

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2024.05.015

# 基于3D空间点云模型的轴向柱塞泵配流盘过流面积计算方法\*

郭志敏<sup>1,2</sup>, 戴海曙<sup>3,4</sup>, 翟江<sup>1,2</sup>, 吴东伟<sup>1,2</sup>, 徐楠<sup>3,4\*</sup>, 谢海波<sup>3,4</sup>

(1. 林德液压(中国)有限公司, 山东 潍坊 261205; 2. 潍柴动力股份有限公司, 山东 潍坊 261205; 3. 浙江大学高端装备研究院, 浙江 杭州 310014; 4. 流体动力与机电系统国家重点实验室, 浙江大学, 浙江 杭州 310001)

**摘要:**在轴向柱塞泵的工作过程中,通过配流盘进行高低压的循环切换,而配流盘的过流面积是影响柱塞泵内部压力平稳过渡的重要参数。为了完成对配流结构过流面积的求解计算,提出了一种基于多维流场点云的过流面积计算方法。首先,对配流盘流场的点云化过程进行了理论分析,得到了点云化处理的实施方法;然后,对配流盘三维流域模型进行了系列修正,提出了缓冲槽连通阶段模型的修正方法,提高了过流面积计算的准确性;最后,对不同配流阶段的过流面积进行了计算,并与理论测量所得结果以及采用计算流体力学(CFD)数值模拟方法所得的结果,分别进行了对比。计算结果表明:基于多维流场点云的过流面积识别算法求得的过流面积峰值大小为 $174.5\text{ mm}^2$ ,而理论测量值的大小为 $177.5\text{ mm}^2$ ;二者的相对误差率大约为1.7%;而与基于CFD方法所得结果的整体相对误差率,大约在5%以内。研究结果表明:采用该方法,能够直接且较精准地完成对配流盘过流面积的求解与计算,有效地简化了过流面积变换趋势的求解过程。

**关键词:**轴向柱塞泵;配流盘;点云模型;过流面积计算;计算流体力学;缓冲槽

中图分类号:TH322

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2024)05-0886-08

## Calculation method of flow area of valve plate of axial piston pump based on 3D spatial point cloud model

GUO Zhimin<sup>1,2</sup>, DAI Haishu<sup>3,4</sup>, ZHAI Jiang<sup>1,2</sup>, WU Dongwei<sup>1,2</sup>, XU Nan<sup>3,4</sup>, XIE Haibo<sup>3,4</sup>

(1. Linde Hydraulic (China) Co., Ltd., Weifang 261205, China; 2. Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261205, China;  
3. Institute of Advanced Machines Zhejiang University, Hangzhou 310014, China;  
4. State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronics, Zhejiang University, Hangzhou 310001, China)

**Abstract:** The axial piston pump can switch the high and low pressure circulation through the valve plate in the working process, and the flow area of the valve plate is an important parameter affecting the smooth transition of internal pressure of the axial piston pump. In order to complete the flow area of the distribution structure, a method of flow area calculation based on multi-dimensional flow field point cloud was proposed. Firstly, the point cloud process of the valve plate flow field was analyzed theoretically, and the implementation method of point cloud processing was obtained. Then, a series of modifications were made to the three-dimensional basin model of the valve plate, and a method was proposed to modify the connecting stage model of the buffer groove, which improved the accuracy of the calculation of the flow area. Finally, the flow area of different distribution stages was calculated and compared with the results obtained by theoretical measurement and numerical simulation of computational fluid dynamics (CFD). The calculation results show that the peak value of the flow area obtained by the identification algorithm based on multi-dimensional flow field point cloud is  $174.5\text{ mm}^2$ , while the theoretical measurement value is  $177.5\text{ mm}^2$ , and the relative error rate of the two is about 1.7%. The overall relative error rate of the results based on the CFD method is less than 5%. The results show that the method can solve and calculate the flow area of the valve plate directly and accurately, and

收稿日期:2023-09-26

基金项目:国家重点研发计划项目(2020YFB2007101)

作者简介:郭志敏(1979-),男,山西襄汾人,博士,高级工程师,主要从事液压泵阀马达产品开发与静液压流体传动及动力机械研究开发工作。

E-mail: pump\_wchai@qq.com

通信联系人:徐楠,男,工程师。E-mail: njlyu924@163.com

effectively simplify the process of solving the flow area transformation trend.

