

某航空齿轮润滑喷嘴结构对喷嘴射流特性的影响研究

张瑞强^{1,2}, 刘少军^{1,2}, 胡小舟^{1,2}

(1. 中南大学 机电工程学院, 长沙 410083;

2. 中南大学 高性能复杂制造国家重点实验室, 长沙 410083)

摘 要: 为了研究喷嘴结构对喷嘴射流扩散角和射流流量的影响,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了二相流仿真和单相流仿真,分别通过高速可视化和喷射滑油称重的方法测量了喷嘴射流扩散角和射流流量,并用测量结果对二相流仿真和单相流仿真进行了合理性验证。当喷嘴长径比大于 2 且喷孔轴线与喷孔上游管道轴线的夹角在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间时沿喷孔轴线距喷孔出口 100 mm 范围内射流扩散角近似为零,且增加喷孔直径、喷孔轴线与喷孔上游管道轴线的夹角或者减小喷孔轴向长度均会引起射流流量的增加。结果表明:当喷嘴长径比大于 2 且喷孔轴线与喷孔上游管道轴线的夹角在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 的范围内变化时对射流扩散角的影响很小;喷孔直径、喷孔轴向长度和喷孔轴线与上游管道轴线的夹角通过影响局部损失和沿程损失,从而影响喷嘴射流流量。

关 键 词: 喷嘴; 喷油润滑; 大涡模拟; 射流扩散角; 射流流量

中图分类号: V228.2

文献标志码: A

Studies on the effects of structural parameters on jet characteristics of nozzles in lubricating aviation gears

ZHANG Rui-qiang^{1,2}, LIU Shao-jun^{1,2}, HU Xiao-zhou^{1,2}

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering,
Central South University, Changsha 410083, China;

2. State Key Laboratory for High Performance Complex Manufacturing,
Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: In order to study the effects of the supply pressure and temperature of oil on the diffusion angle and volume flux of jet oil sprayed by nozzles of gear cases, both the two phase and single phase flow models of the jet flow field of three dimensional nozzles were simulated by employing the Large Eddy Simulation based on the FLUENT. The rationality of the simulation results of the two phase and single phase flow models of jet flow field of three dimensional nozzles was demonstrated by the diffusion angle and volume flux of jet oil measured by the method of high speed visualization and weighting jet oil, respectively. The diffusion angle of jet was approximately zero within the scope of 100 millimeters along the axis apart from the exit of nozzle when the ratio of length to diameter was greater than 2 and the angle between the axis of nozzle orifice and the axis of upstream flow channel changed in

收稿日期: 2016-02-29

基金项目: 总装预研基金

作者简介: 张瑞强(1992—), 男, 甘肃甘谷人, 硕士生, 主要从事深海矿产资源开发利用、直升机传动齿轮疲劳寿命与润滑分析等技术研究。

作者简介: 刘少军(1955—), 男, 湖南长沙人, 教授、博士生导师, 博士, 从事深海矿产资源开发利用、直升机传动齿轮疲劳寿命与润滑分析等技术研究。E-mail: liushaojun@csu.edu.cn

the range of 0 to 90 degree. The volume flux of jet oil increased as the orifice diameter, the angle between orifice axis and upstream axis increased and as the orifice axial length decreased. The result indicate that the diffusion angle of jet is not affected in actual working conditions when the ratio of length to diameter is greater than 2 and the angle between the axis of nozzle orifice and the axis of upstream flow channel changes in the range of 0 to 90 degree. Both the local loss and the linear loss are influenced by the change of the orifice diameter, the orifice axial length and the angle between orifice axis and upstream axis, finally leading to variation of volume flux of jet.

Key words: nozzle; oil jet lubrication; large eddy simulation; diffusion angle of jet; volume flux of jet

齿轮的润滑方式对齿轮的润滑和散热有很大的影响,航空发动机减速器传动齿轮属于高速重载齿轮,大多数采用喷油润滑^[1].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^[2],因此研究喷嘴射流扩散角和射流流量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^[3-4],而基于 FLUENT 的数值模拟成为有效的解决方法^[5-12].

