

# 瞬时单位线计算地面径流峰值的探讨

周 斌

(广东省汕尾市水利水电规划设计院,广东 汕尾 516600)

**摘 要:**工程设计中常采用固定时段计算设计洪水,洪峰从有限的计算时段上统计,存在一定误差.为控制成果精度,可按瞬时单位线上涨历时调整计算时段,计算的原固定时段点的地面径流调整前后不变.还提出了计算任意时刻地面径流的公式,可直接试算地面径流峰值,也可计算出非等距的地面径流过程.

**关键词:**瞬时单位线;洪水;地面径流

**中图分类号:**TV122+.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-4701(2018)05-0369-04

1945年C. O. Clark提出了瞬时单位线的概念,1957年J. E. Nash推导出瞬时单位线的数学方程,从而发展了通过暴雨计算洪水的单位线法。20世纪80年代水电部全国暴雨洪水办公室组织编制暴雨图集,诸多省份相继率定了瞬时单位线的参数,大大推动了瞬时单位线法的广泛应用。21世纪初,全国雨洪办又组织对暴雨图集进行修订,部分省份的瞬时单位线参数又在更长资料系列的基础上重新率定,使计算精度进一步得到了提高。

瞬时单位线法计算洪水时,通常采用固定的计算时段计算出各时段末的地面径流过程,再与地下径流相加,得到时间间隔相等的洪水过程线,并取其中的最大值作为设计洪峰。由于洪峰是从有限的计算节点上统计取值,因此常规方法得到的洪峰成果存在一定误差。

## 1 瞬时单位线的基本原理<sup>[1]</sup>

瞬时单位线是指当输入均匀分布的单位瞬时脉冲雨量(地面净雨)时,经过 $n$ 个线性串联水库的调蓄作用,在流域出口断面形成的地面径流过程。瞬时单位线的计算公式为:

$$u(0,t) = \frac{1}{K \cdot \Gamma(n)} \cdot \left(\frac{t}{K}\right)^{n-1} e^{-\frac{t}{K}} \quad (1)$$

式中: $n$ 、 $K$ 为参数; $\Gamma$ 为伽玛函数; $t$ 为时间,h。

工程中常通过 $S$ 曲线将瞬时单位线转换成时段单位线,再计算流域出口断面的地面径流。 $S$ 曲线的公式

为:

$$S(t) = \frac{1}{\Gamma(n)} \int_0^{\frac{t}{K}} \left(\frac{t}{K}\right)^{n-1} e^{-\frac{t}{K}} \cdot d\left(\frac{t}{K}\right) \quad (2)$$

转换成时段为 $\Delta t$ 无因次时段单位线的公式是:

$$u(\Delta t, t) = \int_{t-\Delta t}^t u(0, t) dt = S(t) - S(t - \Delta t) \quad (3)$$

则流域出口断面的地面径流为:

$$Q(n) = \frac{F}{3.6} \cdot \sum_{i=1}^m \left[ \frac{h_i}{\Delta t} \cdot u(\Delta t, i \cdot \Delta t) \right] \quad (4)$$

式中: $m$ 为时段序号; $F$ 为流域面积, $\text{km}^2$ ; $h_i$ 为第 $i$ 时段的地面净雨量,mm。

工程中运用瞬时单位线计算地面径流时,先根据式(2)采用数值等方法计算 $S(t)$ 曲线,再错 $\Delta t$ 时段相减,从而计算 $\Delta t$ 的整数时刻的 $S(t) - S(t - \Delta t)$ 数值,从而构成一条包含 $\Delta t$ 各整数时刻的 $u(\Delta t, t)$ (时段单位线),再按式(4)累加计算可得地面径流过程。

地下径流的汇流远较地面径流为慢,且地下径流过程较平缓,通常可近似概化为三角形。由于地下径流较为平缓,总径流洪峰往往与地面径流峰值同时发生。

## 2 瞬时单位线计算任意时刻流域出口断面地面径流的公式

根据瞬时单位线 $u(0, t)$ 的定义,对任意时刻 $t_0$ 出口断面的地面径流可用积分表示为:

$$Q(t_0) = \frac{F}{3.6} \cdot \int_0^{t_0} I(t) \cdot u(0, t_0 - t) \cdot dt \quad (5)$$

