

基于设计暴雨法的CSO调蓄池池容计算方法探讨

莫俊锋¹, 王文亮², 白献宇³, 付振³

(1. 北京建筑大学 城市雨水系统与水环境教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 北京未来城市
设计高精尖创新中心, 北京 100044; 3. 北控技术服务<广东>有限公司, 广东 广州
511300)

摘 要: 我国当前采用经验参数法计算合流制溢流(CSO)调蓄池池容,该方法存在参数取值合理性不足、CSO控制效果不清等问题。基于暴雨强度公式和合理法,提出与溢流频次控制标准相对应的设计暴雨,并分别根据简化的三角形径流过程线、由设计降雨过程线得到的径流过程线,给出了CSO溢流口溢流量(调蓄池池容)和污水处理厂厂前溢流量计算方法。以北京为例,拟合得到CSO调蓄池池容与径流截流比、历时24 h设计降雨径流量之间的关系曲线,可供北京城区使用。设计暴雨法可在一定程度上弥补我国当前参数法的不足,为CSO调蓄池池容的合理设计提供参考。

关键词: 设计暴雨法; 合流制溢流; 调蓄池池容

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2020)08-0077-05

Determination Method of CSO Calculation Volume of Storage Tank Based on Design Rainstorm Method

MO Jun-feng¹, WANG Wen-liang², BAI Xian-yu³, FU Zhen³

(1. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Beijing Advanced Innovation Center for Future Urban Design, Beijing 100044, China; 3. Beijing Enterprises Technical Service <Guangdong> Co. Ltd., Guangzhou 511300, China)

Abstract: At present, empirical parameter method is adopted to calculate the combined overflow system (CSO) storage tank volume in China. This method has some problems, such as the lack of rationality of parameter value and the control effect of CSO is not clear. Based on the storm intensity formula and reasonable method, the corresponding design rainstorm for overflow frequency control standards was proposed. According to the simplified triangular runoff line and the runoff line obtained from the design rainfall process line, the calculation methods of CSO overflow (storage tank capacity) and pre-plant overflow in WWTP were given respectively. Taking Beijing as an example, the relationship curve between the capacity and runoff diversion ratio of the CSO storage tank volume, as well as the designed rainfall runoff of 24 h was obtained by fitting, which can be used in Beijing urban area. The design rainstorm method can make up for the deficiency of the current empirical parameter method in China to some extent, and can provide reference for the reasonable design of CSO storage tank volume.

Key words: design rainstorm method; combined sewer overflow; storage tank volume

调蓄是重要的合流制溢流(CSO)控制措施之一,调蓄规模的确定方法主要有经验参数法^[1](如截流倍数、调蓄雨量)、设计暴雨法^[2]、模型模拟法^[3]等。在合流制排水系统(CSS)运行工况、历史连续降雨数据、典型溢流事件及其污染特征等数据具备的情况下,宜优先采用模型连续模拟法对合流制溢流特征、CSO对受纳水体的影响进行评估,在此基础上制定或改进既有CSO控制方案^[4];基于长期大量研究和实践经验,对溢流频次、体积控制标准及其相应的溢流污染物总量控制效果,以及对受纳水体的污染控制效果具备基本判断的基础上,在条件不完全具备的情况下,也可选择较为简明的参数法或设计暴雨法确定CSO控制设施规模^[2]。

我国目前的设计规范采用经验参数法,基于截流倍数 n_1 、调蓄设施设计进水时间 t_i 确定CSO调蓄池池容^[1],但并未给出目标截流倍数、计算调蓄规模与CSO控制效果的对应关系,难以进行“费用-效果”分析与项目决策,换言之,在给定控制标准下,也无法用该方法进行计算;此外,关于调蓄设施设计进水时间,规范提出根据实际CSO初期冲刷特征确定,推荐采用0.5~1.0 h,事实上,不同地区或同一地区不同溢流口的溢流特征(包括规范所指“初期冲刷”特征)均受当地实际降雨条件、管网系统特征等多重因素的影响,不确定性较大,难以根据“初期冲刷”特征确定 t_i 取值,给出适用于全国的 t_i 推荐值的合理性也需要论证。

笔者提出基于设计暴雨法的小流域CSO调蓄池池容计算方法,可在一定程度上弥补当前经验参数法的不足,完善CSO控制设施的规模计算方法。

1 设计暴雨

设计暴雨法采用暴雨强度公式和合理法(推理公式法)进行设计降雨径流计算。由于我国规范明确提出^[1],合理法仅适用于小于2 km²汇水面积上的设计径流峰值计算,因此,该法仅适用于小流域CSO调蓄池池容计算。美国EPA也明确指出,设计暴雨法适用于管网系统较为简单、溢流口数量较少、管网系统运行情况 and 溢流特征较清晰,且服务人口少于75 000人的小型合流制社区CSO调蓄规模的确定,该法较模型模拟法前期投入低,便于操作^[2]。

