

阀门调节式比例施肥泵性能分析与试验

李 红, 张乾坤, 汤 攀, 孙彩珍

(江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

摘 要: 为探明阀门调节式比例施肥泵的工作原理及水力性能, 该研究针对施肥泵的结构原理及主要性能参数进行了分析, 同时还进行了其水力性能的相关试验。研究结果表明: 在进出口压差一定时, 随着施肥泵三通阀角度的增大, 进口流量先减小后增大, 在所有正常工作压力下都呈现同样的趋势。施肥比例与三通阀的水平分流比成正比, 且可以实现 0.07% 到 0.35% 范围内的连续变化。在正常工况下 (进出口压差在 0.06~0.18 MPa), 三通阀角度为 90° 时, 能量转换效率随着进出口压差的增大而增大; 施肥比例稳定度为 95.91%, 表明施肥泵在不同进出口压差下工作时的施肥比例较为稳定。研究结果可为比例施肥泵的整体设计及优化提供指导。

关键词: 农业机械; 试验; 施肥泵; 水力驱动; 活塞运动; 比例施肥

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.18.005

中图分类号: S224.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-18-0034-08

李红, 张乾坤, 汤攀, 等. 阀门调节式比例施肥泵性能分析与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(18): 34-41. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.18.005 <http://www.tcsae.org>

Li Hong, Zhang Qiankun, Tang Pan, et al. Performance analysis and test of valve-regulated proportional fertilization pumps[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(18): 34-41. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.18.005 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

水肥一体化技术因具有水肥高效利用、精准施肥的优点而被广泛关注, 并在中国大量推广和应用^[1]。施肥设备作为水肥一体化系统中不可或缺的一部分, 通常安装在灌溉系统首部, 其主要作用是将灌溉水和肥液按一定比例进行充分混合后将混合液注入灌溉管网中^[2]。目前国内常用的施肥设备中, 手动比例注入泵、柱塞式注肥泵、压差式施肥罐、文丘里施肥器等各有特点, 在农业生产均有较多应用。

手动比例注入泵, 又称比例施肥泵(器), 是性能优良的施肥设备^[3-4]。手动比例注入泵可以依靠来流产生的水压推动活塞运动进行吸肥工作, 具有启动压力小、施肥浓度恒定可调、不受压力波动影响、能量损失小、无须外加动力等诸多优点, 是目前被人们广泛认可的一种施肥设备^[5-6]。

近年来, 国内有许多专家、学者对比例施肥泵进行了相关研究^[7-9]。李百军等^[10-11]依据注肥泵的理论机理, 研制了能量损失小、吸肥量稳定的手动注肥装置。孟一斌^[12]对国外一些产品进行了水力性能试验, 但只是给出了压力流量关系、压力控制范围等相关参数。韩启彪等^[13]对微灌使用的 3 种不同的手动比例施肥泵进行了吸肥性能的对比研究, 得出了入口流量和吸肥量的影响因素。

汤攀等^[14]在比例施肥泵运行机理分析的基础上, 采用流固耦合技术进行数值模拟, 分析了其内部流动以及活塞受力。骆志文等^[15]研究了比例施肥泵进出口腔、驱动腔、进出阀口等的直径以及弹簧腔换向结构对比例施肥泵吸肥性能的影响。李红等^[16]设计了一种全新结构的定比例施肥泵, 该泵的活塞换向机构不受弹簧的影响, 减少了活塞换向时的冲击, 提高了装置运行的效率和平稳性, 但施肥比例不可调。

比例施肥泵起源于国外, 如今以以色列为首的农业发达国家都已经实现了优质产品的批量生产, 但由于技术保密, 只能从已经公开的专利中了解国外的研究现状^[17]。Bron^[18]发明了一种内部带弹簧的可变量加药活塞泵, 可以通过换向机构来改变活塞的行程, 进而调节药液浓度; Thierry 等^[19]发明了一种具有计量功能的往复式水力机械, 通过来流液体驱动活塞向液体中注入添加剂。Urrutia^[20]发明了一种利用弹性装置、差动活塞和凸轮旋转机构等组成的比例施肥泵。Silva 等^[21]基于活塞泵原理开发了一种安装在大型拖拉机上的施肥装置, 肥液通过注肥针孔注入到 50 mm 深度的土壤里, 这种设计可以有利于减少肥料的使用量和提高肥料利用率。由于国外对此研究领先国内, 且施肥泵对制造工艺要求较高, 因此国内市场上所销售的比例施肥泵多为进口产品, 但大都价格昂贵而不能普及。

综上所述, 国内目前虽然对比例施肥泵的研究有很多, 但其结构复杂、价格昂贵的现状仍然没有改变。因此, 对施肥比例稳定度高、结构简单的比例施肥泵进行研究是十分有意义的。相对其他施肥设备, 阀门调节式比例施肥泵具有启动压力及压力损失小、施肥浓度恒定

收稿日期: 2020-02-17 修订日期: 2020-09-07

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFD0300803、2017YFD0201502); 江苏省高等学校自然科学研究面上项目(19KJB470014); 江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(19)2040)

