

陆用运动体多系统协同中的智能优化与控制

方 浩[†], 王雪源, 陈 杰

(北京理工大学 自动化学院 复杂系统智能控制与决策国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 在信息化和网络化背景下, 多系统协同正成为现代战争中陆用运动体的主要作战模式. 针对陆用运动体多系统协同中的智能优化与控制问题, 本文从多系统协同指挥控制中的优化与决策、多维高速运动体的协同制导与编队控制、陆用运动体群集运动的智能与安全控制和非线性随动系统的建模与控制四个方面, 对当前主要研究成果和国内外最新进展做了简要综述. 涵盖了陆用运动体协同过程中涉及的指挥决策、多平台火力控制和群集智能控制与安全控制. 最后在总结国内外研究成果的基础上, 指出了需要进一步研究的问题和未来的研究方向.

关键词: 陆用运动体; 优化与决策; 智能控制; 协同控制; 安全控制

引用格式: 方浩, 王雪源, 陈杰. 陆用运动体多系统协同中的智能优化与控制. 控制理论与应用, 2018, 35(7): 900 – 917

中图分类号: TP18 文献标识码: A

Intelligent optimization and control in multi-system collaboration of ground-based moving platforms

FANG Hao[†], WANG Xue-yuan, CHEN Jie

(School of Automation, Key Laboratory of Intelligent Control and Decision of Complex Systems,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Abstract: Under the background of informatization and network, multi-system cooperation is becoming the main operational pattern in the modern warfare. In the matter of intelligent optimization and control in multi-system collaboration for ground-based moving platforms, the main results and recent progress at home and abroad are briefly reviewed along four research aspects: 1) optimization and decision-making in multi-system collaborative command and control; 2) cooperative guidance and formation control for multi-dimensional high speed moving platforms; 3) intelligent and security control in flocking of ground-based moving platforms; 4) modeling and control for nonlinear servo systems. The survey covers the command and decision-making, multi-platform fire control and swarm intelligent and security control involved in cooperation for ground-based moving platforms. Finally, on the basis of summarizing the research results both at home and abroad, several problems for further study and some research directions in the future are also pointed out.

Key words: ground-based moving platforms; optimization and decision-making; intelligent control; cooperative control; security control

Citation: FANG Hao, WANG Xueyuan, CHEN Jie. Intelligent optimization and control in multi-system collaboration of ground-based moving platforms. *Control Theory & Applications*, 2018, 35(7): 900 – 917

所谓运动体, 是指相对于地球有运动的且具有某种用途或能完成某种任务的系统或平台. 而本文所指的陆用运动体是指以坦克与装甲车辆, 防空武器, 导航与指挥自动化系统, 以及弹药与制导兵器为代表的地面战场使用的常规重型机械化装备和轻型地面作战装备及相应的作战指挥系统.

在信息化和网络化的背景下, 陆用运动体的作战

空间不断延伸, 作战方式愈加多样化. 与此同时, 其作战环境也变得高度复杂, 对抗性加剧. 陆用运动体在控制、优化与决策中既要考虑自身的特点和环境状况, 也必须考虑敌方及友邻的状况. 由于各类型的陆用运动体具有不同的特点, 所以在控制过程中存在不同种类的难度. 例如压制火炮具有重量大、负载大、惯量大等特点. 但在战场环境中受机械振动、传动摩擦等各

收稿日期: 2018-03-05; 录用日期: 2018-06-22.

[†]通信作者. E-mail: fangh@bit.edu.cn; Tel.: +86 13126693283.

本文责任编辑: 宗群.

“2017年智能控制研讨会”论文, 黄琳院士推荐.

国家自然科学基金项目(61573062, 61621063, 61673058), 国家自然科学基金重大国际(地区)联合研究项目(61720106011), 北京智能机器人与系统高级创新中心(北京理工大学), 仿生机器人与系统教育部重点实验室(北京理工大学)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (61573062, 61621063, 61673058), the Projects of Major International (Regional) Joint Research Program NSFC (61720106011), the Beijing Advanced Innovation Center for Intelligent Robots and Systems (Beijing Institute of Technology) and the Key Laboratory of Biomimetic Robots and Systems (Beijing Institute of Technology), Ministry of Education.

种因素的干扰,会产生多种误差,影响射击精度;而防空高炮为了提高毁歼概率,需要提高对机动目标的预测和建模能力,以及解决多约束下火力的优化布阵问题.同时,针对低空高速目标,需要提高快速调炮和拦阻射击控制能力;对于坦克而言,影响其射击精度和反应时间的最主要因素是火控系统的高精度稳定与控制,其中的关键技术主要有行进间瞄准线的高精度稳定控制和高机动目标的动态建模;火箭弹具有威力大、火力猛、机动性好的特点,但是其射弹散布较大,为了提高打击精度,需要在弹道误差的测量与建模,修正量的解算和修正控制等方面进行研究.

信息化条件下陆用运动体具有的特征是:智能化、自动化、网络化.陆用运动体的智能优化与控制系统是一种在信息智能处理基础上给出任务决策,配合操作者完成作战任务的系统.具有自主性、灵活性、共享性和可靠性,能够完成态势感知、敌我识别、信息共享、自主诊断、辅助决策、任务链动态构架等功能,并具有良好的人机交互性.陆用运动体正在向一个集战场侦察、战术决策、目标打击和杀伤性评估等于一体的智能控制系统方向发展.

现代战争中多系统协同正在成为陆用运动体作战的主要模式.其内涵是以信息为纽带,将分布的作战单元有机连接起来,形成一个有机、广义上的武器系统,实现多系统在时间、空间、模式、任务等多维度上的协同,最终形成目标探测、跟踪识别、自主控制、智能决策、精确打击和损伤评估完整链条.为适应未来作战的需要,实现陆用运动体的多系统协同,结合陆用运动体各自的特点,对陆用运动体的研究提出了如下现实需求:

1) 陆用运动体的多系统协同要求指挥决策的分

布化与智能化;

2) 高速运动体在多维空间上需要具备协同机动与拦截能力;

3) 陆用运动体多系统的协同控制要求良好的智能性与安全性;

4) 陆用运动体高精度火力控制需要具备参数快速自学习与高精度随动控制能力.

面对以上现实需求与挑战,针对陆用运动体多系统协同中的智能优化与控制,提炼出以下科学问题:

- 1) 多系统协同指挥控制中的优化与决策;
- 2) 多维高速运动体的协同制导与编队控制;
- 3) 陆用运动体群集运动的智能与安全控制;
- 4) 非线性随动系统的建模与控制.

本文之后的内容安排如图1所示.首先,在第1节中,将从指挥及决策层面介绍关于多协同指挥控制中优化与决策方面的国内外研究进展,包括不确定及受约束条件下的动态决策模型设计与求解,协同指挥知识体系及智能表征模式和基于角色知识的有人/无人协调指挥.随后,在第2节和第3节中将从控制层面对陆用运动体协同控制中的相关问题进行综述.第2节将针对防空及远程精确打击背景下的多维高速运动体的协同制导与编队控制研究情况进行介绍.第2节将针对陆用运动体群集运动的智能与安全控制问题,从有人/无人系统的共享控制技术、安全控制与攻击检测以及非合作行为检测三方面对相关研究进展及技术手段进行总结.而作为实现陆用运动体协同控制的基础,关于非线性随动系统的建模与控制问题的研究进展将在第4节进行介绍.最后一节将对陆用运动体多系统协同问题进行总结和展望.

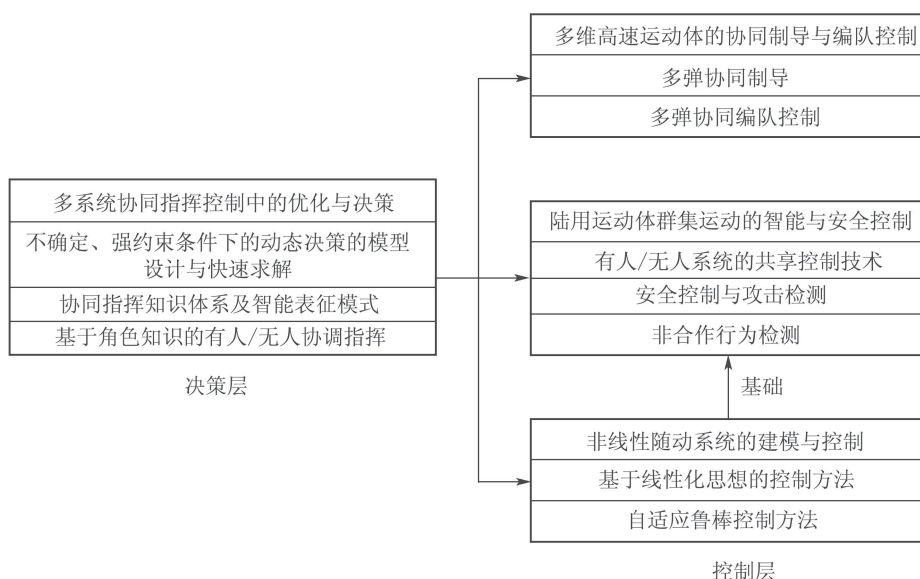


图1 各部分内容安排及其关系

Fig. 1 Content and relationship of the following sections

1 多系统协同指挥控制中的优化与决策 (Optimization and decision-making in multi-system collaborative command and control)

多网络化武器系统的协同指挥控制需要充分利用多个武器平台的“合同”优势,在空间、时间的范围内合理有效地利用武器资源来消除敌方威胁,保护己方重要设施.在实际作战过程中,由于武器和目标等信息,以及相关信息的传输都充满了不确定性和不可预测性,而且决策时间严格受限,可实施的打击次数有强约束.所以在多系统协同指挥控制的过程中,需要解决不确定、强约束条件下动态决策通用模型的构造问题,同时在保证快速性与实时性的前提下,对优化决策问题进行求解.此外,在现代战争中,多系统协同指挥控制中的有人与无人平台结合越来越紧密,所以为适应战场需要,急需提高有人/无人系统协同指挥决策的协调性和快速响应能力.为此需要构建合理的决策知识体系和智能表征模式,同时研究分布式协调任务分配与指挥决策机制.

1.1 不确定、强约束条件下的动态决策的模型设计与快速求解 (Model design and fast solution for dynamic decision-making under uncertain and strong constraint conditions)

武器目标分配问题(weapon target assignment problem, WTA),又称为火力分配问题,是多系统协同指挥控制中动态决策的主要问题.作为一种在军事运筹学领域发展起来的经典约束优化问题,其目的是找到最优或者决策者可以接受的武器对来袭目标分配方案,使得我方对敌方的毁伤达到最大.这是一个不需要增加资源消耗、不要求更高的技术保障就能提高作战效果的有效途径,因而有着十分重要的现实意义^[1].

WTA可以归类为组合优化问题,并已经被证明为NP完全问题(nondeterministic polynomial time complete problem),它分为两种基本情况^[2-4]:静态WTA(static WTA, SWTA)和动态WTA(dynamic WTA, DWTA).在SWTA中,所有武器在同一阶段被用来打击目标,并且问题中的所有参数都是已知的.因此,SWTA问题的目标是给临时的防御任务找到最优的武器目标分配.与此相反,DWTA是多阶段问题,它的目的是在考虑整个防御过程中找到一个全局最优的分配^[5],即通过将可用的武器在合适的时机分配给来袭目标以达到一定的战术目的.DWTA的初期研究认为DWTA仅仅只是SWTA的重复,一直到所有来袭目标均被击中或者我方的武器用尽.但实际上DWTA要比SWTA复杂,一方面DWTA中考虑了更实际的约束,其中最重要的就是武器和目标时间窗口造成的交火可行性约束.在作战结束之前每一个阶段的交战的结果都要用于评估后续的决策,因此,在DWTA中前面的决策对之后的决策会造成链锁影响,这也会极大地

增加问题的复杂度.DWTA问题可以分成多个阶段,每个阶段是一个SWTA问题.同时,各个阶段并不是相互独立的,而是随着时间的推移,每个阶段WTA问题的复杂度将因为相应资源的减少而降低.

按照模型所强调的不同作战目标,WTA模型可以分为基于资产(asset-based)^[6-7]和基于目标(target-based)的WTA模型.基于资产的模型采用最小化来袭目标对我方受保护资产的威胁作为目标函数,可以最小化受保护资产的总价值或者来袭目标毁坏资产的概率.而基于目标的WTA模型不直接采用被威胁资产的价值^[5],而是将最大化我方武器对来袭目标的毁伤作为目标.同样的,假定每个目标具有一定价值,则既可以最大化对来袭目标的毁伤总值,也可以最大化我方对目标的毁伤概率.

此外,文献[5,8-10]的WTA模型仅仅考虑优化毁伤效能或受保护资产的价值,而不管作战消耗的多少和总的作战时间的多少,仅将WTA问题建模为单目标优化问题.而在实际的作战中,一个合适的WTA不仅要满足一定的战术要求,还要考虑交战过程中的耗资(即消耗的武器数量)和作战时间.因此,WTA问题也可以是一个多目标优化问题.例如常见的目标函数包含:最小化尚存资源的价值,最大化对来袭目标的毁伤,最小化武器量消耗,以及最小化作战时间消耗等.对上述目标函数,可以只考虑一个,将其建模为单目标WTA问题.然而更贴合实际的,可以考虑两个及两个以上目标函数,将其建模为多目标WTA问题.Lötter等在文献[11]中研究了双目标WTA问题,目标函数为最小化目标的累积生存概率和最小化武器目标分配的累积代价.进一步,文献[12]在文献[11]的基础上,额外考虑了在当前决策时间窗口后使得各武器系统的重用次数最大化这一目标函数,将其建模为三目标WTA问题.

