

多功能雨水塘水位-流量曲线的构建及水力学原理

邵知宇, 郑卓乐, 李 霜, 张晓媛, 柴宏祥
(重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘 要: 采用多级出水口的雨水塘,随着塘中水位的变化,可兼具出流峰值削减、径流总量控制、水质净化、雨水回用等多重功能,同时可提供景观滨水休闲场地,是国际上应用较为广泛的雨洪管理设施之一。随着塘中水位的上升,多级出水口在孔口、堰流、短管等不同水力流态下进行转换。针对不同水位下的水力控制条件,对多级出水口的水位-流量曲线计算及水力学原理进行了探讨,构建了基于多目标控制的雨水口的出流曲线算法,并应用于实际算例中。

关键词: 海绵城市; 雨水塘; 多级出水口; 出流曲线; 雨洪管理

中图分类号: TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2017)09-0128-05

Hydraulic Computation of Stage-discharge Curves for Multi-stage Outlets Used in Stormwater Retention Basin

SHAO Zhi-yu, ZHENG Zhuo-le, LI Shuang, ZHANG Xiao-yuan, CHAI Hong-xiang
(Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment <Ministry of Education>, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: The stormwater retention basin integrates multiple stormwater management functions such as peak flow reduction, water quality improvement and total volume control, in addition to recreational and aesthetic purposes. The stormwater retention basin shows high-level performances in the sponge city construction and is one of the most widely used stormwater management facilities worldwide. A multi-stage outlet that controls outflow at different flood stages is typically used to achieve all the functions. As the flood stage rises, the multi-stage outlet goes through different flow modes, including orifice flow, weir flow and pipe flow. In this study, the principals and processes involved in the computation of the multi-stage outlet stage-discharge curves were discussed in detail and a study case was presented.

Key words: sponge city; retention basin; multi-stage outlet; discharge curve; stormwater management

雨水塘类蓄水类构筑物是雨水管理及城市低影响开发模式的重要设施,采用多级出水口的雨水塘,随着塘中水位的变化,可兼具蓄、滞、净、用、排等多重海绵功能,同时提供景观滨水休闲场地,是国际上目前应用较为广泛的雨洪管理设施之一。作为雨水塘最基本的构成部分,多级雨水口通过控制不同水

位下的出流流量来实现延长水力停留时间、削减出流峰值、控制总外排量等功能。然而,多级出水口雨水塘的水位-流量曲线构建是一个复杂的水力计算过程,涉及到不同水力流态之间的转换。随着塘中水位的上升,多级出水口在孔口、堰流、短管等不同水力流态下进行转换。我国学者对雨水塘及雨水调

蓄池在控制溢流污染、削减洪峰等方面的研究较多,对雨水调蓄池的容积估算也有一定的研究^[1~3],然而对多级出水口的流量曲线计算研究较少。李俊奇等^[1]根据雨水塘的不同容积功能进行出水口的设计时指出,顶部开口为矩形或圆形的水平开口,在水力计算方面与堰、孔口均不同,需选用正确的水力计算方法。笔者基于多级出水口的水力计算原理对其出流曲线计算过程进行探讨,分析了三个水力出流阶段,介绍了一种较常见的多级出水口的水位-流量曲线构建方法,并在实际案例中进行了应用。

1 蓄水类构筑物及出水口的构造

根据出水口的形状,雨水塘出水口可分为孔口式、立管式、管涵式、溢流堰式及组合式^[4,5]。根据不同水位的出流特征,出水口又可分为单级出水口和多级出水口,如图1所示。单级出水口通常只有一个出水断面,以孔口、涵管或者溢流堰的方式出水。多级出水口通常是孔口、立管、短管和溢流堰的组合形式,在不同的水位,通过不同过水断面的组合来达到控制出流流量的目的。多级立管式出水口是国外最常见的一种雨水塘出水口形式,其竖立管上端开口,且在立管侧壁壁面不同高度穿孔,竖立管下端接外排横短管,总称为主出水口。对于规模较大的蓄水构筑物,主出水口旁边通常另设明渠形式的紧急出水口,称为紧急溢洪道。

