

基于流量调节阀的变量喷灌装置设计与试验

张廷宁^{1,2} 朱德兰^{1,2} 李钊^{1,2} 赵航^{1,2} 纳扎罗夫·胡代贝尔迪³ 柳昌新³

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100;

3. 塔什干国立农业大学农业生物学学院, 塔什干 100140)

摘要: 为实现 Senninger i-Wob2 型喷头的喷灌流量精准变量调节, 在喷头前安装 V 型流量调节阀作为执行机构, 通过阀体水力性能试验, 建立阀前压力、阀体开度和喷头流量之间的数学关系, 据此设计变量喷灌控制系统, 实现喷灌流量的精准调节。研究表明: 确定压力-开度-流量的数学模型特征流量系数 K_L 为 20.40, 阀后压力预测系数 K_p 为 0.97, 流量预测系数 K_q 为 7.08; 喷头射程和流量在相对开度为 60% 前, 随阀体开度变化较为明显; 而在相对开度为 60% 后, 射程与流量随相对开度的变化幅度越来越小; 调节阀流量调节的稳态相对偏差不超过 6.67%, 调节时间不超过 42 s, 测量精度在 96% 以上。该研究实现了基于流量调节阀喷灌流量的精准控制, 为流量调节阀在变量灌溉中的应用提供了数据支持。

关键词: 流量调节阀; 水力性能; 灌溉流量; 自动调测

中图分类号: S24; TP273

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)10-0339-07

OSID:



Design and Experiment of Variable Rate Sprinkler Irrigation Based on Flow Control Valve

ZHANG Tingning^{1,2} ZHU Delan^{1,2} LI Zhao^{1,2} ZHAO Hang^{1,2} KHUDAYBERDI Nazarov³ LIU Changxin³

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

3. College of Agricultural Biology, Tashkent State Agricultural University, Tashkent 100140, Uzbekistan)

Abstract: Aiming at the problem that the current sprinkler flow control is not fine enough, the precise variable adjustment of the irrigation flow of the Senninger i-Wob2 sprinkler was realized by installing a V-type flow control valve in front of the sprinkler as an actuator. Through the hydraulic performance test of the valve body, the mathematical relationship between the pressure before the valve, the opening of the valve body and the flow of the nozzle was established. According to the mathematical relationship, the overall structure of the variable irrigation control was designed, and the specific operation steps of the control structure were clarified, so as to realize the precise adjustment of the irrigation flow. The results showed that the flow calculation formula and the calculation method of the corresponding parameters were established, and the characteristic flow coefficient K_L of the mathematical model of pressure-opening-flow was 20.40, the pressure prediction coefficient K_p after the valve was 0.97, and the flow prediction coefficient K_q was 7.08 through the hydraulic performance test data of the valve body. The range and flow rate of the nozzle changed obviously with the valve opening before the opening of 60%. However, after the opening was 60%, the range and flow rate changed with the valve opening was getting smaller and smaller; the steady-state relative deviation of the flow regulation of the control valve did not exceed 6.67%, the adjustment time did not exceed 42 s, and the measurement accuracy was above 96%. The research result realized the accurate regulation and control of sprinkler irrigation flow through the flow control valve, and provided strong data support for the application of flow control valve in variable irrigation.

Key words: flow control valve; hydraulic performance; irrigation flow; automatic adjustment test

收稿日期: 2023-11-16 修回日期: 2024-01-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD1900400、2021YFE0103000)和宁夏回族自治区重点研发计划项目(2022BBF02026)

作者简介: 张廷宁(1999—), 男, 博士生, 主要从事节水灌溉技术与装备研究, E-mail: 17709595218@163.com

通信作者: 朱德兰(1969—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉技术与装备研究, E-mail: dlzhu@126.com

0 引言

精准农业灌溉技术是通过运用一些现代化技术监测作物各个生育期内的生长状况和环境要素,根据监测得出的土壤墒情和作物需水量,通过使用精确的灌溉设施对作物进行高效施水施肥,在确保满足作物生长过程中灌溉需求的前提下,实现高产、节水、精准的农业灌溉技术^[1-8]。同时,变量喷灌作为精准农业灌溉技术的重要组成部分,是解决作物空间需水量不同、提高灌溉有效水利用指数,充分发挥作物生产潜能的水分管理方法^[9-11]。它可通过对喷灌机多个喷头的流量进行变量调节,根据农田中不同分区作物的不同长势、缺水信息进行针对性地灌溉^[12-15]。

