

# 基于多目标优化的高压油管压力控制模型的研究

## 摘要

高压油管是高压油路的组成部分，高压油管中燃油进入和喷出是许多燃油发动机工作的基础。本文在**泵—管—嘴式喷油系统**上建立了高压油泵的数学物理模型，并针对不同压力情况对喷油和供油策略进行调整。

针对问题一，燃油在高压油泵入口处的压力和高压油管中的压力各不相同，通过 **MATLAB** 构建数学模型由弹性模量与压力的关系拟合出密度与压力的关系式。随后利用定积分方法计算喷油嘴 **B** 周期性喷油速率，构建一定时间内入口 **A** 处和喷油嘴 **B** 的流量方程，求得稳定在 **100 MPa** 情况下 **A** 口的单向阀开启时长为 **0.2837ms**，同时在此基础上改变模型参数，利用**蒙特卡洛算法**求得 **2s**、**5s**、**10s** 调整过程后达到 **150 MPa** 平衡状态的 **A** 口单向阀的开启策略。

针对问题二，通过**傅里叶变换**构建凸轮边缘曲线函数可得凸轮极径与极角的关系以及使用 *Gaussian*（正态分布）函数拟合针阀运动过程，从而改进问题一的模型，建立 **A** 处提供燃油速率与高压油泵凸轮转动的角速度的关系和喷油嘴 **B** 针阀升程周期与喷孔喷出燃油速率的关系的函数模型。由尽量稳定在 **100 MPa** 的平衡条件下代入**理想气体状态方程**与函数模型求解得高压油泵凸轮角速度应为  $9.04\pi \text{ rad/s}$ 。

针对问题三，首先对问题一及问题二中使用的模型进行改进，代入各参数后利用**动态规划**求得增加喷油嘴 **C** 后喷油和供油的调整策略。在增加单向减压阀 **D** 后，综合考虑高压油泵 **A**、喷油嘴 **B**、喷油嘴 **C**、减压阀 **D** 的控制情况建立连续方程，并在多目标变化下利用**蒙特卡洛算法**求得最优解，得出高压油泵和减压阀的控制方案。

最后，将模型得到的数据代入生活实际应用，给出模型的优缺点，对模型进行客观评价。

**关键词：** 高压油管 曲线拟合 蒙特卡洛算法 理想气体状态方程 多目标优化

# 一、问题重述

## 1.1 问题的背景

燃油进入和喷出高压油管是许多燃油发动机工作的基础，燃油经过高压油泵进入高压油管，再由喷口喷出。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。

## 1.2 问题的叙述

根据题中的所给的信息，本文将题目中描述的三大问题细分为以下五个小问，做出假设并建立数学模型进行求解。

**问题 1:** 已知某型号高压油管的内腔长度为 500mm，内直径为 10mm，供油入口 A 处小孔的直径为 1.4mm，通过单向阀开关控制供油时间的长短，单向阀每打开一次后就要关闭 10ms。喷油器每秒工作 10 次，每次工作时喷油时间为 2.4ms。高压油泵在入口处的压力恒为 160 MPa，高压油管内的初始压力为 100 MPa。（1）如果要将高压油管内的压力稳定在 100 MPa 左右，如何设置单向阀每次开启的时长？（2）如果要将高压油管内的压力从 100 MPa 增加到 150 MPa，且分别经过约 2 s、5 s 和 10 s 的调整过程后稳定在 150 MPa，单向阀开启的时长应如何调整？

**问题2:** 在实际工作过程中，高压油管入口处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。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。柱塞腔内直径为5mm，柱塞运动到上止点位置时，柱塞腔残余容积为20mm<sup>3</sup>。柱塞运动到下止点时，低压燃油会充满柱塞腔，低压燃油的压力为0.5 MPa。已知针阀直径为2.5mm、密封座是半角为9°的圆锥，最下端喷孔的直径为1.4mm。针阀升程为0时，针阀关闭；针阀升程大于0时，针阀开启，燃油向喷孔流动，通过喷孔喷出。（1）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100 MPa左右。

**问题3:** 在问题2的基础上，再增加一个喷油嘴。（1）每个喷嘴喷油规律相同，喷

油和供油策略应如何调整？（2）为了更有效地控制高压油管的压力，现计划在D处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。

## 二、问题分析

针对问题一，燃油在高压油泵入口处的压力和高压油管中的压力各不相同，通过MATLAB构建数学模型由弹性模量与压力的关系拟合出密度与压力的关系式。随后利用定积分方法计算喷油嘴B周期性喷油速率，构建一定时间内入口A处和喷油嘴B的流量方程，求得稳定在100 MPa情况下A口的单向阀开启时长为0.2837ms，同时在此基础上改变模型参数，利用蒙特卡洛算法求得2s、5s、10s调整过程后达到150 MPa平衡状态的A口单向阀的开启策略。

针对问题二，通过傅里叶变换构建凸轮边缘曲线函数可得凸轮极径与极角的关系以及使用Gaussian（正态分布）函数拟合针阀运动过程，从而改进问题一的模型，建立A处提供燃油速率与高压油泵凸轮转动的角速度的关系和喷油嘴B针阀升程周期与喷孔喷出燃油速率的关系的函数模型。由尽量稳定在100 MPa的平衡条件下带入函数模型求解得高压油泵凸轮角速度应为 $9.04\pi$  rad/s。

针对问题三，首先对问题一及问题二中使用的模型进行改进，代入各参数后利用动态规划求得增加喷油嘴C后喷油和供油的调整策略。在增加单向减压阀D后，综合考虑高压油泵A、喷油嘴B、喷油嘴C、减压阀D的控制情况建立连续方程，并在多参数变化下利用蒙特卡洛算法求得最优解，得出高压油泵和减压阀的控制方案。

## 三、模型假设

关于模型建立上，我们有以下几点假设：

- 1、喷油压力变化所引起的温度变化是微小的，因此不考虑温度随压力和时间的变化。
- 2、忽略高压油管接口处的集中容积、油管变截面等对喷射过程的影响。
- 3、不考虑油管在泵、嘴两端接口处的流动损失。
- 4、不考虑喷油系统的弹性变形（当不考虑系统变形造成的计算误差在1%以内）。
- 5、在量化的数学物理方程计算上，我们假设误差均在允许范围内。

#### 四、符号说明

符号	定义
$\rho$	燃油密度
$h$	柱塞腔内高度
$P_r$	假设的初始残余压力
$P_{r1}$	新残余压力
$P_1$	柱塞压缩前压强
$P_n$	对抗气压
$T_{pr}$	温度和压强升高比率
$V_x$	柱塞一个运动周期排出燃油体积
$Q$	一个周期内的燃油流量
$C$	流量系数
$V$	高压油泵的体积
$A$	小孔面积
$E$	弹性模量

此外，本文其余所有的 PDE 符号与数学物理方程所采用的符号相同。

## 五、模型的建立与求解

### 5.1 基本模型的建立

由一维不稳定流动方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (5.1-1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} = -f \quad (5.1-2)$$

式中  $f$  为单位流动阻力。

通过化简式 (5.1-1) 和式 (5.1-2) 得以下方程组：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{a^2 \rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial t} = 0 \quad (5.1-3)$$

