

惯性捷联导航系统的标定和数据对准技术

李建明

天津航海仪器研究所 天津 300131

摘要: 惯性捷联导航系统是一种利用惯性传感器获取飞行器姿态和位置信息的重要导航系统。为了提高导航精度和稳定性,标定和数据对准技术成为关键。通过标定可以获得传感器的误差参数,而数据对准技术可以校正传感器的初始误差和动态误差,减小误差的累积效应。本文综述了惯性捷联导航系统的标定和数据对准技术的意义、方法、流程和未来发展。

关键词: 惯性捷联导航; 标定技术; 数据对准技术

1 惯性捷联导航系统概述

惯性捷联导航系统是一种集成了惯性导航和捷联导航技术的高精度导航系统。惯性导航是基于惯性传感器(加速度计和陀螺仪)测量航天器或车辆在空间中的加速度和角速度来确定其位置、姿态和速度的导航方法。然而,惯性导航存在时间累积误差问题,随着时间的推移,导航精度会逐渐降低。为了解决这个问题,捷联导航技术被引入。捷联导航通过将惯性导航系统与外部参考系统(如GPS)相结合,利用参考系统提供的位置、姿态和速度信息来校正惯性导航系统的误差,从而实现更高的导航精度和长时间的稳定性。惯性捷联导航系统在航空航天、船舶、无人驾驶汽车等领域具有广泛的应用^[1]。通过结合惯性传感器的高频数据采集和数据融合算法,惯性捷联导航系统能够提供精确的位置和姿态信息,并且对外部环境的依赖程度较低,适用于各种复杂的导航环境和场景。它在军事、航天、航海、航空等领域中起着至关重要的作用,为导航精度和安全性提供了关键支持。

2 惯性导航系统基本原理

惯性导航系统是一种利用惯性传感器测量物体在空间中的加速度和角速度,从而确定其位置、姿态和速度的导航方法。惯性导航系统的基本原理是基于牛顿第二定律和角动量守恒定律。惯性导航系统包含两个主要的惯性传感器:加速度计和陀螺仪。加速度计用于测量物体在三个方向上的加速度,而陀螺仪则用于测量物体绕三个轴的角速度。在惯性导航系统中,加速度计通过测量物体的加速度来计算其速度和位移。根据牛顿第二定律,物体的加速度与作用在物体上的力的大小和方向成正比。加速度计通过测量物体所受到的惯性力来推导出物体的加速度。惯性力是由于物体的运动而产生的,与物体的惯性质量和加速度有关。陀螺仪则用于测量物体绕三个轴的角速度。根据角

动量守恒定律,物体的角动量与物体绕某个轴旋转的角速度成正比。陀螺仪通过测量物体绕三个轴的角速度来计算物体的旋转角度和方向。将加速度计和陀螺仪的测量结果进行数据融合和计算,可以得到物体的位置、姿态和速度信息。在惯性导航系统中,这些信息可用于测量和估计物体的位置、航向、姿态角、线速度等导航参数^[2]。总之,惯性导航系统的基本原理是基于惯性传感器测量物体的加速度和角速度,通过数据融合和计算得到物体的位置、航向、姿态和速度等导航参数,为导航和定位应用提供准确的信息。

3 惯性捷联导航系统的标定技术

3.1 惯性传感器标定方法

惯性捷联导航系统的标定技术是确保惯性传感器能够准确测量物体的加速度和角速度的关键步骤。标定过程旨在获取惯性传感器的初始误差参数,以便在实际导航中对其测量值进行校正。以下是一些常用的惯性传感器标定方法:(1)静态标定方法:静态标定方法通过将惯性传感器放置在静止的环境中进行标定。在这种方法中,测量不受到外部因素的干扰,可以得到惯性传感器的静态误差参数。一种常见的静态标定方法是在不同的位置和方向上测量传感器的输出,以获取其零偏误差和比例误差。(2)动态标定方法:动态标定方法通过在已知运动状态下对惯性传感器进行标定。这种方法通常需要使用已知精度的平台或运动装置来产生已知的运动输入,并与惯性传感器的测量进行对比。常见的动态标定方法包括旋转运动、加速度运动和自旋运动等^[3]。(3)外部参考标定方法:外部参考标定方法利用其他精确度较高的导航传感器作为参考,对惯性传感器进行标定。例如,可以使用全球定位系统(GPS)测量位置和速度信息,然后与惯性传感器的测量结果进行对比。通过比较和校正,可以获得惯性传感器的误差参数。(4)在线

