

新能源车用减速器润滑系统仿真与优化验证

朱超, 曲婧瑶, 施绍有, 赵志宇

上海电气集团股份有限公司中央研究院, 上海

Email: zhuchao@shanghai-electric.com

收稿日期: 2021年1月29日; 录用日期: 2021年4月1日; 发布日期: 2021年4月8日

摘要

针对新能源汽车用三合一电驱动系统的减速器, 对其齿轮、轴系、壳体等进行润滑系统的建模、仿真、优化和验证。结果表明, 仿真手段可以有效模拟润滑油在减速器内部的流动情况, 而优化后的润滑系统通过仿真与试验的结果对比, 也验证了其设计是满足要求的。

关键词

三合一电驱动系统, 润滑系统, 仿真, 试验验证

Lubrication System Simulation and Optimization Validation of New Energy Vehicle Reducer

Chao Zhu, Jingyao Qu, Shaoyou Shi, Zhiyu Zhao

Shanghai Electric Group Central Academe, Shanghai

Email: zhuchao@shanghai-electric.com

Received: Jan. 29th, 2021; accepted: Apr. 1st, 2021; published: Apr. 8th, 2021

Abstract

Aiming at the reducer of the three-in-one electric drive system for new energy vehicles, the modeling, simulation, optimization and test verification of the gear, shafting, housing and other continuous lubrication systems are carried out. The results show that the simulation method can effectively simulate the flow of lubricating oil in the reducer, and the optimized lubrication system is verified to meet the requirements by comparing the simulation results with the test results.

Keywords

Three-in-One Electric Drive System, Lubrication Systems, Simulation, Test Verification

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

新能源汽车三合一电驱动系统的性能对整车性能影响较大，而减速器的润滑是电驱系统中的重要组成部分，润滑系统的设计也是三合一电驱动系统设计的难点之一。

目前，新能源汽车的重要指标是最高车速，对应到三合一电驱动系统上就是电机和减速器的最高转速，16,000 rpm 以上的转速已经是很常见的了，而高转速带来的齿轴磨损、胶合和老化也为电驱动系统带来了系统失效风险，因此，高转速减速器对于润滑系统的要求也逐渐提高。

新能源汽车电驱动系统减速箱的润滑仿真是计算流体力学在汽车领域内的应用场景之一，国内外学者对于齿轮箱的润滑仿真已经开展了大量的研究工作，董春峰、陈黎卿等[1] [2] [3]对齿轮箱浸油润滑和飞溅润滑的内部流场进行了仿真分析，对比了两种润滑方式的实际效果；林银辉等[4]对变速器内部油轨的进出油情况进行了仿真分析，验证了油轨润滑系统设计的合理性；彭钱磊等[5]提出了基于齿面移动法的飞溅润滑数值分析，并加以试验验证；曹寓等[6]使用 Fluent 软件采用动网格的方法研究了齿轮喷油润滑时齿轮箱内的润滑油分布情况。

本文是基于 ParticleWorks 软件，以新能源汽车三合一电驱动减速箱为研究对象，将模拟仿真与试验相结合来研究减速箱内的润滑情况，以此旨在提升电驱动系统的润滑效果。

2. 三合一电驱动润滑系统建模与仿真

2.1. 减速箱模型

三合一电驱动系统中，减速箱主要由输入轴、中间轴和输出轴以及相应的轴承等三条轴系组成，总速比为 9.935，最高输入转速为 16,000 rpm，最大输入扭矩为 330 Nm。其轴系和壳体的详细设计如图 1：

