

# 基于单目标规划的高压油管压力控制问题

## 摘要

本文从规划角度出发,研究了由于高压油泵供油和喷油嘴喷油造成高压油管内压力变化的问题。

针对问题 1 使管内压力尽量稳定在 100Mpa, 求解此时单向阀每次的开启时长, 本文结合了高压油泵进油和喷油的工作周期, 选择建立以一段时间内高压油管内压力与稳定压力的相对误差最小为目标函数的**单目标规划模型**, 以单向阀每次的开启时长作为决策变量, 以单向阀 A 的进油速率, 喷油嘴 B 的喷油速率与高压油管内燃油的压力与密度等相关量间的关系作为约束条件。采用循环遍历的算法, 对单向阀 A 的开启时长进行**循环遍历**, 遍历步长为 0.01ms, 得到单向阀每次开启 **0.3ms** 可使高压油管内压力稳定在 100Mpa 左右, 此时的相对误差为 0.0076。经过 **2s, 5s, 10s** 的调整过程使压力刚好达到 150Mpa, 此时单向阀的开启时间分别为 **0.88ms, 0.71ms** 和 **0.70ms**。为了使之后压力稳定在 150Mpa 左右, 单向阀的开启时长改为 0.75ms。

针对问题 2 在实际工作中, 凸轮带动柱塞运动导致进油单向阀的开启与关闭。建立以凸轮角速度为决策变量, 以 2s 内高压油管内压力与稳定压力的相对误差最小作为目标函数的**单目标规划模型**, 在问题一约束条件的基础上新增约束条件包括高压油管工作过程中凸轮自身转动角度与极径的关系和单向阀 A 的进油速率与高压油泵内压力密度的关系, 采用循环遍历的求解算法对凸轮角速度进行循环遍历, 遍历步长为 0.001rad/ms, 计算得出此时的凸轮的角速度为 **0.029rad/ms**。

针对问题 3 增加一个相同喷油规律的喷油嘴, 为了使得高压油管内的压强稳定在 100Mpa, 除了对凸轮的转速进行决策, 还需对两喷油嘴开始喷油的时间间隔进行决策。在问题二的基础上增加喷油嘴 C 喷油速率的约束, 以一段时间内高压油管内压力与 100Mpa 的相对误差最小为目标函数, 建立**单目标规划模型**。采用循环遍历的算法, 对两喷油嘴喷油的时间间隔进行循环遍历, 遍历步长 0.01ms。求解得到当两喷油嘴喷油时间间隔为 **41ms**, 凸轮转速为 **0.058rad/s**, 相对误差最小为 0.0114; 针对问题三第二问继续增加单向减压阀, 需要对单向减压阀打开的阈值进行决策, 增加减压阀的喷油速率约束, 以一段时间内高压油管内压力与 100Mpa 的相对误差最小为目标函数, 建立单目标规划模型。同样采用循环遍历的算法, 对减压阀阈值循环遍历, 遍历步长为 0.01Mpa。求解得到加压阀阈值为 **100Mpa**, 凸轮转速为 **0.064rad/ms** 时相对误差最小为 0.0073。

最后, 改变高压油管的体积对模型进行灵敏度分析, 并对模型的优缺点进行评价, 提出改进的方向。

**关键词:** 高压油管 喷油嘴 单目标优化模型 循环遍历算法

## 一、 问题的背景与重述

### 1.1 问题的背景

目前大多数燃油发动机还在依靠高压油管进行工作, 高压油泵阀门打开时间不同, 喷油嘴喷油速率和工作时间不同都会造成高压油管内部压强变化从而影响燃油发动机正常工作, 因此研究高压油管的压力变化具有现实意义。

### 1.2 问题的重述

高压油管有一进一出两个装置, 燃油经高压油泵进入, 由喷油嘴喷出, 进行周而复始的工作。

**问题 1:** 针对给定容积的高压油管和给定工作方式的喷油嘴, 要求合理设置高压油泵每次的供油时间, 即单向阀每次打开的时间保证高压油管内压力尽量维持在 100Mpa。若增大高压油管中压力为 150Mpa, 计算单向阀打开时长, 使高压油管内压力经过给定时间时压力值刚好达到 150Mpa。

**问题 2:** 实际工作中连接高压油泵与高压油管的单向阀开启不是人为设定的, 而是与单向阀两侧压力差有关, 高压油泵由凸轮驱动柱塞进行加油, 喷油嘴 B 的开启由针阀升程决定。沿用问题 1 中的喷油器工作次数和油管尺寸等数据, 计算管内压力 100Mpa 左右的凸轮角速度。

**问题 3:** 在上问基础上, 增加一个与喷嘴 B 喷油规律相同的喷嘴 C, 给出此时喷嘴 B、C 和供油策略的调整方案。继续升级高压油管的压力控制方式, 使高压油管同时具有两个喷油嘴和一个单向减压阀。讨论此时高压油泵与减压阀的详细控制方案。

## 二、 问题的分析

### 2.1 单向阀工作模式问题的分析

问题一要求我们设计单向阀的工作模式, 首先对题目给定的喷油嘴工作方式进行分析, 喷油器的一个工作周期为 100ms, 共可喷油  $44\text{ mm}^3$ 。由于未知高压油泵在入口 A 处压力为 160Mp 的燃油密度, 首先依据题目注 1 给出的燃油压力变化量与密度变化量的正比关系, 利用迭代的方法带入附件三中数据求出 160Mpa 下的燃油密度。结合高压油泵进油工作周期与喷油嘴喷油工作周期, 定义目标函数为 2s 内高压油管内压力与 100Mpa 的相对误差最小, 以单向阀每次开启时长作为决策变量, 以高压油管工作过程中相关量变化关系作为约束条件, 建立单目标规划模型, 采用循环遍历的求解算法, 计算得出使高压油管内压力变化相对误差最小的单向阀打开时间  $t$  的最优解。

### 2.2 确定凸轮运动角速度的问题分析

#### 1) 凸轮作用的分析

实际情况下, 高压油管的进油工作时间和喷油工作时间分别由凸轮驱动柱塞运动和针阀升程决定。由附件一的凸轮边缘曲线, 可以做出凸轮的几何图形如下:

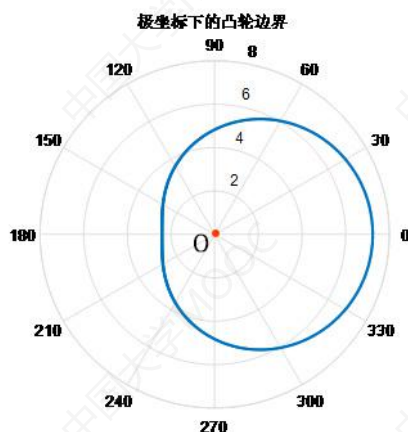


图 1 极坐标下的凸轮边界

由附件 1 中极径值可以算出高压油泵每一时刻的体积。由于凸轮转动不同时刻对应的极径大小不同，驱动着柱塞上下运动造成柱塞腔内充满燃油的体积变化。

## 2) 喷油嘴小孔面积取值原则

初步观察针阀运动规律，发现针阀与密封座空隙的最小面积就是喷油嘴小孔面积。最小面积为针阀边缘向密封座作垂线所形成的圆台侧面积和喷孔面积的较小值。

## 3) 单向阀的工作原理

不同于第一问单向阀为周期性工作，此时的单向阀只有在柱塞腔内压力大于高压油管内的压力时才会开启。

## 4) 高压油泵内各指标的变化

0.5Mpa 压力下的燃油密度可用与问题一中计算 160Mpa 下燃油密度的相同方法求出。高压油泵内密度的变化与燃油从单向阀流出导致的质量变化和体积变化有关。压力可用题目注 1 公式进行求解。

## 5) 问题 2 求解分析

定义目标函数为 2s 内高压油管内压力与 100Mpa 的相对误差最小，以凸轮转动角速度作为决策变量，以高压油管工作过程中凸轮自身转动角度与极径的关系、高压油泵柱塞腔运动过程中的压力变化关系、高压油管内部燃油相关量的对应关系和喷油嘴喷油口径的选择关系作为约束条件，建立单目标规划模型，采用循环遍历的求解算法，计算得出使高压油管内压力变化相对误差最小的凸轮转动角速度的最优解。

## 2.3 增加喷油嘴与排气阀后进油和喷油策略的分析

当增加一个与原喷油嘴喷油规律相同的喷油嘴后，首先考虑二者有同时喷油和交互喷油两种工作方式，两喷油嘴喷油时间间隔的大小是高压油管内压力与稳定压力间相对误差的决定性因素。据此对问题二模型约束条件进行修改，通过以增加固定时间间隔的方式进行循环，求解得到最小相对误差，此时的喷油嘴工作时间间隔即为喷油策略，此时凸轮的角速度即为供油策略。

在 D 处增加单向减压阀后，当高压油管内压强大于某一阈值时，单向减压阀打开直至高压油管内的压强小于该阈值关闭。通过修改问题二的约束条件，建立新的使相对误差尽可能小的凸轮转动角速度优化模型，采用循环遍历的算法对模型进行求解，即可得出此时高压油泵和减压阀的控制方案。

## 2.4 数据分析

### 1) 针阀运动曲线数据分析

针阀一次喷油过程中，升程发生变化，使得喷油器喷油小孔的实际面积发生变化，直接影响到喷油器喷油的速率，由附表 2 针阀的运动规律，可以得到喷油过程中的实际喷油小孔面积，其为针阀下底面周长与密封座形成的最小曲面和喷空最下端面积中的最小值。针阀下底面周长与密封座形成的最小曲面为从下面周长向密封座作垂线形成的圆台侧面积如图 2 所示，喷油嘴一次喷油过程中实际喷油面积如图 3 所示

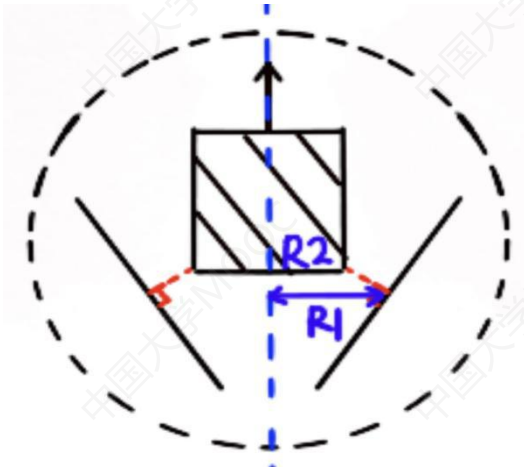


图 2 最小面积选择示意图

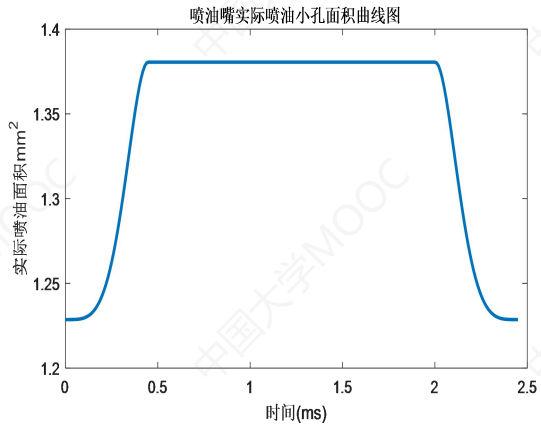


图 3 喷油嘴实际喷油面积图

圆台侧面积公式为  $S = \pi l(R_1 + R_2)$ ，其中  $R_1$  和  $R_2$  分别为圆台上下底面半径，计算可得

$$s = \pi \sin 9^\circ (h \sin 9^\circ \cos 9^\circ + 2.5) \quad (1)$$

其中  $h$  为针阀升程。

### 2) 已知压力下燃油密度的求解

由注 1 关系可得：

$$\Delta P = \frac{E}{\rho} \Delta \rho \quad (2)$$

所以：

$$P_{(t+\Delta t)} - P_t = \frac{E_t}{\rho_t} (\rho_{(t+\Delta t)} - \rho_t) \quad (3)$$

得：

$$\rho_{(t+\Delta t)} = \frac{P_{(t+\Delta t)} - P_t}{E_t} \rho_t + \rho_t \quad (4)$$

运用附表三数据，由式 (1-8) 可求得 160Mpa 压力下的燃油密度为  $0.8711 \text{ mg/mm}^3$ ，0.5Mpa 的低压燃油密度为  $0.8046 \text{ mg/mm}^3$

### 三、模型的假设

#### 3.1 模型的假设

- (1) 忽略高压油泵内燃油温度和高压油管温度变化对喷射温度造成的影响。
- (2) 燃油的压力变化量正比与密度变化量。
- (3) 假设凸轮匀角速度转动。
- (4) 忽略从单向阀进入高压油管内的燃油的扩散过程，认为高压油管内燃油密度是均匀的。
- (5) 假设凸轮在转动时极径的变化量等于柱塞高度的变化量。

