

液压自由活塞发动机液压阀组特性研究

荆崇波, 吴维, 苑士华, 周振华

(北京理工大学 车辆传动国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 研究液压自由活塞发动机液压阀组动态特性. 基于单活塞液压自由活塞发动机活塞运动规律, 给出了其液压阀组形式, 建立了阀组数学模型, 对阀组的稳定性、频率响应、位移时间响应和流量特性进行了分析. 结果表明: 单活塞液压自由活塞发动机吸排油应分别采用反向和正向外流式锥阀; 减小阀组的阀芯质量和黏性阻尼系数可减小阀芯运动与活塞运动之间的相位差, 提高系统容积效率; 排油阀开启过程瞬时开度大且阀芯运动受限位装置影响.

关键词: 自由活塞发动机; 液压; 稳定性; 频率响应

中图分类号: TH 137.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0645(2010)09-1032-05

Dynamics of Hydraulic Valves in a Hydraulic Free-Piston Engine

JING Chong-bo, WU Wei, YUAN Shi-hua, ZHOU Zhen-hua

(National Key Laboratory of Vehicular Transmission, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The dynamics of the hydraulic valves in a hydraulic free-piston engine is given. The piston moving characteristic a single piston hydraulic free piston engine was given and the hydraulic valves formats were presented. The mathematical model of the hydraulic valves was established. The stabilities, frequency responses, spool displacement time response and flow characteristics of the hydraulic valves were analyzed. The results indicate that the suck and vent valves should be backward and forward outward flow cone valves, respectively. Reduction of the spool moving mass and viscous damping coefficient minifies the phase offset between the spool and the piston movements and leads to the increase of system volumetric efficiency. The instantaneous opening of the vent valve in the opening process is large and the spool movement is affected by the stop device.

Key words: free-piston engines; hydraulics; stability; frequency response

受石油危机的影响, 自由活塞发动机 (free-piston engine, FPE) 在沉寂一段时间后, 由于其潜在的节能优势, 在近几十年发展迅速. 国内外已有多个项目组在进行相关的研究^[1-4].

在自由活塞发动机的研究中, 目前主要还是以活塞动力学特性研究为主^[5-6], 集中于自由活塞运动特征与传统内燃机活塞运动特征的比较以及其对热力学过程的影响上^[7-8], 缺少对自由活塞发动机作为一种工作机械如液压泵所具有的一些特性的深入研究.

本课题组所研制的单活塞液压自由活塞发动机 (single piston hydraulic free-piston engine, SPHFPE) 原理样机活塞运动周期短, 在此过程中要完成吸油和排油的动作, 实现此功能的液压阀组直接影响了发动机的整体性能. 本文结合 SPHFPE 运动特性, 对液压阀组的工作特性进行了分析, 指出了影响液压阀组工作性能的因素和改善措施.