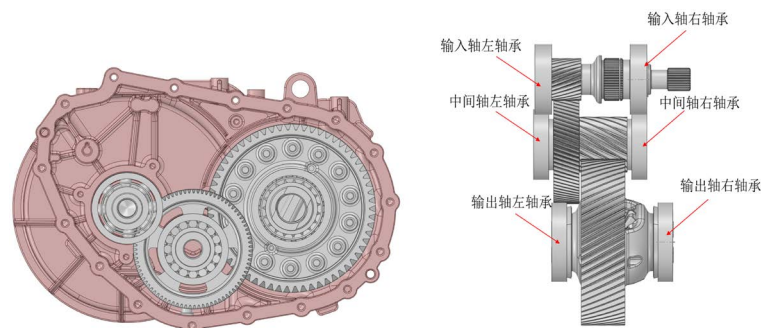


Figure 1. Internal shafting and shell structure of the gearbox

图 1. 减速箱内部轴系和壳体结构

减速箱采用齿轮搅油飞溅润滑的方式，为了使得减速箱内部轴系润滑充分，在减速箱壳体上设计了导油槽，如图 2 和图 3 所示：

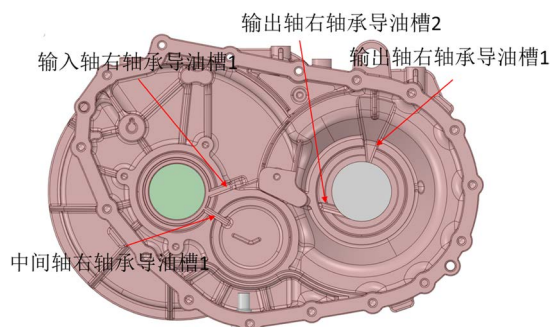


Figure 2. The right side shell and oil guide groove structure of the gearbox
图 2. 减速箱右侧壳体和导油槽结构

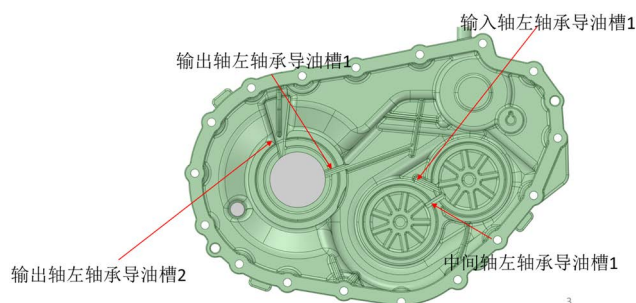


Figure 3. The left side shell and oil guide groove structure of the gearbox
图 3. 减速箱左侧壳体和导油槽结构

2.2. 润滑仿真工况

减速箱在高速运转的时候，飞溅润滑是基本能够满足润滑需求的，但是在低速运转的时候，润滑油很难被搅动起来，润滑效果欠佳，因此，对于润滑仿真来说，重要的是模拟低速时的润滑情况，因此，本文主要以低速(本文选取 2000 rpm)作为仿真输入条件，分别进行前进、倒车、上坡、下坡、左倾和右倾几种工况(如表 1)来对润滑系统设计进行评估。

Table 1. Simulation conditions

表 1. 仿真工况

序号	工况	输入轴转速 rpm	中间轴转速 rpm	输出轴转速 rpm
1	水平前进	2000	666.67	204.3
2	水平倒车	2000	666.67	204.3
3	上坡 5.7°	2000	666.67	204.3
4	上坡 16.7°	2000	666.67	204.3
5	下坡 5.7°	2000	666.67	204.3
6	下坡 16.7°	2000	666.67	204.3
7	右倾 16.7°	2000	666.67	204.3
8	左倾 16.7°	2000	666.67	204.3

减速箱润滑油牌号德士龙 6，加注量 1 L，仿真分析取油温为 40℃，该油温下润滑油密度为 834 kg/m³，粘度为 29.8 cSt。仿真过程中，需要在仿真软件 Particle Works 中设定，减速箱输入轴、中间轴和输出轴

的轴系为运动部件，而减速箱的壳体部分为静止部分。

各工况下，减速箱内部齿轮转向可以参考车辆的前进方向，如图 4 和图 5 所示。

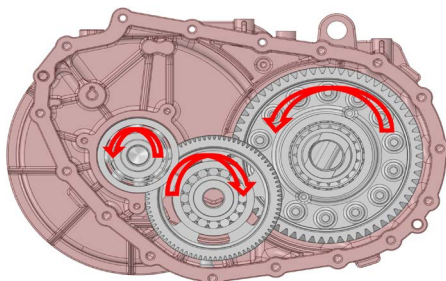


Figure 4. Gear steering of each axis in horizontal forward, up and down slope and left and right inclination conditions
图 4. 水平前进、上下坡和左右倾工况各轴齿轮转向

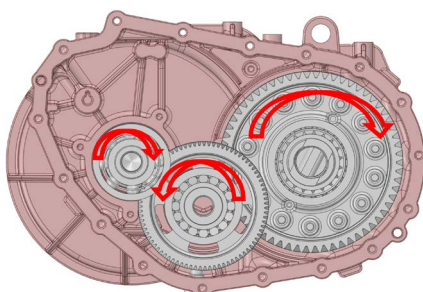


Figure 5. Gear steering of each axis in reverse conditions
图 5. 倒车工况各轴齿轮转向

2.3. 各工况仿真结果

如图 6，从水平前进工况的仿真结果来看，润滑充分的轴承包括：输入轴左轴承、输入轴右轴承、中间轴左轴承、中间轴右轴承、输出轴左轴承、输出轴右轴承。因此，该工况下，减速箱内的润滑情况总体良好。

