

# 基于 Fuzzy ART 聚类的卫星在轨姿态监测系统设计

郑颖<sup>1,2</sup>, 张伟<sup>3</sup>, 靳新<sup>1</sup>, 于千贺<sup>1</sup>

(1. 沈阳工学院 信息与控制学院, 辽宁 抚顺 113122; 2. 沈阳工学院 人工智能研究所, 辽宁 抚顺 113122;  
3. 东软医疗系统股份有限公司, 沈阳 110021)

**摘要:** 针对传统卫星在轨姿态监测系统无法确定在轨姿态向量与正常向量匹配度, 导致姿态角度监测结果不精准的问题, 提出基于 Fuzzy ART 聚类的卫星在轨姿态监测系统设计; 系统硬件根据 GPS 解算方位角和俯仰角, 隔离载体扰动; 使用 MSP430 数字/模拟信号转换器, 统一 CPU 指令和寻址模式; 使用 AS5145B 磁角位置编码器输出脉冲信号; 通过双轴磁传感器 HMC6352 的电磁罗盘电路得出卫星在轨姿态大致方向; 软件部分利用 Fuzzy ART 聚类卫星在轨姿态监测数据, 确定聚类中心, 判定卫星在轨姿态向量与正常向量匹配度, 根据匹配结果, 开辟新的记忆节点, 给出报警信息, 完成姿态监测; 实验结果表明, 所设计系统在轨道圈数为 1 圈时施加控制力矩, 能够迅速使姿态达到稳定; 轨道圈数为 2 圈时,  $z$  轴方向的俯仰角与实际三维角度相差  $1^\circ$ , 表明该系统对卫星在轨姿态监测准确率较高。

**关键词:** Fuzzy ART 聚类; 卫星; 在轨姿态; 角度监测

## Design of Satellite Attitude Monitoring System in Orbit Based on Fuzzy ART Clustering

ZHENG Ying<sup>1,2</sup>, ZHANG Wei<sup>3</sup>, JIN Xin<sup>1</sup>, YU Qianhe<sup>1</sup>

(1. School of Information and Control, Shenyang Institute of Technology, Fushun 113122, China;  
2. Institute of Artificial Intelligence, Shenyang Institute of Technology, Fushun 113122, China;  
3. Neusoft Medical Systems Co., Ltd, Shenyang 110021, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the traditional satellite on-orbit attitude monitoring system cannot determine the degree of matching between the on-orbit attitude vector and the normal vector, resulting in inaccurate attitude angle monitoring results, a satellite on-orbit attitude monitoring system design based on Fuzzy ART clustering is proposed. The system hardware calculates the azimuth and elevation angles according to GPS, and isolates carrier disturbance; uses MSP430 digital/analog signal converter to unify CPU commands and addressing modes; uses AS5145B magnetic angle position encoder to output pulse signals; uses dual-axis magnetic sensor HMC6352 the circuit of the electromagnetic compass to get the approximate direction of the satellite's orbit attitude. The software part uses Fuzzy ART to cluster satellite on-orbit attitude monitoring data, determines the clustering center, determines the degree of satellite on-orbit attitude vector matching with the normal vector, and opens up new memory nodes based on the matching results, gives alarm information, and completes attitude monitoring. The experimental results show that the designed satellite system can quickly stabilize the attitude by applying a control moment when the orbital number of revolutions is 1; when the orbital number of revolutions is 2, the pitch angle in the  $z$ -axis direction differs by  $1^\circ$  from the actual three-dimensional angle, which indicates the system has high accuracy in monitoring the satellite's on-orbit attitude.

