

# 高压油管的压力控制分析

19 刘心雨 陈启源 谢芳艳

## 一、问题分析

问题一有两个小问，目的均为求单向阀的最佳开启时长，不同之处在于第一问仅求保持稳定状态时的单向阀开启时长，第二小问增加了升压过程。由附件三我们可得到弹性模量与压力的数据，利用曲线拟合可得到二者的关系式。由燃油的压力变化量与密度变化量成正比我们可建立微分方程模型，并利用数值积分的方法得到不同步长下的压力与密度值。根据质量守恒定律，建立进出燃油的流量差与高压油管内燃油质量差的等式。为简化问题，通过建立差分方程可递推得到不同时间点的压力值，通过数值积分的结果可进一步得到密度值。问题要求高压油管内的压力稳定在 100MPa。故我们将各个时间点高压油管内的压力值与实际压力值的总偏差作为目标函数，以单向阀开启时长及喷油嘴开始喷油时间作为决策变量，建立最小偏差优化模型。并利用离散化搜索的方式求得决策变量的解。分析过程如图1。

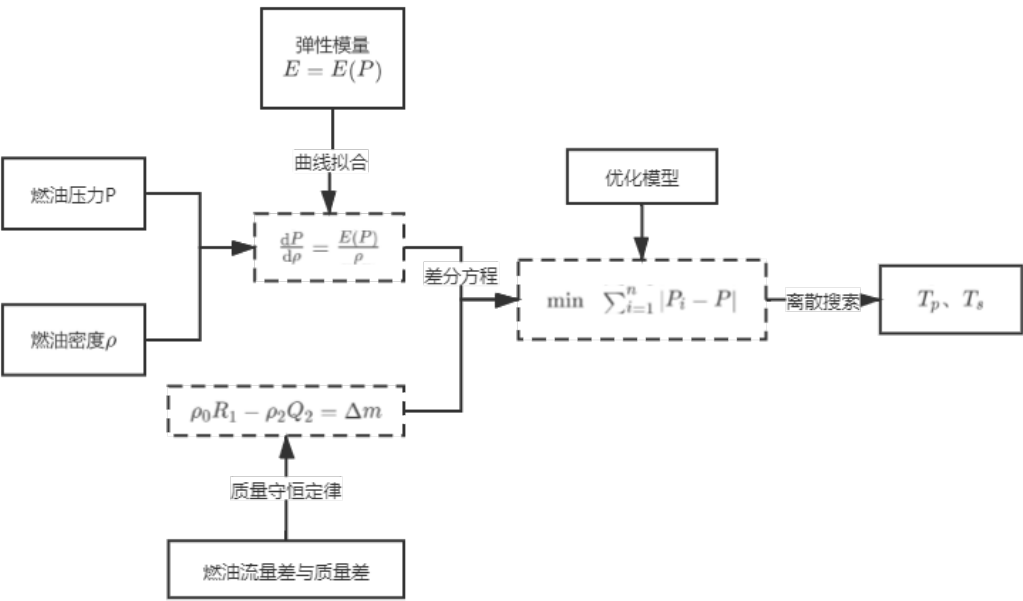


图 1 解题流程

第二小问增加了升压过程，故我们将该问拆分为两部分，一是升压过程中单向阀的开启时长，二是达到稳定状态时单向阀的开启时长，对于稳定状态的求解过程显然与第一小问相同。对于升压过程，我们同样可利用离散搜索的方式求得分别使得高压油管内的压力在 2s、5s、10s 后达到 150MPa 的最小单向阀开启时长。

## 二、符号定义与说明

符号	说明
$T_p$	单向阀的开启时长
$T_s$	喷油嘴开始喷油的时间
$T_0$	单向阀的工作周期
$T_1$	喷油嘴的工作周期
$T$	整个系统运行的周期
$E$	弹性模量
$P_A$	高压泵内的压力
$\rho_A$	高压泵内燃油的密度
$P_0$	高压油管内的初始压力
$\rho_0$	高压油管内燃油的初始密度
$R$	进入高压油管的燃油流量
$Q$	喷出高压油管的燃油流量
$A$	进油处小孔的面积
$C$	流量系数
$d$	高压油管的内直径
$h$	高压油管的内腔长度
$V_0$	高压油管的内腔体积
$P_u$	$t_u$ 时刻对应的高压油管内的燃油密度

部分符号会在文章第一次出现时予以解释

## 三、模型假设

- 1、高压油管内部光滑；
- 2、高压油管在高压下不会发生形变；
- 3、高压油管封闭，不存在燃油泄露的情况；

- 4、单向阀开关的开启与关闭时间均可忽略；
- 5、喷油嘴喷油的间隔时间固定。

## 四、模型建立与求解

### 4.1 模型准备

对高压油管进油与出油的动态过程进行研究。由物理背景，当高压油泵向油管内进油时，油管内压力变大，而当其向外喷油时，油管内压力开始减小，且压力同时影响油管内燃油的密度，由燃油流量公式可知，压力与密度会同时影响燃油的进出流量。由质量守恒定律，进出燃油的流量与高压油管内的燃油质量变化有关，进而反过来影响高压油管内的压力，故该问题为一个复杂的动态过程。该问题的核心在于建立高压油管内的压力、燃油的密度及进出流量的联系，对整个动态过程进行分析。动态过程示意图如图2。

