

## 田间便携式短喉槽的数值模拟

肖苡辘 王文娥\* 胡笑涛

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100)

**摘要** 为进一步研究田间便携式短喉槽过槽的水流特性及测流精度,基于临界流原理和 RNG  $k-\epsilon$  三维湍流模型,利用 FLOW-3D 软件对喉道宽度为 76 mm 的田间便携式短喉槽在 16 种工况下的水力特性进行全流场数值计算,获得了时均流场、槽内水流流态、断面流速分布及佛汝德数,并与试验实测值进行对比分析。结果表明:1)模拟流场分布及流态与模型试验情况具有一致性,量测流量范围宽,最大可达 40 L/s,能够满足田间量水的流量要求;2)水深、断面流速、佛汝德数模拟值与实测值基本吻合,相对误差均小于 10%;3)该短喉槽最大水头损失占总水头的 12.89%,小于长喉槽最大水头损失占总水头的 13%;4)通过回归分析得到了田间便携式短喉槽的上游水深-流量计算公式,其最大测流误差为 9.95%,满足灌区量水精度的要求。

**关键词** 田间便携式短喉槽;数值模拟;流场;流速;佛汝德数;水头损失;上游水深-流量公式

中图分类号 S 274.4

文章编号 1007-4333(2016)05-0129-10

文献标志码 A

## Numerical simulation of portable short-throat flume in the field

XIAO Yi-zhou, WANG Wen-e\*, HU Xiao-tao

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

**Abstract** Portable short-throat flume, which measuring the discharges of water inlet in the field, is a new flow-measuring device. Based on the principle of critical flow and RNG  $k-\epsilon$  three-dimensional turbulence model, simulations of 16 working conditions by FLOW-3D software were carried out on the portable short-throat flume with 76 mm width to study hydraulic performance. The time-averaged flow field, flow regime, velocity distribution and Froude numbers were obtained and compared with measure values. The results showed that: Simulated values were consistent with the measured values within  $\pm 10\%$  errors and the measuring range of the flume was up to 40 L/s; Compared to long-throat flume, the head loss of portable short-throat flume in the field was less; Furthermore, equations of upstream depth with discharge under different working conditions were fitted by regression analyses, and the relative error was less than 9.95%. In conclusion, the portable short-throat flume in the field meets the demand for precise measurement of discharges of water inlet in the field.

**Keywords** portable short-throat flume in the field; numerical simulation; flow field; velocity; Froude number; head loss; equations of upstream depth with discharge

灌区量水是灌区实行计划用水和准确引水、输水、配水、灌水的重要手段,是利用价格杠杆,遵循价值规律,控制用户用水量与水费征收的主要依据<sup>[1]</sup>。对于现有的量水设施,从经济实用、稳定可靠的角度考虑,量水槽是灌区最适合、最易大范围推广应用的一种明渠量水设施<sup>[1-2]</sup>。目前关于量水槽的研究较

多,研究成果多为应用于渠道的量水测流,对于田间进水口小型量水设备的研究很少<sup>[2]</sup>。量水槽的应用受到渠道类型、尺寸以及底坡等的影响,形成了水量计量较为精确,而量水槽配套率低、通用性不强<sup>[3-4]</sup>,且分散到用水户的水量难以准确量测和控制的情况,这与灌区的量水需求不符。由于田间进水口数

收稿日期: 2015-06-04

基金项目: 杨凌示范区科技计划项目(2015NY-30); 公益性行业(农业)科研专项(201503125); 国家自然科学基金项目(51179163)

第一作者: 肖苡辘, 硕士研究生, E-mail: vivianshaw1117@163.com

通讯作者: 王文娥, 副教授, 主要从事流体机械及排灌设备研究, E-mail: wangwene@nwsuaf.edu.cn

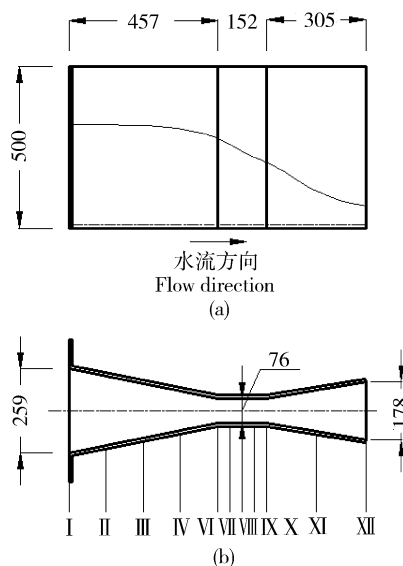
量较大,不适宜采用昂贵复杂的量水设备,应该使用简单、经济、通用性强且具有合理精度的量水设备。现有量水设备的研究成果还不能满足测流精度高、水头损失小的田间进水口测流需求。

针对田间进水口量水设备缺乏的现状,选定体型适宜的量水设备尤为重要。由于长喉槽占地面积过大,无喉槽水力特性复杂难测,因此短喉槽较适宜作为田间进水口量水设备<sup>[5]</sup>。当前对于短喉槽的研究不够完善,研究方向多为巴歇尔量水槽,对其他体型或新体型短喉槽测流研究很少。Cone V M<sup>[6]</sup>于1917年首次提出由收缩段、喉道段、扩散段组成的文丘里量水槽。Parshall R L<sup>[7-8]</sup>改进了文丘里槽,命名为巴歇尔量水槽。Parshall R L研究认为巴歇尔量水槽水头损失不大、不易产生淤积、测流精度高。Wright S J等<sup>[9]</sup>研究了巴歇尔量水槽内流体粘度对水深流量关系式的影响,并建立了数值模型,真实地模拟出巴歇尔量水槽内流体的运动情况。李杰等<sup>[10]</sup>对巴歇尔量水槽进行了水力特性研究试验,得到水深-流量公式及上游水深与水头损失关系。Cox A L等<sup>[11]</sup>在佛汝德数为0.67~1.31、流量最大至0.854 m<sup>3</sup>/s的工况下对喉口宽度为1.5 m的巴歇尔量水槽进行了水力试验,得到相应的佛汝德数计算公式、水深-流量公式。至今,巴歇尔量水槽是国内外灌区明渠流量测量中广泛使用的量水设施之一,但缺点是结构复杂、造价高、施工困难,不适用于淹没出流流量测量<sup>[1,3]</sup>。田间便携式短喉槽是在巴歇尔量水槽的基础上设计的一种便携式、槽底为平底的短喉槽。本研究通过水工模型试验和FLOW-3D数值模拟研究田间便携式短喉槽的水力性能,旨在系统研究该量水槽的水力特性及其数值模型应用于数值模拟的可靠性,以为合理确定田间便携式短喉槽的量水公式、优化体型、提高测流精度提供参考。

