



人物简介：

朱万旭，教授级高级工程师，1972年3月出生，广西玉林市兴业县人，本科就读于哈尔滨工业大学，清华大学硕士毕业后回到广西，长期在柳州欧维姆机械股份有限公司工作，2015年开始执教于桂林理工大学土木与建筑工程学院，系广西第一批、第五批特聘专家，入选2005年度“广西新世纪十百千人才工程”第二层次人选，2013年被评为广西优秀专家，兼任中国土木工程学会混凝土及预应力混凝土分会理事、中国钢结构协会空间结构分会理事。

他为“中国天眼” 织就世界最大索网

——记广西特聘专家、桂林理工大学土木与建筑工程学院教授朱万旭

文/本刊记者 李国君 邓 卉 通讯员 方 亮

“我国500米口径球面射电望远镜工程索网制造和安装工程近日顺利完成，这意味着该工程在关键技术难点上实现了突破。”这是2015年2月新华社权威报道。

位于贵州省黔南州平塘县的500米口径球面射电望远镜（简称FAST工程，誉为“中国天眼”）是目前世界最大单口径射电望远镜，2011年开始建设，定于2016年建成，建成后成为世界级射电天文研究中心。索网制造与安装工程是“中国天眼”工程的主要技术难点之一，既是目前世界上跨度最大、精度最高的索网结构，也是世界上第一个采用变位工作方式的索网体系，工程的关键指标远远高于国内外相关领域的规范要求，在世界范围内没有可借鉴的经验或资料。同时，索网总重量约1300吨，由于场地条件限制，全部索结构须在高空进行

拼装。“中国天眼”工程建造单位国家天文台面向全国寻求能完成这项“国字号”工程的能工巧匠，广西柳州欧维姆机械股份有限公司接住“索网绣球”，并由一位广西工程师凭着超人的想象力、敢创一流的毅力，带领技术团队成功完成了这个“不可能的任务”。他，就是欧维姆机械股份有限公司原副总工程师、现桂林理工大学土木工程与建筑学院教授级高级工程师朱万旭。

中国人有信心建造“中国天眼”

1931年，美国无线电工程师央斯基在研究长途电讯干扰时偶然发现存在来自银河中心方向的宇宙无线电波，由此开创了射电天文学。

“射电”是比红外线频率还要低的电磁波段，射电望远镜与接收卫星信

号的“天线锅”一样，通过锅的反射聚焦把几平方米至几千平方米的信号聚拢到一个点，天文学家就能接收到射电电波。为了提高射电望远镜的精度，天文学家利用多个天线锅对准同一目标，通过比对信号算出更精确的信号位置，但是想接收到更微弱的射电电波，就必须把天线锅造得更大。

1993年东京召开的国际无线电科学联盟大会上，包括中国在内的十国天文学家提出建造新一代射电“大望远镜”，中国建造500米口径球面射电望远镜工程“中国天眼”的动机肇始于此。

“中国天眼”之前，世界上有两个超大射电天线锅，一个是德国100米直径的“埃菲尔伯格”望远镜，一个是美国300米直径的“阿雷西博”望远镜。中国科学院国家天文台射电部首席科学家李菂说，在“中国天



2017年9月号 总第234期

眼”项目建成之前，美国的“阿雷西博”是世界最大望远镜。“中国天眼”项目的出发点就是要比“阿雷西博”更加灵敏，500米半径球面由4400多面主动反射单元构成，因此，“中国天眼”的灵敏度可达“阿雷西博”的2倍，巡天速度是“阿雷西博”的10倍。中国科学院国家天文台“中国天眼”工程首席科学家、总工程师南仁东说，宇宙空间混杂各种辐射，遥远的信号像雷声中的蝉鸣，没有超级灵敏的耳朵就分辨不出来。

1994年底，原北京天文台（现中国科学院国家天文台）牵头国内20所院校提出“喀斯特工程”，拟从中国西南无数个喀斯特地貌的凹坑中，选出一个来建大望远镜。最终，贵州省黔南州平塘县克度镇金科村的一个圆形洼地——大窝凼被选中。“中国天眼”工程2007年底正式立项，2011年3月正式开工，建设周期5年半，2016年9月初步投入使用。

“中国天眼”的设计目标，是把覆盖30个足球场的信号聚集在药片大小的空间里，才有可能监听到宇宙中微弱的射电信号。500米的结构，要实现毫米级精度，是天文学家从未做过的。比起目前领先的“埃菲尔斯特伯格”望远镜，“中国天眼”的灵敏度将提高10倍。这意味着，远在百亿光年外的射电信号，“中国天眼”也有可能听到。南仁东说：“月亮上打手机，‘中国天眼’也能听

