

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.16.014

# 孟加拉国大型供水工程设计实例

车爱伟<sup>1</sup>, 胡 坤<sup>1</sup>, 李龙伟<sup>1</sup>, 巨志剑<sup>1</sup>, 唐翀鹏<sup>2</sup>

(1. 中国市政工程西北设计研究院有限公司, 甘肃 兰州 730000; 2. 中工国际工程股份有限公司, 北京 100080)

**摘 要:** 孟加拉国 Padma(帕德玛)供水工程建设内容包括 1 座  $47.25 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  取水泵站、1 座  $45 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  净水厂、1 座加压泵站和 32.5 km DN2 000 压力输水管线,涵盖了取水、净水、加压、输水工程,是一个给水系统工程。工程设计采用中国标准,应用水力模型、Surge 水锤模拟、复合地基处理、BIM 设计等科学方法辅助优化设计,力争将该工程打造成国际一流的海外精品工程,推行中国标准走向海外。设计中对取水位置选择、取水方式、净水厂工艺选择、水锤分析、顶管施工、加压泵站规模、因地制宜设计等重点难点问题进行了系统分析,以期为海内外大型供水工程提供设计经验。

**关键词:** 孟加拉国; 供水工程; 中国标准

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2020)16-0074-07

## Design Case of Large-scale Water Supply Project in Bangladesh

CHE Ai-wei<sup>1</sup>, HU Kun<sup>1</sup>, LI Long-wei<sup>1</sup>, JU Zhi-jian<sup>1</sup>, TANG Chong-peng<sup>2</sup>

(1. CSCEC AECOM Consultants Co. Ltd., Lanzhou 730000, China; 2. China CAMC Engineering Co. Ltd., Beijing 100080, China)

**Abstract:** A  $47.25 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  water intake pumping station, a  $45 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  water treatment plant, a booster pumping station and 32.5 km DN2 000 pressure water pipeline were constructed in Padma water supply project in Bangladesh, which was a project covering water intake, water purification, pressure and water conveyance. The design adopted Chinese standards, and scientific methods such as hydraulic models, Surge water hammer simulation, composited foundation treatment, and BIM design were used to assist optimal design. The original intention of the design was to strive to build the project into an international first-class overseas fine quality project and promoted Chinese standards to go overseas. In the design, the key and difficult problems, such as water intake location selection, water intake mode, water purification plant process selection, water hammer analysis, pipe jacking construction, pressurized pump station scale, local design and so on, were systematically analyzed in order to provide design experience for large-scale water supply projects at home and abroad.

**Key words:** Bangladesh; water supply project; Chinese standards

### 1 工程概况

孟加拉 Padma(帕德玛)供水工程是依托中国进出口银行贷款,由中工国际以 EPC 模式承建的一座现代化水厂。该工程是孟加拉国首都达卡市的重点建设项目,项目建成后将解决达卡地区超过 400

万民众的安全饮水问题,有效缓解地下水开采压力,是中孟两国在“一带一路”建设中的“民心相通”工程。

孟加拉 Padma(帕德玛)供水工程(一期)供水规模为  $45 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,包含了取水泵站、净水厂、加

压泵站及输水管道,总投资为 2.908 亿美元。工程总平面图见图 1。

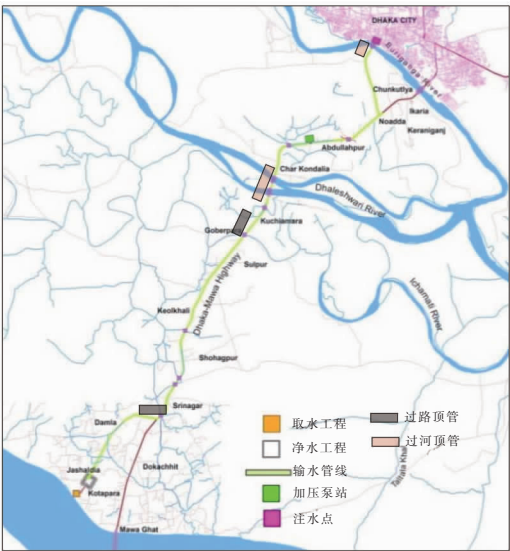


图 1 工程总平面布置

Fig. 1 General plane layout of the project

2 水源选择及水质、水压要求

2.1 水源选择

孟加拉达卡市及周边有 4 条主要河流(Padma 河、Dhaleshwari 河、Buringanga 河、Taltola Khal 河),为选择合适的水源,项目团队在前期做了大量的现场调研及评估工作,分别从水质、水量、取水安全及便利性、水源及水厂的位置、原水输送成本、扩建的可能性、厂址及土地价格等方面对 4 条河流作为取水水源的可行性进行综合性价比选,最终确定了采用 Padma 河作为该项目的水源。

