

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.08.007

多通道施肥机水力特性及其结构优化研究^{*}

刘 敏¹, 陈跃威²

(1. 贵阳学院 数学与信息科学学院, 贵州 贵阳 550005; 2. 贵州大学 机械工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要:针对水肥一体化施肥机精量施肥与应用的要求,开展了多通道施肥机水力特性、结构优化及试验研究。利用 FloEFD 流体仿真分析软件,对单个射流泵及并联多个射流泵组成的吸肥器进行了流体仿真,通过研究通道数与吸肥量及水力特性对比关系,结合实际应用需求,优选了具有合适吸肥量和较优水力性能的三通道吸肥器并联组合对结构;对三通道并联结构参数进行了优化设计,确定了主管道和 3 个射流泵之间的合适长度,实现了每通道吸肥量趋于相同,并且吸肥量高于优化前;最后制作样机进行了试验验证。研究表明:三通道实验吸肥量相对误差最大为 2.57%,吸肥量实验数据与数值模拟数据的误差小于 5%,在合理范围内;样机长时间运行具有很好的稳定性。

关键词:数值仿真;吸肥特性;结构优化;样机试验

中图分类号:TH122;S224.22

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)08-0900-06

Hydraulic characteristics and structure optimization of multi-channels fertilizer machine

LIU Min¹, CHEN Yue-wei²

(1. College of Mathematics and Information Science, Guiyang University, Guiyang 550005, China;

2. College of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: Aiming at the precise fertilization requirements of the water-fertilizer integrated fertilizer machine, the hydraulic characteristics, structural optimization and experimental research of the multi-channels fertilizer were carried out. The fluid simulation software FloEFD was used to research the suction amount and hydraulic characteristics of the multi-channels jet suction pump by analyzing the fluid characteristics of single jet pump and multiple jet pumps in parallel. Then three-channels fertilizer absorber combination with the appropriate suction amount and better hydraulic performance was chosen based on the discipline of the number of channels, the suction amount and the hydraulic characteristics. The structural parameters of three-channels fertilizer absorber were optimized for the same suction amount of per channel and higher than before optimization, in which the proper length between the main pipe and the three jet pumps were determined. At last the prototype was developed for experiments. The experimental results indicate that the maximum relative error of the three-channels experimental suction amount is 2.57%, and the error of the suction amount between the experimental data and the numerical simulation data is less than 5% within a reasonable range, meanwhile the prototype has good stability for long-term operation.

Key words: numerical simulation; fertilizer absorption characteristics; structural optimization; prototype test

0 引 言

水肥一体化技术是一种通过压力管道输送水肥溶

液,集灌溉和施肥于一体的现代农业技术;其具有施肥精准、高效、环境污染小等优点^[1-3]。该技术现已引进国内并推广使用,但是因为水肥一体化技术在国内尚处在发展期,市场上的施肥机的种类大有不同,吸肥设

收稿日期:2020-03-13

基金项目:贵州省教育厅青年科技人才成长项目(黔教合 KY 字[2017]240);贵州省科技厅学术新苗项目(GYU-KJT[2019]-19);贵州省科技厅项目(黔科合支撑[2017]2596);贵阳市科技局-贵阳学院科技专项资金资助项目(GYU-KYZ(2019~2020)RS-07);贵阳国家高新区人才特区建设专项(黔高新 201706)

作者简介:刘敏(1979-),女,贵州六盘水人,副教授,主要从事计算机数值仿真分析及信息化方面的研究。E-mail:83145489@qq.com

备也没有统一的规格,不同施肥机的吸肥量以及吸肥器的水力特性也存在差异。

施肥机吸肥的核心部件多为文丘里式,一些学者对水肥一体化灌溉施肥机吸肥水利特性进行了深入研究。陈囡囡等^[4]对简易型三通道施肥机不同灌溉主管进口压力、流量和吸肥通道开启个数对吸肥量的影响规律进行了研究;田莉等^[5-6]对水肥一体化施肥机不同边界条件下变量吸肥水力特性、“后进前出”模式下水源吸入及水肥混合液稳定输出的效果进行了数值仿真及实验研究;王海涛^[7]对大吸肥量文丘里施肥器结构进行了参数优化与模拟仿真研究,研究成果应用提高了我国水肥一体化施肥机施肥精度。射流泵在实际使用过程中吸入腔内产生能量交换和高速的流体冲击,流体进出口的压差会在吸入腔内产生高频的噪音以及剧烈的震动^[8-9],过大的压差产生的震动会使射流泵产生裂纹以至破碎。此外,农作物对于肥料和水的需求量都有一定的标准;施肥机设备对于灌溉送肥所提供的水压以及流量都有相应要求。优选施肥机工作通道及研究工作时吸肥量以及吸肥设备的水力特性具有重要意义。

