



夏红梅, 李志伟, 甄文斌, 等. 气力板式蔬菜排种器气室真空流场仿真分析[J]. 华南农业大学学报, 2014, 35(6): 99-103.

气力板式蔬菜排种器气室真空流场仿真分析

夏红梅, 李志伟, 甄文斌, 张炳超

(华南农业大学 工程学院, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】优化气力板式蔬菜排种器气室结构参数,简化气室气流体为定常不可压的湍流模型。【方法】选用 ANSYS 软件的 FLOTRAN 模块,对不同气室结构参数进行仿真分析。【结果和结论】相对整体矩形空腔结构,矩形横槽和纵槽连通气室结构更能节省气流量,提高整体强度;双气源口结构相比单气源口结构相对压力损失小,流场分布均匀性更好;优化的气源口位置在距排种器两侧边缘第 4 个和第 5 个吸种孔之间;气室槽深越大,过渡区域相对压力损失越小,吸种孔入口处的相对压力和速度分布越均匀,但排种器整体结构尺寸增大,气腔内形成一定相对压力的稳定流场所需时间更长,槽深取 4 mm 综合较好。验证试验结果表明,在吸种孔入口中心处,仿真分析结果与实际测量结果比较接近,趋势上具有较高一致性,表明仿真分析优化气室结构参数可行。

关键词:蔬菜;排种器;气力板式;真空流场;仿真

中图分类号:S223.2⁺5

文献标志码:A

文章编号:1001-411X(2014)06-0099-05

A simulation analysis on vacuum flow field for an air chamber of pneumatic plate-type vegetable seed metering device

XIA Hongmei, LI Zhiwei, ZHEN Wenbin, ZHANG Bingchao

(College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract:【Objective】To optimize chamber structure parameters of the pneumatic plate-type vegetable seed metering device, and to simplify the vacuum flow field in the air chamber as steady, regular, incompressible and turbulent fluid. 【Method】The FLOTRAN module of ANSYS software was applied to simulate and analyze the air chamber with different structure parameters. 【Result and conclusion】Compared to the rectangular cavity air chamber structure, the rectangular groove connected air chamber structure could save more gas flow and improve the overall strength. Pressure loss of double outlet was less than single outlet, and flow field uniformity of double outlet was better. The optimized air source location was between the fourth and the fifth suction holes calculated from both sides of the metering device. Increasing channel depth could reduce pressure loss at transition region and ensure more uniform pressure and velocity distribution. But if channel depth increased, the size of metering device would increase correspondingly, and the time for forming steady flow would be longer. According to simulation results, 4 mm channel depth was optimized. Verifying tests of the air flow field in the vacuum chamber of seed metering device show that the simulation analysis results are comparatively consistent with the actual measurement results, with a consistent pressure distribution trend. This proves the feasibility of the numerical simulation method.

收稿日期:2013-10-31 优先出版时间:2014-09-30

优先出版网址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20141003.1222.012.html>

作者简介:夏红梅(1975—),女,副教授,博士,E-mail:xhm_scau@scau.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金(51005080)

Key words: vegetable; seed metering device; pneumatic plate-type; vacuum flow field; simulation

国内外理论分析和试验研究表明,气力式排种器气室结构参数对吸种孔口流场强度和分布有直接影响,优化的结构参数对提高吸排种效果有重要意义^[1-6]. 华南农业大学自行研制的气力板式蔬菜排种器动力学模型和初步试验研究表明,吸附阶段排种器气室应保持均匀分布的稳定负压真空流场,各吸种孔口应具有足够流场强度,能提供足够的气流场吸附力,使种子被稳定吸住;排种阶段种子在重力和正压作用下直线加速下落,正压流场的强度和分布对种子排出影响不大,为防止种子反弹,可减小排种高度,控制正压流场强度^[7-8]. 为提高排种器吸种效果,对其不同气室结构参数条件下的真空流场分布和强度进行分析,采用 ANSYS 的 FLOTRAN 模块进行模拟仿真. 为验证仿真分析合理性,进行对比试验研究.

