

基于大数据聚类的飞行探测器复合跟踪控制系统设计

周怡伶¹, 陶金¹, 王建刚²

(1. 中国人民解放军海军士官学校, 安徽蚌埠 233000; 2. 中国人民解放军第91428部队, 浙江宁波 315400)

摘要: 飞行探测器会受到气象条件、磁场等环境干扰, 影响探测器的运动轨迹, 进而影响跟踪精度; 为实现对飞行探测器运动轨迹的实时跟踪与控制, 设计基于大数据聚类的飞行探测器复合跟踪控制系统; 在复合框架体系中, 设置主控芯片、伺服驱动设备两类应用结构, 并联合信标机元件, 调节微惯性传感器器件的实时连接状态, 完成飞行探测器复合跟踪控制系统的硬件设计; 完善大数据聚类算法, 根据跟踪路径节点标定结果, 定义具体的复合跟踪坐标系, 完成对飞行探测器复合跟踪的实时控制建模, 结合相关硬件, 实现基于大数据聚类的飞行探测器复合跟踪控制系统的设计; 实验结果表明, 所设计系统在跟踪1号、2号目标的跟踪准确率平均值分别为96.5%、97.0%, 对目标跟踪时延的平均值为0.9 ms, 可以保证基站主机对飞行探测器运动轨迹的实时控制能力。

关键词: 大数据聚类; 飞行探测器; 跟踪控制; 伺服驱动设备; 信标机; 微惯性传感器; 路径节点; 复合坐标系

Design of Composite Tracking Control System for Flight Detectors Based on Big Data Clustering

ZHOU Yiling¹, TAO Jin¹, WANG Jianguang²

(1. Naval Noncommissioned Officers School, the PLA, Bengbu 233000, China;
2. 91428 Unit, the PLA, Ningbo 3154000, China)

Abstract: Flight detectors are prone to environmental interferences such as meteorological conditions and magnetic fields, which affects their trajectory and subsequently decreases the tracking accuracy. In order to realize the real-time tracking and control of flight detectors' trajectory, a composite tracking control system of flight detectors based on big data clustering is designed. In the composite framework system, two types of application structures are set up, namely the main control chip and servo drive device, and combined with beacon machine components, the real-time connection status of micro inertial sensor devices is adjusted to complete the hardware design of the flight detector composite tracking control system. The big data clustering algorithm is perfected to define the specific composite tracking coordinate system according to the calibration results of tracking path nodes, complete the real-time control modeling of composite tracking for flight detectors, and realize the design of composite tracking control system for flight detectors based on big data clustering combined with relevant application components. Experimental results show that the average tracking accuracy of the designed system for tracking targets 1 and 2 is 96.5% and 97.0%, respectively, with an average tracking delay for targets of 0.9 ms, which can ensure the real-time control ability of the base station host on the motion trajectory of flight detectors.

Keywords: big data clustering; flight probe; tracking control; servo drive equipment; beacon machine; micro inertial sensor; path node; composite coordinate system

0 引言

探测器是负责接收地物电磁辐射信号的物理元件, 能够在实现能量转换的同时, 测量并记录所接收到电磁辐射信号的具体能量水平。探测器是飞行运动系统中关键的组成部分, 作为整个系统的前端部件, 其应用能力直接决定了飞行设备的稳定性与灵敏性^[1]。探测器核心部件由传感器设备、信号处理结构两部分组成, 前者作为核心应用元件, 负责采集与飞行设备相关的实时运动数据。后者可将

采集所得的运动数据转换成稳定的传输信号。对于无人机等飞行类的运动设备而言, 探测器元件打破了复杂地理环境对数据传输的限制作用, 能够满足运动数据的多元化传输需求, 特别是在飞行器运动范围相对较大的情况下, 应用探测器采集运动数据既可以实现对电磁辐射信号的精准识别, 也不会跟踪运动对象的过程中, 出现数据信息错传、误传的情况。

本文设计的飞行探测器在空间探测任务中起着至关重要的作用。为了实现精确的目标探测和定位, 需要设计一

收稿日期: 2023-07-21; 修回日期: 2023-08-30。

作者简介: 周怡伶(1997-), 女, 大学本科, 助教。

引用格式: 周怡伶, 陶金, 王建刚. 基于大数据聚类的飞行探测器复合跟踪控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(8): 161-167, 180.

个复合跟踪控制系统, 以确保探测器能够按照预定轨迹运动并实时调整其姿态和位置, 以适应探测任务的需求。复合跟踪控制系统的设计需要解决以下问题: 首先, 需要确定合适的轨迹节点取样参数, 以实现探测器运动轨迹的准确采样。其次, 需要根据采样数据计算出轨迹的标定节点取样均值, 以描述整体运动特征。然后, 需要通过实时标定向量实现控制器与轨迹节点之间的准确对齐。最后, 利用控制参数和路径节点实时控制特征, 实现对飞行探测器的精确控制和调节。此外, 飞行探测器复合跟踪控制系统的设计也需要考虑环境因素、传感器精度等因素的影响。在深空探测或复杂环境中, 可能存在干扰、噪声和不确定性, 这些因素都会对控制系统的性能造成影响。因此, 针对飞行探测器的复合跟踪控制系统设计是一个具有挑战性的问题, 需要综合考虑多个因素, 并采用合适的数学建模和控制算法来实现目标的精确探测和定位。

