

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.05.041

# 基于 FLUENT 的山丘区规模化灌溉管网系统的数值模拟

赵彦琳, 张宇峰

(杨凌职业技术学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 为解决山丘区规模化灌溉管网的优化设计方法中存在计算工作量大、安全调控设施缺乏且布设不合理等问题,以 FLUENT 流体模拟软件为工具,结合安良水库输水灌溉工程实例,运用 RNG  $k-\epsilon$  紊流模型对管网各轮灌组的简化型式进行了出水流量和工作压力的数值模拟分析,并根据调压池的布置要求,模拟了有调压池和无调压池 2 种情况下的管网压力和流量,并进行了对比分析。结果表明,模拟结果与设计值最大相对误差为 10.77%,调压池可以有效地解决山丘区压力突变和分布不均匀的问题。RNG  $k-\epsilon$  紊流模型用于管网模拟有效可行,可作为山丘区规模化灌溉管网优化设计和验证的工具。

**关键词:** 山丘区;管网;数值模拟;管网优化

中图分类号: TV131.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2018)05-0208-05

## Numerical Simulation of Scale Irrigation Pipe Networks in Hilly Regions Based on FLUENT

ZHAO Yanlin, ZHANG Yufeng

(Yangling Vocational & Technical College, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** This study conducts the simulation and analysis on the simplified model of rotational irrigation groups in hilly regions, the FLUENT fluid simulation software was adopted and the AnLiang reservoir project was taken as an example, aiming at seeking solutions for calculating the optimization design of low-pressure pipe easily and setting the safety control facilities reasonable. Simulation and analysis on the simplified model of rotational irrigation groups by RNG  $k-\epsilon$  epsilon turbulence model showed that the error of output flow rate and working pressure less than 10.77%, the pressure regulating pool can effectively solve the problem of pressure mutation in the hilly regions, and the RNG  $k-\epsilon$  epsilon turbulence model for network simulation is feasible. The FLUENT software can serve as a tool for optimization research design and validation in the hilly regions.

**Keywords:** hilly regions; pipe networks; numerical simulation; pipe network optimization

我国约有 2/3 是山区,遍及西南、西北、东北及华东、华中、华南等地。山丘区灌溉具有沿线地形变化大,用水点多且分散,管网高差变化大,管网压力和出口流量分布不均匀等特点。山丘区节水灌溉起步较晚,灌溉系统规划不合理,设计难度大成为山区农业发展的瓶颈<sup>[1]</sup>。规模化灌溉管网系统的研究,其优化设计所要解决的问题主要是在保证所需的压力和流量均衡的前提下,如何选择输配水管网系统中各组成部分的规格和尺寸,以获得最经济的设计

方案。苏保国<sup>[2]</sup>结合红旗渠灌区节水灌溉技术研究成果,提出了自压管灌系统的经济流速,充分利用水源水头和坡降产生的水头提出了自压管灌树状管网的优化设计方案,但所需干管直径较大,对出水口耐久性要求较高。张峰等<sup>[3]</sup>针对丘陵山区重力式供水管网运行可靠性差的问题,进行了增设减压储水装置的优化对比分析,表明减压装置在山丘区具有较好强的实用性和经济性;在研究规模化灌溉管网的数值模拟方面,国内外学者均作了众多有益的探

收稿日期:2018-05-30

修稿日期:2018-07-03

基金项目:国家“十二五”科技支撑计划课题(2015BAD24B02)

作者简介:赵彦琳(1987—),女,河北张家口人,硕士,讲师,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail:727075748@qq.com

索<sup>[4-7]</sup>。关于管网优化设计的研究,大多以平原地区的工程实例为主,针对于山丘区工程设计的研 究工作较少。已有的管网优化理论,设计计算工作 量很大,且优化方案缺少相应工程实例进行验证。 本文利用 FLUENT 流体力学软件<sup>[8-10]</sup>设定灌溉系 统的工况参数,对山丘区灌溉系统的加压模式、总 体布局 and 轮灌区的划分进行模拟运算,对比分析 数值模拟和设计计算的出水口状态,确定模拟软 件用于山丘区管网研究有效可行,为进一步山丘 区管网优化设计研究提供新的思路。

