排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2021 年 11 月 Nov. 2021 | 第 39 卷 第 11 期 Vol.39 No.11

基于柱塞泵与单片机的可控施肥机设计与喷灌试验

朱梅，顾佳林*，储诚癸，李晓乐，朱德泉
（安徽农业大学工学院，安徽 合肥 230036）


朱梅

摘要： 为了实现水肥一体化施肥装备流量精确且无水头损失，设计了一种基于柱塞泵与单片机的高精度可控施肥机，开展了恒流模式下 6 个流量梯度的喷灌系统施肥均匀性试验；以喷头总流量变化幅度为变量，设计了在 1∶10 的水肥配比下 2 种灌溉总流量变化幅度的不同工况，对比启、闭可控施肥机恒定水肥比例模式对水肥一体化支管内肥料浓度稳定性的影响效果.试验结果表明，高精度可控施肥机在流量分别为 100，200，400，600，800，1 000 L/h 的 6 种恒流模式时，喷灌均匀系数 C_U 为 99.33%～99.71%、变异系数 C_V 为 0.35%～0.75%；C_U，C_V 与施肥机流量分别呈正相关与负相关关系，且喷头喷洒肥液的电导率总平均值 $\overline{E_C}$ 与施肥机流量之间具有显著的正相关性.在恒定水肥比例模式时，试验组管道内肥液浓度在 160 s 时趋于稳定，且稳定后肥液电导率与目标值偏差率小于 4%.高精度可控施肥机恒流模式试验表明施肥机大流量下施肥均匀性变异系数仅为小流量下的 50%，且改变施肥机的流量是水肥一体化喷灌系统实现高均匀度变量施肥的一种有效途径；试验证明恒水肥配比模式可有效减小支管肥料浓度受外界的影响.

关键词： 施肥机；水肥一体化；柱塞泵；电导率；喷灌施肥均匀性
中图分类号： S224.21 **文献标志码：** A **文章编号：** 1674-8530(2021)11-1169-08
Doi：10.3969/j.issn.1674-8530.20.0298

朱梅，顾佳林，储诚癸，等.基于柱塞泵与单片机的可控施肥机设计与喷灌试验[J].排灌机械工程学报，2021，39(11)：1169-1176.
ZHU Mei，GU Jialin，CHU Chenggui，et al. Design and sprinkler irrigation experiment of controllable fertilizer applicator based on plunger pump and single chip microcomputer[J].Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME)，2021，39(11)：1169-1176.(in Chinese)

Design and sprinkler irrigation experiment of controllable fertilizer applicator based on plunger pump and single chip microcomputer

ZHU Mei，*GU Jialin**，*CHU Chenggui*，*LI Xiaole*，*ZHU Dequan*
(School of Engineering，Anhui Agricultural University，Hefei，Anhui 230036，China)

Abstract：In order to realize the accurate flow and no-head loss of the integrated fertilization equipment，a high precision controllable fertilizer applicator based on plunger pump and single chip microcomputer was designed. The fertilization uniformity experiments of sprinkler irrigation and drip irrigation systems with six flow gradients under constant flow mode was carried out. Under the ratios of water and fertilizer of 1∶10，different working conditions of total flow rate of two kinds of sprinklers were designed. The stabilizing effect of the constant water-fertilizer application with that of inconstant one on the fertilizer concentration in the branch tube of integrative water and fertilizer was compared. The result show that when the flow rates of the fertilizer are 100 L/h，200 L/h，400 L/h，600 L/h，

收稿日期： 2020-10-24；**修回日期：** 2021-03-06；**网络出版时间：** 2021-11-01
网络出版地址： https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20211029.1037.024.html
基金项目： 安徽省重点研究和开发计划项目(201904a06020053)
第一作者简介： 朱梅(1977—)，女，安徽怀远人，教授(zhumei@ahau.edu.cn)，主要从事农业水土工程研究.
通信作者简介： 顾佳林(1994—)，男，安徽马鞍山人，硕士研究生(348297150@qq.com)，主要从事农业灌溉设备智能化研究.

800 L/h and 1 000 L/h under the constant-current mode, the coefficient of uniformity C_U of sprinkler is 99.33%-99.71%, and the coefficient of variation C_V is 0.35%-0.75%. C_U and C_V are positively and negatively correlated with the flow rate of fertilizer applicator. The conductivity equivocation $\overline{E_C}$ of sprinkling fertilizer has a significant positive correlation with the total average conductivity of fertilizer liquid sprayed and the flow rate of the fertilizer applicator. In the constant water fertilizer ratio mode, the fertilizer concentration in the pipeline of the experimental group tends to be stable at 160 s, and the deviation rate between the conductivity value and the target value is less than 4%, respectively. The experiment of constant flow mode of fertilizer applicator show that the variation coefficient of fertilizer uniformity under large flow is only 50% of that under small flow. It is an effective way to achieve variable fertilization with high uniformity for the sprinkler system of integrative water and fertilizer by changing the flow rate of the fertilizer applicator. The experiment shows that the constant-current mode can effectively reduce the external influence on the fertilizer concentration in the branch tube.

