

基于 MATLAB 全射流喷头组合喷灌计算模拟

袁寿其, 朱兴业, 李 红, 刘俊萍

(江苏大学 流体机械工程技术研究中心, 江苏 镇江 212013)

摘 要: 对国内原创全射流喷头组合喷灌进行研究后, 提出了一种分析处理喷头水量分布数据以实现三维可视化编程的方法. 研究表明, MATLAB 语言可以方便可靠地将喷头径向水量分布数据转换为网格型数据, 并绘制出单喷头和喷头组合的三维水量分布图. 通过插值叠加求出各网格点总降水深, 求出不同组合间距系数下的全射流喷头组合均匀系数, 实现计算结果可视化. 根据模拟分析, 提出了组合间距系数值: 正方形布置时为 1.2, 各喷头均匀系数平均值为 82.4%; 三角形布置时为 1.5, 各喷头均匀系数平均值为 85.7%. 另外认为, MATLAB 语言编程进行喷头喷洒分析具有功能强大, 方便快捷, 可视性强等优点, 适用于任何喷头水量分布的分析.

关键词: 全射流喷头; 喷灌; 均匀系数; 组合间距; 水量分布; 仿真

中图分类号: S277.9*4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-6254(2008)01-0047-06

Simulation of combined irrigation for complete fluidic sprinkler based on MATLAB

YUAN Shou-qi, ZHU Xing-ye, LI Hong, LIU Jun-ping

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

Abstract: The complete fluidic sprinkler was originally developed in China. A software was presented to analyze the data of water distribution. The data can be made visible in multidimensional orientation as a result. By using MATLAB it was proved that the radial data can be changed into net data conveniently and reliably. Three-dimensional water distribution pictures for sprinkler and combined sprinklers were drawn by MATLAB. According to the test data, the total water depth of net point was calculated using superposition method. Then the combined uniformity coefficient of the complete fluidic sprinkler was simulated in different combined spacings. After the simulation, combined spacing coefficient was chosen as 1.2 in the rectangular combination, and 1.5 in the triangular combination. The average uniformity coefficients are 82.4% and 85.7% respectively. A case study shows that MATLAB is reliable for simulating water distribution in sprinkler irrigation.

Key words: complete fluidic sprinkler; sprinkling irrigation; uniformity coefficient; combined spacing; water distribution; simulation

1980 年江苏工学院与江苏镇江市喷灌机厂干代 PSBZ 型水流自控步进式全射流喷头^[1]. 1981 年
浙民, 陈苏等人开发了第 1 代 PS 连续转动式和第 2 福州大学和镇江农机学院联合开发了 PSH 型互控

收稿日期: 2007-12-06

基金项目: 国家 863 计划项目(2006AA100211)

作者简介: 袁寿其(1963—), 男, 上海金山人, 研究员, 博士生导师(shouqi@ujs.edu.cn), 主要从事流体机械及排灌机械的研究.
朱兴业(1982—), 男, 浙江永康人, 博士研究生(xingye488@163.com), 主要从事流体机械及排灌机械的研究.

式全射流喷头和第4代产品PSZ型自反馈式射流喷头^[2]。1990年,浙江省嵊县抽水机站韩小扬等人发明了双击同步式全射流喷头。2005年,江苏大学流体机械工程技术研究中心研制出PXH型隙控式全射流喷头,该隙控式射流元件结构方面达到国际领先水平^[3-5]。

喷灌均匀度是喷头的重要水力性能指标,用喷灌均匀系数表示。研究组合喷灌均匀系数对喷灌系统的设计非常重要,许多专家提出了均匀系数的计算方法。1942年Christiansen^[6]首次提出按照均匀度选择喷头的组合间距,在世界各国得到广泛应用。计算公式还有前苏联采用的均匀度计算公式,威尔科克斯-斯韦尔斯公式,美国农业部提出的图形系数公式,比尔提出的高图形系数公式,弗特朗提出的变差系数公式和1964年贝纳米-霍尔提出的新的均匀系数公式^[7]。在国内,1993年雷应海、朱旦生^[8]提出了由单喷头水量分布计算多喷头组合喷洒均匀系数的矩阵叠加算法。1993年李久生^[9]通过实测单喷头水量分布图,用电子计算机模拟叠加计算组合均匀系数。1994年黄修桥、廖永诚^[10]通过研究有风条件下洒水水滴运动规律,得出任意风速下不同组合间距的均匀系数。1994年王文元、杨路华^[11]研究微喷头布置形式对组合均匀度的影响,得出微喷头组合的最佳布置形式。1998年朱旦生、刘佳莉^[12]借助傅立叶变换,用单喷头水量分布、支管间距、布置形式以严密的数学表达式加以表述,计算喷灌均匀系数。2003年,韩文霆^[13]采用克理斯琴森均匀度和分布均匀度对组合均匀度进行分析,邓鲁华^[14]采用MATLAB软件对六方(四方)形摇臂式喷头喷洒效果进行了分析。2005年李小平^[15]采用插值法将径向数据转换成网格数据,再进行相应的叠加计算均匀度系数。

