

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.12.020

# 旋转喷头变压节能供水变域喷洒控制策略与试验\*

汤跃 骆寅 袁寿其 刘俊萍

(江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

**【摘要】** 针对目前变域喷洒喷头能耗高, 喷洒形状不理想等问题, 通过深入分析水泵变压运行和喷头变域喷洒机理, 得到了喷头实现变域喷洒时两种调节方法的运行规律。推导了变频器频率  $f_v$  与喷头旋转  $\alpha$  角度所用时间  $t$  之间的关系方程, 提出了一种实现喷头变域喷洒的开环控制策略和通过试验设定控制规律的方法。通过水力能耗的计算发现, 采用变频调速方法实现变域喷洒比采用动静片方法节约 27% 的能量。

**关键词:** 喷灌 旋转喷头 变压供水 变域喷洒 节能分析

**中图分类号:** S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)12-0093-06

## Variable Range of Precision Spraying of Lawn Sprinkler for Control Strategy by Variable Pressure Technology

Tang Yue Luo Yin Yuan Shouqi Liu Junping

(Technical and Research Center of Fluid Machinery Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

### Abstract

There are several factors influence the range of complete fluidic sprinkler. They are inlet press, sprinkler elevation, sectional area, rotate speed, step frequency, pipe length, signal junction depth and so on. Experimental studies of these factors were carried out respectively, the regularity of range influencing factors was found. The inlet press and sectional area were direct proportion to the range of the sprinkler, rotate speed and step frequency were inverse proportion to the range of the sprinkler, pipe length and signal junction depth were less-influence the range of the sprinkler. Orthogonal array of five factors and four levels were selected to carry out the experiment. The dates were analyzed by the method of synthesis point rating. The graduations of range influencing factors were achieved after the orthogonal experiments. They were inlet press, sprinkler elevation, sectional area, signal junction depth, pipe length in sequence. The results showed that compared with active static slice method, variable frequency speed control could save energy by 27%.

**Key words** Sprinkler irrigation, Rotating nozzle, Variable pressure water supply, Spraying in variable range, Energy saving analysis

### 引言

目前, 实现全圆和扇形喷洒的技术和喷灌设备比较成熟, 但在喷洒域方面存在漏喷或重叠系数较大等问题, 为此国内外不少学者提出了变域喷洒的思想, 并在旋转式喷头上采用若干途径和方法进行了变域喷洒的试验研究, 但基本上是通过节流的方

法调节所需的流量和压力以达变域喷洒的目的<sup>[1~4]</sup>。而这些方法存在以下问题: 当需要喷射距离小于喷头最大射程时, 需要通过调节动静截流片的面积或喷射仰角来损耗掉多余的能量, 使喷射距离缩短, 进而达到变域喷洒的目的, 这种方法能耗大; 目前, 非圆形喷洒域变量喷洒喷头还只能实现对矩形和三角形等规则形状的地域喷洒, 不但喷洒形

收稿日期: 2010-09-21 修回日期: 2010-10-12

\* 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2006AA100211)、国家杰出青年科学基金资助项目(50825902)和江苏省农业支撑计划资助项目(BE2010393)

作者简介: 汤跃, 副研究员, 主要从事泵系统节能及测控技术研究, E-mail: tomt@ujs.edu.cn

状不够理想,而且对于不规则形状地域难以实现。

随着变频调速技术的日趋成熟,变频调速供水系统的应用日益广泛,出现了变频调速变压供水技术,即通过使用变频调速装置调节水泵转速,使其沿装置扬程特性曲线运行<sup>[5~6]</sup>。通过对变频器的控制,使泵按照需求的规律精确运行,国内学者对喷头变域喷洒的变压控制策略进行了初步的仿真试验和分析<sup>[7~8]</sup>。

本文拟从变压运行机理出发,对旋转喷头实现变域精确节能喷洒开展试验研究。

## 1 变域喷洒机理

实现变域喷洒的要求是:在喷洒过程中随着喷头旋转,要求射程能按照一定的规律变化。而对于一个固定的喷洒装置,其射程主要与喷头的工作压力和流量有关,因此对水泵而言,则需要按照一定的规律来提供流量和扬程。

