

数字化陆用武器系统中的建模、优化与控制

陈杰^{1,2} 方浩^{1,2} 辛斌^{1,2} 邓方^{1,2}

摘要 从复杂一体化武器系统的体系结构设计与优化、一体化指挥控制中的优化与决策、高速多维度运动体的参数辨识与状态估计、多智能平台的协同控制、非线性随动系统建模与控制五个方面阐述了数字化陆用武器系统中涉及的建模、优化与控制问题，涵盖了陆用武器系统中的指挥控制、火力控制和武器平台的控制。在对五个方面的国内外研究现状进行论述与分析的基础上，指出需要进一步研究的问题和未来研究展望。

关键词 陆用武器系统，体系结构，建模与控制，优化与决策，协同控制

引用格式 陈杰, 方浩, 辛斌, 邓方. 数字化陆用武器系统中的建模、优化与控制. 自动化学报, 2013, 39(7): 943–962

DOI 10.3724/SP.J.1004.2013.00943

Modeling, Optimization and Control in Ground-based Digital Weapon Systems

CHEN Jie^{1,2} FANG Hao^{1,2} XIN Bin^{1,2} DENG Fang^{1,2}

Abstract An overview of the modeling, optimization and control issues regarding digital ground-based weapon systems is provided by reviewing the previous works along five research lines: 1) design and optimization of the architecture and hierarchy of complex integrated weapon systems; 2) optimization and decision-making in integrated command and control; 3) parameter identification and state estimation of multidimensional mobile targets; 4) coordinative control of multiple autonomous platforms; and 5) modeling and control of nonlinear servo systems. The survey covers the command and control, the fire control and the platform control involved in ground-based weapon systems. Based on an introduction and analysis of current research status along the five lines, the paper also points out several significant topics which deserve further research in the future.

Key words Ground-based weapon systems, architecture and hierarchy, modeling and control, optimization and decision-making, coordination control

Citation Chen Jie, Fang Hao, Xin Bin, Deng Fang. Modeling, optimization and control in ground-based digital weapon systems. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(7): 943–962

科学技术作为武器装备发展的基础，不断为高性能武器装备的研制注入新思想和新动力。我国幅员辽阔、陆地边界漫长、周边环境复杂，陆用武器系统的装备数量和武器类型在我国的武装力量中具有显著的支配地位。近半个世纪以来，多学科知识的高度集成促成了精确打击武器、信息化武器、无人化武器、高机动武器等高精尖武器的诞生，陆用武器

装备的发展呈现出数字化、智能化、网络化、无人化等重要特征和趋势。信息化和网络化时代的到来对作战理念也产生了巨大的冲击，作战空间不断延伸，作战方式多样化，作战环境变得高度复杂，对抗性加剧。在新的形势下，陆用武器系统的建模、控制、协调与优化无论在单体（平台级）的分析与控制层面、还是在群体的协同控制与优化层面，都蕴含大量的极具挑战性的科学问题。

未来作战是一体化联合作战，以网络为中心，陆海空天多维有机融合，将分布的作战单元有机连接起来，形成一个有机的、广义上的武器系统，实现战场感知、指挥控制、火力控制、综合保障和效能评估的一体化，通过信息优势形成目标探测、跟踪识别、自主控制、智能决策、精确打击和损伤评估的完整链条。因此，面向未来战争的数字化陆用武器系统必须具备网络化、自动化、一体化、智能化的特征。这些特征反映到陆用武器平台上，主要体现为：平台信息纵向的无缝连接和横向的共享、多武器平台协同控制、装备无人化、平台智能化。

不同类型的武器平台具有不同的特点，存在不同

收稿日期 2013-04-07 录用日期 2013-04-09

Manuscript received April 7, 2013; accepted April 9, 2013

国家自然科学基金(61175112), 国家自然科学基金重大国际合作项目(61120106010), 国家杰出青年科学基金(60925011), 北京市教育委员会共建项目专项基金资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (61175112), Projects of Major International (Regional) Joint Research Program of National Natural Science Foundation of China (61120106010), National Science Fund for Distinguished Young Scholars (60925011), and Beijing Education Committee Cooperation Building Foundation Project

本文为黄琳院士约稿

Recommended by Academician HUANG Lin

1. 北京理工大学自动化学院 北京 100081 2. 复杂系统智能控制与决策重点实验室 北京 100081

1. School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081 2. Key Laboratory of Intelligent Control and Decision of Complex Systems, Beijing 100081

种类、不同难度的问题。例如，压制火炮本身具有机动性强、负载大、惯量大等特点，同时由于受战场环境（例如冲击、振动、传动摩擦、弹性形变等因素）的影响，将产生多种误差，降低射击精度。防空高炮需要提高对机动目标的预测与建模能力，而对于低空高速目标，则需要快速调炮和实现拦阻射击控制，同时需要解决多约束下火力的优化布阵问题。对于坦克而言，影响其射击精度和反应时间的主要因素是火控系统的高精度稳定与控制。其中，行进间的炮塔稳定和高精度稳定瞄准、跟踪与控制以及机动目标的预测动态建模是实现坦克火控系统稳定与控制的关键技术，高精度快速性和低速平稳性对坦克火控系统而言缺一不可。对于火箭弹而言，未来发展的重点是对其进行制导控制，提高其打击精度，与之相关的弹道误差测量与建模、修正量解算和修正控制是必须解决的关键问题。

数字化陆用武器系统这类典型复杂对象的上述特点以及未来作战的迫切需求使得自动化领域在建模、控制与优化方面面临着以下挑战：

- 1) 信息纵向的无缝连接和横向的共享要求指挥网络必须具有高效、简洁的拓扑结构，同时具备复杂对抗环境下的抗毁生存能力；
- 2) 联合协同作战要求在瞬息万变的战场态势下，实现指挥决策的科学化与智能化；
- 3) 超低空、高速、隐身空中机动目标的预测与建模；
- 4) 多平台协同作战要求多个武器平台具有协同战术行为控制的一致性与稳定性；
- 5) 为了实现陆用武器系统的高精度、快速随动控制，需要解决大惯量、高阶、不确定系统的建模、辨识与高精度伺服控制问题。

面对上述重大现实挑战，以数字化陆用武器系统为对象，在复杂系统的建模、优化与控制领域凝练出以下科学问题：

- 1) 复杂一体化武器系统体系结构的设计与优化问题；
- 2) 一体化指挥控制中的优化与决策问题；
- 3) 高速多维度运动体的参数辨识与状态估计问题；
- 4) 多陆用智能平台的协同控制问题；
- 5) 非线性随动系统的建模与控制问题。

1 复杂一体化武器系统体系结构设计与优化

体系结构通常是指组成系统各部件的结构及各结构之间的联系。体系结构主要包括功能体系结构、数据体系结构和通信体系结构。其中功能体系结构研究确定系统各部件的功能和相互之间的关系，数据体系结构确定各部件间的数据内容、时序等；通信

体系结构确定网络规模、信息流、拓扑结构、协议与标准等。目前研究最多的是功能体系结构，例如基于C³I和C⁴ISR的作战体系结构、系统体系结构和技术体系结构等，同时为了增加系统的通用性和互操作性，也可以采用模块化可重构的设计，实现开放式的系统体系结构。然而在“平台为中心”向以“网络为中心”转变的大趋势下，网络化成为复杂一体化陆用武器的典型特征，而拓扑结构对武器系统的效能起到至关重要的作用。高效、灵活的拓扑结构不仅可以缩短“发现”到“打击”的决策链路长度，还可以增强系统对复杂环境、战场任务的适应性。因此，其体系结构的优化更突出的表现为系统拓扑结构的设计与优化。

针对一体化陆用武器系统，目前主要采用仅考虑拓扑连接关系的簇头选举算法，初步实现层次型建模；为了提高系统体系结构的抗毁性，采用基于双备份迂回路由策略的体系重构方案。以上一体化武器系统体系结构的设计方法和功能对环境和任务的动态变化缺乏灵活性和适应性。不仅如此，由于研究中多采用平面型拓扑结构对体系结构进行建模，因而给在复杂动态环境下多异构平台间的信息流通和维护带来巨大的计算负担，消耗不容忽视的通信代价，严重时还会产生网络风暴。鉴于以往的平面型体系结构无法适应复杂、困难、恶劣、对抗的作战环境，需要研究具有抗毁性的分层-分级系统体系结构的分布式构建方法。

1.1 骨干子网的提取与层次型模型建立

一体化武器系统的层次型结构建模的核心是系统骨干子网的提取。在平面型体系结构中，各作战单元的地位和作用等同看待，相互之间是平等关系，在系统进行协同任务操作过程中，每个作战单元均需要与其所有的邻接作战单元进行信息交互，因而在复杂环境下，维护和交换这些动态变化的数据信息需要大量的控制代价、通信代价及消耗不容忽视的网络带宽。与平面型拓扑结构相比，层次型结构最大的优点是伸缩性强，适用于较大规模的系统。必要时可以通过增加域的个数或级数来提高网络容量而不会导致过大的控制开销，这种层次型结构模型可以充分体现分布式控制的本质优势。另一方面，由于传统的骨干子网提取方法所得到的拓扑结构固定，而一体化陆用武器系统的骨干子网需要根据战场态势和作战单元自身的能力实时调整其在系统结构中的功能角色，因此，骨干子网本质上应是一种具有动态性和临时性的主干结构。这种分级递阶的层次型体系结构具有典型的主-从信息交互与任务协调的范式，可有效减少冗余信息交互的数据量、任务耦合约束的复杂度和控制分组的开销，从而显著增强一体

化武器系统的可扩展性并提高吞吐量,有助于提高一体化武器系统对于任务和环境变化的灵活性和适应性。

在骨干子网的构建过程中,树型结构是骨干子网常用的拓扑结构,其优点为各骨干节点在树型结构中不会构成环路,可形成较为精简的系统骨干子网。除此之外,分簇结构也是骨干子网经常采用的节点自组织策略。与树型结构不同的是,分簇结构中的骨干节点相互连接可能构成环状结构,从而使得骨干子网兼具一定的抗毁性能,因此簇型骨干子网结构目前被广泛应用于复杂动态环境下一体化武器系统的层次型建模,例如美国军方项目使用了两级分簇结构和分簇路由算法完成了簇型骨干子网的提取^[1]。在基于分簇算法的层次型体系结构建模过程中,可根据各作战武器单元的相对位置关系、各作战单元所执行任务以及自身结构和功能的差异性将整个系统结构动态划分为若干簇,每个簇由簇首主导节点(骨干节点)和多个从属节点(非骨干节点)组成,骨干节点负责维护簇内通信路由和簇间节点数据转发,与此同时负责本簇内的任务优化分配、冲突消解以及簇间的任务协同。各簇的骨干节点自然形成整个系统的骨干子网,在骨干子网里的节点又可以组成若干更高级的簇,再次形成高一级的骨干子网结构。其中,分簇构建骨干子网的核心理论为图论中的连通支配集理论。由于连通支配集中的支配节点能够自然地组成系统的骨干子网,其提供了一种程式化的骨干子网构造方法,并能够以量化的指标对构造性能加以分析,故在工程上得到非常广泛的应用。

基于连通支配集的骨干子网构建算法的代表有麻省理工学院的 Xu 等提出的 LEACH 算法^[2]、雪城大学的 Deng 等提出的 LDS 算法^[3]、加州大学的 Hong 等提出的 GAF 算法^[4]、渥太华大学的 Zhang 等提出的 GBR 算法^[5]、鲁杰斯大学的 Deb 等提出的 TopDisc 算法^[6]等。西北工业大学的研究人员在经典的 LEACH 算法的基础上提出了基于备用节点的 LEACH 协议的改进算法^[7],华中师范大学的研究人员提出了一种基于多层分簇的连通支配集构造算法^[8],通过在系统拓扑的底层构建具有多个簇头节点的簇集合,在拓扑的顶层构建多跳转发机制来保证能量的高效利用。南京大学谢珊珊等提出基于区域划分的连通支配集协议。该协议中每个节点针对系统拓扑信息,对邻居节点进行区域划分,并以节点的度作为选择支配节点的依据,构建覆盖全网的连通支配集^[9]。中国科学院沈阳自动化所的卞永钊等针对虚拟骨干节点极易失效的问题,通过构造一般分布式容错连通支配集规则提出了 k-CDS 算法^[10]。浙江工业大学洪榛等将寻找最优虚拟主干网

问题抽象转化成最小连通支配集求解问题,并建立了基于混合整数规划的数学模型,通过令牌分发同时辅以全网能量负载均衡的方式,构建最优的最小连通支配集^[11]。美国马里兰大学的 Llorca 等研究空地配合多智能体系统的连通性覆盖问题,通过构建系统的层次型骨干子网并构建系统的代价函数,利用二次型优化理论解决了连通性约束下异构多智能体的协同区域覆盖问题^[12]。

1.2 抗毁性体系结构的构建

在未来战争中,多陆用武器平台将面临复杂、困难、恶劣、对抗环境下的激烈战争,其对抗复杂性主要体现在环境的未知性、工作条件的恶劣性、任务的多样性、感知的局限性、信息获取的困难性、通信能力的有限性、对手的干扰行为等方面。这些因素都有可能造成复杂陆用武器系统拓扑结构的断裂,破坏了协同的基本条件,从而导致协同作战任务的失败。为了提高多陆用武器平台在复杂强对抗环境下的协同作战效能,就必须增强群体系统体系结构的抗毁性,抗毁性主要表现在系统拓扑结构的自愈能力和容错特性方面。对复杂网络化系统的抗毁性研究,文献 [13] 研究了系统的两个主要结构参量(“网络平均度数”和“网络节点数”)与容错性和抗攻击性之间的关系。在有关攻击策略对复杂系统抗毁性影响的仿真研究中,Holme 等进行了较为系统的研究工作,他们将攻击策略分为节点攻击与边攻击两种方式,每种攻击又包括不同的策略^[14]。Cohen 等利用广义随机图上的渗流理论解析研究复杂系统的抗毁性,得出了随机攻击下系统崩溃的节点移除比,结合仿真和解析的方法研究了不同失效模式下系统崩溃的临界值^[15]。在其他文献中,不同学者也展开了抗毁性的研究。例如,Vázquez 等研究了考虑度关联条件下的网络化系统的抗毁性^[16],Rozenfeld 等还研究了空间模型上的连续渗流^[17]。

