



我国抽水蓄能技术水平持续跃升

□ 宫让勤 王学善 姜宏雨

国家主席习近平在第七十五届联合国大会发表演讲时，提出中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，力争于2030年前实现“碳达峰”，并首次提出努力争取2060年前实现“碳中和”。这为我国电力装备制造行业发展指明了方向。

随着清洁能源低碳转型的推进，我国风电和太阳能等非化石能源在电网中的比例越来越高。但由于风电和太阳能等新能源的间歇性特征，要更好地发挥他们的作用，电力系统则需要配备15%的储能电源，以保证电网的电压和频率稳定。而大量研究表明，抽水蓄能电站是最经济、最可靠、最环保、最安全、最成熟、最灵活的大规模储能方式。随着我国抽水蓄能技术水平的持续跃升，抽水蓄能装备正在保障能源电力安全、促进清洁能源消纳、实现“碳达峰、碳中和”目标、促进大气污染防治等方面发挥着越来越重要的作用。

摸索到创新的跨越

抽水蓄能电站作为电网系统的重要一环，对提高整个系统的安全稳定运行和供电质量起着至关重要的作用。而国外公司对研发技术严格保密，我国抽水蓄能机组在很长一段时间处于自我摸索阶段。虽然20世纪末，国内电力装备制造企业与国外公司进行了回龙、白山、韩国青松等项目的合作交 流，积累了一定的机组设计和制造经验，但国内研发能力明显不足。

2005年2月，在国家发改委的大力支持下，进一步推进了我国抽水蓄能机组国产化进程。以哈尔滨电气集团哈尔滨电机厂有限责任公司（以下简称哈电电机）和东方电气集团东方电机有限公司（以下简称东方电机）为代表的国内电力装备制造企业努力抢抓机遇，在学习国外技术的同时大力推进自主创新，使我国的抽水蓄能机组研发能力有了质的飞跃。

作为行业龙头企业的哈电电机和东方电机，累计参与了39座抽水蓄能电站的建设，承制了134台套抽水蓄能机组。这些抽水蓄能机组已涵盖所有水头段和各档转速，在研发、设计、制造、质量等方面已达到世界最先进的水平。

目前，国内已投运的单机容量最大抽水蓄能机组的为仙居电站，单机

容量为375兆瓦；扬程最高的抽水蓄能电站为长龙山电站，最高扬程764米，是世界第二高水头的抽水蓄能电站；转轮直径最大的抽水蓄能电站为白莲河电站，转轮的最大外径为5320毫米。在造的阳江机组单机容量400兆瓦、最高扬程705.6米、额定转速500转每分钟为世界级高点项目，计划今年年底投入商业运行。现正在研制单机容量425兆瓦，最高扬程约为775米，到达世界先进水平。

经过多年发展，我国已经建成的抽水蓄能电站在运装机3179万千瓦、在建装机5063万千瓦，成为全球抽水蓄能规模最大的国家。我国抽水蓄能技术的发展和进步得益于国家的政策、信任和支持。

为适应新型电力系统建设和大规模高比例新能源发展，助力国家实现“碳达峰、碳中和”目标，近日，国家能源局印发了《抽水蓄能中长期发展规划（2021—2035年）》，规划明确到2025年抽水蓄能投产总规模较“十三五”翻一番，达到6200万千瓦以上；到2030年，抽水蓄能投产总规模较“十四五”再翻一番，达到1.2亿千瓦左右。这是我国抽水蓄能技术和装备制造水平进一步跃升的重大机遇，对我国电力装备制造行业更好地发挥助力我国经济社会高质量发展作用具有重要意义。

破解水泵水轮机技术世界难题

抽水蓄能机组设计水头高，且启停机工况复杂，对水轮机各部件的刚强度及抗疲劳性能要求严格。为此，以哈电电机、东方电机为代表的我国电力装备制造企业，在研发、设计、制造过程中开展了大量的创新工作。

根据抽水蓄能电站的不同参数，对水泵水轮机的水力性能（包括：水轮机和水泵工况双向能量性能优化，正常运行区压力脉动的优化、水泵工况“驼峰”区的优化，水泵空化性能的优化和“S”区的优化等）进行了优化设计，对水力通道的几何尺寸和翼型进行优化设计，采用定常与非定常CFD数值计算结果对水力性能进行判断，通过模型试验对水力模型性能进行验证，成功掌握了水泵工况“驼峰”特性控制技术、水泵空化性能优化技术、“S”区优化技术、双向效率与稳定性匹配设计技术，满足了水泵水轮机的稳定、高效运行要求，可以对各水头段水泵水轮机进行水力开发。

