

我国大型灌溉泵站的技术现状与发展趋势

王福军

(中国农业大学水利与土木工程学院, 100083, 北京)

关键词: 泵站; 灌溉; 现状; 发展趋势

中图分类号: TV675

文献标识码: B

文章编号: 1000-1123(2009)23-0019-03

根据最新统计, 至 2008 年年底, 全国机电灌排固定式泵站 44.3 万处, 总装机功率 2 395 万 kW, 有效灌排面积 2.38 亿亩 (0.16 亿 hm^2)。其中, 大型灌溉泵站总装机功率 402 万 kW, 有效灌溉面积 1.37 亿亩 (0.09 亿 hm^2)。我国灌溉泵站发展的特殊背景, 造成灌溉泵站整体技术状况较差的事实。通过前期大型泵站的安全鉴定情况和初步改造结果看, 迫切需要我们理清大型泵站存在的主要问题, 有针对性地深入开展大型灌溉泵站的科学研究工作, 以便在未来的改造过程中全面提高我国大型灌溉泵站科技水平, 保证粮食安全和农村供水安全。

一、我国大型灌溉泵站存在的问题

根据对我国现有大型灌溉排水泵站的调研, 特别是分析 2009 年各省水利厅上报的全国各大型泵站《现状调查分析报告》《现场安全检测报告》和《安全鉴定报告书》, 可以发现, 我国大型农业灌溉泵站发展存在的问题还是比较突出的。主要表现在以下几个方面。

① 规划设计不合理, 建设标准低, 部分泵站供水无保障。我国大型灌溉泵站中约 90% 建于 20 世纪六七

十年代。限于当时的政治、经济条件和技术水平, 很多泵站规划论证不足, 工程设计标准低, 泵站布局不合理, “三边”工程多, 配套不健全。从而导致机组选型不当, 水泵长期在低效区运行, 甚至因扬程不足或汽蚀严重而使泵站不能正常提水。例如, 安徽凤凰颈泵站是世界上少见的大型双向流道泵站, 因设计问题, 在双向流道内存在带有旋涡的较大死水区, 导致机组运行一段时间后水泵叶片因振动出现裂纹而停机, 泵站无法发挥效益。又如 2009 年年初, 我国北方发生大面积春旱, 在海河流域和辽河流域均出现了大面积冬小麦枯死的现象, 其根本原因并不仅是水源不足, 主要是大型农业灌溉泵站因分布不合理导致的应急输水能力跟不上。

② 泵站整体运行效率低, 能耗高, 工作寿命短。从 2008 年开始, 水利部组织国内泵站权威检测单位, 对全国主要大型灌溉泵站进行了现场检测。结果发现, 全国大型灌溉泵站平均装置效率仅为 40%~50%, 能源单耗平均达 7~8 $\text{kWh}/(\text{kt}\cdot\text{m})$, 距部颁标准要求装置的效率 60%~70% 相差很大。其中的主要原因包括: 第一, 水泵选型不合理或运行工况不合理。普遍

存在“大马拉小车”现象, 水泵在低效区运行。第二, 泵站进、出水流道设计不合理, 进水池的附壁涡、附底涡消耗大量能量。这是灌溉泵站普遍存在的突出问题, 这不仅导致泵站能耗高, 还导致水泵进水流态恶化, 压力脉动升高, 进一步导致振动和噪声加剧, 直接影响到机组工作寿命。第三, 水泵自身在设计上也存在很多问题, 如叶片翼型选择不合理、汽蚀余量高、叶道内二次流严重、高效区窄、加工质量低等。此外, 水源条件变化后, 缺乏运行工况的有效调节能力, 也是导致泵站整体运行效率低、工作寿命短的重要原因。

③ 泵站型式单一, 不能满足不同类型供水需求。我国自然条件差异很大, 灌溉供水要求有相当大的区别。例如, 有的灌溉系统中水中含有大量泥沙, 水泵口环极易磨损; 有的灌溉系统中水位在不同季节变幅很高, 要求水泵扬程有极高的适应性; 有的地下水灌溉系统虽然扬程变幅小, 但流量变幅大, 要求使用恒压水泵提水; 还有的农业灌溉系统处于没有电力供应的山区, 需要利用水轮泵来“自动”提水。我国现有的泵站类型, 特别是可供选择的水泵类型, 无法满足诸多供

