

基于仿生耦合功能表面的离心水泵增效机制研究*

田丽梅¹ 梅浩然¹ 李新红² 王银慈¹ 杨 乐² 邵 鹏²

(1. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130022; 2. 吉林市奥吉通泵业有限责任公司, 吉林 132016)

摘要: 海豚特殊的皮肤结构具有减阻功能,模仿其结构,设计了一种具有实际工程应用价值的仿生耦合功能表面,将其应用到离心式水泵的叶轮表面,进行水泵增效试验研究。研究表明:这种仿生耦合功能表面可提高离心式水泵效率3%及以上;仿生耦合功能表面面层材料的硬度对水泵的效率影响显著。分析认为其增效机制主要在于:表面面层材料与基底材料仿生结构的耦合变形降低了叶轮流道壁面的摩擦力及吸收流体介质对叶轮进、出口湍动能的方式实现对流体介质的控制,从而降低离心泵水力损失,实现增效。

关键词: 水泵 仿生耦合功能表面 增效

中图分类号: TB17 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)04-0065-05

Enhancement Mechanism Investigation of Centrifugal Pump
Based on Bionic Coupling Functional Surface

Tian Limei¹ Mei Haoran¹ Li Xinhong² Wang Yinci¹ Yang Le² Shao Peng²

(1. Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130022, China

2. Jilin City AO JI TONG PUMP Co., Ltd., Jilin 132016, China)

Abstract: Dolphin's special skin structure has characteristics of drag reduction, by mimicking this structure, a kind of bionic coupling functional surface which has practical engineering application value was designed. It was applied on the surface of a centrifugal pump impeller to investigate the efficiency enhancement of the pump through contrast experimental method. The experimental results showed that the pump efficiency was improved by 3% by using this kind of bionic coupling functional surface. The hardness of surface material had influence on the pump efficiency. The mechanism of efficiency enhancement of bionic coupling functional surface was the coupling deformation between elastic surface material and bionic structure on the basal material, which can decrease the drag of impeller surface, absorb some energy and effectively reduce the turbulent kinetic energy of the inlet and outlet of impeller, thus, the hydraulic loss would be decreased.

Key words: Pump Bionic coupling functional surface Efficiency enhancement

引言

泵的耗电量约占全国总发电量的20%,其耗油量约占全国总油耗的5%^[1],我国泵类产品的平均设计效率为75%,比国际先进水平低约3~5个百分点,存在极大的节能潜力。针对泵类产品效率低下的问题,提高其效率的方法主要有:抽级改造法、改造或更换叶轮法、涂层法^[2-5]和单因素仿生方

法^[6-7]。采用单因素仿生方法只在一定的流量范围内,增效效果显著^[7],这是因为,生物功能体现是多种互相依存、互相影响的因素通过一定的机制耦合、协同作用的结果,是一种生物耦合^[8-9],具有这种生物耦合功能的典型例子当属海豚的皮肤。研究表明海豚之所以能以较低的动力输出维持较高的游动速度与其特殊的皮肤结构关系密切^[10-12]。海豚皮肤具有3层结构^[13]:最外面是表皮,其上有薄而光滑

收稿日期: 2014-06-25 修回日期: 2014-07-17

* 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51105168)和长春市重大科技攻关专项资助项目(13KG33)

作者简介: 田丽梅,副教授,主要从事机械仿生科学与工程研究, E-mail: limeitian@jlu.edu.cn

的角质膜;中间层是真皮层,有许多乳突,这些乳突在运动中能承受很大的压力;最里面由交错的胶质和弹性纤维组成。当海豚快速游动时,随着阻力增加,海豚光滑表皮、具有弹性的皮下组织以及纤维结节形成优异的耦合状态,这种耦合状态可以有效地降低阻力^[14-17]。本文模仿海豚皮肤结构,设计一种具有实际工程应用价值的仿生耦合功能表面,将其应用到离心式水泵的叶轮上,进行水泵效率的试验,并对其增效机制进行研究,为仿生耦合技术在工程上的应用提供借鉴。

