

基于目标优化模型的高压油管压力控制问题

摘要

本文主要研究高压油管的压力控制问题，为了使高压油管内燃油压力稳定，减少所喷出的燃油量的偏差，通过对供油喷油方式的具体分析，建立恰当的优化模型，通过 MATLAB 遍历求解出燃油进出的各指标，从而确定最优控制方案。

针对问题(1)：确定单向阀开启的时长实际上是一个优化问题，即求解使高压油管内燃油压力与目标压力偏差量最小时的单向阀开启时长。以燃油压力函数 $P(t, t_j)$ 为决策变量，高压油管内的燃油压力与目标压力的偏离量 ε 最小为目标，

通过对燃油压力函数求解可得到决策变量的取值范围，并将取值范围与单向阀开启时间范围作为约束条件，建立**单目标优化模型**。通过**一维有限容积法**离散化微分方程后得到燃油压力函数的递推公式，在单向阀开启时间范围内采用**二分法迭代**求解出满足条件的最优阀门开启时长。求解结果为：每一次单向阀开启时长为 $17.05ms$ ，就可使油管内压强稳定在 $100MPa$ ，当调节时间分别为 $2s$ 、 $5s$ 、 $10s$ 时。稳定前单向阀开启时间分别为 $19.61ms$ 、 $19.61ms$ 、 $17.95ms$ ，稳定后的开启时间为 $17.07ms$ 。

针对问题(2)：由问题一燃油压力函数的递推公式可知，燃油压力、密度及质量之间存在一一对应关系，则将高压油管内燃油压力稳定转化为燃油质量稳定分析。结合问题二实际燃油进出方式，先求出柱塞腔的容积和有限流通面积，进而引入 **0-1 变量**分别列出进出燃油质量变化的方程。然后结合进、出燃油方程式，建立**燃油控制方程模型**。最后，对凸轮的角速度数据进行预处理，将处理后的凸轮角速度数据带入控制方程中，并计算出燃油质量偏离量，选择燃油质量最小偏离量的凸轮角速度为 $2513.27rad/s$ 。

针对问题(3)：在问题二的基础上增加了喷油嘴和单向减压阀后，需要设计出高压油泵和减压阀的控制方案。由于减压阀的开启，需要考虑燃油的利用率问题，所以不仅要考虑偏离量还需要考虑未被利用量。建立双目标为：减压阀开启后燃油质量的未利用量最小和燃油质量与 $100Mpa$ 时偏离量最小，再对质量变化函数推导得到决策变量的约束条件，建立**双目标优化模型**。要确定控制方案，首先需要对高压油泵的凸轮转动周期和减压阀开启条件压力值两个指标进行确定，通过对其取值范围**等间隔抽样**，将凸轮周期的范围缩小到 $T' \in (3.2, 3.4)ms$ ，减压阀启动压力值为 $100Mpa$ 。再通过 MATLAB 以 $0.01ms$ 为精度遍历求解燃油质量的总偏差量，并选择最小总偏差量对应的凸轮角速度为： $1898.24rad/s$ ，

最终高压油泵和减压阀的控制方案为高压油泵处的凸轮以 $1898.24rad/s$ 的角速度旋转驱动柱塞对高压油管内进行供油，单向减压阀则在高压油管内压力达到 $100Mpa$ 后开启减压阀，将燃油回流。

本文最后对模型进行了评价与推广，模型准确度高，适用性强，可推广到其他机械设备的压力控制策略方案设计、发动机燃油方案设计等。

关键词：单目标优化 一维有限容积法 二分法 0-1 变量 控制方程 双目标优化

一、 问题重述

1.1 问题背景

燃油进入和喷出高压油管是许多燃油发动机工作的基础，图 1 给出了某高压燃油系统的工作原理，燃油经过高压油泵从 A 处进入高压油管，再由喷口 B 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。



图 1 高压油管示意图

1.2 问题的提出

问题 1：内腔长度为 500 mm ，内直径为 10 mm 的高压油管中，在供油入口 A 处有直径为 1.4 mm 的小孔，由单向阀开关控制供油时间，单向阀每打开一次后需要关闭 10 ms 。喷油嘴每秒工作 10 次，每次工作时间为 2.4 ms ，喷油嘴工作时从喷油嘴 B 处向外喷油的速率如下图所示。高压油泵在入口 A 处提供的压力恒为 160 Mpa ，且高压油管内的初始压力为 100 Mpa 。我们需要解决的问题是，如何设置单向阀每次开启的时长使得高压油管内的压力稳定在 100 Mpa 左右？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？

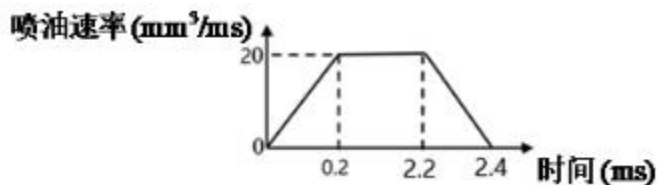


图 2 喷油速率示意图

问题2：根据实际工作情况，高压油管 A 处的燃油是来自高压油泵的柱塞腔出口，喷油由喷油嘴的针阀控制。高压油泵柱塞的供油过程下图所示，凸轮驱动柱塞上下运动，凸轮边缘曲线与角度的关系见附件1。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。柱塞腔直径为 5 mm ，柱塞运动到上止点位置时，柱塞腔残余容积为 20 mm^3 。柱塞运动到下止点时，低压燃油会充满柱塞腔（包括残余容积），低压燃油的压力为 0.5 Mpa 。喷油嘴喷嘴结构如图4所示，针阀直径为 2.5 mm 、密封座是半角为 9° 的圆锥，最下端喷孔的直径为 1.4 mm 。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。在一个喷油周期内针阀升程与时间的关系由附件2给出。在问题1中给出的喷油嘴工作次数、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。



图 3 高压油管实际工作过程示意图

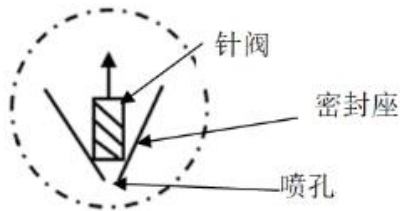


图 4 喷油嘴喷嘴放大后的示意图

问题3. 在问题2的基础上，再增加一个喷油嘴，每个喷嘴喷油规律相同，喷油和供油策略应如何调整？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如下图所示。单向减压阀出口为直径为 1.4 mm 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。

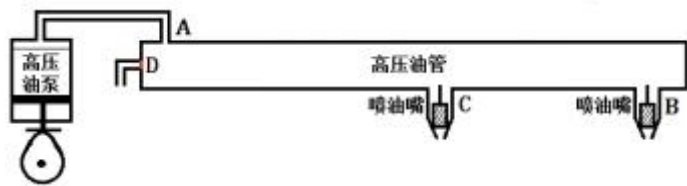


图 5 具有减压阀和两个喷油嘴时高压油管示意图

二、 问题分析

2.1 问题一的分析

问题一需要我们确定单向阀门开启的时长,使得高压油管压力保持在某个具体水平。于是我们引入高压油管内的燃油压力与目标压力的偏离量,使压力偏离量最小,列出容积控制方程,建立单目标优化模型。由于不同的阀门开启时间对应着不同燃油压力函数,首先我们确定某阀门开启时长,对高压油管内燃油的压力进行分析着手。根据注释 1 中可知燃油压力和燃油密度的变化关系,但燃油密度是随时间变化且未知,所以我们需要将燃油密度进行转化,根据燃油为可压缩流体的性质^[1]和密度本身的定义,得到密度和质量之间的关系。再结合燃油质量、密度、压力的初始值,从而进一步得压力函数。最后在阀门开启时长范围内,以 0.1 ms 为精度,采用二分法求解出偏离量最小的最优阀门开启时长。具体思路如下图所示:

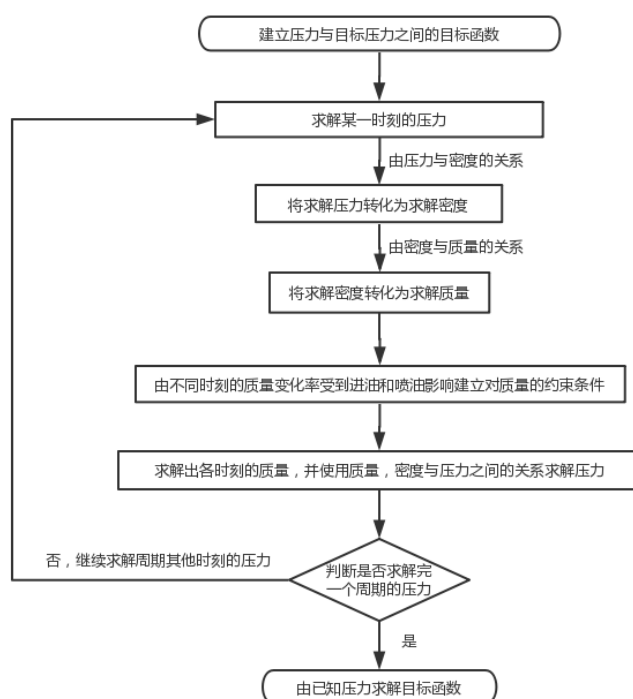


图 6 问题 1 的思路流程图

2.2 问题二的分析

根据问题一可知燃油压力可以由燃油质量推导得到,压力和质量之间存在着对应关系,于是将问题二中燃油压力稳定在 100 Mpa 转化为与燃油质量为 33379.42 mg 的偏离量最小。根据题目给出进出燃油方式,具体分析每个时刻喷

出燃油质量和输入的燃油质量。首先求解引起燃油质量变化的参量，即在高压油泵中的柱塞容积和喷嘴器中的有效流动面积，再通过引入 0-1 变量的思想得到每时刻燃油进出质量变化的递推公式，然后结合燃油进出方程建立燃油控制方程模型，最后在求解控制方程前，先对凸轮角速度进行数据筛选，然后再将筛选的凸轮角速度带入控制方程中，通过 MATLAB 迭代计算得到燃油质量的偏离量，选择其中最小的偏离量对应的凸轮角速度，即最优凸轮角速度。

2.3 问题三的分析

问题三在问题二的基础之上增加喷油嘴和减压阀，并需要确定高压油泵和减压阀的控制方案，即转化为对高压油泵中凸轮周期和减压阀开启压力值的指标确定。同问题二使高压油管压力稳定转化为燃油质量稳定，建燃油质量与 100 *Mpa* 时的燃油质量的偏离量 ε 最小的目标。考虑在减压阀的启动后燃油的利用率，再建立燃油质量的未利用量 ξ 最小的目标。然后对高压油管进出油分析得到燃油质量变化的推导公式，通过燃油质量推导公式对目标进行约束，建立双目标优化模型。最后，先对凸轮周期和减压阀开启压力值的两个指标取值范围缩小，再通过遍历求解出总偏差量最小的值，对应为最优的凸轮周期和减压阀开启压力值，从而可以确定高压油泵和减压阀的控制方案。

