
“冷却”三峡，守护大国重器

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/29269.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

“冷却”三峡，守护大国重器。



三峡水电站。



2016年5月，顾国彪在三峡大坝前。

■ 本报记者孟凌霄 田瑞颖

2011年12月15日15时，三峡电站28号机组顺利完成72小时试运行。那天，75岁的中国工程院院士、中国科学院电工研究所（以下简称电工所）研究员顾国彪再次俯瞰三峡两岸，50多年潜藏的情绪如奔腾的江水，倾泻而下。

不同于采用空冷、水冷技术的国外传统大型发电机组，28号机组是我国首台、世界单机容量最大的大型蒸发冷却机组，采用自主创新的“定子绕组常温自循环蒸发冷却”技术，标志着我国大型水电装备研发走向国际领先。次年，蒸发冷却机组27号也正式投产发电。

十余年来，三峡电站27号、28号两台70万千瓦大型发电机的运行安如磐石，蒸发冷却技术大幅提高了电机的安全性和维护便捷性，打破了国外厂商在大型水电装备领域的技术垄断，并整体拉低了其投标价格。

最早开始钻研蒸发冷却技术时，顾国彪只有22岁，刚加入成立不久的电工所。“不做与国外重复的事情，要做一两件超越国外的事。”这个一度被视为“很荒唐”的想法，成了他和团队一辈子的信念。数十年来，他们一直在思考如何将蒸发冷却技术应用到更广阔的领域，不仅要满足国家重大需求，还要在国民经济主战场发挥作用。

1代号“601”

“更立西江石壁，截断巫山云雨，高峡出平湖。”这是毛泽东主席1956年在武汉畅游长江时写下的宏伟诗篇。

“高峡出平湖”的美好愿望，带来了对于三峡工程的热议。1958年，中共中央下发关于三峡工程的第一个重要文件——《中共中央关于三峡水利枢纽和长江流域规划的意见》，提出“从国家长远的经济发展和技术条件两个方面考虑，三峡水利枢纽是需要修建而且可能修建的”。

中国工程院院士饶芳权回忆，当年论证三峡工程的可行性时，中国只做过6万千瓦的水轮发电机组，但三峡这样量级的水利工程项目的机组至少需要50万千瓦，而当时世界最大的苏联古比雪夫水电站的单机容量也只有11.5万千瓦。

为了突破大型水利工程电力设备领域关键技术，电工所应运而生。一次攻克大容量电机冷却世界性难题的长征，就此开始。

“一把老虎钳、一把锯子、几把螺丝刀，我们的蒸发冷却实验室就是这样干起来的。”刚刚从清华大学电机系毕业的顾国彪，就是在这个关键时刻加入的电工所。

当时，国际大型水轮发电机主要采用空冷和定子绕组水内冷技术。电工所的科研人员曾参与水内冷技术的研究，逐渐认识到水内冷技术的优势和缺点，这种技术最大的问题就是电气安全问题。由于这类发电机的额定电压一般高达2万伏左右，一旦电机内部的水泄漏，会严重破坏绝缘性，造成重大安全生产事故，后果不堪设想。而随着发电机容量的不断增大，绝缘体增厚，发热量也不断提高，空冷这一外部冷却方式越来越满足不了需求。

怎么才能既保证工程安全可靠，又进一步提高冷却效率？顾国彪将研究方向瞄准了当时发展前景尚不明朗的蒸发冷却技术。

不同于空冷和水内冷的原理，蒸发冷却是基于相变换热原理的新型冷却技术，通过绝缘性能良好的介质汽化潜热带走热量。为了验证这种想法，他们还买来一台冰箱，不分昼夜地研究其中的冷冻机。

就这样，他们很快研制出一台15千瓦的压缩制冷电机，证明了压缩制冷在电机上应用的可行性。在后面的试验中，他们渐渐发现，基于冰箱原理的压缩制冷技术很难应用于大型电机，因为外部的压缩制冷系统消耗功率较大，发电机外部必须包上很厚的隔热层，这不仅会增加后期的维护成本，也会影响冷却系统的可靠性。

在进行技术经济论证分析后，顾国彪另辟蹊径，钻研起热力学中的热功转换问题，并提出利用两相流的自循环原理，即利用液体和气体的混合产生比重差从而产生自循环的原理，将制冷压缩机改为液体循环泵或者索性取消，研制常温下的无泵自循环系统。而这个只有23岁的年轻人的想法，让不少人觉得有些“荒唐”。

所有质疑都无法干扰顾国彪。他们仅用了3个月的时间，在1959年底制作出一个立式可观察绕组模型，利用“垂直高度”将热量转化为“功”，从而产生自循环动力，替代了循环泵，形成了无须外界动力的“常温自循环蒸发冷却”系统，实现了蒸发冷却技术最基础和最关键的一步——原理性创新。

