

基于深度学习的数字化装备故障诊断研究综述

刘奥林, 古平, 赵张鹏

(陆军工程大学 石家庄校区, 石家庄 050000)

摘要: 数字化装备具有结构复杂、技术密集、信息化程度高等特点, 传统的故障诊断方法需要拆装的部件多、故障定位准确率低, 而深度学习能够从装备原始数据中挖掘有价值且敏感的特征, 适合用于数字化装备的智能故障诊断; 为此, 首先进行了部队数字化装备故障诊断的现实困境和挑战分析, 阐述了国内外数字化装备维修保障的研究现状, 而后总结了装备故障诊断的主要方法和研究应用进展, 重点将深度学习在装备故障诊断领域的研究成果进行了梳理, 最后结合实际提出了基于深度学习方法实现数字化装备故障诊断的3种研究思路。

关键词: 数字化装备; 维修保障; 故障诊断; 深度学习; 研究综述

Overview of Research on Digital Equipment Fault Diagnosis Based on Deep Learning

LIU Aolin, GU Ping, ZHAO Zhangpeng

(Shijiazhuang Campus, Army Engineering University, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: Digital equipment has the characteristics of complex structure, intensive technology, and high information level. Traditional fault diagnosis methods require multiple components to be disassembled and have low accuracy in fault localization. But deep learning can extract valuable and sensitive features from the raw data of equipment, it is suitable for intelligent fault diagnosis of digital equipment. For this purpose, this paper first analyzes the practical difficulties and challenges of digital equipment fault diagnosis in the military, expounds the research status of digital equipment maintenance support at home and abroad, and then summarizes the main methods and research progress of equipment fault diagnosis, emphatically sorting out the deep learning research results of in the equipment fault diagnosis field; Finally, three research ideas for implementing digital equipment fault diagnosis based on deep learning methods are proposed in combination with practical applications.

Keywords: digital equipment; maintenance support; fault diagnosis; deep learning; research overview

0 引言

近年来, 陆军大抓实战化军事训练, 深入推进数字化部队建设管理和作战运用创新, 聚力打造精锐作战力量。数字化部队作为现代信息化局部战争的主要参战力量, 是当今世界军事强国发展最高水平的代表。古语有云, 凡兵有大论, 必先论其器。信息化局部战争围绕“信息控制权”的较量贯穿全程, 从战场指挥、火力毁伤、作战机动、体系协同到后勤保障等, 基本都依托数字化装备展开。可见, 数字化装备是打赢信息化条件下局部战争的关键要素。

1 部队数字化装备故障诊断的现实困境与挑战分析

数字化装备^[1]结构复杂、技术密集、信息化程度高, 是数字化部队战斗力的重要组成部分。随着我军实战化训练要求提高, 数字化装备动用使用频繁、训练强度加大, 加之使用环境条件复杂, 数字化装备故障显著增多, 由此导致数字化装备故障诊断次数增加。如果按照传统的以人

工经验为主的故障诊断方法, 不仅需要拆装的部件多, 而且会造成故障诊断时间长、故障诊断准确性低、装备性能下降等问题。

目前数字化部队绝大部分数字化装备出现故障后, 由于自身维修保障能力弱, 讲不清故障现象, 主要依靠反复邀请生产厂家和科研院专家到部队现地实施故障诊断, 造成时间长、浪费经费多, 装备发生故障或损坏后, 长时间得不到恢复, 严重影响部队的实战化训练。可尝试通过挖掘实战化训练中产生的故障模式数据, 运用深度学习技术^[2], 融合多领域专家的经验和学习多种故障诊断的方法, 实现数字化装备故障快速、准确诊断, 指导数字化装备检测维修策略, 降低无效部件拆装作业量, 从而降低整体保障成本, 提高装备保障效益, 达成装备保障“精确化”的目标。

数字化装备通过一体化的数字网络, 能够将战场上相互独立的作战单元和指挥平台有机联结, 形成协同密切、行动高效的整体, 进而实现作战效能成几何级增加。然而

收稿日期: 2023-05-26; 修回日期: 2023-07-12。

基金项目: 全军军事类研究生资助课题(JY2021C093)。

作者简介: 刘奥林(1993-), 男, 硕士研究生。

古平(1967-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师。

引用格式: 刘奥林, 古平, 赵张鹏. 基于深度学习的数字化装备故障诊断研究综述[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(5): 1-7.

数字化装备集成的信息技术复杂，对维修保障人员素质要求高，关键部件故障预测难、诊断排除慢，对整体作战效能稳定发挥影响很大。研究的重点就是要构建数字化装备故障诊断深度学习模型，用实战化训练中产生的故障模式数据进行训练，帮助装备维修保障人员快速精确诊断装备故障原因和部位，减少装备待修时间，提高数字化装备的实时可用度和战备水平。

1.1 数字化装备故障数据和知识的收集共享缺少可行方法

数字化装备现已陆续列装陆军各部队，实战化训练中产生的装备故障数据^[3]分散在全国各地，暂没有得到很好的收集梳理和分析应用。相同的装备故障问题在不同的单位出现，厂家技术人员经常要奔波于各地进行保障。厂家技术人员虽熟练掌握所生产部件的故障诊断知识和排除方法，但同一台装备不同部件故障需联系不同厂家的技术人员，加之厂家技术人员数量有限难以满足各部队日益增加的保障需求。为解决厂家技术人员供小于求的问题，迫切需要探索一种可行的数据知识收集方法，提高数字化装备故障经验数据和诊断知识共享应用效率。

