

基于遗传-支持向量机的对置活塞 二冲程柴油机气口高度优化

鲁雪田¹, 张付军^{1,2}, 章振宇¹, 刘宇航³

(1. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081;

2. 北京理工大学 深圳研究院, 广东 深圳 518057;

3. 中国航天科技集团有限公司 中国运载火箭技术研究院
北京航天发射技术研究所, 北京 100076)

摘 要: 以某对置活塞二冲程柴油机为研究对象, 基于一维仿真模型, 利用遗传-支持向量机的方法, 以油耗为优化目标, 进行不同转速工况下进排气口高度组合的自动化寻优。结果表明: 在1200 r/min下, 优化的进、排气口无量纲化高度组合为[0.075, 0.105], 所得最小油耗为220.32 g/(kW·h); 对置活塞二冲程柴油机的气口最优高度应随着转速的提高逐渐增大; 且在高转速(大于1600 r/min)下, 排气口最优高度增加趋势更加明显。

关 键 词: 遗传-支持向量机; 对置活塞二冲程柴油机; 气口高度; 转速; 油耗

中图分类号: V234.2

文献标志码: A

Optimization of port height of opposed-piston two-stroke diesel engine based on GA-SVM

LU Xuettian¹, ZHANG Fujun^{1,2}, ZHANG Zhenyu¹, LIU Yuhang³

(1. School of Mechanical Engineering,

Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Shenzhen Research Institute,

Beijing Institute of Technology, Shenzhen Guangdong 518057, China;

3. Beijing Institute of Space Launch Technology,

China Academy of Launch Vehicle Technology,

China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100076, China)

Abstract: Taking fuel consumption as the optimization goal, the automatic optimization of the intake and exhaust port height of an opposed-piston two-stroke diesel engine prototype for various engine speeds was simulated experimentally by using the genetic-support vector machine method on the basis of one-dimensional simulation model. The results showed that under the low engine speed such as 1200 r/min, the combination of optimized dimensionless intake and exhaust ports height was [0.075, 0.105], and the minimum fuel consumption was 220.32 g/(kW·h). For the opposed-piston two-stroke diesel engine, the optimized port

收稿日期: 2019-05-04

基金项目: 深圳市科技创新基金项目(JCYJ20170817114345260)

作者简介: 鲁雪田(1994—), 女, 硕士生, 主要研究方向为发动机系统结构设计及发动机性能仿真与匹配等。

引用格式: 鲁雪田, 张付军, 章振宇, 等. 基于遗传-支持向量机的对置活塞二冲程柴油机气口高度优化[J]. 航空动力学报, 2019, 34(11): 2387-2394. LU Xuettian, ZHANG Fujun, ZHANG Zhenyu, et al. Optimization of port height of opposed-piston two-stroke diesel engine based on GA-SVM[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(11): 2387-2394.

height for either intake port or exhaust port monotonically increased with the increasing engine speed. Exhaust port height increased more obviously than that of intake port for optimized port height under high engine speed (engine speed was greater than 1600 r/min).

Key words: genetic-support vector machine; opposed-piston two-stroke diesel engine; port height; engine speed; fuel consumption

对置活塞二冲程柴油机作为一种新型结构发动机,与传统发动机相比,取消了复杂的气缸盖和配气机构等部件,结构简化、紧凑^[1],达到了轻量化设计的目标;同时对置活塞二冲程柴油机具备高功率密度^[2-5]、高指示热效率^[6]的明显优势。上述突出优势使对置活塞二冲程柴油机在航空动力、军用车辆^[7]、辅助动力装置^[8]等方面都得到广泛的应用。其作为小型战斗机、侦察机、诱饵机的动力单元,在战场上发挥着关键作用,在无人机等航空发动机领域得到了迅速发展。

由于二冲程柴油机换气过程的特殊性^[9],换气过程对于发动机性能产生十分重要的影响。特别是对于采用“气口-气口”式直流扫气换气结构的对置活塞二冲程柴油机,换气过程中新鲜充量与残余废气产生一定的掺混,换气系统的结构参数对换气品质及缸内气流的运动形式具有重要影响,进而影响发动机的性能。因此,换气系统中气口结构的优化设计对于发动机的换气过程以及整机性能都具有至关重要的作用^[10-11]。

Schuh 和 Chehroudi^[12]采用激光多普勒的方法对进气口末端的气流速度进行了测量,通过研究不同进气口形状下进气口末端气流速度研究了不同进气口形状对扫气效率的影响。Ravi 和 Marathe^[13-14]通过多维耦合模型预测了气口尺寸和开闭时刻对于换气过程的影响,结果表明较大的进气口尺寸、进气口的早开和迟闭对于换气过程有促进作用,而排气口的早闭会导致捕获率的上升和给气比的下降。Hofbauer^[15]建立了对置活塞二冲程柴油机的一维仿真模型,并基于 Star-CD 软件建立三维 CFD 模型,研究了不同进排气口高度对换气过程的影响趋势。张文春^[16]、张航^[17]、章振宇^[9]、吴丹^[1]通过试验及一维、三维耦合仿真方法研究了气口高度和宽度、进气口径向倾角和仰角对换气过程和缸内气流组织的影响。通过分析可以看出,国内外针对换气系统气口结构的研究主要集中在不同气口结构对换气过程影响的机理性、规律性研究,而对于特定气口结构参数的优化设计及其实用性方法技术有待进一步开发。