三、 基本假设

1. 假设问题一中燃油进入的过程和喷出的过程为相互独立，不会同时进行。
2. 假设高压油泵进油、喷油嘴出油过程中，油管内燃油密度均匀。
3. 假设柱塞与凸轮直径的接触状态为理想模型，且凸轮和柱塞的强度和刚度足够大且没有变形，在运动过程中无冲击震动现象。
4. 假设高压油泵到高压油管之间的导管极短，体积忽略不计。

四、 符号说明

变量符号	变量含义	变量单位
P	单位面积的压力	<i>Mpa</i>
M	质量	<i>mg</i>
P_A	在 A 点的压力	<i>Mpa</i>
V	高压油管腔体积	<i>mm</i> ³

ρ	燃油密度	mg / mm^3
t_j	开启单向阀的时间	ms
θ_1	凸轮转动角度	rad
θ_2	凸轮边缘点到极点夹角	rad
h	凸轮边缘最高点到极点的高度	mm
H	柱塞腔的高度	mm
V_1	柱塞腔容积	mm^3
S	喷油嘴有效流通面积	mm^2
ω	凸轮转动角速度	rad / s
T'	凸轮转动周期	ms
P'	单向减压阀开启临界压力	Mpa
ε	偏移量	mg
ξ	未利用量	mg

五、 问题一的模型建立与求解

5.1 基于微分方程的单目标模型的建立

确定高压油管工作周期

高压油管由于燃油间歇性进入和喷出的工作引起了管内压力的变化,燃油喷出的过程是由喷油嘴工作,而燃油的进入则是通过在供油入口出的单向阀开关控制。根据假设 1 燃油进入的过程和喷出的过程相互独立,不会同时进行,并且高压油管的喷油嘴和单向阀是进行重复性工作,于是我们选择高压油管工作的一个周期进行进一步研究。由题目条件可知喷油嘴每工作一次的时间周期为 $100ms$,于是我们选择对每一次喷油嘴工作进行分析,即确定高压油管的工作周期 T 。

$$T = 100ms \quad (5.1)$$

确定高压油管的工作流程

高压油管在一个工作周期内进行一段时间的燃油喷入和燃油喷出过程, 根据题目要求高压油管内的压力尽可能稳定在 100 Mpa 左右, 即在一个周期内高压油管的压力维持在 100 Mpa 左右的时间尽可能长, 于是我们确定高压油管的工作方式为, 在一个周期时间内先进行喷油嘴喷油, 再进行高压油泵供油, 最后稳定在 100 Mpa 左右。

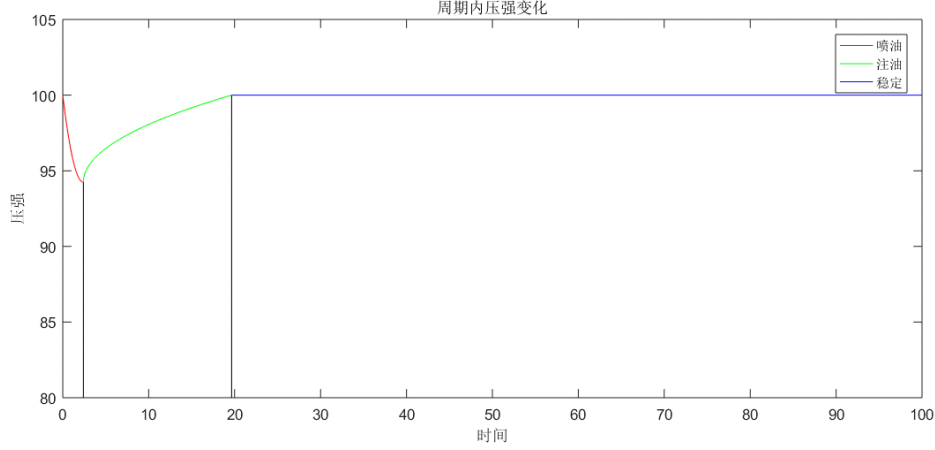


图 7 高压油管工作流程示意图

5.1.1 单目标模型的建立

目标函数的确定

根据题目要求在固定的燃油喷出条件下, 控制单向阀开关的时间即控制燃油进入高压油管的量, 使得高压油管内的压力尽可能稳定在 100 Mpa 左右。于是我们引入一个偏离量 ε , 表示为在一个周期内高压油管燃油的压力与 100 Mpa 的偏离程度。将问题一转化为单目标问题, 目标为一个周期时间内高压油管燃油的压力与 100 Mpa 的偏离程度最小, 设在控制单向阀开关的时间 t_j 下周期内的燃油压力变化函数 $P(t, t_j)$, 并建立目标函数, 见下式:

$$\min \varepsilon = \int_0^T |P(t, t_j) - 100| dt \quad (5.3)$$

约束条件的确定

(1) 燃油压力函数 $P(t, t_j)$ 的约束

上述我们对燃油压力的偏离量建立了目标函数, 由于控制单向阀开关的时间不同则对应的一个周期内压力函数 $P(t, t_j)$ 也就不同, 进而与 100 Mpa 的偏离程度也不同, 为此我们还需要对燃油的压力进行分析, 得到不同单向阀开关时间下的

压力函数 $P(t, t_j)$ 。

根据题中注 1 中可知燃油的压力变化量与密度变化量成正比，且比例系数 k 为弹性模量 E 与燃油密度 ρ 的比值，即表达式如下：

$$P(t + \Delta t, t_j) - P(t, t_j) = \frac{E(t, t_j)}{\rho(t, t_j)} [\rho(t + \Delta t, t_j) - \rho(t, t_j)] \quad (5.4)$$

从 (5.4) 中可以看出燃油压力与燃油的密度，弹性模量有关，根据附件三我们可以得到压力与弹性模量之间的关系，可知每时刻的燃油压力所对应的弹性模量，进而将压力转化为对密度的分析。

对密度进行分析从密度的基本物理定义着手，根据假设 4 高压油管在工作过程中燃油体积变化极小，看作体积没有发生变化，则通过物理学对密度的定义可以得到密度和质量的关系，见下式：

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (5.5)$$

根据高压燃油喷射系统中的流体模型^[2]中的连续性守恒方程，见下式：

$$\frac{dm}{dt} = \sum_{Boundaries} \dot{m}$$

且 \dot{m} 为流入或者喷出的边界质量，用燃油质量变化率来反映燃油质量变化。由于该连续性守恒方程对供油和喷油过程均适用，所以我们对喷油和供油分别分析。

在喷油过程中，喷油嘴每次工作的时间为 2.4 ms ，且从喷油嘴 B 处向外喷油的速率分为 3 个阶段， $0-0.2 \text{ ms}$ 喷油速率以 $100 \text{ mm}^3 / \text{ms}^2$ 单调递增， $0.2-2.2 \text{ ms}$ 时间内喷油速率恒为 $20 \text{ mm}^3 / \text{ms}$ ， $2.2-2.4 \text{ ms}$ 喷油速率以 $100 \text{ mm}^3 / \text{ms}^2$ 单调递减。根据喷油速率-时间关系图的物理意义，可得喷油速率与时间的乘积为喷出燃油的体积，进而分析得到喷油器在不同阶段 dt 时间内喷出燃油体积：

$v_1 = 100t \cdot dt$ 、 $v_2 = 20 \cdot dt$ 、 $v_3 = -100(t - 2.4) \cdot dt$ 。于是得到喷出燃油各阶段的质量变化率的微分方程为：

$$\begin{cases} \frac{dM(t, t_j)}{dt} = -\rho(t, t_j) \cdot 100t & t \in (0, 0.2) \\ \frac{dM(t, t_j)}{dt} = -\rho(t, t_j) \cdot 20 & t \in (0.2, 2.2) \\ \frac{dM(t, t_j)}{dt} = -\rho(t, t_j) \cdot 100 \cdot (2.4 - t) & t \in (2.2, 2.4) \end{cases} \quad (5.6)$$

在燃油进入高压油管的过程中，根据题目可知进出高压油管的流量为：

$$Q = CA\sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (5.7)$$

式中 Q 为单位时间流过小孔的燃油量, $C = 0.85$ 为流量系数, A 小孔的面积, ΔP 为小孔两边的压力差, ρ 为高压侧燃油的密度, 高压油泵在入口 A 处提供的压力恒为 160 Mpa 。通过单位时间的流入的燃油量与时间的乘积得到燃油的体积, 在

dt 时间内流入高压油管的燃油体积为 $v_4 = CA\sqrt{\frac{2\Delta P(t, t_j)}{\rho_{(160 \text{ Mpa})}}}$, 于是我们可以得到燃油进入高压油管的质量变化率的微分方程:

$$\frac{dM(t, t_j)}{dt} = \rho_{(160 \text{ Mpa})} \cdot CA\sqrt{\frac{2\Delta P(t, t_j)}{\rho_{(160 \text{ Mpa})}}} \quad (5.8)$$

通过对压力函数 $P(t, t_j)$ 的分析, 得到高压油管在工作时喷油量和供油量变化率的约束, 进而对燃油压力进行约束。

(2) 初始值的约束

根据高压油管内的初始压力为 100 Mpa , 高压油泵在入口 A 处提供的压力恒为 160 Mpa , 燃油密度为 0.850 mg/mm^3 , 高压油管的内腔长度为 500 mm 和内直径为 10 mm , 通过圆柱体体积计算公式和式 (5.5) 可得高压油管的体积为 $12500\pi \text{ mm}^3$ 、高压油管初始燃油的质量为: $10625\pi \text{ mg}$ 。将其作为对压力函数分析中需要的初始值, 即 $P_A = 160$ 、 $P(0, t_j) = 100$ 、 $\rho(0, t_j) = 0.85$ 、 $V = 12500\pi$ 、 $M(0, t_j) = 10625\pi$ 。

(2) 单向阀开关时间的约束

高压油泵对高压油管进行供油, 需要启动单向阀门开关, 且阀门响应时间^[3]是包括阀门组件的时滞时间和动态时间。根据题目中可知单向阀每打开一次后就要关闭 10 ms , 则在该高压油管下阀门的时滞时间为 10 ms , 阀门响应时间至少为 10 ms , 即阀门开启后关闭的时间至少 10 ms 。

