

汽车自动变速器常见故障模式与智能检修策略

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】：汽车自动变速器作为汽车动力传动系统的核心部件，其性能与可靠性直接影响整车动力性、经济性与安全性。本文系统分析了自动变速器的典型故障模式，包括机械传动系统、液压控制系统及电子控制系统等主要组成部分的常见失效形式及其成因。在此基础上，深入探讨了以数据驱动、模型驱动和知识驱动为核心的智能检修策略，涵盖了基于车载诊断（OBD）的故障码解析、基于传感器信号与深度学习的故障特征提取与识别、以及结合专家系统的智能诊断决策支持等方法。研究表明，融合多源信息与先进算法的智能检修体系能够显著提升故障诊断的准确性、时效性与预判能力，是未来自动变速器维修技术发展的必然趋势。

【关键词】：自动变速器；故障模式；智能检修；故障诊断；深度学习；车载诊断

DOI:10.12417/2811-0528.26.17.051

引言

随着汽车工业向电动化、智能化、网联化方向高速发展，自动变速器的技术复杂度日益提升。现代自动变速器已演变为集精密机械、高压液压与复杂电控于一体的高度集成系统。其复杂性也带来了故障诊断与维修的挑战。传统的检修方法高度依赖维修人员的经验，通过“问、看、听、试”等感官判断和逐步排查，过程繁琐、效率低下，且易因误判导致不必要的拆卸，造成“修出故障”的次生问题。因此，建立一套科学、系统、智能的故障诊断与检修策略，对于保障车辆运行安全、降低维修成本、提升用户满意度具有重要的理论意义与应用价值。

本文旨在系统梳理自动变速器的常见故障模式，并重点论述以现代信息技术和人工智能算法为基础的智能检修策略，为自动变速器的故障诊断与维修实践提供理论参考和技术路径。

1 汽车自动变速器常见故障模式分析

自动变速器的故障可依据其子系统划分为机械传动、液压控制及电子控制三大类故障。

1.1 机械传动系统故障

机械传动系统主要包括液力变矩器（或离合器）、行星齿轮机构、轴及轴承等。其常见故障模式有：

打滑与换挡冲击：表现为发动机转速升高但车速提升缓慢，或换挡时车身明显顿挫。主要原因包括离合器或制动器摩擦片过度磨损、烧蚀，导致传扭能力下降；或相关元件活塞密封件老化、损坏，导致油压建立缓慢或泄漏。

异响与振动：在特定挡位或车速下产生异常噪音或振动。可能源于行星齿轮机构磨损、间隙过大，轴承损坏，或液力变

矩器内部导轮单向离合器失效等。

无动力输出：车辆无法行驶。这通常是机械传动路径完全中断的严重表现，如输入轴、输出轴断裂，或所有换挡执行元件均无法结合。

1.2 液压控制系统故障

液压系统负责传递动力、润滑冷却及控制换挡执行元件，由油泵、阀体、电磁阀、油道及密封件等组成。

油压异常：主油路压力过高或过低。压力过高可能导致换挡冲击严重，压力过低则直接导致打滑甚至无挡。原因包括油泵磨损、调压阀卡滞、滤清器堵塞或油路泄漏等。

阀体与电磁阀故障：阀体内滑阀卡滞、磨损会导致换挡逻辑混乱、延迟或冲击。电磁阀故障则更为常见，可分为开关阀故障（如线圈断路/短路、阀芯卡滞）和线性比例阀故障（如响应迟缓、控制精度下降）。电磁阀线圈电阻值异常（如开关阀 10-30 Ω ，线性阀 2-6 Ω ）是判断其好坏的基本电气检测方法。

油液变质与泄漏：自动变速器油（ATF）长期高温工作导致氧化、污染，使其润滑、传力、散热性能下降，加速内部元件磨损。外部或内部油封泄漏则直接导致油压不足和系统失效。