全射流喷头是国内原创的节水喷头,有必要对其喷洒均匀度及组合喷灌进行研究。这里主要研究的是,为全射流喷头提供一种精度高、可方便实现电算分析水量分布数据的方法,并使数据处理过程和结果实现三维可视化。

1 喷头水量分布测试

全射流喷头样机在江苏大学流体机械工程技术研究中心的喷灌大厅内进行测试。该大厅为直径44m的室内圆形试验厅,作为室内测试场地,排除了风力与其他自然条件因素的影响。喷头水量分布特性

是喷头性能的重要指标,也是喷灌规划设计的主要依据,测量时遵循国家机械行业标准JB/T 7867—1997《旋转式喷头》的要求。江苏大学采用基于RS485总线的分布式测试方案,改进喷头水量分布自动测试系统。图1为自动测量系统雨量筒布置示意图,雨量筒之间间隔1m,总共40个点;图2为基于总线分布式测试系统简图,该系统采用现代分布式总线测控模式,将雨量筒技术模块分布安装于大厅内,各技术模块之间与控制室计算机采用RS485总线连接,大大减少了电缆及连接的工作量,使系统更加简洁、可靠,提高了系统的先进性和可扩充性。由于测试场地面积的局限,只测量单个喷头的雨量分布,表1给出了对不同型号全射流喷头测试时的部分工作参数,图3为单喷头径向水量分布曲线。

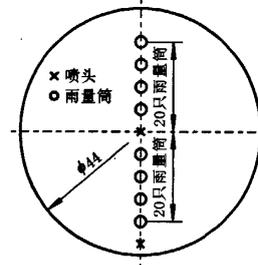


图1 雨量筒布置

Fig. 1 Disposal of the control cylinder

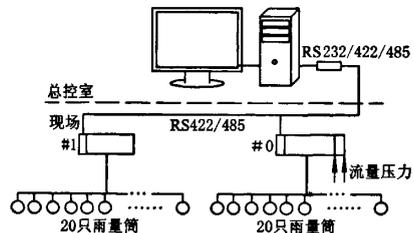


图2 基于总线分布式测试系统

Fig. 2 Auto-testing system based on total line distribution

表1 测试情况

Tab. 1 Experimental instances

型号	p/kPa	$Q/(m^3/h)$	型号	p/kPa	$Q/(m^3/h)$
10	251	1.01	30	404	7.56
15	301	2.35	40	449	16.30
20	351	4.71	50	499	27.69

从图3可知,对于10,15,20,30,40,50系列的全射流喷头,在额定工作压力下,射程分别为:10.5, 19.8, 22.6, 29.4, 35.2, 39.5 m,达到了机械行业标准JB/T 7867—1997的要求。

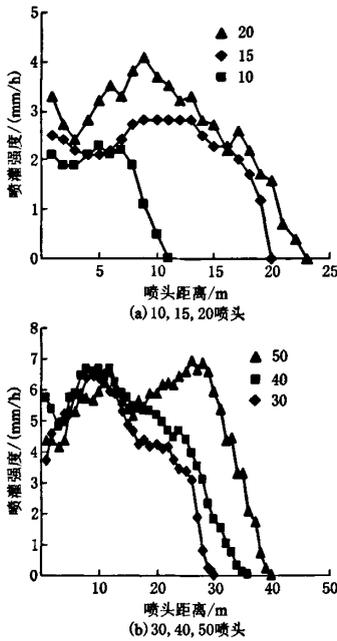


图3 喷头径向水量分布曲线
Fig.3 Water distribution of the sprinkler

2 喷洒水量分布仿真

测试中,喷头的径向水量分布数据转化为网格型数据,是均匀度分析和水量分布图绘制的主要步骤.由于全射流喷头可以假设任何方向上水量分布基本相同,因此,网格点的降水深只取决于各网格点到喷头的距离,然后用实测降水深数据对该距离进行插值,即可求出各网格点的水深.

