

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20220705

翻斗式雨量计翻斗翻转特性的试验和仿真模拟研究

赵泽锦¹, 刘利成¹, 蔡 钊², 刘宏伟²

(1. 红河州南源供水有限公司, 云南 蒙自 661000; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 翻斗式雨量计作为水文气象领域最为基础的降水采集设备,具有实用和稳定好等特点,但对翻斗翻转特性机理及翻斗式雨量计机械误差的产因的研究存在不足。为此,利用高速摄像机的室内试验和数值模拟相结合的方法从机理上探究了翻斗式雨量计翻斗的翻转过程。研究结果表明,翻斗在翻转过程中,从启动到停止的用时约为 0.35~0.40 s,翻斗从启动到水平的耗时 t_1 占比较高,约为 80%~85%左右,从水平到停止 t_2 仅约为 0.05 s,且存在翻斗触及调节螺帽后的轻微回弹现象。在 t_1 时间段内水会持续注入翻斗内,是造成附加水量及雨量计机械误差随雨强变化的根本原因。翻斗在极短时间内(约 0.40 s)将水倾倒入出,且由于翻斗在触碰停止螺栓时会造成轻微回弹现象,由此造成雨量计翻斗在翻出水时产生翻出流量的“双峰”现象,且随着翻斗左右安装倾角变小,而增大的现象。研究结果可为未来翻斗式雨量计的改进提供基础理论支撑。

关键词: 翻斗式雨量计; 数值模拟; 动网格; 附加水量

中图分类号: [TV123];P332

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)01-0190-04

1 引言

翻斗式雨量计(TBR)因其结构简单、实用、可远程观测等特点而广泛应用于气象和水文领域中^[1]。其观测精度是洪涝灾害、气候变化研究的基础条件之一,也直接影响到水文预报、水文过程模拟的准确性^[2]。但翻斗式雨量计由于其机械结构存在翻斗翻转过程中雨量捕捉损失导致的机械误差^[3],且机械误差通常与降雨强度存在紧密关系。TBR的机械误差存在随雨强变化而变化的特性,造成雨量计降水量测量与真实降水强度之间存在非线性关系^[4]。为减小TBR的机械误差,通常采用动态率定的方法来确定的雨量计率定曲线,将雨量计的误差控制在±4%以内,减弱雨强对雨量计翻斗的机械误差影响,从而提高观测精度^[5]。目前,关于翻斗式雨量计的研究较多^[6-8],但通常着重于分析TBR的误差特性及如何消除TBR的机械误差,而缺乏详尽研究翻斗翻转特性的机理尤其是翻斗翻转时翻出水量。为此,本文结合试验和CFD数值模拟,通过室内高速摄像技术探究翻斗翻转特性,并结合网格模型、VOF模

型模拟技术从机理上探究翻斗式雨量计翻斗的翻转过程,模拟结果不仅可得出翻斗翻转的动态过程,也可反映出翻斗每翻一次的出水过程,以期为未来翻斗式雨量计改进提供基础理论支撑。

2 材料与方法

2.1 室内试验

采用翻斗式雨量计自动率定系统配合高速摄像机分析翻斗翻转过程。自动率定系统包括两个蠕动泵、高精度天平、高速摄像设备及控制电脑组成。其中控制电脑可操控蠕动泵模拟不同雨强,为达到蠕动泵模拟雨强的精度,使用小流量泵(1~150 mL/min)和大流量泵(1~352 mL/min)相结合的方式供水;采用高精度天平赛多利斯,分辨率为100 ms;高速摄像设备可捕捉每秒100帧的TBR翻斗的翻动过程,然后通过相关图像处理程序得到翻斗翻转过程中到达不同节点的用时。数码相机的时间分辨率为0.1 s,主要观察单层翻斗雨量计的翻斗运动过程,选择南京水利水文自动化研究所的JDZ系列雨量计进行拍摄分析。

