

液压油弹性模量提高方法与试验*

冯 斌 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】 分析了液压系统中含气量、工作压力等参数对油液有效体积弹性模量的影响规律,在此基础上采用抽真空除气与弹性模量检测相结合的方法提高油液弹性模量至期望值,并试验于某大型液压泵站。应用结果表明:含气量对弹性模量值影响显著,利用抽真空能够有效减小油液的含气量,将弹性模量值由 821.3 MPa 提高至 1 201 MPa;该方法在闭式液压系统中能够实现油液弹性模量的提高。

关键词: 闭式液压系统 有效体积弹性模量 抽真空 试验

中图分类号: TH137 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)03-0219-04

Method and Experiment for Increasing Effective Fluid Bulk Modulus in Hydraulic Systems

Feng Bin Gong Guofang Yang Huayong

(State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract

Effective fluid bulk modulus is an important parameter in hydraulic systems. The major factors of effective fluid bulk modulus were analyzed, and a mathematical model with entrapped air content and working pressure at constant temperature was developed. A device for removing air content based on the method of vacuum-pumping in a closed reservoir was developed to increase bulk modulus. And bulk modulus was measured by the device when vacuum-pumping had been completed. Experiments were carried out in a large hydraulic system, and the results showed that vacuum-pumping is an effective method to reduce air content, and the device increased fluid bulk modulus from 821.3 MPa to 1 201 MPa. Bulk modulus can be improved by using this method in the closed hydraulic system.

Key words Closed hydraulic system, Effective fluid bulk modulus, Vacuum-pumping, Experiment

引言

油液有效体积弹性模量是影响液压系统性能的一个重要物理参数。弹性模量值直接影响了液压动力机构的固有频率和阻尼比,因此对液压系统的有效传动力、稳定性和动态响应具有重要影响^[1]。体积弹性模量是一个软参量,根据系统含气量、工作压力等参数的变化而相应变化。现有研究成果通过不同的试验方法揭示了弹性模量对系统含气、压力和温度等工况参数的敏感性,证实了弹性模量对系统

动静态特性分析的重要影响^[2~3]。但此类研究大多从实验室条件分析为主,目前还未能真正应用于实际工程项目的提高弹性模量的工程方法和应用装置。

本文针对理论分析得出的一定工作压力和温度下,弹性模量值对气泡含量的变化关系,提出一种通过抽真空除气与弹性模量检测相结合得到所需高弹性模量值的适合工程应用的装置。

1 理论分析

液压油的有效体积弹性模量表征了实际系统的

收稿日期: 2009-05-07 修回日期: 2009-09-02

* 国家“973”重点基础研究发展计划资助项目(2007CB714004)和浙江大学“985”工程资助项目

作者简介: 冯斌,博士生,主要从事电液控制技术研究,E-mail: abbottfeng@zju.edu.cn

压缩特性,定义表示为^[4]

$$K_e = V \frac{\Delta p}{-\Delta V}$$

(1)

其中

$$\Delta p = p - p_0$$

式中

K_e ——油液的有效体积弹性模量

V ——系统油液在压力 p 时的容积

Δp ——作用于油液的压力差

ΔV ——对应油液容积变化

p_0 ——初始压力 p ——工作压力

油液的有效体积弹性模量主要分为工作油液的体积弹性模量与管道附件的弹性模量两大部分。管道附件的弹性模量是壁面在压力下存在应变而产生的,与所采用的材料、厚度等有关,通常对油液弹性模量影响较小。工作油液包括纯液压油和空气含量,在压力环境中一部分空气含量溶解在液压油中,而另一部分空气含量以游离气泡形式悬浮在液压油中。由于溶解气体不影响工作油液的物理性能,因此工作油液的体积弹性模量包括纯液压油的体积弹性模量和游离气泡的弹性模量。油液的有效体积弹性模量在工程上表示为

$$\frac{1}{K_e} = \frac{V_l}{V} \frac{1}{K_l} + \frac{V_g}{V} \frac{1}{K_g} + \frac{1}{K_c}$$

(2)

式中 V_l ——纯油容积

K_l ——纯油体积弹性模量物理值

V_g ——油中所含气泡容积

K_g ——气泡的体积弹性模量

K_c ——管道等形成压力区固定容器弹性模量

由于压力、温度等因素对气体状态的影响远胜于油液,随着液压系统工况条件的变化,油液中气体状态平衡被破坏,于是气体将同时以溶解与压缩两种方式不断变化,直到产生新的平衡,致使该过程油液有效体积弹性模量的变化规律显得较为复杂。通常油液中气体体积的变化表示为^[5~6]

$$\frac{p_0 V_g^\gamma}{T_1} = \frac{(p_0 + \Delta p) (V_g + \Delta V_p + \Delta V_d)^\gamma}{T_2}$$

