

# 液压约束活塞发动机的流量脉动仿真分析

黄妮,杜光超,戴作强,郑莉莉,张志超  
(青岛大学 机电工程学院,山东 青岛 266071)

**摘要:**为研究间隙误差对液压约束活塞发动机流量脉动的影响,在 ADAMS 中建立其含有间隙误差的主运动系统动力学模型,将 ADAMS 中得到的模型数据导入 AMESim 中,建立液压系统模型。通过对比不同间隙误差模型的参数输出,分析间隙误差对系统流量脉动的影响。研究表明,在一定范围内,间隙误差对流量脉动有明显的影响,并随着间隙误差的增大而增加;而且,连杆大头和曲轴曲柄之间转动副径向间隙误差对系统流量脉动的影响最大。

**关键词:**活塞发动机;间隙误差;流量脉动;AMESim

中图分类号:TP391.9 文献标志码:A 文章编号:1671-5276(2020)01-0075-03

## Simulation Analysis of Flow Pulsation of Hydraulic Confined Piston Engine

HUANG Ni, DU Guangchao, DAI Zuoqiang, ZHENG Lili, ZHANG Zhichao

(School of Electromechanic Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

**Abstract:** To study the influence of clearance error on the flow pulsation of hydraulic confined piston engine, the dynamical model of the main motion system of HCPE with clearance error is established in ADAMS. Then, the model data from ADAMS is imported into AMESim, the hydraulic system model is established and by comparing the output of parameters between models with different clearance error, the influence of clearance error on the flow pulsation of the system is analyzed. The results show that the clearance error has obvious effect on the flow pulsation of the system, and it increases with the increase of the clearance error. The radial clearance error of the revolute joint between the connecting rod and crankshaft crank has the greatest impact on the flow pulsation of the system too.

**Keywords:** piston engine; clearance error; flow pulsation; AMESim

## 0 引言

液压约束活塞发动机(HCPE)是在原有传统内燃式发动机基础之上,将液压系统与其组合集成的新型双动力输出系统,可以将燃料燃烧产生的内能直接分为机械能和液压能输出<sup>[1-5]</sup>。由于间隙误差对 HCPE 系统运动精度具有一定影响<sup>[6]</sup>,且在 HCPE 系统中柱塞与动力活塞属于刚性连接,所以主运动系统运动精度会直接影响柱塞的运动,从而对系统流量特性产生影响。因此需要对 HCPE 进行流量特性分析,研究间隙误差对系统可靠性的影响。

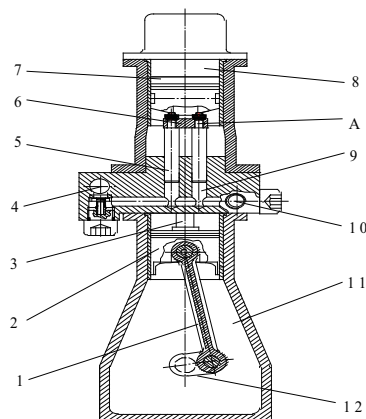
国外很多学者都基于计算机仿真理论方法,利用动力学或运动学仿真软件,对机构可靠性进行仿真分析<sup>[7-9]</sup>。在国内,纪玉杰<sup>[10]</sup>提出了以 ADAMS 作为仿真平台,建立机构运动参数化模型,对机构可靠性进行仿真分析的方法;宋黎等<sup>[11]</sup>利用计算机仿真技术,对含有间隙误差的曲柄滑块机构运动分析的模拟实验修正法作了进一步研究。此外,还有很多学者对曲柄摇杆以及其他平面机构进行了计算机仿真分析<sup>[12-15]</sup>。

