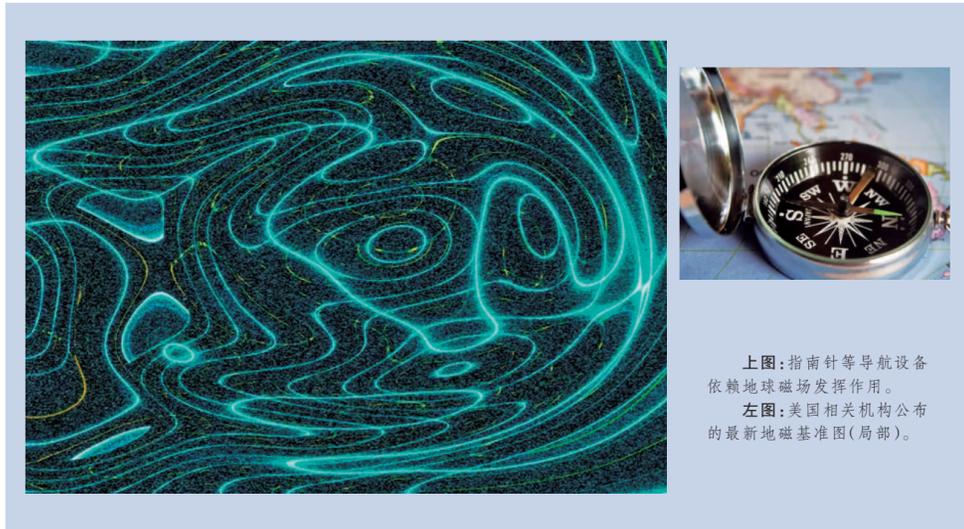


# 地磁导航技术及应用初探

■王奕阳 周家伟 王政

据外媒报道,美国国防创新部门近日启动“地磁空中无人测量系统”项目。该项目计划通过改进现有航空测绘平台,绘制高精度的全球海洋磁场地图,开发不依赖全球卫星定位系统(GPS)且具备较强抗干扰能力的新一代地磁导航系统。

作为目前应用最广泛的卫星定位系统之一,GPS的信号极易受到干扰、欺骗甚至被攻击,在复杂的电磁环境下无法提供稳定的导航服务。如何在GPS失效的环境下为军队提供可靠的备份导航方案,是多国军用导航技术的攻关重点。地磁导航凭借天然的抗干扰优势,成为可靠的“备份”技术。



上图:指南针等导航设备依赖地球磁场发挥作用。

左图:美国相关机构公布的最新地磁基准图(局部)。

## 抗抗优势明显

地球是一个巨大的磁体,周围存在着天然磁场。地球磁场从地核一直延伸至太空数万公里,形成一个环绕地球的磁层结构。它既不受人为干扰,在不同位置又各具特点,容易分辨,从而为精确定位提供了基础。

地磁导航,就是利用地球磁场特征进行定位的一种无源导航技术。其原理是基于探测点或定位点的磁场特征,通过载体上的磁传感器实时测量所在地磁场信息,并与预先建立的磁场地图进行对比,从而计算出载体的实时位置。

由于不依赖外部无线电信号,地磁导航具有抗干扰、隐蔽性强、全天候工作等显著优势,在军事领域尤为有用。因为卫星定位系统在战时极易受到干扰、欺骗甚至摧毁,而地磁导航能在强电子对抗环境中稳定工作,确保作战平台定位导航的准确性。

另外,地磁导航具有误差不会随时间

累积的独特优势。与同属无源导航的惯性导航系统误差会随时间推移不断增大不同,地磁导航的精度取决于磁场地图的精度和磁力计的测量精度,不会因使用时长增加而降低,这使得它成为修正惯性导航系统累积误差的理想选择。在实际应用中,地磁导航常与惯性导航组合使用,形成优势互补,能显著提高导航系统的精度和可靠性。

