

Optimal Model of Pressure Control of High-Pressure Tubing Based on Genetic Algorithm

Ziyu Yao

School of Mathematics, Liaoning University, Shenyang Liaoning
Email: zyzbrightshine@163.com

Received: Apr. 7th, 2020; accepted: Apr. 20th, 2020; published: Apr. 27th, 2020

Abstract

High-pressure fuel pipes are an important part of fuel engines. Controlling the pressure change caused by the high-pressure fuel pipe in and out of the fuel to stabilize the pressure change is an important means to improve the working efficiency of the fuel engine. This paper focuses on the modeling and analysis of high-pressure tubing oil pressure control with two injectors, and considers the alternate working time interval and cam rotation speed of the two injectors, and uses the alternate interval t and the speed increase k as decision variables. The variable range was used as a constraint condition, and the difference between the pumped oil volume and the discharged oil volume per unit time was specified as the objective function. An optimization model was established, and the genetic model was used to solve the optimization model.

Keywords

Genetic Algorithm, Optimization Model, High-Pressure Tubing Pressure Control

基于遗传算法的高压油管压力控制的优化模型

姚子昱

辽宁大学, 数学院, 辽宁 沈阳
Email: zyzbrightshine@163.com

收稿日期: 2020年4月7日; 录用日期: 2020年4月20日; 发布日期: 2020年4月27日

摘要

高压油管是燃油发动机的重要组成部分。通过控制高压油管进出燃油产生的压力变化, 使其压力变化稳

定是提升燃油发动机工作效率的重要手段。本文针对含有两个喷油嘴的高压油管油压控制的问题进行建模分析,从两喷油嘴交替工作时间间隔与凸轮转速两方面进行考虑,以交替间隔 t 与转速增幅 k 作为决策变量,以变量范围作为约束条件,规定最小化单位时间泵入油量与喷出油量的差值为目标函数,建立了优化模型,并利用遗传算法对优化模型进行了求解。

关键词

遗传算法, 优化模型, 高压油管压力控制

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

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,发动机高压油管承担着给发动机输送高压燃油的任务。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,如果油管内压力控制不稳定,高压油管将会出现开裂,引起漏油,不仅对发动机整机可靠性产生不利影响,而且,高压燃油喷射泄露后,极有可能与发动机高温部件接触,导致严重的火灾事故。因此要求油管需要承受一定的油压而且有一定的疲劳强度,维持其压力稳定变得重中之重,从而提高发动机的工作效率。本文主要解决以下几个问题:

- 1) 在只有一个喷油嘴的高压油管油压控制问题基础上,我们再增加一个喷油嘴,喷油嘴规律相同,调整喷油嘴和供油策略应使高压油管内部压强恒定在 100 MPa,给出调整策略。
- 2) 在(1)的条件下安装一个单向减压阀,求试给出高压油泵和减压阀的控制方案,使高压油管内部压强恒定在 100 MPa。

2. 模型建立与模型求解

2.1. 问题分析

问题三是在问题二的基础上进行改进的。问题三可分为两个部分进行讨论:“双喷油嘴优化模型”与“增加了减压阀的双喷油嘴优化模型”。

针对双喷油嘴模型:题目在第二问的基础上增加了一个喷油嘴,要求调整喷油策略与供油策略来对高压油管进行稳压。其中,新增加的喷油嘴与问题二喷油嘴的喷油规律相同(即喷油频率相同)。为了使高压油管内的压力尽量稳定在 100 MPa,我们从供油和喷油两方面进行考虑:首先我们对喷油嘴的喷油顺序进行了调整,假设 B 喷油嘴先进行喷油,则 B 喷嘴喷油结束后到 C 喷油开始前存在一定的时间间隔,设为 t 。在这段时间间隔内高压油泵的供油量 Q 与 t 成正相关。其次对于高压油泵的供油装置,我们对凸轮的角速度进行了调整,设其增大倍数为 k ($k > 1$)。计算出经过上述调整后的 M_{out} 与 M_m 的数学表达,将两者的差值作为目标函数,最佳喷油时间间隔 t 作为决策变量,至此我们建立出了高压油管内部质量变化对于决策变量 t 的优化模型。我们使用遗传算法对该优化模型进行了求解,得到了最佳稳压时间间隔 t ,进而通过 t 与 k 的关系进一步确立了最佳倍数 k 。