1.2 数字化装备维修保障人才队伍高效培养缺乏技术支持

部队装备数字化程度越来越高，维修保障人员需要掌握的知识量越来越多。以某型号主战装备为例，各类技术资料二十余本高达三百万字，保障分队官兵通读难、查阅慢。虽然部分新配发数字化设备按照要求提供了电子技术手册^[4]，较大提高了相应数字化设备技术资料查询速度，但是陆军数字化装备维修保障涉及的设备种类和技术资料量非常庞大，维修人员编配数额有限，各部队维修保障人员培养慢、易断层问题均比较突出。因此，可按典型数字化装备为例，对故障数据和专家维修知识进行系统梳理，以规范的数据格式，形成数字化装备故障诊断知识图谱样式，运用深度学习技术构建模型，利用软件实现智能辅助诊断故障^[5]、指导排除故障的功能，让每一个初级修理工都能有一个专家级智能以助手，从而起到为陆军数字化装备维修保障人才队伍高效培养提供技术支持的作用。

1.3 未来装备维修保障智能化亟需积累数据基础和应用场景参考模型

为加强国防和军队现代化建设，我军按照党的二十大战略部署，加快推进机械化信息化智能化融合发展。目前陆军正在实施装备数据云系统建设，主要是建立陆军装备保障集中统一的管理模式，实现装备保障信息的跨部门共享融合，提高装备管理信息化水平，进而为未来陆军装备保障智能化发展奠定基础。基于深度学习技术设计的数字化装备故

障诊断原型系统，利用网络收集积累数字化装备故障数据和故障诊断知识，通过数据验证，让深度学习模型实现智能辅助诊断装备故障的功能^[6]，从而为未来陆军装备维修保障智能化提供数据基础和应用场景参考模型。

2 数字化装备维修保障的国内外研究现状

从世界最近几场武装冲突和局部战争看，新技术装备在实战中大量应用，数据信息、无人装备、智能技术等成为新的战斗力倍增点。总的来看，机械化装备是主要载体和基础，信息化装备是技术量的积累和发展过渡，智能化装备是未来发展方向和实现性能质的飞跃。数字化是信息化的初级发展阶段，是以机械化为基础，进行信息数据积累和配套关键技术突破的过程。

随着以计算机和通信技术为代表的数字化技术发展，美国等发达国家将系统集成和信息化建设作为军事技术变革的重要手段，使战争和军队形态由机械化向数字化转变^[7]。这一转变主要表现是在现代战场上部队通过数字化装备，实现指挥、通信、控制、情报、打击、保障的一体化。装备数字化的体现就是将战场上的声音、图像、电磁、文字等信息转变成数字信号，实现主要方式是加装或改装数字化信息系统^[8]。以美陆军数字化部队的典型数字化装备 M2A3 步战车为例，其在机械化装备 M2 步战车基础上进行了加改装，加装的先进火控电子系统主要有激光测距仪、热成像仪、数字罗盘、GPS 导航仪和 Force XXI 战斗指挥信息系统等，显著提高了其信息共享能力和火力精度。

2.1 陆军数字化装备体系主要构成及维修保障任务分配

数字化装备使得部队各级作战单元之间信息的传输更快、处理更容易、抗干扰性更强、共享更便捷，进而实现部队情报侦察、精确打击、抗毁重组、快速反应、高效保障、信息攻防等作战能力的整体提升。美陆军数字化部队的数字化装备体系主要构成如图 1 所示，大致分为数字通

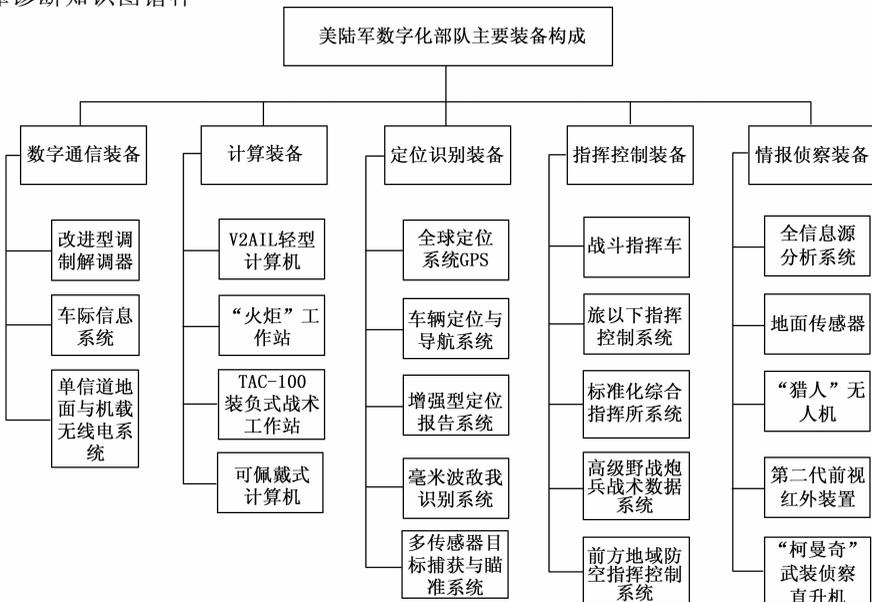


图 1 美陆军数字化部队主要装备构成

信、计算装置、定位识别、指挥控制和情报侦察5大类数字化装备系统。以美陆军装甲旅数字化营为例,按照图1所示的5类22种数字化装备体系构成,配备单兵武器系统、M1A2主战坦克、M2A3装甲步战车等共120余个数字化装备。

