

设计经验

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.12.010

# 特大型全地下式取水泵站工艺设计及运行安全分析

郭海成<sup>1,2</sup>

(1. 上海水业设计工程有限公司, 上海 200092; 2. 上海市政工程设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200092)

**摘要:** 针对特大型全地下式取水泵站施工难度大、安全风险高、检修维护困难等特点,从工艺需求、集约化布置、水泵配置、安装检修及运行安全等角度提出相关设计原则。以南京某长江取水工程为例,对特大型全地下式取水泵站设计要点进行分析。取水型式的选择应结合水文条件、河床深度、施工难度等因素,保证最低水位时的取水量及较好的水力条件;水泵的选型及配置方案应以工况分析为基础,通过比转数计算,并统筹考虑近、远期的水量变化,确保配泵方案适配需求,经济合理;全地下式泵房的布置应尽量采用叠合、组合形式,以减少地下构筑物的占地面积,优化平面布局及竖向空间,降低基坑开挖深度,同时应结合周边交通条件,合理设置运输检修通道;从安全防护角度考虑,全地下式泵站应重点考虑防淹设计,可通过抬高吊装孔翻口及设置防雨百叶等方式防止雨水进入,并配置快关型闸门切断与外部水源的连通;消防设计建议进行消防专项评估,在经消防审批部门认可的情况下,适当扩大防火分区的面积,以降低消防设施对泵房空间布置的影响。

**关键词:** 全地下式泵站; 防淹设计; 消防设计

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)12-0062-06

## Design and Operational Safety Analysis of Extra-large Underground Water Intake Pumping Stations

GUO Hai-cheng<sup>1,2</sup>

(1. Shanghai Water Design & Engineering Co. Ltd., Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Municipal Engineering Design Institute <Group> Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In view of the problems such as high construction difficulty, high operational risk and strict maintenance requirement of extra-large underground water intake pumping station, the relevant design principles were proposed from the perspectives of process requirements, intensive layout, pump setup, installation and maintenance and operation safety. The design points of an extra-large underground water intake pumping station pumping raw water from the Yangtze River in Nanjing were analyzed. The selection of water intake method should be combined with factors such as hydrological conditions, riverbed depth and construction difficulty to ensure the water quantity at the lowest water level and better hydraulic conditions. The selection and layout of the pumps should be based on the analysis of the working conditions, so as to ensure that the pump plan was satisfactory, economic and reasonable through the calculation of the specific rotate speed and overall consideration of the short-term and long-term water

quantity changes. The layout of underground pumping house should adopt the form of superposition or co-construction as far as possible, reduce the footprint area of underground structures, optimize the layout and vertical space and reduce the depth of foundation pit excavation. In addition, the maintenance and transportation access shall be reasonably set based on the surrounding traffic conditions. From the perspective of safety protection, the underground pumping station should focus on flood prevention design, which prevented rainwater entering by raising the lifting hole flap and setting the rainproof louvers, and adding a quick-closing sluice gate to cut off the connection to the external water source. It is suggested to carry out special fire protection evaluation for the fire protection design of underground pumping stations, and appropriately expand the area of fire protection zone after the approval of fire protection examination and approval department, so as to reduce the impact of fire protection facilities on the spatial arrangement of the pumping house.

**Key words:** underground pumping station; flood prevention design; fire protection design

取水泵站是城市建设中不可或缺的市政基础设施,传统的取水泵站建筑形式多为半地下式,因取水水位通常较低,水泵往往布置于地面以下,地面上设置起吊架或高大净空厂房用于水泵起吊,同时配套设置电气、自控等功能用房,其主要缺点为占地面积大、空间浪费多、运行噪声大等<sup>[1]</sup>。随着城镇化进程日益加快,城市发展空间不断向外扩展,建设用地日趋紧张,环境好、景观美、占地省的全地下式取水泵站已逐步开始推广。

