高压油管的压力控制

摘要

本文通过

针对问题一，

针对问题二，

针对问题三，

关键词： 关键词

一、 问题重述

1.1 问题背景

燃油发动机使燃料燃烧并产生动力，是驱动汽车各部分正常工作或行驶的保障。而燃油进入和喷出高压油管是燃油发动机工作的基础，其进入和喷出的过程会导致高压油管内压力的变化，进而导致喷嘴喷油量的偏差，从而影响发动机的工作效率。因此，通过理论分析和计算，给出合理的高压油管控制方案对发动机高效工作有着积极影响。

1.2 问题的提出

燃油经高压油泵进入油管，再由喷口喷出。根据高压油管工作原理（图15），回答以下问题：

（1）已知高压油管尺寸、初始压力及喷油嘴工作次数和工作时间，高压油泵在入口A 处提供 160MPa 稳定压力，为使管内压力尽可能稳定在 100MPa 不变，应如何设置单向阀每次开启时长？若经过 2s、5s 和 10s 的调整后，管内压力从 100MPa 增加到 150MPa 并稳定，又应如何调整开启时长？

（2）若高压油管入口处燃油来自油泵的柱塞腔出口，柱塞运动由凸轮驱动，喷油由油嘴的针阀控制。已知各部分的工作原理和相关参数，在问题 1 喷油器工作次数、高压油管尺寸和初始压力下，确定凸轮工作的角速度，使得油管内压力尽可能稳定在 100MPa。

（3）在问题 2 的基础上增加一个相同的喷油嘴，应如何调整喷油和供油策略？若安装单向减压阀来更好地控制油管压力，请给出油泵和减压阀的控制方案。

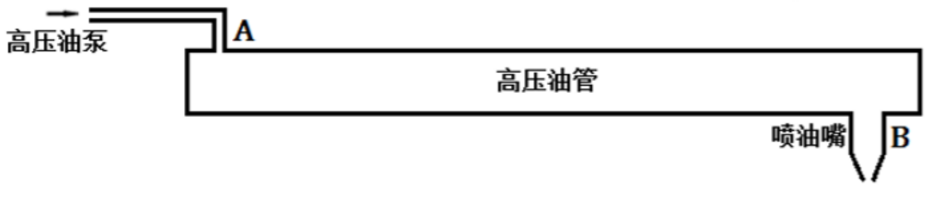


图 **1**　高压油管工作原理示意图

二、 问题分析

2.1 问题一的分析

问题一要求我们在已知高压油管尺寸、初始压力，喷油嘴工作次数和工作时间，高压油泵在入口 A 处提供 160MPa 稳定压力的情况下，通过设置单向阀每次开启时长使管

内压力尽可能稳定在 100MPa 不变；再调整开启时长，使管内压力经过 2s、5s 和 10s 后从 100MPa 增加到 150MPa 并稳定。首先根据燃油压力、密度与弹性模量之间的关系求出 160MPa 下的燃油密度。其次结合高压油管流量的计算公式与波义尔定律，得出高压油管内压力 P 与燃油进入量 q、排出量 e 之间的函数关系 (这里要不要说方程复杂无法求解所以离散)。为求得管内压力尽可能稳定在 100MPa 时单向阀开启时间 $t_{开}$ 的最优取值，以 $\triangle t = 0.01\ ms$ 为时间间隔，$1s$ 内各时刻油管压力与 100MPa 的残差平方和 SSR 为目标函数建立单目标优化模型，并用模拟退火算法求出全局最优解。为使管内压力经过 2s、5s 和 10s 后从 100MPa 增加到 150MPa 并稳定，将单向阀开启时长分增压过程和稳压过程两个部分分别调整。增压时以增压结束点油管压力最接近 150MPa 为目标函数，稳压时以增压结束到 $20s$ 中各时刻油管压力与 150MPa 的残差平方和 SSR 为目标函数，分别建立单目标优化模型。由模拟退火算法求出的解即单向阀开启时长的最优取值。

2.2 问题二的分析

2.3 问题三的分析

三、 基本假设

（1）假设高压油管与油泵内的气体均为理想气体，且压缩、膨胀过程中无温度变化。

（2）假设供给和喷出燃油的过程中油管与油泵内气体与外界气体均无交换。

四、 符号说明

符号	意义
E	弹性模量
ρ	燃油密度
P	燃油压力
C	流量系数
A	小孔面积
V	体积
q	燃油进入量
e	燃油排出量
t	时刻
$t_{开}$	单向阀开启时间
T	单向阀工作周期
d	孔洞直径

五、 问题一的求解

5.1 高压油管内的压力

因燃油的压力变化量与密度变化量成正比，且比例系数为 $\frac{E}{\rho}$，可以得到燃油密度的计算公式

$$\frac{\triangle P}{\triangle \rho} = \frac{E}{\rho} \tag{1}$$

其中，P 为当前压力，ρ 为燃油密度，E 为弹性模量，且其与压力的关系如附件 3 所示。设初始压力 $P_0 = 100\,MPa$，此时燃油密度 $\rho_0 = 0.850\,mg/mm^3$，则 $\triangle P = P - P_0$，$\triangle \rho = \rho - \rho_0$，带入公式 (1) 中可得

$$\frac{P - P_0}{\rho - \rho_0} = \frac{E}{\rho} \tag{2}$$

整理得

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 - \frac{P - P_0}{E}} \tag{3}$$