喷嘴喷油属于油气两相流,由于油与空气密度比值大于 1000,采用数值方法直接模拟喷油过程时所需计算时间较长,因此必须合理选取仿真对象以及数值方法,王延忠等^[13]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;TIAN Xiushan 等^[14]采用大涡模拟和 VOF (volume of fluid) 计算了同轴气体流动环境下的初始破碎特性;周建钊等^[15]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;禹言芳等^[16]基于 FLUENT 对不同形状喷嘴的射流卷吸特性进行了数值模拟,得到射流轴向速度分布规律及射流横截面变化规律;WANG Fujun 等^[17]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,同时提出射流流量主要受供油压力、滑油特性、喷嘴几何形状等因素影响.

本文在研究喷嘴结构对喷嘴射流边界和射流流量的影响时,主要采用基于 FLUENT 的喷嘴二相流仿真和单相流仿真分别得到喷嘴射流扩散角和射流流量的变化规律.为了验证三维仿真模型和数值模拟方法的合理性,分别在易于实现的工况下采用高速可视化和喷射滑油称重的方法得

到某喷嘴射流扩散角和射流流量,并将数值模拟结果与实验结果进行对比分析.

1 某航空齿轮润滑喷嘴

1.1 喷嘴内部结构

某直升机减速器传动齿轮润滑喷嘴内部结构如图 1 所示,根据喷孔轴线与喷孔上游管道轴线的夹角 α 不同将其分为零夹角型喷嘴(图 1(a))和非零夹角型喷嘴(图 1(b)).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 分别为某型直升机零夹角型喷嘴和非零夹角型喷嘴结构参数对照表.

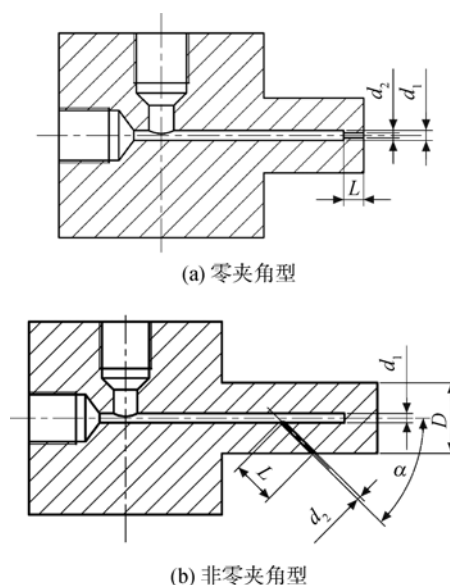


图 1 某直升机传动齿轮润滑喷嘴内部结构
Fig. 1 Internal structure of nozzles lubricating helicopter gears

表 1 零夹角型喷嘴结构参数对照表

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

喷嘴编号	d_2/mm	L/mm
PZ001	1	2
PZ002	1	6
PZ003	1.2	4.8
PZ020	1	4.8

表 2 非零夹角型喷嘴结构参数对照表

Table 2 Structure parameters of nozzles with nonzeroangle between the axis of orifice and the axis of upstream channel

喷嘴编号	d_2/mm	L/mm	D/mm	$\alpha/(\circ)$
PZ030	1	2.85	5.85	15

1.2 喷嘴射流扩散角

为了表示喷嘴喷射润滑油在空气中的扩散程度,参照图 2,定义 θ 为喷嘴射流半扩散角. 由于喷嘴喷油润滑为圆射流,因此射流半扩散角 θ 的计算方法近似表述为:分别测量喷孔出口处和沿喷孔轴线距喷孔出口 L_2 处射流流束的半径 R_1 和 R_2 ,由 $\theta = \arctan \frac{R_2 - R_1}{L_2}$ 计算喷嘴在沿喷孔轴线距喷孔出口 L_2 范围内的射流扩散角 2θ .

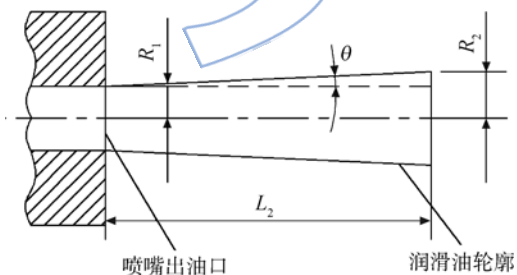


图 2 喷嘴射流半扩散角的示意图

Fig. 2 Schematic diagram of half spread angle of jet nozzle

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^[18].

