

# 复杂环境下人工生态水系工程体系设计研究

董飞<sup>1,2</sup>, 赵进勇<sup>1,2</sup>, 殷淑华<sup>1,2</sup>, 刘晓波<sup>1,2</sup>, 彭文启<sup>1,2</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院水环境研究所, 北京 100038; 2. 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

**摘要:** 城市建设中,常常需要建设不同规模、类型的人工水系。在城市中建设人工水系需协同解决水循环、水质保障、水源与退水、水景观打造及极端情况应急预案等多方面问题。以北京未来科技城环形水系设计为例,采用传统水工设计技术与生态水工学、景观生态学相结合的方法,对环形水系的水循环体系、水质保障工程、水源与退水措施与水景观打造进行了综合设计研究,提出了概念性设计方案,解决了城市复杂约束条件下人工生态水系设计问题,为城市生态人工设计提供了借鉴。研究认为:城市复杂环境下人工生态水系设计需基于传统水工设计技术,有机融入生态水工学及景观生态学方法进行;水循环、水质、水源与退水、景观与生态成为城市人工水系设计的基本内容。

**关键词:** 人工水系; 水工设计; 生态水工学; 未来科技城

中图分类号: X21 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2016)03-0171-05

## Design and research on system of water engineering of artificial ecology under condition of complicated environment

DONG Fei<sup>1,2</sup>, ZHAO Jinyong<sup>1,2</sup>, YIN Shuhua<sup>1,2</sup>, LIU Xiaobo<sup>1,2</sup>, PENG Wenqi<sup>1,2</sup>

(1. Department of Water Environment, China Institute of Water Resources and Hydropower Research., Beijing 100038, China;  
2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Beijing 100038, China)

**Abstract:** It is necessary to build different scales and types of artificial canal systems in the process of urban construction. The problems such as water flow system, water quality guarantee system, source and recession of water, landscape of the system and contingency plan should be solved with the artificial canal systems in the urban construction. Taking the water flow system of future science city as an example, the paper used the method of combining traditional hydraulic structure design technology with eco-hydraulic engineering and landscape ecology to design water cycle system, water quality guarantee project, measures of water source and recession, landscape, and propose a conceptual design scheme. The method solved the design of artificial urban ecology. Result showed that the design of artificial ecological canal system under the condition of complicated environment should be based on the combination of hydraulic structure design technology, eco-hydraulic engineering and landscape ecology. The design of artificial ecological canal system should include water flow system, water quality guarantee system, water source and recession, landscape and ecology.

**Key words:** artificial canal system; hydraulic structure design; eco-hydraulic engineering; future science city

伴随着城市化进程的加快,无论从客观环境改善需求还是从城市居民的主观意愿,水系成为必不可少的自然条件。对于有自然水系的区域,一般从

河道整治及水生态修复方面着手改善水系条件;对于缺少自然水系的区域,则一般通过建设人工水系增加城市水面面积,满足城市的自然与人为需

收稿日期:2015-11-19; 修回日期:2016-01-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51479219、51209230); 水体污染控制与治理科技重大专项(2013ZX07501-004)

作者简介:董飞(1983-),男,山东淄博人,博士,工程师,主要研究方向为流域水环境模型。

通讯作者:赵进勇(1976-),男,山东聊城人,博士,教授级高级工程师,主要研究方向为水生态保护与修复。

求<sup>[1]</sup>。西安市先后投资  $5 \times 10^8$  元和  $10 \times 10^8$  元,分别建设了  $3.6 \text{ km}^2$  的人工水面和  $7 \text{ km}^2$  的“广运潭”人工湖项目;宝鸡市建设了湖泊容积为  $140 \times 10^4 \text{ m}^3$  的金渭湖工程<sup>[2]</sup>。北京市建设了奥林匹克公园水系,其总水面面积达  $84.2 \text{ hm}^2$ ,总需水量达  $130 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,建成了水资源节约、再生水利用、雨洪资源利用、水循环净化、水生态环境保护等 5 个系统<sup>[3-4]</sup>。吉林省前郭县新城区人工水系建有圣湖、月亮湖、和林湖、烟霞湖、郭尔罗斯湖和塞罕湖等 6 个人工湖,总水面面积为  $39.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ <sup>[5]</sup>。在城市水系规划、设计规范化方面,水利部于 2008 年发布了《城市水系规划导则》;住建部和国家质检总局与 2009 年联合发布了《城市水系规划规划》<sup>[6-7]</sup>。人工水系从规划、设计到施工的过程,由于涉及多个学科,以及城市自然环境条件本身的复杂性,使得人工水系的建设受到多方面因素的制约,研究成果也不甚丰富。较之于人工河道而言,人工湖设计的研究则较广泛<sup>[8-9]</sup>。本研究基于当前城市人工水系设计研究不全面的现状,分析城市人工水系设计过程中的主要约束条件,进而提出有效解决方案。