Padma 河由恒河和布拉马普特拉河汇流而成,取水口附近多年平均流量为 38 180 m<sup>3</sup>/s,设计最低水位为 0.65 m(保证率为 97%),设计常水位为 3.2 m(年平均水位),设计洪水位为 7.12 m(百年一遇洪水位),主槽最大水深约 44 m,河道最大宽度达 10 km,该水源的主要优势是水量充沛、水质好,是相对理想的水源。

2.2 水质

Padma 河原水水质除个别指标外,其余各项均满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅱ类水体的要求,是供水的优质地表水水源,但其存在雨季原水浊度高(最高为 541 NTU)、含沙量大(最大为 2.43 kg/m<sup>3</sup>)、浊度变化范围大的特点。原水水质见表 1。

表 1 原水水质

Tab. 1 Raw water quality

项 目	原水水质	均值	最小值
浊度/NTU	320 ~ 541	446	140
悬浮物/(mg · L <sup>-1</sup> )	501 ~ 865	655	90
色度/度	< 206	153	< 15
COD/(mg · L <sup>-1</sup> )	7 ~ 17	12	< 3
铁/(mg · L <sup>-1</sup> )	0.5	0.5	0.5
pH 值	7.12 ~ 8.02	7.65	
总大肠菌群/(CFU · 100 mL <sup>-1</sup> )	350 ~ 560	438	—
电导率/(μS · cm <sup>-1</sup> )	122 ~ 130	126	120
碱度(CaCO <sub>3</sub> )/(mg · L <sup>-1</sup> )	45		

水厂出水水质需符合孟加拉饮用水标准及世界卫生组织(WHO)饮用水水质标准,并要求出水平均浊度<1 NTU,最高值≤5 NTU。

2.3 水压

依据孟加拉达卡供排水局的要求,输水管道与城区管网的接管点压力为 0.4 MPa。

3 取水工程

3.1 取水条件及取水位置的选择

Padma 河的河床实际宽度远大于稳定宽度,河道主流的位置不稳定,河道内沙洲变化频繁,对取水点位置的选择提出了较大的挑战。工程前期分析了 Padma 河道多年航道平面图和河岸演变图,通过对 Padma 河 Mawa 段实地踏勘,选取典型的河床 P3 断面进行研究,P3 断面的河床演变图(1970 年—2011 年)见图 2。从图 2 可知,P3 断面左岸相对稳定,且此处河岸较陡,有利于取水构筑物的设置,取水条件相对较好,是比较合理的取水点位置。

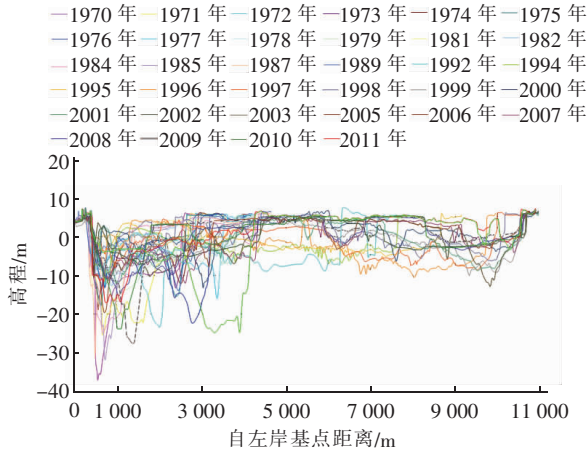


图 2 P3 断面河床演变

Fig. 2 River bed evolution map of P3 section

### 3.2 取水型式的选择

通过对渠道取水、精准闸取水及自流管式取水的方案比选,取水型式确定采用具有预沉效果的渠道取水。为验证其可行性,项目组委托国内某高校开展了渠道取水的模型试验。试验模拟了渠道在河道最不利情况下,即最高水位为 7.12 m、最大含沙量为  $2.43 \text{ kg/m}^3$  工况下的运行情况。模型试验运行 86 h 后,明渠前端淤积情况明显,见图 3。

