

基于多重搜索的高压油管压力控制优化设计

摘要

高压油管是柴油发电机等设备的重要器件，是高压油路的重要组成部分。本文针对不同给油与放油方式，针对进路单向阀开启时间、凸轮角速度与出路减压阀进行优化设计，得到了合理的解以实现管压稳定。

针对问题 1，本文首先进行数据处理，建立燃油压强与密度的关系，以便后续直接使用。考虑全过程中燃油质量是守恒量，可通过燃油质量的改变求得其它物理量。分别针对进油与出油情况，利用题示公式，计算高密度时间节点上进出油量，从而得出进出燃油的质量。将初始状态下的燃油质量作为初值条件，将微分方程转化为差分方程求解。运用**多重搜索算法**，使稳压过程时间节点上管压与目标管压 100MPa 的最大距离为目标函数，将单向阀开启时间精确到 4 位有效数字，所得结果为 0.2876ms。针对调压的情况，首先基于上一模型确定 150MPa 下稳压过程的单向阀最优开启时间，得出结果为 0.7602ms。以此结果优化调压过程。目标函数考量调压结束后的稳压过程，得到 2s、5s、10s 对应调压过程的单向阀开启时间分别为 0.9568ms、0.7570ms、0.7434ms。求解发现，将压力稳定于 150MPa 对应的单向阀开启时间较稳定在 100MPa 的情况长，调压过程单向阀开启时间随调压时间的增加而减少，与理论相符。

针对问题 2，本文在问题 1 模型的基础上重新构建进出流量随时间的关系。流入方面，首先根据凸轮轮廓曲线确定了柱塞高度随凸轮转角的关系，通过质量守恒确定高压油泵内燃油压力。单向阀开启时，燃油流入量和油泵和油管的压力差有关。流出方面，分两种情况考虑喷油嘴喷油有效面积，确定了流出流量随时间的关系。两种综合考虑，修改问题 1 第 1 小问模型，使用多重搜索求得凸轮最优角速度为 0.0272rad/ms。

针对问题 3，本文考虑两喷油嘴总体喷油量等时间间隔分布，即两喷油嘴喷油间隔为 50ms。因此，在问题 2 的基础上视喷油嘴周期为原先的一半，优化得到凸轮最优角速度为 0.0545rad/ms，恰为问题 2 所得结论的两倍，而时间节点上管压的方差由问题 2 的 1.01MPa²降至 0.99MPa²。针对再增加一个减压阀的情况，考虑减压阀的开启与凸轮转角进行关联，同时进行凸轮角速度的优化，所得最优角速度为 0.0802rad/ms，较没有减压阀时有所提高。

本文针对不同情况得出了合理的解，模型具有较强的通用性，可考虑其它因素而只需对模型进行简单修改。

关键词 高压油管；多重搜索算法；差分方程

一、问题重述

体积已知的高压油管中，燃油自高压油泵进入，从喷油嘴喷出。两者周期性开放，控制高压油管中的压力。

问题 1 喷油器每秒喷出 10 次，每次喷油的速率与时间的关系由分段函数给出。已知供油入口直径，在高压油泵压力恒定的情况下优化单向阀每次开启时长，(1)使管内压力稳定在 100MPa 左右；(2)使管内压力分别在 2s, 5s, 10s 升至 150MPa。

问题 2 高压油泵受凸轮控制，喷油嘴受针阀控制。在问题 1 给出的喷油嘴工作周期、油管尺寸、初始压力的条件下，优化凸轮角速度，使高压油管内压力稳定在 100MPa 左右。

问题 3 (1) 在问题 2 的基础上增加一个规律相同的喷油嘴，调整喷油与供油策略。(2) 再增加一个减压阀，使高压油管内燃油能够回流到低压管路中，给出高压油泵与减压阀的控制方案。

二、问题分析

2.1 问题 1 的分析

首先根据注 1 公式与初值条件得到燃油压力与密度的关系，以便后续使用。

针对第 1 小问，建立油管压力随时间的变化关系模型，以高压油管单向阀开启周期为优化变量，以一段时间内压力的方差作为目标函数进行优化。

2.2 问题 2 的分析

问题 2 需要在问题 1 模型的基础上针对流入流量与流出流量进行修改。流入方面，建立油泵凸轮转角与油泵内压力的关系，当油泵压力大于油管压力时开放单向阀。流出方面，建立针阀高度与流出流量的关系。综合流入流出流量，建立油管压力模型。

2.3 问题 3 的分析

针对第 1 小问，为简化求解过程，两喷油交错喷油，即 1 个喷油周期内先后完成两次喷油，间隔时间相同。以此优化高压油泵角速度。

针对第 2 小问，需要考虑在管压较大时进行泄压。在第 1 小问的基础上确定泄压阀开启时间，重新对凸轮角速度进行优化。

三、模型假设

1. 假设高压油管内压力与密度处处相等，喷油嘴位置不对系统产生影响；^[1]
2. 忽略系统温度变化，视燃油压力仅与其密度有关；
3. 视体系为理想刚体，过程中不产生形变，非活动部件体积恒定；
4. 忽略各管路长度对压强产生的影响。

四、符号说明

表 1 符号说明

符号	符号意义	单位
Q_{in}	流入高压油管的燃油流量	mm^3/ms
Q_{out}	流出高压油管的燃油流量	mm^3/ms
P_1	高压油管内压强	MPa
P_2	高压油泵内压强	MPa
V_0	高压油管体积	mm^3
ρ_1	高压油管内燃油密度	mg/mm^3

五、模型的建立与求解

5.1 问题 1 的模型建立与求解

5.1.1 燃油压强与密度关系的建立

由注 1 可知

$$dP = \frac{E}{\rho} d\rho ,$$

其中 E 为弹性模量，与压力有关。分离变量并积分，积分下限取 100MPa 时的燃

油压力与密度，得关系式

$$\int_{100\text{MPa}}^P \frac{1}{E} dP = \int_{0.850\text{mg/mm}^3}^{\rho} \frac{1}{\rho} d\rho。 \quad (1)$$

不难得出（1）式右侧积分

$$\int_{0.850\text{mg/mm}^3}^{\rho} \frac{1}{\rho} d\rho = \ln \rho - \ln 0.850\text{mg/mm}^3，$$

而（1）式左侧由于缺少 E 与 P 的解析式，且拟合式积分复杂，故采用数值积分。

通过梯形法将左侧积分转化为求和：

$$\int_{100\text{MPa}}^P \frac{1}{E} dP \approx \sum_{k=0}^n \left[\frac{1}{E(P_k)} + \frac{1}{E(P_{k+1})} \right] \frac{h}{2}，$$

其中， h 为每个小梯形的高，取附件 3 压强步长 0.5MPa 。

为得到附件 3 中每一压强对应的密度，需要多次计算（1）式左侧的变上限积分。采用前缀和简化积分过程，即第 k 次积分结果为第 $k-1$ 次积分的结果与第 k 个梯形面积之和。

按上述方法可得燃油压强与密度的离散关系。为得到连续关系便于后续使用，需要进行曲线拟合。类比热力学中理想气体状态方程

$$pV = \nu RT = \frac{M}{\mu} RT^{[1]}，$$

在体积 V 与温度 T 恒定的情况下，考虑压强 P 与密度 ρ 线性相关，因此采用一次多项式进行拟合。

综上可以得到密度与压强的关系 $\rho = \varphi(P)$ 及其反函数 $P = \psi(\rho)$ 。

5.1.2 高压油管压强的确定

高压油管内的压强与燃油密度的关系已经建立，通过密度即可得到其压强。油管容积恒定，为计算燃油密度，需要得到油管中燃油质量随时间的变化关系。

高压油管中燃油质量的变化过程分为流入与流出两个过程，两者通过高压油管中的压强相互关联。

1. 流出

流出流量随时间的关系由题图 2 直接给出，为

$$Q_{\text{out}}(t) = \begin{cases} 100\tau_1, & \tau_1 < 0.2\text{ms}, \\ 20, & 0.2\text{ms} \leq \tau_1 \leq 2.2\text{ms}, \\ -100\tau_1 + 240, & 2.2\text{ms} < \tau_1 < 2.4\text{ms}, \\ 0, & \tau_1 > 2.4\text{ms}. \end{cases}$$

式中的时间 τ_1 为真实时间 t 喷油嘴周期 T_{out} 的余数。

在时间微元 dt 内，流出的燃油质量为

$$dm_{\text{out}}(t) = \rho_1(t)Q_{\text{out}}(t)dt. \quad (2)$$

2. 流入

流入流量和高压油泵与高压油管压力差有关，由注 2 公式可表示为

$$Q_{\text{in}}(t) = \begin{cases} CA\sqrt{\frac{2[P_2(t) - P_1(t)]}{\rho_{160}}}, & \tau_2 \leq T_{\text{in}} - 10\text{ms}, \\ 0, & \tau_2 > T_{\text{in}} - 10\text{ms}. \end{cases}$$

式中的时间 τ_1 为真实时间 t 喷油嘴周期 T_{in} 的余数。

在时间微元 dt 内，流出的燃油质量为

$$dm_{\text{in}}(t) = \rho_{160}Q_{\text{in}}(t)dt. \quad (3)$$

3. 净流量

流入质量与流出质量之差即为高压油管内质量的净变化量

$$dm(t) = dm_{\text{in}}(t) - dm_{\text{out}}(t) = \rho_{160}Q_{\text{in}}(t)dt - \rho_1(t)Q_{\text{out}}(t)dt.$$

高压油管的体积恒为 V_0 ，因此其内燃油密度的变化量

$$d\rho_1(t) = \frac{dm(t)}{V_0}.$$

对方程差分化，则

$$\rho_1(t + \Delta t) - \rho_1(t) = \frac{m(t + \Delta t) - m(t)}{V_0}.$$

已知初始时刻燃油密度 $\rho_1(0) = \varphi(100\text{MPa})$ ，可不断递推任意节点燃油密度。

综上所述，通过求解方程组

$$\begin{cases} P_1(t) = \psi[\rho_1(t)], \\ \rho_1(t + \Delta t) - \rho_1(t) = \frac{m(t + \Delta t) - m(t)}{V_0}, \\ m(t + \Delta t) - m(t) = \rho_{160}Q_{\text{in}}(t)\Delta t - \rho_1(t)Q_{\text{out}}(t)\Delta t, \end{cases}$$

