

# 基于穷举法的雨水管渠设计流量计算方法研究

徐得潜, 王瑞雯

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** [目的] 找出雨水管渠设计流量常用计算方法——面积叠加法和流量叠加法中存在的问题, 对计算方法进行改进, 使雨水设计流量计算结果更加合理。[方法] 从下游管段暴雨强度的计算入手, 对流量叠加法进行改进, 同时提出基于穷举法的最大流量法。[结果] 实例计算表明, 除起始管段外, 改进后的流量叠加法的各管段设计流量均小于面积叠加法, 最大流量法各管段设计流量较面积叠加法平均增长 7.0%, 最大增长 13.0%。[结论] 运用最大流量法对雨水管渠进行设计, 计算结果更合理, 更安全, 对缓解城市内涝具有重要意义。

**关键词:** 雨水管渠; 设计流量; 流量叠加法; 穷举法; 最大流量法

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1000-288X(2018)03-0158-04

**中图分类号:** TU992

**文献参数:** 徐得潜, 王瑞雯. 基于穷举法的雨水管渠设计流量计算方法研究[J]. 水土保持通报, 2018, 38(3):158-161. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2018.03.025. Xu Deqian, Wang Ruiwen. Discharge design in storm sewer based on exhaustion method[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(3):158-161.

## Discharge Design in Storm Sewer Based on Exhaustion Method

XU Deqian, WANG Ruiwen

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China)

**Abstract:** [Objective] To solve the issues in area superposition and flow superposition method in order to improve the discharge design in storm sewer. [Methods] Flow superposition method was modified by correcting the calculation method of storm intensity in downstream sewer. A maximum flow method based on exhaustion method was proposed. [Results] A case study indicated that the design discharge with improved flow superposition method was less than that of area superposition method, except for the initial sewer. The average design discharge based on maximum flow method was increased by 7.0%, and the maximum increase rate was 13.0%. [Conclusion] Maximum flow method is more reasonable and safer, and is of great importance for relieving urban flooding.

**Keywords:** storm sewer; design discharge; flow superposition method; exhaustion method; maximum flow method

雨水管渠设计流量是确定管渠断面尺寸及敷设坡度的重要依据。中国规范<sup>[1]</sup>规定计算雨水设计流量采用推理公式, 当汇水面积超过 2 km<sup>2</sup> 时宜采用数学模型法。国外排水设计规范与之类似, 在汇水面积不大或汇流时间不长的情况下, 也以推理公式作为雨水设计流量的计算方法<sup>[1-2]</sup>。

运用推理公式计算雨水管渠设计流量多采用面积叠加法与流量叠加法<sup>[3]</sup>。这 2 种方法均基于极限强度理论, 认为降雨强度  $q$ , 降雨历时  $t$  和汇水面积  $F$  均取相应的极限值时, 雨水管渠的设计流量值达到最大<sup>[4]</sup>。实践表明, 产生流域最大径流的造峰历时  $t_{\max}$

往往小于全面积最远点的集流时间, 换句话说, 以全面积最远点的集流时间为降雨历时计算出的雨水流量很可能小于实际流过设计断面的最大流量<sup>[4-5]</sup>, 这也是造成城市内涝频发的主要原因之一。因此, 有必要在现行推理公式基础上对雨水管渠设计流量的计算方法进行改进。

## 1 雨水管渠设计流量常用计算方法及存在问题

### 1.1 面积叠加法

面积叠加法是将设计管段本段及上游的所有汇

水面视为一个整体,取第一块汇水面上最远点的雨水流达设计断面的集流时间为降雨历时,即通过计算全面积上的平均降雨强度来计算设计流量。虽然其降雨历时中包含了管渠中的雨水流行时间,但它实际上假设雨水是在地面汇集后进入计算管段的<sup>[6]</sup>。这一假设不符合降雨汇流的实际情况,设上、下游管段汇水面积分别为  $F_1, F_2$ , 上、下游降雨强度分别为  $q_1, q_2$ , 在各汇水面径流系数相同的前提下,当  $F_1/F_2 > q_2/q_1$  时,用面积叠加法计算甚至会出现下游管段计算流量小于其上游管段的结果<sup>[7]</sup>。