以正方形喷洒域为例,如图1所示,由喷洒形状的几何关系,当喷头从OA转向OB时,其射程与转角的变化关系为

$$R = \begin{cases} \frac{R_0}{\sqrt{2}\cos\left(\frac{\pi}{4} - \alpha\right)} & \left(0 \leq \alpha < \frac{\pi}{2}\right) \\ \frac{R_0}{\sqrt{2}\cos\left(\frac{3\pi}{4} - \alpha\right)} & \left(\frac{\pi}{2} \leq \alpha < \pi\right) \\ \frac{R_0}{\sqrt{2}\cos\left(\frac{5\pi}{4} - \alpha\right)} & \left(\pi \leq \alpha < \frac{3\pi}{2}\right) \\ \frac{R_0}{\sqrt{2}\cos\left(\frac{7\pi}{4} - \alpha\right)} & \left(\frac{3\pi}{2} \leq \alpha \leq 2\pi\right) \end{cases} \quad (1)$$

式中  $R$ ——射程, m

$R_0$ ——最大射程, m

$\alpha$ ——旋转角度, rad

由式(1)可得喷头旋转一周所要求的射程变化曲线,如图2所示。

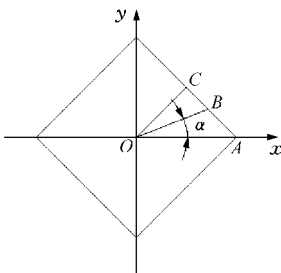


图1 正方形喷洒域示意图

Fig.1 Schematic diagram of square wetted area

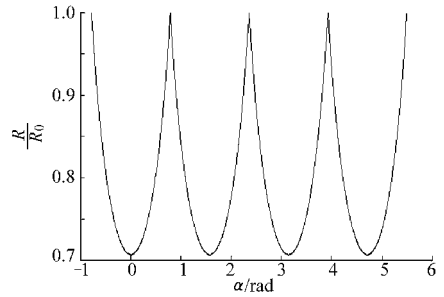


图2 射程与旋转角度变化曲线

Fig.2 Curves between sprinkler throw distance and rotating angle

系,那么,式(1)和图2中喷头射程与转角的变化关系就可转换为 $h_p$ 与 $\alpha$ 的变化关系,即

$$h_p = f(\alpha) \quad (2)$$

如果供水系统提供的水头在克服装置损失后,能满足这一变化关系,喷头就能实现正方形喷洒。

对其他任何形式异形喷洒域,只要根据喷洒的几何形状建立类似式(1)或图2的相应方程或曲线,理论上就能实现任意喷洒域的喷洒。

## 2 变压供水机理分析

一般,喷头的工作压力等于供水装置中喷头进口的压力水头,要使这一压力水头满足式(2),就必须改变水泵的运行工况,而改变水泵的运行工况可采用调节供水系统装置特性或水泵特性两种方法。

在喷头进口处安装动静片的方法属于调节供水系统装置特性,和通常在供水装置中用阀门调节水泵工况一样,称为节流调节;而采用变频器调整水泵转速来达到改变水泵工况的方法属于调节水泵特性,水泵能按喷头喷洒所需的压力水头来提供不同的扬程,称为变压调节。

两种方法的节点装置特性如图3所示,这里节点是指喷头入口处,图中实线是动静片节流喷洒,这一装置特性包含了动静片;虚线是变频调速喷洒。 $h_A$ 、 $h_B$ 和 $h_C$ 是对应喷洒位置A、B和C的喷头进口所需压力水头, $H_A$ 、 $H_B$ 和 $H_C$ 是对应动静片节流喷洒时水泵所提供的扬程, $H'_A$ 、 $H'_B$ 和 $H'_C$ 是对应变频调速喷洒时水泵所提供的扬程。

