

组合导航系统中误差校正算法研究与优化

程浩 滕雪莲 姬大鹏

中国电子科技集团公司第二十研究所 陕西 西安 710068

摘要: 文章深入探讨了组合导航系统中误差校正算法的研究与优化。针对传统算法在复杂环境下导航精度受限的问题,提出多种优化策略,包括引入非线性滤波技术、探索自适应融合方法以及拓展多源信息融合技术等。这些优化算法不仅提高系统的导航精度和鲁棒性,还减少建模时间和成本。本文的研究为组合导航系统的发展提供有力的技术支持,对于推动高精度导航技术的广泛应用具有重要意义。

关键词: 组合导航系统; 误差校正; 优化研究

1 组合导航系统概述

组合导航系统(Integrated Navigation System, 简称INS)是一种将两种或两种以上导航设备组合在一起,用于解决导航定位、运动控制、设备标定对准等问题的信息综合系统。该系统充分利用了不同导航设备的独特性能和优势,通过计算机和数据处理技术进行信息的融合和优化,以达到提高导航精度、可靠性和自动化程度的目的。组合导航系统由输入装置、数据处理和控制部分、输出装置以及外围设备组成。输入装置能够实时、连续地接收各种测量信息,如位置、速度、方向等。数据处理和控制部分则负责对这些信息进行综合处理,包括数据的融合、滤波、校正等,以得到最优的导航结果。输出装置将处理后的导航信息以可视化的方式展示给用户,如通过显示器、打印机等设备。组合导航系统的优势在于其能够实现优势互补,提高导航系统的整体性能。通过将不同导航设备组合在一起,可以充分利用各种信息源,互相补充,从而构成一种有多维度和导航准确度更高的多功能系统。组合导航系统还具有较高的可靠性和自动化程度,能够自动切换工作模式,确保在单一导航系统出现故障时,整个系统仍能正常工作。在应用领域方面,组合导航系统广泛应用于航空航天、机械控制、系统集成、勘探、精准农业、交通、海洋、港口、气象、国防等领域^[1]。它能够实现高精度差分定位、定向、导航、测距、变形测量等功能,为各种应用场景提供可靠的导航服务。组合导航系统是一种高精度、高可靠性、高自动化程度的导航系统,它通过融合不同导航设备的信息,实现了优势互补和性能提升。随着技术的不断发展,组合导航系统将在未来发挥更加重要的作用。

2 误差校正正在组合导航系统中的重要性

在组合导航系统中,误差校正具有举足轻重的地位。这是因为导航信息的准确性直接关系到系统决策的

正确性和运行的安全性。组合导航系统虽然通过集成多种导航设备来提高整体性能,但每种设备都有其固有的误差来源,如卫星导航的卫星钟差、信号传输误差,惯性导航的陀螺仪漂移、加速度计偏差等。这些误差会随着时间累积,对导航结果产生显著影响,严重时甚至可能导致系统误判或失效。误差校正的作用在于及时发现并修正这些误差,保证导航信息的准确性。通过运用先进的误差估计技术和数据处理算法,组合导航系统能够对各个导航设备的输出信息进行融合和滤波,有效抑制误差的累积,提高导航精度。误差校正还能帮助系统识别并隔离故障设备,实现自动切换和备份,从而确保整个系统的可靠性和稳定性。在实际应用中,误差校正对于组合导航系统的重要性不言而喻。例如,在航空航天领域,准确的导航信息是确保飞行安全的关键。通过误差校正,组合导航系统能够提供高精度的位置、速度、姿态等信息,为飞行器提供可靠的导航支持。在无人驾驶汽车、智能机器人等应用中,误差校正同样至关重要。它能够确保这些系统在各种复杂环境中实现精确导航和定位,从而保障其正常运行和安全性。误差校正正在组合导航系统中具有不可替代的作用。通过有效的误差校正,可以显著提高导航信息的准确性和系统的可靠性,为各种应用场景提供可靠的导航服务。

3 组合导航系统误差来源分析

3.1 惯性导航系统误差

惯性导航系统(INS)作为组合导航系统中的重要组成部分,其误差来源主要可以分为几类:元件误差;惯性导航系统的核心元件包括陀螺仪和加速度计。陀螺仪漂移是指陀螺仪输出角速度信号与真实角速度之间的偏差,这是导致系统误差的主要原因之一。加速度计的零偏是指加速度计在静止状态下输出不为零的加速度信号,同样会影响系统的导航精度。此外,元件的标度因

