

缸内直喷汽油机共轨系统结构参数优化

胡云峰^{1,2}, 王长勇², 于树友^{1,2}, 孙鹏远³, 陈虹^{1,2}

(1. 吉林大学 汽车仿真与控制国家重点实验室, 长春 130022; 2. 吉林大学 通信工程学院, 长春 130022;
3. 中国第一汽车集团公司 技术中心, 长春 130011)

摘要:为了降低缸内直喷汽油(Gasoline direct injection, GDI)发动机共轨系统的轨压波动, 同时减少共轨系统结构参数实验标定的工作量, 提出了基于改进型遗传算法的共轨系统结构参数优化设计方法。首先, 在 GT-suite 搭建了 GDI 共轨系统模型, 该模型主要由高压泵模型、共轨管模型、喷油器模型及低压泵模型组成; 其次, 通过动力学特性分析了共轨管体积、阻尼孔直径对共轨压力波动及上升时间的影响, 并验证了模型的合理性; 然后设计了基于前馈和反馈相结合的共轨压力控制系统, 在此基础上, 以共轨压力波动及上升时间为目标函数, 以阻尼孔直径和共轨管体积为优化变量, 提出了基于改进型遗传算法的共轨系统多结构参数优化方法; 最后, 通过仿真实验验证了本文方法的有效性。

关键词:自动控制技术; 缸内直喷汽油机共轨系统; 结构参数优化; 闭环控制; 遗传算法

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2018)01-0236-09

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb20161353

Structure parameters optimization of common rail system for gasoline direct injection engine

HU Yun-feng^{1,2}, WANG Chang-yong², YU Shu-you^{1,2}, SUN Peng-yuan³, CHEN Hong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China; 3. R&D Center, China FAW Group Corporation, Changchun 130011, China)

Abstract: To reduce the common rail pressure fluctuation and reduce the workload of experimental calibration of structure parameters for Gasoline Direct Injection (GDI) engine, a structure parameters optimization method of common rail system is proposed based on improved genetic algorithm. First, a model of GDI common rail system, including high-pressure pump, common rail pipe, injector and low-pressure pump, is developed in GT-suite environment. Second, the effects of common rail pipe volume and damping orifice diameter of the rail pressure fluctuation and rise-time are analyzed by dynamics, and the rationality of the model is verified. Finally, a control system of the common rail pressure is designed based on feedforward and feedback. On this basis, an improved genetic algorithm is used to optimize the damping orifice diameter and common rail pipe volume, considering the common rail pressure fluctuation and rise-time as the objective functions. Simulation results show the effectiveness

收稿日期: 2015-07-10.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (615201106008, 61703177, 61573165); 吉林省科技厅项目 (20170520067JH).

作者简介: 胡云峰(1983-), 男, 讲师, 在站博士后. 研究方向: 发动机控制. E-mail: huyf@jlu.edu.cn

通信作者: 于树友(1974-), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 非线性控制, 模型预测控制. E-mail: yushuyou@126.com

of the proposed optimization method.

Key words: automatic control technology; GDI common rail system; structure parameters optimization; closed-loop control; genetic algorithm

0 前言

随着汽车产业的迅速发展,缸内直喷汽油机(GDI)共轨技术在汽车发动机领域得到了广泛的应用,GDI共轨系统能够保持高性能工作的前提是共轨系统具有稳定的共轨压力,不稳定的共轨压力将使喷油量无法精准控制,最终使发动机的性能变差^[1]。GDI共轨系统中有诸多因素影响共轨压力的稳定,其中结构参数是影响共轨压力波动的关键因素,因此通过合理设计共轨系统结构参数,抑制共轨压力波动是一项有意义的工作^[2];此外,若直接使用共轨实物进行结构参数标定开发周期长,且成本非常高。

针对共轨系统结构参数对共轨系统特性的影响,文献[3]在GT-fuel中建立了高压泵的仿真模型,研究了高压泵进油阀组件、出油阀组件以及柱塞凸轮组件等结构参数对共轨压力的影响,并对比了不同高压泵结构参数对轨压波动的影响;文献[4]利用AMESim建立了电控单体泵燃油系统模型,通过对不同高压油管结构参数的燃油系统进行仿真研究,分析了高压油管长度、内径及内壁粗糙度对单体泵供油压力、喷油压力及循环喷油量等燃油系统性能参数的影响;文献[5]为研究喷油器喷嘴关键结构参数对喷雾的影响,采用数值模拟方法在保持喷孔总流通截面积相同的情况下,通过改变喷孔数目、喷孔直径、喷孔长度等结构、参数,分析了喷油器结构参数对喷雾特性的影响。目前针对共轨系统结构参数的研究仅限于采用商业软件对共轨内的压力波动进行模拟及仿真分析^[6],通过仿真实验给出设计共轨系统结构尺寸的大体准则,但对于最优结构尺寸的确定仍然主要是利用试凑法通过大量的仿真分析确定。这种方法的缺点是实验量大且不一定能够找到最优的结构参数,若利用优化算法取代盲目的试凑法对共轨系统结构参数进行优化,则能够在较小实验量、较短时间内得到结构参数的最优值,进而缩短了GDI共轨系统的开发周期。

遗传算法作为一种智能寻优算法,具有全局优化的优点,被广泛的应用于函数优化、汽车控制、机器人学、图像处理以及人工生命等领域^[7-9],但是其局部寻优能力较差,最终收敛到最优解往往花费较长的时间^[10,11]。