为实现对飞行探测器运动轨迹的有效控制, 曾子元等人^[2]研究了基于扩张状态观测器的飞行控制系统, 分别从非线性、不确定性两个角度, 分析飞行探测器的实时运动行为, 考虑了欠驱动情况下的飞行器运动行为, 以动态扰动思想为基础, 对观测器行进状态进行建模, 又提取关键运动节点处的飞行器运动行为, 并对其精度进行补偿处理, 从而定义具体的运动跟踪与控制方案。马胡伟等人^[3]研究基于 RTX64 的控制系统, 利用 Windows 7+RTX64 平台, 开发控制软件, 通过内存共享的方式, 促进运动数据的快速传输, 可以在大量飞行探测器运动数据中, 快速确定目标轨迹节点所处位置, 从而便于基站主机对其进行捕获与提取处理。然而在飞行探测器运动轨迹相对较长的情况下, 上述两类系统的应用都不足以完全解决跟踪目标丢失的问题, 故而无法达到实际应用所需的精确性控制效果。

聚类是数据挖掘的基本概念, 能够按照某个特定标准, 将一个完整的数据集分割成多个不同的簇或类状结构。在实施挖掘处理的过程中, 网络主机将同一类数据对象尽可能聚集到一起、将不同类数据对象尽量分离开来, 从而在放大同一簇内数据对象相似性的同时, 凸显出非同簇数据对象的差异性, 使得网络主机能够对聚类信息进行准确区分^[4]。利用大数据聚类算法的应用优势, 设计一种新型的飞行探测器复合跟踪控制系统, 并通过对比实验, 验证该系统在解决跟踪目标丢失问题方面的实际应用能力。

1 飞行探测器复合跟踪控制系统硬件设计

飞行探测器复合跟踪控制系统的硬件包括主控芯片、伺服驱动设备、信标机等多个应用结构, 本章节针对其具体设计方法展开研究。

1.1 跟踪控制系统的复合框架

复合框架是飞行探测器复合跟踪控制系统的基本架构模型, 同时为主控芯片、伺服驱动设备、跟踪信标机、微惯性传感器提供了接入端口。飞行探测器复合跟踪控制系统是收发一体型的应用系统, 可以在电动机部件的配合下, 调度下级负载结构, 系统运行过程中, 不会产生额外的传

输信号, 所以即便是在主控芯片、伺服驱动设备、跟踪信标机、微惯性传感器部件间信息传输较为频繁的情况下, 框架体系对于运动数据样本的处理与识别能力也不会受到影响^[5]。系统核心控制主机直接调度主控芯片元件, 由于 GPS/北斗天线始终保持稳定连接状态, 所以数据信号的传输不会改变芯片装置的运行能力, 即便飞行探测器运动行为不断变化, 只要保证天线结构的实时连接, 控制系统复合框架的稳定连接形式就不会受到影响。在复合框架中, 主控芯片、伺服驱动设备、跟踪信标机、微惯性传感器之间的连接关系不会随着数据对象传输行为的变化而发生改变, 因此在系统运行过程中, 基站主机始终能够对飞行探测器运动轨迹进行精准跟踪^[6]。完整的跟踪控制系统复合框架模型如图 1 所示。

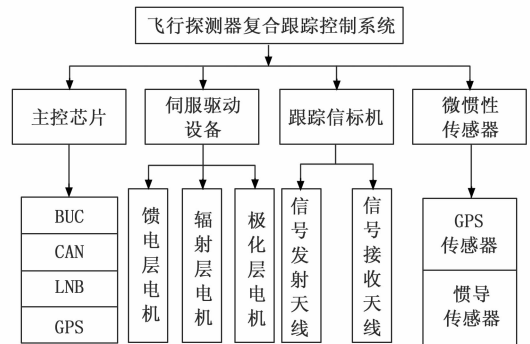


图 1 跟踪控制系统的复合框架模型

复合框架中, 伺服驱动设备、信标机等下级部件结构的连接等级相同, 所以基站主机采集飞行探测器运动轨迹时, 数据对象在各个部件结构内的传输速率并无明显差异性。

1.2 主控芯片

主控芯片是飞行探测器复合跟踪控制系统的核心部件结构, 与电源端直接相连, 可以在 QSPI Flash 设备、复合网关控制结构的配合下, 更改飞行探测器运动轨迹数据在动态存储器中的编码形式, 从而使得基站主机能够准确感知主控芯片元件的实时运行状态。主控芯片中心部件单元由 BUC、CAN、LNB、GPS 四类端点结构组成。其中, BUC 端点作为主控芯片核心部分与 QSPI Flash 设备的连接端口, 可以直接调取基站主机中存储的飞行探测器运动轨迹数据, 并可以按照大数据聚类原则, 对所得信息参量进行初步编码^[7]。CAN 端点与控制系统外接电源结构对接, 负责接收处于传输状态的电量信号, 并可以按照实际传输需求, 将这些信号对象整合成多个完全独立的传输部分。LNB 端点负责记录飞行探测器的实时运动行为, 并可以在完整的运动轨迹中提取节点对象, 以便于基站主机能够准确记录探测器元件的飞行状态。GPS 端点与联合测试装置对接, 二者连接关系决定了主控芯片对于飞行探测器复合运动行为的控制能力^[8]。具体的复合跟踪控制系统主控芯片连接结构如图 2 所示。