针对增加了减压阀的双喷油嘴模型[1]:对高压油管系统进行机理分析,在连续的工作过程中,存在离散的两个喷嘴同时闭合的时间段,对于这些双喷嘴闭合的时间段单向减压阀 D 起到了降低油管内压力

的作用，这样以便于更好地控制高压油管内的压力的稳定。针对减压阀这一改进措施的出现，我们对双喷油嘴优化模型进行了改进，在保持相同决策变量的基础上，在目标函数中增加了加压阀 D 的影响，建立出了高压油管内部质量变化对于决策变量 t 的优化模型[2]，使用遗传算法对该优化模型进行了求解，得到了最佳稳压时间间隔 t 与最佳倍数 k 。

2.2. 双喷油嘴优化模型

2.2.1. 遗传算法原理[2]

遗传算法[3]是一种基于自然选择和一种遗传变异等生物进化机制的全局性概率搜索算法，其主要特点是直接对结构对象进行操作。具有内在的隐并行性和更好的全局寻优能力；采用概率化的优化方法，从选定的初始解出发，通过不断迭代逐步改进当前解，直到最后搜索到最优解或最满意解。使用遗传算法对规划类问题进行求解可以有效地避免结果陷入局部最优，从而求得最满意的全局最优解[4]。

2.2.2. 双喷油嘴优化模型的建立

首先我们对目标函数进行确定，我们将高压油管内燃油变化量作为目标函数

$$\arg \min |M_{in} - M_{out}|$$

参考前两问建立的模型，对喷油总质量 M_{out} 有

$$M_{out} = \rho(100 \text{ MPa}) * C * A \sqrt{\frac{2(100 - 0.01)}{\rho(100 \text{ MPa})}} * 2.45 * n$$

其中，喷油嘴的喷油次数 $n = 1\text{s}/100\text{ms} = 10$ ，则两个喷油嘴在 1 s 内喷油次数为 20 次对进油总质量 M_{in} 有

$$M_{in} = [\rho(0.5 \text{ MPa}) * (\pi * 2.5^2 * (R_{\max} - R_{\min}) + 20) - \rho(100 \text{ MPa}) * 20] * f_1$$

其中 f_1 代表第二问条件下凸轮角速度增大 k 倍后的频率

$$f_1 = \frac{k\omega}{2\pi}$$

对于 t 时间内喷油次数 f_2 ，我们假设 B 喷油嘴开始喷油到结束喷油的时刻 m 与 C 喷油嘴开始喷油的时刻 n 之间的时间间隔为 t ，则 t 时间内喷油次数 f_2 有如下数学形式

$$f_2 = \frac{\omega^2 t}{4\pi^2}$$

对于凸轮角速度增加倍数 k ，我们建立了 k 与 t 的函数关系 $k(t)$ ，推导过程如下：

凸轮原始周期 $T = \frac{2\pi}{\omega}$ ，可推出原始频率 $f = \frac{\omega}{2\pi}$ ，在 t 时间段内对应频率 $f_1 = \frac{km}{2\pi}$ ，故 $f_1 = f_2 = \frac{m^2 t}{4n^2}$ ，

至此我们建立出了角速度增大倍数 k 与喷油间隔 t 之间的函数关系 $k(t) = \frac{\omega t}{2\pi}$

由针阀运动与时间的关系得到针阀进行一次开启(上下一个升程)的时间为 2.46 ms，故我们可以得到决策变量 t 的范围

$$\arg \min |M_{in} - M_{out}|$$

$$\text{s.t. } 0 < t_0 < 97.54 \text{ ms}$$

使用遗传算法对双喷油嘴优化模型进行求解，最终得到，当喷油间隔 $t = 0.39 \text{ ms}$ ， $k = 31.6$ 时，可以使高压油管内燃油变换量达到最小，进而达到最佳稳压效果。但是由于 k 值略大，在实际工作过程中过

