

无人机活塞式发动机进排气系统优化

胡春明^{1,2}, 郝蒙蒙¹

(1. 天津大学 天津内燃机研究所, 天津 300072;
2. 天津大学 机械工程学院 内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300072)

摘 要: 针对一款无人机(UAV)用活塞发动机在飞行转速为 6 500 r/min 时扭矩较低以及燃油消耗率较高的问题,提出了一种基于自适应遗传算法(GA)的发动机进排气系统优化方法,进行进排气系统改进设计。使用 GT-Power 软件搭建了该发动机一维仿真模型,并通过台架试验数据验证模型;基于该模型进行了进排气系统结构参数对扭矩和燃油消耗率的敏感性分析,将进气管长度、直径、空滤器后腔容积和排气管长度作为优化变量,使用 Matlab 进行自适应遗传算法优化,使用 Simulink/GT-Power 接口实现数据采集和优化结果反馈。通过台架试验验证了优化结果的准确性。结果表明:在飞行转速为 6 500 r/min 时,经过优化后的发动机扭矩和燃油消耗率都得到明显改善,扭矩最大可以提高 5.51%,燃油消耗率最大降低 6.31%。

关 键 词: 无人机(UAV); 活塞式发动机; 自适应遗传算法; 敏感性分析; 进排气系统优化

中图分类号: V234.2 **文献标志码:** A

Intake and exhaust system optimization of UAV piston engine

HU Chunming^{1,2}, HAO Mengmeng¹

(1. Tianjin Internal Combustion Engine Research Institute,
Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. State Key Laboratory of Engines, School of Mechanical Engineering,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: To solve the problem of torque decrease and high fuel consumption at 6 500 r/min flying speed of an unmanned aerial vehicle for plant protection, a multi-parameter optimization method using adaptive genetic algorithm (GA) based on 1-D thermodynamic simulation model was proposed to optimize the intake and exhaust system of single cylinder gasoline engine. GT-Power model of the UAV engine was built to simulate the engine working condition. The model was calibrated by experimental bench data to ensure the accurate simulation. Influence of structure parameters of intake and exhaust system on torque and fuel consumption was analyzed through design of experiment, and length of intake pipe and exhaust pipe, diameter of intake pipe and second cavity volume of air filter were chosen as optimization variables. The model was used to calculate the objective optimization function and limit conditions. Adaptive genetic algorithm was executed by Matlab which exchanged data by interface of Simulink/GT-Power to receive and feedback results. According to the optimization result of adaptive GA, new intake and exhaust system was mounted on the engine to verify optimization result. Result demonstrated that torque and fuel consumption at flying

收稿日期:2016-10-10
基金项目:国家自然科学基金(51476112)
作者简介:胡春明(1967—),男,研究员、硕士生导师,博士,主要研究方向为内燃机电控技术的应用。

引用格式:胡春明,郝蒙蒙. 无人机活塞式发动机进排气系统优化[J]. 航空动力学报,2018,33(4):1009-1016. HU Chunming, HAO Mengmeng. Intake and exhaust system optimization of UAV piston engine[J]. Journal of Aerospace Power,2018,33(4):1009-1016.

speed of 6 500 r/min of the engine was obviously improved by adaptive GA, and torque was raised by 5.51% and fuel consumption was improved by 6.31%.

Key words: unmanned aerial vehicle (UAV); piston engine; adaptive genetic algorithm (GA); sensitivity analyze; intake and exhaust system optimization

航空活塞发动机以其续航时间长、载重量大等优势被广泛应用为农用无人机动力源。作为一个复杂的多变量系统,无人机发动机的性能受很多因素的影响^[1-2],进排气系统的结构参数是其中十分重要的因素。进排气系统的合理设计可以有效利用进排气动态特性,降低换气阻力,提高充气效率,对于改善发动机经济性与提高动力性有非常重要的意义^[3-5]。

发动机进排气系统各子模块结构参数对发动机性能有非线性影响,使用传统的正交试验优化耗时长,而且难以保证优化结果准确性。近年来,遗传算法、模拟退火算法等被广泛应用于车用发动机控制和优化设计中^[6-9]。Sun 等利用遗传算法优化汽油机进气道结构从而改进进气流动特性,提高发动机性能^[10];Zhao 等使用遗传算法优化 Atkinson 循环发动机的燃油消耗率,经济性提升明显^[11]。对于本文研究的无人机用汽油机,由于其螺旋桨的功率特性,要求发动机在转速为 6 500 r/min 时能够以高扭矩和低油耗运行,以保证在该转速下无人机飞行的动力性与稳定性。因此,本文针对某款无人机汽油机在飞行转速下扭矩不足以及油耗偏高的问题,对该发动机的进排气系统各子模块重要结构参数进行自适应遗传算法优化研究,并通过试验验证了优化结果的正确性。