Key words: fertilizer applicator; integrative water and fertilizer; plunger pump; conductivity; uniformity of sprinkler applied fertilizer

施肥机是水肥一体化设备中的一个核心环节，负责将储肥桶内的肥液送入灌溉系统主管道中，使水溶肥随管道内的灌溉水流至末端喷头、滴头等节水部件进入土壤[1].施肥机配合节水灌溉工程可显著提高水肥利用率、增产增收、减少环境污染.经调研，目前水肥一体化系统中使用的施肥设备主要采用4种方式，其中压差式、比例泵式、文丘里式的核心原理都是使管道两端生成一定的压力差，令液体肥料从压力高的地方流向压力低的管道中，泵注式则是使用外部动力将肥液加压注入灌溉管道内.国内外许多研究人员对这4种方式进行了研究分析[2].

范军亮等[3]对滴灌压差施肥系统进行了综合性评价，发现压差式施肥罐出口肥液相对浓度随时间呈指数函数快速减少，且此方式的施肥均匀性受供水方式和施肥罐两端压差影响较大；吴锡凯等[4]对水力驱动式比例施肥泵进行了研究，发现在使用中需避免出现较大压差与较小施肥比例配合，以及较小压差与较大施肥比例配合；张超等[5]使用ANSYS对文丘里施肥器进行了水力特性研究，发现文丘里施肥器所产生的较大压力损失，使其只适用于面积不大的灌区.通过以上研究发现3种水力驱动施肥设备都受到管道内压力限制，难以满足部分工况.而泵注式使用机械驱动克服了压力限制，但国内泵注式施肥大多使用增压泵或计量泵，难以实现精确变量施肥.严海军等[6]设计了一种应用于圆形喷灌机的泵注式施肥装置，通过泵流量率定管与储肥桶构成连通器配合柱塞泵曲柄连杆机构实现了精确变量施肥，但无法实现管道内肥液浓度稳定.彭炫等[7]通过对精量水肥配比控制系统进行设计和研究以及水肥混合配比浓度控制试验，证明可以快速、准确、稳定地对水肥溶液进行精确配比，故提高了水和肥料的利用率.

基于以上研究结果，文中提出一种应用于温室系统的新式施肥机.通过在柱塞式注肥泵上加装单片机、变频器与各类传感器，组成一种高精度可控施肥机.此施肥机可以调节变频器输出频率以实现精确变量施肥，主要工作方式有恒流模式与恒水肥配比(施肥机流量：灌溉主管流量)模式，并通过在连栋棚内进行喷灌试验以研究施肥机的运行参数及2种模式下的施肥均匀性[8]与管道浓度稳定性，为水肥一体化技术推广和应用提供技术依据.

1 高精度可控施肥设备设计

1.1 总体系统结构与工作原理

高精度可控施肥设备总体结构如图1所示，主要包括柱塞泵、交流电动机、变频器、单片机控制模块、压力传感器[9]等.其中单片机模块集成安装在变频器内，超声波流量计[10]则安装在主管道上.

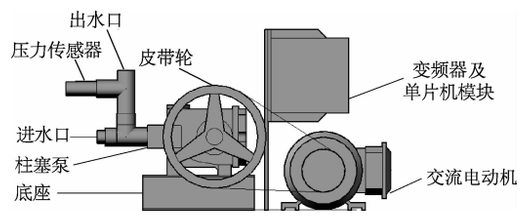


图1 高精度可控施肥设备总体结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of high precision controllable fertilization equipment

系统模块结构如图2所示，主要包括单片机控

制模块、压力传感器、流量计、变频器、供电模块、显示模块、按键模块等.

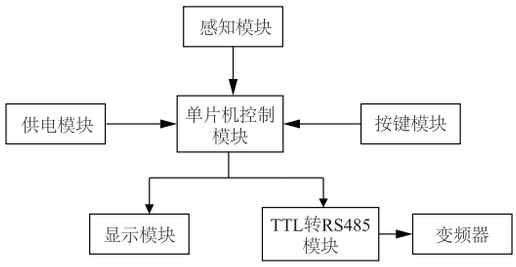


图 2　高精度可控施肥设备系统结构

Fig.2　System structure of high precision controllable fertilization equipment

将设备出水口连接灌溉主管道,进水口连接储肥桶,同时将压力传感器安装在施肥机出水口附近.设备开启后压力传感器检测施肥机出水口压力,超声波流量计获取主管道内流量值并通过 RS232 串口发送给单片机[11],单片机内部根据采集到的压力值与流量值,将按键键入的流量值或水肥配比转变为对应的频率值,并经过 TTL 转 RS485 电路将频率信号传递给变频器.变频器输出相应频率的交流电驱动电动机工作,最后通过皮带轮带动柱塞泵运转将肥液注入主管道.

