

基于 CFD 的某减速器飞溅润滑 仿真分析与验证

李玉哲¹, 艾永生¹, 刘卫真¹, 潘文斌¹, 胡玉梅²
(1. 中国航空发动机集团有限公司 湖南动力机械研究所
直升机传动技术重点实验室, 湖南 株洲 412002;
2. 重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

摘 要: 为评估飞溅润滑减速器的储油结构是否合理,基于计算流体力学方法,建立了包含机匣、螺旋锥齿轮等构件的某减速器飞溅润滑动态仿真模型,开展了气液两相流飞溅润滑流体仿真计算与分析,获得了减速器内部的滑油运动轨迹及分布云图。通过仿真分析可以发现:输入端油兜收集到的滑油量为 531 mL,大于输出端收集到的滑油量 65 mL;4 号油兜收集到的滑油量为 0 mL,结构设计存在不合理之处,并进行了飞溅润滑试验验证。仿真分析结果与试验结果的趋势一致,验证了仿真分析方法的准确性,为飞溅润滑减速器储油结构设计提供了指导。

关 键 词: 飞溅润滑减速器; 计算流体力学 (CFD); 流体仿真; 滑油分布; 飞溅润滑试验

中图分类号: V228.5; TH133.33 **文献标志码:** A

Splash lubrication simulation analysis and verification of a gearbox based on CFD

LI Yuzhe¹, AI Yongsheng¹, LIU Weizhen¹,
PAN Wenbin¹, HU Yumei²

(1. Science and Technology on Helicopter Transmission Laboratory,
Hunan Aviation Powerplant Research Institute,
Aero Engine Corporation of China, Zhuzhou Hunan 412002, China;
2. State Key Laboratory of Mechanical Transmission,
Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In order to evaluate whether the oil storage structure of splash lubricating gearbox was reasonable, a dynamic simulation model for the splash lubrication analysis of gearbox including gearbox housing, spiral bevel gear based on the computational fluid dynamics (CFD) method was established, and the splash lubrication fluid simulation calculation and analysis of gas-liquid two-phase flow were carried out, then the movement track and distribution cloud diagram of lubricating oil in gearbox were obtained. Through the simulation analysis, it was found that the amount of oil collected at input oil pocket was 531 mL, greater than the amount of oil collected at output oil pocket 65 mL, and the No. 4 oil pocket can't collect lubricating oil, so the design of No. 4 oil pocket was unreasonable. According to

收稿日期:2019-10-25

作者简介:李玉哲(1989—),女,工程师,硕士生,主要从事直升机传动系统设计及飞溅润滑仿真分析研究。

引用格式:李玉哲,艾永生,刘卫真,等.基于 CFD 的某减速器飞溅润滑仿真分析与验证[J].航空动力学报,2020,35(7):1482-1488.
LI Yuzhe, AI Yongsheng, LIU Weizhen, et al. Splash lubrication simulation analysis and verification of a gearbox based on CFD[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(7): 1482-1488.

the result of splash lubrication test, it shows that the trend of the simulation analysis result is consistent with the experimental result, which verifys the correctness of the simulation analysis method and provides a guidance for the design of oil storage structure of splash lubricating gearbox.

Key words: splash lubrication gearbox; computational fluid dynamics (CFD); fluid simulation; lubricating oil distribution; splash lubrication test

计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 是用一种采用离散化原理在电子计算机上模拟流体力学的仿真分析方法, 即在计算机上虚拟的开展流体运动试验^[1-2], 达到模拟减速器内部流体运动轨迹目的, 从而为减速器润滑结构设计及维护提供指导。

