

永不停息的“陀螺梦”

——记国家自然科学基金创新研究群体项目“导航制导与传感——先进惯性仪表与系统技术”

■本报记者 甘晓

科学家眼中，陀螺不是一种普通玩具，而是一种相当有用的仪器。利用陀螺敏感惯性空间角速率的特征，科学家研制出结构复杂、具有极高精度的惯性导航定位系统。

自2012年起，在国家自然科学基金创新研究群体项目“导航制导与传感——先进惯性仪表与系统技术”(以下简称创新群体项目)持续资助下，中国科学院院士、北京航空航天大学(以下简称北航)常务副校长房建成团队传承和弘扬“心怀祖国、勇于创新、甘于奉献”的精神，坚持“把论文写在祖国的大地上”，推动了我国惯性仪表与传感技术从机械式到光电式，再到量子式的跨越式发展。

敢为人先攀高峰

早在19世纪，科学家就提出了陀螺仪的概念，之后利用高速旋转自由转子的“定轴性”和“进动性”研制出系列机械转子陀螺仪。在移动的物体中，把一个高速旋转的转子放在可以自由转动的方向支架上，转子将保持惯性空间稳定，通过转子与万向支架三轴框架间的角度来辨别移动物体的方向和姿态，也可以通过调整陀螺仪的力矩来控制移动物体的姿态。然而，现实中想要实现这一原理，却面临重重困难。例如，第一代陀螺仪“机械陀螺仪”要满足支架“自由转动”的条件，必然受到机械运动摩擦力的阻碍。随着科技进步，科学家开始尝试更先进的办法，提出并研制利用光传播特性进行测量的第二代陀螺仪——“光学陀螺仪”。

如今，陀螺仪已经在飞行器的自主导航中取得广泛应用。长期奋战在航空航天科研事业一线的群体成员意识到，国家重大需求对陀螺仪的精度提出了越来越高的要求。基



群体成员合影(左五为房建成)。

研究团队供图

于多项量子技术的重大突破性成果，2012年，房建成带领北航仪器科学与光电工程学院的研究团队获得创新群体项目的资助，为他们攀登科学高峰、开拓人类知识疆域注入了强劲动力。

“面向国家重大需求，我们牢牢把握住基础研究这个‘总机关’。”房建成对《中国科学报》表示，“这就要求我们以敢为人先的精神开展攻关。”

在该创新群体项目支持下，团队开始向第三代陀螺仪——“原子陀螺”挺进。原子陀螺主要是基于原子自旋的定轴性实现超高灵敏度惯性测量的仪器，在没有任何外界环境磁场干扰下，原子自旋类似于传统的转子陀螺；当存在外界磁场变化时，原子自旋会产生进动，从而实现超高灵敏度的磁场测量。因此，基于原子自旋效应，团队同时开展了超高灵敏度磁场与惯性测量技术的研究，并取得重要突破，实现了“一箭双雕”。

2008年，团队在国内率先开展了基于原子自旋效应的超高灵敏度磁场与惯性测量技术研究。2013-2018年，团队在国家自然科学基金委创新群体项目和重大科研仪器研制项目支持下，成功研制出国际公开报道最高指标的

科学装置，为超高精度原子陀螺和原子磁强计的研制奠定了基础。

坚持不懈攻难题

回顾与团队并肩作战的科研生涯，房建成的体会是，“自主创新是一个漫长而艰苦的过程。”创新群体项目如今取得的突破，离不开几十年如一日的长期奋斗。

当年，团队在启动陀螺仪研制时，曾遭到“这个技术太前沿，风险太大”的质疑，房建成带领团队下定决心，“要拿出中国人自己研制的产品”，“团队坚信，做科研就要有前瞻精神，不能永远跟在别人后面跑”。

于是，从2000年开始，仅有5人的团队向目标发起了冲击。当时有关磁悬浮陀螺的信息极少，大家甚至连它长什么样儿都不知道。团队充分发扬不怕困难的“钉钉子”精神，没有周末，没有假期，没日没夜地查资料、调参数、做测试。