为了得到不同喷嘴结构下喷嘴射流扩散角和射流流量,分别对喷嘴三维射流流场建立二相流仿真模型和单相流仿真模型,其中二相流仿真模型包括喷嘴内部流场和喷嘴外部空气场,单相流仿真模型为喷嘴内部流场. 相比于喷嘴单相流仿真模型,喷嘴二相流仿真模型更加准确,不仅可以计算射流扩散角,而且可以计算射流流量,但是二相流仿真模型由于网格数多,且为多相流仿真,不仅对计算机的要求高,而且计算时间长,因此采用喷嘴单相流仿真模型计算喷嘴射流流量,根据流体流动连续性,喷嘴喷孔出口的流量也就是喷嘴射流流量.

2.1 喷嘴二相流仿真

建立喷嘴三维二相流仿真模型,包括喷嘴内部流场和外部空气场,如图 3 所示. 喷嘴内部流场几何尺寸跟实际喷嘴内部结构尺寸保持一致,外部空气场为直径和长度分别为 $D(10\text{ mm})$, $L_1(100\text{ mm})$ 的圆柱体,边界条件依次为入口、壁面和出口.

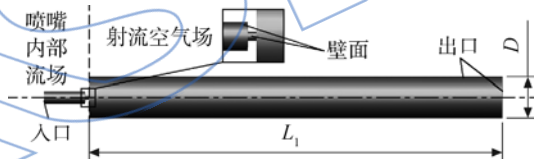


图 3 喷嘴二相流仿真三维模型

Fig. 3 Three-dimensional model of two phase flow of nozzle

在网格划分软件 ICEM 中对二相流仿真模型划分网格,由于喷嘴内部流场为管道流,因此采用 ICEM 软件中独有的 O 型网格对二相流模型划分网格,通过 4 次 O 型网格的嵌套,喷嘴内部流场局部加密等,最终划分的网格模型如图 4 所示.

采用基于 FLUENT 的 VOF (volume of fluid) 作为喷嘴三维射流流场仿真多相流模型,设

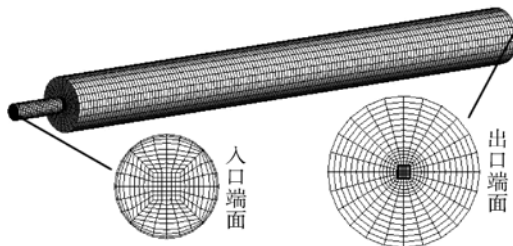


图 4 喷嘴二相流仿真网格模型

Fig. 4 Mesh model of two phase flow simulation of nozzle

置分离求解器求解控制方程, SIMPLEC (semi-implicit method for pressure-linked equation consistent) 算法求解控制方程, LSCB (least squares cell based) 离散梯度, BCD (bounded central differencing) 离散动量方程, PRESTO 实现压力插值, SOI (second order implicit) 作为瞬态求解公式^[19], 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, 时间步长为 $1 \mu\text{s}$, 时间步总数为 10 000, 进行瞬态计算获得喷嘴射流扩散角。

为了对二相流仿真模型网格无关性验证, 划分喷嘴 PZ002 网格数分别为 20 万、30 万、40 万, 在入口压力为 0.48 MPa 和滑油温度为 35°C 时, 计算出口质量流量分别为 0.014 23, 0.014 61, 0.014 61 kg/s, 因此二相流仿真模型网格数约为 30 万时计算结果与网格数无关。

2.2 喷嘴单相流仿真

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, 如图 5 所示, 边界条件依次为入口、壁面和出口。

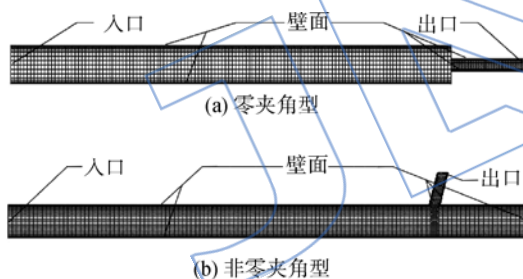


图 5 喷嘴内部流场网格模型

Fig. 5 Mesh models of the inner flow field of nozzles

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, 时间步长为 0.001 s, 时间步总数为 1 000, 其余设置均与二相流仿真一致, 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, 5 576, 90 244, 130 590, 在入口压力为 0.48 MPa 和滑油温度为 35°C 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 实验

