doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.018

基于 PWM 技术的平移式变量喷灌机喷头流量分配方法

莫锦秋　周志宇　陶　帅　李彦明
（上海交通大学机械与动力工程学院，上海 200240）

摘要：大型平移式喷灌机采用脉冲宽度调制（Pulse width modulation，PWM）技术实现变量灌溉作业，因喷头间喷洒区域相互重叠，由地块管理区的设计处方值求解单喷头流量较为困难。首先根据 Nelson R3000 型单喷头喷洒特性，得到平移式喷灌机沿桁架方向的一维叠加水量分布特性，以及平移运动后的二维叠加水量分布特性，分析确定了由 4 个喷头重叠喷洒控制一个管理区，并得到喷头区域喷洒分配率，在此基础上提出了按处方值进行喷头流量分配的加权均分法和基于遗传算法（Genetic algorithm，GA）的分配法。通过管理区喷洒误差分析得出，当相邻处方值变化幅度不超过最大处方值的 33% 时，精度可以达到 5%。为了弥补 GA 法导致喷洒均匀性下降的不足，将加权均分法和 GA 法组合应用，有效降低了处方值突变带来的喷洒误差，同时保证了处方值变化较小区域的喷洒均匀性。本文方法可以扩展到 4 个以上喷头重叠喷洒控制一个管理区的应用场合。

关键词：平移式喷灌机；变量灌溉；喷头流量分配；遗传算法；喷洒均匀性
中图分类号：S277.9⁺4　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2018)10-0163-09

Sprinkler Flow Rate Distribution Method in Lateral Moving Variable Rate Irrigation System Based on PWM

MO Jinqiu　ZHOU Zhiyu　TAO Shuai　LI Yanming
(*School of Mechanical Engineering*, *Shanghai Jiao Tong University*, *Shanghai* 200240, *China*)

Abstract: During the variable rate irrigation operation of large-sized lateral moving irrigation system based on pulse width modulation (PWM) technique, it is quite difficult to solve the flow rate of each sprinkler from the designed prescriptions of management zones because the spraying areas of sprinklers will overlap with each other. At the beginning, the overlapped water distribution in lateral direction, and the two-dimensional contour plot of overlapped water distribution were gotten based on the feature of single sprinkler water distribution of Nelson R3000. Then four sprinklers were determined to control a management zone and the water distribution rate of spraying area was solved. And on this basis a weighted average method and a genetic algorithm (GA) method based on genetic algorithm were proposed to perform sprinkler flow rate distribution according to the prescription. It was found that the solution accuracy can reach 5% when the change between adjacent prescriptions was less than 33% of the maximum prescription by analyzing the irrigation error in management zone. In order to make up for the reduction of irrigation uniformity caused by GA method, a combined method of weighted average method and GA method was put forward. Related examples had showed that the irrigation error caused by the saltation of adjacent prescriptions can be reduced by the combined method effectively and the irrigation uniformity of management zones where prescriptions changed little can also be guaranteed at the same time. By changing the mapping relationship between sprinkler flow rate and actual irrigation volume in each management zone, this method can be extended to more than four sprinklers controlling a management zone.

Key words: lateral moving irrigation system; variable rate irrigation; sprinkler flow rate distribution; genetic algorithm; sprinkling uniformity

收稿日期：2018-07-04　修回日期：2018-09-03
基金项目：国家重点研发计划项目(2017YFD0700504-2)
作者简介：莫锦秋(1969—)，女，副教授，博士生导师，主要从事机电系统集成控制研究，E-mail：mojinqiu@sjtu.edu.cn

0 引言

随着水资源的日益短缺,推广高效节水灌溉技术势在必行。在变量灌溉技术中,根据土壤墒情、作物长势、作物生长需求等参数,依据灌溉决策模型决定各土地决策单元的需水量,形成处方值,由喷灌机按处方值进行喷灌作业。

变量灌溉技术在大型喷灌场合具有广阔应用前景。大型平移式喷灌机通常由几跨装有喷头的桁架相连而成,桁架由若干个行走塔架支承并完成移动,桁架方向与机组移动方向垂直。目前比较常用的变量灌溉方法是通过调节行走速度来改变灌溉量。而脉冲宽度调制(Pulse width modulation, PWM)变量灌溉则是在各个喷头之前安装开关电磁阀,通过调节 PWM 信号的占空比来控制喷水与停喷的时间比,从而改变喷头流量,相对于调节行走速度,该方法能够实现更精准的变量灌溉[1-2]。

各类平移式喷灌机,包括 Valley、Lindsay 等大型产品,各个喷头喷洒区域都有较大部分的重叠。目前对于喷灌机喷洒特性的研究,大多数着重于喷头组合水量分布研究,少见进行喷头流量分配,尤其是沿桁架方向处方值变化时喷头流量分配的相关研究。如严海军[3]通过编写软件,模拟了圆形喷灌机及平移式喷灌机桁架方向喷洒均匀度与喷头间距的关系,并据此提出了喷头间距优化策略。HANKS 等[4]经实验得出喷头间距为湿润直径的 20% ~ 25% 时喷洒均匀性最好的结论。O'SHAUGHNESSY 等[5]在实验过程中发现,相邻管理区的处方值不同时,对喷洒效果将会产生严重影响,提出了在不同处方的灌溉区间设立过渡区的解决方法。此外,喷头水量分布规律及喷灌机速度、工作压力、喷头组合形式等因素对水量分布及均匀性的影响也是主要研究方向[6-13]。

本文对平移式喷灌机进行 PWM 变量灌溉时如何将处方值转换为各喷头的分配流量展开研究,给出喷头流量分配的加权均分法和遗传算法分配法(Genetic algorithm, GA),通过分析两种方法在处理处方值突变和喷洒均匀性上的特性,进一步将两种方法进行组合,以保证相邻处方值突变时的高喷洒精度和均匀变化处方值时的高喷洒均匀性。

1 喷头流量分配问题定义

1.1 重叠喷洒与喷洒管理区

PWM 变量喷灌在总水管供水泵变频恒压控制的基础上进行喷头出水占空比控制、在不改变喷洒水压情形下改变流量。由于水压不变,在喷嘴型号、喷头离地高度确定时单喷头瞬间喷洒空间分布特性可视为不变。图 1 是陈震等[14]将实验测得的 150 kPa 水压、无风条件下 Nelson R3000 型喷头喷洒分布数据插值得到的单喷头喷洒特性。由图 1 可知,若喷头间距等于喷头喷洒直径时,喷洒均匀性较差。