作者简介: 李红, 研究员, 研究方向为流体机械及排灌机械研究。

Email: hli@ujs.edu.cn

且可调等优点，具有极高的推广应用价值。本文对阀门调节式比例施肥泵进行原理及性能参数分析，并为研究其性能开展相关试验。拟为比例施肥泵的整体设计及优化提供指导。

1 阀门调节式比例施肥泵结构及原理

1.1 结构及主要参数

所研究的阀门调节式比例施肥泵是由美国美乐柯（Miracle-Gro）生产的适用于家庭小花园灌溉、施肥的单一型号产品（Miracle-Gro Liquafeed）。该设备结构精巧、体积较小，并可以通过三通阀实现纯灌水模式和灌水施肥模式的切换，因此可以直接安装在水源管路上，不用拆卸^[22]。施肥泵基本结构如图 1 所示，根据功能可将其机械结构大致分为 3 个部分：流量调节部分、吸肥部分和贮肥部分。图 1a 为阀门调节式比例施肥泵测绘完成的三维装配示意图。

为方便表述，将施肥泵内部结构简化后绘制图 1b。在吸肥、排肥的过程中，驱动活塞/吸肥活塞行程 L ，泵腔体内径 D ，吸肥腔体内径 d 的大小也都会对施肥泵的性能产生较大的影响。验证性试验表明三通阀角度 α 会改变进入泵内流量的多少，影响施肥泵性能。以上这些参数都是施肥泵的重要结构参数。结构参数的实测数据如表 1 所示。

表 1 阀门调节式比例施肥泵结构参数
Table 1 Structural parameters of valve-regulated proportional fertilization pump

参数 Parameters	实测数值 Measured value	参数 Parameters	实测数值 Measured value
三通阀角度 Angle of three-way valve $\alpha/(\circ)$	0~90	泵腔体内径 Inner diameter of pump cavity D/mm	71.6
驱动活塞/吸肥活塞行程 Stroke of driving piston / injection piston L/mm	23	吸肥腔体内径 Inner diameter of fertilizer injection cavity d/mm	6.1

施肥泵最主要的功能就是注肥。为更好的研究施肥泵的性能，基于节能及实际需求等方面考虑，以能量转换效率、施肥比例、施肥比例稳定度为施肥泵性能指标，其定义分别为：能量转换效率是指出口处的流体总能量与进口处流体总能量的比值，它也是验证施肥泵能耗高低的重要指标；施肥比例是指单位时间内吸取肥液量与出口流量的比值，因此施肥比例实际为单位周期吸肥肥液量与出口水肥总量的比值，且由于三通阀的调节作用会改变施肥比例，因此施肥比例是一个范围；施肥比例稳定度是指在不同工况条件下，施肥泵的施肥比例保持稳定的程度，可以通过多次重复性试验测定得到。

1.2 调节工作原理

阀门调节式比例施肥泵通过三通阀将进入施肥泵的水进行分流，三通阀的水平分流比 r 定义为进入比例施肥泵的流量占入口总流量的比例，其大小可以通过旋转手柄来控制。手柄与阀芯同步旋转，改变阀芯与阀体（施

肥泵泵体中与阀芯密封配合的结构）的相对角度位置 α 就会改变三通阀的分流比例^[23]。手柄可逆时针旋转，其调节角度范围是 90° 。规定手柄处于竖直方向时（如图 1 所示手柄位置），三通阀角度 α 为 0° ，此时来流不经过施肥泵，为纯灌水模式；规定手柄处于水平直方向时，三通阀角度 α 为 90° ，来流全部经过施肥泵进行吸肥工作；手柄处 $0^\circ\sim90^\circ$ 位置时三通阀将水分为两部分，其中，阀门水平出口分流出的水进入施肥泵驱动腔进行吸肥，阀门竖直出口流出的水则直接流向施肥泵出口与来自吸肥端的水肥混合液进一步混合后流出。

