

高压油管的压力控制

摘要

燃油进入和喷出油管是许多高压发动机的基础，本文通过模型分析了燃油在高压油枪和燃油泵之间的变化规律，建立了燃油流体密度和压强的模型。并通过该模型解决了一系列问题。

关键词 高压油管 微分方差 多重搜索

1 问题重述

燃油进入和喷出高压油管是许多燃油发动机工作的基础，燃油经过高压油泵从一端进入高压油管，再由另一个喷口喷出。燃油进入和喷出的间歇性工作过程会导致高压油管内压力的变化，使得所喷出的燃油量出现偏差，从而影响发动机的工作效率。为此，我们需要解决如下三个问题：

问题一：如果要将高压油管内的压力尽可能稳定在 100MPa 左右，如何设置单向阀每次开启的时长？如果要将高压油管内的压力从 100MPa 增加到 150MPa，且分别经过约 2s、5s 和 10s 的调整过程后稳定在 150MPa，单向阀开启的时长应如何调整？

问题二：在实际工作过程中，高压油管的燃油来自高压油泵的柱塞腔出口，喷油由喷油嘴的针阀控制。高压油泵柱塞的压油过程中，凸轮驱动柱塞上下运动，柱塞向上运动时压缩柱塞腔内的燃油，当柱塞腔内的压力大于高压油管内的压力时，柱塞腔与高压油管连接的单向阀开启，燃油进入高压油管内。在问题 1 中给出的喷油器工作次数、高压油管尺寸和初始压力下，确定凸轮的角速度，使得高压油管内的压力尽量稳定在 100MPa 左右。

问题三：在问题 2 的基础上，再增加一个喷油嘴，每个喷嘴喷油规律相同，喷油和供油策略应如何调整？同时为了更有效地控制高压油管的压力，现计划安装一个单向减压阀。单向减压阀出口为直径为 1.4mm 的圆，打开后高压油管内的燃油可以在压力下回流到外部低压油路中，从而使得高压油管内燃油的压力减小。请给出高压油泵和减压阀的控制方案。

2 问题一的建模与求解

2.1 建立模型

问题一要求通过设置单向阀每次开启的时长，将高压油管内的压强尽可能稳定在 100MPa 左右。由题目备注可知，燃油的压强变化量与密度变化量成正比。则可通过高压油管内进出油的规律，推得燃油的密度，再利用正比关系进一步推出燃油的压强。由此我们可得进出油规律和压强之间的关系式，也就可以知道如何控制进油量来达到规定的压强。

2.1.1 压强与密度的关系

已知燃油的压强变化量与密度变化量成正比，比例系数为 $\frac{E}{\rho}$ ，其中 ρ 为燃油的密度， E 为弹性模量，由此我们可得

$$\frac{dP}{d\rho} = \frac{E}{\rho} \quad (1)$$

通过函数拟合可得压强 P 和密度 ρ 的函数关系，为了后续建模需要，不妨先设为

$$P = f(\rho) \quad \rho = g(P) \quad (2)$$

2.1.2 油管内燃油的质量

设 $I(t)$ 为燃油从高压油泵进入的速率， $O(t)$ 为燃油从喷油器喷出的速率。高压油泵中燃油密度为 ρ_1 ，燃油压强为 P_1 ；高压油管中燃油密度为 ρ_2 ，燃油压强为 P_2 。由进出高压油管的流量可知

$$I(t) = CA\sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho_1}} \quad (3)$$

由喷油速率示意图可知

$$O(t) = \begin{cases} 100(t - 100K), & t \in (100K, 100K + 0.2) \\ 20, & t \in (100K + 0.2, 100K + 2.2) \\ 20 - 100(t - 100K - 2.2), & t \in (100K + 2.2, 100K + 2.4) \\ 0, & t \in (100K + 2.4, 100K + 100) \end{cases} \quad (4)$$