1.3 电子控制系统故障

电子控制系统是自动变速器的“大脑”，通过传感器收集信息，由变速器控制模块（TCM）计算决策，并驱动电磁阀等执行器动作。

传感器故障：输入轴/输出轴转速传感器、油温传感器、油门位置传感器等信号失准或中断，将导致 TCM 无法正确判

断工况,引发换挡点错误、锁止离合器异常或进入故障保护模式(如跛行回家模式)。例如,中间轴转速传感器信号失效即被设定为一种典型的故障测试模式。

执行器(电磁阀)驱动故障:除电磁阀自身机械电气故障外,TCM内部的驱动电路故障也会导致电磁阀无法正常工作。

控制单元(TCM)故障:较为少见,但一旦发生可能导致系统全面瘫痪。表现为无法通信、程序错乱、输出信号固定等。

线路故障:包括短路、断路、虚接及干扰,可能导致间歇性故障,诊断难度较大。

2 传统检修方法的局限性与智能检修的必然性

传统的自动变速器检修遵循“问诊-自诊断-测试-解体”的流程。虽然依赖专用诊断仪读取故障码(DTC)已成为标准步骤,但该方法存在明显局限:首先,故障码仅指示故障范围,无法精确定位故障点(如指示“换挡电磁阀B电路故障”,可能是电磁阀本身、线路或TCM问题);其次,对于大量无故障码的间歇性故障或性能劣化故障,传统方法难以捕捉;最后,诊断过程严重依赖技师经验,缺乏标准化和可复现性。

智能检修策略的提出,旨在利用先进传感技术、数据分析和人工智能算法,克服传统方法的不足,实现故障的精准化、前瞻化、自动化诊断。

3 智能检修策略的核心技术体系

智能检修不仅仅是工具的升级,更是方法论的革命。它构建了一个从感知到决策的三层架构体系。

3.1 感知层:基于增强型 OBD 与多源数据融合

这是智能检修的“感官”基础。传统的诊断仅读取静态故障码,而智能检修则强调全量数据采集。

高频动态数据流:利用增强型 OBD 接口或总线嗅探技术,高频采集转速、油压、电磁阀占空比、油温等实时数据。这些数据构成了变速器运行的“心电图”。

多源异构数据融合:除了车辆自带传感器,智能检修系统还可集成振动传感器(加速度计)、声学传感器(麦克风)和油液在线监测传感器(粘度、水分、颗粒计数)。通过数据融合技术,将机械振动信号、电子信号和液压信号在同一时间轴上对齐,形成反映变速器真实状态的“全息影像”。

3.2 算法层:模型驱动与数据驱动的协同

这是智能检修的“大脑”,负责从海量数据中挖掘故障特征。

3.2.1 模型驱动方法 (Model-Based)

基于自动变速器的物理原理(如液压动力学、机械动力学)建立高保真的数学模型(如 Simulink 模型)。通过将模型的预测输出与实际传感器的测量值进行比较,计算残差(Residual)。如果残差超过设定的阈值,则判定为发生故障,并通过观测器设计进一步隔离故障源。例如,建立液力变矩器的扭矩传递模型,通过对比实际滑差与理论滑差,可以精准识别变矩器内部故障。该方法的优势在于物理意义明确,但在面对未知的复合故障时,模型修正成本高昂。

3.2.2 数据驱动方法 (Data-Driven)

这是当前人工智能在故障诊断领域应用的热点。它不依赖精确的物理模型,而是让算法从数据中“学习”故障模式。

特征提取与分类:利用信号处理技术(如小波变换、傅里叶变换)从振动、声音信号中提取时域、频域、时频域特征。随后,利用机器学习算法(如支持向量机 SVM、随机森林 RF)对这些特征进行分类。例如,有研究采用稀疏自编码器(SAE)进行特征自动降维与提取,再结合 SVM 对电磁阀和传感器的故障进行识别,大幅提高了诊断准确率。

深度学习端到端诊断:利用卷积神经网络(CNN)强大的特征提取能力,直接将振动信号的频谱图或一维波形作为输入,自动学习故障特征,无需人工设计特征。对于具有时间序列特性的换挡过程,利用长短期记忆网络(LSTM)可以有效捕捉换挡过程中的瞬态变化,实现对换挡品质的量化评估。

3.3 决策层:知识图谱与专家系统

这是智能检修的“指挥官”,负责将算法层的分析结果转化为人类可理解的维修方案。

3.3.1 专家系统

将资深维修大师的经验转化为“IF-THEN”规则库。当系统检测到“转速传感器信号波动”且“油温过高”时,系统会自动匹配规则,提示“检查传感器线路屏蔽层是否破损”或“检查变速箱搭铁线”。