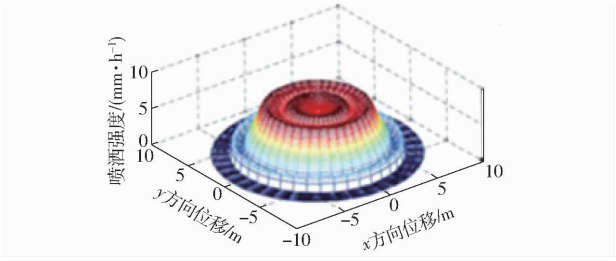


图 1 Nelson R3000 型喷头水量分布

Fig. 1 Water distribution of Nelson R3000 sprinkler

喷灌机上喷头间距不同,相邻喷头喷洒重叠情况也不同。图 2 为参照 HANKS 等[4]的实验研究结论以喷头喷洒直径的 1/4 设置喷头间距。将相邻喷头重叠区域定义为最小水量控制单元,即喷洒管理区。图 2 中相邻 10 个喷头喷洒重叠形成 7 个管理区,管理区宽度为喷洒直径的 1/4,各管理区水量是相邻几个喷头重叠喷洒在此管理区内的水量之和。图 2 所示沿桁架方向的前端和末端各有 3 个管理区涉及的喷头少于 4 个,而桁架中间的各个管理区则均由 4 个喷头控制水量,为区分分别命名为不完全管理区和完全管理区。

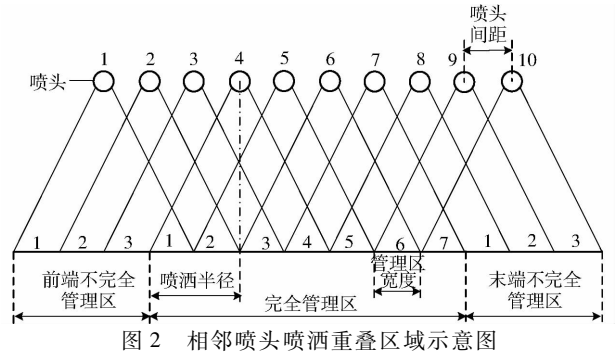


图 2 相邻喷头喷洒重叠区域示意图

Fig. 2 Sketch of overlapped areas of adjacent sprinklers

由图 2 扩展可得相邻喷头数为 n 时,喷头间距 d、喷头喷洒半径 R、管理区宽度 L 间有

$$d = L = 2R/n \tag{1}$$

由 N 个喷头构成的喷灌机若按 n 个相邻喷头重叠喷洒则存在 M 个完全管理区,即

$$M = N - n + 1 \tag{2}$$

同时在桁架前、末端分别存在 $n-1$ 个不完全管理区。

1.2 重叠喷洒喷头数的确定

图 3 为采用陈震等[14]的单喷头喷洒分布实验数据,各喷头取陈震等[14]实验时的相同水量,取 $N = 10$, $n = 1, 2, \cdots, 6$ 时的沿桁架方向剖面的水量叠加

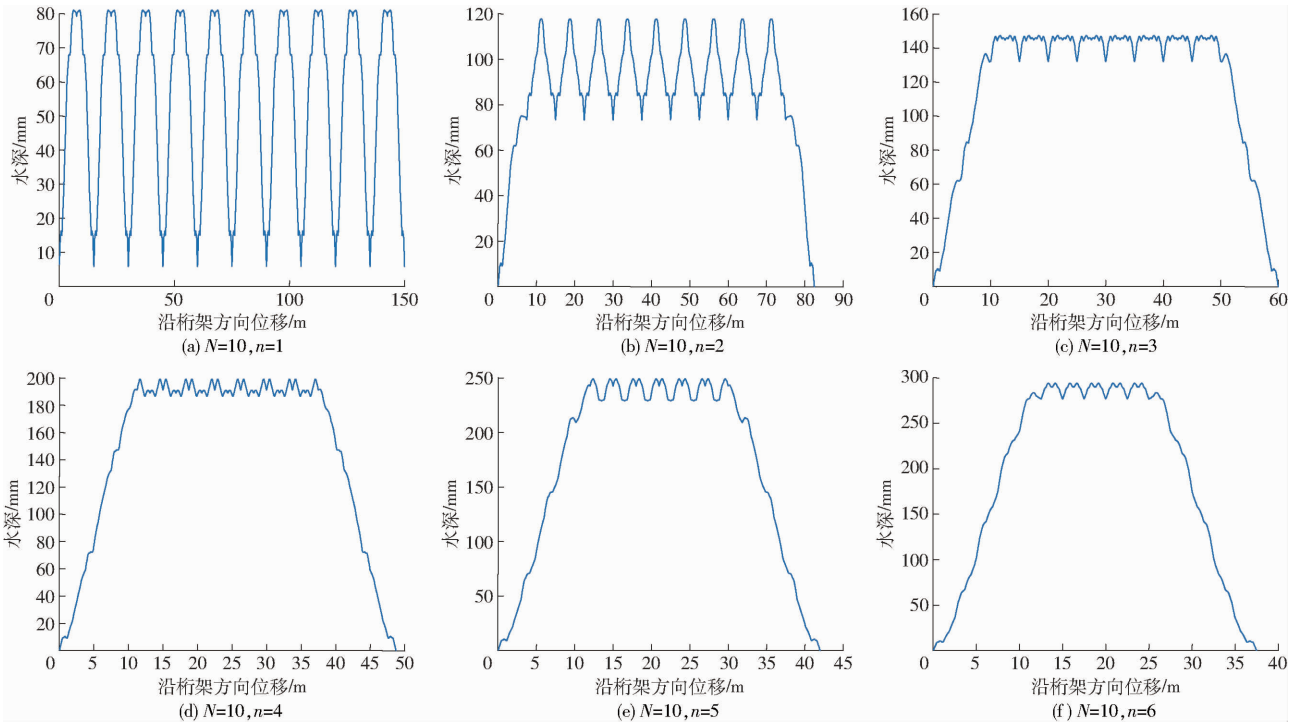


图 3　沿桁架方向的叠加水量分布

Fig. 3　Overlapped water distribution in lateral direction

分布。从图 3 知，当多个喷头喷洒重叠后，各完全管理区相对波动明显减小。

图 3 仅为沿桁架方向单维度的水量波动。图 4 中按桁架方向和前进方向将作业地块离散成 $M_g \times N_g$ 个小区块构成二维地块坐标系(m_g, n_g)，同理每个喷头的喷洒范围也同样可离散成 $M_s \times N_s$ 个小区块，构成喷头局部坐标系(m_s, n_s)。