目前,实现变量灌溉的方式主要通过变量喷头和脉宽调制(PWM)技术实现。BUI^[16]提出可通过水压控制锥形调节机构运动以改变喷嘴形状实现变量喷洒;郝培业^[17]设计了一种新型摇臂式喷头,通过在进水管内设置由喷头内中心轴控制的水流调节阀实现变量喷洒;韩文霆等^[18]设计了一种非圆形喷洒域的摇臂式喷头,通过使喷嘴前方的碎水螺钉碎水改变了喷头射程使其喷洒出任意边界形状的图形,满足了不同形状地块喷灌的要求。随着科技的发展,PWM变量控制技术的日益成熟,通过将PWM变量控制与喷灌机行走速度的控制相结合,可以满足与任意田块匹配的变量灌溉需求,因此PWM变量控制也发展成为变量喷灌的主流方法^[10]。陶帅等^[19]提出了PWM脉冲相位错开的减缓方法,将变量灌溉的控制误差维持在5%以下;邓巍等^[20]研究了在开关电磁阀控制下扇形喷头的喷雾特性,发现喷头流量调节倍数可达4.17。刘大印等^[21]采集拖拉机速度实现调节PWM值,减少了流量传感器的使用,实现了大田喷药均匀性。

但目前通过电磁阀调节流量的方法较单一,仅通过控制灌溉时间控制灌水量,这种调节方式不仅需要阀体频繁快速启闭,且无法实现系统的分区精细调节(即通过阀体开度更加精细对喷灌流量进行调节),自动化程度低。因此,将流量调节阀应用在灌溉通道上,可实现对管道流量的精细调节。本文将流量调节阀应用在喷灌管路中,基于流量调节阀的性能试验建立流量控制数学模型,以实现灌溉流量的精准测控。

1 材料与方法

1.1 变量喷灌装置设计

1.1.1 试验装置

试验装置如图1所示,包括供水装置、流量调节

装置和实时监测装置。供水装置通过水泵提供所需水压;流量调节装置通过流量调节阀调节管道流量;实时监测装置由压力变送器和流量计组成。图中喷头安装高度为1.8 m,喷嘴型号采用12号,喷嘴直径为6.4 mm。

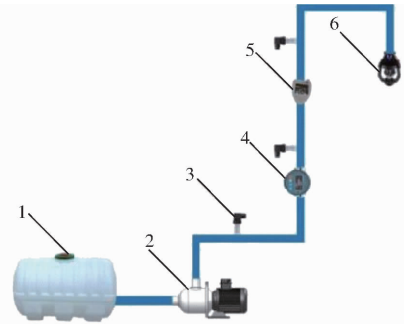


图1 试验装置图

Fig. 1 System structure diagram

1. 储水罐 2. 水泵 3. 压力变送器 4. 流量计 5. 流量调节阀
6. 喷灌喷头

1.1.2 变量喷灌控制结构设计

变量喷灌控制总体结构由采集执行系统和控制系统组成,总体结构图如图2所示。

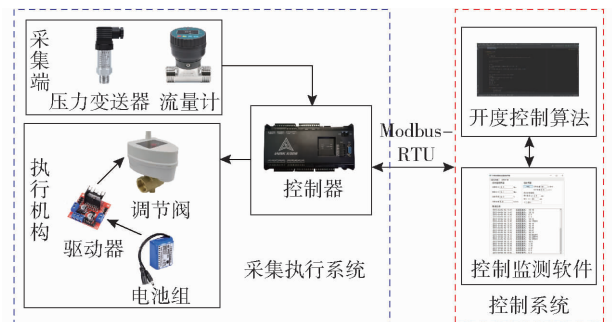


图2 变量喷灌控制总体结构图

Fig. 2 Overall structure diagram of variable sprinkler device

采集执行系统以PLC控制器为核心,分别连接由压力变送器和流量计组成的采集端和由调节阀、驱动器等设备组成的执行机构。控制系统以控制监测软件为核心,开度控制算法通过对监测数据进行处理计算,输出阀门调节开度并下达执行命令。

1.2 试验设计

流量调节阀水力性能试验:设置主管压力为0.08、0.1、0.12、0.14、0.16 MPa 5个压力水平,V型电动调节阀相对开度设置20%、40%、60%、80%、100% 5个开度水平,末端连接Senninger i-Wob2型喷头,监测不同主管压力和开度下的阀前阀后压力和调节阀流量。

开度-电脉冲关系试验:阀体相对开度在0~100%设置10个水平,记录阀体运行的实际相对开度 l_{re} 和与之对应的电脉冲信号 h 。

单喷头水量分布试验:测量Senninger i-Wob2型

喷头在主管压力为 0.08、0.1、0.12、0.14、0.16 MPa 与调节阀相对开度为 20%、40%、60%、80%、100% 不同组合下的水量分布。从喷头处引出 3 条射线进行雨量筒布置,相邻射线间的角度为 45°,相邻雨量筒布置间距为 0.5 m,共布设 64 个雨量筒,每组试验的喷洒时间为 10 min。雨量筒布置示意图如图 3 所示。

