

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.10.013

圆盘雾化器风力性能数值模拟与试验*

周良富¹ 张晓辛² 吕晓兰¹ 丁素明¹

(1. 农业部南京农业机械化研究所, 南京 210014; 2. 南京林业大学经济管理学院, 南京 210037)

【摘要】 采用试验与计算机模拟相结合方法,研究了圆盘雾化器最佳工作转速,不同转速下圆盘雾化器的气流速度场,并进行试验验证。结果显示,圆盘雾化器在选定的叶轮下,最佳工作转速为1400 r/min;圆盘雾化器气流速度场基本呈轴对称形状,气流速度以一定的扩散角在中心平面内扩散,而且气流速度沿中心线逐步衰减;模拟值与试验值相关性较好。

关键词: 圆盘雾化器 风力性能 风场 数值模拟 试验

中图分类号: S224.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)10-0072-04

Numerical Simulation and Experiment on Wind Performance of Disc Atomizer

Zhou Liangfu¹ Zhang Xiaoxin² Lü Xiaolan¹ Ding Suming¹

(1. Nanjing Research Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China

2. College of Economics and Management, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract

In order to investigate the characteristic of properties of the disc atomizer, the experimental and computational simulation methods were adopted. The optimum working rotational speed and the air velocity field at different rotational speeds of the disc atomizer were studied and validated by the experiment data. The results showed that the optimum rotational speed was 1400 r/min at the selected impeller. The velocity field of the disc atomizer was axial symmetry. The velocity of central plane diffused at a fixed angle and decayed along the centre line. The simulation data was closely related to the experiment data.

Key words Disc atomizer, Wind performance, Velocity field, Numerical simulation, Experiment

引言

风送喷雾技术是依靠风机产生的强大气流将雾滴吹送到植株冠层的各个部位,气流不仅有助于雾滴穿透稠密的冠层并促使叶片翻动,提供叶片背面药液附着率,而且具有喷雾质量好、用药省、用水少和生产率高等优点^[1]。

采用计算流体动力学模型方法研究果树冠层对果园风送喷雾机气流的影响结果显示,沿气流方向

树冠后方气流速度严重衰减,而且树冠对气流在垂直面上分布均匀性较显著^[2-4];张晓辛等进行的喷雾参数及雾滴分布特性试验研究表明,喷雾距离、风量、喷雾角度是影响雾滴在果树内分布质量的几个关键因素^[5-7]。Endalew 等对果园风送喷雾机风场的 CFD 模型进行了研究,通过在控制方程上增加源项来模拟树冠对其气流的影响,详细分析了气流强度和喷雾角度对气流穿透性的影响^[8-10]。Katul 等在果树冠层计量、树冠对气流穿透性和雾滴在冠层

收稿日期: 2011-12-30 修回日期: 2012-01-17

* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2008AA100903)和江苏省自然科学基金资助项目(BK2010123)

作者简介: 周良富,助理研究员,主要从事植保机械与流体仿真技术研究,E-mail: zhouliangfuky@sina.com

通讯作者: 张晓辛,教授,博士生导师,主要从事农业工程研究,E-mail: xxzhangl@jlonline.com

中的沉积影响方面作了研究^[11-13]。王贵恩等对果树冠层实时检测、仿形喷雾位置控制系统方面取得了一些研究成果^[14-15]。先前研究主要针对较大型风送喷雾机喷雾性能,而对轻便型的风送雾化部件研究较少。圆盘雾化器不仅适用于仿形果园喷雾装置的特殊要求,而且可以用于温室大棚的降温与植保作业,在畜禽养殖中也可以运用圆盘雾化器进行消毒作业。圆盘雾化器结构研究较充分,但其风力性能还缺乏系统研究,本文采用试验与计算机模拟相结合方法对其风力性能进行研究。