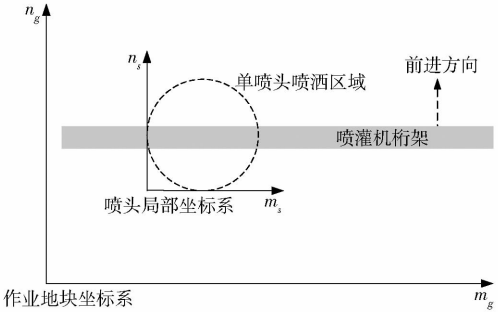


图 4　区块离散示意图

Fig. 4　Sketch of discrete areas

定义喷头的喷洒分配率 $\lambda_s(m_s, n_s)$ 为单个喷头局部坐标某个小区块(m_s, n_s)内的流量占此喷头总流量的百分比，喷头喷洒时将喷头流量 $q(t)$ 分配喷洒到各个局部(m_s, n_s)区块内

$$q_s(m_s, n_s, t) = \lambda_s(m_s, n_s) q(t) \tag{3}$$

其中
$$\begin{cases} \lambda_s(m_s, n_s) \neq 0 & (0 < m_s \leqslant M_s \text{ 且 } 0 < n_s \leqslant N_s) \\ \lambda_s(m_s, n_s) = 0 & (\text{其他}) \end{cases} \tag{4}$$

$$\sum_{m_s=1}^{M_s} \sum_{n_s=1}^{N_s} \lambda_s(m_s, n_s) = 1 \tag{5}$$

式中其他情形指不在此喷头喷洒范围内的情形。

喷灌机作业时作业地块上某个小区块(m_g, n_g)的当前流量 $q_g(m_g, n_g, t)$ 为喷灌机所有喷头在当前区块上的流量总和，即

$$q_g(m_g, n_g, t) = \sum_{k=1}^{N} \lambda_g(m_g, n_g, k, t) q_k(t) \tag{6}$$

式中　$q_k(t)$——第 k 个喷头的当前流量

$\lambda_g(m_g, n_g, k, t)$ 为小区块(m_g, n_g)映射到第 k 个喷头当前的局部区块(m_s, n_s)对应的流量分配率。其中 m_s 与第 k 个喷头在桁架位置有关，n_s 与第 k 个喷头当前前进方向的位移有关，匀速前行时则与时间直接线性相关。由式(4)知当喷头布置或行走使得第 k 个喷头的当前喷洒区域不在小区块(m_g, n_g)时 $\lambda_g(m_g, n_g, k, t) = 0$。

喷灌完成后，区块(m_g, n_g)内喷灌水量 $V_g(m_g, n_g)$ 为

$$V_g(m_g, n_g) = \int q_g(m_g, n_g, t) \mathrm{d}t \tag{7}$$

取 $N = 10$，$n = 1, 2, \cdots, 6$，喷灌机匀速前进时，按上述算法，采用陈震等[14]的单喷头数据，应用 Matlab 编程得出二维水量等高线图，如图 5 所示。

表 1 是对应于图 5 的沿桁架方向各完全管理区的喷洒均匀系数 C_u 和 D_u，其中克里斯琴森均匀系数 C_u 和分布均匀系数 D_u 分别定义[15-18]为

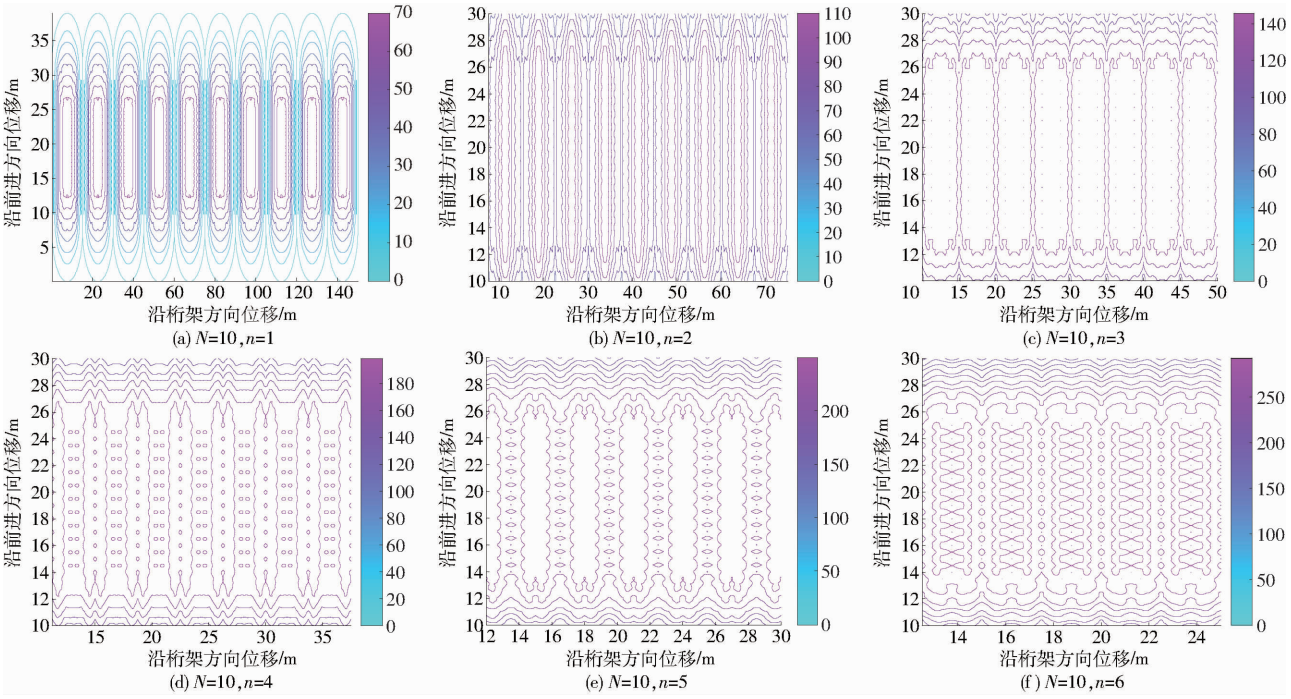


图 5 二维叠加水量分布等高线图

Fig. 5 Two-dimensional contour plots of overlapped water distribution

表 1 沿桁架方向各完全管理区的喷洒均匀系数

Tab. 1 Coefficient of uniformity of complete management zone in lateral direction %