收稿日期: 2009-12-04

作者简介: 王福军 (1964—), 男, 院长, 教授, 博士生导师, 兼任水利部全国大型灌溉排水泵站更新改造安全鉴定复核专家组组长。

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划 (2006BAD11B07) 资助项目。

水条件要求,从而制约了特殊地区的灌溉发展,使得很多地区的农业灌溉仍然要“靠天吃饭”。研制符合不同供水需要、安装新型水泵机组的特种大型泵站,已到了刻不容缓的地步。

④水泵机组低端产品多,高新技术应用少,信息化和自动化程度低。水泵是泵站的“心脏”,我国大型灌溉泵站使用的水泵,绝大部分是20年前所开发的产品。目前可供选择的水泵类型仍然以ZLB型轴流泵和S型双吸离心泵系列为主。虽然这些机组的水力模型在近年得到改善,但核心技术仍然停留在20年以前的水平。国产水泵机组多为低端产品,高新技术应用少,水泵能耗高,空化严重,振动超标。例如,用于高扬程供水的双吸离心泵,日本荏原公司的效率超过了91%,而我国只有86%;日本荏原双吸泵的大修期也远远高于国产水泵。这也就导致了近年国内重要水利工程(如万家寨引水工程、引嫩入白工程、南水北调东线工程)多采用进口机组。因此,我国大型水泵与泵站建设处于十分尴尬的境地,迫切需要有关部门,组织国内相关单位进行攻关,以提升我国大型水泵与大型泵站的自主创新能力。

⑤基础研究薄弱、原创技术匮乏。与发达国家相比,我国泵站基础理论研究薄弱,仿制技术多,原创技术匮乏,产品创新能力不足,对能源节约重视不够。迫切需要通过国家科技计划进行专项支持,以提高我国大型泵站的科技水平。

二、大型灌溉泵站发展趋势

国外在这一领域起步较早,特别是荷兰、日本和美国等国,由于灌排需要,泵站较多,规模较大,因而在该领域的理论研究和水平上总体保持国际领先。根据世界农业灌溉与供水保障技术的发展现状,现代灌溉泵站的发展趋势主要表现在以下几个方面:

①灌溉泵站的职能正在多元化,泵站型式不断丰富。过去灌溉泵站主

要担负单一的农田灌溉供水任务,而随着流域规划的系统化,灌溉泵站有时还需要担负排水功能,特别是从河湖取水的低扬程灌溉泵站的变化更为明显。同时,往往还需要负责农村引水、乡镇工业用水、农村生态保护用水等职责,有的甚至与跨流域调水功能相结合。这样,许多泵站的进水水道经常被做成双向的,或者在泵站外围增加双向控制闸及附加水道。

②泵站装置系统节能是大趋势。发达国家对能耗问题非常关心,从泵站耗能的每一个细节入手,解决能耗高的问题。首先,注意选用节能型水泵。其次,注重进水池和进出水水道设计,例如,在泵站设计过程中会提前进行大量的模型试验和数值模拟,控制进水池内的旋涡和二次流,想办法降低水道水力损失。再次,非常注意实际运行工作点的控制和调节。由于国外泵站的自动化程度较高,故一般总能通过变频或变角调节,使水泵的工作点处于最高效率区,从而适应不同水位和不同流量的变化要求,泵站装置效率一般在70%以上。

③注重泵站机组运行稳定性。这一点是我国泵站与国外泵站的主要区别之一。事实上,我国的大多数泵站特别是在较恶劣条件(如多泥沙水流条件)下工作时,往往3个月就进入大修期,叶轮寿命可能只有6个月,而国外泵站的大修期往往在2年以上,叶轮和蜗壳的寿命也在5年以上。其主要原因,是国外非常注意水泵及水道内的水压力脉动的控制,从而降低由此引起的结构振动、噪声等问题。同时,对高扬程泵站的水锤防护也非常到位,且在运行过程中严格执行操作规程。

④高新技术的采用越来越多。基于三维激光测速系统(PIV)和激光多普勒测速仪(LDV)的实验手段,在大型泵站的模型试验中被广泛采纳,可保证所设计的前池、进水池、进水流道、出水池和出水流道的水力性能最

优。三维计算流体动力学(CFD)工具在近几年也被引入到泵站的设计和流场分析过程中,可通过数值模拟的方法预判流道内哪里有旋涡、哪里有脱流,从而通过优化手段改进流道设计。此外,有限元方法和流固耦合分析方法,正在改变着大型水泵装置系统的设计模式与工程应用水平。