收稿日期: 2022-03-10, **修回日期:** 2022-04-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(91647203);国家重点研发计划(2017YFC0405701)

作者简介: 赵泽锦(1975-),男,高级工程师,研究方向为水文水资源, E-mail:447651037@qq.com

通讯作者: 蔡钊(1991-),男,博士、工程师,研究方向为水文试验与水仪器, E-mail:caizhao@nhri.cn

2.2 数值模拟

2.2.1 模型建立

翻斗式雨量计的三维建模严格依据不同规格的翻斗尺寸,本文所使用的 0.1、1 mm 分辨率的翻斗为三角形,而 0.5 mm 分辨率的翻斗则为圆筒状,不同分辨率的翻斗材质、质量和安装倾角均存在较大的差别,见表 1。JDZ02、JDZ05 翻斗和流体计算域的三维模型见图 1。考虑到 CFD 模拟翻斗翻转的过程中须使用动网格模型模拟翻斗翻转,因此使用非结构化网格对流体计算域进行网格划分,以离散流体计算域,同时采用细化方法细化局部网格,提高网格质量。JDZ02、JDZ05、JDZ10 型雨量计划分的初始网格数量分别为 2.2×10^6 、 2.3×10^6 、 2.7×10^6 个,网格质量则使用网格扭曲度参数进行判别,考虑动网格更新时须保证网格质量,因此将网格的扭曲度控制在 0.85 以下(分别为 0.80、0.83、0.79)。

表 1 不同类型雨量计翻斗的规格和安装倾角

Tab. 1 Specifications of different types of rain gauge tipping buckets

型号	翻斗规格				材质	分辨率 /mm	安装倾角	
	长	宽	高	质量			左斗	右斗
	/mm	/mm	/mm	/g			/°	/°
JDZ02	132	26.4	21	26.73	不锈钢	0.2	11.4	11.8
JDZ05	126	33.5	33.5	30.24	塑料	0.5	19.6	20.6
JDZ10	152	32	32	57.51	塑料	1.0	21.2	21.1

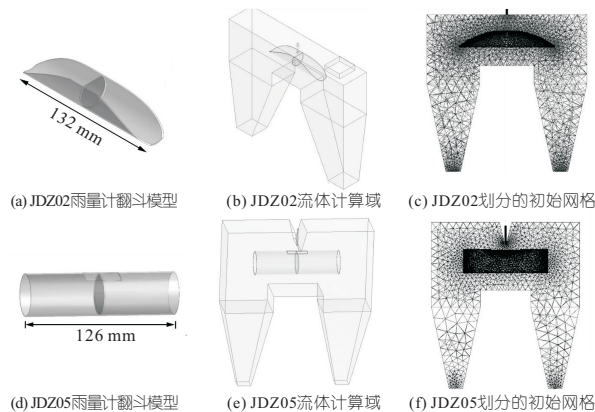


图 1 JDZ02 和 JDZ05 的三维模型和划分的初始网格

Fig. 1 Three dimensional models and initial mesh of JDZ02 and JDZ05

2.2.2 动网格模型

翻斗式雨量计的翻斗存在左右往复的旋转运动,而使用 CFD 仿真模拟则须采用动网格(DM)模型模拟翻斗的翻转过程以及水和空气的两相流运动模拟。在动网格坐标系中纳维斯托克斯方程(N-S)方程为:

$$\dot{r} = \omega r = U \quad (1)$$

由于存在网格运动速度,使得域中任何运动

的点均为关于一个给定的时间变化率的位置向量 r , r 可认为是网格速度,刚体的旋转速度为常数,连续性、动量和质量方程分别为:

$$\frac{d}{dt} \int \rho d\Omega + \iint \rho (\vec{V} - \vec{U}) \cdot n dS = 0 \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} \int \rho \vec{V} d\Omega + \iint [\rho (\vec{V} - \vec{U}) \rightarrow V + p \vec{I} - \vec{\tau}_v] \cdot n dS = \int \vec{F}_b d\Omega \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} \int \rho e_t d\Omega + \iint \{ \rho (\vec{V} - \vec{U}) e_t + p \vec{V} - \vec{\tau}_v \vec{V} + \vec{q} \} \cdot n dS = \int (\vec{F}_b \vec{V} + \dot{Q}_g) d\Omega \quad (4)$$

