

基于 SPH 方法的纯电动车减速器润滑仿真

赵迁¹, 杨良会¹, 赵勇钢², 赵春艳², 刘斯倩³

(1.北京新能源汽车技术创新中心有限公司, 北京 100176;

2.北京新能源汽车股份有限公司, 北京 100176;

3. 澳汰尔工程软件(上海)有限公司, 上海 200436)

摘要: 最高输入转速和最大输入扭矩的逐渐提升给纯电动车减速器的润滑带来了非常大的挑战。为研究某减速器油液流动形态和功率损耗, 用 HyperMesh 软件进行前处理, 用基于 SPH 算法的粒子法求解器 nanoFluidX 对四种工况进行润滑仿真。后处理结果显示, 仿真结果与试验结果在搅油形态上具有较好的一致性, 从而验证了该方法的有效性; 时域平均流线图和时域平均油量分布图可以更直观的观测到润滑情况; 输出轴扭矩时间历程曲线表明随着油量的增多和输入转速的提升, 搅油带来的效率损失增多。

关键词: 纯电动车; 减速器; 润滑仿真; SPH

The Lubrication Simulation of Pure Electric Vehicle Gearbox Based on SPH

Zhao Qian¹, Yang Lianghui¹, Zhao Yonggang², Zhao Chunyan² & Liu Siqian³

1. Beijing New Energy Automotive Technology Innovation Center Co., Ltd.;

2. Beijing Electric Vehicle Co. Ltd.;

3. Altair Engineering Software (Shanghai) Co., Ltd.

Abstract: The gradual increase of maximum input speed and maximum input torque brings great challenge to the lubrication of pure electric vehicle gearbox. In order to study the flow pattern and power loss of the lubrication oil in a gearbox, the Hypermesh software is used for pretreatment, and the particle solver based on SPH algorithm nanoFluidX is used to simulate the lubrication of the four conditions. The results of post-processing show that the simulation results are in good agreement with the test results, and the validity of the method is verified. The time domain average flow graph and the time domain average oil distribution map can be more intuitively observed. The torque time history curve of the output shaft shows that with the increase of oil quantity and the input speed, the loss of efficiency is increased.

Key words: Pure electric vehicle; Gearbox; Lubrication simulation; SPH

前言

随着纯电动车动力性能逐渐提升,减速器的最高输入转速和最大输入扭矩逐渐提升。例如宝马 i3 减速器最高输入转速为 11400RPM, 博格华纳 3103 减速器为 14000 RPM, 而特斯拉 Model S 减速器甚至高达 16000 RPM, 这给减速器的润滑带来了非常大的挑战。如果润滑不良,轻则影响运动零件(齿轮、轴承和油封等)的传递效率,重则带来齿轮胶合、轴承烧蚀和油封老化等失效问题。在减速器开发阶段,为了评估润滑性能好坏,通常在铝制壳体上开观察窗口或者制作透明壳体,观察齿轮搅油的形态来做出主观评价。但是这样经常带来设计上的反复,造成开发周期长和费用非常高。

20 世纪 60 年代,计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)成为一门独立的学科。CFD 在齿轮润滑领域的应用主要体现在油液流动形态的预测和功率损耗的预测。国内外学者对齿轮箱润滑仿真已经开展了大量的研究工作。董春锋、陈黎卿、Lemfeld 等^[1-3]对齿轮箱油浴润滑和飞溅润滑的内部流场进行动态数值模拟,研究了这两种润滑方式的润滑效果;林银辉等^[4]仿真分析了变速器内部油轨的进出油状况,验证了油轨润滑系统设计的合理性;王延忠等^[5-6]对不同方位参数的进油口齿轮润滑过程进行了稳态计算,得到了进油口不同时刻的射流状态;Concli、Gorla、Seetharaman 等^[7-9]通过流场仿真计算了齿轮搅油引起的功率损失,并通过实验进行了验证;彭钱磊等^[10]提出了基于齿面移动的齿轮副流体域网格划分方法,并与单向切齿法、双向切齿法、分离法对比。曹寓^[11]等基于齿面移动法,利