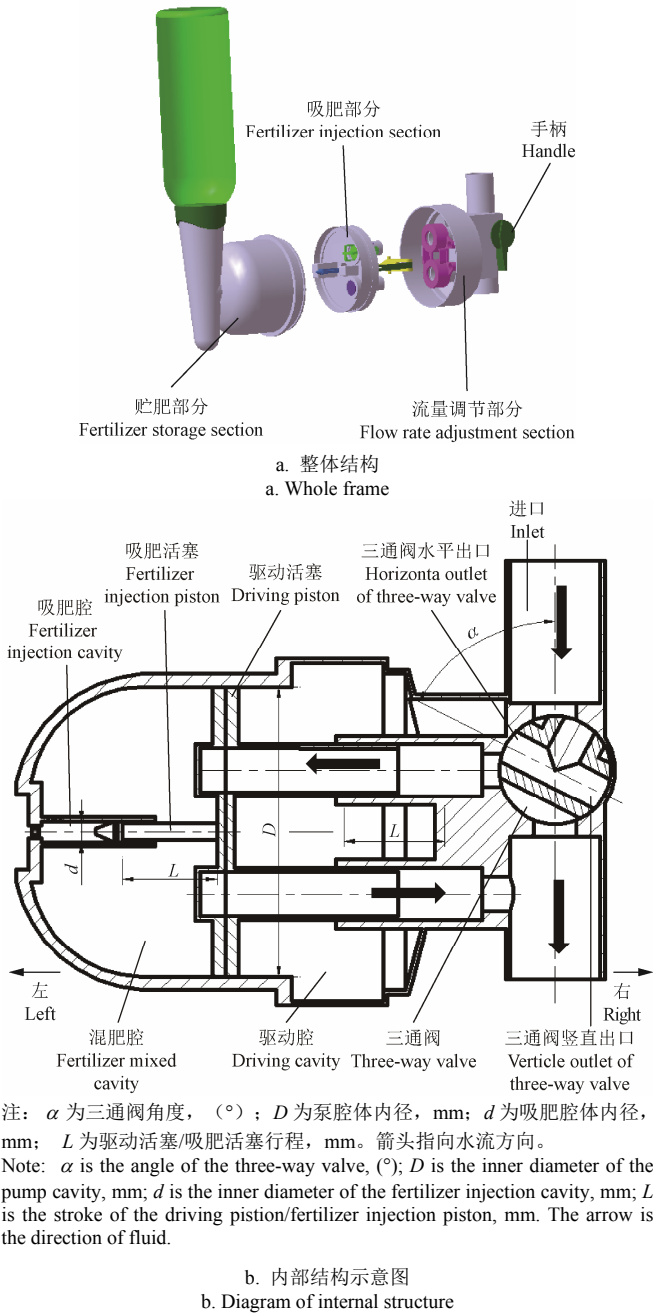


图 1 阀门调节式比例施肥泵示意图
Fig.1 Schematic diagram of valve-regulated proportional fertilization pump

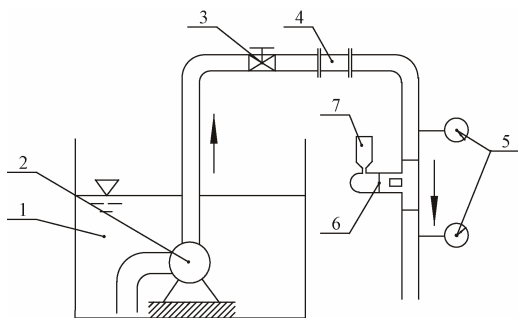
阀门调节式比例施肥泵利用水压使驱动活塞左右产生压差从而使其运动，如图 1b 所示，驱动活塞上固

定着的吸肥活塞在吸肥腔内随着驱动活塞一起运动。规定驱动活塞向右运动时为右行程，向左运动时为左行程。右行程时从三通阀水平出口流出的水进入混肥腔内，推动驱动活塞向右运动，同时将驱动腔内的液体排出。吸肥活塞随驱动活塞向右运动，将肥液从肥液瓶中吸到吸肥腔。右行程结束时在换向机构作用下，切换为左行程。左行程时从分流三通阀水平出口流出的水进入驱动活塞右侧腔体，推动驱动活塞向左运动，同时将驱动活塞左侧腔体的液体排出，吸肥活塞随驱动活塞向左运动，将吸肥腔中的肥液推到驱动活塞左侧腔体。左行程结束时在换向机构作用下，切换为右行程，如此往复^[16]。

2 试验方案与方法

2.1 试验台设计

试验在江苏大学喷灌大厅试验室进行，试验台示意图及实物图如图2。贮水缸1内预先存储一定量的水，水泵2从中吸出的水进入主管道。主管道（ $\phi 25$ mmPVC管）上安装球阀3以调节进口流量和压力，流量计4（0.5%级精度的智能涡轮流量计 LWGYE-40）用于监测施肥泵的进口流量，施肥泵进出口分别安装压力表5（精度等级为2.5%）用于测量进出口压力，压力表间距为0.6 m，肥液瓶7内为产品配套使用的液体肥（Miracle-Gro Liquefeed All Purpose）。



1. 贮水缸 2. 水泵 3. 球阀 4. 流量计 5. 压力表 6. 阀门调节式比例施肥泵 7. 肥液瓶
1. Water storage tank 2. Water pump 3. Ball valve 4. Flow rate meter
5. Pressure gauge 6. Valve-regulated proportional fertilization pump
7. Fertilizer bottle

a. 示意图
a. Schematic diagram



b. 实物图
b. Physical picture

图2 阀门调节式比例施肥泵水力性能试验台

Fig.2 Hydraulic performance test bench for valve-regulated proportional fertilization pump

2.2 试验方案

进行性能试验时，主要通过测定相关工作参数进行性能参数的研究。试验参照国家标准 GB/T19792—2012^[24]，所用的液体肥对施肥泵性能无影响。

试验中通过调节球阀来改变施肥泵进出口压差（试验中出口直接与大气相通，因此进出口压差即进口压力），同时改变施肥泵的进口流量。在同一进出口压差下进一步改变施肥泵三通阀的手柄角度从而改变施肥比例。采取的试验方案为在同一阀门角度下测试所有进出口压差工况后再换到下一角度测试。为便于压力表读数及角度标定，测量的所有进出口压差工况为0.02~0.22 MPa，取值步长为0.02 MPa，所有阀门角度 α 工况为0°~90°，取值步长为5°，所有试验数据测量3次，取平均值用于计算。

水力性能试验的具体操作测量流程为：首先将三通阀调整到0°位置，将进口管路中位于施肥泵之前的球阀打开一定角度，打开水泵，待其稳定运行后旋转进口球阀，使压力表读数稳定在0.02 MPa，待流量计示数稳定后读取、记录、计算进口流量值、吸肥量、活塞运动频率等关键数据。测量完毕后调节球阀使进出口压差变为0.04 MPa，重复上述测量项，直到测完0°下进出口压差从0.02 MPa到0.22 MPa的所有工况，然后将三通阀调到5°位置测量所有进出口压差工况下的参数，如此直到测完三通阀90°下的所有工况。