式中, ρ 为密度; V 为速度; Ω 、 S 分别为移动控体积中的体积、边界面; p 为压力; e_t 为相对总内能; q 为傅里叶数。

在动网格模型中,实现流体计算域网格更新主要有弹簧压缩、动态铺层和局部重构三种方法,本文模拟翻斗翻转主要采用弹簧压缩、局部网格重构的方法对网格进行实时更新,表 2 为模拟 JDZ05 型雨量计所使用的动网格模型的具体参数。

表 2 模拟 JDZ05 型雨量计所使用的动网格模型的参数

Tab. 2 Parameters of dynamic grid model of JDZ05 simulation

方法	子方法	参数	参数值
弹簧压缩	扩散法	扩散系数	1.50
局部重构	局部单元	最大网格扭曲度	0.86
		重构间隔步长	5.00
	区域面分割	分割系数	0.40

3 结果与分析

3.1 试验结果分析

利用雨量计自动率定系统,分别在小雨强(0.4 mm/min)、中雨强(2 mm/min)、大雨强(4 mm/min)情况下,使用高速摄像机捕捉翻斗翻转 20 次的过程,发现 JDZ02 型雨量计在 0.4 mm/min 雨强下翻斗翻转过程为:翻斗从启动到停止(依靠调节螺帽控制翻斗翻转最大角度)的用时约为 0.36 s,而整个过程也分为两个阶段,第一个阶段为翻斗从启动到水平状态,第二阶段为从水平状态到停止,两个阶段的耗时(t_1 、 t_2)相差较大,前者约为 0.30 s,后者为 0.06 s。翻斗在触及调节螺帽后会产生 1~2 帧的轻微回弹,因此 t_2 的耗时还包括此回弹时间。

表 3 为不同分辨率雨量计不同雨强下的翻转时间特性及附加水量和相对误差。由表 3 可知,随雨强增大时, t_1 呈现逐渐减小的趋势,造成此

表 3 单层翻斗雨量计不同雨强下的翻转时间和附加水量

Tab.3 Overturning time and additional water volume of tipping bucket rain gauge under different rain intensities

型号	雨强 /(mm·min ⁻¹)	时间(左右斗平均)		附加水 量/g
		t ₁ /s	t ₁ +t ₂ /s	
JDZ02	0.4	0.30	0.36	0.01
	1	0.30	0.35	0.03
	2	0.26	0.31	0.05
	4	0.25	0.30	0.10
JDZ05	0.4	0.33	0.39	0.03
	1	0.29	0.35	0.08
	2	0.28	0.33	0.15
	4	0.27	0.34	0.28
JDZ10	1	0.35	0.42	0.18
	2	0.35	0.41	0.37
	4	0.33	0.39	0.69

注:t₁为启动到水平状态的时间;t₂为从水平状态到停止的时间。
现象的原因是由于雨量计集雨器形成的水流对翻斗冲击力逐渐增大,使得翻斗转动的角速度增加,从而造成 t₁ 的逐渐减小。同时由于在此时间段内,水持续注入翻斗内,而这部分的水不计入雨量计的计量,便产生了附加水量,其值也随着雨强的增大而逐渐增大。随着雨量计分辨率的减小,此现象呈现逐渐增加趋势,JDZ02 型雨量计在 4 mm/min 雨强下的附加水量仅为 0.1 g,然而 JDZ10 型雨量计的附加水量却达到了 0.69 g。另外,t₁(启动到水平的时间)占据了翻斗翻转过程的 80%~85%左右,在雨量计附加水量产生计量误差中占据了主要的因素。