针对水肥一体化施肥机精量施肥与应用的要求,本文将开展多通道施肥机水力特性、结构优化的研究并进行试验。

1 工作原理与结构设计

1.1 工作原理

射流泵是利用射流紊动扩散作用,来传递能量和质量的流体机械混合反应设备^[10],其结构如图1所示。

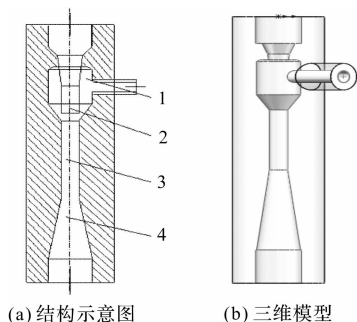


图1 射流泵结构

1—吸入室;2—喷嘴;3—喉管;4—扩散管

射流泵主要由喷嘴、吸入室、喉管和扩散管等组成,射流泵吸肥原理是具有一定压力的水流通过锥形的喷嘴时,水流速度发生快速的改变,速度的极速改变会产生一种负压^[11];肥料溶液在外界大气压以及肥料溶液自身的压力作用下被吸入到射流泵里,离心泵将水肥混合液沿着压力管道输送至田地,从而实现水肥混合灌溉。

1.2 结构设计

笔者拟利用仿真技术,对并联1~5组的吸肥器展开研究,优选出合适的并联吸肥器数目,进行结构优化,并通过样机试验对其进行验证。

并联1-5射流泵吸肥器如图2所示。

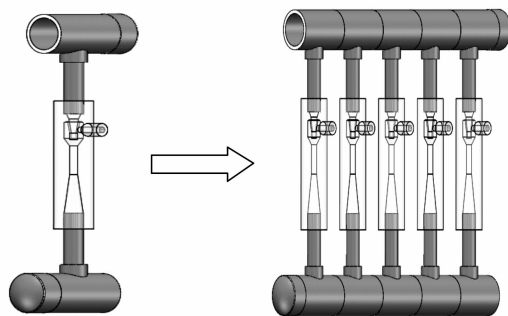


图2 1-5射流泵吸肥器

根据射流泵外部螺纹口的大小,笔者在进、出口两段分别连接一定长度的直径25 mm的PVC管,上部输水和下部混肥的主管道选择50 mm转25 mm的PVC三通,并在三通末端设置50 mm堵头。

2 数学模型构建

2.1 吸肥器主要参数

射流泵用作吸肥器使用时,以流量比、压力比、吸肥效率数值大小来表示其吸肥性能强弱。

(1)流量比为:

$$q = \frac{Q_s}{Q_n} \quad (1)$$

式中: q —流量比; Q_s —吸入口流量; Q_n —工作流体流量。

(2)压力比为:

$$h = \frac{H_c - H_s}{H_n - H_s} \quad (2)$$

式中: h —压力比; H_c —射流泵出口断面总压头; H_s —吸入口断面总压头; H_n —工作进口断面总压头。

(3)效率为:

$$\eta = q \frac{h}{1 - h} \quad (3)$$

式中: η —吸肥效率。

(4)吸肥条件

根据伯努利方程和连续性方程,作为吸肥器吸肥量,射流泵可表示为^[12]:

$$Q_s = A \cdot \sqrt{-2g(h + \frac{p}{\gamma})} \quad (4)$$

式中: A —吸管截面积; h —吸水高度; p —喉管压力。

由式(4)可知,吸入射流泵内的流量随着喉管处

的真空度的变化而变化,只有当 $h + \frac{p}{\gamma} \leq 0$ 时,即射流泵内的压力小于大气压时,射流泵内才会有流体被吸入,达到吸肥目的。