(3)

式中 ΔV_p ——气泡压缩的体积变化

ΔV_d ——气泡溶解的体积变化

T_1 ——油液初始温度

T_2 ——油液工作温度

γ ——气体的绝热指数,绝热压缩时为 1.4,等温压缩时为 1

本试验系统采取有效地油液温度控制措施,近似看作工作过程中油温保持恒定^[7]。同时,假定当液压系统压力变化时,游离气泡的变化过程为先溶解后压缩,如图 1 所示。在溶解过程遵从亨利(Henry)定律,压缩过程遵从气体状态方程^[8]。



图 1 气泡在压力 p 作用下的变化过程

Fig. 1 Air bubble variation at pressure p

由此可得

$$p_0 (V_g - \Delta V_d)^\gamma = p (V_g - \Delta V_g)^\gamma$$

(4)

于是在液压系统保持温度恒定时,压力由 p_0 变至 p 的过程中,混在油液中气泡的体积变化总量为

$$\Delta V_g = \left[1 - \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \right] V_g + 10 \alpha \delta_0 \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \Delta p V_l$$

(5)

其中

$$\alpha = \frac{V_g}{V}$$

式中 δ_0 ——标准大气压下空气的溶解度

α ——气泡的容积率(含气量)

同时假设液压系统所使用管路均为硬管,视容器与管路为刚性。将式(5)代入式(1)和(2),可得系统油液有效体积弹性模量与含气量、压力的关系

$$K_e = \frac{1}{A \alpha^2 + B \alpha + 1} K_l$$

(6)

其中

$$A = -10 \delta_0 K_l \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{1}{\gamma}}$$

$$B = 10 \delta_0 \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{1}{\gamma}} K_l + \frac{1}{p - p_0} \left[1 - \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \right] K_l - 1$$

由式(6)可知,当温度恒定,含气量 α 和压力 p 是有效体积弹性模量最直接的影响参数。针对上式作数值分析,取纯油体积弹性模量 $K_l = 1\,800\text{ MPa}$,含气量 α 分别取 0.1%、0.2%、0.5%、1%、5%,结果如图 2 所示。

含气量 α 对有效体积弹性模量的影响显著,如在压力 $p = 10\text{ MPa}$ 的情况下,当 α 由 5% 变化至 0.1% 时,弹性模量由 160 MPa 增加至 1 500 MPa,由此可见含气量 α 是弹性模量变化的敏感参数。因此在系统压力一定的条件下,通过减小油液中的含气量 α 可以有效地提高其有效体积弹性模量。

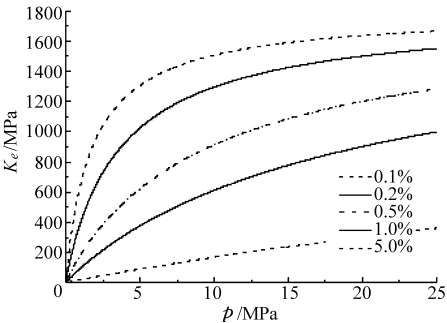


图 2 不同含气量下弹性模量与压力的关系

Fig. 2 Bulk modulus with pressure under different air bubble volume ratios

2 弹性模量提高装置设计

由式(6)分析可知,在液压系统工作过程中,减少油液的含气量是提高系统弹性模量的最有效方法。气泡自行析出的速度极慢,且受气泡形状体积、油液粘度等影响。根据亨利定律,如果将油液置于密闭油箱内,使压力下降至空气分离压附近,油液中原有的溶解空气由于过饱和而析出形成气泡。大量的气泡聚集后,可通过真空泵排出。随后将系统压力复位,随着压力的增大,使部分未能排出系统的气泡重新被溶解,因此很大程度减少了气泡的含量。油液中气泡的分布复杂,不容易直接测量,可以通过对有效体积弹性模量的检测作为除气泡的判据。图 3 为提高液压系统油液有效体积弹性模量的流程图。

基于此,采用除气方式可减少密闭油箱内油液的气泡含量,所需的装置包括液面下降辅助装置、抽真空除气装置。采用式(1)的定义法原理检测油液有效体积弹性模量的装置,包括压力调节、液压加载、密封测试腔等。图 4 为提高油液体积弹性模量的原理图。

