

一种新型凸轮柱塞泵的流量脉动影响分析

董小杏, 杨加星, 吴冬平

成都师范学院物理与工程技术学院, 四川 成都

收稿日期: 2023年3月15日; 录用日期: 2023年4月22日; 发布日期: 2023年4月29日

摘要

凸轮柱塞泵在液压行业中的应用十分广泛, 具有瞬时功率大、极限压力高、能产生较高的压力等优点, 然而凸轮柱塞泵在工作时排量较小, 并且不能输送含有固体悬浮物的液体, 会产生流量脉动、振动及噪声等一系列不良现象, 会影响到液压传动系统的工作性能。流量脉动是影响柱塞泵工作性能的重要因素。我国对于凸轮柱塞泵的研究比较少, 发展比较缓慢, 目前国产泵存在压力和流量不稳定, 性能不稳定的缺点, 大大地制约了其发展和应用。本文对凸轮柱塞泵的流量脉动影响进行了分析, 得出影响其流量脉动的主要因素是零件配合精度、弹簧的疲劳强度以及凸轮和端面的粗糙度及强度。

关键词

柱塞泵, 脉动, 流量特性

Influence Analysis of Flow Pulsation of a New Type of Cam Piston Pump

Xiaoxing Dong, Jiaying Yang, Dongping Wu

School of Physics and Engineering Technology, Chengdu Normal University, Chengdu Sichuan

Received: Mar. 15th, 2023; accepted: Apr. 22nd, 2023; published: Apr. 29th, 2023

Abstract

Cam piston pump in the hydraulic industry is widely used, with the advantages of instantaneous power, high ultimate pressure and producing higher pressure, but the cam piston pump in the working displacement is small, and cannot transport liquid containing a solid suspension, will produce a series of adverse phenomena such as flow pulsation, vibration and noise and will affect the working performance of the hydraulic transmission system. Flow pulsation is an important factor affecting the working performance of the plunger pump. China's research on cam piston pump is relatively small, the development is relatively slow, the current domestic pump has the

shortcomings of pressure and flow instability and unstable performance, greatly restricting its development and application. In this paper, the effect of flow pulsation of cam piston pumps is analyzed. It is concluded that the main factors affecting the flow pulsation are the precision of the material, the fatigue strength of the spring and the roughness and strength of the CAM and the end face.

Keywords

Plunger Pump, Pulsation, Flow Characteristics

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

微小型柱塞泵作为微小流量控制系统的核心执行机构,在工业、信息处理、通信传播、国防科技、航空航天、航海技术、医药生物工程、农业与家庭服务等领域具有十分广阔的应用前景,已成为微机电领域的研究热点之一。20世纪70年代,Sandia国家实验室 Spanser W. J.在美国开发了一种压电薄膜泵[1]。20世纪90年代美国伯乐公司在糖化血红蛋白分析仪中使用了蠕动泵,其原理是电机丝杆带动柱塞往返运动,精度不高而且使用寿命短[2]。21世纪初期,日本东潮提出了步进电机带动蜗轮蜗杆减速器,再传动给双凸轮柱塞机构双柱塞泵,该泵流量和压力都比较稳定,但是制造成本和价格昂贵;随后美国伯乐公司为了提升产品的分析性能,将日本东潮双柱塞泵进行优化,采用了行星减速器机构,运动更平稳、精度更高、寿命更长,可是成本更高[3]。

20世纪90年代中期,我国开始在微流体领域进行研究。清华大学的精密仪器系从1992年开始进行了微型泵及其相关的基础性研究,取得了良好的成果。利用超精密加工技术以及特殊加工技术生产出了各种微小型泵,同时利用硅微加工技术生产出了热制动微小型泵[4]。哈尔滨工业大学先后研制了一种新型压电双向无阀微小型泵,通过大量的试验与测试,得到了泵的压力、流量与工作频率、波形和电压幅值之间的关系。随后在2012年西南石油大学陈纪伟提出了一种石油机械使用的圆柱凸轮柱塞泵,该泵具有恒流恒压的性能,其主要应用在石油机械领域,具有体积大和压力大的特点[5]。2018年吴孟丽等研究了基于组合运动规律的新型圆柱凸轮往复泵的流量脉动分析[6]。

