

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.06.019

电控喷油器关键结构参数的匹配优化研究*

张贺鲲,张振东*,谢乃流

(上海理工大学汽车工程研究所,上海 200093)

摘要:针对电控喷油器动态响应性能需要改善的问题,运用 Ansoft Maxwell 电磁场仿真软件建立了喷油器的计算模型,对包括轭铁厚度、铁芯外径、衔铁长度、工作气隙、线圈匝数和线圈电阻在内的关键结构参数对其动态响应性能的影响规律进行了研究,在此基础上以各关键结构参数作为设计变量,开启滞后时间和落座滞后时间作为目标函数建立了相应的优化模型,通过遗传算法对这些结构参数进行了匹配优化,并通过仿真和试验的方法对该优化方案的有效性进行了验证。研究结果表明,经过优化后电控喷油器的开启滞后时间和落座滞后时间分别缩短了 33.1% 和 37.1%,其动态响应性能得到了提高。

关键词:电控喷油器;开启滞后时间;落座滞后时间;遗传算法

中图分类号:U464.136+.1;TH39;TH122

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)06-0739-06

Optimal design of the key structural parameters in an electronic fuel injector

ZHANG He-kun, ZHANG Zhen-dong, XIE Nai-liu

(Institute of Automotive Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Aiming at solving the problem of improving the dynamic response characteristics of the electronic fuel injector, the calculation model was established with help of the Ansoft Maxwell electromagnetic simulation software to analyze the effects of its key structural parameters on its dynamic response characteristics, including the thickness of yoke, outer diameter of core, length of armature, air gap, turns and resistor of coil. Based on the analyses, with these structural parameters as variables and the opening and closing delay time as objective functions, genetic algorithm was introduced into optimal design of these structural parameters, and the effectiveness of the optimal scheme was verified by simulation and experiment. The results indicate that after optimization, the opening and closing delay time can reduce by 33.1% and 37.1%, so its dynamic response characteristics are improved.

Key words: electronic fuel injector; opening delay time; closing delay time; genetic algorithm

0 引 言

高速电磁阀作为一种新型流体控制元件,因结构简单,性能可靠耐久和成本低而得到广泛应用^[1]。发动车电喷油器作为一种高速电磁阀,是精确控制燃油喷射量和形成喷雾的核心部件,因此有必要对其相关参数进行优化,提高它的动态响应性能,进而改

善其流量特性^[2]。目前相关学者均提出了有效的优化方案^[3-5],但大多是在已有方案基础上进行局部结构的改进,没有进行多参数的优化组合。而随着计算机技术的发展,相关优化算法在工程领域得到应用^[6-8],用来解决多目标,多变量,非线性等复杂系统的优化问题。

本研究针对某款喷油器,运用 Ansoft Maxwell 仿真

收稿日期:2016-01-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51275309)

作者简介:张贺鲲(1992-),江苏苏州人,硕士研究生,主要从事汽车发动机燃油喷射系统的研究。E-mail:email_zhk@163.com

通信联系人:张振东,男,教授,博士生导师。E-mail:usstzdz@126.com

软件分析其关键结构参数对其动态响应性能的影响,并结合遗传算法对结构参数进行匹配优化,实现对电控喷油器的整体性能优化。

1 喷油器结构和原理

1.1 喷油器结构

电控喷油器的结构如图 1 所示,主要由铁芯、衔铁组件、隔磁环、喷管主体、轭铁、线圈等部件组成。线圈通电,衔铁组件受到电磁力作用,当电磁力克服弹簧预紧力时,衔铁组件脱离阀座,电磁阀开启;线圈断电,电磁力逐渐降低,衔铁组件落座,电磁阀关闭,完成喷射过程。

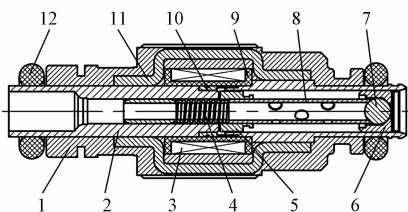


图 1 电控喷油器结构

1—外壳;2—铁芯;3—线圈;4—弹簧;5—衔铁;6—阀座;7—钢珠;8—导管;9—线圈架;10—隔磁环;11—轭铁;12—密封圈

1.2 喷油器数学模型

电控喷油器是电、磁、机的非线性耦合系统^[9],其数学模型包括磁路方程,电路方程,动力学方程:

(1) 磁路子模型

基于平均磁路法建立喷油器的等效磁路方程:

$$iN = \Phi R_M \quad (1)$$

式中: Φ —磁通; R_M —等效磁阻, $R_M = l_M / (\mu_M S_M)$; iN —磁动势, S_M —磁路横截面积; l_M —磁路长度; μ_M —相对磁导率。