本文对三缸 HCPE 液压系统模型进行流量脉动仿真分析,研究 3 种运动副取不同间隙误差时,系统流量特性的变化情况。

## 1 HCPE 系统模型的建立

### 1.1 HCPE 工作原理

HCPE 系统整体结构组成如图 1 所示。



1—连杆;2—导向滑块;3—联接杆;4—进水口;  
5—液压柱塞;6—连接板;7—动力活塞;8—第 1 工作室;9—第 2 工作室;10—出水口;11—第 3 工作室;12—曲轴;A—分流点。

图 1 HCPE 系统整体结构图

基金项目:国家科技支撑计划(80114020168)

第一作者简介:黄妮(1994—),女,湖南常德人,硕士研究生,研究方向为氢燃料电池客车。

HCPE 系统一般由 3 个工作室组成。第 1 个工作室是发动机燃烧室,工作原理与传统内燃式燃烧室类似,也是通过进气、压缩、做功、排气 4 个冲程完成一个工作循环,动力活塞-导向滑块运行 4 个冲程完成一次燃料燃烧内能向直线运动动能的转换。第 2 个工作室是液压工作室,工作原理与传统液压泵类似,通过吸水、压水两个过程完成一次工作循环,实现直线运动动能向液压能的输出。第 3 个工作室为辅助工作室,通过曲柄连杆机构对动力活塞-导向滑块组件进行运动约束,限定工作行程,保证组件正常工作,实现系统工作定时、协调及辅助系统驱动。

## 1.2 HCPE 液压系统模型的建立

本文所设计的 HCPE 是一种双元动力输出装置,该机构机械能输出部分参照原有内燃机,液压输出部分为自行设计,液压柱塞与活塞-柱塞-滑块组成固定连接。机构主要参数有:动力活塞-导向滑块行程  $x=90\text{ mm}$ ;曲柄半径  $r=45\text{ mm}$ ;连杆长度  $l=130\text{ mm}$ ;动力活塞和导向滑块直径  $D=82\text{ mm}$ ;活塞中心线偏离曲轴中心  $1.2\text{ mm}$ ;液压柱塞直径  $16\text{ mm}$ ,每缸柱塞数为 3;主轴径  $62\text{ mm}$ ;连杆轴径  $28\text{ mm}$ 。

首先,在 Adams 中建立 HCPE 取不同间隙误差的仿真模型,如图 2 所示,并在 ADAMS 中对其进行运动仿真分析,然后将得到的数据导入 AMESim 中,进行仿真分析,得到间隙误差对系统流量特性的影响。在 AMESim 中建立的液压系统的简化模型如图 3 所示。