即可得出任意节点油管压强。

5.1.3 目标函数的确定

由于已经微分方程差分化，得到的管压为离散值。构造统计量

$$Z = \max |P_1(t) - 100\text{MPa}|$$

表示管压与 100MPa 在各时间节点上的最大偏移量。视 Z 为目标函数，此问题目标为

$$\min Z(T_{\text{in}}),$$

优化所得 T_{in} 减去关闭时间 10ms 即为单向阀开启时间。

5.1.4 稳压过程模型的求解

1. 压强与密度的关系

联立（1）式数值积分，得到压强与密度的离散关系，表 2 给出了其中部分数据，详细关系参见附录 2。

表 2 部分压强与密度的关系

压强(MPa)	密度(mg/mm ³)	压强(MPa)	密度(mg/mm ³)
98.0	0.849216	100.5	0.850195
98.5	0.849412	101.0	0.850390
99.0	0.849609	101.5	0.850585
99.5	0.849804	150.0	0.867893
100.0	0.850	160.0	0.871078

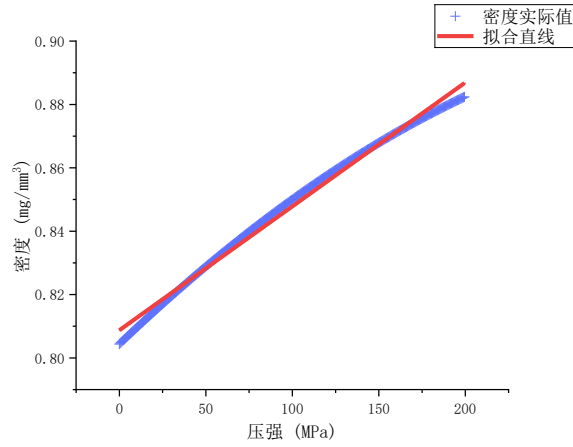


图 1 燃油压强与密度的关系

采用一次多项式拟合，所得直线为

$$\rho = \varphi(P) = 3.910 \times 10^{-4} P + 0.8087 \text{ mg/mm}^3,$$

此时的拟合优度 $R^2 = 0.9925$ 。

$\varphi(P)$ 的反函数亦可得出，为

$$P = \psi(\rho) = \frac{\rho - 0.8087}{3.910 \times 10^{-4}}。$$

2. 优化模型的求解

考虑到优化变量只有一维，目标函数简单，采用多重搜索算法进行求解。设置第一次搜索范围为 $T_{in} \in [10\text{ms}, 5000\text{ms}]$ ，搜索步长为 0.01ms 。针对每次求解过程，设置差分步长 $dt = 0.001\text{ms}$ 。考察 $30\,000\text{ms}$ 内管内压强。

每次求解过程涉及燃油流入、流出的时序问题，具体流程如所示。

第一次搜索过程中截取一段满足 $Z < 40$ 的区间，如图 4 所示。在此基础上进行第二次搜索。观察图 4，设置搜索范围为 $T_{in} \in [10.2\text{ms}, 10.4\text{ms}]$ ，步长为 0.0001ms 。差分步长不变。

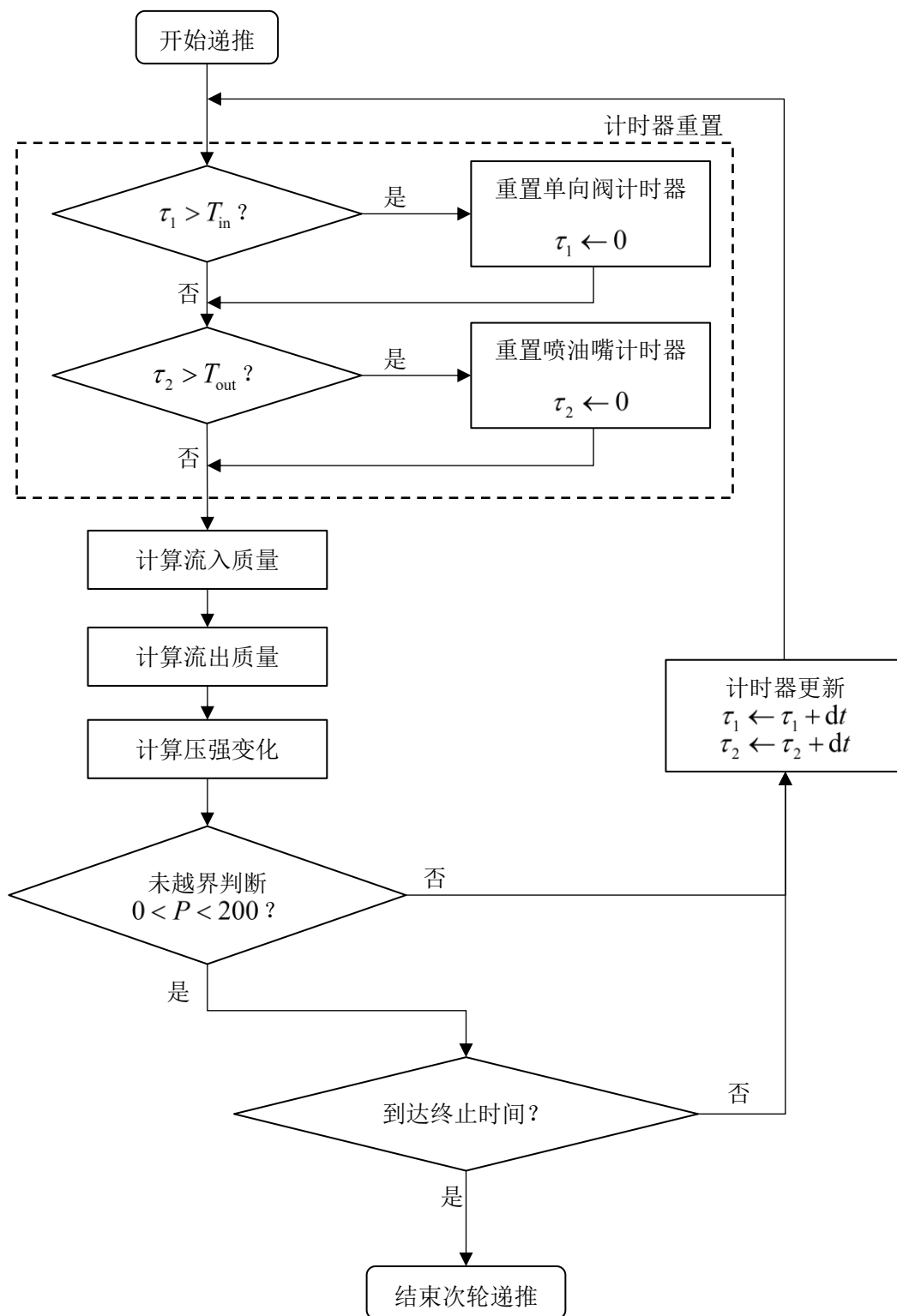


图 2 问题 1 单轮递推流程图

解得 Z 取最小值时, $T_{in} = 10.2876\text{ms}$, 即单向阀开启时间为 0.2876ms 。此时, $Z = 1.60305\text{MPa}$ 。该过程管压随时间变化曲线如图 5 所示。

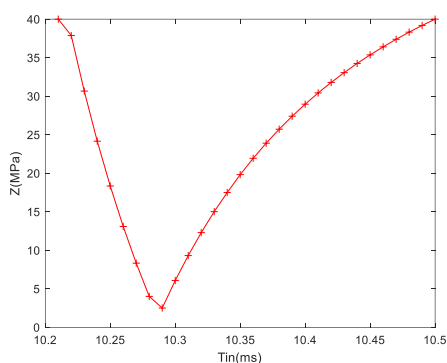


图 4 第一次搜索过程 T_{in} 与 Z 的关系图

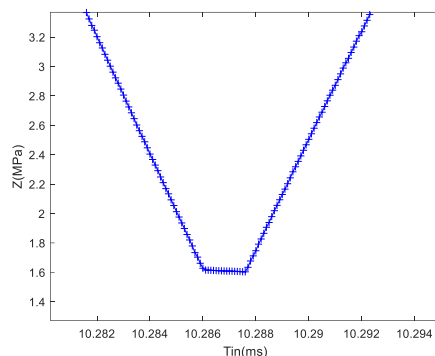


图 3 第二次搜索过程 T_{in} 与 Z 的关系图

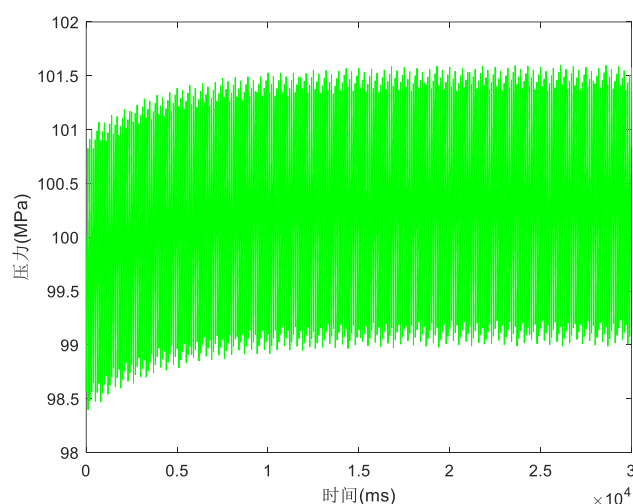


图 5 问题 1 稳压过程管压随时间变化曲线

5.1.5 调压过程模型的建立

与稳压过程类似,但单向阀的控制分两个阶段进行。一是管压未达到 150MPa 时的调压过程,二是管压达到 150MPa 后的稳压过程。两个阶段中单向阀的开启时间不同,但每个阶段中的开启时间恒定。

设调压过程的单向阀开启周期为 T_{in1} , 稳压过程为 T_{in2} 。目标函数调整为稳压过程管压与 150MPa 之差的方差。

5.1.6 调压过程模型的求解

1. 模型的简化与求解

为简化求解过程,首先按照 5.1.5 方法求解稳压过程单向阀周期 T_{in2} , 并以此

为基础进行 T_{in1} 的优化。考虑到压力稳定在 150MPa 时的单向阀周期应比稳定在 100MPa 时的周期大，因此搜索范围修改为 $T_{in2} \in [10.3\text{ms}, 5000\text{ms}]$ 。

两次搜索后得到的 $T_{in2} = 10.7602\text{ms}$ ，即稳压过程中单向阀的开启时间为 0.7602ms。

针对 2s、5s、10s 分别搜索 T_{in1} ，减去关闭时间 10ms，得单向阀开启时间分别为 0.9568ms、0.7570ms、0.7434ms。此时压力曲线如图 6 所示。