⑤水泵的效率越来越高。水泵是泵站的“心脏”,它的质量决定着泵站总体水平。由于一些新的理论与技术,如三维反问题设计方法、计算流体动力学方法和激光快速成形系统等的应用,水泵的效率、高效区带宽、汽蚀余量、压力脉动指标等都得到了很大改善。例如,无论是轴流泵,还是离心泵,日本荏原公司、美国ITT公司和奥地利安德里兹公司等所生产的水泵的效率均高于90%,且机组的大修周期和工作寿命显著高于国内。

⑥泵站的智能化程度逐渐提高,供水成本逐渐降低。泵站供水涉及上下游的流量、水位等多种技术指标,这些指标随着灌溉用水量的变化而不同,特别是在梯级泵站与多机组并联情况下,同时运行几台机组、叶片角度或阀门开度设置成什么位置、转速如何调整,都需要精心设计,而且要实时作出反映。因此,发达国家的泵站都配备了先进的智能化远程控制与调度系统,从硬件和软件两个方面保证泵站运行的安全、稳定和高效。

⑦泵站相关技术标准更加具体化。国外机电排灌比较发达的国家,如日本、美国、荷兰、澳大利亚、俄罗斯等,都制定了若干适合本国国情的泵站专业技术标准,其中代表性的有美国水力协会《泵站进水设计标准》和日本农林水产省的《泵站工程设计规范》等。从标准的内容和细节方面看,国外要大大超前于我国。例如,仅就泵站进水池而言,日本已颁布了6套设计标准,标准发布机构和年份分别为JSME—1984,MLIT—1996,MAFF—1997,MLIT—2001,TSJ—2005,MAFF—2006。

这些标准详细规定了不同类型泵站吸水池的尺寸要求、泵的悬空高要求、吸水管与池壁的距离要求,同时说明了进水池产生表面旋涡和附壁涡的条件,涡的形状、强度等。而到目前为止,我国虽然也有《泵站设计规范》等多项标准出台,但还没有具体到对进水池的流态进行规范的标准。

三、大型灌溉泵站的研究任务

根据《国家中长期科学和技术发展规划纲要》所确定的“水资源优化配置与综合开发利用”和“节能优先”主题,以及中共十七届三中全会通过的《中共中央关于推进农村改革发展若干重大问题的决定》中要求“加快大中型灌区、灌排泵站配套改造”的精神,建议我国大型农业灌溉泵站围绕如下主题开展研究工作。

①我国大型灌溉泵站发展规划与站点布局研究。建议开展我国大型灌溉泵站发展规划与站点布局研究,使泵站规划与现有的跨流域调水规划相适应,与可开发的新型水源相适应。规划不仅满足常规灌溉需求,还要满足发生旱灾与洪涝灾害时的应急灌溉排水要求,即在可能的情况下,将泵站的功能由单一的灌溉功能设计成灌排功能。研究内容包括:我国农业灌溉需水量分布模型研究,我国现有泵站布局与灌溉用水保证率关系的研究,我国大型灌溉泵站与中小型灌溉泵站、排涝泵站的合理级配关系研究,以及大型农业灌溉泵站布局研究等。

②快速供水的大型移动泵站研究。我国的大型农业灌溉泵站几乎都是固定式泵站,为了解决特殊环境下的供水需求,如发生干旱灾害时的远距离供水,应研究与我国水资源分布特征相适应的新型移动式大型灌溉泵站模式,填补国内空白。具体研究内容包括:高扬程远距离输水的移动泵站研究,大流量低扬程移动泵站的研究,移动式有压输水管网研究,以及田间灌溉水快速喷洒设备研究等。

③泵站进水池与进出水流道的水力损失研究。研究内容包括:泵站进水池流态控制方法研究,低扬程泵站进水流道的水力特性研究,大型出水流道水力特性研究,以及进出水流道与泵段的耦合关系研究等。