在一个周期 $T = 100 \text{ ms}$ 内, 喷油嘴工作一次时间为 2.4 ms , 单向阀开启时长为 t_j , 关闭阀门至少 10 ms 。得到开启阀门后供油时间为 t_j 的约束范围, 见下式:

$$0 < t_j < 87.6 \quad (5.9)$$

于是我们建立基于微分方程的单目标模型, 如下:

$$\begin{aligned}
\min \quad & \varepsilon = \int_0^{100} |P(t, t_j) - 100| dt \\
s.t. \quad & \begin{cases} \frac{dM(t, t_j)}{dt} = -\rho(t, t_j) \cdot 100t & t \in (0, 0.2) \\ \frac{dM(t, t_j)}{dt} = -\rho(t, t_j) \cdot 20 & t \in (0.2, 2.2) \\ \frac{dM(t, t_j)}{dt} = -\rho(t, t_j) \cdot 100 \cdot (2.4 - t) & t \in (2.2, 2.4) \\ \frac{dM(t, t_j)}{dt} = \rho_{(160MPa)} \cdot CA \sqrt{\frac{2\Delta P(t, t_j)}{\rho_{(160MPa)}}} & t \in (2.4, 2.4 + t_j) \\ \frac{dP(t, t_j)}{dt} = \frac{E(t, t_j)}{\rho(t, t_j)} \cdot \frac{d\rho(t, t_j)}{dt} \\ P_A = 160; P(0, t_j) = 100 \\ \rho(0, t_j) = 0.85 \\ V = 12500\pi \\ M(0, t_j) = 10625\pi \\ 0 < t_j < 87.6 \end{cases}
\end{aligned}$$

此外，在问题一中还需要调整单向阀开启的时长 t_j ，使得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 ，于是在上述建立的模型基础上，约束条件不发生改变，重新确定目标函数，目标为在 t 时刻时的压力值与 50 Mpa 偏离量最小，具体如下：

$$\min |P(t, t_j) - 150| \quad t = 2000$$

$$\min |P(t, t_j) - 150| \quad t = 5000$$

$$\min |P(t, t_j) - 150| \quad t = 10000$$

且题中要求的调整时间之后压力稳定在 150 Mpa 所建立的目标函数如下式：

$$\min \quad \varepsilon = \int_0^{100} |P(t, t_j) - 150| dt$$

5.2 基于有限容积法和二分法的模型求解

差商代替微商

由于单向阀不同的开启时长对应的高压油管内燃油压力函数 $P(t, t_j)$ 也不同，我们需要确定单向阀门开启的时长，则从高压油管内燃油压力函数 $P(t, t_j)$ 入手，求解在单向阀开启时间 t_j 时高压油管燃油压力函数。由上述建立的单目标模型中压力函数的分析得到，求解压力函数需要的喷油和供油质量变化率的

微分方程和燃油压力与密度的微分方程。

由于直接求解微分方程往往是很困难的，我们采取一维有限容积法^[4,5]将微分方程离散化，采用差商代替微商的方法近似求解，得到离散化后各阶段高压油管内喷出燃油质量变化率的差分方程式：

$$\begin{aligned} M(t+\Delta t, t_j) - M(t, t_j) &= -\rho(t, t_j) \cdot 100t \cdot \Delta t & t \in (0, 0.2) \\ M(t+\Delta t, t_j) - M(t, t_j) &= -\rho(t, t_j) \cdot 20 \cdot \Delta t & t \in (0.2, 2.2) \\ M(t+\Delta t, t_j) - M(t, t_j) &= -\rho(t, t_j) \cdot (2.4-t) \cdot \Delta t & t \in (2.2, 2.4) \end{aligned} \quad (5.10)$$

高压油管内燃油进入质量变化率的差分方程式：

$$M(t+\Delta t, t_j) - M(t, t_j) = \rho_{(160MPa)} \cdot CA \sqrt{\frac{2\Delta P(t, t_j)}{\rho_{(160MPa)}}} \cdot \Delta t \quad t \in (2.4, 2.4+t_j) \quad (5.11)$$

燃油压力和燃油密度的差分方程式：

$$P(t+\Delta t, t_j) - P(t, t_j) = \frac{E(t, t_j)}{\rho(t, t_j)} [\rho(t+\Delta t, t_j) - \rho(t, t_j)] \quad (5.12)$$

通过离散化微分方程后得到求解压力函数的递推公式，具体递推步骤如下：

1. 首先求解出初始值：高压油管内的初始压力为 100 Mpa ，燃油密度为 0.850 mg/mm^3 ，高压油管的体积为： $12500\pi \text{ mm}^3$ ，初始燃油的质量为： $10625\pi \text{ mg}$ 。
2. 然后带入初始值：由于高压油管一个周期工作先进行燃油喷出，可以将燃油初始质量和密度带入递推公式(5.10)得到下一时刻的燃油质量，根据可压流体的性质^[1]，下一时刻的在高压油管内的燃油体积不发生变化，由此可计算出下一时刻的燃油密度。同样带入高压油管内燃油进入质量变化率的递推公式(5.11)，求解得到每一时刻的燃油密度。
3. 最后将每一时刻的燃油密度带入燃油压力和密度的递推公式：结合弹性模型与燃油压力的关系式和高压油泵在入口A处提供的压力 160 Mpa 推出每一时刻的燃油压力，即求解出单向阀开启时间 t_j 时高压油管燃油压力函数。

二分法迭代

根据递推公式可以得到单向阀开启时间 t_j 时高压油管燃油压力函数，通过对单向阀开关时间的约束，可以得到阀门开启时间范围为 $0 < t_j < 87.6 \text{ ms}$ 。由于阀门时间范围较大，且需要精确计算即以较小精度进行迭代，为了提高计算效率，我们采取二分法进行迭代，具体步骤如下：

Step1: 输入最优阀门开启时间范围 $[a, b]$ ，并预先给定阀门开启时间的精度为

$\mu = 0.01ms$ 。

Step2: 计算出 $x = \frac{(a+b)}{2}$ 的时间值，根据上述递推公式计算出阀门开启时间为 x

时的燃油压力函数，求解出在一个周期结束时的压力值 $P(100, x)$ 。

Step3: 如果不满足 $P(100, x) > 100MPa$ 该式，则 $b = x$ ，增加下限；否则 $a = x$ ，减少下线。

Step4: 若 $|a - b| < \mu$ ，则输出满足条件的最优阀门开启时长。

求解结果：

通过 MATLAB 使用二分法对上述求解过程进行迭代，得到如下结果

表 1 问题一结果表

持续稳定 $100MPa$	每次开启时间为 $17.05ms$
2s 后稳定在 $150MPa$	前 2s 每次开启时间为 $19.61ms$ 2s 后每次开启时间为 $17.07ms$
5s 后稳定在 $150MPa$	前 5s 每次开启时间为 $18.34ms$ 5s 后每次开启时间为 $17.07ms$
10s 后稳定在 $150MPa$	前 10s 每次开启时间为 $17.95ms$ 10s 后每次开启时间为 $17.07ms$

六、 问题二的模型建立与求解

6.1 模型的建立

6.1.1 建模准备

问题二是在实际工作情况下对高压油管中的燃油压力进行探究，所以我们首先应对燃油进入和喷出过程中引起高压油管压力变化进行分析。在实际高压油管工作中，燃油的进入在高压油泵中进行，燃油喷出则是在喷油嘴中进行。因此在燃油进入和喷出的过程中，我们分别对高压油泵和喷油嘴进行具体分析。

柱塞腔的容积

燃油进入是通过高压油泵中的凸轮转动驱动柱塞上下运动，柱塞的上下运动引起了高压油泵中柱塞腔的容积变化，由于柱塞腔的容积的变化会导致压力的变化，所以我们对凸轮转动引起柱塞腔的容积变化进行分析。

凸轮是不规则的形状，在绕极点转动过程中，凸轮与柱塞接触的位置在发生变化，由于柱塞和凸轮接触的点是凸轮边缘最高点，所以我们需要计算出凸轮边缘最高点到极点的高度。设凸轮转动的角度为 $\theta_1(g) \ g \in (0, T')$ ，凸轮边缘点到极

点的夹角 $\theta_2(j) \in (0, 2\pi)$ 。根据几何关系得到凸轮转动后边缘每一点到极点的距离，

再取其中最大值为凸轮边缘最高点到极点的高度，设凸轮边缘最高点到极点的高度为 $h(k)$ ，具体表达式如下：

$$h(k) = \max \{h_1(j) \cdot \sin[\theta_1(g) + \theta_2(j)]\} \quad g \in (0, T') \quad (6.1)$$

再通过柱塞运动方程^[5]得到柱塞腔的高度，根据题目可知柱塞运动到上止点位置时，柱塞腔残余容积为 20 mm^3 ，柱塞腔内直径为 5 mm ，则柱塞腔的高度最小为 $H(k)_{\min} = \frac{20}{2.5^2 \pi}$ 。设柱塞腔的高度为 $H(k)$ ，柱塞的长度为 H ，具体的表达式为：

$$H(k) = H(K)_{\min} + H - h(k) \quad (6.2)$$

最后通过高度与横截面积的乘积为体积得到柱塞腔容积，设柱塞腔容积为 $V_1(k)$ ，具体表达式为：

$$V_1(k) = H(k) \cdot 2.5^2 \pi \quad (6.3)$$

有效流通面积

喷油嘴通过针阀的升降进行控制燃油喷出，喷出的燃油改变了高压油管中的燃油质量，进而改变燃油密度，从而引起燃油压力的变化，于是我们对喷油嘴喷出的燃油量进行分析。根据题目给出的喷油嘴示意图可知，将针阀开启后燃油通过密封座流向喷孔，喷出燃油量取决于针阀区域的有效流通面积^[2]，即流过针阀区域垂直于流速的横截面积和喷孔面积中的最小面积。具体喷油嘴的有效流通面积的示意图如下：

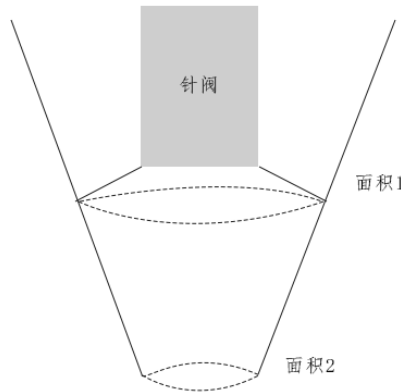


图 8 喷油嘴有效流通面积示意图

于是我们对喷油嘴的有效流通面积进行分析，并画出一部分喷油嘴的半截面几何示意图，如下：

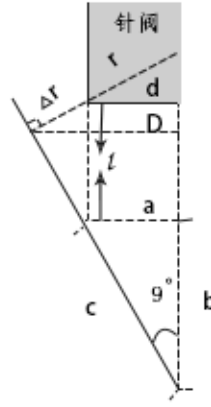


图 9 喷油嘴半截面几何示意图

从图 11 中可以明显看出喷油嘴中几何关系，结合图 10 中有效流通面积的示意图计算出有效流通面积。

设垂直于流速的横截面积为 S' ，喷孔面积为 S'' ，已知附件 2 中给出一个喷油周期时间内的针阀升程值，设每一时刻的针阀升程值为 l_i 。由于垂直于流速的横截面积为圆台表面积，通过图 11 中几何关系得到圆台的各个参数，圆台的上表面半径为针阀半径 $d = 1.25mm$ ，具体参数表达式为：

$$\begin{aligned}\Delta r(k) &= l(k) \cdot \sin 9^\circ \\ D(k) &= d + \Delta r(k) \cdot \cos 9^\circ\end{aligned}\quad (6.4)$$

