

市政原水输送系统特大型泵站工艺设计

钟燕敏, 郑国兴

(上海市市政工程设计研究总院<集团>有限公司 水业设计工程有限公司, 上海
200092)

摘要: 以金泽输水泵站为案例,分析了市政原水输送系统中特大型泵站在工艺设计中需考虑的主要因素。金泽泵站规模为 $351 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,设计针对原水输送系统投产初期流量仅为设计规模的60%的情况,结合水量、调度和用地要求,选用大流量高扬程立式混流泵,全部变频调节,多台水泵并联覆盖全部运行期间所需工况。泵站附属设施设计采用高标准,精准服务于水泵及电机要求、保全泵站运行稳定安全,并应用数值模拟分析、水力过渡过程分析、BIM设计等科学手段辅助优化设计,从设计源头考虑市政原水输送系统及受水净水厂需求、特点和安全运行的要求。运行两年来,泵站很好地适应了初期小流量工况,运行安全高效。

关键词: 特大型泵站; 市政原水输送; 工艺设计

中图分类号: TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2019)16-0062-06

Process Design of Extra-large Scale Pumping Station in Municipal Raw Water Delivery System

ZHONG Yan-min, ZHENG Guo-xing

(Water Design Engineering Co. Ltd., Shanghai Municipal Engineering Design Institute <Group>
Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: Taking the Jinze pumping station as a case, the main factors in the process design of extra-large scale pumping stations in the municipal raw water delivery system were introduced. The scale of Jinze pumping station was $3.51 \text{ million m}^3/\text{d}$. Since the original flow rate was only 60% of the design scale, vertical mixed-flow pumps with large flow rate and high lift were selected based on the requirement of water quantity, dispatching and land use. All pumps could be frequency controlled, and multiple pumps were connected in parallel to cover all operating conditions required during operation. The pumping station's ancillary facilities were designed with high standards, to make sure the operation of the pumping station safe and stable. Numerical simulation analysis, hydraulic transition process analysis, BIM were also used to assist and optimize the design. After two years of operation, the Jinze pumping station ran safely and efficiently, and could be well adapted to the original small flow conditions.

Key words: extra-large scale pumping station; municipal raw water delivery; process design

1 工程概况

在市政原水输送系统中,泵站承担着取水、增压、分配、调节等功能。《城市给水工程项目建设标准》(建标 120—2009)中,按照建设规模,将给水管

程项目分为三类:I类为 $(30 \sim 50) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,II类为 $(10 \sim 30) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,III类为 $(5 \sim 10) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,分别对应大型、中型和小型项目规模。

随着对城市饮用水水源水质及城市岸线管理要

求的提升,大型长距离引水和输送项目的不断出现,设计规模大于 $50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 尤其是 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 以上的泵站也不断出现,这部分泵站通常称为特大型泵站。其中已投入使用的典型代表有上海松浦大桥泵站(设计规模 $500 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 1997 年建成投产)、上海青草沙系统五号沟泵站(设计规模为 $708 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 2010 年建成投产)、南通狼山水厂取水泵站(设计规模为 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 2010 年建成投产)、黄浦江上游水源地工程金泽输水泵站($351 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 2016 年建成投产)和松江中途泵站($240 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 2016 年建成投产)。另外,盐城新水源地及引水工程取水泵站($115 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)、主线中途增压泵站($115 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)和盐龙湖增压泵站($102.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)等正在建设过程中。

对于市政原水输水系统,特大型泵站的设计要充分考虑到其服务对象——受水净水厂的运行特点及要求,兼顾泵站及受水净水厂的安全、平稳、高效运行,结合泵站规模特点,须从流量、选泵、流量调节方式、泵房布局、附属系统等方面逐一分析,展开设计。

结合黄浦江上游水源地工程金泽输水泵站($351 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)案例,对市政原水输水系统中特大型泵站在设计环节中考虑的主要因素进行分析。

2 黄浦江上游新水源地原水系统简介

黄浦江上游新水源地原水系统工程通过一根长约 42 km 的大口径单管将上海西南五区分散取水口归并为两个,实现了以上游新建金泽水库取水口为主,上下游取水口可以相互应急补救。

