

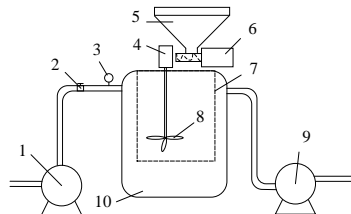
图 5 控制程序流程图

Fig.5 Flow chart of the control program

## 2 材料与方法

### 2.1 装置运行参数测定

基于以上设计方案试制了如图 6 (a) 所示的试验样机, 如图 6 (b) 为试验样机的示意图, 选用名磊 JET370A 型自吸泵作为供水泵 (额定流量 3 m<sup>3</sup>/h); 柱塞泵为威力 J2-300/0.8 型 (流量 300 L/h); 步进电机为步科 86HBS120 型步进电机; 搅拌电机选用学诚牌直流电机, 转速可选 100~500 rpm。为设置装置各部件的运行配合时间, 对注入式水肥一体化装置的加肥流量和注肥流量进行测定。设置直流电机转速为 100 rpm, 测定加肥流量时, 选用市场上常见的 3 种固体肥料——正元尿素 (含氮量 ≥46%)、中化氯化钾 (K<sub>2</sub>O ≥60%) 和中东复合肥 (N+P<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O ≥40%, N18 : P12 : K12), 将 10 kg 的 3 种肥料分别加入料斗中, 测量在不同转速下肥料添加完的时间。测定注肥流量时以水代替肥液, 将 10、20、30、40 L 的水经柱塞泵注入压力分别为 0.1~0.6 MPa 的管道中, 记录注完时间, 换算出注肥流量。



(a) 试验样机

(b) 示意图

注 1.供水泵; 2.电磁阀; 3.流量计; 4.搅拌电机; 5.料斗; 6.步进电机; 7.滤网桶; 8.搅拌器; 9.柱塞泵; 10. 搅拌桶。

图 6 注入式水肥一体化装置

Fig.6 The injected fertigation device

### 2.2 装置工作参数对肥液质量浓度均匀性的影响试验

为研究注入式水肥一体化装置的工作参数 (搅拌速度、加肥流量、供水流量) 对肥液质量浓度均匀性的影响, 在图 6 所示的样机上进行试验。选择直径 300 mm、目数 100 目的滤网桶, 设计如下单因素试验分别研究 3 个工作参数对肥液质量浓度的影响: 保持 10 kg/h 的加肥流量以及 2 m<sup>3</sup>/h 的供水流量, 将搅拌电机的转速分别设置为 100、200、300、400、500 rpm; 供水流量设定为 2 m<sup>3</sup>/h, 设定搅拌速度为 400 rpm, 调节步进电机转速使加肥流量分别为 10、12、14、16、18 kg/h; 设定 10 kg/h 的加肥流量与 400 rpm 的搅拌速度, 调节阀门使供水流量分别为 1.0、1.5、2.0 m<sup>3</sup>/h。试验时在料斗中加入 5 kg 复合肥, 同时启动加肥部件和供水泵, 当有肥液从柱塞泵中流出时开始计时, 每隔 1 min 在柱塞泵出口取样测量电导率并换算成肥液质量浓度, 肥料全部添加后测得质量浓度低于 1 g/L 时试验结束。在试验前对复合肥溶液质量浓度与电导率的关系进行了标定<sup>[18]</sup>, 其关系如式 (5) 所示:

$$C=0.784EC-0.590. \quad (5)$$

基于相对偏差公式建立了如式 (6) 所示的施肥质量浓度偏差  $\delta_F$  来评价装置的施肥均匀性, 施肥质量浓度偏差越小, 施肥均匀性越高。

$$\delta_F = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (c_i - c_M)^2} \times 100\%, \quad (6)$$

