

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.009

中心支轴式喷灌机非设计工况对均匀性的影响评估*

李连豪^{1,2} 李光永¹ 乔晓东³ 金立强⁴

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 黑龙江八一农垦大学工程学院, 大庆 163319;
3. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083; 4. 绥化市东部节水有限公司, 绥化 152000)

摘要: 通过田间试验, 评估了中心支轴式喷灌机非设计工况运行(行进速度和首部压力等)和配置(低压喷头、压力调节器和末端喷枪等)对喷灌机田间喷灌均匀性的影响。结果表明:设计工况下, 赫尔曼-海恩均匀系数 C_{UH} 和均匀分布系数 D_U 均随行进速度提高而减小, 当百分率计数器由 30% 提高到 100%, 采用低压喷头 D3000 时的 C_{UH} 减小 12.91%, D_U 减小 6.35%; 采用低压喷头 R3000 时的 C_{UH} 减小 10.50%, D_U 减小 2.39%; 首部压力大于设计入机压力 0.16 MPa 时, 入口压力递增, C_{UH} 和 D_U 基本保持不变; 首部压力为 0.08 MPa, 采用 D3000 时, C_{UH} 减小 14.04%, D_U 减小 15.09%; 采用 R3000 时, C_{UH} 减小 13.37%, D_U 减小 15.61%; 末端喷枪全程开启, 采用 D3000 时的 C_{UH} 降低 10.27%, D_U 减小 14.13%; 采用 R3000 时的 C_{UH} 降低 20.78%, D_U 降低 23.15%; 不配置压力调节器且平地条件下, 在首部入机压力为 0.12、0.16、0.20 MPa 时, 采用低压喷头 D3000 时的 C_{UH} 分别减小 1.23%、1.82% 和 6.51%, D_U 减小 29.61%、14.87% 和 12.52%; 采用 R3000 时的 C_{UH} 分别减小 9.26%、15.00%、17.19%, D_U 减小 40.05%、32.45% 和 29.76%; 这是由中心支轴喷灌机作业实际工况与设计工况不符引起的。

关键词: 中心支轴式喷灌机 均匀度 评估 运行工况

中图分类号: S220.34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)12-0062-05

Assessment of Influence of Off-design Conditions on Uniformity of Sprinkler Irrigation of Center-pivot Irrigation System

Li Lianhao^{1,2} Li Guangyong¹ Qiao Xiaodong³ Jin Liqiang⁴

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China 3. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China 4. Eastern Water Saving Co., Ltd., Suihua 152000, China)

Abstract: Irrigation system with center-pivot sprinkling system is considered as a system with the highest degree of automation so far. The uniformity in field is one of the important indicators to characterize performance of the center-pivot irrigation system. The off-design working condition was a common phenomenon in actual operation management. Taking Herman - Hein uniformity coefficient (C_{UH}) and distribution uniformity coefficient (D_U) as the evaluation indicators, the influence of off-design working conditions and configuration on uniformity was analyzed by field test. The results showed that C_{UH} was reduced by 12.91%, D_U was reduced by 6.35% with low pressure sprinkler D3000, and C_{UH} was reduced by 10.50%, D_U was reduced by 2.39% with low pressure sprinkler R3000 when moving speed was changed from 30% to 100%. When the inlet pressure of the center-pivot irrigation system was reduced from designed value of 0.16 MPa to 0.08 MPa, C_{UH} was reduced by 14.04%, D_U was reduced by 15.09% with D3000, and C_{UH} was reduced by 13.37%, D_U was reduced by 15.61% with R3000. When the end water spray gun was open, C_{UH} was reduced by 10.27%, D_U was reduced by 14.13% with D3000, and C_{UH}

收稿日期: 2015-07-20 修回日期: 2015-10-04

* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2011AA100507)、“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2014BAD12B05)和黑龙江八一农垦大学培育资助项目(XZR2014-04)

作者简介: 李连豪, 博士生, 黑龙江八一农垦大学讲师, 主要从事节水灌溉技术与装备研究, E-mail: lianhao8002@126.com

通讯作者: 李光永, 教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉技术与装备研究, E-mail: lgycau@163.com

was reduced by 20.78%, D_U was reduced by 23.15% with R3000. Without pressure regulator under the condition of flat ground, when inlet pressures were 0.12, 0.16, 0.20 MPa, C_{UH} values of the center-pivot irrigation system with D3000 were reduced by 1.23%, 1.82% and 6.51%, D_U values were reduced by 29.61%, 14.87% and 12.52%, and C_{UH} values were reduced by 9.26%, 15.00% and 17.19%, D_U values were reduced by 40.05%, 32.45% and 29.76% with R3000, respectively.

