

DOI: 10.3901/JME.2009.07.120

油液体积模量的研究与在线测量*

王静 龚国芳 杨华勇

(浙江大学流体传动及控制国家重点实验室 杭州 310027)

摘要: 随着对液压系统的位置精度、响应时间和稳定性的要求的不断提高,油液体积模量越来越受到科研和工程人员的关注。分析油液体积模量对液压系统的影响,在建立油液体积模量理论模型的基础上,通过仿真对含气量、压力和温度对油液体积模量的影响进行分析。并根据油液体积模量的定义,设计油液体积模量在线测量装置。通过仿真和试验结果的对比,说明提供的分析和测量的方法对确定实际液压系统中的油液体积模量很有意义。

关键词: 液压系统 油液体积模量 仿真分析 在线测量

中图分类号: TH137

Research and Online Measurement of Bulk Modulus of Hydraulic Oil

WANG Jing GONG Guofang YANG Huayong

(The State Key Lab of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract: In view of requirements for better position accuracy, response time and stability of hydraulic system, it is more important than ever to pay attention to bulk modulus of hydraulic oil. The effects of the bulk modulus of hydraulic oil on system performance are analyzed. Based on the theoretical model, studies on the effects of air content, pressure and temperature on bulk modulus are done through simulation. An online measuring device of bulk modulus of hydraulic oil is designed according to the definition of bulk modulus. The simulation and experiment results show that the method of analysis and measurement of bulk modulus provided is very useful to confirming the oil bulk modulus in real hydraulic system.

Key words: Hydraulic system Bulk modulus of hydraulic oil Simulation analysis Online measurement

0 前言

体积模量是油液的一个重要的物理参数,它对液压系统的位置精度、功率水平、响应时间和稳定性的影响显著^[1]。在液压系统动态分析、建模与仿真中,合理准确地选取油液的体积模量值非常重要。在目前的液压系统的设计和研究中,油液的体积模量往往简单地估取为某个常数,而与系统状态无关。不少研究者发现这种简化使得动态分析和仿真的结果与实际情况相差很大^[2-3]。随着液压系统的功率和响应时间的要求不断提高,关注油液体积模量变得越来越重要。油液体积模量与哪些因素相关、其影

响程度多大,如何获得实际系统中的油液体积模量值,本文针对这些问题进行了研究,并设计了一种在线测量油液体积模量的装置。

1 油液体积模量对液压系统性能的影响

1.1 功率损失

由于油液是可以压缩的,在液压缸或活塞移动负载之前,缸内的油液必须先被压缩。换句话说,在负载移动之前,与被压缩体积等量的油液必须先加到液压缸中。这个过程没有做有用功,所做的无用功为

$$W_L = \Delta p \times \Delta V \quad (1)$$

$$\Delta V = \frac{V_0 \times \Delta p}{K_e} \quad (2)$$

因此有

* 国家杰出青年科学基金(50425518)和国家重点基础研究发展计划(973计划, 2007CB714004)资助项目。20080724 收到初稿, 20090305 收到修改稿

$$W_L = \frac{\Delta p^2 \times V_0}{K_e} \quad (3)$$

功率损失为

$$P_L = \frac{\Delta p^2 \times V_0}{K_e \times t} \quad (4)$$

式中 Δp —— 液压缸内油液压力的变化量

V_0 —— 液压缸内油液的初始体积

K_e —— 油液的有效体积模量

1.2 响应时间

在做有用功之前先要做无用功，从功率损失的表达式看出在功率损失一定的情况下，油液体积模量越大，响应时间越短。

1.3 定位精度

液压缸的作用就象一个很硬的线性弹簧，其总刚度等于各腔受压缩液体产生的液压弹簧刚度之和。当活塞处于中间位置时，液压弹簧刚度为

$$k_h = \frac{4K_e A^2}{V_t} \quad (5)$$

式中 A —— 液压缸工作面积

V_t —— 工作腔总容积

液压控制系统的总刚度为液压弹簧刚度与负载弹簧刚度之和。油液体积模量越大，液压弹簧刚度越大，相应的液压控制系统的刚度也越大(负载刚度相同的情况下)，即输出位移受外负载的影响越小，定位越准确^[4]。

