

双层翻斗式雨量计翻斗特性的试验和模拟分析

蔡钊¹,王海鹏¹,刘九夫¹,廖爱民¹,廖敏涵¹,刘宏伟¹,周斌²,姚业²

(1. 南京水利科学研究院水文水资源研究所,江苏 南京 210029; 2. 红河州南源供水有限公司,云南 红河州 661000)

摘要:为探究双层翻斗式雨量计(DTBR)减小计量误差的作用机理以及进一步提高DTBR的计量精度,利用试验和数值模拟相结合的方法,通过高速摄像掌握翻斗翻转特性,结合动网格和流体体积法(VOF)模型对DTBR上层翻斗的翻转过程进行流体动力学模拟,并进一步优化了DTBR的结构设计。结果表明:DTBR依靠上层翻斗,通过中间漏斗将自然降水强度下的出流量稳定在1.01 g/s左右注入下层计量翻斗,可明显降低降水强度对雨量计计量误差的影响,且在高降水强度下的效果更加明显;中间漏斗在不同降水强度下的流量均稳定在1 g/s(等效1.91 mm/min降水强度)左右,在DTBR标定中,可考虑只对下层的计量翻斗进行1.91 mm/min降水强度的标定,即可满足DTBR的计量要求;中间漏斗存在震荡出流过程,出流最大可达2 g/s左右;降低上层翻斗的中轴高度可在一定程度上稳定中间漏斗的出流过程。

关键词:动网格;双层翻斗式雨量计;降水强度;流体动力学模拟

中图分类号:TV123 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2022)06-0079-07

Numerical and experimental investigation on characteristics of the double tipping bucket rain gauge//CAI Zhao¹, WANG Haipeng¹, LIU Jiufu¹, LIAO Aimin¹, LIAO Minhan¹, LIU Hongwei¹, ZHOU Bin², YAO Ye²(1. *Hydrology and Water Resources Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *Honghe Nanyuan Water Supply Co., Ltd., Honghe 661000, China*)

Abstract: In order to explore the mechanism of measurement error reduction for a double tipping bucket rain gauge (DTBR), and to further improve its measurement accuracy, a method of combining experiments and numerical simulation was proposed. A high-speed camera was used to get the tipping characteristics during the movement and a dynamic grid and the volume of fluid (VOF) model were used to simulate the overturning process for the upper tipping bucket of the DTBR. The structure design of DTBR was further optimized. The results show that the DTBR relies on the upper bucket to smooth the discharge under natural precipitation intensity at a steady rate of 1.01 g/s injecting into the lower bucket through the middle funnel, which can significantly reduce the influence of precipitation intensity on the measurement error of the rain gauge, and the effect is more obvious under high precipitation intensity. The discharge of the middle funnel under different precipitation intensity remained at a steady rate of 1 g/s (corresponding to precipitation intensity of 1.91 mm/min), and as a result, for the future DTBR calibration, the 1.91 mm/min precipitation intensity calibration can be considered for the lower tipping bucket, which can meet the error requirements of DTBR. There is an oscillating outflow process of the middle funnel, which can reach a maximum of about 2 g/s. Reducing the central shaft height of the upper bucket can stabilize the outflow of the middle funnel to a certain extent.

Key words: dynamic mesh; double tipping bucket rain gauge; rainfall intensity; computational fluid dynamics simulation

作为水文领域重要的基础数据,降水观测数据是研究水文循环、洪涝灾害、气候变化等最重要的输入数据,其观测精度直接影响水文预报和水文过程模拟的准确性^[1-2]。翻斗式雨量计(TBR)由于具有简单实用、精度高等特点被广泛应用于气象和水文降水测量^[3-5]。但TBR存在由蒸发、浸润和风场扰

动引起的测量误差^[6-10],也存在由于翻斗在翻转过程中雨量捕捉损失导致的机械误差^[5,11]。通常,机械误差随降水强度的变化而变化,造成实际降水强度和雨量计测量降水量之间存在非线性关系^[4,11-12]。为了减小此机械误差对降水观测的影响,通常采用动态率定方法^[13-15]来确定雨量计率定

基金项目:国家自然科学基金(91647203,51609145);国家重点研发计划(2017YFC0405700);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y517018,Y517019)

作者简介:蔡钊(1991—),男,工程师,博士,主要从事水利信息化和水文仪器研究。E-mail:caizhao@nhri.cn

曲线,并对雨量计进行标定,将雨量计的计量误差控制在 $\pm 4\%$ 以内,从而减弱降水强度对雨量计翻斗机械误差的影响,提高观测精度。

另一种减小雨量计机械误差的方式为利用双层翻斗式雨量计(DTBR)。DTBR已在气象观测站中得到广泛应用,并取得了较好的效果^[16-17]。DTBR具有上下两层翻斗以及中间漏斗,上层翻斗承接集雨器收集的雨水,达到翻转条件时将雨水翻入中间漏斗,而后中间漏斗将雨水注入下层计量翻斗。上层翻斗和中间漏斗相结合,起到调节降水强度的作用,使得下层计量翻斗始终接收较为稳定的流量^[18-19]。因此,理论上DTBR只需要进行单一降水强度的标定便可将机械误差稳定在很小的范围内,以提高雨量计的测量精度。