式中:  $N$  为样本个数;  $c_i$  为第  $i$  个样本的肥液质量浓度 (g/L);  $c_M$  为平均肥液质量浓度 (g/L)。

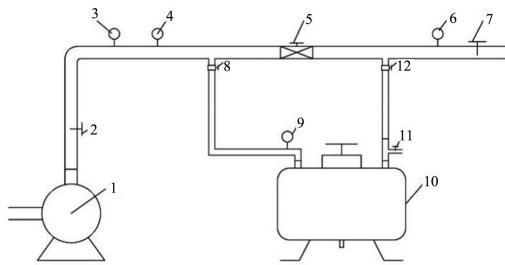
### 2.3 装置施肥性能试验

为研究注入式水肥一体化装置的性能, 在测定了装置运行参数和试验验证了工作参数对肥液质量浓度均匀性影响的基础上, 在试制样机上开展实际施肥性能试验。试验样机结合前文运行过程参数的设计, 保证样机持续稳定运行, 维持出口肥液持续输出。试验时向料斗中添加 10 kg 的复合肥, 加肥速度设为 0.26 kg/min, 供水流量选取 1.5、1.0 m<sup>3</sup>/h 和 0.5 m<sup>3</sup>/h。柱塞泵开始注肥时计时, 每隔 1 min 在施肥装置出口取样, 经过稀释后测量样本电导率, 并换算成肥液质量浓度。

### 2.4 压差施肥罐施肥性能试验

同为施用固体肥料的水肥一体化装置, 将本研究设计的施肥装置与压差施肥罐进行对比, 有利于更好的衡量本装置性能。压差施肥罐的水力性能试验装置及布置如图 7 所示。试验水源来自地下水水库, 水库出水口接离心泵 (流量 10 m<sup>3</sup>/h, 扬程 70 m), 用于提供试验所需流量和压力。通过安装在首部的阀门调节进入主管路 ( $\phi 50$  mm) 的水体流量, 主管路和施肥

管路 ( $\phi 25\text{ mm}$ ) 的流量分别由精度为  $\pm 0.3\%$  的电磁流量计 3 (LWGY-50)、9 (LWGY-25) 测得。在施肥罐上、下游分别安装压力表 4、6 (量程  $0\sim 0.6\text{ MPa}$ , 精度为  $\pm 0.4\%$ ), 用于监测通过施肥罐的压差。施肥罐上下游的压差主要靠调压阀 ( $\phi 50\text{ mm}$ ) 实现。试验采用  $50\text{ L}$  的压差施肥罐, 其进出口管道直径为  $15\text{ mm}$ , 将  $10\text{ kg}$  复合肥与水充分溶解后加入施肥罐中。为获取压差施肥罐的水力性能, 在施肥罐出口设置取样点 11, 从取样口取出的肥液, 用电导率仪测定, 换算成肥液质量浓度。压差式施肥罐的水力性能研究主要考虑了施肥量和压差 2 个因素<sup>[19]</sup>, 试验中保持施肥罐出口主管路上压力  $P_1$  为  $0.10\text{ MPa}$ , 压差分别调至  $0.05$ 、 $0.10\text{ MPa}$  和  $0.15\text{ MPa}$ <sup>[20]</sup>。从施肥罐出口有肥液流出时开始计时, 每隔  $1\text{ min}$  采集 1 次样本, 当采集到的样本质量浓度近似于纯水时, 试验结束。



注 1.水泵; 2.阀门; 3.流量计; 4.压力表; 5.调压阀; 6.压力表; 7.阀门; 8.阀门; 9.流量计; 10.压差施肥罐; 11.采样点; 12.阀门。

图 7 压差施肥罐性能测试试验示意图  
Fig.7 Schematic diagram of performance test for the pressure differential tank