## 1 量水槽体型设计及测流试验

### 1.1 量水槽体型设计

根据临界流理论与文丘里型量水槽的测流原理,田间便携式短喉槽是在小型巴歇尔量水槽<sup>[8,12]</sup>的基础上设计的一种便携式、槽底为平底的短喉槽,采用镀锌铁皮材料制成。田间便携式短喉槽包括收缩段、喉道段和扩散段,纵向总长度为914 mm,侧壁高度为500 mm,侧壁垂直于底板。本研究在8种流量下分别进行了田间便携式短喉槽自由出流、淹没出流测流试验,量水槽结构简图以及槽内控制断面划分如图1所示。槽内控制断面为测流断面,各控制断面距离量水槽进口首断面的距离见表1。



I、II、…、XI为测流断面序号。单位:mm  
I, II, …, XI mean number of cross-section. Unit:mm

图1 田间便携式短喉槽结构简图(a)及其槽内控制断面划分(b)

Fig. 1 Structure sketch and control section division of the portable short-throat flume in the field

表1 田间便携式短喉槽各测流断面距量水槽进口断面的距离

Table 1 Distance between each measuring cross-section and inlet of portable short-throat flume mm

测流断面序号 No. of cross-section	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
与进口断面的距离 Distance from inlet	0.00	114.25	228.50	342.75	457.00	495.00	533.00	571.00	609.00	761.50	914.00

### 1.2 试验装置与方法

试验在西北农林科技大学水工水力学与泥沙实

验室进行。试验装置由泵房、供水管道、稳水池、回水渠段、薄壁三角堰及田间便携式短喉槽组成

(图 2)。根据田间地面灌溉的实际应用情况,尤其是畦灌法,设计在田块进水口处安装该量水槽,进水口前段部分常为类似蓄水坑的水流情况,进水口前段部分的过水断面较田块进水口大,其水流平缓,因

此在试验中将田间便携式短喉槽安置在稳水池中,在量水槽两侧设置高 500 mm 挡水墙以形成类似田间进水口的水流情况。

灌溉经验表明,在我国北方灌区地面灌溉条件

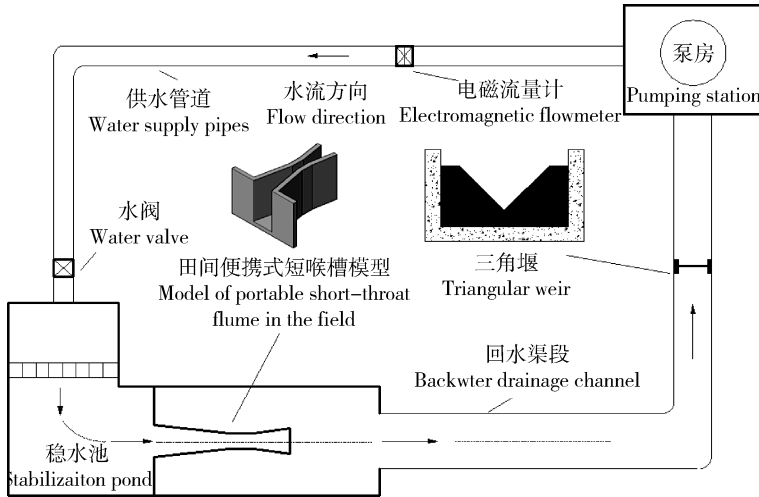


图 2 田间便携式短喉槽试验装置平面布置

Fig. 2 Layout of portable short-throat flume experiment

下,末级渠道的流量范围一般为 10~50 L/s<sup>[2]</sup>,本试验实测流量达到 40.01 L/s。本研究在自由与淹没出流条件、8 组流量(6.77、10.67、14.41、21.44、25.17、31.83、35.91、40.01 L/s)工况下进行了田间便携式短喉槽测流试验,其中淹没出流工况下淹没度控制在 0.70~0.95。试验通过开启水泵、调节水阀改变流量大小,待水面稳定后观测回水渠道上的薄壁三角堰测针读数并计算得到实际过槽流量,计算公式<sup>[13]</sup>为:

$$Q = 1.343H^{2.47} \times 1000 \quad (1)$$

式中:Q 为流量,L/s;H 为薄壁三角堰的堰上水头,m。量水槽内 11 个控制断面的水位采用 SCM60 型水位测针量测,精度 0.1 mm,水位测点为测流横断面中轴线底部和中轴线处的水深位置;采用 Vectrino 小威龙三维点式超声波流速仪(挪威 Nortek AS 公司生产)量测断面流速,设定流速采样频率为 25 Hz,数据采集时间控制在 20 s 左右,每个测点可收集约 400 个数据。横断面测点的布设按照从自由水面由上至下等间距降低 2 cm,从横断面中垂线向两端侧壁等间距移动 2 cm 设置。

## 2 数学模型的建立

### 2.1 控制方程

田间便携式短喉槽测流为不可压缩黏性流体运

动,根据基本的物理守恒定律,过槽水流为牛顿流体,则量水槽测流可运用连续性方程和 Navier-Stokes 方程<sup>[14-19]</sup>描述。连续性方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (2)$$

动量方程(Reynolds 方程):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i u_j}) + S_i \quad (3)$$

