

喷油方式对斜齿轮齿面温度的影响

苏欣,刘军,范一龙,周金阳

(中国船舶重工集团公司第七〇三研究所,黑龙江哈尔滨 150078)

摘要:为探讨喷油方式对齿面温度的影响,以斜齿轮为研究对象,通过CFD仿真和试验研究不同喷油方式对斜齿轮齿面温度的影响。针对斜齿轮喷油润滑过程的特点,分析其齿面摩擦生热量,简化轮齿喷油润滑计算模型,并基于CFX进行齿面对流换热仿真研究,得到了不同喷油方式下的齿面温度;基于功率开放式斜齿轮试验平台,对不同喷油方式下的齿面温度进行了试验测量,与仿真计算结果进行对比分析。结果表明:在高速重载斜齿轮传动系统中,啮出侧喷油润滑的方式比啮入侧喷油润滑方式的冷却降温效果要好。

关键词:喷油方式;斜齿轮;齿面温度;喷油速度

中图分类号:TH132.41 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2020.03.029

[引用本文格式]苏欣,刘军,范一龙,等.喷油方式对斜齿轮齿面温度的影响[J].热能动力工程,2020,35(3):201-206. SU Xin, LIU Jun, FAN Yi-long, et al. Effect of injection method on the tooth surface temperature of helical gears[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(3): 201-206.

Effect of Injection Method on the Tooth Surface Temperature of Helical Gears

SU Xin, LIU Jun, FAN Yi-long, ZHOU Jin-yang

(No. 703 Research Institute of CSIC, Harbin, China, Post Code: 150078)

Abstract: Reasonable design and selection of gear transmission oil-jet method, oil-jet angle and other oil-jet lubrication parameters are of great significance for controlling the meshing tooth surface temperature, improving the tooth surface anti-scuffing capacity and extending the service life. In order to investigate the influence of oil-jet method on tooth surface temperature, this paper uses helical gears as the research object, and the influence of different oil-jet lubrication methods on the tooth surface temperature of the helical gear is studied by CFD simulation and experiment in this article. According to the characteristics of the helical gear oil-jet lubrication process, the frictional heat generation of the tooth surface is analyzed, the calculation model of the oil-jet lubrication of the gear tooth is simplified, the tooth surface heat transfer simulation is carried out based on CFX, and the tooth surface temperature under different oil-jet modes is obtained. Based on the power open helical gear test platform, the tooth surface temperature under different oil-jet modes is tested and compared with the simulation results. The results show that for the high-speed and heavy-duty helical gear transmission system, the oil-jet lubrication on the gear engaging side has better cooling effect than on the gear disengaging side.

Key words: oil-jet method, helical gear, tooth surface temperature, oil-jet speed

引 言

对于高速重载工况下的斜齿轮,一般采用喷油润滑的方式对其齿面进行润滑与冷却。喷油方式一般考虑两种:啮入侧喷油和啮出侧喷油。究竟哪种喷油方式对齿面的冷却效果较好,一直以来没有一个详细的研究结论。

国内的吕先起、王延忠等人^[1-3]对齿轮供油理论、喷油润滑喷嘴角度、润滑过程中的油气率等做了一定的试验研究,从啮出侧和啮入侧喷油润滑的角度分析了对直齿轮温度的影响;王延忠等人^[3-4]基于航空直齿轮喷油润滑的啮齿瞬时流体状态的研究成果,进一步分析了不同喷油角度下的润滑与冷却效果。魏松、曾红等人^[5-6]等开展了针对航空齿轮喷油润滑系统喷油嘴喷射角度改变对齿面冷却效果的影响研究。吴晓玲等人^[7]针对喷油方式对直齿轮本体温度的影响进行了试验测量,测量了低线速度和高线速度两种工况下采用啮入侧喷油和啮出侧喷油两种喷油方式时的大小齿轮的本体温度场;彭杰^[8]在基于单个轮齿有限元模型的基础上,获得了轮齿的本体温度场,分析了润滑油输入温度等关键参数对轮齿本体温度场的影响。赖锋^[9]在考虑齿轮转速及润滑油特性的基础上,推导出了齿轮齿面温度场的计算方法;方特等人^[10]建立了高速直齿轮的线接触弹流润滑模型,通过热网络法和试验法获得了直齿轮稳态温度分布。吉如桃^[11]对人字齿轮喷油润滑温度场进行仿真分析研究,得到了齿面对流换热系数和端面对流换热系数对齿轮本体温度场的影响规律。国外的 Akin 和 Townsend 等人^[12-13]对直齿轮喷油润滑过程中的润滑油飞溅过程进行了捕捉拍摄,并对齿面温度的影响因素进行了理论和试验研究;Tommaso F 等人^[14]研究了喷油润滑在高速齿轮表面产生的抗扭矩及喷射破碎产生的液滴和韧带形成,为齿轮表面配置合适的喷油量以最大限度减少润滑油损失提供了试验依据。