与很多实际问题类似,WTA问题也带有很多跟实际情况密切关联的强约束,如武器量约束、可行性约束、转火约束^[13]等.文献[13]针对基于目标的进攻型WTA问题,在强约束条件下,将其建模为同时考虑对目标的毁伤、武器消耗和时间消耗的三目标确定性DWTA问题,并为该问题设计合理的编解码、交叉、变异及修复算子,利用经典的非支配排序遗传算法II(nondominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II)进行求解.文献[14]在考虑资源约束、可行性约束和转火约束的前提下,同时最大化对敌方来袭目标的毁伤和最小化弹药量的消耗.提出带有自适应策略的NSGA-II(adaptive NSGA-II, ANSGA-II)和基于分解的自适应多目标优化算法(adaptive multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition, AMOEAD)用于求解该问题.针对文献[14]类似的模型,文献[15]采用两个当前流行的最新提出的多目标进化算法,即带自适应权重调整的MOEA/D(MOEA/D with

adaptive weight vector adjustment, MOEA/D-AWA)和带有 ε 约束框架的DMOEA(decompositionbased multi-objective evolutionary algorithm with the ε -constraint framework, DMOEA- ε C), 对其进行求解。

实际中遇到的问题既是多目标的, 也是包含各种不确定性的。针对不同类型的不确定性, 需要不同的处理方法。针对不确定多目标动态武器目标分配问题, 首先确定实际中可能遇到的不确定种类, 然后为其建模。例如, 假设武器 i 对目标 j 的毁伤概率 $p_{ij} = p_{ij}(s, \xi)$ 是不确定的, 该值依赖于作战阶段 s , 以及随机受作战环境、天气情况等因素影响的参数 ξ 。不同的 $p_{ij}(s, \xi)$ 可以代表不同的作战场景。文献[16]假设武器毁伤概率服从某个分布, 进而利用鲁棒算子等消除其不确定性, 即将不确定性问题转化为确定性问题。此外, 在实际情况中重要程度向量一般是用语言变量来表达的, 因此在上述情形下, 还应同时考虑重要程度向量为模糊变量的情况。那么对于同时存在随机性和模糊性的不确定性问题, 文献[16]利用模糊理论和鲁棒算子以及机会约束规划为不确定性问题进行建模, 并将神经网络和多目标进化算法相结合用于求解。

1.2 协同指挥知识体系及智能表征模式(Collaborative command knowledge system and intelligent representation)

在多系统协同指挥控制过程中, 指挥控制系统存储的信息量大大增加。为了充分利用这些信息, 挖掘其中隐藏的战场形势、指控规则以及发展局势, 需要应用到数据挖掘工具。数据挖掘是指从大量数据中抽取出潜在的、有价值的知识的过程。针对指挥控制系统, 可以利用数据挖掘领域中的关联规则挖掘从系统历史数据中搜索频繁项集, 挖掘结构化的协同规则, 建立涉及计划、决策、协调等方面的指挥知识体系, 以更好地帮助高层人员进行决策和研究。

最早的关联规则概念由Agrawal等^[17]提出, 目的是发现数据集中有用的频繁模式。关联规则挖掘过程一般分为两步: 第1步是生成所有频繁项集, 即找出支持度大于等于最小支持度阈值的项集; 第2步是生成强关联规则, 即找出频繁项集中大于等于最小置信度阈值的关联规则。最典型的关联规则挖掘算法是基于频繁项集的Apriori算法^[18], 它可以根据Apriori性质产生候选项集, 使得频繁集被大大压缩, 具有良好的性能。但随着数据库的增大, 该算法的I/O负载急剧增大且会产生大量的冗余候选集, 算法性能大大降低。针对这些问题, 学者们开展了大量研究, 并提出了基于划分的算法^[19], Sampling关联规则算法^[20]和FP-growth^[21]等串行算法对经典Apriori算法进行改进。此外, 为了利用多处理器的计算性能优势, 部分学者也提出了一些分布式并行算法, 如CaD算法^[22]和APM算法^[23]等。

当原始数据为基于图的数据时, 关联规则挖掘即转化为图挖掘。其目的是在图的集合中发现一组公共子结构, 所以又称频繁子图挖掘。频繁子图挖掘主要分为广度优先搜索(如AGM算法^[24]、FSG算法^[25])和深度优先搜索(如gSpan算法^[26])两种方式。此外, 针对不确定图的频繁子图挖掘方法, 邹兆年等在文献[27]中进行了研究。进一步, 胡健等^[28]将深度优先与宽度优先搜索策略结合起来提出了一种针对不确定图的频繁子图挖掘算法。

前面所介绍的关联规则挖掘算法都是静态的, 即在固定数据集和支持度下, 发现数据集中的频繁项集。而在协同指挥控制系统中, 其数据库中存储的信息(如传感器网络信息等)往往是动态变化的。此时, 数据集和支持度都可能会发生变化。这时就需要基于数据流的增量式关联规则挖掘。它的特点是利用滑动窗口技术对数据流作区域性限制, 且抛弃了静态挖掘中多次扫描的方式, 随着数据流的更新对数据进行单次扫描。文献[29]中提出的Moment算法采用滑动窗口技术挖掘基于数据流的频繁项集, 并动态更新序列, 提高了系统内部存储更新速度。文献[30]中提出的DS-CFI算法将滑动窗口分割, 在每个子窗口中分别计算频繁闭项集, 并存入DSCFI树中, 最后利用DSCFI树对滑动窗口中的频繁闭项集进行动态挖掘。赵春等^[31]将文献[32]中提出的部分支持度树应用到增量关联规则挖掘中, 建立起部分支持度树后多次深度优先遍历树, 从树中挖掘频繁项。这种方法只需扫描一遍数据集。文献[33]中提出一种将树、概念格和垂直数据挖掘相结合的挖掘算法, 该算法只需扫描一遍数据集, 数据增加删除操作简单, 一次广度遍历即可获得全部频繁项集。

近年来, 数据挖掘的相关成果陆续被应用于军事指挥与智能决策中。文献[34]讨论了数据挖掘对智能控制与指挥的作用, 同时指出了数据挖掘在安全性和隐私方面的冲突等问题。Stone等在文献[35]阐述了数据挖掘和分析对美军信息化指挥与决策的重要性。文献[36]利用数据挖掘和机器学习中的信息分类来研究军事指挥与控制中的通信信息, 以协助指挥中心决策和分析。文献[37]利用数据挖掘和分类从数据库中寻找有用信息并建立相应规则来改进舰载反导系统。文献[38]利用数据挖掘建立了多机器人协作追捕问题中的协作规则。文献[39]设计了一种利用序列规则的数据挖掘方法来自动确定自相关模型和项目交叉相关需求, 从而更准确预测军事行动计划的库存需求。

1.3 基于角色知识的有人/无人协调指挥(Manned/unmanned collaborative command based on role knowledge)

为提高有人/无人系统协同指挥决策的协调性和快速性, 解决多陆用运动体在不确定环境和无通信条

件下的协同决策问题,需要引入基于角色知识的有人/无人协调指挥.基于角色知识的有人/无人协调指挥是通过跨学科研究,使用人类团队概念,定义责任领域和成员内在关系,进行成员列举和任务分配的指挥模式.这种协同指挥模式利用角色的概念,适应人类团队中的任务计划和执行的协调运作方式.而角色是根据具体成员不同的技能特性,对成员责任范围的描述.它用来描述运动体的能力以及团队对个体成员的预期.无论通信状况如何,依据这些预期可预测各个成员在团队中的行为.

近年来,在设计、应用和分析多智能体系统的相关研究中,将角色的概念引入多陆用运动体系统成为研究热点. Vanhilst和Notkin^[40]使用角色来定义运动体在协作中的责任,使其能共同完成工作.在这个模型中,运动体与合作分别被视为角色以及角色关系的集合. Kristensen^[41]使用角色作为运动体之间的媒介,来定义该运动体对其他运动体的组织关系,这种方法允许运动体通过动态改变他们的角色,形成分层组织. Satterfield等^[42]提出了一种基于角色的协同指挥框架,通过使用团队成员角色来实现隐协作.框架包含一个双互锁控制环,由角色的队友预测环和对队友预测的确认环组成.在预测控制环中,可以利用当前队友状态、队友的角色模型、和已知环境状态对队友的行为进行预测.同时,这些行为线索将作为智能体行为的约束.当队伍内部的通信可以获得时,确认控制环基于队友的显式通信数据,从队友获得的直接信息可以用来确定所预期的队友行为.当显式队友行为的预期失效时,在确认环中队友模型和功能基于角色的队友模型进行更新,来保证未来队友模型预测的精确性. Zhang等^[43]针对多陆用运动体在不确定环境、无通信条件下的协同决策问题,在部分可观的马尔科夫决策过程模型的基础上,提出基于角色的隐式协同框架.为了克服无通信情况下无法获得队友状态信息的问题,引入队友状态估计,基于角色模型更新队友当前状态估计,实现隐式协同决策.

角色是劳动专门化的方式和结果, Ravary等^[44]定义角色为运动体在不同任务上的专门化.在自然系统中,一个劳动划分是形成成功的、高效的的社会的主要因素.一般而言,当团队成员降低他们的行为的储备并在他们负责的功能上变得高效,团队总体期望的效率增加.文献[45]使用响应阈值模型,将任务看作激励.运动体通过过去的经验来提高或降低它对任务的响应,从而随着时间的推移形成了劳动划分.用该模型动态分配领域的角色,可以形成一个有效的劳动分配. Ma等^[46]基于传统的编队控制协议,提出了具有动态角色分配的编队控制算法,给出了一个分配变换矩阵,并采用分布式拍卖算法求解优化问题,使每个运动体都能高效地执行编队任务. Xu等^[47]通过将角色引入情境演算来实现多运动体之间的协作,在框架中

通过角色定义了运动体的一系列行动和策略,同类运动体可以根据预定义的触发器灵活地切换角色.在共同的知识假设下,运动体可以通过预测其他运动体的行为,降低对通信的依赖.

此外,角色在多陆用运动体系统中还有助于降低冲突的不利影响.一方面,角色可以用来降低物理冲突.当大量运动体通过受限的信息导航,通过给运动体指定阶层的角色可以实现更高的效率.较低阶层的运动体躲避较高层级的运动体,只有低级运动体需要关心在移动时避免碰撞,而高级运动体则可以专注于它们的工作^[48].另一方面,角色也可以提供一种降低虚拟冲突的方式^[49].许多协作协议依赖运动体彼此之间显式通信的能力,而当所有运动体在共享媒介上同时通信时,将影响系统的稳定.例如,在基于拍卖的任务分配算法中,一个拍卖者发现一个突出的任务并向队友询问任务的标价.在没有角色的情况下,每一个运动体都可以向拍卖者响应,在一个有限的共享的带宽下这可能导致许多数据包冲突.而角色的定义可以降低每一个运动体负责任务的数量,使更少的运动体在拍卖协商阶段进行响应,减少了数据丢包,从而提升系统的整体性能.

1.4 问题与展望(Problems and future work)

在当前多系统协同指挥控制的研究中,对于动态决策的研究通常只考虑给定情形下的最优决策设计,忽略了不确定情形下的动态决策过程,而不确定性却恰恰是战场环境中不可忽视的一环.为此,需要对对于一般的不确定多目标优化问题进行研究,考虑随机性、模糊性和随机模糊双重不确定性,确定合适的采样方式以及采样次数.在此基础上采用鲁棒优化、模糊理论、机会约束规划、相关机会规划等建立不确定模型,最后用多目标不确定进化算法进行求解.此外,在多系统优化与决策过程中,现有方法对信息获取的不确定性与预测的不精确性考虑不够,需要解决跨领域知识共享和协同推理判断问题.同时,在有人/无人协调指挥过程中,需要建立有人/无人双向自然交互机制,将人的心理模式、计算模式和环境因素有机融为一体,实现多系统协同态势感知与态势共享.