### 3 结果与分析

#### 3.1 注式水肥一体化装置工作性能参数

装置添加 3 种肥料时的加肥流量与电机转速如图 8 所示。氯化钾添加的最快, 复合肥次之, 尿素最慢。加肥流量  $Q_2$  与电机转速  $n$  呈线性关系, 经过拟合, 得到加肥流量与步进电机转速的关系如式 (7) 所示, 3 种肥料的拟合系数  $a$ ,  $b$  见图 8。

$$Q_2 = an + b. \quad (7)$$

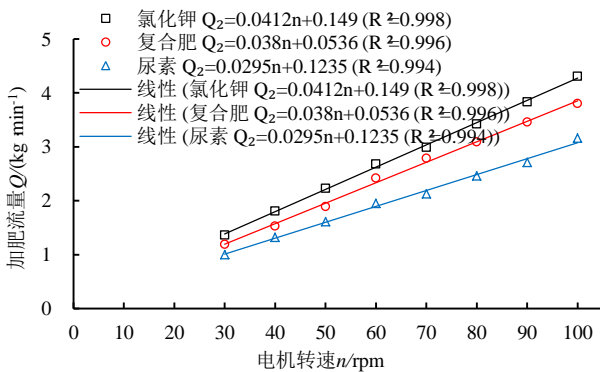


图 8 3 种肥料加肥流量与电机转速的关系  
Fig.8 Relationship between the fertilizer-feeding rate and motor speed

不同管道压力下装置的注肥流量如表 1 所示, 柱塞泵的注肥流量基本不会随着注入液体的量以及管道压力发生变化, 取其平均值  $300\text{ L/h}$  作为注肥流量输入到控制程序中。

表 1 不同管道压力下装置的注肥流量

Table 1 Fertilizer injection flow rate of the fertigation device under different pipe pressure

注入量/L	管道压力/MPa					
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
10	305	300	297	295	296	300
20	300	305	301	295	306	303
30	299	296	303	301	299	309
40	298	300	297	303	295	295

#### 3.2 装置工作参数对肥液质量浓度均匀性的影响

##### 3.2.1 搅拌速度对肥液质量浓度均匀性的影响

不同搅拌速度下装置出肥质量浓度随时间的变化如图 9 所示。搅拌速度为  $400\text{ rpm}$  和  $500\text{ rpm}$  时, 肥液质量浓度均在  $5\text{ min}$  时达到  $4.5\text{ g/L}$ , 比  $100$ 、 $200$ 、 $300\text{ rpm}$  时分别快了  $9$ 、 $5$ 、 $4\text{ min}$ 。由式 (6) 计算可得搅拌速度为  $100$ 、 $200$ 、 $300$ 、 $400$ 、 $500\text{ rpm}$  时的肥液质量浓度偏差分别为  $44.65\%$ 、 $33.03\%$ 、 $25.47\%$ 、 $19.98\%$ 、 $19.08\%$ , 故搅拌速度越快, 肥液质量浓度均匀性越高。将各搅拌速度下的肥液质量浓度偏差绘于图 10, 结果表明施肥质量浓度偏差随搅拌速度的增加而降低, 但搅拌速度越快, 偏差降低的速度越慢, 表明搅拌速度大时, 固体肥溶解速度随搅拌速度增加的增量减小。当搅拌速度超过  $400\text{ rpm}$  后, 搅拌速度的增加对肥液质量浓度均匀性的提升不大, 因此本装置在施用  $5\text{ kg}$  复合肥时的最优搅拌速度为  $400\text{ rpm}$ 。

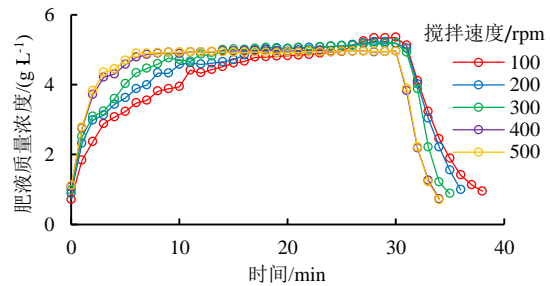


图 9 不同搅拌速度下肥液质量浓度变化  
Fig.9 Variation of fertilizer concentration under different mixing speeds

