

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.01.017

波纹表面接触土壤颗粒动态响应仿真分析*

刘国敏^{1,2} 邹猛³ 徐涛¹ 李建桥³

(1. 吉林大学机械科学与工程学院, 长春 130025; 2. 吉林建筑工程学院, 长春 130118;

3. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130025)

摘要: 为揭示波纹表面的降阻机制,以蚯蚓体表为研究对象,应用离散单元法对接触土壤颗粒动态响应进行仿真分析。仿真得出:波纹表面接触的土壤颗粒运动过程微观可分为“分散—团聚—分散”3个阶段,宏观表现为土壤与波纹试样之间形成孔隙;波纹表面接触颗粒的 X 向位移与试样的前进方向一致,呈线性增加,平均位移为60.33 mm, Y 向速度随着波纹表面的凹凸起伏呈正弦变化、产生微震,且大于光滑表面接触颗粒振幅,波纹表面接触颗粒和波纹的接触位置直接决定受力的大小和方向。分析表明:波纹表面接触颗粒的运动幅度和频率大于光滑表面,颗粒产生微震,且波纹表面与土壤间存在孔隙,从而使得接触面积减小、阻力降低。

关键词: 土壤颗粒 波纹表面 离散元 仿生 降阻

中图分类号: TB17; Q811.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)01-0085-05

Simulation on Dynamic Behavior of Soil Particle Contact with Wavy Surface

Liu Guomin^{1,2} Zou Meng³ Xu Tao¹ Li Jianqiao³

(1. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China

2. Jilin Architectural and Civil Engineering Institute, Changchun 130118, China

3. Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: The earthworm's surface was selected as the object to study the mechanism of resistance reduction of wavy surface, and discrete element method (DEM) was used to simulate the dynamic response of the contact soil particle with wavy surface. The results of simulation showed that the contact time was shorter when the particle contacted with wavy surface, and the particle separated at 1.0 s. Macroscopic showed that the porosity was formed between the wavy sample and soil particle. X direction displacement of the contact particle was increased linearly and in the same direction, the average displacement was 60.33 mm. Y direction velocity was changed with the concave-convex of the wavy surface like sinusoidal variation, and generated microseism, the amplitude of the wavy surface was bigger than the smooth surface. Contact position directly determined the size and direction of the contact force. Analysis showed that the amplitude and frequency of the contact particle with wavy surface was greater than smooth surface. The results can supply the reference to design the bionic wavy surface.

Key words: Contact soil particle Wavy surface Discrete element method Bionic Resistance reduction

引言

土壤动物具有优异的脱附减阻功能,其表面普

遍存在几何非光滑是其主要原因之一^[1],几何非光滑即一定几何形状的结构单元随机地或规律地分布于表面某些部位,结构单元的形状有波纹形、鳞片

收稿日期: 2011-12-25 修回日期: 2012-03-19

* 国家自然科学基金重点资助项目(50635030)、高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20110061120050)、吉林省科技发展计划资助项目(201101024)和工程仿生教育部重点实验室开放基金资助项目(K201005)

作者简介: 刘国敏, 博士后, 吉林建筑工程学院副教授, 主要从事工程仿生学研究, E-mail: lgm951@163.com

通讯作者: 邹猛, 副教授, 主要从事工程仿生学和车辆地面力学研究, E-mail: zoumeng@jlu.edu.cn

形、凸包形、凹坑形、刚毛形等^[2-5]。不同种属的土壤动物大多具有不同的非光滑形态;同一土壤动物表面不同部位呈现的几何非光滑形态也各不相同。几何非光滑结构单元在力学特性上可表现为刚性的、弹性的或柔性的^[6-8]。在尺度上,也有所不同,可分为宏观非光滑和微观非光滑^[9-12]。因此,研究与非光滑体表接触的土壤颗粒动态响应,对揭示非光滑体表减粘降阻机理将起到关键作用。