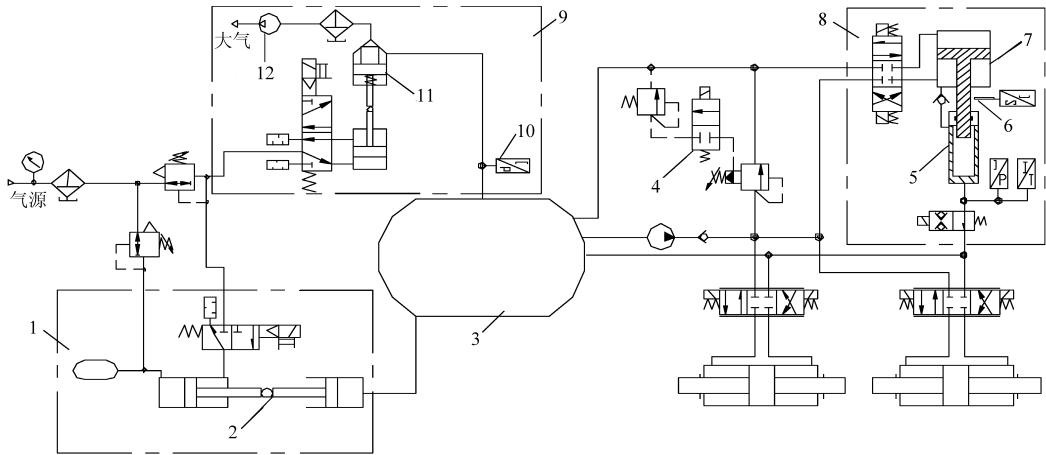


图 4 提高油液有效体积弹性模量的系统原理

Fig. 4 Schematic of increasing hydraulic fluid bulk modulus

1. 液面下降装置 2. 活塞式蓄压器 3. 密闭油箱 4. 调压阀组 5. 密封测试腔 6. 传感器组 7. 液压加载缸 8. 弹性模量检测装置 9. 抽真空除气装置 10. 真空传感器 11. 一体式球阀 12. 真空泵

抽真空过程完成后,控制活塞式蓄压器 2 使密闭油箱 3 的液位复原。为检测气泡的去除效果,对油液进行弹性模量检测。取出系统的一部分油液导入测试腔 5 内,并封闭测试腔。将调压阀组 4 调至低压力档,控制液压加载缸 7 的活塞杆对油液加载(预压缩),传感器组 6 记录此时测试腔内的压力、位移、温度。将调压阀组 4 调至高压力档,控制液压加载缸 7 的活塞杆对油液加载(压缩),传感器组 6 再次记录测试腔内的压力、位移、温度。同时根据式(1)计算出油液的有效体积弹性模量物理值。

图 4 中,液面下降装置 1、抽真空除气装置 9 和

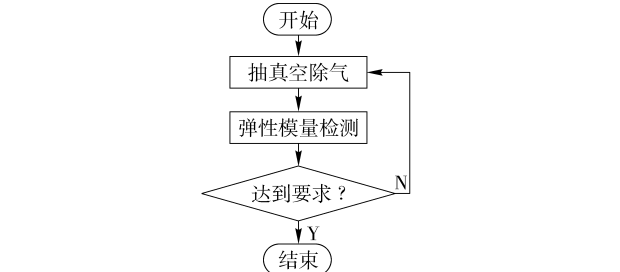


图 3 提高油液有效体积弹性模量的流程图

Fig. 3 Flow sheet of increasing hydraulic fluid bulk modulus

系统运行过程如下:抽真空除气之前,通过气动回路推动活塞式蓄压器 2 的活塞向左移动,使密闭油箱 3 中油液被抽至活塞式蓄压器 2 的活塞腔,液面下降一定高度。由于系统为封闭式,与油箱液面接触的空气压力此时形成负压,有助于气泡的分离。开启真空泵 12,打开一体式球阀 11,对油箱 3 进行抽真空除气。针对液压油析出气泡的速度较慢,一次抽气完成后系统静置 10 min,待更多气体析出后再重复抽气。真空传感器 10 记录了油箱内的绝对压力,该压力代表油箱内气体的容积变化。

弹性模量检测装置 8 在原理上均独立于液压执行系统,允许在接口处设置截止阀控制与液压执行系统导通或截断。由此可实现对移动式液压工程设备油液有效体积弹性模量的提高,无需设备本身附加任何装置。

3 试验分析

密闭油箱的容积为 1 060 L,油箱内施加 0.1 ~ 0.3 MPa 的背压力,以提高油液的气体溶解度。油箱顶部与抽真空除气装置连接,其通断由气动回路控制。抽真空时使油箱液面下降 180 mm,形成约

