

## 圆形喷灌机系统两井泵汇流装置水力性能研究

张云龙<sup>1</sup>, 严海军<sup>1\*</sup>, 王建东<sup>2</sup>

(1. 中国农业大学 水利与土木工程学院, 北京 100083;

2. 中国水利水电科学研究院 水利研究所, 北京 100048)

**摘要:**【目的】为了满足入机流量需求,圆形喷灌机在实际应用中常用多台井泵并联供水,在喷灌机入机处安置井泵汇流装置,以调节流量和稳定水压。【方法】通过设计两井泵汇流装置,开展了汇流装置水力性能试验及数值模拟,研究了雷诺数和两进口汇流比(较小流量与较大流量之比)对装置水力性能的影响。【结果】汇流装置的总水力损失模拟值与试验值较吻合,相对误差范围为0.5%~3.3%,且随雷诺数和汇流比均呈二次函数关系,当汇流比为0.8左右时,装置的总水力损失最小;两进口对应的局部阻力系数均不随雷诺数产生变化,但随汇流比变化趋势相反,当汇流比为0.2~1.0之间时,较大流量进口的局部阻力系数为1.16~1.31,较小流量进口的局部阻力系数为1.31~4.22。【结论】两井泵汇流装置结构及水力性能可用于圆形喷灌机灌溉工程设计和运行管理。

**关键词:**圆形喷灌机系统;两井泵汇流装置;数值模拟;局部阻力系数;汇流比

中图分类号:S277.9<sup>4</sup>

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.20180377

张云龙,严海军,王建东. 圆形喷灌机系统两井泵汇流装置水力性能研究[J]. 灌溉排水学报,2019,38(4):48-54.

### 0 引言

我国人多水少、水资源时空分布不均匀<sup>[1]</sup>。在东北平原、华北平原、内蒙古草原区及西北平原地区<sup>[2]</sup>,农业灌溉用水量较大,井灌区地下水过度超采问题严峻<sup>[3]</sup>。自20世纪90年代开始,国家大力推广和发展节水灌溉技术,普及应用各类喷灌及微灌设备。截至2013年底,全国生产节水灌溉设备和材料的厂家已有2 000多家,具备年生产200万hm<sup>2</sup>的节水灌溉设备和材料的供应能力<sup>[4]</sup>,能基本满足国内喷微灌技术发展的需要。作为大型喷灌设备之一,圆形喷灌机具有喷洒质量好、自动化程度高、适应性强、省力、节水、增产等优点,近年来推广发展迅速,以机井供水为主。由于单井出水量小,无法满足喷灌机入机流量需求,实际工程中常采用两井甚至多井联合供水,在喷灌机入机处安装两井或多井汇流装置,以调节喷灌机的入机流量,稳定喷灌机的入机压力。实际工程中采用的井泵汇流装置结构各异,缺乏计算依据和合理结构,国内外相关研究成果较少。20世纪80年代至90年代期间,我国曾推广真空多管汇流井或者多管机井,出现了多管水汇流装置。姚彩升等<sup>[5]</sup>提出了一种圆柱形集水装置,采用4 mm厚的钢板焊接而成。程兴华<sup>[6]</sup>提出一种内径为80~100 mm、长度为400~500 mm的汇水联通管。但这些装置结构参数不详,未开展水力特性研究,而且结构形式也与圆形喷灌机使用的汇流装置差异较大。此外,有学者利用CFD技术对T型三通管进行了水力性能研究<sup>[7-10]</sup>,采用试验和数值模拟的方法研究了T型三通管道内分流与汇流时的局部水力损失系数变化规律。对汇流装置内部流动进行数值模拟,优化结构汇流装置结构,可以缩短研发周期,节省人力成本。

考虑到现有的圆形喷灌机汇流装置以两井泵供水为主,以两井泵汇流装置为研究对象,设计汇流装置结构,搭建汇流装置性能试验台,测试不同进口流量下汇流装置的总水力损失;应用CFD方法对汇流装置进行数值模拟,并与试验结果比较,分析两进口不同流量组合对装置水力性能的影响。

收稿日期:2018-07-07

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2014BAD12B05);国家重点研发计划项目(2017YFD0201502)