④高效节能型水泵水力模型研制。建议集中力量,通过自主创新,研制代表我国 21 世纪水平的优秀水泵水力模型,特别是高效区宽广、汽蚀性能好的水力模型。新的水力模型开发应注重引进三维计算流体动力学理论和技术,对水泵叶轮等过流部件的流场进行分析,建立水泵水力损失模型及性能预测方法,形成高效节能水泵的设计分析方法及相应软件。其次,进行产学研用联合,研发低扬程大流量贯流泵水力模型、导叶式混流泵水力模型、蜗壳式混流泵水力模型、双吸泵水力模型研究及高扬程小流量离心泵水力模型等。

⑤大型泵站节能综合技术研究。建立大型泵站工作效能综合评价方法,提出根据供水要求合理选择水泵的方法,提出电动机变频运行与水泵变角运行(叶片角度调整)综合控制策略,建立与管路特性曲线匹配的水泵工作点优化方法,通过综合节能技术实现泵站装置效率的提高。应利用三维数值模拟和实验方法研究不同形式供水管路的需要扬程曲线的准确计算方法,以及多台机组并联时的水泵特性曲线计算方法,建立不同供水条件下水泵工作点的精准预测方法,从根本上避免“大马拉小车”的情况,使水泵和电机都工作在其最高效率区。

⑥大型泵站水压力脉动及机组运行稳定性研究。应该深入开展泵站进水池流态对机组水压力脉动的影响研究,典型泵型水压力脉动分布特征与频谱特性的研究,水压力脉动与机组振动和噪声的关系研究,机组振动与泵站厂房稳定性间的关系研究,水压力脉动与结构振动对机组疲劳

寿命影响的研究,提出改善水压力脉动的方法和措施,为大型水泵安全稳定运行提供参考。

⑦大型泵站抗汽蚀与抗磨蚀技术研究。汽蚀和磨蚀问题是目前大型泵站普遍存在的问题,也是水泵向高速、大容量发展的主要障碍。建议通过采用 PIV 测量、流场数值模拟及理论分析相结合的手段,深入研究我国多泥沙条件下水泵的内部流动机制,研究水泵发生汽蚀的物理学和电化学机理,建立水泵汽蚀的流体动力学条件。此外,研究如何通过泵站流道与泵段耦合,以及水泵运行工作点的变化,来影响或控制气泡初生、发展与溃灭的过程。分析汽蚀与其他非稳态运行特性的关联关系,探讨汽蚀与磨损、破坏的关系。从水泵水力设计、材料、结构、安装和运行等方面,提出抵抗汽蚀和磨蚀、提高机组工作寿命的途径。

⑧大型泵站状态监测与智能控制研究。开展泵站主要水动力学指标(如水质、流量、压力、压力脉动、水位、扬程、损失)及结构动力学指标(如转速、功率、振动、噪声、电机参数)实时同步测试技术和设备研究,研制泵站运行状态的智能型专家诊断系统。

⑨长距离输水泵站水力瞬变与过渡过程特性研究。针对我国高扬程、长距离、带有复杂管路系统的供水泵站越来越多的情况,如何保证机组在启动、停机和事故断电工况下的安全、不发生水锤,就成为需要优先解决的重要问题。应该尽快建立高扬程长距离输水泵站水力瞬变过程的分析系统,提出便于工程实施的可靠水锤防护系统。主要研究内容包括:长距离输水系统水力元件计算模型,长距离输水系统水力损失的三维计算方法,空气阀在水锤防护过程中的动力学特性,以及复杂管网条件下的泵站过渡过程计算方法与经济实用的水锤防护措施等。(下转第 38 页)

水质,有效改善直湖港和梅梁湖水环境,并可调梅梁湖水北排,促进梅梁湖等太湖湖湾和水体的有序流动,改善梅梁湖以及太湖水环境。

7.建立与行政区域水质交接责任制相适应的监管体系

在流入、流出直湖港的主要河流断面横林、安桥、新渎桥、沙滩桥、白芍山、花渡桥、稍塘桥和惠山、滨湖的交界断面阳山大桥建设水质自动监测站,实施交接断面水质、水量的实时监控。把区域内外交界断面水质达标纳入环保目标责任制,落实到行政首长的年度考核和任期考核,切实落实水环境质量达标的行政责任。

推行环境资源区域补偿制度。按照前述行政区域水质交接断面和水质目标,上游当月出境水质超过控制断面水质因子考核目标的,由上游行政区域政府根据责任对下游行政区域予以资金补偿。根据《江苏省环境资源区域补偿办法(试行)》,补偿标准为COD每吨1.5万元、氨氮每吨10万元、总磷每吨10万元。