在抗毁性体系结构建模的研究过程中,双连通图理论被广泛应用,双连通结构是一种健壮的、具有容错能力的系统结构。系统中的任意一对节点之间至少存在两条路径使其连通,且各条路径对应的节点集除端节点之外的交集为空,这样的结构称为双连通结构。双连通结构可以保证在任意一个节点失效或者一条边失效时,系统结构仍能保持连通,其可在一定程度上提高系统体系结构的抗毁性,目前已成为抗毁性结构建模最新的研究热点之一。Ramanathan 等通过以连通性和双连通性为约束的拓扑控制对 Ad-hoc 网络传输的能量消耗进行了优化^[18]。Li 等对同构的网络化系统提出两种构建双连通结构的方法^[19]。Butterfield 等从图论的角度,提出了一种不依赖于智能体具体位置的双连通性保持

方法^[20]。Basu 等首次提出通过移动节点的位置来增强系统的容错性的方法, 即通过控制移动智能体的位置来组建 Ad-hoc 网络^[21]。Das 等从关节点的角度出发, 探讨了建立鲁棒的、双连通的移动智能体的方法^[22]。所提出的分布式算法利用 p 跳邻域信息找到局部关节点, 并由此关节点带领不同的群体相互向对方移动, 从而有效地提高了控制效率。Xu 等在文献 [23] 中所提出的方法只需要 1 跳邻域信息并且尝试使移动智能体覆盖范围最大化。Casteigts 等提出的方法不需要初始连通性的假设, 所提出的方法利用了多跳信息, 在使覆盖范围最大化的同时, 着力减小智能体需要移动的距离总和^[24]。Liu 等通过利用 1 跳邻域信息为初始非连通的多智能体系统建立一个双连通的系统结构, 并最终实现移动传感器网络覆盖范围最大化^[25]。南京理工大学的吴俊等针对协同的攻击策略对双连通结构的抗毁性进行了分类, 从抗毁性需求出发, 给出了抗毁性的定义和抗毁性量化指标^[26]。华东师范大学刘啸林等提出了两种提高系统结构抗毁性的方法, 并引入相应的量度系数, 以便精确衡量抗毁性的高低^[27]。

1.3 问题与展望

大多数基于最小连通支配集的骨干子网提取方法将最小化骨干节点的个数作为唯一目标, 并没有充分考虑骨干节点的性能。在实际应用中, 如果某些低性能节点被选作骨干节点, 该骨干子网反而成为整个网络的瓶颈。为此, 需要根据具体作战任务需求和环境的动态变化, 设计启发式的支配节点选举算法来提取系统的骨干子网, 启发函数的构造应综合考虑任务目标、作战单元的机动能力、网络局部代数连通度等信息。通过定义节点的综合特征向量确定出每个节点的支配权重, 提取出系统的骨干子网, 实现最佳层次型模型的建立。

目前, 复杂陆用武器系统的抗毁性研究主要集中于拓扑结构的静态抗毁性方面, 即考虑系统拓扑结构的变化(例如对边和节点的移除等)对系统功能的影响, 而对系统功能随时间动态变化的情形还未做深入研究。而在复杂陆用武器系统中, 各作战单元具有一定的自修复能力, 在遭受到打击后并不会立即失效, 而是呈现出一定的动态变化过程。因此, 研究系统拓扑结构的抗毁性不应局限于一般的静态抗毁性层面, 而应从动态变化的角度考虑抗毁性才更具有实际意义。

传统的复杂陆用武器系统的抗毁性研究往往忽略了拓扑结构的连通度和拓扑结构抗毁性对系统一致性和稳定性的影响, 或者仅从构建体系结构的角度出发, 只关注双连通拓扑结构本身的构建。目前尚缺乏将拓扑结构抗毁性与协同控制策略综合集成、

有机结合的研究成果。而对于复杂陆用武器系统而言, 面向具体作战任务, 在保证系统拓扑双连通的前提下, 如何协同控制多个异构武器平台, 获得最大的作战效能, 更是亟待解决的问题。

目前的拓扑结构设计与优化依然停留在图论的技术层面, 多用节点和边分别表示各作战单元和连接关系, 还没有实现拓扑结构的期望构型与实际对象物理运动的统一, 也没有考虑实际物理对象的可执行能力。为此, 需要将拓扑结构设计与平台运动控制器设计相结合, 以期望的拓扑结构来指导运动控制器的设计, 体现系统拓扑结构的设计与实际对象的运动控制的统一, 实现真正物理意义上的抗毁性拓扑结构的构建。

2 一体化指挥控制中的优化与决策

多平台协同指挥控制是未来作战的主要模式, 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。如何对作战资源进行有效的管理、部署、分配、调度和控制对作战效能具有决定性影响。一体化指挥控制中的优化与决策总体上可以分为决策模型和决策方法两个研究内容。具体来讲, 作战资源的部署问题和分配问题是多平台协同指挥中涉及的最具代表性的两类决策问题。下面对这两类问题的研究进行介绍和分析。

2.1 作战资源部署

作战资源的部署可以分为传感探测资源的部署和火力资源的部署, 作战部署的目的是针对可能出现的作战情形对各种资源进行空间配置, 从而为实际作战奠定基础。现实中, 作战资源的部署依赖于作战指挥人员的经验, 部署效果难以量化评估。目前, 对作战资源部署问题进行量化分析和研究的文献较少。

邢清华等研究了区域防空部署优化问题的建模方法, 提出了掩护价值的概念并将其作为优化目标, 在此基础上建立了基于启发式方法的部署优化求解方法^[28]。韩松臣等采用模拟退火算法并结合随机服务系统理论的作战效能分析数学模型求解防空导弹武器系统的作战布局优化问题^[29]。刘铭等对遗传算法进行改进后用于求解区域防空部署优化问题^[30]。王中杰等研究了雷达组网涉及的资源部署问题, 建立了系统的整体探测能力指标和威力衔接指标, 通过引入约束条件缩小部署空间, 并采用遗传算法进行求解^[31]。刘健针对地面防空作战部署问题, 提出了部署方案贴近度的概念, 并采用层次分析法来确定部署决策中涉及的多个指标的相对权重^[32]。陈杰

等针对要地防空涉及的火力单元部署问题开展了研究, 以最大化部署方案对保护要地的贡献程度为目标, 考虑地理条件和火力资源约束, 并采用 Memetic 算法进行求解^[33]. Tanergüçlü 等考虑了防空武器和雷达的联合部署问题, 结合地理信息系统为该问题建立了最大期望覆盖模型, 并采用数学软件 Lingo 进行求解^[34]. Karasakal 等研究了多舰种构成的海军任务群组的分区部署问题, 在对圆形作战区域进行扇区离散化的基础之上, 将问题表示为 0-1 规划问题, 并建立了分支定界法进行求解^[35].

2.2 作战资源分配

作战资源分配问题可以根据分配资源的类型进行划分, 例如雷达等传感探测资源的分配问题、导弹和火炮等火力单元的分配问题等. 但是, 这些针对不同对象的分配问题无论在数学描述形式上还是求解方法上都非常相似. 这里重点介绍武器–目标分配问题, 即火力单元的分配问题. 武器–目标分配问题 (Weapon-target assignment problem, WTA 问题), 又称为火力分配问题, 是军事运筹学研究中的一个经典组合优化问题. 高级传感器和信息系统的发展使得现代战争不断向网络化作战模式转变, 这使得 WTA 问题的求解变得更加重要. 这一问题的合理有效求解对于制定正确的军事指挥决策具有至关重要的作用. 文献 [36] 指出: 在未来战争中, 随着战场新技术的应用, 多武器–多目标的实际分配是可能的也是必要的. 无论在单平台作战 (如军舰的独立防空作战) 还是多兵种协同作战中, WTA 问题都是实现军事指挥自动化需要解决的关键问题之一^[37]. 另外, WTA 问题的求解对于解决其他研究领域中的相似资源分配问题也具有参考价值, 如媒体资源的分配^[38].

WTA 问题按应用背景的差异可以分为两种基本类型: 进攻性 WTA 问题和防御性 WTA 问题. 前者主要以最大程度地摧毁敌方目标为目的, 而后者以最大程度地保护己方 (防御方) 资源为目的. 在与防御性 WTA 问题对应的作战情形中, 防御方需要在适当的作战时机分配可用的武器打击来袭目标从而达到一定的防御性战术目的. 当前的 WTA 研究可以分为模型和算法两个方面. 美国贝尔实验室的 Hosein 和麻省理工学院的 Athans 早在上世纪 90 年代就提出了静态 WTA (SWTA) 和动态 WTA (DWTA) 的概念, 并为一般的 WTA 问题建立了模型, 但是 Hosein 给出的 DWTA 模型不是真正的动态模型, 只是通过动态规划进行求解^[39–40]. 文献 [38] 对 WTA 研究的近期状况进行了综述, 指出了 DWTA 区别于 SWTA 的一些主要特征和当前 WTA 研究的一些不足. Lloyd 证明了 WTA 是

NP-Complete 的, 即得到 WTA 问题最优解的时间随其规模呈指数规律增长^[41]. 按照模型所强调的不同作战目标, WTA 又可以分为基于目标 (Target-based) 的 WTA 和基于防御方资源 (Asset-based) 的 WTA^[39], 前者强调消灭来袭目标, 因此其模型中直接考虑目标的威胁程度, 优化的主要目的是尽可能地减小目标的总体威胁; 后者强调保护己方设施, 优化的主要目的是使己方资源被破坏的程度最小.

目前, 关于 WTA 的大量研究采用基于目标的 WTA 模型, 而且多数模型属于 SWTA. 就目前的研究方式而言, WTA 的建模方法主要分为 Markov 决策过程建模、数学规划方式建模、基于博弈论的建模和人工智能方式建模. 国防科学技术大学的蔡怀平等在 WTA 问题的研究中将 DWTA 问题建模为马尔科夫过程, 采用马尔科夫的理论方法对 WTA 问题进行了分析^[42]. 国防科学技术大学的陈英武等采用马尔可夫决策模型为 DWTA 问题建模, 并采用策略迭代法来求解最优策略, 其算法采用了较为简单的最优策略判断准则, 减少了计算量^[43]. 海军舰艇学院的杨祖快等建立了与文献 [42] 中基本一致的马尔科夫模型, 并采用策略迭代方式求解最优分配方案, 但是其模型中为了便于计算假设武器对不同目标的杀伤概率相同, 因而只适合于非常特殊的 WTA 问题^[44]. 从总体上讲, 基于马尔科夫决策模型的 WTA 建模与求解方法分析的是策略优化问题, 不关心具体的武器分配方案.

基于数学规划方法的 WTA 建模是最常见的一种 WTA 建模方式, 其基本思想是将 WTA 问题表示成一个最优化问题, 然后通过设计优化算法求解最优解或满意解. 例如, 北京理工大学的 Xin 等提出一种防御性 DWTA 模型, 该模型以多个防御阶段结束后存活资源的期望总价值作为优化指标, 模型中较为全面地考虑了约束条件, 其中包括交火可行性约束、弹药量约束、交火策略约束和武器性能约束, 其研究中还提出了一种可以根据战场环境动态变化进行适应性调整的 DWTA 求解策略和算法框架, 建立了由环境变化激励的快速响应式动态分配算法^[45]. 类似地, 大连海事大学的 Li 等提出了一种基于目标的多阶段 DWTA 模型^[46]. 在基于博弈论的建模方面, 防空兵指挥学院的尤志锋等依据进化博弈论的思想, 采用进化群决策的方式为区域防空中的火力分配问题建模, 其目的是通过交互反馈消除决策差异, 从而产生一致的群体决策方案^[47]. 美国学者 Galati 等采用经典博弈论的思想方法分析了由异类作战单元构成的战斗小组作战过程中进行目标分配的近纳什平衡策略^[48].

基于博弈论进行 WTA 问题的建模分析往往只适用于规模较小的 WTA 问题, 随着问题规模的增

大而变得失去效用。

在 WTA 的人工智能建模方面, 南京理工大学的潘书山等定性地分析了 WTA 的各种因素, 建立了 WTA 的知识表达系统, 并根据粗集理论方法约简得到一些简单的射击规则, 再根据战场情况采用数学规划方法进行优化^[49]。空军工程大学的贺正洪等同样采用基于规则的建模与决策方法, 通过模拟军事专家的思维活动, 建立了基于专家系统的防空火力分配模型^[50]。Sahin 等也采用专家系统对火力分配问题进行建模和求解^[51]。基于人工智能的建模方式简便且易于实现, 但是这种方式对人的依赖性很强, 往往难于满足实际作战决策的快速性要求, 而且缺乏定量的计算与分析。

WTA 的算法研究主要对应于以数学规划为基础的建模方式。20世纪80年代以前, WTA 算法主要局限于传统方法, 如隐枚举法、分支定界法、动态规划^[36]。这些方法简单但难以在计算机上实现, 尤其是在问题规模很大的时候。随着计算机技术的发展, 后来出现了神经网络、遗传算法、禁忌搜索、模拟退火、分布估计算法等新方法。这些方法为大规模 WTA 问题的求解带来了新的思路, 在很多学者的研究中被采用。表 1 列举了文献中常见的 WTA 求解方法。

从表 1 中可以看出: 在采用各种具有独立思想体系的优化方法(如遗传算法、模拟退火算法、粒子群优化算法、动态规划)之外, 很多学者尝试采用了融合型算法进行 WTA 问题求解, 这种研究手段的主要目的在于综合不同方法的优势来设计具有更高求解效率的 WTA 算法^[52]。另外, 当前 WTA 研究主要针对 SWTA 问题, 虽然 DWTA 的概念和基本模型早在 1990 年就已经提出, 但当前的 DWTA 研究仍然较少。

2.3 问题与展望

1) 不确定性条件下的决策与优化问题

武器对目标的杀伤概率、武器的状态、目标的进攻线路和进攻意图以及目标的威胁程度等因素都充满了不确定性。对抗条件下网络时滞、丢包、拓扑结构变化等不确定性因素也会对决策产生影响。目前的决策方法对信息获取的不确定性、预测的不精确性、通信网络和战场动态引入的不确定性考虑不够。如何对这些不同类型的不确定性因素进行刻画, 在决策模型中进行适当的描述, 并分析其对决策的影响, 建立相应的方法进行决策问题求解, 是多平台协同作战研究面临的一类重要问题。这一研究将涉及不确定性建模和不确定优化的相关技术方法, 其中前者是基础也是难点所在。