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial t} = -f \quad (5.1-4)$$

如上方程组有解且仅在初始条件和边界条件下有解。

在燃油喷射开始前，油管内各点的速度为零，压力即残余压力，初始条件表示为：

$$P(x,0) = P_r \quad (5.1-5)$$

$$u(x,0) = 0 \quad (5.1-6)$$

残余压力可用迭代法进行确定，根据最初给的残余压力为初始条件，通过计算对从出油阀进入高压油管的燃油量  $Q_1$  和从喷孔喷出的燃油量  $Q_2$  的比较，若  $Q_1 = Q_2$ ，则假设的残余压力即为实际残余压力；若  $Q_1 \neq Q_2$ ，则选用新的残余压力进行重新计算。新残余压力由下式确定：

$$P_{r1} = P_r + (Q_1 - Q_2) / \rho_r \alpha_r V_a \quad (5.1-7)$$

其中，

$\rho_r$  ——对应  $P_r$  时的燃油密度；

$\alpha_r$  ——对应  $P_r$  时的燃油压缩系数；

$V_a$  ——高压系统的总容积。

由题目所给附件3中弹性模量与压力的关系图表可计算得出压力系数与  $P$  的关系，在

MATLAB中用幂函数进行拟合，效果图如下：

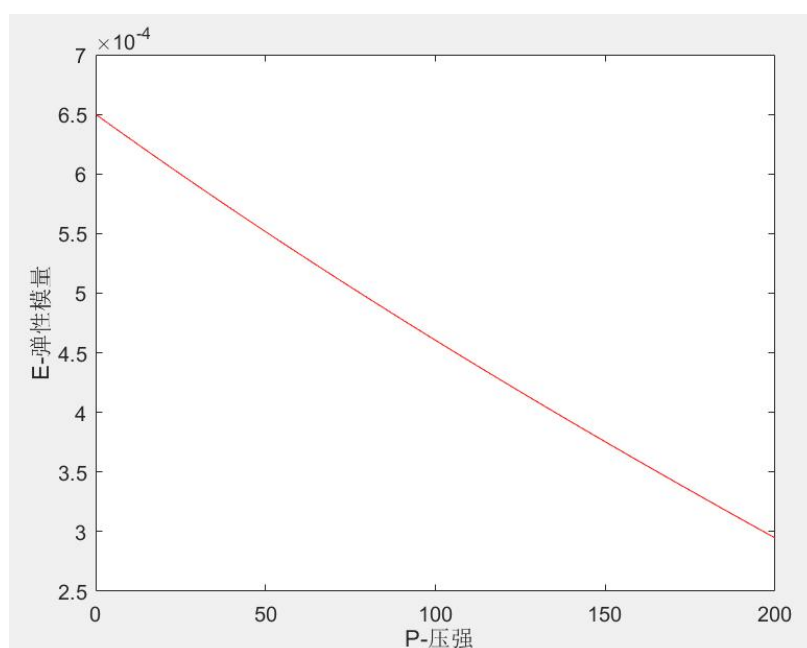


图5.1-1 弹性模量与压力的拟合关系图

关于压强 $P$ 和密度 $\rho$ 的关系可用高斯函数进行拟合，如图5.1-2。而压力残留函数可由弹性模量与压力的拟合图和压力与密度的拟合图得到（具体公式与代码详见附录）。

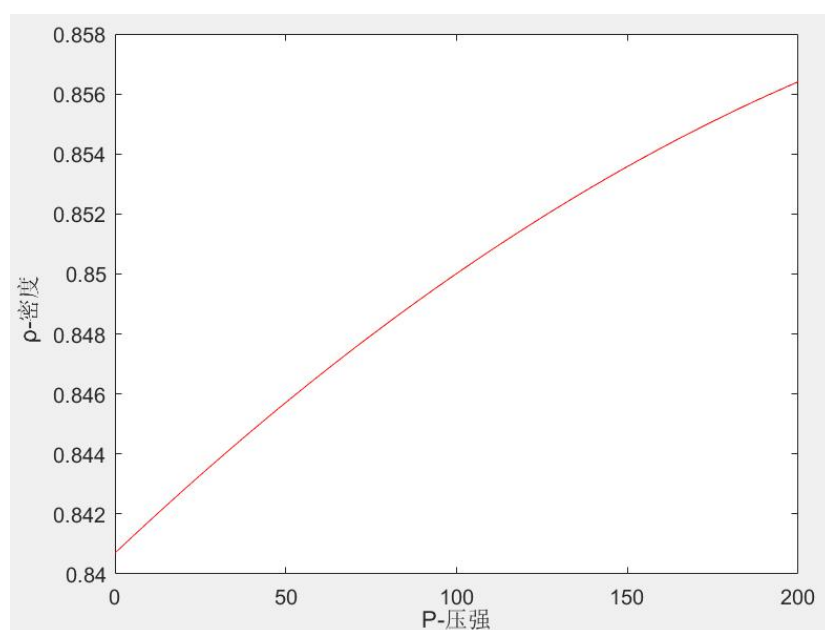


图5.1-2 压力与密度的关系拟合图

## 5.2 模型的构建与求解

### 5.2.1 问题一的求解

#### (1) 问题1中第一问：

燃油在高压油泵入口处的压力和高压油管中的压力不相同，已知100MPa时燃油的密度，通过MATLAB构建数学模型，列式画图求解出在高压油泵入口处燃油的密度。

由题目注释部分给出的数据已知在压力为100MPa时，燃油的密度为0.850mg/mm<sup>3</sup>，由注1可得出燃油压力变化量与密度变化量比例系数公式：

$$\Delta P = \frac{E}{\rho} \Delta \rho$$

易得 $\frac{E}{\rho}$ 的数量级约为10<sup>-2</sup>，所以可以推出 $\Delta \rho$ 随 $\Delta P$ 的变化幅度较小，因此通过附件3弹性模量与压力的关系列出式子：

$$P_1 - P_2 = \frac{E}{\rho_2} (\rho_1 - \rho_2)$$

由已知压力为100MPa时燃油的密度可以正向推出100-200MPa燃油的密度，同理可以逆推出0-100MPa时燃油的密度，综上可得在0-200MPa时 $\rho$ 的大小。再通过多次二项式拟合P与 $\rho$ 的关系式后，由MATLAB计算得P=160MPa时， $\rho=0.8542\text{mg/mm}^3$ 。

我们可以得到MATLAB拟合效果图：

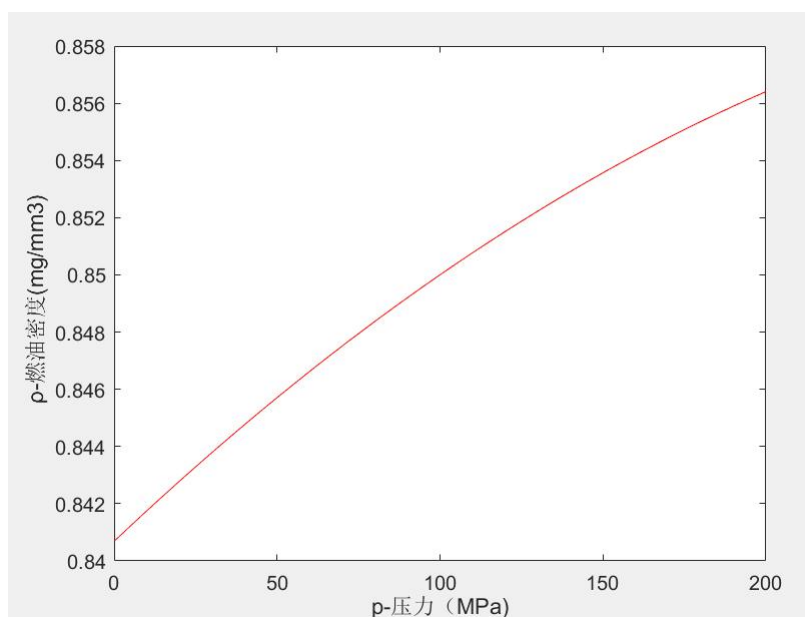


图5.2.1-1 压力与燃油密度拟合关系图

我们得到 $P=160\text{ MPa}$ 时，燃油的密度在入口A处得密度 $\rho=0.8542\text{mg/mm}^3$ 。根据注2中给出的公式：

$$Q = CA\sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (5.2.1-1)$$

和已知量 $C=0.85$ 为流量系数， $A$ 为小孔的面积（ $\text{mm}^2$ ），由分析和拟合图可知，高压油泵入口A处与高压油管内的压强差一直存在，即 $\Delta P \neq 0$ 。高压油泵入口A处与高压油管的压强差在 $[0,100]$ 区间内与 $Q_a$ （A处燃油量）的关系为：

$$Q_a = CA\sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_{160\text{MPa}}}} \quad (5.2.1-2)$$