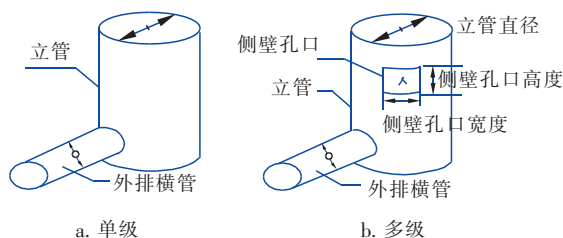


图1 单级和多级立管式出水口

Fig. 1 Single stage and multi-stage vertical pipe outlet

多级出水口的设计参数主要包括:竖立管侧壁孔口的尺寸及位置高度、立管顶端开口的高度、立管管径、外排短管管径、坡度及溢洪道的断面尺寸和高度。这些几何尺寸和位置设置与雨水塘的控制目标一一对应,通过合理的设计使得多级出水口具有控制外排总量、削减洪峰峰值、净化水质等多重功能。李俊奇等人^[1]已针对不同控制目标与出水口尺寸的匹配设计做了详细的探讨,并且指出:各级出水口的中心高程应与相关联的雨水塘控制目标所对

应的塘水位一致或接近,如图2所示。

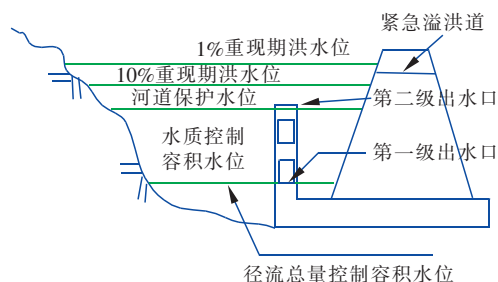


图2 多级立管式出水口与多功能雨水塘各水位控制关系

Fig. 2 Water level control relationship of multi-stage vertical pipe outlet and multi-functional retention basin

根据不同的控制目标,雨水塘的出流流量可大致划分为低、中、高三个等级,分别针对小雨、中大雨及特大暴雨三种降雨条件。各个功能具体的运行工况如下所述:

① 较小降雨雨量时(例如:与年径流总量控制相对应的降雨量),雨水塘以控制出水水质及总径流排出体积为目标。在此降雨条件下,雨水塘中水位较低;而出水口的最下排侧壁孔口高度通常设在水质控制容积或者年径流总量控制容积水位之上,从而将初期径流雨水或年径流总量控制体积之内的雨水全部收集,这部分雨水将储存于雨水塘中就地下渗,实现径流总量控制雨量下的零外排,同时达到径流污染控制的目标。

② 在中雨及暴雨期间,雨水塘水位继续上升,超过污染控制容积的水位,多余雨水开始通过立管侧壁孔口外排。立管壁面的孔口可设多排,分别置于不同高度,总的出流面积将随塘中水位上升而增大,因此外排流量随水位上升也将逐渐增加。通过设置侧壁孔口的开孔尺寸、高度及个数,可限制雨水塘最大外排流量,使得出水峰值控制在《室外排水设计规范》要求之内;或者根据下游市政管网的防洪能力来设计雨水塘最大外排流量,有效利用雨水塘的调蓄容积削减洪峰峰值。由于限制了外排洪峰峰值,下游市政管网可以通行重现期更高的洪水,相当于提高了现有市政管网的设计标准及防涝等级,可有效减少下游管网地区的内涝发生频率。

③ 对于大暴雨及特大暴雨,雨水同时通过壁面孔口及立管上端开口出流,外排流量随水位的上升增加很快,仍然能够控制部分重现期的洪峰峰值,同时高效疏导洪水,以免造成雨水塘堤坝漫顶溃坝。

