

基于 MOSA 算法的高压共轨喷油器多目标仿真优化设计*

熊庆辉 张幽彤

(北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081)

【摘要】建立了高压共轨喷油器的 Matlab/Simulink 仿真模型,采用多目标模拟退火 MOSA 优化算法作为寻优策略,以针阀开启延迟和关闭延迟为目标函数进行高压共轨喷油器的关键结构参数多目标仿真优化设计。实验结果表明:优化后的高压共轨喷油器针阀开启延迟时间降低 16.7%,达到 0.25 ms;关闭延迟时间降低 15.2%,达到 0.78 ms。

关键词: 喷油器 高压共轨 模拟退火 多目标优化

中图分类号: TK413.8⁺4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)01-0027-04

Multi Optimization Simulation Design of a High Pressure Common Rail Injector Based on MOSA Algorithm

Xiong Qinghui Zhang Youtong

(School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract

A precise model for the common rail fuel injector based on the Matlab/Simulink was built. Using the multi objective simulated annealing algorithm as the search strategy, the key injector parameters were optimized. The aim function of the multi objective optimization was the opening delay and the closing delay. The results showed that the delay of the opening was 0.25 ms which reduced by 16.7%; while the delay of the closing was 0.78 ms, which reduced by 15.2%.

Key words Injector, High pressure common rail, Simulated annealing, Multi-objective optimization

引言

目前国内电控喷油器的优化设计主要还是依靠设计者经验或已有方案基础上的改进设计,然后通过样品试制和样品性能试验对优化程度进行验证,这种优化设计体系效率较低,浪费了大量的时间和精力;同时由于高压液力系统的复杂性,很难得到最优设计方案。所以,越来越多的研究人员通过数值计算方法对喷油器的特性进行分析^[1~6],但是没有涉及高压共轨电控喷油器的关键部件的关键参数对喷油特性影响的多目标性进行完善地分析,没有采用较合适的多目标优化解搜索算法进行优化,因此得到的优化解存在局部性和早熟性。

本文利用多目标模拟退火 MOSA (multi objective simulated annealing)算法作为寻优策略,给出一种针对高压共轨喷油器整体响应性能优化方法,以针阀开启延迟和关闭延迟为目标函数建立多目标优化模型,对电控喷油器的关键结构参数进行优化设计。

1 高压共轨喷油器仿真模型

1.1 工作原理

图 1 所示为高压共轨喷油器结构图,高压燃油由高压泵到共轨管,再进入喷油器后分成两路:一路通向控制活塞上的控制腔;另一路通向针阀处的蓄压腔。电磁阀未通电时,衔铁被弹簧压紧在球阀座

收稿日期: 2010-01-21 修回日期: 2010-03-01

* 国防重点预先研究项目(40402030205)

作者简介: 熊庆辉,博士生,主要从事发动机工作过程仿真及电子控制研究,E-mail: xiong.qinghui@gmail.com

上,控制室内的高压燃油被密封,由于控制室和蓄压腔压力相等,针阀受到向下的压力大于向上的力,针阀处于关闭状态,此时无燃油喷出;电磁阀通电后,衔铁抬起,控制室内的高压燃油快速泻出,针阀在很短的时间内由于向上的力大于向下的力而快速抬起,此时喷出高压燃油。在控制脉宽过后,电磁阀关闭,控制室内的压强重新建立,达到一定压力后,针阀重新关闭,整个喷油过程最多持续 3 ~ 4 ms。

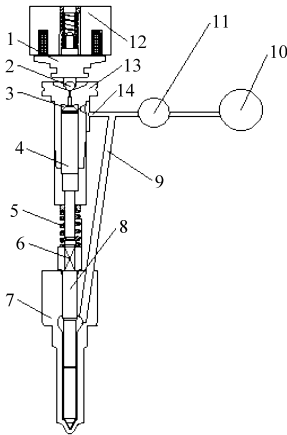


图 1 电控喷油器原理图

Fig. 1 Theory chart of electronic controlled injector

1. 衔铁 2. 钢球 3. 控制室 4. 控制活塞杆 5. 针阀弹簧
6. 挺杆 7. 针阀座 8. 针阀 9. 蓄压腔高压油路 10. 高压泵
11. 共轨管 12. 控制室高压油路 13. 控制活塞套 14. 电磁阀

