

基于集员估计的故障诊断技术综述

董久祥[†], 李 易, 张灏麟, 许锦瑜

(东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110819)

摘要: 对于集员估计的故障诊断技术, 因其在处理未知但有界不确定性方面的理论优势, 已成为提升系统鲁棒性与可靠性的重要研究方向. 本文系统综述了基于集员估计的故障诊断方法, 突破传统综述按时间或领域划分的范式, 以集合几何表示形式为主线, 将现有方法划分为区间型、椭球型、中心对称多胞形型以及其他几何体四大类, 深入阐述了每类方法的基本原理、发展脉络与性能特点. 文章进一步围绕故障检测、隔离与估计三个核心环节, 全面回顾了集员估计在故障诊断中的研究进展, 对比分析了不同几何描述策略在计算复杂度、保守性和工程适用性方面的优劣. 在此基础上, 本文系统梳理了该方法在各领域的典型应用成果, 并总结了当前面临的关键挑战. 最后, 文章指出了未来值得深入研究的若干方向.

关键词: 集员估计; 故障诊断; 中心对称多胞形; 椭球体; 区间观测器

中图分类号: TP277 **文献标志码:** A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2025.0996

引用格式: 董久祥, 李易, 张灏麟, 等. 基于集员估计的故障诊断技术综述 [J]. 控制与决策, xxxx, x(x): xxxx-xxxx.

Review of fault diagnosis techniques based on set-membership estimation

Dong Jiu-xiang[†], Li Yi, Zhang Lu-ling, Xu Jin-yu

(College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: For fault diagnosis techniques based on set-membership estimation, due to their theoretical advantages in handling unknown but bounded uncertainties, these methods have become an important research direction for enhancing the robustness and reliability of systems. This paper systematically reviews the fault diagnosis methods based on set-membership estimation, breaking away from the traditional review paradigm of dividing by time or field. This review takes the geometric representation form of sets as the main line and classifies the existing methods into four categories: interval type, ellipsoidal type, centrally symmetric polyhedral type, and other geometric bodies. This paper elaborates in depth on the basic principles, development trends, and performance characteristics of each category of methods. The paper further comprehensively reviews the research progress of set-membership estimation in fault diagnosis around the three core links of fault detection, isolation, and estimation, and compares and analyzes the advantages and disadvantages of different geometric description strategies in terms of computational complexity, conservativeness, and engineering applicability. On this basis, this paper systematically sorts out the typical application achievements of this method in various fields and summarizes the key challenges currently faced. Finally, the paper points out several directions worthy of in-depth research in the future.

Keywords: set-membership estimation; fault diagnosis; zonotope; ellipsoid; interval observer

0 引言

在现代工业系统、交通运输、电力网络以及航空航天等关键领域中, 故障诊断 (Fault Diagnosis) 技术在保障系统安全性、可靠性与可维护性方面发挥着核心作用^[1-3].

传统的故障诊断方法主要包括基于解析模型的

方法、基于数据驱动的方法和基于知识的方法^[4]. 其中, 基于模型的故障诊断方法因其具有明确的物理意义和良好的可解释性, 得到了广泛研究和应用. 然而, 实际系统总是存在各种不确定性, 如参数扰动、外部干扰和测量噪声等, 这些不确定性会严重影响基于模型的故障诊断方法的性能. 为了处理这些不

收稿日期: 2025-09-20; 录用日期: 2026-03-06.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (62273079); 流程工业综合自动化国家重点实验室科研基金项目 (2013ZCX01).

[†]通信作者. E-mail: dongjiuxiang@ise.neu.edu.cn

确定性,鲁棒故障诊断方法应运而生.然而,传统的鲁棒方法多基于最小化最坏情况下的增益(如 H_∞ 方法),往往过于保守,且难以提供故障的定量估计.随着系统复杂性和自动化水平的不断提高,传统基于概率统计的方法在应对有界不确定性、未知但有界噪声以及模型结构不精确等问题时,往往难以保证诊断结果的严格鲁棒性^[5].

在此背景下,集员估计(Set-Membership Estimation)方法展现出其独特优势.集员估计的核心思想是:在系统模型和噪声/不确定性有界的前提下,通过递归算法得到一个包含系统所有可能状态的集合,而非单一点估计.这种方法的优势在于它能够定量地描述不确定性的大小和传播,从而为故障诊断提供一种保证性(guaranteed)的判断.即,只要系统实际运行在预设的模型和噪声边界内,其真实状态必然位于集员估计所得集合之内.一旦观测数据与无故障模型下的集合描述产生矛盾(即一致性被破坏),即可确信故障发生.

基于集员估计的故障诊断技术历经数十年发展,已形成以不同几何体(如椭球(Ellipsoid)、中心对称多胞形(Zonotope)、区间(Interval)、多面体(Polyhedron)等)来描述不确定性集合的多种分支方法.各类方法在计算复杂度、保守性和实现难度上各有权衡.近年来,集员估计被广泛应用于多种故障诊断场景,包括自动驾驶车辆^[6-7]、航空发动机^[8]等.已有研究表明,合理选择几何体和集合运算策略,在兼顾计算复杂度与估计精度的同时,还能有效实现快速诊断与故障隔离.鉴于此,对于推动该技术在复杂工程系统中的工程化应用而言,系统梳理并总结基于集员估计的故障诊断方法具有重要意义.

本文旨在对基于集员估计的故障诊断方法进行一次系统性的梳理与综述.首先,突破传统按时间或应用领域梳理的范式,以“几何体表示形式”为主线,详细回顾基于不同几何体(重点是中心对称多胞形和椭球)的集员估计方法的发展历程、基本原理.其次,对基于集员估计的故障诊断方法进行系统化分类与比较,揭示不同几何描述背后的诊断逻辑与性能折衷.同时,系统整合了近年的前沿研究,特别是中心对称多胞形、椭球束等紧致化方法在故障诊断中的进展.最后,详细讨论分析不同集员估计方法在故障诊断中的应用现状,不仅总结方法,更深入剖析其适用场景、设计挑战与内在局限,明确指出现有方法在处理高维非线性、时变噪声边界、诊断与控制协同等方面的不足,为后续研究提供清晰的问题导向,探讨该领域当前面临的挑战并展望其未来发展趋势.

1 集员估计发展史、基本原理

1.1 基于中心对称多胞形的集员估计发展史、基本原理

中心对称多胞形(zonotope)最早由数学家Branko Grünbaum系统阐述^[9].该几何结构是一种特殊凸多胞形(Convex Polytope),其定义为中心点与有限个生成器矩阵的闵可夫斯基和(Minkowski sum).具体而言, n 维空间中的中心对称多胞形 Z 可表示为:

$$Z = c \oplus GB^m = \{c + G\beta \mid \beta \in B^m\}, \quad (1)$$

其中 $c \in R^n$ 为中心点, $G \in R^{n \times m}$ 为生成器矩阵(每列表征生成线段的方向和长度), $B^m = [-1, 1]^m$ 是 m 维单位超立方体, \oplus 表示闵可夫斯基和运算.图1展示了中心对称多胞形.

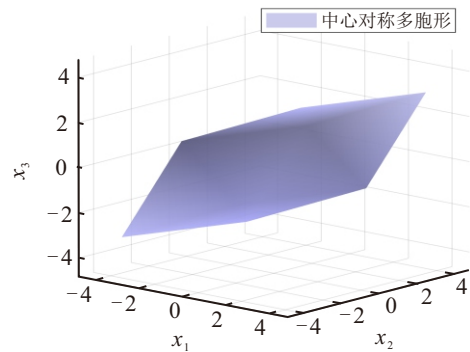


图1 中心对称多胞形示意图

其中,

$$c = [0, 0, 0]^T, G = \begin{bmatrix} 2, 1, 0.5 \\ 1, 2, 0.5 \\ 0.5, 1, 2 \end{bmatrix}$$

中心对称多胞形在集员估计理论中的应用源于对围包效应(Wrapping Effect)的控制需求.1998年,Kühn通过数学证明首次指出该几何体可有效抑制迭代过程的误差累积围包效应^[10].直至2003年,Combastel在开创性工作中系统构建了中心对称多胞形的集员估计框架:其核心在于引入“状态传播-测量校正”两步递归结构——先计算状态传播的外包集合 \bar{X}_k ,再将其与测量约束集合 \hat{X}_{y_k} 求交,并采用奇异值分解技术构造该交集的外包中心对称多胞形,从而首次实现动态系统状态可行集的紧凑表征^[11].该框架被拓展至非线性连续时间系统,奠定了该几何体从理论工具转向工程应用的基石.

具体的,“状态传播-测量校正”的两步的递归结构可以被表示为:

考虑离散线性时不变系统:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) + w(k) \\ y(k) &= Cx(k) + v(k), \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $w(k) \in W$, $v(k) \in V$ 为有界的过程噪声与测量噪声 (通常以中心对称多胞形描述), 初始状态 $x(0) \in X_0$ (中心对称多胞形).

预测步: 若 k 时刻状态集 $x(k) = c_k \oplus G_k B^{m_k}$, 则 $k+1$ 时刻的预测状态集为:

$$X_{pred}(k+1) = (Ac_k + Bu(k)) \oplus [AG_k | Bw_g] B^{m_k+m_w} \quad (3)$$

由此获得包含实际状态的预测中心对称多胞形.

更新步: 基于 $k+1$ 时刻测量值 $y(k+1)$ 及测量噪声集 V , 计算得到校正中心对称多胞形. 因真实状态须同时属于预测集与校正集, 故实际状态必位于二者之交. 由于该交集无法用中心对称多胞形精确表征, 文献 [11] 选择求取外包该交集的中心对称多胞形, 从而确立此类方法的基本范式.

由于采用外包中心对称多胞形包含交集会引入保守性, 学者们的研究重点转向了优化该交集的外包中心对称多胞形. 文献 [12] 提出了两种优化策略: 一种是寻求最小体积的算法, 另一种是寻求最小段数的算法. 最小体积法能获得较高的估计精度, 但计算复杂度较高; 而最小段数法计算效率高, 但精度相对较低. 为在两者间寻求良好折衷, 文献 [13] 提出了一种基于 P-半径的优化方法. 此外, 文献 [14] 设计了最小化 F-半径的算法. 目前, 这两种基于半径的方法已成为该领域的主流优化方法.

受限于中心对称多胞形的计算特性, 其应用过程中的阶数呈指数级增长, 导致计算量急剧增加. 为缓解此问题, 可采用降阶策略减小计算负担, 但每次降阶操作都会引入保守性, 影响集员估计性能. 对此, 文献 [15] 提出了一种降阶方法: 优先选择最短欧几里得范数的生成器, 并用区间包络 (interval hull) 覆盖剩余部分, 以着重降低计算复杂度. 文献 [16] 则基于生成器的轴对齐分数选择生成器, 再施以区间包络, 旨在最小化过估计误差. 文献 [17] 采用组合搜索 (combinatorial search) 选取高体积平行体 (parallelotope) 来包围生成器, 替代区间包络, 从而显著提升了体积估计精度.

