

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.07.020

# 高精度道路交叉口流量分配算法及与SWMM集成

邵知宇<sup>1,2</sup>, 王 菲<sup>1,2</sup>, 李 霜<sup>1,2</sup>, 龚华凤<sup>3</sup>, 柴宏祥<sup>1,2</sup>

(1. 重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045; 2. 重庆大学 环境与生态学院, 重庆 400045; 3. 林同棧国际工程咨询<中国>有限公司, 重庆 400045)

**摘 要:** 高重现期降雨情景下,城市道路作为地表行泄通道联合雨水管道快速排放暴雨径流,可大幅度提高城市内涝防治水平,但存在着排涝流量在道路交叉口下游难以精确界定的问题。SWMM是目前最常用的城市雨洪管理模型,但由于其为一维模型,无法模拟道路交叉口处的复杂流动特征,故在计算交叉口的流量分配方面存在较大误差。为此以山地和丘陵城市一进两出T型道路交叉口为研究对象,在高重现期降雨条件下,通过综合考虑质量、动量以及能量三大守恒,建立交叉口流量分配计算的非线性控制方程,并利用 Matlab 软件进行求解,构建了关于道路交叉口的高精度流量分配算法。在此基础上,获取交叉口流量分配曲线,再据此定义SWMM中出水口属性,从而实现算法与SWMM的集成。从与SWMM现有的两种计算交叉口流量分配方法的模拟结果对比可以看出,该集成算法的计算精度显著优于SWMM普通节点和堰流分流方法,与前人的实验结果最为接近。其中,该流量分配算法的计算结果与 Mizumura 经验公式法的误差 $\leq 6.7\%$ ,与 Kesserwani 二维数值模型法的误差 $\leq 4.6\%$ ,计算精度得到显著提升。

**关键词:** 城市内涝; 道路排水; SWMM; 交叉口; 流量分配

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)07-0130-07

## High Accurate Intersection Flow Distribution Algorithm and Its Integration with SWMM

SHAO Zhi-yu<sup>1,2</sup>, WANG Fei<sup>1,2</sup>, LI Shuang<sup>1,2</sup>, GONG Hua-feng<sup>3</sup>, CHAI Hong-xiang<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment <Ministry of Education>, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. College of Environment and Ecology, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 3. T. Y. Lin International Engineering Consulting <China> Co. Ltd., Chongqing 400045, China)

**Abstract:** As surface drainage channels, the urban roads can rapidly discharge storm runoff combined with rainwater pipeline under rainfall scenarios with high return period, which can greatly improve the urban waterlogging prevention and control efficiency. However, there is a problem that the drainage flow downstream of the road intersection is difficult to be accurately determined. SWMM is hitherto the most commonly used urban stormwater management model. However, it can not simulate the complex flow characteristics at road intersections because it is a one-dimensional model, and there are large errors in calculating the flow distribution at intersections. This paper established a nonlinear control equation for calculating flow distribution at a T-type road intersection in a mountainous and hilly city,

基金项目: 国家自然科学基金资助面上项目(52070027)

通信作者: 邵知宇 E-mail: shaozhiyu@cqu.edu.cn

solved it by using Matlab software, and eventually established the high accurate intersection flow distribution algorithm by comprehensively considering the conservation of mass, momentum and energy under rainfall scenarios with high return period. On this basis, the intersection flow distribution curve was obtained, and the discharge outlet attributes in SWMM were defined accordingly, so as to realize the integration of the algorithm and SWMM. Compared with the simulation results of two existing methods of SWMM for calculating intersection flow distribution, the calculation accuracy of this integrated algorithm was significantly better than that of SWMM's common node and weir flow diversion methods, and it was the closest to the previous experimental results. Among them, the error between the calculation results of this flow distribution algorithm and Mizumura empirical formula method was no more than 6.7%, and the error between the calculation results of this flow distribution algorithm and Kesserwani two-dimensional numerical model method was no more than 4.6%, indicating that the calculation accuracy was significantly improved.