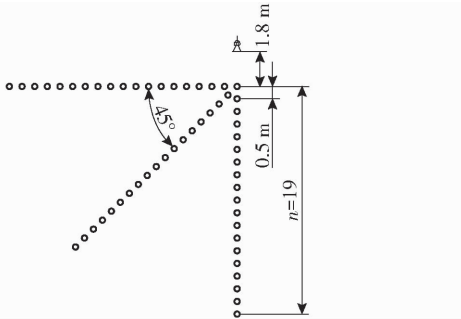


图 3 雨量筒布置示意图

Fig.3 Rain bucket layout diagram

流量调测效果验证试验:设置不同的压力和开度水平,监测不同压力和开度水平下的实际流量和调节开度,并与通过数学模型的计算流量进行对比,以测试流量控制模型的调测效果,具体试验因素水平见表 1。

表 1 流量调测效果验证试验因素水平

Tab.1 Flow measurement effect verification test factors and levels

试验名称	因素	水平
流量调测 验证试验	主管压力/MPa	0.08、0.10、0.12
	目标流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	0.60、0.72、0.84(压力为 0.08 MPa 时)
		0.72、0.84、0.96(压力为 0.10 MPa 时)
0.84、0.96、1.08(压力为 0.12 MPa 时)		
流量测量 验证试验	主管压力/MPa	0.08、0.10、0.12
	目标开度/%	20、40、60、80、100

1.3 测试指标及方法

压力:主管压力、阀前阀后压力采用 PCM300 型压力变送器(精度 0.5%)监测。

流量:调节阀通过流量采用 ZJSUS - DN25 型涡轮式电子流量计(精度 10%)监测。

喷洒水量:采用雨量筒测量。

阀门旋转角度:通过 R1809 - 0007A 型角度位移电位器(精度 10%)测得,并通过量角器进行验证。

2 结果与分析

2.1 流量调节阀水力性能

2.1.1 调节阀调节原理

调节阀在工作时的阀前压力 P_1 、管道流量 q 之

间的关系^[22]可表示为

$$q = K_L \sqrt{\frac{(1 - K_p) P_1}{1 + \frac{K_p}{K_\varphi} \left(\frac{1}{k_v^2} - 1 \right)}} \quad (1)$$

其中
$$K_L = q_{100} \sqrt{\frac{\rho}{\Delta P_{r100}}} \quad (2)$$

$$K_\varphi = \frac{K_p}{\bar{\varphi}} \quad (3)$$

$$\bar{\varphi} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta P_{r100}}{\Delta P_{i,so}}}{n} \quad (4)$$

$$k_v = \frac{q}{q_{100}} \sqrt{\frac{\Delta P_{so}}{\Delta P_{so100}}} \quad (5)$$

式中 K_L ——特征流量系数

K_p ——阀后压力预测系数

K_φ ——流量预测系数

k_v ——相对流量系数,仅与阀门开度有关

ΔP_{r100} ——阀门全开时阀体损失,MPa

ρ ——介质密度,试验采用清水,取 1 g/cm³

q_{100} ——阀体全开时流量, m³/h

$\bar{\varphi}$ ——平均流量系数

$\Delta P_{i,so}$ ——某一开度下管道损失,MPa

n ——计算总个数

ΔP_{so} ——调节阀某一开度下管道损失,MPa

ΔP_{so100} ——调节阀最大开度下管道损失,MPa

对于特征流量系数计算结果如表 2 所示。

表 2 特征流量系数计算结果

Tab.2 Calculation result of characteristic flow coefficient

序号	阀前压力 P_1 /MPa	阀后压力 P_2 /MPa	阀体损失 ΔP_{r100} /MPa	实测流量 q_{100} / (m ³ ·h ⁻¹)	特征流量 系数 K_L
1	0.072	0.070	0.002	0.93	20.76
2	0.092	0.089	0.003	1.05	19.13
3	0.112	0.109	0.003	1.15	21.02
4	0.132	0.128	0.004	1.25	19.83
5	0.152	0.148	0.004	1.35	21.27

实测流量通过流量计直接读取得到,并对计算得到的各个主管压力下的流量系数取平均值,可得 $K_L = 20.40$ 。

阀后压力预测系数 K_p 通过全开度下阀前压力与阀后压力的比值确定,同一管路中为常数。阀前阀后压力关系见图 4,并进行拟合,得到拟合直线斜率为 0.97, R^2 为 0.99。即阀后压力预测系数 K_p 为 0.97。

