

性能与排放

DOI:10.12374/j.issn.1001-4357.2023.02.002

一种燃油有效体积弹性模量计算方法

李华乐, 王敏, 康彦红, 马梁

(中国北方发动机研究所, 天津 300400)

摘要: 为定量研究在不同压力下燃油的有效体积弹性模量, 基于燃油有效体积弹性模量的定义和试验测试数据, 通过 MATLAB 软件拟合求解燃油有效体积弹性模量随压力变化的二次函数和一次函数表达式。二者与试验测试数据对比, 结果表明两种计算方法均与测试数据基本吻合, 但二次函数表达式的准确性更高。以燃油有效体积弹性模量二次函数表达式为基础, 推导在不同压力下燃油密度的计算方法。

关键词: 燃油; 压力; 弹性模量; 计算方法

中图分类号: TH137 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-4357(2023)02-0006-04

A Calculation Method of Fuel Effective Bulk Elastic Modulus

LI Huale, WANG Min, KANG Yanhong, MA Liang

(China North Engine Research Institute, Tianjin 300400, China)

Abstract: In order to quantitatively study the effective bulk elastic modulus of fuel under different pressures, based on the definition and the test data of the fuel effective bulk elastic modulus, the quadratic function and the linear function expression of the effective bulk elastic modulus of the fuel with pressure change were solved by MATLAB software. Comparison between the two and experimental test data show that the two calculation methods are basically consistent with the test data, but the accuracy of the quadratic function expression is higher. Based on the quadratic function expression of the effective bulk elastic modulus, the calculation method of fuel density under different pressures was derived.

Key words: fuel; pressure; elastic modulus; calculation method

0 引言

液压油是液压系统的关键组成部分, 其物理属性对系统的动态特性和工作性能有重要影响。体积弹性模量作为油液本身的固有属性, 表示油液的压缩性, 表征液压油单位体积减小所需要的压强增值。

在过去的模拟计算^[1-3]中, 通常将油液体积弹性模量作为定值处理, 但当液压系统工况变化较大或者进行动态特性分析时, 为了准确表征液

油的可压缩性, 有必要引入有效体积弹性模型^[4]。鉴于油液的可压缩性对于动态特性的显著影响, 获取精确的有效体积弹性模量模型尤为重要^[5]。国内外研究人员对有效体积弹性模量进行了大量深入的研究。文献[6]归纳总结近年来关于有效体积弹性模量的多个理论模型。基于热力学分析, 该文献明确指出正切体积弹性模量的定义应用于数值计算更为准确。文献[7-9]考虑到工程应用实际情况, 提出与工程应用相适应的简化条件, 推导出对应的简化理论模型。

KIM等^[10]采用试验方法发现油液的有效体积弹性模量受多种因素影响，主要与工作压力、油液含气量及温度等相关。当液压系统稳定工作时，温度保持在特定范围内，可以忽略温度对有效体积弹性模量的影响。在高压共轨系统中压力高达200 MPa，此时油液的含气率较低，因此含气率对有效体积弹性模量的影响忽略不计。综上，对于高压共轨系统而言，工作压力是影响有效体积弹性模量的关键因素。

本文通过定义法以试验测试数据为基础，推导高压共轨系统中的燃油有效体积弹性模量，并且通过与试验结果进行对比分析证明该模型的有效性。基于该模型理论，进一步推导在高压下燃油密度与压力的函数关系。

1 理论模型的建立

燃油受压力作用体积减小，表现出燃油在实际工作过程中的压缩特性，即燃油的有效体积弹性模量，其定义为

$$E = -V \frac{dp}{dV} \quad (1)$$

式中： p 为燃油工作压力； V 为燃油总体积。

基于对高压共轨系统的分析，提出适用于本文理论模型的简化假设：(1) 假设燃油压缩和膨胀过程都是等温过程，忽略温度对有效体积弹性模量的影响。(2) 在高压共轨系统中压力高达200 MPa，含气量少，忽略含气率对有效体积弹性模量的影响。

2 试验系统

2.1 试验装置

燃油有效体积弹性模量的测试试验台采用的燃油参照标准 GB/T 8029—2010。试验油温维持在26℃。试验在有效体积弹性模量试验台上进行，图1为试验测试台架原理图。在试验中采用Kistler压力传感器测量系统中的燃油压力，传感器测得的信号经放大器处理后进行压力数据采集。试验测试系统外接一根长为1.5 m、内径为4 mm的超高压软管及两个压力腔。