**Key words:** urban waterlogging; roadway drainage; SWMM; intersection; flow distribution

城市内涝严重威胁城市交通的安全稳定运行,是当前我国城市存在的通病之一。道路大排水技术是利用道路本身过水断面大的特点,以道路作为地表行泄通道有组织地输送排放超出管道设计标准的暴雨径流,实现大暴雨情景下道路与雨水管道联合排放涝水。道路大排水技术可实现城市内涝防治水平的大幅提高,避免城市管道的大规模改造,是目前国内外行业普遍认可的低成本内涝顽疾治理手段<sup>[1-3]</sup>。

道路大排水技术应用过程中,存在道路交叉口处流量分配的精确界定问题<sup>[4-5]</sup>。虽然SWMM作为目前应用最广泛的城市雨洪管理模型,能够完整地模拟城市降雨径流全过程<sup>[6]</sup>,但SWMM的流量分配算法将道路交叉口处的二维复杂流动特征简单化为一维化,存在误差较大的不足。SWMM通过在交叉口节点处求解一维圣维南方程来获得下游支路的流量,一维圣维南方程中的动量守恒方程是基于1个维度(一个流动方向)的动量守恒原理推导得出的,反映了动量沿流动方向(管道轴心方向)的变化。然而,在道路交叉口处的动量变化涉及 $x$ 、 $y$ 两个维度(两个流动方向)。由于缺乏考虑垂直方向的水流流动及其对于动量和能量的影响,SWMM的节点分流算法不能精确计算道路交叉口下游道路的流速及动量等影响交叉口流量分配的关键要素,因此其计算结果与实际情况差别较大。

城市道路交叉口在地表排涝中担任着汇集和重新分配涝水的重要角色,其输送到下游的流量将

决定着下游道路是否存在行泄风险。此外,道路在排放高峰值涝水时,存在着行人和汽车的失稳及翻转等安全隐患<sup>[7-8]</sup>。不仅如此,道路通过检查井及雨水口与雨水管道竖向连通,一旦交叉口处的流量分配与实际不符,将造成额外的高流量负荷通过竖向的连通作用转输到其他汇水区域,增加这些区域下游的洪涝风险,甚至引发新的涝点。因此,精确预测交叉口下游所分配到的排涝负荷对于城市内涝防治具有重要意义<sup>[9-10]</sup>。

鉴于此,笔者以一进两出T型城市道路交叉口为研究对象,开展交叉口处流量分配算法研究,以获取一种适用于SWMM的高精度交叉口流量分配算法,并将此算法与SWMM水力模型进行集成,从而修正由于SWMM无法准确模拟交叉口处流动特征而导致流量分配计算精度低的问题,增强SWMM在城市洪涝模拟中交叉口处下游流量分配预测的精确性,为更准确地设计规划道路大排水提供工具支撑。

## 1 流量分配算法构建

### 1.1 控制方程推导

研究对象为常见的一进两出T型道路交叉口,主路、支路及水流方向如图1所示,其中变量 $i$ 、 $Q$ 、 $h$ 、 $v$ 分别代表道路坡度、流量、水深及流速。所有道路均概化为矩形宽浅明渠,主路在交叉口上下游宽度保持不变。基于《城镇内涝防治技术规范》(GB 51222—2017),高重现期条件下作为大排水行泄通道的道路,水流覆盖整个道路宽度。同时假定主路

下游和支路出流均为自由出流,该假定是我国大多数城市尤其是山地和丘陵城市的实际情况。由于山地和丘陵城市的道路坡度相对较大,表征水流流态的弗劳德数  $Fr (Fr = v/\sqrt{gh})$  通常大于1,导致交叉口处下游道路对交叉口流场不产生顶托作用或者影响较小,因此自由出流的边界条件具有较好的适用性。综合考虑该道路交叉口处两个方向的质量、动量和能量守恒。

