doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.012

水肥一体化灌溉施肥机吸肥器结构优化与性能试验*

刘永华[1,2]　沈明霞[1]　蒋小平[3]　姜宽舒[2]　冯　琦[3]

(1.南京农业大学江苏省现代设施农业技术与装备工程实验室，南京 210031；
2.江苏农林职业技术学院现代园艺工程技术中心，句容 212400；
3.江苏大学流体机械工程技术研究中心，镇江 212013)

摘要：为了优化水肥一体化灌溉施肥机并提高其吸肥性能，在分析文丘里吸肥器工作原理基础上，依据经济流速流量对照表，综合考虑施肥装置及管路系统的沿程损失与局部损失，以吸肥流量为评价指标，应用 CFD 数值计算对影响系统吸肥性能的关键核心部件文丘里吸肥器的渐缩角 α、渐扩角 β、喉部直径 d_0 进行单因素性能优化设计，获得了 3 个主要结构参数对其吸肥性能的影响规律；通过三因素三水平的正交试验方案，得出基于 CFD 数值计算的文丘里吸肥器最优结构参数组合，渐缩角 α 为 20°、渐扩角 β 为 8°、喉部直径 d_0 为 6 mm，且当吸肥管与文丘里主管道呈 40°倾角时吸肥性能最优。模拟数据与水肥一体化灌溉施肥机运行数据表明，CFD 数值优化后的文丘里吸肥器吸肥流量提高约 38.6%，与模糊自动控制系统相配合的水肥一体化灌溉施肥机的吸肥流量总体提高约 47.6%，节能效果显著。

关键词：灌溉施肥机　文丘里吸肥器　结构优化　性能试验

中图分类号：S224.21　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1000-1298(2015)11-0076-06

Structure Optimization of Suction Device and Performance Test of Integrated Water and Fertilizer Fertigation Machine

Liu Yonghua[1,2]　Shen Mingxia[1]　Jiang Xiaoping[3]　Jiang Kuanshu[2]　Feng Qi[3]

(1. *Laboratory of Modern Facility Agriculture Technology and Equipment Engineering in Jiangsu Province*, *Nanjing Agricultural University*, *Nanjing* 210031, *China*
2. *Engineering and Technology Center for Modern Horticulture*, *Jiangsu Polytechnic College of Agriculture and Forestry*, *Jurong* 212400, *China*
3. *Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology*, *Jiangsu University*, *Zhenjiang* 212013, *China*)

Abstract: In order to optimize the integrated water and fertilizer fertigation machine and improve its fertigation performance, the working principle of Venturi injector was analyzed. According to the table of economic flow rate, the frictional loss and local loss of pipeline system as well as fertigation machine were taken into consideration. Taking flow of fertilizer absorption as evaluation index, single factor optimization experiment was carried out on some main parameters in Venturi injector which is the key component in the system by using CFD numerical calculation, including tapered angle α, divergent angle β and throat diameter d_0. The influence rule of three parameters above on fertigation performance was obtained. Then through the orthogonal test with 3-factors and 3-levels, the combination of optimal structure parameters was got with CFD numerical calculation, that means, tapered angle $\alpha = 20°$, divergent angle $\beta = 8°$ and throat diameter $d_0 = 6$ mm. And the best fertigation performance was got when the angle between the

收稿日期：2015-04-01　修回日期：2015-06-01

*国家自然科学基金资助项目(51109098)、江苏省农业科技自主创新资助项目(CX(12)3030)、江苏省农业三新工程资助项目(SXGC[2012]382)和江苏省农机三新工程资助项目(NJ2013-18、NJ2013-28)

作者简介：刘永华，博士生，江苏农林职业技术学院副教授，主要从事智能农业装备研究，E-mail：lyh167@sina.com

通讯作者：沈明霞，教授，博士生导师，主要从事农业电气化与自动化研究，E-mail：mingxia@njau.edu.cn

absorption tube and the main pipe of Venturi was around 40°. Comparing with the simulated data and actual operation data of integrated water and fertilizer fertigation machine, it indicated that the fertigation absorption flow of Venturi was increased by about 38.6% after CFD numerical optimization, and the overall fertilizer absorption flow was increased by about 47.6% with fertigation machine matched with the fuzzy automatic control system. The energy saving effect is remarkable.

