DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2020.06.005

电磁力互动柱塞泵缓冲研究

徐学文*,张洪信b,赵清海b,王东*,王新亮*

(青岛大学 a. 机电工程学院; b. 动力集成及储能系统工程技术中心,山东 青岛 266071)

摘 要:电磁力互动柱塞泵是一种新型的液压泵,柱塞运动控制不当将和泵体产生冲击振动和 噪声。考虑电磁力、液压动力、摩擦力等因素,建立电磁力互动柱塞泵动力过程仿真的数学模型,对电磁力进行仿真与试验研究,发现两者具有较好的一致性。电磁力随着柱塞行程增大单 调递增且变化越来越快,最大值接近1000N;柱塞从下止点运动到上止点且保持通电状态,速 度随电磁力变化趋势越来越大,到上止点时产生剧烈冲击和噪声;缩短通电时间,可使柱塞运 动到上止点时速度近似为0,避免了冲击且电消耗大幅度降低。 关键词:柱塞泵;电磁力;冲击;振动;噪声 中图分类号:TH35 文献标识码:A 文章编号:1671-5276(2020)06-0021-03

Study of Electromagnetic Force Interactive Piston Pump Cushioning

XU Xuewen^a, ZHANG Hongxin^b, ZHAO Qinghai^b, WANG Dong^a, WANG Xinliang^a

(a. Mechanical and Electronic Engineering College; b. Power Integration and Energy

Storage System Engineering Technology Center, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

Abstract: Electromagnetic interaction plunger pump is a new type of hydraulic pump. If the plunger motion is not controlled well, shock, vibration and noise occar in the plunger and the pump body. In consideration of electromagnetic force, hydraulic power, friction force and other factors, this article establishes the mathematical model of the dynamic process of the electromagnetic interactive plunger pump. Then the electromagnetic force is simulated and experimentally studied, the simulation and study results is of good consistency. The electromagnetic force increases monotonously with the increase of the plunger stroke, and it changes faster and faster. The maximum value is near 1 000 N. When the plunger moves from bottom dead center to top dead center, the coil is still in energized condition, the speed increases with the electromagnetic force. And when the plunger reaches the top dead center, it generates violent Impact and noise. By shortening the energization time, the velocity of the plunger approaches to zero when the plunger is moved to the top dead center, thus avoiding the Impact and greatly reducing the electric consumption. **Keywords**: piston pump; electromagnetic force; cushion; vibration; noise

0 引言

电磁力互动柱塞泵作为一种新型的液压泵,如果柱塞 运动到上、下止点时速度不为0,柱塞和泵体之间将产生 大的冲击,并导致系统振动和噪声,严重影响寿命。

目前国内外针对电磁泵缓冲的研究主要集中在液压 缸和气缸方面。国外学者如 ALGAR A 等对双作用气缸 在行程末端缓冲和启动阶段由于活塞的 3D 位移而影响 缓冲和启动性能进行了相关研究;LAI Q 等对高速大流量 液压缸进行了缓冲特性建模与分析,详细研究柱塞结构和 关键的结构参数,证实适当的设计和柱塞长度对提高缓冲 性能是有效的^[1-3];国内赵伟等对高速液压缸的缓冲过程 进行理论分析和实验研究,分析其结构参数对缓冲速度的 影响^[4-5];ZHANG Z L 等则针对特高压断路器中的高速大 流量阀控液压缸缓冲进行优化设计,有效降低柱塞的末速 度^[6];王辉等提出一种新型缓冲装置,通过调节压力调节 阀使气缸以稳定而低速的状态停靠在行程终点,实现高速 气缸的最佳缓冲^[7];罗远新等提出安装可控式液压阻尼 器的解决方案,使单活塞式液压发动机在活塞下止点能够 平稳停止,并通过模拟仿真验证其可行性^[8]。

相关学者虽然对液压缸行程终点的缓冲进行了大量 研究,但将其结合到直线柱塞泵中还比较少见。电磁力互 动柱塞泵结构原理相对独特,本文结合液压缸行程终点的 缓冲研究方法,通过研究其工作过程的动力学特性,得到 电磁铁的电磁力特性^[9-10],控制电磁铁通断电时间,以最 节省的方式避免冲击。