近几十年来, 随着流体力学及计算机技术的快速发展, CFD 方法被广泛运用于齿轮箱飞溅润滑研究。Kvist^[3]介绍了 CFD 方法应用于汽车减速箱搅油的理论依据, 并进行了初步的模拟分析。Farrall 等^[4]在发动机轴承中使用 CFD 数值分析方法追踪油滴的运动轨迹, 为轴承润滑分析提供了指导。Wayne^[5]采用网格优化技术对齿轮箱体内的滑油运动路径及速度进行了模拟及验证, 验证了动网格方法的有效性。Lemfeld 等^[6]用圆柱体简化替代齿轮, 利用多相流动态仿真分析方法虚拟了减速箱在不同工况下的飞溅润滑滑油实际运动轨迹, 为减速器的构型设计及润滑故障排查提供了分析手段。Jiang 等^[7]为研究某型直升机飞溅润滑中间减速器内部的油液分布, 建立了中减 CFD 数值计算模型, 并研究了螺旋锥齿轮传动性能与滑油导游管的影响。Liu 等^[8]应用粒子仿真分析法研究了某变速箱内部不同转速与温度下润滑油粒子的运动轨迹和姿态, 得到了转速与温度对滑油分布云图的影响规律。Peng 等^[9]采用 CFD 方法模拟了齿轮箱内滑油的动态飞溅过程, 得到了润滑油的实际运动轨迹, 设计了试验台观察实际工况下箱体内部的滑油油态, 结果表明该方法能够准确地预测准双曲面齿轮箱内滑油复杂多变的运动情况。Lin 等^[10]在具有双中间轴七档变速结构的减速器中应用动网格技术进行了润滑能力分析, 对减速器内部不同部位的润滑状态进行了具体分析。陈黎卿等^[11]采用高速相机记录油液运动的图片记录法对减速器飞溅润滑动态仿真分析结果进行了验证, 发现仿真的结果与高速相机捕获的试验结果基本吻合。姜义尧等^[12]基于 CFD 方法模拟分析了某减速器内的导油管对齿轮啮合部位及轴承润滑的影响, 并提出了优化

建议。张志彬^[13]研究了减速器内部滑油压力和速度的分布特征, 并分析了输入转速对流体域内部滑油分布的影响。孙凯等^[14]为改进某减速器储油装置的储油能力, 基于仿真分析软件, 以包含一对啮合的螺旋锥齿轮的减速器为研究对象采用 Remeshing 动网格技术开展了两相流飞溅润滑动态仿真分析, 验证了基于 Remeshing 动网格技术仿真减速器内部流体运动轨迹的可靠性。董春锋等^[15]采用专业的仿真分析软件建立了减速器油浴润滑模型, 仿真得到了齿轮输入转速以及油位高度对减速器各个部位润滑效果的影响规律。

与喷油润滑相比, 飞溅润滑减速器具有结构简单, 质量轻等特点, 因此广泛应用于国内外直升机传动系统中的中、尾减。目前飞溅润滑减速器的储油结构 (如油路、油兜与集油槽等) 大多凭经验, 设计过程中无分析手段, 往往在后期试验中发现设计的油兜不能有效收集到滑油, 造成该处的轴承温度偏高。但国内外的学者研究主要集中在汽车齿轮箱直齿轮传动的流场特性分析^[16], 而针对直升机传动系统中、尾减高速旋转齿轮的飞溅润滑研究甚少, 尤其在试验验证方面鲜有开展基于直升机实际运转工况的试验研究。因此, 本文以某一直升机的减速器为研究载体, 开展仿真分析与试验验证, 为今后飞溅润滑减速器储油结构设计及优化提供理论依据。

1 飞溅润滑减速器仿真分析理论

1.1 控制方程

直升机减速器流场数值计算是一个复杂的过程, 但仍遵循 Navier-Stokes 控制方程, 包括动量守恒方程、质量守恒方程和能量守恒方程^[17]。

动量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[u \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} \right] \quad (1)$$

质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

式中 ρ 为流体密度(kg/m^3); t 表示时间(s); u 、 v 、 w 为速度分量(m/s)。

由于只研究中减内流场的分布,不考虑温度的影响,因此忽略能量方程。

1.2 VOF 模型

VOF(volume of fluid) 模型是由 Hirt 和 Nichols^[18] 提出的,该模型是建立在固定的欧拉网格下的一种表面跟踪方法^[19],适用于仿真分析过程中涉及不相融界面的追踪捕捉问题。直升机减速器中存在油和空气两个不相融的界面,因此,采用 VOF 模型动态跟踪捕获油气交接面的变化较为准确。VOF 模型中每个控制单元内润滑油的体积分数之和空气的体积分数之和 1,即

$$\varphi_{\text{air}} + \varphi_{\text{oil}} = 1 \quad (3)$$

式中 φ_{air} 表示单元中空气的体积分数; φ_{oil} 表示单元中润滑油的体积分数。当 $\varphi_{\text{air}}=0$ 表示该单元中只含有润滑油;当 $\varphi_{\text{air}}=1$ 表示该单元中只含有空气;当 $0<\varphi_{\text{air}}<1$ 表示该单元既含有空气又含有润滑油。

