

低能耗多功能轻小型移动式 喷灌机组优化设计与试验研究

涂琴 李红 王新坤 著



科学出版社

低能耗多功能轻小型移动式 喷灌机组优化设计与试验研究

涂琴 李红 王新坤 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是作者多年从事新型喷灌装备设计理论与技术研究工作的总结。全书共分为8个章节。包括轻小型移动式喷灌机组概述、低能耗多功能轻小型移动式喷灌机组设计、轻小型移动式喷灌机组单目标优化、综合评价指标体系与方法、轻小型移动式喷灌机组多目标优化配置研究、轻小型移动式喷灌机组多目标优化配置实例、轻小型移动式喷灌机组田间试验研究、轻小型移动式喷灌机组发展方向探讨等。

本书可供从事喷灌技术及节水灌溉研究工作的工程技术人员、高等学校相关专业的师生以及家庭农场建设技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

低能耗多功能轻小型移动式喷灌机组优化设计与试验研究/涂琴, 李红, 王新坤著. —北京: 科学出版社, 2017

ISBN 978-7-03-054874-0

I. ①低… II. ①涂… ②李… ③王… III. ①移动式-喷灌机-研究
IV. ①S277.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017) 第 254712 号

责任编辑: 惠 雪 沈 旭 / 责任校对: 彭 涛
责任印制: 张 伟 / 封面设计: 许 瑞

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 11 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2017 年 11 月第一次印刷 印张: 9 1/4

字数: 186 000

定价: 89.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

截至 2015 年年底,我国人口总数已达 13.7 亿,是无可争议的人口大国和农业大国。同时,我国也是一个水资源严重短缺的国家,节水灌溉是促进粮食增产的重要途径之一。另有数据显示,我国农业机械能耗比先进水平国家高 30%,受近年各地干旱频发的影响,喷灌动力消耗占据农业机械能耗的很大部分,能耗已经成为制约我国灌溉发展及推广的重要因素。研究和推行节水节能的灌溉方式势在必行。因此,国家“十三五”规划和 2016 年、2017 年中央一号文件都将节水灌溉放在重要的战略位置。

喷灌是一种先进的节水灌溉方式,对作物适用范围广,节水增产效果明显。其中,轻小型移动喷灌机组因其移动灵活、适应性强、操作方便等特点,与我国地理情况、作物种植结构、农村经济水平等条件相适应,将在很长时期内成为我国推广应用的主要节水灌溉方式之一。与此同时,随着农村经济水平提高,农民种植的作物种类日益多样化,使得轻小型移动式喷灌机组的多元化配置成为必然;另外,随着农村劳动力转移、土地适度规模经营等进程的加快,对喷灌机组的管道布置及组合模式提出了新的要求。

目前,轻小型移动式喷灌机组的配置方式较为单一、机组的评价指标仍以技术指标为主,不能满足不同应用场合的需要,给农户及管理者的决策带来一定的困难。同时,喷灌机组便捷性的提高与水肥一体化的实现是日后发展的重要方向,这与机组的配置优化、综合性能试验研究密不可分。因此,急需一部专业著作来全面介绍低能耗多功能轻小型移动式喷灌机组多元化配置、机组管道水力设计及多目标优化、机组综合评价体系及各指标影响因素研究等内容,为灌溉工作者的学习、研究和生产提供帮助。

本书是“十一五”国家高技术研究发展计划(863 计划)项目“变量喷洒低能耗轻小型灌溉机组(2006AA100211)”和“十二五”国家高技术研究发展计划(863 计划)项目“精确喷灌技术与产品(2011AA100506)”等研究成果的总结,并得到国家自然科学基金项目“轻小型喷灌机组变量运行对肥液运输及沉积的影响机理(51609104)”的资助。

本书的撰写得到了江苏大学李红研究员、王新坤研究员的指导和帮助,得到了江苏旺达喷灌机有限公司高志俊总经理、高网大高级工程师、庄金良高级工程师在

机组型式设计、喷灌设备提供中的大力支持，得到了江苏大学流体机械工程技术研究中心领导和节水灌溉方向课题组老师的鼓励以及常州信息职业技术学院领导和同事的大力支持。在此一并致以衷心的感谢。