由式 (3) 和 (23) 可得在很小的时间段 Δt 内，质量的变化量为

$$\Delta m = [\rho_1 I(t) - \rho_2 I(t)] \Delta t \quad (5)$$

2.1.3 油管内的压强和密度

由式 (5) 可知，在很小一段时间 Δt 内，高压油管内燃油密度的变化量为

$$\Delta \rho_2 = \frac{[\rho_1 I(t) - \rho_2 I(t)] \Delta t}{V} \quad (6)$$

对式 (6) 做适当的变形可得高压油管内燃油密度 ρ_2 关于时间的微分方程

$$\frac{\partial \rho_2}{\partial t} = \frac{[\rho_1 I(t) - \rho_2 I(t)]}{V} \quad (7)$$

2.2 问题求解

2.2.1 燃油密度与压强的关系

使用附件三弹性模量与压力的关系作函数拟合，可得压强 P 和弹性模量 E 的关系为

$$P = 0.02983E^2 + 3.077E + 1572 \quad (8)$$

根据已知条件，并将式（8）代入，可得燃油压强与密度的关系式为

$$P = \frac{\rho - 0.81}{1.86 - 1.7\rho} \quad (9)$$

2.2.2 稳定在 100MPa 的单向阀开启策略

考虑到高压油管内燃油进出的动态情况，采用搜索算法寻找最优解。经过不断尝试，最终我们得到单向阀每次开启 0.2868ms 时，高压油管内压力尽可能稳定在 100MPa 左右。此时在一个周期内压强的变化如图所示。

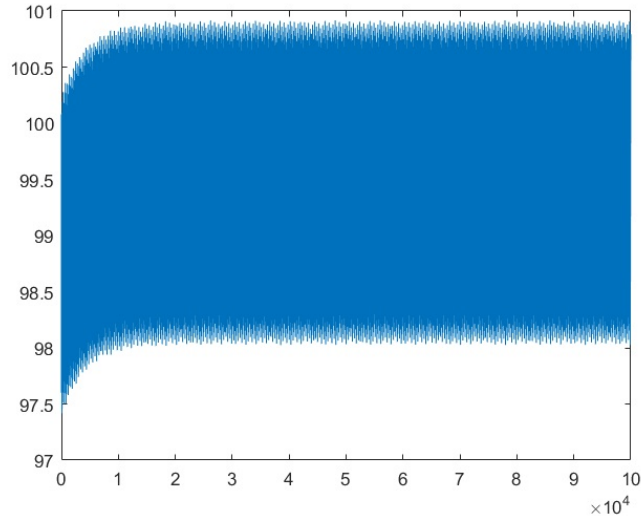


图 1: 一个周期内的压强变化

2.2.3 稳定在 150MPa 的单向阀开启策略

将高压油管内的压强分别经 2s、5s 和 10s 的调整过程后从 100MPa 增加到 150MPa。单向阀开启时长 t_0 同时影响着到达平衡时的压强数值以及

到达平衡的时间。因此我们需要对 t_0 进行动态调整来达到不同的需求。

为简化问题，我们采用线性方法对 t 进行调整，不断尝试并微调，可得以下结果。

经 2s 后稳定 单向阀开启策略如下

$$t_0 = \begin{cases} -0.048t + 0.86, & t < 1.8 \\ 0.768, & t \geq 1.8 \end{cases} \quad (10)$$

经 5s 后稳定 单向阀开启策略如下

$$t_0 = \begin{cases} 0.102t + 0.4, & t < 3.6 \\ 0.768, & t \geq 3.6 \end{cases} \quad (11)$$

经 10s 后稳定 单向阀开启策略如下

$$t_0 = \begin{cases} 0.046t + 0.4, & t < 9 \\ 0.768, & t \geq 9 \end{cases} \quad (12)$$

3 问题二的建模与求解

3.1 建立模型

问题二考虑实际工作过程，高压油管内的燃油来自高压油泵的柱塞腔出口，喷油由喷油嘴的针阀控制。高压油管内的进油方式由凸轮驱动柱塞上下运动，当柱塞腔内的压力大于高压油管内的压力时，柱塞腔与高压油管连接的单向阀开启，燃油进入高压油管。由凸轮的边缘曲线与角度关系可以得到柱塞运动情况，从而得到腔内压力变化的情况。就喷油部分而言，当针阀升程大于 0 时，针阀开启，燃油向喷孔流动，通过喷孔流出。根据所给的喷孔结构以及针阀升程与时间的关系，我们可以推断出喷出的速率，从而最终确定凸轮的角速度，使得高压油管内的压力尽量保持在 100MPa 左右。