为揭示波纹表面降阻机制,以离散单元法为研究手段,以蚯蚓体表形貌为研究对象,针对与表面试样接触的土壤颗粒,分析试样前进时,接触土壤颗粒的位移、速度和力的变化规律。

1 仿真模型建立

1.1 波纹表面

根据离散元仿真需要,将蚯蚓表面简化成轴对称的刚性体,从蚯蚓的身体中截取包含若干个体节的形体,其母线为^[7]

$$r = r_0 + a \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \quad (1)$$

式中 r_0 ——蚯蚓的平均半径

a ——蚯蚓表面波纹表面的振幅

λ ——波长

仿真时 r_0 为 20 mm, a 为 5 mm, λ 为 80 mm, 试样结构尺寸如图 1 所示。

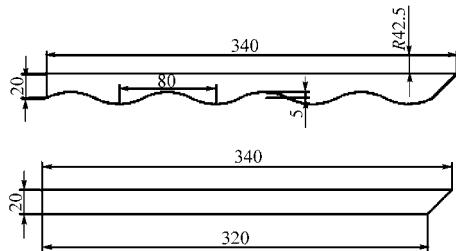


图 1 波纹表面模型

Fig. 1 Simulation model of wavy surface

1.2 土壤力学模型

离散单元法中的模拟土壤内摩擦角为 39.2° , 凝聚力为 2.31 MPa, 弹性模量为 42.5 MPa, 泊松比为 0.32。其主应力差-轴向应变关系曲线如图 2a 所示, 体积应变-轴向应变关系曲线如图 2b 所示。

2 波纹表面接触颗粒动态响应

2.1 颗粒轨迹

在对接触颗粒动态响应研究中选取了与试样表面接触的 5 个颗粒, 为了便于观察, 其他颗粒存在但不显示, 颗粒上的黑色箭头为速度矢量, 效果如图 3 所示。仿真时载荷 20 N, 速度 10 mm/s。仿真运行时记

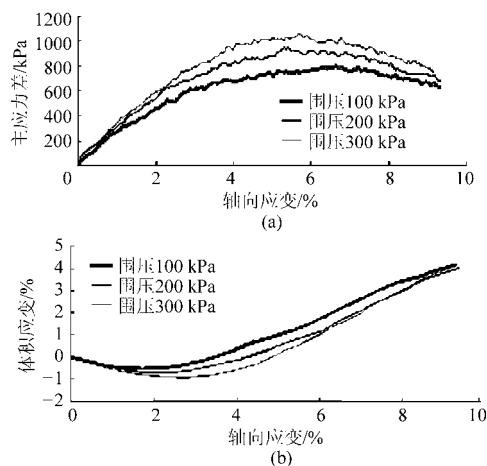


图 2 离散元模拟土壤双轴试验结果

Fig. 2 Biaxial test results of DEM simulation

(a) 主应力差-轴向应变 (b) 体积应变-轴向应变

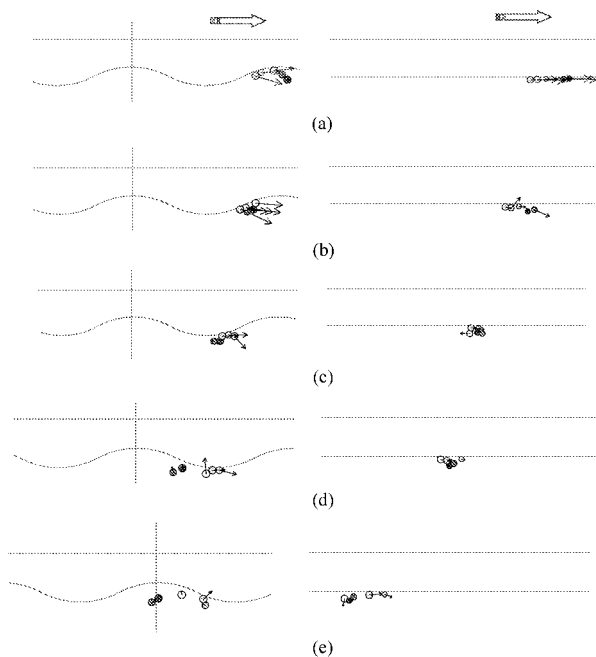


图 3 界面颗粒运动情况

Fig. 3 Interface particles movement

(a) 0 s (b) 0.5 s (c) 1.0 s (d) 1.5 s (e) 2.0 s

录这 5 个颗粒的轨迹、速度、接触力的变化过程。

由图 3 可知, 在试样水平运动的 2.0 s 内, 与波纹表面接触的 5 个颗粒在波纹表面作用下, 颗粒运动表现为分散—团聚—分散的过程, 在 1.0 s 时颗粒与表面分离, 波纹表面与土壤颗粒间形成孔隙, 宏观表现如图 4a 所示。与光滑表面接触的土壤颗粒运动过程与波纹板相似, 也表现为分散—团聚—分散, 但颗粒与表面没有形成孔隙, 即土壤颗粒一直与光滑板表面接触, 宏观表现如图 4b 所示。