1 阀组模型

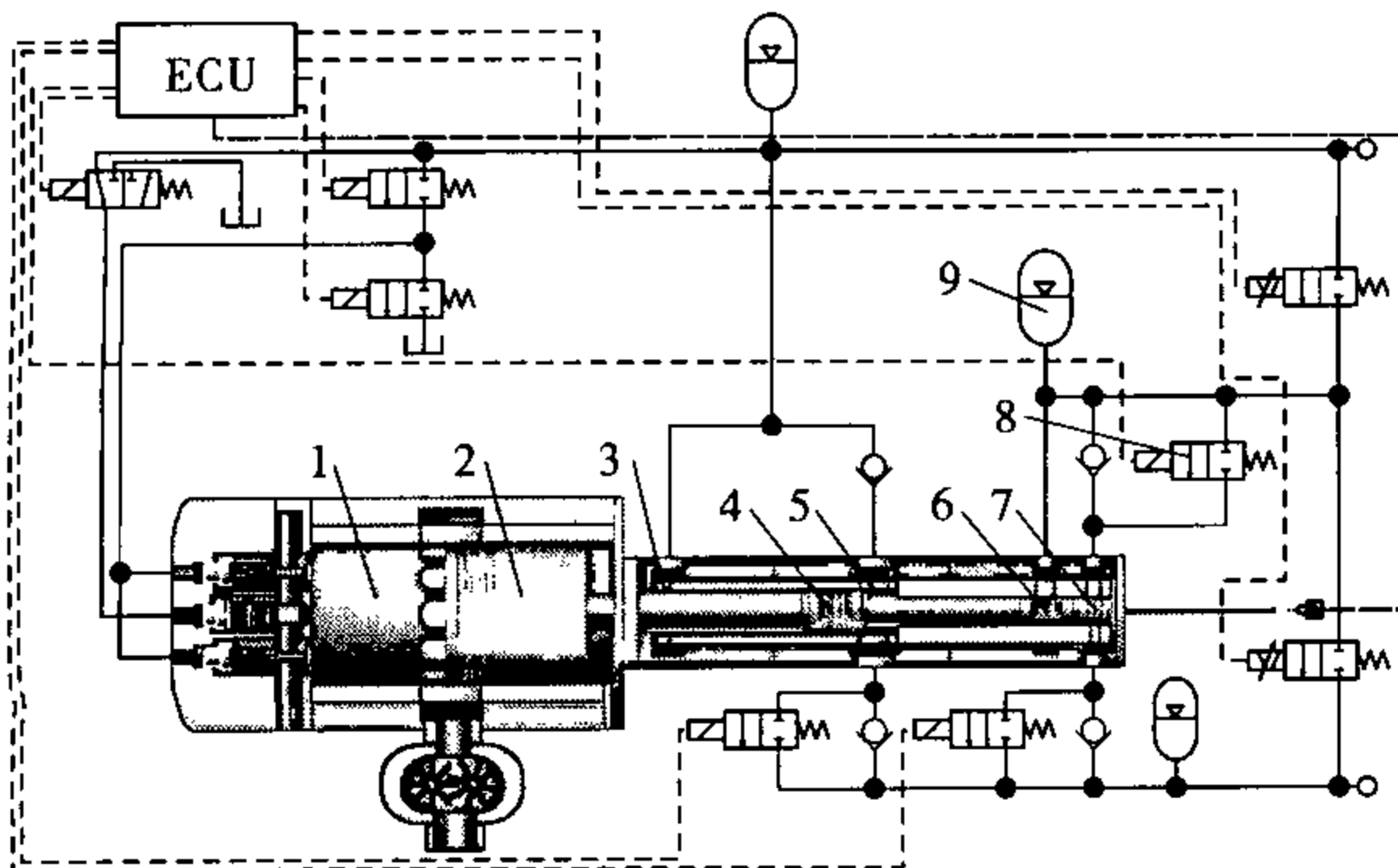
SPHFPE 基本原理如图 1 所示, 其属于直流扫

收稿日期: 2009-04-25

基金项目: 国家部委基础科研项目 (A2220060053)

作者简介: 荆崇波 (1970—), 男, 在职博士, 讲师, E-mail: jingchongbo@bit.edu.cn.

气二冲程液压自由活塞柴油机. SPHFPE 吸排油过程为: 在频率控制阀开启后, 压缩蓄能器里的压力油进入压缩腔推动活塞向左运动, 泵腔容积增大并吸入低压油; 当活塞在上止点附近时, 燃烧放热产生的高压气体推动活塞向右运动, 泵腔容积减小并排出高压油. 显然, SPHFPE 吸排油过程需要泵腔上的液压阀组配合实现.



1—动力腔; 2—动力活塞; 3—高压腔; 4—泵活塞; 5—泵腔; 6—压缩活塞; 7—压缩腔; 8—频率控制阀; 9—压缩蓄能器

图1 SPHFPE 原理图

Fig. 1 Configuration of the SPHFPE

1.1 液压流体力学分析

为提高 SPHFPE 的结构紧凑性同时减小节流损失, 其阀组主要使用插装式锥阀, 基本结构如图 2 所示, 工作油口的压力分别为 p_1 和 p_2 , 对应的作用面积分别为 S_1 和 S_2 , 预紧弹簧刚度为 K , 阀芯受到液动力为 F_H .

根据该阀的结构特点, 可得

$$S_1 = S_2 = \pi D^2 / 4. \quad (1)$$

式中 D 为阀口通径.

由于阀芯受到的瞬态液动力值较小, 在此忽略其影响, 于是阀芯受到液动力为^[9]

$$F_H = -\rho q v \cos \beta. \quad (2)$$

式中: ρ 为油液密度; q_v 为阀的流量; v 为出油平均流速; β 为射流角, 近似取值为阀芯半锥角.

