

华夏周末

文艺副刊

刊头题字：冯其庸

本期导读

第6版 艺文·荟萃

人民是艺术创作的底色

卢禹舜

扎根本土 打造精品力作

彭家鹏

文艺为人民

许鸿飞

第7版 悦读·连载

中国绘画之源与始

刘万鸣

沁园春·哈尼梯田

杨小波

游北京世界花卉大观园有感

冯并

母亲的房子

朱永新

第8版 华夏·翰墨



技进乎道

王岳川

华夏周末

(总第133期)

第5-7版 周六出版
主编：王小宁
编辑：谢颖 杨雪 张丽 郭海瑾
投稿邮箱：
xueshujiayuan@126.com
电话：(010)88146864
88146873

第8版
主编：罗公染
编辑：位朝辉

本版校对：耿斌
本版排版：王晨



扫码读华夏

北斗钟情

黄传会

编者按：仰望星空，北斗璀璨。2020年7月31日，中国北斗三号全球卫星导航系统正式开通。北斗系统的定位功能建立在时间的精准测量之上，原子钟被称为是导航卫星的心脏。梅刚华团队踔厉奋斗、呕心沥血，让这颗“心脏”生机勃勃。本版刊登著名作家黄传会报告文学新作，讲述梅刚华与北斗的故事。

采访我国著名原子钟专家、中科院精密测量科学与技术创新研究院(简称精密测量院)的梅刚华研究员，我们却是先从文学聊起的。

“黄老师，我知道您是写报告文学的，我喜欢报告文学。”

“哦？”我有点儿意外。

“我读过徐迟的《歌德巴赫猜想》。”

“那是什么时候？”

“四十多年前，我还没有上大学。读了这篇文章，陈景润的故事，徐迟的文笔给我留下终生难忘的印象。”

我问：“是不是从那时候开始，您就想做陈景润那样的科学家？”

梅刚华笑了，“那么大的雄心壮志倒没有。不过，那篇文章对我下决心考大学起了很大作用。”

优秀的文学作品是能陶冶情操，激励人生的。徐迟那篇风靡一时的报告文学，激励了一代学子献身祖国的科学事业。梅刚华就属于这一代人。

梅刚华1955年出生于湖北黄陂县(现在的武汉市黄陂区)，父母是县城里做竹器的工匠，从小就喜欢动手动脑，帮大人干些简单的竹器活。读小学时和同伴一起去钓鱼，他的渔具全部是自制的，包括鱼竿和鱼篓。大一点了，他对无线电产生了兴趣，初中时自己动手装了只矿石收音机，高中时已经能做便携式单管收音机了。1974年高中毕业后下乡当知青，到农村劳动锻炼，后来又在第一冶金建设公司当了两年工人。1978年考入武汉大学物理系。本科4年，研究生3年，学的都是半导体专业。

1985年，梅刚华硕士毕业，分配到中科院武汉物理与数学研究所(简称武汉物数所，精密测量院前身)，开始接触原子钟。武汉物数所是专业化从事原子钟研究的单位，为我国原子钟技术发展做出过重要贡献。但在20世纪80年代中后期，由于国际国内形势变化，原子钟研究经历了一段困难时期。1987年，梅刚华转向基础研究，研究激光与原子束相互作用机理和技术。凭着这方面的研究成果获得了博士学位，当上了研究室副主任。10年的积淀，他练就了扎实的原子分子物理理论和实验功底。这是做原子钟研究必备的基本功。

20世纪90年代，我国北斗卫星导航系统工程立项，原子钟发展迎来了难得的机遇。这是因为，北斗系统的定位功能建立在时间的精准测量之上的，按北斗工程总设计师孙家栋院士的说法，原子钟是导航卫星的心脏。做不出原子钟，北斗系统就建不成。

国家有关部门决策，立即开展星载原子钟技术研究。

通过激烈的竞争，武汉物数所拿到研究任务，便立即重建原子标研究室，组建星载原子钟研究室。时任研究所所长叶朝辉院士亲自点将，由梅刚华出任研究室主任和课题组组长。

这是国内第一个星载原子钟国家重大项目。物数所作为抓总单位负责原子钟总体设计和物理系统研制，航天五院504所负责电路系统研制。

导航卫星用的星载原子钟，是原子钟中的极品。不仅精度要求高，还要满足小型化、低功耗、可靠性、寿命和卫星环境适应性的苛刻要求，技术难度极大。当时掌握星载原子钟技术的国家只有美国和瑞士。