国内关于中心对称多胞形的研究最早见于 2008 年, 柴伟和孙先仿针对非线性离散系统提出了一种改进的集员状态估计算法 [18]. 该算法通过优化带与多胞形交集的外界描述方式, 显著提升了非线性不确定系统状态估计的精度. 此后, 基于中心对称多胞形的集员估计方法在国内逐渐受到关注, 研究范

围不断拓展, 被诸多学者应用于有限频故障检测、主动故障诊断等多个领域 [19], [20], 进一步推动了该方法在状态估计与故障诊断中的应用与发展.

针对传统“状态传播-测量校正”两步递归方法中因交集运算引发的保守性问题, 文献 [21] 提出了一种改进方案: 将中心对称多胞形与区间观测器相结合, 设计了基于观测器的集员估计方法. 该方案摒弃了传统的两步递归框架, 其核心在于: 首先设计鲁棒观测器获得系统状态的点估计; 随后, 通过融合该点估计与误差系统的可达集估计, 直接得到状态的集员估计. 该方案设计更为直观简洁.

1.2 基于椭球体的集员估计发展史、基本原理

一个 n 维空间中的椭球被表示为:

$$\mathcal{E}(c, X) = \{x \in \mathbb{R}^n : (x - c)^T X^{-1} (x - c) \leq 1\}, \quad (4)$$

其中, $c \in \mathbb{R}^n$ 是椭球 $\mathcal{E}(c, X)$ 的中心, $X \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 是其形状矩阵, 满足 $X > 0$. 图 2 展示了椭球体的几何图形.

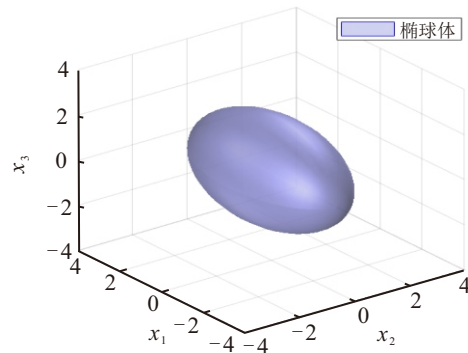


图2 椭球体示意图

其中,

$$c = [0, 0, 0]^T, \quad X = \begin{bmatrix} 3.3, & 0.6, & 0 \\ 0.6, & 12, & 0 \\ 0, & 0, & 5 \end{bmatrix}$$

椭球在 1968 年被 F. Schweppe 首次应用在状态估计, 在动态系统输入和观测误差未知但有界的情况下, 通过递归求取得了包含系统实际状态椭球, 奠定了基于椭球的集员估计的基本思想 [22]. 这就是最初的经典传播-交集椭球集员估计方法. Durieu 与 Maksarov 等学者依据上述两个准则, 计算了椭球闵可夫斯基和及椭球交集, 并提出了求解最优外包椭球的方法, 该算法后来得到了广泛的应用 [23-24]. 但是, 值得注意的是, 这些学者均没有对求取椭球的交集进行优化. 1982 年, Eli Fogel 基于最小体积椭球和最小化半长轴平方和两个原则求解了椭球交集的最优外包椭球 [25]. Durieu 和 Maksarov 等人基于以上两个准则给出了后面被广泛使用的椭球闵可夫斯基和和

椭球交集的最优外包椭球的计算方法^[23-24].至此,得到了改进的传播—交集椭球集员估计方法.

传播-交集椭球集员估计方法可以分为“状态预测-测量更新”两步.考虑离散线性时不变系统:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) + w(k) \\ y(k) &= Cx(k) + v(k), \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $x(k)$ 是系统状态, $u(k)$ 是系统输入, $y(k)$ 是测量输出, A, B, C 分别是具有适当维数的已知矩阵. $w(k)$ 是过程噪声, $v(k)$ 是测量噪声, 分别满足

$$\begin{aligned} w(k) &\in \mathcal{E}(0, W) = \{w(k) : w(k)^\top W^{-1} w(k) \leq 1\} \\ v(k) &\in \mathcal{E}(0, V) = \{v(k) : v(k)^\top V^{-1} v(k) \leq 1\}, \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $W > 0$ 和 $V > 0$ 是已知矩阵. 系统的初始状态 $x(0)$ 满足

$$x(0) \in \mathcal{E}(c_0, X_0), \quad (7)$$

状态预测: 已知 k 时刻的系统状态 $x(k) \in \mathcal{E}(c_k, X_k)$. 根据系统动力学传播, 可以得到 $k+1$ 的状态预测集为:

$$\begin{aligned} X_{pred}(k+1) &= \\ &(Ac_k + Bu(k)) \oplus \mathcal{E}(0, AX_k A^\top) \oplus \mathcal{E}(0, W) \end{aligned} \quad (8)$$

此时, 就能得到一个包含实际状态的预测椭圆.

测量更新: $k+1$ 时刻, 利用测量方程 $y(k+1)$ 以及测量噪声椭圆可以得到与测量输出保持一致的状态集合 $X_{y(k+1)} = \{x(k+1) \in \mathbb{R}^n : |Cx(k+1) - y(k+1)| \leq M\}$, 其中, $V = MM^\top$. 由于 $x(k+1) \in X_{pred}(k+1)$ 且 $x(k+1) \in X_{y(k+1)}$, 则有 $x(k+1) \in X_{pred}(k+1) \cap X_{y(k+1)}$. 椭球 $X_{pred}(k+1)$ 与多面体 $X_{y(k+1)}$ 的交集 $X_{pred}(k+1) \cap X_{y(k+1)}$ 并不是椭球, 但是可以找到一个包含这个交集的最小外包椭球来近似它.

在状态预测和测量更新过程中的椭球闵可夫斯基和以及最优外包椭球均可根据 Durieu 和 Maksarov 等人提出的计算方法进行求解.

在这个框架下, 众多学者开展了广泛研究, 涌现了一系列基于椭球传播-交集的集员估计方法. 文献 [26] 提出了基于组合二次约束的椭球集员估计方法, 解决了模型不确定性下线性及弱非线性离散时间系统状态可行集的非凸估计问题, 并给出了最优或次优解析解. [27] 针对线性离散时间系统, 提出了基于 Cholesky 分解的椭球状态定界鲁棒算法, 通过平方根递推与次最小容积更新策略, 显著提升了算法数值稳定性与计算效率. 文献 [28] 进一步提出了基于奇异值分解的椭球状态定界数值稳定算法, 有效避免了矩阵求逆的病态问题, 保障了椭球形状矩阵的

正定性, 增强了算法在实际系统中的适用性. 文献 [29] 将扩展集员滤波 (ESMF) 应用于捷联惯导系统大方位失准角下的非线性初始对准, 通过区间分析界定线性化误差, 取得了比扩展卡尔曼滤波更优的估计精度与鲁棒性. [30] 首次将集员滤波应用于捷联惯导静基座初始对准, 验证了其在有界噪声下优于卡尔曼滤波的鲁棒性与稳定性. 文献 [31] 提出了一种有效降低了非线性系统状态估计中计算负担与保守性的基于有界椭圆近似和 DC 规划的增强型集员滤波方法. 文献 [32] 针对有界扰动下的线性系统, 提出了一种基于 Lyapunov 稳定的快速递归椭球集员估计算法, 在保证估计精度的同时显著降低了计算复杂度, 并确保了估计误差的输入-状态稳定性. 文献 [33] 提出了一种将事件触发机制和分布式椭球集员滤波相结合的状态估计方法, 通过区间数学理论与邻域信息融合, 有效降低了传感器网络通信负担, 并实现了非线性系统状态的可扩展估计.

然而, 传播-交集法虽概念直观, 但其核心的几何运算计算复杂, 难以满足高阶系统或实时应用的需求. 为此, 研究转向了滤波器范式. 该方法不同于传播-交集方法的“状态预测-测量更新”两步递归, 而是通过设计一个滤波器, 将系统状态的点估计与误差系统的可达集相结合, 从而得到系统状态的集员估计. 过程中只需优化的滤波器增益, 确保所有估计误差动态有界并约束于一个椭球内, 从而将问题转化为更高效的滤波器参数设计, 显著提升了计算效率与工程实用性. 文献 [34] 提出了提出了基于递归线性矩阵不等式的概率保证集员滤波方法, 解决了随机系统矩阵与不完全测量下的状态定界问题, 并通过凸优化满足概率约束. 文献 [35] 针对混合时延与协议约束系统提出了基于椭球优化的集员滤波方法, 在轮询和加权尝试一次丢弃协议下, 有效解决了有界非高斯噪声下的状态定界问题. 文献 [36] 提出了一种基于事件触发的分布式椭球集员滤波方法, 有效解决了非线性饱和系统在有界噪声下的状态估计问题, 并通过优化椭球体积与触发阈值平衡了估计性能与通信效率. 文献 [37] 提出基于集员估计的多传感器融合定位方法, 应用于室内移动机器人, 融合激光扫描匹配与里程计信息, 在保证实时性的同时获得了位姿的严格不确定性边界. 文献 [38] 提出了一种基于动态事件触发机制的分布式椭球集员估计方法, 在显著降低无线传感器网络通信量的同时, 保证了有界噪声下系统状态估计的可靠性和有效性. 文献 [39] 提出了基于轮询协议与多速率提升技术的分布式椭球集员滤波方法, 有效解决了资源受限下

多速率系统的状态定界与通信优化问题. 文献 [40] 针对量化测量与冗余信道下的复杂网络, 提出了一种基于超椭球定界的集员滤波方法, 有效处理了随机延迟与量化误差带来的状态估计不确定性. 文献 [41] 针对无线传感器网络中遭受双通道欺骗攻击与拓扑切换的非线性系统, 首次提出基于事件触发的分布式安全椭球集员滤波方法, 在有界扰动下实现了局部 Lipschitz 系统的状态有界估计. 文献 [42] 针对二进制传感器网络, 提出了基于测量跳变信息与饱和函数的分布式椭球集员估计方法, 有效实现了阈值时变情形下的状态定界与异常值抑制.

