



自动化学报

ACTA AUTOMATICA SINICA

精细抗干扰控制——从干扰不变性到适应可变性

谢一嘉 李文硕 朱玉凯 崔洋洋 郭雷

Refined Anti-disturbance Control: From Disturbance Invariance to Adaptive Variability

XIE Yi-Jia, LI Wen-Shuo, ZHU Yu-Kai, CUI Yang-Yang, GUO Lei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16383/j.aas.c250211>

您可能感兴趣的其他文章

精细抗干扰控制——从干扰不变性到适应可变性

谢一嘉¹ 李文硕² 朱玉凯³ 崔洋洋¹ 郭雷^{1,2}

摘要 抗干扰是控制科学和智能科学的基本主题之一。长期以来,干扰不变性被视为抗干扰控制方法的一个设计准则。然而,干扰不变性设计带来的控制代价易被忽视,且往往不满足执行机构和信息拓扑等系统软硬件限制。本文在干扰不变性准则的基础上,提出干扰适应可变性准则和设计思想。主要实现途径包括:干扰深耦合建模、干扰可抗/可用度量量化、复合抗干扰控制、干扰主动和精细利用、基于抗扰能力量化的系统重构优化等。在此基础上,进一步提出系统进化设计、进化智能和智能系统工程的思想,从“任务目标-干扰因素-系统资源”一体化的角度提高动态适配性,实现闭环系统的行为进化和形态进化。干扰适应可变性准则突破了传统干扰不变性准则的藩篱,实现了从“抗干扰”到“识干扰”、“用干扰”的干扰精细控制理论跨越,为精细抗干扰控制理论和智能系统工程实践提供了新的理论支撑、研究视角和技术途径。

关键词 精细抗干扰控制, 复合抗干扰控制, 干扰利用, 干扰适应可变性准则, 智能系统工程

引用格式 谢一嘉, 李文硕, 朱玉凯, 崔洋洋, 郭雷. 精细抗干扰控制——从干扰不变性到适应可变性. 自动化学报, 2025, 51(10): 1-10

DOI 10.16383/j.aas.c250211 **CSTR** 32138.14.j.aas.c250211

Refined Anti-disturbance Control: From Disturbance Invariance to Adaptive Variability

XIE Yi-Jia¹ LI Wen-Shuo² ZHU Yu-Kai³ CUI Yang-Yang¹ GUO Lei^{1,2}

Abstract Anti-disturbance is one of the basic themes of control science and intelligence science. The principle of disturbance invariance has been used as one of the design criteria for anti-disturbance control methods for a long time. However, the control cost caused by the principle of disturbance invariance design is often ignored, and the limitations of system software and hardware, including the constraints of actuator and information topology, are difficult to be satisfied. To this end, this survey proposes the design idea and principle of adaptive variability under disturbance based on the principle of disturbance invariance. The main implementation methods include: Disturbance deeply-coupled modeling, disturbance resistance/availability quantification, composite anti-disturbance control, active and refined disturbance utilization, and anti-disturbance capability quantification based system reconstruction and optimization, etc. On this basis, the ideas of system evolutionary design, evolutionary intelligence, and intelligent system engineering are further proposed. The dynamic adaptability is improved from the integrated perspective of “task goals-disturbance factors-system resources”, and further achieving closed-loop behavioral and morphological evolution. The principle of adaptive variability under disturbance breaks through the barriers of the traditional principle of disturbance invariance. It realizes the theoretical leap of refined anti-disturbance control theory from “anti-disturbance” to “disturbance recognition” and “disturbance utilization”. It provides new theoretical support, research perspectives, and technical approaches for refined anti-disturbance control theory and intelligent system engineering practice.

Key words Refined anti-disturbance control, composite anti-disturbance control, disturbance utilization, principle of adaptive variability under disturbance, intelligent system engineering

Citation Xie Yi-Jia, Li Wen-Shuo, Zhu Yu-Kai, Cui Yang-Yang, Guo Lei. Refined anti-disturbance control: From disturbance invariance to adaptive variability. *Acta Automatica Sinica*, 2025, 51(10): 1-10

收稿日期 2025-05-11 录用日期 2025-08-04

Manuscript received May 11, 2025; accepted August 4, 2025

国家自然科学基金(62473016, 62373033, 62303019), 北京市自然科学基金(L252020), 国家资助博士后研究人员计划(GZC20252746), 中央高校基本科研业务费资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (62473016, 62373033, 62303019), Beijing Natural Science Foundation (L252020), National Postdoctoral Researcher Program (GZC20252746), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities

本文责任编辑 杨莹

Recommended by Associate Editor YANG Ying

1. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院 北京 100191

干扰与不确定性广泛存在于各类实际控制系统中^[1-13]. 无论是外界环境扰动、内部器件误差和系统模型不确定性等客观存在的干扰因素, 还是博弈对抗态势下的干扰、欺骗、攻击信号, 都会对控制系统

2. 北京航空航天大学杭州创新研究院 杭州 310052 3. 北京航空航天大学宇航学院 北京 102206

1. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191 2. Hangzhou Innovation Institute, Beihang University, Hangzhou 310052 3. School of Astronautics, Beihang University, Beijing 102206

的性能甚至安全性产生关键影响^[8-9]. 对干扰与不确定性的认知和处理长期以来都是控制科学乃至智能科学的一个基本问题, 认识和处置未知与不确定性已成为无人系统智能化的目标^[14-15].

早在十九世纪, 法国数学家彭赛列就提出通过动态平衡机制以实现系统对外部扰动适应性的思想, 为后续抗干扰控制理论的发展提供了哲学框架^[16]. 二十世纪 50 年代, 英国学者 Ashby^[6] 指出: “在无处不在的干扰与不确定性下实现生存, 是有机体和控制系统的共同目标”.

国内外学者从干扰抑制和补偿两个方面对干扰和不确定性进行了研究 (参见文献 [17-20]). 冯纯伯^[9] 在 1995 年论及系统的不确定性时指出: 建模误差、材料形变、结构非线性等模型扰动和外部干扰会破坏系统的稳定性和相关性能. 黄琳等^[12] 在 2003 年论及控制科学的复杂性时指出: 控制科学的研究必须针对非理想环境, 即必须讨论不确定性对系统性能的影响, 并研究能适应不确定性的控制器设计方法以及对应理论. 在 2023 年外滩大会^[21] 的主旨报告中, 机器学习专家 Jordan^[22] 指出: 对自身不确定性的量化评估是当前人工智能大语言模型面临的主要挑战之一.

在干扰补偿控制领域, 干扰不变性长期以来被视作基本的设计准则. 干扰不变设计是指通过补偿干扰影响以期恢复系统标称性能的设计^[2, 5, 7, 23-24], 包括自抗扰控制 (Active disturbance rejection control, ADRC)、干扰观测器控制 (Disturbance observer based control, DOBC) 在内的经典控制方法都建立在干扰不变性准则的基础上^[16, 24]. 这些

基于干扰不变性准则的控制设计已得到广泛成功应用. 但是随着研究的深入和应用的拓展, 干扰不变性准则的局限性也逐渐凸显, 促使人们反思并寻找更加精细和智能的控制设计范式.