笔者采用三次样条插值法,将喷头径向水量分布测试数据转换为网格型.样条插值函数的数学模型建立如下^[12]:

设 $f(x)$ 是区间 $[a, b]$ 上的一个二次连续可微函数,在区间 $[a, b]$ 上给定一组基点: $a = x_1 < x_2 < \dots < x_{n+1} = b$. 设函数

$$S(x) = \begin{cases} S_1(x) & x \in [x_1, x_2] \\ S_i(x) & x \in [x_i, x_{i+1}] \\ S_n(x) & x \in [x_n, x_{n+1}] \end{cases}$$

二次连续可微, $S_i(x)$ 是一个不高于三次的多项式或零多项式, $i = 1, 2, 3, \dots, n$, 且满足条件 $S_i(x) = f(x_j)$, $j = 1, \dots, n + 1$, 称 $S(x)$ 为函数 $f(x)$ 的三次样条插值函数.

记 $m_i = S''(x)$, $f(x_i) = f_i$. 根据三次样条的定义可得: 在每一个子区间 $[x_i, x_{i+1}]$ ($i = 1, 2, 3, \dots,$

n) 上, $S''_i(x) = m_i \frac{x_{i+1} - x}{h_i} + m_{i+1} \frac{x - x_i}{h_i}$, $x \in [x_i, x_{i+1}]$, 其中 $h_i = x_{i+1} - x_i$.

对 $S''_i(x)$ 连续两次积分得

$$S_i(x) = h_i \left[\frac{m_i}{6} (x_{i+1} - x)^3 + \frac{m_{i+1}}{6} (x - x_i)^3 \right] + f_i + f[x_i, x_{i+1}] (x - x_i) - \frac{h_i^2}{6} \times \left[(m_{i+1} - m_i) \frac{x - x_i}{h_i} + m_i \right]$$

只要知道 m_i 和 m_{i+1} , 则 $S_i(x)$ 表达式完全确定, 即可计算获取出喷头径向任意位置的水量分布信息.

MATLAB 工程计算语言具有非常好的数值计算功能, 可根据输入数据自动完成插值函数的构造和插值计算过程, 给出插值结果^[13]. 笔者利用 MATLAB 语言绘制水量分布图. 编制程序, 在全射流喷头射程范围内建立网格点, 确定网格点对应的水量分布数据, 绘制出喷头三维水量分布图, 使数据处理实现三维可视化, 图4为50喷头三维水量分布图.

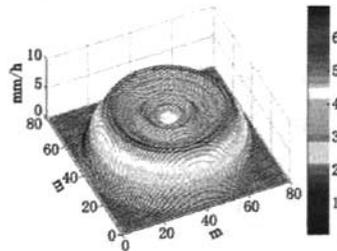


图4 50喷头三维水量分布
Fig.4 Three-dimensional water distribution of sprinkler type 50

从图4中可以简单方便地看出全射流喷头在周向任意一点的水量分布, 使喷头喷洒时得到的水量分布更加直观, 可为以后分析改变全射流喷头结构参数时, 提供一个效果更加明显的表达水量分布的方法, 达到可视化的结果.

3 组合均匀度计算及仿真

喷灌均匀系数是指在喷灌面积上水量分布的均匀程度^[7], 笔者在三次样条插值法进行单喷头水量分布数据分析的基础上, 采用叠加法进行喷头组合喷洒下组合均匀度的计算和水量分布图的绘制, 并对组合均匀度随组合间距系数变化进行仿真, 为全

射流喷头研究提供软件分析平台。

下面就喷头正方形和三角形两种组合布置形式分别加以讨论。图 5 为正方形组合布置形式示意图，图 6 为三角形组合布置形式示意图。

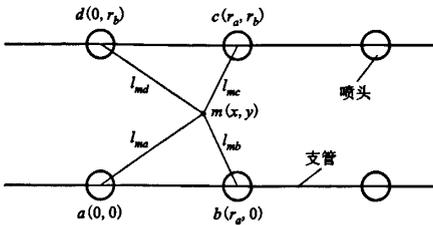


图 5 正方形组合布置

Fig. 5 Combined array in rectangular combination

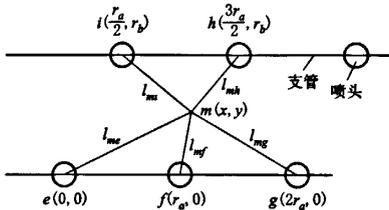


图 6 三角形组合布置

Fig. 6 Combined array in triangular combination

从图 5, 图 6 中可以看出

$$l_{ma} = \sqrt{x^2 + y^2}, l_{mb} = \sqrt{(x - r_a)^2 + y^2}$$

$$l_{mc} = \sqrt{(x - r_a)^2 + (y - r_b)^2}$$

$$l_{md} = \sqrt{x^2 + (y - r_b)^2}, l_{me} = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$l_{mf} = \sqrt{(x - r_a)^2 + y^2}$$