2 多维高速运动体的协同制导与编队控制 (Cooperative guidance and formation control for multi-dimensional high speed moving platforms)

多维高速运动体是指以导弹和可控火箭弹为代表的高速飞行运动体.当前形势下,随着反导技术的快速发展和先进高超声速武器的不断研制,对多弹协同控制研究的需求愈加迫切.一方面在进攻端,单枚弹很容易受到电子干扰而丢失目标或者被完善的反导系统所拦截;另一方面在防御端,由于高超声速目标

具有超高速飞行、无固定弹道和长时间大范围持续机动的特点,所以单枚拦截弹对此类目标的拦截成功率很低^[50]。多弹协同作为一种新的集群化作战策略,在实现“侦察-打击-评估”一体化作战、饱和攻击、协同反导等战术应用中有着独特优势,可以大幅度提高导弹的突防能力、对运动目标的协同搜索能力、对高速目标的拦截能力以及综合作战效能。美国的“网火”作战系统^[51]、俄罗斯的“花岗岩”超声速反舰导弹系统^[52]和“舞会”-E岸基反舰导弹系统^[53]均是基于多弹协同的思想而研制的。多导弹协同技术以其特有的优势正在受到越来越多的关注。

2.1 多弹协同制导 (Multi-missile cooperative guidance and control)

多弹协同制导是一种时间意义上的协同,是指多弹同时齐射,或从不同区域和不同时间发射,同时到达指定区域,从而实现多弹同时突防或协同拦截的目的。多弹协同制导的研究主要分为非交互式 and 交互式两大类。非交互式顾名思义就是在协同制导过程中各枚导弹之间没有信息交互,在发射之前要确定满足作战需求的期望攻击时间,发射后分别独立控制各枚导弹使其攻击时间趋于期望值,以此实现多弹同时到达的目的。交互式则是各枚导弹在制导过程中通过信息交互来协调攻击时间,从而实现协同攻击的目的。

非交互式协同制导的代表性工作是由Jeon等人提出的攻击时间控制导引律 (impact-time-control guidance, ITCG)^[54],各枚导弹在各自加速度指令的控制作用下,攻击时间趋于协同攻击的期望值,从而实现协同制导。在此基础上,Jeon等人在文献[55]中加入攻击角度约束,提出了带角度约束的攻击时间控制导引律 (impact-time-and-angle-control guidance, ITACG),实现了多导弹以不同入射角同时攻击的目的,更加贴近了实际作战需求。进一步,王晓芳等人在考虑攻击角度和时间约束的基础上,又考虑了导弹自身过载约束和弹道收敛性约束,基于比例导引律设计了一种协同制导律用于协同作战^[56]。此外,文献[57]利用双圆弧定理实现了导弹对攻击时间和攻击角度的控制。虽然非交互式协同制导简单易实现,但在实际应用过程中,由于很难提前确定满足协同攻击要求的期望攻击时间范围,所以这种非交互式协同制导方式具有很大的局限性。

与非交互式协同制导不同,交互式协同制导可以通过各导弹之间的信息交互,根据作战情况实时调整期望的攻击时间和攻击角度,实现各导弹之间的动态协同。交互式协同制导又分为集中式和分布式两种制导方式。集中式主要是指存在一个中心节点(可以是地面站、预警机或其中一枚导弹)作为协调单元,可以获取所有导弹的信息进行处理并将协调信息进行分发。较有代表性的有张友安等提出的“领弹-从弹”协

同制导框架^[58]和赵世钰等提出的双层协同制导框架^[59]。在“领弹-从弹”框架中,领弹的运动状态会作为参考状态,各从弹可以从领弹获取信息,并通过对参考状态的跟踪来实现协同制导。在这种框架下,文献[60]设计了一种协同制导算法,领弹采用比例导引法,从弹采用ITCG并将参考状态设为领弹的剩余打击时间,并设计了一种针对从弹无导引头情形下的视线角速率计算方法。文献[61]针对平面内的机动目标,设计了一种基于参数自适应调节器的协同制导方法,保证了从弹的弹目距离不会超过领弹的。文献[62]则将“领弹-从弹”框架应用于解决三维空间中的协同制导问题。在导弹速度不相同的条件下,通过控制领弹和从弹在竖直平面内的前置角和水平面内的弹道曲率,实现了多弹同时攻击。在双层协同制导框架中,底层为导引控制,上层通过对各枚导弹协调变量的控制来实现协同。在文献[59]中,底层采用ITCG,上层协调变量的期望为所有导弹剩余时间估计的加权平均值,通过控制攻击时间向此期望值趋近就可以实现协同制导。文献[63]在此框架下,针对平面内的静止和机动目标,将导弹剩余时间设为协调变量设计了一种偏置比例协同导引律。进一步,利用三维比例导引律,文献[64]将文献[63]中的方法拓展到三维空间中。文献[65]则通过模型变换的方法设计了一种不需要精确剩余时间估计的饱和攻击协同导引律。集中式方法结构简单,易于实现,由于信息获取充分,所以能够得到全局最优解。但存在的最大问题是过分依赖中心节点,中心节点的失效将导致整体协同制导的失败,系统鲁棒性较差。

分布式协同制导不需要中心节点的参与,各导弹通过与相邻导弹的信息交互实现协调信息的一致,从而实现协同制导。文献[66]将各导弹视为同构节点建立了协同制导模型,将各导弹剩余时间附加预定偏置量作为模型输出,设计了分布式协同制导方案,并给出了相应的拓扑条件。文献[67]针对三维空间中机动目标的拦截,基于网络同步原理,设计了一种协同制导策略,将目标视为领弹,与拦截弹构成“领弹-从弹”拓扑结构,从而实现了对机动目标的协同导引。文献[68]考虑了切换拓扑条件下的多导弹协同制导问题,证明了当拓扑结构为强连通平衡图时,利用加权平均一致算法,可以使得协同制导时间渐近收敛于各弹期望导引时间的加权平均值。文献[69]针对三维空间中协同攻击静止目标的情形,设计了一种基于比例导引的分布式协同制导方法。其中,利用专家系统来调整比例导引系数,使得导弹的剩余攻击时间趋于集群中的最大值,并证明了在网络拓扑为连通图时,可以实现协同制导。文献[70]针对平面内静止目标的协同攻击,提出了一种在满足导弹过载限制的前提下,实现有限时间内导弹剩余攻击时间一致的分布式协

同制导算法.

2.2 多弹协同编队控制 (Multi-missile formation control)

多弹协同编队控制是指出于战术目的对多枚导弹进行最优的编队结构设计,并在飞行过程中完成队形的形成及保持.这是一种基于空间协同的多弹协同方式,可以利用特定队形结合地形实现战术隐身效果,提升导弹集群在中段飞行过程中的突防能力.但现阶段国内外关于导弹编队控制方面的文献还很少,多弹协同编队控制方法大多源于多智能体领域的相关研究.

在当前多弹协同编队控制的研究中,绝大多数控制方法都是基于leader-follower框架的.这种控制框架的基本思想是指定编队中某几枚导弹作为leader,带领整个编队进行飞行,通过保持leader和follower的相对距离和角度来形成期望的队形.基于这种控制框架,马培蓓等^[71]研究多弹编队控制中从弹的控制律和实现算法,利用误差的动力学特性设计三维条件下基于从弹的编队控制器.Cui等^[72]基于领弹从弹相对运动模型提出了一种三回路编队控制方法,外环利用动态逆方法设计了导弹编队控制器,中环和内环分别设计了基于能量的控制器和PID控制器,并得到相应的过载和舵面偏转角指令,从而控制导弹跟踪外环编队控制器得到的速度及方向角指令.另一种常用于多弹协同编队的框架是基于行为的编队方法.这种方法的思想是通过对导弹的基本行为及局部控制规则的设计使得导弹编队产生所需的整体行为.Mu等^[73]提出了一种将leader-follower方法与基于行为的方法相结合的多弹编队控制律.其中导弹行为包括编队形成、躲避障碍和防止碰撞,几种行为加权平均后通过行为机制来执行.同时,编队的领弹中还加入了最优飞行目标控制机制.在该方法作用下,导弹不但完成队形保持、避障和避碰的行为,同时在飞行目标的路径上也是最优的.

从控制方法的角度来看,目前的多弹编队研究中主要采用了PI最优控制^[74-75]、模型预测控制^[76-77]、反馈线性化^[78-79]和backstepping^[80-81]等控制方法.韦常柱等^[74]采用PI最优控制理论,设计了可克服相对运动常值扰动、领弹运动状态输入扰动以及非线性模型线性化偏差的最优编队队形保持控制器.杜阳等^[76]针对密集编队在队形变换时的碰撞冲突问题,考虑飞航导弹的低空突防背景与机动能力的限制条件,设计了基于局部模型预测控制的主动防碰撞队形保持控制器.张磊等^[79]采用微分几何理论对导弹运动方程进行精确线性化,建立基于从弹跟踪误差和相对速度误差的控制系统状态方程,利用基于稳态解的黎卡提方程

求解方法求解给定值为零点的状态调节问题,设计了从弹的三维跟随编队控制器.刘新科等^[80]研究了铅垂面内基于制导与控制一体化思想的编队队形控制器设计问题,根据领弹从弹的相对运动模型,建立了领弹姿态信息与从弹舵偏角之间的关系,将从弹通道间的耦合项作为不确定项进行处理,并利用自适应神经网络理论设计了补偿器,依据backstepping理论设计了编队队形控制器.进一步,Wang等^[81]将文献[82]中单枚导弹的一体化控制思想扩展到多弹协同编队控制中,将编队控制回路和姿态控制回路结合起来,在backstepping框架下设计了三维空间中的一体化多弹编队控制器.同时,利用B样条神经网络和自适应律实现了对模型中不确定参数的自学习和不确定性的自补偿.并结合command filter方法解决了BTT(bank-to-turn)导弹在舵面饱和及姿态受限情形下的编队控制问题.此外,韦常柱等在文献[83]中还考虑了领弹信息未知情形下的编队控制问题.将领弹的运动状态从相对运动模型中分离出去,利用自适应调节器估计领弹的未知状态,并结合PD控制器实现了领弹信息缺失条件下的队形保持.

2.3 问题与展望(Problems and future work)

现有的多弹协同制导方案大多是在二维平面内针对静止或慢速目标所设计的,为了满足某些作战需求(如对高超声速武器的拦截),需要加大对三维空间内高机动目标的协同制导研究.对于分布式协同制导方法,为了保证打击效果,在实现时间协同的同时,还应考虑到角度的约束,但目前还比较缺乏对这方面的研究.此外,在利用一致性原理解决协同制导问题时,往往需要对导弹剩余时间进行控制,而实际剩余时间是在导弹匀速飞行的假设下计算得出的,在实际应用过程中,可能会产生较大误差,无法保证系统的稳定性.这也是未来研究中需要加以考虑的问题之一.

而对于多弹协同编队控制问题,现阶段国内外的研究还比较少,仅有的一些研究也大多是借鉴卫星及旋翼无人机编队控制的思路,缺乏对于导弹编队控制的针对性.相比于卫星和旋翼无人机,导弹在飞行过程中具有一些特殊的限制,如无法悬停以及有最大转弯角的限制.此外,由于战术需要和地形限制,导弹编队方式在飞行过程中需要进行动态切换,这时弹间的通信拓扑也将相应发生变化.与此同时,战场上的复杂电磁环境和敌方电子干扰会对严重影响弹间的通讯.这些问题对多弹编队控制提出了新的挑战.所以在未来多弹协同编队的研究中,一方面要注意结合导弹自身的运动学特性及限制条件来进行控制器设计,另一方面应该研究切换拓扑条件下导弹编队的队形变换问题,同时考虑弱通信条件下的编队控制问题.

3 陆用运动体群集运动的智能与安全控制 (Intelligent and security control in flocking of ground-based moving platforms)

在陆用运动体群集运动控制中, 尽管无人系统的自主行为控制能力愈发强大, 但由于战场环境的复杂性和突变性, 仍然需要人进行干预和监督。为了减轻人操作和监督的负担, 人与无人系统之间的控制关系须由简单、低效的主从式协同转变为复杂、高效的合作式协同。为此需要研究有人/无人系统的合作行为控制, 综合考虑环境信息、任务信息、无人系统行为, 建立从人的干预意图到干预行为的映射关系。此外, 在陆用运动体的群集运动控制中, 由于激烈对抗的存在, 极易导致由于一个节点的失效而使得整体任务失败。而现有的信息安全方法无法完全解决陆用运动体的分布式安全控制问题。因此, 需要对群集运动过程中涉及的攻击策略进行数学描述, 同时对攻击性能的指标进行建模。在此基础上研究陆用运动体的非合作状态估计与安全补偿控制。

3.1 有人/无人系统的共享控制技术(Shared control technique for manned/unmanned systems)

近些年来, 随着多陆用运动体系统领域研究的不断深入, 诞生出了大量协同控制与优化算法和框架, 使得多无人系统的自主协同能力得到了长足进步。但在实际复杂环境的控制过程中, 仅仅依靠多无人系统的自主性仍不足以完成任务。例如, 在狭窄区域内实施搜索任务时, 某些运动体被卡住, 任务无法继续完成; 在实施巡逻任务时, 某些敌方恶意运动体进行伪装, 并混入我方集群中进行干扰和破坏; 当环境过于复杂时, 任务约束条件过多, 自主任务规划无法完成; 当发生突发险情和紧急状况时, 凭借多无人系统的自主性不足以及时作出反应等。在这些情况下就需要加入人的干预和监督。

对无人系统进行干预的经典方法被称为遥操作。但经典的遥操作方法会对人类操作者造成巨大的身体和心理负担^[84]。而且在遥操作过程中由于无人系统的自主性比较低, 操作者的一时失误可能会造成很严重的系统问题^[85]。针对这些问题, 共享控制(又称混合主动控制)的概念应运而生。共享控制相比遥操作, 会给予无人系统一定程度的自主性, 使得最后的控制效果是无人系统和人的意图共同作用的结果。它可以保证无人系统在人类干预过程中满足一些环境及安全方面的限制条件。Cacace等在文献[86]中提出了一种混合主动控制方法, 可以使得受到干预的航空服务车运行在规划轨迹附近的球形区域内。Chipalkatty等^[87]利用共享控制技术控制四足救援机器人的腿部运动, 使其在人类干预下保持在稳定的锥体区域内。Loizou等^[88]利用混合主动控制技术, 控制移动机器人在人类