式中 Δr_i 为圆台的母线， D_i 为圆台下表面的半径；

最后通过圆台表面积计算公式得到垂直于流速的横截面积 S' ，如下：

$$S'(k) = 2\pi[l(k) \cdot \sin 9^\circ \cdot \cos 9^\circ + 1.25]\left(\frac{d}{\cos 9^\circ} + l(k) \cdot \sin 9^\circ\right) - \frac{d^2}{\cos 9^\circ}$$

喷孔的面积 S'' 通过圆的面积公式计算，下端喷孔的直径为 $1.4mm$ ，则喷孔面积为：

$$S'' = 0.7^2 \pi$$

则喷油嘴的有效流通面积为： $S = \min\{S', S''\}$ 。

6.1.2 燃油控制方程模型的建立

我们需要确定凸轮的角速度使得高压油管的压力稳定在 $100Mpa$ ，从问题一中的结论可知，在相同初始条件下，高压油管内的燃油压力可以通过燃油质量递推得到，即燃油压力和质量存在对应关系。根据问题一结果，压力为 $100Mpa$ 时

高压油管内燃油的质量为 33379.42 mg 。于是我们将问题二的压力稳定在 100 Mpa 转化为燃油质量稳定在 33379.42 mg 。

引入 0-1 变量

由于在高压油泵柱塞腔内的压力大于高压油管内的压力时，燃油进入高压油管内，引起高压油管内燃油的质量，否则高压油管的燃油质量不发生改变。所以高压油管燃油质量有两种情况，引入 0-1 变量 $u_1(k)$ ，则有：

$$u_1(k) = \begin{cases} 1 & \text{当高压油泵压力} > \text{高压油管压力} \\ 0 & \text{高压油泵压力} \leq \text{高压油管压力} \end{cases} \quad (6.7)$$

根据附件 2 中可知喷油周期时间，喷油嘴一个工作周期内，在 $0-2.45\text{ ms}$ 时间范围内，针阀处于上升状态，燃油喷出， 2.45 ms 后燃油不再喷出，高压油管内燃油质量不再发生变化。引入 0-1 变量 $u_2(k)$ ，取 k 的精度为 0.01 ms 则有：

$$u_2(k) = \begin{cases} 1 & k \in (0, 245) \\ 0 & k > 245 \end{cases} \quad (6.8)$$

根据注释 2 中进出高压油管的流量公式得到进出燃油质量变化量，由于在计算流量过程中燃油进出过程中压力差不同，需要具体分析进出油的压力差。在出油过程中为高压油管的压力和空气中的大气压力差，即 $P_2(k) - P_0$ 。在进油过程中

为高压油泵里燃油压力与高压油管燃油压力差 $P_1(k) - P_2(k)$ 。

再通过结合高压油管内燃油的质量变化关系和引入的 0-1 变量得到下式：喷油嘴喷油过程：

$$M_2(k+1) = M_2(k) - u_2(k) \cdot \rho_2(k) CS \sqrt{\frac{2(P_2(k) - P_0)}{\rho_2(k)}} \quad (6.9)$$

高压油泵进油过程：

$$M_2(k+1) = M_2(k) + u_1(k) \rho_1(k) CA \sqrt{\frac{2(P_1(k) - P_2(k))}{\rho_1(k)}} \quad (6.10)$$

其中进油口的面积 $A = 0.7^2 \pi$ ，外界大气压 $P_0 = 0.1\text{ MPa}$ 。

由于高压油管内燃油进出是动态变化的，需要建立控制方程^[7]将进出的燃油质量变化方程 (6.9) 和 (6.10) 结合。

于是我们建立燃油控制方程模型，如下：

$$M_2(k+1) = M_2(k) + u_1(k) \rho_1(k) CA \sqrt{\frac{2(P_1(k) - P_2(k))}{\rho_1(k)}} - u_2(k) \cdot \rho_2(k) CS \sqrt{\frac{2(P_2(k) - P_0)}{\rho_2(k)}}$$

6.2 模型的求解

筛选凸轮的角速度数据

根据文献[8]所描述的多次循环喷油的周期性对压力波动的影响，不规则的喷油方式会导致循环喷油的一致性下降，为使系统整体趋于稳定，油泵对高压油管燃油的输入和喷油嘴喷油之间必须存在周期性，所以确定凸轮转动一周的时间需要考虑到喷油嘴喷油的周期，且喷油嘴工作周期为 $T''=100ms$ 。

由于在问题一喷油嘴工作条件下，喷油嘴每秒会进行工作 10 次，则凸轮转动周期范围上限为 1 秒。设凸轮转动周期为 T' ，然后对凸轮转动周期采用最大公倍数法筛选：选择凸轮转动周期 T' 与喷油周期 T'' 的最大公倍数为喷油周期的整数倍。得到凸轮周期筛选后的值和对应的角速度，部分数据见下表，具体见附录。

表 2 筛选后的凸轮周期与角速度部分数据

周期 ms	10	20	25	50	100
角速度 rad/s	0.628318	0.314159	0.2513272	0.1256636	0.0628318

根据上表筛选得到的凸轮周期的数据，求解筛选的凸轮周期数据范围内凸轮转动的角度为 $\theta_1(g) \ g \in (0, T')$ ，带入上述燃油状态方程的数学模型，进而可以算出一秒内高压油管各时刻的燃油质量。

我们需要选择最优的凸轮周期，我们还需要计算各个时刻燃油质量与稳定在 100 Mpa 时的燃油质量 33379.42 mg 偏离量。从中选择偏离量最小所对应的凸轮角速度。

求解结果

最后通过 MATLAB 进行迭代求解出各个凸轮周期下燃油质量的偏离量。
程序截图：



运行周期ms	角速度rad/s	偏移量g
1	6283.19	0.45190
2	3141.59	0.43572
2.5	2513.27	0.32605
5	1256.64	0.42122
10	628.32	0.66855
20	314.16	0.86480
25	251.33	0.90359
50	125.66	0.96512

我们选择其中燃油质量偏离量最小值为：0.32605 g，对应的凸轮角速度为最优角速度即 2513.27 rad/s

七、 问题三的模型建立与求解

7.1 模型的建立

7.1.1 建模准备

问题三在问题二的基础上增加了一个喷油嘴和一个单向减压阀，并设计出高压油泵和减压阀的控制方案。高压油泵工作时通过凸轮转动引起燃油质量变化，减压阀是由开启压力条件下进行工作，所以具体的控制方案需要确定高压油泵的凸轮角速度和单向减压阀开启条件。

(1) 两个喷油嘴工作方式的确定

由于新增了一个相同的喷油嘴，我们需要对两个喷油嘴燃油喷出策略进行设计。根据在一个工作循环内进行多次燃油喷射^[7]的研究，连续喷射间隔较短会导致前次喷射压力尚未完全消失，而后次喷射量会表现出波动特性，循环中的喷油量一致下降。

于是在一个工作周期内，我们设置两个喷油嘴分别工作一次，且两个喷油嘴工作时间间隔为 50 ms 。

(2) 单向减压阀开启条件

为了使得高压油管的压力稳定在 100 Mpa 左右，增加了一个控制高压油管压力的减压阀。当高压油管内燃油压力达到 100 Mpa ，单向减压阀将会打开，将高压油管内的燃油回流，减少压力。根据工作调压阀实际工作情况^[9]，为了维持系统压力值的稳定，调节减压阀将以略高于正常压力值的状态进行调节。那么单向减压阀开启的压力条件为一个范围，根据实际情况高压油管压力不能太大，也要略大于 100 Mpa 。

于是我们设定单向减压阀开启的条件的高压油管压力范围为 $100\text{--}105\text{ Mpa}$ 。

(3) 供油方式的确定

高压油泵的供油方式是通过凸轮转动引起燃油质量变化，但为了稳定高压油管的压力，需要同时确定凸轮角速度和减压阀开启条件的值。因此高压油泵的供油方式需要确定控制方案，进而确定凸轮角速度和减压阀开启条件才能得到供油方式。

7.1.2 双目标优化模型的建立

燃油质量变化函数

同问题二将燃油压力的稳定转化为燃油质量的稳定，对高压油管内燃油质量变化进行分析，由于高压油管内的燃油质量收到三部分变化影响，分别为喷油嘴喷油、减压阀调节、高压油泵进油。于是在建立模型前我们先分别对这三部分进行分析。

喷油嘴喷油

两个喷油嘴通过时间间隔为 50 ms 进行分别喷油，可以将该供油方式看作周

期为 20 *ms* 的单个喷油嘴工作。根据问题二中结果可以得到喷油嘴出油过程燃油质量变化公式，如下：

$$M_2(k+1) = M_2(k) - u_2(k) \cdot \rho_2(k) CS \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_2(k)}} \quad (7.1)$$

$$k \in (0, 50)$$

高压油泵进油：

在高压油管确定凸轮的角速度后，同问题二结论可知高压油泵进油过程中燃油质量变化的公式，如下：

$$M_1(k+1) = M_1(k) + u_1(k) \cdot \rho_1(k) CA \sqrt{\frac{2(P_1(k) - P_2(k))}{\rho_1(k)}} \quad (7.2)$$

单向减压阀出油：

单向减压阀在确定开启压力条件后，当高压油管内的压力达到该值后，开启单向减压阀，高压油管内的燃油可以在压力下回流到外部低压油路中，使得燃油质量发生变化。所以燃油质量变化有两种情况，引入 0-1 变量 $u_3(k)$ ，如下：

$$u_3(k) = \begin{cases} 1 & P_2(k) > P' \\ 0 & P_2(k) < P' \end{cases} \quad (7.3)$$

由题目条件的低压燃油的压力为 0.5 *Mpa*，燃油流出的小孔直径为 1.4 *mm*，燃油质量变化公式，具体如下：

$$M_4(k+1) = M_4(k) + u_3(k) \rho_2(k) CA \sqrt{\frac{2(P_2(k) - 0.5)}{\rho_2(k)}} \quad (7.4)$$

结合三个部分燃油质量变化，得到高压油管内燃油质量总变化，可以看出燃油质量总变化与时刻和凸轮周期以及单向阀门开启条件压力值三个因素有关。设高压油泵进油引起燃油质量变化为 m_1 ，喷油嘴喷油引起燃油质量变化为 m_2 ，单向减压阀出油引起燃油质量变化为 m_3 ，得到下列燃油质量变化的表达式：

$$\begin{cases} M_2(k+1, T', P') = M_2(k, T', P') + m_1 + m_2 + m_3 \\ m_1 = u_1(k) \cdot \rho_1(k) CA \sqrt{\frac{2(P_1(k) - P_2(k))}{\rho_1(k)}} \\ m_2 = -u_2(k) \cdot \rho_2(k) CS \sqrt{\frac{2(P_2(k) - P_0)}{\rho_2(k)}} \\ m_3 = -u_3(k) \rho_2(k) CA \sqrt{\frac{2(P_2(k) - 0.5)}{\rho_2(k)}} \end{cases} \quad (7.5)$$

