

# 喷油方位参数对航空直齿轮喷油润滑过程的影响

王延忠<sup>1</sup>, 牛文韬<sup>1</sup>, 唐文<sup>1</sup>, 郭梅<sup>2</sup>, 李国权<sup>2</sup>

- (1. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191;
2. 中国航空工业集团公司 沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)

**摘 要:** 通过对航空直齿轮喷油润滑过程的深入分析,对影响齿轮啮合点润滑初始条件的喷油方位参数进行了系统的定义,并在此基础上建立了喷油润滑过程的计算流体动力学(CFD)模型,分别对喷油角度、喷油点位置以及喷油距离3个喷油方位参数的喷油润滑过程进行了计算,得到了齿轮不同啮合瞬时的射流状态,并对不同喷油方位参数下齿轮啮合过程中接触点入口处的油气率与气液总压变化规律进行了比较.结果表明:当采用啮入侧喷油润滑时,为了得到更好的润滑效果,应该使喷嘴向主动轮偏离一个小的角度,同时使喷油点位置向啮入侧偏离,而对于喷油距离,则应视结构、工况综合考虑而定,但并不是一般认为的越近越好.

**关键词:** 喷油角度; 喷油点位置; 喷油距离; 计算流体动力学; 油气率; 气液总压

**中图分类号:** V232.8

**文献标志码:** A

## Influence of spray orientation parameters on spray lubrication process of aero spur gears

WANG Yan-zhong<sup>1</sup>, NIU Wen-tao<sup>1</sup>, TANG Wen<sup>1</sup>,  
GUO-Mei<sup>2</sup>, LI Guo-quan<sup>2</sup>

- (1. School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;
2. Shenyang Engine Design and Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110015, China)

**Abstract:** Spray orientation parameters influencing lubrication initial conditions of gear meshing point were systematic defined through the analysis of spray lubrication process of aero spur gears, then the computational fluid dynamics (CFD) method of spray lubrication process was established. Three kinds of spray parameter including spray angle, spray point position and spray distance were calculated, jet states were obtained with different meshing instantaneous of gears. The varying rules of the oil/air ratio and oil/air total pressure at the entrance of contact point were compared in the meshing process under different spray parameters. Result show that, nozzle should offset a small angle to driving wheel when spray lubrication using engaging-in side in order to get better lubricating effect, and spray point position should offset engaging-in side, spray distance should take into account the structure, working condition, not general idea that the closer the better.

**收稿日期:** 2014-02-28

**基金项目:** 国家自然科学基金(51275020); 预研基金; 国家高技术研究发展计划(SS2012AA040104)

**作者简介:** 王延忠(1963—),男,辽宁沈阳人,教授、博士生导师,博士,主要从事传动摩擦学理论与应用技术、先进精密传动加工技术、空间啮合曲面数字加工理论和技术等方面研究工作。

**Key words:** spray angle; spray point position; spray distance;  
computational fluid dynamics; oil/air ratio; oil/air total pressure

航空齿轮工作在高速工况下,主要采用喷油方式对其进行润滑<sup>[1]</sup>.由于齿轮在啮合过程中两齿面的啮合间隙非常小,同时高速旋转的齿轮会对润滑油射流产生冲击与激荡作用,阻挡润滑油射流进入啮合区,而导致高速重载航空齿轮啮合区处于乏油或无油润滑状态<sup>[2-5]</sup>,极大地降低了系统工作的可靠性与寿命.

喷油方位参数对润滑油射流能否直接进入齿轮啮合区有着直接影响,在传统喷油润滑的设计中,往往将喷油嘴设计在正对齿轮啮合区,沿两齿轮分度圆切点的公切线方向,喷油嘴与啮合点距离等参数也主要依靠经验进行设计,缺乏对喷油润滑方式以及喷油润滑机理的深入研究,喷油润滑效果不好.

