

# 流量测验时空分布评价方法的构建

胡尊乐<sup>1</sup>, 汪 珊<sup>1</sup>, 潘 杰<sup>1</sup>, 周迎颖<sup>2</sup>, 朱 凯<sup>1</sup>

(1. 江苏省水文水资源勘测局常州分局, 江苏 常州 213022;  
2. 河南省信阳水文水资源勘测局, 河南 信阳 464000)

**摘要:** 基于累积频率曲线法、适线检验法等, 利用概率学原理, 推导和构建了相应的流量测验评价方法, 并且在小河新闻站、大通站等不同精度要求的水文站上收到了较好的验证效果, 进而为指导水文测站开展流量测验工作, 建立更为科学合理的流量测验成果质量评价体系, 修订和完善《河流流量测验规范》提供参考。

**关键词:** 时空分布; 累积频率曲线法; 适线检验法; 流量

**中图分类号:** [TV123]      **文献标识码:** B      **文章编号:** 1007-7839 (2018) 08-0025-06

## Study on the construction of spatial and temporal distribution evaluation method for discharge test

HU Zunle, WANG Shan, PAN Jie, ZHANG Yue, ZHU Kai

(Changzhou Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Jiangsu Province, Changzhou 213022, Jiangsu)

**Abstract:** Based on the cumulative frequency curve method and line fitting test method, using probability principle, the corresponding discharge test evaluation method was derived and constructed. In addition, better verification results had been received at hydrological stations with different precision requirements such as Xiaohe New Gate Station and Datong Station, so as to guide the hydrological station to carry out discharge test work, to establish a more scientific and reasonable quality evaluation system for discharge test results, providing reference to revise and improve the “River Flow Test Specification”.

**Key words:** spatial and temporal distribution; cumulative frequency curve method; line fitting test method; discharge

### 1 概述

水文测验是水文工作的基础, 水文测验质量尤其是水文测验成果质量更是关系到水文测站一年工作的成败。目前, 为了保证水文测验精度, 提高水文测验成果质量, 向社会提供更加可靠的基础资料, 同时为了加强水文测验质量管理, 规范水文测验质量检查评定办法, 水利部水文局编制和颁布了《水文测验质量检查评定办法(试行)》, 其中对水文测验成果质量检查评定有了明确的赋分标准(见表1)。

从表1中可以看出, 流量(泥沙)项目是水文测验成果质量检查评定的核心, 赋分值占总赋分值的46.7%, 主要内容涉及流量(泥沙)测次布置、测点控制等。《河流流量测验规范》(GB50179-2015)中对流量测验次数的布置和测点的控制, 有这样的规定: “水文站一年中的测流次数, 必须根据高、中、低各级水文的水流特性、测站控制情况和测验精度要求, 掌握各个时期的水情变化, 合理地分布于各级水位和水情变化过程的转折点处”。显然, 良好的流量测验次数时空分布, 要能准确反映一年之中的水情变化, 要能满足推算逐日流量和各

收稿日期: 2018-01-02

基金项目: 江苏水利科技项目(2106012)

作者简介: 胡尊乐(1970-), 男, 高级工程师, 主要从事水文水资源研究。

表 1 水文测验成果质量检查评定赋分表(水文站, 300 分)

序号	检查项目及分值	检查内容及赋分标准	百分比(%)
1	水位(60分)	——	
2	流量泥沙(140分)	设施设备、测次布置、测点控制、测验记载、相关曲线…	46.7
3	降水量蒸发量(50分)	——	
4	水文测量(50分)	——	

项特征值的要求。但由于一年之中水情变化(尤其是暴雨洪水变化)的不可预知性,以及一些客观条件的限制,水文测站在开展流量测验时,往往测次分布不够合理、测点控制不尽到位,有时甚至错失洪峰,对水位流量关系曲线的定线精度造成了不可弥补的影响,进而影响到水文资料的可靠性。因此,《水文资料整编规范》(SL 247-2012)和《水文年鉴汇编刊印规范》(SL 460-2009)要求对水文测站稳定的水位流量关系(临时曲线法的主要曲线及经单值化处理的单一线,下同)进行关系点对关系线的标准差( $S_e$ )和随机不确定度( $X'_Q$ )计算,且标准差和随机不确定度满足不同精度要求<sup>[1]</sup>。其中,对于测点在 10 个以上的上述曲线,均应进行符号检验、适线检验和偏离检验。另外,为确保水文资料质量,对于水文测站因故未能测得洪峰流量或最枯水流量,允许对其当年水位流量关系曲线高水或低水做适当延长,以满足推求全年完整流量过程的要求。其中,高水部分延长不应超过当年实测流量所占水位变幅的 30%,低水部分延长不应超过 10%。