对于喷油方式对齿面温度的影响,特别是对斜齿轮齿面温度的影响,很少有学者研究。本文针对斜齿轮喷油润滑过程进行分析,研究不同喷油方式对斜齿轮齿面温度的影响,为指导选择齿轮喷油润滑方式提供参考。

1 齿面温度计算原理

1.1 齿面摩擦生热量计算

齿轮传动过程中齿面摩擦产生的热量绝大部分由齿轮的啮合齿面接收,忽略较小的滚动摩擦以及齿面变形产生的热量,只计算滑动摩擦,可得到齿面摩擦生热量计算公式^[13]:

$$q = \mu \times p \times V \quad (1)$$

式中: μ —摩擦系数; p —齿面接触压力; V —相对滑动速度。

1.2 齿面温度计算

斜齿轮在高速运转过程中,润滑油流经其齿面,齿面与润滑油之间产生对流换热,其基本规律可用牛顿冷却定律来表示^[15]:

$$q = h\Delta T \quad (2)$$

式中: q —齿面摩擦生热量; h —对流换热系数; ΔT —齿面与润滑油之间的温差。

分析式(2)可知,求得齿面摩擦生热量和齿面对流换热系数,便可求出齿面温度。

2 斜齿轮齿面温度仿真计算

2.1 CFD 模型建立

图1为不同喷油方式下的斜齿轮润滑仿真示意图,保持主从动轮的转动方向不变,分别在啮入侧和啮出侧方向上建立3个喷油嘴,使润滑油通过喷油嘴喷射进入齿轮的啮合区域空间。图中喷油嘴附近的阴影区域为喷油嘴喷射的高速润滑油,齿面阴影区域为飞溅的润滑油。

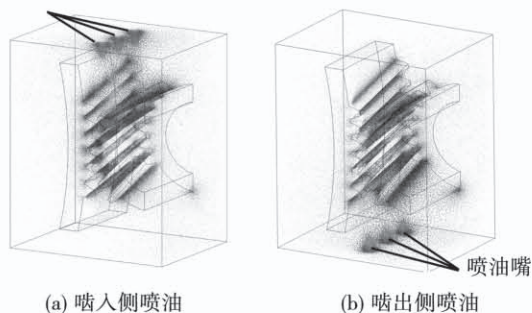


图1 齿轮喷油润滑 CFD 仿真模型

Fig.1 CFD simulation model for gear injection lubrication

2.2 边界条件设置

在 Creo 软件中建立简化后的模型,将模型导入

ICEM 中进行非结构四面体网格划分。利用 ANSYS CFX 进行仿真计算。设置流体计算域为两相流体计算域,其中液相为润滑油,气相为空气;润滑油密度为 883 kg/m^3 ,黏度为 $0.01\text{ Pa}\cdot\text{s}$,喷油孔处为速度入口边界条件,啮合齿面设为摩擦生热面。

斜齿轮齿面温度分析的工况参数如表 1 所示。

表 1 斜齿轮齿面温度分析的工况参数

Tab. 1 Operating conditions parameters for temperature analysis of bevel gear tooth surface

电机转速/ $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	啮合周 期/s	扭矩/ $\text{N}\cdot\text{m}$	喷油距 离/mm	喷嘴孔 径/mm
1 500	0.000 35	954.9	40	2