## 1 特大型全地下式取水泵站设计原则

给水工程按建设规模可分为大型、中型和小型项目,规模分别为 $(30 \sim 50) \times 10^4$ 、 $(10 \sim 30) \times 10^4$ 和 $(5 \sim 10) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ <sup>[2]</sup>。规模超过 $50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 甚至 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 以上的泵站通常称为特大型泵站或超大型泵站。特大型泵站在供水系统中往往具有举足轻重的作用,其运行是否安全关系着整个供水系统的可靠程度。如何保证特大型泵站持续稳定、高效、节能运行,是设计需要考虑的重要课题。此外,不同于常规的地面式或半地下式取水泵站,全地下式取水泵站具有施工难度大、安全风险高、检修维护困难等特点,设计过程需全面考虑全地下式构筑物的特点,确保泵站运行安全、可靠。

特大型全地下式取水泵站的设计应遵循如下原则:满足取水工艺需求,水力条件好,取水安全可靠;根据不同工况运行要求,合理进行水泵配置;尽量集约化布置,降低埋深,节省占地;充分考虑设备运输和起吊,便于安装检修;防淹设计完善可靠,确保泵站运行安全;消防设计符合规范要求,合理

高效。

## 2 工程案例分析

### 2.1 工程概况

南京市某特大型长江取水工程,设计为全地下式,取水规模为 $168 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,工程总体布置见图1。工程内容包括取水头部及取水管、取水泵房,土建按总规模一次建成,取水泵房内的设备分期安装,近期设备安装规模为 $108 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

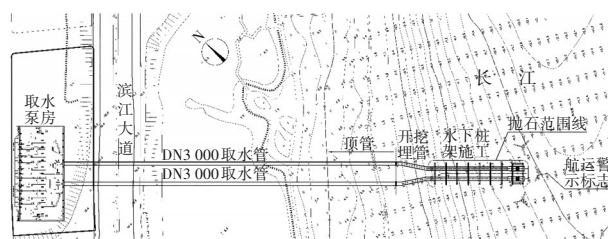


图1 南京市某特大型长江取水工程示意

Fig.1 Schematic diagram of an extra-large Yangtze River water intake project in Nanjing

取水泵站占地面积仅 $3\,442.5 \text{ m}^2$ ,而国家标准中 $50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 地面式泵站的用地指标为 $8\,000 \text{ m}^2$ ,可见,全地下式泵站节地效益显著。工程总投资约3.8亿元,目前项目已完工通水,作为全国最大的水源热泵区域供冷供热系统取水工程,已稳定运行一年,现状运行水量约 $6\,000 \sim 10\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ 。此外,泵站除向各能源站输水提供冷源/热源外,也向城区主要景观河道补水,以改善水环境。

### 2.2 取水型式

取水构筑物型式根据河流水文条件、河床深度、最低水位、对河岸稳定性的影响、漂浮物情况、

通航要求等,结合工程投资和实施难度等多方面因素进行综合考虑。取水泵站在设计保证率的前提下,保证取到设计规模的水量,且应尽量减少取水口的淤积。同时,特大型取水泵站因取水量较大,取水泵的规格往往很大,进水前池应保证较好的水力条件,利于大型水泵运行稳定。

该工程设计取水规模  $168 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,采用河床式取水,即通过取水自流管深入江中,采用格栅喇叭口式取水头部取水。为保证低水位时的取水量需要,取水口顶部位于长江百年一遇最低水位以下。同时,为保证泵站运行安全,在长江大堤内侧岸边建造取水泵房。取水管为两根 DN3 000 钢管,采用顶管穿堤+埋管+水下桩架施工方式,利用泵房进水室作为顶管工作井。

## 2.3 水泵选型

### 2.3.1 运行工况分析

特大型取水泵站的设计规模一般为最大取水量,实际运行时水量多为逐步增长,且往往存在初期小流量的工况。根据项目需求,取水泵站满负荷运行时所需提供的自由水头最大为 19.14 m。长江设计最低水位 -0.50 m (1985 国家高程,下同),设计最高水位 8.60 m,取水泵站设计地坪标高 9.50 m,取水头部、取水自流管及旋转滤网的水头损失 1 m,泵房内的水头损失 3 m,考虑 0.5 m 的富余水头,取水泵站的水泵最大扬程为 32 m。各阶段水量工况对应不同长江设计水位时所需水泵扬程见表 1。

