摇臂式喷头内流道流场数值模拟*

韩文霆^{1,2} Nguyen Van Lanh^{1,3} 徐 琳¹

(1.西北农林科技大学机械与电子工程学院,陕西杨凌 712100;2.西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院,陕西杨凌 712100;3.胡志明农林大学工程技术学院,胡志明 70000,越南)

【摘要】 用 Pro/E 软件建立喷头内流道的三维实体模型,选择 RNG k - e 模型在 CFD 软件 Fluent 中模拟了雨 鸟 30PSH 型摇臂式喷头在 10 种入口压力和 4 种主喷嘴直径组合下的内流道流场,分析了喷头主副喷嘴的流量、入 口压力与出口平均速度等参数的关系。研究结果表明:主喷嘴直径增大时,副喷嘴流量几乎不变;主、副喷嘴的流 量分配比例由主喷嘴直径决定,与入口压力无关。入口压力增大,主喷嘴出口平均速度增大,但副喷嘴出口平均速 度不变。喷头主、副喷嘴的平均湍动能随入口压力增大,不受主喷嘴直径变化的影响。主喷嘴出口静压力、 湍动能和速度的标准差、副喷嘴出口静压力标准差与入口压力近似成正比;而副喷嘴出口湍动能和速度的标准差 随主喷嘴直径或入口压力增大产生较大的无规律变化。喷头内流道流场的可视化结果显示喷头副喷嘴与弯管连 接处静压力较大,接近喷头入口静压力。

关键词:喷头 流场 计算流体动力学 数值模拟 中图分类号:S22;TK72 文献标识码:A 文章编号:1000-1298(2011)08-0058-07

Investigations on Internal Flow Characteristics of Impact Sprinkler Based on Numerical Simulation Method

Han Wenting^{1,2} Nguyen Van Lanh^{1,3} Xu Lin¹

(1. College of Mechanical and Electric Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. Institute of Water Saving Agriculture in Area Regions of China, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
3. Faculty of Engineering and Technology, Nong Lam University, Ho Chi Minh 70000, Vietnam)

Abstract

The geometric model of internal runner was constructed in Pro/E software. The internal flow field of the Rain Bird 30PSH impact sprinkler was conducted by using computational fluid dynamics (CFD) software Fluent with RNG $k - \varepsilon$ model at ten different pressure values and four types of range nozzle. Relationship between flow rate, inlet pressure and average velocity of outlet of range and spreader nozzle were evaluated. The results showed the flow rate of spreader nozzle was almost the same regardless of shifting the diameter of range nozzle. The distribution between range and spreader nozzle depended on the diameter of range nozzle was independent with inlet pressure. The average velocity magnitude of the range nozzle increased with the increasing of inlet pressure but spreader nozzle would not. The turbulent kinetic energy of range and spreader increased with the increasing of inlet pressure was independent with nozzle size. The standard deviation of static pressure, turbulent kinetic energy, velocity of range nozzle and static pressure of spreader nozzle were almost in direct proportion to inlet pressure. Biggish and irregular changing was happened to standard deviation of turbulent kinetic energy and velocity of spreader nozzle. Flow field visualization indicated that joint of runner and spreader nozzle had maximal static pressure.

Key words Sprinkler, Flow field, Computational fluid dynamics, Numerical simulation

收稿日期:2011-02-25 修回日期:2011-03-28

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51079140)和西北农林科技大学基本科研业务费资助项目(Z109021008)

作者简介:韩文霆,副研究员,博士生导师,主要从事节水灌溉装备研究,E-mail: hanwt2000@126.com

59

引言

合理的喷头结构不仅对喷灌水量的均匀分布有 重要作用,而且能降低喷头工作压力,降低能耗。近 年来,计算流体动力学(CFD)已经被广泛用于流场 的模拟与可视化研究^[1-3],成功地应用于水力旋流 过滤器、管接头、滴头和单喷嘴喷头等产品的设计开 发^[4-5]。

Haijun Yan 等对多种入口压力下单喷嘴喷头的 流量特性进行了 CFD 数值模拟^[6-7]。本文对雨鸟 30PSH 型双喷嘴摇臂式喷头的流量特性进行 CFD

图 1 雨鸟 30PSH 型摇臂式喷头模型及网格 Fig. 1 Model and meshes of Rain Bird 30PSH impact sprinkler (a) 喷头内流道的二维模型 (b) 副喷嘴 (c) 三维模型 (d) 网格