2.3 算例计算

表 2 为斜齿轮参数。润滑油型号选用 CD40。利用 CFX 软件,仿真计算齿面对流换热系数,其结果如图 2 所示。

表 2 斜齿轮结构参数

Tab. 2 Structural parameters of helical gears

法面模 数/mm	小齿轮 齿数	大齿轮 齿数	压力 角/(°)	螺旋 角/(°)	齿宽/ mm	中心距/ mm
2.5	23	155	20	13	45	230

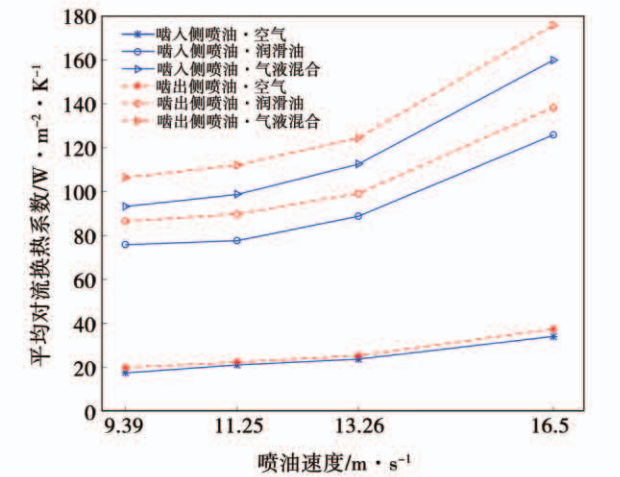


图 2 斜齿轮齿面对流换热系数

Fig. 2 Heat transfer coefficient of inclined gear tooth surface

由图 2 可以看出,无论啮入侧喷油还是啮出侧喷油,都对啮合齿面有一定的冷却作用,空气、润滑

油及气液混合流对齿面的平均对流换热系数都随着油速的增加而增大;采用啮出侧喷油对齿面的平均对流换热作用效果要比啮入侧喷油好;相同喷油速度下,采用气液混合流时齿面的平均对流换热系数更大。

根据式(2)求出不同喷油方式下的斜齿轮的齿面温度,其数据列于表 3 中。

表 3 不同喷油方式和喷油速度下斜齿轮齿面最高温度

Tab. 3 Maximum temperature of bevel gear tooth surface under different oil-jet methods and oil-jet speed

喷油速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	啮入侧喷油/°C		啮出侧喷油/°C	
	大齿轮	小齿轮	大齿轮	小齿轮
9.39	44.8	57.8	44.4	57.0
12.25	44.6	57.5	44.2	56.7
13.26	44.2	56.7	43.8	56.0
16.50	42.9	54.2	42.5	53.5

3 不同喷油方式下斜齿轮齿面温度测量试验

3.1 试验平台及试验方法

如图 3 所示,采用功率开放式斜齿轮试验平台,利用 Optiris PI 红外热像仪对齿面温度进行测量。

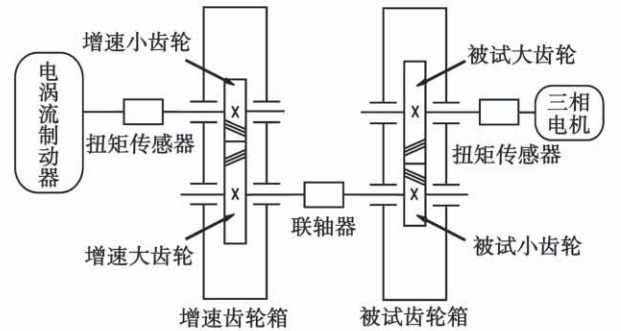


图 3 斜齿轮试验平台

Fig. 3 Inclined gear test platform

如图 4 所示,将输油管连接到被试齿轮箱和增速齿轮箱的进油口处并检查润滑系统回路,保证润滑油的供应与回流。试验过程中保持实验室室温为 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、进油温度为 $25.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

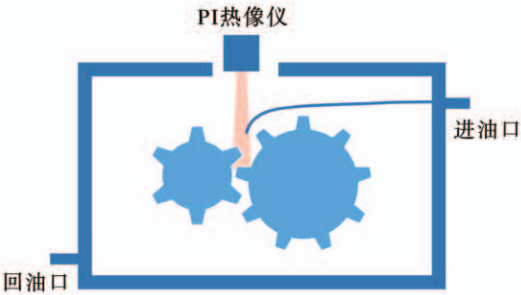


图 4 测温试验齿轮箱内部布置图

Fig.4 Internal layout of gearbox for temperature measurement test

试验过程中,共采用 3 个喷油嘴,喷嘴当量孔径为 2 mm,通过改变喷油压力来改变喷油量。试验中共测试了 4 种喷油压力,分别为 0.10、0.15、0.20 和 0.25 MPa。在 ANSYS 仿真计算中,常设定入口的流体速度,因此需要将喷油压力换算成喷油速度,其对应的喷油量和喷油速度换算值列于表 4 中。具体试验操作步骤:

(1) 控制电机转速为 1 500 r/min,被试齿轮箱传递功率为 150 kW,扭矩为 954.9 N·m。通过计算可知,此刻主从动轮线速度达到 31.42 m/s。

(2) 试验从啮入侧喷油。试验过程中控制电机转速、齿轮箱功率不变,保持主动轮(大齿轮)逆时针转动。喷嘴距离齿轮中心线垂直距离为 40 mm。按照表 4 中的数据改变喷油压力,每种喷油情况下齿轮稳定运转 30 min,然后停机、关闭油门阀口,立刻打开被测齿轮箱顶部端盖,用 PI 热像仪对齿面温度进行测量。

(3) 试验从啮出侧喷油。将润滑油管及喷嘴调整到齿轮啮出侧,保持喷油距离为 40 mm。其余操作按步骤(2),改变喷油压力,用 PI 热像仪测量齿面温度。

表 4 测量试验中喷油参数

Tab.4 Oil-jet parameters in measurement test

喷油压力/MPa	喷油量/L·min ⁻¹	喷油速度/m·s ⁻¹
0.10	1.77	9.39
0.15	2.12	11.25
0.20	2.50	13.26
0.25	3.11	16.50

3.2 试验结果及分析

图 5~图 8 为不同喷油方式下斜齿轮齿面的热像仪测温结果。

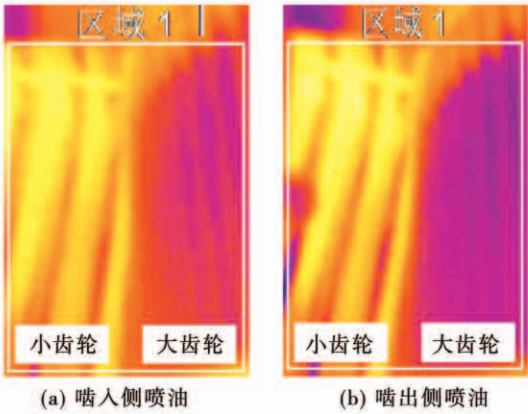


图 5 喷油压力 0.10 MPa
Fig.5 Oil-jet Pressure 0.10 MPa

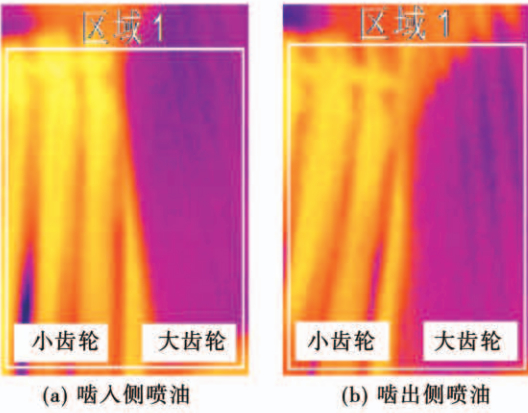


图 6 喷油压力 0.15 MPa
Fig.6 Oil-jet Pressure 0.15 MPa

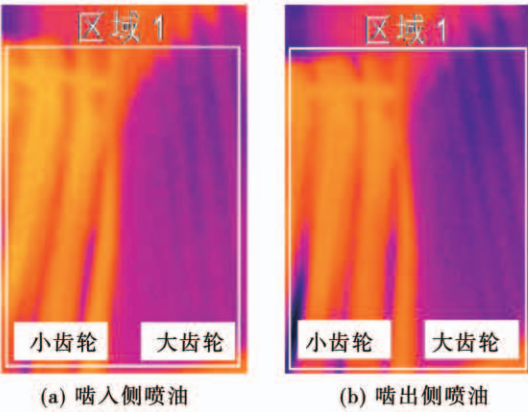


图 7 喷油压力 0.20 MPa
Fig.7 Oil-jet Pressure 0.20 MPa

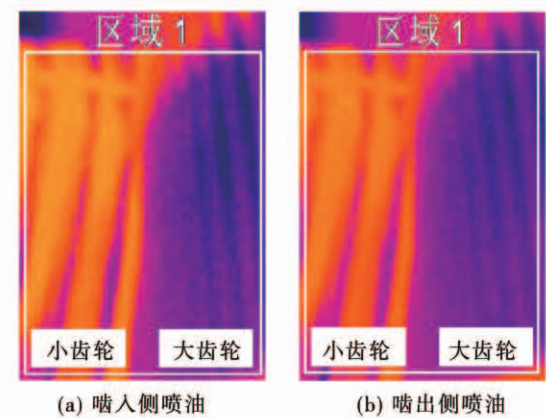


图 8 喷油压力 0.25 MPa
Fig. 8 Oil-jet Pressure 0.25 MPa

PICconnect 上位机软件可以方便地检测出齿面的最高温度值,如表 5 所示。

表 5 不同喷油方式和喷油压力下
齿面最高温度

Tab. 5 Maximum tooth surface temperature under
different oil-jet modes and oil-jet pressure

