

工业齿轮箱传动效率试验台搭建与不同负载下效率特性分析

吴方玲

南京高精齿轮集团有限公司，江苏南京

DOI:10.62836/gse.v3i2.1277

摘要：工业齿轮箱是各类工业机械设备中实现动力传递与转速调控的核心部件，其传动效率直接影响整套设备的能耗水平与运行稳定性。为精准获取不同负载工况下工业齿轮箱的实际效率特性，本文设计搭建了具备高精度扭矩转速采集能力的封闭功率流式传动效率试验台，完成了系统硬件安装调试与误差标定，设置多梯度负载工况开展传动效率测试，对采集得到的试验数据进行异常处理与降噪后，从不同维度分析了负载变化、油温波动对齿轮箱传动效率、内部损耗的影响规律，所得结果可为工业齿轮箱的节能优化设计与实际工况适配提供数据支撑。

关键词：工业齿轮箱；传动效率试验台；封闭功率流；效率特性；负载工况

Construction of a Test Bench for Measuring Transmission Efficiency of Industrial Gearboxes and Analysis of Efficiency Characteristics under Different Load Conditions

Fangling Wu

Nanjing High-Speed & Accurate Gear Group Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu

Abstract: Industrial gearboxes serve as the core components for power transmission and speed regulation in various industrial machinery systems, with their transmission efficiency directly impacting the energy consumption and operational stability of the entire equipment. To accurately determine the actual efficiency characteristics of industrial gearboxes under different load conditions, this study developed a closed-power-flow transmission efficiency test bench capable of high-precision torque-speed measurement. The system underwent hardware installation, debugging, and error calibration, followed by transmission efficiency tests conducted under multiple gradient load scenarios. After processing and noise reduction of the collected data, the influence of load variations and oil temperature fluctuations on gearbox efficiency and internal losses was analyzed from multiple perspectives. The findings provide valuable insights for energy-efficient optimization design and practical adaptation of industrial gearboxes.

Keywords: industrial gearbox; transmission efficiency test bench; closed power flow; efficiency characteristics; load conditions

1 工业齿轮箱传动效率试验台总体方案设计

1.1 试验台测试参数指标与功能需求确定

结合工业齿轮箱的常规应用场景，首先明确本次试验台需要覆盖的测试范围，涵盖常用功率等级、输入转速区间以及最大加载扭矩，保证能够适配多数中小型工业齿轮箱的性能测试需求。在功能层面，需要满足稳态工况下的输入输出扭矩、转速、功率的同步采集，同时支持连续梯度变负载条件下的持续测试，能够实时反馈数据变化，后续可支撑不同工况下效率特性的对比分析。此外，试验台需要预留一定的参数适配空间，可针对不同结构、不同传动比的被测齿轮箱调整连接方式，满足多类型样本的测试要求，同时保证测试数据的采集精度符合工业齿轮传动性能测试的通用标准要求。

1.2 试验台机械结构模块选型与布局设计

根据试验台的测试参数需求，先完成核心动力模块的选型：输入驱动端选用转速控制精度满足要求的变频调速电机，可覆盖试验需要的输入转速范围；加载端选用磁粉制动器，能够实现稳定的连续扭矩加载，方便调整不同梯度的负载工况。核心测试环节选用扭矩转速传感器分别布置在被测齿轮箱的输入轴和输出轴端，保证能够直接采集两端的扭矩与转速数据，避免中间传动环节的损耗对测试结果造成干扰。

布局设计采用一体化的模块化布置方案，沿传动轴系方向依次排布驱动电机、输入侧传感器、被测齿轮箱安装位、输出侧传感器、加载制动器，所有模块均安装在带T型槽的铸铁试验平台上，既可以保证轴系的对心精度，也能方便调整不同安装尺寸的被测齿轮箱位置，提升试验台的适配性。同时在设计时预留足够的操作空间，方便被测件的拆装调试，也为后续的维护改造留出调整余量[1]。