1.2　设备运转关键结构设计

1.2.1　机械传动结构

机械传动结构采用柱塞泵与交流电动机组合的方式,两者之间使用皮带轮进行动力传递.由于设备设计采用调节柱塞运动频率以实现流量控制,所以使用的是 3 柱塞的卧式柱塞泵,与其他类型相比,此型号柱塞泵出水口流量脉动性较低,更易被测量.

1.2.2　单片机控制模块

控制模块可细分为 3 个部分:供电模块、STC 单片机模块、感知模块.

供电模块用于将 DC 24 V 处理后输出 DC 24 V 与 DC 5 V 供给控制模块与各传感器.其中 DC 24 V 用于给超声波流量计供电,DC 5 V 则供单片机、显示模块、压力传感器等其他部件使用.

STC 单片机模块采用 STC12C5A60S2 单片机作为运算核心.其中单片机与变频器通信需要发送多个字节数据,使用其自带的串行口进行通信,通信采用 RS485 协议[12].但由于单片机自身输出信号为 TTL 电平,需要将信号经过 TTL 转 RS485 电路[13].而压力传感器与流量计都为单总线式,因此只需两个 I/O 口就可完成与单片机的通信.

感知模块主要包含压力传感器与超声波流量计.压力传感器选用 XGZP4501 型压力变送器,其量程为 0~1 MPa、供电电源 DC 5 V、输出信号 DC 0.5~4.5 V.超声波流量计则选用 TD-100MB 型,其量程为 0~±12 m/s、供电电源 24 V、精度 1.0 级、工作频率 1 MHz.由于超声波流量计为 RS485 信号输出,与单片机通信方式及变频器相同.而压力传感器输出为模拟信号,故需要由 A/D 转换将模拟信号转换成数字信号才能将压力数据传递给单片机,单片机接收后将数字信号进行数值计算得出当前压力.

1.3　控制系统工作流程

控制系统主程序由 C 语言编写,其流程如图 3 所示,主要包括压力采集子程序、流量采集子程序、状态分析子程序、按键识别子程序、频率计算子程序、数据发送子程序、OLED 显示子程序及各主要芯片初始化.其中频率计算程序是软件设计的关键,直接影响到高精度可控施肥机注肥量的精确性.

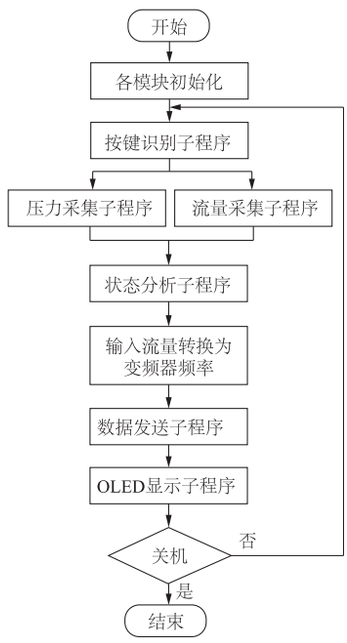


图 3　控制系统主程序流程

Fig.3　Main program flow of control system

软件主要实现的功能是将测得的施肥机出水口压力或主管道流量与按键输入的流量或水肥配比代入到后续试验总结出的关系式中,计算得到对应的变频器频率,检测设备出水口的压力、主管道的流量,并感知按键内容,将检测的内容显示在屏幕上.

其中状态分析子程序负责对压力与流量采集结果进行数值分析,并得出当前灌溉主管中水流情况.控制系统开启后,对压力采集子程序所采集的每

5个压力值求平均值,并将此平均值作为当前管道内压力值保存;同时用新求得的平均值与前一个平均值求差,当差值连续出现3次同符号数时,判断管道内水流发生变化.若施肥机开启了恒水肥配比模式,考虑到超声波流量计数值存在一定幅度波动,为了避免施肥机因波动频繁调整转速,同样使用流量采集子程序所采集流量值的平均值作为当前管道内流量,且仅在判断主管道内水流发生变化时更新主管道流量值.

1.4 设备内置频率计算公式

施肥机动力驱动设备为一台三相交流异步电动机,此类电动机在工作时实际转速 n 满足公式

$$n = [60f(1 - S)/q] \times 100\% , \quad (1)$$

式中:S 为三相异步电动机转差率,%;n 为电动机实际转速,r/min;q 为电动机磁极对数;f 为电动机输入频率,Hz.