用 Fluent 软件研究了齿轮喷油润滑时齿轮箱内两相流的分布情况。

然而,以有限体积法为代表的商业 CFD 软件(例如 Fluent, Star CCM+)在复杂流动中易出现网格畸变和扭曲现象,该问题严重影响计算精度,而网格的重构过程通常又异常复杂。由于无网格方法避免了复杂的网格相关操作,在这方面具有独特优势,因此自 20 世纪 90 年代以来被充分重视,光滑粒子动力学(smoothed particle hydrodynamics, SPH)是其中之一。SPH 方法的应用范围广阔,目前在国内外研究成果多集中于以下领域:天体物理学、爆炸与高速冲击科学、采矿工程、流体动力学等。本文基于无网格的 SPH 方法,利用 nanoFluidX 软件对某纯电动车减速器进行润滑仿真,并与试验结果做对比。

1 SPH 方法和 nanoFluidX 软件

简介

1.1 SPH 方法简介

SPH 方法采用拉格朗日方法描述流体运动。物理量跟随流体质点,而不是跟随静态空间坐标。使用拉格朗日形式的动量守恒方程(N-S 方程),去除对流项,使得方程更容易求解。可以把 SPH 想象成多体(小钢球)之间的相互作用,同时每个体(粒子)没有明显的尖锐边缘,如图 1 所示。

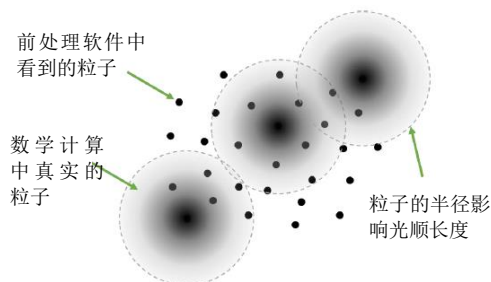


图 1 SPH 粒子相互作用关系

虽然看起来这些粒子是离散的。但是，在数值求解计算中它们是连续的（光顺）。如图2所示，主粒子的所有属性都可以通过下面的体积积分公式（1）表达。

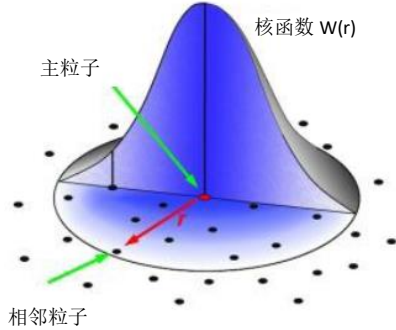


图2 核函数示意图

$$\bar{A}(\vec{r}) = \int A(\vec{r}') W(\vec{r} - \vec{r}', h) d\vec{r}' \approx \sum_b A(\vec{r}_b) V_b W(\vec{r} - \vec{r}_b, h) \quad (1)$$

式中： $\bar{A}(\vec{r})$ 表示主粒子的属性； $A(\vec{r}')$ 表示相邻粒子的属性； $W(\vec{r} - \vec{r}', h)$ 表示核函数； $\sum_b A(\vec{r}_b) V_b W(\vec{r} - \vec{r}_b, h)$ 表示积分的离散形式（下标 b 代表相邻粒子的编号），对相邻粒子的影响求和。

SPH 算法不需要任何人为因素的或者为了数值求解稳定的修正参数，所有的控制方程（流体力学守恒方程）都可以通过上述计算原理和拉格朗日方法变换得到。

因此，SPH 方法是一种精确的、与时间历程无关的、求解连续性方程的方法。可以描述很完美的平流问题。没有本质性的能量耗散，所有的耗散能量都是通过人为添加。例如，添加粘性项。精确求解质量、动量、角动量、能量和熵值，同时保证守恒。它可以确保粒子处于最小能量状态。求解物理量时使用质点坐标（拉格朗日），而不是向欧拉坐标一样在空间体内描述。

1.2 nanoFluidX 软件简介

nanoFluidX 是位于德国慕尼黑的 FluidDyna公司开发的一个基于粒子法（SPH

方法）的流体动力学仿真工具，2014年成为澳汰尔公司的合作伙伴。主要用于预测在复杂几何体中有复杂机械运动的流动，可以用于预测有旋转轴和齿轮的传动系统润滑并分析系统每个部件的力和力矩。使用GPU技术能够对真实的几何形状进行高性能仿真，和更笨重的CPU相比较，GPU计算提供了显著的性能优势和能源节约。采用SPH方法的 nanoFluidX 十分易于处理高密度比的多相流（例如水-空气），并不需要增加额外的计算工作量。流体界面是SPH方法自然得到的副产品，并不需要额外的分界面重构算法，因此节约了计算时间。

nanoFluidX 的操作流程很简单。不再需要传统意义下的网格，只要导入几何，选择单元并生成粒子。不需要更多时间做前处理和生成足够好的网格，如图3所示。其显著的优势体现在：快速的仿真计算方法以实现前期设计优化，更容易学习和实施工程应用，完全 GPU 算法大幅度缩减硬件成本。