1 仿真模型搭建与验证

1.1 仿真模型建立

本文的研究对象为一台 650 mL 单缸汽油机,原机主要结构及技术参数见表 1。

本文使用 GT-Power 建立发动机仿真模型,传热模型选用 Woschni 模型。燃烧模型选择准三维燃烧模型 SI Turb。建立的发动机性能仿真模型如图 1 所示。

表 1 试验样机主要技术参数
Table 1 Main technical parameters of the experiment machine

参数	数值及详情
发动机机型	单缸四冲程
缸径/mm	100
行程/mm	83
压缩比	11.5 : 1
进气方式	自然吸气
供油方式	进气道燃油喷射
燃烧室形状	球形燃烧室
最大扭矩/(N·m)	60
最大扭矩转速/(r/min)	5 000

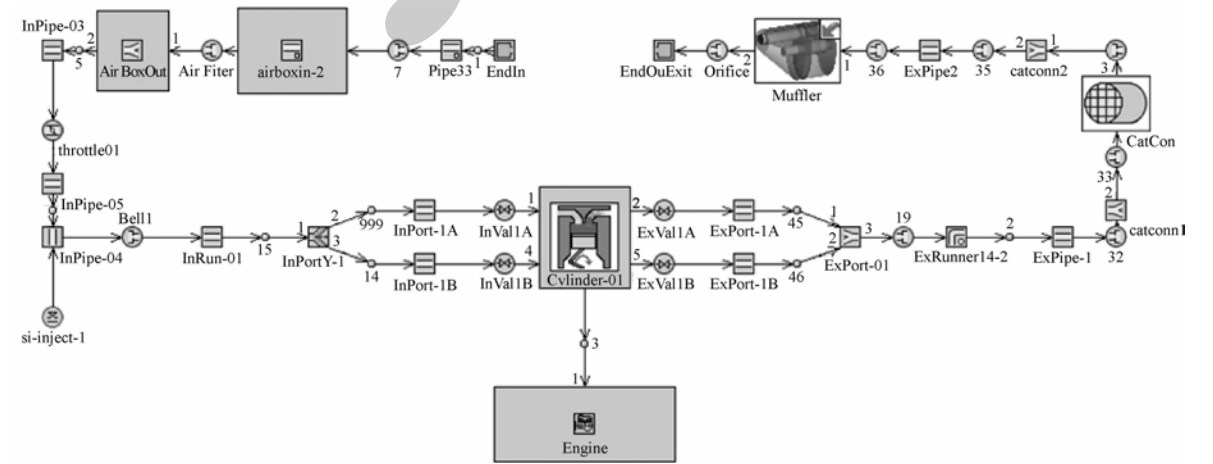


图 1 试验机一维热力学模型

Fig. 1 One-dimensional thermodynamics model of the experiment machine

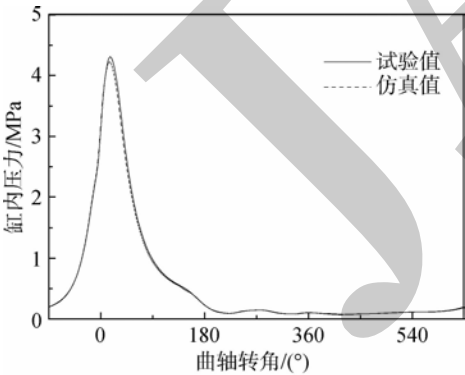
选择 SI Turb 燃烧模型的原因是为了更加精确地模拟发动机的实际运转工况,该燃烧模型会考虑到燃烧室形状、缸内混合气流动、点火正时、点火位置、燃料特性等对燃烧放热率的影响。本模型中,点火正时通过试验采集,缸内混合气流动参数通过气道紊流试验台采集,燃烧特性参数包括稀释指数因子、湍流火焰速度因子、火核增长速度因子、微尺度长度因子,调节以上燃烧特性参数控制模型的误差。