本文为实现对GDI共轨系统结构参数的优化设计,首先在GT-suite中建立了GDI共轨系统的模型,并对该模型进行了动力学特性分析,确定将共轨管的体积以及阻尼孔直径作为优化变量,在进行结构参数优化时采用前馈加反馈的控制策略对共轨压力实现了实时控制。随后利用改进型遗传算法对阻尼孔直径以及共轨管体积进行多变量结构参数优化。最后通过对比优化前、后共轨系统性能验证了本文优化方法的有效性。

1 GDI共轨系统建模及动力学分析

1.1 GDI共轨系统建模

1.1.1 高压泵工作机理与建模

高压泵主要包括:进油口燃油计量阀,凸轮驱动的柱塞泵,以及出油阀及安全阀。进油口处燃油计量阀的主要作用是控制进入高压泵的燃油量,从而实现对共轨压力的调节;出油阀是一个单向阀,主要由复位弹簧以及阀芯、阀座组成,安全阀处于高压泵出口处,当出口处压力大于预设安全压力时,安全阀开启;高压泵腔体的体积随着凸轮轴的转动变化而变化,结合其凸轮形线,泵腔体积可表示如下:

$$V_p(\theta) = V_{p0} - A_p h_p(\theta) \quad (1)$$

式中: $V_p(\theta)$ 为高压泵体积变化量, m^3 ; V_{p0} 为高压泵的初始体积, m^3 ; A_p 为高压泵柱塞横截面积, m^2 ; $h_p(\theta)$ 为高压泵柱塞行程, m 。

根据燃油体积弹性模量公式及流量公式,高压泵内的燃油压力 P_p 满足下式:

$$\dot{P}_p = \frac{K_f}{V_p(\theta)} \cdot \left(\frac{dV_p}{dt} + q_u - q_{pr} - q_0 \right) \quad (2)$$

式中: K_f 为燃油的弹性模量, 10^5 Pa ; q_u 表示从低压泵进入的燃油流量; q_{pr} 为流入共轨管的燃油流量; q_0 为燃油泄漏流量, m^3/t ; p_p 为高压泵压强, p_r 为共轨管压强, 10^5 Pa ; A_{pr} 为阻尼孔的横截面积, m^2 ; c_{pr} 为液体流量系数;

$$\frac{dV_p}{dt} = -A_p \omega \frac{dh_p}{d\theta} \quad (3)$$

$$q_{pr} = \text{sgn}(p_p - p_r) c_{pr} A_{pr} \sqrt{\frac{2(p_p - p_r)}{\rho}} \quad (4)$$

根据以上高压泵结构,在GT-suite中搭建的高压泵模型如图1所示。

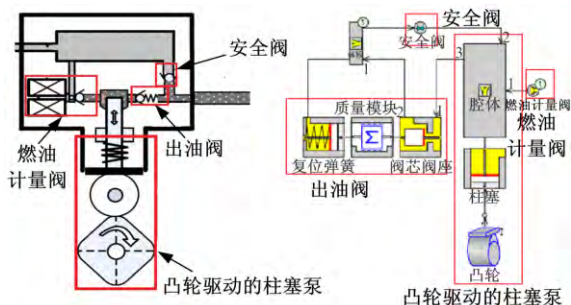


图 1 高压泵结构及 GT-suite 模型

Fig. 1 Structure and GT-suite model of high-pressure pump

1.1.2 共轨管工作机理与建模

共轨管是共轨系统的主要部件,共轨管的作用是储存高压泵提供的高压燃油并分配到各喷油器中,同时缓冲由于高压泵供油以及喷油器喷油所产生的压力波动。共轨管在结构上主要包括连接高压泵端的阻尼孔,连接喷油器端的节流孔,以及轨压传感器,压力限制阀,若把共轨管体积看作常值,则共轨管内燃油压力变化满足如下关系式:

$$\frac{dp_r}{dt} = -\frac{K_f(p_r)}{V_r}(q_{pr} - q_{ri}) \quad (5)$$

式中: $\frac{dp_r}{dt}$ 为共轨管轨压变化, 10^5 Pa; V_r 是共轨管容积, cm^3 ; q_{pr} 为由高压泵到共轨管燃油流量, mm^3/s ; q_{ri} 为由共轨管到喷油器燃油流量, mm^3/s ; A_{rik} 为连接共轨管与喷油器的节流孔横截面积, m^2 ;

$$q_{ri} = \sum_{k=1}^4 \text{sgn}(p_r - p_{ik}) c_{ik} A_{rik} \sqrt{\frac{2|p_r - p_{ik}|}{\rho}} \quad (6)$$

根据共轨管结构,在 GT-suite 中搭建的共轨管模型如图 2 所示。

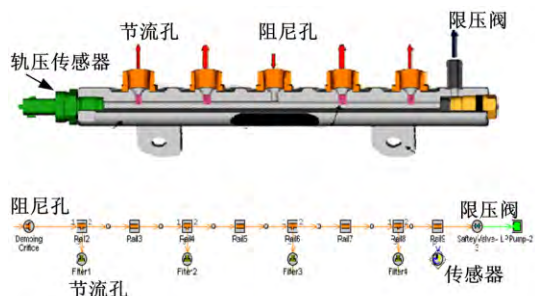


图 2 共轨管结构及 GT-suite 模型

Fig. 2 Structure and GT-suite model of common rail pipe

1.1.3 喷油器工作机理与建模

喷油器主要由电磁阀、衔铁、针阀、复位弹簧,喷油器腔等组成,电磁阀由 ECU 信号控制,电磁阀的开关使得衔铁、针阀移动,最终实现喷油器喷

油。根据弹性体积模量公式及流量公式,喷油器腔内压力微分方程为:

$$\dot{p}_{ik} = \frac{K_f}{V_{ik}}(q_{ri,k} - q_{inj,k}) \quad (7)$$

式中: $q_{ri,k}$ 、 $q_{inj,k}$ 分别为由共轨管进入喷油器,由喷油器进入气缸的燃油流量, m^3/t ; V_{ik} 为喷油腔体积, cm^3 ; E_{TK} 为喷油正时信号; $p_{cyl,k}$ 为气缸压强, 10^5 Pa; p_{ik} 为喷油器压强, 10^5 Pa;

$$q_{inj,k} = \text{sgn}(p_{ik} - p_{cyl,k}) c_{ik} E_{TK} A_{ik}$$

$$\sqrt{\frac{2|p_{ik} - p_{cyl}|}{\rho}} \quad (8)$$

根据喷油器的物理结构在 GT-suite 中建立喷油器模型,如图 3 所示。

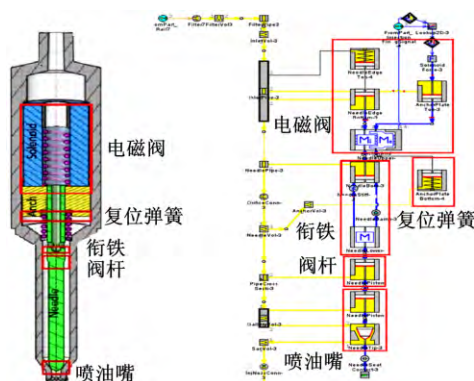


图 3 喷油器结构及 GT-suite 模型

Fig. 3 Structure and GT-suite model of injector

为了完善整个 GDI 共轨燃油喷射系统,本文对低压油路进行简化建模,将其简化成一个以恒定压力(4×10^5 Pa)泵油的低压泵,基于 GT-suite 所建立的 GDI 共轨系统如图 4 所示。

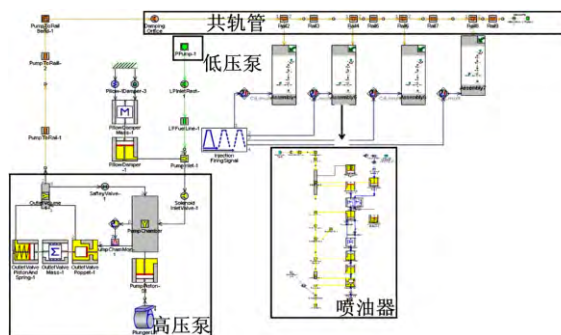


图 4 基于 GT-suite 的 GDI 共轨系统模型

Fig. 4 GT-model of GDI common rail system

本文以 GT-suite 软件供应商所提供的 GDI 共轨系统参数为所建立的 GDI 共轨系统模型匹配参数,部分参数如下:阻尼孔直径为 1 mm;共轨管直径(内)为 8 mm;共轨管长度为 240 mm;共轨管进出油孔数为 5;发动机转速为 2500 r/min;期望轨压为 1.5×10^7 Pa;初始轨压为

1.4×10^7 Pa。利用所搭建的 GDI 共轨系统模型与台架数据进行对比,如表 1 所示,模型的总体误差在 5% 内,满足精度要求。

表 1 GT-suite 模型与台架实验结果对比

Table1 Comparison of results between GT-suite and bench

变 量	台架数据	模型数据	误差/%
高压泵压力/(10^5 Pa)	153	157	2.6
高压泵泵油量/($\text{g} \cdot \text{cycle}^{-1}$)	18.45	17.36	5.9
共轨管平均压力/(10^5 Pa)	153.4	152.6	1
喷油器喷油脉宽/ms	1.45	1.45	0
喷油器喷油速率/($\text{mg} \cdot \text{s}^{-1}$)	10.46	9.89	5.5
喷油质量/($\text{g} \cdot \text{cycle}^{-1}$)	17.4	16.67	4.2
喷油器压力平均值/(10^5 Pa)	153.6	152.6	1

1.2 GDI 共轨系统动力学特性分析

1.2.1 论分析

首先利用在 GT-suite 中建模时所遵守的燃油体积弹性模量公式,以及燃油流量公式分析哪些共轨系统的结构参数对共轨压力有影响,由式(4)可知共轨管体积 V_r 和共轨管压力波动 $\dot{p}_r$ 有关,并且随着共轨管体积 V_r 的增大共轨压力波动 $\dot{p}_r$ 越小。由式(3)可知作为连接共轨管与高压泵机构的阻尼孔的横截面积 A_{pr} 与由高压泵单位时间内进入共轨管的燃油量 q_{ri} 有关,随着阻尼孔横

截面积 A_{pr} 的增大,由高压泵单位时间内进入共轨管的燃油量 q_{ri} 增大,进而由式(4)可知, q_{ri} 越大, $\dot{p}_r$ 越大即共轨压力波动越大。

1.2.2 实验分析

1.1 节利用 GDI 共轨系统数学模型从理论上分析了共轨管体积以及阻尼孔直径对轨压波动的影响,但由于该数学模型未涉及共轨压力的上升时间,因此只利用数学模型无法分析共轨系统的结构参数对上升时间的影响,为了进一步研究 GDI 共轨系统结构参数对共轨压力上升时间的影响,接下来利用 GDI 共轨系统仿真模型对共轨管体积以及阻尼孔直径进行分析。此外,为说明其他结构参数对轨压波动的影响,改变高压泵体积以及喷油器进油孔直径进行实验分析,分别选取阻尼孔直径为 0.75、1.0、1.5 mm;共轨管体积为 6.785、12.063、18.850 cm^3 ;高压泵体积为 1.8、2.5、3.3 cm^3 ;喷油器进油孔直径为 0.69、0.89、1.2 mm。设定期望共轨压力 1.5×10^7 Pa,初始轨压 1.4×10^7 Pa,发动机转速 2500 r/min 进行实验,得到不同结构参数下的共轨压力波动及上升时间,如表 2 所示。

