

doi: 10.7690/bgzdh.2026.03.019

基于自适应容错机制的遥测数据实时融合方法

陈露露, 王明贤, 张 杰

(中国人民解放军 96796 部队, 银川 750002)

摘要: 为适应遥测数据实时处理面临的复杂情况, 提出基于自适应容错机制的遥测数据实时融合方法。以全帧计数为主要融合判据, 通过全帧缓存机制适应乱码、丢帧、全帧乱序等异常情况, 并结合全帧质量检验、全帧质量优选、时码辅助判断全帧连续性等关键技术实现实时融合全帧数据流质量最优且连续稳定。应用结果表明: 该方法能实时充分高效利用多站遥测数据, 有效提升多站遥测数据实时融合处理的效果。

关键词: 实时融合; 容错; 全帧; 遥测数据

中图分类号: V557.3 **文献标志码:** A

Real-time Fusion Method of Telemetry Data Based on Adaptive Fault-tolerance Mechanism

Chen Lulu, Wang Mingxian, Zhang Jie

(No. 96796 Unit of PLA, Yinchuan 750002, China)

Abstract: In order to adapt to the complex situation faced by real-time processing of telemetry data, a real-time fusion method for telemetry data based on adaptive fault tolerance mechanism is proposed. Taking the full frame count as the main fusion criterion, it adapts to garbled code, frame loss, full frame disorder and other abnormal situations through the full frame caching mechanism, and combines key technologies such as full frame quality inspection, full frame quality optimization, time code assistance to judge the continuity of the full frame to achieve optimal quality and continuous stability of real-frame data flow in real time. The application results show that this method can make full and efficient use of multi-station telemetry data in real time and effectively improve the real-time fusion processing of multi-station telemetry data.

Keywords: real-time fusion; fault-tolerant; full-frame; telemetry data

0 引言

为全面准确获取导弹飞行全程遥测数据, 飞行阶段一般由地面 2 台以上遥测站同时接收遥测信号, 全程遥测信号接收由地面多台遥测站接力完成。受导弹尾焰、天线位置、电波传输和各遥测站部署位置、跟踪能力、通信时延等因素影响, 收到的遥测数据可能存在误码、丢帧甚至中断等问题^[1]。遥测数据实时处理的关键是利用各遥测站接收数据冗余性, 进行实时优选拼接, 融合出一条连续、高质量的最优数据流, 提高实时处理的精度。

遥测数据是以特定数据帧为单位的循环帧序列数据结构^[2], 每个全帧均为连续排列的数据字(比特位数固定, 也可称波道)组成的数据矩阵, 子帧为矩阵的行, 副帧为矩阵的列, 参数记录在波道中。目前, 遥测数据实时融合处理主要有 3 类方法: 1) 参数优选法。该类方法最早使用, 主要思路是将每个遥测站的遥测数据流处理为参数值, 通过特定策略

对多个参数择优。该方法存在的主要问题是处理数据量大且效率低、数据源码不能互补和数据利用率低。2) 时码拼接法。该类方法数据拼接时以时码先后顺序为主要判据, 以全帧或子帧质量、帧计数等为辅助判据。文献[3]提出, 首先进行全帧时码修正, 再基于时码实现全帧对齐, 同时进行全帧优选。该方法存在的主要问题是时码精度受设备影响较大, 修正过程复杂, 只把时码作为判据不可靠; 虽进行全帧优选, 但未实现冗余数据互补, 数据利用率低等问题。文献[4]提出, 在全帧时码修正基础上进行全帧编码对齐, 结合数据所属跟踪时段进行优先级判定实现事后融合。该方法因全帧编号与对齐算法较为简单, 更适用于遥测事后数据融合。文献[5]提出的以时码和子帧质量为判据, 通过子帧时间对齐、子帧计数统计和子帧质量优选等实现遥测数据实时融合。该方法不足之处为子帧时码在工程实践中难以对齐^[4], 对齐方法不可靠; 子帧融合算法和文献[4]提出的全帧融合算法相似, 条件是能够提前

收稿日期: 2024-11-12; 修回日期: 2024-12-26

第一作者: 陈露露(1993—), 男, 河南人, 硕士。

获取全部数据，实时处理时无法适应数据丢帧、乱序、误码等情况，容错性差。3) 帧计数融合法。该类方法数据融合时以帧计数为主要判据，以时码、数据帧质量等为辅助判据。文献[6-7]提出，利用时码修正帧计数，根据帧计数大小将遥测数据排序实现测数据事后融合。该方法虽然依赖条件较少，有利于工程实现，但算法设计相对简单，仅适用于事后处理。