由于雨水塘的调蓄削峰,对下游市政管网地区仍然可以起到减轻通洪压力的作用。

2 三个出流阶段水力特征及出水曲线构建

根据多级立管式出水口的构造形式(见图2),可知其出流流量由两部分构成:立管侧壁孔口出流流量和立管顶端出流流量。随着雨水塘水位的上升,雨水先通过立管侧壁外排,然后通过立管顶端与侧壁同时外排。根据不同水位的出流状态,其流量计算可分为以下几个水力阶段^[6]:

① 降雨开始,雨水塘的水位逐渐上升,超出水质控制容积。

a. 水位首先到达立管最下面一排壁面孔口下缘处,通过开口处排出雨水塘,此时侧壁孔口断面未完全淹没,为堰流出流,如图3(a)所示,按照薄壁堰流量公式计算:

$$Q = C_w \times L \times h^{3/2} \quad (1)$$

其中, C_w 为薄壁堰流量系数,通常取值 1.84; L 为堰流总长度,在此为侧壁孔口的宽度(如图1所示); h 为堰上水头,即雨水塘水面与侧壁孔口下缘的高度差。

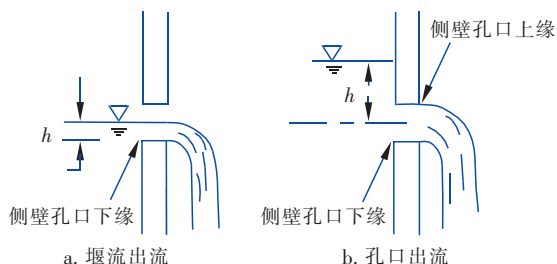


图3 侧壁孔口出流流态转化

Fig.3 Side wall orifice flow conversion

b. 水位上升至立管壁面孔口上缘处,此时侧壁孔口断面完全淹没,开始转化为孔口出流阶段,如图3(b)所示,流量 Q 与水位 $H_{\text{水面}}$ 的关系根据孔口流量计算公式得到:

$$Q = C_0 \times A_0 \times (2gh)^{0.5} \quad (2)$$

其中, C_0 为孔口出流系数,通常取值为 0.6; A_0 为孔口面积; h 为孔口水头,即雨水塘水面与孔口中心的高度差。

如果壁面上存在多个开孔孔口,则需分别按照孔口的水头高度及孔口面积计算出各个孔口的流量,然后算术叠加得到总的孔口出流流量。

② 随着降雨量的增加,水位持续上升,直至立

管顶部开口处。此时,一部分雨水继续通过壁面孔口排出,超出侧壁孔口总过水能力的雨水则通过立管的顶端开口排出。

雨水通过立管顶端的出流为一复杂的水力过程,可以分为4个控制阶段^[1]:堰流控制、孔口出流控制、短管非满流上游控制、短管满流下游控制,如图4所示。假设短管下游为自由出流,在堰流控制及孔口控制阶段,立管与外排管中流态皆为重力流;在短管控制出流阶段,立管中流态为压力流,外排管中流态先为重力非满流然后转化为压力满流。

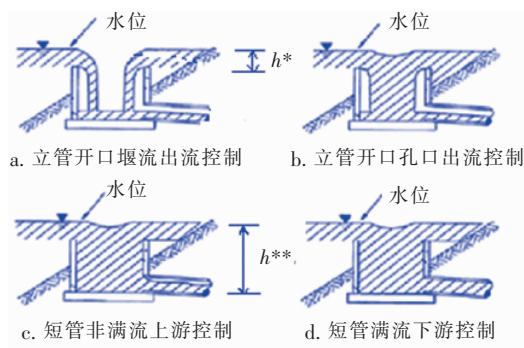


图4 立管流态的4个转化阶段

Fig.4 Four transformation stages of vertical pipe flow

具体的控制状态转折点如下:

a. 雨水塘水位漫过立管顶端但未完全淹没顶端开口。此时通过顶端开口的流态为薄壁堰流出流,如图4(a)所示,流量可以通过薄壁堰流量公式进行计算:

$$Q = C_w \times L \times (h^*)^{3/2} \quad (3)$$

其中, L 为堰流总长度,此处为立管的周长; h^* 为堰上水头,即雨水塘水面与立管管顶的高度差。

b. 雨水塘水位漫过立管顶端并淹没顶端开口。此时,通过顶端开口的流态由薄壁堰流转化为孔口出流,如图4(b)所示,流量可根据孔口流量公式进行计算:

$$Q = C_0 \times A_{\text{立}} \times (2gh^*)^{0.5} \quad (4)$$

其中, $A_{\text{立}}$ 为立管断面面积; h^* 为孔口水头,即雨水塘水面与立管管顶的高度差。

通常根据雨水塘水面与立管管顶的高度差,利用公式(5)计算出流态转化水头 H_t ,并用实际的堰上水头 h^* 进行流态判断,来决定选择堰流公式(3)或者孔口流量公式(4)。

$$H_t = \frac{C_0 A_0}{C_w L} \quad (5)$$

当 $h^* \leq H_l$ 时,堰流,应用堰流公式计算流量;
当 $h^* > H_l$ 时,孔口出流,应用孔口公式计算流量。

c. 雨水塘水位完全淹没顶端开口,立管中为压力流。当雨水塘水位持续升高,淹没深度增大时,根据下游横管中的流动状态,可分为两个阶段:第一阶段,横管仍处于重力非满流(也即上游控制),下游自由出流表面位于立管与横管的交接处,总流量为立管单管出流流量,如图4(c)所示;第二阶段,横管转化为满流压力流(也即下游控制),下游自由出流表面位于横管下游出流处,总流量仅仅取决于立管与横管串联管道的通洪能力,如图4(d)所示。上述两种状态下的流量计算均可通过建立雨水塘水面及下游自由表面的伯努利方程推导得出。伯努利方程计算流量的结果如下:

$$Q = A_p \left[\frac{2gh^{**}}{1 + k_m + \sum (\lambda L/D)} \right]^{0.5} \quad (6)$$

其中, A_p 为管道断面面积; h^{**} 为雨水塘水面与下游自由出流表面处的高度差; k_m 为局部水头损失系数,通常取值为 1.0; λ 为管道沿程阻力系数,通常取值为 0.02 ~ 0.04; D 为管径; L 为管道长度,第一阶段 L = 立管长度,第二阶段 L = 立管长度 + 横管长度。

通常来说,设计合理的多级出水口的水位-出流流量曲线,具有低水位时流量上升缓慢、高水位时流量急剧增大的特征。图5为一典型多级出水口的立管水位-流量曲线以及不同控制流态的转折点。

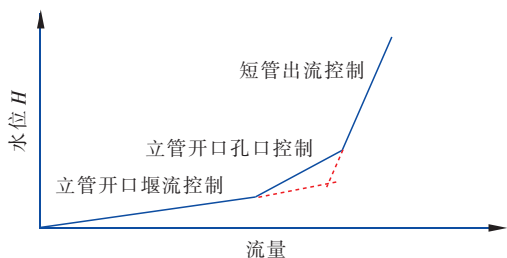


图5 立管出水曲线控制转折点

Fig. 5 Riser outlet curve control turning point

3 实际案例

现有一雨水塘,采用多级立管式出水口出水,具体尺寸如下:立管侧壁底端开方形孔1个,长×高=100 mm×100 mm,孔口中心高度为0.5 m;立管侧壁中端开方形孔1个,长×高=100 mm×100 mm,孔口中心高度为1.0 m;立管管径为200 mm,顶端开口,高度为2.0 m;外排水平横短管直径为250

mm,长度为20 m,横管出口底高度为零。该雨水塘出水口的水位-出流流量计算步骤如下:

① 水位为0~0.45 m时,无外排流量, $Q=0$;