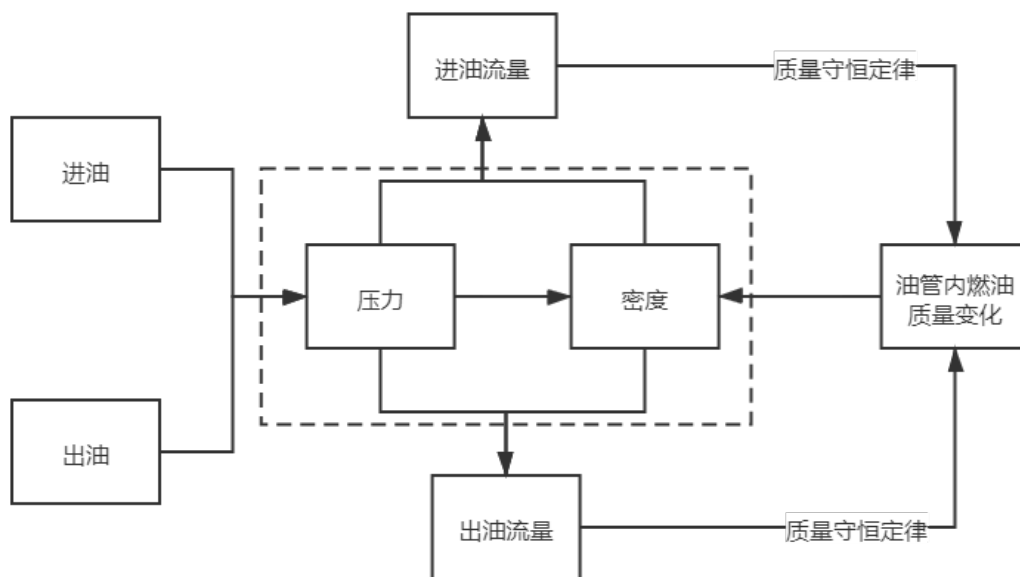


图2 动态过程示意

为对该动态过程进行分析，需要确定两个变量，一是单向阀的开启时长，二是喷油嘴开始喷油的时间。由题，单向阀每打开一次，需关闭 10ms, 设单向阀的开启时长为  $T_p$ ，故单向阀的工作周期为  $T_0 = T_p + 10$ 。而喷油嘴每秒工作 10 次，由假设，喷油嘴每次喷油的间隔时间相同，故喷油嘴的工作周期为  $T_1 = 10\text{ms}$ 。为对整个系统进行分析，我们选择对系统的一次完整工作周期进行分析，而系统的主要工作即为高压油泵进油以及喷油嘴喷油，则  $T = T_0 \times T_1$  可作为系统的工作周期。在  $[0, T]$  时间内对系统进行分析，并假设  $t = 0$  时刻时为单向阀开启的时刻。

## 4.2 稳态求解

### 4.2.1 模型建立

#### (1) 高压油管内燃油密度与压强的微分方程

由注 1，燃油的压力变化量与密度变化量成正比，比例系数为  $\frac{E}{\rho}$ ，其中  $E$  为弹性模量，和压力  $P$  有关，故即为  $E(P)$ 。设  $dP$  为压力的变化量， $d\rho$  为密度的变化量，则有  $dP = \frac{E(P)}{\rho} d\rho$ ，即

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

根据题意，当压力为 100MPa 时，密度为 0.850 mg/mm<sup>3</sup>，则由此定解条件，可得如下微分方程：

$$\begin{cases} \frac{d\rho}{dP} = \frac{\rho}{E(P)} \\ P_0 = 100 \\ \rho_0 = 0.85 \end{cases} \quad (2)$$

由附件 3 弹性模量与压力的数据，我们可利用 matlab 软件里的 cftool 工具箱对两组数据进行拟合。经尝试，多项式拟合效果最好，且次数为 2 时，拟合度便达到 0.9，次数增加时拟合度增加但同时计算量也增强，故我们选取二次多项式作为拟合函数：

$$E(P) = 0.02893P^2 + 3.077P + 1572 \quad (3)$$

拟合结果及拟合图像如图3所示。从表1可知，模型的拟合度高达 0.9991，且均方根误差较小，说明模型拟合效果非常好。

表 1 弹性模量与压力拟合指标

参数	参数估计值	参数置信区间
$\beta_0$	1572	(1567,1576)
$\beta_1$	3.077	(2.971,3.182)
$\beta_2$	0.2893	(0.02842,0.02944)
RMSE=15.53		R-square=0.9991

