

基于多目标优化的高压油管的压力控制模型

摘要

本文主要研究高压燃油系统的工作原理，通过考虑油泵进油和喷油嘴出油两方面对高压油管内物理量的影响，以高压油管的压力波动量以及波动极差最小为目标，建立多目标优化模型，求解得到进出油过程中的最优控制策略。

针对问题一，首先根据附件三求出压力与密度之间的关系，利用微元法的思想分别描述任意时刻油管的压力、密度、流速等参数，从而建立连续性方程组的约束模型。稳定阶段则以一个周期内的波动总量最小为主要目标，波动极差最小为次要目标建立双目标优化模型。调整阶段则以指定时长最后时刻的压力与目标稳定值之差最小为目标，建立单目标优化模型。通过不断调整单向阀开启时长，采用离散化方法迭代求出每一小段的压力，求出第一小问的结果为：**单向阀开启时长为 0.28ms；第二小问的结果为：调整阶段的指定时长约为 2、5、10s 时，单向阀的开启时长依次为：0.83ms，0.66ms，0.65ms，稳定阶段单向阀开启时长为 0.64ms。**

针对问题二，在问题一基础上，依次对进油油泵、油管、油嘴喷油进行分析，油泵内建立任意时刻的气体压力模型，油泵和油管之间连通后任意时刻的压力变化模型，油管与喷油嘴外喷量之间建立参数关系模型。将凸轮的角速度变化转换为柱塞腔的体积变化，推出柱塞腔体积变动导致油泵与油管之间的压力变化规律。通过寻求各参数之间的复杂关系，综合所有连续性方程组，最后进行离散求解最优策略，**求出凸轮角速度为 0.027Rad/ms。**

针对问题三，在问题二的基础上新增了一个喷油嘴，以两个喷油嘴的工作时差和凸轮的角速度为决策变量，将两个喷油嘴的喷油量看作一个总体，具体分析求解与问题二基本相同。**求出凸轮的角速度为 0.057Rad/ms，两个喷油嘴工作时差为 3.97ms；**在此基础上再增加一个减压阀，对于减压阀的控制机制考虑两种情况：第一种是阈值控制：高压油管压力超出某个阈值时减压阀开始工作；第二种是时间控制：工作时长和休息时长固定周期性反复；分别对这两种机制建立油泵、油管、油嘴之间的燃油压力变化模型。再通过离散求解最优策略，**得出阈值控制下最佳阈值为 103.3MPa；时间控制下工作时长为 0.037ms，休息时长为 32.06ms。**

最后，对模型结果进行检验，选取最优值附近的值代入计算并进行误差分析从而确定最优解。对减压阀连接的外部低压油路的固定压力进行参数调节，对最优的高压油泵的角速度和减压阀的阈值进行灵敏度分析，然后对模型的优缺点进行评价，提出了改进的方向。

关键词： 高压燃油系统 仿真离散 双目标优化 耦合方程

一、问题的背景与重述

1.1 问题的背景

大部分燃油发动机工作的基础是燃油从油泵进入和从喷油嘴喷出，其燃油系统的工作原理为燃油通过高压油泵进入高压油管，再从喷口处喷出。而燃油进入和喷出油管之间的间歇性工作过程会使得高压油管内的压力发生变化，导致喷出的燃油量出现偏差，进而妨碍发动机的工作效率。

1.2 问题的重述

(1) 已知高压油管的结构参数和喷油器的工作机制，高压油泵在入口处压力恒为 160 MPa, 高压油管内的初始压力为 100 MPa. 求使得高压油管内压力稳定在 100MPa 左右时单向阀每次开启的时长以及压力增加到 150MPa 且分别经过约 2 s、5 s 和 10 s 的调整稳定 150MPa 时的单向阀开启的时长。

(2) 当柱塞腔内的压力高于油管内的压力时，单向阀打开，燃油进入油管，确定凸轮的角速度，控制高压油管内的压力尽量稳定在 100 MPa 左右；

(3) 在问题二的基础上再加一个喷嘴，喷油规律不变，调整喷油和供油策略；此外，再增加一个单向减压阀，重新给出高压油泵和减压阀的最佳控制方案。

二、问题的分析

2.1 问题的分析

针对问题 1.1，单向阀处的压力不变，即进油速率只与高压油管的压力有关。根据附件 3 可拟合出油管内的压力与密度之间的关系式。油管内的压力随时间的变化可转化为密度随时间的变化。高压油管体积固定，密度与时间的关系又可转化为燃油质量与时间的函数，喷油嘴的喷油速度已知时，且从 A 口进入油管的燃油量都可以用函数表示，那么对任意时刻油管内的质量可以用连续方程描述。这个连续模型中，单向阀开启时长是决策变量，需要在离散化过程中求解寻找并调整，要使油管内的压力在每个时刻都尽可能接近 100MPa。因此目标函数表达为在一个工作周期内总波动量最小，且压力的极差最小。

针对问题 1.2，需要在有限时间内将压力升到 150MPa，然后保持 150MPa. 调整过程和稳定过程无法用同一开启时长来满足要求，因此对 150MPa 达到前后时长分段处理，即分为调整阶段和稳定阶段。具体模型建立跟问题 1.1 相同，仅调整阶段的目标函数变成指定时长最后时刻的压力与目标稳定值之差最小。还是以单向阀开启时长是决策变量，在离散化过程中寻找符合求解的最优值。

针对问题 2，在问题一的基础上，油泵进油速率不再是定值，而是随时间变化的函数，分析柱塞腔内的压力随时间的变化可转化为密度与时间之间的关系，而柱塞腔的密度又与燃油质量和燃油体积变化量有关，将凸轮的角速度规律转换为柱塞腔的体积变化规律。再依次对进油油泵、油管、油嘴喷油进行分析，油泵内建立任意时刻的气体压力模型，油泵和油管之间连通后任意时刻的压力变化模型，油管与喷油嘴外喷量之间建立参数关系模型。推出柱塞腔体积变动导致油泵与油管之间的压力变化规律。

针对问题 3.1，在问题二的基础上新增了一个喷油嘴，两个喷油嘴工作机制一致，但各自的外喷时间段未知，以两个喷油嘴的工作时差为决策变量，将两个喷油嘴的喷油量综合看作一个总体，其余分析求解与问题二基本相同。



图 2-1 问题 3.2 思维导图

针对问题 3.2，在问题 3.1 的基础上，再增加一个减压阀后，对于减压阀的控制方案考虑两种情况：一是阈值控制：油管压力超出某个上限值时减压阀开始工作，此时决策变量就是阈值；在离散化过程中不断调整阈值大小，求解出使得总波动量和压力极差最小的阈值。二是时间控制：类似于单向阀工作机制，工作一定时长后再休息一定的时长，相当于没有自动判别机制，此时决策变量为一个周期里的工作时长和休息时长，重新建立油泵、油管、油嘴之间的燃油压力变化模型，再通过离散化过程求解出最优策略。

三、模型的假设

3.1 模型的假设

- (1) 假设柱塞运动到下止点时的燃油加注是瞬时的；
- (2) 假设减压阀开启时完全打开；
- (3) 忽略喷油器内各个集中容积对压力波反射的影响；
- (4) 忽略压力波实际传播速率的变化；
- (5) 忽略压力造成的机器形变。

四、符号说明

符号	表示含义	单位
P	表示高压油管内的压力	MPa
P_1	表示柱塞腔内的压力	MPa
P_0	油管外气压	MPa
ρ_1	表示 160 MPa 下的燃油密度	mg/mm^3
$\rho_1(t)$	表示油泵进油的燃油密度与时间的函数	mg/mm^3
$\mu(t)$	喷油嘴喷油速率随时间的函数关系式	mg/ms
$m(t)$	高压油管内的燃油质量与时间的函数	mg

V_0	高压油管的体积	mm^3
T	160 MPa 下进油时单向阀的开启时长	ms
$r(\theta)$	凸轮极径与极角直接得函数关系式	mm
ω	凸轮转动角速度	rad / ms
$H(t)$	针阀高度随时间的变化关系	mm

五、模型的建立与求解

5.1 油泵入口处压力为定值的压力变化模型

5.1.1 高压油管压力稳定在 100MPa

为保证发动机工作效率，要求高压油管内压力稳定在 100MPa，因为高压油管的工作机制呈周期性的，可转化为考虑 1 个周期内高压油管的压力变化；喷油嘴每秒可工作 10 次，即定义总的一个周期的考虑时长为 1000 ms，根据喷油嘴一个工作周期内的出油变化来设计单向阀的每次开启时长。

(1) 计算密度与压力的关系式

根据附件 3 中的数据回归拟合弹性模量和压力的函数关系式为：

表 5-1 弹性模量和压力的函数关系式

拟合次数	回归函数	拟合优度
一次	$E = 1379.2 + 8.8623P$	97.14%
二次	$E = 1571.6 + 3.0765P + 0.0289P^2$	99.91%

综合考虑，尽管二次拟合优度更高，但一次拟合的优度也超出了 95% 足够高，且为便于后续计算，这里取一次拟合函数。

已知燃油的压力变化量与密度变化量成正比，比例系数为 $\frac{E}{\rho}$ ，即 $\Delta P = \frac{E}{\rho} \Delta \rho$ ；

代入拟合函数 $E = f(P)$ ，有：

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

当压力为 100MPa 时，密度为 0.850 mg/mm^3 ，代入(1)式，求出微分方程的特解：

$$\rho = F(P) = 0.45(P + 155.63)^{0.11} \quad (2)$$

$$P = G(\rho) = 1079.23\rho^{0.89} - 155.63 \quad (3)$$

将 $P = 160 \text{ MPa}$ 代入式(2)，得出密度为 $\rho_1 = 0.8705 \text{ g/mm}^3$ ；

(2) 高压油管的物理参数分析

以单向阀的开启时长 $T \text{ ms}$ 为决策变量，则需要找寻单向阀开启时长与高压油泵和油管的物理参数(如密度、质量、压力)之间的联系关系，并以函数形式表达。

由于高压油泵和油管的瞬时变化无法通过模型描述，可采用微元法分析 $t - \varepsilon$ 到 t 时刻(ε 无限趋近于 0)之间这一段极小的时长内燃油变化量。

① $t - \varepsilon$ 到 t 时刻通过高压油泵流入高压油管的流量为：

$$V_{\lambda}(t, T) = \int_{t-\varepsilon}^t CA \sqrt{\frac{2(160 - P(t, T))}{\rho_1}} dt \quad (4)$$

式中 T 为单向阀开启时长，流量系数 $C = 0.85$ ， A 为小孔的面积为 1.54mm^2 ； ε 无限趋近于 0； $P(t, T)$ 为 t 时刻高压油管的压力； $\rho_1 = 0.8705\text{g/mm}^3$ 为 160MPa 下的燃油密度。

② $t - \varepsilon$ 到 t 时刻通过高压油泵流入高压油管的燃油质量为：

$$m_{\lambda}(t, T) = \begin{cases} \rho_1 \cdot V_{\lambda}(t, T); & t \in (Z(T+10), Z(T+10)+T) \\ 0; & t \in (ZT, ZT+10) \\ \text{其中 } Z \text{ 为非负整数, 且 } Z \in [0, 100/(T+10)] \end{cases} \quad (5)$$

式中 $\rho_1 = 0.8705\text{g/mm}^3$ 为 160MPa 下的燃油密度；

③ 根据已知条件得喷油嘴出油速率 $\mu(t)$ ：

$$\mu(t) = \begin{cases} 100t; & t \in (0, 0.2) \\ 20; & t \in (0.2, 2) \\ 20 - 100t; & t \in (2.2, 2.4) \\ 0; & t \in (2.4, 100) \end{cases} \quad (6)$$

④ $t - \varepsilon$ 到 t 时刻通过喷油嘴流出高压油管的燃油质量为：

$$m_{\text{出}}(t, T) = \int_{t-\varepsilon}^t \rho(t, T) \mu(t) dt \quad (7)$$

式中 $\rho(t, T)$ 为 t 时刻高压油管内的燃油密度；

⑤ t 时刻高压油管内的燃油质量为：

$$m(t, T) = m(t - \varepsilon, T) + m_{\lambda}(t, T) - m_{\text{出}}(t, T) \quad (8)$$

式中 $m(t - \varepsilon, T)$ 为 $t - \varepsilon$ 时刻高压油管的燃油质量；

⑥ t 时刻高压油管内的燃油密度：

$$\rho(t, T) = \frac{m(t, T)}{V_0} \quad (9)$$

式中 V_0 表示高压油管的体积，其值为 39270mm^3 ；

⑦ t 时刻高压油管内的压力可根据式(3)表示为：

$$P = G(\rho(t, T)) = P(t, T) \quad (10)$$

要使油管内压力尽可能稳定在 100MPa ，则 100ms 内的压力变化总量最小和波动上下限差值最小：

$$\begin{aligned}
\min z &= \int_0^{1000} |P(t, T) - 100| dt \\
\min &= P(t, T)_{\max} - P(t, T)_{\min}
\end{aligned} \tag{11}$$

综合式(4)-(11)建立优化模型如下:

$$\begin{aligned}
\min z &= \int_0^{1000} |P(t, T) - 100| dt \\
\min &= P(t, T)_{\max} - P(t, T)_{\min} \\
s.t. \left\{ \begin{aligned}
V_{\lambda}(t, T) &= \int_{t-\varepsilon}^t CA \sqrt{\frac{2(160 - P(t, T))}{\rho_1}} dt \\
m_{\lambda}(t, T) &= \begin{cases} \rho_1 \cdot V_{\lambda}(t, T); & t \in (Z(T+10), Z(T+10)+T) \\ 0; & t \in (ZT, ZT+10) \end{cases} \\
&\quad \text{其中 } Z \text{ 为非负整数, 且 } Z \in [0, 100/(T+10)] \\
\mu(t) &= \begin{cases} 100t; & t \in (0, 0.2) \\ 20; & t \in (0.2, 2) \\ 20 - 100t; & t \in (2.2, 2.4) \\ 0; & t \in (2.4, 100) \end{cases} \\
m_{\text{出}}(t, T) &= \int_{t-\varepsilon}^t \rho(t, T) \mu(t) dt \\
m(t, T) &= m(t - \varepsilon, T) + m_{\lambda}(t, T) - m_{\text{出}}(t, T) \\
\rho(t, T) &= \frac{m(t, T)}{V_0} \\
P &= G(\rho(t, T)) = P(t, T)
\end{aligned} \right. \tag{12}
\end{aligned}$$

(3) 仿真计算单向阀开启时长 T

由于高压油管的瞬时压力值难以通过计算求得, 为了更精确描述压力的波动, 将 100 毫秒的时长进行离散处理, 均分成 n 个时段区间, 每个区间长度为 t_0 ms, 转化为考虑每个区间之间的压力变化。当区间长度 t_0 越小, 精度越大。

目标函数在离散状态下可转化为:

$$\min z = \sum_{k=1}^n t_0 |P(kt_0) - 100| \tag{13}$$

决策变量: 单向阀开启时长 T

假设单向阀开启时长, 单向阀从 0 时刻开启, 第 k 个区间内油管的燃油流入量:

$$V_{\lambda} = \begin{cases} CA \sqrt{\frac{2(160 - P((k-1)t_0))}{\rho_1}} \cdot t_0; & k \in [\frac{T+10}{t_0}Z, \frac{T+10}{t_0}Z + \frac{T}{t_0}] \\ 0; & k \in [\frac{ZT}{t_0}, \frac{ZT+10}{t_0}] \\ \text{其中} Z \text{ 为非负整数, 且 } Z \in [0, 100/(T+10)] \end{cases} \quad (14)$$

其中 $\rho_1 = 0.8705 \text{g/mm}^3$;

第 k 个区间内油管的燃油流出量:

$$V_{\text{出}} = \frac{\mu((k-1)t_0) + \mu(kt_0)}{2} \cdot t_0 \quad (15)$$

其中 $\mu((k-1)t_0)$ 和 $\mu(kt_0)$ 可由式 (6) 求得;

第 k 个区间时段的高压油管的密度为:

$$\rho_{kt_0} = \frac{F(P_{(k-1)t_0}) \cdot V_0 + V_{\lambda} \cdot \rho_1}{V_0 + V_{\text{出}}} \quad (16)$$

式中 V_0 为高压油管的容积: $V_0 = 39270 \text{mm}^3$;

综合式 (3), (13) - (16) 可得:

第 k 个区间的压力值可表示如下:

$$P_{kt_0} = \begin{cases} G \left(\frac{\rho_{(k-1)t_0} V + CA \sqrt{\frac{320 - 2P((k-1)t_0)}{\rho_1}}}{V + \frac{\mu_{k-1} + \mu_k}{2} t_0} \right); & k \in [\frac{T+10}{t_0}Z, \frac{T+10}{t_0}Z + \frac{T}{t_0}] \\ G \left(\frac{\rho_{(k-1)t_0} V}{V + \frac{\mu_{k-1} + \mu_k}{2} t_0} \right); & k \in [\frac{ZT}{t_0}, \frac{ZT+10}{t_0}] \\ \text{其中} Z \text{ 为非负整数, 且 } Z \in [0, 100/(T+10)] \end{cases} \quad (17)$$