表 2 不同结构参数下共轨压力波动及上升时间

Table2 Pressure fluctuation and rise time of different structure parameters

	结构参数											
	阻尼孔直径/mm			共轨管体积/ cm^3			高压泵体积/ cm^3			喷油器进油孔直径/mm		
	0.75	1.0	1.5	6.785	12.063	18.850	1.8	2.5	3.3	0.69	0.89	1.2
轨压波动/(10^5 Pa)	2.3298	2.4916	3.6028	3.3410	2.8944	2.4817	2.3298	2.3416	2.3428	3.1596	3.1606	3.1656
上升时间/s	0.1894	0.1893	0.1880	0.1874	0.1886	0.1893	0.1313	0.1431	0.1580	0.1056	0.1121	0.1198

由表 2 可知,相较于高压泵体积与喷油器进油孔直径,阻尼孔直径和共轨管体积对共轨系统轨压波动以及上升时间影响更明显。

图 5、图 6 更清楚地反映了阻尼孔直径和共

轨管体积对轨压波动以及上升时间的影响。如图 5 所示,随着阻尼孔直径的增大,轨压波动越来越大,而上升时间越来越短。

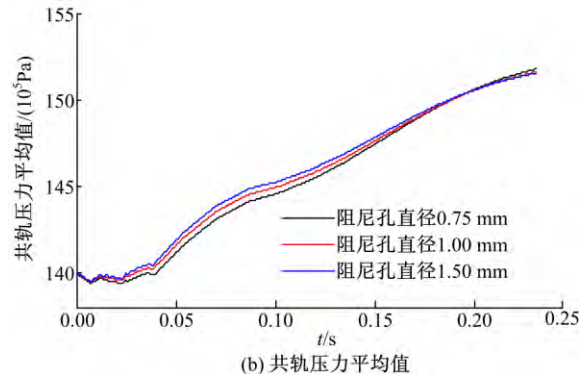
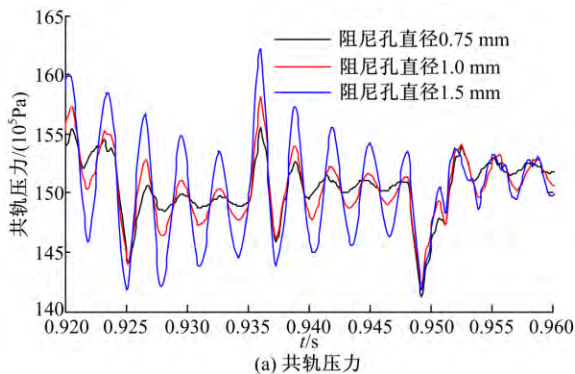


图 5 不同阻尼孔直径下的共轨压力波动及上升时间

Fig. 5 Pressure fluctuation and rise time of different damping hole diameters

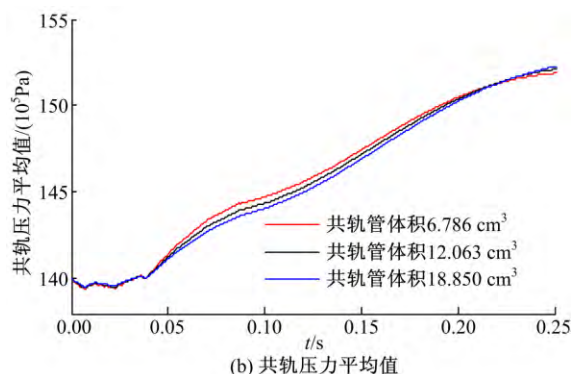
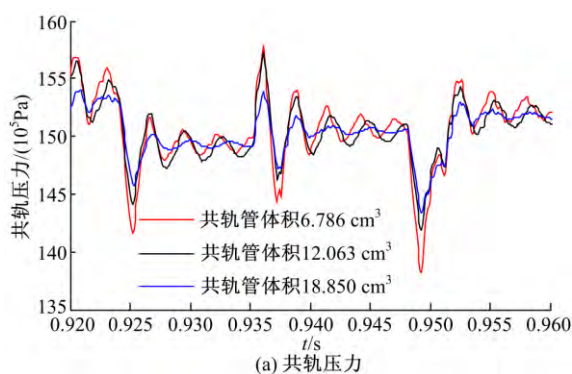


图 6 不同共轨管体积下的共轨压力波动及上升时间

Fig. 6 Pressure fluctuation and rise time of different common rail pipe volumes

由图 6 可知,随着共轨管体积的增大,轨压波动越来越小,而上升时间越来越长,这与之前理论分析的结果一致,进一步验证了本文的 GDI 共轨系统 GT-suite 模型能够合理地反映 GDI 共轨系统的特性。

2 基于改进型遗传算法的共轨系统结构参数优化

2.1 共轨压力控制系统设计及有效性验证

GDI 共轨系统的结构参数优化需要在闭环控制系统下进行,为了保证 GDI 共轨系统共轨压力在各个工作点能够稳定地跟踪上期望值,本文采用前馈控制和反馈相结合的控制策略设计轨压控制系统。