式中: $\rho$  为流体密度,研究对象为水,取值为 1000 kg/m<sup>3</sup>;t 为时间,s; $\mu$  为流体动力黏滞系数,N·s/m<sup>2</sup>,本次数值模拟在 20 °C 条件下进行,取值为 1.002; $u_i, u_j, u'_i, u'_j$  为各脉动流速分量,m/s; $p$  为压强,Pa; $S_i$  为源相,代表不能包括到控制方程的非稳定项、对流项与扩散项中的所有其他各项之和,N/m<sup>3</sup>; $i, j$  为张量角标, $i, j=1, 2, 3$ ,取值表示三维  $x, y, z$  方向。

关于湍动能  $k$  和湍动能耗散率  $\epsilon$ ,湍动能  $k$  方程为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + \rho \epsilon \quad (4)$$

湍动能耗散率  $\epsilon$  方程:

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} =$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon}^* \varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

式(4)~(5)中: $k$ 为湍动能, $\text{m}^2/\text{s}^2$ ;  $\varepsilon$ 为湍动能耗散率, $\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^3$ ;  $\mu_{\text{eff}}$ 为流体的有效动力黏滞系数, $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ ,  $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$ ,其中  $\mu_t = \rho C_\mu k^2/\varepsilon$ ,  $C_\mu = 0.0845$ ;  $\alpha_k, \alpha_\varepsilon$ 为经验常数,  $\alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.39$ ;  $G_k$ 为由于平均速度梯度引起的湍动能  $k$  的产生项,  $G_k = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ ; 模型常数  $C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \frac{\eta(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3}$ ,  $C_{1\varepsilon} = 1.42$ ,  $\eta = (2E_{ij} \cdot E_{ij})^{1/2} \frac{k}{\varepsilon}$ , 时均应变率  $E_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ ,  $\eta_0 = 4.377$ ,  $\beta = 0.012$ ; 模型常数  $C_{2\varepsilon} = 1.68$ 。

## 2.2 数值模型建立与网格划分

根据田间便携式短喉槽的设计尺寸以及试验布置,采用 Auto CAD 建立三维几何模型。为使模拟的水流流态更为接近实际流态,依据实际测流过程中的布设情况,量水槽模型进口处连结一个长 2.5 m、宽 2.0 m 的渠道作为上游进水口,该渠道的过水断面大于量水槽进口断面面积,以保证水流平稳;量水槽模型出口下游部分连结一段宽 1.0 m、一定长度的渠道,作为下游出水口。

Flow-3D 软件对模型网格划分采用 Favor (Fractional area volume obstacle representation) 技术。Favor 技术是运用有限差分法,根据单元中没

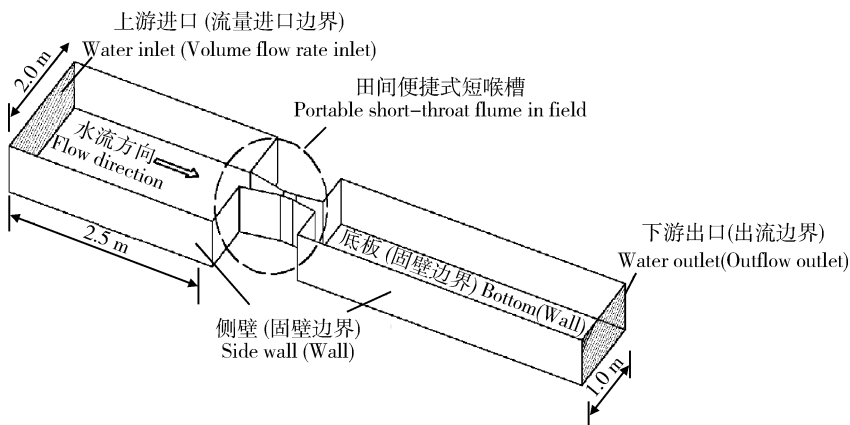


图3 田间便携式短喉槽数学模型及其边界条件

Fig. 3 The entire model geometry and boundary conditions of portable short-throat flume in the field

## 3 结果与分析

### 3.1 模拟结果与试验结果对比

#### 3.1.1 流态分析

试验中发现:在本试验研究的各工况下,当水泵

有被计算对象占据的面积以及体积的比例模拟复杂形状,能够以较少数量六面体网格单元来消除和顺滑不平整区域,使建立起来的网格模型不会失真。该量水槽数值模型单元网格尺寸为  $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ ,整个数值模型共划分网格总数为 543 000 个。

### 2.3 计算方法与边界条件

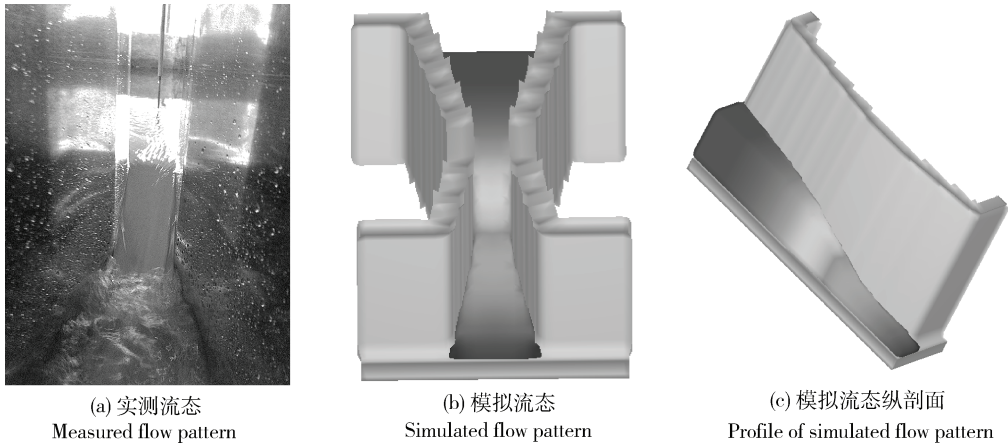
基于计算流体力学软件 Flow-3D,采用 RNG  $k-\varepsilon$  三维湍流模型进行数值模拟,并采用有限差分法将模拟控制方程离散为代数方程组进行求解计算,对流项采用二阶迎风格式,扩散项采用二阶中心差分格式,最小步长值设为  $10^{-6} \text{ s}$ 。TruVOF 方法只计算含有液体的单元而不考虑只含气体的单元,很大程度上减少了模型收敛所需的时间,对自由液面的描述更加准确,为解决水力学问题提供了更高的精度和效率。