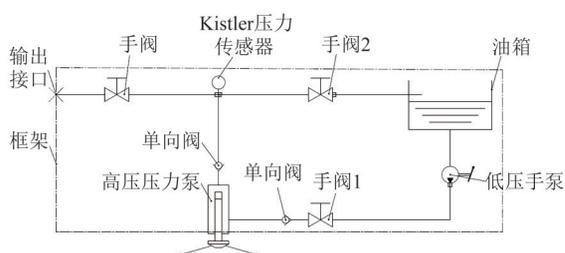


图1 试验测试台架原理图

试验采用瑞士SITEC公司的高压压力泵给系统逐渐加压。高压压力泵的结构原理图见图2，实物图见图3，其最高工作压力可达400 MPa。

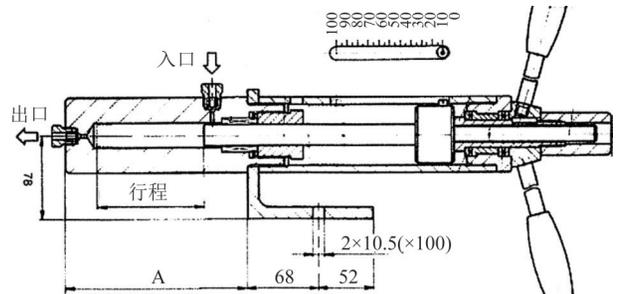


图2 高压压力泵的结构原理图



图3 高压压力泵实物图

2.2 试验测试理论基础及试验结果

测试燃油的有效体积弹性模量的理论基础是其定义式即式(1)。由该式可知，必须精确测得燃油总体积 V 及在压缩行程中单位容积变化对应的压力变化值 dp/dV 。

在试验过程中，转动高压压力泵的手柄，柱塞向前移动，记录转动手柄前后系统的压力差值 dp 。根据高压压力泵的原理图，可以计算出每次转动高压压力泵手柄所引起的系统内燃油体积的变化量 dV 。综上，可求解出燃油在不同压力下的有效体积弹性模量 E_{ex} 。

在试验开始前应先进行排气工作，确保系统内充满燃油。具体操作为：先关闭手阀2，打开手阀1，通过低压手泵加压，排除系统内的空气；然后关闭手阀1，保证在压缩行程中系统内燃油量保持不变。

在压缩行程中记录不同燃油体积变化量对应的系统压力值。根据燃油有效体积弹性模量的定义，得到不同压力下的燃油有效体积弹性模量 E_{ex} ，具体数值见表1。

表1 不同压力下的燃油有效体积弹性模量

序号	燃油压力/ MPa	燃油有效体积 弹性模量/MPa	序号	燃油压力/ MPa	燃油有效体积 弹性模量/MPa
1	11.0	838.015	34	91.3	1 183.376
2	12.9	836.115	35	94.2	1 180.476
3	14.8	834.215	36	97.1	1 258.788
4	16.7	876.121	37	100.2	1 255.688
5	18.7	917.827	38	103.3	1 292.994
6	20.8	872.121	39	106.5	1 249.488
7	22.8	957.133	40	109.6	1 326.800
8	25.0	954.933	41	112.9	1 283.394
9	27.2	952.733	42	116.1	1 320.200
10	29.4	993.740	43	119.4	1 396.712
11	31.7	948.333	44	122.9	1 393.212
12	33.9	946.133	45	126.4	1 429.418
13	36.1	1 029.746	46	130.0	1 386.212
14	38.5	984.540	47	133.5	1 382.712
15	40.8	1 024.946	48	137.0	1 379.212
16	43.2	1 022.546	49	140.5	1 415.018
17	45.6	1 020.146	50	144.1	1 333.006
18	48.0	1 060.152	51	147.5	1 407.818
19	50.5	1 057.652	52	151.1	1 365.212
20	53.0	1 012.946	53	154.6	1 400.618
21	55.4	1 052.652	54	158.2	1 397.018
22	57.9	1 134.164	55	161.8	1 393.418
23	60.6	1 131.464	56	165.4	1 428.425
24	63.3	1 086.958	57	169.1	1 501.737
25	65.9	1 167.770	58	173.0	1 421.025
26	68.7	1 123.364	59	176.7	1 455.631
27	71.4	1 162.170	60	180.5	1 490.037
28	74.2	1 117.964	61	184.4	1 448.031
29	76.9	1 156.570	62	188.2	1 482.237
30	79.7	1 153.770	63	192.1	1 516.243
31	82.5	1 192.076	64	196.1	1 474.437
32	85.4	1 148.170	65	200.0	1 545.949
33	88.2	1 268.088			