尽管该滤波器结构在效率上有所提升, 但其采用的单一椭球近似方式固有保守性强的问题仍未得到妥善解决. 此外, 椭球交集运算不仅计算复杂度高, 且难以精确实现, 这些问题共同制约了算法的实时性能与估计精度. 为在保证实时性的同时获得更紧致的估计, [43] 在 2020 年提出了一种基于椭球闵可夫斯基和的新型集合描述工具——椭球束 (Ellipsoidal Bundle). 该方法利用多个椭球的交集构造更灵活、非对称的集合形状, 以适度增加计算量为代价, 显著降低了估计的保守性, 实现了紧致性与复杂度间的更好权衡. [44] 在 2022 年提出了一种针对离散时间线性 LPV 系统的融合椭球束与 L_∞ 优化的集员估计方法, 有效提高了估计精度并保证了稳定性. [45] 在 2022 年针对 Lipschitz 非线性系统, 提出了一种结合新型观测器结构与峰值性能分析的椭球区间估计方法, 通过线性参数化转换有效提升了区间估计的精度与鲁棒性. 图 3 展示了椭球束的几何图形.

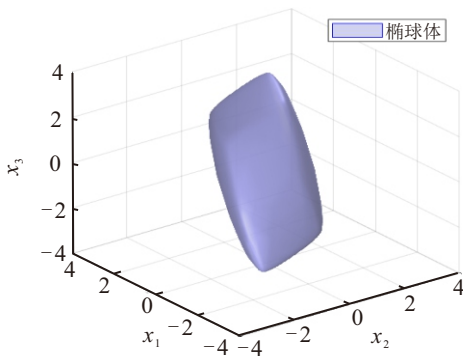


图3 椭球束示意图

1.3 基于区间形式的集员估计发展史、基本原理

区间分析作为一种经典的集员估计方法, 最早由 [46] 在 1966 年提出, 最初用于处理数学计算中的舍入误差和不确定性. 其核心思想是将每个变量表示为一个区间, 通过区间运算规则 (如加法、乘法、函数组合等) 来传播不确定性, 最终得到一个包含所有

可能取值的区间集合. 区间运算具有良好的封闭性和可计算性, 使其在系统建模与状态估计中逐渐得到应用.

在动态系统状态估计中, 区间观测器是一种典型的基于区间分析的集员估计方法. 其基本思想是通过构建状态的上界与下界, 将系统状态约束在一个区间向量中, 从而实现对系统状态的有界估计. 考虑如下离散线性时不变系统

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) + w(k) \\ y(k) &= Cx(k) + v(k), \end{aligned} \quad (9)$$

其中, $w(k) \in [\underline{w}, \bar{w}]$, $v(k) \in [\underline{v}, \bar{v}]$ 为有界的过程噪声与测量噪声, 初始状态 $x(0) \in [\underline{x}_0, \bar{x}_0]$.

典型的区间观测器结构可表示为:

$$\begin{aligned} \underline{x}(k+1) &= A^+ \underline{x}(k) + A^- \bar{x}(k) + Bu(k) + \underline{w} - \\ &\quad L(y(k) - C^+ \underline{x}(k) - C^- \bar{x}(k) - \bar{v}), \\ \bar{x}(k+1) &= A^+ \bar{x}(k) + A^- \underline{x}(k) + Bu(k) + \bar{w} - \\ &\quad L(y(k) - C^+ \bar{x}(k) - C^- \underline{x}(k) - \underline{v}), \end{aligned} \quad (10)$$

其中, $A^+ = \max(A, 0)$, $A^- = A - A^+$, 类似定义 C^+ 和 C^- , L 为观测器增益矩阵.

区间观测器方法因其形式简洁、计算高效, 尤其适用于工程实践中对实时性要求较高的场景. 然而, 传统区间方法在处理高维系统或强非线性系统时, 容易因区间扩张而导致保守性过大. 为此, 研究者提出了多种改进策略, 如利用约束传播、符号区间分析以及混合区间-椭球方法等, 以提升估计精度.

为进一步提高区间估计的紧致性和适用性, 研究者提出了基于可达集的区间核 (Interval Hull) 方法. 该方法的核心是通过计算系统状态在噪声和初始不确定性影响下的可达集, 并求取其最小外包区间, 从而实现对状态集合的更紧凑描述.

可达集区间核方法的发展可追溯至对动态系统鲁棒分析与控制的研究. 1990 年代, 随着计算几何与混合系统验证的发展, 基于区间的可达集计算开始应用于自动控制领域 [47]. 2000 年代初, [48] 将区间分析与可达集计算结合, 提出了用于线性系统可达集计算的区间方法, 并通过 Bernstein 展开等工具处理非线性系统.

具体而言, 考虑系统:

$$x(k+1) = f(x(k), u(k), w(k)), \quad (11)$$

其中 $w(k) \in W$ 为有界噪声.

系统在 k 时刻的可达集 $\mathcal{R}(k)$ 可通过递归计算:

$$\mathcal{R}(k+1) = f(\mathcal{R}(k), u(k), W), \quad (12)$$

区间核 $\mathcal{H}(\mathcal{R}(k))$ 定义为包含 $\mathcal{R}(k)$ 的最小区间向量, 即:

$$\mathcal{H}(\mathcal{R}(k)) = [\min(\mathcal{R}(k)), \max(\mathcal{R}(k))]. \quad (13)$$

图4展示了区间核的几何图形。

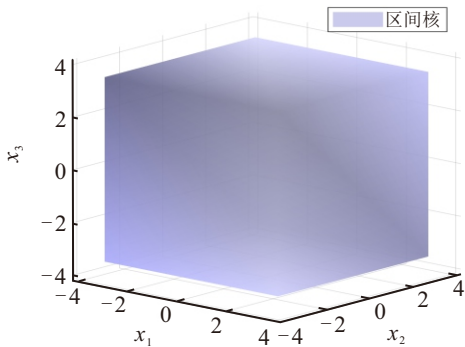


图4 区间核示意图

其中,

$$\mathcal{H}(x) = \begin{bmatrix} -3.5, 3.5 \\ -3.5, 3.5 \\ -3.5, 3.5 \end{bmatrix}$$

尽管区间方法在计算上具有明显优势,但其在高维和非线性系统中的保守性问题仍是当前研究的重点.未来有望通过结合机器学习、自适应区间划分等技术进一步提升其性能.

1.3.1 基于其他几何体的集员估计发展史、基本原理

在集员估计的发展过程中,除区间型、椭球型与中心对称多胞形方法外,研究者还提出了多种其他几何体表示形式,用于描述系统状态的可行集合,以在计算复杂度、外包精度和适应性之间寻求更优平衡.这些方法大多是针对高维系统、非凸不确定性以及特定工程场景中的几何近似需求而提出,并逐渐发展成为集员估计方法的重要分支.

早期的其他几何体方法之一是基于多面体的集合外包策略,其思想是利用一组线性不等式的交集来刻画状态集合的边界^[49].多面体外包在保持集合形状灵活性的同时,可以较精确地逼近状态集合,尤其适用于状态与参数之间呈现分片线性关系的系统.但由于多面体的面数在状态更新过程中可能呈指数增长,计算复杂度成为限制其在实时场景应用的主要瓶颈^[50].综上,基于其他几何体的集员估计方法为解决集员估计在高维、非凸和复杂不确定性场景下的可行集合外包问题提供了多样化的工具箱.未来的发展趋势可能集中在与数据驱动算法的结合、动态几何形式自适应切换以及多精度分层外包框架等方向,以进一步提升实时性和精度.

2 集员估计故障诊断的研究现状

2.1 基于中心对称多胞形的集员故障诊断方法

基于中心对称多胞形的集员估计在故障诊断中的应用,已从早期直观的几何集合操作,发展为一个

包含故障检测、隔离与估计的完整方法体系.其演进脉络深刻反映了研究者如何在保证有界不确定性下诊断可靠性的理论优势与降低保守性、提升计算效率的工程需求之间寻求平衡.该方法的发展脉络清晰呈现了从基于集合一致性检验的直接判定,向基于残差集员分析的集成诊断框架的演进过程,标志着研究重心由几何关系的定性判断转向残差信号的定量评估与深度融合.早期研究主要利用中心对称多胞形描述系统状态的预测集与测量一致集,通过检验两者是否存在交集来实现故障检测:当两个中心对称多胞形存在交集时,故障检测逻辑不报警;当两者交集为空时,则判定故障检测逻辑报警,判定系统存在故障^[51].图5和图6分别展示了使用上述方法检测系统中存在故障和不存在故障的情况.

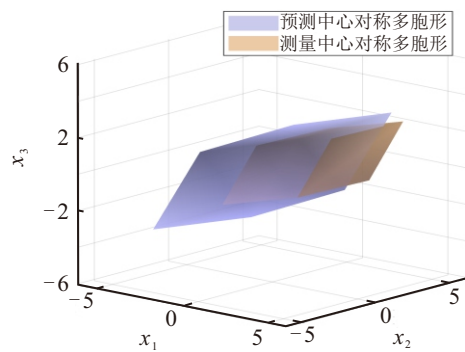


图5 两个中心对称多胞形有交集,故障检测逻辑不报警

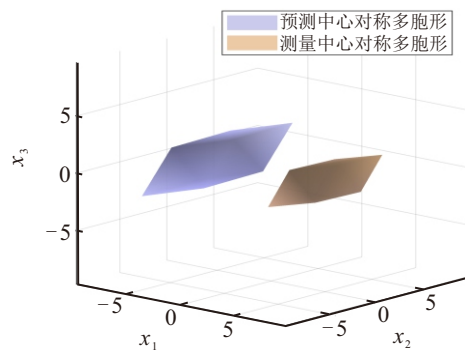


图6 两个中心对称多胞形无交集,故障检测逻辑报警

这种方法概念直观,且仅需噪声有界的先验知识,奠定了集员诊断的严格性基础.然而,这种基于整体集合比较的方法难以与主流的基于残差的诊断系统框架集成,且诊断信息利用率有限,限制了其在实际复杂系统中的应用广度.后续研究虽然尝试引入多胞形参数化描述以增强对参数摄动的鲁棒性,但本质上仍属于集合一致性检验的范畴^[52,53].随着集员估计研究的深入,由学者开始关注基于残差的集员故障诊断方法.在文献[54]提出的方法中,通过中心对称多胞形对无故障残差的集合进行包络,从而生成自适应阈值,故障的检测最终转化为对实际残

差与该集合包容关系的判断. 这种方法实现了集员估计与传统基于模型的故障诊断理论的深度融合, 使前者成为一种强大的不确定性量化与鲁棒阈值设计工具. 图7和图8展示了利用残差实现故障检测的示意图.

