-dimensional elliptic situations[J]. Numerical heat transfer(Part A: Applications), 1981, 4(4): 409-425.
- [10] FERZIGER J H, PERIC M. Computational method for fluid dynamics[M]. Privacy Policy: Springer Science & Business Media, 2002.
- [11] 蒋光彪, 阳杰, 钟海, 等. 高层建筑风场数值模拟研究[J]. 湖南城市学院学报(自然科学版), 2015(3): 45-48.
JIANG G B, YANG J, ZHONG H, et al. Numerical simulation on the high-rise building wind field[J]. Journal of Hunan city university(natural science edition), 2015(3): 45-48. (in Chinese)
- [12] 任立波, 韩吉田, 何海澜. 基于 FLUENT 软件信息传递模式的离散颗粒流动的并行算法[J]. 高校化学工程学报, 2015(4): 963-970.
REN L B, HAN J T, HE H L. Parallel computing of discrete particle flows based on information communication model of FLUENT platform[J]. Journal of chemical engineering of Chinese universities, 2015(4): 963-970. (in Chinese)
- [13] 辛晓华, 张武, 周华. 基于 FLUENT 的绕流问题的数值模拟与并行计算[J]. 计算机工程与设计, 2005(8): 2 153-2 154, 2 200.
XIN X H, ZHANG W, ZHOU H. Numerical simulation and parallel computation of flow over object using FLUENT [J]. Computer engineering and design, 2005(8): 2 153-2 154, 2200. (in Chinese)

[责任编辑: 严海琳]

(上接第 23 页)

- [4] SMITH R K, SLADE P G, SARKOZI M, et al. Solid state distribution current limiter and circuit breaker: application requirements and control strategies[J]. IEEE transactions on power delivery, 1993, 8(3): 1 155-1 162.
- [5] HIROYUKI H, SHINICHI M, TANZO N, et al. Masaumi taguchi experimental study on limiting operation of superconducting fault current limiter in double circuit transmission line model system [J]. IEEE transactions on applied superconductivity, 2002, 12(1): 691-698.
- [6] 郝志杰, 江道灼, 蔡永华. 新型固态故障限流器对电力系统暂态稳定性的影响[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(8): 50-56.
HAO Z J, JIANG D Z, CAI Y H. Effect on novel fault current limiters on power system transient stability [J]. Automation of electric power systems, 2004, 28(8): 50-56. (in Chinese)
- [7] 时宇琳, 王宝华. 基于 Matlab 的电力系统暂态稳定仿真实验与分析[J]. 实验室研究与探索, 2010, 29(4): 40-43.
SHI Y L, WANG B H. Transient stability simulation and analysis of power system based on Matlab [J]. Research and exploration in laboratory, 2010, 29(4): 40-43. (in Chinese)
- [8] SUGIMOTO S, KIDA J, ARITA H, et al. Principle and characteristics of a fault current limiter with series compensation [J]. IEEE transactions on power delivery, 1996, 11(2): 842-847.
- [9] 靳希, 段开元, 张文青. 电网短路电流的限制措施[J]. 电力科学与技术学报, 2008, 23(4): 78-82.
JIN X, DUAN K Y, ZHANG W Q. Short-circuit current limiting methods for power networks [J]. Journal of power science and technology, 2008, 23(4): 78-82. (in Chinese)
- [10] 顾雪平, 杨智龙. 故障限流器对电力系统暂态稳定性的影响分析[J]. 湖南工业大学学报, 2007, 21(4): 22-28.
GU X P, YANG Z L. Influence analysis of transient stability for superconducting fault current limiter on power system [J]. Journal of Hunan university of technology, 2007, 21(4): 22-28. (in Chinese)

[责任编辑: 陈 庆]