梅刚华告诉我：“刚开始的时候，我们物钟的精度跟西方发达国家比差了两个数量级，将近100倍。在可靠性、寿命、卫星环境适应性方面，更是连设计概念都没有，差不多是一片空白。”

二

物原子钟的精度主要指频率稳定度，它直接与原子跃迁信号的强度相关。

物原子钟是根据“光-微波双共振”原理设计的。原子信号的强弱与物理系统的两个主要部件相关，一个是激光共振信号的光谱灯，一个是微波共振信号的微波腔。光谱灯的作用像抽水机一样，将原子从低能级抽运到高能级。水可以自动从高处流到低处，但物原子钟中的高能级原子，却不能自动回到低能级，必须用微波场去激励，它才能下来。所以把光谱灯做好，上去的原子就多；把微波腔做好，下来的原子就多；上去和下来的原子都多，原子信号就强，原子钟的稳定度就高。对于物原子钟设计而言，光谱灯和微波腔是两块硬骨头。

“我们的星载物钟研究是从微波腔起步的。”梅刚华说。“微波腔设计有两个基本的要求。第一是体积要小，不然物钟整机的体积下不来；第二是微波场的分布模式要好，不然原子信号就弱。当时国际上比较成熟的是传统的TE₀₁₁腔和TE₁₁₁腔，前者的体积过大，后者的场分布模式不太好，所以在1997年项目启动的时候，我们就决定做一种新的微波腔。”

为了少走弯路，费了很大劲，物数所请到了国际著名原子钟研究单位瑞士天文台退休专家李·约翰逊来实验室做指导。

约翰逊根据文献和自己的经验，做出了两种新结构微波腔模型，一个叫作慢波螺旋腔，一个叫作分离环腔。但效果并不理想，腔的结构松散，找共振频率困难，产生的原子信号很弱。三月份合同到期一到，他便走了。

看来只能靠自己了。有人疑惑：连瑞士专家都做不出来，我们行吗？梅刚华有信心。两种新结构腔相比，他觉得分离环腔更有优势，关键是如何把它从一个分离的、松散的结构变为一个一体化的刚性结构。多次尝试都不见效果。一天下午，他突然想到一种方案，来不及等工厂加工，说干就干！他找来一块铜片，在上面锉了几个槽，然后卷成一个管，再用铜皮包上没开槽的那一端，塞进一个金属圆筒。在仪器上一测量，马上就看出了共振信号。他将钟达、安绍铎几个骨干叫来，大家一看，都很兴奋。

趁热打铁。第二天，他到工厂加工了一个正式样件。再次测量，发现共振信号不仅还在，而且很强。短短两三天时间，一种新结构微波腔——梅刚华把它命名为开槽管微波腔——雏形就出来了。开槽管微波腔后来获得中国和美国专利授权，到现在仍然是精密测量院星载物钟的主要设计特征。这种微波腔不仅体积小，场分布模式也很好，可以利用小体积原子气室获得高强度原子跃迁信号，这样就从根本上解决了物原子钟高精度和小型化之间的矛盾。

物光谱灯的设计原理并不复杂，就是通过无级放电，使物原子蒸气发光。但原先的设计问题很多，根本上不了天。一是光强跳变，影响物钟的频率稳定度；二是真空里发光不正

常，限制物钟的卫星环境适应性；三是灯泡中的物消耗太快，制约物钟的寿命。

“解决问题，要花大量时间找原因，原因找到了，问题就解决了一半。”梅刚华说。

光强跳变的问题困惑了他们很长一段时间。最后梅刚华让博士生赵峰找来一台摄像机对着灯泡拍“电影”，终于弄清光强跳变是液化的“物滴”在灯泡内表面“迁移”造成的。谱灯在真空中发光不正常的问题，他们通过大量实验，发现是由于灯泡散热不畅通，导致灯泡温度过高造成的。

灯泡玻璃材料试验持续了十年之久。他们让三个谱灯长期点亮工作，每个月测量一次灯泡中的物量，积累了近十年的测量数据。根据这些数据点进行计算，得到了精确的物消耗模型，精度比国外高出六七倍。再根据这个模型，确定了适中的充物量，既不会因为少了而影响物钟的寿命，又不会因为多了而产生物迁移现象，影响物钟的性能。

十年是三千多个日日夜夜，几多辛苦，几多心血，只为拿到一个科学的设计数据。

一台高性能物钟，光有好的物理系统还不行，电子学系统也要做好。物钟的频率稳定度既与原子信号强度相关，也和电路的噪声相关。对于一般精度较低的物钟，电路的设计是不太困难的，但要做极精品物钟，电路的噪声就必须压得很低。原子钟的电路实际上是一个链条，由多个模块组成。为了判定噪声来源，他们一个个模块去找，去诊断，这里面包含了大量的仿真、模拟、测试和试验工作。



