

## ★ 科普笔记

9月26日,新西兰航空一架客机在惠灵顿机场降落时遭遇风切变,被迫中止降落并复飞,幸而乘客和机组人员的安全没有受到影响。

什么是风切变?它是一种由于风速、风向在水平或垂直方向上剧烈变化产生的大气现象。乘坐飞机时,它是令乘客们感到颠簸的始作俑者,也是塔台和机组工作人员时常要应对的“航空杀手”。

风切变主要由锋面(冷暖空气的交界面)、逆温层、雷、复杂地形物面和地面摩擦效应等因素引起。通俗来讲,当两种不同密度的液体倒在一起时,会出现明显的分层。同理,两种方向、速度不一样的风,在相遇时,也会出现分层。这类情况,就可以简单理解成风切变。

根据高度的不同,风切变可以分为两种:高于600米的,被称为高空风切变;600米以下的,则是低空风切变。

通常情况下,高空风切变并不危险。这是因为当飞机的飞行高度比较高时,即使遇到风切变,机组人员也有足够时间将飞机重新调整至平稳的飞行状态。所以,高空风切变一般不会造成安全威胁,只会导致不同程度的颠簸。

## 「航空杀手」风切变

■傅德旺 李伦

600米以下的低空风切变,即发生在着陆进场或起飞爬升阶段的风切变,不仅会使飞机航迹偏离,而且会让飞机姿态在短时间内发生剧烈变化。如果飞行员判断失误或处置不当,就有可能产生严重后果。世界上多起机毁人亡的事故,均在此过程中发生。因为发生低空风切变时留给机组的反应时间相当有限,极可能来不及调整飞机姿态而坠机。1985年,美国达美航空一架飞机因风切变坠毁,造成137人死亡。

风切变的强度由垂直风本身的大小变化来决定。在相同空间距离内,对飞行安全危害最大的是强下降气流。严重的低空风切变,常发生在狭长的强风区,对飞行安全威胁极大。这种风切变从高空急速下冲,就像向下倾泻的巨型水流。当飞机进入该区域时,先遇强逆风,后遇强烈的下沉气流,随后又是强顺风。飞机就像狂风中的树叶被抛上抛下,极易发生严重的坠毁事故。

风切变现象具有时间短、尺度小、强度大的特点,这也导致探测难、预报难、航管难等一系列难题。“三十六计,走为上计。”对付风切变的最好办法就是避开它。目前,世界民航业已经形成基于多种设备的风切变探测预警系统。在中国,风廓线雷达对其周边的风切变探测捕捉率已高达90%。有了风廓线雷达,飞行员就能提前看到这一无形的“杀手”,从而调整飞行轨迹及时避开,保护乘客的生命安全。



风切变示意图。 资料图片

2024法国巴黎军警防务展期间,美国惯性实验室公司展示了INS-FI新型GPS辅助惯性导航系统。该系统采用战术级光纤陀螺仪技术,在全球卫星系统信号拒止环境下,其高性能光纤陀螺仪的惯性测量误差小于0.5°,地面应用定位误差约为行进距离的0.1%。这一新系统再次证明了惯性导航系统的稳定性与可靠性。

作为20世纪人类一项重要发明,惯性导航凭借不可替代的优势,成为现代导航体系的稳固基石。目前,世界上几乎所有的大型舰艇、潜艇和战时都配备了惯性导航系统。

在众多导航手段中,惯性导航有什么独特的优势,目前发展如何,未来又有哪些应用前景?请看本期解读。

## 惯性导航:永不停转的“指南针”

■吴佳楠 李炳哲 张毅



英国布莱克特号研究船正在试验新型量子惯性导航的原型系统。 资料图片

## ★ 高技术前沿

## 为遨游海天提供可靠保证

走在陌生的城市中,我们可以通过路边的地标来确定前进的方向。那么,火箭飞行在茫茫太空中,如何确定方向?

这离不开一项重要的技术——惯性导航。

所谓惯性导航,就是基于牛顿力学原理,利用载体自身的惯性特性进行导航定位的技术。这离不开两个核心部件:陀螺仪和加速度计。

陀螺仪又称角速度传感器,负责感知并跟踪载体的角运动,确保在任何旋转或倾斜的情况下都能准确指向固定的方向。而加速度计则像是一位敏感的“速度监测员”,测量载体沿各个方向的线性加速度,为计算速度和位置提供基础数据。方向有了,速度有了,此时的惯性导航系统更像是一种小型计算机,通过对这些测量值进行连续计算,就能绘制出载体的运动轨迹,实现高精度的导航定位。