1 圆盘雾化器结构特点

圆盘雾化器结构如图 1 所示,主要由雾化器主壳体、叶轮、喷雾环管、防滴喷头、GL712-4.85 型三相电动机及其连接件组成。选用外径为 400 mm 的叶轮,该叶轮具有高效、低噪音和耐腐蚀的特点,而且坚固、质量小、对电动机和轴承产生的磨损较少,压力较小。轴套采用硅铝合金,叶片采用工业级玻璃钢聚酯胺制造,强度高、韧性好。喷雾环管内嵌于雾化器主壳体内,均布配置 8 个防滴喷头。为减小质量,采用铝壳电动机驱动风送式雾化器,所有连接件均采用铝材料。

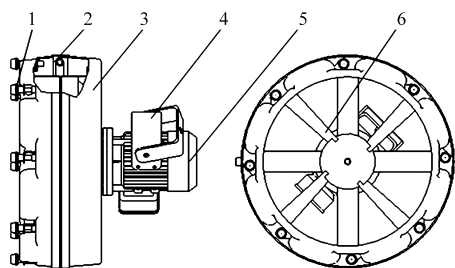


图 1 圆盘雾化器结构图

Fig. 1 Structural drawing of disc atomizer

1. 防滴喷头 2. 喷雾环管 3. 圆盘雾化器主壳体
4. 电动机连接件 5. GL712-4.85 型三相电动机 6. 叶轮

2 圆盘雾化器性能

2.1 风机功率和风量

风机功率与风量计算公式为

$$P = \frac{Mn}{9550} \quad (1)$$

$$Q = 3600vS \quad (2)$$

式中 P ——风机额定功率, kW

M ——风机轴扭矩, N·m

n ——风机转速, r/min

Q ——风机风量, m³/h

v ——风道截面平均风速, m/s

S ——风道截面面积, m²

试验装置如图 2 所示。主要仪器和装置包括 TYPEY160M1-2 型电动机、JW-3A 型扭矩仪、ZJ 型转矩转速传感器、风速仪、风筒(直径 410 mm, 长 4 000 m)及各支撑部件。

叶轮转速在 1 000、1 100、1 200、1 300、1 400 和 1 500 r/min 下,采用扭矩仪分别测量风机轴扭矩 T_n , 风速仪 3 次测量取平均得到风筒内气流速度 v 。由式(1)~(2)算出风机功率和风量。

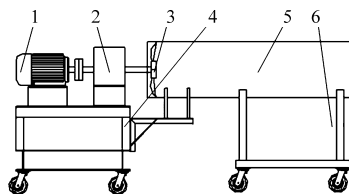


图 2 功率和风量测试装置简图

Fig. 2 Sketch of testing equipment of power and air volume

1. TYPEY160M1-2 型电动机 2. ZJ 型转矩转速传感器 3. 叶轮
4. 电动机支撑 5. 风筒 6. 风筒支撑

2.2 圆盘雾化器风场

2.2.1 研究方法

采用试验与 CFD 数值模拟相结合方法,研究圆盘雾化器风筒内部及外部流场。试验主要为计算机模拟边界条件的确定提供依据,试验和模拟数据之间的耦合度是衡量 CFD 模型及求解参数设置的标准。测试了圆盘雾化器在 1 100、1 200 和 1 400 r/min 时,其外部气流速度分布特点。

2.2.2 模拟区域及边界条件

为使模拟气流为充分发展流动,将模拟计算域扩大到包括风筒和直径为 5 m、高为 10 m 的外部圆柱区域,计算域及网格划分如图 3 所示。采用绝对压力进行计算,忽略地面对其风场的影响,运用二阶隐式耦合求法,进出口均采用 pressure—far—field 边界类型。