## 1 数值模拟模型的建立

### (2) 动量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u w)}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v w)}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho w u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w w)}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_w \end{aligned} \quad (2)$$

### (3) k 方程

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G - \rho \epsilon \quad (3)$$

### (4) ε 方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \epsilon)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_1 \frac{\epsilon}{k} G - \\ C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (4)$$

### (5) α 方程

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha_q}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

式中:  $t$  为时间变量,  $s$ ;  $u_i$  为速度分量,  $m/s$ ;  $x_i$  为坐标分量;  $\rho$  为密度,  $kg/m^3$ ;  $\mu$  为分子黏性系数;  $p$  为压力,  $kPa$ ;  $\mu_t$  为紊流黏性系数;  $G$  为紊动能产生项, 可由下式计算:

$$\mu = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (6)$$

$$G = \mu_1 \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (7)$$

式中:  $C_\mu, \sigma_k, \sigma_\epsilon, C_1, C_2$  均为紊流常数。

### 1.2 网格划分及边界条件选择

管网简化模型由 CAD 创建,并导入 Gambit 中划分网格。由于管道较长,管段网格长度为 0.1 m (见图 1),节点和出口处局部加密,长度为 0.005 m (见图 2),不同轮灌组的网格数均在 20 万左右。入口

### 1.1 紊流模型

曹彪等<sup>[11]</sup>运用 RNG  $k - \epsilon$  紊流模型,对不同流速条件下管道中流体的流动进行了数值模拟,分析了灌溉管网中变径段独特的水流特性及能量耗散机理。据研究经验<sup>[12-14]</sup>,本文亦采用 RNG  $k - \epsilon$  紊流模型,对安良水库灌区管网运行条件下进行压力流量特性模拟研究。采用 N-S 方程建立灌溉管网水流的紊流模型,其控制方程如下。

#### (1) 连续性方程:

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

设为速度入口,分别为各轮灌组干管入口的设计流速。把由地势高差引起的压力水头,等效叠加到入口压力水头的设计值,实现通过建立二维模型对山丘区管网进行数值模拟;同时设定湍流强度为 0.03,水力直径为 0.355 m;所有出口均设为自由出流;湍流模型选用  $k - \epsilon$  模型,稳态过程;考虑到建立的管网模型较为细长,采用双精度解算器;选择非耦合式隐式算法进行求解。

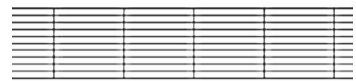


图 1 管段网格划分示意图

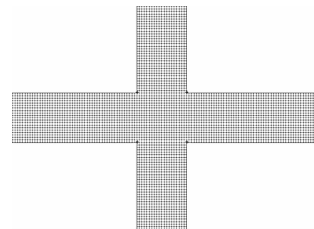


图 2 节点网格加密示意图

## 2 工程实例

### 2.1 工程概况

汉阴县安良水库灌区地貌主要分为河谷阶地、丘陵及中高山三大类型,地面高程在海拔 292 m ~ 500 m 之间,从安良水库放水涵洞至项目区的落差

为 69.96 m, 为典型山丘区灌溉管网。耕地面积 954.53 hm<sup>2</sup>, 其中水田 528.67 hm<sup>2</sup>, 土层深厚, 基本农田多, 是安康市重要的粮油主产区。土壤性质以中壤土为主, 土壤密度为 1.5 g/cm<sup>3</sup>, 主要种植作物为玉米和油菜。结合当地种植作物、地形特点、水源水质条件、投资等因素, 本工程采用管道输水灌溉方式。

## 2.2 输配水管网设计

依据规范<sup>[15]</sup>, 综合考虑项目区的作物组成、灌水方法和经济效益等因素, 进行管网布置(见图 3(a)), 为了建模方便, 在管网平面布置图的基础上, 做相应的线性简化(见图 3(b))。结合灌溉流量分配原则, 并使得同一轮灌组内的管道高程尽量接近, 划分为 5 个轮灌组。其中干管的水力计算结果

