润滑油对平行轴电驱动桥系统效率影响的试验研究

范春利[1] 景雪岩[1] 高健[2] 李浩亮[1] 姜雷[1] 陈德鑫[1]

（1.一汽解放汽车有限公司，长春 130000；2.陆装沈阳军代局驻长春地区第二军代室，长春 130000）

摘要：为研究润滑油参数对平行轴电驱动桥系统效率的影响规律、优化电驱桥润滑匹配设计，以某商用车平行轴电驱动桥为研究对象，建立功率损失与效率理论模型，围绕油品黏度、运行油温、润滑油加注量开展理论分析与台架试验。结果表明，采用75W-80低黏度润滑油可使系统效率提升约0.84%，油温控制在(90±5) ℃时效率提升约0.99%，加注80%设计油量可提升效率约1.40%。

关键词：电驱动桥 润滑油 系统效率 试验研究

中图分类号：U469.7 **文献标志码：**B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20260062

Experimental Study on the Influence of Lubricating Oil on the Efficiency of Parallel-Axis Electric Drive Axle Systems

Fan Chunli[1], Jing Xueyan[1], Gao Jian[2], Li Haoliang[1], Jiang Lei[1], Chen Dexin[1]

(1. FAW Jiefang Automotive Co., Ltd., Changchun 130000; 2. Second Military Representative Office of Army Euuipment in Changchun, Changchun 130000)

Abstract: To reveal the influence of lubricant parameters on the efficiency of parallel-axis electric drive axle systems and optimize the lubrication matching design, a theoretical model of power loss and efficiency is established using a commercial vehicle parallel-axis electric drive axle as the subject. Theoretical analysis and bench tests are conducted around oil viscosity, operating oil temperature, and lubricant filling volume. The results indicate that using 75W-80 low-viscosity lubricant can improve system efficiency by approximately 0.84%, maintaining oil temperature at (90±5) ℃ enhances efficiency by about 0.99%, and filling 80% of the designed oil volume boosts efficiency by roughly 1.40%.

Key words: Electric drive axle, Lubricating oil, System efficiency, Experimental study

1 前言

随着新能源汽车产业的高速发展，电驱动系统集成化、高效化已成为发展方向，其中，电驱动桥作为“电机-减速器-驱动桥”一体化集成的典型代表，其能量转换效率直接决定了整车的续驶里程与能耗水平，因此受到学术界与工业界的广泛关注[1]。与传统内燃机驱动桥相比，电驱动桥取消了离合器与多挡变速器等中间传动环节，采用电机直接驱动减速器的结构形式，其输入转速普遍可达12 000 r/min以上，且运行工况覆盖低速大扭矩、高速巡航、能量回收等多种复杂模式。在此背景下，润滑油对电驱动桥系统效率的影响机制及优化方法已成为当前电驱动系统领域的研究热点。

润滑油是电驱动桥传动系统的关键工作介质，承担润滑、冷却、防锈防腐及密封等功能，但其黏性阻力也会产生不可忽视的寄生功率损失。研究表明[2]，润滑油的黏度、系统运行油温及加注量，会显著改变齿轮啮合、搅油及轴承摩擦损失，进而影响系统传动效率。然而，现有研究多集中

作者简介：范春利（1981—），男，正高级工程师，硕士学位，研究方向为汽车传动系统台架试验、试验方法分析及优化。

参考文献引用格式：

范春利，景雪岩，高健，等.润滑油对平行轴电驱动桥系统效率影响的试验研究[J].汽车工艺与材料，2026(5)：15-20.

FAN C L, JING X Y, GAO J, et al. Experimental Study on the Influence of Lubricating Oil on the Efficiency of Parallel-Axis Electric Drive Axle Systems[J]. Automobile Technology & Material, 2026(5): 15-20.

于传统内燃机配套的手动变速器、自动变速器及非集成式驱动桥，润滑油对高转速、宽工况电驱动桥的影响规律缺乏系统分析，且对多级平行轴传动中不同传动级搅油损失的分布特征研究较少。

本文以某型商用车两级平行轴电驱动桥为研究对象，围绕油品特性、运行油温、加注量3个核心维度，结合理论建模与台架试验开展研究，旨在揭示润滑油对电驱动桥系统效率的影响机理。

