

圆形喷灌机喷头配置技术与软件研究*

严海军¹ 姚培培² 朱勇² 余鹏飞²

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 中国农业机械化科学研究院节水灌溉工程装备中心, 北京 100083)

【摘要】 以圆形喷灌机均匀喷灌水深为目标,建立了主输水管喷头间距不相等条件下喷头配置数学模型,提出了全部使用、不使用及部分使用压力调节器3种工况下的喷头配置技术方案,构建了基于SQL Server的圆形喷灌机低压喷头、压力调节器、机组桁架等零部件结构及性能参数数据库,并开发了可实现圆形喷灌机喷头配置和机组水力性能预测的专业软件。DYP-249型圆形喷灌机应用该软件实现了D3000喷头配置,配置的入机总流量与理论值的相对误差小于1.1%;根据配置结果进行了田间试验,结果表明沿主输水管方向的喷灌强度试验值和模拟值的变化趋势一致,因田间试验受到风速、风向、蒸发飘移和编程算法等影响,测得的喷灌均匀系数值(75.26%)低于软件模拟值(85.59%)。工程实例表明软件能够准确、快捷地完成圆形喷灌机的喷头配置,并能较好地预测机组田间水力性能。

关键词: 圆形喷灌机 喷头配置 数学模型 水力性能 软件

中图分类号: S275.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)06-0084-05

Nozzle Configuration and Software for Center Pivot Irrigation System

Yan Haijun¹ Yao Peipei² Zhu Yong² Yu Pengfei²

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

2. Center for Water-saving Irrigation Equipment, Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract

In order to get uniform water distribution, nozzle size selection of low pressure sprinklers with nonuniform spacing along the center pivot main lateral was established. Three configuration methods of sprinklers equipped with, without and partly with pressure regulators were put forward, and databases on sprinklers, pressure regulators and spans were built. Software on nozzle configuration and hydraulic performance analysis of center pivot irrigation system was also developed. Nozzle package selection for DYP-249 center pivot was generated by using the developed software and a field experiment on its hydraulic performance was conducted. The results showed that the inlet flow rate by using the software for DYP-249 center pivot was very close to the theoretical value, with a relative error less than 1.1%. Both the measured and simulated application rates along the main lateral had the same change trend. Due to the wind speed, wind direction, evaporation and drift, programming algorithm etc., the measured water distribution coefficient was 75.26%, lower than the simulated coefficient of 85.59% by this software. The practical example showed that the software could achieve quick and accurate nozzle configuration, and well predicted hydraulic performance for center pivot irrigation system.

Key words Center pivot irrigation system, Nozzle configuration, Mathematical model, Hydraulic performance, Software

引言

圆形喷灌机也称中心支轴式喷灌机,是迄今为

止机械化、自动化程度最高的喷灌机组。圆形喷灌机喷头喷洒作业时主输水管绕中心支轴旋转,喷头配置与管道式喷灌系统不同,主要采用等间距、不等

收稿日期: 2010-11-22 修回日期: 2011-01-10

* 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2009-2-12、2009-1-92)

作者简介: 严海军,副教授,主要从事节水灌溉装备研究,E-mail: yanhj@cau.edu.cn

流量的配置方法,从中心支轴开始由内至外喷头喷水量逐渐增大^[1]。目前,绝大多数圆形喷灌机采用下悬式安装的低压喷头,喷头间距 2.3 ~ 4.8 m,整机喷头数为 30 ~ 200^[2],手工配置繁琐,精度难以保证。因此,建立喷头配置数学模型^[3-4]、开发计算机配置软件^[5]是提高机组喷洒均匀性的主要手段。国外 Nelson、Senninger 及 Valmont 等喷头或喷灌机制造企业均拥有喷头配置软件,但软件数据库不能兼容其他公司产品,不适合国产圆形喷灌机的喷头配置。仪修堂等^[6]提出了圆形喷灌机在喷头等间距布置时的配置数学模型及相关软件,但水力损失计算中未考虑喷头下垂管部分,在一定程度上降低了配置精度。目前,国内外相关软件只能实现圆形喷灌机的喷头配置,不能预测机组田间工作时的水力性能。因此,本文将完善圆形喷灌机的喷头配置模型,构建喷头、压力调节器、桁架结构等零部件数据库,开发出数据库可扩充、兼具喷头配置和机组水力性能预测的专业软件。