② 水位为0.45~0.55 m时,下排孔口开始堰流出流,流量 $Q = C_w \times L \times h^{3/2} = 1.84 \times 0.1 \times (H_{\text{水面}} - 0.45)^{3/2}$;

③ 水位为0.55~0.95 m时,下排孔口为孔口出流,流量 $Q = C_0 \times A_0 \times (2gh)^{0.5} = 0.6 \times (0.1 \times 0.1) \times [2 \times 9.8 \times (H_{\text{水面}} - 0.5)]^{0.5}$;

④ 水位为0.95~1.05 m时,下排孔口为孔口出流,上排孔口开始堰流出流,外排流量为两排侧壁孔口出流流量总和,即 $Q = C_w \times L \times h^{3/2} + C_0 \times A_0 \times (2gh)^{0.5} = 1.84 \times 0.1 \times (H_{\text{水面}} - 0.95)^{3/2} + 0.6 \times (0.1 \times 0.1) \times [2 \times 9.8 \times (H_{\text{水面}} - 0.5)]^{0.5}$;

⑤ 当水位>2.0 m时,上下侧壁均为孔口出流,外排流量为上下侧壁出流流量总和,加上顶端开口出流流量。

a. 判断:流态转化水位 $H_l, H_l = C_0 A_0 / (C_w L) = (0.6 \times 3.14 \times 0.1 \times 0.1) / (0.42 \times 2 \times 3.14 \times 0.1) = 0.07 \text{ m}$ 。

b. $2.0 \text{ m} < h^* < 2.07 \text{ m}$ 时,立管顶端为堰流控制出流, $Q = C_0 A_0 (2gh_1)^{0.5} + C_0 A_0 (2gh_2)^{0.5} + C_w L_{\text{立}} (h^*)^{3/2} = 0.6 \times (0.1 \times 0.1) \times [2 \times 9.8 \times (H_{\text{水面}} - 0.5)]^{0.5} + 0.6 \times (0.1 \times 0.1) \times [2 \times 9.8 \times (H_{\text{水面}} - 1.0)]^{0.5} + (1.84 \times 2 \times 3.14 \times 0.1) \times (H_{\text{水面}} - 2.0)^{3/2}$ 。

c. 当 $h_l > H_l$ 时,立管顶端为孔口控制出流, $Q = C_0 A_0 (2gh_1)^{0.5} + C_0 A_0 (2gh_2)^{0.5} + C_0 A_{\text{立}} (2gh^*)^{0.5} = 0.6 \times (0.1 \times 0.1) \times [2 \times 9.8 \times (H_{\text{水面}} - 0.5)]^{0.5} + 0.6 \times (0.1 \times 0.1) \times [2 \times 9.8 \times (H_{\text{水面}} - 1.0)]^{0.5} + 0.6 \times (3.14 \times 0.12) \times [2 \times 9.8 \times (H_{\text{水面}} - 2.0)]^{0.5}$ 。

d. 当 $h_l > 2.8 \text{ m}$ 时,通过流量判断,由孔口模式计算的流量大于由伯努利方程计算的短管流量,因此,立管为压力满流,横管为重力非满流(上游控制),下游自由出流表面位于立管与横管的交接处,总流量为立管单管出流流量,即 $Q = A_p [(2gh)/(1 + k_m + \lambda L_{\text{立}}/D_{\text{立}})]^{0.5} = (3.14 \times 0.12) \times [(2 \times 9.8 \times H_{\text{水面}})/(1 + 1.0 + 0.03 \times 2/0.2)]^{0.5}$ 。