我们建立函数：

$$f(x) = ax^b \quad (5.2.1-3)$$

将 $a=2.002$ ,  $b=0.5$ 带入得：

$$Q_a = 2.002(\Delta P)^{0.5} \quad (5.2.1-4)$$

其结果可用幂函数得到很好的拟合，得出MATLAB拟合曲线的SSE（和方差）的数量级为 $10^{-26}$ ，且：

$$R\text{-square} = 1,$$

$$\text{Adjusted R-square} = 1;$$

因为SSE趋于0，确定系数趋于1，表示方程的变量对 $y$ 的解释能力较强，说明模型选择较好，拟合度较高，数据预测准确率较高。

我们建立模型后，在MATLAB上得到的拟合图如下：

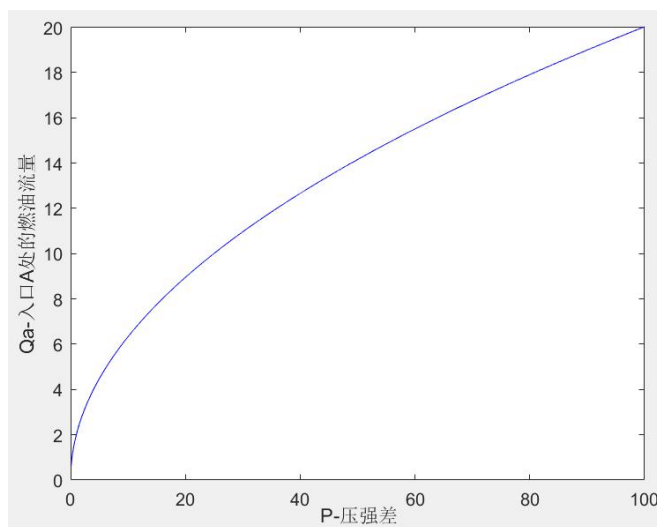


图5.2.1-2 入口A处的燃油流量与压强差的拟合关系图



我们从题目中所给的图5.2.1-3可知喷口B的喷油速率与时间的关系。使用定积分方法计算得出B每次喷出的燃油量（ $mm^3$ ）为 $44 mm^3$ 。由题目已知B每秒喷10次，我们可以将其视作周期性喷射，那么喷口B的喷油量= $440 mm^3/100ms$ ，即 $Q_B=400 mm^3/100ms$ 。

因为要使高压油管内的压力稳定在100 MPa左右，我们假设燃料在A口进和在B口出的时间都极短，管内气压变化极小。所以此时将 $Q_A = CA\sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$ 中 $\Delta P$ 的数值视作恒为160-100=60，于是，

$$Q_A = CA\sqrt{\frac{2 \times 60}{\rho_{160MPa}}} = 15.5088 mm^3/ms = 1550.88 mm^3/100ms$$

要使管内气压稳定，那么要求B每次排出燃料，A便立即补入，则有：

$$Q_A t_A = V_B \quad (5.2.1-5)$$

$$V_B = Q_B \frac{t_B}{T_B} \quad (5.2.1-6)$$

$$T_B = 100ms \quad (5.2.1-7)$$

由式（5.2.1-5）（5.2.1-6）（5.2.1-7）解得：

$$t_A = 0.2837ms.$$

## （2）问题1中第二问：

我们规定：

A处的燃油流量为 $q_A$ （ $mm^3/100ms$ ）；

B处的燃油流量为 $q_B$ （ $mm^3/100ms$ ）；

t的单位是ms；

T=100ms.

由（1）知 $q_B$ 为分段函数：

$$q_B = \begin{cases} 100t, nT + 0 < t \leq nT + 0.2 \\ 20, nT + 0.2 < t \leq nT + 2.2 \\ -100t + 240, nT + 2.2 < t \leq 2.4 \\ 0, nT + 2.4 < t \leq nT + 100 \end{cases} \quad (5.2.1-8)$$