2) 多平台的分布式协同优化问题

基于战场全局信息的集中决策方式虽然具有信

息利用率高、决策质量高等优点, 但往往因决策问题的计算复杂性与决策实时性之间的矛盾变得不可实现, 而且集中决策方式的灵活性较差。随着协同作战空间的扩展和对抗性的加剧, 武器平台将被赋予更高的自主性以快速适应战场环境并做出响应, 多武器平台的分布式协同优化将成为未来作战的必然要求。建立适用于不同指挥层次的分布式协同优化方法是适应未来作战需求的必由之路。

3) 决策算法的实时性问题

作战过程中产生的大多数决策问题有很强的实时性要求, 可以用于制定决策的时间非常有限, 可实施的打击次数也十分有限, 因此快速的决策对于充分利用宝贵的作战时机是十分必要的。优化计算的实时性始终是开发有效决策算法的真正挑战。决策质量与决策实时性之间的权衡往往是决策者必须面对的一个重要问题。将计算过程从作战平台上转移, 依靠网络计算(例如采用云计算)技术实现问题的快速求解有可能为决策实时性问题提供一种解决思路。另外, 随着并行计算研究和可重构模拟进化计算电路的发展, 这一问题可能会有更多的解决方案。

3 高速多维度运动体的参数辨识与状态估计

高速多维度运动体是指以炮弹、火箭弹为代表的高速自旋飞行运动体。随着精确制导炮弹、可控火箭弹以及超高精度导弹研制的迫切需求, 针对复杂高速多维度运动体的辨识及控制研究越来越深入, 所面临的问题和挑战也越来越多。这些问题与挑战主要表现为: 炮弹发射瞬间高过载; 炮弹在炮管中高速自旋, 状态强耦合; 每打一发, 膛线参数都会发生变化, 引起弹道参数发生变化; 在炮弹的整个飞行过程中, 环境参数变化剧烈, 扰动明显, 温度变化范围大。

目前针对高速多维度运动体的检测手段还十分缺乏, 存在不可测、测不准等问题。因此, 高速多维度运动体的参数可辨识性分析、以及参数快速辨识与状态估计成为高速多维度运动体状态估计与辨识的关键问题。针对这一问题, 经典的方法包括改进的最小二乘法^[53-54]、非线性滤波器^[55], 也有学者采用蚁群算法^[56]、神经网络^[57]等方法对弹道参数进行估计。对于系统可辨识性分析, 有学者采用微分代数的方法研究无控系统的全局可辨识性问题, 采用相似变换来分析系统的结构可辨识性; 而对于参数估计, 可以采用基于扩展 Kalman 滤波及其改进方法、粒子滤波方法、无味 Kalman 滤波(Unscented Kalman filtering, UKF) 等非线性滤波器的参数估计方法。

3.1 高速多维度运动体的参数可辨识性研究

通过对高速运动体可辨识性的分析和研究将有

表 1 常见的 WTA 求解方法
Table 1 Common WTA algorithms

问题类型	方法	文献
关于弹道导弹防御的 SWTA 问题	神经网络	[58]
防空作战中的 WTA 问题	Hopfield 神经网络	[59]
战区导弹防御背景下的 WTA 问题	神经网络与动态规划相结合	[60]
关于 DWTA 的约束满足问题	随机变邻域禁忌搜索算法	[61]
智能武器和传感器对目标的分配问题	拍卖算法	[62]
海军舰艇编队作战中的 WTA 问题	禁忌搜索算法	[63]
SWTA 问题	模拟退火和阈值接受算法	[64]
SWTA 问题	分支定界算法、构造性启发式算法、大规模邻域搜索算法	[65]
SWTA 问题	改进型的大规模邻域搜索算法	[66]
多层防御情况下的 WTA 问题	遗传算法	[67]
防空作战指挥系统的 WTA 问题	融合了小生境技术和跨代精英选择策略的遗传算法	[68]
联合作战条件下的 WTA 问题	遗传算法	[69]
海军舰艇编队防空作战中的 WTA 问题	遗传算法	[70]
高炮和地空导弹混编防空作战中的 WTA 问题	遗传算法	[71]
基于目标的 DWTA 问题	遗传算法	[72]
SWTA 问题	混沌优化方法	[73]
SWTA 问题	差分进化算法	[74]
SWTA 问题	结合贪婪搜索策略的离散粒子群优化算法	[75]
SWTA 问题	人工免疫算法	[76]
SWTA 问题	分支定价法 (Branch-and-price)	[77]
舰艇编队防空作战中的 WTA 问题	整数线性规划算法	[78]
SWTA 问题	结合免疫原理的蚁群优化算法	[79]
SWTA 问题	融合优生学原理的遗传算法	[80]
区域防空作战中的 WTA 问题	遗传算法与蚁群优化算法的融合算法	[81]
多层防御体系下防空作战的 WTA 问题	模拟退火和遗传算法的融合算法	[82]
以网络中心战为背景的 DWTA 问题	模拟退火和遗传算法的融合算法	[83]
SWTA 问题	粒子群算法与遗传算法的融合算法	[84]
SWTA 问题	粒子群优化算法与遗传算法的融合算法	[85]
SWTA 问题	禁忌搜索、模拟退火和粒子群优化的融合算法	[86]
DWTA 问题	基于遗传算法的 Memetic 算法	[87]
DWTA 问题	基于简明规则的快速构造性启发式算法	[45]
DWTA 问题	禁忌搜索算法	[88]
DWTA 问题	分布估计算法	[89]

助于以最小的代价获得最多的信息, 而结构可辨识性的研究将有助于采用参数重定义等同变换方法将不可辨识的系统变成可辨识系统, 即参数可辨识化方法的研究。一般的参数可辨识性研究步骤如下: 首

先建立对象运动模型。在原有模型的基础上, 根据高速运动体的特点改进对象模型, 得到观测模型和可辨识性分析模型。其次, 进行系统模型的可辨识性分析。针对建立的对象模型, 通过相似变换方法, 给出

某参数可辨识的充分条件. 对结构可辨识的参数, 采用李代数的李对称性构造相似变换, 从而判断其可辨识性. 对不可辨识参数, 可通过等同变换方法, 或者模型结构的变化以及观测量的改变, 将不可辨识部分变成可辨识部分.

对于非线性系统的可辨识性分析, 学者们首先采用的是线性化方法, 将非线性系统线性化后, 采用线性化系统可辨识性理论进行研究, 文献 [90–91] 在线性化的基础给出了一些非线性可辨识性的结论, 文献 [92] 则给出了系统可辨识的充分条件, 而 Goodrich 等则给出了二阶非线性系统局部可辨识性的充分和必要条件^[93]. 许多学者着重研究了一些典型非线性系统的可辨识性问题, 并得出了相应结论, 例如对多项式及有理非线性系统的可辨识性问题等^[94–96].

在有控系统中有着较好运用的局部状态同构定理方法^[97–98], 对无控系统只能得到全局可辨识的必要条件^[99], 无法得到较好的应用. 为此, Denis-Vidal 等在文献 [100] 中给出了针对无控系统结构可辨识性的必要条件, 同时还证明了该必要条件对一维系统为充分必要条件. 文献 [101] 给出了一种通过幂级数展开的方法检验系统可辨识性的方法, 但这种方法计算复杂, 而且只能得到局部可辨识性的结果^[102]. 文献 [103] 则在文献 [104] 的基础上发展了 Ljung 等的微分代数方法^[105], 研究了无控系统的全局可辨识性问题. 其采用 Rosenfeld-Groebner 算法, 比文献 [105] 计算更容易, 而微分代数方法的计算复杂度会随系统规模的扩大而大大增加. 文献 [103] 又给出了一种启发式的方法, 这种方法通过在实际实验的输入数据中建立新的模型, 来研究系统的可辨识性, 特别是在研究一些复杂系统时, 可以获得其他方法难以得到的全局可辨识结果. 文献 [106] 则进一步给出并证明了无控系统可辨识的充分条件.

结构可辨识性研究是可辨识性问题的重要研究内容^[107], 相似变换方法仍然是结构可辨识性分析的有力武器^[95, 107]. 文献 [95] 采用李代数的李对称性给出相应的相似变换, 并给出了无控系统的结构可辨识判别方法.

3.2 高速多维度运动体的快速参数辨识与状态估计

针对适用于不完整、不连续、不同步数据, 具有强非线性、强耦合、强噪声、强时变特性的高速多维度运动体辨识和状态估计的研究可有助于推进高速多维度运动体辨识和控制理论的发展, 推动相关技术的进步, 其理论成果在弹道解算、弹道修正、目标跟踪、定位导航等领域有着重要的应用价值. 由于高速运动体的许多参数是时变参数, 因此采用时变非线性参数与状态联合估计的算法, 将参数扩展成

状态进行辨识. 针对高速运动体的参数辨识与状态估计, 目前常用的方法有最小二乘法及其改进方法、神经网络等智能方法. 通过将非线性系统的参数扩展成系统状态, 使得扩展 Kalman 滤波 (Extended Kalman filter, EKF) 及其改进方法、粒子滤波方法、无味 Kalman 滤波 (UKF) 等非线性滤波器估计方法成为非线性系统参数与状态估计的一类主要方法.

最小二乘法是经典的参数估计方法之一^[108–109], 它也是诸多非线性估计方法的理论基础. 在非线性系统中多采用具有递推形式的最小二乘法进行参数与状态的估计, 普通的递推最小二乘法结构简单, 计算速度快, 目前在工程实践中仍有非常广泛的应用^[110]. 然而最小二乘法在非线性系统中运用受限, 其对噪声处理能力较差, 许多学者进一步研究了各种最小二乘的改进算法^[111–112], 将最小二乘法与其他方法相结合, 产生了诸多实用的算法, 如与支持向量机^[113]、神经网络等智能方法结合的最小二乘法^[114] 等, 或采用前置滤波器和其他算法先进行滤波, 再进行最小二乘估计. 但由于精度和结构方面的局限性, 最小二乘法在高速运动体参数辨识中的运用也受到了限制, 在其基础上发展起来的 Kalman 滤波也面临同样的问题^[115]. 针对炮弹等高速运动体的参数辨识问题, 采用最小二乘的改进方法, 如 C-K 辨识法进行辨识, 在离线辨识中取得了一定的结果^[116–117]. 但该方法存在对噪声敏感和计算精度的问题, 特别是对变参数的估计存在困难, 适合离线计算, 而不适合在线辨识.

扩展 Kalman 滤波 (EKF) 方法无疑是经典非线性估计方法之一. EKF 解决了非线性高斯估计问题, 但仍有以下不足: 1) 稳定性较差, 容易发散, 即只有当模型的非线性和初始误差满足给定条件时, EKF 的误差才是有界的^[118–119]; 2) 精度较差, 要求非线性函数在进行展开时其导数存在, 一些非线性函数在计算 Jacobian 矩阵及其幂时, 计算复杂, 容易出错; 另外, 一阶 Taylor 展开损失了较多的精度^[120].

针对 EKF 的缺陷, 众多学者提出了各种分解及补偿算法以解决稳定性问题. 例如, 对协方差阵或协方差阵的逆进行平方根分解, 如 U-D 分解、奇异值分解、L-D 分解方法、平方根滤波等^[121]. 这些分解方法可以在一定程度上解决 EKF 的数值稳定性问题, 提高了计算效率, 目前仍有广泛的运用^[122]. 为了能同时提高 EKF 的精度和稳定性, 挪威学者 Schei 于 1995 年提出用中心差分改善 EKF 的方法^[123], 丹麦学者 Norgaard 于 2000 年创立了基于 Stirling 内插多项式的非线性估计理论^[120]. 该方法将非线性模型按多项式展开, 不需计算函数的偏导

数, 理论上可用于任意非线性函数的估计, 其精度较高, 稳定性较好, 但其实现过程较为复杂, 需要进行Householder 变换获得上三角的平方根矩阵。针对 EKF 的鲁棒性和跟踪性问题, 周东华提出了强跟踪滤波器^[124], 提高 EKF 的跟踪性和稳定性, 在非线性估计方面有着广泛的运用。

EKF 及其多种改进方法的实质是近似线性化方法, 都是基于函数拟合的近似方法, 其基本思想是通过采用参数化的解析形式对系统的非线性进行近似, 它们在一定程度上提高了 EKF 的精度和稳定性, 但仍无法完全避免 EKF 在稳定性和精度上的缺陷。在高维系统中, EKF 及其多种改进方法都存在高维数值稳定性问题。文献 [125] 的工作主要将炮弹看作简单的质点进行计算, 当把炮弹作为旋转高速运动体时, 基于 EKF 的估计方法存在复杂的求导过程, 其数值稳定性和计算精度仍有待提高。

粒子滤波 (Particle filtering, PF) 可用于非线性系统的参数辨识与估计^[126]。该方法的核心是利用一些随机样本 (粒子) 来表示系统随机变量的后验概率密度, 能得到基于物理模型的近似最优数值解, 而不是对近似模型进行最优滤波, 适合于强非线性、非高斯噪声系统模型的滤波。粒子滤波代表着近年来非线性滤波研究的主流方向, 但粒子滤波自身也有若干问题有待解决, 主要是粒子的退化问题和计算复杂度的问题^[127]。事实上, 从工程应用的角度讲, 只有当基于解析近似的滤波器不能满足设计要求时, 才有必要考虑粒子滤波。

针对 EKF 等方法需要对非线性模型进行线性近似的缺点, 牛津大学的 Julier 于 1995 年首次提出 Unscented 滤波。它是一种典型的非线性变换估计方法, 在施加非线性变换之后, 仍采用标准 Kalman 滤波框架, 所以也称为无味 Kalman 滤波 (UKF)^[128]。其后, UKF 又得到美国学者 Van der Merwe 等的深入研究和推广^[129]。UKF 是介于 EKF 和 PF 之间的非线性滤波器, 其核心是通过一种非线性变换 — “Unscented 变换” 来进行非线性模型的状态与误差协方差的递推和更新, 它可以解决非线性、非高斯以及非加性噪声的问题。因为对状态分布的近似比对非线性函数的近似更为容易, 因此以采样策略逼近非线性分布, 对状态的概率密度函数做近似。在采样过程中, 由于采用确定性采样策略, 而非 PF 的随机采样, 避免了粒子衰退问题。UKF 的计算量大致与 EKF 算法相当, 它不需要计算 Jacobian 矩阵, 性能优于 EKF^[128]。UKF 具有解决强非线性问题的能力, 对初始值有一定鲁棒性, 滤波器稳定性好, 是一种在精度、稳定性、速度等方面都比较出色的非线性滤波器。近年来, UKF 得到了广泛的运用, 在状态与参数估计方面有

