

# 大功率液力机械变速器状态监测与故障诊断系统

张磊<sup>1</sup>, 徐振贤<sup>1</sup>, 段海金<sup>1</sup>, 李瑾<sup>2</sup>, 王勇<sup>2</sup>, 王凤金<sup>1</sup>, 张斌<sup>1</sup>,  
单红波<sup>1</sup>, 赵娟<sup>1</sup>, 蒋众<sup>1</sup>, 马俊巍<sup>3</sup>

(1. 北京航天发射技术研究所, 北京 100076; 2. 某驻泰安地区军代室, 山东 泰安 271000;  
3. 北京市青年宫, 北京 100035)

**摘要:** 大功率液力机械器是重型特种车辆传动系统的关键核心部件, 为满足整车高速、重载和高任务可靠性的使用要求, 一方面需要提升液力机械变速器自身的强度和可靠性, 另一方面要建立和完善大功率液力机械变速器的状态监测和故障诊断系统; 基于专家系统和典型零部件的失效物理模型, 针对液力机械变速箱系统和关键零部件的常见失效形式, 建立了大功率液力机械变速器状态监测和故障诊断系统, 分为变矩与闭锁功能监测及报警模块、换挡提示及报警模块、油位监测及报警模块、系统油压监测及报警模块和油温监测及报警模块共五大部分; 通过实车测试证明, 大功率液力机械变速器状态监测和故障诊断系统能够较为有效的识别系统的潜在失效和使用风险, 或在出现严重故障前, 通过简单的维护和保养, 避免严重故障的发生, 从而减少人力和零备件的需求, 降低保障费用。

**关键词:** 液力机械变速器; 特种车辆; 状态监测; 故障诊断

## Condition Monitoring and Fault Diagnosis System for High-power Hydraulic Mechanical Transmission

ZHANG Lei<sup>1</sup>, XU Zhenxian<sup>1</sup>, DUAN Haijin<sup>1</sup>, LI Jin<sup>2</sup>, WANG Yong<sup>2</sup>, WANG Fengjin<sup>1</sup>,  
ZHANG Bin<sup>1</sup>, SHAN Hongbo<sup>1</sup>, ZHAO Juan<sup>1</sup>, JIANG Zhong<sup>1</sup>, MA Junwei<sup>3</sup>

(1. Beijing Institute of Aerospace Launch Technology, Beijing 100076, China;  
2. The Military Representative Office of the Equipment Department in Tai'an, Tai'an 271000, China;  
3. Beijing Youth Palace, Beijing 100035, China)

**Abstract:** High-power hydraulic machinery is the key core component of the transmission system of heavy-duty special vehicles. In order to meet the requirements of high-speed, heavy-duty and high-reliability of the vehicle, on the one hand, it is necessary to improve the strength and reliability of the hydraulic mechanical transmission itself. On the other hand, it is necessary to establish and improve the condition monitoring and fault diagnosis system of the high-power hydraulic mechanical transmission. Based on the expert system and the failure physical model, the state monitoring and fault diagnosis system of the high-power hydraulic mechanical transmission is established for the common failure modes of the hydraulic mechanical transmission system and key components, which is divided into the torque conversion and blocking function monitoring and alarm modules, Shift prompt and alarm module, oil level monitoring and alarm module, system oil pressure monitoring and alarm module, and oil temperature monitoring and alarm module are five parts. The actual vehicle test proves that the high-power hydraulic mechanical transmission condition monitoring and fault diagnosis system can more effectively identify the potential failure and use risk of the system, or avoids the occurrence of serious faults through simple maintenance and maintenance before serious faults occur. Thereby reducing the demand for manpower and spare parts, and reducing guarantee costs.

**Keywords:** hydraulic mechanical transmission; special vehicles; condition monitoring; fault diagnosis

收稿日期: 2021-06-05; 修回日期: 2021-07-14。

作者简介: 张磊(1982-), 男, 辽宁沈阳人, 博士, 研究员, 主要从事特种车辆可靠性技术方向的研究。

引用格式: 张磊, 徐振贤, 段海金, 等. 大功率液力机械变速器状态监测与故障诊断系统[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(1): 15-19, 25.