当初始时刻 $k=1$ 时, $P_{t_0} = 100 \text{MPa}$, $\rho_{t_0} = 0.850 \text{mg/mm}^3$, 根据式 (13) 可迭代计算出每个区间的高压油管的压力和密度值。

对任一固定的 T , P_{kt_0} 的定义域唯一确定, 因此总波动量 z 都有一个确定的值, 即可将总波动量视为关于 T 的单变量函数: $z = f(T)$; 以 t_0 为步长, 循环遍历求出

使得总波动量 $z = \sum_{k=1}^n t_0 |P(kt_0) - 100|$ 最小的 T 的值。

5.1.2 分段设计单向阀开启时长

根据题目要求在一定调整时间内需要将高压油管内的压力从 100MPa 增加到 150MPa，之后则稳定在 150MPa。可对单向阀的开启时长分段考虑，第一段为调整阶段，即在指定的时间内将压力调至 150 MPa；第二阶段为稳定阶段，即类似于第一小问，将压力尽可能稳定在某个定值。

(1) 调整阶段：开启时长 T_1

通过控制开启时长，使得高压油管的压力值在指定时长 λ ($\lambda = 2s, 5s, \text{或} 10s$) 内将压力升到 150MPa。

即在模型一的条件表达式(4)-(10)下求目标函数：

$$\min w = |P(\lambda, T) - 150| \quad (18)$$

由于指定时长 λ 已知，即目标函数就是关于 T 的单变量函数。

对指定时长 λ 离散化划分区间，每个区间时长 t_1 ，共划分 n_1 个区间，代入式(12)得：

离散化后的目标函数可表示为：

$$\min w = |P(n_1 t_1) - 150|$$

$$P_{kt_1} = \begin{cases} G \left(\frac{\rho_{(k-1)t_1} V + CA \sqrt{\frac{320 - 2P((k-1)t_1)}{\rho_1}}}{V + \frac{\mu_{k-1} + \mu_k}{2} t_1} \right); & k \in \left[\frac{T+10}{t_0} Z, \frac{T+10}{t_0} Z + \frac{T}{t_0} \right] \\ G \left(\frac{\rho_{(k-1)t_1} V}{V + \frac{\mu_{k-1} + \mu_k}{2} t_1} \right); & k \in \left[\frac{ZT}{t_0}, \frac{ZT+10}{t_0} \right] \end{cases}$$

其中 Z 为非负整数，且 $Z \in [0, 1000/(T+10)]$

(19)

当初始时刻 $k=1$ 时， $P_{t_1} = 100MPa$ ， $\rho_{t_1} = 0.850mg/mm^3$ ，根据式(14)可迭代计算出每个区间的高压油管的压力和密度值。通过不断调整单向阀开启时长 T_1 ，求出使得 $|P(n_1 t_1) - 150|$ 最小。

(2) 稳定阶段：开启时长 T_2

类比模型一式 (12)，即高压油管内的稳定压力值从 100MPa 变为 150MPa，对稳定后的阶段同样做离散化处理，每个区间时长 t_2 ，共划分 n_2 个区间。根据式(2)可求 150MPa 下的高压油管内燃油密度 $\rho_2 = 0.8673mg/mm^3$

$$P_{kt_2} = \begin{cases} F^{-1} \left(\frac{\rho_{(k-1)t_2} V + CA \sqrt{\frac{320 - 2P_{((k-1)t_2}}{\rho_1}}}{V + \frac{\mu_{k-1} + \mu_k}{2} t_2}} \right); & k \in [10000Z, 10000Z + T_2 / t_2] \\ F^{-1} \left(\frac{\rho_{(k-1)t_2} V}{V + \frac{\mu_{k-1} + \mu_k}{2} t_2} \right); & k \notin [10000Z, 10000Z + T_2 / t_2] \end{cases} \quad (20)$$

当初始时刻 $k=1$ 时, $P_{t_2}=150\text{MPa}$, $\rho_{t_2}=0.8673\text{mg/mm}^3$, 根据式(14)可迭代计算出每个区间的高压油管的压力和密度值。通过不断调整单向阀开启时长 T_2 , 求出使得 $z = \sum_{k=1}^{n_2} t_2 |P(kt_2) - 150|$ 最小。

5.1.3 模型的求解

(1) 模型一的求解

取精度 $t_0 = 0.001\text{ms}$, 求解出单向阀开启的时长为 0.280ms 。在此条件下, 高压油管内的压力的波动状况与时间的关系如图 5-1 所示, 根据算法求解结果和图像显示, 当单向阀开启的时长为 0.28ms 时, 高压油管的压力波动范围基本呈周期性落在 $[97.5\text{MPa}, 102\text{MPa}]$ 之间。

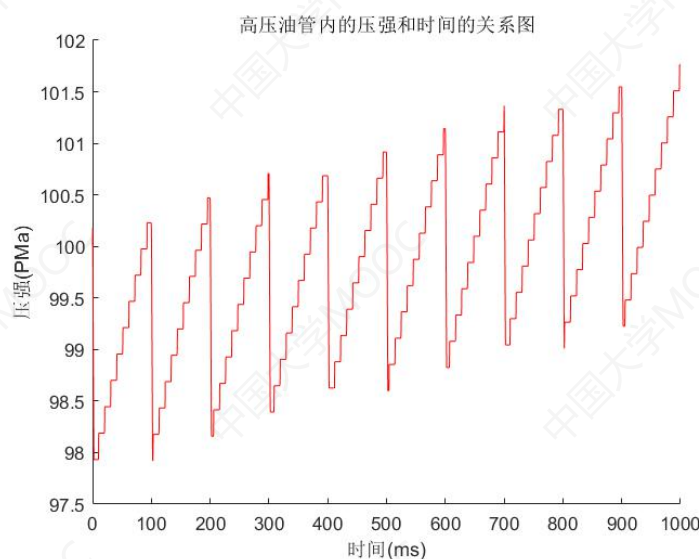


图 5-1 稳定在 100MPa 时高压油管内压力和时间的关系图

(2) 模型二的求解

取精度 $t_0 = 0.001\text{ms}$, 分别对调整阶段和稳定阶段进行离散求解, 结果如下:

① 调整阶段

表 5-2 不同调整时长下单向阀开启时长

调整时间	2s	5s	10s
单向阀开启时长 T_1/ms	0.83	0.66	0.64

当调整时长 λ 给定时，高压油管的压力随时间的变化关系分别如图 5-2、图 5-3、图 5-4 所示；根据图像不难发现，高压油管的压力整体呈现不断上升的状态，直到给定时长末端开始趋于稳定。

② 稳定阶段

取精度 $t_0 = 0.001\text{ ms}$ ，求解高压油管稳定在 150 MPa 时设置单向阀开启的时长为 0.64 ms 。

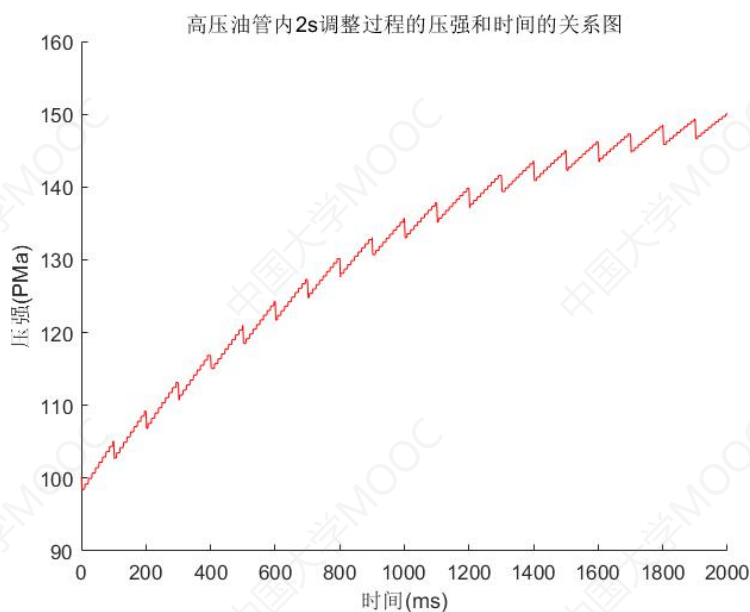


图 5-2 $\lambda = 2$ 时压力和时间的关系

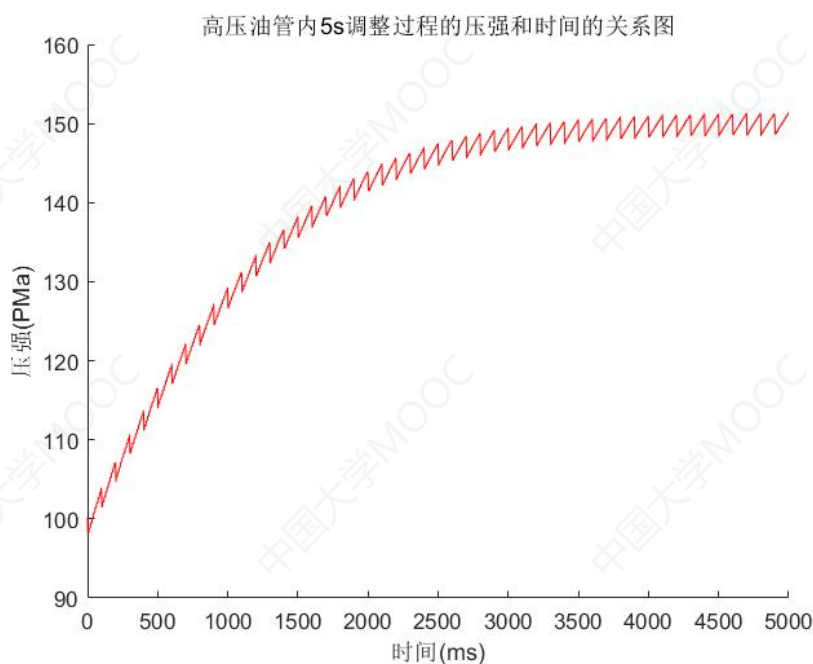


图 5-3 $\lambda = 5$ 时压力和时间关系

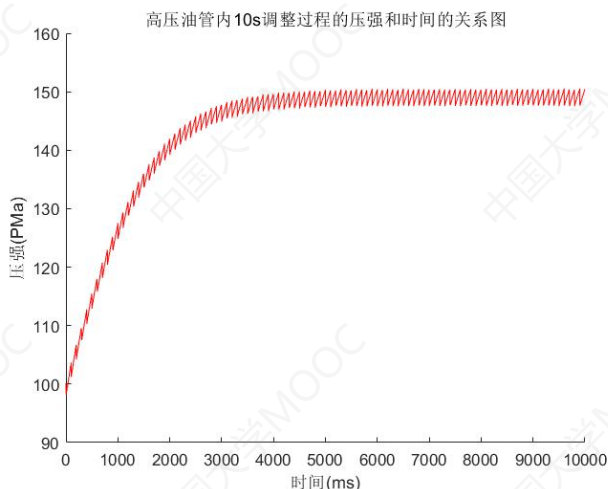


图 5-4 $\lambda = 10$ 时压力和时间关系

5.2 凸轮角速度变化状态下压力变化的模型

5.2.1 凸轮曲线拟合和针阀高度曲线拟合

利用附件二中的数据拟合针阀高度与时间之间的关系式，由于针阀的高度在 $(0, 0.45)$ 单调递增， $(0.45, 2)$ 之间稳定不变， $(2, 2.45)$ 单调递减。故对针阀高度进行分段拟合，同样采用多项式回归，发现使用四次拟合时优度较高，达到拟合要求。图 5-6 (b) 即针阀高度的拟合曲线与实际曲线对比图。

针阀高度拟合结果为：

$$H(t) = \begin{cases} -281.803t^4 + 235.938t^3 - 45.315t^2 + 2.976t - 0.039; & t \in (0, 0.45) \\ 2; & t \in (0.45, 2) \\ -279.966t^4 + 2508.774t^3 - 8401.728t^2 + 12457.583t - 6896.929; & t \in (2, 2.45) \\ 0; & t \in (2.45, 100) \end{cases} \quad (21)$$

根据附件中极坐标下极径与弧度的关系，首先可以作出凸轮的示意图，进而，考虑到转动具有周期性，我们可以对凸轮的极坐标方程进行傅里叶函数进行拟合：

设极径 r 与弧度 θ 的关系式为：

$$r(\theta) = a_0 + a \sin w\theta + b \cos w\theta$$

使用 MATLAB 的 cftool 工具进行数据拟合，得到拟合优度为 100% 时的关系式为：

$$r(\theta) = 4.826 + 2.413 \sin \theta - 2.676 \times 10^{-6} \cos \theta$$

设角速度为 ω 的 t 时刻的最大高度为 $h(\omega, t)$ ，极角为 θ 时的极径为 $R(\omega, t, \theta)$ 。则由上式可得任一时刻任一极径的解析式：

$$R(\omega, t, \theta) = r(\theta + \omega t) = 4.826 + 2.413 \sin(\theta + \omega t) - 2.676 \times 10^{-6} \cos(\theta + \omega t) \quad (22)$$

因为凸轮在转动过程中， t 时刻推动平板上下移动的高度，由此时凸轮的最大

高度确定，可知 h , R 之间满足关系：

$$h(\omega, t) = \max_{\theta \in (0, \frac{\pi}{2}) \cup (\frac{3\pi}{2}, 2\pi)} \{R(\omega, t, \theta) \cos \theta\} \quad (23)$$

根据极径的拟合解析式作出凸轮的极径与极角之间的关系图如图 5-6(a) 所示，而根据凸轮的高度与极径之间的关系可做出本问题的凸轮的轮廓曲线，如图 5-5 所示。

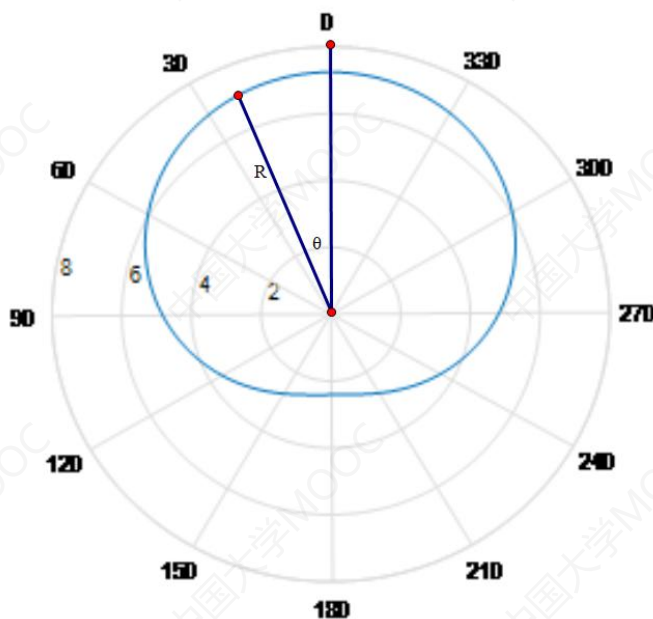
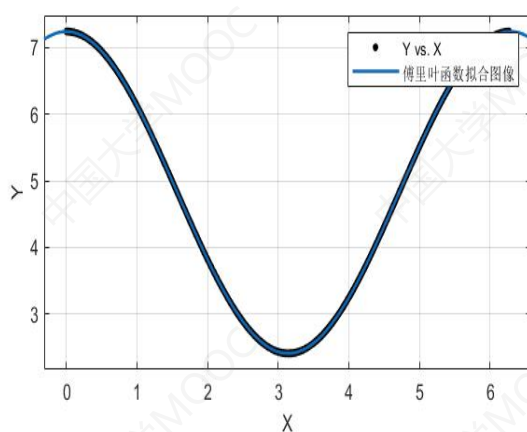
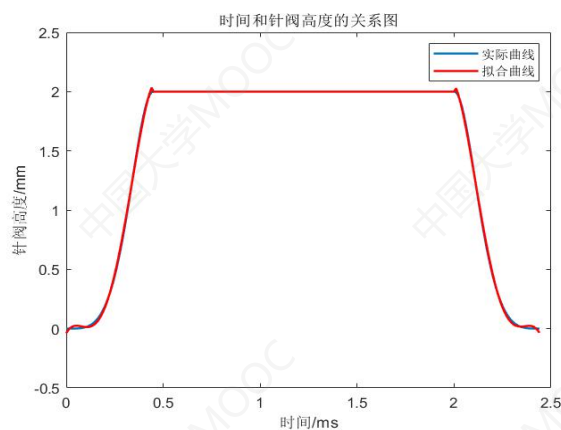