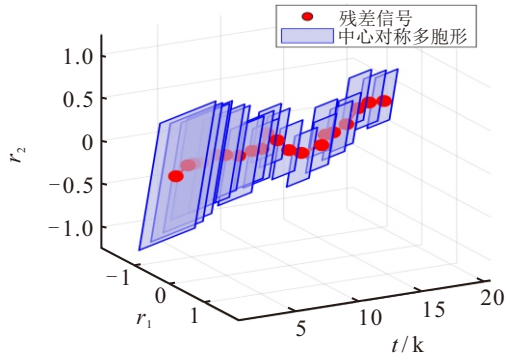


图7 残差被包含在集合内, 故障检测逻辑不报警

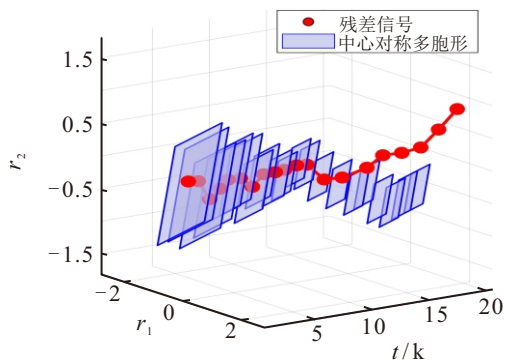


图8 残差不被包含在集合内, 故障检测逻辑报警

现有基于残差的诊断方法, 其研究主要集中在两个关键方向上, 旨在提升诊断性能. 一个方向侧重于引入与优化系统性的设计指标与准则. 学者们将传统控制理论中的性能指标, 如衡量故障灵敏度的 H_2 指标、体现扰动抑制能力的 H_∞ 指标, 以及反映集合体积的 P 半径等, 深度融合到集员估计框架中. 通过构造多目标优化问题来综合设计观测器增益与阈值计算策略, 该方法能够在保证系统对不确定性鲁棒性的同时, 显著提高对故障信号的灵敏度, 从而有效降低因简单几何外包操作所导致的保守性 [55]. 另一个方向则致力于创造新的、表达力更强的集合描述方法, 从数学基础上寻求突破. 例如, 约束中心对称多胞形通过在标准结构中引入线性等式约束, 能够更精确地描述非对称的凸集, 并且在关键的集合交集运算下仍能保持形式封闭, 这从根源上减小了近似误差, 为实现更紧致、更准确的故障检测与状态估计提供了基础 [56].

为应对工业系统日益增长的复杂性, 该诊断框架在模型适应性上得到了广泛拓展. 研究成功突破了早期线性时不变系统的局限, 被系统地应用于线

性变参数系统 [57,58]、广义系统 [59] 以及各类 T-S 模糊系统 [60,61,62] 等复杂模型. 这些拓展通常通过将中心对称多胞形的集合运算与特定系统的稳定性分析和控制器设计工具 [19] 相结合, 展现了该方法强大的可扩展性与解决实际工程问题的潜力.

进一步地, 该领域的研究目标实现了从故障检测与隔离向故障区间估计的深刻演进. 通过将故障信号增广为系统状态的一部分, 并利用中心对称多胞形描述其动态可行集, 研究者能够在有界扰动下, 实时给出故障幅值的上下界估计 [63]. 这一功能在为后续的主动容错控制提供关键信息方面具有不可替代的价值. 相关研究已在切换系统 [63,64]、基于中间观测器的设计 [65] 及通信资源受限的工业网络化控制系统 [66] 等场景中得到验证与发展, 形成了更为完整的“检测-隔离-估计”诊断链条.

总而言之, 基于中心对称多胞形的故障诊断方法已从初期的集合一致性检验, 发展为以残差分析为核心、融合多种性能指标与先进模型表述的综合性诊断框架. 其当前挑战主要在于高维系统下的计算复杂度与保守性之间的平衡, 未来可与降阶策略、混合几何体表示相结合以进一步提升其实用性.

2.2 基于椭球体的集员估计故障诊断方法

集员估计在故障诊断中的应用, 本质上是基于集合一致性检验的故障检测与隔离范式. 其核心在于构建一个包含所有可能系统状态 (考虑有界噪声与不确定性) 的可行椭球, 并与描述无故障系统行为的先验椭球进行比较. 若两者交集为空, 则表明系统行为已偏离正常模型, 从而触发故障告警. 该方法的优势在于仅需噪声边界信息, 无需假设其统计分布, 为故障诊断提供了坚实的鲁棒性理论基础.

在早期发展阶段, 研究主要聚焦于基于椭球交集判据的直接检测方法. 这类方法通过几何集合的包含与相交关系实现故障的检测与隔离, 具有计算相对简单、结论确定性强的特点. 例如, 文献 [67] 提出了基于集员辨识的故障检测方法, 为参数跳变与传感器故障提供了快速诊断策略. 文献 [68] 将集员辨识与 T-S 模糊模型相结合, 实现了非线性系统在未知但有界噪声下的建模与故障检测, 体现了集员方法在系统安全领域的早期应用价值. [69] 提出了基于区间分析与椭球近似的集员滤波算法, 通过泰勒展开线性化与盒子近似处理非线性项, 将非线性系统的状态估计转化为椭球集合运算, 首次系统地集员估计应用于非线性系统的保证性故障诊断. 随着网络化系统的发展, 该方法在资源受限场景中

得到优化. 文献 [70] 提出了基于事件触发的分布式集员滤波方法, 将椭球交集判断与事件触发机制相结合, 在有效检测光伏并网系统孤岛故障的同时, 显著降低了网络通信负载. 后续研究进一步拓展了该框架的应用边界: 文献 [71] 利用预测椭球与估计椭球的交集关系, 成功将其用于检测传感器、执行器及通信链路上的多种网络攻击模式; 文献 [72] 针对机器人装配任务中的电气连接器故障, 通过构建切换线性模型序列并进行椭球优化, 实现了有界扰动下的精确故障隔离. 图 9 和图 10 分别展示了使用上述方法检测系统中存在故障和不存在故障的情况.

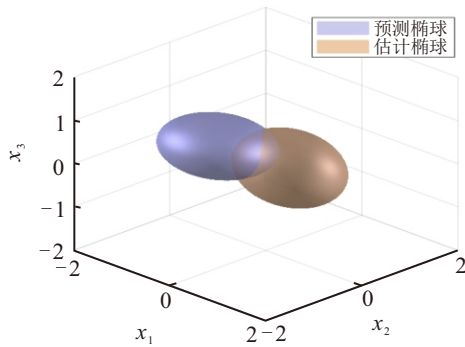


图9 两个椭球体有交集, 故障检测逻辑不报警

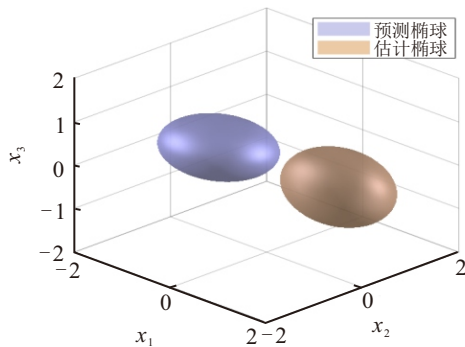


图10 两个椭球体无交集, 故障检测逻辑报警

然而, 基于几何交集的方法存在固有局限. 其对缓变故障的灵敏度较低, 因为此类故障引起的集合漂移可能不足以使椭球迅速脱离交集区域. 此外, 这类方法更多提供“故障是否存在”的二元判断, 缺乏对故障动态特性的刻画. 为更敏感、更动态地揭示系统异常, 研究重心逐渐转向基于滤波残差生成与评估的故障检测方法. 图 11 和图 12 展示了基于滤波器设计的故障检测的示意图.

第二阶段的研究围绕集员滤波器设计展开, 旨在构造动态的、包含时变信息的残差集合. 通过分析残差椭球是否偏离原点或预设的正常范围来实现故障检测. 例如, 文献 [73] 针对具有混合时滞和状态饱和的复杂系统, 通过递归矩阵不等式设计了集员滤波器, 保证了滤波误差椭球的有界性, 提升了在复杂

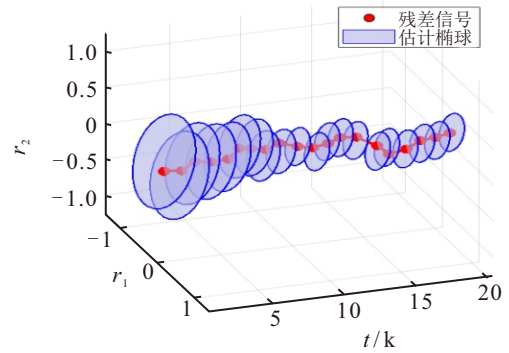


图11 残差被包含在集合内, 故障检测逻辑不报警

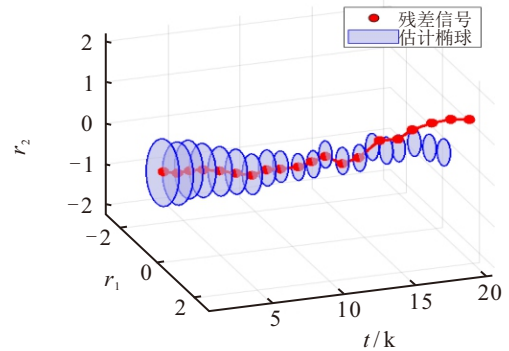


图12 残差不被包含在集合内, 故障检测逻辑报警

动态下的故障检测能力. 文献 [74] 面向传感器网络, 结合 WTOD 协议与分布式椭球交集判据, 不仅实现了多传感单元的协同实时诊断, 还通过优化椭球边界进一步降低了系统能耗. 为平衡故障灵敏度与扰动鲁棒性, 文献 [75] 针对参数不确定的模糊系统, 设计了 H/∞ 性能指标下的集员观测器, 在抑制扰动影响的同时增强了对故障信号的响应. 文献 [45] 提出了另一种面向网络化系统的分布式全局集员估计方法, 通过局部椭球交集与最大化迹的融合策略, 提升了状态估计精度, 并成功应用于光伏孤岛检测, 体现了从局部诊断到全局性能优化的演进.

