

University of British Columbia, 无

#### 教育经历:

- (1) 2019-09 至 2024-02, University of British Columbia, 化学与生物工程, 博士
- (2) 2015-09 至 2018-06, 北京化工大学, 控制工程, 硕士
- (3) 2011-09 至 2015-06, 北京化工大学, 自动化, 学士

#### 博士后工作经历:

- (1) 2025-11 至今, 在站, University of British Columbia ,全职
- (2) 2024-03 至 2025-11, Massachusetts Institute of Technology ,全职

#### 科研与学术工作经历 (博士后工作经历除外):

- (1) 2018-08 至 2019-08, 清华大学, 自动化系, 研究实习员 ,全职
- (2) 2017-08 至 2018-03, University of Duisburg-Essen, 自动控制与复杂系统研究所, 研究实习员 ,全职

#### 曾使用其他证件信息:

无

#### 近五年主持或参加的国家自然科学基金项目/课题:

无

#### 近五年主持或参加的其他科研项目/课题 (国家自然科学基金项目除外):

- (1) NRC Canada, 政府资助项目, F2200264, Microgrid Digital Twin Modeling and Optimal Control, 2025-01 至今, 1500万元, 在研, 参与
- (2) 美国食品药品监督管理局, 政府资助项目, 75F40122C00200, Continuous mRNA Manufacturing Platform, 2023-06 至今, 58700万元, 在研, 参与
- (3) 加拿大Rogers, 政企合作项目, 5G R&D, 5G-enabled Smart Buildings for Energy and Space Management, 2021-11 至今, 2437万元, 在研, 参与

代表性研究成果和学术奖励情况 (填写代表性论文时应根据其发表时的真实情况如实规范列出所有作者署名, 并对本人署名情况进行标注, 包括: ①作者署名按姓氏排序; ②唯一第一作者; ③共同第一作者; ④唯一通讯作者; ⑤共同通讯作者; ⑥其他情况):

一、近5年内发表的代表性论著 (请在“申请书详情”界面, 点开“人员信息”-“代表性成果”卡片查看对应的全文):

(1) Cao, Liang; Wang, Youqing; Qin, Yan; Cao, Yankai; Gopaluni, Bhushan; Braatz, Richard; Attack Detection for Cyber-Physical Systems Based on Causal Representation, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, DOI: 10.1109/TSMC.2026.3661182, 2026, 1-11 (期刊论文) (本人标注: 唯一第一作者)

本人贡献: 构思 实验 写作

- (2) Cao, Liang; Liu, Weide; Liu, Yang; Qin, Yan; Condition-dependent Causal Discovery: A

Polynomial Chaos Framework for Systems with Parametric Uncertainty, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, DOI: 10.1109/TII.2026.3672049, 2026, 1-10 (期刊论文) (本人标注: 唯一第一作者)

本人贡献: 构思 实验 写作

(3) **Cao, Liang**; Liu, Weide; Liu, Yang; Qin, Yan; Causal Discovery in Dynamic Industrial Systems Under Parametric Uncertainty: A Polynomial Chaos Approach, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, DOI: 10.1109/TASE.2026.3672332, 2026, 1-12 (期刊论文) (本人标注: 唯一第一作者)

本人贡献: 构思 实验 写作

(4) **Cao, Liang**; Su, Jianping; Yang, Fan; Cao, Yankai; Gopaluni, Bhushan; Interpretable and Reliable Soft Sensor Development in Industry 5.0, *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2026, 13(1): 236 (期刊论文) (本人标注: 唯一第一作者, 共同通讯作者)

本人贡献: 构思 实验 写作

(5) **Cao, Liang**; Su, Jianping; Luo, Yi; Causal Structure Discovery for Industrial Process Monitoring: A Novel Approach for Nonlinear Systems with Complex Noise, *IEEE Internet of Things Journal*, DOI: 10.1109/JIOT.2026.3653158, 2026, 1-11 (期刊论文) (本人标注: 唯一第一作者)

本人贡献: 构思 实验 写作

## 二、已发表的其余论著:

(1) **Cao, Liang**; Yang, Fan; Wang, Youqing; Causal Representation Learning for Trustworthy Industrial Process Modeling, *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, DOI: 10.1109/JAS.2025.125678, 2025 (期刊论文) (本人标注: 唯一第一作者)

本人贡献: 构思 实验 写作

(2) **Cao, Liang**; Learning Dynamic Causal Graphs Under Parametric Uncertainty via Polynomial Chaos Expansions, *14th International Conference on Learning Representations (ICLR 2026)*, Rio de Janeiro, Brazil, 2026-04-23至2026-04-27 (会议论文) (本人标注: 唯一第一作者, 唯一通讯作者)

本人贡献: 构思 实验 写作

(3) **Cao, Liang**; A Polynomial Chaos Framework for Causal Discovery in Nonlinear Uncertain Systems, *The IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition 2026 (CVPR 2026)*, Denver, USA, 2026-06-03至2026-06-07 (会议论文) (本人标注: 唯一第一作者, 唯一通讯作者)

本人贡献: 构思 实验 写作

(4) **Cao, Liang**; A Natural-Gradient Approach for Nonlinear Stochastic Systems with Parameter Uncertainty, *40th Annual AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI 2026)*, Singapore, 2026-01-20至2026-01-27 (会议论文) (本人标注: 唯一第一作者, 唯一通讯作者)

本人贡献: 构思 实验 写作

(5) **Cao, Liang**; Wang, Jingyi; Su, Jianping; Luo, Yi; Cao, Yankai; Braatz, D. Richard; Gopaluni, Bhushan; Comprehensive Analysis on Machine Learning Approaches for Interpretable and Stable Soft Sensors, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2025, 74: 9517217 (期刊论文) (本人标注: 唯一第一作者)

本人贡献: 构思 实验 写作

(6) **Cao, Liang**; Liu, Yang; Liu, Jing; Su, Jianping; Physics-informed Dynamic Hybrid Modeling for Real-time Renewable CO<sub>2</sub> Tracking in Refinery Co-processing, *ISA Transactions*, DOI:10.1016/j.isatra.2025.10.035, 2025, 1-10 (期刊论文) (本人标注: 唯一第一作者, 唯一通讯作者)

本人贡献: 构思 实验 写作

(7) **Cao, Liang**; Su, Jianping; Conde, Emilio; Siang, Lim C.; Cao, Yankai; Gopaluni, Bhushan; A Novel Automated Soft Sensor Design Tool for Industrial Applications based on Machine Learning, *Control Engineering Practice*, 2025, 160: 106322 (期刊论文) (本人标注: 唯一第一作者)  
本人贡献: 构思 实验 写作

(8) **Cao, Liang**; Yu, Feng; Yang, Fan; Cao, Yankai; Gopaluni, Bhushan; Data-driven Dynamic Inferential Sensors based on Causality Analysis, *Control Engineering Practice*, 2020, 104(无): 104626 (期刊论文) (本人标注: 唯一第一作者)  
本人贡献: 构思 实验 写作

(9) **Cao, Liang**; Su, Jianping; Saddler, Jack; Cao, Yankai; Wang, Yixiu; Lee, Gary; Siang, C.Lim; Pinchuk, Robert; Li, Jin; Gopaluni, Bhushan; Real-time Tracking of Renewable Carbon Content with AI-aided Approaches during Co-processing of Biofeedstocks, *Applied Energy*, 2024, 360: 122815 (期刊论文) (本人标注: 共同第一作者)  
本人贡献: 构思 实验 写作

(10) **Cao, Liang**; Su, Jianping; Saddler, Jack; Cao, Yankai; Wang, Yixiu; Lee, Gary; Siang, C. Lim; Luo, Yi; Pinchuk, Robert; Li, Jin; Gopaluni, Bhushan; Machine Learning for Real-time Green Carbon Dioxide Tracking in Refinery Processes, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2025, 213: 115417 (期刊论文) (本人标注: 共同第一作者)  
本人贡献: 构思 实验 写作

### 三、论著之外的代表性研究成果和学术奖励:

(1) **Cao, Liang**(1/5); IEEE/CAA JAS 工业自动化5.0会议论文二等奖, IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, *自然科学*, 国际学术奖, 2024(**Cao, Liang**; Su, Jianping; Yang, Fan; Cao, Yankai; Gopaluni, Bhushan) (科研奖励)

(2) **Cao, Liang**(1/5); 仪器与控制工程师学会青年作者提名奖, 仪器与控制工程师学会 (SICE), *自然科学*, 国际学术奖, 2022(**Cao, Liang**; Gopaluni, Bhushan; Siang, .C Lim; Cao, Yankai; Li, Jin) (科研奖励)

(3) 2022-10-23至2022-10-26, 举办或参加学术会议/举办国际学术会议/Canadian Chemical Engineering Conference 2022, 担任 "Artificial Intelligence and Machine Learning in Process Systems Engineering" 分会主席, Vancouver, Canada, Chemical Institute of Canada, Mina Naeini (举办或参加学术会议)

(4) 2025-07-12至2025-07-15, 举办或参加学术会议/举办国际学术会议/The 23rd IEEE International Conference on Industrial Informatics, 担任大会程序委员, Kunming, China, IEEE Industrial Electronics Society, Gerhard P. Hancke (举办或参加学术会议)

(5) 2025-09-22至2025-09-24, 举办或参加学术会议/举办国际学术会议/The 4th IEEE International Conference on Industrial Electronics for Sustainable Energy Systems, 担任 "Advanced Monitoring and Control for Industrial Systems" 邀请组主席, Beijing, China, IEEE Industrial Electronics Society, Fang Fang (举办或参加学术会议)

(6) 2026-05-08至2026-05-10, 举办或参加学术会议/举办国际学术会议/Joint International Conference on Automation Intelligence Safety and International Symposium on Autonomous Systems, 担任 "Industrial Process Intelligence Operation Control and Data Analysis" 邀请组主席, Xu Zhou, China, Chongqing University, Yongduan Song (举办或参加学术会议)

(7) **Liang Cao**(1/1); IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 2024年杰出审稿人, IEEE Instrumentation and Measurement Society, *自然科学*, 国际学术奖, 2025(**Liang Cao**) (科研奖励)

(8) Cao, Liang(1/1); Control Engineering Practice 2025年杰出审稿人, Elsevier, *自然科学*, 国际学术奖, 2025 (Cao, Liang) (科研奖励)

(9) Cao, Liang(1/1); 北京市优秀毕业生, 北京市教育委员会, *其他*, 其他, 2018 (Cao, Liang) (科研奖励)

(10) Cao, Liang(1/1); 研究生国家奖学金, 中华人民共和国教育部, *其他*, 其他, 2017 (Cao, Liang) (科研奖励)

## 报告正文Main Body of Proposal

参照以下提纲撰写，要求内容翔实、清晰，层次分明，标题突出。

The proposal shall be written in accordance with the following outline, with informative content, clear structure, and prominent titles.

请勿删除或改动下述提纲标题及括号中的文字。

Please do not delete or change the title of the outline and the words in brackets.

### (一) 主要学术成绩（建议不超过4000字）

#### Major academic achievements(no more than 4000 words)

着重阐述所取得研究成果的创新性、科学价值及本人贡献等。

In this part,you shall focus on the innovativeness and scientific value of the research results,and your personal contribution.

