

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905811

翻斗式雨量计左右斗平衡判别方法*

廖敏涵^{1,2}, 刘九夫^{1,2}, 廖爱民^{1,2}, 蔡钊^{1,2}, 闵星^{1,2}

(1. 南京水利科学研究所 南京 210029; 2. 南京水利科学研究所水文水资源与
水利工程科学国家重点实验室 南京 210029)

摘要:为了判别 TBR 左右斗平衡,提出了差值判别法和差值率判别法。差值判别法以左右斗平均每斗水量的差值为判别指标,并记 α 为差值限;差值率判别法以左右斗差值的绝对值与左右斗测量值的平均值之比作为判别指标,并记 β 为差值率限。以 JDZ05 和 JDZ10 两款 TBR 开展实验分析,结果表明:1)对于 JDZ05, α 可取 0.1 g, β 可取 1%;对于 JDZ10, α 可取 0.2 g, β 可取 1%。2)左右斗不平衡时,不利于 JDZ05 和 JDZ10 监测的雨量范围分别为 0~5.5 mm 和 0~19 mm;经过左右斗调平后,不利于 JDZ05 和 JDZ10 监测的雨量范围分别为 0~3.5 mm 和 0~7 mm。3)经过左右斗调平后,可减少左右斗差值、左右斗差值率和计量误差的离散程度,提高计量误差的重复性,有助于提高测量降雨的准确度。研究成果可对制定 TBR 左右斗平衡判别准则和改进翻斗式雨量计率定流程提供参考。

关键词:翻斗式雨量计;率定;左右斗平衡;差值判别法;差值率判别法

中图分类号: TH764 P335+.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4045

Judgement method for left and right bucket balance of tipping bucket raingauge

Liao Minhan^{1,2}, Liu Jiufu^{1,2}, Liao Aimin^{1,2}, Cai Zhao^{1,2}, Min Xing^{1,2}

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resource and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: In order to judge the balance between the left and right buckets of the TBR, the difference judgement method and the difference rate judgement method are proposed. The difference judgement method uses the difference between the average water weights of the left and right buckets as the criterion, and let α be the difference limit. The difference rate judgement method uses the ratio of the absolute value of the difference between the left and right buckets to the average of left and right bucket measurements as the judgement criterion, and let β be the difference rate limit. The experiment analysis on the two TBRs of JDZ05 and JDZ10 was carried out. The results show that: 1) For JDZ05, α may take 0.1 g, β may take 1%; for JDZ10, α may take 0.2 g, β may take 1%. 2) When the left and right buckets are unbalanced, the rainfall ranges that are not conducive to JDZ05 and JDZ10 monitoring are 0~5.5 mm and 0~19 mm, respectively; after balancing the left and right buckets, the rainfall ranges unfavorable for JDZ05 and JDZ10 monitoring are 0~3.5 mm and 0~7 mm, respectively. 3) After balancing the left and right buckets, the difference value, the difference value rate of the left and right buckets and the dispersion of the measurement errors can be reduced, the repeatability of the measurement error can be improved, which is helpful to improve the accuracy of the rainfall measurement. The research results can provide a reference for developing TBR bucket balance judgement method and improving TBR calibration process.

Keywords: tipping bucket raingauge (TBR); calibration; left and right bucket balance; difference value judgement method; difference value rate judgement method

收稿日期:2019-11-14 Received Date:2019-11-14

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

0 引言

准确测量降雨是一项复杂的工作^[1],但无论是业务观测还是科学研究,都需要精准地测量降雨量^[2-5]。翻斗式雨量计(tipping bucket raingauge, TBR)是目前降雨观测的主要设备^[6-7],广泛应用于国内外自动化降雨监测和实验研究中^[8-12]。因此,TBR的率定问题长期以来都是TBR研究中受国内外学者关注较多的问题^[13-14],分别是不考虑雨强影响的静态率定(static calibration)和考虑雨强影响的动态率定(dynamic calibration)^[15],此外,不同型号TBR的比测也备受关注^[16]。TBR有必要在安装前进行率定或检测^[17-18],有助于了解仪器的性能和状态。经过率定或检测后得出的雨强-误差关系线是这项工作中重要的一环,该关系线可用于后期校正,有效地减少测量中的误差^[19-20]。然而,率定过程中是否对左右斗的水量进行率定的问题不受到关注。Niemczynowicz^[17]认为率定过程中,需要将左右斗水量调整至计量值,同时将左右斗的水量调整一致,但左右斗一致存在主观性,缺少少量的判断准则。世界气象组织(WMO)也曾大规模地组织TBR的率定研究工作,但是未曾对左右斗水量的率定进行研究^[20]。GB/T 21978.2—2014是我国指导TBR测量的最新版规范^[21]。该规范规定在0~4 mm/min雨强范围内,翻斗计量误差最大不超过±4%,但缺乏对左右斗水量进行评判的准则。廖敏涵等^[22]对左右斗水量过程线进行了研究,认为左右斗水量过程线可以精细刻画翻斗内水量动态变化,判断出TBR左右斗的平衡性能。鉴于国内外都缺乏对TBR左右斗水量进行评判的方法,因此,有必要提出合适的方法对TBR左右斗平衡进行判别。

针对上述TBR率定中存在的问题,加深对TBR测量降雨的认识,本文提出了两种评判TBR左右斗水量差异的方法,分别是差值判别法和差值率判别法。为制定TBR左右斗平衡判别准则提供科学依据,同时,对完善TBR的率定研究也有重要意义,本文拟从理论分析和定量实验的角度对此问题进行分析研究。