已有学者对DTBR开展了研究。例如:Stagnaro等^[20]对比分析了单层TBR和SL3-1型DTBR的室内测量误差,发现SL3-1型DTBR总存在负误差,但在高降水强度下误差特性较好;李薛刚等^[21]对比了国内主要的8种雨量计,发现SL3-1型DTBR的计量稳定性较好;李锐锋等^[17]对DTBR翻斗的协调性误差进行了分析,认为DTBR的上层翻斗承水量必须在合理区间,才可避免由于上层翻斗的水量损失而导致的实测降水量偏小的问题。但上述研究通常停留在分析比对DTBR的误差特性以及如何消除DTBR设备故障等,缺乏对翻斗翻转特性,特别是上层翻斗和中间漏斗对调节降水强度作用机理的详尽分析,也无法通过试验得知中间漏斗出流过程特征。因此,本文采用试验和数值模拟相结合的手段,通过动网格和多相流流体体积(volume of fluid,VOF)模型模拟技术精细化探究上层翻斗和中间漏斗调节降水强度的作用,以及中间漏斗的出流特征,并根据模拟结果优化DTBR的设计,以期提高降雨测量精度。

1 材料与方法

1.1 DTBR 结构

目前国内运用较广的DTBR为上海仪器制造厂生产的SL3-1型DTBR,其结构示意图如图1所示。在DTBR结构中,上层翻斗在翻转过程中不进行计数测量,它和中间漏斗组合起来调节降水强度:在集雨器收集降水后,首先注入上层翻斗,当水量达到上层翻斗翻转条件时,雨水被翻入中间漏斗,而后中间漏斗将雨水注入下层翻斗,由下层翻斗进行雨量计数测量。在此过程中下层翻斗始终只接收中间漏斗的雨水,比自然降雨中间漏斗的出流量更稳定,因此,下层翻斗不受自然状态降水强度变化的影响,降低了不同降水强度带来的雨量计机械误差变化的影响。

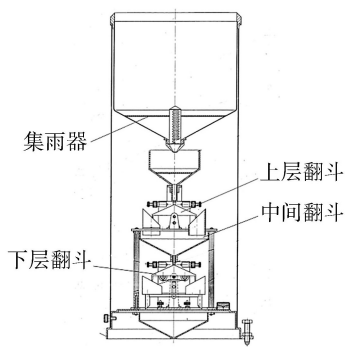
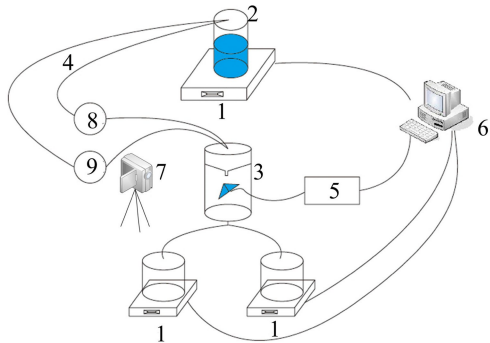


图1 SL3-1型DTBR的结构示意图

1.2 率定试验及模拟参数的获取和设置

采用由蠕动泵、电子天平、高速摄像设备和控制电脑组成的雨量计自动率定系统^[22-23](图2)进行雨量计相关试验。在控制电脑中编制相关程序操控蠕动泵转速,以模拟不同降水强度。为达到模拟降水强度的精度,试验中使用了小流量泵(Kamoer,1~150 mL/min)和大流量泵(1~352 mL/min)相结合的方式供水,采用电子天平(赛多利斯,分辨率1 ms)对中间漏斗出水量进行实时测量(通过软管将水引出中间漏斗的方式进行测量)。在捕捉上层翻斗的翻动过程中,高速摄像装置可捕捉每秒120帧的DTBR上层翻斗的翻动过程,并统计得到其左右斗从启动到水平、从水平到停止的帧数,并由帧数推算翻斗翻转所需要的时间。本研究所用的雨量计已经进行了率定试验及调整,选择0.1 mm/min、0.4 mm/min、1 mm/min、2 mm/min和4 mm/min的降水强度进行试验,统计得到不同降水强度下翻斗翻转的帧数及其平均值。平均帧数可为数值模拟中用户自定义函数(UDF)的编写提供依据,从而进行翻斗翻转的流体动力学数值模拟研究。