设高压侧燃油密度为 ρ，流量系数 $C=0.85$，小孔面积 $A=\pi r_A^2$，油泵在入口 A 处的压力 $P_1=160\ MPa$，小孔 A 两端的压力差 $\triangle P=P_1-P$。则单位时间内经小孔 A 流入高压油管的燃油量为

$$Q=CA\sqrt{\frac{2\triangle P}{\rho}}=CA\sqrt{\frac{2(P_1-P)}{\rho}} \tag{4}$$

将 $P=160\ MPa$ 带入公式 (3) 中，求得 $\rho=0.8687$。

假设高压油管内的气体为理想气体，且体积压缩和膨胀过程中无温度变化，则其压力与体积满足波义尔定律 $P_0V_0=PV$。其中，V_0 为高压油管内腔总体积，P_0 为油管初始压力 $100\ MPa$。设 t 时刻进入油管的燃油量为 q，排出量为 e，则管内体积变化量

$$\triangle V=V_{进入}-V_{喷出}=\int_0^t qdt-\int_0^t edt \tag{5}$$

t 时刻高压油管内的压力 $P=P_0V_0/V$，气体体积 $V=V_0-\triangle V$，代入公式 (5) 可以求得

$$P=\frac{P_0V_0}{V_0-\int_0^t qdt+\int_0^t edt} \tag{6}$$

5.2 单目标优化模型

因高压油管内腔长 $L_{油管}=500\ mm$，内直径 $d_{油管}=10\ mm$，入口 A 的直径 $d_A=1.4\ mm$，则 $V_0=\pi(d_{油管}/2)^2\cdot L_{油管}=12500\pi\ mm^3$，$A=\pi(d_A/2)^2=0.49\pi\ mm^2$。已知小孔 A 通过单向阀开关控制供油时间，且每次打开后就要关闭 $10\ ms$，设每次开启时间为 $t_{开}$，则单向阀工作周期 $T=(t_{开}+10)\ ms$；喷油器每秒工作 10 次，每次喷油 $2.4\ ms$ 且喷油速率如图2所示。

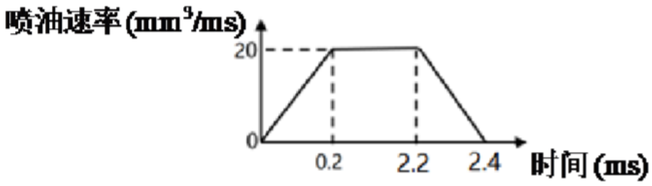


图 **2**　喷油速率示意图

则 t 时刻喷油量

$$e=\begin{cases}100t & 0\le t\le 0.2\\ 20 & 0.2<t\le 2.2\\ 240-100t & 2.2<t\le 2.4\\ 0 & 2.4<t<100\end{cases} \tag{7}$$

由公式 (4) 可知，进入油管的燃油量 q 为 P 的函数 (这里有点问题)，将 q 和 e 代入公式 (6) 中进行求解即可得到油管内压力 P 与时间 t 的方程。因该方程过于复杂无法直接求解，故采用如下方法计算：

Step1: 将时间段 $[0,t]$ 分割为若干个长度为 $\triangle t = 0.01\ ms$ 的小区间，第 i 个区间内燃油的进入和喷出量分别记为 $\triangle q_i$ 和 $\triangle e_i$ $(i = 1, 2, \cdots, n)$。

Step2: 在第 i 个区间上以起始点的 q_i 的值近似代替连续变化的 q。因喷油量 e 为线性函数，因此用每个区间喷油量的平均值的 $\overline{e_i}$ 代替连续变化的 e，即

$$\begin{cases} \triangle q_i \approx q_i \triangle t \\ \triangle e_i = \overline{e_i} \triangle t \end{cases} \tag{8}$$

其中 $i = 1, 2, \cdots, n$ 且 $n = \lfloor \frac{t}{\triangle t} \rfloor$。

Step3: 求 n 个时间段进入和喷出燃油量的和，即

$$\begin{cases} V_{进入} = \int_0^t q dt \approx \sum\limits_{i=1}^{n} \triangle q_i \\ V_{喷出} = \int_0^t e dt \approx \sum\limits_{i=1}^{n} \triangle e_i \end{cases} \tag{9}$$

Step4: 记第 i 个区间起始时刻压力为 P_{i-1}，结束时刻压力为 P_i，则

$$q_i = \begin{cases} CA\sqrt{\frac{2(P_1 - P_{i-1})}{\rho}} & i - \lfloor \frac{t}{T} \rfloor \cdot T \le t_{开} \\ 0 & t_{开} < i - \lfloor \frac{t}{T} \rfloor \cdot T < T \end{cases} \tag{10}$$

Step5: 将公式 (7-10) 依次代入公式 (6) 中可得关于压力的递推关系式

$$P_i = \frac{P_0 V_0}{V_0 - \sum\limits_{i=1}^{n} CA\sqrt{\frac{2(P_1 - P_{i-1})}{\rho}} \cdot \triangle t + \sum\limits_{i=1}^{n} \overline{e_i} \triangle t} \tag{11}$$

通过公式 (11) 不断迭代即可得到 $[0,t]$ 时间段内各区间对应的压力。

本题首先要求将高压油管内的压力尽可能稳定在 $100\ MPa$ 左右，令

$$SSR = \sum_{i=1}^{n} (P_i - 100)^2 \tag{12}$$

其中，$n = \lfloor \frac{t}{\triangle t} \rfloor$，$t = 1000\ ms$。故单向阀每次开启时长的最优设置方案为各时刻压力与 $100\ MPa$ 的残差平方和 SSR 最小时。由此建立单目标优化模型，目标函数为

$$min \quad SSR \tag{13}$$

为求解上述问题的近似全局最优解，采用模拟退火算法，具体步骤如下：

Step1: 初始化目标函数值 SSR，设置退火起点 $t_{开} = 0$，降温系数 $\alpha = 0.999$，终止温度 $T^n = 10^{-30}$，当前时间为 T_1。

Step2: 对当前开启时间 $t_{开}$ 进行变换得到新解 $t'_{开}$，并带入目标函数中求出函数值。

Step3: 计算增量 $\triangle SSR = SSR(t'_{开}) - SSR_{开}$。

Step4: 若 $\triangle SSR < 0$，则将 $t'_{开}$ 作为新的当前解，否则以概率 $exp(-\triangle SSR/T_1)$ 接受 $t'_{开}$ 作为当前解。

Step5: 当 $T_1 \leq^n$ 时，退火算法结束，当前解即近似全局最优解；否则返回 Step2。

5.3 油管压力稳定在 $100MPa$ 的控制方案

用 MATLAB 求解 5.2 中的单目标优化模型，得到单向阀每次开启时间的最优解为 $t_{开} = 0.314\,ms$，$SSR(0.314\,ms) = 173.27$。代入公式 (11) 后作压力随时间变化的图像。