Key words: Fertigation machine　Venturi injector　Structure optimization　Performance test

引言

水肥一体化灌溉施肥是将施肥与灌溉紧密结合的农业新技术，它利用灌溉系统将由固体或液体肥料配兑而成的肥液均匀、准确地输入到作物根部的土壤，能有效控制灌溉用水量和施肥量，提高水肥利用效率。水肥一体化灌溉施肥机由供水、供肥、吸肥器、灌溉管网以及自动精准控制装置等组成；系统通过实时监测 EC（电导率）、pH 值（酸碱度）等，计算出供肥流量，并由电磁阀控制吸肥器准确地将肥料养分注入到灌溉管网，从而实现精准灌溉施肥。目前的研究主要集中于系统布置、参数检测以及电控等方面，对于严重影响灌溉施肥效果的吸肥器的研究则相对较少。

文丘里吸肥器结构简单，操作方便，不需要外动力，广泛应用于微灌工程[1-6]，其结构设计与参数优化对灌溉施肥机的吸肥性能、灌溉能力以及灌区植物生长等影响很大。目前商品化的文丘里吸肥器产品结构尚无确定的国家标准，其结构参数不能保证装置的吸肥性能达到最优[7-12]。本文以吸肥流量为吸肥性能响应综合评价指标，应用 CFD 数值计算与流场优化[13-15]等技术对水肥一体化灌溉施肥机的文丘里吸肥器进行单因素分析及三因素三水平正交试验等优化设计，探索应用 CFD 技术优化和提高水肥一体化灌溉施肥机吸肥性能和经济性的可行性。

1　工作原理与结构设计

1.1　工作原理

文丘里吸肥器是基于文丘里原理，即利用水流速度差所产生的压力差将液体肥料吸入施肥管网中的一种施肥装置。具体来讲，就是当水流通过一个由大渐小然后由小渐大的管道时（文丘里管喉部），水流经狭窄部分时流速加大，压力下降，使前后形成压力差，当喉部有一更小管径的入口时，利用形成的负压将肥料溶液从敞口肥料罐通过细管吸取上来；由于这种形式的吸肥器是根据文丘里原理加工制作而成，故称之为文丘里吸肥器。文丘里吸肥器具有以下特点：注入速度取决于所产生负压（即所损耗的压力）的大小，一般地，损耗压力为原始压力的 10% ~75%；利用文丘里吸肥器可实现按比例施肥，保持灌溉过程中养分浓度的恒定；文丘里吸肥器造价低，使用方便，但由于压力损失大，一般用于小面积灌区。

1.2　结构设计

如图 1 所示，文丘里吸肥器主要由收缩段、喉管与扩散段 3 部分组成。其中喉管处尺寸最小，工作水流速达到最大，压力最小。图中 p_1、p_0、p、p_2 分别表示进口、喉部、吸肥口管道、出口处的压力，v_1、v_0、v、v_2 分别表示进口、喉部、吸肥口管道、出口处的流速，Q_1、Q_0、Q、Q_2 分别表示进口、喉部、吸肥口管道及出口处的流量。主要结构参数有：进口直径 d_1、出口直径 d_2、喉管直径 d_0、吸肥口直径 d，渐缩和渐扩段角度 α、β，渐缩和渐扩段长度 L_1、L_2。

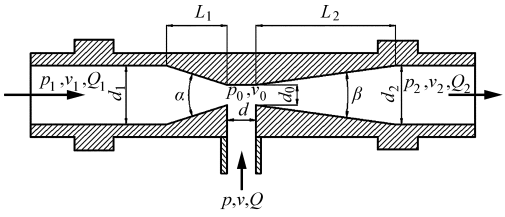

图 1　文丘里吸肥器结构参数示意图

Fig. 1　Sketch map of structure parameters in Venturi fertilizer

初步设计的文丘里吸肥器的主要结构参数为：$\alpha = 24°$，$\beta = 6°$，$d_0 = 6$ mm，$d = 6$ mm。利用 Pro/E 建立了如图 2 所示的文丘里吸肥器物理模型。

图 2　文丘里吸肥器物理模型

Fig. 2　Physical model of Venturi fertilizer

2　吸肥指标与数学模型

2.1　吸肥指标

首先以文丘里管轴线为基准，列进口处和喉部的能量方程

$$Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = Z_0 + \frac{p_0}{\rho g} + \frac{v_0^2}{2g} + h_{w_{1-0}} \tag{1}$$

其中 $Z_1 = Z_0 \quad v_1 = \dfrac{4Q_1}{\pi d_1^2} \quad v_0 = \dfrac{4Q_0}{\pi d_0^2} \quad h_{w_{1-0}} = \zeta_1 \dfrac{\bar{v}_1^2}{2g}$