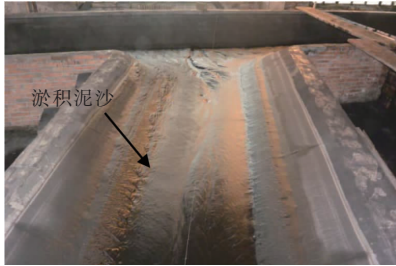


图3 明渠水力模型

Fig. 3 Hydraulic model of open canal

试验结果表明,该取水方式在运行过程中存在淤积风险,需考虑清淤措施。根据模型试验计算的淤积量,考虑采用挖泥船解决渠道淤积的风险。通过对多种形式的挖泥船的比选及实地考察,最终选择了运行过程中对水体扰动最小的耙吸式挖泥船。

建成后的取水工程航拍见图 4,挖泥船见图 5。



图4 取水泵站航拍图

Fig. 4 Aerial photo of water intake pumping station



图5 正在工作的耙吸式挖泥船

Fig. 5 Trailing dredger in operation

### 3.3 取水渠道及泵房

取水明渠按照水厂的远期设计规模  $95 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  (考虑 5% 的自用水系数) 一次性建成,取水泵房按照近期设计规模  $47.25 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  建设。Padma 河水通过取水明渠自流入取水泵房进水流道。考虑到二期取水泵房的建设,渠道末端分为两支,中间设分流墩,二期取水泵房建设时采用临时围堰围挡后施工。

泵房  $\pm 0.00$  层标高按百年一遇洪水位 7.12 m 设计,并考虑浪爬高等因素采用 9.0 m;泵房的阀门检修层设置在常水位 3.2 m 以上,并保证水泵电机位于洪水位以上,立式混流泵与检修层严格密封,防止洪水时河水渗入泵房,该设计不仅能极大地减少取水泵房的高度,还能优化出水管路的布置,既美观又节省投资。

### 4 净水工程

根据 Padma 河水质特点以及孟加拉 BUET 环境工程实验室进行的不同工艺的小试,确定水处理核心工艺采用得利满的高效澄清池 + V 型滤池,工艺流程见图 6。

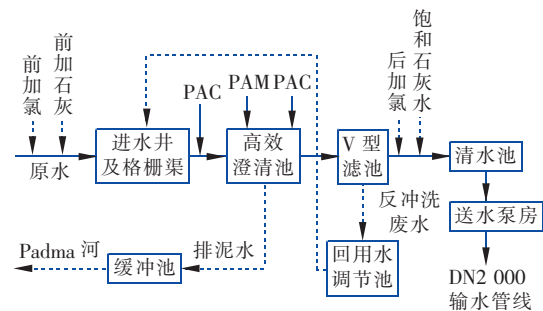


图6 净水工艺流程

Fig. 6 Flow chart of water treatment process

该工艺具有工艺先进、出水水质好、自动化程度高的特点。水厂分两期建设,一期设计规模为  $45 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,并预留远期用地。一期主要建(构)筑物包括 1 座高效澄清池、1 座 V 型滤池、2 座清水池、1 座送水泵房、1 座加药间、1 座加氯间及石灰室、1 座回用水调节池、1 座缓冲池。

总图充分考虑水流、人流、物流、信息流,尽量采用组团化、集约化的布置方式。工程设计将进水井、格栅渠、高效澄清池合建,将 V 型滤池、反冲洗泵房及配电室合建,大大节约占地,减小构筑物之间的水头损失;由于厂区地质存在液化的情况,组团化设计大大减少了厂区地基处理费用。



净水厂实景见图7。



图7 净水厂厂区实景

Fig. 7 Actual scene of water treatment plant

### ① 高效澄清池

高效澄清池前设有进水井及格栅渠,采用渠道配水进入6组高效澄清池(见图8)。高效澄清池包含混合区、絮凝区、沉淀区,每两组澄清池中间设有污泥循环泵房用于污泥循环及排放。污泥通过螺杆泵循环至絮凝区来维持絮凝区的污泥浓度,使高效澄清池对原水水质的变化适应性强,絮凝沉淀效果好,进而保证出水水质。

