

不同指标轻小型喷灌机组配置优化

涂 琴¹, 李 红^{1*}, 王新坤¹, 蔡 彬¹, 庄金良², 汪 磊²

(1. 江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013; 2. 江苏旺达喷灌机有限公司, 金坛 213223)

摘 要: 为探究配置方式对喷灌机组整体性能的影响, 明晰不同配置方式的特点, 在前期调研的基础上, 以轻小型灌溉机组 4.4CP-45 为例, 分别以单位面积上资源消耗, 如机组能耗、年费用及使用年限内总费用等为评价指标, 结合实际使用配置方式, 采用遗传算法, 讨论平坡条件下配置不同喷头 10PXH、15PY、20PY 及 40PY 时的喷头数及管径等最优组合方式, 并对每种配置方式的适用范围进行分析。研究表明, 通过 3 个优化目标下机组最优配置方式的对比, 较好地反映出每种配置方式的优劣, 与实际使用方式吻合较好。配置 40PY 喷头时, 机组单位能耗高, 但年费用很低, 适于抗旱或大田作物的灌溉; 配置 15PY 喷头时, 优化配置下的机组能耗比初始配置时降低 7.3%, 比配置 20PY 降低 8.3%, 同时各项费用都较低, 灌溉均匀性高, 但移动时劳动强度较大, 适于经济作物或植物幼苗的灌溉; 配置 20PY 喷头时, 机组总费用最低, 为 6284.8 元/hm², 比初始配置降低 15.4%。所有配置方式下能耗费、运行费分别占据机组年费用及总费用的主要部分, 有必要通过配置优化或采用中低压喷头、改善管理以降低系统能耗。该研究可以为机组的合理设计、喷头选择及应用推广提供参考。

关键词: 优化, 模型, 喷灌机组, 指标, 能耗

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.22.010

中图分类号: S277

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-22-0083-07

涂 琴, 李 红, 王新坤, 等. 不同指标轻小型喷灌机组配置优化[J]. 农业工程学报, 2013, 29(22): 83-89.
Tu Qin, Li Hong, Wang Xinkun, et al. Optimization of small-scale sprinkler irrigation systems for different indicators[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(22): 83-89. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

近 5 年中国喷灌发展迅猛, 2010 年中国喷灌面积已达 500 万 hm², “十二五”期间还将新增农田有效灌溉面积 333 万 hm², 政府投入明显增加^[1]。喷灌的快速发展及近年干旱加剧、城市地下水水位下降的形势使节水灌溉的需求更加迫切, 因而对喷灌系统及设备的发展提出了新的要求。目前轻小型喷灌机组中, 单喷头喷灌机因系统初始投资低、移动方便等在市场上仍占有很大比例, 但同时具有配套形式单一、能耗高的特点, 难以满足不同地区的灌溉需求^[2]; 多喷头喷灌机组单位面积投资低, 均匀性均较高, 使用广泛, 但与作物种类及种植条件相适应的机组配套方式尚需进一步研究。

在喷灌系统的研究中, 国内外主要集中在喷灌

系统设计^[3-5]、灌水技术指标^[6-7]及管道水力计算^[8-11]等方面。Daccache A^[3]讨论了 2 种流量需求下同一喷灌系统 4 种布置方式对运行状况及性能的影响, 其中系统性能指标主要为灌溉均匀性。Brian B 等^[5]对果树灌溉微喷灌系统设计及维护的技术要素, 以及保证系统稳定出流及灌溉均匀性的关键设备进行了分析。Mateos L^[6]采用均匀度、克里琴森均匀系数、灌水效率、深层渗漏量、尾水回收率等灌水技术指标来评价和对比滴灌、固定式喷灌及沟灌 3 种灌溉方式的优劣。但在大多数喷灌系统中灌水技术指标选用的是土壤表面水量分布均匀性, 现在逐渐采用土壤中水分分布均匀性, 并与作物产量联系起来^[12-15]。土壤表面水量分布的研究则从以往的由单喷头均匀性换算到组合喷灌均匀性的模型研究, 发展到水滴运动理论运用及激光雨滴谱仪试验分析, 均匀性影响因素的探讨也从喷头结构、管道布置方式延伸到作物冠层及土壤特性的影响^[16-18]。可见, 国内外喷灌均匀性的研究占据系统性能研究的很大比重。但在发展中国家喷灌技术的应用中, 用户对灌溉均匀性的要求并不是十分明显, 首要考虑的多为系统的可靠性和成本, 同时合理的管道配置、均匀的喷头工作压力是保证机组组合灌溉均匀性的前提。

收稿日期: 2013-03-27 修订日期: 2013-09-17

基金项目: 863 计划项目 (2011AA100506); 江苏省 2011 年度普通高校研究生科研创新计划 (CXZZ11_0565); 国家农业科技成果转化资金 (2011GB2C100015); 江苏省农业科技支撑计划 (BE2010393)