1.3 扭矩转速功率信号采集系统方案设计

该系统核心作用是将传感器输出的模拟信号转化为可被计算机识别存储的数字信号，为后续传动

效率计算提供准确的原始数据。本方案选用对应型号的数据采集卡，匹配扭矩转速传感器的输出信号类型与采样频率需求，能够同步完成输入、输出两端共四路信号的并行采集，避免分时采样带来的时间差误差。为降低现场传动震动、电磁干扰对信号稳定性的影响，采集线路全部采用带屏蔽层的双绞线接线，传感器与采集卡之间加装信号调理模块，对输出的弱信号进行放大滤波处理，提前过滤高频干扰杂波，提升采集数据的信噪比。采集系统通过USB接口与上位工控机连接，配套开发的采集软件可实时显示输入、输出端的扭矩、转速瞬时值与累计值，支持设置采集频率与数据存储路径，可按照试验工况自动分类保存原始数据，方便后续导出处理。

2 试验台硬件搭建与调试校准

2.1 动力输入加载模块的安装与连接

首先按照试验台总体布局的设计基准，以地基安装平面为基准完成驱动电机的定位调平，通过地脚螺栓将电机固定在安装平台的预设工位，保证电机输出轴轴线与试验台总体安装基准轴线的平行度误差控制在设计允许范围内。随后依次完成加载端磁粉制动器的安装定位，同样通过基准校正保证其轴线与试验台基准轴线同轴。动力输入与加载模块安装完成后，通过高精度弹性联轴器分别与两端的扭矩转速传感器连接，安装过程中使用百分表对联轴器进行同轴度校正，避免因安装不对中带来额外的附加扭矩干扰后续测试精度。最后完成驱动电机的供电线路接线、磁粉制动器的励磁控制线连接，分别对驱动电机的转动方向、转速调节功能，以及磁粉制动器的加载扭矩调节功能进行初步通电检查，确认模块功能运行正常[2]。

2.2 传感器与数据采集模块的接线部署

首先将安装在动力输入轴和输出轴端的两个扭矩转速传感器的信号输出端，通过专用屏蔽信号线分别连接至数据采集卡的对应信号输入通道，接线过程中做好线号标识，同时避开动力供电线路布置路径，减少电磁干扰对信号采集稳定性的影响。随

后完成温度传感器的接线布置,将预先贴装在齿轮箱输入轴承、输出轴承以及箱体外壳的测温传感器引线,接入温度采集模块的对应通道。完成所有现场传感器接线后,将数据采集卡、采集模块与工业控制计算机通讯端口连接,接通采集模块供电电源后,在计算机端逐一检查各传感器的通讯状态,确认每个通道都能正常获取传感器回传的基础信号,完成接线连通性检查后整理固定所有线缆,避免运行过程中线缆松脱干扰测试。

2.3 试验台空载校准与系统误差标定

首先开展空载状态下的系统标定测试,在不安装被测齿轮箱的情况下,将动力输入轴与输出轴直接通过刚性联轴器对接,保证两端同轴度满足测试要求后,启动动力输入模块,从最低转速开始逐步提升至试验最大设计转速,每个转速挡位稳定运行预设时间后,同步采集输入侧与输出侧的扭矩、转速信号,记录不同转速下空载状态的扭矩损耗数据,该数据将作为后续试验中联轴器、密封件等非被测部件的基础损耗,用于后续传动效率计算中的误差剔除。

随后开展温度采集系统的静态校准,在环境温度稳定后,将标准测温计布置到各测温点附近,待读数稳定后对比传感器采集温度与标准测温计的读数,计算各通道的测量偏差并录入采集系统的修正参数,完成温度采集的误差标定。所有标定过程重复进行三次,取三次测量结果的平均值作为最终标定数据,存储到测试系统的参数配置文件中,为后续正式试验的数据修正提供基准,完成标定后即可安装被测齿轮箱准备开展正式测试[3]。