当要求喷头工作压力(水头)在 $h'_A \sim h'_C$ 之间作周期性变化的规律满足式(2)时,就需要不断调节水泵转速 $n$ 跟随其变化,水泵特性 $H = f(Q)$ 将沿系统装置特性移动,并分别与下移的供水系统节点装置特性相交。这里,系统装置特性是指包含喷头设备在内的全部喷洒装置的特性。

从图3可以看出,变压供水能够根据实际需求调节泵的工况,减少了由于节流调节而产生的扬程损失,因此变频调速喷洒比动静片节流喷洒节能。

如果已知喷头射程与工作压力(水头) $h_p$ 的关

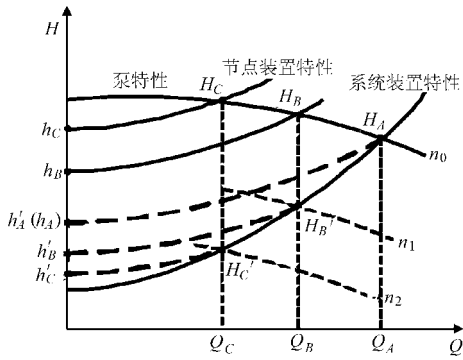


图 3 变量喷洒节点装置特性

Fig. 3 Partial system characteristic of the variable range of spraying system

### 3 变域喷洒控制策略

实现变频调速变域喷洒可以采用闭环或者开环两种控制结构<sup>[9]</sup>。

#### 3.1 闭环控制

根据式(2)可以建立如图 4 的闭环控制结构。

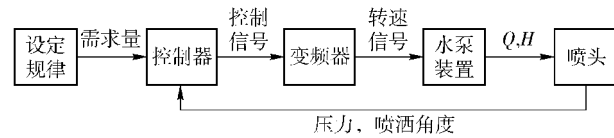


图 4 闭环控制结构图

Fig. 4 Structure of closed loop control

闭环控制对喷头本身的要求不高,但由于需要在喷头上安装位置和压力传感器,带来传感器供电、信号线铺设等一系列工程问题,造成成本大幅提高,使应用推广难以开展。

#### 3.2 开环控制

对于一定的供水系统,由于管路特性是一定的,所以变频调速时,水泵所提供的扬程  $H'$  与喷头工作压力水头  $h_p$  具有确定的关系,即

$$H' = h_p + sQ^2 \quad (3)$$

式中  $s$ ——管路损失系数

$Q$ ——流量

在一定转速范围内,水泵的调速特性具有相似性,即

$$H' = H \sqrt{\frac{n}{n'}} \quad (4)$$

式中  $H'$ ——调速后水泵提供的扬程

$H$ ——调速前水泵提供的扬程

$n$ ——调速前水泵转速

$n'$ ——调速后水泵转速

因此,由式(2)~(4)可以建立水泵转速  $n$  与喷头进口压力水头  $h_p$  之间的关系式

$$h_p = f(n) \quad (5)$$

如果喷头作匀速旋转时,旋转  $\alpha$  角度所需要的时间为

$$t = \frac{T}{2\pi} \alpha$$

式中  $t$ ——喷头旋转  $\alpha$  角度所用时间, s

$T$ ——喷头旋转一周所用时间, s

那么,式(2)可转换为时间与喷头进口压力水头的关系,即

$$h_p = f(t) \quad (6)$$

由式(5)和式(6)可建立水泵转速或变频器频率  $f_v$  与喷头旋转  $\alpha$  角度所用时间  $t$  之间的关系

$$f_v = f(t) \quad (7)$$

因此,如果变频器的频率变化周期与喷头旋转周期同步,则完全可以采用结构简单的开环控制结构,如图 5 所示。



图 5 开环控制结构图

Fig. 5 Structure of open-loop control

采用开环控制结构的优点是不需要从喷头反馈信号,成本较低,开发推广易于实现。但要求喷头的旋转必须均匀、结构可靠,否则由于长时间运转会造成喷头转速与控制周期不同步而使喷洒形状发生改变。