作者简介: 涂 琴 (1987-), 女, 江西宜春人, 博士生, 主要从事节水灌溉技术研究。镇江 江苏大学流体机械工程技术研究中心, 212013。Email: tuqin2575@126.com

*通信作者: 李 红 (1967-), 女, 江苏泰州人, 博士生导师, 主要从事流体机械及排灌设备研究。镇江 江苏大学流体机械工程技术研究中心, 212013。Email: hli@ujs.edu.cn

喷灌系统运行的可靠性及成本高低与合理的管道水力设计密不可分^[19-21]。Dercas N^[8]给出了输水管道设计的 2 种方法, 其中一种能得出使系统建设费及能耗费最低的临界流速, 另一种则是经济管径的计算方法。Rodriguez J A 等^[9]提出了结合用户用水需求特点及管网布置方式(主要指管道长度及管径)确定泵站合理运行工况点的方法, 采用该方法后灌区能耗降低了 10%~30%。Yildirim G R^[11]提出了多口出流微灌管道水力设计的半理论方法, 能够得出达到一定出流均匀性时所需的最小管径、管道长度及最小管道入口压力, 并绘出了均匀性与各参数之间关系的变化曲线图, 所得结果与前人解析法及数值模拟方法计算结果吻合较好。这些灌溉系统的管道优化中, 均只考虑了管道部分, 未涉及水泵—管路协同运行工况。在没有调压设施的喷灌系统中, 管道末端喷头工作压力需等水泵运行后才能确定, 与初始设计值会有一定差异, 但相关的机组配置优化研究较少。

与喷灌机组配置方式有关的研究中, 选择的评价指标也比较单一^[8,21]。如国外中心支轴式喷灌机的设计中虽然考虑了不同类型喷头, 但由于喷头性能相当, 选取的评价指标都为喷灌均匀性^[22]。固定或半固定式喷灌系统的设计优化中多以年费用最小为目标。Zapata N 等^[23]通过长期试验分析了多风地区采用三角形布置时喷头间距及灌水量选取对系统投资的影响。Campo M A 等^[24]对比了小型地块不同管道布置方式、灌水器特点、运行参数对系统安装费及能耗费的影响。Cisty M^[25]将混合遗传算法与线性规划相结合, 以费用最小为目标, 应用于供水管网的优化中。王新坤等^[26]首次采用单位能耗作为喷灌机组配置方式优劣的依据。但喷灌工程使用年限均为 10 a 以上, 系统的评价中不仅需要考察年费用、能耗等, 还需考虑系统使用年限内的总费用。采用不同的评价指标对机组配置方式的影响研究甚少。

轻小型移动式喷灌机组既可作为抗旱机具用于补充灌溉, 又可用于经济作物或大田灌溉, 探索每种应用场合下适宜的配置方式, 及采用不同评价指标对最佳配置方式选择的影响, 不仅能在能源日益紧张的形势下有效地降低能耗、节约成本、拓展机组用途, 而且对促进灌溉技术及低碳高效农业发展与推广都有重要的理论与现实意义。

1 优化模型建立

1.1 优化目标

1.1.1 单位能耗

轻小型多喷头喷灌机组与单喷头喷灌机组相

比最大优势在于, 前者能耗更低; 同时前人研究显示喷头类型、喷头数及管道管径等配置参数的选择对机组能耗的影响比较明显, 因而选用文献^[26]提出的喷灌机组单位能耗作为机组能耗的评价指标

$$E_p = \frac{H}{36.7\eta_b\eta_d\eta_p} \quad (1)$$

式中, E_p 为喷灌机组单位能耗, 即单位面积上灌溉单位深度水量的能耗, $\text{kW}\cdot\text{h}/(\text{mm}\cdot\text{hm}^2)$; H 为水泵扬程, m ; η_b 为水泵运行效率; η_d 为动力机的运行效率; η_p 为田间喷洒水利用系数。

1.1.2 年费用

喷灌系统优化设计中多采用年费用作为评价指标, 机组年费用中折旧费是最主要的一项, 折旧方法有静态法与动态法^[27]。较早的研究中年费用只考虑管道工程的造价, 后来有考虑系统运行费, 即能耗, 也有部分学者计入了水费^[28-29]。根据喷灌工程规模及特点, 喷灌系统年费用的计算方法有所不同。轻小型喷灌机组年费用主要由单位折旧费用和单位能耗费组成, 暂不计入水费, 采用静态折旧法。借鉴文献^[28]及文献^[30]的研究成果, 机组年费用表达式如下:

$$C_A = \frac{r(C_b + naC_g + nC_s)}{MA} + \frac{ETQH}{367.2\eta_b\eta_d\eta_p MA} \quad (2)$$

