

润滑喷嘴的结构对流量和流量系数的影响分析

Effects of structural parameters on volume flux and correction factor of jet of nozzles used lubricating gears

周芳^{1,2} 刘少军^{1,2} 张瑞强^{1,2} 林灵³

ZHOU Fang^{1,2} LIU Shao-jun^{1,2} ZHANG Rui-qiang^{1,2} LIN Ling³

(1. 中南大学机电工程学院, 湖南长沙 410083; 2. 中南大学高性能复杂制造国家重点实验室, 湖南长沙 410083; 3. 中国船舶重工集团第七二二研究所, 湖北武汉 430079)

(1. Central South University, School of Mechanical and Electrical Engineering, Changsha, Hunan 410083, China; 2. Central South University, State Key Laboratory for High Performance Complex Manufacturing, Changsha, Hunan 410083, China; 3. The 722 Research Institute of CSIC, Wuhan, Hubei 430079, China)

摘要:为了研究喷嘴结构对射流流量和流量修正系数的影响,采用基于 FLUENT 的大涡数值模拟方法对喷嘴三维射流流场进行单相流仿真,通过喷射滑油称重的方法测量喷嘴射流流量,并用测量结果对单相流仿真进行合理性验证。结果表明:喷孔直径、喷孔轴向长度和喷孔轴线与喷孔上游圆管轴线的夹角,均会影响水头损失,从而影响喷嘴射流流量;随着喷孔直径、喷孔轴线与喷孔上游圆管轴线的夹角增大,或者喷孔轴向长度减小,喷嘴射流流量修正系数逐渐增大。

关键词:喷嘴;润滑;大涡模拟;射流流量;流量系数

Abstract: In order to study the effects of structural parameters on volume flux and correction factor of jet of nozzles used lubricating gears, single phase flow model of the jet flow field of three dimensional nozzles is simulated by employing the Large Eddy Simulation based on the FLUENT. The rationality of the simulation results of the single phase flow model of jet flow field of three dimensional nozzles were demonstrated by the volume flux of jet oil measured by the method of weighting jet oil. The results indicate that the volume flux of jet is influenced by the orifice diameter, the axial length of orifice and the angle between the axis of nozzle orifice and the axis of upstream flow channel influencing the water head loss. The correction coefficient of quantity of flow increases as the orifice diameter, the angle between orifice axis and upstream axis increase and as the orifice axial length decreases.

Keywords: nozzle; lubrication; large eddy simulation; volume flux of

jet; volume flux correction factor

齿轮的润滑方式对齿轮的润滑和散热有很大的影响。减速器传动齿轮大多数采用喷油润滑。在喷油润滑中,为了使齿轮正常工作,喷嘴需向齿轮啮合齿面提供足够的滑油量,因此研究喷嘴射流流量和流量系数在实际应用中有重要的意义。由于射流流场控制方程为二阶非线性偏微分方程,因此直接对其求解来获得射流扩散角和射流流量比较困难^[1-2],而基于 FLUENT 的仿真计算可快速准确地进行数值模拟,节约研究成本,提高效率,成为有效的解决方法^[3-10]。

针对喷嘴射流研究,王延忠等^[11]基于 FLUENT 对齿轮喷油润滑油气两相流分析的瞬态数学模型进行仿真,得到了齿轮啮合过程中每一个啮合点的油气率和入口压力及其在啮合过程中的变化规律;周建钊等^[12]以锥形和锥直形喷嘴为研究对象,结合计算流体力学研究了喷嘴内部结构对射流流场的影响;Wang Fu-jun 等^[13]采用了高速可视化技术研究了低压入口条件下圆形喷嘴和非圆形喷嘴液体射流破碎特性。本试验拟研究一种新型结构喷嘴,其润滑油进油口与喷嘴轴线垂直,且喷孔轴线与喷嘴轴线不同轴,存在一定夹角。本试验基于 FLUENT,采用大涡数值模拟对该结构喷嘴进行数值模拟,探究喷嘴结构对流量和流量系数的影响。制作射流试验台,采用对喷嘴喷射的润滑油称重的方法对仿真结果进行验证。研究结果对该新型喷嘴的结构设计、应用研究具有指导意义。