复合网关控制结构与主控芯片中心部件保持双向连接

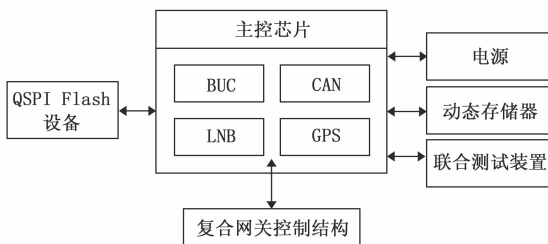


图 2 复合跟踪控制系统主控芯片的结构简图

关系, 飞行探测器运动轨迹数据在两类应用结构间自由传输, 从而使得动态存储器元件能够在探测器飞行过程中提取大量的运动数据对象, 以满足伺服驱动设备、信标机等下级部件结构的实时运行需求。

1.3 探测器伺服驱动设备

飞行探测器复合跟踪控制系统的探测器伺服驱动设备由伺服电机、伺服驱动元件两部分组成, 如图 3、图 4 所示。

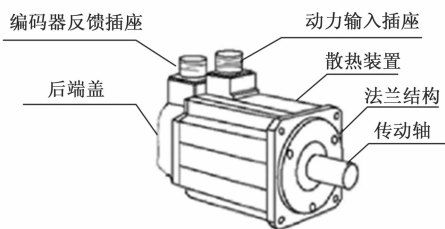


图 3 探测器伺服电机



图 4 探测器伺服驱动元件

1) 探测器伺服电机: 跟踪控制系统的外接电源经由伺服电机动输入插座将电力信号传输至飞行探测器内部, 在此传输过程中, 必然会出现一定的电量损失行为, 这也是散热装置实时温度始终高于室温水平的主要原因^[9]。法兰结构对传动轴的转动行为起到固定作用, 后者每转动一圈就表示飞行探测器在运动轨迹中又前进了一步, 轴体转动会导致伺服电机连接位置发生改变, 而在法兰结构的固定作用下, 这种变化效果的行为幅度极小, 基站主机在聚类处理飞行探测器运动数据时, 可以直接忽略这种变动行为。

2) 探测器伺服驱动元件: 双绞线穿过安装孔将主控芯片与探测器伺服驱动设备连接起来, 飞行探测器运行过程

中, 制动电阻器所负载的电压水平不断升高, 当其数值水平接近主控芯片的额定电压时, 动力指示灯亮起, 基站主机按照大数据聚类原则汇总编码反馈端口输出的数据信息对象, 并可将完成整合后的数据包文件传输至控制系统的数据库主机之中^[10]。信号输入端口接收的电力信号总量大于探测器伺服驱动元件所能消耗的电力信号总量, 剩余电量经过接地端子输出至控制系统外部, 这也是探测器伺服驱动设备在控制系统主机跟踪飞行探测器运动行为过程中并不会表现出带电状态的主要原因。

1.4 飞行探测器跟踪信标机

飞行探测器跟踪信标机负责处理控制系统中的运动轨迹数据样本, 使用频率高、稳定性强、稳定速度快的温补晶振设备完成对轨迹节点的识别, 其运行为配合控制系统中的主控芯片与探测器伺服驱动设备。相较于其他类型的部件结构, 信标机具有正向、负向两种执行权限。正向执行状态下, 外接电源向信标机提供 +15~+24 V 的电量信号, RS232 伺服类接口完全打开, 控制系统输出电压保持在 0~+10 V 之间; 负向执行状态下, 外接电源向信标机提供 -24~-15 V 的电量信号, RS232 伺服类接口断开, 而 RS355 远程控制类接口完全打开, 控制系统输出电压保持在 -10~0 V 之间^[11-12]。对于飞行探测器跟踪信标机相关运行参数的设置参考表 1。

表 1 飞行探测器跟踪信标机参数设置

参数描述	参数取值
电源供电	DC 式供电: +15~+24 V; -24~-15 V
串口 1	RS232 伺服类接口
串口 2	RS355 远程控制类接口
电压输出范围	-10 V~0 或 0~+10 V
电压斜率	20m~400 mV/dB
复合运动信号识别灵敏度	≥0.1 dB
飞行探测器实测信噪比	≤50 dBc/Hz
控制信号输入功率范围	-150~-25 dBm
跟踪行为捕获带宽	200 kHz
跟踪信号单位控制时间	≤20 ms
信号频率稳定度	≤±1 ppm
跟踪机制	极限值跟踪
跟踪信号的频率步进比	1 kHz

飞行探测器运动过程中, 信标机必须时刻记录轨迹节点所处位置, 这就表示为实现跟踪控制系统的稳定运行, RS232 伺服类接口、RS355 远程控制类接口至少应有一个串口部件处于完全闭合的连接状态。