其中控制活塞的进、出油量孔直径、控制活塞杆质量和针阀质量对喷油器的响应特性有重要影响,良好的参数匹配是提高喷油器响应特性的必要手段。

1.2 数值仿真建模

首先需要建立喷油器关于开启延迟和关闭延迟的求解数值仿真模型,建立该模型是为了针对不同的结构参数输入,模拟喷油器喷射过程,从而以量的形式预测喷油器的响应,所以模型的优劣直接关系到不同结构参数下的喷油器响应输出,并最终决定优化效果。

使用 Simulink 进行喷油器建模,研究建立的喷油器子模型如图 2 所示。模型中充分考虑了油孔处的阻尼效应和柴油的可压缩性,提高了仿真精度。

为了证明此计算模型可以用于对高压共轨喷油器响应进行模拟计算,对其在轨压 120 MPa,脉宽 1 000 μs 工况下,进行了喷油规律的仿真结果与实验结果对比,喷油规律实验用法国 EFS8420 型单次喷射仪进行测试。图 3 所示为此工况的喷油规律仿真和实验对比曲线。

从图 3 可以得出,仿真模型较好地模拟了电控喷油器在不同工况下的喷油规律,其中,仿真值较实

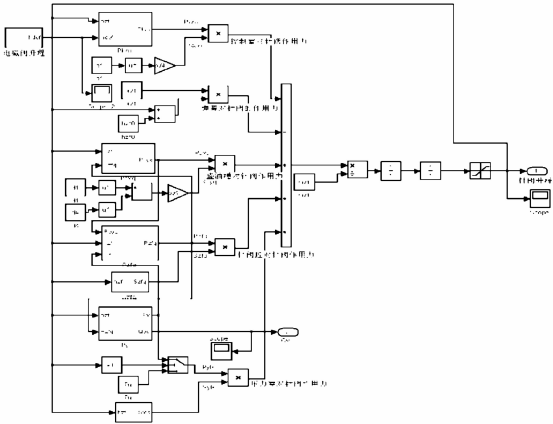


图 2 喷油器子模型

Fig. 2 Sub-model of the injector

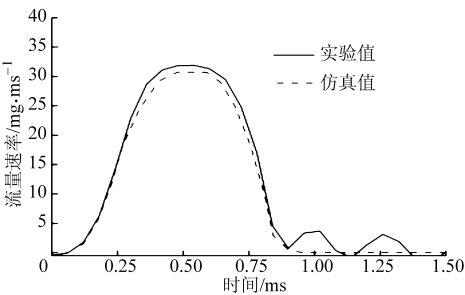


图 3 仿真与实验喷油率对比曲线

Fig. 3 Difference between the simulation and the test

验值略小,是由于在模型中没有建立测试系统的详细模型,仅以流量传感器的型式给出,而实测喷油规律时,燃油高速喷入测试腔内,会带动原来静止的燃油;关闭喷油时,运动的燃油也需一段时间静止,所以测试流量要大于仿真值,且在关闭时有一定延迟。

2 高压共轨喷油器多目标优化

2.1 多目标优化数学模型

本研究优化目标是开启延迟时间 $f_{\text{delay_start}}(\mathbf{x})$ 和关闭延迟时间 $f_{\text{delay_close}}(\mathbf{x})$ 的最小化,关键结构优化参数有:进油量孔直径 d_i 、出油量孔直径 d_o 、控制活塞腔容积 V 、控制活塞杆质量 m_{pis} 、针阀质量 m_{needle} 、和泄油孔直径 d_d (决定背压腔压力),数学描述为

minimize $f_{\text{delay_start}}(\mathbf{x})$
maximize $-f_{\text{delay_close}}(\mathbf{x})$

约束条件: $g_i(\mathbf{x}) \geq 0; h_i(\mathbf{x}) = 0; (i = 1, 2, \dots, n)$, 其中 $\mathbf{x} = (d_i, d_o, V, m_{\text{pis}}, m_{\text{needle}})^T$, $f_i(\mathbf{x})$ 为第 i 个目标函数, $\mathbf{x}$ 为设计变量, g, h 分别为不等式和等式约束条件。

根据控制室内压力变化,优化过程的约束条件为:进油量孔直径 d_i 和出油量孔直径 d_o 受条件 $d_i - d_o < 0$ 约束,只有满足这样的约束,控制活塞才可以正常抬起。

2.2 多目标模拟退火遗传算法 MOSA

模拟退火(SA)算法,是源于热力学中对退火过程的模拟,在一个给定初温下,通过温度下降参数,使算法能够给出一个近似最优解。表 1 所示为组合优化问题的求解与物理退火过程的对应概念。

