



海上油井在线监测控制系统示意图。受访单位供图

# 打通海上智慧油田的“信息大动脉”

◎本报记者 操秀英

看到专家组“同意通过验收”的意见后，中海油研究总院副总经理兼总工程师（钻完井）李中松了一口气。李中牵头“海上油井在线监测关键技术研究”近日通过验收，成果获得专家组高度肯定。1000多个日夜的鏖战终于有了阶段性成果。

从无到有，李中团队系统构建海上油井高精度、高密度、多维度一体化监测和控制理论体系，提出自主的测量、传输、控制一体化解决方案，打通海上智慧油田的“信息大动脉”。

回首3年多的攻关路，李中在接受科技日报记者采访时感慨：“创新就是解决一个又一个问题，不断‘升级打怪’的过程。”

## 找到给油井“号脉”的良方

打造一个智慧油井，是在一线工作27年的海洋石油开发“老兵”李中的夙愿。

“来到中海油研究总院后，我在党建调研中详细摸了摸底，发现我们团队在数字化、智能化方面的基础很好，就下定决心去做这件事。”李中回忆。

这也确是一件不得不做的事。

如今，油气开发的“甜点”越来越少，剩下的多是“残渣”，如何千方百计提质增效，实现精细化管理，尽可能将这些“残渣”吃干净，是摆在油气开发者面前的课题。

“对于我们这样一个石油资源贫乏的国家来说，更是如此。”李中说。

万事开头难。

智能化的基础是数据。海上智慧油田的建设，需要丰富的井下监测数据作为支撑。获取井下数据的技术开发成为研究团队的第一道难关。

众所周知，海上油气田开发最大的痛点是作业成本太高“我们不可能像陆上油田开发那样，频繁测井测试作业，太费钱了。”李中说。

如何充分利用现有的井筒条件，获取尽可能多的油气数据？井下监测就像是一位“老中医”给油藏和井筒“号脉”，脉要写得准，监测工具的精度和可靠性是关键。

“最开始我们采用的是单点电子式温度压力计，但它们的可靠性在高温高压下迅速降低，往往不到一年就坏了，而且无法实现多点监测。”中海油研究总院

钻井工程师李梦博说。

研究团队将视线转移到光纤监测技术。光纤技术确实可实现多点分布式监测，但对于海上油井井下监测来说，它的精度又过低。

怎么办？

从基层油田一路走来的李中有股死磕到底的韧劲儿。此前，他就是靠着这股劲，带领团队攻克多项关键核心技术，叩开了南海油气宝藏的大门。

光纤监测在国内桥梁隧道已有较多应用，为什么在油井中应用得不太好？带着这个问题，李中和团队走遍了大江南北。

向专家请教光纤传感的机理、到光纤制棒企业了解光纤拉丝制备的工艺、赴光缆成缆厂家调研光缆制缆的工序、去南海西江油田了解国外公司井下监测控制产品的使用情况……最终，研究团队提出飞秒阵列光纤光栅监测的思路，这在油井监测领域是首次。

历时一年半，研究团队拿出可行性方案，立项顺利通过。

## 给光纤“穿上防护服”

方案确定后，研究团队迅速搭建了井下油气水环境和高温高压条件的测试装置。

“初期的测试结果给了我们当头一棒。”李中说，按照常规的光纤裸纤测试，无法适应井下高温环境，几个小时后损耗迅速达到饱和，根本无法在油井中长期使用。

油井光纤通常有光纤涂层和光缆结构的保护，仅对裸纤测试无法准确模拟光缆在井下环境工作的实际情况，需要给光纤“穿上防护服”后再进行测试。

“必须迅速调整方案，国外和陆上的经验都可以借鉴，但我们还是要走出适合中国海上油田的自主创新之路。”李中说。

他鼓励团队开拓思路，大胆设想。

他将党建和研发相结合，在党建调研的时候，以党的先进性为切口，让各个支部“亮家底”，谈想法，调动整个团队的积极性。

在集思广益后，研究团队开始了新一轮的分析、测试、改进，挑选各种纤芯、涂层、缆皮材料，分析不同的光栅指标对传感的影响。

在上千组实验和测试后，他们终于找到适合井下特殊环境的光纤“防护服”，完成了海上油井高精度、

高密度通感一体的光纤监测系统方案和工程样机，实现了高精度分布式温度、压力、声波监测，建立了油井光缆可靠性的评价体系和评价标准，填补了海上油井监测的空白。

目前，这套监测系统已在山西临兴气田应用，为油田的生产作业优化提供大量的数据支撑。

## 遥控井下“水龙头”

数据有了，如何根据数据控制现场作业？

“井下智能滑套是一个关键部件。”中海油研究总院完井工程师盛磊祥说，智能滑套可在不动管柱的条件下实现远程控制，是构建海上智慧油田闭环的最后一个环节。

石油和水相伴相生。在一个油层中，水的黏度低于油的黏度，流动速度快，一旦井筒见水，那么开采出来的大部分就是水。此前遇到这种情况时，通常需要停产检修，把水的出口堵死，才能保证采油作业继续顺利进行。

