

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20190159

# 大小双翻斗组合式雨量计的研发与应用

舒大兴<sup>1</sup>, 高明<sup>2</sup>, 张立明<sup>2</sup>

(1.河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098; 2.葫芦岛水文局,辽宁 葫芦岛 125200)

**摘要:**受变化雨强影响,高分辨率翻斗式雨量计有较大的误差。为解决这个难题,研究人员提出了很多提高精度措施,然而,增加的组件会影响翻斗式雨量计的稳定性,致使故障率升高。在充分研究大、小翻斗式雨量计误差来源的基础上,研究开发出上小下大双层翻斗组合式雨量计,内置控制器实时监测大、小翻斗信号,再进行综合逻辑比较输出高精度校准雨量值。组合式雨量计灵敏度高、蒸发误差小、测量精度不受降雨强度影响,高分辨率与高精度有机融合。室内试验成果和野外比测结果表明,大小双翻斗组合式雨量计在监测 0.01~4mm/min 雨强降雨时,测量误差小于 $\pm 2\%$ 。

**关键词:**翻斗式雨量计;大小翻斗;降雨强度;控制器;测量精度

**中图分类号:** P332.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0852(2020)04-0061-05

大气降水测量是地球水循环监测的重要环节,是水资源利用的重要组成部分,也是气候变化、地质灾害、洪水灾害预警和环境评估等多方面的重要影响因素,业内人士寻求多种方法对降雨量进行精确计量。由于翻斗式雨量计结构上的局限性,随着雨强的增大,计量值偏小。对于同样的雨强,翻斗式雨量计的分辨率越高,误差越大,0.1mm 单翻斗雨量计误差可高达 20%;而对于较低分辨率的翻斗雨量计,如 0.5mm 翻斗式雨量计对小于 0.5mm 降雨量无反应,虽然测量暴雨的精度较高,但其观测的年月降水天数明显偏小,导致降雨资料的不完整。

翻斗式雨量计的误差来源很多,最主要受变化雨强的影响而产生的动态计量误差。翻斗左右翻转的时间记为  $T$ ,翻转时降雨强度为  $q$ ,翻转时漏计的损失雨量为  $0.86qT^{[1]}$ 。因降雨强度变化,每次翻转损失的水量不同。翻斗式雨量计出厂时调整翻斗容积,保证中心雨强(2mm/min)误差最小,小于 2mm/min 雨强时,测量误差为正,大于 2mm/min 雨强时,测量误差为负。试验表明,对于 0.1mm 分辨力的单翻斗雨量计,雨强在 0.01~4mm/min 变化时,误差范围在 $\pm 9\%$ 以内。

为提高降雨观测精度,我国进口价格昂贵的称重

式雨量计,测量进入雨量计承雨口降水的重量,推算降雨量。称重雨量计的优点是可以测量固态降水,但区分测值变化量是因降水,还是由风、振动、温度或随机误差引起的便至关重要。这涉及到数据的滤波算法,消除误差因子引起的波动,以便得到真正的降水变化量<sup>[2]</sup>。根据称重雨量计的技术指标和使用部门进行比测试验结论,精度与翻斗式雨量计相当<sup>[2-4]</sup>。可以肯定的是,对于风沙较大的地区,称重雨量计是不能使用的。

综上所述,研究高分辨率高精度的翻斗式雨量计具有重要的现实意义。

## 1 国内外解决措施

高分辨力单翻斗式雨量计的误差很大,业内人士研究了多种措施来减小翻斗翻转时的漏计水量。

### 1.1 虹吸翻斗雨量计

澳大利亚 MEA 公司 710 雨量计的承雨器下部设计了一个虹吸管,从承雨器汇集下来的雨水,不论雨强大小,都积蓄起来,水位达到虹吸管顶时产生虹吸现象,将雨水以相对稳定的流量  $q$  注入计量翻斗,使每次翻斗漏计的损失雨量保持稳定<sup>[5]</sup>。

收稿日期:2019-06-06

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFE0106500)

作者简介:舒大兴(1964-),男,江西九江人,博士,主要从事水文信息采集仪器研究工作。E-mail:njsdx9208@126.com

该虹吸装置存在虹吸渗漏问题,大小雨强均可能发生,特别是小雨强发生渗漏现象的频率高,维持时间长,造成的误差大。另一方面,虹吸管孔较小,草屑、沙尘、昆虫等异物随降雨冲进虹吸室,导致虹吸管堵塞而使雨量计发生故障。