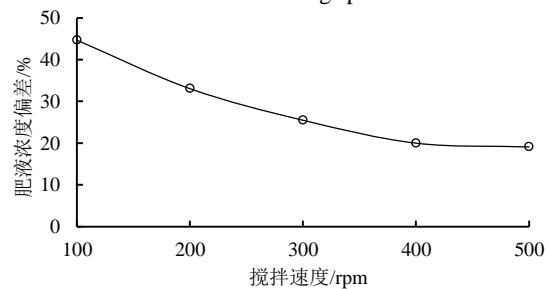


图 10 肥液质量浓度偏差与搅拌速度的关系  
Fig.10 Relationship between the fertilization concentration deviation and the mixing speed

### 3.2.2 加肥流量对肥液质量浓度均匀性的影响

不同加肥流量下的肥液质量浓度如图 11 所示。加肥流量越大，混肥桶中刚有肥液流出时测得的肥液质量浓度越高，这是因为加肥流量大时相同时间内添加到混肥部件中的肥料更多。5 组试验中的肥液质量浓度均在 5 min 左右达到稳定质量浓度，表明加肥流量对肥液达到较稳定质量浓度所需的时间影响不大。由式 (6) 计算可得加肥流量为 10、12、14、16、18 kg/h 时的肥液质量浓度偏差分别为 19.98%、41.45%、61.77%、89.56% 和 118.48%，表明加肥流量越小，肥液质量浓度均匀性越高。此外当肥料全部添加完成后，肥液质量浓度降低到 1 g/L 的时间随着加肥流量的增大而延长，因为加肥流量大时肥液质量浓度也高，质量浓度降低到 1 g/L 所需降低的量也越大，所需的降低时间也就越长。

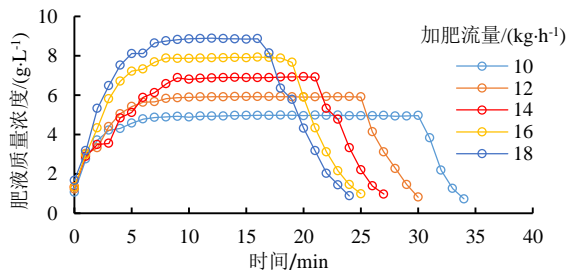


图 11 不同加肥流量下的肥液质量浓度变化

Fig.11 Variation of fertilizer concentration under different fertilizer-feeding flow rates

### 3.2.3 供水流量对肥液质量浓度均匀性的影响

不同供水流量下的肥液质量浓度变化如图 12 所示。供水流量越大，相同时刻的肥液质量浓度越低，肥液质量浓度达到稳定阶段的时间也越短，这是因为较大的供水流量能更快地将肥料从混肥桶中置换出来，降低肥料溶解滞后性对肥液质量浓度的影响。由式 (6) 计算可得供水流量为 2.0、1.5 m<sup>3</sup>/h 和 1.0 m<sup>3</sup>/h 试验组中的肥液质量浓度偏差分别为 19.98%、36.64% 和 57.54%，供水流量为 2 m<sup>3</sup>/h 时肥液质量浓度偏差最小，肥液质量浓度均匀性最高，表明混肥桶中的肥液质量浓度均匀性随供水流量的增大而提高。此外肥液质量浓度降低到 1 g/L 所需时间随供水流量的降低而延长，因为供水流量较小时，相同时间内水置换出的肥料少，加上质量浓度降低量大，导致需花费更长时间才能将肥液质量浓度降低到 1 g/L。

### 3.3 注入式水肥一体化装置的施肥性能

装置在 3 个设定供水流量下分别施完 10 kg 复合肥，且装置内无肥液和固体肥料剩余。装置出口不同供水流量设定下，肥液质量浓度随时间的变化趋势如图 13 所示。