表 1 取水泵站运行工况

Tab.1 Operating conditions of the water intake pumping station

运行工况	流量 $Q/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	扬程 $H$ (低水位)/m	扬程 $H$ (高水位)/m
启动期最小水量	4 300	23.04	13.94
初期最小用水量	6 287	22.56	13.46
初期最大用水量	12 767	23.05	13.95
近期最大用水量	45 187	30.64	21.54
远期满负荷水量	67 371	31.14	22.04

### 2.3.2 水泵选型配置

#### ① 泵型选择

大型取水泵站的水泵较多采用的泵型有:离心泵、斜流泵、轴流泵等。不同泵型的比转数范围不同,离心泵一般对应比转数为 35~300,斜流泵一般对应比转数为 300~500,轴流泵一般对应比转数为

500~1 200。应结合工程实际所需的水泵流量、扬程、转速要求,选择适宜的泵型。此外,轴流泵和混流泵叶轮必须具有一定的淹没水深,因泵房埋深较大,同时,轴流泵和混流泵对进水流道要求较高,往往需设置较大的进水前池。

取水泵房设计规模为  $168 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,结合相关工程经验,运行水泵数量宜为 6~12 台,则单台水泵的运行流量为  $5\,833 \sim 11\,667 \text{ m}^3/\text{h}$ ,满负荷时最大扬程 32 m。为保持运行稳定,大规模取水水泵转速一般较低,该项目水泵转速取 490 r/min。由此计算比转数,如采用单吸泵,则比转数为 169~239,如采用双吸泵,则比转数为 120~169。从比转数来看,离心泵比较适用。同时工程为全地下式泵站,占地应尽量小,埋深不宜太深,离心泵所需进水前池相对较小,且可利用水泵允许吸上真空高度,降低泵房埋深。离心泵效率高,尤其是在平均日工况或其他低流量工况时,水泵依然运行在高效范围,相对轴流泵、斜流泵节能效果明显。且卧式离心泵安装较方便,各地运行维护经验丰富,检修时仅需拆开上部泵壳即能进行检修,维护工作量小,其传动部件一般不与传输介质接触,故障较少。故该工程采用卧式离心泵泵型。

#### ② 水泵配置方案

水泵配置方案要统筹考虑近、远期的水量变化,做到合理、经济、高效,同时兼顾初期小流量工况,通过变频组合及初期单独配泵等方式满足不同工况的运行要求。即配泵方案的设计需满足设计规模、近期和投产初期等各种流量变化及其相应扬程变化,大部分时间段水泵在高效范围内运行。水泵台数既要满足水量变化(结合调速调节)的要求,又要尽量减少泵站投资,应综合考虑确定。为便于运行管理和维护,宜采用相同规格型式的水泵。为适应输水流量变化和所需输水压力变化、节约泵站运行能耗,泵站内的水泵考虑采取调节措施。

本工程参考类似超大型取水泵站设计经验,工作水泵数量定为 6~12 台。如黄浦江上游水源地工程金泽取水泵站,设计规模  $351 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,设置 9 台(7 用 2 备)水泵<sup>[3]</sup>;盐城新水源地及引水工程取水泵站,设计规模  $115 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,设置 10 台(8 用 2 备)水泵。从减少投资和占地方面考虑,在能够达到灵活调配前提下,配泵数量应适当减少,但卧式离心泵单泵规模过大时,需设置专用的冷却水系统,会增



加泵站总体占地面积。在确定本工程最大扬程 32 m 的前提下,为满足离心泵高效、比转数合理的性能要求,且从减少占地角度,不考虑设置专用水冷系统,单台水泵规格不宜过大。最终确定工程按远期  $168 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  规模共配置卧式离心泵 10 台(8 用 2 备)。