直升机减速器工作过程中齿轮高速旋转,导致减速器内润滑油-空气不相融界面的运动轨迹复杂多变,跟踪捕获较为困难,因此选择 VOF 模型进行计算。

1.3 湍流模型

RNG(re-normalization group) k - ϵ 模型自从被 Spalding 和 Launder 提出后,迅速成为了一种具有代表性的湍流模型,在工程项目中得到了广泛使用的^[20]。RNG k - ϵ 模型可以较好的模拟复杂模型内多相流体的剪切及旋涡运动。多工况变姿态下直升机减速器飞溅润滑内部流场空间中的油气两相流流动非常紊乱,湍流特征较为明显,为了尽可能准确地分析某一姿态下直升机减速器内部润滑油的实际分布状态,因此采用 RNG k - ϵ 模型开展研究,关于参数 ϵ 和 k 的方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_\epsilon \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_m + S_k \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\alpha_\epsilon \mu_\epsilon) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \\ C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} [(G_k + C_{3\epsilon} G_b)] - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon + S_\epsilon \end{aligned} \quad (5)$$

式中 G_k 、 G_b 分别表示速度梯度、浮力引发的湍流动能, Y_m 表示由扩散引发的波动, C_1 、 C_2 、 C_3 是常数, α_k 和 α_ϵ 是 k 方程和 ϵ 的有效湍流普朗特数的倒数^[12,14]。

1.4 动网格技术

动网格采用局部重构法可依据齿轮的旋转转动自适应的调节流体域内的网格并再次重构。研究中的直升机减速器模型采用三角形-四面体网格,各个节点之间的连接方式弹簧相似,能实现拉伸自由。弹簧力的计算公式^[21]为

$$F_i = \sum_j^{n_i} k_{ij} (\Delta x_j - \Delta x_i) \quad (6)$$

式中 Δx_j 与 Δx_i 分别为节点 j 与节点 i 的位移(m); n_i 为与节点 i 相连的节点数量; k_{ij} 为弹簧刚度(N/m)。

由于直升机减速器内部齿轮运动过程中流场运动轨迹复杂多样,为了达到精确模拟直升机减速器内部流场的目的,故采用更新及重构性较好的动网格技术。

1.5 飞溅润滑减速器仿真分析流程

根据飞溅润滑减速器仿真分析方法的原理及研制需求,制定了如图 1 所示的技术路线,按照该技术路线以某型直升机减速器为例进行了案例分析。

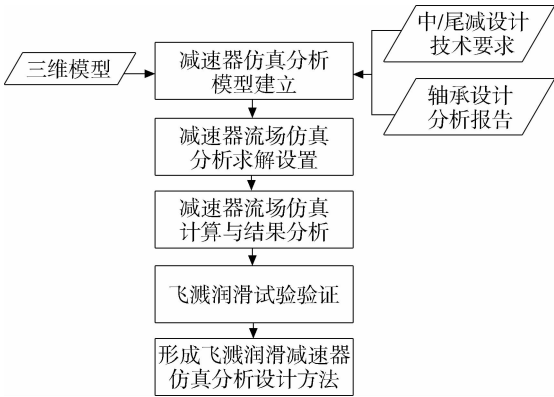


图 1 技术路线

Fig. 1 Technology roadmap

2 飞溅润滑减速器仿真模型建立

直升机飞溅润滑减速器通过齿轮副的高速旋转运动将机匣底部的油池搅起,利用齿轮的离心力把润滑油甩至齿轮啮合处进行润滑,其中一部分甩起的航空滑油沿机匣及输入、输出端盖内壁运动到输入、输出端盖上的油兜处,最后通过各油