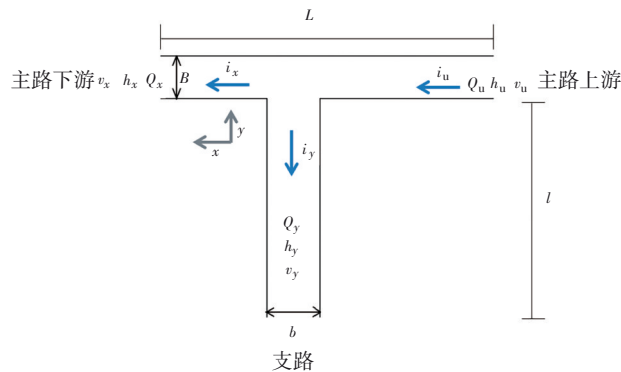


图1 T型道路交叉口分流示意

Fig.1 Schematics of flow division at a T-type road intersection

#### ① 质量守恒约束

交叉口处上游入口流量等于下游出口流量之和,如式(1)所示,亦可表示为流速、宽度和水深的关系,如式(2)所示。

$$Q_u = Q_x + Q_y \quad (1)$$

式中:  $Q_u$  为入流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $Q_x$  为主路出口流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $Q_y$  为支路出口流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ 。

$$h_u v_u B = h_x v_x B + h_y v_y b \quad (2)$$

式中:  $h_u$  为主路入流水深,  $\text{m}$ ;  $h_x$  为主路出流水深,  $\text{m}$ ;  $h_y$  为支路出流水深,  $\text{m}$ ;  $v_u$  为主路入流流速,  $\text{m/s}$ ;  $v_x$  为主路出流流速,  $\text{m/s}$ ;  $v_y$  为支路出流流速,  $\text{m/s}$ ;  $B$  为主路宽度,  $\text{m}$ ;  $b$  为支路宽度,  $\text{m}$ 。

#### ② 动量守恒约束

由于道路概化为矩形宽浅明渠,故参考 Law 等人<sup>[11]</sup>提出的明渠流控制体研究方法,在T型交叉口的情况下,主路入流一部分流向主路下游、另一部分流向支路。流体存在一条分界线将流体划分为两部分,该分界线终止于连接点的下游角,以该流分为界,将流体划分为两部分控制体分别进行动量分析,即流向主路下游的主路-主路控制体和流向支路的主路-支路控制体。

#### a. 主路-主路控制体

主路-主路控制体的宽度从主路上游到下游变宽,如图2所示,在主路上游的流动宽度为  $(Q_x/Q_u) \times B$ ,下游为  $B$ 。由于连接处流道的宽度不断扩大,产生了作用于流体的静水压力,根据 Law 等人<sup>[11]</sup>假设作用于流体的连接处的唯一力是由于流道变宽,故主路-主路控制体动量分析如下。

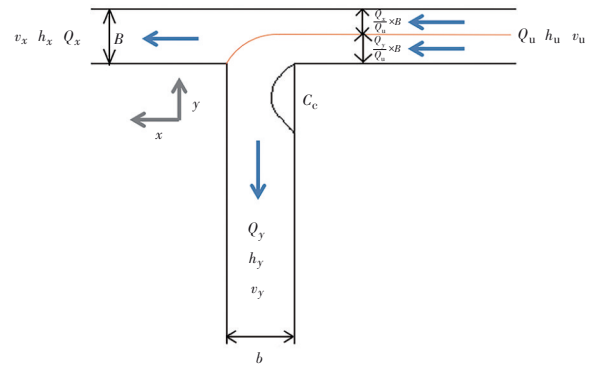


图2 交叉口控制体划分示意图

Fig.2 Schematic diagram of intersection control volume division

$x, y$  方向的流体静力为:

$$F_x = \frac{1}{2} \rho g \left( \frac{h_x^2 + h_u^2}{2} \right) \left( 1 - \frac{Q_x}{Q_u} \right) B \quad (3)$$

$$F_y = \frac{1}{2} \rho g \left( \frac{h_x^2 + h_u^2}{2} \right) B \quad (4)$$

式中:  $\rho$  为水的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $g$  为重力加速度,  $\text{m}/\text{s}^2$ 。