成功的运用实例^[130–132]。同时, 诸多学者也在原有 UKF 基础上, 提出了诸多改进版本的 UKF, 用于提高 UKF 的数值稳定性和计算速度, 例如减少 Sigma 点的 UKF^[133]、平方根分解的 UKF^[122, 134] 等。由于 UKF 具有 EKF 的架构, 并兼具 PF 的一些特点, 所以对 EKF 或 PF 适用的多数改进方法都可能适用于 UKF。另外, 在现有探测手段和体系下, 针对超高速运动体的探测、估计与辨识必须面对不完全、不连续、不同步观测数据的挑战。目前, 针对这类问题的解决途径主要有信息融合方法^[135–137] 和提高滤波器对不完全、不连续和不同步数据的鲁棒性^[138–140], 从而使估计与辨识在数据不完全的情况下仍有较好的结果。

3.3 问题与展望

目前的参数辨识与状态估计方法都对探测手段做了理想化的假设, 但目前的探测手段还不能实现对高速多维度运动体的全程连续探测, 因此数据往往是不完整、不连续、不同步的。在理论方面, 需要解决数据不完整、不连续和不同步条件下的参数辨识和状态估计问题。目前的辨识与估计算法虽然在快速性、自适应性、跟踪性等方面做了改进, 但多数仍然建立在 Kalman 滤波框架的基础上。为此, 需要在理论上设计专门针对非线性高速运动体的算法, 实现在建模困难、参数突变、干扰特性未知条件下的参数辨识与状态估计。

4 拓扑连通性约束下的多智能平台协同控制

在未来战争中, 智能作战平台将在侦查、打击、火力校正及其他一体化作战方面展现出显著的作用, 智能作战平台必将成为未来信息化战争的主要装备。然而, 由于传统的单一作战平台已无法适应现代化战争的需求, 必须依靠群体优势, 构成多异构平台协同作战系统, 才能可靠完成复杂战场环境下的作战任务。

多异构智能作战平台系统是一种特殊的网络化系统。在未来战争中, 智能作战平台必将面对复杂、困难、恶劣、对抗的环境。在这种情况下, 仅仅从稳定性角度出发来考虑多智能平台的分布式协同运动控制, 忽略其系统的拓扑连通性约束的做法已经不切合实际, 无法适应复杂外部环境以及任务多样性所带来的巨大挑战。因此, 对多异构智能作战平台在拓扑连通性保持约束下的协同控制问题开展研究已变得刻不容缓, 这一研究的成果将显著提高系统的综合作战能力、战场生存能力、战场感知能力和对战场环境及作战任务的适应能力。

用智能体 (Agent) 的概念来定义智能作战平台, 则陆用多智能平台协同控制中的关键问题体现为连

通性保持条件下的多智能体协同控制以及障碍物规避条件下的多智能体连通性保持控制.

4.1 连通性保持条件下的多智能体协同控制

针对连通性保持条件下的多智能体协同控制问题, 近些年来, 研究人员分别从势能函数、邻接矩阵以及个体间的权重等角度对其进行深入研究. Meng 等利用图论方法对多智能体系统群集运动进行建模, 并通过对图中的边添加适当的非线性权重信息来处理连通性保持下的队形控制和交汇问题^[141]; Zavlanos 等讨论了群体保持连通的重要性, 设计出一类势能场函数来保持个体之间的连通性^[142]. 进一步, Zavlanos 等将连通性约束转化成单个智能体的可微分的运动约束, 利用 Laplacian 矩阵谱特性并结合光滑势场梯度方法实现了连通性保持, 同时给出的控制律可以实现多智能体系统的避碰和跟踪控制^[143]. Spanos 等提出“几何连通鲁棒性”这一概念, 并通过构造相应的鲁棒连通度度量函数来实现利用系统的局部连通度间接刻化全局连通性能^[144]. 文献 [145] 采用提取并保持系统初始的连通 Hamilton 图的方法解决了非完整约束多机器人的协作运动规划问题.

另一方面, 从代数图论的相关理论出发, 通过控制群体拓扑所对应的 Laplacian 矩阵的代数特征值的变化来优化系统的拓扑结构, 即基于 Laplacian 矩阵的谱特征, 并运用分布式优化方法使系统的代数连通度恒为正, 也是实现群体现系统网络连通性保持的一种研究思路. 文献 [146] 通过定义构造基于 Laplacian 矩阵的势能函数, 使系统的代数连通度 (Laplacian 矩阵的最小正特征值) 恒为正来实现连通性保持. Zavlanos 等通过分布式次梯度优化的方法使系统对应的代数连通度最大化, 从而增加系统的连通性^[147]. 文献 [148] 通过构造与个体间的距离相关的动态变权重邻接图来保持群体连通性.

在上述连通性保持策略的基础上, 结合适当的协同控制策略, 可以实现不同方式的协同控制. Mesbahi 等假设系统拓扑图中两个顶点之间的边的权重是对应的机器人之间距离的函数, 在此假设基础上, 考虑了最优的个体位置配置问题, 以使系统的代数连通度最大化^[149–150]. Xiao 等利用半正定凸规划方法, 考虑和解决了类似的权重设计问题, 提高了系统的代数连通度和系统的一致性收敛速度^[151]. 此外, Cortés 等利用外心算法, 使得每个智能体的下一目标位置为其当前所有邻居通信范围交集中的某一点. 在不需要知道群体全局信息 (所有个体的位置信息) 的情况下能实现全局无分裂的群集行为, 同时满足拓扑结构连通性约束^[152]. Schuresko 等设计出分布式算法用来提取生成树, 并通过在系统动态切

换前后对生成树的边集进行重新配置实现连通性保持^[148, 153]. Gustavi 等针对多智能体交汇问题, 在完全图的情形下对系统拓扑的初始连通性与系统稳定性之间的关系给出了相关的充分条件^[154].

国内方面对于多智能体拓扑的连通性优化与控制的研究还刚刚起步, 其中具有代表性的工作为 Su 等通过构造分布式观测器和连通性保持势场函数的方法, 仅利用多智能体之间的相对位置信息来实现整体的速度一致^[155]. 刘志新等针对 Vicsek 模型讨论了系统满足连通性的条件, 给出了通过多智能体的初始状态、邻居半径和运动速率来判断系统同步的充分条件^[156]. Li 等研究了连通性约束条件下的多智能体系统的蜂拥控制和队形控制, 通过剔除系统的冗余通信连接来实时提取系统的核心结构, 并将其作为系统的连通约束子图进行总体连通性控制^[157]. 陈世明等提出了一类基于最小外接圆方法的群体行为模型^[158], 该模型中每个个体朝着包围其邻域范围内所有其他个体的最小外接圆圆心位置移动, 在不需要知道群体全局信息 (所有个体的位置信息) 的情况下能实现全局无分裂的蜂拥行为, 体现了局部控制策略影响全局群体行为的思想. 此外, 注意到多陆用武器平台具有典型的异构特征, 可通过构建系统的层次型体系结构模型, 实现连通性保持条件下的异构多智能体系统的跨层协同控制. 北京理工大学的 Mao 等利用启发式任务优先级排序算法, 提取骨干核心子网, 采用牵引控制思想并结合变结构控制原理, 设计出骨干子网与非骨干子网间的跨层跟踪控制算法, 有效解决了连通性保持条件下的若干典型协同任务^[159].

4.2 障碍物规避条件下的多智能体连通性保持

在陆用智能平台的协同控制中, 避障控制是一个非常关键的问题, 避障包括运动过程中平台之间的避碰, 以及规避外界环境中的障碍物. 虽然文献 [160] 加入了避障控制, 但是避障控制是不连续的, 对避障效果也没有给出理论分析. Tanner 等利用位置势能函数实现了智能体间的避障^[161], 但是避障势能不是有限的, 这显然与实际不符. 为了克服这个缺陷, Chang 等分别利用有限避障势能函数和有限避障作用力来设计多智能体的避障控制^[162]. Olfati-Saber 通过构建智能体间的排斥势函数并利用正交投影算法, 在凸形障碍物边界上构建虚拟智能体来实现避障控制^[163]. 北京理工大学的 Mao 等采用光滑避障函数结合无界吸引势函数的方法来实现多智能体系统的群集控制^[164], 并将其应用于连通性保持下的多轮式移动机器人的群集运动与避障控制, 但是系统的群集运动控制律是非光滑的.

流函数法是近年来兴起的一种新算法, 这种方

法通过借鉴流体力学的概念建立势场区域, 获得平滑路径, 能够很好地避免局部最小问题。流函数法实质上延续了人工势场函数思想, 它是人工势场法在力学中的拓展。这种方法利用流体力学的概念来处理多智能体系统在避障过程中的连通性保持控制问题, 其基本思想是将智能体看作流体的一部分, 构造复势函数, 且保证其实部与虚部函数互为共轭并同时满足 Laplace 方程, 这样构造的复势函数的虚部函数即为所需的流函数。因为流线是与障碍物表面相切的, 根据流函数的定义, 可以得到流线上质点的两个速度分量。流场与具有连通性保持功能的势能场相结合, 理论上可以实现多智能体系统在较稀疏障碍物环境约束下的编队与平滑避障控制。加州理工大学的 Waydo 等率先利用流函数方法解决了单个障碍物以及障碍物移动时的路径规划问题^[165]。康奈尔大学的 Sullivan 等提出采用附加门限的流函数方法进行涉及多个障碍物的路径规划^[166]。美国奥本大学的 Daily 等通过对存在单个障碍物时的流函数进行加权求和, 解决了两个障碍物接触时的路径规划问题^[167]。华中科技大学的卢骏等提出了基于流函数和单一连接规则的、采用虚拟领航者和二叉树结构的多移动机器人人群集控制模型^[168]。北京航空航天大学的研究人员提出了基于流函数法的路径规划方法, 在传统流函数法基础上采用虚拟目标点方法解决了多障碍物重叠情形的航路规划问题^[169-170]。北京理工大学的 Wang 等将流函数和连通性保持的人工势函数有机结合, 利用多目标分布式跟踪控制理论, 在多球型障碍物环境下, 有效解决了连通性保持条件下的多智能体系统稳定群集运动和光滑避障控制问题^[171]。

4.3 问题与展望

目前, 多智能体协同控制算法多数采用线性质点模型, 忽略了实际对象, 尤其是陆用智能作战平台最显著的惯性、向心力、质量分布、欠驱动非完整约束等典型非线性环节, 无法真正应用于实际物理对象。因此, 需要将非线性控制理论与多智能体理论相结合, 研究非线性系统的分布式控制算法, 真正实现对陆用武器平台的分布式协同控制。以陆用智能作战平台为代表的多智能体控制采用感知/通信邻域内的局部信息, 控制器设计中运用了大量的分布式估计与决策算法。在某种意义上讲, 多智能体控制是与多目标分布式优化密切相关、相辅相成的。因此, 将多智能体协同控制器设计与分布式优化相结合, 必将是多智能体控制研究的重要方向。

5 非线性随动系统的建模与控制

火炮本身具有机动性强、负载大、惯量大等特

点, 数字化火炮的随动系统控制精度直接影响火炮的命中精度。但由于受战场环境约束、冲击、振动、传动摩擦、弹性形变等各种因素的影响, 火炮的随动控制系统存在多种干扰与误差, 直接影响火炮的射击精度。因此, 提高随动系统的控制精度对于增强我军陆用压制武器的战斗性能至关重要。目前, 制约火炮炮控系统性能的两个关键问题表现为: 1) 炮控系统驱动机构相对滞后, 机械传动精度不高, 受到摩擦、齿隙、变形等非线性环节影响; 2) 炮控系统的控制理论和控制方法相对简单, 控制性能不高, 自适应能力差, 参数调整和维修保障困难。针对上述问题, 必须从高效驱动机构和控制策略研究两方面入手, 开展炮控系统非线性建模与扰动谱分析、炮控系统状态估计与参数辨识、高效驱动机构以及智能化控制等研究。

陆用压制武器的随动系统具有典型的非线性特性, 例如摩擦非线性、耦合非线性、驱动器电压死区、轴系传动引起的输入非线性。同时, 随动系统还存在机械或电气参数的不确定性、不平衡负载、扰动、摩擦非精确建模以及忽略电流动态带来的未建模动态等。现有的方法主要集中在线性系统领域, 但由于受理论与方法的限制, 在研究过程中常常采取一些简化措施, 如降阶, 忽略小干扰, 或者利用线性近似, 忽略非线性特性来进行控制器的设计与稳定性分析。这些简化方式缺乏对非线性特性的主动补偿, 控制系统性能很难进一步提高。事实上, 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^[172-173]。因此, 对不确定非线性随动系统的研究具有重大的理论与实际意义, 受到理论研究者与工程师们的普遍关注^[174-179]。随着非线性控制理论的发展, 研究人员提出了各种方法来处理上述不确定性对系统性能的影响^[180-182], 例如 Lyapunov 再设计、滑模控制、自适应鲁棒控制以及智能控制等。在这些方法中, 自适应鲁棒控制结合了自适应控制与鲁棒控制的优点, 在不确定非线性系统理论研究与实际工程应用中取得了一些有意义的结果。然而, 针对不同的实际需求, 对于不确定性的处理, 还需要对自适应鲁棒控制方法进行必要的改进。值得注意的是, 在对非线性系统不确定性的研究过程中, 自适应与鲁棒思想贯穿始终^[183]。从某种意义上说, 自适应鲁棒控制方法为不确定非线性系统的控制提供了一个框架, 而 Lyapunov 稳定性分析理论、反馈线性化、Backstepping 等设计方法则为不确定非线性系统控制算法的大范围的分析与综合提供了强大的技术支持。其中, 大惯量不确定系统的稳定随动控制、不确定系统的参数自学习与非线性主动补偿控制是最受广大控制科学研究人员关注的两个关键性难题。

