

南水北调东线第一期工程淮阴三站结构设计

王星梅¹, 刘远胜²

(1. 淮安市水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 淮安 223005; 2. 淮安市保障性住房建设管理中心, 江苏 淮安 223001)

摘要 结合南水北调东线第一期工程淮阴三站大型贯流泵站设计的经验, 充分考虑该泵站机组是我国首次采用整体吊装结构的大型直联贯流泵机组以及其水泵叶轮直径为国内目前最大的特点, 着重从结构特点、结构布置和优化、侧向稳定措施、结构计算分析、防裂限裂设计、泵房设计等方面分析大型整体吊装贯流泵站结构设计应注意的问题, 探讨解决上述问题以及实现大型整体吊装贯流泵机组泵站结构安全可靠、美观实用、经济合理的途径。

关键词 泵站结构设计; 贯流泵; 结构布置; 淮阴三站

中图分类号: S277.1; TH316 文献标识码: B 文章编号: 1006-7647(2010)04-0060-04

Structural design of Huaiyin No. 3 Pumping Station at first stage of Eastern Route Project of South-to-North Water Diversion // WANG Xing-mei¹, LIU Yuan-sheng² (1. Huai'an Surveying and Design Institute of Water Resources Co., Ltd., Huai'an 223005, China; 2. Huai'an Housing Insurance Centre of Construction and Management, Huai'an 223001, China)

Abstract : Based on the experience of structural design of Huaiying No. 3 Pumping Station, a large bulb tubular pumping station, at the first stage of Eastern Route Project of South-to-North Water Diversion, it was characterized that the set of the pumping station is the first integral hoisting direct driven bulb tubular pumping set and the diameter of the vanes is the largest at present in China. Some emphatical problems in the structural design of the large bulb tubular pumping station were analyzed from the aspects of structural characteristics, structural arrangement and optimization, measures of lateral stability, structural calculation and analysis, design of preventing and limiting cracks, design of pumping houses, etc. The solutions to the above problems and the realization of reliable, practical, economic and rational ways for the integral hoisting of a large-scale bulb tubular pumping set were discussed.

Key words : structural design of pumping station; bulb tubular pump; structural arrangement; Huaiyin No. 3 Pumping Station

1 我国大型贯流泵站设计简述

1.1 国内大型泵站工程现状

国内大流量机组的大型泵站工程主要集中在南水北调东线一期工程上, 该工程利用江苏省江水北调部分泵站将长江水抽送至东平湖, 沿线 13 个梯级共 34 座泵站, 工程总投资约 270 亿元, 总装机容量为 36.6 万 kW、总装机流量为 4429.2 m³/s, 其中新建泵站 21 座, 装机容量为 23.5 万 kW、装机流量为 2961.2 m³/s^[1]。淮阴三站为先期建成的新建泵站之一, 其他泵站正进入全面实施阶段。在国内已建成运行的泵站中, 绝大多数是轴流泵站^[2], 主要是因为大型轴流泵具有制造安装经验丰富、技术成熟等优点而被广泛应用。但是轴流泵站存在水力性能较差、站身结构复杂、易产生裂缝、站身与进出水流道间分缝易产生不均匀沉降而渗漏水且施工难度大等

缺点。相比之下, 大型贯流泵虽具有装置效率高、土建简单等优点, 但由于该类水泵在国内的制造技术还不十分成熟, 因此应用不多。国内大型灯泡贯流泵站目前仅有 1 座——1997 年建成的淮安三站^[3]。该泵站存在振动较大、空蚀严重、起动困难、电动机超功率运行、进出流道偏短等缺点而面临改造。以往的大型泵站一般台数较少, 泵房内布置也不讲究整齐美观, 站身为多层墙板结构, 不涉及刚度、变形及侧向稳定问题。随着泵站建设规模的扩大, 大型贯流泵站常面临泵室段结构单薄、机组是否安全可靠、厂房是否环保节能、辅机设备是否合理布置等问题。淮阴三站很好地解决了上述问题。

1.2 淮阴三站基本情况

淮阴三站为南水北调东线第三梯级提水泵站。调水设计流量为 100 m³/s, 实际装机流量为 134 m³/s, 采用 4 台国内目前最大的叶轮直径 3.2 m 的贯流泵