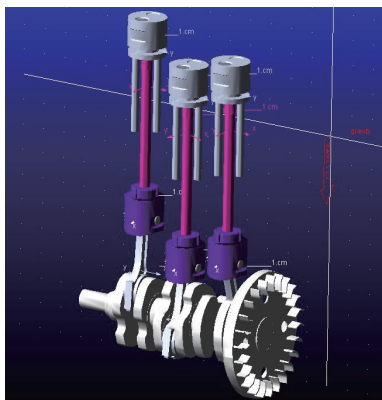


图 2 HCPE 仿真模型

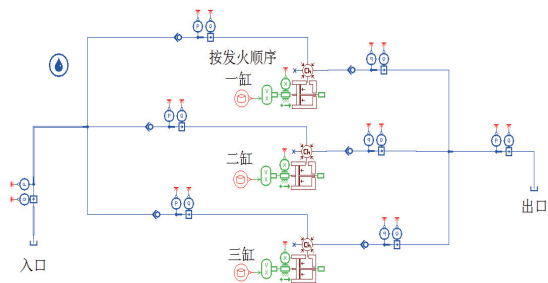


图 3 液压系统模型

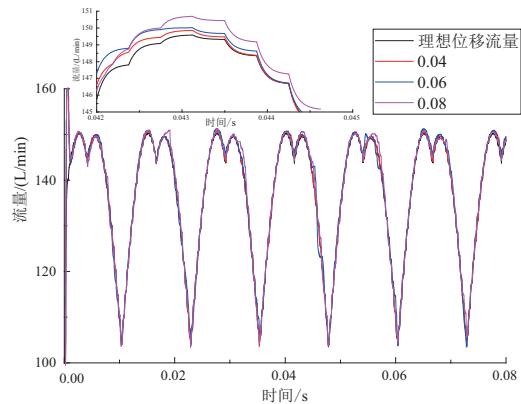
## 2 间隙误差对系统流量脉动的影响

HCPE 作为一种双元动力集成输出装置,动力活塞和

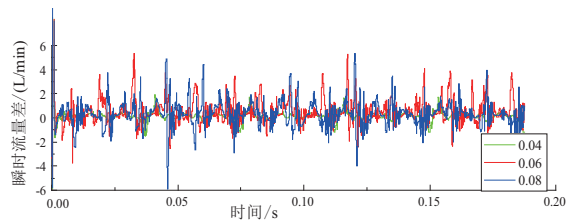
液压柱塞是固连在一起的,动力活塞运动状态的变化会对液压性能产生一定影响。本文通过对没有间隙和含有间隙模型进行对比,分析间隙误差对流量特性的影响。

### 2.1 活塞销与导向滑块径向间隙误差对系统流量脉动的影响

在活塞销与导向滑块之间间隙误差分别取  $0.04\text{ mm}$ 、 $0.06\text{ mm}$ 、 $0.08\text{ mm}$  时及理想状态(无误差)下,对模型流量脉动进行仿真分析,得到结果如图 4 所示(本刊系黑白印刷,相关疑问咨询作者)。图 4(a)上方为系统流量脉动的局部放大图。



(a) 不同间隙误差下流量变化图



(b) 不同间隙误差下瞬时流量差值图

图 4 活塞销与导向滑块径向间隙误差影响下流量变化图

由图 4(a)可以看出,随着间隙的变大,动力活塞运动状态发生一定程度的变化,带动柱塞运动发生变化,而使得流量脉动变大。图 4(b)为瞬时流量差值图,经过分析计算,在  $0.04\text{ mm}$ 、 $0.06\text{ mm}$ 、 $0.08\text{ mm}$  的间隙误差下,瞬时流量差值的平均值分别为  $0.352\text{ L/min}$ 、 $0.794\text{ L/min}$ 、 $0.819\text{ L/min}$ 。综上所述,系统间隙误差越大,流量脉动越大。

### 2.2 动力活塞与气缸侧向间隙误差对系统流量脉动的影响

在动力活塞与气缸侧向间隙误差分别取  $0.04\text{ mm}$ 、 $0.16\text{ mm}$ 、 $0.22\text{ mm}$  时及理想状态(无误差)下,对系统流量脉动进行仿真分析,得到结果如图 5 所示,图 5(a)上方为系统流量脉动的局部放大图。

由图 5(a)可以看出,随着间隙误差的增加,流量脉动变大。图 5(b)为瞬时流量差值图,经过分析计算,在  $0.04\text{ mm}$ 、 $0.16\text{ mm}$ 、 $0.22\text{ mm}$  的间隙误差下,瞬时流量差值的平均值分别为  $0.954\text{ L/min}$ 、 $1.669\text{ L/min}$ 、 $2.045\text{ L/min}$ 。综上所述,系统间隙误差越大,流量脉动越大。