1 试验方法

1.1 试验模型设计

1.1.1 仿生耦合功能表面的设计

海豚皮肤结构示意图如图 1a 所示,受这种特殊皮肤结构的启发,考虑到这种结构在工程上实现的难易程度,建立如图 1b 所示的结构表面。该表面由 2 层不同材质的材料按照一定结构镶嵌而成,基底采用硬质材料,并在上面分布有一定形状和尺寸的仿生结构,类似于海豚真皮的结节结构;其表面覆有一层一定厚度、且具有较大弹性的表面材料,该材料类似水生动物的表面皮肤,可根据水流载荷、流速的高低,通过其弹性变形,吸收部分能量,起到稳定流体的作用。随着流体载荷的进一步增加,表面弹性材料与基底非光滑形态耦合在一起,形成形态、材料之间的相互耦合,这种通过表面弹性材料的变形控制流态的过程,称为动态耦合过程或是动态减阻过程,并将这种具有材料与形态因素耦合的表面称为仿生耦合功能表面。本文仿生耦合功能表面的底层材料结构及尺寸示意图如图 1c 所示,其面层材料与基层材料的仿生形态镜像如图 1d 所示,上下两层仿生形态相互嵌合, $L = L', D = D', H = H'$ 。

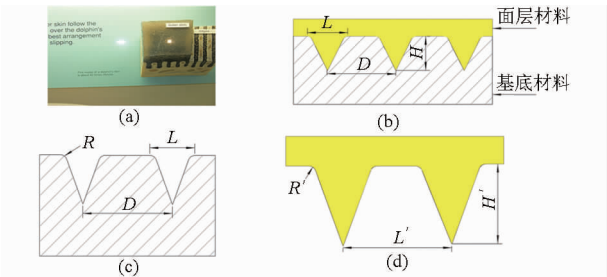


图 1 仿生耦合功能表面设计原理及结构示意图
Fig.1 Structure model of dolphin skin and bionic coupling functional surface (BCFS)

(a) 海豚皮肤结构 (b) 仿生耦合功能表面结构
(c) 基底材料及仿生形态 (d) 面层材料及结构

1.1.2 仿生耦合水泵构建及实现原理

本文仿生耦合水泵是指在不改变原水泵水力模

型、安装等情况下,在叶轮表面上构建仿生耦合功能表面。仿生耦合功能表面在水泵叶轮表面或是泵壳表面的构建原理:充分利用现有泵叶轮表面,以其表面作为基底材料,在泵叶轮表面上加工出仿生非光滑形态,采用浸沾的方法,进行高分子表面材料的涂覆成型。通过上述 2 个步骤,实现仿生耦合功能表面在叶轮表面上的构建。本文仿生耦合水泵具体实施步骤如下:首先,仿生形态在泵叶轮表面上的实现。利用中间介质,采用一次铸造成型方法^[18]直接铸造在叶轮复杂流道表面,仿生形态采用横截面为正三角形的沟槽,沟槽结构参数为 $L = 0.5\text{ mm}, D = 2L, H = 0.866L$,铸造在水泵叶轮表面的沟槽如图 2a 所示。其次,表面弹性材料的涂覆。在本试验中,选择邵氏硬度为 A50 及 A80 的聚氨酯材料作为面层材料。聚氨酯材料由分子式为 $\text{C}_{10}\text{H}_8\text{N}_2\text{O}_2 \cdot \text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}_3$ 的聚氨酯预聚体与分子式为 $\text{C}_{13}\text{H}_{12}\text{N}_2\text{Cl}_2$ 的固化剂按照质量比 25:3 的方式加热混合而成,置于真空中抽真空后,将铸有沟槽形态的的叶轮浸蘸在混合液中,从浸蘸液中提出叶轮,安装在特制旋转轴上,按一定速度旋转,直至混合液凝固,则一层薄而均匀的聚氨酯涂层涂覆在叶轮表面。之后,将叶轮置于硫化机中进行首次硫化,首次硫化温度为 120°C ,硫化时间 15 min。为使叶轮上的仿生耦合功能表面具有更好的力学性能,需进行二次硫化,二次硫化温度为 100°C ,硫化时间 8h。按照此方法形成的仿生耦合叶轮如图 2b 所示,两只相同叶轮装配成二级水泵如图 2c 所示。