喷洒均匀系数	n					
	1	2	3	4	5	6
C_u	50.1	85.6	97.4	97.2	98.7	98.1
D_u	30.3	80.0	95.5	96.6	98.1	96.4

$$C_u = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{I} |h_i - \overline{h}|}{\sum_{i=1}^{I} h_i}\right) \times 100\% \tag{8}$$

$$D_u = \frac{\overline{h}'}{\overline{h}} \times 100\% \tag{9}$$

式中 I——计算网格数

h_i——第 i 个计算点的喷灌水深,mm

$\overline{h}$——区域内所有计算点喷灌水深平均值,mm

$\overline{h}'$——区域内计算点喷灌水深按从小到大排列后,前 1/4 部分计算点的喷灌水深的平均值,mm

相比而言 D_u 可防止个别测量点出现喷洒异常甚至漏喷所导致的喷洒水深与均值相差过大。

由图 5 和表 1 知,多喷头组合喷洒时喷洒均匀性普遍优于单喷头喷洒,重叠喷头数达到 4 和 5 时 C_u 和 D_u 都能达到较高值,这与 HANKS 等[4]实地实验结论相一致。从设备角度出发,叠加喷洒喷头数越多,喷头控制越复杂、制造维护成本越高,结合表 1 取 $n=4$,即一个管理区由相邻 4 个喷头重叠喷洒控制是一个保证喷洒均匀性和经济性的选择。

1.3 喷头管理区喷洒分配率

定义喷头区域喷洒量分配率 $\eta_i(i=1,2,\cdots,n)$ 为单喷头所涉的管理区域按其沿桁架方向从前到后依次的水量分配比例,$\sum_{i=1}^{n} \eta_i = 1$。

当喷灌机组匀速前进时,单喷头定流量喷洒扫掠完成后,沿桁架方向将形成一个单维的水量分配率 $\lambda_{ss}(m_s)$,即单喷头沿桁架方向的水量 $V_{ss}(m_s)$ 与当前喷头的流量 q 间有

$$V_{ss}(m_s) = q\Delta t\lambda_{ss}(m_s) \tag{10}$$

n 个喷头重叠喷洒布置时,单喷头流量分配到 n 个管理区,沿桁架方向分别对各个管理区内的 $\lambda_{ss}(m_s)$ 求和,得到喷头区域喷洒量分配率 η_i,即落入单个管理区内的流量占单喷头总流量的百分比。

采用陈震等[14]的喷头实验数据,并设喷灌机匀速前进,喷头喷洒扫掠可求得 4 喷头重叠喷洒布置时有 $\eta_1=\eta_4=13.78\%$、$\eta_2=\eta_3=36.22\%$。

按 1.2 节的分析结果,本文将针对相邻 4 个喷头控制一个管理区的情况。当喷灌机生产制造、喷头选型等因素导致控制一个管理区的喷头数发生变化时,对于不同喷头、不同工况、不同分区数量,均可以由单个喷头的喷洒特性得到喷头管理区喷洒分配率。以相邻 5 个喷头控制一个管理区为例,喷灌机首尾各出现 4 个不完全管理区。此时每个喷头涉及 5 个管理区,对应的喷头管理区喷洒分配率分别为 η_1、η_2、η_3、η_4、η_5。

1.4　喷头流量分配定义

当每个管理区流量由相邻多个喷头共同决定时，就涉及到管理区处方值到单个喷头流量的转换分配问题。本文取 $n=4$ 按完全管理区处方值要求的喷头流量进行分配。如图 2 所示，各完全管理区由相邻 4 个喷头控制，且有完全管理区数 $M=N-3$。

喷头流量分配问题可以具体化为：已知各个管理区的设计处方值时，分配各个喷头流量，使得各管理区的分配流量与处方值之间的偏差尽量小。管理区流量分配偏差指标有：

(1)管理区流量分配误差 e_i，即管理区分配流量 q_{h_i} 与处方值 q_{p_i} 之差除以设备最大处方值 $q_{p\mathrm{MAX}}$。

$$e_i=\frac{q_{h_i}-q_{p_i}}{q_{p\mathrm{MAX}}}\times 100\% \quad (i=1,2,\cdots,M) \tag{11}$$

(2)最大流量分配误差 e_{ME}，即管理区流量分配误差绝对值的最大值

$$e_{\mathrm{ME}}=\max(|e_i|) \quad (i=1,2,\cdots,M) \tag{12}$$

(3)流量分配平均绝对误差 e_{MAE}，即管理区流量分配误差绝对值的平均值

$$e_{\mathrm{MAE}}=\frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M}|e_i| \tag{13}$$

(4)流量分配均方根误差 e_{RMSE}，即管理区流量分配误差的标准差

$$e_{\mathrm{RMSE}}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{M}e_i^2}{M}} \tag{14}$$

O'SHAUGHNESSY 等[5]在实验过程中发现，相邻管理区的处方值不同时，对喷洒效果将会产生严重影响。对应地本文以沿桁架方向 N 个喷头形成的 M 个完全管理区，在第 J_p 个管理区产生处方值阶跃进行研究。设各管理区的处方值 q_{p_i} 为

$$q_{p_i}=\begin{cases}q_{p_s} & (i=1,2,\cdots,J_p)\\ q_{p_e} & (i=J_p,J_p+1,\cdots,M)\end{cases} \tag{15}$$

式中　q_{p_s}——流量处方值阶跃初值

q_{p_e}——流量处方值阶跃终值

并且可得流量处方值阶跃幅度

$$\Delta q_p=q_{p_e}-q_{p_s} \tag{16}$$

上述流量变量 q_{p_i}、q_{p_s}、q_{p_e}、Δq_p 在流量分配计算时可取与设备最大的处方值 $q_{p\mathrm{MAX}}$ 的百分比表达。

本文后续分析中取 $N=20$，即 $M=17$。各流量处方值阶跃前后的取值组合如表 2 勾取处。对表 2 中每一个处方值组合，分别取 $J_p=2,3,\cdots,17$ 进行求解计算。后期为细化分析分配误差的变化情况，又增加了 Δq_p 取 15%、33%、52% 的组合。

表 2　处方值组合

Tab. 2　Combination of prescriptions

q_{p_s}/%	q_{p_e}/%								
	20	30	40	50	60	70	80	90	100
10	√	√	√	√	√	√	√	√	√
20		√	√	√	√	√	√	√	√
30			√	√	√	√	√	√	√
40				√	√	√	√	√	√
50					√	√	√	√	√
60						√	√	√	√
70							√	√	√
80								√	√
90									√

2　基于喷头区域喷洒量分配率的喷头流量分配

2.1　喷头流量的分配法

2.1.1　喷头流量的平均分配法(加权均分法)

目前 Lindsay 等喷灌机厂商均采用流量均分法，即喷头流量为该喷头控制的管理区的处方值的平均值。按图 2 所示，喷头排序从桁架上首个喷头起，管理区排序从首个完全管理区开始。对应 $n=4$，完全管理区内有

$$q_{i+3}=\frac{q_{p_i}+q_{p_{i+1}}+q_{p_{i+2}}+q_{p_{i+3}}}{4} \quad (i=1,2,\cdots,N-6) \tag{17}$$