标定方法：在线标定方法是在实际导航过程中，通过使用已知的位置和速度信息来动态地校正惯性传感器的误差。这种方法可以实时更新惯性传感器的误差参数，提高导航精度和稳定性。需要注意的是，惯性传感器的标定方法应根据具体的应用和系统需求进行选择。标定过程应考虑随机误差、系统误差和非线性误差等因素，以最大程度地减小误差，并提高惯性捷联导航系统的精度和可靠性。

3.2 标定参数的确定与优化

惯性捷联导航系统的标定技术不仅包括确定惯性传感器的误差参数，还包括对标定参数的优化。标定参数的确定和优化是确保惯性捷联导航系统能够准确估计和校正误差的关键步骤。首先，标定参数的确定需要考虑惯性传感器的特性和系统的需求。不同类型的品牌的惯性传感器具有不同的误差特性，例如零偏、比例误差、温度漂移等。根据传感器的规格书和测试结果，确定需要标定的参数。此外，系统的导航需求和环境条件也会影响标定参数的选择，例如精度要求、运动状态和工作温度范围等。其次，标定参数的优化旨在最小化惯性传感器测量误差并提高导航精度。优化方法可以包括最小二乘法、卡尔曼滤波和粒子滤波等。这些方法通过将惯性传感器的测量值与已知的准确数据进行比较和调整，以最小化误差^[4]。通过迭代优化过程，可以得到较准确的标定参数。在标定参数的优化过程中，还需要考虑误差模型的选择和参数权重的设定。误差模型选择合适的数学模型来描述惯性传感器的误差特性。不同的模型包括线性模型、非线性模型和时变模型等。参数权重用于根据误差的相对重要性对不同的标定参数赋予不同的权重。通常，可以根据实际测量数据和精度要求来确定参数权重。最后，标定参数的优化需要进行系统的实验验证和评估。通过与高精度的参考系统进行对比，评估优化后的标定参数对导航精度的改进效果。如果导航精度仍不满足要求，可以进行进一步调整和优化。

4 惯性捷联导航系统的数据对准技术

4.1 数据对准的意义

惯性捷联导航系统是一种利用惯性传感器获取飞行器姿态和位置信息的导航系统。在飞行过程中，惯性传感器会受到多种误差的影响，从而导致导航系统的姿态和位置的估计误差逐渐积累。为了减小误差并提高导航精度，数据对准技术应运而生。

数据对准的意义主要体现在以下方面：首先，数据对准可以减小惯性传感器的初始误差。惯性传感器通常需要在特定的环境下进行初始标定，以减小其零偏、尺

度因子和非正交性等误差。通过数据对准，可以校正传感器的初始误差，提高导航系统的准确性和稳定性。其次，数据对准可以减小导航系统的误差累积效应。惯性传感器的输出会随时间逐渐偏差，导致导航系统的姿态和位置的估计误差不断积累。通过数据对准技术，可以校正传感器的动态误差，有效减小误差的累积效应，提高导航系统的长时间稳定性和精度。再次，数据对准可以增强导航系统的鲁棒性和可靠性。在飞行过程中，惯性传感器可能会受到外界环境的干扰，导致姿态和位置的估计误差。通过数据对准技术，可以对受到干扰的传感器数据进行修正，提高导航系统对外界干扰的鲁棒性和可靠性。惯性捷联导航系统的数据对准技术对于提高导航系统的精度、稳定性和可靠性具有重要意义^[1]。通过减小初始误差、降低误差累积效应和增强鲁棒性，数据对准技术为飞行器的导航提供了稳定、准确和可靠的解决方案，广泛应用于航空航天、船舶导航和无人驾驶等领域，并为相关行业的发展和应用提供了有力的支持。

4.2 数据对准的方法与流程

惯性捷联导航系统的数据对准技术是指通过一系列处理方法来校正惯性传感器的动态误差，以提高导航系统的精度和稳定性。（1）静态对准：该方法通过静止状态下收集的数据来对传感器的零偏和尺度因子进行校准。在静止状态下，通过比较传感器输出的实际数值与待测值进行对比，得到系统的误差参数。其中，零偏校准通常通过平均多次采集的零偏数据来估计，尺度因子校准则通过比较传感器输出与待测值之间的比例差异来估计。（2）动态对准：该方法通过运动状态下收集的数据来校准传感器的动态误差。动态对准主要分为姿态对准和位置对准。姿态对准通过比较惯性导航系统估计的姿态与参考姿态（如GPS、陀螺仪等）之间的差异来校准传感器，进而提高姿态估计的准确度。位置对准则通过比较惯性导航系统估计的位置与参考位置（如GPS）之间的差异来校准传感器，以提高位置估计的准确度^[2]。