式中, C_A 为喷灌机组单位喷灌面积上的年费用, 元/ $(\text{a}\cdot\text{hm}^2)$; r 为年折旧率; C_b 为动力机、水泵与进水管的造价, 元/套; n 为喷头数量; C_g 为管道单价, 元/ m ; C_s 为喷头及附件的单价, 主要包括喷头、立杆、支架与接头, 元/套; M 为机组工作位置数量, 等于一个灌溉周期内机组平均移动次数; A 为一次灌溉面积, 即机组一个工作位置的灌溉面积, $A=(n-1)ab/10000$, hm^2 ; a 为喷头间距, m ; b 为管道移动间距, m ; E 为燃料价格, 由市场上相应燃料平均价格、燃料密度及热值换算得到, 元/ $(\text{kW}\cdot\text{h})$; T 为机组年运行时间, h 。式(2)中, 第一项为单位折旧费, 记为 C_F , 元/ $(\text{a}\cdot\text{hm}^2)$; 第二项为单位能耗费, 记为 E_F , 元/ $(\text{a}\cdot\text{hm}^2)$ 。

1.1.3 总费用

机组总费用指机组使用年限内的总费用, 是决定喷灌机组型式选择的关键因素, 也是评价喷灌工程好坏、农户能否接受的重要经济指标。机组使用年限一般在 10 a 左右, 总费用的计算采用动态折旧法, 计算方法如下

$$C_{\text{total}} = t \left[\frac{\gamma(1+\gamma)^t}{(1+\gamma)^t - 1} + \rho \right] \frac{(C_b + naC_g + nC_s)}{MA} + \frac{tETQH}{367.2\eta_b\eta_d\eta_p MA} \quad (3)$$

式中， C_{total} 为喷灌机组使用年限内总费用，元/hm²； t 为折旧年限，a； γ 为年利率，%； ρ 为年平均大修率，%。式 (3) 中第一项为总建设费，记为 C_{ctr} ，元/hm²；第二项为总运行费（总能耗费），记为 C_{opt} ，元/hm²。

1.2 遗传算法优化

喷灌机组的配置优化主要是根据水泵的性能参数配备相应喷头及管道，使机组总体性能更优，由于喷头及管道的流量、压力彼此关联，因而是较为复杂的组合问题。采用王新坤等^[26]建立的喷灌机组水力计算模型，假设管道沿程各喷头均匀出流，平坡条件，喷头间距一定，保证管道末端喷头工作压力在设计压力的 90% 以上，喷头间工作压力变化率低于喷头设计压力的 20%，运用退步法进行管道水力计算。同时，保证水泵与管道协同运行，即要求由水泵特性曲线拟合得出的水泵出口工作压力、流量等于由水力计算得到的管道入口压力、流量。最大喷头数也是约束条件之一，根据滴灌带设计中对某一管径管道最大铺设长度的计算方法得出喷灌系统最大和最小配置喷头数的计算公式。并以管道管径、喷头数、管道末端喷头工作压力为决策变量，通过遗传算法不断的迭代优化，使水泵—管路协同运行工况得以实现，同时计算出每个喷头处或管道节点的管道及喷头的压力和流量。机组配置优化的遗传算法程序流程如图 1。适应度计算中采用罚函数法对优化目标进行处理，对离散管径采用整数编码方式。

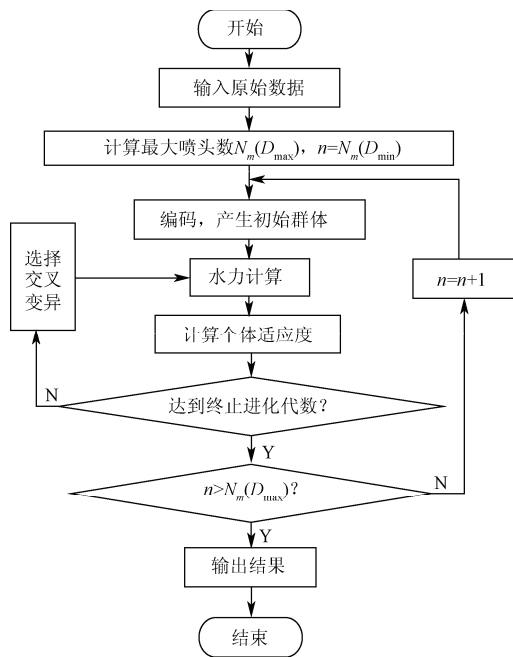


图 1 程序流程图

Fig.1 Program flowchart

根据轻小型移动式喷灌机组优化的问题规模及决策变量的特点，应用竞赛规模为 2 的锦标赛选择算子实现选择操作，应用算术交叉算子实现交叉操作，应用实值变异算子实现变异操作。应用基于遗传算法的喷灌机组优化模型，即可计算得到不同优化目标下的机组最优配置方式，以及该配置方式下水泵性能参数、各段管径及管道沿程工作压力等，从而能对机组整体性能作较全面的分析。

