

# 基于仿真分析的活塞冷却喷嘴主要结构参数对打靶效率的影响

李浩瑄, 王毅, 范鲁艳\*, 张家华

摘要为探究活塞冷却喷嘴打靶准确率受哪些因素影响, 先是建立了二维模型, 并通过 Fluent 模拟打靶过程, 针对活塞冷却喷嘴参数繁多, 控制变量法仿真过于繁琐的问题, 首先结合正交分析减少实验次数, 并通过极差分析和方差分析找到主要影响参数, 通过主成分分析和多因素分析验证主要影响参数的信息贡献率, 获得了活塞冷却喷嘴各个参数对打靶准确率的影响, 并通过再次修改主要参数验证了仿真结论。最后根据回归分析获得了活塞冷却喷嘴参数对油束扩散角度和打靶准确率的回归方程, 及最主要影响因素。

关键词 活塞冷却喷嘴; Fluent; 正交分析; 主成分分析; 多因素分析

[Abstract] To investigate the factors affecting the accuracy of the piston cooling nozzle in the shooting process, a two-dimensional model was first established, and the Fluent software was used to simulate the shooting process. Due to the large number of parameters involved in the piston cooling nozzle and the complexity of controlling variables in simulation experiments, the orthogonal analysis was employed to reduce the number of experiments, and the main influencing parameters were identified through range analysis and variance analysis. The information contribution rate of the main influencing parameters was verified by principal component analysis and multiple factor analysis, and the effects of various parameters on the shooting accuracy were obtained. The simulation conclusion was further verified by modifying the main parameters. Finally, the regression equation of the piston cooling nozzle parameters on the diffusion angle of the oil beam and the shooting accuracy, as well as the most important influencing factors, were obtained through regression analysis. Overall, this method uses numerical simulation and statistical analysis to efficiently and reliably identify the main influencing parameters and their effects on the shooting accuracy of the piston cooling nozzle, and provides guidance for its optimization.

[Keywords] Piston Cooling Nozzle; Fluent ; Orthogonal Analysis; Principal Component Analysis; Multifactor Analysis;

目前发动机为满足排放要求, 强化系数逐渐提高, 引发许多待解决问题, 其中曲轴箱内油雾浓度因发动机强化而明显提高的问题, 尤为值得关注, 曲轴箱内油雾生产的主要部位即为活塞冷却喷嘴, 但对其构造及性能的研究较少, 本次笔者以 Fluent 模拟喷嘴喷油过程, 探究活塞冷却喷嘴性能参数受哪些因素影响。

## 1 绪论

随着柴油机的不断强化, 活塞的热负荷越来越高, 为了满足柴油机的使用要求, 整体内冷油腔活塞、钢顶铝裙、整体锻钢、复合材料、铸铁等活塞应运而生, 其原因一是阻止热源通过活塞向曲轴箱内传热, 使其机油受热碳化, 弱化机油的润滑性能; 另一原因是避免活塞本身受热膨胀变形过大, 降低活塞与气缸壁拉缸的风险。这些高负荷柴油机活塞一般采用内冷

油腔设计,冷却机油通过喷嘴喷入冷却油腔,在油腔内振荡、吸收活塞热量后流出,从而降低活塞(特别是头部)温度。冷却喷嘴一般是固定在发动机机体上的冷却装置(也有大型船用柴油机冷却喷嘴在连杆小头上),在活塞作高速往复运动时,将冷却机油喷入内冷油腔内。冷却机油从喷嘴喷射进入活塞冷却油腔是一个非常复杂的流动过程,其主要形式有自由喷射冷却、振荡冷却和强制震荡冷却三种。[1]

图1显示常见活塞冷却喷嘴基本结构:

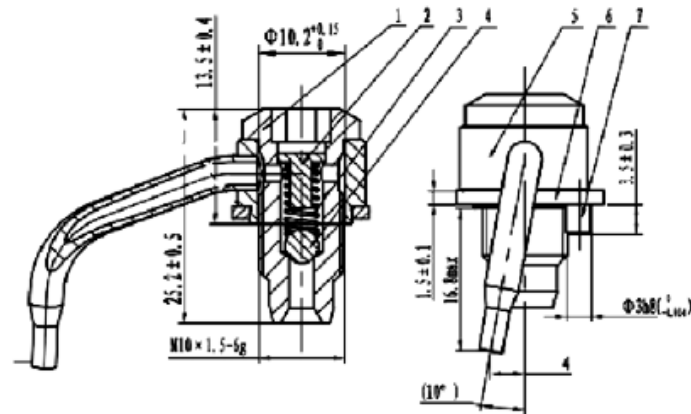


图1 活塞冷却喷嘴基本结构

1为阀体,2为限位块,3为弹簧,4为钢球,5为金属环,6为金属片,7为定位销以及喷油管主要部件组成喷嘴主体结构。润滑油从喷嘴入口流入,当润滑油供油压力达到一定设计压力要求,将钢球及预紧弹簧一起打开,此刻成为喷嘴流量开启时刻,当压力随之继续增大,流量继续增加,当压力达到足够大,此刻弹簧被压缩到不能再压的时刻,由弹簧限位块进行限制,同时,随着供油压力的增长,活塞的流量基本达到了限值。[2]

