

我国升船机技术发展综述

陶桂兰¹, 曾庆祥²

(1. 河海大学高坝通航研究所, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学交通海洋学院, 江苏 南京 210098)

摘要 对升船机的发展历史进行了回顾, 重点对我国近几年升船机的建设情况、升船机船厢、塔柱、提升设备和安全制动等主要技术发展现状和关键问题进行了论述, 提出了我国升船机建设需进一步研究的问题, 并对今后我国升船机的发展提出了建议。

关键词 升船机; 船厢水力学; 塔柱结构; 结构动力特性; 综述

中图分类号: U642.1 文献标识码: A 文章编号: 1006-7647(2008)S1-0164-04

我国的升船机技术经过 50 多年的发展, 已取得了举世瞩目的成就。进入 21 世纪以来, 一批垂直升船机的成功建设和安全运行标志着我国升船机技术整体上达到了国际先进水平。我国西部地区资源丰富, 水电资源理论蕴藏量约为 55 749 万 kW, 占全国水电资源蕴藏量的 82%, 可开发水电资源约为 27 434 万 kW, 占全国可开发水电资源的 72%, 目前开发程度还不到 8%, 比全国水电平均开发程度低 11 个百分点。我国“十一五”发展规划纲要提出了有序开发水电, 建设金沙江、雅砻江、澜沧江、黄河上游等水电基地及溪洛渡、向家坝等大型水电站的要求^[1]。随着我国对西部地区开发力度的加大和西电东输的实施, 水能资源开发势在必行, 解决高坝通航问题作为水资源综合利用的重要组成部分显得愈为迫切和重要。升船机在过坝时具有不耗水、过闸时间短等优点, 在高水头水利枢纽中采用升船机解决高坝通航问题与其他通航措施相比具有极大的优势。本文对国内外升船机发展进行了简单回顾, 重点对我国近 10 年升船机的建设情况、升船机技术发展现状和关键问题进行了总结, 同时也对今后升船机发展提出建议。

1 国内外升船机发展概况

1.1 国外升船机发展概况

升船机的建造已有 200 多年的历史。1788 年在英国建造了世界上第一座升船机, 为纵向斜面干运式升船机; 1838 年在英国的泰晤士河与塞文河之间建造了平衡重式湿运垂直式升船机; 1875 年英国在

韦佛—春特—墨西运河安德腾建造了世界上第一座水压式升船机; 1888 年法国在北部诺弗塞运河上建造了枫迪纳水压升船机, 船舶吨位达 300 t, 1899 年德国在多特蒙德—埃姆斯运河上建造了亨利兴堡较大的浮筒式垂直升船机, 浮筒的提升力达 3 100 t。18~19 世纪出现的升船机提升高度大部分在 15 m 以下, 船舶吨位一般在 100 t 以下, 个别达到 300 t。

现代化大型升船机出现在 20 世纪。随着整个工业水平的发展, 升船机的制造技术有了新的发展, 工程规模越来越大, 款式新颖的升船机也时有出现。世界上几座有代表性的升船机分别建造在德国、法国、比利时和前苏联。例如 20 世纪 30 年代德国建造的世界著名的尼德芬诺升船机, 提升高度为 36 m, 提升总重量为 4 290 t, 是早期最完善的均衡重式垂直升船机。1975 年竣工投入运行的德国吕内堡均衡重式垂直升船机, 提升高度为 38 m, 提升总重量为 5 720 t; 有代表性的浮筒式垂直升船机也建造在德国, 如 1933 年建成的骆特塞升船机, 提升高度为 18.7 m, 过船吨位为 1 000 t; 1962 年竣工的新亨利兴堡升船机, 提升高度为 14.5 m, 过船吨位为 1 350 t, 是世界上最大的浮筒式垂直升船机。自 1934 年在德国建造了尼德芬诺垂直升船机以来, 世界升船机建造的历史已发展到一个新的阶段, 其特点是提升的船舶吨位显著增大, 多为 1 000~2 000 t, 提升的高度自数十米到近百米, 升船机的型式有了进一步发展^[2]。