为了解决陀螺“失稳”的问题，几百组参数一组一组地实验，连续奋战，团队终于突破共性核心技术瓶颈。团队经过近20年坚持不懈的努

力，终于取得多个国内第一：成功研制出国内第一台超高速磁悬浮空控储能两用飞轮、国内第一台高精度长寿命磁悬浮反作用飞轮、第一台单框架磁悬浮控制力矩陀螺、第一台双框架磁悬浮控制力矩陀螺……为我国航空航天事业的飞跃发展提供了重要技术支持。

光纤陀螺方向的成果积累则更为深厚。在20世纪80年代“中国光纤陀螺之父”张维叙教授在国内率先开展光纤陀螺研究的基础上，群体成员张春霖带领研究团队，突破高性能光纤陀螺基础瓶颈，研制出高精度高动态系列光纤陀螺及系统。

特别是，团队创造性地提出将“光子晶体光纤陀螺”作为突破复杂环境下光纤陀螺精度瓶颈的新途径，并攻克了诸多技术难题，研制出高精度光子晶体光纤陀螺，首次在空中应用中验证了光子晶体光纤陀螺作为新一代光学陀螺的技术可行性。

三代传承爱国心

经过多年科研实践，团队总结出近70年来北航三代“陀螺人”“心怀祖国、勇于创新、甘于奉献”的“陀螺精神”。

新中国成立之初，以林士谔先生为代表的第二代“陀螺人”，从“零”起步，开启了中国完全自主创新的陀螺仪研制之路，实现了我国陀螺仪从无到有的跨越。多年来，林士谔先生无私的爱国精神一直在几代“陀螺人”中传承发扬。

20世纪80年代，以张维叙教授为代表的第二代“陀螺人”，30年如一日研制光纤陀螺，满足国家急需。新世纪以后，以房建成、张春霖、宋凝芳等为代表的学者接过创新的“接力棒”，成为第三代“陀螺人”，研制惯性级高精度光纤陀螺，并在国内率先开展基于

原子自旋效应超高灵敏度与磁场测量技术研究。

在三代人的“陀螺精神”中，爱国既是永恒无私的精神坚守，更是无穷无尽的创新原动力。研制出国家急需的陀螺仪成为他们永不停息的梦想。

如今，心怀“陀螺梦”，创新群体成员又开启了新的奋斗征程。最近，他们以超高灵敏度弱磁场与惯性测量装置研究成果为基础，申请立项建设“超高灵敏度弱磁场和惯性测量装置”国家发改委重大科技基础设施已获通过。

这一设施将建成世界唯一、性能最高、空间最大的“零磁”空间，提供极弱磁环境和极限测量手段。

房建成期待，这一设施将为我国开展从“0”到“1”的原创性“零磁科学”探索提供“利器”。依托这一设施，科学家将聚焦零磁和近零磁环境下，生物、医学、化学和物理学的前沿基础科学命题，建立“零磁科学”新学科。

梦想没有边界，创新永无止境。群体成员相信，“陀螺梦”描绘的蓝图正在成为现实。

《中国科学报》：群体成员如何理解基础研究与国家重大需求现实之间的关系？群体成员之间如何分工合作？

房建成：基础研究和国家重大需求是相辅相成的，基础研究有力支撑国家重大需求中“卡脖子”问题的攻关，国家重大需求又牵引基础研究更深入地开展。

我们群体成员中既有从事基础研究的，又有从事国家重大任务攻关的，相辅相成、协同创新。作为群体带头人，我的团队主要研究方向是惯性技术与量子精密测量传感技术。张春霖教授团队主要研究方向是光纤陀螺与惯性导航技术。樊尚春教授主要研究方向是先进传感技术。任章教授、郭雷教授等研究方向是导航制导与控制理论与方法。

《中国科学报》：群体对这一领域的未来方向如何把握？

房建成：坚持面向世界科技前沿、面向经济主战场、面向国家重大需求、面向人民生命健康的“四

个面向”既是新时代科技创新的目标方向，也是我们团队肩负的使命感。我们仍然应当围绕“四个面向”布局未来的工作。

在面向世界科技前沿方面，科学研究的瓶颈让超高灵敏度神经信号测量和脑磁图研究装置成为迫切需要，超高灵敏度弱磁场测量技术将为此作出贡献，并有望支撑零磁科学从“0”到“1”的原创研究。在面向国家重大需求方面，磁异常探测及深空探测对维护国家海洋和太空安全至关重要，需要开展基于新机理的新一代更高精度磁强计研发。同时，研制用于精确惯性制导和定位的芯片化高精度原子陀螺仪，是机遇也是挑战。在面向人民生命健康方面，灵敏度不断提高的原子磁强计将助力帕金森、阿尔茨海默和老年心衰等重大心脑血管疾病的研究和诊疗，而基于极弱磁测量变革性技术的高端脑磁成像装置有望助力自闭症、抑郁症、神经功能障碍、心力衰竭等重大疾病的诊断。

