

文章编号: 1000-646X(2003)02-0069-05

南水北调东线工程梯级 泵站的几个问题^{*}

仇宝云^{1,2}, 袁寿其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, 江苏 镇江 212000; 3. 江苏省水利厅, 江苏 南京 210005)

摘 要: 根据南水北调东线工程的特点、要求和现状, 提出工程梯级泵站、机组结构与功能选用原则。从可靠性、耐久性、稳定性、安装性、维修性、经济性和适用性方面分析泵站适宜采用的水泵机组结构形式及断流方式。研究泵站优化经济运行所需考虑的因素与实现方法。结论对工程的规划、设计、设备选型、运行管理与现有泵站的增容、更新改造有参考价值。

关 键 词: 南水北调东线工程; 梯级泵站; 水泵机组; 优化运行

中图分类号: S277.9 **文献标识码:** A

1 水泵机组型式

1.1 水泵形式

混流泵与轴流泵特性差异: 轴流泵设计扬程 3.0~9.5 m, 混流泵设计扬程 6.0~16.0 m。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, 小流量区(高扬程) $Q-H$ 曲线存在“马鞍”形区域, 运行不稳定, 起动扬程高, 功率大, 易振动, 停机用闸门或快速闸门断流, 门体下降时刻和速度难以控制, 容易造成闭阀运行而超载, 或倒转飞逸, 影响机组和泵站安全。混流泵 $Q-N$ 曲线比较平缓, 机组起动和停机断流比较容易。叶片角度一定, 混流泵高效区宽于轴流泵。在其他条件相同情况下, 应优先选用混流泵。

水泵及泵站扬程取决于工程规划的泵站位置与设置情况、长江取水口水位和湖泊调蓄水位。泵站梯级少, 上下级泵站相距远, 高差大, 河道输水水力损失大, 则泵站扬程高, 可以采用混流泵, 但泵站出水侧的输水河道堤岸需要相应加高, 河面面积增大, 增加河道工程投资和输水渗漏、蒸发损失及河堤的不安全性。相反, 泵站梯级多, 距离近, 扬程低, 泵站数量增加, 可以减小河堤高度, 但增加泵站建设费用和采用轴流泵的可能性。泵站站址选择还要考虑到现有河道和水文地质、交通等情况。因此, 泵站梯级设置要权衡利弊, 统筹考虑。

1.2 动力机型式

采用柴油机作为大型水泵的动力, 可以省去输变电设施, 建设周期短, 但故障率高, 噪声大, 运行排放大量油烟, 柴油运输和储备烦琐, 易污染环境。该方案仅适合于运行时数较短的半临时性排涝泵站, 国外有部分泵站采用。从可靠性、长久之计和环保角度考虑, 不适用于本工程。

大型水泵采用同步电动机作为动力, 运行效率高, 环保性能好, 管理操作方便, 能满足起动转矩要

^{*} 收稿日期: 2002-09-19

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

作者简介: 仇宝云(1962-), 男, 江苏扬州人, 教授, 博士, 主要从事大型泵站与水泵机组结构、故障和运行方面的研究。

求。采用极数少、体积小的电动机,可以降低设备造价,但由于水泵转速较低,需设置降速装置,调节机构设置困难,齿轮变速箱噪声大、可靠性差,安装维护要求高,故只有少部分斜式和卧式机组采用,这类机组如果采用大体积直联传动电动机则无法布置。

1.3 机组容量与台数

泵站机组大小的确定涉及多方面因素。机组太大,台数过少,运行保证率低。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、出水池开挖长度大,增加土建投资,运行管理不便。综合考虑制造、安装、管理、效率、技术条件成熟和抽送每千吨米水单位造价等因素,选用叶轮直径 $D=2.8\sim 3.1\text{ m}$ 左右,配套功率 $N=1000\sim 3000\text{ kW}$ 左右,单站台数 4~8 台较为合适。考虑到本工程的重要性和机组年运行时间长的特点,每站应设置 1 台备用机组。

2 水泵机组与泵站结构

2.1 机组轴线形式

泵站结构形式主要取决于水泵机组结构和进出水流道形式。机组轴线形式有立式(弯管式、井筒式、圪工式、双蜗壳式、箱涵式)、斜式(15° 、 30° 、 45°)和卧式(平面 S 形流道式、水平轴伸式、猫背式、贯流泵机组及双向泵)等。立式水泵采用最多,应用时间最早,技术最为成熟。