本文以通过一维仿真模型得到不同进排气口高度组合的油耗值作为训练样本,利用遗传-支持向量机(GA-SVM)的方法,将机器学习的思想引入优化计算,实现了在满足设计功率的基础上,以经济性为优化目标,不同转速工况下进排气口高度组合的自动化寻优。通过该气口高度优化方法确定的进排气口高度参数,对对置活塞二冲程柴油机可变压缩比技术的发展具有指导意义;同时对米勒循环发动机的优化也将具有十分重要的意义。

1 对置活塞二冲程柴油机换气系统

图 1 所示为对置活塞二冲程柴油机换气系统结构示意图。表 1 所示为该对置活塞二冲程柴油机结构参数。发动机气缸水平放置,进、排气口分别在缸套两侧呈周向布置,进、排气活塞水平对置地布置在缸套内,通过活塞的运动来控制气口的开启与关闭,进排气口外部布置有进排气腔。气口呈长方形,定义气口在气缸轴线方向为气口高度方向,与气缸轴线相垂直方向为气口宽度方向。

定义无量纲气口高度(下文简称为气口高度)为

$$\alpha = \frac{H}{S} \tag{1}$$

式中 H 为气口实际高度, S 为发动机冲程。对置活塞柴油机由于活塞对置布置,因此发动机的冲程是两对置活塞行程的总和。

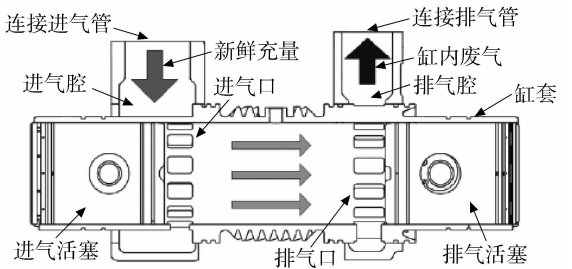


图 1 对置活塞二冲程柴油机换气系统结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the scavenging system structure of the opposed-piston two-stroke diesel engine

表 1 对置活塞二冲程柴油机结构参数

Table 1 Structure parameters of opposed-piston two-stroke diesel engine

参数	数值
缸径/mm	100
冲程/mm	110
几何压缩比	22
实际压缩比	15.8
排量/L	3.4
曲拐偏移角/(°)	8.5
曲轴转角(排气口开启时刻)/(°)	-78
曲轴转角(进气口开启时刻)/(°)	-54
曲轴转角(进气口关闭时刻)/(°)	68
曲轴转角(排气口关闭时刻)/(°)	65
进气口倾角/(°)	20

2 一维模型建立与试验验证

2.1 一维模型的建立

采用 GT-Power 建立对置活塞二冲程柴油机的一维仿真模型,如图 2 所示。模型中包括中冷系统、增压系统和对置活塞二冲程内燃机系统。其中增压系统采用机械增压器和涡轮增压器串联复合增压的方式。控制单元包括:压差控制单元、内燃机功率控制单元和排气背压控制单元。换气过程的进排气压差控制在 0.02 MPa,排气背压保持在 0.18 MPa。

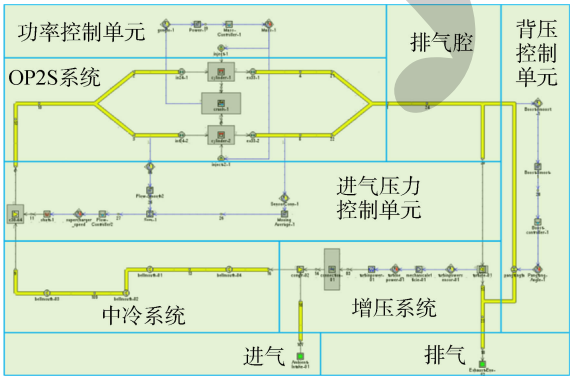


图 2 对置活塞二冲程柴油机一维模型

Fig. 2 One-dimensional model of opposed-piston two-stroke diesel engine

2.2 一维仿真模型验证

对置活塞二冲程柴油机换气过程和缸内燃烧

有着紧密的耦合关系,为验证文中第 2.1 节中一维仿真模型的准确性,本文通过原理样机试验获得发动机换气特性及缸内燃烧特性试验数据,作为一维仿真模型校核的依据。对置活塞二冲程柴油机原理样机的台架示意图如图 3 所示。整个系统可以分为三个子系统:Ⅰ为控制系统;Ⅱ为数据采集系统;Ⅲ为对置活塞二冲程柴油机系统。