美陆军为适应数字化部队装备保障特点,将实行多年的基层级、中继级、基地级三级维修作业体制,转变成野战级和维持级两级^[9]。野战级维修是将基层级和中继级的直接支援级维修合并,维持级维修是将基地级维修和中继级的全般支援级维修合并。野战级维修由旅以下的直接支援分队和基层分队完成,主要对装备可更换部件进行换件修理和原位维修,平均修复时间要求为1小时。维持性维修由军以上的全般支援维修分队、维修基地和合同商完成,主要进行装备故障部件离位维修和故障装备全面维修。

随着我军编制体制改革,维修作业体系也由三级变为两级,维修保障由建制内转为全系统融合。不同等级维修分队的维修任务等级是不同的,对装备故障诊断的精细度、难易度要求也是不同的^[10]。野战级维修对装备故障进行判断,主要确定故障的零部件或模块,通过拆卸更换零部件或模块排除故障,一般不维修更换下来的零部件或模块。维持性维修主要对超出野战级维修能力的故障装备进行维修,通常需标准工具和专用设备对零部件或模块进行拆解修复。

2.2 陆军数字化装备维修保障策略分析

以美陆军的数字化装备M2A3装甲步战车为例,装有指控、火控、观瞄、电源、通信、车况等数字化分系统,每一个分系统都由许多数字化部件或设备组成。这样的智能一体化装备属于典型的复杂动态装备系统,其故障间隔和模式的规律难归纳,对其进行精确系统建模和完备知识获取也非常困难。随着存储和传感器技术发展,数字化装备的监测系统能够采集和存储大量装备运行数据,为评估装备状态和诊断装备故障提供了可挖掘的数据基础。得益于信号处理和机器学习等技术的发展,智能故障诊断逐渐成为装备故障诊断的热点研究方向^[11]。美军在数字化装备的维修保障策略上^[12],先后提出基于性能的保障(PBL)和基于状态的维修(CBM)两种策略。

一是基于性能的保障策略^[13]。该策略核心是对型号装备进行全寿命保障,提高装备完好性和经济可承受度,已发展为美军首选保障策略。在21世纪初的几场战争中,美军采用PBL策略进行保障的装备项目有14个。这些装备项目的保障效果都充分满足了作战需求,特别出色的有F-117战机、C-17战术运输机、海军辅助动力装置、空军联合监视目标与攻击雷达系统等。二是基于状态的维修策略^[14]。该策略更注重状态监控和故障诊断,综合多种先进技术准确判断装备部件状态,进而更换或维修部件解决故障,是美欧装备维修理论与应用的研究热点。数字化装备加装了新型传感器等硬件,嵌入了故障自诊断系统等软件,具有高效传输和处理数据的能力,为实现基于状态的维修保障

提供了物资基础。自主式保障模式是CBM策略的具体实现模式,是美军在开发F-35战机时提出来的,将维修保障系统由传统被动反应式转变为信息先导主动响应式。其通过实时更新的装备信息系统,对装备进行实时状态监测,将维修信息一体融入信息链,根据监测情况自主拟定最佳的维修方案,基本实现装备故障预测和诊断自动化,能尽可能的减少人力限制和人为差错带来的影响,提高保障效益和装备完好率。

通过以上分析,可知数字化装备维修保障具有系统集成度高、信息技术密集、故障规律难寻等特点。美军围绕数字化装备的实战保障需要,在维修任务分配和维修保障策略上,结合部队实际主动采取了新的做法。两级维修体制、自主式保障模式和智能故障诊断方法,已经成为美军数字化装备维修保障主要研究和应用的方向。

3 装备故障诊断主要方法及研究应用进展

装备在使用过程中,虽然不可避免的会出现故障,但是有效地状态监测和故障诊断,对可能发生的严重故障可以进行预警,让保障人员能够提前采取措施,降低故障严重程度或者故障发生率^[15]。研究陆军数字化装备故障诊断,厘清装备故障诊断的发展概况及其方法技术研究现状。

装备故障诊断是维修装备的基础,包括装备检测、判断故障程度与范围等活动。装备故障诊断主要是通过分析装备已知状态数据,对可能发生或者已发生的故障进行预测、判断和分析,确定故障的类别、性质、程度、部位和原因,指出故障发生或发展的后果及趋势,提出消除故障或降低故障影响的对策措施。