1.4 稳定性

液压固有频率

$$\omega_h = \sqrt{\frac{4K_e A^2}{V_t m}} \quad (6)$$

式中， m 为负载质量和管道中油液的附加质量。

低油液体积模量会降低系统的固有频率，将降低系统的稳定性。

2 油液体积模量的理论模型

液体受压力作用而发生体积减小的性质称为液体的可压缩性。图1表示了典型的压力-体积曲线图。曲线显示液体体积 V 为施加的压力 p 、液体压缩性 k 和液体初始体积 V_0 的函数

$$V = f(p, V_0, k) \quad (7)$$

体积模量是液体抗压缩能力的度量。定义体积模量有两种方法。

正切体积模量 K_T 是任一指定压力下的液体体

积和这一点液体压力对体积的导数的乘积(这一点正切线的斜率)。

$$K_T = -V \frac{dp}{dV} \quad (8)$$

正割体积模量 K_S 是初始液体体积与压力-体积曲线上初始点至任一指定点连线的斜率的乘积(这一点正割线的斜率)。

$$K_S = -\frac{V_0}{V - V_0} \times (p - p_0) \quad (9)$$

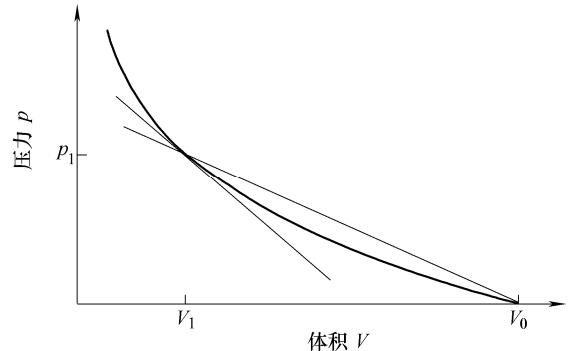


图1 液体压力增加体积减小

下面推导混气油液的体积模量。

对纯油液有

$$\frac{dp}{dV_f} = -\frac{K}{V_f} \quad (10)$$

式中 K —— 纯油液的体积模量

V_f —— 纯油液的体积

p —— 压力

该方程的解为

$$V_f = V_{f0} \exp(-(p - p_0)/K) \quad (11)$$

式中 V_{f0} 为大气压力下纯油液的体积。

将液压系统油液的压缩过程视为绝热过程，则油液中掺混的气体应满足下述状态方程

$$\frac{p}{p_0} = \left(\frac{V_{a0} - V'_a}{V_a} \right)^\lambda \quad (12)$$

式中 p_0 —— 大气压力

V_{a0} —— 大气压力下的气泡总体积

V'_a —— 压力由 p_0 变为 p 过程中溶解的气体体积

V_a —— 压力为 p 时的气泡总体积

λ —— 绝热指数

压力为 p 时混气油液的总体积

$$V = V_a + V_f = (V_{a0} - V'_a) \left(\frac{p_0}{p} \right)^{1/\lambda} + V_{f0} \exp(-(p - p_0)/K) \quad (13)$$

对混气油液有正切体积模量

$$K_{eT} = -V \frac{dp}{dV} = \frac{(V_{a0} - V'_a) \left(\frac{p_0}{p}\right)^{1/\lambda} + V_{f0} \exp(-(p - p_0)/K)}{\frac{(V_{a0} - V'_a) \left(\frac{p_0}{p}\right)^{1/\lambda}}{\lambda} + \frac{V_{f0}}{p} + \frac{V_{f0}}{K} \exp(-(p - p_0)/K)} \quad (14)$$

由于纯油液的体积模量 K 比 $p - p_0$ 大很多, $\exp(-(p - p_0)/K) \approx 1$, 将式(14)简化得到

$$K_{eT} = \frac{1 + \left(\frac{V_{a0} - V'_a}{V_{f0}}\right) \left(\frac{p_0}{p}\right)^{1/\lambda}}{1 + \left(\frac{K}{\lambda p}\right) \left(\frac{V_{a0} - V'_a}{V_{f0}}\right) \left(\frac{p_0}{p}\right)^{1/\lambda}} K \quad (15)$$

图2是根据式(15)仿真的结果, 取 $K = 2 \text{ GPa}$ 。图2中虚线代表的是大气压力下的气泡体积分数为2%, 按箭头方向气泡溶解量分别是大气压力下气泡体积分数的0%、10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%; 实线代表的是大气压力下的气泡体积分数为0.2%, 按箭头方向气泡溶解量分别是大气压力下气泡体积分数的0%、10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%。