1.5 控制系统的微惯性传感器器件

飞行探测器复合跟踪控制系统在工作时, 必须要时刻将飞行设备姿态的扰动进行隔离, 在这个过程中, 惯性传感器器件发挥着至关重要的作用。惯性传感器器件由 MPU9250 传感装置、陀螺、加速度计、磁力计等多个元件结构组成。其中, MPU9250 传感装置负责采集与飞行探测器运动行为相关的数据信息, 并可以按照大数据聚类原则,

将所得数据样本整合成控制系统所需格式。加速度计、陀螺连接于动力连接杆两端，前者记录飞行探测器的加速度行为，后者提供了跟踪信标机元件运行所需的数据信息参量^[13]。磁力计负载于连接架内部，由左、右两部分组成，左侧磁力计记录飞行探测器的左侧转向行为，右侧磁力计记录飞行探测器的右侧转向行为。顶梁架将磁力计连接架支撑起来，中部固定角阀将磁力计元件分为上、下两部分，以避免控制系统运行过程中，出现磁力计错误偏转的情况。完整的微惯性传感器器件连接结构如图 5 所示。

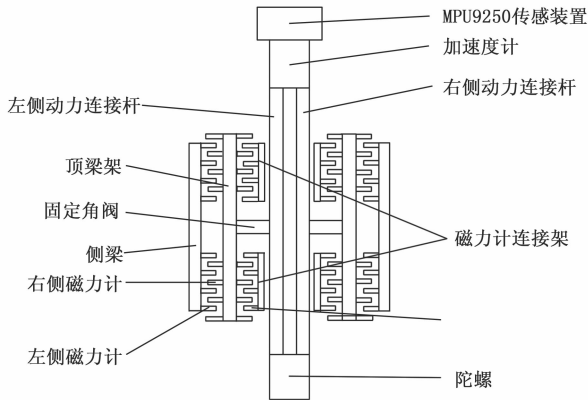


图 5 微惯性传感器器件的连接结构

侧梁与动力连接杆之间的距离应略大于两个测力计装置的水平放置长度，若间隔距离过小，会对测力计装置的磁性能力造成影响，从而使得 MPU9250 传感装置无法准确采集飞行探测器的运动数据；若间隔距离过大，超过 4 个测力计装置的水平放置长度，则会延长运动数据在微惯性传感器器件内的传输时长，从而使得控制主机无法及时捕获跟踪目标^[14]。

2 基于大数据聚类的飞行探测器跟踪路径标定

在核心硬件的配合下，联合大数据聚类算法，并按照大数据汇聚预处理、综合层次聚类算法（BIRCH, balanced iterative reducing and clustering using hierarchies）的处理流程，实现对飞行探测器跟踪路径的标定。

2.1 大数据聚类算法完善

2.1.1 大数据汇聚预处理

面对大量堆积的飞行探测器运动数据，受到存储及计算能力的制约，系统主机无法一次性将所有数据成功聚类起来，或者完成聚类指令需要耗费大量的时间。为了解决上述问题，在聚类飞行探测器运动数据之前，应针对个别大数据对象实施汇聚预处理^[15-16]。所谓大数据汇聚就是指将相似的飞行探测器运动数据融合在一起，而预处理则是针对数据包文件所进行的加工，一般来说，飞行探测器运动轨迹内的标记节点越多，控制系统主机需要预处理的大数据汇聚对象就越多。

设 χ 表示飞行探测器运动轨迹内的大数据节点标记对象，其计算公式如下：

$$\chi = \delta \left[\left(\frac{|\Delta M|}{\dot{m}} \right)^2 + \beta \frac{1}{\alpha} \right] \quad (1)$$

δ 为飞行探测器运动数据识别参数， ΔM 为飞行探测器运动数据的单位累积量， \dot{m} 为基于聚类条件的探测器运动数据识别特征，且 $\dot{m} \neq 0$ 的不等式取值条件恒成立， β 为大数据对象的融合度判别系数， α 为飞行探测器运动轨迹内的数据对象预标记向量。

利用公式 (1)，可将大数据汇聚预处理表达式定义为：

$$B = \chi \cdot b^{-\epsilon} < \bar{\varphi} > \quad (2)$$

其中： b 为飞行探测器运动大数据对象的实时汇聚向量， ϵ 为运动轨迹内的大数据对象取样参数， φ_{\max} 为飞行探测器运动大数据对象预梳理系数的最大取值， φ_{\min} 为大数据对象预梳理系数的最小取值。完成汇聚预处理只能初步去除系统控制主机取样所得的非关键运动数据对象，为完善大数据聚类算法，还需在此基础上，确定聚类项参数的取值范围。