5.1 自适应鲁棒控制

自适应鲁棒控制 (Adaptive robust control, ARC) 最早的形式为自适应滑模控制, 其最初的想法是把自适应控制与动态滑模控制有机地结合起来, 使两者能取长补短。ARC 结合了自适应控制与鲁棒控制的优点, 在处理不确定非线性系统方面取得了可观的成果。通过引入投影算子及对鲁棒控制律的约束, 使鲁棒控制器和自适应控制器巧妙地结合起来^[172, 184–185]。由于连续投影算子过于复杂, 不连续投影使得 ARC 的 Backstepping 设计得以简化, 然而若对象的阶数较高, 运用 Backstepping 方法会出现“项数膨胀 (Explosion of terms)”^[186] (即项数过大) 的现象。为此, Yang 等用动态面控制 (Dynamic surface control, DSC) 取代了 Backstepping 方法, 简化了高阶对象的 ARC 设计, 避免了“项数激增”现象^[187]。虽然 DSC 仅能保证误差系统半全局稳定 (Semi-global stable), 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。

大部分实际对象都存在不可量测的内部状态, 而早期的 ARC 均假设状态完全可测, 这使得 ARC 的应用受到一定的限制。为此, 文献 [188] 提出了一种输出反馈形式的 ARC 设计方法。该方法通过设计参数化的观测器, 实现了不确定对象的自适应状态观测, 再根据观测到的状态估计值构造出控制量, 最终实现输出反馈控制。为了能得到参数较准确的估计值, 以便实时监控系统的工作状况或进行故障检测, 早期的 ARC 只采用梯度型的参数自适应律, 其参数估计值往往难以收敛到真值, 而且在系统输出误差较小时容易受到噪声的影响。为此, 文献 [189] 提出了一种间接自适应鲁棒控制器 (IARC), 通过限制自适应速率, 使 ARC 的自适应律设计与控制律设计相互独立, 从而能选择比梯度算法收敛性更好的自适应律以保证参数估计的效果。然而, 由于 IARC 的参数自适应速度较慢, 使得 IARC 的瞬态响应的快速性逊色于常规的直接自适应鲁棒控制 (DARC)。为此, 文献 [190] 提出了直接/间接混合自适应鲁棒控制 (DIARC), 对影响系统瞬态响应较大的参数, 采取梯度型的参数估计策略, 而对其他参数采取最小二乘估计策略。

虽然 ARC 已经应用到了很多领域, 但仍然存在以下问题: 1) 在处理高阶系统时, 自适应鲁棒控制繁琐的设计方式与复杂的控制器表示形式, 使得常规自适应鲁棒控制器很难应用于实际; 2) 当不确定系统中未知参数发生跳变时, 系统的瞬态性能将受到限制; 3) 常规自适应鲁棒控制很少考虑非线性参数化形式的不确定性与输入非线性等问题; 4) 对于切换不确定非线性系统, 关于自适应鲁棒控制方法

的研究还是一个全新的内容。

5.2 改进型自适应鲁棒控制

针对一类半严格反馈不确定非线性系统的自适应鲁棒控制问题, 为了在简化控制器结构的同时, 使系统保持良好的跟踪性能, 拓展自适应鲁棒控制的适用范围, 采用自适应鲁棒滑模动态面控制 (AR-SMDSC) 方法^[187, 191], 通过引入一个滑模滤波器来替代 Backstepping 方法中对“虚拟”控制律的求导运算, 设计新的误差动态面来完成系统最终控制律的设计, 解决常规自适应鲁棒控制器在处理高阶系统时存在的“项数膨胀”问题。

在以往的自适应鲁棒控制方法中, 非线性系统模型都被假设具有线性参数化的形式, 而实际系统中许多动态特性并不具备这种形式, 如伺服系统中经典的摩擦非线性、输入死区非线性等。针对非线性参数化 (Nonlinearly parameterized, NLP) 系统的自适应控制问题, 最常用的方法是将 NLP 系统进行线性参数化转换。常用的方法包括泰勒展开近似法^[192]、最小–最大值法^[193], 以及基于 Lipschitz 的方法等^[194–195]。除了上述线性参数化近似技术之外, 文献 [196] 不同于传统的基于确定等价原理的方式, 通过增加新的偏置向量函数的方法来设计自适应律; 文献 [197] 则提出了一种新的浸入及不变 (Immersion & invariance) 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。文献 [198] 利用系统非线性函数关于未知参数的 Lipschitz 性质, 将非线性参数化系统转化为线性参数化的形式, 提出一种基于 Lipschitz 方法的自适应鲁棒滑模动态面控制方法, 并给出选取 Lipschitz 函数向量的一个准则。对一类更为一般化的不确定非线性系统 (模型未知), 采用一种神经网络自适应鲁棒滑模动态面控制方法, 并对系统中的输入非线性进行补偿控制, 保证系统具有良好的跟踪性能。

为了进一步拓展自适应鲁棒控制的应用领域, 针对一类具有切换特性的不确定非线性系统, 台湾学者 Wu 提出一种连续反馈控制器方法, 试图解决一类严格反馈非线性切换系统的跟踪问题^[199], 但该方法需要所设计的控制器必须满足一个所谓的“同步支配假设 (Simultaneous domination assumption)”条件, 使得找到这样一个满足条件的控制器比较困难。Han 在文献 [200] 中对一类具有严格反馈形式的切换非线性系统进行了控制器的设计, 利用神经网络设计切换控制量, 然后采用平滑近似的方法得到连续的虚拟控制量。文献 [198] 利用动态面状态的连续性质, 构造系统的误差动态方程, 提出一种切换自适应鲁棒动态面控制方法, 然后利用共同 Lyapunov 函数方法证明系统有界稳定。考虑积

分串联型对象, 模型参数向量不但未知, 且会在某些时刻发生突然的变化, 则参数突变前采集到的数据将会影响突变后的参数估计。为此, 文献 [201] 采用基于参数辨识器的自适应鲁棒控制, 用辨识器加快参数估计的速度; 此外, 还通过对自适应律与辨识器的状态重置, 使参数估计能克服参数突变的影响。该算法在一定的切换条件下, 将辨识得到的参数值作为自适应律的初值, 重置回归矩阵。因此, 该算法可以在系统参数跳变时使得参数快速收敛到真值。

5.3 问题与展望

多数陆用压制武器系统是高阶系统。在处理高阶系统时, 目前的控制器设计过程和最终表达式过于复杂, 因此不得不采取一些简化措施进行数学建模, 如降阶, 忽略小干扰, 或者利用线性近似, 忽略系统中非线性特性来进行控制器的设计与稳定性分析。对于本质上的高阶系统, 这种方法的控制效果难以保证。因此, 需要研究针对若干典型高阶、柔性、存在复杂强干扰的系统的建模方法, 完善与发展复杂系统建模理论。控制器设计与建模过程密切相关, 新的复杂系统建模理论必然催生出新的控制器设计思路。在特征建模、数据建模、集成建模等新的建模方法的推动下, 具有抗强不确定干扰、抗建模误差、抗系统扰动、满足现实作战条件的综合集成控制器设计必定是陆用压制武器系统控制的发展趋势。

6 结论

在数字化陆用武器建模、优化与控制的相关研究中, 我国学者在复杂系统的特征建模、全模型自适应控制、变结构控制、强跟踪滤波器、多智能平台协同控制等多方面取得了显著成绩。以实现作战智能化和自主化为根本目标, 本文从复杂一体化武器系统体系结构设计与优化、一体化指挥控制中的优化与决策、高速多维度运动体的参数辨识与状态估计、多智能平台的协同控制、非线性随动系统建模与控制, 五个方面阐述了数字化陆用武器系统的建模、优化与控制问题, 涵盖了陆用武器系统中的指挥控制、火力控制和武器平台的控制。未来武器系统的发展将以作战需求为牵引, 多平台的协同控制、一体化指挥控制的优化与决策等研究必须体现出作战任务的特殊性。通用的决策模型或者通用的控制器模型将不能满足未来数字化高技术战争对战术细节的需求。因此, 数字化武器系统的建模、优化与控制问题是控制科学与陆用武器相结合中永恒的研究主题。历史经验表明: 尖端科技的诞生和应用往往始于军事应用领域。在各国大力推进军事现代化的时期, 伴随着各种新型军事技术装备的日新月异, 新的建模、优化和控制问题会不断涌现, 会给控制科学带来更多的

挑战。

References

- Ye M, Li C F, Chen G H, Wu J. EECS: an energy efficient clustering scheme in wireless sensor networks. In: Proceedings of the 24th IEEE International Performance, Computing, and Communications Conference. New York, USA: IEEE, 2005. 535–540
- Xu Y, Heidemann J, Estrin D. Geography-informed energy conservation for ad hoc routing. In: Proceedings of the 7th ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York, USA: Association for Computing Machinery, 2001. 70–84
- Deng J, Han Y S, Heinzelman W B, Varshney P K. Balanced-energy sleep scheduling scheme for high-density cluster-based sensor networks. *Computer Communications*, 2005, **28**(14): 1631–1642
- Hong X Y, Xu K X, Gfria M. Scalable routing protocols for mobile ad hoc networks. *IEEE Network*, 2002, **16**(4): 11–20
- Zhang B X, Mouftah H T. Efficient grid-based routing in wireless multi-hop networks. In: Proceedings of the 10th IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC). Cartagena, Cobobia: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2005. 367–372
- Deb B, Bhatnagar S, Nath B. A Topology Discovery Algorithm for Sensor Networks with Applications to Network Management. DCS Technical Report DCS-TR-441, Rutgers University, 2001
- Xing Yun-Bing, Shi Hao-Shan, Zhao Hong-Gang. Improvement of LEACH protocol based on spare nodes for wireless sensor networks. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2007, **20**(7): 1592–1596
(邢云冰, 史浩山, 赵洪钢. 基于备用节点的无线传感器网络 LEACH 协议的改进. 传感技术学报, 2007, **20**(7): 1592–1596)
- Jia Yong-Can, Liu Yu-Hua, Xu Kai-Hua, Gao Jing-Ju. Hierarchical clustering routing scheme based on LEACH in wireless sensor network. *Computer Engineering*, 2009, **35**(11): 74–76
(贾永灿, 刘玉华, 许凯华, 高景菊. WSN 中基于 LEACH 的多层次簇路由方案. 计算机工程, 2009, **35**(11): 74–76)
- Xie Shan-Shan, Bai Guang-Wei, Cao Lei. Protocols of determining connected dominating sets based on region partition. *Computer Engineering and Design*, 2012, **33**(4): 1319–1323
(谢珊珊, 白光伟, 曹磊. 基于区域划分的连通支配集协议. 计算机工程与设计, 2012, **33**(4): 1319–1323)
- Bian Yong-Zhao, Wang Jun, Yu Hai-Bin, Zhang Jian-Hua. Construction of fault tolerant connected dominating sets in WSN. *Application Research of Computers*, 2010, **27**(1): 292–294, 313
(卞永钊, 王军, 于海斌, 张建华. 无线传感器网络中具有容错能力的连通支配集构造算法. 计算机应用研究, 2010, **27**(1): 292–294, 313)
- Hong Zhen, Yu Li, Zhang Gui-Jun, Chen You-Rong. Topology construction based on minimum connected dominating set for wireless sensor networks. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2012, **34**(8): 2000–2006
(洪榛, 俞立, 张贵军, 陈友荣. 基于最小连通支配集的无线传感网拓扑构建研究. 电子与信息学报, 2012, **34**(8): 2000–2006)
- Llorca J, Kalantari M, Milner S D, Davis C C. A quadratic optimization method for connectivity and coverage control in backbone-based wireless networks. *Ad Hoc Networks*, 2009, **7**(3): 614–621