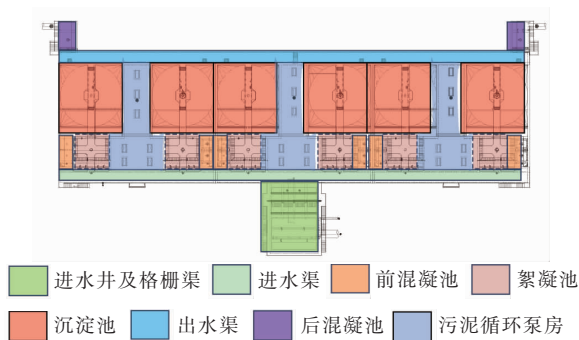


图8 高效澄清池平面布置

Fig. 8 Plane layout of high efficient clarifier

主要设计参数:前混凝池水力停留时间为2.7 min,速度梯度为 $250\text{ s}^{-1}$ ;絮凝池水力停留时间为8 min;沉淀池表面负荷为 $11.5\text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ;后混凝池水力停留时间为30 s,速度梯度为 $250\text{ s}^{-1}$ 。

### ② V型滤池

V型滤池具有节水、运行稳定、自动化程度高、管理维护简便、出水水质良好等优点。针对孟加拉国达卡市雨季原水浊度高的特点,滤池滤料采用有效粒径 $d_{10}=1.35\text{ mm}$ 的石英砂,该粒径滤料纳污能力强,能减少反冲洗运行周期,节省运行费用。工程采用BIM进行施工图后设计,有效控制施工质量,减少返工,节约工程成本。滤池平面布置及BIM模

型分别见图9、10。

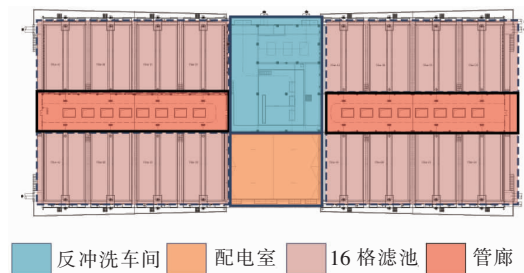


图9 V型滤池平面布置

Fig. 9 Plane layout of V-filter



图10 V型滤池 BIM 模型

Fig. 10 BIM model of V-filter

主要设计参数:1座16格,双排布置,单格尺寸为 $11.26\text{ m} \times 17.19\text{ m}$ ,滤速为 $7.27\text{ m/h}$ ,强制滤速为 $8.31\text{ m/h}$ (1格滤池反冲洗,1格检修),滤料厚度为1.2 m,采用整体浇筑滤板。

## 5 加压泵站

净水厂与末端注水点距离较远,在中途设置加压泵站增压以减小输水管线的工作压力,保障管网运行安全;在加压泵站内设有清水池消毒和存储水量,保障水厂故障时,加压泵站也能短时间给达卡市区供水;设有加氯间进行补氯,以保证注水点的余氯要求。

加压泵站因地制宜进行设计,节约了工程投资及运行费用。孟加拉达卡市严重缺水,供水用户均设有地下水池及高位水箱以调节、存贮用水量,且城区最不利点用户对水压的要求仅为2.5 m(保证管网水能流入用户的地下水池)。国内供水主要依靠清水池或者高位水池来调节泵站供水量和用水量之间的流量差值,而孟加拉主要依靠用户自建地下水池及高位水箱来满足不同时间段的用水量。基于这种差异,清水池、水泵、输配水管网的设计要因地制宜,经与达卡市供排水局商讨确定,水泵及输配水管网设计不考虑时变化系数,清水池功能定位为接触消毒和水厂事故时的短时水量存储,从而减小泵站

的设计流量及输配水管线的管径。

## 6 原水及净水输水管道设计

### 6.1 管线设计

本项目总供水规模为  $90 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , 分二期建设, 本次建设规模为  $45 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。考虑到项目的资金有限, 业主要求, 考虑原水及净水输水管道近期敷设单管, 输水能力为  $45 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , 远期增设一根管道, 保证总输水能力为  $90 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