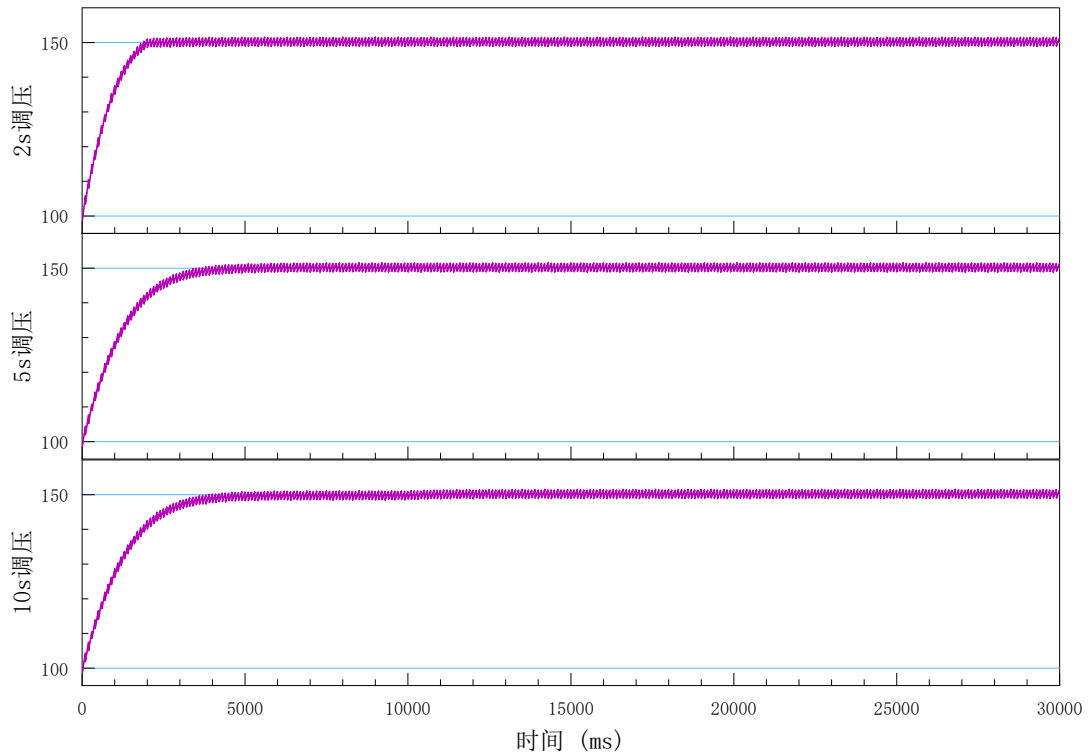


图 6 2s、5s、10s 调压过程压力曲线

2. 调压过程模型所得结论

将不同调压时间与单向阀开启时间建立关系，如图 7 所示。

由图可见，随调整时间的增加，管压改变速度应当减小，因此单向阀开启时间减少。

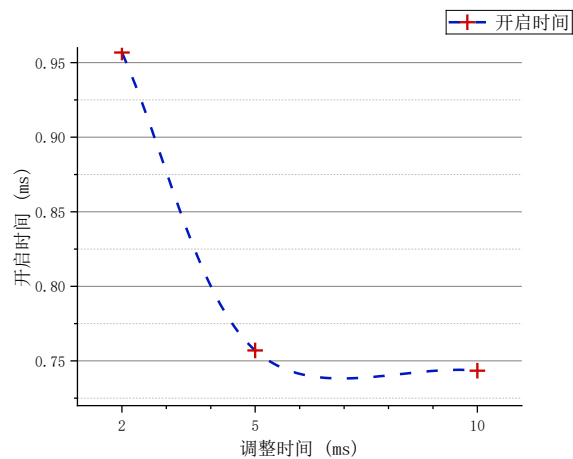


图 7 单向阀最优开启时间与调压时间的关系

5.2 问题 2 的模型建立与求解

5.2.1 流入流量的修改

1. 凸轮边缘曲线拟合

为解得任意时刻柱塞位置，需要凸轮边缘曲线的解析表达式。对附件 1 进行极坐标拟合，得到凸轮曲线 $r(\theta) = a_0 + a_1 \cos \theta + b_1 \sin \theta$ ，其中， $\theta = \pi$ 对应极径最小处。

2. 柱塞高度的确定

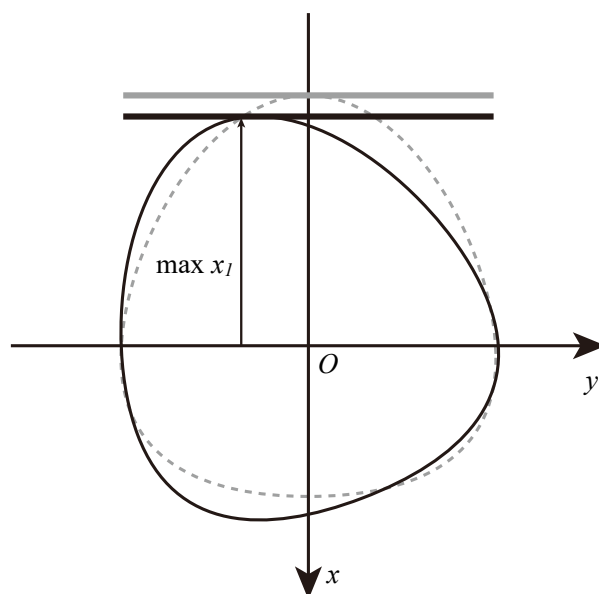


图 8 凸轮旋转与柱塞上升的过程示意图

设初始时刻柱塞位于最低点，记此刻柱塞高度为 $h(0)=0$ ，凸轮转角 $\gamma=0$ 。

经过时间 t 后，柱塞高度为 $h=h(t)$ ，凸轮转角 $\gamma=\gamma(t)$ 。

设凸轮旋转角速度为 ω ，则凸轮转角随时间变化为 $\gamma(t)=\omega t \bmod 2\pi$ 。

初始时刻的凸轮曲线转化为平面直角坐标系下的参数方程：

$$\begin{cases} x(\theta) = r \cos \theta = [a_0 + a_1 \cos \theta + b_1 \sin \theta] \cos \theta, \\ y(\theta) = r \sin \theta = [a_0 + a_1 \cos \theta + b_1 \sin \theta] \sin \theta. \end{cases} \quad (4)$$

t 时刻，曲线逆时针旋转 γ ，形成的曲线参数方程为

$$\begin{pmatrix} x_1(\theta) \\ y_1(\theta) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma \\ \sin \gamma & \cos \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x(\theta) \\ y(\theta) \end{pmatrix}. \quad (5)$$

比起 $y_1(t)$ 的值，我们更关注 $x_1(t)$ 的值，因为这才是引起柱塞高度改变的原因。 t 时刻，柱塞的高度为

$$h(t) = \max[-x_1(\theta)] - r(\pi). \quad (6)$$

3. 压力 P_2 与泵入质量的计算

初始时刻柱塞位于最低点，油泵充满压力为 0.5MPa 的低压燃油，记此时的燃油密度为 $\rho(0)$ 。记柱塞腔残余容积为 $V_1 = 20\text{mm}^3$ ，由柱塞下落而产生的容积为 $V_2(t) = [h_{\max} - h(t)]S$ ，其中 S 为柱塞腔底面积。

每次充满低压燃油时，腔内燃油质量均为

$$m_0 = (V_1 + V_2(0))\rho(0) = (V_1 + h_{\max}S)\rho(0)。$$

柱塞上升过程，燃油密度因 V_2 的压缩而改变为

$$\rho_2(t) = \frac{m_0}{V_1 + V_2(t)}。$$

通过压强与燃油密度的关系式可得压强值为

$$P_2(t) = \psi[(\rho_2)]。$$

当 P_2 大于 P_1 时，单向阀打开，燃油流量为

$$Q_{\text{in}}(t) = CA \sqrt{\frac{2[P_2(t) - P_1(t)]}{\rho(P_2)}}。 \quad (7)$$

考虑 Δt 时间的燃油流入。燃油流入高压油管的质量为

$$\Delta m_{\text{in}}(t) = \varphi(P_2)Q_{\text{in}}(t)\Delta t ,$$

同时，这也正是柱塞流出的燃油质量。

若 t 时刻柱塞燃油质量为 $m(t)$ ，则有

$$m(t + \Delta t) - m(t) = \varphi(P_2)Q_{\text{in}}(t)\Delta t ,$$

此时 $\rho_2(t)$ 有关系

$$\rho_2(t + \Delta t) = \frac{m(t + \Delta t)}{V_1 + V_2(t)}。$$

如此往复直至 P_2 不再大于 P_1 。

5.2.2 流出流量的修改

1. 针阀升程与开口面积的关系

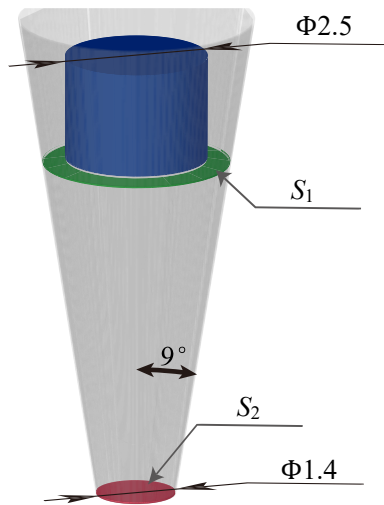


图 9 喷油嘴的结构

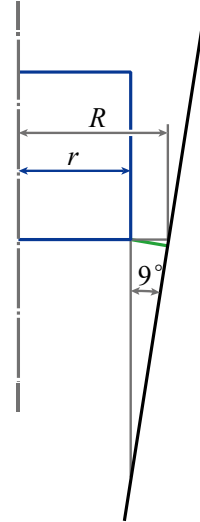


图 10 S_1 的计算示意图

注 2 公式中所用小孔面积值应为燃油流动过程中的最小面积值。如图 9 所示，在针阀上升过程中，这一面积应为

$$A = \min\{S_1, S_2\} ,$$

即燃油流经喷油嘴的有效面积。

S_1 是上下底面半径分别为 R 与 r 的圆台的侧面积，如图 10 所示。该面积向

下投影形成的圆环面积为

$$S = \pi(R^2 - r^2),$$

还原此投影，得

$$S_1 = \frac{S}{\cos 9^\circ} = \frac{\pi(R^2 - r^2)}{\cos 9^\circ}。$$

式中两半径由几何关系不难求出，分别为

$$R = \frac{2.5}{2} + h \sin 9^\circ \cos 9^\circ \text{ mm},$$

$$r = \frac{2.5}{2} \text{ mm}.$$

其中， h 为针阀升程。

S_2 可由圆面积公式直接得出。

综上所述，开口面积与针阀升程可建立联系：

$$A(t) = \min \left\{ \frac{\pi \left[(1.25 + h(t) \sin 9^\circ \cos 9^\circ)^2 - 1.25^2 \right]}{\cos 9^\circ}, 0.7^2 \pi \right\}。 \quad (8)$$

2. 流出流量的计算

将（8）式代入注 2 公式，得流出流量为

$$Q_{\text{out}}(t) = CA \sqrt{\frac{2[P_1(t) - P_o]}{\phi[P_1(t)]}}, \quad (9)$$