- 13 Liu Quan-Long. Research on Complex Networks Dependability [Master dissertation], Beijing University of Posts and Telecommunications, China, 2007
(刘全龙. 复杂网络可靠性研究 [硕士学位论文], 北京邮电大学, 中国, 2007)
- 14 Holme P, Kim B J, Yoon C N, Han S K. Attack vulnerability of complex networks. *Physical Review E*, 2002, **65**(5): 96–109
- 15 Cohen R, Erez K, Ben-Avraham D, Havlin S. Resilience of the internet to random breakdowns. *Physical Review Letters*, 2000, **85**(21): 4626–4628
- 16 Vázquez A, Moreno Y. Resilience to damage of graphs with degree correlations. *Physical Review E*, 2003, **67**(1): 95–101
- 17 Rozenfeld A F, Cohen R, Ben-Avraham D, Havlin S. Scale-free networks on lattices. *Physical Review Letters*, 2002, **89**(21): 695–701
- 18 Ramanathan R, Rosales-Hain R. Topology control of multihop wireless networks using transmit power adjustment. In: Proceedings of IEEE INFOCOM 2000. Tel Aviv, Israel: IEEE, 2000. 404–413
- 19 Li N, Hou J C. Topology control in heterogeneous wireless networks: problems and solutions. In: Proceedings of IEEE INFOCOM 2004. Urbana, USA: IEEE, 2004. 232–243
- 20 Butterfield J, Dantu K, Gerkey B, Jenkins O C, Sukhatme G S. Autonomous biconnected networks of mobile robots. In: Proceedings of the 6th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks and Workshops. Berlin, Germany: IEEE, 2008. 640–646
- 21 Basu P, Redi J. Movement control algorithms for realization of fault-tolerant ad hoc robot networks. *IEEE Network*, 2004, **18**(4): 36–44
- 22 Das S, Liu H, Nayak A, Stojmenović I. A localized algorithm for bi-connectivity of connected mobile robots. *Telecommunication Systems*, 2009, **40**(3–4): 129–140
- 23 Xu Li, Frey H, Santoro N, Stojmenovic I. Localized sensor self-deployment for guaranteed coverage radius maximization. In: Proceedings of ICC 2009 - 2009 IEEE International Conference on Communications. Dresden, Germany: IEEE, 2009. 1–5
- 24 Casteigts A, Albert J, Chaumette S, Nayak A, Stojmenović I. Biconnecting a network of mobile robots using virtual angular forces. In: Proceedings of the 72nd IEEE Vehicular Technology Conference Fall. Ottawa, Canada: IEEE, 2010. 1–5
- 25 Liu H, Chu X W, Leung Y W, Du R. Simple movement control algorithm for bi-connectivity in robotic sensor networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2010, **28**(7): 994–1005
- 26 Wu Jun, Tan Yue-Jin. Study on measure of complex network invulnerability. *Journal of Systems Engineering*, 2005, **20**(2): 128–131
(吴俊, 谭跃进. 复杂网络抗毁性测度研究. 系统工程学报, 2005, **20**(2): 128–131)
- 27 Liu Xiao-Lin, Wang Neng. Study on measures of communication network invulnerability. *Journal of Shanghai Normal University (Natural Sciences)*, 2006, **35**(5): 38–41
(刘啸林, 王能. 通信网络抗毁性量度研究. 上海师范大学学报(自然科学版), 2006, **35**(5): 38–41)
- 28 Xing Qing-Hua, Liu Fu-Xian. Modeling on area air defense optimization deployment system. *Systems Engineering and Electronics*, 2006, **28**(5): 712–715
(邢清华, 刘付显. 区域防空部署优化系统建模. 系统工程与电子技术, 2006, **28**(5): 712–715)
- 29 Han Song-Chen, Shi De-Ping. Optimization for air-defense combat configuration via simulated annealing algorithm. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 1999, **20**(5): 478–480
(韩松臣, 石德平. 基于模拟退火算法的防空作战布局优化. 航空学报, 1999, **20**(5): 478–480)
- 30 Liu Ming, Li Wei-Min, Wang Ying-Long, Liu Yi-Jing. Optimization of the regional air defense disposition based on genetic algorithms. *Systems Engineering and Electronics*, 2003, **25**(2): 191–193
(刘铭, 李为民, 王颖龙, 刘毅静. 基于遗传算法的区域防空部署优化研究. 系统工程与电子技术, 2003, **25**(2): 191–193)
- 31 Wang Zhong-Jie, Li Xia, Zhou Qi-Ming, Wan Fan-Bing. Study on decision-making problems in multi-constrained deploying a radar network system. *Fire Control and Command Control*, 2008, **33**(12): 133–136
(王中杰, 李侠, 周启明, 万凡兵. 多约束条件的雷达组网系统部署决策问题. 火力与指挥控制, 2008, **33**(12): 133–136)
- 32 Liu Jian. Optimum selection and improvement of disposition schemes for ground air-defence operation. *Fire Control and Command Control*, 2005, **30**(2): 97–99
(刘健. 地面防空作战部署方案优选与改进方法. 火力与指挥控制, 2005, **30**(2): 97–99)
- 33 Chen Jie, Chen Chen, Zhang Juan, Xin Bin. Deployment optimization for point air defense based on memetic algorithm. *Acta Automatica Sinica*, 2010, **36**(2): 242–246
(陈杰, 陈晨, 张娟, 辛斌. 基于 Memetic 算法的要地防空优化部署方法. 自动化学报, 2010, **36**(2): 242–246)
- 34 Tanergüclü T, Maraş H, Gencer C, Aygünnes H. A decision support system for locating weapon and radar positions in stationary point air defence. *Information Systems Frontiers*, 2012, **14**(2): 423–444
- 35 Karasakal O, Kandiller L, Özdemirel N E. A branch and bound algorithm for sector allocation of a naval task group. *Naval Research Logistics*, 2011, **58**(7): 655–669
- 36 Cai H P, Liu J X, Chen Y W, Wang H. Survey of the research on dynamic weapon-target assignment problem. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2006, **17**(3): 559–565
- 37 Athans M. Command and control (C2) theory: a challenge to control science. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1987, **32**(4): 286–293
- 38 Çetin E, Esen S T. A weapon-target assignment approach to media allocation. *Applied Mathematics and Computation*, 2006, **175**(2): 1266–1275
- 39 Hosein P A, Athans M. Preferential Defense Strategies. Part I: The Static Case, Technical Report LIPS-P-2002, MIT Laboratory for Information and Decision Systems with Partial Support, USA, 1990
- 40 Hosein P A, Athans M. Preferential Defense Strategies. Part II: The Dynamic Case, Technical Report LIPS-P-2003, MIT Laboratory for Information and Decision Systems with partial support, USA, 1990
- 41 Lloyd S P, Witsenhausen H S. Weapons allocation is NP-complete. In: Proceedings of the 1986 IEEE Summer Simulation Conference. Reno, Nevada, USA: IEEE, 1986. 1054–1058

- 42 Cai Huai-Ping, Liu Jing-Xu, Chen Ying-Wu. On the Markov characteristic of dynamic weapon target assignment problem. *Journal of National University of Defense Technology*, 2006, **28**(3): 125–127
(蔡怀平, 刘靖旭, 陈英武. 动态武器目标分配问题的马尔可夫性. 国防科技大学学报, 2006, **28**(3): 125–127)
- 43 Chen Ying-Wu, Cai Huai-Ping, Xing Li-Ning. An improved algorithm of policies optimization of dynamic weapon target assignment problem. *Systems Engineering - Theory & Practice*, 2007, **27**(7): 160–165
(陈英武, 蔡怀平, 邢立宁. 动态武器目标分配问题中策略优化的改进算法. 系统工程理论与实践, 2007, **27**(7): 160–165)
- 44 Yang Zu-Kuai, Liu Ding-Chen. Optimization model analysis of dynamic WTA based on Markov decision-making. *Fire Control & Command Control*, 2003, **28**(5): 25–27
(杨祖快, 刘鼎臣. 基于马尔柯夫决策过程动态 WTA 最优化模型分析. 火力与指挥控制, 2003, **28**(5): 25–27)
- 45 Xin B, Chen J, Peng Z H, Dou L H, Zhang J. An efficient rule-based constructive heuristic to solve dynamic weapon-target assignment problem. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics — Part A: Systems and Humans*, 2011, **41**(3): 598–606
- 46 Li J J, Cong R, Xiong J G. Dynamic WTA optimization model of air defense operation of warships' formation. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2006, **17**(1): 126–131
- 47 You Zhi-Feng, Li Yong, Liang Yu, Hao Hai-Yan. Analysis of the evolutionary group's decision-making mechanism for the large area air defence. *Modern Defense Technology*, 2005, **33**(4): 14–17
(尤志峰, 李勇, 梁宇, 郝海燕. 大区域防空的进化群决策机制研究. 现代防御技术, 2005, **33**(4): 14–17)
- 48 Galati D G, Simaan M A. Near-Nash targeting strategies for heterogeneous teams of autonomous combat vehicles. In: Proceedings of the 2008 SPIE 6962, Unmanned Systems Technology X. Orlando, FL, USA: SPIE, 2008. DOI: 10.1117/12.782108
- 49 Pan Shu-Shan, Wu Xiao-Yun, Ma Da-Wei, Qiao Yan-Ling. Weapon-target assignment based on the theory of rough sets. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2005, **25**(1): 56–59
(潘书山, 吴晓云, 马大为, 乔艳玲. 基于粗集理论的武器目标分配. 弹箭与制导学报, 2005, **25**(1): 56–59)
- 50 He Zheng-Hong, Zhang Jin-Cheng. A firepower assignment model of aerial defense based on expert systems. *Systems Engineering and Electronics*, 2001, **23**(7): 44–46
(贺正洪, 张金成. 基于专家系统的防空火力分配模型. 系统工程与电子技术, 2001, **23**(7): 44–46)
- 51 Sahin M A, Leblebicioğlu K. A standard expert system for weapon target assignment problem. In: Proceedings of the 2009 International Symposium on Performance Evaluation and Computer & Telecommunication Systems. Ankara, Turkey: IEEE, 2009. 221–224
- 52 Xin B, Chen J, Zhang J, Fang H, Peng Z H. Hybridizing differential evolution and particle swarm optimization to design powerful optimizers: a review and taxonomy. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics — Part C: Applications and Reviews*, 2012, **42**(5): 744–767
- 53 Jackson K, Farbman M S. Trajectory reconstruction with a least squares sliding window (LSSW) filter. In: Proceedings of the 2007 AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Hilton Head, SC, United States: AIAA, 2007. 2058–2080
- 54 Janczak D, Sankowski M. Data fusion for ballistic targets tracking using least squares. *AEU — International Journal of Electronics and Communications*, 2012, **66**(6): 512–519
- 55 Farina A, Ristic B, Benvenuti D. Tracking a ballistic target: comparison of several nonlinear filters. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, **38**(3): 854–867
- 56 Du C P, Sun H D, Zhou D Y, Song B F. On ballistic parameter identification method based on ant colony algorithm. *Electronics Optics and Control*, 2008, **15**(7): 4–6, 19
- 57 Dai Yao, Wang De-Hu, Ma Ye. Study of nonlinear ballistic parameters identification based on neural network contrary model. *Journal of Ballistics*, 2005, **17**(1): 18–22
(戴耀, 汪德虎, 马野. 基于神经网络逆模型的非线性外弹道参数辨识. 弹道学报, 2005, **17**(1): 18–22)
- 58 Wacholder E. A neural network-based optimization algorithm for the static weapon-target assignment problem. *INFORMS Journal on Computing*, 1989, **1**(4): 232–246
- 59 Kang Ying-Jun, Li Wei-Min, Li Xu-Wu. A study of the optimal aerial defense fire-power distribution based on HNN. *Fire Control and Command Control*, 2003, **28**(6): 35–37
(康英军, 李为民, 李续武. Hopfield 神经网络的防空火力最优分配问题. 火力与指挥控制, 2003, **28**(6): 35–37)
- 60 Bertsekas D P, Homer M L, Logan D A, Patek S D, Sandell N S. Missile defense and interceptor allocation by neuro-dynamic programming. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics — Part A: Systems and Humans*, 2000, **30**(1): 42–51
- 61 Cai Huai-Ping, Chen Ying-Wu, Xing Li-Ning. Research on dynamic weapon target assignment problem based on SVNTS algorithm. *Computer Engineering and Applications*, 2006, **42**(31): 7–10, 22
(蔡怀平, 陈英武, 邢立宁. SVNTS 算法的动态武器目标分配问题研究. 计算机工程与应用, 2006, **42**(31): 7–10, 22)
- 62 Bogdanowicz Z R. A new efficient algorithm for optimal assignment of smart weapons to targets. *Computers and Mathematics with Applications*, 2009, **58**(10): 1965–1969
- 63 Blodgett D E, Gendreau M, Guertin F, Potvin J Y, Séguin R. A tabu search heuristic for resource management in naval warfare. *Journal of Heuristics*, 2003, **9**(2): 145–169
- 64 Madni A M, Andrecut M. Efficient heuristic approach to the weapon-target assignment problem. *Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication*, 2009, **6**(6): 405–414
- 65 Ahuja R K, Kumar A, Jha K C, Orlin J B. Exact and heuristic algorithms for the weapon-target assignment problem. *Operations Research*, 2007, **55**(6): 1136–1146
- 66 Lee M Z. Constrained weapon-target assignment: enhanced very large scale neighborhood search algorithm. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics — Part A: Systems and Humans*, 2010, **40**(1): 198–204
- 67 Malhotra A, Jain R K. Genetic algorithm for optimal weapon allocation in multilayer defence scenario. *Defence Science Journal*, 2001, **51**(3): 285–293
- 68 Liu Mei, Zhao Gang, Quan Tai-Fan. New-type genetic algorithm for weapon-target assignment of the antiaircraft command system. *Systems Engineering and Electronics*, 2005, **27**(3): 456–460
(刘梅, 赵刚, 权太范. 新型遗传算法在防空指挥系统目标分配中的应用. 系统工程与电子技术, 2005, **27**(3): 456–460)