该部分控制体动量守恒方程为:

$$\frac{1}{2} \rho g h_u^2 B \frac{Q_x}{Q_u} + \rho v_u^2 h_u B \frac{Q_x}{Q_u} + \frac{1}{2} \rho g \left( \frac{h_x^2 + h_u^2}{2} \right) \cdot \left( 1 - \frac{Q_x}{Q_u} \right) B = \frac{1}{2} \rho g h_x^2 B + \rho v_x^2 h_x B \quad (5)$$

#### b. 主路-支路控制体

由于支路下游存在回流区现象,导致过水断面收缩、实际断面宽度减小,因此引入收缩系数  $C_c$ ,支路实际过水断面宽度为  $b \times C_c$ 。

该部分控制体的动量守恒方程为:

$$\frac{1}{2} \rho g \left( \frac{h_x^2 + h_u^2}{2} \right) B = \frac{1}{2} \rho g h_y^2 b + \rho v_y^2 h_y C_c b \quad (6)$$

同时,式(2)修正为:

$$h_u v_u B = h_x v_x B + h_y v_y C_c b \quad (7)$$

根据 Ramamurthy 等人<sup>[12]</sup>关于交叉口分流的实验结果提出的收缩系数值,  $C_c$  取值为 0.52。

### ③ 能量守恒约束

根据Ramamurthy等人<sup>[13]</sup>的研究,两控制体能量损失系数的表达式如下:

$$K_1 = \frac{E_u - E_x}{v_u^2/2g} \quad (8)$$

$$K_2 = \frac{E_u - E_y}{v_u^2/2g} \quad (9)$$

式中: $K_1$ 为主路-主路控制体能量损失系数; $E_u$ 为主路入口总能量(以水头计,下同),m; $E_x$ 为主路下游出口总能量,m; $K_2$ 为主路-支路控制体能量损失系数; $E_y$ 为支路总能量,m。

### 1.2 控制方程求解

通过1.1节中的三大守恒分析联立式(1)~(9)非线性方程组,该方程组一共包含5个方程、6个未知数,故需要增加一个方程来使其解唯一。由于大多数长直渠道中的水流流动均匀,可假设认为道路排涝是明渠均匀流并服从曼宁公式,因此基于曼宁公式建立上游流量与道路水深及流速的关系,如下所示:

$$Q_u = \frac{1}{n} h_u B \left( \frac{h_u B}{2h_u + B} \right)^{\frac{2}{3}} i_u^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

式中: $i_u$ 为主路上游坡度,%; $n$ 为路面糙率(曼宁系数)。

式(3)~(10)为所需求解的方程组,由于该方程组高度非线性,本研究采用Matlab编程方式进行方程组的求解,建立了入流流量、节点上游水深以及支路流量的关系。

## 2 分配算法与SWMM集成

出水口(Outlet)在SWMM中可通过定义流量曲线的方式控制出流量,故本研究将在交叉口处设置分流管道即出水口(Outlet)的形式来达成算法与SWMM的集成。

### 2.1 SWMM道路交叉口概化模型构建

在SWMM中构建T型道路交叉口大排水模型,见图3。关键参数设置如下:①道路概化为普通矩形明渠,道路宽度和高度分别设为20、0.15 m;②上游入口节点底标高设为100 m,下游根据坡度计算确定;③支路设置分流管道即出水口(Outlet),在其上游设置一个普通节点,以输出流量分配结果,节点深度设为0.5 m,积水面积设为100 m<sup>2</sup>;④出流全设为自由出流的形式,不受下游边界条件限制。

