

抽水蓄能电站的机组设备

——'94 抽水蓄能工程国际学术讨论会论文综述(四)

沈祖诒

(河海大学 南京 210098)

摘要 本文综述了'94 抽水蓄能工程国际学术讨论会涉及抽水蓄能机组的有关论文,介绍国内外在抽水蓄能机组技术方面的进展。主要内容有:水泵水轮机的模型试验、结构设计、选型设计及生产制造;电动发电机的结构设计及推力轴承;用于抽水蓄能机组的微机调速器及实时仿真系统;两个工程中的蓄能机组简介。

关键词 抽水蓄能 水电站 水泵水轮机 电动发电机 微机调速器 学术会议 综述

在'94 抽水蓄能工程国际学术讨论会上,涉及蓄能机组的有6个国家的作者提供的14篇论文。其内容涉及:水泵水轮机的模型试验、结构设计、选型设计及生产制造;电动发电机的结构设计及推力轴承;用于蓄能机组的微机调速器及实时仿真系统;两个工程中蓄能机组的介绍。

世界上一些发达国家,在60年代开始进入兴建抽水蓄能电站的高潮,迄今已有30年历史,因而一些著名制造厂商在蓄能机组的设计和制造方面已积累了丰富的经验。我国抽水蓄能电站建设开始不久,已投运的有潘家口抽水蓄能电站和广州抽水蓄能电站(一期工程)等,在建的有十三陵抽水蓄能电站、羊卓雍湖抽水蓄能电站和天荒坪抽水蓄能电站等,这些电站的蓄能机组均由国外厂商制造。我国制造厂只在70年代制造过装于密云水电站的斜流式蓄能机组,容量仅12MW。可以说我国蓄能机组的设计制造尚属空白,但各研究、设计和制造单位正在积极开展工作,并取得了成绩。水电设计、安装、运行单位也已有了了一定的实践,取得了成绩和经验。

1 水泵水轮机

1.1 转轮特性和模型试验

早期抽水蓄能电站上曾使用水泵和水轮机分开的三机式和四机式机组,亦使用过水泵转轮和水轮机转轮装在同一轴上的机组,后来则主要使用可逆式水力机械——水泵水轮机,同一个转轮既用作水泵又作水轮机。

工业发达家对水泵水轮机转轮做过大量的计算和模型试验工作。国内对此自70年代开始研究,曾做过100m水头段、300m水头段等转轮的模型试验,后来考虑到抽水蓄能电站以水头500~600m较为经济,故亦开展500~600m水头段转轮研究,但至今还没有一个国内研究的转轮用于实际工程。

前苏联也建了几个抽水蓄能电站,其中有较早的基辅抽水蓄能电站和近年投运的扎哥尔斯克抽水蓄能电站(装机 $6 \times 200\text{MW}$)。由于前苏联欧洲部分地形限制,他们以建设100m左右水头的抽水蓄能电站为主。本次会议上,乌克兰科学院水力机械研究所Fedulov^[1]介绍了该所有关水泵水轮机水力设计计算和模型试验的结果。

表1 乌克兰科学院水力机械研究所几个水泵水轮机模型转轮试验结果

转轮号	水轮机工况			水泵工况				
	n'_1 (r/min)	Q'_1 (L/s)	η (%)	n'_1 (r/min)	Q'_1 (L/s)	η (%)	σ	n_{SH}
OP05216	83	355	89.2	92.4	370	86.4	—	205
OP05217	80	345	90.2	88.0	335	89.6	0.12	186
OP05219	83	335	87.0	91.0	325	89.2	0.15	189
OP05220	80	392	90.0	86.5	390	89.2	0.12	197
OP05221	81	393	87.5	93.0	393	89.3	0.12	212
OP05222	80	470	88.0	91.0	430	87.8	0.22	217

该所在转轮设计中,主要采用基于经验的计算方法。先根据工程经验选定比转速 n_s ,然后确定 n'_1 和 Q'_1 ,以及转轮的几何尺寸和形状,最后决定流面(4~7个断面)。转轮叶片数采用6~8个。为了制造方便,除进水边和出水边外,采用等厚度叶片。该所对水头在70~500m,比转速在100~230之间的转轮进行了模型试验,模型转轮直径350mm。试验结果如表1所示。