1 齿轮润滑喷嘴

1.1 喷嘴结构

某新型传动齿轮润滑喷嘴内部结构如图 1 所示,根据喷

基金项目:总装预研基金资助项目(编号:8130208)

作者简介:周芳,女,中南大学在读硕士研究生。

通讯作者:刘少军(1955—),男,中南大学教授,博士生导师。

E-mail: liushaojun@csu.edu.cn

收稿日期:2015-12-11

孔轴线与喷孔上游管道轴线的夹角 A 不同,将其分为零夹角型喷嘴和非零夹角型喷嘴。图 1 中 L 表示喷孔轴向长度, d_1 表示喷孔上游管道直径, D 表示喷嘴外直径;左侧螺纹孔为进油口,直径 d_2 的喷孔为出油口,在供油压力作用下滑油从进油口低速进入到喷嘴,经过喷嘴内部突变流道后降压升速,最后从出油口高速喷射到齿轮润滑区域实现喷油润滑。表 1 和表 2 分别为零夹角型喷嘴和非零夹角型喷嘴结构参数对照表。

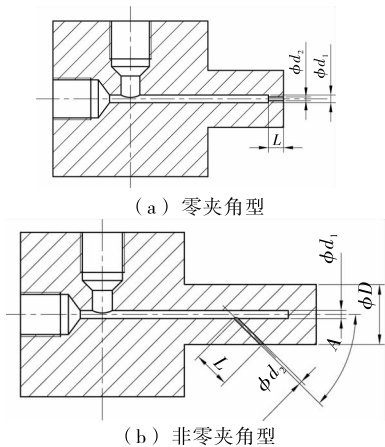


图 1 某传动齿轮润滑喷嘴内部结构

Figure 1 Internal structure of nozzles lubricating helicopter gears

表 1 零夹角型喷嘴结构参数对照表

Table 1 Structure parameters of nozzles with zero angle between the axis of nozzle orifice and the axis of upstream flow channel

喷嘴编号	ϕd_2	L
PZ001	1.0	2.0
PZ002	1.0	6.0
PZ003	1.2	4.8
PZ020	0.8	4.8
PZ021	1.0	4.8
PZ022	1.2	4.8
PZ023	1.4	4.8
PZ024	1.0	6.4
PZ025	1.2	6.4

表 2 非零夹角型喷嘴结构参数对照表

Table 2 Structure parameters of nozzles with nonzero angle between the axis of nozzle orifice and the axis of upstream flow channel

喷嘴编号	ϕd_2 /mm	L /mm	ϕD /mm	$A/(^{\circ})$
PZ030	1	2.85	5.85	30
PZ031	1	2.85	7.03	45
PZ032	1	2.85	7.94	60
PZ033	1	2.85	8.50	75
PZ034	1	2.85	8.70	90

1.2 喷嘴射流流量和流量系数

图 1 中内部流场入口和出口均为缓变流断面,任取水平基准面,暂不计粘性影响,对入口和出口列伯努利方程:

$$z_1 + \frac{P}{\gamma} = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g}, \tag{1}$$

式中:

z_1 、 z_2 ——分别为流体质点经过入口、出口时所具有的相对于基准面的坐标高度,m;

P ——流体质点经过入口时所具有的总压,MPa;

P_2 ——流体质点经过出口时所具有的静压,MPa;

v_2 ——流体质点经过出口时所具有的速度,m/s;

γ ——流体重度,kg/m³。

通常射流流量由 $Q = A_2 v_2$ 计算,结合式(1)得:

$$Q = \frac{\pi}{4} d_2^2 \sqrt{2g} \times \sqrt{\frac{P - P_2}{\gamma}}, \tag{2}$$

式中:

Q ——通过喷孔的流量,L/min;

d_2 ——喷孔直径,mm。

考虑到滑油粘性的作用,对式(2)中理论流量进行粘性修正,于是实际流量为:

$$Q = \frac{\pi}{4} C_d d_2^2 (2 \times 10^6 \frac{\Delta P}{\rho}) \times 60 \times 10^3, \tag{3}$$

式中:

ΔP ——孔口前后压差,MPa。

重力场中粘性不可压缩流体定常流动的总流伯努利方程为:

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{a_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{a_2 v_2^2}{2g} + h_w, \tag{4}$$

式中:

h_w ——以高度表示的机械能损失,称为水头损失,m。

联立式(3)、(4)可得流量系数 C_d 为:

$$C_d = \sqrt{1 - \frac{h_w \times \gamma}{\Delta P}}, \tag{5}$$

式中:

C_d ——流量系数;

通常根据式(3)计算喷嘴出口射流流量,但是实际应用时很难确定流量系数 C_d 的影响因素以及变化规律,因此采用数值模拟分析喷嘴出口射流流量,并根据试验结果验证数值模拟结果的可靠性。

2 喷嘴射流流场仿真

在不同供油压力和滑油温度作用下,喷嘴射流既有层流又有湍流,根据伯努利方程粗略估算喷嘴射流流速,从而判断喷嘴射流流动型态^[3],当喷嘴射流为湍流时,采用基于 FLUENT 的大涡数值模拟方法计算喷嘴射流流场^[14-15]。

建立喷嘴三维单相流仿真模型,即喷嘴内部流场,并对其划分网格见图 2,边界条件依次为入口、壁面和出口。

采用大涡模拟作为喷嘴内部流场仿真的湍流模型,设置入口和出口分别为压力入口和压力出口,其中入口压力为供油压力,出口压力为标准大气压,壁面为无滑移壁面,时间步

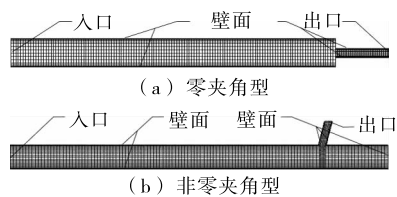


图 2 喷嘴内部流场网格模型

Figure 2 Mesh models of the inner flow field of nozzles

长为 0.001 s,时间步总数为 1 000,其余保持默认设置,进行瞬态计算获得喷嘴射流流量。

为了对单相流仿真模型网格无关性验证,以喷嘴 PZ002 为研究对象,划分不同疏密网格模型,网格数依次为 3 194, 45 576,90 244,130 590,在入口压力和滑油温度分别为 0.48 MPa、35 ℃时计算出口质量流量分别为 0.013 23, 0.014 814,0.014 812,0.014 812 kg/s,发现当网格数为 45 576时出口质量流量已经收敛到稳定值,因此单相流仿真模型网格数为 5 万左右时计算结果与网格数无关。

3 流量测量试验

试验中润滑油采用某减速器传动齿轮润滑油 Mobil Jet II,Mobil Jet II 是中黏度油,部分理化性能见表 3。

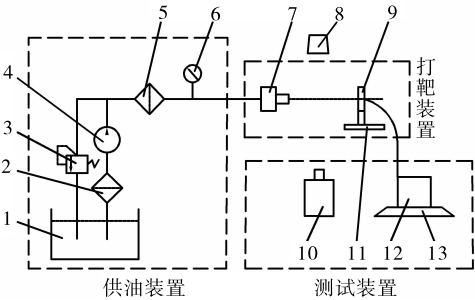
表 3 Mobil Jet II 的理化性能

Table 3 Physical and chemical properties of Mobil Jet II

温度/℃	密度/(g·cm ⁻³)	运动黏度/(mm ² ·s ⁻¹)
35	0.986 9	30.578
100	0.938 6	4.970

3.1 试验装置

试验装置主要分为供油装置、打靶装置和测试装置三部分(见图 3)。供油装置主要由齿轮泵、过滤器、溢流阀等组成;打靶装置主要由喷嘴、导轨和靶板等组成,靶板可在导轨上沿喷孔轴线方向移动,且靶板上设有特定直径的圆孔,其中心轴线与喷孔轴线重合;测量装置主要由高速摄像机、精密电子秤等组成,其中高速摄像机(3 000 帧/s)背光取样,精密电子秤测量精度为 0.1 mg。



1. 油箱 2. 过滤器 3. 溢流阀 4. 齿轮泵 5. 过滤器 6. 压力表 7. 喷嘴 8. LED 灯 9. 靶板 10. 高速摄像机 11. 导轨 12. 量杯 13. 精密电子秤