作者简介:张云龙(1995-),男,江西瑞金人。硕士研究生,主要从事水动力学与水力机械研究。E-mail: 964310142@qq.com

通信作者:严海军(1974-),男,浙江宁波人。教授,博士生导师,主要从事节水灌溉技术与装备研究。E-mail: yanhj@cau.edu.cn

# 1 材料与方法

## 1.1 试验材料

实际工程中常用的两井泵汇流装置结构如图1所示。本研究的汇流装置结构如图2所示,主要参数包括进口管径 $d_1$ 和 $d_2$ 、出口管径 $d_0$ 、两进口管中心间距 $L_1$ 、汇流罐长度 $L_2$ 以及汇流罐直径 $D$ 。由单井流量以及管道经济流速确定汇流装置进出口管径。据调查,东北地区单眼机井涌水量为 $30\sim 50\text{ m}^3/\text{h}$ ,按经济流速 $1\sim 2\text{ m/s}$ 初算,两井泵汇流装置的进口管径多数选用 $80\text{ mm}$ ,而出口管径选用 $125\text{ mm}$ 。汇流装置结构参数见表1。



图1 工程中使用的汇流装置结构

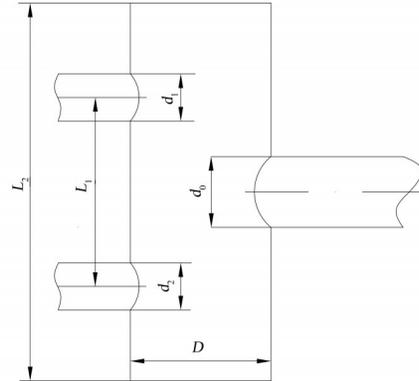


图2 汇流装置结构图

表1 汇流装置主要结构尺寸

| 结构参数 | 入口管径 $d_1/\text{mm}$ | 入口管径 $d_2/\text{mm}$ | 出口管径 $d_0/\text{mm}$ | 两进口管中心间距 $L_1/\text{mm}$ | 汇流罐长度 $L_2/\text{mm}$ | 汇流罐直径 $D/\text{mm}$ |
|------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|-----------------------|---------------------|
| 尺寸   | 80                   | 80                   | 125                  | 480                      | 800                   | 250                 |

## 1.2 试验装置

试验在中国农业机械化科学研究院水泵试验室完成,试验布置如图3所示。汇流装置由2台潜水电泵并联供水,其中井泵1型号为200QJ40-52/4(额定流量为 $40\text{ m}^3/\text{h}$ 、额定扬程为 $52\text{ m}$ ),井泵2型号为200QJ32-52/4(额定流量为 $32\text{ m}^3/\text{h}$ 、额定扬程为 $52\text{ m}$ )。采用电磁流量计测试汇流装置的两进口和出口流量,其中流量计1和流量计2规格均为DN80,分别测量井泵1和井泵2的流量 $Q_1$ 和 $Q_2$ ,安装时流量计上下游直管段长度分别为 $400、250\text{ mm}$ ;流量计3规格为DN150,用于测量出口总流量 $Q_0$ ,安装时上下游直管段长度分别为 $2\ 000、800\text{ mm}$ 。安装的阀门1和阀门2分别位于两井泵出口,用于调节井泵1和井泵2的流量,阀门3位于汇流装置出口,用于调节出口总流量。为了测量汇流装置总水力损失,分别在汇流装置两进口( $P_1、P_2$ )以及出口处( $P_0$ )安装压力表,安装位置均距汇流装置中心线 $215\text{ mm}$ ,3个压力表量程均为 $0\sim 0.6\text{ MPa}$ ,精度 $0.4$ 级。