限于作者水平和研究条件，书中难免存在不妥之处，恳请读者批评指正，不吝赐教。

作 者

2017年6月

符 号 表

符号	物理意义	单位
N	动力机功率	kW
Q	水泵流量	m^3/h
H	水泵扬程	m
n_b	水泵转速	r/min
η_b	水泵效率	%
h_s	水泵吸程	m
n	喷头数	个
d_p	喷嘴直径	mm
p	喷头工作压力	MPa
R	喷头射程	m
q	喷头流量	m^3/h
G	优化目标	
Fit	适应度	
μ_1 、 μ_2 、 μ_3	惩罚因子	
h_n	管道末端喷头工作压力水头	m
D_i	第 i 段管道的直径	mm
H_b	水泵出口工作压力水头	m
H_0	管道入口处工作压力水头	m
$h_{p \min}$	喷头最小工作压力水头	m
h_p	喷头设计工作压力水头	m
$h_{p \max}$	喷头最大工作压力水头	m
E_p	喷灌机组单位能耗	$\text{kW}\cdot\text{h}/(\text{mm}\cdot\text{hm}^2)$
η_b	水泵效率	
η_d	动力机效率	
η_p	田间喷洒水利用系数	
a	喷头间距	m
D	管径	mm
p_{\min}	最小喷头工作压力	MPa
ΔE_p	单位能耗降低率	%
P_{co}	观测的累积概率	
P_{ce}	期望的累积概率	

续表

符号	物理意义	单位
C_F	单位喷灌面积年造价	元/(a·hm ²)
r	折旧率	
C_b	动力机、水泵与进水管的造价	元/套
C_g	管道单价	元/m
C_s	喷头、立杆、支架与接头的单价	元/套
M	机组工作位置数	
A	一次灌溉面积	hm ²
C_A	单位喷灌面积上的年费用	元/(a·hm ²)
E	燃料价格	元/(kW·h)
T_y	年运行时间	h
E_F	单位能耗费	元/(a·hm ²)
C_{total}	总费用	元/hm ²
t	折旧年限	a
γ	年利率	%
ρ_x	年平均大修率	%
C_{ctr}	总建设费	元/hm ²
C_{opt}	总运行费	元/hm ²
LCC	生命周期成本	元
$C_{initial}$	初投资	元
C_{energy}	能耗费	元
C_{labour}	用工费	元
$C_{maintenance}$	维修费	元
$C_{disposal}$	废弃成本	元
$C_{salvage}$	残值	元
P_v, sum, P_v	折算系数	
m	灌水定额	mm/d
T_{sum}	年总灌水时间	h
C_{lb0}	每小时人工费	元/h
$T_{p,all}$	每年喷灌机组操作时间	h
ms_{all}	机组每年移动次数	次
T_A	机组移动一次的操作时间	min

续表

符号	物理意义	单位
N_t	搬运次数	次
$C_{\text{transport}}$	搬运用费	元/次
C_{sv}	废铁价格	元/kg
w_{pump}	水泵质量	kg
$w_{\text{sprinkler}}$	喷头质量	kg
w_{riser}	竖管质量	kg
w_{tee}	三通质量	kg
w_{coupling}	接头质量	kg
CU	克里琴森均匀系数	%
h_{ti}	第 i 个测点喷洒水深	mm
\bar{h}	平均喷洒水深	mm
n_t	测点数目	个
k_1	工人熟练程度系数	
k_2	气候因素系数	
k_3	地面泥泞程度系数	
n_e	机组部件数	
T_i	部件 i 的操作时间	min
$T_{\text{p,sum}}$	机组灌溉一定面积的操作时间	min
m_s	机组灌溉一定面积的实际移动次数	次
T_m	动力机泵操作时间	min
T_p	管路安装时间	min
T_{p1}	一节管路管件安装时间	min
k_d	管径大小系数	
T_{p2}	安装管件行走时间	min
k_t	行走次数系数	
t_p	行走一米的时间	min
T_s	喷头安装时间	min
T_{s0}	安装一套喷头及配件的时间	min
T_t	行走分配喷头的时间	min

续表

符号	物理意义	单位
ρ_s	组合喷灌强度	mm/h
ρ_d	雾化指标	
T_{irr}	一次灌水时间	h
T_0	灌水周期	天
T	机组灌溉一定面积时的总时间	h
ET	作物日蒸发蒸腾量	mm/d
b_m	支管间距	m
AE	灌水效率	%
V_s	喷洒到地面的水量	m^3
V_o	单位时间内喷头流出的水量	m^3
$\rho_s(\text{test})$	喷灌强度测量值	mm/h
$\rho_s(\text{calculated})$	喷灌强度理论值	mm/h
Reliability	可靠性	
Storage	储存方便性	
U	机组方案集合	
V	评价指标集合	
X	机组方案评价指标矩阵	
x_{ij}	评价指标原始数据	
u_0	最佳方案	
Y	评价指标归一化矩阵	
y_{ij}	规格化后的评价指标值	
u_i	第 i 个机组方案	
v_j	第 j 个评价指标	
φ	分辨系数	
ξ	关联度矢量	
W	权值矢量	
W_j	第 j 项指标的综合权重	
W_{ja}	第 j 项指标的主观权重	
W_{jb}	第 j 项指标的客观权重	
C.I.	一致性比率	
λ_{\max}	判断矩阵特征值	
n_m	矩阵的维数	
C.R.	随机一致性比率	
R.I.	同阶平均一致性指标	
$H_{\text{entropy}j}$	第 j 个指标的熵值	
ms_0	灌溉周期内机组最大移动次数	次

