

陆用运动体控制系统发展现状与趋势

孙健^{1,2} 邓方^{1,2} 陈杰^{1,2,3}

摘要 在高技术战争的背景下, 陆用运动体控制系统呈现出数字化、智能化、网络化、无人化的发展趋势. 面向未来作战需求, 陆用运动体控制系统必须更加高效、可靠、自主与智能. 本文针对陆用运动体控制系统的环境与态势感知, 火力指挥与控制, 多平台协同以及维修保障与健康管理等当前主要研究成果和最新进展做了简要综述. 在总结国内外的现有研究成果的基础上, 指出了目前存在的挑战与未来的研究方向.

关键词 陆用运动体, 态势感知, 火力指挥与控制, 协同控制, 健康管理

引用格式 孙健, 邓方, 陈杰. 陆用运动体控制系统发展现状与趋势. 自动化学报, 2018, 44(11): 1985–1999

DOI 10.16383/j.aas.2018.c180600

Control System of Ground-based Moving Platforms: State of the Art and Future Trends

SUN Jian^{1,2} DENG Fang^{1,2} CHEN Jie^{1,2,3}

Abstract Under the background of high-tech war, ground-based moving platforms present a trend of digitalization, intelligence, networking and unmanned. Facing the requirements of the wars in future, ground-based moving platforms are required to be more efficient, reliable, autonomous and intelligent. This paper concentrates on main results and new advances of four aspects of the control system of ground moving platforms, that is, environmental and situational sensing, fire control and command control, coordination among multiple platforms and maintenance and health management. On the basis of summarizing the existing research results, some existing challenges and future research directions are pointed out.

Key words Ground-based moving platforms, situation awareness, fire command and control, collaborative control, health management

Citation Sun Jian, Deng Fang, Chen Jie. Control system of ground-based moving platforms: state of the art and future trends. *Acta Automatica Sinica*, 2018, 44(11): 1985–1999

所谓运动体指相对于地球有运动的且具有某种用途或能够完成某种任务的系统或平台. 本文所指的陆用运动体是指地面战场使用的常规重型机械化设备和轻型地面作战装备以及相应的作战指挥系统. 包括压制武器、坦克与装甲车辆、防空武器、导航与指挥自动化系统、弹药与制导兵器以及轻武器和反

坦克武器, 同时也包括后勤支援设备和作战训练、作战指挥模拟、武器作战使用模拟训练等系统^[1].

科学技术的高速发展给现代战争的形式带来了巨大的改变. 一批高精尖武器的出现, 信息化与网络化极大变革了现代战争的作战理念. 作战空间大, 作战方法多, 作战环境复杂, 对抗加剧是现代战争的主要特征. 面向现代作战的要求, 陆用运动体的发展一直呈现着数字化、智能化、网络化、无人化的趋势. 面对未来战争更高的要求, 如何实现更加智能、自主的陆用运动体控制系统成为一个重要的课题.

面向未来的陆用运动体控制系统还面临着诸多挑战. 1) 为了实现智能化的陆用运动体控制, 运动体对环境与态势的感知是必不可少的. 对环境因素与目标状态的了解是陆用运动体实施精确打击的前提条件. 此外, 随着战场复杂程度的加剧为了使陆用运动体能够更好地自主决策和辅助决策, 需要对环境与态势进行有效的感知. 2) 随着网络化, 信息化程度的不断加深, 火力控制与指挥控制一体化是指挥控制系统的必然发展趋势. 如何对作战资源进行有

收稿日期 2018-09-06 录用日期 2018-10-11
Manuscript received September 6, 2018; accepted October 11, 2018

国家自然科学基金 (61522303, 61621063, 61720106011), 长江学者创新团队 (IRT1208), 长江学者青年项目, 青年拔尖人才支持计划资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (61522303, 61621063, 61720106011), Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University (IRT1208), Youth ChangJiang Scholars Program, and National Outstanding Youth Talents Support Program

本文责任编辑 丁进良

Recommended by Associate Editor DING Jin-Liang

1. 北京理工大学自动化学院 北京 100081 2. 北京理工大学复杂系统智能控制与决策国家重点实验室 北京 100081 3. 同济大学 上海 201804

1. School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081 2. Key Laboratory of Intelligent Control and Decision of Complex System, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081 3. Tongji University, Shanghai 201804

效的管理、部署、分配、调度和控制对作战效能有决定性影响。3) 在未来作战中, 多个陆用运动体之间的自主协调、协作和协商对于更好地完成战术与战略目标具有重要意义。4) 先进的控制技术要求陆用运动体有良好的部件, 如传感器、计算机等, 高效地维护与保障这些部件是战斗力发挥的前提。

因此为了适应现代及未来的作战需要, 要求陆用运动体能够:

1) 自主地、高效地完成对战场的环境感知, 对目标的敌我、种类、位置及运动状态的识别;

2) 高效地完成指定的作战目标的同时, 提供更多及时的信息以及建议给决策者, 帮助决策者更好地理解战场局势变化;

3) 与其他作战单位, 自主, 智能地协同作战;

4) 自主地进行故障检测与诊断, 实现运动体系良好的健康管理。

针对上述需求, 提炼出如下 4 个研究方向:

1) 环境与态势感知;

2) 火力控制与指挥控制;

3) 多平台协同;

4) 故障诊断与健康管理。

1 环境与态势感知

对于陆用运动体控制系统, 环境和态势的感知主要是对战场地形地貌、气象水文、敌我动态、武器配备、兵力分布等信息的获取与掌握情况。环境和态势感知能力对预测战情, 掌控作战进程, 夺取作战优势有着重要的意义。各种陆用运动体控制系统对环境和态势感知的能力是实现系统对目标进行有效打击的重要前提。为此, 首先需获得目标的空间位置、运动状态以及目标种类信息, 并以此为瞄准依据, 驱动火力系统完成对目标的瞄准与打击。

主要研究内容包括: 目标的探测与识别, 机动目标的建模与跟踪以及多传感器多目标关联问题。

1.1 目标探测与识别

目前, 对目标的探测主要包括雷达的主动探测形式以及光电红外的被动方式。目标识别的主要方法可以粗略地概括为以下 4 类:

1) 统计模式识别方法。该方法主要利用目标的统计特性, 以贝叶斯理论为基础, 在提取特征向量的基础上应用特征匹配分类技术对目标进行识别。该方法适用于较窄的场景, 不适用于处理目标或背景变化较大, 目标存在遮蔽, 模糊等情形。

目前, 最近邻域法、多维相关匹配方法、最大似然贝叶斯分类器、贝叶斯优化决策规则、最大似然函数等都已用于目标特征的分类决策。

2) 基于知识和模型的目标识别方法。此方法需

要根据已有的先验知识, 对待识别目标进行相关特征的提取、归纳, 并利用提取的特征对目标进行抽象建模, 由它们构成目标识别的约束, 最后对实际成像图像进行相应的特征提取和目标假设, 并借助获得的目标先验知识模型的约束对该假设完成推理和验证, 得到识别结果。

文献 [2] 将知识引入到解决雷达目标识别这类复杂问题中, 提出一种基于知识的雷达目标识别模型, 可以有效地识别车辆和坦克两类目标, 提高目标识别的可靠性; 文献 [3] 中对比了基于知识的目标识别算法和恒虚警率检测算法对真实合成孔径雷达 (Synthetic aperture radar, SAR) 图像识别效果, 实验结果表明, 基于知识的目标识别算法可以更有效地识别目标, 抑制虚警。

3) 基于人工神经网络的自动目标识别方法。人工神经网络 (Artificial neural network, ANN) 是由大量的基本处理单元组成的非线性自适应系统, 是一种模拟生物神经网络的人工智能方法, 它具有自学能力、联想记忆能力和计算能力, 能通过简单非线性单元的复合映射而获得较强的非线性处理能力。ANN 在目标识别中得到了广泛的应用并取得了不错的识别效果。

文献 [4] 分别应用经典反向传播 (Back propagation, BP) 算法, 具有动量项和自适应学习速率的 BP 算法和 Levenberg-marguardt (LM) 优化算法来训练神经网络以实现精确识别目标的效果, 通过实验对比发现, 采用 LM 优化算法训练的神经网络收敛速度快, 目标识别率较高。针对雷达目标信号复杂多样的特点, 文献 [5] 提出了基于 BP 神经网络的雷达目标识别方法。文献 [6] 提出运用递推最小二乘学习算法训练径向基函数神经网络, 对目标进行识别, 实验结果表明, 基于此方法的目标识别精度较高, 发生错判的几率有所降低, 具有较好的识别效果。

4) 基于深度学习的自动目标识别方法。近年来, 深度学习技术快速发展, 已成功应用于图像识别等领域。深度学习是一种训练深层神经网络的机器学习算法, 最终得到的深度神经网络模型就是一种通过学习大量数据而得到的知识模型。将其运用到自动目标识别中, 就是通过训练图像数据集获得可辨识目标属性的知识模型。获得这种知识模型主要过程包括图像训练样本集预处理, 网络模型构建和网络模型参数优化。

文献 [7] 采用 5 类目标图像数据集: 预警机、航母、驱护舰、F35、F16 和 B52, 训练深度神经网络。实验与测试结果表明此方法能有效改善目标的识别精度和速度。文献 [8] 使用由 Sandia 国家实验室的 SAR 传感器采集的 SAR 图像实验数据集来训练深

度卷积神经网络, 来实现 SAR 图像目标识别与全极化 SAR 地物分类, 针对带相位信息的 SAR 图像, 在文献中将卷积神经网络推广到了复数域, 提出了复数卷积神经网络。