哈电电机的科研基地大电机研究所既是我国大电机行业的专业所，也是水电发电设备国家重点实验室，还是国家水力发电设备工程技术研究中心，依托强有力的人才、技术、设备等研发资源，大电机研究所带领我国行业企业开展抽水蓄能技术研究，在推进水泵水轮机的水力性能、结构刚强度及振动、轴承等方面的技术研究中发挥了重要作用。

水泵水轮机的水力开发需要通过模型试验对设计结果进行验证，而高水头封闭式水泵水轮机模型试验台是水泵水轮机模型试验的基础。试验台数量的多寡与规模的大小在很大程度上代表着企业或部门水力发电设备设计研发能力，同时也代表着水轮机模型试验能力的高低。我国的哈电电机、东方电机等单位也具有多座高水头、高精度的水力性能试验台，可保证水泵水轮机的模型试验结果准确性。

国内公司陆续攻克了80公斤级引水钢管岔管高强钢焊接技术、锻焊结构转子轴套间隙埋弧焊技术、长短叶片结构抽蓄转轮装焊技术、推力瓦巴氏合金自动堆焊技术、机器人超窄间隙MAG自动焊技术、耐磨耐腐蚀层不锈钢自动堆焊等关键技术，进水球阀采用数控设备及配合智能测量技术、整体球阀制造工艺技术、水轮发电机浮动磁轭加工技术和单波纹弹性油箱数控加工技术等关键技术，取得相关发明及实用新型专利百余项，积累了大量的储备技术。这些技术在提升产品质量、生产效率、自动化水平等方面效果显著，为抽蓄市场的持续开发提供了有力的技术支撑。

结构刚强度及振动研究技术方面，利用随时间变化的瞬态压力场计算得到转轮运行过程中的动态应力，能显著提高转轮疲劳评估准确性；在设计阶段通过结构优化改变固有频率，避免发生动静干涉共振风险；发电电动机转子关键部件可靠性分析技术，基于FKM准则的疲劳分析技术，全面考虑疲劳影响因素，提高部件疲劳寿命计算精度；机组振动测试及现场动平衡试验技术，积累了丰富的理论和实践经验，解决无数机组振动问题。上述技术成功应用于阳江抽蓄机组等项目研发，并取得较好的效果，为后续抽蓄机组研发奠定了坚实的技术基础。

国内电力装备制造企业的一系列技术创新，提高了机组运行稳定性，实

现了高效率和高稳定性兼顾，特别在高水头抽水蓄能电站机组上采用了新的控制策略，缩短了水泵水轮机发电工况启动并网时间，成功攻克了水头变幅大的水泵水轮机并网困难的世界性技术难题。

发电电动机技术持续突破

发电电动机的设计从电磁设计、通风系统设计、绝缘系统研究、轴承技术开发、刚强度及稳定性分析技术研发等角度取得了长足进步。

在电磁性能技术研究上，我国拥有行业通用的Ansoft、Magnet、Flux及Simfen等电磁场及电磁暂态仿真软件，可采用二维及三维瞬态电磁场有限元法及机电电磁暂态数值仿真分析法，结合多年来积累的抽蓄项目电磁理论研究经验，从理论分析计算角度保证机组优良的电磁性能，对未来大容量、高转速蓄能机组项目的研发，具备坚实的电磁理论研究基础。同时，我国有具有世界先进水平的试验设备和国家级大型水电设备质量监督检测中心，具有丰富科研及实际工程项目性能试验经验的电气试验团队，能够实现 对理论计算和设计方法的不断校验，有效促进理论分析计算的准确性不断提升。此外，还拥有大型水轮发电机电磁结构及性能实验模型、分数极路比绕组抽水蓄能发电电动样机及抽水蓄能发电电动机变频启动物理仿真系统等，能够对后续抽蓄项目的研发提供有效模拟支撑。

在绝缘性能技术研究领域，哈电电机等国内企业拥有国内容量最大、精度最高的定子线棒冷热循环装置，

能够保证定子线棒拥有良好的热稳定性；具备电热老化实验、耐环境温度、防潮、防盐雾等试验能力。此外，在高电压等级及高海拔环境的绝缘技术方面，积累了丰富的工程经验，对未来大容量、高转速抽蓄项目的研发提供了有力支撑。