吸肥量的测定方案是测量一定时间内的肥料瓶的吸肥开始和结束时的质量，两者的差值即为一定时间内的吸肥量。

换向机构在周期性运动时会发出脆响，通过记录活塞发出50次响声所用的时间，再进行简单换算即可得到活塞的运动频率。

2.3 性能分析

2.3.1 能量转换效率

入口流体的总水头为流体的动能水头、压能水头和势能水头之和，则入口流体的总水头 H_{in} (m)^[25]可以表示为

$$H_{in} = \frac{v_{in}^2}{2g} + \frac{p_{in}}{\rho_{in}g} + z_1 \quad (1)$$

同理，出口处流体的总水头 H_{out} (m)^[25]为

$$H_{out} = \frac{v_{out}^2}{2g} + \frac{p_{out}}{\rho_{out}g} + z_2 \quad (2)$$

式中 v_{in} 、 v_{out} 分别为流体进、出口速度，m/s； p_{in} 、 p_{out} 分别为流体进、出口压力，Pa； ρ_{in} 、 ρ_{out} 为进、出口处流体的密度，kg/m³； z_1 、 z_2 分别为流体在施肥泵进、出口端面处的势能水头，m。

则施肥泵的能量转换效率 η 为

$$\eta = \frac{H_{out}}{H_{in}} \quad (3)$$

2.3.2 施肥比例

由于施肥泵的吸肥活塞固定在驱动活塞上，两者的相对位置、运行状态完全一致，因此行程大小都为 L ，施

肥泵吸肥部分单位周期排出的水肥混合液体积 V_1 为驱动活塞一个周期内扫掠的体积, 即

$$V_1 = \frac{1}{4} \pi D^2 L \times 2 \quad (4)$$

施肥泵只在活塞右行阶段吸肥, 左行阶段排肥, 则单位周期内吸取肥液的体积 V_2 为

$$V_2 = \frac{1}{4} \pi d^2 L \quad (5)$$

式中 V_1 、 V_2 为单位周期排出的水肥混合液体积、单位周期内吸取肥液的体积, mL; D 为泵腔体内径, mm; d 为吸肥腔体内径, mm; L 为驱动活塞/吸肥活塞行程, mm。

但由于三通阀的作用, 只有从阀门水平出口分流的水参与了吸肥, 水肥混合流体在施肥泵出口处与从阀门水平出口分流的水进一步混合后流出。设三通阀的水平分流比为 r , 则阀门调节式比例施肥泵的施肥比例 R 为

$$R = \frac{r}{2} \left(\frac{d^2}{D^2 + d^2} \right) \quad (6)$$

由测绘尺寸: $d=6.1$ mm, $D=71.6$ mm, 可以得出施肥泵的施肥比例为

$$R = 0.0036r \quad (7)$$

由式 (7) 可知: 施肥泵的施肥比例 R 与三通阀的水平分流比 r 成正比; 在优化设计时, 适当调整 $\left(\frac{d^2}{D^2 + d^2} \right)$ 的值可以改变施肥比例。

2.3.3 施肥比例稳定度

为实现阀门调节式比例施肥泵精量加肥, 其施肥稳定性的研究尤为重要, 施肥比例稳定度是衡量在不同进出口压差工况下施肥泵保持一定施肥比例的稳定性高低。

把施肥比例稳定度定义为相同出口压力 p_{out} 下、三通阀角度为 90° 时, 其不同进出口压差 Δp_x 下的施肥比例 R_x 的最低精确度, 表示为

$$\varepsilon = 1 - \frac{\left| \frac{\sum R_x}{N} - R_i \right|_{\max}}{\frac{\sum R_x}{N}} \quad (8)$$

式中 ε 为施肥比例稳定度; N 为不同进出口压差的样本个数; x 为某一进出口压差 Δp_i 时的样本编号, $1 \leq x \leq N$; R_i 为不同进出口压差 Δp_i 下的施肥比例, $1 \leq i \leq N$ 。

3 试验结果与分析

施肥泵在进出口压差为 $0.02 \sim 0.04$ MPa 时, 由于未达到启动压力而不能正常工作; 当进出口压差超过 0.2 MPa 时, 会出现泄露的现象。因此在试验结果分析时, 数据范围都为在正常工况下所测得的数据, 即进出口压差为 $0.06 \sim 0.18$ MPa。正常工况指的是在达到施肥泵的启动压力后, 施肥泵能保持良好的注肥性能的工作状况。即在某一三通阀角度下, 施肥泵的换向机构运行平稳, 施肥比例稳定, 施肥泵泵体无泄漏。

3.1 进出口压差、进口流量及三通阀角度

试验中施肥泵出口直接与大气相通, 则进出口压差即为进口压力。韩启彪等^[13]研究了 3 种水力驱动比例式施肥泵, 发现入口流量受施肥管道两端压差影响, 但受进口压力影响不大, 因此自然出流不影响施肥泵的各项性能。图 3 为阀门调节式比例施肥泵在正常工况范围内, 不同进出口压差下的三通阀角度与进口流量的关系曲线, 是施肥泵的主要外特性曲线。