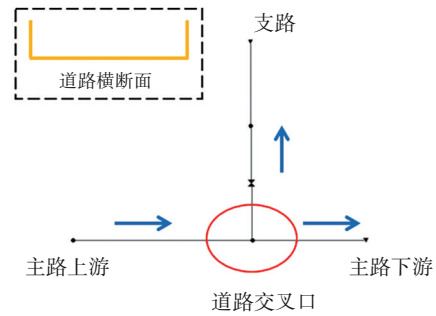


图3 T型道路交叉口处的SWMM模型

Fig.3 SWMM model of T-type road intersection

### 2.2 交叉口流量分配算法与SWMM集成模式

基于1.2节的控制方程求解过程,在不同道路设计参数下求解方程(3)~(10),得到交叉口不同入流情况下上游道路水深和支路出流量的关系,即水深-分流量曲线( $h-Q$ 曲线)。构建交叉口SWMM模型时设为出水口(Outlet)出流,即在交叉口节点与下游道路间添加一段分流管段,故通过将获取的 $h-Q$ 曲线作为分流特征曲线赋予出水口(Outlet),达成算法与模型的耦合集成。具体集成过程如图4所示。

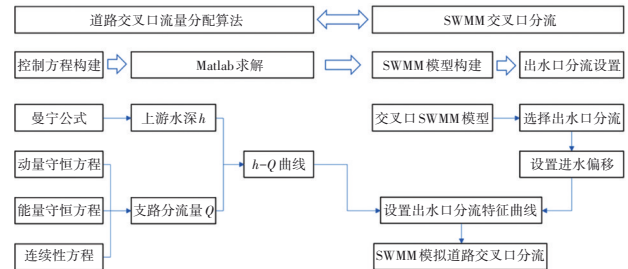


图4 道路交叉口流量分配算法与SWMM集成流程

Fig.4 Integration flowchart of flow distribution algorithm and SWMM at road intersection

在SWMM中,用户可通过定义出流函数或流量曲线来指定出水口转输的流量。出水口的流量曲线类型分为函数曲线(Function curve)和列表曲线(Tabular curve)两类,又分别包括水深-分流量函数/列表曲线和水头-分流量函数/列表曲线。其中,流量函数曲线需用户指定出流流量与水深或者水位所对应的函数关系式,列表曲线均需要用户提供出流流量值与水深或水头对应的列表。由1.1节可知,交叉口处的流量分配控制方程为一系列非线性方程,用单一函数表达式的方式难以进行概化,因此采用列表曲线的方式来集成交叉口的流量分配结果。根据Matlab计算结果在列表中输入各水头下的出流量。



### 3 集成算法的有效性验证

为保证集成算法的精确性和可靠性,需对所提出的算法进行验证,采用与已有水力实验和二维模型结果对比的方法,以保证算法的计算结果真实可靠。选取 Kesserwani 等人<sup>[14]</sup>研究中 10 组不同坡度下的数据进行对比,其中包含 Mizumura 等人<sup>[15]</sup>通过水力实验获取的经验公式计算结果和 Kesserwani 等人<sup>[14]</sup>的二维数值模型模拟结果,结果对比如表 1 所示。其中,流量分配比  $R_q=Q_y/Q_u$ 。从表 1 可以看出,本研究提出的算法计算结果与二维模型模拟结果

的绝对误差 $\leq 4.6\%$ ,与水力实验得到的经验公式计算结果的绝对误差 $\leq 6.7\%$ ,而且绝对误差随着入流流量的增大而逐渐减小,因此本算法适合用于较大重现期降雨下的分流量预测。另外,本算法的计算误差在大坡度时明显低于小坡度,而现有道路排涝的实验研究表明<sup>[7-8]</sup>,道路纵坡越大,地表径流流速越大,更易造成道路危险行泄,故在陡坡道路情景下,下游分配流量的精确预测对城市防洪排涝极其重要。综上所述,本集成算法可用于城市道路排涝交叉口流量分配的下游流量预测。