可见交流电动机转速的影响因素有3个,其中电动机磁极对数为设备固有属性,而三相异步电动机转差率受电动机负载直接影响[14],与电动机输入频率一起作为影响因素,直接决定当前交流异步电动机的实际转速.同时,柱塞泵在高压工作时,一部分高压液体会从活塞与缸套间的间隙泄漏,造成流量损失,因此施肥机动力系统具备非线性特性.

施肥机负载主要由设备出水口处压力与流量组成,故通过试验测量在不同出口压力与输入频率下的流量,再由测量结果分析变频器输出频率与流量和压力的关系,并建立公式.由于往复泵出口流量呈脉动变化,传统测流量仪器难以准确测量,故采用容积法测施肥机流量.除自主设计搭建的基于柱塞泵与单片机的高精度可控施肥机之外,还使用一套恒压供水系统,所用仪器有中国红旗仪表有限公司的Y-60径向压力表.

通过使用恒压供水控制系统形成水循环系统[15],获得不同的主管道压力状态,将恒压供水系统内水泵的进水口接在水箱的出水口上,而系统的末端出水口利用水管引至水箱的顶部开口处.

试验时,先将恒压供水系统打开,调节施肥机出口处压力分别为0,0.05,0.10,0.15,0.20,0.25,0.30,0.35,0.40 MPa.随后将施肥机开启手动调节模式,通过手动调节变频器的输出频率分别为5,10,15,20,25,30,35 Hz.待施肥机稳定后记录下储肥桶减少100 L液体所用时间,通过计算得出当前流量.由此得到出水口压力、设备流量、变频器频率关系见表1;通过分析流量变化特点建立公式,即

$$f = qQ \div \left[60 \left(1.02 - \frac{\frac{60}{3.5}(p - 0.5) + 64.69}{Q\frac{1\,000}{30 \times 60}k + 246} \right) \right], \quad (2)$$

式中:p 为设备出水口处压力,MPa;Q 为设备出口流量,L/h;k 为柱塞泵与交流电动机传动比;q 为电动机磁极对数.

表1 不同压力与变频器频率下流量

Tab.1 Flow rate under different pressure and frequency converter

f/Hz	Q/(L·h^{-1})								
	p=0 MPa	p=0.05 MPa	p=0.10 MPa	p=0.15 MPa	p=0.20 MPa	p=0.25 MPa	p=0.30 MPa	p=0.35 MPa	p=0.40 MPa
5	134	126	124	119	116	106	98	96	96
10	285	276	277	270	265	257	251	246	243
15	436	433	419	412	410	402	400	385	392
20	580	552	549	545	540	533	528	523	517
25	733	733	693	689	683	677	665	660	651
30	885	836	837	834	829	818	807	800	800
35	1 045	980	980	980	980	958	952	946	940

式(2)即为设备内部求变频器输出频率公式.设备通过动态监测出水口压力与设定流量,并代入式(2)计算得出预测目标状态下变频器输出频率,进而实现精确设备流量.通过将同一压力、7种流量下频率计算值与试验值的差求绝对值后相加再取平均,可以得到9个出水口压力下频率数值解与试验值的平均绝对误差 σ 见表2.数值解与现有试验数据的平均绝对误差小于2.89%,可见在9种不同出口压力下数值解与试验数据相比较为接近.该频率计算公式可以较好地预测变频器在不同出口压力下的输出频率,进而精确控制施肥机流量.

表2 不同压力下输出频率平均绝对误差

Tab.2 Mean absolute error of output frequency under different pressures

p/MPa	0	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40
σ/%	1.542	2.889	2.059	2.000	1.896	2.356	2.849	1.837	2.129

2　材料与方法

2.1　试验场地

高精度可控施肥机的施肥均匀性试验在安徽省合肥市长丰县安徽农业大学试验实践基地的连栋棚内进行,每栋大棚长 80 m、宽 20 m、高 3 m,棚内喷灌管路采用 32 mm PE 软管,间距 5 m 纵向排布,共 6 条 PE 软管(即支管 A—F),每条软管上喷头间距 5 m,共安装 16 个喷头[16],如图 4 所示.为了防止储肥桶内有未溶解的肥料晶体堵塞喷头,在施肥机出水端安装了一个网式过滤器.试验水源由恒压供水系统提供,管道内水压可达 0.30 MPa,满足试验要求.

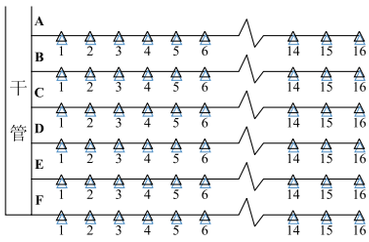


图 4　喷灌管道示意图
Fig.4　Schematic diagram of sprinkler irrigation pipeline

2.2　试验方案

高精度可控施肥机的施肥均匀性在于喷灌施肥均匀性与支管肥料浓度的稳定性.文中重点分析施肥机在恒流模式下不同流量时喷头喷嘴的喷洒肥液浓度,与恒水肥配比模式下,不同喷灌流量变化幅度时支管内肥液浓度变化,从而评价高精度可控施肥机的施肥效果.