$q_A$ 在第（1）问中已求得，由第（1）问的假设，我们先对2s时的情况进行分析计算，从而推出5s、10s的结果。

2s 时，取A的注入时长为 $t_{rA}$ ，使A在2s内的注入周期不变，并在 $t_1 \rightarrow 2s$ 时，管内压

强达到150 MPa，（ $t_1-2s$ ）越小，该注入周期越佳。

以下分别为2s和5s过程的压强与时间周期的关系拟合图：

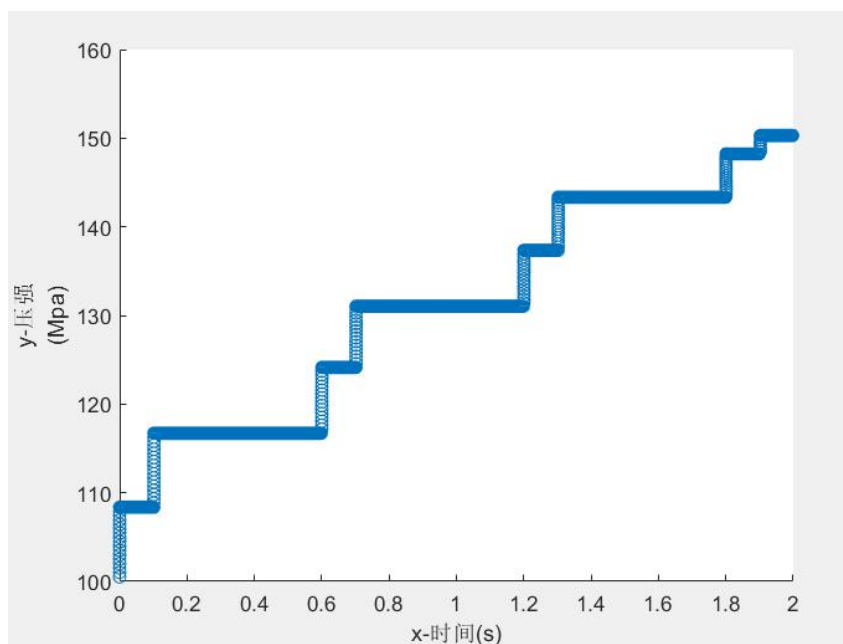


图5.2.1-3 在2s条件下压强与时间变化拟合关系图（2s）

利用蒙特卡洛算法，随机选取 $t_{rA}$ 的值，最后选出最优解为，2s 时： $t_{rA}=1.728ms$

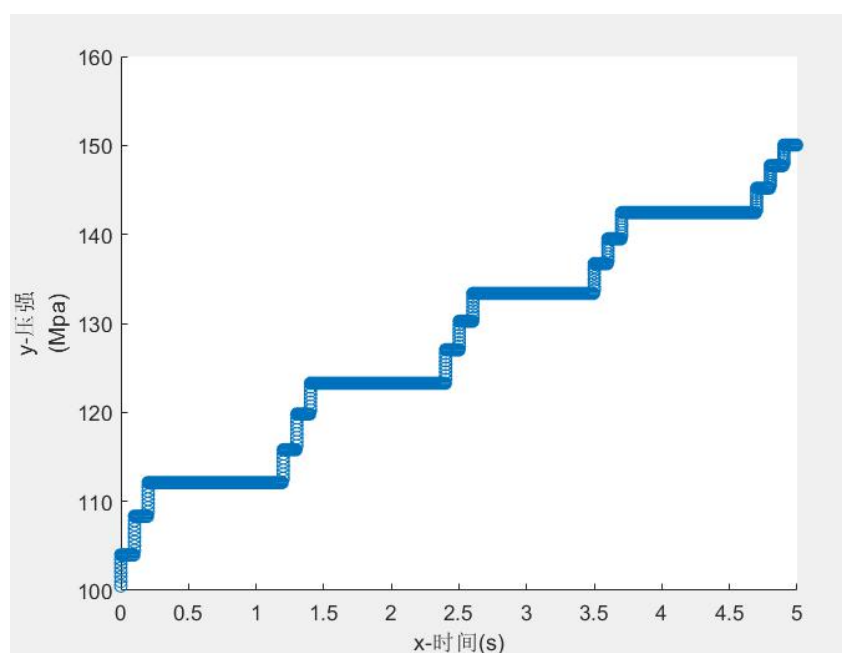


图5.2.1-4 在5秒条件下压强与时间变化拟合关系图（5s）

同理可得，5s时： $t_{rA}=0.865ms$ ；

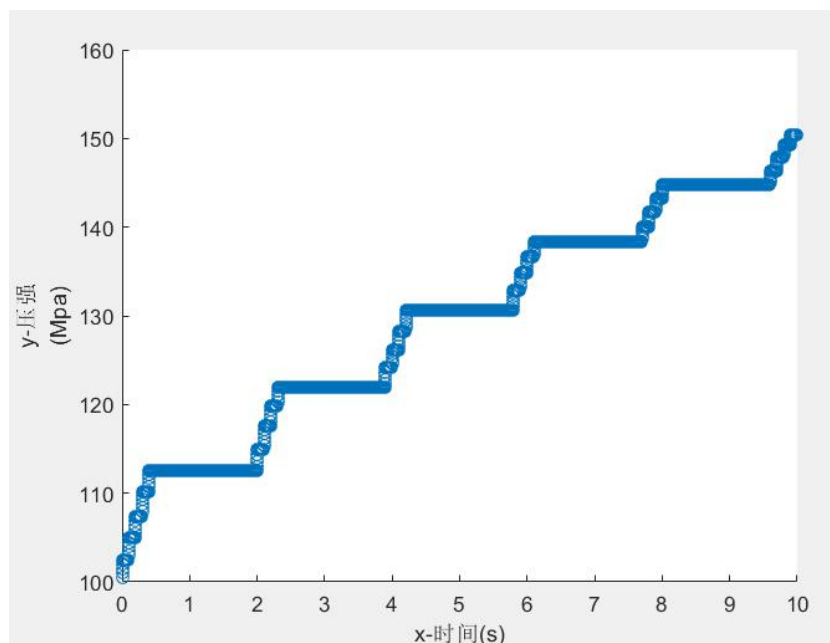


图5.2.1-5 在10秒条件下压强与时间变化拟合关系图（10s）

解出10s条件下， $t_{rA}=0.5263\text{ms}$ 。

## 5.2.2 问题二的求解

**对 A 进行分析：**由附件一凸轮边缘曲线图可得凸轮的极径与极角的关系。通过傅里叶变换函数可以得到如下图较好的拟合：

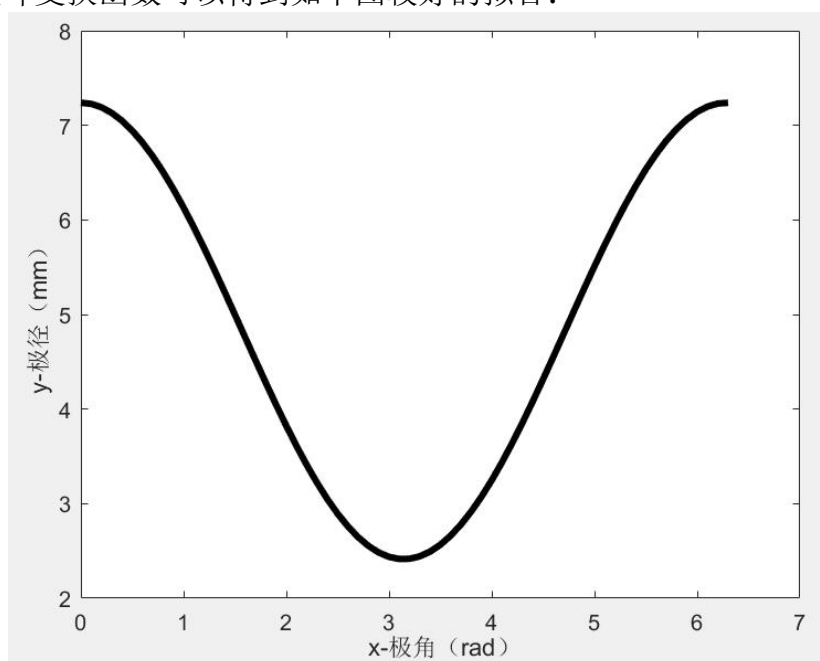


图5.2.2-1 极径与极角的关系拟合图

求得凸轮的最长半径  $\max r$  为7.2390mm，最短半径  $\min r$  为2.4130mm。由残余燃油

的体积  $V_r=20\text{mm}^3$  求出残余燃油体积的高度:

$$h_r = \frac{V_r}{\pi d^2/4} \quad (5.2.2-1)$$

柱塞腔内高度为:

$$h = h_r + (\max r - \min r) \quad (5.2.2-2)$$

解得:

$$h=5.8446\text{mm}$$

所以,

$$\text{油泵的体积 } V = 114.758\text{mm}^3$$

**对B进行分析:** 附件2针阀运动曲线可得到针阀运动的时间与距离之间的关系, 可用 *Gaussian* (正态分布) 函数得到较好的拟合, 得到针阀运动过程函数:

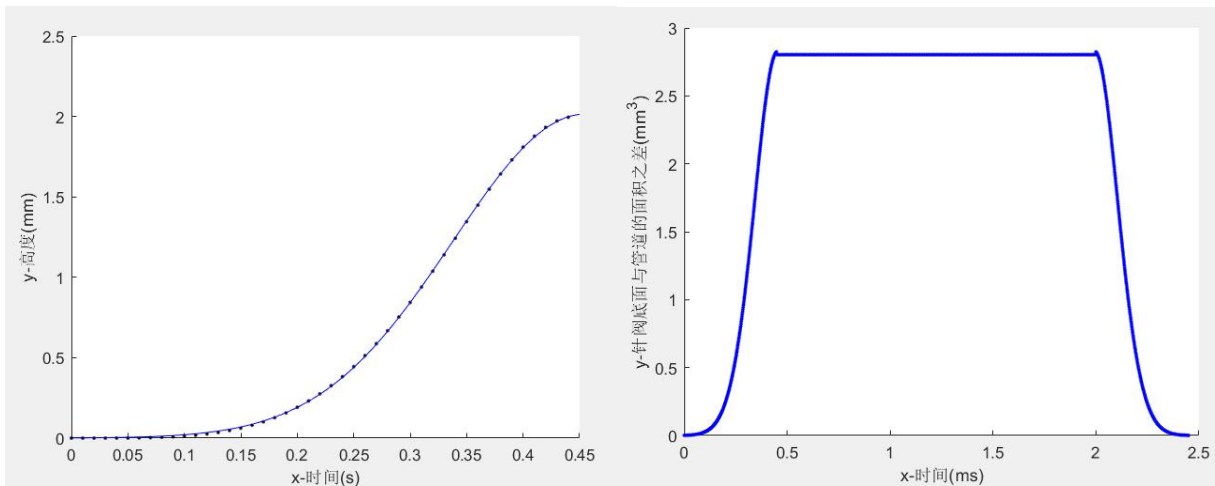


图5.2.2-2 针阀运动时间与距离关系图

图5.2.2-3针阀底面和管道面积差与时间关系图

利用:

$$Q = CA \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_{100\text{MPa}}}} \quad (5.2.2-3)$$

$$\Delta P = 100\text{ MPa (管内)} - 0.1\text{ MPa (大气压)} \quad (5.2.2-4)$$

由式 (5.2.2-3) (5.2.2-4) 可建立针阀开启时B的燃油流量变化函数:

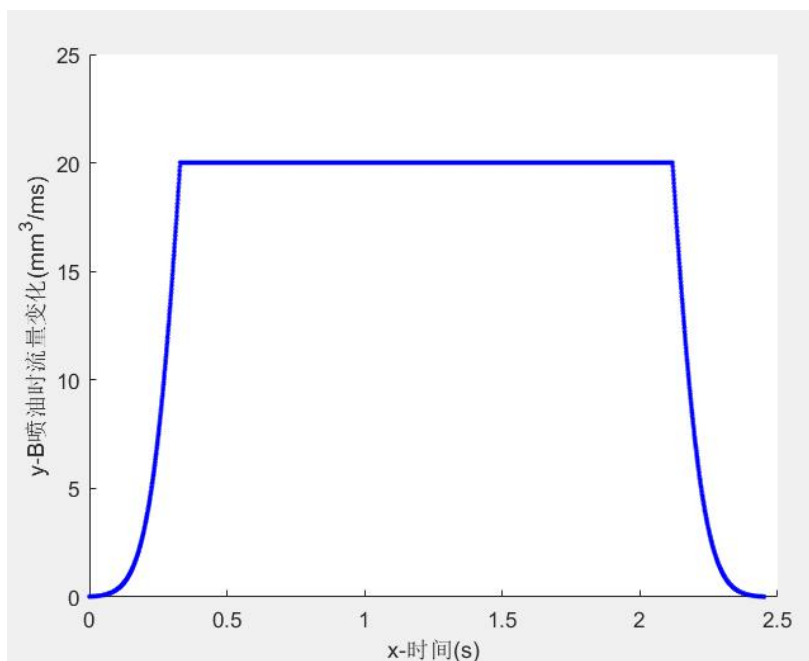


图5.2.2-3 B喷油时流量变化与时间关系图

由图5.2.2-3可得，喷油管B在一个周期（100ms）内的喷油量为 $Q_B=38.687\text{ mm}^3$ 。

#### 回到高压油泵A:

根据题目，柱塞腔内残余压力为100 MPa，体积为 $20\text{ mm}^3$ ，假设0s时柱塞腔和高压油管相连通，腔内压力 = 高压油管内压力。

当柱塞下降至下止点时，原100 MPa的 $20\text{ mm}^3$ 体积的燃油与新注入0.5 MPa的 $114.758\text{ mm}^3$ 体积的燃油充分混合后，变为16.94 MPa的 $114.758\text{ mm}^3$ 体积的燃油。

建立高压油管内的压强与时间的函数模型如图5.2.2-4:

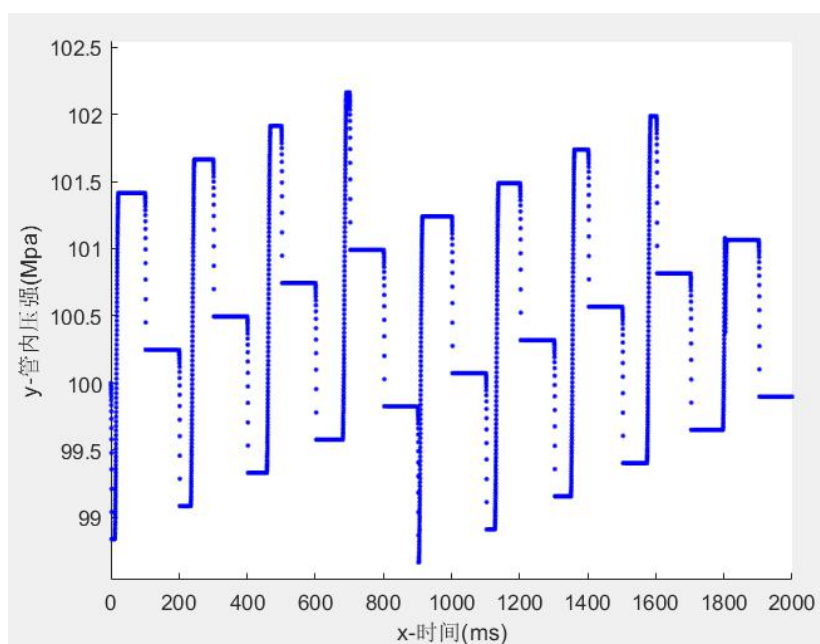


图5.2.2-4 管内压强变化与时间关系散点图

当柱塞上升至上止点时，根据：

$$P = P_1 \times C_{pr} \times T_{pr} - P_n \quad (5.2.2-5)$$

$$P_1 = 16.94 \text{ MPa} \quad (5.2.2-6)$$

$$C_{pr} = \frac{V}{V_r} = 5.9 \quad (5.2.2-7)$$

$$T_{pr} = 5 \quad (5.2.2-8)$$

$$P_n = 0.5 \text{ MPa} \quad (5.2.2-9)$$

其中：

$P_1$  为压缩前压强；

$T_{pr}$  为温度和压强升高比率；

$P_n$  为对抗气压；

$P_0 = 100 \text{ MPa}$ 。

设排出燃油的体积为  $V_x$ ，由理想气体状态方程，有下式成立：

$$PV_r = P_0V_r + P_0V_x \quad (5.2.2-10)$$

将式（5.2.2-5）与式（5.2.2-10）联立解得  $V_x = 79.08 \text{ mm}^3$ ，表示1rad（柱塞运动的一个周期）内，A排出  $79.08 \text{ mm}^3$  100 MPa的燃油至高压油管内。

综上，在问题1给出的喷油器工作次数、高压油管尺寸和初始压力下，通过假设、建模和求解得出当凸轮角速度为  $9.04\pi \text{ rad/s}$  时，能够使高压油管内的压力尽力稳定在 100 MPa左右。

### 5.2.3 问题三的求解

假设在  $t=0$  时，A 的凸轮从最高点开始转动，此时 B 喷油管中的针阀运动，C 喷油管的针阀将在  $t + \Delta t$  后开始运动，B、C 针阀运动规律附和附件二针阀运动曲线表，并每秒运动 10 次。

由问题二得，若高压油管内的压力稳定在 100 MPa 左右，那么 B、C 每次的喷油量为  $38.687 \text{ mm}^3$ 。因此本文中 B、C 喷油量之和为：

$$Q_{BC} = Q_B \times 2 = 38.687 \times 2 \text{ mm}^3 = 77.374 \text{ mm}^3 \quad (5.2.3-1)$$