表 1 本研究算法与现有经验公式及二维模型结果对比

Tab.1 Results comparison of the study algorithm with the existing empirical formula and two-dimensional model

序号	$Q_u/(10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$i_u/\%$	$Fr_u$	流量分配比/%			绝对误差/%	
				经验公式	二维模型	本算法	本算法与经验公式	本算法与二维模型
1	2.0	1	1.70	16.3	20.7	21.0	4.7	0.3
2	6.0	1	1.88	14.9	18.2	20.0	5.1	1.8
3	8.1	1	1.93	14.6	17.5	18.8	4.2	1.3
4	12.0	1	2.00	14.1	16.9	14.0	0.1	2.9
5	4.5	3	3.25	8.9	11.0	15.6	6.7	4.6
6	6.5	3	3.37	8.6	10.5	13.6	5.0	3.1
7	9.5	3	3.50	8.3	10.0	9.3	1.0	0.7
8	10.7	5.75	4.19	7.0	8.2	8.3	1.3	0.1
9	8.5	5.75	4.34	6.7	8.0	8.6	1.9	0.6
10	9.6	5.75	4.92	5.9	7.2	7.7	1.8	0.5

### 4 集成算法与 SWMM 现有方法对比

#### 4.1 普通节点流量分配方法

SWMM 内嵌的交叉口流量分配算法是将交叉口当作普通节点,普通节点的流量分配计算是通过质量守恒进行流量分配,交叉口下游道路的分流流量与道路宽度成正比,在节点处通过迭代求解动量和连续性方程直至收敛。

#### 4.2 堰流分流方法

SWMM 在交叉口节点处的分流计算还可以通过设置侧壁堰流的方式进行,这个设置与 2.2 节类似,但是将道路交叉口的下游支路概化设置为堰(Weir)。堰的形状可为分流支路的断面形状,通常概化为宽顶堰,堰宽度为支路宽度。在 SWMM 中堰流方法的分流量计算根据堰流公式确定,计算公式如下:

$$Q = C_w LH^{\frac{3}{2}} \quad (11)$$

式中: $Q$ 为过流流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $C_w$ 为堰流系数,在此取标准堰流系数值即  $1.38 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ ;  $L$ 为有效堰长,  $\text{m}$ ;

