

南水北调东线工程泵站的设计选型

仇宝云¹, 袁寿其², 施卫东², 冯旭松³, 黄季艳¹

(1. 扬州大学 水利学院, 江苏 扬州 225009; 2. 江苏大学 流体机械中心, 江苏 镇江 212013; 3. 江苏省水利厅, 江苏 南京 210000)

摘要: 根据南水北调东线工程的现状、特点和要求, 从耐久可靠性、安全稳定性、安装维修方便性和经济适用性等方面分析了泵房与机组的功能和型式。

关键词: 南水北调; 东线工程; 梯级泵站; 功能; 型式

中图分类号: TU990.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2003)02-0017-04

Type Selection in the Design of Pump Station for Eastern Line Project of Water Diversion Works from the South to North

QIU Bao-yun¹, YUAN Shou-qi², SHI Wei-dong², FENG Xu-song³, HUANG Ji-yan¹

(1. School of Water Conservancy, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 2. Fluid Mechanics Center, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 3. Jiangsu Province Water Conservancy Bureau, Nanjing 210000, China)

Abstract: In the light of present situation, characteristics and demands of eastern line project of water diversion works from the south to the north, analysis was made on the function and type of pump house and pump unit according to its durability and reliability, safety and stability, convenience in maintenance and installation, and adaptability for economy, etc.

Keywords: water diversion from the south to north; eastern line project; cascade pump station; function; type

我国大型泵站目前存在的主要问题是泵站、机组结构型式及功能选用不尽合理, 机组故障率和维修费用高, 而南水北调东线工程是国家大型重点工程, 装机容量大, 运行时数达 5 000~6 000 h/a, 任何一级泵站发生故障都会影响整个调水工程的正常运行。因此, 一定要合理规划、设计、选型, 提高供水可靠性, 节省维修费用, 降低调水成本。

1 泵站梯级设置

泵站梯级数将影响工程投资。泵站相距远、高差大、扬程高、梯级少, 则泵站建设投资少, 但泵站出

水侧的河道堤岸需要相应加高, 河道工程投资将增加; 相反, 泵站距离近、扬程低、梯级多, 可以减小河堤高度, 但泵站数量增加, 泵站建设和管理费用增加。设泵站为 m 级, 总输水距离为 L , 长江取水口流量 $Q_0 = 1\,400\text{ m}^3/\text{s}$, 第 i 级泵站流量为 Q_i 、扬程为 H_i , 过黄河流量 $Q_H = 700\text{ m}^3/\text{s}$, 沿途渗漏、蒸发流量损失为 q (与河道土质、断面形状、河面面积、纵向坡度、输水流量有关), 沿途分流点的分流量为 q_j ($j = 1, 2, \dots, n$), 河道沿程水头损失为 h (与河道粗糙度、纵向坡度、断面形状、输水流量有关)。又设总

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50179032); 江苏省水利科技重点项目(2001055)

装机容量为 N , 单位电价为 y_1 , 泵站单位装机容量年管理费用为 y_2 (与机组型式和单机容量有关), 单位流量年管理费用为 y_3 , 年运行时间为 t , 泵站效率为 η_z (包括泵站用电), 泵站单位造价为 y_4 (与机组型式和泵站结构有关), 河道疏浚、河堤加固单位费用为 y_5 (与河段现有过流能力、需要过流流量、过流水位、现场条件有关), 工程使用年限为 T , 则泵站运行年动力费用为:

$$Y_1 = \frac{\rho g y_1 t}{10^7 \eta_z} \sum_{i=1}^m Q_i H_i \tag{1}$$

泵站年管理费用为:

$$Y_2 = y_2 N \times 10^{-3} + y_3 \sum_{i=1}^m Q_i \times 10^{-3} \tag{2}$$

式中 $N = \frac{\rho g}{10^3 \eta_z} \sum_{i=1}^m Q_i H_i + N_b$, N_b 为备用装机功率

泵站、设备、河道工程投资年折旧 (静态):

$$Y_3 = \frac{1}{T} \left(\frac{y_4}{10^6} \sum_{i=1}^m Q_i H_i + \int_0^l y_5 dl \right) \tag{3}$$