对于 GDI 共轨压力的控制,主要是通过控制 GDI 共轨系统高压泵前端的燃油计量阀开断实现的,因此控制系统前馈部分标定了一张关于高压泵前端燃油计量阀开度的 map 表,如图 7 所示, map 表的输入为当前共轨压力以及喷油器的喷油量,输出为高压泵一个泵油工作周期内燃油计量阀的开度。对于该 map 的标定,给定 GDI 共轨系统 GT-suite 模型不同的燃油计量阀开度[5,

10, ..., 120], 记录下稳态时的共轨压力以及每循环喷油质量。

控制系统的反馈部分选用的传统的增量型 PID 控制器。其控制率表达式为:

$$\begin{cases} \Delta u = K_p \left[e_k - e_{k-1} + \frac{T}{T_i} e_k + T_d \frac{e_k - 2e_{k-1} + e_{k-2}}{T} \right] \\ e_k = p_r - p_k \\ e_{k-1} = p_r - p_{k-1} \\ e_{k-2} = p_r - p_{k-2} \end{cases} \quad (9)$$

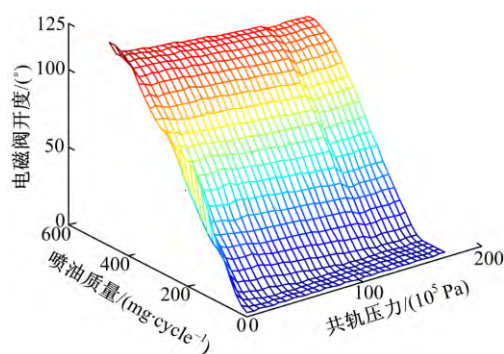


图 7 电磁阀开度 map

Fig. 7 Map of solenoid valve

整个 GDI 共轨系统的轨压控制框图如图 8 所示。

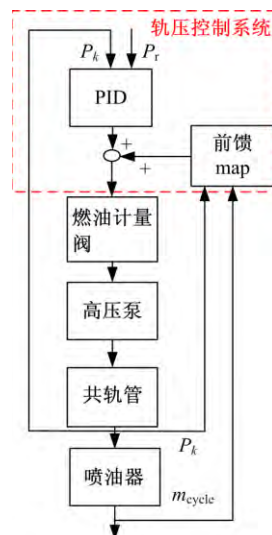


图 8 GDI 共轨压力控制框图

Fig. 8 Control structure of GDI common rail pressure

接下来进行控制系统的有效性验证,选取期望轨压分别为常值,连续阶跃信号以及正弦信号进行实验,实验结果如图 9 所示。

由图 9 可知,实际共轨压力较好地跟踪上期望轨压且轨压波动小于 5×10^5 Pa,证明了所设计的共轨压力控制系统的有效性。

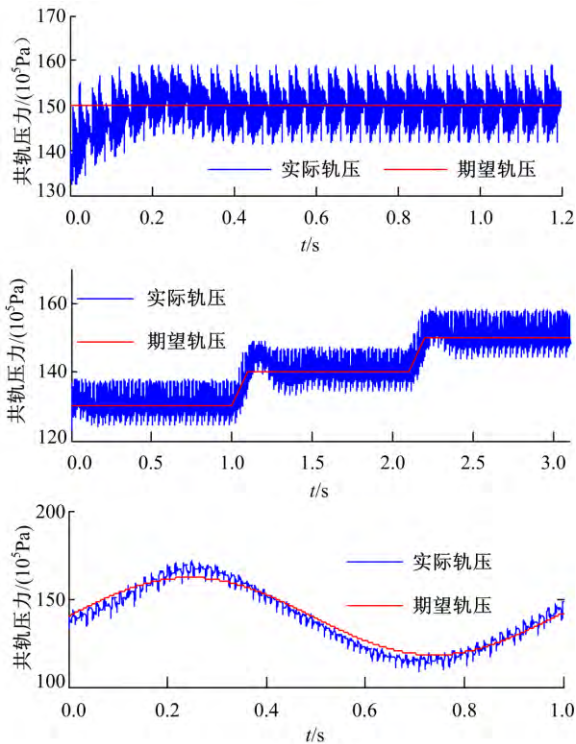


图 9 共轨压力跟踪曲线

Fig. 9 Track curve of common pressure

2.2 共轨系统结构参数优化方法设计

在保证控制系统能够使共轨压力在各工作点稳定跟踪上期望轨压的基础上,为降低共轨压力波动,加快轨压的响应时间,接下来将利用优化算法对高压共轨系统结构参数进行优化。

遗传算法作为一种全局搜索方法,具有较强的全局搜索能力强,但遗传算法局部搜索能力较弱导致搜索最优解的时间较长且不易找到最优解。针对这一缺点,本文提出了一种标准遗传算法和序列二次规划算法相结合的改进型遗传算法,该改进型遗传算法,首先采用遗传算法进行全局搜索,当遗传算法寻优代数达到 $10n$ ($n = 1, 2, \dots$) 时以遗传算法当前迭代得到的最优值作为序列二次规划算法 `fmincon` 的初值进行局部搜索,并把局部寻优得到的最优值替换原来遗传算法的最优值继续进行遗传算法迭代。