1 判别方法理论

本文首先对左右斗平衡的判别方法进行理论分析。在同一种雨强下,随着翻斗次数的增多,左右斗的累积误差逐渐减小,并趋于稳定,最后收敛于某个误差值。然而,不同雨强下的收敛值不完全相同,原因是率定前后附加水量的不同。从定性的角度分析,左右斗水量差值对翻斗计量误差存在较为明显的影响,且差值越大影响越大。另一方面,从定量的角度分析,根据2014版国标规

定,TBR的计量误差上限为4%^[21],本文取该上限的1%(即0.04%),作为累积误差达到稳定的判断标准。基于上述理论分析,本文提出了两种评判TBR左右斗水量差异的方法,分别是差值判别法和差值率判别法。在介绍两种方法之前,先对雨量计的计量值和天平测量值进行说明。雨量计的计量值如式(1)所示。

$$M_C = \frac{n \times \rho \times h \times S}{10} = n \times m_c \quad (1)$$

式中: M_C 为翻斗理论上计量的水量, $M_C = 314.2 \text{ g}$; h 为雨量计的分辨率; n 为翻斗次数, $n = 10/h$,故 $n_{\text{JDZ05}} = 20$, $n_{\text{JDZ10}} = 10$; S 为集水器的面积,JDZ系列TBR, $S = 314.2 \text{ cm}^2$; ρ 为水的密度,实验用水为去离子水,密度 $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$; m_c 为翻斗单次翻动理论上计量的水量, $m_{\text{C-JDZ05}} = 15.71 \text{ g}$, $m_{\text{C-JDZ10}} = 31.42 \text{ g}$;测量值计算如式(2)~(4)所示,计量误差计算如式(5)所示^[23-24]。

$$M_L = \sum_{i=1}^{n/2} L_i \quad (2)$$

$$M_R = \sum_{i=1}^{n/2} R_i \quad (3)$$

$$M_T = \left(\sum_{i=1}^{n/2} L_i + \sum_{i=1}^{n/2} R_i \right) \quad (4)$$

$$E = \frac{M_C - M_T}{M_T} \times 100\% \quad (5)$$

式中: E 为计量误差; M_L 为左天平实际测的水量; L_i 代表左翻斗每斗的实际测量值; M_R 为右天平实际测的水量; R_i 代表右翻斗每斗的实际测量值; M_T 为左右斗实测值的总和。左右斗累积误差 e_n 的计算公式如式(6)所示。

$$e_n = \frac{(n_L + n_R) \times m_c - (n_L \times m_L + n_R \times m_R)}{(n_L \times m_L + n_R \times m_R)} \times 100\% \quad (6)$$

式中: n_L 为左斗翻转的次数; n_R 为右斗翻转的次数; m_L 为左斗单次翻动计量的水量; m_R 为右斗单次翻动计量的水量; m_c 为单翻斗理论计量值。

1.1 判别方法1:差值判别法

采用左斗平均测量值减去右斗平均测量值的绝对值,即左右斗平均每斗水量差值(R_1),来建立评判左右斗平衡的标准,如式(7)所示。

$$\left| \frac{M_L - M_R}{n/2} \right| \leq \alpha \quad (7)$$

将式(2)~(3)代入,可得式(8)。

$$\left| \frac{\sum_{i=1}^{n/2} L_i - \sum_{i=1}^{n/2} R_i}{n/2} \right| \leq \alpha \quad (8)$$

式中: α 为差值限,单位为g,其余参数同上。

1.2 判别方法2:差值率判别法

考虑到TBR的附加水量随雨强的增大而增大,雨强

越大,测量值也越大,故采用左右斗差值的绝对值与测量值的平均值之比,即左右斗水量差值率(R_2),来评判左右斗水量的差异,如式(9)所示。

$$\frac{|M_L - M_R|/n}{(M_L + M_R)} \leq \beta \quad (9)$$

将式(2)~(4)代入,可得式(10)。

$$\frac{\left| \sum_{i=1}^{n/2} L_i - \sum_{i=1}^{n/2} R_i \right|}{\left(\sum_{i=1}^{n/2} L_i + \sum_{i=1}^{n/2} R_i \right)} \leq \beta \quad (10)$$

式中: β 为差值率限,其余参数同上。

2 实验方法

本文选择国内分辨率较大且性能较为稳定的^[22],两种单层TBR进行实验研究,分别是JDZ05和JDZ10。两者的分辨率分别为0.5和1 mm,主要区别是翻斗的形状和单翻斗的感应量不同。本实验基于一套智能化的TBR率定系统(具备称重计量、自动计数和供水等功能),可模拟不同雨强对TBR进行实验研究^[25],如

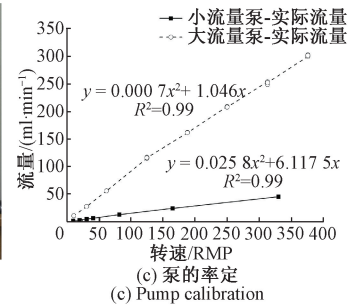
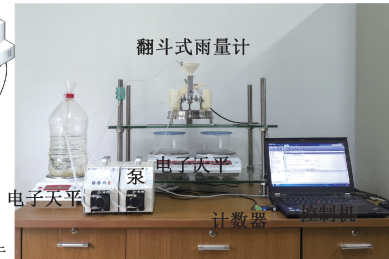
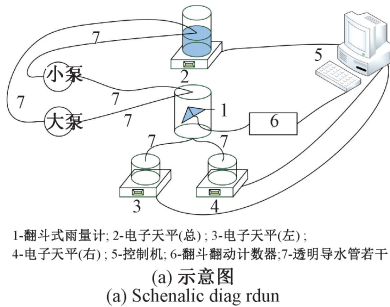