1.2 水泵水轮机结构设计及安装

德国 Voith 公司的 Heine 等^[2]介绍了该公司对水泵水轮机结构设计的观点。该公司多年从事设计和生产水泵水轮机,这些观点可以说是工作经验的总结。美国 Voith 公司的 Henry^[3]介绍了几个工程实践中蓄能机组自激振动的问题,这种自激振动是由水泵水轮机转轮密封环不当引起的。中国天津发电设备厂王林生^[4]介绍了斜流式水泵水轮机转轮安装工艺。

1.2.1 轴系设计

蓄能机组的轴系设计通常有三种方案:①水机顶盖支承的单一轴;②水轮机轴与发电机轴分开;③带有中间轴。第①方案造价最低,第②方案要比第①方案高10%,第③方案要比第①方案高39%。

采用什么样的轴系结构还与水泵水轮机拆装方式有关。一般可有三种拆装方式:侧向、顶向和底向。在欧洲常采用侧向拆装方

式,使用这种方式可以缩短大修周期约2~3周。此时轴系采用有中间轴的结构。但是否采用侧向拆装方式还与其它因素有关。如对地面式厂房,且球阀在涡壳前,或井式厂房,且球阀在同一井中,向上游方向进行水泵水轮机拆装是有利的,不会增加厂房尺寸。而对地下式厂房,且球阀与厂房分别在不同洞室时,采用侧向拆装是不利的。又如在水头超过300m,电动发电机尺寸小于水泵水轮机顶盖尺寸,且水泵水轮机直径小于3.5m时,侧向拆装可以使顶盖采用整体结构,不用分瓣,因此侧向拆装也是有利的。因此,Voith 公司认为^[2],在轮转直径小于3.5m,水头大于600m,宜采用侧向拆装,而在其它情况下,宜采用顶向拆装;至于底向拆装通常是不用的。

1.2.2 推力轴承装置方式

众所周知,推力轴承可放在上机架上、下机架上或水轮机顶盖上。应考虑的因素有:水泵水轮机及发电机检修方便;发电机两个导轴承尽量靠近;减少机组高度和造价等。Voith 公司认为,直径在6m以下的电动发电机应采用推力轴承放在上机架的悬吊式装置方式;而直径在6m以上时,应采用推力轴承放在水轮机顶盖上的装置方式。

1.2.3 导叶操作机构

常规情况是使用二个油接力器,通过调节环操作导叶。为了安全,常采用剪断销或摩擦制动或两种都用等措施。但水泵水轮机导

叶操作机构承受的动态力矩大,因而整个机构粗大。为了减少操作机械,采用每个导叶由一个接力器操作的方案。它们之间同步可用下列办法解决:①用辅助调节环将所有导叶联起来;②用机械办法联系各个接力器的控制阀;③电气同步装置,Voith 公司自 1993 年起即采用这样的操作机构,可靠性好。

1.2.4 水泵水轮机密封中的自激振动

Voith 公司 Henry 介绍了几个工程遇到的振动问题。一个抽水蓄能电站装有 65MW 的蓄能机组 8 台,水轮机水头 65m,转速 150r/min,水泵扬程 46~53m,流量 136 m³/s。正常运行两年后,在两台机上发生由于水轮机导轴承温度过高而事故停机。经实测,轴、轴承和轴承座均有 4.5Hz 的振动。研究表明,这一振动是由转轮下密封中水力振动引起的。作者分析了密封中水力振动的成因。密封中漏水流量决定于径向间隙大小。由于转轮和下环间有偏心,在旋转时,间隙大小变化引起漏水量变化,于是密封腔内压力也变化,同时还形成涡流。这一压力变化的强弱还与平面间隙有关。在一定条件下形成自激振动。在实际工程中,将转轮提高 5mm 后,自激振动消失。

另一抽水蓄能工程有一台水泵水轮机,单机 167MW,水头 360m,转速 360r/min。在运行 16 年后更新设备,更新后运行了 500h,以后发生振动,在发电工况时,轴的摆度均超过标准,最大摆度发生在水机导轴承处,其振动主频为 3.6Hz,为转动频率的 60%。起初试图用引入压缩空气办法来解决,但无效。在水泵水轮机下环处设有在水泵启动和调相时排密封水用的 350mm 直径的排水管,在发电运行时,打开这一管子可以使摆度由 0.5mm 减为 0.08mm。由此证明问题还是出在密封上,经改进后解决了振动问题。