**Key words:** axial piston pump; valve plate; point cloud model; flow area calculation; computational fluid dynamics (CFD); buffer groove

## 0 引言

斜盘式轴向柱塞泵采用盘配流的形式,在工作过程中可以实现高低压的循环转换目的。

其配流环节油液的流动特性如下:当缸体的柱塞腔由低压区向高压区过渡时,此时腔内仍处于低压状态,而在与高压配流窗口接触的瞬間,由于压差的作用,高压区的油液会迅速向腔内倒灌、倾泄,形成液压冲击,这种倒灌现象会导致高压油液与低压油液之间的迅速混合,产生压力波动,影响泵的稳定性和性能;当缸体的柱塞腔由高压区向低压区过渡时,此时腔内处于高压的状态,而与低压配流窗口接触时,高压油液会迅速反冲至低压流道,形成油液的漩涡,进而导致吸油口处发生气穴现象,降低了泵的吸油性能和泵送效率。

为了能够有效减少液压冲击以及空化、气穴对柱塞泵性能的影响,工程技术人员通常会采用缓冲槽等结构来削减配流过程的压力冲击,以此完成缸体柱塞腔内的预升压和预泄压工作,从而提高泵的稳定性和可靠性。

综上所述,缓冲槽结构对提升柱塞泵的输出性能至关重要,其被研究人员视作泵内最主要的优化目标之一<sup>[1]</sup>。根据柱塞泵的配流机理分析,缓冲槽结构优化的本质是对其过流面积的优化,因此,需要精确地计算过流面积,以此实现缓冲槽的优化设计目的,达到过流面积的平顺过渡,在各种工况下都能有效地减少液压冲击,起到脉动抑制效果,提高泵的工作效率和寿命。

目前,针对于配流盘缓冲槽过流面积的求解方法,主要有参数法和模型解析法。参数法主要是将缓冲槽进行参数化,然后建立表征槽过流面积大小的数学表达式进行求解。模型解析法是采用仿真软件对缓冲槽的结构进行建模,然后求解得到过流面积大小。

那成烈<sup>[2]</sup>对缓冲槽过流面积进行了详细的公式推导,得出了理论计算公式。王毅翔<sup>[3]</sup>使用数值解析的方法,对U形、V形以及U、V形组合的缓冲槽结构进行了精细的过流面积分析,并对该解析方法的准确性进行了验证。ZHANG Bin等人<sup>[4-6]</sup>对U形缓冲槽结构的过流面积进行了研究,提取了U形槽的关键结构参数,并进行了优化,然后通过仿真得到了优化后的U形槽结构,其具有降低泵流量脉动的效果。单乐等人<sup>[7-8]</sup>利用数形结合的方式,对球面配流形式的配流盘缓冲槽过流面积进行了解析计算,解决了复杂球面

配流形式的过流面积求解难点。徐楠等人<sup>[9]</sup>采用CFD数值模拟计算的方法,反推求得球面配流形式的缓冲槽过流面积大小,并通过拟合,得到了表征该面积大小的公式。李少年等人<sup>[10]</sup>建立了柱塞泵配流冲击的数学模型,并通过研究,得到了过流面积对柱塞泵流体冲击的影响。闻德生等人<sup>[11]</sup>采用试验方法,研究了开式泵和闭式泵的流量与转速、噪声之间的关系,得到了泵的配流面积对其输出特性的影响规律。另外,孙泽刚等人<sup>[12-18]</sup>使用MATLAB编程以及AMESim仿真软件,对配流时的过流面积进行了求解计算,得到了相应的面积曲线。

通过上述研究不难发现,参数法和模型解析法是目前计算配流盘过流面积的常规方法。然而,对于复杂的缓冲槽结构或球面配流缓冲槽结构,因其过流面积的参数复杂,导致解析难度大,采用模型解析法则需要处理实体模型,计算效率低。

针对上述问题,笔者对配流盘的流体域模型进行点云化分析与处理,求解得到过流面积的大小;然后,将所得结果与理论测量值、模型解析法计算结果进行对比,以验证该方法的准确性。

## 1 配流盘流场点云化与轮廓识别

### 1.1 配流盘流场点云化

当缸体柱塞孔腰型窗口掠过缓冲槽与配流窗口时,柱塞腔内油液与配流窗口内油液存在着较大的压差,会产生节流效应。

配流过程的理论流量为:

$$q_i = C_r A \sqrt{\frac{2|p_f - p_i|}{\rho}} \cdot \text{sign}(p_f - p_i) \quad (1)$$

式中: $q_i$ 为配流节流口流量; $C_r$ 为流量系数; $A$ 为配流过流面积; $p_f$ 为缸体柱塞腔内油液压力; $p_i$ 为配流窗口油液压力; $\rho$ 为油液密度。