的干预下运行在允许的工作空间内且实现避障。

共享控制的方法近年来也被推广到多无人系统的协同控制中。Chipalkatty等^[89]通过共享控制对一套双摆系统进行干预, 使两个摆实现同步。Rodriguez-Seda等^[90]将共享控制应用于移动机器人的协同控制中并可以实现避障。Fang等^[91]提出了一套基于模型预测控制的共享控制系统设计方法, 并将其应用于多机器人系统的队形变换上。文献[92-93]中利用共享控制方法实现多无人系统的连通性保持和避障。总体来说, 这些应用于多无人系统的共享控制方法都是基于领航者-跟随者模式的。由于人类的干预直接作用于领航者, 所以整体系统的控制性能很大程度将取决于领航者的选取。为此, 学者们提出了一些更好的领航者选取算法^[94]和网络重连算法^[95]。虽然这些算法使整体控制性能有一定的提升, 但仍然改变不了这种模式的弊病, 即跟随者只是被动地对领航者的更换进行反应, 且人的干预只作用于领航者, 这使得一些复杂的干预意图无法实现。为此, Shang等^[96]提出了一种双层的共享控制框架, 下层为经典的多运动体一致性网络, 上层为体现人干预意图的人工干预场网络。人工干预场网络是人的干预意图对整个多运动体网络影响的模型, 各节点根据邻居节点和人的干预输入进行更新。与领航者-跟随者模式不同, 这种方法将人的多个干预输入隐式地关联起来而非将其孤立开来, 实现了一对多的灵活干预控制。

3.2 安全控制与攻击检测(Security control and attack detection)

受地理位置等因素的影响, 陆用运动体群集运动控制中的各传感器信息、指挥信息及控制信息都要基于网络系统进行传输。如果缺乏有效的安全措施, 网络系统将存在极大的安全隐患, 且很容易受到网络攻击。比如, 网络化控制系统的通讯信道很容易受到拒绝服务(denial-of-service, DoS)攻击, 受此影响网络系统中会发生严重的时延和丢包问题, 使控制系统的性能大大降低。因此, 陆用运动体群集运动的安全控制问题至关重要。

常见的网络攻击方式主要有3种: DoS攻击、重放攻击和欺骗攻击。DoS攻击是一种使系统资源无效化的攻击形式。具体来说, 攻击者会填满用户域或内核域内的缓冲区, 干扰共享的网络介质, 阻止设备之间的通信或改变路由协议。目前为止, 可以采用队列模型^[97-98]和伯努利模型^[99]对DoS攻击所造成的系统性能退化进行定量分析。用队列模型来模拟攻击行为时, 可以将原系统转化为一个带有时间延迟的系统。这样就可以利用传统的分析方法^[100-101]有效地解决系统的稳定性问题。而在伯努利框架下, DoS攻击和测量数据丢失的数学模型是相同的, 所以可以利用应对测量

数据丢失相似的方法来抵御DoS攻击. 重放攻击是一种对有效数据传输进行恶意重复或延迟的攻击形式. 例如在无线传感器网络中普遍存在的虫洞攻击^[102]中, 攻击者可以在两个端点之间创建通信链路(虫洞隧道), 以重放在不同区域观察到的消息. 重放攻击的特点是无需任何系统信息(如控制器信息和估计器信息等). 这种攻击方式可以被当作时变延迟来考虑, 其上界和变化率等等都是未知的. 欺骗攻击(又称虚假数据注入攻击)是一种对不同网络部件之间传输的数据包进行数据完整性修改的攻击形式. 例如Stuxnet蠕虫^[103]可以重放监控与数据采集系统中可编程逻辑控制器中的代码, 来欺骗系统偏离预期的行为. 针对不同的场景, 欺骗攻击可以有不同的建模方式. 文献[104]和[105]中分别提出了一种基于优化框架的稀疏攻击向量构造方式和一种基于不精确数学模型的虚假数据注入攻击方法. Hao等^[106]指出如果攻击的测量量超过某个值则可以达到隐蔽攻击的目的, 进而针对随机攻击和定点攻击两种场景分别对稀疏隐蔽攻击进行建模.

为了将网络攻击所造成的损失降到最低, 快速、准确的攻击识别技术是必不可少的. 在现有文献中, 具有代表性的攻击检测手段主要有4种: 贝叶斯检测、加权最小平方法、 χ^2 检测和故障检测与隔离技术. 贝叶斯检测被广泛应用于传感器网络数据融合中的攻击检测中^[107-108]. Kosut等^[109]提出了一种基于二元假设的贝叶斯检测器, 用于网络化控制系统的攻击检测中, 并研究了最大估计误差和最小检测概率之间的权衡问题. 当测量值被有色高斯噪声破坏时, Tang等^[110]提出了一种改进的似然比检测器, 来防御监控与数据采集系统中的虚假数据注入攻击. Chorppath等在文献[111]中提出了一种新的贝叶斯博弈框架来解决入侵检测问题. 加权最小平方法利用加权最小二乘观测器构造测量残差, 然后与预先设定的阈值进行比较, 以判断是否存在攻击. Deng等^[112]在加权最小二乘估计和双人零和博弈的基础上, 提出了一种最小费用防

御策略, 以保护系统不受虚假数据注入攻击. 针对攻击的稀疏性, Liu等在文献[113]中设计了一种检测机制, 通过分离网络系统的正常和异常状态来检测恶意攻击. χ^2 检测方法的核心是通过卡尔曼滤波器来检测不良数据和虚假数据. Rawat等在文献[114]中将余弦相似度匹配和 χ^2 检测器相结合, 对网络化控制系统中的虚假数据注入攻击进行检测. 故障检测与隔离是监测系统、识别故障发生的有效手段, 并能准确地判断故障类型及其位置. 它也可以被应用于网络化控制系统的攻击检测中. 文献[115]中提出了一种基于未知输入观测器的故障检测方法, 用于应对监控与数据采集系统的隐蔽式欺骗攻击检测. Alippi等在文献[116]中提出了一种不依赖于模型的检测方法. 这种方法的特点在于既能学习被测系统的正常状态, 又能从采集到的数据中获取故障字典.

相比于攻击检测技术而言, 针对陆用运动体群集运动的安全控制问题的研究尚处于起步阶段. 在现有的文献中, 研究者们提出了一些网络化控制系统中针对DoS攻击^[117-118]、欺骗攻击^[119]和重放攻击^[102]的初步安全控制方案. Dolk等在文献[117]中设计了一种事件触发控制器来抵御具有给定频率和持续时间特性的DoS攻击. Zhang和Shu等^[118]提出了一种对抗干扰攻击的最优调度方案, 可以使得具有能量约束下的线性二次高斯代价最小. 文献[119]中针对离散时间条件下带有受损传感器和网络攻击的多运动体系统, 提出了一种带事件触发的一致性弹性控制. 此外, 系统安全与稳定性的权衡问题也是值得深入研究的问题. 文献[120]和[121]中构建了一些攻击者-防御者博弈问题, 来分析双方的相互作用以及对稳定性的影响. 进一步, Zhang和Szwaykowska等在文献[122]中从理论角度提出并分析了一种调度算法, 它可以使得系统的鲁棒性、可调度性和功耗之间达到平衡. 文献[123]中引入了一种攻击-弹性协同控制策略, 在一定的最大可用功率比下, 对分布式节点的有效功率进行调节. 为了表述清晰, 在表1中对本节所涉及的攻击建模、检测和安全控制方法进行了总结.

表1 攻击建模、检测及安全控制方法

Table 1 Attack modeling, detection and security control

攻击类型	建模方法	检测方法	安全控制方法
DoS 攻击	队列模型 ^[97-98]	视为系统时延 ^[97-98]	事件触发控制器 ^[117]
	伯努利模型 ^[99]	视为测量数据丢失 ^[99]	最优调度方法 ^[118]
重放攻击	建模为时变延迟系统 ^[102]	贝叶斯检测 ^[107-108]	基于无源性理论的方法 ^[102]
欺骗攻击	稀疏攻击向量构造 ^[104,106] 建模为线性时变系统 ^[105]	贝叶斯检测 ^[109]	
		似然比检测 ^[110]	带事件触发的弹性控制 ^[119]
		贝叶斯博弈框架 ^[111]	
		加权最小平方法 ^[112-113]	
		χ^2 检测 ^[105,114] 故障检测与隔离技术 ^[115-116]	

3.3 非合作行为检测 (Non-cooperative behavior detection)

在陆用运动体群集运动控制中, 当节点无法正常执行协同控制任务时, 就表示其产生了非合作行为. 非合作行为主要包括3类^[124]: 毁坏型、失控型和干扰型. 毁坏型是指节点在运行过程中非正常地停止运动, 或是虽然有运动趋势, 但实际的状态却并未按预期发生改变. 产生此种非合作行为原因可能是节点受到外部攻击, 使得动力系统损毁, 或者是节点的能量耗尽, 失去动力来源. 失控型是指节点运动不受控制, 或是节点运动非常规地发生改变, 使得控制效果无法满足任务要求. 产生的原因可能是控制系统发生错误, 无法正常生成控制信息, 或者节点的动力系统与控制系统失去联系, 执行器无法获得正确的控制量. 干扰型是指节点出现大量无规则的运动, 实际运行状态与理论运行状态偏差过大, 已对系统的正常运行产生危害. 其原因可能是节点受强烈的外部随机干扰影响, 如地形过于崎岖, 或是节点执行元件的精度不足, 产生的随机误差太大等. 由于陆用运动体群集运动控制系统自身的分布式特性, 系统中缺少一个中心节点来统筹规划整个系统的行为, 这导致系统中一旦产生非合作节点, 其不利影响将随着通信扩散至整个系统中, 对系统的正常工作产生破坏. 因此, 非合作行为检测是提高群集运动控制系统安全性和可靠性的重要手段.

目前, 对非合作行为检测的研究主要集中于多运动体系统中的故障检测问题上. 依赖于现代控制理论的发展与应用, 基于模型的故障检测方法为高阶动态系统的故障检测问题提供了一种有力的解决工具^[125]. 然而, 由于该方法本质上具有集中式特性, 这导致其并不完全适用于多运动体系统, 因为多陆用运动体系统的协同控制通常是分布式的, 其中每个节点只能获得自身与邻居的信息^[126]. 为此, 研究基于模型的分布式故障检测算法就成为该领域的一个核心问题. 文献[127]将多运动体系统分解为多个互相连通的子系统, 并在此基础上设计了分布式的故障检测方案. Ferrari等^[128]将上述系统分解方法和分布式故障检测方法扩展应用至具有不确定性的非线性系统中.

文献[129]第1次将未知输入观测器引入多运动体故障检测领域, 并给出了对于带有故障信号的二阶系统分布式未知输入观测器设计方法. 文中还进一步指出, 若想观测某节点的某一状态是否出现故障, 则系统中所有节点的该状态必须可以测量, 否则未知输入观测器将无法设计. 该方法可以视为文献[127]中所提系统分解方法的一种特殊形式. 文献[130]则进一步研究了对于模型不精确的系统, 如何利用未知输入观测器对系统中具有微小变化量故障进行检测的方法. 通过分析系统模型在渐变故障影响下参数的变化, 给

出了未知输入观测器观测误差的表达式, 并通过进一步设计门限函数, 使得系统能够对渐变故障保持足够的敏感度, 进而检测出故障节点. Taha等^[131]将未知输入观测器应用于网络化控制系统, 给出了具有网络化特性的未知输入观测器的一般结构及其稳定性证明. 同时, 研究了通信时延对网络化控制系统和网络化未知输入观测器的影响, 从观测器设计的角度求得了系统所允许的通信时延最大值, 并给出了一种对通信时延有很强鲁棒性的观测器设计方法, 使得观测器对未知输入的敏感度始终保持最小.

除了基于未知输入观测器的方法, 其他传统的故障检测方法, 如基于卡尔曼滤波器的故障检测方法^[132]、基于滑模观测器的故障检测方法^[133]、基于部分空间的故障检测方法^[134]等, 都可以按照与文献[129]中所提方法类似的形式进行应用. 此外, 文献[135]中提出了借助多节点信息融合来提高检测结果可靠性的方法. 文献[136]则进一步研究了多体协同故障检测问题, 首次提出局部协同检测网络的概念并设计了基于混合 H_∞/H_2 优化的分布式协同故障检测算法, 有效克服了单节点检测性能不足的缺陷. 本领域的其他研究热点主要集中在解决多运动体系统自身的网络化控制结构给其故障检测问题带来的挑战上^[137], 如解决仅基于邻居相关状态信息的多运动体系统故障检测问题^[138-139], 解决节点间通信存在时滞、丢包条件下的多运动体系统故障检测问题^[140-141], 解决节点模型非齐次条件下的多运动体系统故障检测问题^[142], 等等.