1 数学模型建立

1.1 喷头流量

为实现均匀的喷灌水深,圆形喷灌机可按面积法原理进行喷头配置,即主输水管任意管段处通过流量与该处绕中心支轴形成的圆形面积之比为常数。如图 1 所示,可以建立公式^[7]

$$\frac{Q - Q_E}{\pi L^2} = \frac{Q - Q_{i+1}}{\pi r_i^2} \quad (1)$$

式中 Q ——入机总流量, m^3/h
 Q_E ——末端喷头的流量, m^3/h
 Q_i ——主输水管第 i 段管道的通过流量, $m^3/h, i = 1, 2, \dots, N$
 r_i ——主输水管第 i 段管道出口至中心支轴的距离, m
 L ——主输水管物理总长度, m
 N ——喷头总数

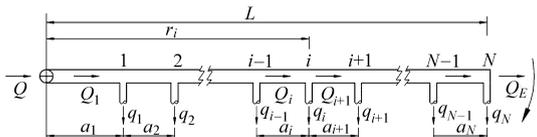


图 1 圆形喷灌机主输水管喷头配置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sprayers on main lateral of center pivot irrigation system

根据式(1)可以推导出主输水管任意喷头的流量

$$q_i = (Q - Q_E) \frac{a_i \left(2 \sum_{j=1}^i a_j - a_i \right)}{\left(\sum_{j=1}^N a_j \right)^2} \quad (2)$$

式中 q_i ——主输水管第 i 个喷头的流量, m^3/h

a_i ——主输水管上第 $i-1$ 个喷头与第 i 个喷头之间的距离, m

1.2 入机总流量

圆形喷灌机的入机总流量为主输水管上所有喷头(包括末端喷头)的流量之和,满足

$$Q = \sum_{i=1}^N q_i + Q_E \quad (3)$$

1.3 喷头工作压力

当圆形喷灌机主输水管的末端工作压力已知时,可以推导出主输水管第 i 个喷头座位置的工作压力,计算公式为

$$H_{i-1} = \sum_{j=i}^N \left(K \frac{Q_j^{m_1}}{D^{b_1} C^{m_1}} a_j + \zeta_1 \frac{8 Q_j^2}{\pi^2 D^4 g} \right) + H_N \quad (4)$$

式中 H_{i-1} ——第 $i-1$ 个喷头座的工作压力, m

D ——主输水管内径, mm

K ——单位换算系数

C ——阻力系数

m_1 ——主输水管的流量指数

b_1 ——主输水管的管径指数

ζ_1 ——喷头座的局部阻力系数

H_N ——主输水管末端工作压力, m

圆形喷灌机安装低压喷头时采用下悬式,使用 U 形管和下垂管,如图 2 所示。上拱状桁架使主输水管的每个喷头座不是处于同一水平面内,为确保

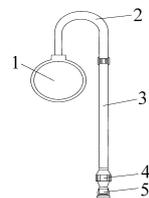


图 2 低压喷头连接组件

Fig. 2 Assembly diagram of low pressure sprinkler

1. 主输水管 2. U形弯管 3. 下垂管 4. 压力调节器 5. 喷头

相同喷头地隙,需要调整连接喷头的下垂管长度。下垂管出口的工作压力可采用公式

$$H_{ip} = H_i - f \frac{q_i^{m_2}}{d^{b_2}} l_i - \zeta_2 \frac{8 q_i^2}{\pi^2 d^4 g} + l_i \quad (5)$$