本文针对喷油润滑特点,利用先进的计算流体力学理论与方法,建立航空直齿轮(下文简称齿轮)喷油润滑分析模型,深入分析齿轮喷油润滑过程,研究喷油方位参数对喷油效果的影响,指导喷油方位参数设计,为现代高性能飞机与发动机齿轮传动系统的喷油润滑系统设计制造提供依据.

## 1 齿轮喷油方位参数的定义

一对轮齿从进入啮合到退出啮合,要经历双齿-单齿-双齿啮合3个阶段<sup>[6]</sup>,在喷油润滑方式下,不同阶段的润滑条件是不同的,以啮入侧喷油润滑为例,前两个阶段即一对轮齿开始进入啮合经历双齿-单齿的过程中,润滑油射流能够通过齿轮上方啮合的间隙射入或流入到啮合点,但随着齿轮的转动,啮合点上方的间隙越来越小,能够流入啮合点的润滑油越来越少;第3个阶段即下一对轮齿开始进入啮合,润滑油被下一对轮齿阻挡,无法直接进入啮合区.

对于前两个啮合阶段,应该选择合理的喷油方位,使得射入啮合点的润滑油尽可能多,对于第3个啮合阶段,啮合点主要依靠吸附在齿面的润滑油及环境中的油雾进行润滑<sup>[7-9]</sup>.结合对喷油润滑过程的分析,定义喷油方位参数为喷油角度、喷油点位置以及喷油距离.

### 1) 喷油角度

喷油角度为喷油嘴喷孔与两齿轮分度圆切点公切线的夹角,如图1所示,图中1,2,3,4,5为

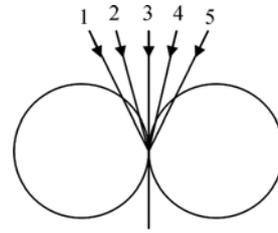


图1 不同喷油角度

Fig. 1 Different spray angles

个不同的喷油角度.

### 2) 喷油点位置

喷油点为喷油孔所在直线与两齿轮分度圆切点公切线的交点,如图2所示,图中1,2,3,4,5为同一喷油角度下不同的喷油点位置.

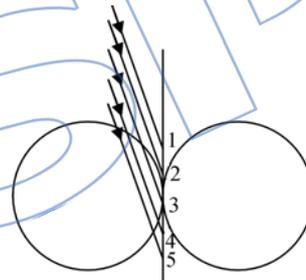


图2 不同喷油点位置

Fig. 2 Different spray point positions

### 3) 喷油距离

喷油距离为喷油嘴出口到喷油点之间的距离,如图3中的喷油距离为 $d$ .

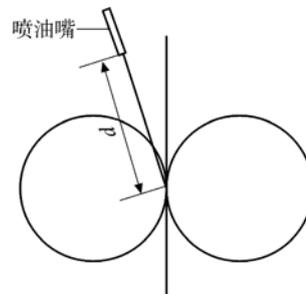


图3 不同喷油距离

Fig. 3 Different spray distances

## 2 齿轮喷油润滑过程计算模型

在齿轮尺寸、结构、工况等参数给定的条件下,能够达到接触点的多相流体的油气率与气液

总压强(文中简称气液总压)定了轮齿接触点的润滑状态<sup>[10-12]</sup>. 建立齿轮喷油润滑过程计算模型, 计算啮合点附近的油气率与气液总压.

### 2.1 数学模型

采用欧拉多相流<sup>[13-15]</sup>模型对喷油润滑下的动态气液多相流进行数学建模, 在模型中假设气液两相均匀混合, 采用均相流法, 不考虑重力影响, 并且忽略喷油润滑过程中的传热与化学反应.

模型控制方程如下:

1) 体积率归一方程

$$\sum_{\alpha=1}^N r_{\alpha} = 1 \quad (1)$$

式中  $\alpha$  为流体相, 此处为润滑油与空气,  $r_{\alpha}$  为体积率,  $N$  为相数, 模型中为 2.