1.2 机动目标建模与跟踪

由于在战场上目标的行为模式复杂多变, 为了能准确估计目标位置和运动状态, 必须要建立目标的运动模型。模型既要符合目标的实际运动情况又要便于对其进行理论上的分析和计算。目标的运动模型大体上可以分为: 全局统计模型和当前统计模型。对于单纯的目标跟踪问题实际上就是目标状态的跟踪滤波问题。它是通过一个或多个传感器获取对环境中目标的有噪声观测值, 利用计算机来完成信号处理, 从背景中识别目标并对目标进行精确的跟踪。当目标发生机动时, 要保证跟踪滤波器能够跟踪上目标运动状态的变化, 并输出正确的目标运动信息。

目前, 机动目标跟踪问题所面临的主要挑战是测量起源的不确定性和目标运动方式的不确定性。基于模型的单模型算法和多模型算法是两类最主要的机动目标跟踪算法, 它们的主要区别在于行为决策与状态估计之间的关系。使用基于单一模型的自适应滤波方法进行机动目标跟踪时效果往往并不理想。而多模型方法是对强机动目标有较高适应性的跟踪方法。目前, 典型的机动目标跟踪算法主要包括: 变维滤波算法, Singer 模型算法和交互式多模型算法等。

1) 变维滤波算法。该算法采用两种模型, 即非机动模型和机动模型。变维滤波算法的基本原理是: 当目标处于非机动时滤波器工作于非机动模型状态, 即采用位置和速度的二维卡尔曼滤波, 当检测器检测到目标机动时, 滤波器切换到机动模型状态, 即采用位置、速度和加速度的三维增广卡尔曼滤波器, 实现目标跟踪。

文献 [9] 将变维卡尔曼滤波算法应用于激光跟踪测量系统, 实现机动目标的跟踪, 大幅提高了系统的跟踪测量精度。文献 [10] 将变维卡尔曼滤波算法应用到雷达跟踪检测系统, 对机动目标跟踪具有较好的性能。该方法提高了机动目标跟踪的精度和抗干扰能力。但是, 该方法存在较大的检测延迟; 滤波器之间切换时会产生较大的瞬时误差。

2) Singer 模型算法。该方法将运动目标的机动看成是噪声注入恒定的目标运动模型而产生的扰动。不同的噪声统计特性可以实现不同强度的目标机动。该方法原理简单, 实现方便, 在一定情况下可取得较好的跟踪效果。但该方法并没有体现出目标产生机动的根本物理原因, 对于大机动的目标, 跟踪效果较

差甚至造成目标跟踪失败。

3) 交互式多模型算法 (Interacting multiple model, IMM)。此方法是在广义贝叶斯算法的基础上发展起来的, 是一种具有相当实用水平的多模型估计算法。它认为不同模型之间的转移概率服从有限态 Markov 过程, 在多模型算法的基础上考虑了多模型的交互, 并根据模型概率加权求和得到最终估计结果。该算法的目标跟踪效果一般取决于其模型的选择、模型的个数以及模型的参数; 然而, 盲目增加模型集的模型数量不仅会导致计算量迅速增加, 而且会降低目标跟踪性能。

文献 [11] 在 IMM 算法中引入了容积卡尔曼滤波器 (Cubature Kalman filter, CKF), 设计了交互式多模型容积卡尔曼滤波算法 (IMM-CKF)。该算法采用 Markov 过程描述多个目标模型间的切换, 利用 CKF 滤波器对每个模型进行滤波, 将各滤波器状态输出的概率加权融合作为 IMM-CKF 的输出。仿真结果表明, 算法跟踪精度比交互式多模型无迹卡尔曼滤波算法精度更高, 具有重要的工程应用价值。文献 [12] 做了进一步的改进, 在 IMM-CKF 算法的基础上, 将平方根容积卡尔曼滤波器 (Square root cubature Kalman filter, SRCKF) 引入到 IMM 算法中, 提出了带有转移概率在线修正的交互式多模型平方根容积卡尔曼滤波 (IMM-SRCKF) 机动目标跟踪算法, 实验仿真结果表明, 该算法相对于常规的 IMM 及 IMM-CKF 算法, IMM-SRCKF 算法跟踪精度更高, 模型切换更合理, 切换速度更快。

文献 [13] 结合 Singer 模型算法和交互多模型算法各自的特点, 设计了基于 IMM-Singer 模型的机动目标跟踪算法, 实现 Singer 模型参数的自适应选择, 实验仿真结果表明, 该算法与单一的 Singer 模型算法及常规的 IMM 算法相比较, 有效提高了机动目标跟踪的精度。

1.3 多传感器多目标关联

在多目标跟踪的情况下, 需建立多个目标点量测的关联关系, 并且同时建立多个目标的航迹。而在多传感器的情况下该问题就更为复杂, 需要建立起不同传感器探测的目标量测之间的关联关系。多传感器多目标跟踪技术是将多个传感器获得的信息在融合中心有机合成, 用以提高多目标运动状态估计的精度, 其性能比单一传感器要优越得多。而数据关联算法是多传感器多目标跟踪技术的核心。

数据关联问题产生的主要原因在于传感器测量数据的不准确性以及目标跟踪环境的复杂性。由于噪声等原因, 传感器所得到的数据不可能完全准确。此外, 由于目标跟踪的先验知识不足, 目标的个数往往也不清楚, 观测数据是否来源于真实目标也无法

事先辨别. 这使得观测数据与真实目标之间的匹配关系非常难以确定.

目前, 在杂波环境下多目标跟踪效果最好的数据关联算法包括联合概率数据关联方法和多假设关联方法. 但是随着跟踪目标数量, 回波数目与杂波密度的增加, 算法的计算量急剧增加. 近年来, 随着人工神经网络的应用研究复兴以来, 人们开始利用神经网络所具有的组优化计算能力来实现多目标数据互联问题的求解.

1.4 问题与展望

目前存在的目标探测与识别方法均存在着一定的局限, 特别是在复杂的战场环境下对目标的识别, 跟踪还存在着一些困难. 对于目标识别, 在复杂环境中有效地识别目标, 使方法对于环境具有高自适应性仍然是挑战. 在目标跟踪问题上, 如何在平衡计算复杂度的前提下提高跟踪精度, 增强自适应能力仍会是未来的研究方向. 如何提高在复杂环境下目标跟踪的性能也是亟待解决的问题. 此外, 在多不确定性环境下, 多传感器多目标跟踪问题上, 目前尚未出现实用的算法, 还需要更多的研究. 随着深度神经网络等机器学习方法在计算机视觉中的广泛应用, 可以预见这些新方法将目标识别, 目标跟踪的结合将会是未来研究的重点. 如何将这些算法从实验室推广到计算资源受限的平台上, 并将在数据集上取得的效果泛化到真实环境中是实用化的重要研究问题.

2 火力控制与指挥控制

火力控制是信息化战争的主要依据, 火力指的是武器或弹药系统形成的有效杀伤、摧毁、破坏的能力; 控制则是对这样的火力进行精准的控制, 以期达到想要的目标. 指挥控制是信息化战争的重要手段, 指挥所执行的功能是“做决定”, 它负有重大的责任, 指挥要对被指挥的人负责; 控制是对指挥员的决定进行操控, 通过发出指令来进行控制. 简单来说, 指挥控制决定打击的目标, 火力控制决定以哪种方式去打击这个目标. 火力控制与指挥控制相辅相成, 共同成为现代战争的重要组成部分, 同样也是国家战争水平先进性的重要标志. 因此, 火力控制与指挥控制的发展对国家的意义十分巨大.

2.1 火力控制

火力控制主要包含以下三个方面: 火力控制系统、火力控制理论和火力控制技术. 火力控制理论是火控科学重要的组成部分, 是火控科学的基础. 火力控制理论用来分析、综合火力控制的全过程. 发展至今, 火力控制理论已经形成了一套独有的理论体系, 可以用来指导火力控制系统的设计. 火力控

制技术是基于火力控制理论并且可以应用到具体火力控制系统中的一种方法, 根据火力控制系统的功能组成, 火力控制技术可以细分为: 目标搜索技术、目标跟踪技术、气象与弹道条件测量技术、定位定向技术、脱靶量测量技术、火控计算机技术、武器随动控制技术、信息显示与控制技术、信息传输技术. 火力控制系统不仅是现代武器系统必不可少的重要组成部分, 而且也是现代武器系统先进性的重要考量. 火力控制系统涉及的领域十分广泛, 几乎所有的现代武器系统中都含有火力控制系统. 火力控制理论、火力控制技术和火力控制系统互相发展, 互相促进, 共同推动了火力控制学科的发展. 火力控制理论是火力控制学科的基础, 伴随着现代武器水平不断发展而逐步更新的火力控制理论是火力控制学科发展的巨大推力; 火力控制技术是火力控制学科得以不断发展, 完善的重要支柱, 火力控制学科是一门多学科交叉的学科, 不同学科中先进技术的发展促进了火力控制技术综合性的发展, 从而为火力控制学科的发展做好了充足的保证; 火力控制系统是火力控制学科的集中表现, 随着火力控制系统对于促进现代武器性能提升的作用日益显著, 很好彰显了火力控制学科在未来的发展中有很好的前景. 本节主要针对火力控制理论、火力控制技术和火力控制系统的国内研究现状进行总结.

2.1.1 火力控制理论

1) 命中分析

命中分析是将目标航迹数学模型与弹头弹道数学模型联立建立命中方程, 进而换算出武器的射击诸元. 命中分析研究内容一般包括: 弹道方程与射表、命中方程、命中方程求解与命中方程分析等. 近年来, 国内在该领域主要针对不同武器系统的火控诸元解算模型和命中方程解算方法进行研究.