基于麦克斯韦电磁力公式可得衔铁组件所受电磁力:

$$F_{\text{mag}} = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 S} \quad (2)$$

式中: μ_0 —真空中磁导率; S —气隙面积。

(2) 电路子模型

基于基尔霍夫定律建立线圈的电压平衡方程:

$$U = iR + \frac{d\Psi}{dt} \quad (3)$$

式中: U —线圈两端电压; R —线圈电阻; Ψ —磁链, $\Psi = N\Phi = Li$, L —线圈电感, $L = N^2 / R_M$ 。

(3) 机械运动子模型

基于牛顿运动定律建立系统的动力学方程:

$$m \ddot{x} = F_{\text{mag}} - F_{\text{spr}} - mg \quad (4)$$

式中: x —衔铁组件位移, m —衔铁组件质量, F_{spr} —弹簧力。

1.3 喷油器动态响应特性

电控喷油器的动态响应过程为线圈通电到衔铁组件达到最大行程的开启过程和线圈断电衔铁组件完全落座的关闭过程。整个动态响应过程分为 5 个阶段,分别为开启触动阶段,开启运动阶段,完全开启阶段,落座触动阶段,落座运动阶段^[10]。

由式(1~4)可以推导出动态响应过程中各阶段的时间表达式^[11]:

$$t_1 = \frac{-N^2}{RR_{MA}} \ln \left(1 - \frac{RR_{MA}}{UN} \sqrt{2\mu_0 F_{\text{spr}} A S} \right) \quad (5)$$

$$t_2 = \sqrt{\frac{2hm}{(F_{\text{mag}} - F_{\text{spr}})_{\text{av}}}} \quad (6)$$

$$t_3 = \frac{-N^2}{RR_{MD}} \ln \left(\frac{RR_{MD}}{UN} \sqrt{2\mu_0 F_{\text{spr}} D S} \right) \quad (7)$$

$$t_4 = \sqrt{\frac{2\delta m}{(F_{\text{spr}} - F_{\text{mag}})_{\text{av}}}} \quad (8)$$

其中: $F_{\text{spr}_{\text{av}}} = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} F_{\text{spr}}(x) dx$, δ —球阀最大升程。

$$t_{d1} = t_1 + t_2 \quad (9)$$

$$t_{d2} = t_3 + t_4 \quad (10)$$

式中: t_1, t_2, t_{d1} —开启触动时间,开启运动时间,开启滞后时间; t_3, t_4, t_{d2} —落座触动时间,落座运动时间,落座滞后时间。

2 喷油器仿真模型的试验验证

本研究在 Ansoft Maxwell 仿真软件中建立某款喷油器的 2D 模型,其磁路结构示意图如图 2 所示。

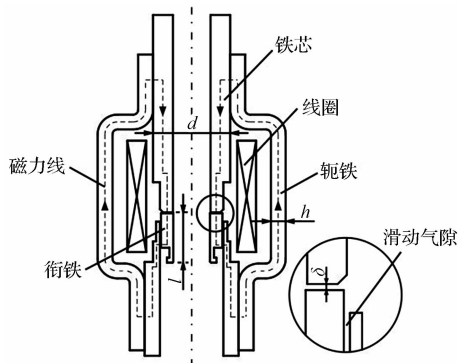


图 2 喷油器磁路结构示意图

主要建模参数如表 1 所示。

表1 主要建模参数

参数	参数值
材料	1J50/1J117
电压 U/V	12
电阻 R/Ω	14
线圈匝数 N	235
工作气隙 δ/mm	0.1
弹簧刚度 $k/N \cdot m^{-1}$	1 667
衔铁组件质量 m/g	2.3

由于衔铁位移难以直接测量,而线圈电流较易测量,且能间接反映喷油器动态响应特性,故本研究通过测量线圈电流曲线获取喷油器的动态响应时间^[12-13]。喷油器驱动及线圈电流的测量电路如图3所示。

线圈电流信号由精密微小阻值电阻转化为电压信号,经过信号放大由数字示波器采集。线圈电流的试验和仿真结果如图4所示,说明仿真模型与实际喷油器具有较好的一致性,可以有效预测喷油器的动态响应性能。