工程近期供水规模  $108 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , 最大扬程 30.64 m。对于近期配泵,通过仍采用远期水泵规格+先期安装部分数量水泵+变频运行方式,满足近期供水工况要求。因此,近期水泵按 6 用 1 备配置,同时为适应工况变化,增加运行调度的灵活性,水泵全部变频调速。

工程启动期及初期用水量较小,启动期最小水量仅为  $4\,300 \text{ m}^3/\text{h}$ , 泵站需提供的对应自由压力为 11.04 m,考虑长江水位变化情况,扬程范围为 14~23 m。从上述的配置水泵规格来看,单台水泵通过变频 60% 可以达到  $4\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ 、扬程 12~39 m 工况,但长期变频运行能耗较高。对于初期用水量,设计采用临时安装小泵、将来更换大泵的方式。配备 6 台(4 用 2 备)小泵,流量  $4\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ ,同时考虑到适应工况变化,增加运行调度的灵活性,小泵全部带变频调速。

根据以上分析,工程近、远期采用同一规格型号水泵,再通过变频满足各种运行工况,这对于建造、运行、维护管理是非常有利的。对于运行初期,可临时安装小泵,再以变频辅助方式来满足各种小流量工况,由此做到整个供水体系工况全覆盖。

## 2.4 泵房布置

全地下式构筑物的土方开挖及基坑围护的工程量大,泵房的平面尺寸及埋深对土建工程量及工程投资影响巨大,故应尽量采用叠合、组合形式,优化地下构筑物的埋深,合理利用平面及竖向空间,减少地下构筑物的占地面积,降低基坑开挖深度。

取水泵站设计规模  $168 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , 采用全地下形式,泵站顶部为公园绿地。取水泵房包含进水池、吸水井、泵房、配电间、变频器室、控制室、值班室等。

取水泵房进水池设旋转滤网,拦截水体中的漂浮杂质。滤网后设水泵吸水井,吸水井的设计要保证足够的进水能力,具有平顺均匀的水力形态,同时在满足安全运行的条件下尽量做到经济合理和

管理方便。项目长江取水最低水位为  $-0.50 \text{ m}$ , 考虑取水管的水头损失,进水池最低水位  $-1.30 \text{ m}$ ,扣除旋转滤网的水头损失,吸水井最低水位  $-1.50 \text{ m}$ 。为保证取水能力,吸水井底板高程要满足最低水位下的取水喇叭管淹没深度及最小悬空高度要求,吸水井底板设计标高  $-7.50 \text{ m}$ ,而泵房室外地坪标高  $9.50 \text{ m}$ ,即吸水井底板埋深 17 m。实际设计时,离心泵吸水井的水下容积一般满足共用该吸水井的水泵 30~50 倍每秒设计流量即可,吸水井最低设计水位以上的空间除作为调蓄容积外,均为无效空间。设计在满足吸水井进水布置要求的情况下,将配电间、变频器室、控制室均叠建于吸水井上部,有效利用竖向空间,减少占地。此外,离心泵的吸水井可与泵房分建,也可与泵房合建,该项目采用吸水井与泵房合建形式,以节省用地面积。吸水井设两格,对称布置,每格对应 5 台水泵。取水泵房进水池及吸水井布置见图 2。