式中 P_o 为喷油嘴外的气压，求解过程中视为大气压强 0.1MPa。

5. 2. 3 管压随时间变化的模型建立

综上所述，将（7）式与（9）式组合形成高压油管内燃油质量随时间变化的关系，为

$$dm(t) = dm_{\text{in}}(t) - dm_{\text{out}}(t) = \phi[P_2(t)]Q_{\text{in}}(t)dt - \phi[P_1(t)]Q_{\text{out}}(t)dt。 \quad (10)$$

初始状态下燃油质量已知，可求出节点时刻燃油质量。对应时刻的燃油密度为

$$\rho_1 = m(t_i) / V_0，$$

管内压强为

$$P_1(t) = \varphi[\rho_1(t)]。$$

5.2.4 模型求解

1. 凸轮边缘曲线拟合

通过最小二乘法拟合得到凸轮曲线各参数，如表 3 所示。该参数下的拟合优度为 0.9999999997。

表 3 凸轮曲线拟合参数

符号	参数值
a_0	4.826
a_1	2.413
b_1	-2.676×10^{-6}

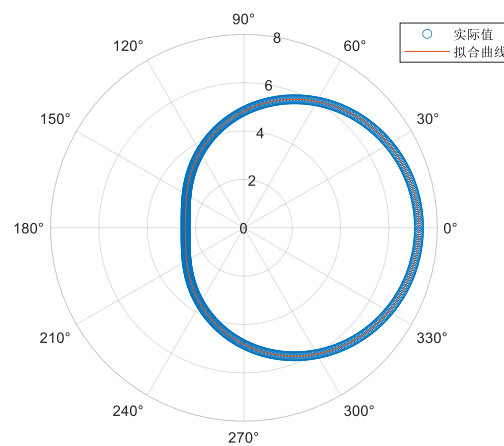


图 11 凸轮曲线拟合效果

2. 柱塞高度的求解

将 (4) 式代入 (5) 式，得

$$\begin{aligned} x_1(\theta) &= x(\theta) \cos \gamma - y(\theta) \sin \gamma \\ &= [a_0 + a_1 \cos \theta + b_1 \sin \theta] \cos \theta \cos \gamma - [a_0 + a_1 \cos \theta + b_1 \sin \theta] \sin \theta \sin \gamma \end{aligned}$$

由于上式驻点求解困难，故考虑对上式进行离散化求解。 γ 自 0 至 2π 线性

遍历，步长取 0.01，寻找 x_l 在不同 γ 下最小值的绝对值。寻找过程依然采取离散化遍历的方式， θ 自 0 至 2π 线性遍历，步长取 0.01。

求得不同 γ 值最小 x_l 的绝对值，记为向量 \mathbf{x} 。最低点处应为 $h=0$ 处，因此不同 γ 值对应的 h 由关系

$$h = x - \min x$$

进行规范化。

3. 问题 2 的结果

使用二重搜索算法。在区间 $(0, 0.05\text{rad/ms}]$ 进行步长为 0.001 的线性搜索。将搜索范围缩小至区间 $[0.025\text{rad/ms}, 0.030\text{rad/ms}]$ 内，进行步长的 0.0001 的线性搜索。

求解得到最优角速度为 0.0272rad/ms 。此时管压随时间变化曲线如图 12 所示。

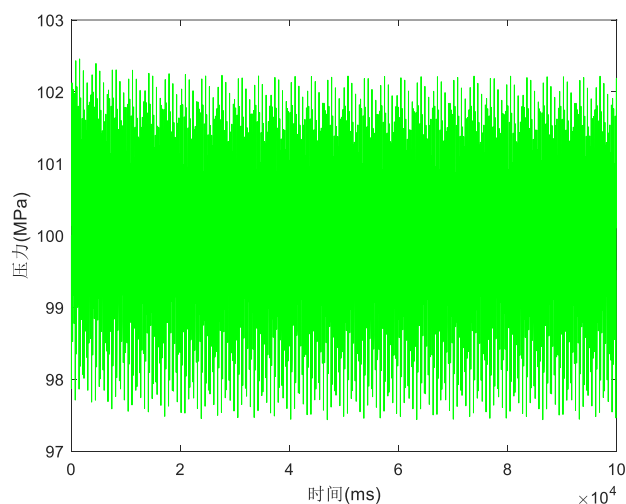


图 12 问题 2 稳压过程管压随时间变化曲线

5.3 问题 3 模型的建立与求解

5.3.1 增加一个喷油嘴的情况

1. 喷油嘴喷油策略的调整

为平衡全过程的喷油量，在两喷油嘴喷油规律相同的情况下，错开量喷油嘴的喷油时间较为合适。考虑到罐体整体压强还由油泵的供油决定，两喷油嘴相隔时间不同带来的差异可以通过调整油泵凸轮角速度进行补偿。因此，取两喷油嘴喷油间隔时间相等，如图 13 所示。

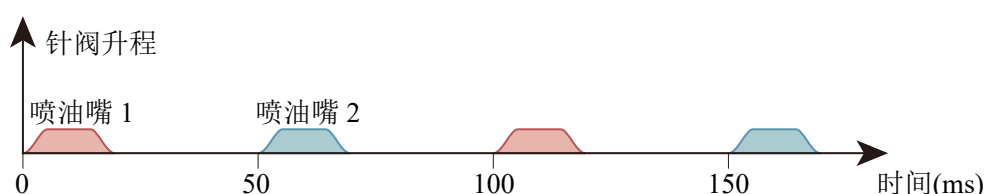


图 13 喷油嘴的喷油策略

2. 高压油泵泵油策略的优化

与问题 2 类似，假设管内压强处处相等，喷油嘴 2 的加入可视为喷油嘴的喷油周期变为原先的一半，即 50ms。

继续采用多重搜索算法，优化高压油泵凸轮角速度。由于喷油嘴等效喷油周期的缩短，油泵角速度值应较问题 2 而言有所提高，因此第一轮搜索范围设定为 $[0.02\text{rad/ms}, 0.10\text{rad/ms}]$ 。根据优化结果进行第二轮优化以提升精度至小数点后 4 位。得到的高压油泵凸轮角速度为 0.0545rad/ms 。

3. 结论

与问题 2 对比，增加一个喷油嘴后时间节点上的管压方差由问题 2 的 1.01047MPa^2 降至 0.99490MPa^2 ，从图 14 也不难看出，曲线较先前而言更为稳定。

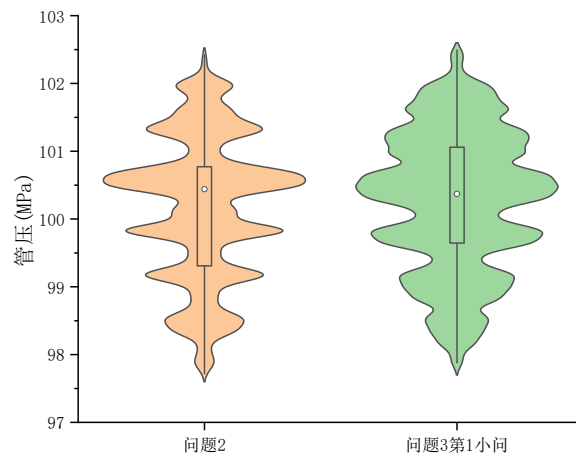


图 14 问题 2 与问题 3 管压小提琴图

5.3.2 再增加减压阀的情况

1. 减压阀开启时间的确定

考虑在问题 3 第 1 小问优化所得凸轮角速度的基础上进行减压阀的优化。

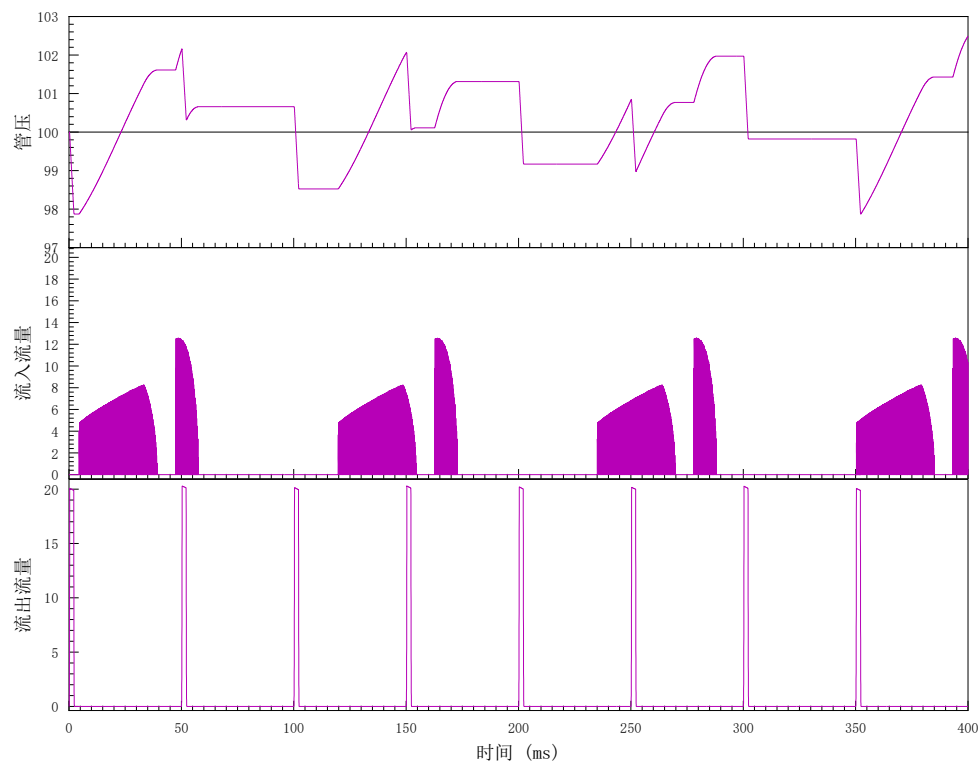


图 15 问题 3 第 1 小问最优过程下管压、输入输出流量曲线图

图 15 展示了在问题 3 第 1 小问所得油泵凸轮角速度下，管压、输入输出流

量随时间的部分曲线图。由图可见，管压的上升是燃油流入所致的，且管压最大值出现周期与凸轮旋转周期大体一致。

减压阀的具体开启时刻与油泵柱塞处于形态上特殊位置的时刻并不相同，存在一定时间差。凸轮旋转使油泵加压的过程中，存在一段时间使得油管压力大于油泵压力，在此段时间开启减压阀以降低管压最大值。

2. 减压阀燃油流出量的确定

减压阀内直径已知，使用注 2 公式计算得到减压阀开启时燃油流量为

$$Q_{\text{out}2}(t) = CA_2 \sqrt{\frac{2[P_1(t) - P_{\text{low}}]}{\rho[P_1(t)]}},$$