3.4 问题与展望 (Problems and future work)

在当前有人/无人系统的共享控制技术研究, 如何衡量算法性能的优劣是亟待解决的一个问题. 所以未来在“一对一”和“一对多”合作行为控制的基础上, 要实现对人工干预的性能指标实现定量化, 使得干预的性能指标可调、可控. 现有的安全控制中, 对攻击方法和防御方法的研究是对立起来的, 忽略了它们之间的联系, 下一步应该考虑如何在一个控制系统的框架下实现攻击和防御的协调统一. 此外, 在现有非合作行为的检测方法中, 并没有充分利用协同过程中的冗余交互信息, 而这些信息如果使用得当, 可以用来协助对攻击行为进行检测. 所以在未来研究过程中可以试图探寻协同冗余交互信息与攻击行为检测之间的内在联系, 同时借助系统群体协同检测的优势克服单节点性能的不足, 降低外部干扰对检测结果的影响.

4 非线性随动系统的建模与控制 (Modeling and control for nonlinear servo systems)

随动系统主要是指坦克、火炮等的火控系统, 它们

作为陆用运动体协同控制的基础,具有十分重要的作用。火炮、坦克等在战场环境中易受冲击、振动等因素的影响,且火控系统驱动机构相对滞后,机械传动精度不高,其模型具有摩擦、齿隙、变形等非线性环节,并存在多种不确定性与干扰。总结起来,随动系统主要具有以下几大特点:典型的非线性特征,包括摩擦非线性、气动力系数变化、耦合非线性和驱动器电压死区等引起的输入非线性;强耦合特性,主要体现在系统的输入和输出间并不是一一对应的关系;不确定性,包括机械、电气或空气动力学参数的不确定性,以及不平衡负载、未建模动态和外扰动等。基于以上特点,需要对随动系统建立准确合理的数学描述,并在此基础上研究随动系统的控制策略和方法。

4.1 基于线性化思想的控制方法 (Linearization-based control method)

随动系统的模型复杂,非线性特性强,直接对其设计控制器难度较大。而在线性系统控制领域,已经有很多成熟的控制方法和稳定性分析手段可以直接加以利用,所以最直接的思路就是对随动系统模型进行线性化处理,以满足一些线性控制算法的应用条件。常用的基于线性化思想的控制方法主要有:小扰动线性化方法、增益调度方法、反馈线性化方法和轨迹线性化方法。

小扰动线性化方法是一种基于基准运动的控制方法。它的主要思想是在系统平衡点附近进行泰勒展开,然后利用频域或跟轨迹方法来设计控制律。其成立的必要条件之一就是扰动运动和基准运动要十分接近。这种方法设计简单,在工程上应用广泛^[143-144]。但小扰动线性化方法有一定的局限性,因为它在线性化过程中忽略了高阶非线性项,如果这些项包含了模型的重要信息,那么就会严重影响系统控制性能。

增益调度方法主要分为传统的增益调度方法和基于线性变参数(linear parameter varying, LPV)系统的增益调度方法。传统的增益调度方法思想是根据被控对象的特点将系统的工作空间划分为多个区域,对每个区域选取操作点进行小扰动线性化,并利用线性方法设计控制器,然后利用插值策略将各区域的控制器结合起来。但是传统的增益调度方法存在以下缺点:前期耗时太长,过于依赖设计者经验;控制参数会发生突变,容易引起系统的不稳定^[145];理论上无法保证系统在整个工作区内的鲁棒稳定性^[146]。针对这些不足,研究者们提出了基于LPV系统的增益调度方法。这种方法将原系统转化为一种动态特性依赖于外部实时可测参数的线性系统,称为LPV模型,并对其直接设计控制律,避免了传统方法中对局部控制器的切换和插值。并且基于LPV系统的增益调度方法大多使用基于范数的性能指标,使得控制器能在预先定义的

工作范围内保证系统的稳定性和性能指标要求。Lee等^[147]针对LPV系统设计控制器,利用特征值分配方法和二次型稳定原理保证了闭环系统的稳定性,减少了增益调度方法中所需控制器的个数。沈明辉等^[148]利用基于状态反馈的二次 H_∞ 性能稳定定理,提出了基于LPV系统的鲁棒增益调度控制方法,使得闭环系统具有满意的动态性能。虽然基于LPV系统的增益调度方法能够保证系统的鲁棒性和性能指标,但是相比于传统增益调度方法其计算量要大很多^[149]。

反馈线性化方法的主要思想是利用系统的状态或输出进行反馈变换,使原非线性系统简化为一个线性系统。与小扰动线性化方法对系统进行线性逼近不同,采用反馈线性化方法得到的线性系统是通过精确的状态变换或反馈得到的,因而具有一定的普遍性^[150]。但这种方法也存在一定的局限性:它要求系统的零动态是稳定的,且全部状态可测;当系统模型中有不确定参数或未建模动态时,不能保证其鲁棒性。针对这些问题,学者们提出了一些相应的解决方案。Wallner等^[151]利用输出重定义,保证了零动态稳定性。文献^[152]和文献^[153]利用有限时间收敛的高阶滑模观测器对系统的不可测状态进行观测,使其符合反馈线性化方法应用的条件。文献^[154]和文献^[155]分别将模型预测控制和滑模控制与反馈线性化方法相结合来提高系统的鲁棒性。

轨迹线性化控制(trjectory linearization control, TLC)是利用开环被控对象的伪逆将轨迹跟踪问题转化为一个时变非线性系统的跟踪误差调节问题,然后设计闭环的状态反馈调节律,使整个系统获得满意的控制性能。这种方法可以得到参考轨迹每一点的增益,可视为一种不需插值的增益调度控制律。相比于传统的增益调度方法,其鲁棒性和稳定性更好^[156]。文献^[156]和文献^[157]中分别将比例-积分反馈和比例-积分-积分反馈与TLC方法结合并进行了研究。虽然TLC方法在非线性跟踪和解耦控制方面有一定优势,但其对控制模型的依赖程度较高,当模型未知或不精确时,其控制性能会有所下降。针对这种问题,Liu等^[158]提出一种基于自适应神经网络的TLC方法,通过自适应地补偿模型不确定性来提高控制性能。朱亮等^[159]在TLC方法基础上,设计了干扰观测器对不确定性和外部干扰进行补偿,提高了系统的鲁棒性。

4.2 自适应鲁棒控制方法(Adaptive robust control method)

基于线性化思想的控制方法依赖被控对象的精确数学描述,缺乏对模型不确定性和外部扰动的主动补偿。而如果不考虑不确定性因素的影响,不但难以获得理想的实际效果,甚至可能造成系统不稳定^[160]。针对系统的不确定性和外部干扰,研究人员提出了许多

方法^[161-163], 如Lyapunov再设计、滑模控制、自适应鲁棒控制以及智能控制等, 来提高系统的控制性能。在这些方法中, 自适应和鲁棒思想始终贯穿其中。自适应鲁棒控制方法正是结合了自适应控制和滑模控制的优点, 同时利用Lyapunov稳定性分析理论和反馈线性化、backstepping等设计方法, 为解决不确定性条件下的随动系统控制问题提供了很好的解决方案。

自适应鲁棒控制(adaptive robust control, ARC)方法充分利用了自适应控制对参数的学习能力以及鲁棒控制对非线性不确定性的抑制补偿能力, 有效地结合了自适应控制与鲁棒控制的优点。其中鲁棒控制的存在可以保证系统快速收敛, 自适应控制可以实现对未知参数的学习, 减少参数不确定性的对系统的性能的影响^[160, 164]。对于低阶系统而言, 自适应鲁棒控制器结构直观明了, 参数调节方便, 在工程中得到了很好的应用, 同时针对应用中产生的局限性出现了很多改进的方法。Taghirad等^[165]将ARC方法应用于伺服系统控制中, 取得了很好的控制效果。为了得到参数估计真值, 从而能够对系统进行实时监控, 或进行故障检测、诊断等, 文献^[166]中提出了间接自适应鲁棒控制(IARC)方法。进一步, 为了提高IARC的瞬态响应速度, 文献^[167]中提出了基于梯度法参数估计的直接/间接混合自适应鲁棒控制(DIARC)方法。为了提高ARC对外部扰动的鲁棒性, Yang等^[168]将ARC与扰动观测器相结合, 得到了比传统ARC更好的抗扰动能力。

当被控对象为高阶非线性系统时, 自适应鲁棒控制器的设计都是基于backstepping方法的。但backstepping方法采用的是逐次迭代设计原理, 每一子系统的虚拟控制量的设计都要用到前一子系统虚拟控制量的导数。所以当系统的阶数较高时, 最终的控制量便会十分复杂, 即出现所谓的“项数膨胀”问题^[169]。针对这种问题, 文献^[170]提出利用一种被称为Command Filter的微分器逼近虚拟控制量的导数, 同时设计补偿器补偿逼近误差, 从而避免了经典backstepping方法中对虚拟控制量的重复求导。类似地, Yang等^[171]将动态面控制方法^[172]与ARC方法相结合, 利用一阶线性滤波器替代对虚拟控制量的求导运算。虽然这种方法只能保证误差系统的半全局稳定, 但通过合理选取控制器参数仍能保证跟踪误差在期望范围以内。当采用线性滤波器来近似虚拟控制量的求导运算时, 为了获得高精度的求导逼近效果, 需要选择非常小的滤波常数, 这会使得控制量在初始时刻变得非常大, 即所谓的初始时刻“峰值现象”, 在实际控制中容易引发系统不稳定。为了解决此问题, 可以结合文献^[173]和^[174]中的方法构造自适应鲁棒滑模动态面控制器, 通过引入一个滑模滤波器来替代虚拟控制量的求导运算, 保证跟踪误差能够收敛到一个已知的

任一小范围内, 且系统控制量在初始时刻不出现“峰值现象”。

前面所提到的ARC方法都是基于不确定非线性系统具有线性参数化的表示形式这个假设而设计的。而在一些随动系统中, 由于包含摩擦非线性等特殊的非线性特征, 其模型只能用非线性参数化的形式来进行表述。所以需要非线性参数化(nonlinearly parameterized, NLP)系统的控制问题进行研究。对于此问题, 常用的解决方案是将NLP系统进行线性参数化转换, 常用的方法包括: 最小-最大值法^[175]、泰勒展开近似法^[176]和基于Lipschitz的方法^[177-178]等。文献^[179]在文献^[177]的基础上利用非线性函数关于未知参数的Lipschitz特性, 对非线性参数化函数进行适当的放大, 将其转化为线性参数化的形式, 并给出了确定Lipschitz函数的一个准则; 同时, 结合自适应鲁棒滑模动态面控制方法设计了新的自适应律, 提出了一种新的针对非线性参数化不确定系统的自适应鲁棒控制律。除了以上线性参数化近似方法之外, Liu等^[180]提出了一种新的浸入及不变方法, 通过对不变流形的设计, 构造参数自适应律, 保证系统的渐近稳定。Qu等^[181]通过增加新的偏置向量函数的方法来设计自适应律, 将系统动态方程和估计误差的动态方程有机地结合起来, 使得系统能够实现全局渐近稳定。

4.3 问题与展望(Problems and future work)

在实际应用中, 许多非线性随动系统都是高阶系统。对于非线性高阶系统来说, 目前的控制器设计过程和最终表达式都过于复杂。所以在实际应用过程中都要对系统的数学模型做一定程度的简化, 如降阶、忽略小干扰, 或利用线性近似、忽略非线性特性等方法来进行控制器的设计与稳定性分析。然而对于本质上的高阶系统, 这样的控制效果将难以保证。因此, 需要研究针对若干典型高阶、柔性和存在复杂强干扰的系统的建模方法, 完善与发展基于特征和数据的复杂系统建模理论, 推动满足现实作战需求, 且能够抗强干扰, 并对建模误差有较高容忍度的综合集成控制器设计理论的发展。

5 结论(Conclusions)

陆军在战争中肩负着快速、持续控制地面战场的重大使命, 是保卫领土完整和国家安全的重要力量。从控制科学的角度出发, 将智能控制和多智能体协同等理论相结合, 可大幅提高陆用运动体多系统协同的指挥与控制效能, 满足未来的作战需求。本文就陆用运动体多系统协同中的智能优化与控制问题, 从协调决策智能化、高速系统可控化、群集控制智能化和火力控制精确化4个方面分别阐述了涉及指挥控制系统、火力控制系统和武器平台控制系统的先进控制理论和方法。伴随着军事技术装备的日新月异, 陆用运

动体的多系统协同必将推动新一轮的战争模式变革。相应地,这也会对智能控制与协同控制带来更多的挑战。

参考文献(References):