见表 1。

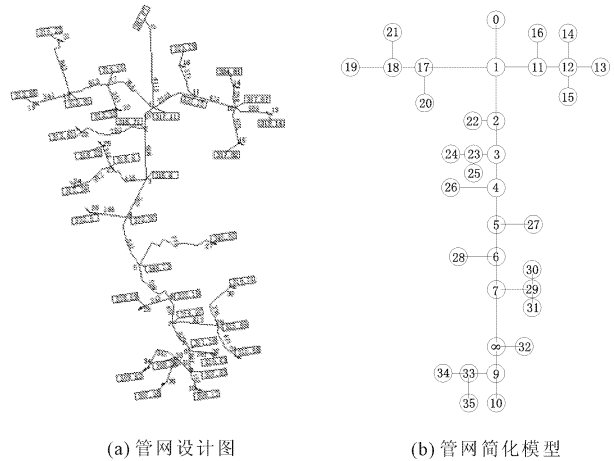


图 3 管网平面布置及简化模型

表 1 干管水力计算表

| 节点 | 管段   | 设计流量<br>/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | 管长<br>/m | 设计流速<br>/(m·s <sup>-1</sup> ) | 总水头损失<br>/m | 地面高程<br>/m | 水压标高<br>/m | 工作压力<br>/m |
|----|------|---|----------|-------------------------------|-------------|------------|------------|------------|
| 1  | 0-1  | 497.55                                      | 4115     | 1.5                           | 25.63       | 321.11     | 361.44     | 40.33      |
| 2  | 1-2  | 149.88                                      | 161      | 1.2                           | 0.94        | 320.71     | 360.50     | 39.79      |
| 3  | 2-3  | 118.49                                      | 606      | 1.2                           | 4.15        | 315.60     | 356.35     | 40.75      |
| 4  | 3-4  | 91.96                                       | 362      | 0.9                           | 1.58        | 319.07     | 354.77     | 35.70      |
| 5  | 4-5  | 85.49                                       | 531      | 0.9                           | 2.04        | 335.53     | 352.73     | 17.20      |
| 6  | 5-6  | 58.32                                       | 528      | 1.2                           | 3.63        | 332.19     | 349.10     | 16.91      |
| 7  | 6-7  | 49.90                                       | 457      | 1.0                           | 1.67        | 329.91     | 347.43     | 17.52      |
| 8  | 7-8  | 26.45                                       | 2291     | 0.9                           | 2.41        | 306.16     | 345.02     | 38.86      |
| 9  | 8-9  | 24.65                                       | 148      | 0.9                           | 1.71        | 313.83     | 343.31     | 29.48      |
| 10 | 9-10 | 21.35                                       | 157      | 0.5                           | 0.81        | 315.36     | 342.50     | 27.14      |

## 3 FLUENT 数值模拟及对比分析

### 3.1 调压池布设

丘陵山区灌溉管网上布设调压池装置, 可有效地削减管道内的工作水头, 又可储水调节管网流量, 从而减小所选供水管道的工作压力和管径以降低工程投资, 提高供水保证率和节省供水成本。减压储水调节装置的设计主要包括四个部分装置的结构、地理位置的选择、容积大小的设计以及装置数量的确定。调压池布置高程按下式计算:

$$H_c = h + \sum h_1 + \sum h_2 + H_0 - h_0 \quad (8)$$

式中:  $H_c$  为设置调压池处的设计地面高程, m;  $h$  为管网下游控制点要求的最小服务水头, m;  $\sum h_1$  为调压池至控制点各级管道的沿程水头损失, m;  $h_0$  为调压池最低水位到安装位置地面的高度, m;  $\sum h_2$  为调压池至控制点各级管道的局部水头损失, m;  $H_0$

为控制点的地面高程, m。

### 3.2 输水管压力模拟分析

输配水管网最大高差为 69.96 m, 节点 1 水压标高 361.4 m, 原项目区并未布置调压池。给水栓处的出流水头设计值一般为 0.3 m~1.2 m<sup>[15]</sup>, 每隔 50 m 设给水栓, 则支管出水口压力水头应在 10 m~20 m 之间。轮灌组 4 所在区域高程介于 329.91 m~335.53 m 之间, 高差较小, 减去水头损失, 出口压力介于 16.91 m~17.52 m 之间, 满足要求。但其它轮灌组高差较大, 出水压力均高于 30 m 水头, 于实际应用不利。由式(8)计算结果, 拟在节点 1 高程 341 m 的位置处和节点 8 高程 328 m 的节点处布设调压池, 进而消减山丘地形大高差引起的管道压力。典型节点调压前后压力模拟图见图 4。并对原项目区(无调压池)(见图 5)和拟建两处调压池(见图 6)两种情况分别对干管节点工作压力进行模拟对比分析。