在建立喷头模拟区域时,将内流道简化为连续的曲面划分网格,网格划分直接决定 CFD 数值模拟结果的精度。对整个区域采取结构六面体网格和非结构四面体网格相结合的网格划分方法。为了获取高质量的网格及进行有效的对比,采用 Tet/Hybrid和 TGrid 原理的结构与非结构相结合的方法。沿喷头入口到喷嘴的流线方向网格尺寸减小,即网格密度增大,解方程得到的速度更精确。图 1d 中 4 种直径的主喷嘴从小到大的网格数量分别为 63 027、75 982、79 101、83 126。

1.2 数值模拟的 CFD 模型

假设水在常温下为粘性不可压缩流,当水以3~ 6 m/s 的速度进入喷头,雷诺数随水流速度增大而 增大,当雷诺数超过 2 300 时,产生湍流。对标准 $k-\varepsilon$ 、RNG $k-\varepsilon$ 和 Realizable $k-\varepsilon$ 3 种基本的双方 程湍流模型进行比较,结果表明 RNG $k-\varepsilon$ 模型的 计算误差最小^[7]。本文选用 RNG $k-\varepsilon$ 模型对正常 工作状态下的喷头内流道流场进行 CFD 数值模拟 研究。k方程和 ε 方程为

$$\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + \rho \varepsilon \qquad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_{\varepsilon} \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\varepsilon}{k} \left(C_{1\varepsilon}^* G_k - C_{2\varepsilon} \rho \varepsilon \right) \quad (2)$$

数值模拟,研究不同喷嘴及喷头入口压力组合条件 下的内流场特性。

1 材料与方法

1.1 喷头内流道建模及网格划分

雨鸟 30PSH 型摇臂式喷头的入口直径、喷射仰 角和副喷嘴直径分别为 15.8mm、27°和 3.18mm, 主 喷嘴直径有 5.16、5.56、5.95、6.35mm。

用游标卡尺测量喷头内流道,在 Pro/E 软件中 建立三维实体模型,内流道的模型如图 1a、1b、1c 所 示。



系数取值^[8]: $C_{\mu} = 0.0845$, $C_{1e} = 1.42$, $C_{2e} = 1.68$, $\alpha_{k} = \alpha_{e} = 1.39$, $\eta_{0} = 4.377$, $\beta = 0.012_{\circ}$

1.3 边界条件与数值方法

入口压力为 200~650 kPa, 喷头出口的水流直 接进入空气, 喷头出口压力为标准大气压。计算区 域的边界假定为非滑移条件, 用标准的边界方程进 行近壁处理, 用分步求解的 SIMPLEC 运算法则求解 控制方程。

2 结果与讨论

2.1 喷头流量与入口压力的关系

喷头流量的计算公式[9]为

$$Q = 3 600 \omega A \sqrt{2gH}$$
(3)
式中 Q——喷头流量 ω ——流量系数

A——喷嘴讨水断面面积

g-----重力加速度 H-----工作压力

流量系数 ω 按喷嘴锥角选取,同一主喷嘴直径 时 ω 不变,g 为常量,所以 Q 与 A、H 均成正比。

不同主喷嘴直径时喷头的模拟流量(数值模拟 得出的流量)与入口压力的关系如图 2,流量随主喷 嘴直径增大而增大,4种主喷嘴直径下流量与入口 压力均成正比,与喷头流量计算公式相符。

表1为4种主喷嘴直径与10种入口压力下喷



图 2 不同喷嘴直径时喷头流量与入口压力曲线

Fig. 2 Relationship between flow rate and inlet pressure

with four types of range nozzles

表1 4种主喷嘴直径与10种入口压力下的喷头流量模拟值与标准值

Tab.1 Contrast between simulated and standard flow rate of sprinkler with four types of range

nozzles and ten different inlet pressures

入口 压力 /kPa	主喷嘴直径/mm											
	5.16			5.56			5.95			6.35		
	模拟流量 /L·s ⁻¹	试验流量 /L·s ⁻¹	相对误 差/%	模拟流量 ∕L•s ⁻¹	试验流量 /L·s ⁻¹	相对误 差/%	模拟流量 /L·s ⁻¹	试验流量 /L·s ⁻¹	相对误 差/%	模拟流量 /L·s ⁻¹	试验流量 /L·s ⁻¹	相对误 差/%
200	0.440	0.567	22.42	0.471	0.631	25.24	0.509	0.700	27.31	0.581	0.769	24.53
250	0.542	0. 639	15.13	0.582	0.714	18.45	0.625	0.783	20.21	0.717	0.867	17.28
300	0.629	0.703	10.57	0.675	0.786	14.11	0.725	0.856	15.22	0.832	0.956	12.95
350	0.704	0.756	6.88	0.757	0.844	10.40	0.814	0.922	11.73	0.933	1.031	9.49
400	0.773	0.808	4.41	0.831	0.894	7.08	0.893	0.964	7.36	1.019	1.100	7.36
450	0.835	0.853	2.13	0.898	0.942	4.62	0.967	1.014	4.67	1.103	1.164	5.24
500	0. 893	0.900	0.83	0.962	0.986	2.45	1.034	1.103	6.20	1.181	1.228	3.81
550	0.949	0. 944	0.46	1.021	1.033	1.20	1.099	1.158	5.16	1.258	1.292	2.58
600	1.001	0. 983	1.81	1.077	1.072	0.45	1.159	1.203	3.67	1.328	1.358	2.24
650	1.050	1.022	2.71	1.130	1.111	1.71	1.216	1.244	2.27	1.388	1.425	2.57