## 0 引言

大功率液力机械变速器包含液力变矩器和机械式变速器两大总成,是特种车辆底盘动力传动系统的关键部件。以往只有在自动变速器中才配有故障报警模块,当发生故障报警时,自动变速器会限制驾驶员的使用或停机,实现自身的保护<sup>[1-8]</sup>。但对于大功率液力机械变速器,由于机械换挡采用手动模式,而变矩器自身的控制功能又相对简单,无法限制驾驶员的操作,因此缺乏对液力机械变速器的故障诊断和预警功能,只有在液力机械变速器的功能完全丧失后,才能察觉到问题的发生,而此时带来的严重影响,以及人员和费用的损失常常是难以估计的。

以往对自动变速器的状态监测和故障诊断主要有两种方法,第一是采用铁谱分析法<sup>[9-12]</sup>,即通过定期采集变速箱的油液并进行分析,判断齿轮、轴承和离合器等零部件的磨损程度,从而指定维修或保养决策,但这种方法具有明显的滞后性,对于突发的故障无法及时发现,而且很难进行隔离定位;第二种是采用振动分析法<sup>[13-20]</sup>,即通过对变速箱振动量的变化对比分析,判断齿轮和轴承的工作状态,但这种方法一方面由于需求外部的诊断设备,因此具有滞后性,另一方面需要积累形成关键零部件状态异常时的振动故障库,然后才能够通过对比实现问题的判断和定位。

由于某多轴超重型底盘具有高任务可靠性的使用要求,因此研究开发了大功率液力机械变速器健康监测和故障诊断系统,其主要包含变矩与闭锁功能监测及报警模块、换挡提示及报警模块、油位监测及报警模块、系统油压监测及报警模块和油温监测及报警模块五大部分,能够满足大功率液力机械变速器实时状态监测和故障诊断的作用。

## 1 系统的组成与功能分析

液力机械变速器的健康监测与故障诊断系统,各模块涉及到的传感器类型和位置要求,如图 1 所示。

大功率液力机械变速器包括液力变矩器、液力缓速器、主离合器和手动机械变速器四大部分。其中,液力变矩器具有变矩和闭锁两大功能,在车辆起步工况,变矩器用于增大发动机扭矩,减小主离合器滑磨,当车辆稳定行驶时,变矩器实现闭锁,从而提高传动效率。液力缓速器用于车辆下长坡时,辅助车辆制动,保证行车安全。作为液力变矩器的核心功能,

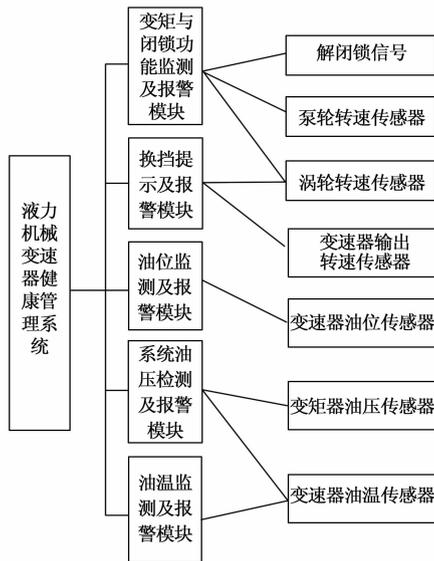


图 1 液力机械变速器健康监测与故障诊断系统原理图

通过“变矩与闭锁功能监测及报警模块”监测变矩与闭锁的功能实现,通过“系统油压监测及报警模块”监测液压控制系统包括变矩控制、闭锁控制以及缓速器控制功能。通过“油温监测及报警模块”对油温的监测和保护控制,避免液力缓速器长期工作超温而导致零部件的损坏。

