

航空天文组合导航技术发展研究

郑云翔

中国东方航空江苏有限公司 江苏南京 210000

摘要：天文导航作为人类探索宇宙、定位导航的重要手段，自古以来便承载着重要的历史使命。从古代航海家利用星辰指引方向，到现代航空航天领域对高精度导航的迫切需求，天文导航技术经历了漫长而辉煌的发展历程。本文旨在探讨天文导航的历史背景，分析其在现代导航体系中的重要地位与意义，为后续航空天文组合导航技术的发展研究提供理论基础与历史借鉴。通过回顾天文导航的起源、发展历程以及关键技术突破，将深入理解其在现代导航系统中的独特优势与应用潜力。

关键词：航空天文；导航技术；发展研究

引言

随着科技的飞速进步和人类对宇宙探索的不断深入，导航技术作为连接地球与浩瀚星空的桥梁，其重要性愈发凸显。天文导航，这一古老而又充满智慧的导航方式，自古以来便伴随着人类的探索脚步，从简单的星辰指引到复杂的天体定位，它见证了人类导航技术的每一次飞跃。本文引言部分旨在概述天文导航技术的历史沿革与现代价值，揭示其在现代航空导航体系中的独特地位，为后续深入探讨航空天文组合导航技术的发展奠定理论基础。通过回顾天文导航技术的辉煌历程，不仅能够更好地理解其科学原理与技术特点，还能从中汲取灵感，为未来的导航技术发展提供新的思路与方向。

一、天文导航的历史背景与现代意义

天文导航，作为一种古老的定位方法，可以追溯到古代航海家利用星星和天体来确定方向。从古希腊天文学家托勒密的“天文钟”到中世纪的“星盘”，人类不断探索利用天体运动规律来辅助导航。在现代，随着科技的进步，天文导航经历了从传统观测到精确计算的革命性转变，如18世纪约翰·哈雷提出的星表法，为后来的航海和航空导航奠定了基础。20世纪，随着GPS等卫星导航系统的出现，天文导航似乎显得过时，但其实它在特定领域的价值并未减弱^[1]。例如，在GPS信号受阻的深空探索中，如“旅行者”号探测器，天文导航仍然是确定位置的关键技术。此外，现代天文导航系统通过与GNSS（全球导航卫星系统）融合，实现了精度的大幅提升，误差可控制在亚米级别，这对于军事隐身飞行器和

高精度测绘任务至关重要。在现代航空领域，天文导航与卫星导航的结合提供了冗余和抗干扰能力，增强了导航系统的可靠性。例如，波音747-8型飞机就配备了先进的天文导航系统，能够在GPS信号丢失时，利用恒星定位来维持飞行安全。同时，随着人工智能和大数据分析的应用，天文导航的误差修正和动态适应能力持续增强，为未来无人驾驶航空器和高动态导航场景提供了新的可能^[2]。

二、天文导航系统的构成与工作原理

天文导航系统是利用天体作为参考点来确定位置的技术，其历史可以追溯到古代航海者依赖星星导航的时代。在现代，天文导航系统通常包括高精度的天体位置数据库、光学或射电天文传感器以及复杂的信号处理算法。例如，系统会利用开普勒定律计算出预知的天体位置，然后通过高精度的望远镜或光谱仪捕获特定天体的瞬间位置。这种技术在GPS等卫星导航系统受到干扰或不可用时，依然能提供可靠的导航服务。

在工作原理上，天文导航系统首先需要识别和测量目标天体的角位置。这可能涉及到对天体的视向速度进行测量，或者通过分析天体光谱的多普勒效应。然后，这些测量数据会被输入到导航计算模型中，结合地球的运动学模型，反演出行星坐标系或地心坐标系中的位置信息。例如，NASA的“旅行者”号探测器就成功地利用了天文导航，实现了深空探索中的精确轨道调整，彰显了天文导航的可靠性和长期稳定性。此外，天文导航系统还能够结合其他导航手段，如惯性导航，来提高整体的导航精度和可靠性。惯性导航系统虽然短期内能提供

高精度的导航信息，但随时间推移误差会逐渐累积，而天文导航则能定期校正这些误差，确保导航的长期准确性。因此，在现代航空及深空探测任务中，天文导航作为一种独立的、不依赖于外部信号的导航手段，发挥着至关重要的作用^[3]。