模拟退火算法在求解优化问题时不要求函数连续、可微,也不需要函数的导数值,特别适合于高压共轨喷油器这类非线性系统的优化问题。1983 年, Kirkpatrick 等提出了现代的 SA 算法^[7],并成功地解决了大规模的组合最优化问题,但是只用于单目标优化,2003 年 Enrico 根据 Pareto 优化前沿的概念,借用量子化理论,对传统的 SA 算法能量函数进行了改进,不但继承了传统模拟退火算法可避免优化早熟和避免局部优化的优点,更使其适用于多目标优化^[8-10],主要流程如图 4 所示。

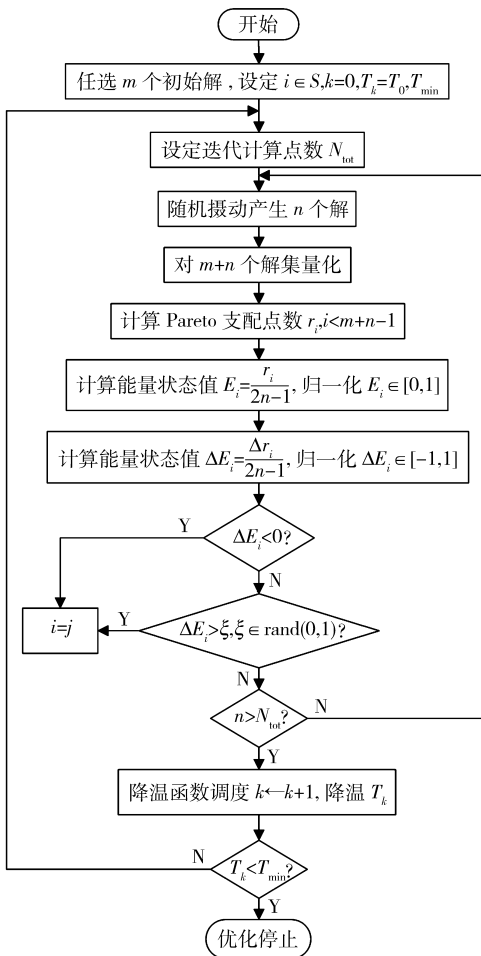


图 4 喷油器 MOSA 优化流程图

Fig.4 Flow chart of MOSA optimization of injector simulation

2.3 多目标优化仿真实现

本研究的多目标优化整个流程包括数据流程和逻辑流程。数据流程将输入变量通过 M 文件导入至喷油器子模型中进行喷油规律计算,并输出目标

变量开启延迟时间和关闭延迟时间到优化求解模型中进行多目标优化。逻辑流程主要是指由一个主 M 文件调用喷油器仿真模型和目标函数计算模型,并在优化求解函数中进行优化。

3 多目标优化结果与分析

根据以上分析,将优化解集数据进行处理,可以得到高压共轨喷油器多目标优化非支配性解集,从图 5 所示的优化目标模拟结果图中可以选出符合当前双目标函数的 Pareto 最优解集前沿。

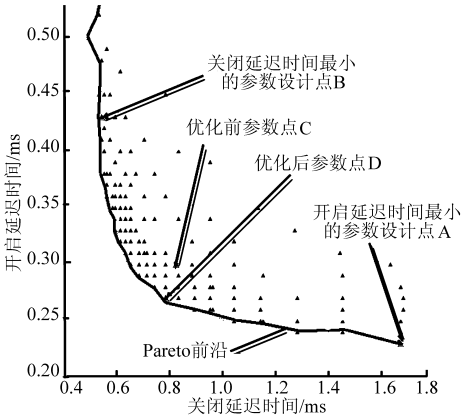


图 5 多目标 Pareto 优化解集

Fig.5 Multi-optimization Pareto results

根据不同的设计要求,通常选择 Pareto 前沿上的不同点作为设计点,此处根据最优解集选取开启延迟时间最小的优化参数设计点,如图中 A 点所示,B 点为关闭延迟时间最小的优化参数设计点。C 点为优化前设计点,根据择优准则,选择距离原点最近的 D 点为优化后设计点,虽然其开启延迟时间不如 A 点,关闭延迟时间不如 B 点,但是对于喷油器整体响应性影响 D 点是较好点。在优化解的选择上,要根据实验结果或者理论分析结论进行取舍。