金泽输水泵站规模为 $351 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 设 3 座箱式取水头部自水库取水增压,通过连通管工程向上海西南五区输水,出站水位为 46 m(吴淞高程),并通过调度中心对黄浦江上游水源地的运营调度进行智能控制。

在连通管中部位置,设置有松江中途泵站,规模为 $240 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 并设 $2 \times 10^4 \text{ m}^3$ 调节池具备一定的调节功能,出站水位为 46 m(吴淞高程)。

3 特大型泵站工艺设计要素分析

3.1 泵站流量

特大型泵站规模确定后,首先应根据受水净水厂和输水系统需求,确定泵站实际提升流量。

一般而言,原水泵站的规模为最高日水量,泵站小时输送能力按照最高日水量的平均值确定,在实际运行中,可根据给水系统实际需求,针对峰时、谷

时调节泵站出水量,配合水厂运行进行总体调度。而最高日的用水高峰,多由净水厂的清水池和二级泵房以及管网中水库泵站等调节措施进行应对。由于市政原水输水系统中特大型泵站通常对应多座水厂,上述运行方式有利于泵站和水厂净水工艺的平稳运行,且利用给水系统各环节的调蓄功能,合理经济地确定泵站机组能力。

泵站流量还应考虑水厂自用水系数和管道漏损因素。净水厂考虑到沉淀池排泥、滤池反冲洗等用水需求,一般在规模之外考虑 5% 左右的自用水系数;另外,原水输送管道也存在漏损可能,根据管道材质、施工方式和管道长度的不同,考虑 2% ~ 5% 的管道漏损。

根据以上原则,金泽输水泵站设计规模为 $351 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 考虑 5% 的水厂自用水、2% 的原水管路漏损,实际输送能力应达到 $376 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 折合到小时流量为 $15.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ 。同样,松江中途泵站设计规模为 $240 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 实际输送能力为 $10.7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

另外,泵站设计还应考虑到系统水量的逐步发展。由于特大型泵站规模往往对应未来数年后的原水需求,投产初期水量一般较设计规模有较大差距,且从运行初期到达设计规模,水量的增长是缓慢、逐步的过程。明确初期水量,划定泵站水量运行范围,这对于泵站水泵数量和调节方式的确定,都有着直接影响。

3.2 水泵配置

水泵配置分析是一个综合、交互的过程,与系统、投资、运行等分析穿插相关。配泵主要原则如下:

- 单台水泵的输水能力及扬程符合系统要求;
- 为减少泵站的投资,水泵数量不宜过多;
- 为便于运行管理和维护,宜采用相同结构型式的水泵;
- 能适应输水流量和压力变化,节约泵站运行能耗;
- 单泵性能尽量符合主流设备特性;
- 单台设备质量应兼顾土建及起吊条件。

金泽输水泵站是压力式的多点供水系统,系统中虽在松江中途泵站设有 $2 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的调节水池,但仅相当于松江中途泵站设计规模下 12 min 的抽水水量,因此对于用户水量的适应,主要从水泵台数

和单泵流量调节两个方面进行应对。

金泽输水泵站投产初期,水量是较低的,平均日水量预计为 $200 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,仅为设计规模的 57%,冬季夜间工况流量更小。根据市政原水供水经验,规模较大、多受水水厂的原水泵站,为满足用户在一年中不同时期水量变化,运行水泵台数不宜少于 4 台。若按照泵站运行初期设置 4~5 台常用泵,对应设计规模,至少需要设置 6~8 台同型号的常用泵。综合金泽泵站输水规模及变化范围,泵房及前池方案布置,主流水泵厂水泵规格、制造能力,水泵、电机和变频器等设备特性,泵房设置 9 台水泵(7 用 2 备)。额定工作点单泵流量为 $22\,355 \text{ m}^3/\text{h}$ ($6.21 \text{ m}^3/\text{s}$),扬程为 510 kPa,单泵配套电机功率为 4 000 kW。

3.3 泵型选择

大型、特大型原水泵站的水泵多采用离心泵、斜流泵、轴流泵等泵型。

离心泵通过叶轮高速旋转产生离心力,从而使液体的压能、位能和动能得到增加。离心泵的型式多样,适用的流量、扬程范围较广,是给水工程中广泛采用的一种水泵,从理论上说效率也是三种水泵中最高的,但与另两种泵相比,进水管路设置的阀门、异径管等管配件也会引起水头损失,整体效率未有显著优势。