式(17)中分配给第 $i+3$ 个喷头的流量 q_{i+3} 是此喷头喷洒到的 4 个相邻管理区的处方值 q_{p_i}、$q_{p_{i+1}}$、$q_{p_{i+2}}$、$q_{p_{i+3}}$ 的平均值。而实际上，由 1.3 节可知，每个喷头在 4 个管理区的区域喷洒量分配率并不都是 1/4，而应该分别为 η_1、η_2、η_3、η_4。对式(17)以区域喷洒量分配率进行加权后得到加权均分法的喷头流量分配式

$$q_{i+3}=\eta_1 q_{p_i}+\eta_2 q_{p_{i+1}}+\eta_3 q_{p_{i+2}}+\eta_4 q_{p_{i+3}} \quad (i=1,2,\cdots,N-6) \tag{18}$$

式(18)仅适用于中间的 $N-6$ 个喷头，如图 2 中的喷头 4、5、6、7。最前端和最末端的各 3 个喷头因为涉及非完全管理区而无法采用式(18)，其流量则可通过补足所涉完全管理区处方值的方式求取。以图 2 中的完全管理区 3 为例，其实际喷洒量由 q_3、q_4、q_5、q_6 共同决定，而 q_4、q_5、q_6 已由后续的完全管理区按式(18)确定，因此可以通过补足处方值 q_{p_3} 得到

$$q_3=\max\left(\frac{q_{p_3}-\eta_3 q_4-\eta_2 q_5-\eta_1 q_6}{\eta_4},0\right) \tag{19}$$

同理已知 q_3、q_4、q_5 后向桁架前端递推得

$$q_2=\max\left(\frac{q_{p_2}-\eta_3q_3-\eta_2q_4-\eta_1q_5}{\eta_4},0\right) \tag{20}$$

同理已知 q_2、q_3、q_4 再后向桁架前端递推得

$$q_1=\max\left(\frac{q_{p_1}-\eta_3q_2-\eta_2q_3-\eta_1q_4}{\eta_4},0\right) \tag{21}$$

同理对桁架末端喷头可得

$$q_{N-2}=\max\left(\frac{q_{p_{N-2}}-\eta_2q_{N-3}-\eta_3q_{N-4}-\eta_4q_{N-5}}{\eta_1},0\right) \tag{22}$$

$$q_{N-1}=\max\left(\frac{q_{p_{N-1}}-\eta_2q_{N-2}-\eta_3q_{N-3}-\eta_4q_{N-4}}{\eta_1},0\right) \tag{23}$$

$$q_N=\max\left(\frac{q_{p_N}-\eta_2q_{N-1}-\eta_3q_{N-2}-\eta_4q_{N-3}}{\eta_1},0\right) \tag{24}$$

第 i 个完全管理区内的管理区分配流量 q_{h_i} 是它所涉的 4 个喷头喷洒在本管理区的流量总和

$$q_{h_i}=\eta_4q_i+\eta_3q_{i+1}+\eta_2q_{i+2}+\eta_1q_{i+3}\quad(i=1,2,\cdots,N-3) \tag{25}$$

由式(11)可得各管理区分配流量误差 e_i。对于中间的 $M-6$ 个完全管理区，由式(18)、(25)可得

$$\begin{aligned}e_i=[&\eta_1\eta_4q_{p_{i-3}}+(\eta_1\eta_3+\eta_2\eta_4)q_{p_{i-2}}+\\&(\eta_1\eta_2+\eta_2\eta_3+\eta_3\eta_4)q_{p_{i-1}}+\\&(\eta_1^2+\eta_2^2+\eta_3^2+\eta_4^2-1)q_{p_i}+\\&(\eta_1\eta_2+\eta_2\eta_3+\eta_3\eta_4)q_{p_{i+1}}+\\&(\eta_1\eta_3+\eta_2\eta_4)q_{p_{i+2}}+\eta_1\eta_4q_{p_{i+3}}]/q_{p_{\max}}\times100\%\end{aligned} \tag{26}$$

由式(26)可知，e_i 与当前管理区及其前后相邻 3 个管理区共 7 个管理区处方值有关，但误差不会传递到其他管理区上。误差最小值可达到 0，但当相邻处方值变化较大时，误差增加可观。如当 $q_{p_{i-3}}=q_{p_{i-2}}=q_{p_{i-1}}=q_{p_{i+1}}=q_{p_{i+2}}=q_{p_{i+3}}=q_{p_{\max}}$ 而且 $q_{p_i}=0$ 时，误差达到最大值。

2.1.2 喷头流量的遗传算法分配法(GA 法)

遗传算法依照生物进化，将实际问题映射为环境，将问题解转化为一系列基因编码的染色体，通过复制、组合交叉及变异产生后代种群，按照优胜劣汰、适者生存的原则筛选出适应性最优的染色体种群，亦即解集[19-21]。

喷头流量分配问题的优化设计变量为喷头流量序列

$$\boldsymbol{x}=[q_1\quad q_2\quad\cdots\quad q_N] \tag{27}$$

优化目标为管理区分配流量与处方值间的偏差，适应度函数可取

$$F_{it}=\sum_{i=1}^{M}(q_{h_i}-q_{p_i})^2 \tag{28}$$

遗传算法中，初始值按 2.1.1 节的加权均分法取得，不断循环地找出某个种群中使适应度函数达到最小值的染色体，参与到下个迭代的遗传过程以产生更优良的新染色体，直至适应度达到设计要求，管理区分配流量与设计处方值之间偏差足够小。

对于非 4 个喷头控制一个管理区也可采用加权平均法和 GA 法确定喷头流量。以相邻 5 个喷头控制一个管理区为例，采用加权均分法时中间喷头的流量取其涉及的 5 个管理区的处方值的加权平均值，同时仿照式(19)~(24)通过将前端和末端的各 4 个完全管理区水量补足的方式取得前端和末端各 4 个喷头的流量，GA 法则是在加权平均法的基础上进行优化。

2.2 管理区流量分配精度分析

2.2.1 流量分配误差与处方阶跃初值的关系

采用表 2 处方值组合进行两种分配方法的流量分配，均发现流量分配误差与处方阶跃初值无关。如以 $\Delta q_p=33\%$、$J_p=9$ 为例，采用 GA 法进行流量分配，当 q_{p_s} 取不同值时，各流量分配误差如表 3 所示。

表 3 不同阶跃初值下的流量分配误差

Tab. 3 Flux distribution error of different starting values

%

流量分配误差	q_{p_s}/%					
	10	20	30	40	50	60
e_{ME}	5.13	4.87	4.67	4.88	4.83	5.61
e_{MAE}	1.27	1.21	1.26	1.15	1.17	1.25
e_{RMSE}	2.08	2.00	2.00	1.99	1.99	2.14