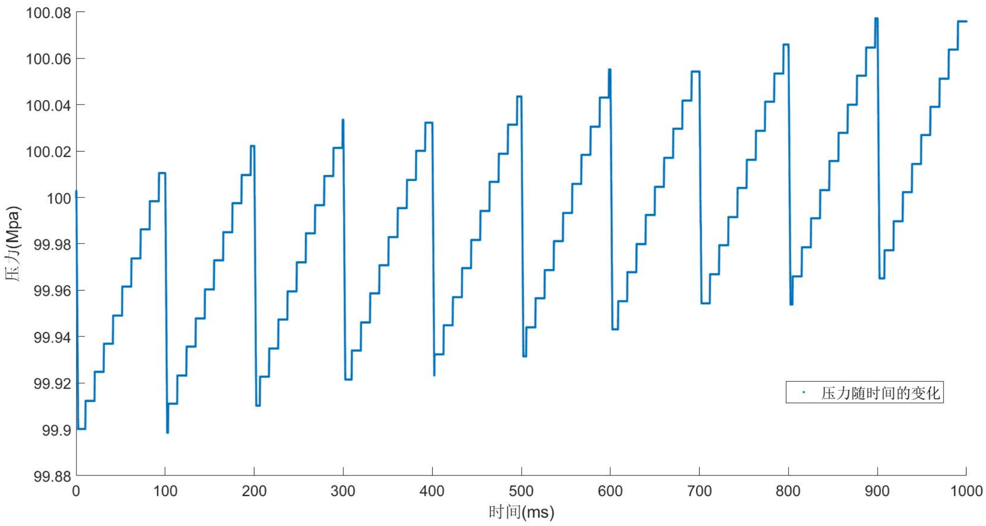


图 **3**　稳定在 $100\ MPa$ 时压力随时间变化示意图

由图3可以看出 $1s$ 内高压油管的压力在 $100\ MPa$ 上下小幅度波动，且 100000 个区间的平均偏离量仅为 $1.7327e-3$，说明压力较为稳定。

5.4 油管压力增加到在 $150MP$a 的调整方法

针对题目中要求的经过 $2\ s$ 调整后管内压力增加到 $150\ MPa$ 并保持稳定，采用与 5.2 中相似的计算方法，并将单向阀开启时长的调整分为两个部分。首先是增压过程，显然 $t_{开}$ 越大，压力增加得越快。$2\ s$ 时刻压力达到 $150\ MPa$，即 $|P_{2s} - 150\ MPa|$ 最小。令 $\triangle P = |P_{2s} - 150\ MPa|$，则调整单目标优化模型的目标函数为

$$min \quad \triangle P \tag{14}$$

通过模拟退火算法求得近似全局最优解为 $t_{开} = 15.046\ ms$，代入公式 (11) 中经迭代求出 $P_{2s} = 149.3\ MPa$。增压阶段结束后进入稳压阶段，压力尽可能维持在 $150\ MPa$，即

t 时间内各时刻压力与 150 MPa 的残差平方和 SSR。考虑将 20 s 内的最优解作为最佳开启时间，调整优化模型目标函数为

$$min \quad \sum_{i=2000}^{20000} (P_i - 150)^2 \tag{15}$$

经计算，稳压阶段单向阀每次开启的时长为 $t_{开} = 0.753$，求得的目标函数值为 9478.16。作 20 s 内管内压力随时间变化的图像，由局部放大图可知，管内压力增大到 150 MPa 后，$t_{开}$ 经调整可以使得压力在 150 MPa 附近小幅度波动，且波动量不超过 0.2 MPa。因此可以得出单向阀开启时长的调整方案较为合理的结论。