通过式(1)可以看出,配流环节的过流面积 $A$ 是影响节流流量的重要参数。当缸体柱塞腔与缓冲槽连通时,在压差作用下会产生流量倒灌现象,导致输出流量发生波动。

笔者以具有加强筋的某型号配流盘为例,来分析基于点云模型的过流面积识别算法。

配流盘的结构以及流域模型如图1所示。

由图1(a)可知:配流盘为对称结构形式,其缓冲槽

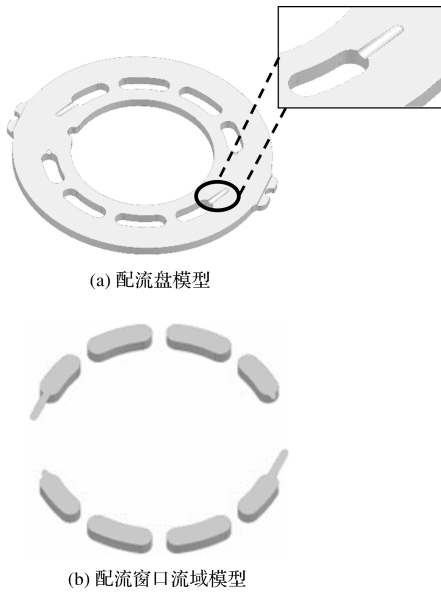


图 1 配流盘结构模型与流域模型

Fig. 1 Valve plate structure model and fluid model

采用圆柱形构型,过渡区域由一个长直圆柱槽与短圆柱槽构成,同时高、低压配流窗口具有三处加强筋结构;提取得到的配流盘的三维流域模型,如图 1(b)所示。

对于具有加强筋结构形式的配流盘,若采用参数法进行过流面积的计算,需要考虑加强筋结构对过流面积的影响,相较于常规形式的配流窗口,模型复杂程度高。

根据配流盘结构模型,笔者进一步将其流域模型转化为稀疏点云模型,采用边缘识别法对配流窗口的边缘进行点云化。

配流盘流域点云模型处理如图 2 所示。

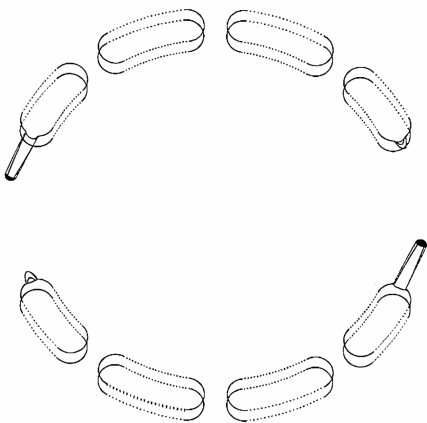


图 2 配流盘流域点云模型处理

Fig. 2 Processing of point cloud model of valve plate fluid domain

## 1.2 配流盘流体域点云特征细化与轮廓识别

构建的配流盘流域稀疏点云模型,主要表征配流盘流体域的边缘特征,可根据点云的坐标将其分为平面点和空间曲面点。其中,平面点位于流体域上下表

面,构成流域的轮廓,对于腰型配流窗口仅存在平面点;空间曲面点主要表征配流流域的结构特征,即缓冲槽的结构特征。

配流盘过流面积的定义是指缓冲槽的内部通流面积,即油液从缸体柱塞腔流入缓冲槽的流通截面的大小,其为流体通过的最小面积<sup>[19]</sup>。

由过流面积的定义可知,对于带缓冲槽的腰型窗口结构,在缓冲槽结构附近,过流面积为空间截面,因此,需要对缓冲槽的点云模型进行局部的插值细化。而对于不带缓冲槽的腰型窗口,其过流面积始终平行于配流平面,因此,无需对其点云模型进行局部细化。

局部细化的方案如下:

1) 针对于圆柱形缓冲槽的结构特点,利用点云的特征点曲率信息,在缓冲槽的圆柱特征面上进行局部点云加密;

2) 针对于缓冲槽的圆弧面特征,对相邻点进行插值局部加密。加密点的坐标为:

$$\begin{cases} x_i = \frac{x_{i-1} + x_{i+1}}{2} \\ y_i = \frac{y_{i-1} + y_{i+1}}{2} \\ z_i = \frac{z_{i-1} + z_{i+1}}{2} \end{cases} \quad (2)$$

笔者使用插值算法,在局部区域内生成新的点云数据,通过对现有有点云数据进行插值处理,可以在局部区域内增加更多的点,从而实现局部细化目的。

通过上述方法,笔者对缓冲槽结构细节进行点云加密,同时确保其结构特征不丢失。

另外,在对点云模型进行过流面积轮廓的识别时,还需确定缸体柱塞腔流通截面的运动方向。基于此,笔者依据盘面角度,将上述配流盘点云模型分成 8 块区域。

配流盘流域的点云轮廓描绘如图 3 所示。

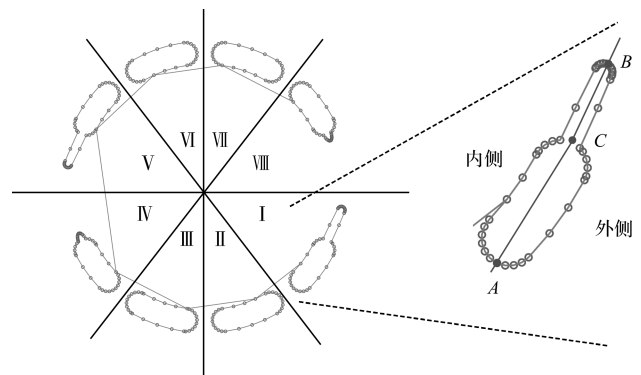


图 3 配流盘流域点云轮廓描绘原理图

Fig. 3 Schematic diagram of point cloud contour depiction in the valve plate fluid domain

图3中,对于其中每一块配流区域,笔者分别进行点云轮廓识别,找到轮廓点并按照边界顺序连线绘制出当前模型的轮廓边界。

由于配流盘流域通常是绕圆心分布的规则区域,在此前提下,笔者采用了一种基于参考点的点云轮廓分类绘制方法。

在进行点云轮廓绘制之前,需要先寻找参考点,将当前配流区域的点云模型分为内侧和外侧。这样做的目的是为了能够在极坐标的情况下,按照“半径+角度”的方式,把每个区域的点连起来。