Deng 等^[14] 利用射表数据虚拟的弹道曲线和参数辨识方法, 建立了一种弹道微分方程模型, 并给出整个方法的流程图. 赵东华等^[15] 提出了一种基于二分法求根思想的解外弹道方程组决定火炮射击诸元算法, 有效避免了查找射表带来的诸如容易出错, 时间长, 数据拟合复杂等问题, 在保证计算精度的条件下大大提升了求解射击诸元的计算速度. 随着计算机技术的迅猛发展, 对火控弹道诸元解算速度提出了更高的要求. 秦鹏飞等^[16] 通过对现行基于二分法的弹道解算方法的详细分析, 提出了一种全新的基于落点诸元信息的弹道解算方法, 进一步提高了火炮射击诸元的实时解算能力. 邱晓波等^[17] 针对对动过程中容易出现火炮难以命中目标等问题, 利用车体运动速度传感器补偿弹丸附加初速, 采用机

运动模型进行目标跟踪与预测,并直接在极坐标系下设计了目标机动模型和滤波算法用于解命中计算,为实际环境下作战系统的解命中方法提供了一种新型的改进策略。

2) 误差分析

误差分析在火力控制理论中具有很重要的实际价值.对实际环境下各个作战系统的火控进行误差分析,可以为不同情况选择进行误差补偿或者为改进控制策略提供良好的思路 and 参考,对于提升我国火控系统战术、技术性能有重要的指导意义。

许建胜等^[18]采用蒙特卡洛方法对末敏弹命中目标位置的散布特性进行了仿真研究,分析了风向、伞的摆动、滚转角和战斗部散布等各个参数对于命中点的影响.陈敬志等^[19]给出了空舰导弹火控系统动态精度实验方法和需确定的重要的实验要素,提出了有效的误差分析与处理方法,为空舰导弹火控系统的设计定型提供了技术支撑.李魁武等^[20]结合火控闭环控制技术和火控解算误差相关性,建立了针对自行高炮射击误差综合补偿模型,利用火控解算前一时刻的误差特性,对后一时刻火控解算进行误差实时综合补偿,有效提高了自行高炮射击精度。

2.1.2 火力控制技术

火力控制技术属于应用范畴,它综合了计算机技术、网络技术、通信技术、控制理论与技术、光电子等技术,具有典型的多学科交叉特性.本节仅对火控系统中的一个重要支撑技术的近些年取得的成果进行总结。

1) 火控计算机技术

火控计算机技术是研究火控系统计算设备的科学技术,包括火控计算机硬件和火控软件.火控计算机是火控系统数据处理的核心与中枢;火控软件一般指运行于火控计算机上的应用程序。

齐劲松等^[21-22]结合国产化工程实践分别提出了基于龙芯 2F+1A 和龙芯 3A+2H 的火控计算机系统的设计思路和方法,在保证满足军用系统的安全性和可靠性的同时,也具有较好的实时性和实用性.邓方等^[23]将改进粒子群优化的弹道解算方法和多核计算机并行计算能力相结合,提出了一种基于改进粒子群优化的弹道并行求解算法,极大地减少了弹道计算时间。

2) 网络化火控技术

传统集中式的火控体系结构由于其信息处理速度慢,抗毁性差等原因已不能适应现代化作战的需求,并且随着网络技术的飞速发展和高科技作战形式的不断产生,人们开始研究了一种网络化的火控体系结构.网络化控制系统是通过网络闭环的反馈控制系统,系统内各节点可以通过网络互相连接通

信并根据环境需求灵活重组,系统反应速度快,适应性和抗毁性强.自网络化火控系统这个问题提出以来,一直受到很多学者的广泛关注。

陈晨等^[24]以网络化防空作战为背景,构建了网络化防空火控系统的分层分布式体系结构和基于预测序列的信息传输方式,并针对防空作战的任务需求,提出了相应的指挥体系重组方法.陈杰等^[25]在此基础上,将网络化防空火控系统和航迹融合问题进行结合,提出并构建了基于联邦卡尔曼滤波技术的航迹融合方法,很好地解决了在信息传输过程中出现的数据丢包和时延等问题.王磊等^[26]以区域防空反弹道导弹网络化作战为背景,描述和分析了军事系统资源的动态集成过程,实现了区域防空网络化作战体系结构的服务视图产品的设计。

2.1.3 火力控制系统

火力控制系统是实现火力控制功能的、若干相互联系和相互作用的要素组成的统一整体,这些要素包括装备和人.火力控制系统是火控理论和火控技术的物化或载体。

坦克作为陆上作战的中坚力量,受到了越来越广泛的关注.坦克火力控制系统经历 4 个发展阶段:人工装表、简易自动装表、稳像和自动跟踪.王钦钊等^[27]针对火控系统解命中理论、目标跟踪与状态辨识、炮控系统稳定精度以及射击延时误差等多个层面分析影响坦克火控系统性能的原因,并提出相应的改进方法.郑岩等^[28]建立了车载火控系统在高速运动的情况下对运动目标进行自动跟踪时敌我两车相对运动关系的数学模型,并基于传感器的实时信息利用卡尔曼滤波技术实现了车载火控系统对目标的自动跟踪,提高了首发命中率。

2.2 指挥控制

指挥控制是战争运用的重要手段之一,它随着战争的发生而诞生,也必将随着生产力的发展而不断发展.从 20 世纪 50 年代的 C2 (指挥与控制) 系统,到 60 年代 C3 (指挥、控制与通信) 系统,70 年代 C3I (指挥、控制、通信与情报) 系统,再到 C4I (指挥、控制、通信、计算机和情报) 系统以及最新的 C4ISR (指挥、控制、通信、计算机与情报、监视、侦察) 系统,指挥控制系统越来越呈现出多技术交叉的特征.陆用运动体系统指挥控制的研究方向主要包括:多传感器数据融合、网络化指挥控制、智能辅助决策,下面就这三个方向在近些年取得的成果分别进行阐述。

2.2.1 多传感器数据融合

多传感器数据融合技术为国内外研究的热点.多传感器数据融合是指:将一定数量不同的传感器的观测数据进行综合从而获得被测对象更鲁棒更完

整的描述的过程。多传感器数据融合技术广泛应用于机器人、传感器网络、目标识别、智能系统设计等领域。目前常用的多传感器数据融合的算法包括加权平均法、卡尔曼滤波法、多贝叶斯估计法、人工神经网络法、专家系统等。

张品等^[29]将贝叶斯估计和卡尔曼滤波结合起来,提出了一种优化的贝叶斯估计多传感器数据融合方法。司迎利等^[30]提出了一种基于全局状态估计的多传感器加权数据融合算法,可以使状态的估计值充分逼近真实值,从而使得算法具有较高的融合精度和抗干扰性。曾喆昭等^[31]提出了一种基于递推最小二乘法的多传感器数据融合的正交基神经网络算法,用基于递推最小二乘法的神经网络算法对各传感器的量测数据进行处理,并用神经网络输出结果的平均值来实现多传感器的数据融合。

2.2.2 网络化指挥控制

网络化控制系统是指通过网络闭环的反馈控制系统。近年来,网络化控制系统得到了广泛的研究和飞速的发展。网络化指挥控制是网络化控制在军事领域内的典型应用。网络化指挥控制将在一定范围内的作战单元通过网络连接起来,在互联互通,互操作的基础上,将各个分散的作战单元形成一个整体,提高资源的综合利用率,实现作战效能的大幅提升。网络化指挥控制系统具有极强的抗毁性、灵活性、快速性,是物联网时代的必然产物。

李启元等^[32]分析了网络化指挥控制中的同步问题。在指挥控制经典的包以德循环(Observation, orientation, decision, action, OODA)模型的基础上结合耦合相位振子的Kuramoto模型,建立了网络化指挥控制系统动态行为描述模型。在此基础上,分析了耦合强度与网络化指挥控制系统同步特性之间的关系。王文普等^[33]从网络化作战所特需的入网能力、作战指挥能力、指挥关系重组能力、网络安全防护能力出发,详细分析了网络化指挥控制系统的作战能力,并建立了网络化作战能力的评估指标体系和评估模型。

2.2.3 智能辅助决策

随着战争复杂程度的加重,对决策者提出了越来越高的要求,例如,能否24小时连续作战,能否综合各方面信息快速决策,能否在短时间内对战场形势进行估计,能否快速对目标的威胁程度进行评估并迅速调整火力分配和部署以求精准消灭等。因此,智能辅助决策系统引起了越来越多人的关注,成为地面武器装备指挥控制系统中的研究热点。智能辅助决策包括4个方面:信息获取,战场态势评估,目标威胁估计和火力分配等。

辅助决策传统的求解方法是建立在以数学规划

为基础的建模方式上的。王连峰等^[34]研究了空袭目标的实时威胁评估问题,在充分利用目标与阵地实时信息的基础上,应用模糊理论结合加权平均模型对威胁度进行了较准确的计算,评估结果更符合实现情况。马瑾等^[35]以装甲车为实例,提出适用平面的二次曲线获取方法,并在此基础上求解了战场环境中关注目标的三维几何数据。随着计算机技术与人工智能技术的不断发展,许多智能优化算法不断涌现,例如:蚁群算法、粒子群算法、模拟退火算法、遗传算法、差分进化算法、深度学习算法等。朱丰等^[36]分析了大数据背景下的战场态势评估,对基于深度学习的战场态势评估问题进行了较全面的综述,并展望了未来的研究方向。李姜等^[37]采用粒子群算法(Particle swarm optimization, PSO)对支持向量机(Support vector machine, SVM)中惩罚参数和核函数进行优化,建立改进的PSO-SVM目标威胁估计模型及算法。刘海波等^[38]采用模拟退火改进的粒子群算法代替神经网络中传统的梯度下降法,对网络参数初始值进行优化,建立了基于模拟退火粒子群算法优化的灰色神经网络模型,并应用于空中目标威胁评估,取得了良好的效果。

