

发动机系统损坏故障的诊断与修复策略

杨赛克

河南豫鼎鉴定技术研究院有限公司 河南 郑州 450052

【摘要】：发动机作为各类动力装备的核心，其运行可靠性直接关系到设备安全、效率与寿命。发动机系统结构复杂，工况恶劣，损坏故障具有多样性、隐蔽性和关联性等特点，对诊断与修复技术提出了极高要求。本文系统阐述了发动机系统损坏故障的主要类型与成因，深入剖析了从传统经验判断到现代智能诊断的各类技术方法，包括基于信号分析、模型解析与数据驱动的诊断策略。在此基础上，本文构建了一个从故障检测、隔离、评估到修复执行的闭环管理流程框架，并详细论述了原位修复、离位大修、部件更换及先进再制造等修复策略的选择与实施要点。最后，结合物联网、大数据与人工智能等新技术融合趋势，探讨了预测性健康管理 with 智能维护决策支持系统的发展方向，旨在为提升发动机系统维护保障的精准性、时效性与经济性提供理论参考与实践指导。

【关键词】：发动机；故障诊断；修复策略；预测性维护；智能维护

DOI:10.12417/2811-0528.26.17.039

1 引言

发动机，无论是往复式内燃机、燃气轮机还是其他特种动力装置，均是交通运输、能源发电、工业生产及国防装备中的关键动力源。其技术密集、结构复杂，长期在高温、高压、高转速及交变载荷的恶劣环境下工作，导致其成为故障多发系统。发动机系统故障若不能被及时、准确地诊断与修复，轻则导致设备停机、效率下降与经济损失，重则可能引发严重的安全事故。

传统的发动机维护多采用事后维修（Run-to-Failure）或定期计划维修（Time-Based Maintenance）模式。前者被动响应，损失巨大；后者缺乏针对性，可能造成“过度维修”或“维修不足”。随着传感器技术、信息处理与人工智能的飞速发展，基于状态的维修（Condition-Based Maintenance, CBM）和预测性健康管理（Prognostics and Health Management, PHM）已成为发动机维护领域的主流方向。其核心在于通过对发动机运行状态的实时或准实时监控，运用先进的分析方法，早期识别故障征兆，精准定位故障根源，并据此制定最优的修复决策，从而实现从“被动应对”到“主动预防”的转变。

本文旨在系统性地梳理发动机系统损坏故障的诊断与修复策略。首先对常见故障模式进行分类与机理分析；其次，全面综述现有的诊断技术体系；然后，提出一个结构化的诊断与修复流程框架，并详细阐述各类修复策略；最后，展望该领域的技术发展趋势与挑战。

2 发动机系统损坏故障的主要类型与机理

发动机系统是一个由多个子系统协同工作的复杂整体，其故障可大致归为以下几类：

2.1 机械类故障

（1）磨损与疲劳：如活塞环、气缸套、轴承、齿轮、叶片等运动副因长期摩擦导致的尺寸超差、表面损伤，或因交变应力引发的疲劳裂纹、断裂。这是最常见的渐进性故障。（2）变形与断裂：由于过热、过载、碰撞或材料缺陷导致的缸体、缸盖、曲轴、连杆等关键承力部件发生塑性变形或突然断裂。战损发动机常面临此类问题。（3）不平衡与不对中：转子系统（如涡轮转子、曲轴）因质量不平衡或安装不对中引发剧烈振动，加速轴承磨损，甚至导致结构共振破坏。

2.2 性能类故障

（1）燃烧异常：表现为爆震、失火、功率下降、油耗增加、排放超标等。根源可能在于燃油系统（喷油嘴堵塞、油泵压力不足）、进气系统（空气滤清器堵塞、进气泄漏）、点火系统（火花塞失效、点火正时错误）或控制系统故障。（2）压缩压力不足：气缸密封不良（气门漏气、活塞环磨损、缸垫损坏）导致压缩比下降，直接影响发动机功率和效率。（3）润滑与冷却失效：机油压力低、油质劣化导致润滑不良，引发拉缸、抱轴；冷却系统故障（水泵损坏、节温器卡滞、散热器堵塞）导致发动机过热，造成材料强度下降、机油失效等一系列连锁反应。

2.3 电气与控制类故障

（1）传感器与执行器故障：转速、温度、压力、位置等传感器信号失真或丢失，以及燃油计量阀、废气再循环（EGR）阀、可变几何涡轮（VGT）执行器等动作失灵，导致发动机电控单元（ECU）接收错误信息或输出错误控制指令，使发动机工作异常。（2）控制系统软硬件故障：ECU 内部电路板、