在通过图 3 和图 4 定性分析界面颗粒运动情况后, 将采用定量的方法分析这 5 个颗粒的位移、速度和受力情况。图 5 为仿真运行 30 s 过程中与波纹表面接触颗粒轨迹变化情况。由图 5 可知, 由于波纹

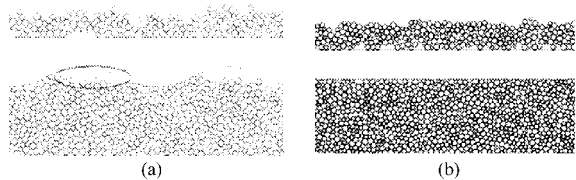


图 4 体表颗粒接触情况

Fig. 4 Contact particles between interface

(a) 波纹体表 (b) 光滑体表

表面对颗粒的摩擦力作用,与表面接触颗粒的 X 方向与波纹试样前进方向一致,位移呈线性增加。其中,颗粒 1 的位移为 38.41 mm,颗粒 2 为 65.15 mm,颗粒 3 为 63.42 mm,颗粒 4 为 23.18 mm,颗粒 5 为 111.48 mm,平均 X 向位移为 60.33 mm。

由图 5 可知,与波纹表面接触颗粒在 Y 向的轨迹变化随着波纹表面的凹凸起伏周期变化,波形为正弦波,但振幅略有下降,这说明颗粒由初始的接触状态逐渐被其他颗粒取代接触位置,从而离波纹表面越来越远,波纹表面对其作用力越来越小。

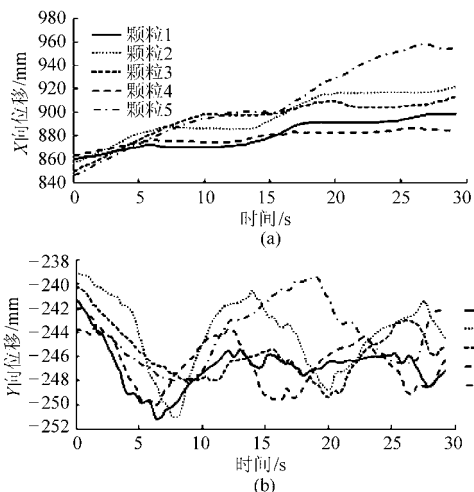


图 5 波纹表面接触颗粒位移

Fig. 5 Displacement of particles contact with wavy surface

(a) 颗粒 X 向位移 (b) 颗粒 Y 向位移

图 6 为仿真运行 30 s 过程中与光滑表面接触颗粒轨迹变化。由图 6 可知,5 颗粒 X 向运动与波纹表面接触颗粒 X 向运动相似。其中,颗粒 1 的位移为 76.63 mm,颗粒 2 为 29.05 mm,颗粒 3 为 62 mm,颗粒 4 为 19.28 mm,颗粒 5 为 50.22 mm,平均 X 向位移为 47.43 mm。而由图 6 可知,由于 5 颗粒与接触的其他颗粒相互作用,在 Y 方向呈现不规则的振荡状态,最大振幅为 5.1 mm,小于波纹表面的最大振动幅度 12.2 mm。

2.2 颗粒速度

图 7 为仿真运行 30 s 过程中与波纹表面接触颗粒速度变化情况。由图 7 可知,颗粒 X 方向速度基本大于零,仅部分时间速度小于零,也就是说颗粒主

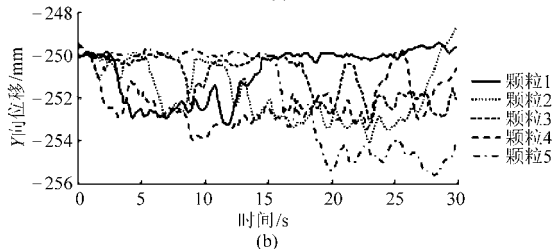
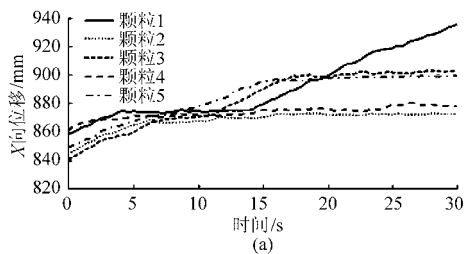