1—电子天平;2—水源箱;3—双层翻斗式雨量计;4—透明导水软管;5—电子计数器;6—控制电脑;7—高速摄像机;8—小蠕动泵;9—大蠕动泵

图2 雨量计率定系统示意图

1.3 建模与网格划分

在数值模拟研究中,首先依据DTBR翻斗以及中间漏斗的实际尺寸(图3),建立了SL3-1型DTBR上层翻斗和中间漏斗的三维模型(图4(a))。

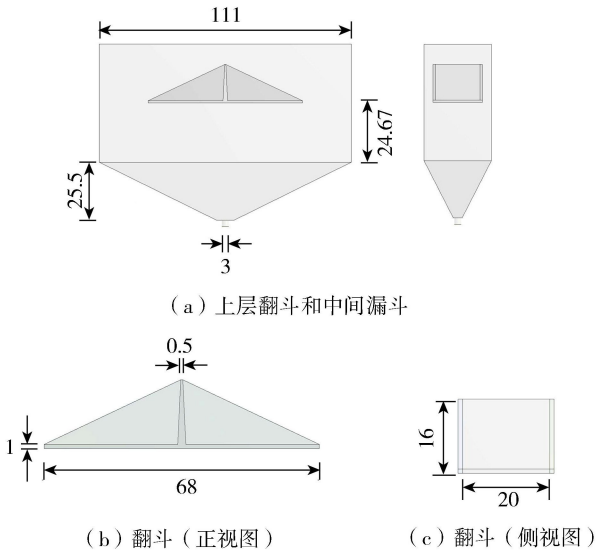


图3 DTBR 上层翻斗和中间漏斗的模型尺寸(单位:mm)

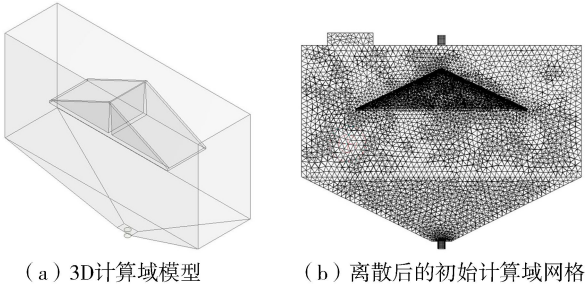


图4 DTBR 上层翻斗和中间漏斗的三维模型和划分后的网格

为模拟翻斗的翻转过程,在综合对比旋转机械通常使用的滑移网格、动参考系模型、动网格等模拟机械结构旋转的方法后,采用动网格模型对本研究的流体计算域网格进行实时更新,模拟翻斗边界随时间改变而引起的流场变化。对于翻斗的转动速度,则通过在试验中高速摄像机得到的翻斗从启动到水平以及从水平到停止的时间,编写相应的 UDF 进行控制。在对流体空间域进行网格划分时,由于使用动网格方法,且模型本身较为复杂,因此初始网格和实时更新的网格均使用非结构网格对计算域进行离散。初始网格如图 4(b) 所示,初始以及更新后网格的质量检验主要由网格扭曲度参数完成,初始网格扭曲度为 0.76(网格扭曲度小于 0.9 的网格是进行较好流体模拟的前提,且扭曲度越小越好^[24])。在使用动网格模型对网格进行更新时,为保证网格质量,模型参数使用弹性光顺法、层铺法和局部重构法进行网格实时更新,其中弹性光顺法设定扩散系数为 1.5^[24],局部重构法中最大网格扭曲度设置为 0.81,网格更新间隔为 5 步长。计算流体力学(CFD)模拟计算的模型基础为不可压缩 Navier-Stokes 方程,使用 VOF 模型模拟水和空气两相流的

运动。Aydin 等^[25]使用 VOF 模型模拟了水槽虹吸过程,并进行试验验证,显示 VOF 在虹吸数值模拟与试验有较好的一致性。

2 结果与分析

2.1 试验结果与分析

通过试验得到的翻斗翻转视频(每秒 120 帧),可得出翻斗从启动到水平位置所需的时间(帧数)远大于翻斗从水平到停止所需的时间。因此,为精确获取 DTBR 上层翻斗的左右斗在翻转时的运动特征,利用固定在屏幕上的直尺判断翻斗的启动帧、到达水平的帧数以及停止帧,统计得到左右斗翻转时的帧数(表 1)。从表 1 可知,在 1 mm/min 降水强度下,左斗从启动到水平平均需要 32.6 帧,时间为 0.270 s,从水平到停止平均需要 6.2 帧,时间为 0.050 s;右斗从启动到水平平均需要 33.8 帧,所需时间为 0.280 s,从水平到静止平均需要 6.6 帧,时间为 0.055 s。其结果可为数值模拟中编写翻斗运动的 UDF 文件提供很好的试验数据支持,并通过此 UDF 文件控制并模拟不同降水强度下翻斗翻转时间以及转动角速度。