对于内侧,需要把所有半径小于一定值的点提取出来,并按照不同的角度连起来;外侧同理。但由于内外侧的角度顺序是反的,所以需要进行分侧。

由于配流区域呈规则分布,可以将当前区域流域点云从直角坐标系转化为极坐标系,通过找到左右最大分布角度的方式,找到点云轮廓的左右边界点,作为当前点云分类的两个基准参考点。

对于连接缓冲槽的配流区域,由于缓冲槽通常为直槽,并非是绕中线点的圆弧边界,仅有两个基准参考点并不能保证点云分类的准确性。因此,需要在缓冲槽等特殊结构附近加入第3个参考点,以此保证点云分类的准确性。

图3中,以配流区域I为例,通过结构特征找到左右边界的参考点A、B,然后在缓冲槽附近加入参考点C。

以ACB为界,将配流区域I分成内侧和外侧,对于内侧和外侧的点可以按照其在极坐标系中分布的角度分别排序后,对两个区域的点进行连接,可得到按照顺序描绘的点云轮廓。

## 2 过流面积扫描计算

### 2.1 缓冲槽过流面积扫描

缓冲槽的过流面积为纵贯于中心轴的截面,当截面与中心轴垂直时,所得截面面积最小,为此时刻的过流面积。

缓冲槽过流面积点云轮廓绘制图如图4所示。

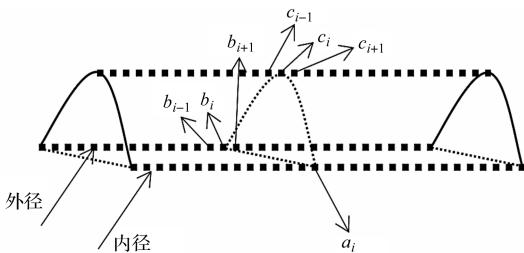


图4 缓冲槽过流面积点云轮廓绘制示意图

Fig.4 Sketch map of point cloud contour drawing for overflow area of buffer groove

过流面积的求解首先以内径  $a_i$  点为基准点,以  $b_i$ 、 $c_i$  为相邻参考点进行截面重构,得到截面  $S_0$ ;进一步考虑截面参考点的移动,依次求解由  $b_i$ 、 $c_i$  相邻参考点为边界的截面面积,即:

$$\begin{cases} S_0 = S_{a_i b_i c_i} \\ S_1 = S_{a_i b_{i-1} c_i} \\ S_2 = S_{a_i b_{i-1} c_{i-1}} \\ S_3 = S_{a_i b_{i+1} c_i} \\ S_4 = S_{a_i b_{i+1} c_{i+1}} \end{cases} \quad (3)$$

笔者以缓冲槽内径的特征点作为步进点,以缓冲槽曲面的点为特征点,对截面进行重构,将点云数据转换为连续的截面模型,并通过截面的网格化,求解截面面积,即:

$$S_F = \min \langle S_0, S_1, S_2, S_3, S_4 \rangle \quad (4)$$

### 2.2 腰型槽配流窗过流面积扫描

过流面积的扫描计算是依靠缸体柱塞孔窗口区域,以一定步频绕圆心旋转一周,在此过程中取缸体柱塞孔窗口区域点云轮廓与配流盘流体域点云轮廓的交集进行计算。

因此,需要确定如何根据缸体的转动,来绘制不同时刻的柱塞孔窗口点云轮廓。

缸体柱塞孔的窗口近似为圆弧,并通过缸体转角、窗口包角、半径以及分布圆半径参数来确定。

缸体柱塞孔窗口点云轮廓绘制图如图5所示。

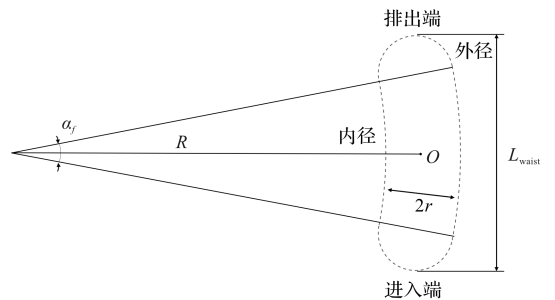


图5 缸体柱塞孔窗口点云轮廓绘制示意图

Fig.5 Schematic diagram of point cloud contour drawing for cylinder block hole window

过流面积求解方法示意图如图6所示。

类似的柱塞孔窗口同样也需确定扫描计算的画布区域。

图6中,通过窗口的中心点来确定整个点云画布的原点,以其横向最大长度  $L_{waist}$  来确定点云画布的宽度  $L_{canvas}$ ,然后在该画布中均匀打入点集(浅色),并记录点集个数为  $N_{total}$ ,同时提取位于柱塞孔窗口区域与配流盘流体域的交集的点集(深色),标记为  $N_{flow}$ 。