图 6 光滑表面接触颗粒位移

Fig. 6 Displacement of particles contact with smooth surface

(a) 颗粒 X 向位移 (b) 颗粒 Y 向位移

要运动方向与试样一致,但在与其他颗粒作用时会向反方向运动。由图 7 可知接触颗粒 Y 方向速度随波纹的起伏上下波动,这与图 3 的颗粒速度矢量图显示一致。

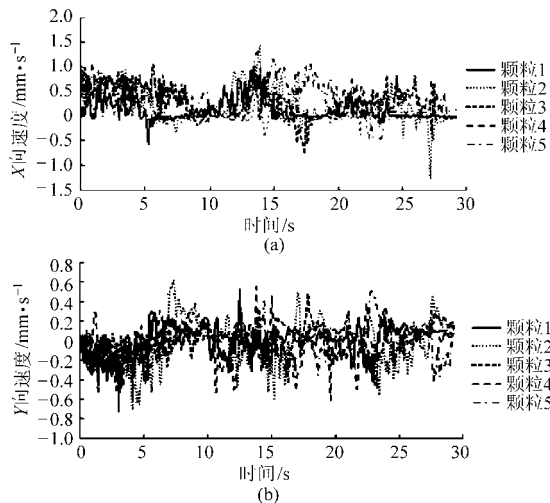


图 7 波纹表面接触颗粒速度

Fig. 7 Velocity of particles contact with wavy surface

(a) 颗粒 X 向速度 (b) 颗粒 Y 向速度

图 8 为仿真运行 30 s 过程中与光滑表面接触颗粒速度变化,由图 8 可知,与光滑表面接触颗粒在光滑试样前进时 X 向速度基本为零,而由图 8 可知 Y 向速度在零上下振动。

2.3 颗粒接触力

图 9 为仿真运行 30 s 过程中与光滑表面接触颗粒受力情况。由图 9 可知,颗粒 X 方向受力随波纹变化呈现起伏,当遇到波纹凸起的前进方向时,颗粒受力明显增大,然后随着颗粒的向前运动颗粒与凸起的背面接触,颗粒受力减小。另外,由图 9 可知颗粒 Y 方向受力变化类似于 X 方向变化,与波纹的接

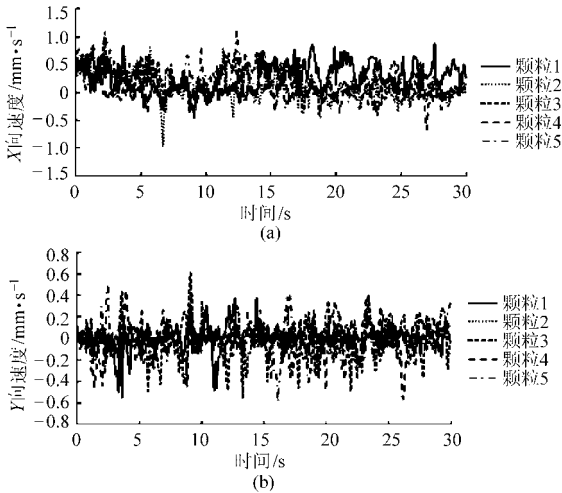


图8 光滑表面接触颗粒速度

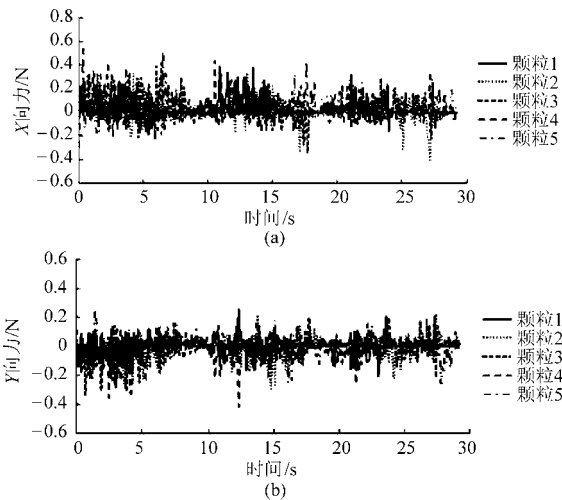
Fig. 8 Velocity of particles contact with smooth surface
(a) 颗粒 X 向速度 (b) 颗粒 Y 向速度