可以看出，注入式水肥一体化装置在系统运行的前 10 min 内处于调整阶段，而后在理想质量浓度周

边波动但波动不大，其肥液质量浓度较稳定，在最后 20 min 内肥液质量浓度缓慢下降，这是因为停止加肥后，直流泵与柱塞泵持续工作至肥液全部排出。经过式 (6) 计算可得，施肥装置在供水流量分别为 1.5、1.0、0.5 m<sup>3</sup>/h 时，施完 10 kg 复合肥的施肥质量浓度偏差分别为 51.67%、55.07%、52.75%，施肥质量浓度与平均肥液质量浓度的偏差较小，表明施肥均匀性高。且当加肥速度一定时，肥液质量浓度的稳定值会随着供水流量的增大而降低。

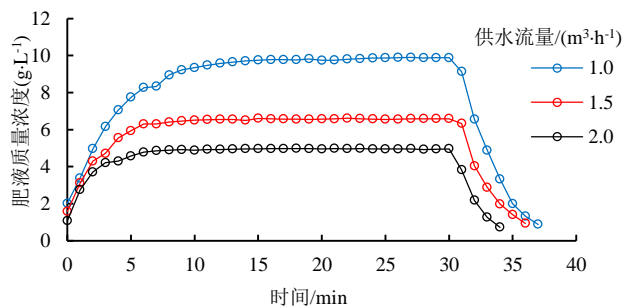


图 12 不同供水流量下装置出肥质量浓度变化

Fig.12 Variation of fertilizer concentration under different inlet water flow rates

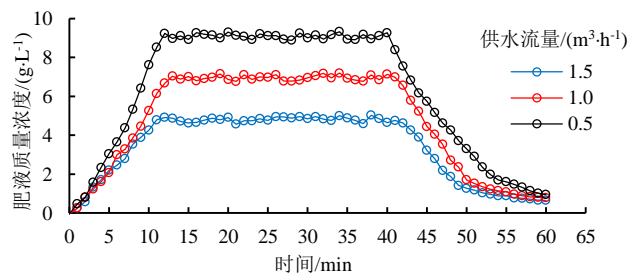


图 13 注入式水肥一体化装置出口肥液质量浓度随时间的变化

Fig.13 Variation of fertilizer concentration at the outlet with time of the injected fertigation device

### 3.4 与压差施肥罐的施肥性能对比

图 13 展示了注入式水肥一体化装置施用 10 kg 复合肥时不同供水流量下的出口肥液质量浓度变化，将注入式水肥一体化装置施肥性能的部分试验结果与施用 10 kg 复合肥时不同压差下的压差施肥罐的试验结果共同绘于图 14。从质量浓度曲线可以看出，压差式施肥罐的出口肥液质量浓度呈指数型下降<sup>[21]</sup>，最大质量浓度差达到了近 200 g/L，而注入式水肥一体化装置的肥液质量浓度差小，不超过 10g/L；根据式(6)，压差施肥罐的压差为 0.05、0.10 MPa 和 0.15 MPa 时，施肥质量浓度偏差分别为 99.84%、101.85%、110.36%。压差施肥罐出肥质量浓度随时间变化如图 14 所示，表明出肥质量浓度随时间递减，肥液质量浓度在初始的 10 min 内下降很快，之后逐渐趋于平稳。压差越大，出口肥液质量浓度衰减的就越快，施肥时间也越短。从出口肥液质量浓度曲线的稳定程度上可以看出，施用同样重量的固体肥料情况下，注入式水肥一体化装



置的施肥质量浓度偏差比压差施肥罐施肥质量浓度偏差小 50%，则注入式水肥一体化装置在施肥均匀性方面要远优于同样施用固体肥料的压差施肥罐。

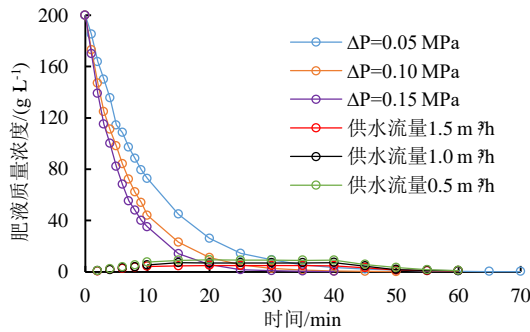


图 14 注入式水肥一体化装置与压差施肥罐的施肥性能对比  
Fig.14 Fertilization performance comparison between the injected fertilization device and the pressure differential tank