某一工况下,槽内水流为恒定流,边界条件设定如下(图3):上游进口设置为流量进口边界,根据试验中实测流量给定一系列的进口流量值,不设定流体高度和流动方向,即默认流体从整个边界开放区域流入,流动方向与边界垂直;下游出口设置采用出流边界(若为淹没出流工况,则在量水槽出口下游 2~3 m 处设立一定高度的坎进行壅水,形成淹没出流工况);渠道底部均及侧壁均选择固壁边界;渠道顶部空气入口设定为对称边界,即默认无流体穿过该边界。

以及上游水阀开启时,水流快速通过上游供水管道流入稳水池,在稳水池通过田间便携式短喉槽向下游回水渠道下泄;随着水的不断流入,稳水池的水位有一定的抬升,量水槽内水面缓缓上升;随着时间的推移,稳水池水位上升至一定水位后趋于平稳,量水

槽内水面逐渐稳定,整个流场趋于稳定。水流经过田间便携式短喉槽收缩段时比较平顺,在收缩段接近喉道段的部分水位开始缓缓下降;由于受到喉道段侧收缩的影响,水流经过喉道段时开始有明显的水面降落,并在喉道段内产生临界流,水流由缓流转变至急流;随后通过扩散段下泄至下游回水渠道。根据试验实测流量、量水槽出口出流情况(自由出流或

淹没出流),利用 Flow-3D 软件模拟各工况下田间便携式短喉槽的时均流场变化结果,所得模拟结果与试验观测结果一致。图 4(a)为自由出流工况下流量  $Q$  为 10.67 L/s 的试验实测流态,图 4(b)和(c)为自由出流工况下流量  $Q$  为 10.67 L/s 的模拟流场分布,数值模拟结果显示量水槽内水面由于受到侧收缩的影响不断下降的流态,与实测流态一致(图 4(a))。



流量  $Q$  为 10.67 L/s,自由出流。Discharge is 10.67 L/s with free outflow.

图 4 田间便携式短喉槽实测流态与模拟流态对比(下游视角)

Fig. 4 Comparison of measured and simulated flow state of the portable short-throat flume in the field (downstream view)

### 3.1.2 纵剖面水面线

纵剖面水面线是形象表达过槽水流流态的重要元素。图 5 示出模拟与实测情况下纵剖面水面线的变化规律。可见,田间便携式短喉槽收缩段水面平缓且略有下降的趋势,为渐变流;在收缩段内接近喉道段的部分由于受到侧收缩的影响,水面有明显下降,水面线曲率明显增大,为急变流;喉道段水面急

剧跌落,水流流态从缓流转变至急流;扩散段水面在自由出流工况下继续下降且快速下泄至槽外,在淹没出流工况下产生水跃,水面波动较大,最终水面缓缓抬高至下游水位。通过对所得模拟结果与试验观测数据对比分析可知,不同流量、不同出流条件下模拟与实测水面线的变化规律趋势相同,模拟值与实测值较为接近,平均相对误差(相对误差=(模拟

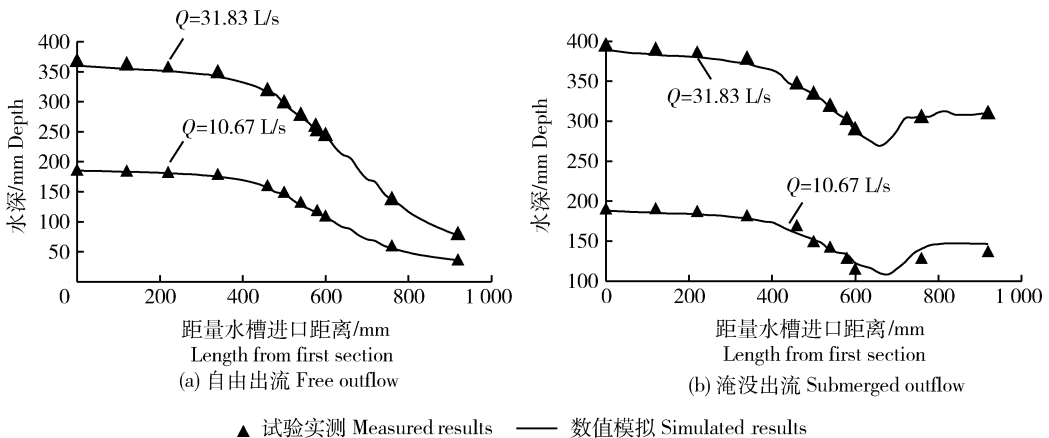


图 5 田间便携式短喉槽中轴线纵剖面水面线变化规律

Fig. 5 Variation of water surface profiles at the centerline of portable short-throat flume

值-实测值)/实测值)为1.72%，最大相对误差为-9.21%。由此可得，利用Flow-3D软件模拟该量水槽过槽水流流态及其模拟参数值的设置是适宜的。

### 3.1.3 断面流速分布

流速是反映过槽水流运动规律的重要元素，试验测得16种工况下176个横断面流速分布的实测值与相同工况下的数值模拟值吻合。由于流量与上游Ⅲ断面水深具有稳定关系，因此选择Ⅲ断面作为断面流速分布的参考断面。以流量为21.44 L/s自由出流和淹没出流工况下的Ⅲ断面模拟与实测(采用SURFER软件绘制)断面流速分布为例(图6)，

