

电动汽车驱动系统润滑油及 添加剂的技术趋势

— 下一代电动汽车润滑油应用的要素探讨 —



足立常夫

Tsuneo ADACHI

雅富顿化学日本株式会社筑波研究所

1. 前言

近年来，随着混合动力汽车及电动汽车的普及，为满足电气化的特殊要求，需要对驱动单元所用润滑油进行最优设计。我们围绕电动汽车润滑油添加剂应用中的关键技术课题，开展了多方面的研究，不仅包括添加剂配方设计，也包括评价方法。本文将围绕通过这一系列工作所明确得出的、下一代电动化车辆中润滑油及添加剂应用相关的要素进行阐述。

2. 驱动单元的进化

如表1所示，随着电动化的发展，汽车的驱动单元正不断多样化和高功率化。以内燃机为主要动力源的自动变速器是传统型的代表性示例，例如有级式变速器 (Step-type AT)、无级变速器 (CVT)、双离合变速器 (DCT) 等。

表1 驱动单元的分类和特点

驱动单元	特点
手动变速器	- 在乘用车领域所占全球生产份额为10%~15%左右 - 商用车几乎全部是MT或AMT
自动变速器	- 高度简约化的设计 (80年历史) - 大量生产 “传统型”的技术 - AT/CVT/DCT的基本结构
混合动力自动变速器	- 电机对传统设计进行补充 - 集成复合动力源 - 润滑油直接冷却电机 - AT/CVT/DCT的基本结构
DHT	- 专用于混合动力汽车，从初期阶段开始设计 - 已简化并优化 - 没有电驱动则无法成立的设计 - 基于AT/CVT/DCT基本结构的设计
eAxe	- 用于BEV/FCEV - 润滑油润滑齿轮 - 部分情况下用油冷却电机

近年来，在这些变速器中集成电机的混合动力自动变速器，作为应对电动化的方式正在不断普及。例如，在有级式AT中增加电机的方式，在沿用传统机构及变速特性的同时，实现了驱动效率的提升。此外，专为混合动力汽车设计的DHT (Dedicated Hybrid Transmission) 的应用也在扩大。

不包含内燃机的eAxe则是电动化进一步发展的形态。eAxe是将电机、逆变器、减速器集成一体的电驱动单元，具有结构简洁、车辆设计自由度高以及响应性优异等特点。

【作者咨询方式】

邮编：300-2635 茨城县筑波市东光台5-9-4

Tel: 029-847-1910

E-mail: Tsuneo.Adachi@AftonChemical.com

表2 考虑电驱动油时的项目及潜在要素

项目	考虑润滑油特性时的潜在要素
材料适应性	弹性体、工程塑料、铜
摩擦特性	单挡/多挡离合器、同步器性能
电气特性	新油及老化油中的电阻、绝缘击穿电压
可持续性	生命周期分析 (LCA)
机械耐久性	极压性能、耐疲劳性能、耐磨性 (齿轮、轴承)
冷却性能	导热性、比热容、氧化稳定性
泡沫与空气混入	在新油及老化油中，以及高速条件下
效率	热性能、摩擦/牵引特性、黏度特性

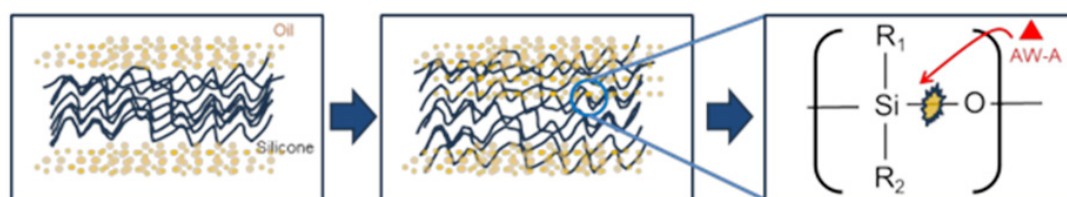


图1 硅类材料因超低黏度润滑油而劣化的机理

3. 不断演变电驱动油要求与配方难题

如表2所示，在制定电驱动油添加剂配方的策略时，需要综合考虑多种复合因素。除以往所要求的润滑性、防护性等基本性能外，有时还需考虑电气特性、应对高转速化，以及冷却性能等。