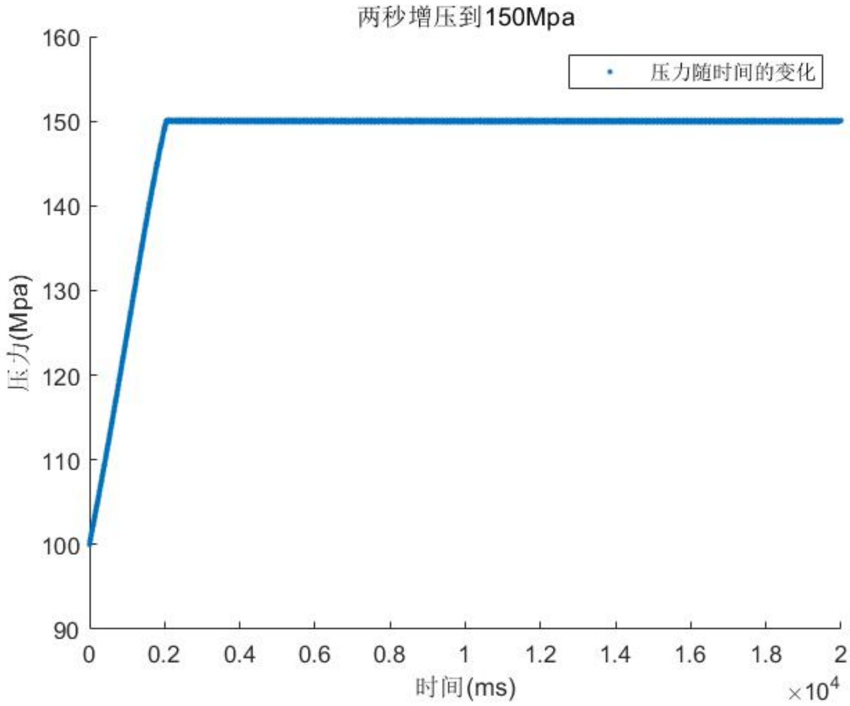


图 **4**　增压过程为 2 s 的压力变化示意图

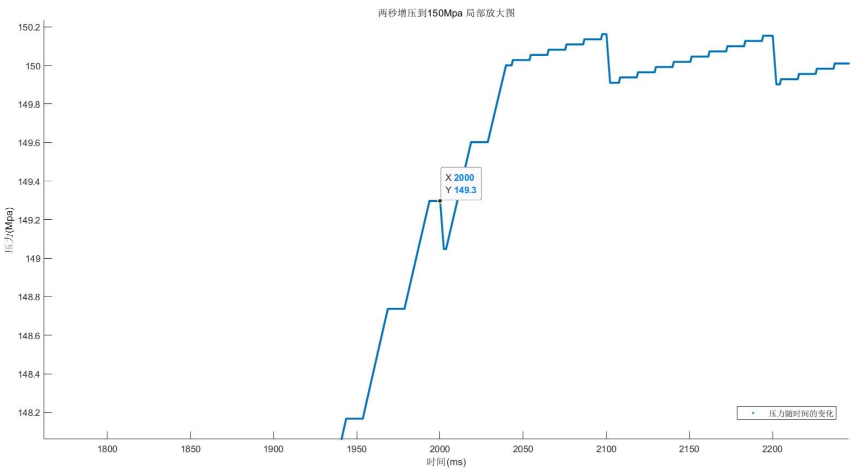


图 **5**　增压过程为 2 s 的压力变化局部放大图

用相同的方法求出增压过程为 5 s 和 10 s 时单向阀开启时长调整方案列于表3中, 并作 20 s 内管内压力随时间变化的图像。

表 **1**　单向阀开启时长调整方案

增压时长 $t_{增}$	增压过程 $t_{开}$	压力 $P_{t_{增}}$	稳压过程 $t_{开}$	目标函数 SSR
2 s	15.046 ms	149.3MPa	0.753 ms	9478.16
5 s	3.707 ms	150MPa	0.754 ms	8780.90
10 s	1.849 ms	150.1MPa	0.754 ms	5098.11

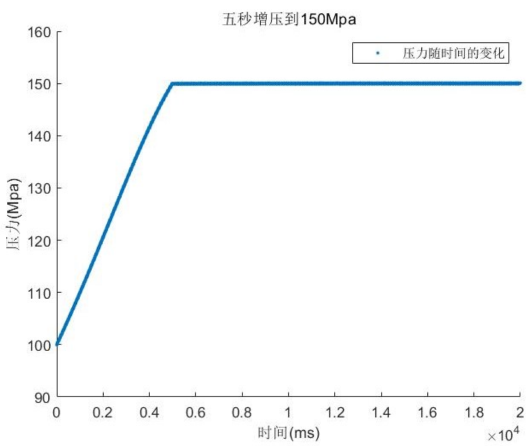


图 **6**　增压 5 s 的压力变化示意图

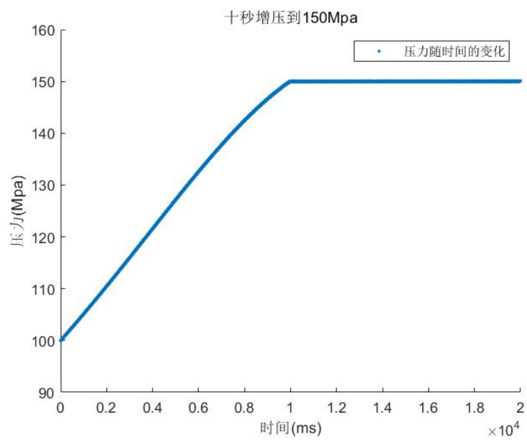
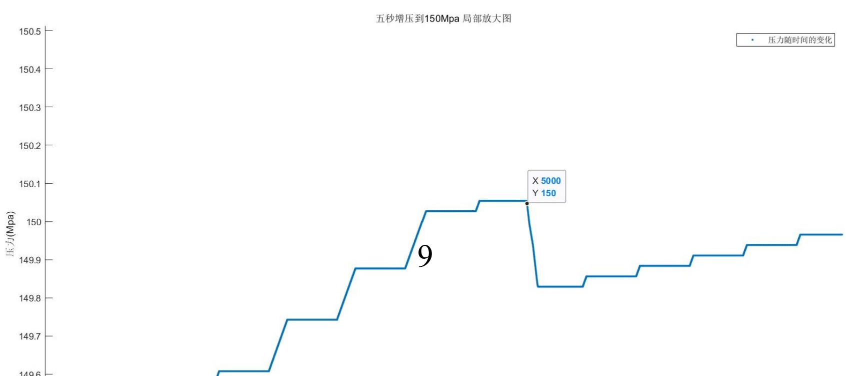


图 **7**　增压 10 s 的压力变化示意图



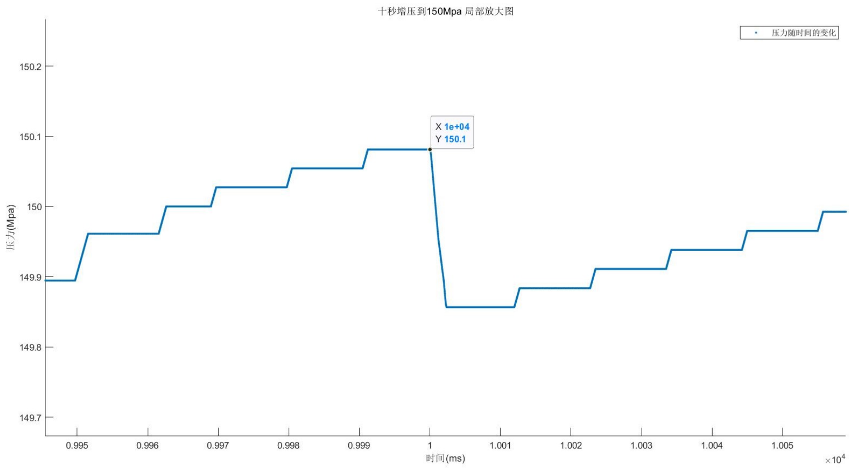


图 **9**　增压过程为 10 s 的压力变化局部放大图

六、 问题二的求解

6.1 柱塞运动方程

将附件 1 中凸轮极角与对应的极径输入 MATLAB 中，拟合曲线即可得到凸轮的外形 (图10) 及其极径与角度的关系（图11)。

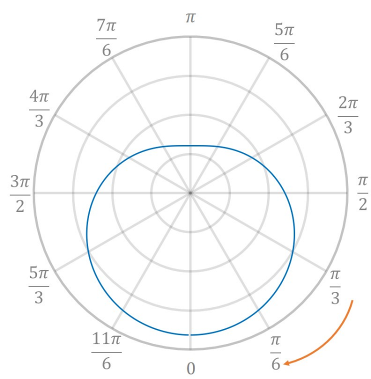


图 **10**　凸轮边缘轮廓

拟合后曲线的方程为 $L(\theta)=equation$，其中 θ 为旋转角度，L 为角度 θ 所对应的的极径。曲线 $L(\theta)$ 的拟合优度 $R^2=X$，说明拟合度较好，因此该曲线的方程可用来表示柱塞上升距离与角度的关系，即