三、现代航空组合导航系统的分类

现代航空组合导航系统的发展，主要体现在对多种导航技术的集成与融合，以克服单一导航方式的局限性，提高定位精度和可靠性。根据技术融合方式和主导导航信号，可以将航空组合导航系统大致分为以下几类：一是互补型组合，如将惯性导航与地磁导航结合，利用各自在长时间稳定性和地磁图匹配上的优势；二是多模态融合系统，如GPS与GLONASS、Galileo等多星座卫星导航系统的融合，增强信号覆盖和抗干扰能力；三是有源与无源结合，如卫星导航与雷达或激光雷达的组合，实现全天候、全地形导航；四是量子导航预研系统，虽然尚处于早期研究阶段，但量子传感器（如量子陀螺和量子钟）的引入有望实现更高精度的无源导航^[4]。五是深度学习与数据融合系统，这类系统利用深度学习算法对多源导航数据进行智能融合与处理，提高导航信息的准确性和鲁棒性；六是空天地一体化组合导航，通过整合空间卫星、地面基站和无人机等平台的信息，实现三维空间的全方位、高精度导航；七是生物启发的自适应导航系统，借鉴生物界的导航机制（如蝙蝠的回声定位、候鸟的迁徙导航），开发具有自适应能力的航空导航系统。这些新型分类不仅丰富了航空组合导航系统的内涵，也为未来航空导航技术的发展提供了新的方向。深度学习与数据融合系统的引入，标志着航空组合导航系统向智能化迈进的重要一步。通过深度学习算法的强大数据处理能力，系统能够自动识别并优化导航数据源，有效应对复杂多变的飞行环境。而空天地一体化组合导航，则实现了导航信息的无缝对接与高效利用，为航空器提供了更为全面、精准的导航支持。生物启发的自适应导航系统，更是将自然界的智慧融入现代科技，为航空导航技术的发展开辟了全新的思路^[5]。

四、航空天文组合导航技术发展

1. 高精度天文导航技术的创新

高精度天文导航技术的创新是近年来航空导航领域的一大亮点。随着天体测量技术的进步，如天体位置的精确计算和高精度时间同步，天文导航的精度已经显著提升。例如，通过使用更先进的望远镜和传感器，现在

可以实现对恒星位置的测量精度达到微角秒级别，这比十年前的精度提高了几个数量级。这种精度的提升使得天文导航在没有地面基础设施的深空探索中，如火星探测任务，成为了不可或缺的定位手段，为航天器的自主导航提供了可能。此外，创新的数据处理算法也对提高天文导航精度起到了关键作用。利用机器学习和人工智能技术，可以更有效地校正大气折射、地球曲率等复杂因素导致的误差，进一步优化导航结果。例如，通过训练的神经网络模型，可以实时分析和预测误差模式，从而实现动态误差补偿，提高导航的实时性和可靠性。同时，高精度天文导航技术还促进了与其他导航系统的深度融合。例如，通过与全球导航卫星系统（GNSS）的数据融合，可以在GNSS信号受阻（如在地球的极区或地下环境中）时，无缝切换到天文导航模式，确保导航服务的连续性。

另一项技术创新在于自适应天文导航算法的开发。这种算法能够根据航天器的实时位置和姿态，自动调整观测天体的选择策略，从而最大化利用可用的天文信息。例如，在航天器接近地球两极时，传统的天文导航可能会受到观测天体数量减少的限制，而自适应算法则能智能地选择那些在特定时间和位置下最为明亮和易于观测的天体，确保导航数据的连续性和准确性。

2. GNSS与天文导航的融合策略

随着全球导航卫星系统（GNSS）的广泛应用，其在航空导航中的主导地位日益凸显。然而，GNSS依赖于地面站网络，易受信号遮挡、干扰和欺骗的影响，这在高精度和高可靠性的航空领域提出了挑战。因此，融合GNSS与天文导航的策略成为了研究的热点，旨在实现导航系统的互补性和自主性。天文导航利用恒星、行星和卫星等天体的位置信息来确定位置，具有自主、抗干扰和长期稳定的特点。例如，NASA的火星探测器“好奇号”就成功地使用了天文导航技术，实现了在无地面参照的火星表面的自主导航。在地球上，天文导航可以提供对GNSS的补充，特别是在海洋、极地和偏远地区。融合策略的关键在于如何有效地结合两种导航方式的优点。这通常涉及到误差建模、数据融合算法和实时校正技术。例如，可以利用GNSS的实时位置信息对天文导航的初始姿态进行快速校准，然后通过先进的滤波理论（如卡尔曼滤波）融合两种导航系统的测量数据，提高整体定位精度和鲁棒性^[6]。