实验中润滑油采用某直升机减速器传动齿轮润滑油 Mobil Jet II, Mobil Jet II 是中黏度油^[1], 部分理化性能如表 3 所示。

表 3 Mobil Jet II 的理化性能

Table 3 Physical and chemical properties of Mobil Jet II

温度/ $^\circ\text{C}$	密度/(g/cm^3)	运动黏度/(mm^2/s)
35	0.9869	30.578
100	0.9386	4.97

根据表 3 中的已知数据, 结合航空润滑油理化性能计算公式^[2]得 Mobil Jet II 的密度和黏度与温度的关系式分别为

$$\rho = 0.998 - 7.44 \times 10^{-4}(t - 20),$$

$$\ln[\ln(\nu + 0.8)] = 21.492 + 3.534 \ln(t + 273.15)$$

其变化曲线如图 6 所示。

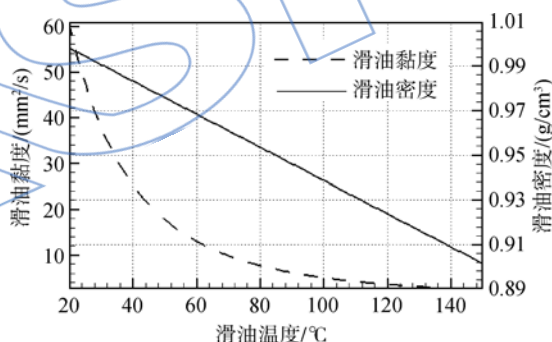


图 6 Mobil Jet II 密度和黏度随温度的变化曲线

Fig. 6 Changing curves of Mobil Jet II density and viscosity with temperature of oil

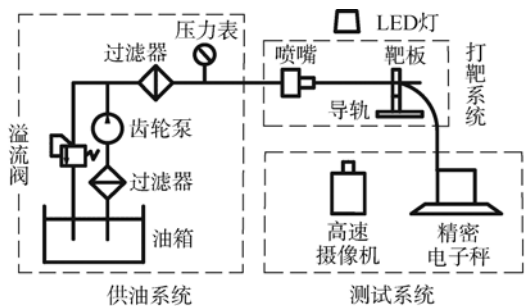
3.1 实验装置

实验装置主要分为供油装置、打靶装置和测试装置 3 个部分, 如图 7 所示。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。

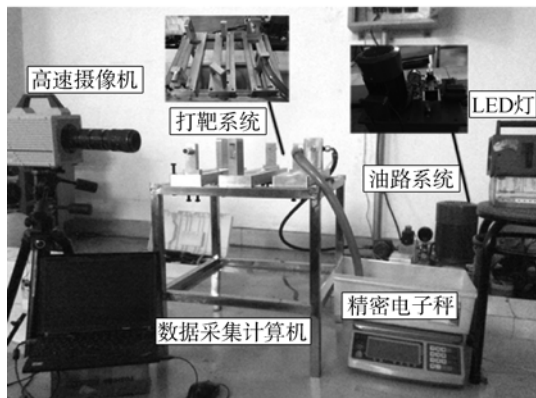
3.2 实验方法

3.2.1 射流扩散角测量方法

滑油在供油压力作用下由喷嘴喷射到空气中



(a) 原理图



(b) 实物图

图 7 实验装置

Fig. 7 Experimental apparatuses

形成射流流束,调整高速摄像机的镜头和焦距,背光取样获得不同时刻射流流束轮廓,参照图 2,分别测量喷孔出口处和沿喷孔轴线距喷孔出口 L_2 处射流流束的半径,从而计算射流扩散角。

3.2.2 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喷孔出口射流流量比较困难,因此实验中采用喷射滑油称重的方法测量喷嘴射流流量,其主要原理为:参照图 7,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质量,将采集到的滑油质量拟合为一条直线,根据直线的斜率 k 计算喷嘴射流流量 $Q = \frac{\Delta m}{\Delta \tau \rho} = \frac{k}{\rho}$,式中 Q 为喷孔出口射流流量, ρ 为滑油密度, Δm 为容器中滑油的质量, $\Delta \tau$ 为时间。