3.1 装备故障诊断发展概况

装备故障诊断最早应用于19世纪末工业生产的机械装备,于20世纪60年代发展形成一门学科,根据其发展过程的主要技术特点可分为3个阶段,依次是基于原始技术诊断阶段、基于传感器技术诊断阶段、基于人工智能诊断阶段。第一个阶段始于19世纪末,主要依靠维修人员感官经验,使用简单仪器;第二个阶段始于20世纪60年代,融合吸收了传感器技术和计算机技术,装备故障数据和信号的量取更加方便,但是每个步骤都要求技术人员参与判断决策,装备故障诊断不够智能;第三个阶段始于20世纪80年代,在前一阶段诊断技术基础上,将人工智能领域研究成果应用到装备故障诊断,使诊断过程逐步由信号处理为主转变为知识处理为主^[16]。

装备故障智能化诊断技术虽然还不够成熟,但是装备故障诊断的准确性和效率已大大提高。如今,装备故障诊断技术呈现出诊断智能化、系统集成化、方向综合化的发展趋势,装备故障诊断领域的热门研究课题主要有故障机理研究、故障诊断专家系统研究、故障信号处理方法研究、故障模式识别方法研究、装备状态监测系统开发等^[17]。

3.2 装备故障诊断主要方法研究现状

装备故障诊断技术发展到现在,有很多故障诊断的方法被提出,整体上可分为定性和定量两大类故障诊断方法,

常用方法的分类如图 2 所示。

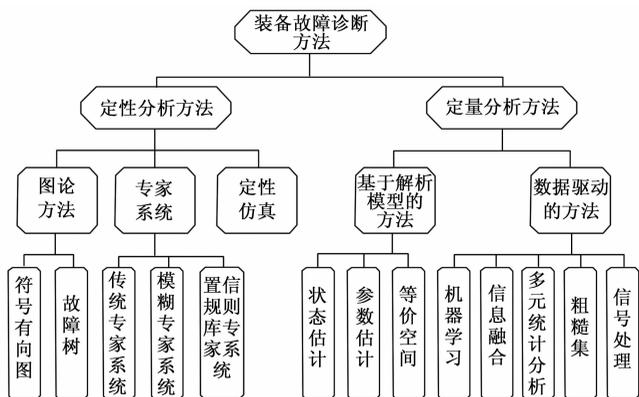


图 2 装备故障诊断常用方法分类

定性分析方法主要借助专家经验和定性分析工具，凭装备过去和现在的状态延续情况，利用部件或节点变化的因果关系，对故障进行判断的方法，适用于故障逻辑关系比较明确的装备系统。基于图论的装备故障诊断方法，比如符号有向图^[18]和故障树^[19]2种方法，建模简单、易于理解、应用范围广，但面对复杂系统搜索过程复杂，诊断正确率低，可能给不出有效结果。基于专家系统^[20]的装备故障诊断方法，能利用专家的丰富知识和经验，无需数学建模、结果易理解，但是有效知识获取瓶颈难突破，准确度依赖专家水平，规则多之后存在组合爆炸、匹配冲突、效率低下问题。定性仿真方法主要是基于定性微分方程约束，将装备描述成一个表示物理参数符号和参数之间约束关系方程的集合，对装备的初始状态到后续状态进行动态推理，从而得到装备正常和故障不同状态的描述作为故障诊断知识，同样只适用于相对简单的装备。

定量分析方法主要借助统计的装备数据建立精确模型，并利用建立的模型分析计算出装备系统的各项指标，适用于有大量历史数据和能建立精确模型的装备系统。基于解析模型的装备故障诊断方法^[21]，利用装备系统的数学模型与可观测指标，通过对比信号残差分析进行故障诊断，常用的方法主要有参数估计、状态估计、等价空间等。基于解析模型进行装备故障诊断，需对装备内部有深层认识，对装备精确模型依赖较大，但是实际装备大多难以建立精确数学模型。基于数据驱动的方法^[22]，在不知道装备精确模型的情况，通过对分析处理装备运行过程中积累的大量数据进行故障诊断，常用的方法主要有粗糙集、多元统计分析、信号处理、信息融合和机器学习等。基于数据驱动进行装备故障诊断，不需要精确的装备数学模型，应用更直接但对收集的装备样本数据精度、完备度、代表性要求较高，针对不同特点的装备样本数据需要采取不同的数据处理方法。

3.3 装备故障诊断主要方法的应用进展

不同故障诊断方法各有优长，所应用的场景和范围也差别较大，比如解析模型用于线性装备系统效果好，定性

分析解释非线性装备更自然，神经网络^[23]适用于大样本量，支持向量机^[24]则用于小样本量，多元统计分析常用于多维历史数据降维，信号处理更适用于实时监测数据处理，信息融合处理多属性判决优势突出，粗糙集能降低故障特征集复杂度。虽然定性分析和定量分析是完全不同的两类装备故障诊断方法，但是相互之间并不是孤立的。单一的故障诊断方法基本只能用于分析某一类故障，实际工作中对复杂装备系统进行故障诊断，通常需要综合运用不同的故障诊断方法。

数字化装备，是在传统的机械化装备基础上，引入信息技术，嵌入集成电路、传感器和软件等信息元器件，从而形成的机械技术与信息技术深度融合的装备。对于这样的复杂动态非线性装备系统，准确的数学模型基本无法建立，完整装备知识和有效专家经验获取也很困难，如何从各种传感器和监测系统采集的海量数据中，分析挖掘出装备故障情况的信息更加重要。陆军数字化装备的故障诊断，需要在前人关于装备故障诊断的研究成果基础上，重点运用机器学习领域中热门的深度学习方法，对陆军所属各兵种数字化装备的智能故障诊断开展研究。