2.1.2 BIRCH 聚类参数计算

BIRCH 聚类是一种层次化聚类方法，不要求大数据取值对象之间的相关性，在已知汇聚预处理条件的情况下，只要飞行探测器运动数据处于同一轨迹曲线之内，就可以根据 BIRCH 参数指标的数值水平，完成对大数据对象的聚类处理。大数据聚类算法要求，在处理飞行探测器运动数据的过程中，只要控制主机掌握 BIRCH 聚类参数的取值范围，就可以将待跟踪轨迹节点分成几个完全独立的部分，一般来说，在实数范围内，BIRCH 聚类参数的取值包括 $(-\infty, -1)$ 、 $(-1, 0)$ 、 $(0, 1)$ 、 $(1, +\infty)$ 共 4 个数值区间^[17-18]。

设 φ 表示预处理条件下的飞行探测器运动大数据聚类系数， γ 表示基于 BIRCH 指数的大数据样本标记参数， \vec{C} 表示飞行探测器运动大数据的实时传输向量，联立上述物理量，可将飞行探测器运动大数据的 BIRCH 聚类参数计算式表示为：

$$v = \frac{\varphi \gamma}{C} \quad (3)$$

在公式 (3) 的基础上，规定 λ 表示大数据对象的聚类阈值， ι 、 κ 表示两个随机选取的飞行探测器运动大数据编码向量， \tilde{a}_ι 表示基于参数 ι 的大数据对象聚类特征， \tilde{a}_κ 表示基于参数 κ 的大数据对象聚类特征，联立公式 (2)，推导大数据聚类算法表达式如下：

$$L = \sqrt{\frac{\sum_{\lambda=1}^{+\infty} (\tilde{a}_\iota + \tilde{a}_\kappa)^2}{B \cdot v}} \quad (4)$$

大数据聚类算法要求飞行探测器运动数据的取值应保持唯一性特征，所以在计算 BIRCH 聚类参数的过程中，与同一大数据对象对应的参数计算结果始终属于同一个数值区间。

2.2 飞行探测器跟踪路径节点标定

飞行探测器跟踪路径节点标定就是按照大数据聚类算法，完成对跟踪控制节点的统一标记，在节点数量较多的

情况下, 统一的标记原则能够缩短系统主机对飞行探测器运动数据的筛选时长, 从而加快系统的运行效率。在同一路径曲线内, 为保证符合跟踪控制指令的执行准确性, 系统主机根据大数据聚类原则同时定义两个路径节点作为标记对象, 且这两个节点的空间坐标与平面坐标都不相同^[19]。当飞行探测器保持水平或竖直运动状态时, 系统主机利用二维坐标空间就可以完成对跟踪路径节点的标定, 此时仅需参考两个节点对象的空间坐标; 若同一运动状态下, 飞行探测器的水平、竖直所处区域同时发生变化, 系统主机就必须利用三维空间坐标才可以完成对跟踪路径节点的标定^[20]。

以空间坐标系为例, 联立公式 (4) 所示的大数据聚类算法表达式, 推导飞行探测器跟踪路径节点标定条件为:

$$A = \frac{\eta}{L} \times (\sqrt{l_1^2 + l_2^2} + \sqrt{k_1^2 + k_2^2} + \sqrt{j_1^2 + j_2^2}) \quad (5)$$

式中, l_1, l_2 表示两个节点对象的水平位置标记参数, k_1, k_2 表示两个节点对象的竖直位置标记参数, j_1, j_2 表示两个节点对象的空间位置标记参数, η 表示基于大数据聚类算法的飞行探测器复合跟踪节点筛选向量。如果飞行探测器运动行为在较短时间内极速变化, 依靠所选取节点对象标定跟踪路径节点有可能导致精准性下降的问题, 则可以记录整条轨迹曲线, 并计算所有路径节点的平均值, 以用于计算得出准确的节点标定结果。

3 探测器复合跟踪的实时控制

根据跟踪路径标定结果, 定义复合跟踪坐标系, 并以此为基础, 实现对飞行探测器的实时控制建模, 再联合相关硬件应用结构, 完成基于大数据聚类的飞行探测器复合跟踪控制系统的设计。

3.1 复合跟踪坐标系定义

控制系统根据复合跟踪坐标系研究飞行探测器与基站主机之间的位置关系。复合跟踪坐标系的定义参考大数据聚类算法, 假设运动区域是一个平面, 忽略探测器旋转曲率的影响, 规定水平坐标轴、竖直坐标轴、空间坐标轴始终保持绝对垂直的关系, 且轨迹节点完全分布在由 3 个坐标轴组成的运动区域内^[21-22]。

规定 s_x 表示飞行探测器运动行为在水平轴方向上的数值分量, \vec{d} 表示水平轴方向上的运动基向量, θ_x 表示标定轨迹节点与水平坐标轴之间的物理夹角, s_y 表示飞行探测器运动行为在竖直轴方向上的数值分量, \vec{g} 表示竖直轴方向上的运动基向量, θ_y 表示标定轨迹节点与竖直坐标轴之间的物理夹角, s_z 表示飞行探测器运动行为在空间轴方向上的数值分量, \vec{q} 表示空间轴方向上的运动基向量, θ_z 表示标定轨迹节点与空间轴之间的物理夹角, 联立上述物理量, 可将飞行探测器复合跟踪坐标系定义条件表示为:

$$\begin{cases} h_x = s_x \cdot \vec{d} \cdot \sin\theta_x \\ h_y = s_y \cdot \vec{g} \cdot \cos\theta_y \\ h_z = s_z \cdot \frac{\vec{q}}{\tan\theta_z} \end{cases} \quad (6)$$

h_x 表示水平轴方向上的坐标定义项, h_y 表示竖直轴方向上的坐标定义项, h_z 表示空间轴方向上的坐标定义项。为满足系统主机对飞行探测器运动轨迹的实时跟踪与控制需求, 每一个标定节点最多只能有一个坐标定义项参数的取值为零。