兜底部的油孔流入轴承内圈达到润滑轴承滚子延长轴承使用寿命的目的。

2.1 模型处理

以某型直升机的减速器为分析对象,其主要结构包括主机匣、轴承、输入轴承端盖、一对齿轮、输出轴承端盖、法兰盘等。为了简化计算提高计算速度,仿真建模只保留对飞溅润滑过程影响较大的部位,而忽略其他结构,简化后的模型如图 2 所示。

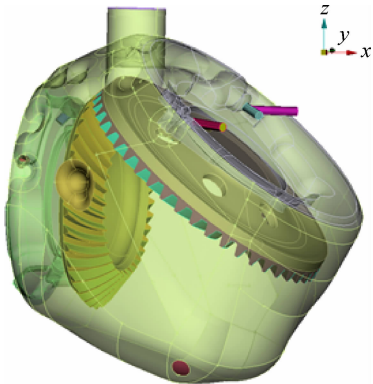


图 2 简化后的仿真模型
Fig. 2 Simplified simulation model

2.2 网格划分

直升机减速器齿轮转速较高,齿轮啮合处的流体域变形复杂,经常出现发散、负体积报错,为避免该现象对流体域内部的齿轮啮合区、油兜处的网格进行局部细化,最后整个流体域的初始网格数为 130 万左右,网格划分后飞溅润滑减速器仿真分析模型对称面的网格如图 3 所示。

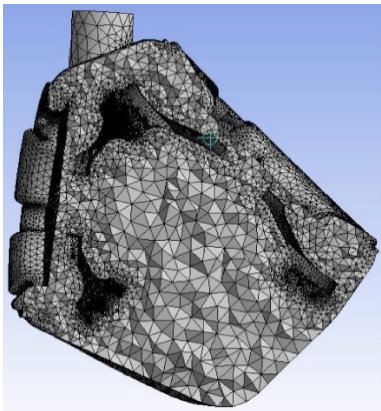


图 3 模型网格划分后的效果图
Fig. 3 Rendering of the model mesh diagram

2.3 仿真设置

结合某型直升机减速器的实际工况进行设

置:输入齿轮的转速为 5 000 r/min,润滑油密度为 875.15 kg/cm³,初始油液面定义在最大油位标线处。飞溅润滑减速器齿轮转速较高,导致内部流场运动轨迹复杂,捕捉连续的油液面较为困难,为了能捕捉到较为连续、细腻、不发散的油液面,研究中采用 Coupled 算法,该算法敛散特征明显、不易发散。同时,设置机匣及输入、输出端盖内表面为固定壁面,齿轮副外表面为运动边界。设置完毕后即可在 Fluent 中进行计算。

3 飞溅润滑减速器仿真结果分析

3.1 减速器内部的滑油运动轨迹

从流线图(图 4)中可以清楚地看出,机匣内液面(绿色)起伏波动较大,整个流体空间分布着大量杂乱的流线,这是由于齿轮的高速旋转作用导致齿轮周围几乎没有流线分布,而是分布于靠近机匣及端盖壁面位置。依据仿真结果进行分析,如图 4 中滑油的流线图及图 5 中的滑油流态图,可以发现 5 000 r/min 转速下多数润滑油的流动方向,润滑油由轮齿逐步飞离,运动至机匣及端盖壁面。