$$d=L(\theta)-L_{min}=equation \tag{16}$$

其中，L_{min} 为柱塞运动到下止点时凸轮旋转角度所对应的的极径，d 为柱塞相对于下止点的位移。设 ω 为凸轮旋转角速度，$T=\frac{2\pi}{\omega}$ 为旋转周期，$t_r=t-\lfloor\frac{t}{T}*T\rfloor$ 为凸轮在某个旋转周期内的旋转时间，则 $\theta=\omega t_r$。代入公式 (16) 可得到柱塞上升距离与旋转时间 t_r 的关系式

$$d(t)=d(t_r)=L(t_r)-L_{min}=equation \tag{17}$$

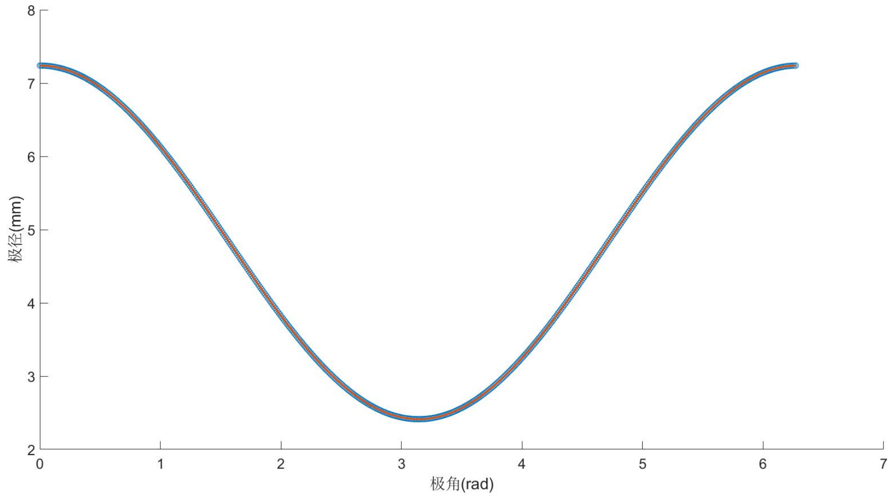


图 **11**　凸轮极径与角度的关系曲线

记柱塞运动速度为 u，则

$$u(t) = d'(t) = equation \tag{18}$$

已知柱塞内直径为 $5mm$，柱塞运动到上止点腔内残余容积为 $20mm^3$，运动到下止点压力为 $P_{初}$ =0.5MPa 的低压燃油充满柱塞腔。上下止点之间的距离 $H = L_{max} - L_{min} = 4.826mm$，柱塞腔横截面积 $S = \pi(d_{柱塞腔}/2)^2 = 6.25\pi$，则柱塞腔最大容积 $V_{max} = 20 + HS = 114.719mm^3$，则腔内体积随时间变化的关系式为

$$V(t) = V_{max} - S \cdot d(t) \tag{19}$$

6.2 高压油泵中燃油的压力

流体的可压缩性指温度一定时流体的体积或密度随压力而改变的性质。考虑到柱塞腔内燃油的可压缩性，柱塞向上运动时腔内燃油的压力随着体积的减小而不断增大。用压缩系数 $\kappa(m^2/N)$ 表示燃油的可压缩性，设温度一定时，燃油的原体积 V_0，压力 P_0，压缩后体积 V，压力 P，压力增量 dP，体积减小量 dV，则

$$\kappa = -\frac{dV/V_0}{dP} = -\frac{1}{V_0}\frac{dV}{dP} \tag{20}$$

压缩系数 κ 的倒数为燃油的弹性模量 E，即

$$E = \frac{1}{\kappa} = -V_0\frac{dP}{dV} \tag{21}$$

附件 3 给出了燃油弹性模量与压力的关系。对题中所给数据进行线性拟合，得到 E 关于 P 的一次函数

$$E = 8.8623P + 1379.2 \tag{22}$$

拟合优度 $R^2 = X$ 表示拟合程度较高。令 $k = 8.8623$，$b = 1379.2$，则 $E = kP + b$。与公式 (21) 联立得

$$kP + b = -V_0 \frac{dP}{dV} \tag{23}$$

即

$$-\frac{1}{V_0}dV = \frac{1}{kP+b}dP \tag{24}$$

对等式两边求积分可得

$$\int_{V_0}^{V} -\frac{1}{V_0}dV = \int_{P_0}^{P} \frac{1}{kP+b}dP \tag{25}$$

即

$$-\frac{1}{V_0}(V - V_0) = \frac{1}{k}ln(kP+b) - \frac{1}{k}ln(kP_0+b) \tag{26}$$

经整理可得压缩后燃油的压力

$$P = \frac{(kP_0+b)e^{-\frac{k}{V_0}(V-V_0)} - b}{k} \tag{27}$$

温度一定时流体膨胀为压缩的逆过程，设燃油的原体积 V_0，压力 P_0，膨胀后体积 V，压力 P。代入公式 (27) 中整理得到膨胀后燃油的压力

$$P = \frac{(kP_0+b)e^{-\frac{k}{V}(V-V_0)} - b}{k} \tag{28}$$

记柱塞腔内压力为 $P_{腔}$，高压油管内压力为 $P_{管}$。当柱塞向上运动且 $P_{腔} \leq P_{管}$ 时，柱塞腔与高压油管连接的单向阀未开启，腔内燃油总量不变。将 $P_{腔}$、$P_{初}$、V_{max} 和式 (19) 代入式 (27)，得到该情况下柱塞腔内压力随时间变化的函数

$$P_{腔} = \frac{(kP_{初}+b) \cdot e^{-\frac{k}{V_{max}}[V_{max} - S \cdot d(t_r) - V_{max}]} - b}{k} \tag{29}$$

当柱塞向上运动且 $P_{腔} > P_{管}$ 时，柱塞腔与高压油管连接的单向阀开启，腔内燃油进入高压油管。因 t 时刻进入油管的燃油量 q 为压力 $P_{腔}$ 和 $P_{管}$ 的函数，压力又同时受到经过单向阀的燃油流量的影响，故联立三者的方程难以直接求出其关于时间 t 的函数。对于上述问题，考虑使用迭代法进行重建，即求解时将连续的时间分割为多个时间间隔，离散化压力、排出量与时间的函数关系图像。具体计算步骤如下：