3.2 飞行探测器复合跟踪的实时控制建模

飞行探测器复合跟踪的实时控制建模就是按照大数据聚类算法, 定义复合跟踪控制系统的执行原则。基站主机对飞行探测器运动轨迹的控制必须时刻掌握轨迹节点所处位置, 一方面能够保证复合跟踪坐标系与标定轨迹节点之间的对应关系, 另一方面也可以使信标机准确记录标定轨迹节点的位置坐标^[23-24]。

e 表示基于大数据聚类的飞行探测器运动轨迹复合判定参数, 其计算式如下:

$$e = (h_x \cdot h_y \cdot h_z)^{-1} \frac{|\Delta D|}{A} \quad (7)$$

ΔD 表示由跟踪坐标轴围成的运动轨迹区域的单位面积。

飞行探测器的运动轨迹节点需要按照一定的时间间隔进行采样, 以保证对其位置和速度等状态的准确获取。复合跟踪轨迹内的标定节点需要根据采样的轨迹节点数据进行计算, 以得到一组标定节点的平均值, 用以表示轨迹的整体运动特征。轨迹节点的实时标定向量是根据探测器当前的状态和目标轨迹节点的期望位置等信息计算得出的。该向量可以用来描述探测器与轨迹节点之间的偏差, 从而用于实现控制。根据上述分析, 推导飞行探测器复合跟踪的实时控制建模表达式如下:

$$F = f\bar{W} + \frac{1}{\mu}e^2 + \nu R \quad (8)$$

其中: f 为飞行探测器运动轨迹节点的实时取样参数, \bar{W} 为复合跟踪轨迹内的标定节点取样均值, μ 为轨迹节点的实时标定向量, ν 为飞行探测器复合跟踪轨迹的控制参数, R 为跟踪轨迹内的路径节点实时控制特征。实时建模条件决定了系统主机对飞行探测器复合轨迹的跟踪与控制能力, 为保障基于大数据聚类的飞行探测器复合跟踪控制系统的稳定运行, 约束该项物理量的取值极为重要。

4 实验分析

本次实验根据目标跟踪的准确性, 分析基站主机对飞行探测器运动轨迹的控制能力, 选择基于大数据聚类的飞行探测器复合跟踪控制系统、基于扩张状态观测器的飞行控制系统、基于 RTX64 的控制系统 3 种不同方法进行实验。

4.1 实验原理描述

利用 Linux 软件模拟图 1 所示的飞行探测器运动轨迹, 将基站主机放置在初始运动位置处, 在轨迹路线中, 随机选择 1 号、2 号两个运动目标, 并分析实验过程中, 在不同控制系统作用下, 飞行探测器对这两个目标对象的跟踪准确率, 根据具体分析情况, 确定基站主机对飞行探测器运

动轨迹的控制能力。飞行探测器复合跟踪原理如图 6 所示。

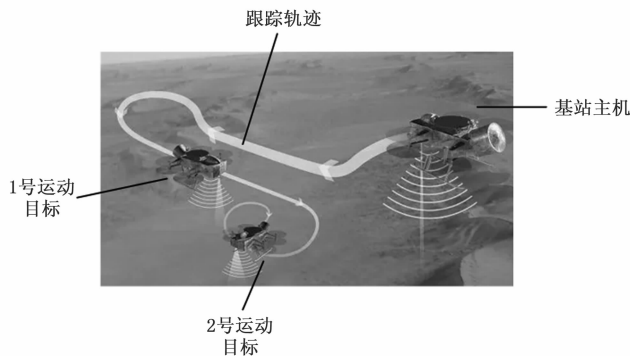


图 6 飞行探测器复合跟踪原理

4.2 实验条件与参数

本次实验的实验条件如下：

- 1) 飞行探测器：使用具备姿态和位置控制能力的飞行探测器作为实验对象。
- 2) 复合框架体系：搭建包含主控芯片、运动行为监测设备和电动机的复合跟踪控制系统。
- 3) 微惯性传感器器件：选用高精度的微惯性传感器器件，能够提供准确的姿态和位置信息。

根据上述实验条件设计本次实验所选设备元件的具体型号如表 2 所示。

表 2 实验设备选型

项目	设备原则	设备型号
1	主控芯片	AMD Ryzen 7 5800X
2	飞行探测器	BL-UVSS-I 移动式飞行装置
3	运动行为监测设备	SSI-CD2A 监测设备
4	触发器元件	CD-7H
5	电动机	Y2-801-4-0 电力装置
6	遥控装置	5840-31ZY 控制元件
7	微惯性传感器器件	MPU-9250 综合型惯性测量单元