冷却喷嘴射流为非淹没射流,国内外学者在淹没射流和非淹没射流方面已进行了大量研究。陈春等[3]利用计算流体力学的方法,比较分析了淹没射流和非淹没射流的区别。王冬等[4]将紊流  $k-\epsilon$  模型和多流体模型结合,建立了适合于描述非淹没高速水射流喷嘴内外流场特性的数学模型,对其进行了大量的模拟计算。杨国来等[5]以水和空气为对象分析了非淹没射流下喷嘴的流动过程及两相分布,从黏性运动的基本方程出发得出了湍流射流的基本方程。Wen 等[6]利用实验研究了淹没射流的流动特性,对比了低雷诺数和高雷诺数对射流结构的影响。Carlomagno 等[7]主要研究了从喷嘴到平板短距离内的流动结构及其动态特性。Xia[8]通过数值模拟和试验详细比较了相同的网格分辨率和流动条件下圆形喷嘴和锯齿形喷嘴的射流特性,通过瞬时近场的流场可视化研究,根据涡度轮廓的比较,结果显示两种喷嘴在近喷嘴区域的剪切层生长的机制不同。Ayech 等[9]采用改进的低雷诺兹数  $k-\epsilon$  模型,利用有限差分法对控制方程进行数值求解,主要研究了速度比对流动的动态、热和湍流特性的影响。此外,相关研究表明潜在核心区内同向协同射流对喷嘴射流动态特性、温度和湍流参数的影响是可以忽略不计的。本文在此研究的基础上利用试验获取冷却喷嘴的喷流参数,通过数值模拟研究不同喷流速度和喷流密度的变化规律,并分析喷嘴出口到喷流截面的距离和喷流截面宽度的关系,建立了冷却喷嘴喷流模型,确定内冷油腔入口捕捉率的影响因素。[10]吴倩文等利用 CFD 动态网格层变法建立了活塞振荡冷却的瞬态计算模型,并应用 VOF 模型对活塞的振荡冷却进行了瞬态数值模拟计算。分析了活塞在不同位置时油腔内冷却油的流动情况,得到了内冷油腔的机油填充率、壁面传热系数等随曲轴转角的变化规律。为验证其冷却效果,提取了内冷油腔壁面的换热边界,对活塞的温度场进行了有限元模拟计算,并与试验结果进行了对比,为活塞的优化设计提供了依据[11]谭建松等通过建立发动机内部活塞与周围环境的传热模型,应用三维有限元方法,对比分析了不同冷却方式对活塞热状态的影响作用。经过

对发动机活塞采用内冷油腔、底喷无油腔、无底喷油雾、高位空心环内冷等 4 种不同冷却方式的对比计算,表明在高强化发动机上仅采用底喷无油腔、无底喷油雾无法满足活塞的使用要求,必须采用强制内部冷却才能有效大幅度降低活塞高温区域的温度,提高活塞的可靠性。[12]仲杰设计带内冷油腔的活塞喷油冷却的稳态实验测量台,针对活塞测量出不同喷油压力下定时间段内冷却喷嘴的总喷油量和内冷油腔的回油量,分析内冷油腔回油量与活塞位置的关系及因喷油压力改变造成的活塞不同位置处内冷油腔机油流量的变化。数值模拟阶段,首先提取活塞喷油冷却的稳态模型,模拟实验条件下得到的不同喷油压力下活塞处于不同位置时内冷油腔内的机油通过量及其占总喷油量的百分比,通过与实验结果进行对比证明稳态模拟的可信性。在此基础上分析活塞处于不同位置时,冷却机油在内冷油腔内的体积分数分布和机油流动情况,确认喷油嘴与冷却油腔的配合效果,并对不同喷油角度进行模拟,分析不同喷油角度对结果的影响。由于实际工作过程中活塞并非静止,因此根据活塞实际运动规律,采用动网格技术模拟不同喷油速度、不同活塞运行速度及不同喷油角度时,整个循环过程中的不同时刻冷却机油在内冷油腔壁面的分布,内冷油腔进、出口瞬时机油质量流量以及由振荡冷却产生的换热效果,并与稳态结果进行对比和分析,通过分析得出喷油速度、活塞速度、喷油角度与换热系数的关系。利用软件求出未加任何冷却方式时的活塞温度场的分布,再将瞬态数值模拟部分求得的活塞内冷油腔表面的换热系数与流体温度进行时间和空间平均,作为活塞温度场计算的第三类边界条件,同时结合燃气温度和活塞其他表面换热系数的经验公式求出带有内冷油腔的活塞温度场的分布。比较无任何冷却方式和内冷油腔喷油冷却两种情况下活塞的温度场分布的不同,从而分析内冷油腔喷油冷却方式对活塞温度场分布的影响和意义。[4]曹元福等采用商用软件 FLUENT 的动网格技术和多相流模型对某活塞开式内冷油腔中的振荡流动特性与传热特性进行了模拟研究,揭示了机油通过率、充油率和换热系数随转速、冷却机油流量的变化规律。结果表明:机油通过率在 60%~80%左右;机油填充率与转速和机油流量密切相关;内冷油腔平均换热系数随转速的提高而迅速增大;油腔中机油填充率过多或过少都会导致换热性能的下降。选取 50%的机油填充率,可在保证活塞振荡传热效果的前提下,降低了冷却喷嘴的机油流量。[13]

活塞冷却喷嘴安装于发动机缸体内,喷射出的机油也分布在气缸内部,如采属试验方法对其流场分布及喷射规律进行研究,不但成本高昂,而且难以实现,因此,近年来研究者多使用 CFD 方法进行研究。郭金宝等人对带内冷油腔的柴油机活塞进行了机油填充分析,获得了机油填充率和壁面传热系数;仲杰等人通过稳态分析,得到了活塞处于不同位置时,内冷油腔内机油的流动与分布规律;王任信等人使用动网格技术,研究了柴油机活塞内冷油腔运动情况下的振荡流动特性与传热特性。现有的研究主要针对柴油机活塞、仅关注内冷油腔在运动情况下的机油填充及换热规律。[14]

本文主要研究活塞冷却喷嘴参数在打靶准确率方面的影响。

## 2 软件

### 2.1 仿真软件

本次使用 ANSYS Fluent 软件进行仿真分析,ANSYS Fluent 是一款强大的计算流体力学 (CFD) 软件,由 ANSYS 公司开发。它用于模拟流体流动及相关物理现象,如热传递、化学反应和湍流等。Fluent 使用数值方法解决复杂的流体流动问题,包括稳态和时变模拟。它可以处理各种流体流动场景,包括可压缩和不可压缩流、层流和湍流、多相流等。该软件提供了用户友好的界面,可用于设置模拟、定义几何形状、指定边界条件和可视化结果。它还

提供了全面的后处理工具，用于分析和可视化模拟数据，如速度场、压力分布、温度剖面 and 流动轨迹等。

## 2.2 统计分析软件

本次使用 SPSS (Statistical Product and Service Solutions) 软件进行数据分析，SPSS (是由 IBM 公司开发的一款集成统计分析、数据挖掘和预测建模等功能的软件。它是目前全球最流行的统计分析软件之一，也是社会科学、商业管理、医学、工程技术等领域研究中最常用的数据分析工具之一。SPSS 软件提供了丰富的分析工具和技术，包括描述性统计分析、推理统计分析、因子分析、聚类分析、回归分析、多元分析、时间序列分析等。这些功能可以帮助用户从海量数据中提取有用的信息，发现数据中的规律和趋势，为决策提供科学依据。

