

张晓明, 鲍安红, 谢守勇, 等. 基于 Fluent 的文丘里管结构参数对吸肥性能的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(18): 208–210.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.18.053

基于 Fluent 的文丘里管结构参数对吸肥性能的影响

张晓明, 鲍安红, 谢守勇, 邱振宇

(西南大学工程技术学院, 重庆 400715)

摘要:为优化文丘里施肥器设计, 研究了渐缩角 α 、渐扩角 β 和喉管直径 d 等结构参数对文丘里施肥器吸肥性能的影响。基于流体的连续方程、Navier–Stokes 方程和标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型, 通过改变渐缩角 α 、渐扩角 β 和喉管直径 d 等文丘里管结构参数的值, 采用有限元分析软件 Fluent 进行数值模拟, 根据总流量和吸肥浓度的数值, 发现 $\alpha = 25^\circ$ 、 $\beta = 7^\circ$ 、 $7\text{ mm} \leq d \leq 11\text{ mm}$ 时吸肥性能最佳; 利用分析软件 Matlab 对模拟得到的数据进行拟合, 得到了单个参数与总流量和吸肥浓度的函数关系, 以及渐缩角 α 、渐扩角 β 和喉管直径 d 与文丘里施肥器总流量和吸肥浓度之间的综合函数关系式, 通过分析综合函数关系式, 得到了各个参数对总流量及吸肥浓度影响的百分比, 得出喉管直径 d 对支管流量、吸肥性能的影响最显著, 渐缩角 α 的影响最小的结论。

关键词: Fluent; 文丘里管; 结构参数; 总流量; 吸肥浓度

中图分类号: S224.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)18-0208-03

文丘里施肥器是目前最常用的灌溉施肥装置之一, 该施肥器利用文丘里管产生的压力差吸取液肥, 具有构造简单、运行成本低、维护方便等优点^[1-4]。但国产产品性能与国外相比仍有较大差距, 主要体现在性能稳定性欠缺、工作压力范围窄、系列化程度低等方面, 因而很有必要对文丘里施肥器结构参数进行优化设计。

目前, 国内外学者对文丘里管的结构参数对其水力性能的影响进行了大量研究。孔令阳等通过试验对文丘里施肥器吸肥性能进行了研究, 分析了吸肥流量与喉部负压、进出口压力与进口流量间的关系^[5]。林棋采用数值模拟方法, 分析了收缩锥角与喉部缩径比对内流场的影响^[6]。孙艳琦等分析了结构参数与最小压力和进出口压力的关系, 提出了文丘里管结构参数的优化建议^[7]。但文丘里管结构参数对吸肥效率影响的研究依旧非常薄弱, 许多学者主要进行试验研究, 研究效率偏低; 部分学者使用有限元分析软件进行数值模拟, 且主要从水力性能方面进行研究, 还没有根据流量和吸肥浓度综合分析进行文丘里管结构参数优化。因此, 为了设计出经济、高效的文丘里施肥器, 本研究以文丘里管为研究对象, 采用数值模拟的方法研究渐缩管、喉管和渐扩管 3 部分对文丘

里管总流量和吸肥性能的影响, 以为文丘里施肥器的优化设计提供合理的依据。

1 理论与方法

1.1 物理模型

文丘里管的结构模型如图 1 所示。

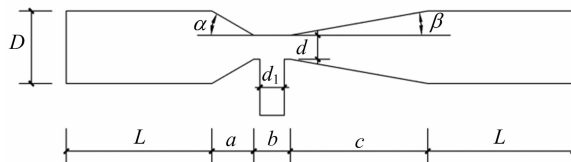


图1 文丘里管结构示意图

图 1 中, 文丘里管由渐缩管、喉管和渐扩管 3 部分组成。 D 为主管管径 (mm), L 为主管段长度 (mm), a 为渐缩段长度 (mm), b 为喉管段长度 (mm), c 为渐扩段长度 (mm), d 为喉管管径 (mm), d_1 为吸肥管管径 (mm), α 为渐缩角锥度 ($^\circ$), β 为渐扩角锥度 ($^\circ$)。取主管直径 $D = 15\text{ mm}$, 喉管段长度 $b = 10\text{ mm}$, 喉管与吸肥管为同径管, 吸肥管长度为 800 mm 。

1.2 数学模型

为了突出文丘里施肥器结构参数变化对文丘里管内部流场的影响, 数值模拟研究采用以下假设:

(1) 文丘里管中的水流可视为稳定的不可压缩流体。

(2) 忽略水流过管道时与外界的热交换, 且不考虑重力作用。

收稿日期: 2017-03-16

基金项目: 国家星火计划 (编号: 2013GA811002); 重庆市应用开发计划 (编号: cstc2013yykfa80009)。

作者简介: 张晓明 (1992—), 男, 重庆开县人, 硕士研究生, 主要从事农业水土工程及相关研究。E-mail: zhangxmswu@163.com。

通信作者: 鲍安红, 博士, 教授, 主要从事节水灌溉设备的研究。E-mail: baoanhong1969@163.com。

[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(16): 27–31.