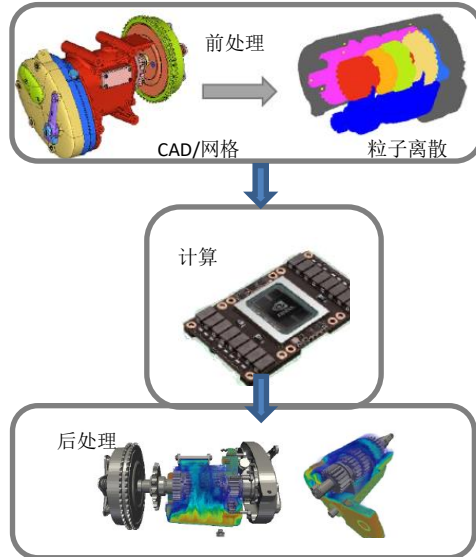


图3 nanoFluidX 的仿真流程

2 减速器结构和润滑试验

2.1 减速器结构

该单速比减速器采用两级平行轴斜齿轮，集成差速机构，如图4所示。减速器输入端通过花键和法兰与驱动电机连接，减速器输出端两端通过花键和半轴连接。减速器采用飞溅润滑，速比 8.28（第一级齿数比 26/69，第二级齿数比 25/78），最高输入转速 10000 RPM，最大输入扭矩 360Nm。



图4 减速器3D数模

2.2 润滑试验

为便于观察润滑油的搅油形态以及轴承和齿轮等处的润滑情况，采用透明壳体。减速器理论设计油量附近以0.1L为间隔，减速器输入轴以1000RPM为间隔从1000 RPM到最大转速进行运转，观察齿轮、轴承和油封润滑情况。



图5 减速器润滑试验

3 润滑仿真建模及结果分析

3.1 前处理

将减速器三维数模导入到HyperMesh软件中，在生成SPH粒子之前，需要对原始数模做一定程度的简化。为了确保减速器壳体的封闭性，将两输出端的端面封闭，并截断

输入轴伸出壳体外的部分；所有的油封和轴承外圈与壳体固定不动，轴承内圈及滚子与齿轮轴一起按相同转速转动；壳体部分只提取与内部流体接触的湿表面，如图6所示。

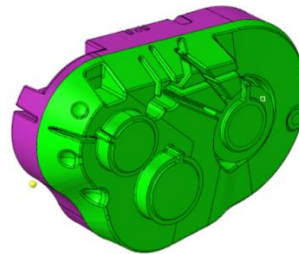


图6 提取的壳体湿表面

本次仿真采用的基于SPH算法的粒子法求解器nanoFluidX中有四种不同的粒子类型，分别为流体粒子FLUID，固定壁面粒子WALL，运动壁面粒子MOVINGWALL和流量监测粒子MASSFLOW。仿真计算中，把减速器壳体作为一个密闭的容器，即WALL类型的SPH粒子；壳体中包含三个不同转速的旋转齿轮轴，即MOVINGWALL类型的SPH粒子；只考虑润滑油单相流，建立FLUID类型的SPH粒子。仿真模型的切面如图7所示，下面橙色的为润滑油粒子，输入轴上的零件依靠第一级和第二级大齿轮搅油润滑。

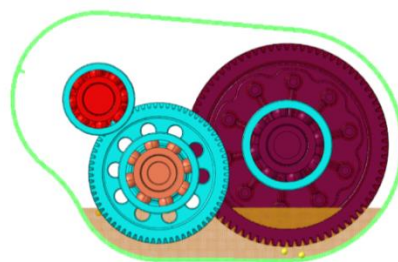


图7 仿真模型

粒子间距设为1mm，各主要部件的粒子数量统计如表1所示。一共计算四个工况，即油量1.2L、1.6L，输入轴转速分别为1000RPM和5000RPM。这四种工况的前处理流程基本一致，唯一的差别在于油量不同导