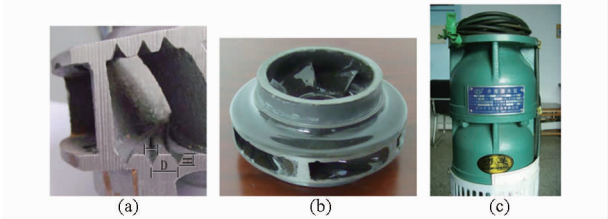


图 2 仿生水泵构建

Fig.2 Realization process of bionic coupling pump
(a) 仿生沟槽 (b) 仿生耦合叶轮 (c) 仿生耦合水泵

1.2 试验方法及设备

1.2.1 试验样件的设计

按照上述试验模型的设计及实现方法,设计 2 种仿生耦合水泵样件,与普通水泵在 300 h 内进行效率对比试验,待水泵运转平稳后,每隔 2 h 采集一次试验数据,样件情况说明如表 1 所示。

1.2.2 试验设备、试验标准及数据处理

本试验在吉林市奥吉通泵业有限责任公司潜水泵试验台完成,该试验台测试精度为 0.5%。试验台示意图如图 3 所示。本试验标准根据 GB/T

表 1 样品说明
Tab.1 Samples description

样品号	样品说明
样品 1	仿生耦合水泵,面层材料的邵氏硬度为 A50,面层材料厚度 0.5 mm
样品 2	仿生耦合水泵,面层材料的邵氏硬度为 A80,面层材料厚度 0.5 mm
样品 3	普通水泵,叶轮表面不作任何改动

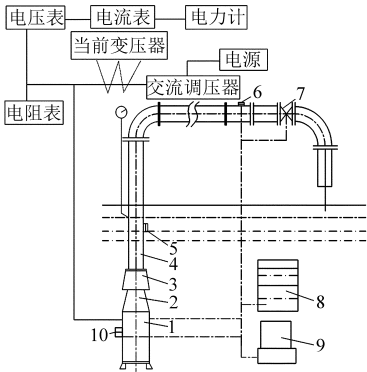


图 3 试验台示意图
Fig.3 Experimental set-up

1. 电动机 2. 水泵入口 3. 水泵出口 4. 管道 5. 压力传感器
6. LWGY 涡轮流量传感器 7. 流量阀 8. PMS 水泵综合自动测试系统 9. 数据处理系统 10. 转速差计量器

12785—2002,该标准规定了井用潜水泵的型式、型号、基本参数、连接尺寸、技术要求、试验方法、检验规则、标志和包装等,适用与潜水电机连成一体潜入水中提取清水流量 2~500 m³/h,扬程 14~598 m 的井用潜水泵。试验精度等级选择 1 级,测定参数的允许误差及实际测试误差如表 2 所示。

表 2 测定参数的允许误差及实际测试误差
Tab.2 Allowed error of measured value and actual test error

测定参数	允许范围/%	实际误差/%
流量	±1.5	±0.5
扬程	±1.0	±0.5
轴功率	±0.35	±0.1
电动机输入功率	±0.35	±0.1
转速	±0.35	±0.1

泵的实际效率可以表示为

$$\eta_p = \frac{\rho g Q' H'}{P'} \times 100\% \tag{1}$$

式中 ρ ——流体密度 Q' ——实测流量
 H' ——总扬程 P' ——实测轴功率

试验过程中,当电动机的驱动泵旋转时,由于存在一定的不稳定因素,电动机的实际输出轴功率每次并不完全一致,因此泵的旋转速度每次随着轴功率输出的不同而发生改变,为了确保试验数据具有

