

高压共轨喷油器多目标优化仿真研究

The Multi-Objective Optimizing Simulation Research of a Common Rail Injector

熊庆辉¹, 张晓琨², 王定标³

(1. 北京理工大学清洁车辆实验室, 北京, 100081; 2. 西迪阿特科技(上海)有限公司, 上海, 100020;
3. 郑州大学化学工学院, 郑州, 450002;)

摘 要: 高压共轨喷油器的关键结构参数对喷油器的响应特性具有决定性影响, 采用多目标模拟退火优化算法 MOSA (Multi Objective Simulated Annealing), 基于多目标多学科优化平台 modeFRONTIER, 并集成液压仿真分析软件 AMESim, 以针阀开启延迟和关闭延迟为目标函数建立了多目标优化模型, 对电控喷油器的关键结构参数进行多目标优化设计。结果表明: 针阀开启延迟时间降低了 20%, 达到 0.24ms; 关闭延迟时间降低了 17.4%, 达到 0.76ms。

关键词: modeFRONTIER, 高压共轨, 喷油器, MOSA, 多目标优化

Abstract: The key structural parameters of the common rail injector have large impact on the response time of the injector. This paper uses the MOSA (Multi Objective Simulated Annealing) method to optimize the parameters of the injector. The optimization is based on the multi-objective optimization platform, modeFRONTIER, also, integrated with the hydraulic simulation software, AMESim. The aim function is the delay of the opening and closing of the nozzle. The results show that the delay of the opening is 0.24ms which reduces 20%; while the delay of the closing is 0.76ms, which reduces 17.4%.

Key words: modeFRONTIER; common rail; injector; MOSA; Multi-objective optimization

引言

随着排放法规的日趋严格, 高压共轨电控燃油喷射系统是最具发展潜力的高压喷射系统, 电控喷油器作为高压共轨系统的核心部件^[1], 它的性能直接影响着高压共轨系统多次喷射和精确定时喷射的能力, 这就要求电控喷油器要达到尽量小的开启延迟和关闭延迟。

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, 浪费了巨大的时间和财力; 同时由于高压液力系统的复杂性, 很难得到最优设计方案群。所以, 越来越多的研究人员通过对高压共轨喷油器进行数值计算对喷油器的特性进行分析, G. M. Bianchi^{[2][3]}等人通过 Simulink 进行喷油器建模, 分析了控制活塞的关键尺寸对喷油规律的影响; 张建明^[4]和蔡珍辉^[5]等人使用液压仿真软件 AMESim 进行共轨喷油器建模, 充分分析了喷油器关键结构参数对喷油规律的影响, 后者还针对共轨喷油器电磁阀进行了详细建模; 王秀丽^[6]使用 GT-Fuel 软件对压电晶体喷油器进行了建模, 并修正了由于实验误差带来的模型失准, 但是以上这些工作中均对共轨喷油器进行单目标优化分析。李育学^[7]等人通过喷油器仿真模型结合多目标规划方法对喷油器的响应性和经济性进行了优化设计; 袁文华^[8]等人通过自适应粒子群优化算法结合 CFD 分析对仅对喷油器油嘴进行结构优化, 解决了气穴损失和喷雾效果双目标优化问题, 没有涉及喷油器控制阀部件的优化分析; Teresa Donateo^[9]等人通过遗传算法 (MOGA) 结合已有喷油器模型对喷油器进行了喷油率形状和喷油量的双目标优化, 但是采用的简单遗传算法作为寻优算法, 存在

早熟和局部优化的问题。

本文使用的多目标模拟退火 MOSA 算法可以很好的解决多目标优化中局部优化和优化早熟这两大问题，更为重要的是，给出了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了多目标优化模型，对电控喷油器的关键结构参数进行了优化设计。

1. 高压共轨喷油器多目标优化

1.1 高压共轨喷油器工作原理

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上，从而密封住控制室内的高压燃油，这样由于控制室和蓄压腔压强相等，针阀受到向下的压力大于向上的力，这样针阀关闭无燃油喷出；当电磁阀通电，衔铁抬起，从而控制室内的高压燃油快速泻出，因此针阀在很短的时间内由于向上的力大于向下的力，快速抬起，从而喷出高压燃油。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，整个喷油过程最多的持续时间有 3—4ms。