所使用的各个添加剂有时会同时对多个功能发挥作用。因此，关键在于以各添加剂组分的作用机理及相互影响为基础，构建整体性能平衡的配方。在此，选取“材料适应性”、“耐久性”、“效率”三个角度作为主要考量要素，对其各自所需的要求以及添加剂配方设计中的思路进行整理。

4. 材料兼容性

4-1 满足电驱动油对机械性能与材料兼容性的双重要求

在配方设计中，适当平衡含磷、含硫的抗磨剂与极压剂的添加量十分重要。这些添加剂在赋予齿轮和轴承高机械保护性能的同时，也可能对各种材料产生影响。电驱动单元中，高分子材料和电磁线等多种材料共存，需要综合了解润滑油化学设计对各类材料的影响。

4-2 低黏度化与有机材料的兼容性

随着电动化的发展，为了提高系统效率，润滑油正在进一步向低黏度化方向发展。如图1所示，有报告指出，对于硅类材料，润滑油低黏度化会使润滑油更容易渗透到材料中，在存在化学侵蚀性较高的抗磨剂的条件下，劣化会变得更加显著¹⁾。

基于这种情况，对于润滑油所使用的添加剂，在充分了解其化学侵蚀性的基础上，适当控制添加量十分关键。这需要在兼顾有机材料兼容性与机械性能的前提下，采用多种添加剂复配及采用替代添加剂在内的配方设计。

4-3 电磁线的兼容性试验方法

电驱动单元 (EDU) 中大量使用铜材料，因此对铜的防腐蚀性能逐渐成为重要的评估项目之一。但是，在许多部件中，铜与润滑油直接接触的部分较少，传统的润滑油铜腐蚀试验未必能准确反映实际使用状态。电机中使用的电磁线 (Magnet wire) 通过用树脂包覆铜线来确保电气绝缘性。油冷式电机中，润滑油与电磁线直接接触，因此需要能够评估两者兼容性的方法。

Kwak等人提出了电磁线与润滑油的兼容性试验方法²⁾。该试验方法将润滑油和电磁线试样放入试管中。之后，在相应的试验温度和试验条件下，根据情况加入少量水，进行浸渍试验。浸渍结束后取出电磁线，如图2所示，测量电磁线的绝缘击穿电压。本研究显示，根据润滑油的种类不同，绝缘击穿电压的降低展现出不同的情况。利用这一特性，就能够以接近实际使用状态的方式评估电磁线与润滑油的兼容性。

4-4 铜腐蚀试验发展

采用ASTM D130这一通用铜腐蚀试验，通过灵活设定试验温度和时长，评估测试后铜表面的外观及润滑油中铜的溶出量，对润滑油的侵蚀性进行初步评估。



图2 电磁线兼容性试验

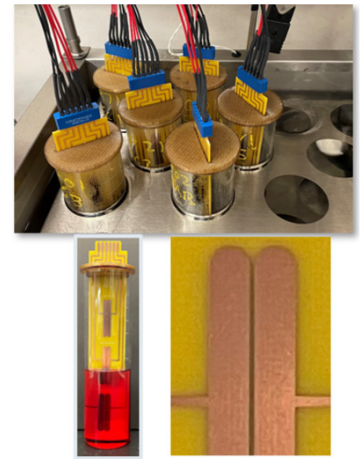
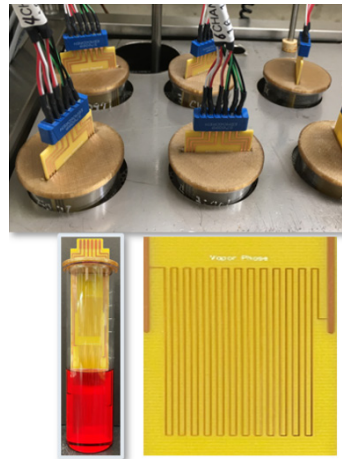