2.2.2 流量分配误差与处方阶跃点的关系

采用表 2 处方值组合进行两种分配方法流量分配，发现当阶跃发生在两端时，误差较小；阶跃发生在中间位置时流量分配误差与处方阶跃点无关。如以 $q_{p_s}=10\%$、$q_{p_e}=43\%$ 为例，采用 GA 法进行流量分配，当 J_p 取不同值时，各流量分配误差如图 6 所示。

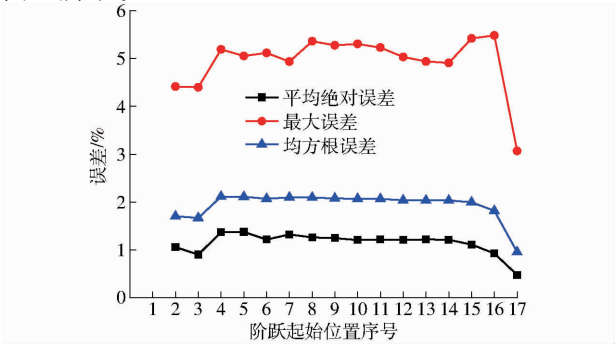


图 6 不同阶跃起始位置时的流量分配误差

Fig. 6 Flux distribution error of different starting points

2.2.3　流量分配误差与处方阶跃幅度的关系

图 7 是采用表 2 处方值组合进行两种分配方法的流量分配，按不同的阶跃幅度得到的管理区流量分配误差。加权均分法的各类流量分配误差会随着阶跃幅度的增大而线性增大。GA 法的 e_{ME} 小于加权均分法，且随着阶跃幅度增大而增大。当 Δq_p 在 50% 左右时，两种算法的 e_{ME} 差距最大，GA 法优化效果最明显。当 Δq_p 取 15%、33%、52% 时，e_{ME} 分别约为 2%、5% 和 10%。因此为保证较好的流量分配精度，制定处方图时相邻管理区的处方值差不宜超过最大处方值的 33%。GA 法的 e_{MAE} 和 e_{RMSE} 均小于加权均分法，而 e_{RMSE} 变化趋势与 e_{ME} 相类似。GA 法的 e_{RMSE} 始终小于加权均分法，说明 GA 法得到的各管理区分配误差波动小。可见 GA 法得到的流量分配精度高于加权均分法，尤其适用于处理相邻处方值存在较大突变的情况。当相邻处方值的变化幅度在 33% 以内时，分配精度可以控制在 5% 以内。

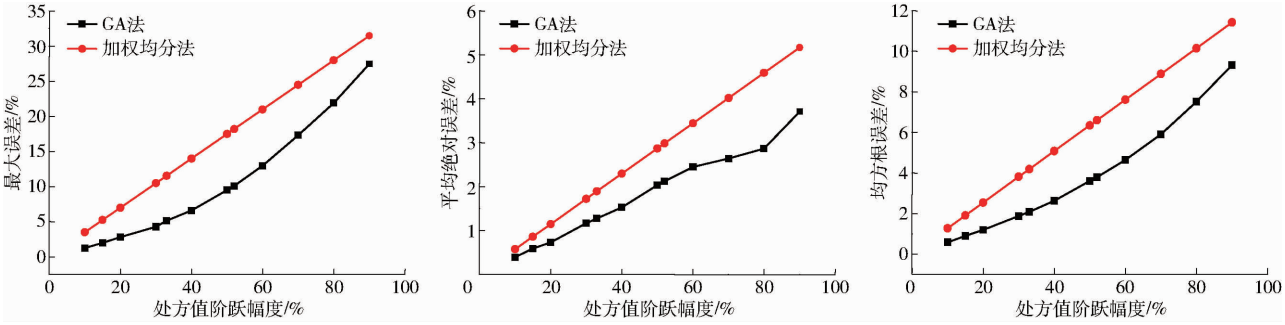


图 7　不同阶跃幅度时的流量分配误差

Fig. 7　Flux distribution error of different variations of prescriptions

O'SHAUGHNESSY 等[5]的中心支轴喷灌机实验中，以相邻 12 个喷头为一个等水量灌溉区。为避免水量干扰，保证灌溉区内的均匀度及喷洒精度，三跨喷灌机在灌溉区间设置 3 m 过渡区，而六跨喷灌机过渡区则增大至 6 ~ 9 m。O'SHAUGHNESSY 等[5]的等水量灌溉区按上文定义可转换为在 $J_p = 9$ 处发生阶跃，阶跃附近流量分配误差较大的管理区则可作为过渡区。采用 GA 法时如 $\Delta q_p \leqslant 33\%$ 则实现 5% 的管理区流量分配精度，从而无需在相邻管理区之间设置过渡区域，可大大提高土地利用率和喷灌机使用效率。

2.2.4　阶跃引起的流量分配误差传递

GA 法进行全局优化，相邻管理区有可能会彼此影响并导致误差向两侧传递。图 8 给出 $q_{p_s} = 10\%$、$q_{p_e} = 43\%$ 时在不同位置进行阶跃的管理区流量分配误差变化。从图 8 可以发现，阶跃处的流量分配误差将远远大于其他位置上，误差向两侧逐渐衰减。当误差向两侧各传递一个管理区后，衰减到最大误差的一半以下，因此可以认为由于处方值阶跃而产生的喷洒误差出现在阶跃处左右各两个管理区内。

3　基于管理区流量喷洒均匀性的喷头流量分配改进

图 9 是按 O'SHAUGHNESSY 等[5]的实验情况，在 $J_p = 9$ 处以 $q_{p_s} = 10\%$ 分别引入 q_{p_e} 为 43%、62% 和 100% 的处方值阶跃，采用 GA 法进行喷头流量分配，并采用陈震等[14]的 Nelson R3000 型喷头空间喷洒分布特性在喷头径向扩展，得到沿桁架的分配流量分布，其中桁架方向各处的分配流量以最大处方值的百分比形式给出。从图 9 可知，引入 Nelson R3000 型喷头喷洒分布特性后，非阶跃处喷洒均匀性差，这是 GA 法全局优化时，仅保证管理区分配流量精度指标，相邻喷头分配的流量差异可能较大。由式(26)知加权均分法在处方值序列均匀变化或者不变时 e_i 可以达到 0，而 GA 法只能做到无限趋近于 0。