表 1 上层翻斗的左右斗从启动到水平和从水平到停止所需的帧数

降水强度/ (mm · min ⁻¹)	左斗所需帧数		右斗所需帧数	
	启动到水平	水平到停止	启动到水平	水平到停止
0.1	30	6	29	6
	28	7	27	7
	27	6	30	6
	29	6	28	7
	30	7	31	7
0.4	32	6	31	5
	31	6	35	6
	30	5	32	6
	31	6	29	7
	33	7	34	7
1	34	6	32	7
	32	6	41	6
	30	6	30	6
	31	6	28	7
	36	7	38	7
2	32	6	33	6
	31	7	33	7
	33	6	34	7
	35	7	30	6
	36	6	38	7
4	29	6	22	6
	27	6	25	6
	27	6	25	6
	25	6	25	6
	25	6	24	6

DTBR 由于翻斗在翻转过程中,雨量持续注入

翻斗,使得附加水量随着降水强度的增大而增大(机械误差增大)所导致的。另外,由于中间漏斗的出流过程很快(1~2 s),即使是精度和响应度很高的天平(本研究使用响应时间为1 ms的天平)也无法呈现中间漏斗的详细出水过程。因此可利用CFD优势,精细化模拟探究上层翻斗翻转过程,详尽分析中间漏斗的出流特征,以及DTBR对减小计量误差的作用机理,本研究考虑到数值模拟的时效性问题,暂使用1 mm/min、2 mm/min和4 mm/min降水强度下的模拟结果进行分析和对比。

2.2 模拟结果与分析

2.2.1 翻斗翻转过程模拟

DTBR上层翻斗在翻转过程中将降水翻入中间漏斗,降水强度为4 mm/min时翻斗翻转过程的数值模拟结果如图5所示,图中白色(透明)代表空气,蓝色代表水,由图5可知,在 $t=0$ s的初始状态,翻斗处于水平位置,在计算开始后,翻斗向左翻转,右斗开始承接水;当 $t=1.86$ s时,右斗达到翻动状态并开始翻转; $t=2.14$ s后翻斗中水全部翻入中间漏斗

斗; $t=4.10$ s时,左斗结束翻转过程,右斗开始承接水。通过图中流体的运动状态可看出,翻斗将水翻入中间漏斗后,由于具有较大的动能,水在中间漏斗中会产生左右晃动,造成中间漏斗出流过程的流量存在不稳定的状态。由图5(f)可得知翻斗在翻转过程中出现机械误差的来源:水持续注入翻斗,但翻斗继续翻转,而在此时间段内由于不同降水强度下注入翻斗的水量不同,即在高降水强度下注入翻斗的水量较大,但在低降水强度下注入翻斗的水量则较少,造成雨量计的计量产生偏差。SL3-1型DTBR的原理是利用上层翻斗和中间漏斗,通过中间漏斗稳定降水强度的调节作用,使得注入下层计量翻斗的等效降水强度稳定在一定的范围内。

2.2.2 中间漏斗出水过程

图6给出了不同降水强度下上层翻斗翻转4次时中间漏斗的出流过程。由图6可知,在上层翻斗翻转过程中,中间集水漏斗在一定程度上可稳定自然降水强度,而后注入下层翻斗,进而降低降水强度对计量误差的影响。中间漏斗出流过程存在很大的