- [1] ZHENG Jinsheng. *Research and Application of Artillery Firing Theory* [M]. Beijing: Liberation Army Press, 2002.
(郑津生. 炮兵射击理论研究与应[M]. 北京: 解放军出版社, 2002.)
- [2] HOSEIN P A, ATHANS M. *Some analytical results for the dynamic weapon-target allocation problem* [R]. Boston: MIT Laboratory for Information and Decision Systems with Partial Support, 1990: 1 – 28.
- [3] LEE Z J, SU S F, LEE C Y. Efficiently solving general weapon-target assignment problem by genetic algorithms with greedy eugenics [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2003, 33(1): 113 – 121.
- [4] LOTTER D P, VAN VUUREN J H. A tri-objective, dynamic weapon assignment model for surface-based air defence [J]. *ORiON*, 2016, 32(1): 1 – 22.
- [5] XIN B, CHEN J, ZHANG J, et al. Efficient decision makings for dynamic weapon-target assignment by virtual permutation and tabu search heuristics [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, 2010, 40(6): 649 – 662.
- [6] HAN Songchen. *Stochastic Theory and Method for Effectiveness Analysis of Missile Weapon Systems* [M]. Beijing: National Defense Industry Publication, 2001.
(韩松臣. 导弹武器系统效能分析的随机理论方法 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.)
- [7] MATLIN S. A review of the literature on the missile-allocation problem [J]. *Operations Research*, 1970, 18(2): 334 – 373.
- [8] LEE Z J, LEE W L. A hybrid search algorithm of ant colony optimization and genetic algorithm applied to weapon-target assignment problems [C] // *Proceedings of the International Conference on Intelligent Data Engineering and Automated Learning*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2003: 278 – 285.
- [9] XIN B, CHEN J, PENG Z, et al. An efficient rule-based constructive heuristic to solve dynamic weapon-target assignment problem [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, 2011, 41(3): 598 – 606.
- [10] SAHIN M A, LEBLEBICIOGLU K. Approximating the optimal mapping for weapon target assignment by fuzzy reasoning [J]. *Information Sciences*, 2014, 255: 30 – 44.
- [11] LOTTER D P, NIEUWOUDT I, VAN VUUREN J H. A multiobjective approach towards weapon assignment in a ground-based air defence environment [J]. *ORiON*, 2013, 29(1): 31 – 54.
- [12] LOTTER D P, VAN VUUREN J H. Weapon assignment decision support in a surface-based air defence environment [J]. *Military Operations Research*, 2014: 1 – 27.
- [13] LI J, CHEN J, XIN B. Efficiently solving multi-objective dynamic weapon-target assignment problems by NSGA-II [C] // *Proceedings of the 34th Chinese Control Conference*. Hangzhou, China: IEEE, 2015: 2556 – 2561.
- [14] LI J, CHEN J, XIN B, et al. Solving multi-objective multi-stage weapon target assignment problem via adaptive NSGA-II and adaptive MOEA/D: A comparison study [C] // *Proceedings of the 2015 IEEE Congress on Evolutionary Computation*. Sendai, Japan: IEEE, 2015: 3132 – 3139.
- [15] LI J, CHEN J, XIN B, et al. Efficient multi-objective evolutionary algorithms for solving the multi-stage weapon target assignment problem: A comparison study [C] // *Proceedings of the 2017 IEEE Congress on Evolutionary Computation*. San Sebastian, Spain: IEEE, 2017: 435 – 442.
- [16] LI J, CHEN J, XIN B, et al. Solving the uncertain multi-objective multi-stage weapon target assignment problem via MOEA/D-AWA [C] // *Proceedings of the 2016 IEEE Congress on Evolutionary Computation*. Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2016: 4934 – 4941.
- [17] AGRAWAL R, IMIELINSKI T, SWAMI A. Mining association rules between sets of items in large databases [C] // *Proceedings of the 1993 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*. Washington DC, USA: ACM, 1993: 207–216.
- [18] AGRAWAL R, SRIKANT R. Fast algorithms for mining association rules [C] // *Proceedings of the 20th International Conference on Very Large Data Bases*. San Francisco, CA, USA: ACM, 1994: 487 – 499.
- [19] SAVASERE A, OMIECINSKI E, NAVATHE S B. An efficient algorithm for mining association rules in large databases [C] // *Proceedings of the 21st International Conference on Very Large Data Bases*. San Francisco, CA, USA: ACM, 1995: 432 – 444.
- [20] TOIVONEN H. Sampling large databases for association rules [C] // *Proceedings of the 22nd International Conference on Very Large Data Bases*. San Francisco, CA, USA: ACM, 1996: 134 – 145.
- [21] HAN J, PEI J, YIN Y. Mining frequent patterns without candidate generation [C] // *Proceedings of the 2000 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*. Dallas, Texas, USA: ACM, 2000: 1 – 12.
- [22] AGRAWAL R, SHAFER J C. Parallel mining of association rules [J]. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 1996, 8(6): 962 – 969.
- [23] CHEUNG D W, HAN J, NG V T, et al. A fast distributed algorithm for mining association rules [C] // *Proceedings of the 4th International Conference on Parallel and Distributed Information Systems*. Miami Beach, FL, USA: IEEE, 1996: 31 – 42.
- [24] INOKUCHI A, WASHIO T, MOTODA H. An apriori-based algorithm for mining frequent substructures from graph data [C] // *Proceedings of the European Conference on Principles of Data Mining and Knowledge Discovery*. Lyon, France: Springer, 2000: 13 – 23.
- [25] KURAMOCHI M, KARYPIS G. Frequent subgraph discovery [C] // *Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Data Mining*. San Jose, CA, USA: IEEE, 2001: 313 – 320.
- [26] YAN X, HAN J. Gspan: Graph-based substructure pattern mining [C] // *Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Data Mining*. Maebashi, Japan: IEEE, 2002: 721 – 724.
- [27] ZOU Zhaonian, LI Jiangzhong, GAO Hong, et al. Mining frequent subgraph patterns from uncertain graphs [J]. *Journal of Software*, 2009, 20(11): 2965 – 2976.
(邹兆年, 李建中, 高宏, 等. 从不确定图中挖掘频繁子图模式 [J]. 软件学报, 2009, 20(11): 2965 – 2976.)
- [28] HU Jian, HE Linbo, MAO Yimin, et al. Research of improved mining frequent subgraph patterns in uncertain graph databases [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2015, 51(3): 112–116.
(胡健, 何林波, 毛伊敏, 等. 挖掘不确定频繁子图的改进算法的研究 [J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(3): 112–116.)
- [29] CHI Y, WANG H, YU P S, et al. Moment: Maintaining closed frequent itemsets over a stream sliding window [C] // *Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Data Mining*. Brighton, UK: IEEE, 2004: 59 – 66.
- [30] LIU Xuejun, XU Hongbing, DONG Yisheng, et al. Mining frequent closed patterns from a sliding window over data streams [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2006, 43(10): 1738 –

1743.
(刘学军, 徐宏炳, 董逸生, 等. 基于滑动窗口的数据流闭合频繁模式的挖掘 [J]. 计算机研究与发展, 2006, 43(10): 1738 – 1743.)
- [31] ZHAO C, LIN X, ZHU Q. Incremental updating algorithm of mining association rules based on partial support tree [J]. *Journal of Tsinghua University Science and Technology*, 2011, 51(12): 1814 – 1818.
- [32] GOULBOURNE G, COENEN F, LENG P. Algorithms for computing association rules using a partial-support tree [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2000, 13(2): 141 – 149.
- [33] VO B, LE T, HONG T P, et al. An effective approach for maintenance of pre-large-based frequent-itemset lattice in incremental mining [J]. *Applied Intelligence*, 2014, 41(3): 759 – 775.
- [34] THURASINGHAM B M, CERUTI M G. Understanding data mining and applying it to command, control, communications and intelligence environments [C] // *Proceedings of the 24th Annual International Computer Software and Applications Conference*. Taiwan, China: IEEE, 2000: 171 – 175.
- [35] STONE S. Data to decisions for cyberspace operations [J]. *Military Cyber Affairs*, 2015, DOI: 10.5038/2378-0789.1.1.1002.
- [36] LEIFLER O, ERIKSSON H. Message classification as a basis for studying command and control communications—an evaluation of machine learning approaches [J]. *Journal of Intelligent Information Systems*, 2012, 38(2): 299 – 320.
- [37] MOTTA A A, ALVES A S, EBECKEN N F F. Data mining in military systems [J]. *WIT Transactions on Modelling and Simulation*, 2007, 45: 171 – 180.
- [38] LI J, PAN Q, HONG B, et al. Multi-robot cooperative pursuit based on association rule data mining [C] // *Proceedings of the 6th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*. Tianjin, China: IEEE, 2009: 303 – 308.
- [39] THIAGARAJAN R, RAHMAN M, GOSSINK D, et al. A data mining approach to improve military demand forecasting [J]. *Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing Research*, 2014, 4(3): 205 – 214.
- [40] VANHILST M, NOTKIN D. Using role components in implement collaboration-based designs [J]. *ACM SIGPLAN Notices*, 1996, 31(10): 359 – 369.
- [41] KRISTENSEN B B. *Object-oriented Modeling with Roles* [M]. London: Springer, 1996: 57 – 71.
- [42] SATTERFIELD B, CHOIX H, HOUSTEN D. *Role based operations* [M] // *Multi-robot Systems: From Swarms to Intelligent Automata*. Volume III. Dordrecht, The Netherlands: Springer, 2005: 283–289.
- [43] ZHANG H, CHEN J, FANG H, et al. A role-based POMDPs approach for decentralized implicit cooperation of multiple agents [C] // *Proceedings of the 13th IEEE International Conference on Control & Automation*. Ohrid, Macedonia: IEEE, 2017: 496 – 501.
- [44] RAVARY F, LECOUTEY E, KAMINSKI G, et al. Individual experience alone can generate lasting division of labor in ants [J]. *Current Biology*, 2007, 17(15): 1308 – 1312.
- [45] PANKIW T, PAGE JR R E. Response thresholds to sucrose predict foraging division of labor in honeybees [J]. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 2000, 47(4): 265 – 267.
- [46] MA Z, LIU Z, CHEN Z. Distributed formation control for a multi-agent system with dynamic role assignment [C] // *Proceedings of the 34th Chinese Control Conference*. Hangzhou, China: IEEE, 2015: 7118 – 7123.
- [47] XU D, XIA K. Role assignment, non-communicative multi-agent coordination in dynamic environments based on the situation calculus [C] // *Proceedings of the WRI Global Congress on Intelligent Systems*. Xiamen, China: IEEE, 2009: 89 – 93.
- [48] CAMPBELL A, WU A S, GARELD K, et al. Empirical study on the effects of synthetic social structures on teams of autonomous vehicles [C] // *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control*. FL, USA: IEEE, 2006: 440 – 445.
- [49] LABELLA T H, DORIGO M, DENEUBOURG J L. Division of labor in a group of robots inspired by ants' foraging behavior [J]. *ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems*, 2006, 1(1): 4 – 25.
- [50] ZHAO Qilun, CHEN Jian, DONG Xiwang, et al. Cooperative guidance law for heterogeneous missiles intercepting hypersonic weapon [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2016, 37(3): 936 – 948.
(赵启伦, 陈建, 董希旺, 等. 拦截高超声速目标的异类导弹协同制导律研究 [J]. 航空学报, 2016, 37(3): 936 – 948.)
- [51] BAI Yi. The mainstay of the US Army's future combat system – the NLOS-LS weapon system [J]. *Technology Foundation of National Defence*, 2003, (3): 33 – 35.
(白毅. 美军未来作战系统的支柱 – “网火” 武器系统 [J]. 国防技术基础, 2003, (3): 33 – 35.)
- [52] LIU Tonglin. K-141 nuclear submarine and P-700 anti ship cruise missile [J]. *Winged Missiles Journal*, 2002, (3): 34 – 37.
(刘桐林. 库尔斯克核潜艇与花岗岩反舰巡航导弹 [J]. 飞航导弹, 2002, (3): 34 – 37.)
- [53] XIAO Zhibin, HE Ran, ZHAO Chao. Cooperative combat of missile formation: concepts and key technologies [J]. *Winged Missiles Journal*, 2013, (1): 1 – 3.
(肖志斌, 何冉, 赵超. 导弹编队协同作战的概念及其关键技术 [J]. 航天电子对抗, 2013, (1): 1 – 3.)
- [54] JEON I S, LEE J I, TAHK M J. Impact-time-control guidance law for anti-ship missiles [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2006, 14(2): 260 – 266.
- [55] LEE J I, JEON I S, TAHK M J. Guidance law to control impact time and angle [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2007, 43(1): 301 – 310.
- [56] WANG Xiaofang, LIN Hai. A guidance law for multiple missiles combating cooperatively under multiple constraints [J]. *Journal of Ballistics*, 2012, 24(3): 59 – 64.
(王晓芳, 林海. 多约束条件下导弹协同作战制导律 [J]. 弹道学报, 2012, 24(3): 59 – 64.)
- [57] ZHANG Yougen, ZHANG You'an, SHI Jianhong, et al. Research on cooperative guidance for multi-missiles based on bi-arcs [J]. *Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute*, 2009, 24(5): 537 – 542.
(张友根, 张友安, 施建洪, 等. 基于双圆弧原理的协同制导律研究 [J]. 海军航空工程学院学报, 2009, 24(5): 537 – 542.)
- [58] ZHANG You'an, MA Guoxin, WANG Xingping. Time-cooperative guidance for multi-missiles: a leader-follower strategy [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 30(6): 1109 – 1118.
(张友安, 马国欣, 王兴平. 多导弹时间协同制导: 一种领弹-被领弹策略 [J]. 航空学报, 2009, 30(6): 1109 – 1118.)
- [59] ZHAO Shiyu, ZHOU Rui. Multi-missile cooperative guidance using coordination variables [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2008, 29(6): 1605 – 1611.
(赵世钰, 周锐. 基于协调变量的多导弹协同制导 [J]. 航空学报, 2008, 29(6): 1605 – 1611.)
- [60] ZHAO E, WANG S, CHAO T, et al. Multiple missiles cooperative guidance based on leader-follower strategy [C] // *Proceedings of the 2014 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference*. Yantai, China: IEEE, 2014: 1163 – 1167.
- [61] ZHAO E, TAO C, WANG S, et al. An adaptive parameter cooperative guidance law for multiple flight vehicles [C] // *Proceedings of*