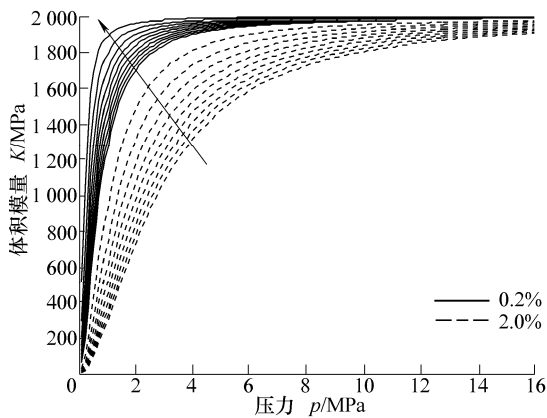


图2 混气油液正切体积模量随压力的变化

从图2中可以看出, 大气压力下的含气量越小, 体积模量越大; 含气量越大, 体积模量越小。在相同初始含气量下, 溶解量越大, 正切体积模量越大。

而温度、压力和压缩时间对溶解量均有影响。对同一溶质, 在相同的气相分压下, 溶解度随温度的升高而减小。液体中气体的溶解遵从亨利(Henry)定律, 即在一定的温度下溶解到液体中的气体体积量是和压力成正比的。对油液而言, 在相当高的压力下此定律仍有效。气体在油液中的溶解需要一个过程, 图3中给出了不同压力下的溶解过程^[5]。

因此, 温度越低、压力越大、压缩时间越长, 则溶解量越大; 温度越高、压力越小、压缩时间越

短, 则溶解量越小。

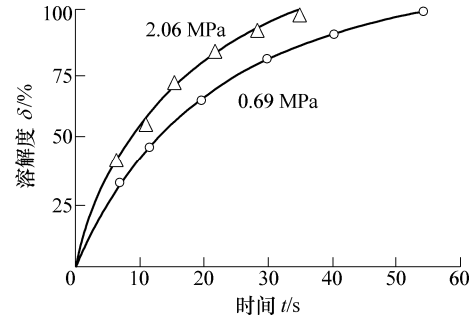


图3 空气在油液中的溶解度随时间的变化

图4是将纯油液的体积模量取为 $K=1.4 \sim 2.0 \text{ GPa}$, 大气压下的气泡体积分取为0.2%的仿真结果。图4中按箭头方向纯油液体积模量从1.4 GPa递增0.1 GPa至2.0 GPa。

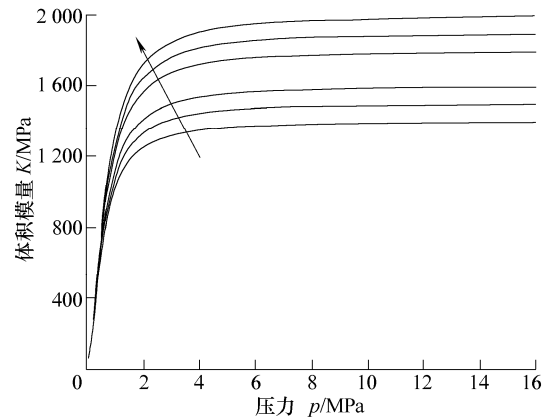


图4 纯油液体积模量对混气油液正切体积模量的影响

从图4中可以看出, 纯油液的体积模量越大, 混气油液正切体积模量也越大。而对于同一种油液, 在影响体积模量的几个因素中键合方式和原子结构、化学成分等均不会变化, 只有温度升高会使体积模量值降低。

对混气油液有正割体积模量

$$B_{eS} = -\frac{V_0}{V - V_0} (p - p_0) = -\frac{V_{a0} + V_{f0}}{V_a + V_f - V_{a0} - V_{f0}} (p - p_0) = \frac{V_{a0} + V_{f0}}{(V_{a0} - V'_a) \left(\frac{p_0}{p}\right)^{1/\lambda} + V_{f0} \exp(-(p - p_0)/K) - V_{a0} - V_{f0}} (p - p_0) = \frac{1 + \frac{V_{a0}}{V_{f0}}}{1 + \frac{V_{a0}}{V_{f0}} - \frac{V_{a0} - V'_a}{V_{f0}} \left(\frac{p_0}{p}\right)^{1/\lambda} - \exp(-(p - p_0)/K)} (p - p_0) \quad (16)$$

图5是根据式(16)仿真的结果, 取 $K = 2 \text{ GPa}$ 。

图5中短虚线代表的是大气压力下的气泡体积分数为0.05%，按箭头方向气泡溶解量从大气压力下气泡体积分数的99%至0%；长虚线代表的是大气压力下的气泡体积分数为0.10%，按箭头方向气泡溶解量从大气压力下气泡体积分数的99%至0%；实线代表的是大气压力下的气泡体积分数为0.20%，按箭头方向气泡溶解量从大气压力下气泡体积分数的99%至0%。