可以看出，无论是自由出流还是淹没出流条件，Ⅲ断面最大流速均发生在横断面中部偏下，由断面中心至边壁流速逐渐减小，模拟的断面流速分布与实测断面流速分布基本吻合。由图6(c)和(d)沿程平均流速分布图可知，在量水槽收缩段以及喉道段内，流速沿程逐渐增大，尤其在喉道段内，流速变化曲线曲率较大，流速增幅较大；在量水槽扩散段自由出流工况下流速持续增大，淹没出流工况下流速急剧减小且降幅较大。自由出流工况下模拟值与实测值最大相对误差仅-7.09%，淹没出流工况下模拟值与实测值最大相对误差为8.65%，故模拟结果可信程度较高。

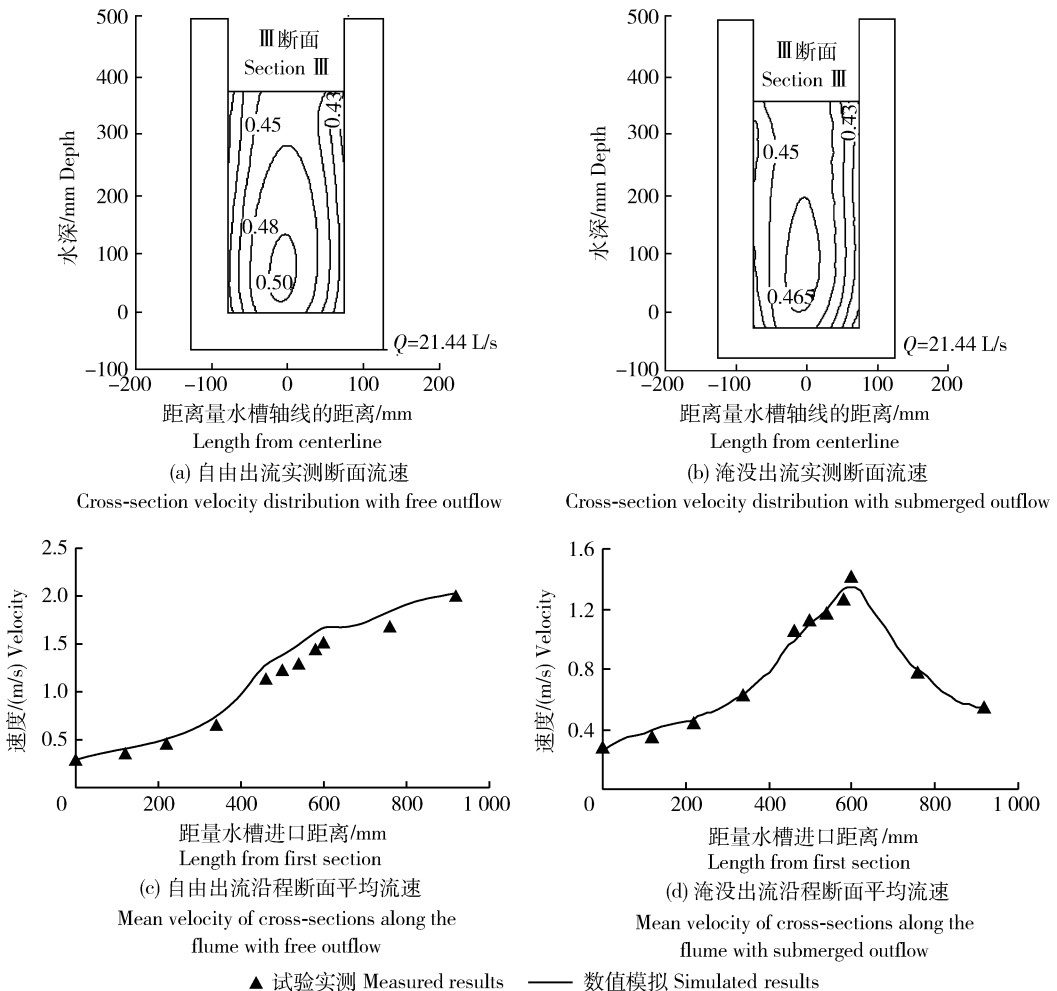


图6 Ⅲ断面流速分布及量水槽沿程流速变化

Fig. 6 Velocity distributions of section III and variation of velocity along portable short-throat flume

综上，本研究应用的数学模型能够较真实地反映田间便携式短喉槽过槽水流运动的流场分布。在

此基础上，分析总结试验测得数据，并结合Flow-3D软件模拟各工况下田间便携式短喉槽水流运动所获

得的模拟值,能够较全面地分析该量水槽的水力特性,并得到满足灌区量水精度要求的流量公式。

### 3.2 佛汝德数分析

在明渠水力学中,佛汝德数  $Fr$  是一个非常重要的参数,可作为判别明渠水流流态的标准。试验测得 16 种工况下 176 个控制断面的佛汝德数值均与相同工况下模拟值吻合。以流量为 21.44 L/s 自由出流和淹没出流工况下的实测和模拟佛汝德数沿程变化规律为例(图 7),自由出流工况下的佛汝德

数沿程增大,淹没出流工况下佛汝德数整体上呈关于喉道段末断面的正态分布。量水槽收缩段流态为缓流,其佛汝德数  $< 0.5$ ,满足测流规范要求<sup>[20]</sup>;在喉道段佛汝德数沿程增大,水流由缓流( $Fr < 1$ )转变至急流( $Fr > 1$ ),淹没出流工况下临界流( $Fr = 1$ )的产生位置比自由出流工况下更偏向下游方向;在扩散段自由出流与淹没出流工况下的佛汝德数有不同的趋势,自由出流工况下佛汝德数继续增长,淹没出流工况下佛汝德数减小且最终  $< 1$ 。