3.1.1 燃油进入

凸轮的轮廓曲线决定其位移曲线的形状，因此对凸轮轮廓曲线的拟合将会直接服务于其运动规律的反解，根据附件 1 中的边缘曲线极角极径的关系可推测高压油泵中柱塞的位置。

凸轮中的上止点和下止点对应柱塞的升程分别为最大和最小，在极坐标上对应着极角变化，极坐标不变。我们以凸轮中心为中心建立直角坐标系，并设初始状态下转角为 $\phi_0 = 0$ ，为了得到凸轮转至各转角 ϕ_k 时柱塞的升程值，需要模拟凸轮和柱塞间的相对运动。对于转角 ϕ_0 时凸轮的轮廓线上点的坐标 $(x_{m,0}, y_{m,0})$ ，转角为 ϕ_k 时的坐标 $(x_{m,k}, y_{m,k})$ 可由下式计算：

$$\begin{cases} x_{m,k} = x_{m,0}\cos\phi_k - y_{m,0}\sin\phi_k \\ y_{m,k} = x_{m,0}\sin\phi_k + y_{m,0}\cos\phi_k \end{cases} \quad (13)$$

如此可得特定凸轮转角时的横纵坐标，若凸轮机构的基圆半径为 R_0 ，则在凸轮转角为 ϕ_k 时柱塞的升程值 s_k 为

$$s_k = \max(y_k) - R_0 \quad (14)$$

已知柱塞腔内直径 5mm，可求柱塞腔的底面积 S 。由于凸轮运动初始时刻凸轮底端接触柱塞底面，则凸轮转角为 ϕ_k 时燃油内体积为

$$V = (h_2 - s_k)S \quad (15)$$

当凸轮运动至下止点时，柱塞腔内燃油体积 $V_0 = Sh_2$ ，则腔内燃油的质量为 $m = p_0 v_0$ ，凸轮转角为 ϕ_k 时，体积随之变化为 V_1 ，最终得到 p_1 的计算公式为

$$\rho_1 = \frac{\rho_0 h_2}{h_2 - s_k} \quad (16)$$

设凸轮转动角速度为 w ，则在一段极小的时间段 Δt 转过的角度为

$$\phi_k + 1 - \phi_k = w\Delta t \quad (17)$$

由题目可得，当腔内压力大于高于高压油管内的压力时，高压油泵开始向高压油管内进油，则进油量 $I(t)$ 为

$$I(t) = CA\sqrt{\frac{2[P_1(t) - P_2(t)]}{\rho}} \quad (18)$$

3.1.2 燃油喷出

分析喷油器喷嘴放大后示意图，分析燃油喷出的面积可能有两个，分别是针阀与密封座之间的空隙面积，记为 S_1 ，以及密封底座底部的面积，记为 S_2 ，附件 2 给出了一个喷油周期内针阀升程和时间的关系，针阀升程先持续

升高，然后在 $[0.45, 2]$ 区间内稳定在 2mm，之后持续降低，在 $[2.46, 100]$ 时间段恒为 0。

设针阀在某时刻的升程为 $h(t)$ ，由于密封座截面半径与升程有函数关系，因此，密封座截面半径为 $R_t(t)$ 随时间变化，喷孔半径为 R_2 已知且保持不变，若将密封座还原为圆锥，则喷孔距离虚拟圆锥顶点的距离为 L_0 ，圆锥半角为 9° 。密封座截面半径为

$$R_t(t) = [h(t) + L_0] \tan 9^\circ \quad (19)$$

喷孔半径为 R_2 ，然后燃油从该处喷出时选取喷出面积最小的，为 $S(t)$

$$S(t) = \min \pi R_1^2, \pi R_2^2 \quad (20)$$

假设喷油嘴外部的压强为 P_ϵ 为标准大气压，高压油管内压力为 $P_2(t)$ ，得到燃油喷出的流量 $O(t)$ 为

$$O(t) = CS(t) \sqrt{\frac{2[P_2(t) - P_\epsilon]}{\rho_2}} \quad (21)$$

3.1.3 动态过程的分析与控制

高压油管不断有燃油的进入和喷出，在 Δt 时间内的质量变化可由进入和喷出的燃油密度分别与其体积的乘积计算求得，从高压油泵进入的燃油质量为 $m_1 = \rho_1 I(t) \Delta t$ ，从针阀喷孔处喷出的燃油质量为 $m_2 = \rho_2 O(t) \Delta t$ 。即 Δt 时间段管内燃油的变化量

$$m(t + \Delta t) - m(t) = \rho_1 I(t) \Delta t - \rho_2 O(t) \Delta t \quad (22)$$