而智能滑套相当于一个“水龙头”。一旦它监测到油层某个位置见水或有见水的趋势，就可以拧转这个位置的“水龙头”，让其减小水的流出，促进油层其他位置原油的流动。但其难点在于如何简单可靠地控制智能滑套。

“我们考虑过电力控制的方案，但电子元器件在高温高压条件下可靠性会迅速降低，现阶段电控不适合用于井下的永久监控，但是常规液控方案对于多层控制需要下入多条液控管线，也不利于现场作业。”李中提出，还是把研究方向定在可靠性更高的液压控制，“可以考虑用1条液压管线，实现井下多储层的注采在线智能调控”。

一条液压管实现井下多层控制？这又是一个没有人尝试过的方案，这个方案集成了液压的可靠性优势和更为简单的管柱结构。

经过数次方案优化，最终的智能滑套产品在陆上成功进行入井测试。目前，智能滑套已用于中海油多个油田，削减了用钻井船修井导致的高昂作业费用，为生产动态优化和油藏精细化管理提供支撑。

没有停歇，李中立刻带领团队开展二期的项目筹备和方案制定。“项目的验收只是万里长征的第一步，我们要不断总结完善，加大推广应用力度，让海上智慧油田的‘信息大动脉’更畅通，给出海洋油气开发增储上产的‘良方’。”

## 成果播报

### 非常规射孔技术实现海底“榨”油

◎本报记者 王延斌  
通讯员 丁静 黄晓龙

近日，我国首次完成了在海底实施分段桥塞多簇射孔联作施工。该工程位于渤海湾盆地坳北凸起的一口评价井——坳北斜891井，完钻井深4521.68米，井温147摄氏度，施工者为中石化经纬有限公司下属胜利测井公司。

桥塞多簇射孔联作技术是借助电缆将射孔枪串输送到目的层，通过地面操作系统实现桥塞坐封和射孔枪起爆一次完成，对于储层渗透率较低的非常规油藏而言，可有效提升储层改造效果，缩短施工周期。中石化经纬有限公司射孔工程技术专家张林向记者强调，这是目前在陆地作业中的主流非常规射孔技术，但在海上施工井中应用尚属首次。

据了解，非常规射孔主要是为后期压裂服务的。张林表示，对于像页岩、致密砂岩这样如同“磨刀石”“铁板”一般几乎没有孔隙的储层，它们的渗透率都很低，这意味着油气在储层中的流动性很差。如果将椰汁比作常规石油，那椰肉里榨出来的汁就是非常规石油。

从岩石中“榨”油，需要更科学的手段。张林告诉记者，非常规射孔就是根据目的层特点，在不同的位置上，通过射孔枪打开地层缝隙，制造“榨油”的通道，这就是“射得开”。同时，

每射开一个层段前，需要在这个位置下方坐封桥塞，相当于用一个塞子堵住这段通道，让这段通道成为一个相对密闭的空间，使得压力可以很好地作用到这个层段，从而扩大榨油的通道，进一步改造储层，这就是“封得牢”。当榨油的通道符合设计要求后，这个塞子还要能及时溶解，让出通道，方便油更好地流出，这就是“溶得好”。

对于施工的坳北斜891井而言，最大的困难是高矿化度压裂液对桥塞坐封的影响，也就是堵住通道的塞子不能“封得牢”“溶得好”。胜利测井公司非常规射孔工程部副经理黄晓龙认为，与陆地不同，在海上进行非常规射孔，由于海水含盐量高，相应的压裂液配比也发生了变化，矿化度与陆地上相比高10倍左右。同样地层条件下，海水压裂液对桥塞的溶解速度加快，而一旦桥塞提前溶解，就像可乐瓶漏了气，不仅严重影响压裂效果，还会影响整个储层的试油求产。

为确保分段压裂“封得牢”、试油求产“溶得好”，胜利测井公司成立专项小组负责组织实施，安排技术骨干赴海洋平台开展现场踏勘。他们依据踏勘落实的第一手数据，结合海上非常规射孔施工特点，优化可溶桥塞设计方案，不断试验和完善桥塞选材等工作，研发出适用于海水压裂的“经纬祝融”高抗盐系列高温全可溶桥塞，在坳北斜891井中成功应用，坐封成功率和有效封隔率均达100%。