### 四、符号说明

符号	表示含义	单位
$P_{Gt}$	$t$ 时刻高压油管内压力	Mpa
$P_{Et}$	$t$ 时刻高压油泵内压力	Mpa
$V$	高压油管内腔体积	$\text{mm}^3$
$T_0$	单向阀每次开启时长	ms
$T_1$	高压油泵供油的工作周期	ms
$T_2$	喷油嘴向外喷油的工作周期	ms
$\varepsilon$	$t$ 时间段内高压油管内压力与稳定压力 100Mpa 的相对误差	
$m_{A\Delta t}$	从 $t$ 时刻到 $t+\Delta t$ 时刻高压油泵进入高压油管的燃油质量	mg
$m_{B\Delta t}$	从 $t$ 时刻到 $t+\Delta t$ 时刻喷油嘴 B 喷出的燃油质量	mg
$m_{C\Delta t}$	从 $t$ 时刻到 $t+\Delta t$ 时刻喷油嘴 C 喷出的燃油质量	mg
$m_{D\Delta t}$	从 $t$ 时刻到 $t+\Delta t$ 时刻单向减压阀 D 流出的燃油质量	mg
$\omega$	凸轮转动角速度	rad / ms
$h_{Bt}$	表示 $t$ 时刻喷油嘴 B 的针阀升程	mm
$h_{Ct}$	表示 $t$ 时刻喷油嘴 C 的针阀升程	mm
$E_{Gt}$	$t$ 时刻高压油管内的弹性模量	Mpa
$E_{Et}$	T 时刻高压油泵内的弹性模量	Mpa
$M_{Gt}$	高压油管 $t$ 时刻内燃油质量	mg
$M_{Et}$	高压油泵 $t$ 时刻内燃油质量	mg

### 五、模型的建立与求解

#### 5.1 供油单向阀工作方式设计模型

##### 5.1.1 单向阀每次开启时长的单目标优化模型<sup>[2]</sup>——模型一

## 1. 决策变量

设单向阀每次开启时长为  $T_0$ ，单位为 ms，则有通过高压油泵进油的周期

$T_1 = (t+10)\text{ms}$ ，由题目数据可知通过喷油嘴向外喷油的周期为  $T_2=100\text{ms}$ 。

## 2. 约束条件

用  $m_{A\Delta t}$  表示从  $t$  时刻到  $t+\Delta t$  时刻高压油泵进入高压油管的燃油质量：

$$m_{A\Delta t} = \rho_A V_{\Delta t} = \rho_A Q_{At} \Delta t = \rho_A CA \sqrt{\frac{2(P_A - P_{Gt})}{\rho_A}} \Delta t \quad (1-1)$$

其中  $\rho_A$  表示压力大小为 160Mpa 时的燃油密度， $Q_{At}$  表示  $t$  时刻从 A 口流进高压油管的进油速率。

用  $m_{B\Delta t}$  表示从  $t$  时刻到  $t+\Delta t$  时刻喷油嘴喷出的燃油质量有：

$$m_{B\Delta t} = \rho_{Gt} Q_{Bt} \Delta t \quad (1-2)$$

其中  $Q_{B0}$  表示初始时刻从 B 口流出高压油管的喷油速率单位为  $\text{mm}^3 / \text{ms}$ ， $\rho_0$  表示初始时刻高压油管内的燃油密度。

用  $M_{Gt}$  表示  $t$  时刻高压油管内剩余的燃油质量有：

$$M_{G(t+\Delta t)} = M_{Gt} + m_{A(t+\Delta t)} - m_{B(t+\Delta t)} \quad (1-3)$$

$$\rho_{G(t+\Delta t)} = \frac{M_{G(t+\Delta t)}}{V} \quad (1-4)$$

由已知  $\Delta P = \frac{E}{\rho} \Delta \rho$  有：

$$P_{G(t+\Delta t)} = \frac{E_{Gt}}{\rho_{Gt}} (\rho_{G(t+\Delta t)} - \rho_{Gt}) + P_{Gt} \quad (1-5)$$

式中  $E_{Gt}$  表示  $t$  时刻高压油管内的弹性模量。

由题图 2 喷油速率示意图可得  $t$  时刻从 B 口流出高压油管的喷油速率  $Q_{Bt}$ ，

取  $a$  为  $t$  时间与喷油嘴工作周期作商的余数即  $a = t \% T_2$  有：

$$Q_{Bt} = \begin{cases} 100a, & 0 \leq a < 0.2 \\ 20, & 0.2 \leq a < 2.2 \\ -100a + 240, & 2.2 \leq a < 2.4 \\ 0, & a \geq 2.4 \end{cases} \quad (1-6)$$

### 3. 目标函数

高压油管内部压力的变化会使得喷油器喷出的燃油量出现偏差,故要求在喷油器工作时高压油管内的压力尽可能稳定。我们定义目标函数为 $T$ 时间段内高压油管内压力与稳定压力 100Mpa 的相对误差,即:

$$\varepsilon = \frac{\int_0^T |p_{Gt} - 100| dt}{100T} \quad (1-7)$$

为使高压油管内的压力在喷油器工作时尽可能稳定在 100Mpa 左右,即要求相对误差尽可能小。

综上我们建立使相对误差尽可能小的单向阀开启时间规划模型<sup>[2]</sup>:

目标函数:

$$\min \varepsilon \quad (1-8)$$

决策变量:

单向阀打开时间 $T_0$

约束条件:

$$s.t. \begin{cases} M_{G(t+\Delta t)} = M_{Gt} + m_{A(t+\Delta t)} - m_{B(t+\Delta t)} \\ \rho_{G(t+\Delta t)} = \frac{M_{G(t+\Delta t)}}{V} \\ m_{A\Delta t} = \rho_A V_{\Delta t} = \rho_A Q_{At} \Delta t = \rho_A C A \sqrt{\frac{2(P_A - P_{Gt})}{\rho_A}} \Delta t, \quad t \in [kT_1, kT_1 + t], k \in N \\ m_{A\Delta t} = 0, \quad \text{其他} \\ m_{B\Delta t} = \rho_{Gt} Q_{Bt} \Delta t \\ P_{G(t+\Delta t)} = \frac{E_{Gt}}{\rho_{Gt}} (\rho_{G(t+\Delta t)} - \rho_{Gt}) + P_{Gt} \\ P_{G0} = 100 \\ \rho_{G0} = 0.8711 \end{cases} \quad (1-9)$$

### 5. 1. 3 模型一的求解算法

运用 MATLAB 软件采用循环遍历的算法,以 0.01ms 为迭代步长,对其在 1ms 内进行循环遍历,在不同单向阀开启时长下持续 2s 的高压油管内压力变化进行求解,得到使高压油管内压力变化相对误差最小的单向阀打开时间 $T_0$ 的最优解。

具体算法流程图如下:



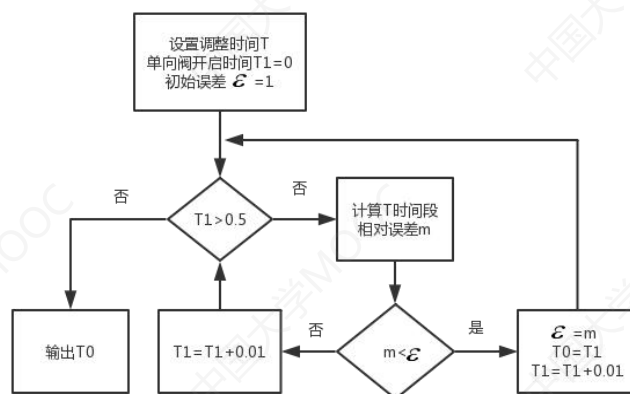


图 2 模型一循环遍历流程图

**Step1:** 初始时刻  $T_1=0$ ，此时油管内压力为 100Mpa，当前最小相对误差  $\varepsilon$  为 1；

此时判断  $T_1$  与 1ms 的大小关系，决定是否结束循环；

**Step2:** 若  $T_1 < 1\text{ms}$ ，带入模型计算此时高压管内压力大小，并计算相对误差结果为  $m$ ；若  $T_1 > 1\text{ms}$ ，结束循环，输出  $T_0$ ；

**Step3:** 比较  $m$  与  $\varepsilon$  的大小关系，若  $m < \varepsilon$ ，将  $m$  赋值给当前最小误差  $\varepsilon$ ，把  $T_1$  赋值给当前最优单向阀开启时长  $T_0$ ，否则更新  $T_1 = T_1 + 0.01$ ，重复 Step2；

#### 5.1.4 模型一的结果与分析

粗略改变单向阀开启时长，判断出相对误差最小值在单向阀开启时长在 0.25~0.35ms 之间，从 0.25ms 开始每次增加 0.01ms 到 0.35ms 结束得出不同单向阀开启时长下的相对误差图如下：

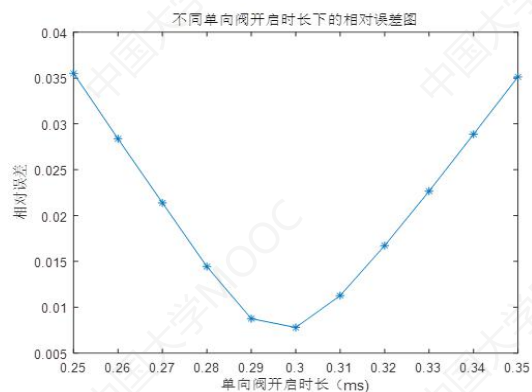


图 3 不同单向阀开启时长下的相对误差

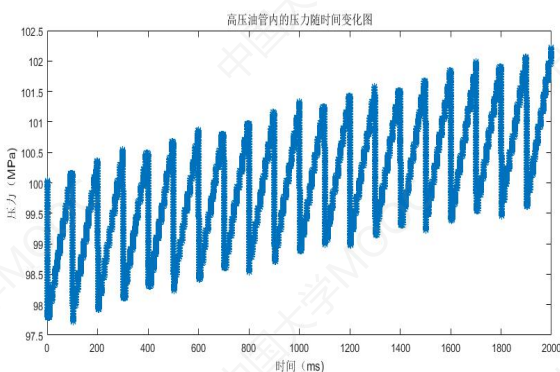


图 4 喷油嘴喷油时管内压力变化图



由图 5 可知在单向阀开启时长  $t=0.3\text{ms}$  时，相对误差最小为 0.0076，进而以单向阀开启时长  $t=0.3\text{ms}$  作出此时喷油嘴喷油时高压油管内压力在 2s 内随时间的变化曲线如图 6。

由图 6 可看出，喷油嘴喷油时高压油管内压力随着时间增加呈微小上升趋势，分析该趋势的原理，由于该问将高压油泵在入口 A 处的压力恒定为 160Mpa，使得每 100ms 进入高压油管的燃油近似不变，但喷油嘴的间歇性工作会使得高压油管内压力发生突变，影响喷出燃油的燃油密度，进而影响喷出的燃油质量。

### 5.1.5 高压管内压力稳定在 150Mpa 单向阀开启时间优化模型<sup>[2]</sup>——模型二

在模型一的基础上，为了使高压油管内的压力经一定的调整时间后稳定在 150Mpa，需对模型一的目标函数进行调整。定义目标函数为给定调整时间段  $T$  后高压油管内压力与 150Mpa 的相对误差，即：

$$\varepsilon_1 = \frac{P_{Gt} - 150}{150} \quad (1-10)$$

为使高压油管内的压力在喷油器工作时尽可能稳定在 150Mpa 左右，即要求相对误差尽可能小。

综上我们建立使相对误差尽可能小的单向阀开启时间规划模型：

目标函数：

$$\min \varepsilon_1 \quad (1-11)$$

决策变量：

单向阀打开时间  $T_0$

约束条件：

$$s.t. \begin{cases} m_j = m_{j-1} + m_{Aj} - m_{Bj} \\ M_{G(t+\Delta t)} = M_{Gt} + m_{A(t+\Delta t)} - m_{B(t+\Delta t)} \\ \rho_{G(t+\Delta t)} = \frac{M_{G(t+\Delta t)}}{V} \\ m_{A\Delta t} = \rho_A V_{\Delta t} = \rho_A Q_{At} \Delta t = \rho_A C A \sqrt{\frac{2(P_A - P_{Gt})}{\rho_A}} \Delta t, \quad t \in [kT_1, kT_1 + t] k \in N \\ m_{A\Delta t} = 0, \quad \text{其他} \\ m_{B\Delta t} = \rho_{Gt} Q_{Bt} \Delta t \\ P_{G(t+\Delta t)} = \frac{E_{Gt}}{\rho_{Gt}} (\rho_{G(t+\Delta t)} - \rho_{Gt}) + P_{Gt} \\ P_{G0} = 100, \rho_{G0} = 0.8711 \end{cases}$$

(1-12)