### 1.2 流量叠加法

流量叠加法是按照雨水在地面和管内的实际流动情况计算设计流量的,即上游汇水面上汇集的雨水在上游就已进入管道内,雨水是在管道内汇集,所计算的各管段暴雨强度与该段设计断面集水时间一致,设计管段的设计流量等于上游管段的传输流量与本管段产生的流量之和<sup>[3]</sup>。

### 1.3 存在问题

流量叠加法中,下游管段的降雨强度计算普遍存在一个误区。假设起始段管渠的地面集水时间为  $t_1$ , 下游某段管渠的地面集水时间为  $t_x$ , 起始管段至下游该管段设计断面的管渠内雨水流行时间为  $t_{1x}$ 。由于暴雨强度公式中的时间代表降雨的历时,计算出的强度值为该历时平均降雨强度,而非某一时刻的瞬时强度,若不加讨论地将下游该管段汇流的降雨的历时视为  $(t_1 + t_{1x})$ , 直接代入暴雨强度公式<sup>[1]</sup> 计算其降雨强度  $q_x$ , 并不一定符合实际情况。设  $t$  时段内的平均降雨强度为  $q(t)$ , 当  $t_x \geq t_1 + t_{1x}$  时, 下游该管段的降雨强度即为  $q(t_1 + t_{1x})$ , 此时该管段仅有部分汇水面积参与汇流; 而当  $t_x < t_1 + t_{1x}$  时, 下游管段全部汇水面积参与汇流, 汇集  $(t_1 + t_{1x} - t_x) - (t_1 + t_{1x})$  时段内的降雨, 应按下式计算下游管段的降雨强度, 对流量叠加法进行改进:

$$q_x = \frac{q(t_1 + t_{1x}) \times (t_1 + t_{1x}) - q(t_1 + t_{1x} - t_x) \times (t_1 + t_{1x} - t_x)}{t_x} \quad (1)$$

除上述问题外,流量叠加法和面积叠加法还存在一个共性问题:如果将每一单块汇水面上汇流的雨水流量最大(根据分析,必为降雨历时等于该段地面集水时间)视为该段汇流达到峰值,那它们均未考虑除第一块汇水面外的其他汇水面达到汇流峰值的情况。这2种方法中汇水面积与降雨历时直接取极限值,即只考虑第一块汇水面的汇流达到峰值,认为此时整个雨水管渠的设计流量值全部达到最大。显然这样的计算思路于实际情况而言并不相符,某段管渠

内出现最大流量值的时间很可能发生在本段或上游其他汇水面达到汇流峰值之时,此时上游为部分或全部面积产生汇流。笔者就这一问题,提出一种基于穷举法的雨水管渠设计流量计算新方法——最大流量法。

## 2 基于穷举法的最大流量法

### 2.1 计算思路

最大流量法就是考虑各管段汇水面积与降雨历时的各种可能取值,本质上是一种穷举法,先穷举出各个汇水面达到其汇流峰值时各管段可能出现的雨水流量值,再分别取其最大值作为设计流量。因而最大流量法计算出的各管段最大设计流量,并非发生在同一时刻。

最大流量法计算思路为:依次假设雨水管渠的各节点为起始点,分别进行整个雨水管渠的设计计算。由于每一管段的最大设计流量必然出现在其本段或其上游某段的汇水面达到汇流峰值时,因而当起始点取第  $J_f$  节点时,其上游各管段的设计参数应已确定,此时  $J_f$  至  $J_{f+1}$  管段可视为第一管段,该管段的汇流达到峰值,据此计算雨水流量。可以看出,流量叠加法是最大流量法中起始点取第一个节点时的特殊情况。

### 2.2 计算方法

当起始点取第  $J_f$  节点时,需设计计算的为该段及其下游各管段,其中,汇流峰值对应的本管段设计流量等于本段产生的雨水流量与传输的上游部分或全部汇水面积流量之和。峰值段下游管段的设计流量按照修正后的流量叠加法进行计算。