### 1.2 微型阀门翻斗雨量计

意大利西亚普公司 UM8150 月记雨量计在进水翻斗处安装一个微型阀门,翻斗触发控制阀门关闭,雨水暂存于承雨器内,当空翻斗位于漏斗嘴下方时,阀门被打开,使雨水注入斗室。这种方法常用于 1mm 翻斗式雨量计,0.1mm 翻斗式雨量计机械能很小,这种方法不便使用,大翻斗受雨强影响程度相对较小,没有使用的必要,又因微型阀门易堵塞,故障率高<sup>9</sup>。

### 1.3 双层翻斗雨量计

SL3-1 型雨量计是双层翻斗式雨量计的典型代表<sup>6</sup>,上层均化雨强翻斗,将变化雨强的自然降水调节为比较均匀的中等强度降水,下层设计有计量翻斗和计数翻斗,共三组翻斗组成。该型雨量计精度较高,为我国气象部门通用的雨量观测仪器。因翻斗容积小,大雨时翻转频繁,斗内余水占比大,残留水量造成较大误差。另外,翻斗多,小而轻,故障率高。

### 1.4 多层翻斗雨量计

上海气象仪器厂有限公司对 SL3-1 改进后设计出 SC1 型翻斗式雨量计<sup>7</sup>,它有双通道信号输出,第一通道信号是 0.1mm 降水量信号,第二通道是 0.5mm 降水量信号。当降小雨、中雨时可采用 0.1mm 降水量信号,当降大雨、暴雨时可采用 0.5mm 降水量信号。该雨量计有三层四组翻斗,故障率升高,只是把 0.1mm 和 0.5mm 翻斗机械地串在一起,分级计量,遥测终端需要监测两组翻斗信号,进行雨强计算,判断使用哪组信号,因此,其通用替换性能差。

### 1.5 大翻斗雨量计

《翻斗式雨量计》(GB/T 21978.2-2014) 规定了有 0.1mm、0.2mm、0.5mm 和 1.0mm 四种分辨力的翻斗式雨量计,当降雨强度在 0.01~4.0 mm/min 范围内变化时,翻斗式雨量计的精度等级分为 I、II、III 等,对应的精度为 $\pm 2\%$ 、 $\pm 3\%$ 和 $\pm 4\%$ 。20 世纪九十年代,水文站均使用 0.1mm 虹吸雨量计,点雨量观测精度很高,随着雨量遥测站建设,为推广翻斗式雨量计投入使用,《降雨量观测规范》(SL21-90) 对降水量观测记载的最小值(简称记录精度)作了较大的改动<sup>8</sup>,第 1.0.5 条规定需要控制雨日地区分布变化的雨量站必须记至

0.1mm;不需要雨日资料的雨量站,可以记至 0.2mm;多年平均降水量大于 800mm 地区,可记至 0.5mm;《降雨量观测规范》(SL21-2006)继续放宽记录精度,多年平均降水量大于 400mm 小于 800mm 地区,如果汛期雨强特别大,且降水量占全年 60%以上,亦可记至 0.5mm<sup>9</sup>;《降雨量观测规范》(SL21-2015)4.3 中,多年平均降水量大于 400mm 小于 800mm 地区可记至 0.5mm<sup>10</sup>,进一步放宽 0.5mm 雨量计使用范围。当前,水文部门在多年平均降水量大于 400mm 地区全部使用 0.5mm 雨量计。

《降雨量观测规范》对推广翻斗式雨量计在遥测雨量站使用起到积极作用,但水文部门使用低分辨力翻斗式雨量计也为业界诟病。一般情况下,使用 0.5mm 雨量计监测一场大雨时,测量精度应该高于 0.1mm 双翻斗式雨量计,全年累计降雨量的精度也不低,但 0.5mm 翻斗式雨量计广泛使用造成年降雨天数严重偏小也是不争的事实。

## 2 大小双翻斗组合式雨量计的研发

我国气象部门始终使用 0.1mm 双层翻斗式雨量计,水文上多使用 0.5mm 翻斗式雨量计。翻斗式雨量计的误差来源很多,但小翻斗和大翻斗雨量计的误差差异主要是小翻斗翻转频次高,翻转时的漏水量与降雨强度密切相关,小雨时测量精度较高,大暴雨时累积误差偏负很大;而大翻斗雨量计测量大暴雨时精度较高,对小于 0.5mm 的降雨量不翻转,故灵敏度低,蒸发误差大,无法准确测量降雨日数。本文研究的大小双翻斗组合式雨量计能较好地解决了这个难题。