### 1. 学术成绩概述

申请人目前在加拿大不列颠哥伦比亚大学化学与生物工程系担任博士后研究员，师从Bhushan Gopaluni教授（加拿大工程院院士），同时在美国康奈尔大学Fengqi You教授(AAAS/AICHe/FRSC Fellow)的联合指导下进行可信机器学习及其工业化应用研究。此前，申请人于2015年6月和2018年6月从北京化工大学信息科学与技术学院获得学士和硕士学位，师从王友清教授（国家杰出青年科学基金获得者，CAA/IET Fellow）进行工业过程故障诊断与容错控制研究。同时硕士期间在德国杜伊斯堡-埃森大学联合培养，师从Steven X. Ding教授进行多维系统故障诊断研究。于2024年2月从加拿大不列颠哥伦比亚大学化学与生物工程专业获得博士学位，师从Bhushan Gopaluni教授和Yankai Cao教授进行可解释机器学习与流程工业智能监测研究。自2024年3月到2025年11月在美国麻省理工学院化学工程系担任博士后研究员，师从Richard D. Braatz教授（美国工程院院士、IEEE/IFAC/AAAS/AICHe Fellow）进行流程工业的建模与最优控制研究。申请人将加入北京化工大学王友清教授团队。

以石油化工为代表的复杂工业过程是我国国民经济的支柱产业，其安全、高效、绿色运行是实现高质量发展和建设制造强国的关键。当前，全球新一轮科技革命与产业变革深入发展，推动制造业加速向数字化、网络化、智能化转型升级。国家"十五五"规划纲要提出"全面实施'人工智能+'行动"，工业和信息化部等八部门联合印发的《"人工智能+制造"专项行动实施意见》进一步明确要求推动人工智能技术深度嵌入生产制造核心环节，加快实现工艺流程自适应优化、安全生产监测预警与设备预测性维护等关键能力，全方位赋能新型工业化。然而，复杂工业过程固有的强非线性、快时变、多变量强耦合、运行工况多变等特点，给过程的精准建模、实时监测、故障诊断与优化控制带来了巨大挑战。尽管人工智能技术在工业过程监测与控制领域取得了诸多进展，但在应对多源信息融合、保障模型可信度、提升模型泛化能力等方面仍存在显著不足。因此，发展兼具高精度、强鲁棒性与良好可解释性的智能监测与控制新方法，成为确保复杂工业过程长周期安全稳定运行、实现智能化升级的迫切需求与核心科学问题。

如图1所示，针对上述挑战，申请人聚焦复杂工业过程的智能监测与控制，以提升工业系统运行的安全性、可靠性与智能化水平为目标，系统开展了复杂工业过程的“数模联动混合建模”、“可信智能监测与故障诊断”、“多通道故障容错控制”三个层层递进的研究方向。首先以高精度、具备物理一致性的混合模型为基础，进而支撑可解释、可靠的智能监测与故障诊断，最终驱动鲁棒自适应的容错控制，构建数据与过程知识深度融合、覆盖“建模-监测-诊断-控制”全流程的复杂工业过程智能体系。上述研究取得一系列重要成果，现简要概述如下：

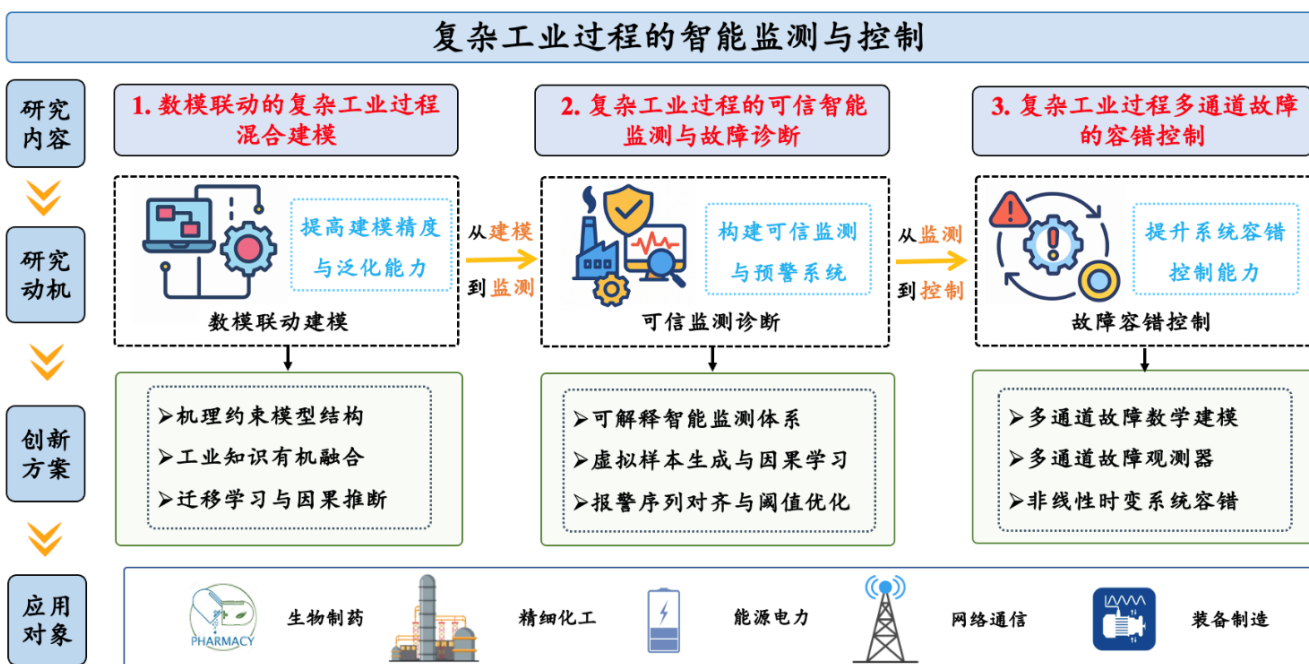


图1. 复杂工业过程的智能监测与控制总体结构图

期刊论文与专著：在国际知名期刊与学术会议共发表论文48篇，其中以第一作者发表SCI期刊论文20篇、通讯作者发表4篇；以第一作者发表CCF-A类国际顶级会议论文3篇，通讯作者发表3篇。一作期刊论文包括自动化领域顶级期刊IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica、IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems、IEEE Transactions on Industrial Informatics、IEEE Transactions on Automation Science and Engineering等，化工能源领域顶级期刊Renewable and Sustainable Energy Reviews、Applied Energy等。一作会议论文包括人工智能领域CCF-A类ICLR 2026、CVPR 2026、AAAI 2026等。与博士期间导师合作出版专著Large-scale Process Models Using Deep Learning。

表 1. 申请人在重点期刊和会议上发表的论文统计（部分）

重点期刊/会议名称	影响因子/分区	一作/通讯
<b>IEEE Transactions/Journal 期刊</b>		
IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica (JAS)	19.2 / JCR 1 区 Top	2 / 1
IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics: Systems (TSMC)	8.7 / JCR 1 区 Top	1 / 0
IEEE Trans. Industrial Informatics (TII)	9.9 / JCR 1 区 Top	1 / 0
IEEE Trans. Automation Science and Engineering (T-ASE)	6.4 / JCR 1 区	1 / 0
IEEE Internet of Things Journal (IoTJ)	8.9 / JCR 1 区 Top	1 / 0
IEEE Trans. Instrumentation and Measurement (TIM)	5.9 / JCR 1 区	1 / 0
IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics	4.0 / JCR 1 区	2 / 1
<b>CCF-A 类会议</b>		
International Conference on Learning Representations (ICLR 2026)	CCF-A	1 / 1
AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI 2026)	CCF-A	1 / 1
Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2026)	CCF-A	1 / 1
<b>过程控制与能源化工类期刊</b>		
ISA Transactions	6.5 / JCR 1 区 Top	1 / 1
Control Engineering Practice (CEP)	4.6 / JCR 1 区	3 / 0
Journal of Process Control (JPC)	3.3 / JCR 1 区	0 / 1
Renewable and Sustainable Energy Reviews (RSER)	16.3 / JCR 1 区 Top	1 / 0
Applied Energy	11.0 / JCR 1 区 Top	1 / 0
Green Energy and Intelligent Transportation (GEITS)	16.4 / JCR 1 区	0 / 1

**学术活动：**在学术活动方面，申请人担任顶级期刊**IEEE Transactions on Industrial Informatics**（SCI一区Top，IF 9.9）副编委（Associate Editor）；同时担任过程控制顶级期刊Control Engineering Practice和国产顶级期刊The Innovation Informatics青年编委。申请人还担任Joint International Conference on Automation-Intelligence-Safety（ICAIS）& ISAS 2026专题主席、IEEE第23届工业信息会议INDIN 2025程序委员、第4届IEEE工业电子与可持续能源系统国际会议IESES 2025专题主席，以及第73届加拿大化学工程会议CSCChE 2022分会主席。此外，申请人担任包括IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence、IEEE Transactions on Automatic Control、Automatica、ACM Computing Surveys、IEEE Transactions on Industrial Electronics、International Conference on Machine Learning等40余个顶级期刊及会议审稿人，并连续获得多个顶级期刊的Outstanding Reviewer荣誉。

表 2. 申请人主要学术任职情况（部分）

序号	学术职位	任职时间
1	IEEE Transactions on Industrial Informatics副编委	2025 – 至今
2	Control Engineering Practice青年编委	2025 – 至今
3	The Innovation Informatics青年编委	2025– 至今
4	程序委员， 23rd IEEE International Conference on Industrial Informatics	2025
5	专题主席， Joint International Conference on Automation Intelligence Safety (ICAIS) and International Symposium on Autonomous Systems (ISAS) ICAIS & ISAS, Session: Industrial Process Intelligence Operation Control and Data Analysis	2026
6	专题主席， 4th IEEE International Conference on Industrial Electronics for Sustainable Energy Systems, Session: Advanced Monitoring and Control for Industrial Systems	2025
7	专题主席， Canadian Chemical Engineering Conference, Session: AI & Machine Learning in Process Engineering	2022

**论文引用：**截止2026年4月，申请人研究成果的施引者来自于33个国家，包括加拿大皇家科学院、加拿大工程院院士以及加拿大最高荣誉勋章获得者 David P. Wilkinson教授，德国国家科学与工程院院士、德国功绩勋章获得者Birgit Vogel-Heuser 教授，美国工程院院士Leo Chiang教授、 Richard Braatz教授，欧洲科学院院士Zhongping Jiang 教授，加拿大皇家科学院、加拿大工程院院士Tongwen Chen 教授，加拿大工程院院士Biao Huang教授等24位国际/内院士，以及IEEE Fellow、IFAC Fellow、AIChE Fellow等著名学者31位（院士和会士名单见附录表）。

**获奖与荣誉：** 申请人获得多项奖励，包括教育部国家奖学金（2016, 2017），北京市优秀毕业生（2018），加拿大政府Mitacs Accelerate Award（2019），UBC校长卓越博士奖学金（2021, 2022, 2023），UBC突破性创新与工程领导力奖（2022），仪器与控制工程师协会（SICE）Young Author Award提名奖（2022）（排名第一），IEEE/CAA JAS工业自动化5.0会议论文二等奖（2024）（排名第一），IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement杰出审稿人（2024, 2025）以及Control Engineering Practice杰出审稿人（2025）等。

**科研项目：** 在美国麻省理工学院期间，申请人作为核心成员参与由Richard Braatz教授负责的**世界首个mRNA疫苗连续制造平台**项目（目前美国食品药品监督管理局对麻省理工学院的**最大资助项目**，资助金额8000万美元），主要解决mRNA疫苗生产过程中的数字孪生建模以及最优控制问题。在加拿大不列颠哥伦比亚大学期间，申请人作为核心成员参与UBC-Parkland Corporation炼化厂数字孪生项目，负责软测量开发与大数据分析平台建设，成果已成功应用于实际生产。目前作为Bhushan Gopaluni教授团队的项目负责人，主持多个跨学科联合项目，包括与康奈尔大学Fengqi You教授合作的加拿大国家研究委员会（NRC）微电网数字孪生建模与优化控制项目、与多伦多大学Alán Aspuru-Guzik教授合作的AI加速材料发现与逆向设计项目，以及与温哥华海岸卫生局Chad Kimsing博士合作的急诊科实时智能监测系统开发项目。

表 3. 申请人主持/参与的项目（部分）

序号	时间	项目名称	参与状态	资助机构	资助金额 (万元)
1	2020.06 – 2023.06	Modeling and Control of Refining Process	项目负责人 (CO-PI)	Mitacs	65
2	2022.11 – 2024.02	Smart Energy Modeling and Optimization	核心成员	Rogers Canada	150
3	2024.03 – 2025.11	Continuous mRNA Manufacturing	核心成员	US FDA	59000
4	2025.01 – 至今	Microgrid Digital Twin Modeling and Optimal Control	项目负责人 (CO-PI)	NRC Canada	1500
5	2025.07 – 至今	AI-Accelerated Materials Discovery and Inverse Design	项目负责人 (CO-PI)	Mitacs	360
6	2025.09 – 至今	Timely Monitoring of the Emergency Department	项目负责人 (CO-PI)	Vancouver Coastal Health	850

## 2. 研究成果及科学价值

申请人针对复杂工业过程智能监测与控制中的核心问题开展深入探索。具体聚焦于：1) 如何有效融合数据驱动与机理知识，克服传统建模方法在精度与物理解释性之间的矛盾；2) 如何突破智能监测与诊断系统在实际应用中面临的“黑箱”困境、低可靠性以及复杂故障诊断效率低下的瓶颈；3) 如何设计有效的控制策略以应对工业系统中多类型、多通道故障并发带来的稳定性和性能保障挑战。申请人发展了一系列理论与方法，在混合建模、可信监测诊断、以及多通道容错控制三个层面取得了系统性成果，研发的技术已成功应用于**炼油厂数字孪生模型构建、生物质共处理及锂电池管理**等实际工业场景。具体研究成果分述如下：