基于改进型遗传算法的 GDI 共轨系统控制及结构参数优化框图如图 10 所示。

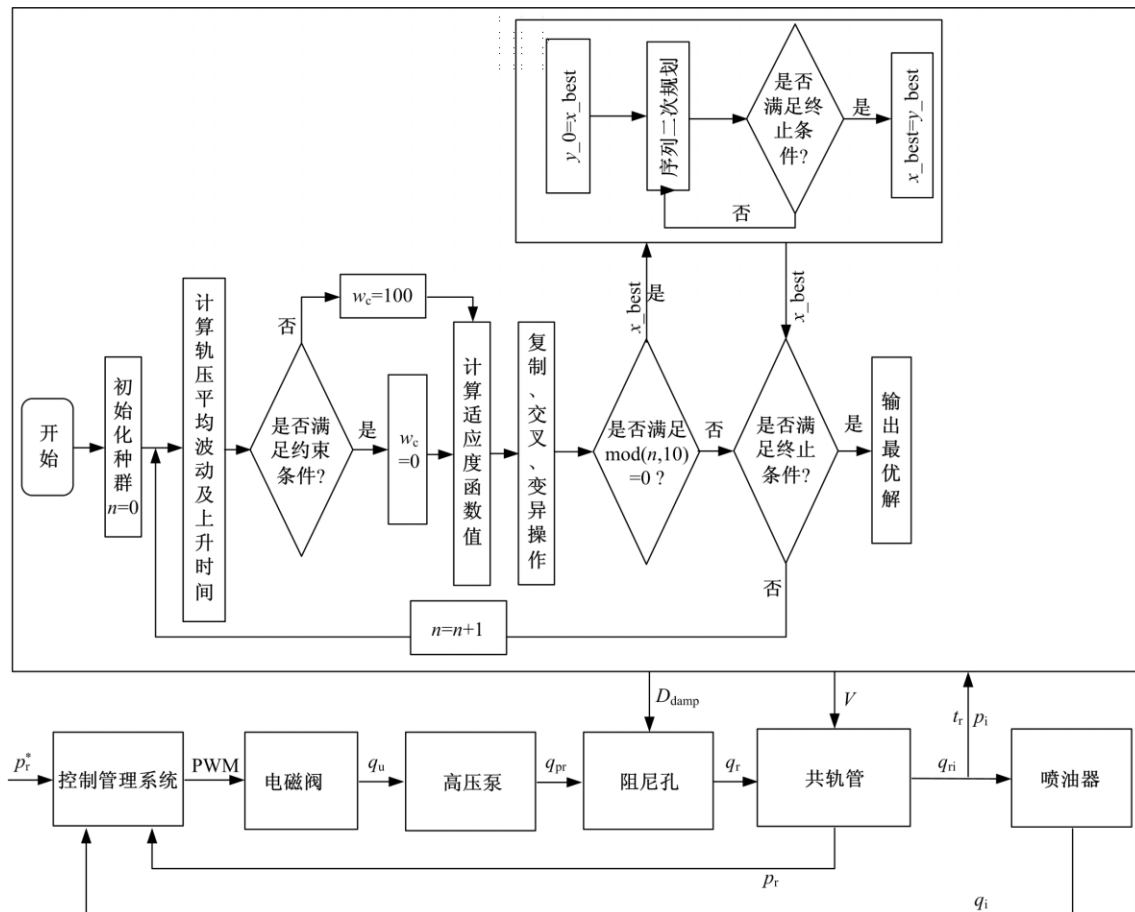


图 10 基于改进型遗传算法共轨系统结构参数优化框图

Fig. 10 Diagram of structural parameters optimization of common rail system

2.2.1 适应度函数及优化变量的选取

对于适应度函数的选取,主要从改善喷油质量、提升发动机性能的角度考虑,要求 GDI 共轨系统轨压波动尽可能小,即:

$$\text{Min}f_1(p_i) = \frac{\sum_{i=1}^N |p_i - p_r|}{N} \quad (10)$$

式中: p_i 代表第 i 时刻的共轨压力; p_r 代表期望的共轨压力; N 表示总的采样点个数。

为了适应不同的发动机工况需求,共轨压力的建立时间应尽可能小,即:

$$\text{Min}f_2(t_r) = t_r \quad (11)$$

式中: t_r 表示上升时间。

因此本文中的共轨系统结构参数优化问题是一个多目标优化问题,对于该多目标优化问题,本文利用加权思想将多目标优化变成单目标优化,因此适应度函数为:

$$\text{Min}f(p_i, t_r) = k_1 f_1(p_i) + k_2 f_2(t_r) \quad (12)$$

式中: k_1 、 k_2 表示共轨压力波动及上升时间的加权因子,考虑到轨压波动的数值范围是 (1,10) 而上升时间的数值范围为 (0.16,0.25),且本次优化更看重的是降低轨压波动这一优化目标,因此选取 $k_1 = 1, k_2 = 10$ 。

优化变量的选取是优化算法的基础,是设计最后所需确定的参数,通过对共轨系统动力学的分析,本文选取共轨管体积 V_r 以及阻尼孔直径 D_{damp} 作为优化变量。

2.2.2 约束条件的选取

为保证共轨系统的安全以及共轨系统结构的合理性,必须根据实际的共轨系统对流体流动,共轨管体积,阻尼孔直径等进行约束,约束条件如表 3 所示。对于几何约束条件,在变量赋值时可以进行变量范围的约束,对于目标约束条件,采用惩罚函数策略,将约束条件转化成目标函数中的惩罚项,从而将一个有约束的优化问题转化成无约束的优化问题,对于最小化的非线性问题,通常采用加法形式构造目标函数,惩罚项由惩罚因子和对违反约束的惩罚构成,因此适应度函数(11)最终的表达形式为:

$$\text{Min}f(p_i, t_r) = (1 + w_c) \cdot (k_1 f_1(p_i) + k_2 f_2(t_r)) \quad (13)$$

式中: w_c 为惩罚因子,当共轨压力的平均波动小于 5×10^5 Pa,且上升时间小于 0.2 s 时, $w_c = 0$; 否则 $w_c = 100$ 。