3 有效体积弹性模量计算方法及验证

3.1 有效体积弹性模量计算方法

(1) 假设燃油有效体积弹性模量近似是燃油压力值的二次函数，即

$$E = k_0 + k_1 p + k_2 p^2 \quad (2)$$

式中： k_0 、 k_1 、 k_2 为二次函数的系数。

以试验获得的不同压力下的燃油有效体积弹性模量 E_{ex} 为基础，令 $E = E_{ex}$ （单位为 MPa），应用 MATLAB 软件中的 polyfit 函数，拟合求得式 (2) 中的系数：

$$k_2 = -1.47 \times 10^{-3} \text{ (MPa)}^{-1}$$

$$k_1 = 6.64$$

$$k_0 = 747.855 \text{ MPa}$$

故有：

$$E = 747.855 + 6.64p + (-1.47 \times 10^{-2})p^2 \quad (3)$$

(2) 假设燃油有效体积弹性模量近似是燃油压力值的一次函数，即

$$E = I_0 + I_1 p \quad (4)$$

式中： I_0 、 I_1 为一次函数的系数。

令 $E = E_{ex}$ ，应用 MATLAB 软件中的 polyfit 函数，拟合求得式 (4) 中的系数：

$$I_1 = 3.80$$

$$I_0 = 833.425 \text{ MPa}$$

故有：

$$E = 833.425 + 3.80p \quad (5)$$

3.2 计算方法验证

为验证上述燃油有效体积弹性模量计算方法式 (3) 和式 (5) 的准确性，将试验测试数据（见表1）与理论计算数据进行对比，见图4。

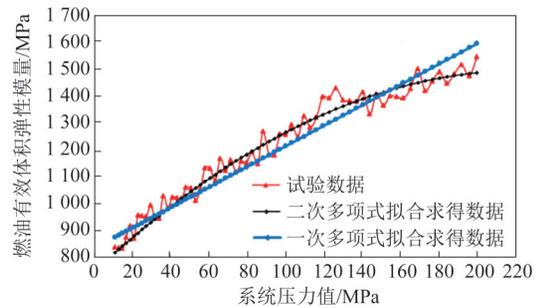


图4 理论计算数据与试验测试数据对比

由图4可知，当二次多项式拟合求得数据与试验测试数据误差最大时，系统压力为 22.8 MPa，试验得到的有效体积弹性模量为 957.133 MPa，二次多项式拟合求得数据为 891.649 MPa，两者的误差为 6.84%。当一次多项式拟合求得数据与试验测试数据误差最大时，系统压力为 126.4 MPa，此时试验测试得到 E_{ex} 为 1 429.418 MPa，一次多项式拟合求得数据为 1 314.256 MPa，两者的误差为 8.06%。对比发现，二次多项式和一次多项式的计算结果均与测试数据吻合良好，但二次多项式拟合的效果要优于一次多项式。

4 燃油密度计算方法

假设燃油有效体积弹性模量近似是燃油压力的二次函数，在此基础上推导燃油密度 ρ 与系统压力 p 的关系。

设方程 $k_0+k_1p+k_2p^2=0$ 的两个根是 p_1 和 p_2 ，通过计算可知：

$$p_1=544.013 \text{ MPa}$$

$$p_2=-93.274 \text{ MPa}$$

已知

$$k_0+k_1p+k_2p^2=k_1(p-p_1)(p-p_2) \quad (6)$$

联立式 (1)、式 (6)，再进行积分运算得到，

$$\frac{1}{\sqrt{\Delta}} \ln \left| \frac{p-p_2}{p-p_1} \right| = -\ln V + c' \quad (7)$$