损失比值系数计算结果如表 3 所示。

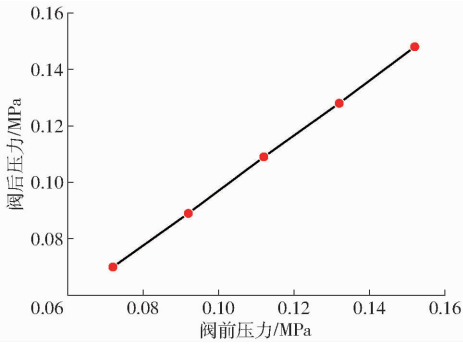


图4 阀前、阀后压力关系

Fig. 4 Relationship diagram of valve front pressure and valve rear pressure

表3 不同相对开度、阀前压力下损失比值系数

Tab. 3 Loss ratio coefficient under different relative opening and valve pressures

相对开度/ %	阀前压力/MPa				
	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16
0	0.025	0.030	0.025	0.029	0.025
20	0.034	0.043	0.037	0.042	0.037
40	0.067	0.081	0.071	0.087	0.077
60	0.133	0.167	0.150	0.190	0.174
80	0.167	0.231	0.231	0.286	0.267
100	0.200	0.273	0.273	0.333	0.333

对计算得到的各水平下的损失比值系数取平均,可得 $\bar{\varphi} = 0.137$ 。同时根据试验数据计算得到的流量预测系数 K_{φ} 为 7.08。

将根据试验数据计算得到的相对流量系数实际数据和拟合数据绘制成图 5。

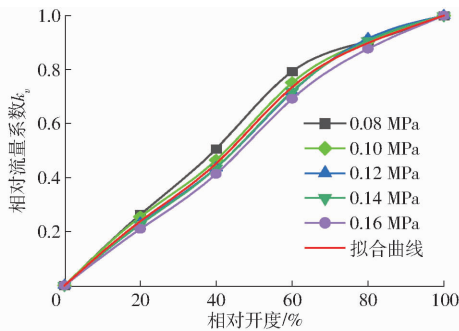


图5 实测与拟合相对流量系数曲线

Fig. 5 Measured and fitted relative flow coefficient curves

由图 5 可知,相关流量系数受压力的影响很小,主要是受到开度的影响。开度越大,流量越大,阀体损失越小,对应着相对流量系数就会越大。同时可以看到,在相对开度为 60% 前,相对流量系数随开度的变化量较大;但在相对开度为 60% 后,相对流量系数变化量随开度的增加而减小。

相对开度与相对流量系数拟合关系式为

$$k_v = -0.393 9l_{re}^2 + 1.432 1l_{re} - 0.017 8 \quad (R^2 = 0.99)$$

(6)

式中 l_{re} ——相对开度, %

2.1.2 阀门相对开度与电脉冲的关系

通过角度位移电位器将旋转角度转化为电脉冲数,调节阀相对开度与电动机电脉冲数关系见图 6。

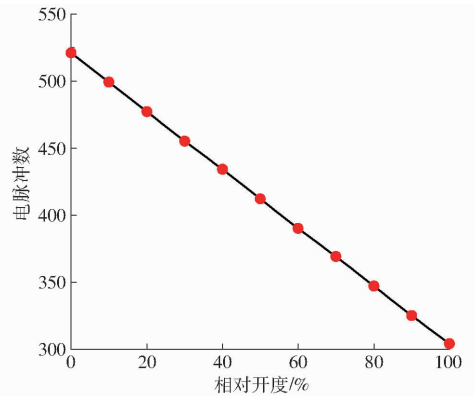


图6 相对开度与电脉冲数关系曲线

Fig. 6 Relative opening and electric pulse relationship curve

由图 6 可知,电动调节阀相对开度与电脉冲数呈负相关,并将相对开度与电脉冲数进行拟合,拟合曲线 R^2 为 0.99,拟合曲线公式为

$$h = -2.17l_{re} + 521 \quad (7)$$

式中 h ——电脉冲数

2.1.3 流量调节阀阀体损失计算

由于流量调节阀在调节过程中,不同开度的阀体损失也是不同的。因此为了探究不同阀体开度下阀体损失,需计算阀体损失系数。

阀体损失系数计算公式为^[23]

$$\Delta P_L = \xi q^2 \quad (8)$$

式中 ΔP_L ——阀前阀后压力差, MPa

ξ ——阀体损失系数,只与阀体开度有关, h^2/m^5

将监测到的各个工况下的阀前阀后压力和流量代入式(8)计算得到各个阀体开度下相对应的阀体损失系数。因为阀体损失系数仅与阀体开度有关,但是由于管道内压力存在波动,因此为消除这部分误差,对相同阀体开度下各工况的阀体损失系数求平均值。相应的计算结果如表 4 所示。