(1) 汇流峰值对应管段的设计流量计算。汇流峰值对应的本管段汇水面积产生的流量用暴雨强度公式和推理公式直接计算,其汇水时间等于该段地面集水时间。

汇流峰值对应管段传输的上游部分或全部汇水面积流量根据峰值管段地面集水时间,上游管段地面集水时间、汇水面积,以及上游管段至峰值管段的管内流行时间进行计算。假设峰值出现在第  $J_f$  至  $J_{f+1}$  管段所对应的汇水面,其地面集水时间为  $t_f$ , 上游的某一管段  $J_s$  至  $J_{s+1}$  的地面集水时间为  $t_s$ , 汇水面积为  $F_s$ ,  $J_s$  至  $J_f$  的管渠内雨水流行时间为  $t_{sf}$ , 则上游管段  $J_s$  至  $J_{s+1}$  的实际汇流时间为  $(t_f - t_{sf})$ , 此时需分2种情况讨论:①若  $t_f - t_{sf} \leq 0$ , 上游管段传输的雨水流量为零;②若  $t_f - t_{sf} > 0$ , 则令  $t_f - t_{sf} = \min(t_s, t_f - t_{sf})$ , 上游管段实际汇水面积  $F_s' \leq F_s$ , 如缺乏降雨汇流资料,可将其实际汇水面积视为随降雨历时均

匀增长,此时上游第  $J_s$  至  $J_{s+1}$  段的雨水流量  $Q_s$  为:

$$Q_s = q_s \cdot \Psi_s \cdot F_s' = q(t_f - t_{sf}) \cdot \Psi_s \cdot \frac{t_f - t_{sf}}{t_s} F_s \quad (2)$$

式中:  $q_s$ ——上游  $J_s$ — $J_{s+1}$  管段的设计暴雨强度,用暴雨强度公式计算 [ $L/(s \cdot \text{hm}^2)$ ];  $\Psi_s$ ——上游  $J_s$  至  $J_{s+1}$  管段汇水面的径流系数。

(2) 汇流峰值下游各管段的流量计算。对汇流峰值下游各管段雨水流量的计算采用修正后的流量叠加法,每段设计流量为转输的上游管段总流量加上本段雨水流量。

### 2.3 上游管内流速与流行时间计算

采用最大流量法计算峰值管段或下游管段流量时,设计管段上游各段均未达到相应的最大流量值,即上游管渠内为非满流。对于圆形管道,充满度  $> 0.5$  时,非满流下的流速大于满管流流速<sup>[7]</sup>,此时若仍采用满流流速求管内流行时间,会导致其计算值偏大,流量的计算值偏小,不安全,因而需按照非满流情况计算上游管段的实际流速。对于雨水箱涵,实际的水力半径与流速值计算较为简便,可以直接计算。圆形管道的非满流流速计算较为复杂,在已知管道直径  $D$ ,水力坡度  $I$ ,曼宁粗糙系数  $n$  和设计流量  $Q$  的情况下,实际流速的求解有以下几种方法:

- (1) 查询圆形管道非满流水力计算表或图<sup>[7]</sup>。
- (2) 采用近似公式求解<sup>[8]</sup>。
- (3) 求出管道的充满角后直接求流速。非满流

圆形管道的充满角  $\theta$  的隐函数计算式<sup>[7]</sup>为

$$\theta = \left[ \frac{(\theta - \sin\theta)^{5/3} D^{8/3} I^{1/2}}{20.16 \cdot n \cdot Q} \right]^{3/2} \quad (3)$$

求解上式可采用以下方法: ①构造  $f(\theta) - C = 0$  ( $C$  为常数),缩小  $\theta$  的取值范围后利用线性插值公式近似计算; ②移项使  $g(\theta) = 0$ ,使用牛顿迭代法求解; ③利用 MATLAB 软件直接求解等。得到  $\theta$  值后,即可求得上游管道的实际水力半径与实际流速值。

最大流量法中,上游管段至峰值管段的管渠内雨水流行时间  $t_{sf}$  的计算既是重点,也是难点。在管长、管径及坡度已定的情况下,上游管渠内雨水流行时间由其流速决定,但流速取决于上游管段流量,而流量又是由管内流行时间推求出的,因此在计算上游雨水流量时需要通过逐段试算迭代来确定。