式中:  $I(t)$  为时刻  $t$  的地面净降雨强度, mm/h。

如  $\Delta t_i$  时段内降雨强度近似保持不变, 即在时段  $\Delta t_i$  内近似有  $I(t) \approx \bar{I}_i = \frac{h_i}{\Delta t_i}$ , 对于  $t_0 = \Delta t_1 + \Delta t_2 \cdots + \Delta t_n$ , 式(5)可展开写为:

$$Q(t_0) = \frac{F}{3.6} \cdot \left[ \frac{h_1}{\Delta t_1} \int_{t_0 - \Delta t_1}^{t_0} u_1(0, t) \cdot dt + \frac{h_2}{\Delta t_2} \int_{t_0 - \Delta t_1 - \Delta t_2}^{t_0 - \Delta t_1} u_2(0, t) \cdot dt \cdots + \frac{h_n}{\Delta t_n} \int_{t_0 - \Delta t_1 - \Delta t_2 \cdots - \Delta t_{n-1}}^{t_0 - \Delta t_1 - \Delta t_2 \cdots - \Delta t_{n-1}} u_n(0, t) \cdot dt \right] \quad (6)$$

$$\text{因 } u_i(\Delta t_i, t_0 - \sum_{k=1}^{i-1} \Delta t_k) = \int_{t_0 - \sum_{k=1}^{i-1} \Delta t_k}^{t_0 - \sum_{k=1}^{i-1} \Delta t_k + \Delta t_i} u_i(0, t) \cdot dt, \text{ 式}$$

(6)也可写为下式:

$$Q(t_0) = \frac{F}{3.6} \cdot \sum_{i=1}^n \left[ \frac{h_i}{\Delta t_i} \cdot u_i(\Delta t_i, t_0 - \sum_{k=1}^{i-1} \Delta t_k) \right] \quad (7)$$

### 3 固定时段 $\Delta t$ 的适宜取值与地面径流的关系

工程中固定时段  $\Delta t$  通常与暴雨时段取值相一致。

虽然时段单位线任意时刻的数值  $u(\Delta t, t) = \int_{t-\Delta t}^t u(0, t) dt$  通常只能采用数值方法近似求解, 但其成果仍然是有极高精度的, 因而固定时段点的地面径流成果是较高的; 而固定时段点以外的时段单位线数值和地面径流不能准确得到, 特别是用位于固定时段点的最大流量作为地面径流的峰值(洪峰)成果, 存在一定的误差。

如时段  $\Delta t$  内降雨强度近似不变, 即  $I \approx \frac{h_{\Delta t}}{\Delta t}$ , 如将

时段  $\Delta t$  进一步分为  $n$  段, 即  $\Delta t = \sum_{i=0}^n \Delta t_i$ , 则对于时段  $\Delta t$  内的降雨量, 出口断面某一时刻  $t_0$  对应的径流量分量  $Q(t_0)$  为:

$$Q(t_0) = \frac{F}{3.6} \cdot \frac{h_{\Delta t}}{\Delta t} \cdot \sum_{i=1}^n \int_{t_0 - i \cdot \Delta t_i}^{t_0 - (i-1) \cdot \Delta t_i} u(0, t) \cdot dt = \frac{F}{3.6} \cdot \frac{h_{\Delta t}}{\Delta t} \cdot \sum_{i=1}^n \left[ u(\Delta t_i, t_0 - \sum_{k=1}^{i-1} \Delta t_k) \right] \quad (8)$$

由定积分的性质, 可知  $u(\Delta t, t_0) = \sum_{i=1}^n [u(\Delta t_i, t_0 - \sum_{k=1}^{i-1} \Delta t_k)]$ 。瞬时单位线具有线性迭加的性质, 任一降

雨时段细分, 细分前后计算的地面洪水流量不变。

为控制固定时段  $\Delta t$  计算洪水的精度, 有文献提出,

一般应使  $\Delta t \leq \frac{1}{4} t_p \sim \frac{1}{3} t_p$  [2] ( $t_p$  为上涨历时)。函数

$u(0, t)$  的极值处有  $\frac{du(0, t)}{dt} = 0$ , 易证得  $u(0, t)$  的上

涨历时  $t_{p0} = (n-1) \cdot K$ , 瞬时单位线  $u(0, t)$  具有急涨缓降特性, 即对任意  $\Delta t$  有  $u(0, t_{p0} - \frac{\Delta t}{2}) < u(0, t_{p0} +$

$\frac{\Delta t}{2})$ , 则  $u(\Delta t, t) = \int_{t-\Delta t}^t u(0, t) dt$  的峰值必定位于区间