轴流泵是一种通过叶轮低速旋转产生提升力,叶轮中流体在此提升力的作用下围绕泵轴螺旋上升,在导叶作用下将水流转为轴向流动的水泵型式。轴流泵的转速低,提升力小,扬程较低,但通过较大的叶轮,可以提升的水量大,其提升扬程一般不超过 10 m ($1 \text{ m} \approx 10 \text{ kPa}$)。

混流泵亦称斜流泵,是一种性能介于离心泵与轴流泵之间的水泵型式。混流泵适用于流量范围比离心泵大、扬程范围比轴流泵广的场合。在上海青草沙系统五号沟泵站中,也应用了大流量高扬程(50 m 以上)的离心叶片型式和斜向导叶型式相结合的立式混流泵^[1],并且通水近 6 年,运行状况良好。

金泽输水泵站对适用的水泵结构进行了分析,水泵的比转速 n_s 为 145~362。根据水泵相似性原理,其水泵的比转速适合离心泵或单级离心叶片型式混流泵的范围,即双吸离心泵和离心叶片型式混流泵均适用于本工程。最终,考虑到泵房安全,选定

金泽输水泵站和松江中途泵站的水泵型式为电机安装标高位于最高水位以上的立式混流泵。

3.4 机组调节措施

由于原水输送系统随水量逐步发展、季节、工况不同,泵站流量和所需扬程都存在变化,因此泵站机组需要具备调节措施。

在水泵配置时,已从启用水泵台数方面具备了水量调节的部分能力,但通过水泵开启台数的调节方式是粗放的,存在明显的能耗浪费,大型水泵的经常启停也不利于设备维护。因此,通常需要对部分或所有水泵设置单泵调流措施。

另一方面,泵站运行初期水量往往与设计规模存在相当的差距,根据流体力学原理,系统克服管路损失所需的扬程与水量为平方关系,因此初期泵站面临的最大问题是机组对小流量低扬程工况的适应。

单泵调流有被动和主动两种方式。

① 被动调流:通过减小泵后阀门开角等方式来增加管路水头损失,但由于会造成能耗浪费和泵后阀门易产生气蚀等问题,并不提倡长期使用,仅可作为临时手段。

② 主动调流:主要有调节水泵叶片角度和变频调速两种方式。上海松浦大桥泵站的取水泵单台规模为 $50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,扬程为 14 m,采用了调节水泵叶片角度方式,对流量的调节幅度在 10% 左右,调节幅度较小;变频调速是目前主流的单泵调流方式,调频幅度一般可低至 50%~60%。

以金泽泵站为例,设计规模为 $351 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,对应水库不同的运行水位设计工作点扬程 51~45 m,初期平均时规模为 $200 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,对应水库不同的运行水位水泵运行扬程约 23~17 m。虽在水泵台数方面考虑了初期水量,但最大三倍的扬程差距使工频水泵难以适应初期工况,不仅会造成能耗浪费,更重要的是会带来水泵运行滑出设备安全运行范围、调压困难等问题,存在震动增加、叶轮受损、设备过载、用于持压的泵后阀组受损等风险。设计阶段通过水泵变频曲线并联分析,金泽泵站至少需要 5 台水泵同时变频调速并联运行,方能满足长距离输配水系统初期及水量发展过程的流量和水位要求。考虑到设备轮换运行的需要,金泽泵站 9 台水泵全部设置了变频调速装置,可覆盖运行期间所需工况。金泽输水泵站泵组变频分析见图 1。