图 5-5 凸轮轮廓拟合曲线



a 极径与极角的关系图



b 针阀高度与时间的关系图

图 5-6 拟合曲线与实际曲线对比图

5.2.2 高压油泵进油

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。

决策变量：

t, ω

(1) 定义 x_1 为关于时间 t 的函数，用于描述高压油管是否进油，定义为：

$$x_1(t) = \begin{cases} 1; & P_1(t-\varepsilon) \geq P(t-\varepsilon), \text{进油} \\ 0; & P_1(t-\varepsilon) < P(t-\varepsilon), \text{不进油} \end{cases} \quad (24)$$

(2) t 时刻油泵流入油管的流速：

$$Q_1(t, \omega) = x_1(t) \cdot CA \sqrt{\frac{2(P_1(t, \omega) - P(t, \omega))}{\rho_1(t, \omega)}} \quad (25)$$

式中 A 为小孔的面积 1.54mm^2 ， $P_1(t, \omega)$ 为 t 时刻柱塞腔内压力， $P(t, \omega)$ 表示 t 时刻高压油管内压力；

(3) t 时刻高压油管流入燃油的质量为：

$$m_\lambda(t, \omega) = x_1 \int_{t-\varepsilon}^t \rho_1(t, \omega) Q_1(t, \omega) dt \quad (26)$$

(4) t 时刻高压油泵的剩余燃油质量：

$$m_1(t, \omega) = m_1(t - \varepsilon, \omega) - x_1 \int_{t-\varepsilon}^t \rho_1(t, \omega) Q_1(t, \omega) dt \quad (27)$$

(5) t 时刻高压油泵的柱塞腔体积：

$$V_1(t, \omega) = S_{\text{柱}} \cdot (7.239 - r(\omega t) + h_0) \quad (28)$$

式中 $S_{\text{柱}}$ 表示柱塞面面积为 19.63mm^2 ； ω 为凸轮角速度； $r(\omega t)$ 为 t 时刻下凸轮的极径，且凸轮最大极径为 7.239 ； h_0 表示上止点到油泵顶端的高度，根据柱塞运动到上止点时的低压容积可计算出 $h_0 = 1.02\text{mm}$ ；具体描述如图 6-6 所示。

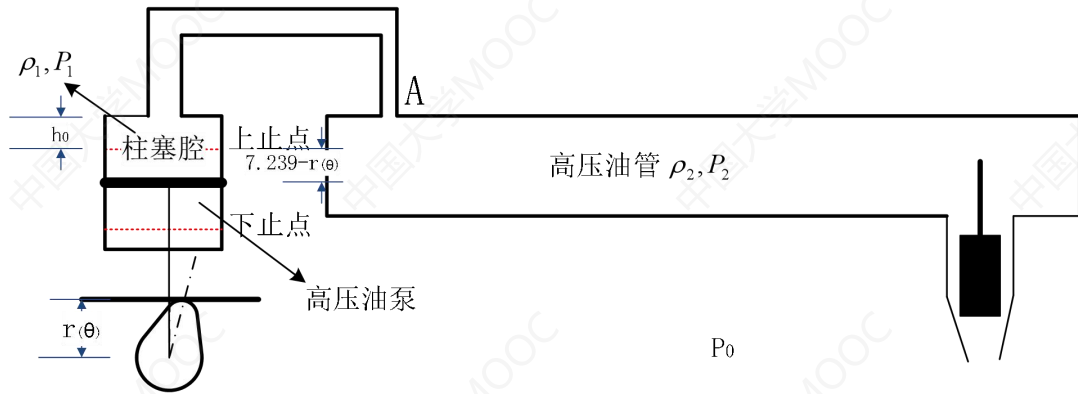


图 5-7 高压油管工作示意图

(6) 高压油泵中流入油管的燃油部分的密度为：

$$\rho_1(t, \omega) = \frac{m_1(t, \omega)}{V_1(t, \omega)} \quad (29)$$

(7) 高压油泵 t 时刻的压力为:

$$P_1 = G(\rho_1) = P_1(t, \omega) \quad (30)$$

5.2.3 喷油嘴出油

(1) 由式(16)可知针阀上升高度随时间的变化 $H(t)$, 故针阀升降过程中喷油嘴处出油空隙圆环面积为:

$$S_c = \pi(0.7 + H(t) \tan 9^\circ)^2 - 0.49\pi \quad (31)$$

(2) 喷油嘴外气压 P_0 可根据问题一中已知的喷油嘴最大流速代入流速公式中求得, 其中当喷油嘴流速最大为时, 根据附件 3 可知针阀的上升高度为 2mm, 即:

$$Q_m = 0.85 \cdot (\pi(0.7 + 2 \tan 9^\circ)^2 - 0.49\pi) \sqrt{\frac{2(100 - P_0)}{0.85}} = 20 \text{ mm}^3 / \text{ms} \quad (32)$$

式中 P_0 的值求解结果为 0.7469MPa;

(3) t 时刻喷油嘴喷出油的速率:

$$Q(t, \omega) = 0.85 S_c \sqrt{\frac{2(P(t, \omega) - P_0)}{\rho(t, \omega)}} \quad (33)$$

式中 $\rho(t, \omega)$ 表示为 t 时刻高压油管的密度; $P(t, \omega)$ 表示为 t 时刻高压油管的压力。

(4) t 时刻高压油管喷出质量为:

$$m_{\text{出}}(t, \omega) = \int_{t-\varepsilon}^t \rho(t, \omega) Q(t, \omega) dt \quad (34)$$

5.2.4 综合模型的建立

高压油管内 t 时刻的燃油质量可表示为:

$$m(t) = m(t - \varepsilon) + \int_{t-\varepsilon}^t \rho_1(t) Q_1(t) dt - \int_{t-\varepsilon}^t \rho(t) Q(t) dt \quad (35)$$

高压油管内的压力为:

$$P(t, \omega) = G(\rho(t, \omega)) = G\left(\frac{m(t, \omega)}{V_0}\right) \quad (36)$$

要使得高压油管的压力稳定, 即考虑 1 秒内的油管波动总量最小, 故目标函数为:

$$\begin{aligned} \min z &= \int_0^{100} |P(t, \omega) - 100| dt \\ \min &= P(t, \omega)_{\max} - P(t, \omega)_{\min} \end{aligned} \quad (37)$$

综合式(21)–(37)：

$$\begin{aligned}
 \min z &= \int_0^{100} |P(t, \omega) - 100| dt \\
 \min &= P(t, \omega)_{\max} - P(t, \omega)_{\min} \\
 \left\{ \begin{aligned}
 r &= 4.826 + 2.413 \sin \theta - 2.676 \times 10^{-6} \cos \theta \\
 H(t) &= \begin{cases} -281.803t^4 + 235.938t^3 - 45.315t^2 + 2.976t - 0.039, & t \in (0, 0.45) \\ 2, & t \in (0.45, 2) \\ -279.966t^4 + 2508.774t^3 - 8401.728t^2 + 12457.583t - 6896.929, & t \in (2, 2.45) \\ 0, & t \in (2.45, 100) \end{cases} \\
 x_1(t) &= \begin{cases} 1; & P_1(t - \varepsilon) \geq P(t - \varepsilon), \text{进油} \\ 0; & P_1(t - \varepsilon) < P(t - \varepsilon), \text{不进油} \end{cases} \\
 Q_1(t, \omega) &= x_1(t) \cdot CA \sqrt{\frac{2(P_1(t, \omega) - P(t, \omega))}{\rho_1(t, \omega)}} \\
 m_\lambda(t, \omega) &= x_1 \int_{t-\varepsilon}^t \rho_1(t, \omega) Q_1(t, \omega) dt \\
 m_1(t, \omega) &= m_1(t - \varepsilon, \omega) - x_1 \int_{t-\varepsilon}^t \rho_1(t, \omega) Q_1(t, \omega) dt \\
 s.t. \quad V_1(t, \omega) &= S_{\text{柱}} \cdot (7.239 - r(\omega t) + h_0) \\
 \rho_1(t, \omega) &= \frac{m_1(t, \omega)}{V_1(t, \omega)} \\
 S_c &= \pi(0.7 + H(t) \tan 9^\circ)^2 - 0.49\pi \\
 Q_m &= 0.85 \cdot (\pi(0.7 + 2 \tan 9^\circ)^2 - 0.49\pi) \sqrt{\frac{2(100 - P_0)}{0.85}} = 20 \text{ mm}^3 / \text{ms} \\
 Q(t, \omega) &= 0.85 S_c \sqrt{\frac{2(P(t, \omega) - P_0)}{\rho(t, \omega)}} \\
 m_{\text{出}}(t, \omega) &= \int_{t-\varepsilon}^t \rho(t, \omega) Q(t, \omega) dt \\
 m(t) &= m(t - \varepsilon) + \int_{t-\varepsilon}^t \rho_1(t) Q_1(t) dt - \int_{t-\varepsilon}^t \rho(t) Q(t) dt \\
 P(t, \omega) &= G(\rho(t, \omega)) = G\left(\frac{m(t, \omega)}{V_0}\right)
 \end{aligned} \right. \quad (38)
 \end{aligned}$$

5.2.5 模型的求解

类比于问题一的处理方法，将 100 毫秒的时长进行离散处理，均分成 n 个时段区间，每个区间长度为 t_0 ms，转化为考虑每个区间之间的压力变化。当区间长度 t_0 越小，精度越大。

现设已知各个物理量在 $t(t \geq 0)$ 时刻的数值，且在 $(t, t+t_0)$ 之间处于工作状态，则可以按照以下步骤求解在 $t+t_0$ 的数值

Step1: 根据 t 时刻的压力差及密度，近似计算 $t+t_0$ 时刻的流速：

$$Q_1(\omega, t+t_0) = CA \sqrt{\frac{2(P_1(\omega, t) - P(\omega, t))}{\rho_1(\omega, t)}}$$

$$Q(\omega, t+t_0) = C(S_1(t) + S_2(t)) \sqrt{\frac{2(P(\omega, t) - P_0)}{\rho(\omega, t)}}$$

Step2: 由 $t+t_0$ 时刻的流速计算 $(t, t+t_0)$ 之间流入/出的质量，从而得到 $t+t_0$ 时刻的质量：

$$\Delta m_1(\omega, t) = \int_t^{t+t_0} \rho_1(\omega, t) Q_1(\omega, t+t_0) dt$$

$$\Delta m(\omega, t) = \int_t^{t+t_0} \rho(\omega, t) Q(\omega, t+t_0) dt$$

$$m_1(\omega, t+t_0) = m_1(\omega, t) - \Delta m_1(\omega, t)$$

$$m(\omega, t+t_0) = m(\omega, t) + \Delta m_1(\omega, t) - \Delta m(\omega, t)$$

Step3: 由 $t+t_0$ 时刻的质量计算此时的密度：

$$\rho_1(\omega, t+t_0) = \frac{m_1(\omega, t+t_0)}{V_1(\omega, t+t_0)}$$

$$\rho(\omega, t+t_0) = \frac{m(\omega, t+t_0)}{V(\omega, t+t_0)}$$

Step4: 由 $t+t_0$ 时刻的密度计算此时的压力：

$$P_1 = G(\rho_1(\omega, t+t_0)) = P_1(\omega, t+t_0)$$

$$P = G(\rho(\omega, t+t_0)) = P(\omega, t+t_0)$$

回到 **Step1**，可以计算 $t+2t_0$ 时刻的流速，重复以上步骤，可以得到压力关于时间和角速度的变化图像。遍历角速度 ω ，计算当 $\sum_{k=1}^n |P(\omega, kt_0) - 100| t_0$ 取最小值时的 ω ，即为油泵的最佳角速度。

当取精度 $t_0 = 0.001 \text{ ms}$ ，求解使得高压油管稳定在 150MPa 时设置凸轮的角速度为 0.027 rad/ms 。此时高压油管内的压力波动如图 5-8 所示，基本呈现周期性波动，且波动范围大概在 (98MPa, 102.5MPa) 之间。总周期 1 秒的时间里进油质量与出油质量与时间的关系图如 5-9 所示

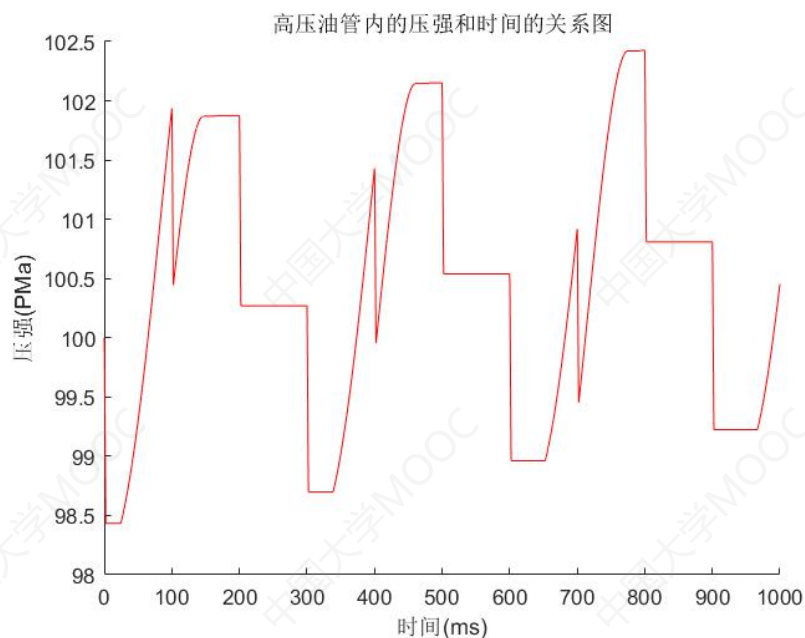


图 5-8 高压油管内的压力和时间的关系图

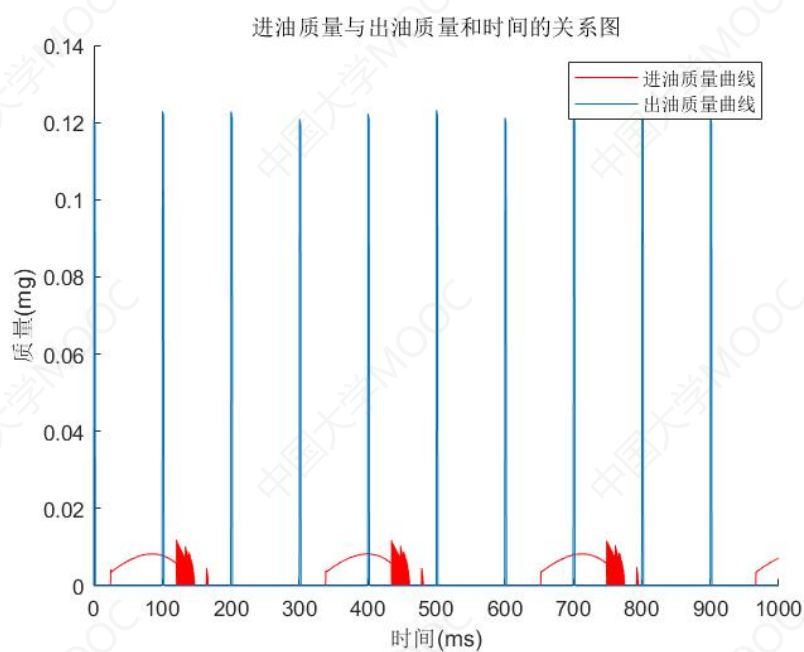


图 5-9 进油质量与出油质量和时间的关系图

5.3 新增喷油嘴和减压阀后的调整策略

5.3.1 新增喷油嘴的喷油和供油策略

假设 0 时刻油泵及另一个喷油管同时开始工作，经过时间 φ ms 后，另一个喷油管开始工作，假定新增油嘴出口面积为 $S_2(t)$ ，原喷油嘴面积为 $S_1(t)$ 。

目标函数为:

$$\begin{aligned}\min z &= \int_0^{1000} |P_2(t, \varphi) - 100| dt \\ \min &= P(t, \varphi)_{\max} - P(t, \varphi)_{\min}\end{aligned}$$

决策变量为:

$$\varphi$$

约束条件为:

- (1) 考虑到两个喷油嘴喷油机制相同, 则新增喷油嘴的出口面积与原喷油嘴出口面积的关系式为:

$$S_2(t) = S_1(t - \varphi) \quad (39)$$

- (2) 新增喷油嘴后, 任意时刻, 高压油管内的燃油流出的出孔面积则变为该时刻下两个喷油嘴的面积之和, 则综合流速可表示为:

$$Q_2(t, \varphi) = C(S_1(t) + S_2(t)) \sqrt{\frac{P_2(t) - P_0}{\rho(t)}} \quad (40)$$

- (3) 高压油管在 $t (t > 0)$ 时刻的燃油质量为:

$$m_2(t, \varphi) = m_2(t - \varepsilon, \varphi) + \int_{t-\varepsilon}^t \rho_1(t) Q_1(t) dt - \int_{t-\varepsilon}^t \rho_2(t, \varphi) Q_2(t, \varphi) dt \quad (41)$$