3.2 数值模拟结果分析

数值模拟侧重于分析流体状态,可更为精细化地研究流体在翻斗翻转过程中的状态。图 2 为 JDZ02 型雨量计在 4 mm/min 下翻斗的左斗和右斗各翻转一次的流体运动过程(浅色代表水,深色代表空气)。由图 2 可知,t=0 s 为初始时刻,在注入水 3.4 s 后,翻斗的右斗开始翻转,此时翻斗从原有静止的接水状态逐渐旋转至水平状态。在 0.25 s 后,翻斗旋转至水平位置,此时间段内仍有水持续注入翻斗内,然而这部分水不计入计量,即为附加水量,同时由于自然降雨状态下降雨雨强时刻变化,因此存在不同的雨强附加水量不同的情况,使得雨量计的计量误差随降雨雨强增大而非线性增大的情况。

为验证数值模拟的准确性,表 4 为试验中(1、2、3、4 mm/min 雨强)翻斗式雨量计每斗的翻转水量和数值模拟结果的对比。由表 4 可知,CFD 数值模拟的每斗翻转水量与试验的差距较小,基本控制在±5%以内,说明数值模拟的结果可很好地反映出翻斗的真实翻转过程。

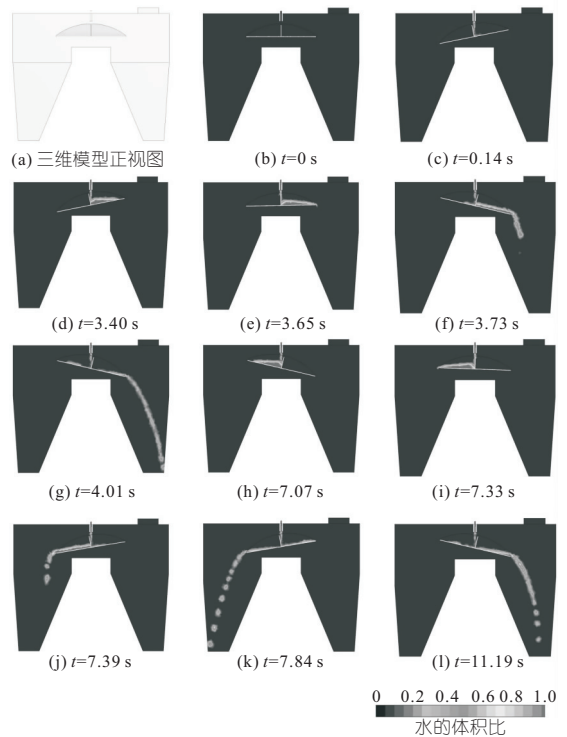


图 2 数值模拟的 JDZ02 在雨强为 4 mm/min 下的翻斗翻转过程

Fig.2 Numerical simulation of JDZ02 tipper overturning process under 4 mm/min the rain intensity

表 4 JDZ02、JDZ05 左右斗翻转水量的试验和模拟值的对比
Tab.4 Comparison of experimental and simulated values of volume of left and right buckets of JDZ02 and JDZ05

型号	模拟雨强	翻斗次数/次	注入水量/g	平均排出水量(试验)		平均排出水量(模拟)	
				左斗/g	右斗/g	左斗/g	右斗/g
JDZ02	0.1	50	311.85	3.04	3.11	—	—
	0.4	50	313.75	3.06	3.16	—	—
	1	50	324.88	3.16	3.26	3.09	3.15
	2	50	326.29	3.26	3.20	3.15	3.17
JDZ05	0.1	20	310.32	7.59	7.72	—	—
	0.4	20	312.38	7.63	7.78	—	—
	1	20	316.69	7.75	7.92	7.63	7.76
	2	20	318.89	7.83	7.96	7.77	7.82
	3	20	323.82	7.95	8.08	7.43	7.82
	4	20	325.00	7.93	8.17	7.89	8.02