### 2.1 研究成果一：数模联动的复杂工业过程混合建模

#### • 研究背景

随着大数据和人工智能技术的快速发展，数据驱动建模方法在复杂工业过程监控中得到了广泛应用。然而，单纯依赖数据驱动模型往往存在数据质量不足、泛化性能差、以及难以有效利用工业过程的领域知识和机理规律等局限性。另一方面，机理建模方法虽具有良好的解释性和可靠性，但在处理复杂、高维、强耦合的工业系统时往往难以精确描述，导致模型精度不足。因此，**如何有效融合数据驱动模型与机理模型的优势，建立兼具精度、稳定性和符合机理知识的方法**，是当前工业建模与优化领域的重要研究方向，具有显著的科学价值和迫切的应用需求。申请人围绕数据驱动与机理模型融合的混合建模方法进行了深入研究并在多个领域进行应用，形成如图2所示的研究体系，具体工作如下：

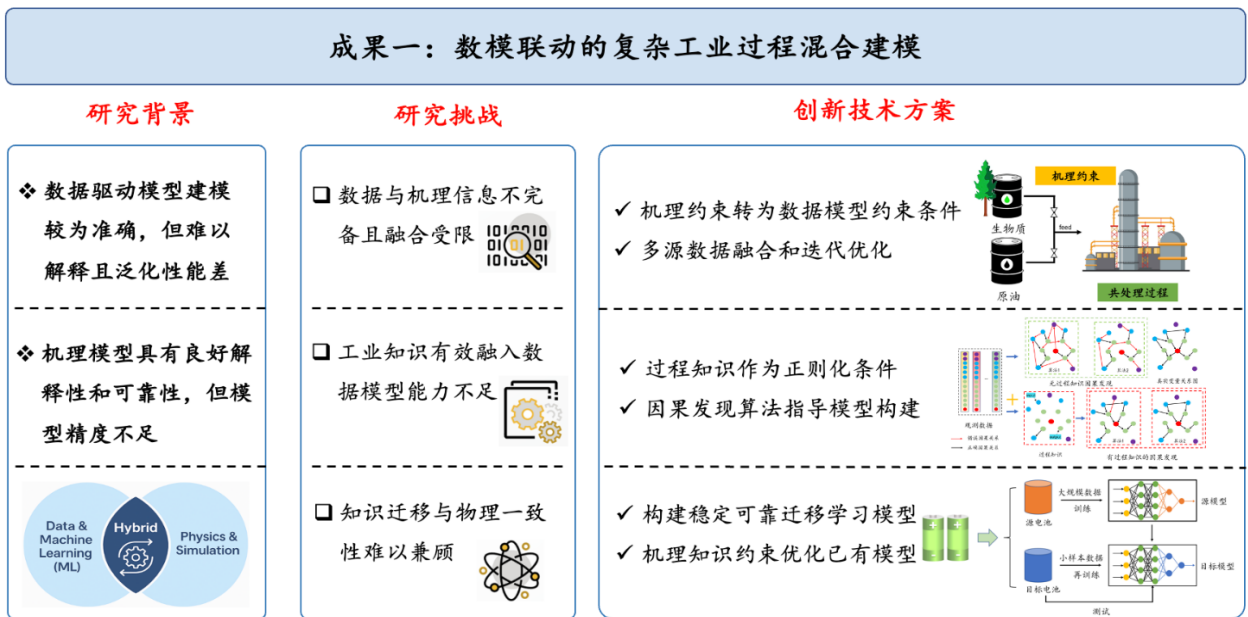


图 2. 数模联动的复杂工业过程混合建模研究结构图

- **研究工作与创新**

- (1) **机理约束的混合建模方法**

针对**复杂工业过程中数据与机理信息不完备**的问题，提出了**融合机理约束的机器学习建模方法**。该方法首先基于工业过程的物理化学原理建立机理约束方程；然后将这些机理约束转化为机器学习模型的约束条件，确保模型预测符合物理规律；最后通过多源数据融合和迭代优化，提高模型预测精度和泛化能力。在炼化过程的应用中，基于物质平衡原理和反应机理，建立了生物质共处理过程中碳流动的机理约束方程，实现了可再生碳含量的实时精确追踪。该方法有效整合了机理知识与数据驱动模型的优势，不仅提升了模型的预测精度和泛化能力，还保证了结果的物理可解释性，为数模联动的混合建模提供了新思路。在此基础上，申请人进一步将机理约束混合建模方法拓展至多工况动态工业场景，提出了面向多模态工业共处理过程的数据驱动动态建模方法，通过自适应识别工况切换模式并结合动态机理约束，实现了工况变化条件下可再生碳排放的精准动态追踪与实时预测，为复杂多工况工业过程的在线监测与优化提供了有力支撑。

- (2) **因果学习混合建模方法**

针对**工业高维数据难以有效利用过程知识**的问题，申请人提出了**融合过程知识的因果发现与建模方法**。该方法首先定义了适用于工业过程特性的四类过程知识；然后将这些过程知识作为正则化条件融入到因果发现算法中，通过约束搜索空间实现因果结构学习的有效修正；最后基于确定的因果结构选择模型输入，构建高精度的工业过程模型。在**加拿大Parkland炼化厂流化催化裂化装置**的应用中，该方法有效解决了工业过程数据高维度、强相关性问题，显著提高了因果发现精确度和模型预测准确性。在此基础上，针对工业过程中参数不确定性导致系统因果关系随工况动态变化的难题，申请人提出了基于多项式混沌展开的条件依赖因果发现理论框架，实现了参数不确定性条件下动态因果图的准确学习与辨识。该框架将参数不确定性建模为多项式混沌基函数，通过在混沌展开空间中进行因果结构搜索，有效分离了确定性因果关系与随机扰动的影响，为复杂工业系统在多工况运行条件下的精准建模提供了新的工具。

- (3) **迁移学习混合建模方法**

针对**工业系统中知识迁移与物理一致性难以兼顾**的问题，申请人提出了**基于迁移学习的混合建模方法**。该方法首先通过神经网络捕捉系统动态特性构建时序预测模型；其次利用迁移学习技术将已有知识迁移到数据稀缺的新系统中；最后结合物理机理知识对模型再进行约束和优化，确保预测结果符合物理规律。在锂电池容量衰减预测和循环寿命估计的应用中，该方法

有效解决了电池数据稀缺问题，通过将已有电池模型的知识迁移到新电池系统，并结合电池老化机理约束，显著提高了电池容量预测的准确性和模型的泛化能力，为电池管理系统的智能决策提供了可靠支持。

- **代表性成果**

聚焦于传统建模方法难以兼顾预测精度与物理可解释性的问题，申请人围绕数模联动的混合建模开展了系统探索，重点研究了基于机理约束、因果学习和迁移学习等策略的数据与知识融合机制。在过程控制、工业信息学与能源化工领域的国际顶级期刊发表论文12篇，包括IEEE Transactions on Industrial Informatics（中科院1区TOP, IF 9.9）、Renewable and Sustainable Energy Reviews（中科院1区TOP, IF 16.3）、Applied Energy（中科院1区TOP, IF 10.1）、ISA Transactions（中科院TOP, IF 6.5）、Fuel（中科院TOP, IF 6.7）以及Control Engineering Practice（过程控制领域顶级期刊）、Industrial & Engineering Chemistry Research（化工领域三大期刊之一）等。此外，因果发现方法论相关成果还发表在CVPR 2026和ICLR 2026等CCF-A类国际顶级会议上（均为第一作者）。其中发表在The Canadian Journal of Chemical Engineering中的论文被选为期刊亮点文章。代表性论文包括：

[A1]. **Liang Cao\***. Learning dynamic causal graphs under parametric uncertainty via polynomial chaos expansions. *International Conference on Learning Representations (ICLR 2026)*, 1–19. Rio de Janeiro, Brazil. 2026.

[A2]. **Liang Cao\***. A polynomial chaos framework for causal discovery in nonlinear uncertain systems. *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2026)*, 1–9. Denvor, USA. 2026.

[A3]. **Liang Cao**, Weide Liu, Yang Liu, Yan Qin. Condition-dependent causal discovery: A polynomial chaos framework for systems with parametric uncertainty. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, pp. 1-10, DOI: 10.1109/TII.2026.3672049, 2026.

[A4]. **Liang Cao\***, Jianping Su, Yang Liu, Jin Liu. Physics-informed dynamic hybrid modeling for real-time renewable CO2 tracking in refinery co-processing. *ISA Transactions*, pp. 1-10, DOI: 10.1016/j.isatra.2025.10.035, 2025.

[A5]. **Liang Cao**, Jianping Su, Jack Saddler, Yankai Cao, Yixiu Wang, Gary Lee, Lim C Siang, Yi Luo, Robert Pinchuk, Jin Li, R Bhushan Gopaluni. Machine learning for real-time green carbon dioxide tracking in refinery processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 213, pp. 115417, 2025.

[A6]. **Liang Cao**, Jianping Su, Yankai Cao, Lim C. Siang, Gary Lee, Jin Li, R. Bhushan Gopaluni. Data-driven dynamic modeling of renewable CO<sub>2</sub> emissions in multimode industrial co-processing processes. *Control Engineering Practice*, vol. 164, pp. 106424, 2025.

[A7]. **Liang Cao**, Jianping Su, Jack Saddler, Yankai Cao, Yixiu Wang, Gary Lee, Lim C Siang, Robert Pinchuk, Jin Li, R Bhushan Gopaluni. Real-time tracking of renewable carbon content with AI-aided approaches during co-processing of biofeedstocks. *Applied Energy*, vol. 360, pp. 122815, 2024.

[A8]. **Liang Cao**, Jianping Su, Yixiu Wang, Yankai Cao, Lim C. Siang, Jin Li, Jack Nicholas Saddler, Bhushan Gopaluni. Causal discovery based on observational data and process knowledge in industrial processes. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 61, pp. 14272-14283, 2022.

[A9]. Jianping Su, **Liang Cao**, Gary Lee, Jonathan Tyler, Anna Ringsred, Michael Rensing, Susan van Dyk, Don O'Connor, Robert Pinchuk, Jack John Saddler. Challenges in determining the renewable content of the final fuels after co-processing biogenic feedstocks in the fluid catalytic cracker (FCC) of a commercial oil refinery. *Fuel*, vol. 294, pp. 120526, 2021.

[A10]. Yixiu Wang, Jiangong Zhu, **Liang Cao**, Yankai Cao, Bhushan Gopaluni. Long short-term memory network with transfer learning for lithium-ion battery capacity fade and cycle life prediction. *Applied Energy*, vol. 350, pp. 121660, 2023.

[A11]. Yixiu Wang, Qiyue Luo, **Liang Cao**, Arpan Seth, Jianfeng Liu, Bhushan Gopaluni, Yankai Cao. Data-driven battery capacity estimation using support vector regression and model bagging under fast-charging conditions. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 102, pp. 3322-3332, 2024. [期刊亮点文章](#)

[A12]. Yi Luo, Bhushan Gopaluni, Yuan Xu, **Liang Cao**, Qun-Xiong Zhu. A novel approach to alarm causality analysis using active dynamic transfer entropy. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 59, pp. 8661-8673, 2020.

- 代表性同行评价

【评价1】加拿大阿尔伯塔大学Biao Huang教授（加拿大工程院院士，IEEE/CIC/AAIA/AIAA Fellow）及其合作者在IEEE Transactions on Cybernetics的论文（vol 54, no. 10, pp. 6081-6094, 2024）中引用申请人的工作（引文[47]，[申请人代表成果\[A8\]](#)），指出申请人在因果结构推断中提出了[直接利用领域知识确定部分因果结构的新方法](#)。引用原文为：There are some alternative methods that can incorporate domain knowledge into causal structure inference, such as employing known domain knowledge as the final partial causal structure directly [47], injecting...domain knowledge [37].

【评价2】加拿大不列颠哥伦比亚大学David P. Wilkinson教授（加拿大最高荣誉勋章获得者、加拿大皇家科学院院士、加拿大工程院院士，EIC/CIC Fellow）和上海大学张久俊教授（加拿大皇家科学院院士、加拿大工程院院士、EIC/CIC/ISE/RSC Fellow）及其合作者在Matter的论文（vol 8, no. 3, 2025）中引用申请人的两项工作（引文[137]和[138]，申请人代表成果[A10]和[A11]），认可其在开发高效准确的电池性能预测方法领域的创新贡献，强调了将机器学习融入数据分析以预测电池性能和剩余寿命的实用价值。引用原文为：It would therefore be helpful to develop time-efficient and accurate methods for predicting the anti-corrosion performance and calendar life of batteries, such as incorporating machine learning into data analysis 23,137,138.