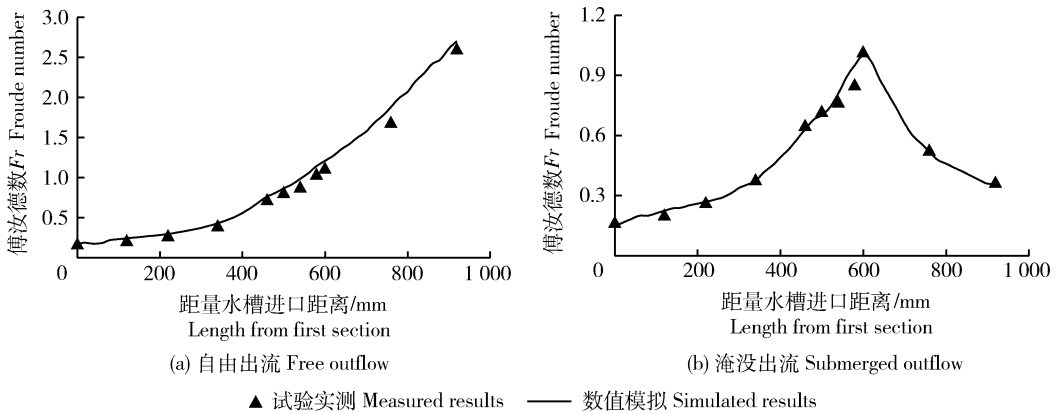


图 7 流量为 21.44 L/s、自由出流与淹没出流工况下田间便携式短喉槽内  $Fr$  沿程变化

Fig. 7  $Fr$  variation along the flow of the portable short-throat flume in the field under free and submerged outflow conditions when discharge is 21.44 L/s

### 3.3 水头损失分析

由于实际液体存在粘滞性,为了计算流经喉槽的实际流量,水流流经量水槽时因摩擦、收缩而引起的水头损失是必须考虑在内的。对于喉口宽度  $< 22.86$  m 的短喉槽,水头损失较小,可以用上、下游测量水头差近似代替<sup>[2]</sup>,故试验选取田间便携式短喉槽收缩段首断面和扩散段末断面为上、下游水头控制断面,计算断面总水头:  $h = Z + P/\gamma + v^2/2g$ ,上、下游控制断面总水头之差为该量水槽的水头损失  $h_w$ (表 2)。可知,数值模拟与水工试验结果的误差小于 10%,证明该数学模型是可靠且有效的。自由出流工况下最小水头损失占上游总水头的 4.11%,最大水头损失占上游总水头的 10.82%,水头损失主要集中在 0.08~0.11 倍总水头;淹没出流工况下最小水头损失占上游总水头的 9.94%,最大水头损失占上游总水头的 12.89%,水头损失主要集中在 0.10~0.12 倍总水头,2 种工况下水头损失占上游总水头值均  $<$  长喉槽的 13%<sup>[21]</sup>,故该量水槽与长喉槽相比水头损失较小,可以应用于灌区允许

水头损失小的灌区量水。

由表 2 可知,田间便携式短喉槽槽内自由出流工况下的水头损失比淹没出流工况下的水头损失小,此结论与李杰等<sup>[10]</sup>研究的巴歇尔量水槽水力特性试验关于水头损失分析结论有所不同。其原因是李杰等研究的巴歇尔量水槽是安装在明渠的模型,水头损失计算所选取的上、下游控制断面均为距离量水槽进、出口一定长度距离的上、下游渠道断面,故在自由出流工况下形成在槽尾下游渠道的水跃所消耗的能量是计算在巴歇尔量水槽水头损失之内,因此安装连接在明渠的巴歇尔量水槽在自由出流工况下的水头损失比淹没条件下的水头损失大;田间便携式短喉槽在淹没条件下槽内已经形成一定程度的水跃,此时槽内水跃掺混充分可达到消能的效果,而自由出流工况下槽尾水深低、水层薄、流速快,槽内还未形成水跃进行掺混,因而自由出流工况下消耗在槽尾下游部分的能量并未计入槽内水头损失,所以该量水槽在自由出流工况下槽内水头损失比淹没出流工况下的水头损失小。

表2 田间便携式量水槽水头损失计算结果

Table 2 Calculation of head loss of portable short-throat flume

出流类型 Outflow condition	流量/(L/s) Discharge	水头损失 $h_w$ /mm Head loss		相对误差 Relative error/%
		数值模拟结果 Simulation	水工试验结果 Experiment	
自由出流 Free flow	6.77	6.1	5.7	7.02
	10.67	12.8	12.7	0.79
	14.41	18.8	19.5	-3.59
	21.44	23.5	25.3	-7.11
	25.17	27.7	29.7	-6.73
	31.83	38.4	39.7	-3.27
	35.91	43.1	42.9	0.47
	40.01	43.7	43.6	0.23
淹没出流 Submerged flow	6.77	15.7	16.5	-4.85
	10.67	23.4	22.6	3.54
	14.41	29.6	29.2	1.37
	21.44	33.3	34.7	-4.03
	25.17	35.8	36.2	-1.10
	31.83	40.1	39.8	0.75
	35.91	46.7	44.3	5.42
	40.01	56.2	57.0	-1.40

### 3.4 上游水深-流量公式

简明实用的流量公式及较高的量水精度是衡量量水设备优劣的重要技术指标。短喉槽因喉道短,喉道上的水面曲线明显弯曲,水压力不按静压分布,流量  $Q$  也不再与上游水头  $h^{3/2}$  成比例<sup>[1]</sup>。其流量公式常采用指数形式,但其系数和指数都是个别率定的。量水槽通过使过槽水流达到临界水深而达到最佳测量效果,此时流量只需通过测量上游水深便可得到,淹没出流工况下还需对过槽水流的淹没度  $S$  (下游水深比上游水深之值)进行测量才能准确进行率定。依据试验测得数据分析量水槽上游各断面(I~V断面)水深与流量的关系可得量水槽Ⅲ断面水深与流量的相关性较高,复相关系数  $R^2$  为 0.985 9,因此选定Ⅲ断面水深为上游水深计算值来测定流量。

田间便携式短喉槽在自由出流时流量主要与上游水深有关,基于流量与上游水深的模拟值,通过回归分析得到上游水深与流量的经验公式:

$$Q = 193.4h^{1.7132} \quad (6)$$

式中: $Q$ 为流量,L/s; $h$ 为量水槽收缩段Ⅲ断面处的水深,m。在淹没出流时流量主要与上游水深和淹

没度有关,基于流量与上、下游水深的模拟值,本研究通过逐步回归分析建立了具有量纲和谐性的流量计算公式:

$$Q = 438.1S\sqrt{1-S}h^{1.5998} (0.7 \leq S \leq 0.95) \quad (7)$$

式中: $S=h_{\text{下}}/h_{\text{上}}$ 为淹没度; $h_{\text{上}}$ 为量水槽收缩段首断面(I断面)的水深,m; $h_{\text{下}}$ 为量水槽扩散段尾断面(Ⅴ断面)的水深,m。