[17] 吴晓蓉. K 均值聚类算法初始中心选取相关问题的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2008.

[18] 赖玉霞, 刘建平, 杨国兴. 基于遗传算法的 K 均值聚类分析[J]. 计算机工程, 2008, 34(20): 200–202.

[19] 李莎, 钱建平, 赵春江, 等. 不同颜色模型识别成熟苹果图像的比较分析[J]. 计算机工程与设计, 2015, 36(6): 1545–1550.

[20] Camargo A, Smith J S. An image-processing based algorithm to automatically identify plant disease visual symptoms[J]. Biosystems Engineering, 2009, 102(1): 9–21.

(3) 由于文丘里管长度较短,因此在计算水头损失时,可以忽略沿程摩阻引起的水头损失。

文丘里管中的流体都应符合质量和动量守恒定律,因此其基本控制方程可由连续方程和 Navier-Stokes 方程来表达^[8]。

连续方程为:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (1)$$

式中: u 、 v 、 w 是速度矢量 U 在 x 、 y 、 z 轴的分量。

Navier-Stokes 方程为:

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla(\rho u U) = \nabla(\mu \text{grad} u) - \frac{\partial p}{\partial x} + F_x \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla(\rho v U) = \nabla(\mu \text{grad} v) - \frac{\partial p}{\partial y} + F_y \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla(\rho w U) = \nabla(\mu \text{grad} w) - \frac{\partial p}{\partial z} + F_z \end{cases} \quad (2)$$

式中: p 是微元体上的压力; F_x 、 F_y 和 F_z 是微元体上的体力,若体力只有重力,且 z 轴竖直向上,则 $F_x = 0$, $F_y = 0$, $F_z = -\rho g$; μ 是运动黏度, ρ 是水的密度。

1.3 网格划分

选用软件 Design Modeler 建立文丘里管三维模型,其中 $\alpha = 25^\circ$, $\beta = 10^\circ$, $d = d_1 = 5 \text{ mm}$ 。采用 SIMPLE 算法,标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型进行模拟,迭代残差小于 0.0001 ^[9-10]。边界条件选用压力入口和压力出口,设定入口端为压力入口,出口端为压力出口,吸肥支管端为压力入口。边界条件设置后开始迭代求解,计算结果均收敛。文丘里管三维模型如图 2 所示。

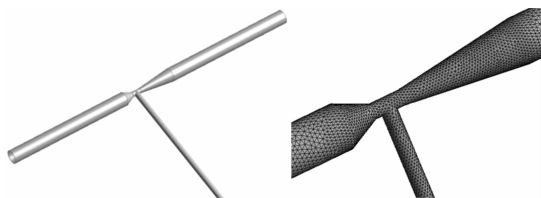


图2 文丘里管几何模型与网格划分

参照文献[11],在进口压力为 16 kPa 时试验得到的吸肥量为 62.4 L/h,在相同条件下模拟得到的吸肥量为 64.1 L/h,与试验所得数据相比,相对误差为 2.72%。因此,可以认为本模型在模拟计算吸肥量时,计算结果是可靠的。

2 结果与分析

2.1 施肥器渐缩角 α 对吸肥浓度的影响

在相同进出口压力条件下,取 $\beta = 10^\circ$, $d = d_1 = 5 \text{ mm}$,改变渐缩角 α ($17^\circ \sim 31^\circ$),模拟得到的数据如图 3 所示。

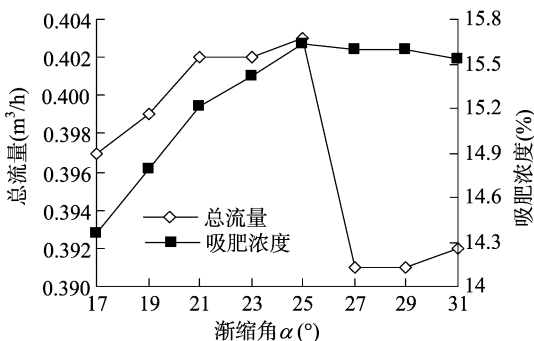


图3 渐缩角 α 对总流量及吸肥浓度的影响

从图 3 可以看出,当 $17^\circ \leq \alpha < 25^\circ$ 时,总流量随着渐缩角的增大而增大,但增大的幅度逐渐变小; $25^\circ \leq \alpha < 27^\circ$ 时,总流量随着渐缩角的增加急剧下降,之后逐渐趋于平稳。支管吸肥浓度随着渐缩角的增大而增大,在 $\alpha = 25^\circ$ 时达到最大值。在文丘里施肥器的设计过程中,为了使施肥器经济高效地运行,应尽量保证支管在高效输送液肥的同时仍保持较高的浓度,因此渐缩角的优选区间为 $21^\circ \leq \alpha \leq 25^\circ$,取 $\alpha = 25^\circ$ 时,文丘里施肥器总流量与吸肥浓度都达到最大值,因而具有最佳的吸肥效率。对图 3 中的数据进行回归分析,得到渐缩角 α 与总流量、吸肥浓度的函数关系式为:

$$Q_1 = -18\ 831\alpha^6 + 47\ 183\alpha^5 - 48\ 761\alpha^4 + 26\ 602\alpha^3 - 8\ 080.6\alpha^2 + 1\ 296\alpha - 85.361 \quad (r^2 = 0.9279);$$

$$C_1 = -39.389\alpha^2 + 37.642\alpha + 6.6632 \quad (r^2 = 0.9942).$$

式中: α 的单位取弧度; Q_1 为总流量, m^3/h ; C_1 为支管吸肥浓度 (%); r^2 是方程拟合度。

2.2 施肥器渐扩角 β 对吸肥浓度的影响

在相同的计算条件下,取 $\alpha = 25^\circ$, $d = d_1 = 5 \text{ mm}$,改变渐扩角 β ($3^\circ \sim 17^\circ$),模拟得到的数据如图 4 所示。

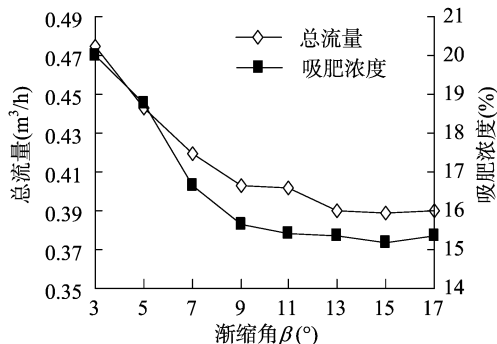


图4 渐扩角 β 对总流量及吸肥浓度的影响

从图 4 可以看出,总流量、吸肥浓度与渐扩角呈负相关关系, $3^\circ \leq \beta < 9^\circ$ 时总流量与渐扩角呈线性关系,吸肥浓度的减小趋势逐渐变缓; $\beta \geq 9^\circ$ 时,总流量与吸肥浓度减小的幅度变缓趋于稳定。在设计文丘里施肥器时,应尽量使施肥器具有较大的流量与吸肥浓度,以满足施肥要求。当 $\beta < 7^\circ$ 时,结构较长,压力损失反而增加,选取 $\beta \geq 7^\circ$ 的情况下,文丘里管吸肥效果好^[7]。因此渐扩角的优选区间为 $7^\circ \leq \beta \leq 9^\circ$,当 $\beta = 7^\circ$ 时输送肥料与吸肥效果最佳,回归分析得到的渐扩角 β 与支管流量、吸肥浓度的关系分别为:

$$Q_2 = 2.1112\beta^2 - 1.0631\beta + 0.5217 \quad (r^2 = 0.9866);$$

$$C_2 = 147.44\beta^2 - 69.983\beta + 23.329 \quad (r^2 = 0.9775).$$

式中: β 的单位取弧度; Q_2 为总流量, m^3/h ; C_2 为支管吸肥浓度 (%); r^2 是方程拟合度。

2.3 施肥器喉管直径 d 对吸肥浓度的影响

在相同计算条件下,取 $\alpha = 25^\circ$, $\beta = 7^\circ$, $d = d_1$,改变 d ($5 \sim 12 \text{ mm}$),模拟得到的数据如图 5 所示。

从图 5 可以看出,总流量、吸肥浓度都与喉管直径 d 呈正相关关系,随着喉管直径的增大,总流量、吸肥浓度都增大。随着喉段收缩比 (d/D) 的增大,文丘里管的吸力会逐渐减弱,当 $d > 11 \text{ mm}$ 时,流量与吸肥浓度增加的幅度变缓基本趋于稳定。因此喉管直径的优选区间为 $7 \text{ mm} \leq d \leq 11 \text{ mm}$,根据