【评价3】东南大学李世华教授（IEEE/IET/AAIA/CAA Fellow）及其合作者在Chemical Engineering Research and Design的论文（vol 208, pp. 326-335, 2024）中引用申请人的工作（引文Cao et al., 2022，申请人代表成果[A6]）作为支持工业系统故障安全风险日益成为关注焦点的重要参考引文。引用原文为：However, despite the benefits of complex systems and new technologies, safety risks associated with system failures have emerged as a growing concern (Cao et al., 2022; Zhang et al., 2021).

【评价4】加拿大阿尔伯塔大学Sirish Shah教授（加拿大工程院院士，IEEE Life Fellow，CIC Fellow）和Tongwen Chen教授（加拿大工程院院士，加拿大皇家科学院院士，IEEE/IFAC/EIC Fellow）及其合作者在2022年American Control Conference的论文（pp. 2467-2472）中，将申请人提出的贝叶斯网络方法（引文[13]，申请人代表成果[A12]）列为确定报警因果关系的重要方法，与知名的因果推理和格兰杰因果方法并列，强调了该方法在根因分析中的价值。引用原文为：In addition, to facilitate root cause analysis, alarm causality was determined using different metrics, such as causality inference [12], Bayesian networks [13], and Granger causality [14].

【评价5】加拿大坎梅特能源国家实验室主任陈金文教授（加拿大工程院院士）及其合作者在发表于Fuel期刊的论文（vol 324, 124608, 2022）中引用申请人的工作（引文[144]，申请人代表成果[A9]），指出软测量分析技术的缺乏是原油与生物质共处理行业面临的重要技术空白，肯定了工作的前沿性与重要性。引用原文为：The lack of fast, low-cost, and reliable analytical techniques with high precision and low detection limits is a significant knowledge gap for the co-processing industry and requires further investigations [17,142–144].

【评价6】美国佩恩公共政策研究所所长Morgan D. Bazilian教授（世界银行首席能源专家，联合国国际能源问题特别顾问，爱尔兰能源部首席顾问）和英国萨塞克斯大学Benjamin Sovacool教授（英国社会科学院院士）及其合作者在发表于Energy Research & Social Science的论文（vol

89, 102542, 2022) 中引用申请人的工作 (引文[219], 申请人代表成果[A9]), 将其作为石油炼制过程减碳四种替代路径研究的重要参考引文, 肯定了所提方法利用现有炼油厂设备进行大规模应用的潜力。引用原文为: These pathways have varying levels of synergy with existing refining assets and rely on access to cost-effective, abundant feedstocks to meet product demand levels, which puts the potential for deployment in the medium to long-term [219,402–412].

## 2.2 研究成果二：复杂工业过程的可信智能监测与故障诊断

### • 研究背景

现代工业生产过程通常运行在高温高压、易燃易爆、有毒有害等危险环境中, 且工艺流程繁复、工况变化多样。在这种条件下, 关键性能参数往往难以直接测量和实时监控, 给过程安全运行和质量稳定控制带来严峻挑战。可信智能监测与故障诊断系统作为解决这一难题的关键技术, 需要同时具备精确的软测量能力和高效的故障识别能力。然而, 当前智能监测与诊断系统普遍面临三个关键挑战: 一是模型可解释性缺乏, 随着算法复杂度提高, 模型决策过程日益“黑盒”化, 导致现场工程师对系统缺乏理解和信任; 二是模型可靠性不足, 在工况波动、设备老化和原料变化等扰动因素影响下容易失效; 三是故障诊断效率低下, 系统在面对复杂故障时常出现误报漏报, 且难以从海量报警信息中快速识别根本原因。因此, 研究开发具有强解释性、高可靠性和精准诊断能力的可信智能监测方法, 对保障工业生产安全稳定运行具有重要科学价值和迫切应用需求。申请人围绕复杂工业过程的可信智能监测与故障诊断问题进行了深入研究, 形成如图3所示的研究体系, 具体工作如下:

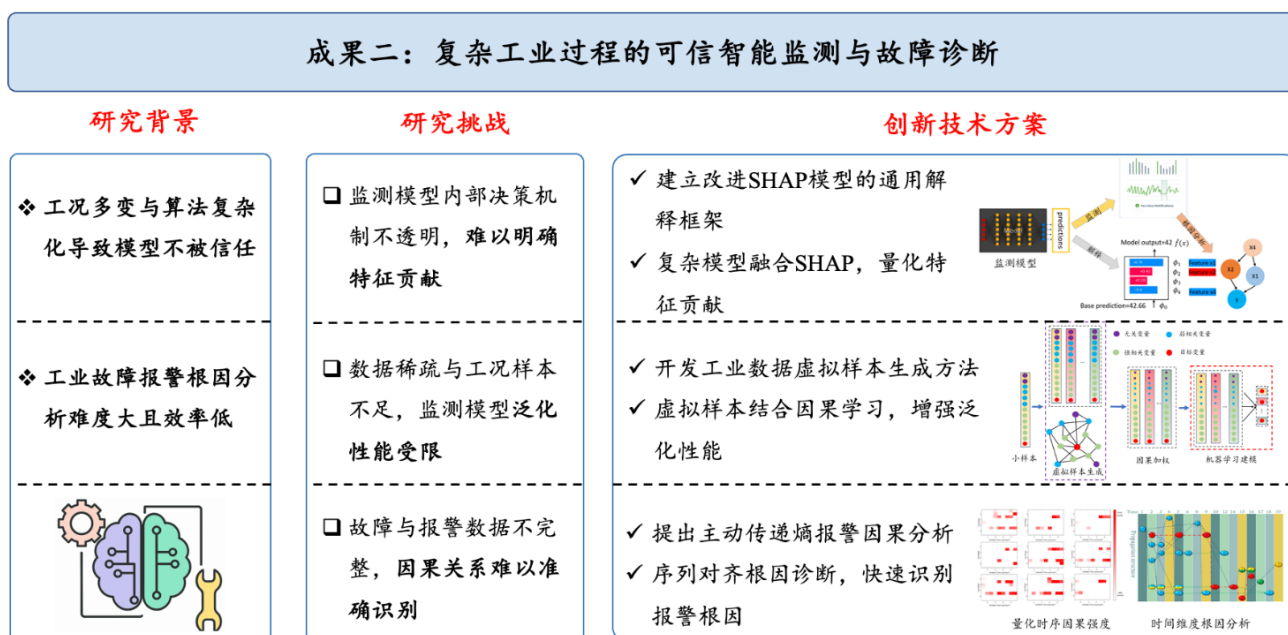


图 3. 复杂工业过程的可信智能监测与故障诊断研究结构图

## • 研究工作与创新

### (1) 特征归因的可解释智能监测方法

针对传统数据驱动软测量模型**难以解释且现场应用受限**的问题,申请人提出了一种**模型无关的通用可解释智能监测方法**。该方法核心是通过SHAP等可解释机器学习技术对黑盒模型的输出进行系统分解,无需对原模型结构或参数进行特殊修改,即可精确量化各输入特征对预测结果的贡献。在工业应用中,该方法不仅保持了高预测精度,还能系统地解释过程变量对关键性能参数的影响机制,使工程师能够直观理解模型决策依据,有效解决了智能监测系统的"黑盒"问题,提高了模型在实际生产中的可信度和接受度。在此基础上,申请人进一步提出了基于因果表征学习的可信工业过程建模方法。该方法从高维工业数据中自动学习具有因果意义的特征表示,通过将数据驱动深度学习与因果推理机制相结合,不仅提升了模型的预测精度,更从根本上增强了模型的可解释性与可信度,为工业过程智能监测系统从"能用"到"可信"的跨越提供了理论保障。

### (2) 数据增强的可靠智能监测方法

针对工业生产过程中**异常数据稀少、样本不足和工况多变**导致的监测模型不稳定问题,申请人提出了**基于虚拟样本生成与因果稳定学习融合**的可靠智能监测方法。该方法首先设计了工业过程数据的虚拟样本生成算法,有效扩充训练数据并增强模型对未知工况与异常状态的泛化能力;其次提出新型稳定性损失函数,显著提升了模型对数据扰动和工况波动的预测稳健性;最后将因果学习理论引入特征选择过程,从工业过程高维数据中挖掘变量间的真实因果关系。该方法为复杂工业过程中软测量模型的泛化性与可靠性提供了理论保障,并在多个实际工业场景验证中展现出优异的稳定性和适应性。此外,申请人提出了面向工业过程监测的系统性数据质量评估框架,针对工业数据中普遍存在的噪声、缺失和异常值问题,建立了覆盖完整性、一致性和时效性等维度的数据质量评价指标体系,为可靠监测模型的构建提供了数据质量保障。同时,针对动态工业系统中参数不确定性导致变量间因果关系随工况变化的难题,提出了基于多项式混沌展开的因果发现方法,有效提升了动态工况下监测模型的特征选择准确性与预测鲁棒性。

### (3) 因果推理的智能故障诊断方法

针对工业过程中**故障根因难以识别、报警信息繁杂和诊断效率低下**的问题,申请人提出了**基于因果推理的智能故障诊断方法**。该方法首先利用主动传递熵技术构建工业过程变量和报警事件间的因果关系网络,实现了故障传播路径的精确识别与可视化;其次基于因果结构

开发了报警信息的根因分析算法，显著提高了复杂场景下的诊断准确性；最后提出了基于序列对齐的故障模式识别方法，有效克服了工业过程中报警时序数据不完整和不确定性强的挑战。该方法在多个行业实际应用中为操作人员快速提供了清晰的故障传播机制解释和处理指导，有效提升了安全运行水平和故障响应能力。在此基础上，申请人进一步发展了面向非线性工业系统的因果结构发现方法，针对复杂噪声条件下因果关系辨识困难的问题，提出了适用于非高斯噪声环境的因果结构学习算法，显著提升了故障传播路径识别的准确性与可靠性；同时提出了基于快慢动态分离的Koopman网络异常检测方法，针对非平稳工业过程中时滞变量的影响，通过分离系统的快、慢动态特征实现了动态工况下异常状态的实时精准检测。

研究成果二的内容被申请人统一集成到**智能监测平台**中（如图4所示），该平台具有直观的界面和自动化功能。工程师无需掌握复杂的机器学习和数据分析知识，只需通过简单的操作界面即可实现自动建模、智能监测和系统部署的全流程管理。这一集成化解决方案大大降低了先进算法的应用门槛，使工业现场技术人员能够轻松获取关键工艺参数的实时分析结果，有效提升了生产过程的安全性和可控性，为智能工厂建设提供了实用工具。