Henry 还提出由于 S 形特性,可能产生工况不稳定。另外还描述了水泵特性上的马

鞍形特性。

1.3 水泵水轮机选型设计

我国在抽水蓄能电站的设计方面已做了许多工作,其中包括水泵水轮机选型设计工作。华东勘测设计院李胜兵等^[5]介绍了天荒坪抽水蓄能电站水泵水轮机选型设计的经验;江苏省水利勘测设计院张仁田^[6]介绍了水泵水轮机的变速特性。

天荒坪抽水蓄能电站装有 6 台蓄能机组,单机容量 300MW,水头 528~610m,输水系统长度 1428m。

天荒坪电站上库无水源,故全部发电用水均需由下库抽上去。由于水库水位在变动,水泵的特性使其流量亦是变化的,故不能用平均流量概念计算上库充水过程,必须作详细过程计算。文献作者考虑了水泵的水头-流量特性,水库的水位-面积特性,水泵启动和停机过程等。在水泵启动间隔为 385s,水泵停机间隔为 380s 时,上水库充水时间达 438min。若按平均流量计算,上水库充水时间需 365min。

在抽水过程中还要考虑电网低谷时间和水泵的最大输入功率。抽水时间短,输入功率就要大,一般水泵最大输入功率发生在扬程最低,即流量最大时。计算表明,对天荒坪电站,在抽水开始时输入功率达 330MW,然后逐渐降低,由 330MW 降至 306MW 的历时达 195min。由于历时较长,故不能用电动机过载的办法来解决超负荷问题。

1.4 国内水泵水轮机设计制造的潜力

哈尔滨电机厂对 200m 水头段的水泵水轮机转轮进行了水力设计和试验,就双向水流对水泵水轮机流道设计的影响进行了研究,对转轮几何尺寸和叶片数选择做了工作^[7]。该转轮的特性为:水泵工况下,比转速 120~130m·kW,单位流量 220~250L/s,单位转速 84~94r/min;水轮机工况下,比转速 122~135m·kW,单位流量 250~300L/s,单

位转速 75~84r/min。水泵工况最高效率达 90%。该转轮曾用于抽水蓄能电站设计。此外该厂还参加十三陵抽水蓄能电站水泵水轮机的制造工作。

天津发电设备厂与清华大学等单位合作,研究过 100~300m 水头段的水泵水轮机转轮,进口了 140m 水头段水泵水轮机转轮的技术,正在进口 60m 水头段的水泵水轮机转轮技术^[8]。该厂正在考虑桃花寺抽水蓄能电站蓄能机组的设计制造工作,桃花寺蓄能电站水头 140.8~177m,装机 1 000MW,单机 125MW。

2 电动发电机结构

法国 GEC-ALSTHOM 的 Hemery 等^[9]介绍了广州抽水蓄能电站电动发电机的结构,并作了分析。中国第 14 工程局机电安装公司的何少润^[10]介绍了对广州抽水蓄能电站机组推力轴承存在问题的分析和改进。

2.1 电动发电机结构设计

因为目前大多抽水蓄能电站水头高,单机容量大,这里面临的是高速大容量电机设计问题,主要是两个问题:一个是机械强度问题,在逸速时离心力很大,振动也会引起较大的内力;另一个是发热问题,主要是电流密度大,尺寸小。

机械强度方面,国内通常要求轴系的第一临界转速应高于飞逸转速,并要有一定裕量,国外则不一定这样要求。对所有影响临界转速的因素都要予以仔细考虑,通常要考虑减少转动部分重量,减少导轴承之间的距离,增加转动和静止部分的刚度等。蓄能机组开停机频繁,对材质的疲劳有影响,也应予以考虑。

一般水轮发电机采用风冷,利用装置在转子上、下两端的风扇驱动空气循环。由于电动发电机双向旋转,使用这样的风扇有困难,故广州抽水蓄能电站电动发电机采用专门的

电动机驱动的风扇,有 8 个。冷却循环是轴向-径向型,从空气冷却器出来的冷风,由风扇驱动,分为两路,从上、下通过转子支架和磁轭汇成一路,然后通过定子铁芯。这样的冷却系统曾于 1980 年成功地用于蒙德齐克抽水蓄能电站的电动发电机。单极功率可允许 38MVA。

广州抽水蓄能电站电动发电机采用混合制动系统:当机组转速降至 50%时,开始电气制动,降至 5%时,投入机械制动。机械制动采用与主风道隔离的制动板结构,这种结构可以减少尺寸,防止摩擦材料落入电机。机械制动,在必要时,也可在 25%额定转速时投入。