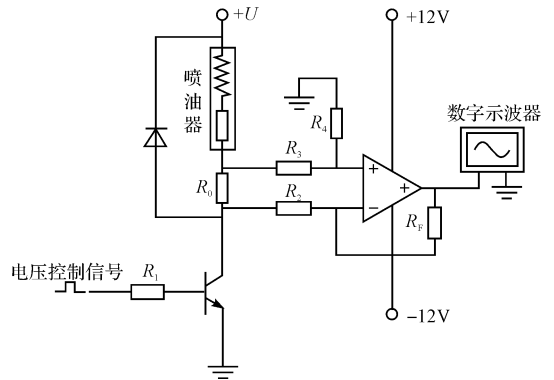


图3 喷油器驱动及线圈电流测量电路

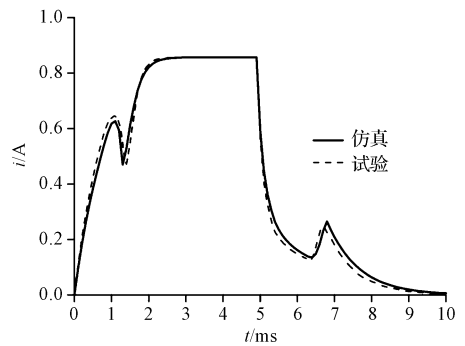


图4 线圈电流的仿真和试验曲线对比

3 动态响应性能的影响因素分析

影响电控喷油器动态响应性能的因素主要包括磁路参数、电路参数等。笔者借助 Ansoft Maxwell 仿真软件对轭铁厚度 h , 铁芯外径 d , 衔铁长度 l , 工作气隙 δ , 线圈匝数 N 和线圈电阻 R 等因素进行研究。动态响

应时间随轭铁厚度、铁芯外径和衔铁长度变化曲线如图5所示。

动态响应时间工作气隙、线圈匝数和电阻变化曲线如图6所示。

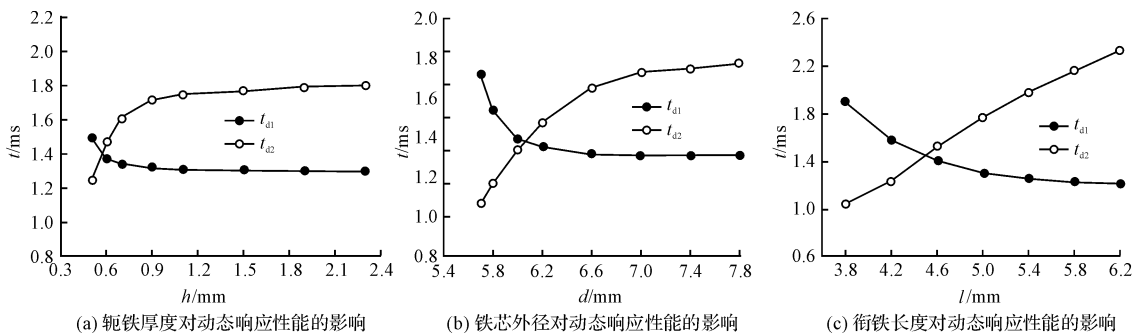


图5 动态响应时间随轭铁厚度、铁芯外径和衔铁长度变化曲线

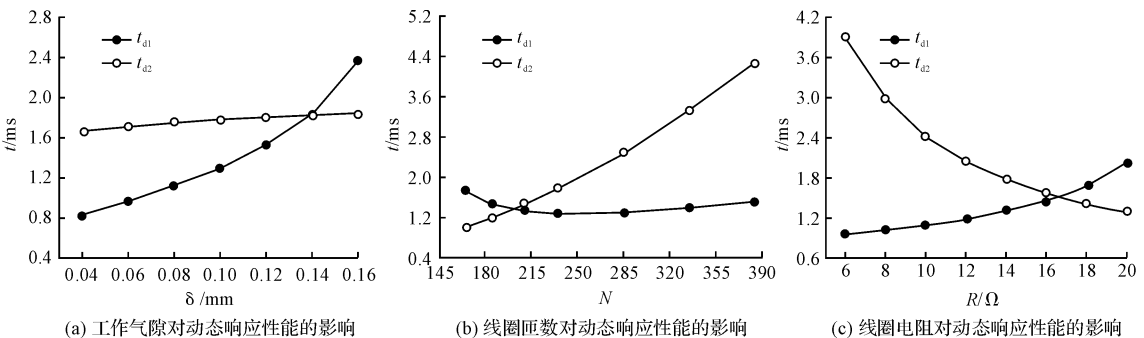


图6 动态响应时间工作气隙、线圈匝数和电阻变化曲线

3.1 轭铁厚度对动态响应性能的影响

如图 5(a) 所示,随着轭铁厚度的减小,磁阻增加缓慢,开启和落座滞后时间均基本不变,但当轭铁厚度减小到 0.9 mm 左右时,磁阻增加幅度变大,开启滞后时间开始增加,落座滞后时间明显下降。