4 深度学习在装备故障诊断领域的应用分析

深度学习是机器学习领域中非常热门的研究方向，是一类复杂机器学习算法的统称，目前已被广泛运用于民用和军事领域。与传统的浅层学习相比，深度学习可以通过多个非线性变换自适应地从原始数据中学习有用的特征，具有浅层学习不可比拟的优势^[25]。深度学习的神经网络模型由浅层学习的3层结构增加到了5~10层，通过对学习样本数据多层处理，逐渐将初始的浅层特征转化为深层特征表示，用“简单模型”可完成复杂的分类等学习任务。即可以通过构建深层次神经网络学习模型，用装备运行中收集的大量数据加以训练，进而获取数据中隐含的特征，利用输出层分类器实现复杂装备的故障诊断。

深度学习与浅层学习方法最明显的区别在于，前者能够自动从原始数据学习有价值而敏感的特征，而不是人工选择特征；其次，深度学习有多个隐层和较强的非线性处理能力，使其比ANN, SVM等浅层学习模型，能更有效、更灵活地学习装备故障诊断问题中复杂的关系。借鉴深度学习方法的应用成功经验，一些学者已经将深度学习应用于装备故障诊断领域，并取得一定的实践成效。根据深度学习方法应用在装备不同部件故障诊断时的显著区别，可划分为装备机械结构故障诊断和电子系统故障诊断两类不同应用方面。

4.1 深度学习方法在装备机械结构故障诊断上的应用分析

深度学习方法在装备机械结构故障诊断上的应用，多以轴承、齿轮箱、发动机等价值大且转速高的部件为研究对象，通过传感器采集装备机械部件运转时的振动、声音、速度、温度等不同类型信号，用不同的深度学习方法和模型加以处理，挖掘提取出装备故障的特征和模式，主要用

于诊断和预测装备重要机械部件的渐变式故障。

1) 在动力旋转机构故障诊断上:堆栈自编码器(SAE)用于旋转机构的故障诊断^[26],可通过无监督的逐层预训练充分挖掘故障特征,能够有效地对旋转机件的故障情况进行分类;深度置信网络(DBN)用于轴承的故障特征提取^[27],可通过计算重构误差并检测其变化趋势,进而得出判断故障准则;分层深度卷积神经网络(CNN)可用于滚动轴承的故障诊断^[28],用一个CNN从原始振动数据中学习特征并诊断故障模式,用另一个CNN评估每个故障模式中故障的严重程度,对故障的分级处理可以取得很好的效果;通过构造多尺度卷积层^[29],可减少网络训练时间和参数量,进而提高模型运行速度和故障诊断鲁棒性;通过结合迁移学习或者改进卷积神经网络方法^[30],可由已知生成未知、由单一生成复合的数据,进而解决故障数据少、分布不同的问题,实现扩充故障样本提高诊断精度。

2) 在从动传动机构故障诊断上:基于深度卷积神经网络(DCNN)的自适应多传感器数据融合方法^[31],能够将齿轮箱的振动信号、瞬时角速度、电流信号与声信号4种类型信号分割组合,输入DCNN进行特征提取与故障诊断,可取得比单一信号更好的效果;对于二维信号数据^[32],可采用不同的时频方法(S变换、小波变换、短时傅里叶变换)分别将原始信号转化时频图像,再用CNN提取特征,能够用于变速箱故障诊断,通过CNN和SAE、DBN对比,在时频图像的识别方面CNN表现的性能更优;将CNN与多堆栈胶囊结合,能够有效识别和解耦复合故障;对于信号的噪声干扰,可用数字小波帧等方法进行信号降噪或去噪,再用SAE实现装备机械故障诊断,该模型诊断精度较高并具有较强的鲁棒性。

4.2 深度学习方法在装备电子系统故障诊断上的应用分析

深度学习方法在装备电子系统故障诊断上的应用,多以指控、通信、火控等软件硬件高度集成的信息化部件为研究对象,通过监测系统采集装备电子部件运行时的电压、电流、时频差、准确率等不同类型信号,用不同的深度学习方法和模型加以处理,挖掘提取出装备故障的特征和模式,主要用于诊断和预测装备重要电子部件的突变式故障。

1) 在模拟电路部件故障诊断上:针对模拟电路故障诊断中特征提取的难题^[33],引入深度置信网络DBN模型具有可行性和有效性;采用扩张卷积神经网络,能够处理电机故障的一维数据^[34],无需手工提取特征,具有较好泛化能力;考虑电机速度的情况下,将振动信号当做图像输入CNN,可降低模型复杂性,进而减少过度拟合并提高故障诊断精度;通过在Leapfrog滤波器电路上进行故障分类对比实验^[34],对比DBN、小波分析方法及BP网络的电路故障特征提取能力,结果表明DBN提取的特征更能反映数据本质,具有传统浅层算法无法比拟的效果与优势;采取逐层贪婪编码方式自适应的非监督式预训练^[36],进行高维深层故障特征的自适应提取和挖掘,再用反向传播算法对模