从城市自然环境条件,人工水系的建设可能受到如下条件的制约。

(1)地形与建筑约束:拟建人工水系的区域有其自然的高程及因建筑物而导致的高程改变,可能已经建有公路、房屋、地下管线、地下通道等建筑物,人工水系在规划、设计、施工过程中除了要因循高程条件外,还要解决水系与已建建筑物的交叉问题;

(2)水质达标需求:人工水系的水质同水源有直间关系,水源水质较好时,若是措施不当,可能造成水质的恶化;当水源水质较差时必须综合采用工程与非工程措施使得水质提升至一定的水质需求目标;

(3)景观需求:水系的形态要与整体及周边景观相融和;同时,水系建设过程中的突兀的水工建筑物也要进行美化修饰,以使其与周边景观协调;

(4)水源与退水:人工水系无自身水源,需要解决来水问题;水体流经水系之后,其去向亦要妥善解决;

(5)极端条件应急需求:人工水系在建设过程中将有大量的工程措施,需考虑在暴雨、冰封等条件下运行维护措施。

从设计环节而言,一般设计机构主要从事传统水工结构的设计,对于近年来发展起来的生态水工措施的应用往往没有予以足够的重视,导致工程的水质保障能力偏弱。在我国,《水工设计手册》及各

项规范为指导设计人员进行水工设计的重要工具。2013 年重版的《水工设计手册》(第二版)第 3 卷专门将生态水工设计技术写入手册<sup>[10]</sup>。然而由于生态水工学本身在我国起步较晚,故一般设计机构尚未全面推进生态水工技术的设计应用。而一般研究机构在工程的落地建设方面亦表现出不足。现实中遇到生态水系水工设计问题时,常常成为工程整体过程的瓶颈问题。

本文以北京未来科技城人工生态环形水系设计方案研究为例,综合运用传统水工设计技术、生态水工技术<sup>[11-12]</sup>及景观生态学原理,系统探讨提出了在复杂地形、水质、水源与退水、景观需求等多类约束条件下,人工生态水系的设计方案,为水系进一步的初步设计与施工图设计奠定了基础,也为类似工程的设计提供参考。

## 1 研究区概况

### 1.1 研究区基本情况

北京未来科技城,位于北京市昌平区境内,为“千人计划”的实施项目,于 2009 年 7 月正式启动建设,其建设定位是:具有世界一流水准、引领我国应用科技发展方向、代表我国相关产业应用研究技术最高水平的人才创新创业基地<sup>[13]</sup>。根据相关规划,未来科技城拟建的景观水系分为东、西两大部分,其东部景观水系规划建设呈不规则环形(见图 1)。本研究即针对此环形水系。环形水系位于温榆河以南,东西有定泗路与南区一路横穿,南北有鲁疃西路纵贯。规划方案为:周长约  $2\ 800 \text{ m}$ ,西侧部分宽  $10 \sim 15 \text{ m}$ ,东侧部分宽  $30 \sim 40 \text{ m}$ 。

### 1.2 工程建设约束条件分析

人工水系建设一般受地表高程、道路与管线、水源与水质目标、周边景观、位置与形象等方面的约束。

1.2.1 地表高程 地表高程是环形水系流向设计的重要约束条件之一,故对环形水系建设区的现状高程进行分析。经统计:环形水系位置最低高程  $28.62 \text{ m}$ ,为一沟渠处,最高高程  $32.01 \text{ m}$ ,为定泗路路面;在不考虑沟、路情况下,现状地面高程在  $29.52 \sim 31.11 \text{ m}$  之间。可见,拟建环形水系区域地势较平坦,且无明显高低走向趋势,环形水系的流向受地形限制较小。