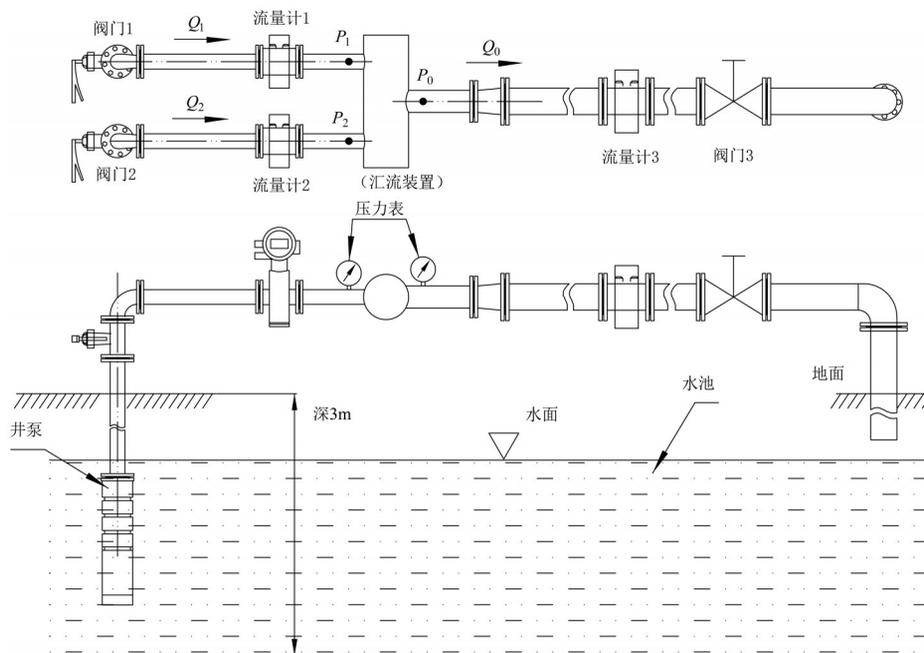


图3 试验布置

### 1.3 试验方法

试验包括2部分内容:①先关闭阀门1和阀门2,启动两井泵,缓慢开启阀门1和阀门2至最大开度,调节阀门3将总流量调节至110 m<sup>3</sup>/h,再以间隔为5 m<sup>3</sup>/h的流量关小阀门,得到总流量在60~110 m<sup>3</sup>/h之间的11个工况;②保持总流量为60 m<sup>3</sup>/h不变,此时对应的阀门3开度也不变,通过调节阀门1和阀门2,使两进口汇流比 $k_q$ (较小流量 $Q_2$ 与较大流量 $Q_1$ 的比值)分别取0.1~1之间的10个工况。在每种工况下,同时记录汇流装置两进口及出口处的流量和压力值。

### 1.4 数据处理

对两井泵汇流模型列出总能量守恒方程<sup>[11]</sup>,即:

$$m_1g\left(Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g}\right) + m_2g\left(Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g}\right) = m_0g\left(Z_0 + \frac{P_0}{\rho g} + \frac{v_0^2}{2g}\right) + E_{\text{损}}, \quad (1)$$

式中: $m_i = \rho Q_i dt$ ,且 $m_0 = m_1 + m_2$ ;  $E_{\text{损}} = m_0 g h_w$ ,为模型能量损失; $\rho$ 为流体密度; $g$ 为重力加速度; $Q_i$ 为各管道的流量; $Z_i$ 为位置势能; $P_i/\rho g$ 为压力势能; $v_i^2/2g$ 为速度势能;其中 $i=0,1,2$ 分别指汇流装置出口0、进口1、进口2。

汇流装置造成的总水力损失 $h_w$ 计算式为:

$$h_w = \frac{Q_1\left[Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g}\right] - \left[Z_0 + \frac{P_0}{\rho g} + \frac{v_0^2}{2g}\right] + Q_2\left[Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g}\right] - \left[Z_0 + \frac{P_0}{\rho g} + \frac{v_0^2}{2g}\right]}{Q_0}。 \quad (2)$$

考虑到模型在同一水平面上,所以位置势能项 $Z$ 可以省去,再把静压和动压用总压 $P_i$ 表示,即:

$$\frac{P_i}{\rho g} + \frac{v_i^2}{2g} = \frac{P_{ii}}{\rho g}。 \quad (3)$$

联合式(2)和式(3),将汇流装置总水力损失的计算公式化简为:

$$h_w = \frac{Q_1(P_{i1} - P_{i0}) + Q_2(P_{i2} - P_{i0})}{Q_0 \rho g}。 \quad (4)$$