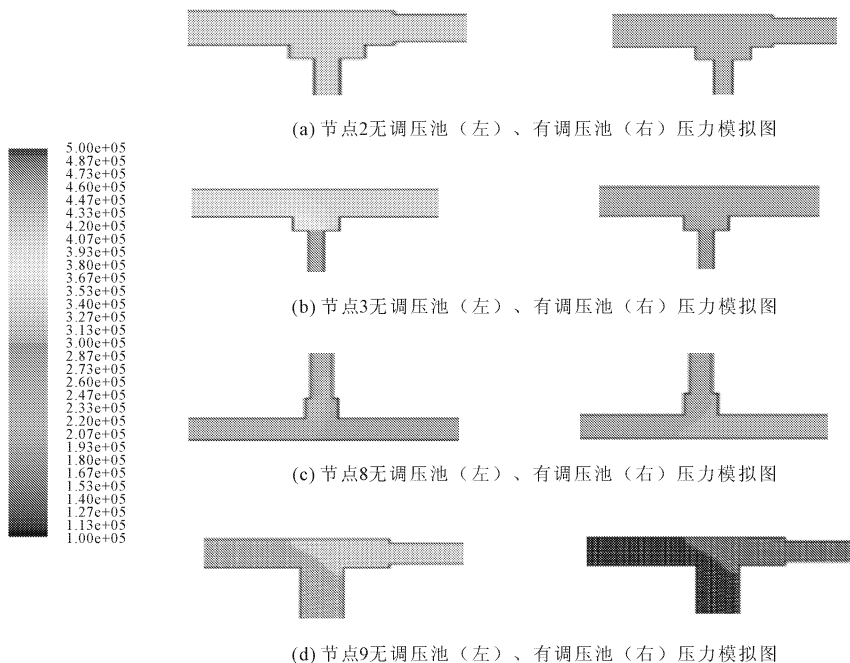


图 4 典型节点调压前后压力模拟图

原工程设计无调压池,各轮灌组入口压力水头取设计值 40 m,干管各节点压力模拟结果与设计值吻合良好,由于地势起伏较大,节点 5 和节点 7 输水区间平均高程 330 m,为本设计实例管网灌溉的最高区域,输水压力水头均低于 20 m,其余管段压力水头均高于 30 m(见图 5);有调压池的情况,模拟结果仍然拟合良好,且由于调压池的布置,在节点 5~7 以外的位置处,降低了由于地形较低引起的高水头,消除了由于地形变化而引起的压力突变,压力水头基本都降低至 20 m 以下,且随着输水距离的增加,水头有明显递减趋势,和水头损失的数值大小基本相符,说明调压池的布设,对山丘区落差较大的轮灌组管道压力具有有效的调节和均衡作用(见图 6)。

### 3.3 流量模拟对比分析

所建立的 5 个轮灌组模型中(见图 7),包括了工程中常见的管道 L 型、T 字型、十字型等布设型式,对各轮灌组单独进行流量模拟,均能收敛。轮灌组 1~5 模拟流量值和设计流量值的相对误差最大值分别为 7.25%、3.23%、7.43%、10.77% 和 5.91% (见表 2),总体吻合度较高。经分析,模拟误差的大小,与该轮灌组的节点数量和总管长有关,其中节点数量是主要因素。轮灌组 1、2 布置形式相对简单,节点有 2 个,模拟精度也较高,且轮灌组 2 总长度小于轮灌组 1,所以轮灌组 2 的模拟精度更高;轮灌组 3、4 节点都有 4 个多且总管长较长,模拟误差会相应增大,符合一般规律。