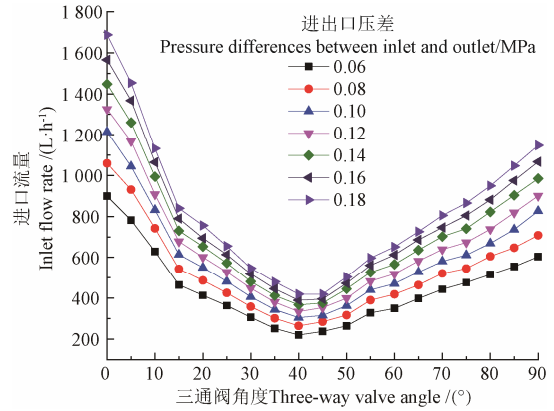


图 3 不同进出口压差下三通阀角度和进口流量关系

Fig.3 Relationship between three-way valve angle and inlet flow rate under different pressure differences between inlet and outlet

从图 3 可以看出, 在进出口压差一定时, 随着施肥泵三通阀角度的增大, 进口流量先减小后增大, 在所有压力下都呈现同样的趋势。造成这种趋势的主要原因是三通阀进口过流断面先减小后增大, $40^\circ \sim 45^\circ$ 附近时达到最小, 并且进口过流断面的变化趋势在 $40^\circ \sim 45^\circ$ 附近两侧基本对称。这是由于阀门在 15° 到 75° 之间吸肥部分都在工作, 而吸肥部分产生的主要是机械损失, 且大小是一定的, 因此这段区间的进口流量基本关于 $40^\circ \sim 45^\circ$ 附近的阀门角度对应的流量值左右对称。

3.2 活塞运动频率

活塞运动频率的变化主要受进出口压差、进口流量和三通阀角度的影响, 是影响吸肥量的重要指标。试验中发现施肥泵从三通阀角度为 20° 开始稳定吸肥, 但不代表施肥泵从三通阀从 20° 才开始分流。在三通阀角度为小于 15° 当进出口压差很大时能监测到活塞换向的声音, 但活塞单个行程运动时间极长, 可视为未开始施肥。

不同进出口压差下三通阀角度与活塞运动频率关系曲线如图 4 所示。从图 4 可以看出, 三通阀角度一定时, 驱动活塞运动频率随施肥泵进出口压差的增大而增大, 这是由于施肥泵进出口压差越大, 驱动腔内水压越大, 驱动活塞受到的驱动力越大, 活塞运动加速度越大, 活塞运动频率越高。杨大森等^[26]在研究国外其他比例施肥泵时也得出相同结论。

在相同进出口压差下, 活塞运动频率随三通阀角度的增大总体呈上升趋势, 但在 20° 到 50° 之间并不是平稳上升, 而是呈现波浪形变化趋势。 50° 到 90° 的曲线呈现单调上升趋势, 这段曲线的施肥性能相对前段曲线较理

想。分流比一定时进出口压差越大，进口流量越大，从而从阀门水平出口进入吸肥部分的水的流量就越大，活塞运动频率也越高；进出口压差一定时水平分流比越大，从阀门水平出口进入吸肥部分的水的流量就越大，活塞运动频率也越高。

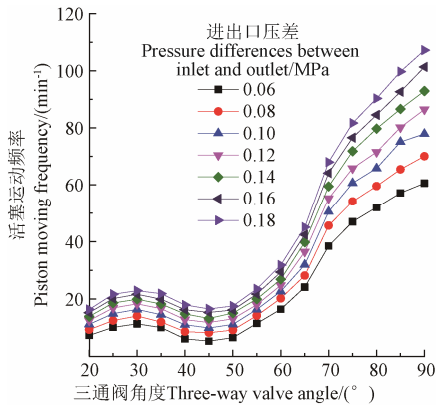


图 4 不同进出口压差下三通阀角度与活塞运动频率关系
Fig.4 Relationship between three-way valve angle and piston motion frequency under different pressure differences between inlet and outlet

3.3 施肥比例

试验中通过测得施肥泵在不同三通阀角度下的进口流量及工作 5 min 的吸肥量，并依据施肥比例的定义——单位时间内吸取肥液量与出口流量的比值，经换算得到的施肥比例曲线如图 5 所示。从图中可以看出，不同进出口压差下的施肥比例曲线基本重合，说明进出口压差对施肥比例没有太大影响，但 45°附近不同进出口压差对应曲线偏离现象略微严重，并且进出口压差越大对应施肥比例越高，曲线也越靠拢，这是由于施肥泵的制造工艺并不是十分精密，在进出口压差较低时存在轻微泄露问题。同时结合图 3 可知，40°~45°附近由于阀门进口过流断面最小，相同进出口压差下该角度附近对应的进口流量最小，因此导致施肥泵腔体内的压力较小，从而使得活塞的换向驱动力减小，影响换向机构的平稳运行，无法保持良好吸肥性能。因此在三通阀角度为 40°~45°附近工况下的施肥比例较低，且不同进出口压差下的施肥比例有较大差异。

由图 5 可知，阀门调节式比例施肥泵在三通阀角度为 20°时施肥比例最小，取平均值约为 0.07%；90°时施肥比例最大，取平均值约为 0.35%，说明该施肥泵的施肥比例在不同进出口压差下可以实现 0.07%到 0.35%范围内的连续变化。但施肥比例调节曲线并非单调上升，而是与活塞运动频率曲线呈现相似的变化趋势，这与施肥泵前部的三通阀调节特性有关。因此可通过改进三通阀的调节特性减少施肥比例调节难度和提高施肥比例调节精度。