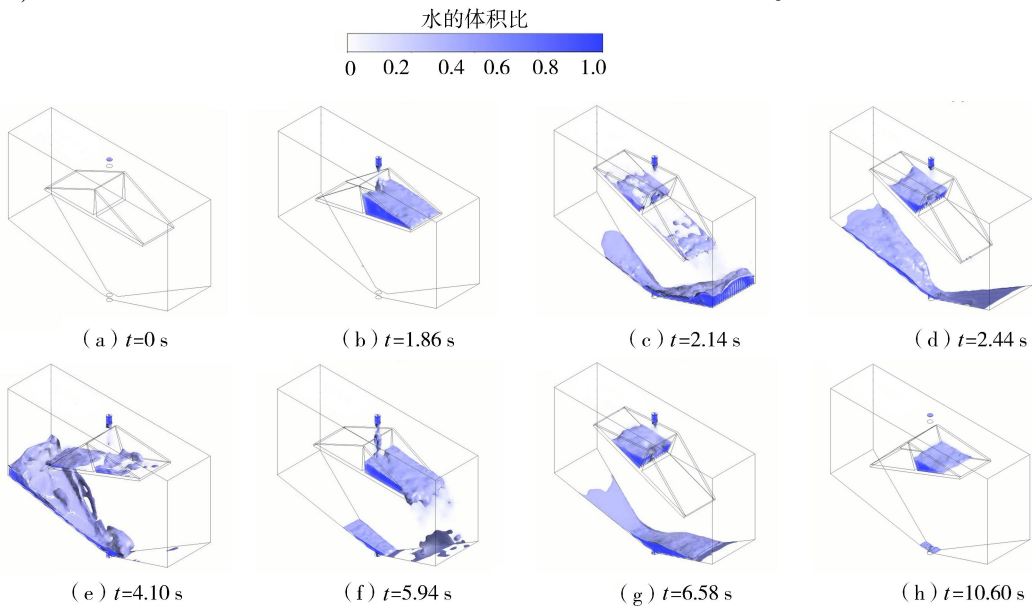


图5 4 mm/min降水强度时上层翻斗翻转并注入中间漏斗的过程

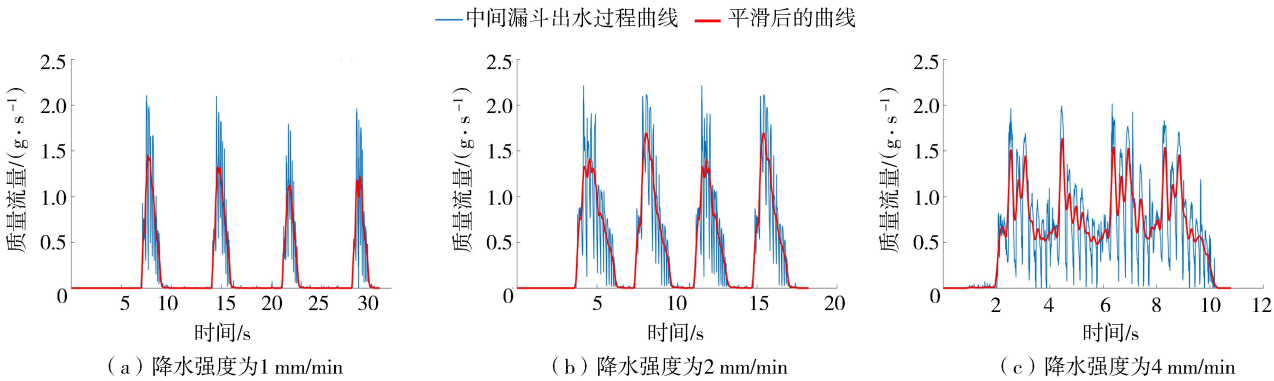


图6 不同降水强度下上层翻斗翻转4次中间集水漏斗的出流过程

波动性。在第一次出流过程中(以 1 mm/min 降水强度为例),随着上层翻斗内的水开始注入中间漏斗,出流量逐渐增大,约 0.7 s 后达到峰值 2.1 g/s 左右,即 4.01 mm/min 的等效降水强度,之后随着集水漏斗内水量的减少,波动呈现减小趋势,最终变为 0。为得到更为直观の出流过程,将出流曲线进行平滑。由平滑曲线可知,在每次上层翻斗的水注入中间漏斗后,中间漏斗的出流过程有类似“金字塔”形的震荡增大再减小的趋势,这与我们通常认知的平稳的出流过程有所不同。通过图 6(a)(b)(c)的横向对比可知,在 1 mm/min 和 2 mm/min 降水强度下,中间漏斗的第 1 次和第 3 次(即相同的右斗翻一次水),第 2 次和第 4 次(即相同的左斗翻一次水)的出流过程基本一致,但在 4 mm/min 降水强度下则存在一定的差别,这可能是由于在 4 mm/min 降水强度下,在上层翻斗将第二次水翻入中间漏斗时,此时中间漏斗内的水还没有完全流出,造成相同的左、右斗两次的出流过程不一致。

出流过程呈现波动(震荡)变化的主要原因为,翻斗中的水在刚翻入中间集水漏斗时,存在较大的动能,从而引起流体在集水漏斗中左右晃动(如图 5(c)(d)所示),导致中间漏斗的出流存在震荡现象。对比图 6(a)(b)(c)可知,出流过程主要在峰值附近波动最大,因此对不同降水强度下中间漏斗中的出流过程曲线中大于 0.5/s 的数据进行统计(表 2),可在一定程度上反映中间集水漏斗流出过程的变化情况。

表 2 不同降水强度下中间漏斗出流过程数据统计

降水强度/ (mm · min ⁻¹)	极差/ (g · s ⁻¹)	均值/ (g · s ⁻¹)	中位数/ (g · s ⁻¹)	方差/ (g ² · s ⁻²)	离差 系数
1	1.61	1.03	0.80	0.24	0.48
2	1.71	1.08	0.89	0.22	0.44
4	1.51	0.99	0.87	0.16	0.41