当 p 在 $0 \sim 500 \text{ MPa}$ 时，

$$\frac{1}{\sqrt{\Delta}} \ln \left| \frac{p-p_2}{p-p_1} \right| = -\ln \frac{C}{V} \quad (8)$$

设 p_0 为标准大气压， V_0 为系统的原始总容积。

当 $p=p_0$ 时，存在 $V=V_0$ 。令 $a=\left(\frac{V}{V_0}\right)^{\sqrt{\Delta}}$ 和 $b=b(V) = \frac{1+a}{1-a}\sqrt{\Delta}$ ，求解可知：

$$V=V(p) = V_0 \left[\frac{b(p) - \sqrt{\Delta}}{b(p) + \sqrt{\Delta}} \right] \frac{1}{\sqrt{\Delta}} \quad (9)$$

考虑在试验过程中燃油无泄漏损失，根据质量守恒定律可知在高压共轨系统中燃油密度与试验压力的关系为

$$\rho=\rho(p) = \frac{m}{V} = \rho_0 \left[\frac{b(p) + \sqrt{\Delta}}{b(p) - \sqrt{\Delta}} \right] \frac{1}{\sqrt{\Delta}} \quad (10)$$

式中： ρ_0 为在压力为 p_0 时的燃油密度。

考虑到 $p_0=0.1 \text{ MPa}$ ， $p \gg p_0$ ，将测得的试验数据代入上式，简化得到

$$\rho \approx 0.81 \left(\frac{14963.74 + 16.03p}{14963.74 - 2.75p} \right)^{0.106} \quad (11)$$

式中： ρ 的单位是 g/cm^3 。

5 结论

(1) 当试验油温为 $26 \text{ }^\circ\text{C}$ 时，以高压压力泵不同压缩行程所对应的压力测试数据为基础，计算在不同压力下试验所用燃油的有效体积弹性模量 E_{ex} 。

(2) 通过 MATLAB 软件对燃油有效体积弹性模量试验测试数据分别进行二次多项式拟合和一次多项式拟合，整理两种计算方法。将二者的计算结果与试验结果进行对比分析，结果表明二次多项式拟合效果优于一次多项式。因此，在不同压力下燃油有效体积弹性模量的计算方法选用二次函数表达式。

(3) 以燃油有效体积弹性模量的二次函数表达式为基础，推导在不同压力下燃油密度 ρ 的计算方法，可以用于燃油密度的计算与分析。

参考文献

- [1] 杨华勇, 宋月超, 徐兵. 复杂工况下柱塞泵流量脉动并行仿真与试验研究 [J]. 中国科学: 技术科学, 2012, 42 (12): 1463-1471.
- [2] 胡仁喜, 苑士华, 刘红宁, 等. 高压高速条件下柱塞副泄漏流场分析 [J]. 农业机械学报, 2009, 40 (4): 221-226.
- [3] 李静, 徐兵, 马吉恩. 可压缩流体介质轴向柱塞泵流量脉动仿真研究 [J]. 机床与液压, 2008, 36 (5): 154-155, 212.
- [4] 路甬祥. 液压气动技术手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [5] 李松年, 葛思华, 史维祥. 油液体积弹性模量 β_0 的在线测量技术 [J]. 机械工程学报, 1989, 25 (3): 88-93.
- [6] GHOLIZADEH H, BURTON R, SCHOENAU G. Fluid bulk modulus: a literature survey [J]. International Journal of Fluid Power, 2011, 12 (3): 5-15.
- [7] 王静, 龚国芳, 杨华勇. 油液体积模量的研究与在线测量 [J]. 机械工程学报, 2009, 45 (7): 120-125.
- [8] 冯斌, 龚国芳, 杨华勇. 液压油弹性模量提高方法与试验 [J]. 农业机械学报, 2010, 41 (3): 219-222.
- [9] 杨树军, 焦晓娟, 鲍永, 等. 油液含气量对液压机械换段性能的影响 [J]. 机械工程学报, 2015, 51 (14): 122-130.
- [10] KIM S, MURRENHOFF H. Measurement of effective bulk modulus for hydraulic oil at low pressure [J]. Journal of Fluids Engineering, 2012, 134 (2): 021201.