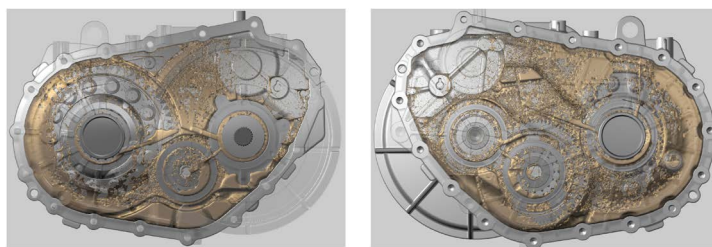


Figure 6. Right and left side view of oil distribution in horizontal forward condition
图 6. 水平前进工况油液分布右侧和左侧视图

如图 7，从水平倒车工况的仿真结果来看，润滑充分的轴承包括：输入轴左轴承、输入轴右轴承、中间轴左轴承、中间轴右轴承、输出轴左轴承、输出轴右轴承。因此，该工况下，减速箱内的润滑情况总体良好。

如图 8、图 9 和图 10，从上坡 5.7°、上坡 16.7°，下坡 5.7°的工况仿真结果来看，润滑充分的轴承：输入轴左轴承、输入轴右轴承、中间轴左轴承、中间轴右轴承、输出轴左轴承、输出轴右轴承。因此，这几种工况下，减速箱内的润滑情况总体良好。

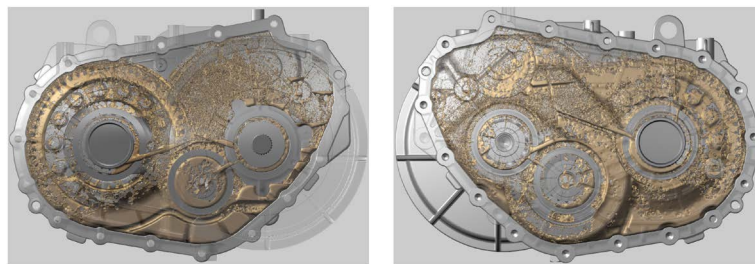


Figure 7. Right and left side views of oil distribution in horizontal reverse condition

图 7. 水平倒车工况油液分布右侧和左侧视图

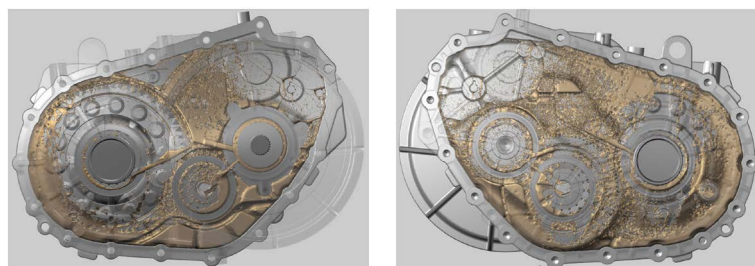


Figure 8. Right and left views of oil distribution in uphill 5.7° condition

图 8. 上坡 5.7° 工况油液分布右侧和左侧视图

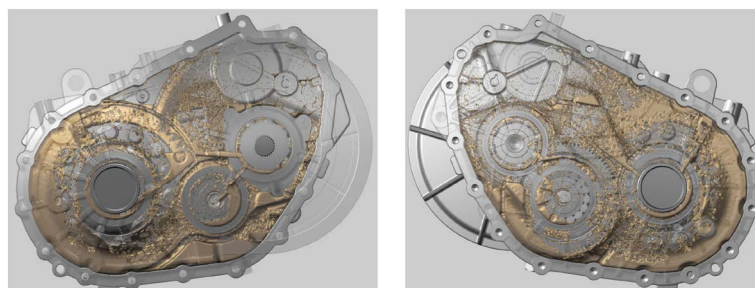


Figure 9. Right and left views of oil distribution in uphill 16.7° condition

图 9. 上坡 16.7° 工况油液分布右侧和左侧视图

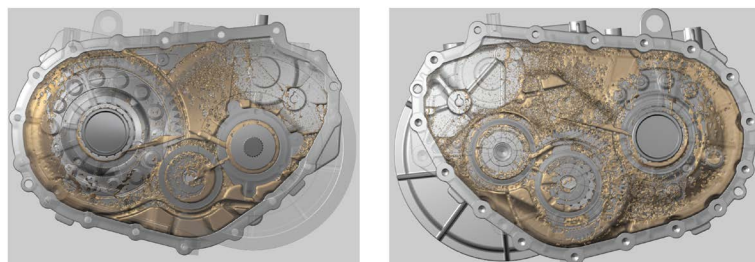


Figure 10. Right and left views of oil distribution in downhill 5.7° condition

图 10. 下坡 5.7° 工况油液分布右侧和左侧视图

如图 11, 从下坡 16.7° 的工况仿真结果来看, 输入轴右轴承的润滑油油量明显较少, 其它轴承的润滑情况良好。从输入轴右轴承室的导油槽来看, 输出轴右轴承上面的导油槽未见有油持续流入, 而输出轴右轴承下面的导油槽有少量润滑油流入, 因此, 输出轴右轴承润滑流量明显要较其它轴承小, 此工况下, 减速箱的润滑存在一定风险, 需要改进。