2) 连续方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (2)$$

式中密度  $\rho = \sum_{\alpha=1}^N r_{\alpha} \rho_{\alpha}$ ,  $\rho_{\alpha}$  为  $\alpha$  相的密度,  $\mathbf{U}$  为流体速度.

3) 动量守恒方程(Navier-Stokes 方程)

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \boldsymbol{\tau} + \mathbf{S}_m \quad (3)$$

式中  $p$  为压强,  $\mathbf{S}_m$  为外部体积力, 在此为零,  $\boldsymbol{\tau}$  为应力张量.

$$\boldsymbol{\tau} = \mu \left[ \nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \mathbf{U} \right] \quad (4)$$

式中  $\mu$  为流体黏度.

4) 湍流模型

综合考虑模型的计算效率、鲁棒性以及准确度, 选用目前运用最为普遍与成功的标准  $k-\epsilon$  模型<sup>[16-17]</sup>, 湍流黏度为

$$\mu_t = C_{\mu} \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (5)$$

式中  $C_{\mu}$  为模型常数, 此处取 0.09,  $k$  为湍流动能,  $\epsilon$  为其耗散率.

### 2.2 三维 CFD 模型

在一对轮齿的一次啮合过程中, 喷油射流的状态随着齿轮的转动不断变化, 当喷油嘴喷出的润滑油射流速度大于齿轮的线速度时, 对于轮齿啮合过程的某一瞬时, 可以将其作为一个准稳态过程<sup>[18]</sup>. 将轮齿的啮合过程看成很多个准稳态的组合, 能够得到轮齿啮合过程中任意时刻喷油气液多相射流的状态.

首先在三维建模软件中建立一对啮合的齿轮

模型, 由于计算的是喷油润滑过程中射流的变化与状态, 运用布尔运算建立计算流体域, 将齿轮转过一个小的角度, 运用同样方法得到各个啮合瞬时的流体域, 如图 4 所示为啮合过程中的两个不同啮合瞬时. 模型中两齿轮的参数与尺寸相同: 齿轮模数  $m=4$ , 压力角  $\alpha_p=20^\circ$ , 分度圆半径  $R=100 \text{ mm}$ , 齿厚  $l=2 \text{ mm}$ .



图 4 流体域三维模型

Fig. 4 Three-dimensional model of fluid domain

利用网格划分软件 ICEM 对三维模型进行分网, 对啮合点附近以及喷油孔处小尺寸部位设置网格加密, 网格采用非结构四面体网格, 划分后的网格总数达到 200 万. 将划分好的网格模型导入软件 CFX 前处理模块 CFX-Pre 中, 设置喷油嘴入口速度、齿轮转速以及空气环境等边界条件, 选择算法与求解器, 设置计算步长、迭代次数以及收敛条件, 运行 CFX-Solver 求解, 求解完成后在后处理软件 CFX-Post 中查看计算结果.

### 3 喷油角度计算与分析

建立如图 1 所示不同喷油角度的计算模型, 图 1 中编号 1, 2, 3, 4, 5 的喷油角度分别为  $-5^\circ$ ,  $-2.5^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $2.5^\circ$  以及  $5^\circ$ , 如图 5 所示, 对每一个喷油角度一对轮齿进入啮合到其下一对轮齿进入啮合的全过程进行计算, 将此过程分为 10 个啮合瞬时状态.

设置计算域为两相流体计算域, 其中液相润滑油黏度为  $0.01 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 、密度为  $959 \text{ kg/m}^3$ , 气相为常温下的空气; 喷油嘴入口速度为  $50 \text{ m/s}$ , 设置齿

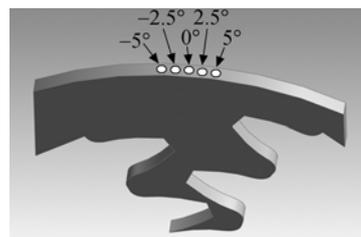


图 5 不同喷油角度示意图

Fig. 5 Schematic diagram of different spray angles

轮齿面为无滑移转动壁面,齿轮转速为 50 r/s,其余边界面设置为开放式边界条件;油气率为零,相对压强为零.设置求解器的收敛判据为方均根残差(RMS)为  $10^{-4}$ .