尽管故障检测与分离能够实现定性定位, 但要支撑后续的容错控制与系统恢复, 必须对故障进行定量计算. 该方法旨在定量地重构故障信号的实时幅值, 通过设计特殊滤波器将残差信息提炼为对故障本身的渐近或有界估计, 从而完成了从“定性”到“定量”的诊断深化, 成为连接诊断与容控的关键桥梁. 例如, 文献 [76] 针对旋转导向钻井系统, 提出的基于椭球束描述符模型的传感器故障估计方法, 在有界不确定性下同步实现了系统状态与故障信号的区间估计, 为安全控制提供了量化输入. 文献 [77] 针对非线性时变复杂网络, 结合动态事件触发与未知输入观测器的故障估计方法, 在保证估计性能的前提下优化了通信资源的使用. 文献 [78] 体现了数据驱动与集员框架的融合趋势, 通过椭球束优化的区

间预测神经网络,有效降低了纯数据驱动方法在噪声下的预测保守性,提升了故障诊断的准确性与可靠性。

基于椭球体的集员故障诊断研究,已形成从几何检测到动态滤波残差分析,再到故障估计的清晰技术演进路径.其核心思想始终围绕利用有界不确定性描述,提供保证性能的诊断结论.当前研究呈现出模型驱动与数据驱动相融合、集中式向分布式发展、诊断精度与资源消耗相权衡三大趋势。

2.3 基于区间形式的集员估计故障诊断的方法

对于含有有界测量噪声和过程扰动的不确定系统,不精确的概率特性往往导致传统统计滤波方法性能下降,而区间方法只要求已知不确定性界限,可以在数值上保证所有可能状态均落在估计的区间范围内.在动态系统中,通过区间算子进行递推更新,即可得到每一时刻的状态可行域;结合测量方程,可以实现对新一轮数据的集员约束,从而缩小区间宽度.在故障诊断中,该思想被应用于残差的区间表征,即在无故障假设下计算输出的区间包络,并与实际测量的输出进行比较,当零向量不再落入残差区间时,便可判定系统发生了不可忽略的结构变化或偏差,这一机制可自然用于故障检测(FD)[4,79].图13和图14展示了针对基于区间形式动态阈值实现故障检测的示意图。

在故障检测与隔离方面,区间集员估计方法通

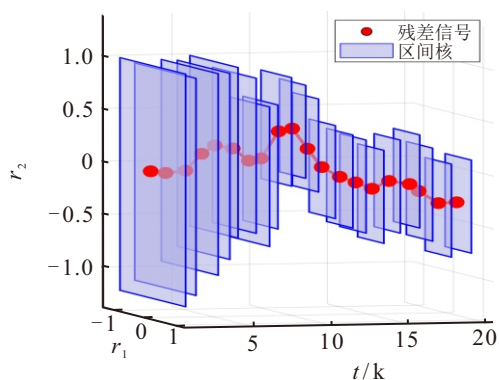


图13 残差被包含在集合内,故障检测逻辑不报警

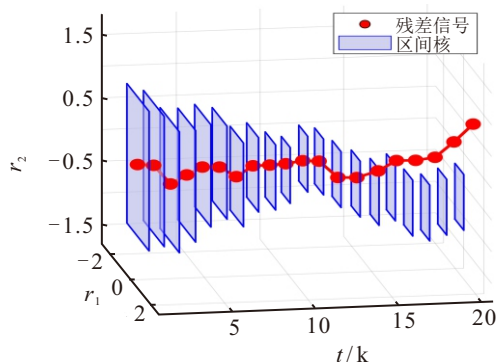


图14 残差不被包含在集合内,故障检测逻辑报警

常结合基于残差策略进行,即通过建立相应的区间观测器模型,将实际测量计算所得的残差分别与给出的无故障残差区间进行检验来判断故障是否发生.[80]设计了能够适应模型参数时变和测量噪声的鲁棒区间观测器,在网络化系统环境中仍能保持良好的检测性能.[81]针对中国铁路高速所使用的电气牵引装置,提出了一种区间滑模观测器以及一种早期传感器故障检测方法,通过构建连续非线性函数和新注入函数的区间边界,设计了区间滑模观测器.然后,通过残差生成器和相应的阈值生成器建立了基于区间滑模观测器的故障检测框架.针对加性干扰和测量噪声是未知但有界的模糊切换系统,[82]在考虑前提变量不可测情况下,完成了模糊区间观测器的设计.[83]将区间观测器应用于感应电机绕组故障检测,通过构造 Metzler 矩阵实现状态区间估计.[84]将区间滑模观测器与混合逻辑动态模型结合,用于逆变器开路故障诊断;[85]则针对广义系统执行器故障,设计了基于区间观测器的故障检测方法.[86]将区间观测器应用于矿井水位传感器故障检测,通过故障特征矩阵处理故障检测与隔离,提高了检测合理性.[87]针对广义系统,研究了离散和连续情形下的区间观测器设计方法,为广义系统的故障诊断提供了工具.得益于这些区间观测器的发展,基于区间集员估计的故障检测方法在工业过程中已经成为低计算成本、易实现的有效方案。

在故障估计环节,区间方法的优势在于其“界限化”特性能够同时给出故障量的上下界,从而为安全控制提供保守但有保障的定量信息.这一思想已被多个领域采用:在能源系统中,[88]提出了一种利用设计的降阶区间观测器来诊断感应电机驱动器中的开路开关故障和电流传感器故障方法,其采用降阶区间观测器来同时估计状态和开路开关故障.此外,通过利用区间观测器,提出了故障检测和识别方法,以有效地诊断并区分开路开关故障和电流传感器故障.针对网络化控制系统,[89]将执行器故障视为增广状态,构造与原系统等价的增广系统,基于所得到的增广系统和隐蔽式攻击信号的上下界信息,设计鲁棒增广状态区间观测器,从而实现研究隐蔽式攻击下状态与执行器故障的联合区间估计。

总体来看,基于区间形式的集员估计方法在故障检测中具有快速性和确定性保障,在故障估计中则能够提供有界的幅值评估.然而,其在高维系统中的保守性与区间膨胀仍然是主要挑战.未来的发展趋势包括通过区间与椭球、多面体等几何体的混合外包降低保守性,以及结合边缘计算和分布式诊断

策略,将区间方法的快速检测优势与多节点协作能力相结合,适应工业过程、智慧能源与自主系统等领域对高鲁棒性和高实时性的故障诊断需求。

2.4 基于其他几何体的集员估计故障诊断方法

在集员估计领域,除中心对称多胞形,椭球体与区间两种常用的几何描述形式外,研究者还发展了多种能够更灵活表征不确定集合边界的几何体方法,包括带约束的中心对称多胞形,多面体、平行体以及混合几何体等。这些方法的共同目标是通过更精细的几何逼近来提升不确定集合的紧致性,从而提高故障诊断过程中的检测灵敏度与隔离精度。

在故障检测,故障隔离以及故障估计方面,针对广义线性系统,[90]提出基于集值的状态估计和主动故障诊断方法。这些算法基于带约束的中心对称多胞形,这是一种中心对称多胞形的扩展形式,能够描述具有强烈不对称性的凸集,同时保留了中心对称多胞形的计算优势。与区间、椭球体和中心对称多胞形不同,带约束的中心对称多胞形能够直接将线性静态约束(这是描述系统所具有的典型特征)纳入其数学表示中,从而实现更保守的封闭范围。然而,对于不稳定或不可完全观测的广义线性系统,有界表示无法确保随着时间的推移对状态的有效封闭。为了解决这一局限性,[91]引入了线性中心对称多胞形,这是一种新的无界集合表示,保留了带约束的中心对称多胞形的关键特性,包括多项式时间复杂度的降低方法,同时能够描述中心对称多胞形、超平面和整个 n 维欧几里得空间。这种扩展不仅将带约束的中心对称多胞形的应用推广到了无界环境中,而且还能够增强稳定和不稳定情况下的基于集合的估计以及主动故障诊断。对具有未知有界噪声的非线性系统,[92]提出了一种基于超平行空间的集员滤波状态估计算法。其利用斯特林矩阵对模型进行一阶线性化,并通过凸差规划精确定界线性化误差。在预测与更新过程中,算法始终采用超平行空间来描述误差边界和状态可行集。更新时将观测值分解为多个“带”,并依次与预测的可行集进行相交运算,从而得到更新后的状态集。这种方法避免了传统误差外包络所导致的体积过度扩张问题,显著降低了非线性集员滤波的保守性。[93]针对含有未知但有界噪声的线性系统,提出了一种基于集员滤波的故障诊断策略。其核心思想是利用正多胞体来描述参数的可行集,并通过一个结合了线性规划的递归运算来实时更新该集合。系统通过检测参数可行集是否为空来判断有无故障。一旦检测到故障(即可行集

为空),则启动模型匹配程序,利用为不同故障类型专门设计的集员滤波器进行故障隔离。此外,该系统具备学习能力,能够将样本库中未包含的新故障类型自动添加,从而不断完善诊断能力。

总体而言,基于其他几何体的集员估计方法在故障诊断的三个核心环节中各具优势。在故障检测与隔离中,多面体与混合几何体因其高逼近精度而能显著提升检测灵敏度;在故障估计中,平行体和支持函数等形状能够在控制计算复杂度的同时为故障变量提供收紧的幅值上下界。然而,这些方法也存在顶点数或方向数随时间增长而导致计算量增加的问题,这对在线实时应用是一个挑战。未来的研究趋势在于:一方面借助几何体降阶与稀疏化技术缓解集合表示膨胀,另一方面结合数据驱动方法实现集合形状的自适应调整,从而平衡几何紧致性与计算效率,进一步促进其在智能制造、能源互联网以及安全关键控制系统等场景中的应用。

3 集员估计故障诊断的应用成果与挑战分析

随着现代工业系统复杂性的不断提升,基于集员估计的故障诊断方法因其在处理未知但有界不确定性方面的理论优势,已在多个安全关键领域得到实质性应用。本节系统梳理该技术的典型应用成果,分析当前面临的核心挑战,并总结相应的解决方案与研究趋势。

3.1 代表性应用成果汇总

集员估计方法已在多个工程领域成功应用于故障检测、隔离与估计,其代表性成果如下:

交通运输领域:在自动驾驶车辆中,基于中心对称多胞形的集员方法被用于鲁棒故障诊断,特别是在线性参数变化(LPV)系统框架下,实现了对传感器与执行器故障的可靠检测[6]。在高速铁路电气牵引装置中,区间滑模观测器结合集员思想,实现了早期传感器故障的检测与隔离[83]。在车辆横向动态系统故障检测中,[19]提出了一种有限频域集员故障检测观测器设计方法,通过广义Kalman-Yakubovich-Popov(KYP)引理在有限频域内优化故障敏感性与扰动鲁棒性,利用中心对称多胞体(zonotope)描述残差集合,实现了对执行器故障的快速、鲁棒检测,并在车辆动力学仿真中验证了其优越性。

能源与电力系统:文献[43]提出了另一种面向网络化系统的分布式全局集员估计方法,通过局部椭球交集与最大化迹的融合策略,提升了状态估计

精度, 并成功应用于光伏孤岛检测, 体现了从局部诊断到全局性能优化的演进. 文献 [70] 提出了基于事件触发的分布式集员滤波方法, 将椭球交集判断与事件触发机制相结合, 在有效检测光伏并网系统孤岛故障的同时, 显著降低了网络通信负载. [88] 提出了一种利用设计的降阶区间观测器来诊断感应电机驱动器中的开路开关故障和电流传感器故障方法, 其采用降阶区间观测器来同时估计状态和开路开关故障. [84] 将区间滑模观测器与混合逻辑动态模型结合, 用于逆变器开路故障诊断; [83] 将区间观测器应用于感应电机绕组故障检测, 通过构造 Metzler 矩阵实现状态区间估计. 在电机驱动系统故障诊断方面, 集员估计方法展现出良好的适用性. [94] 针对永磁同步电机逆变器开路故障, 提出了一种基于椭球集员估计的故障诊断方法, 以椭球残差电流为诊断变量, 利用椭球长半轴自适应设定阈值, 在仅需噪声有界的条件下实现了快速准确的单管故障定位, 诊断时间仅占电流周期的 8%. [20] 针对永磁直流电动机的微小故障, 提出了一种基于全对称多胞形状态估计的主动故障检测方法, 通过设计最优辅助输入信号使正常与故障模型状态集合分离, 显著提升了微小故障的检测灵敏度, 并在电机驱动系统中验证了其低保守性与有效性.