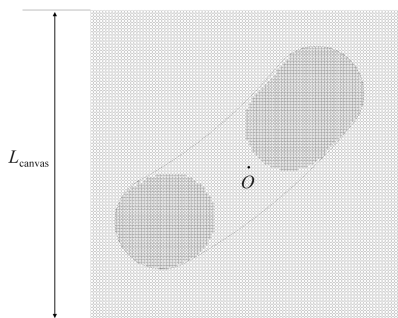


图 6 过流面积求解示意图

Fig. 6 Schematic diagram for solving the flow area

因此,只需要将缸体转动一周后,即可计算完整的配流模型过流面积  $S_{scan}$ ,如下式所示:

$$S_{scan} = \frac{N_{flow}}{N_{total}} \cdot L_{canvas}^2 \quad (5)$$

### 3 扫描计算结果

笔者使用上述算法,然后以  $0.5^\circ$  为步长的转角频率以及  $N_{total} = 10\,000$  的总画布点集,扫描整个配流盘流体区域。绘制时,需要设定缸体柱塞孔窗口的初始位置为内死点处,求得配流盘的过流面积曲线。

基于点云模型识别算法所得过流面积曲线如图 7 所示。

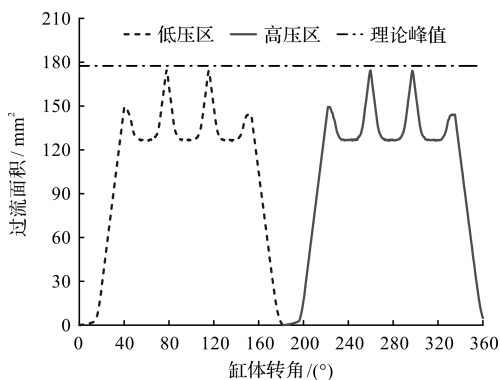


图 7 基于点云模型识别算法过流面积结果图

Fig. 7 Result chart of flow area recognition algorithm based on point cloud model

该型号配流盘的实际最大过流面积时刻,出现在 II、III、VI、VII 块配流区间处,此时缸体柱塞孔窗口与上述配流区间的槽孔完全流通,通过测量得出理论过流面积峰值为  $177.5\text{ mm}^2$ ,而基于点云模型的配流盘过流面积识别算法求得的过流面积峰值为  $174.5\text{ mm}^2$ ,二者的误差率约为 1.7%。

由图 7 中的过流面积曲线可以看出:缸体柱塞孔窗口在初始位置恰好与配流盘缓冲槽即将接触,通过测量得到,从该初始位置转动到区间 II 的面积峰值时

的理论转角为  $78.7^\circ$ ,而基于点云模型的配流盘过流面积识别算法求得该转角为  $79^\circ$ ,二者误差率约为 0.38%。

因此,可以认为基于点云模型的配流盘过流面积识别算法具有较高的可信度。

## 4 计算流体力学方法结果对比

### 4.1 CFD 计算模型

前文所提到的流体力学(CFD)计算方法,是按照薄壁小孔的“流量-压差”定量关系所得,也就是孔口节流的基本原理。笔者按照文献[9]的方法,进行过流面积的计算,并验证基于点云模型的配流盘过流面积识别算法的准确性。

过流面积的 CFD 计算模型如图 8 所示。

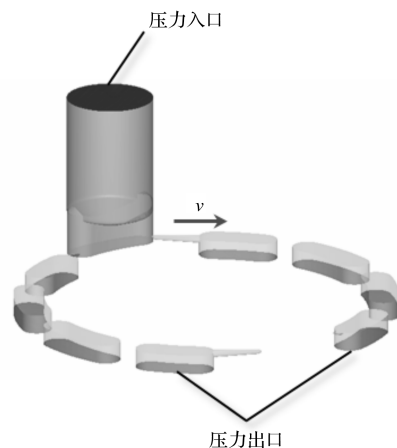


图 8 基于 CFD 方法的过流面积计算模型

Fig. 8 Based on CFD method for computing the flow area

图 8 中,流域仿真模型主要包括缸体的柱塞孔流域、配流窗口流域。

仿真设置如下:将缸体柱塞孔顶端截面设为压力入口,大小为  $10\text{ MPa}$ ;配流流域底部窗口设为压力出口,大小为  $6\text{ MPa}$ ,即进出口的压差  $\Delta p$  大小为  $4\text{ MPa}$ 。

定义缸体柱塞孔流域的网格为动网格<sup>[20-22]</sup>,其运动方式为绕配流流域中心做旋转运动,添加湍流模型为标准  $k-\varepsilon$  模型,设置时间步长为 720 步,即缸体柱塞孔流域每旋转  $1^\circ$ ,便对应一个步长。

计算模型设置完成后,便可以开始计算,并得到出口的流量大小。

### 4.2 CFD 计算结果

根据式(1),笔者将仿真所得流量值代入式中,对于压差大小为  $4\text{ MPa}$ ,选取流量系数  $C_v$  值后,即可反推求得过流面积大小。

对于流量系数  $C_v$  的值,此处根据经验选取 0.7,但对于不同的模型,流量系数与流速、雷诺数等大小相关。所以笔者选取多组不同的流量系数,以确保计算结果的准确性。