▲甚高精度星载物原子钟。这是中科院精密测量科学与技术创新研究院研制的第三代星载物钟，2018年装备北斗三号卫星。

解决了物理系统原子信号强度和电路降噪的问题，物钟的短期稳定度就基本解决了，但长期稳定度还没解决。某种意义上长稳更重要，因为导航卫星用的主要是每天的稳定度。“影响长稳的主要因素是光频移和温度频移。”梅刚华介绍：“我们开始的做法有点治标不治本，总想通过选择工作点、加强温控等外部措施来解决，效果不好。于是就系统地研究如何将原子体系自身的频移降下来。这就需要改变和优化很多设计参数，比如物泡中充入的缓冲气体的种类、配比、压力等等。这些东西最好每次只改一样，不然你的判断就不一定准。科研就是这样，没有捷径可走，必须老老实实去做，水滴石穿，水到渠成。”

一晃，8年过去了。2000年，梅刚华团队研制出国内第一台星载物钟原理样机；2004年，又研制出星载物钟电性能样机，技术指标基本满足北斗系统的应用需求。

但是，真正的考验还在后头。

三

2004年，北斗二号系统星载物钟进入工程样机研制阶段。

孙家栋院士一直在关注着武汉物数所，亲自带专家组前来考察。

孙家栋握着梅刚华的手：“刚华，我知道你们这几年拼得很苦啊！”梅刚华十分感动，说：“孙老，有您这句话，所有的苦都值得。”孙家栋说：“于北斗就需要有这么一股劲。有时候，看不到前方的曙光，但是咬牙坚持下去，就可能成功了。”

听了汇报，看了实验室，孙家栋对梅刚华团队几年来的努力和取得的成果，给予充分肯定。

忽然，孙家栋停顿了几秒钟，而后话锋一转：“恕我直言，武汉物数所研制的原子钟研究，比我想象的要好得多，但工程化能力，比我想象的要差得多。”



▲梅刚华研究员在工作

全场寂静。

包括时任所长詹明生和梅刚华在内，武汉物数所所有在场的人都怔住了，他们像是被猛烈地抽了一鞭子。

孙家栋说的工程化，是指航天产品研制生产要遵循一套严格的流程和规范。要生产出合格的航天产品，必须编写全套设计、工艺文件；装配、调试和测试现场必须满足严格的洁净度、温湿度要求，人员上岗要培训，要有资质；要编制试验大纲和试验细则，按规范完成振动、冲击、热循环、热真空等全套环境试验；所有过程都要翔实纪录，做到可追踪、完全受控。所有这些都，当时的武汉物数所几乎都不具备。

冷静下来一想，孙家栋是一言中的，物数所团队研究功底扎实是强项，但工程化能力弱，却是不争的事实。

怎么办？紧急动员，亡羊补牢。詹明生决定立即组建技术发展处和质量办公室两个管理部门，开始建设质量保证体系。

梅刚华带队去航天五院和八院参观学习，回来后立即按航天单位的标准改造实验室。不久，一条符合航天规范的物钟生产线雏形就出来了。他请来航天八院的专家，指导团队编写设计、工艺和试验文件。中国科学院派出监理组，对研制过程进行全程监理。“那段时间是最紧张的，整个团队日夜以继日地工作，从没休过假，我自己则是累得头发一块一块地掉。”梅刚华说。

仅用了两年多时间，物数所不仅完成了星载物钟初样和飞行件两个阶段的研制任务，实现了首台物钟飞行件上天，质量体系同时也建立起来。质量控制能力实现了三级跳，总体单位对物数所产品质量控制的评价从“基本不受控”变为“基本受控”，再变为“受控”。

2007年，北斗二号系统星载物钟进入批量正样产品研制阶段，研制过程仍然充满艰辛。最痛苦的是技术“归零”。

“归零”是航天行业一个专用术语，指产品出现故障以后，要按照“定位准确、机理清楚、措施有效、故障复现、举一反三”的要求，将故障现象和影响完全排除，保证产品上天执行任务时万无一失。

梅刚华讲了一个“归零”的故事。有一次，一台产品交付后出现异常，他们将产品取回做了处理后交给总体，可一通电又出现同样的问题。于是他们沉下心来一个部件、一个部件仔细排查，最后发现是一个电子器件装配方式不合理，属于批次性质量问题。他们将那个批次的产品全部召回，问题是彻底解决了，可就是解决这样一个看似简单的问题，却花掉他们半年的精力。