图 3 试验装置

Figure 3 Experimental apparatuses

3.2 射流流量测量方法

参照表 1,由于喷孔直径 d_2 很小,直接通过流量传感器测量喷嘴出口射流流量比较困难,因此试验中采用喷射滑油称重的方法测量喷嘴射流流量,其主要原理(参照图 3)为:喷嘴喷射出来的滑油全部穿过靶台上的圆孔,再经过管道引流到精密电子秤上的容器中,待喷嘴射流稳定后连续测量等时间间隔点上容器中喷射滑油的重量,将采集到的滑油重量拟合为一条直线,根据直线的斜率 k 按式(6)计算喷嘴射流流量。

$$Q = \frac{m}{\rho \cdot t} = \frac{k}{\rho}, \tag{6}$$

式中:

Q ——喷孔出口射流流量,L/min;

ρ ——滑油密度,kg/L;

m ——容器中滑油的重量,kg;

t ——试验时间,min。

4 结果与讨论

为了验证喷嘴射流单相流仿真的合理性,当供油压力在 0.1~1.0 MPa 范围内变化且滑油温度为 35 ℃时,分别用喷嘴单相流仿真和喷射滑油称重方法计算喷嘴 PZ001、PZ002、PZ003 的射流流量,仿真结果和试验结果见图 4。

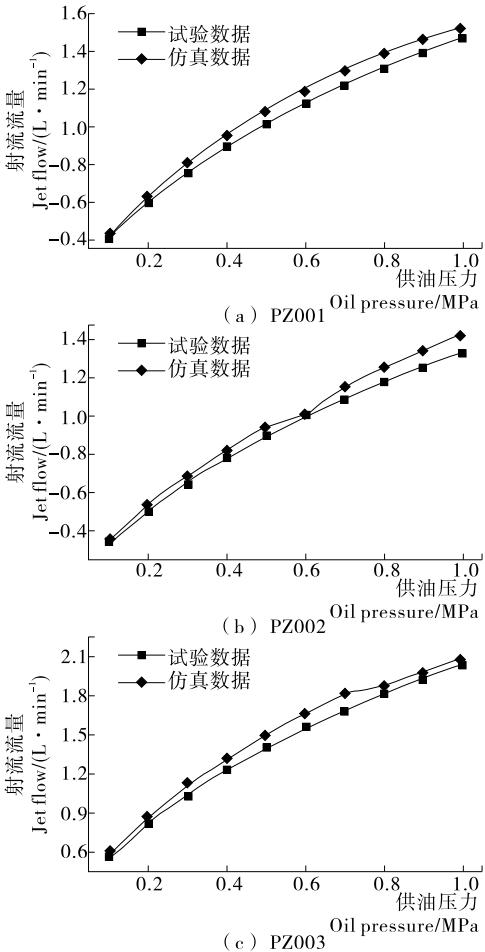


图 4 长径比不同的喷嘴射流流量变化曲线

Figure 4 Variation of jet flow of nozzles with the three different ratios of length to diameter

图 4 中仿真结果相对试验结果的最大偏差为 7%，考虑到试验测试方法本身的误差和单相流模型未考虑的其他管路损失,说明数值计算结果是准确的,同时也说明了单相流仿真的合理性和可行性。

4.1 喷孔直径

为了分析喷孔直径 d_2 对射流流量 Q 的影响,采用数值模拟得到在不同供油压力下通过喷嘴 PZ020、PZ021、PZ022、PZ023 的射流流量,当滑油温度为 80 °C 时仿真结果见图 5。

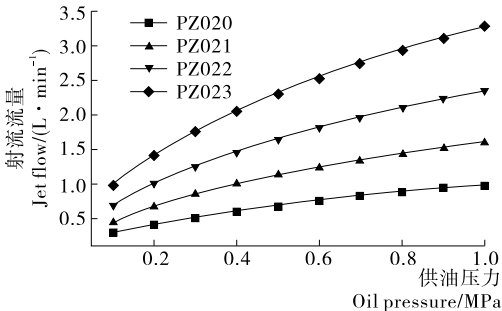


图 5 喷孔直径不同的喷嘴射流流量变化曲线
Figure 5 Variation of jet flow of nozzles with four different orifice diameters