2 平行轴电驱动桥系统效率理论模型

2.1 动力传动路径与损失构成

某型商用车平行轴电驱动桥的动力传动路径为：驱动电机动力输入→一级减速齿轮副→二级减速齿轮副→差速器→左右半轴→驱动轮。其传动结构如图1所示。

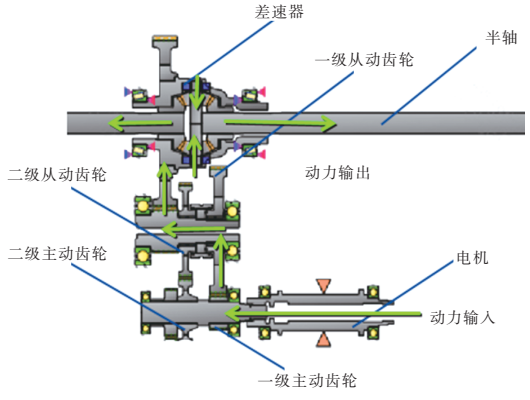


图1 平行轴电驱桥动力传动

在此能量传递路径中，系统的总功率损失P_{loss}主要由齿轮啮合损失、搅油损失、轴承摩擦损失及其他辅助损失构成，其表达式为：

$$P_{loss} = P_g + P_j + P_b + P_q \tag{1}$$

式中：P_g为齿轮啮合损失，P_j为搅油损失，P_b为轴承摩擦损失，P_q为油封、密封件及电机空载等其他辅助损失。

基于输入输出功率差法，平行轴电驱动桥系统效率η可表示为：

$$\eta = \frac{P_{in} - P_{loss}}{P_{in}} \times 100\% \tag{2}$$

式中：P_{in}为电驱动桥输入轴的机械功率。

2.2 齿轮啮合损失

齿轮啮合过程中的功率损失主要源于齿面滑动摩擦与滚动摩擦，其中滑动摩擦占主导地位。根据弹性流体动力润滑理论，单对齿轮副的啮合损失功率可表示为：

$$P_g = \frac{1}{1\,000}\sum(f \cdot F_n \cdot V_s) \tag{3}$$

式中：f为摩擦因数，F_n为法向载荷，V_s为齿面滑动速度。

摩擦因数f受润滑油黏度、齿面粗糙度及卷吸速度影响，可采用经验公式估算。在混合润滑与弹性流体动力润滑状态下，适当降低润滑油黏度可有效减小齿面流体剪切阻力，降低摩擦因数，从而提高齿轮传动效率。

2.3 搅油损失

搅油损失是指旋转齿轮、轴系等部件搅动箱体内润滑油所产生的黏性阻力矩损失，是电驱动桥空载功率损失的最主要来源。对于圆柱齿轮传动，单级齿轮的搅油损失功率可表示为：

$$P_g = \frac{1}{2}\rho\omega^3 R^3 A C_j \tag{4}$$

式中：ρ为润滑油密度；ω为齿轮的旋转角速度；R为齿轮的节圆半径；A为齿轮的浸油面积；C_j为无量纲搅油阻力系数，与齿轮结构、浸油深度及润滑油运动黏度相关。

由式(4)可知，搅油损失与旋转角速度的三次方成正比，这是电驱动桥高速工况下功率损失急剧增加的根本原因。同时，搅油损失与润滑油加注量(直接决定浸油深度)正相关，与系统运行油温(影响润滑油黏度与密度)密切相关。

2.4 轴承摩擦损失

滚动轴承的摩擦损失主要由滚动体与滚道间的滚动摩擦、滑动摩擦以及润滑油的黏性阻力组成，其总摩擦损失功率可表示为：

$$P_b = \sum(f_r \cdot \mu_b \cdot \omega_b \cdot d_b) \tag{5}$$

式中：f_r为轴承所受径向载荷，μ_b为轴承摩擦因数，ω_b为轴承旋转角速度，d_b为轴承内径。

低黏度润滑油可有效减小轴承内部的流体动力损失，但需兼顾轴承的承载能力与边界润滑性能，避免出现干摩擦导致的早期失效。

2.5 油封及电机等其他损失

油封、旋转密封件及驱动电机(空载)等部件

受自身结构与材料特性影响会产生一定的功率损失。由于上述损失与润滑油参数的相关性较弱,且在本研究的试验工况范围内波动较小,故将其视为常数项处理。

3　润滑油对电驱动桥系统效率的影响分析

3.1　油品黏度特性的影响机制

润滑油的黏度是影响电驱动桥传动效率的核心物性参数,其对系统效率的影响具有显著的双向性,且不同损失项对黏度的响应特性存在明显差异。

从润滑机理来看,足够的动力黏度可在齿轮齿面与轴承滚道表面形成连续的弹性流体动力润滑油膜,避免金属表面直接接触,有效降低边界摩擦与黏着磨损;但黏度过高会显著增大润滑油的流体剪切阻力,同时加剧齿轮与轴系的搅油阻力,导致系统寄生功率损失大幅上升。文献[3]研究表明,采用低黏度专用电驱动桥润滑油可同时降低齿轮啮合区的流体剪切应力和齿轮搅油阻力,在高速工况下效果尤为显著,是当前提升电驱动桥系统效率最经济有效的技术措施之一。