### 5.1.6 模型二的求解算法

运用 MATLAB 软件采用循环遍历的算法，对单向阀开启时长在 1ms 内进行遍历，以 0.01ms 为遍历步长，对从初始时刻分别持续 2s，5s，10s 的高压油管内压力变化进行求解，使得调整时间结束时刻高压油管内压力与 150Mpa 的相对误

差最小，得到最优单向阀开启时长  $T_0$ 。具体实现流程图如下：

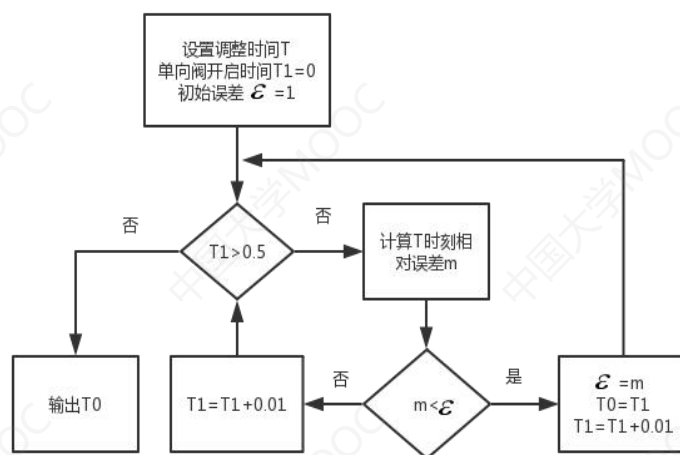


图 7 模型二循环遍历流程图

**Step1:** 初始时刻  $T_1=0$ ，此时油管内压力为 100Mpa，当前最小相对误差  $\varepsilon$  为 1；

此时判断  $T_1$  与 1ms 的大小关系，决定是否结束循环；

**Step2:** 若  $T_1 < 1\text{ms}$ ，带入模型计算此时高压管内压力大小，并计算相对误差结果为  $m$ ；若  $T_1 > 1\text{ms}$ ，结束循环，输出  $T_0$ ；

**Step3:** 调整时间结束  $T$  后比较  $m$  与  $\varepsilon$  的大小关系，若  $m < \varepsilon$ ，将  $m$  赋值给当前最小误差  $\varepsilon$ ，把  $T_1$  赋值给当前最优单向阀开启时长  $T_0$ ，否则更新  $T_1 = T_1 + 0.01$ ，重复 Step2；

### 5.1.7 模型二的结果分析

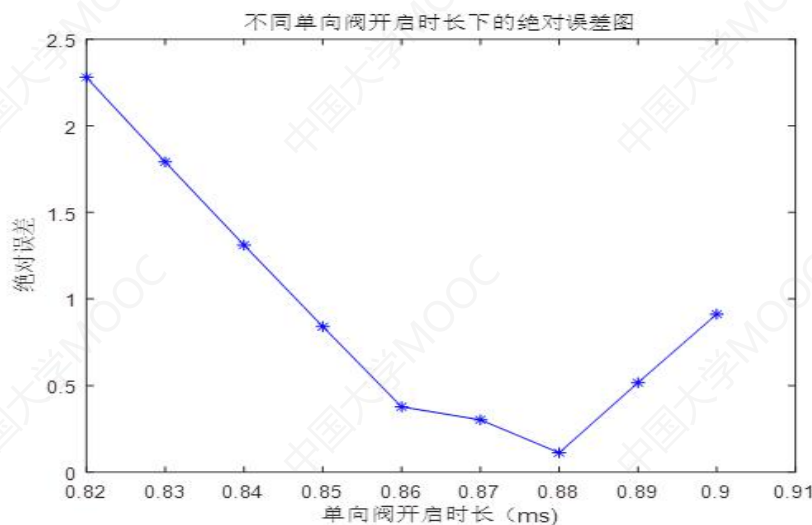


图 8 单向阀不同开启时长的绝对误差

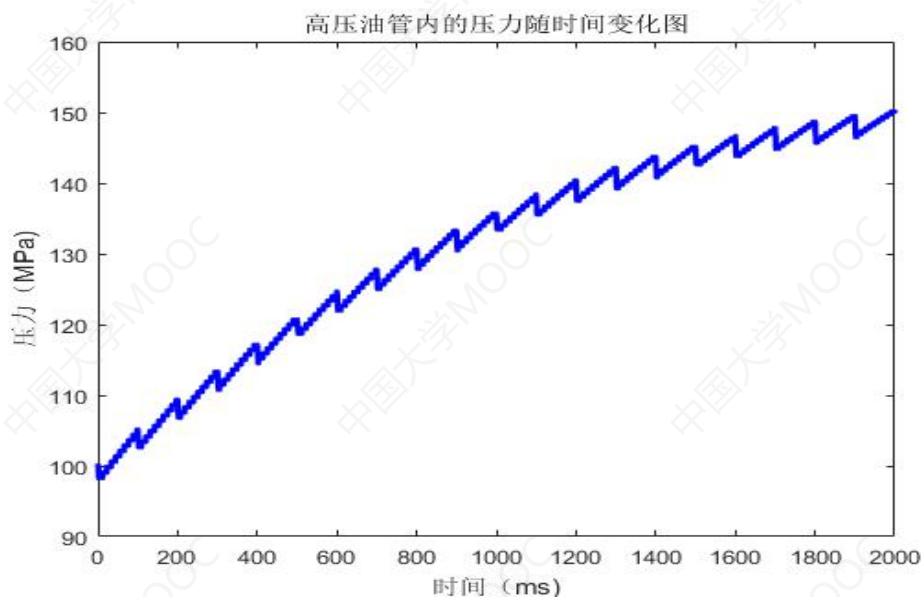


图 9 喷油嘴喷油时管内压力变化图

图 8 可以看出单向阀开启时间在 0.86–0.89ms 内经 2s 调整过程后的绝对误差较小, 当单向阀开启时长为 0.88ms 时绝对误差最小, 此时 2s 调整过程中的高压油管内压力变化如图 9 所示。

同理可得单向阀的开启时间分别为 0.88ms, 0.71ms 和 0.70ms 是使经过 2s, 5s, 10s 的调整过程后高压油管压力刚好达到在 150Mpa 的最优策略。当高压油管内压强达到 150Mpa 后为了使其趋于稳定, 单向阀的开启时长改为 0.75ms。

## 5.2 凸轮角速度确定的单目标优化模型<sup>[2]</sup>——模型三

### 5.2.1 模型的建立

问题 2 在问题 1 上复杂化, 供油单向阀的开启时长不再是人为设定, 而是依靠凸轮转动驱动柱塞上下移动, 通过比较柱塞腔和高压油管内的压力大小来决定单向阀的打开时间, 而喷油嘴的喷油速率也不在恒定, 改为由针阀控制, 针阀升程决定是否喷油, 由此对模型一进行推广, 建立这种情况下单目标规划模型<sup>[2]</sup>。

#### 1. 决策变量

设凸轮转动的角速度为  $\omega$ , 单位为 rad/ms。  $\omega$  即为决策变量。

#### 2. 约束条件

##### 1) 凸轮自身转动约束

凸轮初始位置为极径最小时对应的弧度  $\theta_0 = 3.14$ ,  $t$  时刻的极径为  $r_t$ ,  $t$  时刻的弧度  $\theta_t$  为:

$$\theta_t = 3.14 + \omega t \quad (2-1)$$

##### 2) 高压油泵柱塞腔运动的压力约束

用  $\rho_{E0}$  表示初始时刻高压油泵的燃油密度,  $V_{E0}$  表示初始时刻高压油泵的柱

塞腔残余体积,  $M_{E0}$  表示初始时刻高压油泵柱塞腔内存有燃油的质量,  $P_{E0}$  表示初始时刻高压油泵的压力, 用  $P_{out}$  表示喷油嘴外燃油压力, 通过查询文献<sup>[1]</sup>可知

$P_{out} = 5\text{Mpa}$ , 计算得  $\rho_{E0} = 0.8046\text{mg/mm}^3$ ,  $V_{E0} = 114\text{mm}^3$ ,  $P_{E0} = 0.5\text{Mpa}$ ,  $M_{E0} = 92.3349\text{mg}$ 。

用  $V_{G(t+\Delta t)}$  表示  $t + \Delta t$  时刻柱塞腔残余体积, 有

$$V_{E(t+\Delta t)} = V_{Et} + s_{\text{柱}}(r_t - r_{t+\Delta t}) \quad (2-2)$$

用  $m_{A\Delta t}$  表示从  $t$  时刻到  $t + \Delta t$  时刻高压油泵进入高压油管的燃油质量:

$$m_{A\Delta t} = \begin{cases} \rho_{Et} V_{\Delta t} = \rho_{Et} Q_{At} \Delta t = \rho_{Et} C S_A \sqrt{\frac{2(P_{Et} - P_{Gt})}{\rho_A}} \Delta t, & P_{Et} > P_{Gt} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2-3)$$

用  $M_{Et}$  表示  $t$  时刻高压油泵内的燃油质量,  $\rho_{Et}$  表示有  $t$  时刻高压油泵内的燃油密度有:

$$M_{E(t+\Delta t)} = M_{Et} - m_{A\Delta t} \quad (2-4)$$

$$\rho_{E(t+\Delta t)} = \frac{M_{E(t+\Delta t)}}{V_{E(t+\Delta t)}} \quad (2-5)$$

由已知  $\Delta P = \frac{E}{\rho} \Delta \rho$  有:

$$P_{E(t+\Delta t)} = P_{Et} + \frac{E_{Et}}{\rho_{Et}} (\rho_{E(t+\Delta t)} - \rho_{Et}) \quad (2-6)$$

式中  $E_{Et}$  表示  $t$  时刻高压油泵内燃油的弹性模量。

### 3) 高压油管内部燃油相关量的约束

用  $\rho_{G0}$  表示初始时刻高压油管的燃油密度,  $M_{G0}$  表示初始时刻高压油管内内存有燃油的质量,  $P_{G0}$  表示初始时刻高压油管内的压力, 可算出  $\rho_{G0} = 0.85\text{mg/mm}^3$ ,  $P_{G0} = 100\text{Mpa}$ ,  $M_{G0} = \rho_{G0} V$ 。

用  $m_{B\Delta t}$  表示从  $t$  时刻到  $t + \Delta t$  时刻高压油管从喷油嘴流出的燃油质量有:

$$m_{B\Delta t} = \rho_{Gt} Q_{Bt} \Delta t = \rho_{Gt} C S_{Bt} \sqrt{\frac{2(P_{Gt} - P_{out})}{\rho_{Gt}}} \Delta t \quad (2-7)$$

用  $M_{Gt}$  表示  $t$  时刻高压油管内的燃油质量,  $\rho_{Gt}$  表示有  $t$  时刻高压油管内的燃油密度:

$$M_{G(t+\Delta t)} = M_{Gt} + m_{At} - m_{Bt} \quad (2-8)$$

$$\rho_{G(t+\Delta t)} = \frac{M_{G(t+\Delta t)}}{V} \quad (2-9)$$

$$P_{G(t+\Delta t)} = P_{Gt} + \frac{E_{Gt}}{\rho_{Gt}} (\rho_{G(t+\Delta t)} - \rho_{Gt}) \quad (2-10)$$

#### 4) 喷油嘴喷油口径约束

用  $S_B$  表示最下端喷油孔径的横截面积, 用  $s_{ZBt}$  表示  $t$  时刻针阀和密封座之间形成的空隙的面积, 用  $s_{Bt}$  表示  $t$  时刻喷油嘴的实际喷油面积即为  $s_B$  与  $s_{ZBt}$  中的最小值。  $h_{Bt}$  表示  $t$  时刻喷油嘴  $B$  的针阀升程:  $S_B = 0.7^2 \pi \text{ mm}^3$ 。

$$s_{ZBt} = \pi \sin 9^\circ (h_{Bt} \sin 9^\circ \cos 9^\circ + 2.5) \quad (2-11)$$

$$s_{Bt} = \min(s_{ZBt}, S_B) \quad (2-12)$$

### 3. 目标函数

高压油管内部压力的变化会使得喷油器喷出的燃油量出现偏差, 故要求在喷油器工作时高压油管内的压力尽可能稳定。结合高压油泵进油工作周期  $T_1$  与喷油嘴喷油工作周期  $T_2$ , 我们定义目标函数为 2s 内高压油管内压力与稳定压力 100Mpa 的相对误差, 即:

$$\varepsilon = \frac{\int_0^T |P_{Gt} - 100| dt}{100T} \quad (2-13)$$

为使高压油管内的压力在喷油器工作时尽可能稳定在 100Mpa 左右, 即要求相对误差尽可能小。

综上我们建立使相对误差尽可能小的凸轮转动角速度规划模型:

目标函数:

$$\min \quad \varepsilon$$

决策变量:

凸轮转动角速度  $\omega$

约束条件:

$$\begin{aligned}
 & \theta_t = 3.14 + \omega t \\
 & V_{E(t+\Delta t)} = V_{Et} + s_{\text{柱}}(r_t - r_{t+\Delta t}) \\
 & m_{A\Delta t} = \begin{cases} \rho_{Et} V_{\Delta t} = \rho_{Et} Q_{At} \Delta t = \rho_{Et} C S_A \sqrt{\frac{2(P_{Et} - P_{Gt})}{\rho_A}} \Delta t, & P_{Et} > P_{Gt} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\
 & M_{E(t+\Delta t)} = M_{Et} - m_{A\Delta t} \\
 & \rho_{E(t+\Delta t)} = \frac{M_{E(t+\Delta t)}}{V_{E(t+\Delta t)}} \\
 & P_{E(t+\Delta t)} = P_{Et} + \frac{E_{Et}}{\rho_{Et}}(\rho_{E(t+\Delta t)} - \rho_{Et}) \\
 \text{s.t.} \quad & m_{B\Delta t} = \rho_{Gt} Q_{Bt} \Delta t = \rho_{Gt} C S_{Bt} \sqrt{\frac{2(P_{Gt} - P_{out})}{\rho_{Gt}}} \Delta t \\
 & M_{G(t+\Delta t)} = M_{Gt} + m_{At} - m_{Bt} \\
 & \rho_{G(t+\Delta t)} = \frac{M_{G(t+\Delta t)}}{V} \\
 & P_{G(t+\Delta t)} = P_{Gt} + \frac{E_{Gt}}{\rho_{Gt}}(\rho_{G(t+\Delta t)} - \rho_{Gt}) \\
 & s_{Bt} = \min(s_{ZBt}, s_B) \\
 & \rho_{E0} = 0.8046, V_{E0} = 114, P_{E0} = 0.5, M_{E0} = 92.3349 \\
 & \rho_{G0} = 0.85, P_{G0} = 100 \\
 & M_{G0} = \rho_{G0} V
 \end{aligned}$$

(2-14)

### 5.2.2 模型三的求解算法

为了确定最佳的凸轮转动角速度，查找相关资料，粗略判断凸轮角速度一般小于  $0.1 \text{ rad/s}$ ，凸轮角速度以  $0.01 \text{ rad/s}$  为步长变化，循环遍历  $0 \text{ rad/s} \sim 0.1 \text{ rad/s}$  的内的每一个值，分别求出相应的目标函数，求出目标函数最小的凸轮角速度。

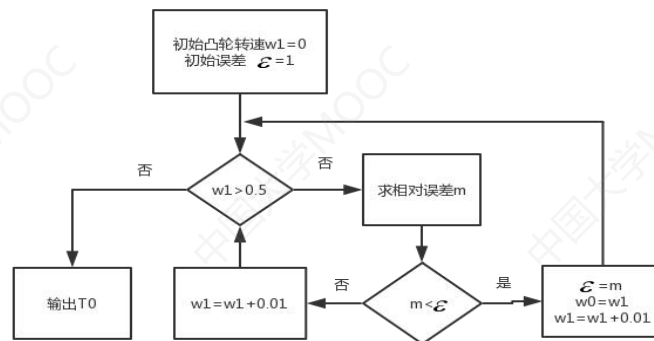


图 10 模型三循环遍历流程图

**Step1:** 输入初始值  $\omega=0\text{rad/s}$ ，此时油管内压力为  $100\text{Mpa}$ ，当前最小相对误差  $\varepsilon$  为 1；此时判断  $\omega$  与  $0.1\text{rad/s}$  的大小关系，决定是否结束循环；

**Step2:** 若  $\omega \leq 0.1\text{rad/s}$ ，带入模型计算此时高压管内压力大小，并计算相对误差结果为  $m$ ；若  $\omega > 0.1\text{rad/s}$ ，结束循环，输出  $\omega$ ；

**Step3:** 比较  $m$  与  $\varepsilon$  的大小关系，若  $m < \varepsilon$ ，将  $m$  赋值给当前最小误差  $\varepsilon$ ，把  $\omega$  赋值给当前最优凸轮转动角速度  $\omega_0$ ，否则更新  $\omega=\omega+0.01$ ，重复 Step2；

### 5.2.3 模型三的结果与分析

凸轮角速度从  $0\text{rad/s} \sim 0.1\text{rad/s}$  以  $0.01\text{rad/s}$  的步长依次改变，分别计算相应的目标函数值，选出使得高压油管内压力保持在  $100\text{Mpa}$  左右的最优的凸轮角速度，粗略改变凸轮角速度大小，判断出相对误差最小值在凸轮角速度为  $0.023 \sim 0.03\text{rad/ms}$  之间，相对误差图如下：

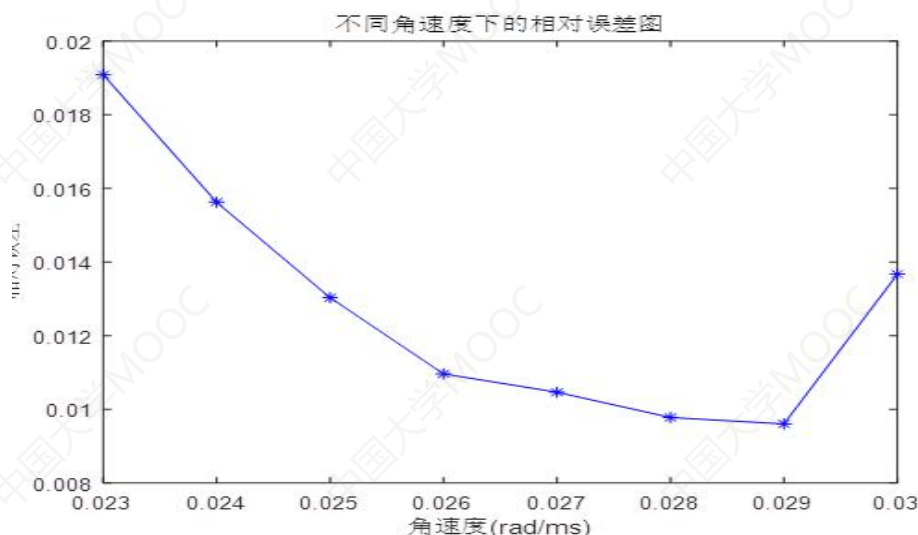


图 11 不同凸轮角速度下的相对误差

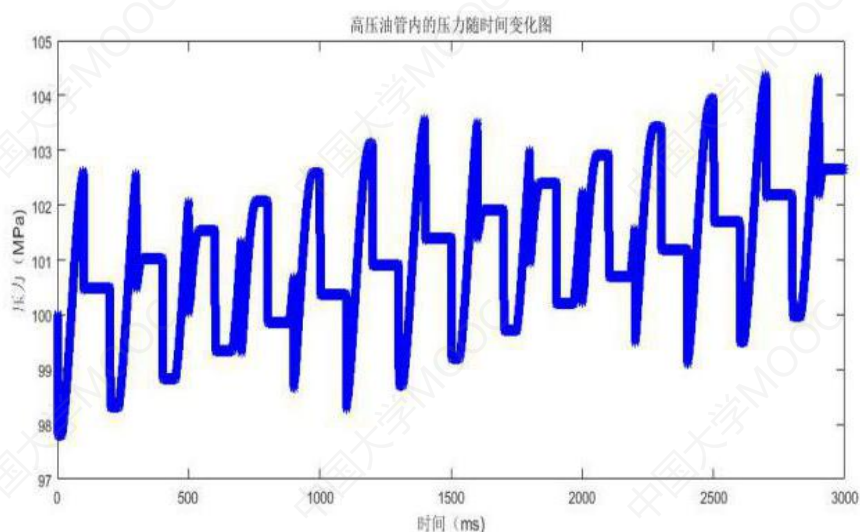


图 12 喷油嘴喷油时管内压力变化图



由图 11 可以看出当角速度大小为 0.029rad/ms 时使高压油管内压力稳定在 100Mpa 的效果最好。此时管内压力变化如图 12 所示。

### 5.3 增加一个喷油嘴的策略优化模型——模型四

在问题 2 的基础上增加一个喷油嘴，两个喷油嘴的喷油规律相同，可以考虑两个喷油嘴交错喷油的情况，对凸轮的转速进行优化使得高压油管内压强稳定在 100Mpa 左右。在模型三的基础上更改约束条件，建立新的使相对误差尽可能小的凸轮转动角速度规划模型。

#### 5.3.1 模型的约束条件

在模型三约束条件的基础上对式（2-8）进行修改，即：

$$M_{G(t+\Delta t)} = M_{Gt} + m_{At} - m_{Bt} - m_{Ct} \quad (3-1)$$

同时增加新的约束：

$$m_{C\Delta t} = \rho_{Gt} Q_{Ct} \Delta t = \rho_{Gt} C S_{Ct} \sqrt{\frac{2(P_{Gt} - P_{out})}{\rho_{Gt}}} \Delta t \quad (3-2)$$

喷油器 C 比喷油器 B 推迟工作时间  $t_1$ ：

$$h_{C(t+t_1)} = h_{Bt} \quad (3-3)$$

用  $S_C$  表示 C 喷油孔最下端喷油孔径的横截面积，用  $s_{ZCt}$  表示  $t$  时刻针阀和密封座之间形成的空隙的面积，用  $s_{Ct}$  表示  $t$  时刻喷油嘴的实际喷油面积即为  $s_C$  与  $s_{ZCt}$  中的最小值。 $h_{Ct}$  表示  $t$  时刻喷油嘴 C 的针阀升程： $S_C = 0.7^2 \pi \text{ mm}^3$ 。

$$s_{ZCt} = \pi \sin 9^\circ (h_{Ct} \tan 9^\circ \cos^2 9^\circ + 2.5) \quad (3-4)$$

$$s_{Ct} = \min(s_{ZCt}, s_C) \quad (3-5)$$

综上我们建立使相对误差尽可能小的凸轮转动角速度规划模型：

目标函数：

$$\min \quad \varepsilon$$

决策变量：

凸轮转动的角速度  $\omega$

约束条件:

$$\begin{cases}
 \theta_t = 3.14 + \omega t \\
 V_{E(t+\Delta t)} = V_{Et} + s_{柱}(r_t - r_{t+\Delta t}) \\
 m_{A\Delta t} = \begin{cases} \rho_{Et} V_{\Delta t} = \rho_{Et} Q_{At} \Delta t = \rho_{Et} C S_A \sqrt{\frac{2(P_{Et} - P_{Gt})}{\rho_A}} \Delta t, & P_{Et} > P_{Gt} \\ 0 & , \text{其他} \end{cases} \\
 M_{E(t+\Delta t)} = M_{Et} - m_{A\Delta t} \\
 \rho_{E(t+\Delta t)} = \frac{M_{E(t+\Delta t)}}{V_{E(t+\Delta t)}} \\
 P_{E(t+\Delta t)} = P_{Et} + \frac{E_{Et}}{\rho_{Et}} (\rho_{E(t+\Delta t)} - \rho_{Et}) \\
 s.t. \begin{cases} m_{C\Delta t} = \rho_{Gt} Q_{Ct} \Delta t = \rho_{Gt} C S_{Ct} \sqrt{\frac{2(P_{Gt} - P_{out})}{\rho_{Gt}}} \Delta t \\ M_{G(t+\Delta t)} = M_{Gt} + m_{At} - m_{Bt} - m_{Ct} \\ \rho_{G(t+\Delta t)} = \frac{M_{G(t+\Delta t)}}{V} \\ P_{G(t+\Delta t)} = P_{Gt} + \frac{E_{Gt}}{\rho_{Gt}} (\rho_{G(t+\Delta t)} - \rho_{Gt}) \\ h_{c(t+t_1)} = h_{Bt} \\ m_{B\Delta t} = \rho_{Gt} Q_{Bt} \Delta t = \rho_{Gt} C S_{Bt} \sqrt{\frac{2(P_{Gt} - P_{out})}{\rho_{Gt}}} \Delta t \\ s_{Ct} = \min(s_{ZCt}, s_C) \\ \rho_{E0} = 0.8046, V_{E0} = 114, P_{E0} = 0.5, M_{E0} = 92.3349 \\ \rho_{G0} = 0.85, P_{G0} = 100, M_{G0} = \rho_{G0} V \\ s_{Bt} = \min(s_{ZBt}, s_B) \end{cases}
 \end{cases} \quad (3-6)$$

### 5.3.2 模型四的求解算法

考虑到两个喷油嘴的工作规律相同,但允许两个喷油嘴交替工作,即喷油口  $C$  可以比喷油口  $B$  的工作时间延迟  $t_1 ms$ , 为了确定最佳延迟时间  $t_1 ms$  喷及其对应的凸轮转动的最佳角速度  $\omega$ ,  $t_1$  从  $0 \sim 50 ms$  的以  $0.01 ms$  最为步长循环遍历, 分别计算凸轮转动的最佳角速度  $\omega$ , 及其对应的目标函数, 求出目标函数最小的喷油口  $C$  可以比喷油口  $B$  的工作延迟时间  $t_1$ , 及其对应的凸轮转动角速度。