如图 12, 从右倾 16.7° 的工况仿真结果来看, 右侧的三个轴承以及输入轴右轴承和中间轴右轴承

润滑情况较好，而输出轴左轴承的润滑情况相对差一些，因此，该工况下减速箱的润滑存在风险，需要改进。

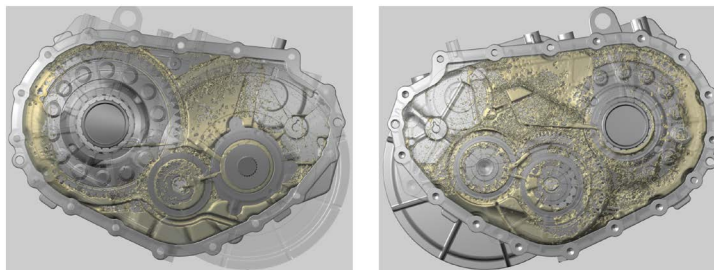


Figure 11. Right and left views of oil distribution in downhill 16.7° condition

图 11. 下坡 16.7° 工况油液分布右侧和左侧视图

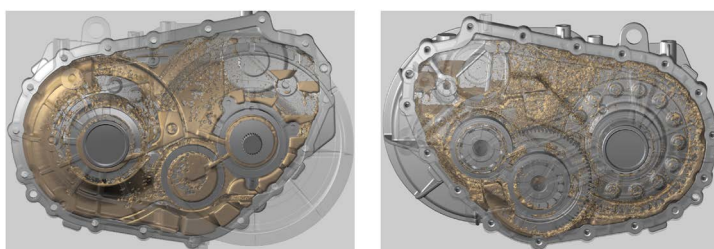


Figure 12. Right and left side views of oil distribution in 16.7° right tilt condition

图 12. 右倾 16.7° 工况油液分布右侧和左侧视图

如图 13，从左倾 16.7° 的工况仿真结果来看，左侧的三个轴承及输入轴右轴承和中间轴右轴承润滑情况非常好，但是输出轴右轴承润滑情况相对差一些，几乎无油润滑油，因此，该工况的减速箱润滑存在风险，需要改进。

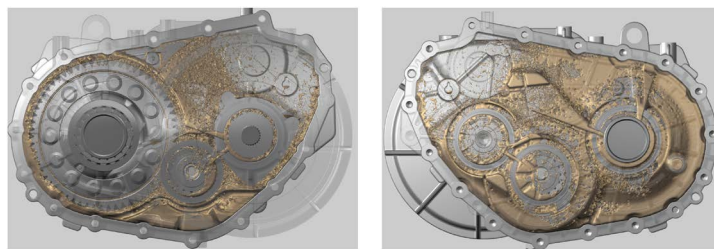


Figure 13. Right and left side views of oil distribution in 16.7° left tilt condition

图 13. 左倾 16.7° 工况油液分布右侧和左侧视图

3. 优化后的模型仿真及试验验证

从仿真分析的结果来看，减速箱在右倾 16.7° 和左倾 16.7° 的工况下存在润滑风险，针对存在润滑问题的轴承，进行优化改进，主要是通过优化导油槽的设计，从而使得润滑油能够顺利进入轴承室内对轴承进行润滑。

如图 14~17，对优化后的模型进行各工况仿真与试验对比，结果表明，对于减速箱内的润滑油分布，仿真与试验的结果非常接近，证明了仿真结果的有效性，也直接说明了润滑仿真手段在减速箱润滑系统设计中是可靠的。

针对减速箱在右倾 16.7° 和左倾 16.7° 的工况下存在润滑风险，对优化后的模型重点仿真和试验，结果如图 18 和图 19。

从仿真结果和试验结果都可以看到, 优化后的模型, 在右倾 16.7° 和左倾 16.7° 的工况下, 轴承处的润滑油量均满足要求, 润滑情况良好。因此, 可以证明, 优化后的模型润滑系统设计是满足设计要求的, 并且, 润滑仿真与试验结果的一致也表明润滑仿真可以作为润滑系统设计的参考的。