$H$ 为堰前水头,  $\text{m}$ 。

在 SWMM 中,支路的堰流分流参数设置如图 5 所示。

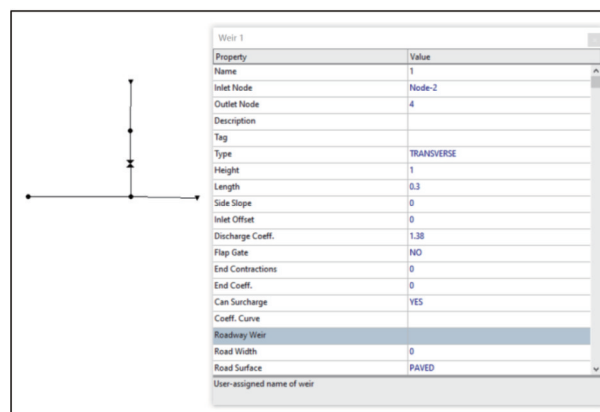


图 5 SWMM 中交叉口堰流分流参数设置

Fig.5 Setting of weir flow diversion parameters at intersection in SWMM

#### 4.3 集成算法与 SWMM 现有分流算法比较

本研究所提出的流量分配集成算法与上述 SWMM 内嵌的普通节点方法和堰流分流方法的结

果对比如表2所示。可以看出,与SWMM现有的两种道路交叉口分流计算方法相比,本研究集成的流量分配算法的计算精度显著更优,本集成算法的结果与经验公式和二维模型的结果更接近。与经验公式相比,SWMM普通节点方法、SWMM堰流分流方法和本集成算法的计算结果绝对误差分别为33.7%~44.1%、8.5%~17.8%、0.1%~6.7%;与二维模型相比,3种方法的计算结果绝对误差分别为29.3%~42.8%、4.1%~16.5%、0.1%~4.6%。其中,经验公式计算结果与本研究算法计算结果的均方根误差(RMSE)为3.81,与SWMM普通节点方法和堰流分流方法计算结果的RSME分别为39.65和13.81;二维模型模拟结果与本研究算法计算结果

的RMSE为2.13,与SWMM普通节点方法和堰流分流方法计算结果的RSME分别为37.48和11.94。这是因为道路交叉口处的流动不同于街道上的一维流动,具有显著的二元结构,SWMM中将交叉口作为普通节点的求解方法未考虑交叉口水流方向的改变,而且未考虑交叉口处水跃现象造成的较大能量损失,导致与经验公式和二维模型模拟结果相比误差较大。而利用堰流公式计算的堰流分流方法仅考虑堰前水头,没有涉及流速的影响,同时没有考虑到由于支路回流区的存在造成的过水断面小于实际断面的现象,也会产生一定的误差。由此可见,本研究集成的流量分配算法可以作为一种有效的道路交叉口模拟方法。

表2 集成算法与SWMM现有流量分配算法的结果对比

Tab.2 Results comparison of integrated algorithm with existing SWMM traffic allocation algorithms

序号	$Q_u/(10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$i_u$	流量分配比/%			绝对误差/%					
			本算法	SWMM节点方法	SWMM堰流方法	与经验公式相比			与二维模型相比		
						本算法	SWMM节点方法	SWMM堰流方法	本算法	SWMM节点方法	SWMM堰流方法
1	2.0	1	21.0	50	24.8	4.7	33.7	8.5	0.3	29.3	4.1
2	6.0	1	20.0	50	23.9	5.1	35.1	9.0	1.8	31.8	5.7
3	8.1	1	18.8	50	23.7	4.2	35.4	9.1	1.3	32.5	6.2
4	12.0	1	14.0	50	23.6	0.1	35.9	9.5	2.9	33.1	6.7
5	4.5	3	15.6	50	24.1	6.7	41.1	15.2	4.6	39.0	13.1
6	6.5	3	13.6	50	23.8	5.0	41.4	15.2	3.1	39.5	13.3
7	9.5	3	9.3	50	23.7	1.0	41.7	15.4	0.7	40.0	13.7
8	10.7	5.75	8.3	50	23.6	1.3	43.0	16.6	0.1	41.8	15.4
9	8.5	5.75	8.6	50	23.7	1.9	43.3	17.0	0.6	42.0	15.7
10	9.6	5.75	7.7	50	23.7	1.8	44.1	17.8	0.5	42.8	16.5

5 结论

① 以一进两出T型道路交叉口为研究对象,基于质量、动量以及能量三大守恒分析,获取了道路交叉口流量分配计算非线性控制方程,并利用Matlab软件进行求解,建立交叉口的高精度流量分配算法及水深-分流量关系曲线。在此基础上,采用出水口设置方式将算法与SWMM进行集成,集成后的SWMM在道路交叉口处流量分配的计算精度得到了大幅度提升,模拟结果与Kesserwani二维模型模拟结果相比,绝对误差≤4.6%,与Mizumura经验公式计算结果相比,绝对误差≤6.7%。

② 模拟结果显示,本集成算法的计算精度显著优于SWMM普通节点和堰流分流方法,能较精确地预测交叉口分配到支路的出流量,从而准确进行

道路大排水系统的规划设计。本研究提出的流量分配公式适用于高重现期降雨下山地和丘陵城市道路排涝的情景,然而,与SWMM耦合的方法具有普适性,适用于所有城市。

参考文献:

[1] 车伍,杨正,赵杨,等. 中国城市内涝防治与大小排水系统分析[J]. 中国给水排水, 2013, 29(16): 13-19.  
CHE Wu, YANG Zheng, ZHAO Yang, et al. Analysis of urban flooding control and major and minor drainage systems in China [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(16): 13-19 (in Chinese).