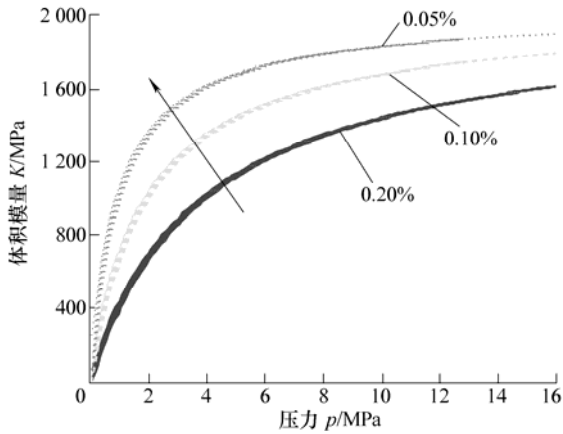


图5 混气油液正割体积模量随压力的变化

从图5中可以看出，油液正割体积模量受大气压力下的含气量的影响比正切体积模量更为显著。在相同初始含气量下，溶解量越大，正割体积模量越小。

图6是将纯油液的体积模量取为 $K=1.4\sim 2.0$ GPa，大气压下的气泡体积分数取为0.2%的仿真结果。图6中按箭头方向纯油液体积模量从1.4 GPa递增0.1 GPa至2.0 GPa。

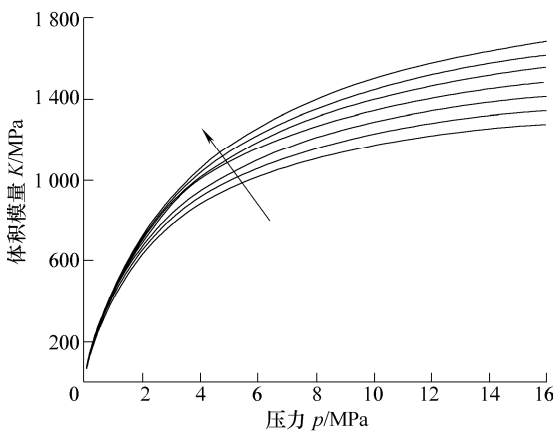


图6 纯油液体积模量对混气油液正割体积模量的影响

从图6中可以看出，纯油液的体积模量越大，混气油液正割体积模量也越大。

油液正切体积模量表示的是某一压力点的可压缩性，正割体积模量表示的是压力区间上的平均

值。由于系统工作压力经常随负载而变化，液压缸两腔的压力是在一定的压力范围内变化的，油液正割体积模量更能反映实际系统工作过程中油液的可压缩的平均水平。

下面介绍的油液体积模量在线测量装置是根据油液正割体积模量的定义设计的。按照实际系统工作情况，可以设定为测量油液的正割体积模量、近似的正切体积模量和任意两工作压力点之间的平均体积模量值。

3 油液体积模量在线测量

3.1 测量装置基本原理

油液体积模量在线测量装置的基本结构如图7所示。

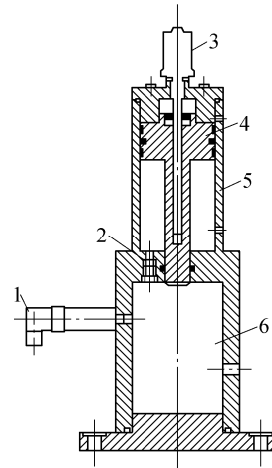


图7 油液体积模量在线测量装置基本结构图

- 1. 压力传感器 2. 单向阀 3. 位移传感器
- 4. 活塞和活塞杆 5. 加载缸 6. 测试腔

该装置的基本原理是，利用液压系统的部分油液作为研究对象，对测试腔内一定体积的油液施加压力，改变压力的大小，得到相应的油液体积的变化量，按油液体积模量的定义求得油液的体积模量值，通过二次系统直接显示或输出体积模量信号。图8是该装置的工作原理图。