综上所述，当前遥测数据实时融合处理主要方法是以时码或帧计数为判据，实现融合数据的连续完整性，并对全帧或子帧数据进行质量优选，确保数据处理精度，但存在以下问题：1) 子帧时码对齐难以工程实现^[4]，全帧时码对齐算法受设备时钟精度影响较大，时码修正算法复杂且通用性不强；2) 帧计数融合法虽然依赖条件少，但当前算法均不适用于实时处理；3) 缺少容错机制，未考虑误码、丢帧、全帧乱序以及数据中断等异常的处置策略。基于以上研究，笔者以遥测全帧计数为主要判据，通过时码辅助判断存在丢帧现象时帧计数连续

性，设计基于全帧缓存的自适应容错算法，实现遥测数据实时融合。

1 自适应容错的实时融合方法

1.1 融合判据

遥测实时融合数据源特点：1) 数据来源唯一。飞行器实时下传的遥测数据虽经多个地面遥测站接收后传输至指控中心进行融合解算，但数据源均为弹上遥测系统。限于实时处理时，遥测数据及处理时间有限，发动机尾焰、分离动作以及黑障等因造成的数据质量降低很难修正，主要通过多站数据冗余分关键信息，并不一定需要事后处理那样的高精度，需要在处理效率和精度上取得平衡，因此算法复杂度要尽可能低。2) 容错性。能够利用多站冗余数据解决各站遥测数据可能存在误码、丢帧、乱序甚至中断等问题。