## 3 边界条件

### 3.1 标准几何结构

选用活塞冷却喷嘴参数如下图所示，活塞冷却喷嘴本身结构高度对称，故可以使用二维模型简化计算，对与活塞冷却喷嘴打靶准确率，需要观察油束在曲轴箱内的发展过程，故设计与曲轴箱内尺寸相似的 60mm×60mm 计算域以模拟油束运动过程。

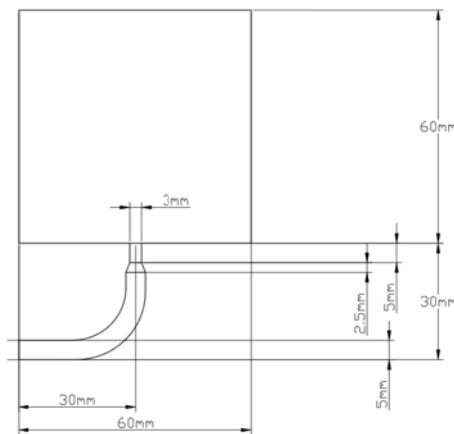


图 2 标准活塞冷却喷嘴及喷射域尺寸图

### 3.2 网格划分

利用 Meshing 进行网格划分，经查询文献发现边界层网格设定遵循公式：

$$\delta = 5.0 * \nu / u \quad (1)$$

其中， $\delta$  表示边界层厚度， $\nu$  表示流体的运动粘度， $u$  表示流体的平均速度。适用于雷诺数处于较低范围内的情况（通常小于 2300）。当雷诺数超过 2300 时，流动状态将从层流变为湍流，边界层厚度公式也需要进行相应的修正。此时可以采用 Prandtl-Karman 定律，其形式为：

$$\delta = k * x / \text{sqrt}(Rex) \quad (2)$$

其中， $\delta$  表示边界层厚度， $x$  表示离起点的距离， $Re_x$  表示以  $x$  为特征长度的雷诺数， $k$  为经验常数，通常在 0.35 左右。适用于雷诺数处于较高范围内的情况（通常大于 2300）。