## 4 讨论

本研究发现，加肥流量与电机转速呈线性相关，在测定注肥流量时，本装置采用了柱塞泵，试验表明柱塞泵的注肥流量基本不会随着注入液体的量以及管道压力发生变化，这与王晶晶等<sup>[22]</sup>研究结果相似，其通过试验验证了柱塞泵在 100% 行程工作时，柱塞泵流量受灌溉管道压力波动影响很小。此外，压差罐的质量浓度在最初 10 min 内随时间迅速下降，然后逐渐稳定，所得结果与 Li 等<sup>[23]</sup>研究一致。施肥装置的施肥质量浓度偏差大于 30%，这是由于肥料溶解滞后造成的。当前施肥装置实现了自动化运行，未来可在现有装置基础上引入检测反馈系统，提高系统的精准性，实现智能化运行。

## 5 结论

1) 针对施用固体肥的大田管道灌溉，研发了注入式水肥一体化装置，并设计了加肥部分，提高了加肥流量的控制精度；建立了水肥混合过程模型，设计装置硬件及控制流程，保证装置出口肥液持续稳定输出肥液。通过控制系统调控各部件的配合运行，实现持续地向压力管道中注肥。

2) 注入式水肥一体化装置注肥流量稳定，能实现持续稳定注肥，加肥流量与肥料种类有关且与步进电机转速呈线性关系。搅拌速度越快，肥液质量浓度均匀性就越高，且本装置施用复合肥的最优搅拌速度为 400 rpm；加肥流量越小，肥液质量浓度均匀性就越高；供水流量越大，肥液质量浓度均匀性就越高。