图1 实验设备

Fig.1 Experiment setup

3 实验结果与讨论

3.1 差值判别法和差值率判别法实验结果分析

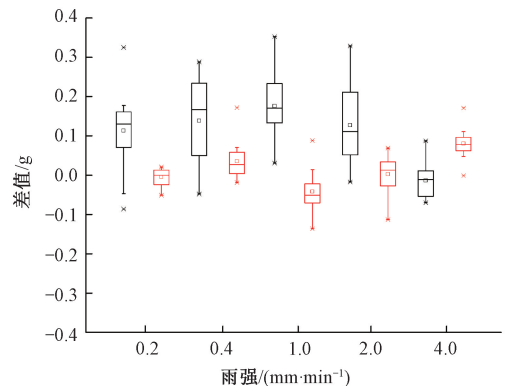
根据差值判别法和差值率判别法两种方法进行计算和分类,可以得到图2和3所示的结果。图2和图3所示分别为不同雨强下JDZ05和JDZ10率定前、后 R_1 和 R_2 的分布。由图2可知,率定前 R_1 和 R_2 的分布范围较大且较为散乱,而进行左右斗水量调平后, R_1 和 R_2 的分布范围随之缩小且较为集中。其次,可根据定量计算,对左右斗平衡的范围进行探讨,确定 α 和 β 的值。

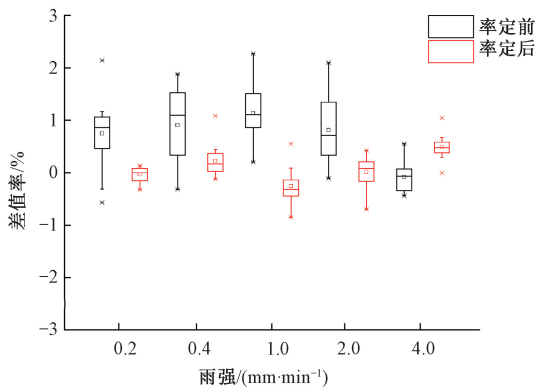
1)用差值判别法对JDZ05左右斗平衡进行评判。率定前,差值在 $[-0.1, 0.1]$ 之间($\alpha = 0.1g$)的个数占47%,在 $[-0.2, 0.2]$ 之间($\alpha = 0.2g$)的个数占79%,在 $[-0.3,$

图1(a)和(b)所示。此外,考虑到泵的精度对实验的影响^[24,26],实验还对供水方面加以改进。使用了小流量泵(LLS Plus, Kamoer, China, 1~150 mL/min, 泵管的内外径分别为1.6和4.8 mm)和大流量泵(LLS Plus, Kamoer, China, 1~352 mL/min, 泵管的内外径分别为4和7.2 mm)进行供水,在0.2、0.4和1 mm/min雨强时,使用小流量泵,在2、4 mm/min时,使用大流量泵,且两种泵在实验前均进行过率定(图1(c))所示率定曲线每个点样本数为3),以保证模拟雨强的准确性。本实验在0~4 mm/min雨强范围内,模拟5种不同雨强(0.2、0.4、1、2、4 mm/min),按国标要求,每次实验翻斗翻转 $n = 10/h$ 次^[21]。

实验首先对TBR进行出厂验证实验,获取左右斗水量的基本情况。对出厂设备进行验证后,再以0.2 mm/min的雨强对TBR进行误差调零,同时对左右斗进行调平(该雨强下附加水量较小,易于对左斗翻斗进行精确调平)。每组实验在每种雨强下进行5次实验,雨强由小到大进行实验,共进行3组循环实验,累积实验数据进行统计分析。

0.3]之间($\alpha = 0.3g$)的个数占96%,差值均处于 $[-0.4, 0.4]$ 之间($\alpha = 4g$)。率定后,JDZ05左右斗水量差值在

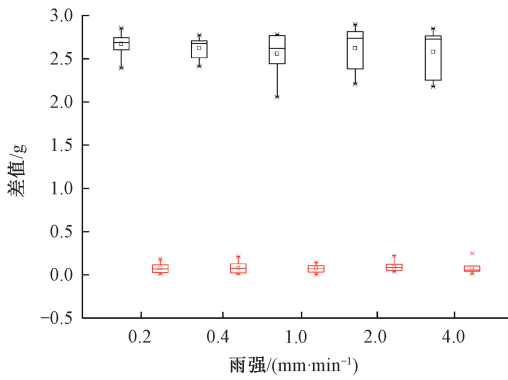




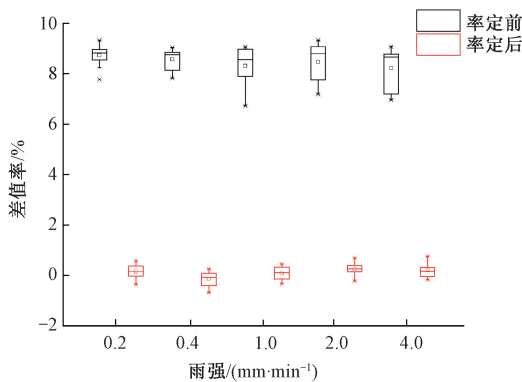
(b) 不同雨强下 R_2 的范围
(b) Range of R_2 under different rain intensities