本文首先概述基于干扰不变性准则的抗干扰控制研究进展. 在此基础上提出干扰适应可变性准则和设计思想, 并阐述其主要实现途径: 干扰深耦合建模、干扰可抗/可用度量、复合抗干扰控制、干扰主动和精细利用、基于抗扰能力量化的系统重构优化. 在此基础上, 进一步提出系统智能测评与进化设计思想, 为仿生智能和智能系统工程的研究与实践提供一种新的研究视角和解决途径. 本文在前期多源干扰系统复合抗干扰控制^[17, 20] 和复合干扰滤波理论^[25] 的基础上, 从抗干扰能力和性能指标的角度研究抗干扰控制问题. 本文总体脉络如图 1 所示.

1 干扰不变性准则

1.1 单一干扰系统的补偿控制方法

干扰不变性准则作为经典干扰补偿或抵消控制方法的设计准则, 通过通道解耦或补偿干扰影响恢复系统标称性能^[5, 7, 24]. 苏联科学家较早研究了干扰不变性问题^[2-5, 7]. 文献 [26-27] 中指出, 基于内模原理的输出调节目标是让系统输出独立于影响系统的干扰, 使闭环系统可控. 文献 [28-29] 中指出, 只有存在完全补偿干扰影响的控制律时, 干扰适应控制方可保证系统满足平衡点条件. 通过设计未知输入观测器 (Unknown input observer, UIO) 估计与补偿的方式, 使得系统状态完全独立于干扰. 文献 [30]

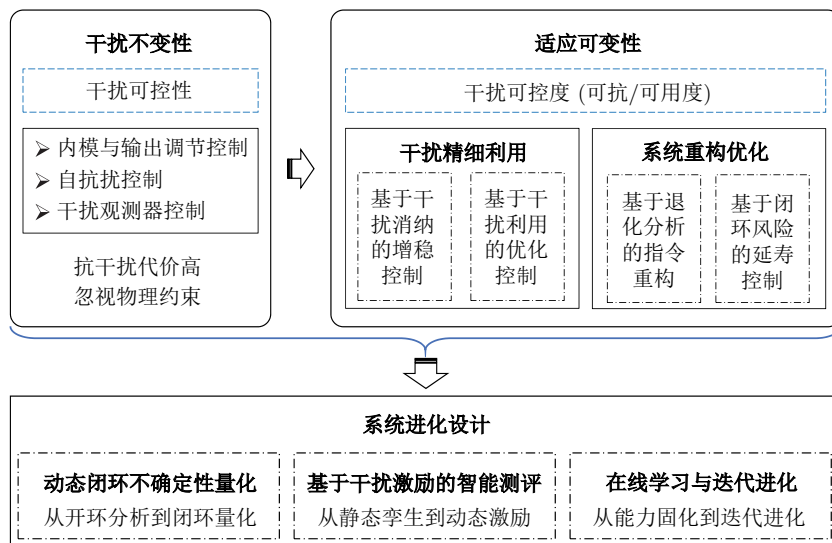


图 1 从干扰不变性到适应可变性与系统进化设计

Fig. 1 From disturbance invariance to adaptive variability and system evolvable design

提出一种基于干扰观测器的控制, 用于估计频域线性系统的负载力矩以提升力矩和速度控制. 文献 [31] 提出状态空间非线性系统的 DOBC 方法, 能够实现非线性系统的实时干扰估计补偿. 文献 [19] 对 DOBC 的基本思想和设计方法进行了综述, 得到了众多学者的广泛关注, 长期位于 IEEE 工业电子汇刊“Popular”论文第一名. 文献 [32] 提出自抗扰控制理论, 可估计并补偿由内部和外部干扰构成的集总干扰^[33-34]. 由此可见, 上述干扰补偿的内模原理、干扰适应控制、DOBC、ADRC, 都是利用干扰生成一个抵消该干扰影响的主动信号, 通过估计将干扰或干扰的影响完全补偿, 使被控变量与干扰尽量独立、解耦, 尽可能地保证被控变量在干扰的影响下保持不变, 均可视为基于干扰不变性准则的设计^[16, 24, 35-38].

实际系统中, 干扰通常具有物理多来源(多源)、数学多类型(异质)、通道强耦合(异构)的“复合”特征^[17, 20]. 此时, 基于干扰单一补偿的控制方法难以充分利用干扰特性, 导致控制设计具有一定的粗糙性或保守性, 很大程度上制约了系统性能的进一步提升.

1.2 多源干扰系统的复合控制方法

针对实际系统中的多源、异质、异构干扰与不确定性, 文献 [39-40] 首先提出了多源干扰系统的复合精细控制 (Composite refined control, CRC) 理论. 具体包括复合分层抗干扰控制 (Composite hierarchical anti-disturbance control, CHADC)^[17-18]、复合干扰滤波 (Composite disturbance filtering, CDF)^[25]、动态闭环不确定性量化 (Dynamic closed-loop uncertainty quantification, DC-UQ)^[14], 形成了“复合表征-分离估计-前馈补偿/反馈抑制/闭环消纳-重构优化-智能测试与进化设计”的理论框架. 其中干扰建模、表征和估计是控制的前提, DC-UQ 是将 CDF 和 CHADC 向智能系统工程的拓展. CHADC 具有“XDO+YC” (X 型干扰观测器+Y 型控制器) 结构^[17-18], 可针对干扰的多源、异质、异构特征进行同时补偿和抑制, 且具有良好的动态可裁剪特性, 已被成功应用于处理时滞/切换/多智能体系统等理论问题以及航空航天、电力电子、先进制造等领域的工程难题^[14-15, 20]. CRC 理论包括以下设计过程:

1) 建模: 在传统单一同质干扰的基础上, 考虑干扰的多源、异质、异构特征, 将其建模为多源异质干扰; 进一步考虑干扰与系统状态、控制输入、量测输出以及其他干扰的耦合特征, 并将其建模为多源复合干扰.

2) 估计: 传统抗干扰控制方法将干扰视为单一/

集总变量估计, CHADC 和 CDF 通过充分利用干扰的复合特征, 实现多源复合干扰的精细分离估计.

3) 控制: 不同于传统单一补偿或抑制的控制, CHADC 充分利用干扰自身信息特性和其他不确定性的动态特性, 实现干扰的同时补偿和抑制, 进而提高系统的适应性.

4) 分析: 现代控制理论的稳定性、可控性、可观性分析局限于对内部状态特性的刻画, 难以反映干扰等外部输入对系统性能的影响, CHADC 和 DC-UQ 理论将分析进一步推广至干扰稳定性 (干扰影响下的稳定性)、干扰可控性 (干扰影响下的可控性)、可度分析.

在 CHADC 方法设计中, 采用了更为精细的干扰表征与处理方式, 在干扰补偿的基础上, 进一步考虑了难以估计与补偿的干扰, 通过设计复合控制器结构实现了多源复合干扰的同时补偿和抑制. 与传统干扰不变性设计相比, 利用了更丰富的技术手段来消除或降低干扰影响, 提高了闭环系统的精确性和鲁棒性. 本文在上述理论的基础上, 重点从抗干扰能力和性能设计的角度研究“抗”干扰控制问题, 阐述从“抗”干扰到“用”干扰的设计过程.