综合型惯性测量单元为保证实验结果的准确性，每测得一组实验结果，都要对基站主机进行复原处理，待其各项数值归零后，才可以开始下一次实验。

关键参数如下：

- 1) 主控芯片时钟频率：3.8 GHz；
- 2) 微惯性传感器数据输出速率：100 Hz；
- 3) 加速度计量程： ± 8 g；
- 4) 信标机传输功率： $-10 \sim +20$ dBm。

4.3 步骤与流程

丢失跟踪目标影响基站主机对飞行探测器运动轨迹的控制效果，在不考虑其他干扰条件的情况下，如果目标跟踪准确率较高，就表示主机元件对飞行探测器运动轨迹的跟踪与控制能力较强。

本次实验的具体实验流程如下：

- 1) 数据采集：在实验中，需要准备合适的数据集，包

括飞行探测器的运动轨迹、姿态信息、传感器数据等。

2) 数据预处理和特征提取：对采集的数据 B 进行预处理，包括去噪、滤波、对齐等操作，以消除干扰和提高数据质量。然后，从预处理的数据中提取出与飞行探测器复合跟踪相关的特征，例如位置、速度、加速度等。

3) 大数据聚类算法：根据跟踪路径节点的标定结果 $l_1, l_2, k_1, k_2, j_1, j_2$ ，使用大数据聚类算法对数据进行处理和分析。聚类算法将相似的数据点聚集在一起，形成不同的簇。通过分析聚类结果，可以识别出不同的探测器运动模式和轨迹特征。

4) 定义复合跟踪坐标系：根据聚类结果和飞行探测器的运动特征，定义具体的复合跟踪坐标系 (h_x, h_y, h_z) 。该坐标系将作为后续实时控制建模的基础，用于描述飞行探测器相对于跟踪路径节点的姿态和位置。

5) 实时控制建模：结合相关硬件设计和定义的复合跟踪坐标系，实时控制构建模型 F 。根据飞行探测器当前的状态和预定的控制策略，计算得出实时的控制参数 v ，并调整飞行探测器的姿态和位置，以实现复合跟踪轨迹的精确控制。

6) 获取实验结果：将基于大数据聚类的飞行探测器复合跟踪控制系统的执行程序输入基站主机之中，记录实验过程中，探测器对 1 号、2 号运动目标位置的跟踪情况，所得结果记为实验组数据。将基于扩张状态观测器的飞行控制系统的执行程序输入基站主机之中，记录实验过程中，探测器对 1 号、2 号运动目标位置的跟踪情况，所得结果记为对照组 1 数据。将基于 RTX64 的控制系统的执行程序输入基站主机之中，记录实验过程中，探测器对 1 号、2 号运动目标位置的跟踪情况，所得结果记为对照组 2 数据。

统计所得实验数据，总结实验规律。

4.4 实验结果

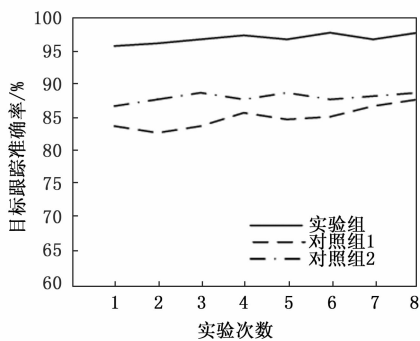
实验组、对照组 1、对照组 2 的具体实验情况如图 7 所示。

分析图 7 可知，在实验组控制系统作用下，飞行探测器在跟踪 1 号、2 号目标运动位置时，目标跟踪准确率平均值分别为 96.5%、97.0%；在对照组 1 控制系统作用下，飞行探测器在跟踪 1 号、2 号目标运动位置时，目标跟踪准确率平均值分别为 86.0%、90.5%；在对照组 2 控制系统作用下，飞行探测器在跟踪 1 号、2 号目标运动位置时，目标跟踪准确率平均值分别为 87.5%、85.5%。

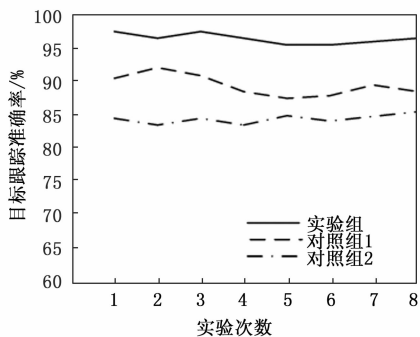
在此基础上测试 3 种方法对 1 号运动目标跟踪的时延，即跟踪数据从发送端到接收端所需的时间。实验结果如图 8 所示。

分析图 8 可知，实验组控制系统对目标跟踪时延的平均值为 0.9 ms，对照组 1 控制系统对目标跟踪时延的平均值为 7.5 ms，实验组控制系统对目标跟踪时延的平均值为 4.2 ms。由此可见，所设计控制系统在飞行探测器复合跟踪控制方面的效率更好。