$$Re = \rho v l / \mu \quad (3)$$

其中， $\rho$  表示流体密度， $v$  表示流体速度， $l$  表示特征长度， $\mu$  表示流体粘度。

$$Re_x = (\rho v |x|) / \mu \quad (4)$$

其中， $\rho$  表示流体密度， $v|x|$  表示在  $x$  位置处的流体速度大小， $\mu$  表示流体粘度。

下图为网格划分示意图：

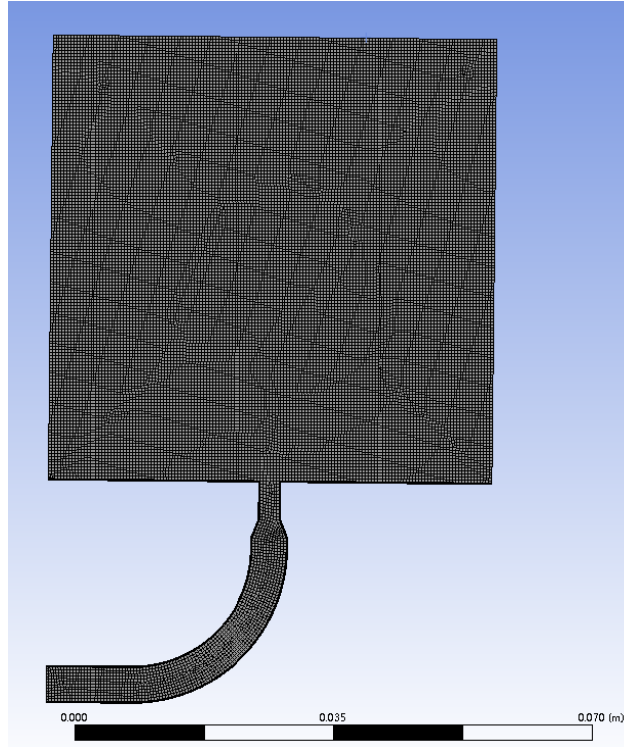


图 3 网格划分示意图

调整 mesh 模块 display 命令至显示网格质量 (elementquality)，如下图所示，整体网格质量较好。

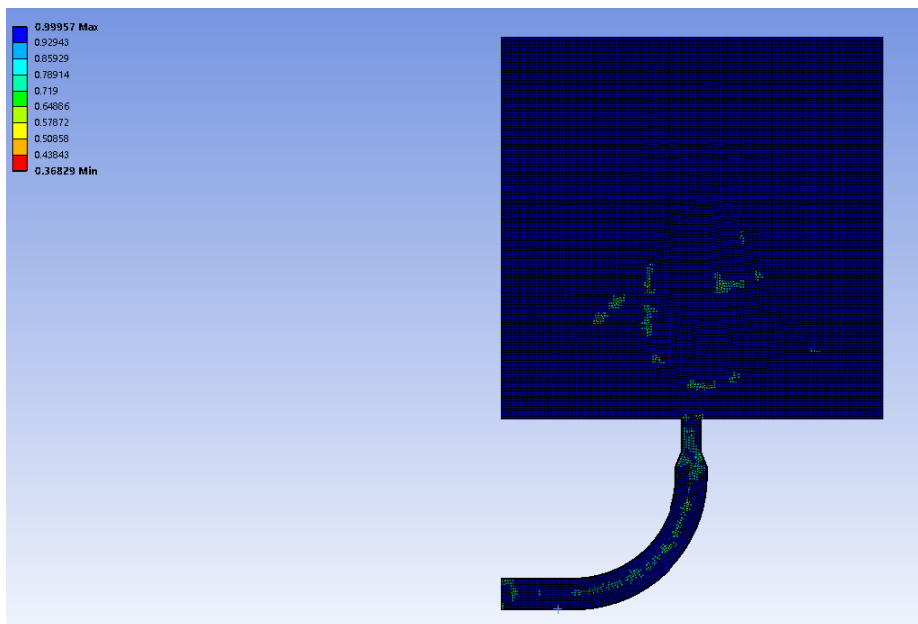


图 4 网格质量图

在 Meshing 模块下可以对边界命名以减少在 Fluent 中的操作，设定喷管壁为 Wall，曲轴箱内空间为 airfree，喷管进口为 oilin。并使用更新命令把网格信息导入 Fluent 中，在 Fluent 中并未内置润滑油作为预设流体，故查阅文献自行创建，定义密度为  $800\text{kg/m}^3$  运动粘度为  $0.0056\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 。设定重力为 y 轴负方向  $9.81\text{m/s}^2$ ，由于研究为管道内流动且条件稳定故选用稳态模拟 (steady)。由于油束射入气体域中属于典型的多相流工况，故开启多项模型，并选择 VOF (volumeoffluid) 模型，Volume of Fluid (VOF) 是一种流体模拟方法，用于模拟两种或多种不相溶流体之间的界面。VOF 方法通过跟踪流体中每个体积元素 (或单元格) 内的物质的体积分数，来确定不同流体之间的交界面。在 VOF 方法中，每个体积元素都被认为是单一流体或多个流体中的一种，每种流体都有一个特定的物质体积分数值。当两种不同的流体交界时，交界面上的体积分数值会发生跃迁，从而形成一个清晰的界面。使用参数化的方式建立体积分数的数学公式，并使用显式求解方法对其进行求解，润滑油显然具有粘性，故选择 RNG K-epsilon，定义质量流量入口，质量流量为  $10\text{L}/\text{min}$ ，定义喷管壁为 Wall，定义曲轴箱空气域边界都为压力出口，并允许空气回流。创建上壁面直线以观察油束角度进行全局初始化并是全部计算区域充满空气，求解流体动力学方程组的数值方法为 Coupled，Coupled 方法具有更高的准确性，且更易于收敛。设定速度图和相图以观察油束状态，设定动画监测，每 5 步输出一次，以观察状态，收敛残差全部定义为  $10^{-4}$ ，仿真结果如下图所示：

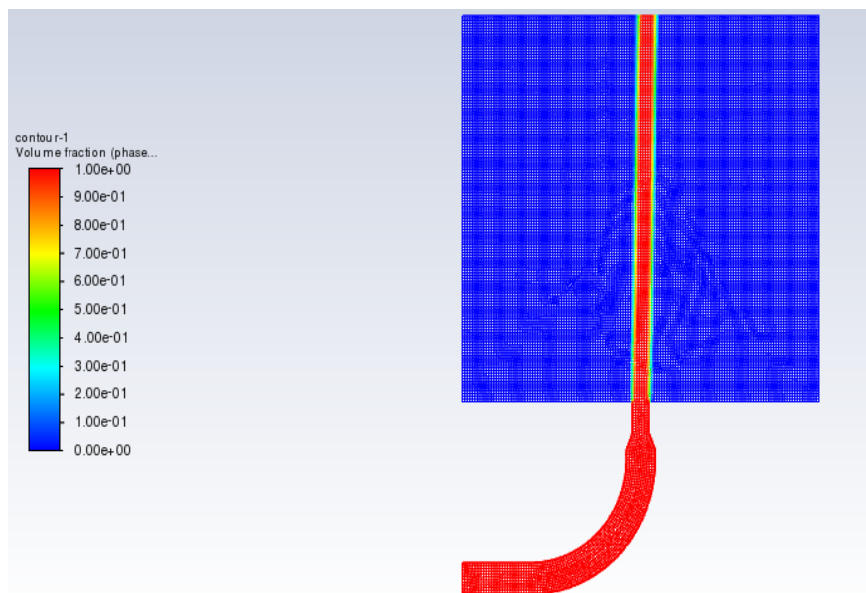


图 5 喷射过程相图

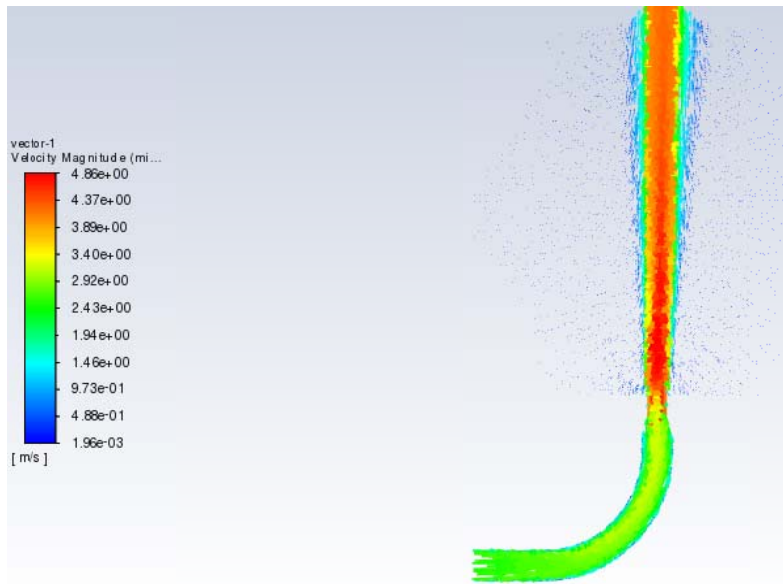


图 6 喷射过程速度矢量图

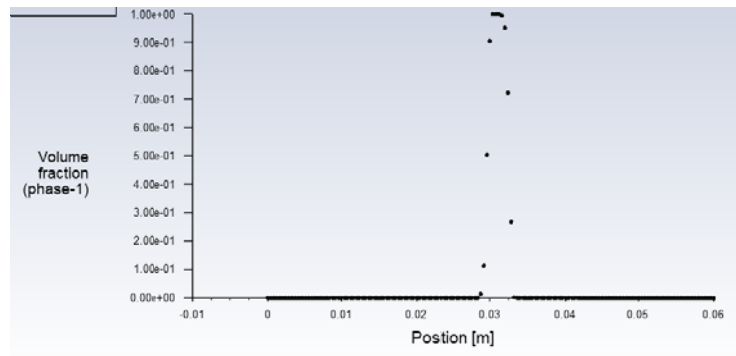


图 8 计算域上缘油束扩散长度

仿真可见：相呈现中心多，边缘与空气结合的趋势，油束中心速度大且集中，边界速度小且发散，速度整体符合文献及真实发动机需要，根据检测计算域上缘油束扩散长度可以计算油束角度和打靶准确率。