图9 波纹表面接触颗粒接触力

Fig. 9 Contact force between particle and wavy surface
(a) 颗粒 X 向力 (b) 颗粒 Y 向力

触位置直接决定受力的大小和方向。

图10为仿真运行30s过程中与光滑表面接触颗粒受力情况。由图10可知,随着光滑表面前进,与表面接触的这5个颗粒受其他颗粒和试样共同作用,受力在零线上下呈现波动变化。

3 结论

(1) 波纹表面接触的颗粒与表面的接触时间较

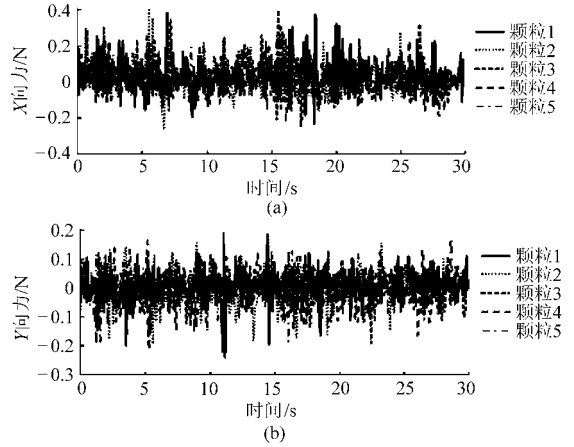


图10 光滑表面接触颗粒接触力

Fig. 10 Contact force between particle and smooth surface
(a) 颗粒 X 向力 (b) 颗粒 Y 向力

短,在1.0s时颗粒与表面分离,宏观表现为土壤与波纹试样之间形成孔隙,而与光滑表面接触的土壤颗粒接触时间长,无孔隙形成,但与波纹表面和光滑表面接触颗粒的运动都表现为分散—团聚—分散的过程。

(2) 波纹和光滑表面接触颗粒的X方向运动与试样的前进方向一致,位移呈线性增加,5颗粒平均位移分别为60.33mm和47.43mm;波纹表面接触颗粒的Y方向运动大致随着波纹表面的凹凸起伏周期变化,且大于光滑表面接触颗粒Y向振幅。

(3) 波纹表面接触颗粒X方向速度基本大于零,仅部分时段小于零,即颗粒主要运动方向与试样一致,但在与其他颗粒作用时会向反方向运动;接触颗粒Y方向速度随波纹的起伏上下波动。光滑表面接触颗粒在光滑试样前进时X向速度和Y向速度变化小于波纹表面。

(4) 波纹表面接触颗粒X方向受力随波纹变化呈现起伏,颗粒Y方向受力变化类似于X方向变化,与波纹的接触位置直接决定受力的大小和方向。随着光滑表面前进,与表面接触的这5个颗粒受其他颗粒和试样共同作用,受力在零线上下呈现波动。

(5) 波纹表面接触颗粒的运动幅度和频率大于光滑表面,颗粒产生微震,波纹表面与土壤间存在孔隙,接触面积和粘附减小,阻力降低。

参 考 文 献

- 任露泉. 地面机械脱附减阻仿生研究进展[J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2008, 38(9): 1353 ~ 1364.
Ren Luquan. Progress in the bionic study on anti-adhesion and resistance reduction of terrain machines [J]. Science China Series E—Technological Sciences, 2008, 38(9): 1353 ~ 1364. (in Chinese)
- Tong J, Ren L Q, Chen B C, et al. Characteristics of adhesion between soil and solid surface [J]. Journal of Terramechanics, 1994, 31(2): 93 ~ 105.
- Northen M T, Turner K L. Meso-scale adhesion testing of integrated micro-and nano-scale structures [J]. Sensors and Actuators: A, 2006, 130(31): 583 ~ 587.

