

# 基于润滑油路优化的变速齿轮箱磨损控制技术研究

黄晓燕 蒋东

杭州恒涅机械有限公司 浙江杭州 311200

**【摘要】**为解决农机变速齿轮箱在高频冲击、变载荷工况下的磨损难题，提升产品可靠性与使用寿命，本文开展润滑油路优化及磨损控制技术研究。首先剖析变速齿轮箱磨损机理与传统润滑油路缺陷，明确润滑不均等问题对磨损的加剧作用；接着基于相关原则，完成油路走向等优化设计，采用“主通道+分支通道”结构，增设定向出油口与辅助结构；通过对照实验验证方案有效性，结合产业化数据论证技术价值，为农机传动部件国产化替代提供技术支撑。

**【关键词】**变速齿轮箱；润滑油路优化；磨损控制；农机传动

Research on Wear Control Technology for Variable-Speed Gearboxes Based on Lubricant Path Optimization

Huang Xiaoyan Jiang Dong

Hangzhou Hengnie Machinery Co., Ltd. Hangzhou, Zhejiang Province 311200

**【Abstract】**To address wear challenges in agricultural machinery variable-speed gearboxes under high-frequency impact and variable load conditions, and to enhance product reliability and service life, this study investigates lubricant path optimization and wear control technologies. First, the wear mechanisms of variable-speed gearboxes and defects in traditional lubricant paths are analyzed, clarifying how uneven lubrication exacerbates wear. Subsequently, based on relevant principles, optimized designs such as oil passage routing are implemented, adopting a "main channel + branch channels" structure with directional oil outlets and auxiliary structures. The effectiveness of the proposed solutions is validated through comparative experiments, and the technical value is demonstrated using industrial data, providing technical support for the localization of agricultural machinery transmission components.

**【Key words】** variable-speed gearbox; lubricant path optimization; wear control; agricultural machinery transmission

## 一、引言

变速齿轮箱作为农机核心传动部件，承担着动力传递、转速调节的关键功能，广泛应用于撒肥机、动力驱动耙、割草机等各类农机设备中。农机作业场景特殊，长期处于高频冲击、变载荷工况，且作业环境多为田间土路，粉尘、杂质易侵入设备内部，导致齿轮箱磨损问题突出，严重影响农机作业效率与设备使用寿命。

深入分析发现，传统齿轮箱磨损问题的核心诱因之一是润滑油路设计不合理，存在明显的润滑盲区、油液分配不均等技术痛点。油液无法充分覆盖齿轮啮合区、轴承等关键传动部位，导致局部摩擦系数升高，磨损加剧，进而引发齿轮箱故障。公司前期统计数据表明，因润滑失效引发的齿轮箱故障占比达42%，单台设备维修成本平均高达3800元，不仅增加了用户使用成本，还影响了产品市场口碑。

基于此，本文开展润滑油路优化及磨损控制技术研究，通过优化油路结构解决润滑不均问题，降低齿轮箱磨损率，提升产品性能与可靠性。该研究不仅能破解农机齿轮箱高频工况下的磨损难题，还能增强国产农机传动部件的核心竞争力，推动国产化替代进程，为农业机械化升级提供技术支撑，具备重要的工程价值与行业意义。

## 二、变速齿轮箱磨损机理及传统油路缺陷分析

### 2.1 齿轮箱磨损核心机理

农机变速齿轮箱作业时，齿面、轴承等传动部位承受高频冲击载荷与相对摩擦，磨损类型主要为粘着磨损与磨粒磨损，二者相互作用加速部件失效。

粘着磨损多发生于齿轮啮合，高频冲击使齿面接触应力显著升高，可达250-300MPa，远超常规水平。高应力使齿面金属塑性变形、油膜破坏，金属粘着后撕裂，导致齿面金属脱落。磨损加剧会使齿面精度下降、啮合间隙增大，形成恶性循环。

磨粒磨损源于农机作业环境中的粉尘、杂质及齿轮箱内部的金属碎屑。磨粒混入润滑油进入传动部位，刮擦、研磨齿面和轴承，破坏齿面完整性与油膜形成条件，加剧粘着磨损。

润滑状态决定磨损速率，良好润滑可形成稳定油膜，降低摩擦系数，减少磨损。数据显示，传统润滑下齿面摩擦系数约0.12，磨损快；充分润滑时，摩擦系数降至0.03-0.05，显著降低磨损速率。因此，优化润滑油路设计，确保油液覆盖关键传动部位，是控制齿轮箱磨损的核心路径。