2 从干扰不变性到适应可变性

2.1 干扰不变性准则的局限性

尽管基于干扰不变性准则的抗干扰控制方法已在实际应用中取得成功, 但伴随而来的控制代价往往被忽视. 首先, 控制律中的干扰补偿项会带来额外的控制能量消耗. 例如, 当风扰较为剧烈时, 旋翼无人机实时补偿风扰所需的电机峰值功率显著增加, 导致电池电量消耗加剧、飞机续航时间缩短. 其次, 执行机构为补偿干扰所需的高强度/高频率作动会加速执行机构损耗、降低其寿命. 例如, 在电动汽车电机控制中, 需通过高频转矩修正指令来补偿路面振动对电机转速的影响, 这将导致电机绕组电流频繁波动, 铁损和铜损大幅增加. 此外, 干扰补偿所产生的负面影响还包括激发柔性模态、引入额外测量噪声等, 难以满足智能无人系统安全、绿色和进化的目标^[14-15, 25].

另一方面, 干扰补偿所需的额外控制量可能超出执行机构的物理约束, 尤其是当执行机构自身发生饱和、退化或故障时, 要求系统维持干扰不变性在物理上难以实现. 例如, 在空间飞行器姿态机动过程中, 为补偿太阳光压等外部干扰力矩的影响, 反作用飞轮可能由于持续输出最大力矩而进入输出饱和, 导致飞行器姿态误差积累甚至失控.

无论是维持干扰不变性所需的额外控制代价,还是执行机构等硬件资源给干扰不变设计的物理可实现性带来的挑战,都促使我们对干扰不变性准则本身进行反思. 未来要突破干扰不变性的藩篱,找到一种更智能、更精细、代价更小、硬件资源适配度更高的干扰处理方式,避免“过度医疗”,实现“对症下药”.

2.2 仿生学等学科的启示

物竞天择,适者生存. 生物在亿万年的进化过程中形成了强大的环境适应、生存与进化能力. 师法自然,自然界中的有害细菌寄生在宿主内部,依赖宿主的营养不断繁殖. 然而这类相互作用的生物种间关系具有相对性和动态性,即不同细菌在不同宿主、不同环境下具有不同的作用. 蝙蝠通常在风暴锋面即将到来前的夜晚迁徙,利用风暴暖风提供的风力降低飞行能耗,以更少的能量完成长距离迁徙^[41]. 鸟类在近地飞行时,可利用地面效应实现节能飞行,工程上苏联的“里海怪兽”、我国的LF910飞行器均是利用这一仿生原理设计的地效飞行器^[42].

在信号处理领域,噪声通常被认为是对测量精度有害的因素. 然而,随着物理学家发现随机共振现象,噪声有害的传统认知被颠覆. 随机共振的核心机制在于:特定强度的噪声输入能够显著提升非线性系统对微弱周期性信号的响应能力,使原本无法被检测的弱信号在噪声辅助下突破系统阈值并产生可观输出^[43-44]. 目前,随机共振在生物传感等领域已展现出巨大应用潜力,成为跨物理学、信息科学和生物学的重要研究方向^[45-46]. 另外,在无线电定位问题中,信号传播的多径效应通常被视作影响定位精度的干扰因素,但随着相关研究的深入,人们发现通过虚拟锚点扩展等技术,可以对超宽带、5G毫米波等无线电信号反射路径所携带的几何信息加以利用,将多径干扰转化为辅助定位的有效信息来源^[47-48]. 目前,多径干扰辅助定位已在车联网、仓储物流、通信感知一体化等领域得到应用^[49].

这些多学科案例启示我们:干扰的信息和能量,对不同工作环境、不同任务下的系统,可能包含了更丰富的环境信息和潜在能量. 这启发我们进一步探索系统与干扰和解共生的更优解,即,如何以更智能、更精细、代价更小、硬件资源适配度更高的方式,将系统中“寄生”、“竞争”的干扰转化为“共生”、“互惠”的有益资源.

2.3 干扰适应可变性设计

干扰潜在的有利价值在传统控制方法中往往被

忽视. 事实上,干扰对系统的影响并非都是完全有害的,有些干扰可能有利于控制目标的实现^[29]. 因此,在控制系统设计与分析阶段,不再以消除干扰影响为优先目标,而是根据系统性能指标、干扰信号特征及其实时益害属性,将干扰利用/补偿/抑制等处理方式有机结合,识别并利用有益的干扰能量和趋势,设计具有动态适应性的干扰处理方式,实现系统性能的智能可变调节,即适应可变设计.

基于上述思想,相关研究人员针对无人机控制等应用场景提出了气流干扰利用等设计方法,但尚未凝练出一般性的干扰适应可变性设计框架. 本文在团队前期研究工作的基础上^[14-15, 20, 25],系统梳理并提出“干扰认知-干扰补偿/抑制/利用-重构优化”的干扰适应可变性准则设计框架(Principle of adaptive variability under disturbance, PAVD),如图2所示. 其中,干扰认知是指干扰建模表征以及包含干扰益害属性、实时可用度在内的系统能力量化分析,只有充分刻画系统、干扰及其复合交互特征,方可实现“四两拨千斤”、“因势利导”的干扰利用效果;其次,结合干扰认知信息,实现对可用干扰有益部分的充分利用,对有害部分和不可用干扰采取同时补偿和抑制的方式处理,并根据环境、任务等目标要求,对难以消除的干扰通过闭环系统量化实现重构优化.

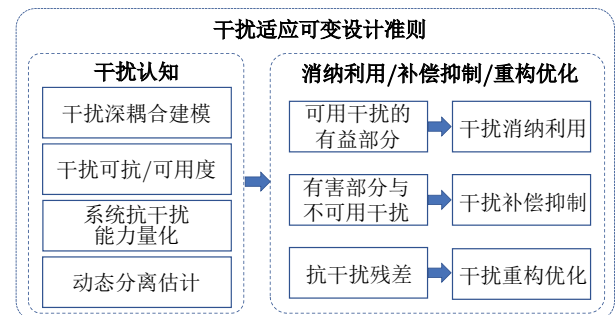


图2 干扰适应可变性准则的设计框架

Fig. 2 Design framework for the principle of adaptive variability under disturbance

干扰适应可变性准则的特征在于: 1) 相比于传统可控/可观性秩判据聚焦于系统内部属性分析,干扰适应可变性准则通过定义干扰可抗/可用度量化指标,实现了抗干扰能力认知与性能指标量化,为精细抗干扰控制策略选取提供了理论依据; 2) 相比于干扰不变性准则下的前馈补偿等二自由度控制方法,通过基于益害属性判别的干扰主动精细利用,可充分发挥干扰对控制目标的潜在有益影响,实现更精细、更智能的抗干扰控制; 3) 干扰适应可变性准则以抗干扰算法设计为核心,同时考虑了基

于系统总体决策与优化调度的抗扰能力综合设计、基于干扰认知与复合评估的系统重构优化、基于动态闭环不确定性量化的系统进化设计等。

2.3.1 干扰可抗/可用度量量化分析

在干扰适应可变性准则的设计中, 对干扰的实时认知是基本前提. 这里的干扰实时认知, 既包括对干扰信号的动态分离估计, 又包括基于系统资源配置的抗干扰能力量化, 还包括从总体控制目标出发对干扰损害属性的实时量化.