- (4) 高压油管 $t (t > 0)$ 时刻的密度可表示为:

$$\rho_2(t, \varphi) = \frac{m_2(t, \varphi)}{V} \quad (42)$$

- (5) 高压油管 $t (t > 0)$ 时刻压力可表示为:

$$P_2 = G(\rho_2(t, \varphi)) = P_2(t, \varphi) \quad (43)$$

综合式 (24) - (30), (39) - (43):

$$\begin{aligned}\min z &= \int_0^{1000} |P_2(t, \varphi) - 100| dt \\ \min &= P(t, \varphi)_{\max} - P(t, \varphi)_{\min}\end{aligned}$$

$$\begin{cases}
x_1(t) = \begin{cases} 1; & P_1(t-\varepsilon) \geq P(t-\varepsilon), \text{进油} \\ 0; & P_1(t-\varepsilon) < P(t-\varepsilon), \text{不进油} \end{cases} \\
Q_1(t, \omega) = x_1(t) \cdot CA \sqrt{\frac{2(P_1(t, \omega) - P(t, \omega))}{\rho_1(t, \omega)}} \\
m_{\lambda}(t, \omega) = x_1 \int_{t-\varepsilon}^t \rho_1(t, \omega) Q_1(t, \omega) dt \\
m_1(t, \omega) = m_1(t-\varepsilon, \omega) - x_1 \int_{t-\varepsilon}^t \rho_1(t, \omega) Q_1(t, \omega) dt \\
V_1(t, \omega) = S_{\text{柱}} \cdot (7.239 - r(\omega t) + h_0) \\
s.t. \begin{cases} \rho_1(t, \omega) = \frac{m_1(t, \omega)}{V_1(t, \omega)} \\ P_1 = G(\rho_1) = P_1(t, \omega) \\ S_2(t) = S_1(t - \varphi) \\ Q_2(t, \varphi) = C(S_1(t) + S_2(t)) \sqrt{\frac{P_2(t) - P_0}{\rho(t)}} \\ m_2(t, \varphi) = m_2(t-\varepsilon, \varphi) + \int_{t-\varepsilon}^t \rho_1(t) Q_1(t) dt - \int_{t-\varepsilon}^t \rho_2(t, \varphi) Q_2(t, \varphi) dt \\ \rho_2(t, \varphi) = \frac{m_2(t, \varphi)}{V} \\ P_2 = G(\rho_2(t, \varphi)) = P_2(t, \varphi) \end{cases}
\end{cases} \quad (44)$$

5.3.2 高压油泵和减压阀的控制方案

单向减压阀的减压机制可考虑两种方法：一是阈值控制：即当高压油管的压力达到某个上限值时，减压阀打开；二是时间控制：即类似于单向阀的工作机制，每打开一段固定时长后，自动关闭。等待一段时间后，再次开始工作，以此反复。

目标函数为：

$$\begin{aligned}
\min z &= \int_0^{1000} |P_2(t) - 100| dt \\
\min &= P(t)_{\max} - P(t)_{\min}
\end{aligned}$$

(1) 时间控制

假设减压阀开启时长为 T_1 ，每工作一次休息时长 T_2 ，则决策变量为：

$$T_1, T_2, t, \omega$$

① 减压阀 t 时刻的流速为：

$$Q_3(T_1, T_2, t, \omega) = CS_3 \sqrt{\frac{P_2(T_1, T_2, t, \omega) - P_0}{\rho(T_1, T_2, t, \omega)}} \quad (45)$$

式中单向减压阀的面积 $S_3 = \frac{\pi \cdot 1.4^2}{4}$;

② 高压油管在 $t (t > 0)$ 时刻通过减压阀流出的燃油质量为:

$$m_3(T_1, T_2, t, \omega) = \begin{cases} \int_{t-\varepsilon}^t \rho_2(T_1, T_2, t, \omega) \cdot Q_3(T_1, T_2, t, \omega) dt; & t \in (Z(T_1 + T_2), Z(T_1 + T_2) + T_1) \\ 0; & t \in (ZT_1, ZT_1 + T_2) \end{cases}$$

其中 Z 为非负整数, $Z \in [0, 1000/(T_1 + T_2)]$

(46)

③ 高压油管在 $t (t > 0)$ 时刻的燃油质量为:

$$m_2(T_1, T_2, t, \omega) = m_2(T_1, T_2, t - \varepsilon, \omega) + \int_{t-\varepsilon}^t \rho_1(t) Q_1(t) dt - \int_{t-\varepsilon}^t \rho_2(T_1, T_2, t, \omega) Q_2(T_1, T_2, t, \omega) dt - \int_{t-\varepsilon}^t \rho_2(T_1, T_2, t, \omega) Q_3(T_1, T_2, t, \omega) dt$$
(47)

④ 高压油管 $t (t > 0)$ 时刻的密度可表示为:

$$\rho_2(T_1, T_2, t, \omega) = \frac{m_2(T_1, T_2, t, \omega)}{V}$$
(48)

⑤ 高压油管 $t (t > 0)$ 时刻压力可表示为:

$$P_2 = G(\rho_2(T_1, T_2, t, \omega)) = P_2(T_1, T_2, t, \omega)$$
(49)

综合式 (24) - (30), (39) - (43), (45) - (49)

$$\min z = \int_0^{1000} |P_2(T_1, T_2, t, \omega) - 100| dt$$

$$\min = P(T_1, T_2, t, \omega)_{\max} - P(T_1, T_2, t, \omega)_{\min}$$

$$\begin{aligned}
& \left\{ \begin{aligned} x_1(t) &= \begin{cases} 1; & P_1(t-\varepsilon) \geq P(t-\varepsilon), \text{进油} \\ 0; & P_1(t-\varepsilon) < P(t-\varepsilon), \text{不进油} \end{cases} \\ Q_1(t, \omega) &= x_1(t) \cdot CA \sqrt{\frac{2(P_1(t, \omega) - P(t, \omega))}{\rho_1(t, \omega)}} \\ m_\lambda(t, \omega) &= x_1 \int_{t-\varepsilon}^t \rho_1(t, \omega) Q_1(t, \omega) dt \\ m_1(t, \omega) &= m_1(t-\varepsilon, \omega) - x_1 \int_{t-\varepsilon}^t \rho_1(t, \omega) Q_1(t, \omega) dt \\ V_1(t, \omega) &= S_{\text{柱}} \cdot (7.239 - r(\omega t) + h_0) \\ \rho_1(t, \omega) &= \frac{m_1(t, \omega)}{V_1(t, \omega)} \\ s.t. \quad P_1 &= G(\rho_1) = P_1(t, \omega) \\ Q_3(T_1, T_2, t, \omega) &= CS_3 \sqrt{\frac{P_2(T_1, T_2, t, \omega) - P_0}{\rho(T_1, T_2, t, \omega)}} \\ m_3(T_1, T_2, t, \omega) &= \begin{cases} \int_{t-\varepsilon}^t \rho_2(T_1, T_2, t, \omega) \cdot Q_3(T_1, T_2, t, \omega) dt; & t \in (Z(T_1 + T_2), Z(T_1 + T_2) + T_1) \\ 0; & t \in (ZT_1, ZT_1 + T_2) \end{cases} \\ &\quad \text{其中 } Z \text{ 为非负整数, 且 } Z \in [0, 1000/(T_1 + T_2)] \\ m_2(T_1, T_2, t, \omega) &= m_2(T_1, T_2, t-\varepsilon, \omega) + \int_{t-\varepsilon}^t \rho_1(t) Q_1(t) dt - \int_{t-\varepsilon}^t \rho_2(T_1, T_2, t, \omega) Q_2(T_1, T_2, t, \omega) dt - m_3(T_1, T_2, t, \omega) \\ \rho_2(T_1, T_2, t, \omega) &= \frac{m_2(T_1, T_2, t, \omega)}{V} \\ P_2 &= G(\rho_2(T_1, T_2, t, \omega)) = P_2(T_1, T_2, t, \omega) \end{aligned} \right. \quad (50)
\end{aligned}$$

(2) 阈值控制

假设高压油管内的压力超过 p 值时, 减压阀自动打开, 此时决策变量为:

$$t, p$$

① 减压阀 t 时刻的流速为:

$$Q_3(t, p) = CS_3 \sqrt{\frac{P_2(t, p) - P_0}{\rho(t, p)}} \quad (51)$$

式中单向减压阀的面积 $S_3 = \frac{\pi \cdot 1.4^2}{4} = 1.54 \text{ mm}^2$;

② 高压油管在 t ($t > 0$) 时刻通过减压阀流出的燃油质量为:

$$m_3(t, p) = \begin{cases} \int_{t-\varepsilon}^t \rho_2(t, p) \cdot Q_3(t, p) dt; & P_2(t, p) \geq p \\ 0; & P_2(t, p) < p \end{cases} \quad (52)$$

③ 高压油管 $t (t > 0)$ 时刻的密度可表示为:

$$\rho_2(t, p) = \frac{m_2(t, p)}{V_0} \quad (53)$$

④ 高压油管 $t (t > 0)$ 时刻压力可表示为:

$$P_2 = G(\rho_2(t, p)) = P_2(t, p) \quad (54)$$

综合式 (24) - (30), (39) - (43), (51) - (54)

$$\begin{aligned} \min z &= \int_0^{1000} |P_2(t, p) - 100| dt \\ \min &= P_2(t, p)_{\max} - P_2(t, p)_{\min} \\ \text{s.t.} \quad &\begin{cases} x_1(t) = \begin{cases} 1; & P_1(t - \varepsilon) \geq P(t - \varepsilon), \text{进油} \\ 0; & P_1(t - \varepsilon) < P(t - \varepsilon), \text{不进油} \end{cases} \\ Q_1(t, \omega) = x_1(t) \cdot CA \sqrt{\frac{2(P_1(t, \omega) - P(t, \omega))}{\rho_1(t, \omega)}} \\ m_\lambda(t, \omega) = x_1 \int_{t-\varepsilon}^t \rho_1(t, \omega) Q_1(t, \omega) dt \\ m_1(t, \omega) = m_1(t - \varepsilon, \omega) - x_1 \int_{t-\varepsilon}^t \rho_1(t, \omega) Q_1(t, \omega) dt \\ V_1(t, \omega) = S_{\text{柱}} \cdot (7.239 - r(\omega t) + h_0) \\ \rho_1(t, \omega) = \frac{m_1(t, \omega)}{V_1(t, \omega)} \\ P_1 = G(\rho_1) = P_1(t, \omega) \\ Q_3(t, p) = CS_3 \sqrt{\frac{P_2(t, p) - P_0}{\rho(t, p)}} \\ m_3(t, p) = \begin{cases} \int_{t-\varepsilon}^t \rho_2(t, p) \cdot Q_3(t, p) dt; & P_2(t, p) \geq p \\ 0; & P_2(t, p) < p \end{cases} \\ \rho_2(t, p) = \frac{m_2(t, p)}{V_0} \\ P_2 = G(\rho_2(t, p)) = P_2(t, p) \end{cases} \end{cases} \quad (55)$$

5.3.3 模型的求解

(1) 问题 3(1) 的求解

考虑到高压油管的燃油质量瞬时变化，且任意时刻的实际值难以通过计算求解得到。因此，将时间离散成一段一段形式，每段时长为 t_0 。以 1 秒为周期，计算高压油管压力波动量最小。

则模型的目标函数可表示为：

$$\min z = \sum_{k=1}^n t_0 |P_2(kt_0) - 100|$$

任一时段的燃油质量都可以表示为前一个时段的燃油质量与当时段的变化量之和：

$$m_2(kt_0) = m_2((k-1)t_0) + t_0 [\rho_1((k-1)t_0)Q_1((k-1)t_0) - \rho_2((k-1)t_0)Q_2((k-1)t_0)]$$

任一时段的燃油流速可用前一时段的压力描述为：

$$Q_2(kt_0) = C(S_1(kt_0) + S_2(kt_0)) \sqrt{\frac{P_2((k-1)t_0) - P_0}{\rho((k-1)t_0)}}$$

当取 $t_0 = 0.001ms$ ，求出 $\omega = 0.057rad/s$, $\varphi = 3.97ms$ ；此参数条件下高压油管内压力随时间的变化图和进出油质量与时间的关系图如下：

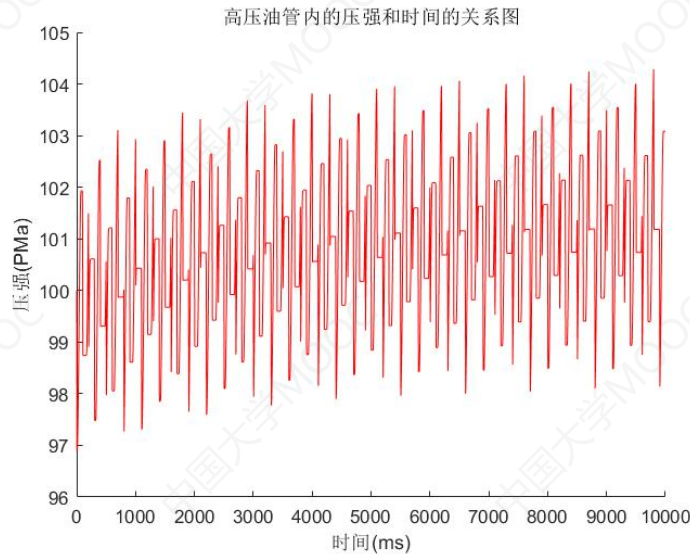


图 5-10 高压油管内的压力随时间的变化关系图

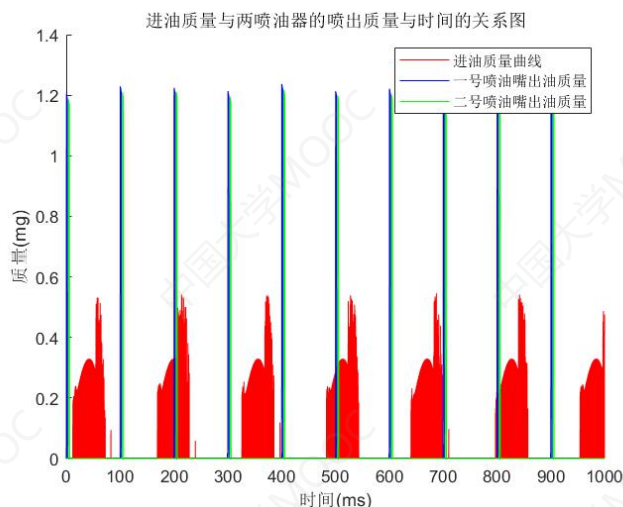


图 5-11 进油质量与两个喷油器喷出质量与时间的关系图

(2) 问题 3(2) 的求解

方法一：时间控制下，对模型 (50) 离散求解得出：减压阀的控制策略设计为：工作时长为 $T_1 = 0.037ms$ ，固定休息时长为 $T_2 = 32.06ms$ ；高压油泵的凸轮角速度设计为： $\omega = 0.057rad/ms$ 。

方法二：阈值控制下，高压油泵的凸轮角速度设计为 $\omega = 0.057rad/s$ ，设计的阈值为 $103.3MPa$ 。

六、灵敏度分析与模型的检验

6.1 灵敏度分析

存在一个数据是由相关文献的查阅得到的大致范围并结合题意给出，因此考虑到数据的误差与不准确性。

例如问题 3 中的第二问求解最优的高压油泵和减压阀的控制方案中，利用了基于固定压力的阈值调节方法中，减压阀连接的外部低压油路的固定压力的取值具有较大的不确定性。因此对其进行参数调节，以讨论最优高压油泵和减压阀的控制方案的角速度和阈值的影响。将外部低压油路的固定压力从 $0-100MPa$ 并以 $2MPa$ 为步长进行循环遍历得到如下图所示的对应的角速度变化和减压阀开启的高压油管内的阈值变化关系图。