理论上,地磁导航具备全天候、全地域运行能力,不受时间、位置和天气等条件影响,无论是在陆地、海洋、天空还是近地空间都能稳定运行。尤其是在水下,无线电信号会迅速衰减,导致卫星导航系统无法正常使用,而地球磁场几乎不受影响,这使得地磁导航成为水下导航的首选方案。此外,在深山峡谷、地下空间和室内场所等卫星信号覆盖不全或无法到达的区域,地磁导航也能正常提供服务。

## 两种技术类型

目前的地磁导航技术主要包括地磁

滤波导航和地磁匹配导航两种,工作方式和应用方向各有侧重。

地磁滤波导航是一种多源信息融合技术。它将地球磁场信息作为一个连续、实时的观测值,与惯性导航系统等其他导航系统的信息进行融合对比,同时借助一系列算法,利用地球磁场空间变化的特征,抑制惯性导航误差等,最终提高整体导航精度。其优势在于不需要庞大的地磁基准图,尤其适合在无法获取或不需要高精度地磁基准图的场景下使用。美国戈达德航天中心曾在卫星上成功验证这一导航技术,实时估计并修正了卫星轨道高度和姿态,验证了该技术在天空平台上使用的可能性。缺点是其抗地磁异常干扰能力弱、匹配模糊等。因此,这一技术适用于对绝对精度要求不高、同时需要大范围连续导航支持的场景。

相比之下,地磁匹配导航侧重图匹配与精确定位。这项技术要求事先使用航空、卫星或地面测量手段,获取任务区域的高精度地磁基准图,并

将其存储在载体内。当载体运动至该区域时,其搭载的磁力计会实时测量出区域地磁信息,并与基准图进行对比,从而解算出载体的精确地理位置。这种导航技术能提供比地磁滤波导航更高的定位精度,尤其适用于对定位精度有严格要求的巡航导弹和水下潜航器等装备。俄罗斯现役SS-19洲际弹道导弹就采用这一技术进行制导。该型导弹在飞行末段通过实时测量地球磁场信息,并与预先存储在弹体内的地磁基准图进行对比,从而实现沿大气层边缘的非常规机动飞行,显著增强了突防能力。

未来,随着人工智能技术的使用和地磁测绘水平的提高,这两类技术都在向着更高精度、更强适应性方向发展,确保成为未来战场上可靠的导航“备份”方案。

## 未来应用前景

虽然地磁导航前景广阔,但在实

现广泛应用前还需克服以下技术挑战。

首先,绘制一份高精度磁场地图是基础,也是难点。目前使用的磁场地图更多描述地球内部的磁场状态,且精度有限,对于由地壳岩石产生的细微磁场特征,尤其是在海洋和偏远地区,仍缺乏高精度数据。更麻烦的是,地球磁场并非一成不变,而是会缓慢移动,太阳活动引发的短期磁暴也会对地球磁场产生干扰。这就要求磁场地图必须定期更新,否则会失去参考价值。前文提到的美国“地磁空中无人测量系统”项目,其目标就是开发新的地磁导航测量技术,攻克海洋区域的精准导航难题。

其次,消除载体与环境的“噪音”也是一大难题。进行测量的载体,无论是战机、舰艇还是汽车,其自身的金属结构都会被磁化,从而产生一个额外的磁场,干扰地球磁场信号。另外,地球表面的建筑物、电缆、矿产等也会产生杂散磁场。如何有效滤除这些磁场产生的磁“噪音”,准确捕捉到地球磁场信号,是需要攻克的技术难点。

最后,让计算机快速、准确地“看图找位置”并非易事。即使有了高精度磁场地图,如何将实时测量到的地磁信号,与地磁基准图进行快速精准对比,需要先进的算法加持。现有算法在计算效率、误差容忍度方面仍有待提升,尤其是在地磁特征较弱的区域,其可靠性和精度面临挑战。

此外,磁传感器灵敏度需要不断提升。高灵敏度、高稳定性且能适应复杂温度变化的磁传感器是这一技术的基础。现有传感器技术在极端环境下的精度、响应速度等,仍有提升空间。

虽然仍有一系列技术难题等待攻克,但地磁导航凭借其固有的抗干扰性、隐蔽性和全域可用性,很可能成为未来高端军事对抗中不可或缺的导航技术,能在卫星导航信号被彻底压制或欺骗的“导航战”等极端情况下,为关键作战平台提供可靠的自主定位能力。相关技术发展值得关注。