得到压力函数 $P(t)$ 的求解模型

$$\begin{cases} P(t) = f[\rho(t)] \\ I(t) = CA \sqrt{\frac{2[P_2(t) - P_\epsilon]}{\rho_2}} \end{cases} \quad (23)$$

由求解得到的压力函数 $P(t)$ ，将 $P(t)$ 离散化表示为 $P(t_k)$ ，由压强差指标 Z 建立单目标规划模型，表示如下

$$\min Z \quad (24)$$

求解该单目标规划从而确定凸轮的角速度。

3.1.4 问题求解

通过有限差分法，代入已知高压油管参数初始值，由高压油管压力模型求得管内压力。以 0.01 为步长搜索凸轮运动的角速度，迭代求解各值，使管内压力波动尽可能小，最终求得凸轮的角速度为 0.0273rad/ms 时，高压油管的压力稳定在 100MPa 左右，然后有时会有一定程度的波动，压力随时间变化的关系图为

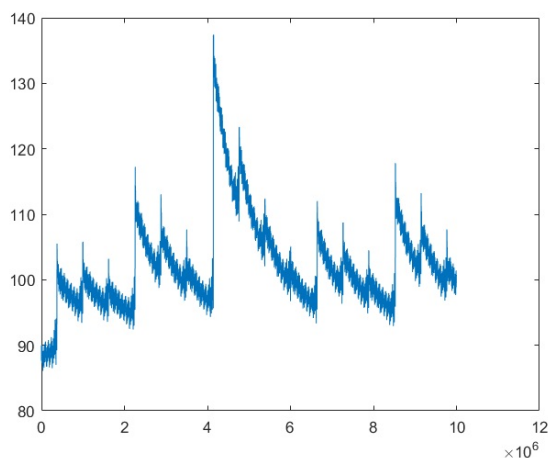


图 2: 角速度为 0.0273rad/s 时管内压强变化

4 问题三的建模与求解

4.1 模型建立

在问题一和问题二的基础上，我们加入第二个喷油嘴和单向减压阀。新的喷油策略需要考虑两个喷油嘴的喷油间隙。我们不妨设喷油嘴 1 在 $t = 0$ 的时刻开始喷射，喷油嘴 2 在 $t = \Delta t$ 时刻开始喷射，即喷射间隔为 Δt 。

4.2 问题求解

采用多重搜索的方法，可以得到最佳延迟时间 $\Delta t = 48.9\text{ms}$ 。

下面接着考虑单向减压阀，设阈值压强为 P_0 ，当 $P_2 > P_0$ 时单向减压

阀开启。此时燃油流量由流量计算公式可得

$$Q' = CA\sqrt{\frac{2(P_2 - P_0)}{\rho_1}} \quad (25)$$

当 $P_2 < P_0$ 时单向阀关闭，此时需要使高压油管内的压强尽量稳定，再次使用多重搜索寻找最优值。最终求得阈值压强为 102.24MPa，凸轮的角速度为 0.0545rad/ms，喷射间隔为 48.9ms。此时的压强变化如图。