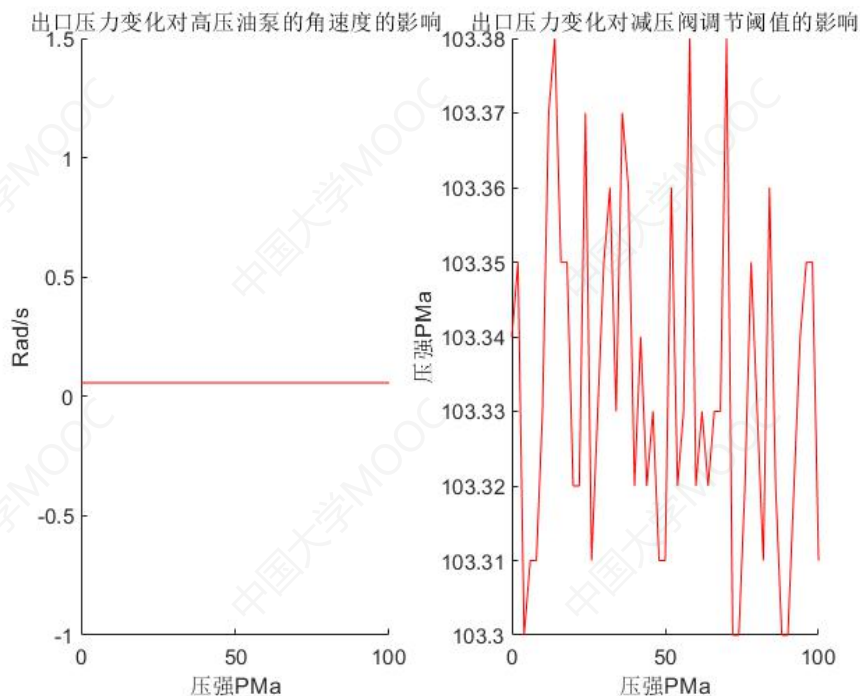


图 6-1 角速度变化和减压阀开启的高压油管内的阈值变化关系图

从图 6-1 中可以看出减压阀外部的固定的低压油路中的压力的变化对高压油泵的角速度和减压阀的阈值波动影响较小。

并对其进行变异系数的计算

根据变异系数： $C_v = \frac{\text{标准偏差}}{\text{平均值}} \times 100\%$ 计算公式求出对应的角速度和压力的变

异系数为：

表 6-1 变异系数

角速度变异系数 C_ω	压力的变异系数 C_p
4.9×10^{-14}	0.69

结论：结合图表和变异系数大小得出第三问中的基于固定压力的阈值调节方法的最优控制方案高压油泵角速度0.057，阈值103.3MPa的结果具有较大的置信度和稳定性，该模型的稳健性较好。

6.2 模型的检验

(1) 问题 1.1 的检验

假定高压油管的压力值始终为100MPa 不变，不考虑压力的浮动误差，则燃油单位时间里流速 Q 不变,即：

$$Q_1 = CA \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_1}}$$

式中 $\Delta P = 60 \text{ MPa}$ ， 流量系数 $C = 0.85$ ， A 为小孔的面积 mm^2 ， 算出

$$Q_1 = 15.36 \text{ mm}^3 / \text{ms} ;$$

又有喷油嘴每次工作 2.4ms 喷出 44mm³, 1 秒可喷出 440mm³。因此单向阀同样也需要流入的燃油量:

$$Q_2 = \frac{440 \times 0.85}{\rho_1} = 429.64 \text{ mm}^3$$

代入求解得到的 $T=0.277\text{ms}$, 则 1 秒内单向阀总开通时间: $\frac{1000}{T+10} \cdot T = 26.95\text{ms}$,

则 1 秒内单向阀的流入燃油量:

$$V = 26.95 \times 15.36 = 414 \text{ mm}^3$$

检验在误差范围内, 说明模型和结果是合理的

(2) 问题 1.2 的检验

分别计算调整过程末时刻的高温油管内的压力与目标值 150MPa 的相对误差, 经过约 2s, 5s, 10s 的调整过程高压油管内的压力从 100MPa 增加到 150MPa, 对应的 2s, 5s, 10s 时刻的压力差为:

表 6-2 不同调整时长的压力差

指定时长的调整过程	2s	5s	10s
压力差	0.0574MPa	1.3921MPa	0.0574MPa

由上表中的各时段对应的压力差可得增加过程中最大的压力差为 1.3921MPa, 最小的压力差为 0.0574MPa, 同时实际过程中高压油管的压力控制为连续的而计算时对模型进行离散化时间段微分处理而导致存在误差。

以 2s 为例检验在最优的单向阀开启时间附近, 求解高压油管的压力与 150MPa 的差:

表 6-3 调整时长为 2 秒时的不同单向阀开启时长下的压力差

单向阀开启时长	0.820	0.825	0.830	0.835	0.840
压力差	0.0577	0.0575	0.0574	0.0576	0.0578

结果在计算误差范围内 0.83ms 的单向阀开启时长为第一问 2s 左右调整时长的最优解。

(3) 问题 2.1 的检验

在角速度的最优解附近进行求解得到高压油管内的燃油稳定在 100MPa 左右下的 1s 内的高压油管内的平均压力, 压力的极差, 压力的标准差:

表 6-4 1 秒内高压油管的压力集中程度反应量

角速度 rad / ms	平均压力 MPa	压力的极差 MPa	压力的标准差 MPa
0.026	99.7640	1.86	1.13
0.0265	99.7641	1.86	1.12
0.027	99.7643	1.86	1.12
0.0275	99.7642	1.87	1.13
0.028	99.7648	1.89	1.13

从表 6-4 中可以得出在最优值附近进行调整时误差增大因此在计算误差范围内 0.027 为最优解且取值具有合理性。

七、模型的评价与改进

7.1 模型的优点

- (1) 本文对高压输油管内压力稳定控制问题做了模型研究。对附件中所给的数据进行了多项式回归分析,选取优度较高且形式较为简洁的方程,并由回归方程进一步推导出各个物理量与时间等变量的函数解析式。
- (2) 对喷油管和油泵处于不同工作状态时的各个物理量变化做了比较详细的说明
- (3) 将题中稳定性的要求转化为评价极差和方差的大小,再将极差和方差与时间和各个问题中所给变量(角速度,工作时间)等建立函数关系,从而转化为非线性规划问题
- (4) 模型的求解过程使用了递推的思想,并进行了仿真模拟。
- (5) 问题三对减压阀的工作模式进行了分类,分别建立了阈值控制和定时控制两种减压阀工作模型。

7.2 模型的缺点

- (1) 认为油泵处于下止点时,泵内油立刻补满,没有结合实际输油过程中油泵内部的加油过程。
- (2) 实际中减压阀根据压力差的大小有着不同的开度,在本题中为了简化模型,则认为是完全打开,与实际情况有出入。

7.3 模型的改进

- (1) 对油泵处于下止点时,泵内油立刻补满时进行状态分析;
- (2) 离散求解过程的步长在有条件下可以取精度更高的值。

八、模型的推广与应用

8.1 模型的推广

本文建立了高压输油管道压力控制的模型,其解答思想可以运用到更多的现实事件中:

- (1) 改变管道输送的物质,可以研究高压输气,高压调水时管道内部的压力控制方案;
- (2) 可以用于辅助研究消防车高压水枪的耐压设计要求;
- (3) 辅助设计控制管道减压阀的开启状态的智能电路。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 王慧敏,向建华,汪川.微运动下高压油泵柱塞副瞬态泄漏研究[J].润滑与密封,2018,43(10):33-37+88.
- [3] 李丕茂,张幽彤,谢立哲.喷射参数对共轨系统高压油管压力波动幅度的影响[J].内燃机学报,2013,31(06):550-556.

附录:

所有代码基于 **MATLAB R2018a**

代码文件名与函数的对应关系

1. 压力与弹性模量的函数关系: **fE.m**
2. 时间与针阀高程的函数关系: **fh.m**
3. 密度和压力的函数关系: **fp.m**
4. 压力差与流量的函数关系形式 1: **fQ.m**
5. 压力差与流量的函数关系形式 2: **fQ2.m**
6. 角度和极径的函数关系: **fr.m**
7. 压力和密度的函数关系: **frou.m**

代码文件名与问题的对应关系

第一题差分递推得到附件中压力对应的密度: **no1.m**

第一题高压油管内压力稳定在 100PMa: **no1_1.m**

第一题 2s 左右高压油管内压力增加到 150PMa 后保持稳定: **no1_2.m**

第一题 5s 左右高压油管内压力增加到 150PMa 后保持稳定: **no1_3.m**

第一题 10s 左右高压油管内压力增加到 150PMa 后保持稳定: **no1_4.m**

第一题高压油管内压力稳定在 150PMa: **no1_5.m**

第二题凸轮边缘曲线极角与极径的函数关系拟合: **no2_draw.m**

第二题针阀高程与时间的函数关系拟合: **no2_draw1.m**

第二题确定凸轮角速度下高压油管内压力稳定在 100PMa: **no2.m**

第三题增加一个喷油嘴喷油和供油策略的调整: **no3_1.m**

第三题基于高压油管阈值的出口压力控制: **no3_2_1.m**

第三题基于时间调节的出口压力控制: **no3_2_2.m**

灵敏度分析: **sensitivity.m**

极角与极径函数关系 傅里叶函数拟合.sfit 见支撑文件

压力与弹性模量的函数关系

fE.m

function result = fE(p)

result = 1.377373902419157e+03 + 8.874290177361140 * p;

end

时间与针阀高程的函数关系

fh.m

function result = fh(time)

```

if time < 0.45
    result =
-281.802615397640*time^4+235.938168776810*time^3-45.3148881052477*time^2+2.975747935
81541*time-0.0389060599889690;
else
    if time <= 2
        result = 2;
    else
        if time < 2.45
            result =
-298.750137765260*time^4+2674.28646999683*time^3-8947.92116690225*time^2+13257.66791
50705*time-7335.87959854093;
        else
            result = 0;
        end
    end
end

end
end

```

密度和压力的函数关系
fp.m

```

function result = fp(rou)
a = 8.874290177361140;
b = 1.377373902419157e+03;
rou0 = 0.850;
p0 = 100;
result = ( ((rou / rou0)^a) * (a * p0 + b) - b) / a;
end

```

压力差与流量的函数关系形式 1
fQ.m

```

function result = fQ(p)
%流量系数
C = 0.85;
%直径
d = 1.4;
%小孔的面积

```

```

A = pi * (d / 2)^2;
%高压侧的密度
rou = 0.871142313;
%对应的流量
result = C * A * sqrt(2 * p / rou);
end

```

压力差与流量的函数关系形式 2
fQ2.m

```

function result = fQ2(p, rou)
%流量系数
C = 0.85;
%直径
d = 1.4;
%小孔的面积
A = pi * (d / 2)^2;
%对应的流量
result = C * A * sqrt(2 * p / rou);
end

```

角度和极径的函数关系
fr.m

```

function result = fr(angle)
result = -0.0631540540760908*angle^4+0.793438181955619*angle^3-2.64657621671509*angle^2+0.969612026675749*angle+7.08990900705086;
end

```

压力和密度的函数关系
frou.m

```

function result = frou(p)
a = 8.874290177361140;
b = 1.377373902419157e+03;
rou0 = 0.850;
p0 = 100;
result = rou0 * (log((a * p + b) / (a * p0 + b)) / log(a));
end

```

第一题差分递推得到附件中压力对应的密度

no1.m

%根据附件三的数据计算对应压力下的密度

clear all

%导入对应的 100-200 的压力

p = xlsread('附件 3-弹性模量与压力', 1, 'a');

%导入对应的 100-200 的压力下的弹性模量

E = xlsread('附件 3-弹性模量与压力', 1, 'b');

%用来存储对应的 100-200 压力情况下的密度

rou = zeros(size(E, 1), 1);

rou(1) = 0.850;

%根据公式递推算出对应的密度

for i = 2 : size(E, 1)

rou(i) = rou(i - 1) + (p(i) - p(i - 1)) * rou(i - 1) / E(i - 1);

end

%导入对应的 0-100 的压力

p1 = xlsread('附件 3-弹性模量与压力', 1, 'a_1');

%导入对应的 0-100 的压力下的弹性模量

E1 = xlsread('附件 3-弹性模量与压力', 1, 'b_1');

%用来存储对应的 0-100 的压力情况下的密度

rou1 = zeros(size(E1, 1), 1);

rou1(size(E1, 1)) = 0.850;

%根据公式递推算出对应的密度

j = size(E1, 1) - 1;

for i = 1 : (size(E1, 1) - 1)

rou1(j) = rou1(j + 1) + (p1(j) - p1(j + 1)) * rou1(j + 1) / E1(j + 1);

j = j - 1;

end

%重新构造对应的压力和弹性模量之间的关系

p = [p1(2 : size(p1, 1), :); p];

p = [ones(size(p, 1), 1), p];

E = [E1(2 : size(E1, 1), :); E];

%回归寻找压力和弹性模量之间的关系

[b,bint,r,rint, stats] = regress(E, p);

第一题高压油管内压力稳定在 100PMa

no1_1.m

```

clear all
%%进行单向阀门开启时间的循环遍历
%优化目标的最小值
min = inf;
%进油口的密度
inputrou = 0.871142313;
%进油口的恒定 160Mpa 的压力
inputp = 160;
%喷油速率的对应的斜率
k = 20 / 0.2;
%高压油管对应的体积
oilV = 500 * (10 / 2)^2 * pi;
%最优目标对应的单向阀门的开启时间
bestt = 0;
%用来存储对应的时间的油管内的压力和时间
tempp = [];
temptime = [];
%存储最优情况下的对应的时间和压力
finalp = [];
finaltime = [];

for t = 0.27 : 0.01 : 0.29 %单位为毫秒
    tempp = [];
    temptime = [];
    %时间的微分单位为毫秒
    dt = 0.01;
    %用来存储每一个微分阶段的油管的压力
    %初始值为 100Mpa
    oilp = 100;
    %用来存储每一个阶段的油管内的密度
    %初始值为 0.850
    oilrou = 0.850;
    %油管内的油的质量
    m = oilV * oilrou;
    %用来存储积分的结果数值
    sum = 0;
    %存储微分的份数单位为毫秒
    n = 1000 / dt;
    %对时间的累加判断是否有出油和进油
    time = 0;
    %计算已经加油的时间判断是否中断 10ms

```



```

overtime = 0;
%%对微分的每一份进行求解
for i = 1 : n
    %判断是否是初始状态
    if i == 1
        %计算压力差
        dp = inputp - oilp;
        %计算油管的流量
        Q = fQ(dp);
        %计算流入的体积
        V = Q * dt;
        %计算流入的质量
        inputm = V * inputrou;
        %计算流出的质量
        outputm = (k * dt) * dt / 2 * oilrou;
        %该时段的油管内的油的质量
        m = m + inputm - outputm;
        %该时段的油管内的密度
        oilrou = m / oilV;
        %计算该时段的油管内的压力
        %代入密度压力的关系函数
        oilp = fp(oilrou);
        %对微分后的积分进行计算
        sum = sum + abs(oilp - 100) * dt;
        %对应压力的存储
        tempp = [tempp, oilp];
        %对应时间的存储
        temptime = [temptime, time];
        %对应的总时间段变化
        time = time + dt;
        %对应的已经加油的时间累加
        overtime = overtime + dt;
    else
        %判断已经加油时间是否超过单向阀开启的时间
        if overtime >= t
            %超过则休息 10ms
            overtime = -10;
        end
    end
end

```

```

%判断是否需要加油
if overtime >= 0 && overtime <= t
    %计算压力差
    dp = inputp - oilp;
    %计算油管的流量
    Q = fQ(dp);
    %计算流入的体积
    V = Q * dt;
    %计算流入的质量
    inputm = V * inputrou;
    %对应的加油的时间增加
    overtime = overtime + dt;
else
    %不需要加油
    %流入质量变为 0
    inputm = 0;
    %对应的加油时间增加
    overtime = overtime + dt;
end

%判断是否需要出油
if mod(time, 100) >= 0 && mod(time, 100) <= 2.4
    %需要出油
    %判断喷油的速率处于哪一个阶段
    if mod(time, 100) >= 0.2 && mod(time, 100) <= 2.2
        %计算流出的质量
        outputm = (20 * dt) * oilrou;
    else
        %计算流出的质量
        outputm = (k * dt) * dt / 2 * oilrou;
    end
else
    %不需要出油
    outputm = 0;
end

%该时段的油管内的油的质量
m = m + inputm - outputm;
%该时段的油管内的密度
oilrou = m / oilV;
%计算该时段的油管内的压力

```

```

    %代入密度压力的关系函数
    oilp = fp(oilrou);
    %对应压力的存储
    tempp = [tempp, oilp];
    %对应时间的存储
    temptime = [temptime, time];
    %对微分后的积分进行计算
    sum = sum + abs(oilp - 100) * dt;
    %对应的总时间段变化
    time = time + dt;
end
end

%判断是否为最优目标数值
if sum < min
    bestt = t;
    min = sum;
    finalp = tempp;
    finaltime = temptime;
end

end

%最优的单向阀开启的时长
bestt;
%bestt 0.028ms

%绘制压力和时间关系图
title('高压油管内的压力和时间关系图');
hold on
plot(finaltime, finalp, 'r');
xlabel('时间(ms)');
ylabel('压力(PMa)');

%进行模型的检验
%高压油管内的压力的变化的均值
averagep = mean(finalp);

%高压油管压力变化的标准差
stdp = std(finalp);

```

%高压油管内的压力变化的最大极差

gap1 = abs(max(finalp) - 100);

gap2 = abs(min(finalp) - 100);

gap = max(gap1, gap2);

%averagep 99.7939

%stdp 0.8324

%gap 2.0801

由于第一题 2s,5s,10s,左右高压油管内压力增加到 150MPa 后保持稳定的代码高度相似现给出第一组 2s 左右高压油管内压力增加到 150MPa 后保持稳定的代码。

clear all

%%两秒的时候高压油管的压力增加到 150Mpa

%%进行单向阀门开启时间的循环遍历

%进油口的密度

inputrou = 0.871142313;

%进油口的恒定 160Mpa 的压力

inputp = 160;

%喷油速率的对应的斜率

k = 20 / 0.2;