式中 ρ——常温下水的密度,kg/m^3

ζ_1——渐缩管阻力系数

$\bar{v}_1$——平均流速

$Q_1 = Q_0 = Q$ 由选定的经济流速及管径,通过查经济流速流量对照表确定,p_1 由实验仪器测得;由以上各式可计算出喉部降压后的压力 p_0。在标准大气压下,若不考虑吸肥管的水头损失,根据实际液体恒定流的连续性方程及能量方程可以推导得出吸肥流量计算公式[16]

$$q = A\sqrt{-2g(h + p_0/\gamma)} \tag{2}$$

式中 q——文丘里吸肥器的吸肥流量,m^3/h

h——以肥液面为起点,文丘里吸肥器喉部中心距肥液面的垂直高度,m

A——吸肥管横截面积,m^2

γ——流体体积力,N/m^3

由式(2)可知,文丘里吸肥器的吸肥流量与吸肥管喉部压力、横截面积、吸肥高度等有关。在吸肥管横截面积和吸肥高度不变的条件下,吸肥流量只与喉部压力有关,且当$(h + p_0/\gamma) \geqslant 0$ 时,文丘里吸肥器不能够吸肥;当$(h + p_0/\gamma) < 0$ 时,文丘里吸肥器才能吸肥;当$(h + p_0/\gamma) = C$(常数),即文丘里吸肥器喉部的压力稳定不变时,吸肥流量稳定不变[16]。

2.2 吸肥器数学模型

文丘里吸肥器内部的液体运动可视为不可压缩流体,本文主要研究常温下的内流场分布,温度场基本不变,故不考虑能量交换引起的温度场变化,因此基本控制方程由连续性方程和 Navier - Stokes 方程等构成,它们在直角坐标系中的形式为:

连续性方程
$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{3}$$

Navier - Stokes 方程

$$\begin{cases} \dfrac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla(\rho u \boldsymbol{U}) = -\dfrac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 u + \rho f_x \\ \dfrac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla(\rho v \boldsymbol{U}) = -\dfrac{\partial p}{\partial y} + \mu \nabla^2 v + \rho f_y \\ \dfrac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla(\rho w \boldsymbol{U}) = -\dfrac{\partial p}{\partial z} + \mu \nabla^2 w + \rho f_z \end{cases} \tag{4}$$

其中 $\boldsymbol{U} = u\boldsymbol{i} + v\boldsymbol{j} + w\boldsymbol{k}$

式中 $\boldsymbol{U}$——流体流速

u、v、w——流速在 x、y、z 坐标轴方向的分量

μ——动力黏度系数,Pa·s

f_x、f_y、f_z——质量力在 x、y、z 坐标轴方向分量

当质量力只有重力作用时,$f_x = f_y = 0$,$f_z = -g$。

根据微尺度理论和试验研究可知,在微小尺度下,转捩雷诺数小于宏观尺度,而且在结构弯曲多变的流道内,除了靠近壁面的部分外,其它基本为湍流。因此,可采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型进行数值模拟,其中 k 为湍动能系数,ε 为耗散率[17]。

3 基于 CFD 的吸肥性能优化设计

3.1 网格划分与边界条件设置

网格的数量与质量对 CFD 计算精度等有重要影响。本文使用 ICEM 软件对导入的模型进行网格划分[18],采用全局尺寸为 0.5 的六面体网格,并进行局部加密,划分结果见图 3。网格数 87 万,节点数 76 万。检查网格质量后设置模型边界类型,设置文丘里吸肥器进口为压力进口,吸肥管进口为压力自由液面,吸肥器出口为质量流量出口。

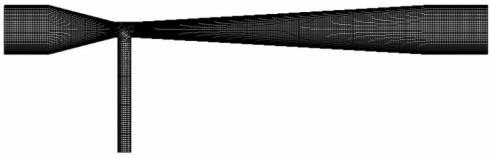

图 3 文丘里结构网格

Fig. 3 Structured grid of Venturi

3.2 渐缩角 α 对吸肥性能的影响

保持基本模型中的其它结构参数不变,改变渐缩角 α,从而收缩段长度也相应发生变化。在相同计算条件下,数值模拟结果见表 1。

表 1 不同渐缩角 α 的文丘里吸肥器吸肥性能

Tab. 1 Fertilizer absorption performance of Venturi fertilizer under different tapered angles α

渐缩角 α/(°)	进口流量/(m^3·h^{-1})	吸肥流量/(m^3·h^{-1})	出口压力/Pa
16	1.709	0.090	43 977
18	1.703	0.096	34 831
20	1.687	0.112	31 602
22	1.696	0.103	33 537
24	1.691	0.102	32 935
26	1.698	0.101	33 902
28	1.696	0.101	33 470