式中 A_2 为减压阀直径， P_{low} 为低压油路的压力，由问题 2 知此值为 0.5MPa。

在 Δt 时间段内，自减压阀流出的燃油质量为

$$\Delta m_{\text{out}2}(t) = \rho[P_1(t)]Q_{\text{out}2}(t)\Delta t。$$

3. 总模型

综上所述，修改（10）式，将减压阀流出燃油的质量考虑在内，得

$$dm(t) = \rho[P_2(t)]Q_{\text{in}}(t)dt - \rho[P_1(t)]Q_{\text{out}}(t)dt - \rho[P_1(t)]Q_{\text{out}2}(t)dt。$$

4. 模型求解

减压阀的存在必然使得管压曲线上方最大偏移量减少，对而下方偏离量的影响较小。为使曲线上移，需要在问题 3 第 1 小问的基础上增加凸轮角速度。因此，在 $[0.05\text{rad/ms}, 0.11\text{rad/ms}]$ 范围内进行两重搜索，得到的最佳角速度为 0.0802rad/ms 。此时的管压随时间变化曲线如图 16 所示。

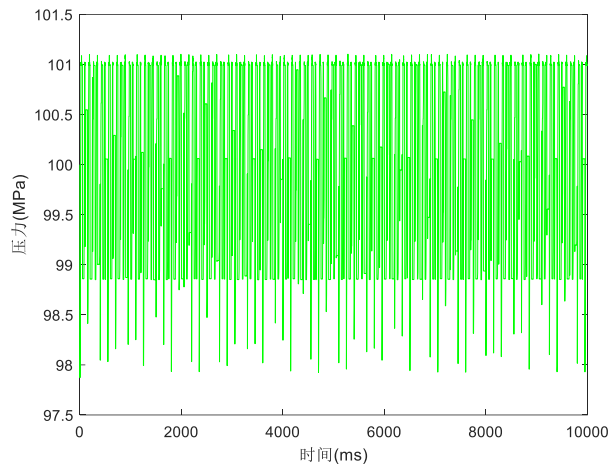


图 16 问题 3 第 2 小问管压曲线

六、模型的评价及优化

6.1 灵敏性分析

考虑在问题 3 第 2 小问的模型中对高压油管体积施加 1% 内的扰动，探究模型在体积变化过程中的稳定性。

灵敏性分析结果如图 17 所示。由图可见，统计量 Z 与容器体积呈线性相关趋势，容积的增加能够提高模型稳定性。

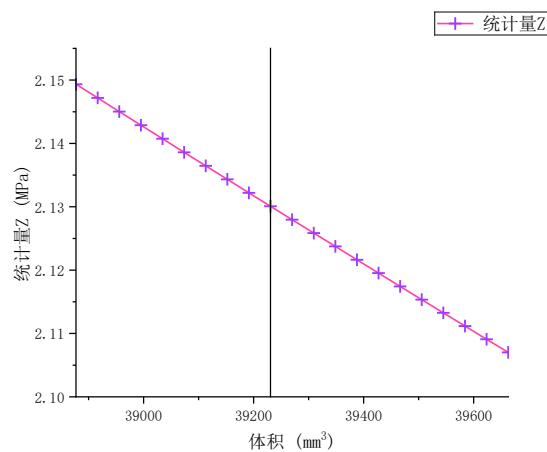


图 17 灵敏性分析结果图

6.2 模型的优点

1. 采用差分方程代替微分方程求解，模拟了油管压强的变化过程，减少了程序运行时间；

2. 合理地设置了减压阀的开启时间，使管压的最大值下降，减少管压过高的风险；
3. 采用多重搜索方法，不存在智能优化算法的随机性，所得结果较为准确。

6.3 模型的不足

1. 使用线性函数拟合燃油密度与压强的关系，导致问题 2 柱塞下降过程中因燃油密度较低而得出压强为负的结果，尽管这不会影响问题 2 的求解；
2. 忽略了温度等环境对体系的影响，也忽略了细小管道的体积；

6.4 模型的推广

高压油管是柴油发电机的重要部件，此模型可作为柴油发电机的管压模拟，亦可考虑其它因素而只需对模型进行简单修改。

参考文献

- [1] 任明星,李邦盛,杨闯,等.微尺度型腔内液态金属流动规律模拟研究[J].物理学报,2008,(08):5063-5071.
- [2] 张玉民. 热学: 第 2 版[M] .北京: 科学出版社, 2007: 27.

附录说明	
附录 1	支撑材料清单
附录 2	燃油压强与密度的关系表
附录 3	源程序代码

附录 1 支撑材料清单

支撑材料清单		
问题 1	Q1_get_Prou.m	计算燃油压强与密度的关系
	Q1.m	主程序
问题 2	Q2_pre.m	凸轮曲线拟合
	Q2.m	主程序
问题 3	Q3_1.m	第 1 小问主程序
	Q3_2.m	第 2 小问主程序

注. 拓展名为.m 的文件为 MATLAB 程序文件，本文的运行环境是 MATLAB R2022b。

附录 2 燃油压强与密度的关系表

附表 1 燃油压强与密度的关系		压强	密度	压强	密度
压强 (MPa)	密度 (mg/mm ³)	(MPa)	(mg/mm ³)	(MPa)	(mg/mm ³)
0.0	0.804364	6.5	0.807729	13.5	0.811291
0.5	0.804624	7.0	0.807986	14.0	0.811543
1.0	0.804885	7.5	0.808242	14.5	0.811795
1.5	0.805145	8.0	0.808498	15.0	0.812046
2.0	0.805405	8.5	0.808753	15.5	0.812297
2.5	0.805665	9.0	0.809009	16.0	0.812548
3.0	0.805924	9.5	0.809264	16.5	0.812798
3.5	0.806183	10.0	0.809518	17.0	0.813048
4.0	0.806441	10.5	0.809773	17.5	0.813298
4.5	0.806699	11.0	0.810026	18.0	0.813547
5.0	0.806957	11.5	0.81028	18.5	0.813796
5.5	0.807215	12.0	0.810533	19.0	0.814045
6.0	0.807472	12.5	0.810786	19.5	0.814293
		13.0	0.811039	20.0	0.814542

压强 (MPa)	密度 (mg/mm ³)	压强 (MPa)	密度 (mg/mm ³)	压强 (MPa)	密度 (mg/mm ³)
20.5	0.814789	41.5	0.824897	62.5	0.834425
21.0	0.815037	42.0	0.82513	63.0	0.834645
21.5	0.815284	42.5	0.825364	63.5	0.834865
22.0	0.81553	43.0	0.825597	64.0	0.835084
22.5	0.815777	43.5	0.825829	64.5	0.835303
23.0	0.816023	44.0	0.826062	65.0	0.835521
23.5	0.816269	44.5	0.826294	65.5	0.835739
24.0	0.816514	45.0	0.826525	66.0	0.835957
24.5	0.816759	45.5	0.826756	66.5	0.836175
25.0	0.817004	46.0	0.826987	67.0	0.836392
25.5	0.817248	46.5	0.827218	67.5	0.836609
26.0	0.817492	47.0	0.827448	68.0	0.836825
26.5	0.817736	47.5	0.827678	68.5	0.837041
27.0	0.81798	48.0	0.827908	69.0	0.837257
27.5	0.818223	48.5	0.828137	69.5	0.837473
28.0	0.818466	49.0	0.828366	70.0	0.837688
28.5	0.818708	49.5	0.828595	70.5	0.837903
29.0	0.81895	50.0	0.828823	71.0	0.838117
29.5	0.819192	50.5	0.829051	71.5	0.838332
30.0	0.819433	51.0	0.829279	72.0	0.838546
30.5	0.819675	51.5	0.829506	72.5	0.838759
31.0	0.819915	52.0	0.829733	73.0	0.838972
31.5	0.820156	52.5	0.82996	73.5	0.839185
32.0	0.820396	53.0	0.830187	74.0	0.839398
32.5	0.820636	53.5	0.830413	74.5	0.83961
33.0	0.820875	54.0	0.830638	75.0	0.839822
33.5	0.821115	54.5	0.830864	75.5	0.840034
34.0	0.821353	55.0	0.831089	76.0	0.840245
34.5	0.821592	55.5	0.831314	76.5	0.840456
35.0	0.82183	56.0	0.831538	77.0	0.840667
35.5	0.822068	56.5	0.831762	77.5	0.840877
36.0	0.822306	57.0	0.831986	78.0	0.841087
36.5	0.822543	57.5	0.832209	78.5	0.841296
37.0	0.82278	58.0	0.832432	79.0	0.841506
37.5	0.823016	58.5	0.832655	79.5	0.841715
38.0	0.823252	59.0	0.832877	80.0	0.841923
38.5	0.823488	59.5	0.8331	80.5	0.842132
39.0	0.823724	60.0	0.833321	81.0	0.84234
39.5	0.823959	60.5	0.833543	81.5	0.842547
40.0	0.824194	61.0	0.833764	82.0	0.842755
40.5	0.824429	61.5	0.833985	82.5	0.842962
41.0	0.824663	62.0	0.834205	83.0	0.843168

压强 (MPa)	密度 (mg/mm ³)	压强 (MPa)	密度 (mg/mm ³)	压强 (MPa)	密度 (mg/mm ³)
83.5	0.843375	104.5	0.851745	125.5	0.859536
84.0	0.843581	105.0	0.851937	126.0	0.859714
84.5	0.843786	105.5	0.852129	126.5	0.859892
85.0	0.843992	106.0	0.852321	127.0	0.86007
85.5	0.844197	106.5	0.852512	127.5	0.860248
86.0	0.844401	107.0	0.852703	128.0	0.860425
86.5	0.844606	107.5	0.852893	128.5	0.860602
87.0	0.84481	108.0	0.853084	129.0	0.860778
87.5	0.845014	108.5	0.853274	129.5	0.860954
88.0	0.845217	109.0	0.853463	130.0	0.86113
88.5	0.84542	109.5	0.853652	130.5	0.861306
89.0	0.845623	110.0	0.853841	131.0	0.861481
89.5	0.845825	110.5	0.85403	131.5	0.861656
90.0	0.846027	111.0	0.854218	132.0	0.86183
90.5	0.846229	111.5	0.854406	132.5	0.862004
91.0	0.846431	112.0	0.854594	133.0	0.862178
91.5	0.846632	112.5	0.854781	133.5	0.862352
92.0	0.846832	113.0	0.854968	134.0	0.862525
92.5	0.847033	113.5	0.855155	134.5	0.862698
93.0	0.847233	114.0	0.855341	135.0	0.86287
93.5	0.847433	114.5	0.855527	135.5	0.863042
94.0	0.847632	115.0	0.855713	136.0	0.863214
94.5	0.847831	115.5	0.855898	136.5	0.863386
95.0	0.84803	116.0	0.856083	137.0	0.863557
95.5	0.848229	116.5	0.856268	137.5	0.863728
96.0	0.848427	117.0	0.856452	138.0	0.863898
96.5	0.848625	117.5	0.856636	138.5	0.864069
97.0	0.848822	118.0	0.85682	139.0	0.864239
97.5	0.849019	118.5	0.857003	139.5	0.864408
98.0	0.849216	119.0	0.857186	140.0	0.864577
98.5	0.849412	119.5	0.857369	140.5	0.864746
99.0	0.849609	120.0	0.857551	141.0	0.864915
99.5	0.849804	120.5	0.857733	141.5	0.865083
100.0	0.85	121.0	0.857915	142.0	0.865251
100.5	0.850195	121.5	0.858097	142.5	0.865419
101.0	0.85039	122.0	0.858278	143.0	0.865586
101.5	0.850585	122.5	0.858458	143.5	0.865753
102.0	0.850779	123.0	0.858639	144.0	0.86592
102.5	0.850973	123.5	0.858819	144.5	0.866086
103.0	0.851166	124.0	0.858999	145.0	0.866252
103.5	0.851359	124.5	0.859178	145.5	0.866417
104.0	0.851552	125.0	0.859357	146.0	0.866583