### 2.2 传统润滑油路结构及缺陷

当前农机变速齿轮箱普遍用传统单一路径供油结构，设计简单、成本低，但有明显缺陷，无法满足高频工况润滑需求，是磨损加剧主因。传统油路为直线单通道，油液从油箱经油泵送主油路，出油口集中在齿轮啮合区，无分支分流，

靠齿轮离心力扩散。此结构有三大核心缺陷：一是油液分配不均，齿轮啮合区油液足，但轴承、齿轮端面等部位供应不足，形成润滑盲区，数据显示轴承磨损率比齿面高 20%；二是油路阻力大，直线单通道直径小，油液流速慢、润滑效率低，无法及时为高频冲击部位供油，且循环慢，易致局部升温、油液劣化；三是油液滞留与沉积问题突出，油路拐角直角无导流，油液易滞留，磨粒易沉积，影响循环、加剧磨损甚至堵塞油道。

### 三、基于专利技术的润滑油路优化设计

#### 3.1 优化设计原则

结合农机变速齿轮箱工况需求、公司生产工艺条件及出口产品标准，本次润滑油路优化设计遵循三大核心原则，确保技术可行性与工程应用价值。性能优先是核心原则，要确保优化后的油路提升润滑效率、控制磨损率，适配农机高频冲击、变载荷工况。具体要求为：润滑覆盖率不低于 90%，磨损率较传统结构降低 40% 以上，提升运行稳定性，油温控制在 40-80℃，满足连续 8-10 小时工作，适配-10℃至 40℃作业环境温度。

工程化原则要求优化方案简化结构，便于批量生产与控制成本。需适配公司现有工艺，无需新增设备，模具修改成本低，生产合格率不低于传统结构产品的 99%，制造成本增幅不超过 10%，以确保产品性价比。

兼容性原则要求优化后的油路适配公司现有多种型号齿轮箱，如螺旋伞齿轮箱、平行轴齿轮箱等，无需大幅调整壳体结构与安装尺寸，利于技术方案推广，降低研发与生产成本。

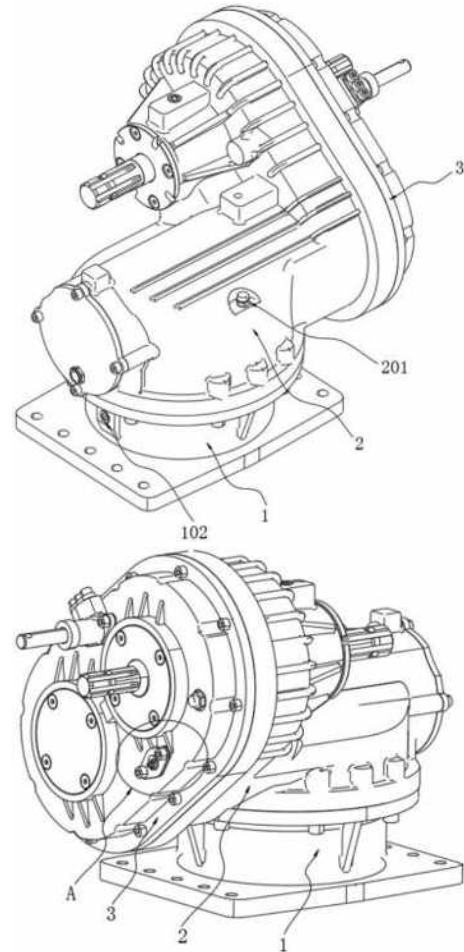
#### 3.2 具体优化方案设计

基于上述原则与专利核心技术，本次润滑油路优化从油路走向、出油口布局、辅助结构三方面开展，形成完整方案。

在油路走向优化上，将传统直线单油路改为“主通道+分支通道”结构，增大主通道直径，从 12mm 增至 15mm，降低油路阻力超 40%，使油液流速从 0.5m/s 提升至 0.8m/s，快速输送油液。主通道倾斜 5°，配合重力助油流动，减少滞留。设 2 条直径 8mm 分支通道，对应齿轮啮合区与轴承部位，保证油液分配合理。