但需特别注意,润滑油黏度存在下限阈值。当黏度过低时,齿面与轴承表面的油膜厚度将小于两接触表面的综合粗糙度,润滑状态将从弹性流体动力润滑转变为混合润滑甚至边界润滑,此时摩擦因数会急剧上升,不仅会降低传动效率,还会引发齿面点蚀、轴承烧蚀等。

3.2　油温变化的影响机制

系统运行油温主要通过改变润滑油的黏温性间接影响电驱动桥系统效率,其影响规律呈现显著的非线性特征。

随着油温升高,润滑油的运动黏度指数下降,导致齿轮搅油阻力与齿面流体剪切阻力显著减小,系统空载损失与部分负载损失均随之降低,传动效率逐步提升;但当油温超过某一临界值后,润滑油黏度将降至油膜形成的最低要求,齿面与轴承表面的边界润滑比例大幅增加,摩擦因数上升,同时润滑油的氧化变质速度加快,其润滑性能与冷却性能进一步恶化,最终导致系统效率下降。

因此,电驱动桥系统效率随油温的变化曲线通常呈现“先升后降”的非线性特征,存在最优运行油温区间。

3.3　油量高低的影响机制

润滑油加注量直接决定了齿轮的浸油深度,是影响搅油损失的最关键因素,其对电驱动桥高速工况效率的影响尤为显著。

从能量损失机理来看,当润滑油加注量过高时,齿轮的浸油深度增加,不仅会增大齿轮的浸油面积,还加剧润滑油的飞溅与湍流效应,导致搅油阻力矩呈非线性增长,系统空载损失显著上升。若润滑油加注量过低,则无法保证齿轮与轴承的充分飞溅润滑,同时润滑油的总热容量减小,系统散热能力下降,易导致局部过热、齿面胶合与轴承早期失效。

因此,在满足全工况下齿轮与轴承的润滑冷却需求的前提下,尽可能降低润滑油加注量是减小搅油损失、提升电驱动桥高速工况效率的最直接途径。

4　试验台架设计及系统效率测试方案

4.1　试验台架设计

本文采用的平行轴电驱动桥专用试验台架结构如图2所示。电驱动桥的电机作为动力源,由电池模拟器为其输入电压;电驱动桥的输出端连接试验台架的测功机,测功机为其提供道路阻力;另外,台架配备温度控制单元与平行轴电驱动桥相连接,根据目标温度调整电机及润滑油温度。

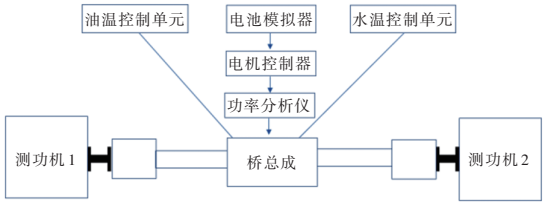


图2　试验台架结构

4.2　测试方案

采用控制变量法,分别考察润滑油品特性、系统运行油温及润滑油加注量3个核心因素对电驱动桥系统效率的影响规律,试验工况设置如表1所示。

表1 试验工况

试验维度	变量设置	固定条件
油品对比	3种不同黏度等级润滑油：75W-80、75W-90、80W-90	基准油温(90±5) ℃、设计加注量、覆盖电机转速2 000~6 500 r/min、输出扭矩50~500 N·m的全工况范围
油温对比	系统运行油温：(60±5) ℃、(90±5) ℃、(120±5) ℃	基准油品、设计加注量、覆盖电机转速2 000~6 500 r/min、输出扭矩 50~500 N·m的全工况范围
油量对比	润滑油加注量：80%设计加注量、100%设计加注量、120%设计加注量	基准油品、基准油温(90±5) ℃、覆盖电机转速2 000~6 500 r/min，输出扭矩50~500 N·m的全工况范围