压强 (MPa)	密度 (mg/mm ³)	压强 (MPa)	密度 (mg/mm ³)	压强 (MPa)	密度 (mg/mm ³)
146.5	0.866748	164.5	0.872468	182.5	0.877764
147.0	0.866912	165.0	0.872621	183.0	0.877905
147.5	0.867077	165.5	0.872774	183.5	0.878045
148.0	0.867241	166.0	0.872926	184.0	0.878186
148.5	0.867404	166.5	0.873078	184.5	0.878326
149.0	0.867568	167.0	0.873229	185.0	0.878465
149.5	0.867731	167.5	0.87338	185.5	0.878605
150.0	0.867893	168.0	0.873531	186.0	0.878744
150.5	0.868056	168.5	0.873682	186.5	0.878882
151.0	0.868218	169.0	0.873832	187.0	0.879021
151.5	0.868379	169.5	0.873982	187.5	0.879159
152.0	0.868541	170.0	0.874131	188.0	0.879297
152.5	0.868702	170.5	0.874281	188.5	0.879434
153.0	0.868863	171.0	0.87443	189.0	0.879571
153.5	0.869023	171.5	0.874578	189.5	0.879708
154.0	0.869183	172.0	0.874726	190.0	0.879844
154.5	0.869343	172.5	0.874874	190.5	0.87998
155.0	0.869502	173.0	0.875022	191.0	0.880116
155.5	0.869661	173.5	0.875169	191.5	0.880252
156.0	0.86982	174.0	0.875316	192.0	0.880387
156.5	0.869978	174.5	0.875463	192.5	0.880521
157.0	0.870137	175.0	0.875609	193.0	0.880656
157.5	0.870294	175.5	0.875755	193.5	0.88079
158.0	0.870452	176.0	0.8759	194.0	0.880924
158.5	0.870609	176.5	0.876046	194.5	0.881057
159.0	0.870766	177.0	0.876191	195.0	0.88119
159.5	0.870922	177.5	0.876335	195.5	0.881323
160.0	0.871078	178.0	0.87648	196.0	0.881456
160.5	0.871234	178.5	0.876624	196.5	0.881588
161.0	0.871389	179.0	0.876767	197.0	0.88172
161.5	0.871544	179.5	0.876911	197.5	0.881851
162.0	0.871699	180.0	0.877054	198.0	0.881982
162.5	0.871854	180.5	0.877196	198.5	0.882113
163.0	0.872008	181.0	0.877338	199.0	0.882244
163.5	0.872162	181.5	0.87748	199.5	0.882374
164.0	0.872315	182.0	0.877622		

附录 3 源程序代码

Q1 get Prou.m
% 获得 P 与 rou 的离散关系

```

%% 初始化
clear
clc
close all

%% 读附件 3
data3=xlsread("附件 3-弹性模量与压力.xlsx");
x=data3(:,1);
y=data3(:,2);

%% 左侧循环积分（前缀和）
h=0.5; % 步长
down = 100;
c=0;
result = [];
for i=1:length(y)-1
    c=(1/y(i)+1/y(i+1))/2*(x(2)-x(1))+c ;
    result(end+1) = c;
end
%常数追加
det=result(find(x==down));
result=result-det;

%% 与右侧积分相等，反解 rou
rou=exp(result+log(0.85));

%% 绘图
plot(x(1:end-1),rou,"o-")
xlabel("压强 P")
ylabel("密度 ρ")
title("密度与压强的关系图")

%% 导出离散数据
dataout={"压强(MPa)","密度(mg/mm^3)"};
for ind=1:length(result)
    dataout{ind+1,1}=x(ind);
    dataout{ind+1,2}=rou(ind);
end
xlswrite("压强与密度的关系.xlsx",dataout,1);

%% 拟合
p=polyfit(x(1:end-1),rou,1);
func=@(x)p(1).*x+p(2);

```

```

%% 检验
TSS=sum((rou-mean(rou)).^2);
RSS=sum((func(x(1:end-1))-rou).^2);
R2=1-RSS/TSS

```

Q1.m

```

%% 初始化
clear
clc
close all

%% 常量定义
global C A V0 get_rou get_P Qout Qin dt tend
C=0.85;
A=pi*(1.4/2)^2;
V0=pi*500*(10/2)^2;

%% rou 与 P 的关系
get_rou=@(p)3.910284764226142e-04.*p+0.808708414066112;
get_P=@(rou)(rou-0.808708414066112)/3.910284764226142e-04;

%% 流出流量函数
Qout=@(t)(100*t).*(t<=0.2)+(20).*(t>0.2 && t<2.2)+(-100*t+240).*(t>=2.2
&& t<=2.4)+0.*(t>2.4);

%% 流入流量函数
Qin=@(P2,P1)(C*A*(2*(P2-P1)/get_rou(160))^(0.5));

%% 循环优化 Tin
dt=0.001; % 差分步长, 单位 ms
tend=30000; % 终止时间, 单位 ms
t1=0.01; % 大步长
t2=0.0001; % 小步长
%% 大步长搜索
% p=[];
% for Tin=10:t1:5000
%     p(end+1)=get_dPmax(Tin);
% end
% plot(10:t1:5000,p)

%% 小步长搜索
% p=[];
% for Tin=10.2:t2:10.4
%     p(end+1)=get_dPmax(Tin);
% end

```

```

% x=10.2:t2:10.4;
% plot(x,p,"b+-")
% xlabel("Tin(ms)")
% ylabel("Z(MPa)")
% [~,min_ind]=min(p);

% fprintf("最优周期:%f\n",x(min_ind))
dPmax=get_dPmax(10.2876);
%% 函数计算压强变化峰值
function dPmax = get_dPmax(Tin)
    global C A V0 get_rou get_P Qout Qin dt tend
    %Tin-流入周期
    Tout=100;
    P0=100; % 初始压强
    P2=160; % 进入压强
    m=get_rou(P0)*V0; % 实时质量，赋初值为初始质量
    tin=1; % 流入计时器
    tout=1; % 流出计时器
    ind=1;
    P=P0; % 实时压强存储
    p_ls=P;
    dPmax=0; % 压强差最大值
    for t=1:dt:tend
        tic
        %% 计时器重置
        if tin>Tin
            tin=tin-Tin;
        end
        if tout>Tout
            tout=tout-Tout;
        end
        %% 流入
        if tin<Tin-10
            vin=Qin(P2,P);
        else
            vin=0;
        end
        %% 流出
        vout=Qout(tout);
        %% 质量更新
        m=m+get_rou(160)*vin*dt-get_rou(P)*vout*dt;
        %% 压强变化计算
        rou_now=m/V0;
        P=get_P(rou_now);
    end
end

```

```

        p_ls(end+1)=P;
        %% 计时器更新
        tin=tin+dt;
        tout=tout+dt;
        %% 越界判断
        if P<=0 || P>=200
            dPmax=inf;
            return
        end
        if dPmax<abs(P-P0)
            dPmax=abs(P-P0);
        end
        if dPmax>40
            dPmax=40;
            fprintf("====跳出本轮====\n")
            return
        end
        if mod(ind,100000)==0
            usetime=toc;
            fprintf("正在计算 Tin=%fms, t=%.4fms, 当前压强%.4f, 当前最大差
为%.5f, 用时%f...\n",Tin,t,P,dPmax,usetime);
        end
        ind=ind+1;
    end
    fprintf("====结束本轮====\nTin=%fms,最大差=%.5f",Tin,dPmax)
    x=0:dt:tend;
    plot(x(1:length(p_ls)),p_ls,"g-",LineWidth=0.1)
    xlabel("时间(ms)")
    ylabel("压力(MPa)")
end

```

Q2_pre.m

```

%% 初始化
clear
clc
close all

%% 读文件
data=xlsread("附件 1-凸轮边缘曲线.xlsx");

%% 拟合
f=fit(data(:,1),data(:,2),"fourier1");

%% 绘图

```

```
polarplot(data(:,1),data(:,2),"o",data(:,1),f(data(:,1)),"-")
legend("实际值","拟合曲线")
```

```
%% 检验
rou=data(:,2);
theta=data(:,1);
TSS=sum((rou-mean(rou)).^2);
RSS=sum((f(theta)-rou).^2);
R2=1-RSS/TSS
```