在自由出流与淹没出流工况下,由式(6)和式(7)所得计算流量与薄壁三角堰测得的实测流量进行比较,结果表明二者存在较好的一致性(图8)。式(6)所得计算流量与实测流量的平均相对误差为 1.11%,最大相对误差为 -7.54%;式(7)所得计算流量与实测流量的平均相对误差为 3.16%,最大相对误差为 9.95%。灌区田间量水精度要求特设量水设施误差不超过 10%<sup>[2]</sup>,故本研究所建立的各工况下该量水槽流量公式可以满足测流精度要求。以上所得流量公式形式简单,量水精度较高,为后续灌区应用或不同规格尺寸量水槽流量公式的拟定作出了参考。



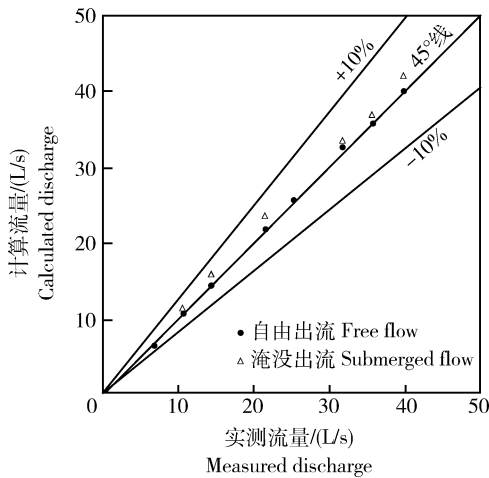


图8 田间便携式量水槽实测流量与计算流量对比

Fig. 8 Comparison of measured and calculated discharges through portable short-throat flume

## 4 讨论与结论

目前已研制的各种量水槽仅适用于渠道上的量水,田间进水口的水量计量颇为缺乏,且量水槽受到渠道类型、尺寸及底坡的限制,需要考虑泥沙淤积的影响,种类多推广少,故现有量水槽在经济性、适用性、实践性上存在一定的不足。针对这一现状,研制经济实用、适用于田间进水口水量计量的新型量水槽迫在眉睫。适用于田间进水口水量计量的新型量水槽不宜采用占地面积较大的长喉槽以及水力特性复杂的无喉槽,故采用短喉槽来进行田间进水口水量量测较为合适。本研究在巴歇尔量水槽的基础上,设计出一种便携式、槽底为平底的新型短喉槽,试验结果表明该体型量水槽上游水面稳定,可以准确量测过槽流量,尤其是在淹没出流条件下,虽然量水精度略低于自由出流,但仍然满足灌区量水精度要求。试验表明其最大水头损失为上游总水头的12.89%,小于长喉槽的13%<sup>[21]</sup>。由于该量水设施为便携式,故抗淤堵能力强。田间便携式短喉槽结构简单、造价低廉、施工方便,针对田间进水口的水量计量,相较于巴歇尔量水槽、长喉槽复杂的设计与施工,具有明显的优越性。

目前常用的CFD(Computational fluid dynamics)软件较多,用于明渠水流流场模拟的软件主要有FLUENT、FLOW-3D等,本研究采用FLOW-3D软件,结合量水槽的工作原理对田间便携式短喉槽水流流场分布进行数值模拟研究,模拟

值与实测值的误差控制在10%以内,满足灌区田间量水精度要求。本研究采用的RNG  $k-\epsilon$  三维湍流模型相较于标准  $k-\epsilon$  通过修正湍动粘度、考虑主流的时均应变率,从而可以更好地处理高应变率及流向弯曲程度较大的流动。FLOW-3D软件中采用的TruVOF方法相较于传统的VOF方法很大程度上减少了模型收敛所需的时间,对自由液面的描述更加准确,为解决水力学问题提供了更高的精度和效率<sup>[17]</sup>。

灌溉经验表明在我国北方灌区在地面灌溉条件下,末级渠道的流量范围一般为10~50 L/s<sup>[2]</sup>。田间便携式短喉槽量程为6~40 L/s,量测范围基本可以满足灌区田间进水口水量计量的要求。通过试验与数值模拟相结合的方法系统研究了田间便携式短喉槽的水力特性,主要研究结果如下:

1)由16种工况条件下田间便携式短喉槽模拟值与实测值的对比结果可知,二者所得流场分布一致,水深、断面流速的模拟值与实测值非常吻合,相对误差均在10%以内,可以满足灌区量水精度要求。

2)通过对佛汝德数模拟值与试验计算值的对比分析可知,物理量模拟值与试验计算值基本吻合,由佛汝德数沿程分布规律分析可知临界水深断面的位置位于喉道段,且在淹没出流条件下临界水深断面位置在喉道段内更偏向下游方向。

3)通过对量水槽水头损失的分析得知,该量水槽自由出流条件下的槽内水头损失比淹没出流条件下的小,最小水头损失为总水头的4.11%,最大水头损失为总水头的12.89%,水头损失主要集中在0.08~0.12倍总水头,小于长喉槽的13%,由此可知该量水槽的水头损失较小,可以应用于灌区允许水头损失小的灌区量水。

4)通过系统试验与数值仿真,建立了不同出流条件下量水槽上游水深与过槽流量的测流经验公式,该流量公式形式简单、具有量纲和谐性,自由出流条件下的流量公式计算值与实测值平均相对误差仅为1.11%,最大相对误差为-7.54%,淹没出流条件下的流量公式平均相对误差为3.16%,最大相对误差为9.95%,误差均<10%,可以满足灌区量水设施的测流精度要求。