基于以上特点分析，提出基于自适应容错机制的遥测实时数据流融合方法，如图 1 所示。

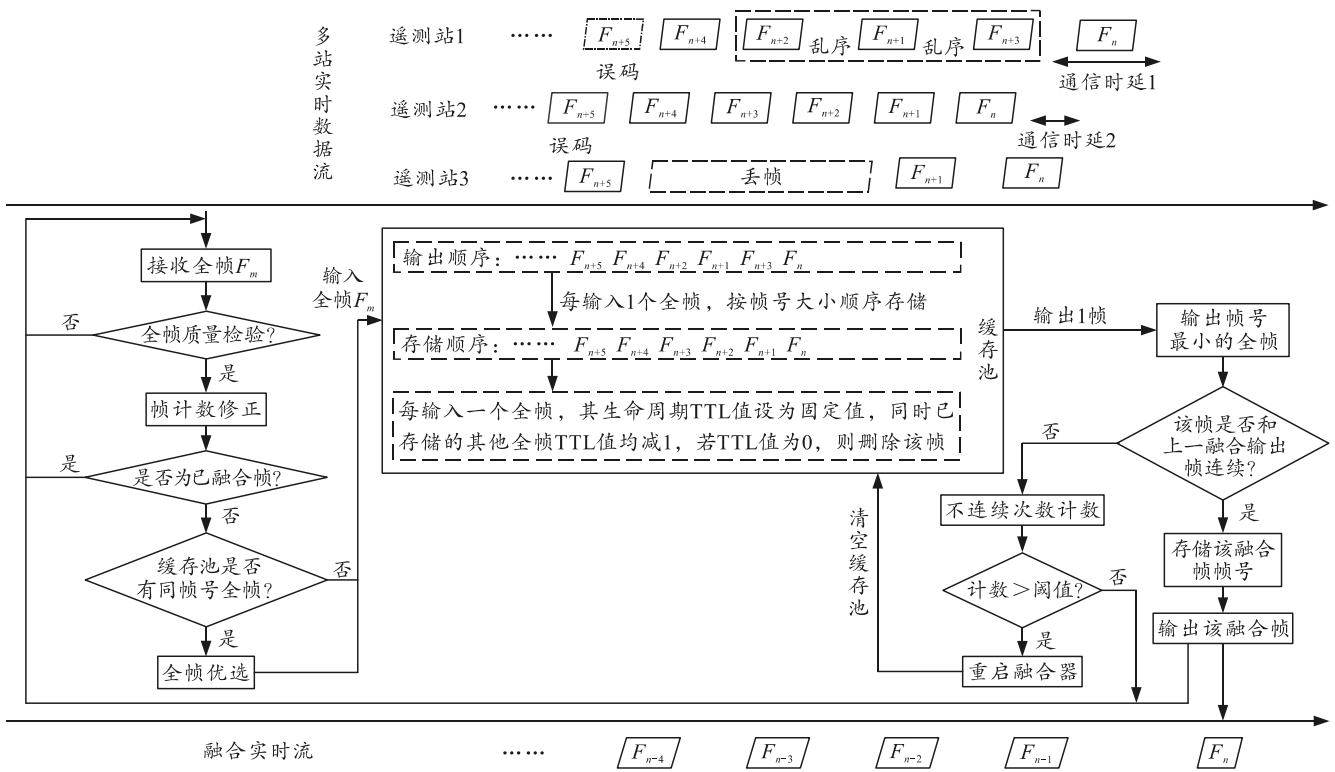


图 1 实时融合处理流程

1.2 算法关键步骤分析

1.2.1 全帧数据质量检验

遥测数据包由数据包包头和全帧数据 2 部分组成，包头中含数据类型标识 (BID)、数据源标识 (SID) 等标识信息。该步骤主要作用是去掉数据质量不合

格的全帧数据，便于后续缓存优选。文献[5]提出通过规范性、完整性、作用时段和特征参数 4 方面评价单个数据帧质量，其中规范性、完整性均可通过数据包包头标识、数据帧大小、同步码正确性等评价，笔者认为特征参数选择太少不具有代表性，选择太多增加算法复杂度，考虑到子帧同步码和全帧

同步码具有较强代表性且在全帧数据中分布均匀，因此将同步码作为判据。文献[7]提出通过帧计数和工作弧段 2 方面评价单个数据帧质量。综上，结合实践经验，通过数据包包头 BID 和 SID、全帧数据帧大小、子帧同步码、全帧同步码等检验全帧数据是否合格，以上信息均为确定性信息，若全部正确，则数据帧质量判为合格。

1.2.2 全帧计数修正

全帧计数一般为固定若干字节，且多少为 2~3 字节，循环计数。通过质量检验的数据帧需通过式(1)判断当前原始全帧计数 C_0 是否接近最大帧计数 C_{max} 。

$$|C_0 - C_{max}| < x. \quad (1)$$

式中 x 为固定阈值，一般可设为 20~50 之间，若 n 次满足式(1)，则判定帧计数即将开始循环， n 的值可设为 x 的 25%~50% 之间，若后续出现帧计数小于某较小阈值，如 10~50 之间时，则循环计数次数 m 增加 1，修正后的帧计数 \bar{C} 满足：

$$\bar{C} = mC_{max} + C_0. \quad (2)$$

若融合帧队列中已有帧计数为 \bar{C} 的全帧，则认为该帧延时过大并丢弃，若缓存池中已有该帧，则进行质量优选，否则将该帧输入缓存池。

1.2.3 全帧数据质量优选

质量合格且尚未融合的全帧数据首先进行缓存，但数据质量优先级不一定高，待后续出现数据质量优先级更高且帧计数相同的数据帧，则用高质量数据帧替换缓存池中存在的低质量数据帧。可根据各遥测设备历史效能数据，并结合布站情况人为设置不同工作时段各遥测设备数据质量优先级。

1.2.4 全帧数据融合

全帧数据融合^[8-9]的依据是相同帧计数，全帧数据有多个来源，受遥测站布站位置、通信质量、数据接收质量等多个因素影响，多源数据到达中心处理机的时延、数据质量均不同，可能出现低质量数据先到的情况。图 2 为某次连续 50 s 时段，不同遥测站每秒内相同帧计数遥测全帧通信网络时延情况，遥测全帧周期为 25 ms。从图中可以看出：4 个遥测站最大数据帧传输时延约为 110 ms，最小时延约为 50 ms。

考虑到可能出现乱序、丢帧、网络拥堵等情况^[10]，若能够缓存至少 5 个全帧，则可以充分利用 4 台站全部遥测数据，实现对丢帧、乱序等异常现

象的容错，结合数据质量优选，可输出高质量、连续的全帧数据。图 1 中，缓存池 TTL 值为待融合帧的生命周期，是为防止缓存池溢出。

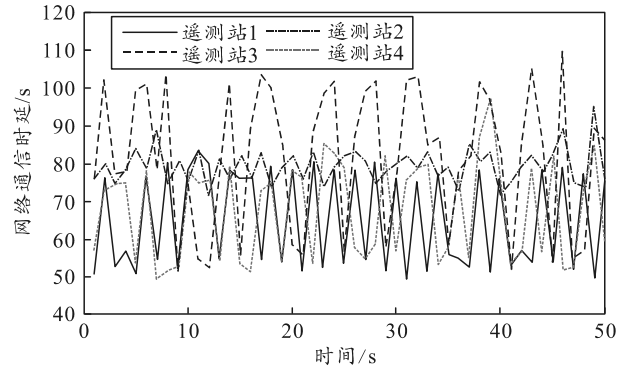


图 2 某时段遥测数据传输时延情况

1.2.5 全帧数据连续性判断

为保证算法的鲁棒性，确保在不同复杂情况下输出的融合数据帧帧计数连续稳定，需增加全帧连续性判断，若多次不连续，视为融合出错，重新开始融合。通过式(3)判断连续 2 个融合输出的全帧是否连续：