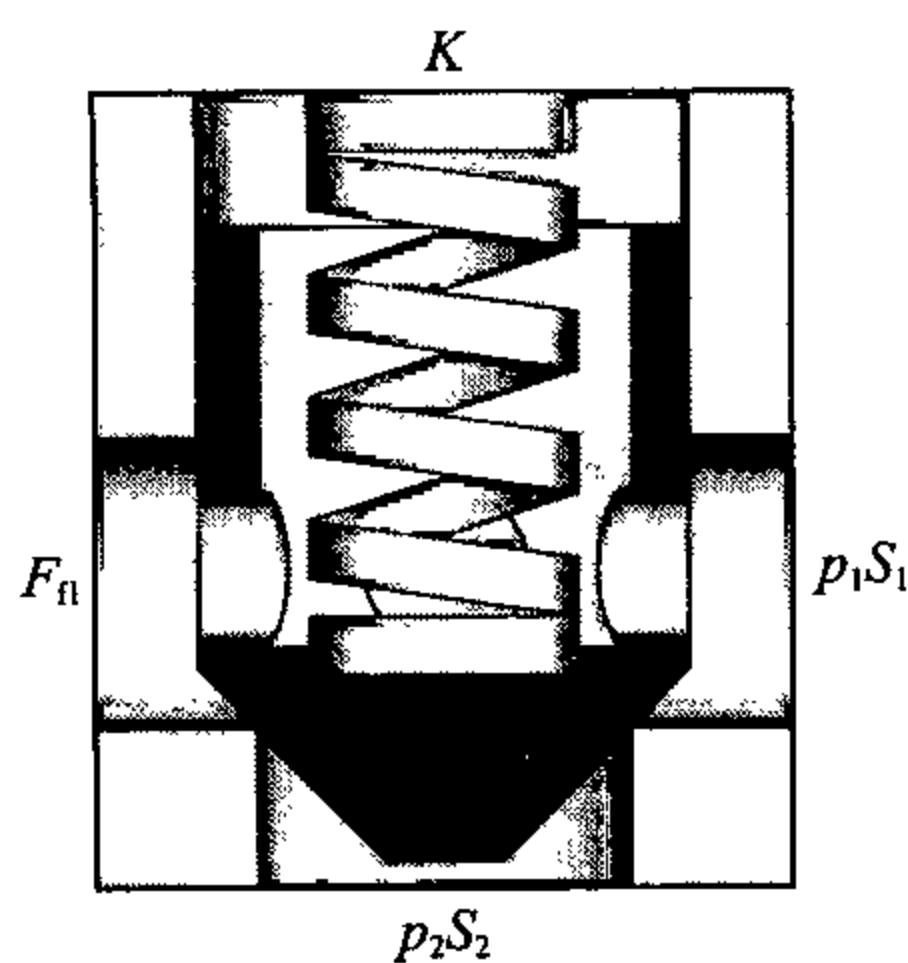


图2 插装阀结构简图

Fig. 2 Configuration of the conical valve

在此假定阀芯初始位置处于关闭状态且开启方向为阀芯位移 x 正方向. 流经插装阀的流量为

$$q_v = C_D A(x) \sqrt{(2|p_2 - p_1|)/\rho} \operatorname{sgn}(p_2 - p_1). \quad (3)$$

式中: C_D 为流量系数; $A(x)$ 为过流断面积, 与阀芯位移有关.

过流断面积 $A(x)$ 用下式计算:

$$A(x) = \pi D_v x \sin \beta. \quad (4)$$

式中 D_v 为阀口的平均直径.

阀芯运动引起的阀口两端液压腔的容积变化为

$$\Delta V_v = \pm S_2 x. \quad (5)$$

对应的液压腔容积增大时取正号.

预紧弹簧作用在阀芯上的力为

$$F_K = K(x + x_0). \quad (6)$$

式中: F_K 为预紧弹簧力; x_0 为弹簧的预压缩量.

1.2 动力学分析

根据上面的分析, 同时考虑限位装置以及阀座对阀芯运动的影响, 得到阀芯运动方程为

$$\begin{cases} \dot{x} = -\lambda_{r1} \dot{x} & x = 0, \\ m\ddot{x} + c_f \dot{x} + \rho q v \cos \beta + K(x + x_0) + p_1 S_1 - p_2 S_2 = 0 & 0 < x < x_{\max} \\ \dot{x} = -\lambda_{r2} \dot{x} & x = x_{\max} \end{cases} \quad (7)$$

式中: λ_{r1} 为阀芯与阀座相互接触时的弹性恢复系数; m 为阀芯质量; c_f 为黏性阻尼系数; x_{\max} 为阀芯最大位移; λ_{r2} 为阀芯与限位装置相互接触时的弹性恢复系数.

当 $0 < x < x_{\max}$ 时, 由式(3)(4)和(7)得到:

$$m\ddot{x} + c_f \dot{x} + [\pi C_D^2 D_v \Delta p \sin(2\beta) + K]x + Kx_0 + (p_1 - p_2)S_2 = 0. \quad (8)$$

式中 $\Delta p = p_2 - p_1$. 从式(8)可知, 阀芯运动系统为线性系统.

2 阀组稳定性与频率响应

2.1 稳定性

根据式(8)得到阀芯运动的特征方程为

$$mS^2 + c_f S + [\pi C_D^2 D_v \Delta p \sin(2\beta) + K] = 0. \quad (9)$$

该特征方程的根为

$$\lambda = \frac{-c_f \pm \sqrt{c_f^2 - 4m[\pi C_D^2 D_v \Delta p \sin(2\beta) + K]}}{2m}. \quad (10)$$

阀芯运动的稳定性可以分为两种情况:当 $c_f^2 - 4m[\pi C_D^2 D_v \Delta p \sin(2\beta) + K] < c_f^2$ 时,特征方程的根全部为负实根或者具有负实部,系统是稳定的;当 $c_f^2 - 4m[\pi C_D^2 D_v \Delta p \sin(2\beta) + K] > c_f^2$ 时,特征方程的根存在正实根,系统是不稳定的。