## 可灵活滑行的水上机器人



涟漪蜻蜓足部有扇形结构,可在水下展开。

近日,美国和韩国的研究人员模仿一种水生昆虫涟漪蜻蜓的运动方式,开发出一款敏捷型水上滑行机器人,能够在湍急的水流中灵活滑行。该研究成果发表在《科学》杂志上。

研究人员发现,当涟漪蜻蜓进入水中时,它的足部会展开呈扇形,帮助它在水面滑行。展开这些扇形结构并不需要肌肉参与,而是水面张力在发挥作用。一旦离开水面,这些扇形结构就会收起,以减少阻力。

受此启发,研究人员仿制出一种扇形结构体,并将其安装在微型机器人的腿上。这些扇形结构体帮助微型机器人在水面滑行时拥有更强的推力、更灵活的控制能力。

未来,此类机器人可用于环境监测、搜救或其他水上行动。

## 有了“痛觉”的新型电子皮肤



新型电子皮肤有“触觉”和“痛觉”。

近日,中国科研人员推出一种新型神经形态的机器人电子皮肤,让机器人真正拥有“触觉”与“痛觉”。相比目前仅能感应压力的机器人皮肤,这项技术突破使机器人能够智能感知触碰并作出反应。

这种电子皮肤仿照人类皮肤与神经系统设计,共分为4层。最外层起保护作用,内层的传感器与电路模拟神经网络。平时,皮肤会每隔一段时间向主机发送“一切正常”的脉冲信号;一旦被碰伤或损坏,信号自动停止,主机可自主定位损伤并预警。

值得关注的是,这款电子皮肤拥有“疼痛感知”能力。当电子皮肤感知到正常触碰时,信号会被传递至主机;若触碰力度超过安全阈值,电子皮肤会直接向运动神经网络发送高压脉冲,触发快速缩或移动等反射动作,无需经过主机处理,极大提升反应速度与安全性。

这款电子皮肤采用模块化磁吸设计,损坏后可快速更换贴片完成修复。研发团队表示,该设计能显著提升机器人触觉交互的真实性与安全性,尤其适用于医护、陪伴等服务场景。未来,科研人员计划进一步提高电子皮肤的灵敏度,使其能同时分辨多种复杂触觉信号,让机器人互动更加自然、智能。

## 采用气泡驱动的微型机器人

近日,由中美科学家组成的研发团队开发出一款气泡驱动的微型机器人。

在特定压力下,液体气泡破裂时会产生极大的冲击能量,这一过程被称为空化效应。在自然界中,有许多动植物利用空化效应实现运动等目的。例如,蕨类植物利用孢子囊中空化细胞的空化效应喷射孢子;螳螂虾在水下用力挥动附肢击打猎物,同时其附肢表面气泡破裂时产生的冲击能量足以击碎猎物。

研发团队尝试模仿空化效应过程,驱动微型机器人运动。他们用二氧化钛等材料制成毫米级机器人,当激光照射时,微型机器人表面的液体会迅速汽化形成气泡,气泡膨胀后骤然破裂,释放出的能量可将微型机器人以超过每秒12厘米的速度弹射出去。另外,研究人员通过调节激光位置,还能精确控制微型机器人的运动方向。

目前,这项技术仍处概念验证阶段,其在医疗、微电子等领域的应用潜力受到关注。

(子渊)

## 图文兵戈

# “水上飞舟”

■张诗宏



左图中,一架US-2水陆两栖飞机滑翔在跑道上,蓝白涂装的机身看起来格外高大。该机下半部采用船身式设计,上半部为机翼螺旋桨设计,形成“一半飞机,一半船”的独特造型。

水陆两栖飞机的设计核心,在于兼顾空中飞行与水上航行。船身结构的底部配备V型或U型滑行艇体,可减小水面阻力,并抵御浪涌;两侧机翼下方一般还配有浮筒,用于维持水面滑行时的横向稳定性。这种设计使其既能在陆地机场正常起降,又能在开阔水域完成滑行、起飞和降落,实现水空自由穿梭。