Q2.m

```
%% 初始化
% clear
clc
close all

%% 常量定义
global C A V0 get_rou get_P Aout Qout Qin dt tend f aa0 aa1 bb1
t_of_needle h_of_needle h_dic h_max
C=0.85;
A=pi*(1.4/2)^2;
V0=pi*500*(10/2)^2;

%% 读文件
data1=xlsread("附件 1-凸轮边缘曲线.xlsx");
data2=xlsread("附件 2-针阀运动曲线.xlsx");
t_of_needle=[data2(:,1);data2(:,4)];
h_of_needle=[data2(:,2);data2(:,5)];

%% 拟合
f=fit(data1(:,1),data1(:,2),"fourier1");
aa0=4.826;
aa1=2.413;
bb1=-2.676e-6;

%% rou 与 P 的关系
get_rou=@(p)3.910284764226142e-04.*p+0.808708414066112;
get_P=@(rou)(rou-0.808708414066112)/3.910284764226142e-04;

%% 流出流量函数
Aout=@(t)min((pi*(1.4/2)^2),pi*((2.5/2+hout(t)*sin(9*pi/180)*cos(9*pi/180)).^2-(2.5/2)^2)/cos(9*pi/180));
Qout=@(P1,Pout,t)(C*Aout(t)*(2*(P1-Pout)/get_rou(P1))^(0.5));

%% 流入流量函数
```

```

Qin=@(P2,P1)(C*A*(2*(P2-P1)/get_rou(P2))^(0.5));

%% 转角与高度的关系
xx=@(ttheta,ggamma)(f(ttheta).*cos(ttheta).*cos(ggamma)-
f(ttheta).*sin(ttheta).*sin(ggamma));
h_dic=[];
for gam=0:0.01:2*pi
    xxx=0;
    for ttheta=1:0.01:2*pi
        xxx_temp=xx(ttheta,gam+pi);
        if xxx_temp>xxx
            xxx=xxx_temp;
        end
    end
    h_dic(end+1)=xxx;
    if mod(gam,0.1)==0
        fprintf("计算高度至%.2f/6.28\n",gam)
    end
end
h_dic=h_dic-min(h_dic);
h_max=max(h_dic);

%% 循环优化 Tin
dt=0.01; % 差分步长, 单位 ms
tend=100000; % 终止时间, 单位 ms
t1=0.001; % 大步长
t2=0.0001; % 小步长
%% 大步长搜索
% p=[];
% x=t1:t1:0.05;
% for omg=x
%     p(end+1)=get_dPmax(omg,0);
% end
% plot(x,p)
% xlabel("ω(rad/ms)")
% ylabel("Z(Mpa)")

%% 小步长搜索
% p=[];
% x=0.025:t2:0.030;
% for Tin=x
%     p(end+1)=get_dPmax(Tin,0);
% end
% plot(x,p,"b+-")

```



```

% xlabel("Tin(ms)")
% ylabel("Z(MPa)")
% [~,min_ind]=min(p);
%
% fprintf("最优周期:%f\n",x(min_ind))
get_dPmax(0.0272,1);

%% 函数计算压强变化峰值
function dPmax = get_dPmax(omg,show_fig)
    global C A V0 get_rou get_P Aout Qout Qin dt tend f aa0 aa1 bb1
    t_of_needle h_of_needle h_dic h_max

    %omg-凸轮角速度
    Tin=2*pi/omg;
    Tout=100;
    P0=100; % 初始压强
    P2=0.5; % 进入压强
    m1=get_rou(P0)*V0; % 管内实时质量, 赋初值为初始质量
    m2=((f(0)-f(pi))*(pi*2.5*2.5)+20)*get_rou(0.5);
    gin=0; % 流入转动角
    tout=0; % 流出计时器
    ind=1;
    P1=P0; % 管内实时压强存储
    p_ls=P1;
    dPmax=0; % 压强差最大值
    Pout=0.1; % 外界大气压
    V1=20;
    for t=1:dt:tend
        %% 计时器重置
        if gin>=2*pi
            gin=gin-2*pi;
        end
        if tout>Tout
            tout=tout-Tout;
        end
        %% 柱塞压缩
        % 压缩高度计算
        %
        xx=@(ttheta,ggamma)(f(ttheta).*cos(ttheta).*cos(ggamma)-
        f(ttheta).*sin(ttheta).*sin(ggamma));
        %
        xxx=0;
        %
        for ttheta=1:0.01:2*pi
            %
            xxx_temp=xx(ttheta,gin+pi);
            %
            if xxx_temp>xxx
                %
                xxx=xxx_temp;
            %
        end
    end

```

```

%         end
%         h=xxx-f(pi);
h=h_dic(int32(gin*100)+1);
V2=(h_max-h)*(pi*2.5*2.5);
if h<0.1
    %% 流入柱塞
    P2=0.5;
    m2=((f(0)-f(pi))*(pi*2.5*2.5)+20)*get_rou(0.5);
else
    rou2=m2/(V1+V2);
    P2=get_P(rou2);
end
%% 流入
if P2>P1
    vin=Qin(P2,P1);
    fprintf("流入>>>")
    m2=m2-get_rou(P2)*vin*dt;
else
    vin=0;
end
%% 测试断点
if t>79.18
    t;
end
%% 流出
if tout<2.45
    vout=Qout(P1,Pout,tout);
else
    vout=0;
end
%% 质量更新
if vin>0 || vout>0
    m1=m1+get_rou(P2)*vin*dt-get_rou(P1)*vout*dt;
end
%% 压强变化计算
rou_now=m1/V0;
P1=get_P(rou_now);
if show_fig
    p_ls(end+1)=P1;
end
%% 计时器更新
gin=gin+dt*omg;
tout=tout+dt;
%% 越界判断

```

```

        if P1<=0 || P1>=200
            dPmax=inf;
            return
        end
        if dPmax<abs(P1-P0)
            dPmax=abs(P1-P0);
        end
        if dPmax>40
            dPmax=40;
            fprintf("\n=====跳出本轮=====\\n")
            return
        end
        if mod(ind,100)==0
            fprintf("\n 正在计算 omg=%.5frad/ms, t=%.4fms, 当前压强
P1=%.4fMPa;P2=%.4fMpa;压缩率%.4f;Vin=%.4f;Vout=%.4f;h=%.4f,V2=%.4f, 当前最
大差为%.5f...",omg,t,P1,P2,gin/pi,vin,vout,h,V2,dPmax);
        end
        ind=ind+1;
    end
    fprintf("\n=====结束本轮=====\\nTin=%fms,最大差
=%.5f",Tin,dPmax)
    if show_fig
        fprintf("\n 方差为%f\\n",var(p_ls))
        range=40000;
        figure
        x=0:dt:tend;
        plot(x(1:range),p_ls(1:range),"g-",LineWidth=0.1)
        xlabel("时间(ms)")
        ylabel("压力(MPa)")

        x`figure
        plot(x(1:length(p_ls)),p_ls,"g-",LineWidth=0.1)
        xlabel("时间(ms)")
        ylabel("压力(MPa)")

    end
end

%% 针阀升程与时间的关系
function h=hout(t)
    global t_of_needle h_of_needle
    if t>=0.45-1e-4 && t<=2+1e-4
        h=2;
    return

```

```

elseif t>=2.46-1e-4
    h=0;
    return
else
    h=h_of_needle(find(abs(t_of_needle-t)<1e-6));
    return
end
end

```

Q3 1.m

```

%% 初始化
% clear
clc
close all

%% 常量定义
global C A V0 get_rou get_P Aout Qout Qin dt tend f aa0 aa1 bb1
t_of_needle h_of_needle h_dic h_max
C=0.85;
A=pi*(1.4/2)^2;
V0=pi*500*(10/2)^2;

%% 读文件
data1=xlsread("附件 1-凸轮边缘曲线.xlsx");
data2=xlsread("附件 2-针阀运动曲线.xlsx");
t_of_needle=[data2(:,1);data2(:,4)];
h_of_needle=[data2(:,2);data2(:,5)];

%% 拟合
f=fit(data1(:,1),data1(:,2),"fourier1");
aa0=4.826;
aa1=2.413;
bb1=-2.676e-6;

%% rou 与 P 的关系
get_rou=@(p)3.910284764226142e-04.*p+0.808708414066112;
get_P=@(rou)(rou-0.808708414066112)/3.910284764226142e-04;

%% 流出流量函数
Aout=@(t)min((pi*(1.4/2)^2),pi*((2.5/2+hout(t)*sin(9*pi/180)*cos(9*pi/180)).^2-(2.5/2)^2)/cos(9*pi/180));
Qout=@(P1,Pout,t)(C*Aout(t)*(2*(P1-Pout)/get_rou(P1))^(0.5));

%% 流入流量函数
Qin=@(P2,P1)(C*A*(2*(P2-P1)/get_rou(P2))^(0.5));

```

```

%% 转角与高度的关系
% xx=@(ttheta,ggamma)(f(ttheta).*cos(ttheta).*cos(ggamma)-
f(ttheta).*sin(ttheta).*sin(ggamma));
% h_dic=[];
% for gam=0:0.01:2*pi
%     xxx=0;
%     for ttheta=1:0.01:2*pi
%         xxx_temp=xx(ttheta,gam+pi);
%         if xxx_temp>xxx
%             xxx=xxx_temp;
%         end
%     end
%     h_dic(end+1)=xxx;
%     if mod(gam,0.1)==0
%         fprintf("计算高度至%.2f/6.28\n",gam)
%     end
% end
% h_dic=h_dic-min(h_dic);
% h_max=max(h_dic);

%% 循环优化 Tin
dt=0.01; % 差分步长, 单位 ms
tend=100000; % 终止时间, 单位 ms
t1=0.001; % 大步长
t2=0.0001; % 小步长
%% 大步长搜索
% p=[];
% x=t1:t1:0.05;
% for omg=x
%     p(end+1)=get_dPmax(omg,0);
% end
% plot(x,p)
% xlabel("ω(rad/ms)")
% ylabel("Z(Mpa)")

%% 小步长搜索
% p=[];
% x=0.025:t2:0.030;
% for Tin=x
%     p(end+1)=get_dPmax(Tin,0);
% end
% plot(x,p,"b+-")
% xlabel("Tin(ms)")

```

```

% ylabel("Z(MPa)")
% [~,min_ind]=min(p);
%
% fprintf("最优周期:%f\n",x(min_ind))
get_dPmax(0.0545,1);

%% 函数计算压强变化峰值
function dPmax = get_dPmax(omg,show_fig)
    global C A V0 get_rou get_P Aout Qout Qin dt tend f aa0 aa1 bb1
    t_of_needle h_of_needle h_dic h_max
    %omg-凸轮角速度
    Tin=2*pi/omg;
    Tout=50;
    P0=100; % 初始压强
    P2=0.5; % 进入压强
    m1=get_rou(P0)*V0; % 管内实时质量, 赋初值为初始质量
    m2=((f(0)-f(pi))*(pi*2.5*2.5)+20)*get_rou(0.5);
    gin=0; % 流入转动角
    tout=0; % 流出计时器
    ind=1;
    P1=P0; % 管内实时压强存储
    p_ls=P1;
    vin_ls=[];
    vout_ls=[];
    dPmax=0; % 压强差最大值
    Pout=0.1; % 外界大气压
    V1=20;
    for t=1:dt:tend
        %% 计时器重置
        if gin>=2*pi
            gin=gin-2*pi;
        end
        if tout>Tout
            tout=tout-Tout;
        end
        %% 柱塞压缩
        % 压缩高度计算
        %      xx=@(ttheta,ggamma)(f(ttheta).*cos(ttheta).*cos(ggamma)-
        f(ttheta).*sin(ttheta).*sin(ggamma));
        %      xxx=0;
        %      for ttheta=1:0.01:2*pi
        %          xxx_temp=xx(ttheta,gin+pi);
        %          if xxx_temp>xxx
        %              xxx=xxx_temp;