航空航天与精密控制: 在航空发动机等复杂动力系统, 基于集员估计的鲁棒容错控制方法, 提升了系统在故障情况下的稳定性和性能 [8]. 在捷联惯导系统初始对准中, 集员滤波方法在有界噪声下表现出优于卡尔曼滤波的鲁棒性与估计精度 [12]. 在卫星飞轮故障预测方面, [95] 将中心对称多面体集员估计与电流退化模型相结合, 提出了一种故障检测与寿命预测一体化方法, 实现了在有界噪声下对

飞轮性能退化的在线评估与预警. 针对参数不确定性与未知扰动的线性系统, [96] 设计了一种基于未知输入集员滤波器的故障诊断方法, 将特定执行器故障视为未知输入并实现解耦, 通过一组滤波器并行估计输出边界, 结合区间阈值实现了故障检测与分离, 并在 VTOL 飞行器纵向模型中验证了其零误报率与高可靠性.

工业过程与制造: 文献 [72] 针对机器人装配任务中的电气连接器故障, 通过构建切换线性模型序列并进行椭球优化, 实现了有界扰动下的精确故障隔离. 文献 [76] 针对旋转导向钻井系统, 提出的基于椭球束描述符模型的传感器故障估计方法, 在有界不确定性下同步实现了系统状态与故障信号的区间估计, 为安全控制提供了量化输入. [86] 将区间观测器应用于矿井水位传感器故障检测, 通过故障特征矩阵处理故障检测与隔离, 提高了检测合理性.

网络化与信息物理系统: 在资源受限的工业网络化控制系统中, 基于协议调度与中心对称多胞形的状态与故障区间估计方法, 实现了在有限通信带宽下的可靠诊断 [66]. 文献 [71] 利用预测椭球与估计椭球的交集关系, 成功将其用于检测传感器、执行器及通信链路上的多种网络攻击模式; [89] 将执行器故障视为增广状态, 构造与原系统等价的增广系统, 基于所得到的增广系统和隐蔽式攻击信号的上下界信息, 设计鲁棒增广状态区间观测器, 从而实现研究隐蔽式攻击下状态与执行器故障的联合区间估计.

为更清晰地呈现基于集员估计的故障诊断方法在不同工程领域中的典型应用, 表 1 从系统对象、集合表示形式及所解决的代表性问题等方面, 对前文所述的部分代表性成果进行了系统梳理与分类. 该

表1 基于集员估计的故障诊断典型应用成果

工程领域	系统对象	集合表示形式	代表性问题	代表文献
交通运输领域	车辆动力学系统	中心对称多胞形	故障检测与隔离	[6], [19]
	高速列车牵引系统	区间形式	故障检测与隔离	[83]
能源与电力系统	电力系统	椭球体	故障检测	[43], [70]
	电路系统	区间形式	故障检测与隔离	[84], [88]
	电机系统	中心对称多胞形/椭球体/区间形式	故障检测与隔离	[20], [83], [94]
航空航天领域	航空发动机系统	椭球体	故障检测与故障估计	[8]
	卫星飞轮系统	中心对称多胞形	故障检测与寿命预测	[95]
	捷联惯性导航系统	椭球体	故障检测	[12]
	飞行器系统	中心对称多胞形	故障检测	[96]
工业过程与制造	机器人装配系统	椭球体	故障检测与隔离	[72]
	旋转导向钻井系统	椭球体	故障估计	[76]
	矿井水位系统	区间形式	故障检测与隔离	[86]
信息物理与网络系统	网络化控制系统	中心对称多胞形/椭球体/区间形式	故障检测与估计	[66], [71], [89]

表直观反映了不同几何体(如中心对称多胞形、椭球、区间等)在交通运输、能源电力、航空航天、工业制造及信息物理系统等关键领域中的具体应用情况,进一步印证了集员估计方法在处理有界不确定性故障诊断问题中的广泛适用性与工程价值。

3.2 当前面临的主要挑战

尽管集员估计故障诊断方法取得了显著进展,但在面向更高维、更非线性、更开放的实际工程系统时,仍面临以下关键挑战:

高维系统下的计算负担:基于几何集合的递推运算(如闭可夫斯基和、交集计算)复杂度随系统维数快速增长,制约了方法在高维状态系统(如大型电网、化工过程)中的在线应用[18,49]。

非线性与非凸动态导致的保守性:当系统具有强非线性或非凸不确定性时,传统几何体(如椭球、区间)的外包操作往往过于保守,导致故障检测灵敏度下降,甚至产生漏报[31,92]。

噪声与不确定性边界未知或时变:集员估计的性能依赖于对噪声与不确定性边界的先验知识。在实际中,边界往往难以精确获取或随时间变化,导致估计集合过大或诊断性能下降[79,82]。

诊断与控制的协同集成不足:多数研究集中于故障检测与估计环节,与后续的容错控制、系统重构的衔接机制尚未形成标准化、一体化的框架,限制了其在闭环安全控制系统中的全面应用[8,63]。

3.3 现有解决方案与发展趋势

为应对上述挑战,近年来研究者从算法设计、模型表述和系统架构等多个层面提出了改进方案,主要趋势如下:

提升计算效率的算法策略:采用生成器降阶[15-17]、集合稀疏化、分布式并行计算[39]以及事件触发机制[36,38]等方法,有效降低高维系统下的实时计算负担。基于观测器或滤波器范式的设计方法(如区间观测器、集员滤波器)通过优化增益矩阵,避免了复杂的几何集合递推,提升了工程实用性[21,34]。

降低保守性的集合描述革新:发展更灵活、更紧致的集合描述工具是核心方向之一。例如,约束中心对称多胞形通过引入线性等式约束,在保持计算效率的同时显著提升了集合描述的精度和对非凸集的适应能力[50]。椭球束利用多个椭球的交集构造非对称形状,在适度增加计算量的前提下实现了更好的紧致性[43]。混合几何体外包(如区间-椭球结合)也是降低保守性的有效途径[48]。

增强适应性的数据驱动与学习机制:将集员估计与数据驱动方法相结合,是应对模型不确定性和噪声边界未知问题的重要趋势。例如,利用区间神经网络并辅以椭球束优化,可以在有界噪声下获得更可靠的故障检测性能[78]。自适应阈值调整、噪声边界在线估计等方法也能提升诊断系统在时变环境中的鲁棒性[54,80]。

面向工程集成的系统级框架:研究重点正从单一的诊断模块向“检测-隔离-估计-容错”一体化框架演进。通过将集员状态/故障估计与模型预测容错控制、滑模控制等方法深度结合,形成信息感知与决策执行的闭环,提升整体系统的韧性与自主性[8,65]。同时,针对网络化系统,研究通信协议、安全机制与集员诊断的协同设计,成为保障信息物理系统安全的重要方向[41,66]。

4 结语

本文围绕集员估计在故障诊断领域的研究现状进行了系统整理与分析。文章首先回顾了集员估计在处理未知但有界不确定性问题中的理论基础,阐述了其通过集合外包与递归更新实现状态可行集估计的基本原理。结合几何体表示形式的不同,本文深入分析了区间型、椭球型、中心对称多胞形及其他几何体四大类方法的演化历程与适用特点,指出各类外包策略在计算复杂度、逼近精度、适用性等方面的优势与不足。在应用层面,集员估计方法已在风力机组、交通自动化、电网监测、机器人定位等多个领域得到工程验证,其在鲁棒性与容错能力上的优势得到充分体现。然而,通过综述可见,当系统维数较高、动态过程存在强非线性、或噪声界限难以精确获取时,集员估计的外包策略仍面临计算压力大、集合保守性过强等技术瓶颈。

未来的集员估计研究可在以下几个方向上值得深入推进。首先,在高维系统与复杂网络化环境下,亟需发展更加高效的集合运算与压缩技术,如基于分布式计算和并行加速的迭代优化方法,以及结合多种几何体的混合外包策略,在保证精度的同时有效抑制计算规模的膨胀。其次,在非线性与非凸系统的外包建模上,可以引入分段线性化、多项式近似及支持函数表征,以降低传统凸几何体方法在此类场景中的保守性。再次,随着传感器网络、大数据分析机器学习方法的发展,将集员估计与数据驱动算法相结合,可实现噪声界限与动态阈值的自适应调整,从而增强方法在复杂工况和时变环境中的实用性。最后,在广泛的实际物理系统中,其内在固有

的对称性信息是值得被利用的, 将集员估计与群理论相结合, 可以将对称性信息纳入到集员估计中, 以提升传统集员估计的估计性能。

参考文献 (References)

