

# 斜盘式轴向柱塞泵动态特性研究

马超 李玮

(北京电子科技职业学院航空工程学院 北京 100176)

**摘要:** 文章为研究斜盘式轴向柱塞泵的动态特性, 首先, 利用 DASyLab 采集柱塞泵运行数据, 解决柱塞泵流场的粘性阻力相似问题; 其次, 分析柱塞泵单泵运行与双泵运行情况, 对柱塞泵的流量脉动率与压力脉动率进行动态分析; 最后, 在柱塞泵不同压力与不同转速的条件下, 分析柱塞泵的流量脉动变化与压力脉动变化。结果发现, 流量脉动率随着压油口与吸油口出口压力的增加而增加, 随着压油口转速的增加而降低。因此, 降低柱塞泵压油口与吸油口的出口压力, 能够有效地缓解柱塞泵脉动率高的问题, 对于斜盘式轴向柱塞泵的稳定运行具有重要作用。

**关键词:** 斜盘式; 轴向柱塞泵; 动态特性; 液压系统

## 0 引言

液压泵是液压系统中的核心元件, 能够提供能量, 执行传动动作。其中, 轴向柱塞泵以其体积小、传递功率高、控制简便等优势, 在航空航天液压系统中广泛使用<sup>[1,2]</sup>。随着人们对空气质量、生活质量的关注增加, 对液压元件、柱塞泵的特性提出了更高的要求。整体来看, 轴向柱塞泵特性的优劣, 直接影响着整个液压系统的运行可靠性, 对其进行动态特性分析至关重要。

斜盘式轴向柱塞泵的结构形式较多, 主要分为端面、滑阀、轴等配流方式。根据配流结构多配定量泵、变排量泵, 而配流过程中, 柱塞泵工作压力较高, 飞机运行动力更高<sup>[3,4]</sup>。在柱塞泵运行的过程中, 外伸的柱塞与缸体形成了真空工作腔, 腔内压力较低, 能够通过配流盘进行进油与排油, 达到更加严格的加工精度, 提高柱塞泵的工作压力。在此基础上, 本文研究了斜盘式轴向柱塞泵的动态特性, 保证飞机等机械设备的运行可靠性。

## 1 试验准备

本文利用 DASyLab 采集柱塞泵运行数据, 利用 Microsoft Windows TM 提供的功能, 反映柱塞泵的动态变化数据。在 DASyLab 中, 通过 A/D 转换、D/A 转换等模块, 建立一个柱塞泵动态特性测试模型<sup>[5]</sup>。在柱塞泵正常工作时, 能够在各个模块中自动布线。

本文利用 DASyLab 采集柱塞泵的使用信号, 信号的频谱图形较为稳定, 始终在  $-3.0 \sim +3.0\text{Hz}$  的范围内变化<sup>[6]</sup>。柱塞泵在进行试验测试的过程中, 实际尺寸

与工况很难满足试验需求。因此, 本文根据柱塞泵的粘性阻力, 利用  $Re$  准则解决柱塞泵流场的粘性阻力相似问题。 $Re$  准则如下:

$$Re = \frac{\rho_a l_a v_a}{\delta_a} = \frac{\rho_b l_b v_b}{\delta_b} \quad (1)$$

式中:  $\rho_a$ 、 $\rho_b$  — 柱塞泵原型与试验模型的流体密度;  
 $l_a$ 、 $l_b$  — 柱塞泵原型与试验模型的特征长度;  
 $v_a$ 、 $v_b$  — 柱塞泵原型与试验模型的流体速度;  
 $\delta_a$ 、 $\delta_b$  — 柱塞泵原型与试验模型的流体动力黏度系数<sup>[7]</sup>。

在柱塞泵正常工作过程中, 存在进油与排油的工况, 在排油的过程中, 柱塞腔表面的边界就是入口, 底端边界是出口。在进油与排油的过程中, 入口速度为  $500 \sim 3000\text{r/min}$ , 柱塞腔内的实际流速、机理试验入口流速、机理试验流量均存在不同程度的变化, 如表 1 所示。

表 1 试验对应表

柱塞泵转速 / (r/min)	腔内的实际流速 / (m/s)	机理试验入口流速 / (m/s)	机理试验流量 / (L/min)
500	0.45	0.0043	0.20
1000	0.76	0.0072	0.35
1500	1.14	0.010	0.52
2000	1.45	0.015	0.74
2500	1.91	0.016	0.93
3000	2.32	0.024	1.06