```

```

%         end
%     end
%     h=xxx-f(pi);
h=h_dic(int32(gin*100)+1);
V2=(h_max-h)*(pi*2.5*2.5);
if h<0.1
    %% 流入柱塞
    P2=0.5;
    m2=((f(0)-f(pi))*(pi*2.5*2.5)+20)*get_rou(0.5);
else
    rou2=m2/(V1+V2);
    P2=get_P(rou2);
end
%% 流入
if P2>P1
    vin=Qin(P2,P1);
    m2=m2-get_rou(P2)*vin*dt;
else
    vin=0;
end
%% 流出
if tout<2.45
    vout=Qout(P1,Pout,tout);
else
    vout=0;
end
%% 质量更新
if vin>0 || vout>0
    m1=m1+get_rou(P2)*vin*dt-get_rou(P1)*vout*dt;
end
%% 压强变化计算
rou_now=m1/V0;
P1=get_P(rou_now);
if show_fig
    p_ls(end+1)=P1;
    vin_ls(end+1)=vin;
    vout_ls(end+1)=vout;
end
%% 计时器更新
gin=gin+dt*omg;
tout=tout+dt;
%% 越界判断
if P1<=0 || P1>=200
    dPmax=inf;

```

```

        return
    end
    if dPmax<abs(P1-P0)
        dPmax=abs(P1-P0);
    end
    if dPmax>40
        dPmax=40;
        fprintf("\n=====跳出本轮=====\\n")
        return
    end
    if mod(ind,100)==0
        fprintf("\n 正在计算 omg=%.5frad/ms, t=%.4fms, 当前压强
P1=%.4fMPa;P2=%.4fMpa;压缩率%.4f;Vin=%.4f;Vout=%.4f;h=%.4f,V2=%.4f, 当前最
大差为%.5f...",omg,t,P1,P2,gin/pi,vin,vout,h,V2,dPmax);
    end
    ind=ind+1;
end
fprintf("\n=====结束本轮=====\\nTin=%fms,最大差
=%.5f",Tin,dPmax)
if show_fig
    range=100000;
    figure
    x=0:dt:tend;
    plot(x(1:range),p_ls(1:range),"g-",LineWidth=0.1)
    xlabel("时间(ms)")
    ylabel("压力(MPa)")
    figure

    plot(x(1:range),vin_ls(1:range),"g-
",x(1:range),vout_ls(1:range),"r-");
    xlabel("时间(ms)")
    ylabel("流量(mm^{3}/ms)")
    legend("流入流量","流出流量")
end
end

%% 针阀升程与时间的关系
function h=hout(t)
    global t_of_needle h_of_needle
    if t>=0.45-1e-4 && t<=2+1e-4
        h=2;
        return
    elseif t>=2.46-1e-4
        h=0;

```



```

        return
    else
        h=h_of_needle(find(abs(t_of_needle-t)<1e-6));
        return
    end
end
end

```

Q3 2.m

```

%% 初始化
% clear
clc
close all

%% 常量定义
global C A V0 get_rou get_P Aout Qout Qout2 Qin dt tend f aa0 aa1 bb1
t_of_needle h_of_needle h_dic h_max
C=0.85;
A=pi*(1.4/2)^2;
V0=pi*500*(10/2)^2;

%% 读文件
data1=xlsread("附件 1-凸轮边缘曲线.xlsx");
data2=xlsread("附件 2-针阀运动曲线.xlsx");
t_of_needle=[data2(:,1);data2(:,4)];
h_of_needle=[data2(:,2);data2(:,5)];

%% 拟合
f=fit(data1(:,1),data1(:,2),"fourier1");
aa0=4.826;
aa1=2.413;
bb1=-2.676e-6;

%% rou 与 P 的关系
get_rou=@(p)3.910284764226142e-04.*p+0.808708414066112;
get_P=@(rou)(rou-0.808708414066112)/3.910284764226142e-04;

%% 流出流量函数
Aout=@(t)min((pi*(1.4/2)^2),pi*((2.5/2+hout(t)*sin(9*pi/180)*cos(9*pi/180)).^2-(2.5/2)^2)/cos(9*pi/180));
Qout=@(P1,Pout,t)(C*Aout(t)*(2*(P1-Pout)/get_rou(P1))^(0.5));
Qout2=@(P1,Pout)(C*(pi*0.7^2)*(2*(P1-Pout)/get_rou(P1))^(0.5));

%% 流入流量函数
Qin=@(P2,P1)(C*A*(2*(P2-P1)/get_rou(P2))^(0.5));

```

```

%% 转角与高度的关系
% xx=@(ttheta,ggamma)(f(ttheta).*cos(ttheta).*cos(ggamma)-
f(ttheta).*sin(ttheta).*sin(ggamma));
% h_dic=[];
% for gam=0:0.01:2*pi
%     xxx=0;
%     for ttheta=1:0.01:2*pi
%         xxx_temp=xx(ttheta,gam+pi);
%         if xxx_temp>xxx
%             xxx=xxx_temp;
%         end
%     end
%     h_dic(end+1)=xxx;
%     if mod(gam,0.1)==0
%         fprintf("计算高度至%.2f/6.28\n",gam)
%     end
% end
% h_dic=h_dic-min(h_dic);
% h_max=max(h_dic);

%% 循环优化 Tin
dt=0.01; % 差分步长, 单位 ms
tend=10000; % 终止时间, 单位 ms
t1=0.001; % 大步长
t2=0.0001; % 小步长
%% 大步长搜索
% p=[];
% x=0.05:t1:0.12;
% for omg=x
%     p(end+1)=get_dPmax(omg,0);
% end
% plot(x,p)
% xlabel("ω(rad/ms)")
% ylabel("Z(Mpa)")

%% 小步长搜索
% p=[];
% x=0.025:t2:0.030;
% for Tin=x
%     p(end+1)=get_dPmax(Tin,0);
% end
% plot(x,p,"b+-")
% xlabel("Tin(ms)")
% ylabel("Z(MPa)")

```

```

% [~,min_ind]=min(p);
%
% fprintf("最优周期:%f\n",x(min_ind))

%% 灵敏性分析
V00=V0;
step=0.001*V00;
p=[];
x=V00*0.99:step:V00*1.01;
for V0=x
    p(end+1)=get_dPmax(0.0802,0);
end
plot(x,p,"r+-")
xlabel("V_{0}(mm^{3})")
ylabel("Z(MPa)")

%% 函数计算压强变化峰值
function dPmax = get_dPmax(omg,show_fig)
    global C A V0 get_rou get_P Aout Qout Qout2 Qin dt tend f aa0 aa1 bb1
    t_of_needle h_of_needle h_dic h_max
    %omg-凸轮角速度
    Tin=2*pi/omg;
    Tout=50;
    P0=100; % 初始压强
    P2=0.5; % 进入压强
    m1=get_rou(P0)*V0; % 管内实时质量, 赋初值为初始质量
    m2=((f(0)-f(pi))*(pi*2.5*2.5)+20)*get_rou(0.5);
    gin=0; % 流入转动角
    tout=0; % 流出计时器
    ind=1;
    P1=P0; % 管内实时压强存储
    p_ls=P1;
    vin_ls=[];
    vout_ls=[];
    dPmax=0; % 压强差最大值
    Pout=0.1; % 外界大气压
    V1=20;
    for t=1:dt:tend
        %% 计时器重置
        if gin>=2*pi
            gin=gin-2*pi;
        end
        if tout>Tout
            tout=tout-Tout;

```

```

end
%% 柱塞压缩
% 压缩高度计算
%      xx=@(ttheta,ggamma)(f(ttheta).*cos(ttheta).*cos(ggamma)-
f(ttheta).*sin(ttheta).*sin(ggamma));
%      xxx=0;
%      for ttheta=1:0.01:2*pi
%          xxx_temp=xx(ttheta,gin+pi);
%          if xxx_temp>xxx
%              xxx=xxx_temp;
%          end
%      end
%      h=xxx-f(pi);
h=h_dic(int32(gin*100)+1);
V2=(h_max-h)*(pi*2.5*2.5);
if h<0.1
    %% 流入柱塞
    P2=0.5;
    m2=((f(0)-f(pi))*(pi*2.5*2.5)+20)*get_rou(0.5);
else
    rou2=m2/(V1+V2);
    P2=get_P(rou2);
end
%% 流入
if P2>P1
    vin=Qin(P2,P1);
    m2=m2-get_rou(P2)*vin*dt;
else
    vin=0;
end
%% 流出
vout=0;
if tout<2.45
    vout=vout+Qout(P1,Pout,tout);
end
if vin==0 && P1>101
    vout=vout+Qout2(P1,0.5);
end
%% 质量更新
if vin>0 || vout>0
    m1=m1+get_rou(P2)*vin*dt-get_rou(P1)*vout*dt;
end
%% 压强变化计算
rou_now=m1/V0;

```

```

P1=get_P(rou_now);
if show_fig
    p_ls(end+1)=P1;
    vin_ls(end+1)=vin;
    vout_ls(end+1)=vout;
end
%% 计时器更新
gin=gin+dt*omg;
tout=tout+dt;
%% 越界判断
if P1<=0 || P1>=200
    dPmax=inf;
    return
end
if dPmax<abs(P1-P0)
    dPmax=abs(P1-P0);
end
if dPmax>40
    dPmax=40;
    fprintf("\n=====跳出本轮=====\n")
    return
end
if mod(ind,100)==0
    fprintf("\n 正在计算 omg=%.5frad/ms, t=%.4fms, 当前压强
P1=%.4fMPa;P2=%.4fMPa;压缩率%.4f;Vin=%.4f;Vout=%.4f;h=%.4f,V2=%.4f, 当前最
大差为%.5f...",omg,t,P1,P2,gin/pi,vin,vout,h,V2,dPmax);
end
ind=ind+1;
end
fprintf("\n=====结束本轮=====\nomg=%fms,最大差
=%.5f",Tin,dPmax)
if show_fig
    fprintf("\n 方差为%f\n",var(p_ls))
    range=40000;
    figure
    x=0:dt:tend;
    plot(x(1:range),p_ls(1:range),"g-",LineWidth=0.1)
    xlabel("时间(ms)")
    ylabel("压力(MPa)")

    figure
    plot(x(1:length(p_ls)),p_ls,"g-",LineWidth=0.1)
    xlabel("时间(ms)")
    ylabel("压力(MPa)")

```

```

        figure
        plot(x(1:range),vin_ls(1:range),"g-
",x(1:range),vout_ls(1:range),"r-");
        xlabel("时间(ms)")
        ylabel("流量(mm^{3}/ms)")
        legend("流入流量","流出流量")
    end
end

%% 针阀升程与时间的关系
function h=hout(t)
    global t_of_needle h_of_needle
    if t>=0.45-1e-4 && t<=2+1e-4
        h=2;
        return
    elseif t>=2.46-1e-4
        h=0;
        return
    else
        h=h_of_needle(find(abs(t_of_needle-t)<1e-6));
        return
    end
end
end

```