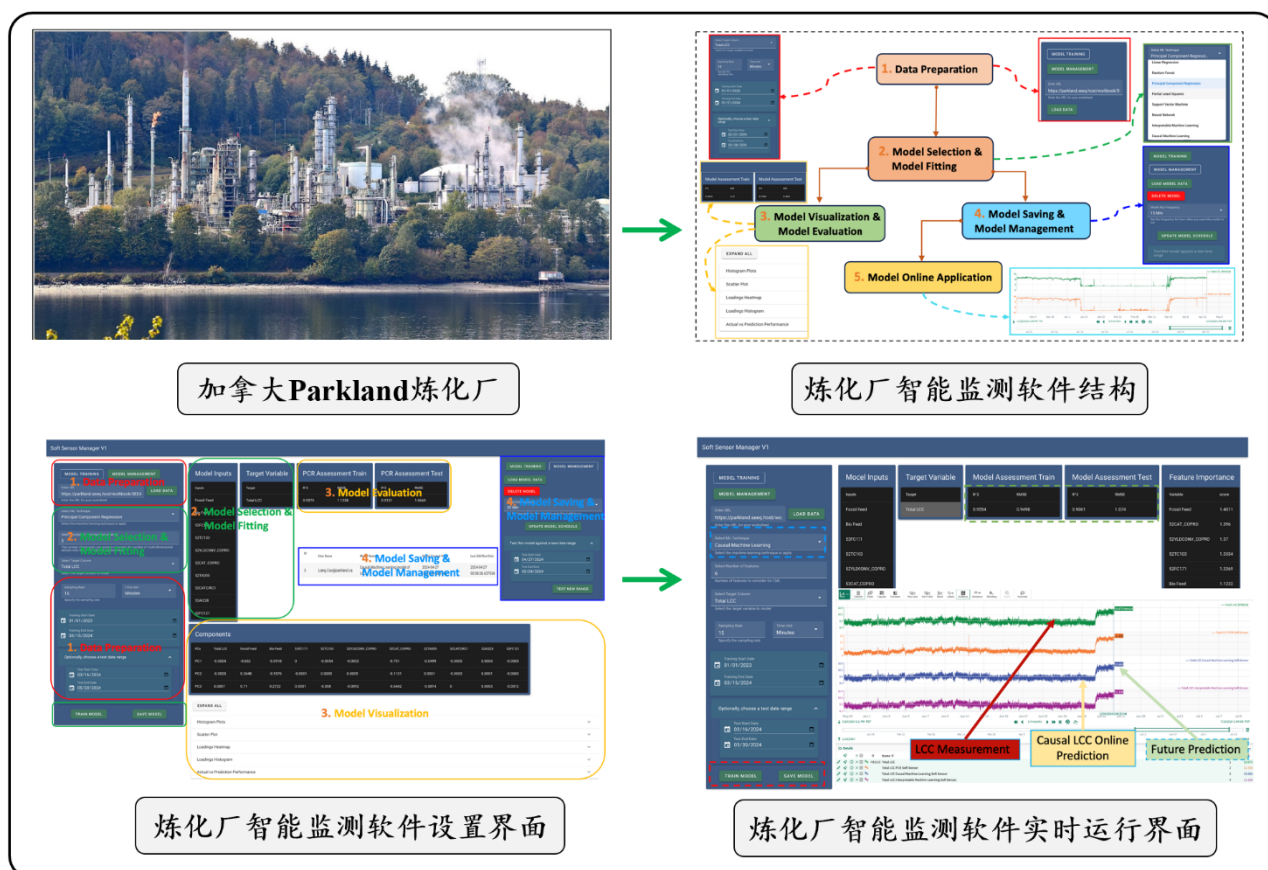


图 4. 申请人研发的智能监测软件实际运行架构与功能实现图

● 代表性成果

聚焦于解决复杂工业过程智能监测与诊断中模型可解释性差、可靠性低及故障诊断效率不高等关键问题，申请人围绕可信智能监测与故障诊断开展了系统研究，重点探索了基于特征归因的可解释性增强、基于数据增强与因果学习的可靠性提升，以及基于因果推理的智能故障诊断方法。在自动化控制、工业信息学与计算机领域的国际顶级期刊发表论文13篇，包括IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica（中科院1区TOP，IF 19.2，2篇一作）、IEEE Internet of Things Journal（中科院TOP, IF 8.9）、ACM Computing Surveys（中科院1区TOP，IF 23.8）、IEEE Transactions on Automation Science and Engineering（自动化领域顶级期刊，IF 6.4）、Control Engineering Practice（过程控制领域顶级期刊）、Journal of Process Control（过程控制领域顶级期刊）以及IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics等。此外，相关方法论成果还发表在ACM WWW 2026等CCF-A类国际顶级会议上。其中发表在IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica上的论文同时获IEEE/CAA JAS工业自动化5.0会议论文二等奖（第一作者）。代表性论文包括：

[B1]. **Liang Cao**, Jianping Su, Fan Yang, Yankai Cao, R Bhushan Gopaluni. Interpretable and reliable soft sensor development in industry 5.0. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 13, pp. 236-238, 2026. [获IEEE/CAA JAS工业自动化5.0会议论文二等奖](#)

[B2]. **Liang Cao**, Weide Liu, Yan Qin. Causal discovery in dynamic industrial systems under parametric uncertainty: A polynomial chaos approach. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, pp. 1-12, DOI: 10.1109/TASE.2026.3672332, 2026.

[B3]. **Liang Cao**, Jianping Su, Yi Luo. Causal structure discovery for industrial process monitoring: A novel approach for nonlinear systems with complex noise. *IEEE Internet of Things Journal*, DOI: 10.1109/JIOT.2026.3653158, 2026.

[B4]. **Liang Cao**, Yixiu Wang, Jianping Su. A systematic framework for data quality assessment in industrial process monitoring. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*, DOI: 10.1109/JESTIE.2026.3667011, 2026.

[B5]. **Liang Cao**, Weide Liu, Yan Qin, Zhenghua Chen, Zhuo Chen, and Bhushan Gopaluni. Sparse causal latent features for robust multimodal learning under distribution shifts. *Proceedings of the ACM Web Conference (WWW 2026)*, 1–7. CCF A, Dubai, United Arab Emirates. 2026.

[B6]. **Liang Cao**, Fan Yang, Youqing Wang. Causal representation learning for trustworthy industrial process modeling. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, DOI: 10.1109/JAS.2025.135470, 2025.

[B7]. Yan Qin, Shan Yin, Wenbin Qian, Wei Dai, **Liang Cao\***. Slow-fast dynamics-assisted Koopman network for anomaly detection in nonstationary industrial processes with time-lagged variables. *Journal of Process Control*, vol. 161, pp. 103678, 2026.

[B8]. **Liang Cao**, Jianping Su, Emilio Conde, Lim Siang, Yankai Cao, Bhushan Gopaluni. A novel automated soft sensor design tool for industrial applications based on machine learning. *Control Engineering Practice*, vol. 160, pp. 106322, 2025.

[B9]. **Liang Cao**, Feng Yu, Fan Yang, Yankai Cao, R Bhushan Gopaluni. Data-driven dynamic inferential sensors based on causality analysis. *Control Engineering Practice*, vol. 104, pp. 104626, 2020.

[B10]. Liu, Jing, Yang Liu, Jieyu Lin, Jieli Li, **Liang Cao**, Peng Sun, Bo Hu, Liang Song, Azzedine Boukerche, Victor C.M. Leung. Networking systems for video anomaly detection: A tutorial and survey. *ACM Computing Surveys*, vol. 57, pp. 1-37, 2025.

[B11]. Yi Luo, Bhushan Gopaluni, **Liang Cao**, Yongjian Wang, Jian Cheng. Adaptive online optimization of alarm thresholds using multilayer Bayesian networks and active transfer entropy. *Control Engineering Practice*, vol. 137, pp. 105534, 2023.

[B12]. Yupeng Li, Weihua Cao, R. Bhushan Gopaluni, Wenkai Hua, **Liang Cao**, Min Wu. False alarm reduction in drilling process monitoring using virtual sample generation and qualitative trend analysis. *Control Engineering Practice*, vol. 133, pp. 105457, 2023.

[B13]. Shiqi Lai, Fan Yang, Tongwen Chen, **Liang Cao**. Accelerated multiple alarm flood sequence alignment for abnormality pattern mining. *Journal of Process Control*, vol. 82, pp. 44-57, 2019.

- 代表性同行评价

【评价1】加拿大阿尔伯塔大学Tongwen Chen教授（加拿大工程院院士，加拿大皇家科学院院士，IEEE/IFAC/EIC Fellow）及其合作者在专著Intelligent Industrial Alarm Systems（Springer, 2024）的章节“Overview of Industrial Alarm Systems”中引用申请人的研究（引文[119]，申请人代表成果[B11]），肯定了自适应报警阈值在线优化在工业报警系统研究领域的贡献，提高了报警传播分析的准确性。引用原文为：[119] constructed a simplified multilayer Bayesian network based on active transfer entropy to adjust thresholds in real time to improve the accuracy of alarm propagation analysis.

【评价2】德国慕尼黑工业大学Birgit Vogel-Heuser教授（德国国家科学与工程院院士、德国功绩勋章获得者，IEEE Fellow）及其合作者在IEEE Robotics and Automation Letters的论文（vol 10, no. 1, pp. 335-342, 2025）中引用申请人的工作（引文[10]，申请人代表成果[B13]），指出申请人提出一种新颖的报警泛滥相似性分析方法，有效解决了报警序列顺序模糊性和非相关报警干扰的问题。引用原文为：A novel alarm flood similarity analysis [10] has been developed to address

the frequently observed ambiguity regarding the order of alarms and the occurrence of irrelevant alarms within otherwise similar alarm subsequences.

【评价3】奥地利维也纳工业大学Schahram Dustdar教授（欧洲科学院院士，IEEE/EAI/AAIA Fellow）及其合作者在Journal of Process Control的论文（vol 105, pp. 15-26, 2021）中引用申请人的工作（引文[8]，申请人代表成果[B13]），将其作为报警优化方法的代表工作，肯定了该方法在提高单变量报警性能方面的重要贡献。引用原文为：In recent years, the scholars have proposed some alarm optimization design methods based on dead band, time delay and filtering to improve the performance of univariate alarm [8–10].

【评价4】加拿大不列颠哥伦比亚大学Jack Saddler教授（加拿大皇家科学院院士）及其合作者在Sustainable Energy & Fuels的论文（vol 6, no. 24, pp. 5600-5607, 2022）中引用申请人的工作（引文[17]，申请人代表成果[B8]），强调了其能够替代传统监测方法，在工业实际应用中具有重要价值。引用原文为：More user-friendly and cheaper methods are needed to supplement <sup>14</sup>C monitoring with the hope that "soft sensors" can be established at various points within a refinery so data can be collected and validated. [16,17]

【评价5】日本早稻田大学Yosuke Nakanishi教授（IEEE Fellow）及其合作者在Journal of Process Control的论文（vol 142, 103284, 2024）中引用申请人的工作（引文[11]，申请人代表成果[B7]），肯定了虚拟样本生成和定性趋势分析相结合的方法有效解决了误报率高的问题。引用原文为：To solve this problem, Li et al. [11] developed a false alarm reduction method using virtual sample generation and qualitative trend analysis.

### 2.3 研究成果三：复杂工业过程多通道故障的容错控制

#### • 研究背景

复杂工业过程中常出现多通道、多类型的故障，例如传感器与执行器故障的加性故障与乘性故障。这些故障若未能及时诊断和有效处理，将可能引发严重的安全事故，导致重大经济损失乃至环境灾害。目前已有的故障诊断与容错控制研究大多针对单一通道故障或理想条件下的模型展开，难以应对实际存在的高度非线性、时变时滞和不确定性等复杂特性。尤其是在面对多通道故障同时发生的场景时，传统的故障诊断与容错控制方法往往难以实现精确定位和可靠控制，导致系统安全性和稳定性难以保障。此外，现有研究也缺乏统一的理论框架来描述多通道故障的随机动态特性，这为故障建模、观测器设计和控制策略开发带来了额外挑战。因此，探索复杂工业过程中多通道故障的诊断与容错控制理论和方法，对于保障工

业系统的安全稳定运行、降低运行风险具有重要的科学意义和迫切的现实需求。申请人聚焦于解决复杂工业过程中非线性、多通道故障诊断与容错控制难题，形成如图 5 所示的系统性研究体系，从故障建模、诊断到容错控制构建了完整的理论框架，具体工作如下：

● 研究工作与创新

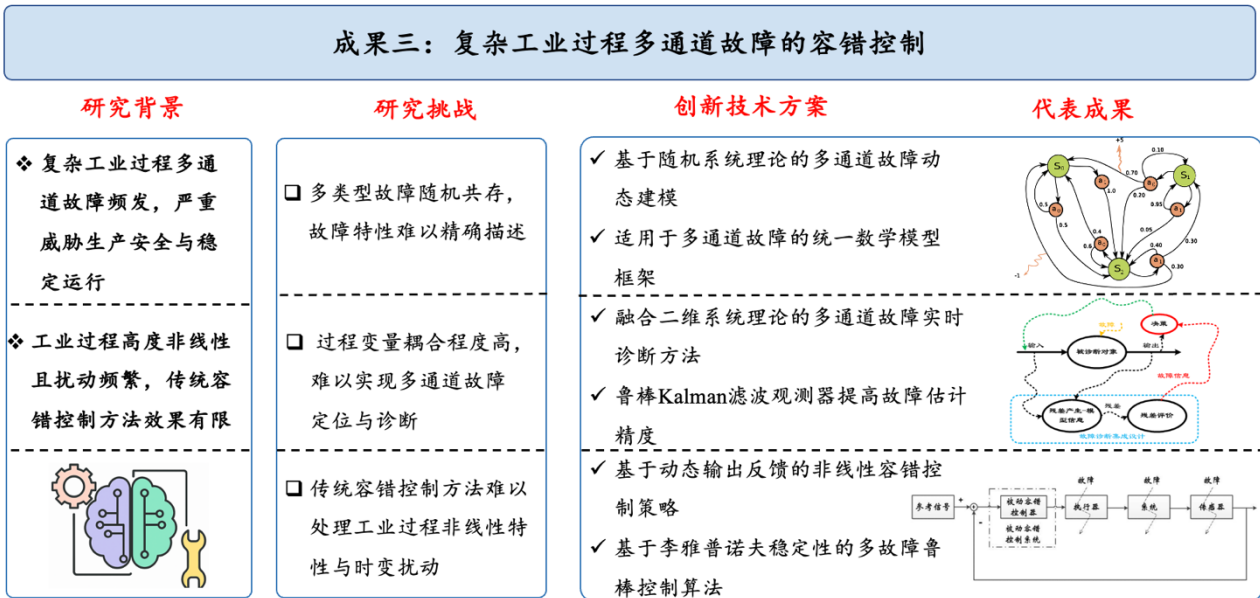


图 5. 复杂工业过程多通道故障的容错控制研究结构图

(1) 多通道故障随机系统建模

针对复杂工业过程中多通道故障随机特性难以精确描述的问题，申请人创新性地<sup>1</sup>将Markov跳变系统理论引入多通道间歇故障建模。该方法系统描述了执行器与传感器间歇性故障随机发生的特征，构建了统一的多通道间歇故障数学模型框架。通过定义有限状态Markov链表征故障模式转移，该模型不仅能精确刻画故障发生的随机性，还能描述故障持续时间的不确定性和多通道间的耦合关系。与传统确定性故障模型相比，该随机建模方法更接近实际工业过程故障特性，提高了模型对真实工业环境中故障表现的预测准确性，为多通道故障诊断与容错控制提供了理论基础。