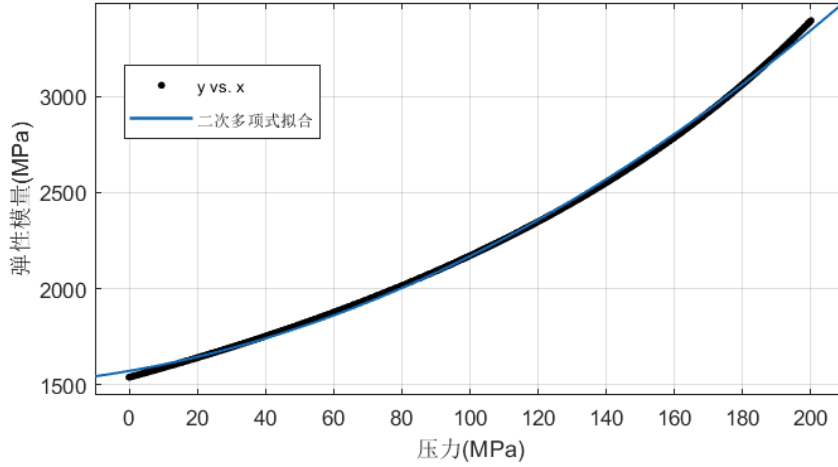


图3 弹性模量与压力拟合曲线

将(3)式代入方程组(2)中,求解微分方程组,可得到 $\rho$ 关于 $P$ 的关系式,由于微分方程组较复杂,我们采用数值积分的方式进行求解。考虑式 $\frac{d\rho}{\rho} = \frac{dP}{E(P)}$ ,左边从 $\rho_0$ 积分到 $\rho_i$ ,右边从 $P_0$ 积分到 $P_i$ ,其中 $\rho_i$ 为压力 $P_i$ 时对应的密度值。其中 $P_i = P_0 + i\Delta P, \lim \Delta P = 0$ ,则由梯形公式:

$$\ln \rho_i - \ln \rho_0 = \int_{P_0}^{P_i} \frac{dP}{E(P)} \approx \sum_{j=0}^{i-1} \frac{\Delta P}{2} \left( \frac{1}{E_j} + \frac{1}{E_{j+1}} \right) = \frac{\Delta P}{2} \sum_{j=0}^{i-1} \left( \frac{1}{E_j} + \frac{1}{E_{j+1}} \right) \quad (4)$$

取 $\Delta P = 0.5$ ,则由附件3数据及初始条件 $\rho(P = 100) = 0.85$ 可求得各压力从0到200MPa对应的燃油密度。

## (2) 进油流量与出油流量的分析

由于油管内的压强与密度均随时间而发生变化,故进油流量与出油流量均为时间 $t$ 的函数,设进油流量为 $R(t)$ ,则根据注2中的流量公式,可得

$$R(t) = \begin{cases} CA\sqrt{\frac{2[P_A - P(t)]}{\rho_A}} & , t \in [kT_0, kT_0 + T_p] \\ 0 & , t \in (kT_0 + T_p, (k+1)T_0) \end{cases}, k \in N \quad (5)$$

即单向阀开启时,进油流量为 $CA\sqrt{\frac{2[P_A - P(t)]}{\rho_A}}$ ,单向阀关闭时,进油流量为0。其中 $C = 0.85$ 为流量系数, $A$ 为小孔面积, $P_A$ 为高压侧的压力,恒为160MPa, $P(t)$ 为压力关于时间的函数, $\rho_A$ 为高压侧燃油的密度,当高压侧压力恒为160MPa时,由数值积分的结果,可得此时的密度 $\rho_A$ 为 $0.8679 \text{ mg/mm}^3$ 。

设出油流量为  $Q(t)$ , 则由出油速率图像,

$$Q(t) = \begin{cases} 100(t - kT_1 - T_s) & , t \in [T_s + kT_1, T_s + kT_1 + 0.2] \\ 20 & , t \in (T_s + kT_1 + 0.2, T_s + kT_1 + 2.2] \\ -100(t - T_s - kT_1) + 240 & , t \in (T_s + kT_1 + 2.2, T_s + kT_1 + 2.4] \\ 0 & , \text{otherwise} \end{cases}, k \in N \quad (6)$$

### (3) 高压油管的压力与密度的差分方程

将总周期  $T$  等分为  $n$  份, 每份长  $\Delta t = 0.01\text{ms}$ , 则  $n = \frac{T}{\Delta t}$ 。为简化模型, 将  $P(t)$  离散化表示为  $P(t_u)$ ,  $P(t_u)$  表示  $t_u$  时刻对应的压力值, 且满足  $t_u = u \Delta t, u = 0, 1, \dots, n$ 。