从以上分析可知,系统稳定性主要取决于 K 与 $-\pi C_D^2 D_v \Delta p \sin(2\beta)$ 的大小关系,

$$K > -\pi C_D^2 D_v \Delta p \sin(2\beta). \quad (11)$$

根据 $\Delta p = p_2 - p_1$,于是当 $p_2 > p_1$ 时,属外流式,稳态液动力使阀关闭;当 $p_2 < p_1$ 时,属内流式,稳态液动力使阀开启。

当系统为外流式时,式(11)始终成立,即系统始终是稳定的。当系统为内流式时,只有在 Δp 满足下式的情况下系统才稳定。

$$|\Delta p| < K / [\pi C_D^2 D_v \sin(2\beta)]. \quad (12)$$

因此使用内流式插装锥阀时,阀口压差不能太大。

2.2 频率响应

保证 SPHFPE 稳定可靠地运行,需要提高阀组

的稳定性,而要提高 SPHFPE 的性能,则需要明确阀芯运动规律与活塞运动规律之间的关系。根据阀芯位移对驱动压力的传递函数,得到其频率特性为

$$G(j\omega) = \frac{A - \partial F_{fl} / \partial p_2}{m(j\omega)^2 + c_f(j\omega) + \pi C_D^2 D_v \Delta p \sin(2\beta) + K} \quad (13)$$

根据 SPHFPE 活塞运动规律可知,阀组驱动压力基本是按三角函数规律变化的,与之对应的阀芯运动规律也是如此,但两者之间存在相位差。对于 SPHFPE 而言,相位差越小,同时阀芯开度越大,SPHFPE 作为液压泵的整体性能就越好。

基于 SPHFPE 阀组结构参数,根据式(13)得到的阀芯质量、预紧弹簧刚度和黏性阻尼系数对阀芯运动系统频率响应的影响如图 3 所示。

从图 3 可知,减小阀组的阀芯质量,增大预紧弹簧刚度,减小黏性阻尼系数,相位差均减小。在实际应用过程中,由于增大回位弹簧刚度将影响阀芯平衡开度、阀芯受到的驱动压力等因素,因此不宜随意调整。

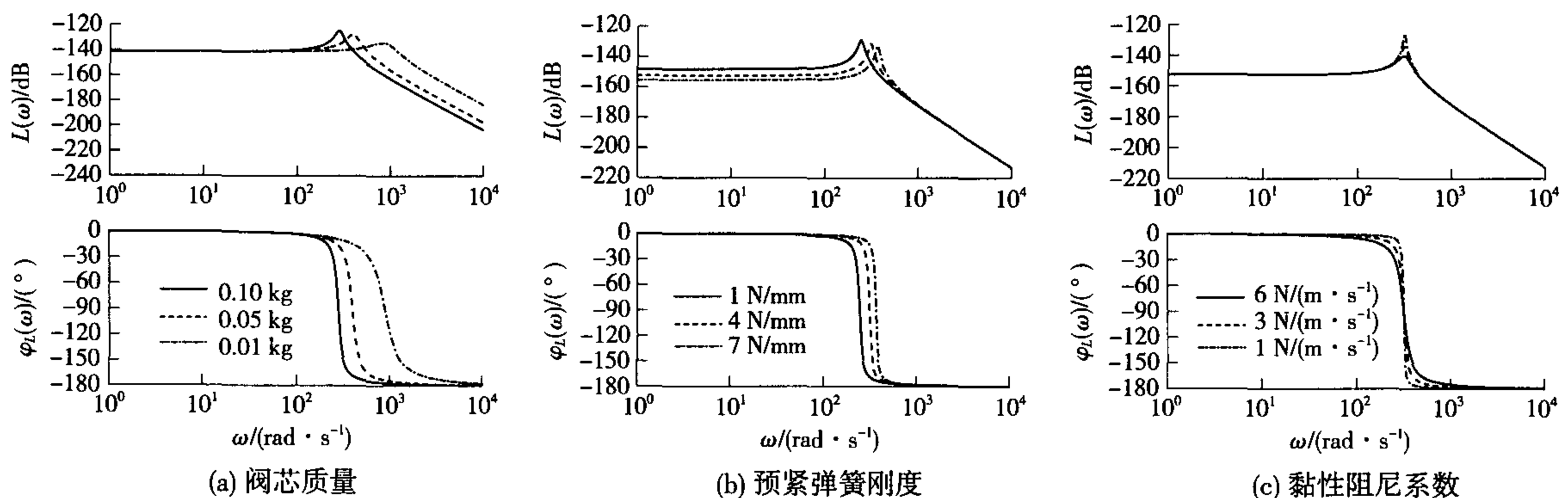


图 3 阀芯运动系统频率响应的影响因素

Fig. 3 Influencing factors on frequency response

3 阀组流量特性与时间响应

3.1 流量特性

根据以上对阀组的稳定性和频率响应的分析,考虑到 SPHFPE 的基本功能,其泵腔排油采用外流式锥阀实现。

SPHFPE 泵腔过大的死区容积会影响系统工作的稳定性,尤其会增大工作频率控制的难度。因此 SPHFPE 对泵腔死区容积有着严格的要求。采用外流式锥阀吸油,需要在阀芯径向与泵腔连通,同时还要保证一定的机械结构强度,此时死区容积将无法得到有效的控制。