可比性,需将实测流量 Q' 、总扬程 H' 及实测轴功率 P' 根据标准旋转速度 n_{sp} 进行标准化处理,在本试验中,标准旋转速度为 2 850 r/min, n 为实测旋转速度。标准转换公式为

$$Q = Q' \frac{n_{sp}}{n} \tag{2}$$

$$H = H' \left(\frac{n_{sp}}{n} \right)^2 \tag{3}$$

$$P = P' \left(\frac{n_{sp}}{n} \right)^3 \tag{4}$$

$$\eta_{sp} = \eta_p \tag{5}$$

式中 Q 、 H 、 P ——标准化后流量、总扬程及轴功率
 η_{sp} ——转换后的泵效率

1.3 试验结果及分析

1.3.1 试验观察结果及分析

300 h 后,样品 1、2、3 升井,取出叶轮观察,升井后的叶轮如图 4 所示。

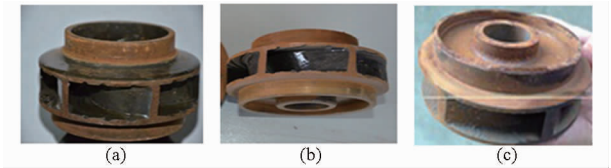


图 4 试验后的叶轮

Fig.4 Impeller after experiment

(a) 样品 1 (b) 样品 2 (c) 样品 3

观察发现,两组仿生耦合叶轮在叶轮流道内部尤其是叶轮边缘部位,其涂层颜色均发生了改变,表明在长时间的运行过程中,过流部件与流体介质作用强烈,由于摩擦导致温度的升高,导致表面材料颜色的改变,尤其是表面材料硬度为 A50 的仿生耦合叶轮,颜色变化更明显。样品 2 即仿生耦合水泵面层材料硬度为 A80 的叶轮过流表面与试验前基本一致,表面没有锈蚀点。而样品 1 即仿生耦合叶轮面层材料为 A50 的叶轮,表面磨损较为严重,肉眼可看到锈蚀点。这表明,经过 300 h 的连续运转,涂层叶轮表面的聚氨酯材料已经部分磨掉,流体介质直接与金属基底接触。样品 3 即普通叶轮的流道内部锈蚀严重,肉眼可见麻点。

上述观察结果表明,邵氏硬度为 A80 的仿生耦合水泵,其耐磨性能优于邵氏硬度为 A50 的仿生耦合水泵,更具有工程实际应用价值。

1.3.2 仿生耦合水泵效率随时间变化关系分析

(1) 仿生水泵 2 h 时各水泵效率对比

由图 5 可以看出,在运行时间为 2 h 时,在整个流量范围内,2 种仿生耦合水泵的效率都高于普通水泵效率,尤其是表面材料的硬度为邵氏硬度 A50 的仿生水泵,其最高效率达到 75%,邵氏硬度为

A80 的仿生耦合水泵,其效率也达到 74%,而普通水泵的最高效率不到 70%,效率提高 4~5 个百分点。上述试验结果表明:相比于普通水泵,仿生耦合水泵全流量段范围内效率提高显著而且稳定,在 2 h 内,面层材料硬度较低的材料对于提高水泵的效率,优势更明显。

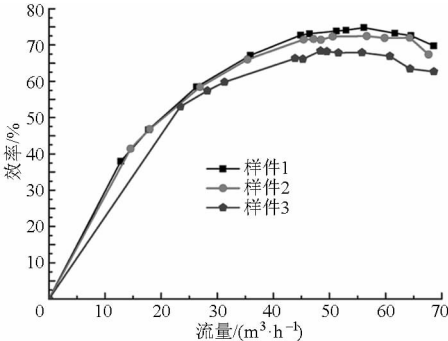


图 5 仿生水泵与普通水泵在运行时间为 2 h 时,流量关系曲线

Fig. 5 Relationship between flow capacity and pump efficiency of all samples after running two hours