(2) 多通道故障观测器设计

针对工业过程非线性强、多通道故障交互干扰导致的故障难以准确诊断问题，申请人提出了集成线性矩阵不等式（LMI）与广义Kalman滤波理论的多通道故障诊断观测器。该方法首先通过二维系统描述建立工业过程状态和故障特性的关系；然后基于LMI构造稳定的观测器增益矩阵；最后利用Kalman滤波算法实现对多通道故障信号的实时估计。申请人还将状态时滞和

参数不确定性等因素纳入观测器设计，构建了**应对系统非线性、时滞和不确定性的鲁棒诊断方法**。在化工过程验证中，该方法展现出对多种类型故障的有效识别能力，即使故障信号被噪声干扰的情况下，仍保持较高的诊断准确率。此外，随着工业系统向智能化、网络化深度融合，信息物理系统（CPS）面临的恶意虚假数据注入等新型安全威胁对传统故障诊断框架提出了新挑战。申请人将因果表征学习引入CPS攻击检测，提出了基于因果表征的网络物理系统攻击检测方法，通过学习系统变量间的因果不变特征，有效区分正常工况波动与恶意攻击信号，显著提升了检测的准确性与鲁棒性，将故障诊断的研究视角从传统物理故障扩展到网络安全层面。

### （3）多通道故障非线性容错控制

针对**复杂工业过程多通道故障同时发生且非线性强**的挑战，申请人提出了系统化的多通道故障非线性容错控制方法。该方法**将容错控制问题转化为随机系统稳定性分析框架**，通过构建李雅普诺夫函数，为理论分析提供了严格的数学工具。基于此设计了动态输出反馈的被动容错控制策略，使系统在多通道故障存在时仍保持期望性能。针对故障转移概率难以获取的问题，申请人提出了基于部分信息的鲁棒容错控制算法，有效解决了**转移概率不确定**下的容错控制难题。该方法确保即使在执行器和传感器同时故障的极端条件下，系统仍能维持基本性能和安全边界。在此基础上，针对工业信息物理系统中虚假数据注入攻击对系统状态估计可靠性的威胁，申请人进一步提出了容量感知的潜在扩散模型方法，在无人机电池健康状态估计等复杂攻击场景下实现了对系统状态的可靠估计。上述工作将容错控制框架从传统物理故障扩展至网络攻击防御，形成了物理故障容错与网络攻击防御双重保障的体系，为工业信息物理系统的安全可靠运行提供了新的解决方法。

#### • 代表性成果

聚焦于解决复杂工业过程中**多通道、多类型故障并发**带来的诊断与控制难题，同时考虑系统**非线性、时变时滞与随机不确定性**的影响，申请人围绕**多通道故障的容错控制**开展了系统性研究。重点探索了基于**Markov跳变系统**的随机故障建模、基于观测器的鲁棒故障诊断以及**面向随机系统的非线性容错控制理论与方法**，并进一步拓展至网络物理系统的攻击检测与安全防御。在自动控制、系统安全与过程监测领域的顶级期刊**发表论文10篇**，包括IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems ([系统工程领域顶级期刊](#))、Green Energy and Intelligent Transportation ([新能源与智能交通领域顶级期刊](#))、IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement ([智能监测领域顶级期刊](#))、IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics ([工业电子领域知名期刊](#)) 等期刊。上述鲁棒控制器设计方法的相关成果还发表在

AAAI 2026等CCF-A类国际顶级会议上。其中发表在仪器与控制工程师学会 (SICE) 会议的论文获SICE青年作者提名奖。代表性论文包括：

[C1]. **Liang Cao\***. A natural-gradient approach for nonlinear stochastic systems with parameter uncertainty. *The Fortieth AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI 2026)*, 1–8. CCF A, Singapore, 2026.

[C2]. **Liang Cao**, Youqing Wang, Yan Qin, Yankai Cao, Bhushan Gopaluni, Richard Braatz. Attack detection for cyber-physical systems based on causal representation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, pp. 1-11, DOI: 10.1109/TSMC.2026.3661182, 2026.

[C3]. Yan Qin, Zhiqing Luo, Yunhong Che, **Liang Cao\***. False data Injection Attacks Against UAV Battery State of Health Estimation with A Capacity-informed Latent Diffusion Model. *Green Energy and Intelligent Transportation*, pp. 1-16, DOI: 10.1016/j.geits.2026.100401, 2026.

[C4]. **Liang Cao**, Jingyi Wang, Jianping Su, Yi Luo, Yankai Cao, Richard D. Braatz, Bhushan Gopaluni. Comprehensive analysis on machine learning approaches for interpretable and stable soft sensors. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 74, pp. 9517217, 2025.

[C5]. **Liang Cao**, Xiaolu Ji, Yankai Cao, R Bhushan Gopaluni. Adaptive process monitoring for multimode industrial processes through machine learning. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*, vol. 6, pp. 1819-1827, 2025.

[C6]. **Liang Cao**, Dong Zhao, Youqing Wang. Simultaneous estimation of multiple channel faults for two-dimensional linear systems. *International Journal of Systems Science*, vol. 48, pp. 2838-2849, 2017.

[C7]. **Liang Cao**, Youqing Wang. Fault-tolerant control for nonlinear systems with multiple intermittent faults and time-varying delays. *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 16, pp. 609-621, 2018.

[C8]. **Liang Cao**, Dong Zhao, Youqing Wang, Steven X Ding. Existence and design of observers for two-dimensional linear systems with multiple channel faults. *Multidimensional Systems and Signal Processing*, vol. 30, pp. 641-660, 2019.

[C9]. **Liang Cao**, Yuan Tao, Youqing Wang, Juan Li, Biao Huang. Reliable  $H_\infty$  control for nonlinear discrete-time systems with multiple intermittent faults in sensors or actuators. *International Journal of Systems Science*, vol. 4, pp. 302-315, 2016.

[C10]. **Liang Cao**, R Bhushan Gopaluni, Lim C Siang, Yankai Cao, Jin Li. Soft sensor change point detection and root cause analysis. *Society of Instrument and Control Engineers (SICE) Annual Conference*, pp. 123-128, 2022. 获SICE青年作者提名奖

- 代表性同行评价

【评价1】美国加州大学圣地亚哥分校Miroslav Krstić教授（塞尔维亚科学艺术院外籍院士，IEEE/IFAC/ASME/SIAM/AAAS/IET/AIAA Fellow）和纽约大学Zhong-Ping Jiang教授（欧洲科学院院士，IEEE/IFAC/CAA/AAIA/AAAS Fellow）及其合作者在Automatica论文（vol 171, 11194, 2025）中，对时滞系统在稳定性、鲁棒性及最优性等方面的控制理论研究进行了系统总结，并认为申请人的工作（引文Cao and Wang (2018)，申请人代表成果[C7]）是近几十年来重要的代表性工作。引用原文为：In the last several decades, control theory for time-delay systems attracted considerable attention from researchers and practicing engineers, and various stability, robustness, and optimality problems have been studied; see, for instance, Cao and Wang (2018), Fridman (2014), ..., and numerous references therein.

【评价2】加拿大不列颠哥伦比亚大学Victor C.M. Leung教授（加拿大工程院院士，加拿大皇家科学院院士，IEEE Life Fellow，EAI Fellow）、加拿大渥太华大学Azzedine Boukerche教授（加拿大工程院院士，IEEE/EAI/AAAS Fellow）与复旦大学宋梁教授（加拿大工程院院士）及其合作者在ACM Computing Surveys的论文（vol 57, no. 10, pp. 1-37, 2025）中引用申请人的工作（引文[11]和[13]，申请人代表成果[C4]和[C5]），指出申请人的研究在异常检测领域具有广泛应用价值，为智慧城市、工业制造等新兴领域提供重要支持。引用原文为：As a result, VAD has gained widespread attention in academia and industry over the last decade and has been used in emerging fields [11, 13, 142] such as information forensics [211], industrial manufacturing [106, 185] in smart cities as well as online content analysis in mobile video applications [210].

【评价3】挪威科技大学Shen Yin教授（挪威技术科学院院士，IEEE Fellow，IEEE Transactions on Industrial Informatics 联合主编）及其合作者在IEEE Transactions on Industrial Electronics的论文（vol 64, no. 1, pp. 643-653, 2016）中引用申请人的工作（引文[4]，申请人代表成果[C9]），认为其是容错控制领域研究的重要进展。引用原文为：In recent years, data-driven fault detection, process monitoring, and fault-tolerant control have gained wide attention, and many significant achievements have been obtained [1]– [6].

【评价4】新加坡南洋理工大学Changyun Wen教授（IEEE Fellow，IEEE Transactions on Industrial Electronics联合主编）及其合作者在International Journal of Robust and Nonlinear Control的论文（vol 29, no. 10, pp. 3027-3041, 2019）中指出申请人的研究（引文[23]，申请人代表成果[C9]）针对带有多重间歇故障和非线性干扰的随机系统提出了一种有效的容错控制方法，肯定了方法

的原创性。引用原文为：An FTC method is proposed for stochastic systems with multiple intermittent faults and nonlinear disturbances [23].

【评价5】韩国岭南大学Ju H. Park教授（韩国科学技术院院士）和东南大学曹进德教授（欧洲科学院院士、IEEE/AAIA/IET Fellow）及其合作者在IEEE Transactions on Cybernetics的论文（vol 50, no. 8, pp. 3731-3739, 2019）中引用申请人的工作（引文[38]，申请人代表成果[C7]），将其作为随机系统时滞研究领域的重要参考文献，并认为是值得深入探讨的研究方向。引用原文为：It is well known that the delay exists in communication channels extensively, as well as partial state estimation [33]–[39]; therefore, the investigation of the network-based stochastic systems with time delay may be the direction of our future research.

【评价6】东北大学张化光教授（IEEE/CAAI/IET/APR Fellow）及其合作者在IEEE Transactions on Fuzzy Systems的论文（vol 28, no. 8, 2020）中引用申请人的研究（引文[28]，申请人代表成果[C7]），指出申请人在间歇故障下的容错控制领域开展了深入研究，相关成果为后续工作提供了重要启发。引用原文为：So passive FTC does not need fault diagnosis unit, that is to say, it does not need any real-time fault information. It is worth pointing out that the research on passive FTC is not enough [28], which inspires us to do this work.

【评价7】清华大学周东华教授（IEEE/CAA/IET Fellow）及其合作者在The Canadian Journal of Chemical Engineering的论文（vol 96, no. 2, pp. 515-520, 2018）中引用申请人的工作（引文[15]，申请人代表成果[C9]），肯定其在非线性离散时间系统间歇故障 $H_\infty$ 控制方面的贡献。引用原文为：For a nonlinear discrete-time system with intermittent faults, several studies propose reliable  $H_\infty$  control [15–19].