$$|(t_i - t_{i-1}) - T(\bar{C}_i - \bar{C}_{i-1})| < nT. \quad (3)$$

式中： t 为时码时间； T 为全帧周期； \bar{C} 为全帧计数； n 为经验值但不小于 1，若遥测站时统设备精度较高， n 的值相应越小。

2 应用实例分析

该方法已多次运用于实践，有效提高了遥测数据实时融合的效率和数据质量。选取某典型时段 4 个遥测站同时收到质量不同的遥测数据后的实时融合效果进行分析。连续 150 s 内 4 台遥测站理论跟踪能力：遥测站 1，0~96 s；遥测站 2，24~138 s；遥测站 3，41~135 s；遥测站 4，57~149 s。表 1 为不同跟踪时段遥测设备优先级设置，其中 1 表示优先级最高，4 表示优先级最低。

表 1 不同时段各遥测站优先级设置

时段 t/s	遥测站 1	遥测站 2	遥测站 3	遥测站 4
0~40	1	2	3	4
41~80	2	1	3	4
81~110	4	2	3	1
111~150	4	3	2	1

2.1 原始全帧数据质量情况分析

全帧同步率 k 衡量各遥测站的数据质量：

$$k = (F_1 / F_T) \times 100\%. \quad (4)$$

式中： F_1 为每秒全帧质量检验合格的全帧个数，即 BID、SID，全帧数据大小、子帧同步码、全帧同步

码均正确的全帧数据个数； F_T 为全帧频率，即每秒全帧总数。

某次全帧周期为 25 ms，全帧频率 F_T 为 40，设置最小缓存帧数为 8。图 4 为各遥测站同步率情况。

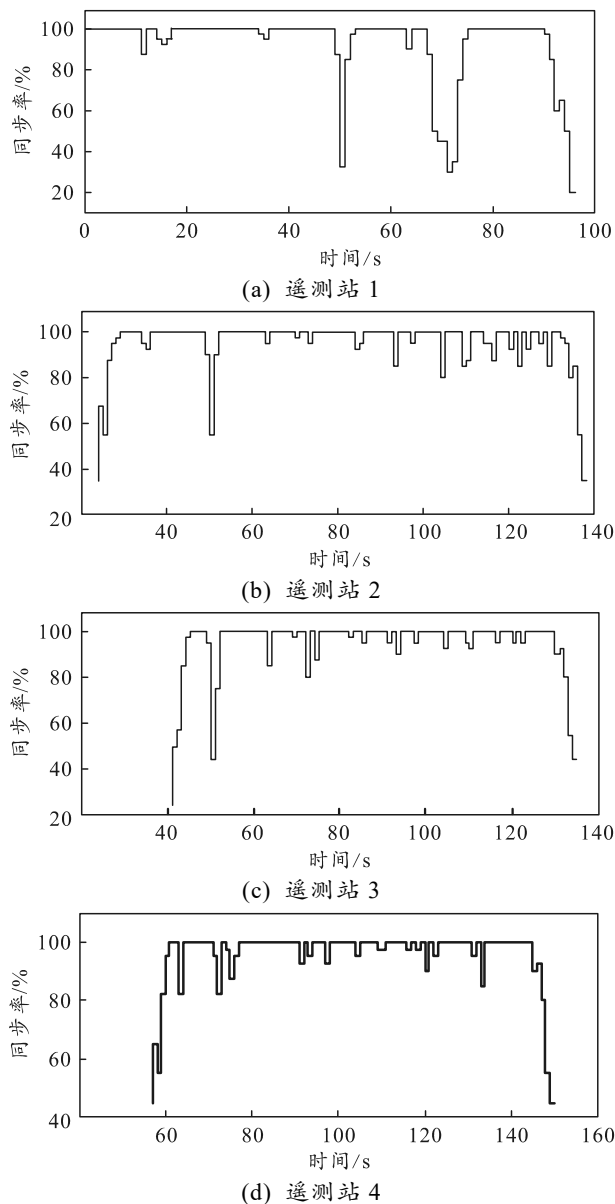


图 4 遥测站全帧数据实时同步率

2.2 全帧融合效果分析

图 5 为实时融合数据同步率。

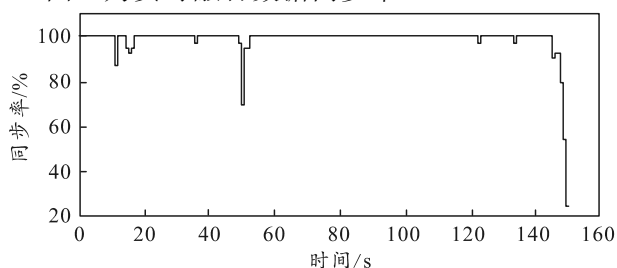


图 5 融合全帧数据实时同步率

同步率反映了各遥测站和融合后全帧数据质量情况，各遥测站数据都存在不同程度的丢帧现象：0~40 s，融合数据只有遥测站 1 数据源，因此融合数据同步率和遥测站 1 同步率完全一致；在 51 s，因各遥测站质量均较差，同步率均低于 60%，但融合后数据同步率为 70%，充分利用了各遥测站每个全帧数据，实现了全帧数据实时融合的效果，其他时段融合后数据质量明显优于各遥测站数据，仅 123 和 134 s 未达到 100%，说明整体融合效果较好。