得一清二楚。”

在工程设计方案中，“中国天眼”的框架、索网、接收器等每一部分的位移都要控制在毫米级，“中国天眼”才能正常工作。其中的关键一环，就是索网——“中国天眼”的天线锅，这个锅在工作时会不断变形，联系着边框以及2000多个天坑地表面上的小电机，整个变形过程，由激光定位系统校准。

“中国天眼”的钢索网很重，拉扯十分频繁，因此需要超高的耐疲劳强度。我国大型工程包括斜拉桥上的钢索，其强度都是200兆帕、200万次弯



朱万旭（左）在美国CTL试验室进行大型拉索疲劳试验

曲的，但“中国天眼”对索网要求更高、建设难度极大，国内多个知名研究院所、工厂几经试验，均不能达到国家天文台的设计要求。

2年前，国家天文台副总工程师在南宁参加会议期间偶遇广西柳州欧维姆机械股份有限公司（以下简称“欧维姆公司”）总工程师龙跃，双方谈起此事，欧维姆公司乐意一试，先由一批技术骨干研发，但进展不大，

公司分管技术研发的副总工程师朱万旭，这位从清华大学取得硕士学位后，直接回桂参加工作的广西玉林人得知情况毅然扛起这“烫手重担”，他的理由是：“中国人有信心建造‘中国天眼’。”

朱万旭长期从事锚固结构研究工作，潜心研究锚固机理，并采取理论分析、有限元计算与试验相结合方法对锚具进行计算和优化，改进和完善了我国预应力锚固体系，解决了国产锚具锚固效率系数不稳定的难题，为核电站和超低温储罐工程应用国产化锚具打下基础；研究拉索锚固单元的耐疲劳设计，使得钢绞线拉索系统的疲劳性能满足国际标准。

2011年，他主持完成“GJ钢绞线整束挤压拉索体系”，获广西科技进步二等奖（排名第二）；2014年，参与完成“现代预应力混凝土结构关键技术创新与应用”获国家科技进步一等奖（排名第七）。凭着自己掌握的尖端技术基础，让朱万旭敢于挑起“中国天眼”索网重担，带着新组建的科研团队与国家天文台密切协作，强力攻关。

“中国天眼”索网是世界上跨度最大、精度最高的索网结构，也是世界上第一个采用变位工作方式的索网体系，其反射面面积约30个足球场大，技术难度不言而喻，需要攻克的技术难题贯穿索网的设计、制造及安装全过程，其关键技术问题主要包括：超大跨度索网安装方案设计、超高疲劳性能钢索结构研制、超高精度索结构制造工艺等。如，主索索段控制精度