工程优化规划设计要求调水成本最低, 即:

$$\text{MIN } Y = \text{MIN} (Y_1 + Y_2 + Y_3) \tag{4}$$

约束条件包括

① 流量约束:

$$Q_0 \geq Q_1 > Q_2 > \dots > Q_m \geq Q_H \tag{5}$$

② 河道控制点流量约束:

$$\begin{aligned} Q_0 &\geq 1\,400 \text{ m}^3/\text{s}; \quad Q(L_1) \geq Q_{R1}; \\ Q(L_2) &\geq Q_{R2}; \dots; \quad Q_H \geq 700 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned} \tag{6}$$

③ 流量守恒:

$$Q_H + \sum_{j=1}^n q_j + \int_0^L q dl = Q_0 \tag{7}$$

④ 扬程约束:

$$3 \leq H_i \leq 10, \quad i = 1, 2, \Lambda, m \tag{8}$$

⑤ 扬程守恒:

$$40 + \int_0^L h dl = \sum_{i=1}^m H_i \tag{9}$$

⑥ 梯级约束:

$$m \geq 5 \tag{10}$$

式中 L_k ——第 k 控制点距长江的输水距离
 $Q(L_k)$ ——该控制点处河道的实际流量
 Q_{Rk} ——控制点最小流量, $Q_{Rk} = \int_{L_k}^L q dl + \sum_{i \geq L_k} q_i + Q_H$

利用上述模型可以确定泵站梯级、位置及有关

参数。泵站站址选择还要考虑现有泵站、河道和水文地质、交通等情况。按初步规划, 该工程设泵站 13 级, 共 30 处, 调水流程如图 1 所示。

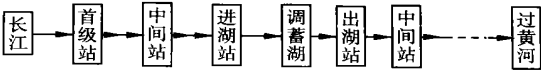


图 1 梯级泵站调水流程

2 泵站的断流方式

大型泵站一般采用 3 种断流方式: 拍门断流、闸门断流和真空破坏阀断流。拍门断流投资较省, 但拍门长期浸没于水下, 受出水的冲击摆动, 门较容易因锈蚀和疲劳而损坏, 导致拍门冲落, 造成停机倒流; 拍门关闭对流道出口的撞击力很大; 出水池泥沙淤积阻碍拍门开启, 容易造成机组闭门启动而过载, 这些都对工程和机组安全不利。混流泵不易过载, 为节省工程量, 减小出水流道水力损失, 适应出水池的水位变化, 宜采用平直管出水流道、快速闸门断流。首级站、中间站、出湖站出口水位可以按设计控制不变, 若采用轴流泵, 最好采用虹吸出水流道、真空破坏阀断流, 以保证停机断流可靠。

3 水泵机组型式

3.1 轴流泵与混流泵

轴流泵设计扬程为 3.0 ~ 9.5 m (30 ~ 95 kPa), 混流泵设计扬程为 6.0 ~ 20.0 m (60 ~ 200 kPa)。水泵扬程取决于泵站梯级的设置和进、出口水位, 泵房型式则取决于水泵型式。轴流泵接近零流量时扬程和功率很大 (约为设计值的 2 ~ 3 倍), 高扬程区 $Q \sim H$ 曲线存在“马鞍”形, 运行时易振动, 而停机用快速闸门断流时门体下降时刻和速度难以控制, 容易造成闭阀运行而过载或倒转飞逸, 影响机组和泵站安全。混流泵 $Q \sim N$ 曲线比较平缓, 机组不易过载, 高效区宽于轴流泵, 如有可能应优先选用混流泵。

3.2 机组容量与台数

从耐久可靠性和环保角度考虑, 该工程宜采用电动机作为大型水泵的配套动力。泵站机组的大小涉及多方面因素。若机组太大, 台数过少, 则运行保证率降低。如只设 2 台机组, 1 台发生故障后抽水量仅为 50%; 若 1 台备用, 则因机组过大造成浪费。相反一座泵站装机台数过多, 则站房和前池、出水池开挖大, 既增加土建投资又使运行管理不便。泵站运行所需管理人员数量 (p) 可用下式计算:

$$p=p_0+\frac{z}{z_0}\tag{11}$$

式中 p_0 ——泵站运行基本管理人员数量, 主要负责在总控制室通过仪器、仪表监视机组运行状况和记录有关数据, $p_0=2\sim 3$ 人, 自动化程度高的泵站取小值, 反之取大值

z_0 ——1 名值班人员负责巡回检查的机组台数, $z_0=1\sim 3$ 台/人, 机组设备简单、容量小的泵站取大值, 反之取小值

z ——泵站机组运行台数

泵站装机容量一定, 单机容量越小装机台数越多, 所需管理人员也就越多。综合考虑制造、安装、管理、效率、技术条件和抽送吨水单位造价等因素, 选用叶轮直径 $D=2.8\sim 3.1\text{ m}$, 配套功率 $N=1\,000\sim 3\,000\text{ kW}$, 单站台数为 $4\sim 8$ 台较为合适。考虑到该工程的重要性和特殊性, 每站应设置 1 台备用机组, 备用流量为 $15\%\sim 20\%$ 。