2.3 问题与展望

在目前的陆用运动体装备系统中,火力控制与指挥控制仍然是分开的。其原因在于目前的装备自动化、信息化、智能化程度仍然是较低的。首先,为了提高火力控制与指挥控制一体化程度,提高未来装备的自动化水平是充分条件之一。再次,将理论上效果优良的火力控制方法实用化,利用网络化提高火控系统信息融合程度是提高火控系统效率的重要方向。目前在信息融合方面无通用算法出现,而且针对复杂战场上信息传递和处理能力存在瓶颈,仍然需要解决方案。网络化控制系统是未来的趋势,针对其中复杂的信息流与物质流的互动和控制仍然需要研究。面对未来更加复杂的战场环境,智能辅助决策系统将会是智能陆用运动体的控制系统的重要组成部分。目前智能算法层出不穷,如何将它们运用在决策辅助中,并且将效果推广到真实环境中将会是智能辅助决策系统研究中的关键问题。

3 多平台协同

多平台协同控制和优化,是现代战争的重要特点,如何将分散的战略战术资源和各类武器平台有机地结合起来,最大化地发挥出作用,充分利用武器平台的“合同”优势,整合有效的武器资源,对我方的重要基础设施进行有效的保护,对作战资源进行高效的管理,实现对敌方威胁的有效清除对于作战效能的提高有着至关重要的作用。从2000年起,美

国国防部每两年制定一次无人作战系统路线图。在新版的路线图中明显地强调了多无人平台的协同。美军成功开展了通用式开放架构、自主处理与鲁棒决策、全异信息融合与控制的研究,并于2012年5月在DARPA位于Georgia的Fort Wtewart成功进行了多平台的协同群集验证。针对无人机蜂群作战,美国也积极开展相关的研究工作,启动了一些研究项目。例如,美国空军研究实验室提出的“忠诚僚机”项目,美国国防高级研究计划局提出的“小精灵”项目和“体系综合技术和实验”项目等。在真实的战争环境中,武器与目标信息、信息传输过程中包含的扰动、不可预计的意外事件、同时决策时间,打击频率都受到客观条件的约束,在多平台协同中,必须要解决包含不确定性的强约束条件下的动态决策问题。其次,无人机、无人车等无人平台的引入,在多平台协同过程中必须要考虑有人/无人系统的协同指挥和快速响应,为此需要建立相应的知识库和决策体系,研究任务分配和指挥决策问题。

3.1 作战资源部署

在战争开始之前,需要对战场形式进行评估,利用已有的传感探测资源和武器战略资源进行空间部署,针对可能出现的作战情形,提前做好准备,使得在实战中占到主动权和先机,但是在实际的作战中,需要考虑的因素极其复杂,对于不同设施的重要性评估,战略资源的毁伤概率等,作战资源部署更多地依赖战场指挥者的经验和智慧,当前对于作战资源部署的研究还不成熟,只有少量的研究成果进行了量化分析。

作战资源部署需要根据作战意图、任务、敌情和地形确定,不同的因素对于问题的重要性不均匀,机械的量化会导致模型与实际情形的差异较大,对于实际作战无指导意义。在实际的进攻部署中,需要划分战场和方向,每个方向包括多个不同的作战单位,不同的单位有各自的任务和目的,而在防御部署中,同样要在各个战场构建多道防线,防线间还有预备队等替补集团。

在考虑防空部署问题上,邢清华提出了掩护价值的概念^[39],即掩护能力和保卫目标重要程度的综合度量,利用其作为优化指标,采用启发式算法,优化得到模型的解,并在实际应用中验证了可行性。刘健提出了部署方案相似度的概念^[40],在资源部署过程中,优化过程极其困难,同时暴力搜索也是不现实的,通过相似度概念,可以通过少量的计算,实现目标明确的优化资源部署。此外,文献[41–42]同样考虑了防空导弹的部署问题,但是分别使用了模拟退火算法和进化算法对于优化问题进行求解。

3.2 作战资源分配

根据已有资源的属性不同,作战资源分配问题可以分为传感探测资源分配和武器资源分配,虽然在具体背景下的资源分配有差异,但是抽象到数学模型,在问题描述和求解上具有相似性,现有的研究集中于武器目标分配问题。随着信息技术的高速发展,现代战争不断向信息化,系统化发展,先进的传感监测系统可以精准地探测到目标,现代化的武器能够对目标进行准确的打击,通信技术将不同的平台、资源、信息连接在一起,在这样的背景下,武器目标分配问题的求解变得尤为重要,对于制定正确的战术战略决策有着重大意义。

武器目标分配问题(Weapon target assignment, WTA)是多系统协同中的动态决策的主要问题,是军事运筹学中一个经典的组合优化问题。通过有效的分配已有资源,对目标进行打击,使得对敌方目标最大化损毁,或者保护己方重要设施,并且使用最小的作战消耗。不同的优化目标之间往往不一致,甚至是相互矛盾的,需要权衡各个目标之间的相对重要性,选取合适的优化目标。WTA问题可以用数学中的多目标优化来描述,这是作战资源分配的一个通用的决策模型。解决多目标优化问题的实质是在各个目标之间做取舍,权衡相对重要性进行折中处理。

武器目标分配问题根据不同的标准可以进行不同的分类,根据应用场景的不同可以分为防御性WTA和进攻性WTA。进攻性WTA以造成最大毁伤为目的,防御性WTA的目标为保护关键设施和防御资源。根据模型是否时变分为动态WTA和静态WTA。当前的研究主要集中于静态WTA问题。动态WTA包含不确定性和参数变化,问题的分析和求解较为困难。在文献[43]中,作者总结了当前WTA问题研究的现状,指出了在动态WTA问题的特征,目前的研究集中在静态WTA上,同时指出只有规模小的问题被很好地解决,而大规模问题目前没有好的解决方案。

在文献[44]中,Lloyd等已经证明了目标武器分配问题为NP完全问题。文献[45]中使用大规模邻域搜索的方法进行WTA问题求解,在可行解中求取最优的结果,虽然得到了准确的解,但是计算的时间和空间复杂度较大,文献[46]给出了改进的大范围邻域搜索的方法,但是当维度增加,搜索空间变大后,无法得到性能良好的解决方法。随着研究的深入各类智能优化算法表现良好,其中进化算法成为了研究的热门,进化算法是一种随机优化方法,该方法被证明了可以用于单目标优化,又可以用于多目标优化,算法对于待优化问题的连续性要求没有传

统算法高,可以处理的目标函数和约束条件也更加宽泛。

文献[47–51] 分别在不同的背景下,使用遗传算法,求解 WTA 问题,其中文献[47] 讨论了在多层防御体系下的武器目标分配,在文献[48–50] 中考虑了不同情形下的防空防御问题,文献[51] 考虑了动态武器目标分配问题,利用元级控制过程控制算法的响应时间。文献[45] 同样考虑了防空作战指挥系统的 WTA 问题,采取了融合小生境技术及跨代基因选择技术的改进的遗传算法,取得了良好的求解效果。单独使用遗传算法和改进遗传算法对与性能的提升有限,在原始的基于分解的多目标优化问题中,使用的是模拟二进制交叉和多项式变异算子,为了改进算法效果,将遗传算法与其他智能优化算法融合,如蚁群算法^[52]、粒子群算法^[53]、模拟退火等。同样是考虑在多层防御体系下的防空作战,在文献[54] 中,将模拟退火和遗传算法融合,模拟退火算法作为一种随机启发式优化算法,通常用于难以求解的组合优化问题,搜索近似最优解^[55],先使用遗传算法搜索到接近全局最大/最小值,然后使用模拟退火进一步优化结果,使得计算效率提高。文献[56–58] 将粒子群算法和遗传算法融合,改善了单独使用单一算法的性能。

3.3 多平台协同控制

现代战争中,各个智能平台将共同协作,收集信息,打击目标,毁伤评估,而不是传统的单一平台指挥作战,为满足未来战争的需要,必须构建一体化智能作战平台,依靠群体优势,利用异构协同作战平台,应对复杂的战场环境。由于战争环境的变化迅速,充斥着随机事件和人为因素,在恶劣的条件下,如果只考虑多智能平台的稳定性,则系统无法满足实际要求,无法适应多样化的任务和复杂的环境。因此,必须要解决在任务与环境约束下的多平台协同控制问题,以提高系统环境适应能力与复杂任务的完成能力。

3.3.1 连通性保持条件下的协同控制

在系统节点保持连通的情况下,如何进行协同控制是最近的研究热点,研究人员从不同的角度进行分析。在文献[59] 中,通过给拓扑中的边加上权值,保证拓扑连通,研究动态拓扑中的多智能体协同控制。同样是在保证拓扑的连通性方面,文献[60–61] 使用了势能函数的概念,特别地,连通度约束被转化为每个节点运动的微分约束。在无线网络约束下,Spanos 等在[62] 中提出了“几何鲁棒性问题”,文献[63] 使用图的连通性,分析了闭环的多智能体运动规划。