(2)100 h 内仿生耦合水泵效率随时间变化

在额定流量为 50 m³/h 下,水泵运行 100 h 内,普通水泵的效率基本维持在 70% 左右。图 6 为额定流量为 50 m³/h 下,仿生耦合水泵效率在 100 h 内效率随时间变化曲线。连续运行 75 h 内,样件 1 即面层材料硬度为 A50 的仿生耦合水泵,其效率提高最为显著,分析认为是由于硬度为 A50 的材料,其弹性变形较大,柔性面层材料依靠一定的厚度与基底材料的非光滑形态实现耦合,从而对流体介质的顺应性更强所致。超过 75 h,由于流体介质对面层材料的磨损,其表面厚度发生变化,从而减弱了面层材料依靠其弹性变形与非光滑形态的耦合能力,也就降低了对流体介质的控制能力,其增效能力随着时间的增加出现降低。然而 75 h 之后,样件 2 的效率与 40 h 之前的效率基本持平,表现为:样件 2 即面层材料硬度为 A80 的仿生耦合水泵的增效效果优于样件 1,且效率仍然维持在 73.5% 以上,与普通水泵效率相比,增效幅度仍然超过 3%。分析认为由于样件 2 面层材料的硬度较高,其耐磨性能优于面层材料为 A50 的仿生耦合水泵,面层材料的厚度变化不大,效率随着时间的增加,降低并不明显。上述试验结果表明,仿生耦合水泵面层材料的厚度对其效率具有重要影响。此外,从工程应用意义上来说,样件 2 即面层材料的硬度稍高一些的材料更具有实际应用价值。

(3)300 h 内样件 2 效率-流量关系曲线

图 7 为仿生耦合水泵样件 2 在 300 h 内,其流量与效率关系曲线。从图中可以看出,样件 2 运行

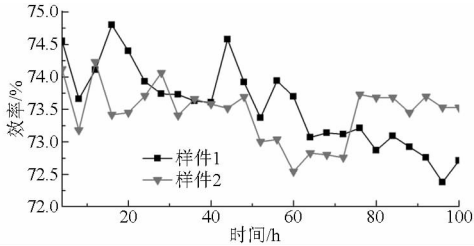


图 6 仿生耦合水泵在额定流量 50 m³/h 下效率随时间变化曲线

Fig. 6 Efficiency change of bionic coupling pump at rated flow of 50 m³/h

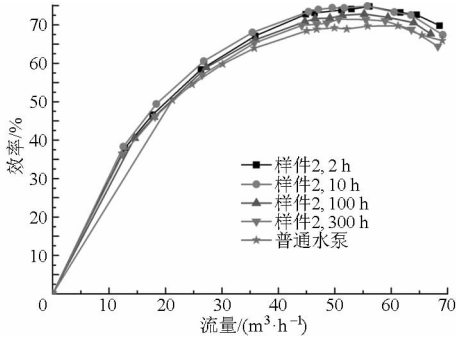


图 7 样件 2 不同时间段效率曲线对比

Fig. 7 Efficiency curve of sample 2 at different times

10 h 左右,水泵效率最高,最高效率为 74.08%,优于运行 2 h 左右的效率,说明经过一段时间的磨合后,水泵的效率反而提高,这点与普通水泵的运行效率的走向是一致的;在 100 h 和 300 h 时,其效率在全流量段范围之内逐渐下降,尤其是在 300 h 时,其最高效率只有 72% 左右,尽管如此,其效率仍然高于普通水泵的效率 70% (该效率为普通水泵运行 10 h 时效率)。分析认为,由于仿生耦合水泵的表面面层在流体介质的作用下,出现了磨损,面层材料的厚度出现了变化,从而面层材料与基层材料的耦合状态发生了变化,进而影响了对流体介质的控制能力,从而导致水泵效率的下降。