运行求解器,得到计算结果如图 6 所示.

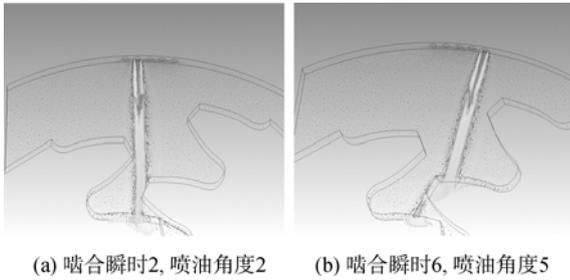
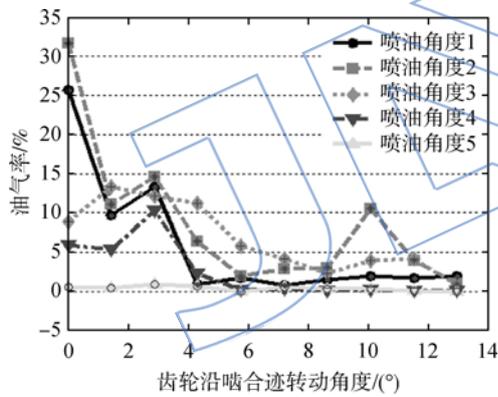


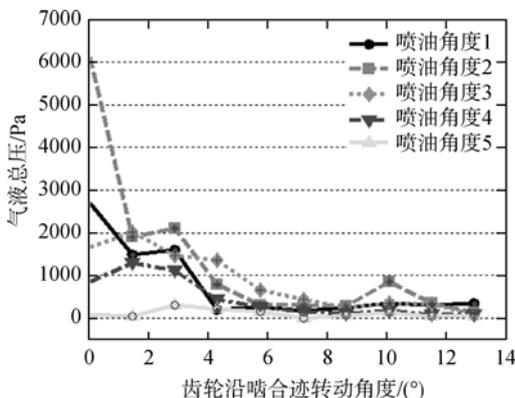
图 6 不同喷油角度计算结果

Fig. 6 Calculation result of different spray angles

在距各个啮合点 Y 坐标为 -0.1 mm 处做一个平行于啮合迹的平面,以此面上的油气率与气液总压对不同喷油角度的喷油润滑过程进行比较.如图 7 所示.



(a) 啮合过程的油气率



(b) 啮合过程的气液总压

图 7 不同喷油角度比较

Fig. 7 Comparison of different spray angles

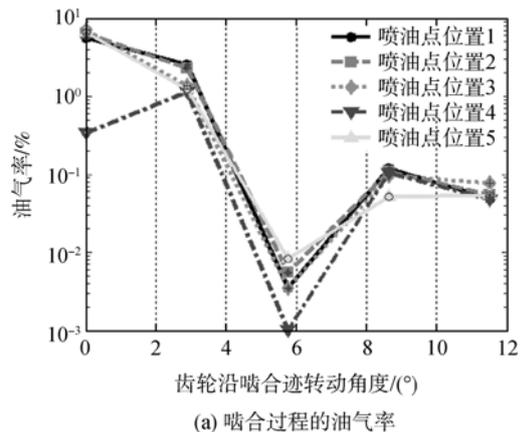
由图 7 可以看出,随着齿轮的啮合,总体呈现下降趋势,但过程中也有个别点出现升高,这是因为此瞬时射流运动方向与齿面切向方向达到一致,对射流的阻挡作用减弱,此时润滑油较易进入啮合区,使得此时啮合区入口的润滑油油气率与气液总压较高.喷油角度 2 在啮合过程前后段中的油气率与气液总压较高,喷油角度 3 在啮合过程的中间半段中油气率与气液总压较大,这是因为啮合过程的前后段两齿面所形成的间隙利于喷油角度 2 喷出射流的流动,啮合过程的中段形成的间隙有利于喷油角度 3 喷出射流的流动.喷油角度 5 在啮合全过程中的油气率与气液总压最小.由此可以得到,按照传统经验方法沿分度圆公切线方向布置喷油嘴的设计并不能获得最佳的喷油润滑效果,喷油嘴向主动轮偏离一个小的角度能够获得较好的喷油效果.对计算结果进行综合比较,喷油角度 2 的平均油气率与气液总压最高,分别为 8.7123% 与 1310.742 Pa,故喷油嘴应该向主动轮方向偏离  $2.5^\circ$ ,此时喷油效果最佳.