多智能体系统与图论联系紧密,图论的相关理

论可以用于多智能体系统的分析,将子系统看作节点,系统间的联系看作边,整个系统形成一个拓扑,很多研究分析了以拉普拉斯矩阵为基础的代数特征,比如最小的非零特征值、谱半径等,这些代数特征一定程度地反映了系统的连通特性。在文献[64] 中,考虑的情形是机场网络的连通度最大化,即航班的增加和取消问题,提升机场运营效率。文献[65] 考虑的是二阶积分器模型,给出了分布式的优化系统连通度的方法。Zavlanos 等使用的是分布式次梯度优化的方法,优化目标仍然是增大化系统连通性^[66]。Mesbahi 等假设两个节点间的距离决定拓扑权重,考虑最优配置个体位置时,优化系统代数连通度,即最小的非零特征值^[67–68]。

在保证系统连通性的条件下,结合适当的协同控制策略,可以实现多种控制目标。Xiao 考虑的是分布式平均一致性问题,使用半正定规划优化代数连通度,得到快速收敛的迭代方法^[69]。Cortes 等则使用外心算法,使得每个节点的目标节点位于邻居节点的交集中,利用局部信息,实现全局无分裂的群集行为^[70]。Schuresko 等使用分布式的方法提取拓扑生成树,在系统切换的过程中保持节点间的连通^[71–72]。

3.3.2 障碍物规避条件下的连通性保持

在真实的环境中,各个子系统所处的环境充满着各类扰动,其中障碍物规避是必须考虑的实际问题。避障控制是一个非常关键的问题,障碍不仅是环境中可能出现的干扰节点运动的实例,也包含节点之间的相互规避,以免发生碰撞。

在文献[73] 中,Olfati-Saber 给出了在自由空间中,存在障碍物的条件下分布式集群算法的设计和理论框架,给出了三种具体的集群算法。除了势函数,流函数也是目前的研究重点,其实质仍然是人工势场函数的思想,但是借鉴了流体力学中的势场区域概念,将每个节点看作是流体的一部分,构造复势函数,得到平滑的控制规律。Waydo 等借用水动力分析的概念,给出的流函数满足拉普拉斯方程,给出了二维空间的导航函数^[74]。同样也是使用流函数,文献[75] 从将智能体视为不可压缩的流体通过圆形障碍物扩展到多个障碍物,并包含编队、风险管理,实现复杂环境下的路径规划问题。文献[76] 将人工势函数和流函数结合,实现了稳定的集群运动,在保证系统动态的拓扑连通性的同时实现了避障。Daily 等考虑了高速运动物体的路径规划,在复杂外形的障碍物情况下,其势场为多个圆形势场的加权平均^[77]。此外,针对无人机平台的路径规划,在地形障碍和视为圆形雷达区域的影响下,将无人机的目的地视为端,推导出复杂的流函数^[78–79]。

3.3.3 基于事件驱动机制的协同控制

在实际的协同控制系统中, 各个平台之间通过网络进行通信交换自身的局部信息. 而在实际环境中, 网络带宽通常有限, 如何在尽量不降低系统总体控制性能的情况下, 尽可能地降低通讯频率是一个值得考虑的问题. 事件驱动机制的提出在一定程度上解决了这个问题. 所谓的事件驱动机制是指当某一预先设计好的事件 (如平台的状态偏差超过某一个阈值等) 发生时才执行一次操作 (如信息传输等). 基于事件驱动的控制方法在单个系统的控制中得到了广泛应用^[80-82]. 特别是, Astrom 等证明了对于一阶随机系统在满足一定性能指标的前提下, 事件驱动方法可以有效降低控制器的更新频率^[81]. 近年来, 基于事件驱动机制的协同控制受到了广泛的关注. 现有文献中事件驱动机制可以大体分为以下几种: 1) 集中式事件驱动机制; 2) 分布式事件驱动机制; 3) 自驱动机制; 4) 边驱动机制. 文献 [83] 分别提出了一类集中式事件驱动机制和一类分布式事件驱动机制, 研究了基于上述驱动机制的一阶多智能体系统一致性控制问题. 集中式事件驱动机制中往往包含了系统中所有个体的信息, 故在实际系统中, 尤其是规模较大的系统中, 很难实现. 与之相比, 分布式事件驱动机制中每个个体都有自己的驱动条件, 且仅与自身状态及其邻居状态有关. 因此, 分布式事件驱动机制更适用于大规模网络化系统, 具有更好的扩展性和鲁棒性. 文献 [83] 提出的分布式事件驱动条件包含了其邻居的当前时刻信息. 这就意味着该机制中要求邻居的状态时刻可知, 从而无法从本质上降低通讯频率. 为此, 文献 [84] 利用已知的邻居信息代替当前的邻居信息, 提出了一种分布式的事件驱动机制, 进一步降低了个体与其邻居之间的通讯频率. 文献 [85] 提出了一种利用预估器的分布式事件驱动策略, 更进一步地降低了通讯次数, 同时取得了良好的一致性控制效果. 上述两种事件驱动机制均需要单个平台对自身的状态进行实时监测以判断是否满足事件驱动条件, 而在实际系统中这一要求往往不能实现. 为此, 文献 [86] 考虑一种自驱动机制. 在自驱动机制中, 下一次的事件驱动时刻可以由系统根据当前状态计算而得到, 因引无需对自身状态进行实际监测. 在上述的驱动机制中, 只要驱动条件满足, 所有的个体均向其邻居发送信息. 文献 [87] 提出了一种基于边信息的事件驱动机制. 在该机制中每一条链接边具有不同的驱动条件, 当该条件满足时, 与该链接边对应的两个智能体之间传送信息. 在事件驱动的多平台协同控制中, 另一个比较重要的问题同排除 Zeno 现象. 所谓的 Zeno 现象是指在有限时间内发生无限次驱动. 该问题的主要研究思路是证明

任意两次驱动之间的间隔存在一个严格大于 0 的下界.

3.4 问题和展望

目前, 协防布阵与火力分配优化主要存在如下问题. 目前的研究主要集中在静态 WTA 模型上, 对于动态 WTA 模型的研究比较匮乏, 动态与静态分配相结合的研究则更少. 文献中现有的方法主要解决了小规模 WTA 问题, 对于较大规模的 WTA 分配问题还亟需高效, 计算量更小的解决方法. 现有 WTA 问题的研究基本没有考虑分配中的不确定性因素. 研究 WTA 问题需要研究作战过程中的不确定性因素, 这也是面向实际作战的 WTA 问题求解的一个难点. 同时, 目前文献中的 WTA 模型往往没有考虑战场环境的动态变化, 使得模型的适用范围不够宽广. 此外, 布阵与火力分配的结合也是一个非常具有挑战性的研究方向, 完善的布阵方法应当结合火力分配来对布阵效果进行评估, 由此才能建立合理, 精确的布阵方法.

在现有的研究中, 通常人为地割裂拓扑连通性保持和分布式运动协同控制之间的联系, 往往片面强调连通性保持而忽视了具体控制任务的需求, 缺乏将连通性作为约束条件, 从而与具体的协同控制任务目标相结合的一体化综合控制方案. 此外, 如何设计完全分布式的事件驱动机制以及相应的如何排除 Zeno 现象是一个值得探讨的问题. 此外, 针对更一般的拓扑条件, 如切换拓扑、时变拓扑等, 设计事件驱动一致性协议也是非常具有挑战性的研究课题.

4 故障诊断与健康管理

随着陆用运动体系统的日益更新, 高科技的不断应用, 系统的复杂度越来越高, 不断往集成化、智能化、高效化方向发展, 对可靠性、维修与保障的要求也越来越高. 同时维修费用所占的比重在陆用运动体系统全生命周期费用中越来越大. 因此, 系统的健康状况日益受到关注. 维修方式从计划性向高自适应性转变. 维修保障由传统的故障后维修, 计划性维修向基于状态维修、预测性维修、智能化维修方向发展^[88]. 为了满足系统维修保障的需求, 综合集成状态监控、故障诊断、故障预测和健康评估成为一种必然趋势, 装备健康管理 (Equipment health management, EHM) 成为研究的热点. 它对于提高陆用运动体系统的安全性、可靠性、维修性、降低全生命周期经济支出, 实现自主维修、预知维修与智能化维修具有重要的意义^[89].

陆用运动体系统的 EHM 技术主要包括状态监控、故障诊断、故障预测、健康评估和决策调控等方面. EHM 超出了传统装备监控和维修的范围, 将装

备纳入到规范化、科学化和智能化的管理之中,因此 EHM 将维修和管理有机地结合在一起。

4.1 故障诊断和预测

随着部队对陆用运动体系保障性要求的提高,对陆用运动体系的故障诊断与预测技术提出了更高的要求。该方面的研究也越来越受到广泛关注。

对陆用运动体系的故障进行准确及时的预测,检测与诊断,并进行及时维修是系统持续发挥战斗力的重要保障,具有重要的军事意义。同时,故障诊断和故障预测技术在陆用运动体系维护中的使用能够节省大量维修费用,对装备的贮存、使用及维护具有显著的经济价值。目前故障诊断的主要方法可以分为三类:基于模型的方法、基于信号处理的方法和基于人工智能的方法。基于模型的故障诊断方法主要有状态估计法、参数估计法和等价空间法。基于模型的故障诊断方法往往需要建立精确的数学模型。由于实际系统受到多种复杂因素的影响,建立其精确的数学模型往往是非常困难的,这也限制了这种方法的应用范围。尤其是陆用运动体系其所处的战场环境非常复杂,其数学模型往往带有很强的非线性和不确定性,建立其精确的数学模型难度非常大。故基于模型的故障诊断方法很难适用于陆用运动体系的故障诊断。基于信号处理的方法利用信号模型,提取出信号特征,例如如频率、方差、幅值等,然后对这些信号特征进行分析从而判断出故障^[90]。基于信号处理的故障诊断方法主要包括测量系统输入输出法、信息匹配法、小波变换法等。陆用运动体系日益复杂化,需要处理的信号数量较多且容易受干扰,因此该方法难以满足实际要求。基于人工智能的故障诊断方法往往不依赖于精确的数学模型,通过学习、训练、推理等方式对故障进行诊断与识别。基于人工智能的故障诊断方法比较适用于具有强非线性、强扰动、强耦合的复杂系统。因此,该方法可广泛应用于陆用运动体系的故障诊断。

