

# 大数据与人工智能在航空电缆电气装配中的应用潜力分析

肖伊伊 殷强 李易甜

陕西飞机工业有限责任公司 陕西 汉中 723213

**摘要:** 大数据与人工智能在航空电缆电气装配中展现出显著应用潜力。大数据技术可实现多源异构数据实时采集与智能分析,为设计优化、故障预测提供数据支撑。人工智能通过深度学习、强化学习等算法,在电缆结构优化、生产设备预测性维护、表面缺陷识别及性能在线监测等环节实现自动化与智能化,大幅缩短研发周期、降低维护成本并提升产品质量,助力航空电缆装配向高效化、精准化方向升级。

**关键词:** 大数据;人工智能;航空电缆电气装配;应用潜力

引言:在航空工业高速发展、对装备可靠性与智能化要求日益提升的背景下,航空电缆电气装配的质量与效率至关重要。然而,传统装配模式存在数据分散、故障预测滞后、质量检测精度有限等问题。大数据凭借强大的数据整合与分析能力,人工智能依托先进的算法模型,二者深度融合,有望在装配设计优化、生产智能管控、质量精准检测等方面释放巨大潜力,推动行业变革。

## 1 文献综述与理论基础

### 1.1 EWIS 线束设计与三维工艺设计发展现状

(1) 传统模式局限:曾长期依赖人工经验驱动,设计阶段靠手工绘制图纸,工艺数据管理依赖 AutoCAD 与 Excel 人工维护,易出现数据错配、传递滞后问题;装配环节按 1:1 图纸手工布线,如 A380 线束需超 10000 小时人工操作,周期长达数月,且人工检测难以规避电磁干扰、绝缘破损等隐患,一致性与效率双低。(2) EWIS 与先进技术突破:作为迭代升级方案,已形成“需求分析-拓扑规划-参数建模”全流程体系,依托 CATIA、CHS 等工具实现三维数字化设计,通过干枝树模型自动优化路径,精准规避关键区域并满足 FAA 适航要求。结合 MBD 技术构建三维工艺体系,将装配信息嵌入模型,虚拟仿真提前解决干涉问题,工艺数据与 MES 集成实现实时管控,某机型装配周期缩短 20%,返工率降低 15%。(3) 未来智能展望:当前仍面临设计与工艺数据实时同步等挑战,AI 技术成为突破方向。通过机器学习分析历史数据可优化布线设计,集成传感器与智能算法实现故障预测,自动化检测使缺陷识别率达 99%,预计将进一步提升设计效率 30%,降低维护成本 15%。

### 1.2 航空电缆电气装配领域研究进展

(1) 传统方法:依赖经验公式确定电缆布线参数,如根据电缆长度、直径估算电阻值;通过制作物理样机进行装配试验,检测电缆与其他部件的兼容性;采用人工目检方式检查电缆接头是否牢固、绝缘层是否破损,该方法效率低且易受人为因素影响。(2) 现有改进:引入数字化布局设计技术,利用 CAD 软件构建航空电缆装配三维模型,实现布线方案的虚拟仿真与优化;应用自动化装配设备(如机器人)完成电缆裁剪、剥皮、压接等工序,提升装配精度与效率;采用离线质量检测手段,如通过工业 CT 扫描检测电缆内部结构缺陷,减少对装配过程的干扰。(3) 局限性:各环节数据分散存储于不同系统(如设计系统、生产系统),形成数据孤岛,难以实现数据共享与协同分析;缺乏实时分析能力,无法及时发现装配过程中的异常情况并调整工艺参数;故障预测能力不足,主要依靠历史故障数据进行事后分析,难以提前预测电缆装配故障,增加了航空设备运行风险<sup>[1]</sup>。

## 2 大数据与 AI 在航空电缆装配中的核心应用

### 2.1 智能设计与优化

(1) 案例:在航空电缆结构设计中,某航空制造企业采用基于深度学习的优化方案,以卷积神经网络(CNN)为核心模型,输入电缆材质、直径、屏蔽层结构等多维度参数,结合历史传输损耗数据构建训练集。模型通过多层卷积与池化操作,精准学习参数与传输损耗间的非线性关系,可快速预测不同结构参数下电缆的信号传输性能,有效规避传统设计中“试错式”调整的弊端。(2) 方法:该方法以企业近 10 年积累的 5000+ 组电缆设计与测试数据为基础,通过数据清洗与特征工程提取关键设计变量,采用迁移学习优化 CNN 模型训练过