$(t_{p0} + \frac{\Delta t}{2}, t_{p0} + \Delta t)$  内, 故计算时段  $\Delta t$  宜取为:

$$\Delta t \leq 0.4 t_{p0} = 0.4 \cdot (n-1) \cdot K \quad (9)$$

当  $\Delta t$  不满足式(9)时, 可将调整计算时段为原计

算时段的  $\frac{1}{n}$  ( $n$  为整数) 细分暴雨过程, 使得调整后的

计算时段满足式(9)的要求, 再按常规方法计算即可

(以下简称加密法)。调整前后原固定时段点的地面径

流并不会发生变化, 只增加调整后新增的固定时段点地

面径流成果。通过计算点加密的方法可降低地面径流

峰值(洪峰)成果误差, 并得到更精细的洪水过程。

### 4 基于任意时刻的瞬时单位线公式计算地面径流过程

根据式(7), 可以计算任意时刻的地面径流, 其成

果是准确的。因此, 可以预先选择各计算时刻, 在暴雨

时段  $\Delta t$  的基础上, 按式(7)依次计算预选各时刻的地

面径流, 形成完整的地面径流过程(以下简称预选法)。

预选法尤其适合于对洪峰精度要求高的工程, 甚至可以

采用试算或其它逼近算法直接求解地面径流峰值而不

必计算地面径流过程。需要注意的是, 采用预选法时,

尽管暴雨过程是等时段( $\Delta t$ )的, 但最末计算时段往往

有:  $\Delta t_n \leq \Delta t$ 。

## 5 算例

### 5.1 基本情况

已知江西省某流域<sup>[3]</sup>, 流域面积为 161 km<sup>2</sup>, 初取  $\Delta t = 3$  h, 净雨及主要参数见表 1<sup>[3]</sup>。

表1 江西某流域暴雨洪水计算基本数据摘录表 ( $\Delta t = 3\text{ h}$ )

时段序号	净雨/mm	净雨强/(mm/h)	$n$	$K$
1	0.9	0.30	2	3.31
2	0	0	2	0
3	11.8	3.93	2	3.31
4	43.8	14.60	2	2.49
5	143.3	47.80	2	1.82
6	16.9	5.63	2	3.21
7	6.1	2.03	2	3.31

5.2 加密法计算地面径流过程

以净雨主峰推算  $t_{p0} = (n - 1) \cdot K = (2 - 1) \cdot 1.82 = 1.82$ , 应有  $\Delta t \leq 0.4 t_{p0} = 0.782\text{ h}$ 。如取  $\Delta t = 0.6\text{ h}$ , 即原时段5等分。采用 Excel 的 GAMMADIST 函数计算时段单位线  $u(\Delta t, t)$  [4,5], 采用式(4)计算洪水过程, 地面洪峰为  $1409\text{ m}^3/\text{s}$  (发生于第15.6 h), 较原成果  $1329\text{ m}^3/\text{s}$  (发生于第15 h) [3] 约大6%。修正  $\Delta t$  后的洪水过程成果见图1。

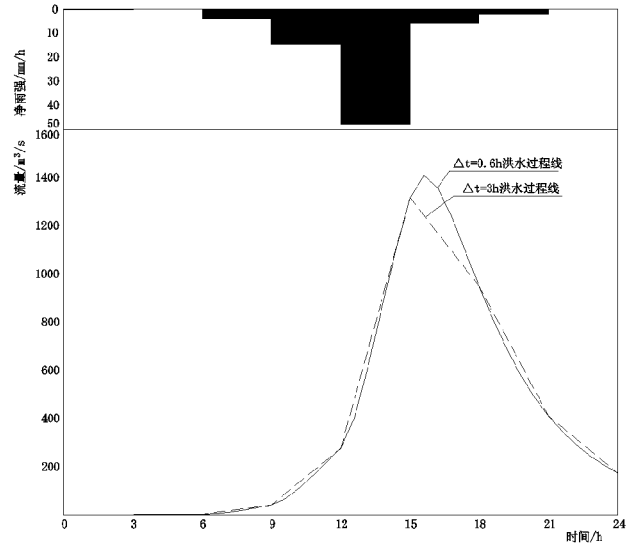


图1 江西某流域瞬时单位线法计算地面径流过程线

5.3 预选法直接计算指定时刻的地面径流

在暴雨过程  $\Delta t = 3\text{ h}$  的基础上, 用式(3)计算各时段净雨对应的  $u(\Delta t, t)$ 、用式(7)计算时刻  $t = 15.6\text{ h}$  的地面洪水流量, 过程见表2。