1.2.2 道路与管线 拟建环形水系区域有鲁疃西路、定泗路和南区一路穿过,路面以下均敷设有给水管、排水管和再生水管等管线。环形水系有 6 处与上述 3 条道路交叉,设计时,若要保持水系在交叉处

的连通性,需设置交叉建筑物。而各管线和地面的高程及其相互管线,直接影响交叉建筑物的类型及其穿越位置。



图1 环形水系规划概念图

1.2.3 水源与水质目标 人工水系的可利用水源类型一般包括:河湖水体、再生水、雨水。不同类型水体的水质存在较大差异,而水源水质则直接影响人工水系的水质处理结果。同时,不同类型的水源的可利用经济性、工程建设量、水源位置等,均制约着人工水系的建设。

人工水系的水质目标一般基于水系的功能类型制定,而水系的水质目标又制约着水系的各类水质保障工程、措施等。

此外,先前城市总体规划中关于水系的位置、水系的形象、水系周边景观等条件,也对水系的建设形成制约。

## 2 人工生态水系设计方案

基于未来科技城拟建水系的各类约束条件,研究了未来科技城人工生态水系的设计方案,从水循环工程、水质保障方案、水源与退水方案及水景观等4个方面进行研究。

### 2.1 水循环工程

水循环工程体系是整个人工水系设计的基础。基于各类约束条件,本研究提出两套方案。

2.1.1 方案 I:连通大循环 连通大循环方案为环形水系全面贯通,中间不分段,水系与道路交叉处设置交叉建筑物,通过泵站实现水的循环。如图2所示,水系与道路交叉各处分别以序号①、②、③、④、⑤、⑥表示。①处设置涵洞,采用顶管穿路,高程为18.05 m,顶管段长105 m,管径为1 m,双排布置,管道为一用一备。②处地处引桥处,可采用从引桥地下铺管绕行方式。③处设置涵洞,采用顶管穿路,管径为1 m,双排布置,管道为一用一备,起点及终点分别布置跌落井,在上游侧的跌落井设叠梁闸门。

④处设置涵洞,采用顶管穿路,管径为1 m,双排布置,管道为一用一备,起点及终点分别布置跌落井,在上游侧的跌落井设叠梁闸门。⑤处设置涵洞,采用顶管穿路,管径为1 m,双排布置,一用一备,起点及终点分别布置跌落井及叠梁闸门。⑥可根据道路具体型式灵活设计。水系整体循环示意图见图3。



图2 方案 I 平面示意图

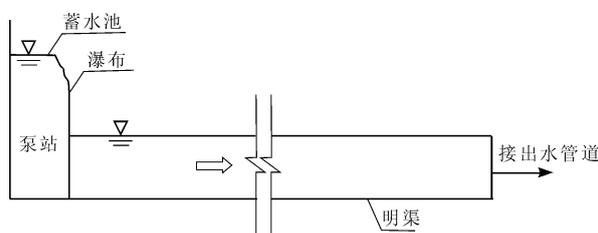


图3 水系整体循环垂向布置示意图

本方案水环总水量为 $9.2 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,整体循环时间为16 h,设计流量为 $1.6 \text{ m}^3/\text{s}$ ,设计流速 $0.2 \sim 0.6 \text{ m/s}$ 。利用水泵提升水头,通过水位控制实现流动;通过跌落井、叠梁闸门控制每段水面高程及流量。