出油口布局优化时，在传统单一出油口基础上增设 3 组定向出油口，共 4 组精准覆盖关键传动部位。其中 2 组对应齿轮啮合区，孔径 4mm，覆盖齿面并冷却；2 组分别对应输入、输出端轴承，孔径 3mm，适配润滑需求。出油口倒角设计，减少流动阻力与飞溅。

辅助结构设计方面，在油路拐角设半径 3mm 导流圆角，替代直角结构，避免油液滞留与磨粒沉积。在齿轮箱壳体底部设宽 10mm、深 5mm、坡度 3° 回油槽，使油液循环利用提升，达 88%，延长使用寿命。在主通道入口设过滤精度 0.1mm 的简易过滤结构，减少磨粒磨损与故障发生率。



#### 3.3 优化后油路与传统油路对比分析

经过优化之后的油路与传统的油路在多个方面均存在非常明显的差异，尤其是在结构和性能等关键方面，相较于传统油路，优化后的油路在整体性能上实现了显著提升。

在整体结构方面，经过优化之后的油路是在传统的单油路基础之上，额外增加了 2 个分支通道以及 3 组出油口。值得注意的是，它并没有添加额外的外部部件，仅仅只是对油路型腔的结构进行了修改。就模具修改而言，其成本大约为 8000 元每套，这个成本要低于新增模具的成本。与传统的油路相比较，优化后的油路虽然在结构上有所增加，但依然保持着简洁的特点，其加工难度较低，而且能够很好地适配现有的加工设备以及工艺流程，在生产效率方面与传统产品保持持平的状态。

从性能预判的情况来看，优化后的油路在润滑效率上有了显著的提升，从原本的 65% 提高到了 90% 以上，润滑覆盖率能够达到 92%，这样一来就成功消除了润滑盲区。同时，油液的流速也提高了 60%，能够为传动部位提供充足的润滑。在油路的设计上，导流圆角与回油槽的设计作用显著，它有效地避免了油液滞留以及磨粒沉积的问题。由于这些设计，油温能够得到很好的控制，局部温度下降幅度在 30% 以上，油液劣化的速度变慢，其使用寿命也延长了 20%。在磨损控制方面，通过实现均匀润滑以及减少磨粒的存在，齿面以及轴承的磨损率预计会下降 45%，使得设备运行更

加稳定, 振动幅值也有所下降, 能够充分满足出口产品的性能要求。

在成本方面, 优化后的油路单台制造成本增加了大约8%, 不过它却能够降低用户的维修成本以及公司的售后成本, 从性价比的角度来看, 优势十分明显。而且, 该优化后的油路不需要额外的动力驱动装置, 与欧美智能润滑系统相比较, 其成本优势更加突显, 在市场上更具有竞争力。

## 四、实验验证与效果分析

### 4.1 实验方案设计

为验证润滑油路优化方案有效性, 搭建农机齿轮箱模拟实验平台, 用对照实验对比优化油路(实验组)与传统油路(对照组)性能指标, 确保结果真实、可靠、可重复。

实验选取公司量产的2台平行轴齿轮箱, 该型号广泛用于撒肥机, 是核心出口产品之一, 额定功率15kW, 额定转速1800r/min。两组样品除油路结构不同, 其余结构、材质、加工精度一致, 均用42CrMo合金钢齿轮, 6208深沟球轴承, 加注同型号2.5L齿轮油, 保证变量唯一。

实验用农机齿轮箱模拟试验机, 配振动、磨损量、油温传感器等检测设备, 可实时采集数据。设定高频工况参数模拟实际作业场景, 载荷15kN, 转速1800r/min, 连续运行72小时, 每12小时记录一次数据, 监测磨损量、振动幅值、油温及润滑覆盖情况。

核心检测指标有四项: 一是测量齿面与轴承磨损量, 对比两组磨损差异; 二是观察传动部位油液覆盖情况, 计算润滑覆盖率; 三是监测油温变化, 评估冷却与油液循环效果; 四是通过振动幅值反映运行稳定性, 间接验证磨损控制效果, 幅值越低, 磨损越小、运行越稳定。