近期敷设原水及净水输水管线的管道管径均为 DN2 000, 原水管道长度为 0.9 km, 水厂至加压泵站输水管道为 24.2 km, 加压泵站至注水点的输水管道为 7.4 km, 管道总长度为 32.5 km。

### 6.2 防水锤分析

长距离压力输水管道水锤计算及防护至关重要。输水管道系统水锤程度和水锤防护后的控制采用瞬态水力过渡过程计算方法进行分析<sup>[1]</sup>。工程设计对原水管道、水厂至加压泵站的输水管道、加压泵站至注水点的输水管道采用 Surge 水锤计算软件进行模拟分析, 并根据模拟结果合理采取水锤防护措施, 保障在最不利工况下(断电)不发生水锤危害。以水厂至加压泵站的输水管道水锤模拟为例进行分析。

输水管道在无水锤防护措施, 4 台水泵机组同时停机(断电)、液控止回阀拒动工况下, 管路系统的压力包络线见图 11, 最大压力为 0.998 MPa, 最小压力为 -0.093 MPa, 发生汽化。

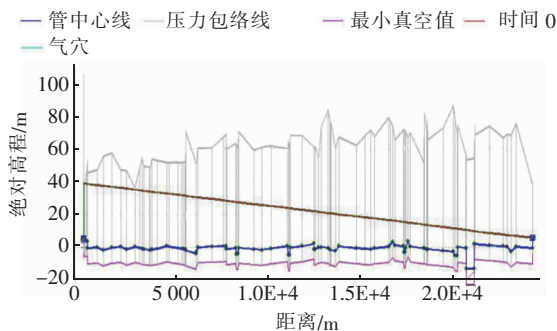


图 11 无保护措施压力包络线图

Fig. 11 Envelope of pressure without protection

从图 11 可以看出, 在管道无防护措施的情况下突然断电, 管道承受的正压及负压均较大, 容易发生爆管, 需对管道采取防护措施。通过控制液控止回阀快关和慢关的时间及快关和慢关对应的开启度、在管道合适位置中设置排气阀等措施, 突然断电的

情况下, 对采用保护措施的管道进行模拟计算, 结果见图 12。

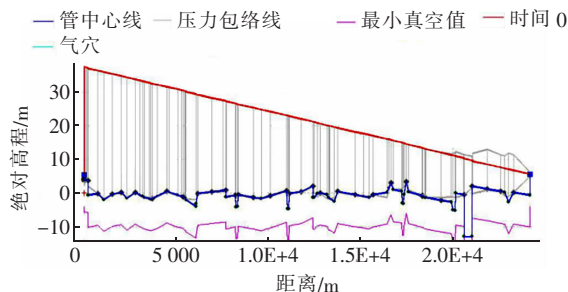


图 12 有保护措施压力包络线图

Fig. 12 Envelope of pressure with protection

图 12 结果表明, 采用水锤消除措施后, 高压被有效消除, 最高节点压力为 0.387 MPa, 负压也控制在 -70 ~ -20 kPa 内, 水锤导致的压力波动得到了控制。

### 6.3 顶管设计

输水管道沿途穿越两处 N8 公路及两处主要河流(Buringanga 河、Dhaleshwari 河)时采用顶管, 顶管的工作井及接收井均采用圆形沉井, 工作井直径为 10 m, 接收井直径为 7 m<sup>[2]</sup>。顶管穿越河道时的埋置深度应位于河床的冲刷线以下, 并满足管道抗浮的要求<sup>[3]</sup>。

为满足这一要求, 管道在穿越 Buringanga 河时, 沉井最大深度达到 32 m, 且沉井毗邻河道、地下水位高、穿越土层为砂性土, 基于以上特性, 沉井采用不排水下沉、水下封底的方案, 对施工质量要求非常高。

顶管穿越 Dhaleshwari 河总长度约为 1 400 m, 一次顶管穿越难度高, 风险大。Dhaleshwari 河为分叉河, 河道中间有小岛, 设计考虑在小岛内设置工作井, 在河道两侧设置接收井, 采用双向顶管的方式进行施工。

过河顶管主要穿越 4 层粉砂土, 顶进阻力大, 且受粉砂土层中承压水的作用, 易产生流砂、管涌, 可能造成开挖面失稳现象, 易引起地层位移及周边地表沉降, 要求精确控制顶管施工。