主离合器和手动机械变速器部分,用于通过驾驶员的手动操作,控制主离合器的分离与结合,配合变速器档位变化实现对输出转速和扭矩的控制。在变速器运转过程中,换挡产生的冲击载荷最大,因此通过“换挡提示及报警模块”提示驾驶员进行正确的换挡,并通过对换挡过程的监测来评估对变速箱各部件冲击载荷的影响,结合各关键部件的失效物理模型,评估其使用状态和剩余寿命。“油位监测及报警模块”用于变速器油位,从而保证齿轮、轴承和同步器等部件的润滑,避免因润滑不足而造成过热失效。

## 2 系统硬件设计

### 2.1 变矩与闭锁功能监测及报警模块

变矩与闭锁功能监测及报警模块通过采集变矩器解锁闭锁信号、变矩器泵轮转速和涡轮转速信息,实现对变矩和闭锁功能的监测功能。

当该模块发出报警时,可依据图 2 进行 FTA 故障排查。

其中,变矩与闭锁控制功能检查需要结合电控系统和“系统油压监测及报警模块”对液压系统的监测结果进行综合分析;而机械部分主离合器和闭锁离合

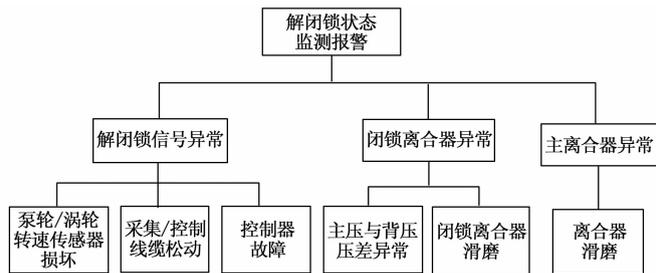


图 2 解闭锁状态监测报警 FTA 故障树

器的滑磨情况,则需要结合“换挡提示及报警模块”对换挡的监测与相应失效物理模型,实现对磨损状态的评估。

### 2.2 换挡提示及报警模块

机械变速器通过驾驶员控制不同档位的变化,来满足车辆行程过程中对转速和扭矩的需求。变速器换挡提示及报警模块,主要用于监测变矩器涡轮转速和变速器输出转速。

该模块具有两大功能,第一项是正常换挡提示功能,当采集到的变矩器涡轮转速达到或超过发动机额定转速时,会提示驾驶员进行升档操作;当采集到的变矩器涡轮转速低于发动机最大扭矩转速时,提示驾驶员进行降档操作。第二项是异常换挡报警功能,由于手动机械变速器对驾驶员换挡没有约束,因此有可能出现驾驶员异常换挡,而导致降档所挂入档位与该档位对应转速不匹配的问题,此时会对变速器同步器产生损伤,而更严重是导致离合器超过极限转速而发生失效。因此,需要对上述驾驶员的操作进行有效识别和提示,以减少人为操作造成的变速器损坏。

### 2.3 油位监测及报警模块

为防止液力机械变速器在运转过程中异常漏油或加油量不足,造成机械变速器的齿轮和轴承损坏,因此在功能上设计油位监测及报警模块。

该模块主要用于两种工况条件下的油位监测和报警,第一是在液力机械变速器加油过程中,在初始加油过程中,变矩器会将润滑油吸入变矩器内,而导致变速器内的油位下降,如果此时变速器未及时补油,则可能损坏变速器的齿轮、轴承和同步器等传动关键部位;第二是底盘行驶过程中,液力机械变速器出现漏油,或变矩器阀板卡滞,也会导致变速箱侧的油位降低,从而引发齿轮和轴承损坏等二次故障。