图 2 JDZ05 率定前后 R_1 和 R_2 分布

Fig.2 The distribution of R_1 and R_2 of JDZ05 before and after calibration



(a) 不同雨强下 R_1 的范围
(a) Range of R_1 under different rain intensities



(b) 不同雨强下 R_2 的范围
(b) Range of R_2 under different rain intensities

图 3 JDZ10 率定前后 R_1 和 R_2 分布

Fig.3 The distribution of R_1 and R_2 of JDZ10 before and after calibration

$[-0.1, 0.1]$ 之间 ($\alpha = 0.1g$) 的个数占 91%, 在 $[-0.15, 0.15]$ 之间 ($\alpha = 0.15g$) 的个数占 97%, 差值均处于 $[-0.2, 0.2]$ 之间 ($\alpha = 0.2g$)。

2) 用差值率判别法对 JDZ05 左右斗平衡进行评判。率定前, 左右斗水量差率 (%) 在 $[-1, 1]$ 之间 ($\beta = 1%$) 的个数占 46%, 在 $[-2, 2]$ 之间 ($\beta = 2%$) 的个数占 96%, 差值率均处于 $[-3, 3]$ 之间 ($\beta = 3%$)。率定后, JDZ05 左右斗水量差值率在 $[-0.5, 0.5]$ 之间 ($\beta = 0.5%$) 的个数占 83%, 在 $[-1, 1]$ 之间 ($\beta = 1%$) 的个数占 97%, 差值率均处于 $[-2, 2]$ 之间 ($\beta = 2%$)。

3) 用差值判别法对 JDZ10 左右斗平衡进行评判。率定前, 差值在 $[2, 2.2)$ 之间 ($\alpha = 2 \sim 2.2g$) 的个数占 3%, 在 $[2.2, 2.4)$ 之间 ($\alpha = 2.2 \sim 2.4g$) 的个数占 15%, 在 $[2.4, 2.6)$ 之间 ($\alpha = 2.4 \sim 2.6g$) 的个数占 15%, 在 $[2.6, 2.8)$ 之间 ($\alpha = 2.6 \sim 2.8g$) 的个数占 57%, 在 $[2.8, 3]$ 之间 ($\alpha = 2.8 \sim 3g$) 的个数占 11%。率定后, JDZ10 左右斗水量差值在 $[-0.1, 0.1]$ 之间 ($\alpha = 0.1g$) 的个数占 67%, 在 $[-0.2, 0.2]$ 之间 ($\alpha = 0.2g$) 的个数占 96%, 差值均处于 $[-0.3, 0.3]$ 之间 ($\alpha = 0.3g$)。

4) 用差值率判别法对 JDZ10 左右斗平衡进行评判。率定前, 左右斗水量差值率在 $[5, 6)$ 之间 ($\beta = 5\% \sim 6%$) 的个数占 0%, 在 $[6, 7)$ 之间 ($\beta = 6\% \sim 7%$) 的个数占 3%, 在 $[7, 8)$ 之间 ($\beta = 7\% \sim 8%$) 的个数占 21%, 在 $[8, 9)$ 之间 ($\beta = 8\% \sim 9%$) 的个数占 60%, 在 $[9, 10]$ 之间 ($\beta = 9\% \sim 10%$) 的个数占 16%。率定后, JDZ10 左右斗水量差值率在 $[-0.5, 0.5]$ 之间 ($\beta = 0.5%$) 的个数占 92%, 差值率均处于 $[-1, 1]$ 之间 ($\beta = 1%$)。

差值判别法和差值率判别法分别是通过 R_1 和 R_2 的范围来判断左右斗平衡。TBR 在翻转过程中会附加带走的一部分水量 (称为附加水量), 雨强越大, 测量值 (含附加水量) 越大^[20]。差值判别法采用式 (8), 左右斗附加水量互相抵消, 因此未考虑到附加水量的影响; 但差值率判别法采用式 (10), 考虑到了附加水量的影响, 更能真实地反映 TBR 翻转特性, 故推荐使用差值率判别法来进行左右斗平衡的判别。经过左右斗水量调平后, 无论是通过差值判别法判别还是差值率判别法判别, R_1 和 R_2 均比率定前的范围要小。当占比达到 95% 以上时, 可认为左右斗水量处于平衡的状态, 根据此时的占比来决定 α 和 β 的值。综上所述, 对于 JDZ05 来说, $\alpha = 0.15g$, 占比达 97%, $\beta = 1%$ 时, 占比达 97%, 可认为左右斗水量处于平衡状态; 对于 JDZ10 来说, $\alpha = 0.2g$, 占比达 96%, $\beta = 1%$ 时, 占比达 100%, 可认为左右斗水量处于平衡状态。以上讨论结果如表 1 和 2 所示。