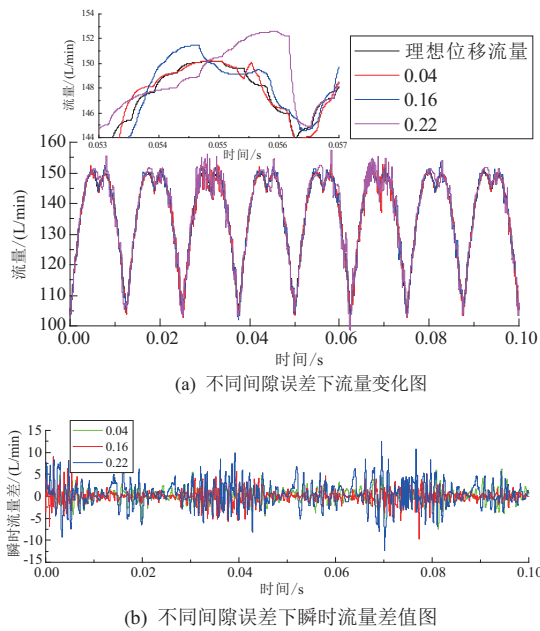


图5 动力活塞与气缸侧向间隙误差影响下流量变化图

### 2.3 连杆大头与曲轴曲柄径向间隙误差对系统流量脉动的影响

在连杆大头和曲轴曲柄之间转动副径向间隙误差分别取 0.04 mm、0.12 mm、0.18 mm 时及理想状态(无误差)下,对系统流量脉动进行仿真分析,得到结果如图 6 所示。图 6(a)上方为系统流量脉动的局部放大图。

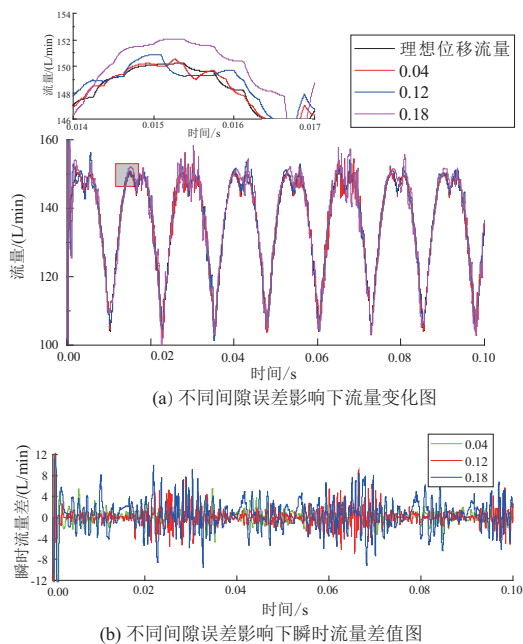


图6 连杆大头和曲轴曲柄径向间隙误差影响下流量变化图

由图 6(a)可以看出,随着间隙误差的增大,柱塞输出流量脉动变大。图 6(b)为瞬时流量的差值,经过分析计算,在 0.04 mm、0.12 mm、0.18 mm 的间隙误差下,瞬时流量差值的平均值分别为 1.017 L/min、1.294 L/min、2.179

L/min。综上所述,系统间隙误差越大,流量脉动越大,瞬时流量差值的平均值越大,且对比其他部位间隙误差对系统流量脉动的影响,连杆大头和曲轴曲柄之间转动副径向间隙误差对流量脉动影响最大。

### 2.4 综合各项误差对流量的影响

在综合考虑上述各项误差的情况下,对系统流量脉动进行仿真分析,3 组误差的选取与上述运动分析时相对应,得到结果如图 7 所示。图 7(a)上方为系统流量脉动的局部放大图。