2 仿生耦合功能表面增效机制分析

水泵的效率损失主要包括:容积损失、机械损失和水力损失,采用仿生耦合功能表面主要降低的是水泵的容积损失,即减少的是水流与过流部件边壁间摩擦阻力引起的损失以及叶轮进、出口撞击引起的能量损失。

2.1 仿生耦合功能表面降低过流部件摩擦阻力

流体流过水泵叶轮时,流体介质与叶轮表面接触分为理论接触面与实际接触面,理论接触面是指水泵叶轮为刚性表面时,在流体介质的作用下,其表面不产生变形,此时,理论接触面与实际接触面重合,如图 8a 所示,其中 o 点为理论接触点,o'为实际接触点,此时,o 点与 o'点重合,流体的速度在 o 及

o' 的速度都为零；实际接触面是指叶轮表面采用仿生耦合功能表面时，在流体压力的作用下，其表面材料的弹性与基底仿生形态耦合产生弹性变形，此时理论接触面与实际接触面分离，实际接触表面在弹性变形的作用下发生下移（图 8b），理论接触点 o 点位置相应的下移至到 o' 与 o'' 处，在实际接触点 o' 与 o'' 处速度为零，而理论接触点的速度不再为零，分别为 u_i 与 u'_i 。此时，仿生耦合功能表面的速度梯度比刚性表面的速度梯度要小，由于两相邻流体层之间的单位面积上的内摩擦力（实际上是表面力中的切应力，又称剪应力）与两流体层间的速度梯度 $\frac{du}{dy}$ 成正比，即剪应力 $\tau = \mu \frac{du}{dy}$ ，其中 μ 为动力粘度。由于仿生耦合功能表面的速度梯度要小于刚性光滑表面，其剪应力变小，则其表面摩擦力变小。因此，仿生耦合功能表面通过面层材料与基底仿生结构的耦合变形，改变了流体边界层内部的速度梯度，从而达到

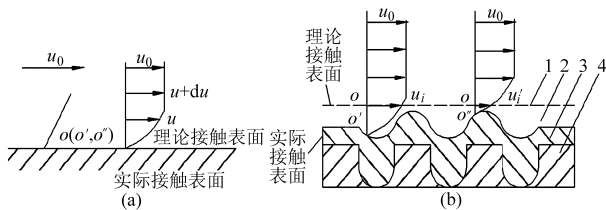


图 8 刚性表面与仿生耦合功能表面速度梯度分析图

Fig. 8 Schematic diagram of velocity gradient of rigid surface and BCFS

1. 理论接触表面 2. 变形区 3. 面层材料 4. 基底材料

到降低过流部件摩擦阻力，从而降低水流与过流部件边壁间摩擦阻力引起的损失。

2.2 仿生耦合功能表面降低能量损失

从能量的观点来看，流体流经过流部件表面时，流体克服粘滞摩擦阻力做功，其动能不断地转化成热能而全部耗散；而流经具有仿生耦合功能表面的过流部件时，由于其弹性变形，可将部分能量以弹性势能的形式存储，而不是全部转化为热能而耗散，在其恢复形变的过程中，弹性力做功又把弹性势能转化成流体动能，避免了流固交界面能量的过分交换而带来的能量损失，特别是叶轮进、出口撞击引起的能量损失，从而实现水泵增效的目的。

3 结论

- (1) 仿生耦合功能表面可显著提高离心式水泵的效率。
- (2) 仿生耦合功能表面面层材料的硬度及厚度对水泵效率的影响较大。
- (3) 仿生耦合功能表面通过表面面层材料与基底材料仿生结构的耦合变形，使其实际接触面下移，使得其边界层内部的速度梯度降低，从而减小叶轮流道壁面的摩擦阻力；通过仿生耦合功能表面的变形，避免了流固交界面能量的过分交换而带来的能量损失，特别是叶轮进、出口撞击引起的能量损失，达到降低离心泵水力损失，实现增效的目的。

参 考 文 献

1 袁寿其,刘厚林. 泵类流体机械研究进展与展望[J]. 排灌机械,2007,25(6):46-51.
Yuan Shouqi, Liu Houlin. Research progress and prospect on fluid machinery-pumps[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2007, 25(6): 46-51. (in Chinese)

2 王志高,何成连. 减阻是水泵节能的有效措施[J]. 水泵技术,2008(1):37-41.