3.2 左右斗水量差值对翻斗计量误差的影响分析

若翻斗翻动为偶数斗, 则左右斗水量的差会被相抵消, 不利于分析对翻斗计量误差的影响, 实际测量降水

$[-0.05, 0.05]$ 之间 ($\alpha = 0.05g$) 的个数值占 59%, 在

表1 差值判别法结果

Table 1 The result of difference value discriminant method

| 雨量计型号 | 状态 | α/g | 范围/g | 占比/% |
|-------|-----|------------|--------------|------|
| JDZ05 | 率定前 | 0.1 | [-0.1,0.1] | 47 |
| | | 0.2 | [-0.2,0.2] | 79 |
| | | 0.3 | [-0.3,0.3] | 96 |
| | | 0.4 | [-0.4,0.4] | 100 |
| | 率定后 | 0.05 | [-0.05,0.05] | 59 |
| | | 0.1 | [-0.1,0.1] | 91 |
| | | 0.15 | [-0.15,0.15] | 97 |
| | | 0.2 | [-0.2,0.2] | 100 |
| JDZ10 | 率定前 | 2~2.2 | [2,2.2) | 3 |
| | | 2.2~2.4 | [2.2,2.4) | 15 |
| | | 2.4~2.6 | [2.4,2.6) | 15 |
| | | 2.6~2.8 | [2.6,2.8) | 57 |
| | 率定后 | 2.8~3 | [2.8,3] | 11 |
| | | 0.1 | [-0.1,0.1] | 67 |
| | | 0.2 | [-0.2,0.2] | 96 |
| | | 0.3 | [-0.3,0.3] | 100 |

表2 差值率判别法结果

Table 2 The result of difference value rate discriminant method

| 雨量计型号 | 状态 | $\beta/\%$ | 范围/g | 占比/% |
|-------|-----|------------|------------|------|
| JDZ05 | 率定前 | 1 | [-1,1] | 64 |
| | | 2 | [-2,2] | 96 |
| | | 3 | [-3,3] | 100 |
| | | 0.5 | [-0.5,0.5] | 83 |
| | 率定后 | 1 | [-1,1] | 97 |
| | | 1.5 | [-1.5,1.5] | 100 |
| | | 5~6 | [5,6) | 0 |
| | | 6~7 | [6,7) | 3 |
| JDZ10 | 率定前 | 7~8 | [7,8) | 21 |
| | | 8~9 | [8,9) | 60 |
| | | 9~10 | [9,10) | 16 |
| | | 0.5 | [-0.5,0.5] | 92 |
| | 率定后 | 1 | [-1,1] | 100 |

中,存在翻斗翻动为奇数斗的情况,为了分析左右斗水量差对测量降水误差的影响,实验设置 JDZ05 和 JDZ10 均翻了奇数斗,如 1,3,5,7,⋯,29,31 斗进行实验且不考虑残留水量的影响。然后取率定前、后的差值范围进行分析,假设左斗的水量大于右斗的水量。为了排除翻斗翻

动随机误差的影响,本节内容为建立在率定前、后左右斗水量差值基础上的理论分析。由于雨强越大,翻斗的附加水量也越大,附加水量的计算根据天平的实测值进行计算。

由表 1 可知,率定前 JDZ10 单斗平均水量差为 2~3 g,率定后单斗平均水量差为 0.1~0.2 g;同理,率定前 JDZ05 单斗平均水量差为 0.1~0.4 g,率定后,JDZ05 单斗平均水量差为 0.05~0.2 g。 e_n 计算的方法如式(6)所示,分析结果如图 4 所示。

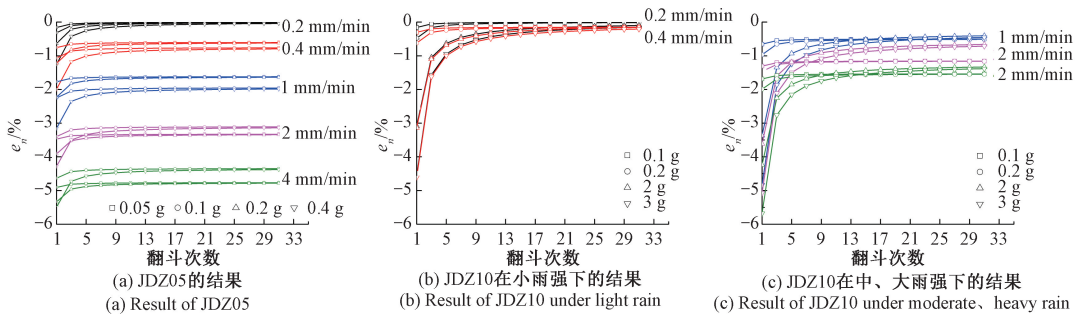


图4 JDZ05 和 JDZ10 左右斗水量差值对翻斗计量误差的影响分析

Fig.4 Influence analysis of the difference value between the left and right bucket water volumes of JDZ05 and JDZ10 on the measurement error of the bucket

图 4(a) 所示为 JDZ05 在实验雨强下得到的计算结果;图 4(b) 和(c) 所示为 JDZ10 分别在 0.2、0.4 mm/min 和 1、2、4 mm/min 雨强的计算结果。由前文可知,当 $|e_{n+2} - e_n| < 0.04\%$ 时 e_n 达到稳定,计算结果如表 3 所示。表 4 所示为 JDZ05 和 JDZ10 率定前后左右斗水量差值对降水观测的影响分析,结果表明,在 $n \leq 11$ 斗,即降水量 ≤ 5.5 mm 时,JDZ05 左右斗水量差值对误差有明显的影

响,且差值越大,影响越明显;在 $n \leq 19$ 斗,即降水量 ≤ 19 mm 时,JDZ10 左右斗水量差值对误差有明显的影,且差值越大,影响越明显。然而,在实际降雨中,为评估小于 5.5 mm 和 19 mm 的降雨事件发生的频率,本文选取了国内不同地区和不同海拔的 9 个气象站和滁州水文实验基地 2017 年~2018 年的降雨数据进行分析,共计 1 054 场次。由表 4 可知, $0 < P < 5.5$ mm 的平均降雨次数