2.1.2 方案 II:分段独立循环 为避免建设交叉建筑物,可在定泗路、南区一路与环形水系交叉处对环形水系进行分段,则环形水系整体分为6个弧段,平面布置示意图见图4。对于每个弧段而言,可分别设计成明渠+管道型式,即在基本维持现状高程的情况下,采用明渠与管道结合,管道与明渠形成闭合回路,以泵站为动力,形成循环体系。明渠段水流由南向北,管道段水流由北向南。明渠进、出口段分别设蓄水池和调节池,分别形成高水头区和明渠退水收集区。本方案垂向布置示意图如图5所示。此种方案流速、流量受补水量限制程度低,且水体水力扰动强度较大,可对环形水系内水体进行持续净化,净化效果显著增强。同时可避免建设交叉建筑物,还可灵活设计水流流向,以营造错落有致的景观。例如,靠近南段的两个弧段水流为由南向北,中部东西

两个弧段水流可由北向南,等,可针对景观、文化需求做进一步的设计。



图4 方案II平面示意图

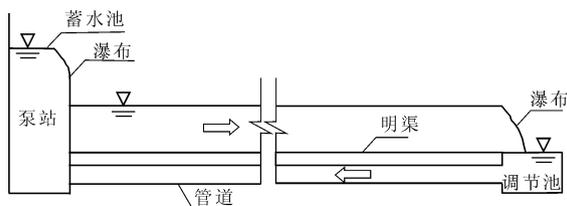


图5 循环式方案垂直布置示意图

## 2.2 水质保障工程

未来科技城系列规划方案中对环形水系的水源进行了规划,即采用再生水。为了强化对再生水的净化效果,需要在有限的空间内,采用生态水工技术建设渠底及护岸,以实现最优的水质净化目标。当水体流速较小时,水体自净能力差,生态功能脆弱,易造成污染物累积。增大水体流速或减小水力停留时间是减小水污染发生风险的有效措施。受地形等基础因素的制约,难以采用加大坡降以提高流速的方式;考虑补水的经济性,方案I也不宜采用通过高水而减小水力停留时间的方式。因此,进行水工设计时,应采用现代化的生态水工技术<sup>[14]</sup>。

环形水系水面宽浅不一,渠底的设计因地制宜,在不同区段采用不同的型式:在水面较宽处采用表面流人工湿地、潜流人工湿地或复合流人工湿地;而在水面较窄处,充分利用地下空间,采用生物生态方法(如生态氧化沟)对水体进行深度净化,实现最优化的水质净化目标。护岸采用自然石叠放、自嵌式生态砌块、边坡湿地等类型的生态护岸,形成多样性、渗透性、休闲性、稳定性兼具的护岸形式。

## 2.3 水源与退水方案

水源工程与退水工程为水循环体系的重要组成部分。初步认为以再生水为水源较为适宜。再生水管线沿鲁疃西路、定泗路及南区一路均有布设。为使管线内水进入环形水系,需设泵站。退水可接入

再生水管线;若不允許,则可另设退水管线,将环形水系退水输送至温榆河。

同时,为了减少购买再生水的费用,同时可考虑通过雨水收集利用解决一部分水源。雨水收集在区域规划方案中通过屋顶雨水收集、地面雨水收集、雨水存储等措施进行实现。

2.3.1 方案I 全线由定泗路北侧预留再生水口补水。预留管径为500 mm,正常补水能力约为 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ;在需换水、公园补水等情况时,水体将通过穿堤涵退入湿地公园,补水量约为 $285 \sim 398 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

2.3.2 方案II 方案II分设6个区段,各段均就近取用再生水水源。具体而言:靠近南段两个弧段均采用沿鲁疃西路再生水管线再生水水源,中部东西两个弧段均采用沿南区一路铺设的再生水管线内再生水为水源,靠近北段两个弧段均采用沿定泗路铺设的再生水管线内再生水为水源。若考虑流向需求,水源亦可就近接入。设退水管线,将退水输送到温榆河。其中,退水主管线沿鲁疃西路敷设,四条分管线分别沿南区一路和定泗路布设,如图6所示。