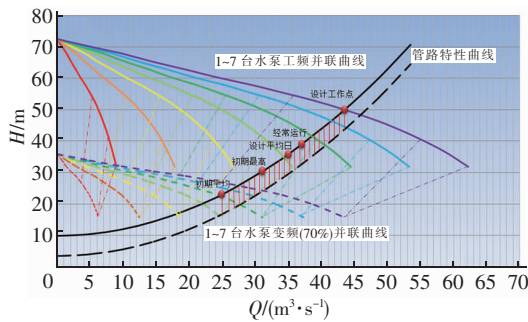


图1 金泽输水泵站泵组变频分析

Fig. 1 Pumps frequency analysis diagram of Jinze pumping station

3.5 泵房布置

大型泵站中泵房的设计,要满足所选择泵组及附属设施的安装、运行、检修和管理要求。

金泽输水泵站采用7用2备共9台大型立式混流泵,分为可独立运行的三舱,每舱设置一根DN3 600取水管与前池衔接(见图2)。

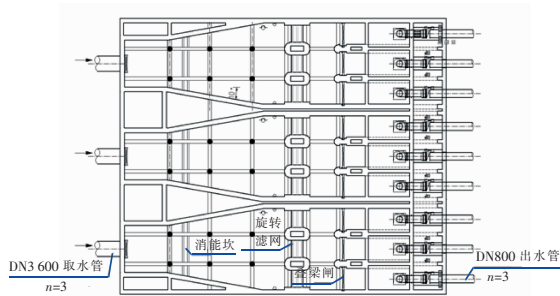


图2 金泽输水泵房平面布置

Fig. 2 Plane layout of the Jinze pump room

泵站进水流道是泵站的重要组成部分,它的作用是为水泵吸水创造良好的水力条件,若设计不当容易引起流态恶化、水力损失加大、水泵机组震动、泵站效率下降等现象^[2],而影响吸水池流态的因素有吸水条件、主要设计尺寸^[3](包括池长、池宽、后壁距、淹没水深、悬空高度等)和流道型线。

对于大型混流泵的前池,设置的目的在于将取水管和吸水井之间,通过一定的扩散角 α 进行衔接,使水流平顺地扩散分布,避免形成漩涡。扩散角越大,引起漩涡的可能性也越大,进水的理想边壁扩散角为 $9^\circ \sim 11^\circ$ ^[4]。《泵站设计规范》(GB 50265—2010)规定扩散角应小于 40° ,由于用地所限,工程上扩散角 α 一般大于理想扩散角,为 $20^\circ \sim 40^\circ$,金泽泵站根据现场用地条件,尽可能取最小扩散角,最终确定前池扩散角 α 取值 20° 。

原水经整流、旋转滤网清污后,进入单台水泵流

道进行水泵提升。根据进水水位条件,并通过水力过渡过程分析(超降、壅水),初步进行泵房布置,再根据采购设备特性,经三维流动数值分析和装置模型试验验证、优化,确定泵房详细布置和水泵吸水消涡措施。

课题组与河海大学合作,采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型和 SIMPLE 算法求解流速场分布,用雷诺平均 N-S 方程来描述流体的运动^[5]。取水头部计算结果见图3。

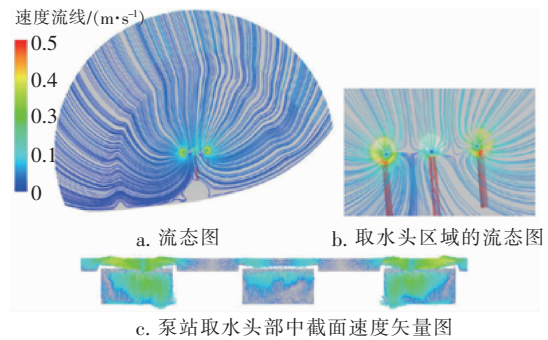


图3 取水头部计算结果

Fig. 3 Calculation results of water intake head

在初始设计模型的基础上,通过三维数值分析,验证了泵房初步设计是总体合理的,另利用数值模拟,对池型、底坎、池体后壁设消涡板等整流措施进行多工况、多方案比选,优化设计,使得泵站进水系统内的流态得到有益改善,工作泵进水池内的流动均匀性都得到一定程度的提高(见图4),消除了反向流和漩涡,使相邻水泵进水更加均匀,提升水泵运行稳定性,而且泵站进水系统内的水面降落变化幅度不大,同时达到了节能的效果。

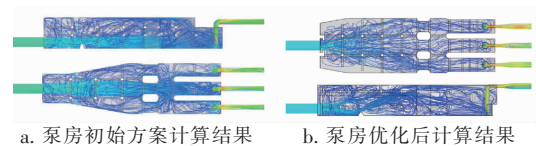


图4 泵房数值分析优化成果

Fig. 4 Numerical analysis optimization results

金泽输水泵站具有重要性高、流量大、扬程高、供水方向多、机组台数多、运行时间长的特点。为更好地为泵站的设计提供技术支撑,在数值模拟的基础上进行了整体物理模型试验,并与数值模拟结论相互印证。模型采用正态模型,模型几何比尺为 $1:10$ (见图5)。经过初步模型以及多次局部优化模型试验,最终确定了泵房设计方案。