3.3 机组轴线型式

水泵机组结构型式不但影响泵站结构、投资和效率, 而且还影响机组本身的耐久可靠性、安装维修和工况调节性。斜式和卧式水泵的流道水力损失小, 站房高度低, 工程投资较省, 但需采用转速较高的小体积电机降速传动, 故机组的受力条件、运行环境、调节功能和安装检修功能差。机组轴线型式对比见表 1。

表 1 机组轴线型式对比

轴线型式	流道水力损失	工况可调性	导轴承荷载	安装检修	电动机环境
立式	较大	好	小	容易	好
斜式	较小	不好	较大	较难	较好
卧式	较小	不好	大	较难	较差
(贯流式)	最小	较差	大	困难	最差

该工程运行时间长, 可靠性要求高, 宜采用导轴承荷载较小的立式机组。立式方案可以方便地设置叶片调节机构, 采用该方案提高工程供水可靠性、节省运行维修费用产生的经济效益和社会效益远远大于采用斜卧式方案所节省的工程投资。

3.4 立式机组关键结构

① 电机结构。与大型立式水泵直联配套的同步电机体积大, 出厂为分散式结构, 需在泵站进行组合安装, 且安装要求高, 技术性强。电机设顶车装置

和推力轴承液压减载装置, 可大大方便机组的安装与检修。采用空气冷却器封闭通风结构, 可减少空气中的灰尘与油缸产生的油蒸汽混合物粘附于电机定子铁心与线圈及通风槽内造成的影响, 保证通风散热良好, 延长电机大修周期。

② 水泵结构。几种立式泵机组结构的对比见表 2。

表 2 立式水泵结构的对比

结构型式	耗费金属	耗费钢筋混凝土	导轴承数	土建施工	安装检修	叶轮直径 (m)
弯管式	最多	最少	2	容易	较难	≤ 1.8
半井筒式	较多	较少	1	较易	容易	$2.0\sim 3.1$
全井筒式	较多	较多	1	一般	较难	3.0
圪工式	最少	较多	1	最难	较难	≥ 2.8

叶轮外壳、进水伸缩节及导叶体的下半部分裸露在水泵层的结构称半井筒式, 水泵外安装操作空间大, 便于故障观测与检修, 这种结构机组安装检修性能最好, 故推荐采用。

③ 导轴承。导轴承是水泵关键的但易磨损的部件, 也是水泵运行寿命、大修周期和可靠性的主要控制因素。立式机组导轴承荷载小, 可以采用水润滑、非金属轴承。立式机组不平衡径向力与叶轮直径 D 的 $2.0\sim 2.5$ 次方成正比, 为防止河水泥沙进入而磨损轴承, $D\geq 2.0\text{ m}$ 的水泵非金属轴承宜采用清水润滑。采用护管式结构, 清水润滑轴承使用寿命可以达到 $30\,000\text{ h}$ 。提高机组的制造安装质量, 对泵轴径向荷载进行控制和预测有利于减小轴承荷载, 提高设计水平, 延长使用寿命。

④ 工况调节功能。大型、低扬程水泵通过改变工况可满足启动、流量和经济运行的要求。改变工况的方法有: 改变叶片安装角、改变水泵转速、改变固定前导叶角度。扬程随调蓄湖水位经常变化的进湖站和出湖站应设置全调节机构, 根据实际扬程调节叶片角度, 保证装置效率最高。有些泵型变角经济运行, 泵装置效率可提高 $5\%\sim 10\%$ 。油压式调节机构的耐久可靠性好, 但装置较复杂。机械式调节机构结构紧凑、操作简便, 目前已广泛采用, 但其可靠性还有待提高。

采用水泵叶轮叶片调节时等效率线基本与流量 Q 轴平行, 扬程变化不大, 比较适用于流量调节。叶片频繁调节, 根部与轮毂之间的“λ”形橡皮密封容易失效(漏油或进水)。德国 KSB 公司生产的具有