1 气室真空流场模型

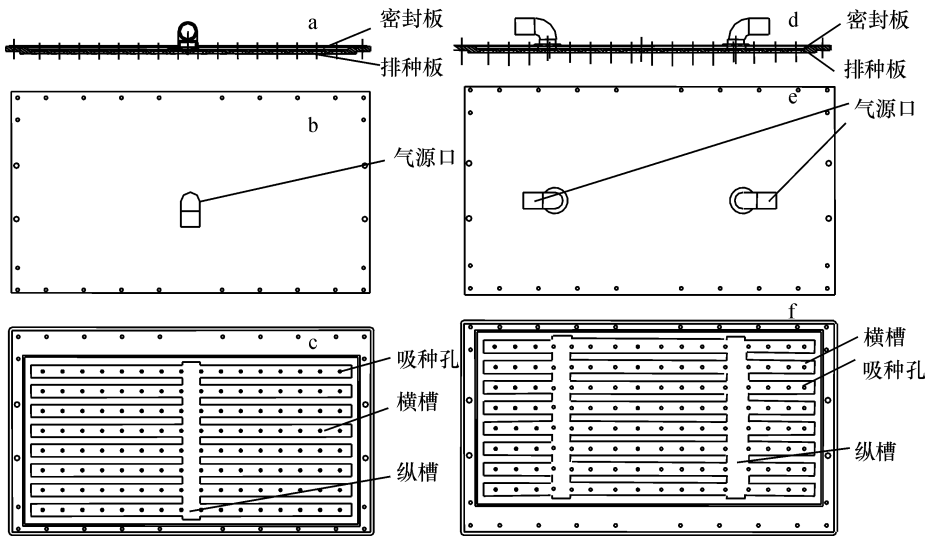
在种子被吸附瞬时气室流场已基本稳定,可简化为定常流动模型. 考虑空气粘性,简化为符合牛顿粘性定律的牛顿流体. 常温(20 ℃)下,空气密度为 $1.205\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,空气粘度系数为 $1.83 \times 10^{-5}\text{ Pa} \cdot \text{S}$,

真空气室流场特征尺寸为 $L = 0.025\text{ m}$,实测气流平均速度为 $1.53\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,计算雷诺数 $\text{Re} = 2\,560 > \text{Rec}$,因此气室流体运动模型为湍流^[9]. 计算马赫数 $\text{Ma} = 0.004\,4 < 0.3$,表明气室流体不可压缩^[10]. 对于定常不可压湍流气流场,由于密度不变,只需求解流场中的压强和速度,可通过连续性方程、动量方程和能量方程求解^[11-12].

2 气室真空流场仿真分析

2.1 不同气室结构仿真分析

板式排种器气室由排种板和密封板固定连接形成. 密封板为带有气源接口的薄板,排种板可设计为整体矩形空腔,或矩形横槽和纵槽连通结构. 整体矩形空腔排种板整体为薄板,结构强度差,容易变形,气室所需气流量大. 矩形横槽和纵槽连通排种板,其槽的边框可以起到加强肋作用,气室所需气流量较小. 考虑结构复杂性因素,设计基本尺寸一致的单、双气源口矩形横槽和纵槽连通气室结构,如图 1 所示. 双气源口位置定在距离两侧边缘第 4 和第 5 个吸种孔之间. 由于排种器吸种孔结构尺寸相对整个气室很小,将其简化为直孔结构,直径取 0.9 mm ^[7].



a、b、c 分别表示单气源中气室截面、密封板、排种板; d、e、f 分别表示双气源中气室截面、密封板、排种板.

图 1 气源口气室结构

Fig. 1 Outlet air chamber structure

为比较不同气源口数目对各吸种孔气流入口流场分布的影响,在气流入口边界增加一段自然边界区域. 考虑对称性,取横向对称面一半进行分析. 选用 FLUID141 单元,采用自由网格划分方式,在吸种孔附近对网格进一步细化. 当气源流量为 $160\text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, <http://xuebao.scau.edu.cn>

单气源出口边界速度为 $5.5\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,双气源出口边界速度为 $7.6\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,出口处相对压力为 -5.8 kPa ,自然边界上相对压力为 0,流速为 0,垂直对称面方向流速为 0,固定壁面上流速为^[13-15]. 不同气源口气室流场速度矢量分布,及各吸种孔气流入口处流速和