作为多功能航空器,水陆两栖飞机广泛用于军事和民用领域。以US-2为例,该机可在浪高3米的恶劣海况下起降,搭载搜救与医疗设备,执行海上巡逻、伤员转运和反潜侦察等任务;在森林灭火时,能快速汲水数十吨,对火场实施精准投水,效率远超直升机;在交通不便的海岛、偏远湖区,可承担客运和货运,无需修建专用机场,只要一片足够开阔的水域即可,大幅降低了基础设施的建设成本。

各国的水陆两栖飞机因任务需求不同而各具特色。俄罗斯别-200以消防为主,采用喷气动力,在汲水效率和飞行速度方面处于世界前列;中国AG600“鲲龙”是目前全球在研的最大水陆两栖飞机,可执行森林灭火、海上搜救及远海岛礁物资运输任务;日本US-2注重海上搜救适应性,大幅缩短起降距离,可在狭窄水域使用;加拿大CL-415凭借优异的低空低速性能,成为国际市场上最受欢迎的消防两栖飞机之一。

水陆两栖飞机的发展,折射出人类对航空器跨界应用的不懈探索。从早期木质浮筒式水上飞机,到如今采用复合材料和电传操纵系统的现代化机型,虽然技术形式不断演进,但水空融合的核心理念始终未变。这种飞机填补了飞机与船舶之间的功能空白,在海洋开发、应急救援、国防安全等领域发挥着不可替代的作用,被誉为连接海洋与天空的“水上飞舟”。



## 英国打造水下无人监视网

■王哲 陈昭旭

近日,英国国防部正式启动代号“大西洋堡垒”的新战略,计划部署一系列无人载具与侦察系统,构建水下监视网络。英国国防部称,该计划是为“应对俄罗斯不断增多的潜艇与水下活动”。

“大西洋堡垒”的核心装备之一,是由德国防务公司制造的“SG-1 Fathom”水下潜航器。这款展开后外形如同“长了翅膀的鱼雷”一般的无人载具,能够在海洋深处静默滑行数月,利用传感器搜集情报,机上配备的人工智能(AI)软件能快速识别敌方潜艇等威胁。另外,英国国防部还展示了无人快艇、无人直升机及无人潜艇等多型装备。

“大西洋堡垒”水下监视网络是面向北大西洋的反潜作战体系,核心是把“感知—拦截—保障”三层任务架构交给“AI+无人集群”运行,具有以下技术特点。

AI声学“指纹”识别。“大西洋堡垒”引入人工智能声纹系统,可对潜艇螺旋桨噪声进行毫米级特征比对,误判率相比传统声呐大大降低。

大规模降低成本。“大西洋堡垒”初期规划部署24艘“海上霸王”无人艇,18

艘“剃刀鱼”无人潜航器等,单价均不足50万美元,一名操作员可监控数千千米防线,大大降低了部署成本。

“即时服务”持续存在。“大西洋堡垒”由承包商负责运营维护,形成7×24小时无人值守的“水下监视云”,有人平台如26型护卫舰、P-8A巡逻机等在必要时介入作战。

跨域数字火控网。“大西洋堡垒”通过将水面、水下、空中和岸基声呐阵列全部接入统一数字目标定位网络,由AI实时融合温度、盐度、洋流等环境数据,自动生成最优布阵与武器射击方案。

“大西洋堡垒”试图将北大西洋变成一张智能反潜网,推动英国海上作战迈入“AI+无人集群”规模化实战阶段。然而,并非所有人看好这一新战略。英国皇家联合军事研究所专家罗伯特认为,这套战略看起来不错,实际上华而不实。他指出,英国皇家海军长期忽视北大西洋的防卫责任,如今因缺乏足够的军舰执行任务,才试图用廉价的无人装备填补缺口,“这项战略只是在亡羊补牢”。

上图:技术人员正在投放“SG-1 Fathom”水下潜航器。