2.2 数值计算

2.2.1 模型选择

根据流体在射流泵内的流动特性,认为流体在整个泵内是湍流流动,湍流模型选取 $RNGk-\varepsilon$ 模型^[13]。

2.2.2 网格划分

由于计算射流泵为水平进水偏向进口的结构形式,其腔内为锥形喷嘴,以及斜面等复杂结构,为提高数值计算的精确性,笔者在网格的划分上利用非结构化网格进行计算,在结构变化大的位置(射流泵的喷嘴、拐角和斜面)进行网格加密处理^[14-17]。

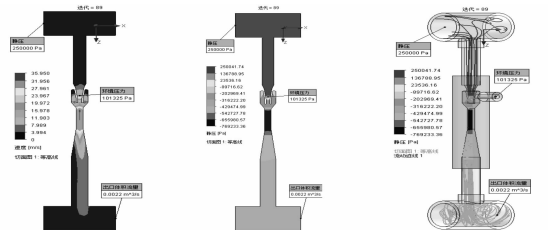
2.2.3 边界条件

吸肥管道的进口设定为压力 0.25 MPa;吸肥管道的出口实际连接的是离心泵的进口端,这里的边界条件设定为出口体积流量 $0.002\ 2\ \text{m}^3/\text{s}$ 。因施肥机吸肥依靠在射流泵内部产生一定的负压,通过外界大气压将肥液吸入射流泵内,射流泵的吸肥口边界条件设置为外界大气压 101 325 Pa。

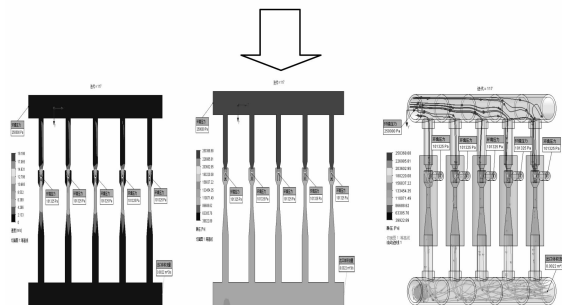
3 仿真结果及分析

3.1 吸肥仿真分析及通道优选

笔者利用 FloEFD 流体仿真分析软件,根据有限体积法对施肥通道进行流体仿真,包括流体速度云图、压力云图,流体流动迹线的 1-5 射流泵流体仿真结果如图 3 所示。



(a) 单射流泵流速、静力及流迹云图



(b) 五射流泵流速、静力及流迹云图

图 3 1-5 射流泵流体仿真结果

通过模拟单射流泵吸肥工作状态,分析单射流泵吸肥时流体仿真结果可知:流体在进入射流泵时因喉管的口径缩小,流体的速度逐渐升高压强也随之降低;在喉管以下位置速度达到最大值约 30 m/s,压强达到最小值并形成负压约 0.7 MPa,该条件射流泵进出口压差为 0.725 MPa。

观察流体迹线图可知,该条件下的吸肥器有一定的吸肥能力且吸肥量较大,吸入的流体体积流量为 5 483.289 6 L/h。

由 2 条射流泵并联吸肥时的流体仿真结果知:在射流泵喷嘴处流体速度达到最大值约 21 m/s,不同于单个射流泵产生高速流体的位置;在射流泵喷嘴下部流体产生一定的负压约 0.4 MPa,射流泵进出口的压力差为 0.27 MPa;两射流泵吸入的流体体积流量分别为 2 076.12 L/h、2 056.32 L/h。

由 3 条射流泵并联吸肥时的流体仿真结果知:在喷嘴下部流体流速约为 20 m/s;3 条射流泵由左右侧分别为 0.036 MPa、0.059 MPa、0.048 MPa,进、出口的压力差为 0.18 MPa;三射流泵吸入的流体体积流量分别为 1 134.01 L/h、1 150.88 L/h、1 144.93 L/h。

由 4 条射流泵并联吸肥时的流体仿真结果知:在射流泵的喷嘴处流体具有最高的流速为 18 m/s;射流泵喉管处产生的压力值为 0.042 MPa、0.011 MPa、0.012 MPa、0.065 MPa,射流泵的进出口的压力差值为 0.14 MPa;4 条并联的射流泵吸入的流体体积流量分别为 493.56 L/h、469.8 L/h、475.92 L/h、502.92 L/h。