Step1: 离散化变量。将时间段 $[0, t]$ 分割为若干个长度为 $\triangle t = 0.01\ ms$ 的小区间，第 i 个区间内进入油管的燃油体积为 $\triangle V_{in}^i$ $(i = 1, 2, \cdots, \lfloor \frac{t}{0.01} \rfloor + 1)$。记区间 i 内柱塞腔和高压油管的压力分别为 $P_{腔}^i$ 和 $P_{管}^i$，单位时间燃油流量为 q_i，假设其值仅在一个区间的起始与终止时课进行更新，在区间内保持不变。

Step2: 更新柱塞腔内压力与燃油密度。令 $P_0 = 100$MPa，$\rho_0 = 0.85mg/mm^3$。记区间 i 内柱塞腔的体积恒为 $V_{腔}^i$，液体密度为 ρ_i，则 $V_{腔}^i = V_{max} - d(t_i)$。代入式 (27) 中得

$$P_{腔}^i = \frac{(kP_{腔}^{i-1}+b) \cdot e^{-\frac{k}{V_0}[d(t_{i-1}) - d(t_i)]} - b}{k} \tag{30}$$

柱塞腔内压力不断变化导致腔内燃油密度随之变化。将式（23）代入式（11）中可得

$$\frac{dP}{d\rho} = \frac{kP+b}{\rho} \tag{31}$$

整理后求定积分得

$$\int_{P_0}^{P_{腔}^i} \frac{dP}{kP+b} = \int_{\rho_0}^{\rho_i} \frac{d\rho}{\rho} \tag{32}$$

即

$$ln\rho_i - ln\rho_0 = \frac{1}{k}[ln(kP_{腔}^i + b) - ln(kP_0 + b)] \tag{33}$$

移项并整理得到密度随压力实时变化的方程

$$\rho_i = \rho_0 \cdot (\frac{kP_{腔}^i + b}{kP_0 + b})^{\frac{1}{k}} \tag{34}$$

Step3：计算进入高压油管的燃油量。用第 i 个区间起始点的流量 q_i 近似代替区间内连续变化的 q，则 $\triangle V_{in}^i = q_i \triangle t$。由式 (4) 得

$$q_i = CA\sqrt{\frac{2(P_{腔}^i - P_{管}^i)}{\rho_i}} \tag{35}$$

则进入高压油管的全部燃油体积为

$$V_{进入} = \sum_{i=1}^{n} q_i \triangle t \quad , \qquad n = \lfloor \frac{t}{0.01} \rfloor + 1 \tag{36}$$

Step4：修正柱塞腔内压力。在区间 i 内，燃油因部分流入高压油管而导致体积减少，而柱塞腔的体积并未改变，因此需要修正腔内压力。假设腔内剩余燃油的压力保持 $P_{腔}^i$ 不变，则其体积 $V_1 = V_{腔}^i - \triangle V_{in}^i$。记 $P_1 = P_{腔}^i$，此时柱塞腔内燃油实际压力即压力为 P_1，体积为 V_1 的燃油膨胀至体积为 $V_{腔}^i$ 时的压力。代入式 (28) 中得到修正后的压力

$$P_{腔}^i = \frac{(kP_1 + b)e^{-\frac{k}{V_{腔}^i}(V_{腔}^i - V_1)} - b}{k} \tag{37}$$

Step5：更新高压油管内的压力。由式 (6) 得

$$P_{腔}^i = \frac{P_0 V_0}{V_0 - V_{进入} + V_{喷出}} \tag{38}$$

代入柱塞腔的进油量 $V_{进入}$ 与喷油嘴的出油量 $V_{喷出}$ 即可求得区间 i 上高压油管内的压强 $P_{管}^i$。柱塞向下运动时各变量的求解与上述求解过程相同，在此不重复阐述。

6.3 喷油嘴的喷油速率

喷油嘴的结构如图12所示。图中 $\alpha = 9°$，喷孔直径 $d_0 = 1.4mm$，针阀下底面所

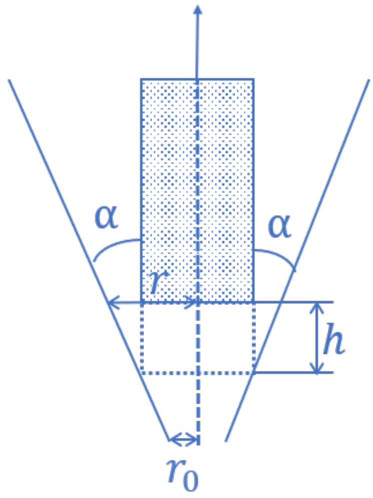


图 **12**　喷油嘴示意图

处圆锥的截平面半径为 r，上升高度 h 见附件 2。则喷孔半径 $r_0 = d_0/2 = 0.7mm$，$r = h\cdot\tan 9^\circ + r_0$。单位时间内经喷嘴喷出的燃油量

$$Q_{喷出} = CB\sqrt{\frac{2\triangle P}{\rho}} \tag{39}$$

其中 B 为油嘴最大喷射面积 (mm^2)，$\triangle P$ 为油嘴两边压力差 (MPa), ρ 为高压侧燃油密度 (mg/mm^3)。油嘴最大喷射面积的取值需要比较针阀下底面与圆锥之间圆环的面积 S_0 与喷孔的面积 S_1，即

$$B = \begin{cases} S_0 & S_0 \le S_1 \\ S_1 & S_0 > S_1 \end{cases} \quad 且 \quad \begin{cases} S_0 = \pi(r^2 - r_0^2) \\ S_1 = \pi r_0^2 \end{cases} \tag{40}$$

假设喷油嘴低压侧压力为标准大气压 $P_{标准} = 0.1$MPa，油管内压力为 P，则 $\triangle P = P - P_0$。用划分时间间隔的方法求解各变量，将区间 i 上油管压力 $P_{管}^i$ 代入式 (34) 中求得此时油管中的燃油密度 ρ_i，再由式 (39) 得到喷油嘴的流量 $Q_{喷出}^i$。则

$$V_{喷出} = \sum_{i=1}^{n} Q_{喷出}^i \triangle t \quad , \qquad n = \lfloor \frac{t}{0.01} \rfloor + 1 \tag{41}$$

6.4 凸轮角速度与高压油管内压力的关系

为使得高压油管内的压力尽可能稳定在 100 MPa 左右，令

$$SSR = \sum_{i=1}^{n} (P_{管}^i - 100)^2 \quad , \qquad n = \lfloor \frac{t}{0.01} \rfloor + 1 \tag{42}$$