利用 MATLAB 进行编程,可以快速地实现上游管道充满角与实际流速的计算,以及上游管内流行时间的迭代,从而计算出各管段设计流量值。

## 3 实例分析

合肥市某道路雨水主干管长约 2.8 km,总汇水面积约 58  $\text{hm}^2$ ,综合径流系数  $\Psi = 0.5$ ,设计重现期  $P = 2$  a,地面集水时间  $t_1 = 10$  min,粗糙系数  $n = 0.013$ 。合肥市暴雨强度公式为:

$$i = \frac{36.61 \times (1 + 0.77 \lg P)}{(t + 23.15)^{0.93}} \quad (4)$$

该雨水主干管的概化过程如图 1 所示。

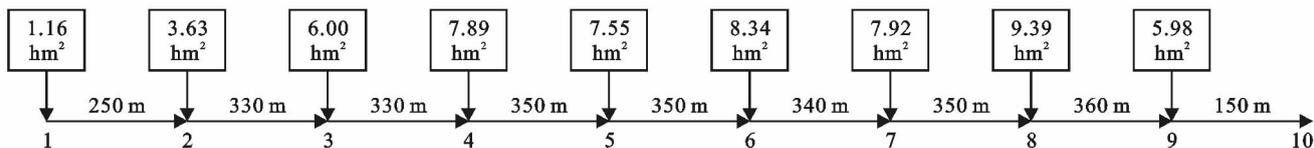


图 1 合肥市某道路雨水主干管概化过程

使用 MATLAB 编程后,分别用面积叠加法、修正后的流量叠加法和最大流量法计算该雨水主干段

设计流量。3 种方法的设计过程中,保持各段管径不变,只改变坡度。结果见表 1—3。

表 1 面积叠加法计算结果

设计管段 编号	管长 $L$ / m	累计汇水 面积 $F$ / $\text{hm}^2$	管内雨水流行 时间/min		单位面积 径流量 $q_0$ / ( $L \cdot s^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	设计流量 $Q$ / ( $L \cdot s^{-1}$ )	管径 $D$ / mm	坡度 $I$ / ‰	满流流速 $v$ / ( $m \cdot s^{-1}$ )	管道输水 能力 $Q'$ / ( $L \cdot s^{-1}$ )
			$\sum t_2$	$t_2$						
1—2	250	1.16	0	4.84	145.14	168.52	500	2.0	0.86	168.87
2—3	330	4.80	4.84	5.58	127.84	613.13	900	1.2	0.99	627.11
3—4	330	10.79	10.42	4.23	112.55	1 214.68	1 100	1.6	1.30	1 236.56
4—5	350	18.69	14.65	4.18	103.26	1 929.59	1 350	1.4	1.40	1 997.07
5—6	350	26.23	18.83	4.04	95.52	2 505.85	1 500	1.3	1.44	2 548.72
6—7	340	34.57	22.88	3.63	89.09	3 080.04	1600	1.4	1.56	3 141.65
7—8	350	42.49	26.50	4.08	84.04	3 570.88	1 800	1.0	1.43	3 634.96
8—9	360	51.88	30.59	3.68	79.02	4 099.23	1 800	1.3	1.63	4 144.49
9—10	150	57.86	34.27	1.43	75.00	4 339.18	1 800	1.5	1.75	4 451.90

表2 修正后的流量叠加法计算结果

设计管段编号	管长 $L/m$	本段汇水面积 $F/hm^2$	管内雨水流行时间/min		单位面积径流量 $q_0/(L \cdot s^{-1} \cdot hm^{-2})$	本段流量 $Q_i/(L \cdot s^{-1})$	设计流量 $Q/(L \cdot s^{-1})$	管径 $D/mm$	坡度 $I/\%$	满流流速 $v/(m \cdot s^{-1})$	管道输水能力 $Q'/(L \cdot s^{-1})$
			$\sum t_2$	$t_2$							
1—2	250	1.16	0	4.84	145.14	168.52	168.52	500	2.0	0.86	168.87
2—3	330	3.63	4.84	5.58	107.50	390.73	559.25	900	1.2	0.99	627.11
3—4	330	6.00	10.42	4.23	80.36	481.87	1 041.12	1 100	1.6	1.30	1 236.56
4—5	350	7.89	14.65	4.18	66.36	523.80	1 564.92	1 350	1.4	1.40	1 997.07
5—6	350	7.55	18.83	4.04	55.98	422.54	1 987.46	1 500	1.3	1.44	2 548.72
6—7	340	8.34	22.88	3.63	48.20	401.91	2 389.37	1 600	1.4	1.56	3 141.65
7—8	350	7.92	26.50	4.08	42.60	337.25	2 726.62	1 800	1.0	1.43	3 634.96
8—9	360	9.39	30.59	3.68	37.45	351.44	3 078.06	1 800	1.3	1.63	4 144.49
9—10	150	5.98	34.27	1.43	33.61	201.06	3 279.12	1 800	1.5	1.75	4 451.90