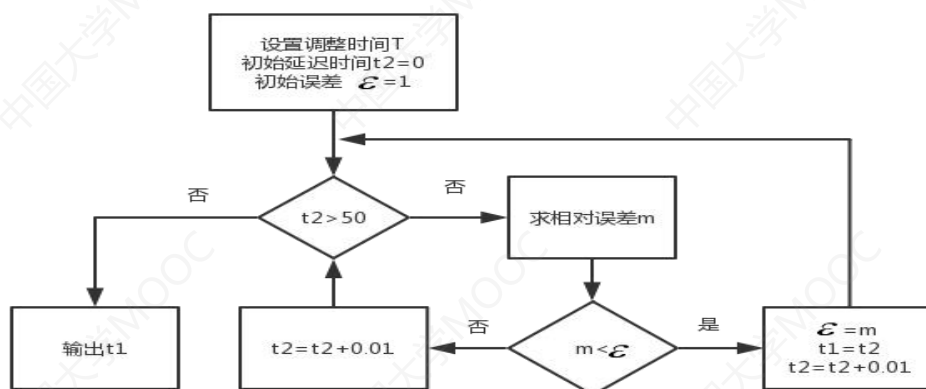


图 13 模型四循环遍历流程图

**Step1:** 输入初始值  $t_1=0ms$ ，此时油管内压力为 100MPa，当前最小相对误差  $\varepsilon$  为

1；此时判断  $t_1$  与 50ms 的大小关系，决定是否结束循环；

**Step2:** 若  $t_1 \leq 50ms$ ，带入模型计算此时高压管内压力大小，并计算相对误差结果为  $m$ ；若  $t_1 > 50ms$ ，结束循环，输出  $t_0, w_0$ 。

**Step3:** 比较  $m$  与  $\varepsilon$  的大小关系，若  $m < \varepsilon$ ，将  $m$  赋值给当前最小误差  $\varepsilon$ ，把  $t_1$  赋值给当前最优延迟时间  $t_0$ ，把  $\omega_1$  赋值给当前最优凸轮转动角速度  $\omega_0$ ，否则更新  $t_1$ ，重复 Step2；

### 5.3.3 模型四的结果与分析

当两喷油口交互喷油时，喷油口 C 可以比喷油口 B 的工作延迟时间  $t_1$  从 0ms ~ 50ms 以 0.01ms 的步长依次改变，分别计算相应的目标函数值，选出使得高压油管内压强保持在 100MPa 左右的最优的  $t_1$ ，及其对应的最优凸轮转动角速度  $\omega_1$ ，结果如下：

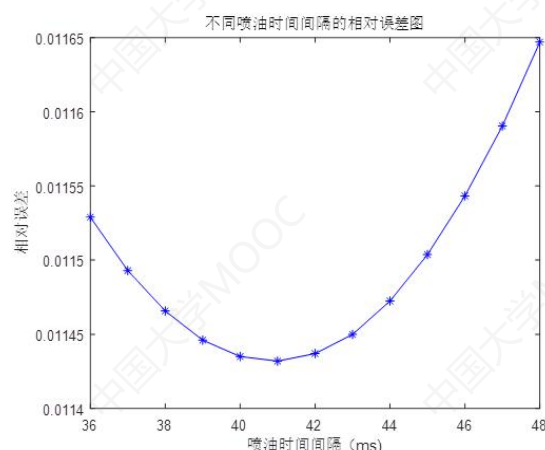


图 14 不同喷油间隔下的相对误差

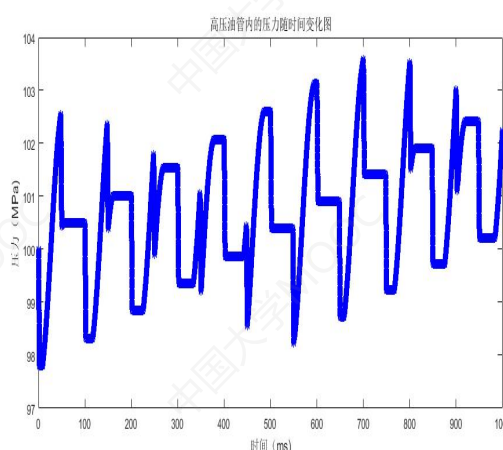


图 15 喷油嘴喷油时管内压力变化图

由图 14 可以看出当喷油器喷油时间间隔为 41ms 时相对误差最小，此时的管

内压力变化如图 15 所示。

当两喷油口同时喷油时，管内压力随时间的变化如下图所示，与图 15 比较可以看出该情况下压力变化不稳定，因此两喷油器交错喷油更有利于高压油管内压力的稳定。

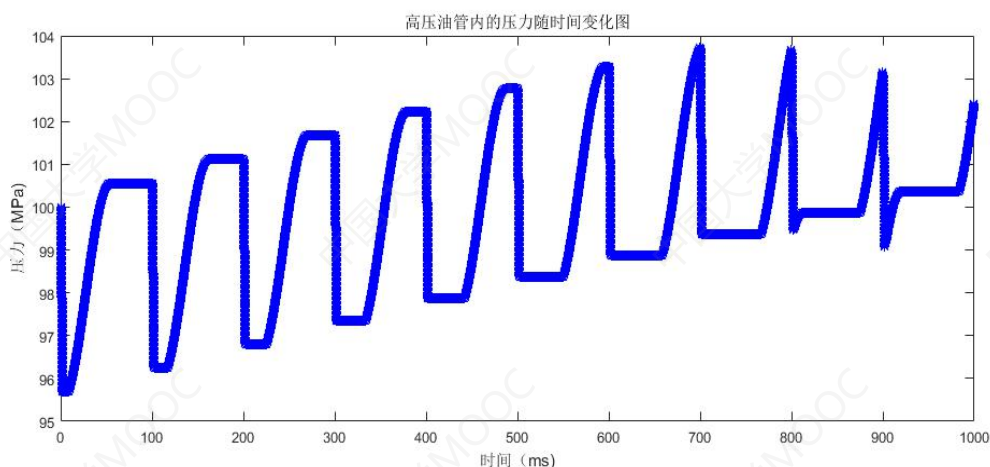


图 16 两喷油嘴同时喷油时管内压力随时间变化曲线

#### 5.3.4 增加单向减压阀的策略优化模型——模型五

在问题 3 第一问的基础上，两个喷油嘴交错喷油的时间差取最优值，增加一个单向减压阀，当高压油管内压强大于某一阈值时，单向减压阀打开直至高压油管内的压强小于该阈值关闭。对凸轮的转速进行优化使得高压油管内压强稳定在 100MPa 左右。建立新的使相对误差尽可能小的凸轮转动角速度规划模型。

##### 1. 模型的约束条件

在模型三约束条件的基础上对式（2-8）进行修改，即：

$$M_{G(t+\Delta t)} = M_{Gt} + m_{At} - m_{Bt} - m_{Ct} - m_{Dt} \quad (3-7)$$

同时增加新的约束：

$$m_{D\Delta t} = \begin{cases} \rho_{Gt} C S_D \sqrt{\frac{2(P_{Gt} - P_d)}{\rho_A}} \Delta t, & P_{Gt} > P_{\text{阈}} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3-8)$$

其中  $S_D$  表示单向减压阀的口径面积。

综上我们建立使相对误差尽可能小的凸轮转动角速度规划模型：  
目标函数：

$$\min \quad \varepsilon$$

决策变量：

凸轮转动角速度  $\omega$

约束条件:

$$\begin{cases}
 \theta_t = 3.14 + \omega t \\
 V_{E(t+\Delta t)} = V_{Et} + s_{柱}(r_t - r_{t+\Delta t}) \\
 m_{A\Delta t} = \begin{cases} \rho_{Et} V_{\Delta t} = \rho_{Et} Q_{At} \Delta t = \rho_{Et} C S_A \sqrt{\frac{2(P_{Et} - P_{Gt})}{\rho_A}} \Delta t, & P_{Et} > P_{Gt} \\ 0 & , \text{其他} \end{cases} \\
 M_{E(t+\Delta t)} = M_{Et} - m_{A\Delta t} \\
 \rho_{E(t+\Delta t)} = \frac{M_{E(t+\Delta t)}}{V_{E(t+\Delta t)}} \\
 P_{E(t+\Delta t)} = P_{Et} + \frac{E_{Et}}{\rho_{Et}} (\rho_{E(t+\Delta t)} - \rho_{Et}) \\
 m_{B\Delta t} = \rho_{Gt} Q_{Bt} \Delta t = \rho_{Gt} C S_{Bt} \sqrt{\frac{2(P_{Gt} - P_{out})}{\rho_{Gt}}} \Delta t \\
 m_{C\Delta t} = \rho_{Gt} Q_{Ct} \Delta t = \rho_{Gt} C S_{Ct} \sqrt{\frac{2(P_{Gt} - P_{out})}{\rho_{Gt}}} \Delta t \\
 s.t. \begin{cases} m_{D\Delta t} = \begin{cases} \rho_{Gt} C S_{Dt} \sqrt{\frac{2(P_{Gt} - P_d)}{\rho_A}} \Delta t, & P_{Gt} > P_{\text{阈}} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\ M_{G(t+\Delta t)} = M_{Gt} + m_{At} - m_{Bt} - m_{Ct} - m_{Dt} \\ \rho_{G(t+\Delta t)} = \frac{M_{G(t+\Delta t)}}{V} \\ P_{G(t+\Delta t)} = P_{Gt} + \frac{E_{Gt}}{\rho_{Gt}} (\rho_{G(t+\Delta t)} - \rho_{Gt}) \\ s_{Bt} = \min(s_{ZBt}, s_B) \\ s_{Ct} = \min(s_{ZCt}, s_C) \\ h_{c(t+t_1)} = h_{Bt} \\ \rho_{E0} = 0.8046, V_{E0} = 114, P_{E0} = 0.5, M_{E0} = 92.3349 \\ \rho_{G0} = 0.85, P_{G0} = 100 \\ M_{G0} = \rho_{G0} V \end{cases}
 \end{cases}$$

(3-9)

### 5.3.5 模型五的求解算法

在模型四的基础上,在喷油嘴C比喷油嘴口B的工作时间延迟 $t_1 ms$ 最优的基础上,增加单向减压伐,当高压油管内的压强大于阈值 $P_{\text{阈}}$ 时,单向减压发开启,为了确定最佳阈值延迟时间 $P_{\text{阈}}$ 及其对应的凸轮转动的最佳角速度 $\omega$ , $P_{\text{阈}}$ 从100Mpa到102Mpa以0.01Mpa为步长循环遍历,分别计算凸轮转动的最佳角速度

$\omega$ ，及其对应的目标函数，求出目标函数最小的阈值  $P_{\text{阈}}$ ，及其对应的凸轮转动角速度。

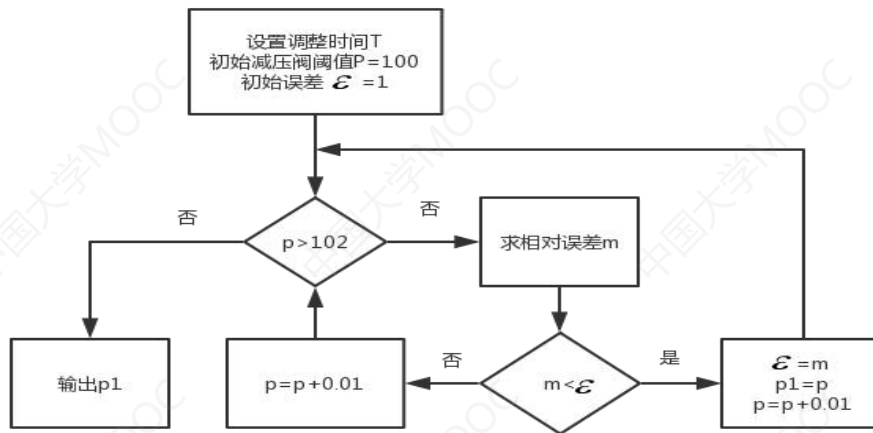


图 17 模型五循环遍历流程图

**Step1:** 输入初始值  $P_{\text{阈}}=100\text{Mpa}$ ，此时油管内压力为  $100\text{Mpa}$ ，当前最小相对误差  $\varepsilon$  为 1；此时判断  $P_{\text{阈}}$  与  $102\text{Mpa}$  的大小关系，决定是否结束循环；

**Step2:** 若  $P_{\text{阈}} \leq 102\text{Mpa}$ ，带入模型计算此时高压管内压力大小，并计算相对误差结果为  $m$ ；若  $P_{\text{阈}} > 102\text{Mpa}$ ，结束循环，输出  $P_{\text{阈}0}, w_0$ 。