表4 不同相对开度、阀前压力下阀体损失系数

Tab. 4 Valve body loss coefficient under different relative opening and valve pressures h^2/m^5

相对开度/%	阀前压力/MPa					平均值
	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	
20	0.656	0.654	0.671	0.686	0.711	0.676
40	0.120	0.131	0.127	0.120	0.118	0.123
60	0.031	0.035	0.035	0.033	0.033	0.033
80	0.018	0.017	0.014	0.014	0.014	0.015
100	0.008	0.010	0.008	0.009	0.008	0.009

将阀体开度与阀体损失系数进行拟合,得到拟合曲线决定系数 R^2 为 0.997,拟合曲线公式为

$$\xi = 4.0877l_{re}^4 - 12.709l_{re}^3 + 14.781l_{re}^2 - 7.6974l_{re} + 1.5458 \quad (9)$$

2.2 阀门开度对喷头水力性能的影响

2.2.1 喷洒射程

喷洒射程是指喷头中心线与测出的灌水强度为

某一数值的那一测点的距离,该点的喷灌强度为 $0.25 \text{ mm/h}^{[24]}$;根据此方法得到不同开度下的射程如表 5 所示。

因为喷头射程与其工作压力存在正相关关系,从表 5 可以看出,在同一开度下,随着主管压力的增

表 5 不同开度条件下单喷头喷洒射程和阀后压力

Tab.5 Spray range of single injection nozzle under different opening adjustment

相对开度/ %	主管压力/MPa									
	0.08		0.10		0.12		0.14		0.16	
	射程/m	阀后压力/MPa	射程/m	阀后压力/MPa	射程/m	阀后压力/MPa	射程/m	阀后压力/MPa	射程/m	阀后压力/MPa
20	6.21	0.022	6.52	0.030	6.74	0.038	6.86	0.045	7.03	0.053
40	6.92	0.050	7.42	0.063	7.45	0.078	7.89	0.094	7.95	0.108
60	7.41	0.065	7.46	0.082	7.95	0.100	8.34	0.119	8.37	0.137
80	7.43	0.068	7.84	0.087	8.00	0.107	8.38	0.126	8.40	0.145
100	7.45	0.070	7.87	0.089	8.03	0.109	8.41	0.128	8.43	0.148

大,喷头射程也在增加;在同一主管压力下,由相对流量系数变化规律可知,阀体开度越大,阀体自身损失越小,使阀后压力越大,从而喷头射程也越大。只是在相对开度 60% 前射程随着开度的增大变化明显,但在相对开度 60% 后,射程随开度变化的趋势减小。

2.2.2 喷头流量

喷头流量直接受主管压力和开度的影响,不同压力和开度下测得的喷头流量见图 7。

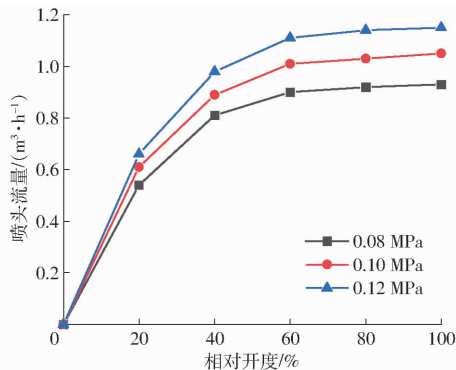


图 7 喷头流量与相对开度关系曲线

Fig.7 Nozzle flow opening diagram

从图 7 可知,在同一开度下,喷头流量随着压力的增大而增大,并且开度越大,流量受压力的变化就越明显。在同一主管压力下,流量随着开度的增大而增大,但开度越大流量变化值越小。同时压力越大,流量变化值随开度的变化就越大。并且流量随着开度变化的整体趋势基本一样,不受压力的影响。

2.3 软件设计

基于主管压力和阀体开度对流量调节的流程图

如图 8 所示,具体步骤如下:

(1) 设定目标流量、流量允许控制误差和其他初始化参数。

(2) 读取管道入口压力和当前开度,计算当前管道流量。并判断其与目标流量的差值是否在流量允许控制误差范围内。若在,本次流量调节直接结束;反之,通过数学模型根据目标流量计算相对开度,并计算该开度下的调节流量。

(3) 根据目标开度计算电脉冲信号,控制驱动电机转动调节至目标开度。

(4) 通过式(1)计算流量;开度计算则是根据调节阀流量调节性能相关计算的反向计算,将目标流量作为 q ,并输入其他参数通过式(1)计算得到相对流量系数 k_v ,再将其代入式(6)的反函数 $l_{re} = f(k_v)$,求得相对开度 l_{re} ,最终根据式(7)计算得到电脉冲数,即目标流量对应的电脉冲数。