“始终把服务国家需求作为有机氟化学研究的首要任务”

——记国家自然科学基金创新研究群体项目“功能导向的有机氟化学”

■本报记者 秦志伟

氟醚橡胶可在苛刻环境下起到密封作用，被广泛用于航空航天、汽车、化工、半导体等领域。然而，我国高性能氟醚橡胶严重依赖进口，受制于人。瞄准这一国家重大需求，中国科学院上海有机化学研究所(以下简称上海有机所)研究员卿凤翎带领团队持续攻关，最终研制出耐低温的偏氟醚橡胶和全氟醚橡胶。

“我们在老一辈科学家的言传身教下，始终将国家重大需求作为首要研究目标。”卿凤翎说。

在国家自然科学基金创新研究群体项目(以下简称创新群体项目)支持下，卿凤翎作为学术带头人，带领团队开展功能导向的有机氟化学研究。6年来，他们发展了一系列有机氟化学新反应、新氟化和氟烷基化试剂，并用于含氟功能物质的创制，而且成为一支在国际上具有重要影响力的研究队伍。

直面问题和关键任务

“氟”是一个神奇的元素，20%的药物和40%的农药含有氟原子。由于含氟物质的特殊性能，有机氟材料是不可替代的功能材料，如耐高温和耐油氟醚橡胶可制成O型圈用于航空和航天器的密封，含氟高温润滑油可用于航空发动机的润滑。

由于含氟物质在材料和生物医药的重要应用，含氟化合物的合成方法学一直是有机化学的重要研究内容。特别是近年来，有机氟化学已成为研究热点。

“在我国开展氟化学基础研究显得尤为重要。”卿凤翎介绍，我国萤石氟矿基础储量达1.1亿吨，每年开采量占全球的60%。在他看来，开展氟化学基础研究，把我国的氟资源优势转化为技术优势非常符合我国的重大战略需求。



卿凤翎(左七)等学术骨干在中国科学院有机氟化学重点实验室合影。

研究团队供图

虽然天然无机氟化物非常丰富，但天然有机氟化物含量稀少。因此，几乎所有的有机含氟物质需要靠人工合成。“在这一大的背景下，有机氟化学学科的关键任务是通过掌握氟化学规律，实现含氟有机分子的高效合成以及性质和功能的发挥。”卿凤翎告诉《中国科学报》。

经过几十年的发展，我国在中低端有机氟材料方面已满足国内相关领域的需求。但是，我国部分高性能有机含氟材料主要依赖进口，使得高性能有机含氟材料的获取受制于人。

在对有机氟化学学科深入思考的基础上，创新群体项目团队产生出开展有机氟化学研究的基本思想，即围绕有机氟化学领域的问题与挑战，发展新反应、新试剂，并用于含氟功能物质的创制。

“氟化反应”“胡试剂”“沈试剂”……

卿凤翎介绍，创新群体形成了探

索氟原子(含氟基团)对反应和功能的影响(氟效应)、含氟有机化合物的合成方法学、功能含氟有机分子和材料创制3个主要研究领域。

卿凤翎带领团队提出“氧化三氟甲基化反应”新概念，发展一系列氧化氟烷基化新反应，取得具有国际领先水平的原创性研究成果，相关研究成果获得2019年国家自然科学二等奖。上海有机所研究员胡金波在长期有机氟化学研究的基础上，首次提出亲核氟烷基化反应中的“氟氟效应”，形成一个有机氟化学研究新体系，并发展一系列二氟甲基、二氟卡宾等氟化和氟烷基化试剂，其中两个试剂均被称为“胡试剂”，这些试剂在国内学术界和工业界得到广泛应用。

