提升新能源装备制造水平

风电、水电、核电及太阳能等能源，由于取之不尽用之不竭，正在得到越来越多国家的重视。我国“十二五”能源发展规划和“新兴能源产业发展规划”的规划纲要将共同搭建起今后10年我国能源发展框架。据知情人士介绍，到2020年，非化石能源占一次能源消费总量的比重争取达到15%左右，其中，水电占到9%～10%，核电占2%～3%，而风能、太阳能等可再生能源占2%以上，预计投资5万亿元，发展空间巨大。

经过多年发展，我国已在能源装备制造领域取得长足进步，但是很多关键零部件仍需进口，造成成本过高，关键技术受制于人。能否掌握新能源装备制造的核心技术，提升新能源装备制造水平，成为装备制造企业和机床工具企业共同面对的课题。

本期策划，我们有幸邀请到了原东方电机副总工程师、三峡项目负责人贺元先生，他亲身参与了三峡机组的开发与研制，也见证了我国发电设备科研和制造能力快速提升、机械制造工艺技术优化创新的艰辛历程，文中提到的很多关键技术和设备都十分珍贵，对今后我国发电设备的制造与创新发展很有参考价值。

德国DMG、瑞士斯达拉格海科特、意大利马利奥•卡耐基公司都是具有先进的技术和丰富的生产制造经验的国际机床制造商，他们为世界知名的能源设备制造企业提供先进的数控机床和完整的解决方案，对于我国装备制造技术和水平的提升有积极的借鉴意义。

此外，本期还策划了多个能源装备制造的典型案例，供大家查考，以期促进我国能源装备制造业的结构调整和健康可持续发展。

本期策划：梅　峰

三峡工程促进了工艺技术创新和机械设备升级

中国机械制造工艺协会技术顾问　贺　元

作者简介：贺元，中国机械制造工艺协会技术顾问，东方电机原副总工程师、生产部长、总工艺师、三峡项目负责人，现从事水电机组监理工作。

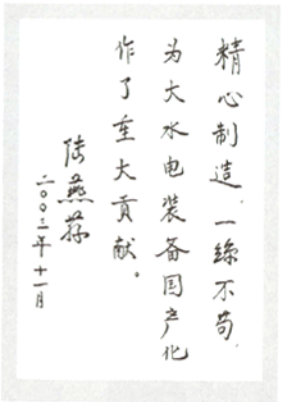
三峡工程举世瞩目。三峡工程的建成不仅提高了长江的防洪和通航能力，为国家提供了更多清洁能源，也促进了工艺技术的优化创新和机械设备的升级换代。作为工艺战线的一名老兵，我有幸参与了三峡机组开发与研制，也见证了我国发电设备科研和制造能力快速提升，机械工艺技术优化创新的艰辛历程。

三峡工程提升了我国水电设备的研究开发能力

三峡水电机组是当今容量、尺寸、重量及制造难度最大的机组。为了造好三峡机组，国务院三峡办（包括原国务院重大办）及中国机械工业联合会（包括原机械工业部）组织国内制造企业、科研院所及高等院校对三峡机组的转轮水力设计、转轮制造及线圈绝缘等关键技术进行了科研攻关，取得了多项重大科研成果，培养了大批专业人材，为三峡机组的技术转让和生产制造奠定了坚实的基础。在三峡机组招标前，国务院又制定了“技贸结合、技术转让、联合设计、合作生产”的方针，旨在通过制造三峡机组，提升国内水电设备研究开发能力。

2000年以来，东方电机员工经过艰辛努力，先后制造出了三峡左岸和三峡右岸机组，并相继投入运行，机组制造和运行质量达到了国际先进水平。通过三峡机组的研制，东方电机有限公司成功开发出了水轮机转轮的水力性能计算、五轴数控加工、巨型转轮焊接和加工、主轴窄间隙焊接及水内冷定子线圈制造等多项关键技术，也为今后自主研发百万千瓦巨型水电机组奠定了坚实基础。

原机械工业部副部长陆燕荪多次强调，工艺出精品，精品出效益；振兴装备制造业的核心是加强基础工艺，采用先进制造技术。制造三峡机组采用了许多先进工艺技术，使得发电设备的工艺技术得到了进一步的优化和创新，而先进的工艺技术又推动了机械设备的升级换代。老部长的真知灼见在三峡机组的制造中再次得到见证。



2003年陆燕荪（中）到东电视察，并为《无悔追求》一书题词，右一为本文作者

不锈钢精炼技术

在制造三峡机组之前，国内铸件厂对转轮上冠、下环、叶片等不锈钢铸件都是采用普通电炉冶炼的。三峡转轮上冠、下环、叶片开始采用了UOD或AOD方法进行冶炼，使得这些不锈钢铸件质量大为提高。目前，国内一重、二重、鞍钢、大重、共享等多家铸件生产企业装备了UOD或AOD炉，掌握了不锈钢精炼技术，水轮机转轮铸件的不锈钢精炼能力和技术水平大为提升。