%高压油管对应的体积

oilV = 500 * (10 / 2)^2 * pi;

%最优目标对应的单向阀门的开启时间

bestt = 0;

%到达压力的误差

ebs = 0.1;

%最后达到的最优压力

bestp = 0;

%用来存储对应的时间的油管内的压力和时间

tempp = [];

temptime = [];

%存储最优情况下的对应的时间和压力

finalp = [];

finaltime = [];

for t = 0.82 : 0.01 : 0.84 %单位为毫秒

tempp = [];

temptime = [];

%时间的微分单位为毫秒

```

dt = 0.02;
%用来存储每一个微分阶段的油管的压力
%初始值为 100Mpa
oilp = 100;
%用来存储每一个阶段的油管内的密度
%初始值为 0.850
oilrou = 0.850;
%油管内的油的质量
m = oilV * oilrou;
%存储微分的份数单位为毫秒
n = 2000 / dt;
%对时间的累加判断是否有出油和进油
time = 0;
%计算已经加油的时间判断是否中断 10ms
overtime = 0;

%%对微分的每一份进行求解
for i = 1 : n
    %判断是否是初始状态
    if i == 1
        %计算压力差
        dp = inputp - oilp;
        %计算油管的流量
        Q = fQ(dp);
        %计算流入的体积
        V = Q * dt;
        %计算流入的质量
        inputm = V * inputrou;
        %计算流出的质量
        outputm = (k * dt) * dt / 2 * oilrou;
        %该时段的油管内的油的质量
        m = m + inputm - outputm;
        %该时段的油管内的密度
        oilrou = m / oilV;
        %计算该时段的油管内的压力
        %代入密度压力的关系函数
        oilp = fp(oilrou);
        %对应压力的存储
        tempp = [tempp, oilp];
        %对应时间的存储
        temptime = [temptime, time];
    end
end

```

```

%对应的总时间段变化
time = time + dt;
%对应的已经加油的时间累加
overtime = overtime + dt;

else

%判断已经加油时间是否超过单向阀开启的时间
if overtime >= t
    %超过则休息 10ms
    overtime = -10;
end

%判断是否需要加油
if overtime >= 0 && overtime <= t
    %计算压力差
    dp = inputp - oilp;
    %计算油管的流量
    Q = fQ(dp);
    %计算流入的体积
    V = Q * dt;
    %计算流入的质量
    inputm = V * inputrou;
    %对应的加油的时间增加
    overtime = overtime + dt;
else
    %不需要加油
    %流入质量变为 0
    inputm = 0;
    %对应的加油时间增加
    overtime = overtime + dt;
end

%判断是否需要出油
if mod(time, 100) >= 0 && mod(time, 100) <= 2.4
    %需要出油
    %判断喷油的速率处于哪一个阶段
    if mod(time, 100) >= 0.2 && mod(time, 100) <= 2.2
        %计算流出的质量
        outputm = (20 * dt) * oilrou;
    else

```

```

        %计算流出的质量
        outputm = (k * dt) * dt / 2 * oilrou;
    end
    else
        %不需要出油
        outputm = 0;
    end

    %该时段的油管内的油的质量
    m = m + inputm - outputm;
    %该时段的油管内的密度
    oilrou = m / oilV;
    %计算该时段的油管内的压力
    %代入密度压力的关系函数
    oilp = fp(oilrou);
    %对应压力的存储
    tempp = [tempp, oilp];
    %对应时间的存储
    temptime = [temptime, time];
    %对应的总时间段变化
    time = time + dt;
end

end

%判断是否达到了 150PMa
if abs(oilp - 150) <= ebs
    bestp = oilp;
    bestt = t;
    finalp = tempp;
    finaltime = temptime;
end

end

%最优的单向阀开启的时长
bestt;
%bestt 0.83ms

%绘制压力和时间的关系图
title('高压油管内 2s 调整过程的压力和时间的关系图');

```

```

hold on
plot(finaltime, finalp, 'r');
xlabel('时间(ms)');
ylabel('压力(PMa)');

```

第一题高压油管内压力稳定在 150PMa
no1_5.m

```

clear all
%%进行单向阀门开启时间的循环遍历
%优化目标的最小值
min = inf;
%进油口的密度
inputrou = 0.871142313;
%进油口的恒定 160Mpa 的压力
inputp = 160;
%喷油速率的对应的斜率
k = 20 / 0.2;
%高压油管对应的体积
oilV = 500 * (10 / 2)^2 * pi;
%最优目标对应的单向阀门的开启时间
bestt = 0;
%用来存储对应的时间的油管内的压力和时间
tempp = [];
temptime = [];
%存储最优情况下的对应的时间和压力
finalp = [];
finaltime = [];

for t = 0.64 : 0.001 : 0.65 %单位为毫秒
tempp = [];
temptime = [];
%时间的微分单位为毫秒
dt = 0.01;
%用来存储每一个微分阶段的油管的压力
%初始值为 100Mpa
oilp = 100;
%用来存储每一个阶段的油管内的密度
%初始值为 0.867946960132912
oilrou = 0.867946960132912;
%油管内的油的质量

```



```

m = oilV * oilrou;
%用来存储积分的结果数值
sum = 0;
%存储微分的份数单位为毫秒
n = 1000 / dt;
%对时间的累加判断是否有出油和进油
time = 0;
%计算已经加油的时间判断是否中断 10ms
overtime = 0;
%%对微分的每一份进行求解
for i = 1 : n
    %判断是否是初始状态
    if i == 1
        %计算压力差
        dp = inputp - oilp;
        %计算油管的流量
        Q = fQ(dp);
        %计算流入的体积
        V = Q * dt;
        %计算流入的质量
        inputm = V * inputrou;
        %计算流出的质量
        outputm = (k * dt) * dt / 2 * oilrou;
        %该时段的油管内的油的质量
        m = m + inputm - outputm;
        %该时段的油管内的密度
        oilrou = m / oilV;
        %计算该时段的油管内的压力
        %代入密度压力的关系函数
        oilp = fp(oilrou);
        %对微分后的积分进行计算
        sum = sum + abs(oilp - 150) * dt;
        %对应压力的存储
        tempp = [tempp, oilp];
        %对应时间的存储
        temptime = [temptime, time];
        %对应的总时间段变化
        time = time + dt;
        %对应的已经加油的时间累加
        overtime = overtime + dt;
    end
end

```

else

%判断已经加油时间是否超过单向阀开启的时间

if overtime >= t

%超过则休息 10ms

overtime = -10;

end

%判断是否需要加油

if overtime >= 0 && overtime <= t

%计算压力差

dp = inputp - oilp;

%计算油管的流量

Q = fQ(dp);

%计算流入的体积

V = Q * dt;

%计算流入的质量

inputm = V * inputrou;

%对应的加油的时间增加

overtime = overtime + dt;

else

%不需要加油

%流入质量变为 0

inputm = 0;

%对应的加油时间增加

overtime = overtime + dt;

end

%判断是否需要出油

if mod(time, 100) >= 0 && mod(time, 100) <= 2.4

%需要出油

%判断喷油的速率处于哪一个阶段

if mod(time, 100) >= 0.2 && mod(time, 100) <= 2.2

%计算流出的质量

outputm = (20 * dt) * oilrou;

else

%计算流出的质量

outputm = (k * dt) * dt / 2 * oilrou;

end

else

%不需要出油

```

        outputm = 0;
    end

    %该时段的油管内的油的质量
    m = m + inputm - outputm;
    %该时段的油管内的密度
    oilrou = m / oilV;
    %计算该时段的油管内的压力
    %代入密度压力的关系函数
    oilp = fp(oilrou);
    %对应压力的存储
    tempp = [tempp, oilp];
    %对应时间的存储
    temptime = [temptime, time];
    %对微分后的积分进行计算
    sum = sum + abs(oilp - 150) * dt;
    %对应的总时间段变化
    time = time + dt;
end
end

%判断是否为最优目标数值
if sum < min
    bestt = t;
    min = sum;
    finalp = tempp;
    finaltime = temptime;
end

end

%最优的单向阀开启的时长
bestt;
%0.64ms

%绘制压力和时间的关系图
title('稳定在 150PMa 下高压油管内的压力和时间的关系图');
hold on
plot(finaltime, finalp, 'r');
xlabel('时间(ms)');
ylabel('压力(PMa)');

```

```
%进行模型的检验  
%计算时间末的压力偏差
```

```
d = abs(finalp(1, end) - 150);
```

```
%d 0.0574
```

第二题凸轮边缘曲线极角与极径的函数关系拟合
no2_draw.m

```
close all;  
clear all;  
clc
```

```
A = xlsread('附件 1-凸轮边缘曲线.xlsx');
```

```
disp(A)
```

```
theta = A(1 : 628);
```

```
R = A(629 : 1256);
```

```
plot(theta, R, 'r', 'LineWidth', 1.5);
```

```
p = polyfit(theta, R, 4);
```

```
pval = polyval(p, theta);
```

```
hold on;
```

```
plot(theta, pval, 'LineWidth', 1.5);  
title('极角与极径的关系');  
xlabel('角度/Rad');  
ylabel('极径/mm');  
legend('实际曲线', '拟合预测曲线');
```

```
close all;  
clear all;
```

```
clc
```

```
A = xlsread('附件 1-凸轮边缘曲线.xlsx');
```

```
fprintf('x, y\n')
```

```
disp(A)
```

```
X = A(1 : 628);
```

```
Y = A(629 : 1256);
```

```
polar(X, Y);
```

```
hold on
```

```
x = 0 : 0.05 : 6.27;
```

```
y = spline(X, Y, x);
```

```
polar(x, y, 'r');
```

```
hold on
```

```
title('极角和极径的关系');
```

```
xlabel('极角(°)');
```

```
ylabel('极径(mm)');
```

第二题针阀高程与时间的函数关系拟合

```
no2_draw1.m
```

```
clear all;
```

```
clc
```

%对时间和针阀上升高度的拟合

%第一段

```
time = xlsread('附件 2-针阀运动曲线.xlsx', 1, 'a');
```

```
h = xlsread('附件 2-针阀运动曲线.xlsx', 1, 'b');
```

```
p = polyfit(time, h, 4);
```

```
pval = polyval(p, time);
```

%第二段

```
time1 = xlsread('附件 2-针阀运动曲线.xlsx', 1, 'a_2');
```

```
h1 = xlsread('附件 2-针阀运动曲线.xlsx', 1, 'b_2');
```

```
p1 = polyfit(time1, h1, 4);
```

```
pval1 = polyval(p1, time1);
```

```

%第三段
t = 0.45 : 0.01 : 2;
t = t.';
temph = ones(size(t, 1), 1) * 2;

%画出实际图像和拟合后的图像
H = [h; temph; h1];
T = [time; t; time1];
YH = [pval; temph; pval1];

plot(T, H, 'LineWidth', 1.5);
hold on
plot(T, YH, 'r', 'LineWidth', 1.5);
title('时间和针阀高度的关系图');
xlabel('时间/ms');
ylabel('针阀高度/mm');
legend('实际曲线', '拟合曲线');

```

第二题确定凸轮角速度下高压油管内压力稳定在 100PMa
no2.m

```

clear all
%%进行凸轮角速度的循环遍历
%优化目标的最小值
minp = inf;
%初始的低压燃油的压力 0.50MPa
inputp = 0.50;
%初始的燃油在 0.50PMa 下的密度
inputrou = 0.80458041413329;
%初始的燃油流入量
inputm = 0;
%高压油泵的初始总体积
heightV = 20 + (5 / 2)^2 * pi * 4.826;
%高压油泵的初始的质量
heightm = heightV * inputrou;
%高压油泵的初始的高度
H = 4.826 + (20) / (pi * 2.5 * 2.5);
%高压油泵的初始的底面积
S = pi * (5/2)^2;
%高压油管对应的体积

```

```

oilV = 500 * (10 / 2)^2 * pi;
%到达下至点后燃油补充的等待时间
%根据第一问设置为 10ms
waittime = 0;
%最优目标凸轮的角速度
bestw = 0;
%外部的压力
%根据第一题的隐含的条件进行计算
outp = 100 - (20 * 20 * 0.85) / (2 * 0.85^2 * ((0.7)^2 * pi)^2);

```

%用来存储对应的时间的油管内的压力和时间

```
tempp = [];
```

```
temptime = [];
```

%存储最优情况下的对应的时间和压力

```
finalp = [];
```

```
finaltime = [];
```

%存储流出的燃油量

```
tempq = [];
```

```
q = [];
```

%存储输入的质量

```
tm = [];
```

%存储输出的质量

```
tm1 = [];
```

%最优方案对应的输出质量

```
finalm1 = [];
```

%最优方案对应的输入质量

```
finalm = [];
```

%进行角速度的遍历以 1000ms 作为总时长

```
for w = 0.026 : 0.001 : 0.030 %单位为 Rad/ms
```

```
tempp = [];
```

```
temptime = [];
```

```
tm = [];
```

```
tm1 = [];
```

%时间的微分单位为毫秒

```
dt = 0.1;
```

%用来存储每一个微分阶段的油管的压力

%初始值为 100Mpa

```
oilp = 100;
```

%用来记录总的时间

```

time = 0;
%用来存储每一个阶段的油管内的密度
%初始值为 0.850
oilrou = 0.850;
%油管内的油的质量
m = oilV * oilrou;
%用来存储积分的结果数值
sum = 0;
%存储微分的份数单位为毫秒
n = 1000 / dt;
%对应的极角旋转的总的弧度数
angle = 3.14;
%对应的误差极小值
ebs = 0.1;

%%对微分的每一份进行求解
for i = 1 : n

    %判断极角是否大于 6.28
    if angle >= 6.28
        angle = angle - 6.28;
    end

    %判断高压油泵是否达到下至点
    %对高压油泵进行补充初始化
    if abs(angle - 3.14) <= ebs
        %初始的低压燃油的压力 0.50MPa
        inputp = 0.50;
        %初始的燃油在 0.50MPa 下的密度
        inputrou = 0.80458041413329;
        %高压油泵的初始总体积
        heightV = 20 + (5 / 2)^2 * pi * 4.82;
        %高压油泵的初始的质量
        heightm = heightV * inputrou;
        %设置 1ms 的等待时间
        waittime = 0.01;
        %此时的流入流量设置为 0
        inputm = 0;
    end

    %waittime = waittime - dt;

```



```

%判断高压油泵处于什么状态
%if waittime <= dt
    %判断高压油泵的压力是否大于高压油管的压力
    %判断单向阀是否开启
    if inputp > oilp
        %高压油泵压力大于高压油管的压力
        %燃油进行压入
        %压力差
        dp = inputp - oilp;
        %进入的流量
        Q = fQ2(dp, inputrou);
        %进入的质量
        inputm = Q * dt * inputrou;
        %高压油泵对应减少的质量
        heightm = heightm - inputm;
        %极角
        angle = angle + w * dt;
        %极径
        r = fr(angle) - 2.413;
        %高压油泵的体积的变化
        heightV = S * (H - r);
        %高压油泵对应的密度的改变
        inputrou = heightm / heightV;
        %高压油泵的压力的变化
        inputp = fp(inputrou);
    else
        %高压油泵压力小于高压油管的压力
        %燃油未能够进行压入
        %极角
        angle = angle + w * dt;
        %极径
        r = fr(angle) - 2.413;
        %高压油泵的体积的变化
        heightV = S * (H - r);
        %高压油泵对应的密度的改变
        inputrou = heightm / heightV;
        %高压油泵对应的压力的变化
        inputp = fp(inputrou);
        %输入的油量为 0
        inputm = 0;
    end
end

```

```

end
%end

%%判断喷油嘴流出的燃油
%计算针阀上升的高度
h = fh(mod(time, 100));

if h <= 0
    %针阀封闭不出油
    %流出的质量为 0
    outputm = 0;
else
    d = h * tan(pi / 20);
    l = 1.25;
    %计算圆环的面积
    circleS = pi * (l + d)^2 - pi * l^2;
    %计算喷孔的面积
    outS = pi * 0.7^2;
    %计算出面积较小的那一个
    minS = min(outS, circleS);
    %压力差
    dp = oilp - outp;
    %流量
    Q = 0.85 * minS * sqrt(2 * dp / oilrou);
    %流出的燃油
    outputm = Q * dt * oilrou;
end

%计算高压油管的当前质量
m = m + inputm - outputm;
tm = [tm, inputm];
tm1 = [tm1, outputm];
%高压油管的当前的密度
oilrou = m / oilV;
%高压油管的当前的压力
oilp = fp(oilrou);
%对应压力的存储
tempp = [tempp, oilp];
%对应时间的存储
temptime = [temptime, time];
%对微分后的积分进行计算

