

Design Drainage Flow Calculation of Pumping Station in Binjiang City

Cheng Gao^{1,2}, Jun Liu^{2,3}

¹College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing

²State Key Laboratory of Hydrology Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing

³College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing

Email: gchohai@163.com

Received: Apr. 23rd, 2012; revised: May 11th, 2012; accepted: May 29th, 2012

Abstract: Riverside cities always prevent flood by embankments, draining water-logging by pump stations, in which the core of drainage calculation is to determine the reasonable design drainage capacity of pump stations. There's no reliable method at present. During the process of the calculation in riverside cities, the complicated drainage boundary of pump stations has typical characteristics, differing from the boundary of natural unsteady flow calculation. Therefore, the key point is the handling of the drainage boundary to find out the reasonable design drainage capacity of pump stations. A trial and error calculation method is proposed in this paper. By assuming the initial design drainage capacity of pump stations, the final value is obtained by the trial and error calculations of unsteady flow, taking the water level of city river network as controlling condition. Different ways to assume initial values and the flow chart are given, in order to improve the applicability of the proposed method. Hexi New Town of Nanjing City was taken as a case study, results showed that the method is scientific and feasible, which provides a new method to determine the reasonable design drainage capacity of pump stations in riverside cities.

Keywords: Riverside City; Unsteady Flow; Drainage Boundary; Trial Calculation; Drainage Capacity

滨江城市泵站设计排涝流量计算方法研究

高成^{1,2}, 刘俊^{2,3}

¹河海大学环境学院, 南京

²河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京

³河海大学水文水资源学院, 南京

Email: gchohai@163.com

收稿日期: 2012年4月23日; 修回日期: 2012年5月11日; 录用日期: 2012年5月29日

摘要: 滨江城市地区以堤防挡洪, 以泵站排涝, 其排涝计算的核心在于确定合理的泵站设计流量, 目前尚无可靠的方法。滨江城市排涝计算中复杂的泵站抽排边界是其区别于天然河道非恒定流计算的典型特征, 因此, 处理泵站抽排边界是合理确定泵站设计流量的关键。论文提出了试算法的处理方法, 通过假设泵站流量初值, 利用非恒定流试算, 以城市河网水位为控制条件, 多次试算得到最终泵站设计流量。论文提出了不同的初值赋予方式, 列出计算框图, 增强了方法适用性。最后该法在南京市河西新城区进行了运用, 结果科学可行, 为滨江城市地区计算泵站设计排涝流量提供了一种新方法。

关键词: 滨江城市; 非恒定流; 泵站抽排边界; 试算; 排涝流量

作者简介: 高成(1983-), 男, 安徽宿州人, 河海大学环境学院, 博士后, 从事城市防洪减灾及低影响开发方面的研究。

1. 引言

随着我国城市化进程的加剧,涝灾已经成为威胁城市经济社会安全的重大问题。滨江城市地区多属于平原地带,雨量充沛,地势低平,很多区域地面高程低于江河洪水位,主要通过建立圩垸,依靠堤防抵御江河洪水。对于当地暴雨造成的涝水,则常采用泵站强排方式排除。城市涝水经坡面汇流、管网汇流和河网汇流之后,最终依靠泵站强抽排至城市外河。

在滨江城市地区排涝计算的各环节中,泵站排涝流量计算是最关键的一环。泵站排涝流量过小,入河涝水难以排除,造成城市内部积水;过大则造成了资金浪费。目前,关于城市地区产汇流计算的研究较多,方法也相对比较成熟,特别是城市地区排水和积水模拟是当前城市地区排涝计算研究的热点之一,有SWMM、Wallingford、MOUSE等众多知名的雨洪模型^[1-3],也有徐向阳^[4],Lhomme^[5]等国内外学者建立的淹水模拟模型,而关于城市地区排涝流量的研究不足,阎玮、秦莹等^[6,7]利用水量平衡计算了城市圩区排涝模数和排涝流量,作者^[8-10]及研究小组成员焦圆圆^[11]对城镇圩区排涝模数和排涝流量的方法进行了简化计算方法的研究,此处将之称为简化方法。该法忽略了城市地区河网的河槽调蓄作用,计算结果偏大,需进一步探讨准确计算滨江城市排涝过程的新方法。