不合理的水泵结构故障率高^[1]。斜式和卧式水泵流道水力损失小,站房高度小,工程投资较省,但需降速传动,机组受力条件、运行环境、调节功能和安装检修性差。最致命的弱点是导轴承荷载大,可靠性差。可以说,国内应用的大型斜式和卧式水泵在可靠性和耐久性方面是不成功的。贯流泵机组对密封要求高,内壁结露很难解决,安装检修和运行维护困难。

因此,本工程运行时间长,可靠性要求高,宜采用导轴承荷载较小的立式方案。考虑到本工程大部分泵站运行扬程随水位经常变化,立式方案可以方便地设置叶片调节机构,可以根据实际扬程调节水泵工况,使泵装置始终处于高效运行。本方案虽然流道水力损失稍大,但由于具有较好的工况调节功能,平均泵装置效率实际高于无法设置调节机构实现变工况经济运行的斜、卧式装置。采用本方案提高工程供水可靠性和运行效率、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。

2.2 立式机组及泵站结构

立式弯管式水泵有一 60° 金属弯管,在弯管上部和导叶体内设有 2 只导轴承,2 只导轴承与定子安装对中困难^[2],适用于叶轮直径 $D=1.20\sim 2.00\text{ m}$ 的中型水泵。立式圪工式水泵的出水弯管用钢筋混凝土现场浇筑而成,泵轴穿出处设有密封,水泵部件必须由站房一端的吊物孔吊入,经水泵层运输通道运至机坑安装,安装检修极不方便。采用的水泵有 $D=2.80\sim 4.00\sim 4.50\text{ m}$ 轴流泵、 $D=2.85\sim 5.70\text{ m}$ 双蜗壳式混流泵。立式箱涵式水泵是近年来发展起来的,它适用于内外水位变化频繁、高低交错的沿江圩区特低扬程双向双层流道泵站,如江苏高港泵站,这种结构上下层流道仅有一板所隔,可以提灌和排涝,也可利用底层流道自流灌溉和排涝。在泵轴穿出上层流道处设有泵盖和密封。这种结构泵站不但能省去实现双向功能的控制闸,还能减小并联合制闸的长度。但水泵状态难以检查观测,安装检修极不方便。立式井筒式水泵安装在现浇混凝土井筒内,所有部件均可由井筒吊入安装,可以进入人对导轴承进行检修,上部金属泵盖与井筒配合形成弯管。其中,水泵全部包围在井筒内的结构,称全井筒式,如江苏刘老涧泵站,该种结构可以简化泵站排水系统,但叶轮故障观测和检修困难;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,目前有 $D=2.00\sim 3.10\text{ m}$ 轴流泵采用。这种结构机组安装检修性能最好,故推荐采用。最近建成的位于本工程三级调水的江苏省淮阴二站即采用了这种结构。

导轴承是水泵关键易磨易损部件,是水泵运行寿命、大修周期和可靠性的主要控制因素^[3]。巴氏合金轴承采用稀油润滑,需要密封和排漏装置阻止泵内水体进入轴承破坏润滑条件。但密封装置经常失效而大量漏水损坏轴承,润滑油泄漏污染水体。据调查,江苏省几乎所有大泵油轴承都发生过浸水受损事故,同一水泵 10 年发生多达 18 次之多^[4]。水润滑非金属导轴承无浸水受损问题,但承载力低,大型斜式

和卧式水泵泵轴径向荷载大,采用非金属轴承易发生偏磨和损坏,运行寿命仅有 100~ 500 h。立式机组轴承荷载大大减小,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~ 2.5 次方成正比,为防止河水中泥沙磨损轴承, $D \geq 2.0$ m 的水泵非金属轴承宜采用清水润滑,传统的清水润滑轴承平板橡皮与不锈钢动环密封效果差,仍有泥沙进入磨损轴承和轴径。采用护管式结构^[5],清水润滑轴承使用寿命可以达到 30000 h。立式泵轴承荷载主要与电机定转子之间的间隙不均匀度、转动部件不平衡质量力、叶轮来流方向与轴向夹角、叶片安装角度差值等制造、安装质量有关。提高机组制造安装质量,对泵轴径向荷载控制和预测,有利于减小轴承荷载,提高轴承设计水平,延长使用寿命。

汽蚀是衡量水泵耐久性的主要因素。更新改造后的江苏江都第一、二抽水站,水泵叶片和外壳采用不锈钢,成本增加不多,经一个周期运行后检查,几乎没有汽蚀痕迹,值得推广应用。叶轮外壳内表面中部镶嵌不锈钢带,可提高抗汽蚀性能,更换方便、经济。对相关过流部件表面进行粉末喷涂等预处理,可以提高抗汽蚀性能。