3.3.2 知识图谱

相比于扁平化的规则库,知识图谱构建了以“自动变速器”为核心的网状知识结构。它包含了“部件”、“故障现象”、“故障原因”、“检测方法”、“维修方案”等实体及其复杂关系。当输入“3升4挡打滑”时,系统不仅能列出“离合器C组磨损”这一原因,还能通过图谱推理,关联出“C组油路泄漏”、“C组蓄压器故障”等所有可能的因果链,并按概率排序,辅助维修人员进行系统化排查。

3.3.3 预测性维护 (Predictive Maintenance)

这是智能检修的最高阶形态。通过对长期监测数据的趋势分析(如油液污染度呈指数上升、离合器接合时间线性延长),利用退化模型和剩余使用寿命(RUL)算法,系统可以在故障发生前几周甚至几个月发出预警,提示用户更换部件,真正实现从“故障后维修”向“视情维护”的转变。

4 智能检修系统的实施架构与工程挑战

4.1 “云-管-边-端”协同架构

一个成熟的智能检修系统通常采用分层架构:

端(End): 车辆端的传感器、TCM及网关,负责数据采集与初步清洗。

边(Edge): 车载高性能计算单元或路侧单元,负责实时性要求高的边缘计算,如实时振动分析。

管(Pipe): 5G/V2X通信链路,保障海量数据的高速、低延时传输。

云(Cloud): 云端数据中心,汇聚海量历史数据,进行复杂模型的训练与迭代,管理全局知识图谱,并向维修终端推送诊断报告。

4.2 面临的挑战与对策

尽管前景广阔,但智能检修的全面落地仍面临诸多挑战:

数据孤岛与标准缺失: 各车企出于商业利益和技术壁垒,数据接口封闭,格式不统一。推动行业制定通用的诊断数据标

准(如扩展OBD协议)是解决之道。

算法泛化能力不足: 针对某款车型训练的深度学习模型,很难直接应用于另一款结构不同的变速器。迁移学习(Transfer Learning)技术的发展有助于解决这一问题,利用预训练模型在小样本上进行微调。

安全与隐私: 车辆运行数据涉及用户隐私和商业机密。必须建立完善的数据加密、脱敏和访问控制机制。

人才断层: 懂汽车机械的技师不懂AI,懂AI的工程师不懂汽车。高校和企业需要联合培养既懂汽车构造又精通数据分析的复合型人才。

5 结论与展望

汽车自动变速器的故障诊断正从依赖经验的传统模式,迈向以数据与算法为核心的智能模式。本文系统分析了自动变速器机械、液压、电控系统的常见故障模式,并构建了包含感知层、算法层和决策支持层的智能检修策略框架。通过融合增强型OBD数据、基于模型与数据驱动的智能诊断算法以及专家知识系统,智能检修能够实现更精准的故障定位、更高效的维修决策,并最终向预测性维护演进。

未来,随着车联网(V2X)技术的普及、边缘计算能力的提升以及人工智能算法的持续优化,自动变速器的智能检修将更加实时、精准和自动化。同时,推动行业数据接口标准化、加强跨领域人才培养、保障数据安全,将是推动该技术大规模落地应用的关键。

参考文献:

- [1] DU C,ZHANG S,LIN Z,et al.Fault Identification of Vehicle Automatic Transmission based on Sparse Autoencoder and Support Vector Machine[J].IOP Conference Series:Materials Science and Engineering,2019,490(7):072050.
- [2] 李国栋.汽车自动变速器故障检测与维修[J].内燃机与配件,2022,(01):159-161.
- [3] 陈启优.汽车自动变速器常见故障分析[J].内燃机与配件,2020,(20):147-148.
- [4] 王恩伯.汽车自动变速器故障原因及检修方法研究综述[J].内燃机与配件,2020,(11):173-174.
- [5] 邵海东,张笑阳,程军圣,等.Intelligent Fault Diagnosis of Bearing Using Enhanced Deep Transfer Auto-encoder[J].机械工程学报,2020,56(9):84-93.
- [6] MA T.Model-Based Control Design and Experimental Validation of an Automated Manual Transmission[D].The Ohio State University,2013.