- [1] Ding S X. Model-based fault diagnosis techniques: Design schemes, algorithms and tools[M]. Berlin: Springer, 2008.
- [2] Patton R J, Frank P M, Clark R N. Issues of fault diagnosis for dynamic systems[M]. Berlin: Springer, 2000.
- [3] Isermann R. Fault-diagnosis applications: model-based condition monitoring[M]. Berlin: Springer, 2011.
- [4] 杨光红, 张志慧. 基于区间观测器的动态系统故障诊断技术综述[J]. *控制与决策*, 2018, 33(5): 769-781.
(Yang G H, Zhang Z H. Review of interval observer based fault diagnosis techniques for dynamic systems[J]. *Control and Decision*, 2018, 33(5): 769-781.)
- [5] Chen J, Patton R J. Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems[M]. Berlin: Springer, 2012.
- [6] Zhang S, Puig V, Ifqir S. Robust LPV fault diagnosis using the set-based approach for autonomous ground vehicles[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2024, 25(8): 9078-9090.
- [7] Zhang Z, He X, Zhou D H. Active fault diagnosis for uncertain LPV systems: A zonotopic set-membership approach[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2024, 21(4): 5110-5120.
- [8] Qin W C, Tang W T, Xia W G. Robust fault-tolerant control based on set-membership estimation and tube MPC[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2025, 22: 19499-19510.
- [9] Grünbaum B. Convex polytopes[M]. The 2nd edition. Berlin: Springer, 2011.
- [10] Kühn W. Rigorously computed orbits of dynamical systems without the wrapping effect[J]. *Computing*, 1998, 61(1): 47-67.
- [11] Combastel C. A state bounding observer based on zonotopes[C]. Proceedings of the 2003 European Control Conference. Cambridge, 2003: 2589-2594.
- [12] Alamo T, Bravo J M, Camacho E F. Guaranteed state estimation by zonotopes[J]. *Automatica*, 2005, 41(6): 1035-1043.
- [13] Le V T H, Stoica C, Alamo T, et al. Zonotopic guaranteed state estimation for uncertain systems[J]. *Automatica*, 2013, 49(11): 3418-3424.
- [14] Combastel C. Zonotopes and Kalman observers: Gain optimality under distinct uncertainty paradigms and robust convergence[J]. *Automatica*, 2015, 55: 265-273.
- [15] Combastel C. Zonotopes and Kalman observers: Achievable estimation accuracy in presence of bounded disturbances[J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2003, 36(13): 447-452.
- [16] Girard A. Reachability of uncertain linear systems using zonotopes[C]. *Hybrid Systems: Computation and Control*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005: 291-305.
- [17] Althoff M, Stursberg O, Buss M. Verification of uncertain embedded systems by computing reachable sets based on zonotopes[J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2008, 41(2): 5125-5130.
- [18] 柴伟, 孙先仿. 改进的全对称多胞形集员状态估计算法[J]. *控制理论与应用*, 2008, 25(2): 273-277.
(Chai W, Sun X F. An improved estimation algorithm for set membership states by zonotopes[J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(2): 273-277.)
- [19] 李佶桃, 王振华, 沈毅. 线性离散系统的有限频域集员故障检测观测器设计[J]. *自动化学报*, 2020, 46(7): 1531-1538.
(Li J T, Wang Z H, Shen Y. Set-membership fault detection observer design in finite-frequency domain for linear discrete-time system[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(7): 1531-1538.)
- [20] 王晶, 史雨茹, 周萌. 基于状态集员估计的主动故障检测[J]. *自动化学报*, 2021, 47(5): 1087-1097.
(Wang J, Shi Y R, Zhou M. Active fault detection based on state set-membership estimation[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2021, 47(5): 1087-1097.)
- [21] Tang W T, Wang Z H, Wang Y, et al. Interval estimation methods for discrete-time linear time-invariant systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2019, 64(11): 4717-4724.
- [22] Schweppe F. Recursive state estimation: Unknown but bounded errors and system inputs[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1968, 13(1): 22-28.
- [23] Durieu C, Walter É, Polyak B. Multi-input multi-output ellipsoidal state bounding[J]. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 2001, 111(2): 273-303.
- [24] Maksarov D G, Norton J P. State bounding with ellipsoidal set description of the uncertainty[J]. *International Journal of Control*, 1996, 65(5): 847-866.
- [25] Fogel E, Huang Y F. On the value of information in system identification[J]. *Automatica*, 1982, 18(2): 229-238.
- [26] Polyak B, Shcherbakov P. Ellipsoidal approximations to attraction domains of linear systems with bounded control[C]. 2009 American Control Conference. St. Louis, 2009: 5363-5367.
- [27] 柴伟, 孙先仿. 椭球状态定界的鲁棒算法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2006, 32(12): 1447-1450.
(Chai W, Sun X F. Robust ellipsoidal state bounding algorithm[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2006, 32(12): 1447-1450.)
- [28] 柴伟, 孙先仿. 椭球状态定界的数值稳定算法[J]. *西安*

- 交通大学学报, 2007, 41(4): 453-457.
(Chai W, Sun X F. Numerically stable ellipsoidal state bounding algorithm[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(4): 453-457.)
- [29] 孙先仿, 王世纪, 张海. 扩展集员滤波在捷联惯导大方位失准角初始对准中的应用[J]. 中国惯性技术学报, 2008, 16(5): 505-508.
(Sun X F, Wang S J, Zhang H. Application of extended set-membership filter in SINS initial alignment of large azimuth misalignment[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2008, 16(5): 505-508.)
- [30] 王世纪, 孙先仿, 柴伟. 基于集员滤波的 SINS 静基座初始对准[J]. 微计算机信息, 2009, 25(10): 298-299.
(Wang S J, Sun X F, Chai W. Initial alignment of SINS on stationary base using set-membership filter[J]. Microcomputer Information, 2009, 25(10): 298-299.)
- [31] Zhou B, Qian K, Ma X D, et al. A new nonlinear set membership filter based on guaranteed bounding ellipsoid algorithm[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(2): 146-154.
- [32] Liu Y S, Zhao Y, Wu F L. Ellipsoidal state-bounding-based set-membership estimation for linear system with unknown-but-bounded disturbances[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2016, 10(4): 431-442.
- [33] Ding D R, Wang Z D, Han Q L. A set-membership approach to event-triggered filtering for general nonlinear systems over sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2020, 65(4): 1792-1799.
- [34] Wei G L, Liu S, Song Y, et al. Probability-guaranteed set-membership filtering for systems with incomplete measurements[J]. *Automatica*, 2015, 60: 12-16.
- [35] Zou L, Wang Z D, Gao H J. Set-membership filtering for time-varying systems with mixed time-delays under round-robin and weighted try-once-discard protocols[J]. *Automatica*, 2016, 74: 341-348.
- [36] Ma L F, Wang Z D, Lam H K, et al. Distributed event-based set-membership filtering for a class of nonlinear systems with sensor saturations over sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2017, 47(11): 3772-3783.
- [37] 周波, 钱堃, 马旭东, 等. 基于集员估计的室内移动机器人多传感器融合定位[J]. *控制理论与应用*, 2017, 34(4): 541-550.
(Zhou B, Qian K, Ma X D, et al. Multi-sensor fusion for mobile robot indoor localization based on a set-membership estimator[J]. *Control Theory & Applications*, 2017, 34(4): 541-550.)
- [38] Ge X H, Han Q L, Wang Z D. A dynamic event-triggered transmission scheme for distributed set-membership estimation over wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2019, 49(1): 171-183.
- [39] Liu S, Wang Z D, Wei G L, et al. Distributed set-membership filtering for multirate systems under the round-robin scheduling over sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2020, 50(5): 1910-1920.
- [40] Zhao Z Y, Wang Z D, Zou L, et al. Set-membership filtering for time-varying complex networks with uniform quantisations over randomly delayed redundant channels[J]. *International Journal of Systems Science*, 2020, 51(16): 3364-3377.
- [41] Basit A, Tufail M, Rehan M, et al. Event-based secure filtering under two-channel stochastic attacks and switching topologies over wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, 2024, 11(4): 3704-3717.
- [42] Han F, Wang Z D, Liu H J, et al. Local design of distributed state estimators for linear discrete time-varying systems over binary sensor networks: A set-membership approach[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2024, 54(9): 5641-5654.
- [43] Tang W T, Zhang Q H, Wang Z H, et al. Ellipsoid bundle and its application to set-membership estimation[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2020, 53(2): 13688-13693.
- [44] Tang W T, Zhang Q H, Wang Z H, et al. Set-membership estimation based on ellipsoid bundles for discrete-time LPV descriptor systems[J]. *Automatica*, 2022, 145: 110580.
- [45] Zhang W H, Wang Z H, Raïssi T, et al. Ellipsoid-based interval estimation for lipschitz nonlinear systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2022, 67(12): 6802-6809.
- [46] Moore R E. Interval analysis[M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1966.
- [47] Alur R, Courcoubetis C, Halbwachs N, et al. The algorithmic analysis of hybrid systems[J]. *Theoretical Computer Science*, 1995, 138(1): 3-34.
- [48] Girard A, Le Guernic C, Maler O. Efficient computation of reachable sets of linear time-invariant systems with inputs[C]. *Hybrid Systems: Computation and Control*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006: 257-271.
- [49] Chisci L, Garulli A, Zappa G. Recursive state bounding by parallelotopes[J]. *Automatica*, 1996, 32(7): 1049-1055.
- [50] Scott J K, Raimondo D M, Marseglia G R, et al. Constrained zonotopes: A new tool for set-based estimation and fault detection[J]. *Automatica*, 2016, 69: 126-136.
- [51] Guerra P, Puig V, Ingimundarson A, et al. Robust fault detection with unknown input set-membership state estimators and interval models using zonotopes[C].

- Proceedings of the 6th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes. Beijing, 2006: 1234-1239.
- [52] Puig V. Fault diagnosis and fault tolerant control using set-membership approaches: Application to real case studies[J]. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 2010, 20(4): 619-635.
- [53] Blesa J, Puig V, Saludes J. Robust fault detection using polytope-based set-membership consistency test[C]. Conference on Control and Fault-Tolerant Systems. Nice, 2010: 726-731.
- [54] Combastel C, Zhang Q H. Robust fault diagnosis based on adaptive estimation and set-membership computations[C]. Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes. Amsterdam: Elsevier, 2007: 1204-1209.
- [55] Tang W T, Wang Z H, Shen Y, et al. Fault detection based on multi-objective observer and interval hull computation[J]. *IFAC-Papers OnLine*, 2018, 51(24): 332-337.
- [56] 吴钰滢, 张浪文, 谢巍, 等. LPV 系统的混合 H_2/H_∞ 指标区间观测器设计[J]. *控制与决策*, 2023, 38(10): 2969-2976.
(Wu Y Y, Zhang L W, Xie W, et al. Design of interval observer with mixed H_2/H_∞ performance for LPV systems[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(10): 2969-2976.)
- [57] Wang Y, Wang Z H, Puig V, et al. Zonotopic set-membership state estimation for discrete-time descriptor LPV systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2019, 64(5): 2092-2099.
- [58] Zhang S, Puig V, Ifqir S. A robust fault detection observer using set-membership estimation for LPV systems[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2024, 34(7): 4509-4531.
- [59] Wang Y, Puig V, Cembrano G, et al. Zonotopic fault detection observer for discrete-time descriptor systems considering H_2 fault sensitivity[J]. *International Journal of Systems Science*, 2021, 52(1): 95-109.
- [60] Masoud P, Nguyen A, Guerra T M. Zonotopic observer designs for uncertain takagi-sugeno fuzzy systems[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2022, 114: 105126.
- [61] Ren W J, Guo S H, Ah C K. Guaranteed set-membership estimation for local nonlinear uncertain fuzzy systems subject to partially decouplable unknown inputs[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2023, 31(12): 4336-4349.
- [62] Li Y, Dong J X. Fault detection for discrete-time interval type-2 takagi-sugeno fuzzy systems using H_2/L_∞ unknown input observer and zonotopic analysis[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2024, 32(3): 846-858.
- [63] Zhang W H, Wang Z H, Raïssi T, et al. Zonotope-based interval estimation for discrete-time linear switched systems[C]. *IFAC-Papers OnLine*, 2020, 53(2): 4707-4712.
- [64] Zhang L L, Li Z X, Li Y, et al. State and fault interval estimation for discrete-time takagi-sugeno fuzzy systems via intermediate observer based on zonotopic analysis[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2024, 32(11): 6588-6593.
- [65] Wang X D, Wang G Q, Li Z, et al. Event-based fault estimation and compensation for discrete-time systems via zonotopes[J]. *Information Sciences*, 2023, 631: 1-14.
- [66] Li Q, Zhi Y F, Tan H L, Sheng W G. Protocol-based zonotopic state and fault estimation for communication-constrained industrial cyber-physical systems[J]. *Information Sciences*, 2023, 634: 730-743.
- [67] 孙先仿, 范跃祖, 宁文如. 故障检测的集员辨识方法[J]. *航空学报*, 1998, 19(3): 371-374.
(Sun X F, Fan Y Z, Ning W R. Set membership identification approach for fault detection[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 1998, 19(3): 371-374.)
- [68] 柴伟, 孙先仿. 集员辨识与 T-S 模型相结合的非线性系统建模及其故障检测算法[J]. *宇航学报*, 2006, 27(6): 1314-1318.
(Chai W, Sun X F. Nonlinear system modeling and fault detection algorithm using set membership identification and T-S model[J]. *Journal of Astronautics*, 2006, 27(6): 1314-1318.)
- [69] 柴伟, 孙先仿. 非线性椭球集员滤波及其在故障诊断中的应用[J]. *航空学报*, 2007, 28(4): 948-952.
(Chai W, Sun X F. Nonlinear set membership filtering using ellipsoids and its application in fault diagnosis[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2007, 28(4): 948-952.)
- [70] Yang F W, Xia N, Han Q L. Event-based networked islanding detection for distributed solar PV generation systems[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 13(1): 322-329.
- [71] Mousavinejad E, Yang F W, Han Q L, et al. A novel cyber attack detection method in networked control systems[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2018, 48(11): 3254-3264.
- [72] Huang J, Wang Y, Fukuda T. Set-membership-based fault detection and isolation for robotic assembly of electrical connectors[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2018, 15(1): 160-171.
- [73] Ju Y M, Wei G L, Ding D R, et al. A novel fault detection method under weighted try-once-discard scheduling over sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 2020, 7(3): 1489-1499.