$\rho(t_{u+1})$  表示  $t_{u+1}$  时刻的密度值, 即  $\rho(t_{u+1}) = \rho(P(t_{u+1}))$ , 为简化符号, 以  $P_u$  表示  $P(t_u)$ ,  $\rho_u$  表示  $\rho(t_u)$ , 即  $\rho(P_u)$ 。

根据  $\frac{dP}{d\rho} = \frac{E(P)}{\rho}$ , 则由差分方程可得

$$\frac{P_{u+1} - P_u}{\rho_{u+1} - \rho_u} \approx \left. \frac{dP}{d\rho} \right|_{t_u} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} P_{u+1} &= P_u + \frac{E(P_u)}{\rho_u}(\rho_{u+1} - \rho_u) \\ &= P_u + \frac{E(P_u)}{\rho_u V_0}(m_{u+1} - m_u) \end{aligned} \quad (8)$$

其中  $V_0 = \pi(\frac{d}{2})^2 h$  为高压油管的体积, 故  $m_{u+1}$ 、 $m_u$  为  $t_{u+1}$  及  $t_u$  时刻高压油管内燃油的质量。

由质量守恒定律, 在  $t_u$  到  $t_{u+1}$  这段时间内, 高压油管内质量的变化等于进、出燃油的质量之差, 而进出燃油的流量为单位时间的燃油体积, 故

$$m_{u+1} - m_u = \rho_A R(t_u) \Delta t - \rho_j Q(t_u) \Delta t \quad (9)$$

由于  $\Delta t$  相当小, 则在  $t_u$  到  $t_{u+1}$  这段时间内认为进油速率与出油速率相同。 $R(t_u) \Delta t$  表示  $\Delta t$  时间内进入高压油管的燃油体积, 进入高压油管的燃油压强恒定, 故密度也恒定, 为  $\rho_A = \rho(P_A)$ , 从而  $\rho_A R(t_u) \Delta t$  为  $\Delta t$  时间内进入高压油管的燃油质量。同理,  $\rho_u Q(t_u) \Delta t$  为  $t_u$  到  $t_{u+1}$  时间内喷出高压油管的燃油质量。联立方程 (8) 与方程 (9), 有

$$P_{u+1} = P_u + \frac{E(P_u)}{\rho_u V_0}(\rho_0 R(t_u) - \rho_u Q(t_u)) \Delta t \quad (10)$$

经递推得,

$$P_u = P_0 + \sum_{j=0}^{u-1} \frac{E(P_j)}{\rho_j V_0}(\rho_0 R(t_j) - \rho_j Q(t_j)) \Delta t, u = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

#### (4) 建立偏差最小优化模型

要使高压油管内的压力稳定在 100MPa，则需一个周期内，高压油管内的实际压力与 100MPa 相差尽量小。故我们定义一个指标为

$$W = \sum_{i=1}^n |P_i - 100| \quad (12)$$

决策变量为  $T_p$  和  $T_s$ ，则该规划模型可表示为

$$\min W = \sum_{i=1}^n |P_i - 100| \quad (13)$$

$$st. \begin{cases} E(P) = 0.02842P^2 + 3.077P + 1572 \\ R(t) = \begin{cases} CA\sqrt{\frac{2[P_A - P(t)]}{\rho_A}} & , t \in [kT_0, kT_0 + T_p] \\ 0 & , t \in (kT_0 + T_p, (k+1)T_0) \end{cases}, k \in N \\ Q(t) = \begin{cases} 100(t - kT_1 - T_s) & , t \in [T_s + kT_1, T_s + kT_1 + 0.2] \\ 20 & , t \in (T_s + kT_1 + 0.2, T_s + kT_1 + 2.2] \\ -100(t - T_s - kT_1) + 240 & , t \in (T_s + kT_1 + 2.2, T_s + kT_1 + 2.4] \\ 0 & , \text{otherwise} \end{cases}, k \in N \\ n = \frac{T}{\Delta t} \\ P_u = P_0 + \sum_{j=0}^{u-1} \frac{E(P_j)}{\rho_j V_0} (\rho_0 R(t_j) - \rho_j Q(t_j)) \Delta t, u = 1, 2, \dots, n \\ P_0 = 100 \end{cases} \quad (14)$$

#### 4.2.2 模型求解

由 4.1.2 得，偏差最小优化模型的决策变量为  $T_p$  及  $T_s$ ，其中  $T_p \in [0, 100]$ ,  $T_s \in [0, 97.6]$ ，对于此大规模优化问题无法直接求解，故我们对  $T_p$  及  $T_s$  进行离散化搜索，求得单向阀开启时长及喷油嘴开始喷油时间的最优解。为提高搜索效率，我们设计了变步长的搜索算法，对于  $T_p$  与  $T_s$ ，我们首先以 1ms 为步长进行离散化搜索，确定二者大致范围后，再缩小步长为 0.01ms，进一步搜索，得到较精确的解。最终缩短步长为 0.0001ms，进行最终精确搜索。