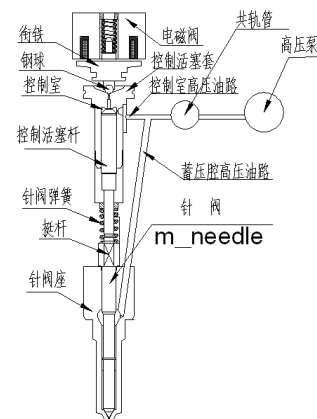


图 1 电控喷油器原理图

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性有重要影响^[4]，良好的参数匹配是提高喷油器响应特性的必要手段。

1.2 高压共轨喷油器数值仿真建模

为了对高压共轨喷油器的关键性能进行优化，应用多目标优化方法对高压共轨喷油器的关键结构参数进行优化设计，首先需要建立喷油器的关于开启延迟和关闭延迟的求解数值仿真模型，建立这个模型是为了针对不同的结构参数输入，可以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，并最终决定了优化的效果。

本文使用 Imagine 公司的 AMESim 软件^[10]对喷油器的喷油响应进行计算，本研究建立的喷油器模型如图 2 所示。

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 120MPa，脉宽 1000 μ s 工况下，进行了喷油规律的仿真结果与实验结果对比，喷油规律实验使用的是法国 EFS 公司第四代单次喷射仪 8420 进行测试。图 3 为其中 1 个工况的喷油规律仿真和实验对比曲线。

从图 3 可以得出，仿真模型较好的模拟了电控喷油器在不同工况下的喷油规律，其中，仿真值较实验值偏小，是由于在模型中没有建立测试系统的详细模型，只是以流量传感

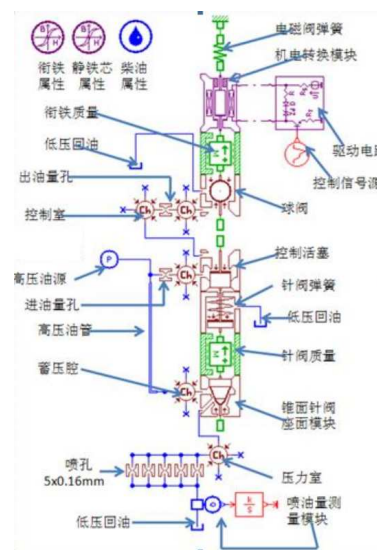


图 2 电控喷油器计算模型

器的型式给出,而实测喷油规律时,在燃油高速喷入测试腔

内,会带动原来静止的燃油,在关闭喷油时,运动的燃油静止也需一段时间,所以测试流量要大于仿真值,且在关闭时有一定延迟。

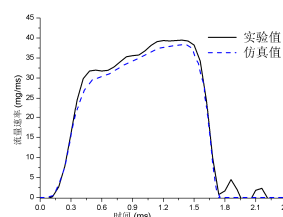


图3 轨压=120MPa,脉宽=1000us下的仿真与实验喷油率曲线对比

2 高压共轨喷油器多目标优化仿真

2.1 多目标优化数学模型

高压共轨喷油器具有较好的响应性主要体现在开启延迟时间和关闭延迟时间是否足够短,而喷油器开启和关闭延迟时间的优化构成一个双目标优化问题。

本研究优化目标是开启延迟时间 $f_{\text{delay_start}}(x)$ 和关闭延迟时间 $f_{\text{delay_close}}(x)$ 的最小化,优化参数有:进油量孔直径 d_{inlet} 、出油量孔直径 d_{outlet} 、电磁阀弹簧刚度 k 、控制活塞腔容积 V_{cv} 、控制活塞杆质量 m_{pis} 、针阀质量 m_{needle} 、和泄油孔直径 d_{drain} (决定背压腔压力)等关键结构参数作为优化参数,数学描述为:

$$\text{Minimize} \quad f_{\text{delay_start}}(x)$$

$$\text{Maximize} \quad -f_{\text{delay_close}}(x)$$

$$\text{约束条件: } g_i(x) \geq 0; h_i(x) = 0; (i = 1, 2, 3, \dots, n)$$

其中, $\mathbf{x} = (d_{\text{inlet}}, d_{\text{outlet}}, k, V_{\text{cv}}, m_{\text{pis}}, m_{\text{needle}})^T$, $f_i(x)$ 为第 i 个目标函数, x 为设计变量, g 、 h 分别为等式和不等式约束条件。

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_{inlet} 和出油量孔直径 d_{outlet} 受条件 $d_{\text{inlet}} - d_{\text{outlet}} < 0$ 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