表 3 约束条件的选取

Table 4 Selection of constraints

约束类型	约束变量	约束区间
几何约束	共轨管体积/cm ³	[5, 20]
	阻尼孔直径/mm	[0.5, 2]
目标约束	轨压平均波动/(10 ⁵ Pa)	[0, 5]
	上升时间/s	[0, 0.2]

2.2.3 共轨系统结构参数优化结果及分析

GDI 共轨系统各个结构相互耦合是共轨系统的一个特点,目前国内对共轨系统结构的优化研究大多数集中于对单个结构参数进行优化,未考虑各结构间对共轨压力的耦合效应。本文考虑到共轨管体积和阻尼孔直径对共轨系统轨压的影响存在耦合关系,因此,对阻尼孔直径以及共轨管体积进行多变量结构参数优化。相比于单变量的遗传算法,多变量的遗传算法有以下不同:

(1)变量维数。变量维数由 1 维变成 2 维,考虑到变量之间的相互影响,此时的种群规模及种群代数应适当增大。

(2)编码方式。之前的单变量优化采用的是二进制编码,随着变量个数的增加,二进制编码会导致算法速度减慢,因此多变量优化采用了实数编码的方式。

具体的改进型遗传算法参数设置如下:变量个数为 2;种群规模为 20;代数为 20;精英个体为 2;交叉概率为 0.9;变异概率为 0.1;变量范围为 0.1~2 mm,3~20 cm²。

基于改进型遗传算法的 GDI 共轨系统结构参数优化实验结果如图 11 所示。

通过图 11(a)可以看出:随着种群代数的增加,每代种群适应度函数的最小值和平均值逐渐减小,前 4 组平均数值大,是由于此时的共轨管体积与阻尼孔直径选取不合理导致轨压波动或上升时间不满足约束条件造成的;图 11(b)更好地显示了 6 代以后种群收敛过程;图 11(c)代表每代种群各个变量间的平均距离;图 11(d)给出了最终的优化结果:阻尼孔直径为 0.9083 mm,共轨管体积为 18.5812 cm³。

图 12 给出了阻尼孔直径以及共轨管体积优化前后的对比结果。优化后共轨系统的轨压波动变小,上升时间有所增加,这是因为本文在轨压波动及上升时间这两个优化指标中更看重轨压波动这一指标,因此在目标函数中轨压波动占比更大一些,若想加大上升时间的比重可以适当地调节权值 k_1 、 k_2 。

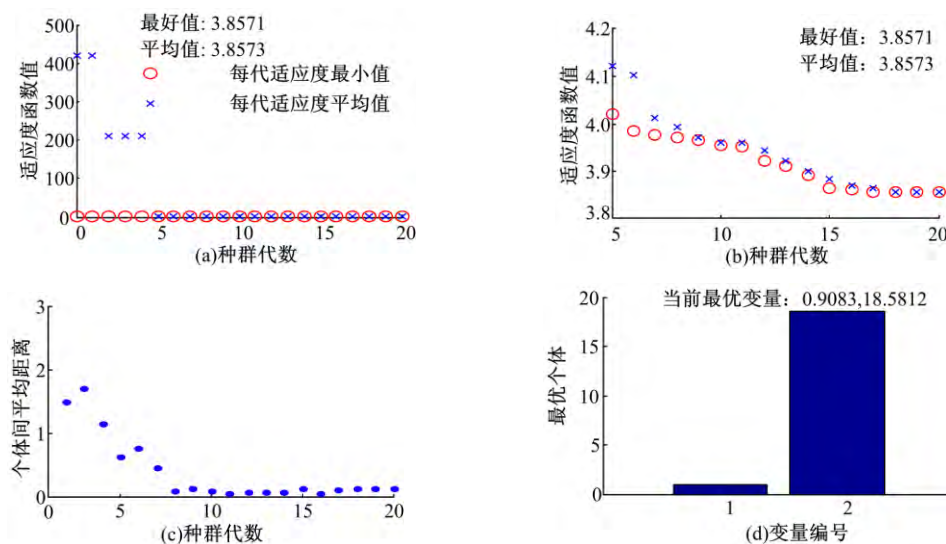


图 11 共轨管体积及阻尼孔直径优化结果

Fig. 11 Optimization results of common rail pipe volume and damping hole diameter

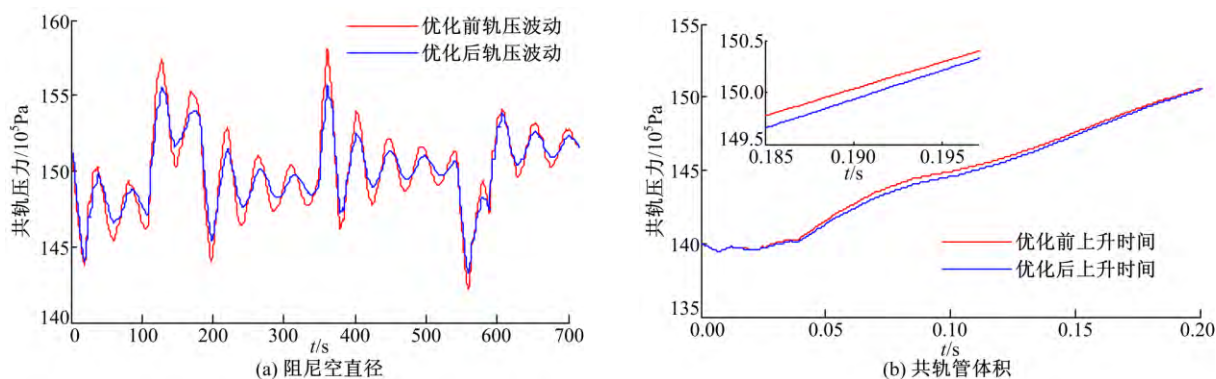


图 12 共轨系统结构参数优化前后结果对比

Fig. 12 Comparison of results between before and after optimization

通过表 4 可以更清晰地看出,优化后的阻尼孔直径由 1 mm 变为 0.9083 mm,共轨管体积由 12.036 cm^3 变为 18.5812 cm^3 ,共轨压力波动由 $2.7494 \times 10^5 \text{ Pa}$ 优化至 $1.9338 \times 10^5 \text{ Pa}$,减少了 29.7%。