显然,《河流流量测验规范》对流量测验次数的布置和测点的控制有一个定性的规定,《水文资料整编规范》和《水文年鉴汇编刊印规范》对水位流量关系定线成果有一个定量的规定,都在一定程度上保证了流量测验成果的可靠性。但由于各地河流的差异性,对于流量测验的时空分布还缺乏明确的评价方法。目前,我国各地水文站基于《河道流量测验规范》中高、中、低水的有关规定,采用一定方法确定某站的高、中、低水位及相应的测流要求,如王维志<sup>[2]</sup>等采用特征值法和漫滩水位指标法对河道流量测验中的水位级划分方法进行了研究,喇承芳<sup>[3]</sup>采用皮尔逊 III 型曲线法确定了黄河贵德水文站高、中、低水位,赵建伟<sup>[4]</sup>采用特征值法确定了沁河孔家坡水文站高、中、低水位及相应的流量测验方案。这些方法对开展流

量测验具有一定的指导意义,但仍没有对水文测站流量测次的时空分布情况有个准确合理的评价。本文基于小河新闻等站的流量测验资料,依次采用累积频率曲线法、适线检验法等方法,并利用概率学原理,逐步构建了流量测验时空分布合理性的评价方法,进而为指导水文测站开展流量测验工作,建立更为科学合理的流量测验成果质量评价体系,修订和完善《河流流量测验规范》提供参考。

## 2 流量测次分布区间及理想分布

为了便于描述,本文仅对形如:  $Q=f(z)$  的水位流量单一曲线(假定其已通过三项检验,且高、低水部分延长均满足规范要求)进行分析。

设某水文测站当年实测  $N$  次流量(从小到大排列:  $Q_1, Q_2, \dots, Q_{N-1}, Q_N$ )。其中,实测最大、最小流量分别为  $Q_{max}$ 、 $Q_{min}$ , 流量变幅为  $\Delta Q = Q_{max} - Q_{min}$ , 则流量测次分布区间为  $[Q_{min}, Q_{max}]$ , 每个子区间的步长为:

$$\Delta q = \frac{\Delta Q}{N-1} = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{N-1} \quad (1)$$

$N$  个子区间及其集合  $\Phi_i$  定义为:

$$\Phi_i = \{[0, Q_{min}], [Q_{min}, Q_{min} + \Delta q], [Q_{min}, Q_{min} + 2\Delta q], \dots, [Q_{max} - \Delta q, Q_{max}]\}$$

若某一子区间内有流量测次分布,则记为 1, 即:

$$M_{(i)} = \sum 1, Q_{min} + (i-1)\Delta q < Q_i \leq Q_{min} + i\Delta q, i=1, 2, \dots, N \quad (2)$$

显然,最理想的流量测次分布是上述每个子区间内均有流量测次,即:  $\sum M_{(N)} = N$ 。

当  $\sum M_{(N)} = N$  时,亦有  $\sum M_{(i)} = i$ , 则认为流量测次分布为理想分布。若流量增幅是均匀的( $Q_2 - Q_1 = Q_3 - Q_2 = \dots = Q_N - Q_{N-1}$ ), 则认为流量测次分布为完全理想分布。

### 3 合格率与不合理

定义水文测站当年流量测次分布的合格率  $p(\%)$ :

$$p(\%) = 100 \times \frac{\sum M_{(N)}}{N} \quad (3)$$

可按水文站的精度要求, 对流量测次分布的合格率要求如表 2 规定:

表 2  $p(\%)$  指标限定表

站类	一类精度的水文站	二类精度的水文站	三类精度的水文站
$P(\%)$	70	65	60

因此, 当水文测站当年流量测次分布的合格率不满足表 2 规定时, 可认为流量测次分布是不合理的。另外, 令:

$$dQ_m = \max(Q_2 - Q_1, Q_3 - Q_2, \dots, Q_N - Q_{N-1}), \delta(\%) = 100 \times \frac{dQ_m}{\Delta Q} \quad (4)$$