表3 最大流量法计算结果

设计管段编号	管长 $L/m$	本段汇水面积 $F/hm^2$	设计流量 $Q/(L \cdot s^{-1})$	管径 $D/mm$	坡度 $I/\%$	满流流速 $v/(m \cdot s^{-1})$	管道输水能力 $Q'/(L \cdot s^{-1})$	与面积叠加法相对误差/ $\%$	起始节点
1—2	250	1.16	168.52	500	2.0	0.86	168.87	0.0	—
2—3	330	3.63	631.98	900	1.3	1.03	652.72	3.1	2
3—4	330	6.00	1 258.13	1 100	1.7	1.34	1 274.61	3.6	2
4—5	350	7.89	2 031.52	1 350	1.5	1.44	2 067.17	5.3	3
5—6	350	7.55	2 710.81	1 500	1.5	1.55	2 737.76	8.2	3
6—7	340	8.34	3 335.85	1 600	1.6	1.67	3 358.56	8.3	3
7—8	350	7.92	3 944.20	1 800	1.2	1.56	3 981.90	10.5	4
8—9	360	9.39	4 559.74	1 800	1.6	1.81	4 597.90	11.2	4
9—10	150	5.98	4 902.36	1 800	1.9	1.97	5 010.45	13.0	4

从计算结果可以看出,除第一管段外,修正后的流量叠加法设计流量计算结果均小于面积叠加法,最大流量法设计流量计算结果较面积叠加法平均增长7.0%,其中末端管段设计流量增长13.0%。最大流量法与面积叠加法的相对误差到下游逐渐提高,是因为从起始点到设计断面的管段长度不断增加,导致面积叠加法中汇流时间不断增大、暴雨强度值不断降低,在汇水面积增长速度较均匀的情况下,计算出的流量值与最大流量法的差距逐渐拉大。

## 4 讨论与结论

(1) 面积叠加法作为计算雨水管渠设计流量的传统方法,过程较简单,但由于其假设前提不完全合理,故而计算结果可能不合理或较实际值偏小。

(2) 流量叠加法经修正后趋于合理,但其计算结果甚至小于面积叠加法,故仍需改进。

(3) 基于穷举法的最大流量法在一定程度上修正了传统计算方法的局限性,在考虑到雨水汇流的实际情况的同时,兼顾了降雨历时的各种可能取值。就工程实例的计算结果,较面积叠加法而言,最大流量

法各段设计流量值平均增长7.0%。因而,运用基于穷举法的最大流量法对雨水管渠进行设计,计算结果更合理,更安全,对缓解城市内涝具有重要意义。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 住房和城乡建设部. GB50014-2006 室外排水设计规范[S]. 2016年版. 北京:中国计划出版社,2016.
- [2] 王磊,周玉文. 国内外城市排水设计规范比较研究[J]. 中国给水排水,2012,28(8):23-27.
- [3] 刘宇红,南军,钟丹. 给水排水管道系统[M]. 北京:电子工业出版社,2014.
- [4] 王继明. 给水排水管道工程[M]. 北京:清华大学出版社,1989.
- [5] 北京市市政工程设计研究总院. 给水排水设计手册:第5册[M]. 2版. 北京:中国建筑工业出版社,2004.
- [6] 陈静,何伟. 关于城市雨水管渠水力计算方法的探讨[J]. 中国给水排水,2014,30(9):155-158.
- [7] 严煦世,刘遂庆. 给水排水管网系统[M]. 3版. 北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [8] 韩会玲,孟庆芝. 非满流圆管均匀流水力计算的近似数值解法[J]. 给水排水,1994(10):25-26.