续表

符号	物理意义	单位
ms_d	机组一天内最大移动次数	次
Q_{design}	额定工况下的水泵流量	m^3
h_b	水泵进出口损失	m
h_0	水源水面与管路进口的高程差	m
q_p	喷头额定流量	m^3/h
h_v	喷头工作压力极差率	%
H_i	支管第 i 节点压力	m
Q_i	第 i 管段流量	m^3/h
Q_n	末端管道的流量	m^3/h
h_i	第 i 节点处喷头工作压力	m
q_i	第 i 节点处喷头流量	m^3/h
q_n	末端喷头流量	m^3/h
l	竖管长度	m
d	竖管内径	mm
Le_i	支管管件局部水头损失当量长度	m
le_i	竖管管件局部水头损失当量长度	m
I_i	地形坡度	
f, m, b	与管材有关的水头损失计算系数	
μ	喷头流量系数	
h_{bn1}	干管末端的工作压力水头	m
h_{bn2}	最末端的支管入口处工作压力水头	m
h_{bn}	干管末端压力水头	m
T_c	优化算法平均计算时间	s
E_O	优化算法最佳性能指标	
E_R	优化算法鲁棒性能指标	
$p_{ij}^k(t)$	转移概率	
α	信息素重要程度因子	
β	启发函数重要程度因子	

续表

符号	物理意义	单位
k	蚁群算法中蚂蚁的编号	
$\eta_{ij}(t)$	启发函数	
h_{ij}	两个节点间管段 i 上的水力损失	m
$\tau_{ij}^k(t)$	信息素浓度	
ρ	信息素的挥发系数	
$\Delta\tau_{ij}^k(t)$	信息素总量	
Q_a	修正系数	
M_{GA}	遗传算法种群大小	
N_{max}	最大迭代次数	次
P_c	交叉概率	
P_m	变异概率	
m_{ant}	蚂蚁数	
t_{max}	最大迭代次数	次
F	目标函数	
W_i	权值	
p_{avg}	喷头平均工作压力	MPa
RMSE	均方根误差	
R_r	相关系数	
θ	风与北向夹角	(°)
v	风速	m/s
T_{air}	空气温度	°C
CU _R	矩形布置时的均匀系数	%
CU _T	三角形布置时的均匀系数	%
R_{CU}	为喷灌均匀性的极差	%

注：以上变量按在文中出现的先后顺序列出。

目 录

前言

符号表

第 1 章 轻小型移动式喷灌机组概述	1
1.1 概述	1
1.2 轻小型移动式喷灌机组现有机组型式	3
1.2.1 现有机组型式	3
1.2.2 机组适应性分析	5
1.3 轻小型喷灌机组评价指标及评价方法现状	5
1.3.1 评价指标	5
1.3.2 灰色关联评价方法	8
1.4 喷灌管道水力计算及优化方法	8
1.4.1 管道水力计算方法	9
1.4.2 优化方法	9
1.4.3 算法特点对比	11
1.4.4 优化质量与收敛速度对比	11
1.5 主要研究内容	12
第 2 章 低能耗多功能轻小型移动式喷灌机组设计	14
2.1 轻小型喷灌机组系列	14
2.1.1 机组参数	14
2.1.2 基本配置	14
2.1.3 存在的不足	17
2.2 移动固定多目标喷灌系统	18
2.2.1 系统组合模式	18
2.2.2 机组关键部件改进	19
2.3 组合式双支管多喷头喷灌系统	22
2.3.1 系统构成	22