图5 金泽输水泵站水力模型

Fig. 5 Hydraulic model of Jinze pumping station

3.6 附属设施

特大型泵站还应重视润滑水及冷却水、防水锤等附属设施设计。

若水泵为立式泵,需外部提供洁净水供填料函润滑,减少水泵启动运转的磨损;特大型泵站所采用泵组多为大功率水泵,功率上千甚至数千千瓦,发热量大,电机冷却方式多为水冷(IC86W),变频器冷却方式可采用空水冷和单水冷,其冷却水水量及压力应满足不同厂家的设备需求。润滑水及冷却水系统在工程投资中虽只占较小比重,却是维持大型泵运行必不可少的部分,在设计时应在安全设置方面与运行主泵采用同等标准。不同系统,有不同的水量、压力要求,与此对应,辅助水泵应进行合理分组,水泵的台数和变频台数综合运行水泵的数量进行确定,供水管路也应保证单台设备流量总体均衡。为节约用水,冷却用水多采用循环冷却系统,或直接使用经过滤处理达到水质要求的原水。冷却水循环管路尤其应关注各路支管的管路损失基本均衡,建议尽量按照同程系统设置,避免出现水量分配不均的情况。

另外,长距离输水系统需要考虑水力过渡过程,泵站也往往与防水锤设施结合建设。泵站内的防水锤措施主要有泵后止回阀、单向补压塔等。泵后止回阀快关缓闭的工作模式可在泵站水泵失电的情况下,防止大流量倒流保护水泵的同时减缓泵后管路水锤的产生,补压塔可有效阻断水锤波,将水锤波转化为补压塔内涌浪压力保护管路系统。

黄浦江上游水源地原水系统对泵站抽水断电防护进行了水力过渡过程专题分析,在泵站突发失电但未采取防护措施的情况下,金泽泵站泵后产生了54 m以上的压力下降,该压力波向后传播将导致金泽泵站至松江泵站段沿线出现严重负压,管道压力可能降低至水流汽化压力以下,将导致管道破坏。在泵站及管路系统沿线设置指定位置及高度的单向补压塔后,可维持相应管路不出现过压及负压,同时

各单向塔不出现漏空,保证输水系统的安全运行。

3.7 BIM 技术参与泵站设计

作为工艺复杂、工种交叉的超大型泵站,金泽输水设计全过程采用BIM技术(见图6),工艺与结构、建筑、电气、暖通、自控等专业协同工作,提高了设计质量和效率,并成功申请成为第一批上海市政府投资BIM试点项目。

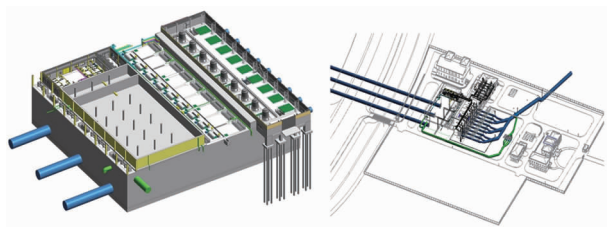


图6 金泽泵站泵房及总平BIM设计

Fig. 6 BIM design of Jinze pumping station

4 金泽泵站运行情况

2016年12月29日,包括金泽泵站在内的黄浦江上游水源地原水系统正式对外通水。经过两年的运行,泵站总体运行良好可靠,2018年金泽泵站最高日水量为 $237 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,平均日为 $214 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,出站压力为12~25 m,可很好地适应初期小流量、低扬程工况,水泵及附属系统运行高效稳定。

5 结语

我国特大型泵站的持续出现,是集约化供水和生活饮用水水源安全管理带来的一种趋势,是城市供水发展与城市空间管理要求的有机结合。特大型泵站工艺设计中,应深入调研并掌握原水输送系统的流量扬程发展特征及调度要求,合理确定配泵、泵型、调节方式、泵房布置及附属设施方案,并应用数值模拟分析、水力过渡过程分析、BIM设计等科学手段辅助并优化设计,从设计源头贯彻践行市政原水输送系统及受水净水厂需求、特点和安全运行的要求,并重视系统低碳节能。