2012年，北斗二号卫星导航系统全面建成。精密测量院等三家单位研制的星载物钟，为我国独立自主建成北斗二号系统发挥了关键作用。精密测量院的星载物钟，无论是精度还是可靠性，都受到总体部门的高度评价。

梅刚华只有短暂的兴奋。他知道，北斗二号系统星载物钟的性能，只相当于美国GPS系统物钟20世纪90年代的水平。而眼下，GPS已经用上了新一代物钟，技术指标又提升了差不多一个数量级。

2009年，定位和授时精度更高的北斗三号全球系统工程正式立项。北斗三号上什么样的物钟？多数人的意见是上高精度物钟。高精度物

钟的技术指标比北斗二号卫星物钟高，但是跟GPS新一代物钟比，仍然差了一大截。

梅刚华的意见是高精度物钟和甚高精度物钟同时上，其中甚高精度物钟的指标要完全对标GPS的新一代物钟。在项目评审会上，他掷地有声地表示：我们中国北斗的目标是建成一流的北斗，世界的北斗，所以必须用上最好的钟！

工程总体强有力地支持了梅刚华的意见。2011年，高精度物钟和甚高精度物钟两个攻关项目同时启动。一种技术同时布局两个项目，这在北斗系统技术攻关中是独一无二的。

梅刚华带领团队，又开始了新一轮的拼搏。如同参加一场马拉松赛，前一段赛程，他们一直在努力跟跑对手；这一段赛程，他们将发起冲刺，要追平乃至超越对手。

他们对物光谱灯的发光光谱做了更深入的研究，发现光谱谱线轮廓普遍存在变形和增宽。它对稳定度的影响，如果是一般的物钟，完全可以忽略；但要是做世界上最好的物钟，这个影响将是颠覆性的。通过反复试验，他们终于找到了解决办法。

微波腔设计水平也上了新台阶。以前，靠的是经验设计，哪怕修改一个设计参数，都要花上几个星期的时间反复验证，费时费力。这一次，他们利用计算机软件进行仿真设计，所有参数设计一次到位。很快，各种尺寸的微波腔设计出来了，微波场分布模式也得到进一步改善。

他们对物光谱灯的发光光谱做了更深入的研究，发现光谱谱线轮廓普遍存在变形和增宽。它对稳定度的影响，如果是一般的物钟，完全可以忽略；但要是做世界上最好的物钟，这个影响将是颠覆性的。通过反复试验，他们终于找到了解决办法。

高精度星载物钟于2013年研制成功，2015年开始装备北斗三号卫星。

甚高精度星载物钟于2016年研制成功，2018年开始装备北斗三号卫星。

2020年7月31日，北斗三号全球卫星导航系统正式开通。在北斗三号系统全部35颗卫星上，每颗卫星都装备有精密测量院的物钟。

甚高精度物钟的短期频率稳定度达到 $7 \times 10^{-13}/\tau^{1/2}$ ，天稳达到 3×10^{-15} ，超过了GPS最新一代物钟。测试结果表明，甚高精度物钟被国外同行认为是目前世界上稳定度最高的物原子钟。

甚高精度物钟上天，标志北斗系统用上了最好的星载物钟。梅刚华没有食言。

为了这一天，梅刚华和他的团队呕心沥血、踔厉奋发。他们用20多年的时间，走完了外国人40多年走过的路，使我国的星载原子钟技术打破了西方国家的垄断和封锁，实现了从无到有、由弱到强的跨越，使北斗系统有了强大的心脏。他和团队因此而先后获得十余项国家和省部级奖励和荣誉，其中包括国家科技进步特等奖、国家技术发明二等奖和全国创新争先奖。

有人形容梅刚华与北斗的关系是一见钟情。他热爱他的原子钟研究，因原子钟研究与北斗结下不解情缘，目标既定，矢志不移。这种专注、执着，支撑他一路走来。

采访结束时，我问梅刚华：“物原子钟技术走到头了吗？”

“是啊。”他平静地说：“我们最近研制的新型物钟原理样机，短期稳定度比甚高精度物钟还要高3倍多，接下来我们会重点解决长期稳定性问题。”他们还要继续走下去。

蓦地，我心中不由得腾起一种自豪感，为梅刚华和他的团队，更为他们永无止境的探索和创新精神！



▲梅刚华(左四)和团队成员一起分析星载物钟测试数据