2.3.2	关键部件设计	23
2.4	管道配置方式拓展	24
2.5	本章小结	27
第 3 章	轻小型移动式喷灌机组单目标优化	28
3.1	机组优化数学模型	28
3.1.1	喷灌机组水力计算方法	29
3.1.2	约束条件	29
3.1.3	遗传算法优化	30
3.2	机组能耗最低为目标	31
3.2.1	单位能耗计算方法	31
3.2.2	能耗影响因素分析	31
3.3	机组成本最低为目标	37
3.3.1	年造价	38
3.3.2	年费用	38
3.3.3	总费用	39
3.3.4	生命周期成本 (LCC)	39
3.4	喷灌均匀性最高为目标	40
3.4.1	喷灌均匀性计算公式	40
3.4.2	喷灌均匀性影响因素分析	40
3.5	操作时间最少为目标	42
3.6	本章小结	43
第 4 章	综合评价指标体系与方法	45
4.1	技术性指标	45
4.1.1	喷灌强度	45
4.1.2	喷灌均匀性	45
4.1.3	雾化指标	46
4.2	经济性指标	46
4.2.1	生命周期成本 (LCC)	46
4.2.2	灌水时间	46
4.3	环境指标	47
4.3.1	单位能耗	48

4.3.2	灌水效率	48
4.4	社会指标	48
4.4.1	操作时间	48
4.4.2	可靠性	49
4.4.3	储存方便性	49
4.5	灰色关联度评价方法	50
4.5.1	灰色关联模型	50
4.5.2	权值确定方法	50
4.6	实例分析	53
4.6.1	灌溉面积选择	53
4.6.2	机组选择	53
4.6.3	灌溉制度	54
4.6.4	评价指标与评价方法	54
4.6.5	结果与讨论	54
4.7	本章小结	63
第 5 章	轻小型移动式喷灌机组多目标优化配置研究	65
5.1	轻小型喷灌机组管道水力设计方法	65
5.1.1	后退法	66
5.1.2	前进法	66
5.1.3	后退法与前进法相结合	69
5.2	优化方法比较	73
5.2.1	遗传算法	73
5.2.2	蚁群算法	73
5.3	多目标优化方法	79
5.3.1	多目标优化问题的数学模型	80
5.3.2	求解方法	80
5.4	本章小结	81
第 6 章	轻小型移动式喷灌机组多目标优化配置实例	83
6.1	单目标多种喷头配置对比	83
6.1.1	优化指标的选取	83
6.1.2	机组及喷头的选择	83

6.1.3	优化结果及讨论	85
6.2	机组多目标配置优化	88
6.2.1	子目标拟合公式	88
6.2.2	目标归一化及权重设置	89
6.2.3	计算结果与讨论	90
6.3	不同支管布置方式对比	90
6.3.1	支管布置选择依据	90
6.3.2	不同支管布置计算结果对比	91
6.4	机组规模拓展	94
6.4.1	项目区概况	94
6.4.2	机组选择及管道布置	94
6.4.3	性能计算及评价	95
6.5	本章小结	97
第 7 章	轻小型移动式喷灌机组田间试验研究	99
7.1	试验材料	99
7.1.1	研究对象	99
7.1.2	试验场地	100
7.1.3	试验设备	101
7.2	机组配置优化及能耗试验研究	101
7.2.1	试验目的	101
7.2.2	试验方案	102
7.2.3	测量结果与分析	103
7.3	喷灌均匀性影响因素研究	109
7.3.1	喷头工作压力的影响	109
7.3.2	喷头间距、管道布置、工作压力的综合影响	111
7.4	机组配置方式优选	114
7.5	本章小结	115
第 8 章	轻小型移动式喷灌机组发展方向探讨	117
	参考文献	119
	索引	131

第1章 轻小型移动式喷灌机组概述

1.1 概 述

我国是个农业大国,但人均水资源占有量远低于世界平均水平,为了满足我国 13.83 亿人口的粮食需求,发展节水农业与现代农业已逐渐形成共识。与此同时,我国农业机械能耗比先进水平国家高 30%,受近年各地干旱频发的影响,喷灌动力消耗占据农业机械能耗的很大部分。随着世界范围内油价一路攀升,能耗已经成为制约农业机械发展的重要因素^[1]。研究推行节水节能的灌溉形式势在必行^[2]。

国家“十三五”规划和 2016 年、2017 年中央一号文件都将节水灌溉放在了重要的战略位置。2016 年,中共中央、国务院、农业部、水利部等部门先后出台了近十项全国性与灌溉有关的规划和政策^[3]。其中,中共中央、国务院印发的《关于落实发展新理念加快农业现代化实现全面小康目标的若干意见》指出,“到 2020 年农田有效灌溉面积达到 10 亿亩以上,农田灌溉水有效利用系数提高到 0.55 以上”^[3]。受政策及市场的双重影响,据水利部统计数据显示,截至 2016 年 12 月 10 日,2016 年全国新增高效节水灌溉面积 2145 万亩,提前超额完成该年度《政府工作报告》提出的目标要求^[4]。