3.2 铁芯外径对动态响应性能的影响

铁芯外径变化和轭铁厚度变化效果相同,如图 5(b) 所示,随着铁芯外径的减小,开启和落座滞后时间变化不明显,但当减小至 6.2 mm 左右时,开启滞后时间开始增加,落座滞后时间明显下降。

3.3 衔铁长度对动态响应性能的影响

如图 5(c) 所示,随着衔铁长度的增加,滑动气隙磁阻急剧降低,开启滞后时间明显下降而落座滞后时间明显增加,而当衔铁长度增加至一定程度后,磁阻变化减缓,开启滞后时间变化逐渐减缓。

3.4 工作气隙对动态响应性能的影响

与轭铁厚度,铁芯外径,衔铁长度一样,工作气隙也是影响磁阻的重要因素,如图 6(a) 的 t_{d1} 曲线所示,随着工作气隙的减小,磁阻减小明显,且气隙的边缘效应减小,开启滞后时间明显降低。如图 6(a) 中 t_{d2} 曲线所示,随着气隙减小,球阀升程降低,故落座滞后时间缓慢下降。

3.5 线圈匝数对动态响应性能的影响

如图 6(b) 的 t_{d1} 曲线所示,随着线圈匝数的降低,磁动势减小,但电感大幅下降,开启滞后时间缓慢降低,但当匝数下降至 215 匝左右时,由于匝数过小,磁动势不足,开启滞后时间又呈上升趋势。如图 6(b) 中 t_{d2} 曲线所示,随着线圈匝数的降低,电感和磁动势下降,落座滞后时间降低。

3.6 线圈电阻对动态响应性能的影响

如图 6(c) 所示,随着线圈电阻的减小,线圈的电流增加,磁路中的磁动势增加,开启滞后时间减小,而落座滞后时间增加。高阻型喷油器电阻值一般为 $12 \Omega \sim 16 \Omega$ 。

4 结构优化

4.1 基于遗传算法的结构优化

影响喷油器动态响应性能的结构参数较多,且有多个优化目标,而遗传算法作为一种模拟生物进化机制的全局搜索和优化方法,可以有效处理这样的多目标,多参数优化问题。它将问题域中的可能解看作种

群中的个体,并且将每个个体编码,然后模拟遗传学中的染色体选择,交叉和变异行为,通过预设的适应度函数对个体进行评价,不断得到最优群体,从而得到问题的最优解。本研究选择 Matlab 的 GATBX 遗传算法工具箱进行优化求解^[14]。遗传算法的实现过程如下:

4.1.1 确定设计变量与目标函数

根据对喷油器动态响应性能影响因素的分析,确定的设计变量及其边界条件如表 2 所示。由于开启和落座滞后时间是喷油器动态响应性能的重要评价指标,故以此为目标函数。优化模型如下:

$$\begin{cases} \min f(X) = \omega_1 f_1(X) + \omega_2 f_2(X) \\ \text{s. t. } X_{\min} \leq X \leq X_{\max} \\ X = [X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6] \end{cases} \quad (11)$$

式中: $f_1(X) = t_{d1}(X)$; $f_2(X) = t_{d2}(X)$; ω_1, ω_2 —加权系数。

表 2 设计变量和边界条件

变量	边界条件	符号
轭铁厚度 h/mm	[0.6, 1.5]	X_1
铁芯外径 d/mm	[5.8, 7.8]	X_2
衔铁长度 l/mm	[4.2, 5.8]	X_3
工作气隙 δ/mm	[0.06, 0.1]	X_4
线圈匝数 N	[172, 235]	X_5
线圈电阻 R/Ω	[12, 16]	X_6

4.1.2 编码与种群初始化

本研究在求解时将每个设计变量编码为二进制串,并串接为一个染色体,表示解空间中的一个可行解。根据设计变量的精度要求和边界条件,变量 $X_1 \sim X_6$ 编码位数分别为 6、7、7、5、6、6,初始种群数量为 20。