田间便携式短喉槽结构简单、造价低廉、量测方便、测流精度高、且水头损失小,适用于田间进水口水量计量,不受渠道类型、尺寸及底坡的限制,是

一种相当实用的新型田间便携式量水设备。对于灌区田间末级渠道较大流量的量测,以及结合已研发喉道宽度为 51 mm 的田间便携式短喉槽<sup>[12]</sup>进行标准系列化生产,尚需进一步深入研究。

## 参 考 文 献

- [1] 潘志宝,吕宏兴,魏溪. 灌区量水槽的应用研究现状与进展[J]. 西北农林科技大学:自然科学版,2007,35(4):214-217  
Pan Z B, Lv H X, Wei X. Current applied research and advances of measuring flume in irrigation district[J]. *Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition*, 2007,35(4):213-217 (in Chinese)
- [2] 王长德. 量水技术与设施[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005  
Wang C D. *Water Measurement Technique and Measure*[M]. Beijing:China Water & Power Press,2005 (in Chinese)
- [3] 俞双恩,左晓霞,赵伟. 我国灌区量水现状及发展趋势[J]. 节水灌溉,2004(4):35-37  
Yu S E, Zuo X X, Zhao W. Status and developing trend of domestic flow measurement in irrigation district [J]. *Water Saving Irrigation*, 2004(4):35-37 (in Chinese)
- [4] 徐义军,韩启彪. 我国灌区量水槽研究概述[J]. 节水灌溉,2012(5):56-59  
Xu Y J, Han Q B. Summary of current research on measuring flume in irrigation districts of China [J]. *Water Saving Irrigation*, 2012(5):56-59 (in Chinese)
- [5] 肖苡轲,王文娥,胡笑涛. 基于 CFD 的田间量水槽选型研究[J]. 中国农村水利水电,2015(8):126-131  
Xiao Y Z, Wang W E, Hu X T. A comparison of flumes in the field based on CFD[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2015(8):126-131 (in Chinese)
- [6] Cone V M. The Venturi flume[J]. *Journal of Agricultural Research*, 1917,9(4):116-129
- [7] Parshall R L, Rohwer C. *The Improved Venturi Flume*[M]. Fort Collins:Colorado Agricultural Experiment Station,1921
- [8] Parshall R L. *The Improved Venturi Flume*[M]. Fort Collins:Colorado Agricultural Experiment Station,1928
- [9] Wright S J, Tullis B P, Long T M. Recalibration of Parshall flumes at low discharges [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1994,120(2):348-362
- [10] 李杰,吕宏兴,胥维纤. 巴歇尔量水槽水力特性试验研究[J]. 节水灌溉,2009(12):45-47  
Li J, Lv H G, Xu W X. Experimental study on hydraulic characteristics of Parshall flume[J]. *Water Saving Irrigation*, 2009(12):45-47 (in Chinese)
- [11] Cox A L, Thornton C I, Abt S R. Supercritical flow measurement using a large Parshall flume [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2013,139(8):655-662
- [12] 肖苡轲,王文娥,胡笑涛. 田间便携式平底短喉道量水槽水力特性试验[J]. 农业工程学报,2015,31(10):99-106  
Xiao Y Z, Wang W E, Hu X T. Hydraulic performance experiment of portable short-throat flume with flat base in field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015,31(10):99-106 (in Chinese)
- [13] 吕宏兴,裴国霞,杨玲霞. 水力学[M]. 北京:中国农业出版社,2011  
Lv H G, Pei G X, Yang L X. *Hydraulics*[M]. Beijing:China Agriculture Press,2011(in Chinese)
- [14] Ramamurthy A S, Tadayon R. Numerical simulation of flows in cut-throat flumes [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2008,134(6):857-860
- [15] Aydin M C, Emiroglu M E. Determination of capacity of labyrinth side weir by CFD [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2013,19:1-8
- [16] 刘英,王文娥,胡笑涛,刘嘉美. U形渠道圆头量水柱测流影响因素试验及模拟[J]. 农业工程学报,2014,30(19):97-106  
Liu Y, Wang W E, Hu X T, Liu J M. Experimental and simulation of factors affecting flow measurement of water-measuring column with round head in U-shaped channel[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014,30(19):97-106 (in Chinese)
- [17] 刘嘉美,王文娥,胡笑涛. U形渠道圆头量水柱的数值模拟[J]. 中国农业大学学报,2014,19(1):168-174  
Liu J M, Wang W E, Hu X T. Numerical simulation of water-measuring pillar with round head in the U-shaped channel[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2014,19(1):168-174 (in Chinese)
- [18] 孙斌,吕宏兴,张宽地,石喜, DINH Thi Huong, 周亚森. U形渠道机翼形量水槽水跃数值模拟与试验研究[J]. 实验流体力学,2013,27(1):65-71  
Sun B, Lv H X, Zhang K D, Shi X, DINH Thi Huong, Zhou Y S. Numerical simulation and experimental research of hydraulic jumps on the airfoil-shaped measuring flume in U-shaped canal [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2013,27(1):65-71 (in Chinese)
- [19] 郝晶晶,马孝义,王波雷,张兴建. 基于 VOF 的量水槽流场数值模拟[J]. 灌溉排水学报,2008,27(2):26-29  
Hao J J, Ma X Y, Wang B L, Zhang J X. Numerical simulation of flow field in flow-measuring flume based on VOF method [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2008,27(2):26-29 (in Chinese)
- [20] 吕宏兴,刘焕芳,朱晓群,潘志宝. 机翼形量水槽的试验研究[J]. 农业工程学报,2006,22(9):119-123  
Lv H G, Liu H F, Zhu X Q, Pan Z B. Experimental research on airfoil-shaped flow flume [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006,22(9):119-123 (in Chinese)
- [21] 李国佳,牟献友,李金山,王力,戴鑫. U形渠道直壁式量水槽水力特性的研究[J]. 中国农村水利水电,2010(5):124-127  
Li G J, Mou X Y, Li J S, Wang L, Dai X. Research on the hydraulic characteristics of U-shaped channel of straight wall tanks[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2010(5):124-127 (in Chinese)