3) 注入式水肥一体化装置的施肥质量浓度偏差比压差施肥罐小 50%，表明注入式水肥一体化装置具有更高的施肥均匀性和肥液稳定性。

## 参考文献:

- 赵春江, 郭文忠. 中国水肥一体化装备的分类及发展方向[J]. 农业工程技术, 2017, 37(7): 10-15.  
ZHAO Chunjiang, GUO Wenzhong. Classification and development direction of integrated water and fertilizer equipment in China[J]. Agricultural Engineering Technology, 2017, 37(7): 10-15.
- 朱亮, 曾值. 水肥一体化农业智能灌溉系统研究[J]. 南方农机, 2021, 52(14): 53-54.  
ZHU Liang, ZENG Zhi. Research on integrated agricultural intelligent irrigation system of water and fertilizer[J]. Southern agricultural machinery, 2021, 52(14): 53-54.
- 韩云, 张红梅, 宋月鹏, 等. 国内外果园水肥一体化设备研究进展及发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(8): 191-195.  
HAN Yun, ZHANG Hongmei, SONG Yuepeng, et al. Research progress and development trend of water and fertilizer integrated equipment in orchards at home and abroad[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(8): 191-195.
- 韩启彪, 李浩, 冯绍元, 等. CFD 模拟在压差施肥罐浓度衰减研究中的应用初探[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(12): 81-84.  
HAN Qibiao, LI Hao, FENG Shaoyuan, et al. Preliminary application of CFD simulation technology to concentration decay law research of pressure-fertilizer tank[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(12): 81-84.
- 王淼, 黄兴法, 李光永. 文丘里施肥器性能数值模拟研究[J]. 农业工程学报, 2006(7): 27-31.  
WANG Miao, HUANG Xingfa, LI Guangyong. Numerical simulation of characteristics of Venturi Injector[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006(7): 27-31.
- 汤攀, 李红, 骆志文, 等. 比例施肥泵驱动活塞受力分析及内部流动模拟与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 93-100, 315.  
TANG Pan, LI Hong, LUO Zhiwen, et al. Force analysis of drive piston and simulation and experiment of internal flow for proportional fertilizer pump[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(23): 93-100, 315.
- 颜士敏, 殷广德, 刘林旺, 等. 江苏水稻机械化施肥发展现状与对策[J]. 中国农技推广, 2019, 35(9): 10-12.  
YAN Shimin, YIN Guangde, LIU Linwang, et al. The development status and countermeasures of rice mechanized fertilization in Jiangsu[J]. China Agricultural Technology Extension, 2019, 35(9): 10-12.
- 王毅, 邓波, 张丽. 施肥机在水肥一体化系统中的研究现状及发展前景分析[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(S1): 34-36.  
WANG Yi, DENG Bo, ZHANG Li. Present situation and development prospect analysis of fertilizer distributor in fertigation system[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(S1): 34-36.
- 张承林. 以色列的现代灌溉农业[J]. 中国农资, 2011(9): 53.  
ZHANG Chenglin. Modern irrigation agriculture in Israel[J]. China Agricultural Means of Production, 2011(9): 53.
- 朱志坚, 早熟木, 尼加提·依, 等. 自控变频调速式灌溉水注肥装置的研究[J]. 农业工程学报, 2005(9): 94-97.  
ZHU Zhijian, ZAO Remu, NI Jiaoti·Y, et al. Autocontrol variable voltage variable frequency type of irrigation fertigation device[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005(9): 94-97.
- 李建平, 胡佳宁, 王鹏飞, 等. 一种施肥方法及水肥混合装置: CN104429270A[P]. 2015-03-25.
- 刘永华, 沈明霞, 蒋小平, 等. 水肥一体化灌溉施肥机吸肥器结构优化与性能试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 76-81, 48.  
LIU Yonghua, SHEN Mingxia, JIANG Xiaoping, et al. Structure optimization of suction device and performance test of integrated water and fertilizer fertigation machine[J]. Transactions of the Chinese

- Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 76-81, 48.
- [13] 张青, 栗方亮, 孔庆波. 移动式灌溉施肥机设计[J]. 农业工程, 2020, 10(12): 28-31.  
ZHANG Qing, LI Fangliang, KONG Qingbo. Design on mobile fertilizer irrigation machine[J]. Agricultural Engineering, 2020, 10(12): 28-31.
- [14] 徐灿, 刘霓红, 程俊峰, 等. 基于蠕动泵的水肥药一体化装备设计与试验[J]. 农机化研究, 2022, 44(4): 63-70.  
XU Can, LIU Nihong, CHENG Junfeng, et al. Design and test of water, fertilizer and medicine integrated equipment based on peristaltic pump[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(4): 63-70.
- [15] 陆绍德, 黄所, 关经伦, 等. HJYDS-1 型移动式水肥药一体化施肥车研制与推广[J]. 现代农业装备, 2012(9): 48-50.  
LU Shaode, HUANG Suo, GUAN Jinglun, et al. Development and promotion of HJYDS-1 mobile integrated fertilization vehicle for water, fertilizer and medicine[J]. Modern Agricultural Equipments, 2012(9): 48-50.
- [16] 袁洪波, 李莉, 王俊衡, 等. 温室水肥一体化营养液调控装备设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(8): 27-32.  
YUAN Hongbo, LI Li, WANG Junheng, et al. Design and test of regulation and control equipment for nutrient solution of water and fertilizer integration in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(8): 27-32.
- [17] 马静, 杨令强, 孙春阳. 灌区闸门远程自动化控制系统的研发[J]. 灌溉排水学报, 2007, 26(S1): 134-135.  
MA Jing, YANG Lingqiang, SUN Chunyang. Research and development of remote automatic control system for irrigation gates[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2007, 26(S1): 134-135.
- [18] 李加念, 洪添胜, 冯瑞珏, 等. 基于模糊控制的肥液自动混合装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(16): 22-30.  
LI Jianian, HONG Tiansheng, FENG Ruijue, et al. Design and experiment of automatic mixing apparatus for liquid fertilizer based on fuzzy control[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(16): 22-30.
- [19] 孟一斌, 李久生, 李蓓. 微灌系统压差式施肥罐施肥性能试验研究[J]. 农业工程学报, 2007(3): 41-45.  
MENG Yibin, LI Jiusheng, LI Bei. Fertilization performance of the pressure differential tank in micro-irrigation system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007(3): 41-45.
- [20] 封俊, 沈雪民, 刘春和, 等. 压差式喷灌施肥装置的研究[J]. 农业工程学报, 1991(2): 107-113.  
FENG Jun, SHEN Xuemin, LIU Chunhe, et al. A study on the pressure differential fertilizer injection unit in sprinkler irrigation system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1991(2): 107-113.
- [21] 胡昕宇, 严海军, 陈鑫. 基于压差式施肥罐的均匀施肥方法[J]. 农业工程学报, 2020, 36(1): 119-127.  
HU Xinyu, YAN Haijun, CHEN Xin. Uniform fertilization method based on differential pressure tank[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(1): 119-127.
- [22] 王晶晶, 卓越, 张颢晖, 等. 柱塞式注肥泵的设计试验及精准施肥应用[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(1): 22-29.  
WANG Jingjing, ZHUO Yue, ZHANG Haohui, et al. Design and test of piston injection pump and its application in precise fertigation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2022, 40(1): 22-29.
- [23] LI J, MENG Y, LIU Y. Hydraulic performance of differential pressure tanks for fertigation[J]. Transactions of the ASABE, 2006, 49(6): 1 815-1 822.