目标函数的确定

得到高压油管在工作时燃油质量变化函数后，要使高压油管内压力稳定在 100 *Mpa* 左右，同问题二我们需要建立目标为燃油质量与 100 *Mpa* 时的燃油质量

的偏离量 ε 最小。由于高压油泵供油和减压阀排油同时进行，还需要考虑燃油的利用率问题，不仅要考虑燃油质量偏离量最小也需要考虑燃油的未利用量 δ 最小，建立目标为减压阀开启后燃油质量的未利用量 ξ 最小。

于是建立两个目标函数，具体表达式如下：

$$\begin{aligned}\min \varepsilon &= \sum |M_2(k, T', P') - M_2(0)| \\ \min \xi &= \sum |u_3(k)M_2(k, T', P') - M_2(0)|\end{aligned}\quad (7.6)$$

约束条件的确定

对上述列出的目标函数进行约束，对目标函数中质量变化函数进行约束，通过进行燃油质量变化推导，得到燃油质量变化推导公式即可以对目标函数进行约束。具体约束条件见公式(7.5)。

于是我们建立单目标优化模型，如下：

$$\begin{aligned}\min \varepsilon &= \sum |M_2(k, T', P') - M_2(0)| \\ \min \xi &= \sum |u_3(k)M_2(k, T', P') - M_2(0)| \\ s.t. &\begin{cases} M_2(k+1, T', P') = M_2(k, T', P') + m_1 + m_2 + m_3 \\ m_1 = u_1(k) \cdot \rho_1(k) CA \sqrt{\frac{2(P_1(k) - P_2(k))}{\rho_1(k)}} \\ m_2 = -u_2(k) \cdot \rho_2(k) CS \sqrt{\frac{2(P_2(k) - P_0)}{\rho_2(k)}} \\ m_3 = -u_3(k) \rho_2(k) CA \sqrt{\frac{2(P_2(k) - 0.5)}{\rho_2(k)}} \end{cases}\end{aligned}$$

7.3 模型的求解

燃油质量变化是关于凸轮周期、减压阀开启压力值、时刻三个变量的函数，则模型中燃油质量目标函数也是这三个变量。由于高压油管的喷油嘴工作周期设定值为 50 ms ，于是我们确定时刻的取值，只考虑目标函数中凸轮周期和减压阀开启压力值两个变量。

由于燃油质量偏离量和未被利用量可以线性相加，将双目标转化为单目标函数，设燃油质量总偏差函数为 $\delta(T', P')$ ，具体表达式如下：

$$\min \delta = \varepsilon + \xi = \sum |M_2(k, T', P') - M_2(0)| + \sum |u_3(k)M_2(k, T', P') - M_2(0)|$$

等间隔抽样取值缩小范围

首先我们估计总偏离函数的两个变量的取值范围，根据问题二中凸轮周期的估计取值范围为 $T' \in (0, 100)\text{ ms}$ ，单向减压阀开启的条件的高压油管压力范围为

$(100-105)\text{ Mpa}$ 。然后我们需要对周期和压力值的范围进行缩小，对凸轮周期

以 0.01 ms 等间隔抽样出凸轮周期取值，同样地以 0.1 Mpa 等间隔抽样出开启条

件的压力值，得到周期和压力值的组合所有取值数据。

通过 MATLAB 遍历计算工作周期为 50ms 内所有凸轮周期和压力值组合数据的燃油质量总偏差函数 $\delta(T', P')$ 的值。部分数据见下表，具体数据见附录 14。

表 3 开启压力与凸轮角速度对应的偏移量

T\P	101.1	101.2	101.3	101.4	101.5	101.6	101.7	101.8	101.9	102.0	102.1
30	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072
40	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072
50	0.071	0.071	0.071	0.071	0.071	0.071	0.071	0.071	0.071	0.071	0.071
60	0.069	0.069	0.069	0.069	0.069	0.069	0.069	0.069	0.069	0.069	0.069

再通过 MATLAB 绘制出取值范围内各组合情况的燃油质量总偏差图，如下图：

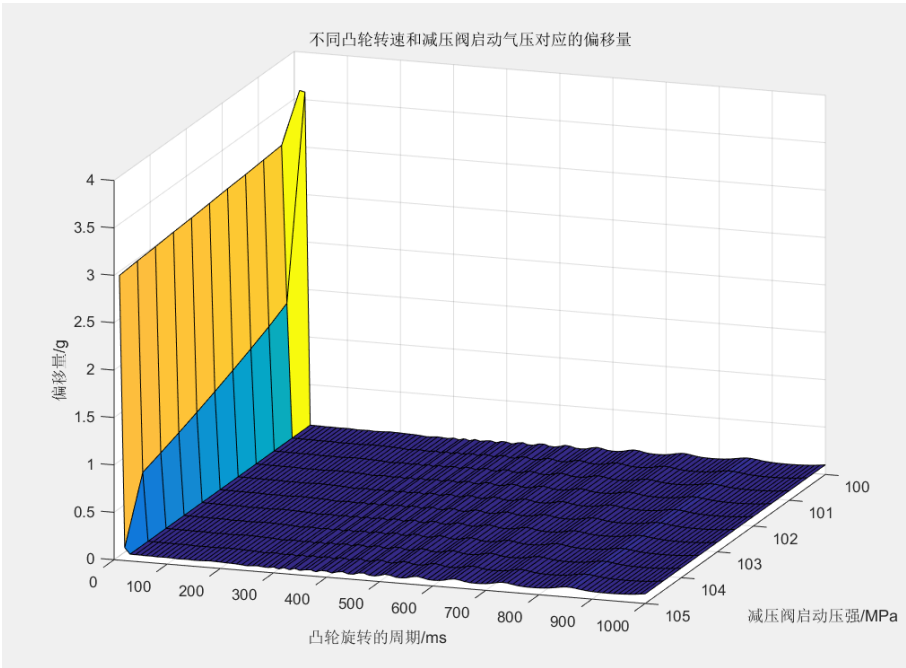


图 10 大范围取值的凸轮周期和启动压力值对应的总偏差图

从图 12 中可以看出，凸轮周期较小时即图中为黄色和蓝色部分的燃油质量总偏差量很大，凸轮周期较大时图中为深蓝色区域部分燃油质量总偏差量较小，而且在不断的波动。因此我们缩小凸轮周期的范围到 $T' \in (3.2, 3.4)\text{ms}$ 。

而减压阀启动压力值在凸轮周期较小时影响较大，在凸轮周期较大时影响较小，几乎可以看作在启动压力范围为 $(100-105)\text{Mpa}$ 内总偏差量只受凸轮周期影响。为了有效地控制高压油管内压力，我们选择减压阀启动压力值为 100Mpa 。

遍历求解

在确定减压阀启动压力值为 100Mpa 的条件后，通过对缩小后的凸轮周期取

值区间 $T' \in (3.2, 3.4)ms$ 以精度为 $0.01ms$ 遍历求解燃油质量的总偏差量的值，并绘制出凸轮周期取值范围的燃油总偏差量图，如下图：

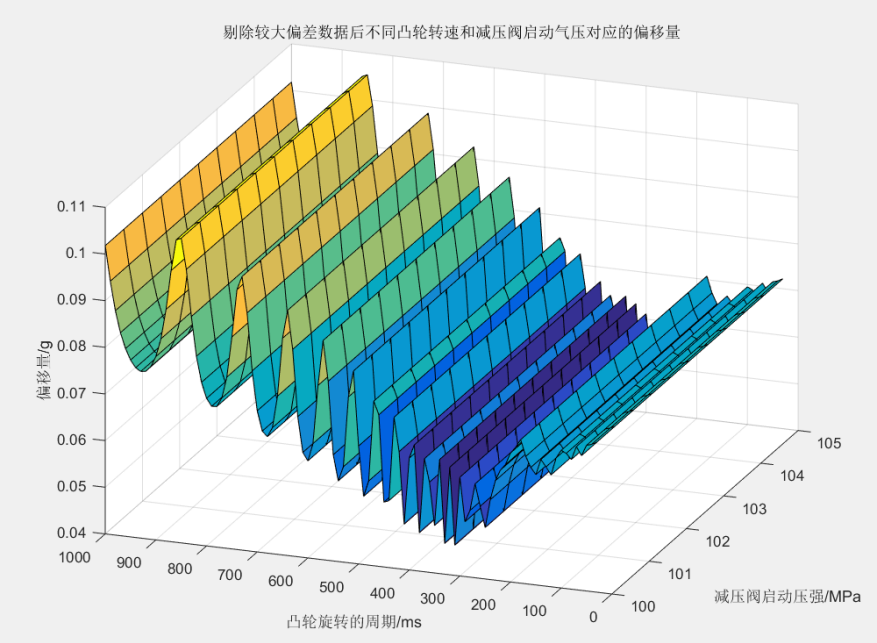


图 11 凸轮周期取值范围的燃油总偏差量图

求解结果

程序截图：

运行周期ms	角速度rad/s	启动压力	偏移量g
3.20	1963.50	100	0.88012
3.21	1957.38	100	0.87891
3.22	1951.30	100	0.86877
3.23	1945.26	100	0.84856
3.24	1939.25	100	0.81541
3.25	1933.29	100	0.76837
3.26	1927.36	100	0.71077
3.27	1921.46	100	0.65220
3.28	1915.61	100	0.60391
3.29	1909.78	100	0.57174
3.30	1904.00	100	0.55590
3.31	1898.24	100	0.55549
3.32	1892.53	100	0.57001
3.33	1886.84	100	0.59980

在其中选择总偏差量最小的数据为：0.55549，对应的高压油泵的凸轮角速度：1898.24rad / s。

高压油泵和减压阀的控制方案

高压油泵处的凸轮以1898.24rad / s 的角速度旋转驱动柱塞对高压油管内进行供油，单向减压阀则在高压油管内压力达到 100 Mpa 后开启单向减压阀，将燃油回流。

八、 模型的评价

8.1 模型的优点

1. 模型一基于流体力学的连续性守恒方程建立, 准确度高, 适用性强, 同时将方程运用一维有限容积法离散化使用二分法进行求解, 精度可调, 收敛程度快。

2. 模型二联系实际, 基于柱塞运动方程得到活塞运动轨迹, 通过几何分析得到有效流通面积, 建立控制方程进行迭代求解, 模型考虑比较全面, 结果准确度高。

3. 模型三联系实际, 考虑了燃油利用率, 消除了凸轮转速高所带来的误差, 并通过线性加和将多目标转化为单目标优化, 并使用等间隔抽样确定目标函数的最优解范围, 减小计算量。