### 4 变频调速变域喷洒试验

#### 4.1 试验装置

由于草坪喷头使用水涡轮驱动喷头旋转,喷洒面为圆形或扇形,转速均匀稳定,有利于实现开环控制,因此,以雨鸟公司 S3504 型草坪喷头作为研究对象,其试验装置简图如图 6 所示,测控系统采用 NI 公司的虚拟仪器系统。

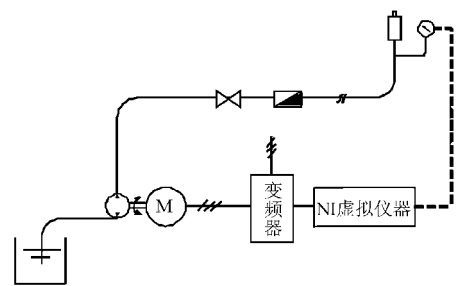


图 6 试验装置示意图

Fig. 6 Test device

#### 4.2 控制方程的确定

图 6 所示的装置测定草坪喷头不同工作压力与射程的关系如图 7 所示。

可以看出,草坪喷头工作压力在 200 kPa 以下时射程变化明显,大于 200 kPa 后射程变化缓慢,为

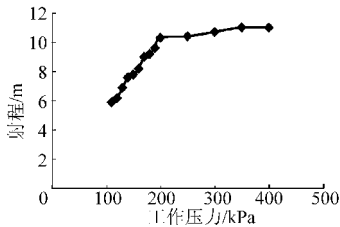


图7 S3504型草坪喷头工作压力与射程关系曲线  
Fig. 7 Relationship between sprinkler throw distance and pressure of the S3504 lawn sprinkler

实现变量喷洒,取200 kPa以下作为喷头工作压力,其与射程的关系式为

$$R = 0.0482h_p + 0.6018 \quad (8)$$

将式(8)代入式(1),则式(2)转换为

$$h_p = \begin{cases} \frac{R_0}{0.0482\sqrt{2}\cos\left(\frac{\pi}{4} - \alpha\right)} - 12.485 & \left(0 \leq \alpha < \frac{\pi}{2}\right) \\ \frac{R_0}{0.0482\sqrt{2}\cos\left(\frac{3\pi}{4} - \alpha\right)} - 12.485 & \left(\frac{\pi}{2} \leq \alpha < \pi\right) \\ \frac{R_0}{0.0482\sqrt{2}\cos\left(\frac{5\pi}{4} - \alpha\right)} - 12.485 & \left(\pi \leq \alpha < \frac{3\pi}{2}\right) \\ \frac{R_0}{0.0482\sqrt{2}\cos\left(\frac{7\pi}{4} - \alpha\right)} - 12.485 & \left(\frac{3\pi}{2} \leq \alpha \leq 2\pi\right) \end{cases}$$

测得草坪喷头不同工作压力与转速关系如图8所示。

由图8可得,当压力在90~200 kPa范围时,其转速变化相差较小,而变域喷洒是一个周期性的过程,因而可采用此压力范围喷头旋转速度的平均值 $\omega = 0.118 \text{ rad/s}$ (即 $6.79^\circ/\text{s}$ )来保证与变频器的同步,因此式(6)转换为

$$h_p = \begin{cases} \frac{R_0}{0.068\cos\left(\frac{\pi}{4} - 6.79t\right)} - 12.485 & \left(0 \leq \alpha < \frac{\pi}{2}\right) \\ \frac{R_0}{0.068\cos\left(\frac{3\pi}{4} - 6.79t\right)} - 12.485 & \left(\frac{\pi}{2} \leq \alpha < \pi\right) \\ \frac{R_0}{0.068\cos\left(\frac{5\pi}{4} - 6.79t\right)} - 12.485 & \left(\pi \leq \alpha < \frac{3\pi}{2}\right) \\ \frac{R_0}{0.068\cos\left(\frac{7\pi}{4} - 6.79t\right)} - 12.485 & \left(\frac{3\pi}{2} \leq \alpha \leq 2\pi\right) \end{cases} \quad (9)$$