相较于卫星导航、无线电导航等,惯性导航在“导航家族”中具有独特的优势和不可替代的作用。

首先,高度的自主性让惯性导航在恶劣环境中仍能正常工作,为军事行动中的隐蔽性和突发性提供有力保障。在俄罗斯海军“白熊-2021”任务期间,3艘俄罗斯战略导弹核潜艇同时完成破冰出水任务。潜艇能在环境恶劣的北极冰层下长时间航行并到达指定地点,依靠的就是惯性导航的自主性。

其次,惯性导航能够提供高精度、连续的航向、姿态、速度和位置信息。在一些精确打击任务中,如海上使用舰炮或导弹对敌方目标进行打击,惯性导航系统提供的定位信息往往更为具体、详细,可有效提高武器装备的命中率。

此外,由于不依赖外部信息源,惯性导航系统的可靠性在各种导航系统中首屈一指。在军事行动中,如果卫星导航系统受到敌方干扰或破坏,依赖卫星导航的装备就会失去导航能力;无线电导航技术要求飞机等装备必须与地面设备保持联通,一旦地面设备损坏或受到电磁干扰,装备会成为“睁眼瞎”。惯性导航系统不依赖外部信号,不易受无线电干扰,等于在茫茫海天间为装备装上了一个永不停转的“指南针”。

## 从机械时代到光学纪元

根据惯性导航系统内部的陀螺仪来划分,惯性导航系统经历了机电式陀螺仪惯性导航、光学陀螺仪惯性导航以及集

成光电陀螺仪惯性导航等发展阶段。

机电式陀螺仪惯性导航的发展可以追溯到20世纪中叶。初代惯性导航系统内部的陀螺仪利用轴承和滚珠来支撑陀螺转子,系统容易受到外部振动信号的干扰,并且陀螺转子与支承结构之间也很容易产生摩擦。这个时期,机电式陀螺仪惯性导航精度相对较低,对定位误差的影响非常明显。

20世纪70年代,美国MX导弹使用了液浮、气浮和磁悬浮3种支承结构来提升惯性导航的精度。这种结构减小了惯性导航系统内部的机械噪声,大大延长了其使用寿命,陀螺精度显著提高。

20世纪80年代,世界各国相继开展静电陀螺的研制,传统机电式惯性导航进入一个新的发展阶段。静电陀螺仪惯性导航内的陀螺仪利用静电场吸引力来支撑球形转子,能够最大程度减小摩擦。在理想条件下,静电陀螺仪不受任何外力作用,其主轴将永远保持不动,可作为精密导航与定位的参照物。这等于在仪器舱内建造了一颗“人工恒星”,从而将漂移误差系数降到极低的水平。

静电陀螺仪惯性导航能够显著提高武器装备的隐蔽性,特别适用长时间工作的场合,因此在核潜艇中得到广泛应用。例如美军的三叉戟核潜艇

就使用了静电陀螺仪惯性导航,潜艇获取定位校正信号的时间成功延长到40天以上。

激光技术出现后,光电陀螺仪惯性导航成为最有发展前景的惯性导航系统。光电陀螺仪通过激光干涉实现角运动的精确测量,同时取消高速旋转的机械转子,结构得到极大的简化。

20世纪90年代,一家美国公司研发出一款AN/WSN-7A型环型激光陀螺仪惯性导航系统,它采用新型的双轴旋转技术,14天内定位误差不过1海里。它还进行了相应改造,更加适合潜艇水下使用。美军海狼级、海狼级和弗吉尼亚级潜艇使用的就是这种惯性导航系统。

在20世纪末,光纤陀螺仪惯性导航越来越受到各国军方的青睐。相较于激光陀螺仪,光纤陀螺仪以光纤线圈构成环形光路,具有更小的体积、更轻的质量、更低的成本以及没有运动部件等优点,是一种真正的全固态装备,探测精度也进一步提升。比如法国的Geonys光纤陀螺仪惯性导航系统,就被广泛应用于北约国家的自行火炮等武器系统中,以提供重要的定位和导航支持。

进入21世纪,光纤陀螺仪惯性导航开始向集成化方向发展,其具体目标是将光纤陀螺仪中除光源和探测器以外的

其他光路器件集成在一个芯片上。芯片级尺寸的集成光学惯性导航有望在军事、航空航天、深海探测、自动驾驶等多个领域发挥重要作用。如果光纤陀螺仪惯性导航系统的体积继续减小,或许未来有一天,普通的炮弹都可以实现制导化。

## 量子惯性导航未来可期

随着量子技术的飞速发展,量子惯性导航正成为惯性导航领域的新生力量。量子惯性导航的结构与传统惯性导航系统基本一致,主要由原子陀螺仪、原子加速度计、原子钟和信号采集处理单元等部分构成。