## 4 仿真结果

### 4.1 正交分析

活塞冷却喷嘴制造参数繁多，导致控制变量实验过于繁杂故采用正交分析减少实验次数，正交分析（Orthogonal Analysis）是一种多元统计分析方法，用于确定影响结果的各种因素之间的相互作用和重要性，以优化设计或改进生产过程等。它是一种实验设计和数据分析方法，旨在减少实验次数、提高实验效率和精度。正交分析的核心思想是将多个因素分解为正交（垂直）的因子，以避免因素之间的相互干扰和混淆。这些正交因子可以通过数学方法进行计算和优化，并用于预测结果和优化设计。选取入口直径、入口至缩口中轴长度、缩口直径、缩口长度、喷管高度、渐缩管长度为 6 因素，每个因素设置 3 个水平，获得正交分析表格如下：

表 1 正交分析表格

编号	入口直径 /mm	总长 /mm	缩口直径 /mm	缩口长 度/mm	总高 /mm	渐缩管长 /mm
1	5	30	3	5	30	2.5
2	5	30	2	6	29	3
3	5	31	3	4	29	2
4	5	31	4	5	31	3
5	5	29	2	4	31	2.5
6	5	29	4	6	30	2
7	4.5	30	3	4	31	3
8	4.5	30	4	5	29	2
9	4.5	31	2	6	31	2
10	4.5	31	4	4	30	2.5
11	4.5	29	3	6	29	2.5
12	4.5	29	2	5	30	3
13	5.5	30	2	4	30	2
14	5.5	30	4	6	31	2.5
15	5.5	31	3	6	30	3
16	5.5	31	2	5	29	2.5
17	5.5	29	3	5	31	2
18	5.5	29	4	4	29	3

## 4.2 基于正交分析的仿真结果

根据第三章所示，对表格中 18 种喷管进行仿真分析，得到所有结果汇总于下表，测量为计算域上边缘油束长度，并根据参数及该长度计算油束角。

表 2 仿真结果

编号	入口直径 /mm	总长 /mm	缩口直径 /mm	缩口长 /mm	总高 /mm	渐缩管长 /mm	油束角/ $^{\circ}$	打靶准确率
1	5	30	3	5	30	2.5	0.859808	0.512821
2	5	30	2	6	29	3	1.71923	0.526316
3	5	31	3	4	29	2	0.859808	0.512821
4	5	31	4	5	31	3	0.764286	0.416667
5	5	29	2	4	31	2.5	1.146344	0.625
6	5	29	4	6	30	2	0.764286	0.416667
7	4.5	30	3	4	31	3	0.859808	0.512821
8	4.5	30	4	5	29	2	0.955326	0.4
9	4.5	31	2	6	31	2	0.764286	0.714286
10	4.5	31	4	4	30	2.5	1.5283	0.357143
11	4.5	29	3	6	29	2.5	0.859808	0.512821
12	4.5	29	2	5	30	3	1.337337	0.588235
13	5.5	30	2	4	30	2	0.573229	0.769231
14	5.5	30	4	6	31	2.5	0.955326	0.4



15	5.5	31	3	6	30	3	0.668759	0.540541
16	5.5	31	2	5	29	2.5	0.764286	0.714286
17	5.5	29	3	5	31	2	1.050838	0.487805
18	5.5	29	4	4	29	3	0.573229	0.434783

对油束角进行极差分析,极差分析是利用方差分析的方法进行数据分析和效应评估。与方差分析不同的是,极差分析强调的是效应值的极限情况而非平均值。考虑了因素效应的极限情况,不仅反映平均水平。可以比较各个因素的最大效应,更详细地评估影响。不假设数据服从特定分布,提高了可信度。

结果为:

表 3 极差分析

K1	6.97357	5.922726	5.15883	5.73188	5.73172	6.113872
K2	7.832991	5.349726	6.304712	5.731695	5.731687	5.922649
K3	6.209666	5.731842	5.540752	5.540719	5.540887	4.967773
k1	1.162262	0.987121	0.859805	0.955313	0.955287	1.018979
k2	1.305499	0.891621	1.050785	0.955282	0.955281	0.987108
k3	1.034944	0.955307	0.923459	0.923453	0.923481	0.827962
R	0.127317	0.0955	0.19098	0.03186	0.031805	0.191017

根据极差分析可知:最大角度应出现在

4.5	30	2	5	30	2.5
-----	----	---	---	----	-----

最小角度应出现在

5.5	31	3	4	31	2
-----	----	---	---	----	---

经仿真验证可得:

最大角度为  $1.15^\circ$  , 最小角度为  $0.86^\circ$  。另可发现对于油束角度最大影响因素为缩口直径,次为入口直径,再次为渐缩管长。可以发现理论上最合理试验并未得到对应最大最小角度,原因在于极差分析存在缺点: 1.只关注极值,忽略了因素之间的关系。2.结果依赖于实验设计,可能存在偏差。故对上述数据进行方差分析验证极差结论。

方差分析(ANOVA)是一种统计方法,用于检验不同因素对结果的影响。它通过比较实验组与对照组间的方差来判断复杂数据间的差异是否具有统计学意义。计算组内方差(within-groups variance)和组间方差(between-groups variance)。计算 F 值。如果 F 值显著高于 1,说明组间差异大于组内差异,因素可能有影响。通过 F 检验进行假设检验。一般采用系数相关性表,判断 F 值的显著性。根据 p 值判断结果是否具有统计学显著性。p 值通常取 0.05 或 0.01。利用 SPSS 进行主成分分析,分析结论如下:

表 4 方差分析

### 主体间效应检验

因变量: 角度

源	III 类平方和	自由度	均方	F	显著性
修正模型	.572 <sup>a</sup>	12	.048	.219	.985
截距	16.064	1	16.064	73.932	<.001
入口直径	.296	2	.148	.681	.548
总长	.028	2	.014	.065	.938
缩口直径	.113	2	.057	.261	.780
缩口长	.004	2	.002	.009	.991
总高	.004	2	.002	.009	.991
渐缩管长	.126	2	.063	.289	.761
误差	1.086	5	.217		
总计	17.722	18			
修正后总计	1.658	17			

a. R 方 = .345 (调整后 R 方 = -1.228)