上海有机所研究员沈其龙从价廉易得的糖精出发设计合成“沈试剂”，该试剂目前已被国内外20余个课题组应用于发展三氟甲基化反应。再如，上海有机所研究员张新刚发现首例金属二氟卡宾参与的催化偶联反应，国外同行评价其为发现用

于农药、医药等领域的生物活性分子提供了新的机遇，为理解金属氟卡宾参与的化学开辟了新的视角。上海有机所研究员肖吉昌发展的新氟化反应成功应用到¹⁹F标记三氟甲磺基化化合物的合成……

“我们依据个人研究方向分别在三个领域开展研究工作，群体成员和研究生经常在一起讨论研究进展，利用各自的专长，相互借鉴，共同促进有机氟化学学科的发展。”卿凤翎说。

2010年，卿凤翎带领团队发展一个铜介导的芳基硼酸的氧化三氟甲基化反应。在机理上，他们推测是经过三价铜中间体[Ar-Cu(III)-CF₃]的还原消除得到三氟甲基化产物，然而该关键中间体从未被检测或分离鉴定。但上海有机所研究员沈其龙利用金

属有机化学专长，首次成功分离芳基与三氟甲基配位的三价铜络合物。该反应关键中间体的分离鉴定，进一步促进温和条件下的氧化三氟甲基化反应的发现。

卿凤翎表示，创新群体发展的有机氟化学新反应和新试剂已应用于有机氟材料创制，发展的高性能有机氟材料满足了国家重大战略需求。

“上海氟化学”再接再厉

创新群体项目依托中国科学院有机氟化学重点实验室，该实验室目前是国内唯一从事有机氟化学基础研究和应用基础研究的实验室，其前身是上世纪50年代末由黄耀曾院士、黄维垣院士、蒋锡夔院士、陈庆云

院士等老一辈科学家创建的上海有机所氟化学研究室。

卿凤翎介绍，六十多年来，实验室几代科学家励精图治，薪火相传，形成了一支国际有影响力、国内独一无二的中青年有机氟化学创新研究群体。

由于发展了10余个原创性氟化学试剂和反应，并有多项试剂和反应应用国外著名化学类工具书和得到广泛应用，上海有机所有机氟化学被国外同行誉为“上海氟化学”。

在卿凤翎看来，“上海氟化学”继续保持国际有重要影响的研究群体地位的关键在于，要有满足研究需求的经费支持，学术带头人必须有长期的研究积累和把握研究方向的敏感性，要有一批思维活跃和对科学研究有兴趣的年轻人。

《中国科学报》：目前功能导向的有机氟化学面临哪些挑战？

卿凤翎：尽管创新研究群体已发展了一系列有机氟化学新反应和新试剂，在国内外产生重要影响，但目前发展的有机氟化试剂的原子经济性和成本不高；发展的大部分有机氟化/氟烷基化反应仅应用于药物化学的先导化合物的小量合成，尚无法应用于含氟药物的大规模合成。因此，当前有机氟化学急需结合国家需求发展绿色的含氟原子经济性的有机氟试剂/氟化与氟烷基化反应，例如，如何从氟化工产业链上大量易得的产品或副产品(如三

氟甲烷)发展出高效的有机氟试剂与氟化、氟烷基化反应。

《中国科学报》：在创新群体项目的支持下，如何从国家需求中寻找科学问题进而开展研究？

卿凤翎：高性能有机氟材料可以在高新技术产业如大飞机、5G及未来的6G通信光纤、电动汽车、氢燃料电池、水处理和生物医药等领域得到广泛应用。创新群体将紧密结合国家需求，探寻高性能有机氟材料创制中的关键科学问题并开展研究，如含氟新型功能单体的高效合成、是否可以发展可控的含氟功能单体聚合，以及含氟高分子的结构序列

与特定功能的构效关系等。

《中国科学报》：对于功能导向的有机氟化学而言，未来的发展方向有哪些？

卿凤翎：依据有机氟化学学科的发展和社会需求，我们认为未来的发展方向有以下几点：绿色、高原子经济性的有机氟化试剂的发展；可规模化应用且经济高效的氟化/氟烷基化新反应；含氟生物活性物质及含氟化合物在生物医学的新应用；可控的含氟功能单体聚合方法学及含氟高分子的结构序列与特定功能的构效关系；新型高性能含氟高分子材料；含氟高分子的循环利用，等等。