经过近些年的发展,我国在微量泵研究方面成绩不俗,开发研究了多种微量泵,并研究了其流量脉动问题。为了解决目前国产泵存在压力和流量不稳定,性能不稳定的问题,研究凸轮柱塞泵的结构和原理,找出其流量脉动的主要原因;通过搭建实验平台,分析和测试凸轮柱塞泵的流量脉动规律并进行实验验证。

2. 凸轮柱塞泵的结构及其工作原理

凸轮柱塞泵主要由出油阀弹簧、出油阀、柱塞、柱塞弹簧、供油拉杆、滚轮体、滚轮、调节臂和凸轮等组成。凸轮柱塞泵是依靠凸轮推动柱塞在缸体内使其做循环往复运动,使密闭工作腔的工作容积发生变化来实现吸油、压油的,如图1所示。

1) 进油行程

凸轮的凸起部分转过去之后,柱塞将会在弹簧力的作用下开始向下运动,柱塞上部空间的泵油室会产生相应的真空度,当柱塞上端面把柱塞套上的进油孔打开时,充满在油泵上体油道内的柴油经过进油

孔进入泵油室，柱塞运动到下止点，进油行程结束。

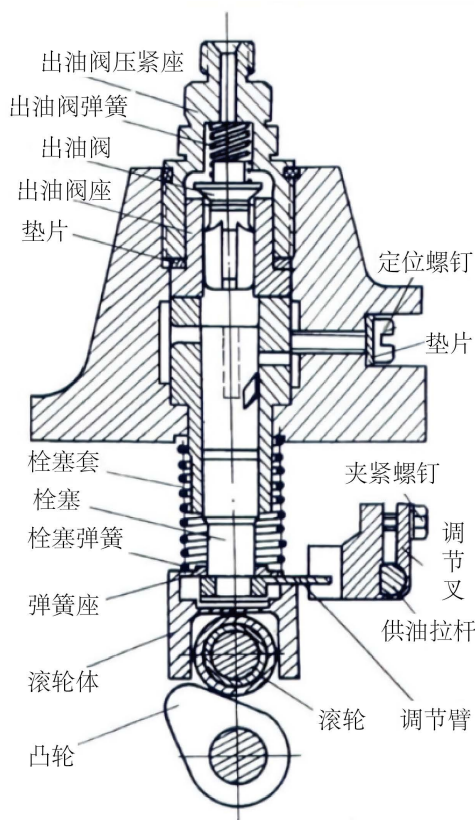


Figure 1. Structure of Cam piston pump
图 1. 凸轮柱塞泵的结构

2) 回油行程

回油时，柱塞向上供油，当上行到柱塞上的斜槽与柱塞套筒上的回油孔相通时，泵油室低压油路便与柱塞头部的中孔和径向孔及斜槽沟通，油压陡然下降，在弹簧力的作用下，出油阀快速关闭并停止供油。但是在此之后，柱塞还要上行运动，当凸轮的凸起部分转过去后，在弹簧的作用下柱塞又下行运动。此时便开始了下一个循环。柱塞泵以一个柱塞为原理介绍，一个柱塞泵上有两个方向相反的单向阀，柱塞向一个方向运动时缸内出现负压，这时一个单向阀打开液体被吸入缸内，柱塞向另一个方向运动时，将液体压缩后另一个单向阀被打开，被吸入缸内的液体被排出。这种工作方式运动后就形成了供油。

3. 凸轮柱塞泵的流量脉动的影响因素分析

凸轮柱塞泵在吸、压油过程中存在着周期性的流量脉动，流量脉动会对柱塞泵的性能产生直接的影响。因此，有必要对凸轮柱塞泵的液压系统进行分析，确定产生流量脉动的影响因素，从而达到减少流量脉动的目的。本文采用 MATLAB 编程建立凸轮柱塞泵流动特性的仿真模型，研究了零件配合间隙、弹簧的疲劳强度、凸轮和端面的粗糙度及强度都会对凸轮柱塞泵的流量脉动的影响。