1 电磁力互动柱塞泵结构原理

电磁力互动柱塞泵结构原理及样机如图1所示。电 磁铁位于系统的上部,以电磁铁为动力元件,下部的泵腔 部分和配流系统与传统的往复柱塞泵结构原理相同。衔 铁在底部的凹槽带有橡胶缓冲垫,可以防止因工作不稳定

基金项目:国家自然科学基金项目(51575286);山东省自然科学基金项目(2014ZRB01503)

第一作者简介:徐学文(1995—),男,山东潍坊人,硕士研究生,研究方向为轴向柱塞泵的设计优化和液压仿真。

出现柱塞到达上止点时对电磁铁底部冲击过大的问题。 泵工作时,左、右缸电磁线圈交互通断电,电磁线圈通电时 成为磁铁,磁化本缸的衔铁柱塞,衔铁柱塞因受到电磁力 而向上移动,对应泵腔吸入低压流质,并通过齿轮齿条传 动机构驱动另一缸衔铁柱塞同步向下移动,对应泵腔输出 高压流质,左、右两缸交替通电,完成电能向流体压力能的 转化^[11-13]。因左、右缸的衔铁柱塞组件运动相反,往复惯 性力完全抵消,整个系统没有因往复惯性力带来系统振 动。但如果在上、下止点处衔铁柱塞组件速度不为0,将 产生冲击力,带来冲击振动和噪声^[14-16]。





(b) 样机
1—外壳;2—电磁线圈;3—衔铁柱塞组件;
4—互动齿轮;5—齿轮轴;6—齿条;7—泵体;
8—泵腔;9—进流质单向阀;10—出流质单向阀。
图 1 电磁力互动柱塞泵工作原理与基本结构

2 电磁力互动柱塞泵动力学建模

2.1 动力学建模

左、右两个衔铁工作过程完全一致,存在的相位差为 π, 因此只需要建立、分析单缸半个周期内的动力学过程^[17]。



图 2 电磁泵运动部件受力图

在左侧电磁铁通电时,左、右柱塞的受力平衡方程为:

$$F_{\rm em} - F_{\rm tl} - F_{\mu \rm l} - F_{\rm fl} - m_{\rm l} a_{\rm l} = 0 \tag{1}$$

$$-F_{12} + F_{\mu 2} + F_{f 2} + m_2 a_2 = 0 \tag{2}$$

式中: F_t 为切向力; F_f 为摩擦力; F_{em} 为电磁力; $F_{\mu 1}$ 、 $F_{\mu 2}$ 分别为两个柱塞的摩擦力。

柱塞摩擦力与径向力、切向力之间关系为:

$$F_{\mu 1} = F_{r 1} \mu = \mu F_{t 1} \tan \alpha \tag{3}$$

$$F_{\mu 2} = F_{r 2} \mu = \mu F_{r 2} \tan \alpha \tag{4}$$

式中: α 为齿轮压力角,标准齿轮压力角 α =20°; F_r 为径向力; μ 为柱塞与泵体之间摩擦系数,当完全油膜润滑时为0.06 左右,不完全油膜润滑时为0.15 左右,本文取0.06。

互动齿轮的转动平衡方程为:

$$F_{t1}r - J\alpha = F_{t2}r \tag{5}$$

式中:r为互动齿轮节圆半径;α=a₁/r,为互动齿轮角加速 度;J为互动齿轮转动惯量,由于互动齿轮较小忽略其转 动惯量。

在定性研究分析泵的动力特性时,通常取 pi 为 0,pi 为泵的扬程(或负载工作压力),对分析结果的可信度不 会有明显影响^[18-19]。

联立以上各式,电磁力 F_{em}求解得到,则图 2 中各力均可得到。

2.2 电磁力 F_{em}仿真与实验

用 COMSOL 软件建立电磁力仿真分析模型对衔铁在 不同位置时的磁场进行计算,如衔铁位移 s(柱塞底面距 离下止点的距离)为 15 mm 时磁场分布如图 3 所示,然后 得到 F_{em}与 s 之间关系。