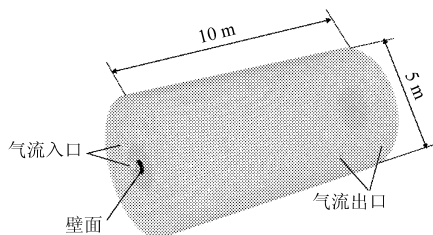


图 3 模拟计算域及网格划分

Fig. 3 Simulation geometry and meshing

2.2.3 模型理论基础

空间区域内亚音速气流扩散是属于完全湍流问题,假定空气为理想气体、忽略热量交换。采用基于湍流动能和扩散率的标准两方程 $k-\varepsilon$ 模型。主要基于理想气体状态方程、气体质量守恒方程、运动方程、能量方程、湍流动能和扩散率输运方程,即

$$p = R\rho T \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{V} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla p \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(e + \frac{\mathbf{V}^2}{2} \right) + \mathbf{V} \cdot \nabla \left(e + \frac{\mathbf{V}^2}{2} \right) = -\frac{1}{\rho} \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k V_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon V_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (8)$$

式中 p ——气体压力 ρ ——气体密度
 R ——气体常数 T ——温度
 e ——气体内能 \mathbf{V} ——流速矢量
 G_k ——由于平均速度梯度引起的湍流动能 k 的产生项
 G_b ——由于浮力引起的湍流动能 k 的产生项
 Y_M ——可压缩湍流中脉动扩张的贡献
 μ ——流体粘性系数
 μ_t ——湍流粘性系数
 $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$ ——经验常数
 $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ ——与湍流动能 k 和耗散率 ε 对应的 Prandtl 数
 S_k, S_ε ——自定义源项

根据 Launder 等的推荐值及后来的试验验证, 模型常数取值如下: $C_{1\varepsilon} = 1.44$ 、 $C_{2\varepsilon} = 1.92$ 、 $C_{3\varepsilon} = 0.09$ 、 $\sigma_k = 1.0$ 和 $\sigma_\varepsilon = 1.3$ ^[16]。有关 G_k 、 G_b 、 Y_M 可参照文献[16]。

3 结果与分析

3.1 圆盘雾化器最佳工作转速确定

圆盘雾化器要求在一定功率下获得最大风量, 而功率和风量都随叶轮转速变化。由图 4 可以看出, 功率和风量都随叶轮转速的增大而加大, 在 1 000 ~ 1 400 r/min 时, 功率和风量都随转速增大而平缓增加, 在 1 400 ~ 1 500 r/min 时, 功率有明显的剧增, 而风量增大不显著, 所以选 1 400 r/min 为圆盘雾化器的最佳工作转速。

3.2 圆盘雾化器气流速度场分析

研究结果表明, 叶轮转速在 1 100、1 200 和 1 400 r/min 时, 其气流速度场分布特性无明显差异, 叶轮转速为 1 400 r/min 时的速度云图, 如图 5 所示。