在通风冷却技术研究方面，国内企业拥有专业的冷却技术研究团队，应用国际通用的Fluent、CFX、Flow-master等流体及热分析软件进行电机的流场和温度场分析，能够有效解决电机冷却技术研究问题。国内企业自主开发了用于模拟发电电动机流场的相似通风模型、用于高密转子通风结构研究的转子共轭换热模型、用于基础科研的流体及换热参数试验台进行有针对性 的研究，解决了发电电动机通风冷却的瓶颈问题，实现了抽水蓄能发电电动机容量提升过程中通风冷却系统的升级。先后完成了白鹤滩、丰宁、敦化、阳江等重点项目的通风模型验证。从研发到试验验证，再到工程应用、现场运行试验对比，国内企业实现了抽水蓄能发电电动机通风冷却系统的闭环研究，冷却技术基础扎实，创新能力强，可有力支撑抽水蓄能项目的推进。

在轴承技术研究方面，自宝泉、惠州、白莲花等抽水蓄能机组技术引进开始，哈电电机和东方电机就展开了对蓄能机组双向推力轴承的瓦面材料、支撑结构、性能计算等关键技术研究，经过30余年发展，各项研究内容已经逐渐成熟并取得了丰硕成果。在瓦面材料方面，开发出了巴氏合金瓦和弹性金属塑料瓦两种瓦面材料，经验证两种材料均适用于大型抽

水蓄能机组；在轴承支撑结构方面，开发了特有的弹性油箱支撑结构，能自动平衡瓦间负荷，提升轴承运行稳定性，其性能处于行业领先地位；在计算方法方面，自主开发了热弹流动力润滑性能计算分析软件TBearing，可对轴承承载能力实现精准计算。除此之外，哈电电机还建设了高速推力轴承试验台，其试验能力处于行业第一位置，先后进行过深润、深蓄、敦化、长龙山、阳江等抽水蓄能机组双向推力轴承全尺寸模拟试验，积累了行业内最丰富的双向推力轴承试验数据，为提升轴承综合设计能力提供了坚实基础。

与此同时，随着近年来技术改造及信息化进程的加速，国内的工艺装备发生了质的变化。以哈电电机为代表的国内公司早已配备了功能强劲的下料、热处理、成型设备，类别齐全、加工范围广泛的系列冷加工设备，数控精大稀金属切削设备，全自动数控加工中心，焊接机器人以及为制造定子线棒、磁极部件、磁扼冲片等关键工件的专用加工设备。

经过近20年的高速发展，我国抽水蓄能机组装备制造水平持续跃升、制造成就令人瞩目，能够承担单机容量450兆瓦的抽水蓄能机组的设计和制造，水头范围覆盖到800米，转轮直径最大可达7米，转速从100转每分钟~750转每分钟，实现了单级水泵水轮发电机组水头全覆盖、转速全覆盖、容量全覆盖，为“双碳目标”的实施提供强有力的装备制造支持。

可以预见，随着抽水蓄能中长期发展规划的落实实施，我国抽水蓄能技术和装备制造水平将进一步跃升。

（宫让勤系哈尔滨电机厂有限责任公司副总设计师；王学善系哈尔滨电机厂有限责任公司党委宣传部；姜宏雨系哈尔滨电机厂有限责任公司市场部项目经理）



国网新源控股有限公司泰安抽水蓄能电站上水库

（国网新源控股有限公司供图）

从孤寂到喧嚣

——蒙西抽水蓄能电站发展历程

水蓄能电站。

呼和浩特抽水蓄能电站（以下简称呼蓄电站），地处武川县，上水库位于大青山之巅，下水库位于哈拉沁沟（利用一个几字形弯曲河道筑坝而成）。电站于2004年5月开始筹建，2006年8月正式通过国家发改委核准，2014年底1.2号机组投产，2015年6月3、4号机组投产，总装机容量120万千瓦，设计年发电量20.07亿千瓦时，设计年抽水电量26.77亿千瓦时。

呼蓄电站在电网中的运行与其他抽水蓄能电站稍有不同，主要因为网内电源结构不同。内蒙古自治区是国家最大型的以风、光为主的清洁能源基地，在呼蓄电站投运之时，网内的风电和光伏装机容量占比已达30%，利用抽水蓄能调节风光的波动性，内蒙古电网成为首选试验田。通过预测和调度技术手段调风光抽蓄优化运行，用抽蓄平抑风电和光伏的波动，联合优化后使其出力平稳和稳定，减少化石能源消耗，更多接纳新能源。

经过多年的调度运行实践，呼蓄电站作为内蒙古电网唯一的大型调节器，在网内与风光的联动运行调度愈来愈灵活，作用愈来愈凸显。随着近年来

风电光伏新能源容量的持续大幅增长，呼蓄电站运行次数明显逐年增加。

据统计，2018年~2020年间，呼蓄电站启用频繁，而同期电网的弃风、弃光现象也大幅改善，其中弃风率降低了5%，弃光率降低了1%。从而看出，呼蓄电站运行过程中，与风光新能源联合调度运行，在充分发挥削峰填谷作用的同时，有效助力蒙西地区的清洁能源消纳。但2021年弃风率、弃光率明显回升，其主要原因在于2021年并网风光光伏装机容量增幅过大，一座抽水蓄能电站已明显不能满足内蒙古电网的需求。