### 多项施工工艺打造大跨度高架桥

◎本报记者 韩荣

6月17日，记者从中铁十七局五公司获悉，该局承建的108国道改造工程2标上跨平谷高速、青龙古镇长高架桥荣获第十五届“中国钢结构金奖”。

回忆起施工时的场景，中铁十七局五公司项目负责人介绍，项目在建设过程中有4条50千伏的高压电线通过施工区域上空，施工线路走向为S形平曲线。

“该项目钢结构总用钢量为1.2万吨，约为建造北京奥运会鸟巢用钢量的四分之一，总重量相当于1.5座埃菲尔铁塔，安全风险高，作业难度大。”中铁十七局五公司项目负责人说。

为此，施工人员综合现场高压净空、施工场地狭窄、吊装无法站位等因素，受“钢箱梁纵向拖拉法”启发，对桥梁第三至六联创新采用“顶推滑移变轨”施工技术。通过高精度传感器不断采集油缸的压力和行程信息，对千斤顶行程信息进行计算，向液压力系统发出动力指令，精准控制钢箱梁顶进速度及方向，相当于给顶推施工加上了“AI”大脑。

同时，为确保钢箱梁在两条不同水

平线、不同宽度的轨道平稳过渡，施工团队还在滑移轨道梁的前端焊接了长约1米的过渡斜坡，实现滑道顺利变轨。

传统的钢筋混凝土防水铺装层结构施工舒适度差、桥面系使用寿命短、后期维护工程量大。为了提高工程质量，施工团队在沥青摊铺施工中，创新采用“浇注式沥青青、横施工缝处理施工”技术，通过在纵、横施工缝中粘贴贴缝条，利用贴缝条遇高温易软化的特点，提高施工缝整体的拉伸强度，有效防止施工缝开裂，保证整个摊铺的整体性。

此外，项目团队还利用BIM（建筑信息模型）技术预建立体3D模型，对桥梁每节段和整体进行分段分块深化设计、受力验算，弥补了以往厂内加工与现场安装、初步深化设计与构件拼装衔接的不足，极大地提高了现场安装精度，满足了桥梁结构外观的质量要求。

中铁十七局五公司项目负责人表示，此次项目建设具有施工精度高、工期短、操作方便灵活、安全可靠等优点，较满堂支架拼装法缩短工期60天，施工效率提升45%，节约成本30%，创造了当时国内顶推滑移累计长度8892米的最长施工纪录。

# 超声技术出手，给电池做无损“体检”

◎本报记者 吴纯新  
通讯员 高翔

当前，新能源汽车、新能源和信息技术等领域蓬勃发展，以锂离子电池为代表的二次电池发挥着核心作用。

近日，记者从华中科技大学（以下简称华科大）获悉，该校黄云辉和沈越教授团队自主研发了锂离子电池超声扫描成像设备，并在第十五届深圳国际电池技术交流展览会上正式发布了最新产品。该产品从基本原理到软、硬件集成均由华科大团队自主开发，在动力电池产业界和学术界获得广泛应用。

## 直观快速监测电池状态

电池作为一个极其复杂的封闭式系统，如何实时、无损、原位地获取其内部信息是电池产业发展的痛点所在。

“电池使用过程中，电化学反应会逐渐衰减，电极材料结构和电解液分布在不断演变，并伴随副反应而出现产气、析锂等现象，影响电池寿命和安全。”黄云辉说，迫切需要对电池的内部状态特别是健康状态进行识别检测和实时评判。

此前，无论学术界还是产业界通常以拆解方法破坏性地获取电池内部信息，因电池内部多种组分对空气高度敏感，拆解过程中状态信息发生变化，所

以该方法无法精准分析电池失效机制。

其他如X射线、中子衍射等无损表征方法，其灵敏性、快速性和便捷性又难以满足实时快速检测需求。

电池行业对开发新型表征技术来满足电池实时检测和健康监测的需求日益强烈，亟待从电池本质出发，通过准确获取电池内部信息，赋能电池研发、生产、应用、回收等全生命周期各环节，实现电池综合性能优化和提升。

为解决电池安全难题，自2015年起，华科大黄云辉团队便创新性地提出将超声技术用于电池健康监测，2016年申请并授权了核心发明专利“一种监测锂离子电池荷电状态和健康状态的方法及其装置”。2017年，团队在华中科技大学研究院进行电池超声成像设备开发。