SPHFPE 吸油阀采用图 4 所示结构。在此将图 2 结构称为正向外流式,而图 4 结构为反向外流式。假设进出口端压力仍为 p_2 和 p_1 ,从图中可知,阀芯

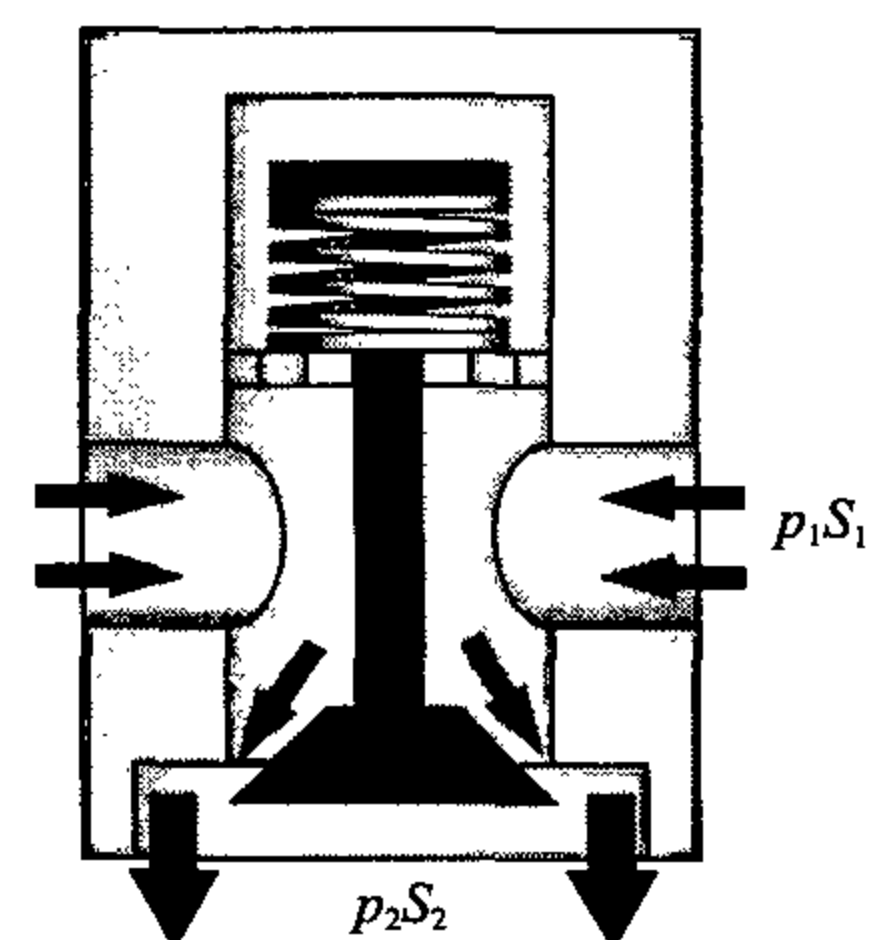


图 4 吸油阀结构图

Fig. 4 Configuration of the suck valve

运动方程也可以用式(8)表示. 于是可知,该系统的稳定性特征与外流式锥阀完全相同,即系统始终是稳定的. 图4吸油阀还可以直接与泵腔配合,实现结构简单且死区容积容易保证在较小的范围内.

通径相同且开启压力均为0.03 MPa的SPHFPE吸排油阀流量特性如图5所示. 从图5可知,吸油阀节流损失较排油阀大,可以通过增大吸油阀通径或者使用双阀进油^[10],同时适当增大进油压力来改善活塞高速运行工况下SPHFPE的吸油效果.