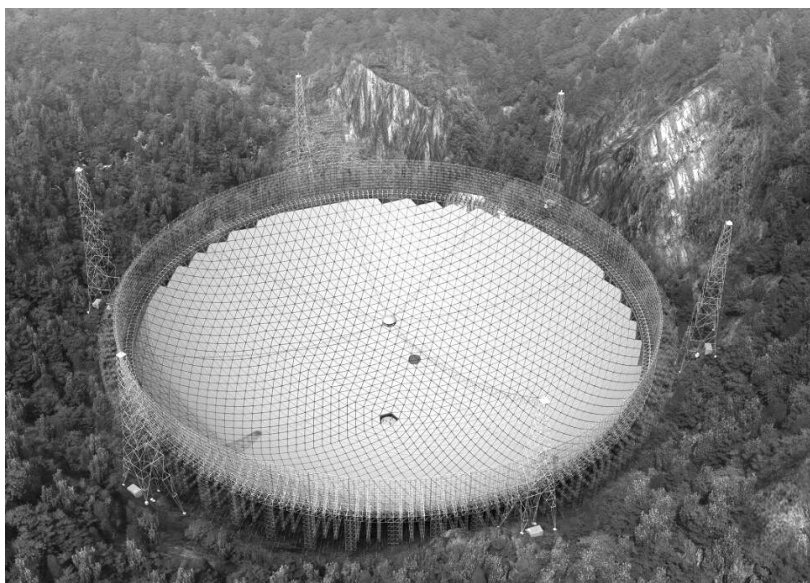


必须达到1毫米以内，主索节点的位置精度须达到5毫米。整个索网共6670根主索、2225个主索节点及相同数量的下拉索。仅以高应力幅钢索研制为例，“中国天眼”工程对拉索疲劳性能的要求相当于规范规定值的2倍，国内外均没有可借鉴的经验或资料作为参考。索网的研制工作经历了“失败—认识—修改—完善”过程，前后历时一年半时间，最终，欧维姆公司完成技术攻关，实现索疲劳问题的系统解决方案、主索网精度控制工艺及方法、刚性与柔性自适应配合问题等三大自主创新，发明了冷铸挤压复合锚固技术、高强预应力钢丝与钢绞线组合制索技术等高新技术，研发出符合要求的新的钢索材料、包裹材料和制造工艺，凸显四个特点：世界跨度最大、精度

最高；工程用拉索可承受应力幅比国内外标准高2倍；首创反射面自适应连接机构；在同行业率先创建索类制品信息化管理系统。

索网项目的成功研发，使“中国天眼”工程避免采用造价高达6亿多元的日本碳纤维拉索，为国家节约至少4.8亿元成本，使得欧维姆公司获得“中国天眼”工程索网制造与安装的合同，成为广西唯一参与“中国天眼”这个国家重大科学工程的单位，并最终获得中国科学院国家天文台（业主）及北京市建筑工程研究院有限公司（驻场监造）的高度肯定。

索网项目成功解决了FAST建造的关键技术难题，使得我国射电天文研究领域具有了世界领先的观测设备；形成12项自主创新性的专利成果，其中发明专利7项，取得成果已在国际专家评审会上得到国外专家组的认可，除成功应用于“中国天眼”工程，这些成果对我国索结构工程领域的研发及制造能力起到了巨大的提升作用，也将应用到国民经济的其他



图为“中国天眼”现场效果图

领域，已先后在开原市滨水新城2号桥、新疆伊犁皮里青河桥、印度STAR BAZZR斜拉桥等工程上得到应用，经济效益显著。同时，经过一定的结构简化或变更，索网工艺可以广泛应用于公路、铁路和市政等索类工程。

“中国天眼”的主要目标是探测宇宙中的遥远信号和物质，实现对宇宙物质成分和演化历史最基本的理解，也可被用于探测地外文明和生物。李菡说，“中国天眼”是中国很难得的具有世界领先技术指标、又有自主知识产权的科学大设备。

朱万旭回忆“中国天眼”索网研

制和建设过程，感慨地说：“有志者事竟成，我们团队历尽艰辛终于建成500米索网，我心里松了一口气，也对这个家伙充满期待，希望它能早日有重大发现，那时候就真正骄傲了。”

朱万旭参与“500m口径球面射电望远镜超大空间结构工程创新与实践”项目的设计和施工研究，攻克“中国天眼”500MPa超高疲劳应力幅拉索系统难题，获得2015年中国钢结构协会科学技术特等奖（排名第三）、2016年北京市科学技术一等奖（排名第三），2016年获广西技术发明一等奖（排名第一）。朱万旭对预应力锚具和拉索工程实践认识更加深刻，先后获30项相关发明专利授权，并积极参与我国相关规范制订，主编了JT/T 850-2013《挤压锚固钢绞线拉索》。

广西技术“托起”世界最长跨海大桥——港珠澳大桥

“它就是现代世界七大奇迹之一。”这是英国《卫报》对一桥飞架三地的港珠澳大桥的最高致敬。而在这座桥的建设过程中，朱万旭带领他的团队再度施展了超级技术——

港珠澳大桥是连接香港、珠海和澳门三地的特大型桥梁隧道结合工程，横跨珠江口伶仃洋海域，全长55公里，大桥集桥、岛、隧道于一体，不仅是世界上最长的跨海大桥工程，



2017年9月号 总第234期

也是中国建设史上里程最长、投资最多、施工难度最大的跨海桥梁项目。

港珠澳大桥项目研究始于2004年，2005年基本确定工程方案，西岸着陆点为珠海拱北和澳门明珠，东岸着陆点为香港大屿山西北的散石湾。大桥的海中桥梁线路长，工程量浩大，水域台风频发，涌浪大，施工环境恶劣，安全风险及环保压力极大；桥区的航线多、船行密度大，建设条件复杂，需穿越环境敏感区（中华白海豚保护区），环保要求高；海洋环境腐蚀性强，桥梁耐久性要求高，设计使用寿命为120年。为缩短海上作业时间，减少对环境的影响，提高作业效率，确保工程质量和结构耐久性，大桥的建设选择“大型化、工厂化、标准化、装配化”施工方案。