4. 本文所有模型对样本值都无无严格限制, 可适应不同规模的数据, 通用性好。

8.2 模型的缺点

1. 模型一和模型二为保证结果的准确性, 求解过程较为复杂, 对数据的精度要求较高, 求解时间相对较长。

2. 模型三受到的影响因素较多, 本文考虑的比较全面, 导致模型较为复杂, 求解较为困难。

8.3 模型的推广

1. 模型一和模型二可以推广为其他机械设备的压强控制策略, 例如医疗上的高压消毒, 航空航天上的减压供气等情况。

2. 模型三可推广到其他发动机的燃油供给方案的设计, 并可根据实际燃油价格确定线性加和的权值。

参考文献

- [1]流体力学及其工程应用/(美) E. 约翰芬纳莫尔, 约瑟夫 B. 弗朗兹尼编著 钱翼稷, 周玉文等译. —北京:机械工业出版社, 2009. 09
- [2]王称心. 柴油机高压共轨燃油喷射性能仿真研究[D]. 江南大学, 2015.
- [3]阀门的响应时间[EB/OL]. <https://wenku.baidu.com/view/93da4208844769eae009ed0b>
- [4]颜松. 柴油机高压共轨系统压力动态特性模拟[D]. 浙江大学, 2005.
- [5] 计算流体力学:典型算法与算例/高歌 ... [等] 编著. —北京:机械工业出版社, 2015
- [6]李晶晶. 柴油机电控高压共轨燃油喷射系统控制策略及仿真研究[D]. 北京交通大学, 2011.
- [7]高献坤. 柴油机高压共轨系统模拟计算与仿真[D]. 河南农业大学, 2005.
- [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.
- [9]郑欣, 邢建国, 李东明, 黄楠. 天然气调压装置关键阀门选型与应用[J/OL]. 油气储运:1-8[2019-09-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1093.TE.20190904.1804.002.html>.

附录

- 附录 1 a_1.m 求解持续稳定在 $100MPa$ 时的放油时间的程序
 附录 2 a_2.m 求解 $2s$ 后稳定在 $150MPa$ 时的放油时间的程序
 附录 3 a_3.m 求解 $5s$ 后稳定在 $150MPa$ 时的放油时间的程序
 附录 4 a_4.m 求解 $10s$ 后稳定在 $150MPa$ 时的放油时间的程序
 附录 5 a_5.m 求解持续稳定在 $150MPa$ 时的放油时间的程序
 附录 6 a_6.m 绘制周期内进油出油的过程的程序
 附录 7 b_1.m 计算凸轮旋转到不同角度时活塞被顶起的高度的程序
 附录 8 b_2.m 计算不同时刻喷油口的有效流通面积的程序
 附录 9 b_3.m 求解问题二的最优角速度的程序
 附录 10 c_1.m 对问题三进行抽样计算确定趋势的程序
 附录 11 c_2.m 绘制抽样点的误差分析趋势的程序
 附录 12 c_3.m 计算问题三凸轮最优转速的程序
 附录 13 凸轮周期与角速度的对应关系
 附录 14 开启压力与凸轮角速度对应的偏移量

附录 1 a_1.m 求解持续稳定在 $100MPa$ 时的放油时间的程序

```
clear;%求解稳定 100
clc;
time = 1000000;
C = 0.85;
A = 0.7^2*pi;
V = 500*25*pi;%油管体积
p = xlsread('c.xlsx','Sheet1');%密度与弹性模量
t = 1:1:time;%时间
P1 = zeros(1,time);%压强
p1 = zeros(1,time);%燃油密度
M1 = zeros(1,time);%燃油质量

M1(1) = 0.85*V;%给定初始值
p1(1) = 0.85;
P1(1) = 100;
time = 10000;
P = zeros(21,2);
for nn = 1690:1:1710
    for k = 1:1:time*100-1
        p1(k) = M1(k)/V;%计算密度
        if mod(k,time)<time*0.002
            M1(k+1) = M1(k)-mod(k,time)/10*p1(k);
        elseif mod(k,time)<time*0.022
            M1(k+1) = M1(k)-20/10*p1(k);
        elseif mod(k,time)<time*0.024
            M1(k+1) = M1(k)-(240-mod(k,10000))/10*p1(k);
```

```

elseif mod(k,time)<nn%设立添加的时长为
    M1(k+1) = M1(k)+0.01*C*A*sqrt(2*(160-p1(k))/p1(k));
else
    M1(k+1) = M1(k);
end
p1(k+1) = M1(k+1)/V;
e = 0.0001*p1(k).^3 - 0.001082*p1(k).^2 + 5.474*p1(k) + 1532;%计算弹性模量
P1(k+1) = P1(k)+(p1(k+1)-p1(k))*e/p1(k);
P(nn-1689,1) = P(nn-1689,1)+abs(P1(k)-100)*0.00000001;
end
P(nn-1689,2) = nn;
end
fprintf('气压稳定在 100MPa 所需的单向阀开启时间\n');
fprintf('开启时间 ms\t\t 函数积分\n');
for k = 14:1:18
    fprintf('%0.2f\t\t\t\t%.5f\n',P(k,2)/100,P(k,1));
end

```

附录 2 a_2.m 求解 2s 后稳定在 150MPa 时的放油时间的程序

```

clear;%求解 2s 稳定 150
clc;
time = 1000000;
C = 0.85;
A = 0.7^2*pi;
V = 500*25*pi;%油管体积
p = xlsread('c.xlsx','Sheet1');%密度与弹性模量
t = 1:1:time;%时间
P1 = zeros(1,time);%压强
p1 = zeros(1,time);%燃油密度
M1 = zeros(1,time);%燃油质量

M1(1) = 0.85*V;%给定初始值
p1(1) = 0.85;
P1(1) = 100;
time = 10000;
P = zeros(201,2);
for nn = 1955:1:1965
    for k = 1:1:time*100-1
        p1(k) = M1(k)/V;%计算密度
        if mod(k,time)<time*0.002
            M1(k+1) = M1(k)-mod(k,time)/10*p1(k);
        elseif mod(k,time)<time*0.022
            M1(k+1) = M1(k)-20/10*p1(k);
        elseif mod(k,time)<time*0.024
            M1(k+1) = M1(k)-(240-mod(k,10000))/10*p1(k);
        end
    end
end

```



```

elseif mod(k,time)<nn%设立添加的时长为
    M1(k+1) = M1(k)+0.01*C*A*sqrt(2*(160-p1(k))/p1(k));
else
    M1(k+1) = M1(k);
end
p1(k+1) = M1(k+1)/V;
e = 0.0001*p1(k).^3 - 0.001082*p1(k).^2 + 5.474*p1(k) + 1532;%计算弹性模量
P1(k+1) = P1(k)+(p1(k+1)-p1(k))*e/p1(k);
end
P(nn-1954,1) = min(abs(P1(200000-1)-150));
P(nn-1954,2) = nn;
end
fprintf('2s 气压稳定在 150MPa 所需的单向阀开启时间\n');
fprintf('开启时间\t\t 终时误差\n');
for k = 5:1:9
    fprintf('%0.2f\t\t%0.5f\n',P(k,2)/100,P(k,1));
end

```

附录 3 a_3.m 求解 5s 后稳定在 150MPa 时的放油时间的程序

```

clear;%求解 5s 稳定 150
clc;
time = 1000000;
C = 0.85;
A = 0.7^2*pi;
V = 500*25*pi;%油管体积
p = xlsread('c.xlsx','Sheet1');%密度与弹性模量
t = 1:1:time;%时间
P1 = zeros(1,time);%压强
p1 = zeros(1,time);%燃油密度
M1 = zeros(1,time);%燃油质量

M1(1) = 0.85*V;%给定初始值
p1(1) = 0.85;
P1(1) = 100;
time = 10000;
P = zeros(201,2);
for nn = 1830:1:1840
    for k = 1:1:time*100-1
        p1(k) = M1(k)/V;%计算密度
        if mod(k,time)<time*0.002
            M1(k+1) = M1(k)-mod(k,time)/10*p1(k);
        elseif mod(k,time)<time*0.022
            M1(k+1) = M1(k)-20/10*p1(k);
        elseif mod(k,time)<time*0.024
            M1(k+1) = M1(k)-(240-mod(k,10000))/10*p1(k);
        end
    end
end

```

```

elseif mod(k,time)<nn%设立添加的时长为
    M1(k+1) = M1(k)+0.01*C*A*sqrt(2*(160-p1(k))/p1(k));
else
    M1(k+1) = M1(k);
end
p1(k+1) = M1(k+1)/V;
e = 0.0001*p1(k).^3 - 0.001082^p1(k).^2 + 5.474*p1(k) + 1532;%计算弹性模量
P1(k+1) = P1(k)+(p1(k+1)-p1(k))*e/p1(k);
end
P(nn-1829,1) = min(abs(P1(500000-1)-150));
P(nn-1829,2) = nn;
end
fprintf('5s 气压稳定在 150MPa 所需的单向阀开启时间\n');
fprintf('开启时间\t\t 终时误差\n');
for k = 3:1:7
    fprintf('%0.2f\t\t%0.5f\n',P(k,2)/100,P(k,1));
end

```

附录 4 a_4.m 求解 10s 后稳定在 150MPa 时的放油时间的程序

```

clear;%求解 10s 稳定 150
clc;
time = 1000000;
C = 0.85;
A = 0.7^2*pi;
V = 500*25*pi;%油管体积
p = xlsread('c.xlsx','Sheet1');%密度与弹性模量
t = 1:1:time;%时间
P1 = zeros(1,time);%压强
p1 = zeros(1,time);%燃油密度
M1 = zeros(1,time);%燃油质量

M1(1) = 0.85*V;%给定初始值
p1(1) = 0.85;
P1(1) = 100;
time = 10000;
P = zeros(201,2);
for nn = 1790:1:1800
    for k = 1:1:time*100-1
        p1(k) = M1(k)/V;%计算密度
        if mod(k,time)<time*0.002
            M1(k+1) = M1(k)-mod(k,time)/10*p1(k);
        elseif mod(k,time)<time*0.022
            M1(k+1) = M1(k)-20/10*p1(k);
        elseif mod(k,time)<time*0.024
            M1(k+1) = M1(k)-(240-mod(k,10000))/10*p1(k);
        end
    end
end

```

```

elseif mod(k,time)<nn%设立添加的时长为
    M1(k+1) = M1(k)+0.01*C*A*sqrt(2*(160-p1(k))/p1(k));
else
    M1(k+1) = M1(k);
end
p1(k+1) = M1(k+1)/V;
e = 0.0001*p1(k).^3 - 0.001082*p1(k).^2 + 5.474*p1(k) + 1532;%计算弹性模量
P1(k+1) = P1(k)+(p1(k+1)-p1(k))*e/p1(k);
end
P(nn-1789,1) = min(abs(P1(1000000-1)-150));
P(nn-1789,2) = nn;
end
fprintf('10s 气压稳定在 150MPa 所需的单向阀开启时间\n');
fprintf('开启时间\t\t终时误差\n');
for k = 4:1:8
    fprintf('%0.2f\t\t%0.5f\n',P(k,2)/100,P(k,1));
end