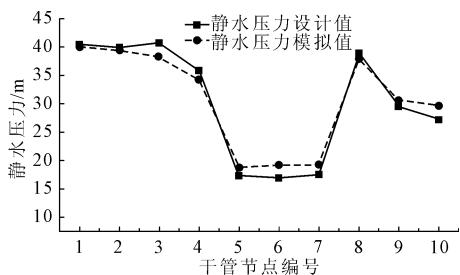


图 5 无调压池干管工作压力模拟值

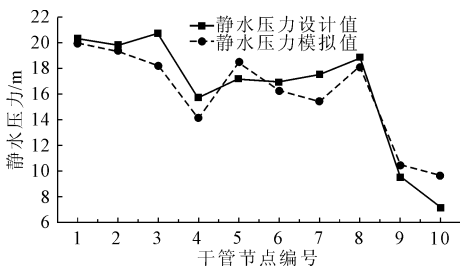


图 6 有调压池干管工作压力模拟值

## 4 结 论

(1) 用 CAD 创建山丘区管网的简化模型,导入 Gambit 中进行网格划分,采用双精度求解器进行求解,把由地势高差引起的压力水头,等效叠加到入口压力水头的设计值,比较有效地解决了用二维模型模拟山丘区细长管网的问题。

(2) 管网工程实例的模拟结果与设计计算的压力和流量值有较好的吻合度,模拟流量值和设计流

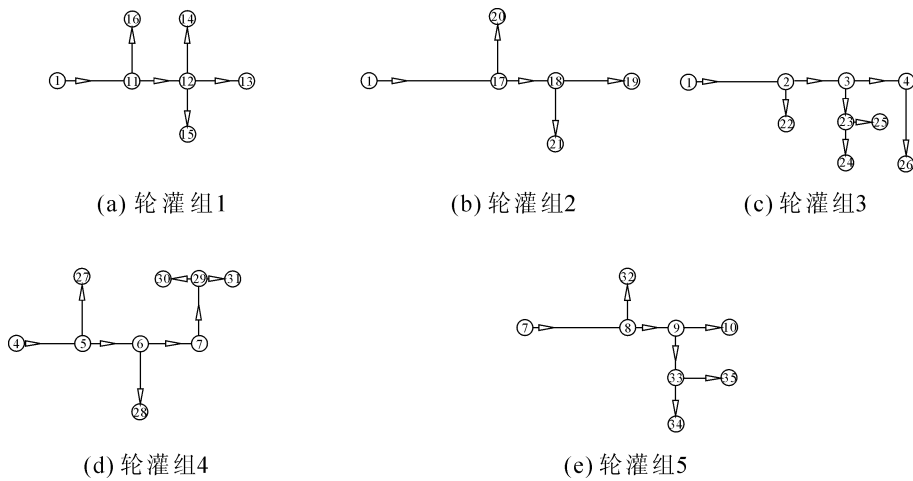


图 7 各轮灌组模型示意图

表 2 各轮灌组计算流量和模拟流量对比表

| 轮灌组 | 出水口节点 | 管段    | 管径/mm | 管长/m | 设计流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ) | 模拟流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ) | 相对误差/% |
|-----|-------|-------|-------|------|---|---|--------|
| 1   | 13    | 12-13 | 90    | 589  | 34.62                                     | 33.55                                     | 3.10   |
|     | 14    | 12-14 | 63    | 258  | 22.35                                     | 23.97                                     | 7.25   |
|     | 15    | 12-15 | 63    | 157  | 22.35                                     | 23.79                                     | 6.43   |
|     | 16    | 11-16 | 63    | 371  | 22.35                                     | 23.91                                     | 6.99   |
|     | 19    | 18-19 | 63    | 141  | 30.35                                     | 31.33                                     | 3.23   |
| 2   | 20    | 17-20 | 90    | 253  | 44.70                                     | 45.36                                     | 1.48   |
|     | 21    | 18-21 | 90    | 843  | 44.70                                     | 45.51                                     | 1.82   |
| 3   | 22    | 2-22  | 90    | 750  | 37.56                                     | 34.77                                     | 7.43   |
|     | 24    | 23-24 | 90    | 123  | 40.39                                     | 37.10                                     | 7.36   |
|     | 25    | 23-25 | 90    | 267  | 44.70                                     | 42.08                                     | 5.86   |
|     | 26    | 4-26  | 63    | 85   | 22.35                                     | 23.40                                     | 4.71   |
| 4   | 27    | 5-27  | 90    | 771  | 44.70                                     | 49.52                                     | 10.77  |
|     | 28    | 6-28  | 63    | 343  | 22.35                                     | 24.58                                     | 9.98   |
|     | 30    | 29-30 | 63    | 336  | 22.35                                     | 23.43                                     | 4.82   |
|     | 31    | 29-31 | 63    | 471  | 22.35                                     | 22.04                                     | 0.69   |
|     | 32    | 8-32  | 63    | 60   | 22.35                                     | 23.64                                     | 5.78   |
| 5   | 33    | 9-33  | 63    | 137  | 22.35                                     | 23.67                                     | 5.91   |
|     | 34    | 33-34 | 63    | 379  | 22.35                                     | 23.47                                     | 5.01   |
|     | 35    | 33-35 | 63    | 205  | 22.35                                     | 23.29                                     | 4.21   |