**Step3:** 比较  $m$  与  $\varepsilon$  的大小关系，若  $m < \varepsilon$ ，将  $m$  赋值给当前最小误差  $\varepsilon$ ，把  $P_{\text{阈}}$  赋值给当前最优延迟时间  $P_{\text{阈}0}$ ，把  $\omega_1$  赋值给当前最优凸轮转动角速度  $\omega_0$ ，否则更新  $P_{\text{阈}}$ ，重复 Step2；

### 5.3.6 模型五的结果与分析

当高压油管内的压力大于阈值  $P_{\text{阈}}$  时单向减压阀开启  $P_{\text{阈}}$  从  $100\text{Mpa}$  到  $102\text{Mpa}$  以  $0.01\text{Mpa}$  的步长依次改变，分别计算相应的目标函数值，选出使得高压油管内压力保持  $100\text{Mpa}$  左右的最优的  $P_{\text{阈}}$ ，及其对应的最优凸轮转动角速度  $\omega_1$ ，不同的单向减压阀开启阈值  $P_{\text{阈}}$  对应的最优目标函数值如下表所示：

阈值 (Mpa)	凸轮角速度 (rad/ms)	相对误差
100	0.064	0.0073
100.2	0.064	0.0076
100.4	0.064	0.0082
100.6	0.064	0.0090
100.8	0.064	0.0099

说明当高压油管内压力大于 100Mpa 时，打开减压阀 D，使得高压油管内燃油压力保持稳定的能力最好，此时凸轮的角速度为 0.064rad/ms。

#### 5.4 模型的灵敏度分析

由于实际生活中高压油管的型号多样，不同型号的高压油管体积不同，因此我们选择通过改变高压油管的体积  $V$  对模型进行灵敏度分析，结果如下：

高压油管 体积 ( $\text{mm}^3$ )	0.7V	0.8V	0.9V	V	1.1V	1.2V	1.3V
单向阀开 启 时间 (ms)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
压力相对 误差	0.0108	0.0095	0.0084	0.0076	0.0069	0.0063	0.0059

观察上表可知，体积变化对高压油管内压力变化的相对误差变化较小，模型较为稳定。

## 六、模型的评价与改进

### 6.1 模型的评价

#### 6.1.1 模型的优点

1. 对模型求解采用循环遍历法，以 0.01ms 为步长进行迭代，所得结果较为准确。
2. 运用差分方程求解压力和密度的对应关系，避开了微分方程的繁琐，使得模型求解更为简便

#### 6.1.2 模型的缺点

- 1、弹性模量与压力的函数关系未知，运用插值的方法求表中未给定的压力对应的弹性模量，存在误差，可能会影响结果的准确度。
- 2、模型求解采用循环遍历的算法，算法复杂度较高，求解时间较长。

### 6.2 模型的改进

- 1、可通过查找相关资料进行物理机理分析，得到弹性模量与压力的函数关系，避免插值运算带来的误差。
- 2、采用遗传算法、粒子群算法等启发式算法来求解局部最优解，以避免循环遍历算法的求解时间较长的问题。

## 七、模型的应用与推广

本文对高压油管压力控制问题的研究具有很强的推广意义。依据题目所给压力变化量与密度变化量的正比关系得出的关于高压油管内压力的单目标优化模型可以应用于其他存在气体双向交换的问题例如对自行车打气等现实问题。



## 八、参考文献

- [1] 二冲程缸内直喷发动机建模和混合气形成仿真[D]牛燕华. 南京航空航天大学. 2016
- [2] 姜启源, 谢金星, 叶俊. 数学模型(第三版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003. 85-130.

## 九、附录

所有代码基于 MATLAB R2016b

question1-1: 稳定 100Mpa 相对误差图, 得到最优单向阀开启时长;

question1-2: 100Mpa 最优单向阀开启时长下高压油管内压力随时间的变化曲线;

question1-3: 2s, 5s, 10s 后达到 150Mpa 单向阀开启时长;

question1-4: 2s 后达到 150Mpa 高压油管内压力随时间的变化曲线;

question1-5: 稳定在 150Mpa 单向阀开启时长;

question2-1: 稳定在 100Mpa 最优凸轮转动角速度;

question2-2: 最优角速度下的高压油管内压力随时间的变化曲线;

question3-1: 稳定在 100Mpa 最优时间间隔;

question3-2: 最优时间间隔下的高压油管内压力随时间的变化曲线;

question3-3: 不同阈值下的最优角速度;

minganxingfenxi: 不同高压油管体积对模型的敏感性分析;

shujuchuli1: 求解 160Mpa 下的燃油密度

shujuchuli2: 求解 0.5Mpa 下的燃油密度

shujuchuli3: 求解针阀喷油的实际面积随时间的变化曲线

### question1-1

```
clear;clc
```

```
data=load('附表 3.txt');
```

```
x=data(:,1);
```

```
y=data(:,2);
```

```
ca=1.3085;
```

```
roug=0.8711;%高压侧燃油的密度, 第一题为定值
```

```
p1=160;%高压侧燃油的压力值
```

```
rou(1,1)=0.85;%rou 用来储存每次单向阀打开时的高压油管燃油密度
```

```
p(1,1)=100;%p 用来储存每次单向阀打开时的高压油管内压强
```

```
t(1,1)=0;%t 用来储存每次单向阀打开时的时间
```

```
m(1,1)=3.3379e+04;
```

```
v=3.9270e+04;
```

```
e=2171.4;
```

```
S2=2000*100;%喷油阶段的总面积
```

```
for z=25:35
```

```
    k=z/100;
```

```
S1=0;
```

```
S0=0;
```

```
for i=2:200000
```

```
    t(1,i)=t(1,i-1)+0.01;
```

```
    if mod(t(1,i),k+10)<=k
```

```
        q=ca*sqrt(2*(p1-p(1,i-1))/roug);
```

```

m1=q*0.01*roug;
else
    m1=0;
end
if mod(t(1,i),100)<=0.2
    m(1,i)=m1+m(1,i-1)-mod(t(1,i),100)*100*0.01*rou(1,i-1);
else if mod(t(1,i),100)<=2.2
    m(1,i)=m1+m(1,i-1)-20*0.01*rou(1,i-1);
    else if mod(t(1,i),100)<=2.4
        m(1,i)=m1+m(1,i-1)-(mod(t(1,i),100)*(-100)+240)*0.01*rou(1,i-1);
    else
        m(1,i)=m1+m(1,i-1);
    end
end
end
rou(1,i)=m(1,i)/v;
p(1,i)=p(1,i-1)+e/rou(1,i-1)*(rou(1,i)-rou(1,i-1));
e=interp1(x,y,p(1,i),'linear');
end
for n=1:200000
    S0=S0+0.01*abs(p(1,n)-100);
end
S(1,z)=S0/S2;
end

figure;
m=0.25:0.01:0.35;
plot(m,S(1,25:35),'*-');
xlabel('单向阀开启时长 (ms)');
ylabel('相对误差');
title('不同单向阀开启时长下的相对误差图');

```

### question1-2:

```

clear;clc
data=load('附表 3. txt');

x=data(:,1);
y=data(:,2);
ca=1.3085;
roug=0.8711;%高压侧燃油的密度，第一题为定值
p1=160;%高压侧燃油的压力值
rou(1,1)=0.85;%rou 用来储存每次单向阀打开时的高压油管燃油密度
p(1,1)=100;%p 用来储存每次单向阀打开时的高压油管内部压强

```

```

t(1,1)=0;%t 用来储存每次单向阀打开时的时间
m(1,1)=3.3379e+04;
v=3.9270e+04;
e=2171.4;
S2=200000;%喷油阶段的总面积
    z=30;
    k=z/100;
S1=0;
S0=0;
for i=2:200000
    t(1,i)=t(1,i-1)+0.01;
    if mod(t(1,i),k+10)<=k
        q=ca*sqrt(2*(p1-p(1,i-1))/roug);
        m1=q*0.01*roug;
    else
        m1=0;
    end
    if mod(t(1,i),100)<=0.2
        m(1,i)=m1+m(1,i-1)-mod(t(1,i),100)*100*0.01*rou(1,i-1);
    end
    if mod(t(1,i),100)<=2.2&&mod(t(1,i),100)>0.2
        m(1,i)=m1+m(1,i-1)-20*0.01*rou(1,i-1);
    end
    if mod(t(1,i),100)<=2.4&&mod(t(1,i),100)>2.2
        m(1,i)=m1+m(1,i-1)-(mod(t(1,i),100)*(-100)+240)*0.01*rou(1,i-1);
    end
    if mod(t(1,i),100)>2.4
        m(1,i)=m1+m(1,i-1);
    end
    rou(1,i)=m(1,i)/v;
    p(1,i)=p(1,i-1)+e/rou(1,i-1)*(rou(1,i)-rou(1,i-1));
    e=interp1(x,y,p(1,i),'linear');
end
for n=1:200000
    S0=S0+0.01*abs(p(1,n)-100);
end
S=S0/S2;

figure;
plot(t,p,'*b-');
xlabel('时间 (ms)');
ylabel('压力 (MPa)');
title('高压油管内的压力随时间变化图');

```

### question1-3:

```
clear;clc
data=load('附表 3. txt');

x=data(:,1);
y=data(:,2);
ca=1.3085;
roug=0.8711;%高压侧燃油的密度，第一题为定值
p1=160;%高压侧燃油的压力值
rou(1,1)=0.85;%rou 用来储存每次单向阀打开时的高压油管燃油密度
p(1,1)=100;%p 用来储存每次单向阀打开时的高压油管内部压强
t(1,1)=0;%t 用来储存每次单向阀打开时的时间
m(1,1)=3.3379e+04;
v=3.9270e+04;
e=2171.4;
for z=82:90
    k=z/100;

for i=2:200000
    t(1,i)=t(1,i-1)+0.01;
    if mod(t(1,i),k+10)<=k
        q=ca*sqrt(2*(p1-p(1,i-1))/roug);
        m1=q*0.01*roug;
    else
        m1=0;
    end
    if mod(t(1,i),100)<=0.2
        m(1,i)=m1+m(1,i-1)-mod(t(1,i),100)*100*0.01*rou(1,i-1);
    else if mod(t(1,i),100)<=2.2
        m(1,i)=m1+m(1,i-1)-20*0.01*rou(1,i-1);
    else if mod(t(1,i),100)<=2.4
        m(1,i)=m1+m(1,i-1)-(mod(t(1,i),100)*(-100)+240)*0.01*rou(1,i-1);
    else
        m(1,i)=m1+m(1,i-1);
    end
end
end
rou(1,i)=m(1,i)/v;
p(1,i)=p(1,i-1)+e/rou(1,i-1)*(rou(1,i)-rou(1,i-1));
e=interp1(x,y,p(1,i),'linear');
end
```

```

S(1,z)=abs(p(1,i)-150);
end
figure;
m=0.82:0.01:0.90
plot(m,S(1,82:90),'*b-');
xlabel('单向阀开启时长 (ms)');
ylabel('绝对误差');
title('不同单向阀开启时长下的绝对误差图');

```

#### question1-4

```

clear;clc
data=load('附表 3. txt');

x=data(:,1);
y=data(:,2);
ca=1.3085;
roug=0.8711;%高压侧燃油的密度，第一题为定值
p1=160;%高压侧燃油的压力值
rou(1,1)=0.85;%rou 用来储存每次单向阀打开时的高压油管燃油密度
p(1,1)=100;%p 用来储存每次单向阀打开时的高压油管内部压强
t(1,1)=0;%t 用来储存每次单向阀打开时的时间
m(1,1)=3.3379e+04;
v=3.9270e+04;
e=2171.4;
z=88;
k=z/100;
S1=0;
for i=2:200000
    t(1,i)=t(1,i-1)+0.01;
    if mod(t(1,i),k+10)<=k
        q=ca*sqrt(2*(p1-p(1,i-1))/roug);
        m1=q*0.01*roug;
    else
        m1=0;
    end
    if mod(t(1,i),100)<=0.2
        m(1,i)=m1+m(1,i-1)-mod(t(1,i),100)*100*0.01*rou(1,i-1);
    end
    if mod(t(1,i),100)<=2.2&&mod(t(1,i),100)>0.2
        m(1,i)=m1+m(1,i-1)-20*0.01*rou(1,i-1);
    end
    if mod(t(1,i),100)<=2.4&&mod(t(1,i),100)>2.2
        m(1,i)=m1+m(1,i-1)-(mod(t(1,i),100)*(-100)+240)*0.01*rou(1,i-1);
    end
end

```

```

        end
        if mod(t(1,i),100)>2.4
            m(1,i)=m1+m(1,i-1);
        end
        rou(1,i)=m(1,i)/v;
        p(1,i)=p(1,i-1)+e/rou(1,i-1)*(rou(1,i)-rou(1,i-1));
        e=interp1(x,y,p(1,i),'linear');
    end

figure;
plot(t,p,'.b-');
xlabel('时间 (ms)');
ylabel('压力 (MPa)');
title('高压油管内的压力随时间变化图');