### 4 喷油点位置计算与分析

建立如图 2 所示不同的喷油点位置计算模型,图 2 中的喷油点位置 1,2,3,4,5 分别在两齿轮分度圆切点公切线上距切点 5,2.5,0,-2.5,-5 mm 处,喷油角度相同,均为  $-2.5^\circ$ ,对每一个喷油点位置一对轮齿进入啮合到其下一对轮齿进入啮合的全过程进行计算.齿轮工况、喷油边界条件与喷油角度计算相同.

运行计算并绘制不同喷油位置下啮合过程的油气率与气液总压变化.5 个不同的喷油点位置喷油润滑过程中的油气率与气液总压如图 8 所示,图中纵坐标为对数坐标.

由图 8 可以看出,5 个喷油点位置的油气率与气液总压随着齿轮的啮合都呈现下降趋势.在



(a) 啮合过程的油气率

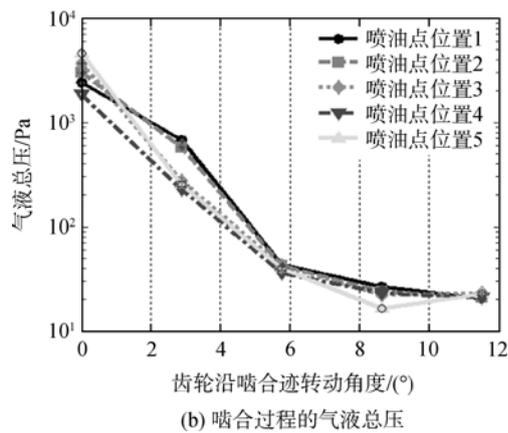


图 8 不同喷油点位置比较

Fig. 8 Comparison of different spray point positions

整体啮合过程中,尤其是在啮合过程的后半段,喷油点位置 1 与喷油点位置 2 的油气率与气液总压较大,喷油点位置 4 与喷油点位置 5 的油气率与气液总压较小,故在啮入侧喷油的情况下,喷油点应设计在偏向啮入侧位置,进入啮合区的润滑油较多,润滑条件较好.

### 5 喷油距离计算与分析

建立如图 3 所示不同喷油距离的计算模型,喷油距离分别为 40 mm 和 30 mm,喷油角度相同,均为  $-2.5^\circ$ ,喷油点位置相同,为齿轮分度圆切点,对每一个喷油距离一对轮齿进入啮合到其下一对轮齿进入啮合的全过程进行计算,如图 9 所示.