此外,借鉴流体力学对局部阻力系数的定义,即进口与出口的总压差与进口速度势能的比值。把两进口对应的局部阻力系数定义为<sup>[11]</sup>:

$$\zeta_1 = \frac{2gh_{w1-0}}{v_1^2}, \quad (5)$$

$$\zeta_2 = \frac{2gh_{w2-0}}{v_2^2}, \quad (6)$$

式中: $\zeta_1$ 为进口1的局部阻力系数; $h_{w1-0}$ 为进口1与出口0断面之间的水力损失; $\zeta_2$ 为进口2的局部阻力系数; $h_{w2-0}$ 为进口2与出口0断面之间的水力损失。

## 2 数值模拟方案

### 2.1 几何模型与网格

数值模拟过程中,首先需要对计算区域进行三维造型。为减小汇流装置上下游边界对计算域的影响,一般计算区域的上下游尺寸可取管径的10倍以上<sup>[12-13]</sup>。在数值模拟时计算域中汇流装置的进口和出口管长取为管径的12倍。如图4所示,分别在计算域0-0、1-1和2-2断面设置压力监测点,用于获取不同工况下该位置的压力变化,计算出汇流装置产生的局部水力损失,3个监测位置与试验时压力表安装一致。

计算域采用非结构网格划分,内部中心区采用六面体核心网格Hexa-Core,并对边界层进行了加密处理。网格质量均在0.3以上,生成的汇流装置网格如图5所示。

为了消除网格因素对计算结果的影响,数值模拟过程需要进行网格无关性检查。通过相同的网格划分方法,设置不同的网格密度,得到了4套网格方案,网格数分别为306 091、620 179、1 177 510、1 631 345个。以汇流装置总水力损失作为评价网格相关性的指标,计算得到的总水力损失分别为0.690、0.671、0.653和0.650 m,具体结果见图6。从图6可以看出,随着网格数增加,装置总水力损失先下降后趋于稳定,其中方案3与方案4的总水力损失较为接近。而相同工况下总水力损失实测值是0.646 m,网格数1 177 510和1 631 345下总水力

损失模拟值和实测值的相对误差只有 1.07% 和 0.62%。考虑到计算效率和计算精度,选择方案 3 作为最终计算网格方案。

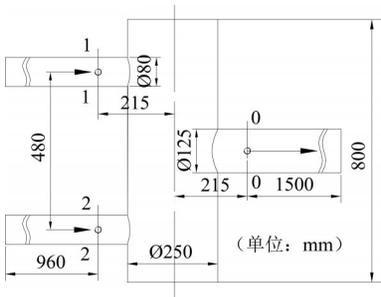


图 4 汇流装置计算域尺寸

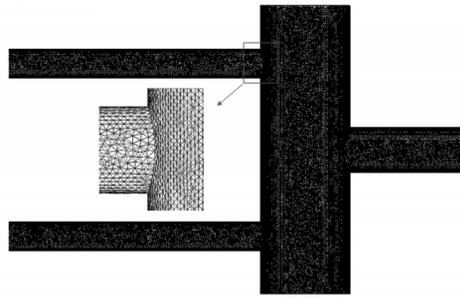


图 5 汇流装置网格

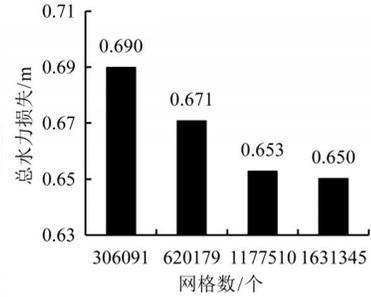


图 6 总水力损失随网格数的变化趋势

## 2.2 湍流模型

石喜等<sup>[14]</sup>通过试验与数值模拟对 DN75×75 和 DN75×50 的 2 种 PVC 三通管进行了研究,研究了分流比水力性能的影响,并验证了 Realizable  $k-\varepsilon$  模型对汇流工况的模拟准确性。考虑到本研究的汇流装置与三通管相似,内部水流存在旋涡流动,流线弯曲程度较大,因此也选择 Realizable  $k-\varepsilon$  模型。

