

某型号液力变速器无动力输出故障技术分析-液压控制系统单元失压

宦燕飞

贵州航天凯星智能传动有限公司 贵州 遵义 563011

【摘要】：液力变速器无动力输出是工程机械与重型车辆领域常见的失效模式，表现为发动机运转正常但动力无法传递至输出轴。本文从某型号液力变速器液力传动原理出发，分析了无动力输出的故障机理，基于故障树分析方法建立以无动力输出为顶事件的逻辑模型，梳理了各底事件间的因果关联，建立故障树逐步分析无动力输出原因。

【关键词】：液力变速器；无动力输出；传动；故障树

DOI:10.12417/3083-5526.25.08.007

1 引言

某液力变速器配套的多功能高速工程车，具有装载、推土、挖掘、牵引和排障等功能。该车辆设有液压动力输出接口，通过快换机构实现作业装置的快速更换，可灵活搭载多种液压机具以满足复杂工况需求。在高速行驶工况下，其最高车速可达120 km/h，能够适应高原、山地等复杂环境，具备较强的机动性与多任务作业能力^[1]。然而，液力变速器作为该类装备的核心传动部件，其结构精密、控制回路复杂，一旦发生故障，尤其是“无动力输出”故障——即发动机正常运转、挡位已挂入但输出轴无转矩输出，往往直接导致整车动力链中断，使装备完全丧失作业能力^[2]。因此，针对该类典型故障开展系统性的机理分析与原因定位具有重要的工程意义。

故障树分析是一种经典的系统故障分析方法，是以系统故障为顶事件，通过逻辑关系将其逐层分解为若干基本事件，实现对故障原因自上而下进行分析。该方法通过构建层次化的故障树模型，能够直观揭示各故障因素之间的逻辑关系及其对系统失效的影响路径，从而实现对复杂系统故障机理的结构化描述^[3]。同时，故障树分析在识别关键薄弱环节和开展定性故障诊断方面具有显著优势，已广泛应用于机械系统可靠性分析与工程故障诊断领域^[3-4]。

基于此，本文拟从某型号液力变速器液力传动原理出发，结合典型故障现象，采用故障树分析方法建立以“无动力输出”为顶事件的逻辑模型，分析定位出一种导致液力变速器前进挡无动力的原因，为后续故障诊断与工程优化提供理论依据。

2 故障描述及分析

2.1 故障描述

装配某型号液力变速器的整车在进行装载作业时，出现前进挡无动力现象。现场对故障现象进行排查，经检查，智能控制系统及线束、控制阀总成等外围部件工作正常，故初步确定为产品内部问题。

2.2 系统结构与故障机理

2.2.1 变速器动力传递路径

某型号液力变速器采用液力变矩器、变速器、控制系统相结合的总体结构。液压回路由外啮合齿轮泵供油，驱动液压控制系统，经电控阀调节各液压缸结合次序，控制各离合器工作状态，从而实现换挡。

离合器活塞工作时，压力油推动活塞克服回位弹簧的弹力，使活塞压紧摩擦片，改变力矩的传递路径，从而实现不同挡位的扭矩传递，见图1。

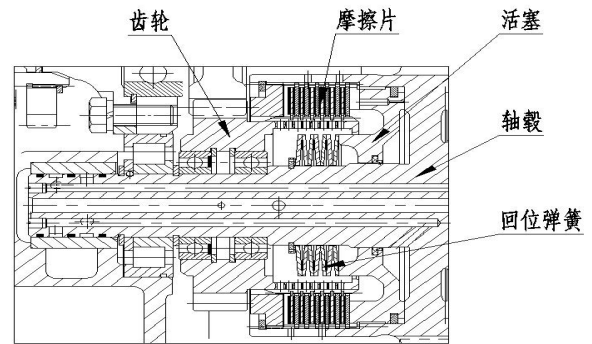


图1 离合器工作原理

2.2.2 无动力输出故障机理分类

(1) 传动介质失效：变矩器内液压油不足^[2]或严重变质，液体循环能力下降，导致液流动能不足以驱动涡轮。此时泵轮空转而无负载反馈，造成无动力输出。

(2) 液压控制系统单元失压：液压泵磨损、滤网堵塞、调压阀卡滞等原因造成系统压力低于离合器接合所需阈值，油压降低，离合器摩擦片无法压紧^[5]，动力中断，造成无动力输出。