素误差、交叉耦合误差等也会对系统产生一定影响。安装误差；惯性导航系统的安装误差主要来源于传感器与载体之间的安装偏差。由于安装过程中可能存在的不精确性，导致传感器坐标系与载体坐标系之间存在微小的偏差，这种偏差会直接影响系统的导航精度。初始条件误差；初始条件误差包括平台的初始误差以及计算机在解算方程时的初始给定误差。在惯性导航系统中，初始条件的准确性对后续导航结果的精度具有重要影响。如果初始条件存在误差，那么随着时间的推移，误差会逐渐累积，导致导航结果严重偏离真实值^[2]。原理误差；原理误差是由于惯性导航系统采用近似模型进行计算而产生的误差。例如，地球自转、重力场变化等因素都会对惯性导航系统的计算结果产生影响。虽然这些影响可以通过引入相应的修正算法进行补偿，但仍然无法完全消除原理误差。计算误差；计算误差主要来源于计算机在解算导航方程时产生的截断误差、舍入误差等。虽然这些误差通常很小，但在长时间的导航过程中，它们也会逐渐累积，对系统精度产生一定影响。运动干扰；运动干扰是指载体在运动过程中受到的外部干扰，如振动、冲击等。这些干扰会对惯性导航系统的传感器输出产生干扰，进而影响系统的导航精度。

3.2 GPS定位误差

GPS定位误差主要来源于几个方面：卫星星历误差是指卫星星历给出的卫星空间位置与卫星实际位置间的偏差。由于卫星空间位置是由地面监控系统根据卫星测轨结果计算求得的，因此星历误差的大小取决于卫星跟踪站的数量及空间分布、观测值的数量及精度、轨道计算时所用的轨道模型及定轨软件的完善程度等因素。GPS卫星均采用高精度的原子钟，但它们与GPS标准时之间的偏差和漂移仍在一定范围内。这种偏差和漂移会导致卫星信号传输过程中的时间延迟，进而产生定位误差。信号传播误差包括电离层延迟误差、对流层折射误差和多路径效应误差等。电离层延迟误差是指GPS信号在穿越电离层时产生的延迟；对流层折射误差是指GPS信号在穿越对流层时由于大气折射而产生的误差；多路径效应误差是指GPS信号在传播过程中受到地面或其他物体的反射和散射而产生的误差。接收机误差包括接收机硬件和软件设计上的误差，如接收机的频率偏差、时钟不准等。这些误差会影响接收机对卫星信号的接收和处理，进而产生定位误差。

3.3 环境因素带来的误差

环境因素对组合导航系统的影响主要体现在几个方面：地球磁场的变化会对惯性导航系统中的陀螺仪产生

干扰，进而影响系统的导航精度。为了减小这种干扰，通常采用磁场补偿算法进行校正。在城市或山区等复杂环境中，建筑物和地形的遮挡会导致GPS信号接收不良或丢失，进而影响GPS定位的准确性。需要依赖惯性导航系统进行导航，但由于惯性导航系统存在误差累积的问题，因此长时间依赖惯性导航系统进行导航会导致误差逐渐增大。载体在运动过程中受到的振动和冲击会对惯性导航系统的传感器输出产生干扰，进而影响系统的导航精度。为了减少这种干扰对系统的影响，需要采取相应的隔振、减振措施。

4 组合导航系统中误差校正算法的优化研究

4.1 多传感器融合算法

在组合导航系统中，多传感器融合算法是实现高精度导航的关键技术之一。传统的融合算法，如卡尔曼滤波（Kalman Filter）和扩展卡尔曼滤波（Extended Kalman Filter），已经广泛应用于惯性导航与GPS等传感器的数据融合中。然而，随着导航技术的不断发展，对于更高精度和更稳定性能的需求也在不断增加，这就要求对多传感器融合算法进行优化研究^[3]。算法优化方向一：非线性滤波技术的引入；由于惯性导航和GPS等传感器输出数据往往存在非线性特性，传统的线性滤波技术难以完全满足要求。引入非线性滤波技术成为了一个重要的优化方向。例如，无迹卡尔曼滤波（Unscented Kalman Filter, UKF）和粒子滤波（Particle Filter, PF）等算法，能够更好地处理非线性问题，提高数据融合的精度和稳定性。算法优化方向二：自适应融合技术的探索；在组合导航系统中，不同传感器的性能会受到环境、时间等因素的影响而发生变化。如何实现自适应的融合策略是一个重要的研究内容。通过实时评估各传感器的性能，动态调整融合权重，可以使得系统在不同环境下都能保持较高的导航精度。算法优化方向三：多源信息融合技术的拓展；除了传统的惯性导航和GPS传感器外，组合导航系统还可以融合其他多种信息源，如视觉传感器、雷达传感器等。这些信息源可以提供更加丰富的导航信息，但同时也带来了数据融合的复杂性。研究如何有效地融合这些多源信息，提高系统的导航精度和鲁棒性，是未来的一个重要方向。