由式 (7) 可知，当来流全部经过施肥泵时，其施肥比例理论计算值为 0.36%，但在试验中不同压力条件下得到的数据均小于该施肥比例。其原因是当换向机构工作时，吸肥腔内并非充满状态，即单次吸入的肥料量会低于理论值，因此施肥比例会略有降低。且随着施肥泵进

出口压差不断增大，施肥比例逐渐降低，这是因为随着腔内压力的增大，吸肥频率增加，吸肥的效率会逐渐降低，也就是吸肥不充分的现象更加严重。

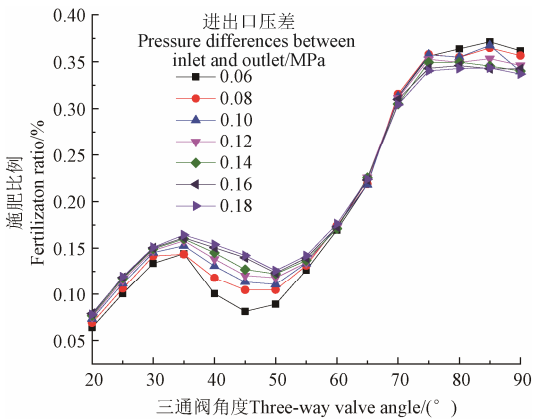


图 5 不同进出口压差下三通阀角度与施肥比例关系
Fig.5 Relationship between three-way valve angle and fertilization ratio under different pressure differences between inlet and outlet

3.4 能量转换效率及施肥比例稳定度

三通阀对施肥泵性能的影响都是由三通阀的调节特性影响的，并且有关学者已经对三通阀进行了深入的研究^[23]。因此在研究施肥泵的能量转换效率和施肥比例稳定度时，只在三通阀角度为 90°时进行试验，来流的水全部经过施肥泵进行吸肥、混肥工作，因此可以忽略由于三通阀分流带来的影响，此时的能量转换效率及施肥比例稳定度的大小可以侧面表征施肥泵的性能好坏。

由于施肥泵进出口管道垂直安装，因此可以将下方压力表处作为基准平面（试验中上、下 2 个压力表测得的压力可分别近似为施肥泵的进、出口压力）。此时下方压力表处的势能水头近似为出口端面处的势能水头，取值为 0，进口端面处的势能水头为压力表安装高度差距，为 0.6 m，管内流速可利用流量进行换算。因为末端自由出流，出口压力为 0，则进口压力的测量值即为施肥泵的进出口压差。试验中测得进口压力和进口流量、以及一定时间内的吸肥量后，可根据式 (3) 进行能量转换效率的计算，计算结果如表 2 所示。

表 2 三通阀角度为 90°时的能量转换效率及施肥比例稳定度
Table 2 Energy conversion efficiency and fertilization ratio stability with three-way valve angle 90°

进出口压差 Pressure difference between inlet and outlet/MPa	进口流量 Inlet flow rate /(L·h ⁻¹)	吸肥量 Fertilizer injection /(L·h ⁻¹)	能量转换效率 Energy conversion efficiency/%	施肥比例 Fertilization ratio /%	施肥比例稳定度 Fertilization ratio stability/%
0.06	603.2	2.18	59.76	0.360	95.91
0.08	708.2	2.53	59.33	0.356	
0.10	826.2	2.82	60.83	0.340	
0.12	900.3	3.13	62.41	0.346	
0.14	984.8	3.36	64.50	0.340	
0.16	1 067	3.66	66.66	0.342	
0.18	1 147	3.88	68.78	0.337	

从表 2 试验结果可以看出, 阀门调节式比例施肥泵的能量转换效率随着进出口压差的增大而增大均在 60% 左右, 此现象与其他常见的非阀门调节式施肥泵有很大不同。汤攀^[27]对一款国外比例施肥泵的研究发现, 在同一施肥比例下, 随着压差的增大, 施肥泵能量转换效率迅速降低。这表明该施肥泵能量转换性能优良, 但能量转换效率却不高, 这也是日后进行优化设计所要提高的重要参数之一。

在试验中提取了多个样本进行计算, 得到在三通阀角度为 90° 时, 施肥泵在正常工况下的施肥比例稳定度为 95.91%, 表明施肥泵在不同进出口压差下的施肥比例较为稳定。但在三通阀角度为 0°~90° 的其他角度时, 其施肥稳定度会存在一定的差异, 这是由于三通阀的调节特性导致的。Li 等^[28]研究认为在进行微灌系统设计时应优先选用施肥比例稳定的比例施肥泵, 因此表明该施肥泵具有一定的优势。

综上分析可知, 在施肥泵的研究和优化设计过程中, 应对三通阀调节施肥比例的原理进行深入研究, 改进其结构以提高其控制的简易性和准确度; 通过结构改进、流道优化来提高能量转换效率, 减少能量损失; 通过增加吸肥腔体内径及其他可行方式提高施肥比例的调节范围, 以满足不同作物需要; 加强密封性设计, 提高泵体的耐压范围及容积效率。

4 结 论

1) 介绍了阀门式比例施肥泵的内部结构及其原理, 并对其主要性能参数进行了性能分析和公式推导。研究发现在进出口压差一定时, 随着施肥泵三通阀角度的增大, 进口流量先减小后增大, 在所有正常工作压力下都呈现同样的趋势。