图3 铜线腐蚀试验（左）与导电性沉积物试验（右）

对电驱动油而言，评估通电状态下与铜材料之间的相互作用可能至关重要。图3右侧所示的测试电路板中，铜与铜之间设有间隙，将该电路板与润滑油放入圆筒形容器中进行试验。该试验在通电状态下进行，用于确认评估过程中是否生成导电性沉积物。当该间隙中形成导电性沉积物时，通电时会导致电压上升，因此可以检测其生成情况。该打印电路板上，在气相、中间相、液相中均布置了相同排布的电路形状，可确认各相中的现象。

另一方面，图3左侧所示的测试电路板配置了排布铜线的电路图形，如果试验中铜从铜线溶出则线宽变细，电阻随之增加。同样，在气相、中间相、液相中均设有相同布局的电路图形，可确认各相中的现象³⁾。

4-5 含硫极压剂真的“不好”吗？

人们通常容易认为“含硫极压剂成分越多，铜腐蚀越严重”，但这种说法未必成立。如图4所示，部分情况下，通过在铜表面形成稳定的保护膜，铜的溶出会随时间推移而趋于收敛。在ASTM D130铜腐蚀试验中虽然观察到变色现象，但需要将这种外观变化与实际使用环境中的实际危害区分开来考虑。在优先考虑机械部件抗磨损耗性和耐久性的设计思路中，这类非腐蚀性变色可以说是可以接受的现象。

此外，这也揭示出，在铜部件未暴露、电气部件已适当绝缘的情况下，或许可以更积极地利用有助于提高耐久性

浸渍时间:	3	24	48	72	96	120	144	168	192	216	240
ASTM D130; 150°C (目视评估及 试验后油中的 铜溶出量)											
	1B; 低于 检测 界限	2E; 5	3A; 6	4A; 7	4A; 10	4B; 13	4B; 14	4A; 14	4A; 15	4A; 17	4B; 22

图4 铜腐蚀试验中随测试时长变化的外观与铜溶出量

表3 High EP EDF的特点

Test item	High EP EDF	Axle	MTF	ATF
FZG A10/16.6R/90; (FLS)	10; 11	12	11	6
FZG Wear Verschleiss C/0.05/90-120/10	< 50 mg	22 mg	n/a	20-30 mg
FZG Pitting C/9/90	200-300 hr	250-300 hr	200-300 hr	200 hr
Bearing Protection	Good	Good	Good	Good

的极压剂组分。但是，这些见解主要是基于台架试验结果得出的，其最终有效性应通过实际设备条件下的耐久性评估加以验证。

5. 耐久性

从机械性能的角度来看，为了确保与各种部件的兼容性以及优异的电气特性，一直以来在电驱动系统中广泛使用的ATF类型配方，今后仍将继续发挥重要作用。另一方面，若基于新的设计思路和运行工况来应用这些配方，有望进一步提高极压性能和耐抗磨性能。表3所示的高极压型电驱动油 (High EP EDF) 显示出优于ATF和MTF的极压性能，在FZG试验中也具有与车桥油同等水平的抗点蚀性和抗磨性。

5-1 EDU耐久试验中的失效案例

图5展示了电驱单元 (EDU) 耐久试验中出现的一例失效案例。该试验中，在规定的耐久工况下运行结束后，拆解检查中确认齿轮出现损伤。此外，该耐久试验过程中观察到试验油温度上升。

经排查后发现，低黏度油的使用与高转速条件相叠加，导致润滑油中卷入空气，即发生了所谓的“空气夹带”。推测由此导致有效油膜厚度降低，齿

面之间无法维持充分润滑状态，最终导致润滑状态转移到了边界润滑区域。在边界润滑状态下，金属彼此间的直接接触增加，作用于齿面的面压及剪切应力局部上升。在这种严苛条件下，部件表面产生的负荷增大，如果无法获得充分保护，齿轮就容易发生损伤。换言之可以得出结论，在本耐久试验中，在低黏度、高转速这一运行条件下，润滑设计所面临的要求变得更为严格，但油剂设计未能充分满足该要求，这是耐久性失效及硬件故障的直接原因。