3.1. 零件配合间隙对凸轮柱塞泵流量脉动的影响分析

柱塞和柱塞套是一对精密偶件，经过配对研磨后不能互换，要求有较高的精度、光洁度和较好的耐

磨性，它的配合精度为 0.002~0.003 mm。若超过 0.002~0.003 mm，柱塞孔和柱塞之间形成的密闭性被破坏，油液就会从间隙泄漏，造成流量脉动不会周期性变化，并且会减少凸轮柱塞泵的使用寿命。除了柱塞和柱塞套，出油阀和出油阀座也是一对精密偶件，配对研磨后不能互换，它的配合间隙为 0.01 mm。若间隙超过 0.01 mm，油液就会从间隙泄漏，造成流量脉动不会周期性变化，并且会减少凸轮柱塞泵的使用寿命。运用有限元分析模型，改变柱塞和柱塞套、出油阀和出油阀座参数得出主要零件配合精度的对脉动率的影响情况，如表 1 所示。可以看出配合间隙与流量脉动率基本呈正相关特性，配合间隙越小，流量脉动越小，凸轮柱塞泵工作越稳定。

Table 1. The influence of coordination gap on flow pulsation rate

表 1. 配合间隙对流量脉动率的影响

	配合间隙(mm)	脉动率(mm)
柱塞和柱塞套	0.001	1.01%
	0.002	0.98%
	0.003	0.97%
	0.004	1.68%
出油阀和出油阀座	0.01	0.87%
	0.02	1.24%
	0.03	1.45%
	0.04	1.67%

3.2. 弹簧的疲劳强度对凸轮柱塞泵流量脉动的影响分析

疲劳强度是指材料在无限多次交变载荷作用而不会产生破坏的最大应力，称为疲劳强度或疲劳极限。因此，弹簧在经过多次的被压缩后，弹簧的最大应力就会被破坏。造成弹簧不会再像之前一样伸缩，这是破坏流量脉动的周期性的原因之一。弹簧的疲劳强度在现有的实验条件下难以具体测量，所以在此做理论分析。

1) 零件承受的变应力最大值越高，断裂前所能承受的应力循环周次 N 越小；而应力最大值越低，断裂前的应力循环周次 N 越大。在一定条件下，当应力最大值低于某值时，材料可经受无限次应力循环而不发生断裂。循环应力与断裂周次间的关系，即疲劳曲线(S-N 曲线)，如图 2 所示。从该曲线可明显地看到，当应力最大值低于某值后，曲线逐渐与横坐标平行，成为定值，此时的应力值即为疲劳极限。

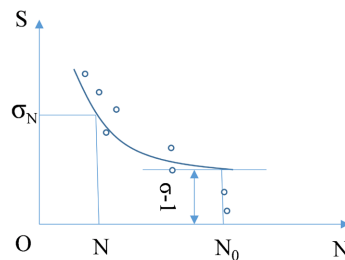


Figure 2. Fatigue curve (S-N curve)

图 2. 疲劳曲线(S-N 曲线)

2) 实践证明，大多数钢铁材料的疲劳曲线在 10 的 7 次方周次后变为水平，而有色金属和某些超高

强度钢的疲劳曲线无明显水平部分,需经 10 的 8 次方周次或更多周次应力循环后才能有条件地确定疲劳极限。为了方便起见,常根据实际需要规定一有限值(一般为 5×10 的 7 次方或 10 的 8 次方周次),把应力循环周次超过此有限值而不断裂的最大应力称为材料的条件疲劳极限[7]。

3) 对于受正负交变循环应力作用的材料,在最大应力相同的前提下,应力为对称循环相比应力为不对称循环而言对材料造成的损害更大。当应力为不对称循环时,若最大应力相同,则应力循环不对称的程度越大,试件断裂前经受的应力循环周次越多,亦即对材料造成的损害越小。

4) 弹簧的疲劳曲线是由实验测定的,实验数据的分散性是很大的。严格地说 S-N 曲线实际上是一个曲线带。因此,疲劳曲线应看作是一组试验所得的分散带的均值。当疲劳数据足够多时,可将数据用概率统计法画出不同破坏概率的一组疲劳曲线,即 P-S-N 曲线,其中 P 表示疲劳破断概率。通常绘出的 S-N 曲线相当于破断概率 $P = 50\%$ 的 P-S-N 曲线。