相对压力分布仿真结果如图2所示。

图2表明,从气源口到矩形横槽过渡区域,及矩形横槽到吸种孔口过渡区域,由于气流方向急剧变化,相对压力损失大,形成涡流。在气源口附近区域流速高,相对压力大,远离气源口区域流速低,相对压力小。在吸种孔入口边界处,单气源口结构相对压

力变化范围为-0.11 ~ -1.99 kPa,流速变化为1.52 ~6.31 m·s⁻¹;双气源口结构相对压力变化范围为-0.73 ~ -2.2 kPa,流速变化为3.89 ~6.48 m·s⁻¹。可见双气源口结构相比单气源口结构相对压力损失小,流场分布均匀性更好。

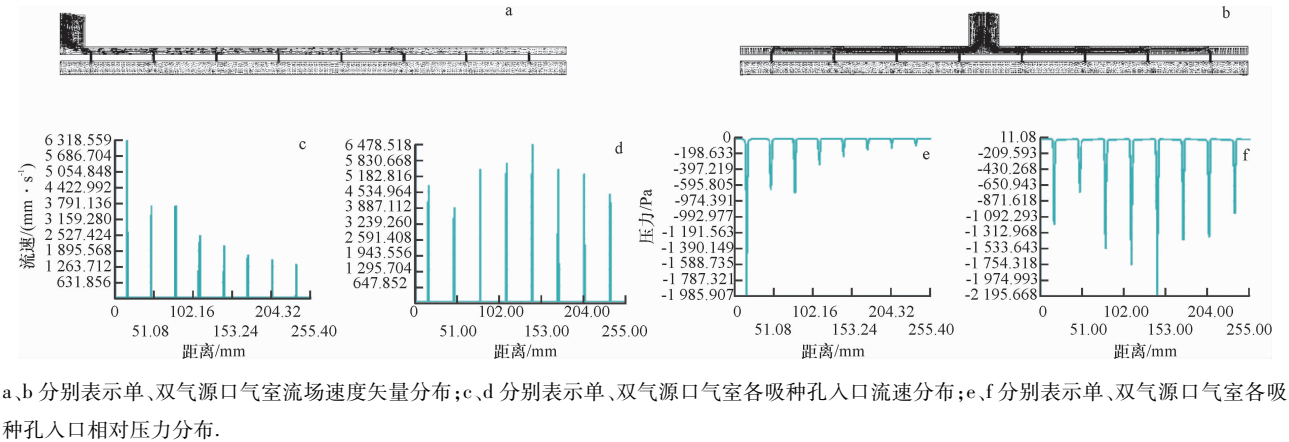


图2 不同气源口结构仿真结果

Fig.2 Simulation results of different air source port structure

为确定合理气源口位置,对双气源口结构取横面对称面右侧部分进行仿真分析。气源口位置(1)~(5)分别定在距离排种器右侧边缘第2和3吸种孔之间,第3和第4个吸种孔之间,第4和5个吸种孔之间,第5和6个吸种孔之间,第6和7个吸种孔之间。

选用 FLUID141 单元,采用自由网格划分方式,在吸种孔附近对网格进行进一步细化。设置出口边界速度为7.6 m·s⁻¹,出口处相对压力为-5.8 kPa。在自然边界上施加相对压力为0,流速为0,垂直对称面方向流速为0,固定壁面上流速为0的边界条件。仿真得到吸种孔入口流速和相对压力变化范围如表1所示。

表1 不同气源口对各吸种孔入口气流速度和相对压力影响
Tab.1 Effects of air source positions on velocity and pressure of each suction hole inlet

位置	气流速度/(m·s ⁻¹)	相对压力/kPa
(1)	2.71 ~6.93	-0.32 ~ -2.47
(2)	3.18 ~6.31	-0.49 ~ -1.96
(3)	3.98 ~6.48	-0.75 ~ -2.20
(4)	3.59 ~6.32	-0.61 ~ -1.99
(5)	2.96 ~6.41	-0.42 ~ -2.05