$$l_{mg} = \sqrt{(x - 2r_a)^2 + y^2}$$

$$l_{mh} = \sqrt{\left(x - \frac{3r_a}{2}\right)^2 + (y - r_b)^2}$$

$$l_{mi} = \sqrt{\left(x - \frac{r_a}{2}\right)^2 + (y - r_b)^2}$$

喷头组合间距系数为

$$k_a = \frac{r_a}{R}, k_b = \frac{r_b}{R}$$

式中 R 为喷头射程。在喷头组合间距系数 $k_a = k_b = 1.2$ 下, 根据前述采用三次样条数学模型插值, 计算出每个喷头在插值点处的降水深度, 然后叠加求出插值点处的总降水深度。用 MATLAB 编制计算程序, 对 10 喷头进行组合水量分布图绘制。图 7 为 10 喷头组合喷洒三维水量分布图, 图 8 为 10 喷头组合喷洒水量分布等值线图。

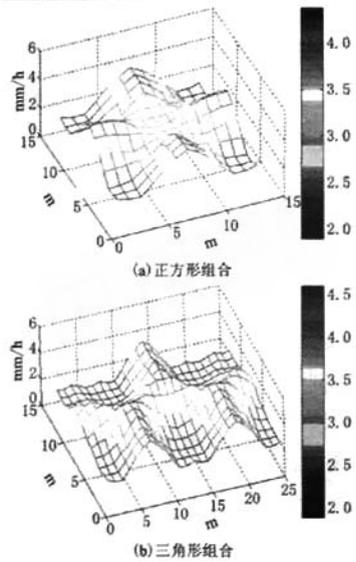


图 7 10 喷头组合喷洒三维水量分布

Fig. 7 Three-dimensional water distribution of sprinkler type 10 in combined irrigation

从图 8 中可以看出, 在喷头组间距系数 $k_a = k_b = 1.2$ 的情况下, 正方形组合布置时, 水量分布在喷灌控制面积内四周均匀一致; 在两喷头中间, 喷灌强度达到最高值 4 mm/h , 离任一喷头越近, 组合水量分布越少。三角形组合布置时, 在喷灌控制面积内, 水量分布呈现三角形分布趋势, 组合水量分布情况与正方形组合布置时类似。另外, 正方形组合布置比三角形组合布置水量分布更加均匀, 可以预测, 正方形组合均匀度要高于三角形组合均匀度。

当单喷头水量分布确定后, 影响喷灌组合均匀度的主要因素为喷头组合方式和组合间距。在确定喷头组合布置形式下, 有了插值点总降水深, 即可计算出组合均匀度。在 MATLAB 上编制仿真程序, 采用仿真技术计算在一定组合间距下, 喷灌组合均匀度的大小, 从而确定喷头最佳组合方式。按上述方法, 对于喷头正方形和三角形两种布置方式, 选取组合间距系数 $k = k_a = k_b$ 分别为 1, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8 等 9 种情况进行仿真计算, 运行结果得出数据后再进行三次样条插值, 绘制喷头组合间距系数与组合均匀度关系图。

按上述方法运行, 图 9 为正方形组合喷洒均匀度仿真曲线。从图 9 中可以看出: 正方形布置时比三角形布置时的组合均匀度曲线更加平坦。这意味着正方形布置时, 随着组合间距系数改变, 均匀度呈稳定变化状态。三角形布置时, 随组合间距系数改变,

均匀度呈急剧变化状态. 正方形布置组间距为 1 ~ 1.4, 三角形布置组间距为 1.5 ~ 1.7 时, 系列喷头组合均匀度能超过 75%, 符合喷灌要求.