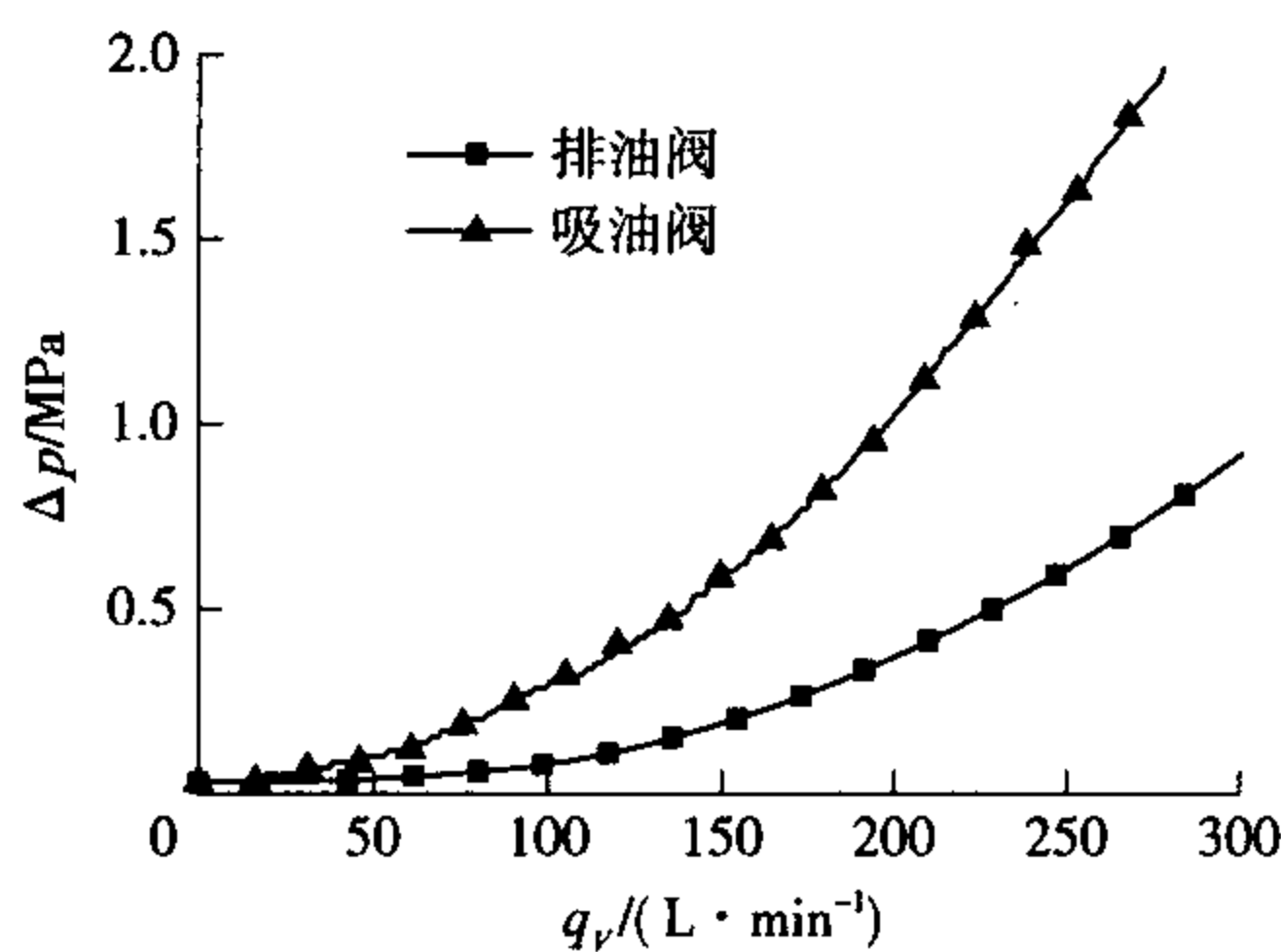


图5 吸排油阀流量特性

Fig. 5 Discharge characteristics of the hydraulic valves

3.2 时间响应

SPHFPE活塞运动速度快且泵腔吸排油流量变化剧烈,吸排油阀阀芯动作与活塞运动的同步配合程度对发动机的输出功率和工作稳定性都有很大影响.

根据对SPHFPE的阀组方案,通过阀组模型与发动机热力学模型以及活塞动力学模型的耦合仿真,对阀组的时间响应特性进行了分析. 发动机具体参数请参看文献[11]. 吸排油阀的主要仿真参数:阀芯直径为25.0 mm,阀口通径约为20.5 mm,阀芯质量约为0.12 kg,预紧弹簧刚度为5 N/mm,开启压力约为0.03 MPa,阀芯最大行程为7 mm. 图6为阀芯位移在单次循环下的响应曲线. 从图中可知,吸油阀的实际完全关闭位置与理想位置即活塞运动上止点有一段偏差,阀芯响应滞后将降低