Key words: Center-pivot sprinkler irrigation system Uniformity Assessment Operation condition

引言

中心支轴式喷灌机 (Center-pivot irrigation system), 也称圆形喷灌机, 是迄今为止自动化程度最高的一种喷灌机。由于其具有省工、省力、易于实现精确灌溉、施肥 (施药) 等显著优点, 已在北美、西欧和中东等劳动力价格高的国家得到普遍应用。随着水资源短缺矛盾日益加剧、农牧业经营规模扩大和劳动力价格提高, 近年来中心支轴式喷灌机在中国的使用量也呈现出逐年快速增长趋势。

田间喷灌均匀性是中心支轴式喷灌机主要的技术指标之一, 也是表征喷灌效果好坏的质量指标。中心支轴式喷灌机的灌水均匀性受系统配置 (低压喷头类型、有无压力调节器及规格和末端喷枪等)、运行管理 (行进速度、首部入机压力、末端喷枪开启和关闭) 以及风速等多种因素的影响。

国内外对中心支轴式喷灌机结构、喷头配置、系统设计、风速对均匀度的影响等进行了诸多研究^[1-3], Ascough 等^[4]、Bremond 等^[5] 和 Hussein^[6] 分别提出了用赫尔曼-海恩均匀系数 (C_{UH}) 和分布均匀度系数 (D_U) 评定喷灌机水量分布均匀性的方法。Dukes 等^[7] 进行了中心支轴式喷灌机田间喷灌均匀度的测定和评估, 但侧重于评估风速对中心支轴式喷灌机的影响。中心支轴式喷灌机在实际应用过程中, 常会出现与系统设计条件不一致的其他使用工况, 如由于地下水位的变化, 导致的系统首部入机压力与设计值不符; 没有配置压力调节器或规格配置不当, 末端喷枪开启方式与原始设计不符等, 这些田间运行工况均会影响喷灌均匀性, 但田间实测评估鲜见报道。

基于以上考虑, 本文通过田间实测试验评估田间运行管理和配置对中心支轴式喷灌机喷灌均匀性的影响, 研究结果可为中心支轴式喷灌机的运行管理提供依据和支撑。

1 材料与方 法

1.1 试验地点

试验在黑龙江省农垦总局绿色草原牧场进行, 土质为黑粘土, 平地, 试验时间为 2013 年 10 月

21—29 日。

1.2 喷灌机与设备配置

中心支轴式喷灌机基本参数见表 1。系统配置 (入机压力、压力调节器、喷头间距和喷嘴型号) 由 Nelson 公司提供。所有试验均由同一台中心支轴式喷灌机完成。

表 1 试验用中心支轴式喷灌机基本参数
Tab.1 Basic parameters of center-pivot irrigation system for test

参数	数值	参数	数值
喷灌机长度/m	272	末端增压泵扬程/m	22
末端喷枪额定流量/($m^3 \cdot h^{-1}$)	15.96	首部入机压力/MPa	0.16
末端喷枪额定压力/MPa	0.329	水泵流量/($m^3 \cdot h^{-1}$)	80
压力调节器预置压力/MPa	0.103	跨数	5
悬臂长度/m	12	单跨长度/m	52

1.3 雨量筒与布置

以中心支轴式喷灌机中心支轴为中心, 扇形交错排列雨量筒^[8] (开口直径 87 mm, 深度 162 mm) 支架, 支架上端离地面 60~70 cm, 布置方法及实际作业布置^[9] 如图 1 所示。雨量筒的错开距离近似等于雨量筒间距的 $\frac{1}{N}$, N 为雨量筒的排数; 图中, a 为基准点, 用以计算第 i 个雨量筒与中心支轴的距离; 喷头射程小于 10 m 时, 雨量筒的最大间距为 3 m, 喷头射程大于等于 10 m 时, 雨量筒的最大间距为 5 m; 相邻 2 排最末端雨量筒支架间距 50 m, 相邻 2 个雨量筒间距 3 m。