式中 H_{ip} ——第 i 个喷头座相应的下垂管出口压力, m

d ——下垂管管径, mm

l_i ——第 i 个喷头座与下垂管出口之间的垂直高差, m

m_2 ——下垂管的流量指数

b_2 ——下垂管的管径指数

ζ_2 ——弯管的局部阻力系数

f ——下垂管的摩擦损失系数

1.4 入机工作压力

整理式(4)可得圆形喷灌机入机工作压力的计算公式

$$H = H_1 + K \frac{Q_1^{m_1}}{D^{b_1} C^{m_1}} a_1 \quad (6)$$

式中 H ——入机工作压力, m

1.5 喷嘴直径

当喷头的流量和工作压力已知时,由文献[8]可求出喷头的理论喷嘴直径为

$$d_2 = \sqrt{\frac{79.8473q_i}{\mu \sqrt{H_{zi}}} \quad (7)$$

式中 d_2 ——理论喷嘴直径, mm

H_{zi} ——第 i 个喷头的工作压力, m

μ ——喷嘴流量系数,一般取 0.95

1.6 机组运行速度

圆形喷灌机喷灌水深取决于机组的运行速度,运行越快,喷灌水深越小。机组运行速度又取决于末端塔架车的运行速度,即与驱动电动机转速、两级减速器的传动比以及百分率计时器设定值有关。末端塔架车的运行速度可表示为

$$V_e = \frac{\pi k R n}{30 i_1 i_2} \quad (8)$$

式中 V_e ——末端塔架车的运行速度, m/s

k ——百分率计时器设定值, %

R ——轮胎动力半径, m

n ——驱动电动机转速, r/min

i_1 ——电动机减速器传动比

i_2 ——车轮减速器传动比

假设圆形喷灌机各塔架车同步运行,且运行时主输水管呈直线状态,则主输水管任意管道出口的运行速度为

$$V_i = \frac{r_i}{r_e} V_e \quad (9)$$

式中 V_i ——主输水管第 i 段管道出口处的运行速度, m/s

r_e ——末端塔架车至中心支轴的距离, m

2 软件开发关键技术

2.1 软件总体设计

根据上述数学模型开发的圆形喷灌机喷头配置和机组水力性能预测的专业软件由参数设置、计算分析和结果输出三大模块组成。软件总体结构图如图3所示。

2.2 喷头配置关键技术

圆形喷灌机喷头配置目的是使喷头流量尽量接近设计流量。由流体力学可知,喷头流量与喷嘴直

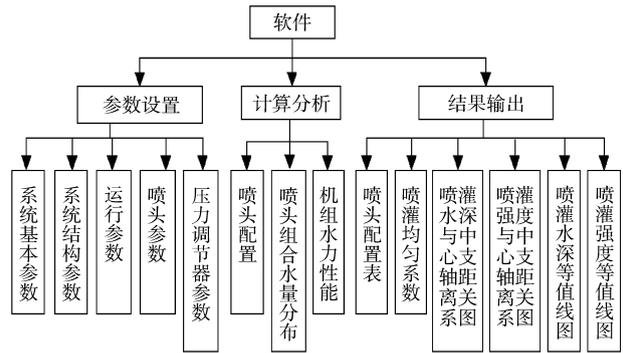


图3 软件总体结构图

Fig.3 Structural diagram of the software

径、工作压力有关。因此应首先选择小直径喷嘴,当配置的流量仍超过设计流量时,需要在喷头进口前安装压力调节器或节流孔板以降低喷头工作压力。目前,圆形喷灌机低压喷头压力调节器的使用有全部使用、不使用和部分使用3种方式。

(1) 全部使用压力调节器

喷头配置前需要构建不同压力调节器与喷嘴直径组合工况下的喷头流量数据库,配置时应遵循喷头配置流量与设计流量的偏差系数不大于5%的原则。为减少计算量,可从最靠近中心支轴的第一个喷头开始,首先选择压力调节器,其次从数据库中遍历搜寻与该处设计流量最接近的喷嘴直径作为配置结果,依此方法按顺序配置其他喷头。图4为喷头配置流程图。