叶片五轴数控加工技术

以前的转轮叶片是采用砂轮打磨，采用样板进行检测。三峡转轮叶片采用了五轴数控天桥铣床进行铣削（见图1），采用光电经纬仪或三坐标测量机进行检测，大大提高了叶片加工效率和测量精度。目前国内的水电设备制造企业都已装备了五轴数控铣床，掌握了叶片数控加工技术。国内沈阳机床集团、北京第一机床厂、齐齐哈尔二机床厂、桂林机床厂等已制造出大型五轴数控铣床。我国高精度数控机床制造能力得到大幅度提升。

叶片强力磨削技术

记得20多年前陆燕荪说过，我国大型水电、火电设备技术有很大提高，但我国液压、气动等基础元件与国外先进水平相差还很远。以前我们都是采用叶片式风动砂轮机铲磨叶片（见图2），铲磨质量不高，效率低。铲磨三峡叶片采用了国外先进的涡轮式风动打磨机，叶片形线质量好，效率也大为提高。上海京浦风动工具厂经多年攻关，已研制成功这种涡轮式风动打磨机。

转轮焊接技术

以往转轮上冠、下环材料为普通钢，叶片为不锈钢，采用奥氏体焊条进行焊接。三峡转轮上冠、下环、叶片全部采用不锈钢，采用马氏体焊丝进行焊接（见图3）。转轮焊完后一次性探伤合格率高，焊缝残余应力低，返修率低，达到国际先进水平。目前国内水电设备都已采用马氏体焊丝焊接转轮，哈尔滨焊接研究所等国内多家焊丝厂已能生产这种焊丝。

大件起吊翻身技术

三峡机组大部件在加工中需多次进行翻身，一两百吨的部件翻身还不算太难，对近500t的转轮实施翻身就不那么容易了。东电采用了巨力集团制造的120mm无接头钢丝绳和翻身架对500t三峡转轮进行了翻身，攻克了大件翻身技术（见图4）。如今巨力集团已成长为世界最大吊索具企业。

激光数控切割技术

三峡发电机磁轭的冲片厚度较以往发电机增加一倍，由于冲剪力大幅度提高，采用传统的冲剪技术已行不通，只能采用了高精度的数控激光切割机进行切割。东电率先在国内采用华工激光公司生产的数控激光切割机切割出三峡左岸发电机磁轭冲片共计13 000多片，总重量达1 300多吨（见图5）。目前华工激光公司已批量生产多种规格的数控激光切割机。

图1　五轴数控天桥铣加工三峡叶片

图2　采用涡轮式风动砂轮机铲磨叶片

图3　正在焊接的三峡转轮

图4　用无接头钢丝绳和翻身架对转轮进行翻身

主轴窄间隙焊接技术

采用厚钢板分段成形，利用窄间隙埋弧焊技术将主轴毛坯分别焊接成功三峡左岸水轮机主轴和发电机主轴，主轴焊缝一次探伤合格率达99%，达到国际先进水平（见图6）。目前这一技术已在国内广泛用于水电机组主轴的生产。

特大型部件加工技术

由于三峡机组尺寸大，质量重，在制造三峡机组期间，许多大尺寸、重量重的特大部件都需要大型数控立车、数控卧车进行加工。通过三峡机组的制造，我国的机床制造业得到迅猛发展，目前国内武重、齐一、青重等多家机床行业已生产出22m大型数控立车、数控卧车，我国机床制造能力得到进一步提升（见图7）。

定子线棒真空无溶剂浸渍技术

借助三峡技术引进，又经过技术人员的消化创新，东电终于建成了定子线棒真空无溶剂浸渍系统（VPI），成功制造出70万kW的水电机组线圈和100万kW超超临界汽轮发电机线圈（见图8）。采用这种技术生产的线圈，不仅提高了线圈的制造质量和使用寿命，也使线圈制造的效率得到了成倍提高。

中国机械工业联合会顾问、国务院三峡重大设备制造检查组组长陆燕荪指出："发电设备制造业已进入全球体系，中国占住了主导地位；通过三峡工程建设，我们的核心技术和自主知识产权有了很大进步，也把我们水电设备制造业推上了一个新的台阶。"目前，东电和哈电自主设计和制造出三峡右岸机组已投产发电，单机容量70万kW的三峡地下电站机组、77万kW溪落渡机组和80万kW向家坝机组正在制造中；东电、哈电还在加紧研发100万kW水电机组。

面对水电设备制造业的大好局面，不禁让我想起了10多年前国务院三峡办主任郭树言一席感人的肺腑之言："如果三峡工程建成时，虽然宏伟壮观，但主要设备都是进口的，没带动民族装备工业的发展，那我们就愧对全国人民的关心和支持。"