1.4 风速测定

采用旋杯式风速风向仪测量试验期间的风速, 风速仪距地面高度 2 m, 试验期间风速不大于 0.3 m/s。

1.5 田间影响喷灌机均匀度因素的选择

影响中心支轴式喷灌机喷灌均匀度的因素很多^[8], 本文重点探讨田间运行工况及配置对中心支轴式喷灌机喷灌均匀度的影响。运行工况包括行进速度和首部入机压力, 配置包括压力调节器、低压喷头类型和末端喷枪开启和关闭等。

1.6 均匀度计算方法

(1) 赫尔曼-海恩均匀度 C_{UH} : 描述各观测点水深和平均水深偏差的绝对值之和与总水深均值的比

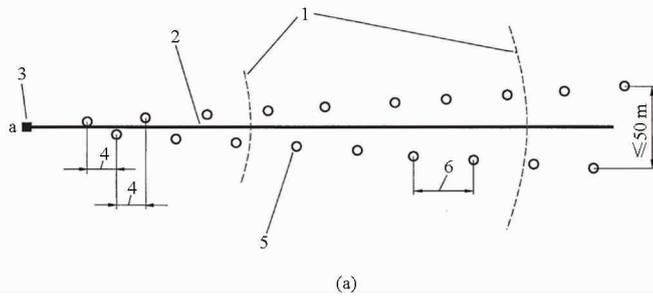


图1 雨量筒布置

Fig.1 Arrangement of rain gauges

(a) 布置方法 (b) 实际作业布置

1. 轮辙 2. 中心支轴式喷灌机管道 3. 中心支轴 4. 错开的距离 5. 第 j 排的第 i 个雨量筒 (与另一排错开) 6. 雨量筒间距

值, C_{UH} 可以较好地表征整个田间水量分布与平均值偏差的情况^[10]。其计算式为

$$C_{UH} = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |h_i - h| r_i}{\sum_{i=1}^n h_i r_i} \right) \times 100\% \quad (1)$$

式中 n ——数据分析所采用的雨量筒数量, 个
 i ——数据分析所采用的雨量筒的序数, 从距中心点最近的被采用的雨量筒 ($i = 1$) 开始

 h_i ——第 i 个雨量筒的喷灌水深, mm r_i ——第 i 个雨量筒至中心支轴距离, m h ——雨量筒平均喷灌水深, mm

(2) 分布均匀度 D_U : 描述部分测点水深的平均值与总水深均值的比值^[11], 强调降水深较小的那部分水量, 有利于保证作物获得必要的最小灌水量。其计算式为

$$D_U = \frac{d_{lq}}{D_{ave}} \times 100\% \quad (2)$$

其中

$$d_{lq} = \frac{\sum_{i=1}^{n/4} h_{\frac{ni}{4}} S_{\frac{ni}{4}}}{\sum_{i=1}^{n/4} S_{\frac{ni}{4}}}$$

式中 d_{lq} ——喷灌水深从小到大排列前 $n/4$ 个雨量筒的加权平均数, mm

D_{ave} ——数据分析所采用所有雨量筒喷灌水深的加权平均数, mm

表2 2种行走速度和2种低压喷头在设计配置时的喷灌均匀度

Tab.2 Uniformity of designed sprinkler irrigation at two moving speeds and two low pressure sprinklers

工况	行进速度/%	首部压力/MPa	喷头类型	压力调节器输出压力/MPa	末端喷枪	$C_{UH}/\%$	$D_U/\%$
1	100	0.16	D3000	0.103	关闭	75.31	67.77
2	30	0.16	D3000	0.103	关闭	88.22	78.27
3	100	0.16	R3000	0.103	关闭	87.13	76.90
4	30	0.16	R3000	0.103	关闭	93.48	79.29

注: 中心支轴式喷灌机行进速度由其主控制箱面板上的百分计数器来控制, 数值越大行进速度越快。

$h_{\frac{ni}{4}}$ ——前 $n/4$ 个雨量筒中第 i 个雨量筒的喷灌水深, mm

$S_{\frac{ni}{4}}$ ——前 $n/4$ 个雨量筒与中心支轴的距离, m

上述均匀度计算时, 不包括悬臂部分的雨量筒, 并剔除了靠近中心支座距离 10% 的雨量筒的数据^[8]。

需特别指出的是, 本文所涉及的试验数据均为 2 排雨量筒采集数据的平均值。

2 结果与分析

2.1 行进速度和低压喷头类型对喷灌均匀度的影响

2 种行进速度和 2 种低压喷头在设计配置下的实测水量 (平均风速 0.14 m/s, 最大风速 0.26 m/s) 分布如图 2 所示, 均匀度计算结果如表 2 所示。