```

### question1-5

```

clear;clc
data=load('附表 3.txt');

x=data(:,1);
y=data(:,2);
ca=1.3085;
roug=0.8711;%高压侧燃油的密度，第一题为定值
p1=160;%高压侧燃油的压力值
rou(1,1)=0.85;%rou 用来储存每次单向阀打开时的高压油管燃油密度
p(1,1)=150;%p 用来储存每次单向阀打开时的高压油管内部压强
t(1,1)=0;%t 用来储存每次单向阀打开时的时间
m(1,1)=3.3379e+04;
v=3.9270e+04;
e=2171.4;
S2=200000;%喷油阶段的总面积
    z=75;
    k=z/100;
S1=0;
S0=0;
for i=2:200000
    t(1,i)=t(1,i-1)+0.01;
    if mod(t(1,i),k+10)<=k
        q=ca*sqrt(2*(p1-p(1,i-1))/roug);
        m1=q*0.01*roug;
    else
        m1=0;
    end
end

```



```

    if mod(t(1,i),100)<=0.2
        m(1,i)=m1+m(1,i-1)-mod(t(1,i),100)*100*0.01*rou(1,i-1);
    end
    if mod(t(1,i),100)<=2.2&&mod(t(1,i),100)>0.2
        m(1,i)=m1+m(1,i-1)-20*0.01*rou(1,i-1);
    end
    if mod(t(1,i),100)<=2.4&&mod(t(1,i),100)>2.2
        m(1,i)=m1+m(1,i-1)-(mod(t(1,i),100)*(-100)+240)*0.01*rou(1,i-1);
    end
    if mod(t(1,i),100)>2.4
        m(1,i)=m1+m(1,i-1);
    end
    rou(1,i)=m(1,i)/v;
    p(1,i)=p(1,i-1)+e/rou(1,i-1)*(rou(1,i)-rou(1,i-1));
    e=interp1(x,y,p(1,i),'linear');
end
for n=1:200000
    S0=S0+0.01*abs(p(1,n)-150);
end
S=S0/S2;

```

### question2-1

```

clear;clc
data=load('附表 3. txt');
data1=load('附表 1. txt');
x=data(:,1);
y=data(:,2);
x1=data1(:,1);
y1=data1(:,2);
ca=1.3085;
ca2=0.85*pi*0.7*0.7;
p1(1,1)=0.5;%p1 保存高压油泵的压力
p2(1,1)=100;%p2 保存高压油管的压力
rou1(1,1)=0.8046;%rou1 保存高压油泵的密度
rou2(1,1)=0.850;%rou2 保存高压油管的密度
s= 19.635;%柱塞腔底面积
r(1,1)=2.413;
v1(1,1)= 114.7587;%保存高压油泵的体积
m1(1,1)=92.3349;%保存高压油泵的质量
m2(1,1)=3.3379e+04;%保存高压油管的质量
t(1,1)=0;
v2=3.9270e+04;
e1=1540.8;

```

```

e2=2171.4;
S2=2450;
for z=23:30
    w=z/1000;
    S1=0;
% pen=zeros(100,2);%第二列用来保存喷出的质量
deltam=0;
rad=3.14;
for i=2:100000
    t(1,i)=t(1,i-1)+0.01;
    if p1(1,i-1)>p2(1,i-1)

deltam=rou1(1,i-1)*ca*sqrt(2*(p1(1,i-1)-p2(1,i-1))/rou1(1,i-1))*0.01;
    else
        deltam=0;
    end
    A=load('附表 2. txt');
    C=0.85;
    plow=5;
    a=mod(i,10000);
    if a<=245
        h0=A(a+1,2);
    else
        h0=0;
    end

S1=min(pi*0.7*0.7,pi*h0*tan(9/180*2*pi)*cos(9/180*2*pi)*(h0*tan(9/180
*2*pi)*cos(9/180*2*pi)*cos(9/180*2*pi)+1.25+1.25));
    Q=C*S1*sqrt(2*(p2(1,i-1)-plow)/rou2(1,i-1));
    V=Q*0.01;

    deltam1=rou2(1,i-1)*V;
    m2(1,i)=m2(1,i-1)+deltam-deltam1;
    rou2(1,i)=m2(1,i)/v2;
    p2(1,i)=p2(1,i-1)+e2/rou2(1,i-1)*(rou2(1,i)-rou2(1,i-1));
    e2=interp1(x,y,p2(1,i),'linear');
%更新高压油泵的各项指标
    rad=rad+0.01*w;
%    k=mod(i,628);
    rad0=mod(rad,6.28);
    r(1,i)=interp1(x1,y1,rad0,'linear');
% r(1,i)=data1(k,2);
    h=r(1,i-1)-r(1,i);
    v1(1,i)=v1(1,i-1)+h*s;

```

```

m1(1,i)=m1(1,i-1)-deltam;
rou1(1,i)=m1(1,i)/v1(1,i);
    p1(1,i)=p1(1,i-1)+e1/rou1(1,i-1)*(rou1(1,i)-rou1(1,i-1));
    if p1(1,i-1)<p2(1,i-1)&&h>0
        m1(1,i)=m1(1,1);

        % rou1(1,i)=0.8046;
        p1(1,i)=0.5;
        deltam=0;
    end

    if p1(1,i)<0
        p1(1,i)=0.5;
        rou1(1,i)=0.8046;
    end
    e1=interp1(x,y,p1(1,i),'linear');

end
for n=0:9
    for j=10000*n+1:10000*n+245
        S1=S1+0.01*abs(p2(1,j)-100);
    end
end
S(1,z)=S1/S2;
end
w=0.023:0.001:0.030;
figure;plot(w,S(1,23:30),'*b-')
xlabel('角速度(rad/ms)');
ylabel('相对误差');
title('不同角速度下的相对误差图');

```

## question2-2

```

clear;clc
data=load('附表 3.txt');
data1=load('附表 1.txt');
x=data(:,1);
y=data(:,2);
x1=data1(:,1);
y1=data1(:,2);
ca=1.3085;
ca2=0.85*pi*0.7*0.7;
p1(1,1)=0.5;%p1 保存高压油泵的压力
p2(1,1)=100;%p2 保存高压油管的压力
rou1(1,1)=0.8046;%rou1 保存高压油泵的密度

```

```

rou2(1,1)=0.850;%rou2 保存高压油管的密度
s= 19.635;%柱塞腔底面积
r(1,1)=2.413;
v1(1,1)= 114.7587;%保存高压油泵的体积
m1(1,1)=92.3349;%保存高压油泵的质量
m2(1,1)=3.3379e+04;%保存高压油管的质量
t(1,1)=0;
v2=3.9270e+04;
e1=1540.8;
e2=2171.4;
S2=2450;
z=29;
w=z/1000;
S1=0;
deltam=0;
rad=3.14;
for i=2:300000
    t(1,i)=t(1,i-1)+0.01;
    if p1(1,i-1)>p2(1,i-1)

deltam=roul(1,i-1)*ca*sqrt(2*(p1(1,i-1)-p2(1,i-1))/roul(1,i-1))*0.01;
    else
        deltam=0;
    end
    A=load('附表 2. txt');
    C=0.85;
    plow=5;
    a=mod(i,10000);
    if a<=245
        h0=A(a+1,2);
    else
        h0=0;
    end

S1=min(pi*0.7*0.7,pi*h0*tan(9/180*2*pi)*cos(9/180*2*pi)*(h0*tan(9/180
*2*pi)*cos(9/180*2*pi)*cos(9/180*2*pi)+1.25+1.25));
    Q=C*S1*sqrt(2*(p2(1,i-1)-plow)/rou2(1,i-1));
    V=Q*0.01;

    deltam1=rou2(1,i-1)*V;
    m2(1,i)=m2(1,i-1)+deltam-deltam1;
    rou2(1,i)=m2(1,i)/v2;
    p2(1,i)=p2(1,i-1)+e2/rou2(1,i-1)*(rou2(1,i)-rou2(1,i-1));
    e2=interp1(x,y,p2(1,i),'linear');

```

```

%更新高压油泵的各项指标
    rad=rad+0.01*w;
%    k=mod(i,628);
    rad0=mod(rad,6.28);
    r(1,i)=interp1(x1,y1,rad0,'linear');
% r(1,i)=data1(k,2);
    h=r(1,i-1)-r(1,i);
    v1(1,i)=v1(1,i-1)+h*s;
m1(1,i)=m1(1,i-1)-deltam;
roul(1,i)=m1(1,i)/v1(1,i);
    p1(1,i)=p1(1,i-1)+e1/roul(1,i)*(roul(1,i)-roul(1,i-1));
    if p1(1,i-1)<p2(1,i-1)&&h>0
        m1(1,i)=m1(1,1);

        % rou1(1,i)=0.8046;
        p1(1,i)=0.5;
        deltam=0;
    end

    if p1(1,i)<0
        p1(1,i)=0.5;
        rou1(1,i)=0.8046;
    end
    e1=interp1(x,y,p1(1,i),'linear');

end
figure;
plot(t,p2,'*b-');
xlabel('时间 (ms)');
ylabel('压力 (MPa)');
title('高压油管内的压力随时间变化图');

```

### question3-1

```

clear;clc
data=load('附表 3.txt');
data1=load('附表 1.txt');
x=data(:,1);
y=data(:,2);
x1=data1(:,1);
y1=data1(:,2);
ca=1.3085;
ca2=0.85*pi*0.7*0.7;
p1(1,1)=0.5;%p1 保存高压油泵的压力
p2(1,1)=100;%p2 保存高压油管的压力

```

```

rou1(1,1)=0.8046;%rou1 保存高压油泵的密度
rou2(1,1)=0.850;%rou2 保存高压油管的密度
s= 19.635;%柱塞腔底面积
r(1,1)=2.413;
v1(1,1)= 114.7587;%保存高压油泵的体积
m1(1,1)=92.3349;%保存高压油泵的质量
m2(1,1)=3.3379e+04;%保存高压油管的质量
t(1,1)=0;
v2=3.9270e+04;
e1=1540.8;
e2=2171.4;
S2=1000*100;
for g=3600:100:4800

    z=58;
    w=z/1000;
    S1=0;
    S0=0;
    deltam=0;
    rad=3.14;
    T=0.01;
    for i=2:100000
        t(1,i)=t(1,i-1)+T;
        if p1(1,i-1)>p2(1,i-1)

            deltam=rou1(1,i-1)*ca*sqrt(2*(p1(1,i-1)-p2(1,i-1))/rou1(1,i-1))*T;
            else
                deltam=0;
            end
            A=load('附表 2. txt');
            C=0.85;
            plow=5;
            a=mod(i,10000);
            if a<=245
                h0=A(a+1,2);
            else
                h0=0;
            end

            S1=min(pi*0.7*0.7,pi*h0*tan(9/180*2*pi)*cos(9/180*2*pi)*(h0*tan(9/180
            *2*pi)*cos(9/180*2*pi)*cos(9/180*2*pi)+1.25+1.25));
            Q=C*S1*sqrt(2*(p2(1,i-1)-plow)/rou2(1,i-1));
            V=Q*T;

```

```

        b=mod(i, 10000);
        if b<=245+g&&b>g
            h0=A(b-g+1, 2);
        else
            h0=0;
        end

S1=min(pi*0.7*0.7, pi*h0*tan(9/180*2*pi)*cos(9/180*2*pi)*(h0*tan(9/180
*2*pi)*cos(9/180*2*pi)*cos(9/180*2*pi)+1.25+1.25));
        Q=C*S1*sqrt(2*(p2(1, i-1)-p1ow)/rou2(1, i-1));
        V1=Q*T;

        deltam1=rou2(1, i-1)*V;
        deltam2=rou2(1, i-1)*V1;
        m2(1, i)=m2(1, i-1)+deltam-deltam1-deltam2;
        rou2(1, i)=m2(1, i)/v2;
        p2(1, i)=p2(1, i-1)+e2/rou2(1, i-1)*(rou2(1, i)-rou2(1, i-1));
        e2=interp1(x, y, p2(1, i), 'linear');
%更新高压油泵的各项指标
        rad=rad+T*w;
%        k=mod(i, 628);
        rad0=mod(rad, 6.28);
        r(1, i)=interp1(x1, y1, rad0, 'linear');
% r(1, i)=data1(k, 2);
        h=r(1, i-1)-r(1, i);
        v1(1, i)=v1(1, i-1)+h*s;
m1(1, i)=m1(1, i-1)-deltam;
rou1(1, i)=m1(1, i)/v1(1, i);
        p1(1, i)=p1(1, i-1)+e1/rou1(1, i-1)*(rou1(1, i)-rou1(1, i-1));
        if p1(1, i-1)<p2(1, i-1)&&h>0
            m1(1, i)=m1(1, 1);

        % rou1(1, i)=0.8046;
        p1(1, i)=0.5;
        deltam=0;
    end

    if p1(1, i)<0
        p1(1, i)=0.5;
        rou1(1, i)=0.8046;
    end
    e1=interp1(x, y, p1(1, i), 'linear');