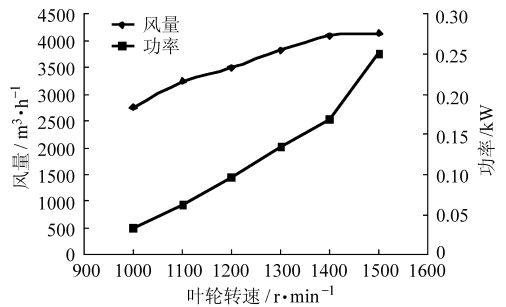


图 4 叶轮风量与功率曲线

Fig. 4 Air volume and power curve of impeller

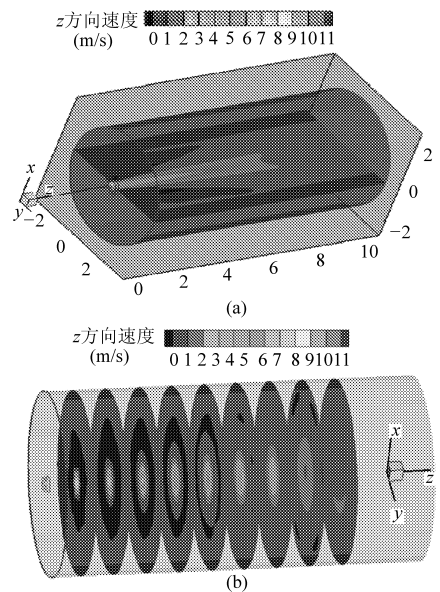


图 5 叶轮转速为 1 400 r/min 时的速度云图

Fig. 5 Velocity contours at 1 400 r/min

(a) 中心平面速度云图 (b) 不同截面速度云图

从图 5 可以看出, 圆盘雾化器气流速度场基本呈轴对称形状, 气流速度以一定的扩散角在中心平面内扩散, 而且气流速度沿中心线逐步衰减。在距离圆盘雾化器 7 m 处, 气流速度衰减到零。

3.3 试验对比分析

在圆盘雾化器出口平行截面(每 1 m 间距)区域内, 用细绳将该截面划分成 0.25 m × 0.25 m 小区域, 风速仪探头放置在小区域节点位置测量风速, 每个测试点风速取 3 次平均。叶轮转速为 1 400 r/min 时, 距圆盘雾化器出口为 1、2、3 m 的截面上气流速度模拟值与试验值的对比, 如图 6 所示。

由图 6 可知, 距圆盘雾化器出口为 1、2、3 m 的截面上气流速度模拟值与试验值的变化趋势是一致的, 但在中心轴线处模拟值普遍比试验值大, 究其原因因为模拟将雾化器的阵风假设为稳态的平行风。

对各个截面上风速模拟值与试验值进行相关性分析, 如图 7 所示。可以得出模拟值与试验值具有比较好的相关性, 相关曲线为 $y = 0.88x + 0.58$, 其决定系数 $R^2 = 0.8896$ 。

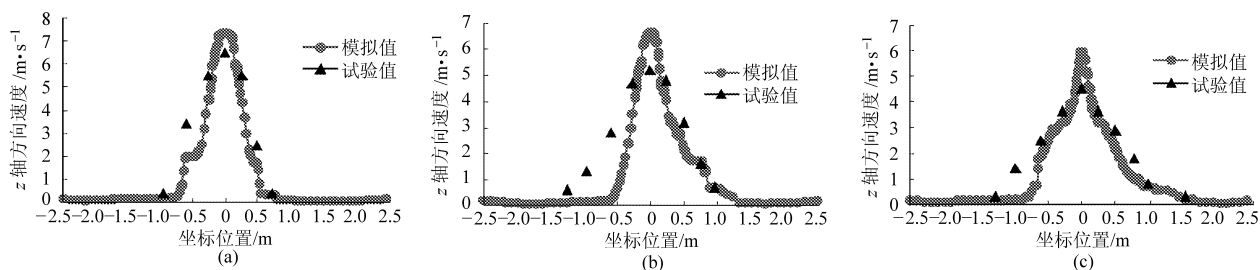


图 6 叶轮转速为 1 400 r/min 时,不同截面上速度模拟值与试验值对比

Fig. 6 Comparison of simulation and experiment velocity on different sections at 1 400 r/min