**Keywords:** fuzzy ART clustering; satellite; on-orbit attitude; point of monitoring

## 0 引言

长时间运行后, 同步卫星的姿态相对于初始姿态会发生变化, 而地面卫星的天线则指向初始预定的位置, 从而造成通信中断<sup>[1]</sup>。大多数卫星天线是抛物形, 与信号的频率和孔径成反比, 孔径越大, 工作频率越高, 主瓣越窄, 风能很容易地将直径较大的天线从卫星上移走<sup>[2]</sup>。另外,

这种天线会偏离预定的方向, 使天线的方向系数和效率的乘积大大降低, 从而造成通信和信息传输中断, 这就需要一套能够无人操纵的自动监测系统来监测这类卫星的轨道姿态<sup>[3]</sup>。以往使用基于大数据分析的卫星在轨姿态仿真监测系统, 把模拟结果和卫星在轨数据结合起来, 可以直接用于在轨控制系统的性能评估, 为在轨故障诊断和应急预案演练提供方便。但因为卫星在境内运行时间短, 要求仿

收稿日期: 2021-04-06; 修回日期: 2021-07-12。

作者简介: 郑颖(1980-), 女, 辽宁沈阳人, 硕士研究生, 副教授, 主要从事图像识别方向的研究。

引用格式: 郑颖, 张伟, 靳新, 等. 基于 Fuzzy ART 聚类的卫星在轨姿态监测系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(12): 17-21.

真分析及时、可靠；使用全物理仿真监测系统，综合分析轨道环境、卫星结构参数和姿态确定算法，确定最佳的参数配置和系统方案，对于硬件接入情况，对系统性能进行了全面测试和技术评估。尽管该系统可靠、灵活、直观，操作性强，但在发生突发故障情况下，监测结果不准确。面对上述传统系统存在的问题，提出了基于 FuzzyART 聚类的卫星在轨姿态监测系统。结合 FuzzyART 自组织聚类算法，在面对突发故障情况下，通过将输入向量和网络双向连接后，达到精准监测的目的。

## 1 总体架构设计

卫星在轨姿态监测系统由仿真电脑和可选择的存取硬件组成，系统组成结构如图 1 所示。

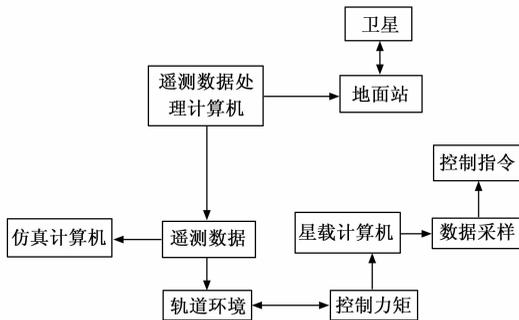


图 1 总体架构框图

如图 1 所示，仿真计算机是整个系统的核心，其扩展接口支持对整个卫星姿态控制系统或轨道上卫星遥测数据进行访问，可根据需要扩展系统工作模式。卫星在轨姿态监测需要模拟计算机处理卫星遥测数据，就硬件而言，在轨卫星通过通信链路与仿真系统相连<sup>[4]</sup>。卫星遥测数据一般是由专门地面站接收，然后传送到测控站；将 UDP 标准网络协议传输到仿真计算机，实现了对在轨姿态三维动态演示或同步仿真验证。在软件方面，使用 FuzzyART 聚类方法对人脑认知过程仿真，当聚类和分类大量复杂数据时，通过识别和比较网络输入矢量和双向连接权值，可以实现共振，完成自记忆，实现在轨卫星姿态的回收<sup>[5]</sup>。

## 2 系统硬件结构设计

卫星在轨姿态监测系统由姿态监测单元、电机驱动单元、主控制单元和监控单元四部分组成，如图 2 所示。

由图 2 可知，当执行在轨姿态监测装置时，将采集的姿态信息传送到主控制装置。通过主控单元控制方位角和俯仰角，利用驱动装置发送控制命令，驱动步进电机运行，并实时记录方位角和俯仰角<sup>[6]</sup>。天线驱动单元根据在轨卫星的姿态信息，实现了天线姿态监测模块的扁平化，隔离了载波干扰，保证了天线与卫星的对准。监控装置负责实时监控卫星的姿态，并发出相应控制指令<sup>[7]</sup>。