由表 2 可知,上层翻斗和中间漏斗稳定降水强度的作用在不同降水强度下表现不同,在 4 mm/min 降水强度下,样本方差和离差系数最小,为 0.16 和 0.41,而在 1 mm/min 时则达到 0.24 和 0.48,且降水强度从 1 mm/min 变化到 4 mm/min,样本方差和离差系数呈现逐渐减小的趋势,说明高降水强度下 SL3-1 型 DTBR 稳定降水强度的效果可能要优于低降水强度。此处可考虑用均值来代表上层翻斗和中间漏斗稳定后的降水强度,在 4 mm/min 降水强度下,中间漏斗的出水量的均值为 1.01 g/s,可等效 1.93 mm/min 降水强度,综合 3 种降水强度下的均值表现,中间漏斗可使降水强度稳定在 1 g/s(等效 1.91 mm/min 降水强度)左右。因此在未来的 DTBR 标定中,可考虑只对下层的计量翻斗进行 1.91 mm/min 降水强度下的标定,即可满足 DTBR 的计量要求。

SL3-1 型 DTBR 在高降水强度下的计量效果较好,这与利用 DTBR 自动率定系统所进行的试验结果相吻合^[21]。试验中 4 mm/min 降水强度下 SL3-1 型 DTBR 的总误差可稳定在±4% 以内(图 7),且总误差的稳定性和重复性远优于低降水强度下的试验结果。通过表 2 以及图 7 的分析结果便可解释试验中 SL3-1 型 DTBR 的计量总误差随降水强度增大而减小的现象。

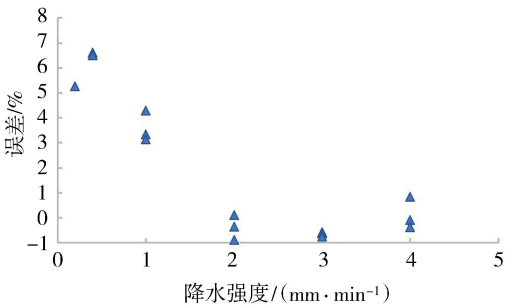


图 7 不同降水强度下 SL3-1 型 DTBR 的误差特性曲线

2.2.3 提高 DTBR 计量精度的探讨分析

上层翻斗的水在翻入中间漏斗后,由于存在较大的动能,因此也伴随着更大范围的湍流。湍动能是湍流速度涨落方差与流体质量乘积的 1/2(单位质量的湍动能),能反映流体的湍流脉动程度。图 8 截取了翻斗翻转一次时,计算域(中间漏斗)内流体的湍动能的分布情况。由图 8 可知,水在刚注入中间漏斗时,随着流体接触到中间漏斗的壁面,产生较大的湍动能,最大可达 0.3 m²/s²。之后由于此时流体的动能较大,造成水在中间漏斗中呈现左右晃动,产生图 5 所示的中间漏斗出流震荡现象。同时随着水在中间漏斗的左右晃动的消能过程,湍动能也随之减小(如图 8(d)(e)所示)。

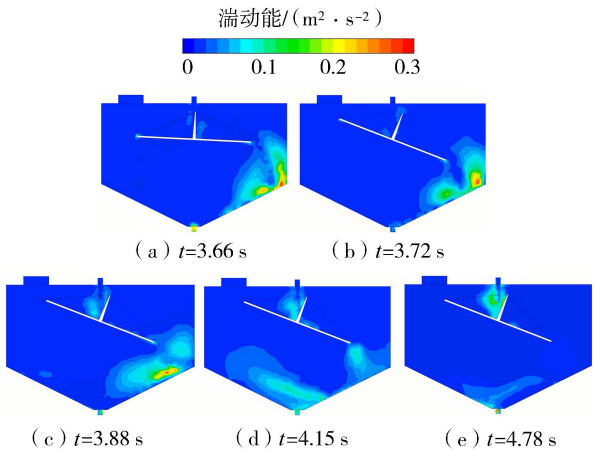


图 8 2 mm/min 降水强度下计算域中流体湍动能的分布

中间漏斗出水过程存在震荡,这与通常认知的稳定出流过程不同。由上述分析可知,减小此震荡过程的方法之一是降低水在翻入中间漏斗时的动能。可考虑降低上层翻斗中轴的高度,缩短翻斗与

中间漏斗之间的距离(定义此距离为 d),降低水在翻入中间漏斗过程中的动能,从而减小中间漏斗的出流波动,进而增加下层翻斗的计量精度。进一步利用CFD模拟的优势,对 d 值减小2.5 mm、5.0 mm、7.5 mm和10.0 mm的情况进行重复模拟,并对中间漏斗的出水过程(出流量 ≥ 0.5 g/s)进行参数统计(表3)。由于离差系数反映了变量概率分布函数的离散程度,可作为判别中间漏斗出流过程稳定性的参数。离差系数越小说明出流过程的震荡越小。通过对比分析后确定 d 值,可为DTBR的结构设计提供参考。

表3 4 mm/min 降水强度下 d 不同减小量对应的中间漏斗出流量统计

d 减小量/ mm	极差/ ($\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$)	均值/ ($\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$)	中位数/ ($\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$)	方差/ ($\text{g}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)	离差 系数
0	1.51	0.99	0.87	0.16	0.41
2.5	1.43	0.97	0.86	0.16	0.40
5.0	1.31	0.94	0.77	0.13	0.37
7.5	1.47	1.01	0.86	0.15	0.40
10.0	1.34	1.01	0.89	0.17	0.40