从表 1 看出, 本文选取一个斜盘式轴向柱塞泵, 在其运行转速为  $500 \sim 3000\text{r/min}$  的范围内, 进行试验分析, 并以上述对应数据为基础, 选择一个合适的模型, 对柱塞泵进行运动学特性分析。

## 2 试验过程

本文将具有动态性能的 MEMS (Micro-Electro-Mechanical System, 微机电系统) 传感器接入测试平台中, 利用动态测试的方式, 分析柱塞泵的动态特性。为了避免柱塞泵动态特性分析存在的随机性, 本文将数据采集频率设置为 1000Hz, 连续采样。只有采集频率, 并不足以表示直流分量<sup>[8]</sup>。本文选取的柱塞泵中, 存在 9 个柱塞, 正常运行时, 柱塞泵的转速为 1000r/min, 由此得知柱塞泵的柱塞脉动频率为:

$$d = \frac{m_1 \times m_2}{60} = \frac{1000 \times 9}{60} = 150\text{Hz} \quad (2)$$

式中:  $d$  - 柱塞泵的柱塞脉动频率;

$m_1$  - 柱塞泵正常运行的转速;

$m_2$  - 柱塞泵的柱塞数量。

由此测得柱塞泵单泵脉动时域图, 如图所示。

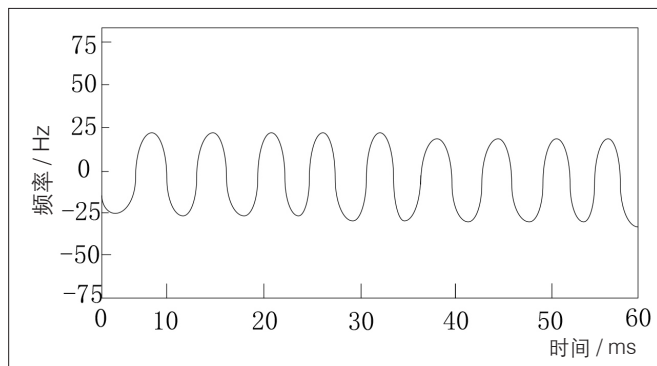


图 柱塞泵单泵脉动时域图

如图所示, 本文选取的 9 个柱塞泵中, 存在稳定的均匀脉动, 可以证明动态测试的准确性<sup>[9]</sup>。此过程中, 柱塞泵流量脉动的平均值为 0, 其动态的流量脉动并不会影响静态流量值。

本文根据柱塞泵单泵运行与双泵运行情况, 对柱塞泵的流量脉动率与压力脉动率进行动态分析。流量脉动率的计算公式如下:

$$\gamma = \frac{p_{\max} - p_{\min}}{(p_{\max} + p_{\min}) / 2} \quad (3)$$

式中:  $\gamma$  - 流量脉动率;

$p_{\max}$  - 出口流量最大值;

$p_{\min}$  - 出口流量最小值。

压力脉动率计算公式如下:

$$\chi = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{(R_{\max} + R_{\min}) / 2} \quad (4)$$

式中:  $\chi$  - 压力脉动率;

$R_{\max}$  - 出口压力最大值;

$R_{\min}$  - 出口压力最小值。

流量脉动率或压力脉动率越大, 柱塞泵发生油液倒灌的现象越明显, 柱塞泵在现场工作的噪声越大。

## 3 试验结果

柱塞泵配流盘结构的入射速度大小与方向, 是流场动态变化的主要特征, 对于分析动态特性具有重要影响。本文根据模型特征, 得出配流盘入射速度, 如表 2 所示。

表 2 配流盘入射速度表

入口区域坐标	速度大小 / (m/s)	速度偏差 / %	入射角度 / °	角度偏差 / %
(48, 36)	0.092	0.00	78.472	0.00
(50, 38)	0.106	12.12	76.585	1.05
(52, 40)	0.111	16.43	75.432	1.26
(54, 42)	0.115	20.25	74.496	1.93
(56, 44)	0.116	22.16	73.543	4.78
(58, 46)	0.123	24.62	72.162	5.02
(60, 48)	0.125	25.31	71.134	5.08