型进行监督式微调,即可输入Softmax分类器实现故障分类输出;采集得到的原始数据可制作成语音形式,通过时频变化转化为语谱图,再将其用CNN的VGG16模型进行训练与测试^[37],结果证明该方法可以很好地用于模拟电路故障诊断。

2) 在数字电路部件故障诊断上:使用去噪自动编码器构建网络,通过BP算法的有监督式微调,可提升通信电台模块级故障的诊断准确度^[38];运用堆叠去噪自编码器学习低层故障特征,而后用DBN提取学习深层故障特征,再输入Softmax分类器,可实现短波发信机的故障诊断^[39];针对多传感器信号融合困难,可通过构建测量数据帧进行卷积计算,实现多通道数据的自然融合和特征提取;采用预分类和精细分类方法,可优化网络结构和提高分类精度^[40];基于粒子群也可对网络进行优化;利用主成分分析法进行降维,可以提高算法效率;采用自适应算法优化DBN,可模型学习速率的自适应变化;将GAN与堆叠稀疏自编码器相结合,可增加数据的多样性和提高网络泛化能力;将云计算技术引入深度学习,可把海量故障数据切片,再利用DBN进行分布式并行处理,进而实现大数据条件下的故障诊断^[41]。

4.3 深度学习方法在装备故障诊断上系统应用的现状分析

深度学习方法在装备故障诊断上系统应用,通常以某一指挥信息系统或装备数据平台为载体,以整装故障诊断为研究对象,将深度学习方法与装备知识推理、装备数据分析、装备状态监控等结合,实现装备故障诊断以及故障排除、预防措施分析。已知的典型成果有:陆军某合成旅将深度学习方法与装备维修信息管理系统结合,进行同型号装备的故障数据累积和故障样本学习^[42],实现上报装备异常现象及时得出故障分析和需更换部件等相关信息;海军某大型舰艇将深度学习方法应用于舰艇交互式电子技术手册^[43],通过知识智能推理和高速搜索得出装备故障诊断分析结果;某通信旅将深度学习方法应用于电子检测车故障自检系统,实现通信系统开机后自检分析故障部位。存在的主要不足和技术瓶颈有:不同类型装备差异大,装备知识图谱不够完善;装备状态监测信号导出不全,装备故障数据采集量不足^[44];装备知识自动识别、结构化整理以及批量录入图谱模型缺乏相应技术方法,模型构建和更新难度大。

5 深度学习应用在数字化装备故障诊断上的研究思路

数字化装备故障模式、故障规律错综复杂,针对不同型号装备中各子系统或部组件的结构和特性,要充分运用数字化装备的运行数据和各领域专家经验,迫切需要构建可软件实现和方便使用推广的整装智能故障系统模型,为部队数字化装备故障诊断提供技术指导。

5.1 深度学习应用在数字化装备故障诊断上的前景展望

随着机械化信息化智能化融合发展战略加快推进,部

队的整体信息化水平越来越高,数字化装备更新换代越来越快,甚至现在已有部分智能化装备列装部队。与之紧密相关的装备维修保障技术要求也越来越高,维修保障人员要不断跟进学习数字化装备的知识,确保及时准确的诊断和排除装备故障。基于深度学习的装备故障诊断系统能够作为智能助手的角色,将海量的装备知识和各领域专家经验,以图数据库形式存储并进行推理运算,结合实时收集和处理的装备状态信息,帮助维修保障人员快速分析装备状态、准确诊断和定位异常部位。

深度学习应用在数字化装备故障诊断上,将彻底改变传统的装备知识死记硬背学习方式,帮助解决人员故障诊断经验水平差异大、学习新装备知识速度慢等问题。随着装备知识及时更新和故障诊断经验的不断积累,供深度学习模型推理学习的数据规模将越来越大、装备知识也越来越完善,数字化装备故障诊断的准确度和智能化水平也会越来越高。

5.2 深度学习应用在数字化装备故障诊断上的现状分析

目前数字化装备故障诊断,受限于部队培养对应的人才慢,主要依靠生产厂家和科研院所专家实施,损坏装备长时间得不到恢复,严重影响部队的实战化训练。有些专家学者应用深度学习的理论方法^[45-47],主要是结合特定装备某一重要部件的故障诊断,在知识抽取、信号的识别与降噪处理以及故障特征提取与降维等方面作了一些很好的探索,但存在难整装应用、需额外加装传感器、迁移拓展性不好等问题,暂没有可供推广运用的深度学习模型。

5.3 深度学习应用在数字化装备故障诊断上的研究思路

针对现有研究和应用遇到的典型问题,诸如故障样本数据不足、信号数据类型不同、海量数据处理困难、复合故障解耦不易、网络参数优化复杂、应用效果偏差大等,可以参考解决相应问题最新研究成果,将深度学习算法与信号处理方法、浅层学习算法、参数优化算法、专家系统等结合应用^[48-50]。基于深度学习实现数字化装备故障诊断整装实际应用,主要有以下 3 个研究思路。

1) 与数字化装备现有状态监测系统相结合。目前数字化装备现有的状态监测系统,大多能通过传感器监测主要部件的状态信号,大概判断装备分系统状态正常与否。在此基础上,硬件方面可以增加必要传感器和重要信号箱外测量点,减少因开箱监测和信号缺失等造成的装备实时状态监测盲区;软件方面可以将深度学习算法模型与数字化装备现有状态监测系统进行兼容结合,实现数字化装备故障类型和部位的实时解析。