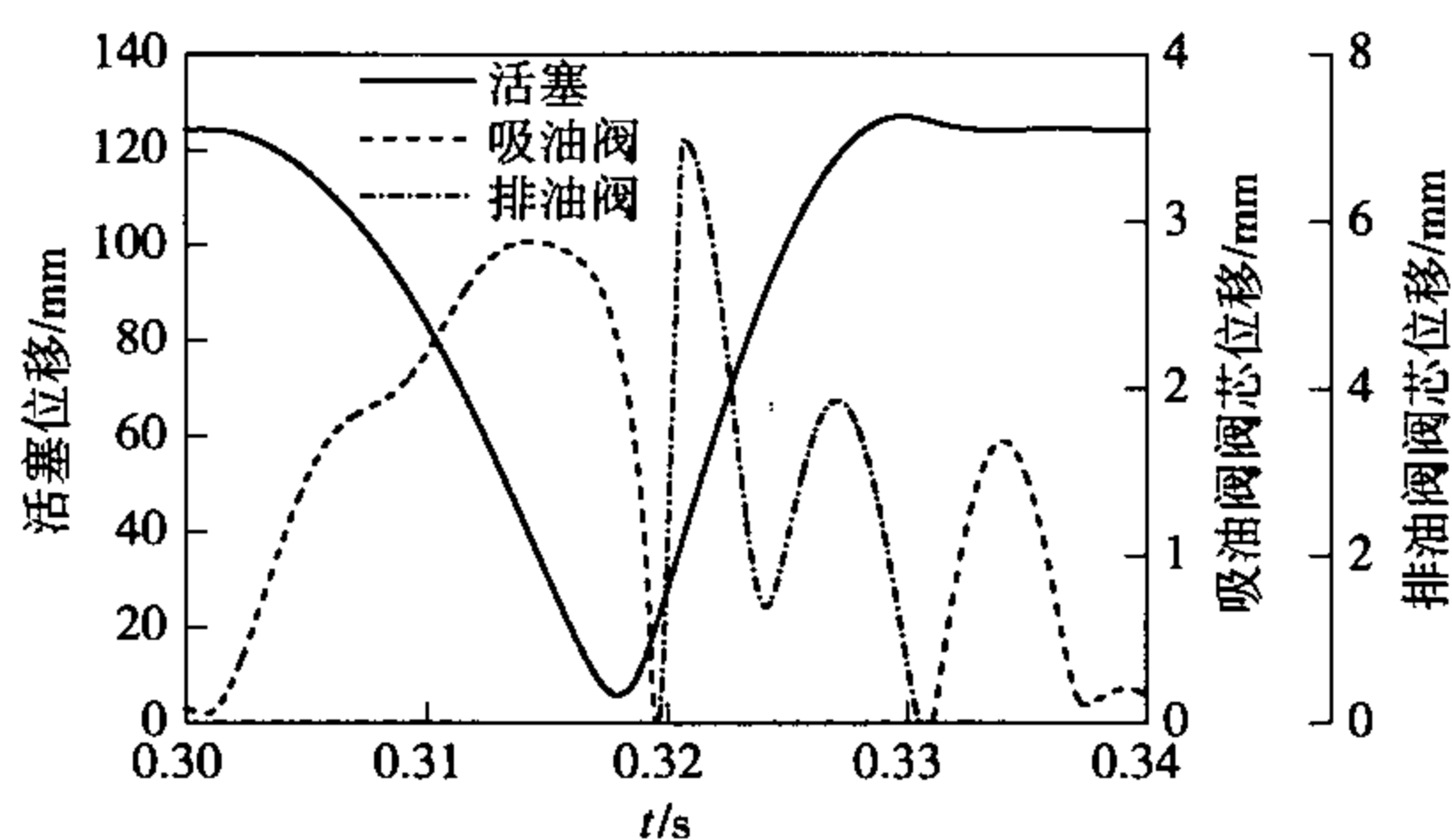


图6 单次循环阀芯动态响应

Fig. 6 Dynamic responses of the spools in one cycle

SPHFPE的容积效率.

对于吸油阀,阀芯上的作用力主要是阀口压差产生的力和弹簧力,两者相互影响且作用方向相反. 活塞在压缩冲程末端速度迅速减小,吸油流量也将迅速减小,阀口压差产生的力也将迅速较小,此时阀芯依靠弹簧力回位,因此弹簧力越大,阀芯回位速度越快. 提高弹簧力有大预紧力小弹簧刚度和大弹簧刚度小预紧力两种方法,两种方法都将增大节流损失. 在实际应用时要在不影响发动机正常工作的前提下尽量选择节流损失小的参数设置.

排油阀阀芯位移动态响应仿真结果与文献[11]的试验测试结果基本一致. 从图6中可知,排油阀阀芯开启速度较快,而后与限位装置发生了碰撞. 排油阀阀芯运动轨迹相比吸油阀更复杂,其关闭过程相对于活塞位移的相位差将造成高压油回流,影响SPHFPE的容积效率. 减小排油阀阀芯运动相位差的主要方法是减小阀芯质量、减小黏性阻尼系数和增加预紧弹簧刚度.

4 结 论

① 考虑到锥阀的稳定性,SPHFPE阀组应采用外流式形式,其中吸油采用反向外流式而排油采用正向外流式.

② SPHFPE阀组阀芯运动与活塞运动之间存在相位差,且相位差的存在降低了系统容积效率. 减小相位差的方法主要有减小阀芯质量、减小黏性阻尼系数和增大预紧弹簧刚度.