可调前导叶的混流泵结构简单可靠、造价低、等效率线基本与 $Q \sim H$ 曲线平行, 更适合于扬程变化较大的泵站经济运行。

该工程首级泵站进口水位受海潮影响一天涨落两次(见表3), 泵站扬程变化特别频繁, 采用变频装置实现调速经济运行在经济上是合理的, 技术上也是可行的, 装置还可用于机组低速启动, 减小启动功率, 低速停机也可减小闸门断流过载的危险。如2 000 kW 变频装置设备及安装调试费用约需130万元, 按运行5 000 h/a 计算, 则3~4年所节省的电费即可收回增加的设备投资。

表3 50年间月平均最高、最低潮位

月 份	6月	7月	8月	9月
最高潮位(m)	4.361	4.853	4.793	4.503
最低潮位(m)	1.973	2.571	2.439	2.153

4 结 论

可靠性和经济性是南水北调东线工程梯级泵站设置需要考虑的两个主要问题。各梯级泵站间距应适当, 应优先选用混流泵。泵站应以调水为主, 设计和选型不能因考虑排涝和反向发电等其他功能而影响正常的调水功能。

综合考虑耐久可靠性、经济适用性和安装维修等方面, 该工程宜采用立式半井筒式直联水泵机组。混流泵宜采用平直管出水流道、快速闸门断流, 必须采用轴流泵时, 则首级站、中间站和出湖站宜采用虹吸出水流道、真空破坏阀断流, 保证启动和停机安全。进湖站和出湖站宜设置叶片全调节机构或可调前导叶以实现变角经济运行; 中间站扬程比较稳定, 如果没有特殊启动要求和流量微调要求(如装机台

数较多), 可以采用半调节叶轮; 首级站因进口水位受长江潮位的影响, 扬程变化频繁, 宜设置变频装置实现调速经济运行。

参考文献:

[1] 仇宝云. 大型立式轴流泵导轴承荷载分析计算[J]. 农业机械学报, 2000, 31(1): 58—61.

[2] 仇宝云, 魏强林, 龚维明, 等. 大泵机组结构功能对机组安装的影响比较[J]. 水泵技术, 1998, 29(4): 12—15.

[3] 仇宝云, 汤正军, 黄海田, 等. 大型水泵机组大修与大修周期分析[J]. 水泵技术, 1998, 29(3): 40—42.

[4] 魏强林, 黄海田, 仇宝云. P23 酚醛塑料轴承在大型立式水泵导轴承上的应用[J]. 水泵技术, 1999, 30(2): 26—28.

[5] 仇宝云, 魏强林, 汤正军. 护管式清水润滑轴承在大型立式水泵中的应用[J]. 农业工程学报, 1999, 15(3): 256—258.

[6] 仇宝云. 全调节泵站变角经济运行[J]. 水泵技术, 1993, 24(4): 25—28.

[7] 仇宝云, 刘超. 泵站水泵叶片调节方式概论[J]. 水泵技术, 1997, 28(4): 29—33.

[8] 仇宝云, 黄海田, 莫岳平, 等. 高港泵站1~3号机组变频调速效益分析[J]. 灌溉排水, 2000, 19(4): 56—60.

作者简介: 仇宝云(1962—)男, 江苏扬州人, 扬州大学水利学院、江苏省水利动力工程重点实验室教授, 在职博士, 主要从事大型水泵机组及装置结构和水力特性研究与教学工作。

电话: (0514)7328976

E-mail: yzdxqby@pub.yz.jsinfo.net

收稿日期: 2002—09—08

。工程信息。

河南省平顶山市污水处理厂工程

该污水厂位于平顶山市东郊, 一期处理规模: $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 二期处理规模: $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; 处理工艺: 氧化沟, 所需主要设备: 横卧式转刷、离心式脱泥机、潜污泵, 占地面积: 1.7 hm^2 ; 服务区域: 平顶山市区, 一期投资额: 2.2 亿元, 二期投资额: 1.7 亿元人民币。设计单位: 东华工程股份有限公司, 建设单位: 中建七局、中建八局、河南省建安总公司、平顶山市建安公司。目前一期工程已完成, 二期工程正处于可行性研究阶段。

(河南省平顶山工学院 吴少杰 供稿)