若 D 未开启，则 A 为高压油管补充 100 MPa 的燃油量， $Q_{A3}$  等价于 B、C 的喷油量，

且在数值上  $Q_{A2} = Q_B$ 。

那么，

$$Q_{A3} = 2Q_{A2} \quad (5.2.3-2)$$

A、B、C 均为周期性变化，为使管内压强变化量尽量小，则由残余压力公式：

$$P_{r1} = P_r + (Q_1 - Q_2) / \rho_r \alpha_r V_a \quad (5.2.3-3)$$

即，使得单位时间内  $\Delta q = q_{A3} - q_{BC}$  尽量小。

$Q_{A3}$  与极角的关系可用傅里叶函数表示，如图 5.2.3-1。

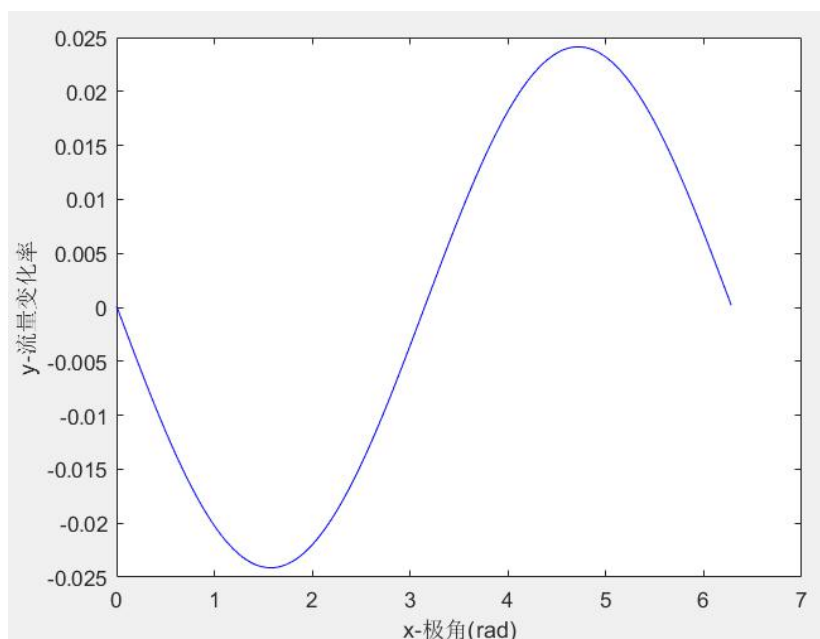


图 5.2.3-1 流量变化率  $Q_{A3}$  与极角的关系图

又：

$$q_{BC} = q_B + q_C \quad (5.2.3-4)$$

所以  $q_B$ 、 $q_C$  与  $t_B$ 、 $t_C$  的关系可用分段函数表示，如图5.2.2-3。

因为，

$$t_B = T_{BC} + t_B \quad (5.2.3-5)$$

其中， $T_{BC}$  表示两者开启时间。

通过蒙特卡洛算法计算得出， $T_{BC} = 47.6\text{ms}$ 。

当A、B、C皆在周期性运作时，可以做出高压油管内的压强与时间关系图：

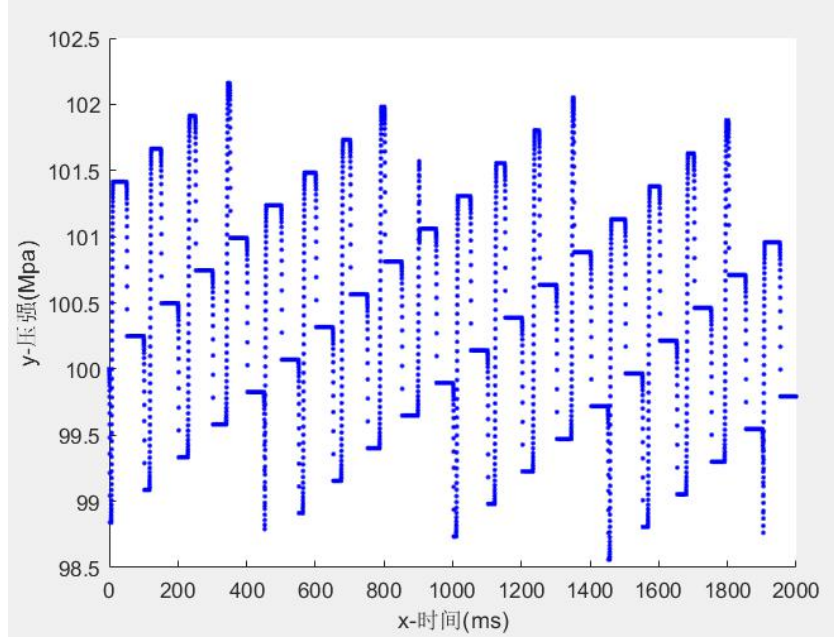


图5.2.3-2 高压油管内压强变化与时间关系散点图

在此模型下，高压油管的最高瞬时压强为102.23 MPa，最低瞬时压强为98.83 MPa，压强差为3.4 MPa。

将单向阀D加入到此模型中，使得高压油管压强较大时，部分燃油能从D中排出，从而让高压油管中的压强差尽可能减小。

由图5.2.3-2我们假设，在压强最高时D开始工作，D的工作时长为10ms，工作周期为500ms。

假设A、B、C、D都处在工作中，此时高压油管中的压强稳定在100 MPa，有：

$$Q_{A'} = Q_{B'} + Q_{C'} + Q_{D'} \quad (5.2.3-6)$$

$$(2 \times V_x \times t_B + q_D \times t_D) / V_x \quad (5.2.3-7)$$

其中， $V_x = 79.08 \text{ mm}^3$ （凸轮运动一圈时产生的100 MPa燃油体积量），且  $t_B = t_D = 1\text{s}$ 。

$$P_{r1} = P_r + (Q_1 - Q_2) / \rho_r \alpha_r V_a \quad (5.2.3-8)$$

根据上述公式，利用蒙特卡洛算法找出令高压油管压强差极值最小时， $q_{C'}$  的取值。

得出：

单向阀D工作流速： $q_D = 0.504 \text{ mm}^3 / \text{ms}$ ；

单向阀D工作周期： $T_{D'} = 500 \text{ ms}$ ；

单向阀D一个周期内工作时长： $t_{D'} = 10 \text{ ms}$ ；

此时，高压油管的压强差最高值为  $\Delta P = 3.3609 \text{ MPa}$ ，凸轮转速为  $A \text{ rad} = 18.305\pi \text{ rad} / \text{s}$ 。



## 六、模型的评价与推广

### 6.1 模型的优点

- (1) 本模型的建立是在一般的数学物理方程上建立的，具有适用性；
- (2) 本模型采用蒙特卡洛算法，模型的建立层层递进，有层次感；
- (3) 所建立的模型变量较少，增加了模型的可读性；
- (4) 本模型对若干问题进行“切片化”处理，确保在遵循本原则的情况下，尽可能多的保证解决方案的普适性。

### 6.2 模型的缺点

- (1) 在进行数学物理方程的求解中，我们采取一般快速办法，没有对边界条件进行更细致的划分；
- (2) 模型的个别参数是在理想状态下建立的，各个参数只是针对一般情况或者普适情况所给出的，缺少特殊性。

### 6.3 模型的改进

- (1) 运用更高级的求解方法，对数学物理方程建立进行更为细致的划分和求解；
- (2) 在实际中，运用本模型，做到理论与实际相结合。

### 6.4 模型的推广

- (1) 对于其他的高压油管设备，我们可以采用相同的方法；
- (2) 通过所建立的模型以及求解结果，我们可以得到多个喷油嘴下，高压油泵与减压阀之间的模型关系，也可以使用在其他不同的高压燃油系统中，将模型应用于实际的生活，具有非常重要的现实意义。

## 七、参考文献

- [1] 张海磊, 王强, 冯耀楠. 高压油管长度对柱塞泵结构强度的影响[J]. 机床与液压, 2019, 47(08):103-108.
- [2] 汪云, 姜利, 张幽彤. 柴油机共轨蓄压式燃油喷射系统输油管道的建模分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2006(08):933-936+940.
- [3] 蔡梨萍. 基于 MATLAB 的柴油机高压喷油过程的模拟计算[D]. 华中科技大学, 2005.
- [4] 吕晓辰. 高压共轨系统高压管路压力波动特性仿真研究及结构优化[D]. 北京交通大学, 2016.
- [5] 高宗英. 根据高压油管实测压力计算柴油机喷油过程的一种新方法[J]. 内燃机学报, 1983(03):73-95.
- [6] 郝真真. 生物柴油喷射系统嘴端压力分析[D]. 广西科技大学, 2015.
- [7] 李雪军. 基于傅里叶级数从动件运动规律的凸轮设计方法与性能分析[J]. 机械传动, 2018, 42(12):86-92+103.
- [8] 白云. 高压共轨燃油系统循环喷油量波动特性研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2017.