如此查明原因之后，在重新进行的电驱动单元耐久试验中实现了优异的耐久性。拆解及检查结果如图6所示，确认所有试验后的部件均保持非常好的状态⁴⁾。

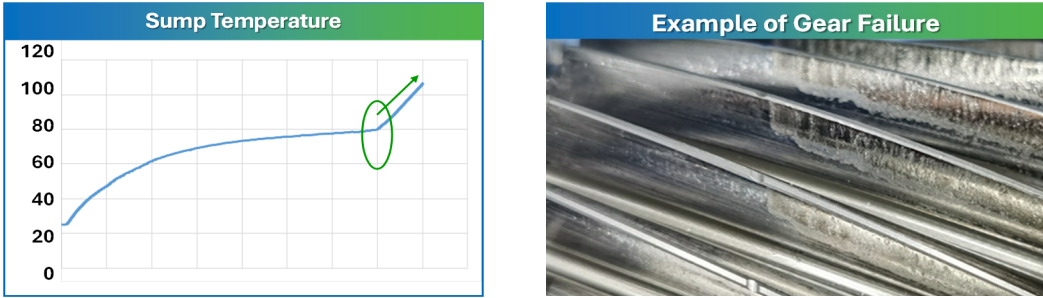


图5 EDU耐久试验中的油温上升与齿轮损伤

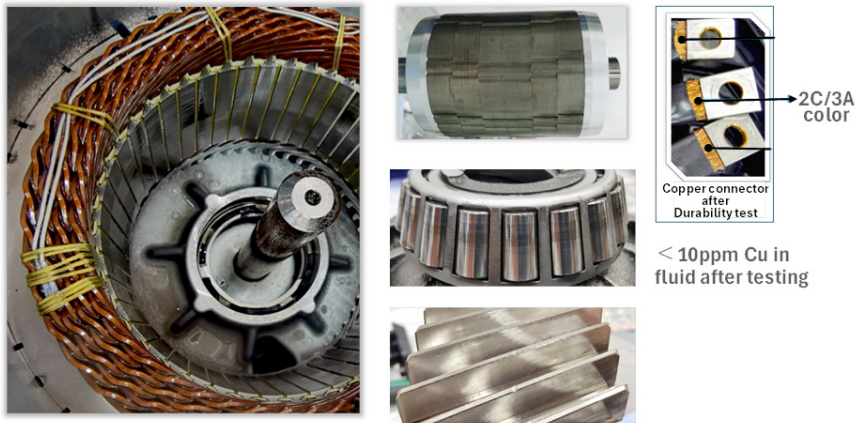