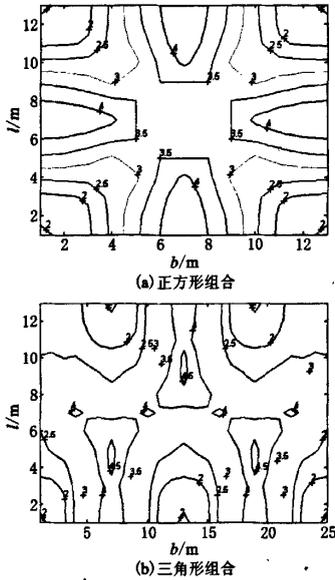


图 8 10 喷头组合洒水水量分布等值线
Fig. 8 Water distribution contour of sprinkler type 10 in combined irrigation

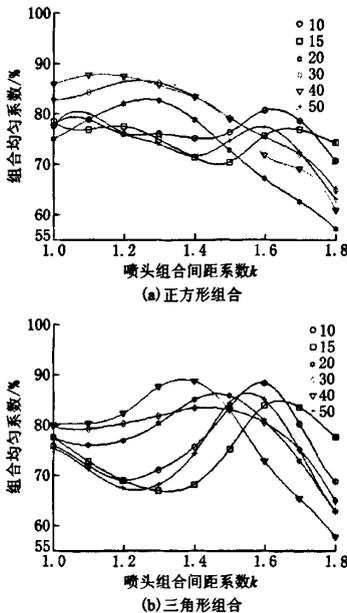


图 9 组合洒水均匀度仿真曲线
Fig. 9 Simulated curves of combined irrigation coefficient

表 2 为经过仿真计算, 系列喷头均匀度达到最大值所对应的组间距系数. 从表 2 中可以看出, 对

于系列喷头, 正方形布置时, 宜选取组间距系数为 1.2, 对应组间距为 1.2 R, 不同喷头在此相同组间距下均匀系数平均值为 82.4%. 三角形布置时, 选取组间距系数为 1.5, 对应组间距为 1.5 R, 不同喷头在此相同组间距下均匀系数平均值为 85.7%.

表 2 均匀度最大值对应组间距系数
Tab. 2 Combined distance in maximum uniformity coefficient

喷头类型	10	15	20	30	40	50
正方形 组间距系数	1.6	1.0	1.3	1.2	1.1	1.1
布置 均匀度最大值	80.5	78.2	82.4	86.1	87.4	79.8
三角形 组间距系数	1.6	1.6	1.5	1.4	1.4	1.6
布置 均匀度最大值	88.2	83.7	85.7	83.3	88.6	84.9

4 结 论

1) 国内原创的系列全射流喷头, 包括 10PXH, 15PXH, 20PXH, 30PXH, 40PXH, 50PXH 等 6 种型号, 样机通过室内喷灌大厅测试, 得出喷头径向水量分布. 在额定工作压力下, 射程分别为: 10.5, 19.8, 22.6, 29.4, 35.2, 39.5 m.

2) 采用三次样条插值法, 将喷头径向水量分布测试数据转换为网格型, 利用 MATLAB 语言编制水量分布图绘制程序, 使数据处理实现三维可视化. 进行组合水量分布图的绘制, 为全射流喷头的研究提供软件分析平台.

3) 在正方形和三角形两种布置形式下, 对全射流喷头组合均匀度随组间距系数的变化进行仿真后, 提出了最佳组间距系数值: 正方形布置时为 1.2, 三角形布置时为 1.5.

参考文献 (References)

[1] 黄志斌. PSZ 型自反馈式射流喷头的研究 [J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 1981, 2(2): 28 - 31.
HUANG Zhi-bin. Study on feedback fluidic sprinkler type PSZ [J]. *Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition*, 1981, 2(2): 28 - 31. (in Chinese)

[2] 黄志斌, 张世芳. 自反馈式射流喷头的设计 [J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 1985, 6(2): 35 - 38.
HUANG Zhi-bin, ZHANG Shi-fang. Design in fluidic sprinkler feedback by itself [J]. *Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition*, 1985, 6(2): 35 - 38. (in Chinese)