2) 三通阀角度一定时, 活塞运动频率随施肥泵进出口压差的增大而增大; 在相同进出口压差下, 活塞运动频率随三通阀角度的增大总体呈上升趋势, 但在 20° 到 50° 时呈波浪形变化趋势。三通阀角度为 20° 时的施肥比例最小, 为 0.07%; 90° 时施肥比例最大, 为 0.35%。

3) 施肥泵在不同工况下的能量转换效率均在 60% 左右, 且随着进出口压差的增大而增大; 在三通阀角度为 90° 时, 施肥比例稳定度为 95.91%, 表明施肥泵在不同进出口压差工况下的施肥比例较为稳定。

【参 考 文 献】

- [1] Huang Wei, Lu Meiling, Liang Xin, et al. Design and application of water, fertilizer and pesticide integrated automatic control device[J]. Plant Diseases and Pests, 2020, 11(1): 30-32.
- [2] 李久生, 王迪, 栗岩峰. 现代灌溉水肥管理原理与应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2008.
- [3] 韩启彪. 设施农业灌溉施肥泵性能试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2008.

Han Qibiao, Experimental Study on Performance of Facility

Agricultural Fertigation Device[D]. Beijing: China Agricultural University, 2008. (in Chinese with English abstract)

- [4] 杨大森. 水动比例施肥泵运动分析及性能优化[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- Yang Dasen. Valve-regulated Proportional Dosing Pump Movement Analysis and Performance Optimization[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [5] 骆志文. 水动比例注入泵性能参数研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2017.
- Luo Zhiwen. Research on Performance Parameters of Hydrodynamic Proportional Injection Pump[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [6] Tang Pan, Li Hong, Issaka Zakaria, et al. Methodology to investigate the hydraulic characteristics of Valve-regulated piston-type proportional injector used for aricultural chemigation[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2018, 34(3): 545-553.
- [7] 吴锡凯, 王文娥, 胡笑涛, 等. 水力驱动式比例施肥器性能影响因素试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2018(4): 6-9.
- Wu Xikai, Wang Wenbiao, Hu Xiaotao, et al. Experimental study on factors affecting the performance of hydraulically driven proportional fertiliser[J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(4): 6-9. (in Chinese with English abstract)
- [8] 赵友俊. 水动比例注肥泵的研制[J]. 现代农业装备, 2011(8): 48-50.
- Zhao Youjun. The invention of water-driven proportioning injector[J]. Modern Agricultural Equipments, 2011(8): 48-50. (in Chinese with English abstract)
- [9] 王建东, 龚时宏, 徐茂云, 等. 微灌用水动活塞式施肥泵研制[J]. 农业工程学报, 2006, 22(6): 100-103.
- Wang Jiandong, Gong Shihong, Xu Maoyun, et al. Development of water-driven piston fertilization pump for micro-irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(6): 100-103. (in Chinese with English abstract)
- [10] 李百军, 王晓宁. 水动施肥装置的设计与试验[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2002, 23(2): 9-12.
- Li Baijun, Wang Xiaoning. Design and experiment of hydrodynamic fertilization device[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2002, 23(2): 9-12. (in Chinese with English abstract)

- [11] 赵立新, 郑立允, 连学文, 等. 水压驱动施肥泵的开发研究[J]. 水泵技术, 2002(6): 44-45.
Zhao Lixin, Zheng Liyun, Lian Xuewen, et al. Development and research of hydraulically driven fertilization pump[J]. Pump Technology, 2002(6): 44-45. (in Chinese with English abstract)
- [12] 孟一斌. 微灌施肥装置水力性能研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2006.
Meng Yibin. Study on Hydraulic Performance of Micro-Irrigation and Fertilization Device[D]. Beijing: China Agricultural University, 2006. (in Chinese with English abstract)
- [13] 韩启彪, 吴文勇, 刘洪禄, 等. 三种水力驱动比例式施肥泵吸肥性能试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 43-47.
Han Qibiao, Wu Wenyong, Liu Honglu, et al. Experiment on fertilizer suction performance of three hydraulic driven pumps[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(2): 43-47. (in Chinese with English abstract)
- [14] 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.
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 (Transactions of the CSAE), 2017, 33(23): 93-100. (in Chinese with English abstract)
- [15] 骆志文, 李红, 杨大森. 水动比例施肥泵容积效率分析[J]. 中国农村水利水电, 2016(9): 91-94.
Luo Zhiwen, Li Hong, Yang Dasen. Analysis on volumetric efficiency of proportional dosing pumps[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(9): 91-94. (in Chinese with English abstract)
- [16] 李红, 汤攀, 陈超, 等. 一种水力驱动的定比例施肥泵: ZL20150771913. 8[P]. 2015-11-13.
- [17] 卢珍, 周小波, 李光辉, 等. 水动比例施肥泵研究现状及存在的问题[J]. 现代农业科技, 2019(19):171-172.
Lu Zhen, Zhou Xiaobo, Li Guanghui, et al. Research status and problems of hydrodynamic proportional fertilization pump[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2019(19):171-172. (in Chinese with English abstract)
- [18] Bron D. Pump for variable dosing, 4118152[P]. 1978-10-03.
- [19] Thierry G, Higham D, Vacher D, et al. Reciprocating hydraulic machine, especially a motor, and dosing apparatus comprising such a motor, US7207260B2[P]. 2007-04-24.
- [20] Urrutia S. Reciprocating differential hydraulic machine, especially a differential hydraulic machine, US6684753B1[P]. 2004-02-03.
- [21] Silva M J D, Magalhes P S G. A liquid injection dosing system for site-specific fertiliser management[J]. Biosystems Engineering, 2017, 163: 150-158.
- [22] 孙彩珍. 阀门调节式比例施肥器理论及试验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2018.
Sun Caizhen. Theoretical and Experimental Research on Valve-Regulated Proportional Fertilization Applicator[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [23] 孙彩珍, 李红, 汤攀. 三通调节阀分流比及内部流动特性分析[J]. 排灌机械工程学报, 2019, 37(5): 441-446.
Sun Caizhen, Li Hong, Tang Pan. Analysis of split ratio and internal flow characteristics of three-way control valve[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2019, 37(5): 441-446. (in Chinese with English abstract)
- [24] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国标准化管理委员会. 农业灌溉设备 水动化肥-农药注入泵: GB/T19792—2012 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [25] 罗惕乾. 流体力学[M]. 第四版. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [26] 杨大森, 李红, 骆志文. 活塞式比例施肥泵性能对比试验[J]. 节水灌溉, 2015(11): 47-50.
Yang Dasen, Li Hong, Luo Zhiwen. Working principle and performance test of the piston proportion fertilizer applicator[J]. Water Saving Irrigation, 2015(11): 47-50. (in Chinese with English abstract)
- [27] 汤攀. 比例施肥泵水力性能优化及水肥一体化系统应用研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2018.
Tang Pan. Optimization of Hydraulic Performance of Proportional Fertilization Pump and Application Research of Water and Fertilizer Integrated System[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [28] Li Jiusheng, Meng Yibin, Li Bei. Field evaluation of fertigation uniformity as affected by injector type and manufacturing variability of emitters[J]. Irrigation Science, 2007, 25(2): 117-125.