### 2.1 设计思路

针对自然降雨量雨强变化适应性问题,大、小翻斗式雨量计的优缺点是互补的,利用大小两个翻斗“串联”形式进行测量(见图 1)。0.1mm 翻斗位于支架上方承接自然降雨,水满翻斗转动倒出雨水进入上汇集漏斗再流到下方的 0.5mm 翻斗中,随着降雨继续,大翻斗装满失衡转动排出降水。大小翻斗转动时都有磁钢扫过相应的干簧开关,产出通断脉冲信号。控制器实时监测大、小翻斗的脉冲信号,在大翻斗翻转时,对大、小翻斗的计数进行综合逻辑比较,分析出高精度测量值,并实时输出修正后补发的降雨量脉冲信号,供遥测终端采集。

### 2.2 翻斗式雨量计的误差特性

选用某型号翻斗式雨量计进行模拟降雨误差试

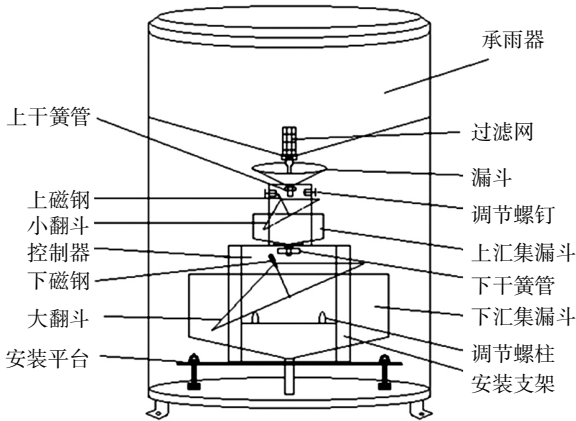


图1 大小双翻斗组合式雨量计结构

Fig.1 The structure of the combined rainfall meter with big and small tipping-buckets

验。通过调整翻斗式雨量计翻斗部件的安装角  $\phi$ , 分别将每斗的容积设置为 2.6ml、2.8ml 和 3.0ml, 使用 YDZ-YL20MA 型翻斗式雨量计滴定仪进行误差检测, 在各种模拟雨强下用固定注入水量法进行三组试验, 绘制雨强与三组试验数据误差均值关系(见图 2)。

从图 2 可以看出, 每种翻斗容积测量误差点据密集分布在点群中心斜线的两侧, 说明翻斗误差与雨强的关系密切; 翻斗容积从 2.6ml、2.8ml 到 3.1ml 变化时, 误差雨强关系线沿 Y 轴平移, 误差从正偏离变化到负偏离, 关系线的 Y 轴截距反应翻斗容积, 关系线的斜率反应翻斗倾角结构特征; 对于 0.1mm 的单翻斗雨量计, 如将翻斗容积设为 3.14 ml, 小雨强时误差小, 大雨强时误差大, 4mm/min 雨强时, 误差达 -18%, 降雨量测量值将严重偏小; 在降雨强度为 0.01~4mm/min 范围内, 使误差正负分布, 中心雨强 2mm/min 时, 误差为 0, 内插一根误差雨强关系线(图 2 中粗线), 此时翻斗容积为 2.85ml。雨强在 0.01~4mm/min 变化时, 误差范围  $\pm 9\%$ 。小雨强时, 测量误差偏正, 大雨强时, 测量误差偏负, 提高年总降雨量观测精度。翻斗容积与中心雨强有关, 翻斗容积变化将使测量值产生系统误差, 按 1mm/min 与 2mm/min 的中心雨强调整翻斗容积, 二者测量成果的系统误差为 4.5%, 因此, 各地应根据实际中心雨强调整翻斗容积。

### 2.3 误差校准方法

大小双翻斗组合式雨量计, 上部翻斗的容量调整为 3.1 ml, 保证小雨强观测准确, 大雨强观测值偏小。小翻斗翻转倒出雨水和漏计雨水经上汇集漏斗以 4mm/min 的雨强流到 0.5mm 大翻斗, 大翻斗每次翻转