故障预测技术,是一种建立在对系统的实时状态进行监测,分析系统的发展趋势以及对系统的故障进行预测的一种维修方法,相对于事后维修与计划维修,它能够使武器系统更为安全可靠地工作,节约大量资源,是武器装备维修一个发展趋势。目前文献中主要有模型驱动、数据驱动、基于概率统计三种故障预测方法^[91]。

模型驱动方法的前提条件是系统的物理模型必须已知,基于故障演化机理模型预测部件的剩余寿命。模型驱动的方法主要包括:卡尔曼滤波、粒子滤波、基于知识的方法等^[92]。数据驱动的故障预测技术不需要系统的模型已知,但必须要求系统的定量数据可以获得。该方法以采集到的数据为基础应

用各种数据处理手段对故障进行预测^[93]。数据驱动的方法主要包括:专家系统、神经网络、灰色模型、其他人工智能方法等。基于概率统计的故障预测技术^[94]的主要思想是从故障的历史数据的统计特性角度对故障进行预测。基于概率统计的方法主要有:时间序列预测法、马尔科夫模型、回归预测法、支持向量机等。

4.2 健康评估和决策支持

为了监测陆用运动体系的健康状况,以避免突发系统失效,需要对系统的运行状态进行准确地评估,然后根据评估结果制定合理的维修计划。针对陆用运动体系由于多种原因而产生的故障,可采用基于失效机理、专家经验知识、数据信息等方法建立相应的健康评估模型。在此基础上应用各种推理方法(如规则推理、模糊推理、专家系统、贝叶斯网络等)判定陆用运动体系的健康指数^[95]。健康指数是指陆用运动体系处于健康状态的程度,它可以由具体的数值表示。例如 0 表示系统处于完全故障状态,1 表示系统处于完全健康状态。根据推理得到的系统的健康指数,可以判定出系统目前所处的健康水平,从而为安排维修,排除故障隐患提供一定的依据^[96]。一般来讲,陆用运动体系的健康程度总可以由相关监测参数信息反映。对得到的监测参数信息进行综合处理便可以得到装备健康水平^[96]。为此,文献[95]提出了一种基于模糊层次分析法的监测参数选择方法以及基于粗糙集合的装备健康评估方法。在经典的层次分析法的基础上引入了三角模糊数构造决断矩阵,克服了评判的绝对性。利用粗糙集确定监测参数的权重,使得评估结果更加客观。文献[97]基于置信规则库(Belief rule base, BRB)理论,同时利用半定量信息,建立了一种复杂机电系统健康评估模型。该模型综合利用证据推理,差分进化等技术,使知识表达方式更接近实际,一定程度上解决了定性知识存在主观性的问题。实验结果表明该模型可以取得较高的评估精度。

在故障诊断与预测和健康评估的基础上,综合考虑系统中可利用的资源,利用计算机仿真,专家系统等建立陆用运动体系健康决策支持系统是非常必要的。该系统能够自动分析和识别系统中各位组成部分出现的健康问题,对系统的整体健康情况进行综合评判,形成决策方案。利用该系统生成的决策方案,可以调配各种维修资源,相关的人力资源等,提高陆用运动体系的健康管理水平和维护维修效率。

4.3 问题与展望

随着陆用运动体系集成化、综合化、信息化水平的不断提高以及计算机技术、通讯技术、网络

技术、人工智能技术、大数据技术等信息技术的飞速发展, 陆用运动体系统的维修保障与健康管理系统朝着网络化、智能化、高效化、集成化的方向发展^[98]。目前, 陆用运动体系统健康管理的理论研究和实践应用上还存在很大的差距, 维修与保障缺乏准确性和时效性。因此需以故障诊断和预测技术为依托, 建立合理的陆用运动体系统维护决策方案, 改善和提高装备健康管理的自动化水平。

5 结束语

在未来高技术战争的背景下, 陆用运动体将会在更加复杂的战场上承担更复杂的任务, 如持续控制地面战场, 防御空中来袭目标等, 任务艰巨, 使命重大。陆用运动体需要在未来变得更智能, 更高效才能够在未来战场上歼敌制胜。本文从陆用运动体控制系统中的环境与态势感知、火力控制与指挥控制、多平台协同、维修保障与健康管理等 4 个方向阐述了面向未来、高智能的陆用运动体控制系统的基础理论以及技术的发展现状和趋势。可以预见, 未来军事对抗的科技含量必将越来越高。它们在不断给陆用运动体的控制系统设计带来更多挑战的同时, 也同时推进控制技术水平的提高。

References

- Fang Hao, Wang Xue-Yuan, Chen Jie. Intelligent optimization and control in multi-system collaboration of ground-based moving platforms. *Control Theory & Applications*, 2018, **35**(7): 900–917
(方浩, 王雪源, 陈杰. 陆用运动体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)
- Tao Yong, Hu Wei-Dong. A study on knowledge-based radar target recognition. *Modern Rader*, 2009, **31**(10): 62–65
(陶勇, 胡卫东. 基于知识的雷达目标识别研究. 现代雷达, 2009, **31**(1): 62–65)
- Zhao Hui, Wang Wen-Guang, Sun Jin-Ping, Hong Wen, Mao Shi-Yi. Target detection in SAR images based on knowledge. *Systems Engineering and Electronics*, 2009, **31**(6): 1314–1318
(赵晖, 王文光, 孙进平, 洪文, 毛士艺. 基于知识的 SAR 图像目标检测. 系统工程与电子技术, 2009, **31**(6): 1314–1318)
- Li Li-Rong, Wang Cong-Qing. Research and application of neural network in targets recognition of accurate strike. *Modern Defence Technology*, 2013, **41**(3): 185–191
(李丽荣, 王从庆. 神经网络在精确打击目标识别中的应用研究. 现代防御技术, 2013, **41**(3): 185–191)
- Chen Wei-Tao, Yang Pei, Liu Chao-Yang, Sheng Si-Jia. Application of BP neural network in radar target recognition. *Electronic Sci. And Tech.*, 2010, **23**(12): 18–19
(陈伟涛, 杨沛, 刘朝阳, 盛思佳. BP 神经网络在雷达目标识别中的应用. 电子科技, 2010, **23**(12): 18–19)
- Zhou Hao, Wei Dao-Zhi, Jin Feng-Jie. The study on target recognition based on RBF neural network. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2008, **28**(5): 215–216
(周浩, 韦道知, 金凤杰. RBF 神经网络在目标识别中的应用研究. 弹箭与制导学报, 2008, **28**(5): 215–216)
- Hui Bao-Guo. Auto target recognition technology based on deep learning. In: *Proceedings of the 4th China Conference on Command and Control*. Beijing, China: Publishing House of Electronics Industry, 2016. 314–319
(惠保国. 基于深度学习的自动目标识别技术. 第四届中国指挥控制大会论文集. 北京, 中国: 电子工业出版社, 2016. 314–319)
- Xu Feng, Wang Hai-Peng, Jin Ya-Qiu. Deep learning as applied in SAR target recognition and terrain classification. *Journal of Radars*, 2017, **6**(2): 136–148
(徐丰, 王海鹏, 金亚秋. 深度学习在 SAR 目标识别与地物分类中的应用. 雷达学报, 2017, **6**(2): 136–148)
- Chen Xiao-Rong, Chen Shu-Fen. Variable dimension of Kalman filter for target tracking. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, **27**(9): 1163–1166
(陈晓荣, 陈淑芬. 变维卡尔曼滤波实现运动目标的跟踪. 仪器仪表学报, 2006, **27**(9): 1163–1166)
- Zhang Ai-Min, Gao Peng, Zhang Feng-Zhen, Wang Yin-Ting. Maneuvering target tracking performance of VD-Kalman filter algorithm. *Computer and Digital Engineering*, 2014, **42**(1): 57–60
(张爱民, 高鹏, 张峰贞, 王殷廷. 变维卡尔曼滤波算法的机动目标跟踪性能研究. 计算机与数字工程, 2014, **42**(1): 57–60)
- Chen Hai, Shan Gan-Lin. Maneuvering target tracking based on IMMCKF algorithm. *Electronics Optics and Control*, 2011, **18**(10): 1–5
(陈海, 单甘霖. 基于 IMMCKF 的机动目标跟踪算法. 光电与控制, 2011, **18**(10): 1–5)
- Guo Zhi, Dong Chun-Yun, Cai Yuan-Li, Yu Zhen-Hua. Time-varying transition probability based IMM-SRCKF algorithm for maneuvering target tracking. *Systems Engineering and Electronics*, 2015, **37**(1): 24–30
(郭志, 董春云, 蔡远利, 于振华. 时变转移概率 IMM-SRCKF 机动目标跟踪算法. 系统工程与电子技术, 2015, **37**(1): 24–30)
- Tan Shun-Cheng, Wang Guo-Hong, Wang Na. Maneuvering target tracking algorithm based on IMM-singer model. *Fire Control and Command Control*, 2012, **37**(2): 32–34
(谭顺成, 王国宏, 王娜. IMM-Singer 模型的机动目标跟踪算法. 火力与指挥控制, 2012, **37**(2): 32–34)
- Deng F, Chen J, Bai Y Q. Identification of ballistic parameters based on virtual ballistic trajectory data from firing tables. In: *Proceedings of the 29th Chinese Control Conference*. Beijing, China, 2010. 1236–1241
- Zhao Dong-Hua, Zhang Huai-Zhi, Guo Sheng-Qiang, Huang Peng-Bo, Gu Zhi-Guo. Researched on determining firing data of gun based on solving ballistic equations with binary search. *Fire Control and Command Control*, 2012, **37**(12): 182–183
(赵东华, 张怀智, 郭胜强, 黄鹏波, 谷智国. 基于二分法的弹道解算决定火炮射击诸元. 火力与指挥控制, 2012, **37**(12): 182–183)
- Qin Peng-Fei, Cui Qing-Chun, Li Shuo, Liu Ai-Feng, Xiong Tao. Research on the real-time ballistic algorithm based on a type of large caliber cannon. *Journal of gun launch and control*, 2015, **36**(1): 68–72
(秦鹏飞, 崔青春, 李硕, 刘爱峰, 熊涛. 基于大口徑火炮的实时弹道解算方法研究. 火炮发射与控制学报, 2015, **36**(1): 68–72)