从仿真结果可以看出,当喷孔轴向长度 L 不变时,随着喷孔直径 d_2 的增大,射流流量 Q 增大,而且增大的速度逐渐加快。从式(3)中可以看出,射流流量跟 d_2^2 成正比,与仿真结果吻合。分析 d_2 与流量系数 C_d 的关系见图 6。

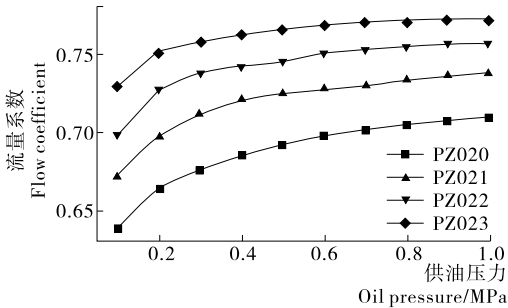


图 6 喷孔直径不同的喷嘴流量系数变化曲线
Figure 6 Variation of flow correction coefficient of nozzles with four different orifice diameters

从计算结果可以看出,随着喷孔直径 d_2 的增大,流量系数 C_d 逐渐增大,但增加的速度逐渐减慢。由于 d_2 导致局部损失 h_f 发生变化,因此参照式(5)可知当 d_2 增大时 h_f 减小。通常 $h_f = \zeta \frac{v^2}{2g}$,其中 ζ 为局部阻力系数且主要受几何形状的影响,试验测试当 $\frac{d_2}{d_1}$ 从 0.2 增大到 0.4 时, ζ 从 0.45 减小到 0.34,与上述仿真结果吻合。

4.2 喷孔轴向长度

为了分析喷孔轴向长度 L 对射流流量 Q 的影响,采用数值模拟分别对比分析通过喷嘴 PZ021 和 PZ024、PZ022 和 PZ025 的射流流量的变化,当滑油温度为 80 °C 时仿真结果见图 7。

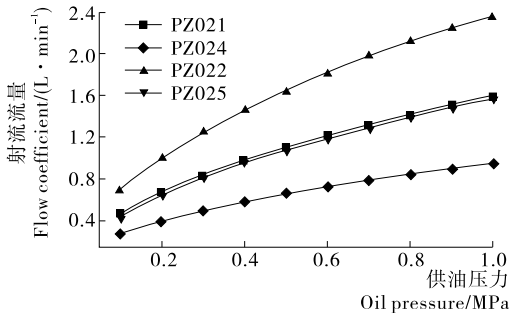


图 7 喷孔轴向长度不同的喷嘴射流流量变化曲线
Figure 7 Variation of jet flow of nozzles with two different orifice axial lengths

从 PZ021 和 PZ024、PZ022 和 PZ025 的仿真结果可以看出,随着喷孔轴向长度 L 的增加,射流流量 Q 逐渐减小。分析 L 对流量系数 C_d 的影响见图 8。

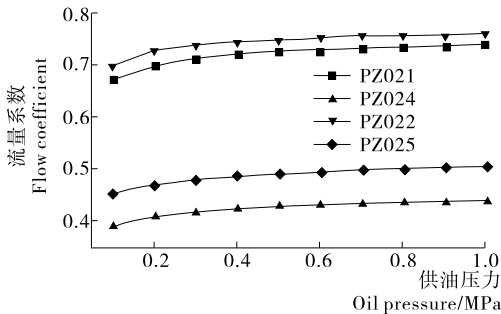


图 8 喷孔轴向长度不同的喷嘴流量系数变化曲线
Figure 8 Variation of flow correction coefficient of nozzles with two different orifice axial lengths

从计算结果可以看出,当喷嘴 PZ021、PZ022 的喷孔轴向长度 L 从 4.8 mm 增加到 6.4 mm 时,流量系数 C_d 分别减小了 0.28、0.25。由于 L 变化导致沿程损失 h_f 发生变化,因此参照式(5)可知当 L 增加时 h_f 迅速增大。通常 h_f 与速度相关,层流时 $h_f = k_1 v$,湍流时 $h_f = k_2 v^{1.75 \sim 2}$,喷孔内滑油速度较高,因此 L 增加时 h_f 迅速增大,与仿真结果吻合。