由 5 条射流泵并联时吸肥时的流体仿真结果知:在射流泵的喷嘴处流体最高流速为 16 m/s,压力云图在射流泵喷嘴的下边形成一定的负压 0.09 MPa,进出口的压力差为 0.13 MPa;5 条并联射流泵具有一定的吸肥能力,但相对于其他通道数量的吸肥器吸肥能力明显降低,吸入的流体体积流量分别为 145.44 L/h、141.12 L/h、145.44 L/h、180.36 L/h、208.44 L/h。

对比汇总数据,5 种射流泵的吸肥量如表 1 所示。

表 1 5 种射流泵的吸肥量

吸肥器 泵数量	各吸肥通道吸肥量/($\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$)				
	1	2	3	4	5
1 泵	5 483				
2 泵	2 076	2 056			
3 泵	1 134	1 150	1 144		
4 泵	493	469	475	502	
5 泵	145	141	145	180	208

注:射流泵从左至右分别为 1~5 号

根据计算分析结果,考虑到水肥一体化施肥机要求能够实现多种肥液的均匀混合并施用于农业灌溉,

并联1条和2条射流泵的吸肥器虽然能够提供较高的吸肥量,但吸肥过于单一,不能同时施加氮、磷、钾3种必需的农业肥料,并联4条和5条射流泵构成的吸肥器吸肥量较小,施肥效率较低。

5种射流泵的进出口压差如表2所示。

表2 五种射流泵的进出口压差

吸肥器 泵数量	各吸肥管道进出口压差/MPa				
	1	2	3	4	5
1 泵	0.72				
2 泵	0.71	0.69			
3 泵	0.22	0.20	0.21		
4 泵	0.18	0.17	0.15	0.16	
5 泵	0.14	0.12	0.12	0.11	0.10

并联三通道射流泵时,各通道流量适中及压差较小,均匀性较好。

综上所述,笔者选择并联三通道射流泵作为吸肥器设计施肥机,并对其进行必要的结构优化,提高吸肥量及均匀性。

3.2 三通道吸肥量分析

根据原设计结构仿真结果,三通道吸肥器分别为1 134 L/h、1 150 L/h、1 144 L/h,1-3通道吸肥管道的吸肥量存在一定的差异,可通过结构尺寸调整提高各通道吸肥量及其均匀性。

三通道吸肥器流量分布如图4所示。

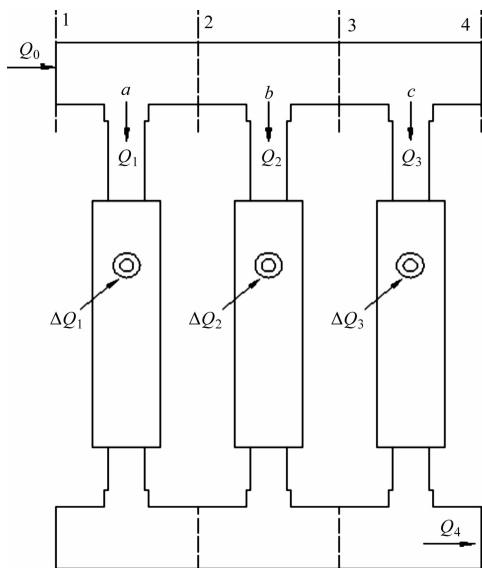


图4 三通道吸肥器流量分布

根据质量守恒定律有:

$$Q_0 = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (5)$$

式中: Q_0, Q_1, Q_2, Q_3 —总流量、1通道流量、2通道流量、3通道流量。

则有:

$$v_0 A_0 = v_1 A_1 + v_2 A_2 + v A_3 \quad (6)$$

式中: v —通道平均流速; A —通道截面积。

图4中1、2、3、4断面的恒定总流量能量方程为:

$$\left. \begin{aligned} Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{a_1 v_1^2}{2g} &= Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{a_2 v_2^2}{2g} + h_{11-2} \\ Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{a_2 v_2^2}{2g} &= Z_3 + \frac{p_3}{\gamma} + \frac{a_3 v_3^2}{2g} + h_{12-3} \\ Z_3 + \frac{p_3}{\gamma} + \frac{a_3 v_3^2}{2g} &= Z_4 + \frac{p_4}{\gamma} + \frac{a_4 v_4^2}{2g} + h_{13-4} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 —1断面高程、2断面高程、3断面高程、4断面高程; p_1, p_2, p_3, p_4 —1断面压力、2断面压力、3断面压力、4断面压力; v_1, v_2, v_3, v_4 —1断面平均流速、2断面平均流速、3断面平均流速、4断面平均流速; a_1, a_2, a_3, a_4 —1断面动能修正系数、2断面动能修正系数、3断面动能修正系数、4断面动能修正系数; $h_{11-2}, h_{12-3}, h_{13-4}$ —1-2断面水头损失、2-3断面水头损失、3-4断面水头损失。

该吸肥器由3条射流泵并联组成,每条射流泵间距相同,因3个管段内都存在流体水头损失,流进每条射流泵的流体流量不相同,提供的能量也不相同,所以3条射流泵的吸肥能力存在差异,需要调整结构尺寸,使吸肥量均匀化。

4 吸肥器结构优化

4.1 理论分析

根据能量损失计算公式有:

$$h_l = h_f + h_m \quad (8)$$

式中: h_l —水头损失; h_f —沿程水头损失; h_m —局部水头损失。

沿程水头损失为:

$$h_f = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (9)$$

式中: λ —沿程阻力系数; l —管长; d —管径; v —断面处平均速度。

局部水头损失为:

$$h_m = \xi \frac{v^2}{g} \quad (10)$$

式中: ξ —局部阻力系数。

分析1-2、2-3、3-4断面水头损失可知,改变三通T型出口两侧的长度缩段主管道长度和吸肥射流泵间距,可降低流体的能量损失,使流入每条射流泵的流体流量和能量趋于一致。

4.2 结构优化

原设计吸肥器主管道是由3个相同的T型三通组成,其结构尺寸示意如图5所示。

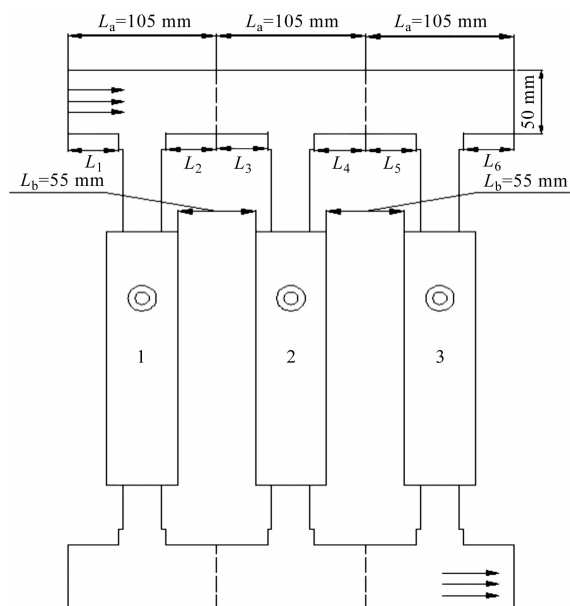


图 5 吸肥器结构尺寸示意

三通长 $L_a = 105$ mm, 内径为 50 mm, 三通 T 型出口两侧长度原设计为 $L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = L_5 = L_6 = 36$ mm。笔者选择该三通作为分析研究的对象, 利用 FloEFD 软件, 按三通两侧长度每次缩减梯度 ΔL , 分别取 $\Delta L_1 = 5$ mm, $\Delta L_2 = 10$ mm, $\Delta L_3 = 15$ mm, $\Delta L_4 = 20$ mm, 分析不同条件下 1、2、3 射流泵的吸肥量。

保持基本模型中的其他结构参数不变, L_2 、 L_4 、 L_6 分别按照 ΔL_1 、 ΔL_2 、 ΔL_3 、 ΔL_4 梯度同时减小, 缩短主管道和 3 条射流泵之间的距离; 对在相同计算边界条件下的数值模拟结果进行分析可知, 当 L_2 、 L_4 、 L_6 减小 15 mm 时, 每条射流泵的吸肥量都趋于一致, 且吸肥量优于优化前; 此时三通道吸肥量分别为 1 151 L/h、1 161 L/h、1 164 L/h。