作者简介: 王星梅(1966—), 女, 江苏淮安人, 高级工程师, 硕士, 从事工程设计工作。E-mail: xingmeiw@126.com

(178GZ-4.78),贯流泵机组采用国内首例整体组合吊装结构,总装机容量为8800 kW,流量调节采用国际先进的变频技术。泵站采用整体块基型结构,进出水流道布置于站身底板范围内,采用平直管进出水流道,快速闸门断流,油压启闭机启闭闸门。站身顶部至底部高程为14.40~ -1.425 m(废黄河高程,下同),站身底板顺水流向总长为34 m,垂直水流向总长为54.82 m。泵室段自下而上依次为进出水流道层、电缆夹层、辅机层、主厂房层。主厂房内布置主副钩75/10 t桥机。主厂房南侧布置检修间,北侧布置控制楼^[4]。

淮阴三站泵站工程于2007年4月下旬开工建设,截至2009年12月8日已基本完成主体土建施工及设备的安装调试,2009年12月13日顺利通过了泵站机组试运行验收,试运行中各项指标运行良好,工程质量总体优良,现场测试的泵站装置效率比水泵模型试验效率高1%。

2 淮阴三站结构设计特点及存在问题

2.1 结构设计特点

a. 站身高填土,侧向水平荷载较大。站身底板底高程为0.675~ -1.425 m,室外地面高程为14.20 m,填土最高达15.4 m。

b. 站身体量较大。平直管进出水流道布置于站身底板范围内,站身总长34 m,4台机组,每台机组中到中距离约为8.55 m,再考虑检修间及辅机等设备布置,总宽度超过50 m;站身主厂房高程为14.40 m,站身地下高度为13.725~ 15.825 m。

c. 贯流泵机组体量大、质量大。本工程机组设备采购采用国内为主、国际合作的方式,较好地保证了机组的安全可靠性。机泵直联为整体组合结构^[5],在现场不可拆卸,需整体吊装。机组最大件质量为70 t,长为5.86 m,外径为4.69 m,总高度为5.195 m。

d. 由于设备布置及安装检修的需要,站身顺水流方向进出水流道两侧为多层墙板封闭结构,而中间泵室段为开敞式结构。结构刚度呈现两头大、中间小的特点。站身纵剖面及横剖面分别如图1、图2所示。

2.2 结构设计面临的难题

结构设计面临的难题如下:站身防渗漏、防裂、侧向稳定及不均匀沉降问题;泵室段结构强度、刚度及结构变形问题;机组安装检修时整体吊装、机组振动、噪音、通风散热及室内采光等问题;进出水流道内贯流泵结构对水流流态影响等问题。

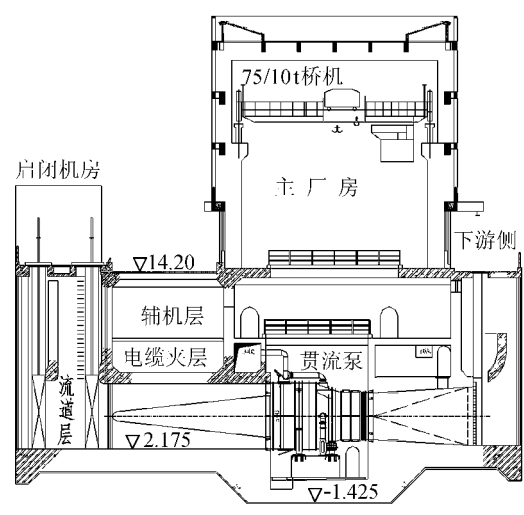


图1 站身纵剖面(单位:m)

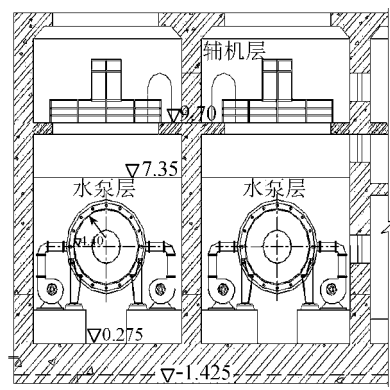


图2 站身横剖面(单位:m)