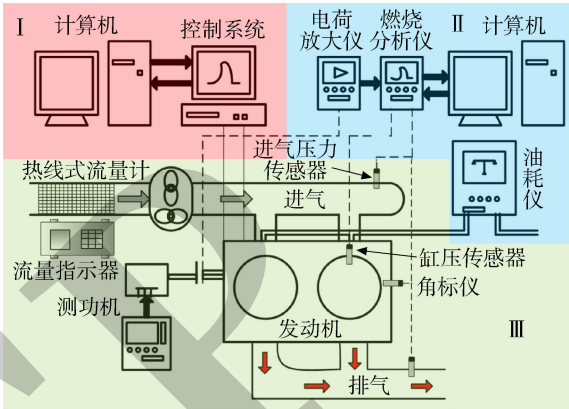


图 3 对置活塞二冲程柴油机试验台架示意图

Fig. 3 Schematic diagram of experiment bench of opposed-piston two-stroke diesel engine

2.2.1 一维仿真模型缸压及油耗试验验证

缸内压力(简称为缸压)试验数据和仿真数据的对比如图 4 所示,燃油消耗率(简称为油耗)试验数据和仿真数据如图 5 所示。从图 4、图 5 可以看出,一维模型所得到的缸压和油耗数据与试验数据吻合度良好。

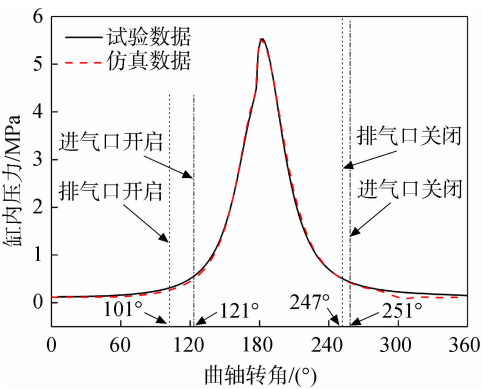


图 4 缸压试验数据和仿真数据

Fig. 4 Experiment and simulation data of cylinder pressure

2.2.2 一维仿真模型换气品质试验验证

该原理样机试验中,换气品质的测试采用示踪气体方法,测试方法的详细介绍可见文献[18]。

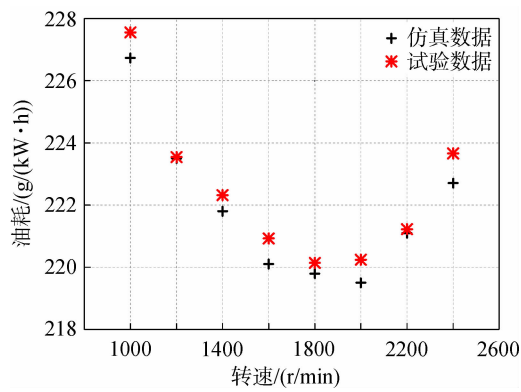


图 5 油耗试验数据和仿真数据

Fig. 5 Experiment and simulation data of fuel consumption

在进气道中注入定量示踪气体,并在排气管中收集样本气体进行分析。通过发动机工作循环结束后,进排气管中的甲烷质量分数变化就可以计算出换气过程的捕获率^[19]。通过安装在进气管上的流量计可以计算出给气比。给气比与捕获率都得到后,扫气效率也可以计算出。因此,扫气效率与给气比的关系图即可得出,如图 6 所示^[10,13]。从试验与仿真的数据来看,所建立的仿真模型准确性良好。

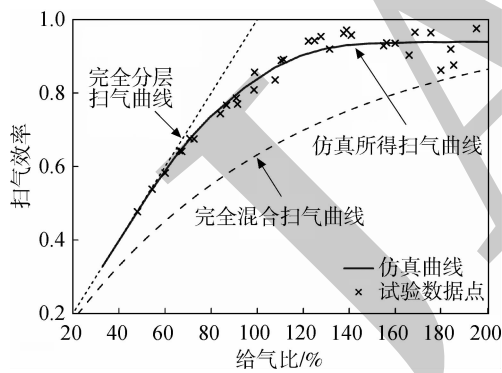


图 6 扫气效率与给气比的试验及仿真结果

Fig. 6 Experiment and simulation results of scavenging efficiency and delivery ratio

3 基于 GA-SVM 的气口高度组合优化设计

由于进排气口高度的改变对发动机油耗的影响呈现非单调的变化规律^[9]。因此以油耗作为经济性评价指标,采用 GA-SVM 的方法对不同转速下的进排气口高度组合进行优化计算具有重要的意义。