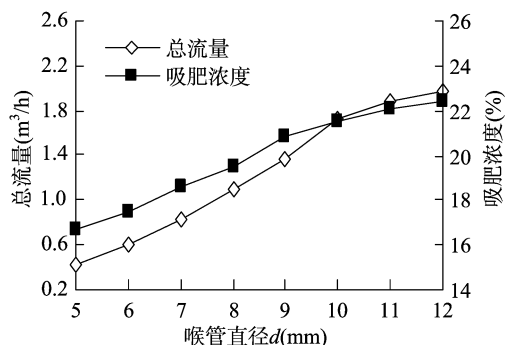


图5 喉管直径 d 对总流量及吸肥浓度的影响

模拟数据回归分析得到的喉管直径 d 与总流量、吸肥浓度的关系分别为:

$$Q_3 = -14.866d^2 + 18.304d - 1.1257 (r^2 = 0.9882);$$

$$C_3 = -181.94d^2 + 103.48d + 8.8238 (r^2 = 0.9926).$$

式中: d 的单位为 mm ; Q_3 为总流量, m^3/h ; C_3 为支管吸肥浓度(%); r^2 是方程拟合度。

2.4 综合分析施肥器结构参数对吸肥浓度的影响

根据上诉数据,使用 Matlab 进行多元回归分析,得到主管径为 15 mm 时,总流量和吸肥浓度分别与渐缩角 α 、渐扩角 β 和喉管直径 d 的计算公式为:

$$Q = -0.0262\alpha - 0.2143\beta + 13.6518d - 0.7425 (r^2 = 0.9943);$$

$$C = 6.2239\alpha - 18.3681\beta + 48.8455d + 12.1799 (r^2 = 0.9138).$$

回归得到的计算公式均为三元一次方程,根据各个变量的系数即可知道各个参数分别对函数的影响大小,参数的影响百分比如图6所示。

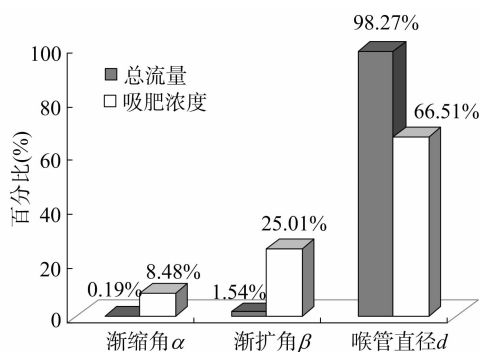


图6 文丘里管结构参数对总流量及吸肥浓度的影响百分比

从图6可以看出,喉管直径 d 对总流量的影响很大,达到

了98.27%,渐缩角 α 与渐扩角 β 对总流量的影响可以忽略不计。而文丘里管的结构参数渐缩角 α 、渐扩角 β 和喉管直径 d 对施肥浓度的影响都是不可忽视的,其中喉管直径 d 的影响最为显著,渐缩角 α 的影响最小。

3 结论

文丘里管总流量随着渐缩角 α 的增大先增后降,吸肥浓度与 α 呈正相关,但角度越大增长幅度越小。 $\alpha = 25^\circ$ 时,总流量与吸肥浓度都为最大值,因而具有最佳的吸肥性能。

总流量和吸肥浓度都与渐扩角 β 成反比,随着渐扩角 β 的增大,流量和浓度减小幅度变缓。 $\beta < 7^\circ$ 时,渐扩段较长,局部水头损失大,因此建议取 $\beta = 7^\circ$ 。

总流量和吸肥浓度都与喉管直径 d 成正比,增加幅度随着直径的变大逐渐变缓,因此最佳取值区间为 $5\text{ mm} \leq d \leq 11\text{ mm}$ 。在文丘里施肥器的设计中,应根据实际工程需要选择合适的喉管直径。

结构参数对总流量以及吸肥浓度的影响程度为:喉管直径 $d >$ 渐扩角 $\beta >$ 渐缩角 α 。

参考文献:

- [1] 韩丽娜,汪小岳. 文丘里施肥器水肥分布分析[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(3): 385-387.
- [2] 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.
- [3] 严海军,陈燕,徐云成,等. 文丘里施肥器的空化特性试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(8): 724-728.
- [4] 冯瑞珏,洪添胜,李加念,等. 文丘里施肥器控制性能试验分析[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(6): 11-14.
- [5] 孔令阳,范兴科. 文丘里施肥器喉部负压的影响因素分析[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(6): 78-82.
- [6] 林棋,娄晨. 基于ANSYS-CFX基于的文丘里管水力特性数值研究[J]. 石油工业技术监督, 2014, 30(6): 41-45.
- [7] 孙艳琦,牛文全. 文丘里管结构参数对其水力性能的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(2): 211-218.
- [8] 王福军. 计算流体力学分析-CFD软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004: 7-9.
- [9] 邱振宇,鲍安红. 施肥器结构参数对施肥浓度影响的数值研究——基于并联式文丘里施肥器[J]. 农机化研究, 2012, 34(4): 42-45.
- [10] 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.
- [11] 沙毅,侯素娟. 并联式文丘里管施肥器试验研究[J]. 排灌机械, 1995(2): 37-39.