由表3可知,随着 d 的减小,中间漏斗出流过程的离差系数呈现先减小后增大的趋势,当 d 减小量为5 mm时,离差系数降为0.37; d 继续减小,方差、中位数以及离差系数都呈增大趋势。说明上层翻斗与中间漏斗的距离不能一直减小,需要控制在合理的范围内。可考虑在进一步的试验验证后,将减小量5 mm作为DTBR优化设计方案。

3 结 论

a. DTBR上层翻斗和中间漏斗对自然降水强度的稳定作用在高降水强度下效果明显。1 mm/min、2 mm/min和4 mm/min降水强度的模拟结果显示,中间漏斗稳定的流量均在1 g/s(等效1.91 mm/min降水强度)左右,因此,在DTBR标定中,可考虑只对下层的计量翻斗进行1.91 mm/min降水强度的标定,即可满足DTBR对计量精度的要求。

b. 中间漏斗的出流过程不是通常认知的平缓减小过程,而是存在震荡的先增大后减小的过程,最大出流量可达2g/s左右,这是由于上层翻斗中的水翻入中间漏斗后存在较大的动能,需要在中间漏斗中消耗这部分动能,使得水在中间漏斗中出现晃动所致。

d. 降低上层翻斗中轴的高度可减小注入中间漏斗后水的动能,当 d 减小5 mm时,中间漏斗出流过程的中位数、方差以及离差系数均比原结构的值小,但随着 d 的减小,中间漏斗出流量的方差、离差系数以及出流曲线的不稳定性呈现增大的趋势。因

此在DTBR设计中,可考虑缩短上层翻斗与中间漏斗之间的距离,优化DTBR的机械结构,提高计量精度。

参考文献:

[1] KOCHENDORFER J, EARLE M, RASMUSSEN R, et al. How well are we measuring snow post-SPICE? [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2022, 103 (2): E370-E388.

[2] YANG Daqing. Double fence intercomparison reference (DFIR) vs. bush gauge for “true” snowfall measurement [J]. Journal of Hydrology, 2014, 509: 94-100.

[3] SHEDEKAR V S, KING K W, FAUSEY N R, et al. Assessment of measurement errors and dynamic calibration methods for three different tipping bucket rain gauges [J]. Atmospheric Research, 2016, 178-179: 445-458.

[4] FANKHAUSER R. Influence of systematic errors from tipping bucket rain gauges on recorded rainfall data [J]. Water Science & Technology, 1998, 37(11): 121-129.

[5] MOLINI A, LANZA L G, LA BARBERA P. The impact of tipping-bucket rain gauge measurement errors on design rainfall for urban-scale applications [J]. Hydrological Processes, 2005, 19(5): 1073-1088.

[6] ZHOU Zehui, YONG Bin, LIU Jiufu, et al. Preliminary evaluation of the HOBO data logging rain gauge at the Chuzhou hydrological experiment station, China [J]. Advances in Meteorology, 2019, 2019: 5947976.

[7] COLLI M, LANZA L G, RASMUSSEN R, et al. The collection efficiency of shielded and unshielded precipitation gauges. Part I: CFD airflow modeling [J]. Journal of Hydrometeorology, 2016, 17(1): 231-243.

[8] COLLI M, LANZA L G, RASMUSSEN R, et al. The collection efficiency of shielded and unshielded precipitation gauges. Part II: modeling particle trajectories [J]. Journal of Hydrometeorology, 2016, 17(1): 245-255.

[9] BAGHAPOUR B, WEI Cao, SULLIVAN P E. Numerical simulation of wind-induced turbulence over precipitation gauges [J]. Atmospheric Research, 2017, 189: 82-98.

[10] 蔡钊, 刘九夫, 李薛刚, 等. 风场对雨量计收集降水影响的流体动力学研究 [J]. 水利水电科技进展, 2019, 39 (6): 17-23. (CAI Zhao, LIU Jiufu, LI Xuegang, et al. CFD simulation of wind field impact on gauge precipitation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(6): 17-23. (in Chinese))

[11] 王建龙, 彭柳苇, 张敬玉, 等. 降雨特征对半透水道路径流系数的影响 [J]. 水资源保护, 2022, 38 (3): 96-101. (WANG Jianlong, PENG Liuwei, ZHANG Jingyu, et al. Influences of rainfall characteristics on runoff coefficient of semi-permeable roads [J]. Water Resources Protection,

2022,38(3):96-101. (in Chinese))

[12] World Meteorological Organisation. Guide to meteorological instruments and methods of observation [M]. Geneva:World Meteorological Organisation,2012.

[13] CALDER I R, KIDD C H R. A note on the dynamic calibration of tipping-bucket gauges [J]. Journal of Hydrology,1978,39(3/4):383-386.