回顾各级领导对国内企业研制三峡机组的关心和支持，在心存感激之余，我们还应该看到，在抽水蓄能机组、核电机组、燃气发电机组及风电机组等领域我们还需要借鉴三峡工程建设的成功经验，利用巨大的市场潜力，抓住机遇，与国际高端科技紧密接轨，在学习和掌握好国外先进技术同时进一步推进工艺技术优化创新，精益求精，生产出更多的国际一流电力设备，使我国发电设备的制造能力和工艺技术迈上新的台阶。

当前我国正处于经济转型，产业结构调整，产品升级换代的关键时期，如果其他产业也能像建设三峡工程那样，在工程建设的同时，抓好相关机械产品的升级换代，把市场竞争从纯粹劳动密集型成本竞争转变为品质竞争。那样，每当一个大型工程完工之时，就会有一批达到国际先进水平的节能、环保、高效的机械设备问世，我国也将逐渐从一个制造业大国转变成为一个制造业强国。

案例：涡轮式风动打磨机的升级创新

以前水电设备行业都是采用叶片式风动打磨机铲磨转轮叶片（见图9），叶片式打磨机功率小，

图5 数控激光切割机切割磁轭冲片

图6 窄间隙自动焊机焊接三峡主轴

图7 在22m立车上车削三峡转轮

图8 线圈真空无溶剂浸渍系统

铲磨质量不高，效率也低。在铲磨三峡叶片时采用了国外先进的涡轮式风动打磨机，打磨机功率大，铲磨叶片质量好（见图10），效率大为提高，就是价格太贵。联想起20多年前陆燕荪在原机械部七五科研攻关会上对我们的叮嘱："我国大型水电、火电设备经过技术引进，消化吸收取得了突破性进展，但我国液压、气动等基础元件方面与国外先进水平差距还相当大，今后要加大这一领域的科研攻关。"我们向国内多家企业和研究所发出信函，希望尽快研发出这种先进打磨机，实现国产化，降低成本。由于技术十分复杂，研发难度大，加上企业资金缺乏，只有上海京浦风动工具厂表达了研发意愿。

图9 传统叶片式打磨机的马达

图10 高速涡轮打磨机的涡轮气马达

2002年以来，京浦风动工具厂瞄准这项国际先进气动工具技术，投入800万元资金进行科研创新和技术改造。在厂长黄耀中的带领下，坚持走与技术专家、工人技师相结合的道路，博采众长，引入人机工程学的设计理念，对传统气动工具在结构、工艺和材料上进行创新。

经过五年多艰辛攻关，先后攻克了高速涡轮气马达及其相匹配传动机构的设计制造难关，采用多种新材料，并将节能、安全、环保、低噪、低振、冷却等多项技术融为一体，研制成功了这种以涡轮气动马达为动力的涡轮风动打磨机（见图11），一举填补了国内空白。这种涡轮风动打磨机依照燃气涡轮原理，采用36个叶片的涡轮取代只有4～6个叶片的传统叶轮，当659kPa（6.5个大气压）的压缩空气通过导轮的六条通道驱动涡轮，使涡轮转速快速提升到每分钟6万～12万转，再通过传动机构使输出功率提升到4.5kW；涡轮打磨机重量仅4.5kg，比相同重量叶片式打磨机的功率大10多倍。

涡轮气动打磨机设计富于创新，机内设置有平衡系统、消音系统、冷却气通道和限速装置，可降低振动、噪声和温升，确保运转安全。这种打磨机功率大，重量轻，噪声低，操作方便。经国家权威技术部门检测认定：该产品属国内领先、国际先进；该产品已获多项知识产权，并荣获2008年上海市创新发明奖，上海市《高科技成果转化项目》。

图11 涡轮式风动打磨机

两年多以来经多家大型水电、火电设备制造企业的使用证明：一人操作一台涡轮式打磨机打磨水轮机叶片，其效率相当于操作同等型号传统气动打磨机的6倍，既可降低劳动力成本，又可提高产品质量。这项创新成果可广泛用于电力、造船、钢结构、铸造、采矿、交通、铁路、汽车和军工等制造业。图12为2010年陆燕荪听取蜗轮式打磨机创新技术汇报。

图12 陆燕荪（左一）听取蜗轮式打磨机创新技术汇报

当前我国产业结构正面临调整，企业将面对如何提高质量，降低成本的双重压力。在机械行业使用涡轮式打磨机对提高产品质量，降低生产成本效果将十分明显。希望这种涡轮式气动打磨机能为推进我国液压、气动、电动工具行业产品的升级换代出一把力，使液压、气动、电动工具行业能开发出更多具有国际先进水平的高效，节能，环保产品，为我国逐步从一个制造业大国转变成为一个制造业强国作出贡献。**MW**

（收稿日期：20110523）