Figure 14. Comparison of simulation and test results after optimization; Left side view of oil distribution in horizontal forward condition

图 14. 优化后仿真与试验对比图; 水平前进工况油液分布左侧视图



Figure 15. Comparison of simulation and test results after optimization; Left side view of oil distribution in horizontal reverse condition

图 15. 优化后仿真与试验对比图; 水平倒车工况油液分布左侧视图



Figure 16. Comparison of simulation and test results after optimization; Left side view of oil distribution in uphill 5.7° condition

图 16. 优化后仿真与试验对比图; 上坡 5.7° 工况油液分布左侧视图

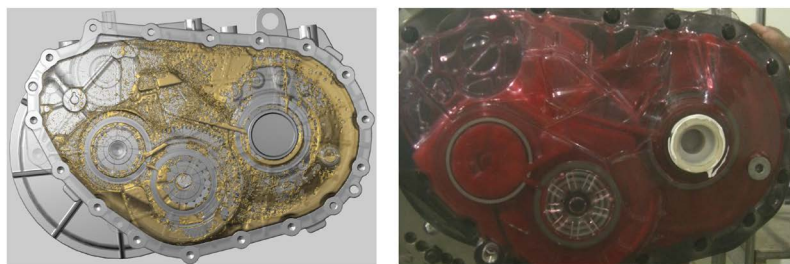


Figure 17. Comparison of simulation and test results after optimization; Left side view of oil distribution in downhill 5.7° condition

图 17. 优化后仿真与试验对比图; 下坡 5.7° 工况油液分布左侧视图

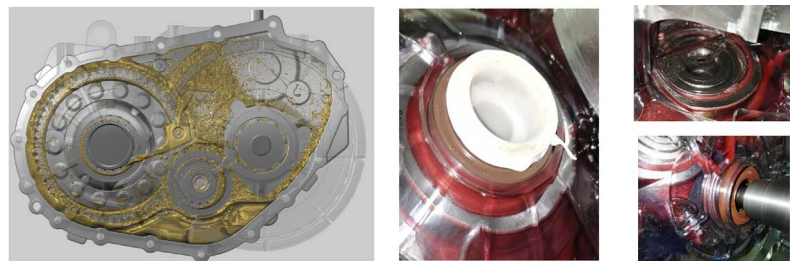


Figure 18. Comparison of simulation and test results after optimization; Right side view of oil distribution in 16.7° left tilt condition

图 18. 优化后仿真与试验对比图；左倾 16.7° 工况油液分布右侧视图



Figure 19. Comparison of simulation and test results after optimization; Left side view of oil distribution in 16.7° right tilt condition

图 19. 优化后仿真与试验对比图；右倾 16.7° 工况油液分布左侧视图

4. 结论

本文以新能源汽车用减速器的润滑系统优化作为研究对象，利用仿真与试验的结果做了对比，通过对减速箱的润滑系统进行多工况条件下的仿真与试验，可以得出如下结论：

- 从减速箱内飞溅润滑的润滑油分布形态来看，仿真结果与试验结果基本一致，可以证明，仿真结果的有效性，也可以说明，基于 ParticleWorks 软件的润滑系统仿真分析在润滑系统设计的过程中是具有参考和指导意义的。
- 从优化后模的型仿真与试验结果来看，优化后的模型已经解决了优化前润滑系统存在的风险，也直接证明了润滑仿真可以在一定程度上缩短电驱动系统设计的时间周期，节省了开发成本。

参考文献

- [1] 董春峰, 林腾蛟, 何泽银. 基于动网格的齿轮箱内部流场数值模拟[J]. 机械研究与应用, 2012, 24(2): 17-22.
- [2] 陈黎卿, 张栋, 胡志华. 基于流固耦合的分动器齿轮两相流动数值模拟与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(4): 54-61.
- [3] Lemfeldt, F. (2009) Study of the Geometrical Model Parameters for Simplification of Tooth System. *Journal of Applied Science in the Thermodynamics and Fluid Mechanics*, 3, 1-4.
- [4] 林银辉, 臧孟炎, 胡志华, 等. 双离合自动变速器油轨的流场模拟及其润滑效果评价[J]. 中国机械工程, 2013, 24(22): 3052-3056.
- [5] 彭钱磊, 桂良进, 范子杰, 等. 基于齿面移动法的齿轮飞溅润滑性能数值分析与严政[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 51-56.
- [6] 曹寓, 林腾蛟, 田文昌. 基于动网格的齿轮喷油润滑流场仿真分析[J]. 机械研究与应用, 2017, 30(3): 18-22.