此外，随着天基GNSS信号增强系统的部署，如

欧洲的EGNOS和美国的WAAS，这些系统可以提供对GNSS信号质量的监测和增强，进一步提升与天文导航融合后的性能。通过这种方式，即使在GNSS信号弱或不可用的情况下，航空器也能保持安全的导航能力。在实际应用中，开发融合导航的机载系统需要考虑硬件小型化、低功耗和实时处理能力。例如，波音公司的一项研究就展示了如何在商业飞机上集成微型天文导航传感器，与GNSS系统协同工作，以提高导航的可靠性。

3. 卫星导航辅助下的天文组合导航

在现代航空导航中，卫星导航辅助下的天文组合导航已经成为提高定位精度和可靠性的关键技术之一。传统的天文导航系统虽然能够提供全球覆盖，但受制于天体观测的误差，精度往往受限。而卫星导航系统，如GPS或GLONASS，虽然具有高更新率和高精度，但在信号受阻或干扰时，其性能会大幅下降。因此，将两者结合，可以实现优势互补，提供更高水平的导航服务。在卫星导航辅助下，天文导航的观测数据可以被用于修正卫星导航系统的误差模型。例如，通过天文观测获取的独立位置信息可以用于估计和消除卫星信号的多径效应或电离层延迟。此外，当卫星信号受到遮挡，如在高楼林立的城市峡谷或繁密的森林中，天文导航可以作为有效的备份，确保连续的导航能力。这种组合导航方法还增强了系统的鲁棒性。在极端天气条件下，如强烈的太阳风暴，卫星导航系统可能会受到干扰，而天文导航则不受此类天气现象的影响，能够继续提供稳定的导航服务。同时，天文导航的自主性和独立性使其不易受到人为干扰或攻击，这对于军事航空等高度敏感领域尤为重要。卫星导航辅助下的天文组合导航不仅提升了定位精度和可靠性，还通过增强系统的适应性和鲁棒性，为现代航空导航开辟了新的可能性。

五、典型应用案例

1. 航天任务中的天文组合导航实践

在航天任务中，天文组合导航技术的应用展现出了其独特的优势和重要性。例如，在“阿波罗”登月任务中，天文导航系统与地球上的跟踪站网络相结合，为飞船提供了远距离的自主定位能力，确保了在月球表面精确着陆。天文导航利用恒星或行星的位置作为参考，即使在地球导航信号无法到达的深空环境中，也能保持高精度的定位。近年来，随着深空探测任务的复杂性增加，如“朱诺”号木星探测器和“洞察”号火星探测器，天文组合导航的重要性更加凸显。此外，天文组合

导航技术在应对空间碎片挑战中也发挥了关键作用。例如，国际空间站可能需要快速规避未知的碎片，此时高响应、高精度的导航系统是安全操作的基石。通过集成先进的数据融合算法和机器学习技术，导航系统能够快速适应不断变化的环境条件，提高规避决策的可靠性和效率^[7]。

2. 商业航空中的应用

商业航空中，航空天文组合导航技术的应用日益显现其重要性。传统的航空导航系统，如GPS，虽然在全球范围内提供了广泛的服务，但其对地面基础设施的依赖以及易受干扰的特性，为航班安全和效率带来了挑战。例如，GPS信号可能受到地形遮挡、太阳耀斑或人为干扰，这在关键飞行阶段，如起飞、降落和飞行路径的改变时，可能会导致导航精度下降。航空天文组合导航技术通过融合多种导航源，如卫星导航、天文导航和惯性导航，可以显著提高导航的可靠性和自主性。例如，波音公司的一项研究显示，通过天文导航与GPS的融合，可以将导航误差降低几个数量级，从而提高飞行路径的精确度，减少燃油消耗，并增强在GPS信号不可用情况下的导航能力。

六、未来发展趋势与研究方向

1. 量子导航与天文导航的融合前景

随着导航技术的快速发展，量子导航与天文导航的融合前景展现出巨大的潜力。量子导航，利用量子纠缠和量子钟的高精度特性，有望在极端环境下提供前所未有的定位精度（如NASA预测的亚毫米级精度）。而天文导航，依赖于对天体位置的精确测量，已经在深空探测任务中证明了其可靠性，如“旅行者”计划中对航天器的远距离定位。两者的融合，可以互补各自的局限性，提高整体导航系统的稳定性和抗干扰能力，尤其在地球遮挡、GPS信号弱或被干扰的区域，如高纬度飞行、深空探索和军事应用中将发挥关键作用^[8]。例如，新型的导航系统，它在地面和卫星上部署量子传感器，与天文导航的天体数据库相结合。在地球遮挡导致GPS信号丢失时，天文导航可以接管，而量子传感器则能提供超精确的本地时间参考，增强导航解算的精度。通过先进的数据融合算法，可以实现导航信息的无缝切换和优化，确保在各种复杂条件下的连续、安全导航服务。预计到2030年，随着量子技术的商业化进程加速，融合导航系统可能会成为航空、航天和国防领域的标准配置，极大地提升全球定位、授时和安全性能。这不仅将改变我们