(3) 机械单元零件故障：密封圈损坏、离合器毂尺寸超差、油管破裂等机械零件异常^[6]，造成内部泄压，导致无法正常传递动力，动力传递中断。

(4) 变速器装配过程错误（误操作）：多片离合器因装

配错误,使得离合器同时处于接合状态,多个离合器同时工作,动力在变速器内部被抵消,无动力输出。

变速器装配过程错误(误操作)属人为因素,其引发机理复杂、诊断困难,在维修实践中占有特殊地位,故本文不对其进行分析。

2.3 故障树分析

对某型号故障机(无动力输出)进行台架试验。试验结果如下:

输入转速 2000r/min 时:油缸油压为 1.45-1.51MPa(液力变速器性能指标要求为 1.9-2.1MPa),流量为 2.3-2.5m³/h(要求流量 ≥ 3.5m³/h)。

台架试验结束后,对故障机进行拆解检查,发现油液含大量金属碎屑。考虑到液压系统故障具有一定传导性:由泵轮损伤产生的碎屑可随油液循环,在系统中进一步引发堵塞滤网、卡滞阀芯、磨损密封面等问题,形成“碎屑产生→油路堵塞→压力下降→离合器打滑→二次磨损加剧”的恶性循环。因此,仅依据金属碎屑的存在无法判断其来源。进一步对金属碎屑进行成分分析,结果表明其主要成分与铜基摩擦片基层材料基本一致,据此判断金属碎屑主要来源于铜基摩擦片铜基层损坏。

以“液力变速器无动力输出”为顶事件,第一级中间事件按动力传递环节划分为:变矩器无动力输出、变速箱空转无输出、输出轴卡滞。针对某一型号液力变速器故障,由上述分析可知,造成某型号变速器无动力输出的原因为油缸油压不足,离合器无法正常工作。“变速箱空转无输出”为真事件发生,其余第一级中间事件未发生,故以“变速箱空转无输出”的底事件进行分析。

针对某一型号液力变速器,“变速箱空转无输出”的底事件级包括:(1)机械单元零件故障-摩擦片损坏;(2)传动介质失效-传动油变质、缺少;(3)液力控制系统单元失压-密封结构失、油管泄漏、阀体总成异常、油孔堵塞。

2.4 故障定位

2.4.1 机械单元零件故障-摩擦片损坏

某型号液力变速器采用的是铜基摩擦片,摩擦片耐高温、性能稳定,导热快,能迅速散失摩擦热,防止高温失效;摩擦系数受速度和温度影响小,制动平稳^[7]。完全满足液力变速器使用要求,对故障机摩擦片进行检测,未见异常,所以摩擦片损坏可以排除。

2.4.2 传动介质失效-传动油变质、缺少

变矩器内液压油缺少或者严重变质时,会导致液流动能降低,油液流动时不能驱动涡轮。发生故障时,对油位进行了检查,未见异常。故传动油变质、缺少可以排除

2.4.3 液压控制系统单元失压-密封结构失效、油管泄漏、阀体总成异常、油孔堵塞

液压控制系统压力低于离合器工作要求值,离合器工作时摩擦片无法压紧,造成离合器工作异常。对变速器各密封圈结构、油管、油孔进行检查,均未发现明显异常。进一步拆解阀体发现,换挡压力调节阀阀芯的固定螺钉发生松动并退出,高出阀芯端面约 4mm,导致阀芯工作位置向泄油侧偏移,使前进挡油路与泄油孔意外接通。该油路异常导致系统压力无法维持在正常范围,影响换挡离合器的有效结合,最终表现为前进挡无动力输出故障。