3.1 GA-SVM 理论基础

支持向量机(support vector machine,SVM)

是由 Vapnik 基于统计学习理论提出的一种机器学习理论^[20],是一种专门针对小样本数量情况下的回归分析方法。由于对置活塞二冲程柴油机进排气口高度的变化对于油耗的影响较为复杂,因此通过对部分进排气口参数组合进行计算形成训练样本,再由 SVM 进行预测,不断缩小计算范围可以为气口参数组合提供有效的指导。

虽然机器学习理论可以通过样本学习来逼近实际值,但是仍然会与实际值有一定的误差。本质上讲预测精度的丧失是由 $C^{[21-22]}$ (惩罚因子)和 ξ_i, ξ_i^* (松弛因子)造成的^[23],因此如何选择惩罚因子和松弛因子对实现 SVM 的准确预测十分重要。本文对于上述因子的优化选择是基于遗传算法(GA)。

GA 是由美国密歇根大学的 Holland 教授借鉴生物进化论“优胜劣汰”现象提出的全局优化算法。相比于传统的优化算法,GA 不需要知道确切的优化函数表达式,具有较为普适的通用性,并且由于算法本身的特点,其并行性计算和扩展性都非常良好。该算法主要分为四部分:参数编码、适应度函数的确定、遗传操作过程和控制参数的确定。本文在计算过程中群体的数量为 20,进化代数 为 200,惩罚因子和松弛因子的取值范围均为 0~100,适应度函数 $F(x)$ 为

$$F(x) = \frac{1}{z} \sum_{i=1}^z (g_i - e_i)^2 \tag{2}$$

式中 z 为训练样本数量, g_i 为训练样本真实值, e_i 为通过 GA-SVM 所得到的预测值。

3.2 优化目标函数

本文的目标是优化进排气口高度参数组合使得发动机在满足设计功率的基础上能够达到油耗的最小值。

根据进排气口高度的定义可知,进排气口高度的极限分别为 0 和 0.5,通过参考文献[24],确定了进排气口高度的取值范围。优化目标函数如下所示:

$$\begin{cases} \min \zeta \\ 0.06 \leq \alpha_{in} \leq 0.12 \\ 0.06 \leq \alpha_{out} \leq 0.12 \\ \Delta p_{ad} = 0.02 \text{ MPa} \\ P_d = 70 \text{ kW} \end{cases} \tag{3}$$

式中 ζ 为油耗, α_{in} 为进气口高度, α_{out} 为排气口高度, Δp_{ad} 为进排气压差, P_d 为设计功率。

3.3 优化计算流程

整体优化计算流程如图 7 所示。通过 GT-

Power 建立的一维模型的计算结果作为 GA-SVM 的训练样本输入,首先通过 GA-SVM 预测得到一组预测值,并对预测最小值的区域进行重新划分,作为下一步 GT-Power 中进行训练样本计算的输入;同时每一次通过 GT-Power 计算得到的最小油耗与上一次的计算值进行收敛性判断,如果满足收敛条件,则终止计算,并将该最小值所对应的进排气口高度输出为进排气口高度的最优组合,如果不满足收敛条件则重复上述计算过程直至结果收敛。

图 8 所示为基于 GA-SVM 的具体计算过程和计算区域划分过程示意图。如图 8(a)所示,给定进气口高度的取值范围为 $[\alpha_{in,1}, \alpha_{in,n+1}]$,排气口高度的取值范围为 $[\alpha_{out,1}, \alpha_{out,m+1}]$ 。第一步计算,将进气口高度取值范围均分为 n 段,排气口高度取值范围均分为 m 段,以此来将整个计算范围划分为 $m \times n$ 个区域,并将每个小区域由左下向右上按照所处位置分别命名为 $(1,1), (1,2), \dots,$

(m,n) 。整个区域共有 $(m+1) \times (n+1)$ 种进排气口高度的组合形式(如图中紫色数据点所示)。通过一维模型计算这些进排气口高度的组合所得到的结果作为训练样本数据点。将每个小区域重新划分为 h 段(图中划分为 4 段进行说明),整个区域可以得到 $(h \times n+1) \times (h \times m+1)$ 种进排气口高度的组合形式(图中蓝色数据点所示)作为预测数据点,利用通过训练样本训练好的 GA-SVM 模型对预测数据点进行预测,寻找预测的最小油耗点所在的区域。经过 GA-SVM 方法预测后的最小油耗值可能会出现两种情况:第一种情况,如图中 A 区域所示,预测的最小油耗值处于 A 区域的中间部位,那么需关注 A 区域进行下一次计算;第二种情况是预测的最小油耗值处于某一计算节点位置,如 B 区域中的紫色计算节点。此时,以计算节点为中心取与 A (或 B 区域)相同的计算区域进行下一次计算,此时第一次计算完成。