将加权均分法和 GA 法进行组合，便形成喷头流量分配的组合法。即在处方阶跃处附近采用 GA 法，减少阶跃引起的管理区流量分配误差；在非阶跃处采用加权均分法，减小相邻喷头流量差，提高喷洒均匀性。由 2.2.4 节知 GA 法在阶跃左右各两个管理区内产生显著误差，因此可以只对这 4 个管理区及其涉及的 7 个喷头进行优化，然后使用加权均分法确定其他喷头的流量。对图 9 的场合运用组合法重新进行流量分配和喷头喷洒特性叠加，得到组合法时的分配喷洒分布，见图 10。对比图 9，图 10 中非阶跃处喷洒均匀性有明显提高，误差控制在 5% 内。

组合法中加权均分法的引入虽然会在一定程度上降低 GA 法的计算精度，但误差可以控制在较小范围内。而非阶跃部分的喷洒均匀性得到了显著的提高。

随着大型喷灌机喷头数量增多，如全局应用

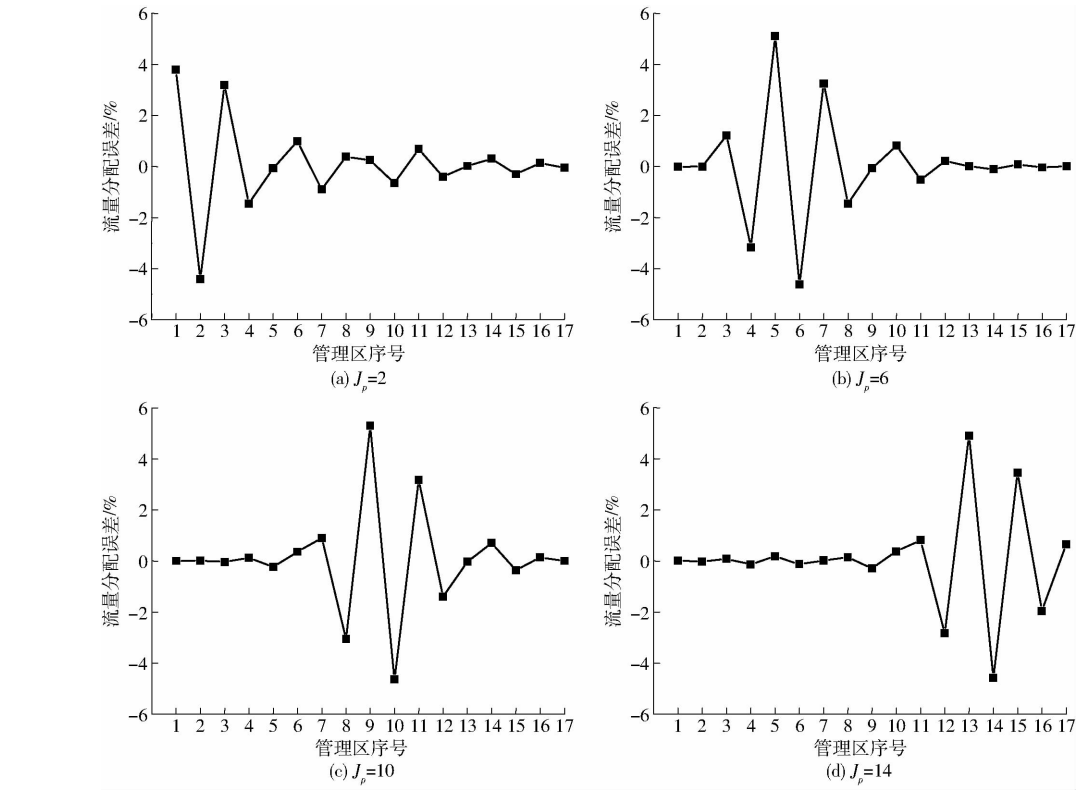


图 8 GA 法的分配误差传递

Fig. 8 Distribution error spread of GA method

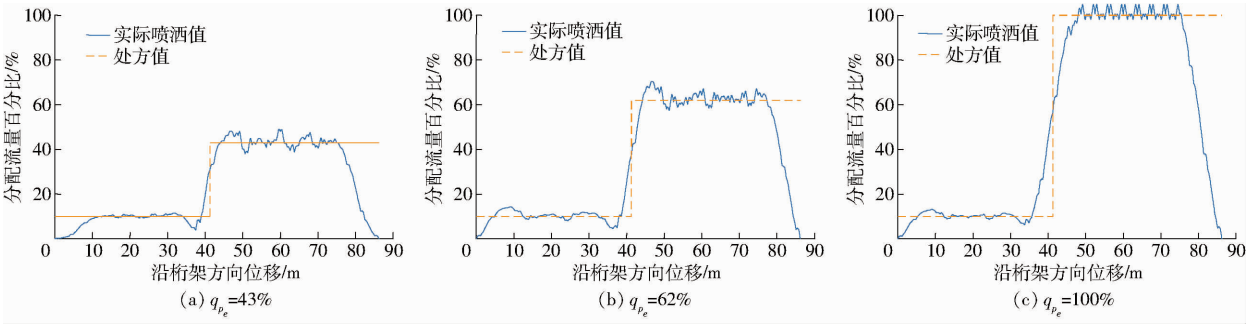


图 9 采用 GA 法的分配流量分布

Fig. 9 Water distribution of GA method

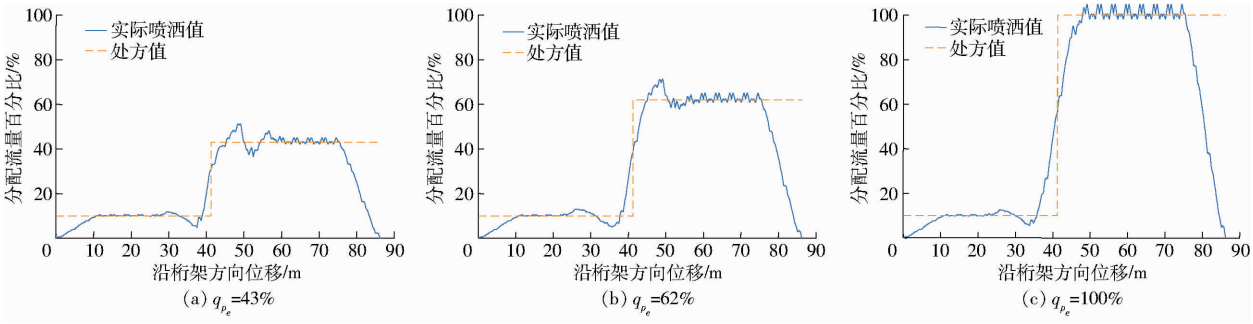


图 10 采用组合法的分配流量分布

Fig. 10 Water distribution of combined method

GA 法则运算时间将急剧增大。采用组合法将缩短运算时间,降低控制器配置要求。

4 结论

(1)给出了大型平移式 PWM 变量喷灌机按处方值进行喷头流量分配的方法,并讨论其实现的精度和均匀性。基于 Nelson R3000 型单喷头水量分布实验数据,分析了多喷头喷洒叠加后的喷洒均匀性,确定了相邻 4 个喷头重叠喷洒控制一个管理区的喷头间距布置,并得到了喷头喷洒区域的喷头管