广州抽水蓄能电站投运后,经实际测量,电动发电机振动很小,在额定转速时,仅 30 μ m。实测发热量也比设计值小。定子设计发热量为 330MVA 时 80K,实际为 341MVA 时 77K;转子设计发热量为 333MVA 时 90K,实测为 341MVA 时 70K。

2.2 广州抽水蓄能电站机组推力轴承的改进

1992 年 9 月第一台机组盘车时发现,在高压喷油泵正常工作情况下,用 4 根 3m 长钢管、8 个人无法盘动。后来增加到 30 人,甚至增加两台 3t 千斤顶仍然无法盘车。这显然是不正常现象。

根据计算,若摩擦系数减少至 0.02,则 8 个人应能盘车,现在盘不动,说明高压油泵没有起到作用,油膜没有形成。

原设计中,轴瓦中央有一个 1cm 半径的喷油孔,当油压增加时,本应能使镜面脱离轴瓦,并形成油膜。国内的通常做法是轴瓦必须刮花,深度为 0.1~0.15mm,它们相互交叉,且与出油口相通,于是油可以由出油口,经过这些浅孔布满轴瓦面,当然其油压是自中心向边缘减少的。因为在大面积上均有油压,故可以将转子顶起形成油膜。

然而,Neypic 提供的轴瓦在磨光后没

有刮花,就没有像上述那种连续的浅孔存在,结果只有在出油孔这点小面积上有油压,当然顶起转子是困难的。据计算,要有 $13\ 121\text{kg/cm}^2$ 压力才能顶起转子,这个油压已大大超过原厂家设计的油压。另外由于负荷不均,瓦块倾斜,高压油在个别瓦块上淌出,致使油压难以升高。结果是大部分瓦块没有离开镜面,摩擦力大,无法盘车。

根据广州抽水蓄能电站的建议,厂家同意改进轴瓦上油孔,并刮花(见文[10]图6)。将原半径 1cm 的油孔改为半径 2.5cm 油孔,且周围在半径 8cm 范围内刮花,形成 $0.02\sim 0.03\text{mm}$ 的油槽。改进后,在油压为 $70\cdot 10^5\text{Pa}$ 时8个人可轻易进行盘车。

3 微机调速器和实时仿真系统

我国对微机调速器的研制处于国际先进水平,但工艺上尚有不及之处。到目前为止,大型抽水蓄能电站尚未使用国产微机调速器,但从技术水平讲,国内完全可以制造出供大型抽水蓄能电站用的微机调速器。国内为了微机调速器的调试和现场动态试验还研制了实时仿真系统。包括用于蓄能机组的实时仿真系统。目前国外亦重视仿真系统的研制,如 Voith 公司有用于自控系统调试的实时仿真系统。在本次会议上,Sulzer 公司展示了其内置于微机调速器的数字仿真系统,河海大学也展示了微机调速器及实时仿真系统的研究成果。

3.1 微机调速器

电力自动化研究院研制的微机调速器为双微机系统调速器^[11],每一系统硬件包括 Intel 公司的 OEM 单板机 iSBC88/25、8088CPU、内存扩展板、采样控制板、输出控制板、模拟量输入板、数字量输入板、显示板和电源。软件由模块组成。

基本控制规律为改进的 PID 控制规律,另有辅助 PI 控制。其系统结构可参见文献

[11]图2。

3.2 实时仿真系统

河海大学沈祖诒等^[12]介绍了水泵水轮机的实时仿真系统。包括调速器在内的控制装置常需通过与控制对象对接起来构成闭环系统进行调整。然而在制造厂内,没有机组,只能进行开环试验;把闭环试验放到现场去做,不利于厂家研制产品,不利于缩短现场调试时间。在现场,虽然有机组,但带着机组调试也有不安全和不方便之处。使用实时仿真系统,即用微机实时仿真机组的动态特性,可以在制造厂内闭环调试调速器和其它控制装置。在现场用实时仿真系统可以缩短整个机组安装或大修周期,可以更好地保障机组安全。同时仿真系统还可用来培训运行人员。河海大学研制的仿真系统还可用于实时纪录现场动态试验。

水泵水轮机实时仿真系统硬件包括微机、信号调理仪、多功能采集板和打印机等。

软件包括实时仿真软件,能仿真水泵水轮机的各种工况,如水轮机启动、停机、空载扰动、并列运行时负荷增减、甩负荷、水泵启动、流量增减、水泵断电、水泵转发电等等。仿真时,可在屏幕上实时显示过渡过程及有关参数的当前值、最大值和最小值。软件还包括调速器性能测试软件,动态过程记录软件,图形输出软件及其它辅助软件。