量子惯性导航的核心在于利用量子效应进行高精度测量。例如,某些量子传感器能够利用超冷原子的量子干涉现象来精确测量微小的角运动和加速度变化。这种测量方式不仅精度高,而且不易受外界干扰,这使得量子惯性导航系统在复杂环境中依然能够保持卓越的性能。

采用量子技术能显著提高导航精度,有望实现厘米级甚至更高精度的定位,其精度之高令传统机电式陀螺仪和光学陀螺仪难以企及。量子惯性导航

## 空射无人机面面观

■张 犇 张心悦

据报道,今年上半年,俄罗斯联合飞机制造集团获得了一次性空射无人机的RU2816326 C1专利。该专利对未来空射无人机的概念设计及应用进行了描述,一定程度上反映了微型无人机的应用方向和应用潜力。

空射无人机主要是指由运输机、直升机、战斗机、大型无人机等有人或无人空中载机平台挂载,并实施空中发射的无人机。近年来,无人机在战场上的地位日益凸显,无论发达国家还是发展中国家,甚至一些地区武装都开始局部战争或冲突中大量使用无人机。空射无人机可携带红外/光电雷达、电子战装备、高爆炸药、导弹等载荷,抵近敌防区快速部署、协同作战,执行侦察预警、通信中继、电子对抗、火力打击等任务,极大提高任务安全性和成功率。无人机蜂群虽具

有零伤亡、低成本、规模大等优势,却也存在飞行速度慢、作战半径小等短板。因此,为解决高强度对抗环境下无人机蜂群远程作战问题,很多国家都在积极研发基于载机的空射无人机技术。

2016年,美国启动旨在验证空中投放回收、先进飞行控制、低成本可消耗设计等关键技术的小精灵”无人机组项目。2021年,美军利用“女武神”隐身无人机,完成空射ALTIUS-600无人机的验证,实现“无人机空射无人机”的新突破。同年,美军还完成了用C-130运输机空中回收X-61A“小精灵”无人机的试验,验证了无人机空中回收技术的可行性。

美国多次进行空射无人机试验,其他国家不甘落后。俄罗斯试验了直升机空射无人机集群技术,并于2021年公开“闪电”蜂群无人机模型。该无人

机具备较好的隐身能力,拥有侦察型、打击型、电子战型等多种型号,可由运输机、战斗机、大型无人机等平台挂载空射,功能强大,部署灵活。俄罗斯还启动了用伊尔-76运输机搭载可回收版“闪电”无人机计划。欧洲空客公司开发一种发射装置,可从空客A400M运输机中发射无人机。日本试验了由F-15J战机组挂载并空射TACOM战术无人机。印度也与美国合作开发空射无人机。

利用空中载机平台发射无人机,融合了有人机与无人机、无人机与无人机的协同技术,既可实施协同空战、协同对地攻击等作战任务,又能遂行协同侦察、通信中继、物资投送等保障任务,在军事上具有重大应用价值。但空射无人机想要大规模应用于战场,还有一些技术需要突破。

高升阻比气动布局设计技术。空

射无人机要完成远距离持久通信或火力支援任务,需要较长的滞空时间,这就对无人机的空气动力学、飞行力学、结构设计及飞行控制等提出较高要求。研发人员通常采用高升阻比翼型设计,或者采取嵌入式机翼结构、小截面减阻机身设计、大弯度薄翼型设计等手段满足高效气动布局。

紧凑折叠展开机构设计技术。空射无人机要实现通过多类型平台高密度空中储运和发射,必须实现小体积收纳,而且要能做到发射后迅速展开,进入巡航飞行状态。解决好小体积收纳与大展弦比气动构型之间的矛盾是成功的关键,机翼的旋转装置设计也要满足弹翼加载、旋转、抬升及角度定位等设计要求。

多母机平台兼容安全脱离发射技术。不同类型的搭载母机平台飞行速度差异很大,兼顾不同载机与空射无

人机之间的速度差异也是发射过程中不容忽视的问题。对不同速度的搭载平台,可采用前射、后射或直接空投等形式实施发射。如直升机在低速或悬停状态下通常采用前向发射,为无人机提供一定的前飞空速;速度较快的搭载平台则可采取后射方式发射无人机,这样既可帮助折叠无人机减速使其尽快进入适配巡航空速,也可防止折叠无人机发射后高速爬升与载机发生碰撞。

安全回收技术。虽然很多空射无人机都被定位为消耗型装备,但出于降低成本的考虑,人们当然希望能够完全或部分回收空射无人机,实现重复利用。在平整地面擦地着陆的回收方式相对简单,用载机在空中完成对空射无人机的安全回收则危险得多,目前很多国家都在积极进行相关技术研究。

## ★ 热点追踪