从表 2 看出, 配流盘入射速度与配流盘入口区域坐标有关, 本文给定入口区域的标准坐标为 (48, 36), 入射速度与角度偏差均为 0。将入口区域的纵横坐标均增加 2mm, 坐标越大, 速度偏差与角度偏差越大。

根据柱塞泵的压力状态, 本文选取出柱塞泵压油口的出口压力为 3.5MPa、9.0MPa、15.0MPa、21.0MPa, 分析在不同压力下, 柱塞泵吸油口流量脉动变化情况如表 3 所示。

表 3 不同压力下柱塞泵吸油口流量脉动变化情况表

出口压力 / MPa	3.5	9.0	15.0	21.0
最大流量 / (L/min)	32.26	35.63	36.03	37.96
最小流量 / (L/min)	28.45	25.72	21.33	18.45
平均流量 / (L/min)	30.355	30.675	28.680	28.205
流量差值 / (L/min)	3.81	9.91	14.70	19.51
流量脉动率 / %	12.55	32.31	51.26	69.17

从表 3 看出, 吸油口的出口压力越大, 最大流量越大, 最小流量越小, 流量差值随着出口压力的增加而增加, 导致流量脉动率随之增加。

本文选取出 900r/min、1200r/min、1500r/min 等多种转速, 分析不同转速下柱塞泵压油口流量脉动变化情况, 如表 4 所示。

表4 不同转速下柱塞泵压油口流量脉动变化情况表

转速 r/min	900	1200	1500
最大流量 / (L/min)	18.28	24.32	30.08
最小流量 / (L/min)	13.67	19.46	26.04
平均流量 / (L/min)	15.975	21.890	28.060
流量差值 / (L/min)	4.61	4.86	4.04
流量脉动率 /%	28.86	22.20	14.40

从表4看出,柱塞泵的转速越大,最大流量、最小流量、平均流量均随之增加,流量脉动率随之降低,由此证明柱塞泵转速越大,流量脉动率越小。

#### 4 结语

近些年来,节约能源减少排放的课题越来越重要,大功率、高压高速的机械设备成为相关领域发展的必然趋势。因此,本文研究了斜盘式轴向柱塞泵的动态特性这一课题。通过分析柱塞泵的流动参数与振动特性,对柱塞泵进行综合分析,减少液压系统故障问题,为液压系统正常运行提供保障。

**基金项目:**北京电子科技职业学院科研课题:基于飞机斜盘柱塞泵不同工况的流动性研究和应用,项目编号:2022X050-KXZ。

#### 参考文献:

[1] 王晓晶,陈帅,张梦俭.基于ADAMS和AMESim的斜盘式轴向柱塞泵联合仿真[J].哈尔滨理工大学学报,2020,25(01):9-14.

[2] 杨天策,蔡景,黄艳,等.基于Modelica的斜盘式轴向柱塞泵建模仿真研究[J].南京航空航天大学学报,2022,54(03):508-516.

[3] 徐学文,张洪信,赵清海.基于AMESim的轴向柱塞泵柱塞组件动力学分析[J].机械制造与自动化,2020,49(05):123-126.

[4] 黄明辉,王照卓,潘晴,等.混凝土泵车泵控系统建模仿真与特性分析[J].华南理工大学学报(自然科学版),2022,50(03):106-118.

[5] 韩祥,孙泽刚,杨莽.基于FLUENT的斜盘式轴向柱塞泵流量脉动分析和节流槽优化设计[J].煤矿机械,2021,42(05):24-27.

[6] 梁瑛娜,高建新,高殿荣.仿生非光滑表面滑靴副水压轴向柱塞泵的摩擦磨损及效率试验研究[J].华南理工大学学报(自然科学版),2022,50(06):145-154.

[7] 刘启航,万丽荣.基于AMESim液压仿真平台的双联轴向柱塞泵液压系统分析及试验研究[J].机床与液压,2022,50(04):24-28.

[8] 王虹艳,李永康,廉自生,等.基于凸轮曲线的阀配流柱塞泵输出特性分析[J].华中科技大学学报(自然科学版),2022,50(02):32-37.

[9] 叶绍干,葛纪刚,侯亮,等.基于遗传算法的轴向柱塞泵配流盘密封环结构多目标优化[J].农业机械学报,2022,53(01):441-450.

**作者简介:**马超(1986.06-),男,汉族,河南开封人,硕士研究生,讲师,研究方向:机械一体化,飞机结构与系统。