图6 经改良的电驱动油的EDU耐久试验后的部件外观

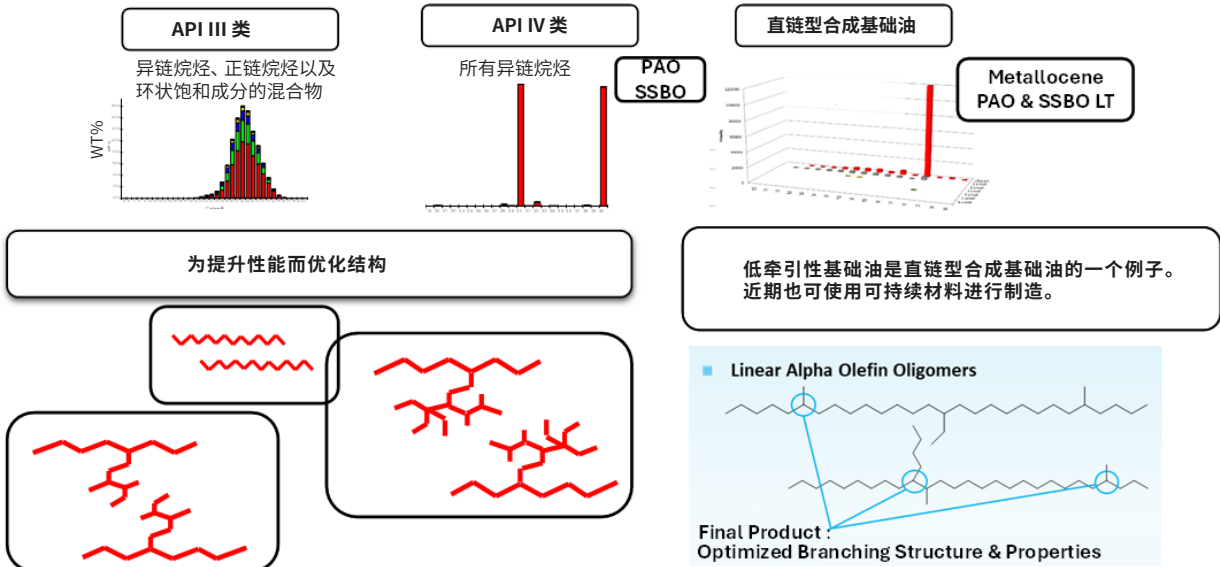


图7 基础油特性比较

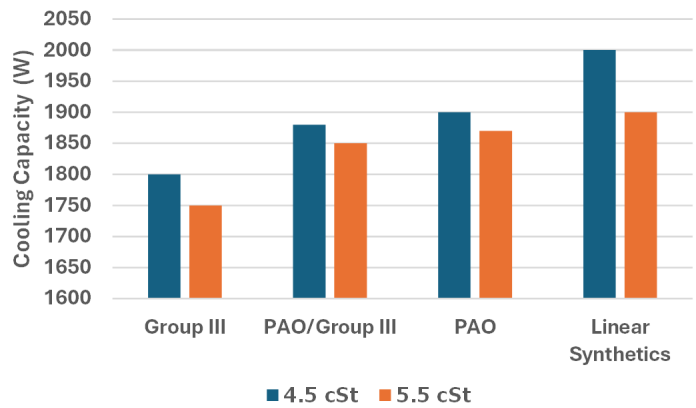
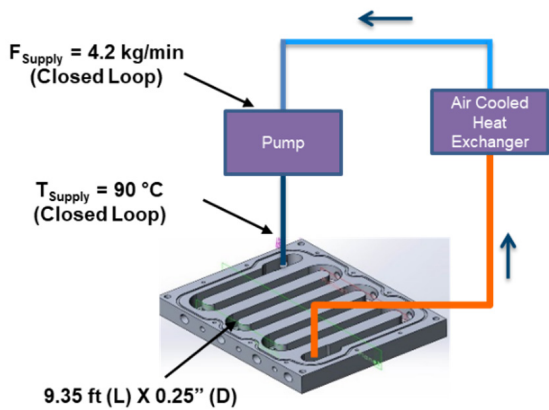