喷油压力/MPa	啮入侧喷油/℃		啮出侧喷油/℃	
	大齿轮	小齿轮	大齿轮	小齿轮
	(主动轮)	(从动轮)	(主动轮)	(从动轮)
0.10	49.0	57.2	47.8	56.3
0.15	47.9	56.1	46.5	54.9
0.20	46.2	55.1	43.7	52.0
0.25	42.3	51.4	41.0	49.2

由图 5 ~ 图 8 以及表 5 分析可知:

- (1) 同种喷油方式、同样喷油压力下,小齿轮的齿面最高温度高于大齿轮,这是因为同样时间内小齿轮齿面啮合次数多于大齿轮齿面啮合的次数。
- (2) 随着喷油压力的增大,不论是从啮入侧喷油还是从啮出侧喷油,大齿轮和小齿轮的齿面最高温度都在减小。
- (3) 同样的喷油压力下,啮出侧喷油时,大齿轮和小齿轮的齿面最高温度都要低于啮入侧喷油时的齿面最高温度,即在高速工况下,啮出侧喷油要比啮入侧喷油的润滑与冷却效果要好。

3.3 试验结果与仿真结果对比

为证明仿真结果的可信度,将仿真和试验的结果进行对比,如图 9 所示。

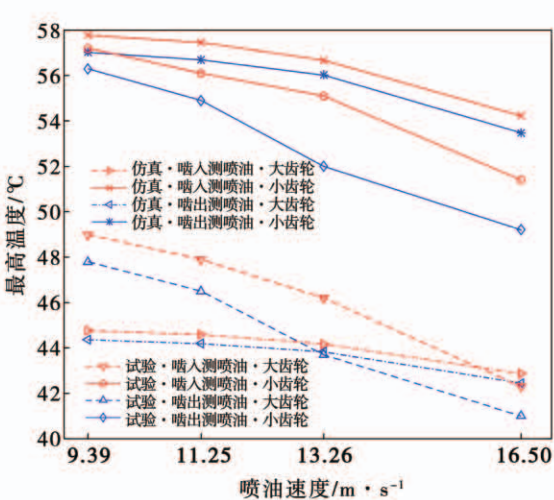


图 9 不同喷油方式下齿面最高温度仿真和试验
分析结果

Fig. 9 Simulation and experimental analysis of
maximum temperature on gear surface under different
oil-jet methods

分析图 9 可以得出:

- (1) 不同喷油方式和喷油速度下,齿面最高温度的仿真计算值与试验值存在一定的误差,误差在 2% ~ 11% 之间,产生误差的主要原因是:采用理论与仿真计算的过程中,对模型做了一定的简化,对齿轮啮合过程进行了离散化分解求解;同样,试验过程中测量齿面温度时需要打开齿轮箱顶盖,这期间齿面温度也会发生变化,同时,测温过程中齿面上残留的润滑油对齿面温度测量存在一定的干扰。
- (2) 采用理论与仿真计算方法所求解的结果和试验所得的结果基本一致,都指出了在高速齿轮传动副中,啮出侧喷油润滑冷却的效果要好于啮入侧,其齿面最高本体温度随着喷油量增加的变化趋势也是一致的,两种方法求解结果的误差也在合理范围之内,所研究的经验公式结合有限元仿真的方法对于人字齿轮喷油润滑温度场的计算求解是合理的。

4 结 论

- (1) 相同喷油速度下,采用气液混合流比纯润滑油对齿面的冷却效果好。
- (2) 喷油嘴处喷油速度在 9.39 ~ 16.50 m/s 的范围内,喷油压力越大,齿面冷却效果越好。
- (3) 在一定的喷油速度范围内,相同速度下,啮

出侧喷油润滑的方式比啮入侧喷油润滑方式的冷却降温效果好。

(4) 不同喷油方式下,所得齿面温度的变化趋势一致,证明了仿真结果的正确性。

参考文献:

- [1] 吕先起. 关于齿轮供油理论的探讨[J]. 山东工业大学学报, 1984(1): 41-57.
LYU Xian-qi. Discussion on the theory of gear oil supply[J]. Journal of Shandong University of Technology, 1984(1): 41-57.
- [2] 吕先起,尹世霞. 高速齿轮的润滑方法[J]. 山东工业大学学报, 1996(2): 87-90.
LYU Xian-qi, YIN Shi-xia. Lubrication method for high speed gears [J]. Journal of Shandong University of Technology, 1996(2): 87-90.
- [3] 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 Yan-zhong, NIU Wen-tao, TANG Wen, et al. Analysis of oil and gas two-phase flow in air direct gear injection lubrication[J]. Journal of Aeronautical Dynamics, 2013, 28(2): 439-444.
- [4] 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(7): 1605-1610.
WANG Yan-zhong, NIU Wen-tao, TANG Wen, et al. Effect of oil injection azimuth parameters on the lubrication process of airborne straight gear injection[J]. Journal of Aeronautical Dynamics, 2015(7): 1605-1610.
- [5] 魏松. 齿轮喷油润滑试验台研制及测试研究[D]. 锦州: 辽宁工业大学, 2016.
WEI Song. Research on development and test of gear injection lubrication test bench[D]. Jinzhou: Liaoning University of Technology, 2016.
- [6] 曾红,魏松,牛文韬,等. 喷油嘴喷射角度对航空齿轮冷却效果的影响[J]. 润滑与密封, 2016, 41(9): 128-131.
ZENG Hong, WEI Song, NIU Wen-tao, et al. Effect of injector injection angle on cooling effect of aeronautical gears[J]. Lubrication & Sealing, 2016, 41(9): 128-131.
- [7] 吴晓铃,汤锋,戚文正. 润滑方式对齿轮本体温升的影响[C]//中国机械工程学会摩擦学分会: 第五届全国摩擦学学术会议论文集(上册). 中国机械工程学会摩擦学分会, 1992.
WU Xiao-ling, TANG Feng, QI Wen-zheng. Effect of lubrication mode on temperature rise of gear body[C]//Tribology Branch of

China Society of Mechanical Engineering; Proceedings of the Ninth National Conference on Tribology(Volume I). Tribology Branch of China Society of Mechanical Engineering, 1992.

- [8] 彭杰,刘少军,胡小舟,等. 高速直齿轮本体温度场的仿真与试验研究[J]. 现代制造工程, 2014(11): 121-126.
PENG Jie, LIU Shao-jun, HU Xiao-zhou, et al. Simulation and experimental study on temperature field of high speed straight gear body [J]. Modern manufacturing engineering, 2014(11): 121-126.
- [9] 赖锋,林腾蛟,邢惠斌,等. 齿轮齿面温度场计算[J]. 舰船科学技术, 2012, 34(3): 50-53.
LAI Feng, LIN Teng-jiao, XING Hui-bin, et al. Calculation of temperature field of gear tooth surface[J]. Ship science and Technology, 2012, 34(3): 50-53.
- [10] 方特,刘少军. 弹流润滑下高速直齿轮稳态温度场研究[J]. 机械传动, 2017, 41(5): 132-137.
FANG Te, LIU Shao-jun. Study on steady temperature field of high speed straight gears under elastic flow lubrication[J]. Mechanical transmission, 2017, 41(5): 132-137.
- [11] 吉如桃. 人字齿轮喷油润滑温度场仿真分析研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
Ji Ru-guang. Simulation and analysis of temperature field of oil injection lubrication of herringbone gear[D]. Nanjing: Aeronautics and astronautics, 2017.
- [12] AKIN L S, TOWNSEND D P, MROSS J J. Study of lubricant jet flow phenomena in spur gears[J]. Technical Memorandum TM X-71572, NASA, 1974.
- [13] TOWNSEND D P, AKIN L S. Analytical and Experimental spur gear tooth temperatures as affected by operating variable[J]. ASME Journal of Mechanical Design, 1981(103): 216-226.
- [14] TOMMASO F, ANTONIO A, RICCARDO D. S, et al. Volume of fluid (VOF) analysis of oil-jet lubrication for high-speed spur gears using an adaptive meshing approach[C]. ASME Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition, 2015.
- [15] 姚阳迪. 基于热弹变形的高速重载齿轮修形研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
YAO Yang-di. Study on the shape fixing of high speed heavy duty gears based on thermal elastic deformation [D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.

(丛敏编辑)