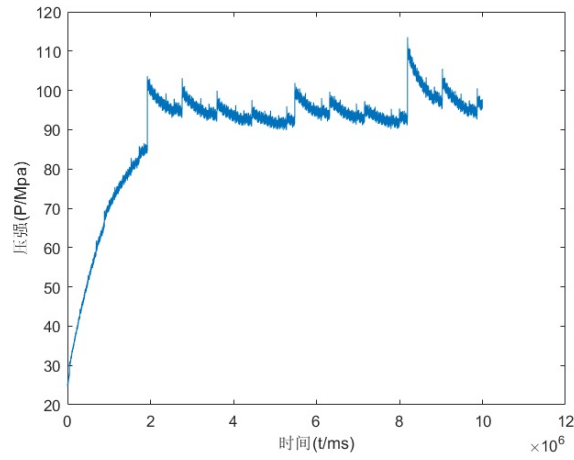


图 3: 单向阀方案下的压强变化

附录

问题一程序

```
c=0.85;
A=(1.4/2)^2*pi;
rou=@(x)0.80853816*(1+(0.6*10^-3*x)/(1+1.7*10^-3*x));
P=@(rou)-(90071992547409920000*rou-72826643121816530000)/
(153122387330596864*rou-167501279180178019);
qorigin=@(q)100*q.*(q<=0.2)+20.*(q>0.2&q<=2.2)-(100*q-240).*(
(q>2.2&q<=2.4))+0*(q>2.4);
```

```

V=(5^2)*500*pi;
k=[];
result=0;
delta_t=0.01;
t=0.2865;
p0=100;
m0=rou(100)*V;
m1=m0;
u=00;j=0;h=0;q=0;x=[];
for i=0:delta_t:100000
    q=q+1;
    x(q)=i;
    vin=0;
    if h>t+10
        h=h-(t+10);
    end
    if h<t
        vin=(c*A*(2*(160-p0)/0.8696)^(.5));
    end
    h=h+delta_t;
    m_in=0.8696*vin*delta_t;
    if u>100
        u=u-100;
    end
    v_out=qorigin(u)*delta_t;
    u=u+delta_t;
    m_out=v_out*rou(p0);
    delta_m=m_in-m_out;
    rou_now=(m0+delta_m)/V;
    p0=P(rou_now);
    j=j+1;
    k(j)=p0;
    m0=m0+delta_m;

```

```

end
plot(x,k)

```

问题二程序

```

rou=@(x)0.80853816*(1+(0.6*10^-3*x)/(1+1.7*10^-3*x));
P=@(rou)-(90071992547409920000*rou-72826643121816530000)
/(153122387330596864*rou-167501279180178019);
c=0.85;
A=(1.4/2)^2*pi;
A_you=(5/2)^2*pi;
H=5.8446;
Vmax=H*A_you;
M=Vmax*rou(0.5);
V=(5^2)*500*pi;
m0=rou(100)*V;
delta_t=0.01;
p_wai=0.1;
theta=xlsread('附件1','sheet1','A2:A629');
r=xlsread('附件1','sheet1','B2:B629');
L0=0.7/tan(9/180*pi)*2.5/1.4;
A_zhen=(2.5/2)^2*pi;
A_kong=0.7^2*pi;
k=[];x=[];y=[];
a1=xlsread('附件2','sheet1','B2:B46');
b1=2*ones(156,1);
c1=xlsread('附件2','sheet1','E2:E46');
h_zhen=[a1;b1;c1;zeros(9755,1)]';
for i=1:628
    x(i)=sin(theta(i))*r(i);
    y(i)=cos(theta(i))*r(i);
end

```

```

s = []; u=1;
for i=0:0.01:6.27
    xk = [];
    yk = [];
    for j=1:628
        xk(j)=x(j)*cos(i)-y(j)*sin(i);
        yk(j)=x(j)*sin(i)+y(j)*cos(i);
    end
    s(u)=max(yk)-2.4130;
    u=u+1;
end
s=interp1([0:0.01:6.27],s,[0:0.000001:6.27],'spline');
w=0.0273;
j=1;u=1;
p0=100;
rou0=0.85;
m_you=M;
fy=1;
for i=0:delta_t:100000
    fy=fy+int32(w*delta_t/0.000001);
    while fy>6270001
        fy=fy-6270001;
        m_you=M;
    end
    h_now=H-s(fy);
    V_now=A_you*h_now;
    rou_now=m_you/V_now;
    P_now=P(rou_now);
    vin=0;
    if P_now>p0
        vin=c*A*(2*(P_now-p0)/rou_now)^(.5);
    end
    m_in=rou_now*vin*delta_t;