保持基本模型中的其他结构参数不变, L_1 、 L_3 、 L_5 按照 ΔL_1 、 ΔL_2 、 ΔL_3 、 ΔL_4 梯度同时减小, 缩短主管道和 3 条射流泵之间的距离; 对在相同计算条件下的数值模拟结果进行分析可知, 当 L_1 、 L_3 、 L_5 缩短 15 mm 时, 每条射流泵的吸肥量都趋于相同, 且吸肥量优于优化前; 此时三通道吸肥量分别为 1 159.6 L/h、1 158.1 L/h、1 161.7 L/h。

保持基本模型中的其他结构参数不变, L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 、 L_5 、 L_6 同时减小 15 mm 时, 在相同计算条件下进行数值仿真模拟, 结果显示, 三通道的吸肥量分别为 1 170 L/h、1 180 L/h、1 225 L/h。

对结构参数调整前后吸肥器的吸肥量进行对比可知, 吸肥器结构调整后每条射流泵的吸肥量都有显著提升, 按照 3 条射流泵吸肥量均匀性, 选择主管道所有三通的左侧 L_1 、 L_3 、 L_5 , 同时吸肥器结构缩短 15 mm, 对应三通道吸肥量分别为 1 159.6 L/h、1 158.1 L/h、1 161.7 L/h。

优化后的吸肥器结构如图 6 所示。

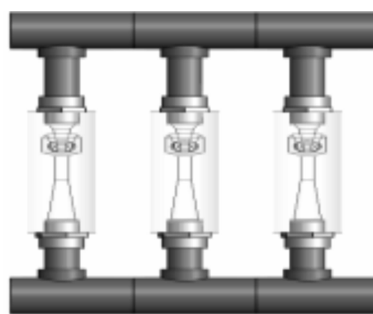


图 6 优化后的吸肥器结构

5 样机试验

5.1 样机构建

根据吸肥器结构, 笔者按照灌溉方式以及流体原理构建的水肥一体化施肥机, 如图 7 所示。



图 7 水肥一体化施肥机

施肥机采用内径 50 mm 的 UPVC 管件, 连接组成吸肥主管道, 其他管道采用内径 25 mm、20 mm 等的 UPVC 管件组装; 离心泵的规格选择 45 m 扬程, 电压 220 V, 功率 2.2 kW。施肥机配套使用 1 600 L/h 的浮子流量计用于监测流量。

为了提高试验的合理性, 施肥机配备 3 个液体肥料桶, 如图 8 所示。



图 8 液体肥料桶

液肥桶通过 16 mm 内径软管分别与施肥机吸肥口相连。为增加试测吸肥量的准确性, 施肥机上搭载成套控制系统通过相应的软件, 实时地记录施肥机吸入的流量。

5.2 试验结果与分析

紧密连接各管道后,接通施肥机工作电源并开启离心泵,开通全部通道,在施肥机运行稳定后,记录浮子流量计的数值。笔者共进行 5 组次试验。

施肥机吸肥量的试验值如表 3 所示。

试验次数	射流泵吸肥量/(L·h ⁻¹)			最大相对误差/(%)
	1	2	3	
1	1 108	1 095	1 110	1.19
2	1 110	1 108	1 114	0.54
3	1 109	1 110	1 109	0.09
4	1 115	1 096	1 112	1.73
5	1 112	1 090	1 118	2.57
最大相对误差/(%)	0.63	0.09	0.18	

由表 3 可知:(1)每次实验 3 个通道流量相对误差较小,最大值为第 5 次实验的 2.57%;(2)同一通道不同次实验吸肥量误差很小;(3)整体上三通道施肥机实际吸肥量均匀,稳定性较好。

笔者记录每组次的最大吸肥量数据,并与仿真实验结果进行比对,结果如表 4 所示。

表 4 吸肥量试验值和仿真值比较			
射流泵	试验吸肥量/(L·h ⁻¹)	仿真吸肥量/(L·h ⁻¹)	误差/(%)
1	1 115	1 159.6	3.8
2	1 110	1 158.1	4.1
3	1 118	1 161.7	3.7