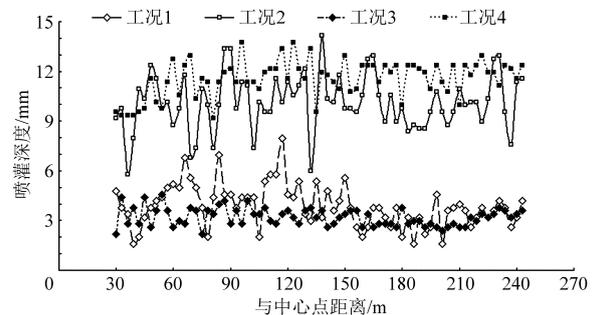


图2 2种行走速度和2种低压喷头条件下的水量分布

Fig.2 Water distributions at two moving speeds and two low pressure sprinklers

由表 2 及图 2 可知, 在采用 2 种低压喷头条件下, C_{UH} 和 D_U 均随行进速度的提高而减小。采用

D3000 时,30% 行进速度的 C_{UH} 为 88.22%, 较 100% 行进速度时高 12.91%, D_U 高 10.50%; 采用 R3000 时, C_{UH} 为 93.48%, 较 100% 时行进速度高 6.35%, D_U 高 2.39%。

100% 行进速度时, R3000 的 C_{UH} 较 D3000 高 15.70%, D_U 高 13.47%; 30% 行进速度时, R3000 的 C_{UH} 较 D3000 高 5.96%, D_U 高 1.30%。

2.2 首部入机压力对喷灌均匀度的影响

首部入机压力分别设置为 0.08、0.16、0.20 MPa 3 种状况(平均风速 0.10 m/s, 最大风速 0.17 m/s)。试验结果见表 3。

表 3 不同首部压力时的喷灌均匀度

Tab.3 Uniformity of sprinkler irrigation under different head pressures

工况	行进速度/%	首部压力/MPa	喷头类型	压力调节器		末端喷头	$C_{UH}/\%$	$D_U/\%$
				输出压力/MPa	末端喷头			
1	100	0.08	D3000	0.103	关闭	61.28	52.68	
2	100	0.16	D3000	0.103	关闭	75.32	67.77	
3	100	0.20	D3000	0.103	关闭	75.52	70.86	
4	100	0.08	R3000	0.103	关闭	73.76	62.29	
5	100	0.16	R3000	0.103	关闭	87.13	76.90	
6	100	0.20	R3000	0.103	关闭	87.36	76.67	

由压力调节器产品样本可查得, 该压力调节器的起调压力为 0.09 MPa, 由表 3 可知, 当首部压力为 0.08 MPa, 即小于压力调节器的起调压力, C_{UH} 和 D_U 均大幅度下降, 采用 D3000 时, C_{UH} 下降 14.04%, D_U 下降 15.09%; 采用 R3000 时, C_{UH} 下降 13.37%, D_U 下降 15.61%。当首部入机压力为 0.20 MPa 时, 与设计工况 0.16 MPa 比较, C_{UH} 和 D_U 基本保持不变, 同理, 参照 D3000 工况设计, 低压喷头 R3000 的均匀度变化规律与低压喷头 D3000 一致。

2.3 末端喷枪开启对喷灌均匀度的影响

中心支轴式喷灌机沿中心支座做圆周运动, 其灌溉区域为圆形, 但对于方形地块, 中心支轴式喷灌机对圆形灌溉区域的 4 个角则无法灌溉, 一般在中心支轴式悬臂末端增加喷枪, 行进到四角区域时开启喷枪。表 4 所示为末端喷枪开启与关闭时的均匀度测试结果; 实测水量(平均风速 0.16 m/s, 最大风速 0.28 m/s)分布如图 3 所示。

由表 4 和图 3 可知, 当末端喷枪开启时, 采用 D3000 时, C_{UH} 下降 10.27%, D_U 下降 14.13%; 采用 R3000 时, C_{UH} 下降 20.78%, D_U 下降 23.15%。

2.4 无压力调节器对喷灌均匀度的影响

在首部压力一定的条件下, 在喷头进口处安装

表 4 末端喷枪开启与关闭条件下的喷灌均匀度

Tab.4 Uniformity of sprinkler irrigation with end water spray gun open and closed