由此可知,某型号液力变速器无动力输出的直接原因为液压控制系统单元失压,根本原因在于阀体内部固定螺钉松动,导致阀芯位置偏移并引发内部泄漏。

2.5 分析计算

2.5.1 基本公式

$$M_m = uPr_h \frac{(1+A) \left[1 - (AB)^{\frac{Z}{2}} \right]}{\left(1 + uu_1 \frac{r_h}{R_j} \right) (1-AB)}$$

式中: M_m 为摩擦矩; u 为静摩擦系数; u_1 为动摩擦系数; P 为摩擦片压紧力; r_h 为换算半径; r_j 为花键内平均半径; R_j 为花键外平均半径; Z 为摩擦面对数。

2.5.2 离合器弹簧产生的力

离合器所受到的摩擦片压紧力等于活塞力与单组弹簧产生力之差,离合器产生的弹簧力如表 1,蝶形弹簧(前进挡、倒挡)对合组合时,单组弹簧弹力与单个弹簧弹力相等。

波形、螺旋弹簧工作载荷满足下列公式:

$$k = \frac{F}{f}$$

式中: k 为弹簧刚度; F 为弹簧工作载荷,单位 N; f 为工作载荷下的变形量,单位 mm。蝶形弹簧工作载荷满足下列公式:

$$K_1 = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{\left(\frac{C-1}{1} \right)^2}{\frac{C+1}{C-1} - \frac{2}{\ln 2}}$$

$$F = \frac{4E}{1-u^2} \cdot \frac{t^4}{K_1 \cdot D^2} \cdot K_4^2 \cdot \frac{f}{t} \cdot \left[K_4^2 \cdot \left(\frac{h_0}{t} - \frac{f}{t} \right) \left(\frac{h_0}{t} - \frac{f}{2t} \right) + 1 \right]$$

式中: f 为单个弹簧变形量,单位 mm; C 为直径比 D/d ; t 为厚度; h_0 为碟簧压平时的变形量,单位 mm; D 为外径,单位 mm; d 为内径,单位 mm; E 为弹性模量, $E=206000\text{MPa}$;

u 为泊松比, u=0.3; k 为弹簧刚度; F 为弹簧工作载荷, 单位 N; 无支承面碟簧: K₄=1;

表 2 离合器弹簧产生的力

名称	工作载荷下变形量 (mm)	单个弹簧弹力	单组弹簧个数	单组弹簧弹力 (N)	备注
前进挡离合器	1.34	1633.29	7	1633.29	蝶形弹簧

故障机前进挡油缸缸压实测为 1.5Ma, 前进挡离合器各参数及摩擦力矩见表 3:

表 3 前进及倒挡离合器参数表

摩擦面外半径 (m)	0.0745
摩擦面内半径 (m)	0.0572
静摩擦系数 (钢与铜基材料): μ	0.10
动摩擦系数 (钢与铜基材料): μ ₁	0.06
换算半径: r _n (m)	0.06585
内花键平均半径 r _j (m)	0.0572
外花键平均半径 R _j (m)	0.0745
$a = \mu \mu_1 r_n / r_j$	0.0069073427
$b = \mu \mu_1 r_n / R_j$	0.0053033557
$A = (1-a) / (1+a)$	0.98262800828
$B = (1-b) / (1+b)$	0.989449243
AB	0.9758740814
1+A	1.98262800828
$1 + \mu \mu_1 r_n / R_j$	1.0053033557
1-AB	0.0241259186
$\mu r_n (1+A) / ((1 + \mu \mu_1 r_n / R_j) (1-AB))$	0.539281195
摩擦面对数 Z	12
油缸内直径 D ₁ (m)	0.053
油缸外直径 D ₂ (m)	0.1492
单位面积上的压力 p (Pa)	1500000
活塞油压接触面积 S = (D ₂ ² - D ₁ ²) * π / 4 (m ²)	0.015277282