当水文测站当年流量测次分布的大于某一指标时, 亦可认为流量测次分布是不合理的。指标同样按水文站的精度要求, 如表 3 规定:

表 3  $\delta(\%)$  指标限定表

站类	一类精度的水文站	二类精度的水文站	三类精度的水文站
$\delta(\%)$	15	18	20

从上面定义来看, 合格率  $p(\%)$  规定了集合  $\Phi_i$  中有测点分布的子区间的最少个数要求,  $\delta(\%)$  规定了流量测次分布中相邻测点的最大允许级差要求 (最大允许级差占当年实测流量最大幅度的百分比不能超过限定要求)。显然, 合格率  $p(\%)$  越大,  $\delta(\%)$  越小, 流量测次的时空分布越相对合理。但合格率  $p(\%)$  和  $\delta(\%)$  两个指标只是具体规定了流量测次分布是否合理的基本要求, 仍无法准确诊断流量测次空间的具体分布情况, 如仍无法判断水位流量关系点据集中在高水部分还是低水部分。

图 1 为某三类精度要求的水文测站当年 16 个测点所率定的水位流量关系曲线, 已通过三项检验, 且高、低水延长满足流量推算要求。

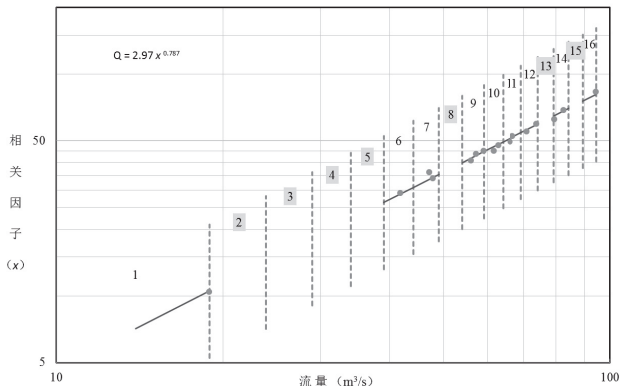


图 1 某站水位流量关系图

但从图 1 可以看出, 水文测站当年 16 个测点所确定的 16 个子空间中, 有 7 个子空间无测点分布, 合格率  $p(\%) = 56.2\%$ ,  $\delta(\%) = 25\%$ , 均不满足表 2 和表 3 的要求, 仍可以认为该站流量测次分布是不合理的。

### 4 累积频率曲线法

以下仅讨论  $p(\%)$  和  $\delta(\%)$  指标满足表 2 和表 3 规定的情形。

根据式 (2) 的规定, 当  $\sum M_{(N)} < N$  时, 则涉及到有哪些子区间 (记为  $\Omega_j, j=1, 2, \dots, N-M$  显然,  $\Omega_j \subset \Phi_i, i=1, 2, \dots, N$ ) 没有测次分布 ( $M_{(j)}=0$ ), 这些区间在  $N$  个子区间的分布如何, 如图 1 所示, 第 2 ~ 5、8、13、15 子区间无测点分布。

累积频率曲线法是指: 对于一组样本  $x_1, x_2, \dots, x_n$  给定某一阈值  $x_0$ , 不大于  $x_0$  的样本数为  $m$ , 则称  $m/n$  为不大于  $x_0$  的累积频率; 依次计算就得到累积频率曲线。因此, 建立  $\sum M_{(i)} \sim i$  曲线, 近似为累积频率曲线, 且有 3 种主要分布特性, 如图 2 所示 (横坐标表示  $i$ , 纵坐标表示  $\sum M_{(i)}$ )。

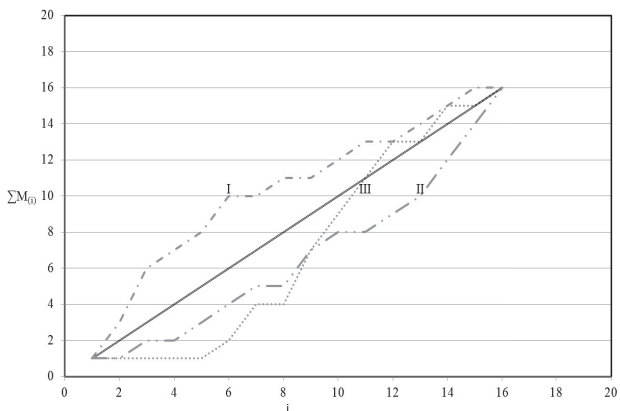


图 2  $i \sim \sum M_{(i)}$  关系图

从图2中可以看出:

(1) 当曲线上凸时(I号线),则表示水位流量关系点据主要位于中下部;某一段曲线上凸越明显,则表示点据越相对集中。

(2) 当曲线(II号线)下凹时,则表示水位流量关系点据主要位于中上部;某一段曲线下凹越明显,亦表示点据越相对集中。

(3) 当曲线(III号线)下凹又上凸(或上凸又下凹)时,则表示水位流量关系中部点据相对缺乏。

另外,参照《水文资料整编规范》(SL247-2012),计算 $\Sigma M_{(i)}$ 关于 $i$ 的标准差( $S_e$ )和随机不确定度( $X'_Q$ ):

$$S_e = \left[ \frac{1}{N-2} \sum \left( \frac{\Sigma M_{(i)} - i}{i} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

$$X'_Q = 2S_e \quad (6)$$

显然,标准差和随机不确定度在一定指标范围内,可认为流量测次分布是相对合理的。标准差和随机不确定度的指标可按水文站的精度要求如表4。

表4 流量测次分布的标准差和随机不确定度指标表

站类	一类精度的水文站	二类精度的水文站	三类精度的水文站
$S_e$ (%)	4	5	6
$X'_Q$ (%)	8	10	12

从上面分析可以看出,累积频率曲线法能在一定程度反映流量测次的大致分布情况,尤其通过标准差和随机不确定度的计算能够较好地确定流量测次分布的系统偏差,即:确保点据不会集中在某一(部分)子区间。

根据图2,计算曲线I、II、III的标准差结果如表5(按三类精度要求)。

表5 标准差计算成果表

站类	I	II	III
$S_e$ (%)	4.7	3.2	4.5
结论	不合理	合理	不合理

## 5 适线检验法

以下继续讨论 $S_e$  (%)指标满足表4规定的情形。

为进一步分析 $\Omega_j$ 在 $\Phi_i$ 中的分布情况,可建立新的集合空间 $\Psi_k$ , $\Psi_k$ 定义如下:

$$\Psi_k = \Omega_j \cup \Phi'_m \quad (7)$$

式(7)中, $\Phi'_m$ 表示 $\Phi_i$ 中与 $\Omega_j$ 相邻的且 $M_{(i)}=1$ 的子区间。显然, $\Psi_k$ 是由0、1两个元素组成。当 $\Psi_k$ 中0、1依次排列或排列均匀时,可以认为流量测次分布是相对合理的。合理性的判断方法可借用《水文资料整编规范》(SL247-2012)中的适线检验法。主要步骤如下:

第一步,对 $\Psi_k (= \{\Psi_{(1)}, \Psi_{(2)}, \dots, \Psi_{(k)}, \dots\})$ 中已经排列好的元素(0、1),从第二个元素开始,统计元素变换,变换符号记1,否则记0。即:

$$F_{(h+1)} = \begin{cases} 1, & \Psi_{(h+1)} \neq \Psi_{(h)} \\ 0, & \Psi_{(h+1)} = \Psi_{(h)} \end{cases} \quad h=1, 2, \dots, K \quad (8)$$

第二步,统计记为“1”的次数( $\Sigma F_{(i)}$ )。按式(9)计算 $u$ 值,并与给定的显著性水平 $\alpha$ 及 $u_{1-\alpha}$ (见表6)进行比较。当 $u < u_{1-\alpha}$ 时,则接受检验,流量测次空间分布合理,否则认为流量测次空间分布不合理。

$$u = \frac{0.5(K-1) - \Sigma F_{(h)} - 0.5}{0.5\sqrt{K-1}} \quad (9)$$

表6 临界值特性表

显著性水平 $\alpha$	0.05	0.10	0.25
置信水平 $1-\alpha$	0.95	0.90	0.75
$u_{1-\alpha}$	1.64	1.28	-

显然,通过使用适线检验法,在一定程度上构建了流量测次分布合理性的评价方法。但对于连续无测点的子空间的分布要求,还没有明确的判断方法。因此,本文继续从概率统计角度进行分析。主要步骤如下:

第一步,设定 $\Psi_k$ 中连续为0的元素个数不超过 $y$ 。根据前面流量测次分布,此处 $y$ 满足:

$$y \leq \left\lfloor \frac{dQ_m}{\Delta q} \right\rfloor_{(\text{取整})} \quad (10)$$

第二步,计算 $\Psi_k$ 中连续为0的元素个数不超过 $y$ 的可能性 $p_y$ 。此处类似:“将 $J$ 个球( $\Psi_k$ 中为0的元素)放入 $K$ 个盒子( $\Psi_k$ 中元素的个数),要

求每个盒子至多放  $y$  个球”, 根据排列组合与概率学原理<sup>[5]</sup>, 则有:

$$M_{K,J}=\sum_{r=0}^{\lfloor \frac{K}{J+1} \rfloor} (-1)^r \cdot C_J^r \cdot C_{J+K-(y+1)r-1}^{K-(y+1)r} \tag{11}$$

$$p_y(\%)=100\times \frac{M_{K,J}}{2^K} \tag{12}$$

第三步, 当  $p_y(\%)$  小于某一给定指标  $p_N(\%)$  时, 可认为流量测次分布是合理。同样, 按水文站的精度要求,  $p_N(\%)$  如表 7 定义:

表 7  $p_N(\%)$  指标限定表

站类	一类精度的水文站	二类精度的水文站	三类精度的水文站
$p_N(\%)$	3.0	3.5	4.0

6 实际应用

(1) 小河新闸站

小河新闸站为三类精度要求的水文站。2017 年 2 ~ 9 月实测引(长江)水流量 16 次, 10 月实测 4 次。实测点据按流量从小到大排列, 如表 8:

表 8 小河新闸站 2017 年实测引水流量成果表

序号	流量	相关因子	序号	流量	相关因子
1	18.9	10.4	11	62.9	47.9
2	28.0	17.5	12	66.2	49.6
3	38.0	25.0	13	66.9	52.5
4	41.8	29.0	14	70.9	55.1
5	47.2	36.1	15	73.9	59.7
6	47.9	33.9	16	79.6	62.5
7	56.1	40.7	17	82.6	68.8
8	57.3	43.7	18	85.0	71.0
9	59.2	45.2	19	90.0	75.0
10	61.7	45.0	20	94.4	83.2

注: 表中斜体加粗点据为 2017 年 10 月实测, 其余为当年 2 ~ 9 月实测。

根据表 8 中 2 ~ 9 月实测引水流量点据, 采用一潮推流法率定水位流量关系为:

$$Q=2.97x^{0.787} \text{ (x 为相关因子)} \tag{13}$$

三项检验成果如表 9。

表 9 小河新闸站水位流量关系三项检验成果表

1. 符号检验表				
项 目	符号	数 值	检 验 结 论	
测点总数	N	16	合 理	不合理
正号或负号个数最小值	K ( 或 n1 )	8	√	
检验统计量	U	-0.25		
显著性水平	A	0.25		
检验临界值 ( 查表 )	$u_{1-\alpha/2}$	1.15		
2. 适线检验表				
项 目	符号	数 值	检 验 结 论	
测点总数	N	16	合 理	不合理
正负符号变换次数	K	13	√	
检验统计量	U		$K \geq 0.5 \times (N-1)$	
显著性水平	A	0.10	不作该项检验	
检验临界值 ( 查表 )	$u_{1-\alpha}$	1.28		
注：α 可采用 0.05 ~ 0.10，相应得 $u_{1-\alpha}$ 为 1.64 ~ 1.28				



(续表 9)

3. 偏离数值检验表

项 目	符号	数 值	检 验 结 论	
自由度	$K=n-1$	15	合 理	不合理
检验统计的绝对值	$ t $	0.60	√	
显著性水平	$\alpha$	0.10		
检验临界值	$t_{1-\alpha/2}$	1.73		

注： $\alpha$  可采用 0.10 ~ 0.20

计算该站合格率  $p(\%)=56.2\%$ ,  $\delta(\%)=25\%$ , 均不满足表 2 和表 3 的要求。为此, 2017 年 10 月该站又补测了 4 潮次引水流量(见表 8)。经计算, 该站水位流量关系没有发生改变, 也通过三项检验(略)。此时, 总测次  $N=20$ ,  $p(\%)=60\%$ ,  $\delta(\%)=13.2\%$ , 均满足表 2 和表 3 的要求,  $i \sim \Sigma M_{(i)}$  如图 3 所示。