根据表 1 数据绘制如图 4a 所示的吸肥流量 q 随渐缩角 α 变化的曲线图,可知 q 随 α 的增加整体呈现先增大后降低的趋势;这是由于当 α 过小,渐缩段过长,喉部压降不足,从而造成与吸肥口的压差不足,导致吸肥流量减少。当 α 过大,则渐缩段的局部损失增大,造成吸肥流量减小。当 α 在 16°~28°范围内变化时,吸肥流量在 $\alpha = 20°$左右时取得最大值。

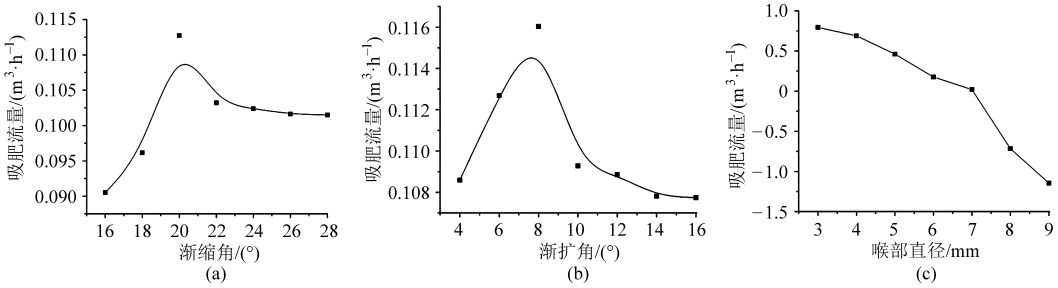

图 4　吸肥流量变化曲线

Fig. 4　Flow changing curves of fertilizer absorption

3.3　渐扩角 β 对吸肥性能的影响

取 $\alpha=20°$，保持其他结构参数不变，改变渐扩角 β，从而扩散段长度也相应发生变化。在相同边界条件下，数值模拟结果见表 2。

表 2　不同渐扩角 β 的文丘里吸肥器吸肥性能

Tab. 2　Fertilizer absorption performance of Venturi fertilizer under different divergent angles β

渐扩角 β/(°)	进口流量/($m^3 \cdot h^{-1}$)	吸肥流量/($m^3 \cdot h^{-1}$)	出口压力/Pa
4	1.691	0.108	60 806
6	1.687	0.112	31 590
8	1.683	0.116	6 778
10	1.695	0.104	−7 272
12	1.691	0.108	−21 978
14	1.694	0.105	−24 617
16	1.690	0.109	−25 997

根据表 2 的数据绘制如图 4b 所示的吸肥流量随渐扩角 β 的变化曲线图，可知文丘里吸肥器的吸肥流量随渐扩角 β 的增加整体呈现先增大后降低的趋势，β 从 4°～16°变化中，吸肥流量在 7°～8°左右时取得最大值。且在 $\beta>8°$后，出口压力为负值，即低于大气压，此时文丘里吸肥器不能正常工作。设计时，β 角不能太小，否则渐扩段过长，沿程水头损失大大增加，且减速增压的效果会降低，使文丘里吸肥器的整体损失增大。所以，取因素最优值 $\beta=8°$。

3.4　喉部直径 d_0 对吸肥性能的影响

根据前面分析，取 $\alpha=20°$、$\beta=8°$，改变喉管直径 d_0。由于喉管直径与吸肥管直径相差太大会使得接口处无法安装，且建模时网格质量太差，影响分析结果，所以默认吸肥管直径与喉部直径相等，即 $d_0=d$。保持边界条件不变，改变文丘里吸肥器的喉部直径 d_0，分析吸肥能力的变化。数值模拟结果见表 3。

根据表 3 数据绘制吸肥流量随文丘里管喉部直径 d_0 的变化曲线图，如图 4c 所示；由表 3 和图 4c 可知，文丘里吸肥器的吸肥流量与喉部直径 d_0 成反比，管道进口流量随喉部直径减小而增大，当喉部直径 $d_0>7$ mm 时，吸肥流量 q 为负值，即此时文丘里管喉部的压力 p_0 大于吸肥管管口的压力（约为一个大气压），根据前面的理论分析，此时的结构装置吸不了肥料。文丘里管道出口压力 p_2 随 d_0 的增大急剧降低。而当喉部直径 $d_0<6$ mm 时，文丘里吸肥器的管道出口压力为负值，即低于大气压力，此时肥料和水的混合液不能流出管道进行灌溉，施肥机装置也不能正常工作。综上所述，建议文丘里吸肥器的喉部直径尺寸取为 $d_0=6$ mm。