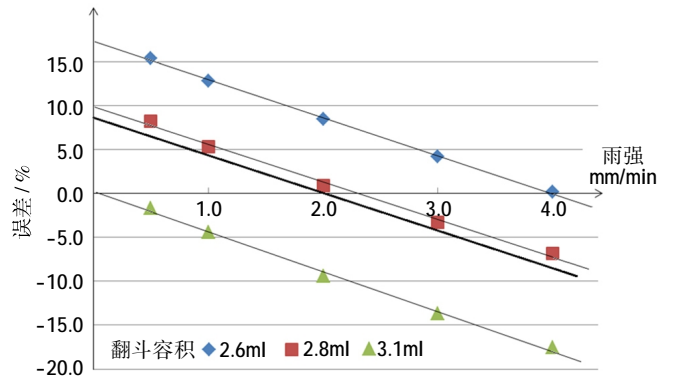


图 2 不同翻斗容积下的雨强与雨量误差关系

Fig.2 The relationship between the rainfall intensity and error under different tipping-bucket capacities

历时 0.28 秒, 漏计水量为  $0.86qT=0.5\text{ml}$ , 因此, 将大翻斗容积调整为 15.2ml。

逻辑比较控制器由 CPU、液晶和接口电路组成, 内置软件设了 4 个变量 A、B、C 和 D, 分别记录小翻斗的测量值、大翻斗测量值、综合输出校准值和大翻斗翻转 1 次期间小翻斗的翻转数, 归一化整数变换后, 小翻斗翻转 1 次, A、C、D 三个变量均加 1, 大翻斗翻转 1 次, B 变量加 5。

将大、小翻斗的开关量信号接入逻辑比较控制器输入接口, 输出接口接遥测仪等外设, 每次小翻斗翻转时, 控制器变量 A 加 1, C 加 1, D 加 1, 并实时输出 1 个脉冲信号, 即输出降雨量 0.1mm; 每次大翻斗翻转时, 控制器变量 B 加 5, 逻辑比较控制器分析大翻斗相邻二次翻转期间小翻斗的翻转次数 D, 有三种情况:

(1) 如果  $D > 5$ , 即小翻斗测量值大于大翻斗测量值, 说明本阶段降雨强度很小, 0.5mm 翻斗内有部分雨水被蒸发了, 0.1mm 的翻斗计量精度高于 0.5mm 翻斗的计量精度, 不需要校准, 初始化  $D=0$ 。

(2) 如果  $D=5$ , 大、小翻斗计量值相同, 本段时间的降雨强度适中, 大小翻斗计量精度一致, 控制器已输出 5 个信号, 不需要校准, 初始化  $D=0$ 。

(3) 如果  $D < 5$ , 0.1mm 翻斗翻转时的漏水较多, 其测值偏小, 说明本阶段降雨强度较大, 0.5mm 翻斗测量值精度高于 0.1mm 翻斗测量值精度, 控制器立即补发差值  $(5-D)$  个脉冲数, 综合输出校准值 C 加  $(5-D)$ , 即用 0.5mm 翻斗测量值实时校准 0.1mm 翻斗测量值, 校准之后, 初始化  $D=0$ 。

### 2.4 大小双翻斗组合式雨量计精度论证

从 2.3 的校准方法可以看出, 大小双翻斗组合式

雨量计有下述明显的优势:

(1)翻斗计量稳定可靠,简单实用,维护方便,成本低廉;

(2)测量分辨力是 0.1mm,测量实时性好,灵敏度高,蒸发误差小,能够准确观测降雨天数;

(3)高分辨力与高精度有机融合,大、小翻斗之间全量程内互相实时校准,测量精度不受变化雨强的影响。用 0.5、1、2、3、4、5、6mm/min 雨强进行检验,得出试验成果见表 1。在 0.5~4mm/min 雨强范围内误差较小,持续超过 4mm/min 雨强降雨时,上汇集漏斗内积留雨水使水头抬高,流入 0.5mm 翻斗的流量增大,故大于 4mm/min 雨强时,测量值偏小。不过,自然界降雨强度持续超过 4mm/min 的概率较小。

(4)翻斗式雨量计由于堵塞、卡滞等许多因素而产生故障<sup>[1]</sup>,大小双翻斗组合式雨量计内置控制器可以根据大、小翻斗的差异自诊断雨量计的工作状态,向外发出故障信号,及时提醒工作人员检修。

(5)本仪器测量输出 0.1mm 分辨力,精度高于 0.5mm 单翻斗雨量计。因为,0.5mm 单翻斗雨量计不但有蒸发误差,其直接接受自然降雨,测量精度也会受到降雨强度影响,而大小双翻斗组合式雨量计注入 0.5mm 翻斗的雨水是经上汇集漏斗流出的 4mm/min 稳定雨强,将 0.5mm 翻斗容积调整为 15.2ml,预先考虑了翻转漏水 0.5ml。