多地增大角速度的值可能会消耗生产成本，因此本题中的第二部分在原有的基础之上在增添了单向减压阀 D，减压阀 D 可在喷油嘴未喷油时降低高压油管内的压力，从而达到更好地减压效果。

2.3. 增加了减压阀的双喷油嘴优化模型

经过机理分析可知，减压阀的主要作用是在两喷油嘴都未工作的时间间隔内对高压油管进行减压，此时油管内气体只能通过减压阀进行减压。我们对双喷油嘴优化模型的目标函数进行了调整，得到了增加了减压阀的双喷油嘴优化模型的目标函数，形式如下

$$\arg \min |M_{in} - M_{out}|$$

在上一问的基础上，假设 p 时间段内减压阀工作而两个喷油嘴不工作，则 $p = 100 - 2.45 \times 2 = 95.1(\text{ms})$ ，此时需要调整凸轮的角速度为原来(上一问结论)的 k_1 倍 ($0 < k_1 < 1$)，来减少泵入的燃气体积，此时凸轮的频率调整为

$$f_3 = k_1 f_1 = \frac{k_1 k \omega}{2\pi}$$

对于泵入油管燃油质量，我们有

$$M_{in} = \left[\rho(0.5 \text{ MPa}) * (\pi * 2.5^2 * (R_{\max} - R_{\min}) + 20) - \rho(100 \text{ MPa}) * 20 \right] * f_3$$

对于喷油总质量，我们有

$$M_{minish} = \rho(P_2) * C * A * \sqrt{\frac{2(100 - P_2)}{\rho(100)}} (t_0 + 2 * 2.45) + M_{out}$$

其中 P_2 是指减压阀外侧的压强。

根据模型机理，我们构建了下述约束条件：

$$0 < t_0 < 97.54 \text{ ms}$$

$$0 < k_1 < 1$$

综上所述推导，我们最终建立了增加了减压阀的双喷油嘴优化模型的数学表达形式

$$\arg \min |M_{in} - M_{out}|$$

$$0 < t_0 < 97.54 \text{ ms}$$

$$0 < k_1 < 1$$

使用遗传算法对增加了减压阀的双喷油嘴优化模型进行了求解，最终得到当 $t_0 = 0.84$ ， $k_1 = 0.79$ ，即凸轮转速增幅为 $0.79 \times 31.62 \approx 24.96$ 可以达到喷油总质量与进油总质量之差的绝对值最小，即为 0，此时单向减压阀 D 内的压力为 $P_2 = 99.78$ 。说明只要减压阀外侧压力只要小于高压油管内部压力，我们的模型即是合理的。这一部分可以看出通过增添单向减压阀可以更好地控制油管内的压力，还能适当降低生产成本。

3. 总结

本模型对复杂的实际问题进行了合理简化，将复杂的函数关系转化为简洁的函数表达，如对 $\rho(p)$ 函数关系的逼近。在对针阀升程与时间的函数使用 Sigmoid 函数进行了最小二乘拟合，拟合效果非常好。在对第三问的优化模型进行求解时，我们选择了遗传算法作为求解工具，可以避免结果陷入局部最优，从而获得全局最优解。

参考文献

- [1] 蔡梨萍. 基于 MATLAB 的柴油机高压喷油过程的模拟计算[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [2] 王健, 赵国生. MATLAB 数学建模与仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2017: 598-599.
- [3] 司守奎, 孙兆亮. 数学建模算法与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2019: 91-98, 327-336.
- [4] 张志涌, 杨组樱. MATLAB 教程[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2015: 51-68.