表 4 阻尼孔与共轨管多变量优化前后结果

Table 4 Optimization results of common rail pipe volume and damping hole diameter

参数	优化前	优化后
共轨管体积/ cm^3	12.036	18.5812
阻尼孔直径/mm	1	0.9083
轨压波动/ (10^5 Pa)	2.7494	1.9338
上升时间/s	0.18957	0.19233

因此,在进行 GDI 共轨系统结构参数设计时,考虑各结构间的耦合效应,进行多结构参数优化能够有效降低共轨压力波动,提升 GDI 共轨系统的性能。

4 结束语

本文为实现对 GDI 共轨系统的结构参数优化,搭建了 GDI 共轨系统的数学及仿真模型,设计了基于前馈和反馈的轨压控制系统,在此基础上,提出了标准遗传算法与序列二次规划算法相结合的改进型遗传算法,进而实现了对共轨系统结构参数的优化,优化后阻尼孔直径由 1 mm 变为 0.9083 mm,共轨管体积由 12.036 cm^3 变为 18.5812 cm^3 ,共轨压力波动由 $2.7494 \times 10^5 \text{ Pa}$ 减少至 $1.9338 \times 10^5 \text{ Pa}$,减少了 29.7%,有效降低了共轨系统轨压波动。为 GDI 共轨系统结构参数的优化设计提供了一种新的思路。此外,考虑到共轨系统参数优化过程中存在约束,因此采用模型预测控制(MPC)做控制系统与共轨系统结构参数协同设计是可行的,这也将是作者后续将要开展的研究内容。

参考文献:

- [1] Yan F J, Wang J M. Common rail injection system iterative learning control based parameter calibration for accurate fuel injection quantity control [J]. International Journal of Automotive Technology, 2011, 12(2): 149-157.
- [2] Luo Z L, Huang K. Optimized design of structure parameter of new fuel injection system [J]. Advanced Materials Research, 2013, 655: 486-490.
- [3] 张斌. 高压共轨系统高压泵结构参数对轨压波动影响的仿真研究[D]. 长春: 吉林大学汽车工程学院, 2012.
- Zhang Bin. Research on simulation of effects of high pressure pump structural parameters on the fluctuation of rail pressure[D]. Changchun: College of Automotive Engineering, Jilin University, 2012.
- [4] 吕晓辰, 李国岫, 孙作宇, 等. 高压油管结构对电控单体泵燃油系统性能的影响[J]. 兵工学报, 2016, 37(10): 1778-1787.
- Ly Xiao-chen, Li Guo-xiu, Sun Zuo-yu, et al. Effect of high pressure fuel pipe structure on performance of electronic unit pump fuel system [J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(10): 1778-1787.
- [5] 袁亚飞, 李丽, 宋睿智, 等. GDI 喷油器喷嘴结构参数对喷雾特性影响分析[J]. 现代车用动力, 2016 (3): 22-27.
- Yuan Ya-fei, Li Li, Song Rui-zhi, et al. Analysis of influence of key structure parameters about spray characteristic of injector in gasoline direct injection system [J]. Modern Vehicle Power, 2016 (3): 22-27.
- [6] 裴海灵, 周乃君, 杨南, 等. 基于多学科设计优化的共轨管设计优化[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2011, 42(1): 234-239.
- Pei Hai-ling, Zhou Nai-jun, Yang Nan, et al. Rail tube optimization based on multidisciplinary design optimization [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(1): 234-239.
- [7] 葛继科, 邱玉辉, 吴春明, 等. 遗传算法研究综述[J]. 计算机应用研究, 2008, 25(10): 2911-2916.
- Ge Ji-ke, Qiu Yu-hui, Wu Chun-ming, et al. Summary of genetic algorithms research [J]. Application Research of Computers, 2008, 25(10): 2911-2916.
- [8] 赵万忠, 施国标, 林逸, 等. 基于遗传算法的 EPS 系统参数优化[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2009, 39(2): 286-290.
- Zhao Wan-zhong, Shi Guo-biao, Lin Yi, et al. Parameter optimization of EPS system based on genetic algorithm [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2009, 39(2): 286-290.
- [9] 董立岩, 苑森淼, 刘光远, 等. 一种基于遗传算法的受限制的分类器学习算法[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2007, 37(3): 595-599.
- Dong Li-yan, Yuan Sen-miao, Liu Guang-yuan, et al. Constrained classifier learning algorithm based on genetic algorithm [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2007, 37 (3): 595-599.
- [10] Li H, Zuo H, Liang K, et al. Optimizing combination of aircraft maintenance tasks by adaptive genetic algorithm based on cluster search [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2016, 27(1): 140-156.
- [11] Wei X K, Shao W, Zhang C, et al. Improved self-adaptive genetic algorithm with quantum scheme for electromagnetic optimization [J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2014, 8(12): 965-972.