## 附录

表 1. 引用申请人研究成果的相关院士名录

序号	姓名	院士头衔	序号	姓名	院士头衔
1	Richard Braatz	美国工程院	2	David Wilkinson	加拿大工程院、加拿大皇家科学院
3	Miroslav Krstić	塞尔维亚科学艺术院	4	Zhongping Jiang	欧洲科学院、欧洲科学艺术院
5	Shen Yin	挪威技术科学院	6	Hamid Reza Karimi	欧洲科学院
7	Biao Huang	加拿大工程院	8	Tongwen Chen	加拿大工程院、加拿大皇家科学院
9	Birgit Vogel-Heuser	德国科学与工程院	10	Bhushan Gopaluni	加拿大工程院
11	Jiujun Zhang	加拿大工程院、加拿大皇家科学	12	Schahram Dustdar	欧洲科学院
13	Wen Yu	墨西哥科学院	14	Ju H. Park	韩国科学技术院
15	Sirish Shah	加拿大工程院	16	Jin Hua	欧洲科学院
17	Benjamin Sovacool	英国社会科学院	18	Jinde Cao	欧洲科学院院士、欧洲科学艺术院
19	Jinwen Chen	加拿大工程院	20	Jack Saddler	加拿大皇家科学院
21	Victor Leung	加拿大工程院、加拿大皇家科学院	22	Azzedine Boukerche	加拿大工程院
23	Liang Song	加拿大工程院	24	Leo Chiang	美国工程院

表 2. 引用申请人研究成果的相关会士名录

序号	姓名	Fellow 头衔	序号	姓名	Fellow 头衔
1	Miroslav Krstić	IEEE/IFAC/ASME/SIAM/AAAS/IET/AIAA	2	Zhongping Jiang	IEEE/IFAC/CAA/AIA/AAAS
3	Richard Braatz	IEEE/IFAC/AAAS/AICHE	4	Biao Huang	IEEE/CIC/AAIA/AIAA
5	Schahram Dustdar	IEEE/EAI/AAIA	6	Tongwen Chen	IEEE/IFAC/EIC
7	Shihua Li	IEEE/IET/AAIA/CAA	8	Jinde Cao	IEEE/IET/AAIA/AIAA
9	Donghua Zhou	IEEE/CAA/IET	10	Huaguang Zhang	IEEE/IET/CAAI/APR
11	Sirish Shah	IEEE/CIC	12	Jiujun Zhang	EIC/ISE/RSC
13	Hamid Reza Karimi	IIAV/ISCM	14	David Wilkinson	EIC/CIC
15	Min Wu	IEEE/CAA	16	Youqing Wang	IET
17	Chang Yun	IEEE	18	Shen Yin	IEEE
19	Birgit Vogel-Heuser	IEEE	20	Robert McCormick	SAE
21	Fei Liu	CAA	22	Qunxiong Zhu	CAA
23	Yosuke Nakanishi	IEEE	24	Shi Chun	CSAE

<b>25</b>	Baizeng Fang	RSC	<b>26</b>	Jinhua Sun	CI
<b>27</b>	Ahmet Palazoglu	AIChE	<b>28</b>	Mian Li	ASME
<b>29</b>	Josep M. Guerrero	IEEE	<b>30</b>	Victor Leung	IEEE/CIC
<b>31</b>	Azzedine Boukerche	IEEE/EAI/AAAS			

## (二) 全职回国（来华）后拟开展的研究工作（建议不超过

4000字） The research work to be carried out after returning/coming to China full-time(no more than 4000 words)

主要阐述全职回国（来华）后主要研究方向和思路、预期目标、团队和科研条件的支撑情况。

In this part, you shall mainly expound the main research direction and ideas, expected goals, team and research conditions after returning/coming to China full-time.

## 复杂流程工业的动态风险评估与智能安全控制

### 1. 研究背景

流程工业在化工、冶金、制药等关键领域占据核心地位，当前全球正经历技术创新与产业升级的关键时期，人工智能与智能制造等前沿科技快速发展，推动流程工业向更高标准转型升级。在此背景下，现代流程工业亟需发展能够**精准感知生产状态、智能分析工艺变化并实现自主决策控制**的方法，以应对在生产安全、运行稳定与高效协同方面的多重挑战。然而，流程工业固有的强非线性、多尺度时空耦合以及动态不确定性等复杂特性，使得现有方法在实际工业场景应用中面临严峻考验。例如，在复杂动态与非稳态操作下，过程状态的精确感知与监测能力不足是长期存在的技术瓶颈，2005年美国BP德州炼油厂事故的调查分析就将非正常工况下关键参数监测失效和态势感知缺乏列为关键促成因素之一。同时，当前模型在面对工艺参数漂移、原料组分波动或设备性能衰减时，普遍存在泛化能力差、可靠性随时间下降的问题，难以保证长期预测精度与决策支持的有效性，这在制药过程中因未能持续符合生产标准而导致的批次性产品不合格乃至召回现象（如近年广泛使用的胃药雷尼替丁因工艺变更导致杂质失控引发的召回等）中反映突出。此外，在面对多变量耦合、强约束以及突发扰动时，现有控制系统在实现高维、多目标实时优化与自主安全决策方面的能力亦显不足，2010年墨西哥湾漏油事件的深度分析指出了复杂系统管理与控制响应策略的局限性。

基于此，申请人将聚焦于复杂流程工业的动态感知与智能安全控制中的三个关键挑战：

**1. 感知精准度不足：**现有感知模型多基于纯数据驱动方法，缺乏对工业机理知识的有效融合，导致模型在静态工况下的感知精度有限。特别是对于那些难以直接测量的关键性能参数，模型难以提供准确估计，无法满足流程工业对状态感知的高要求，限制了智能决策的质量。

**2. 模型可靠性不足：**流程工业环境动态多变，智能系统面临设备老化和原料变化等挑战。现有模型在环境与条件变化时表现出显著的性能衰减，难以适应新工况。在数据噪声、缺失数据以及未知扰动情况下，系统缺乏必要的自适应能力，无法提供可靠的预测结果，影响下游控制与决策的可靠性。**3. 智能安全控制能力不足：**现有控制系统在面对复杂工况变化时缺乏自适应调节能力，难以在高维状态空间内实现实时、鲁棒的多目标协同优化。现有的基于人工智能的控制方法虽具有学习能力，但在安全约束、实时性和控制可靠性方面表现不足。如何构建兼具自适应学习和安全可靠特性的智能控制系统，实现工业过程的实时优化与自主决策，仍是亟待攻克的难题。本研究将以流程工业实际需求为导向，系统性地解决关键技术难题，构建从感知到控制的全链条智能化解决方案，为实现流程工业的安全、高效、绿色运行提供理论基础和技术支撑。

## 2. 主要研究方向和思路

申请人拟在前期围绕复杂工业过程的混合建模、可信智能监测与诊断、多通道故障容错控制所取得的成果基础上，进一步探索面向复杂流程工业的状态动态感知、风险实时评估与智能安全控制的新理论方法与关键技术方案，推动前期研究成果从工业过程的监测控制向流程工业动态风险评估与智能安全控制体系的全面拓展与提升，具体规划图6所示的三个相互支撑的研究方向：

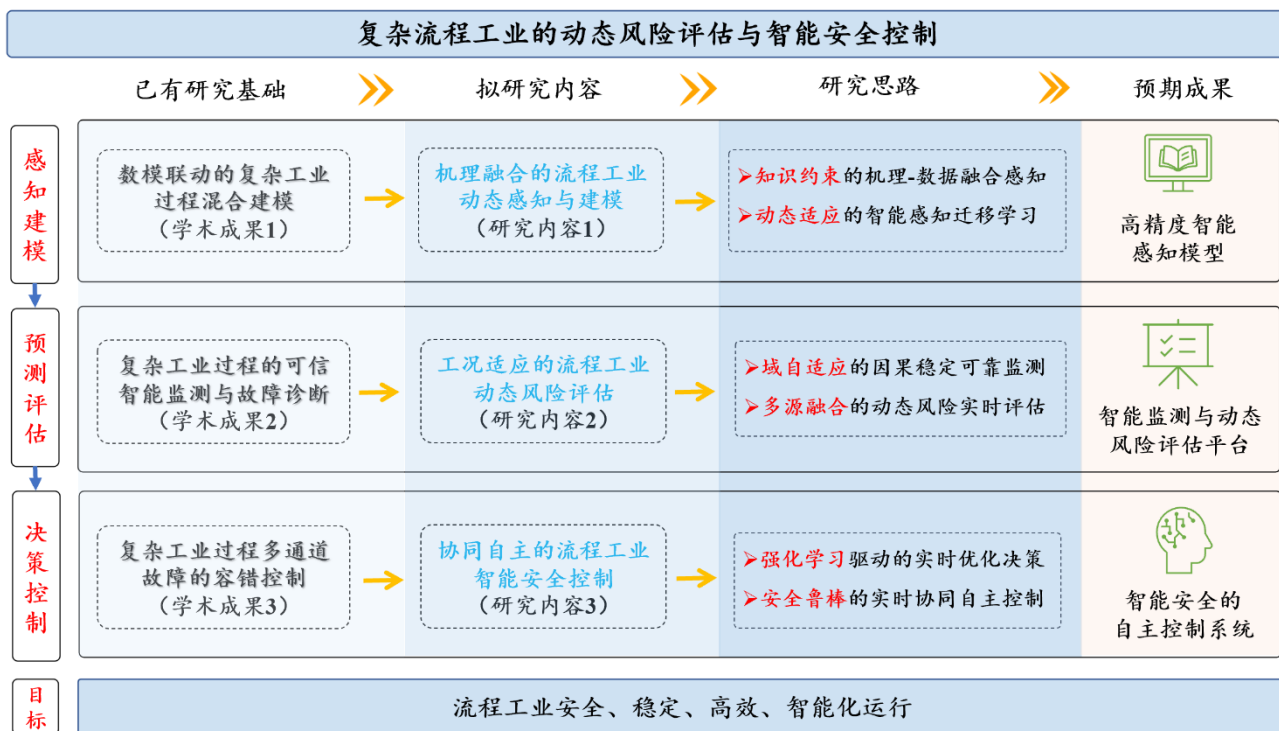


图 6. 复杂流程工业的动态风险评估与智能安全控制研究框架图

## 2.1 机理融合的流程工业动态感知与建模

机理与数据融合的智能感知方法是实现流程工业状态精准监测的关键基础。然而，现有人工智能感知技术难以同时满足模型精度、泛化性和解释性的要求。因此，本研究拟提出**融合因果结构学习与工业机理知识的混合智能感知方法**，通过知识引导的深度学习与自适应更新机制，实现流程工业生产过程的精准状态感知和关键参数实时估计。

(1) **知识约束的机理-数据融合感知**：将工业机理知识与约束嵌入深度神经网络架构设计与训练过程，突破纯数据驱动模型在静态工况下精度不足的瓶颈；同时通过因果结构学习识别关键变量间的本质关系，使智能感知模型更具物理解释性与预测准确性，为高质量智能决策提供可靠数据基础。

(2) **动态适应的智能感知迁移学习**：研究基于增量学习与迁移学习的智能感知模型自适应更新策略，实现模型在不同工况间的知识迁移与动态演化，解决工业生产过程中设备老化与原料变化带来的模型失配问题，实现对关键性能参数的实时精准感知与动态跟踪，确保在工况变化条件下仍能保持稳定的感知性能。

## 2.2 工况适应的流程工业动态风险评估

流程工业生产环境特征复杂多变，现有的智能预测方法在设备老化、原料变化和工况迁移等条件下表现出显著的性能衰减，严重影响下游控制与决策的可靠性。本研究拟提出**面向工况变化的可靠预测与异常监测方法**，提升智能系统在动态环境中的适应性与鲁棒性，为自主控制提供可靠的预测支持。

(1) **域自适应的因果稳定可靠预测**：针对流程工业中频繁的工况变化和環境扰动，研究适用于动态环境的鲁棒学习框架，特别关注设备老化、原料变化等导致的模型漂移问题。通过设计稳定特征学习算法，提取工况无关的本质特征；结合域适应和自适应更新技术，使模型能够感知工况变化并自动调整，保持在新工况下的预测可靠性，有效应对数据噪声、缺失数据和未知扰动带来的挑战。

(2) **多源融合的动态风险实时评估**：针对单一数据源难以全面捕捉系统状态的问题，研究多源异构数据的深度融合方法。通过整合多模态传感器数据与工艺参数，构建对环境变化更加鲁棒的异常监测框架；同时引入不确定性量化机制，使系统能评估预测结果的可靠性水平，为下游控制系统提供可信度信息，确保在工况变化条件下仍能维持稳定的预测性能，增强整体系统的可靠性和决策质量。

## 2.3 协同自主的流程工业智能安全控制

流程工业生产过程的优化控制对提升生产效率、降低能耗与风险至关重要，但现有控制方法难以满足复杂大规模系统的实时优化与安全运行需求。基于人工智能的自主控制技术通过结合数据驱动学习与安全约束，有望实现生产过程的自适应优化与智能决策，显著提升运行效率、控制精度和安全保障能力。

(1) **强化学习驱动的实时优化决策**：研究融合机理知识与强化学习算法自主学习能力的方方法，构建安全可靠的实时优化决策框架。通过在虚拟环境中预先训练和评估控制策略，结合在线适应性调整，实现对动态环境的实时响应与全局最优解探索。重点研究可解释强化学习算法，确保自主决策过程的透明性与可信性，为操作人员提供直观理解的控制建议和决策依据。

(2) **安全鲁棒的实时协同自主控制**：研究融合过程安全约束与人工智能自主控制方法，构建基于模型预测的智能控制框架。利用多时间尺度控制策略，实现长期优化目标与短期控制性能的协同；引入安全屏障函数与鲁棒控制理论，保证控制系统在面对扰动和不确定性时的安全性与可靠性。重点攻克在复杂非线性、耦合约束和多目标要求下的快速控制算法设计与工业实时实施方法，实现从人工辅助决策向系统自主控制的转变。