采用变频器调节电动机转速,在喷头进口处设置压力传感器,测量得到变频器频率与喷头进口压力关系为

$$f = 197.46h_p + 19.604 \quad (10)$$

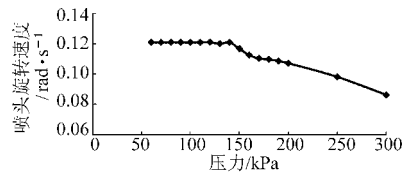


图8 S3504型草坪喷头工作压力与转速关系曲线  
Fig. 8 Relationship between sprinkler rotation speed and pressure of the S3504 lawn sprinkler

根据式(9)~(10),即可得喷洒域为正方形的控制波形,如图9所示。

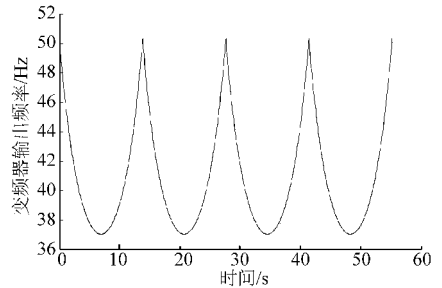


图9 设定的控制曲线

Fig. 9 Given control curves

### 4.3 喷洒效果分析

将控制规律输入控制器,当喷头作均匀旋转时,用变频器对喷洒水泵机组进行调速控制,使喷头进口压力随时间的变化满足确定的工作特性,达到变域精确喷洒的目的,其效果如图10所示。



图10 正方形喷洒效果图

Fig. 10 Effect of square wetted area controlled by invert

压力随时间变化如图11所示。

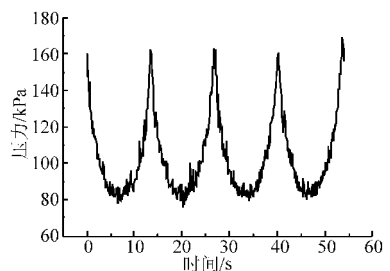


图11 时间与喷头工作压力关系曲线

Fig. 11 Relationship between pressure and time

根据Cauazza公式( $R = 1.35\sqrt{Dp}$ )计算得出的理论射程与试验射程对比如图12所示。

由图10~12可以看出采用变频调速方式实现



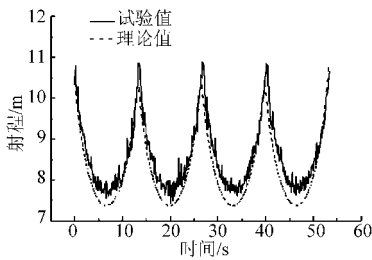


图 12 射程理论值与试验值对比曲线

Fig. 12 Correlation curves of theoretical and experimental value of range

正方形喷洒域其理论值与试验值基本一致,基本偏差为 4.2%,如图 13 所示。

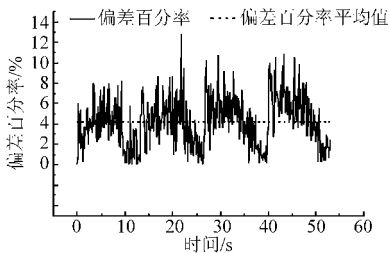


图 13 试验值与理论值偏差曲线

Fig. 13 Deviation curves of experimental and theoretical results

当喷头在低于工作压力下运行,其水滴直径、喷灌强度、水量分布特性等指标会偏离设计工况,因此,为了确定在该方式工作下的喷头性能,根据图 11 的结果,将其在变域喷洒过程中压力的最大值(150 kPa)、最小值(90 kPa)与喷头在正常工作压力(250 kPa)下的水量分布进行了实际测量,其结果如图 14 所示。