注:模拟雨强单位为 mm/min。

为探究翻斗在翻转后水流的状态,对模型流体计算域两个出口位置进行流量过程监控,以 0.2 mm 雨量计为例,发现翻斗在翻转后,水在很短时间(约 0.4 s)被倾倒入,这是由于翻斗在触及停止螺栓时在不到 1 s 内完成质量的倾斜而造成的。同时由于此回弹效应的影响使翻斗水流的出流过程出现两个峰值。另外由于 JDZ02 型雨量计的右斗安装倾角比左斗大 0.4°,故造成出流

的第二次峰值要低于第一次峰值,即随着安装倾角的减小,回弹产生的影响越大。

4 结论

a. 由高速摄像机逐帧分析可知,翻斗式雨量计在计数时,翻斗从启动到停止的用时约为 0.35~0.40 s,但整个过程也分为翻斗从启动到水平、从水平到停止两个阶段,且第一阶段的耗时 t_1 占比约为 80%~85% 左右,而后者 t_2 仅为 0.05 s 左右,且在第二阶段存在翻斗触及调节螺帽后的轻微回弹现象。

b. 由模拟结果可知,在 t_1 时间段内水会持续注入翻斗内,但此部分水不计量,造成附加水量随着降雨雨强而产生时刻变化,是雨量计量误差随雨强变化的根本原因。

c. 翻斗在将水翻转出翻斗时,水会在极短时间内(约 0.4 s)被倾倒入,且由于翻斗在触碰停止螺栓时会造成轻微回弹现象,会造成雨量计翻斗在翻出水时产生翻出流量的“双峰”现象,且随着翻斗左右安装倾角变小而增大的现象。

参考文献:

[1] 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.

[2] KOCHENDORFER J, EARLE M, RASMUSSEN R, et al. How well are we measuring snow post-SPICE? [J]. Bulletin of the American meteorological society, 2021, 10:1-49.

[3] COLLI M, RASMUSSEN R, ROY 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.

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

[5] LA BARBERA P, LANZA L G, STAGI L. Tipping bucket mechanical errors and their influence on rainfall statistics and extremes[J]. Water science and technology, 2002, 45:1-9.

[6] 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.

[7] 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):160-163,79.

[8] 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.

Investigating on Characteristics of Tipping Bucket Rain Gauge by Numerical Simulation and Experiment

ZHAO Ze-jin¹, LIU Li-cheng¹, CAI Zhao², LIU Hong-wei²

(1. Honghe Nanyuan Water Supply Co., Ltd., Mengzi 661000, China;

2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: As the most basic precipitation collection equipment in the field of hydrometeorology, the tipping bucket rain gauge has the characteristics of practicality and good stability, but there are some deficiencies in the research on the tipping characteristics and mechanism of the tipping bucket rain gauge and the causes of the mechanical error of the tipping bucket rain gauge. In this study, the mechanism of the tipping process of tipping bucket rain gauge was explored by means of combination of numerical simulation and indoor experiment with high-speed camera. The results show that during the turnover process, the time from start to stop is about 0.35-0.40 s, the time t_1 from start to level is relatively high, about 80%-85%, and the time t_2 from level to stop is only about 0.05 s, and there is a slight rebound after the turnover touches the adjusting nut. During t_1 period, water will be continuously injected into the tipping bucket, which is the fundamental reason for the change of additional water volume and mechanical error of rain gauge with rain intensity. The tipping bucket will pour out the water in a very short time (about 0.4 s), and because the tipping bucket will cause slight rebound when touching the stop bolt, it will cause the "double peak" phenomenon of the tipping flow of the rain gauge tipping bucket when pouring out the water, and it will increase with the small installation inclination of the tipping bucket on the left and right. The research results can provide basic theoretical support for the improvement of tipping bucket rain gauge in the future.

Key words: tipping bucket rain gauge; numerical simulation; dynamic mesh; additional water