4.1.3 建立适应度函数

采用基于线性排序法^[14]的适应度函数,适应度值由下式计算:

$$FitnV(pos) = 2 - sp + 2(sp - 1) \frac{pos - 1}{NIND - 1} \quad (12)$$

式中: pos —排序位置, sp —选择压力, $NIND$ —种群数目。

4.1.4 染色体选择、交叉和变异

选择过程为随机遍历抽样算法^[14],种群中每个个体被选择的概率由下式计算:

$$F(x_i) = \frac{f(x_i)}{\sum_{i=1}^n f(x_i)} \quad (13)$$

式中: $F(x_i)$ —某个体被选择的概率, $f(x_i)$ —某个体的适应度值。

交叉和变异过程使用单点交叉算子和离散变异算

子。选择代沟为0.9,交叉概率为0.7,变异概率为0.02。

4.1.5 迭代收敛

终止进化代数设置为100,通过遗传算法得到的计算结果如表3所示。

表3 优化前后结构参数对比

参数	优化前	优化后
轭铁厚度 h/mm	1.5	0.83
铁芯外径 d/mm	7.8	6.58
衔铁长度 l/mm	5.0	4.89
工作气隙 δ/mm	0.1	0.06
线圈匝数 N	235	185
线圈电阻 R/Ω	14	12

4.2 优化效果的仿真分析

本研究借助 Ansoft Maxwell 仿真软件对使用遗传算法优化后的模型进行仿真,优化前、后的线圈仿真电流对比如图7所示。

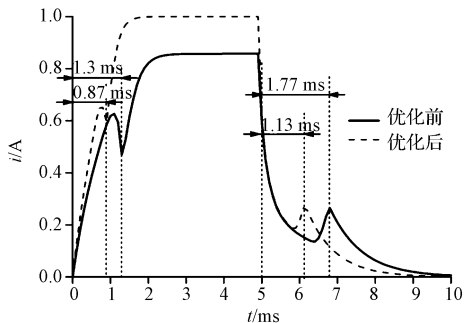


图7 优化前后线圈电流仿真曲线对比

由图7可以看出优化后,开启过程的电流上升速率增加,开启滞后时间由优化前的1.3 ms降为0.87 ms,减少33.1%;落座过程的衔铁开始运动的瞬时电流增加,落座滞后时间由优化前的1.77 ms降为1.13 ms,降低36.2%。

结合图5、图6,在该优化方案中,轭铁厚度和铁芯外径减小,磁阻增加,有效缩短落座滞后时间而不会大幅增加开启滞后时间;线圈匝数的适当降低,落座过程中的磁动势和电感降低,落座滞后时间明显缩短;工作气隙减小,开启过程的磁阻减小,有效缩短开启滞后时间,从而整体上达到较好的优化效果。

4.3 优化效果的试验验证

为了进一步验证该优化模型的有效性,本研究按

优化后的结构参数进行样品试制,并搭建电控喷油器性能试验台如图8所示。

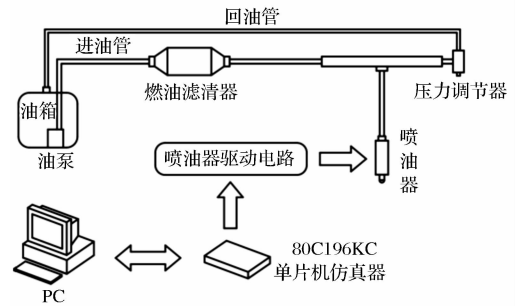


图8 电控喷油器性能试验台

试验过程中,利用80C196KC单片机向图3所示的喷油器驱动电路发出喷油脉冲信号,利用数字示波器监测喷油器线圈电流波形,并依据记录的瞬态电流数据计算获得喷油器开启及落座滞后时间。测试条件为:电压12 V,喷油压力0.2 MPa,环境温度20 ℃。

试验结果如表4所示。

表4 测试结果

	t_{d1}/ms	t_{d2}/ms
优化前	1.39	1.67
优化后	0.93	1.05

与优化前相比,喷油器参数优化后,开启滞后时间降低33.1%,关闭滞后时间降低37.1%。说明经过遗传算法优化后,喷油器动态响应性能得到显著提高。

5 结束语

本研究在验证了某电控喷油器仿真模型有效性的基础上,对包括轭铁厚度、铁芯外径、衔铁长度、工作气隙、线圈电阻和匝数在内的关键结构参数设置了不同的水平值,分别建立相应的仿真模型,得到了喷油器动态响应性能和各结构参数的关系曲线,在此基础上通过遗传算法初步实现了喷油器各结构参数的匹配优化。仿真和试验结果均表明优化后的喷油器动态响应时间缩短,说明该遗传算法模型的有效性,对提高喷油器动态响应性能具有一定指导意义。

(下转第759页)

本文引用格式:

张贺鲲,张振东,谢乃流. 电控喷油器关键结构参数的匹配优化研究[J]. 机电工程,2016,33(6):739-743,759.

ZHANG He-kun, ZHANG Zhen-dong, XIE Nai-liu. Optimal design of the key structural parameters in electronic fuel injector[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016, 33(6): 739-743, 759.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>