程,实现设计参数的自动调优。在方案生成阶段,模型可根据航空设备对电缆的传输要求,实时输出3-5组最优结构参数组合,大幅减少人工干预。(3)效果:应用该技术后,企业电缆研发周期从传统的45天缩短至18天,缩短幅度达60%;同时因设计方案精准度提升,原材料浪费减少,研发成本降低40%,在大型客机电缆组件研发项目中成效尤为显著。

## 2.2 生产过程智能管控

(1)设备预测性维护:①技术:针对航空电缆装配中的关键设备(如自动压接机、剥线机),采用长短期记忆网络(LSTM)构建预测模型。通过设备上部署的振动、温度传感器,实时采集每10秒1次的运行数据,LSTM模型利用其对时序数据的长期依赖捕捉能力,分析数据趋势并识别设备异常特征,提前预测潜在故障。②案例:某航空电缆生产企业部署该系统后,设备非计划停机时间从每月平均8.5小时减少至4.9小时,降幅达42%;同时因避免了紧急维修与过度维护,年度维护成本从230万元降至150万元,降低35%。(2)智能工艺参数调控:①方法:在电缆绝缘层挤出工序中,采用模糊PID控制算法结合实时传感器数据(如熔融树脂温度、挤出压力),构建闭环调控系统。算法通过模糊逻辑对传感器数据进行动态分析,自动调整挤出机螺杆转速(调节精度达 $\pm 1r/min$ ),确保绝缘层厚度稳定<sup>[2]</sup>。②效果:应用前绝缘层厚度偏差普遍在 $\pm 0.05mm$ ,应用后缩小至 $\pm 0.015mm$ ,满足航空级精度要求;同时废品率从传统的3.2%降至0.7%,单条生产线年节约原材料成本超80万元。

## 2.3 质量检测自动化

(1)表面缺陷识别:①技术:采用YOLOv5目标检测算法,搭配多光谱成像系统(覆盖可见光、近红外波段),对电缆表面进行实时扫描。系统可自动识别划痕(最小检测尺寸0.2mm)、气泡(直径 $\geq 0.1mm$ )等微小缺陷,通过算法优化实现检测流程端到端处理,无需人工预处理。②指标:检测速度达到25帧/秒,可匹配生产线15m/min的传输速度;缺陷识别准确率稳定在98.5%以上,漏检率低于0.3%,较人工目检(准确率约85%)大幅提升。(2)性能在线监测:①方法:在电缆成品检测环节,引入近红外光谱分析技术,结合随机森林机器学习模型。光谱仪实时采集电缆的近红外吸收光谱,模型通过分析光谱特征与传输损耗、回波损耗等电气性能指标的关联关系,实现性能参数的实时计算与判定<sup>[3]</sup>。②效果:产品批次间性能一致性指标从之前的62%提升至97%,提升35%;因性能问题导致的客户投诉率从每月12

起降至4.8起,下降60%,客户满意度显著提高。

## 2.4 故障预测与健康管理

(1)数据驱动的故障模型:①技术:基于贝叶斯网络构建故障分析模型,输入企业近5年的电缆装配故障数据(涵盖接头松动、绝缘层破损等12类故障类型),通过网络节点概率推理,识别故障发生的潜在诱因与传播路径,形成故障预警规则库。②案例:某企业应用该模型后,在一次电缆组件装配过程中,系统提前72小时预警“压接机压力传感器漂移”故障,技术人员及时更换部件,避免了后续200余件产品返工及非计划停机,减少经济损失约120万元。(2)寿命预测:①方法:采用强化学习算法(DQN深度Q网络)优化电缆绝缘材料配方,以“延长使用寿命”为奖励目标,在虚拟仿真环境中模拟不同配方材料的老化过程,筛选最优成分比例。同时结合实际老化试验数据,持续迭代优化模型。②效果:优化后的绝缘材料介电常数波动范围从 $\pm 0.08$ 缩小至 $\pm 0.04$ ,缩小50%;介质损耗因数从0.0035降至0.0030,降低12%,电缆预计使用寿命从15年延长至20年,满足航空设备长周期服役需求。

## 3 大数据与AI在航空电缆装配中的技术挑战与实施路径

### 3.1 关键挑战

(1)数据质量与标注难题:航空领域数据稀缺性显著,一方面因航空电缆产品研发周期长达1-3年,且试验需模拟极端工况(如高空低温、强电磁干扰),单次试验成本超百万元,导致积累的有效数据量有限;另一方面,核心数据涉及航空安全与技术保密,企业间数据共享意愿低,难以形成跨企业的大规模数据集。标注成本同样居高不下,电缆缺陷标注需工程师对照SAEAS50881等航空标准,逐帧分析多光谱图像,单条电缆缺陷标注需2-3小时,成本约为普通工业产品标注的4倍,且标注结果易受工程师经验差异影响,数据一致性难以保障。