2) 与数字化装备现有专家系统相结合。对于数字化装备状态监测系统和装备操作人员初步判断的装备分系统故障,需要维修人员具体定位到故障单元和部件。部队级通常需要精确到板级和模块级,基地级则需要进一步对故障

模块和板件进行诊断。装备生产厂家和部队高级维修人员根据装备结构知识和丰富维修经验,从故障现象和机理出发,梳理形成了详实的故障诊断树,在此基础上加以开发出一系列的装备故障诊断专家系统。将深度学习算法模型和专家系统相结合,既能充分利用专家经验和及时更新故障数据,又能降低诊断难度和提高诊断效率。

3) 构建模块化嵌入式数字化装备故障诊断系统。现有的故障诊断领域深度学习算法应用研究,大部分停留在理论模型和部件试验层面,应用于实际装备故障诊断的较少。数字化装备系统集成度高,不同的分系统具有不同层次结构,功能相对独立又高度关联。模块化嵌入式系统能有效解决兼容性问题,降低整体开发难度,可通过基于不同深度学习算法的信号处理单元模块,嵌入式组合成整装故障诊断系统,实现从信号采集输入到故障类型输出的高效智能故障诊断。

6 结束语

基于深度学习的数字化装备故障诊断,最终要实现根据装备运行实时状态数据,及时准确判断装备故障情况和部位,为数字化装备维修保养工作提供依据。与传统故障诊断方法相比,深度学习方法在数字化装备故障诊断上准确率更高、时效性更优。因此,在数字化装备故障诊断中运用深度学习方法非常有研究意义。本文首先介绍了数字化装备故障诊断的现实困境和挑战,阐述了国内外数字化装备维修保障的研究现状,总结了装备故障诊断的主要方法和研究进展,重点梳理了深度学习在装备故障诊断领域的研究成果,最后结合实际提出了基于深度学习方法实现数字化装备故障诊断的 3 种研究思路。

参考文献:

- [1] 胡渤海. 信息战·数字化装备与国防军工发展 [J]. 国防科技工业, 2015 (10): 52-53.
- [2] 王应晨, 段修生. 深度学习及其在装备故障诊断中的研究进展 [J]. 战术导弹技术, 2018 (5): 25-30.
- [3] 王海卿, 古平, 王增光. 典型数字化装备 RMS 参数分析 [J]. 计算机与数字工程, 2017, 45 (1): 5-7.
- [4] 王飞璇, 魏清新, 王坤明. 武器装备系统级故障诊断发展及研究 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (4): 977-979.
- [5] 吴立金, 夏冉, 詹红燕, 韩新宇. 基于深度学习的故障预测技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (2): 9-12.
- [6] 鞠建波, 胡胜利, 祝超, 等. 基于深度学习的装备故障诊断方法 [J]. 电光与控制, 2018, 25 (2): 103-106.
- [7] 李燕安. 国外陆军装备数字化技术综述 [J]. 国防技术基础, 2008, 8: 50-54.
- [8] 赵德勇, 张国兴, 吴巍屹, 等. 基于信息系统集成训练综述 [J]. 飞航导弹, 2017 (9): 65-69.
- [9] 咎翔, 陈春良, 张仕新, 等. 数字化部队装备维修保障任务分配与调度框架研究 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (9): 99-101.