4.3 喷孔轴线与喷孔上游圆管轴线的夹角

为了分析喷孔轴线与喷孔上游圆管轴线的夹角 A 对射流流量 Q 的影响,采用数值模拟分析通过喷嘴 PZ030 等的射流流量的变化,当滑油温度为 80 °C 时仿真结果见图 9。

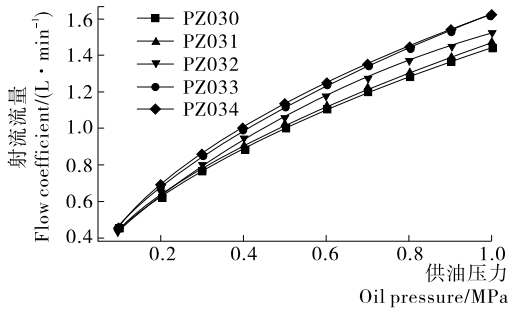


图 9 喷孔轴线与喷孔上游圆管轴线的夹角不同的喷嘴射流流量变化曲线
Figure 9 Variation of jet flow with five different angles between the axis of nozzle orifice and the axis of upstream flow channel

从仿真结果可以看出,当喷孔轴线与喷孔上游圆管轴线的夹角 A 在 $30^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 时,随着夹角 A 的增大,射流流量也随之增大,但相对变化量很小。从式(3)可知,夹角 A 变化导致通过喷孔的射流流量修正系数 C_d 发生变化,其变化规律见图 10。

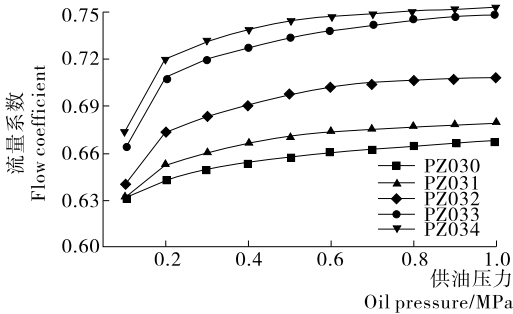


图 10 喷孔轴线与喷孔上游圆管轴线的夹角不同的喷嘴流量系数变化曲线

Figure 10 Variation of flow correction coefficient with five different angles between the axis of nozzle orifice and the axis of upstream flow channel

从计算结果可以看出,当喷孔轴线与喷孔上游圆管轴线的夹角 A 增大时,流量系数 C_d 逐渐增大,而且当夹角 A 在 $45^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 时, C_d 的相对变化量更大。由于夹角 A 变化导致局部损失 h_j 发生变化,因此参照式(5)可知当夹角 A 从 30° 逐渐增大至 90° 时,局部阻力系数 ζ 逐渐减小,进而 h_j 逐渐减小,而且当夹角 A 在 $45^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 时, ζ 更易受影响。

5 结论

随着喷孔直径、喷孔轴线与喷孔上游圆管轴线的夹角的增大,或者喷孔轴向长度的减小,喷孔出口射流流量逐渐增大,通过喷孔的射流流量修正系数也逐渐增大。比较喷嘴射流流量的试验数据,基于有限体积法的大涡模拟(LES)能精确地预测喷嘴圆射流内部流场。

参考文献

[1] 贾月梅. 流体力学[M]. 北京:国防工业出版社,2006: 51-226.

[23] 孟令仪,宋忻恬,张晶莹,等. Wistar 大鼠 30 天喂养试验体重及食物利用率参考值的研究[J]. 中国医学创新,2014, 11(6): 84-86.

[24] 郭建强,齐娜,苏忆兰,等. SPF 级大鼠体重和主要脏器正常参考值的探讨[J]. 毒理学杂志,2002, 16(4): 255-257.

[25] 王亚东,杨海燕,王海玉,等. SD 大鼠 30 d 喂养试验正常参考值的探讨[J]. 现代预防医学,2007, 34(1): 1 265-1 267.