## 2.3 边界条件

计算边界条件设置为速度进口、自由出流、无滑移静止壁面边界,壁面粗糙度设置为系统缺省值,即  $0.5 \mu\text{m}$ 。为研究不同汇流出口雷诺数  $Re$  及汇流比  $k_q$  对汇流装置水力性能的影响,将出口流量为 30、60、90、120  $\text{m}^3/\text{h}$  四组水平,对应的雷诺数为 84 883、169 765、254 648、339 531,在相同雷诺数下,将两进口边界汇流比设置为 0.0.2.0.4.0.6.0.8.1 共 6 组水平。

雷诺数是用于表征流体流动情况的无量纲数,其计算式<sup>[15]</sup>为:

$$Re = \rho v d / \mu, \quad (7)$$

式中: $v$ 、 $\rho$ 、 $\mu$  分别为流体的流速、密度与黏性系数; $d$  为特征长度,对于管道, $d$  为管径。

设置参数除进口速度外,还需给出入口边界输运的湍流参数,即湍流强度  $I$  和水力直径(圆管为管径)。

由于管道内流动为充分发展湍流,因此进口处湍流强度  $I$  计算式<sup>[15]</sup>为:

$$I = u' / \bar{u} = 0.16 (Re)^{-1/8}, \quad (8)$$

式中: $I$  为湍流强度; $u'$  为湍流脉动速度; $\bar{u}$  为湍流平均速度。

## 2.4 数值求解方法

数值模拟控制方程离散采用有限体积法,稳态计算,压力和速度的耦合求解采用 SIMPLE 算法。计算过程中先将离散格式设置为一阶迎风格式,计算 1 000 步保存算例及结果;其次将离散格式均设置为二阶迎风格式计算,同时将压力、动量及湍动能的松弛因子降低了 0.2,以确保计算精度和效率。将残差精度设置到 0.000 01,迭代计算步数设置为 6 000 步。整个计算在 4 000 步左右趋于“收敛”。计算结果“收敛”的判定依据是 100 个计算步内,3 个监测点的压力趋于稳定,变化范围为 0~0.05 Pa。

## 2.5 计算模型验证

为了验证数值计算模型的准确性,两进口速度边界条件分别按试验值设置,共对比了 5 组工况,具体参数设置见表 2。

表 2 边界条件

| 工况 | 进口边界参数                                   |  |  |  | 出口边界    |
|----|--|--|--|--|---------|
|    | $Q_1 / (\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$ | $V_1 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | $Q_2 / (\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$ | $V_2 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ |         |
| 1  | 58.61                                    | 3.24                                   | 50.85                                    | 2.81                                   | Outflow |
| 2  | 53.91                                    | 2.98                                   | 45.62                                    | 2.52                                   |         |
| 3  | 49.16                                    | 2.72                                   | 40.41                                    | 2.23                                   |         |
| 4  | 44.61                                    | 2.47                                   | 35.1                                     | 1.94                                   |         |
| 5  | 40.37                                    | 2.23                                   | 29.63                                    | 1.64                                   |         |

将数值模拟与试验结果如图 7 和图 8 所示。由图 7 可知,装置的总水力损失模拟值与试验值较吻合,相对误差值最小为 0.5%,最大为 3.3%。图 8 为两进口静压的模拟值与试验值的比较,其中  $P_1$  指进口 1 的静压力, $P_2$  指进口 2 的静压力。可见,装置的进口静压的模拟值与试验值同样吻合较好,相对误差值最小为 0.1%,最大为