可以看到入口直径、缩口直径、渐缩管长，对油束角有影响，且在置信区间为 98.5% 情况下，无因素存在显著影响，方差分析与极差分析出现不同，且仍未发现参数对油束角和打靶准确率的明显影响。为寻找更具体的关系引入其他方法。

在仿真过程中可以发现，油束在空气中扩散的主因之一是在管内流动时，弯曲区域及缩口区域导致的流动变化，使得油束出现了更明显的速度分布差异，为探究参数间的关系及其对油束角的影响，进行主成分分析。

主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA) 是一种常用的数据降维技术，用于将多个相关变量转化为少数几个无关变量，以便更好地理解数据的结构和特征。主成分分析是一种线性变换技术，通过线性组合原始变量得到新的主成分，使得主成分之间不相关，且第一主成分解释原始数据方差最大，第二主成分解释方差次大，以此类推。主成分分析的核心思想是通过降维来减少数据中的冗余信息，提高数据的解释性和可视化能力。

利用 SPSS 进行主成分分析，分析发现：

表 5 检验

### KMO 和巴特利特检验

KMO 取样适切性量数。		.244
巴特利特球形度检验	近似卡方	49.428
	自由度	28
	显著性	.007

KMO 值较低主原因为样本数量少，但巴特利特球形度检验显著性满足主成分分析要求，故可以进行分析。

表 6 方差解释

### 总方差解释

成分	初始特征值			提取载荷平方和		
	总计	方差百分比	累积 %	总计	方差百分比	累积 %
1	1.956	24.446	24.446	1.956	24.446	24.446
2	1.477	18.468	42.914	1.477	18.468	42.914
3	1.000	12.500	55.414			
4	1.000	12.500	67.914			
5	1.000	12.500	80.414			
6	1.000	12.500	92.914			
7	.551	6.884	99.798			
8	.016	.202	100.000			

提取方法：主成分分析法。

表7 主成分值

### 成分矩阵<sup>a</sup>

	成分	
	1	2
打靶准确率	-.987	.086
缩口直径	.877	-.460
总长	-.139	-.130
缩口长	.073	.064
角度	.256	.835
入口直径	-.263	-.646
渐缩管长	.229	.344
总高	-.045	-.069

提取方法：主成分分析法。

a. 提取了 2 个成分。

利用主成分分析提取了 2 个主成分，可以解释全局的 42%，对数据进行标准化，并计算  $y_1$  和  $y_2$  值。

表8 主成分、油束角及打靶准确率

编号	$y_1$	$y_2$	$y$	油束角 /°	打靶准确率
1	0.028305	-0.23546	-0.03559	0.859808	0.512821
2	-0.01045	3.18749	0.571239	1.71923	0.526316
3	-0.44303	-0.79369	-0.24919	0.859808	0.512821
4	1.848552	-0.9356	0.275245	0.764286	0.416667
5	-1.69031	1.156043	-0.19759	1.146344	0.625
6	1.774757	-1.28672	0.194332	0.764286	0.416667
7	0.473455	0.784571	0.254852	0.859808	0.512821
8	2.184494	-0.16791	0.494055	0.955326	0.4
9	-2.86407	0.401673	-0.61508	0.764286	0.714286

10	2.977937	1.429395	0.971996	1.5283	0.357143
11	0.64723	0.846463	0.307699	0.859808	0.512821
12	-0.50138	2.97667	0.41547	1.337337	0.588235
13	-4.05931	-1.52257	-1.2483	0.573229	0.769231
14	1.810758	-1.38433	0.185402	0.955326	0.4
15	-0.47829	-1.16417	-0.32434	0.668759	0.540541
16	-3.19733	-0.6386	-0.88231	0.764286	0.714286
17	-0.08038	-0.84859	-0.17204	1.050838	0.487805
18	1.579079	-1.80465	0.054143	0.573229	0.434783

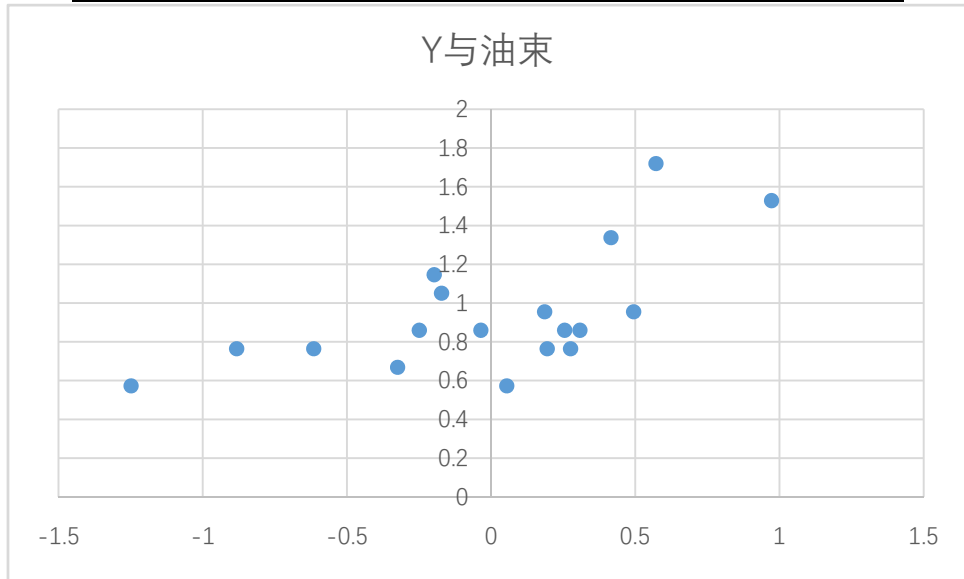


图 9 主成分与油束角散点图  
表 9 主成分与油束角回归拟合度

**模型摘要**

模型	R	R 方	调整后 R 方	标准估算的误差
1	.634 <sup>a</sup>	.402	.365	.24889

a. 预测变量: (常量), y

表 10 主成分与油束角回归显著性

**ANOVA<sup>a</sup>**

模型		平方和	自由度	均方	F	显著性
1	回归	.667	1	.667	10.765	.005 <sup>b</sup>
	残差	.991	16	.062		
	总计	1.658	17			

a. 因变量: 角度

b. 预测变量: (常量), y

R 略小于 0.7, R<sup>2</sup>略小于 0.5, 因为提取的主成分只能解释<50%的总信息, 但模型回归显著, 方程如下表给出:

表 11 主成分与油束角回归方程

### 系数<sup>a</sup>

模型		未标准化系数		标准化系数	t	显著性
		B	标准错误	Beta		
1	(常量)	.945	.059		16.103	<.001
	y	.367	.112	.634	3.281	.005

a. 因变量：角度

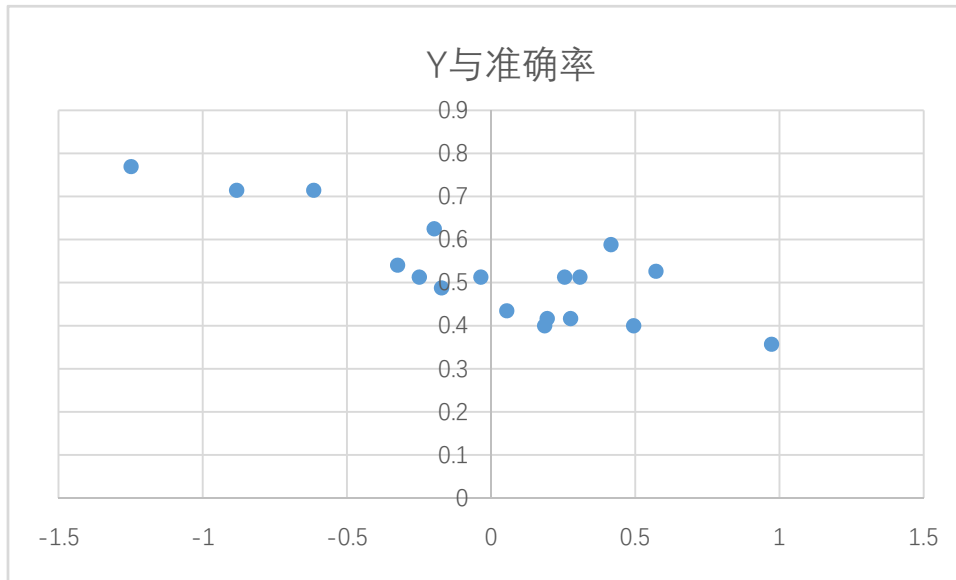


图 10 主成分与打靶准确率散点图

表 12 主成分与打靶准确率回归拟合度

### 模型摘要

模型	R	R 方	调整后 R 方	标准估算的错 误
1	.816 <sup>a</sup>	.666	.645	.07056

a. 预测变量：(常量), y

表 13 主成分与打靶准确率回归显著性

### ANOVA<sup>a</sup>

模型		平方和	自由度	均方	F	显著性
1	回归	.159	1	.159	31.913	<.001 <sup>b</sup>
	残差	.080	16	.005		
	总计	.239	17			

a. 因变量：打靶准确率

b. 预测变量：(常量), y

模型拟合程度高，回归显著，方程如下表给出：

表 15 主成分与打靶准确率回归方程

系数<sup>a</sup>

模型		未标准化系数		标准化系数	t	显著性
		B	标准错误	Beta		
1	(常量)	.525	.017		31.540	<.001
	y	-.179	.032	-.816	-5.649	<.001

a. 因变量：打靶准确率

根据主成分分析，对大量参数进行降维后发现了 y 与油束和打靶准确率的对应关系，但主成分分析求解 y 值步骤长，需要试验数量多，且仍未明晰各个参数对油束和打靶准确率的影响，故引入多元回归分析继续寻找。

多元回归分析是一种常用的统计分析方法，用于探究一个或多个自变量与因变量之间的关系，并可以用于预测因变量的取值。在多元回归分析中，因变量通常是感兴趣的变量，而自变量是可能影响因变量的变量。多元回归分析的基本思想是建立一个数学模型，该模型可以描述因变量与自变量之间的关系。在这个模型中，每个自变量都有一个系数，用于表示该变量对因变量的影响程度。通过对模型进行拟合，可以得到自变量的系数，从而确定自变量与因变量之间的关系。

利用 SPSS 进行多元回归分析,分析发现:

表 16 变量与油束角多元回归模型摘要

模型摘要<sup>b</sup>

模型	R	R 方	调整后 R 方	标准估算的错 误	德宾-沃森
1	.484 <sup>a</sup>	.235	-.183	.33962	2.842

a. 预测变量：(常量), 渐缩管长, 总高, 缩口长, 缩口直径, 总长, 入口直径

b. 因变量：角度

预测变量可以解释模型的 23.5%，

表 17 变量与油束角多元回归模型显著性分析

系数<sup>a</sup>

模型		未标准化系数		标准化系数	t	显著性	共线性统计	
		B	标准错误	Beta			容差	VIF
1	(常量)	3.523	4.340		.812	.434		
	入口直径	-.287	.196	-.385	-1.461	.172	1.000	1.000
	总长	-.032	.098	-.086	-.325	.751	1.000	1.000
	缩口直径	-.064	.098	-.171	-.649	.529	1.000	1.000
	缩口长	.016	.098	.043	.162	.874	1.000	1.000
	总高	-.016	.098	-.043	-.162	.874	1.000	1.000
	渐缩管长	.159	.196	.214	.812	.434	1.000	1.000