头的模拟流量与试验流量对比,其中喷头的试验流 量来自 30PSH 型摇臂式性能参数表(由喷头生产商 Rain Bird 公司提供)。

喷头模拟流量与试验流量的相对误差在入口压 力为 200~350 kPa 时较大,最大为 27.1%,最小为 6.88%;入口压力为 400~650 kPa 时相对误差较 小,最大为 7.36%,最小仅 0.45%。这说明在入口 压力大于 350 kPa 时,模拟流量非常接近试验流量, 模拟效果较好。但入口压力小于 350 kPa 时,模拟 流量大于试验流量,且相对误差较大,可能是数学模 型或者三维建模方面带来的误差,具体原因还需更 深入研究。

2.2 主、副喷嘴间的流量分配

表 2 是 4 种主喷嘴直径与 10 种入口压力下主、 副喷嘴流量及比值。其中,主喷嘴的最大、最小流量 分别为 1.164 5 、0.347 3 L/s,副喷嘴的最大、最小流 量分别为 0.222 9 、0.095 2 L/s,流量比表示主喷嘴 流量与副喷嘴流量之比。从表 2 可以看出,主喷嘴 直径不变、喷头入口压力增大时,主、副喷嘴的流量 随之增大,但流量比几乎不变;喷头入口压力不变、 主喷嘴直径增大时,主喷嘴流量增大,副喷嘴流量几 乎不变,流量比减小。同一主喷嘴直径时,主、副喷 嘴的流量比可用表 2 中的 10 种入口压力下平均流 量比表示,主喷嘴直径从 5.16 mm 增大到 6.35 mm, 平均流量比从 3.61 增大到 5.23。

2.3 速度

4 种主喷嘴直径与 10 种人口压力下,喷头人口 平均速度的最大、最小值分别是 6.10、1.93 m/s, 主、副喷嘴出口平均速度的最大、最小值分别是 17.99、7.03 m/s 和 10.14、4.24 m/s。图 3 是主喷 嘴直径为 5.95 mm 时 10 种人口压力下,喷头人口 及主、副喷嘴出口的平均速度。图 3 中人口和主、 副喷嘴出口的平均速度都与人口压力近似成正 比,且人口平均速度增长最快,主喷嘴次之,副喷 嘴最慢。

图 4~6 分别是 4 种主喷嘴直径与 10 种入口压

表 2 4 种主喷嘴直径与 10 种入口压力下主、副喷嘴流量及其比值

Tab.2 Flow rate of range and spreader nozzle and their proportion with four types of range

nozzles and ten different inlet pressures

	主喷嘴直径/mm											
入口	5.16			5.56			5.95			6. 35		
压力	主喷嘴	副喷嘴		主喷嘴	副喷嘴		主喷嘴	副喷嘴		主喷嘴	副喷嘴	
∕kPa	流量	流量	流量比	流量	流量	流量比	流量	流量	流量比	流量	流量	流量比
	$/L \cdot s^{-1}$	$/L \cdot s^{-1}$		$/L \cdot s^{-1}$	$/L \cdot s^{-1}$		/L \cdot s $^{-1}$	$/L \cdot s^{-1}$		$/L \cdot s^{-1}$	$/L \cdot s^{-1}$	
200	0.344	0.095	3.62	0.376	0.095	3.96	0.414	0.094	4.40	0.487	0.093	5.24
250	0.424	0.117	3.62	0.464	0.117	3.97	0.508	0.116	4.38	0.602	0.115	5.23
300	0.492	0.136	3.62	0.538	0.136	3.96	0.590	0.135	4.37	0. 698	0.133	5.25
350	0.551	0.153	3.60	0.603	0.152	3.97	0.662	0.151	4.38	0.783	0.150	5.22
400	0.604	0.168	3.60	0.664	0.168	3.95	0.727	0.166	4.38	0.855	0.164	5.21
450	0.652	0.181	3.60	0.717	0.181	3.96	0.786	0.180	4.37	0.925	0.177	5.23
500	0. 699	0.194	3.60	0.766	0.194	3.95	0.841	0.192	4.38	0.990	0.190	5.21
550	0.742	0.206	3.60	0.814	0.206	3.95	0.892	0.204	4.37	1.055	0.202	5.22
600	0.782	0.218	3.59	0.859	0.217	3.96	0.943	0.215	4.39	1.114	0.213	5.23
650	0.822	0.228	3.61	0.901	0. 227	3.97	0. 988	0. 225	4.39	1.165	0. 223	5.22
均值			3.61			3.96			4.38			5.23