其中，$t = 10s$。故凸轮的最优转速为各时刻压力与 100 MPa 的残差平方和 SSR 最小时。由此建立单目标优化模型，目标函数为

$$min \quad SSR \tag{43}$$

用模拟退火算法求解，得到最佳角速度 $\omega = 26.569 rad/m$，目标函数值 $SSR = 272.99$。油管内压力随时间变化如图13所示，从图中可以看出，管内压力在 100MPa 上下小幅度波动，且最大偏移量不超过 0.2MPa，说明凸轮在该角速度下可以保证油管内稳定在 100MPa 左右。

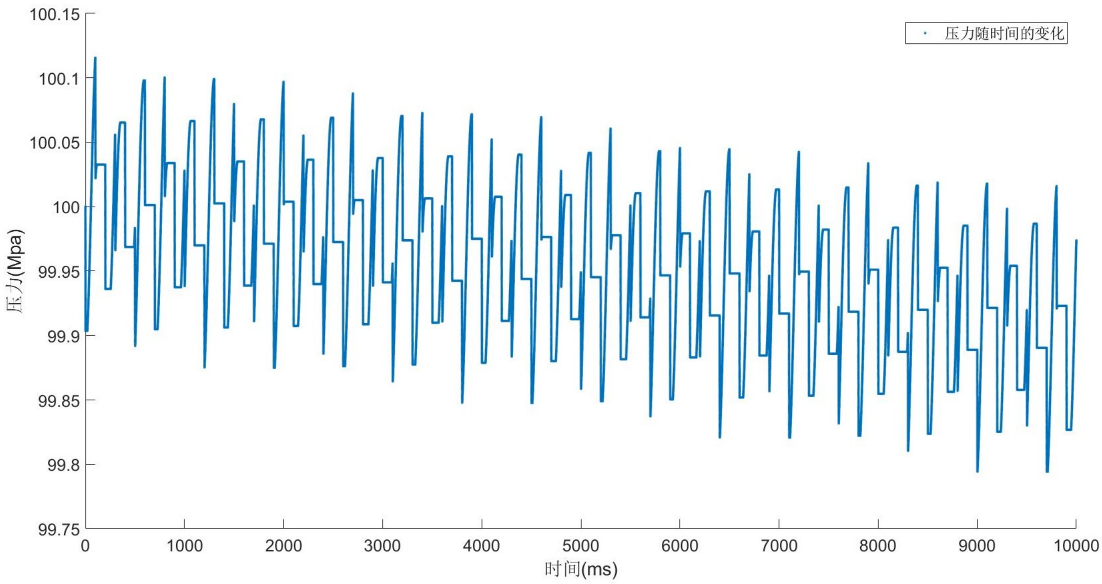


图 **13**　油管内压力随时间变化示意图

七、 问题三的求解

7.1 模型的建立与求解

八、 灵敏度检验

九、 模型的评价

9.1 模型的评价

9.1.1 模型的优点

9.1.2 模型的缺点

十、 模型的改进

1、传感器计算该开启时间下 10 s 内各时刻的油管压力并作压力随时间变化的图像，可以看出管内压力总体呈上升趋势，但偏离 100 MPa 的最大值仅为 100.7 MPa，

2、流量系数 C 的取值

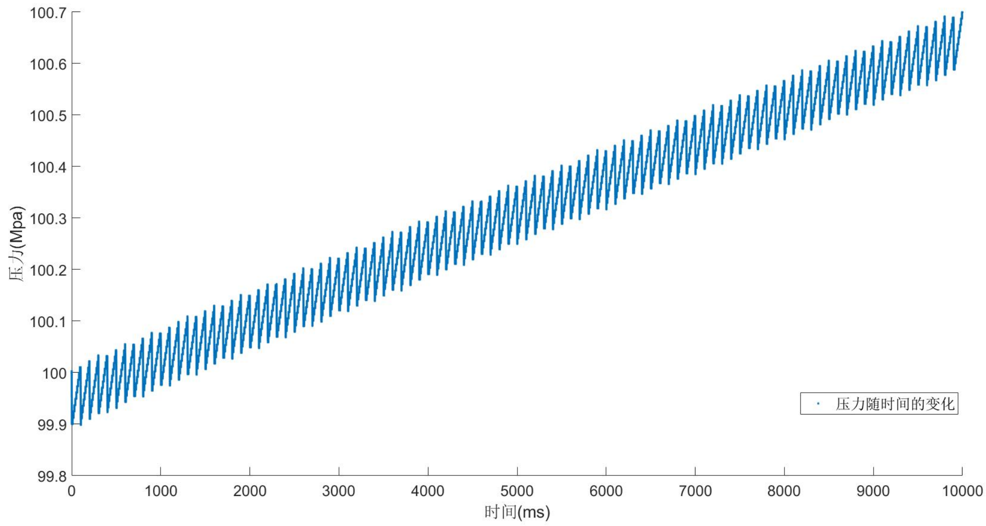


图 **14　10s** 内压力随时间变化示意图

3、修正高压油管内的密度

十一、 参考文献

[1] 曾文军, 曾小雨, 郑娟, 朱金伟. 多雷达定位误差简析 [J]. 高等函授学报 (自然科学版), 2008(05):57-59.

[2]

附录 A 引用

问题一要求我们根据 CMA 热带气旋最佳路径数据集和**其他相关资料**，对中国各省（以地级市为单位）**进行**进行热带气旋的风险评估。首先统计出 1949 年-2018 年登录我国沿海各省份的热带气旋数量，并选取其中登录次数最多的四个省份作为评估对象。**其次确定**评定热带气旋风险等级的八个因素：**受热带气旋**影响过程中的平均降雨量、**日最大**降雨量、平均风速、日最低气压、热带气旋的登陆频次、持续时间、造成的人员伤亡数和直接经济损失。接着确定四个热带气旋风险等级分别为：灾情较轻，灾情一般，灾情较重，灾情严重。由于对热带气旋风险的评估属于模糊决策，故采用模糊综合评价法求出各省受热带气旋影响的评价结果。[1] 最后在四个受灾最严重的省份中各选取四个典型城市，采用相同的方法进行风险评估，并结合地理、气候因素分析其对风险等级的影响。