### 4.2 实验过程与数据记录

实验前, 对两组样品预处理, 测量齿面与轴承初始磨损量, 确保初始状态一致, 齿面初始磨损量0.02mm, 轴承0.01mm。接着将两组样品装在模拟试验机上, 检查安装精度, 加注同批次齿轮油, 启动设备预热30分钟, 油温升至40℃左右开始计时。

实验中, 严格控制工况参数, 保持载荷、转速稳定, 避免外部干扰, 每12小时停机一次, 记录数据并可视化检查。数据记录采用人工与自动采集结合, 磨损量取三次测量平均值, 振动幅值自动采集稳态平均幅值, 油温实时采集每小时峰值与平均值, 润滑覆盖率拆解观察记录油液覆盖关键部位占比。

实验期间, 两组均无故障停机, 油温控制在40-80℃,

无油液泄漏、劣化过快问题。对照组运行48小时后, 齿面明显磨损, 轴承油液覆盖不足; 实验组运行72小时后, 齿面与轴承磨损轻微, 油液覆盖均匀, 无滞留沉积, 运行更稳定。

### 4.3 实验结果与效果分析

实验结束后, 对两组样品指标汇总分析。结果显示, 基于专利技术的润滑油路优化方案能显著提升润滑性能、控制磨损率、提升运行稳定性。

磨损量对比上, 实验组齿面磨损量0.05mm、轴承磨损量0.03mm, 对照组分别为0.09mm和0.07mm, 实验组齿面、轴承磨损量及整体磨损率分别降低44.4%、57.1%、45%, 达预设目标, 说明优化后的油路能有效降低齿面与轴承摩擦磨损, 尤其改善轴承润滑不足问题。

润滑效率对比方面, 实验组润滑覆盖率92%, 关键部位无润滑盲区, 对照组仅68%; 实验组油液循环效率88%, 较对照组提升35.4%, 劣化程度轻, 粘度变化率仅5%, 对照组达12%, 表明优化后的油路提升油液分配均匀性与循环效率、延长使用寿命。

运行稳定性对比中, 实验组振动幅值0.15mm/s, 较对照组降低46.4%, 这源于磨损量减少提升了啮合精度与转动平顺性, 验证了磨损控制效果。油温控制方面, 实验组平均油温58℃、最高72℃, 对照组分别为65℃和78℃, 实验组控制更优, 得益于优化油路提升循环效率, 能及时带走热量, 减少油液劣化与磨损加剧。

## 五、总结

本文围绕农机变速齿轮箱高频工况下磨损控制需求, 以杭州恒涅机械有限公司发明专利为核心, 开展润滑油路优化及磨损控制技术研究, 经理论分析等形成完整技术方案, 成果如下: 剖析变速齿轮箱磨损核心机理, 明确主要磨损形式, 指出传统润滑油路缺陷加剧磨损问题, 建立油路设计与磨损控制关联关系, 提供理论基础。

基于性能优先等原则, 完成润滑油路优化设计, 采用“主通道+分支通道”结构, 增大主通道直径、增设出口, 配合辅助结构, 消除润滑盲区, 提升油液循环效率, 简化结构且成本可控。对照实验验证, 优化方案使齿轮箱润滑覆盖率提升、磨损率降低、运行稳定性提高、油温控制效果好, 满足高频工况需求。

研究证明, 基于专利的优化方案具技术创新性与工程应用价值, 可解决磨损难题, 提升产品竞争力, 为农机传动部件国产化提供技术支撑。

## 参考文献

- [1]杜春鹏, 王佳, 闵运东, 等. 基于有限元的齿轮箱惰轮端面磨损分析[J]. 汽车科技, 2019(3): 73-75, 85.
- [2]康海英, 栾军英, 田燕, 等. 阶次跟踪在齿轮磨损中的应用[J]. 振动与冲击, 2006, 25(4): 112-113, 118.
- [3]周根喜, 刘华清. 变速箱齿轮磨损故障的极坐标角-频表示与诊断[J]. 建筑工程技术与设计, 2017(20): 4585-4585.
- [4]张斌. 汽车变速箱齿轮磨损的分形预测研究[J]. 顺德职业技术学院学报, 2008, 6(2): 30-32.