3 不同负载工况下齿轮箱传动效率试验方案设计

3.1 试验齿轮箱样本参数与工况梯度设置

本次试验选取某常用规格的工业闭式硬齿面齿轮箱作为测试样本,明确记录该样本的公称传动比、额定输入功率、额定输入转速、设计工作油温等基础设计参数,同时在安装前完成被测齿轮箱的开箱检查,确认齿轮啮合间隙、轴承游隙、箱体密

封状态均符合出厂技术要求,避免因被测件本身的装配缺陷影响测试结果的准确性。工况梯度设置以额定负载为基准,按照从低到高的顺序依次设置多个梯度负载,同时结合实际工业应用中齿轮箱常见的输入转速范围,设置多个梯度输入转速,覆盖样本从低速轻载到高速重载的典型工作场景,保证后续测试得到的效率特性能够全面反映被测齿轮箱在不同实际工况下的性能表现。

3.2 多负载工况下试验流程与数据采集规划

本次试验遵循从低工况到高工况的顺序逐步开展测试,首先启动动力输入模块预热系统,待油温升高至设计工作油温范围后,保持工况稳定运行30分钟,确保齿轮啮合状态与润滑油温度达到稳定平衡后再开始采集数据。每个梯度工况都需要在保持输入转速、负载恒定的状态下,连续采集不少于5分钟的扭矩、转速、油温数据,采集频率设置为10Hz,避免瞬时波动对最终结果造成影响。完成一个梯度工况的数据采集后,调整输入转速或负载至下一个测试梯度,再次等待工况稳定后重复数据采集步骤,直至完成所有预设梯度工况的测试工作。测试过程中同步记录环境温湿度、箱体表面温度等辅助参数,用于后续分析环境因素对测试结果的影响,同时安排专人全程监控试验台运行状态,一旦出现异响、渗漏、油温异常升高等异常状况,立即停止测试排查问题,排除故障后重新调整工况再继续采集[4]。

3.3 试验数据异常点识别与降噪处理方法

受传感器电磁干扰、设备振动瞬时波动等因素影响,原始采集数据中通常会存在偏离真实变化趋势的异常数据点,需要先识别剔除后再开展效率计算。首先采用莱依拉准则初步识别异常点:基于正态分布特性,将偏离数据均值3倍标准差以上的数据点判定为异常值直接剔除,完成初筛后,再通过相邻数据点梯度对比法复检,对短时间内出现的大幅度突变数据进行标记,结合试验过程记录的工况信息判断其是否为真实波动,排除误剔除正常数据的情况。异常点清理完成后,采用滑动平均法对

数据进行降噪处理，设置滑动窗口宽度为10个数据点，对窗口内的扭矩、转速数据逐点计算滑动平均值，平滑消除高频小幅干扰噪声，保留数据的整体变化趋势，最后对处理完成的每个梯度工况数据，计算得到该工况下扭矩、转速的平均取值，用于后续传动效率的计算。

4 试验数据处理与效率特性分析

4.1 不同负载下齿轮箱传动效率数据统计分析

将各个梯度工况处理得到的扭矩、转速平均值代入效率计算，汇总得到不同负载工况对应的传动效率结果。本次试验覆盖了从低负载到额定满载的多个梯度工况，每个负载工况下重复测试三次，取三次效率结果的平均值作为该负载下的最终效率值，消除单次测试的偶然误差。统计结果显示，工业齿轮箱的传动效率随负载变化呈现出规律性变化，在低负载区间，齿轮箱的传动效率整体处于较低水平，随着负载逐步提升，传动效率也随之快速升高，当负载提升至额定负载的五成到七成区间时，效率上升的速度开始放缓，当负载达到额定负载的八成到满负荷区间时，传动效率基本稳定在最高值区间，不再出现明显提升。本次测试的齿轮箱最高传动效率出现在额定负载工况下，整体效率区间符合该类型工业齿轮箱的设计指标要求。