在现代控制理论中, 通过建立状态空间模型的可控/可观性秩判据对系统能力进行描述, 主要反映的是系统内部属性, 忽视了对干扰影响的刻画. 针对这一局限, 文献 [20] 在复合精细干扰控制研究中, 首次将状态 (内部) 可控性/可观性概念推广到干扰 (外部) 可控性/可观性概念. 进一步地, 提出了干扰可抗度的定量判据, 该指标既能反映系统内部结构特征, 又能反映多源复合干扰的信号特征及影响特性. 例如, 针对动态、随机、范数有界干扰耦合的复合干扰系统, 可建立如下干扰可控度量量化指标^[14]:

$$\gamma = \alpha_1 \sigma_{\min}(\bar{W}_{\text{obs}}(0, T)) + \alpha_2 (\mathcal{H}(y) - \mathcal{H}(y|\omega_1)) + \alpha_3 \min_L \frac{\|e_2\|_{\mathcal{L}_2}}{\|\omega_2\|_{\mathcal{L}_2}}$$

其中, $\sigma_{\min}(\bar{W}_{\text{obs}}(0, T))$ 刻画了动态干扰的可分离程度; $\bar{W}_{\text{obs}}(0, T)$ 表示动态干扰子系统与原系统状态扩维后的能观格拉姆矩阵; T 为能观性分析的时间区间; $\mathcal{H}(y) - \mathcal{H}(y|\omega_1)$ 和 $\min_L \frac{\|e_2\|_{\mathcal{L}_2}}{\|\omega_2\|_{\mathcal{L}_2}}$ 分别刻画了随机干扰 ω_1 和范数有界干扰 ω_2 的可抑制程度; L 表示滤波器增益的所有可能值; e_2 为用户关心的误差输出; $\mathcal{H}(y)$ 和 $\mathcal{H}(y|\omega_1)$ 分别为量测输出 y 的绝对熵和条件熵; α_1 、 α_2 和 α_3 为归一化权重系数.

在上述干扰可控度量量化指标中, 尚未从干扰利用的角度对干扰实时损害属性加以量化, 所得到的结果仍局限于干扰不变设计的范畴. 针对干扰损害属性判别问题, 文献 [50] 基于频域因果分析的方向性, 提出基于系统输出方差分解的干扰损害判别因子. 随后, 该结果被推广至状态空间系统中交叉耦合项与干扰的损害判别^[51-54]. 注意到, 现有益害判别主要针对系统集总干扰, 且采用了有益则完全引入、有害则完全补偿的二元处理方式, 本质上是一种基于指标触发的干扰补偿策略, 并未考虑干扰可抗/可用度的定量刻画, 难以实现部分有益干扰的精细利用.

与控制系统设计原则从“干扰不变设计”再到“适应可变设计”相对应, 系统能力分析需要从“干

扰可控性”向“干扰可控度 (可抗/可用度)”进行拓展. 其中, 干扰可抗/可用度量量化指标应同时反映干扰的实时损害属性、有益干扰的可利用程度以及物理约束下有害干扰的可抵御程度. 应当注意的是, 干扰利用的一个基本前提是能够得到干扰信号的动态分离估计值. 假设动态干扰 \mathbf{d} 满足可分离估计条件, 而控制系统瞬时代价函数定义为 $S(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{d}, \tau)$, 其中 \mathbf{x} 、 \mathbf{u} 、 \mathbf{d} 、 τ 分别表示系统状态、控制输入、干扰变量和时间变量. 那么, 可对干扰 \mathbf{d} 建立如下可抗/可用度量量化指标:

$$\epsilon = \min \left\{ \bar{\mathbf{u}}_m(\mathbf{d}), \mathbf{d} - \check{\mathbf{d}}^* \right\} \quad (1)$$

其中, $\bar{\mathbf{u}}_m(\mathbf{d})$ 表示执行机构物理约束下最大抗干扰控制容量; $\mathbf{d} - \check{\mathbf{d}}^*$ 表示以最大程度利用后剩余需要补偿或抑制的部分干扰. 特别地, $\check{\mathbf{d}}^*$ 表示干扰 \mathbf{d} 的最大可用度, 定义如下:

$$\begin{aligned} \check{\mathbf{d}}^* &= \arg \max \check{\mathbf{d}} \\ \text{s.t. } J^*(\check{\mathbf{d}}) &\leq J^*(\mathbf{0}), \quad \check{\mathbf{d}} \leq \mathbf{d} \end{aligned}$$

其中, $J^*(\check{\mathbf{d}})$ 和 $J^*(\mathbf{0})$ 分别表示干扰为 $\check{\mathbf{d}}$ 和 $\mathbf{0}$ 时的最优积分代价函数值. 最优积分代价函数 $J^*(\cdot)$ 定义如下:

$$J^*(\mathbf{d}) = \min_{\mathbf{u}} \int_t^{t+\Delta t} S(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{d}, \tau) d\tau$$

其中, Δt 表示任意选定的时间.

注 1. 注意到, 在上述干扰可抗/可用度量量化指标中, 需要用到干扰真值 \mathbf{d} , 这在实际当中是难以实现的. 然而, 当干扰 \mathbf{d} 满足完全可观条件且干扰观测器合理设计时, 干扰估计值 $\hat{\mathbf{d}}$ 将渐近收敛至其真值的较小邻域内. 因此, 实际应用中可用 $\hat{\mathbf{d}}$ 近似替代指标 (1) 中的 \mathbf{d} . 这也进一步印证了对干扰的动态分离估计是主动精细利用干扰的一个基本前提.

本文所提的可抗/可用度指标, 在可控/可观等系统内部属性秩判据基础上, 进一步考虑了系统抗干扰能力和性能指标量化的干扰可抗度、干扰可用度以及系统软硬件约束, 是对干扰和系统的深入认知, 支撑了后续的干扰精细利用和系统重构优化设计. 在干扰认知的基础上, 如何系统性地处理可用干扰的有益部分、有害部分与不可用干扰是干扰适应可变性设计准则的核心之一.

2.3.2 干扰主动和精细利用方法

早在二十世纪 70 年代, Johnson^[29] 便提出了干扰利用的初步思路, 通过将满足某种假设的干扰与系统状态扩维, 整体代入线性二次型目标函数进行优化求解, 即可实现对部分干扰的利用. 然而, 由于缺少必要的干扰认知手段, 所提方法的工程可实现

性受到很大制约。

随着干扰认知能力的增加, 干扰利用方法的工程应用条件逐渐成熟. 近年来, 本文团队从基于干扰消纳的增稳控制和基于干扰利用的优化控制两个方面开展了干扰利用方法研究, 理论结果已在无人机控制、卫星姿态对准等实际工程问题中得到了应用验证, 如表 1 所示 (见文献 [55–56]).

1) 基于干扰消纳的增稳控制

在控制系统中, 干扰项往往与控制器当中的部分功能模块具有同构性. 例如, 作为系统振荡抑制功能模块, 阻尼在系统稳定性设计中是不可或缺的. 一个具有良好阻尼特性的系统, 在受到外界干扰后能够迅速恢复到稳定状态. 我们注意到, 在很多情况下, 系统干扰与控制器阻尼项具有同构性, 通过利用干扰的阻尼特性, 可以改善误差收敛特性、提升系统稳定裕度.

在无人机控制中, 气动阻力基本取决于无人机无风下的速度, 这意味着气动阻力可产生类似阻尼的效果. 文献 [55] 通过设计风速观测器获得外部风速, 结合无人机姿态信息, 将气动阻力视为阻尼加以利用, 有效提高了无人机在高速飞行下跟踪误差的收敛速度.