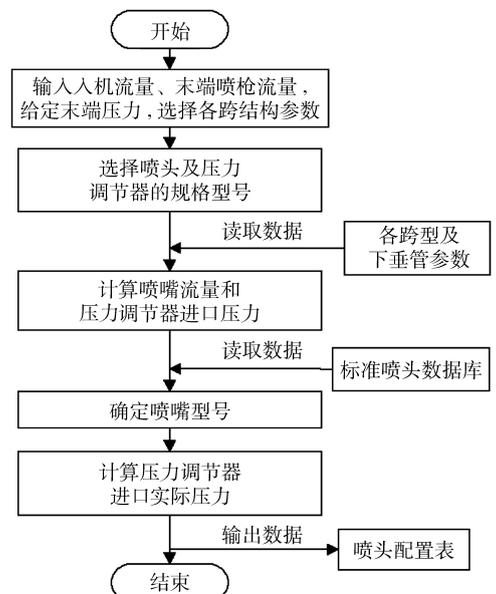


图4 安装压力调节器时的喷头配置流程图

Fig.4 Flow chart of nozzle configuration software with pressure regulator

(2) 不使用压力调节器

应遵循实际喷嘴直径与理论喷嘴直径的偏差系数不大于5%的原则。首先按式(7)计算出理论喷

嘴直径,其次从数据库中搜寻出与该理论喷嘴直径最接近的喷头作为配置结果,依此方法按顺序配置其他喷头。

(3) 部分使用压力调节器

综合压力调节器全部使用和不使用两种工况的配置方法,可以实现部分使用时的喷头配置。

2.3 机组水力性能分析关键技术

当主输水管喷头型号、布置间距及工作参数确定后,调用建立的单喷头径向水量分布图数据库,由式(8)、(9)求得机组运行参数,可以通过组合重叠喷水量模拟出机组静止或运行工况时水量分布,进而对机组平均喷灌强度、喷灌水深、喷灌均匀系数等指标进行预测。单喷头径向水量分布图是实现机组水力性能预测的基础和关键,本软件构建了室内无风条件下测得的 D3000 喷头径向水量分布图数据库。软件开发时,沿主输水管的喷灌水测点间距选取 0.5 m,计算测点接受喷头喷水量时需对测得的径向水量分布离散值进行插值处理。图 5 是圆形喷灌机计算测点喷灌水深流程图。

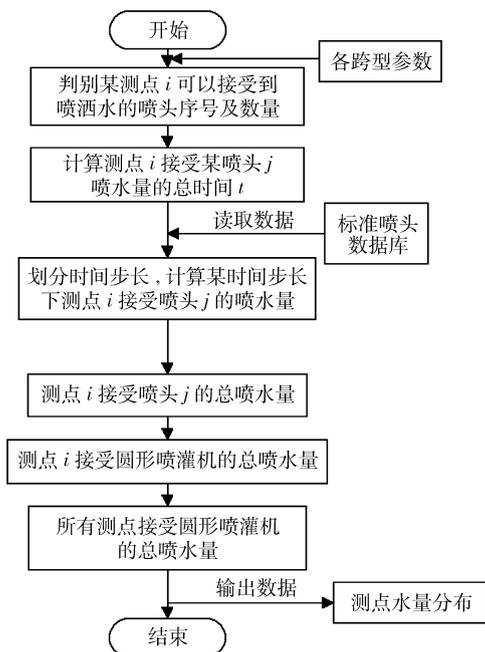


图 5 计算喷灌水深流程图

Fig. 5 Flow chart of water depths calculating

软件开发选择 SQL Server 数据库,建立的圆形喷灌机结构参数数据库包括跨距及主输水管管径、末端悬臂长度及管径、喷头间距、喷头连接下垂管长度及管径等;建立的喷头和压力调节器数据库包括不同的喷嘴直径以及碎水盘组件与压力调节器组装时的喷头流量。用户可以修改、扩充所有数据库。