4 结果与讨论

分别讨论喷嘴结构参数(喷孔直径、喷孔轴向长度和喷孔轴线与喷孔上游管道轴线的夹角)对喷嘴射流扩散角和射流流量的影响。

4.1 对射流扩散角的影响

为了验证喷嘴射流二相流仿真的合理性,当供油压力和滑油温度分别为 0.48 MPa, 35 °C 时,采用高速可视化技术获得喷嘴 PZ002 射流稳定后不同时间点的射流流束轮廓。通过实验中实际测试的供油压力和滑油温度,根据喷嘴入口和出口总流伯努利方程判断喷嘴射流为湍流,采用基于 FLUENT 的大涡数值模拟计算喷嘴 PZ002 二相流射流流场,其结果如图 8 所示。

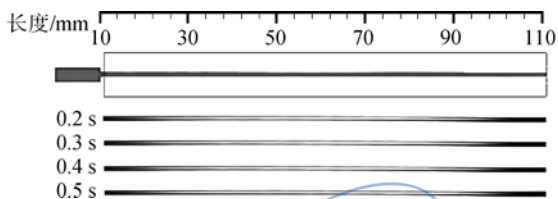


图 8 滑油射流轮廓的二相流仿真和实验结果

Fig. 8 Results of jet outline of two phase flow simulation and experiment respectively

采用大涡数值模拟方法计算喷嘴 PZ002 的射流扩散角为 0.034°,而采用高速可视化技术计算连续等间隔时间点喷嘴 PZ002 射流扩散角分别为 0.028°, 0.035°, 0.032°, 0.033°,实验测试参数受空气流动影响较大,但两种方法计算的射流扩散角均近似为零,因此说明基于 FLUENT 的大涡数值模拟和喷嘴射流二相流仿真能准确计算喷嘴射流扩散角。

4.1.1 喷孔长径比

改变 PZ001 的喷孔轴向长度 L (间接改变喷孔长径比),基于 FLUENT 对喷嘴射流流场二相流仿真,滑油温度为 80 °C 时计算结果如图 9 所示。

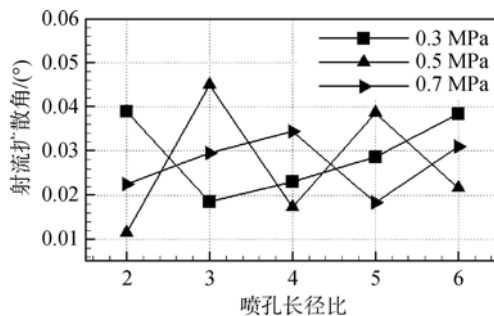


图 9 喷嘴射流扩散角随喷孔长径比的变化曲线

Fig. 9 Changing curves of diffusion angle of jet with length-diameter ratio of orifice

参照图 9, 当供油压力和滑油温度在喷嘴实际工况范围内时, 沿喷嘴轴线距喷嘴出口 100 mm 范围内滑油的射流扩散角近似为零. 根据文献[5]长径比增大时射流边界的扩散角会减小, 喷嘴 PZ001 的长径比为 2, 因此喷嘴长径比大于 2 时其变化对射流扩散角的影响很小.

4.1.2 喷嘴轴线与喷嘴上游管道轴线的夹角

改变喷嘴 PZ030 喷嘴轴线与喷嘴上游管道轴线的夹角 α , 基于 FLUENT 对其射流流场二相流仿真, 当滑油温度为 80 °C 时计算结果如图 10 所示.

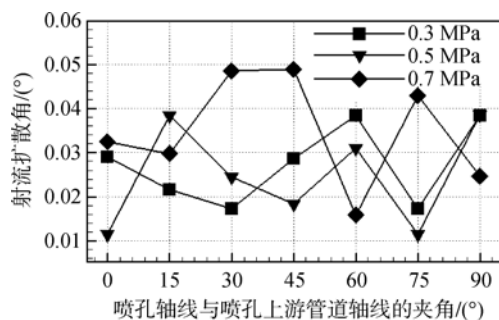


图 10 喷嘴射流扩散角随喷嘴轴线与喷嘴上游管道轴线的夹角的变化曲线

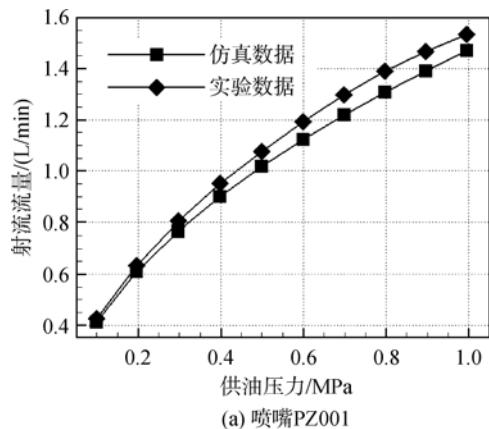
Fig. 10 Changing curves of diffusion angle of jet with the angle between the orifice axis and the axis of upstream flow channel