3 郑小松. 利用环氧树脂复合涂料修复水泵过流部件汽蚀麻面[J]. 排灌机械,2006,24(3):39-41.
Zheng Xiaosong. Using epoxy resin compound coating to repair water pump flowed part's cavitation pockmarked face[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2006,24(3):39-41. (in Chinese)

4 白晓宁,胡庆宏,李永兵,等. 高分子涂层在泵维修技术中的应用[J]. 热处理技术与装备,2011,32(3):33-35.

5 郑晓涛,赵鹏晓. ARC 高含量陶瓷在泵类过流件的成功应用[J]. 全面腐蚀控制,2008,22(3):29-30.

6 Christoph P Pauly. What is a shark doing in this pump [J]. World Pumps, 2001, 423:15-16.

7 任露泉,彭宗尧,陈庆海,等. 离心式水泵仿生非光滑增效的试验研究[J]. 吉林大学学报:工学版,2007, 37(3): 101-103.
Ren Luquan, Peng Zongyao, Chen Qinghai, et al. Experimental study on efficiency enhancement of centrifugal water pump by bionic non-smooth technique[J]. Journal of Jilin University:Engineering and Technology Edition,2007,37(3): 101-103. (in Chinese)

8 Ren L Q. Progress in the bionic study on anti-adhesion and resistance reduction of terrain machines[J]. Sci. China Ser. E-Tech. Sci., 2009, 52(2): 273-284.

9 Ren L Q, Liang Y H. Biological couplings: classification and characteristic rules[J]. Sci. China Ser. E-Tech. Sci., 2009, 52(10): 2791-2800.

10 Zhang Hui, Yoshuyake N, Hagiwara Y. Changes in drags acting on an angled wavy silicon-rubber plate as a model of the skin folds of a swimming dolphin[M]// Yoshuyake N, Hagiwara Y. Bio-mechanisms of swimming and flying. Tokyo:Springer,2008: 91-102.

12 Elmaloglou S, Diamantopoulos E. Simulation of soil water dynamics under subsurface drip irrigation from line sources [J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(11): 1587 – 1595.

13 李耀刚, 王文娥, 胡笑涛. 基于 HYDRUS-3D 的涌泉根灌土壤入渗数值模拟 [J]. *排灌机械工程学报*, 2013, 31(6): 546 – 552.
Li Yaogang, Wang Wen'e, Hu Xiaotao. Numerical simulation of soil water infiltration under bubbled root irrigation based on HYDRUS-3D [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2013, 31(6): 546 – 552. (in Chinese)

15 Mitchell W H, Sparks D L. Influence of subsurface irrigation and organic additions on top and root growth of field corn [J]. *Agronomy Journal*, 1982, 74(6): 1084 – 1088.

16 雷廷武, 江培福, Vincent F Bralts, 等. 负压自动补给灌溉原理及可行性试验研究 [J]. *水利学报*, 2005, 36(3): 298 – 302.
Lei Tingwu, Jiang Peifu, Vincent F Bralts, et al. A simple infiltration method for estimating soil hydraulic properties of unsaturated soils [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(3): 298 – 302. (in Chinese)

17 江培福, 雷廷武, Vincent F Bralts, 等. 土壤质地和灌水器材对负压灌溉出水流量及土壤水运移的影响 [J]. *农业工程学报*, 2006, 22(4): 19 – 22.
Jiang Peifu, Lei Tingwu, Vincent F Bralts, et al. Effects of soil textures and emitter material on the soil water movement and efficiency of negatively pressurized irrigation system [J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(4): 19 – 22. (in Chinese)