- 4 孙久荣, 孙博宁, 韦建恒, 等. 蚯蚓表面电位的测定及其与运动的关系[J]. 吉林工业大学学报, 1991, 21(4): 18~24.
Sun Jiurong, Sun Boning, Wei Jianheng, et al. Measurement and determination earthworm skin potential related to moving [J]. Journal of Jilin University of Technology, 1991, 21(4): 18~24. (in Chinese)
- 5 Persson B N J. Study on the mechanism of adhesion in biological systems[J]. Journal of Chemical Physics, 2003, 118(16): 7 151~7 164.
- 6 Zu Y Q, Yan Y Y. Numerical simulation of electro osmotic flow near earthworm surface[J]. Journal of Bionic Engineering, 2006, 3(4): 179~186.
- 7 施卫平, 任露泉, Yan Yuying. 蚯蚓蠕动过程中非光滑波纹形体表的力学分析[J]. 力学与实践, 2005, 27(3): 73~74.
Shi Weiping, Ren Luquan, Yan Yuying. The creeping mechanism of the non-smooth wavy surface of earthworm [J]. Mechanics in Engineering, 2005, 27(3): 73~74. (in Chinese)
- 8 施卫平, 任露泉. 波纹形非光滑推土板减粘降阻的简化力学模型[J]. 农业机械学报, 2005, 36(1): 93~95, 103.
Shi Weiping, Ren Luquan. Simplified dynamic model of adhesion and resistance reduction for the corrugated non-smooth bulldozing plate [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(1): 93~95, 103. (in Chinese)
- 9 刘国敏, 李建桥, 田喜梅, 等. 蚯蚓非光滑表面减粘降阻试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(9): 138~143.
Liu Guomin, Li Jianqiao, Tian Ximei, et al. Experiment on reduction of soil adhesion force and sliding resistance of earthworm non-smooth surface [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(9): 138~143. (in Chinese)
- 10 刘国敏, 邹猛, 李建桥. 蚯蚓体表与土壤接触界面动态行为仿真[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2010, 40(6): 1 609~1 613.
Liu Guomin, Zou Meng, Li Jianqiao. Interfacial dynamics simulation between soil and earthworm surface [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2010, 40(6): 1 609~1 613. (in Chinese)
- 11 周健, 苏燕, 池永. 颗粒流模拟土的工程特性[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(3): 391~396.
Zhou Jian, Su Yan, Chi Yong. Simulation of soil properties by particle flowcode [J]. Chinese Journal of Geotechnical, 2006, 28(3): 391~396. (in Chinese)
- 12 Li J Q, Kou B X, Liu G M, et al. Resistance reduction by bionic coupling of the earthworm lubrication function [J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53(11): 2 989~2 995.
- 13 郭志军, 杜干, 周志立, 等. 土壤耕作部件宏观触土曲面减阻性能研究现状分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 47~52.
Guo Zhijun, Du Gan, Zhou Zhili, et al. Actuality analysis of resistance-reducing properties on soil cultivating components with different macroscopic soil-engaging surfaces [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 47~52. (in Chinese)
- 14 杨望, 蔡敢为, 杨坚. 土壤直剪试验的动力学仿真[J]. 农业机械学报, 2011, 42(7): 96~101.
Yang Wang, Cai Ganwei, Yang Jian. Dynamics simulation of direct shear test [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 96~101. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 79 页)

- 17 Shih T H, Liou W W, Shabbir A, et al. A new  $k-\varepsilon$  eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows-model development and validation [J]. Computers & Fluids, 1995, 24(3): 227~238.
- 18 江帆, 黄鹏. Fluent 高级应用与实例分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- 19 吕宏兴, 裴国霞, 杨玲霞. 水力学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.
- 20 贺益英, 赵懿珺, 孙淑卿, 等. 弯管局部阻力系数的试验研究 [J]. 水利学报, 2003, 34(11): 54~58.  
He Yiyang, Zhao Yijun, Sun Shuqing, et al. Experimental study on local loss coefficient of bend in pipeline [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(11): 54~58. (in Chinese)
- 21 华绍曾, 杨学宁. 实用流体阻力手册 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.
- 22 李玲, 李玉梁, 黄继汤, 等. 三叉管内水流流动的数值模拟与实验研究 [J]. 水利学报, 2001, 32(3): 49~52.  
Li Ling, Li Yuliang, Huang Jitang, et al. Numerical simulation and experimental study on water flow in Y-type tube [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 32(3): 49~52. (in Chinese)