理区喷洒分配率。

(2)结合重叠喷头的喷头管理区喷洒分配率，构建了按处方值进行喷头流量分配的加权均分法和 GA 法。通过对处方阶跃时的流量分配误差分析发现，采用 GA 法，处方阶跃幅度小于 33% 时，流量分配误差在 5% 之内；GA 法最大流量分配误差出现在阶跃处，并影响附近 4 个管理区。

(3)通过分析叠加喷头的喷洒特性，发现全局 GA 法对喷洒均匀性具有不利影响。所提出的将 GA 法和加权均分法组合运用的组合法，综合了 GA 法处理相邻处方值突变时的高喷洒精度和加权均分法处理均匀变化处方值时的高喷洒均匀性。

参 考 文 献

1 赵伟霞，李久生，栗岩峰. 大型喷灌机变量灌溉技术研究进展[J]. 农业工程学报，2016，32(13)：1－7.
ZHAO Weixia, LI Jiusheng, LI Yanfeng. Review on variable rate irrigation with continuously moving sprinkler machines[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(13): 1－7. (in Chinese)

2 Al-KUFAISHI S, BLACKMORES S, SOURELL H, et al. Assessment of two variable rate irrigation controllers used on a central pivot[J]. Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal, 2005, 7(9): 1－14.

3 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.
YAN Haijun. Study on water distribution uniformity of center pivot and lateral move irrigation system based on variable rate technology[D]. Beijing: China Agricultural University, 2004. (in Chinese)

4 HANKS R J, KELLER J, RASMUSSEN V P, et al. Line source sprinkler for continuous variable irrigation-crop production studies[J]. Soil Science Society of America Journal, 1976, 40(3): 426－429.

5 O'SHAUGHNESSY S A, URREGO Y F, EVETT S R, et al. Assessing application uniformity of a variable rate irrigation system in a windy location[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2013, 29(4): 497－510.

6 巩兴晖. 移动式喷灌机折射式喷头水量及动能分布规律研究[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2015.
GONG Xinghui. Study on the water and specific power distribution of the spray plate sprinkler used in the moving sprinkler machine[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015. (in Chinese)

7 葛茂生，吴普特，朱德兰，等. 相邻喷头射流相互作用对喷洒特性的影响[J]. 农业工程学报，2015，31(9)：100－106.
GE Maosheng, WU Pute, ZHU Delan, et al. Effect of jets interaction on spray characteristics between adjacent sprinklers[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(9): 100－106. (in Chinese)

8 韩文霆，姚小敏，朱冰钦，等. 变量喷洒喷头组合喷灌试验[J/OL]. 农业机械学报，2013，44(7)：121－126，112. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20130721&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.07.021.
HAN Wenting, YAO Xiaomin, ZHU Bingqin, et al. Test and evaluation on variable-rate irrigation sprinkler[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(7): 121－126, 112. (in Chinese)

9 张以升，朱德兰，张林，等. 平移式喷灌机行走速度及喷灌均匀度试验研究[J]. 排灌机械工程学报，2014，32(7)：625－630.
ZHANG Yisheng, ZHU Delan, ZHANG Lin, et al. Study on translocating speed and water distribution uniformity of lightweight lateral move irrigation system[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(7): 625－630. (in Chinese)

10 CHU S T, MOE D L. Hydraulics of a center pivot system[J]. Transactions of the ASAE, 1972, 15(5): 894－896.

11 李久生. 喷灌水量分布均匀性评价指标的试验研究[J]. 农业工程学报，1999，15(4)：78－82.
LI Jiusheng. Evaluation methods of sprinkler water uniformity[J]. Transactions of the CSAE, 1999, 15(4): 78－82. (in Chinese)

12 喻黎明，吴普特，牛文全. 喷头组合间距、工作压力和布置形式对喷灌均匀系数的影响[J]. 水土保持研究，2002，9(2)：154－157.
YU Liming, WU Pute, NIU Wenquan. Influence of the combination distance, work pressure and layout form of sprinkler head on uniformity coefficient in irrigation[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2002, 9(2): 154－157. (in Chinese)

13 韩文霆，王玄，孙瑜. 喷灌水量分布动态模拟与均匀性研究[J/OL]. 农业机械学报，2014，45(11)：159－164. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20141125&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.11.025.
HAN Wenting, WANG Xuan, SUN Yu. Dynamic simulation for sprinkler irrigation water distribution with uniformity[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 159－164. (in Chinese)

14 陈震，段福义，范永申，等. 喷灌机全喷洒域与叠加域水量分布特性的静态模拟[J]. 农业工程学报，2017，33(16)：104－111.
CHEN Zhen, DUAN Fuyi, FAN Yongshen, et al. Static simulation on water distribution characteristics of overlap area and whole spraying area for sprinkler[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(16): 104－111. (in Chinese)

15 CHRISTIASEN J E. Irrigation by sprinkler[R]. California Agricultural Experimanetal Station Research Bulletin, 1942: 123.

16 中华人民共和国建设部. GB/T 50085—2007：喷灌工程技术规范[S]. 北京：中国标准出版社，2007.

17 中华人民共和国工业和信息化部. JB/T 6280—2013：圆形(中心支轴式)和平移式喷灌机[S]. 北京：机械工业出版社，2013.

18 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. GB/T 27612.3—2011：农业灌溉设备 喷头 第3部分：水量分布特性和试验方法[S]. 北京：中国标准出版社，2012.

19 郝思齐，池慧. 三种常见现代优化算法的比较[J]. 价值工程，2014，33(27)：301－302.
HAO Siqi, CHI Hui. Studies on three modern optimization algorithms[J]. Value Engineering, 2014, 33(27): 301－302. (in Chinese)

20 汪民乐. 遗传算法的收敛性研究[J]. 计算技术与自动化，2015，34(1)：58－62.
WANG Minle. Research on convergence of genetic algorithm[J]. Computing Technology and Automation, 2015, 34(1): 58－62. (in Chinese)

21 梁春英，吕鹏，纪建伟，等. 基于遗传算法的电液变量施肥控制系统 PID 参数优化[J/OL]. 农业机械学报，2013，44(增刊1)：89－93，88. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=2013s117&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S1.017.
LIANG Chunying, LÜ Peng, JI Jianwei, et al. Optimization of PID parameters for electro-hydraulic variable rate fertilization system based on genetic algorithm[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp.1): 89－93, 88. (in Chinese)