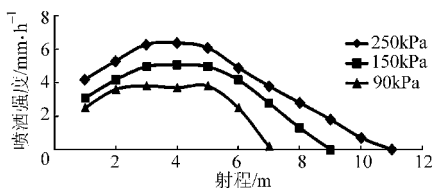


图 14 3 种压力下的径向水量分布图

Fig. 14 Distribution of rainfall at three work pressure

如图 14 所示,当运行在变域喷洒的工作压力范围内,相对于正常工作压力,只是其射程发生变化,而水量分布变化不大,因此能够保证喷头正常工作。

#### 4.4 水力能耗计算

喷洒系统的水力能耗实际上与系统中水泵的运行状态、管路装置(包含喷头)有关。由图 3 可以看出,采用动静片调节喷头工作压力时,水泵提供的扬

程沿水泵特性曲线移动;而采用变频调速调节喷头工作压力时,水泵沿系统装置特性曲线移动。当喷头旋转一周时,两种方法的水力能耗<sup>[10-12]</sup>分别为

$$W_1 = 3.6\rho \int_0^{T'} Q(t)H_b(Q(t))dt \quad (11)$$

$$W_2 = 3.6\rho \int_0^{T'} Q(t)H_s(Q(t))dt \quad (12)$$

式中  $Q(t)$ ——流量变化函数

$T'$ ——喷头旋转周期

$H_b$ ——额定转速下的泵特性函数

$\rho$ ——水密度

$H_s$ ——泵系统装置特性函数

由试验所得的水泵水力特性和系统装置特性的拟合方程分别为

$$H_b(Q(t)) = 0.0069Q^2(t) - 0.8176Q(t) + 18.604 \quad (13)$$

$$H_s(Q(t)) = 24.003Q^2(t) + 4.8287Q(t) + 0.5 \quad (14)$$

喷头变域喷洒时,所测定的流量随时间的变化规律如图 15 所示。

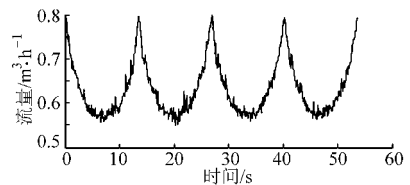


图 15 变域喷洒时流量变化曲线

Fig. 15 Curves of flow changes in the variable range

将式(13)、(14)分别代入式(11)、(12),可求得两种方法水力能耗分别为 1 700 J、1 243.5 J。因此,实现变域喷洒,采用变频调速技术比采用动静片方法节能 27%。

## 5 结论

(1)深入分析了喷头变域喷洒和水泵装置的变压运行机理,得到了喷头在实现变域喷洒时两种调节方法的运行规律。

(2)提出了一种实现喷头变域喷洒的开环控制策略,推导了变频器频率  $f_v$  与喷头旋转  $\alpha$  角度所用时间  $t$  之间的关系方程和通过试验设定控制规律的方法。

(3)通过水力能耗的计算发现,采用变频调速实现变域喷洒比采用动静片方法节约 27% 的能量。

## 参 考 文 献

- 1 韩文霆,吴普特,冯浩,等. 仿形喷洒变量施水精确灌溉技术研究进展[J]. 农业工程学报,2004,20(1):16~19.  
Han Wenting, Wu Pute, Feng Hao, et al. Review on irrigated area profile modeling and variable-rate precision sprinkle irrigation technique[J]. Transactions of the CSAE, 2004,20(1):16~19. (in Chinese)