- 69 Wang Wei, Cheng Shu-Chang, Zhang Yu-Zhi. Research on approach for a type of weapon target assignment problem solving by genetic algorithm. *Systems Engineering and Electronics*, 2008, **30**(9): 1708–1711
(王玮, 程树昌, 张玉芝. 基于遗传算法的一类武器目标分配方法研究. 系统工程与电子技术, 2008, **30**(9): 1708–1711)
- 70 Lu H Q, Zhang H J, Zhang X J, Han R X. An improved genetic algorithm for target assignment, optimization of naval fleet air defense. In: Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation. Dalian, China: IEEE, 2006. 3401–3405
- 71 Ma Hai-Tao, Zhao Wei-Dong. The fire distribution problem of ADG made up of AGM based on genetic algorithm. *Fire Control and Command Control*, 2006, **31**(4): 36–38
(马海涛, 赵伟东. 基于遗传算法的弹炮混编防空群火力分配. 火力与指挥控制, 2006, **31**(4): 36–38)
- 72 Wu Ling, Lu Fa-Xing, Jia Pei-Fa. Meta-level control of the anytime algorithm for the dynamic weapon-target allocation problem. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2008, **48**(S2): 1762–1765
(吴玲, 卢发兴, 贾培发. 动态武器目标分配问题中改进遗传算法的元级控制. 清华大学学报(自然科学版), 2008, **48**(S2): 1762–1765)
- 73 Xiu Chun-Bo, Liu Xiang-Dong, Zhang Yu-He, Tang Yun-Yu. A chaos optimization algorithm for firepower distribution. *Fire Control and Command Control*, 2006, **31**(1): 14–16
(修春波, 刘向东, 张宇河, 唐运虞. 一种用于求解火力分配问题的混沌优化算法. 火力与指挥控制, 2006, **31**(1): 14–16)
- 74 Deng Chang-Shou, Liang Chang-Yong. Hybrid coding differential evolution algorithm for weapon-target assignment problem. *Application Research of Computers*, 2009, **26**(1): 74–76
(邓长寿, 梁昌勇. 求解武器 – 目标分配问题的混合编码差异演化算法. 计算机应用研究, 2009, **26**(1): 74–76)
- 75 Zeng X P, Zhu Y L, Nan L, Hu K Y, Niu B, He X X. Solving weapon-target assignment problem using discrete particle swarm optimization. In: Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation. Dalian, China: IEEE, 2006. 3562–3565
- 76 Wang L, Wang H Y, Qiu Z M. An improved artificial immune algorithm for solving weapon-target assignment problem. In: Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation. Chongqing, China: IEEE, 2008. 8622–8625
- 77 Kwon O, Lee K, Kang D H, Park S. A branch-and-price algorithm for a targeting problem. *Naval Research Logistics*, 2007, **54**(7): 732–741
- 78 Karasakal O. Air defense missile-target allocation models for a naval task group. *Computers and Operations Research*, 2008, **35**(6): 1759–1770
- 79 Lee Z J, Su S F, Lee C Y. An immunity-based ant colony optimization algorithm for solving weapon-target assignment problem. *Applied Soft Computing*, 2002, **2**(1): 39–47
- 80 Lee Z J, Su S F, Lee C Y. Efficiently solving general weapon-target assignment problem by genetic algorithms with greedy eugenics. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics — Part B: Cybernetics*, 2003, **33**(1): 113–121
- 81 Fu T P, Liu Y S, Chen J H. Improved genetic and ant colony optimization algorithm for regional air defense WTA problem. In: Proceedings of the 1st International Conference on Innovative Computing, Information and Control. Beijing, China: IEEE, 2006. 226–229
- 82 Bisht S. Hybrid genetic-simulated annealing algorithm for optimal weapon allocation in multilayer defence scenario. *Defence Science Journal*, 2004, **54**(3): 395–405
- 83 Khosla D, Nichols T. Hybrid evolutionary algorithms for network-centric command and control. In: Proceedings of SPIE 6249, Defense Transformation and Network-Centric Systems. Orlando, FL, USA: SPIE, 2006. DOI: 10.1117/12.782108
- 84 Wang Xiao-Yi, Hou Chao-Zhen, Yuan Ju-Mei, Guo Fei, Hao Wei. Modeling and optimization method on antiaircraft firepower allocation. *Control and Decision*, 2006, **21**(8): 913–917
(王小艺, 侯朝桢, 原菊梅, 郭飞, 郝伟. 防空火力分配建模及优化方法研究. 控制与决策, 2006, **21**(8): 913–917)
- 85 Chen Hua-Dong, Wang Shu-Zong, Wang Hang-Yu. Research of firepower assignment with multi-launcher and multi-weapon based on a hybrid particle swarm optimization. *Systems Engineering and Electronics*, 2008, **30**(5): 880–883
(陈华东, 王树宗, 王航宇. 基于混合粒子群算法的多平台多武器火力分配研究. 系统工程与电子技术, 2008, **30**(5): 880–883)
- 86 Ding Zhu, Ma Da-Wei, Tang Ming-Duan, Zhang Xue-Feng. TSAPSO: a hybrid search algorithm of tabu search and annealing particle swarm optimization for weapon-target assignment. *Journal of System Simulation*, 2006, **18**(9): 2480–2483
(丁铸, 马大为, 汤铭端, 张学锋. 基于禁忌退火粒子群算法的火力分配. 系统仿真学报, 2006, **18**(9): 2480–2483)
- 87 Chen J, Xin B, Peng Z H, Dou L H, Zhang J. Evolutionary decision-makings for the dynamic weapon-target assignment problem. *Science in China Series F: Information Sciences*, 2009, **52**(11): 2006–2018
- 88 Xin B, Chen J, Zhang J, Dou L H, Peng Z H. Efficient decision makings for dynamic weapon-target assignment by virtual permutation and tabu search heuristics. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics — Part C: Applications and Reviews*, 2010, **40**(6): 649–662
- 89 Xin B, Chen J. An estimation of distribution algorithm with efficient constructive repair/improvement operator for the dynamic weapon-target assignment. In: Proceedings of the 31st Chinese Control Conference. Hefei, China: IEEE, 2012. 2346–2351
- 90 Grewal M S, Glover K. Identifiability of linear and nonlinear dynamical systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1976, **21**(6): 833–837
- 91 Berntsen H E, Balchen J G. Identifiability of linear dynamical systems. In: Proceedings of the 3rd IFAC Symposium on Identification and System Parameter Estimation. The Hague, Delft, Netherlands: North Holland, 1973. 871–874
- 92 Siferd R E, Maybeck P S. Identifiability of nonlinear dynamical systems. In: Proceedings of the 21st IEEE Conference on Decision and Control. Orlando, FL, USA: IEEE, 1982. 1167–1171
- 93 Goodrich R L, Caines P E. Necessary and sufficient conditions for local second-order identifiability. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1979, **24**(1): 125–127
- 94 Némcová J. Structural identifiability of polynomial and rational systems. *Mathematical Biosciences*, 2010, **223**(2): 83–96
- 95 Evans N D, Chapman M J, Chappell M J, Godfrey K R. Identifiability of uncontrolled nonlinear rational systems. *Automatica*, 2002, **38**(10): 1799–1805

- 96 Wang L Y, Yin G G, Zhang J F. Joint identification of plant rational models and noise distribution functions using binary-valued observations. *Automatica*, 2006, **42**(4): 535–547
- 97 Fliess M. Local realization of linear and nonlinear time-varying systems. In: Proceedings of the 21st IEEE Conference on Decision and Control. Orlando, FL, USA: IEEE, 1982. 733–738
- 98 Tunali E, Tarn T J. New results for identifiability of nonlinear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1987, **32**(2): 146–154
- 99 Joly-Blanchard G, Denis-Vidal L. Some remarks about an identifiability result of nonlinear systems. *Automatica*, 1998, **34**(9): 1151–1152
- 100 Denis-Vidal L, Joly-Blanchard G. An easy to check criterion for (un)identifiability of uncontrolled systems and its applications. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2000, **45**(4): 768–771
- 101 Pohjanpalo H. System identifiability based on the power series expansion of the solution. *Mathematical Biosciences*, 1978, **41**(1–2): 21–33
- 102 Walter E. *Identifiability of State Space Models: with Applications to Transformation Systems*. Berlin: Springer-Verlag, 1982
- 103 Denis-Vidal L, Joly-Blanchard G, Noiret C. Some effective approaches to check the identifiability of uncontrolled nonlinear systems. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2001, **57**(1–2): 35–44
- 104 Diop S, Fliess M. Nonlinear observability, identifiability, and persistent trajectories. In: Proceedings of the 30th IEEE Conference on Decision and Control. Brighton, UK: IEEE, 1991. 714–719
- 105 Ljung L, Glad T. On global identifiability for arbitrary model parametrizations. *Automatica*, 1994, **30**(2): 265–276
- 106 Denis-Vidal L, Joly-Blanchard G. Equivalence and identifiability analysis of uncontrolled nonlinear dynamical systems. *Automatica*, 2004, **40**(2): 287–292
- 107 Yates J W, Evans N D, Chappell M J. Structural identifiability analysis via symmetries of differential equations. *Automatica*, 2009, **45**(11): 2585–2591
- 108 Strejc V. Least squares parameter estimation. *Automatica*, 1980, **16**(5): 535–550
- 109 Mowery V. Least squares recursive differential-correction estimation in nonlinear problems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1965, **10**(4): 399–407
- 110 Kukreja S L, Kearney R E, Galiana H L. A least-squares parameter estimation algorithm for switched Hammerstein systems with applications to the VOR. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2005, **52**(3): 431–444
- 111 Vajda S, Valkó P, Godfrey K R. Direct and indirect least squares methods in continuous-time parameter estimation. *Automatica*, 1987, **23**(6): 707–718
- 112 Angeby J. Estimating signal parameters using the nonlinear instantaneous least squares approach. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2000, **48**(10): 2721–2732
- 113 Goethals I, Pelckmans K, Suykens J A K, De Moor B. Identification of MIMO Hammerstein models using least squares support vector machines. *Automatica*, 2005, **41**(7): 1263–1272
- 114 Gao Jian, He Bing-Geng. Neural network for solving nonlinear least squares problem. *Journal of Mathematics for Technology*, 2002, **18**(4): 29–31
(高坚, 贺秉庚. 用神经网络解非线性最小二乘问题. 工科数学, 2002, **18**(4): 29–31)
- 115 Kalman R E. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Transactions of the ASME — Journal of Basic Engineering*, 1960, **82**: 35–45
- 116 Chen Jie, Deng Fang, Chen Wen-Jie. Parameters identification from indirect data and its application in the identification of ballistic parameters. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2007, **27**(S1): 118–122
(陈杰, 邓方, 陈文颉. 基于间接数据的参数辨识及其在弹道模型中的应用. 北京理工大学学报, 2007, **27**(S1): 118–122)
- 117 Deng Fang, Chen Jie, Bai Yong-Qiang. Identification of ballistic parameters based on virtual ballistic trajectory data from firing tables. In: Proceedings of the 29th Chinese Control Conference. Beijing, China: IEEE, 2010. 1236–1241
(邓方, 陈杰, 白永强. 基于射表虚拟弹道数据的弹道模型参数辨识. 第29届中国控制会议. 北京, 中国: IEEE, 2010. 1236–1241)
- 118 Reif K, Guenther S, Yaz E, Unbehauen R. Stochastic stability of the continuous-time extended Kalman filter. *IEE Proceedings Control Theory and Applications*, 2000, **147**(1): 45–52
- 119 Reif K, Guenther S, Yaz E, Unbehauen R. Stochastic stability of the discrete-time extended Kalman filter. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1999, **44**(4): 714–728
- 120 Norgaard M, Poulsen N K, Ravn O. New developments in state estimation for nonlinear systems. *Automatica*, 2000, **36**(11): 1627–1638
- 121 Bierman G J. Measurement updating using the U-D factorization. *Automatica*, 1976, **12**(4): 375–382
- 122 Arasaratnam I, Haykin S. Square-root quadrature Kalman filtering. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, **56**(6): 2589–2593
- 123 Schei T S. A finite-difference method for linearization in nonlinear estimation algorithms. *Automatica*, 1997, **33**(11): 2053–2058
- 124 Zhou Dong-Hua, Xi Yu-Geng, Zhang Zhong-Jun. A suboptimal multiple fading extended Kalman filter. *Acta Automatica Sinica*, 1991, **17**(6): 689–695
(周东华, 席裕庚, 张钟俊. 一种带多重次优渐消因子的扩展卡尔曼滤波器. 自动化学报, 1991, **17**(6): 689–695)
- 125 Chen Jie, Deng Fang, Chen Wen-Jie, Ma Tao. Parameter identification of nonlinear system and its application based on strong tracking filter and wavelet transform. *Control Theory and Applications*, 2010, **27**(6): 738–744
(陈杰, 邓方, 陈文颉, 马韬. 基于强跟踪滤波器及小波变换的非线性系统参数辨识及应用. 控制理论与应用, 2010, **27**(6): 738–744)
- 126 Gordon N J, Salmond D J, Smith A F. Novel approach to nonlinear/non-Gaussian Bayesian state estimation. *IEE Proceedings F (Radar and Signal Processing)*, 1993, **140**(2): 107–113
- 127 Arulampalam M S, Maskell S, Gordon N, Clapp T. A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-Gaussian Bayesian tracking. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2002, **50**(2): 174–188
- 128 Julier S J, Uhlmann J K, Durrant-Whyte H F. A new approach for filtering nonlinear systems. In: Proceedings of the 1995 American Control Conference. Seattle, WA, USA: American Automatic Control Council, 1995. 1628–1632

- 129 Van der Merwe R. Sigma-point Kalman Filters for Probabilistic Inference in Dynamic State-space Models [Ph.D. dissertation], Oregon Health and Sciences University, USA, 2004
- 130 Sarkka S. On unscented Kalman filtering for state estimation of continuous-time nonlinear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2007, **52**(9): 1631–1641
- 131 Wan E A, Van der Merwe R. The unscented Kalman filter for nonlinear estimation. In: Proceedings of the 2000 IEEE Adaptive Systems for Signal Processing, Communications, and Control Symposium. Lake Louise, Alta., Canada: IEEE, 2000. 153–158
- 132 VanDyke M C, Schwartz J L, Hall C D. Unscented Kalman filtering for spacecraft attitude state and parameter estimation. *Advances in the Astronautical Sciences*, 2005, **119**(Sup): 217–228
- 133 Julier S J, Uhlmann J K. Reduced sigma point filters for the propagation of means and covariances through nonlinear transformations. In: Proceedings of the 2002 American Control Conference. Anchorage, AK, USA: IEEE, 2002. 887–892
- 134 Holmes S, Klein G, Murray D W. A square root unscented Kalman filter for visual monoSLAM. In: Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Pasadena, CA, USA: IEEE, 2008. 3710–3716
- 135 Deng Zhi-Hong, Yan Li-Ping, Fu Meng-Yin. Multirate multisensor data fusion based on missing measurements. *Systems Engineering and Electronics*, 2010, **32**(5): 886–890
(邓志红, 袁莉萍, 付梦印. 基于不完全观测数据的多速率多传感器数据融合. 系统工程与电子技术, 2010, **32**(5): 886–890)
- 136 Zhao Wen-Ce, Pan Jian-Ping, Chen Wei-Li. The processing method of incomplete instrumentation data based on consideration of trajectory dynamic characteristics. *Journal of Spacecraft TT & C Technology*, 2006, **25**(6): 64–68
(赵文策, 潘建平, 陈伟利. 基于弹道动力特性考虑的不完全测量数据处理方法. 飞行器测控学报, 2006, **25**(6): 64–68)
- 137 Wang Yuan-Yuan, Zhang Jun, Zhu Yan-Bo, Lin Xi. Asynchronous multi-rate sensor information fusion algorithm based on missing measurements. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2009, **37**(S1): 271–274
(王媛媛, 张军, 朱衍波, 林熙. 异步多速率传感器不完全观测信息融合算法. 华中科技大学学报(自然科学版), 2009, **37**(S1): 271–274)
- 138 Wang Z D, Shen B, Liu X H. H_∞ filtering with randomly occurring sensor saturations and missing measurements. *Automatica*, 2012, **48**(3): 556–562
- 139 Liang H Y, Zhou T. Robust state estimation for uncertain discrete-time stochastic systems with missing measurements. *Automatica*, 2011, **47**(7): 1520–1524
- 140 Ma L F, Wang Z D, Hu J, Bo Y M, Guo Z. Robust variance-constrained filtering for a class of nonlinear stochastic systems with missing measurements. *Signal Processing*, 2010, **90**(6): 2060–2071
- 141 Meng J, Egerstedt M. Distributed coordination control of multiagent systems while preserving connectedness. *IEEE Transactions on Robotics*, 2007, **23**(4): 693–703
- 142 Zavlanos M M, Pappas G J. Potential fields for maintaining connectivity of mobile networks. *IEEE Transactions on Robotics*, 2007, **23**(4): 812–816
- 143 Zavlanos M M, Jadbabaie A, Pappas G J. Flocking while preserving network connectivity. In: Proceedings of the 46th IEEE Conference on Decision and Control. New Orleans, LA, USA: IEEE, 2007. 2919–2923
- 144 Spanos D P, Murray R M. Motion planning with wireless network constraints. In: Proceedings of the 2005 American Control Conference. Portland, USA: IEEE, 2005. 87–92
- 145 Pereira G A S, Kumar V, Campos M F M. Closed loop motion planning of cooperating mobile robots using graph connectivity. *Robotics and Autonomous Systems*, 2008, **56**(4): 373–384
- 146 Notarstefano G, Savla K, Bullo F, Jadbabaie A. Maintaining limited-range connectivity among second-order agents. In: Proceedings of the 2006 American Control Conference. Minneapolis, MN, USA: IEEE, 2006. 2124–2129
- 147 Zavlanos M M, Tahbaz-Salehi A, Jadbabaie A, Pappas G J. Distributed topology control of dynamic networks. In: Proceedings of the 2008 American Control Conference. Seattle, WA: IEEE, 2008. 2660–2665
- 148 Schuresko M, Cortés J. Distributed motion constraints for algebraic connectivity of robotic networks. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2009, **56**(1–2): 99–126
- 149 Mesbahi M. On state-dependent dynamic graphs and their controllability properties. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005, **50**(3): 387–392
- 150 Yoonsoo K, Mesbahi M. On maximizing the second smallest eigenvalue of a state-dependent graph Laplacian. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2006, **51**(1): 116–120
- 151 Xiao L, Boyd S. Fast linear iterations for distributed averaging. *Systems and Control Letters*, 2004, **53**(1): 65–78
- 152 Cortés J, Martínez S, Bullo F. Robust rendezvous for mobile autonomous agents via proximity graphs in arbitrary dimensions. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2006, **51**(8): 1289–1298
- 153 Schuresko M D, Cortés J. Safe graph rearrangements for distributed connectivity of robotic networks. In: Proceedings of the 46th IEEE Conference on Decision and Control. New Orleans, LA: IEEE, 2007. 4602–4607
- 154 Gustavi T, Dimarogonas D V, Egerstedt M, Hu X M. Sufficient conditions for connectivity maintenance and rendezvous in leader-follower networks. *Automatica*, 2010, **46**(1): 133–139
- 155 Su H S, Wang X F, Chen G R. A connectivity-preserving flocking algorithm for multi-agent systems based only on position measurements. *International Journal of Control*, 2009, **82**(7): 1334–1343
- 156 Liu Zhi-Xin, Guo Lei. Connectivity and synchronization of multi-agent systems. In: Proceedings of the 25th Chinese Control Conference. Harbin, China: IEEE, 2006. 373–378
(刘志新, 郭雷. 多个体系统的连通与同步. 第 25 届中国控制会议. 哈尔滨, 中国: IEEE, 2006. 373–378)
- 157 Li X L, Xi Y G. Distributed cooperative coverage and connectivity maintenance for mobile sensing devices. In: Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control. Shanghai, China: IEEE, 2009. 7891–7896
- 158 Chen Shi-Ming, Fang Hua-Jing. Modeling and stability analysis of large-scale intelligent swarm. *Control and Decision*, 2005, **20**(5): 490–494
(陈世明, 方华京. 大规模智能群体的建模及稳定性分析. 控制与决策, 2005, **20**(5): 490–494)