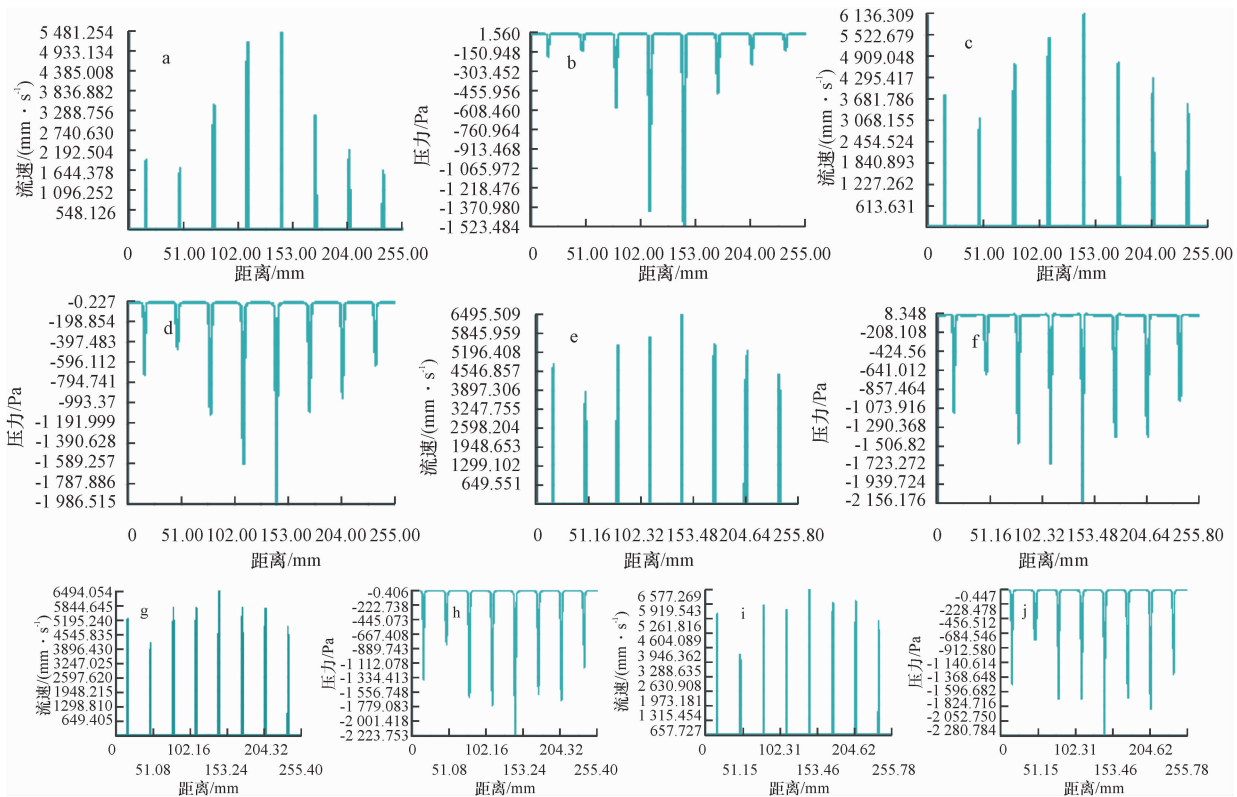
仿真结果表明,各吸种孔入口流场分布随气源

口位置变化,气源口在位置(1)和位置(2)时,靠近排种器右侧边缘处的吸种孔入口流速和相对压力相对较高;在位置(4)和位置(5)时,靠近排种器中间对称面处的吸种孔入口流速和相对压力相对较高。气源口在位置(3)时各吸种孔入口流速和相对压力变化范围最小,流场分布最均匀,因此气源口最佳位置在距离两侧边缘第4个和第5个吸种孔之间。

2.2 不同气室槽深的仿真分析

为分析气室槽深对气流场分布的影响,分别取槽深为2、3、4、5、6 mm 进行对比分析。出口边界速度为1.53 m·s⁻¹,出口处相对压力为-8.6 kPa。不同槽深条件下,各吸种孔入口流速和相对压力分布如图3所示。