3 站身布置优化设计

3.1 站身地下结构优化布置

a. 以往的泵站大多在控制楼内设电缆夹层,而淮阴三站是在泵室内设电缆夹层,一方面避免了泵室内各种管线零乱布置,而使泵室清爽整洁;另一方面抬高了辅机层,使辅机层处于常水位以上,避免了窖潮现象,使辅机层可以用于布置电气设备,从而节省地面控制楼空间。

b. 首次在泵房两侧设置从上到下的空箱结构,其优点一是通过在空箱内适当填土,可以调整泵室2块底板的不均匀应力,减少底板不均匀沉降,增加底板侧向稳定;二是在两侧空箱内设置上下行楼梯,从而增加泵室段空间,同时各层空箱也可以布置检修排水设备、电气现地控制设备、机泵等自动监控设备。

c. 调整优化了站身各层(集水井层、辅机层等)缝墩门洞,尽量减少不必要的缝墩门洞,以免漏水等隐患,优化了缝墩止水布置,缝墩止水采取双层止水措施,并在混凝土浇筑完毕后充灌水玻璃。取消站身高程13.70 m处的水平止水设施(此处已高于洪水位,不必考虑止水)。为了充分利用缝墩内侧向水压力来平衡另一边的侧向土压力,以利于侧向稳定,在

缝墩内靠近站身上游隔墙处设置 1 道垂直止水带。

d. 优化了主厂房层和辅机层布置,适当加大泵房段吊物孔的尺寸,辅机层下游侧布置变频机组,取消变频室与泵房间的隔墙,使其变成开敞式,既有利于变频机组安装,不需在厂房内增设吊物孔,又有利于变频器室通风散热。

3.2 泵房优化设计

淮阴三站工程主厂房设计充分考虑了机组的通风、散热、采光,整个厂房包括泵室、变频器室等均为连通开敞式,可保持自然通风。为了避免东、西面日晒,高大厂房采用大面积实墙,降低能耗,增加装饰面,采用便于操作的底窗和屋顶天窗通风采光,新颖别致的屋顶天窗靠侧面百叶窗自然通风。在江苏省泵房设计中首次采用这种建筑节能设计方案,无论是外观还是实际效果都起了很好的作用。

在控制楼基础设计时,由于基础下回填土高度为 1~15 m,范围较大,厚度不均,若采用单独灌注桩、水泥搅拌桩^[6]或空箱基础,都不易解决基础不均匀沉降问题,本工程首次在泵站控制楼基础设计中采用了空箱加灌注桩相结合基础设计,既解决基础不均匀沉降问题,又便于结构布置,空箱兼做电缆夹层及下游路堤挡墙。

3.3 进出水流道优化设计

根据泵站装置模型试验,为了改善出水流动内的水流流态,在出水流动内增设钢筋混凝土结构的细长渐变式导流锥,与主机组相接,很好地改善了出水流动内的水流流态。

3.4 站身侧向稳定设计

淮阴三站工程泵站底板较长且其承受的仅有水压力,水头差也不大,站身正向(顺水流向)比较容易满足稳定性要求,而侧向(垂直于水流向)由于单侧增加了侧向土压力所以稳定性不太容易满足规范要求,需采取必要的抗滑稳定措施。

3.4.1 站身侧向稳定计算模式

在计算侧向水平力时,由于缝墩伸缩缝内填满了泡沫聚乙烯板和钢板顶块,缝隙内水压力介于正常和孔隙水压力之间,根据经验并从安全考虑,缝隙内水压力取值约为正常水压力的 1/2。垂直水流向临土侧水压力值为侧向渗流时站身上下游侧扬压力对应值,垂直于水流向缝隙内正常水压力取值在垂直止水以前部分按上游水压力计算、以后部分按下游水压力计算。顺水流向和垂直于水流向土压力计算参数的取值均按常规进行。