2.4 变量喷灌调测效果

2.4.1 流量调节效果

评价调节效果通常选用调节时间、稳态相对偏差两个指标进行评价,调节时间反映调节速率,稳态相对偏差则反映调节的精准性^[25],相关公式为

$$t = t_1 - t_0 \quad (10)$$

式中 t ——调节阀的调节时间,s

t_0 ——调节阀开始调节的时间,s

t_1 ——调节流量达到稳态流量 5% 所用时间,s

$$e_{ss} = \left| \frac{q_c - q_0}{q_0} \right| \times 100\% \quad (11)$$

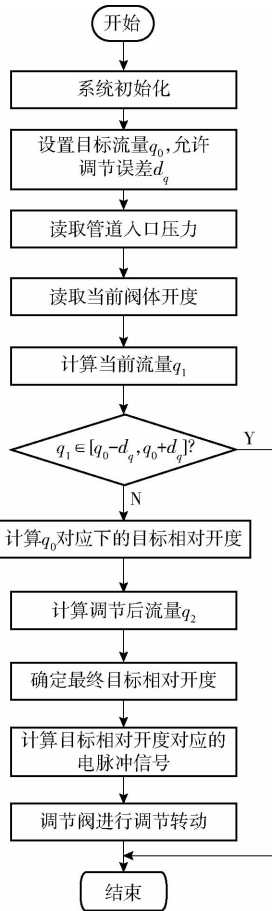


图 8 流量控制模型运行流程图

Fig. 8 Flowchart of flow control mathematical model operation

式中 e_{ss} —— 稳态相对偏差, %
 q_c —— 调节流量, m^3/h
 q_0 —— 目标流量, m^3/h

每组处理得到的调节时间 t 、稳态相对偏差 e_{ss} , 以及通过流量计监测的稳态流量见表 6。

表 6 调节效果评价结果

Tab. 6 Evaluation form of adjustment effect

P/MPa	$q_0/(m^3 \cdot h^{-1})$	$q_c/(m^3 \cdot h^{-1})$	t/s	$e_{ss}/\%$
0.08	0.60	0.64	12	6.67
	0.72	0.75	17	4.17
	0.84	0.83	19	1.19
0.10	0.72	0.76	13	5.56
	0.84	0.85	14	1.19
	0.96	0.95	21	1.04
0.12	0.84	0.88	12	4.76
	0.96	0.96	17	0
	1.08	1.07	22	0.93
	1.15	1.15	42	0

由表 6 可知, 在同一目标流量下, 调节时间随着压力的增大而减小, 但稳态相对偏差随着压力的增

大而增大; 在同一压力下, 调节时间随着目标流量的增大而增大, 稳态相对偏差随着目标流量的增大而减小。整体上, 调节的稳态相对偏差不超过 6.67%, 最大开度调节时间不超过 42 s, 满足流量快速稳定的调节要求。

由于本文的喷灌形式是每次调节后, 待满足灌溉需求后关闭流量调节阀, 等待下次调节指令发出。因此本文无需考虑流量调节阀返程误差对流量调节和后续流量测量效果的影响。

2.4.2 流量测量效果

对于调节阀流量测量性能, 采用精准度 P 来评价测量的准确率, 计算公式为

$$P = \left(1 - \left| \frac{q_d - q_a}{q_a} \right| \right) \times 100\% \quad (12)$$

式中 q_d —— 通过式(1)计算的流量, m^3/h

q_a —— 流量计监测的实际流量, m^3/h

对实际流量和计算流量进行数据处理, 得到各工况下调节阀对流量的测量精准度见表 7。

表 7 各工况下调节阀流量测量性能评价结果

Tab. 7 Flow measurement performance evaluation result of regulating valve under each working condition

阀前压力/ MPa	相对开度/ %	实际流量/ ($m^3 \cdot h^{-1}$)	计算流量/ ($m^3 \cdot h^{-1}$)	精准 度/%
0.08	20	0.54	0.55	98.15
	40	0.81	0.79	97.53
	60	0.90	0.89	98.89
	80	0.92	0.93	98.91
0.10	100	0.93	0.95	97.85
	20	0.61	0.62	98.36
	40	0.89	0.9	98.88
	60	1.01	1.00	99.01
0.12	80	1.03	1.05	98.06
	100	1.05	1.07	98.10
	20	0.66	0.68	96.97
	40	0.98	0.99	98.98
0.12	60	1.11	1.11	100
	80	1.14	1.16	98.25
	100	1.15	1.19	96.52