力下喷头入口和主、副喷嘴出口的平均速度。可以 发现,随着入口压力增大,喷头入口和主、副喷嘴出 口的平均速度增大。随着主喷嘴直径的增大,入口 和主喷嘴出口的平均速度增大,而副喷嘴出口的平 均速度几乎不变,这个结论从喷头流量计算公式 (式(3))也可以得出。因为喷头的入口压力不变, 主喷嘴直径增大时,喷头入口和主喷嘴的流量会增 大,副喷嘴的流量几乎不变,且喷头入口和副喷嘴出 口断面直径不变,所以入口的平均速度增大,副喷嘴 出口的平均速度不变。但主喷嘴直径流量和直径都 增大的同时,主喷嘴出口平均速度也增大,具体原因 有待进一步研究。





Fig. 3 Average velocity of inlet and outlet with ten different inlet pressures when range nozzle is 5.95 mm

2.4 湍动能

喷头出口的湍动能大小是评价喷头流场特性的 一个重要指标。图7是4种主喷嘴直径下喷头主、 副喷嘴的平均湍动能随入口压力变化关系。其中,



入口的平均速度曲线





喷嘴出口的平均速度曲线

Fig. 5 Average of velocity of range outlet with four types range nozzles and ten different inlet pressures

喷头入口的最大湍动能为 0.992 3 m^2/s^2 ,最小湍动 能为 0.964 4 m^2/s^2 ;喷头主、副喷嘴出口的最大、最 小湍动能分别为 1.797 8、0.540 4 m^2/s^2 和 3.363 5、 0.740 4 m^2/s^2 。从图 7 可以发现,主喷嘴直径变化对 主喷嘴平均湍动能影响甚微,对副喷嘴的影响也较



Fig. 6 Average of velocity of spreader outlet with four types range nozzles and ten different inlet pressures

小。主、副喷嘴的平均湍动能随入口压力的增大而 增大,说明影响主、副喷嘴平均湍动能的主要参数是 入口压力。

2.5 标准差

同一主喷嘴直径和入口压力下,在 Fluent 软件 中要对喷头内流道流场进行多次模拟,直到模拟结 果稳定,得到的模拟结果才准确。本文进行 250 次 模拟后,所有参数都能得到稳定的结果。模拟所得 的主、副喷嘴出口的静压力、湍动能和速度都是 250 次模拟数据的平均值,标准差反映每组数据的离散 程度,标准差越大说明变化越剧烈。图 8 是喷头主、 副喷嘴出口的静压力、湍动能和速度的标准差随入 口压力变化情况。从图 8a、图 8b、图 8c 可以看出, 压力不变时,主喷嘴出口的静压力、湍动能和速度的 标准差随主喷嘴直径增大而发生微小的无规则变 化,说明不同主喷嘴直径对其出口的静压力、湍动能 和速度影响较小;主喷嘴直径不变时,主喷嘴出口的 静压力、湍动能和速度的标准差与入口压力近似成





(a) 主喷嘴(b) 副喷嘴

正比,说明它们随入口压力增大而增大。其中,有关 速度和湍动能的结论与2.3节和2.4节中对主、副 喷嘴出口的速度和湍动能分析一致。

观察图 8d、8e、8f 发现,压力不变时,随主喷嘴 直径的增大,副喷嘴出口的静压力标准差发生微小 的无规则变化,反之亦然,但湍动能和速度的标准差 均发生较大的无规则变化。说明不同的主喷嘴直径 和压力对副喷嘴出口静压力影响较小;但对副喷嘴 出口的湍动能和速度影响很大,且无明显规律。