参照图 10, 当夹角 α 在 0°~90° 之间变化时, 沿喷嘴喷嘴轴线距喷嘴出口 100 mm 范围内射流扩散角近似为零, 因此喷嘴轴线与喷嘴上游管道轴线的夹角 α 在 0°~90° 范围内变化时对喷嘴射流扩散角的影响很小.

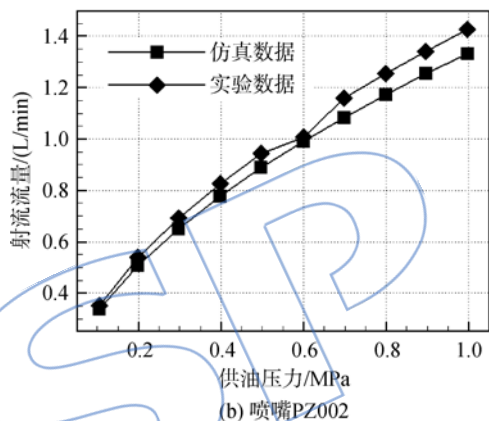
4.2 对射流流量的影响

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 °C 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、喷嘴 PZ002、喷嘴 PZ003 的射流流量, 仿真结果和实验结果如图 11 所示.

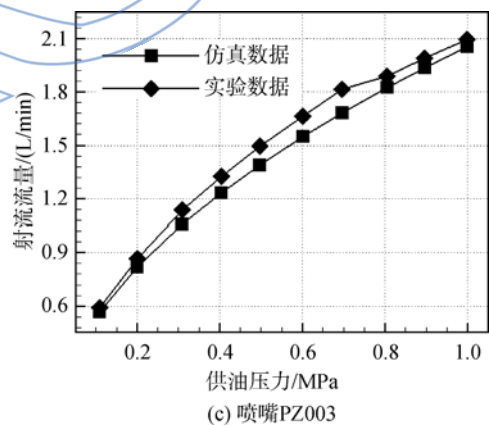
图 11 中仿真结果相对实验结果的最大偏差为 7%, 考虑到实验测试方法本身的误差和单相流模型未考虑的其他管路损失, 如收集喷嘴出口油液时流经圆管产生的损失, 说明数值计算结果是准确的, 同时也说明了单相流仿真的合理性和可行性.



(a) 喷嘴 PZ001



(b) 喷嘴 PZ002



(c) 喷嘴 PZ003

图 11 喷嘴射流流量随供油压力的变化曲线

Fig. 11 Changing curves of volume flux of jet of nozzles with different pressures

4.2.1 喷嘴直径

为了研究喷嘴直径对射流流量的影响, 改变喷嘴 PZ020 的喷嘴直径, 基于 FLUENT 分别对其单相流模型仿真得到在不同供油压力时的射流流量, 当滑油温度为 80 °C 时计算结果如图 12 所示.

参照图 12, 当喷嘴轴向长度 L 不变时, 随着喷嘴直径 d_2 的增大, 射流流量 Q 非线性增大.

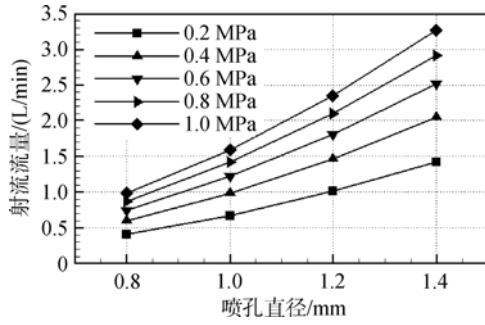


图 12 喷嘴射流流量随喷嘴直径的变化曲线

Fig. 12 Changing curves of volume flux of jet of nozzles with different orifice diameters

通常由 $Q = A_2 v_2$ 计算射流流量, 其中 $A_2 = \frac{\pi d_2^2}{4}$ 为喷嘴横截面面积, v_2 为喷嘴出口射流流速. 为了研究 d_2 对 v_2 是否造成影响, 分别将图 12 中射流流量除以喷嘴横截面面积得到 v_2 随 d_2 的变化曲线, 如图 13 所示.