从表 7 可以看出, 不同压力下的测量流量精准度达到 96% 以上, 并且随着相对开度和流量的增大, 精准度有所提高。但在相同相对开度下, 压力对调节阀的流量测量精准度影响不显著。

3 结论

(1) 设计了一种流量调测装置, 该装置以 V 型

流量调节阀作为执行部件,以电动机为动力输入,压力变送器为采集软件,PLC 作为控制器,计算机作为控制终端,实现了喷灌流量的调测。

(2)通过对调节阀的水力性能进行试验,建立了主管压力、流量和开度之间的关系,确立了通过阀体开度计算阀体损失的计算式。水量分布试验表明,喷头射程和流量在相对开度为 60% 前,随调节阀开度变化明显;而

在相对开度为 60% 后,随开度的变化趋势越来越小。

(3)根据建立的主管压力、流量和相对开度之间的关系,构建了变量喷灌调测系统。该系统的流量调节稳态相对偏差不超过 6.67%,调节时间最大为 42 s,同时流量测量精度达到 96% 以上。并且在试验中发现,随着压力和相对开度的增大,调节阀调测精度更好。

参 考 文 献

- [1] 封金祥. 精准灌溉技术及其应用前景分析[J]. 新疆农业科技, 2005(4): 47.
- [2] 李福强, 张恒嘉, 王玉才, 等. 我国精准灌溉技术研究进展[J]. 中国水运(下半月), 2017, 17(4): 145-148.
LI Fuqiang, ZHANG Hengjia, WANG Yucan, et al. Research progress of precision irrigation technology in China[J]. China Water Transport (Second Half Month), 2017, 17(4): 145-148. (in Chinese)
- [3] 刘永华, 俞卫东, 沈明霞, 等. 智能化精准灌溉施肥技术研究现状与展望[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(8): 384-387.
LIU Yonghua, YU Weidong, SHEN Mingxia, et al. Research status and prospect of intelligent precision irrigation and fertilization technology [J]. Jiangsu Agricultural Science, 2014, 42(8): 384-387. (in Chinese)
- [4] 赵伟霞, 李久生, 杨汝苗, 等. 基于土壤水分空间变异的变量灌溉作物产量及节水效果[J]. 农业工程学报, 2017, 33(2): 1-7.
ZHAO Weixia, LI Jiusheng, YANG Rumiao, et al. Yields and water-saving effects of crops as affected by variable rate irrigation management based on soil water spatial variation[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(2): 1-7. (in Chinese)
- [5] 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, 2005.
YAN Haijun. Research on water distribution characteristics of circular and translational sprinklers based on variable technology [D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- [6] 冯倩, 尹义蕾, 王柳, 等. 基于作物表型的温室精准灌溉策略研究进展[J]. 节水灌溉, 2023(6): 34-40.
FENG Qian, YIN Yilei, WANG Liu, et al. A review on precision irrigation strategy for greenhouse crops based on phenotype[J]. Water Saving Irrigation, 2023(6): 34-40. (in Chinese)
- [7] 周国祥, 苗玉彬, 周俊, 等. 基于现场总线技术的农业机械控制系统研究[J]. 农业机械学报, 2005, 36(8): 93-97.
ZHOU Guoxiang, MIAO Yubin, ZHOU Jun, et al. Study on control system of agricultural machinery based on field bus[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(8): 93-97. (in Chinese)
- [8] 马旭, 赵旭, 刘赛赛, 等. 水稻高速插秧机固体颗粒肥料变量施肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(9): 99-110.
MA Xu, ZHAO Xu, LIU Saisai, et al. Design and experiment of solid particle fertilizer variable rate fertilization device for high-speed rice transplanter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 99-110. (in Chinese)
- [9] 董鑫, 周利明, 刘阳春, 等. 基于指数平滑预测的高效变量喷灌方法[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 372-378.
DONG Xin, ZHOU Liming, LIU Yangchun, et al. Efficient variable irrigation method based on exponential smoothing prediction [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 372-378. (in Chinese)
- [10] 周志宇. 大型喷灌机处方变量灌溉特性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
ZHOU Zhiyu. Study on prescription variable irrigation characteristics of large sprinkler irrigation machines [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019. (in Chinese)
- [11] 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)
- [12] 莫锦秋, 黄小林, 李文涛, 等. 基于 PWM 技术的大型变量喷灌机整机水力性能研究及优化[J]. 农业工程学报, 2020, 36(19): 76-85.
MO Jinqiu, HUANG Xiaolin, LI Wentao, et al. Research and optimization of hydraulic characteristics of large-scale variable sprinkler irrigation machine based on PWM technology[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(19): 76-85. (in Chinese)
- [13] 孙宇, 李茂娜, 王云玲, 等. 圆形喷灌机条件下变量灌溉对苏丹草产量与品质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(4): 32-38.
SUN Yu, LI Maona, WANG Yunling, et al. Effects of variable rate irrigation on sudangrass yield and quality under center-pivot irrigation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(4): 32-38. (in Chinese)
- [14] 周建军. 基于组件式 GIS 的变量灌溉决策支持系统研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2004.
ZHOU Jianjun. Research on variable irrigation decision support system based on component GIS [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2004. (in Chinese)