致润滑油粒子数量的不同。油量1.2L的两个转速对应的粒子总数为4792369，油量1.6L则为5218985。

表 1 粒子数量统计

部件	1.2L 油量下粒	1.6L 油量下粒
	子数 (个)	子数 (个)
壳体	1 623 140	1 623 140
齿轮、油封、轴	1 995 690	1 995 690
轴承等		
润滑油	1 173 539	1 600 155

3.2 计算设置和计算时间

根据输入轴的转速，可计算出中间轴和输出轴的转速。当输入轴转速 1000RPM 时，中间轴转速 376.8RPM，输出轴转速 120RPM；当输入轴转速 5000RPM 时，中间轴和输出轴的转速分别为 1884RPM 和 600RPM。

各仿真工况采用相同的求解器设置，包括考虑单相流；润滑油属性:密度为 847.2 kg/m^3 ，粘度为 $0.0251 \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$ ；采用 Free Surface 模型和表面张力模型。保证在整个仿真过程中输出轴转动 10 圈，当输入轴转速 1000RPM 时，计算物理时间设为 5 秒；输入轴转速 5000RPM 时设为 1 秒。各工况的计算规模相仿，采用相同的硬件资源（1.5 块 K80 显卡），每个工况都能在 2.5 天内完成计算。

3.3 后处理与计算结果分析

后处理采用的工具为开源软件 ParaView，可以从SPH粒子中获得和传统 CFD求解类似的结果。例如，流体外观形状、速度云图、切面图、流线图、矢量图、各变量的时间历程曲线、时域平均流场属性等。

首先，对各工况下的搅油形态进行仿真与试验的对比。如图8和图9所示，油量1.2L、转速1000RPM工况下，润滑油很难覆盖减速

器上部区域，特别是中间轴的上方只有极少量的润滑油；当转速提高至5000RPM时，减速器上部油量明显增多。

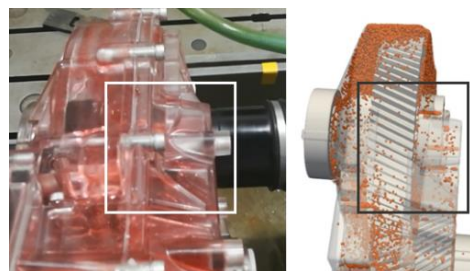


图 8 1.2L、1000RPM 仿真与试验对比

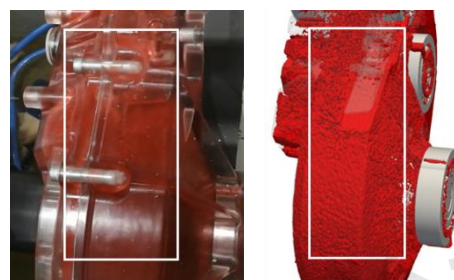


图 9 1.2L、5000RPM 仿真与试验对比

油量为 1.6L 时，如图 10 和图 11 所示，1000RPM 工况下润滑油的运动轨迹基本能覆盖减速器中传动部件所在的关键部位，包括轴承；当转速提高至 5000RPM 时，更多的润滑油从减速器下部被甩至上部，同时可观察到外壳加强筋的部分有积油现象。