根据以上分析,高压共轨喷油器优化是一个双目标多参数优化,而求解多目标优化问题的一个传统的、很自然的方法就是依据不同目标的重要程度,设定权重系数将多目标优化问题转化为单目标优化问题,然后用单目标优化问题的方法求解,在满足一定的条件下,转化后的单目标优化问题的最优解对应着原多目标优化问题的

Pareto 最优解,从而可用这些解近似原多目标优化问题的 Pareto 最优解,常用的转化方法有线性加权法和法^[11]、多目标规划法^[7]等。但是这

表1 优化问题与模拟退火概念对比

优化问题	解	目标函数	Metropolis 搜索	最优解	设定初始温度	温度下降函数
物理退火	状态	能量函数	等温过程	最低能量状态	加温过程	冷却过程

样的优化方法需要多次运行求解单目标优化问题的算法,由于这些运行求解过程相互独立,而且它们之间的信息无法共享,导致计算的开销很大,且得到的解有可能不可比表,使得决策者难以进行多目标决策,特别是对于像喷油器这样的函数性质不好的多目标优化问题,应用这些传统方法往往是不可行的。

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对应概念。

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, 这样的算法特别适合于高压共轨喷油器这样的非线性系统的优化问题。1983 年, Kirkpatrick 等人提出了现代的 SA 算法^[12], 并成功地利用它来解决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更改, 不但继承了传统模拟退火算法的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^{[13][14]}, 主要流程如下图 4 所示。

2.3 多目标优化仿真实现

本研究的多目标优化过程是在多目标多学科优化平台 modeFRONTIER 中完成的。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集成模块的数据接口导入^{[15][16]}, 在计算完成后导出数据进入下一个集成软件模块进行计算, 最后的输出变量为目标变量。逻辑流程包括集成的各个软件模块, 并通过调度器进行优化。初始数据由试验设计 (DOE) 中的 RANDOM 算法产生, 可以去除不满足约束条件的初始值, 初始值输入进 AMESim 进行计算, 之后在 M 函数中将目标函数计算用的中间变量导出, 并计算出目标函数。优化算法根据目标函数值进行选择降温过程和等温过程内优化解等操作, 从而达到优化目的。

3. 多目标优化结果与分析

根据以上分析, 使用优化平台 modeFRONTIER 处理优化后解集数据, 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。

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, 选择距离远点最近的 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。在优化的选择上, 要根据实验结果或者理论分析结论进行取舍。表 2 列出了优化前后设计参数, 表 3 所示为优化前后开启延迟时间和关闭延迟时间的数值。

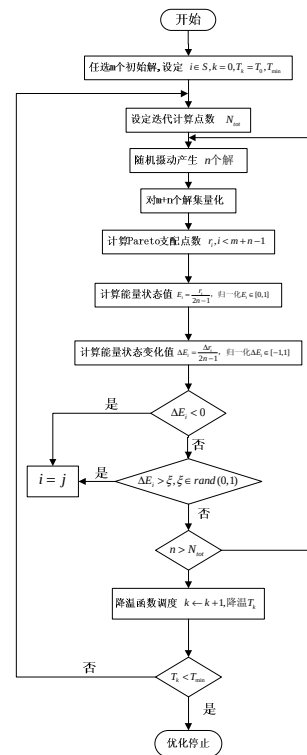


图 4 喷油器 MOSA 优化流程图

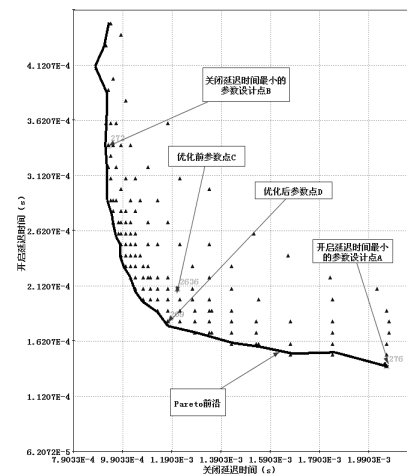


图 5 多目标 Pareto 优化解集

图6为参数优化前和优化后的喷油率曲线对比,图中也包含控制信号,此时轨压为60MPa,脉宽0.7ms,只有一次喷射。可以看出优化后比优化前在开启延迟时间和关闭延迟时间得到了有效的减少。

表2 优化前后参数表

参数	进油量孔 直径 mm	出油量孔 直径 mm	泄油孔 直径 mm	控制室 容积 ml	控制活塞 质量 g	针阀 质量 g	电磁阀 刚度 N/mm
优化前	0.2	0.3	2	0.02	6.98	4.05	42.5
优化后	0.23	0.29	2.5	0.03	6.67	3.04	33.9