3.4.2 站身侧向稳定措施

在进行站身垂直于水流向抗滑稳定性计算时,由于站身底板两侧荷载的不对称性以及挡土高度较

高,侧向稳定计算不易满足要求,除了优化结构布置外,还采取以下增加侧向抗滑稳定的措施:①侧向设置空箱底板,以增加底板侧向稳定计算的长度。②空箱内填一定高度的土来配重,既增加侧向稳定,又调整不均匀系数。③侧向底板最外侧悬挑底板增加侧向稳定。④缝墩之间增设钢板顶块顶撑措施,2 块顶块为 1 组在缝内紧贴布置。顶块采用 A₃ 钢,顶块尺寸为 600 mm×400 mm×10 mm(长×宽×厚),整个站身内设计顶块为 20 块。顶块表面热镀锌处理。⑤在缝墩内只设 1 道垂直止水带,让缝内进水。泵站完工时,通过对沉降观测资料分析,结果表明站身基本上没有侧向位移,侧向稳定措施起了很好的作用。

4 工程结构设计优化

站身顺水流方向可分为 5 段,两头为进出口段,中间为泵室段,进出口段与泵室段之间为进出水流道段。进出水流道段为 3 层封闭框架墙板结构,刚度较大,进出口段和泵室段均为开敞式结构,但是由于进出口段较短且浅,比泵室段浅 2.2 m,同时进出口段均有胸墙作为支撑来增加结构刚度,因此结构最薄弱的部分是开敞式泵室段,总深度达到 15.8 m。泵室段上部有主厂房,上设 75/10 t 桥机吊装主机组。以下主要阐述泵室段结构处理。

4.1 结构加强措施

a. 为了减少泵室段隔墙顶端变形,四周均设悬挑板,与两侧墩墙相连,既增加结构刚度和约束,又作为人行通道。

b. 将泵室段底板适当加厚,由进出水流道处 1.5 m 加厚至 1.7 m。

4.2 机组基础与进出水流道连接段优化设计

本工程主机泵为现场不可拆卸的整体结构,总质量约为 70 t,泵组底部 4 个泵脚支撑于泵基础上,泵出水侧与出水口连接管采用法兰刚性连接,泵进水侧先与橡胶伸缩节采用法兰连接,再与进水口连接管法兰连接,主机泵与进水口连接管为柔性连接,进出水口连接管分别预埋于进出水流道内。主机泵运行时主要由基础和出水流动承受各种内力和变形,因泵的进水侧为柔性连接,可以承受主机泵的各种微小变形。主机泵最初的安装方案是水泵支撑于基础上,允许机组泵脚水平摆动和转动,机组出水侧允许上下移动,进水侧则是自由的。笔者认为这种结构受力体系不稳定,易使机组运行时产生有害振动,对结构寿命产生不利影响,经过与厂家多次讨论研究,最终将泵脚固定于基础之上。

泵组基础设计时,4 个泵脚基础形式设计得好坏直接关系到机组是否振动的重大问题,既要考虑到基

基础整体刚度,避免机组振动,又要为进入孔、集水井及人行通道等预留空间。为此,将4个泵脚基础顺水流向两两相连,并分别与厚大的墩墙连为一体。泵站启动验收时,未发现机组存在任何有害振动现象。

4.3 结构计算模式选取

本工程结构计算除了采用平面计算方法外,还结合机组振动分析,请河海大学相关专家进行了空间三维有限元分析计算^[7]。对这2种计算成果进行对比分析,结果表明在结构计算中最不利的部位是泵室段中孔底板。计算结果见表1。由表1可见,主要且关键部位的空间有限元计算出的弯矩和应力偏小,而平面计算成果偏大。为安全起见,采用平面计算成果,但需对平面计算模式分析研究并进一步完善,使成果更加合理。

表1 泵站底板最不利部位平面解与空间解比较

计算解	$M_{min}/(kN\cdot m)$	σ_{min}/MPa	$M_{max}/(kN\cdot m)$	σ_{max}/MPa
平面解	-1500	-3.11	1300	2.69
空间解	-619.8	-1.29	382.3	0.79

注: M 表示弯矩, σ 表示应力。 M_{min} 及 σ_{min} 所在部位为泵室段中孔底板顶部, M_{max} 及 σ_{max} 所在部位为泵室段中孔底板墩墙底部。

平面二维计算泵室段结构内力是按弹性地基上的开敞式结构进行整体计算^[8]。底板内力计算采用河海大学工程力学研究所编制的水工结构有限元分析系统软件(AutoBANK V4.0版)。计算工况为完建期、设计工况Ⅰ、设计工况Ⅱ、检修期和地震期5种情况。