综上所述本次实验结论为：应用所设计系统的目标跟



(a) 1号运动目标



(b) 2号运动目标

图 7 目标跟踪准确率

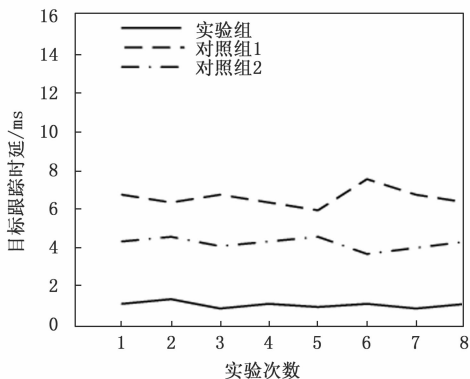


图 8 目标跟踪时延

跟踪准确率较高, 目标跟踪时延较短, 能够实现对飞行探测器运动轨迹的实时精准跟踪与控制。

5 结束语

设计基于大数据聚类的飞行探测器复合跟踪控制系统, 重新定义了复合框架体系, 联合主控芯片、伺服驱动设备、信标机等多个硬件, 在标定飞行探测器跟踪路径的同时, 完成对复合跟踪行为的实时控制建模, 且由于复合跟踪坐标系始终保持较为稳定的数值状态, 所以即便是在路径节点出现轻微偏差的情况下, 系统主机对于飞行探测器的跟踪能力也可以得到保障。实用性方面, 这种新型控制系统的的应用, 有效解决了跟踪目标丢失的问题, 保障了基站主机对飞行探测器运动轨迹的控制能力, 符合实际应用需求。

参考文献:

- [1] 于国斌, 汪鹏飞, 朱安文, 等. 基于 10 kWe 核反应堆电源的海王星探测任务研究 [J]. 中国科学: 技术科学, 2021, 51 (6): 711-721.
- [2] 曾子元, 李云桓. 基于扩张状态观测器的四旋翼无人机飞行控制系统研究 [J]. 微特电机, 2022, 50 (1): 41-44.
- [3] 马胡伟, 周建江, 周明月, 等. 基于 RTX64 的飞行器虚拟飞行软件控制系统的设计 [J]. 电光与控制, 2021, 28 (1): 90-93.
- [4] 郑冬花, 叶丽珠, 隋 栋, 等. 云计算环境中面向大数据的改进密度峰值聚类算法 [J]. 济南大学学报 (自然科学版), 2022, 36 (5): 592-596.
- [5] 孙秦豫, 付 锐, 王 畅, 等. 人机协作系统中车辆轨迹规划与轨迹跟踪控制研究 [J]. 中国公路学报, 2021, 34 (9): 146-160.
- [6] 张旭辉, 吕欣媛, 王 甜, 等. 数字孪生驱动的掘进机器人决策控制系统研究 [J]. 煤炭科学技术, 2022, 50 (7): 36-49.
- [7] 熊素琴, 李求洋, 肖志强. 考虑寄生参数影响的芯片 RC-HBM 静电测试模型 [J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50 (4): 172-179.
- [8] 葛卫敏, 许春华, 林利泉, 等. 基于 FPGA 的便携式四极杆质谱控制系统设计 [J]. 质谱学报, 2023, 44 (1): 87-95.
- [9] 王法臻, 崔少辉, 王 成. 基于 Linux 的 PXIe 可重构仪器设备驱动程序开发 [J]. 计算机工程, 2021, 47 (4): 166-172.
- [10] 刘 晶, 高立超, 孙跃华, 等. 基于知识和数据融合驱动的设备故障诊断方法 [J]. 郑州大学学报 (理学版), 2022, 54 (2): 39-46.
- [11] 董全睿, 王伟国, 陈 飞, 等. 基于自适应卡尔曼算法的单探测器解耦控制技术研究 [J]. 红外与激光工程, 2022, 51 (6): 345-352.
- [12] 李树德, 刘彩霞, 徐 林, 等. 星间激光通信中四象限探测器的定位精度研究 [J]. 光通信研究, 2021 (4): 61-65.
- [13] 何 坚, 刘新远. RGB-D 和惯性传感器融合的地面障碍物检测技术 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2022, 34 (2): 254-263.
- [14] 王佩英, 邱霖玄, 王 欢, 等. 微热对流式惯性传感器悬臂梁结构的优化与制备 [J]. 微纳电子技术, 2021, 58 (12): 1108-1113.
- [15] 李浩思, 邓 琼, 徐 鹏, 等. 低低跟踪重力卫星高精度微波测距系统数据预处理与分析 [J]. 地球物理学报, 2023, 66 (5): 1945-1959.
- [16] 杨 纯, 李垠韬, 宋 伟, 等. Φ -OTDR 光纤传感电缆防外破监测数据预处理方法 [J]. 激光与红外, 2021, 51 (4): 486-492.
- [17] 田春华, 崔鹏飞, 刘家扬, 等. 基于时序聚类和关联规则挖掘的气化炉操作参数优化方法 [J]. 陕西师范大学学报 (自然科学版), 2021, 49 (1): 61-67.
- [18] 李生虎, 于新钰, 胡 涛, 等. 基于加权聚类和分层等值的含风电微网可靠性等值 [J]. 太阳能学报, 2021, 42 (11): 315-320.

(下转第 180 页)