当溢流口年均溢流频次为1~4次时,CSO控制

系统应能储存、处理或削减0.25~1年一遇、历时1 h设计降雨强度和历时24 h设计降雨量条件下,合流制系统产生的溢流量^[2],CSO频次控制标准与对应的设计暴雨如表1所示。

表1 CSO频次控制标准与对应的设计暴雨

Tab.1 CSO frequency control standards and the design storm

CSO 频次控制标准/(次·a ⁻¹)		4	3	2	1
设计暴雨	设计降雨重现期/a	0.25	0.33	0.5	1
	设计降雨历时、强度、雨量、雨型	历时1 h设计降雨强度、历时24 h设计降雨量与雨型			

以北京为例,历时1 h设计降雨强度计算如下:

$$i_1 = \frac{60A_1(1 + Clg P)}{167(t + b)^n} = \frac{60 \times 1602(1 + 1.037lg P)}{167(60 + 11.593)^{0.681}} \quad (1)$$

式中 i_1 ——历时1 h设计降雨强度,mm/h

t ——设计降雨历时,5 min < t ≤ 1 440 min

A_1 、 C 、 b 、 n ——暴雨强度公式参数

P ——设计重现期,2~100年

需指出的是,式(1)并不适用于≤1年一遇设计暴雨的计算,即北京目前尚无低重现期(小于2年一遇)设计暴雨^[5],在此暂且按式(1)进行估算。

历时1 h、2 h、3 h、……、24 h设计降雨量 H_j 根据下式进行计算:

$$H_j = \frac{tA_1(1 + Clg P)}{167(t + b)^n} = \frac{t \times 1602(1 + 1.037lg P)}{167(t + 11.593)^{0.681}} \quad (2)$$

24 h设计雨型的雨峰位置位于第17时段(最小时段为1 h,共24个时段)^[5],采用“交替区块法”确定1年一遇24 h设计暴雨的设计降雨过程线^[6],如图1所示。

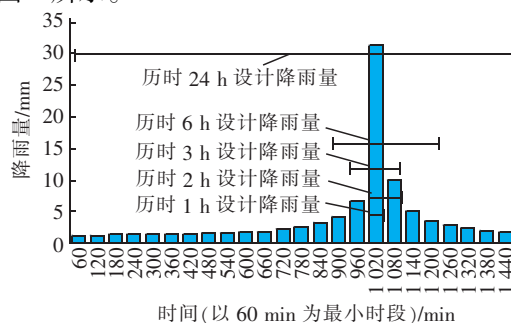


图1 北京1年一遇24 h设计暴雨降雨过程线

Fig.1 Hyetograph for 1-year 24 h design storm in Beijing

历时1 h设计降雨径流峰值流量 Q_R (m^3/d)、历时24 h设计降雨径流量 V_R (m^3)根据合理法计算:

$$Q_R = 240 \Psi F i_1 \quad (3)$$

$$V_R = 10 \Psi F H_{24} \quad (4)$$

式中 Ψ ——径流系数

H_{24} ——历时24 h设计降雨量, mm

F ——合流制子排水分区面积, hm^2

2 计算方法

城市建成区往往包含若干合流制管网系统和分流制管网系统,由管网末端溢流排放口上溯可将其划分为若干合流制子排水分区和分流制子排水分区,如图2所示。

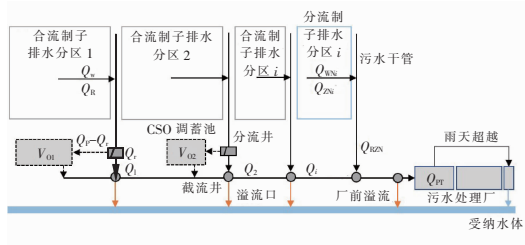


图2 排水系统雨天溢流控制示意

Fig. 2 Wet weather CSO control

在旱天,各排水分区内的污水均送往污水处理厂进行处理。在雨天,合流制子排水分区的部分雨水通过截流干管送往污水处理厂,超量雨污水则在截流井处或厂前发生溢流并排入接纳水体,为有效控制溢流,可采用调蓄、就地处理、截流至污水处理厂进行一级或全过程处理等方式,将部分溢流雨污水进行有效处置,降低溢流污染。在雨天,对于分流制子排水分区内的污水管网,由于外水(入渗/入流)进入,同样会有一定的超量水送入污水处理厂,将一定程度上增加雨天溢流总量。