### 2.1 MSP430 微控制器

MSP430 (MCU) 是以简化的指令集处理器为基础的 16 位微控制器，在晶片内设有模数转换器及模数转换器，使

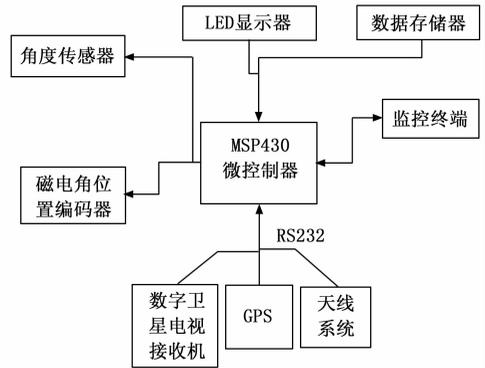


图 2 系统硬件结构

其既能接收与输出数字信号，又能接收与输出模拟信号<sup>[8]</sup>。

1) MCU 的 CPU 模块通过存储器地址总线、数据总线、程序存储模块、数据存储模块以及各种外部设备模块，统一使用 CPU 指令和寻址方式<sup>[9]</sup>。

2) 由 MSP430 微控制器产生所需的各种时钟信号，它可以在多种时钟源的支持下工作，包括加入一个外部晶体的高频稳定时钟源，而不接入任何外部器件。采用自编程序控制时钟模块的工作状态和频率，使微控制器能够利用等待状态下的低频时钟信号，甚至关闭时钟电路，降低了系统能耗<sup>[10]</sup>。

3) 对运行中高频时钟信号进行加速信号处理，MSP430 微控制器每一组装配指令对应于一个逻辑电路模块，MSP430 微控制器依靠运行程序完成工作。该控制器是由设计人员向单片机发出的一组指令，指令指示单片机在操作中调用逻辑电路模块，使指令以二进制代码形式存储在内存中。单片机每次从内存中读出一个指令码，并完成指令码相关指定操作<sup>[11]</sup>。

### 2.2 磁角位置编码器

磁角位置编码器是一种利用电磁原理将机械几何位移转换为电子信号（脉冲或数据信号）的机械与电子紧密结合的精密测量装置。该编码器采用磁电角编码器，具有抗震、抗腐蚀、抗污染、可靠性高、结构简单等优点。AS5145B 是一种无触点的，高精度，高分辨率的磁旋转变换器，测量范围为 0~360°。磁角位置编码器是一个集成了线性霍尔元件环形阵列，模拟前端，数字信号处理器的完整芯片系统<sup>[12]</sup>。

通过使用由线霍尔元件组成的环形阵列来检测晶片外场，线霍尔元件在环 A 阵列上可以感觉到放置在晶片上的磁体场强，并且可以为每块磁体施加电压，从而改变每块磁体的磁场。正向曲线电压落在环形线性霍尔单元阵上，由模拟前端放大，数据串或脉冲信号经数字信号处理器处理后输出<sup>[13]</sup>。

### 2.3 在轨姿态模块电磁罗盘电路

内存处理器 HMC6352 具有用户校准功能，用户可以通过相关命令进入校准模式。使用标定装置时，要求使用者至少转动罗盘一次，以确保罗盘在各个方向都能采集数据。



$$Sim = \frac{\alpha}{D} \quad (2)$$

根据近似度,即警戒参数,构建测试标准,判断卫星在轨姿态向量与正常向量匹配度是否满足警戒参数,设警戒层为  $\chi$ ,警戒测试可表示为:

$$\begin{aligned} Sim > \chi, & \text{警戒测试通过} \\ Sim \leq \chi, & \text{警戒测试失败} \end{aligned} \quad (3)$$

step3:若任意输出节点的状态向量与正常模式向量相匹配,则表明系统处于正常工作状态;如果不完全匹配,则表明系统工作状态异常。系统能够根据警戒测试结果,自动打开网络中的新节点,存储异常状态矢量的特征数据,并给出报警信息。