工程设计选用更能精确控制开挖面水土压力的泥水平衡顶管机, 泥水平衡顶管工法具有工艺成熟且顶距长、能很好控制地面隆沉等特点, 适合本工程。

顶管机头及顶管工作井见图 13。

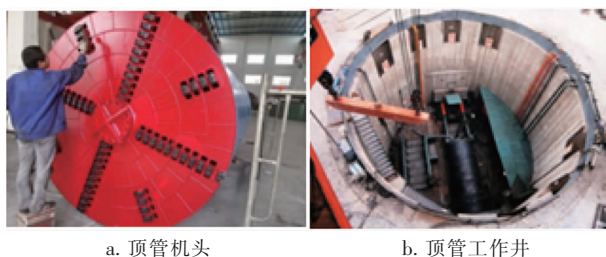


图13 顶管机头及顶管工作井

Fig. 13 Pipe jacking head and working well

#### 6.4 管线附属构筑物

工程区域最高洪水位为 7.12 m,常水位约 3.2 m,除了城区的地势高于 7.0 m 外,其他区域地面标高均在 0.5~3.5 m,由于孟加拉国并没有完整的防洪系统,在雨季地势较低的地方会全部被洪水淹没,给管线的设计、施工及运行带来巨大困难。基于此,为了保障管线的安全运行,在地势较低的地方创新性地设计了“炮楼型排气阀井”(见图 14),将排气阀设置在最高洪水位以上,以保证排气阀的正常运行。



图14 炮楼型排气阀井

Fig. 14 Turret type exhaust well

### 7 调试及运行

水厂建成后,通过单机调试、全厂联动调试及试运行,水厂的出水水量、水压均能满足合同要求,出水水质明显优于合同要求,该工程已于 2019 年 2 月顺利通过孟加拉供排水局(DWASA)的验收并颁发了工程移交证明(Taking-over Certificate)。水厂目前已稳定运行数月,在原水浊度波动大、浊度高的工况下高效澄清池的出水浊度  $< 0.5$  NTU,出厂水浊度  $\leq 0.2$  NTU。

### 8 工程特点

① 项目建设意义重大。该项目为海外大型供

水工程,建成后将解决达卡地区超过 400 万民众的安全饮水问题,是中孟两国在“一带一路”建设中的“民心相通”工程。

② 中国标准走向海外。项目合同签订标准采用中国标准,同时约定不得与孟加拉国标准和国际通用标准相违背,业主聘请了欧洲监理对设计图纸进行审查,经过数次交锋最终赢得了技术认可,通过了设计审查。该工程将国标推向国际迈出了艰难的一步。

③ 给水处理系统全流程设计。包括取水工程、原水输水工程、净水工程、加压泵站及净水输水工程。

④ 取水工程难度大。Padma 河为游荡性河道,取水点位置的选择至关重要,存在取水难度大、取水型式确定困难等特点,最终通过模型试验验证了取水型式的可行性。

⑤ 采用先进、实用、经济的水处理工艺。采用高效澄清池 + V 型滤池的核心水处理工艺,高效澄清池单格沉淀区面积为  $289 \text{ m}^2$ 、V 型单格面积为  $167.8 \text{ m}^2$ ,单格面积均为全球最大。该工艺占地面积小、工程投资省、运行灵活、抗冲击负荷能力强。

⑥ 废水采用分质处理流程。滤池的反冲洗废水在回用水调节池内经过沉淀处理后,上清液回流至进水井、污泥排至缓冲池;高效澄清池内的污泥排入缓冲池,可以与回用水调节池内的污泥通过重力流或者泵送至 Padma 河下游,减少了污泥处理的费用,也能满足当地的环保要求。

⑦ 海绵城市的设计理念的应用。孟加拉雨季降雨量较大,历史最大降雨量能达到  $364 \text{ mm/d}$ ,厂站总图设计时考虑采用下凹绿地、植草浅沟等,既减少了土方量吹填量,又减少排水系统的工程量,在节省工程投资的同时,又较好地解决了雨季排水问题。厂区的雨水排水系统已经过一个雨季的考验,效果非常好。