[14] NIEMCZYNOWICZ J. The dynamic calibration of tipping-bucket rain gauges [J]. Hydrology Research, 1986, 17(3):203-214.

[15] LA BARBERA P, LANZA L G, STAGI L. Tipping bucket mechanical errors and their influence on rainfall statistics and extremes[J]. Water Science & Technology,2002,45(2):1-10.

[16] MA Yueyue, ZHANG Honghe, YANG Zhenguo. Failure analysis of premature corrosion on a new type of ring in SL3-1 double tipping bucket rain sensor[J]. Journal of Fudan University (Natural Science), 2014, 53 (4) : 557-566.

[17] 李锐锋,陈苏婷,张晋. SL-3 型双翻斗雨量传感器翻斗协调性误差分析[J]. 气象科技,2016,44(4):576-580. (LI Ruifeng, CHEN Suting, ZHANG Jin. Analysis of measurement errors of double tipping raingauges [J]. Meteorological Science and Technology, 2016, 44 (4) : 576-580. (in Chinese))

[18] 杨银,杨玲君. SL3-1 型双翻斗式雨量传感器故障分析及排除方法 [J]. 气象科技, 2012, 40 (2) : 319-320. (YANG Yin, YANG Lingjun. Failure analysis and troubleshooting of SL3-1 double tipping bucket rain sensors [J]. Meteorological Science and Technology, 2012, 40 (2) : 319-320. (in Chinese))

[19] 杜衍君. SL3-1 型双翻斗雨量传感器的工作原理及故障排除 [J]. 安徽农业科学, 2012, 40 (35) : 17231-17232. (DU Yanjun. Working principles and failure recovery of the SL3-1 double-skip rain sensor [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40 (35) : 17231-17232. (in Chinese))

[20] STAGNARO M, COLLI M, LANZA L G, et al. Performance of post-processing algorithms for rainfall intensity using measurements from tipping-bucket rain gauges [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2016, 9 (2) : 5699-5706.

[21] 李薛刚,刘九夫,廖爱民,等. 八种国内翻斗式雨量计翻斗计量误差测评分析 [J]. 水电能源科学, 2019, 37 (6) : 160-163. (LI Xuegang, LIU Jiufu, LIAO Aimin, et al. Evaluation of measurement errors for eight domestic tipping bucket rain gauges [J]. Water Resources and Power, 2019, 37 (6) : 160-163. (in Chinese))

[22] 廖敏涵,刘九夫,廖爱民,等. 翻斗式雨量计左右斗平衡判别方法 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41 (5) : 58-65. (LIAO Minhan, LIU Jiufu, LIAO Aimin, et al. Judgement method for left and right bucket balance of tipping bucket raingauge [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41 (5) : 58-65. (in Chinese))

[23] CAI Zhao, LIU Jiufu, LIAO Aimin, et al. Numerical and experimental investigation on the function of siphons for tipping-bucket rain gauges [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2020, 37 (7) : 1189-1201.

[24] Fluent Inc. Fluent 6. 2 user's guide [M]. Lebanon: Centerra Resource Park, 2006.

[25] AYDIN M C, ÖZTÜRK M, YÜCEL A. Experimental and numerical investigation of self-priming siphon side weir on a straight open channel [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2015, 45 : 140-150.

(收稿日期:2021 - 10 - 10 编辑:俞云利)

(上接第 65 页)

[15] 朱大奇,刘雨,孙兵,等. 自治水下机器人的自主启发式生物启发神经网络路径规划算法 [J]. 控制理论与应用, 2019, 36 (2) : 183-191. (ZHU Daqi, LIU Yu, SUN Bing, et al. Autonomous underwater vehicles path planning based on autonomous inspired Gladius bio-inspired neural network algorithm [J]. Control Theory & Applications, 2019, 36 (2) : 183-191. (in Chinese))

[16] ARUN PANDIAN R. Concrete surface sample images for Surface Crack Detection [DB/OL]. [2021-11-30]. <https://www.kaggle.com/arunrk7/surface-crack-detection>.

[17] SOILLE P. Morphological image analysis [M]. Berlin: Springer, 1999.

[18] 李富裕,李言俊,张科. 链码技术在景象图像特征提取中的应用 [J]. 中国图象图形学报, 2008, 13 (1) : 114-118. (LI Fuyi, LI Yanjun, ZHANG Ke. The use of the chain-code technique in extracting feature point in scene image [J]. Journal of Image and Graphics, 2008, 13 (1) : 114-118. (in Chinese))

[19] Sosososo. 混凝土表面裂纹检测图像数据集 [DB/OL]. (2020-07-01) [2021-11-30]. <https://www.heywhale.com/mw/dataset/5eba5fe1366f4d002d79ae04/file>.

(收稿日期:2021 - 12 - 05 编辑:俞云利)