经第一步的大范围搜索，最终认为  $T_p$  集中在 1 附近，于是缩短步长为 0.01ms，得到  $T_p$  的最优值为 0.28， $T_s$  的最优值为 49，我们固定  $T_p = 0.28$ ，首先在  $T_s$  附近以 1ms 为步长进行取值，做出  $T_s$  与目标函数值的图像如图4所示。

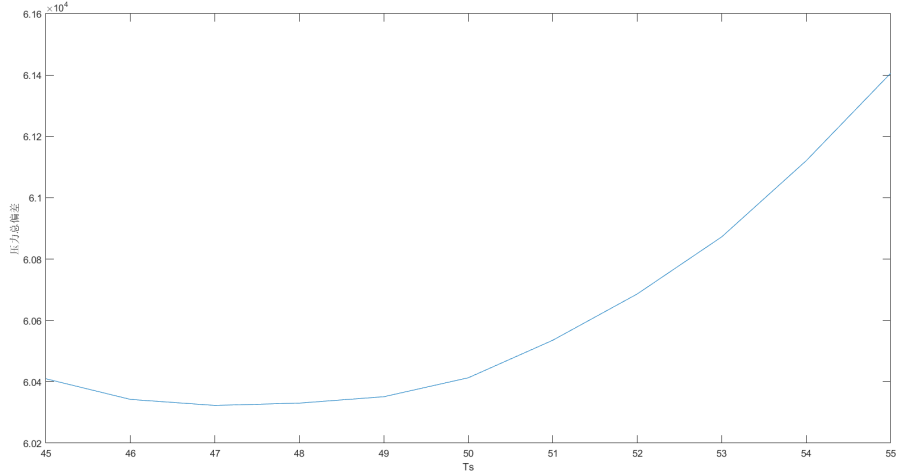


图4  $T_s$  与目标函数值

可见，决策变量  $T_s$  对目标函数的影响并不显著，故对于  $T_s$ ，我们不再缩短步长，以提高算法效率。

最终经精确搜索，确定  $T_p$  的最优解为 0.2851， $T_p$  的最优解为 49。我们固定  $T_s$ ，在  $T_p$  附近取值，可得到  $T_p$  与目标函数值的图像如图5。由图像， $T_p$  取值在 0.28 至于 0.29 间时，压力总偏差最小，从而验证了结果的正确性。

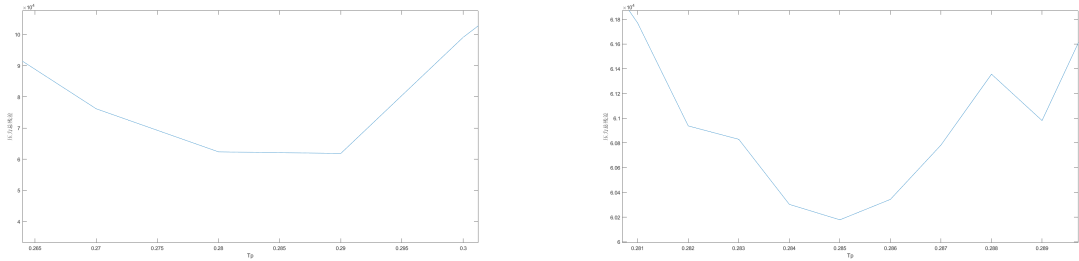


图5  $T_p$  与目标函数值

### 4.3 动态求解

#### 4.3.1 增压状态

第二小问相对于第一小问增加了升压状态，即高压油管内的压力分别经历约 2s、5s、10s 后从 100MPa 增加到 150MPa，并稳定在 150MPa，要求求出此时单向阀开启时长的调整策略。显然增压过程的单向阀开启时长与稳定状态时单向阀的开启时长不同，故我们拆分为两个部分进行求解。



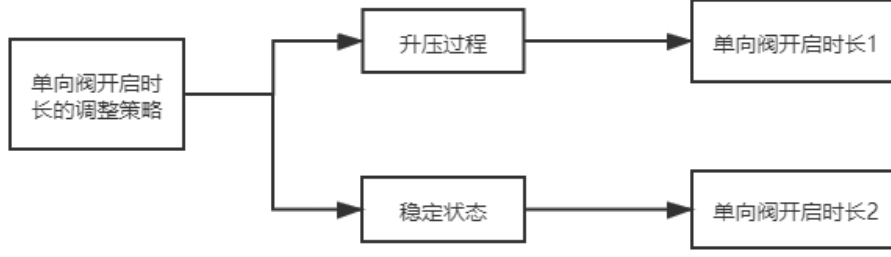


图6 升压与稳定过程

对于升压过程,目的为使得高压油管内的压力分别在 2s、5s、10s 后开始达到 150MPa,即希望找到使得高压油管内压力在 2s、5s、10s 后达到 150MPa 的单向阀开启时长,且最优单向阀开启时长为所有时长中的最小值。即优化模型为:

$$\min T_p \quad (15)$$

$$st. \begin{cases} E(P) = 0.02842P^2 + 3.077P + 1572 \\ R(t) = \begin{cases} CA\sqrt{\frac{2[P_A - P(t)]}{\rho_A}} & , t \in [kT_0, kT_0 + T_p] \\ 0 & , t \in (kT_0 + T_p, (k+1)T_0) \end{cases}, k \in N \\ Q(t) = \begin{cases} 100(t - kT_1 - T_s) & , t \in [T_s + kT_1, T_s + kT_1 + 0.2] \\ 20 & , t \in (T_s + kT_1 + 0.2, T_s + kT_1 + 2.2] \\ -100(t - T_s - kT_1) + 240 & , t \in (T_s + kT_1 + 2.2, T_s + kT_1 + 2.4] \\ 0 & , \text{otherwise} \end{cases}, k \in N \\ n = \frac{T}{\Delta t} \\ P_u = P_0 + \sum_{j=0}^{u-1} \frac{E(P_j)}{\rho_j V_0} (\rho_0 R(t_j) - \rho_j Q(t_j)) \Delta t, u = 1, 2, \dots, n \\ P_0 = 100 \\ P_T \geq 150 \end{cases} \quad (16)$$

其中上述参数  $T$  为系统周期,当调整策略不同时,周期  $T$  不同,高压油管内的压力从 100 MPa 增加到 150 MPa,分别经过约 2s、5s和10s 调整过程,参数  $T$  分别等于 2000,5000,10000。经第一小问分析,喷油嘴开始喷油时间对目标函数的取值影响不大,故我们取为第一小问的最优值,即 49ms。

沿袭第一小问的思路,我们仍然采用离散搜索的方法寻找最优的单向阀开启时长,设计算法,如图7。找到  $T_p$  的最小值后,缩短步长为 0.0001ms,并更改初始值为第一次搜索的最小值,继续执行该算法。

经 matlab 求解，可分别输出 2s、5s、10s 情况下的最优单向阀开启时长，如表 2 所示。

表 2 2s、5s、10s 情况下的最优单向阀开启时长

	2s	5s	10s
升压过程	0.9078ms	0.7503s	0.7493ms

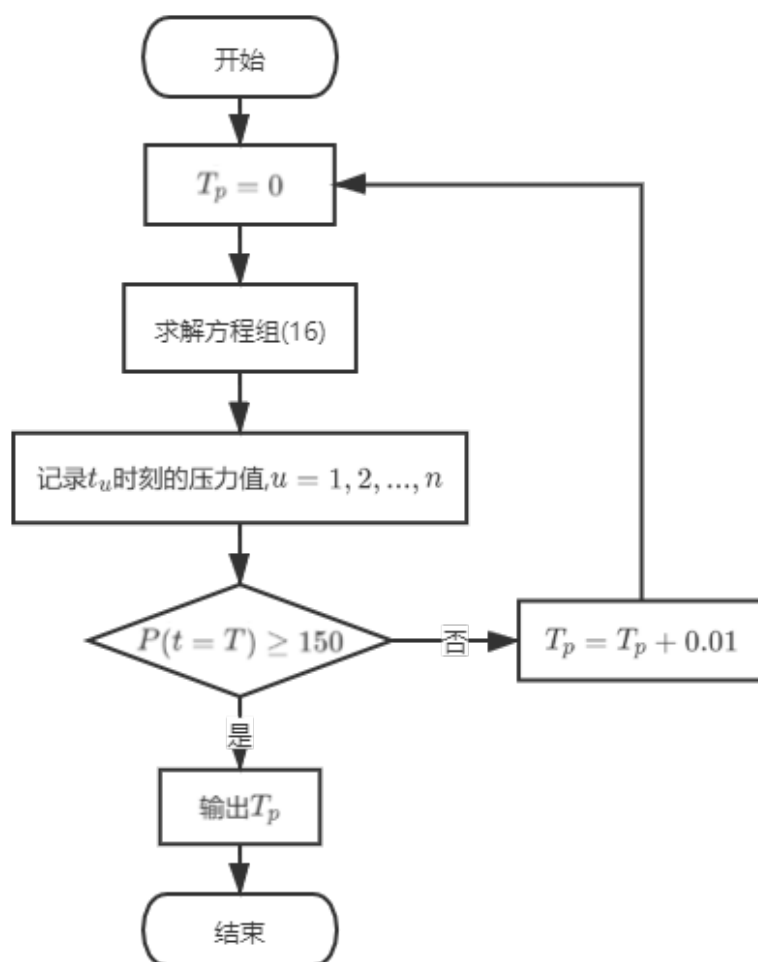
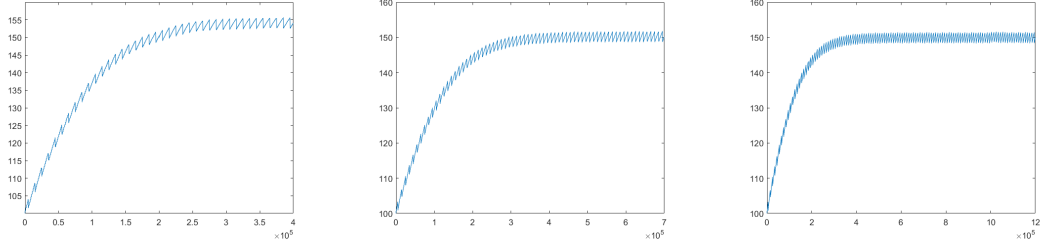