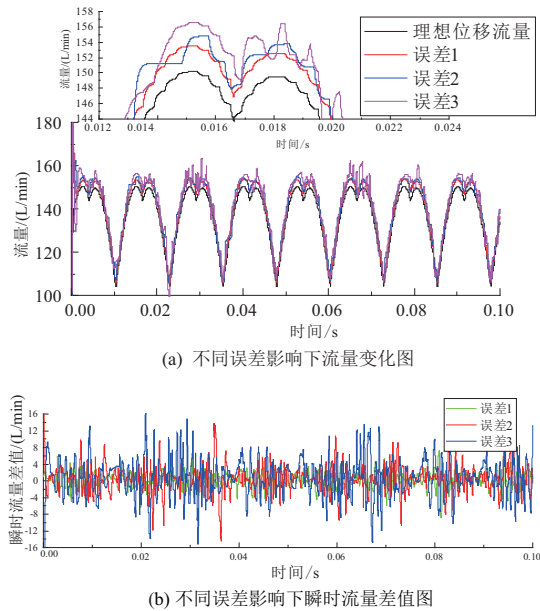


图7 综合不同误差影响下流量变化图

由图 7(a)可以看出,随着间隙误差的增大,输出流量脉动变大。图 7(b)为瞬时流量差值图,在 3 组误差下,分析计算得瞬时流量差值的平均值分别为 1.444 L/min、2.265 L/min、3.487 L/min。

通过上述各种间隙误差对输出流量的影响可以看出,当动力活塞间隙误差增加时,系统运动产生一定程度的变动,从而引起了柱塞运动变化,使得流量脉动相对柱塞理想运动状态下发生变化。随着误差增大,流量脉动变大。脉动的增加会使得部分液压能量不能得到合理的利用,降低能量利用率,造成能量损耗,并且脉动的增大会使得机构振动增强,噪声变大,加快机体零件损坏速度,加大损耗,对整机性能产生不利影响。所以,为了提高能量利用率、减少构件损耗,提高系统运行可靠度,需要对构件运动副间隙误差进行优化控制。

### 3 结语

通过对含有间隙误差的 HCPE 液压系统模型进行流量脉动仿真分析,得到在不同间隙误差下,系统流量特性的变化规律。分析结果表明:

- 1) 随着间隙误差的增加,系统流量脉动增大,会带来零部件之间振动加强,噪声增大,给整机系统带来不利的影响。

(下转第 90 页)

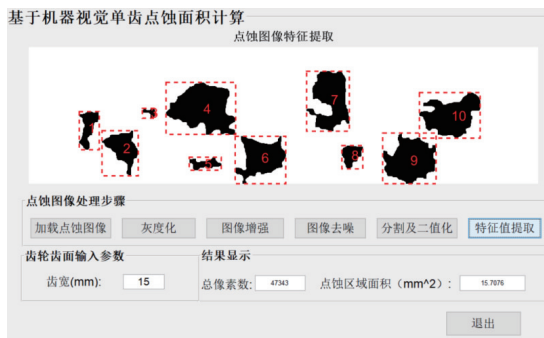


图6 点蚀图像连通区域标记图

### 3 结语

齿面点蚀面积是判断试件是否点蚀失效的判据,本文通过对齿轮点蚀照片特点的分析,研究了通过机器视觉提取点蚀面积信息的方法。相对于铅印法、人眼观察等传统方法,采用数字机器视觉方法,能够快速、方便、经济地获得齿面的点蚀面积信息,判断试验是否可以继续。本文利用 Matlab 开发出界面友好、使用方便的图形界面(GUI),使操作人员不需对机器视觉和 Matlab 知识有了解便可轻松获取点蚀面积,大大提高了试验效率。

#### 参考文献:

[1] GB/T 14229-1993 齿轮接触疲劳强度试验方法[S].

- [2] WESLEY E. Snyder and Hairong Qi, Machine vision [M]. [S.I.]: China Machine Press, 2005:1-2.
- [3] 吴禄慎,万超,张丛. 轨道扣件检测特征提取算法研究[J]. 机械设计与制造, 2018(8):5-7.
- [4] 林玉玲,韩国强. 基于图像配准的扫描电镜图像误差校正[J]. 机械制造与自动化, 2017, 46(6):96-99.
- [5] A.Soini. Machine vision technology take-up in industrial applications [J]. Image and Signal Processing and Analysis, 2001:332-338.
- [6] 张金瑞. 基于机器视觉的树叶面积特征提取的研究[D]. 北京:北京林业大学, 2010.
- [7] 吕威兴. 大功率碟型激光焊金属蒸汽图像特征分析[D]. 广州:广东工业大学, 2011.
- [8] 李红钢. 基于机器视觉的某型药筒零件难测量尺寸测量系统研究[D]. 太原:中北大学, 2014.
- [9] 邢文博,蒋敬. 基于 Matlab 开发数字图像处理 GUI[J]. 电气电子教学学报, 2013, 35(6):107-108, 115.
- [10] 张秀君,孙晓丽. 分段线性变换增强的自适应方法[J]. 电子科技, 2005(3):13-16.
- [11] 刘江林. 基于小波变换的雷达机器视觉技术及仿真[J]. 舰船科学, 2015, 37(4):211-214.
- [12] DONG wookCho, TIEN D Bui. Multivariate statistical modeling for image denoising using wavelet transforms [J]. Signal Processing Image Communication, 2005, 20:77-89.