5 测试结果分析

按照制定的试验方案开展测试，每个工况点重复测试3次，取算术平均值作为该工况点的有效测试数据，经异常值剔除与数据平滑处理[4]后，得到不同润滑油参数下的电驱动桥系统效率试验结果。

5.1 油品黏度对系统效率的影响

不同黏度等级润滑油对应的电驱动桥系统效率试验结果如表2所示，基于试验数据绘制的效率对比曲线如图3所示。

表2 油品对比方案电驱桥系统效率试验结果

电机转速/r·min^{-1}	电机扭矩/N·m	不同油品电驱桥系统效率/%		
		75W-80	75W-90	80W-90
2 000	50	91.30	91.10	90.85
2 500	100	92.70	92.02	91.76
3 000	150	92.96	92.51	91.98
3 500	200	93.65	93.06	92.66
4 000	250	94.03	93.72	93.33
4 500	300	95.03	94.53	94.08
5 000	350	95.53	95.01	94.84
5 500	400	96.61	96.01	95.73
6 000	450	96.74	96.10	95.87
6 500	500	96.97	96.42	96.05

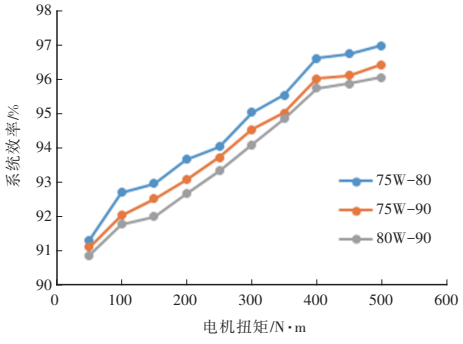


图3 不同油品对应电驱桥系统效率关系

由表2和图3可知，在所有试验工况下，电驱动桥系统效率均随润滑油黏度的升高而单调降低。其中，75W-80低黏度油对应的系统效率最高，80W-90高黏度油对应的系统效率最低，全工况范围内系统效率均值相差约0.84%；且随着电机转速的升高，不同黏度油品之间的效率差异呈增大趋势。

润滑油黏度越高，其流体剪切阻力越大，同时齿轮搅油阻力也随之增大，导致齿轮啮合损失与搅油损失均显著增加，这部分能量会转化为热量损失，最终表现为系统总效率下降。由于搅油损失与旋转角速度的三次方成正比，因此高转速工况下低黏度油的效率提升优势更为明显。

5.2 系统运行油温对系统效率的影响

不同运行油温下的电驱动桥系统效率试验结果如表3所示，基于试验数据绘制的效率对比曲线如图4所示。

表3 油温对比方案电驱动桥系统效率试验结果

电机转速/r·min^{-1}	电机扭矩/N·m	不同油温下电驱桥系统效率/%		
		(60±5) ℃	(90±5) ℃	(120±5) ℃
2 000	50	91.08	91.85	90.79
2 500	100	92.11	92.86	91.94
3 000	150	93.72	94.52	93.29
3 500	200	94.84	95.16	94.43
4 000	250	95.12	96.33	94.89
4 500	300	95.66	96.48	95.21
5 000	350	96.35	97.02	96.09
5 500	400	96.84	97.25	96.32
6 000	450	97.06	97.57	96.91
6 500	500	97.37	97.79	97.02

从图4中可知，在相同试验工况下，油温为(90±5) ℃时系统效率最高，而在较低温(60±5) ℃和较高温(120±5) ℃时系统效率均会下降，各工况对

应的系统效率均值相差达约0.99%。

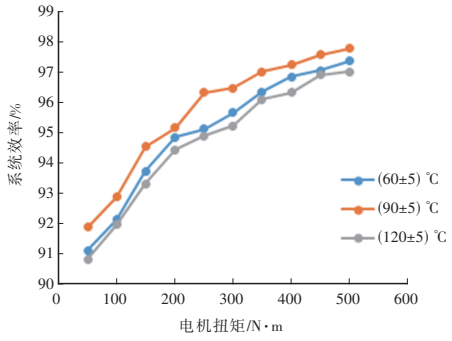


图4　不同油温对应电驱桥系统效率关系

由于在油温为(60±5) ℃时,润滑油黏度相对较高,流动性相对较差,齿轮搅油和轴承拖曳阻力较大,导致系统空载损失显著增加;当油温升高至(90±5) ℃时,油温适宜,黏度下降至适宜工作区间,流动阻力减小,搅油损失明显降低,同时齿面仍能保持良好的弹性流体动力润滑状态,因此系统效率达到峰值;当油温进一步升高至(120±5) ℃时,润滑油黏度过低,过高的温度可能导致油膜变薄,负面效应开始占据主导,电机铜损增加,性能衰减,尤其在齿轮啮合的高应力区,存在润滑不良的风险,虽不直接体现为瞬时效率下降,但会增加摩擦因数的波动和磨损风险。故油温为(90±5) ℃是该润滑油适宜的工作温度范围,有利于提升电驱桥系统效率。