量值的相对误差最大值分别为 7.25%、3.23%、7.43%、10.77% 和 5.91%。模拟精度与该轮灌组的节点数量和总管长有关,其中节点数量是主要因素。

(3) 调压池可以有效地解决山丘区压力较高和分布不均匀的问题。对原项目设计(无调压池)和有调压池的情况进行数值模拟和对比分析,模拟值和设计值吻合良好。

(4) FLUENT 软件可以较准确地模拟山丘区灌溉管网设计中的主要参数,数值模拟作为管网优化研究的工具,能大大提高管网流态计算的效率,可以

通过建模快速计算并验证管网优化方案的合理性,并便于结合模拟结果进行模型的调整和重新计算,可以为管网优化设计研究提供新的思路。

#### 参考文献:

- [1] 谢清华.山区小流域灌溉水利用系数研究[J].中国农村水利水电,2011(3):33-34.
- [2] 苏保国.山区自流灌区自压管道灌溉技术应用研究[J].中国农村水利水电,2008(12):14-16.

(上接第 212 页)

- [3] 张 峰,马树升,樊铭京,等.丘陵山区重力式供水设置网中减压储水装置的管网优化分析[J].山东农业大学学报,2010,41(1):117-121.
- [4] Estrada C, Gonzalez C, Aliod R, et al. Improved pressurized pipe network hydraulic solver for applications in irrigation systems[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering – ASCE, 2009, 135(4):421-430.
- [5] Gorev N R. Noniterative implementation of pressure-dependent demands using the hydraulic analysis engine of EPA – NET2[J]. Water Resources Management, 2013, 27(10), 3623-3630.
- [6] Gonzalez Cebollada C, Macarulla B, Sllan D. Recursive design of pressurized branched irrigation networks[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering – ASCE, 2011, 137(6):375-382.
- [7] Khadra R, Lamaddalena N. Development of a decision support system for irrigation systems analysis [J]. Water Resources Management, 2010,24(12):3279-3297.
- [8] 李进良.精通 FLUENT6.3 流场分析[M].北京:北京化学工业出版社,2009.
- [9] 陈 超.常见管道局部水头损失的数值模拟[D].天津:天津大学,2008:49-52.
- [10] 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.
- [11] 曹 彪,吕宏兴,朱德兰,等.灌溉管网中变径管水力特征的试验研究与数值模拟[J].灌溉排水学报,2015,34(3):24-27.
- [12] 师志刚,刘群昌,白美健,等.压力管道输水灌溉优化设计研究进展[J].水利与建筑工程学报,2017,15(1):1-4.
- [13] 翟保林,刘亚坤.高水头明流泄洪洞三维数值模拟[J].水利与建筑工程学报,2017,15(3):31-34.
- [14] 章少辉,刘群昌,白美健,等.规模化灌溉管网非恒定流模拟研究[C]//中国农业工程学会农业水土工程专业委员会学术研讨会论文集,2014:325-328.
- [15] 中华人民共和国水利部.灌溉与排水工程设计规范:GB 50288—99[S].北京:中国计划出版社,1999.