- 2 韩文霆,吴普特,冯浩,等. 非圆形喷洒变量施水精确灌溉喷头综述[J]. 农业机械学报,2004,35(5):220~224.  
Han Wenting, Wu Pute, Feng Hao, et al. Variable-rate sprinklers for precision irrigation on irregular boundary area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(5):220~224. (in Chinese)
- 3 Liu Junping, Yuan Shouqi, Li Hong, et al. Method for achieving irregular boundary area for complete fluidic sprinkler[C]// Proceedings of the 2nd IFIP International Conference on Computer & Computing Technologies in Agriculture, 2008, 2:901~908.
- 4 King B A, Wall R W, Kincaid D C, et al. Field testing of a variable rate sprinkler and control system for site-specific water and nutrient application[J]. Transactions of the ASAE, 2005, 21(5):847~853.
- 5 汤跃,朱兴业,郑颖. 涡轮式旋转喷头实现变域喷洒的仿真试验[J]. 中国农村水利水电, 2009(8):4~7.  
Tang Yue, Zhu Xingye, Zheng Ying. Simulated experiment of the turbo-type whirling sprinkler for achieving variable rate irrigation[J]. China Rural Water and Hydropower, 2009(8):4~7. (in Chinese)
- 6 Zhu Xingye, Yuan Shouqi, Liu Junping, et al. Strategy of energy-saving for variable-rate irrigation sprinkler[C]// Proceedings of the 2009 International Conference on Engineering Computation (ICEC 2009), Hongkong, China, 2009: 29~32.
- 7 汤跃,尚亚波,吴徐,等. 变频调速恒压与变压供水的能耗分析[J]. 排灌机械, 2007, 25(1):45~49.  
Tang Yue, Shang Yabo, Wu Xu, et al. Energy consumption analysis on constant-pressure variable-frequency water supply and variable-pressure variable-frequency water supply [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2007, 25(1): 45~49. (in Chinese)
- 8 王琦,刘书明,陈晋端,等. 基于EPANET的供水系统中变频变压供水方式的模拟[J]. 给水排水, 2009, 35(增刊2): 350~353.  
Wang Qi, Liu Shuming, Chen Jinduan, et al. EPANET based simulation on variable pressure mode with VFPs in water supply system[J]. Water & Wastewater Engineering, 2009, 35(Supp. 2):350~353. (in Chinese)
- 9 Camp C R, Sadler E J, Evans D E. Variable-rate, digitally controlled metering device[J]. Transactions of the ASAE, 2000, 16(1):39~44.
- 10 汤跃,秦武轩,袁寿其. 基于变工况运行的泵能耗指标计算方法[J]. 农业工程学报, 2009, 25(3):46~49.  
Tang Yue, Qin Wuxuan, Yuan Shouqi. Method to calculate the energy consumption index of pump operation under variable working conditions[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(3):46~49. (in Chinese)
- 11 许燕飞. 工业循环水泵站的能耗测评及优化运行研究[D]. 镇江:江苏大学, 2010.  
Xu Yanfei. Research on energy consumption evaluation and optimal scheduling of the industrial circulating pump station[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2010. (in Chinese)
- 12 Nourbakhsh A, Jaumotte A B. Turbo pumps and pumping systems[M]. London: Springer, 2007.
- 13 朱兴业,袁寿其,向清江,等. 旋转式射流喷头设计与性能正交试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(7):76~79.  
Zhu Xingye, Yuan Shouqi, Xiang Qingjiang, et al. Orthogonal experiment on design and performance of a rotational jet sprinkler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(7):76~79. (in Chinese)

(上接第92页)

- 11 Annia García Pereira, Antihus Hernández Gómez, 何勇. 农产品物理特性的检测与应用研究进展[J]. 农业工程学报, 2003, 18(5):7~11.  
Annia García Pereira, Antihus Hernández Gómez, He Yong. Advances in measurement and application of physical properties of agricultural products [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 18(5):7~11. (in Chinese)
- 12 吴宗泽. 机械设计手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2002.
- 13 Conto S M, Silvín M A, Regazzi A J. An electrical conductivity method suitable for quantitative mechanical damage evaluation[J]. Transactions of the ASAE, 1998, 41(2):421~426.
- 14 Allison R V, Boots V A. A three-way look at the mechanical harvesting of two long-fiber crops, ramie and kenaf[J]. Soil and Crop Science of Florida, 2006, 30(3):100~112.
- 15 O'Dogherty M J, Huber J A, Dyson J, et al. A study of the physical and mechanical properties of wheat straw[J]. J. Agric. Engng. Res., 1995, 62(62):133~142.