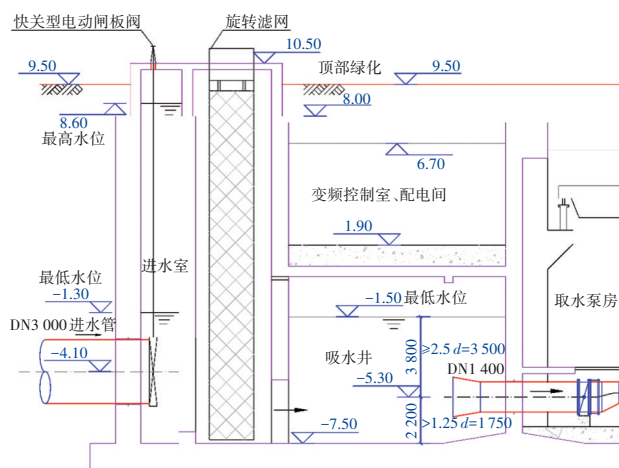


图 2 取水泵房进水池及吸水井布置

Fig.2 Layout of intake chamber and suction well of water intake pumping house

泵房的平面尺寸与水泵的布置形式密切相关,卧式双吸离心泵可以有直线单排布置及交错双排布置方案。水泵采用直线单排布置时,泵房跨度小,但长度较大,操作管理路线较长,一般适用于水泵台数不超过 5~6 台的泵房;采用交错双排布置时,泵房面积小,布置紧凑,但跨度大,且为减少泵房面积,水泵、电机可倒顺转交错布置,适用于水泵台数在 6 台以上及选用大型双吸卧式离心泵的地下泵房。

该项目为全地下式泵房,共设 10 台水泵,为节

省占地,推荐采用交错双排布置方案。泵房内设桥式起重机,泵房一侧设检修平台,顶板设吊装孔,外部汽车吊通过吊装孔及检修平台与室内桥式起重机接驳,完成设备运输。泵房建成后的照片见图3。



图3 全地下式取水泵站建成后实景照片

Fig.3 Photo of underground water intake pumping station after construction

## 2.5 运输检修

全地下式取水泵站的主要设备、阀门、管路等均位于地下,需充分考虑安装及检修条件。可设置进出地下构筑物的汽车坡道,或采用外部汽车吊与内部固定式起重机相结合的方式,地下构筑物顶板设吊装孔,内部设起吊检修平台,满足设备安装检修要求。

考虑到该项目占地较为紧张,且泵房底板埋深较深,不具备设置地下汽车坡道的条件,且地块为公园绿地,较长的汽车坡道对绿化景观整体效果影响较大。因此,设计在泵房顶部设置吊装孔、内部设起吊检修平台,利用外部汽车吊与内部固定式起重机相结合的方式,实现设备的安装和检修维护。

## 2.6 防淹设计

全地下式厂站的水淹风险来源于外水和内水两部分<sup>[4]</sup>。全地下式取水泵站主体构筑物均位于地面以下,且泵房与外部取水水源连通,外水的水淹风险主要来源于雨水和江水,内水的水淹风险主要来源于爆管事故。

雨水可能通过通风孔和吊装孔进入地下箱体,设计时为防止雨水侵入,吊装孔翻口高出地面0.5 m以上,顶部设封闭透明玻璃,透光挡雨。通风孔设置防雨百叶,且百叶高出地面1 m以上。吊装孔及通风孔防淹设计见图4。

因泵房进水室直接与江水连通,为防止江水淹

没泵房,进水室设计顶板标高大干设计最高取水水位,且进水口设快关式电动闸门,同时配置EPS电源,事故时可迅速切断与外部水源的连通。



a. 顶部吊装孔翻口

b. 通风孔

图4 吊装孔和通风孔防淹设计实例

Fig.4 Examples of flood prevention design for lifting holes and venting holes

内水引起的水淹风险主要来源于水锤引起的爆管事故,设计在每台水泵出水管设置防水锤效果较好的液控缓闭蝶式止回阀,可实现两阶段关闭,降低水锤危害。同时,泵房内设置事故排水池及排水泵,并为水泵配置EPS电源,事故发生时可实现应急排水。