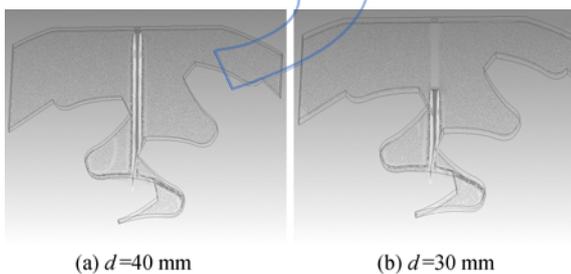


图 9 不同喷油距离计算结果

Fig. 9 Calculation result of different spray distances

绘制不同喷油距离  $d=40, 35, 30$  mm 下啮合过程的油气率与气液总压变化,进行比较,啮合过程中的油气率与气液总压如图 10 所示,图中纵坐标为对数坐标.

由计算结果可以看出,不同喷油距离下的油气率与气液总压随齿轮啮合表现出的下降趋势相似,在啮合过程前半段中,喷油距离 3 ( $d=30$  mm) 的油气率与气液总压较大,喷油距离 1 ( $d=40$  mm) 的油气率与气液总压较小;而在啮合过程的

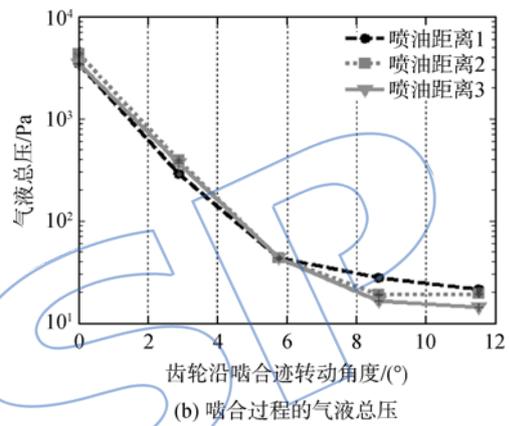
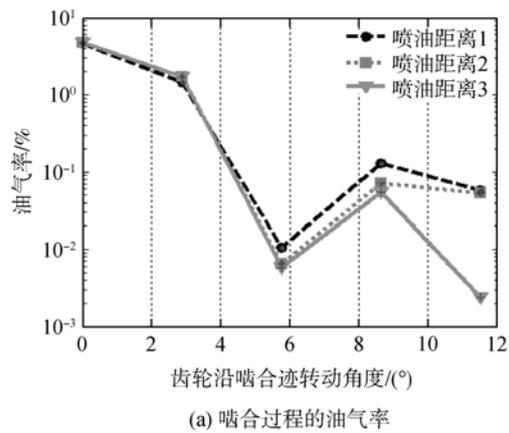


图 10 不同喷油距离比较

Fig. 10 Comparison of different spray distances

后半段中,喷油距离 3 ( $d=30$  mm) 的油气率与气液总压最小,喷油距离 1 ( $d=40$  mm) 的油气率与气液总压最大;喷油距离 2 ( $d=35$  mm) 的油气率与气液总压在整个啮合过程中处于平均水平. 经过分析,导致这种现象的主要原因是:喷油距离越小,滑油射流的速度越大、扩散程度越小,而喷油距离越大,由于受到空气阻力的作用,速度变小、扩散程度较大,在啮合过程的前半段,较大的速度使得润滑油较易进入啮合区,所以较小喷油距离的油气率与气液总压较大,在啮合过程后半段,较小的射流速度及较大的扩散角减少了射流受到的冲击阻挡作用,所以较大喷油距离的油气率与气液总压较大. 综上,在对喷油距离进行设计时,并不是喷油距离越小越好,相反的,如果是啮入侧喷油,由于啮合过程后半段的润滑条件更为恶劣,较大的喷油距离能够为后半段啮合过程提供较好的油气率与气液总压条件,所以在对喷油距离进行设计时,需要进行综合考虑,选择合适的喷油距离.