(a) 1 m (b) 2 m (c) 3 m

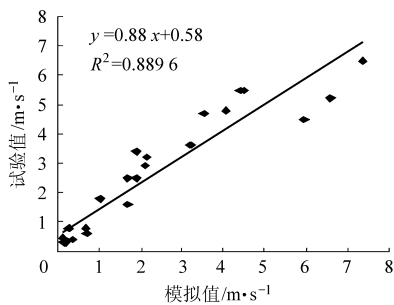


图 7 速度模拟值与试验值相关性分析

Fig. 7 Correlation analysis on simulation and experiment velocity

4 结论

(1) 圆盘雾化器在选定的叶轮下,最佳的工作转速为 1 400 r/min。

(2) 圆盘雾化器外部风场基本呈轴对称形状,气流速度以一定的扩散角在中心平面内扩散,而且气流速度沿中心线逐步衰减,气流逐渐平缓。

(3) 圆盘雾化器外部风场的模拟值与试验值具有很好的相关性,相关曲线为 $y = 0.88x + 0.58$,决定系数 $R^2 = 0.8896$ 。

参 考 文 献

- 屠豫钦,李秉礼. 农药应用工艺学导论[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 360 ~ 367.
- Isaev S A, Baranov P A, Kudryavtsev N A, et al. Numerical analysis of the angle of attack on turbulent flow around a thick profile with vortex cells at high reynolds numbers[J]. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2003, 76(4): 877 ~ 887.
- Delele M A, Jaeken P, Debaer C, et al. CFD prototyping of an air-assisted orchard sprayer aimed at drift reduction[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2007, 55(1): 16 ~ 27.
- Farooq M, Salyani M. Modeling of spray penetration and deposition on citrus tree canopies[J]. Transactions of the ASAE, 2004, 47(3): 619 ~ 627.
- 洪添胜,王贵恩,陈羽白,等. 果树施药仿形喷雾关键参数的模拟试验研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(4): 104 ~ 107. Hong Tiansheng, Wang Guien, Chen Yubai, et al. Profile modeling of spray parameters of chemical solution application to fruit trees[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(4): 104 ~ 107. (in Chinese)
- 张晓辛,吕晓兰,丁素明,等. 果园风送式喷雾机仿形喷雾试验研究[J]. 中国农机化, 2011(3): 68 ~ 72. Zhang Xiaoxin, Lv Xiaolan, Ding Suming, et al. Experimental research on profiling spray of air-assisted orchard sprayer[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2011(3): 68 ~ 72. (in Chinese)
- 祁力钧,赵亚青,王俊,等. 基于 CFD 的果园风送式喷雾机雾滴分布特性分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(2): 62 ~ 67. Qi Lijun, Zhao Yaqing, Wang Jun, et al. CFD simulation and experimental verification of droplet dispersion of air-assisted orchard sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(2): 62 ~ 67. (in Chinese)
- 陈发元,汪小昂,丁为民,等. 果树喷雾用圆盘风扇三维气流速度场数值模拟与验证[J]. 农业机械学报, 2010, 41(8): 51 ~ 55. Chen Fayuan, Wang Xiaochan, Ding Weimin, et al. Numerical simulation and experimental verification of 3-D air velocity field of disk fan used in orchard sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(8): 51 ~ 55. (in Chinese)
- Endalew A M, Debaerb C, Rutten N, et al. A new integrated CFD modelling approach towards air-assisted orchard spraying. Part I. Model development and effect of wind speed and direction on sprayer airflow[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 71(2): 128 ~ 136.
- Delele M A, De Moor A, Verboven P, et al. CFD modelling of air flow patterns from an air assisted orchard sprayer[J]. Aspects of Applied Biology, 2004, 71(2): 303 ~ 310.

组合为: 脱粒间隙 15 mm、滚筒齿顶线速度 25 m/s、
脱离间隙 55 mm、上盖板导向 4 次、凹板筛筛分包角
204°、凹板筛筛孔尺寸 36 mm × 15 mm、振动筛曲柄
转速 404 r/min、16 mm 方孔编织筛、离心风机转速

1 787 r/min、振动筛振幅 30 mm, 较优参数组合下的
机具收获性能指标为: 脱净率 99.10%、破碎率
0.43%、夹带损失率 0.223%、含杂率 2.57% 和吹出
损失率 0.15%。