3 工程实例

软件应用时首先要进行参数设置,包括基本参

数、运行参数、结构参数、喷头和压力调节器等。基本参数包括圆形喷灌机的入机总流量、末端流量(不配置末端喷枪时为零)和末端压力,末端压力可以选择主输水管最末端喷头座处的压力,或者最末端压力调节器进口处压力(如不使用压力调节器,即为喷头进口压力)。运行参数包括机组的百分率计时器设定值、轮胎动力半径、电动机转速、电动机及车轮减速器的传动比等。结构参数需要确定机组的首跨、中间跨和末跨(含末端悬臂)的规格型号及中间跨数,喷头 U 形弯管和下垂管的规格型号及喷头地隙等。此外,还需确定喷头和压力调节器的规格型号,以及压力调节器的使用情况。

应用开发软件对 DYP-249 型圆形喷灌机进行喷头配置,入机理论流量为 $54 \text{ m}^3/\text{h}$,未安装末端喷枪,压力调节器进口压力为 20 m,喷头选择 Nelson 的 D3000 型和蓝色碎水盘,全部使用 138 kPa (20 psi) 规格的压力调节器。圆形喷灌机的轮胎动力半径为 0.588 m,驱动电动机转速为 1487 r/min,电动机减速器和车轮减速器的传动比分别为 50、52,百分率计时器设定值取 40%;总长 249 m,由 6 跨 40 m 跨距的桁架和 9 m 末端悬臂组成,主输水管外径为 165 mm、壁厚为 3 mm,末端悬臂管外径为 114 mm、壁厚为 3 mm。

参数设置完成后,运行软件可以得到喷头配置结果,机组配置的入机总流量与理论流量的相对误差小于 1.1%,每个喷头理论流量与配置流量的平均相对误差为 5.44% (按标准 GB/T 19797—2005 规定^[9],靠近中心支轴的前 10 个喷头未统计在内,其理论流量之和占入机总流量的 1.2%),表明本软件实现喷头配置精度较高。DYP-249 型圆形喷灌机根据喷头配置结果参照标准^[10]进行了田间试验。试验时平均风速不超过 1.5 m/s,瞬时风速不超过 3.0 m/s,风向有变化,以东南风为主;雨量筒布置间距 3 m,收集雨量筒的有效试验范围 40.5 ~ 247.5 m,在距离中心支轴 30、70、110、150、190、230 m 处分别测试机组喷灌强度。图 6 给出了 DYP-249 型圆形喷灌机沿主输水管方向喷灌水深的模拟值与试验值的分布情况,可以看出喷灌水深试验值波动较大,原因是 D3000 喷头选配蓝色碎水盘时喷水量集中在喷头射程的最外侧部分(有效喷洒宽度约为射程的 1/4 ~ 1/3),其余部分受水量极少,受水面积呈圆环状的特点造成的^[10]。应用本软件模拟的喷灌水深分布规律与试验值基本相同。田间试验测得的喷灌均匀系数为 75.26%,而基于室内无风条件下单喷头水量分布得到的喷灌均匀系数模拟值为 85.59%,两者偏差主要是由田间试验时风速风向、

雨量筒间距大、蒸发飘移、编程算法等因素引起。图7给出了DYP-249型圆形喷灌机与中心支轴距离和沿主输水管方向喷灌强度的关系。可以看出,模拟的喷灌强度呈现一定的波动,与试验值相同,均随着与中心支轴距离的增大呈上升趋势。模拟的末端悬臂附近区域喷灌强度迅速下降是由重叠喷头数目减少引起的。