### 6 结论

喷油角度对轮齿啮合点入口处的油气率与气

液总压状态影响很大,在本文的计算中,喷油角度5的效果差,喷油嘴喷出的润滑油几乎没有能够进入啮合区,喷油角度2与喷油角度3喷油效果较好,所以在对喷油嘴进行设计与安装时,应该使喷油嘴向主动轮偏离一个合适的小角度,达到更好喷油效果。

不同喷油点位置下啮合点入口处的油气率与气液总压边界条件不同,在本文对5个喷油点位置的分析中,喷油点位置1与喷油点位置2的喷油效果最好,在设计时应使喷油点向啮入侧稍偏离。

在啮合过程前半段中,喷油距离越小,能够进入啮合点的润滑油越多,啮合过程后半段则相反,在进行喷油距离设计时应考虑齿轮结构、工况等条件进行综合考虑,合理选择喷油距离。

## 参考文献:

- [1] 林基恕,张振波. 21世纪航空发动机动力传输系统的展望[J]. 航空动力学报,2001,16(2):108-114.  
LIN Jishu, ZHANG Zhenbo. Prospects of aero-engine powertransmission system in the 21st century[J]. Journal of Aerospace Power,2001,16(2):108-114. (in Chinese)
- [2] Biboulet N, Colin F, Lubrecht A A. Friction in starved hydrodynamically lubricated line contacts[J]. Tribology International,2013,58:1-6.
- [3] Querlioz E, Ville F, Lenon H, et al. Experimental investigations on the contact fatigue life under starved conditions[J]. Tribology International,2007,40:1619-1626.
- [4] Akbarzadeh S, Khonsari M M. Performance of spur gears considering surface roughness and shear thinning lubricant[J]. Journal of Tribology,2008,130(2):021503. 1-021503. 8.
- [5] Wijnant Y H, Venner C H. Contact dynamics in starved elastohydrodynamic lubrication [J]. Tribology Series, 1999,36:705-716.
- [6] 申永胜. 机械原理教程[M]. 2版. 北京:清华大学出版社, 2005.
- [7] Höhn B R, Michaelis K, Otto H P. Minimised gear lubrication by a minimum oil/air flow rate[J]. Wear, 2009,266(3/4):461-467.
- [8] Brandão J, Meheux M, Ville F, et al. Comparative overview of five gear oils in mixed and boundary film lubrication[J]. Tribology International,2012,47:50-61.
- [9] Li S, Kahraman A. A transient mixed elastohydrodynamic lubrication model for spur gear pairs[J]. Journal of Tribology,2010,132(1):011501. 1-011501. 9.
- [10] Bobach L, Beilicke R, Bartel D, et al. Thermal elastohydrodynamic simulation of involute spur gears incorporating mixed friction[J]. Tribology International,2012,48:191-206.
- [11] Dowson D. Elastohydrodynamic and micro-elastohydrodynamic lubrication[J]. Wear,1995,190(2):125-138.
- [12] Dhar S, Vacca A. A fluid structure interaction—EHD model of the lubricating gaps in external gear machines: formulation and validation [J]. Tribology International, 2013,62:78-90.
- [13] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [14] Subramaniam S. Lagrangian-Eulerian methods for multiphase flows[J]. Progress in Energy and Combustion Science,2013,39(2/3):215-245.
- [15] Enwald H, Peirano E, Almstedt A E. Eulerian two-phase flow theory applied to fluidization[J]. International Journal of Multiphase Flow,1996,22(suppl. ):21-66.
- [16] HE Zhixia, ZHONG Wenjun, WANG Qian, et al. Effect of nozzle geometrical and dynamic factors on cavitating and turbulent flow in a diesel multi-hole injector nozzle[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2013, 70: 132-143.
- [17] Murphy J, Schmidt D, Wang S P, et al. Multi-dimensional modeling of multiphase flow physics: high-speed nozzle and jet flow—a case study[J]. Nuclear Engineering and Design, 2001,204(1/2/3):177-190.
- [18] 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.  
WANG Yanzhong, NIU Wentao, TANG Wen, et al. Research on oil/air multiphase flow of spray lubrication of areo spur gears[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(2):439-444. (in Chinese)

(编辑:王碧琚)