某型比例阀内流仿真及流量线性分析

重庆红江机械有限责任公司　李亚洲 付健 梁宏喜 郭元

一、引言

比例阀对流量线性调节和响应速度是整个控油系统的关键，在柴油机燃油系统中比例阀出口处燃油经过泵体低压进油道后进入油腔，比例阀起着控制进入柱塞腔燃油量的作用，从而控制泵入共轨管中高压燃油的数量，实现对轨压的动态控制。为满足共轨油泵对比例阀流量线性要求，根据给定的供油边界条件，文中设计了三种不同的结构，分析各结构下比例阀内部流场分布情况及供油特性，以获得较大流量线性比例极限。

二、设计方案

以国内某型柴油机比例阀为分析对象，该阀开口处的几何尺寸如图 1 所示，为了研究矩形开口尺寸及出口管道类型对比例阀流量调节的线性度和响应速度的影响情况，本文设计三种研究方案，其设计方案如表 1 所示。

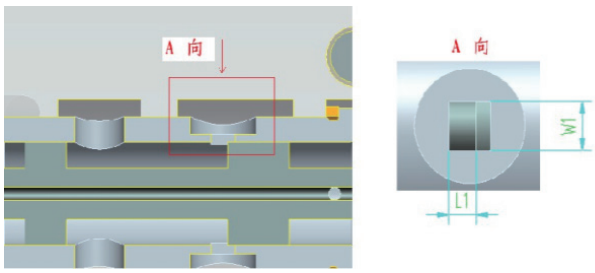


图 1 比例阀开口结构示意图

表 1 比例阀研究方案

方案	宽 W1（mm）	长 L1（mm）	进口个数	总面积（mm^2）	低压管道类型
一	1.7	4	4	27.2	竖直
二	1.8	4	4	28.8	竖直
三	1.9	4	4	30.4	倾斜

三、建模

该比例阀由阀芯、阀套、阀壳体、弹簧和衔铁等零件组成，其剖面结构如图 2 所示。比例阀内部流域从低压进油接头到出油口之间的区域，因此抽取流道时仅对管接头、阀芯、阀套、阀壳体之间的区域建模。

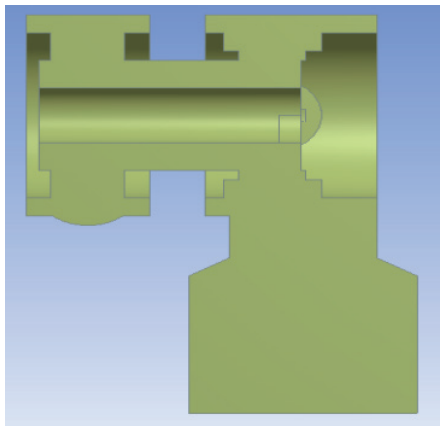


图 2 比例阀流域模型剖面图

投稿邮箱 | cadcam@idnovo.com.cn
IMCHINA@idnovo.com.cn

四、网格及边界条件

本文采用 mesh 对模型进行网格划分，阀口处采用了相同尺寸的网格（0.1mm）划分，设置全局网格尺寸为 0.5mm，最终生成的网格单元数量约 280 万，网格模型如图 3 所示。阀稳定工作状态时燃油密度 823kg/m^3，粘度为 0.003kg/m · s；进口端压力设为 0.4MPa，湍流强度为 0.5%；出口端连接柱塞低压吸油腔，本文是为了比较各种结构比例阀在相同边界条件下的流通特性，因此出口压力统一设置为 0MPa，湍流强度为 2%，参考压力 0.1MPa。

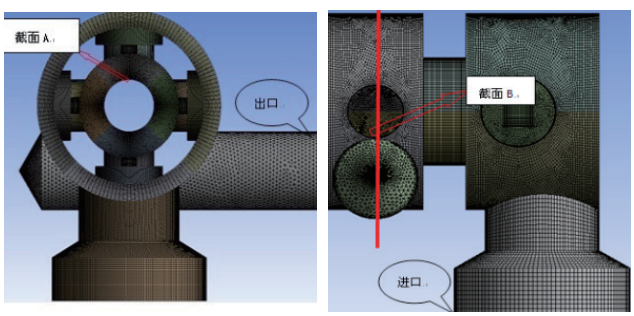


图 3 比例阀网格模型

五、计算模型

从 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型相比于标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型，在复杂剪切流动，旋流以及存在流动分离的场合中具有很好的预测效果，结合比例阀内部的结构特点和流动状况，选择该模型作为分析比例阀内部流场的湍流模型。

RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型的湍动能和湍流耗散的输运方程如下：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i)=$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\alpha_k \mu_{eff}\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k+G_b-\rho\varepsilon-Y_M+S_k$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i)=$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\alpha_\varepsilon \mu_{eff}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k+C_{3\varepsilon}G_b)-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}$$

$$-R_\varepsilon+S_\varepsilon$$

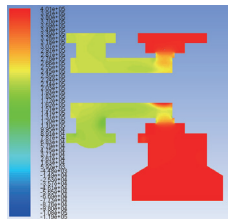
式中：G_k 为由层流速度梯度而产生的湍动能项；G_b 为由浮力产生的湍动能项；Y_M 表示在可压缩流动中，湍流脉动膨胀到全局流程中对耗散率的贡献项；S_k、S_ε 为用户定义的湍动能项和湍流耗散源项；$C_{1\varepsilon}$、$C_{2\varepsilon}$ 为模型常量；σk、$\sigma\varepsilon$ 为湍动能 k 和耗散率 ε 对应的湍流 Prandt 数。

六、计算结果及试验对比

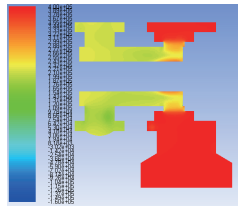
本文采用 FLUENT 软件对比例阀内部流动过程进行仿真，对比各结构比例阀组件在共轨油泵中的供油特性，结合试验数据结果得到具有较好的流通特性比例阀结构，然后对比分析各方案的开度 – 流量曲线情况。

1. 压力场分析

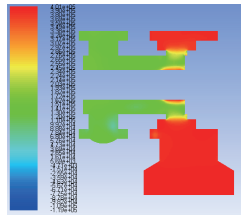
图 4、图 5 为 A、B 截面的压力云图，可以看出当比例阀开度为 4mm 时，在阀口区域产生的压降约占总压降的 47%，在低压油道内产生的压降约占总压降的 33%。方案二压力云图与方案一相似，都是由于低压油道的存在产生了较明显的压力损失，导致比例阀的有效压差明显降低。阀口区域产生的压降约占总压降的 44%，在低压油道内产生的压降约占总压降的 35%；方案三改进了阀低压出口段结构，低压油道中产生了的压力损失大大减少，比例阀的有效压差得到保证。阀口区域产生的压降约占总压降的 64%，在低压油道内产生的压降约占总压降的 7%；因此方案三具有较好的压力效果。



(a) 方案一

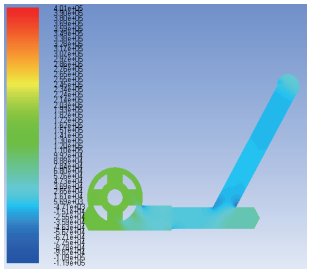


(b) 方案二

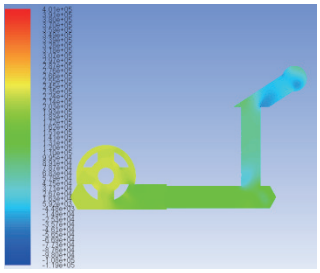


(c) 方案三

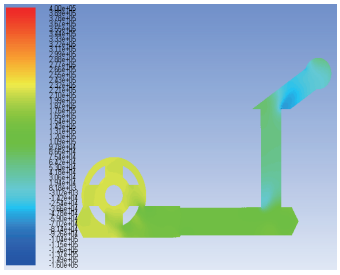
图 4 A 截面压力云图



(a) 方案一



(b) 方案二

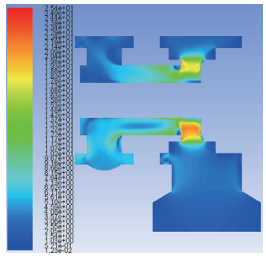


(c) 方案三

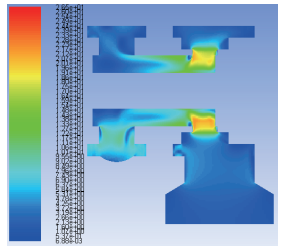
图 5 B 截面压力云图

2. 速度场云图

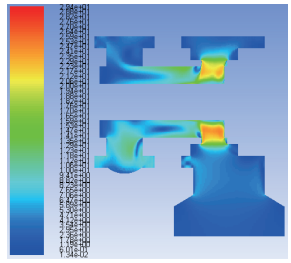
图 6、图 7 是 A、B 截面的速度云图，可以看出方案一和方案二的 B 截面在油道的两个拐角下游，流速分布不均匀，最大局部速度达 18m/s，约为平均速度的 2 倍。而从方案三的 B 截面速度场云图中可以看出，由于油道拐角数量由 2 个减少到 1 个，速度场分布较为均匀，最大局部速度达 13m/s，约为平均速度的 1.25 倍。故方案三比例阀具有较好的流动特点。