（3）稳态对准：该方法通过飞行状态下的持续运动数据来校准传感器的误差。稳态对准可以更加精确地校准传感器，减小误差的累积效应。在稳态对准过程中，需要通过算法来实时校正传感器的误差参数，以提高导航系统的精度和稳定性。通过采集大量的数据，并运用适当的算法来处理和分析数据，可以得到惯性捷联导航系统的误差参数，并对传感器进行精确的校准，从而提高导航系统的性能。惯性捷联导航系统的数据对准过程主要包括静态对准、动态对准和稳态对准三个阶段，通过相应的方法和流程来校准传感器的误差，以提高导航系统

的精度、稳定性和可靠性。

4.3 实验设计与数据处理

在进行惯性捷联导航系统的数据对准技术研究时，实验设计和数据处理是非常关键的。首先，实验设计要考虑到数据采集的准确性和可重复性。需要选择合适的实验场地和设备，确保惯性传感器能够在真实环境中获得准确的数据。同时，要保证实验条件的稳定性，避免外界干扰对实验结果的影响。在设计实验过程中，可以考虑到多个工况、多次重复实验，以获取充分的数据样本。其次，数据处理过程需要考虑到准确性和可靠性。首先，需要对采集到的原始数据进行预处理，包括去除噪声和异常值，使数据质量得到保证。接着，根据数据对准的具体方法和流程，进行相应的计算和分析。常用的处理方法包括统计分析、滤波算法、数学模型拟合等。通过这些处理过程，可以得到传感器误差参数的估计结果。在数据处理过程中，还需要进行合理的误差评估和结果验证。可以采用交叉验证、均方根误差等指标来评估数据对准的效果^[3]。同时，将数据对准的结果与其它参考数据进行对比，以验证结果的准确性和可靠性。如果有必要，还可以进行误差分析，找出误差产生的原因，进一步优化数据处理流程。恰当的实验设计和合理的数据处理方法能够提供准确的实验数据，并通过数据分析和验证，得到可靠的数据对准结果。这将为惯性捷联导航系统的性能提升和应用提供重要的支持。

5 对惯性捷联导航系统未来发展的展望

对于惯性捷联导航系统的未来发展，有以下几个展望：第一，随着技术的不断进步，惯性传感器的精度和稳定性将得到进一步提高。目前，惯性传感器仍存在一定的漂移和精度限制，限制了惯性捷联导航系统的精度和长期稳定性。然而，随着新材料、新技术和新算法的引入，惯性传感器将会变得更加小型化、高精度并且价格更加实惠，从而进一步提高了导航系统的性能。第二，基于人工智能和深度学习的技术将广泛应用于惯性捷联导航系统中。人工智能和深度学习的快速发展为导

航系统的优化和改进提供了新的途径。通过使用机器学习算法，可以进一步优化传感器数据的处理和数据对准的过程，提高导航系统的自适应性和智能化。第三，与其他导航技术的融合将是未来发展的一个重要方向。惯性捷联导航系统与其他导航技术（如GPS、激光雷达、视觉导航等）的融合使用，可以充分发挥各技术的优势，提高导航系统的性能和可靠性^[4]。例如，将惯性传感器与视觉导航相结合，可以在GPS信号弱或室内环境缺乏GPS信号的情况下提供可靠的导航解决方案。第四，惯性捷联导航系统的应用领域也将不断拓展。随着航空航天、无人驾驶、智能交通等领域的不断发展，对导航系统精度要求的提高，惯性捷联导航系统将有更广泛的应用需求。例如，在飞行器导航中，惯性捷联导航系统可以实现更加准确和稳定的姿态和位置估计；在无人驾驶领域，惯性捷联导航系统可以提供更高精度和实时性的定位信息，提高驾驶系统的自主导航能力。

结束语

未来，随着技术的进步和应用的拓展，惯性捷联导航系统的标定和数据对准技术将会更加精确和智能化。这将为航空、无人驾驶、智能交通等领域的应用提供更好的支持，推动相关行业的发展。因此，对标定和数据对准技术的持续研究和改进具有重要的意义。

参考文献

- [1]张帆, 马强, 王军伟.惯性导航中的传感器标定与数据对准技术[J].光学精密工程, 2021, 29(9): 1922-1939.
- [2]姜盛, 李瑞芬, 徐宇航.基于自适应滤波的惯性导航系统数据对准研究[J].测绘与空间地理信息, 2021, 44(2): 96-102.
- [3]刘京, 李华安, 李卓.GPS/INS组合导航中的数据对准技术研究[J].电子器件, 2021, 44(1): 47-52.
- [4]程亚华, 胡恩友, 王奇军.惯性导航系统中误差辨识与标定方法研究[J].中国惯性技术学报, 2021, 29(3): 198-205.