0.5%。由此可见,本研究所采用的网格方案以及计算模型是可行的。

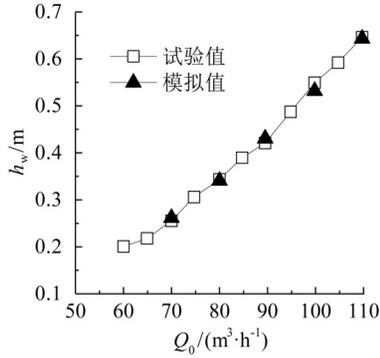


图7 总水力损失随总流量的变化

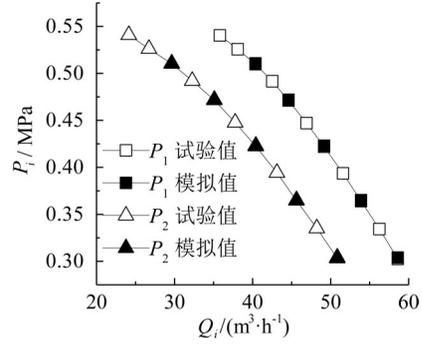


图8 两进口静压随对应井泵流量的变化

### 3 结果与分析

#### 3.1 雷诺数与汇流比对装置总水力损失的影响

图9为出口流量保持为60 m<sup>3</sup>/h时,试验值与模拟值的对比得到的总水力损失随汇流比的变化曲线。可见,在汇流总流量一定的情况下,总水力损失均随汇流比呈二次函数变化,先递减后递增,试验值与模拟值吻合较好;拟合方程见表3,发现总水力损失最小值均是当汇流比为0.8左右时,而不是汇流比为1(即两井泵流量相等)的工况。

表3 总水力损失与汇流比之间的拟合方程

| 计算结果 | 拟合公式  | R <sup>2</sup> (拟合度) |
|------|---|----------------------|
| 试验值  | $h_{w\text{试}} = 0.6434k_q^2 - 1.0201k_q + 0.614$ | 0.981                |
| 模拟值  | $h_{w\text{模}} = 0.7359k_q^2 - 1.1675k_q + 0.640$ | 0.984                |

图10为不同汇流比情况下,总水力损失随雷诺数的变化规律,可见总水力损失随雷诺数增大而增大,同样呈二次函数变化。雷诺数越大,流量越大,总水力损失大小与水流速度正相关,因此总水力损失也就越大。由曲线的增长趋势可见,雷诺数越大,汇流比间的差异对总水力损失的影响也就越大。

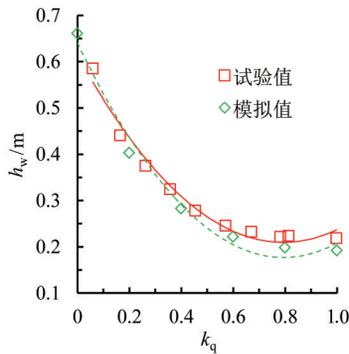


图9 总水力损失随汇流比的变化

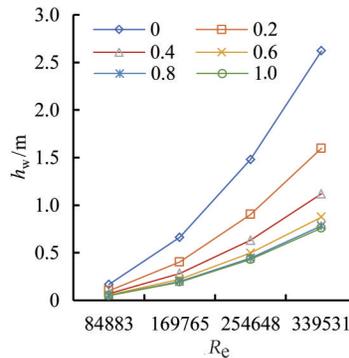


图10 总水力损失随雷诺数的变化

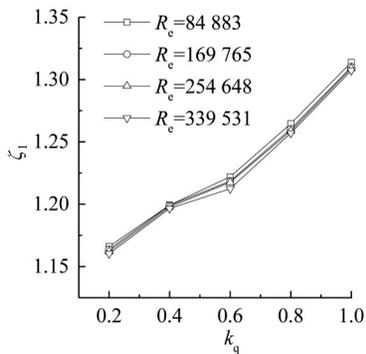


图11 局部阻力系数 $\zeta_1$ 随 $k_q$ 和 $R_e$ 的变化

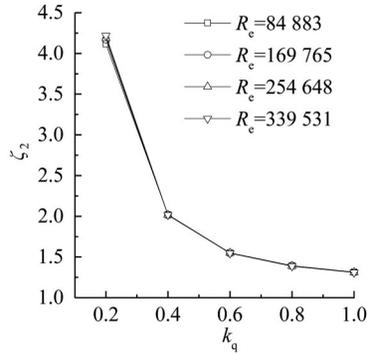


图12 局部阻力系数 $\zeta_2$ 随 $k_q$ 和 $R_e$ 的变化

#### 3.2 雷诺数与汇流比对装置阻力损失系数的影响

由于本次计算设置的最小雷诺数为84 883,处于紊流态范围。研究表明,当雷诺数大于某一数值之后,将进入“阻力平方区”,此时的局部阻力系数将与雷诺数无关<sup>[11]</sup>。比如对于平顺的直管段,水流进入“阻力平方