- [74] Li X R, Dong H L, Wang Z D, et al. Set-membership filtering for state-saturated systems with mixed time-delays under weighted try-once-discard protocol[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2019, 66(2): 312-316.
- [75] Han W X, Long P, Xu B. Fault detection for uncertain polynomial fuzzy systems using H/L_∞ observer and ellipsoidal analysis[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2023, 31(4): 1113-1123.
- [76] Wang W L, Geng Y F, Huang S S, et al. Sensor fault estimation based on ellipsoid bundles for dynamic point-the-bit rotary steerable systems[J]. *Measurement*, 2024, 235: 114973.
- [77] Du X T, Zou L, Zhong M Y. Set-membership filtering approach to dynamic event-triggered fault estimation for a class of nonlinear time-varying complex networks[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2024, 11(3): 638-648.
- [78] Zhou M, Zhang Y Y, Wang J, et al. Robust fault detection method based on interval neural networks optimized by ellipsoid bundles[J]. *Automatica*, 2025, 176: 112233.
- [79] 郭胜辉, 朱芳来. 基于区间观测器的执行器故障检测[J]. *控制与决策*, 2016, 31(6): 1118-1122.
(Guo S H, Zhu F L. Actuator fault detection based on interval observers[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(6): 1118-1122.)
- [80] Efimov D, Raïssi T. Design of interval observers for uncertain dynamical systems[J]. *Automation and Remote Control*, 2016, 77(2): 191-225.
- [81] Zhang K K, Jiang B, Yan X G, et al. Interval sliding mode observer based incipient sensor fault detection with application to a traction device in China railway high-speed[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(3): 2585-2597.
- [82] Garbouj Y, Dinh T N, Raïssi T, et al. Optimal interval observer for switched Takagi-Sugeno systems: An application to interval fault estimation[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2021, 29(8): 2296-2309.
- [83] 田阳, 张柯, 姜斌. 基于区间观测器的感应电机故障检测[J]. *控制工程*, 2020, 27(6): 927-933.
(Tian Y, Zhang K, Jiang B. Fault detection of induction motor based on interval observer[J]. *Control Engineering of China*, 2020, 27(6): 927-933.)
- [84] 陈超波, 王霞霞, 高嵩, 等. 基于区间滑模观测器的逆变器开路故障诊断方法[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(14): 4569-4579.
(Chen C B, Wang X X, Gao S, et al. A diagnosis method for open-circuit faults in inverters based on interval sliding mode observer[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(14): 4569-4579.)
- [85] 郭胜辉, 朱芳来, 李泽. 广义系统执行器故障检测: 区间观测器方法[J]. *控制工程*, 2019, 26(11): 2000-2005.
(Guo S H, Zhu F L, Li Z. Actuator fault detection for descriptor system: An interval observer approach[J]. *Control Engineering of China*, 2019, 26(11): 2000-2005.)
- [86] 赵国强, 周茜, 张宏建. 基于区间观测器的矿井水位传感器故障检测[J]. *计算机仿真*, 2012, 29(2): 404-407.
(Zhao G Q, Zhou Q, Zhang H J. Mines water level sensor fault detection based on interval observers[J]. *Computer Simulation*, 2012, 29(2): 404-407.)
- [87] 郭胜辉, 朱芳来. 广义系统区间观测器设计[J]. *控制与决策*, 2016, 31(2): 361-366.
(Guo S H, Zhu F L. Interval observers design for descriptor systems[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(2): 361-366.)
- [88] Xu S Q, Yu H Y, Wang H, et al. Simultaneous diagnosis of open-switch and current sensor faults of inverters in IM drives through reduced-order interval observer[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2025, 72(6): 6485-6496.
- [89] 李进, 姜顺, 潘丰. 隐蔽式攻击下网络化控制系统状态与故障的联合区间估计[J]. *控制与决策*, 2023, 38(12): 3418-3426.
(Li J, Jiang S, Pan F. Joint interval estimation of state and fault for networked control systems under stealthy attacks[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(12): 3418-3426.)
- [90] Rego B S, Raimondo D M, Raffo G V. Set-based state estimation and fault diagnosis of linear discrete-time descriptor systems using constrained zonotopes[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2020, 53(2): 4291-4296.
- [91] Rego B S, Raimondo D M, Raffo G V. Line zonotopes: A tool for state estimation and fault diagnosis of unbounded and descriptor systems[J]. *Automatica*, 2025, 179: 112380.
- [92] 王子赞, 李旭, 王艳, 等. 基于超平行空间集员滤波的非线性系统状态估计方法[J]. *控制与决策*, 2022, 37(9): 2287-2295.
(Wang Z Y, Li X, Wang Y, et al. Hyperparallel space set-membership filtering based state estimation algorithm for nonlinear system[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(9): 2287-2295.)
- [93] 王子赞, 徐桂香, 刘子幸, 等. 基于正多胞体线性规划的滤波故障诊断方法[J]. *控制与决策*, 2020, 35(4): 807-815.
(Wang Z (B /Y), Xu G X, Liu Z X, et al. Orthotopic linear programming filtering based fault diagnosis method[J]. *Control and Decision*, 2020, 35(4): 807-815.)
- [94] 朱燕飞, 汪振杰, 李振江, 等. 集员估计在PMSM逆变器开路故障诊断中的应用[J]. *控制理论与应用*, <https://link.cnki.net/urlid/44.1240.TP.20241010.1711.036.TP>.

20241010.1711.036.

(Zhu Y F, Wang Z J, Li Z J, et al. Application of set-membership estimation in open-circuit fault diagnosis of PMSM inverter[J]. Control Theory & Applications, <https://link.cnki.net/urlid/44.1240.TP.20241010.1711.036>.)

- [95] 梁寒玉, 张文瀚, 王振华, 等. 基于集员估计的卫星飞轮故障检测与预测方法[J]. 航空学报, 2022, 43(3): 497-508.

(Liang H Y, Zhang W H, Wang Z H, et al. Fault detection and prognosis approach for satellite flywheel based on set-membership estimation[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(3): 497-508.)

- [96] 汤文涛, 王振华, 王焯, 等. 基于未知输入集员滤波器的不确定系统故障诊断[J]. 自动化学报, 2018, 44(9): 1717-1724.

(Tang W T, Wang Z H, Wang Y, et al. Fault diagnosis for uncertain systems based on unknown input set-membership filters[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(9): 1717-1724.)

作者简介

董久祥 (1978-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为容错控制与故障诊断模糊系统、集员估计、多智能体协同控制, E-mail: dongjiuxiang@ise.neu.edu.cn;

李易 (1998-), 男, 博士生, 主要研究方向为容错控制与故障诊断、集员估计模糊系统、, E-mail: liy_i_neu@163.com;

张灏麟 (2000-), 男, 博士生, 主要研究方向为故障诊断、集员估计、模糊系统, zll_1191585645@163.com;

许锦瑜 (2001-), 女, 硕士生, 主要研究方向为集员估计、多智能体控制、故障诊断, E-mail: jelly_xujinyu@163.com.

科研团队简介

董久祥教授科研团队隶属于东北大学信息科学与工程学院, 依托辽宁省自主无人系统安全运行技术重点实验室, 长期专注于智能控制与无人系统领域的研究. 目前, 实验室以杨光红教授、叶丹教授、李霄剑教授、安立伟教授和芦安洋教授等为学术骨干, 汇聚控制理论、人工智能、信息物理系统安全等多学科交叉背景的青年科研力量, 围绕无人系统智能认知、状态监测与故障诊断以及容侵控制等重大科学问题, 构建从基础理论、关键技术到工程示范的完整创新链条.

课题组负责人董久祥教授是东北大学博士生导师, 无人系统自主控制研究所所长, 教育部新世纪优秀人才. 其在模糊系统控制、容错控制与故障诊断领域取得系列创新突破, 相关成果在 IEEE Transactions on Automatic Control、Automatica 等国际权威期刊发表论文 200 余篇, 其中 IEEE 汇刊论文 110 余篇, 得到国内外著名专家的高度认可. 其博士学位论文获全国百篇优秀博士论文提名奖. 目前担任《IEEE Transactions on Circuits and Systems II》等期刊编委, 兼任中国航发研究所、中航工业研究所兼职副总师. 目前课题组正承担多个国家级科研任务.

团队主持国家自然科学基金面上项目“网络攻击下的 T-S 模糊系统的控制问题研究”、国家自然科学基金面上项目“基于隶属度函数在线优化的 T-S 模糊系统的控制问题研究”等重大课题, 作为核心成员参与国家自然科学基金创新群体项目“故障诊断与容错控制”和国家自然科学基金重点国际合作研究项目“涡扇发动机控制系统的故障诊断方法研究”. 课题组研究成果曾获辽宁省自然科学奖一等奖、教育部自然科学奖二等奖等重要奖励.