## 八、附录

```
%附件一 凸轮的转动周期
clc,clear
load dataf1.txt
x=dataf1(:,1);
y=dataf1(:,2);
scatter(x,y);
hold on
%cftool(x,y)%Fourier
x1=0:0.1:6.3;
y1=4.826+2.413*cos(x1)-(2.452e-06)*sin(x1);
plot(x1,y1,'k','LineWidth',3);

%p0high=p0(1,321);
p100high=0.8542;%100Mpa 下的密度
c=0.85;
a=(1.4/2)^2*pi;
qa=c*a*sqrt(2*(160-100)/p0high);%A 每 ms 流量

%利用蒙特卡洛计算出最合适的解
a=1000;
x=zeros(1,10000);
y=zeros(1,length(x));
%时间单位为 0.01ms
ya=15.372;
%ra=rand(1,100);
min=0;
ry=zeros(3,10000);
for r=1:10000
    ra=rand()*500;
    a=1000;
    ymin=10000;
    ymax=0;
    for i=1:1000
        x(1,i)=i;
        if (mod(i,1000)<=741 && mod(i,1000)>500)
            a=a-(yb(1,mod(i,1000)-500)*0.01);
        end
        if(mod(i,1000)>(ra) && mod(i,1000)<((ra)+283.7))
            a=a+ya*0.01;
        end
        y(1,i)=a;
        if(y(1,i)<ymin)
            ry(3,r)=y(1,i);%记录极小值
            ymin=y(1,i);
        end
        if(y(1,i)>ymax)
            ry(2,r)=y(1,i);%记录极大值
```

```

        ymax=y(1,i);
    end
end
    if(var(y)<9e+04)
        ry(1,r)=ra;%给方差较小的标记
    end
end
ytemp=1000;
ym=0;
rtemp=0;
for r=1:10000
    if(ry(1,r)~=0)
        if((((ry(2,r)-1000)^2+(1000-ry(3,r))^2)<ytemp)
            ytemp=((ry(2,r)-1000)^2+(1000-ry(3,r))^2);
            ym=ra;
            rtemp=r;
        end
    end
end
ym
ytemp
ry(2,rtemp)
ry(3,rtemp)
for i=1:1000
    x(1,i)=i;
    if (mod(i,1000)<=741 && mod(i,1000)>500)
        a=a-(yb(1,mod(i,1000)-500)*0.01);
    end
    if(mod(i,1000)>(ra) && mod(i,1000)<((ra)+283.7))
        a=a+ya*0.01;
    end
    y(1,i)=a;
    if(y(1,i)<ymin)
        ry(3,r)=y(1,i);%记录极小值
        ymin=y(1,i);
    end
    if(y(1,i)>ymax)
        ry(2,r)=y(1,i);%记录极大值
        ymax=y(1,i);
    end
end
end
scatter(x,y);

%附件三
load dataf3.txt
x=dataf3(:,1);
y=dataf3(:,2);
scatter(x,y);
grid on
%得出图像呈指数型
%cftool(x,y)
%pxy=polyfit(x,y,3);%三次多项式拟合
p=0:0.5:200;%压强

```

```

%E=polyval(pxy,p);%弹性模量
%plot(x,y,p,E,'r')
%poly2sym(pxy)%函数描绘
p0=zeros(1,length(p));
p0(1,201)=0.85;
for i=201:400
    p0(1,i+1)=(y(i,1)+0.1)*p0(1,i)/y(i,1);%
end
for i=201:-1:2
    p0(1,i-1)=y(i,1)*p0(1,i)/(y(i,1)+0.1);
end
p0;%密度
%scatter(p,p0);
%cftool(p,p0)
pxy=polyfit(p,p0,2);
pp=polyval(pxy,p);
plot(p,pp,'r');
poly2sym(pp)
p0(1,321)%160MPa 下的密度

%压缩系数是弹性模量的倒数 附件三
clc,clear
load dataf3.txt
p=dataf3(:,1);
e=dataf3(:,2);
for i=1:length(e)
    ae(i)=1/e(i);
end
%scatter(p,ae);
%cftool(p,ae);
%拟合结果的系数
%x_Ae = 0:0.001:200;
%a_Ae = -8.739e-05;
%b_Ae = 0.002996;
%c_Ae = 0.0007374;
%d_Ae = -0.002428;
%Ae=a*exp(b*x)+c*exp(d*x);

%压缩系数拟合结果
function [ae]=Ae_fun(x_Ae) %输入当前压力
a_Ae = -8.739e-05;
b_Ae = 0.002996;
c_Ae = 0.0007374;
d_Ae = -0.002428;
ae=a_Ae*exp(b_Ae*x_Ae)+c_Ae*exp(d_Ae*x_Ae);

%Qa 流量随压强差的变化
c=0.85;%流量系数
a=pi*(1.4/2)^2;%小孔面积
p06=0.8542;%160MPa 下的密度
xp=100:-0.01:0.1;
Qa=c*a*sqrt(2*xp/p06);
scatter(xp,Qa);

```

```

%cftool(xp,Qa);
Qa1=2.002*xp.^0.5;
plot(xp,Qa1,'r');

%喷油速率

x=0:0.01:2.4;
yb=(100*x).*(x>=0 & x<=0.2)+(20+0*x).*(x>0.2 & x<=2.2)+((-100)*(x)+240).*(x>2.2 & x<=2.4);
plot(x,yb);
vb=trapz(x,yb);%每 2.4ms 从 B 中流出体积 mm^3
po0=0.850;
V1=vb*10*po0;
%计算单位时间减少量
qb=zeros(1,length(x));
for i=1:21
    qb(1,i)=x(1,i)*yb(1,i)/2;
end
for i=22:221
    qb(1,i)=2+20*(x(1,i)-0.2);
end
for i=221:241
    qb(1,i)=2+20*(2.2-0.2)+2-((2.4-x(1,i))*yb(1,i)/2);
end

%B
function [yb]=Qb_fun(x)
yb=(100*x).*(x>=0&x<=0.2)+(20+0*x).*(x>0.2&x<=2.2)+((-100)*(x)+240).*(x>2.2 & x<=2.4);

%当前密度的计算函数

function [pp0]=P0_fun(p)
a_p0 = 0.8604;
b_p0 = 362.4;
c_p0 = 2381;
pp0=a_p0*exp(-((p-b_p0)/c_p0)^2);

%压力残留函数
function [pp]=Pr_fun(q1,q2,pr)
e=Ae_fun(pr);%当前压缩系数
p0=P0_fun(pr);%当前密度
v=500*(10/2)^pi;
pp=pr+(q1-q2)/(p0*e*v);%残余压力

%附件一 凸轮的转动周期
function [y1]=Cam_fun(x1)
load dataf1.txt
%x=dataf1(:,1);
%y=dataf1(:,2);
%scatter(x,y);
%hold on
%cftool(x,y)%Fourier