## An Injected Fertigation Device

LI Hong, SONG Xiuhua, CHEN Chao, ZHANG Zhiyang, XIA Huameng

(National Research Center of Pumps, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** 【Background and objective】 Fertigation has the advantage of delivering water and fertilizers simultaneously into the root zones to maximize their uptake by crops. It has seen a rapid application in China. Typical fertilization devices consist of a pressure tank, a Venturi fertilizer applicator, a proportional fertilizer pump and a fertilizer injection pump, but most of them can only use soluble fertilizers. The purpose of this paper is to present the prototype of an injected fertigation device that uses solid fertilizers. 【Method】 We redesigned the structure and fertilization part of fertigation device, and then analyzed and tested its operation parameters, including their influence on uniformity of fertilizer application. We compared its performance with that of the conventional pressure tank. 【Result】 The injected fertigation device works well. Its fertilizer injection flow rate is 300 L/h and the fertilizer-feeding flow rate is proportional to the speed of the stepper motor. Increasing mixing speed of the device improves the uniformity of the fertilizer concentration; the optimal mixing speed is 400 rpm. Reducing fertilizer-feeding flow rate improves uniformity of the fertilizer concentration, and increasing the water flow rate can also enhance the uniformity of the fertilizer liquid concentration. When the water flow rate is 1.5 m<sup>3</sup>/h, 1.0 m<sup>3</sup>/h and 0.5 m<sup>3</sup>/h, the fertilization concentration deviation after applying 10 kg of compound fertilizer is 51.67%, 55.07% and 52.75%, respectively, and their associated fertilization concentration deviation is 50% smaller than that of the pressure tank overall. The stability and uniformity of the outlet fertilizer concentration in the device is much higher than those using the conventional pressure tank. 【Conclusion】 The injected fertigation device can dispose of solid fertilizer into the irrigation pipe where it dissolves. Compared with similar fertigation devices that use soluble fertilizers, the new device has the advantage of high fertilization uniformity and fast disposing of fertilizers.

**Key words:** solid fertilizer; fertigation; pipe irrigation; fertilization uniformity

责任编辑：赵宇龙