2.3 全帧优选效果分析

图 6 为实时融合数据各遥测站数据优选率，即每秒融合数据中，各遥测站全帧数据占全帧频率的百分比情况。

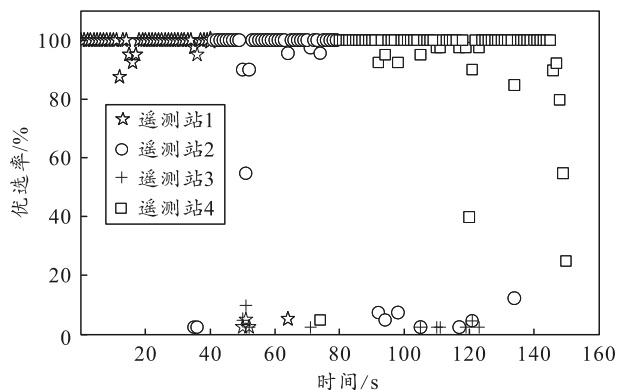


图 6 融合全帧数据各遥测站优选率

从图 6 可以看出：41~80 s，遥测站 2 全帧数据优先级最高；81~150 s，遥测站 4 优先级最高，符合表 1 优先级设置，各时段优选率说明融合数据充分利用了不同遥测站的全帧数据。41~80 s，遥测站 4 优先级最低，但第 74 s，只有遥测站 4 数据能够和遥测站 2 数据进行互补，实现 100% 的全帧数据同步率。第 106 s，融合数据使用了优先级较低的遥测站 3 全帧数据，第 117、121、134 s 分别使用了优先级较低的遥测站 2 全帧数据。综上可以看出：该方法能够实现优先融合优先级高的遥测全帧数据，同时能充分利用全部全帧数据，实现最优的实时融合效果。

3 结束语

笔者提出基于自适应容错机制的遥测数据实时融合方法，能够适应误码、丢帧、全帧乱序等多种复杂情况下的遥测全帧数据实时融合。实际应用结果表明：该方法降低了对时码精度的要求，通用性强，容错性好，能够高效、充分地利用多站遥测全帧数据，有效提高遥测数据实时处理的效率和质量。

参考文献:

[1] 史伟娜, 马卫东, 黄列纯. 遥测试验数据误码统计分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017, 15(6): 1020-1024.

[2] 张东. 典型遥测帧结构分析与数据处理关键技术[J]. 兵工自动化, 2020, 39(3): 5-9.

[3] 刘桂生, 高山, 贵宇, 等. 多站遥测数据实时对接方法研究[J]. 无线电工程, 2014, 44(11): 34-37.

[4] 杨军, 张东. 基于全帧质量最优的多站遥测数据融合方法[J]. 电子测量技术, 2019, 42(17): 101-105.

[5] 贾海艳, 王华松. 基于子帧质量最优的多站遥测数据实时融合方法研究[J]. 电子测量技术, 2020, 43(10):

74-77.

[6] 杜鹏. 多站遥测数据快速融合软件设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2014, 23(6): 2218-2219, 2240.