图 7 算法流程

并分别输出在对应单向阀开启时长下高压油管内压力的变化情况图8。由图所示，在 3 种不同单向阀开启时长下高压油管内压力分别约在 2s、5s、10s 后达到 150MPa，进一步验证了结果的正确性。



(a) 2s 高压油管内压力变化情况 (b) 5s 高压油管内压力变化情况 (c) 10s 高压油管内压力变化情况

图 8 三种情况下高压油管内压力变化情况

#### 4.3.2 稳定状态

对于稳定状态，即求使得高压油管内稳定在 150MPa 的最优单向阀开启时长，与调整时间无关，故 3 种情况下计算出的结果应完全相同。此时的优化模型为：

$$\min W = \sum_{i=1}^n |P_i - 150| \quad (17)$$

$$st. \begin{cases} E(P) = 0.02842P^2 + 3.077P + 1572 \\ R(t) = \begin{cases} CA\sqrt{\frac{2[P_A - P(t)]}{\rho_A}} & , t \in [kT_0, kT_0 + T_p] \\ 0 & , t \in (kT_0 + T_p, (k+1)T_0) \end{cases}, k \in N \\ Q(t) = \begin{cases} 100(t - kT_1 - T_s) & , t \in [T_s + kT_1, T_s + kT_1 + 0.2] \\ 20 & , t \in (T_s + kT_1 + 0.2, T_s + kT_1 + 2.2] \\ -100(t - T_s - kT_1) + 240 & , t \in (T_s + kT_1 + 2.2, T_s + kT_1 + 2.4] \\ 0 & , \text{otherwise} \end{cases}, k \in N \\ n = \frac{T}{\Delta t} \\ P_u = P_0 + \sum_{j=0}^{u-1} \frac{E(P_j)}{\rho_j V_0} (\rho_0 R(t_j) - \rho_j Q(t_j)) \Delta t, u = 1, 2, \dots, n \\ P_0 = 150 \end{cases} \quad (18)$$

利用变步长搜索算法进行搜索，可得最优单向阀开启时长为 0.7631ms。

综上所述，3 种情况下单向阀开启时长的调整策略如表 3 所示。

**表 3 3 种情况下单向阀开启时长的调整策略**

调整时间	单向阀开启时长策略
2s	0-2s 时，开启时长为 0.9078ms，2s 后变为 0.7631ms
5s	0-5s 时，开启时长为 0.7503ms，5s 后变为 0.7631ms
10s	0-10s 时，开启时长为 0.7493ms，10s 后变为 0.7631ms

## 附录 A 数据预处理

```
%% 计算燃油密度与压强的关系
function [p,k]=cal_rou
%% 数据的初始化
p(1,1)=100;
p(2,1)=0.85;
dp=0.01;
num=(160-100)/dp;
for i=1:num
%% 递推求得100MPa到160MPa压强
    E=645.4*exp(0.00671*p(1,i))+905.6;
    drou=p(2,i)/E*dp;
    p(2,i+1)=p(2,i)+drou;
    p(1,i+1)=p(1,i)+dp;
end
%% 递推求得0到100MPa的压强
num2=100/dp;
k(1,1)=100;
k(2,1)=0.85;
for i=1:num2
    E=645.4*exp(0.00671*k(1,i))+905.6;
    drou=k(2,i)/E*dp;
    k(2,i+1)=k(2,i)-drou;
    k(1,i+1)=k(1,i)-dp;
end
```