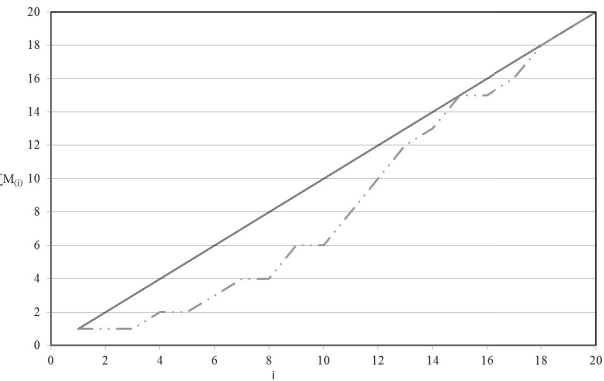


图 3 小河新闸站关系图

从图 3 中可以看出, 该站实测水位流量点据主要集中在中下部, 且标准差  $S_e(\%)=3.6\%$ , 满足表 4 的要求。另外, 该站由元素 (0、1) 组成的集合空间  $\Psi_k$  如表 10 所示。

表 10 小河新闸站  $\Psi_k$  元素表 ( $K=14$ )

序号	1	2	3	4	5	6	7
元素	1	0	0	1	0	1	1
序号	8	9	10	11	12	13	14
元素	0	1	0	1	1	0	1

根据表 9 和式 (9), 计算  $\Psi_k$  中元素变换次数  $\Sigma F_{(h)}=10 > 7(K/2)$ , 通过适线检验(亦满足表 6

的要求)。且该站  $\Psi_k$  中连续为 0 的元素个数不超过 2, 亦满足式 (10) 的要求。同样, 根据式 (11) 和式 (12), 计算  $p_y=0.02\%$ , 满足表 7 的要求。

由此可见, 经过 10 月有针对性的流量补测, 小河新闻水文站流量测次满足了空间合理分布的要求, 全年流量资料整编精度得到了保证。

(2) 枫桥站

枫桥站为一类精度要求的水文站。根据该站 2016 年实测流量资料, 采用上述评价方法, 评价结果如表 11 所示。

表 11 枫桥站 2016 年流量测验时空分布合理性评价结果表

项目	合格率				
评价结果	71.4	14.5	3.8	0	1.8
限定	70	15	4.0	1.64	3.0

7 结语

流量测验成果质量是水文资料可靠性的保证, 而流量测验时空分布(测次的布置和测点的控制)则是流量测验成果质量的基础。《河流流量测验规范》对流量测验次数的布置和测点的控制有一个定性的规定, 《水文资料整编规范》和《水文年鉴汇编刊印规范》则对水位流量关系定线成果有一个定量的规定。但由于各地河流的差异性, 目前我国对流量测验时空分布的合理性尚缺乏明确的评价方法。

本文基于累积频率曲线法、适线检验等方法, 并利用概率学原理, 较为严密地推导和构建 (下转第 33 页)

（上接第30页）

了流量测次时空分布合理性的评价办法。根据小河新闻水文站 2017 年的流量资料和枫桥水文站 2016 年的流量资料, 验证效果较为明显, 可为指导水文测站开展流量测验工作、建立科学合理的流量测验成果质量评价体系、修订和完善《河流流量测验规范》提供参考。

需要说明一点的是, 本文所推导和构建的方法仅仅是对流量测验时空分布合理性评价的一个尝试。表 2、3、4、6 中不同指标的限定值仅基于十几个水文站近 20 年水文资料的验证结果, 需要用更多的水文资料去验证和确定。另外, 子空间是随测次变化的, 从小河新闻站上的验证情况来看, 测次增多不一定使流量测次时空分布的合格率增大, 对子空间的定义也可能需要更多的水

文资料去验证和确定。

### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部. SL247-2012 水文资料整编规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
- [2] 王维志, 王冬梅. 河道流量测验水位级划分方法初探[J]. 东北水利水电, 2010, 26(287):35-40.
- [3] 喇承芳. 黄河贵德水文站不同水位级划分探讨[J]. 甘肃水利水电技术, 2010, 46(7):13-14.
- [4] 赵建伟. 孔家坡水文站水位级划分及流量测验编制方案[J]. 山西水利, 2006, (6):56-59.
- [5] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计(第四版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.