Fig. 8 Changing relationship with inlet pressure of standard deviation of static pressure, turbulent kinetic

energy and velocity of range and spreader nozzles

2.6 流场的剖视图

喷头竖管中心线和主喷嘴中心线相交构成一个 平面,这一平面与喷头内流道流场相交的面称作喷 头内流道流场的剖面。主喷嘴直径为5.16 mm 时 剖面的静压力分布图如图9所示。3种人口压力 下,喷头静压力均呈现出从入口到弯管逐渐下降,从 弯管到两个喷嘴下降更快的趋势;喷头副喷嘴与弯 管连接处的上半部分较特殊,它的静压力在喷头弯 管到两个喷嘴之间区域是最大的,接近于喷头入口 的静压力,并且喷头入口压力越大时,它与喷头入口 的静压力越接近。这说明喷头副喷嘴与弯管连接处 是整个喷头承受静压力最大的地方,进行喷头结构 设计时应加以关注。

图 10 是人口压力为 400 kPa 时剖面上的速度 分布图。当主喷嘴直径增大时,喷头入口的平均速 度及内流道剖面的速度明显增大,副喷嘴出口的平 均速度几乎不变,主喷嘴出口的平均速度增大,但是 图中表现不明显。

剖面上半部分的速度向量分布如图 11 所示,喷 头内流道速度向量分布比较均匀,没有湍流。但是, 在喷头副喷嘴与弯管连接处的下半部分产生了逆 流。







(a) 主喷嘴直径 5.16 mm (b) 主喷嘴直径 5.95 mm (c) 主喷嘴直径 6.35 mm

3 结束语

用 Pro/E 软件完成喷头内流道的几何建模,在 Fluent 软件中进行数值模拟研究。结果表明,入口 压力增大时,入口的流量与平均速度、主副喷嘴的流 量、出口平均速度与平均湍动能都增大;主、副喷嘴 的流量分配比例不变。主喷嘴直径增大时,喷头的 入口流量、主喷嘴流量与分配比例、入口和主喷嘴出 口的平均速度都增大,副喷嘴流量分配比例减小;副 喷嘴流量与出口平均速度几乎不变,主、副喷嘴的平



均湍动能变化较小。主、副喷嘴出口的静压力标准 差、主喷嘴湍动能与速度的标准差与入口压力近似 成正比,受主喷嘴直径的影响较小;主喷嘴直径或入 口压力增大都会使副喷嘴出口的湍动能和速度的标 准差发生较大的无规律变化。入口压力、流量、湍动 能、静压力等参数间呈现的规律多数与前人大量试 验所得的规律相符,也存在一些无规律的变化。

图 11 喷头入口压力为 400 kPa 时的速度向量分布图 Fig. 11 Velocity vector distribution of cross section with 400 kPa inlet pressure

参考文献

- 1 Novozhilov V, Harvie D J E, Kent J H, et al. A computational fluid dynamics study of wood fire extinguishment by water sprinkler[J]. Fire Safety Journal, 1997, 29(4):259 ~ 282.
- 2 Jyh-Chyang Renn, Chih-Hung Hsiao. Experimental and CFD study on the mass flow-rate characteristic of gas through orificetype restrictor in aerostatic bearings[J]. Triblology International, 2004,37(4):309 ~ 315.
- 3 Wen-Lih Chen, King-Leung Wong, Ching-Te Huang. A parameter study on the laminar flow in an alternating horizontal or vertical oval cross-section pipe with computational fluid dynamics [J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 2006,49 (1 ~ 2):287 ~ 296.
- 4 Wei Qingsong, Shi Yusheng, Dong Wenchu, et al. Study on hydraulic performance of drip emitters by computational fluid dynamics [J]. Agricultural Water Management, 2006,84(1~2):130~136.
- 5 Zhang Jun, Zhao Wanhua, Wei Zhengying, et al. Numerical and experimental study on hydraulic performance of emitters with arc labyrinth channels[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2007,56(2):120~129.
- 6 Yan H J , Ou Y J, Yu F F, et al. Effect of straightening vane on hydraulic performances of sprinkler by CFD analysis [C] // Computational Mechanics: Proceedings of ISCM 2007, Tsinghua University Press & Springer, Beijing, China, 2007: 422 ~ 431.
- 7 Yan Haijun, Ou Yangjun, Kazuhiro Nakano, et al. Numerical and experimental investigations on internal flow characteristic in the impact sprinkler[J]. Irrigation and Drainage systems, 2009, 23(1):11 ~ 23.
- 8 Victor Yakhot, Steven A Orszag. Renormalization group analysis of turbulence. I. basic theory [J]. Journal of Scientific Computing, 1986,1(1):3~11.
- 9 李世英.喷灌喷头理论与设计[M].北京:兵器工业出版社,1995.