- 17 Qiu Xiao-Bo, Dou Li-Hua, Shan Dong-Sheng. Solution of hit problem of firing on the move on target under maneuvering. *Acta Armentarii*, 2010, **31**(1): 1–6
(邱晓波, 窦丽华, 单东升. 机动条件下坦克行进间射击解命中问题分析. 兵工学报, 2010, **31**(1): 1–6)
- 18 Xu Jian-Sheng, Su Po, Rong Yong-Jie, Yan Zhi-Wen. Research on the hitting point distribution of terminal sensing ammunition based on Monte-Carlo method. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2015, **35**(6): 29–32
(许建, 苏坡, 戎永杰, 严智文. 基于蒙特卡洛法的末敏弹命中点散布研究. 弹箭与制导学报, 2015, **35**(6): 29–32)
- 19 Chen Jing-Zhi, Chen Hua, Wang Xuan-Shi. Accuracy analysis for airship missile fire control system. *Morden Defence Technology*, 2013, **41**(3): 38–41
(陈敬志, 陈华, 王宣世. 空舰导弹火控系统精度分析研究. 现代防御技术, 2013, **41**(3): 38–41)
- 20 Li Kui-Wu, Pei Yi-Xuan, Huo Yong-Mou. Rsearch on firing precision comprehensive compensation method of self-propelled anti-aircraft Gun. *Acta Armentarii*, 2015, **36**(2): 214–219
(李魁武, 裴益轩, 霍勇谋. 自行高炮射击精度综合补偿技术研究. 兵工学报, 2015, **36**(2): 214–219)
- 21 Qi Jin-Song, Jia Zhi-Qiang Tang Jie, Wang Gao-Feng. Fourfold-redundancy fire control computer system based on Loongson-2F and Loongson-1A. *Measurement and Control Technology*, 2014, **33**(12): 69–71
(齐劲松, 贾志强, 唐杰, 王高峰. 基于龙芯 2F+1A 的四余度火控计算机系统设计. 测控技术, 2014, **33**(12): 69–71)
- 22 Qi Jin-Song, Guo Jiang-Yu, Wu Yu-Sheng, Wang Wei-Dong. Design of fire-control computer system based on Loongson 3A+2H. *Measurement and Control Technology*, 2014, **33**(7): 85–87
(齐劲松, 郭江宇, 吴玉生, 王伟冬. 基于龙芯 3A+2H 的火控计算机系统设计. 测控技术, 2014, **33**(7): 85–87)
- 23 Deng Fang, Cui Jing, Fang Hao, Li Feng-Mei, Guo Su. A parallel method of ballistic based on the improved particle swarm optimization algorithm. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2015, **35**(4): 391–396
(邓方, 崔静, 方浩, 李凤梅, 郭素. 基于改进粒子群优化的弹道并行求解算法. 北京理工大学学报, 2015, **35**(4): 391–396)
- 24 Chen Chen, Chen Jie, Zhang Juan, Wang Gao-Peng. Research on architecture of networked air defense fire control system. *Acta Armentarii*, 2009, **30**(9): 1253–1258
(陈晨, 陈杰, 张娟, 王高鹏. 网络化防空火控系统体系结构研究. 兵工学报, 2009, **30**(9): 1253–1258)
- 25 Chen Jie, Chen Chen, Xia Yuan-Qing, Zhang Juan. Track fusion in networked antiaircraft fire control system. *Control Theory and Applications*, 2009, **26**(9): 977–982
(陈杰, 陈晨, 夏元清, 张娟. 网络化防空火控系统航迹融合. 控制理论与应用, 2009, **26**(9): 977–982)
- 26 Wang Lei, Luo Xue-Shan, Shu Zhen. Formalized description of service view and evolution within C4ISR architecture. *Journal of National University of Defense Technology*, 2011, **33**(3): 134–139
(王磊, 罗雪山, 舒振. C4ISR 体系结构服务视图及其演化的形式化描述方法. 国防科技大学学报, 2011, **33**(3): 134–139)
- 27 Wang Qin-Zhao, Gu Xiao-Wei, Li Xiao-Long, Wang Chun-Zhong. Tank fire control system under high-speed state. *Ordnance Industry Automation*, 2012, **31**(3): 19–21
(王钦钊, 谷晓伟, 李小龙, 王春忠. 基于高机动条件下的坦克火控系统. 兵工自动化, 2012, **31**(3): 19–21)
- 28 Zheng Yan, Tan Qing-Chang, Wang Shu-Fan, Xu Jie. Kalman filter for automatic tracking on the vehicular fire control system. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, **39**(2): 346–351
(郑岩, 谭庆昌, 王树范, 徐杰. 车载火控系统自动跟踪的卡尔曼滤波. 红外与激光工程, 2010, **39**(2): 346–351)
- 29 Zhang Pin, Dong Wei-Hao, Gao Da-Dong. An optimal method of data fusion for multi-sensors based on bayesian estimation. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2014, **27**(5): 643–648
(张品, 董为浩, 高大冬. 一种优化的贝叶斯估计多传感器数据融合方法. 传感技术学报, 2014, **27**(5): 643–648)
- 30 Si Ying-Li, Yang Xin-Yu, Chen Yong, Xiang Jing-Bo, Guo Shi-Wei. Multi-sensor weighted data fusion algorithm based on global state estimation. *Infrared Technology*, 2014, **36**(5): 360–364
(司迎利, 杨新宇, 陈勇, 向静波, 郭世伟. 基于全局状态估计的多传感器加权数据融合算法. 红外技术, 2014, **36**(5): 360–364)
- 31 Zeng Zhe-Zhao, Wang Yao-Nan. Multi-sensor information fusion approach based on the neural network. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2007, **20**(6): 1368–1370
(曾喆昭, 王耀南. 基于正交神经网络算法的多传感器数据融合方法. 传感技术学报, 2007, **20**(6): 1368–1370)
- 32 Li Qi-Yuan, Duan Li, Jiang Tao. Analysis of synchronous characteristics of network command and control system. *Journal of Naval University of Engineering*, 2014, **26**(5): 48–52
(李启元, 段立, 姜涛. 网络化指挥控制系统同步特性分析. 海军工程大学学报, 2014, **26**(5): 48–52)
- 33 Wang Wen-Pu, Liu Guang-Yao, Yang Hui, Guo Yi. Evaluation method for network-based operational capability of C3I. *Command Control and Simulation*, 2015, **37**(5): 1–4
(王文普, 刘光耀, 杨慧, 郭弋. 指挥控制系统网络化作战能力评估方法. 指挥控制与仿真, 2015, **37**(5): 1–4)
- 34 Wang Lian-Feng, Liu Wei-Dong. Threat evaluation of air attack target missile position. *Command Control and Simulation*, 2009, **31**(4): 33–36
(王连锋, 刘卫东. 导弹阵地空袭目标威胁评估. 指挥控制与仿真, 2009, **31**(4): 33–36)
- 35 Ma Jin, Liu Cheng, Li Yi-Bing, Liu Feng, Liu Chang. Research on the acquisition technique of battle field information based on image. *Journal of Academy of Amored Force Engineering*, 2007, **21**(3): 53–56
(马瑾, 刘成, 李一兵, 刘锋, 刘昶. 基于摄影图像的战场信息获取技术研究. 装甲兵工程学院学报, 2007, **21**(3): 53–56)
- 36 Zhu Feng, Hu Xiao-Feng. Survey and research Prospect of battlefield situation assessment based on deep learning. *Military Operations Research and Systems Engineering*, 2016, **30**(3): 22–27
(朱丰, 胡晓峰. 基于深度学习的战场态势评估综述与研究展望. 军事运筹与系统工程, 2016, **30**(3): 22–27)
- 37 Li Jiang, Guo Li-Hong. Target threat assessment using improved SVM. *Optics and Precision Engineering*, 2014, **22**(5): 1354–1362
(李姜, 郭立红. 基于改进支持向量机的目标威胁估计. 光学精密工程, 2014, **22**(5): 1354–1362)
- 38 Liu Hai-Bo, Wang He-Ping, Shen Li-Ding. Target threat assessment using SAPSO and grey neural network. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2016, **34**(1): 25–32
(刘海波, 王和平, 沈立顶. 基于 SAPSO 优化灰色神经网络的空目标威胁评估. 西北工业大学学报, 2016, **34**(1): 25–32)