1.2 我国升船机的发展概况

我国现代化升船机的研究工作始于 20 世纪 50

年代中期 ,特别是对三峡升船机方案进行了大量的研究工作。20 世纪 50 年代末 ,在安徽寿县建成了我国第一座小型斜面升船机。1965 年 ,湖北省浠水县浠水白莲河升船机的建成 ,开始了我国在水利枢纽上建造升船机的历史 ,至 20 世纪 80 年代 ,共建有升船机 60 余座。我国大部分 70 年代以前建造的小型斜面升船机 ,在当时的历史条件下 ,对克服水位落差、解决闸坝碍航、繁荣水运起到一定的积极作用 ,后因铁路、公路网的快速发展 ,原有的升船机由于通航尺度小 ,过闸速度慢 ,与公路、铁路相比已无竞争力 ,再加上我国当时升船机制造工艺及管理水平落后等原因 ,已建的升船机因难以满足使用要求 ,大多已被淘汰。据不完全统计 ,目前还在运转的升船机约 30 余座^[3]。

随着我国工业现代化水平不断提高 ,在一些大中型高水头水利枢纽上出现了一批技术含量高的现代化升船机 ,其工程规模越来越大 ,技术也越来越先进 ,我国升船机的建设取得了举世瞩目的成就。特别是进入 21 世纪以来 ,一批垂直升船机的建设和安全运行 ,标志着我国升船机设计及建造整体上达到了国际先进水平。我国先后在广西红水河上的岩滩、福建闽江上的水口、湖北清江上的隔河岩和高坝洲等水利枢纽上建设了一批大中型垂直升船机。近几年我国升船机建设情况见表 1。

2000 年交付使用的岩滩升船机最大提升高度为 68.5 m ,设计通航 250 t 驳船 ,该升船机是国内首次采用钢丝绳提升、部分平衡、湿运、船厢下水式垂直升船机 ,成功解决了承船厢制动系统多点集群同步控制、多电机同轴电气传动装置等问题 ,并采用先进的机械设备、监控系统、液压均衡与调平系统等技术^[4] ,为我国垂直升船机的建设和发展提供了借鉴 ; 2002 年在福建闽清县境内的水口建成了世界第一座全平衡钢丝卷扬垂直升船机 ,最大提升高度为

59 m ,总提升重量为 5500 t ,可通航 500 t 的船舶 ,2007 年建成了湖北清江高坝洲和清江隔河岩两级垂直升船机。正在建设的三峡和向家坝升船机 ,都是采用齿轮齿条爬升方案和螺母螺杆安全装置^[5]。齿轮齿条爬升、螺母螺杆安全保障系统的升船机在国内没有先例 ,虽然在德国已有应用 ,但都在水位变幅小的运河上 ,提升高度和重量都与三峡升船机有较大的差距 ,因此难度非常大。随着我国西部大开发战略的实施 ,交通运输更是开发的重点 ,西部很多河流如澜沧江、金沙江、嘉陵江、西江、乌江、红水河、南北盘江等正处于梯级开发中 ,一大批航电枢纽亟待兴建 ,升船机应用前景广阔。此外正在设计和拟建的还有构皮滩、思林、百色、龙滩等大型升船机工程。

2 我国升船机技术的研究现状

随着我国水电事业的发展 ,近年来建设了一批现代化的中型垂直升船机 ,在此过程中主要开展了船厢结构动力特性及船厢水力学、塔柱、提升设备和事故安全装置等技术难题的研究。

2.1 船厢结构动力特性及船厢水力学研究

承船厢在提升过程中是一个十分典型的与水体晃动问题紧密相关的复杂的动力学系统。江苏科技大学采用水弹性理论建立了提升系统的动力特性数值模型^[6] ,通过模型试验 ,对其流固耦合问题 ,主要是提升过程中船厢内水体的晃动、提升缆的受力和船厢动态响应等进行了研究^[7]。此外武汉大学根据流体力学势流理论 ,建立了三峡升船机承船厢悬挂系统刚性竖直振动与水体振动的偏微分方程 ,对正常工况和紧急制动工况进行了数值仿真 ,分析了水体振动及承船厢悬挂系统刚性竖直振动的稳定性^[8]。