另外,应该抓紧制定河流总氮地方标准。总氮是太湖水污染的重要因子,但是我国现行的《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中没有针对河流水质制定总氮标准,影响直湖港总氮的控制和削减。因此,应抓紧制定太湖流域河流总氮地方标准,提出总氮控制要求,为太湖流域总氮的控制和削减提供依据。

(上接第21页)

⑩梯级泵站与多机组并联时的优化调度研究。针对灌溉泵站系统中梯级泵站与多机组并联运行日益普及的情况,统筹考虑级间和机组间的流量、扬程、水泵工作点等因素对运行成本和调水效果的影响,提出适用于梯级泵站和多机组并联运行的站内、站群联合运行调度模型,有效实现站间流量平衡与水位控制,丰富泵站工程的调控理

表3 直湖港地区各类综合整治工程污染物削减量明细表

削减量	COD(t/a)		氨氮(t/a)		总磷(t/a)	
	2010年	2020年	2010年	2020年	2010年	2020年
工业	1 862.0	1 960.1	273.7	288.1	5.8	6.1
城市生活	1 137.2	1 400.6	159.2	196.1	15.9	19.6
农村生活	975.0	1 007.4	33.9	53.6	9.8	10.1
种植业	163.7	163.7	26.2	26.2	6.5	6.5
畜禽养殖	575.2	575.2	39.4	39.4	31.8	31.8
水产养殖	1.2	3.0	0.2	0.4	0.1	0.3
合计	4 714.3	5 110.0	532.6	603.8	69.9	74.4

表4 直湖港地区污染物削减目标可达性分析

项目	COD(t/a)		氨氮(t/a)		总磷(t/a)	
	2010年	2020年	2010年	2020年	2010年	2020年
入河量	7 183.7	7 368.4	768.9	787.8	98.9	100.1
环境容量	4 442.0	3 666.0	282.0	219.0	33.0	26.0
削减目标	2 741.7	3 702.4	486.9	568.8	65.9	74.1
削减量	4 714.3	5 110.0	532.6	603.8	69.9	74.4
目标可达性	可达	可达	可达	可达	可达	可达

五、污染物削减效果和目标可达性分析

1.整治措施污染物削减量分析
根据直湖港水环境综合整治措施提出的工业污水集中处理率、生活污水处理率、河道生态疏浚工程量各项指标分析,各项整治措施污染物削减效果为2010年削减COD4 714.3 t/a、氨氮532.6 t/a、总磷69.9 t/a;2020年削减COD5 110.0 t/a、氨氮603.8 t/a、总磷74.4 t/a(见表3)。

2.目标可达性分析
根据入河污染物削减目标以及综合整治工程污染物削减量,分析不同水平年污染物削减目标可达性。由表4可见,2010年、2020年水环境综合整治工程污染物削减量均大于污染

物削减目标,说明在水环境综合整治措施实施后,直湖港地区不同规划水平年的环境容量均大于综合整治工程削减后污染物入河量,加上新沟河延伸拓浚工程实施后直湖港主要客水水质将达到Ⅲ类水标准,其水功能区水质目标可达。

参考文献:

[1] 汤建中.城市河流污染治理的国际经验[J].世界地理研究,1998,7(2).
[2] 冯建军,朱燕含.中小河流综合整治研究[J].中国环境管理,2003,12(22).
[3] 徐续,操家顺.河道曝气技术在苏州地区河流污染治理中的应用[J].水资源保护,2006(1).
[4] 卢伯生.水环境综合治理的探索[J].江苏水利,2004(6).

责任编辑 李计初

论,通过泵站群的联合优化运行,节省供水成本,提高供水效率。

参考文献:

[1] 中国灌溉排水发展中心.全国大型灌溉排水泵站更新改造规划报告[R].2009.
[2] 王福军.水泵与水泵站[M].北京:中国农业出版社,2005.
[3] 王福军.计算流体力学分析——CFD软件的理论与应用[M].北京:清华大学出版社,2004.

[4] Hydraulic Institute. American National Standard for Pump Intake Design, ANSI/ HI9.8-1998.1998.
[5] Zikic, S., and Svensson, T. Integration of CFD Analysis in the Process of Defining Pump Station Geometry. Proc. 3rd International Conference on Water and Wastewater Pumping Stations, Bedfordshire.2005.

责任编辑 李建章