收稿日期:2018-10-23

(上接第 77 页)

2) 随着间隙误差的增加,瞬时流量差值的平均值越大,且对比其他部位间隙误差对系统流量脉动的影响,连杆大头和曲轴曲柄之间转动副径向间隙误差对流量脉动影响最大。

3) 间隙误差对系统流量脉动影响明显,因此,需要对机构间隙进行进一步合理设计,减小间隙误差,以保证零部件以及系统使用的可靠性。

#### 参考文献:

- [1] 张洪信,张铁柱,霍炜,等. 液压约束活塞发动机能量平衡分析[J]. 农业机械学报, 2009, 40(3):36-39.
- [2] 张洪信,戴作强,张翼,等. 轴向液压约束活塞发动机工作原理与运转平稳性[J]. 中国机械工程, 2006, 17(5):529-532.
- [3] ZHANG Hongxin, ZHANG Tiezhu, WANG Weichao. Influence of valve's characteristic on total performance of three cylinders internal combustion water pump [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 22(1):91-96.
- [4] 赵红,张铁柱,张洪信,等. 三缸内燃式水泵的动力学建模和外特性仿真[J]. 农业工程学报, 2009, 25(3):114-118.
- [5] 张铁柱,张洪信,张继忠,等. 工程机械的未来动力源——机械-液压二元动力系统[J]. 中国工程机械学报, 2005, 3(3):262-266.
- [6] 郭哲锋. 液压支架机构运动精度可靠性的分析与仿真[D]. 郑州:郑州大学, 2011.
- [7] MANOLIS Papadrakakis, NIKOS D Lagaros. Reliability-based

structural optimization using neural networks and monte carlo simulation[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2002, 191(32):34-91.

- [8] Di Sciuva M, LOMARIO D. A comparison between Monte Carlo and FORMs calculating the reliability of a composite structure [J]. Composite Structures, 2003, 59(1):155-162.
- [9] MAINAK Mazumdar, DAVID W Coit, KELVIN Me Bride. A highly efficient Monte Carlo method for assessment of system reliability based on a Markov model[J]. Quality Control and Applied Statistics, 2001, 46(1):109-112.
- [10] 纪玉杰. 机构动作可靠性仿真技术研究[D]. 沈阳:东北大学, 2006.
- [11] 宋黎,曹惟庆,褚金奎. 间隙曲柄滑块机构运动误差分析的模拟实验修正法[J]. 机械设计, 1999, 16(4):37-40.
- [12] 陆凤仪,孙占营,徐格宁. 基于杆组理论的连杆机构运动精度及运动仿真研究[J]. 太原科技大学学报, 2003, 24(1):57-61.
- [13] 陈建军,陈勇. 平面四杆机构运动精度可靠性分析与数字仿真[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2001, 28(6):759-764.
- [14] 武丽梅,耿华. 基于 ADAMS 的曲柄摇杆机构的运动精度仿真研究[J]. 机械设计与制造, 2006(10):9-11.
- [15] 周毓明,赵竹青. 平面凸轮机构运动精度可靠性分析与数字仿真[J]. 机械设计, 2005, 22(1):48-50.

收稿日期:2018-09-10