2) 基于干扰利用的优化控制

如前文所述, 部分干扰对控制性能指标的优化可以产生助力. 因此, 在实时量化干扰可抗/可用度的基础上, 设计基于干扰利用的优化控制策略, 是适应可变设计思想的实现途径之一.

本文团队提出基于干扰主动和精细利用的优化控制设计新思路. 针对多源干扰系统, 设计干扰动态分离估计器, 建立干扰可抗/可用度实时量化指标, 将当前干扰估计与未来干扰预测值引入控制代价函数, 通过滚动时域优化的方式实现有益干扰的主动精细利用.

考虑干扰影响下的优化控制问题:

$$V_N^*(\hat{\mathbf{x}}, \hat{\mathbf{d}}) = \min_{\bar{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{U}}} \{V_N(\bar{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{d}}, \bar{\mathbf{U}}) \mid \bar{\mathbf{U}} \in \mathcal{U}_N(\bar{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{d}}), \hat{\mathbf{x}} \in \bar{\mathbf{x}} \oplus E_{\hat{\mathbf{x}}}, \hat{\mathbf{d}} \in \bar{\mathbf{d}} \oplus E_{\hat{\mathbf{d}}}\} \quad (2)$$

其中, N 、 $\hat{\mathbf{x}}$ 、 $\bar{\mathbf{x}}$ 、 $\bar{\mathbf{d}}$ 、 $\hat{\mathbf{d}}$ 、 $E_{\hat{\mathbf{x}}}$ 、 $E_{\hat{\mathbf{d}}}$ 、 $\mathcal{U}_N(\bar{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{d}})$ 、 $\bar{\mathbf{X}}$ 、 $\bar{\mathbf{U}}$ 、 \oplus 分别表示预测步长、状态估计、标称状态、预测干扰、干扰估计、状态预测误差不变集、干扰预测误差

不变集、可行控制集、最优状态序列、最优控制序列、闵可夫斯基集合加. 代价函数可定义为

$$V_N(\bar{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{d}}, \bar{\mathbf{U}}) = \sum_{k=0}^{N-1} l(\bar{\mathbf{x}}(k), \bar{\mathbf{d}}(k), \bar{\mathbf{u}}_p(k)) + V_f(\bar{\mathbf{x}}(N))$$

其中, $l(\cdot)$ 和 $V_f(\cdot)$ 分别表示预测阶段代价和终端代价; $\bar{\mathbf{u}}_p$ 表示对干扰 $\bar{\mathbf{d}}$ 信息和能量利用下的最优决策. 设计闭环系统控制律为

$$\mathbf{u} = \bar{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{e} \quad (3)$$

其中, \mathbf{e} 表示干扰和状态的预测误差; \mathbf{K} 为反馈控制增益. 因此, $\bar{\mathbf{u}}$ 可视为包含有益干扰利用的最优控制项, $\mathbf{K}\mathbf{e}$ 可视为有害干扰补偿/抑制和误差修正项, 进而实现主动和精细的干扰利用.

2.3.3 基于抗扰能力量化的系统重构优化方法

无人系统通常具有多级回路 (上回路+下回路) 结构. 其中, 上回路是系统总体决策与优化调度层, 负责给出系统的动态性能指标、参考输入和优化参数. 传统的干扰不变性准则主要聚焦于下回路 (控制层和执行层) 的设计与优化, 忽视了系统硬件资源配置所带来的固有能力局限, 导致控制器预设性能指标与系统实际执行能力不匹配. 一个典型的例子是无人机为补偿外界风干扰所需的输出控制力矩, 超出了舵机及桨叶所容许的最大输出幅值.

针对上述问题, 文献 [57–60] 在时/空/谱异构空间干扰可抗度量与复合评估的基础上, 提出将上回路指令决策与下回路干扰控制进行一体化设计的重构优化策略, 是干扰适应可变性准则和设计思想的另一重要体现. 两类典型的重构优化策略包括: 1) 通过重构优化得到与系统闭环抗干扰能力相匹配的性能指标、参考输入或重构指令 (重构控制)^[57]; 2) 通过合理分配执行机构输出力矩等控制系统硬件资源, 在达到满意控制性能指标的同时, 使系统总体可靠性或运行寿命最大化 (延寿控制)^[60].

针对无人机执行机构退化与失效情形下的安全容错控制问题, 文献 [57] 开展了机构失效与飞行约束条件下无人机闭环可控能力量化分析, 在此基础上, 提出了具有动态能力适应性的安全飞行包络与参考指令信号重构策略, 实现了执行机构退化与失

表 1 干扰主动和精细利用的典型应用

Table 1 Typical applications of active and refined disturbance utilization

问题	方法	效果
无人机控制 ^[55]	利用气动阻力干扰实现增稳	跟踪精度提升 16.9%, 不引入额外能耗
卫星姿态对准 ^[56]	利用耦合干扰改善误差收敛特性	稳态精度提升 91.64%, 能耗降低 71.69%

效情形下飞控系统的重构优化^[58]. 针对干扰与执行机构故障情形下的航天器可靠控制问题, 文献 [59] 提出动态故障观测与静态可靠度量相结合的闭环风险评估方法, 并对执行机构剩余寿命进行了实时预测. 在此基础上, 将执行机构剩余寿命作为上回路决策变量, 文献 [60] 提出一种平衡控制性能和执行机构可靠性的动态调控策略, 实现了航天器延寿控制; 基于闭环风险量化结果, 文献 [61] 提出一种满足风险约束的上回路指令重构策略.

此外, 实际工程中难以实现绝对不变性, 若仍追求传统稳定意义下的平衡点, 将对控制系统造成较大的执行负担. 因此, 考虑多源复合干扰影响下未知的非零/动态平衡点, 可以通过迭代优化的方式寻到更利于控制目标的动态平衡点, 实现系统性能的自主调节和从稳定到均衡的设计^[62].

3 系统进化设计

与具身智能不同, 仿生智能强调系统智能、生物智能、对抗智能以及系统的进化智能. 仅仅依靠控制算法的“软功”不足以实现系统的性能目标, 必须“软硬一体、形神兼备、内外兼修”, 通过算法进化实现系统结构、形态和行为的进化^[14-15, 25].

通过干扰消纳利用与重构优化, 可以得到与任务目标、干扰因素和系统硬件条件更加匹配的控制设计结果, 提升“任务-干扰-资源”的动态适配能力. 进一步考虑从算法重构到系统行为进化、从结构进化到形态进化的仿生智能系统进化设计. 通过硬件资源的迭代进化, 可以扩展系统能力边界, 提高干扰与不确定性条件下的适应调节能力. 因此, 文献 [14-15, 25] 提出系统能力的动态闭环量化、智能测评与进化设计方法, 在此基础上对系统硬件指标和资源配置进行反设计, 实现系统能力的迭代进化.