表 1 列出了优化前、后设计参数,表 2 所示为优化前、后开启延迟时间和关闭延迟时间的数值。

表 1 优化前后参数

Tab.1 Parameters difference between optimization						
目标	进油量	出油量	泄油孔	控制室	控制活	针阀
	孔直径	孔直径	直径	容积	塞质量	质量
	/mm	/mm	/mm	/mL	/g	/g
优化前	0.20	0.30	2.0	0.02	6.98	4.05
优化后	0.23	0.29	2.5	0.03	6.67	3.04

表 2 多目标优化结果

Tab.2 Results after multi-object optimization		
目标	开启延迟时间/ms	关闭延迟时间/ms
优化前	0.30	0.92
优化后	0.25	0.78
改进程度/%	16.7	15.2

按照优化后参数进行样品试制,经 EFS 单次喷射喷油规律实验测试得优化前后喷油器规律对比曲线,如图 6 所示。图中也包含控制信号,此时轨压为

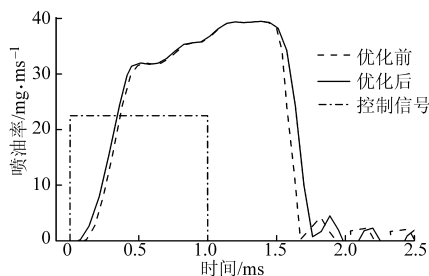


图 6 优化前、后喷油率曲线对比

Fig. 6 Flow rate difference between the before and after optimization

120 MPa,脉宽 1 ms,一次喷射。可以看出优化后开启延迟时间和关闭延迟时间有效减少,同时优化后喷油器开启时喷油率斜率有下降,从而使得发动机燃烧更加柔和,有利于减小噪声。

4 结论

(1) 建立了高压共轨喷油器仿真模型,充分考虑了阻尼因素和燃油可压缩性的影响,经过实验验证,提高了模型精度。

(2) 使用多目标模拟退火优化算法 MOSA 对高压共轨电控喷油器响应特性进行了优化设计,实验结果表明,开启响应延迟时间降低了 16.7%,关闭响应延迟时间降低了 15.2%。

参 考 文 献

- Bianchi G M, Pelloni P, Filicori F, et al. Optimization of the solenoid valve behavior in common-rail injection system[C]. SAE Paper 2000-01-2042, 2000.
- Bianchi G M, Falfari S, Parotto M. Advanced modeling of common rail injector dynamics and comparison with experiments [C]. SAE Paper 2003-01-0006, 2003.
- Bianchi G M, Falfari S, Pelloni P. A numerical and experimental study towards possible improvements of common rail injectors[C]. SAE Paper 2002-01-0500, 2002.
- 何志霞,李德桃,胡林峰,等. 柴油机高压共轨喷油系统内的瞬变流动研究[J]. 农业机械学报, 2004, 35(1): 48~51.
He Zhixia, Li Detao, Hu Linfeng, et al. Study of transient flow in a common rail injection system of diesel engine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(1): 48~51. (in Chinese)
- Teresa Donato, Arturo de Risi, Domenico Laforgia. Optimization of high pressure common rail electro-injector using genetic algorithms[C]. SAE Paper 2001-01-1980, 2001.
- 丁晓亮,张幽彤,熊庆辉. 压电式高压共轨喷油系统喷油量波动特性试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 11~14.
Ding Xiaoliang, Zhang Youtong, Xiong Qinghui. Investigations into multiple-injection fuel quantity fluctuation for high pressure common rail system with piezo-actuated injector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 11~14. (in Chinese)
- Kirkpatrick S, Gelatt C D, Vecchi J. Optimization by simulated annealing[J]. Science, 1983(220): 671~680.
- Ahmed M A, Alkhamis T M. Simulation-based optimization using simulated annealing with ranking and selection[J]. Computers and Operations Research, 2002, 29(4): 387~402.
- Enrico R. MOSA-multi objective simulated annealing[R]. Esteco Technical Report, 2003-003, 2003.
- Phil Stephenson, Yang Chen. Multi-objective optimization of a charge air cooler using mode FRONTIE-R [C]. SAE Paper 2008-01-0886, 2008.

(上接第 26 页)

- Marco Coppo, Claudio Dongiovanni, Claudio Negri. Numerical analysis and experimental investigation of a common rail-type diesel injector [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2004, 126(4): 874~885.
- Mirko Baratta, Andrea Emilio Catania, Alessandro Ferrari. Hydraulic circuit design rules to remove the dependence of the injected fuel amount on dwell time in multijet CR systems[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2008, 130(12): 121~104.