```

```

%x1=0:0.1:6.3;
y1=4.826+2.413*cos(x1)-(2.452e-06)*sin(x1);
%plot(x1,y1,'k','LineWidth',3);

%针阀升起过程 Gaussian (0,0.45)ms
function [h]=ND_up(x_nd)
h=2.016*exp(-((x_nd-0.4551)/0.1661)^2);

%针阀降落过程 Gaussian (0,0.45)ms
function [h]=ND_down(x_nd)
h=2.016*exp(-(((2-x_nd+0.45)-0.4551)/0.1661)^2);

%凸轮的最长边和最短边
minr=10;
maxr=0;
for i=1:6300
    temp=Cam_fun(i/1000);
    if(minr>temp)
        minr=temp;
    end
    if(maxr<temp)
        maxr=temp;
    end
end
maxr-minr

clc,clear
%附件二
load dataf2.txt
x=dataf2(:,1);
y=dataf2(:,2);
%scatter(x,y);
%grid on
%cftool(x,y)%Gaussian

        a1 =        2.016;
        b1 =        0.4551;
        c1 =        0.1661;
x1=0:0.01:0.45;
y1=a1*exp(-((x1-b1)/c1).^2);
scatter(x,y,'k','.');
hold on
plot(x1,y1,'b');

a=100;
c=0.85;%流量系数
A=pi*(1.4/2)^2;%小孔面积
x=zeros(1,10000);
y=zeros(1,length(x));
p06=0.8542;
%时间单位为 0.01ms

```

```

min=0;
rmin=0;
dmin=zeros(1,10);
drmin=zeros(1,10);
for ij=1:5
for j=1:1000
    ra=(rand()*1);
    a=100;
    for i=1:1000000 %时间单位为 0.01ms
        x(1,i)=i;
        q1=0;%A 的流入量
        q2=0;%B 的流出量
        if (mod(i,1000+ra*10)<=ra*10 && mod(i,1000+ra*10)>0)
            q1=(c*A*sqrt(2*(160-a)/p06));
        end
        if (mod(i,10000)<=241 && mod(i,10000)>0)
            q2=Qb_fun(mod(i,10000)*0.01)*0.01;
        end
        if(q1~=0 && q2~=0)
            a=Pr_fun(q1,q2,a);%高压管内残余压强
        end
        y(1,i)=a;
        if(y(1,i)>150)
            break
        end
    end
    if(i>min && y(1,i)>150)
        min=i;
        rmin=ra;
    end
end
dmin(1,ij)=min;
drmin(1,ij)=rmin/0.01;
end

%针阀打开时，燃油通过面积的变化量
clc,clear
ya=zeros(1,2451);%A 面积
x=0:0.001:2.45;
for i=1:1:2450
    if(i<450)
        ya(1,i)=(pi/4)*(2*tan(deg2rad(9))*ND_up(i/1000)+2.5)^2-(pi/4)*(2.5)^2;
    end
    if(i>=450 && i<=2000)
        ya(1,i)=(pi/4)*(2*tan(deg2rad(9))*2+2.5)^2-(pi/4)*(2.5)^2;
    end
    if(i>2000 && i<=2450)
        ya(1,i)=(pi/4)*(2*tan(deg2rad(9))*ND_down(i/1000)+2.5)^2-(pi/4)*(2.5)^2;
    end
end
scatter(x,ya,'b','.')
%针阀打开时，燃油单位时间能通过面积的变化量
%针阀打开时，燃油单位时间流出时经过的面积

```



```

yy=pi*(1.4^2)/4
for i=1:1:2451
    if(ya(1,i)>yy)
        yyb(1,i)=yy;
    end
    if(ya(1,i)<=yy)
        yyb(1,i)=ya(1,i);
    end
end

%针阀打开时，B 的燃油流量
Qb=0;

for i=1:1:2450
    qb2(1,i)=0.85*yyb(1,i)*sqrt(2*(100-0.1)/0.8542);
    Qb=Qb+qb2(1,i)*0.001;
end
qb2(1,2451)=0;
scatter(x,qb2,'b','.')
Qb

a=100;
c=0.85;%流量系数
A=pi*(1.4/2)^2;%小孔面积
x=zeros(1,10000);
y=zeros(1,length(x));
p06=0.8542;
%时间单位为 0.01ms
min=0;
rmin=0;
dmin=zeros(1,10);
drmin=zeros(1,10);
ra=0.5263
    for i=1:1000000 %时间单位为 0.01ms
        x(1,i)=i;
        q1=0;%A 的流入量
        q2=0;%B 的流出量
        if (mod(i,1000+ra*10)<=ra*10 && mod(i,1000+ra*10)>0)
            q1=(c*A*sqrt(2*(160-a)/p06));
        end
        if (mod(i,10000)<=241 && mod(i,10000)>0)
            q2=Qb_fun(mod(i,10000)*0.01)*0.01;
        end
        if(q1~=0 && q2~=0)
            a=Pr_fun(q1,q2,a);%高压管内残余压强
        end
        y(1,i)=a;
    end
y(1,i)
scatter(x,y)

%计算高压油泵的高度

```

```

clc,clear
maxr =7.2390;
minr =2.4130;
hr=20/(pi*(5/2)^2)%残余燃油的高度
h=hr+(maxr-minr)
p0_100=0.850;
mr=p0_100*20%剩余质量
p0_05=P0_fun(0.5);
my=h*pi*(5^2)/4

```

%针阀打开时，燃油通过面积的变化量

```

clc,clear
ya=zeros(1,246);%A 面积
for i=1:1:246
    if(i<45)
        ya(1,i)=(pi/4)*(2*tan(deg2rad(9))*ND_up(i/100)+2.5)^2-(pi/4)*(2.5)^2;
    end
    if(i>=45 &&i<=200)
        ya(1,i)=(pi/4)*(2*tan(deg2rad(9))*2+2.5)^2-(pi/4)*(2.5)^2;
    end
    if(i>200 &&i<=245)
        ya(1,i)=(pi/4)*(2*tan(deg2rad(9))*ND_down(i/100)+2.5)^2-(pi/4)*(2.5)^2;
    end
end
x=0:0.01:2.45;
p2=100;
maxr =7.2390;
minr =2.4130;
cr=maxr-minr;
rrad=4.62*2;%转速
hnow(1,1)=maxr;
p2=100;
ra=rand();
min=120;
max=0;
for i=1:10001 %单位 0.1ms 总时长 1s

    qa1=0;%表示高压油管内燃油注入量
    qb2=0;%表示高压油管内燃油流失量
    qb3=0;%表示高压油管从 D 流出的燃油流失量
    hnow(1,i+1)=Cam_fun(mod(i,10000/rrad)*rrad*6.28/1000);
    if(mod(i,10000/rrad)>=(1/rrad)*1000*(1/2) && mod(i,10000/rrad)<=(1/rrad)*1000)
        qa1=79.08*abs(hnow(1,i)-hnow(1,i+1))/cr;
    end
    qq(1,i)=qa1;

    itemp=mod(i,1001);
    if(itemp<=24.1 && itemp>0)%B 喷油管
        qb2=0.85*ya(1,itemp)*sqrt(2*(100-0.1)/0.8542);
    end
    if(itemp<=524.1 && itemp>500)%C 喷油管
        qb2=0.85*ya(1,itemp-500)*sqrt(2*(100-0.1)/0.8542);
    end
end

```

```

end
itemp=mod(i,1001);
if(itemp<=50 && itemp>10)%D
    qb3=0.05;
end
qb2=qb3+qb2;
if(qq(1,i)==0 &&i~=0)
    p2_n(1,i)= p2;
end

if(qa1>0 || qb2>0)
    p2=Pr_fun(qa1,qb2,p2);
    p2_n(1,i)=p2;
end
    if min > p2_n(1,i)
        min=p2_n(1,i);
    end
    if max < p2_n(1,i)
        max=p2_n(1,i);
    end
end
end

x=0:0.1:1000;
scatter(x,p2_n,'b','.')

```