[2] 周玉文. 城市排水(雨水)防涝工程的系统架构[J]. 给水排水, 2015, 41(12): 1-5.  
ZHOU Yuwen. System architecture of waterlogging

- prevention on water drainage (rainwater) system [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2015, 41(12): 1-5 (in Chinese).
- [3] 李俊奇,王耀堂,王文亮,等. 城市道路用于大排水系统的规划设计方法与案例[J]. *给水排水*, 2017, 43(4): 18-24.
- LI Junqi, WANG Yaotang, WANG Wenliang, *et al.* Urban roads for major drainage system planning-design methods and cases [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2017, 43(4): 18-24 (in Chinese).
- [4] THORND AHL S, WILLEMS P. Probabilistic modelling of overflow, surcharge and flooding in urban drainage using the first-order reliability method and parameterization of local rain series [J]. *Water Research*, 2008, 42(1/2): 455-466.
- [5] DJORDJEVIC S, SAUL A J, TABOR G R, *et al.* Experimental and numerical investigation of interactions between above and below ground drainage systems [J]. *Water Science & Technology*, 2013, 67(3): 535-542.
- [6] 徐雷,吴正松,邵知宇,等. 基于SWMM耦合模型的道路行泄通道设计方法与应用[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(1): 114-120.
- XU Lei, WU Zhengsong, SHAO Zhiyu, *et al.* Design method and application of roadway drainage path based on coupled hydraulic SWMM model[J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(1): 114-120 (in Chinese).
- [7] 王耀堂. 道路用于城市大排水系统规划设计方法与案例研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2017.
- WANG Yaotang. Planning-design Methods and Case Study on Major Drainage System Using Urban Roads [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2017 (in Chinese).
- [8] DAVID L M, DE CARVALHO R F. Designing for people's safety on flooded streets: uncertainties and the influence of the cross-section shape, roughness and slopes on hazard criteria [J]. *Water*, 2021, 13(15): 2119.
- [9] CONVERTINO M, ANNIS A, NARDI F. Information-theoretic portfolio decision model for optimal flood management [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2019, 119: 258-274.
- [10] CHEN S, GARAMBOIS P A, FINAUD-GUYOT P, *et al.* Variance based sensitivity analysis of 1D and 2D hydraulic models: an experimental urban flood case [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2018, 109: 167-181.
- [11] LAW S W, REYNOLDS A J. Dividing flow in an open channel [J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 1965, 92: 207-231.
- [12] RAMAMURTHY A S, SATISH M G. Division of flow in short open channel branches [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1988, 114(4): 428-438.
- [13] RAMAMURTHY A S, ZHU W M, CARBALLADA B L. Dividing rectangular closed conduit flows [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1996, 122(12): 687-691.
- [14] KESSERWANI G, VAZQUEZ J, RIVIÈRE N, *et al.* New approach for predicting flow bifurcation at right-angled open-channel junction [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 136(9): 662-668.
- [15] MIZUMURA K, YAMASAKA M, ADACHI J. Side outflow from supercritical channel flow [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, 129(10): 769-776.
- 作者简介:邵知宇(1975- ),女,四川广安人,博士,博导,教授,美国高级注册工程师,主要研究方向为城市防洪排涝、海绵城市、低影响开发、水文水力数值模型及优化计算等。
- E-mail: shaozhiyu@cqu.edu.cn
- 收稿日期: 2022-10-28
- 修回日期: 2023-02-06

(编辑:刘贵春)