升船机在运行过程中厢内水体动态特征关系到承船厢运行的安全及承船厢内船舶的泊稳条件。廖乐康等^[9-10]在不考虑重力波的情况下 ,推导了承船

表 1 近几年我国大中型升船机建设情况

地点	河流名称	船厢驱动方式	安全制动方式	水位变幅/ m	提升高度/m	过船吨位/t	船厢尺度/m			质量/t	运行速度/ (m·s ⁻¹)	建成时间
							长	宽	高			
广西岩滩	红水河	钢丝绳卷扬提升	盘式安全制动器	11 ~ 8.5	68.5	250	48.5	16.2	4.4	1430	0.190	2000
福建水口	闽江	钢丝绳卷扬提升	盘式安全制动器、沿程锁定	10 ~ 15.8	59	2 × 500	113	12.0	2.5	5500	0.200	2002
湖北长阳县隔河岩一级	清江	钢丝绳卷扬提升	盘式安全制动器、沿程锁定	4.2	42	300	32	10.2	1.7	1500	0.125	2002
湖北长阳县隔河岩二级	清江	钢丝绳卷扬提升	盘式安全制动器、沿程锁定	4.2	82	300	32	10.2	1.7	1500	0.133	2007
湖北高坝洲	清江	钢丝绳卷扬提升	盘式安全制动器、沿程锁定	2 ~ 9.6	40.3	300	42	10.2	1.7	1560	0.125	2007
长江三峡	长江	齿轮齿条爬升	长螺母短螺杆安全装置	30 ~ 11.8	113	3000	120	18.0	3.5	13000	0.200	建设中

厢作纵倾运动时的动水压力计算公式,建立了承船厢纵倾运动与主提升同步轴扭转的耦合动力模型,并对非线性微分方程的动态响应进行数值仿真,对升船机承船厢悬挂系统的稳定性以及非线性因素对稳定性的影响等问题进行了初步研究;长江科学研究院对卧倒门在不同工作方式下承船厢内的水动力特性及船舶停泊条件进行了物理模型试验^[11],分析了卧倒门启闭过程中承船厢内的水力特性和动力特性,运用回归分析法得出了承船厢内水面最大升降值和船舶停泊条件的经验计算式。

2.2 塔柱结构研究

升船机塔柱作为承船厢、平衡重、提升设备及其机房的主要支撑结构,受力复杂,目前国内外尚无相应的规程规范可作为设计依据,计算参数也不明确,且对抗震性能要求高,分析和设计相对困难。

塔柱形式一般有全筒式、开敞筒体式、筒体箱梁式及墙筒式。开敞筒体式塔柱温度效应有明显改善,但受风时,涡流最乱,体型系数也最大,抗扭性能较弱,筒体箱梁式塔柱横河向迎风面较小,可改善风对塔柱的不利影响,自重也较轻,可节约工程量,有利于抗震,承船厢采光和通视效果也较佳,但大跨度必须施加预应力,施工工艺较复杂,同时在总体上,结构体型比较单薄,地震时结构模态十分复杂,对上部机房抗震不利,墙筒式塔柱受风面积和墙体的风振脉动效应最大,地震时筒体受扭,振动效应不易计算,全筒式塔柱横河向迎风面较大,但刚度也较大,结构整体稳定性较好,抗震性能也较好,在龙滩和三峡均采用全筒式塔柱^[12]。

长江水利水电科学研究院和中国水利水电科学研究院利用有限元和物理模型试验分别对三峡升船机和岩滩升船机进行塔柱的静力和动力比较分析^[13-15]。其中,有限元分析包括结构应力、位移、结构自振特性计算、温度徐变应力计算等,结构模型试验包括结构应力和位移测试、超载试验以及顶部的梁板结构模型试验等。河海大学和长江水利委员会对三峡升船机闸首结构进行了空间有限元分析,采用空间线弹性有限元研究了塔柱顶部是否独立和不同温度边界对结构变形形态和应力状况的影响^[16]。

2.3 提升设备和安全制动技术的发展

我国在“七五”、“八五”期间对钢丝绳卷扬式全平衡垂直升船机的上下闸首的闸门和启闭机械的布置、升船机承船厢、主提升机械的关键设备、专用钢丝绳、平衡重结构、电力拖动和自动控制系统等各项技术进行了深入研究。长江水利水电科学研究院对承船厢、主提升机械、电力拖动等设备的相互耦合作用以及运载船只过坝过程的升船机整体动态特性进