工况	行进速度/%	首部压力/MPa	喷头类型	压力调节器输出压力/MPa	末端喷枪	$C_{UH}/\%$	$D_U/\%$
2	100	0.16*	D3000	0.103	开启	65.05	53.64
3	100	0.16	R3000	0.103	关闭	87.13	76.90
4	100	0.16*	R3000	0.103	开启	66.35	53.75

注: * 首部压力由变频器控制和保证。

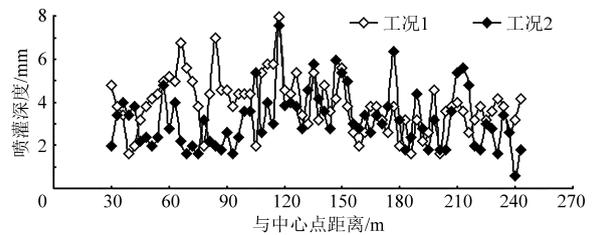


图 3 末端喷枪开关条件下的水量分布

Fig.3 Water distributions under conditions with end water spray gun open and closed

适当的压力调节器进行压力调节, 可使各喷头进口压力一致。特别是在地形起伏的灌溉区域, 安装压力调节器尤为必要。有些中心支轴式喷灌机不安装压力调节器, 该种工况下喷灌均匀度测试结果(平均风速 0.14 m/s, 最大风速 0.22 m/s)见表 5。由表 5 可知, 无压力调节器与有压力调节器的工况比较, 在首部入机压力为 0.12、0.16、0.20 MPa 时, 采用 D3000 时, C_{UH} 分别下降 1.23%、1.82% 和 6.51%, D_U 分别下降 29.61%、14.87% 和 12.52%。采用 R3000 时, C_{UH} 分别降低 9.26%、15.00%、17.19%, D_U 分别降低 40.05%、32.45% 和 29.76%。

表 5 无压力调节器条件下的喷灌均匀度(平地)

Tab.5 Uniformity of sprinkler irrigation without pressure regulator (flat ground)

工况	行进速度/%	首部压力/MPa	喷头类型	压力调节器	末端喷枪	$C_{UH}/\%$	$D_U/\%$
2	100	0.16	D3000	无	关闭	73.50	52.90
3	100	0.20	D3000	无	关闭	68.81	55.25
4*	100	0.16	D3000	有	关闭	75.32	67.77
5	100	0.12	R3000	无	关闭	77.87	36.95
6	100	0.16	R3000	无	关闭	72.13	44.45
7	100	0.20	R3000	无	关闭	69.04	47.14
8*	100	0.16	R3000	有	关闭	87.13	76.90

注: * 为设计工况。

3 讨论

(1) 行进速度和低压喷头类型对喷灌均匀度的影响

2种低压喷头(D3000和R3000)的喷洒均匀度均随着中心支轴喷灌机行走速度的提高而降低,这与严海军^[12]、David等^[13]和Hanson等^[14]的研究结论一致。D3000为散射低压喷头,R3000为旋转低压喷头,R3000在2种行进速度条件下,其灌水均匀度均高于D3000,系统配置时,应尽量采用R3000低压喷头。

(2)首部入机压力对喷灌均匀度的影响

当首部压力小于压力调节器的起调压力时,均匀度大幅度下降;当首部压力大于压力调节器的起调压力时,均匀度变化幅度较小。这与Valin等^[15]和Clark等^[16]的研究结论相似。对于目前广泛应用的规格为0.103 MPa Nelson压力调节器,其最低工作压力(起调压力)是0.13 MPa。当首部压力低于压力调节器起调压力时,压力调节器入口压力远小于压力调节器起调压力,压力调节器不能正常工作,从而导致均匀度大幅度下降。

当首部压力高于压力调节器起调压力时,减去压力沿程损失,压力调节器入口压力仍高于压力调节器起调压力,压力调节器能够正常工作,使得低压喷头入口压力一致,均匀度基本没有变化。

(3)末端喷枪开启对喷灌均匀度的影响

本试验在进行时,控制柜装配变频器,其能够确保中心支轴式喷灌机末端喷枪开启或者关闭时首部压力相同。当中心支轴式喷灌机末端喷枪全程开启,中心支轴式喷灌机均匀度均大幅度下降。这主要是由于在末端喷枪全程开启条件下,输水管的水量增加,造成支管水头损失增加,使得后段支管压力小于压力调节器的起调压力,沿程压力分布不均匀,从而使得均匀度下降。有些喷灌系统管理中,为了增加喷灌机的控制面积,末端喷枪实行与设计方