合流制与分流制子排水分区的旱天平均流量、分流制子排水片区污水干管雨天最大总输流量及污水处理厂旱天平均来水量可通过实测方法确定。CSO水力控制设施(如截流井、分流井、泵站等)的有效截流能力受下游截流干管的输运能力等影响,可通过实测或对截流构筑物进行水力计算确定。

2.1 溢流口溢流量

对于某合流制子排水分区,径流过程线见图3,为简化计算,径流过程线采用三角形径流过程线。

由图3可知:

$$\frac{V_0}{V_R} = \left(1 - \frac{Q_r - Q_w}{Q_R}\right)^2 \quad (5)$$

式中 V_0 ——溢流口溢流量, m^3

Q_r ——CSO水力控制设施的有效截流能力, m^3/d

Q_w ——旱天平均流量, m^3/d

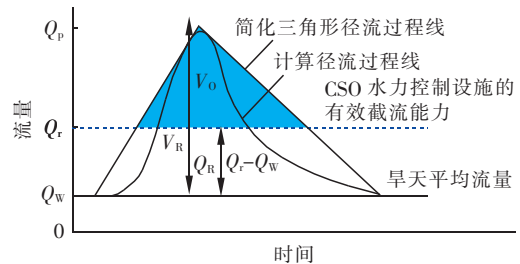


图3 溢流量计算

Fig. 3 Overflow volume calculation

式(5)可改写为:

$$V_0 = V_R (1 - r)^2 \quad (6)$$

式中 r ——径流截流比, $r = \frac{Q_r - Q_w}{Q_R}$

由于上述计算是基于简化的三角形径流过程线,具体项目计算时,可根据图1所示设计降雨过程线计算得到的径流过程线对计算结果进行修正:

$$V_0 = k V_R (1 - r)^2 = k_f V_R \quad (7)$$

式中 k ——修正系数

f ——溢流比, $f = (1 - r)^2$

2.2 污水处理厂厂前溢流量

各合流制子排水分区的最大转输径流量 Q_i 按下式计算:

$$Q_i = \min[Q_R, (Q_r - Q_w)] \quad (8)$$

合流制子排水分区最大总转输径流量 Q_{RZ} 按下式计算:

$$Q_{RZ} = \sum Q_i \quad (9)$$

各分流制子排水分区污水干管的雨天最大总转输径流量 Q_{RZN} 按下式计算:

$$Q_{RZN} = \sum (Q_{ZNi} - Q_{WNi}) \quad (10)$$

式中 Q_{ZNi} ——各分流制子排水分区污水干管雨天最大转输流量, m^3/d

Q_{WNi} ——各分流制子排水分区污水干管旱天平均流量, m^3/d

转输至污水厂最大总径流量 Q_{RZT} 按下式计算:

$$Q_{RZT} = Q_{RZ} + Q_{RZN} \quad (11)$$

污水处理厂径流处理比 α 按下式计算:

$$\alpha = (Q_{PT} - Q_{WT}) / Q_{RZT} \quad (12)$$

式中 Q_{PT} ——污水处理厂一级处理能力, m^3/d

Q_{WT} ——污水处理厂旱天平均来水量, m^3/d

厂前溢流比 β 参照各溢流口溢流比进行计算:

$$\beta = (1 - \alpha)^2 \quad (13)$$

合流制区域雨天总径流来水量 V_{RdT} 按下式计算:

$$V_{RdT} = \sum (V_{Ri} - V_{Oi}) \quad (14)$$

式中 V_{Ri} ——各合流制子排水分区历时 24 h 设计降雨径流量, m^3 , 按式(4)计算

V_{Oi} ——各合流制子排水分区溢流口溢流量, m^3 , 按式(7)计算

分流制区域总径流来水量 V_{RNT} 以简化的三角形径流过程线进行计算:

$$V_{RNT} = \sum (Q_{ZNi} - Q_{WNi})/2 \quad (15)$$

污水厂雨天总径流来水量 V_{RT} 按下式计算:

$$V_{RT} = V_{RdT} + V_{RNT} \quad (16)$$

厂前总溢流量 V_{OWWTP} 按下式计算:

$$V_{OWWTP} = \beta V_{RT} \quad (17)$$

3 计算示例

以北京为例, 历时 1 h 设计降雨强度 $i = 31.4$ mm/h, 历时 24 h 设计降雨量 $H = 97.07$ mm, 某片区由 1 个面积为 47.2 hm^2 的合流制子排水分区和 1 个分流制子排水分区构成, 合流制子排水分区不透水面积率为 53.4%, 径流系数为 0.47, 1 h 设计降雨径流峰值流量 $Q_R = 167\ 179$ m^3/d , 旱天平均流量 $Q_W = 12\ 096$ m^3/d , 管网系统中截流井、分流井等 CSO 水力控制设施的有效截流能力 $Q_r = 49\ 248$ m^3/d , 合流制区域最大总转输径流量 $Q_{RZ} = \sum \text{MIN}[167\ 179, (49\ 248 - 12\ 096)] = 37\ 152$ m^3/d , 24 h 设计降雨径流量 $V_R = 21\ 534$ m^3 。径流截流比 $r = (49\ 248 - 12\ 096)/167\ 179 = 0.22$, 溢流比 $f = (1 - 0.22)^2 = 0.6$, 溢流口溢流量即调蓄池池容为 $V_O = 0.6 \times 21\ 534 = 12\ 921$ m^3 。根据历时 24 h 设计降雨过程线, 按式(4)计算各时段径流量, 得到径流过程线如图 4 所示, 计算得到溢流口溢流量为 $6\ 108$ m^3 , 即径流截流比为 0.22 时, 溢流口溢流量的修正系数 $k = 6\ 108/12\ 921 = 0.47$, 可知在该特定雨型条件下, 采用简化三角形径流过程线计算得到的溢流口溢流量偏差较大。对于该案例, 采用模型模拟连续模拟法计算得到的溢流口溢流量及调蓄池池容为 $4\ 700$ m^3 [3], 与采用设计降雨过程线计算得到的溢流量较为接近, 存在一定差异的原因主要是设计暴雨法和

SWMM 模型连续模拟法在降雨边界条件、降雨径流计算方法(合理法、运动波法)等方面存在差异, 导致计算结果的一致性不足, 需对径流系数、排水分区特征宽度等关键水文参数进行修正。

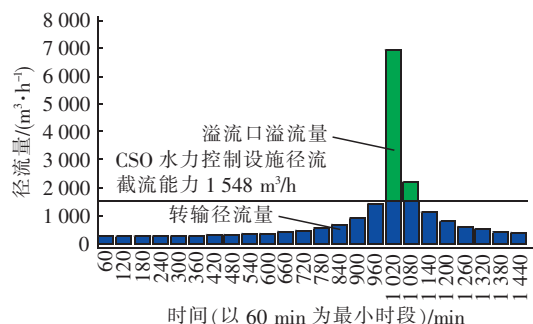


图 4 根据降雨过程线计算径流过程线计算合流制子排水分区溢流量

Fig. 4 Overflow volume calculation using hydrograph from

hydrograph

由上述设计暴雨法计算方法可知, 设计降雨雨型一定的情况下, 溢流口溢流比 (V_O/V_R) 仅与径流截流比 r 相关, 分别采用式(5)即简化的三角形径流过程线方法和基于图 1 所示历时 24 h 设计降雨过程线计算径流过程线的方法, 绘制径流截流比与溢流比的关系曲线, 如图 5 所示。

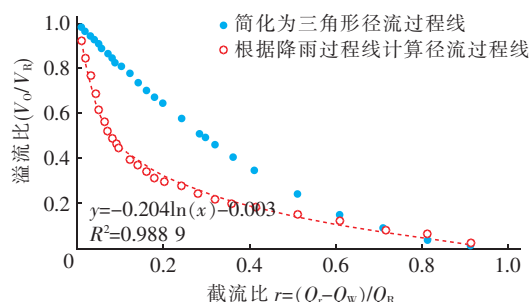


图 5 径流截流比与溢流口溢流比关系

Fig. 5 Relationship between diversion ratio and overflow ratio

由图 5 可知, 两种方法计算结果的差异较大, 此时, 应采用后者计算调蓄池池容, 拟合径流截流比与溢流比的关系见下式(可在北京地区推广使用):

$$V_O = V_R (-0.204 \ln \frac{Q_r - Q_W}{Q_R} - 0.003) \quad (18)$$

分流制区域污水干管旱天平均流量 $Q_{WN} = 8\ 000$ m^3/d , 雨天最大转输流量 $Q_{ZN} = 12\ 000$ m^3/d , 雨天最大总转输径流量 $Q_{RZN} = 12\ 000 - 8\ 000 = 4\ 000$ m^3/d 。