不同流量系数下的过流面积如图 9 所示。

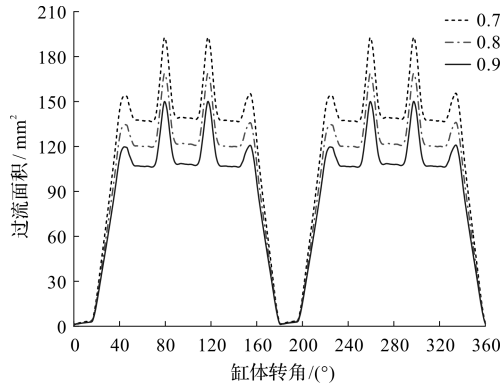


图 9 不同流量系数下的配流盘过流面积

Fig. 9 Flow area of the valve plate under different flow coefficient

由图 9 可知:不同流量系数计算得到的过流面积除大小不同之外,整体变化趋势一致,且随着流量系数的增大,过流面积大小呈递减规律。

不同流量系数下峰值过流面积的大小值如表 1 所示。

表 1 不同流量系数下的峰值过流面积 ( $\text{mm}^2$ )

Table 1 Peak flow area under different flow coefficient ( $\text{mm}^2$ )

流量系数 $C_v$	仿真值	理论值	绝对误差率/%
0.7	192.9	177.5	8.67
0.8	168.8	177.5	4.91
0.9	150.1	177.5	15.44

由表 1 可知:随着流量系数的增大,仿真值与理论值之间的误差呈先减后增的趋势。根据误差率的变化推断可知,此过流面积计算模型下的准确流量系数大约在 0.7~0.8 之间。

为了得到一组准确的过流面积曲线,笔者进行如下计算:找到仿真计算所得峰值过流面积对应的峰值流量,结合前文理论测量所得过流面积的峰值大小,然后即可通过式(1),反推得出此时的流量系数大小约为 0.76。

#### 4.3 结果对比

在前一小节中,笔者对该配流模型的流量系数大小进行反推,基于该流量系数,计算得到过流面积的大小;然后,与点云模型识别算法所得过流面积大小进行对比。

基于不同计算方法所得到的配流盘过流面积大小如图 10 所示。

由图 10 可知:采用两种方法计算所得过流面积的

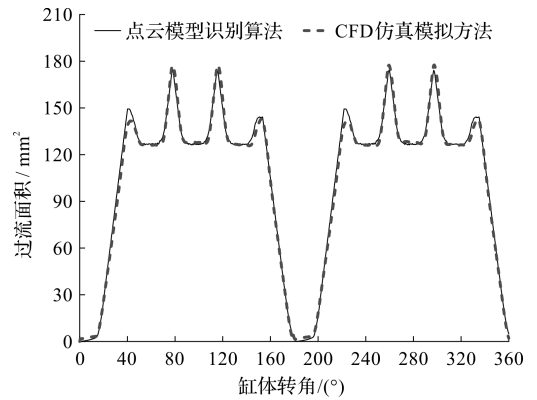


图 10 基于不同计算方法的配流盘过流面积对比

Fig. 10 Comparison of flow area of valve plate based on different calculation method

变化趋势一致,而在吸油区和排油区的第一个峰值面积处,二者略有差异,CFD 方法计算得出的过流面积略小于点云模型识别算法,这可能是由于在过渡区域,油液受到加强筋的作用,使得流动状态发生了改变,导致此处计算有些许误差;利用 CFD 方法计算所得过流面积为  $141.6 \text{ mm}^2$ ,而点云模型识别算法所得过流面积为  $149.3 \text{ mm}^2$ ,二者误差大约为 5%,其他位置处的过流面积误差率,均在 5% 以内。

根据上述分析得知:基于点云模型识别算法的过流面积求解,其准确率相对较高,且相较于 CFD 仿真方法,无需建立复杂的计算模型以及经验值的反推等,具有更简便、高效的优点。

## 5 结束语

针对于轴向柱塞泵配流盘过流面积的计算过程,笔者提出了一种基于多维流场点云的配流盘过流面积计算方法,对不同阶段的过流面积进行了计算。

研究得出以下结论:

1) 通过提取配流盘流体域的点云化模型,然后对其进行了扫描轮廓识别,可以完成复杂结构的配流盘过流面积计算求解,无需通过参数化建模的方法构建过流面积的数学模型,简化了求解过程;

2) 通过与参数化模型的过流面积峰值测量结果对比,基于多维流场点云的配流盘过流面积识别算法,误差率在 2% 以内;