### 4 系统调试

系统调试目的主要是验证基于 FuzzyART 聚类的卫星在轨姿态监测系统设计合理性。

#### 4.1 系统调试环境

调用 STK 中三维可视化场景,直观演示卫星在轨运行情况,演示结果如图 5 所示。

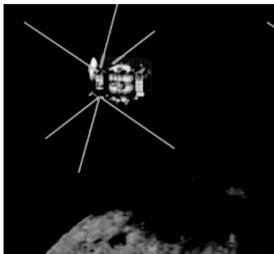


图 5 卫星在轨状态运行演示结果

相关参数如表 1 所示。

表 1 相关参数

轨道历元		2018-10-01 16:00:00	
偏心率	0.001 522	半长轴	6 510.438 1 km
倾角	97.350 2°	赤经	288.835 4°
幅角	168.052 165°	平近地点角	22.651 449°

#### 4.2 速率阻尼仿真分析

卫星在初始角速度为  $[1, 1, 1]^{\circ}/s$  条件下,用时 2.0 轨完成初始卫星在轨姿态消旋,角速度稳定在  $\pm 0.3^{\circ}/s$  内。卫星在轨的俯仰角和方位角三维角度显示结果如图 6 所示。

由图 6 可知,采用磁矩控制,三轴控制磁矩在阻尼过程中均以最大值输出,施加控制力矩,能够迅速使姿态达到稳定。当角速率稳定后,切换至反作用轮组,由该轮组施加控制力矩。实验结果表明所设计系统能够较好地控制卫星速率阻尼,在动量轮参与控制下姿态捕获速度更快,初态控制时间更少,监测效率较好。

#### 4.3 系统调试结果

分别使用基于大数据分析的监测系统、全物理仿真监测系统和基于 FuzzyART 聚类监测系统监测卫星在轨俯仰角和方位角,监测结果如图 7 所示。

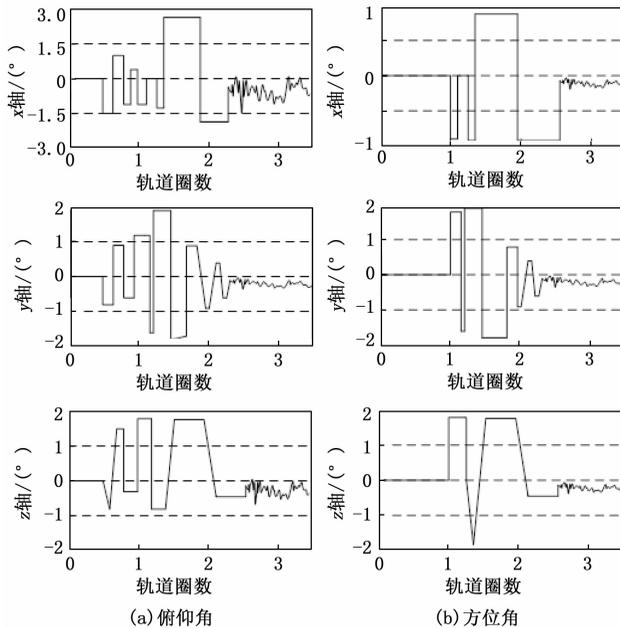


图 6 卫星在轨的三维角度显示结果

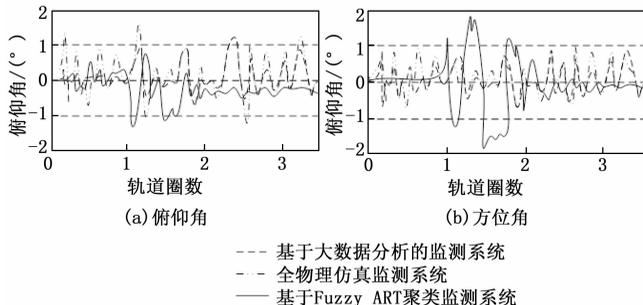


图 7 不同系统俯仰角和方位角监测结果对比分析

由图 7 可知,使用基于大数据分析的监测系统、全物理仿真监测系统俯仰角和方位角与卫星在轨的三维角度显示结果差别较大,而使用基于 FuzzyART 聚类监测系统俯仰角和方位角与卫星在轨的三维角度显示结果基本一致,仅在轨道圈数为 2 圈时,  $z$  轴方向的俯仰角与实际三维角度显示结果存在一定偏差,导致整体角度偏大  $1^{\circ}$ 。通过上述分析结果可知,该系统对仰角和方位角的监测误差较小,监测结果更加精准,能够对卫星在轨姿态做出准确监测。