芯片故障或控制软件逻辑错误。

2.4 流体系统故障

(1) 泄漏: 燃油、机油、冷却液的内部或外部泄漏。(2) 堵塞: 油路、气路、水路因杂质、积碳、冰堵等原因造成流通不畅。

3 发动机故障诊断技术体系

现代发动机故障诊断技术已形成多层次、多方法的综合体系。

3.1 基于信号分析的诊断方法

该方法通过分析发动机运行过程中产生的物理信号来识别故障。(1) 振动分析: 用于诊断旋转机械的不平衡、不对中、轴承损坏、齿轮啮合故障等。时域分析(如峰值、有效值)、频域分析(频谱、包络谱)以及时频分析(小波变换)是常用手段。例如, 增强最小熵解卷积方法能有效提取轴承故障的周期性冲击特征。(2) 油液分析: 通过对润滑油中的磨损金属颗粒、污染物及油品理化性质进行分析, 监测发动机内部的磨损状态和润滑状况, 是一种有效的磨损类故障预测手段。(3) 性能参数分析: 监控转速、温度、压力、流量等关键性能参数, 与健康基线或模型预期值进行比对, 发现异常趋势。气路故障诊断常采用此方法。(4) 声学及噪声分析: 利用声音信号诊断燃烧异常、气门异响、泄漏等故障。

3.2 基于模型的诊断方法

该方法建立在发动机数学模型(如物理模型、数据驱动模型)基础上。

(1) 解析模型方法: 利用发动机的热力学、流体力学和动力学方程建立精确数学模型, 通过比较模型输出与实际传感器输出的残差来诊断故障。逆模型方法可用于执行机构及其传感器的故障定位。(2) 状态估计方法: 采用卡尔曼滤波器、观测器等工具, 估计无法直接测量的系统状态变量, 通过状态估计误差进行故障诊断。

3.3 基于数据驱动的诊断方法

随着大数据和人工智能技术的发展, 此类方法日益成为研究热点。

(1) 机器学习与深度学习: 利用历史故障数据训练分类或回归模型(如支持向量机、随机森林、卷积神经网络、长短期记忆网络), 实现故障模式的自动识别与分类。案例推理(CBR)系统通过检索相似历史案例来辅助诊断决策。(2) 模糊逻辑与专家系统: 将领域专家的经验知识规则化, 适用于处理诊断过程中存在的不确定性和模糊性。Delphi-模糊 Petri

网等方法被用于构建航空发动机故障诊断系统。

3.4 综合智能诊断系统

在实际工程中, 往往采用多种技术融合的智能诊断系统。例如, 智能汽车发动机故障排除系统(CEFTS)将故障现象、证据、原因与解决方案构建成知识库, 为技术人员提供结构化指导。基于物联网的分布式诊断系统, 则通过优化传感器网络和搜索策略(如基于定位集的搜索), 降低诊断过程中的通信开销, 提高效率。

4 发动机故障诊断与修复的闭环管理流程

一个完整的发动机故障处理应遵循一个系统化的闭环流程, 如图1所示(概念源自商业航空发动机故障管理流程)。该流程可概括为以下四个阶段:

4.1 故障检测与警报

系统通过在线监测传感器数据, 利用阈值判断、趋势分析或智能算法, 识别出偏离正常状态的异常。一旦确认异常, 立即触发警报, 通知维护人员或系统。

4.2 故障诊断与隔离

此阶段是核心。维护人员或系统接收警报后, 进入观察与数据收集阶段。通过进一步的数据分析(如第3节所述的各种方法), 结合内窥镜检查、离线测试等辅助手段, 对故障进行“解释”(Interpret), 即识别故障的根本原因(Root Cause)和具体位置(如哪个子系统、哪个部件)。例如, 针对战损发动机, 需按决策流程图依次检查燃油、润滑、进气、冷却等系统, 判断其是否工作正常、故障是否可检测、是否可修复。

4.3 修复任务规划与决策

基于诊断结果, 定义修复任务目标。然后, 制定具体的修复操作程序(Procedure Formulation), 包括所需的工具、备件、工艺标准、安全措施和人员配置。决策内容还包括修复策略的选择(见第5节)和维修优先级的确定。

4.4 修复执行与验证

由具备资质的维修人员按照既定程序执行修复任务。修复完成后, 必须进行严格的测试与验证(如台架试车、路试), 重新“观察”系统状态, 确保故障已彻底排除, 发动机恢复至安全且功能正常的“目标状态”(Goal State)。验证报告将反馈至系统, 用于更新设备健康档案和优化诊断模型, 实现闭环学习。