能源绿色低碳转型的主战场 内蒙古清洁能源基地

风，在内蒙古从来都是不可或缺的存在。“风荒沙暗九天”，老舍先生的《内蒙即景八》中曾这样描述，可见风之大、风之烈。自治区的风资源储量占全国的1/3，70米高度风能资源量15亿千瓦，居全国首位。其中，巴彦淖尔市北部、包头市、乌兰察布市属于蒙西地区风能资源丰富集中区域，部分区域已建成百万千瓦级风电基地。

内蒙古除了有丰富的风资源，光

资源也不甘落后，这里有全国最大的沙漠集中式光伏发电基地——达拉特光伏发电基地。区域内光照时间长、强度大，太阳能年总辐射量在4831MJ/m²~7013MJ/m²之间，是全国高值地区之一，全区年总辐射值由东北向西南逐渐递增。

2020年9月，第七十五届联合国大会上，中国正式向国际社会承诺“力争于2030年前实现碳达峰，力争于2060年前实现碳中和”。2021年3月，在中央财经委员会第九次会议上，习近平总书记对“碳达峰、碳中和”作出了进一步部署，明确了实现“碳达峰、碳中和”的基本思路和主要举措，强调要构建以新能源为主体的新型电力系统。在“双碳”目标愿景下，2030年全国风电、太阳能发电总装机容量将达到12亿千瓦以上。

内蒙古作为我国重要的清洁能源基地，新能源将成为电力装机增量的主体能源。根据《内蒙古自治区国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》，自治区依托丰富的风光资源，提出新能源倍增计划，即到2025年，全区新能源装机占比将超过50%，成为全区电力的

主体能源。根据规划，“十四五”期间，自治区将重点在包头、鄂尔多斯、乌兰察布、巴彦淖尔、阿拉善等地建设千万千瓦级新能源基地。内蒙古自治区将成为实现“双碳”目标、构建以新能源为主体的新型电力系统的主战场之一。

携手相伴 蒙西地区抽水蓄能中长期规划

随着风电、光伏等新能源电源的倍增式入网，内蒙古电网现有的火电以及抽水蓄能电站在超负荷运行状态下，难以满足电网需求。从2021年上半年运行数据可以看出，蒙西地区弃风率、弃光率较往年有增长趋势，随着新能源大批入网，此种现象还将加剧。为了适应新型电力系统建设和大规模高比例新能源发展需要，内蒙古电网范围内急需建设一批抽水蓄能电站。通过内蒙古电网电力系统模拟，在已建呼蓄电站120万千瓦的基础上，内蒙古电网2035年至少需要新增抽水蓄能电站装机容量530万千瓦。

近日，国家能源局发布《抽水蓄能中长期发展规划（2021—2035年）》（以下简称《规划》），到2030年，抽水蓄能投产总规模达到1.2亿千瓦左右。

重点实施项目340个，总装机容量约4.21亿千瓦；储备项目247个，总装机规模约3.05亿千瓦。其中蒙西地区储备抽水蓄能站点7个，总装机容量780万千瓦；重点实施项目3个，总装机容量360万千瓦。截至目前，已有两个重点实施项目开启前期设计工作，进度稍快的乌海抽水蓄能电站最迟2022年核准开工。

从《规划》中提出的重点实施项目来看，其装机容量仍难满足电网需求，未来还需涉及生态红线但经济性优的部分储备站点，在落实相关条件、做好与生态保护红线等环境制约因素避让和衔接后，将其进行开发建设。

抽水蓄能电站运行灵活，是电力系统主要的调节电源，对保障电网安全运行、促进新能源消纳、构建以新能源为主体的新型电力系统具有重要意义。在“碳达峰、碳中和”目标引领下，积极发展抽水蓄能电站恰逢其时，势在必行。随着发改价格[2021]633号文《关于进一步完善抽水蓄能价格形成机制的意见》的落地，在多重利好政策的推动下，蒙西地区抽水蓄能市场将呈现一片繁荣景象。相信在不久的将来，呼蓄电站将不再孤单，内蒙古高原之巅必将出现汪汪清池，与呼蓄一起携手捍卫内蒙古电网的安全，助力双碳目标的实现。

（作者系中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司规划发展研究院副室主任）