本仪器自 2017 年在辽宁省葫芦岛站使用,现摘录 2018 年全年比测数据(见表 2)。

表1 大小双翻斗组合式雨量计雨强与误差关系 (%)

Table1 The correlation between the rainfall intensity and error of combined rainfall meter with big and small Tipping-buckets

序号	雨强 mm/min						
	0.5	1	2	3	4	5	6
1	-0.3	-1.1	-0.4	-0.9	-1.4	-1.4	-1.8
2	0.6	-1.8	1.3	-1.1	1.7	-0.8	-1.1
3	-0.5	-1.5	0.8	-0.6	-0.8	-2.1	-0.8
4	-0.2	-0.8	-1.6	-1.1	-1.3	-0.7	-2.2
5	0.3	1.1	-0.8	-0.7	1.5	-1.5	-1.3
6	-0.4	-1.4	1.2	-1.4	0.9	-1.4	-1.6
7	0.5	-0.6	1.3	-0.3	-0.6	-1.1	-1.4
8	0.4	-1.1	0.7	0.9	0.9	-0.8	-1.9
9	-0.7	0.7	-0.9	-1.1	-1.2	-0.5	-1.5
10	0.8	1.1	1.6	1.2	1.4	-1.4	-1.3
平均	0.05	-0.54	0.32	-0.51	0.11	-1.17	-1.49

以人工雨量器测值作标准进行对比,按规范统计误差,日降雨量<10mm,差值小于在±0.3mm之内,日降雨量≥10mm,相对误差在±3%之内。比测 39 天降雨量误差合格率 97.4%,时段累计降雨量误差为 0.2%。特别是在 8 月 13~14 日连续 2d 降雨量超过 100mm 时,二者差异也只有 -0.4%。

### 3 结论

大小双翻斗组合式雨量计由上层 0.1mm 和下层 0.5mm 翻斗“串联”组成,将小翻斗的容量调整为 3.1ml,保证了小雨测量准确,大翻斗的容量调准为 15.2ml,保证了大雨测量准确,具有灵敏度高、蒸发误差小、测量成果精度与降雨强度无关等特点,高分辨力与高精度有机融合,用简单和稳定的方法提高了翻斗式雨量计的测量精度。室内试验成果和野外比测结果表明,大小双翻斗组合式雨量计在监测 0.01~4mm/min 雨强降雨时,测量误差小于±2%。

大小双翻斗组合式雨量计的灵魂是逻辑比较控

表2 大小双翻斗组合式雨量计与人工雨量器比测成果 (mm)

Table2 The comparison error between the combined rainfall meter with big and small tipping-buckets and artificial rainfall gauge

日期	双翻斗	雨量器	误差	日期	双翻斗	雨量器	误差
5月11日	0.1	0.1	0.0	17日	0.5	0.4	0.1
15日	0.2	0.2	0.0	19日	0.1	0.1	0.0
17日	0.1	0.1	0.0	24日	1.1	1.1	0.0
21日	1.6	1.6	0.0	25日	0.7	0.6	0.0
22日	2.3	2.1	0.2	26日	0.1	0.1	0.0
30日	2.0	2.1	-0.1	8月04日	0.4	0.4	0.0
6月06日	9.3	8.7	0.6	07日	41.3	41.4	-0.2%
07日	0.5	0.5	0.0	11日	2.2	1.9	0.3
09日	0.9	0.8	0.1	12日	7.8	7.7	0.1
12日	20.0	19.7	1.5%	13日	166.4	166.8	-0.2%
13日	2.8	2.6	0.2	14日	126.9	127.4	-0.4%
16日	0.6	0.5	0.1	15日	3.3	3.3	0.0
18日	13.1	13.2	-0.8%	19日	16.0	16.5	-3.0%
19日	9.3	9.0	0.3	20日	9.5	9.6	-0.1
27日	0.6	0.7	-0.1	26日	3.4	3.5	-0.1
7月06日	0.2	0.2	0.0	9月01日	3.5	3.4	0.1
07日	28.9	28.7	0.7%	02日	10.6	10.5	1.0%
08日	3.3	3.4	-0.1	06日	5.7	5.6	0.1
11日	0.7	0.7	0.0	09日	0.1	0.1	0.0
13日	24.5	24.4	0.4%	全年合计	520.6	519.7	0.2%