2. 产汇流计算方法

2.1. 产流

从产流的物理机制来看,城市流域的产流过程与天然流域没有本质差别。但其设计洪水计算方法注重地表径流计算,简单处理甚至忽略地下径流。在产流计算中,城市下垫面分为不透水面积和透水面积,其中透水面积产流计算主要考虑雨期蒸发、植物截留、填洼和土壤蓄水等损失;不透水面积产流计算主要考虑填洼。不透水面积和透水面积上的地表径流之和即为城市地区地表径流量。

2.2. 汇流

滨江城市地区地表径流雨水从上游流向下流,最后通过道路边沟流入雨水口,进入地下管网系统或进

入明渠排水系统。整个汇流过程包括了坡面汇流、管网汇流和河网汇流等阶段。

坡面汇流计算一般采用瞬时单位线法、等流时线法和非线性水库法等。而采用等流时线方法由设计净雨推求设计流量过程线的最大优点是无需已知设计流域的径流资料。加之城市管渠排水系统调蓄能力一般不大,使得等流时线方法在管渠排水系统设计中应用较为普遍。我国以往均按恒定均匀流进行管网汇流计算,计算结果与实际不符。由于排水管道可以存在有压流状态,管道输水模拟采用考虑水头的非恒定流运动方程来表达,可通过选用四点、非中心、隐式有限差分格式求解雨水管道非线性运动波方程。滨江城市多位于平原河网地区,河网汇流计算采用明渠非恒定流法。目前,圣维南方程组的数值求解方法多是有限差分法,Preissmann隐式差分格式应用最为广泛。

3. 泵站设计排涝流量计算方法

3.1. 泵站抽排边界

滨江城市地区河网汇流过程与其他平原河网汇流过程的不同在于边界条件,其边界有两种:1)管道汇流过程;2)泵站抽排过程。第二种边界较复杂,由于泵站为人为控制,其出量过程跟河道汇流后的水位紧密相关。在城市内部河网水位等于起调水位时,且入流流量小于泵站排涝流量时,为水位边界;在入流流量大于泵站排涝流量时,则以泵站排涝流量为流量边界,此时多余水量蓄在河道内抬高水位;在城市内部河网水位高于起调水位时,仍以泵站排涝流量为流量边界;在城市内部河网水位再次等于起调水位时,又以水位边界计算。

因此,进行城市化圩区河网排涝计算时的重点就是对泵站抽排过程这一边界条件的处理,论文提出泵站边界试算法来解决这一边界问题,其核心就是直接假定泵站排涝流量,利用泵站边界进行河网试算的方式,计算得到泵站最终的排涝流量。

3.2. 泵站流量初值假定

在城市内设置多个泵站时,对泵站初始排涝流量的假定较为困难。利用简化方法计算的排涝模数是针对城市排涝面积整体而言,未对多个泵站的排涝流量进行具体设计,因此,无法利用简化方法对多个泵站

的初值进行假定, 但其计算的排涝流量可作为该城市区总的排涝流量初值, 即为各泵站排涝流量初值之和。

由于平原河网河道河底比降基本为零, 过流流量与附加比降、河道规模、糙率有关。针对多个泵站的初值假定问题, 可依据其过流流量确定, 采用以下三种方式:

1) 平均分配法。将总排涝流量初值平均分配到各泵站, 以此作为初值。

2) 河道规模确定法。可根据各设置排涝泵站的河道规模, 假定河底比降为百万分之一, 计算各河道过流能力, 按比例和总排涝流量初值对各排涝泵站排涝流量初值进行分配。

3) 虚拟外河法。可在设置泵站的节点或断面一定长度的虚拟外河, 定之以水位边界, 水位可等于内河初始水位。通过河网计算得到该节点或断面的流量过程, 以最大流量为依据, 按各设置泵站节点最大流量比例和总排涝流量初值对各泵站排涝流量初值进行分配。

在对泵站排涝流量初值进行假定时, 以虚拟外河确定初值这一方式较好, 在进行虚拟外河进行计算的过程中, 虚拟外河起点处即为泵站设置位置, 也已考虑了河网密度的实际作用, 按此比例进行初值假定较为符合实际。因此, 推荐采用虚拟外河确定初值。

3.3. 泵站设计流量确定

在假定各泵站排涝流量后, 利用非恒流河网计算模型得到各节点水位, 若 $|Z_{\max} - Z_m| > 0.05$, 则各泵站流量值应按式(1)重新赋值。

$$\begin{aligned} q^{ii} &= \left(1 + \frac{Z_{\max} - Z_m}{Z_m - Z_0}\right) q_i^{ii} & Z_{\max} > Z_m \\ q^{ii} &= \left(1 - \frac{Z_m - Z_{\max}}{Z_m - Z_0}\right) q_j^{ii} & Z_{\max} < Z_m \end{aligned} \quad (1)$$