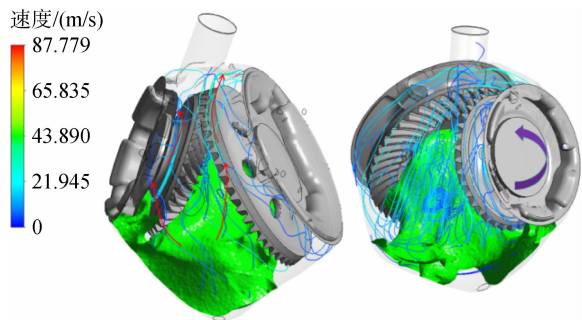


图 4 箱体内部滑油流线图
Fig. 4 Oil velocity streamline diagram in gearbox

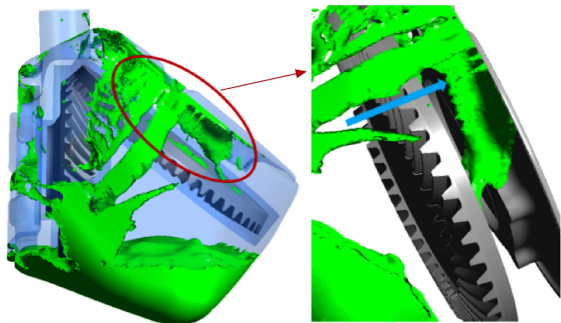


图 5 箱体内部滑油流态图
Fig. 5 Oil flow state diagram in gearbox

由图 4、图 5 可以发现顺着齿轮旋转方向,在滑油被搅起一侧,油液流线沿着红色箭头向前运动;而在锥齿轮啮出一侧,大量流线堆积,形成较大的涡流区。

3.2 储油结构(油兜)处的油气比例分布

油气比例分布图是一种表征流体域内部滑油实际分布情况的方法,油气比例代表流体域网格内润滑油所占的比例,油气比例越高表示该处的润滑油越多,润滑效果越佳。当油气比例为 1 时,表示该处流体域内全部是润滑油;当油气比例为 0 时,表示该处流体域内全部是空气。

对仿真结果进行处理,得到 4 个油兜处的油气比例分布云图,如图 6 和图 7 所示。可发现,输入端 1、2 号油兜处的油气比例分布大于输出端 3、4 号油兜处的油气比例,输入端油兜收集到的滑油量为 531 mL,大于输出端收集到的滑油量 65 mL;输出端 4 号油兜及油管处的油气比例近乎为

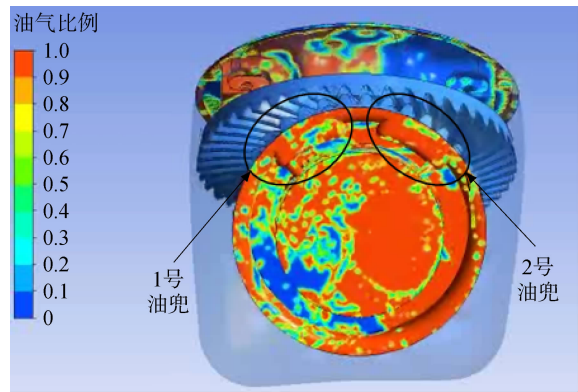


图 6 输入端 1、2 号油兜的油气比例分布
Fig. 6 Distribution of oil and gas ratio in input oil pocket 1 and 2

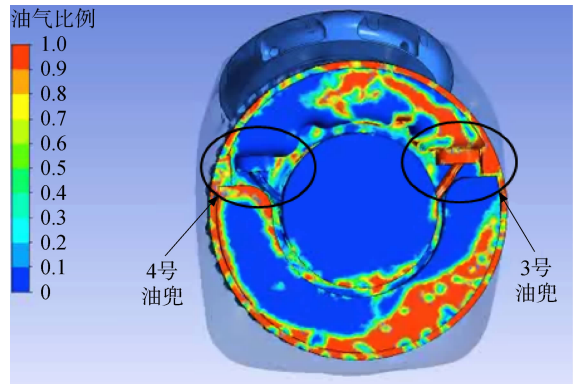


图 7 输出端 3、4 号油兜的油气比例分布
Fig. 7 Distribution of oil and gas ratio in output oil pocket 3 and 4

0,表示该处几乎无法收集到滑油,将会导致输出端轴承温度偏高,造成轴承失效。

对油兜 4 处的速度矢量图进行分析(如图 8),可以发现油兜 4 处的润滑油速度矢量一直指向前方,并且 4 号油兜对应的油管处出现回流现象,这是因为齿轮高速转动带动减速器内部的气流运动,在油兜 4 处形成低压区,造成外界大气压远大于内部气压,产生空气回流现象,以上原因导致该处油兜结构不能储油。