随后，中国科学院主持召开蒸发冷却电机工业推广会议，落实了蒸发冷却实验电机的任务，正式定名“601任务”。

随着电工所等单位联合研制的650千瓦水轮发电机在北京玉渊潭电站试验成功，他们向着“三峡

发电”的目标又迈进了一步。

“做工程技术，要有敢想的精神，不要外国人讲什么就信什么，满足于国外的好东西。要敢于质疑，相信我们能做得更好。”这种深入骨髓的自信，让顾国彪勇往直前，带领团队不断挑战这件看似“不可能实现的事”。

2这件事，贷款也要干！

从1960年到1968年，蒸发冷却技术研究被迫回到实验室。但在这8年里，这支团队并没有停滞不前，而是继续蒸发冷却基础试验研究，并掌握了与电机结构结合的两相流体的测量、散热能力。

1972年，新的转折点到来。他们与良乡发电设备厂共同制造的1200千瓦蒸发冷却汽轮发电机在厂内进行额定负载试验后，并网运行一举成功。至此，自循环蒸发冷却技术在水轮发电机和汽轮发电机上的结构方案都圆满地完成了小型工业机组样机试验，为更大容量等级的蒸发冷却机组研制打下了坚实的基础。

20世纪70年代末80年代初，电工所与东方电机厂等开展合作，但因为立项进度等原因，安装运行资金十分紧张，顾国彪想到了向国家贷款。

“这件事，贷款也要干！科学试验最终要为国民经济服务，一定要实现工业应用，才会给国家带来真正的好处。”当时很多人认为工程应用是企业的事，顾国彪的这一想法无疑是超前的。

凭着这股韧劲儿，顾国彪最终获得了160万元的国家贷款。当时电工所有几百人，每年的研究经费和运行经费不到100万元。“现在想来，我们的胆子真的很大，当时工资才多少钱，我们居然想要贷款160万元。我大概是第一个用贷款方式筹集科研资金的人。”顾国彪感慨道。

有了这笔资金，两台1万千瓦的蒸发冷却水轮发电机组，终于落地云南省大寨水电站。这是我国自主研发的、投入工业应用的首台自循环蒸发冷却水轮发电机，因为没有见过，就连资深的老工程师在首次启动时也倍感紧张。

最终，时间证明了蒸发冷却技术的安全可靠。如今，这两台发电机组已安全运行40多年，先后获得1987年中国科学院科技进步奖一等奖、1988年国家科技进步奖二等奖。

凭借大寨水电站安全运行的基础，蒸发冷却技术团队又争取到在陕西安康火石岩电站建设5万千瓦水轮发电机的项目。为了确保每个环节准确无误，整个团队在工地上一干就是12个小时，吃饭时就直接靠着墙。就连厂内的工程建设者都认不出来，这些灰头土脸的“工友”竟是北京来的科学家。

蒸发冷却技术“安全高效”的形象使越来越多的项目主动找上门，但这群科学家心里始终记着那个最大的梦想——走向三峡工程。

3五十余年，圆一个三峡梦

1994年，三峡工程正式开工。顾国彪向三峡工程建设委员会提出使用蒸发冷却技术的建议。

委员会专家提出了一个挑战：“你们的技术我了解过，你们搞了一个5万千瓦的发电机，但我们

这是70万千瓦的。如果你能在四五年内完成40万到50万千瓦的电机，并且两年之内不出故障，我们就一定用。”

恰巧，青海李家峡水电站将启动一个40万千瓦的发电机，这是当时国内单机容量最大的水轮发电机组。

当时，李家峡发电机的1号机已经安装，2号机和3号机正在生产，只有4号机有可能性。顾国彪写了厚厚一叠关于李家峡水电站发电机应用定子绕组蒸发冷却技术的建议书，仅材料复印费就花了3万元。凭借之前项目的良好声誉，他们最终成功争取到这个机会，并成为“九五”国家科技攻关计划中的一项。

实际上，从5万千瓦到40万千瓦，对蒸发冷却技术团队而言是一个不小的挑战，常规而言，还应该再研制20万千瓦的机组，但这意味着又需要10年左右的时间，蒸发冷却技术走向三峡将无法实现。

“我当时心里憋着一股气，一定要把蒸发冷却技术应用到三峡工程中去！”顾国彪说。

为了圆满完成任务，蒸发冷却技术团队夜以继日地奋战在工程前线。1999年末，李家峡40万千瓦蒸发冷却水轮发电机终于研制成功。

顾国彪至今仍记得，李家峡水电站正式运行那天，虽然身处壮美的国家森林公园，可根本无心欣赏风景，直到项目宣告成功，才发觉自己“腿都发软了”。

李家峡水电站40万千瓦蒸发冷却水轮发电机也在之后于法国巴黎召开的国际大电网会议上，被评为旋转电机领域四大进展之一，还与安康5万千瓦蒸发冷却水轮发电机联合获得国家科技进步奖二等奖。