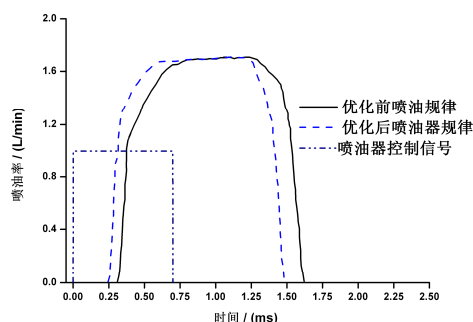


图6 优化前后喷油率曲线对比

表3 多目标优化结果

目标	开启延迟时间 ms	关闭延迟时间 ms
优化前	0.3	0.92
优化后	0.24	0.76
改进程度	20%	17.4%

4. 结论

(1) 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,优化结果表明,开启响应延迟时间降低了20%,关闭响应延迟时间降低了17.4%。

(2) 采用多目标优化平台 modeFRONTIER,集成液压仿真软件 AMESIM 进行电控喷油器的自动优化仿真,同时降低了开启延迟时间和关闭延迟时间,提供了一种对高压共轨电控喷油器优化设计新方法。

致谢

感谢郑州大学的王定标教授在仿真建模时的有益讨论以及西迪亚特科技有限公司北京办事处的技术支持张晓琨工程师,在百忙之中抽出时间解答作者在课题研究中的疑难问题,同时提出了在高压共轨喷油器虚拟仿真和协同设计方面很多宝贵的意见,为本研究能够顺利进展提供了宝贵的技术支持。

参考文献

- [1] G.M.Bianchi, P.Pelloni, F.Filicori, and G.Vannini, "Optimization of the Solenoid Valve Behavior in Common-Rail Injection System", [C] Sae2000-01-2042, SAE Publications Group, USA, June 19-22. 2000, pp. 1-4.
- [2] G. M. Bianchi, S. Falfari and M. Parotto "Advanced Modeling of Common Rail Injector Dynamics and Comparison with Experiments", [C] Sae2003-01-0006, SAE Publications Group, USA, March 3-6. 2003, pp. 2-20.
- [3] G. M. Bianchi, S. Falfari and P. Pelloni "A Numerical and Experimental Study Towards Possible Improvements of Common Rail Injectors", [C] Sae2002-01-0500, SAE Publications Group, USA, March 4-7. 2002, pp. 2-15.

-
- [4] 张建明, 苏冰, 杨兵等, 高压共轨燃油喷射系统中喷油器的仿真与实验研究[J], 系统仿真学报, 2006, 18(1):257-259.
- [5] 蔡珍辉, 杨海青, 杭勇等. “基于AMESim的高压共轨喷油器的建模及分析” [J], 柴油机设计与制造, 2008, 15(1):228~242.
- [6] 王秀丽, “共轨喷油器仿真模型优化” [J], 内燃机车, 2009, 7:1~7.
- [7] 李育学, 张静秋, 欧阳光耀. “电控喷油器的优化设计” [J], 内燃机学报, 2006, 24(3):271~275.
- [8] 袁文华, 鄂加强, 龚金科等, “自适应粒子群优化的高压共轨燃油喷嘴多学科优化设计” [J], 内燃机工程, 2009.10:64-67.
- [9] Teresa Donato, Arturo de Risi and Domenico Laforgia, “Optimization of High Pressure Common Rail Electro-injector Using Genetic Algorithms” [C], Sae2001-01-1980, SAE Publications Group, USA, May 7-9. 2001, pp. 1-10.
- [10] AMESim user manual[M].
- [11] 曾庆生, 杨毅, 王湘江, “转子式机油泵多学科优化设计” [J], 内燃机工程, 2009, 10:74~76.
- [12] Kirkpatrick.S, Gelatt.C.D, Vecchi.Jr, “Optimization by simulated annealing” [J], Science 220(1983)671-680.; Ahmed.M.A., Alkhamis.T.M, “Simulation-based optimization using simulated annealing with ranking and selection” [J], Computers and Operations Research 29(4)(2002)387-402.
- [13] Enrico.R., “MOSA-Multi Objective Simulated Annealing” [R], Esteco Technical Report2003-003,2003,5
- [14] modeFRONTIER user manual[M].
- [15] Phil Stephenson and Yang Chen et.al, “Multi-objective Optimization of a Charge Air Cooler using modeFRONTIER” [C], Sae2008-01-0886, SAE Publications Group, USA, April 14-17. 2008, pp. 2-9.