e. 由于该设计中,横管通行能力始终大于立管,横管满流出流阶段未出现。

由此计算得到水位-流量曲线如表1所示。

表 1 水位 - 流量曲线计算结果
Tab. 1 Calculation results of stage-discharge curve

水位/ m	侧壁出流			侧壁出流			顶端出流			总流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
	作用水 头/kPa	侧壁孔口 1 流 量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	流态	作用水 头/kPa	侧壁孔口 2 流 量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	流态	作用水 头/kPa	顶端开口流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	流态	
0	0	0						0		0.000
0.45	0	0						0		0.000
0.55	1	0.006	堰流					0		0.006
0.95	4.5	0.018	孔口	0	0.000	堰流				0.018
1.05	5.5	0.020	孔口	1	0.006	堰流				0.026
2	15	0.033	孔口	10	0.027	孔口		0		0.059
2.05	15.5	0.033	孔口	10.5	0.027	孔口	0.5	0.013	堰流	0.073
2.07	15.7	0.033	孔口	10.7	0.027	孔口	0.7	0.021	堰流转化为孔口	0.082
2.2	17	0.035	孔口	12	0.029	孔口	2	0.037	孔口	0.101
2.3	18	0.036	孔口	13	0.030	孔口	3	0.046	孔口	0.112
2.4	19	0.037	孔口	14	0.031	孔口	4	0.053	孔口	0.121
2.5	20	0.038	孔口	15	0.033	孔口	5	0.059	孔口	0.129
2.6	21	0.038	孔口	16	0.034	孔口	6	0.065	孔口	0.137
2.8	23	0.040	孔口	18	0.036	孔口	8	0.075	孔口	0.151
2.81								0.153	短管(立管单管)	0.153
3								0.159	短管(立管单管)	0.159
4								0.183	短管(立管单管)	0.183
5								0.205	短管(立管单管)	0.205

4 结论

通过对不同出流阶段水力流态的分析,探讨了雨水塘多级出水口构建出流曲线的方法及原理。该出流曲线分级构建的原理和方法不仅适用于雨水塘、人工湿地及景观水体等调蓄类设施出水口的计算,也适用于天然洼地以及城市低洼地带内涝点内涝深度及溢流量的计算,可为海绵城市建设中调蓄类设施的规划和设计提供计算依据。

参考文献:

[1] 李俊奇,秦祎,王亚婧,等. 雨水塘的多级出水口及其设计方法探析[J]. 中国给水排水,2014,30(12):34-40.

[2] 车伍,武彦杰,杨正,等. 海绵城市建设指南解读之城市雨洪调蓄系统的合理构建[J]. 中国给水排水,2015,31(8):13-17.

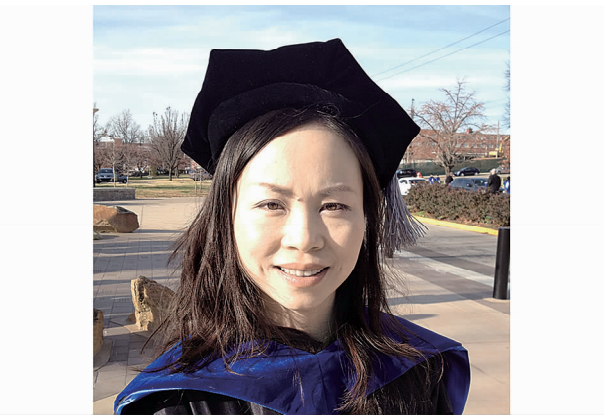
[3] 王肖军. 初期雨水调蓄池在城市排水系统中的应用[J]. 中国给水排水,2012,28(10):45-47.

[4] Dietz M E. Low impact development practices: A review of current research and recommendations for future directions[J]. Water Air Soil Poll,2007,186(1):351-363.

[5] Elliott A H,Trowsdale S A. A review of models for low

impact urban stormwater drainage[J]. Environ Model Softw,2007,22(3):394-405.

[6] Department of Engineering and Public Works. Tennessee Stormwater Management Manual[M]. Knox County:Knox County Tennessee,2008.



作者简介:邵知宇(1975-),女,四川广安人,博士,讲师,美国高级注册工程师,主要研究方向为低影响开发雨水系统、城市防洪排涝、水文水力数值模型及优化计算。

E-mail:shaozhiyu@cqu.edu.cn

收稿日期:2016-11-05