[7] 舒传华, 孙喜, 崔俊峰, 等. 基于单帧质量最优的遥测多站数据自动对接方法[J]. 遥测遥控, 2014, 35(6): 50-55.

[8] 张军, 张潇潇, 李圳峰. 多站遥测数据精确拼接方法设计与实现[J]. 遥测遥控, 2017, 38(2): 22-26.

[9] 成红艳, 舒传华, 崔俊峰. 通过数据处理提高遥测精度的方法[J]. 信息系统与网络, 2018, 35(6): 10-14.

[10] 吕楠, 畅春华, 李强. 遥测数据的丢帧分析与融合研究[J]. 战术导弹技术, 2014, 35(4): 32-37.

(上接第 100 页)

各智能体根据时间进而更新各智能体的状态。一段时间后, 可以看出: 尽管受到 $d_i(t)$ 的干扰, 但在预定时间滑模编队控制器式(4)的作用下, 5 个智能体在不同初始位置的条件下依然能逐渐形成并保持期望的编队队形。这表明所采用的编队控制方法在该非线性系统中具有显著的有效性和优越的稳定性; 为使观察更为清晰, 对图 6 的 0~0.1 s 进行放大, 如图 7 所示。

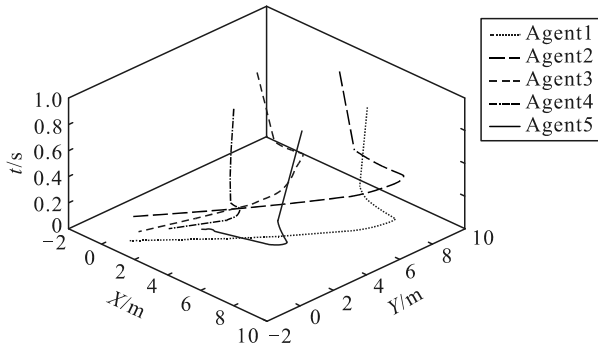


图 7 0~0.1 s 时不同智能体的轨迹

由图 7 可见: 在 0.078 s 左右时, 系统基本形成预设的编队队形, 小于预定的收敛时间。

4 结束语

笔者提出一种非线性系统编队的 PT-TSM 控制算法, 旨在解决持续性外部干扰对非线性系统的影响: 首先, 通过引入 TSM 控制策略, 有效抵御了系统在面对不确定项和外部干扰时造成的影响, 降低系统的震荡和不稳定行为, 显著增强了系统的鲁棒性; 其次, 结合预定时间稳定条件, 使得系统能

够在不同场景和任务需求下能够灵活地调整系统沉降时间, 确保系统适应多样性环境。可将该算法扩展到无人机、水下机器人等复杂场景, 融合事件触发、间歇通信等机制, 节约通信资源。综上所述, 本文中研究成果为非线性鲁棒控制领域提供了一个更加可靠和高效的解决方案, 为相关领域的技术发展和应用推广带来了实际价值。

参考文献:

[1] ZAK M. Terminal attractors for addressable memory in neural networks[J]. Physics Letters A, 1988, 133(1-2): 18-22.

[2] ZHAO D, ZOU T. A finite-time approach to formation control of multiple mobile robots with terminal sliding mode[J]. Systems Science, 2012, 43(11): 1998-2014.

[3] FENG Y, YU X, MAN Z. Non-singular terminal sliding mode control of rigid manipulators[J]. Automatica, 2002, 38(12): 2159-2167.

[4] NGUYEN N P, PARK D, NGOC D N, et al. Quadrotor formation control via terminal sliding mode approach: Theory and experiment results[J]. Drones, 2022: 172.

[5] 千金杰, 耿雪浩, 王巧. 基于扰动观测器的协调器自适应滑模控制[J]. 兵工自动化, 2023, 42(7): 16-21.

[6] 马经帅, 于洵, 韩峰. 机载光电稳定平台的强鲁棒性滑模变结构控制[J]. 兵工自动化, 2021, 40(5): 30-33, 83.

[7] MENG C C, ZHANG X Y. Distributed leaderless formation control for multiple autonomous underwater vehicles based on adaptive nonsingular terminal sliding mode[J]. Applied Ocean Research, 2021, 115: 102781.

[8] QIAN M, WU Z, ZHANG Z, et al. Finite time fault tolerant tracking control for multiple unmanned aerial vehicles with actuator faults[J]. Adaptive Control and Signal Processing, 2022, 36(12): 3142-3160.