18 邹朝望, 薛绪掌, 张仁铎. 负水头灌溉原理与装置 [J]. *农业工程学报*, 2007, 23(11): 17 – 22.
Zou Chaowang, Xue Xuzhang, Zhang Renduo. Principle and equipment of negative pressure irrigation [J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(11): 17 – 22. (in Chinese)

19 邹朝望, 薛绪掌, 张仁铎. 基于负水头下土壤水分一维水平运动理论与实验研究 [J]. *土壤通报*, 2006, 37(5): 841 – 846.
Zou Chaowang, Xue Xuzhang, Zhang Renduo. Hydraulic characteristics of one-dimensional horizontal soil water flow [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(5): 841 – 846. (in Chinese)

20 Šimůnek J, van Genuchten M T, Sejna M. Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages, and related codes [J]. *Vadose Zone Journal*, 2008, 7(2): 587 – 600.

21 van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44(5): 892 – 898.

22 Bufon V B, Lascano R J, Bednarz C. Soil water content on drip irrigated cotton: comparison of measured and simulated values obtained with the Hydrus-2D model [J]. *Irrigation Science*, 2012, 30(4): 259 – 273.

23 Pang Liping, Close M E, Watt J P C, et al. Simulation of picloram, atrazine, and simazine leaching through two New Zealand soils and into groundwater using HYDRUS-2D [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2000, 44(1): 19 – 46.

24 张东, 赵娟, 鲍露, 等. SPSS 软件在试验设计与分析课程教学中的应用 [J]. *安徽农业科学*, 2013, 41(23): 9847 – 9849.
Zhang Dong, Zhao Juan, Bao Lu, et al. Exploration of teaching reform on curriculum of experimental design and analysis based on statistical softwares [J]. *Anhui Agricultural Sciences*, 2013, 41(23): 9847 – 9849. (in Chinese)

(上接第 69 页)

11 Fish F E. Biomimetics: determining engineering opportunities from nature [J]. *Proc. SPIE 7401, Biomimetics and Bioinspiration*, 2009: 740109.

12 Fish F E, Paul W Weber, Mark M Murray, et al. the tubercles on humpback whales' flippers: application of bio-inspired technology [J]. *Integrative and Comparative Biology*, 2001, 51: 203 – 213.

13 孙久荣, 戴振东. 非光滑表面仿生学 (II) [J]. *自然科学进展*, 2008, 18(7): 727 – 733.
Sun J R, Dai Z D. Bionic non-smooth surface (II) [J]. *Progress in Nature Science*, 2008, 18(7): 727 – 733. (in Chinese)

14 田丽梅, 王银慈, 高桂桦, 等. 镶嵌式仿生耦合功能表面流体介质控制机制研究 [J]. *农业机械学报*, 2014, 45(6): 324 – 328.
Tian Limei, Wang Yinci, Gao Zhihua, et al. Fluid control mechanism of mosaic bionic coupling functional surface [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(6): 324 – 328. (in Chinese)

15 Tian L M, Gao Z H, Ren L Q, et al. The study of the efficiency enhancement of bionic coupling centrifugal pumps [J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2013, 35(4): 517 – 524.

16 Lee Y C, Thompson H M, Gaskell P H. Thin film flow over flexible membranes containing surface texturing: bio-inspired solutions [J]. *Proc. IMech E, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2009, 223: 337 – 345.

17 Fish F E. Influence of hydrodynamic-design and propulsive mode on mammalian swimming energetics [J]. *Australian Journal of Zoology*, 1994, 42(1): 79 – 101.

18 田丽梅, 卜兆国, 陈庆海, 等. 肋条状仿生非光滑表面铸造成型方法 [J]. *农业工程学报*, 2011, 27(8): 189 – 194.
Tian Limei, Bu Zhaoguo, Chen Qinghai, et al. Casting method of rib-like bionic non-smooth surface [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(8): 189 – 194. (in Chinese)