影响疲劳性能的因素很多,除去弹簧本身外,零件的制作工艺、使用环境等都有不同的影响。因此对于一些重要的零件,在定型时需要进行疲劳试验。

3.3. 凸轮和端面的粗糙度对凸轮柱塞泵流量脉动的影响分析

表面粗糙度(surface roughness)表面粗糙度指的是在机械行业中,形容其表面微观形貌的一种普遍的参数。表面粗糙度体现了加工部件表面的微观几何形状的误差。指的是加工表面具有的较小间距和微小峰谷的不平度。其两波峰或两波谷之间的距离极其小,它属于微观几何形状误差。表面粗糙度越小,则表面越光滑[8]。表面粗糙度一般是因为加工时所采用的方法和其他因素所形成的。不同的加工方法和工件材料,被加工表面所留下痕迹的深浅、疏密、形状和纹理都是有差别的。表面粗糙度与机械零件的配合性质、耐磨性、疲劳强度、接触刚度、振动和噪声等有密切关系,影响着机械产品的使用寿命和可靠性。粗糙度很大程度上决定了机械零件的寿命,理论上说,粗糙度等级越低越好,但是表面越精细,成本也越高。

凸轮和端面是凸轮柱塞泵的主要工作表面,其表面精度要求高,一般 Ra 为 1.6 mm。运用有限元分析模型,改变凸轮和端面表面粗糙度数值,可以得出对应的流量脉动率也随表面粗糙度的改变幅度而改变,表面精度越高,流量脉动越小。

4. 实验验证

利用搭建的实验平台进行试验验证,如图 3 所示。该实验平台包括计算机、凸轮柱塞泵、压力表、

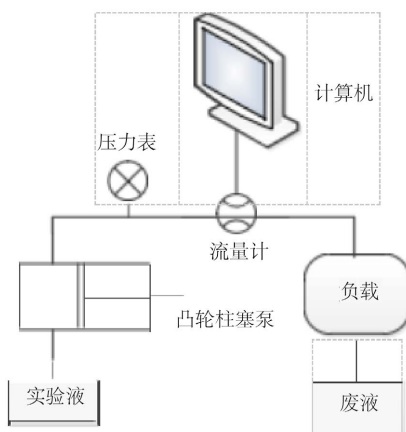


Figure 3. Experimental platform
图 3. 实验平台

流量计、负载及管路接头等,采用了荷兰进口的微量流量计(Bronkhorst μ -flow),流量的范围为 0.5~10 μ l/m [9]。该流量计还自带软件,与计算机进行连接并且按照其软件,可以实时监测系统的流量,通过流量的脉动测量,结果与上述仿真分析结果的误差在 0.005 之内。

5. 结语

研究凸轮柱塞泵的结构和原理,找出其流量脉动的主要原因,分析凸轮柱塞泵的流量脉动规律。柱塞泵在吸油和压油过程中存在着周期性的流量脉动,这是产生泄漏和振动噪声的重要原因之一,流量脉动对柱塞泵的性能有着直接的影响。材料的精度、弹簧的疲劳强度、凸轮和端面的粗糙度及强度都会影响凸轮柱塞泵的流量脉动。

参考文献

- [1] 司士辉,周光红. β -环糊精固载于 TiO_2 纳米粒多孔膜的压电石英晶体传感器[J]. 分析试验室, 2003, 2(4): 14-17.
- [2] Laser, D.J. and Santiago, J.G. (2005) A Review of Micropumps. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, **14**, 5-64. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/14/6/R01>
- [3] Shuichi, S. and Esashi, M. (2007) Fabrication of a Micropump for Integrated Chemical Analyzing Systems. *Electronics and Communications in Japan (Part II: Electronics)*, **72**, 52-59. <https://doi.org/10.1002/ecjb.4420721006>
- [4] 王蔚,田丽,鲍志勇,等. 一种新型压电式双向无阀微型泵的研制[J]. 传感技术学报, 2006, 9(5): 2018-2021.
- [5] 陈纪伟. 圆柱凸轮柱塞泵动力学研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2012: 6.
- [6] 吴孟丽. 双面凹槽凸轮泵的流量脉动分析[J]. 机械设计, 2019, 36(12): 84-89.
- [7] 高林. 柱塞泵关键部件有限元分析与流量脉动研究[D]: [硕士学位论文]. 邯郸: 河北工程大学, 2021.
- [8] 黎石,王国志. 基于斜盘交错角的柱塞泵流量脉动研究[J]. 计算机与数字工程, 2021(3): 595-602.
- [9] 董小杏. 恒压恒流凸轮柱塞泵凸轮曲线特性分析及优化[J]. 机床与液压, 2021, 49(12): 47-51.