表2 预选法计算  $t = 15.6\text{ h}$  地面径流过程

时段序号	净雨/mm	$K$	$\Delta t / \text{h}$	$t / \text{h}$	$u(\Delta t, t)$	$\frac{F}{3.6} \cdot \bar{I} \cdot u(\Delta t, t)$
1	0.9	3.31	3	15.6	0.056	0.7
2	0	0	3	12.6	-	-
3	11.8	3.31	3	9.6	0.193	34.0
4	43.8	2.49	3	6.6	0.318	207.9
5	143.3	1.82	3	3.6	0.544	1162.7
6	16.9	3.21	0.6	0.6	0.015	3.9
7	6.1	3.31	-	-	-	-

$$Q(t_0) = \frac{F}{3.6} \cdot \sum [\bar{I} \cdot u(\Delta t, t)] = 1409.2$$

6 结 语

常规的瞬时单位线法计算洪水时, 采用了固定时段计算各时段的地面径流过程, 通过有限点来描述地面径流过程, 并从中统计出峰值, 这种方法存在一定误差。采用常规瞬时单位线法计算洪水时应审慎地选择计算时段  $\Delta t$ , 确保计算成果的精度。对于洪峰成果精度有较高要求时, 宜采用预选法在洪峰发生时间附近试算确定地面径流峰值。此外, 还可采用预选法直接计算非等距的地面径流过程。江西省概化统一时程分配雨型有

60 min、3 h、6 h 和 24 h 四种, 一般要求瞬时单位线采用以 3 h、6 h 以上时段的暴雨雨型进行分配计算 [3], 如直接引用暴雨雨型的时段计算, 极易导致洪水过程线过于稀疏, 使统计的洪峰成果误差过大, 需严格控制成果精度。

参考文献:

[1] 叶守泽, 许静仪, 王祥三, 等. 水文水利计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1992年.  
 [2] 沈跃明, 陈天良, 肖公健, 等. 四川省中小流域暴雨洪水计算手册[M]. 成都: 四川省水利厅, 1984年.  
 [3] 江西省暴雨洪水查算手册[M]. 南昌: 江西省水文局, 2010年.

- [4]周斌,赵正鹏.广西暴雨洪水计算的局部优化探讨[J].人民珠江, 2015(5):55~57.  
 [5]耿鸿江,齐松茹.瞬时单位线的Excel快速算法[J].人民长江,2003 (2):6~7.

编辑:张绍付

## To discuss calculating the peak of overland runoff with Nash unit line

ZHOU Bin

(Shanwei Municipal Water Resources and Hydropower Planning and Designing Institute, Shanwei 516600, China)

**Abstract:** In engineering design, the design flood is usually calculated in a fixed period of time. In order to control the accuracy of the results, the calculation period can be adjusted according to the rising time of the instantaneous unit line. A formula for calculating ground runoff at any time is presented, which can be used to calculate the peak value of ground runoff directly or to calculate the non-equidistant ground runoff process.

**Key words:** Nash unit line; Flood; Overland runoff

翻译:周斌

(上接第344页)

## Numerical simulation of temperature and humidity coupling and stability of different types of rainfall slopes

XU Xiang

(Jiangxi Provincial Water Conservancy Planning and Designing Research Institute, Nanchang 330029, China)

**Abstract:** In order to study the temperature and humidity coupling characteristics and slope stability of a certain slope in Nanning Guangxi under different rainfall conditions (average rainfall front rainfall center front rainfall and post front rainfall). The finite element calculation of Geo-slope 2012, a famous geotechnical software in Canada, is carried out. The results show that: Under rainfall condition, the pore pressure and volume water content of the surface layer of the slope reach the maximum at first, and then develop to the depth of the slope gradually. After the rainfall, the pore pressure and the volume water content of the surface layer of the slope decrease rapidly. The order of pore pressure and volume water content in the surface layer of slope soil is as follows: posterior front rainfall  $\geq$  center front rainfall  $\geq$  average rainfall  $\geq$  front rainfall. The order of pore pressure and volume water content in the deep layer is as follows: posterior front rainfall  $\leq$  average rainfall  $\leq$  center front rainfall  $\leq$  front rainfall. After the end of rainfall, the order of pore pressure and volume water content in slope soil is as follows: posterior front rainfall  $\geq$  average rainfall  $\geq$  center front rainfall  $\geq$  front rainfall. The total temperature field in the slope is consistent with the climate change, which increases first and then decreases, and the range of temperature change in the slope is smaller than that in the surface of the slope, and the temperature variation of the lower monitoring surface is smaller than that of the upper monitoring surface and the central monitoring surface. The safety coefficient gradually decreases with time in the rainfall process, and keeps constant after the rain. The safety coefficient of different rainfall types in the early period of rainfall is: the rear front type more than average type center type or more forward type, and the final safety factor tends to a fixed value.

**Key words:** Different rainfall types; Temperature and humidity coupling; Slope stability; Numerical simulation Geo-Slope

翻译:徐翔