```

附录 5 a_5.m 求解持续稳定在 150MPa 时的放油时间的程序

```

clear;%求解持续稳定 150
clc;
time = 1000000;
C = 0.85;
A = 0.7^2*pi;
V = 500*25*pi;%油管体积
p = xlsread('c.xlsx','Sheet1');%密度与弹性模量
t = 1:1:time;%时间
P1 = zeros(1,time);%压强
p1 = zeros(1,time);%燃油密度
M1 = zeros(1,time);%燃油质量

M1(1) = 0.8517*V;%给定初始值
p1(1) = 0.8517;
P1(1) = 150;
time = 10000;
P = zeros(201,2);
for nn = 1700:1:1710
    for k = 1:1:time*100-1
        p1(k) = M1(k)/V;%计算密度
        if mod(k,time)<time*0.002
            M1(k+1) = M1(k)-mod(k,time)/10*p1(k);
        elseif mod(k,time)<time*0.022
            M1(k+1) = M1(k)-20/10*p1(k);
        elseif mod(k,time)<time*0.024
            M1(k+1) = M1(k)-(240-mod(k,10000))/10*p1(k);
        end
    end
end

```

<pre> elseif mod(k,time)<nn%设立添加的时长为 M1(k+1) = M1(k)+0.01*C*A*sqrt(2*(160-p1(k))/p1(k)); else M1(k+1) = M1(k); end p1(k+1) = M1(k+1)/V; e = 0.0001*p1(k).^3 - 0.001082*p1(k).^2 + 5.474*p1(k) + 1532;%计算弹性模量 P1(k+1) = P1(k)+(p1(k+1)-p1(k))*e/p1(k); end P(nn-1699,1) = min(abs(P1(1000000-1)-150)); P(nn-1699,2) = nn; end fprintf('气压稳定在 150MPa 所需的单向阀开启时间\n'); fprintf('开启时间\t\t 终时误差\n'); for k = 7:1:11 fprintf('%0.2f\t\t%0.5f\n',P(k,2)/100,P(k,1)); end </pre>
附录 6 a_6.m 绘制周期内进油出油的过程的程序
<pre> clear;%作图 clc; x = 0:0.01:2.4; y = (x-2.4).^2+100-2.4^2; h1 = plot(x,y,'r'); hold on plot([2.4,2.4],[94.24,80],'black'); y = 94.24:0.01:100; x = 0.52*(y-94.24).^2+2.4; h2 = plot(x,y,'g'); plot([19.6524,19.6524],[100,80],'black'); h3 = plot([19.6524,100],[100,100],'b'); plot([100,100],[105,105]); plot([100,100],[80,80]); legend([h1,h2,h3],'喷油','注油','稳定'); title('周期内压强变化'); xlabel('时间'); ylabel('压强'); </pre>
附录 7 b_1.m 计算凸轮旋转到不同角度时活塞被顶起的高度的程序
<pre> clear;%计算不同角度的凸轮竖直高度 clc; data = xlsread('a.xlsx','Sheet1'); seta = 0:0.01:6.27; </pre>

```

y = zeros(1,628);
x = zeros(1,628);
n = zeros(1,628);
polar(data(:,1),data(:,2));%极坐标外轮廓图
% for k = 1:1:628
%     scatter(cos(data(k,1))*data(k,2),sin(data(k,1))*data(k,2),5,'r');%直角坐标轮廓图
%     hold on
% end
for k = 1:1:628
    for m = 1:1:628
        n(m) = cos((seta(k)+data(m,1)))*data(m,2);
    end
    [y(k),x(k)] = max(n);
end
data = [data,y',x'];

```

附录 8 b_2.m 计算不同时刻喷油口的有效流通面积的程序

```

clear;%计算各时刻的喷射面积
clc;
data = xlsread('b.xlsx','Sheet1');
a = 1.25;
b = 7.8922;
c = 7.9906;
R = zeros(1,400);
r = zeros(1,400);
l = zeros(1,400);
D = zeros(1,400);
d = zeros(1,400);
S = zeros(1,400);
for k = 1:1:400
    l(k) = a*data(k,2)/c;
    R(k) = a*(sqrt(data(k,2)^2-l(k)^2)+c)/b;
    r(k) = R(k)-l(k);
    D(k) = a*(sqrt(data(k,2)^2-l(k)^2)+c)/c;
    d(k) = r(k)*b/c;

    S(k) = R(k)*D(k)*pi-r(k)*d(k)*pi;
    if S(k)>1.5394
        S(k) = 1.5394;
    end
end
S = S';

```

附录 9 b_3.m 求解问题二的最优角速度的程序

```

clear;%求解最优角速度
clc;

```

```

seta = xlsread('a.xlsx','Sheet1');
S = xlsread('a.xlsx','Sheet3');
V2 = 500*25*pi;%油管体积
TT
=
[100,200,250,500,1000,2000,2500,5000,10000,20000,30000,40000,50000,60000,70000,80000,
90000,100000];
fprintf('运行周期 ms\t 角速度 rad/s\t\t 偏移量 g\n');
seee = zeros(18,2);
xx = 1;
for T = TT
C = 0.85;
trans = xlsread('c.xlsx','Sheet2');%密度与压强的转换
V1 = zeros(1,T);
for k = 1:1:T%计算出各时刻的油泵体积
    V1(k) = (8.2576-seta(ceil(k/T*628),3))*2.5*2.5*pi;
end
A = 0.7*0.7*pi;
P1 = zeros(1,100000);
P2 = zeros(1,100000);
M1 = zeros(1,100000);
M2 = zeros(1,100000);
p1 = zeros(1,100000);
p2 = zeros(1,100000);
data = zeros(6,100000);
P1(1) = 0.5;
P2(1) = 100;
p1(1) = 0.8046;
p2(1) = 0.85;
M1(1) = V1(1)*p1(1);
M2(1) = V2(1)*p2(1);

for k = 1:1:99999%循环迭代
    if mod(k,T) == 0
        p1(k) = M1(k)/V1(100);
    else
        p1(k) = M1(k)/V1(mod(k,T));%计算密度
    end
    %已知密度求压强
    for n = 1:1:400
        if p1(k)>trans(n,2)
            P1(k) = (p1(k)-trans(n,2))/(trans(n+1,2)-trans(n,2))*(trans(n+1,1)-
trans(n,1))+trans(n,1);
        end
    end
end

```

```

p2(k) = M2(k)/V2;
if k<245%喷油
    M2(k+1) = M2(k)-p1(k)*C*S(k)*sqrt(2*abs((P2(k)-0.1))/p2(k));
else
    M2(k+1) = M2(k);
end
p2(k+1) = M2(k+1)/V2;
for n = 1:1:400
    if p2(k)>trans(n,2)
        P2(k) = (p2(k)-trans(n,2))/(trans(n+1,2)-trans(n,2))*(trans(n+1,1)-
trans(n,1))+trans(n,1);
    end
end
if P1(k)>P2(k)%加油
    M1(k+1) = M1(k)-0.01*p1(k)*C*A*sqrt(2*(P1(k)-P2(k))/p1(k));
    M2(k+1) = M2(k)+0.01*p1(k)*C*A*sqrt(2*(P1(k)-P2(k))/p1(k));
elseif mod(k,T) == T/2%油泵加油
    M1(k+1) = p1(1)*V1(1);
else
    M1(k+1) = M1(k);
end

if mod(k,T) == 0%计算密度
    p1(k+1) = M1(k+1)/V1(T);
else
    p1(k+1) = M1(k+1)/V1(mod(k,T));
end

data(1,k) = p1(k);
data(2,k) = p2(k);
data(3,k) = P1(k);
data(4,k) = P2(k);
data(5,k) = M1(k);
data(6,k) = M2(k);
end

cy = 0;%抽样
see = 0;
for k = 1:1:100000
    cy = abs(data(6,k)-500*5*5*0.85*pi)*0.0001;
    see = see+cy;
end

```

```

seee(xx,1) = T;
seee(xx,2) = see;

if xx==3

fprintf('%0.1f\t\t\t%0.2f\t\t\t%0.5f\n',seee(xx,1)/100,2*pi/seee(xx,1)*100000,abs(seee(xx,2))/1000
);
elseif xx<18

fprintf('%0.1f\t\t\t%0.2f\t\t\t%0.5f\n',fix(seee(xx,1)/100),2*pi/seee(xx,1)*100000,abs(seee(xx,2))/1000
);
else

fprintf('%0.1f\t\t\t%0.2f\t\t\t%0.5f\n',fix(seee(xx,1)/100),2*pi/seee(xx,1)*100000,abs(seee(xx,2))/1000
);
end
xx = xx+1;
end

```

附录 10 c_1.m 对问题三进行抽样计算确定趋势的程序

```

clear;%求解第三问最优角速度和开启压力的范围
clc;
seta = xlsread('a.xlsx','Sheet1');
S = xlsread('a.xlsx','Sheet3');
A = 0.7^2*pi;
V2 = 500*25*pi;%油管体积
TT = 10:100:10000;
trans = xlsread('c.xlsx','Sheet2');%密度与压强的转换

seee = zeros(18,2);
xx = 1;
PP0 = 100:0.5:105;
t1 = 1;
pyl = zeros(101,101);
for P0 = PP0
    t2 = 1;
    for T = TT
        C = 0.85;
        V1 = zeros(1,T);
        for k = 1:1:T%计算出各时刻的油泵体积
            V1(k) = (8.2576-seta(ceil(k/T*628),3))*2.5*2.5*pi;
        end
        P1 = zeros(1,10000);
        P2 = zeros(1,10000);
        M1 = zeros(1,10000);
    end
end

```



```

M2 = zeros(1,10000);
p1 = zeros(1,10000);
p2 = zeros(1,10000);
data = zeros(9,10000);
P1(1) = 0.5;
P2(1) = 100;
p1(1) = 0.8046;
p2(1) = 0.85;
M1(1) = V1(1)*p1(1);
M2(1) = V2(1)*p2(1);
for k = 1:1:9999%循环迭代
    if mod(k,T) == 0
        p1(k) = M1(k)/V1(T);
    else
        p1(k) = M1(k)/V1(mod(k,T));%计算密度
    end
    for n = 1:1:400%已知密度求压强
        if p1(k)>trans(n,2)
            P1(k) = (p1(k)-trans(n,2))/(trans(n+1,2)-trans(n,2))*(trans(n+1,1)-trans(n,1))+trans(n,1);
        end
    end
    p2(k) = M2(k)/V2;
    if (k<245)||(k>5000)&&(k<5245)%喷油两次
        M2(k+1) = M2(k)-p1(k)*C*S(mod(k,5000))*sqrt(2*abs((P2(k)-0.1))/p2(k));
    else
        M2(k+1) = M2(k);
    end
    p2(k+1) = M2(k+1)/V2;
    for n = 1:1:400
        if p2(k)>trans(n,2)
            P2(k) = (p2(k)-trans(n,2))/(trans(n+1,2)-trans(n,2))*(trans(n+1,1)-trans(n,1))+trans(n,1);
        end
    end
    if P1(k)>P2(k)%加油
        M1(k+1) = M1(k)-0.01*p1(k)*C*A*sqrt(2*(P1(k)-P2(k))/p1(k));
        M2(k+1) = M2(k)+0.01*p1(k)*C*A*sqrt(2*(P1(k)-P2(k))/p1(k));
    elseif mod(k,T) == T/2%油泵加油
        M1(k+1) = p1(1)*V1(1);
    else
        M1(k+1) = M1(k);
    end
end