对地球表面和深空的探索方式，还将为全球通信网络、物联网设备和无人驾驶车辆提供更加可靠的位置服务，开启导航技术的新纪元^[9]。

2. 人工智能在导航误差修正中的作用

随着航空天文组合导航技术的不断发展，人工智能（AI）在导航误差修正中扮演着越来越重要的角色。传统的导航系统中，误差来源包括天体测量的不确定性、地球物理模型的简化以及环境干扰等，这些误差往往限制了导航的精度和可靠性。然而，AI技术的应用，如机器学习算法和数据融合策略，能够显著提高导航性能。例如，通过训练深度神经网络，AI可以学习并理解各种导航传感器（如星敏感器、GPS接收机）的输出特性，以及这些输出与实际位置之间的复杂关系。在实时操作中，AI系统能够自动识别并校正由于大气折射、卫星信号多径效应等导致的误差，从而提高定位精度。此外，AI还能实现对大量历史数据的智能分析，建立动态的误差修正模型。这些模型能够适应不断变化的环境条件，如大气压力、温度变化对导航信号的影响。通过与高精度的气象模型和地球动力学模型相结合，AI能够提供更准确的误差预测，进一步提升组合导航的性能。

3. 空间碎片监测与避碰中的导航技术需求

随着太空活动的日益频繁，空间碎片的数量急剧增加，对在轨航天器构成了严重的安全威胁。据国际电信联盟（ITU）估计，截至2020年，仅在地球低轨道就有超过50万块尺寸大于1cm的空间碎片。在这样的背景下，导航技术在空间碎片监测与避碰中的作用显得尤为重要。传统的导航系统在处理空间碎片问题时可能存在局限性，例如，无法实时提供高分辨率的碎片位置信息。因此，发展能够精确探测、预测碎片轨迹并实现快速避碰策略的导航技术成为一项紧迫任务。航空天文组合导航技术通过融合多种导航源，如GPS、GLONASS、伽利略等全球导航卫星系统（GNSS）数据，结合天文观测信息，可以显著提高对空间碎片动态的监测能力。例如，NASA的“碎片跟踪与避碰”（CARA）项目中，就利用了先进的导航技术来评估与碎片的潜在碰撞风险。通过构建高精度的轨道预测模型，结合多源数据，可以提前

数周预测可能的危险接近事件，从而为航天器制定安全的轨道调整计划。

结束语

综上所述，航空天文组合导航技术的发展研究是一个不断追求精确性、可靠性和自主性的过程。随着科技的进步和航空领域的不断发展，航空天文组合导航技术将在未来发挥更加重要的作用。它不仅能够提升航空器的导航精度和安全性，还能为航天任务的顺利实施提供有力保障。同时，在组合导航技术的研究和应用中，仍存在着诸多挑战和问题，需要科研人员不断进行深入研究和探索。只有这样，才能更好地推动航空天文组合导航技术的发展，为人类的航空事业作出更大的贡献。

参考文献

- [1] 黄国义, 张亚崇, 周嘉琦. 航空导航技术发展现状与展望[J]. 科技与创新, 2024, (22): 158-161.
- [2] 向煜. 民航空管通信导航监测设施设备的防雷技术初探[J]. 中国新通信, 2024, 26(07): 4-6.
- [3] 韩萍, 卢晓光, 刘海涛, 陈万通, 李冬霞. 卫星通信导航监视技术及其民航应用[J]. 卫星应用, 2023, (03): 23-30.
- [4] 王尔申, 宋远上, 徐嵩, 庞涛, 曲萍萍, 黄煜峰. 基于“北斗”的低空空域通航飞机导航监视技术研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51(05): 586-591.
- [5] 赵育良, 苏媛媛, 刘建东, 王淑娟. 基于PC104的某型航空相机综合检测系统[J]. 现代电子技术, 2019, 42(12): 7-10+15.
- [6] 蔡隆慧. 浅析航空飞行器导航技术[J]. 中国新通信, 2019, 21(11): 90-91.
- [7] 张文红. 民航卫星导航系统中的同步技术[J]. 电子技术与软件工程, 2018, (21): 20.
- [8] 成华强, 蒋国庆. 高精度VOR/ILS航空导航信号发生技术[J]. 电子质量, 2018, (08): 44-48+62.
- [9] 钱亚明. 民航无线电导航着陆技术及发展趋势[J]. 通讯世界, 2018, (07): 22-23.