喷灌技术作为高效节水灌溉技术之一,为解决我国的粮食问题起到了重要作用。世界范围内水资源及能源的日益短缺使得低压低能耗成为喷灌发展的主要方向之一^[5]。根据我国地理条件、作物种植特点、土地经营特点等国情,采用适宜的喷灌技术是目前我国喷灌发展急需解决的问题。

地理条件方面,我国山地丘陵耕地有 6.7 亿亩,占总耕地面积的 45%^[6]。作物轮作方面,东北、华北主要是“冬小麦 + 夏玉米”或“花生 + 玉米”,华南江苏一带为“小麦 + 水稻”,湖南、云南一带为“烟 + 稻”。其中,玉米、小麦有时需要季节性固定灌溉,并且各地降雨量及水源情况不同,对喷灌系统的型式提出了不同的要求^[7-9]。

土地经营方面,我国农村实行的是以户为单位的联产承包责任制,每户种植面积多为 0.67hm^2 (10 亩)左右,而且地块分散^[10]。另外随着近年来土地适度规模经营的逐步推行以及一定范围内农民返乡潮的兴起,使土地经营方式呈现出更大的多样性和不确定性,这对喷灌机组的设计及型式的选择带来了新的挑战。

由于我国地理条件、作物种植结构、土地经营方式的多样性,大型喷灌机的应

用受到一定的限制。如图 1-1 所示,由小型水泵、可移动管道和多喷头等组成的轻小型移动式喷灌机组适应性相对更强,其使用特点与目前我国农村大部分地区的经济水平和农民的技术水平相适应,在很长时间内将是我国推广应用的主要喷灌及抗旱设备之一。

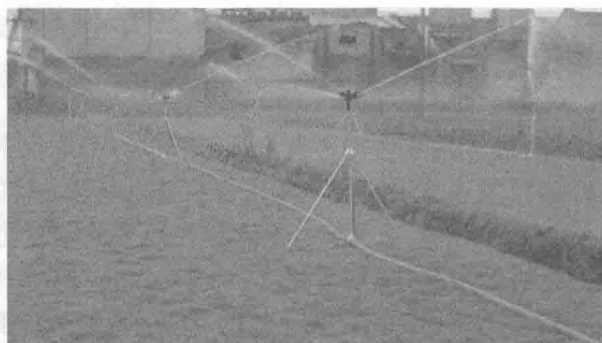


图 1-1 轻小型移动式喷灌机组构成 (图片来源:文献 [11])

根据《轻小型喷灌机》(GB/T 25406—2010)规定,轻小型喷灌机组的配套功率为 22kW 以内^[12]。配套动力有汽油机、柴油机或电机,机组构成型式主要包括手提式、手抬式、手推车式、小型拖拉机悬挂式、小型绞盘式。轻小型喷灌机组的特点如下:①轻巧灵活,便于移动;②一次性投资少,操作简单,维护方便;③节省劳动力,保持水土,提高产量;④适用性强,可以应用于小型田块、丘陵山区、大型喷灌作业区的边角部位以及别墅庭院前后等场合的农作物或景观作物的喷灌作业。该类型机组在 2009 年、2010 年和 2011 年安徽、河南等 6 省份的春季抗旱中起到了关键作用,突出反映了它是比较有效的抗旱机具^[13]。2011 年的统计信息显示,国内常见的轻小型喷灌机组使用量为 88.9 万台,且以每年 5%左右的速率增长^[13]。在该机组型式广泛使用的同时,还有以下几方面亟待改进:①能耗相对较高;②喷洒均匀性不易保证;③安装、移动用工量较大;④采用“一”字形布置的喷灌机组灌溉面积受到一定限制。

受近年来我国农村劳动力持续转移、土地适度规模经营政策力度加大等因素影响,轻小型移动式喷灌机组的系统组合形式亟待拓展,需要能够方便地实现移动、固定多目标应用,同时使有限的动力及流量范围内机组的灌溉面积得到拓展。为了提高喷灌机组移管时的便捷性,需要对机组关键连接部件进行设计改进。为了改变现有轻小型喷灌机组管道布置形式单一的特点,需要提供多元化的管道布置方式供用户进行选择,同时使机组能耗降低,为我国先进节水灌溉技术的推广及部分地区的抗旱需求提供可靠保障。

目前,轻小型移动式喷灌机组的设计配套多考虑系统各组成部分的设备性能,