2.2.1　肥液配比与浓度标定

氯化钾属强电解质,其水溶液的导电能力强,因此试验中选择氯化钾肥料.氯化钾肥液质量分数通过电导率求得[17].肥液的电导率测定采用哈希 sensION156 型多功能参数测量仪,仪器显示值均为 25 ℃时的标准电导率.试验标定得到了氯化钾肥液质量分数和电导率之间的拟合公式为

$$E_C = 22\,441C + 771.48, R^2 = 0.999, \quad (3)$$

其中

$$C = \frac{m}{m + m_w} \times 100\%,$$

式中:E_C 为电导率,μS/cm;C 为肥液中氯化钾的质量分数,%;m 为肥料质量,kg;m_w 为水质量,kg.

式(3)的决定系数 R^2 为 0.999,表明氯化钾肥液电导率与肥液质量分数之间差异具有统计学意义.

2.2.2　高精度可控施肥机恒流施肥模式试验

为了研究设备不同恒定流量对施肥均匀性的影响,试验选取施肥机流量作为单一变量.施肥机分别选取 100,200,400,600,800,1 000 L/h 6 种不同输出流量.

恒压供水主管维持 0.3 MPa 压力,同时开启 6 条喷灌支管进行试验.此时喷头总流量为 3 m^3/h,储肥桶中肥液按照氯化钾肥料和清水的质量比为 1∶333 进行配制.

每种流量情况下试验时,先启动恒压供水系统再开启施肥机,待所有喷头正常喷洒且系统压力与流量稳定后,再进行施肥均匀性试验.在 6 条喷灌支管上随机选取 10 个喷头作为肥液样本采集点,使用量杯接收这 10 个喷头的喷洒肥液各 150 mL,并用多功能参数测量仪测定肥液导电率,试验现场如图 5 所示.



图 5　试验现场
Fig.5　Experimental site

2.2.3　变频恒水肥配比模式试验

为了研究设备在变频恒水肥配比模式下喷灌肥液浓度稳定性,设置施肥机开启恒水肥配比模式为试验组,未开启恒水肥配比模式为对照组;试验组与对照组内设置 2 种喷灌流量变化幅度.水肥配比选择 1∶10,储肥桶中肥液按照氯化钾肥料和清水的质量比 1∶90.9 混合后,主管内肥液理论质量分数为0.1%,由式(3)得到相应的电导率理论值为 3 015.58 μS/cm.喷灌流量变化幅度即为连栋棚内喷灌支管关闭数量,分别为关闭 E,F,以及关闭 C,D,E,F 两种情况.

每次试验时先启动恒压供水系统再开启施肥机,待所有喷头正常喷洒且系统压力与流量稳定后,再进行肥料浓度稳定性试验.在 2 条常开的 A 和 B 喷灌软管上分别选取 1,7 与 16 号喷头作为 6 个肥液采集点.由于单个喷头喷洒量约为 500 mL/min,每根支管内可存约 6 L 液体,且恒压供水系统内置 PID 的调整时间约为 60 s,故每次采集肥液

100 mL,共采集 6 次.在改变喷灌流量前进行第 1 次肥液采集,完成后关闭相应数量的支管,随后每间隔 30 s 在各采集点采集 1 次,再采集 5 次.

2.3 喷灌施肥均匀性评价参数

连栋棚内喷头的喷洒肥液浓度均匀性测定可用克里斯琴森均匀系数 C_U 和变异系数 C_V 表示.

1) 克里斯琴森均匀系数[18] C_U:参照表征喷灌水量分布均匀性的克里斯琴森均匀系数,即

$$C_U = \left(1 - \frac{|\Delta E_C|}{\overline{E_C}}\right) \times 100\% , \tag{4}$$

式中:C_U 为克里斯琴森均匀系数,%;ΔE_C 为所有量杯中肥液电导率(或肥液浓度)的平均偏差,μS/cm;$\overline{E_C}$为所有量杯中肥液电导率(或肥液浓度)的算术平均值,μS/cm.

2) 变异系数 C_V:用于表示各量杯电导率(或肥液浓度)的标准偏差与算术平均值的比值.喷灌施肥均匀性越高,测得的变异系数越小.计算公式为

$$C_V = \frac{S}{\overline{E_C}} \times 100\% , \tag{5}$$

式中:C_V 为变异系数,%;S 为所有量杯中肥液电导率(或肥液浓度)的标准偏差,μS/cm.