3) 通过与 CFD 方法计算结果对比,基于多维流场点云的配流盘过流面积识别算法,误差率在 5% 以内,该算法具有准确性较高,更加简便、高效等优点。

后续,笔者将重点针对球面形式的配流盘过流面积进行求解计算,同时探究不同结构类型的缓冲槽过流面积,以提升该研究方法的普适性。

## 参考文献 (References) :

- [1] PALMBERG J O. Modelling of Flow Ripple from Fluid Power Piston Pumps [ C ]. 2nd Bath International Power Workshop, University of Bath, UK. 1989;207-227.
- [2] 那成烈. 三角槽节流口面积的计算 [ J ]. 甘肃工业大学学报, 1993, 18(2) : 45-48.
- NA Cheng-lie. Determination of the sectional area of triangle throttle channel [ J ]. Journal of Gansu University of Technology, 1993, 18(2) : 45-48.
- [3] 王毅翔. 轴向柱塞泵配流盘阻尼槽特性分析及优化设计 [ D ]. 杭州: 浙江大学机械工程学院, 2014.
- WANG Yi-xiang. Study on Damping Groove Characteristics and Optimization of Axial Piston Pump [ D ]. Hangzhou: School of Mechanical Engineering, Zhejiang University, 2014.
- [4] ZHANG Bin, WANG Yi-xiang. Modeling and Simulation on Axial Piston Pump with U-shape Silencing Groove [ C ] // Proceedings of the Eighth International Conference on Fluid Power Transmission and Control, Beijing: World Publishing Corporation, 2013 : 291-294.
- [5] HONG Hao-cen, ZHANG Bin, YU Min, et al. Analysis and optimization on U-shaped damping groove for flow ripple reduction of fixed displacement axial-piston pump [ J ]. International Journal of Fluid Machinery and Systems, 2020, 13(1) : 126-135.
- [6] 许书生, 徐 兵, 李春光, 等. 基于 SolidWorks 二次开发的轴向柱塞泵参数化建模设计 [ J ]. 机床与液压, 2010, 38(9) : 71-73, 79.
- XU Shu-sheng, XU Bing, LI Chun-guang, et al. Study on parametric modeling of axial piston pump based on SolidWorks secondary development [ J ]. Machine Tool & Hydraulics, 2010, 38(9) : 71-73, 79.
- [7] 单 乐, 王金林, 冀 宏, 等. 柱塞泵球面配流盘阻尼槽对流量脉动性的影响 [ J ]. 液压与气动, 2015, 38(2) : 31-36.
- SHAN Le, WANG Jin-lin, JI Hong, et al. Influence of relief groove of spherical valve plate on axial piston pump flow ripple [ J ]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2015, 38(2) : 31-36.
- [8] 单 乐. 轴向柱塞泵球面配流盘阻尼槽对流量脉动性影响的研究 [ D ]. 兰州: 兰州理工大学能源与动力工程学院, 2014.
- SHAN Le. The Research of the Influence of Damping Groove of Spherical Valve Plate on Piston Pump Flow Ripple [ D ]. Lanzhou: School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, 2014.
- [9] 徐 楠, 王金林, 闵 为, 等. 球面配流盘三角槽过流面积对柱塞泵出口流量脉动影响的研究 [ J ]. 液压气动与密封, 2022, 42(4) : 19-24.
- XU Nan, WANG Jin-lin, MIN Wei, et al. The effect of piston pump spherical valve plate triangular groove flow area on outlet flow pulsation [ J ]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2022, 42(4) : 19-24.
- [10] 李少年, 杨 攀, 包尚令, 等. 某型锥形缸体斜盘式轴向柱塞泵配流冲击研究 [ J ]. 机电工程, 2022, 39(8) : 1041-1049.
- LI Shao-nian, YANG Pan, BAO Shang-ling, et al. Flow distribution impact of a swash plate axial piston pump with conical cylinder [ J ]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2022, 39(8) : 1041-1049.
- [11] 闻德生, 潘景昇, 吕世君, 等. 轴向柱塞泵配油窗口面积对转速和噪声的影响 [ J ]. 机床与液压, 2003, 26(5) : 115-116, 268.
- WEN De-sheng, PAN Jing-sheng, LV Shi-jun, et al. The influence of the oil distribution window area on the speed and noise of an axial piston pump [ J ]. Machine Tool & Hydraulics, 2003, 26(5) : 115-116, 268.
- [12] 孙泽刚, 何德文, 雷德全, 等. 变流量轴向柱塞泵性能优化 [ J ]. 机床与液压, 2023, 51(9) : 174-179.
- SUN Ze-gang, HE De-wen, LEI De-quan, et al. Performance optimization of variable flow axial piston pump [ J ]. Machine Tool & Hydraulics, 2023, 51(9) : 174-179.
- [13] 刘 璘. 配流盘结构参数对柱塞泵流量脉动影响及优化 [ J ]. 轻工机械, 2022, 40(5) : 76-80, 85.
- LIU Lin. Influence and optimization of port plate parameters on flow ripple of piston pump [ J ]. Light Industry Machinery, 2022, 40(5) : 76-80, 85.
- [14] HONG Hao-cen, ZHAO Chun-xiao, ZHANG Bin, et al. Flow ripple reduction of axial-piston pump by structure optimizing of outlet triangular damping groove [ J ]. Processes, 2020, 8(12) : 1664.
- [15] XU Bing, YE Shao-gan, ZHANG Jun-hui, et al. Flow ripple reduction of an axial piston pump by a combination of cross-angle and pressure relief grooves: analysis and optimization [ J ]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2016, 30(6) : 2531-2545.
- [16] 王建森, 张志伟, 于昕海, 等. 正开口配流盘轴向柱塞变量泵输出特性预测 [ J ]. 液压气动与密封, 2021, 41(2) : 64-70.
- WANG Jian-sen, ZHANG Zhi-wei, YU Xin-hai, et al. Flow characteristics prediction on axial variable piston pump with cross porting valve plate [ J ]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2021, 41(2) : 64-70.
- [17] 黄海游, 叶晓雨. 轴向柱塞泵配流机构通流面积计算 [ J ]. 机床与液压, 2020, 48(9) : 117-119.
- HUANG Hai-you, YE Xiao-yu. Calculation of flow area in distribution mechanism of axial piston pump [ J ]. Machine