附录 B 排队算法–matlab 源程序

```
kk=2;[mdd,ndd]=size(dd);
while ~isempty(V)
[tmpd,j]=min(W(i,V));tmpj=V(j);
for k=2:ndd
[tmp1,jj]=min(dd(1,k)+W(dd(2,k),V));
tmp2=V(jj);tt(k-1,:)=[tmp1,tmp2,jj];
end
tmp=[tmpd,tmpj,j;tt];[tmp3,tmp4]=min(tmp(:,1));
if tmp3==tmpd, ss(1:2,kk)=[i;tmp(tmp4,2)];
else,tmp5=find(ss(:,tmp4)~=0);tmp6=length(tmp5);
if dd(2,tmp4)==ss(tmp6,tmp4)
ss(1:tmp6+1,kk)=[ss(tmp5,tmp4);tmp(tmp4,2)];
else, ss(1:3,kk)=[i;dd(2,tmp4);tmp(tmp4,2)];
end;end
dd=[dd,[tmp3;tmp(tmp4,2)]];V(tmp(tmp4,3))=[];
[mdd,ndd]=size(dd);kk=kk+1;
end; S=ss; D=dd(1,:);
```

附录 C 长表格

表 **2 abcd**

增益介质	功率	波长
HeNe	000	
HeNe	1mW	633nm
000	1mW	633nm
	1mW	633nm
HeNe	1mW	633nm
HeNe	1mW	633nm
HeNe	1mW	633nm
HeNe	1mW	633nm
HeNe	1mW	633nm
HeNe	1mW	633nm
HeNe	1mW	633nm
HeNe	1mW	633nm
HeNe	1mW	633nm
HeNe	1mW	633nm
HeNe	1mW	633nm
HeNe	1mW	633nm
HeNe	1mW	633nm
HeNe	1mW	633nm
HeNe	1mW	633nm
HeNe	1mW	633nm
HeNe	1mW	633nm
HeNe	1mW	633nm
HeNe	1mW	633nm
HeNe	1mW	633nm
HeNe	1mW	633nm
HeNe	1mW	633nm
HeNe	1mW	633nm
HeNe	1mW	633nm
HeNe	1mW	633nm
HeNe	1mW	633nm
HeNe	1mW	633nm

表 **2**　**abcd(绪)**

增益介质	功率	波长
HeNe	1mW	633nm
HeNe	1mW	633nm
HeNe	1mW	633nm

附录 D　表格

省份	城市			
浙江	杭州	湖州	金华	丽水
福建广东海南	福州	厦门	宁德	福鼎
	徐闻	广州	汕头	湛江
	三亚	东方	儋县	海口

表 **3**　风险评估对象（地级市）

附录 E　图片

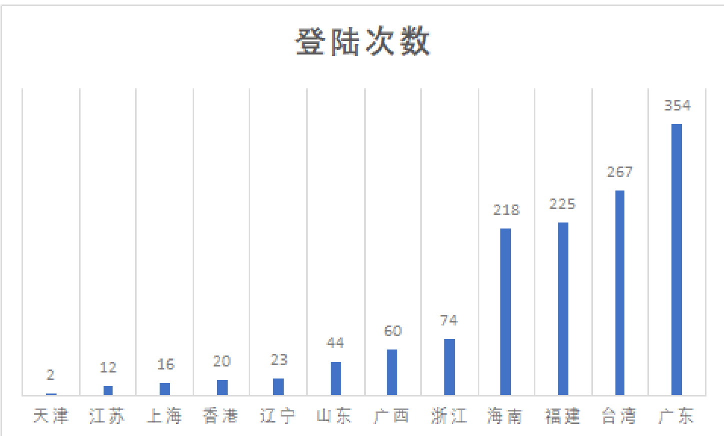


图 **15**　**1949** 年到 **2018** 年我国沿海各省份热带气旋的登陆次数柱状图

附录 F　并排图片、表格

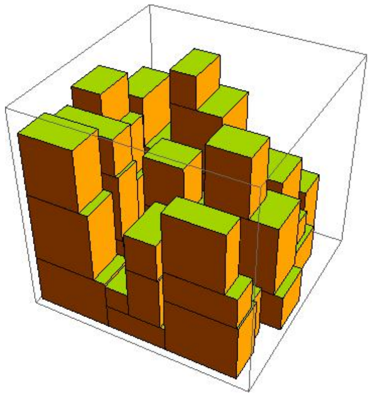


图 **16　2**

表 **4　3**

a	b	c
1	2	3

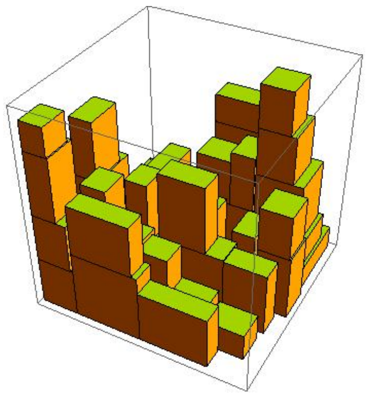


图 **18　1**

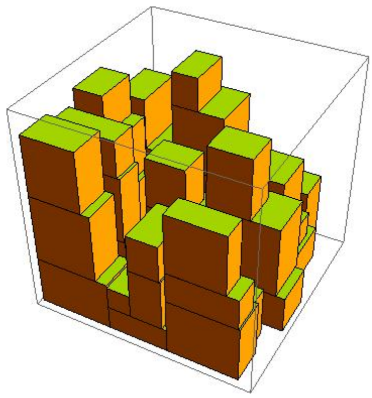


图 **19　2**

附录 G　数学公式

$$\sum_{n=1}^{N} a_n \tag{44}$$

$$\begin{matrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & \cdots & r_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{81} & \cdots & r_{8n} \end{matrix} \quad \begin{pmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & \cdots & r_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{81} & \cdots & r_{8n} \end{pmatrix} \quad \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & \cdots & r_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{81} & \cdots & r_{8n} \end{bmatrix} \tag{45}$$

$$\begin{Bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & \cdots & r_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{81} & \cdots & r_{8n} \end{Bmatrix} \quad \begin{vmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & \cdots & r_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{81} & \cdots & r_{8n} \end{vmatrix} \quad \begin{Vmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & \cdots & r_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{81} & \cdots & r_{8n} \end{Vmatrix} \tag{46}$$