## 附录 B 主程序

```
%% 计算不同单向阀开启时长高压油管压强随时间变化及稳定性
function [p,sum]=module(p0,rou0,th,tao,ts)
%%输入参数：高压油管初始压强p0，密度rou0，经历时间th，单向阀开启时间tao，单向阀开启时长ts
rou=0.8711; %160MPa燃油密度
A=pi*0.7^2;
dt=0.01;
p(1,1)=p0;
p(2,1)=rou0;
V=pi*5^2*500;
C=0.85;
num=th/dt; %遍历步数
sum=0;
for i=1:num-1
    m=mod((i-1)*dt,100); %确定喷油嘴所处工作状态
    n=mod((i-1)*dt,tao+10); %确定单向阀所处工作状态
```

```

if m>=0+ts&& m<=0.2+ts
    dQ2=100*dt*(m-ts); %喷油嘴喷油速率上升
    dm2=dQ2*p(2,i);
end
if m>0.2+ts&& m<=2.2+ts
    dQ2=20*dt; %喷油嘴喷油速率达到最大且保持不变
    dm2=dQ2*p(2,i);
end
if m>2.2+ts&& m<=2.4+ts
    dQ2=(20-(m-2.2-ts)*100)*dt; %喷油嘴喷油速率逐渐降低
    dm2=dQ2*p(2,i);
end
if (m>2.4+ts&& m<100) | m<ts
    dQ2=0; %喷油嘴进入休息状态
    dm2=dQ2*p(2,i);
end
if n>=0&& n<=tao
    dQ1=C*A*sqrt(2*(160-p(1,i))/rou)*dt; %单向阀处于开启时间
    dm1=dQ1*rou;
end
if n>tao&& n<=tao+10
    dQ1=0; %单向阀处于时长为10ms的关闭状态
    dm1=dQ1*rou;
end
dm=dm1-dm2; %计算高压管内燃油质量差，密度差
drou=dm/V;
E=645.4*exp(0.00671*p(1,i))+905.6; %计算弹性模量
dp=drou/p(2,i)*E;
p(2,i+1)=p(2,i)+drou; %更新下一时刻高压油管压强与密度
p(1,i+1)=p(1,i)+dp;
sum=sum+abs(p(1,i+1)-100);
end
%sum=var(p(1,:)); %记录该参数下的高压油管压强波动方差
sum;

```

## 附录 C 稳定在 100MPa

```

function [result2]=testt
k=1;
min_result=0;
min_ts=0;
for ts=49:1:69 %49:0.1:51
    for tao=0:0.01:1
        %for tao=0.27:0.0001:0.29
            [p,result]=module(100,0.85,1000,tao,ts);

```

```

    %[p,result]=module(150,0.8679,2000,tao,ts);
    y(k)=result;
    if(result<min_result | min_result==0)
        min_result=result;
        min_ts=ts;
    end
    k=k+1;
end
end
[m,i]=min(y);
%result2=i*0.001;
result2=i*0.01
min_ts
end

```

## 附录 D 2s 稳定在 150MPa

```

%% 计算2s到达稳定时的单向阀开启时长
function [tao,z]=sol2
flag=1;
%tao=0;
tao=0.9
k=1;
while flag==1
    [p,~]=module(100,0.85,2000,tao,49);
    if p(1,200000)>=150 %循环找到2s时高压油管压强达到150MPa的最短单向阀开启时长
        flag=0;
    end
    tao=tao+0.0001;
end
tao
for x=0:0.01:1
    [p,result]=module(150,0.8679,1000,x,49);
    y(k)=result; %找到2s后使得高压油管稳定在150MPa的单向阀开启时长
    k=k+1;
end
[~,z]=min(y);
z=z*0.01;
[p1,~]=module(100,0.85,2000,tao,49);
[p2,~]=module(150,0.8679,2000,x,49) %作图
p=[p1(1,:),p2(1,:)];
plot(p);

```

## 附录 E 5s 稳定在 150MPa

```
%% 计算5s到达稳定时的单向阀开启时长
function [tao,z]=sol2
flag=1;
%tao=0;
tao=0.9
k=1;
while flag==1
    [p,~]=module(100,0.85,5000,tao,49);
    if p(1,200000)>=150 %循环找到5s时高压油管压强达到150MPa的最短单向阀开启时长
        flag=0;
    end
    tao=tao+0.0001;
end
tao
for x=0:0.01:1
    [p,result]=module(150,0.8679,1000,x,49);
    y(k)=result; %找到5s后使得高压油管稳定在150MPa的单向阀开启时长
    k=k+1;
end
[~,z]=min(y);
z=z*0.01;
[p1,~]=module(100,0.85,5000,tao,49);
[p2,~]=module(150,0.8679,2000,x,49) %作图
p=[p1(1,:),p2(1,:)];
plot(p);
```

## 附录 F 10s 稳定在 150MPa

```
%% 计算10s到达稳定时的单向阀开启时长
function [tao,z]=sol2
flag=1;
%tao=0;
tao=0.9
k=1;
while flag==1
    [p,~]=module(100,0.85,10000,tao,49);
    if p(1,200000)>=150 %循环找到10s时高压油管压强达到150MPa的最短单向阀开启时长
        flag=0;
    end
    tao=tao+0.0001;
end
tao
```



```

for x=0:0.01:1
    [p,result]=module(150,0.8679,1000,x,49);
    y(k)=result; %找到10s后使得高压油管稳定在150MPa的单向阀开启时长
    k=k+1;
end
[~,z]=min(y);
z=z*0.01;
[p1,~]=module(100,0.85,10000,tao,49);
[p2,~]=module(150,0.8679,2000,x,49) %作图
p=[p1(1,:),p2(1,:)];
plot(p);

```