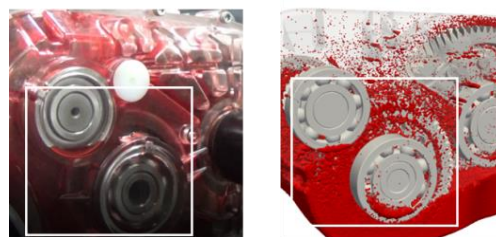


图 10 1.6L、1000RPM 仿真与试验对比

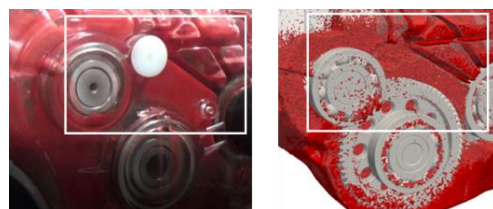


图 11 1.6L、5000RPM 仿真与试验对比

通过上述对比，可以看到仿真与试验结果具有较好的一致性，仿真得到的搅油形态

能在很大程度上捕捉到与试验相似的关键物理现象，为衡量不同油量与转速工况下的润滑效果提供客观而可靠的依据。

相比于试验测量，仿真还能提供更为丰富的时域平均流场信息，而这些信息对评估减速器的润滑设计起到了十分重要的作用。图 12 所示，通过对以速度着色的时域平均流线图的处理，可以直观地看到在稳定运行的状态下，减速器内部润滑油的运动轨迹以及速度分布。油量为 1.2L 时，低转速工况下，润滑油在输入轴及输出轴上部并未形成稳定的流动路径，速度最大的区域集中在中间轴和输出轴齿轮的下部，可以认为在初始状态下没有与润滑油直接接触的输入轴存在润滑不良的风险。同样的油量，在转速提升到 5000RPM 时，润滑油在减速器上方区域形成了稳定的涡流区域，输出轴齿轮的各个部位均被流线包裹，且流速较高，润滑效果有了明显改善。

如将转速同为 1000RPM，油量分别为 1.2L 和 1.6L 的两个工况进行对比，可以发现初始油位较高的时候，即使是 1000RPM 的低转速工况，润滑油的运动轨迹也基本能覆盖减速器上部，包括输入轴和输出轴的上端，这主要是通过输出轴和中间轴的转动与靠近减速器的两侧壁面共同作用起到的甩油效果，因此可以在两侧观察到较高的流速。油量 1.6L、转速 5000RPM 是这四个仿真工况中油润效果最佳的工况，密实的流线不仅包裹了所有的齿轮和转轴，而且穿过了中间轴和输出轴的轴承处，并且在这些区域都呈现出了较高的流速。

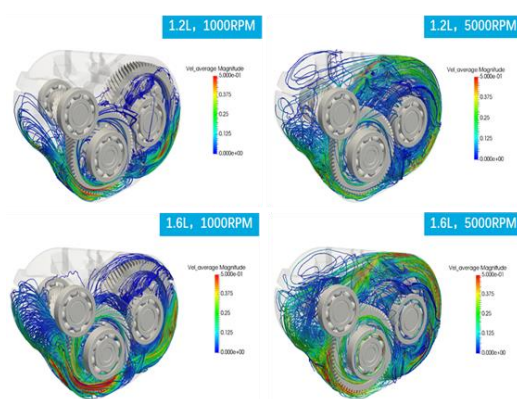


图 12 各工况的时域平均流线图

图 13 中统计的各工况下的时域平均油量分布是润滑情况的又一直观反应，其中色条的颜色深浅代表了润滑油粒子在这一位置出现的概率高低。当油量 1.2L、转速为 1000RPM 工况下，输入轴端的油粒子较少，在整个运行过程中起到的润滑作用比较有限，存在润滑不良的风险；而相同转速油量增大为 1.6L 时，整个减速器上半部的油粒子明显增多，特别是中间轴和输出轴之间的位置，润滑效果有显著提升。当油量 1.2L，转速为 5000RPM 时工况下，稳定运行时润滑油能基本覆盖整个减速器；相同转速油量增大为 1.6L 时，中间轴的齿轮和轴承处以及输入轴的润滑效果更佳，但有一部分润滑油聚集在壳体上半部分的加强筋中，这种局部积油的现象会对润滑油的循环使用造成一定程度的副作用，需要进一步改进壳体设计。

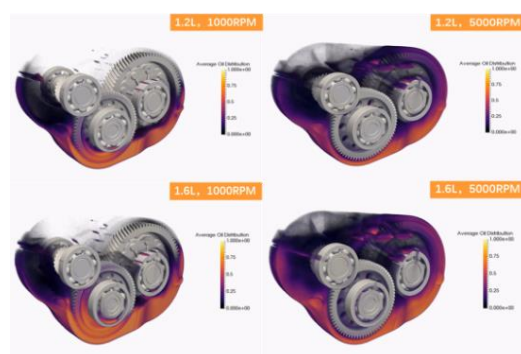
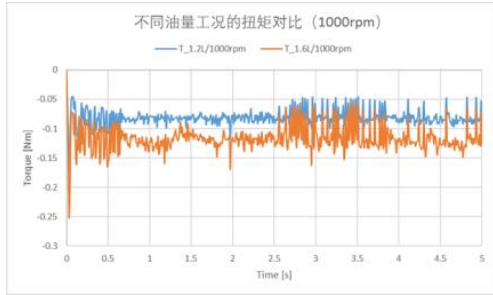
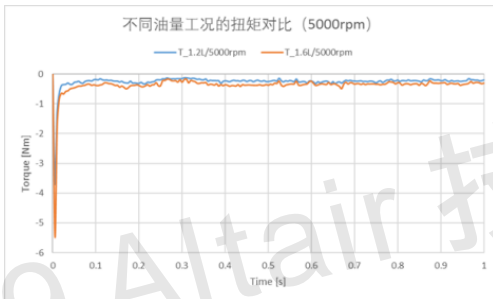