### 5 结束语

设计的基于 FuzzyART 聚类的卫星在轨姿态监测系统,成本低、操作简单。可以实时监测在轨姿态,为卫星运行提供帮助。结合 FuzzyART 聚类监测原理,设计监测流程。通过 STK 仿真调试,支持三维动态演示,且由实验结果可知,该系统监测到的卫星在轨俯仰角和方位角与实际运行姿态一致,具有精准监测效果。

由于研究条件有限,所设计的卫星姿态控制方面还有待进一步深入探索,为了方便应急预案的实施,应建立应急预案分析系统,增加自动生成预案案例的功能,形成完

整的卫星地面协同模拟控制回路。

#### 参考文献:

- [1] 王 婵, 王慧泉, 金仲和. 皮纳卫星遥测数据异常检测聚类分析方法 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50 (4): 110 - 116.
- [2] 耿远卓, 郭延宁, 李传江, 等. 敏捷凝视卫星密集点目标聚类与最优观测规划 [J]. 控制与决策, 2020, 35 (3): 104 - 112.
- [3] 潘志安, 刘庆杰, 王小英, 等. 基于改进聚类算法的卫星数据异常检测模型 [J]. 科技通报, 2018, 34 (7): 128 - 131.
- [4] 夏 炎, 潘树国, 赵鹏飞, 等. 基于无监督学习的卫星 NLOS 信号检测方法 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2019, 49 (3): 565 - 572.
- [5] 李顺勇, 张苗苗, 曹付元. 基于分类型矩阵对象数据的 MD fuzzy k-modes 聚类算法 [J]. 计算机研究与发展, 2019, 56 (6): 1325 - 1337.
- [6] 李 渊, 刘嘉伟, 严泽幸, 等. 基于卫星定位导航数据的景区旅游者空间行为模式研究——以鼓浪屿为例 [J]. 中国园林, 2019, 35 (1): 79 - 83.
- [7] 汤振鹏, 陈 劲. 基于 PLFT 及信息融合的卫星图像河流检测 [J]. 计算机仿真, 2019, 36 (3): 45 - 49, 86.
- [8] 杜超禹, 蒙 涛, 金仲和. 面向皮纳卫星姿态确定的 MEMS 陀螺磁强计组合滤波系统 [J]. 传感技术学报, 2018, 31 (1): 152 - 157.
- [9] 李利亮, 牛 睿, 邵志杰, 等. 采用简化滤波器思想的卫星姿
- 态确定系统故障诊断 [J]. 宇航学报, 2019, 40 (7): 776 - 784.
- [10] 谢 韬, 杜亚江, 齐金平, 等. 基于北斗卫星的动车组车体姿态检测方法 with 实现 [J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15 (8): 1920 - 1927.
- [11] 梁 健, 眭晓虹, 赵 阳, 等. 基于变结构控制器的敏捷卫星姿态机动方法 [J]. 导航与控制, 2020, 19 (2): 59 - 66.
- [12] 魏春岭, 袁 泉, 张 军, 等. 空间多体系统轨道姿态及机械臂一体化控制 [J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46 (2): 15 - 21.
- [13] 王志伟, 许江淳, 李玉惠, 等. 面向两轮平衡机器人姿态检测系统的研究与设计 [J]. 测控技术, 2019 (8): 21 - 25.
- [14] 张彩友, 杨鸿珍, 贺 琛, 等. 基于北斗三代系统的设备姿态监测预警应用研究 [J]. 电子设计工程, 2019, 27 (10): 159 - 162.
- [15] 谢方圆, 张爱民. 基于干扰观测器的受扰卫星姿态控制器设计与优化 [J]. 航天控制, 2019 (5): 31 - 39.
- [16] 杨新岩, 廖育荣, 倪淑燕. 基于干扰观测器的小卫星自适应积分滑模姿态控制 [J]. 科学技术与工程, 2019, 19 (3): 255 - 260.
- [17] 陈 理. 基于惯性传感器的运动姿态实时检测系统设计 [J]. 自动化与仪器仪表, 2019, 240 (10): 44 - 48.