3 结果与分析

3.1 施肥机输出流量对喷灌施肥均匀性的影响

在主管道恒压 0.3 MPa 下,将施肥机流量分别调整为 100,200,400,600,800,1 000 L/h,各喷头喷洒肥液的电导率分布规律如图 6 所示,图中 N 为量杯编号,可以看出不同流量下的电导率变化规律总体一致.计算施肥机在不同流量下运行时的电导率平均值 $\overline{E_C}$以及 C_U 和 C_V,并将结果相互对比.可以发现施肥机小流量工作时测得电导率平均值小于大流量下的电导率平均值,主要原因是施肥机工作流量减小而主管内流量不变,使得注入主管道后的喷洒肥液被稀释,各喷头喷洒肥液浓度降低,进而测得电导率变小.

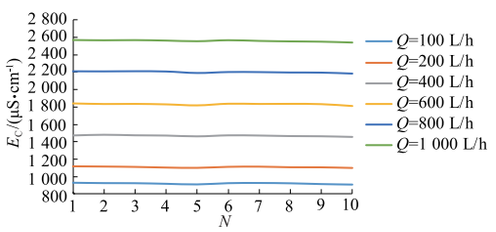


图 6 喷灌施肥电导率变化曲线

Fig.6 Variation curves of electrical conductivity of sprinkler fertilization

将不同流量下的电导率平均值进行线性拟合,得到公式为

$$\overline{E_C} = 1.82Q + 738.32, R^2 = 0.999 , \tag{6}$$

式中:Q 为施肥机流量,L/h.

式(6)中的决定系数 R^2 达到了 0.999,表明电导率的平均值与施肥机流量之间具有显著的正相关性关系,说明施肥机在不同流量下工作都具有较高的稳定性,这对于施肥机的变量喷灌施肥运行非常重要.

高精度可控施肥机恒流模式下,多种流量时不同喷头喷洒肥液电导率分析结果见表 3,表中 E_{Cth}为电导率理论值.由表中电导率可知,所有流量情况下所测得的电导率平均值均小于其质量分数所对应的理论电导率值.造成这种差异的原因较多,例如试验的固体氯化钾存在细微不溶物、溶液存在电解质、氯化钾溶液分层现象、塘水电导率变化、主管灌溉水流量不稳定等.但这些差异对相同工况下测得的各喷头电导率分布均匀性不会产生影响.

表 3 电导率分析结果

Tab.3 Analysis results of electrical conductivity

Q/(L·h⁻¹)	$\overline{E_C}$/(μS·cm⁻¹)	E_{Cth}/(μS·cm⁻¹)	C_U/%	C_V/%
100	920.3	995.89	99.33	0.75
200	1 108.9	1 220.30	99.52	0.55
400	1 469.1	1 669.12	99.59	0.47
600	1 830.6	2 117.94	99.63	0.48
800	2 199.8	2 566.76	99.67	0.39
1 000	2 558.5	3 015.58	99.71	0.35

且根据表 3 中 C_U 和 C_V 值可以看出,施肥机在不同流量下工作时的喷灌施肥均匀性的变异系数 C_V 的最大值仅为 0.75%,而克里斯琴森均匀系数 C_U 均超过 99%,表明每种流量下,喷头喷洒肥液浓度高度一致,但根据 C_U 和 C_V 的变化规律可以得到大流量下的施肥机工作均匀性更好.

通过温室喷灌施肥试验,有效验证了高精度可控施肥机在不同流量需求下与不同施肥方式下都具有较高的稳定性与施肥均匀性,且与文丘里式施肥机和比例泵式施肥机相比,高精度可控施肥机具有更高的流量调节精度与施肥速度,实现了在对灌溉主管没有造成压力损失的同时控制管道内肥料浓度.

3.2 恒水肥配比模式对主管道肥料浓度稳定的效果

在 2 种喷灌流量变化幅度的试验组与对照组试验中测得各采集点所采集肥液电导率.为了体现水肥一体化支管内肥料浓度整体情况,将试验组与对照组所测各量杯电导率取平均值,并将不同流量变

化幅度的试验组与对照组流量绘制成点线图分析变化趋势,如图 7 所示,图中 B 为采集批次.通过分析试验结果,在 1∶10 水肥配比、关闭 2 条支管时,试验组的肥液电导率稳定在 2 568.4 μS/cm、对照组的肥液电导率稳定在 3 038.3 μS/cm;关闭 4 条支管时试验组的肥液电导率稳定在 2 549.4 μS/cm、对照组的肥液电导率稳定在 4 196.6 μS/cm.2 种流量变化幅度情况下,试验组肥液电导率最终稳定值皆与目标值存在一定偏差,此偏差可能与超声波流量计的精确度及施肥机流量误差有关,但通过计算电导率偏差率小于 4%,仍体现比例调节的精确性.