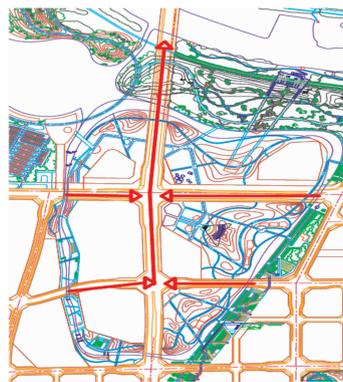


图6 退水管线示意图

## 2.4 水景观

环形水系岸线构建蜿蜒性特征,其岸线自然之美的展现强调结合自然地形进行规划设计,尽量少动土方,保留岸线的蜿蜒平面形态、断面的多样性、宽窄相间的自然特性等在不影响水动力运行与水质保障的前提下,对水工建筑物形成的突兀进行美化装饰,以实现环形水系与周边景观协调的目标。泵站、蓄水池外形为瀑布、假山,等。明渠适当部分形成跌水。岸边带景观设计以自然美为主,辅以人工美,充分利用环形水系的天然地貌特征、水文特征,植物、动物、山石、水体之美,塑造自然景观,并把人工设施和雕琢痕迹融于自然景色之中,“虽为人作,宛自天开”,实现生态价值的最大化,并提高可达性

和亲水性,为周边人群提供休闲场所。在环形水系关键节点设置景观节点,并与周边区域规划进行无缝对接,如地下空间出入口与景观节点的对接、环形水系水体作为地下城休闲元素等。

### 3 结 论

由于城市建设的需求,人工水系成为城市规划、设计、建设的必要因素之一。城市人工水系的建设受到地形与建筑、水质达标需求、景观需求、水源与退水、极端条件应急预案等多类因素的限制,这使得人工水系的设计不能仅靠传统的水工设计技术完成。本文综合采用传统水工设计技术、生态水工学原理、景观生态学原理等方法,以北京未来科技城环境水系设计为例,进行了复杂环境条件下人工水系设计的研究。

(1)城市人工水系设计一般受地表高程、道路与管线、水源与退水、水质达标、周边景观、极端条件应急预案等方面的约束。

(2)城市人工水系的设计需在分析城市现有约束条件的前提下,综合考虑水循环体系、水质保障、水源与退水措施、水景观打造、生态保护等需求,上述方面也成为城市人工水系设计的基本内容。

(3)城市人工水系的设计需在传统水工设计技术的基础上,有机融入生态水工学、景观生态学、水生态保护与修复技术等方法。

(4)不同的设计方案各有优劣,实际中需根据当地情况,从安全性、经济性等多方面做多情景综合分析,选定最优方案。

### 参考文献:

- [1] 费文源. 多功能城市人工水系布局优化模型与应用研究[D]. 天津:天津大学,2014.
- [2] 林文戈. 城市人工湖水水质预测与评价方法研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2008.
- [3] 沈来新,邓卓智. 北京水系生态治理的理念与实践[J]. 中国水利,2010(20):86-88+77.
- [4] 北京市水利规划设计研究院. 北京奥林匹克公园水系及雨洪利用系统研究、设计与示范[M]. 北京:中国水利水电出版社,2009.
- [5] 韩冬梅,许经宇. 吉林省城市景观水系设计研究[J]. 水利规划与设计,2014(4):31-33+21.
- [6] 中华人民共和国水利部. SL431-2008. 城市水系规划导则[S]. 北京:中国水利水电出版社,2008.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB50513-2009. 城市水系规划规范[S]. 北京:中国计划出版社,2009.
- [8] 周斌,钱新,张玉超,等. 三维水质模型在城市人工湖设计中的应用[J]. 水资源保护,2008,24(4):4-9.
- [9] 万杰,冯炳燕. 基于城市水安全的人工湖水体工程设计[J]. 中国给水排水,2014,30(12):73-76.
- [10] 陈伟,朱党生. 水工设计手册——第3卷 征地移民、环境保护与水土保持[M]. 第2版. 北京:中国水利水电出版社,2013.
- [11] 董哲仁. 试论生态水利工程的基本设计原则[J]. 水利学报,2004,35(10):1-6.
- [12] 董哲仁,孙东亚,赵进勇,等. 生态水工学进展与展望[J]. 水利学报,2014,45(12):1419-1426.
- [13] 中共北京市昌平区委员会,北京市昌平区人民政府. 未来科技城规划设计方案汇编[R]. 2012.
- [14] 董哲仁,刘菡,曾向辉. 受污染水体的生物-生态修复技术[J]. 水利水电技术,2002,33(2):1-4.