⑧ 因地制宜,突破国内常规设计思维。基于孟加拉当地主要依靠用户自建地下水池及高位水箱来满足自身不同时间段的用水量,调蓄主要在末端用户,清水池设计可不考虑调蓄功能,水泵及输水管线也可以不考虑时变化系数,因地制宜的设计大大节约了工程投资及运行费用。

⑨ 泵房优化节能设计。取水泵房、送水泵房及加压泵房均采用  $6.6 \text{ kV}$  的高压泵,经多方案经



济、技术比较,采用一半调速、一半定速方案,既节能又有效控制了投资。

⑩ 采用 Surge 计算软件模拟分析水锤。输水管线采用 Surge 水锤计算软件进行模拟分析,合理采取水锤防护措施,为泵站及管线的安全运行保驾护航。

⑪ 输水管线线路复杂、管径大、实施难度大。原水管线及净水输水管线的管径均为 DN2 000,主要采用球墨铸铁管,当管线穿越公路、坑塘及河道时采用钢管。工程区域地形复杂、地质条件较差、征拆困难,约 80% 管线沿正在拓宽的 N8 公路敷设,实施及协调的难度极大,管线穿越公路及河流采用顶管施工,成功实施了大口径、长距离的顶管工程。

⑫ 地基处理复杂。工程设计根据不同的地质情况合理采用不同的地基处理方式,如 RRC 桩、CFG 桩、砂桩、振冲桩、水泥搅拌桩、旋喷桩。

⑬ 应用 BIM 设计并指导施工。用 BIM 进行施工图后设计,用于项目展示及指导施工,有效控制施工质量,减少返工,控制成本。

## 9 结语

本工程针对 Padma 河的河道特性及水质特点,依据水力模型试验的结果,取水工程采用渠道引水的取水方式;净水厂采用高效澄清池 + V 型滤池的核心水处理工艺,保证净水厂出水水质明显优于合同要求;针对大口径长距离输水管线,采用水锤模拟软件合理配置相应的防水锤措施,保障管道的运行安全;本工程设计因地制宜,突破国内常规设计思维,使工程顺利移交孟方业主,项目的成功实施也将将国标推向国际作出了应有的贡献。

## 参考文献:

[1] GB 50013—2006,室外给水设计规范[S]. 北京:中国

计划出版社,2006.

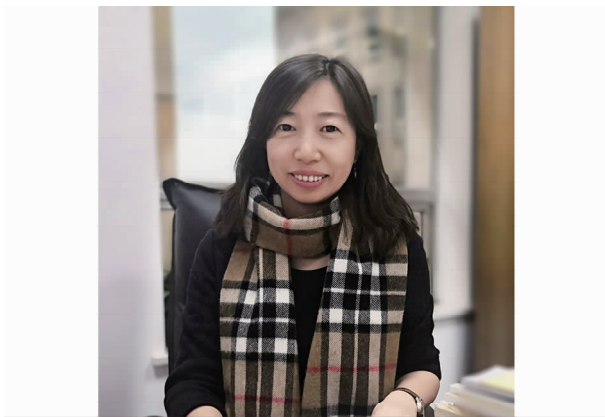
GB 50013 - 2006, Code for Design of Outdoor Water Supply Engineering[S]. Beijing: China Planning Press, 2006(in Chinese).

[2] 车爱伟,李龙伟,胡坤,等. 过河顶管技术在国外大口径输水管线工程的应用[J]. 中国给水排水,2019,35(16):77-81.

Che Aiwei, Li Longwei, Hu Kun, et al. Application of pipe-jacking river-crossing technology in large-diameter pipeline project abroad[J]. China Water & Wastewater, 2019,35(16):77-81(in Chinese).

[3] CECS 246:2008,给水排水工程顶管技术规程[S]. 北京:中国计划出版社,2008.

CECS 246:2008, Technical Specification for Pipe Jacking of Water Supply and Sewerage Engineering[S]. Beijing: China Planning Press, 2008(in Chinese).



作者简介:车爱伟(1974 - ),女,黑龙江绥化人,本科,高级工程师,中国市政工程西北设计研究院有限公司北京分公司副总经理,主要从事市政给排水的设计及研究工作,曾获省级优秀工程勘察设计二等奖。

E-mail:37621370@qq.com

收稿日期:2019-12-11