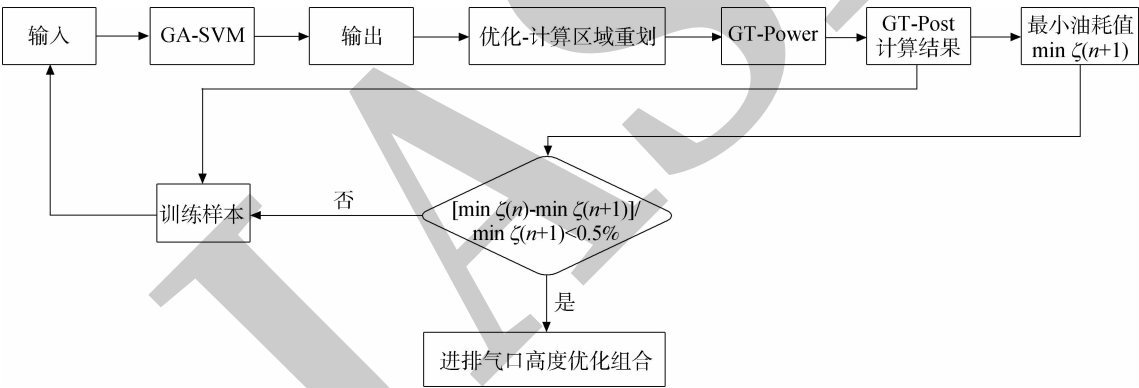


图 7 基于 GA-SVM 的气口高度组合整体优化流程
Fig. 7 Overall optimization process of port height combinations based on the GA-SVM method

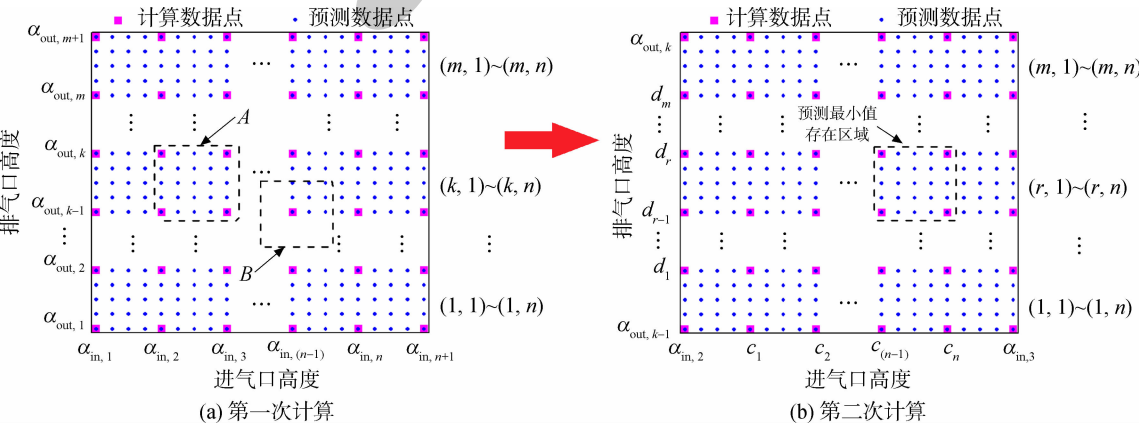


图 8 计算过程及区域划分过程示意图
Fig. 8 Schematic diagram of the calculation process and regional division

进行下一次预测步骤。将图中黑色虚线所包含的区域(A或B区域)重新提取,按照第一步的计算流程重复计算,寻找最小油耗点所在区域,如图8(b)黑色虚线所包含区域所示,第二次计算步骤完成。按照同样的原理再进行后续的计算。当下一次通过一维模型计算出的最小油耗值与上一次计算出的最小油耗值数据误差小于0.5%,计算结果收敛,计算终止并取其中满足最小油耗的进排气口高度组合作为优化值。

4 优化计算结果

4.1 1200 r/min 转速工况下计算结果及验证

本节将以1200 r/min转速工况为计算示例具体介绍该工况下优化流程及结果,其他转速工况下同理。本次计算取 $m=n=h=2$,预测样本数量为25个,一维仿真模型计算结果作为训练样本,如表2所示,根据上文中所述的思路,在后面的计算中保持 $m、n、h$ 参数不变。

表 2 进排气高度组合计算结果

Table 2 Calculation results of the intake and exhaust ports height combinations			
编号	α_{in}	α_{out}	$\zeta/(g/(kW \cdot h))$
1	0.06	0.06	261.542
2	0.06	0.09	222.607
3	0.06	0.12	223.117
4	0.09	0.06	279.359
5	0.09	0.09	221.293
6	0.09	0.12	222.434
7	0.12	0.06	295.981
8	0.12	0.09	233.728
9	0.12	0.12	224.310