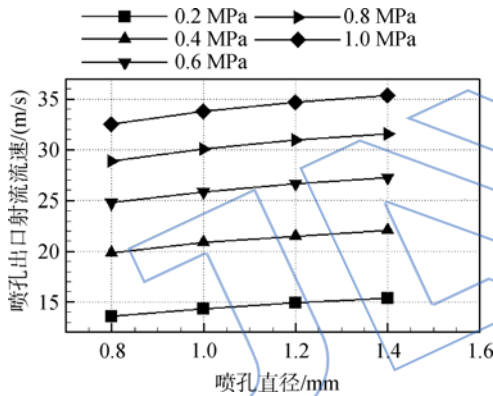


图 13 喷嘴出口射流流速随喷嘴直径的变化曲线

Fig. 13 Changing curves of jet velocity of nozzle exit with diameter of orifice

参照图 13, 当喷嘴直径 d_2 增大时 v_2 非线性增大. 根据总流伯努利方程 $z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{a_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{a_2 v_2^2}{2g} + h_w$ 以及流动阻力和能量损失^[3], 要使 d_2 增大时 v_2 增大, 则需使 d_2 增大时局部损失 h_j 减小. 通常 $h_j = \zeta \frac{v^2}{2g}$, 其中 ζ 为局部阻力系数且主要受几何形状的影响, 因此喷嘴直径 d_2 增大时局部阻力系数 ζ 减小. 从仿真结果也可以看出, 当 d_2 从 0.8 mm 增加到 1.4 mm 时, v_2 相对增加量最大为 13.13%.

4.2.2 喷嘴轴向长度

为了研究喷嘴轴向长度对射流流量的影响,

改变喷嘴 PZ020 的轴向长度 L , 基于 FLUENT 分别对其单相流模型仿真得到不同供油压力时的射流流量, 当润滑油温度为 80℃ 时计算结果如图 14 所示.

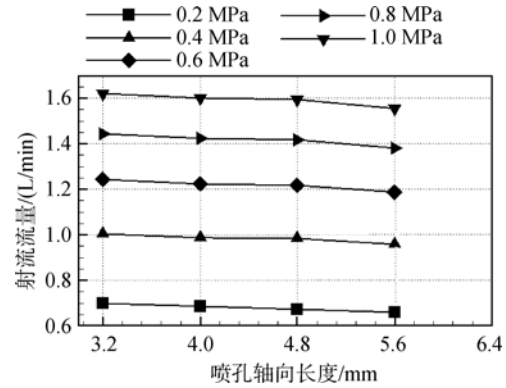


图 14 喷嘴射流流量随喷嘴轴向长度的变化曲线

Fig. 14 Changing curves of volume flux of jet of nozzles with different orifice axial lengths

4.2.3 喷嘴轴线与喷嘴上游管道轴线的夹角

为了研究喷嘴轴线与喷嘴上游管道轴线的夹角对射流流量的影响, 改变喷嘴 PZ030 的夹角 α , 基于 FLUENT 分别对其单向流模型仿真得到不同供油压力时的射流流量, 当润滑油温度为 80℃ 时计算结果如图 15 所示.

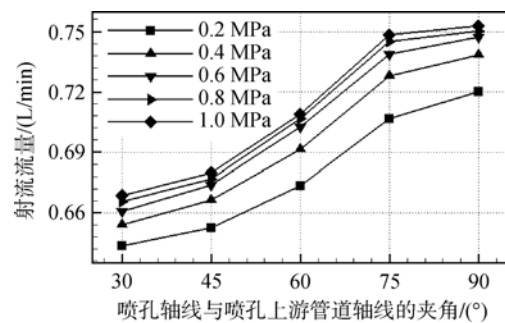


图 15 喷嘴射流流量随喷嘴轴线与喷嘴上游管道轴线的夹角的变化曲线

Fig. 15 Changing curves of volume flux of jet of nozzles with different angles between the orifice axis and the axis of upstream flow channel

参照图 15, 当喷嘴轴线与喷嘴上游管道轴线的夹角 α 在 30°~90° 范围内增加时, 喷嘴射流流量非线性增大. 根据流动阻力和能量损失^[3], 夹角 α 变化主要导致局部损失 h_j 发生变化. 参照总流伯努利方程及 $h_j = \zeta \frac{v^2}{2g}$ 知当夹角 α 从 30°~90° 逐

渐增大时,要使射流流量增大,则 h_1 需减小,即局部阻力系数 ζ 逐渐减小.当夹角 α 从 $30^\circ \sim 90^\circ$ 范围内增加时,不同供油压力下射流流量相对增加量最大为 13.03%.