区”的雷诺数一般为 $10^6$ 左右<sup>[16]</sup>。也有研究表明,对于分岔管等形变件管道,由于水流在突变区受强烈的扰动,紊流程度大大增强,使在雷诺数远小于 $10^6$ 时便能进入“阻力平方区”,即局部阻力系数提前进入恒定状态<sup>[17]</sup>。由图11、图12可知,进口1的局部阻力系数 $\zeta_1$ 随汇流比增大而增大,而进口2的局部阻力系数 $\zeta_2$ 随汇流比增大而减小,当汇流比为0.2~1.0之间时, $\zeta_1$ 为1.16~1.31之间, $\zeta_2$ 为1.31~4.22之间。

## 4 讨论

汇流装置是整个圆形喷灌机系统中汇合水流的能量节点,其水力性能将影响系统的水力设计、井泵选型和喷头配置。由于国内外对两井泵汇流装置的研究较少,此前多采用三通管进行汇流,因此借鉴三通管的研究方法。但绝大多数学者仅研究了三通管局部阻力系数的影响因素,如陈伟业等<sup>[18]</sup>利用数值模拟研究了等径PVC三通管局部损失系数随入口雷诺数的变化;陈江林等<sup>[19]</sup>采用数值模拟方法得到了不同分流比、进口流速、管径比对T型三通管局部阻力系数的影响;巩启涛等<sup>[20]</sup>通过数值模拟方法研究了大管径三通管局部阻力系数与分流比、雷诺数等参数之间的变化规律。针对汇流模型推导了汇流装置总水力损失的计算公式,研究了汇流装置的水力性能变化,包括总水力损失及局部阻力系数;对设计的汇流装置在不同进口流量下总水力损失进行了测试,并将试验与数值模拟结果进行了比较,验证了提出的汇流装置数值模拟方法是可行的,节约了大量计算时间和开发成本。此外,通过与三通管的研究结果进行定性对比发现,汇流装置的两股水流不直接汇合冲击,经汇流罐体内混合后,在出口处的压力更加稳定。而三通管由于两股水流冲击较严重,导致出口压力波动较大,将影响圆形喷灌机的入机性能和灌水质量。

研究发现,随着汇流比增大,汇流装置的两进口流量差异减小,压力差减小,不易产生分离区和二次流,总水力损失呈减小趋势;但汇流比继续增大时,两进口处水流冲击增大,造成水流更紊乱,因此汇流比为1时汇流装置的总水力损失有增大的趋势。因此在一定范围内,增大汇流比,不仅能使井泵并联工况点更加稳定,而且还能减小汇流装置的总水力损失。同时,从雷诺数对汇流装置阻力损失系数的影响规律可见,局部阻力系数 $\zeta_1$ 、 $\zeta_2$ 曲线在设计4组雷诺数水平下基本重合,说明本文研究的汇流装置在雷诺数大于84 883时已进入“阻力平方区”,其局部阻力系数不随雷诺数产生变化。

兹获得的汇流装置局部阻力系数可用于计算其水力损失,而雷诺数及汇流比对装置水力损失的影响规律可用于预测圆形喷灌机系统工况点的变化趋势,并在此基础上,可求得汇流装置前管路的水力损失曲线,确定井泵并联性能曲线,最终得到井泵的并联工况点。此外,本文设计的汇流装置结构参数适用于圆形喷灌机的实际工程。

## 5 结论

汇流装置的总水力损失模拟值与试验值基本吻合,相对误差范围为0.5%~3.3%,监测压力的相对误差范围为0.1%~0.5%,表明建立的计算方法较为可行。总水力损失随两井泵汇流比和雷诺数均呈二次函数变化,且汇流比为0.8左右时,装置总水力损失最小;而装置两进口对应的局部阻力系数均不随雷诺数产生变化,但随汇流比变化趋势相反,当汇流比为0.2~1.0之间时, $\zeta_1$ 为1.16~1.31之间, $\zeta_2$ 为1.31~4.22之间。