为 45 次,发生频率为 43.69%; $5.5 \leq P < 10$ mm 的平均降雨次数为 14 次,发生频率为 13.59%; $10 \leq P < 19$ mm 的平均降雨次数为 16 次,发生频率为 15.53%; $P < 19$ mm 的平均降雨次数为 75 次,发生频率为 72.82%。研究结果表明,实际降雨中,小于 19 mm 的降水过程发生频率很高,大于 70%,因此应该重视左右斗水量的平衡,提高降雨自动化监测的水平。

表 3 JDZ05 和 JDZ10 左右斗水量差值对降雨量测量的影响

Table 3 The influence of difference value of the left and right bucket water volume of JDZ05's and JDZ10 on the rainfall measurement

| 雨量计型号 | 平均每斗水量差/g | 翻斗次数 | 降雨量/mm |
|-------|-----------|------|--------|
| JDZ05 | 0.05 | 5 | 2.5 |
| | 0.1 | 7 | 3.5 |
| | 0.2 | 7 | 3.5 |
| | 0.4 | 11 | 5.5 |
| JDZ10 | 0.1 | 7 | 7 |
| | 0.2 | 5 | 5 |
| | 2 | 15 | 15 |
| | 3 | 19 | 19 |

综上所述,左右斗不平衡时,不利于 JDZ05 和 JDZ10 监测的雨量范围分别为 0~5.5 mm 和 0~19 mm;经过左右斗调平后,不利于 JDZ05 和 JDZ10 监测的雨量范围分别为 0~3.5 mm 和 0~7 mm,可充分发挥 TBR 测量中小降雨的性能。

3.3 率定前后 R_1 、 R_2 和计量误差 (E) 的离散程度变化分析

图 5 所示为率定前后 TBR 的 R_1 、 R_2 和 E 的离散程度对比,用标准差 (S_r) 来衡量,每个点的样本数均为 15。从图 5(a) 中可得,率定前 $R_{1-JDZ05}$ 的标准差在各个实验雨强下在 0.04~0.09 g 之间, $R_{1-JDZ10}$ 在 0.12~0.25 g 之间。经过左右斗率定后,在各个实验雨强下 $R_{1-JDZ05}$ 在 0.02~0.05 g 之间, $R_{1-JDZ10}$ 在 0.05~0.07 g 之间;同理,从图 5(b) 中可得,率定前 $R_{2-JDZ05}$ 的标准差在各个实验雨强下在 0.27%~0.7% 之间, $R_{2-JDZ10}$ 在 0.4%~0.79% 之间。经过左右斗率定后,在各个实验雨强下 $R_{2-JDZ05}$ 在 0.13%~0.33% 之间, $R_{2-JDZ10}$ 在 0.22%~0.28% 之间;从图 5(c) 中可得,率定前 E_{JDZ05} 的标准差在各个实验雨强下在 0.08%~0.39% 之间, E_{JDZ10} 在 0.37%~0.58% 之间。经过左右斗率定后,在各个实验雨强下 E_{JDZ05} 在 0.07%~0.19% 之间, E_{JDZ10} 在 0.09%~0.14% 之间。

综上所述,JDZ05 和 JDZ10 在率定前 R_1 、 R_2 和 E 的离散程度都比经过左右斗率定后的离散程度要大。此外,经过左右斗率定后,在各个实验雨强下,JDZ05 和 JDZ10

表 4 国内不同地区和不同海拔降雨观测站 2017 年—2018 年场次降雨数据统计

Table 4 Statistics of rainfall data from 2017 to 2018 in the rainfall observation stations in different regions and different altitudes in China

| 站名 | 区站号 | 站点海拔/m | 降雨量大小/mm | 发生次数 | 频率/% |
|----------|--------|---------|-------------------|------|-------|
| 北京 | 54 511 | 31.3 | $0 < P < 5.5$ | 38 | 55.88 |
| | | | $5.5 \leq P < 10$ | 5 | 7.35 |
| | | | $10 \leq P < 19$ | 10 | 14.71 |
| | | | $P \geq 19$ | 15 | 22.06 |
| 广州 | 59 287 | 70.7 | $0 < P < 5.5$ | 46 | 41.07 |
| | | | $5.5 \leq P < 10$ | 10 | 8.93 |
| | | | $10 \leq P < 19$ | 14 | 12.50 |
| | | | $P \geq 19$ | 42 | 37.50 |
| 海口 | 59 758 | 63.5 | $0 < P < 5.5$ | 45 | 37.19 |
| | | | $5.5 \leq P < 10$ | 18 | 14.88 |
| | | | $10 \leq P < 19$ | 19 | 15.70 |
| | | | $P \geq 19$ | 39 | 32.23 |
| 哈尔滨 | 50 953 | 118.3 | $0 < P < 5.5$ | 60 | 63.16 |
| | | | $5.5 \leq P < 10$ | 12 | 12.63 |
| | | | $10 \leq P < 19$ | 9 | 9.47 |
| | | | $P \geq 19$ | 14 | 14.74 |
| 武汉 | 57 494 | 23.6 | $0 < P < 5.5$ | 40 | 35.40 |
| | | | $5.5 \leq P < 10$ | 15 | 13.27 |
| | | | $10 \leq P < 19$ | 13 | 11.50 |
| | | | $P \geq 19$ | 45 | 39.82 |
| 南京 | 58 238 | 35.2 | $0 < P < 5.5$ | 35 | 31.53 |
| | | | $5.5 \leq P < 10$ | 15 | 13.51 |
| | | | $10 \leq P < 19$ | 24 | 21.62 |
| | | | $P \geq 19$ | 37 | 33.33 |
| 都江堰 | 56 188 | 698.5 | $0 < P < 5.5$ | 45 | 37.82 |
| | | | $5.5 \leq P < 10$ | 19 | 15.97 |
| | | | $10 \leq P < 19$ | 23 | 19.33 |
| | | | $P \geq 19$ | 32 | 26.89 |
| 林芝 | 56 312 | 2 991.8 | $0 < P < 5.5$ | 54 | 56.84 |
| | | | $5.5 \leq P < 10$ | 16 | 16.84 |
| | | | $10 \leq P < 19$ | 11 | 11.58 |
| | | | $P \geq 19$ | 14 | 14.74 |
| 乌鲁木齐牧试站 | 51 469 | 1 930 | $0 < P < 5.5$ | 66 | 57.39 |
| | | | $5.5 \leq P < 10$ | 18 | 15.65 |
| | | | $10 \leq P < 19$ | 17 | 14.78 |
| | | | $P \geq 19$ | 14 | 12.17 |
| 滁州水文实验基地 | \ | 37.5 | $0 < P < 5.5$ | 26 | 24.76 |
| | | | $5.5 \leq P < 10$ | 15 | 14.29 |
| | | | $10 \leq P < 19$ | 28 | 26.67 |
| | | | $P \geq 19$ | 36 | 34.29 |