在泵房段内力计算时,按开敞底板结构计算出的弯矩较大,考虑到站身实际布置情况:①每台泵的泵室段顺水流向长约7m,垂直于水流向宽7.4m,深度达15.8m,从空间角度来看,实际上类似于多个连筒形结构。②由于泵站2块底板分缝宽度为2cm,且高程7.35m以下缝墩之间用对顶布置的钢板来限制墩墙位移,同时泵室段两侧进出水流道、横隔墙对其也有较大的约束作用。因此,泵房段隔墙顶部不是自由变形的,而是有约束的。根据结构特性和经验,可假定缝墩和边墩高程9.70m处仅考虑0.5cm水平位移,并附加1个约束,限制水平位移,以此来计算结构内力。最大裂缝宽度控制在长期为0.25mm、短期为0.30mm以内。泵站验收时,站身没有发现结构裂缝。

5 站身防裂限裂设计

在设计方面,注意合理结构形态及配筋设计,正确计算结构抗裂能力,提出合理的温控指标,特别加强易裂部位的设计;在泵站进出水流道墩墙及顶板

等易裂部位采用聚丙烯纤维混凝土^[9],提高混凝土的抗裂性能。纤维掺量建议为 $0.9\text{ kg}/\text{m}^3$,纤维直径为 $18\sim 24\mu\text{m}$ 、长度为 $4.9\sim 19\text{ mm}$,抗拉强度不小于 400 MPa ,极限伸长率为 $15\%\sim 18\%$ 。在预留段及二期混凝土浇筑时采用补偿收缩混凝土技术;在进出水流道厚大墩墙内采用砌筑素混凝土芯墙等措施提高混凝土抗裂性能;在进行结构配筋时断面变化大等处加大抗裂钢筋的配置,并设置暗梁;在底板、墩墙内埋设蛇形冷却水管^[10]。

6 结 语

南水北调东线第一期工程淮阴三站是我国首座采用整体吊装结构的大型直联贯流泵机组的泵站,该泵站的水泵叶轮直径为目前国内最大的。淮阴三站在大型整体吊装贯流泵泵站结构设计方面积累了成功经验,并对超长底板结构设计、开敞式泵房结构设计、泵房侧向稳定设计、厂房设计等方面进行了有益的尝试。泵站运行及验收结果表明,站身没有出现结构裂缝。该站结构设计成果对今后南水北调等大型泵站的结构设计具有很好的借鉴作用。

参考文献:

[1] 中水淮河工程有限责任公司,中水北方勘测设计研究有限责任公司.南水北调东线第一期工程可行性研究总报告[R].蚌埠:中水淮河工程有限责任公司,中水北方勘测设计研究有限责任公司,2005.

[2] 储训,陈履.大型泵站建设和更新改造对策[M].南京:河海大学出版社,2000.

[3] 孙洪斌,鲁靖华,郑源,等.淮安三站大型贯流机组运行存在问题及分析[J].水泵技术,2007(5):36-40.

[4] 淮安市水利勘测设计研究院有限公司.南水北调东线第一期工程淮阴三站初步设计报告[R].淮安:淮安市水利勘测设计研究院有限公司,2005.

[5] 张仁田,邓东升,朱红耕,等.不同形式灯泡贯流泵的技术特点[J].南水北调与水利科技,2008,6(6):4-6.

[6] 黄颖蕾,杨和明,张志强,等.水泥搅拌桩在太浦河泵站地基处理中的应用[J].河海大学学报:自然科学版,2003,33(增刊):102-106.

[7] 潘树军.灯泡贯流泵站结构受力分析[D].南京:河海大学,2007.

[8] 王龙,朱彦鹏,李庆福.浅析弹性地基梁的计算模型与计算方法[J].甘肃科技,2003,19(3):54-55.

[9] 朱冠美,杨松玲.三峡工程聚丙烯纤维混凝土试验研究[J].人民长江,2002,33(10):39-41.

[10] 朱岳明,徐之清,贺金仁,等.混凝土水管冷却温度场的计算方法[J].长江科学院院报,2003,20(2):19-22.

(收稿日期 2009-03-10 编辑 高建群)