- the AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference. Dallas, TX, USA: AIAA, 2015: 1 – 10.
- [62] MA Guoxin, ZHANG Yougen, ZHANG Youan. Leader-controlled three-dimensional guidance law for time-cooperative multi-missiles [J]. *Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute*, 2013, 28(1): 11 – 16.
(马国欣, 张友根, 张友安. 领弹控制下的多导弹时间协同三维制导律 [J]. 海军航空工程学院学报, 2013, 28(1): 11 – 16.)
- [63] ZHAO J, ZHOU R. Unified approach to cooperative guidance laws against stationary and maneuvering targets [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2015, 81(4): 1635 – 1647.
- [64] ZHAO J, ZHOU R, DONG Z. Three-dimensional cooperative guidance laws against stationary and maneuvering targets [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2015, 28(4): 1104 – 1120.
- [65] ZENG J, DOU L, XIN B. Cooperative salvo attack using guidance law of multiple missiles [J]. *Journal of Advanced Computational Intelligence & Intelligent Informatics*, 2015, 19: 301 – 306.
- [66] MA Guoxin, ZHANG You'an. Time-cooperative distributed guidance law design for multi-missiles [J]. *Control and Decision*, 2014, 29(5): 843 – 847.
(马国欣, 张友安. 多导弹时间协同分布式导引律设计 [J]. 控制与决策, 2014, 29(5): 843 – 847.)
- [67] SUN Xuejiao, ZHOU Rui, WU Jiang, et al. Distributed cooperative guidance and control for multiple missiles [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2014, 40(1): 120 – 124.
(孙雪娇, 周锐, 吴江, 等. 多导弹分布式协同制导与控制方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(1): 120 – 124.)
- [68] PENG Chen, LIU Xing, WU Sentang, et al. Consensus problems in distributed cooperative terminal guidance time of multi-missiles [J]. *Control and Decision*, 2010, 25(10): 1557 – 1561.
(彭琛, 刘星, 吴森堂, 等. 多弹分布式协同末制导时间一致性研究 [J]. 控制与决策, 2010, 25(10): 1557 – 1561.)
- [69] WEI X, WANG Y, DONG S, et al. A three-dimensional cooperative guidance law of multimissile system [J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2015, DOI: 10.1155/2015/479427.
- [70] HOU D, WANG Q, SUN X, et al. Finite-time cooperative guidance laws for multiple missiles with acceleration saturation constraints [J]. *IET Control Theory & Applications*, 2015, 9(10): 1525 – 1535.
- [71] MA Peibei, ZHANG Youan, YU Fei, et al. Design of multi-missile formation hold controller [J]. *Flight Dynamics*, 2010, 28(3): 69 – 73.
(马培蓓, 张友安, 于飞, 等. 多导弹编队保持控制器设计 [J]. 飞行力学, 2010, 28(3): 69 – 73.)
- [72] CUI N, WEI C, GUO J, et al. Research on missile formation control system [C] // *Proceedings of the 2009 International Conference on Mechatronics and Automation*. Changchun, China: IEEE, 2009: 4197 – 4202.
- [73] MU X, DU Y, LIU X, et al. Behavior-based formation control of multi-missiles [C] // *Proceedings of Chinese Control and Decision Conference*. Guilin, China: IEEE, 2009: 5019 – 5023.
- [74] WEI Changzhu, GUO Jifeng, CUI Naigang. Research on the missile formation keeping optimal control for cooperative engagement [J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(4): 1043 – 1050.
(韦常柱, 郭继峰, 崔乃刚. 导弹协同作战编队队形最优保持控制器设计 [J]. 宇航学报, 2010, 31(4): 1043 – 1050.)
- [75] WEI C, SHEN Y, MA X, et al. Optimal formation keeping control in missile cooperative engagement [J]. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2012, 84(6): 376 – 389.
- [76] DU Yang, WU Sentang. Transformation control for the formation of multiple cruise missiles [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2014, 40(2): 240 – 245.
(杜阳, 吴森堂. 飞航导弹编队队形变换控制器设计 [J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(2): 240 – 245.)
- [77] WANG Y, WANG Y, SUN M, et al. Neural networks based formation control of anti-ship missiles with constant velocity [C] // *Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Computer and Information Technology; Ubiquitous Computing and Communications; Dependable, Autonomic and Secure Computing; Pervasive Intelligence and Computing*. Liverpool, UK: IEEE, 2015: 2151 – 2156.
- [78] MA Peibei, JI Jun. Three-dimensional multi-missile formation control [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2010, 31(8): 1660 – 1666.
(马培蓓, 纪军. 多导弹三维编队控制 [J]. 航空学报, 2010, 31(8): 1660 – 1666.)
- [79] ZHANG Lei, FANG Yangwang, DIAO Xinghua, et al. Design of nonlinear optimal controller for multi-missile formation [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2014, 40(3): 401 – 406.
(张磊, 方洋旺, 刁兴华, 等. 多导弹协同攻击编队非线性最优控制器设计 [J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(3): 401 – 406.)
- [80] LIU Xinke, LI Dapeng, TAN Lezu. Research on missile formation control based on integrated guidance and control [J]. *Fire Control & Command Control*, 2011, 8(8): 208 – 210.
(刘新科, 李大鹏, 谭乐祖. 基于制导与控制一体化的导弹编队队形控制 [J]. 火力与指挥控制, 2011, 8(8): 208 – 210.)
- [81] WANG X, FANG H, DOU L, et al. Integrated distributed formation flight control with aerodynamic constraints on attitude and control surfaces [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2018, 91(4): 2331 – 2345.
- [82] WANG X, FANG H, DOU L, et al. Integrated 3-D flight trajectory tracking control with aerodynamic constraints on attitude and control surfaces [J]. *Asian Journal of Control*, 2018, DOI: 10.1002/asjc.1696.
- [83] WEI C, GUO J, LU B, et al. Adaptive control for missile formation keeping under leader information unavailability [C] // *Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA)*. Hangzhou, China: IEEE, 2013: 902 – 907.
- [84] LIU Y, NEJAT G. Robotic urban search and rescue: a survey from the control perspective [J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2013, 72(2): 147 – 165.
- [85] PRATT K S, MURPHY R R. Protection from human error: Guarded motion methodologies for mobile robots [J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2012, 19(4): 36 – 47.
- [86] CACACE J, FINZI A, LIPPIELLO V. A mixed-initiative control system for an aerial service vehicle supported by force feedback [C] // *2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Chicago, IL, USA: IEEE, 2014: 1230 – 1235.
- [87] CHIPALKATTY R, DAEPP H, EGERSTEDT M, et al. Human-in-the-loop: MPC for shared control of a quadruped rescue robot [C] // *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. San Francisco, CA, USA: IEEE, 2011: 4556 – 4561.
- [88] LOIZOU S G, KUMAR V. Mixed initiative control of autonomous vehicles [C] // *2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Roma, Italy: IEEE, 2007: 1431 – 1436.
- [89] CHIPALKATTY R, EGERSTEDT M. Human-in-the-loop: terminal constraint receding horizon control with human inputs [C] // *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Anchorage, AK, USA: IEEE, 2010: 2712 – 2717.
- [90] RODRIGUEZ-SEDA E J, TROY J J, ERIGNAC C A, et al. Bilateral teleoperation of multiple mobile agents: Coordinated motion and collision avoidance [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2010, 18(4): 984 – 992.
- [91] FANG H, SHANG C, CHEN J. An optimization-based shared control framework with applications in multi-robot systems [J]. *Science China Information Sciences*, 2018, 61(1): 014201:1 – 014201:3.

- [92] FRANCHI A, SECCHI C, RYLL M, et al. Shared control: balancing autonomy and human assistance with a group of quadrotor UAVs [J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2012, 19(3): 57 – 68.
- [93] LEE D, FRANCHI A, GIORDANO P R, et al. Haptic teleoperation of multiple unmanned aerial vehicles over the internet [C] // *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Shanghai, China: IEEE, 2011: 1341 – 1347.
- [94] FRANCHI A, BULTHOFF H H, GIORDANO P R. Distributed online leader selection in the bilateral teleoperation of multiple UAVs [C] // *The 2011 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*. Orlando, FL, USA: IEEE, 2011: 3559 – 3565.
- [95] CHAPMAN A, MESBAHI M. Semi-autonomous consensus: network measures and adaptive trees [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2013, 58(1): 19 – 31.
- [96] SHANG C, FANG H, CHEN J, et al. Interacting with multi-agent systems through intention field based shared control methods [C] // *Proceedings of the 11th Asian Control Conference*. City of Gold Coast, Australia: IEEE, 2017: 150 – 155.
- [97] LONG M, WU C H, HUNG J Y. Denial of service attacks on network-based control systems: impact and mitigation [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2005, 1(2): 85 – 96.
- [98] PANG Z H, LIU G P, DONG Z. Secure networked control systems under denial of service attacks [J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2011, 44(1): 8908 – 8913.
- [99] AMIN S, SCHWARTZ G A, SASTRY S S. Security of interdependent and identical networked control systems [J]. *Automatica*, 2013, 49(1): 186 – 192.
- [100] ZHANG X M, HAN Q L. New Lyapunov-Krasovskii functionals for global asymptotic stability of delayed neural networks [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2009, 20(3): 533 – 539.
- [101] ZHANG X M, HAN Q L. Global asymptotic stability analysis for delayed neural networks using a matrix-based quadratic convex approach [J]. *Neural Networks*, 2014, 54: 57 – 69.
- [102] LEE P, CLARK A, BUSHNELL L, et al. A passivity framework for modeling and mitigating wormhole attacks on networked control systems [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2014, 59(12): 3224 – 3237.
- [103] AMIN S, LITRICO X, SASTRY S, et al. Cyber security of water SCADA systems – Part I: Analysis and experimentation of stealthy deception attacks [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2013, 21(5): 1963 – 1970.
- [104] KIM T T, POOR H V. Strategic protection against data injection attacks on power grids [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2011, 2(2): 326 – 333.
- [105] HOU F, SUN J. False data injection attacks in cyber-physical systems based on inaccurate model [C] // *The 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Beijing, China: IEEE, 2017: 5791 – 5796.
- [106] HAO J, PIECHOCKI R J, KALESHI D, et al. Sparse malicious false data injection attacks and defense mechanisms in smart grids [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2015, 11(5): 1 – 12.
- [107] KAILKHURA B, HAN Y S, BRAHMA S, et al. Distributed Bayesian detection in the presence of Byzantine data [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2015, 63(19): 5250 – 5263.
- [108] KAILKHURA B, HAN Y S, BRAHMA S, et al. Asymptotic analysis of distributed bayesian detection with byzantine data [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2015, 22(5): 608 – 612.
- [109] KOSUT O, JIA L, THOMAS R J, et al. Malicious data attacks on the smart grid [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2011, 2(4): 645 – 658.
- [110] TANG B, YAN J, KAY S, et al. Detection of false data injection attacks in smart grid under colored Gaussian noise [C] // *Proceedings of IEEE Conference on Communications and Network Security*. Philadelphia, PA, USA: IEEE, 2016: 172 – 179.
- [111] CHORPPATH A K, ALPCAN T, BOCHE H. Bayesian mechanisms and detection methods for wireless network with malicious users [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2016, 15(10): 2452 – 2465.
- [112] DENG R, XIAO G, LU R. Defending against false data injection attacks on power system state estimation [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 13(1): 198 – 207.
- [113] LIU L, ESMALIFALAK M, DING Q, et al. Detecting false data injection attacks on power grid by sparse optimization [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2014, 5(2): 612 – 621.
- [114] RAWAT D B, BAJRACHARYA C. Detection of false data injection attacks in smart grid communication systems [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2015, 22(10): 1652 – 1656.
- [115] AMIN S, LITRICO X, SASTRY S S, et al. Cyber security of water SCADA systems, Part II: Attack detection using enhanced hydrodynamic models [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2013, 21(5): 1679 – 1693.
- [116] ALIPPI C, NTALAMPIRAS S, ROVERI M. Model-free fault detection and isolation in large-scale cyber-physical systems [J]. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence*, 2017, 1(1): 61 – 71.
- [117] DOLK V S, TESI P, DE PERSIS C, et al. Event-triggered control systems under denial-of-service attacks [J]. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 2017, 4(1): 93 – 105.
- [118] ZHANG H, SHU Y, CHENG P, et al. Privacy and performance trade-off in cyber-physical systems [J]. *IEEE Network*, 2016, 30(2): 62 – 66.
- [119] DING D, WANG Z, HO D W C, et al. Observer-based event-triggering consensus control for multiagent systems with lossy sensors and cyber-attacks [J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2017, 47(8): 1936 – 1947.
- [120] FARRAJ A, HAMMAD E, AL DAOUD A, et al. A game-theoretic analysis of cyber switching attacks and mitigation in smart grid systems [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 7(4): 1846 – 1855.
- [121] LI Y, QUEVEDO D E, DEY S, et al. A game-theoretic approach to fake-acknowledgment attack on cyber-physical systems [J]. *IEEE Transactions on Signal and Information Processing over Networks*, 2017, 3(1): 1 – 11.
- [122] ZHANG F, SZWAYKOWSKA K, WOLF W, et al. Task scheduling for control oriented requirements for cyber-physical systems [C] // *Proceedings of the 2008 Real-Time Systems Symposium*. Barcelona, XSpain: IEEE, 2008: 47 – 56.
- [123] LIU Y, XIN H, QU Z, et al. An attack-resilient cooperative control strategy of multiple distributed generators in distribution networks [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 7(6): 2923 – 2932.
- [124] CHEN Jie, FANG Hao, XIN Bin. *Cooperative Flocking Control of Multi-Agent Systems* [M]. Beijing: Science Press, 2017. (陈杰, 方浩, 辛斌. 多智能体系统的协同群集运动控制 [M]. 北京: 科学出版社, 2017.)
- [125] CHEN J, PATTON R J. *Robust Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems* [M]. New York: Springer Science & Business Media, 2012.
- [126] MESKIN N, KHORASANI K. Actuator fault detection and isolation for a network of unmanned vehicles [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, 54(4): 835 – 840.