图9为GA-SVM模型预测值与真实计算值的比较。可以看出一维仿真模型计算值与GA-SVM预测值偏差很小,整体的方均根误差值为3.081,误差较小,总体预测情况良好。因此所训练出的预测模型可以作为下一步计算的基础。

基于GA-SVM预测优化的各步计算结果如图10所示,首次一维仿真模型计算所得的最小油耗值为221.293 g/(kW·h),此时的进排气口高度组合为[0.09,0.09]。整个计算域被划分为4块子区域,分别为(1,1),(1,2),(2,1),(2,2)。第一次计算结果显示通过预测最小油耗值处于(2,1)区

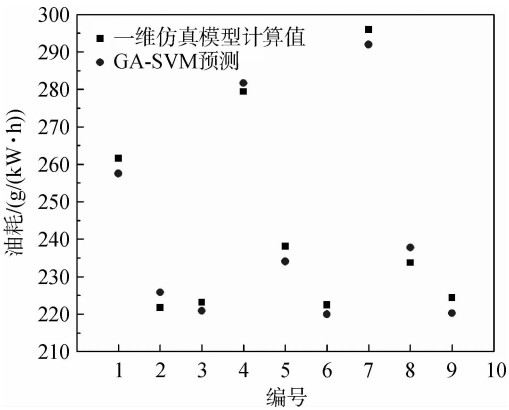


图 9 训练集与预测数值比较

Fig. 9 Comparison of training set and predicted value

域,预测的最小数值为218.493 g/(kW·h),此时进气口高度范围为0.06~0.09,排气口高度范围为0.09~0.12;第二次计算基于(2,1)区域进行再次划分得到黑色正方形所示的进排气口高度排列组合。通过一维仿真模型计算这些组合所得的最小结果为220.32 g/(kW·h),此时的进排气口高度组合为[0.075,0.105],该区域的计算及预测结果如图10(b)所示。第一次计算中,一维仿真模型计算所得的最小结果为221.293 g/(kW·h)。两次计算结果的误差为 $(221.293 - 220.32)/220.32 = 0.442\%$,最小值误差已经小于0.5%,因此可以终止计算,最终的最优进排气口高度组合为[0.075,0.105],所得最小油耗为220.32 g/(kW·h)。

取进气口高度范围为[0.06~0.09],排气口高度范围为[0.09~0.12],进排气口高度取值间隔为0.005,利用遍历法将每个进排气口高度排列组合进行计算可以得到如图11所示的等高线图。图中红色五角星图标表示通过GA-SVM方法得到的优化后的进排气口高度组合。从图中可以看出,基于GA-SVM方法预测所得到的进排气口高度组合位于通过遍历法计算所得到的油耗较小的区域。这说明通过GA-SVM方法优化进排气口高度组合的方法是可行的。

从图11可以看出,通过遍历法计算,在进排气高度取值范围内分别取7个值,经过排列组合,要经过 $7 \times 7 = 49$ 次计算才可以得到如图所示的云图。而通过GA-SVM方法只需要进行两次计算,每次计算9个算例就可以准确地预测出进排气口高度的优化组合。因此,通过GA-SVM优化进排气口高度组合具有较小的计算量。