图 13 各工况的时域平均油量分布图

除了搅油形态, 仿真得到的输出轴扭矩是评估搅油功率损耗的一项重要定量分析指标。图 14 和图 15 对比了不同油量和转速工况下的输出轴扭矩随时间变化的曲线。可以看到, 计算经过了最初 20% 时间步的数值震荡后基本趋于平稳, 只在一个较小的区间内波动。



(a)



(b)

图 14 各工况下的输出轴扭矩时间历程

为了更可靠地对比, 选取了后 60% 的瞬态数据做时域平均, 最终得到了表 2 中的扭矩统计。输入轴转速相同的情况下, 油量从 1.2L 增加至 1.6L, 输出轴扭矩有将近 50% 的提升; 油量相同时, 输入轴转速从 1000RPM 上升至 5000RPM, 输出轴扭矩将近提高至原来的 2.75 倍。可见随着油量的增多和输入转速的提升, 搅油带来的效率损失增多。

表 2 不同工况下的输出轴时域平均扭矩

油量(L)	1000RPM 下平均	5000RPM 下平
	扭矩(Nm)	均扭矩(Nm)
1.2	-0.08	-0.22

1.6

-0.12

-0.33

4 结论

本文首先介绍了 SPH 方法和 nanoFluidX 软件, 然后阐述了某纯电动车的减速器结构和润滑试验。在此基础上重点对四种工况进行了润滑仿真, 得到以下结论:

(1) 从搅油形态上来看, 仿真与试验结果具有较好的一致性。仿真得到的搅油形态能在很大程度上捕捉到与试验相似的关键物理现象, 为衡量不同油量与转速工况下的润滑效果提供客观而可靠的依据。并且随着油量增多和输入转速提升, 润滑性能变好;

(2) 时域平均流线和时域平均油量分布图可以更直观的观测到润滑情况, 1.2L、1000RPM 工况下输入轴存在润滑不足的风险;

(3) 通过输出轴扭矩时间历程曲线, 可见随着油量的增多和输入转速的提升, 搅油带来的效率损失增多。

总之, 基于 SPH 方法的润滑仿真可以在设计阶段而不用等到样机阶段就可以评估润滑性能好坏, 从而节省设计周期和费用。例如可以评估合适的加油量 (加油量多容易导致传递效率低, 而加油量少则导致润滑不良); 还可以评估壳体内部挡油板和油道设计是否合理以及通气塞位置是否合理; 进一步还可以研究齿轮齿数、模数、齿宽、压力角等宏观参数对传递效率的影响。

5 参考文献

[1] 董春锋, 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] Lemfeld F, Frana K. Study of the geometrical model parameters for simplification of tooth system[J]. Journal of applied science in the thermodynamics and fluid mechanics, 2009, 3(2) : 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] 王延忠, 牛文韬, 唐文, 等. 喷油方位参数对航空直齿轮喷油润滑过程的影响[J]. 航空动力学报, 2015, 30(7) : 1606—1610.
- [6] 王延忠, 牛文韬, 唐文, 等. 航空直齿轮喷油润滑油气两相流分析[J]. 航空动力学报, 2013, 28(2) : 439—444.
- [7] Concli F, Gorla C, Della T A, et al. Windage power losses of ordinary gears: different CFD approaches aimed to the reduction of the computational effort [J]. Lubricants, 2014, 2(4) : 162—176.
- [8] Gorla C, Concli F, Stahl K, et al. CFD simulations of splash losses of a gearbox[J]. Advances in Tribology, 2012, 26(7) : 11—14.
- [9] Seetharaman S, Kahraman A, Moorhead M D, et al. Oil churning power losses of a gear pair: experiments and model validation[J]. Journal of tribology, 2009, 131(2) : 22—30.
- [10] 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验证 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(10) : 51 —56.
- [11] 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.