制器,控制器实时监测大、小翻斗信号后,综合比较输出校准值的误差可控制 $\pm 2\%$ 之内。控制器输出的脉冲信号类型与干簧管的脉冲信号类似,可直接无差别替换正在使用的各类翻斗式雨量计。今后继续增加比测实例,充分论证大小双翻斗组合式雨量计的适用性和稳定性,早日在全国推广使用,提高我国降雨量观测精度。

#### 参考文献:

- [1] Duchon C, Fiebrich C, Grimsley D. Using high-speed photography to study undercatch in tipping-bucket rain gauges [J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2014,31(6):1330-1336.
- [2] 倾鹏程,蔡成满,吴卓宣.称重雨量计与双翻斗雨量计的对比分析[J]. *广东气象*, 2018,40(2):69-72. (QING Pengcheng, CAI Chengman, WU Zhuoxuan. Contrastive analysis of weighing rainfall meter and double dump rainfall meter [J]. *Guangdong Meteorology*, 2018, 40(2):69-72. (in Chinese))
- [3] Lambrecht 15184(E)H3 称重式雨量计[EB/OL]. [http://www.chem17.com/offer\\_sale/detail/12581427.html](http://www.chem17.com/offer_sale/detail/12581427.html). (Lambrecht 15184 (E) H3 weighing rain gauge [EB/OL]. [http://www.chem17.com/offer\\_sale/detail/12581427.html](http://www.chem17.com/offer_sale/detail/12581427.html). (in Chinese))
- [4] OTT Pluvio2 称重式雨雪量计 [EB/OL]. [http://www.hbzhan.com/st111562/product\\_11865436.html](http://www.hbzhan.com/st111562/product_11865436.html). (Ott pluvio2 weighing rain and snow meter [EB/OL]. [http://www.hbzhan.com/st111562/product\\_11865436.html](http://www.hbzhan.com/st111562/product_11865436.html). (in Chinese))
- [5] 杨汉塘. 翻斗雨量计动态计量系统误差来源及其改善措施[J]. *水利水电自动化*, 2001,(4):20-25. (YANG Hantang. Error source and improvement measures of dynamic measurement system of dump rainfall meter [J]. *Automation in Water Resources and Hydrology*, 2001,(4):20-25. (in Chinese))
- [6] SL3-1 翻斗式雨量传感器 [EB/OL]. <http://www.shqxyq.com/Product/43>. (SL3-1 Tipping Bucket Rainfall Sensor [EB/OL]. <http://www.shqxyq.com/Product/43>. (in Chinese))
- [7] SC1 翻斗式雨量传感器[EB/OL]. <http://www.shqxyq.com/ProductD/73>. (SC1 tipping bucket rainfall sensor [EB/OL]. <http://www.shqxyq.com/ProductD/73>. (in Chinese))
- [8] SL21-90,降水量观测规范[S]. (SL21-90, Specification for Precipitation Observations [S]. (in Chinese))
- [9] SL21-2006,降水量观测规范[S]. (SL21-2006, Specification for Precipitation Observations [S]. (in Chinese))
- [10] SL21-2015, 降水量观测规范 [S]. (SL21-2015, Specification for Precipitation Observations [S]. (in Chinese))
- [11] G J G Upton, A R Rahimi. On-line detection of errors in tipping-bucket rain gauges [J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 278(1-4): 197-212.

## Development and Application of Combined Rainfall Gauge with Big and Small Tipping-Buckets

SHU Daxing<sup>1</sup>, GAO Ming<sup>2</sup>, ZHANG Liming<sup>2</sup>

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Huludao Hydrological Bureau, Huludao 125200, China)

**Abstract:** Due to the influence of changing rain intensity, the high resolution tipping-bucket rain gauge has greater errors. In order to solve this international problem, researchers have proposed many measures to improve the accuracy. However, the increase of components could affect the stability of the tipping-bucket rain gauge, resulting in higher failure rate. On the basis of fully studying the error sources of large and small tipping-bucket rain gauges, this paper developed a double-deck tipping-bucket combined rain gauge with a built-in controller for real-time monitoring of large and small dump signals, and then compared the output of high-precision calibration rainfall values by comprehensive logic. The combined rainfall gauge has high sensitivity, small evaporation error, and its measurement accuracy is not affected by rainfall intensity. It combines high resolution with high precision organically. The results of indoor test and field comparison show that the measurement error of the combined rainfall gauge with large and small tipping-bucket is less than  $\pm 2\%$  when it monitors the rainfall intensity in the range of 0.01-4 mm/min.

**Key words:** tipping-bucket rain gauge; small and large buckets; rainfall intensity; controller; measurement accuracy