## 2.7 消防设计

全地下式取水泵站按其火灾危险性分类一般为丁类厂房。根据现行的《建筑设计防火规范》(GB 50016—2014, 2018年版),丁类厂房的每个防火分区最大允许建筑面积为1 000 m<sup>2</sup>,当厂房内设置自动灭火系统时,每个防火分区的最大允许建筑面积可增加1.0倍。但设置自动喷水灭火系统后,需配套设置消防水箱间等附属设施,占地面积较大。同时,每个防火分区在地上部分也需设置疏散口,过多的疏散口会影响地上部分空间的利用。考虑到取水泵站内可燃物较少,火灾危险性低,且人员停留时间短,建议较大规模的全地下式泵站的消防设计应经消防专项评估,在经消防审批部门认可的情况下,适当扩大防火分区的面积<sup>[5]</sup>。如经消防专项评估后无法突破现行规范扩大防火分区面积,可在检修走道等局部区域设置自动喷水灭火系统,或通过防火隔墙将泵房分为两个或多个防火分区,并在隔墙处设置两处对开的防火门,相邻两个防火分区互相借用疏散楼梯。

该项目泵房区域总建筑面积小于2 000 m<sup>2</sup>,且当地消防部门对消防设计较为严格,考虑到泵房总体长度较长,设计在泵房中间设隔墙,分为两个防火分区,在隔墙处设置两处对开的防火门,互相借

用疏散楼梯。根据规范,仅需设置轻便消防软管卷盘,不设置自动灭火系统。

### 3 结论

① 特大型全地下泵站具有系统重要性高、施工难度大、维护检修难等特点,设计需重点考虑工艺可靠、布置集约、埋深合理、管理便利等要素,确保泵站能够持续安全、稳定、高效运行。

② 水泵选型配置应以运行工况分析为基础,通过水泵比转数计算,选择适宜的泵型,并结合用地条件和近、远期的水量压力需求,合理确定水泵配置数量。

③ 特大型全地下式泵站应以节省占地、降低埋深为原则,在满足工艺取水需求及运行管理要求的前提下,通过建构筑物叠合、组合形式,提高平面及竖向空间的利用率,泵房推荐采用交错双排布置形式,以减少用地面积,降低工程投资。

④ 全地下式泵站安全设计应重点关注防淹及消防设计。防淹措施主要应对外水入侵风险,采用吊装孔翻口抬高、通风口安装防雨百叶及进水端设置快关式闸门等形式;消防设计应着重考虑防火分区划分,特大型全地下式泵站的消防设计建议做消防专项评估,确保安全可靠、合法合规。

### 参考文献:

- [1] 张楠,杜强强,赵和惠.全地下式污水泵站的设计要点[J].中国给水排水,2017,33(22):49-52.  
ZHANG Nan, DU Qiangqiang, ZHAO Hehui. Design key points of underground wastewater pumping station [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(22): 49-52 (in Chinese).

- [2] 住房和城乡建设部.城市给水工程项目建设标准:建标 120—2009[S].北京:中国计划出版社,2009.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Construction Standards of Urban Water Supply Project: Construction Standards 120-2009 [S]. Beijing: China Planning Press, 2009(in Chinese).
- [3] 钟燕敏,郑国兴.市政原水输送系统特大型泵站工艺设计[J].中国给水排水,2019,35(16):62-67.  
ZHONG Yanmin, ZHENG Guoxing. Process design of extra-large scale pumping station in municipal raw water delivery system [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(16): 62-67(in Chinese).
- [4] 陈秀成.全地下污水处理厂防淹设计要点及工程案例[J].给水排水,2022,48(5):50-54,59.  
CHEN Xiucheng. Key points of flood prevention design and engineering examples of underground municipal wastewater treatment plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(5): 50-54,59(in Chinese).
- [5] 刘世德,崔洪升,尹兴蕾,等.全地下污水处理厂消防设计分析及建议[J].中国给水排水,2016,32(16):46-49.  
LIU Shide, CUI Hongsheng, YIN Xinglei, et al. Analysis and suggestions for fire protection design of underground sewage treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(16): 46-49 (in Chinese).

作者简介:郭海成(1989-),男,河北唐山人,硕士,工程师,从事给水工程设计和研究工作,曾获全国优秀工程勘察设计一等奖、上海市优秀工程勘察设计一等奖。

E-mail:guohaicheng@smedi.com

收稿日期:2022-10-04

修回日期:2022-12-14

(编辑:孔红春)

坚持节约资源和保护环境的基本国策