表 3　不同喉部直径 d_0 的文丘里吸肥器吸肥性能

Tab. 3　Fertilizer absorption performance of Venturi fertilizer under different divergent throat diameters d_0

喉部直径/mm	进口流量/($m^3 \cdot h^{-1}$)	吸肥流量/($m^3 \cdot h^{-1}$)	出口压力/Pa
3	1.006	0.793	−3 482 990
4	1.110	0.689	−1 058 150
5	1.339	0.460	−283 232
6	1.683	0.116	6 778.86
7	2.263	0.046	122 168
8	2.815	−1.015	127 214
9	3.444	−1.644	129 157

3.5　结构参数正交试验及极差分析

通过前面的单因素分析，分别得出文丘里吸肥器的渐缩角 α、渐扩角 β、喉部直径 d_0 等结构参数对装置吸肥性能的影响。下面通过正交试验的方法，设计出以上因素的最优组合，即具最优吸肥性能的文丘里吸肥器结构参数。

这里采用三因素三水平的正交试验方案[19]，试验的因素水平设计如表 4 所示，试验方案及结果分析如表 5 所示。表中 A、B、C 为因素编码值。

选取吸肥流量 q 为评价指标，在相同的边界条件下，通过 CFX 的数值模拟，得到 9 个文丘里吸肥器结构的参数设计对吸肥量、出口压力的数值模拟结果。为了评价渐缩角 α、渐扩角 β、喉部直径 d_0 等 3 个因素对吸肥流量的影响，找到主要影响因素及优化方案，对正交试验结果进行了极差分析，结果如表 5 所示。

表 4 试验因素及水平

Tab. 4 Factors and levels of experiment

水平	因素		
	α/(°)	β/(°)	d_0/mm
1	20	6	5.5
2	22	8	6.0
3	24	10	6.5

表 5 正交试验设计结果及极差分析

Tab. 5 Results of orthogonal experiment and analysis

序号		因素			q/(kg·s^{-1})	p_2/Pa
		A	B	C		
1		1	1	1	0.079	−72 822.8
2		1	2	2	0.032	10 472
3		1	3	3	−0.046	107 125
4		2	1	2	−0.050	113 218
5		2	2	3	0.086	−141 729
6		2	3	1	0.026	36 779.3
7		3	1	3	0.028	−7 424.83
8		3	2	1	−0.050	115 212
9		3	3	2	0.082	−113 038
q/(kg·s^{-1})	k_1	0.022	0.019	0.018		
	k_2	0.021	0.022	0.021		
	k_3	0.020	0.021	0.020		
	R	0.001 3	0.003 4	0.004 3		
	较优水平	A_1	B_2	C_2		
	主次因素		$A_1B_2C_2$			
p_2/Pa	k_1	0.065	0.057	0.055		
	k_2	0.062	0.068	0.064		
	k_3	0.061	0.063	0.063		
	R	0.004	0.011	0.009		
	较优水平	A_1	B_2	C_2		
	主次因素		$A_1B_2C_2$			

通常情况下,各列的极差 R 是不等的,这表明各因素的水平对试验指标结果影响程度不同。极差 R 越大,表示该列因素的数值在试验范围内的变化对试验指标的影响越大,所以对试验结果影响最大的因素即是极差 R 最大的一列所对应的因素。

由极差分析得到了各结构参数对文丘里吸肥器吸肥流量影响的主次顺序为 C、B、A。就单个因素而言,因素 A 对吸肥流量影响顺序为 A_1、A_2、A_3;因素 B 对吸肥流量影响顺序为 B_2、B_3、B_1,因素 C 对吸肥流量影响顺序为 C_2、C_3、C_1。

综合上述分析,得到最佳组合为 $C_2B_2A_1$,即 $\alpha=20°$,$\beta=8°$,$d_0=6$ mm。根据这些参数设计出最优方案的文丘里吸肥器。

3.6 优化对比

上述吸肥管内液体流向与文丘里管主管道内的液体流向垂直,肥料经喉部吸入时造成的冲击损失较大;经理论分析,如果将吸肥管倾斜一角度,使经由吸肥管的肥液进入文丘里管道后流向与主流基本一致,可以在降低两种不同流速汇合时冲击损失的同时,进一步提高吸肥流量。为了验证,在之前已确定最优结构的基础上,特殊加工了一个吸肥管安放角度可以柔性改变的吸肥器;样机试验数据表明,倾角在 40°时的吸肥流量最大(图 5)。数值模拟得到吸肥管倾斜布置与未倾斜布置的文丘里吸肥器的吸肥性能对比见表 6。可以看出,肥料管倾斜布置的吸肥器吸肥性能最好,吸肥流量比原结构提高约 38.6%。