案不一致的全程开启方式,这种运行方式会导致均匀度 C_{UH} 下降10~20个百分点,取决于采用的喷头,应尽量避免此种运行方式。

但通常农户在使用过程中,不会装配变频器,此时随着中心支轴式喷灌机末端喷枪全程开启,总流量增加,造成首部压力大幅度下降,从而使中心支轴式喷灌机均匀度均大幅度下降,这也是在使用中应尽量避免的运行方式。

(4)无压力调节器对喷灌均匀度的影响

无压力调节器,在平地条件下,喷灌机前段压力大于低压喷头工作压力,尾段部分小于工作压力, C_{UH} 描述整个喷灌机各个低压喷头水量与平均值的变差或离散程度, C_{UH} 依然会较高。但 D_U 描述的是最小1/4水量占平均值的比例,由于无压力调节器时,尾段部分压力下降,水量减小,导致 D_U 下降幅度很大。这种现象表明,在无压力调节器时,尽管 C_{UH} 较高,但由于最小1/4水量的减少,会导致某些灌域灌水不足。因此,在中心支轴式喷灌机实际应用中应安装压力调节器。

4 结束语

通过田间试验,明晰了中心支轴式喷灌机的非设计工况和配置对喷洒均匀度的影响。喷灌均匀度随喷灌机行进速度提高而减小。当入机压力小于设计值和末端喷枪全程开启时,喷灌均匀度均显著下降。无压力调节器且平地条件下,采用D3000喷头的 C_{UH} 降低不明显,但采用R3000喷头时 C_{UH} 降低明显,并且不配置压力调节器会导致 D_U 大幅度降低。该结果有助于用户对中心支轴式喷灌机的运行管理和配置进行风险评估。

参 考 文 献

- 1 金宏智,严海军,钱一超. 国外节水灌溉工程技术发展分析[J]. 农业机械学报,2010,41(9):60-64.
Jin Hongzhi, Yan Haijun, Qian Yichao. Overseas development of water-saving irrigation engineering technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(9):60-64. (in Chinese)
- 2 严海军,姚培培,朱勇,等. 圆形喷灌机喷头配置技术与软件研究[J]. 农业机械学报,2011,42(6):84-87.
Yan Haijun, Yao Peipei, Zhu Yong, et al. Nozzle configuration and software for center pivot irrigation system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6):84-87. (in Chinese)
- 3 William K. Center pivot sprinkler nozzle replacement and maintenance [C] // Proceedings of the 24th Annual Central Plains Irrigation Conference, 2012:102-110.
- 4 Ascough G W, Kiker G A. The effect of irrigation uniformity on irrigation water requirements [J]. Water SA, 2002, 28(2):235-242.
- 5 Bremond B, Molle B. Characterization of rainfall under center pivot: influence of measuring procedure [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1995, 121(5):347-353.
- 6 Hussein M. Effect of maintenance on the performance of sprinkler irrigation system and irrigation water conversation [J]. Food Science and Agricultural Research, 2006, 17(8):5-19.
- 7 Dukes M D, Perry C. Uniformity testing of variable-rate center pivot irrigation control systems [J]. Precise Agriculture, 2006, 7(3):205-218.