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,需在泵站进行部件组合安装,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,可阻止空气中的灰尘与油缸产生的油蒸汽混合粘附于电机定子铁心与线圈及通风槽内,保证通风散热良好,延长电机大修周期^[3]。

2.3 断流方式

泵站采用拍门断流,拍门长期浸没于水下,受出水的冲击摆动,门铰容易锈蚀和疲劳破坏而致拍门冲落,造成停机倒流;拍门关闭对流动出口的撞击力很大;出水池泥沙淤积阻碍拍门开启,容易造成机组闭门起动而超载。这些都对工程和机组安全不利。首级站、中间站、出湖站出口水位可以人为控制保持不变,轴流泵站最好采用虹吸出水流动真空破坏阀断流,以保证起动和停机断流可靠性;为节省工程量,减小出水流动水力损失,混流泵宜采用平直管出水流动、快速闸门断流。

3 泵站功能

3.1 双向提水功能

南水北调东线工程部分大型泵站兼有排涝任务。实现双向提水的方法有:① 泵站单向抽水,通过水闸调节控制;② 泵站采用单向水泵、双向流动(包括利用下层流动道自排自引);③ 采用可调头安装的水泵;④ 单向叶片安装角度改变 180°,水泵反向旋转;⑤ 采用 S 形叶片双向水泵。后 4 种方案可以省去控制水闸,工程量大大节省。但双向流动方案抽水时,进水流道和出水流道内流动水体与静止水体交汇,叶轮来流紊乱,不能满足轴向均匀条件,出水弯管内水力损失增加,泵装置效率很低。流动极不稳定,进水侧容易发生涡带汽蚀,压力剧烈脉动,功率时大时小,机组振动加剧,水泵导轴承极易损坏。双向流动机组稳定性、可靠性和能量性能都比较差,只适用于年运行时数很短的泵站,如江苏省镇江谏壁泵站、安徽省凤凰颈泵站。方案 3~ 5 采用单层流动道,土建投资最省,但只适用于卧式水泵,导轴承荷载大,油润滑轴承密封不可靠,水润滑轴承承载能力差,寿命短。方案 3 需要叶轮及外壳和导叶体同时换向安装,拆装工作量大,实现困难。方案 4 存在后导叶匹配问题。方案 5 的 S 形双向叶片单向效率低于单向叶片。

本工程兼有排涝任务的泵站少,排涝时间短,而主要功能是调水,运行时间特长,要求运行可靠,调水效率高、成本低。考虑到现有泵站需要的排涝功能大都已经具备,如江苏省江都水利枢纽和苏北灌溉总渠水利枢纽,且大都采用了效率高、可靠性好的单向泵站与控制闸结合方案(方案 1),所需新建的兼有排涝功能的泵站很少,与整个工程的可靠性和运行费用相比,这部分泵站采用方案 1 增加的控制闸工程投资无足轻重。因此,为工程沿线泵站可靠性相匹配,保证调水可靠性不因某一泵站因采用卧式水泵,导轴承容易损坏而受到严重影响,新建具有双向提水功能的工程宜采用站闸结合方案。

3.2 反向发电功能

江苏省江水北调工程部分大型泵站可以利用上游余水反向发电,增加收入。为提高发电效率,可以采用双速电机(江都三站)、变频调速(刘老涧泵站)等方案,在进出水流道与断流方式上予以适当考虑。根据统计,南北方同时出现多水的年份极少,这就意味着本工程正式启用后,在江苏多水年份仍需向北调水,能够利用余水发电的机率大大减少。因此,为保证调水运行高效、稳定可靠,新建泵站及机组应按

水泵运行工况要求进行设计选型,而不专门考虑反向发电要求。在上述前提下,如果反向发电效果显著,基本不增加工程投资,只需电气设备附带考虑,并且发电运行不会造成振动、汽蚀等明显的不良影响,则可以考虑设置反向发电功能。

4 工况调节与优化运行

大型低扬程水泵通过改变工况满足启动、流量和经济运行要求。变工况方法有:改变叶片安装角、改变水泵转速、改变固定前导叶角度。

叶片全调节机构费用约占泵机组设备费用的 $1/4$ 左右。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 $5\% \sim 10\%$ 。全调节机构还可调小叶片角,减小启动转矩;调大叶片角,增大抽水流量。油压式调节机构可靠耐久性好,但油压装置系统复杂。机械式调节机构结构紧凑,操作简便,目前已广泛采用,但可靠性还有待提高。