3.1 动态闭环不确定性量化

对系统能力的刻画是进化设计的前提. 2003年, 美国桑地亚实验室提出了不确定性量化 (Uncertainty quantification, UQ) 研究方向, 研究在不确定性条件下如何对系统进行设计、模拟与性能分析评估. 2016年, 美国 DARPA 将 UQ 相关研究列入重点资助方向. 不同于一般系统, 无人系统能力刻画必须考虑自身动态闭环特性和多源耦合干扰因素的影响. 自 2002 年以来, 文献 [14, 17-19, 25, 39-40] 围绕多源干扰系统的 CRC 理论展开研究. CHADC 与 UQ 理论几乎同时产生, DC-UQ 理论是 CHADC 理论的拓展. 与传统的 UQ 理论不同, DC-UQ 通过

全回路干扰与不确定性的闭环可控能力量化、干扰与不确定性的动态分离估计、动静混合风险度量等方式, 实现了从开环分析到闭环量化、从静态分析到动态分离、从随机表征到复合表征的动态闭环不确定性量化. DC-UQ 能够更好地适应无人系统的闭环反馈和实时交互特点, 提升了复杂干扰与不确定性条件下动态闭环设计、分析与测评能力, 为“安全、绿色、免疫”的智能无人系统设计和智能系统工程实践奠定了理论基础^[14].

3.2 智能测评与智能系统工程

智能无人系统与动物类似, 需要能够针对特定抗原 (不确定性) 产生相应的抗体 (处理机制), 并具有学习、记忆和进化的能力. 作为仿生智能的突出体现, 通过对无人系统进行动态演进与迭代进化设计, 能够破除现有无人系统技术“理想环境、确定模式、预设任务”的局限性, 实现“安全、绿色、进化”的目标. 受此启发, 本文开展了无人系统智能测评与迭代进化技术研究. 不同于传统离线标校技术, 智能测评的主要特征之一是在无人系统运行过程中通过某种方式对干扰与不确定性进行在线激励, 从而提升对干扰与不确定性的动态认知能力, 实现“边用边测”. 针对多源复合干扰与故障并存下的分离估计问题, 文献 [63] 提出一种基于激励算子的执行器故障与负载不确定性分离估计策略, 有效降低了故障诊断模块的误报率和漏检率.

在此基础上, 针对具有未知生成机理和复杂时变特征的干扰与不确定性, 文献 [64-65] 提出了干扰与不确定性的在线学习方法, 实现了“边飞边学、终身学习”. 具体地, 将干扰信号分解为不变特征 (元) 与可变量, 分别进行离线学习和在线估计, 进而设计干扰“元进化”观测器, 实现干扰认知与估计能力的动态演进^[64]. 针对未知动态的复合干扰, 利用状态空间克里金模型提出一种数据/机理混合驱动的元素模型干扰观测器, 并设计一种基于历史干扰估计误差修正的元素模型在线更新机制, 提升了系统对环境不确定性的进化适应能力^[65].

智能系统工程是通过智能算法、智能器件、智能系统与环境交互等多维度智能化构建, 赋予实际工程系统以智能感知、决策、行为与进化能力. 智能系统工程是无人系统技术的重要发展趋势, 是人工智能与系统科学、控制科学等多学科深度融合的体现, 也是 CRC 理论研究的出发点和落脚点^[14].

最后, 通过“软硬一体、形神兼备、内外兼修”, 根据动态闭环不确定性量化给出系统整体抗干扰能力边界, 对系统硬件指标和资源配置提出反设计要

求, 将系统总体、核心器件、智能算法三者进行交互优化, 实现仿生智能的形态进化和行为进化, 提高无人系统适应极端环境、抵御系统内外部风险、自我强化和动态演进的能力。

4 总结与展望

尽管基于干扰不变性准则的抗干扰控制方法在许多领域得到了成功应用, 但仍面临控制能耗与执行机构损耗增加、引入额外测量噪声、难以满足系统物理约束等局限性。本文在干扰不变性准则的基础上, 提出并总结干扰适应可变性准则和设计思想, 其主要实现途径包括: 干扰深耦合建模、干扰可抗/可用度量、复合抗干扰控制、干扰主动和精细利用、基于抗扰能力量化的系统重构优化等。干扰适应可变性准则破除了“理想环境、确定模式、预设任务”的局限性, 实现了“适应环境、抵御干扰、致胜天敌”的仿生智能。在此基础上, 进一步提出系统进化设计、进化智能和智能系统工程的思想, 从“任务目标-干扰因素-系统资源”一体化的角度提高动态适配性。干扰适应可变性准则突破了传统干扰不变性准则的藩篱, 实现了从“抗干扰”到“识干扰”、“用干扰”的干扰精细控制理论跨越, 为精细干扰控制理论和智能系统工程实践提供了新的理论支撑、研究视角和技术途径。

未来拟围绕精细、复合、智能三个理论特征继续深化研究。具体地, 1) 精细: 利用系统的先验信息和历史数据, 建立多源复合干扰的深耦合表征, 揭示干扰与系统状态、输入输出、其他干扰间的映射关系; 2) 复合: 在干扰精细认知的基础上, 结合补偿抑制、消纳利用、重构优化等复合控制方式, 提高控制效果与任务品质; 3) 智能: 结合人工智能技术^[66-67], 通过干扰学习、干扰预测等方式, 实现智能系统的进化设计等。将以干扰适应可变性准则进一步丰富空天仿生智能系统的科学内涵, 进而以仿生智能赋能无人系统, 提升无人系统在强对抗、强不确定性、高烈度等极端环境下的强自主、强适应、强生存能力。