参考文献:

[1] 高速轮式多功能工程车关键技术研究及应用[R]. 贵州省科学技术进步奖, 2023.
 [2] 李明刚, 李宁. 液力变矩器常见故障及其原因分析[J]. 农机使用与维修, 2015, (02): 41.
 [3] 覃桂吉. 故障树分析法在工程机械发动机故障诊断中的应用[J]. 内燃机与配件, 2024, (17): 69-71.
 [4] 李涛, 高朋, 季建华, 等. 故障树分析法在某工程机械车辆卷扬系统故障中的应用[J]. 液压气动与密封, 2025, 45(11): 122-128.
 [5] 牛华. 基于故障树的自动变速器无动力输出故障分析[J]. 南方农机, 2021, 52(02): 122-123.
 [6] 张雅琨, 梁宗峰, 常健, 等. 液力变矩器故障导致整车动力中断的分析[J]. 汽车零部件, 2021, (10): 78-81.
 [7] 杨水余, 周焕辉, 李炎森, 等. 铜基粉末冶金摩擦片的研究现状与展望[J]. 粉末冶金工业, 2024, 34(01): 148-153.

活塞力 P' = S * p (N)	22915.9235
一组弹簧所产生的力 F (N)	1633
活塞压紧力 P = P' - F (N)	21282.9235
前进挡摩擦力矩 M _n (N·m)	988.8846494

当前进挡缓冲阀芯总成螺钉退出 4mm 时, 缓冲阀芯在阀孔中的位置改变, 泄油口与前进挡油路接通, 如图 4, 造成前进挡供油泄漏, 导致前进挡油压降低, 经台架测试, 前进挡油压为 1.4-1.5MPa, 低于设计值 1.9MPa; 经计算, 当油压为 1.5MPa 时, 前进挡离合器所能承受的扭矩为 988N·m, ; 而变速器前进一档在变矩工况时, 前进挡离合器传递的最大扭矩为 1083N·m; 推装作业时, 会出现最大传递扭矩, 超过了前进挡离合器发生故障时所能传递的扭矩, 致使前进挡摩擦片工作时打滑, 造成前进挡摩擦片磨损, 产生多余物进入前进挡活塞泄油孔造成堵塞, 在前进挡切换为倒退挡时, 由于前进挡油缸泄油不及时, 致使前进挡摩擦片不能完全脱开, 进一步加剧了摩擦片的磨损, 当前进挡摩擦片磨损后, 摩擦片打滑更加严重, 无法正常传递扭矩, 导致整车前进挡无动力输出。

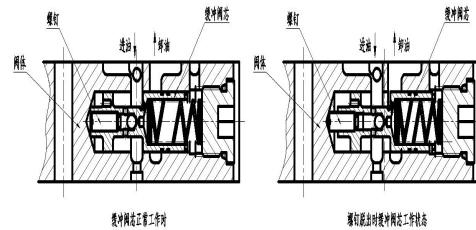


图 4

3 结论

通过分析, 由于前进挡缓冲阀芯总成螺钉退出 4mm, 使缓冲阀芯在阀孔中的位置改变, 泄油口与前进挡油路接通, 前进挡供油泄漏, 导致前进挡油压降低, 前进挡摩擦片工作时打滑, 造成前进挡摩擦片磨损, 产生多余物进入前进挡活塞泄油孔造成堵塞, 在前进挡切换为倒退挡时, 由于前进挡油缸泄油不及时, 致使前进挡摩擦片不能及时脱开, 进一步加剧了摩擦片的磨损, 前进挡工作时, 摩擦片打滑严重, 无法正常传递扭矩, 最终导致液力变速器无动力输出。