2 机组配置方式选择

选用江苏旺达喷灌机有限公司生产的型号为 4.4CP-45 的灌溉机组作为研究对象，据调研结果显示该机组在江苏、安徽、山东等地使用较多，配套水泵型号为 50BP-45。额定工况下，水泵流量 $Q=20 \text{ m}^3/\text{h}$ ，扬程 $H=45 \text{ m}$ ，效率 $\eta_b=58\%$ ，水泵性能曲线见图 2。配置的喷头分别选用厂家推荐的 15PY、20PY、40PY 喷头，以及由江苏大学自主开发的全射流喷头 10PXH。喷头的水力性能参数、单价及喷头间距设置等见表 1。表 1 中，每套喷头的价格是指喷头连同其附件（立管、三通、支架）的价格。市场上广泛使用的该机组在不同工作压力下的配置方式见表 2。喷头配置表示为“喷头数×喷头型号”。机组优化以表 2 中配置方式作为初始配置。

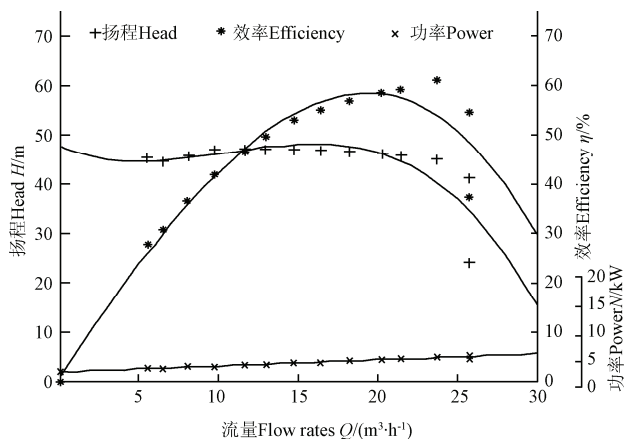


图 2 水泵特性曲线

Fig.2 Characteristic curve of pump

表 1 喷头水力性能及喷头间距

Table 1 Hydraulic parameters of sprinklers and spacing

编号 Number	型号 Sprinkler type	喷嘴直径 Pipe diameter d/mm	工作 压力 Pressure head p/MPa	流量 Discharge Q/ (m ³ ·h ⁻¹)	射程 Radius R/m	单价 Unit price C _s / (元·套 ⁻¹)	喷头 间距 Spacing a/m
1	10PXH	4	0.25	0.96	10.5	88	10
2	15PY	5×3	0.30	2.16	15.5	120	15
3	20PY	6×3.1	0.40	3.4	19.5	170	20
4	40PY	15	0.40	17.6	29.5	360	40

表 2 机组初始配置

Table 2 Initial designs of the system

管径 Pipe diameter <i>D</i> /mm	喷头配置 Sprinklers configuration		
50	9×15PY	6×20PY	1×40PY

灌溉管道采用涂塑软管，“一”字形布置，移动过程中 2 个工作位置的间距等于喷头间距，即采用方形布置。待选管径及价格见表 3。动力机泵造价 2 260 元，燃料采用 0#柴油，价格按 7.54 元/升计，换算得 0.8 元/(kW·h)。动力机运行效率为 0.4，田间喷洒水利用系数取 0.9。机组年运行时间为 300 h，每个灌溉周期内平均移动 15 次。水泵折旧年限 10 a，管道折旧年限 5 a，故机组折旧年限取

10 a，折旧率 0.20。年利率 0.095，年平均大修率 0.01。

表 3 待选管道单价

Table 3 Unit prices of the available pipes

管径 Pipe diameter <i>D</i> /mm	40	50	65
单价 Unit price/(元·m ⁻¹)	3.5	5	6

表 4 配置 15PY 时优化前后参数对比

Table 4 Comparison of performances of the system with sprinklers 15PY before and after optimization

性能参数 Parameters	配置方式 Designs	管道 Pipe			水泵 Pump			单位能耗 Specific energy consumption <i>E_p</i> /(kW·h·mm ⁻¹ ·hm ⁻²)
		管径 Diameter <i>D</i> /mm	Minimal Pressure head <i>h_{pmin}</i> /m	Pressure difference <i>h_v</i> %	流量 Flow rate <i>Q</i> /(m ³ ·h ⁻¹)	扬程 Head <i>H</i> /m	效率 Efficiency <i>η</i> %	
优化前	9×15PY	50	31.9	22.3	20.7	40.8	54.7	5.918
优化后	12×15PY	65/50	27.2	18.7	25.1	33.1	51.2	5.487

注：*h_{pmin}* 为管道末端喷头工作压力，*h_v* 为管道沿程喷头工作压力变化率。

从表 4 可知，配置 12×15PY，且前 11 段管径为 65 mm，最后一段管径为 50 mm 时，喷头工作压力变化率为 18.7%，与机组初始配置 9×15PY 相比能耗降低了 7.3%。优化配置前后管道与喷头沿程压力、及管道流量分布见图 3。管道流量线性变化，则各喷头处为均匀出流。优化后系统工作压力明显降低，管道沿程工作压力变化更加平缓，喷灌均匀