- [10] 齐小刚, 张仲华, 宋卫星, 等. 多中心维修任务分配研究现状 [J]. 智能系统学报, 2022, 17 (3): 448-458.
- [11] 李春林, 熊建斌, 苏乃权, 等. 深度学习在故障诊断中的应用综述 [J]. 机床与液压, 2020, 48 (13): 174-184.
- [12] 李冠松, 卢兴华. 美军维修改革发展研究 [J]. 火力与指挥控制, 2017, 42 (5): 181-183.
- [13] 姚世锋, 柏彦奇, 乔良. 美军基于性能的保障模式及启示 [J]. 军事交通学院学报, 2020, 22 (4): 47-52.
- [14] 张伟, 康建设, 贾云献, 等. 军用装备基于状态的维修策略研究 [J]. 装甲兵工程学院学报, 2005 (3): 16-19.
- [15] 丁紫薇. 基于机器学习的复杂装备故障诊断研究 [D]. 西安: 西安工业大学, 2022.
- [16] 刘瑞宏, 谢国强, 苑宗港, 等. 基于知识图谱的智能故障诊断研究 [J]. 邮电设计技术, 2020 (10): 30-35.
- [17] 邢砾文, 姚文凯, 黄莹. 基于深度学习的集成化装备故障诊断方法综述 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (8): 1-8.
- [18] 张如佩, 姜斌, 刘剑慰. 基于符号有向图的故障样本选取方法 [J]. 控制工程, 2018, 25 (1): 57-61.
- [19] 李胜利. 故障树分析法在无人机故障诊断中的应用分析 [J]. 现代工业经济和信信息化, 2022, 12 (2): 144-145.
- [20] 闫华. 空空导弹故障诊断专家系统研究 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (3): 796-802.
- [21] 谈娟. 基于解析模型的飞控系统故障诊断技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
- [22] 张妮, 车立志, 吴小进. 基于数据驱动的故障诊断技术研究现状及展望 [J]. 计算机科学, 2017, 44 (s1): 37-42.
- [23] 马长刚, 李青, 孙大林, 等. 基于神经网络的某装备智能故障诊断方法研究 [J]. 舰船电子工程, 2017, 37 (10): 104-107.
- [24] 张金泽, 段修生, 李和平, 等. 支持向量机技术的雷达板级电路快速故障诊断 [J]. 火力与指挥控制, 2008 (2): 85-88.
- [25] 任浩, 屈剑锋, 柴毅, 等. 深度学习在故障诊断领域中的研究现状与挑战 [J]. 控制与决策, 2017, 32 (8): 1345-1358.
- [26] 龙云瑶. 基于SAE和CNN的滚动轴承故障诊断方法研究 [D]. 上海: 东华大学, 2022.
- [27] 梁珊. 基于深度信念网络的滚动轴承故障诊断研究 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2019.
- [28] 余道明, 贾民平. 一种新型多层深度卷积神经网络的滚动轴承故障诊断方法 [C] //南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室, 第十二届全国振动理论及应用学术会议论文集, 中国振动工程学会, 2017.
- [29] 韩冰. 基于深度复卷积神经网络的滚动轴承故障诊断方法研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- [30] 王司, 王晓峰. 基于深度学习的缺失数据故障诊断方法研究 [J]. 自动化技术与应用, 2020, 39 (9): 87-91.
- [31] 雷亚国, 林京, 何正嘉. 基于多传感器信息融合的行星齿轮箱故障诊断 [C] //第十二届全国设备故障诊断学术会议论文集, 中国振动工程学会故障诊断专业委员会, 2010: 222-224.
- [32] 赵双龙, 郝永生. 基于二级信息融合的装备故障诊断方法 [J]. 中国测试, 2011, 37 (3): 74-77.
- [33] 王月海, 王瀚晨. 一种使用深度学习网络进行模拟电路故障特征自动提取的方案 [J]. 北方工业大学学报, 2020, 32 (5): 66-70.
- [34] 马立玲, 刘潇然, 沈伟, 等. 基于一种改进的一维卷积神经网络电机故障诊断方法 [J]. 北京理工大学学报, 2020, 40 (10): 1088-1093.
- [35] 颜学龙, 邵伟. 深度信念网在模拟电路故障诊断中的应用研究 [J]. 微电子学与计算机, 2016, 33 (9): 159-163.
- [36] 朱超岩, 姚晓东, 林向会, 等. 堆栈稀疏降噪自编码网络在变压器故障诊断中的应用 [J]. 中国科技论文, 2019, 14 (11): 1217-1222.
- [37] 易灵芝, 肖伟红, 于文新, 等. 基于深度学习的模拟电路故障诊断算法 [J]. 计算机工程与应用, 2018, 54 (24): 143-148.
- [38] 张经纬, 鞠建波. 某型电台智能故障诊断系统模型研究 [J]. 现代电子技术, 2015, 38 (1): 90-92.
- [39] 刘程, 陈斌, 瞿珊瑚, 等. 基于深度学习的短波发信机故障诊断应用 [J]. 通信技术, 2018, 51 (12): 3033-3037.
- [40] 吴魁, 王仙勇, 孙洁, 等. 基于深度卷积网络的多传感器信号故障诊断方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (1): 18-21.
- [41] 黄予春, 曹成涛, 顾海. 基于云计算和深度学习的电力电容器故障诊断和识别 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39 (4): 71-75.
- [42] 公丕平, 杨小强, 崔中清, 潘轶. 基于BP神经网络的某型装备故障诊断专家系统 [J]. 机械制造与自动化, 2012, 41 (5): 125-126.
- [43] 林广宏, 李赫. 基于全寿命保障的舰船交互式电子技术手册应用技术研究 [J]. 船舶, 2021, 32 (1): 28-34.
- [44] 毛伟伟, 高巍, 高峰. 两栖装甲装备故障诊断智能检测系统设计 [J]. 计算机与数字工程, 2012, 40 (2): 58-60.
- [45] 曲建岭, 余路, 袁涛, 等. 基于卷积神经网络的层级化智能故障诊断算法 [J]. 控制与决策, 2019, 39 (12): 2619-2625.
- [46] 郑铤, 张琳, 汤煜, 等. 基于小波变换与SVM的复杂装备故障诊断研究 [J]. 火力与指挥控制, 2016, 6 (41): 104-107.
- [47] 庞天照, 赵新文. 复杂信息化舰船装备故障分析对比研究 [J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39 (4): 30-33.
- [48] 潘亚楠, 李晶. 基于BP神经网络的故障诊断技术在装备维修中的应用 [J]. 舰船电子工程, 2010, 30 (10): 138-140.
- [49] 苏冠敏, 潘艳东. 基于神经网络的舰艇装备模拟电路故障诊断方法 [J]. 舰船电子工程, 2012, 32 (4): 110-112.
- [50] 赵春华, 胡恒星, 陈保家, 等. 基于深度学习特征提取和WOA-SVM状态识别的轴承故障诊断 [J]. 振动与冲击, 2019, 38 (10): 31-37.