References

- Schipanov G. Theory and methods of designing automatic regulators. *Automatika in Telemekhanika*, 1939, 4(1): 49-66
- Luzin N N. Absolute invariance and ϵ -invariance in the theory of differential equations. *Dokl Akad Nauk SSSR*, 1946, 51(4): 251-253
- Petrov B N. The invariance principle and the conditions for its application during the calculation of linear and non-linear systems. *IFAC Proceedings Volumes*, 1960, 1(1): 127-135
- Kulebakin V S. The theory of invariance of regulating and control systems. *IFAC Proceedings Volumes*, 1960, 1(1): 116-126
- yJaHoB [Author], Hu Bao-Sheng [Translator]. *Disturbance Adjusting*. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1963.
(乌兰诺夫 [著], 胡保生 [译]. 扰动调节. 上海: 上海科学技术出版社, 1963.)
- Ashby W R. *An Introduction to Cybernetics*. New York: Wiley, 1956.
- Preminger J, Rootenberg J. Some considerations relating to control systems employing the invariance principle. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1964, 9(3): 209-215
- Prigogine I, Stengers I. *The End of Certainty: Time, Chaos, and the New Laws of Nature*. New York: Simon and Schuster, 1997.
- Feng Chun-Bo. *Robust Control System Design*. Nanjing: Southeast University Press, 1995.
(冯纯伯. 鲁棒控制系统设计. 南京: 东南大学出版社, 1995.)
- Chen Han-Fu, Guo Lei. Progress and prospects of modern control theory. *Chinese Science Bulletin*, 1998, 43(1): 1-7
(陈翰馥, 郭雷. 现代控制理论的若干进展及展望. 科学通报, 1998, 43(1): 1-7)
- Guo Lei, Feng Chun-Bo. Robust H_∞ control for a class of systems with nonlinear uncertainties. *Control Theory and Applications*, 1999, 16(4): 619-620
(郭雷, 冯纯伯. 一类具有非线性不确定性系统的鲁棒 H_∞ 控制. 控制理论与应用, 1999, 16(4): 619-620)
- Huang Lin, Duan Zhi-Sheng. Complexity in control science. *Acta Automatica Sinica*, 2003, 29(5): 748-754
(黄琳, 段志生. 控制科学中的复杂性. 自动化学报, 2003, 29(5): 748-754)
- Guo Lei. Estimation, control, and games of dynamical systems with uncertainty. *Scientia Sinica Informationis*, 2020, 50(9): 1327-1344
(郭雷. 不确定性动态系统的估计、控制与博弈. 中国科学: 信息科学, 2020, 50(9): 1327-1344)
- Guo Lei, Li Wen-Shuo, Cui Yang-Yang, Zhu Yu-Kai, Zhang Jian-Chun, Yu Xiang, et al. Dynamic closed-loop uncertainty quantification theory with intelligent unmanned systems applications. *Scientia Sinica Technologica*, 2025, 55(1): 1-13
(郭雷, 李文硕, 崔洋洋, 朱玉凯, 章健淳, 余翔, 等. 动态闭环不确定性量化理论与智能无人系统应用. 中国科学: 技术科学, 2025, 55(1): 1-13)
- Guo Lei, Zhu Yu-Kai, Qiao Jian-Zhong, Guo Kang, Bao Wei-Min. Survival intelligence and safety, immunity and green control technologies for unmanned systems. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(10): Article No. 527129
(郭雷, 朱玉凯, 乔建忠, 郭康, 包为民. 无人系统生存智能与安全、免疫、绿色控制技术. 航空学报, 2022, 43(10): Article No. 527129)
- Tian G, Gao Z Q. From Poncelet's invariance principle to active disturbance rejection. In: Proceedings of the American Control Conference. St. Louis, USA: IEEE, 2009. 2451-2457
- Guo L, Cao S Y. *Anti-disturbance Control for Systems With Multiple Disturbances*. Boca Raton: CRC Press, 2014.
- Guo L, Cao S Y. Anti-disturbance control theory for systems with multiple disturbances: A survey. *ISA Transactions*, 2014, 53(4): 846-849
- Chen W H, Yang J, Guo L, Li S H. Disturbance-observer-based control and related methods—An overview. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(2): 1083-1095
- Guo Lei, Zhu Yu-Kai. *Composite Autonomous Anti Disturbance Control for Systems With Multiple Disturbances (Chapter of Chinese E-Science Blue Book 2020)*. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2020. 210-220
(郭雷, 朱玉凯. 多源干扰系统复合自主抗干扰控制技术 (中国科研信息化蓝皮书). 北京: 电子工业出版社, 2020. 210-220)
- Wen Ting, He Kui, Song Wei-Ping. Technology and industry collaborate at the 2023 inclusion conference on the bund to explore a sustainable future. *Shanghai Securities News*, 2023-09-08 (004)
(温婷, 何奎, 宋薇萍. 科技产业联动 2023 外滩大会“探路”可持续发展未来. 上海证券报, 2023-09-08 (004))
- Jordan M I. Statistical contract theory [Online], available: <https://www.emergentmind.com/topics/statistical-contract-theory>, August 9, 2025

- 23 Bhattacharyya S P. Disturbance rejection in linear systems. *International Journal of Systems Science*, 1974, **5**(7): 633–637
- 24 Bhattacharyya S. Compensator design based on the invariance principle. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1975, **20**(5): 708–711
- 25 Guo L, Li W S, Zhu Y K, Yu X, Wang Z D. Composite disturbance filtering: A novel state estimation scheme for systems with multisource, heterogeneous, and isomeric disturbances. *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, 2023, **4**: 387–400
- 26 Davison E J, Smith H W. Pole assignment in linear time-invariant multivariable systems with constant disturbances. *Automatica*, 1971, **7**(4): 489–498
- 27 Davison E J. The output control of linear time-invariant multivariable systems with unmeasurable arbitrary disturbances. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1972, **17**(5): 621–630
- 28 Johnson C. Optimal control of the linear regulator with constant disturbances. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1968, **13**(4): 416–421
- 29 Johnson C. Accommodation of external disturbances in linear regulator and servomechanism problems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1971, **16**(6): 635–644
- 30 Ohishi K, Ohnishi K, Miyachi K. Torque-speed regulation of DC motor based on load torque estimation method. In: Proceedings of the JIEE/International Power Electronics Conference. Tokyo, Japan: JIEE, 1983. 1209–1218
- 31 Chen W H, Ballance D J, Gawthrop P J, O'Reilly J. A nonlinear disturbance observer for robotic manipulators. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2000, **47**(4): 932–938
- 32 Han J Q. From PID to active disturbance rejection control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, **56**(3): 900–906
- 33 Gao Z Q. Active disturbance rejection control: A paradigm shift in feedback control system design. In: Proceedings of the American Control Conference. Minneapolis, USA: IEEE, 2006. 2399–2405
- 34 Guo B Z, Zhao Z L. On convergence of the nonlinear active disturbance rejection control for MIMO systems. *SIAM Journal on Control and Optimization*, 2013, **51**(2): 1727–1757
- 35 Cao M Y, Yang J, Li S H, Madonski R, Xue W C. Cascaded filter PID paradigm for error-based active disturbance rejection control: Equivalence, design, and implementation guidelines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, DOI: [10.1109/TIE.2025.3559950](https://doi.org/10.1109/TIE.2025.3559950)
- 36 Deng J Q, Xue W C, Zhang L Y, Bao Q L, Mao Y. Disturbance-compression extended state observer with noise insensitivity: Application to electro-optical tracking system. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2025, **22**: 17761–17777
- 37 Chen W H, Rhodes C, Liu C J. Dual control for exploitation and exploration (DCEE) in autonomous search. *Automatica*, 2021, **133**: Article No. 109851
- 38 Li S H, Yang J, Iwasaki M, Chen W H. Hierarchical disturbance/uncertainty estimation and attenuation for integrated modeling and motion control: Overview and perspectives. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, DOI: [10.1109/TMECH.2024.3515084](https://doi.org/10.1109/TMECH.2024.3515084)
- 39 Guo L, Chen W H. Disturbance attenuation for a class of nonlinear systems via disturbance-observer-based approach. *IFAC Proceedings Volumes*, 2002, **35**(1): 19–24
- 40 Guo L, Chen W H. Disturbance attenuation and rejection for systems with nonlinearity via DOBC approach. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2005, **15**(3): 109–125
- 41 Hurme E, Lenzi I, Wikelski M, Wild T A, Dechmann D K N. Bats surf storm fronts during spring migration. *Science*, 2025, **387**(6729): 97–102
- 42 Luo Zhan-Hu. A review of the development of wing-in-ground (WIG) aircraft. *Science and Technology Innovation Herald*, 2021, **18**(9): 17–22
(罗战虎. 地效飞行器发展综述. 科技创新导报, 2021, **18**(9): 17–22)
- 43 Benzi R, Sutera A, Vulpiani A. The mechanism of stochastic resonance. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 1981, **14**(11): L453–L457
- 44 Gammaitoni L, Hänggi P, Jung P, Marchesoni F. Stochastic resonance. *Reviews of Modern Physics*, 1998, **70**(1): 223–287
- 45 Chapeau-Blondeau F. Noise-aided nonlinear Bayesian estimation. *Physical Review E*, 2002, **66**(3): Article No. 032101
- 46 Chapeau-Blondeau F, Rousseau D. Noise-enhanced performance for an optimal Bayesian estimator. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2004, **52**(5): 1327–1334
- 47 Meissner P, Witrisal K. Multipath-assisted single-anchor indoor localization in an office environment. In: Proceedings of the 19th International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP). Vienna, Austria: IEEE, 2012. 22–25
- 48 Witrisal K, Meissner P, Leitinger E, Shen Y, Gustafson C, Tufvesson F, et al. High-accuracy localization for assisted living: 5G systems will turn multipath channels from foe to friend. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2016, **33**(2): 59–70
- 49 Wang T Y, Li Y X, Liu J C, Hu K K, Shen Y. Multipath-assisted single-anchor localization via deep variational learning. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, **23**(8): 9113–9128
- 50 Gigi S, Tangirala A K. Quantification of interaction in multipath control systems using directed spectral decomposition. *Automatica*, 2013, **49**(5): 1174–1183
- 51 Guo Z Y, Zhou J, Guo J G, Cieslak J, Chang J. Coupling-characterization-based robust attitude control scheme for hypersonic vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, **64**(8): 6350–6361
- 52 Guo Z Y, Guo J G, Zhou J, Chang J. Robust tracking for hypersonic reentry vehicles via disturbance estimation-triggered control. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2020, **56**(2): 1279–1289
- 53 Zhang M H, Jing X J. Energy-saving robust saturated control for active suspension systems via employing beneficial nonlinearity and disturbance. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2022, **52**(10): 10089–10100
- 54 Huang Z G, Chen M, Shi P. Disturbance utilization-based tracking control for the fixed-wing UAV with disturbance estimation. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2023, **70**(3): 1337–1349
- 55 Jia J D, Guo K X, Yu X, Zhao W H, Guo L. Accurate high-maneuvering trajectory tracking for quadrotors: A drag utilization method. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2022, **7**(3): 6966–6973
- 56 Teng H, Lu Y K, Xia P F, Qiao J Z, Guo L. Refined disturbance utilization-based green control for spacecraft with composite actuator disturbances. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, DOI: [10.1109/TMECH.2025.3563132](https://doi.org/10.1109/TMECH.2025.3563132)
- 57 Zhou X B, Yu X, Guo K X, Zhou S C, Guo L, Zhang Y M, et al. Safety flight control design of a quadrotor UAV with capability analysis. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2023, **53**(3): 1738–1751
- 58 Gu Y P, Guo K X, Zhao C L, Yu X, Guo L. Fast reactive mechanism for desired trajectory attacks on unmanned aerial vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2023, **19**(8): 8976–8984
- 59 Meng Y, Qiao J Z, Zhu Y K, Teng H, Zhang J C. Remaining useful life prediction for spacecraft actuator based on multiplicative fault observer. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2023, **59**(6): 8489–8501
- 60 Zhang J C, Liu T Y, Qiao J Z. Solving a reliability-performance balancing problem for control systems with degrading actuators under model predictive control framework. *Journal of the Franklin Institute*, 2022, **359**(9): 4260–4287
- 61 Bian J, Zhang J C, Guo K X, Li W S, Yu X, Guo L. Risk-aware path planning using CVaR for quadrotors. In: Proceedings of the 6th International Symposium on Autonomous Systems (ISAS). Nanjing, China: IEEE, 2023. 1–6