3 优化结果

3.1 优化效果分析

应用已建立好的喷灌机组优化模型，以单位能耗为目标时，不同类型喷头相比，最优配置方式为 12×15PY，优化前后参数见表 4。

性将有所提高，机组总体性能更优。

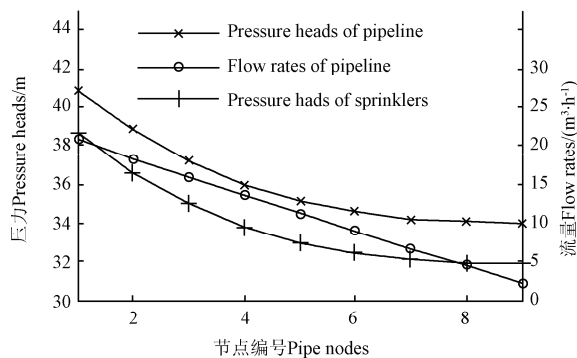
3.2 最佳配置方式对比

采用喷灌机组单位能耗、年费用及使用年限内总费用 3 个指标，考虑 4 种配置方式得到的最佳喷头数优化结果对比见表 5。表 5 中，各组配置方式下与表 2 中初始配置相应评价指标大小及构成的对比结果见图 4。

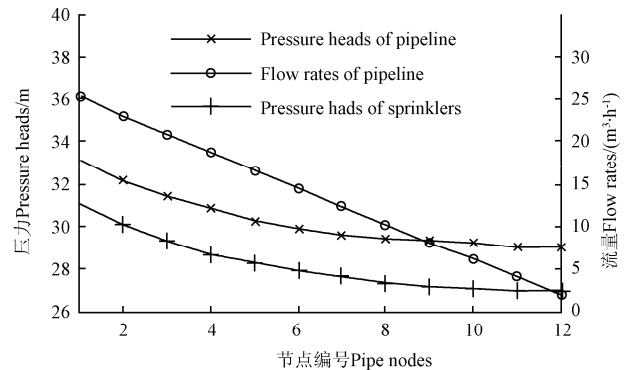
表 5 优化结果对比

Table 5 Comparison of optimization results

喷头型号 Sprinkler type	优化目标 Objectives (Indicators)			优化结果 Optimization results	
	单位能耗 Specific energy consumption <i>E_p</i> /(kW·h·mm ⁻¹ ·hm ⁻²)	年费用 Annual cost <i>C_A</i> /(元·a ⁻¹ ·hm ⁻²)	总费用 Total cost <i>C_{total}</i> /(元·hm ⁻²)	喷头数 Number of sprinkler <i>n</i>	管径 Pipe diameter <i>D</i> /mm
10PXH	5.535	784.6	7145.8	24	65/50
15PY	5.487	650.3	6674.6	12	65/50
20PY	5.985	685.1	6284.8	7	65
40PY	5.704	652.8	6748.6	1	65



a. 优化前 Before optimization



b. 优化后 After optimization

图 3 以能耗为目标优化前后管道及喷头沿程压力及流量对比 (配置 15PY)

Fig.3 Comparisons of pressure heads and flow rates of pipeline and sprinklers 15PY respectively before and after optimization for minimum energy consumption

表 5 中对比可得，以单位能耗为目标时，机组最优配置方式为 12×15PY，此时能耗为 5.487 kW·h/(mm·hm²)。以年费用为目标，此时最优配置方式也为 12×15PY。从图 4b 可以看出，该配置下机组年费用比初始配置时降低 22.1%。配置 1×40PY 时，机组年费用也很低，且 $H=45.44$ m， $Q=18.0$ m³/h， $\eta_b=58.6\%$ ，机组工作在水泵额定工况点附近。

目标为总费用时，配置 7×20PY 机组总费用最低，为 6 284.8 元/hm²，比机组初始配置 6×20PY 时降低 15.1%，比配置 12×15PY 时降低 5.8%，比配置 1×40PY 时降低 6.9%。