图8 试验装置概念图（左）与基于基础油的种类及粘度进行的冷却性能比较（右）

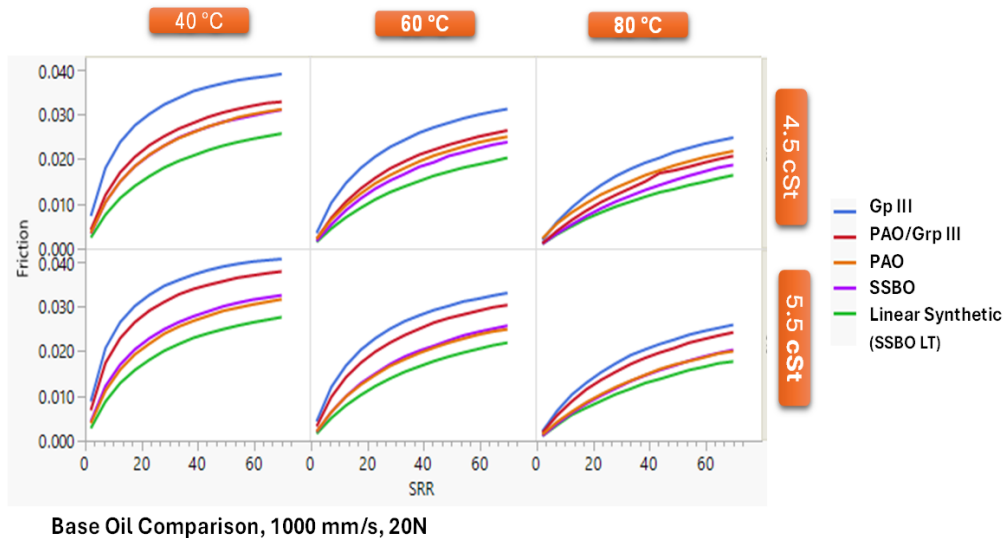


图9 基础油种类导致的摩擦特性差异

6. 效率

6-1 基础油的种类与选择

在选择基础油时，理解分子结构与性能的平衡十分重要。API III类油具有支链烷烃、直链烷烃、环状饱和烃混合存在的结构，广泛适用于多种用途。另一方面，以PAO（聚 α -烯烃）和SSBO（可再生合成基础油）等为代表的API IV类油全部由支链烷烃构成，能够发挥更高性能。此外，近年来，由于以茂金属PAO和SSBO LT为代表的直链型合成基础油的出现，低牵引特性和可持续原料的应用备受关注。具有直链结构的 α -烯烃衍生低聚物是实现结构与物性优化的一个例子，根据用途选择基础油的范围正在不断扩大。图7中展示了这些基础油的概念性比较。

6-2 冷却性能的模拟

使用6-1节所示各种基础油，进行了冷却性能评估。试验概要如图8所示。试验条件为管道长度9.35英尺（约2.82m）、内径0.25英寸（约6.35mm）、流量4.2 kg/min、入口流体温度90°C，并据此进行了冷却性能比较。结果表明，冷却性能由高到低依次为SSBO LT > SSBO $\approx$ PAO > Group III。通过降低润滑油黏度，冷却能力最多提升约2.5%；而将基础油从

Group III变更为SSBO LT时，确认冷却能力提升约8%。这是因为SSBO LT具有更均匀且线性的分子结构，表现出了有利于热传递的特性⁵⁾。

6-3 牵引特性

针对6-2节所述基础油结构的影响，进行了牵引特性试验。结果如图9所示，发现分子结构越接近直链的基础油，其牵引系数越低，顺序为SSBO LT $\leq$ PAO $\leq$ SSBO < Group III。这表明，均匀且呈线性的分子结构可降低剪切时的分子间阻力，有助于减少摩擦。

6-4 使用EDU的效率验证试验

此前，我们介绍了材料兼容性、耐久性及基础油特性相关的、包括评估方法在内的研究成果。基于这些认识，我们正在添加剂配方设计中，推进同时高水平满足多项性能的配方开发。

对于采用了所开发添加剂的润滑油，使用EDU，在CLTC (China Light-duty Vehicle Test Cycle)工况下进行了效率评估，并与参照油进行了比较。如图10所示，在冷却水温20°C条件下，确认效率提高约1.5%。