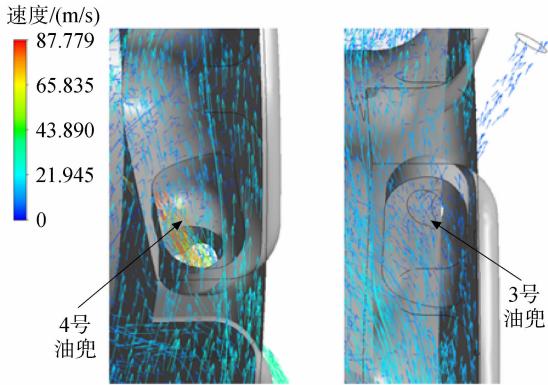


图 8 输出端 3、4 号油兜处的速度矢量图
Fig. 8 Velocity vector of output oil pocket 3 and 4

4 飞溅润滑试验验证与分析

为验证仿真分析方法的准确性,设计并开展了飞溅润滑集油试验。试验方案为:对中间减速器输入、输出端盖等零件进行改制,将油兜流向轴承的进油口堵住后重新开孔(保持斜向下),再用管接头和导油管与该孔连接引出,达到在减速器外部收集滑油的目的,改制后的减速器如图 9 所示。

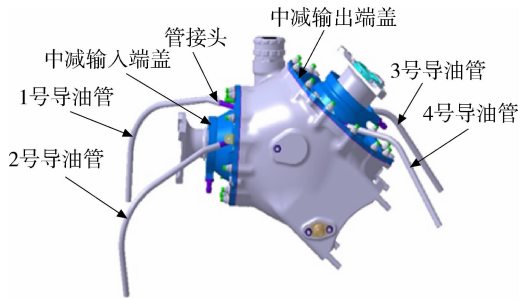


图 9 试验件示意图
Fig. 9 Schematic diagram of test piece

按照试验方案装配的试验装置如图 10(a),在此装置上按照某型直升机减速器的实际工况在车台开展了飞溅润滑集油试验,同一工况同一时

间内各个储油结构(油兜)处的接油量如图 10(b)所示。

由图 10 中可以明显的观察出输入端 1、2 号油兜及导油管接到的滑油量大于输出端 3、4 号油兜及导油管接到的滑油量,且 4 号油兜未收集到滑油,后续应该进行结构优化,由此可以看出仿真结果与试验结果趋势一致,验证了仿真分析方法的准确性。

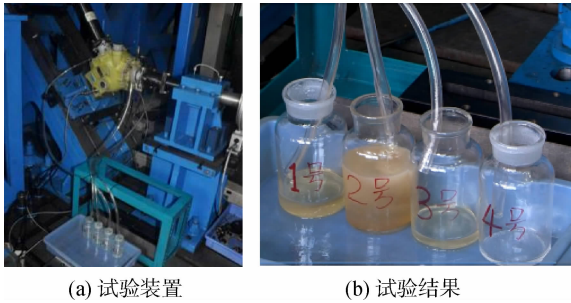


图 10 集油试验及试验结果

Fig. 10 Oil collecting test d and results

5 结 论

1) 本文建立了某型直升机减速器的飞溅润滑动态仿真模型,基于 CFD 开展了气液两相流飞溅润滑仿真分析,获得了减速器内部的滑油运动轨迹及分布情况,通过仿真分析可以发现,输入端油兜收集到的滑油量为 531 mL,大于输出端收集到的滑油量 65 mL;4 号油兜收集到的滑油量为 0 mL,后续需进行结构优化。

2) 通过飞溅润滑集油试验,验证了 CFD 仿真分析方法的准确性,形成了飞溅润滑减速器仿真分析设计方法,目前已用于两机重大专项某型号减速器内部流场分析及储油结构的集油能力评估。

3) 本文结合某型直升机的实际工况开展了飞溅润滑减速器仿真分析及试验验证,为在研型号中飞溅润滑减速器储油结构优化及后续自主设计飞溅润滑减速器储油结构提供了指导。

参考文献:

[1] 孙丽,黄少青,仲峻峰. 基于 FLUENT 的多回路泵流场数值模拟[J]. 制造技术与机床,2010,16(1):72-73.
SUN Li, HUANG Shaoqing, ZHONG Junfeng. Numerical simulation of flow field of multi-circuit pump based on FLUENT[J]. Manufacturing Technology and Machine-Tool,2010,16(1):72-73. (in Chinese)
[2] 张永学,李振林. 流体机械内部流动数值模拟方法综述