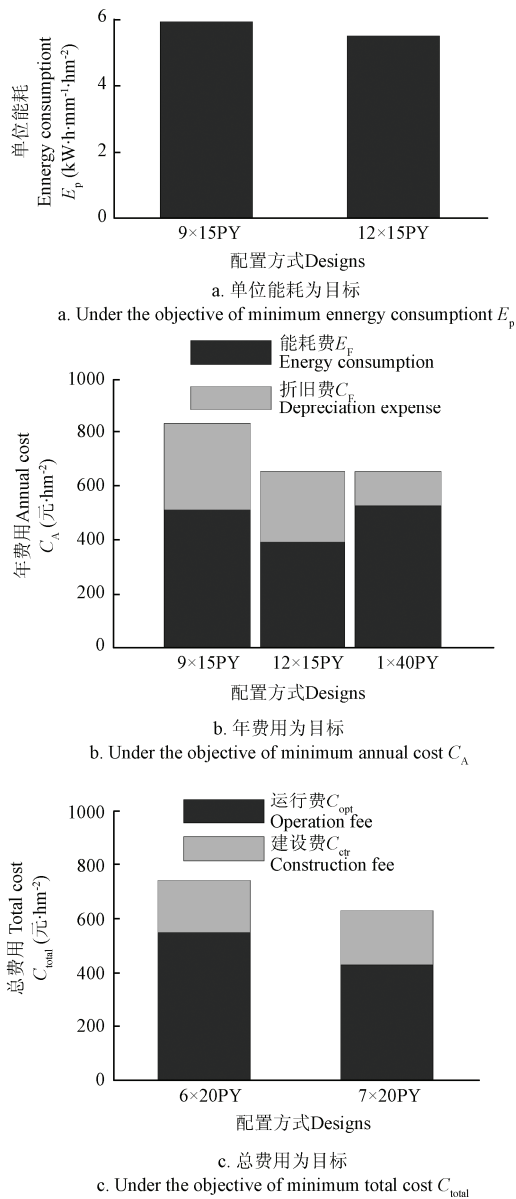


图 4 不同指标下最优配置方式与初始配置对比
Fig.4 Comparisons of optimal design and initial one under different indicators

4 讨论

4.1 评价指标的影响

从表 5 及图 4 知，在不同评价指标下，得到的最佳喷头组合方式有所不同。单位能耗及机组年费用能反映短期效益，总费用更能反映长期灌溉效益。考虑近期效益时，配置 12×15PY 或 1×40PY 时比较合适，长期使用选用 7×20PY 系统总投资最低，且机组效率较高、喷头工作压力偏差率小，灌溉效果更佳。

4.2 年费用及总费用构成分析

对于只有一级或二级管道的轻小型喷灌机组，能耗费 E_F 、运行费 C_{opt} 分别是系统折旧费 C_F 、建设费 C_{ctr} 的 2 倍左右，喷头数少时比例更大。能耗费或运行费占年费用或机组总费用的主要部分，因此采用中低压喷头、降低系统工作压力对降低系统能耗具有重要意义。

4.3 各项配置适用场合分析

表 4 中，配置 15PY 喷头时，系统单位能耗、年费用都是 4 种组合中最低的，总费用也不高；同时喷头工作压力低，组合喷灌均匀性高，但其缺点是移动时用工量较大。适合于粮食作物幼苗或经济作物的灌溉，采用浅水勤灌。

配置 40PY 时，机组单位能耗较高，但年费用很低，而且系统构成简单，移动、维修都比较方便。经厂家前期调研，该方式对一般农户的吸引力很大。但其缺点是喷头工作压力高，对作物打击力大，且喷灌中由于喷头运转产生的反向冲击力较大，易使立杆倾斜，因而适用于大田作物如玉米、成熟小麦、草坪等的灌溉，是干旱季节应急抗旱的推荐产品。

配置 20PY 时，系统单位能耗最高，因喷头工作压力为 0.4 MPa，运行在喷头额定工作压力 0.30~0.40 MPa 的上限值。在轻小型机组长期使用中，农户形成的经验为倾向于使用中压喷头，配置喷头数较少，运行压力稍高，从而使系统初投资降低。优化分析也表明，该配置下机组总费用最低。从喷灌质量、系统投资、便捷性、运行稳定性等角度考虑，该配置方式下机组总体性能较优，通用性强，使用范围较广，如应用于粮食作物和经济作物苗期或土壤松软的田块喷灌。

5 结论

1) 建立了喷灌机组单位能耗、年费用及使用年限内总费用的评价指标体系，通过遗传算法对机组配置进行优化，较好地反映出各项配置方式的特点，与实际使用情况吻合较好，为喷灌机组设计者及使用者提供有力的理论参考。机组能耗费占机组

总费用的比例较大,在农机能耗高且能源问题日益紧张的背景下,可以通过优化配置、开发低压喷头来降低系统能耗,推动低碳高效农业的快速发展。

2)对于型号为4.4CP-45的喷灌机组,平坡条件使用,以管道末端喷头工作压力、管径及喷头数为决策变量进行优化,考虑一次灌溉单位面积上的资源消耗,经对比,配置12×15PY时机组能耗低,比初始配置9×15PY时降低7.3%,比采用7×20PY降低8.3%;投资也低,投资低,喷灌均匀性好,适于植物幼苗或经济作物的灌溉;配置1×40PY时,机组年费用低,且移动方便,是大田作物灌溉及应急抗旱的很好选择,但需解决喷洒均匀性等问题;配置7×20PY时,系统总费用最低,为6 284.8元/hm²,且便捷可靠,使用范围广。