经过多年持续研发，技术和设备不断成熟并实现规模应用。2020年，该团队开发的超声成像设备应用于电池健康状态监测分析的研究成果在学术期刊《焦耳》上发表，成果获取到了电解液浸润状态、微量产气等信息，可用于准确分析电池失效机制。

据介绍，该团队目前已开发了电池超声检测系列产品，利用高频超声透射方法，使发射端探头发射聚焦声束穿透电池，再利用接收端探头接收。团队通过对接收信号的处理分析评估电池内部状态，成像精度可达亚毫米级。

“电池超声检测成像技术与医院做B超相似，我们在给电池做‘体检’，通

过成像可直观快速地监测电池健康状态，查找电池内部缺陷，保证电池安全。”黄云辉说。

**独特视角获知电池失效进程**

黄云辉介绍，采用团队研发技术获取的超声检测结果，从独特视角揭示了电池内部状态演变规律。

超声波对气—液、气—固界面的识别十分有效，如电池内部存在气泡，超声波会发生大幅度衰减。电池发热与正极材料劣化等多种电池失效问题都会伴随气体产物生成，这一技术可通过对气体产物的识别获知电池失效进程。

此外，电池材料变化也会影响超声波的传播行为，该技术可通过电池不同区域超声传播行为的差异判断电池材料的结构演变。

随着对电池超声技术的不断研发和积累，黄云辉团队找到了解决电池瓶颈问题的新视角。

团队首次提出并利用超声技术观测到电池“退浸润”现象。电池在设计阶段，其电解液用量是基于电池材料孔隙率所制定，而电池在循环过程中，因膨胀等问题，原有材料孔隙变大，电解液设计用量不足以填充孔隙，电解液无法充分浸润电极材料，这种“退浸润”现象会导致电池性能衰减，甚至引发更为严重的失效反应。

“以往研究很难获知电池真实的浸润状态，而这一技术可以无损、实时、原

位地观测浸润状态演变，对研究电池失效机制有着重要意义，对电池厂商来说同样非常有效。”特斯拉电池项目首席科学家、加拿大达尔豪斯大学教授杰夫·达恩说。

同时，电池超声检测技术也可用于电池循环过程中电解液干涸、材料劣化等一些电池失效机制研究。

目前，这项技术成果的转化产品已被比亚迪、特斯拉等50余家电池和新能源汽车企业以及部分高等院校应用。该技术正逐渐成为检测电池内部健康状态的通用设备，已是保障动力电池安全的关键技术，为新能源汽车和储能产业发展保驾护航。

视觉中国供图

◎本报记者 陈曦

## 浮式生产储卸油船天津启航

6月12日，世界最大吨位之一的FPSO（海上浮式生产储卸油船）“SEPETIBA”轮完成所有模块建造、连接及调试等相关工作，在天津港保税区企业天津博迈科海洋工程有限公司（以下简称博迈科）码头完成交付并于6月15日离港启运巴西。“SEPETIBA”轮的成功交付，对助力天津市海洋工程装备产业高质量发展具有重要意义。

据博迈科副总裁邱攀峰介绍，FPSO在石油行业被称为皇冠上的明珠，“SEPETIBA”轮总长333米、总高64米、总宽60米，主甲板面积约3.5个标准足球场大，储油能力达200万桶，空船重量达93000吨，最大排水量45万吨，在巴西海域可满足2000米深水深海作业要求，是名副其实的“海上巨无霸”。

据悉，“SEPETIBA”轮于2021年7月停靠在天津港，博迈科作为总承包商主要负责该项目上部模块建造以及船体

集成、总装、调试工作。

博迈科项目运营中心经理徐立品介绍，与传统分层建造工艺不同，此次FPSO创新性地采用模块化建造，不用先完成结构再铺设管线，而是像搭积木一样，尽可能在陆地上完成全部模块的制造，合拢的时候可以完成70%的管线铺设，比传统方法能缩短一年多的建造时间。

“此外，船的油气系统在大海上要保证使用20年以上不被腐蚀，因此在防腐控制方面，我们也进行了创新，并最终解决了这个难题。”徐立品说。

天津港保税区近年来始终围绕科技自立自强国家战略需要，以海洋经济示范区建设为抓手，依托临港区域得天独厚的码头岸线条件和优越的营商环境，持续引育海洋装备产业项目，高质量建设国家级海洋工程装备创新型产业集群。下一步，天津港保税区将继续坚持“党建引领 共同缔造”理念，聚焦提升海洋工程装备产业自主创新原始创新能力，打造发展新引擎，奋力推进一流港口经济示范区建设。