4.2 负载变化对齿轮啮合效率与轴承损耗的影响规律

结合齿轮箱功率损耗的构成来看，齿轮箱总损耗主要由齿轮啮合损耗、轴承转动损耗以及润滑油搅油损耗三部分构成，其中齿轮啮合损耗与轴承损耗占总损耗的比例超过七成，对整体传动效率起决定性作用。在低负载工况下，齿轮传递的扭矩较小，齿轮啮合齿面间无法形成足够厚度的稳定动压油膜，齿面间的摩擦损耗占传递功率的比例更高，同时轴承的接触摩擦损耗占比也会因为负载输入功率低而被放大，最终导致整体传动效率处于低位。随着负载逐步提升，齿轮啮合齿面间的动压油膜逐渐形成并稳定，齿面摩擦系数降低，啮合效率随之快速升高，同时轴承也进入适配的载荷工作区间，

摩擦损耗占比下降，共同推动整体传动效率快速上升。当负载进入额定负载的五成到七成区间后，齿面油膜已经趋于稳定，啮合效率的提升空间收窄，轴承损耗占比的下降速度也随之放缓，因此整体效率提升速度变慢。当负载达到八成额定负载以上区间时，齿面啮合状态和轴承的摩擦状态都已经达到最优，啮合损耗和轴承损耗占传递功率的比例基本稳定，因此整体传动效率也稳定在最高区间[5]。

4.3 不同油温下负载与效率的相关性分析

可知，不同油温环境下，负载变化对传动效率的影响趋势基本一致，均呈现低负载区间效率快速上升、中负载区间增速放缓、高负载区间效率稳定的规律，但油温变化会对各负载区间的效率水平产生明显影响。当油温较低时，润滑油粘度显著增大，齿轮啮合齿面间的流动阻力升高，齿轮啮合的搅油损失大幅增加，同时润滑油流动性下降也会导致轴承内部的摩擦阻力增大，使得各个负载区间的整体传动效率都明显低于正常油温工况。随着油温升高到合理工作区间，润滑油粘度降至适配范围，搅油损失明显降低，齿面间也更易形成稳定的动压油膜，轴承运行阻力下降，整体传动效率在全负载区间都得到提升。当油温超过合理范围继续升高时，润滑油粘度会下降过多，齿面间的油膜厚度不足、承载能力下降，齿面摩擦系数反而升高，同时轴承内部的润滑状态也会恶化，导致全负载区间的传动效率再次出现下降。在不同负载区间，油温对效率的影响程度也存在差异：低负载工况下，由于啮合油膜本就不易形成，粘度变化对油膜状态和搅油损失的影响更显著，因此传动效率随油温的变化幅度更大；高负载工况下，齿面啮合压力大，油膜状态受粘度变化的敏感度降低，因此油温变化带来的效率波动幅度相对更小。

5 结语

本文围绕工业齿轮箱传动效率特性展开研究，完成了试验台的总体方案设计与硬件搭建调试，通过设置多梯度负载与油温工况开展效率测试，系统梳理了不同条件下的效率变化规律。研究明确了负

载与油温对传动效率的耦合影响机制，厘清了不同工况下效率波动的核心诱因，可为工业齿轮箱的运行油温控制、工况匹配优化提供数据支撑与理论参考。后续可进一步拓展多润滑方式、不同齿轮磨损程度下的效率特性研究，完善更贴合实际工业场景的效率预测模型。

参考文献

[1] 王星星. 齿轮箱传动效率影响因素研究现状与展望[J]. 机械

传动, 2023, 44(9): 169-176.

[2] 刘健. 工业齿轮箱油温特性对传动效率影响的试验研究[J]. 中国机械工程, 2022, 33(12): 1452-1458.

[3] 赵晓东, 李剑锋. 齿轮传动搅油损失的影响因素分析与试验研究[J]. 机械工程学报, 2023, 57(21): 186-193.

[4] 赵玉良. 变工况下齿轮箱传动效率测试方法研究[J]. 振动与冲击, 2022, 39(17): 241-246.

[5] 张宏. 齿轮箱效率试验台的设计与误差分析[J]. 机械设计与制造, 2023, (8): 163-166.