参考文献:

- [1] 王如华,沈庞勇,李静毅,等. 特大型超深城市供水泵站水泵型式选择的分析与研究[J]. 给水排水,2009,35(4):50-55.
Wang Ruhua, Shen Pangyong, Li Jingyi, et al. Research on the pump style selection of exceptionally large and deep pumping station [J]. Water & Wastewater Engineering, 2009, 35(4): 50-55 (in Chinese).
- [2] 刘竹溪,刘景植. 水泵及水泵站[M]. 北京:中国水利

水电出版社,2006.

Liu Zhuxi, Liu Jingzhi. Pump and Pump Station [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2006 (in Chinese).

- [3] 成立,刘超,周济人,等. 泵站前池底坝整流数值模拟研究[J]. 河海大学学报,2001,29(3):42-45.

Cheng Li, Liu Chao, Zhou Jiren, et al. Numerical simulation of sill flows in the forebay of pumping station [J]. Journal of Hohai University, 2001, 29(3): 42-45 (in Chinese).

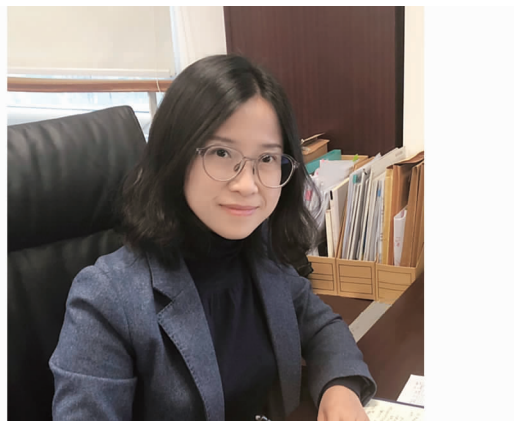
- [4] 上海市工程设计研究总院(集团)有限公司. 给水排水设计手册(第3册):城镇给水[M]. 第3版. 北京:中国建筑工业出版社,2017.

Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co. Ltd. Design Manual for Water & Wastewater (III): Urban Water Supply [M]. 3rd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017 (in Chinese).

- [5] 冯建刚,钱向栋,张睿. 城市输水泵站前池流态及整流措施[J]. 水利水电科技进展,2018,38(2):77-83.

Feng Jiangang, Qian Xiangdong, Zhang Rui. Flow patterns and rectification measures in forebays of urban water pumping station [J]. Advances in Science and

Technology of Water Resources, 2018, 38(2): 77-83 (in Chinese).



作者简介:钟燕敏(1977-),女,江西赣州人,硕士,正高级工程师,副总工,专业从事给水设计和研究工作,曾获全国优秀工程勘察设计行业一等奖、上海市优秀工程设计一等奖、上海市科技进步三等奖等奖项。

E-mail: zhongyanmin@smedi.com

收稿日期:2019-01-02

(上接第61页)

⑤ 在进水水质波动的情况下,通过加药、加碳源等手段,二级生物处理后的污水经过BAF池及活性砂过滤工艺后的出水水质可以稳定达到一级A排放标准。

参考文献:

- [1] 杨波,杨志恒,胡文容,等. 采用一级强化处理+曝气生物滤池工艺的污水处理工程[J]. 中国给水排水, 2006, 22(22): 72-74.

Yang Bo, Yang Zhiheng, Hu Wenrong, et al. Wastewater treatment project by enhanced primary treatment and biological aerated filter process [J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(22): 72-74 (in Chinese).

- [2] 秦海霞. 安徽某污水厂深度处理工艺设计[J]. 中国给水排水, 2012, 28(22): 89-91.

Qin Haixia. Design of advanced treatment process in a WWTP in Anhui Province [J]. China Water & Wastewater,

2012, 28(22): 89-91 (in Chinese).



作者简介:卫佳(1984-),男,天津人,本科,工程师,主要从事市政给排水工程及规划、水环境治理工程设计等技术工作。

E-mail: 86318738@qq.com

收稿日期:2018-06-11