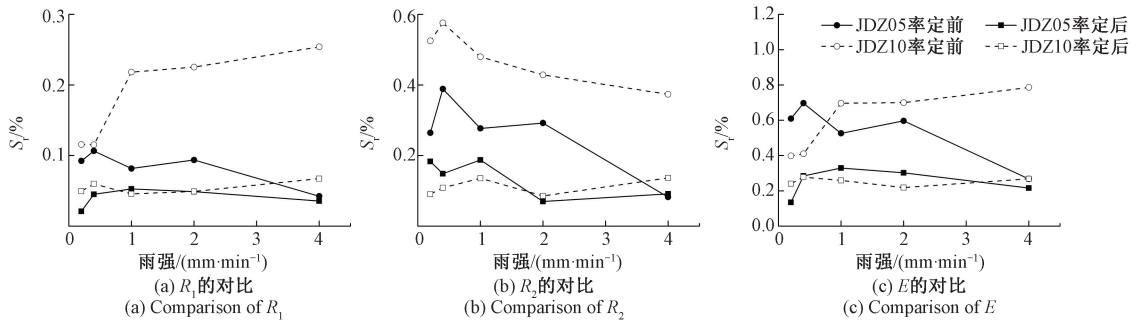


图5 JDZ05和JDZ10率定前后 R_1 、 R_2 和 E 的标准差对比

Fig.5 Comparison of the standard deviation of R_1 , R_2 and E for JDZ05's and JDZ10 before and after calibration

计量误差的标准差都小于0.2%,重复性限 $r^{[21]}$ 均不超过0.57% ($r=2.83S_r$),说明经过左右斗调平后,可减少计量误差的离散程度,提高计量误差的重复性,有助于提高测量降雨的准确度。

4 结 论

本文对率定前和率定后的结果进行了系统地分析和讨论,得出以下结论:

1)通过对TBR的计量特点进行了分析,本文提出了两种判别TBR左右斗平衡的方法,分别是差值判别法和差值率判别法。研究表明,差值率判别法考虑到了附加水量的影响,更能真实地反映TBR翻转特性,故推荐使用差值率判别法。

2)对差值判别法和差值率判别法的原理和使用进行了较为详细地介绍,并给出了判别指标。研究表明,对于JDZ05来说, α 可取0.1g, β 可取1%;对于JDZ10来说, α 可取0.2g, β 可取1%。

3)本文对TBR的率定工作进行了补充,研究成果可对现有的率定流程加以改进。研究表明,经过左右斗水量调平后对翻斗计量误差的影响很小,建议在率定工作中,对左右斗水量进行调平,充分发挥TBR测量中小降雨的性能,以减少TBR测量中小降雨的误差。

4)本文使用0.2mm/min雨强进行左右斗水量调平,达到了比较好的效果,但仍存在耗时的问题。在TBR研究中,率定耗时的问题一直存在且仍未解决,在后续的研究中,有必要对此问题进行深入研究。

参考文献

[1] COLLI M, POLLOCK M, STAGNARO M, et al. A computational fluid-dynamics assessment of the improved performance of aerodynamic rain gauges [J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(2): 779-796.

[2] 吴佳佳, 行鸿彦, 孙江. 一种雨声信号的盲源分离处理方法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2019, 33(9):

144-153.

WU J J, XING H Y, SUN J. Blind source separation processing method for the rain sound signal [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2019, 33(9): 144-153.

[3] SANTANA M, GUIMARÃES P, LANZA L, et al. Metrological analysis of a gravimetric calibration system for tipping-bucket rain gauges [J]. *Meteorological Applications*, 2015, 22(S1): 879-885.

[4] 何炜琨, 汲超迪, 王晓亮, 等. 风轮机叶片雷达散射特性计算与解析式拟合[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(11): 2626-2633.

HE W K, JI CH D, WANG X L, et al. Radar cross characteristics calculation and analytical formula fitting of wind turbine blade [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(11): 2626-2633.

[5] 行鸿彦, 张金玉, 徐伟. 地面自动气象观测的技术发展与展望[J]. *电子测量与仪器学报*, 2017, 31(10): 1533-1542.

XING H Y, ZHANG J Y, XU W. Development and prospect of automatic meteorological observation technology on the ground [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2017, 31(10): 1533-1542.