3)优化得到的能耗低、年费用较低的机组移动时用工量较大,故移动式喷灌机组综合性能的评价中便捷性及灌溉均匀性的考察需进一步研究,以使优化模型更加可靠,同时也为喷微灌节水灌溉综合评价提供一定的技术理论基础。

[参 考 文 献]

- [1] 李仰斌.新时期我国节水灌溉发展战略与对策思考[J].节水灌溉,2011(9):1-3.
Li Yangbin. Thoughts on the development strategies and solutions of water saving irrigation in china in the new period[J]. Water Saving Irrigation, 2011(9): 1-3. (in Chinese with Chinese abstract)
- [2] 侯永胜.多喷头轻小型移动式喷灌机组优化配套研究[D].北京:中国农业机械科学研究院,2007,6.
Hou Yongsheng. Study on Optimizing of Configuration for the Small-Scale Movable Sprinkler Irrigation Equipment (SMSIE) With Multiple Sprinkler[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2007, 6. in Chinese with Chinese abstract)
- [3] Daccache A. On-demand pressurized water distribution system impacts on sprinkler network design and performance[J]. Irrigation Science, 2010, 28(4): 331-339.
- [4] Peters R T. Optimal Economic Irrigation Mainline Design[C]//ASABE Annual International Meeting, 2006: 062071.
- [5] Brian B, Blake S, Troy P, et al. Status of microsprinkler system design, operation, and maintenance in 2010[C]//ASABE Annual International Meeting, 2010: IRR10-9639.
- [6] Mateos L. A simulation study of comparison of the evaluation procedures for three irrigation methods[J]. Irrigation Science, 2006, 25(1): 75-83.
- [7] Playan E, Burguete J, Zapata N, et al. Mathematical problems and solutions in sprinkler irrigation[J]. Monografías de la Real Academia de Ciencias de Zaragoza, 2009, 31: 153-174.
- [8] Dercas N, Valiantzas J D. Two explicit optimum design methods for a simple irrigation delivery system: comparative application[J]. Irrigation and Drainage, 2012, 61(1): 10-19.
- [9] Rodriguez J A, Montesinos P, Camacho P E. Detecting critical points in on-demand irrigation pressurized networks-a new methodology[J]. Water Resource Management, 2012, 26(6): 1693-1713.
- [10] Fasano A, Farina A. Designing irrigation pipes[J]. Journal of Mathematics in Industry, 2011, 1(8): DOI 10.1186/2190-5983-1-8, 15 pages.
- [11] Yildirim G R. Simplified procedure for hydraulic design of small-diameter plastic pipes[J]. Irrigation and Drainage, 2009, 58(2): 209-233.
- [12] Mateos L. Assessing whole-field uniformity of stationary sprinkler irrigation system[J]. Irrigation Science, 1998(18): 73-81.
- [13] Leopoldo S L. The effect of spray head sprinklers with different deflector plates on irrigation uniformity, runoff and sediment yield in a Mediterranean soil[J]. Agricultural Water Management, 2006, 85(3): 243-252.
- [14] Montazar A, Moridnejad M. Influence of wind and bed slope on water and soil moisture distribution in solid-set sprinkler systems[J]. Irrigation and Drainage, 2008, 57(2): 175-185.
- [15] Salmeróna M, Urregob Y F, Isla R, et al. Effect of non-uniform sprinkler irrigation and plant density on simulated maize yield[J]. Agricultural Water Management, 2012, 113: 1-9.
- [16] Fukui, Y K, Nakanishi, Okamura, S. Computer evaluation of sprinkler irrigation uniformity[J]. Irrigation Science, 1980, 2(1): 23-32.
- [17] Bautista-Capetillo C F, Salvador R, Burguete J, et al. Comparing methodologies for the characterization of water drops emitted by an irrigation sprinkler[A]. Transactions of the ASABE. 2009, 52(5): 1493-1504.
- [18] Sancheza I, Zapatab N, Faci J M. Combined effect of technical, meteorological and agronomical factors on solid-set sprinkler irrigation: II. Modifications of the wind velocity and of the water interception plane by the crop canopy[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(10): 1591-1601.
- [19] Valin M I, Cameira M R, Teodoro P R, et al. A model for center-pivot design and evaluation[J]. Computers and Electronics in Agriculture 2012, 87: 159-170.
- [20] Gil C, Bañosl R, Ortega J, et al. Ant colony optimization for water distribution network design: a comparative study[C]//International Work-Conference on Artificial and Natural Neural Networks (IWANN) 2011, Part II, LNCS 6692: 300-307.
- [21] Khan S, Abbas A, Gabriel H F, et al. Hydrologic and economic evaluation of water-saving options in irrigation systems[J]. Irrigation and Drainage, 2008, 57(1): 1-14.
- [22] Colaizzi P D, Evett S R, Howell T A. Crop production comparison with spray, LEPA, and subsurface drip irrigation in the Texas high plains[C]//ASABE Annual International Meeting, 2010: IRR10-9704.
- [23] Zapata N, Playan E, Martínez-Cob, et al. From on-farm solid-set sprinkler irrigation design to collective irrigation network design in windy areas[J]. Agricultural Water Management, 2007, 87(2): 187-199.