图3表明,不同槽深气室各吸种孔口边界处流场分布规律一致,左起第2个孔的流速最小,相对压力最小,第5个孔的流速最大,相对压力最大。气室槽深越大,越有利于流场的稳定。随着气室槽深的增大,过渡区域相对压力损失减小,吸种孔入口处的相对压力和速度分布越均匀。但槽深越大,排种器整体结构尺寸增大,气腔内形成一定相对压力的稳定流场所需时间更长。比较4、5和6 mm 的槽深在吸种孔口处速度和相对压力变化已比较接近,故气室槽深取4 mm 即可。



a、b 表示槽深 2 mm 各孔口流速分布和相对压力分布；c、d 表示槽深 3 mm 各孔口流速分布和相对压力分布；e、f 表示槽深 4 mm 各孔口流速分布和相对压力分布；g、h 表示槽深 5 mm 各孔口流速分布和相对压力分布；i、j 表示槽深 6 mm 各孔口流速分布和相对压力分布。

图 3 不同槽深气流场仿真结果

Fig. 3 Air flow field simulation results of different air chamber depth

3 试验验证

3.1 试验设备和方法

按仿真优化的气室结构参数制作排种器,在华南农业大学校自行研制的气力板式蔬菜播种试验台上进行真空流场分布试验. 试验台如图 4 所示,由机架、排种器、驱动系统、控制系统、正压气源、负压气源和正负压切换装置组成. 正压气源为 CZQ 型单向风机,功率为 120 W,可提供最大正压为 0.29 kPa,风量为 $2\text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. 负压气源为可调功率的海尔 ZW1200-211 型真空吸尘器,功率调节范围为 250 ~ 1200W,最大相对压力为 -20.5 kPa. 正负压切换装置由 4 个两位两通电磁换向阀组成,与正、负压气源和排种器气源口连通,通过控制系统控制电磁阀通断实现气室正负压切换.

考虑对称性,取排种器横向对称面右侧部分进行测试. 选取 8 个量程为 0 ~ -100 kPa,精度为 -0.1 kPa 的 DP-20 型数字显示真空计,分别安装在各标记孔处,对标记孔中心相对压力进行测量. 在正负压切换装置与排种器气源口之间安装 1 个量程为 100 ~ 700 L · min⁻¹,精度为 2.5% 的 LWGQ-25 气体涡轮流量传感器, LRT-I 现场显示表, DP-20 型数字显示真空计,对气室出口流量和相对压力进行测量.

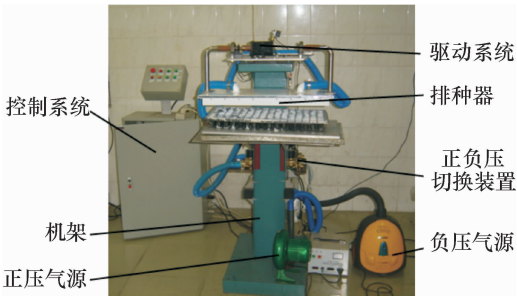


图 4 播种试验平台

Fig. 4 A sowing test platform

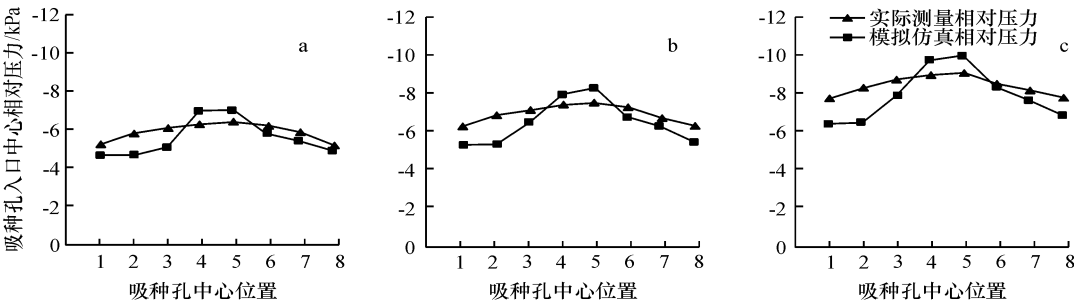
为清除气体涡流和断面流速不均匀对流量测量的影响,在流量传感器进出口处安置直段整流器,上下游直管段长度分别为 8D 和 3D (D 为传感器公称通径). 具体测试方法为:调节负压气源功率,改变气室出口处流量和相对压力,在气室流场稳定后,读取各标记孔中心相对压力值;按实测气室出口气流场强度进行模拟仿真分析,分别读取各标记吸种孔入口中心相对压力值,将实测结果与模拟仿真结果进行对比分析.