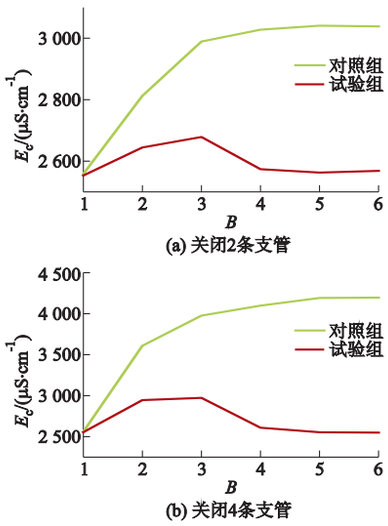


图 7　对照组电导率平均值变化曲线

Fig. 7　Variation curve of average conductivity in control group

分析图 7,试验组的管道内电导率经历先增大后变小的过程.根据喷灌管道内水力分析[19]可知,当喷灌总流量减少后,管道内各部件水头损失降低,灌溉主管压力增大,导致各喷头处的压力与流量略有上升.随后恒压供水控制系统对管道进行调压,喷灌总流量进一步减小,此过程由于施肥机恒水肥比例模式存在响应延迟,施肥机流量无法及时匹配总喷灌流量,管道内肥液浓度缓慢上升.最终主管道内压力回到恒压数值,喷灌总流量趋于稳定,施肥机恒水肥比例模式根据此时流量调节自身流量后,管道内肥液浓度开始逐渐降低逼近目标值.

通过施肥机恒水肥配比模式对灌溉主管内肥料浓度进行控制,虽然不能完全消除因灌溉流量变化所引起的浓度波动,但波动持续时间明显降低,提高了施肥精度.与传统人工调节施肥机流量相比,高精度可控施肥机响应速度更快、精度更高、人工成本更低.

4　结　论

1）采用单片机、压力传感器、超声波流量计、柱塞泵、交流电动机、变频器等设计了高精度可控施肥机.

2）高精度可控施肥机可控流量范围为 60～1 200 L/h;通过调节设备流量,可适应储肥桶内不同浓度肥液的施肥要求.

3）高精度可控施肥机在恒流模式下,将设备流量分别恒定为 100,200,400,600,800,1 000 L/h 时,各喷头喷洒肥液的电导率平均值与设备流量呈正相关性,且喷灌施肥均匀系数超过 99%.表明改变施肥机的流量可以实现高均匀度变量施肥.且喷灌施肥均匀系数 C_U 为 99.33%～99.71%,变异系数 C_V 为 0.35%～0.75%,其中施肥机流量越大,施肥的均匀性越好.

4）高精度可控施肥机在恒水肥配比模式下,当喷灌喷头数发生变化时,试验组管道内肥液浓度在 160 s 时趋于稳定,且稳定后肥液电导率值与目标值偏差率小于 4%.

5）所设计的高精度可控施肥机在温室施肥中具有良好的适用性.但施肥机流量调节范围难以满足大田施肥需要,如何提高设备流量仍需进一步研究.

6）使用自主设计的泵注式高精度可控施肥机在连栋棚内进行了喷灌试验,并在恒流模式与恒水肥配比模式下取得预期效果,为基于单片机与柱塞泵的泵注式施肥机提供了技术支持,对推动水肥一体化发展提供了新思路.

参考文献(References)

[1] 王文婷,翟国亮,郭二旺,等.水肥一体化智能灌溉系统组成与设计[J].河南水利与南水北调,2021,50(5):83-84.
WANG Wenting, ZHAI Guoliang, GUO Erwang, et al. Composition and design of water and fertilizer integrated intelligent irrigation system [J]. Henan water conservancy and south-to-north water transfer, 2021,50(5):83-84.(in Chinese)

[2] FAN Junliang, WU Lifeng, ZHANG Fucang, et al. Evaluation of drip fertigation uniformity affected by injector type, pressure difference and lateral layout[J]. Irrigation and drainage, 2017,66(4):520-529.

[3] 范军亮,张富仓,吴立峰,等.滴灌压差施肥系统灌水与施肥均匀性综合评价[J].农业工程学报,2016,32(12):96-101.