参 考 文 献

- 李媛媛, 孙曙光, 林爱琴. 凹板间隙对谷物联合收获机作业性能影响的试验研究[J]. 装备制造技术, 2009(3): 22~23.
Li Yuanyuan, Sun Shuguang, Lin Aiqin. Experimental study on the effect of concave clearance to grain combine harvester's work performance[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2009(3): 22~23. (in Chinese)
- 丁为民, 姬长英, 鲁植雄, 等. 农业机械学: 下册[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996: 69~74.
- 蔺公振, 杨建明, 时心荣, 等. 悬挂式联合收获机清选装置的试验[J]. 洛阳工学院学报, 1994, 15(4): 21~25.
Lin Gongzhen Yang Jianming Shi Xinrong, et al. Experiment of cleaning mechanism of tractor-mounted grain combine[J]. Journal of Luoyang Institute of Technology, 1994, 15(4): 21~25. (in Chinese)
- 陈魁. 试验设计与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 276~293.
- 吴崇友, 丁为民, 张敏, 等. 油菜分段收获脱粒清选试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(8): 72~76.
Wu Chongyou, Ding Weimin, Zhang Min, et al. Experiment onthreshing and cleaning in two-stage harvesting for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(8): 72~76. (in Chinese)
- 杜金萍. 模糊正交法在 Gr15 钢切削用量优化中的应用[J]. 轴承, 2007(3): 26~28.
- 徐立章, 李耀明, 张立功, 等. 轴流式脱粒清选装置试验台的设计[J]. 农业机械学报, 2007, 38(12): 85~88.
Xu Lizhang, Li Yaoming, Zhang Ligong, et al. Development of test-bed of axial threshing and cleaning unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(12): 85~88. (in Chinese)
- 张建瓴, 赵华海, 周学成, 等. 珠江-130 型梳脱式联合收获机的部件试验研究[J]. 农业工程学报, 2001, 17(5): 63~67.
Zhang Jianling, Zhao Huahai, Zhou Xuecheng, et al. Experimental research on modules of stripper combine harvester Zhujiang-130[J]. Transactions of the CSAE, 2001, 17(5): 63~67. (in Chinese)
- 陶桂香, 衣淑娟. 水稻轴流脱粒机理研究现状分析[J]. 农机化研究, 2007(11): 239~240.
Tao Guixiang, Yi Shujuan. Analysis of the present situation and existing problems on corn axial threshing mechanics[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007(11): 239~240. (in Chinese)
- 李耀明, 邓玲黎, 丁为民. 小型联合收割机清选装置的技术分析[J]. 农机化研究, 2004(3): 55~56.
Li Yaoming, Deing Lingli, Ding Weiming. Analysis and improvement design on the cleaning mechanism of small grain combine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2004(3): 55~56. (in Chinese)

(上接第 75 页)

- Katul G G, Mahrt L, Poggi D, et al. One-and two-equation models for canopy turbulence[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2004, 113(2): 81~109.
- Phattaralerphong J, Sathornkich J, Sinoquet H. A photographic gap fraction method for estimating leaf area of isolated trees: assessment with 3D digitized plants[J]. Tree Physiology, 2006, 26(1): 1123~1136.
- Brown R B, Sidahmed M M. Simulation of spray dispersal and deposition from a forestry airblast sprayer—part II: droplet trajectory model[J]. Transactions of the ASAE, 2001, 44(1): 11~17.
- 俞龙, 赵祚喜, 洪添胜. 果树冠层参数实时检测系统[J]. 农业机械学报, 2009, 40(增刊): 194~197.
Yu Long, Zhao Zuoxi, Hong Tiansheng. Real time measuring system for fruiter canopy parameters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(Supp.): 194~197. (in Chinese)
- 王贵恩, 洪添胜, 李捷, 等. 果树施药仿形喷雾的位置控制系统[J]. 农业工程学报, 2004, 20(3): 81~84.
Wang Guien, Hong Tiansheng, Li Jie, et al. Position control system of profile modeling spray for fruit trees[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(3): 81~84. (in Chinese)
- 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.
- 王军锋, 黄继伟, 黄俏梅, 等. 气力辅助静电雾化的 PIV 试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(3): 251~254.
Wang Junfeng, Huang Jiwei, Huang Qiaomei, et al. PIV experimental study on air-assisted electrostatic spray[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(3): 251~254. (in Chinese)