- [127] FERRARI R M G, PARISINI T, POLYCARPOU M M. Distributed fault diagnosis with overlapping decompositions: an adaptive approximation approach [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, 54(4): 794 – 799.
- [128] FERRARI R M G, PARISINI T, POLYCARPOU M M. Distributed fault detection and isolation of large-scale discrete-time nonlinear systems: an adaptive approximation approach [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2012, 57(2): 275 – 290.
- [129] SHAMES I, TEIXEIRA A M H, SANDBERG H, et al. Distributed fault detection for interconnected second-order systems [J]. *Automatica*, 2011, 47(12): 2757 – 2764.
- [130] SHAMES I, TEIXEIRA A M H, SANDBERG H, et al. Distributed fault detection and isolation with imprecise network models [C] // *American Control Conference*. Montreal, QC, Canada: IEEE, 2012: 5906 – 5911.
- [131] TAHA A F, ELMAHDI A, PANCHAL J H, et al. Unknown input observer design and analysis for networked control systems [J]. *International Journal of Control*, 2015, 88(5): 920 – 934.
- [132] HE X, WANG Z, LIU Y, et al. Least-squares fault detection and diagnosis for networked sensing systems using a direct state estimation approach [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2013, 9(3): 1670 – 1679.
- [133] ZONG Q, ZENG F, LIU W, et al. Sliding mode observer-based fault detection of distributed networked control systems with time delay [J]. *Circuits & Systems and Signal Processing*, 2012, 31(1): 203 – 222.
- [134] ZHONG M, SONG Y, DING S X. Parity space-based fault detection for linear discrete time-varying systems with unknown input [J]. *Automatica*, 2015, 59: 120 – 126.
- [135] LI Y, FANG H, CHEN J, et al. Distributed fault detection and isolation for multi-agent systems using relative information [C] // *Proceedings of 2016 American Control Conference*. Boston, MA, USA: IEEE, 2016: 5939 – 5944.
- [136] LI Y, FANG H, CHEN J, et al. Distributed cooperative fault detection for multi-agent systems: a mixed H_∞/H_2 optimization approach [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, DOI: 10.1109/TIE.2017.2786235.
- [137] GAO Z, CECATI C, DING S X. A survey of fault diagnosis and fault-tolerant techniques, Part I: fault diagnosis with model-based and signal-based approaches [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(6): 3757 – 3767.
- [138] MENON P P, EDWARDS C. Robust fault estimation using relative information in linear multi-agent networks [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2014, 59(2): 477 – 482.
- [139] ZUO Z, ZHANG J, WANG Y. Adaptive fault-tolerant tracking control for linear and Lipschitz nonlinear multi-agent systems [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(6): 3923 – 3931.
- [140] MESKIN N, KHORASANI K. Fault detection and isolation of distributed time-delay systems [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, 54(11): 2680 – 2685.
- [141] YAN H, QIAN F, ZHANG H, et al. H_∞ Fault detection for networked mechanical spring-mass systems with incomplete information [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(9): 5622 – 5631.
- [142] DAVOODI M R, KHORASANI K, TALEBI H A, et al. Distributed fault detection and isolation filter design for a network of heterogeneous multiagent systems [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2014, 22(3): 1061 – 1069.
- [143] DAVIDSON J, LALLMAN F, MCMINN J, et al. Flight control laws for NASA's Hyper-X research vehicle [C] // *Proceedings of Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*. Portland, OR, USA: AIAA, 1999: 4124.
- [144] RUTH M, FERNANDEZ J, TRACY C. X-34 auto-landing guidance, navigation and control [C] // *Proceedings of the 24th Annual AAS Rocky Mountain Guidance and Control Conference*. Breckenridge, CO, USA: AAS, 2001: 171 – 192.
- [145] SHAMMA J S, ATHANS M. Gain scheduling: potential hazards and possible remedies [J]. *IEEE Control Systems*, 1992, 12(3): 101 – 107.
- [146] SHAMMA J S, ATHANS M. Guaranteed properties of gain scheduled control for linear parameter-varying plants [J]. *Automatica*, 1991, 27(3): 559 – 564.
- [147] LEE C H, SHIN M H, CHUNG M J. A design of gain-scheduled control for a linear parameter varying system: an application to flight control [J]. *Control Engineering Practice*, 2001, 9(1): 11 – 21.
- [148] SHEN Minghui, CHEN Lei, WU Ruilin, et al. The design of the gain scheduled robust attitude control system of the endoatmospheric kinetic interceptor [J]. *Journal of Astronautics*, 2007, 28(3): 562 – 565.
(沈明辉, 陈磊, 吴瑞林, 等. 大气层内动能拦截弹的变增益鲁棒姿态控制系统设计研究 [J]. 宇航学报, 2007, 28(3): 562 – 565.)
- [149] RUGH W J, SHAMMA J S. Research on gain scheduling [J]. *Automatica*, 2000, 36(10): 1401 – 1425.
- [150] ISIDORI A. *Nonlinear Control Systems* [M]. New York: Springer Science & Business Media, 1995.
- [151] WALLNER E M, WELL K H. Attitude control of a reentry vehicle with internal dynamics [J]. *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 2003, 26(6): 846 – 854.
- [152] WANG Liang, LIU Liangdong, SHENG Yongzhi. High-order sliding mode observer based adaptive time-varying sliding mode for re-entry attitude control [J]. *Control and Decision*, 2014, 29(2): 281 – 286.
(王亮, 刘向东, 盛永智. 基于高阶滑模观测器的自适应时变滑模再入姿态控制 [J]. 控制与决策, 2014, 29(2): 281 – 286.)
- [153] IQBAL S, EDWARDS C, BHATTI A I. Robust feedback linearization using higher order sliding mode observer [C] // *Proceedings of the 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*. Orlando, FL, USA: IEEE, 2011: 7968 – 7973.
- [154] VAN SOEST W R, CHU Q P, MULDER J A. Combined feedback linearization and constrained model predictive control for entry flight [J]. *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 2006, 29(2): 427 – 434.
- [155] WANG Liang, LIU Liangdong, SHENG Yongzhi, et al. Design of attitude control law based on exponential time-varying sliding mode for re-entry vehicle [J]. *Flight Dynamics*, 2012, 30(6): 532 – 536.
(王亮, 刘向东, 盛永智, 等. 基于指数时变滑模的再入飞行器控制系统设计 [J]. 飞行力学, 2012, 30(6): 532 – 536.)
- [156] ZHU J J, BANKER D, HALL C E. X-33 ascent flight control design by trajectory linearization — a singular perturbation approach [C] // *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*. Dever, CO, USA: AIAA, 2000: 1 – 19.
- [157] ZHU J J, HUIZENG A B. A type two trajectory linearization controller for a reusable launch vehicle — a singular perturbation approach [C] // *Proceedings of AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit*. Providence, Rhode Island, USA: AIAA, 2004, 2: 1121 – 1137.
- [158] LIU Y, HUANG R, ZHU J. Adaptive neural network control based on trajectory linearization control [C] // *Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*. Dalian, China: IEEE, 2006, 1: 417 – 421.
- [159] ZHU Liang, JIANG Changsheng, ZHANG Chunyu. Adaptive trajectory linearization control for aerospace vehicle based on RBFNN disturbance observer [J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*,

- 2007, 28(3): 673 – 677.
(朱亮, 姜长生, 张春雨. 基于径向基神经网络干扰观测器的空天飞行器自适应轨迹线性化控制 [J]. 航空学报, 2007, 28(3): 673 – 677.)
- [160] SHAHNAZI R, AKBARZADEH-T M R. PI adaptive fuzzy control with large and fast disturbance rejection for a class of uncertain nonlinear systems [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2008, 16(1): 187 – 197.
- [161] VAN DER SCHAFT A J, SCHUMACHER J M. *An Introduction to Hybrid Dynamical Systems* [M]. London: Springer, 2000.
- [162] KHALIL H K. *Nonlinear Systems* [M]. New Jersey, USA: Prentice Hall, 2002.
- [163] BACCIOOTTI A, ROSIER L. *Lyapunov Functions and Stability in Control Theory* [M]. Second Edition. Berlin: Springer, 2005.
- [164] YAO B, TOMIZUKA M. Adaptive robust control of MIMO nonlinear systems in semi-strict feedback forms [J]. *Automatica*, 2001, 37(9): 1305 – 1321.
- [165] TAGHIRAD H D, JAMEI E. Robust performance verification of adaptive robust controller for hard disk drives [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, 55(1): 448 – 456.
- [166] YAO B, PALMER A. Indirect adaptive robust control of SISO nonlinear systems in semi-strict feedback forms [J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2002, 35(1): 397 – 402.
- [167] YAO B. Integrated direct/indirect adaptive robust control of SISO nonlinear systems in semi-strict feedback form [C] // *Proceedings of the 2003 American Control Conference*. Denver, CO, USA: IEEE, 2003, 4: 3020 – 3025.
- [168] YANG Z J, HARA S, KANAE S, et al. An adaptive robust nonlinear motion controller combined with disturbance observer [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2010, 18(2): 454 – 462.
- [169] WANG D, HUANG J. Neural network-based adaptive dynamic surface control for a class of uncertain nonlinear systems in strict-feedback form [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2005, 16(1): 195 – 202.
- [170] FARRELL J A, POLYCARPOU M, SHARMA M, et al. Command filtered backstepping [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, 54(6): 1391 – 1395.
- [171] YANG Z J, NAGAI T, KANAE S, et al. Dynamic surface control approach to adaptive robust control of nonlinear systems in semi-strict feedback form [J]. *International Journal of Systems Science*, 2007, 38(9): 709 – 724.
- [172] SWAROOP D, HEDRICK J K, YIP P P, et al. Dynamic surface control for a class of nonlinear systems [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2000, 45(10): 1893 – 1899.
- [173] CHEN J, LI Z, ZHANG G, et al. Adaptive robust dynamic surface control with composite adaptation laws [J]. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2010, 24(12): 1036 – 1050.
- [174] CHEN Jie, LI Zhiping, ZHANG Guozhu. Higher-order sliding-mode controller for a class of uncertain nonlinear systems [J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(5): 563 – 569.
(陈杰, 李志平, 张国柱. 不确定非线性系统的高阶滑模控制器设计 [J]. 控制理论与应用, 2010, 27(5): 563 – 569.)
- [175] KOJIC A, ANNASWAMY A M. Adaptive control of nonlinearly parameterized systems with a triangular structure [J]. *Automatica*, 2002, 38(1): 115 – 123.
- [176] KARSENTI L, LAMNABHI-LAGARRIGUE F, BASTIN G. Adaptive control of nonlinear systems with nonlinear parameterization [J]. *Systems & Control Letters*, 1996, 27(2): 87 – 97.
- [177] YOKOI K, HUNG N V Q, TUAN H D, et al. Adaptive control design for nonlinearly parameterized systems with a triangular structure [J]. *Asian Journal of Control*, 2007, 9(2): 121 – 132.
- [178] HUNG N V Q, TUAN H D, NARIKIYO T, et al. Adaptive control for nonlinearly parameterized uncertainties in robot manipulators [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2008, 16(3): 458 – 468.
- [179] LI Z, CHEN J, ZHANG G, et al. Adaptive robust control of servo mechanisms with compensation for nonlinearly parameterized dynamic friction [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2013, 21(1): 194 – 202.
- [180] LIU X, ORTEGA R, SU H, et al. Immersion and invariance adaptive control of nonlinearly parameterized nonlinear systems [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2010, 55(9): 2209 – 2214.
- [181] QU Z, HULL R A, WANG J. Globally stabilizing adaptive control design for nonlinearly-parameterized systems [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2006, 51(6): 1073 – 1079.

作者简介:

方浩 (1973–), 男, 博士生导师, 教授, 目前研究方向为移动机器人控制、并联机器人控制、多智能体系统控制与优化, E-mail: fangh@bit.edu.cn;

王雪源 (1990–), 男, 博士研究生, 目前研究方向为飞行器编队控制、多智能体系统控制, E-mail: xueyuanwang.auto@gmail.com;

陈杰 (1965–), 男, 博士生导师, 教授, 中国工程院院士, 目前研究方向为复杂系统智能控制与优化, E-mail: chenjie@bit.edu.cn.