5 发动机损坏故障的修复策略

修复策略的选择取决于故障类型、严重程度、设备价值、

停机时间成本及可用资源。

5.1 原位修复与调整

适用于轻微或可调故障。(1) 清洁与调整: 清洗喷油嘴、节气门、更换空气/燃油滤清器, 调整气门间隙、点火正时、皮带张紧度等。(2) 紧固与密封: 紧固松动的连接件, 更换密封垫片、油封以解决泄漏问题。(3) 软件刷新与标定: 更新发动机控制单元(ECU)软件, 重新标定参数以解决控制逻辑问题。

5.2 部件更换

当关键部件损坏严重, 无法修复或不值得修复时, 采用更换策略。(1) 总成更换: 更换发电机、起动机、水泵、涡轮增压器等模块化总成, 速度快, 但成本高。(2) 核心部件更换: 更换活塞、连杆、轴承、气门、喷油嘴等单个部件, 要求较高的装配工艺。

5.3 离位大修与再制造

针对发动机核心机(如缸体、曲轴、缸盖)的严重磨损或损伤, 需进行离位大修。(1) 传统大修: 将发动机完全拆解, 清洗、检测所有零件, 更换所有磨损件和密封件, 按原厂规格重新装配和测试。这是恢复发动机性能最彻底的方式。(2) 先进再制造: 超越传统大修, 采用激光熔覆、等离子喷涂、冷喷涂等先进表面工程技术, 修复磨损或损伤的零件尺寸与性能, 甚至提升其耐磨、耐腐蚀性。再制造追求“如新甚至优于新”的质量标准, 是绿色循环经济的重要体现。转子平衡工艺(如影响系数法、三圆法)是航空发动机大修中的关键环节, 用于消除振动。

5.4 战损/应急修复

在军事或特殊应急情况下, 需采用快速、临时的修复手段以恢复基本功能, 可能不追求完美性能, 旨在使设备能够撤离现场或完成紧急任务。

6 技术发展趋势与展望

发动机故障诊断与修复领域正与新兴技术深度融合, 呈现

以下趋势:

(1) 预测性健康管理(PHM)的深化: 基于物联网(IoT)的传感器网络可采集更全面、更实时的海量数据。结合大数据分析和机器学习算法, 建立高精度的剩余有用寿命(RUL)预测模型, 实现从“诊断已发生故障”到“预测将发生故障”的跨越, 为预测性维护提供科学依据。

(2) 数字孪生与虚拟维修: 构建发动机的高保真数字孪生模型, 在虚拟空间中映射物理发动机的实时状态。可在数字孪生体上模拟故障演化、测试修复方案、优化维修工艺, 并进行维修人员培训, 从而降低实装操作风险与成本。

(3) 人工智能驱动的智能决策支持: 维护决策支持系统(MDSS)将整合 PHM 信息、备件库存、维修资源、成本模型等多源信息, 运用运筹学与人工智能算法, 自动生成最优的维修计划、备件采购策略和资源调度方案, 实现维护活动的全局优化。

(4) 自主化与远程化维护: 无人机、爬行机器人用于发动机外部和内部(如通过内窥孔)的自动巡检。增强现实(AR)技术可指导现场维修人员操作, 远程专家能通过 AR 眼镜提供实时支持, 突破地域限制, 提升一线维修能力。

挑战: 新技术的应用也面临数据质量与安全、算法可解释性、初期投资成本高、跨学科复合型人才短缺以及标准法规滞后等挑战。未来需在技术创新、人才培养和标准体系建设上协同推进。

7 结论

发动机系统损坏故障的诊断与修复是一项涉及多学科知识的系统工程。本文系统论述了从故障机理分析、智能诊断技术到闭环修复管理的完整知识体系。当前, 该领域正从依赖经验的传统模式, 向以数据为驱动、以预测为核心的智能化模式快速演进。融合物联网、大数据、人工智能与先进制造技术的预测性健康管理 with 智能维护策略, 是保障发动机高可靠性、长寿命与经济运行的关键发展方向。未来的研究与实践应聚焦于提升诊断预测的准确性、修复工艺的先进性以及维护决策的整体优化效率, 以应对日益复杂的发动机系统维护保障需求。

参考文献:

- [1] 熊保胜.汽车电控发动机系统故障的诊断与维修研究[J].(期刊名),2022(2):111-113.
- [2] CHEN M,QU R,FANG W.Case-based reasoning system for fault diagnosis of aero-engines[J].Expert Systems with Applications,2022,117350.
- [3] 李大为,王奕首,李军,等.军用航空发动机气路故障诊断技术进展[J].航空动力学报,2024,39(12):1-15.
- [4] 赵艺珂,王家序,张新,等.基于增强最小熵解卷积的航空发动机故障诊断[J].振动工程学报,2023,36(1):210-218.
- [5] 张光宇,张福光,程继红.基于 Delphi-模糊 Petri 网的航空发动机故障诊断[J].航空动力学报,2020,35(12):2655-2664.