行了物理模型试验,取得了较丰富的试验研究成果,为升船机的设计提供了科学依据^[17]。此外上海交通大学、华中科技大学^[18-19]采用模态综合技术对升船机整体特性进行了动态分析。

易春辉等^[20]提出了3种电气传动系统方案,就升船机的多电机传动速度控制和出力均衡控制进行了分析,阐述了国内升船机传动方案应用及调试效果。在船厢上设置了液压均衡系统,解决了船厢倾斜、提升绳张力不均等问题。三峡升船机提升及安全系统经过多方案比选,最终确定为齿轮齿条爬升、“长螺母-短螺杆”安全方案^[5],并由长江水利委员会长江设计院和德国 LI-KuK 设计联营体共同承担设计任务。

2.4 升船机运行控制系统的研究

升船机的安全运行除了本身设备的安全可靠外,还需通过辅助设备来监控。一般的升船机电气控制方式以计算机监控为主,现场手动控制为辅,主控级与现地控制级的通信采用双纲冗余结构。当操作员工作站发生故障时,可无扰动地代替其工作,直到故障排除,仍回复到热备状态^[21]。为此西安交大、中国航天工业总公司210研究所和西北大学等单位对升船机的电气系统和监控系统均作了较为深入的研究^[21-23]。

3 升船机设计中尚待进一步研究的关键问题

垂直升船机不管是钢丝绳卷扬式还是齿轮齿条爬升驱动在国外都有成功的经验,但是与即将修建的三峡升船机和向家坝升船机相比,建设规模、提升重量、提升高度、运行工况条件均不可比拟,加上对运行可靠性的要求,可以说三峡和向家坝升船机的技术难度是前所未有的,设计、制造、安装、运行等建设全过程充满了探索性和挑战性。需要进一步研究的主要问题有:

a. 升船机局部受力安全问题。有必要对采用齿轮齿条爬升的短头螺栓与塔柱混凝土的接触问题及升船机地震鞭梢效应等作全面分析。

b. 机械设备的设计、制造与安装。升船机的机械部分包括主提升系统、承船厢及其设备、平衡重系统及其辅助设备和埋件等。目前国内升船机的主机驱动电机、钢丝绳和齿轮爬升系统等均是国外进口的,因此在自主创新方面还有很多工作要做。

c. 塔柱大体积混凝土薄壁结构形式优化。塔柱一般分为全筒式、开敞筒体式、筒体箱梁式和筒墙式,它们的受力特性各有特点。为了节省材料和有利于抗震可采用变截面,但会增加施工的难度,因此结构的优化尤为重要。

d. 复杂埋件设计与施工工艺。对于正在建设的

三峡升船机二期混凝土施工完成的预埋件钢结构起到把事故状态时短螺杆所施加的荷载传递到钢筋混凝土结构上的作用,是整个安全机构传力过程的核心部分,要求预埋构件连接强度要满足设计要求。

e. 土建结构施工与机械设备安装精度对升船机安全可靠运行的影响。对于齿轮齿条式升船机,齿条的制造精度和塔柱壁上的安装精度对齿合都是十分重要的。

f. 土建结构与机械运动协调性研究。齿轮爬升对土建结构与机械的协同性要求很高,当风荷载及温度变化导致承船厢两侧塔柱之间的间距发生变化,使爬升齿轮不能正常齿合,如何使其咬合也是有待深入探讨的问题。

g. 升船机安全运行可靠性研究。升船机的安全不仅关系到国家的财产更关系到人民群众的生命安全问题,是设计首先要考虑的问题。目前我国较成熟的方案是盘形安全制动装置,在岩滩、水口、隔河岩和高坝洲等工程中积累了经验。但该安全制动装置形式在国内的应用经验还不够成熟。

h. 仿真优化设计。随着升船机的建设与发展,从结构形式到计算方法已积累了大量的设计经验,对典型结构的设计将逐步趋向成熟。对一个大型工程,其设计工作是相当烦琐和复杂的。因此为减轻设计强度,做到工程设计科学化和程序化,提高其正确性及工作效率则显得尤其重要,有必要对高坝通航建筑物设计进行仿真设计研究。