若 $|Z_{\max} - Z_m| \leq 0.05$ 时, 符合计算精度条件要求, 应停止计算。式中, q^{ii} 为第 ii 个泵站设计排涝流量; Z_{\max} 为河网最高水位; Z_m 为城市最高控制水位; Z_0 为河网初始水位。

然而实际上, 各泵站排涝流量初值假定不同可能导致城市内部河网部分节点在部分时段水位高于邻近节点。特别是在用平均分配法和根据河道规模确定

初值时, 由于各河道周边河网密度不同和泵站设置位置的关系, 可能导致部分节点水位偏低或偏高, 与实际河网水位相差不大这一情形不符, 同时城市内部河网水流流向假定初值较大的泵站, 甚至出现部分泵站排涝流量为零。

为减少各泵站排涝流量初值假定对计算结果的影响, 可采用以下方式处理。设节点 i 的水位为 Z_i , 节点 j 的水位为 Z_j , 其邻近的泵站能力分别为 q_i^{ii} 和 q_j^{ii} , 若 $Z_i - Z_j > 0.05$, 则 q_i^{ii} 和 q_j^{ii} 分别按式(2)取值。

$$q_i^{ii} = \left(1 + \frac{Z_i - Z_j}{Z_m - Z_0}\right) q_i^{ii}, \quad q_j^{ii} = \left(1 - \frac{Z_i - Z_j}{Z_m - Z_0}\right) q_j^{ii} \quad (2)$$

将重新确定的 q_i^{ii} 和 q_j^{ii} , 再进行河网计算至满足计算需求时止, 具体计算框图见图 1。

若该滨江城市排涝依靠单一泵站排涝时, 可直接假定泵站排涝流量 q , 其初值选取可采用简化方法计算结果作为初值, 代入河网进行试算。当计算得到的最高水位不大于城市最高限制水位 Z_m , 且与之相差不大时, 所假定的 q 为所求; 否则, 重新假定 q 继续进行计算。

4. 应用实例

南京市河西新城区位于南京市西南, 定位为商务、商贸、文体三大功能为主的城市副中心。目前, 河西新城区主要发展区域在原沙洲圩地区, 面积 54.7 km²。该区域西临长江夹江, 东至外秦淮河、南河, 南接秦淮新河, 平均地面高程 5 m 左右, 低于外河常水位, 以堤防挡洪, 是南京市内涝最为严重的地区之一。随着该区域快速的城市化进程, 填埋河道严重, 可调蓄水面率快速下降。河西新城区在城市发展过程中, 已设置泵站 8 座。但城市化和河道调蓄能力下降的双重作用, 增大了涝灾风险, 现状排涝流量严重不足。

4.1. 产汇流计算及河网概化

将河西新城区下垫面情况划分为水面(3.56 km²)、不透水面积(42.94 km²)和透水面积(8.21 km²), 各下垫面产流计算采用各自特点的产流计算方法; 继而通过坡面汇流和管网汇流计算模型, 可以得到河西新城区最终进入河网的入流过程。