[6] 马洪连, 李龙, 芦良鑫. 水情自动监测终端的设计与实现[J]. *仪器仪表学报*, 2007, 28(S1): 274-276.

MA H L, LI L, LU L X. Design and implement of automatic hydrology monitor terminal [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007, (S1): 274-276.

[7] YANG B, LIU Y, LU Y, et al. Research of optical rainfall sensor based on CCD linear array [J]. *Instrumentation*, 2015, 2(3): 29-36.

[8] LA B, LANZA L, STAGI L. Tipping bucket mechanical errors and their influence on rainfall statistics and extremes [J]. *Water Science & Technology A Journal of*

- the International Association on Water Pollution Research, 2002, 45(2): 1-10.
- [9] LIU J, GU W. Hydrology of Artificial and Controlled Experiments [M]. USA: Experiences and Establishing New Experimental Watersheds, 2018.
- [10] LEWLOMPHAISARL U, SAENGSAATCHA P. High accuracy tipping bucket rain gauge [C]. SICE Annual Conference, 2012:13056171.
- [11] VASVÁRI V. Calibration of tipping bucket rain gauges in the Graz urban research area[J]. Atmospheric Research, 2005, 77(1): 18-28.
- [12] GILES B. A history of rain gauges[J]. Weather, 2010, 65(9): 133-138.
- [13] CALDER I, KIDD C. A note on the dynamic calibration of tipping-bucket gauges [J]. Journal of Hydrology, 1978, 39(3): 383-386.
- [14] MARSALEK J. Calibration of the tipping-bucket rain gauge[J]. Journal of Hydrology, 1981, 53(3): 343-354.
- [15] HUMPHREY M, ISTOK J, LEE J, et al. A new method for automated dynamic calibration of tipping-bucket rain gauges [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1997, 14(6): 1513-1519.
- [16] SHEDEKAR V, KING K, FAUSEY N, 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.
- [17] NIEMCZYNOWICZ J. The dynamic calibration of tipping bucket rain gauges [J]. Iwa Publishing, 1986, 17: 203-214.
- [18] LANZA L, VUERICH E, MICHAELIDES S. The WMO field intercomparison of rain intensity gauges [J]. Atmospheric Research, 2009, 94(4): 555-563.
- [19] COSTELLO T, JR H. Short duration rainfall intensity measured using calibrated time-of-tip data from a tipping bucket rain gauge [J]. Agricultural & Forest Meteorology, 1991, 57(s1-3): 147-155.
- [20] LANZA L, LEROY M, ALEXANDROPULOS C, et al. WMO laboratory intercomparison of Rainfall intensity gauges[R]. Geneva, 2006.
- [21] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 降水量观测仪器第2部分 翻斗式雨量传感器: GB/T 21978.2-2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Instrument for precipitation observation-Part 2 Tipping bucket rainfall sensor: GB/T 21978.2—2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.
- [22] 廖敏涵, 刘九夫, 廖爱民, 等. 三种 JDZ 型翻斗式雨量计性能比对实验研究[J]. 水文, 2020, 40(1): 29-34.
- LIAO M H, LIU J F, LIAO A I M, et al. Experimental investigation on comparison of three types of JDZ tipping bucket rain gauge [J]. Journal of China Hydrology, 2020, 40(1): 29-34.
- [23] COLLI M, LANZA L, CHAN P. Co-located tipping-bucket and optical drop counter RI measurements and a simulated correction algorithm [J]. Atmospheric Research, 2013, 119(1): 3-12.
- [24] COLLI M, LANZA L, BARBERA P, et al. Measurement accuracy of weighing and tipping-bucket rainfall intensity gauges under dynamic laboratory testing[J]. Atmospheric Research, 2014, 144(7): 186-194.
- [25] LIAO M, LIU J, LIAO A, et al. Investigation of tipping-bucket rain gauges using digital photographic technology[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2020, 37(2): 327-339.
- [26] 郑国梁, 阳春华, 朱红求, 等. 基于频率曲线优化的蠕动泵精确定容方法 [J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(11): 28-34.
- ZHENG G L, YANG CH H, ZHU H Q, et al. Peristaltic pump accurate constant volume method based on frequency curve optimization [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(11): 28-34.

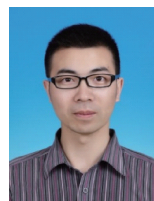
作者简介



廖敏涵, 2017年于东华理工大学获得学士学位, 现为南京水利科学研究所博士研究生, 主要研究方向为水文实验和水文仪器。

E-mail: mhliao666@163.com

Liao Minhan received his B.Sc. degree from East China University of Technology in 2017. He is currently a Ph.D. candidate at Nanjing Hydraulic Research Institute. His main research interest includes hydrological experiment and hydrological instruments.



廖爱民 (通信作者), 2009年于中国矿业大学获得学士学位, 2012年于南京水利科学研究所获得硕士学位, 2015年于南京大学获得博士学位。现为南京水利科学研究所高级工程师, 主要研究方向为水文实验、水文地球物理和同位素水文学。

E-mail: seamsum1226@163.com

Liao Aimin (Corresponding author) received his B.Sc. degree in 2009 from China University of Mining and Technology, M. Sc. degree in 2012 from Nanjing Hydraulic Research Institute and Ph. D. degree in 2015 from Nanjing University. Now, he is a senior engineer in Nanjing Hydraulic Research Institute. His main research interests include hydrological experiment, hydrogeophysics and isotope hydrology.