5.3　润滑油加注量对系统效率的影响

不同润滑油加注量下的电驱动桥系统效率试验结果如表4所示,基于试验数据绘制的效率对比曲线如图5所示。

表4　油量对比方案电驱桥系统效率试验结果

电机转速/r·min^{-1}	电机扭矩/N·m	不同油量电驱桥系统效率/%		
		80%设计加油量	设计加油量	120%设计加油量
2 000	50	92.03	91.75	90.58
2 500	100	93.11	92.84	91.91
3 000	150	94.72	94.33	93.22
3 500	200	95.84	95.17	94.38
4 000	250	96.74	96.23	94.79
4 500	300	96.92	96.36	95.12
5 000	350	97.15	97.01	96.03
5 500	400	97.44	97.17	96.21
6 000	450	97.86	97.43	96.32
6 500	500	97.97	97.71	96.88

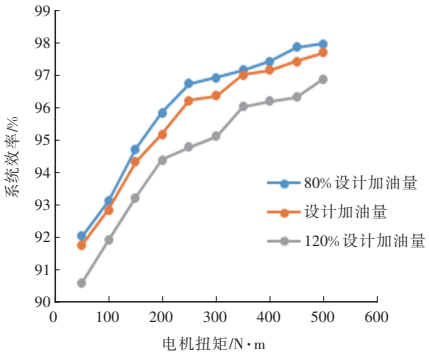


图5　不同油量对应电驱动桥系统效率关系

从在所有试验工况下,电驱动桥系统效率均随润滑油加注量的增加而单调降低。其中,加注80%设计加注量时系统效率最高,加注120%设计加注量时系统效率最低,全工况范围内系统效率均值相差约1.40%。

搅油损失在电驱动桥系统总功率损失中占比最大,润滑油加注量直接决定了齿轮的浸油深度与浸油面积。加注量越高,齿轮搅油阻力越大,搅油损失呈非线性增长;尤其在高转速工况下,由于搅油损失与旋转角速度的三次方成正比,过量加注润滑油会导致系统效率大幅下降。试验结果表明,在满足全工况润滑与冷却需求的前提下,将润滑油加注量降低至设计值的80%可有效减少搅油损失,显著提升电驱动桥系统效率。

6　结束语

本文以某平行轴电驱动桥为研究对象,建立了系统效率理论模型,分析了润滑油参数对电驱动桥系统效率的影响机制,并通过台架试验系统验证了润滑油黏度、运行油温及加注量对系统效率的量化影响规律,得到以下结论:

a. 在所测试的3种黏度等级润滑油中,电驱动桥系统效率随润滑油黏度升高单调降低,75W-80低黏度油的效率提升效果最佳,全工况范围内系统效率均值较80W-90高黏度油提升约0.84%。

b. 电驱黏桥系统效率随运行油温呈先升后降的单峰变化特征,(90±5) ℃为该型电驱动桥的最优运行油温区间,全工况范围内系统效率均值较(60±5) ℃和(120±5) ℃分别提升约0.77%、0.99%。

c. 电驱动桥系统效率随润滑油加注量增加单调降低,在满足全工况润滑与冷却需求的前提下,

将加注量降低至设计值的80%可获得最优效率，全工况范围内系统效率均值较120%设计加注量提升约1.40%；但在实际产品开发中，必须完成80%加注量下的极限工况温升试验、润滑状态检测及长周期可靠性验证，在确保系统安全可靠运行的基础上实现效率优化。

参考文献：

[1] 孙越. 我国新能源汽车分类及发展现状浅析[J]. 汽车实用技术, 2020(4): 13-15.

[2] 刘宏威，孔卓，闫书法，等. 润滑油对电驱桥功率损失影响的试验研究[J]. 机械传动, 2025, 49(2): 111-117.

[3] 闫淑颖，李成，张国茹. 电动汽车减速箱油黏度与传动效率相关性研究[J]. 合成润滑材料，2023，50(3)：1-5.

[4] 任露泉. 试验设计及其优化[M]. 北京：科学出版社，2009.

AT&M