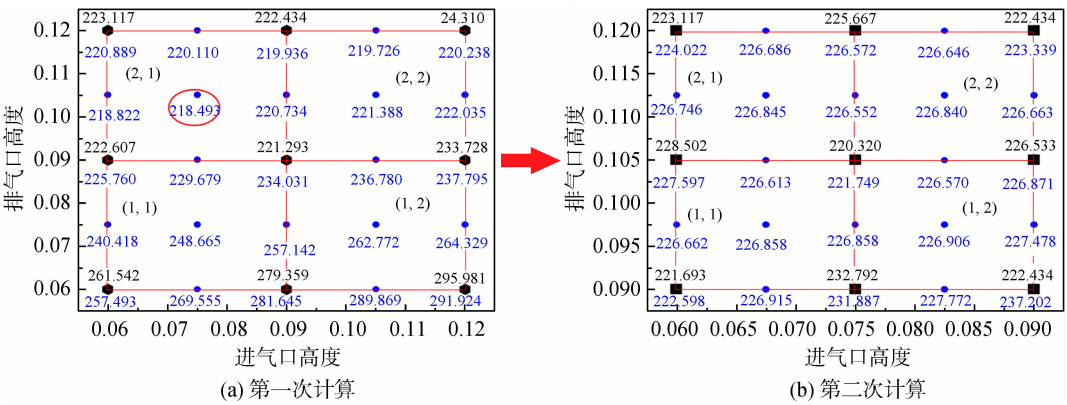


图 10 基于 GA-SVM 预测优化的详细计算过程

Fig. 10 Detailed calculation process based on GA-SVM predictive optimization

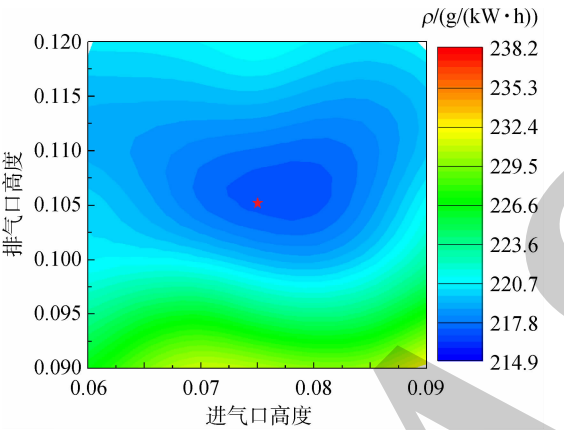


图 11 GA-SVM 计算与遍历法计算结果比较

Fig. 11 Comparison of GA-SVM calculation and ergodic calculation results

4.2 不同转速工况计算结果

基于前文中总结的 GA-SVM 的进排气口高度优化方法,在满足不同转速的设计功率的条件下,对各转速工况下的进排气口高度组合进行了优化计算,结果如图 12 所示。从图中可以看出,气口高度随着转速的升高基本呈现逐渐增大的趋势,这主要是由于转速的增加会使换气时间变短,气口高度的增加可以增大气口开启面积使换气过程改善。当转速低于 1600 r/min 时,随着转速的增加进气口高度和排气口高度都有明显的增大;当转速高于 1600 r/min 时,随着转速的增加进气口高度的增加并不明显,排气口高度仍有较明显的增加。由于排气口高度的增加会使自由排气阶段开始时刻提前,自由排气阶段排出缸外的气体质量增加,这会使进气口开始时,缸压更低,更有利于换气过程。因此当转速较高时,排气口高度设计应该较大。

图 12 中三角型与圆点型数据点分别给出了

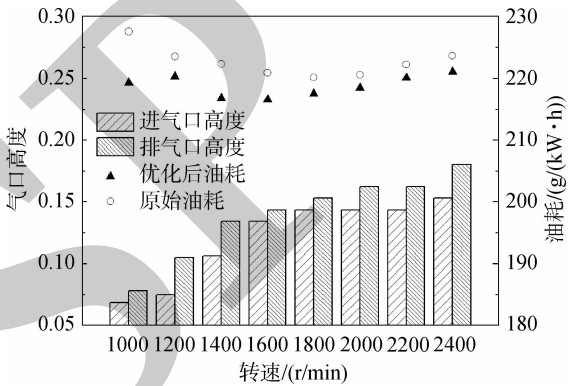


图 12 基于 GA-SVM 方法的优化结果

Fig. 12 Optimization results based on GA-SVM method

各转速工况下基于 GA-SVM 方法优化气口高度后得到的发动机油耗优化值与原始试验所测得的油耗值,通过对比可明显看出,优化气口高度后的发动机的油耗值有了明显降低,即发动机经济性有了显著提高。

5 结 论

- 1) 利用 GA-SVM 的方法预测最优进排气高度组合所在区域并结合一维仿真计算模型,可以快速有效地寻找到满足某一设计功率的优化的进排气口高度组合。
- 2) 对于对置活塞二冲程柴油机,随着发动机转速的提高,气口高度的取值应当逐渐增大。当转速低于 1600 r/min 时,进排气口高度的改变对于发动机油耗都有重要的影响;当转速高于 1600 r/min 时,排气口高度的影响将会更加明显。

参考文献:

[1] 吴丹. 对置活塞二冲程柴油机换气过程研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.