在河网概化过程中, 充分考虑对水流输送占主导

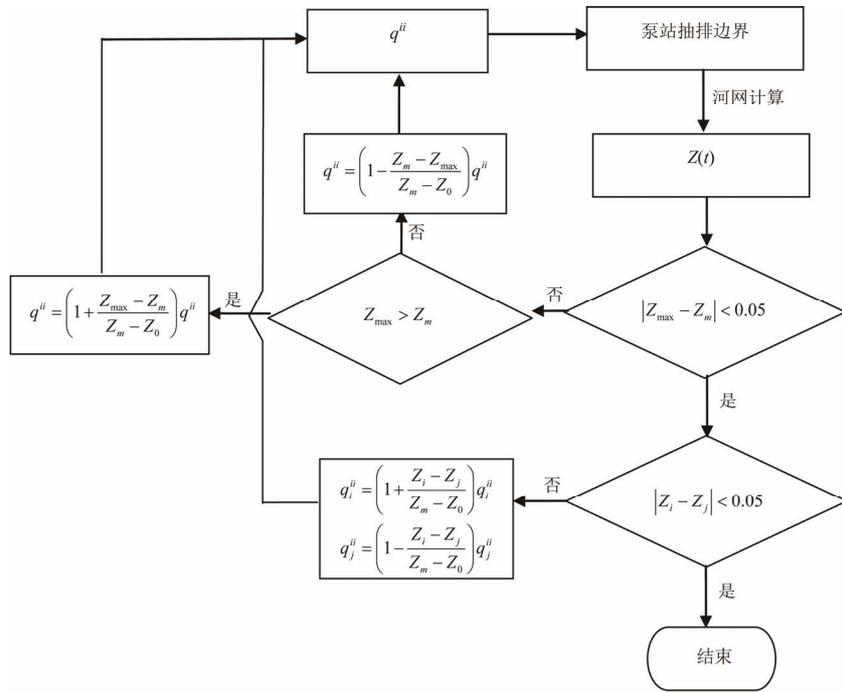


Figure 1. Flow chart of trial calculation for drainage boundary
图 1. 泵站边界试算法计算程序框图

作用的骨干河道,也考虑少数虽然输水能力不强但能够沟通水系的河道;对于一些输水能力较小的河道或断头浜等未进入概化水系的河道,虽然忽略了其输水能力,但通过陆域调蓄水面率反应其调蓄功能。另外,区内也分成了南部河网和北部河网两部分,南部河网较为复杂,北部河网仅有一个排涝泵站,见图 2。

河西新城模型中参数主要包括河道长度、断面面积、陆域宽度、糙率、水面率等,依据该城区电子地图确定。

4.2. 泵站边界试算法应用

本文利用泵站边界试算法计算河西新城排涝模数,采取的是虚拟外河的方式来确定初值。将城区的 8 座泵站虚拟成 8 条 10 km 长的外河,直接与城外河道相通,通过非恒定流计算模型求得各设置泵站处断面的过流能力,并利用简化方法求得的排涝模数计算河西新城排涝流量(219.89 m³/s),以过流能力权重来分配得到各泵站设置断面的排涝流量(表 1)。

以该初值作为泵站抽排边界,利用河网计算模型,按照泵站边界试算法的计算框图进行第一次试算,试算得到南部河网的最高水位为 3.38 m,北部河网的最高水位为 3.32 m,而河道最高控制水位为 3.50

m,均没有达到程序终止要求,需根据式(1)重新对各泵站排涝流量赋值,进行第二次试算。

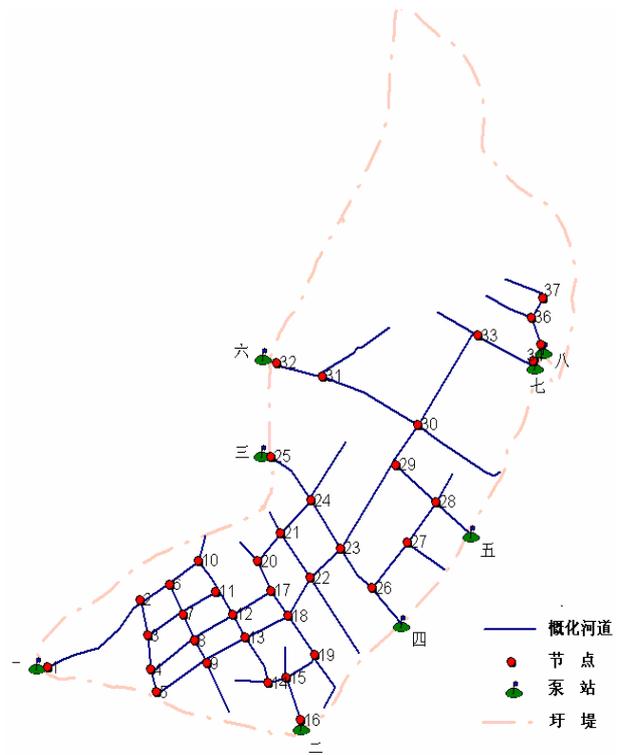


Figure 2. Generalization of river-network in Hexi new town
图 2. 河西新城河网概化

Table 1. Allocation of drainage capacity of each pump station
表 1. 各泵站的排涝流量分配

泵站编号	一	二	三	四	五	六	七	八	合计
虚拟外河过流能力 $q(\text{m}^3/\text{s})$	28.5	32.9	32.6	29.5	32.5	72.4	58.2	46.5	333.1
权重	0.086	0.099	0.098	0.089	0.098	0.217	0.175	0.140	1.000
$q^i(\text{m}^3/\text{s})$	18.81	21.72	21.52	19.47	21.45	47.79	38.42	30.70	219.89