图 5 文丘里吸肥器最优结构模型

Fig. 5 Optimal model of Venturi fertilizer

表 6 优化设计前后文丘里吸肥器吸肥性能参数对比

Tab. 6 Fertilizer absorption performance of Venturi fertilizer before and after optimization m^3/h

吸肥器结构类型	进口流量	吸肥流量
原有结构	1.696	0.083
正交优化	1.683	0.106
吸肥管斜放	1.639	0.115

优化设计前后文丘里吸肥器内部压力分布及流场情况如图 6 所示。

由图 6 的压力及速度分布云图可知,优化后的文丘里吸肥器内部流动状态比优化前好,且吸肥流量明显提高。

综上所述,改进后的文丘里吸肥器的最优结构参数为渐缩角 $\alpha=20°$,渐扩角 $\beta=8°$,喉部直径 $d_0=6$ mm,吸肥管与文丘里主管道呈一定倾角(约为 40°)。

4 应用

将结构参数优化后的文丘里吸肥器应用到所开发的无土栽培微灌示范工程的水肥一体化灌溉施肥机中(图 7),通过与图 8 所示的水肥一体化灌溉施肥机模糊自动控制系统相配合,整个系统吸肥流量总体提高约 47.6%。该系统各运行参数正常,节能效果显著。

5 结论

(1)应用 CFD 数值计算对影响系统吸肥流量的文丘里吸肥器的渐缩角 α、渐扩角 β 以及喉部直径 d_0 进行单因素优化设计,分别获得了各参数对吸肥

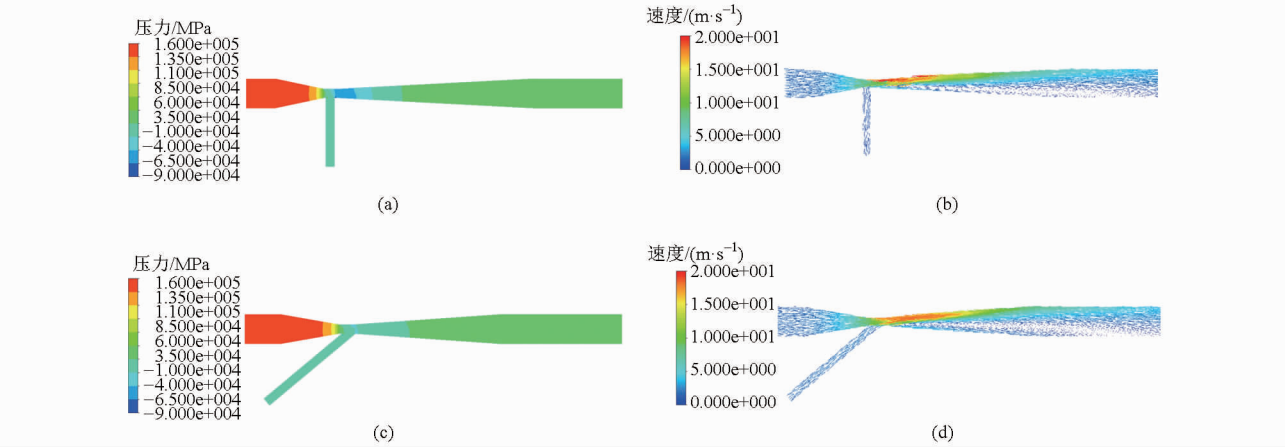

图 6　优化前后文丘里吸肥器内部压力分布及流场情况

Fig. 6　Pressure distribution and flow field in Venturi fertilizer before and after optimization