河海大学研制的实时仿真系统已用于电力自动化研究院、长江控制设备研究所、陈村水电站等调速器研制单位和运行单位。

4 两个抽水蓄能电站机组简介

4.1 溪口抽水蓄能电站

Sulzer 公司 Jaquet^[13]介绍了溪口抽水蓄能电站。该站装2台机组,单机容量 41.4MW ,水头在 $236.6\sim 271\text{m}$ 。水泵水轮机转轮由整体不锈钢铸造。轴系临界转速是最大逸速的 1.25 倍。20个导叶均用不锈钢制

造。调速液压系统压力为 $60 \times 10^5 \text{Pa}$ 配有 Sulzer 公司的微机调速器。球阀直径为 1400mm。

4.2 马耳他抽水蓄能电站机组

奥地利 Verbundgesellschaft 的 Schröfelbauer^[14]介绍了马耳他抽水蓄能电站的组合式水泵水轮机。马耳他梯级由三级组成,发电容量 891MW,抽水容量为 406MW,年发电量 $800 \times 10^6 \text{kW} \cdot \text{h}$ 。第一级为抽水蓄能电站,装有两台水泵水轮机,水头 198m,单机容量 60MW(发电)/58MW(抽水)。水泵水轮机为组合式,水轮机转轮在上,水泵转轮在下,水轮机尾水和水泵进水管是分开的,涡壳是公共的。一年中发电约 1000h,抽水约 500h。文献[14]介绍了水泵水轮机的各种运行方式。

参考文献

- 1 Fedulov Yu I. Development and investigation of pump turbine models of Francis-type. In: Proceedings of International Symposium on Pumped Storage Development '94, Sept. 1994, Nanjing. 403~409
- 2 Heine W. et al. Comparison of mechanical design concepts of high head pump/turbines. In: Proceedings of International Symposium on Pumped Storage Development '94, Sept. 1994, Nanjing. 428~437
- 3 Henry L F. Some hydro-mechanical problems on reversible pump/turbines. In: Proceedings of International Symposium on Pumped Storage Development '94, Sept. 1994, Nanjing. 444~452
- 4 Wang L Sh. Installation feature of Deriaz pump-turbines. In: Proceedings of International Symposium on Pumped Storage Development '94, Sept. 1994, Nanjing. 498~510
- 5 Li Sh B, et al. Aspects for pump-turbine selection for Tianhuangping pumped-storage Power Plant. In: Proceedings of International Symposium on Pumped Storage Development '94, Sept. 1994, Nanjing. 463~471
- 6 Zhang R T. the variable-speed characteristics for reversible pump-turbines. In: Proceedings of International Symposium on Pumped Storage Development '94, Sept. 1994, Nanjing. 511~522
- 7 Huang P. et al. Progress in domestic design and manufacture of pump-turbine. In: Proceedings of International Symposium on Pumped Storage Development '94, Sept. 1994, Nanjing. 453~455
- 8 Gao D Y. Domestic-made equipments for medium and small-sized Francis pumped storage projects. In: Proceedings of International Symposium on Pumped Storage Development '94, Sept. 1994, Nanjing. 410~415
- 9 Hemery G, et al. Guangzhou Generator Motors. In: Proceedings of International Symposium on Pumped Storage Development '94, Sept. 1994, Nanjing. 436~443
- 10 He Sh R. Analysis and treatment of thrust bearing at Guangzhou Pumped Storage Station. In: Proceedings of International Symposium on Pumped Storage Development '94, Sept. 1994, Nanjing. 416~427
- 11 Shao Y X, et al. Digital governor of pump-turbine for pumped storage power stations. In: Proceedings of International Symposium on Pumped Storage Development '94, Sept. 1994, Nanjing. 483~491
- 12 Shen Z Y, et al. Real-time simulator for pump-turbine set. In: Proceedings of International Symposium on Pumped Storage Development '94, Sept. 1994, Nanjing. 492~497
- 13 Jaquet M. Xikou-medium Hydro Pumped Storage Plant. In: Proceedings of International Symposium on Pumped Storage Development '94, Sept. 1994, Nanjing. 456~462
- 14 Schröfelbauer H, et al. Isogyre pump turbines of the storage power plant Malta/Austria. In: Proceedings of International Symposium on Pumped Storage Development '94, Sept. 1994, Nanjing. 472~482

(收稿日期:1995-03-15)