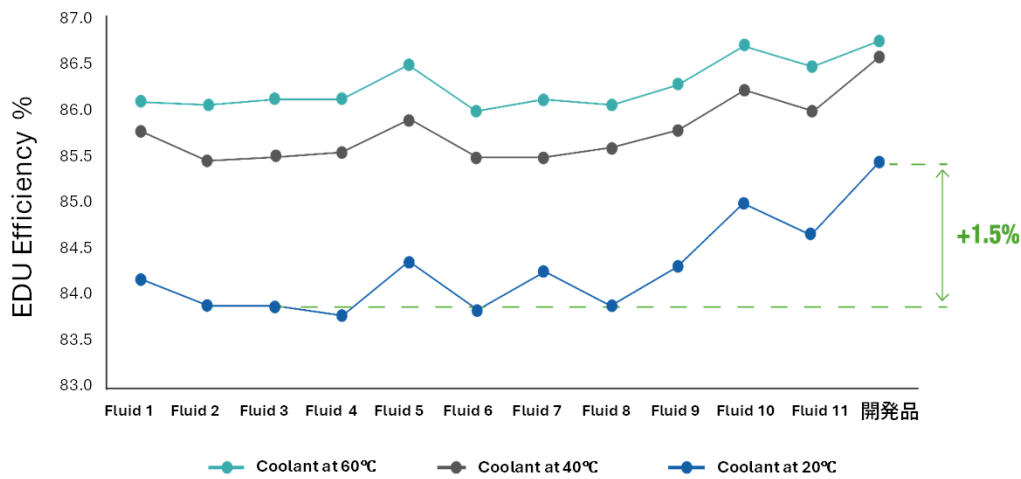


图10 CLTC工况下的EDU效率比较试验结果

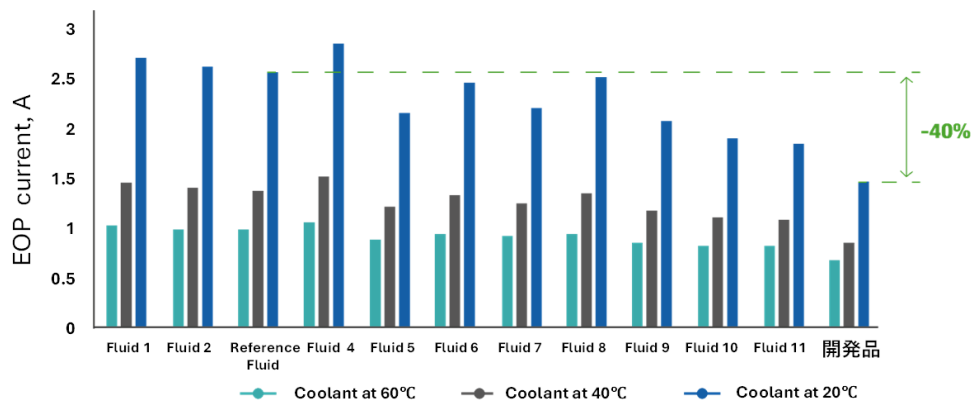


图11 油泵的电流值比较

测试中同时也对电子油泵的电流及功耗进行了监测。如图11所示，在冷却水温20℃条件下，新开发的电驱润滑油使电子油泵的电流消耗降低约40%。由此确认，该技术可减轻油泵工作时的负荷，进而降低功耗。

7. 结论

随着电动化的发展，润滑油及添加剂所需的性能，正在朝着比以往更加高端化、更优化的方向演进。与此同时，新的评估指标和试验方法虽在不断引入，但过度依赖特定指标或试验结果的开发方式，也可能使其他重要性能要素变得相对更难被识别到。此外，如果能对以往积累下来的评估试验及润滑油设计的相关知识作出适当的定位，这些知识仍然能够提供有效的参考。

在电动化的转型期，真正考验的不仅仅是对新事物的追求，更是能否准确判断什么是本质需求。从所需性能的定义到具体实现，唯有深刻理解其中相互制约与可行性的技术人员之间的成熟对话，才能最终找到最佳解决方案。我们认为，这样的积累将有助于实现客户价值的最大化与可持续发展社会。

参考文献

- 1) T. Adachi, Y. Ono, W. Bunting, C. Cleveland, R. Iwasawa, Y. Suzuki, H. Nakamura, Y. Kitajima, H. Aoki: 电驱动油低黏度化与有机材料适应性的研究, 汽车技术会学术演讲预稿集(秋), 20256025 (2025).
- 2) Y. Kwak, P. Grzyska, C. Cleveland & T. Adachi: Magnet Wire Compatibility Test for Electric Drivetrain Fluid Development, JSAE 20239054 (2023).
- 3) Y. Kwak & C. Cleveland: Novel Test Methods for Electric Transmission Fluid Development, 76th STLE Annual Meeting & Exhibition, Orlando, FL (2022).
- 4) T. Adachi, J. Zhou, C. Cleveland: 具备高效率与高可靠性的下一代ETF技术开发, 摩擦学会议预稿集(秋), 2025.
- 5) J. Rosalli, C. Cleveland et al.: Building the Next Generation Electric Drive Fluids (EDFs) for Enhanced Energy Efficiency, The 2nd STLE Tribology & Lubrication for E-Mobility Conference (2022).