- [18] 佟 盟, 田文杰, 陈福彬, 等. 基于六电板石英晶体谐振器的姿态检测转换结构设计 [J]. 传感器与微系统, 2019, 38 (10): 67 - 69.
- [19] 肖志文, 常 明. 虚实结合的电磁频谱监测训练系统设计 [J]. 电子设计工程, 2020, 28 (3): 106 - 110.
- [20] 贾 帅, 张永波. 基于开关矩阵的卫星通信测控站多路频谱监测系统 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (11): 76 - 79, 93.
- [21] 孙 彝, 王 玮, 梁 克, 等. 载人航天器与伴随卫星间射频系统电磁兼容性分析方法 [J]. 中国空间科学技术, 2020, 40 (2): 49 - 53.
- [22] 邓志刚, 周桐庆, 谢 莹, 等. 一种面向海上频谱监测的无人机调度方法 [J]. 小型微型计算机系统, 2019, 40 (8): 1788 - 1793.
- [23] 孙 威, 殷兴辉, 王新君. 基于 STM32 的频谱测量系统的设计 [J]. 电子技术应用, 2019, 45 (3): 96 - 99, 103.
- [24] 史小平, 林晓涵, 李师轮, 等. 航天器编队飞行自适应协同避碰控制 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52 (4): 13 - 20.
- [25] 李志鹏, 杨海东, 叶剑锋. 基于 LabVIEW 的现场数控专机监测系统 [J]. 机床与液压, 2019, 47 (2): 172 - 176.
- [26] 陈长龙, 王竹刚. 通用零中频构架的 CPM 射频调制系统的设计 [J]. 微电子学与计算机, 2020, 37 (12): 16 - 20.
- [27] 杨世康, 王长清, 白维维. 基于大数据的无线通信频谱资源分批协作分配系统设计 [J]. 现代电子技术, 2020, 43 (17): 28 - 32.
- [28] 罗 丽, 高 飞, 邢传玺, 等. 一种频谱监测无线传感器节点的设计与实现 [J]. 云南民族大学学报 (自然科学版), 2020, 29 (3): 70 - 76.
- [29] 刘会杰, 宋继红, 衣文索, 等. 基于光纤干涉技术的电机故障监测系统 [J]. 长春理工大学学报 (自然科学版), 2020, 43 (5): 129 - 134.
- [30] 王子樵, 徐 湛, 陈晋辉, 等. 频控阵雷达多路相参信号源的设计与实现 [J]. 电子测量技术, 2020, 43 (3): 16 - 21.
- [31] 闫晓宏. 基于频谱分析的船载供电线路防雷保护装置设计 [J]. 舰船科学技术, 2019, 41 (6): 212 - 214.
- [32] 张亚博, 师 鹏, 张 皓, 等. 电磁航天器编队悬停鲁棒协同控制方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45 (2): 165 - 174.
- [33] 程俊平, 徐志坚, 贾晓静, 等. 基于共享数据库的空间电磁环境监测方法与系统 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019, 17 (3): 435 - 439.
- [34] 方元坤, 袁斌文, 孟子阳, 等. 分布式遥感编队多星协同观测中的姿态控制 [J]. 光学精密工程, 2019, 27 (1): 63 - 73.
- [35] 谢嘉成, 王学文, 杨兆建. 基于数字孪生的综采工作面生产系统设计与运行模式 [J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25 (6): 1381 - 1391.
- [36] 何 仁, 方妍月. 基于 Fluent-Simulink 协同仿真的 EVAP 系统泄漏监测中压力场分析 [J]. 汽车工程, 2019, 41 (11): 1341 - 1346.
- [37] 李霁川, 谭 征, 吴 伟, 等. 航天器异地测控链路无线联试系统设计 [J]. 航天器工程, 2019, 28 (2): 80 - 85.