为了验证和校准仿真模型,研制了 F_{em}的试验装置, 如图 4 所示。当电磁铁通电时,衔铁受到电磁吸力的作用 使拉块上部调节螺栓的底端紧压在传感器的触点上,通过 此传感器便可测出电磁铁吸力的大小。

实验数据和仿真数据对比如图 5 所示。仿真数据和 实验数据最大误差为 9 N,具有较好的一致性。电磁力随 着柱塞行程增大单调递增,且变化越来越快,最大值接近 1 000 N,则柱塞从下止点开始运动,加速度越来越大,速 度也越来越快。

3 柱塞缓冲策略

如果电磁力互动柱塞泵在整个工作过程中保持通电,



柱塞运动的加速度与速度曲线如图 6 所示。左柱塞从下 止点开始向上运动,速度由0递增。因为越往上电磁力越 大,所以加速度越大,速度变化增快,趋势同电磁力变化, 到上止点时最大,达到 1.6 m/s。右柱塞与左柱塞速度一 致,方向相反。所以左、右柱塞运动到上、下止点时将与外 壳及泵体产生较大冲击力,使柱塞速度瞬间为0,导致剧 烈冲击振动和噪声,严重影响系统的寿命和可靠性^[20]。





基于上述考虑,针对柱塞泵半个周期为 0.178 s 的工 况,经过反复实验,柱塞从下止点静止位置开始通电0.07s (柱塞泵的半个周期为0.178s),柱塞运动到上、下止点附 近的速度刚好为0,此时电磁力曲线如图7所示。电消耗 大幅度降低;柱塞速度与时间之间的关系如图 8 所示,与 位移之间的关系如图 9 所示。在 t=0.07 s、柱塞位移为 0.012 m时速度达到最大,即 0.42 m/s,然后匀速递减到上 止点时为0;柱塞加速度与时间的关系如图10所示,断电 后为恒定负值,这是由于摩擦力和泵腔压力所致。



结语 4

1) 考虑电磁力、液压动力、摩擦力等因素,建立电磁 力互动柱塞泵动力过程仿真的数学模型。

2) 对电磁力进行仿真与试验研究,两者具有较好的 一致性。电磁力随着柱塞行程增大单调递增,且变化越来 越快,最大值接近1000 N。

(下转第31页)



图》 维原卫派位直的压力力中占6

好,可以利用此种装置来降低加工难度。

5 结语

基于常见的固定式节流缓冲装置的缺点,设计了一种 浮动型内置式缓冲装置。通过对该种装置缓冲套 3 个台 阶流量的数学建模,并用 MATLAB 软件分析了在整个缓 冲行程上浮动型内置式缓冲装置的缓冲速度 v 与缓冲加 速度 a 的曲线,两种运动曲线非常符合理想状态下缓冲装 置运动的特性曲线。在缓冲套刚进入缓冲阶段的位置、局 部损失位置、锐边节流阶段位置和缝隙节流阶段位置 4 个

^^^^^

(上接第23页)

3) 柱塞从下止点运动到上止点保持通电状态,则速 度以电磁力变化趋势越来越大,到上止点时产生剧烈冲击 和噪声。

4) 缩短通电时间,可使柱塞运动到上止点时速度近 似为0,避免冲击且电消耗大幅度降低。

参考文献:

- [1] ALGAR A, CODINA E, FREIRE J. Experimental study of 3D movement in cushioning of hydraulic cylinder [J]. Energies, 2017, 10(6): 3-10.
- [2] LAI Q, LIANG L, LI J, et al. Modeling and analysis on cushion characteristics of fast and high-flow-rate hydraulic cylinder[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016(2): 1-17.
- [3] ZAO Wei.Cushion process of the hydraulic cylinder of hydraulic operating mechanism for high voltage circuit breaker[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 216-221.
- [4] 赵伟, 黄钰曌, 俞浙青, 等. 高速液压缸活塞式缓冲机构的 研究[J]. 中国机械工程, 2014(8): 1033-1036.
- [5] 张日红,杜群贵. 基于 AMESIM 的高速气缸新型缓冲装置缓冲性能研究[J]. 振动与冲击, 2017(21): 92-98.
- [6] ZHANG Z L, WU S, ZHONG J, et al. Optimal design of cushion system for high-speed and high-flow valve-controlled hydraulic cylinder [J]. Journal of Central South University, 2015, 46(10): 3646-3655.
- [7] 王辉, 张超. 液压活塞发动机缓冲机构仿真研究[J]. 机床与 液压, 2014(15): 166-169.
- [8] 王传瑶,王勇勤,罗远新,等.液压缸缓冲动态特性对比研 究[J].液压与气动,2017(10):89-95.
- [9] YAN Yuqing, SHI Zhanqun, ZHENG Lin. Analysis of influencefactors for axial piston hydraulic pump flow fluctuation based on