```



```

end
for n=1:100000
    S0=S0+T*abs(p2(1,n)-100);
end

S(g/100,z)=S0/S2;
end
figure;
m=36:48;
plot(m,S(36:48,58),'*b-');
xlabel(' 喷油时间间隔 (ms)');
ylabel(' 相对误差');
title(' 不同喷油时间间隔的相对误差图');

```

### question3-2

```

clear;clc
data=load('附表 3. txt');
data1=load('附表 1. txt');
x=data(:,1);
y=data(:,2);
x1=data1(:,1);
y1=data1(:,2);
ca=1.3085;
ca2=0.85*pi*0.7*0.7;
p1(1,1)=0.5;%p1 保存高压油泵的压力
p2(1,1)=100;%p2 保存高压油管的压力
rou1(1,1)=0.8046;%rou1 保存高压油泵的密度
rou2(1,1)=0.850;%rou2 保存高压油管的密度
s= 19.635;%柱塞腔底面积
r(1,1)=2.413;
v1(1,1)= 114.7587;%保存高压油泵的体积
m1(1,1)=92.3349;%保存高压油泵的质量
m2(1,1)=3.3379e+04;%保存高压油管的质量
t(1,1)=0;
v2=3.9270e+04;
e1=1540.8;
e2=2171.4;
S2=1000*100;
g=4100

z=58;
w=z/1000;
S1=0;
S0=0;

```

```

deltam=0;
rad=3.14;
T=0.01;
for i=2:100000
    t(1,i)=t(1,i-1)+T;
    if p1(1,i-1)>p2(1,i-1)

deltam=rou1(1,i-1)*ca*sqrt(2*(p1(1,i-1)-p2(1,i-1))/rou1(1,i-1))*T;
    else
        deltam=0;
    end
    A=load('附表 2. txt');
    C=0.85;
    plow=5;
    a=mod(i,10000);
    if a<=245
        h0=A(a+1,2);
    else
        h0=0;

    end

S1=min(pi*0.7*0.7,pi*h0*tan(9/180*2*pi)*cos(9/180*2*pi)*(h0*tan(9/180
*2*pi)*cos(9/180*2*pi)*cos(9/180*2*pi)+1.25+1.25));
    Q=C*S1*sqrt(2*(p2(1,i-1)-plow)/rou2(1,i-1));
    V=Q*T;

    b=mod(i,10000);
    if b<=245+g&& b>g
        h0=A(b-g+1,2);
    else
        h0=0;
    end

S1=min(pi*0.7*0.7,pi*h0*tan(9/180*2*pi)*cos(9/180*2*pi)*(h0*tan(9/180
*2*pi)*cos(9/180*2*pi)*cos(9/180*2*pi)+1.25+1.25));
    Q=C*S1*sqrt(2*(p2(1,i-1)-plow)/rou2(1,i-1));
    V1=Q*T;

    deltam1=rou2(1,i-1)*V;
    deltam2=rou2(1,i-1)*V1;
    m2(1,i)=m2(1,i-1)+deltam-deltam1-deltam2;
    rou2(1,i)=m2(1,i)/v2;
    p2(1,i)=p2(1,i-1)+e2/rou2(1,i-1)*(rou2(1,i)-rou2(1,i-1));

```

```

        e2=interp1(x,y,p2(1,i),'linear');
%更新高压油泵的各项指标
        rad=rad+T*w;
%        k=mod(i,628);
        rad0=mod(rad,6.28);
        r(1,i)=interp1(x1,y1,rad0,'linear');
% r(1,i)=data1(k,2);
        h=r(1,i-1)-r(1,i);
        v1(1,i)=v1(1,i-1)+h*s;
m1(1,i)=m1(1,i-1)-deltam;
roul(1,i)=m1(1,i)/v1(1,i);
        p1(1,i)=p1(1,i-1)+e1/roul(1,i-1)*(roul(1,i)-roul(1,i-1));
        if p1(1,i-1)<p2(1,i-1)&&h>0
            m1(1,i)=m1(1,1);

        % rou1(1,i)=0.8046;
        p1(1,i)=0.5;
        deltam=0;
end

        if p1(1,i)<0
            p1(1,i)=0.5;
            rou1(1,i)=0.8046;
        end
        e1=interp1(x,y,p1(1,i),'linear');

end
for n=1:100000
    S0=S0+T*abs(p2(1,n)-100);
end

S(g/100,z)=S0/S2;

figure;
plot(t,p2,'*b-');
xlabel('时间 (ms)');
ylabel('压力 (MPa)');
title('高压油管内的压力随时间变化图');

```

### question3-3

```

clear;clc
data=load('附表 3.txt');
data1=load('附表 1.txt');

```

```

x=data(:,1);
y=data(:,2);
x1=data1(:,1);
y1=data1(:,2);
ca=1.3085;
ca2=0.85*pi*0.7*0.7;
p1(1,1)=0.5;%p1 保存高压油泵的压力
p2(1,1)=100;%p2 保存高压油管的压力
rou1(1,1)=0.8046;%rou1 保存高压油泵的密度
rou2(1,1)=0.850;%rou2 保存高压油管的密度
s= 19.635;%柱塞腔底面积
r(1,1)=2.413;
v1(1,1)= 114.7587;%保存高压油泵的体积
m1(1,1)=92.3349;%保存高压油泵的质量
m2(1,1)=3.3379e+04;%保存高压油管的质量
t(1,1)=0;
v2=3.9270e+04;
e1=1540.8;
e2=2171.4;
S2=1000*100;
g=41;%g 表示两喷油嘴的时间间隔

for z=63:65

    w=z/1000;
    S1=0;
    S0=0;
    deltam=0;
    rad=3.14;
    T=0.01;
    for i=2:100000
        t(1,i)=t(1,i-1)+T;
        %A 口进入质量
        if p1(1,i-1)>p2(1,i-1)

            deltam=rou1(1,i-1)*ca*sqrt(2*(p1(1,i-1)-p2(1,i-1))/rou1(1,i-1))*T;
            else
                deltam=0;
            end
            %D 口出去质量
            if p2(1,i-1)>101

                deltam3=rou2(1,i-1)*ca*sqrt(2*(p2(1,i-1)-0.5)/rou2(1,i-1))*T;
                else

```

```

        deltam3=0;
    end
    A=load('附表 2. txt');
    C=0.85;
    plow=5;
    a=mod(i,10000);
    %B 喷口出去质量
    if a<=245
        h0=A(a+1,2);
    else
        h0=0;
    end

    S1=min(pi*0.7*0.7,pi*h0*tan(9/180*2*pi)*cos(9/180*2*pi)*(h0*tan(9/180
    *2*pi)*cos(9/180*2*pi)*cos(9/180*2*pi)+1.25+1.25));
    Q=C*S1*sqrt(2*(p2(1,i-1)-plow)/rou2(1,i-1));
    V=Q*T;

    b=mod(i,10000);
    %C 喷口出去质量
    if b<=245+g&& b>g
        h0=A(b-g+1,2);
    else
        h0=0;
    end

    S1=min(pi*0.7*0.7,pi*h0*tan(9/180*2*pi)*cos(9/180*2*pi)*(h0*tan(9/180
    *2*pi)*cos(9/180*2*pi)*cos(9/180*2*pi)+1.25+1.25));
    Q=C*S1*sqrt(2*(p2(1,i-1)-plow)/rou2(1,i-1));
    V1=Q*T;

    deltam1=rou2(1,i-1)*V;
    deltam2=rou2(1,i-1)*V1;
    m2(1,i)=m2(1,i-1)+deltam-deltam1-deltam2-deltam3;
    rou2(1,i)=m2(1,i)/v2;
    p2(1,i)=p2(1,i-1)+e2/rou2(1,i-1)*(rou2(1,i)-rou2(1,i-1));
    e2=interp1(x,y,p2(1,i),'linear');
    %更新高压油泵的各项指标
    rad=rad+T*w;
    %    k=mod(i,628);
    rad0=mod(rad,6.28);
    r(1,i)=interp1(x1,y1,rad0,'linear');
    % r(1,i)=data1(k,2);

```

```

        h=r(1,i-1)-r(1,i);
        v1(1,i)=v1(1,i-1)+h*s;
        m1(1,i)=m1(1,i-1)-deltam;
        rou1(1,i)=m1(1,i)/v1(1,i);
        p1(1,i)=p1(1,i-1)+e1/rou1(1,i-1)*(rou1(1,i)-rou1(1,i-1));
        if p1(1,i-1)<p2(1,i-1)&&h>0
            m1(1,i)=m1(1,1);

        % rou1(1,i)=0.8046;
        p1(1,i)=0.5;
        deltam=0;
    end

    if p1(1,i)<0
        p1(1,i)=0.5;
        rou1(1,i)=0.8046;
    end
    e1=interp1(x,y,p1(1,i),'linear');

end
for n=1:100000
    S0=S0+T*abs(p2(1,n)-100);
end

S(1,z)=S0/S2;
end
figure;
plot(t,p2,'*b-');
xlabel('时间 (ms)');
ylabel('压力 (MPa)');
title('高压油管内的压力随时间变化图');

```

### **minganxingfenxi:**

```

clear;clc
data=load('附表 3. txt');

x=data(:,1);
y=data(:,2);
ca=1.3085;
roug=0.8711;%高压侧燃油的密度，第一题为定值
p1=160;%高压侧燃油的压力值
rou(1,1)=0.85;%rou 用来储存每次单向阀打开时的高压油管燃油密度

```

```

p(1,1)=100;%p 用来储存每次单向阀打开时的高压油管内部压强
t(1,1)=0;%t 用来储存每次单向阀打开时的时间
m(1,1)=3.3379e+04*0.8;
v=3.9270e+04*0.8;
e=2171.4;
S2=2000*100;
for z=25:35
    k=z/100;
S1=0;
S0=0;

for i=2:200000
    t(1,i)=t(1,i-1)+0.01;
    if mod(t(1,i),k+10)<=k
        q=ca*sqrt(2*(p1-p(1,i-1))/roug);
        m1=q*0.01*roug;
    else
        m1=0;
    end
    if mod(t(1,i),100)<=0.2
        m(1,i)=m1+m(1,i-1)-mod(t(1,i),100)*100*0.01*rou(1,i-1);
    else if mod(t(1,i),100)<=2.2
        m(1,i)=m1+m(1,i-1)-20*0.01*rou(1,i-1);
    else if mod(t(1,i),100)<=2.4
        m(1,i)=m1+m(1,i-1)-(mod(t(1,i),100)*(-100)+240)*0.01*rou(1,i-1);
    else
        m(1,i)=m1+m(1,i-1);
    end
end
rou(1,i)=m(1,i)/v;
p(1,i)=p(1,i-1)+e/rou(1,i)*(rou(1,i)-rou(1,i-1));
e=interp1(x,y,p(1,i),'linear');
end
for n=1:200000
    S0=S0+0.01*abs(p(1,n)-100);
end
S(1,z)=S0/S2;
end

figure;
m=0.25:0.01:0.35;
plot(m,S(1,25:35),'*-');

```

```

xlabel('单向阀开启时长 (ms)');
ylabel('相对误差');
title('不同单向阀开启时长下的相对误差图');

```

#### shujuchuli1:

```

%%该代码是用来运算 160Mpa 时的燃油密度
rou=0.850;
p=100;
A=load('question1_3.txt');
while p<=160
    index=find(A(:,1)==p(end));
    E=A(index,2);
    p(end+1)=p(end)+0.5;
    rou(end+1)=0.5*rou(end)/E+rou(end);
end
rou(121)

```

#### shujuchuli2:

```

%%该代码是用来运算 0.5Mpa 时的燃油密度
rou=0.850;
p=100;
A=load('question1_3.txt');
while p>0.5
    index=find(A(:,1)==p(end));
    E=A(index,2);
    p(end+1)=p(end)-0.5;
    rou(end+1)=-0.5*rou(end)/E+rou(end);
end
rou(end)

```

#### shujuchuli3:

```

%%针阀喷油的面积随时间变化的曲线,并且求得一次喷油质量
clc
clear
A=load('question1_2.txt');
S=[];
C=0.85;
P=100;
rou=0.85;
plow=0.5;
rad=9/180*pi;
for i=1:size(A,1)
    S(end+1)=pi*sin(rad)*(A(i,2)*sin(rad)*cos(rad)+2.5);
    smin(i)=min(S(i),pi*0.7*0.7);
end

```



```
end  
plot(A(:, 1), smin);  
title(' 喷油嘴实际喷油小孔面积曲线图');  
xlabel(' 时间(ms)');  
ylabel(' 实际喷油面积 mm2')
```