(a) 方案一

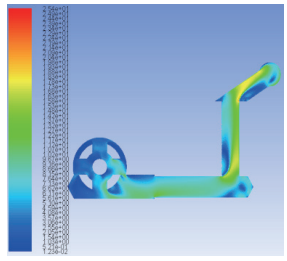


(b) 方案二

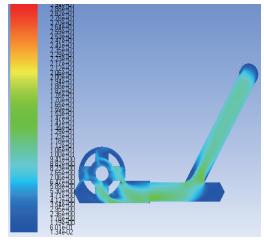


(c) 方案三

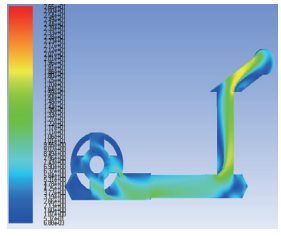
图 6 A 截面速度云图



(a) 方案一



(b) 方案二



(c) 方案三

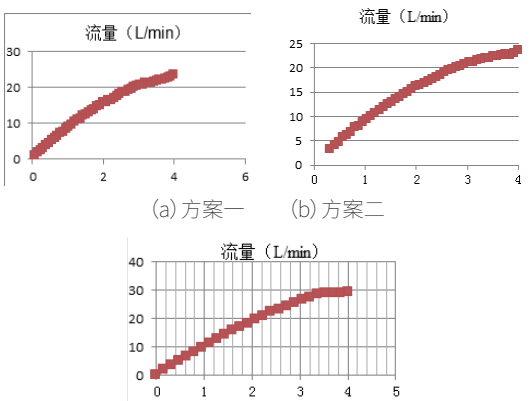
图 7 B 截面速度云图

3. 进口流量特性

图 8 是各方案的开度 – 流量曲线图，横坐标代表开度，

投稿邮箱 | cadcam@idnovo.com.cn
IMCHINA@idnovo.com.cn

纵坐标代表流量。方案一可以看出在小开度区间流量具有明显线性，当开度达到 75% 以上流量随开度增加略微减缓，一定程度上破坏了比例阀的线性特性，在最大开度下流量值为 23.48L/min。方案二比例阀流量曲线在小开度区间具有明显线性，在最大开度下流量值分别为 23.49 L/min，与方案一相比并无明显的流量提升，前两种方案的流通能力相同。方案三比例阀流量曲线在 80% 以下的开度区间内具有较好的线性特性，其流量线性比例极限为 87.5%；最大开度下流量值分别为 29.22L/min，相比前两种方案有明显的流量提升，且流量特性的线性度较好。因此，方案三的比例阀设计方案具有最宽广的线性工作区间和较大的流通能力。



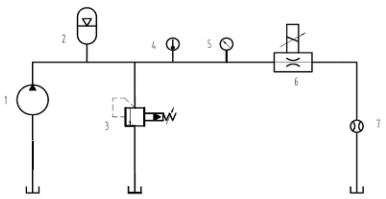
(a) 方案一　(b) 方案二

(c) 方案三

图 8 开度 - 流量曲线特性

4. 实验分析

图 9 为比例阀实验回路图，装置总共由泵、蓄能器、溢流阀、温度计、压力表、比例阀以及流量计组成，图 10 是比例阀实验现场实验台，通过调节电流大小控制阀芯的往复运动，随控制电流的增大，阀逐渐关闭。图 11 是控制电流与流量的关系，从图 11 中可以看出阀关闭过程与开启过程流量特性曲线相吻合；在全开状态下，流量为 29.1L/min，与仿真结果的相对误差为 0.04%，在 0.2 ~ 28L/min 范围有较好的线性特征，线性比例极限达 88%，与仿真结果一致。



1. 泵 2. 蓄能器 3. 溢流阀 4. 温度计 5. 压力表 6. 比例阀 7. 流量计

图 9 比例阀实验回路

图 10 比例阀实验台

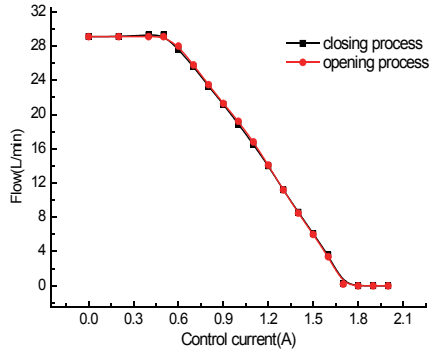


图 11 电流 - 流量

七、结语

经数值模拟和实验分析得到如下结论：(1) 方案三内部流速分布均匀，最大局部速度为 13m/s，闭口区域压降占总压降 64%，低压流道压降占总压降 7%。(2) 方案三比例阀设计具有较宽的线性工作区间和较大的流通能力。(3) 方案三比例阀流量特性曲线仿真与实验结果相一致，该方案下阀结构更适合燃油系统进油要求。

阀口尺寸及低压管道类型会影响比例阀内流场分布，为了获得较大流量线性极限，本文采用了数值模拟与实验相结合的方法设计三种方案。结果表明：阀开度为 4mm 时，方案三与前两种方案相比闭口区域压降上升约为 18%，低压管道压降下降约为 27%；方案三流速分布较均匀，局部最大速度为 13m/s；方案三在 80% 开度以下流量线性特性较好，线性比例极限为 87.5%，最大流量为 29.22L/min；方案三的流量特性实验与仿真结果一致，综述，方案三设计具有较好的线性区间和较大的流通能力，适合燃油系统供油要求。