污水厂旱天平均来水量 $Q_{WT} = 12\ 096 + 8\ 000 =$

20 096 m³/d,一级处理能力 $Q_{PT}=26\ 144\text{ m}^3/\text{d}$,污水厂径流量一级处理能力 $Q_{RT}=26\ 144-20\ 096=6\ 408\text{ m}^3/\text{d}$,转输至污水处理厂的最大总径流量 $Q_{RZT}=37\ 152+4\ 000=41\ 152\text{ m}^3/\text{d}$,处理比 $\alpha=(26\ 144-20\ 096)/41\ 152=0.15$,厂前溢流比 $\beta=(1-0.15)^2=0.73$;合流制区域总径流来水量 $V_{RdT}=21\ 534-6\ 108=15\ 426\text{ m}^3$,分流制区域总径流来水量 $V_{RNT}=(12\ 000-8\ 000)/2=2\ 000\text{ m}^3$,雨天总径流来水量 $V_{RT}=15\ 426+2\ 000=17\ 426\text{ m}^3$,厂前总溢流量 $V_{OWWTP}=0.73\times 17\ 426=12\ 721\text{ m}^3$ 。

4 结论与建议

① 设计暴雨法适用于计算小流域CSO调蓄池容,根据溢流频次控制标准,设计暴雨法基于暴雨强度公式计算历时1 h设计降雨强度,并采用“交替区块法”获取 ≤ 1 年一遇重现期、总历时24 h最小时段1 h的设计降雨过程线,因此,当地应具备适用于小重现期长历时的暴雨强度公式。当然,也可采用其他方法得到的24 h设计降雨过程线计算。

② 无论采用设计暴雨法还是模型模拟法,均需要较为准确的合流制管网系统与污水处理厂一体化运行工况数据,尤其是管网系统旱天平均流量,截流井、分流井、泵站等CSO水力控制设施的有效截流能力,污水处理厂一级处理能力、分流制污水干管雨天最大转输流量等基础数据,这些数据的准确性对计算结果的影响较大。

③ 各地采用设计暴雨法时,应分别基于简化的三角形径流过程线、由设计降雨过程线计算得到的径流过程线两种方法计算CSO调蓄池容,计算结果差异较大时,应采用后者计算,或采用后者对前者进行修正。设计降雨过程线一定时,溢流口溢流比仅与径流截流比相关,以北京为例拟合得到的调蓄池容计算公式,可供北京城区使用,各地可参照绘制。

参考文献:

- [1] GB 50014—2006,室外排水设计规范[S]. 2016年版. 北京:中国计划出版社,2017.
GB 50014—2006, Code for Design of Outdoor Wastewater Engineering [S]. 2016 ed. Beijing: China Planning Press, 2017 (in Chinese).
- [2] USEPA. Green Long-Term Control Plan—EZ Template: A Planning Tool for Combined Sewer Overflow Control in

Small Communities [M]. Washington: Office of Water, EPA, 2011.

- [3] 王文亮,王二松,贾楠,等. 基于模型模拟的合流制溢流调蓄与处理设施规模设计方法探讨[J]. 给水排水, 2018, 44(10): 31—34.

Wang Wenliang, Wang Ersong, Jia Nan, *et al.* Discussion on scale design method of concurrent overflow storage and treatment facilities based on model simulation [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(10): 31—34 (in Chinese).

- [4] 贾楠,王文亮,车伍,等. 美国合流制溢流控制标准分析及对我国的启示[J]. 中国给水排水, 2019, 35(7): 121—127.

Jia Nan, Wang Wenliang, Che Wu, *et al.* Analysis of combined sewer overflow control standards of the United States and its enlightenment to China [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(7): 121—127 (in Chinese).

- [5] DB 11/T 969—2016,城市雨水系统规划设计暴雨径流计算标准[S]. 北京:北京市规划和国土资源管理委员会, 2016.

DB 11/T 969—2016, Standard of Rainstorm Runoff Calculation for Urban Storm Drainage System Planning and Design [S]. Beijing: Beijing Municipal Commission of Planning and Natural Resources, 2016 (in Chinese).

- [6] GB 51222—2017,城镇内涝防治技术规范[S]. 北京:中国计划出版社, 2017.

GB 51222—2017, Technical Code for Urban Flooding Prevention and Control [S]. Beijing: China Planning Press, 2017 (in Chinese).



作者简介:莫俊锋(1992—),男,河南周口人,在读硕士研究生,研究方向为城市雨洪管理。

E-mail: 1078334524@qq.com

收稿日期:2019—11—17