桥梁墩台是大桥承受上部结构传来的竖向荷载及水平荷载的主要结构构件。

根据港珠澳大桥施工方案，港珠澳大桥非通航孔桥梁墩台采用预制承台及墩身节段拼装工艺，必须使用大直径预应力高强螺纹钢筋生产及其连接锚固体系，而国内尚不具备轧制大直径的预应力高强螺纹钢筋工艺技术和装备。

“我们要让广西技术‘托起’世界最长跨海大桥——港珠澳大桥。”朱万旭向欧维姆公司立下铮铮誓言，他带领研发团队历经两年的艰苦攻关，终于研制成功大直径预应力高强螺纹钢筋及其生产方法，非通航孔桥深水区下部结构的墩身利用75毫米大直径预应力高强螺纹钢筋锚固体系+剪力键将预制桥墩各节段连接为整体，这是目前国际上所使用的直径最大的预应力高强螺纹钢筋连接锚固体系，螺纹

钢筋设计抗拉强度达到1030兆帕以上，2012年根据国家工程质量监督检验中心的检验结果，高强螺纹钢筋主要性能参数各指标均优于国内同类产品，达到国外同类产品要求。

产品研发成功后，欧维姆公司配合中国交通二航局等施工单位，在海上完成桥墩1:1预制承台现场工艺试验，进行了高强度螺纹钢筋锚固体系在承台预埋、承台吊装、墩身节段拼装、钢筋张拉、孔道灌浆等工序工艺试验，并最终获得港珠澳大桥主体工程桥梁工程合同，这是该体系在国内的首次运用，打破了国外大直径预应力高强螺纹钢筋及其锚固体系的垄断，也填补了国内大直径预应力高强螺纹钢筋及其锚固体系的空白。

由此，欧维姆公司负责完成港珠澳大桥主体工程中CB04和CB03两个标段44座桥墩共105个节段墩身预应力高强螺纹钢筋的对接、张拉及压浆施工。

“港珠澳大桥的桥墩，每座有几十米高，分成3截，而欧维姆公司研发的高强大尺寸预应力螺纹钢棒穿插其中，把3截桥墩像糖葫芦连一起。”欧维姆公司总工程师龙跃说，实际上，这根“糖葫芦竹签”并不简单，港珠澳大桥的寿命要求为120年，跨海大桥的桥墩不仅要面对海风海浪的冲击，当车辆驶过桥面时，也会将力传递给桥梁、桥墩。而超强预应力钢棒就是要承受冲击、维护桥梁结构的稳定，就像“定海神针”稳稳地将桥墩拼接起来。这项在全国首创的技术，满足了港珠澳大桥工程要求的120年寿命。

历时7年多的建设，2016年9月港珠澳大桥主体工程中的桥梁工程全线贯通，2017年7月7日，港珠澳大

桥海底隧道正式贯通，这也意味着全球最长的跨海大桥——港珠澳大桥实现了主体工程全线贯通，今年年底将具备通车条件。

在产学研结合中攀登新的科学高峰

2015年，朱万旭来到桂林理工大学土木工程与建筑学院执教，他想要在“象牙塔”中静心思考，为研发新的工程设计与施工方式找到创新的突破口，并实现产学研的深度融合。

朱万旭说：“从清华到欧维姆，我在施工工地奔忙了20年，如今想回到学校，一边传道授业，一边总结多年的工作经验，思考新的科研方向。”

2017年6月，在桂林理工大学的大力支持下，朱万旭带领科研团队创立汉西鸣科技有限责任公司，主攻拉索预应力锚具智能监控方向，这是一项前景广阔的新技术，就是要在拉索、索网上安装“神经系统”，感知结构的受力寿命，更有效地管养大型索网设备。

目前，朱万旭带领的科研团队参加第六届中国创新创业大赛广西赛区暨2017年广西创新创业大赛，以初赛组第一名的成绩获得该组别唯一的一等奖。他指导本科生、研究生组队参加“全国大学生科技创新大赛”获得广西金奖，将代表广西参加全国决赛。

近年来，广西大力实施创新驱动发展战略，采取一系列政策措施，推动科技改革发展。朱万旭说：“广西人社厅、科技厅出台各种配套政策，使各类人才创业有机会、干事有平台、发展有希望，我们科技人员更有信心为广西的经济提速贡献智慧和力量。”