Performance analysis and test of valve-regulated proportional fertilization pumps

Li Hong, Zhang Qiankun, Tang Pan, Sun Caizhen

(Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: The valve-regulated proportional fertilization pump (proportional pump for short) is a kind of fertilization equipment with excellent performance, but it can't be widely used due to complicated structure and high manufacturing requirements. At present, most of proportional pumps sold in domestic market are imported from developed countries, and due to the complex structure and difficult production, most of the proportional pumps produced in China are mainly imitated. Meanwhile, there are many researches on the proportional pump in China, but its structure is still complex and price is still expensive. Therefore, it is very meaningful to study the performance of a proportional pump with high precision and simple structure. Firstly, in this study, a simple structured valve-regulated proportional fertilization pump was introduced. This proportional pump does not require an external driving device, taking advantage of water pressure to cause a pressure difference between the two sides of driving piston, driving the piston moving periodically and making use of the reversing mechanism to realize travel conversion, so that the driving piston periodically reciprocates and drives the fertilizer injection piston fixed on it. It can switch between irrigation mode and irrigation and fertilization mode by adjusting the three-way valve. Secondly, the internal structure, main performance parameters and principle of valve-regulated proportional fertilization pump were analyzed comprehensively. Furthermore, in order to verify its hydraulic performance, tests were carried out. Energy conversion efficiency, fertilization ratio, and fertilization ratio stability were taken as the main performance indicators. The results showed that when the pressure difference between inlet and outlet was constant, the inlet flow rate decreased firstly and then increased with the three-way valve angle of the proportional pump increased, showing same trend under all pressure differences between inlet and outlet. The main reason for this trend was that the inlet flow cross section of the three-way valve decreased first and then increased, reaching the minimum when the three-way valve angle was 40° - 45° . At the same time, since the three-way valve angle was between 15° and 75° , the energy loss was caused by mechanical mechanism, so the curve of relationship between three-way valve angle and inlet flow under different pressure differences between inlet and outlet was basically symmetrical about 45° . The fertilization ratio of the proportional pump was proportional to the horizontal split ratio of the three-way valve, and the fertilization ratio could achieve continuous changes in the range from 0.07% to 0.35%. The fertilization ratio gradually decreased as the pressure difference between inlet and outlet increased. The theoretical calculation value of the fertilization ratio was 0.36% when all incoming flows passed through the proportional pump, but the data obtained under different pressure conditions in the experiment were less than it. As the pressure difference between inlet and outlet increased, the fertilization ratio gradually decreased. Because as the pressure increased, the frequency of fertilizer injection piston movement increased, but the efficiency of fertilizer injection gradually decreased, that is to say, fertilizer injection insufficiency was more serious at this moment. The energy conversion efficiency increased with the increase of the pressure difference between inlet and outlet. The fertilization ratio stability of the proportional pump was 95.91%, which indicated that the fertilization ratio of proportional pump under different pressure differences between inlet and outlet was relatively stable. In the future, researches on the principle of the three-way valve adjusting the fertilization ratio need to be developed further. Firstly, its structure should be improved to reduce difficulty and improve accuracy of its control; secondly, carrying out research on structural optimization can improve energy conversion efficiency and reduce energy loss; thirdly, increasing the adjustment range of the fertilizer ratio can be realized by increasing the diameter of the fertilizer suction chamber to meet the needs of different crops; last but not the least, strengthening the sealing design will improve the withstand voltage range and volume efficiency of the pump body.

Keywords: agricultural machinery; experiment; fertilization pump; hydraulic driving; piston movement; proportional fertilization