[26] 胡建武,卢胜明,车路平. 10 种常见 SPF 级实验大、小鼠血液学及生化指标正常参考值的探讨[J]. 实验动物科学,2007, 24(2): 5-10 .

[27] 孙劲,徐元宏. SD 大鼠常见血液学检测指标参考范围的建立[J]. 临床输血与检验,2008, 10(3): 253-255

[28] 项华,查捷,孙建荣,等. 清洁级 SD 大鼠血液学和血液生化学指标正常参考值的观察[J]. 中国卫生检验杂志,2009, 19(4): 772-774.

[29] 邓雯,陈莉莉,刘晶,等. SPF 级 SD 大鼠血液学及血清生化指

[2] 刘沛清. 自由紊动射流理论[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2008: 14-98.

[3] Cai Jin-sheng, Tsai Her Mann, Liu Feng. Numerical simulation of vortical flows in the near field of jets from notched circular nozzles[J]. Computers & Fluids, 2010, 39(3): 539-552.

[4] Sun Zuo-yu, Li Guo-xiu, Chen Chuan, et al. Numerical investigation on effects of nozzle's geometric parameters on the flow and the aviation characteristics within injector's nozzle for a high-pressure common-rail DI diesel engine[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 89(1): 843-861.

[5] Xiao F, Dianat M, McGuirk J J. LES of turbulent liquid jet primary breakup in turbulent coaxial air flow[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2014(60): 103-118.

[6] 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分析[J]. 航空动力学报,2015, 30(7): 1 605-1 610.

[7] 王延忠,牛文韬,唐文,等. 喷油嘴喷射方向偏离的影响因素[J]. 航空动力学报,2012, 27(7): 1 665-1 670.

[8] 汤毅,谢晶,王金峰,等. CFD 预测风机摆设形式对冷库的影响[J]. 食品与机械,2012, 28(1): 124-128.

[9] 柴宏生. 亚音速射流试验台的设计与流场模拟[D]. 武汉:华中科技大学,2012: 8-33.

[10] 陈海涛,张裕中. 叶轮角度与流体黏度对高剪切罐内流体影响的模拟研究[J]. 食品与机械,2012, 28(5): 131-134.

[11] 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.

[12] 周建钊,徐肖攀,朱自成,等. 基于 ICEM CFD 与 ANSYS FLUENT 的热力射流喷嘴流场分析[J]. 机床与液压,2014, 42(17): 157-160, 122.

[13] Wang Fu-jun, Fang Tie-gang. Liquid jet breakup for non-circular orifices under low pressures[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2015(72): 248-262.

[14] 张兆顺,崔桂香,许春晓. 湍流大涡数值模拟的理论和应用[M]. 北京:清华大学出版社,2008: 54-129.

[15] 唐家鹏. FLUENT14.0 超级学习手册[M]. 北京:人民邮电出版社,2013: 39-66.

标正常值探讨[J]. 毒理学杂志,2010, 24(2): 174-175.

[30] Neijat M, Gakhar N, Neufeld J, et al. Performance, egg quality, and blood plasma chemistry of laying hens fed hempseed and hempseed oil[J]. Poultry Science, 2014, 93(11): 2 827-2 840.

[31] 王亚东,王海玉,张聪恪,等. SD 大鼠 30 d 喂养试验血液学生化和脏器系数指标参考值探讨[J]. 实用预防医学,2007, 14(4): 1 037-1 038.

[32] 夏介英,雷培琪,曾晓兰,等. SPF 级 KM 小鼠主要脏器重量和血液生化值的测定[J]. 四川生理科学杂志,2009, 31(3): 104-107.

[33] 李慕,王冬平,尚士臣. 不同日龄 SPF 级 KM 小鼠血液生理生化正常指标的探讨[J]. 中国比较医学杂志,2006, 16(9): 561.

[34] 席晓霞,席栋宾,吴润,等. 3 种 SPF 小鼠血液生理生化正常参考值的研究[J]. 黑龙江畜牧兽医,2011, 23(12): 134-138.

[35] 李雯雯,黄颖,黄敏慧,等. SPF 级昆明小鼠血液生化值的测定[J]. 广东畜牧兽医科技,2013, 38(5): 15-18.