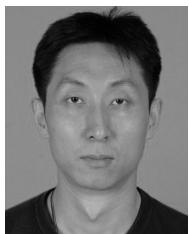
- 159 Mao Y T, Dou L H, Fang H, Liu H G. Distributed motion coordination for multi-agent systems with connectivity maintenance using backbone-based networks. In: Proceedings of the 18th IFAC World Congress. Milano, Italy: IFAC, 2011. 13588–13593
- 160 Yamaguchi H. A distributed motion coordination strategy for multiple nonholonomic mobile robots in cooperative hunting operations. *Robotics and Autonomous Systems*, 2003, **43**(4): 257–282
- 161 Tanner H G, Jadbabaie A, Pappas G J. Flocking in teams of nonholonomic agents. In: Proceedings of the 2003 Block Island Workshop on Cooperative Control. Block Island, RI, USA: Springer-Verlag, 2002. 229–239
- 162 Chang D E, Marsden J E. Gyroscopic forces and collision avoidance with convex obstacles. *New Trends in Nonlinear Dynamics and Control and Their Applications*, 2004, **295**(1): 145–159
- 163 Olfati-Saber R. Flocking for multi-agent dynamic systems: algorithms and theory. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2006, **51**(3): 401–420
- 164 Mao Y T, Dou L H, Fang H, Liu H G, Cao H. Connectivity-preserving flocking of multi-agent systems with application to wheeled mobile robots. In: Proceedings of the 29th Chinese Control Conference. Beijing, China: IEEE, 2010. 4494–4500
- 165 Waydo S, Murray R M. Vehicle motion planning using stream functions. In: Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Taipei, China: IEEE, 2003. 2484–2491
- 166 Sullivan J, Waydo S, Campbell M. Using stream functions for complex behavior and path generation. In: Proceedings of the 2003 AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Austin, Texas: AIAA, 2003. 3–5
- 167 Daily R, Bevly D M. Harmonic potential field path planning for high speed vehicles. In: Proceedings of the 2008 American Control Conference. Seattle, Washington: IEEE, 2008. 4609–4614
- 168 Lu Jun, Guan Zhi-Hong, Wang Hua. Multiple mobile robots swarming control model based on stream function. *Robot*, 2006, **28**(3): 265–268, 274
(卢骏, 关治洪, 王华. 基于流函数的多移动机器人Swarming控制模型. 机器人, 2006, **28**(3): 265–268, 274)
- 169 Guo Teng-Fei, Wang Hong-Lun, Liang Xiao. Path planning based on stream function method for UAV. *Tactical Missile Technology*, 2011, (5): 27–32
(郭腾飞, 王宏伦, 梁宵. 基于流函数法的无人机航路规划. 战术导弹技术, 2011, (5): 27–32)
- 170 Cao Meng-Lei, Wang Hong-Lun, Liang Xiao. Route planning for UAVs using improved stream function method. *Electronics Optics and Control*, 2012, **19**(2): 1–4, 16
(曹梦磊, 王宏伦, 梁宵. 采用改进流函数法的无人机航路规划. 电光与控制, 2012, **19**(2): 1–4, 16)
- 171 Wang Q, Fang H, Chen J, Mao Y T, Dou L H. Flocking with obstacle avoidance and connectivity maintenance in multi-agent systems. In: Proceedings of the 51st IEEE Conference on Decision and Control. Hawaii, USA: IEEE, 2012. 4009–4014
- 172 Yao B. High performance adaptive robust control of nonlinear systems: a general framework and new schemes. In: Proceedings of the 36th IEEE Conference on Decision and Control. New York, USA: IEEE, 1997. 2489–2494
- 173 Shahnazi R, Akbarzadeh-T M R. PI adaptive fuzzy control with large and fast disturbance rejection for a class of uncertain nonlinear systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2008, **16**(1): 187–197
- 174 Armstrong-Helouvry B. Stick slip and control in low-speed motion. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1993, **38**(10): 1483–1496
- 175 Ren B B, Ge S S, Su C Y, Tong H L. Adaptive neural control for a class of uncertain nonlinear systems in pure-feedback form with hysteresis input. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics — Part B: Cybernetics*, 2009, **39**(2): 431–443
- 176 Zhou J, Meng J E, Zurada J M. Adaptive neural network control of uncertain nonlinear systems with nonsmooth actuator nonlinearities. *Neurocomputing*, 2007, **70**(4–6): 1062–1070
- 177 Jang J O. Neural network saturation compensation for dc motor systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2007, **54**(3): 1763–1767
- 178 Leonessa A, Haddad W M, Hayakawa T, Morel Y. Adaptive control for nonlinear uncertain systems with actuator amplitude and rate saturation constraints. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2009, **23**(1): 73–96
- 179 Boiko I, Fridman L, Pisano A, Usai E. Analysis of chattering in systems with second-order sliding modes. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2007, **52**(11): 2085–2102
- 180 Khalil H K. *Nonlinear Systems (Third edition)*. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002
- 181 van der Schaft A, Schumacher H. *An Introduction to Hybrid Dynamical Systems*. London: Springer-Verlag, 2000
- 182 Bacciotti A, Rosier L. *Liapunov Functions and Stability in Control Theory (Second edition)*. Berlin Heidelberg: Springer, 2005
- 183 Krstic M, Kanellakopoulos I, Kokotovic P. *Nonlinear and Adaptive Control Design*. New York: John Wiley, 1995
- 184 Yao B, Tomizuka M. Adaptive robust control of MIMO nonlinear systems in semi-strict feedback forms. *Automatica*, 2001, **37**(9): 1305–1321
- 185 Yao B, Tomizuka M. Adaptive robust control of SISO nonlinear systems in a semi-strict feedback form. *Automatica*, 1997, **33**(5): 893–900
- 186 Wang D, Huang J. Neural network-based adaptive dynamic surface control for a class of uncertain nonlinear systems in strict-feedback form. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2005, **16**(1): 195–202
- 187 Yang Z J, Nagai T, Kanae S, Wada K. Dynamic surface control approach to adaptive robust control of nonlinear systems in semi-strict feedback form. *International Journal of Systems Science*, 2007, **38**(9): 709–724
- 188 Yao B, Xu L. Output feedback adaptive robust control of uncertain linear systems with disturbances. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2006, **128**(4): 938–945
- 189 Yao B, Palmer A. Indirect adaptive robust control of SISO nonlinear systems in semi-strict feedback forms. In: Proceeding of the 15th IFAC Triennial World Congress. Barcelona, Spain: IFAC, 2002. 1050–1056
- 190 Yao B. Integrated direct/indirect adaptive robust control of SISO nonlinear systems in semi-strict feedback form. In: Proceedings of the 2003 American Control Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003. 3020–3025

- 191 Zhang G Z, Chen J, Li Z P. Adaptive robust control for servo mechanisms with partially unknown states via dynamic surface control approach. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2010, **18**(3): 723–731
- 192 Karsenti L, Lamnabhi-Lagarrigue F, Bastin G. Adaptive control of nonlinear systems with nonlinear parameterization. *System and Control Letters*, 1996, **27**(2): 87–97
- 193 Kojić A, Annaswamy A M. Adaptive control of nonlinearly parameterized systems with a triangular structure. *Automatica*, 2002, **38**(1): 115–123
- 194 Yokoi K, Hung N V Q, Tuan H D, Hosoe S. Adaptive control design for nonlinearly parameterized systems with a triangular structure. *Asian Journal of Control*, 2007, **9**(2): 121–132
- 195 Hung N V Q, Tuan H D, Narikiyo T, Apkarian P. Adaptive control for nonlinearly parameterized uncertainties in robot manipulators. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2008, **16**(3): 458–468
- 196 Qu Z H, Hull R A, Wang J. Globally stabilizing adaptive control design for nonlinearly-parameterized systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2006, **51**(6): 1073–1079
- 197 Liu X B, Ortega R, Su H Y, Chu J. Immersion and invariance adaptive control of nonlinearly parameterized nonlinear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2010, **55**(9): 2209–2221
- 198 Li Z, Chen J, Zhang G, Gan M G. Adaptive robust control for DC motors with input saturation. *IET Control Theory and Applications*, 2011, **5**(16): 1895–1905
- 199 Wu J L. Stabilizing controllers design for switched nonlinear systems in strict-feedback form. *Automatica*, 2009, **45**(4): 1092–1096
- 200 Han T T, Ge S S, Lee T H. Adaptive neural control for a class of switched nonlinear systems. *Systems and Control Letters*, 2009, **58**(2): 109–118
- 201 Zhang G Z, Chen J, Li Z P. Identifier-based adaptive robust control for servomechanisms with improved transient performance. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, **57**(7): 2536–2547



陈杰 北京理工大学自动化学院教授。1986年、1996年和2000年分别获得北京理工大学控制科学与工程专业学士学位、硕士学位和博士学位。主要研究方向为复杂系统智能控制与优化。本文通信作者。E-mail: chenjie@bit.edu.cn
(CHEN Jie) Professor at the School of Automation, Beijing Institute of Technology. He received his bachelor, master, and Ph. D. degrees in control science and engineering from Beijing Institute of Technology in 1986, 1996, and 2000, respectively.

His research interest covers intelligent control and optimization of complex systems. Corresponding author of this paper.)



方浩 北京理工大学自动化学院教授。1995年于西安理工大学获得自动控制专业学士学位, 1998年和2002年于西安交通大学分别获得自动控制专业硕士学位和博士学位。主要研究方向为移动机器人控制, 并联机器人, 多智能体系统。
E-mail: fanghao@bit.edu.cn

(FANG Hao) Professor at the School of Automation, Beijing Institute of Technology. He received his bachelor degree in automatic control from Xi'an University of Technology in 1995, master and Ph. D. degrees in automatic control from Xi'an Jiaotong University in 1998 and 2002, respectively. His research interest covers control of mobile robots, parallel manipulators, and multi-agent systems.)



辛斌 北京理工大学自动化学院讲师。2004年获得北京理工大学信息工程专业学士学位, 2012年获得北京理工大学控制科学与工程专业博士学位。主要研究方向为智能优化, 组合优化, 进化计算。
E-mail: brucebin@bit.edu.cn

(XIN Bin) Lecturer at the School of Automation, Beijing Institute of Technology. He received his bachelor degree in information engineering from Beijing Institute of Technology in 2004, and his Ph. D. degree in control science and engineering from Beijing Institute of Technology in 2012. His research interest covers intelligent optimization, combinatorial optimization, and evolutionary computation.)



邓方 北京理工大学自动化学院讲师。2004年和2009年分别获得北京理工大学控制科学与工程专业学士学位和博士学位。主要研究方向为非线性系统辨识, 故障诊断。
E-mail: dengfang@bit.edu.cn

(DENG Fang) Lecturer at the School of Automation, Beijing Institute of Technology. He received his bachelor and Ph. D. degrees in control science and engineering from Beijing Institute of Technology in 2004 and 2009, respectively. His research interest covers nonlinear system identification and fault diagnosis.)