- [24] Campo M A, Zamarron A, Robles C. Optimization of cost design and energy use of plot irrigation systems in Navarra, Spain[C]//ASABE Annual International Meeting, 2009: 096483.
- [25] Cisty M. Hybrid genetic algorithm and linear programming method for least-cost design of water distribution systems[J]. *Water Resource Management*, 2010, 24(1): 1—24.
- [26] 王新坤, 袁寿其, 朱兴业, 等. 轻小型移动喷灌机组低能耗遗传算法优化设计[J]. *农业机械学报*, 2010, 40(10): 58—62.
Wang Xinkun, Yuan Shouqi, Zhu Xingye, et al. Optimization of light-small movable unit sprinkler system using genetic algorithms based on energy consumption indicators[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery: Transactions of the CSAM*, 2010, 14(10): 58—62. (in Chinese with English abstract)
- [27] 陈守伦, 徐青. 各种折旧方法静态与动态特性探讨[J]. *河海大学学报*, 2000, 28(2): 40—44.
- Chen Shoulun, Xu Qing. Research on static and dynamic characteristics of various depreciation methods[J]. *Journal of Hohai University*, 2000, 28(2): 40—44. (in Chinese with English abstract)
- [28] 白丹. 机压喷灌干管管网优化[J]. *农业机械学报*, 1996, 27(3): 52—57.
Bai Dan. The optimum design of sprinkler main pipe network with pump[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery: Transactions of the CSAM*, 1996, 27(3): 52—57. (in Chinese with English abstract)
- [29] 白丹. 给水输配水管网系统优化设计研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2003.
Bai Dan. Optimal Design of Water Transmission Conduits and Water Distribution Network[D]. Xi'an, Xi'an University of Technology, 2003. (in Chinese with English abstract)
- [30] Tu Qin, Wang Xinkun, Li Hong. Optimization of sprinkler irrigation machine based on Genetic Algorithms[C]//ASABE Annual International Meeting, 2012, 12—1341121.

Optimization of small-scale sprinkler irrigation systems for different indicators

Tu Qin¹, Li Hong^{1*}, Wang Xinkun¹, Cai Bin¹, Zhuang Jinliang², Wang Lei²

(1. *Research Centre of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;*

2. *Jiangsu Wangda Sprinkler Company limited, Jintan 213223, China)*

Abstract: The optimal design of a sprinkler irrigation system belongs to a class of large combinational optimization problems. It involves choosing the proper type and number of sprinklers and pipe diameters, and operating them at rational pressure heads according to the characteristics of pump and motor equipment. Theoretically, the optimization has rarely been addressed on the small-scale sprinkler irrigation systems compared to applications of the systems. Based on a survey done in cooperation with the factory, a small-scale sprinkler machine type 4.4CP-45 that can be equipped with fluidic sprinklers 10PXH, impact sprinklers 15PY, 20PY or 40PY, was taken as an example to investigate the impact of designs on the performances of system laid on a flat ground so that the characteristics of different designs involved can be summarized. The optimization models were built with three objective functions considering the resource consumptions per unit area irrigated, specific energy consumption, annual cost and total cost in a life cycle of the system separately subject to the constraints considering the pump-pipeline working conditions. The specific energy consumption here refers to the energy consumption per unit area with unit depth of water applied, and a static depreciation method was applied in the annual cost, while a dynamic method in the total cost. In the hydraulic calculation a back step method was introduced, and the optimization models were solved with genetic algorithms. Results show that: comparison of optimal designs under three objective functions will reflect the advantages and disadvantages of every scheme involved, which is in accordance with field practices and applications. When the irrigation system is equipped with one sprinkler typed 40PY, the specific energy consumption is high, and annual cost very low, so it's suitable for the irrigation of lands in serious drought or for the field crops. When equipped with 15 sprinklers typed 15PY, the specific energy consumption of the system under optimal design is 7.3% lower than that before optimization, 8.3% lower than that of the system equipped with sprinklers typed 20PY. All the indicators of the system are low, and it will show a high irrigation uniformity, but it is labor intensive in moving, thus it's applicable for profit crops or young plants. When 7 sprinklers typed 20PY are used, the total cost of the system is at its lowest, 6 284.8 Yuan/hm², 15.4% lower than that of the initial design, and it is practical for many occasions. In the economical analyses of the system, the energy consumption fee or operation fee in any scheme constitutes a major part of the annual cost or the total cost respectively. Therefore, to reduce the energy consumption of irrigation systems through optimization or introduction of low pressure sprinklers is now an important task.

Key words: optimization, models, sprinkler systems, indicators, energy consumption

(责任编辑: 信世强)