```

```

        sum = sum + abs(oilp - 100) * dt;
        %对应的总时间段变化
        time = time + dt;

    end

    %判断是否为最优目标数值
    if sum < minp
        bestw = w;
        minp = sum;
        finalp = tempp;
        finaltime = temptime;
        finalm = tm;
        finalm1 = tm1;
    end

end

%最优的凸轮的角速度
bestw;

%绘制压力和时间的关系图
figure(1);
title('高压油管内的压力和时间的关系图');
hold on
plot(finaltime, finalp, 'r');
xlabel('时间(ms)');
ylabel('压力(PMa)');
hold on

%绘制进油质量与出油质量和时间的关系图
figure(2);
title('进油质量与出油质量和时间的关系图');
hold on
%subplot(1, 2, 1);
hold on
plot(finaltime, finalm, 'r', finaltime, finalm1, 'LineWidth', 0.1);
ylabel('质量(mg)');
xlabel('时间(ms)');
legend('进油质量曲线', '出油质量曲线');
% hold on

```

```

%%绘制出油量和时间的关系图
% title('出油油质量和时间的关系图');
% hold on
% subplot(1, 2, 2);
% hold on
% plot(finaltime, finalm1, 'r', 'LineWidth', 0.1);
% ylabel('质量(mg)');
% xlabel('时间(ms)');

```

```

%0.027Rad/s
%minp = 1,0324e3

```

第三题增加一个喷油嘴喷油和供油策略的调整

```
no3_1.m
```

```

clear all
%%进行凸轮角速度的循环遍历
%%进行第一个喷油器开启和第二个喷油器开启之间的时长间隔的循环变遍历

%优化目标的最小值
minp = inf;
%初始的低压燃油的压力 0.50MPa
inputp = 0.50;
%外部的压力
%根据第一题的隐含的条件进行计算
outp = 100 - (20 * 20 * 0.85) / (2 * 0.85^2 * ((0.7)^2 * pi)^2);
%初始的燃油在 0.50MPa 下的密度
inputrou = 0.80458041413329;
%初始的燃油流入量
inputm = 0;
%高压油泵的初始总体积
heightV = 20 + (5 / 2)^2 * pi * 4.826;
%高压油泵的初始的质量
heightm = heightV * inputrou;
%高压油泵的初始的高度
H = 4.826 + (20) / (pi * 2.5 * 2.5);
%高压油泵的初始的底面积
S = pi * (5/2)^2;
%高压油管对应的体积
oilV = 500 * (10 / 2)^2 * pi;
%最优目标凸轮的角速度

```

```

bestw = 0;
%最优目标时长间隔
bestT = 0;
%用来存储对应的时间的油管内的压力和时间
tempp = [];
temptime = [];
%存储最优情况下的对应的时间和压力
finalp = [];
finaltime = [];
%用来存储加油质量
temprm = [];
%用来存储一号喷油器的喷出的质量
temprm1 = [];
%用来存储二号喷油器的喷出的质量
temprm2 = [];
%存储最优的加油质量
finalm = [];
%存储一号喷油器最优的喷出质量
finalm1 = [];
%存储二号喷油器最优的喷出质量
finalm2 = [];

%进行角速度的遍历
%进行时间的遍历
for w = 0.056 : 0.001 : 0.058 %单位为 Rad/ms
    for T = 0 : 0.01 : 3.98 %单位为 ms

        tempp = [];
        temptime = [];
        temprm = [];
        temprm1 = [];
        temprm2 = [];

        %时间的微分单位为毫秒
        dt = 0.1;
        %用来存储每一个微分阶段的油管的压力
        %初始值为 100Mpa
        oilp = 100;
        %用来记录总的时间
        time = 0;
        %用来存储每一个阶段的油管内的密度

```

```

%初始值为 0.850
oilrou = 0.850;
%油管内的油的质量
m = oilV * oilrou;
%用来存储积分的结果数值
sum = 0;
%存储微分的份数单位为毫秒
n = 1000 / dt;
%对应的极角旋转的总的弧度数
angle = 3.14;
%对应的误差极小值
ebs = 0.1;
%初始化两个喷头的输出的燃油的质量
outputm1 = 0;
outputm2 = 0;

%%对微分的每一份进行求解
for i = 1 : n

    %判断极角是否大于 6.28
    if angle >= 6.28
        angle = angle - 6.28;
    end

    %判断高压油泵是否达到下至点
    %对高压油泵进行补充初始化
    if abs(angle - 3.14) <= ebs
        %初始的低压燃油的压力 0.50MPa
        inputp = 0.50;
        %初始的燃油在 0.50MPa 下的密度
        inputrou = 0.80458041413329;
        %高压油泵的初始总体积
        heightV = 20 + (5 / 2)^2 * pi * 4.82;
        %高压油泵的初始的质量
        heightm = heightV * inputrou;
        %此时的流入流量设置为 0
        inputm = 0;
    end

    %判断高压油泵的压力是否大于高压油管的压力
    %判断单向阀是否开启

```

```

if inputp > oilp
    %高压油泵压力大于高压油管的压力
    %燃油进行压入
    %压力差
    dp = inputp - oilp;
    %进入的流量
    Q = fQ2(dp, inputrou);
    %进入的质量
    inputm = Q * dt * inputrou;
    %高压油泵对应减少的质量
    heightm = heightm - inputm;
    %极角
    angle = angle + w * dt;
    %极径
    r = fr(angle) - 2.413;
    %高压油泵的体积的变化
    heightV = S * (H - r);
    %高压油泵对应的密度的改变
    inputrou = heightm / heightV;
    %高压油泵的压力的变化
    inputp = fp(inputrou);
else
    %高压油泵压力小于高压油管的压力
    %燃油未能够进行压入
    %极角
    angle = angle + w * dt;
    %极径
    r = fr(angle) - 2.413;
    %高压油泵的体积的变化
    heightV = S * (H - r);
    %高压油泵对应的密度的改变
    inputrou = heightm / heightV;
    %高压油泵对应的压力的变化
    inputp = fp(inputrou);
    %输入的油量为 0
    inputm = 0;
end

%%判断喷油嘴流出的燃油
%为双喷油嘴

```

```

%第一个喷油嘴
%计算针阀上升的高度
h1 = fh(mod(time, 100));

if h1 <= 0
    %针阀封闭不出油
    %流出的质量为 0
    outputm1 = 0;
else
    d1 = h1 * tan(pi / 20);
    l1 = 1.25;
    %计算圆环的面积
    circleS1 = pi * (l1 + d1)^2 - pi * l1^2;
    %计算喷孔的面积
    outS = pi * 0.7^2;
    %计算出面积较小的那一个
    minS1 = min(outS, circleS1);
    %压力差
    dp = oilp - outp;
    %流量
    Q1 = 0.85 * minS1 * sqrt(2 * dp / oilrou);
    %流出的燃油
    outputm1 = Q1 * dt * oilrou;
end

```

```

%第二个喷油嘴
%判断是否开始工作

```

```

if time >= T
    %计算针阀上升的高度
    h2 = fh(mod(time - T, 100));

```

```

if h2 <= 0
    %针阀封闭不出油
    %流出的质量为 0
    outputm2 = 0;
else
    d2 = h2 * tan(pi / 20);
    l2 = 1.25;
    %计算圆环的面积

```



```

        circleS2 = pi * (l2 + d2)^2 - pi * l2^2;
        %计算喷孔的面积
        outS = pi * 0.7^2;
        %计算出面积较小的那一个
        minS2 = min(outS, circleS2);
        %压力差
        dp = oilp - outp;
        %流量
        Q2 = 0.85 * minS2 * sqrt(2 * dp / oilrou);
        %流出的燃油
        outputm2 = Q2 * dt * oilrou;
    end

end

%计算两个喷头总的流出的燃油的质量
outputm = outputm1 + outputm2;

%用来存储加油质量
tempm = [tempm, inputm];
%用来存储一号喷油器的喷出的质量
tempm1 = [tempm1, outputm1];
%用来存储二号喷油器的喷出的质量
tempm2 = [tempm2, outputm2];

%计算高压油管的当前质量
m = m + inputm - outputm;
%高压油管的当前的密度
oilrou = m / oilV;
%高压油管的当前的压力
oilp = fp(oilrou);
%对应压力的存储
tempp = [tempp, oilp];
%对应时间的存储
temptime = [temptime, time];
%对微分后的积分进行计算
sum = sum + abs(oilp - 100) * dt;
%对应的总时间段变化
time = time + dt;

```

end

%判断是否为最优目标数值

if sum < minp

 bestw = w;

 minp = sum;

 finalp = tempp;

 finaltime = temptime;

 bestT = T;

 finalm = tempm;

 finalm1 = tempm1;

 finalm2 = tempm2;

end

 end

end

%最优的凸轮的角速度

bestw;

%最优的时长间隔

bestT;

%绘制压力和时间的关系图

figure(1);

title('高压油管内的压力和时间的关系图');

hold on

plot(finaltime, finalp, 'r');

xlabel('时间(ms)');

ylabel('压力(PMa)');

%绘制进油质量与两喷油器的喷出质量与时间的关系图

figure(2);

title('进油质量与两喷油器的喷出质量与时间的关系图');

hold on

plot(finaltime, finalm, 'r', finaltime, finalm1, 'b', finaltime, finalm2, 'g');

xlabel('时间(ms)');

ylabel('质量(mg)');

legend('进油质量曲线', '一号喷油嘴出油质量', '二号喷油嘴出油质量');

%0.057Rad/s

%3.97ms

%1.3152e3

```
%进行模型的检验
%高压油管内的压力的变化的均值
averagep = mean(finalp);
```

```
%高压油管内压力变化的标准差
stdp = std(finalp);
```

```
%高压油管内的压力变化的最大极差
gap1 = abs(max(finalp) - 100);
gap2 = abs(min(finalp) - 100);
gap = max(gap1, gap2);
```

```
%averagep 99.7378
%gap 1.93
%stdp 1.11
```

```
第三题基于高压油管阈值的出口压力控制
no3_2_1.m
```

```
clear all
%%进行减压阀的最优阈值的循环遍历
%%进行高压油泵的最优的角速度的循环遍历
%%喷油嘴的喷油策略采用第三题第一问的策略
```

```
%优化目标的最小值
minp = inf;
%存储最优的阈值
bestlimit = 0;
%单向减压阀左端的压力的大小 0.50MPa
switchs = 0.5;
%根据上一问数据
%第二个喷油嘴最佳的开启时长为 3.92ms
T = 3.92;
%初始的低压燃油的压力 0.50MPa
inputp = 0.50;
%外部的压力
%根据第一题的隐含的条件进行计算
outp = 100 - (20 * 20 * 0.85) / (2 * 0.85^2 * ((0.7)^2 * pi)^2);
%初始的燃油在 0.50MPa 下的密度
inputrou = 0.80458041413329;
```

```

%初始的燃油流入量
inputm = 0;
%高压油泵的初始总体积
heightV = 20 + (5 / 2)^2 * pi * 4.826;
%高压油泵的初始的质量
heightm = heightV * inputrou;
%高压油泵的初始的高度
H = 4.826 + (20) / (pi * 2.5 * 2.5);
%高压油泵的初始的底面积
S = pi * (5/2)^2;
%高压油管对应的体积
oilV = 500 * (10 / 2)^2 * pi;
%最优目标凸轮的角速度
bestw = 0;
%用来存储对应的时间的油管内的压力和时间
tempp = [];
temptime = [];
%存储最优情况下的对应的时间和压力
finalp = [];
finaltime = [];

%进行角速度的遍历
%进行时间的遍历
for w = 0.054 : 0.001 : 0.059 %单位为 Rad/ms
    for limit = 0 : 0.1 : 4 %阈值的设立 PMA
        tempp = [];
        temptime = [];
        tempm = [];
        tempm1 = [];
        tempm2 = [];

        %时间的微分单位为毫秒
        dt = 0.1;
        %用来存储每一个微分阶段的油管的压力
        %初始值为 100Mpa
        oilp = 100;
        %用来记录总的时间
        time = 0;
        %用来存储每一个阶段的油管内的密度
        %初始值为 0.850
        oilrou = 0.850;
    end
end

```

```

%油管内的油的质量
m = oilV * oilrou;
%用来存储积分的结果数值
sum = 0;
%存储微分的份数单位为毫秒
n = 1000 / dt;
%对应的极角旋转的总的弧度数
angle = 3.14;
%对应的误差极小值
ebs = 0.1;
%初始化两个喷头的输出的燃油的质量
outputm1 = 0;
outputm2 = 0;
%初始化流入低压油路中的燃油的质量
outputm3 = 0;

%%对微分的每一份进行求解
for i = 1 : n

    %判断极角是否大于 6.28
    if angle >= 6.28
        angle = angle - 6.28;
    end

    %判断高压油泵是否达到下至点
    %对高压油泵进行补充初始化
    if abs(angle - 3.14) <= ebs
        %初始的低压燃油的压力 0.50MPa
        inputp = 0.50;
        %初始的燃油在 0.50MPa 下的密度
        inputrou = 0.80458041413329;
        %高压油泵的初始总体积
        heightV = 20 + (5 / 2)^2 * pi * 4.82;
        %高压油泵的初始的质量
        heightm = heightV * inputrou;
        %此时的流入流量设置为 0
        inputm = 0;
    end

    %判断高压油泵的压力是否大于高压油管的压力
    %判断单向阀是否开启

```

```

if inputp > oilp
    %高压油泵压力大于高压油管的压力
    %燃油进行压入
    %压力差
    dp = inputp - oilp;
    %进入的流量
    Q = fQ2(dp, inputrou);
    %进入的质量
    inputm = Q * dt * inputrou;
    %高压油泵对应减少的质量
    heightm = heightm - inputm;
    %极角
    angle = angle + w * dt;
    %极径
    r = fr(angle) - 2.413;
    %高压油泵的体积的变化
    heightV = S * (H - r);
    %高压油泵对应的密度的改变
    inputrou = heightm / heightV;
    %高压油泵的压力的变化
    inputp = fp(inputrou);
else
    %高压油泵压力小于高压油管的压力
    %燃油未能够进行压入
    %极角
    angle = angle + w * dt;
    %极径
    r = fr(angle) - 2.413;
    %高压油泵的体积的变化
    heightV = S * (H - r);
    %高压油泵对应的密度的改变
    inputrou = heightm / heightV;
    %高压油泵对应的压力的变化
    inputp = fp(inputrou);
    %输入的油量为 0
    inputm = 0;
end

%%判断喷油嘴流出的燃油
%为双喷油嘴

```

```

%第一个喷油嘴
%计算针阀上升的高度
h1 = fh(mod(time, 100));

if h1 <= 0
    %针阀封闭不出油
    %流出的质量为 0
    outputm1 = 0;
else
    d1 = h1 * tan(pi / 20);
    l1 = 1.25;
    %计算圆环的面积
    circleS1 = pi * (l1 + d1)^2 - pi * l1^2;
    %计算喷孔的面积
    outS = pi * 0.7^2;
    %计算出面积较小的那一个
    minS1 = min(outS, circleS1);
    %压力差
    dp = oilp - outp;
    %流量
    Q1 = 0.85 * minS1 * sqrt(2 * dp / oilrou);
    %流出的燃油
    outputm1 = Q1 * dt * oilrou;
end

```

```

%第二个喷油嘴
%判断是否开始工作

```

```

if time >= T
    %计算针阀上升的高度
    h2 = fh(mod(time - T, 100));

```

```

if h2 <= 0
    %针阀封闭不出油
    %流出的质量为 0
    outputm2 = 0;
else
    d2 = h2 * tan(pi / 20);
    l2 = 1.25;
    %计算圆环的面积

```

```

        circleS2 = pi * (l2 + d2)^2 - pi * l2^2;
        %计算喷孔的面积
        outS = pi * 0.7^2;
        %计算出面积较小的那一个
        minS2 = min(outS, circleS2);
        %压力差
        dp = oilp - outp;
        %流量
        Q2 = 0.85 * minS2 * sqrt(2 * dp / oilrou);
        %流出的燃油
        outputm2 = Q2 * dt * oilrou;
    end

end

%计算两个喷头总的流出的燃油的质量
outputm = outputm1 + outputm2;

%判断是否超过了设定的阈值
%判断单向减压阀是否打开
if oilp - 100 >= limit
    %打开
    %压力差
    dp = oilp - switchs;
    %流量
    Q = 0.85 * (1.4/2)^2 * sqrt(2*dp/oilrou);
    %质量
    outputm3 = Q * dt * oilrou;
else
    %关闭
    outputm3 = 0;
end

%加上回流到低压油路中的燃油的质量
outputm = outputm + outputm3;

%计算高压油管的当前质量
m = m + inputm - outputm;
%高压油管的当前的密度
oilrou = m / oilV;
%高压油管的当前的压力

```



```

    oilp = fp(oilrou);
    %对应压力的存储
    tempp = [tempp, oilp];
    %对应时间的存储
    temptime = [temptime, time];
    %对微分后的积分进行计算
    sum = sum + abs(oilp - 100) * dt;
    %对应的总时间段变化
    time = time + dt;

```

```

end

```

```

%判断是否为最优目标数值

```

```

if sum < minp

```

```

    bestw = w;

```

```

    bestlimit = limit;

```

```

    minp = sum;

```

```

    finalp = tempp;