（a）优化设计前压力分布云图　（b）优化设计前速度矢量图　（c）优化设计后压力分布云图　（d）优化设计后速度矢量图

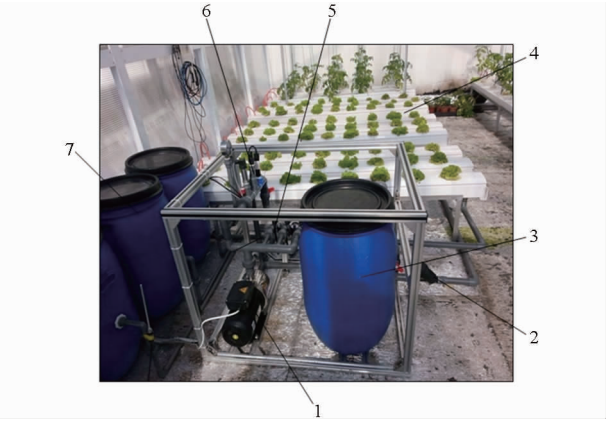

图 7　水肥一体化灌溉施肥机应用现场

Fig. 7　Application of integrated water and fertilizer fertigation machine

1. 自吸泵　2. 过滤器　3. 肥液混合罐　4. 作物栽培槽　5. 电磁阀　6. 文丘里吸肥器　7. 肥料罐

性能的影响规律。

（2）通过参数正交试验设计出了基于 CFD 数值计算的文丘里吸肥器最优结构参数组合，模拟吸肥流量比原型提高约 38.6%。

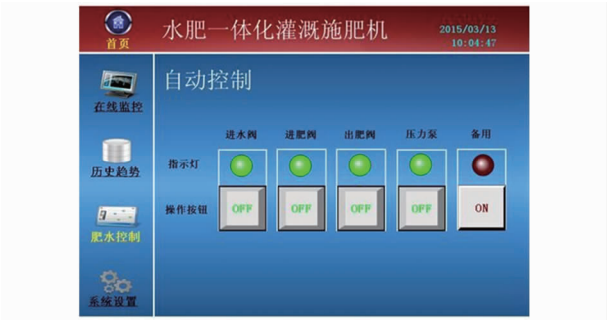

图 8　水肥一体化灌溉施肥机模糊控制系统

Fig. 8　Fuzzy control system of integrated water and fertilizer fertigation machine

（3）将性能优化设计后的文丘里吸肥器应用到新开发的水肥一体化灌溉施肥机中，通过与模糊自动控制系统相配合，试验吸肥流量比原型总体提高约 47.6%，节能效果显著。

参　考　文　献

1　张丽莹，王荣莲，张俊生，等. 水肥耦合对温室无土栽培黄瓜氮代谢的影响[J]. 园艺学报，2011，38(5)：893－902.
Zhang Liying, Wang Ronglian, Zhang Junsheng, et al. Effects of water and fertilizer coupling on nitrogen me-tabolism of cucumber under soilless culture in green-house[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2011, 38(5): 893－902. (in Chinese)

2　李久生，杜珍华，栗岩峰. 地下滴灌系统施肥灌溉均匀性的田间试验评估[J]. 农业工程学报，2008，24(4)：83－87.
Li Jiusheng, Du Zhenhua, Li Yanfeng. Field evaluation of fertigation uniformity for subsurface drip irrigation systems [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(4): 83－87. (in Chinese)

3　Yuan Z, Choi C Y, Waller P M, et al. Effects of liquid temperature and viscosity on Venturi injectors [J]. Transactions of the ASAE, 2000, 43(6): 1441－1447.

4　Neto I E L, Porto R D M. Performance of low-cost ejectors [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2004, 130(2): 122－128.

5　Roberto V, Montoya Y E. Operation setting nomograms for unidrench Venturi injector[J]. Agronomía Colombiana, 2010, 28(2): 303－318.

6　Hanson B, O'Connell N, Hopmans J, et al. Fertigation with microirrigation[M]. Santa Barbara, CA: University of California, 2006: 43－50.

7　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.