### 2.4 系统油压监测及报警模块

主油压监测及报警模块。液力机械变速器的液力

与液压工作原理,如图 3 所示。

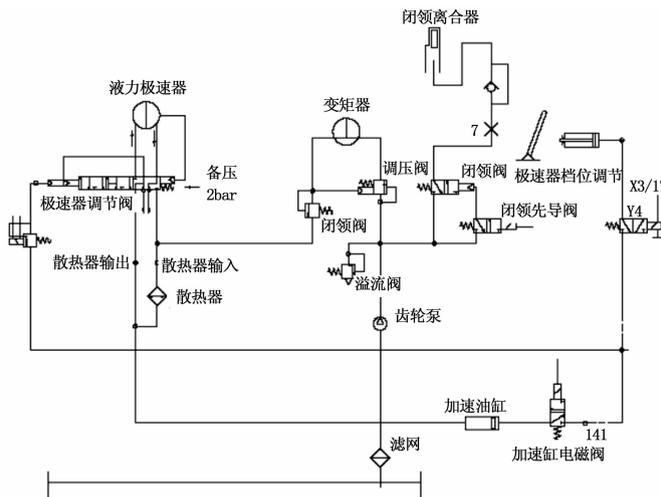


图 3 液力变矩器总成液压控制原理图

主油压是变矩器内的系统压力,当系统压力升高时,会打开溢流阀而保护液压系统,使用过程中依据图 4 进行主油压监测及报警 FTA 故障排查。

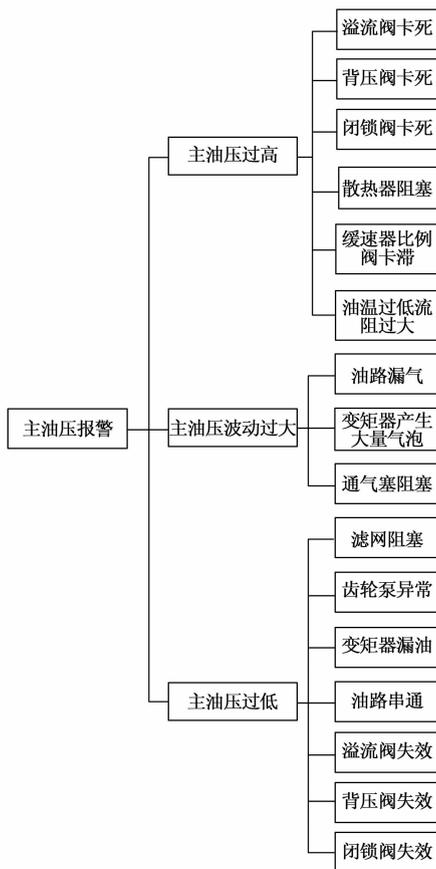


图 4 主油压监测报警 FTA 故障树

其中,对于由于低温润滑油阻过大产生的报警,需要温度信号作为辅助判据,当油温低于 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,不进行报警。

当出现油压过大报警时,应首先检查变矩器外围部件如管路、散热器和缓速器阀,然后再检查或清洗集成的液压控制阀块,包括背压阀、闭锁阀和溢流阀。

当出现油压波动过大时,则需要检查系统管路、接头、通气阀等是否漏气。

当出现油压过小时,首先对吸油滤网进行检查,然后再检查集成液压控制阀块和油路,最后排查齿轮泵。

## 2.5 油温监测及报警模块

为了避免液力机械变速器长期在高温下运行,而损坏轴承和密封元件,因此需要设置油温监测及报警模块。当油温高于 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件,会触发高温报警。如果此时变矩器处于变矩工况,则会通过换挡提升系统,提示驾驶员进行降档操作;而如果处于液力缓速器工作状态,则会提示驾驶员注意油温,当油温高于 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 会对液力缓速器进行自动降档。

## 3 试验结果与分析

大功率液力机械变速箱搭载超重型底盘开展了30 000公里鉴定试验,包括高原、高低温等环境适应性试验。由于配备了状态监测与故障诊断系统,跑车试验过程中未出现致命性故障,故障检测率达到约90%。