- 62 Guo L, Zhu Y K, Qiao J Z, Wang C L. Composite anti-disturbance dynamic regulation for systems with multiple disturbances: From stability to balance. In: Proceedings of the 33rd Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Kunming, China: IEEE, 2021. 5685–5690
- 63 Zhou S C, Wang M, Jia J D, Guo K X, Yu X, Zhang Y M, et al. Fault separation based on an excitation operator with application to a quadrotor UAV. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2024, **60**(4): 4010–4022
- 64 Jia J D, Zhang W Y, Guo K X, Wang J L, Yu X, Shi Y, et al. EVOLVER: Online learning and prediction of disturbances for robot control. *IEEE Transactions on Robotics*, 2024, **40**: 382–402
- 65 Yang Y J, Bao Z Y, Qiao J Z, Zhu Y K, Guo L. Refined metamodel disturbance observer-based control for coarse pointing assembly under constraints. *Guidance, Navigation and Control*, 2024, **4**(4): Article No. 2450017
- 66 Tan Tie-Niu. Promoting AI for good through intensified global governance and cooperation. *Contemporary World*, 2025(5): 4–9 (谭铁牛. 加强国际治理与合作推动人工智能向善向好. 当代世界, 2025(5): 4–9)
- 67 Zeng Kai, Wang Yao-Nan, Tan Hao-Ran, Fang Qiu, Wang Yuan, Yuan Li-Wei. Prospects and technology of embodied intelligent humanoid robots driven by AI large models. *Scientia Sinica Informationis*, 2025, **55**(5): 967–992 (曾凯, 王耀南, 谭浩然, 方迺, 汪渊, 袁礼伟. AI大模型驱动的具身智能人形机器人技术与展望. 中国科学: 信息科学, 2025, **55**(5): 967–992)



谢一嘉 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院博士后. 2017年获得南京理工大学学士学位, 2024年获得北京航空航天大学博士学位. 主要研究方向为抗干扰控制, 奇异摄动系统, 模型预测控制.

E-mail: yjxiebuaa@126.com

(**XIE Yi-Jia** Postdoctor at the School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University. He received his bachelor degree from Nanjing University of Science and Technology in 2017, and his Ph.D. degree from Beihang University in 2024. His research interest covers anti-disturbance control, singularly perturbed systems, and model predictive control.)



李文硕 北京航空航天大学杭州创新研究院副研究员. 2012年获得山东大学学士学位, 2020年获得北京航空航天大学博士学位. 主要研究方向为自主导航, 抗干扰状态估计, 多源信息融合. E-mail: wslibuaa@126.com

(**LI Wen-Shuo** Associate researcher at the Hangzhou Innovation Institute, Beihang University. He received his bachelor degree from Shandong University in 2012, and his Ph.D. degree from Beihang University in 2020. His research interest cov-

ers autonomous navigation, anti-disturbance state estimation, and multi-source information fusion.)

ers autonomous navigation, anti-disturbance state estimation, and multi-source information fusion.)



朱玉凯 北京航空航天大学宇航学院副教授. 2020年获得北京航空航天大学博士学位. 主要研究方向为复合抗干扰控制及其应用, 航天器自主机动控制. E-mail: ykzhubuaa@126.com

(**ZHU Yu-Kai** Associate professor at the School of Astronautics, Beihang University. He received his Ph.D. degree from Beihang University in 2020. His research interest covers composite anti-disturbance control and its applications, and autonomous maneuvering control of spacecraft.)



崔洋洋 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院副教授. 2022年获得北京航空航天大学博士学位. 主要研究方向为干扰估计与补偿, 先进控制理论及其在机电系统、飞行器等领域的工程应用.

E-mail: yangyangcui@buaa.edu.cn

(**CUI Yang-Yang** Associate professor at the School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University. He received his Ph.D. degree from Beihang University in 2022. His research interest covers disturbance estimation and compensation, advanced control theory, and its engineering applications in electromechanical systems, aircraft and related fields.)



郭雷 中国科学院院士, 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院教授. 1997年获得东南大学博士学位. 主要研究方向为无人系统仿生智能, 抗干扰控制理论及其应用, 仿生自主导航. 本文通信作者.

E-mail: lguo@buaa.edu.cn

(**GUO Lei** Academician at Chinese Academy of Sciences, professor at the School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University. He received his Ph.D. degree from Southeast University in 1997. His research interest covers bionic intelligence for unmanned systems, anti-disturbance control theory and its applications, and bionic autonomous navigation. Corresponding author of this paper.)