(2)算法实时性要求:航空电缆装配线运行速度快,如自动布线机每分钟可完成15米电缆布设,需AI系统在 $\leq 50$ 毫秒内完成数据处理与决策。当前主流AI模型难以满足需求,例如用于缺陷检测的YOLOv5模型未优化前体积超120MB,在装配线边缘控制器(如嵌入式PLC)上推理时,帧率仅6-8帧/秒,无法匹配生产线15m/min的传输速度,易出现缺陷漏检;LSTM设备预测模型在处理振动、温度等实时数据时,单次计算耗时超80毫秒,滞后于设备运行状态变化,无法及时发出故障预警。(3)安全与可靠性验证:航空产品需通过FAA、EASA的严格认证,AI系统需符合DO-178C软件认证标准。AI模型的“黑箱

特性”成为主要障碍，如某企业的电缆故障预测模型曾出现误判，却无法追溯是训练数据偏差还是模型参数异常导致，不符合认证中的“可追溯性”要求。此外，极端工况下模型稳定性不足，实验室数据显示，当装配车间温度波动 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 时，CNN结构参数优化模型的预测误差从2%增至8%，无法达到航空级可靠性标准（故障率 $\leq 10^{-9}$ /小时）。

### 3.2 实施路径

（1）数据层：构建航空电缆装配专属数据中台，采用OPCUA工业通信协议，打通设计端CAD模型系统、生产端MES系统、检测端质量系统的数据壁垒，实现30+类核心数据的实时汇聚。同时，引入半监督学习算法，以500组人工标注的高质量数据为基础，通过数据增强技术（如旋转、噪声添加）生成5000+组合成训练数据，将标注成本降低60%；建立数据质量评估机制，通过 $3\sigma$ 原则剔除异常值，结合专家审核，确保数据准确率达99.5%以上。（2）算法层：基于TinyML技术开发轻量化模型，对YOLOv5进行剪枝与量化，移除冗余卷积层，将模型体积压缩至8MB，推理速度提升至35帧/秒，满足生产线实时检测需求；针对LSTM模型，采用知识蒸馏技术，将复杂模型的知识迁移至轻量模型，在保证89%预测准确率的前提下，计算耗时缩短至35毫秒。同步研发边缘AI控制器，集成模型推理与数据采集功能，实现装配线“端-边”协同决策<sup>[4]</sup>。（3）应用层：分三个阶段部署智能模块，第一阶段（1-3个月）上线表面缺陷识别模块，替代人工目检，覆盖电缆划痕、气泡等8类常见缺陷；第二阶段（4-6个月）部署设备预测性维护系统，对压接机、挤出机等10类关键设备进行故障预警；第三阶段（7-12

个月）推出智能工艺调控模块，实现绝缘层挤出、接头压接等工序的参数自动优化。每个阶段设置1个月效果验证期，通过对比AI与人工的作业数据，持续迭代模型。

（4）标准层：联合中国商飞、航空工业等企业，以及FAA、EASA认证机构，参与制定AI在航空电缆装配中的应用标准。参照欧盟AI法案“高风险AI系统”要求，明确模型训练数据审核、决策逻辑追溯等12项合规指标；推动制定《航空AI软件测试规范》，建立从模型开发到部署的全生命周期验证流程，确保AI系统满足DO-178C认证要求。同时，参与ICAO（国际民航组织）的技术研讨，推动标准的国际适配。

### 结束语

大数据与人工智能为航空电缆电气装配带来了创新变革契机，在智能设计、生产管控、质量检测和故障预测等方面展现出巨大潜力，能有效提升效率、降低成本、增强可靠性。不过，数据、算法及安全验证等挑战不容忽视。未来，需通过完善数据层、优化算法层、有序推进应用层、构建标准层等路径，推动二者深度融合，助力航空电缆装配迈向智能化新阶段。

### 参考文献

- [1]张栋善,王泓然.航空电器中电缆故障与对策[J].电子测试,2020,(10):29-31.
- [2]吕志召.航空电缆检测中的技术应用与分析[J].设备管理与维修,2022,(08):96-97.
- [3]王坤宇.航空电气系统接口电路设计与仿真研究[J].电器与能效管理技术,2023,(08):33-40.
- [4]王晓彪.航空电气电缆故障诊断与检测技术分析[J].电子制作,2021,(18):92-93.