5 结 论

1) 当喷孔长径比大于 2 时或喷孔轴线与喷孔上游管道轴线的夹角在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内变化时,两者对射流扩散角的影响很小.

2) 增加喷孔直径和喷孔轴线与喷孔上游管道轴线的夹角或者减小喷孔轴向长度均会引起射流流量的增加.

3) 滑油流过喷嘴时产生的能量损失与喷嘴结构有关,喷孔直径和喷孔轴线与喷孔上游管道轴线的夹角增加时产生的局部损失减小,喷孔轴向长度减小时产生的沿程损失减小.

参考文献:

- [1] 《航空发动机设计手册》总编委会. 航空发动机设计手册: 第 12 册 传动及润滑系统[M]. 北京: 航空工业出版社, 2002.
- [2] 《航空发动机设计手册》总编委会. 航空发动机设计手册: 第 13 册 减速器[M]. 北京: 航空工业出版社, 2002.
- [3] 贾月梅. 流体力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [4] 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.
- [5] CAI Jinsheng, Tsai H M, 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.
- [6] SUN Zuoyu, LI Guoxiu, 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.
- [7] 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(4): 103-118.
- [8] 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): 1605-1610.
WANG Yanzhong, NIU Wentao, TANG Wen, et al. Analysis on influence of spray orientation parameters on spray lubrication process of aero spur gears[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(7): 1605-1610. (in Chinese)
- [9] 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): 1665-1670.
WANG Yanzhong, NIU Wentao, TANG Wen, et al. Research on deflection of nozzle spray direction[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(7): 1665-1670. (in Chinese)
- [10] 康灿, 张峰, 杨敏官, 等. 环形水射流流场的实验研究与统计分析[J]. 实验流体力学, 2011, 25(1): 7-12.
KANG Can, ZHANG Feng, YANG Minguan, et al. Experimental and statistical analysis of water jet discharged from an annular nozzle[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2011, 25(1): 7-12. (in Chinese)
- [11] 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.
CAI Hongsheng. Design of subsonic velocity jet test platform and flow field simulation [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- [12] 刘奕, 郭印诚, 张会强, 等. 平面射流及平面射流火焰中拟序结构的实验研究[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2002, 42(2): 243-246.
LIU Yi, GUO Yincheng, ZHANG Huiqiang, et al. Experimental study of coherent structures in planar jets and planar jet flames[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2002, 42(2): 243-246. (in Chinese)
- [13] 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 aero spur gears[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(2): 439-444. (in Chinese)
- [14] TIAN Xiushan, ZHAO Hui, LIU Haifeng, et al. Three-dimensional large eddy simulation of round liquid jet primary breakup in coaxial gas flow using the VOF method[J]. Fuel Processing Technology, 2015, 131(3): 396-402.
- [15] 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.
ZHOU Jianzhao, XU Xiaopan, ZHU Zicheng, et al. Flow field analysis of thermal jet nozzle based on ICEM CFD and ANSYS FLUENT[J]. Machine Tools and Hydraulics, 2014, 42(17): 157-160, 122. (in Chinese)
- [16] 禹言芳, 李春晓, 孟辉波, 等. 不同形状喷嘴的射流流动与卷吸特性[J]. 过程工程学报, 2014, 14(4): 549-555.
YU Yanfang, LI Chunxiao, MENG Huibo, et al. The jet flow and entrainment characteristics of different shape of nozzles[J]. Chinese Journal of Process Engineering, 2014, 14(4): 549-555. (in Chinese)
- [17] WANG Fujun, FANG Tiegang. Liquid jet breakup for non-circular orifices under low pressures [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2015, 72: 248-262.
- [18] 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.
- [19] 唐家鹏. FLUENT 14.0 超级学习手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2013.