- Tool & Hydraulics,2020,48(9):117-119.
- [18] 徐礼林. 轴向柱塞泵配流机构过流面积分析及计算[J]. 机床与液压,2011,39(24):54-56.  
XU Li-lin. Analysis and calculation of flow port areas in axial piston pump[J]. Machine Tool & Hydraulics,2011,39(24):54-56.
- [19] 那成烈. 轴向柱塞泵可压缩流体配流原理[M]. 北京:兵器工业出版社,2003.  
NA Cheng-lie. Principle of Compressible Fluid Flow Distribution in Axial Piston Pump [M]. Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry,2003.
- [20] 高伟,张立茹,姚慧龙,等. 基于动网格技术水平轴风力机叶片及尾迹流场旋涡特性[J]. 排灌机械工程学报,2023,41(2):172-178.  
GAO Wei, ZHANG Li-ru, YAO Hui-long, et al. Vortex characteristics of horizontal axis wind turbine blades and wake flow field based on dynamic grid technology [J].
- Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2023,41(2):172-178.
- [21] 李树勋,刘斌才,吴翰林,等. 基于动网格的轴流式止回阀关闭过程动态特性分析[J]. 流体机械,2023,51(10):69-75.  
LI Shu-xun, LIU Bin-cai, WU Han-lin, et al. Dynamic characteristics analysis of axial flow check valve closing process based on dynamic grid[J]. Fluid Machinery,2023,51(10):69-75.
- [22] 董亮,张立新,刘厚林,等. 车用凸轮式氢气循环泵内非定常流动特性[J]. 排灌机械工程学报,2022,40(5):433-439.  
DONG Liang, ZHANG Li-xin, LIU Hou-lin, et al. Unsteady flow characteristics inside a cam type hydrogen circulation pump for vehicles [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2022, 40 ( 5 ) : 433-439.

#### 本文引用格式:

郭志敏,戴海曙,翟江,等. 基于3D空间点云模型的轴向柱塞泵配流盘过流面积计算方法[J]. 机电工程,2024,41(5):886-893.

GUO Zhimin, DAI Haishu, ZHAI Jiang, et al. Calculation method of flow area of valve plate of axial piston pump based on 3D spatial point cloud model[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2024,41(5):886-893. 《机电工程》杂志;http://www.meem.com.cn

#### (上接第869页)

- [12] ZHAO Xiao-li, YAO Jian-yong, DENG Wen-xiang, et al. Intelligent fault diagnosis of gearbox under variable working conditions with adaptive intraclass and interclass convolutional neural network [J]. IEEE. Transactions on Neural Networks and Learning Systems,2022,34(9):6339-6353.
- [13] 袁红春,张文凤. 融合 SimAM 注意力机制和双向 ConvLSTM 的异常检测方法[J]. 小型微型计算机系统, 2023,44(8):1777-1784.  
YUAN Hong-chun, ZHANG Wen-feng. Anomaly detection method fused with SimAM attention mechanism and bidirectional convlstm [J]. Journal of Chinese Computer Systems,2023,44(8):1777-1784.
- [14] HE Kai-ming, ZHANG Xiang-yu, REN Shao-qi, et al. Delving deep into rectifiers: surpassing human-level performance on ImageNet classification [J]. IEEE. Computer Society,2015(12):1026-1034.
- [15] THILO S, VASILY T. Beyond ImageNet: deep learning in industrial practice [J]. Applied Data Science, 2019 ( 6 ) : 205-232.
- [16] PARK H, KANG Y, KIM J. Enhancing structure-property relationships in porous materials through transfer learning and cross-material few-shot learning [J]. ACS Applied Materials & Interfaces,2023(15):56375-56385.
- [17] WANG Yu, LIU Ruo-nan, LIN Di, et al. Coarse-to-fine: progressive knowledge transfer-based multitask convolutional neural network for intelligent large-scale fault diagnosis[J]. IEEE. Transactions on Neural Networks and Learning Systems,2021(8):761-774.
- [18] 杜义浩,常超群,杜正,等. 基于改进迁移学习的运动想象分类识别算法[J]. 计量学报,2023,44(11):1740-1748.  
DU Yi-hao, CHANG Chao-qun, DU Zheng, et al. Classification and recognition algorithm of motion imagination based on improved transfer learning [J]. Acta Metrologica Sinica,2023,44(11):1740-1748.