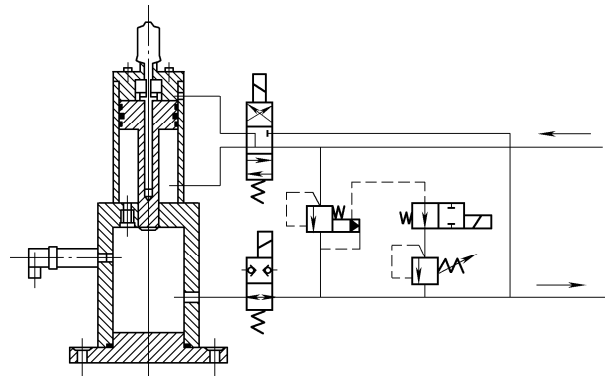


图8 油液体积模量在线测量装置工作原理图

3.2 测量装置的特点

该测量装置通过合理设计具有以下特点。

(1) 加载缸的活塞杆能够在测试腔内移动，通过加载缸活塞杆对封闭的测试腔内的油液施加压力。加载缸活塞杆的运动由电磁阀控制，测量过程可以通过程序控制自动实现。

(2) 测试腔的筒壁尽量取得比较厚，使得容器变形对测量值的影响小到几乎可以忽略不计。液压系统固体壁面的变形与其材料、结构以及尺寸有关，不在本文讨论范围之内，测量中尽量排除这个因素。实际应用中应通过合理的设计减小其影响，需要考虑时可将具体固体壁面的体积模量与混气油液的体积模量并联相加得到有效体积模量。

(3) 在加压测量以前，测试腔的油液通过循环流动与被测液压系统中的油液充分交换，使得被测量的油液的温度和含气量等参数与系统中工作的油液一致。以确保测得的油液体积模量能反映系统中油液体积模量的实际状况。这就是在线测量优于离线测量的地方。

(4) 测量时对测试腔油液施加的压力大小，可以根据实际系统中的工作压力，通过调节溢流阀来改变。使得被测量的油液的压力参数与系统中工作的油液一致。

4 试验

根据上述设计思想制造加工了油液体积模量在线测量装置，实物如图 9 所示。并且利用它对实际系统中的油液进行了测量。



图 9 油液体积模量在线测量装置实物图

由于油液体积模量受大气压下的气泡体积分

数以及气体溶解量的影响在低压区域比较明显，试验时主要对测试腔压力设定在 3 MPa 以下的情况进行了观察。

下表给出的是几组在油箱封闭式系统中的油液体积模量的实测数据。

表 体积模量实测数据

组号	状态描述	体积模量	压力	温度
		K/MPa	p/MPa	$\theta/^\circ\text{C}$
1	系统混气前	1 075	25.55	35.5
		1 072	25.56	35.7
		1 073	25.62	35.5
2	系统混气后	928	25.63	35.7
		929	25.59	35.9
		930	25.7	35.9
3	系统抽真空除气前	910	17.81	42.1
		906	17.84	42.0
		906	17.83	41.9
4	系统抽真空除气后	959	18.0	41.8
		960	18.0	41.6
		962	18.03	41.7

通过与仿真结果对比，其中第一组数据反映的气泡体积分数为 0.10%，而混气后的第二组数据反映的气泡体积分数为 0.15%。第三组数据油温升高，体积模量降低应该是由前面分析的油温对纯油液体积模量和气体溶解量的影响综合后所引起的。第四组数据与第三组数据的对比说明通过抽真空除气可以提高油液的体积模量。