[J]. 流体机械,2006,34(7):34-38.
ZHANG Yongxue, LI Zhenlin. Summary of numerical simulation methods for flow in fluid machinery[J]. Fluid Machinery,2006,34(7):34-38. (in Chinese)
[3] KVIST T. Splash lubrication simulation using CFD[J]. Delivering Drive Line Technologies,2011,11(4):1-17.
[4] FARRALL M, SIMMONS K, HIBBERD S, et al. A numerical model for oil film flow in an aeroengine bearing chamber and comparison to experimental data[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power,2006,128(1):111-117.
[5] WAYNE S. CFD investigation of gear pump mixing using deforming/agglomerating mesh[J]. Journal of Fluids Engineering,2007,129(4):476-484.
[6] LEMFELD F, FRANA K. Numerical simulations of unsteady oil flows in the gear-boxes[J]. Journal of Applied Science in the Thermodynamics and Fluid Mechanics, 2007,1(1):1-5.
[7] JIANG Yiyao, HU Xiaozhou, HONG Shunjun, et al. Influences of an oil guide device on splash lubrication performance in a spiral bevel gearbox[J]. Tribology International, 2019,136(2):155-164.
[8] LIU H, ARFAOUI G, STANIC M, et al. Numerical modelling of oil distribution and churning gear power losses of gearboxes by smoothed particle hydrodynamics[J]. Engineering Tribology,2019,233(1):74-86.
[9] PENG Q L, GUI L J, FAN Z J. Numerical and experimental investigation of splashing oil flow in a hypoid gearbox [J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics,2018,12(1):324-333.
[10] LIN Yinhui, HU Zhihua. Research of flow field simulation for lubrication system and effect evaluation on a 7-speed dual clutch transmission[J]. Lecture Notes in Electrical Engineering,2013,195(3):285-298.
[11] 陈黎卿,张栋,陈无畏. 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.
CHEN Liqing, ZHANG Dong, CHEN Wuwei. Numerical simulation and test on two-phase flow inside shell of transfer case based on fluid-structure interaction[J]. Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014,30(4):54-61. (in Chinese)
[12] 姜义尧,胡小舟,孙凯. 某型直升机中减速器飞溅润滑流场特性分析[J]. 航空动力学报,2018,33(12):3032-3040.
JIANG Yiyao, HU Xiaozhou, SUN Kai. Analysis of flow field characteristics of medium reducer with splash lubrication in a certain helicopter[J]. Journal of Aerospace Power, 2018,33(12):3032-3040. (in Chinese)
[13] 张志彬. 机车齿轮箱温度及压力场仿真研究[D]. 成都:西南交通大学,2011.
ZHANG Zhibin. Simulation study on temperature and pressure field of locomotive gear box[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2011. (in Chinese)
[14] 孙凯,刘少军,胡小舟. 基于动网格的中减速器飞溅润滑内

部流场分析[J]. 润滑与密封, 2017, 42(8): 131-134.

SUN Kai, LIU Shaojun, HU Xiaozhou. Analysis on interal flow field of middle reducer splash lubrication based on dynamic mesh[J]. Lubrication of Engineering, 2017, 42(8): 131-134. (in Chinese)

[15] 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, 2011, 24(2): 17-22.

DONG Chunfeng, LIN Tengjiao, HE Zeyin. Numerical simulation of flow field in the gearbox based on moving mesh[J]. Mechanical Research and Application, 2011, 24(2): 17-22. (in Chinese)

[16] 刘杰, 刘世军, 徐文博, 等. 高速列车齿轮箱润滑性能优化与热平衡温度分析[J]. 机械传动, 2017, 36(4): 99-104.

LIU Jie, LIU Shijun, XU Wenbo, et al. Lubricant performance optimization and thermal balance temperature analysis of high-speed train gearbox[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2017, 36(4): 99-104. (in Chinese)

[17] ANDERSON J D. Computational fluid dynamics: the basics with applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.

[18] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. Journal of Computational Physics, 1981, 39(1): 201-225.

[19] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2017.

[20] BARBER J R. The distribution of heat between sliding surfaces [J]. Journal Mechanical Engineering Science, 1966, 9(5): 351-354.

[21] BECKER K M. Measurements of convective heat transfer from a horizontal cylinder rotating in a tank of water[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1963, 6(12): 1053-1062.

(编辑: 王碧琚)