WU Dan. Investigation on the gas exchange process of an

- opposed-piston two-stroke diesel engine[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [2] REDON F, KALEBJIAN C, KESSLER J, et al. Meeting stringent 2025 emissions and fuel efficiency regulations with an opposed-piston, light-duty diesel engine[R]. SAE Technical Paper 2014-01-1187, 2014.
- [3] 陈文婷, 诸葛伟林, 张扬军, 等. 双对置二冲程柴油机扫气过程仿真研究[J]. 航空动力学报, 2010, 25(6): 1322-1326.
CHEN Wenting, ZHUGE Weilin, ZHANG Yangjun, et al. Simulation on the scavenging process of the opposite two-stroke diesel engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(6): 1322-1326. (in Chinese)
- [4] 马富康, 赵长禄, 张付军, 等. 对置活塞二冲程汽油机分层稀燃组织研究[J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(1): 12-19.
MA Fukang, ZHAO Changlu, ZHANG Fujun, et al. Research on stratified mixture lean burn of opposed-piston two-stroke gasoline engine[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2018, 38(1): 12-19. (in Chinese)
- [5] 高宏力, 张付军, 刘波澜, 等. 空气辅助喷射闪急沸腾喷雾特性试验[J]. 航空动力学报, 2019, 34(1): 63-72.
GAO Hongli, ZHANG Fujun, LIU Bolan, et al. Experiment on spray characteristics of air-assisted injection under flash boiling conditions[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(1): 63-72. (in Chinese)
- [6] HEROLD R E, WAHL M H, REGNER G, et al. Thermodynamic benefits of opposed-piston two-stroke engines[R]. SAE Technical Paper 2011-01-2216, 2011.
- [7] KALKSTEIN J, ROVER W, CAMPBELL B, et al. Opposed piston opposed cylinder (OPOC7M) 5/10 kW heavy fuel engine for UAVs and APUs[M]. Washington DC: SAE, 2006: 26-45.
- [8] FRANKE M, HUANG H, LIU J P, et al. Opposed piston opposed cylinder (opocTM) 450 hp engine: performance development by CAE simulations and testing[R]. SAE Technical Paper 2006-01-0277, 2006.
- [9] 章振宇. 对置活塞二冲程柴油机工作过程耦合仿真与试验研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
ZHANG Zhenyu. Coupling simulation and experimental research on the working process of an opposed-piston two-stroke diesel engine[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [10] 董雪飞. 对置活塞二冲程柴油机换气过程及增压匹配研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
DONG Xuefei. Research on scavenging process and turbocharging matching of an opposed-piston two-stroke diesel engine[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [11] 裴玉姣. 对置活塞式二冲程柴油机直流扫气过程仿真分析及优化[D]. 太原: 中北大学, 2013.
PEI Yujiao. Analysis and optimization on the uniflow scavenging process for the opposed piston two-stroke diesel engine[D]. Taiyuan: North University of China, 2013. (in Chinese)
- [12] SCHUH D, CHEHROUDI B. LDV measurements of intake port flow in a two-stroke engine with and without combustion[R]. SAE Technical Paper 920424, 1992.
- [13] RAVI M R, MARATHE A G. Effect of inlet and exhaust pressures on the scavenging characteristics of a carbureted uniflow scavenged engine[R]. SAE Technical Paper 920840, 1992.
- [14] RAVI M R, MARATHE A G. Effect of port sizes and timings on the scavenging characteristics of a uniflow scavenged engine[J]. SAE Transactions, 1992, 101(3): 1571-1589.
- [15] HOFBAUER P. Opposed piston opposed cylinder (OPOC) engine for military ground vehicles[R]. SAE Technical Paper 2005-01-1548, 2005.
- [16] 张文春. 对置活塞发动机运动和动力特性研究[D]. 辽宁大连: 大连海事大学, 2013.
ZHANG Wenchun. The research of kinematic and dynamic characters of opposed piston engines[D]. Dalian, Liaoning: Dalian Maritime University, 2013. (in Chinese)
- [17] 张航. 二冲程船用柴油机扫气过程 CFD 模拟分析[D]. 辽宁大连: 大连海事大学, 2011.
ZHANG Hang. CFD simulation and analysis of scavenging process for two-stroke marine diesel engine[D]. Dalian, Liaoning: Dalian Maritime University, 2013. (in Chinese)
- [18] 董雪飞, 赵长禄, 张付军, 等. 对置活塞二冲程柴油机换气过程的试验[J]. 内燃机学报, 2015, 33(4): 362-369.
DONG Xuefei, ZHAO Changlu, ZHANG Fujun, et al. Experiment on the scavenging process of opposed-piston two-stroke diesel engine[J]. Transactions of CSICE, 2015, 33(4): 362-369. (in Chinese)
- [19] LIU Y, ZHANG F, ZHAO Z, et al. Study on the synthetic scavenging model validation method of opposed-piston two-stroke diesel engine[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 104(1): 184-192.
- [20] VAPNIK V N. Statistical learning theory[M]. New York: John Wiley and Sons, 1998.
- [21] 金鑫, 李玉鑑. 不平衡支持向量机的惩罚因子选择方法[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(33): 129-133.
JIN Xin, LI Yulan. Error-cost selection for biased support vector machines[J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(33): 129-133. (in Chinese)
- [22] 王晓初, 王士同, 包芳, 等. 最小化类内距离和分类算法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(3): 532-540.
WANG Xiaochu, WANG Shitong, BAO Fang, et al. Intra-class-distance-sum-minimization based classification algorithm[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2016, 38(3): 532-540. (in Chinese)
- [23] 林升梁, 刘志. 基于 RBF 核函数的支持向量机参数选择[J]. 浙江工业大学学报, 2007, 35(2): 163-167.
LIN Shengliang, LIU Zhi. Parameter selection in SVM with RBF kernel function[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2007, 35(2): 163-167. (in Chinese)
- [24] HOFBAUER P. Opposed piston opposed cylinder (OPOC) engine for military ground vehicles[C]//2005 SAE World Congress. Washington DC, USA: SAE, 2005: 578-618.