```

```

    finaltime = temptime;

```

```

end

```

```

    end

```

```

end

```

```

%最优的凸轮的角速度 0.04

```

```

bestw;

```

```

%bestlimit 3.1

```

```

%绘制压力和时间关系图

```

```

figure(1);

```

```

title('高压油管内的压力和时间关系图');

```

```

hold on

```

```

plot(finaltime, finalp, 'r');

```

```

xlabel('时间(ms)');

```

```

ylabel('压力(PMa)');

```

```

%bestw 0.057

```

```

%bestlimit 3.3

```

```

%minp 1.3118e3

```

第三题基于时间调节的出口压力控制

no3_2_2.m

clear all

%%进行减压阀的工作时间和休息时间的循环遍历

%%进行高压油泵的角速度的循环遍历

%%喷油嘴的喷油策略采用第三题第一问的策略

%优化目标的最小值

minp = inf;

%存储最优的工作时间

bestworktime = 0;

%存储最优的休息时间

bestfreetime = 0;

%单向减压阀左端的压力的大小 0.50MPa

switchs = 0.5;

%根据上一问数据

%第二个喷油嘴最佳的开启时长为 3.92ms

T = 3.92;

%初始的低压燃油的压力 0.50MPa

inputp = 0.50;

%外部的压力

%根据第一题的隐含的条件进行计算

outp = 100 - (20 * 20 * 0.85) / (2 * 0.85^2 * ((0.7)^2 * pi)^2);

%初始的燃油在 0.50MPa 下的密度

inputrou = 0.80458041413329;

%初始的燃油流入量

inputm = 0;

%高压油泵的初始总体积

heightV = 20 + (5 / 2)^2 * pi * 4.826;

%高压油泵的初始的质量

heightm = heightV * inputrou;

%高压油泵的初始的高度

H = 4.826 + (20) / (pi * 2.5 * 2.5);

%高压油泵的初始的底面积

S = pi * (5/2)^2;

%高压油管对应的体积

oilV = 500 * (10 / 2)^2 * pi;

%最优目标凸轮的角速度

bestw = 0;

%用来存储对应的时间的油管内的压力和时间

tempp = [];

```

temptime = [];
%存储最优情况下的对应的时间和压力
finalp = [];
finaltime = [];

%进行角速度的遍历
%进行时间的遍历
for w = 0.050 : 0.001 : 0.060 %单位为 Rad/ms
    for worktime = 0.035 : 0.001 : 0.040 %工作时间 ms
        for freetime = 32 : 0.01 : 33 %休息时间 ms

            tempp = [];
            temptime = [];
            tempm = [];
            tempm1 = [];
            tempm2 = [];

            %时间的微分单位为毫秒
            dt = 0.1;
            %用来存储每一个微分阶段的油管的压力
            %初始值为 100Mpa
            oilp = 100;
            %用来记录总的时间
            time = 0;
            %用来存储每一个阶段的油管内的密度
            %初始值为 0.850
            oilrou = 0.850;
            %油管内的油的质量
            m = oilV * oilrou;
            %用来存储积分的结果数值
            sum = 0;
            %存储微分的份数单位为毫秒
            n = 1000 / dt;
            %对应的极角旋转的总的弧度数
            angle = 3.14;
            %对应的误差极小值
            ebs = 0.1;
            %初始化两个喷头的输出的燃油的质量
            outputm1 = 0;
            outputm2 = 0;
            %初始化流入低压油路中的燃油的质量

```

```

outputm3 = 0;
%一个工作和休息的周期
t = worktime + freetime;

%%对微分的每一份进行求解
for i = 1 : n

    %判断极角是否大于 6.28
    if angle >= 6.28
        angle = angle - 6.28;
    end

    %判断高压油泵是否达到下至点
    %对高压油泵进行补充初始化
    if abs(angle - 3.14) <= ebs
        %初始的低压燃油的压力 0.50MPa
        inputp = 0.50;
        %初始的燃油在 0.50MPa 下的密度
        inputrou = 0.80458041413329;
        %高压油泵的初始总体积
        heightV = 20 + (5 / 2)^2 * pi * 4.82;
        %高压油泵的初始的质量
        heightm = heightV * inputrou;
        %此时的流入流量设置为 0
        inputm = 0;
    end

    %判断高压油泵的压力是否大于高压油管的压力
    %判断单向阀是否开启
    if inputp > oilp
        %高压油泵压力大于高压油管的压力
        %燃油进行压入
        %压力差
        dp = inputp - oilp;
        %进入的流量
        Q = fQ2(dp, inputrou);
        %进入的质量
        inputm = Q * dt * inputrou;
        %高压油泵对应减少的质量
        heightm = heightm - inputm;
        %极角

```

```

    angle = angle + w * dt;
    %极径
    r = fr(angle) - 2.413;
    %高压油泵的体积的变化
    heightV = S * (H - r);
    %高压油泵对应的密度的改变
    inputrou = heightm / heightV;
    %高压油泵的压力的变化
    inputp = fp(inputrou);
else
    %高压油泵压力小于高压油管的压力
    %燃油未能够进行压入
    %极角
    angle = angle + w * dt;
    %极径
    r = fr(angle) - 2.413;
    %高压油泵的体积的变化
    heightV = S * (H - r);
    %高压油泵对应的密度的改变
    inputrou = heightm / heightV;
    %高压油泵对应的压力的变化
    inputp = fp(inputrou);
    %输入的油量为 0
    inputm = 0;
end

%%判断喷油嘴流出的燃油
%为双喷油嘴

%第一个喷油嘴
%计算针阀上升的高度
h1 = fh(mod(time, 100));

if h1 <= 0
    %针阀封闭不出油
    %流出的质量为 0
    outputm1 = 0;
else
    d1 = h1 * tan(pi / 20);
    l1 = 1.25;
    %计算圆环的面积

```

```

circleS1 = pi * (l1 + d1)^2 - pi * l1^2;
%计算喷孔的面积
outS = pi * 0.7^2;
%计算出面积较小的那一个
minS1 = min(outS, circleS1);
%压力差
dp = oilp - outp;
%流量
Q1 = 0.85 * minS1 * sqrt(2 * dp / oilrou);
%流出的燃油
outputm1 = Q1 * dt * oilrou;
end

%第二个喷油嘴
%判断是否开始工作

if time >= T

%计算针阀上升的高度
h2 = fh(mod(time - T, 100));

if h2 <= 0
%针阀封闭不出油
%流出的质量为 0
outputm2 = 0;
else
d2 = h2 * tan(pi / 20);
l2 = 1.25;
%计算圆环的面积
circleS2 = pi * (l2 + d2)^2 - pi * l2^2;
%计算喷孔的面积
outS = pi * 0.7^2;
%计算出面积较小的那一个
minS2 = min(outS, circleS2);
%压力差
dp = oilp - outp;
%流量
Q2 = 0.85 * minS2 * sqrt(2 * dp / oilrou);
%流出的燃油
outputm2 = Q2 * dt * oilrou;
end

```

```

end

%计算两个喷头总的流出的燃油的质量
outputm = outputm1 + outputm2;

%判断单向减压阀处于什么状态
if mod(time, t) < freetime
    %在休息的区间内
    %关闭
    outputm3 = 0;
else
    %压力差
    dp = oilp - switchs;
    %流量
    Q = 0.85 * (1.4/2)^2 * sqrt(2*dp/oilrou);
    %质量
    outputm3 = Q * dt * oilrou;
end

%加上回流到低压油路中的燃油的质量
outputm = outputm + outputm3;

%计算高压油管的当前质量
m = m + inputm - outputm;
%高压油管的当前的密度
oilrou = m / oilV;
%高压油管的当前的压力
oilp = fp(oilrou);
%对应压力的存储
tempp = [tempp, oilp];
%对应时间的存储
temptime = [temptime, time];
%对微分后的积分进行计算
sum = sum + abs(oilp - 100) * dt;
%对应的总时间段变化
time = time + dt;

end

%判断是否为最优目标数值

```

```

if sum < minp
    bestw = w;
    minp = sum;
    finalp = tempp;
    finaltime = temptime;
    bestworktime = worktime;
    bestfreetime = freetime;
end

```

```

    end
end
end

```

%最优的凸轮的角速度 0.057

bestw;

%bestfreetime 32.16ms

%bestworktime 0.037ms

%bestw 0.057Rad/s

%绘制压力和时间的关系图

figure(1);

title('高压油管内的压力和时间的关系图');

hold on

plot(finaltime, finalp, 'r');

xlabel('时间(ms)');

ylabel('压力(PMa)');

灵敏度分析

sensitivity.m

%%灵敏度的分析

%基于高压油管阈值的出口压力控制方案中调节单向减压阀的外部低压油路的数值对结果进行灵敏度分析

clear all

%%进行减压阀的最优阈值的循环遍历

%%进行高压油泵的最优的角速度的循环遍历

%%喷油嘴的喷油策略采用第三题第一问的策略

%存储最优的阈值


```

bestlimit = 0;
%根据上一问数据
%第二个喷油嘴最佳的开启时长为 3.92ms
T = 3.92;
%初始的低压燃油的压力 0.50MPa
inputp = 0.50;
%外部的压力
%根据第一题的隐含的条件进行计算
outp = 100 - (20 * 20 * 0.85) / (2 * 0.85^2 * ((0.7)^2 * pi)^2);
%初始的燃油在 0.50MPa 下的密度
inputrou = 0.80458041413329;
%初始的燃油流入量
inputm = 0;
%高压油泵的初始总体积
heightV = 20 + (5 / 2)^2 * pi * 4.826;
%高压油泵的初始的质量
heightm = heightV * inputrou;
%高压油泵的初始的高度
H = 4.826 + (20) / (pi * 2.5 * 2.5);
%高压油泵的初始的底面积
S = pi * (5/2)^2;
%高压油管对应的体积
oilV = 500 * (10 / 2)^2 * pi;
%最优目标凸轮的角速度
bestw = 0;
%用来存储对应的时间的油管内的压力和时间
%tempp = [];
%temptime = [];
%存储最优情况下的对应的时间和压力
%finalp = [];
%finaltime = [];

%单向减压阀左端的压力的遍历
%进行角速度的遍历
%进行时间的遍历

%存储对应的单向减压阀左端的压力的值和对应的最优阈值最优角速度对应最优的目标函数值
result = ones(51, 4);

%统计数目
count = 0;

```

```

for switchs = 0 : 2 : 100
    %优化目标的最小值
    minp = inf;
    for w = 0.056 : 0.001 : 0.058 %单位为 Rad/ms
        for limit = 3.25 : 0.01 : 3.45 %阈值的设立 PMA

%tempp = [];
%temptime = [];

%时间的微分单位为毫秒
dt = 0.1;
%用来存储每一个微分阶段的油管的压力
%初始值为 100Mpa
oilp = 100;
%用来记录总的时间
time = 0;
%用来存储每一个阶段的油管内的密度
%初始值为 0.850
oilrou = 0.850;
%油管内的油的质量
m = oilV * oilrou;
%用来存储积分的结果数值
sum = 0;
%存储微分的份数单位为毫秒
n = 1000 / dt;
%对应的极角旋转的总的弧度数
angle = 3.14;
%对应的误差极小值
ebs = 0.1;
%初始化两个喷头的输出的燃油的质量
outputm1 = 0;
outputm2 = 0;
%初始化流入低压油路中的燃油的质量
outputm3 = 0;

%%对微分的每一份进行求解
for i = 1 : n

    %判断极角是否大于 6.28
    if angle >= 6.28

```

```

    angle = angle - 6.28;
end

%判断高压油泵是否达到下至点
%对高压油泵进行补充初始化
if abs(angle - 3.14) <= ebs
    %初始的低压燃油的压力 0.50MPa
    inputp = 0.50;
    %初始的燃油在 0.50MPa 下的密度
    inputrou = 0.80458041413329;
    %高压油泵的初始总体积
    heightV = 20 + (5 / 2)^2 * pi * 4.82;
    %高压油泵的初始的质量
    heightm = heightV * inputrou;
    %此时的流入流量设置为 0
    inputm = 0;
end

%判断高压油泵的压力是否大于高压油管的压力
%判断单向阀是否开启
if inputp > oilp
    %高压油泵压力大于高压油管的压力
    %燃油进行压入
    %压力差
    dp = inputp - oilp;
    %进入的流量
    Q = fQ2(dp, inputrou);
    %进入的质量
    inputm = Q * dt * inputrou;
    %高压油泵对应减少的质量
    heightm = heightm - inputm;
    %极角
    angle = angle + w * dt;
    %极径
    r = fr(angle) - 2.413;
    %高压油泵的体积的变化
    heightV = S * (H - r);
    %高压油泵对应的密度的改变
    inputrou = heightm / heightV;
    %高压油泵的压力的变化
    inputp = fp(inputrou);

```

```

else
    %高压油泵压力小于高压油管的压力
    %燃油未能够进行压入
    %极角
    angle = angle + w * dt;
    %极径
    r = fr(angle) - 2.413;
    %高压油泵的体积的变化
    heightV = S * (H - r);
    %高压油泵对应的密度的改变
    inputrou = heightm / heightV;
    %高压油泵对应的压力的变化
    inputp = fp(inputrou);
    %输入的油量为 0
    inputm = 0;
end

%%判断喷油嘴流出的燃油
%为双喷油嘴

%第一个喷油嘴
%计算针阀上升的高度
h1 = fh(mod(time, 100));

if h1 <= 0
    %针阀封闭不出油
    %流出的质量为 0
    outputm1 = 0;
else
    d1 = h1 * tan(pi / 20);
    l1 = 1.25;
    %计算圆环的面积
    circleS1 = pi * (l1 + d1)^2 - pi * l1^2;
    %计算喷孔的面积
    outS = pi * 0.7^2;
    %计算出面积较小的那一个
    minS1 = min(outS, circleS1);
    %压力差
    dp = oilp - outp;
    %流量
    Q1 = 0.85 * minS1 * sqrt(2 * dp / oilrou);

```

```

    %流出的燃油
    outputm1 = Q1 * dt * oilrou;
end

%第二个喷油嘴
%判断是否开始工作

if time >= T

%计算针阀上升的高度
h2 = fh(mod(time - T, 100));

if h2 <= 0
    %针阀封闭不出油
    %流出的质量为 0
    outputm2 = 0;
else
    d2 = h2 * tan(pi / 20);
    l2 = 1.25;
    %计算圆环的面积
    circleS2 = pi * (l2 + d2)^2 - pi * l2^2;
    %计算喷孔的面积
    outS = pi * 0.7^2;
    %计算出面积较小的那一个
    minS2 = min(outS, circleS2);
    %压力差
    dp = oilp - outp;
    %流量
    Q2 = 0.85 * minS2 * sqrt(2 * dp / oilrou);
    %流出的燃油
    outputm2 = Q2 * dt * oilrou;
end

end

%计算两个喷头总的流出的燃油的质量
outputm = outputm1 + outputm2;

%判断是否超过了设定的阈值
%判断单向减压阀是否打开
if oilp - 100 >= limit

```

```

        %打开
        %压力差
        dp = oilp - switchs;
        %流量
        Q = 0.85 * (1.4/2)^2 * sqrt(2*dp/oilrou);
        %质量
        outputm3 = Q * dt * oilrou;
    else
        %关闭
        outputm3 = 0;
    end

    %加上回流到低压油路中的燃油的质量
    outputm = outputm + outputm3;

    %计算高压油管的当前质量
    m = m + inputm - outputm;
    %高压油管的当前的密度
    oilrou = m / oilV;
    %高压油管的当前的压力
    oilp = fp(oilrou);
    %对应压力的存储
    %tempp = [tempp, oilp];
    %对应时间的存储
    %temptime = [temptime, time];
    %对微分后的积分进行计算
    sum = sum + abs(oilp - 100) * dt;
    %对应的总时间段变化
    time = time + dt;

end

%判断是否为最优目标数值
if sum < minp
    bestw = w;
    bestlimit = limit;
    minp = sum;
    %finalp = tempp;
    %finaltime = temptime;
end

```

```

        end
    end

    count = count + 1;

    result(count, 1) = switchs;
    result(count, 2) = bestw;
    result(count, 3) = bestlimit;
    result(count, 4) = minp;

end

%绘制出口压力变化对高压油泵的角速度和减压阀调节阈值的影响关系图
subplot(1, 2, 1);
hold on
title('出口压力变化对高压油泵的角速度的影响');
hold on
plot(result(:, 1), result(:, 2), 'r');
xlabel('压力 PMA');
ylabel('Rad/s');
hold on
subplot(1, 2, 2);
hold on
title('出口压力变化对减压阀调节阈值的影响');
hold on
plot(result(:, 1), result(:, 3) + 100, 'r');
xlabel('压力 PMA');
ylabel('压力 PMA');

%计算误差
%用变异系数衡量灵敏度的好坏

Cw = std(result(:, 2)) / mean(result(:, 2)) * 100;
Cp = std(result(:, 3)) / mean(result(:, 3)) * 100;

```