水泵叶轮叶片调节,等效率线基本与 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。近年来,德国 KSB 公司生产的具有可调前导叶的混流泵,机构简单可靠,造价低,等效率线基本与 $Q \sim H$ 曲线平行,更适用于扬程变化较大的泵站经济运行,是发展方向。

本工程首级泵站进口水位受海潮影响,一天长落 2 次,泵站扬程变化特别频繁,可以采用变频装置实现调速经济运行,虽然变频装置费用高,经济上仍是合理的,技术上也是可行的,装置还可用于低速启动,减小启动功率,低速停机减小闸门断流过载的危险。如 2000 kW 变频装置设备及安装调试费用约需 130 万元,按年运行 5000 h 计算,3~4 年所节省的电费即可收回增加的设备投资。

根据工程调度要求,如果要求某一梯级泵站保证一定抽水流量,则在同一梯级的并联泵站中,应优先运行河道短直宽、泵装置效率高、运行成本低的泵站。如果要求在规定时间内向上级调蓄湖抽蓄一定体积的水量,则泵站特别是首级泵站可以在进口低水位时(扬程高)不抽水或少抽水,而在进口高水位时(扬程低)机组全开,加大抽水流量,即低水不抽或少抽,高水尽量多抽。水泵流量加大后,轴功率反而减小(轴流泵)或变化不大(混流泵),与高扬程运行相比,不任此时装置是否在高效区运行,都可节省运行费用。如果实行电价白天与夜间分开计量,分别计费,白天电价高,夜间电价低,则应尽量加大夜间的抽水流量。因此,应在保证时段总抽水量、考虑河道输水能力的前提下,根据各泵站及河道情况,泵装置性能和变工况功能设置情况,同时考虑到白天和夜间电价和水位变化及上下梯级站的配合,利用系统工程的方法确定最优运行方案。

5 结 论

可靠性和经济性是南水北调东线工程梯级泵站需要考虑的二个主要问题。泵站应优先选用混流泵,上下梯级泵站间距应适当。泵站功能应以调水为主,泵站设计及机组选择不能因考虑排涝和反向发电等其他功能而影响正常调水功能。

综合考虑稳定性、可靠性、维修性和经济性,本工程宜采用立式半井筒式直联水泵机组,单向流道。混流泵宜采用平直管出水流道,快速闸门断流;首级站、中间站和出湖站轴流泵采用虹吸出水流道,真空破坏阀断流,保证启动和停机断流安全。进湖站和出湖站宜设置叶片全调节机构或可调前导叶,实现变角经济运行;中间站扬程比较稳定,如果机组启动没有特殊要求,可以采用半调节叶轮;首级站因进口水位受长江潮位影响,扬程变化频繁,宜设置变频装置实现调速经济运行。在变工况经济运行的基础上,可以根据不同泵站及输水河道特点、不同时段扬程和电价的变化,实行高效多抽、低效少抽,高水多抽、低水少抽,低价多抽、高价少抽,实现系统的最优运行,最大限度地节省运行费用,降低调水成本。

参考文献:

- [1] Bright Robert D. 叶片泵运行中故障原因的确定 [J]. World Pumps, 1996, (35): 60~61.
- [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, (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,(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,(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.

Several Problems about Step Pump Stations in Eastern Route
South-to-North Water Transfer Project

QIU Bao-yun^{1,2}, YUAN Shou-qi², FENG Xu-song³, HUANG Ji-yan¹

- (1. Hydraulic and civil Engineering College of Yangzhou University, Yangzhou 225009, China;
2. Jiangsu University, Zhengjiang, Zhenjiang 212000, China;
3. Jiangsu Water Conservancy Bureau, Nanjing 210024, China)

Abstract Based on the present situation, characteristics and demands of Eastern Route South-to-North Water Transfer Project, several principles for selecting pump stations and pump units are put forward. The suitable types and structures of pump stations and pump units in the project are analyzed and discussed in view points of reliability, durability, stability, installation, maintenance, economy and operation. Relevant effecting factors and realizing methods for optimal and economical operation of the step pump stations are also discussed in this paper, which is helpful for planning, designing, equipment selection, operation and maintenance of new pump stations in the project, and also helpful for reconstruction of the existing pump stations.

Key words Eastern Route South-to-North Water Transfer Project; step pump station; pump units; optimal operation