（下转第 48 页）

5 杜立恒,俞高红,张国凤,等.高速插秧机钵体毯状苗纵向送秧装置的设计与试验[J]. 农业工程学报,2014,30(14):17 - 23.
Du Liheng, Yu Gaohong, Zhang Guofeng, et al. Design and experiment of vertically feeding-seedling device for pot-blanket seedling based on high-speed rice transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(14): 17 - 23. (in Chinese)
6 宋建农,黄育仕,魏文军,等. 水稻钵苗对辊式拔秧机构[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2006,27(4):92 - 94.
Song Jiannong, Huang Yushi, Wei Wenjun, et al. Evulsing rice potted-seedling mechanism equipped with double roller[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2006, 27(4): 92 - 94. (in Chinese)
7 陈恒高,田金和,宋来田. 机械手式水稻抛秧机的研究[J]. 农业机械学报,1998,29(3):48 - 52.
Chen Henggao, Tian Jinhe, Song Laitian. Study on rice seeding throwing transplanter of manipulater type[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1998, 29(3): 48 - 52. (in Chinese)
8 肖丽萍. 基于空间机构的水稻钵苗精准栽植机构的研究[D]. 北京:中国农业大学,2007.
Xiao Liping. Research on the mechanism of the rice seedling transplanting mechanism based on spatial mechanism[D]. Beijing: China Agricultural University, 2007. (in Chinese)
9 潘显武,孔令有. 钵苗水稻插秧机:中国,200820072816.5[P]. 2009 - 12 - 09.
10 尹大庆,张敏. 钵苗移栽纵向送秧机构:中国,201310154750X[P]. 2013 - 04 - 28.
11 裘利钢. 蔬菜钵苗自动移栽机送苗装置的设计与分析[D]. 杭州:浙江理工大学,2011.
Qiu Ligang. The design and analysis of seedling feeding device of the automatic transplanting machine for vegetable bowl[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-tech University, 2011. (in Chinese)
12 赵匀,宋志超. 齿轮驱动钵苗移栽纵向送秧机构:中国,2013106210314[P]. 2013 - 11 - 29.
13 钱瑞明. 齿式棘轮的精确设计[J]. 机械科学与技术,1993(6):19 - 21.
Qian Ruiming. Precise design of tooth type ratchet [J]. Mechanical Science and Technology, 1993(6): 19 - 21. (in Chinese)
14 濮良贵,纪名刚. 机械设计[M]. 北京:高等教育出版社,2011.
15 赵匀. 农业机械分析与综合[M]. 北京:机械工业出版社,2008.
16 成大先. 机械设计手册[M]. 北京:机械工业出版社,2010.
17 张成军. 实验设计与数据处理[M]. 北京:化学工业出版社,2009.

(上接第 81 页)

8 严海军,初晓一,王敏,等. 微灌系统文丘里施肥器吸肥性能试验[J]. 排灌机械工程学报,2010,28(3):251 - 255.
Yan Haijun, Chu Xiaoyi, Wang Min, et al. Injection performance of Venturi injector in micro-irrigation system[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(3): 251 - 255. (in Chinese)
9 孙艳琦. 文丘里施肥器结构参数对吸肥性能的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
Sun Yanqi. Effects of Venturi structural parameters on the absorption fertilizer performance [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010. (in Chinese)
10 李百军,毛罕平,李凯. 并联文丘里管吸肥装置的研究及其参数选择[J]. 排灌机械, 2001, 19(1): 42 - 45.
Li Baijun, Mao Hanping, Li Kai. A study on the parallel connection Venturi tube and its parameter selection [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2001, 19(1): 42 - 45. (in Chinese)
11 Huang Xingfa, Li Guangyong, Wang Miao. CFD simulation to the flow field of Venturi injector[J]. IFIP Advances in Information and Communication Technology, 2009, 294: 805 - 815.
12 韩启彪,黄兴法,范永申,等. 6 种文丘里施肥器吸肥性能比较分析[J]. 农业机械学报, 2013, 44(4):113 - 117
Han Qibiao, Huang Xingfa, Fan Yongshen, et al. Comparative analysis on fertilization performance of six Venturi injectors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 113 - 117. (in Chinese)
13 单德东. 新产品设计开发中的标准化[J]. 机械工业标准化与质量,2004(4):17 - 18.
14 王淼. 文丘里施肥器性能与结构参数优化研究[D]. 北京: 中国农业大学,2006.
Wang Miao. Numerical simulation of characteristics of Venturi injector[D]. Beijing: China Agricultural University, 2006. (in Chinese)
15 严海军,初晓一. 喉管直径对文丘里施肥器性能影响的数值模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(4): 359 - 363.
Yan Haijun, Chu Xiaoyi. Numerical simulation for influence of throat diameter on Venturi injector performance [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(4): 359 - 363. (in Chinese)
16 封俊,沈雪民,刘春和,等. 文丘里滴灌施肥器水力性能的研究[J]. 喷灌技术,1992(1):41 - 43.
Feng Jun, Shen Xuemin, Liu Chunhe, et al. Research of Venturi fertigation device hydraulic performance[J]. Sprinkler Technology, 1992(1): 41 - 43. (in Chinese)
17 王福军. 计算流体动力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
18 孙帮成,李明高. ANSYS FLUENT 14.0 仿真分析与优化设计[M]. 北京:机械工业出版社,2013.
19 沈艳宁,袁寿其,陆伟刚,等. 复合叶轮离心泵数值模拟正交试验设计方法[J]. 农业机械学报,2010,41(9): 22 - 26.
Shen Yanning, Yuan Shouqi, Lu Weigang, et al. Orthogonal test design method based on numerical simulation for non-overload centrifugal pump with complex impeller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(9): 22 - 26. (in Chinese)