4 结 语

随着西部水运的发展及科学技术的进步,我国升船机建设数量也将会越来越多,升船机设计、制造、安装技术将得到进一步提高,升船机在西部水资源开发中将发挥越来越大的作用。三峡升船机的建设及一大批大中型升船机的运行,标志着我国升船机技术整体上达到了国际先进水平,同时也对相应的设计标准、维护管理措施提出了更高的要求。但目前我国在升船机的设计规范及维护管理方面的技术标准还有所滞后,急需制定相应的规范、规程以指导设计、施工和管理,提高升船机的设计、管理及维护水平,保证升船机的顺利建设和安全运行。

参考文献:

- [1] 周建平,杨泽艳,陈观富.我国高坝建设的现状和面临的挑战[J].水利学报,2006,37(12):1433-1438.
- [2] 吴德镇.升船机及其发展概况[J].水运工程,1982(10):21-24.
- [3] 孙精石,周华兴,赵德志,等.关于升船机的调查研究

[J].水道港口,2001,22(3):141-145.

- [4] 中国水力发电工程学会.岩滩升船机总体技术居国际先进水平[J].水力发电,2001(5):55.
- [5] 钮新强,宋维邦.船闸与升船机设计[M].北京:中国水利水电出版社,2007.
- [6] 朱仁庆,吴有生,彭兴宁.三峡工程升船机提升系统力学模型[J].华东船舶工业学院学报,1998,12(5):2-6.
- [7] 朱仁庆,吴有生,彭兴宁.升船机提升系统中船厢、水体和钢缆相互耦合作用分析[J].中国造船,2004,45(3):1-13.
- [8] 石端伟,宋政,廖乐康.升船机承船厢水体参数激振的耦合分析[J].武汉大学学报,2003,36(1):77-80.
- [9] 廖乐康,石端伟.升船机承船厢纵倾运动与主机扭振耦合分析[J].人民长江,1996,27(9):19-24.
- [10] 廖乐康,张圣坤.承船厢二维非线性晃动的分析[J].船舶力学,2006,10(2):47-55.
- [11] 周赤,刘敦煌,杨淳.三峡升船机卧倒门水动力特性试验研究[J].长江科学院院报,1996,13(4):1-6.
- [12] 徐勋倩.龙滩垂直升船机塔柱结构选型的若干研究[J].南通工学院学报:自然科学版,2004,3(1):45-48.
- [13] 张伟林,钱胜国.三峡升船机塔柱结构的动力试验与抗震分析[J].长江科学院院报,1986(1):19-30.
- [14] 阎诗武,严根华,樊宝康,等.三峡升船机塔柱结构的抗震优化设计[J].水利水运科学研究,1994(4):307-317.
- [15] 孙志恒,刘致彬.岩滩水电站升船机塔柱结构模型试验研究[J].水利水电技术,1995(5):58-62.
- [16] 王旭虹,朱虹,汪基伟.三峡升船机塔柱结构温度变形计算[C]//崔京浩.第十届全国结构工程学术会议论文集第I卷.北京:清华大学出版社中国力学学会《工程力学》期刊社,2001:931-935.
- [17] 陶亦寿,阮世永,龚壁建,等.三峡升船机模型及测量系统研究[J].长江科学院院报,1996,13(4):49-53.
- [18] 潘尔顺.三峡升船机整体动态响应分析方法的研究[D].上海:上海交通大学,2001.
- [19] 华中理工大学升船机数学模型课题组.三峡升船机整体动态数学模型的可行性研究报告[R].武汉:华中理工大学,1996.
- [20] 易春辉,李天石.升船机电气传动系统方案的研究[J].电气传动自动化,2005,27(3):37-39.
- [21] 孙洪秉,初日亭.岩滩垂直升船机技术研究及可靠性分析[J].水力发电,2001(1):32-36.
- [22] 易春辉,张新秋,谢敏.岩滩升船机的电气传动系统的应用与研究[J].红水河,1999,18(4):36-42.
- [23] 张英.三峡升船机控制系统设计和可靠性研究[D].西安:西北工业大学,2006.

(收稿日期:2008-03-19 编辑:方字形)