位置上,利用 Fluent 软件进行流场仿真获得各位置的压力 云图也表明,浮动型内置式缓冲装置缓冲性能良好。

参考文献:

- [1] 冯倩文. 大型自动修井作业中扶正手接管缓冲机构研究[D]. 武汉: 武汉理工大学,2016.
- [2] 武晓凤. 液压缸复合型缓冲结构及缓冲过程的分析[D]. 太 原: 太原理工大学,2013.
- [3] 许贤良,韦文术. 液压缸及其设计[M]. 北京: 国防工业出版 社,2011.
- [4] 冯江涛,高钦和,管文良,等. 多级液压缸建模及级间缓冲研究[J]. 兵工学报,2016,37(12): 2268-2276.
- [5] 丁凡,路甬祥. 短笛型缓冲结构的高速液压缸缓冲过程的研究[J]. 中国机械工程,1998,9(10): 52-54.
- [6] 黄崇溪. 高速气缸动力学与缓冲性能研究[D]. 广州:华南理 工大学,2016.
- [7] 张日红,杜群贵.高速气缸新型缓冲装置及其性能[J].华南 理工大学学报(自然科学版),2016,44(11):90-96.
- [8] SCHWARTZ C, DE Negri V J, CLIMACO J V. Modeling and analysis of an auto-adjustable stroke end cushioning device for hydraulic cylinders[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2005, 27(4): 415-425.

收稿日期:2019-09-16

AMESim[J]. Hydraulic & Pneumatics, 2014(2): 104-108.

- [10] ZHENG J, HUANG H, ZHANG S, et al. A general method to simulate the electromagnetic characteristics of HTS maglev systems by finite element software [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 99(12): 1.
- [11] 张洪信,王新亮,张延君,等.一种电磁力互动柱塞泵:中国, CN105587553A[P].2016-05-18.
- [12] 杨国来,李世伟,张俊峰,等.一种新型永磁式电磁泵的设计[J].新技术新工艺,2014(1):41-43.
- [13] 张铁柱,张洪信,张继忠,等. 约束活塞型内燃式柔性动力系 统[C]. 武汉:中国内燃机学会 2005 年学术年会暨 APC2005 年联合学术年会, 2005.
- [14] XU Xianliang, ZHAO Lianchun, WANG Chuangjing. Flow pulsation of the axial piston pump[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1992(4): 72-82.
- [15] 丁问司,袁林燕,丁元文,等. 气垫传动冲击锤钻冲击特性 影响分析[J]. 振动与冲击,2015(10):100-104.
- [16] 孙涛,罗凯,周华,等. 燃料柱塞泵流动特性仿真分析与低 噪声设计[J]. 振动与冲击,2017(2):165-169,189.
- [17] M. Deeken. Simulation of the reversing effects of axial piston pumps using conventional CAE tools [J]. Ölhydraulik und Pneumatik, 2002, 46: 276-282.
- [18] E. KOC, C. J. Hooke. Considerations in the design of partially hydrostatic slipper bearings [J]. Tribology International, 1997, 30(11): 815-823.
- [19] 郑光泽.考虑内燃机系统耦合振动的活塞拍击研究[J].振 动与冲击,2013,32(11):2559-2565.
- [20] 邱博,毕新胜,陈璐,等. 斜盘式轴向柱塞泵动态特性研 究与仿真试验[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(1): 197-201.

收稿日期:2019-09-02