- 39 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)
- 40 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)
- 41 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)
- 42 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)
- 43 Cai H, Liu J, Chen Y, Wang H. Survey of the research on dynamic weapon-target assignment problem. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2006, **17**(3): 559–565.
- 44 Lloyd S P, Witsenhausen H S. Weapons allocation is NP-complete. In: *Proceedings of the IEEE Summer Conference on Simulation*. Reno, USA: IEEE, 1986. 1054–1058
- 45 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
- 46 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
- 47 Malhotra A, Jain R K. Genetic algorithm for optimal weapon allocation in multilayer defence scenario. *Defence Science Journal*, 2001, **51**(3): 285–293
- 48 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
(王伟, 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)
- 49 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
- 50 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)
- 51 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)
- 52 Li K, Zhang Q, Battiti R. MOEA/D-ACO: a multiobjective evolutionary algorithm using decomposition and ant colony. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2013, **43**(6), 1845–1859
- 53 Al Moubayed N, Petrovski A, McCall J. D2MOPSO: MOPSO based on decomposition and dominance with archiving using crowding distance in objective and solution spaces. *Evolutionary Computation*, 2014, **22**(1): 47–77.
- 54 Bisht S. Hybrid genetic-simulated annealing algorithm for optimal weapon allocation in multilayer defence scenario. *Defence Science Journal*, 2004, **54**(3): 395–405
- 55 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
- 56 Wang Xiao-Yi, Hou Chao-Zhen, Yuan Ju-Mei, Guo Fei, Hao Wei. Modeling and optimization method on anti-aircraft fire-power 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)
- 57 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)
- 58 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)
- 59 Meng J, Egerstedt M. Distributed coordination control of multiagent systems while preserving connectedness. *IEEE Transactions on Robotics*, 2007, **23**(4): 693–703
- 60 Zavlanos M M, Pappas G J. Potential fields for maintaining connectivity of mobile networks. *IEEE Transactions on Robotics*, 2007, **23**(4): 812–816
- 61 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
- 62 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
- 63 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
- 64 Wei P, Chen L, Sun D. Algebraic connectivity maximization of an air transportation network: the flight routes' addition/deletion problem. *Transportation Research Part E Logistics & Transportation Review*, 2014, **61**(2): 13–27

- 65 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
- 66 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, USA: IEEE, 2008. 2660–2665
- 67 Mesbahi M. On state-dependent dynamic graphs and their controllability properties. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005, **50**(3): 387–392
- 68 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
- 69 Xiao L, Boyd S. Fast linear iterations for distributed averaging. *Systems and Control Letters*, 2004, **53**(1): 65–78
- 70 Cortes J, Martinez 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
- 71 Schuresko M, Cortes J. Distributed motion constraints for algebraic connectivity of robotic networks. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2009, **56**(1-2): 99–126
- 72 Schuresko M D, Cortes J. Safe graph rearrangements for distributed connectivity of robotic networks. In: Proceedings of the 46th IEEE Conference on Decision and Control. New Orleans, LA, USA: IEEE, 2007. 4602–4607
- 73 Olfati-Saber R. Flocking for multi-agent dynamic systems: algorithms and theory. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2006, **51**(3): 401–420
- 74 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
- 75 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
- 76 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
- 77 Daily R, Bevely 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
- 78 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, 梁霄. 基于流函数法的无人机航路规划. 战术导弹技术, 2011, (5): 27–32)
- 79 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
(曹梦磊, 王宏伦, 梁霄. 采用改进流函数法的无人机航路规划. 光电与控制, 2012, **19**(2): 1–4)
- 80 Arzen K E. A simple event-based PID controller. In: Proceedings of the 14th IFAC World Congress. Beijing, China: IFAC, 1999. 8687–8692
- 81 Åström K, Bernhardsson B. Comparison of periodic and event based sampling for first order stochastic systems. In: Proceedings of the 14th IFAC World Congress. Beijing, China: IFAC, 1999. 5006–5011
- 82 Tabuada P. Event-triggered real-time scheduling of stabilizing control tasks. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2007, **52**(9): 1680–1685
- 83 Dimarogonas D V, Razzoli E, Johansson K H. Distributed event-triggered control for multi-agent systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2012, **57**(5): 1291–1297
- 84 Nowzari C, Cortes J. Distributed event-triggered coordination for average consensus on weight-balanced digraphs. *Automatica*, 2016, **68**: 237–244
- 85 Sun J, Yang Q, Liu X, Chen J. Event-triggered consensus for linear continuous-time multi-agent systems based on a predictor. *Information Sciences*, 2018, **459**: 278–289
- 86 Zhu W, Pu H Z, Wang D. Event-based consensus of second-order multi-agent systems with discrete time. *Automatica*, 2017, **79**: 78–83
- 87 Cao M T, Xiao F, Wang L. Event-based second-order consensus control for multi-agent systems via synchronous periodic event detection. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2015, **60**(9): 2452–2457
- 88 Department of Defense. MIL-STD-2165A, *Military standard testability program for systems and equipments*. 1993
- 89 Man Qiang, Xia Liang-Hua, Wang Ya-Bin, Xu Ying. Health management mode summarization of complex equipment. *Journal of Gun Launch & Control*, 2009, **30**(2): 92–96
(满强, 夏良华, 王亚彬, 徐英. 复杂装备健康管理模式综述. 火炮发射与控制学报, 2009, **30**(2): 92–96)
- 90 Wang Xin-Jun, Cai Yan-Ping, Cheng Shu. Research on application of fault diagnosis technology in maintenance of weaponry and equipment. *China Shiprepair*, 2006, **19**(S1): 23–27
(王新军, 蔡艳平, 成曙. 故障诊断技术在武器装备维修中的应用研究. 中国修船, 2006, **19**(S1): 23–27)
- 91 Zhu Da-Qi. Knowledge-based fault diagnosis methods. *Journal of Anhui University of Technology*, 2002, **19**(3): 197–204
(朱大奇. 基于知识的故障诊断方法综述. 安徽工业大学学报, 2002, **19**(3): 197–204)
- 92 Hu Dong, Xie Jin-Song, Lv Wei-Min. Applications of PHM technology in missile weapon systems. *Missiles and Space Vehicles*, 2010, (04): 24–30
(胡冬, 谢劲松, 吕卫民. 故障预测与健康管理技术在导弹武器系统中的应用. 导弹与航天运载技术, 2010, (04): 24–30)
- 93 Shen Fan-Yu, Zhou Sheng-Lin. Research on equipment fault prediction technology status and development. *Equipment Manufacturing Technology*, 2016, (08): 123–126
(沈凡宇, 周圣林. 装备故障预测技术现状及发展研究. 装备制造技术, 2016, (08): 123–126)

- 94 Wang Chang-Rong, Zhao Yu-Long, Jiang You-Cai. Application of fault prediction technology in weaponry and its development. *Value Engineering*, 2015, **34**(05): 41–43
(王昌荣, 赵玉龙, 蒋有才. 故障预测技术在武器装备中的应用及发展. 价值工程, 2015, **34**(05): 41–43)
- 95 Yang Shu-Ming, Qiu Jing, Liu Guan-Jun. Study on monitoring parameter selection and health evaluation method for equipment health management. *China Mechanical Engineering*, 2012, **23**(13): 1513–1517
(杨述明, 邱静, 刘冠军. 面向装备健康管理的监测参数选择与健康评估方法研究. 中国机械工程, 2012, **23**(13): 1513–1517)
- 96 Qiu Li-Jun. Study of key technology for prognostics and health management system of weapon equipment. *Ship Electronic Engineering*, 2012, **32**(05): 17–18
(邱立军. 武器装备故障预测与健康管理系统的关键技术. 舰船电子工程, 2012, **32**(05): 17–18)
- 97 Yin X, Wang Z, Zhang B, Zhou Z, Gao Z. Health estimation of fan based on belief-rule-base expert system in turbofan engine gas-path. *Advances in Mechanical Engineering*, 2017, **9**: 1–11
- 98 Hu Niao-Qing, Hu Lei, Chen Ling, Gao Ming. The status quo, future, and challenge of equipment health management. *National Defense Science & Technology*, 2015, **36**(1): 10–15
(胡鸢庆, 胡雷, 陈凌, 高明. 装备健康管理的现状、未来与挑战. 国防科技, 2015, **36**(1): 10–15)



孙 健 北京理工大学教授. 2001 年于吉林工学院获得电气工程及其自动化专业学士学位, 2004 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得机械电子工程专业硕士学位, 2007 年于中国科学院自动化研究所获得控制理论与控制工程专业博士学位. 主要研究方向为网络化控制系统, 信息物理融合系统安全

性, 多智能体系统. 本文通信作者.

E-mail: sunjian@bit.edu.cn

(**SUN Jian** Professor at Beijing Institute of Technology. He received his bachelor degree from Jilin Institute

of Technology in 2001, master degree from Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics, and Physics, Chinese Academy of Sciences in 2004, Ph.D. degree from Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences in 2007. His research interest covers networked control systems, security of cyber-physical-systems, and multi-agent systems. Corresponding author of this paper.)



邓 方 北京理工大学自动化学院教授. 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** Professor 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.)



陈 杰 中国工程院院士, 同济大学教授, 北京理工大学自动化学院教授. 1986 年、1996 年和 2001 年分别获得北京理工大学控制理论与应用专业学士学位、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, 多智能体协同控制. E-mail: chenjie@bit.edu.cn

(**CHEN Jie** Academician of Chinese Academy of Engineering, Professor at Tongji University and School of Automation, Beijing Institute of Technology. He received his bachelor, master, and Ph.D. degrees in control science and application from Beijing Institute of Technology in 1986, 1996, and 2001, respectively. His research interest covers intelligent control and optimization of complex systems, an multi-agent cooperative control.)