

飞机主要着陆方法研究与发展趋势分析

曹有权^{1, 2}

1. 中国电子科技集团公司第二十研究所 陕西 西安 710068

2. 陕西省组合与智能导航重点实验室 陕西 西安 710068

摘要：本文研究了仪表着陆、微波着陆、毫米波雷达着陆和卫星导航着陆四种主要飞机着陆方法。对各方法的组成、原理及优缺点进行了分析。展望多源融合、自主着陆以及量子导航等新型技术，将是未来飞机着陆技术的主要发展方向。

关键词：飞机着陆；仪表着陆；卫星导航；多源融合

1 引言

飞机着陆是整个飞行过程中最关键且风险最高的阶段。据统计高达40%的航空事故发生在飞机进近和着陆过程中^[1]，因而高精度、高可靠的着陆导航技术研究是航空安全领域的重要方向。

目前主流的着陆引导系统主要包括仪表着陆系统、微波着陆系统、毫米波雷达着陆系统和卫星导航着陆系统，系统研究这些着陆方法的原理和特性，对于提高着陆安全性、推动航空技术发展具有重要意义。

本文旨在系统分析几类主要飞机着陆方法的原理、优缺点及应用场景，并预测未来飞机着陆技术的发展趋势，为中国航空导航技术发展提供参考。

2 主要着陆方法

2.1 仪表着陆系统

仪表着陆系统是历史最悠久、应用最广泛的飞机着陆引导系统，自1939年问世以来，一直被国际民航组织作为国际标准着陆系统。

仪表着陆系统包括地面设备和机载设备两部分。地面设备由航向台、下滑台和指点标三个核心设备构成。机载设备主要包括天线系统、接收机和指示器，用于接收和处理地面发射的信号，并将引导信息显示在指示器上。

仪表着陆系统工作原理是航向台安装在跑道末端中心延长线上，产生频率为90Hz和150Hz的两个交叉调制的波束，这两个波束的重叠部分形成跑道中心线方向，提供水平引导信号，确定飞机相对于跑道中心线的位置。下滑台设置在跑道一侧，采用类似的方式提供垂直引导信号，确定飞机下滑道偏差。当飞机偏离理想路径时，两种调制信号的强度差会发生变化，机载接收机通过比较90Hz和150Hz信号的调制深度，确定飞机相对于理想航向道和下滑道的位置偏差^[2]。指点标包括外、中、内三个指点标，为飞行员提供距离确认信息。

该系统的优点主要包括^[3]：能在复杂气象条件下向驾驶员提供精确而直观的仪表着陆引导信息；可根据机场和气象条件选择不同的工作类型（决断高度和跑道视距）；使用国际通用的标准设备，造价便宜且维护方便。

其缺点也十分明显：只能提供一条下滑角固定不变、对准跑道中心线的直线航道来进行着陆引导，不适用于短距起落和垂直起落的飞机；通道数少，不能满足国际民航的新要求；对地形反射及障碍物遮挡敏感，容易导致信号受到干扰，需要大面积的保护区，对场地平整度要求极高，有些机场受地形限制无法安装。

2.2 微波着陆系统

微波着陆系统是为克服仪表着陆系统局限性而研发的下一代着陆引导系统，于20世纪80年代开始推广。

微波着陆系统包括地面设备和机载设备两部分。地面设备由方位台、仰角台和精密测距器组成。机载设备包括接收机、处理单元和显示器。

微波着陆系统采用微波频段传输信号，是基于扫描波束技术。飞机在进近着陆时，由地面方位台和仰角台的天线，分别播发左右和上下扫描的扇形波束，机载设备接收到相应波束信号后，测量两个波束信号经过飞机的时间间隔，得到飞机相对于跑道的方位角、俯仰角等信息，以引导飞机安全着陆^[4]。

微波着陆系统除了能提供方位、仰角和距离引导信息外，还具有一个向飞机发播信息的地-空数据链路，其中涵盖了地面设备功能识别、信号覆盖范围、最低下滑角、台站参数和机场信息等内容。机载接收机在收到地-空数据链路发播的数据后，将会用于处理角度、修改或调整接收机输出量等功能，以提供给其它机载设备使用^[5]。

微波着陆系统的应用场景与仪表着陆系统类似，但因其性能优势而适用于更复杂的环境。支持多种进近路径（包括直线、曲线和分段进近），能适应复杂地形和

空域环境；提供的覆盖范围更大，允许飞机从多个方向进近；精度更高，在整个覆盖范围内都能提供非常稳定和精确的引导信号，误差极小；抗干扰能力强，其对多路径干扰和雨雪天气的敏感度远低于仪表着陆系统，减少了环境天气等因素对着陆的影响；信道容量大，一个微波地面台可以同时为多达200条不同的进场路径提供引导服务，服务多架飞机。