```

```

m_you=m_you-m_in;
r1=(h_zhen(u)+L0)*tan(9/180*pi);h_z=h_zhen(u);
A_out=pi*r1^2-A_zhen;
if pi*r1^2-A_zhen-A_kong>0
    A_out=A_kong;
end
if h_zhen(u)==0
    A_out=0;
end
u=u+1;
if u>10001
    u=u-10001;
end
vout=c*A_out*(2*(p0-p_wai)/rou0)^(.5);
mout=vout*rou0*delta_t;
delta_m=m_in-mout;
rou0=(m0+delta_m)/V;
k(j)=p0-10;
p0=P(rou0);
j=j+1;
m0=m0+delta_m;
end
plot(k)

```

问题三程序

```

rho=@(x)0.80853816*(1+(0.6*10^-3*x)/(1+1.7*10^-3*x));
P=@(rou)-(90071992547409920000*rou-72826643121816530000)
/(153122387330596864*rou-167501279180178019);
c=0.85;
A=(1.4/2)^2*pi;
A_you=(5/2)^2*pi;

```

```

H=5.8446;
Vmax=H*A_you;
M=Vmax*rho(0.5);
V=(5^2)*500*pi;
m0=rho(100)*V;
delta_t=0.01;
p_wai=0.1;
theta=xlsread('附件1','sheet1','A2:A629');
r=xlsread('附件1','sheet1','B2:B629');
L0=0.7/tan(9/180*pi)*2.5/1.4;
A_zhen=(2.5/2)^2*pi;
A_kong=0.7^2*pi;
k=[];x=[];y=[];
al=xlsread('附件2','sheet1','B2:B46');
bl=2*ones(156,1);
cl=xlsread('附件2','sheet1','E2:E46');
h_zhen=[al;bl;cl;zeros(9755,1)'];
yanchi=5000;
for i=10001:-1:yanchi+1
    h_zhen1(i)=h_zhen(i-yanchi);
end
for i=1:1:yanchi
    h_zhen1(i)=0;
end

for i=1:628
    x(i)=sin(theta(i))*r(i);
    y(i)=cos(theta(i))*r(i);
end
s=[];u=1;

for i=0:0.01:6.27
    xk=[];

```

```

yk=[];
for j=1:628
    xk(j)=x(j)*cos(i)-y(j)*sin(i);
    yk(j)=x(j)*sin(i)+y(j)*cos(i);
end
s(u)=max(yk)-2.4130;
u=u+1;
end
s=interp1([0:0.01:6.27],s,[0:0.000001:6.27],'spline');
w=0.0545;
j=1;
u=1;
p0=100;
rho0=0.85;
m_you=M;
fy=1;
for i=0:delta_t:100000
    fy=fy+int32(w*delta_t/0.000001);
    while fy >6270001
        fy=fy-6270001;
        m_you=M;
    end
    h_now=H-s(fy);
    V_now=A_you*h_now;
    rho_now=m_you/V_now;
    P_now=P(rho_now);
    vin=0;
    if P_now>p0
        vin=c*A*(2*(P_now-p0)/rho_now)^(.5);
    end
    m_in=rho_now*vin*delta_t;
    m_you=m_you-m_in;
    rl=(h_zhen(u)+L0)*tan(9/180*pi);

```

```

r12=(h_zhen1(u)+L0)*tan(9/180*pi);
A_out=pi*r1^2-A_zhen;
if pi*r1^2-A_zhen-A_kong>0
    A_out=A_kong;
end
if h_zhen(u)==0
    A_out=0;
end
Al_out=pi*r12^2-A_zhen;
if pi*r12^2-A_zhen-A_kong>0
    Al_out=A_kong;
end
if h_zhen1(u)==0
    Al_out=0;
end
u=u+1;
if u>10001
    u=u-10001;
end
vout=c*(A_out+Al_out)*(2*(p0-p_wai)/rho0)^(.5);
mout=vout*rho0*delta_t ;
delta_m=m_in-mout;
rho0=(m0+delta_m)/V;
k(j)=p0/4;
p0=P(rho0);
j=j+1;
m0=m0+delta_m;
end
plot(k)
xlabel('时间 (t/ms)')
ylabel('压强 (P/Mpa)')

```