3.2 试验结果与分析

由图 5 可知,气室出口处实测流量为 170 L · min⁻¹ 时,相对压力为 -6.5 kPa;流量为 190 L · min⁻¹ 时,相对压力为 -7.6 kPa;流量为 210 L · min⁻¹ 时,相对压力为 -9.1 kPa. 不同试验条件

下,各吸种孔入口中心处实测平均相对压力与模拟仿真分析结果与实际测量结果较为接近,在反映各吸种孔中心相对压力分布的趋势上具有较高一致性. 仿真分析相对压力值与实际测量相对压力值存

在一定的差异,这与理论流场模型的近似性,数值模拟求解模型的近似性,求解中经验系数的选取,测量误差等因素有关. 试验表明,采用数值模拟方法研究气室流场特性,并以此指导其结构优化具有可行性.



a、b、c分别表示出口相对压力为-6.5、-7.6、-9.1 kPa

图5 实际测量相对压力与模拟仿真相对压力的比较

Fig. 5 A comparison of measured pressure and simulated pressure

4 结论

将气力板式蔬菜排种器气室气流体简化为定常、不可压缩的湍流,利用 ANSYS 的 FLOTTRAN 模块对气室流场进行仿真分析.

相对整体矩形空腔结构,气室采用矩形横槽和纵槽连通结构有利于节省气流量,提高排种器整体强度. 仿真结果表明,双气源口相比单气源口相对压力损失小,流场分布均匀性更好;气源口在距离排种器两侧边缘第 4 和第 5 个吸种孔之间,各吸种孔入口流速和相对压力变化范围最小,流场分布最均匀.

气室槽深越大,过渡区域相对压力损失越小,吸种孔入口处的相对压力和速度分布越均匀. 但槽深越大,排种器整体结构尺寸越大,气室内形成一定相对压力的稳定流场所需时间更长,槽深取 4 mm 综合较优.

验证试验表明,模拟仿真分析结果与实际测量结果较为接近,反映各吸种孔入口中心相对压力分布趋势与实际测量结果具有较高一致性. 仿真分析与实际测量值存在一定差异,这与理论流场模型的近似性,数值模拟求解模型的近似性,求解中经验系数选取,测量误差等因素有关. 试验结果表明采用数值模拟方法来研究优化气室结构参数具有可行性.

参考文献:

[1] SIAL F S, PERSSON S P E. Vacuum nozzle design for seed metering[J]. T ASABE, 1984, 27(3): 688-696.
[2] SHAFII S, HOLMES R G. Air-jet seed metering, a theoretical and experimental study [J]. T ASABE, 1990, 33(5):1432-1438.

[3] KARAYEL D , BARUT Z B , OZMERZI A. Mathematical modeling of vacuum pressure on a precision seeder [J]. Biosyst Eng, 2004,87(4): 437-444.
[4] 袁月明,马旭,金汉学,等. 气吸式水稻芽种排种器气室流场研究[J]. 农业机械学报, 2005, 36 (6): 42-45.
[5] 廖庆喜,李继波,覃国良. 气力式油菜精量排种器气流场仿真分析[J]. 农业机械学报, 2009, 40(7): 78-82.
[6] 李耀明,赵湛,陈进,等. 气吸振动式排种器吸种性能数值模拟与试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(10): 95-99.
[7] 夏红梅,李志伟,甄文斌. 气力板式蔬菜排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2010,41(6):56-60.
[8] 夏红梅,李志伟,汪刘一. 气力板式蔬菜排种器吸种种动力学模型研究[J]. 华南农业大学学报,2011,32(1):112-116.
[9] 林建忠,阮晓东,陈邦国,等. 流体力学[M]. 北京:清华大学出版社, 2005.
[10] 张鸣远,景思睿,李国君. 高等工程流体力学[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2006.
[11] 周光炯,严宗毅,许世雄,等. 流体力学(上,下册)[M]. 北京:高等教育出版社, 2003.
[12] 王新月. 气体动力学基础[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2006.
[13] 韩占忠,王敬,兰小平,等. FLUNET: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.
[14] 任重. ANSYS 实用分析教程[M]. 北京:北京大学出版社, 2003.
[15] 张洪信. 有限元基础理论及 ANSYS 应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2005.

【责任编辑 霍 欢】