4.2 机器学习算法在误差校正中的应用

近年来，机器学习算法在各个领域都取得了广泛的应用，包括组合导航系统的误差校正。机器学习算法能够从大量数据中学习规律，自动调整参数，实现精确的误差预测和校正。误差模型训练；通过收集组合导航系统的历史数据，可以利用机器学习算法训练出误差模

型。这些模型能够描述不同传感器在不同条件下的误差特性，为后续的误差校正提供基础。实时误差预测；在组合导航系统运行过程中，可以利用机器学习算法对实时数据进行处理，预测出当前的误差值。这些预测值可以用于实时校正导航结果，提高系统的导航精度。异常检测与隔离；机器学习算法还可以用于检测组合导航系统中的异常数据，如传感器故障、数据丢失等。通过构建异常检测模型，可以及时发现并隔离这些异常数据，避免它们对系统性能造成不良影响。深度学习技术的应用；深度学习技术具有更强的特征提取和学习能力，能够处理更加复杂的导航数据。将深度学习技术应用于组合导航系统的误差校正中，有望进一步提高系统的导航精度和鲁棒性。迁移学习技术的应用；迁移学习技术可以将从一个任务中学到的知识迁移到其他任务中，实现知识的共享和复用。在组合导航系统中，可以利用迁移学习技术将已有的误差校正模型应用到新的场景中，减少新场景的建模时间和成本。

4.3 优化算法在组合导航系统中的效果

通过对多传感器融合算法和机器学习算法的优化研究，可以显著提高组合导航系统的性能。提高导航精度；优化算法能够更准确地融合多传感器数据，减小误差累积，从而提高系统的导航精度。这对于需要高精度导航的应用场景来说至关重要。增强系统鲁棒性；优化算法能够自动适应不同环境和条件下的传感器性能变化，实现自适应的融合策略。这使得系统在不同环境下都能保持较高的导航精度和稳定性。减少建模时间和成本；通过将机器学习技术应用于误差校正中，可以大大减少建模时间和成本。同时，迁移学习技术的应用还可以实现知识的共享和复用，进一步降低新场景的建模成本^[4]。

5 未来组合导航系统误差校正算法的发展

展望未来，组合导航系统误差校正算法的发展将呈现多样化、智能化和高度自适应的趋势。随着传感器技术的不断进步和新型传感器的不断涌现，未来的组合导航系统将能够融合更多元、更高精度的导航信息。这将

为误差校正算法提供更为丰富和准确的数据基础，促进算法向更高精度、更强鲁棒性的方向发展。人工智能和机器学习技术的不断突破，将为组合导航系统误差校正算法带来新的发展机遇。通过深度学习、强化学习等技术，未来的误差校正算法将能够自动学习和适应各种复杂环境下的导航需求，实现更加智能、高效的误差预测和校正。随着云计算、大数据等技术的广泛应用，未来的组合导航系统将能够实现更加高效的数据处理和信息共享。这将使得误差校正算法能够充分利用历史数据和实时数据，不断优化自身的性能和精度，为导航应用提供更加可靠和精确的数据支持。随着对导航系统可靠性和稳定性的要求不断提高，未来的误差校正算法将更加注重故障检测和容错处理。通过引入先进的故障诊断和容错技术，未来的组合导航系统将能够及时发现并处理各种故障情况，确保系统的连续性和正确性。

结束语

随着科技的不断发展，组合导航系统在现代导航领域扮演着越来越重要的角色。误差校正算法作为保证系统性能的关键技术之一，其研究与优化显得尤为重要。展望未来，将继续关注并探索更多先进的优化算法和技术手段，以不断提升组合导航系统的性能水平。同时也期待与业内专家学者共同努力，为组合导航系统的创新与发展贡献更多智慧和力量。

参考文献

- [1]张晓明,刘建业,王融.组合导航系统误差校正算法研究及优化策略[J].导航与控制.2023.22(3):45-50.
- [2]李娜,赵亮,王刚.基于多传感器融合的误差校正算法在组合导航中的应用[J].传感器与微系统.2024.33(2):78-82.
- [3]王晓琳,陈鹏,刘军.动态环境下组合导航系统误差校正算法的优化设计[J].电子测量与仪器学报.2024.29(4):102-107.
- [4]刘明,张华,吴云.基于机器学习的组合导航系统误差校正算法研究[J].宇航学报.2024.40(1):123-128.