主要缺点是：需要部署昂贵的地面基础设施，机场需要大量投资更新设备；目前仅在少数特殊场合使用，未能成为国际主流标准。

2.3 毫米波雷达着陆系统

毫米波雷达着陆系统（简称雷达着陆系统）利用毫米波波段的电磁波实现高精度测量和跟踪，提供精确的着陆信息。

雷达着陆系统由地面设备和机载设备组成。地面设备包括雷达天线、跟踪处理模块、综合显示控制终端、伺服控制机构和数据传输设备等。机载设备包括机载应答处理机和收发天线。

雷达着陆系统工作原理是地面雷达发射毫米波信号，信号遇到飞机后反射回地面，通过测量信号往返时间计算距离，通过多普勒效应测量相对速度，通过天线波束定向测量方位角和仰角。主要有搜索和跟踪两种工作方式。当处于搜索状态时，地面雷达天线进行水平和俯仰扫描，并发射询问信号，当机载应答机接收到地面雷达辐射的询问信号后，经过处理，产生应答信号通过机载天线辐射出去，地面雷达天线接收到应答信号，进入跟踪方式，开始为该目标提供服务，最终计算出目标相对于着陆点的仰角、方位角偏差以及距离、速度等导航信息传输给空中目标使用^[6]。

雷达着陆系统的应用场景主要是军事领域和特殊民用场合，可用于无人机、直升机和固定翼飞机等多种航空器的着陆引导，优点主要包括：引导精度高，因波长极短，波束可以非常窄，角分辨率极高。能够极其精确地测量飞机的方位、仰角和距离，其测角精度可以达到0.1度级别；抗干扰能力强，不易受光线和大多数电子干扰影响；适应性强，具备一定的穿透能力（可以穿透烟雾、灰尘等），能在恶劣气象条件下工作。

但其缺点也很明显：设备成本高，毫米波元器件的制造工艺复杂，技术门槛高；频谱资源有限，毫米波段使用需要严格管理；当前技术发展和应用尚不成熟，尚未形成国际统一标准，限制了其广泛应用。

2.4 卫星导航着陆系统

卫星导航着陆系统是基于全球导航卫星系统及地基增

强系统的飞机着陆技术，代表了飞机着陆的最新技术。

卫星导航着陆系统组成包括地面设备和机载设备。地面设备由基准接收机及天线、数据处理单元、时统设备、显控设备和数据传输设备等组成；机载设备包括卫星天线、接收机、处理单元和接收电台及天线。

该系统工作原理是：地面上的接收机接收卫星信号，计算误差校正量和完好性信息，将这些信息通过电台发给飞机；机载设备利用校正后的卫星信号实现精密定位，引导飞机沿预定路径着陆。

卫星导航着陆系统优点主要包括：通过载波相位差分技术，能够提供厘米级的定位精度，可满足各类精密进近要求；信号覆盖范围广，灵活性强，可生成多条甚至曲线的近进路径，极大地提高飞行安全性和空域利用效率；经济性也是其显著优势，地面设备按照报文广播式工作模式，一套地面设备可供场域内所有飞机同时使用，且对于场地要求低，地面设备维护成本低，应用范围广。

但该系统在实际应用中仍面临一系列技术挑战：信号易受压制干扰和欺骗。卫星导航信号功率非常低，极易受到有意干扰影响，恶意干扰和欺骗干扰可以导致系统无法工作甚至引导飞机错误进近。使用中需要不断提高抗干扰和反欺骗技术来提高系统的安全性。多路径干扰是其面临的另一挑战。机场环境中大量金属物体和光滑表面（如飞机本身、建筑物等），都是多路径干扰的高发因素，造成测量误差，需要采用专门的多路径抑制技术来解决。系统完好性是其关键要求，通过完好性算法来保证系统的完好性，但如何在高精度、高可用性和高完好性之间找到平衡，是一个不断需要提升的技术难点。

3 飞机着陆技术发展趋势

基于对当前技术状况的分析，判断未来飞机着陆技术的发展趋势主要体现在多源融合、自主着陆和新型导航技术方面。

3.1 多源融合技术

单一导航着陆系统有各自的局限性，多源融合技术将成为未来飞机着陆系统的主要发展方向。多源信息融合是将不同时空域上的多传感器信息在一定准则下加以分析，得到被测对象的一致性解释与描述，使系统获得更优越的性能。常用导航信息有卫星、惯性、视觉、雷达及激光测距以及测高仪测高信息^[7]。