综上所述，本研究围绕复杂流程工业动态运行中的关键科学问题，从感知建模的精准性、动态风险评估的可靠性、智能控制的安全性三个核心环节入手，系统发展兼具机理约束与数据驱动融合的智能方法，提升模型在实际工业环境中的泛化能力和适应性；通过域自适应学习与多源数据融合策略，强化对复杂工况变化的监测和异常诊断能力；进一步结合强化学习、自适应鲁棒控制和安全屏障函数技术，构建具备自主决策与实时响应能力的智能优化控制体系，全面提升复杂流程工业在动态风险评估与智能安全控制方面的整体技术水平与应用可靠性，推动工业智能化转型升级。

### 3. 预期目标

申请人对团队与实验室、人才培养、科学研究以及成果转化的预期目标总结如下：

(1) **团队与实验室建设**：申请人计划在北京化工大学王友清教授领导的“安全分析与智能决策研究室”基础上，在动态风险评估与智能安全控制方向组建由博士后、博士、硕士组成的研究团队，形成特色鲜明的研究方向。同时依托美国麻省理工学院、美国康奈尔大学、加拿大不列颠哥伦比亚大学等国际知名高校合作渠道，开展高水平国际合作研究项目1-2项。

(2) **人才培养**：申请人计划培养高水平研究生10人以上，其中博士研究生3-5人。培养高水平本科生参与科研训练。建立高效、创新的研究生培养体系，通过定期学术研讨、工程实践

与企业合作，培养学生扎实的理论基础、先进的研究视野和解决工业实际问题的能力。通过国际合作与学术交流，选派优秀学生赴国内外高水平大学或研究机构进行联合培养。

(3) **科学研究**: 申请人计划在工业智能监测与优化控制领域权威期刊发表**10-15篇顶级期刊论文**，申请发明专利**2-3项**，软件著作权**2-4项**。积极参与国内外顶级会议，积极申报并承担国家级、省部级及企业合作科研项目，争取获得**2-3项**国家级或省部级科研项目，取得具有国际竞争力的原创性成果。

(4) **成果转化**: 依托北京化工大学现有产学研合作基础，通过与石油化工、制药、能源等行业头部企业建立产学研合作关系，完成**2-3项**智能感知与安全控制在石油化工、生物制药等领域的示范应用，形成**可复制、可推广**的解决方案，与合作企业推动科技成果的产业化。

#### 4. 团队和科研条件的支撑情况

申请人依托北京化工大学信息科学与技术学院，学院拥有一支由中国工程院院士1人、国家基金委杰出青年基金获得者1人、国家特聘专家1人、中国自动化学会会士1人、国家基金委优秀青年基金获得者2人、外籍院士1人等领衔的高水平师资队伍。近年来，学院承担了国家科技重大专项、国家重点研发计划、国家自然科学基金等多项国家级科研项目，并建有先进过程控制实验室、工业互联网与大数据分析平台等多个国家和省部级科研平台，为研究工作的顺利开展提供了坚实支撑。

本人将加入王友清教授领衔的“安全分析与智能决策研究室”团队。该团队学术实力雄厚，由国家杰出青年科学基金获得者王友清教授带领，现有教授2人、副教授2人、高级工程师1人、讲师2人及30余名研究生。团队长期聚焦智能化工系统安全评估、故障检测与诊断等方向，在流程工业智能监测与安全控制领域具有广泛国际影响力。近年来，团队牵头承担了国家自然科学基金杰出青年基金、国家重点研发计划项目、国家自然科学基金重点项目等二十余项国家和省部级项目，其中多项与本人拟开展研究高度相关，为本项目提供了坚实的理论与数据资源支撑。此外，团队积极开展国际学术交流，与美国、英国、德国、加拿大等多所国际知名高校建立了稳定的合作关系。团队与中石油、中石化、宝钢集团、华能集团等头部企业建立了紧密合作关系，积累了丰富的工业实践资源与数据，为人工智能在流程工业的实际应用验证提供了优越条件。

团队同时已建立完善的人才培养与科研管理体系，形成高效的学术指导与协作机制。申请人将充分利用团队在科研平台、研究资源、国际合作等方面的优势支持，发挥个人在工业过程

建模、智能监测与控制优化领域的专长，迅速构建动态风险评估与智能安全控制研究小组，培养高水平研究生团队，推动相关领域的理论创新与成果转化。

申请人已与国内外多位著名学者建立了深厚的合作关系，为回国后的研究工作奠定了坚实基础。[Richard D. Braatz教授](#)（麻省理工学院，美国工程院院士）作为申请人的博士后导师，将在先进制药过程的数字孪生与智能控制领域继续合作。[Fengqi You教授](#)（美国康奈尔大学）作为申请人的博士后联合导师，将在新能源优化与控制领域继续合作。[Bhushan Gopaluni教授](#)（加拿大不列颠哥伦比亚大学，加拿大工程院院士）和 [Yankai Cao 教授](#)（加拿大不列颠哥伦比亚大学）作为申请人的博士生导师，将在工业智能监测与优化控制领域继续合作。[Steven X. Ding教授](#)（德国杜伊斯堡-埃森大学）作为申请人联合培养硕士阶段的导师，将在工业过程故障诊断与安全控制方面继续合作。[杨帆教授](#)（清华大学）作为申请人在清华大学担任研究助理的导师，将在因果发现和软测量领域继续合作。

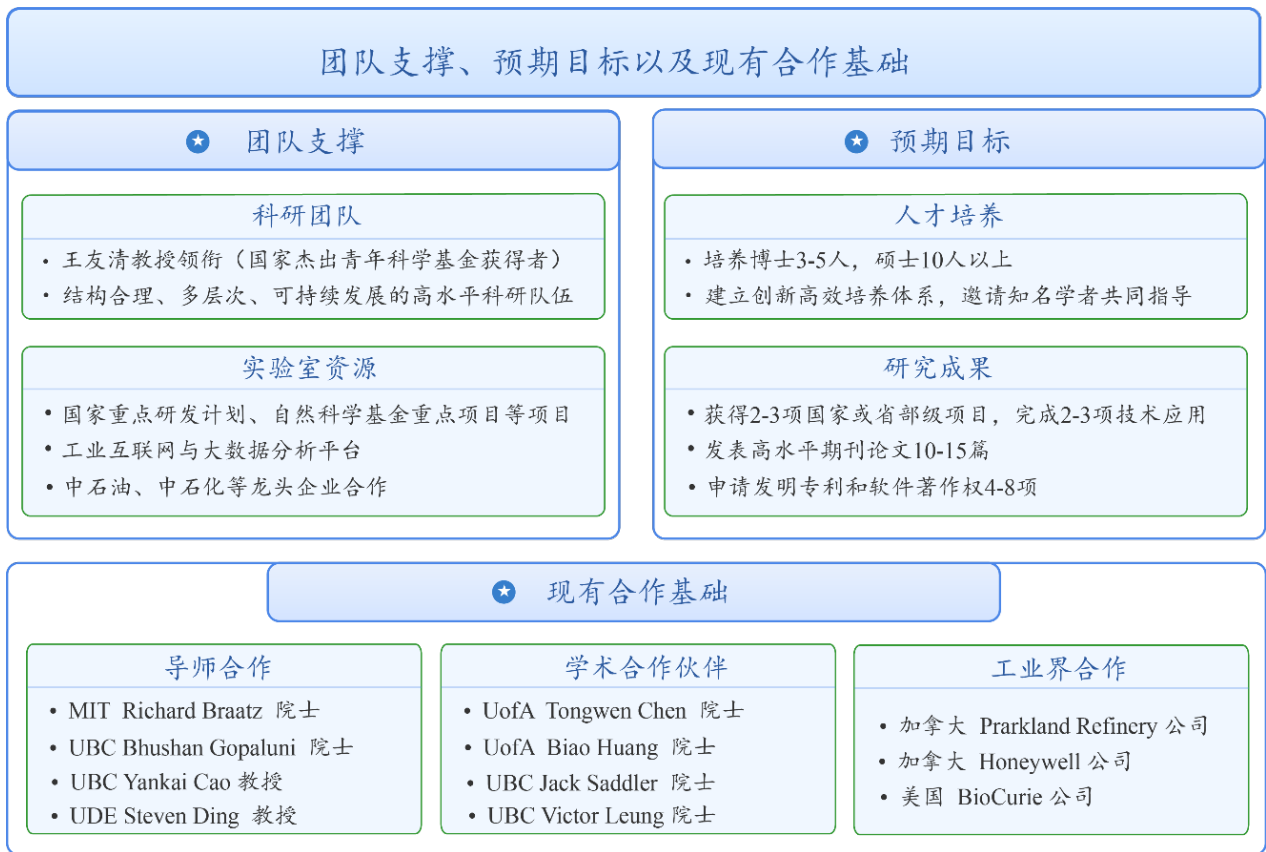


图7. 团队支撑、预期目标以及现有合作基础总结

申请人还与多位国内外著名学者已开展合作并联合发表了多篇高水平论文，包括与[Biao Huang教授](#)（加拿大阿尔伯塔大学，加拿大工程院院士）合作非线性系统容错控制的研究，与[Tongwen Chen教授](#)（加拿大阿尔伯塔大学，加拿大工程院院士、加拿大皇家科学院院士）合作工业报警管理和智能监测的研究，与[Jack Saddler教授](#)（加拿大不列颠哥伦比亚大学，加拿大皇

家科学院院士)合作生物质共处理与绿色碳追踪的研究,与Victor C.M. Leung教授(加拿大不列颠哥伦比亚大学, IEEE Life Fellow、加拿大工程院院士)合作故障诊断的研究,以及与Weide Liu博士(哈佛大学)合作时间序列分析的研究等。

在工业界合作方面,申请人与多家国际知名企业建立了合作关系。与加拿大最大的能源零售上市公司Parkland Refinery过程控制部门主管Jin Li和数据科学家Siang Lim合作成功实施了石油炼化厂的数字孪生项目,该项目在催化裂化装置中实现了实际有效应用,后续合作研究至今仍在持续开展。同时,与加拿大Honeywell公司在控制器的设计、优化研究及实际工业应用方面保持紧密合作,成功将先进控制算法应用于多个工业装置的过程优化中。此外,与美国BioCurie公司在制药过程智能优化领域开展深入合作,开发了基于机器学习的工艺优化模型。

团队支撑、预期目标以及现有合作基础的总结如图7所示。申请人未来将充分利用已有的学术界和企业界合作网络,邀请国际知名学者来访交流,共同指导研究生,选派优秀研究生赴国外合作单位进行联合培养。同时与企业开展高水平合作研究,解决实际流程工业中智能感知与自主控制领域的关键科学问题。

### (三) 其他需要说明的问题Other issues need to be addressed.

1. 申请人同年申请不同类型的国家自然科学基金项目情况(列明同年申请的其他项目的项目类型、项目名称信息,并说明与本项目之间的区别与联系;已收到自然科学基金委不予受理或不予资助决定的,无需列出)。

Proposals that the applicant has submitted for different types of NSFC programs in the same year (please list the types of programs and title of proposals submitted in the same year, and explain the differences and connections with this proposal;Proposals deemed ineligible or unfundable by the NSFC can be excluded).

无

2. 申请人是否存在同年申请或者参与申请国家自然科学基金项目的单位不一致的情况(如存在上述情况,列明所涉及人员的姓名,申请

或参与申请的其他项目的项目类型、项目名称、单位名称、上述人员在该项目中是申请人还是参与者，并说明单位不一致原因）。

Whether the applicant's host institution is inconsistent with the one indicated in other proposals that he or she submits or participates in applying in the same year (if there is any such inconsistency, please list the names of the personnel involved, the types of programs, titles of proposals, names of host institutions for other projects that you applied or participated in, whether the abovementioned personnel are the applicants or participants in the projects, and explain the reasons for the inconsistency).

无

3. 申请人是否存在与正在承担的国家自然科学基金项目的单位不一致的情况（如存在上述情况，列明所涉及人员的姓名，正在承担项目的批准号、项目类型、项目名称、单位名称、起止年月，并说明单位不一致原因）。

Whether the applicant's host institution is inconsistent with the one indicated in the NSFC project that he/she is undertaking (if there is any such inconsistency, please list the name of the personnel involved, approval number, type of program, title of proposal, name of host institution, start and end dates of the undertaking project, and explain the reasons for the inconsistency).

无

4. 申请人教育或工作经历若不连续请说明原因。

If there is any discontinuity in education or work experience, please explain the reason.

无

5. 同年以不同专业技术职务（职称）申请或参与申请科学基金项目情况（应详细说明原因）。

Situation where the applicant applies for NSFC programs as PI or participant using different professional or academic titles in the same year (Please elaborate on the reasons).

无

6. 其他。 Others.

无