Table 2. The final results of trial calculation for drainage boundary
表 2. 泵站边界试算法最终试算结果

泵站编号	一	二	三	四	五	六	七	八	合计
$q^i(\text{m}^3/\text{s})$	14.48	18.46	16.57	14.99	16.52	36.8	29.58	23.88	171.28

第二次试算后发现南部河网水位均能满足, 但二号泵站处的水位较周围水位偏高, 而其他泵站及节点水位相差不大, 因此可将二号泵站的排涝流量按式(2)赋值, 其他泵站排涝流量保持不变。此外, 北部河网最高水位为 3.61 m, 需重新对八号泵站排涝流量按式(1)赋值, 进行第三次试算, 试算结果达到程序终止要求, 最终河西新城泵站设计排涝流量为 171.28 m^3/s , 分配结果见表 2。

5. 结论

在滨江城市地区进行排涝计算的过程中, 本文提出了泵站边界试算法处理河网计算过程中的泵站抽排边界, 以虚拟外河法确定各排涝泵站设计流量初值比较符合实际, 建立了新的初值赋予公式。在南京市河西新城的应用表明, 该法仅需三次试算便可计算得到泵站设计流量(171.28 m^3/s), 与简化方法得到的计算结果(219.89 m^3/s)相比, 其值小 28.4%, 更符合滨江城市的实际。该法弥补了滨江城市地区排涝计算过程中的排涝流量计算方法的不足。

参考文献 (References)

- [1] HUBER, W. C., DICKINSON, R. E. Storm Water management model. User's Manual Ver.IV, US Environmental Protection Agency, 1988.
- [2] HR Wallingford Ltd. HydroWorks: On-line manual. Oxon, 1997.
- [3] Danish Hydraulic Institute. MOUSE Ver. 1999 user manual and tutorial. Horsholm, 1999.

- [4] 徐向阳. 平原城市雨洪过程模拟[J]. 水利学报, 1998, 8: 34-37. XU Xiangyang. Simulation of storm runoff process for plain urban. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 8: 34-37. (in Chinese)
- [5] LHOMME, J. Applying a GIS-based geomorphological routing model in urban catchments. Journal of Hydrology, 2004, 299 (3-4): 203-216.
- [6] 阎玮. 苏南圩区城市化排水标准与最优水面率研究[D]. 扬州大学, 2006. YAN Wei. Studies on the urbanization drainage criteria and the optimal water surface rate of the polder areas in Southern Jiangsu Province. Yangzhou University, 2006. (in Chinese)
- [7] 秦莹. 苏南圩区水系优化规划方法与应用[D]. 扬州大学, 2010. QIN Ying. Optimized planning method and application of polder water system in southern Jiangsu. Yangzhou University, 2010. (in Chinese)
- [8] GAO, C., LIU, J., CUI, H. and DODDI, Y. An applicable method to calculate drainage modulus in urbanized lowlying area. International Workshop on Education Technology and Training and 2008 International Workshop on Geoscience and Remote Sensing, Nanjing, 21-22 December 2008: 456-459.
- [9] 高成, 刘俊, 崔韩. 城镇圩区排涝模数计算方法及其与河道调蓄库容关系研究[J]. 灾害学, 2008, 23(3): 7-9. GAO Cheng, LIU Jun and CUI Han. Study on drainage-modulus-calculation method and its correlation with the regulation storage in urban Diked area. Journal of Catastrophology, 2008, 23(3): 7-9. (in Chinese)
- [10] 吕刚, 高成. 城市圩区与农业圩区排涝计算差异研究[J]. 水电能源科学, 2011, 29(2): 96-98. LV Gang, GAO Cheng. Study on differences of drainage calculation between urban and agricultural polders. Water Resources and Power, 2011, 29(2): 96-98. (in Chinese)
- [11] 焦圆圆, 徐向阳, 徐红娟. 城市化圩区排涝模数与主要影响因素间的关系分析[J]. 中国给水排水, 2008, 24(4): 40-43. JIAO Yuanyuan, XU Xiangyang and XU Hongjuan. Analysis on relation between modulus of surface drainage and main influencing factors in urbanized polder area. China Water & Wastewater, 2008, 24(4): 40-43. (in Chinese)