- in Hetao Irrigation District[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(1): 102 – 109. (in Chinese)
- [40] YANG C, LV D T, JIANG S Y, et al. Soil salinity regulation of soil microbial carbon metabolic function in the Yellow River Delta, China[J]. Science of the Total Environment, 2021, 790: 148258.
- [41] 李亮, 史海滨, 贾锦凤, 等. 内蒙古河套灌区荒地水盐运移规律模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 31 – 35.
LI Liang, SHI Haibin, JIA Jinfeng, et al. Simulation of water and salt transport of uncultivated land in Hetao Irrigation District in Inner Mongolia[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(1): 31 – 35. (in Chinese)
- [42] XIAO X, XU X, HUANGG H. Improved analytical expressions for transient specific yield in shallow groundwater drainage[J]. Journal of Hydrology, 2021, 597: 126186.
- [43] 孙亚楠, 李仙岳, 史海滨, 等. 基于遥感的节水改造下河套灌区土壤盐渍化演变分析[J]. 农业机械学报, 2022, 53(12): 366 – 379.
SUN Ya'nan, LI Xianyue, SHI Haibin, et al. Evolution mechanism of soil salinization in Hetao Irrigation District under condition of water-saving reform based on remote sensing technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 366 – 379. (in Chinese)
- [44] 李亮, 史海滨, 赤江刚夫, 等. 内蒙古河套灌区耕地与荒地间水盐补排规律的研究[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(5): 73 – 77.
LI Liang, SHI Haibin, AKAE T, et al. Transport of soil moisture and salt between irrigated land and saline land in the Inner Mongolia Hetao Irrigation District[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(5): 73 – 77. (in Chinese)

(上接第 345 页)

- [15] 廖敏, 粟超, 张宇, 等. 大棚种植川贝母分区变量灌溉系统研制[J]. 农业工程学报, 2021, 37(16): 108 – 116.
LIAO Min, SU Chao, ZHANG Yu, et al. Development of the partition variable irrigation system for greenhouse planting *Fritillaria cirrhosa*[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(16): 108 – 116. (in Chinese)
- [16] BUI D Q. Nozzle with flow rate and droplet size control capability US7124964[P]. 2006 – 10 – 24.
- [17] 郝培业. 新型摇臂式喷头: CN2436233[P]. 2001 – 06 – 27.
- [18] 韩文霆, 冯浩, 吴普特, 等. 非圆形喷洒域的摇臂式喷头 CN1175938C[P]. 2004 – 11 – 17.
- [19] 陶帅, 李文涛, 黄小林, 等. 大型喷灌机喷头 PWM 变量脉冲的实现[J]. 农机化研究, 2021, 43(5): 18 – 22.
TAO Shuai, LI Wentao, HUANG Xiaolin, et al. The realization of PWM variable pulse for the sprinkler of large-scale irrigation machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(5): 18 – 22. (in Chinese)
- [20] 邓巍, 丁为民, 何雄奎. PWM 间歇式变量喷雾的雾化特性[J]. 农业机械学报, 2009, 40(1): 74 – 78.
DENG Wei, DING Weimin, HE Xiongkui. Spray characteristics of PWM-based intermittent pulse variable spray[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1): 74 – 78. (in Chinese)
- [21] 刘大印, 王秀, 毛益进, 等. 基于单片机 PWM 变量农药喷洒控制系统的研究[J]. 农机化研究, 2011, 33(5): 99 – 103.
LIU Dayin, WANG Xiu, MAO Yijin, et al. Research on PWM variable pesticide spraying control system based on single chip microcomputer[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(5): 99 – 103. (in Chinese)
- [22] 陆培文, 汪裕凯. 调节阀实用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [23] 王福军. 水泵与水泵站[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011.
- [24] 王金辉. 移动定点式电驱动卷盘式喷灌机研究及开发[D]. 镇江: 江苏大学, 2021.
WANG Jinhui. Research and development of movable fixed-point electric drive reel sprinkler[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021. (in Chinese)
- [25] LIU Mengyang, ZHU Delan, NIE Xinxin, et al. Design and testing of a remote control-based integrated flow regulation and measurement device[J]. Sustainability, 2022, 14(23): 15672.