### 3.1 变矩与闭锁报警案例(闭锁继电器松动)

某特种车辆在累计行驶1万公里后,闭锁与报警模块出现间隙性报警,根据解闭锁状态监测报警FTA故障树进行排查(见图3),由于油压监测模块和换挡监测模块均未报警,因此初步可以排除液压系统故障和离合器滑磨的可能,而将问题集中在电控系统。

通过检查发现,继电器和配套插座及接触器发生虚接,如图5所示,导致继电器的插头与连接端子间歇连接失效,而导致变矩器闭锁异常。

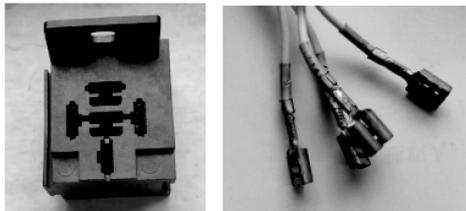


图5 继电器相关零件外形图

更换变矩器继电器及相应线缆后,变矩器恢复正常状态,故障现象消除。

### 3.2 换挡提示报警案例(同步器磨损)

在冬季低温跑车试验过程中,连续出现换挡提示系统报警。与驾驶员确认,由于冰雪路面,采用主制动容易出现车辆侧滑风险,因此驾驶员通过强制降档的方式,通过返拖发动机排气制动来降低车速。

越级换挡会造成同步器、离合器和发动机的超速和超温问题,从而加速传动部件的磨损,结合典型部件的故障机理模型分析,当单个档位越级或超速降档达到一定限值时,同步器的失效风险最高,其次是主离合器。

在冬季跑车试验后,经统计越级换挡和超速换挡次数达到约500次,接近失效物理模型的理论失效边界,因此在低温跑车试验后,对变速箱进行拆解检查,发现同步器有高温发蓝现象,说明由于速差过大导致过热,同时,同步器齿也出现了打齿而产生的异常磨损,存在较大的失效风险,如图6所示。



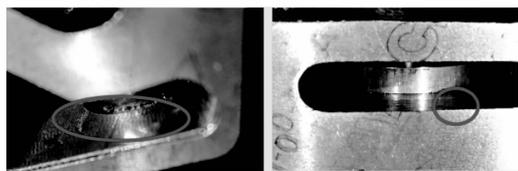
图6 故障锥体和同步环实物

通过试验证明,“换挡提示和报警模块”可以在同步器失效之前及时地提示驾驶员进行检查和维修,从而降低多轴超重型底盘使用风险。

### 3.3 油压与油位的报警(控制阀板阻塞)

某特种车辆在长途机动行驶过程中,出现变矩器主油压偏低和油位偏低两项报警的情况。由主油压系统报警故障树的分析可知,主油压偏低包括,油路滤网阻塞、齿轮泵异常、变矩器漏油、油路串通、溢流阀失效、背压阀失效和闭锁阀失效等多种可能,其中油路滤网阻塞、齿轮泵异常是由于变矩器供油系统异常导致的,但不会影响变速箱侧的油位变化,而通过检查也可以排除变矩器漏油的问题,因此问题集中定位于控制阀总成(包括溢流阀、背压阀、闭锁阀和油路)。

对控制阀总成进行检查,发现变矩器内控制阀总成溢流阀、调压阀阀口处存在多余物,见图7所示。



(a)溢流阀位置

(b)调压阀位置

图7 阀件存在多余物

控制阀拆解后,检查各零件,控制阀阀体内孔有轻微摩擦划痕,阀芯表面有摩擦印痕,零件的磨损程度未见异常。在控制阀阀体阀孔与油道相交处,发现有毛刺存在。在变矩器调压阀阀芯上,除了有摩擦印痕外,还有划伤现象。

结合液压原理可知,如图3所示。当变矩器中多余物进入调压阀配合间隙内,造成阀芯阻力增加或者阀芯卡滞,在低转速时,溢流阀没有开启,油液通过变矩器调压阀、背压阀进入散热器并返回油箱。在高转速时,循环油泵流量增加,系统压力升高,溢流阀异常开启,由于变矩器调压阀阻力增加,阀口开启达不到设定值,大量的油液从溢流阀溢流回变矩器内的油箱,而进入变矩器调压阀、背压阀及散热器的油液减少,变速器的回油流量降低,因此出现了变速器油位降低甚至报警的问题。