[3] 袁寿其, 朱兴业, 李 红, 等. 全射流喷头重要结构参

- 数对水力性能的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(10): 113-116.
- YUAN Shou-qi, ZHU Xing-ye, LI Hong, et al. Effects of complete fluidic sprinkler on hydraulic characteristics based on some important geometrical parameters [J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(10): 113-116. (in Chinese)
- [4] 朱兴业, 袁寿其, 李红, 等. 全射流喷头产业化开发中的问题及其改进[J]. 排灌机械, 2006, 24(6): 24-27.
- ZHU Xing-ye, YUAN Shou-qi, LI Hong, et al. Some problems and improvements in batching process of complete fluidic sprinkler [J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2006, 24(6): 24-27. (in Chinese)
- [5] 刘俊萍, 袁寿其, 李红, 等. 全射流喷头实现非圆形喷洒域的可行性分析[J]. 排灌机械, 2007, 25(5): 36-38.
- LIU Jun-ping, YUAN Shou-qi, LI Hong, et al. Feasibility analysis on complete fluidic sprinkler for achieving irregular boundary area [J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2007, 25(5): 36-38. (in Chinese)
- [6] Christiansen J E. Irrigation by sprinkling [R]. *California Agricultural Experiment Station Bull. No. 670*, Davis: California University, 1942.
- [7] 周世峰. 喷灌工程学 [M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2004: 93-95.
- [8] 雷应海, 朱旦生. 多喷头组合喷洒均匀度的矩阵叠加计算法[J]. 甘肃水利水电技术, 1993, 6(2): 17-20.
- LEI Ying-hai, ZHU Dan-sheng. Matrix calculation for combined irrigation uniformity of sprinklers [J]. *Gansu Water and Hydropower Engineering*, 1993, 6(2): 17-20. (in Chinese)
- [9] 李久生. 灌水均匀度与深层渗漏量关系的研究[J]. 农田水利与小水电, 1993(1): 1-4.
- LI Jiu-sheng. Study on relationship between irrigation uniformity and deep-seated leakage [J]. *Rural Water and Hydropower*, 1993(1): 1-4. (in Chinese)
- [10] 黄修桥, 廖永诚, 刘新民. 有风条件下喷灌系统组合均匀度的计算理论与方法研究[J]. 灌溉排水, 1995, 14(1): 12-18.
- HUANG Xiu-qiao, LIAO Yong-cheng, LIU Xin-min. The compound uniformity of sprinkler irrigation system under wind condition: A study on its calculation theories and methods [J]. *Irrigation and Drainage*, 1995, 14(1): 12-18. (in Chinese)
- [11] 王文元, 杨路华. 微喷头布置形式对喷洒均匀度的影响[J]. 灌溉排水, 1994, 13(2): 11-13.
- WANG Wen-yuan, YANG Lu-hua. The influence on spray uniformity by microsprinkler arrangement style [J]. *Irrigation and Drainage*, 1994, 13(2): 11-13. (in Chinese)
- [12] 朱旦生, 刘佳莉. 用傅里叶变换表示喷灌组合均匀度[J]. 水利学报, 1998(10): 27-31.
- ZHU Dan-sheng, LIU Jia-li. Using fourier transforms to express sprinkler overlapping uniformity [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1998(10): 27-31. (in Chinese)
- [13] 韩文霆. 变量喷洒可控精确灌溉喷头及喷灌技术研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2003.
- [14] 邓鲁华, 郝培业. 六方(四方)形摇臂式喷头喷洒效果分析(三) [J]. 节水灌溉, 2003(4): 11-14.
- DENG Lu-hua, HAO Pei-ye. Analysis of insufflations effect for sprinkler with hexagonal (Quadrangular) insufflations range [J]. *Water Saving Irrigation*, 2003(4): 11-14. (in Chinese)
- [15] 李小平. 喷灌系统水量分布均匀度研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2005.

(责任编辑 张文涛)

(上接第 42 页)

参考文献 (References)

- [1] 吕秀龙, 姜成启. SEZ 型立式混流泵在引水泵站中的应用 [J]. 排灌机械, 2003, 21(2): 15-17.
- LV Xiu-long, JIANG Cheng-qi. Application of SEZ vertical mixed pumps in pump station [J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2003, 21(2): 15-17. (in Chinese)
- [2] 肖庆荣, 葛秀成, 游玉萍, 等. 循环泵运行故障分析及排除 [J]. 排灌机械, 2004, 22(1): 47-48.
- XIAO Qing-rong, GE Xiu-cheng, YOU Yu-ping, et al. Analysis and exclusion of the circulating pumps' malfunction [J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2004, 22(1): 47-48. (in Chinese)
- [3] 沈阳水泵研究所. 叶片泵设计手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1983.
- [4] 关醒凡. 现代泵技术手册 [M]. 北京: 宇航出版社, 1995.
- [5] 贾国方. 水泵在线智能监控技术的研究 [J]. 排灌机械, 2005, 23(6): 28-30.
- JIA Guo-fang. Research of the online intelligent monitoring technology of the water pump [J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2005, 23(6): 28-30. (in Chinese)

(责任编辑 张文涛)