③ SPHFPE吸油阀开启过程缓慢而关闭过程较快. 排油阀开关过程都很迅速且开启过程瞬时开度大,阀芯位移受限位装置影响.

参考文献:

- [1] Martin G, Lixin P. Free piston engine: its application and optimization, SAE paper 2000-01-0996[R]. Warrendale, USA: Society of Automotive Engineers, 2000.
- [2] Mikalsen R, Roskilly A P. A review of free-piston engine history and applications[J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(14-15): 2339-2352.
- [3] 李庆峰,肖进,黄震. 自由活塞式内燃发电机研究现状[J]. 小型内燃机与摩托车, 2008, 37(4): 91-96.
Li Qingfeng, Xiao Jin, Huang Zhen. Research status of free piston generator engine[J]. Small Internal Combustion Engine and Motor Cycle, 2008, 37(4): 91-96. (in Chinese)

- [4] Mikalsen R, Roskilly A P. Performance simulation of a spark ignited free-piston engine generator [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2008, 28(5-6):1726-1733.
- [5] 苑士华, 吴维, 胡纪滨, 等. 单活塞式液压自由活塞发动机运动特性研究[J]. *内燃机学报*, 2009, 27(5):474-479.
Yuan Shihua, Wu Wei, Hu Jibin, et al. Motion characteristics of a single piston hydraulic free piston engine [J]. *Transactions of CSICE*, 2009, 27(5):474-479. (in Chinese)
- [6] Wu W, Yuan S H, Hu J B, et al. Design approach for single piston hydraulic free piston diesel engines [J]. *Frontiers of Mechanical Engineering in China*, 2009, 4(4):371-377.
- [7] Mikalsen R, Roskilly A P. A computational study of free-piston diesel engine combustion [J]. *Applied Energy*, 2009, 86(7-8):1136-1143.
- [8] Mikalsen R, Roskilly A P. Coupled dynamic-multidimensional modeling of free-piston engine combustion [J]. *Applied Energy*, 2009, 86(1):89-95.
- [9] 路甬祥. 两通插装阀的流量系数和液动力 [J]. *液压气动与密封*, 1983, 3(4):14-21.
Lu Yongxiang. The discharge coefficients and flow forces of the cartridge valves [J]. *Hydraulics Pneumatics and Seals*, 1983, 3(4):14-21. (in Chinese)
- [10] Achten P A J, Van Den Oever J P J, Potma J, et al. Horsepower with brains: the design of the CHIRON free piston engine, SAE paper 2000-01-2545 [R]. Warrendale, USA: Society of Automotive Engineers, 2000.
- [11] 吴维. 单活塞式原动直线泵特性研究 [D]. 北京: 北京理工大学机械与车辆工程学院, 2010.
Wu Wei. Study on the performance of a single piston hydraulic free-piston pump [D]. Beijing: School of Mechanical and Vehicular Engineering, Beijing Institute of Technology, 2009. (in Chinese)

(责任编辑: 刘雨)

(上接第 1023 页)

- [4] 杨玉胜, 吴宗之. 储罐爆炸碎片最可能抛射距离的 Monte-Carlo(蒙特卡罗)数值模拟 [J]. *中国安全科学学报*, 2008, 18(3):15-21.
Yang Yusheng, Wu Zongzhi. Monte-Carlo numerical simulation on the most probable flight distance of fragments from explosion of storage tanks [J]. *China Safety Science Journal*, 2008, 18(3):15-21. (in Chinese)
- [5] 钱新明, 徐亚博, 刘振翼. 球罐 BLEVE 碎片抛射的 Monte-Carlo 分析 [J]. *化工学报*, 2009, 60(4):1057-1061.
Qian Xinming, Xu Yabo, Liu Zhenyi. Monte-Carlo analysis of fragments projectile from spherical tank BLEVE [J]. *Journal of the Chemical Industry and Engineering Society of China*, 2009, 60(4):1057-1061. (in Chinese)
- [6] Hauptmanns U. A Monte-Carlo based procedure for treating the flight of missiles from tank explosions [J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2001, 16:307-312.
- [7] Hauptmanns U. A procedure for analyzing the flight of missiles from explosions of cylindrical vessels [J]. *Journal of Loss Prevention in Process Industries*, 2001, 14:395-402.
- [8] Gubinelli G, Zanelli S, Cozzani V. A simplified model for the assessment of the impact probability of fragments [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2004, A116:175-187.
- [9] CCPS. Guidelines for evaluating the characteristics of vapor cloud explosions, flash fires, and BLEVEs [M]. New York: American Institute of Chemical Engineers, 1994.
- [10] Holden P L, Reeves A B. Fragment hazards from failure of pressurized liquefied gas vessel [J]. *Icheme Symposium Series*, 1985, 93:205-220.

(责任编辑: 刘雨)