200 L的负压空间,使油气分离。通过真空泵排出油液析出的气体,真空泵排量 15 L/s。抽真空过程中的压力变化由管路中的真空度传感器和油箱上的高精度压力表读取。

抽真空完成后,将油液导入弹性模量自动测量装置进行检测。测试腔容积为 2 L,加载压力 3 MPa。一次测量时间约 30 s,测量过程中油温控制在 40℃。弹性模量检测的压力、体积变化均有高精度压力传感器和内置式位移传感器直接采集。PLC 控制器将采集的数据根据式(1)实时计算得出该次测量结果。

如图 5 所示,系统原弹性模量为 821.3 MPa,经过 3 次抽真空处理后,弹性模量为 1 201 MPa,提高约 46%,达到目标值。参照图 2 的仿真结果,系统原有含气量为 0.2%~0.5% 之间,经过 3 次抽真空后含气量减小至 0.1%,实现了通过减小系统含气量 α 提高系统油液有效体积弹性模量的目的。

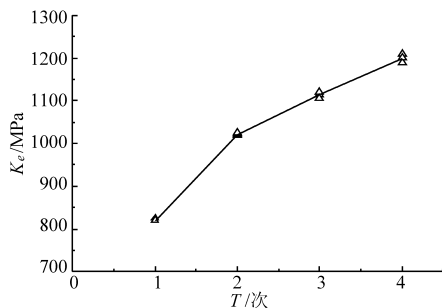


图 5 抽真空后的弹性模量变化

Fig. 5 Variation of bulk modulus

3 次抽真空过程中系统绝对压力的变化如图 6 所示。压力值降低代表向外抽气过程,压力值升高

代表静置过程。静置过程中绝对压力不断增大,是由于气泡从油液中析出破灭混入原有的真空环境中,随着空气体积的增加而产生压力。绝对压力越大说明油箱内气体含量越多,压力变化趋势则间接反映了气泡的析出速度。3 次抽真空过程中,压力变化曲线没有明显的规律,说明气泡在油液中的分布不均匀;第 1 次静置压力峰值由 5 864 Pa 减小至 3 286 Pa,而且后 2 次的差值显著减小,说明随着油液中的含气量在不断减少,气泡的析出效率也越来越低。这与实际中液面附近的油液容易分离气体,油液底层气泡析出所需克服的阻力较大相一致。

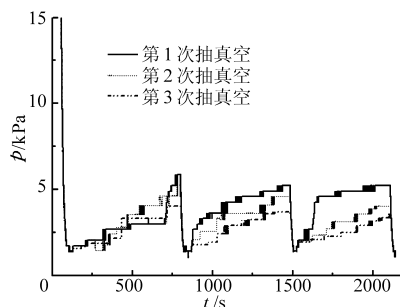


图 6 抽真空过程的压力变化

Fig. 6 Pressure variation in vacuum-pumping

4 结束语

设计了一种闭式液压系统,通过抽真空除气减小油液的含气量,结合弹性模量检测,实现液压系统弹性模量的监测与提高,从而有助于提高液压系统的执行效率以及动静态性能。通过试验发现该方法与装置具有较好的效果,能够将系统原弹性模量提高约 46%。

参 考 文 献

- 李松年,葛思华,史维祥. 油液体积弹性模量 β_e 的在线测量技术[J]. 机械工程学报, 1989, 25(3): 89~96.
Li Songnian, Ge Sihua, Shi Weixiang. The technique for the on-line measurement of the bulk modulus of hydraulic fluid β_e [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1989, 25(3): 89~96. (in Chinese)
- Yu Jinghong, Chen Zhaoneng, Lu Yuanzhang. The variation of oil effective bulk modulus with pressure in hydraulic systems [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1994, 116(1): 146~150.
- Manring N D. The effective fluid bulk-modulus within a hydrostatic transmission [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1997, 119 (3): 462~466.
- 盛敬超. 液压流体力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- Baek-Hyun Cho, Hyoun-Woo Lee, Jong-Sun Oh. Estimation technique of air content in automatic transmission fluid by measuring effective bulk modulus[J]. International Journal of Automotive Technology, 2002, 3(2): 57~61.
- Ruan Jian, Richard Burton. Bulk modulus of air content oil in a hydraulic cylinder[C] // 2006 Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2006, 14: 259~269.
- Wang Jing, Gong Guofang, Yang Huayong. Research on two key technologies of improving dynamic quality of hydraulic system with high flow[C] // 2008 Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Conference (DSCC2008).
- 路甬祥. 液压气动技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.