FAN Junliang, ZHANG Fucang, WU Lifeng, et al. Field evaluation of fertigation uniformity in drip irrigation system with pressure differential tank[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(12): 96-101. (in Chinese)

[4] 吴锡凯,王文娥,胡笑涛,等.水动式比例施肥泵大田性能影响因素试验研究[J].节水灌溉,2019(2):18-21,28.
WU Xikai, WANG Wen'e, HU Xiaotao, et al. An experimental study on influence factors of field performance of hydrodynamic proportional fertilization pump [J]. Water saving irrigation, 2019(2): 18-21, 28. (in Chinese)

[5] 张超,梁忠伟,刘晓初,等.基于ANSYS的文丘里施肥器水力特性研究[J].农业与技术,2019,39(8):1-4.
ZHANG Chao, LIANG Zhongwei, LIU Xiaochu, et al. Study on hydraulic characteristics of Venturi fertilizer applicator based on ANSYS[J]. Agriculture and technology, 2019, 39(8): 1-4. (in Chinese)

[6] 严海军,王志鹏,马开.圆形喷灌机注肥泵的设计与试验研究[J].排灌机械工程学报,2014,32(5):456-460.
YAN Haijun, WANG Zhipeng, MA Kai. Design and experiment on fertigation plunger pump in center pivot irrigation system[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2014, 32(5): 456-460. (in Chinese)

[7] 彭炫,周建平,许燕,等.基于差分进化算法的水肥配比控制系统设计[J].江苏农业科学,2019,47(1):207-210.
PENG Xuan, ZHOU Jianping, XU Yan, et al. Design of water and fertilizer mixing control system using a differential evolution algorithm based on PID[J]. Jiangsu agricultural sciences, 2019, 47(1): 207-210. (in Chinese)

[8] 周舟,傅泽田,王秀,等.滴灌施肥机灌水与施肥均匀性试验[J].农业工程学报,2009,25(5):7-13.
ZHOU Zhou, FU Zetian, WANG Xiu, et al. Experiment of fertigation uniformity of drip fertigation machine[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(5): 7-13. (in Chinese)

[9] 吴宪平, 胡美凤. 扩散硅压力传感器性能优化研究[J]. 传感技术学报, 1992(3):1-6.
WU Xianping, HU Meifeng. A study on improving performance of diffuse silicon pressure sensors[J]. Chinese journal of sensors and actuators, 1992(3): 1-6. (in Chinese)

[10] LEONTIDIS V, CUVIER C, CAIGNAERT G, et al. Experimental validation of an ultrasonic flowmeter for unsteady flows[J]. Measurement science and technology, 2018, 29(4): 045303.

[11] 潘方. RS232串口通信在PC机与单片机通信中的应用[J]. 现代电子技术, 2012, 35(13): 69-71.
PAN Fang. Application of RS232 serial port in communication between PC and MCU[J]. Modern electronics technique, 2012, 35(13): 69-71. (in Chinese)

[12] 冯子陵,俞建新.RS485总线通信协议的设计与实现[J].计算机工程,2012,38(20):215-218.
FENG Ziling, YU Jianxin. Design and implementation of RS485 bus communication protocol[J]. Computer engineering, 2012, 38(20): 215-218. (in Chinese)

[13] 董海波,曾新顺,冯帆,等.USB串行口三合一转换器设计[J].电脑编程技巧与维护,2014(12):105,119.
DONG Haibo, ZENG Xinshun, FENG Fan, et al. USB serial port triple converter design[J]. Computer programming skills & maintenance, 2014(12): 105, 119. (in Chinese)

[14] DIYOKE G C, OKEKE C, ANIAGWU U. Different methods of speed control of three-phase asynchronous motor[J]. American journal of electrical and electronic engineering, 2016, 4(2): 62-68.

[15] 张清恒, 李彦阳, 张义超, 等. 基于PLC的变频恒压供水系统设计[J]. 工业控制计算机,2018,31(9):154-155.
ZHANG Qingheng, LI Yanyang, ZHANG Yichao, et al. Design of variable frequency constant pressure water supply system based on PLC[J]. Industrial control computer, 2018, 31(9): 154-155. (in Chinese)

[16] 王波雷,马孝义,范严伟,等.旋转式喷头射程的理论计算模型[J].农业机械学报,2008,39(1):41-45.
WANG Bolei, MA Xiaoyi, FAN Yanwei, et al. Modeling and experiment validation on the rotational sprinkler nozzle range[J]. Transactions of the CSAM, 2008, 39(1): 41-45. (in Chinese)

[17] 王凤花, 裘正军, 介邓飞, 等. 农田土壤pH值和电导率采集仪设计与试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(6):164-168.
WANG Fenghua, QIU Zhengjun, JIE Dengfei, et al. Design and experiment on the field information pH value and electrical conductivity acquisition instrument[J]. Transactions of the CSAM, 2009, 40(6): 164-168. (in Chinese)

[18] 农业灌溉设备 喷头 第3部分:水量分布特性和试验方法:GB/T 276712.3—2011[S].

[19] YILDIRIM G. Total energy loss assessment for trickle lateral lines equipped with integrated in-line and on-line emitters[J]. Irrigation science, 2010, 28(4): 341-352.

(责任编辑 张文涛)