图 10 给出的是在油箱封闭式系统中测量时记录的压力和位移变化曲线，油温 35 °C。

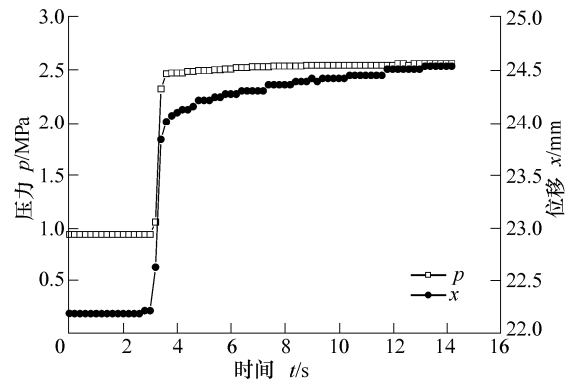


图 10 测量时的压力和位移变化曲线

从图 10 中可以看出，当测试腔压力基本不变化时油液体积仍在减小。通过计算得到该过程中的油液体积模量

$$K_e = [1\ 167.3, 1\ 151.9, 1\ 136.9, 1\ 108.1]$$

说明随着气体溶解量的增加体积模量有所减小，与仿真得到的结果一致。

图 11 表示的是在常温 25 °C 下的油箱敞开式系

统中测得的油液体积模量随压力变化的数据。

图 11 中压力在 3 MPa 以下的数据与图 5 中气泡体积分数为 0.10% 的油液正割体积模量这组仿真数据相吻合。压力在 5 MPa 以上的数据与图 5 中气泡体积分数为 0.05% 的油液正割体积模量这组仿真数据相吻合。由于试验条件限制,这两组试验数据并不是在同一环境下连续测量获得的。油液体积模量在线测量的目的是为了掌握系统中油液的体积模量值为控制系统提供依据以及检测抽真空除气的效果。在测量不同压力下的油液体积模量时并不能保证含气量不变,只能认为在一个较短的时间内油液中的气泡体积分数基本不变。上述两组试验数据分别与图 5 理论仿真得到的某一含气量下的油液体积模量随压力变化曲线相吻合,说明油液体积模量在线测量值能够准确反映不同含气量下的油液体积模量的真实值,同时也说明了油液体积模量理论模型的正确性。

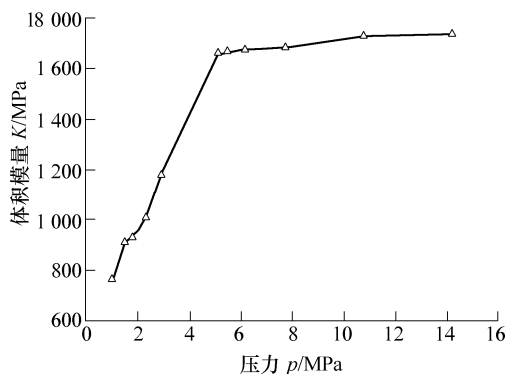


图 11 油液体积模量随压力变化曲线

在油液体积模量的三个影响因素中,油温和压力在油液体积模量测量过程中是可以控制的。而掺混气体也就是气泡的体积分数目前还没有办法准确掌握。并且随着系统的运行,气穴现象不断发生和气泡不断溶解,气泡体积分数还在不断变化。目前国内外在对油液体积模量与压力和温度的关系进行实验研究时,往往采取完全去除油液中的空气的办法,只研究纯油液的体积模量与压力和温度关系。例如文献[6]中测量时采取的措施是在真空下向测试容腔中充入已经除去空气的油液并且保持待测油液在系统最高压力下静置几分钟,使其中的气体溶解。

实际上,混气油液的体积模量的实测值更有工程价值。因为在一般液压系统中要完全避免油液中混入空气是难以做到的,所以为了使计算的液压固

有频率和实测值相近,一般取 $K=690$ MPa。如果有条件的话最好还是采用它的实测值^[4]。

5 结论

(1) 建立了油液体积模量的理论模型,通过仿真对含气量、压力和温度对油液体积模量的影响进行了分析。

(2) 通过油液体积模量在线测量结果与理论分析结果的对比证明,提出的油液体积模量的理论模型比较全面地反映了相关因素对油液体积模量的影响,精度较高。

(3) 油液体积模量在线测量为确定实际液压系统中油液的体积模量提供了依据。

参 考 文 献

- [1] GEORGE H F, BARBER A. What is bulk modulus and when is it important[J]. *Hydraulics & Pneumatics*, 2007(7): 34-39.
- [2] AKKAYA A V. Effect of bulk modulus on performance of a hydrostatic transmission control system[J]. *Sadhana*, 2006, 31: 543-556.
- [3] EDGE K A. Cylinder pressure transients in oil hydraulic pumps with sliding plate valves[C]//*Proc. Int. Mech. Eng.*, 1986, 200(B1): 45-54.
- [4] 李洪人. 液压控制系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981.
LI Hongren. *Hydraulic control system*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1981.
- [5] 路甬祥. 液压气动技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
LU Yongxiang. *The technical manual of hydraulics and pneumatics*[M]. Beijing: China Machine Press, 2002.
- [6] HAYWARD A T J. How to measure the isothermal compressibility of liquids accurately[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1971(7): 938-949.
- [7] 竹中利夫. 液压流体力学[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
OSAMA Inoda. *Hydraulic hydrokinetics*[M]. Beijing: Science Press, 1980.

作者简介: 王静, 女, 1978 年出生, 博士研究生。主要从事机电控制、流体传动及控制技术的研究。发表论文 5 篇, 获得专利 1 项。

E-mail: wangjing_chsh@163.com