- 5 陆林广. 泵站进水水道设计理论的新进展[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2001, 29(1):40-45.
Lu Linguang. Progress in design theory for suction boxes of pumping stations[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2001, 29(1):40-45. (in Chinese)
- 6 冯俊, 郑源, 罗欣. 后置导叶对立式轴流泵装置性能影响[J]. 水电能源科学, 2012, 30(8):126-128.
Feng Jun, Zheng Yuan, Luo Xin. Effects of exit guide vane on performance of axial-flow pump system[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(8):126-128. (in Chinese)
- 7 欧鸣雄, 施卫东, 田飞, 等. 立式循环泵进水水道的内部流场研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(3):55-58, 63.
Ou Mingxiong, Shi Weidong, Tian Fei, et al. Flow field analysis of inlet sump in vertical circulation pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(3):55-58, 63. (in Chinese)
- 8 成立, 刘超, 汤方平, 等. 立式泵装置进水水道演化数值分析研究[J]. 水动力学研究与进展, 2004, 19(1):81-85.
Cheng L, Liu C, Tang F P, et al. Research on an evolution method for suction box of pumping system by numerical computation [J]. Journal of Hydrodynamics, 2004, 19(1):81-85. (in Chinese)
- 9 成立, 刘超, 周济人, 等. 大型立式泵站双向进水水道三维紊流数值模拟[J]. 农业机械学报, 2004, 35(3):61-64.
Cheng Li, Liu Chao, Zhou Jiren, et al. Numerical simulation of three-dimensional flow inside suction box of reversible pumping station[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(3):61-64. (in Chinese)
- 10 李忠, 杨敏官, 王晓坤. 导叶对轴流泵性能影响的试验[J]. 排灌机械工程学报, 2009, 27(1):15-18.
Li Zhong, Yang Minguan, Wang Xiaokun. Experimental study of guide vane influence on performance of axial-flow pump[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2009, 27(1):15-18. (in Chinese)
- 11 汤方平, 王国强. 后导叶对喷水推进轴流泵性能的影响[J]. 船舶力学, 2006, 10(6):19-26.
Tang Fangping, Wang Guoqiang. Influence of outlet guide vanes upon performances of water jet axial-flow pump[J]. Journal of Ship Mechanics, 2006, 10(6):19-26. (in Chinese)
- 12 郑源, 茅媛婷, 周大庆, 等. 低扬程大流量泵装置马鞍区的流动特性[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(5):369-373.
Zheng Yuan, Mao Yuanting, Zhou Daqing, et al. Flow characteristics of low-lift and large flow rate pump installation in saddle zone[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(5):369-373. (in Chinese)
- 13 杨华, 孙丹丹, 汤方平, 等. 叶轮进口挡板改善轴流泵非稳定工况性能研究[J]. 农业机械学报, 2012, 43(11):18-22.
Yang Hua, Sun Dandan, Tang Fangping, et al. Research on the performance improvement of axial-flow pump under unstable condition using CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(11):18-22. (in Chinese)
- 14 张德胜, 施卫东, 张华, 等. 不同湍流模型在轴流泵性能预测中的应用[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1):66-71.
Zhang Desheng, Shi Weidong, Zhang Hua, et al. Application of different turbulence models for predicting performance of axial-flow pump[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1):66-71. (in Chinese)
- 15 Li Yaojun, Wang Fujun. Numerical investigation of performance of an axial-flow pump with inducer [J]. Journal of Hydrodynamics; Ser. B, 2007, 19(6):705-711.
- 16 Shi Weidong, Zhou Ling, Lu Weigang, et al. Numerical prediction and performance experiment in a deep-well centrifugal pump with different impeller outlet width[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 25(1):46-52.
- 17 Winzer P J, Sherman K, Zirngibl M. Time-division multiplexed Raman pump experiment using a tunable C-band laser[J]. Photonics Technology Letters IEEE, 2002, 14(6):789-791.

(上接第 66 页)

- 8 GB/T 19797—2005/ISO 11545:2001. 农业灌溉设备 中心支轴式和平移式喷灌机水量分布均匀度的测定[S]. 2005.
- 9 Kincaid D C. Application rates from center pivot irrigation with current sprinkler types[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2006, 21(4):605-610.
- 10 王永辉, 兰才有, 仪修堂. 中心支轴式喷灌机地角漏灌问题解决方案探讨[J]. 节水灌溉, 2012(3):72-74.
- 11 King B A, Wall R W, Karsky T F. Center-pivot irrigation system for independent site-specific management of water and chemical application [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2009, 25(2):187-198.
- 12 严海军. 基于变量技术的圆形和平移式喷灌机水量分布特性的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
- 13 David J H, Gu Yuping, James W, et al. Lateral move water application uniformity relative to machine speed[J]. Transactions of the ASAE, 1988, 31(2):527-531.
- 14 Hanson B R, Lancaster D L. Evaluation of center-pivot sprinkler systems[J]. California Agriculture, 1986, 40(5):24-26.
- 15 Valin M L, Cameira M R. A model for center-pivot design and evaluation[J]. Computer and Electronic in Agriculture, 2012, 87: 159-170.
- 16 Clark G A, Srinivas K, Rogers D H, et al. Measured and simulated uniformity of low drift nozzle sprinkler[J]. Transactions of the ASAE, 2002, 46(2):321-330.