自此，我国在电机领域的国际地位开始扭转。

但前往三峡的路，仍不平坦。

据顾国彪回忆，对于这项国内自主研发的蒸发冷却技术，三峡工程建设委员会在4年左右的时间里，召开了7次技术评审会，直到2008年才正式决定用于三峡地下电站28号和27号机组。

3年后，三峡地下电站28号、27号定子绕组蒸发冷却机组相继投入运行。由电工所参与完成的“长江三峡枢纽工程”荣获2019年度国家科学技术进步奖特等奖。

从最初的1万千瓦到5万千瓦、40万千瓦、70万千瓦，蒸发冷却技术走向世界最大容量的水轮发电机，赶超国外，蒸发冷却技术团队用了50多年。

至今，这些常年稳定运行，连定子线棒都没有更换过的蒸发冷却水轮发电机，“安静”得甚至让水电站的一线维护新人都不知道工程背后还隐藏着中国的“独门绝技”。

作为顾国彪的博士生开门大弟子，电工所电力设备新技术研究部主任阮琳说，蒸发冷却技术工业应用之前，我国大型水利工程电力设备领域几乎采用的都是国外的技术。无论从装备容量还是从技术指标上，这两台采用了蒸发冷却技术的三峡发电机都超越了一些跨国公司，达到了国际领先

水平，“完全自主知识产权的技术确保机组更加稳定、可靠运行”。

完成服务三峡的使命后，蒸发冷却技术团队又开启了新领域的“跨界”研究，尤其是向大科学仪器装置和超级计算、云计算等方向进军。

2010年至2013年期间，电工所与中国科学院近代物理研究所合作，正式将蒸发冷却技术应用于重离子加速器领域的ECR离子源。十余年来，集成一体化蒸发冷却ECR离子源运行稳定，冷却系统换热效率和可靠性高，在常导源中，其功率密度和磁场参数均达到国际领先水平，被誉为世界最好的常导源之一。

蒸发冷却技术还成为高海拔宇宙线观测站“拉索”的“降温利器”，成功支撑“拉索”数据采集系统和在站数据处理系统，真正实现了“无人值守”机房要求下的平稳运行。在关键指标实测服务器机柜电能使用效率方面，“拉索”数据中心消耗的所有能源与IT负载消耗的能源比值（PUE）为1.03，如此低的数值成为高性能计算中心冷却业内难以超越的成绩。

从2009年起，阮琳还带领团队持续探索蒸发冷却技术在耗能巨大的超算领域上的应用。如今，电工所电力设备新技术实验室的蒸发冷却技术，在祖国大地的各类大型工程项目中落地开花，新的技术生长点也在萌生。

在蒸发冷却技术蜚声国际之时，国外知名水电公司曾想高薪聘请顾国彪，但顾国彪婉拒了。蒸发冷却技术团队第二代、第三代科研骨干也曾收到国外大型企业抛来的“橄榄枝”——只要出去，就能赚更多的钱，但这个只有20多人的小团队始终十分稳定。科学家的“国界”，一直在他们心里。

是什么力量支撑着几代人接续奋进、支撑着几十年的持续攻关，让蒸发冷却技术打破国外垄断？又是什么力量，让蒸发冷却技术团队的精神传承一以贯之，永不褪色？阮琳的答案是，“使命感永远在心，而且在某种程度上，我们都是理想主义者”。

今年88岁的顾国彪，依然牵挂着青年科学家的成长。他希望电工所乃至中国科学院所有的年轻人，心系“国家事”，肩扛“国家责”，不断创新，协力攻关，把越来越多的科研成果书写在祖国的江河和大地上。



三峡电站28号机组转子吊装。



1983年，云南大寨水电站1万千瓦蒸发冷却水轮发电机。



1982年，云南大寨水电站1万千瓦蒸发冷却水轮发电机组测温装置调试。



2019年，稻城海子山表贴式蒸发冷却数据中心。



2013年，微动力强迫循环喷淋式蒸发冷却超级计算机。



2011年，顾国彪在三峡地下电站70万千瓦蒸发冷却水轮发电机安装现场。



2000年，顾国彪在李家峡水电站40万千瓦蒸发冷却水轮发电机启动试验现场。电工所供图

《中国科学报》(2024-09-04第4版专题)
作者：孟凌霄，田瑞颖 来源：中国科学报

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发