更换新的控制阀板后,液力机械变速器恢复正常,报警故障消除。

### 3.4 油温报警(驾驶员停车未摘空挡)

某特种车辆在停车检查过程中,出现液力机械变速器超温报警。对换挡提示系统进行检查发现,问题发生时,驾驶员未将变矩器摘空挡,导致变矩器的输出轴不转动,变矩器处于零速工况。因此,变矩器温升较快,停车检查约五分钟,液力机械变速器的油温从 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上升到 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

由于油温报警较为及时,且时间不长,驾驶员就离开进行了纠正,因此未对系统尤其是密封元件产生过大损伤,可以正常使用。

## 4 结束语

采用状态监测与故障诊断系统的大功率液力机械变速器,通过了各项台架性能与可靠性试验验证,并随某多轴超重型底盘开展了初步的性能测试,该系统能够较为全面与及时的液力机械变速器内部以及外部的各种故障进行有效监测和预警,对提高产品可靠

性,预防突发故障的产生具有重要作用。

### 参考文献:

- [1] 李玉维. 汽车自动变速器故障诊断与维修浅析 [J]. 汽车与驾驶维修, 2018 (2): 102-103.
- [2] 张红英. 汽车自动变速器故障诊断方法的研究 [J]. 机械工程与自动化, 2012 (4): 186-187.
- [3] 马才伏, 阳小良, 马云贵, 等. 汽车自动变速器典型故障的诊断与排除 [J]. 农业装备与车辆工程, 2008 (10): 50.
- [4] 唐天广, 高松. 汽车自动变速器机械与液压系统故障诊断与排除方法 [J]. 农业装备与车辆工程, 2009 (7): 41-44.
- [5] 姚秀琴, 彭威, 尚文利. 变速器故障诊断数据采集关键技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (7): 1515-1517.
- [6] 吴际璋, 李孟顺, 冯传荣. 雅阁轿车自动变速器的特点与故障诊断(待续) [J]. 汽车维护与修理, 2001 (9): 24-28.
- [7] 吴际璋, 李孟顺, 冯传荣. 雅阁轿车自动变速器的特点与故障诊断(续完) [J]. 汽车维护与修理, 2002 (1): 26-28.
- [8] 远山. 技术领导动力8挡自动变速器解析 [J]. 汽车与驾驶维修(汽车版), 2010 (2): 119.
- [9] 左云波, 谷玉海, 王立勇. 电磁式油液金属磨粒检测系统研究 [J]. 设备管理与维修, 2018 (13): 21-23.
- [10] 张珊珊, 李方义, 贾秀杰, 等. 基于油液磨粒分析的变速器磨损损伤评估 [J]. 润滑与密封, 2017 (8): 92-96.
- [11] 郭蕊蕊. 汽车变速器油封密封试验台的开发及应用 [J]. 拖拉机与农用运输车, 2020 (1): 48-50.
- [12] 周晓锋, 史海波, 尚文利. 变速器故障诊断中的同步数据采集技术研究 [J]. 计算机工程与应用, 2010 (9): 16-18.
- [13] 徐跃进. 齿轮箱中齿轮故障的振动分析与诊断 [J]. 机械设计, 2009 (12): 120.
- [14] 颜天晓, 张瑞亮, 王铁, 等. 基于EEMD和Hilbert包络分析的轴承复合故障诊断研究 [J]. 机械传动, 2016 (6): 132-135.
- [15] 徐亚军, 于德介, 刘坚. 基于线调频小波路径追踪阶比循环平稳解调的滚动轴承故障诊断 [J]. 航空动力学报, 2013 (11): 2600-2608.

(下转第25页)