### 参考文献:

- [1] 王熹,王湛,杨文涛,等.中国水资源现状及其未来发展方向展望[J].环境工程,2014,32(7):1-5.
- [2] 杨志勇,胡勇,袁喆,等.井灌区水循环研究进展[J].灌溉排水学报,2015,34(3):56-60.
- [3] 严海军,朱勇,白更,等.对内蒙古推广使用大型喷灌机的思考[J].节水灌溉,2009(1):18-21.
- [4] 袁寿其,李红,王新坤.中国节水灌溉装备发展现状、问题、趋势与建议[J].排灌机械工程学报,2015,33(1):78-92.
- [5] 姚彩升,尹占平.集水器在小群井中的应用[J].中国农村水利水电,1998(5):14-15.
- [6] 程兴华.多管联通真空井[J].地下水,1986(2):18-19.
- [7] ERFANINIA A, NEMATOLLAHI M. Numerical study of mass transfer coefficient in a T-junction[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(17):7 027-7 035.
- [8] ATHULYA A S, MIJI C R. CFD modelling of multiphase flow through T-junction[J]. Procedia Technology, 2016, 24:325-331.
- [9] SAKOWITZ A, MIHAESCU M, FUCHS L. Turbulent flow mechanisms in mixing T-junctions by Large Eddy Simulations[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2014, 45:135-146.
- [10] SAKOWITZ A, MIHAESCU M, FUCHS L. Effects of velocity ratio and inflow pulsations on the flow in a T-junction by Large Eddy Simulation[J]. Computers & Fluids, 2013, 88:374-385.

- [11] 罗惕乾. 流体力学 [M]. 第3版. 北京:机械工业出版社, 2007.
- [12] RAHMEYER W J, DENT P. Pressure loss data for large pipe tees[J]. ASHRAE Transactions, 2002, 108(1):376-389.
- [13] RAHMEYER W J. Pressure loss data for PVC pipe tees[J]. ASHRAE Transactions, 2003, 109(2):252-271.
- [14] 石喜, 吕宏兴, 朱德兰, 等. PVC三通管水流阻力与流动特征分析[J]. 农业机械学报, 2013, 44(1):73-79.
- [15] 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.
- [16] 李玉梁, 李玲, 陈嘉范, 等. 抽水蓄能电站对称岔管的流动阻力特性[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2003 (2):270-272.
- [17] 贺益英, 赵懿珺, 孙淑卿, 等. 弯管局部阻力系数的试验研究[J]. 水利学报, 2003 (11):54-58.
- [18] 陈伟业, 吕宏兴, 石喜, 等. 等径PVC三通管局部水头损失系数试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(1): 128-130.
- [19] 陈江林, 吕宏兴, 石喜, 等. T型三通管水力特性的数值模拟与试验研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 73-77.
- [20] 巩启涛, 杨俊红, 韩奎, 等. 大管径T型三通数值模拟及局部阻力特性分析[J]. 动力工程学报, 2016, 36(9): 753-758.

## Hydraulic Characteristics at the Confluence of Two Submersible Pumps in Center-pivot Irrigation

ZHANG Yunlong<sup>1</sup>, YAN Haijun<sup>1\*</sup>, WANG Jiandong<sup>2</sup>

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Department of Irrigation and Drainage, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

**Abstract:** **【Objective】** Double submersible pumps are often used in parallel in center-pivot irrigation to meet the requirement for flow rate, with a confluence device installed to regulate the inlet flow rate and stabilize the working pressure. The purpose of this paper is to analyze the hydraulic characteristics at the confluence. **【Method】**The study was based on numerical simulation, in which we examined the impact of Reynolds number and the confluence ratio (ratio of the maximum flow rate to the minimum flow rate at the inlet) on the hydraulic characteristics at the confluence. **【Result】**It was found that the relative error of the simulated hydraulic loss at the confluence was in the range of 0.5% to 3.3%, compared to the experimental measurement. The hydraulic loss was quadratically related to the Reynolds number and the confluence ratio, with minimum hydraulic loss achieved when the confluence ratio was 0.8. In addition, the local resistance coefficient at the two inlets was independent of the Reynolds number, but changed with the confluence ratio. When the confluence ratio varied between 0.2 and 1.0, the local resistance coefficient varied between 1.16 and 1.31 at the large flow inlet, and between 1.31 and 4.22 at the small flow inlet. **【Conclusion】** The structure and hydraulic performance of the confluence can be used in engineering design and operational management of the center-pivot irrigation system.

**Key words:** center-pivot irrigation system; confluence device; numerical simulation; local resistance coefficient; confluence ratio

责任编辑:陆红飞