a. 因变量：角度

根据表中数据可知，预测模型解释度较低，且显著性不明显，故油束角不合适多元回归分析，继续分析打靶准确率与变量间关系。

表 18 变量与打靶准确率多元回归模型摘要

**模型摘要<sup>b</sup>**

模型	R	R 方	调整后 R 方	标准估算的误差	德宾-沃森
1	.931 <sup>a</sup>	.868	.795	.05360	2.309

a. 预测变量: (常量), 渐缩管长, 总高, 缩口长, 缩口直径, 总长, 入口直径

b. 因变量: 打靶准确率

预测变量可以解释模型的 86.8%

表 19 变量与打靶准确率多元回归模型摘要

**系数<sup>a</sup>**

模型		未标准化系数		标准化系数		t	显著性	共线性统计	
		B	标准错误	Beta				容差	VIF
1	(常量)	.229	.685			.335	.744		
	入口直径	.044	.031	.154		1.408	.187	1.000	1.000
	总长	.016	.015	.113		1.026	.327	1.000	1.000
	缩口直径	-.126	.015	-.894		-8.144	<.001	1.000	1.000
	缩口长	-.008	.015	-.060		-.545	.597	1.000	1.000
	总高	.005	.015	.033		.299	.770	1.000	1.000
	渐缩管长	-.047	.031	-.166		-1.516	.158	1.000	1.000

a. 因变量: 打靶准确率

根据表中数据可知, 打靶准确率与变量间进行回归分析, 模型解释度高, 缩口直径显著影响打靶准确率。

为保证结论正确需验证多元回归分析前提条件: 变量独立性、变量不存在多重共线性、残差正态性。

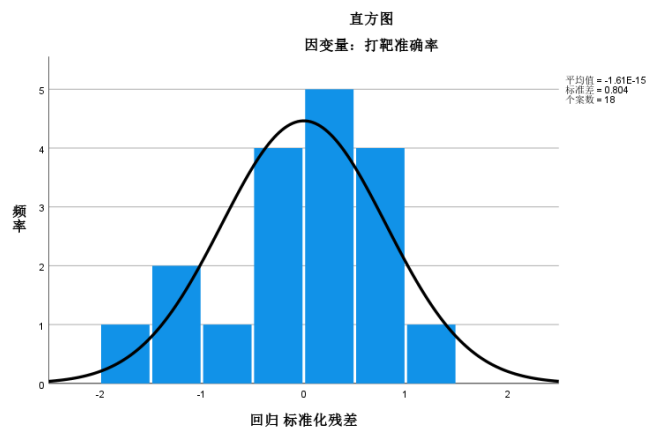


图 11 标准化残差

由上表及上图可知德宾-沃森值>2, 变量明显独立, VIF<5, 变量明显不存在多重共线性, 正态性较差, 可能原因是样本量过少。故认为符合多元回归前提条件。

## 5 总结

通过对活塞冷却喷嘴建模仿真，并对仿真数据进行数据分析得到以下结论。

(1)对活塞冷却喷嘴油束角及打靶准确率，主要的影响因素有缩口直径、入口直径、渐缩管长。

(2)基于主成分分析可以获得主成分综合得分  $y$  与油束角及打靶准确率的一元线性回归方程，其中打靶准确率拟合程度较好。

(3)基于多元线性回归分析可得对活塞冷却喷嘴油束角及打靶准确率，最主要影响因素为缩口直径。

### 参考文献

[1] 吴义民, 徐传民, 徐涛. 活塞内冷油腔及冷却喷嘴初步研究[J]. 内燃机与动力装置, 2009(06):15-18+36.

[2] 仲杰, 活塞喷油振荡冷却的稳、瞬态模拟计算及活塞温度场分析, [硕士学位论文], 山东大学 2012.

[3] 徐小彬, 李一, 张小丽. 某发动机活塞冷却喷嘴特性研究[J]. 汽车实用技术, 2019(11):155-159. DOI:10.16638/j.cnki.1671-7988.2019.11.050.

[4] 陈春, 聂松林, 吴正江, 等. 高压水射流的 CFD 仿真及分析[J]. 机床与液压, 2006(2):103-105.

CHEN Chun, NIE Song-lin, WU Zheng-jiang, et al. CFD simulation and analysis of high pressure water jet [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2006 (2): 103-105.

[5] 王冬, 周明来. 非淹没高速水射流喷嘴内外流场数值模拟[J]. 后勤工程学院学报, 2000, 16(4):21-25.

WANG Dong, ZHOU Ming-lai. Numerical simulation of flow field in non-submerged high-speed water Jet nozzle [J]. Journal of Logistical Engineering University, 2000, 16(4): 21-25.

[6] 杨国来, 周文会, 刘肥. 基于 FLUENT 的高压水射流喷嘴的流场仿真[J]. 兰州理工大学学报, 2008, 34(2):49-52.

YANG Guo-lai, ZHOU Wen-hui, LIU Fei. Simulation of flow field of high pressure water jet nozzle based on FLUENT [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2008, 34(2):49-52.

[7] WEN Q, KIM H D, LIU Y Z, et al. Dynamic structures of a submerged jet interacting with a free surface[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2014, 57:396-406.

[8] CARLOMAGNO G M, IANIRO A. Thermo-fluid-dynamics of submerged jets impinging at short nozzle-to-plate distance: A review[J]. Experimental thermal and fluid science, 2014, 58:15-35.

[9] XIA H. Turbulent jet characteristics for axisymmetric and serrated nozzles [J]. Computers & Fluids, 2015, 110:189-197.

[10] AYECH S B H, HABLIS, SAÏD N M, et al. A numerical study of a plane turbulent wall jet in a coflow stream[J]. Journal of Hydro-environment Research, 2016, 12:16-30.

[11] 刘瑞, 邓立君, 章健, 刘世英. 活塞冷却喷嘴油截面的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2018, 33(03):398-404. DOI:10.16076/j.cnki.cjhd.2018.03.017.

[35] 吴倩文, 张敬晨, 庞铭, 解志民, 胡定云, 胡玉平. 活塞振荡冷却的数值模拟计算及温度场分析[J]. 车用发动机, 2015(04):54-59.



- [12]谭建松,俞小莉. 高强度发动机活塞冷却方式仿真[J]. 兵工学报, 2006(01):97-100.
- [13]曹元福,张卫正,杨振宇,原彦鹏,朱海荣. 活塞开式内冷油腔振荡流动传热特性研究[J]. 汽车工程, 2014, 36(05):546-551. DOI:10.19562/j.chinasae.qcgc.2014.05.007.
- [14]朱肃敬,王翀,杨昆,曾庆强,卿辉斌. 发动机活塞冷却喷嘴射流的数值模拟研究[C]//. 第19届亚太汽车工程年会暨2017中国汽车工程学会年会论文集., 2017:1660-1663.