```

```

if mod(k,T) == 0
    p1(k+1) = M1(k+1)/V1(T);
else
    p1(k+1) = M1(k+1)/V1(mod(k,T));
end
data(7,k) = p2(k);
data(8,k) = P2(k);
data(9,k) = M2(k);
if P2(k) > P0;%减压阀工作， 低压未知
    M2(k+1) = M2(k)+0.01*p2(k)*C*A*sqrt(2*(P2(k)-0.5)/p2(k));
    p2(k+1) = M2(k+1)/V2;
    for n = 1:1:400
        if p2(k)>trans(n,2)
            P2(k) = (p2(k)-trans(n,2))/(trans(n+1,2)-trans(n,2))*(trans(n+1,1)-trans(n,1))+trans(n,1);
        end
    end
end
data(1,k) = p1(k);
data(2,k) = p2(k);
data(3,k) = P1(k);
data(4,k) = P2(k);
data(5,k) = M1(k);
data(6,k) = M2(k);
end
see = 0;
for k = 1:1:10000%计算偏移量
    if data(9,k)>500*5*5*0.85*pi
        cy = 2*(data(9,k)-500*5*5*0.85*pi)*0.0000001;
    else
        cy = (500*5*5*0.85*pi-data(9,k))*0.0000001;
    end
    see = see+cy;
end
%disp(see);
clc;
fprintf('运行时间较长， 请等待， 已运行百分之%.2f\n',(t1*100+t2-101)/1010*100);
see(xx,1) = T;
see(xx,2) = see;
pyl(t2,t1) = see;
t2 = t2+1;
end
t1 = t1+1;
end

```

<pre>fprintf('各转速和减压阀开启压强所对应的总误差如下表'); disp(pyl(1:100,1:11));</pre>
附录 11 c_2.m 绘制抽样点的误差分析趋势的程序
<pre>clear;%对全部范围内的偏差值进行作图 clc; x = 100:0.5:105; y = 10:10:1000; [x,y] = meshgrid(x,y); z = xlsread('b.xlsx','Sheet3','O17:Y116'); figure(1); surf(x,y,z); title('不同凸轮转速和减压阀启动气压对应的偏移量'); xlabel('减压阀启动压强/MPa'); ylabel('凸轮旋转的周期/ms'); zlabel('偏移量/g'); figure(2); x = 100:0.5:105; y = 30:10:1000; [x,y] = meshgrid(x,y); z = xlsread('b.xlsx','Sheet3','O17:Y116'); z = z(3:100,:); surf(x,y,z); title('剔除较大偏差数据后不同凸轮转速和减压阀启动气压对应的偏移量'); xlabel('减压阀启动压强/MPa'); ylabel('凸轮旋转的周期/ms'); zlabel('偏移量/g');</pre>
附录 12 c_3.m 计算问题三凸轮最优转速的程序
<pre>clear;%求解第三问最优角速度的范围 clc; seta = xlsread('a.xlsx','Sheet1'); S = xlsread('a.xlsx','Sheet3'); A = 0.7^2*pi; V2 = 500*25*pi;%油管体积 TT = 320:1:340; trans = xlsread('c.xlsx','Sheet2');%密度与压强的转换 T = 50000;%旋转周期 fprintf('运行周期 ms\t 角速度 rad/s\t\t 启动压力\t\t 偏移量 g\n'); seee = zeros(18,2); xx = 1; PP0 = 100; t1 = 1; pyl = zeros(101,101); for P0 = PP0 t2 = 1;</pre>

```

for T = TT
C = 0.85;
V1 = zeros(1,T);
for k = 1:1:T%计算出各时刻的油泵体积
    V1(k) = (8.2576-seta(ceil(k/T*628),3))*2.5*2.5*pi;
end
P1 = zeros(1,100000);
P2 = zeros(1,100000);
M1 = zeros(1,100000);
M2 = zeros(1,100000);
p1 = zeros(1,100000);
p2 = zeros(1,100000);
data = zeros(9,100000);
P1(1) = 0.5;
P2(1) = 100;
p1(1) = 0.8046;
p2(1) = 0.85;
M1(1) = V1(1)*p1(1);
M2(1) = V2(1)*p2(1);
for k = 1:1:99999%循环迭代
    if mod(k,T) == 0
        p1(k) = M1(k)/V1(T);
    else
        p1(k) = M1(k)/V1(mod(k,T));%计算密度
    end
    for n = 1:1:400%已知密度求压强
        if p1(k)>trans(n,2)
            P1(k) = (p1(k)-trans(n,2))/(trans(n+1,2)-trans(n,2))*(trans(n+1,1)-trans(n,1))+trans(n,1);
        end
    end
    p2(k) = M2(k)/V2;
    if (k<245)||(k>5000)&&(k<5245)%喷油两次
        M2(k+1) = M2(k)-p1(k)*C*S(mod(k,5000))*sqrt(2*abs((P2(k)-0.1))/p2(k));
    else
        M2(k+1) = M2(k);
    end
    p2(k+1) = M2(k+1)/V2;
    for n = 1:1:400
        if p2(k)>trans(n,2)
            P2(k) = (p2(k)-trans(n,2))/(trans(n+1,2)-trans(n,2))*(trans(n+1,1)-trans(n,1))+trans(n,1);
        end
    end
end
end

```

```

if P1(k)>P2(k)%加油
    M1(k+1) = M1(k)-0.01*p1(k)*C*A*sqrt(2*(P1(k)-P2(k))/p1(k));
    M2(k+1) = M2(k)+0.01*p1(k)*C*A*sqrt(2*(P1(k)-P2(k))/p1(k));
elseif mod(k,T) == T/2%油泵加油
    M1(k+1) = p1(1)*V1(1);
else
    M1(k+1) = M1(k);
end

if mod(k,T) == 0
    p1(k+1) = M1(k+1)/V1(T);
else
    p1(k+1) = M1(k+1)/V1(mod(k,T));
end

data(7,k) = p2(k);
data(8,k) = P2(k);
data(9,k) = M2(k);
if P2(k) > P0;%减压阀工作， 低压未知
    M2(k+1) = M2(k)+0.01*C*A*sqrt(2*(P2(k)-0.5)/p2(k));
    p2(k+1) = M2(k+1)/V2;
    for n = 1:1:400
        if p2(k)>trans(n,2)
            P2(k) = (p2(k)-trans(n,2))/(trans(n+1,2)-trans(n,2))*(trans(n+1,1)-trans(n,1))+trans(n,1);
        end
    end
end

data(1,k) = p1(k);
data(2,k) = p2(k);
data(3,k) = P1(k);
data(4,k) = P2(k);
data(5,k) = M1(k);
data(6,k) = M2(k);
end
see = 0;
for k = 1:1:100000%计算偏移量
    if data(9,k)>500*5*5*0.85*pi
        cy = 2*(data(9,k)-500*5*5*0.85*pi)*0.0000001;
    else
        cy = (500*5*5*0.85*pi-data(9,k))*0.0000001;
    end
    see = see+cy;
end

```

```

end
%disp(see);
seee(xx,1) = T;
seee(xx,2) = see;
pyl(t2,t1) = see;
t2 = t2+1;
fprintf('%0.2f\t\t%0.2f\t\t\t%d\t\t\t%0.5f\n',TT(xx)/100,2*pi/TT(xx)*100000,100,see);
xx = xx+1;
end
    t1 = t1+1;
end

```

附录 13 凸轮周期与角速度的对应关系

	1	6283.18
	2	3141.59
	2.5	2513.27
	5	1256.64
	10	628.32
	20	314.16
	25	251.33
	50	125.66
	100	62.83
	200	31.42
	300	20.94
	400	15.71
	500	12.57
	600	10.47
	700	8.98
	800	7.85
	900	6.98
	1000	6.28

附录 14 开启压力与凸轮角速度对应的偏移量

0.072 134	0.072 134	0.072 134	0.072 134	0.072 134	0.072 134	0.072 134	0.072 134	0.072 134	0.072 134	0.072 134
0.071 561	0.071 561	0.071 561	0.071 561	0.071 561	0.071 561	0.071 561	0.071 561	0.071 561	0.071 561	0.071 561
0.071 226	0.071 226	0.071 226	0.071 226	0.071 226	0.071 226	0.071 226	0.071 226	0.071 226	0.071 226	0.071 226
0.068 875	0.068 875	0.068 875	0.068 875	0.068 875	0.068 875	0.068 875	0.068 875	0.068 875	0.068 875	0.068 875
0.070 7	0.070 7	0.070 7	0.070 7	0.070 7	0.070 7	0.070 7	0.070 7	0.070 7	0.070 7	0.070 7
0.067 798	0.067 798	0.067 798	0.067 798	0.067 798	0.067 798	0.067 798	0.067 798	0.067 798	0.067 798	0.067 798

0.075 719	0.075 719	0.075 719	0.075 719	0.075 719	0.075 719	0.075 719	0.075 719	0.075 719	0.075 719	0.075 719
0.076 402	0.076 402	0.076 402	0.076 402	0.076 402	0.076 402	0.076 402	0.076 402	0.076 402	0.076 402	0.076 402
0.077 92	0.077 92	0.077 92	0.077 92	0.077 92	0.077 92	0.077 92	0.077 92	0.077 92	0.077 92	0.077 92
0.080 248	0.080 248	0.080 248	0.080 248	0.080 248	0.080 248	0.080 248	0.080 248	0.080 248	0.080 248	0.080 248
0.083 521	0.083 521	0.083 521	0.083 521	0.083 521	0.083 521	0.083 521	0.083 521	0.083 521	0.083 521	0.083 521
0.088 11	0.088 11	0.088 11	0.088 11	0.088 11	0.088 11	0.088 11	0.088 11	0.088 11	0.088 11	0.088 11
0.094 312	0.094 312	0.094 312	0.094 312	0.094 312	0.094 312	0.094 312	0.094 312	0.094 312	0.094 312	0.094 312
0.101 802	0.101 802	0.101 802	0.101 802	0.101 802	0.101 802	0.101 802	0.101 802	0.101 802	0.101 802	0.101 802