在着陆阶段，飞机可用的导航源包括提供引导功能的导航传感器（如仪表、微波、卫星等）、提供位置信息的导航传感器（如VOR、DME、无线电高度表等）、

感受飞机姿态的导航传感器（如惯性基准系统等）以及感受飞行环境条件的传感器（如大气数据系统等）。通过导航传感器数据预处理和信息充分融合技术，得到高精度的引导信息，确保着陆阶段的精确性和安全性。

多源融合时，不同数据源的数据更新率、延迟特性和坐标系各不相同，需要先进的数据处理和融合算法来实现最优整合。随着神经网络、深度学习及人工智能技术的发展和运用，将使系统能够自适应地调整融合策略，根据环境条件和传感器状态智能选择最优的传感器组合，提供更加精确和安全的着陆引导服务。

3.2 自主着陆系统

自主着陆系统是飞机着陆技术的另一重要发展方向。传统的自动着陆系统都需要依赖地面设备的支持和引导，并非完全自主。以后的自主着陆系统是指不依赖外部基础设施，仅凭机载设备就能精确完成导航着陆任务。

自主着陆系统的关键技术包括传感器融合、实时图像处理 and 智能决策。系统需要整合视觉信息、红外信息、惯性导航信息和卫星导航信息，形成对跑道环境和飞机位置的准确感知；需要实时处理图像数据，提取跑道特征并进行跟踪；需要智能决策算法，根据当前状态和着陆要求生成最优着陆轨迹。

深度学习和人工智能技术在自主着陆系统中的应用，将进一步增强着陆系统的能力。通过大量着陆数据的学习和训练，系统能够识别各种复杂环境下的跑道特征，适应不同的气象条件和照明条件，以及处理异常情况和应急着陆需求，最终实现飞机的全自主着陆。

3.3 新型导航技术

新型导航技术将为飞机着陆系统带来革命性变革，其中视觉导航、量子导航和生物导航是目前最具前景的方向。

视觉导航是基于计算机视觉技术提出，通过视觉传感器采集飞机着陆过程中的实时图像，并计算平台与跑道的相对几何关系，从而求取两者间的相对姿态与位置，实现飞机精准着陆，具有自主性强、不受电磁干扰等特点^[8]。基于对跑道特征点技术的不断研究及与惯导技术的深度融合，该技术的成熟应用已指日可待。

量子导航系统主要由量子加速度计、陀螺仪、原子钟和信号采集处理单元等组成，其工作原理基于量子纠缠现象，可以在不直接测量位置的情况下，通过测量与位置相关的纠缠粒子对的属性进而推算出位置信息，其抗干扰能力强，更加精确和可靠。量子导航的成功应用将使飞机在不依赖卫星等外部信号的情况下保持精准定位，特别适用于强对抗环境下的着陆需求。

生物导航技术是模仿生物体的导航机制，如鸟类迁徙、昆虫觅食等导航方式，为自主着陆系统提供新思路。该技术通常采用多模态传感器融合和仿生算法，实现环境感知、路径规划和导航控制的一体化处理。生物导航具有适应性强、鲁棒性好的特点，特别适用于未知区域和动态变化环境中的着陆任务。

4 结论

本文系统分析了仪表着陆系统、微波着陆系统、毫米波雷达着陆系统和卫星导航着陆系统四种飞机着陆方法的原理和特点，并对未来发展趋势进行了展望，未来飞机着陆技术将朝着多源融合、自主着陆和新技术应用的方向发展。随着新技术不断涌现和应用，飞机着陆将变得更加安全、可靠、精确、自主，为人类航空事业开辟新的天地。

参考文献

- [1]李鹏图.飞行器精密进近导航着陆设备关键技术专业技术报告[J].科学导报·学术, 2020(59).3
- [2]杨兴耀.仪表着陆与伏尔导航系统的研究与实现[D].西安电子科技大学硕士论文, 2010.3.11
- [3]刘水, 张鹏明, 王思臣.无线电着陆引导系统的发展现状[J].电子科学
- [4]李勇军, 朱林寰, 赵鹏飞.微波着陆系统 (MLS) 机场应用研究[J].长沙航空职业技术学院学报, 2018 年 9 月, Vol.18 No.3
- [5]陈斌.微波着陆系统数据信号的实现与应用[J].现代导航, 2014年4月, (2):121-126
- [6]高乾, 王振欣, 刘杰等.固定翼无人机自主着陆引导技术发展综述[J], 现代导航, 2016年8月, (4):309-312
- [7]李丰阳, 贾学东, 董明.飞行载体自主着陆导航技术的现状与趋势[J].导航定位学报, 2017年 6 月, Vol.5 No.2
- [8]李洪, 王大元, 明丽等.基于线特征的无人机自主着陆惯性/视觉导航方法[J], 中国惯性技术学报[J].2021年 8 月, Vol.29 No.4