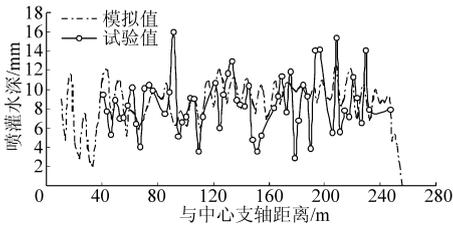


图6 DYP-249型圆形喷灌机沿主输水管方向喷灌水深的试验值与模拟值比较

Fig.6 Measured and simulated water depths along the main lateral of DYP-249 center pivot irrigation system

4 结论

(1)以均匀喷灌水深为目标,建立了圆形喷灌机喷头间距不等条件下的喷头流量和入机总流量模型,提出了考虑主输水管、喷头连接弯管和下垂管条件下的水力损失综合计算模型;提出了喷头全部使

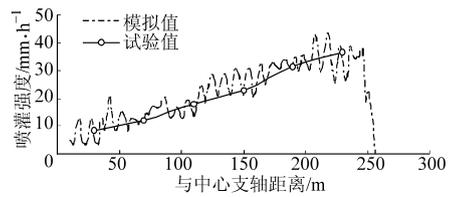


图7 DYP-249型圆形喷灌机沿主输水管方向喷灌强度的试验值与模拟值比较

Fig.7 Measured and simulated average application rates along the main lateral of DYP-249 center pivot irrigation system

用、不使用及部分使用压力调节器3种方式下的喷头配置技术方案;构建了喷头、压力调节器、机组桁架等规格型号和工作性能数据库,用户可以根据需要修改、补充数据库。开发软件不但可以完成圆形喷灌机的喷头配置,还可以预测机组田间工作时水力性能。

(2)由DYP-249型圆形喷灌机应用开发软件完成了喷头配置,机组配置的入机总流量与理论流量的相对误差小于1.1%。根据配置结果进行了田间试验,结果表明沿主输水管方向的喷灌强度试验值与模拟值的一致性较好,喷灌均匀系数试验值75.26%,低于软件模拟值85.59%,两者偏差主要是风速风向、蒸发飘移、雨量筒间距以及编程算法等因素造成。

参 考 文 献

- Richard G Allen, Jack Keller, Derrel Martin. Center pivot design[M]. Falls Church, VA: The Irrigation Association, 2000.
- James L G, Blair S K. Performance of low pressure center pivot systems[J]. Transactions of the ASAE, 1984, 27(6): 1753 ~ 1762.
- Scaloppi E J, Richard G A. Hydraulics of center-pivot laterals[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1993, 119(3): 554 ~ 567.
- 严海军, 金宏智. 圆形喷灌机末端出流多口系数的研究[J]. 农业机械学报, 2003, 34(5): 65 ~ 68.
Yan Haijun, Jin Hongzhi. Study on friction factor for center-pivot system with end flow[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(5): 65 ~ 68. (in Chinese)
- Wilmes G J, Martin D L, Supalla R J. Decision supports system for design of center pivots[J]. Transactions of the ASAE, 1993, 37(1): 165 ~ 175.
- 仪修堂, 窦以松, 兰才有, 等. 中心支轴式喷灌机喷头配置方法及其数学模型[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 117 ~ 121.
Yi Xiutang, Dou Yisong, Lan Caiyou, et al. Sprinkler configuration method and mathematical model of center-pivot irrigation system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(2): 117 ~ 121. (in Chinese)
- Б. М. 列别捷夫. 喷灌机械理论和构造[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1981.
- 严海军, 金宏智. 圆形喷灌机非旋转低压喷头流量系数的研究[J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(2): 55 ~ 58.
Yan Haijun, Jin Hongzhi. Study on the discharge coefficient of nonrotatable sprays for center-pivot system[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2004, 23(2): 55 ~ 58. (in Chinese)
- GB/T 19797—2005 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].
- Yan Haijun, Jin Hongzhi, Qian Yichao. Characterizing center pivot irrigation with fixed spray plate sprinklers[J]. Science China: Technological Science, 2010, 53(5): 1398 ~ 1405.