由表 4 可知:3 个通道的实际吸肥量均小于仿真吸肥量,两者数据误差在 5% 范围内,主要原因是实际结构比仿真分析简化结构复杂、沿程损耗较大所致。实际应用中,只要根据实验数据进行差值修正,即可满足农业施肥要求。

6 结束语

本研究利用 FloEFD 软件对并联 1-5 条射流泵构成的吸肥器进行水力特性仿真分析,优选了具有较好吸肥能力和适应性的并联 3 条射流泵吸肥器结构形式;通过优化设计计算,每个 T 型三通出口左侧吸肥管道长度减小了 15 mm,同时提高了 3 个通道的吸肥量及均匀性。

笔者开发了三通道施肥机样机,并进行了试验。试验结果表明:三通道之间实际吸肥量误差小,稳定性较高,实际吸肥量与仿真实验得到的吸肥量两者误差

在合理范围内,可满足农业生产水肥一体化应用需求。

参考文献(References):

- [1] 赵 洪. 水肥一体化技术优势浅析[J]. 现代农业,2017(5):48-49.
- [2] 陈 超,钮力亚,陈 健,等. 农业水肥一体化技术研究进展[J]. 现代园艺,2018(9):88-90.
- [3] 王海亭. 水肥一体化技术在农业生产中的运用[J]. 乡村科技,2019(10):122-124.
- [4] 陈囡囡,朱德兰,柏 杨,等. 水肥一体化灌溉施肥机吸肥性能试验研究[J]. 节水灌溉,2019(5):17-20.
- [5] 田 莉,李家春,赵先锋,等. 水肥一体化施肥机变量吸肥系统的设计与试验[J]. 农机化研究,2019(10):74-79.
- [6] 田 莉,李家春,朱来贺,等. 一种丘陵地区水肥一体化灌溉模式设计研究[J]. 贵州大学学报,2019,36(4):43-47.
- [7] 王海涛. 大吸肥量文丘里施肥器结构参数优化与模拟[D]. 北京:中国水利水电科学研究院水利研究所,2019.
- [8] 李 恺,尹义蕾,侯 永. 中国设施园艺水肥一体化设备应用现状及发展趋势[J]. 农业工程技术,2018,38(4):16-21.
- [9] OZKAN F, OZTURK M, BAYLAR A. Experimental investigations of air and liquid injection by venturi tubes[J]. **Water and Environment Journal**,2006,20(3):114-122.
- [10] 陆宏圻. 喷射技术理论及应用[M]. 1 版. 武汉:武汉大学出版社,2004.
- [11] 吴 波. 液气射流泵性能研究与数值模拟[D]. 成都:西南石油大学机电工程学院,2017.
- [12] 朱自强,钱翼稷,李宗瑞. 普朗特流体力学基础[M]. 11 版. 北京:科学出版社,2008.
- [13] YAKHOT V, SMITH L M. The renormalization group, the-expansion and derivation of turbulence models[J]. **Journal of Scientific Computing**,1992(7):35-61.
- [14] 王松林,王玉川,桂绍波. 液体射流泵内部流动分析: I 试验与三维数值模拟[J]. 排灌机械工程学报,2012,30(6):655-659.
- [15] 崔 伟,高 波,张 宁,等. 内射流对离心泵进口流场及压力脉动影响[J]. 流体机械,2019,47(8):57-60,88.
- [16] 张 棣,董祥伟,李增亮,等. 射流泵内流场数值计算的结构化网格划分方法[J]. 石油矿场机械,2016,45(11):1-7.
- [17] 欧鸣雄,贾卫东,邱白晶,等. 射流泵全特性工况的数值分析及试验研究[J]. 排灌机械工程学报,2016,34(12):1022-1027.

[编辑:程 浩]

本文引用格式:

刘 敏,陈跃威. 多通道施肥机水力特性及其结构优化研究[J]. 机电工程,2020,37(8):900-905.

LIU Min, CHEN Yue-wei. Hydraulic characteristics and structure optimization of multi-channels fertilizer machine[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2020,37(8):900-905.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>