1.2 模型验证

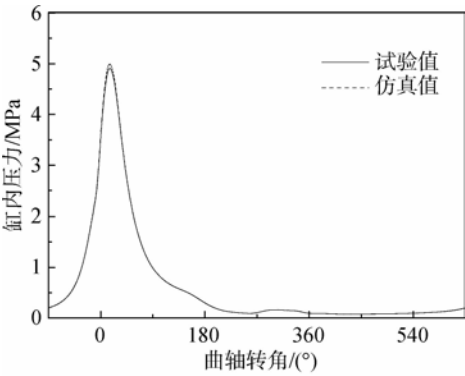
为了确认仿真模型的准确性,通过原发动机的缸压、有效燃油消耗率、转矩等台架试验数据进行模型验证。转速为 4000、5000 r/min,节气门开度为 40% 是该发动机的常用工况,5 000 r/min 转速、100% 节气门开度是发动机最大扭矩点。因此选择以上工况点的缸内压力(简称缸压)仿真计算值与试验值对比,如图 2 所示。

通过对比结果可以发现,仿真模型所计算的缸压曲线与试验获得的缸压曲线基本保持一致,误差在 3% 以内。

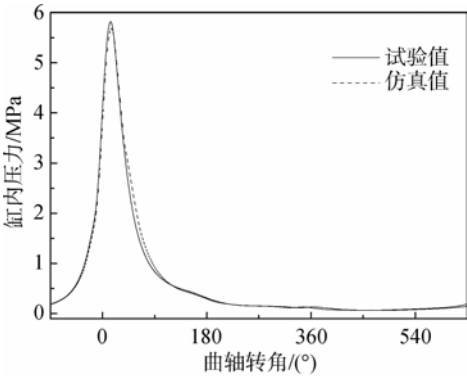
图 3、图 4 分别为原发动机扭矩和燃油消耗率的外特性曲线仿真值与试验值对比,基本趋势保持一致,扭矩最大误差为 3.65%,燃油消耗率



(a) 转速为4000 r/min, 节气门开度为40%



(b) 转速为5000 r/min, 节气门开度为40%



(c) 转速为5000 r/min, 节气门开度为100%

图 2 缸内压力仿真值与试验值对比

Fig. 2 In-cylinder pressure comparison of simulation and experiment

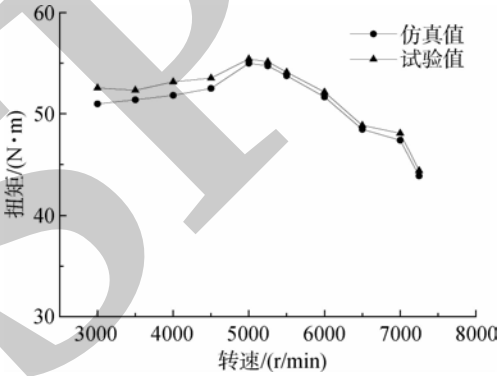


图 3 原发动机扭矩仿真值与试验值对比

Fig. 3 Torque comparison between simulation and experiment of original engine

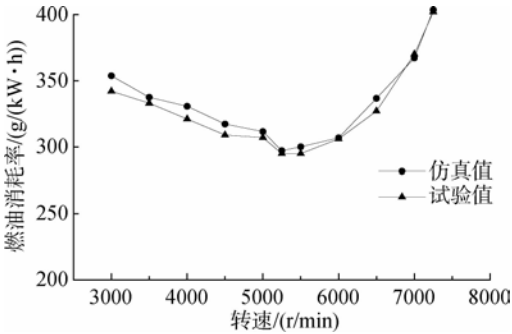


图 4 原发动机燃油消耗率仿真值与试验值对比

Fig. 4 Fuel consumption rate comparison of simulation and experiment of original engine

最大误差为 3.4%。因此,可以认为,使用该 GT-Power 模型可以达到模拟计算的精度要求,进行原机的进排气系统优化设计。

2 进排气系统敏感性分析

发动机的换气过程是影响发动机性能的最主

要因素之一。换气过程是典型的不定常流动,由于存在脉动与谐振,气体的流速和压力都在不断变化^[12-13]。进排气系统的结构参数直接影响压力波的传递与反射,进而影响发动机性能。由于进排气系统结构参数较多,而且并非所有参数都是扭矩与燃油消耗率的关键影响因素,因此本文中选取空滤器前腔容积 V_{in} 、后腔容积 V_{out} 、进气管长度 L_{in} 和直径 D_{in} 、节气门喉口直径 D_{th} 、排气管长度 L_{ex} 和直径 D_{ex} 以及排气管弯曲角度 A_{ex} 共 8 个变量,使用试验设计的方式,分析在转速为 6 500 r/min 时,各个变量对发动机扭矩及燃油消耗率的影响。影响因数计算结果如图 5 所示。

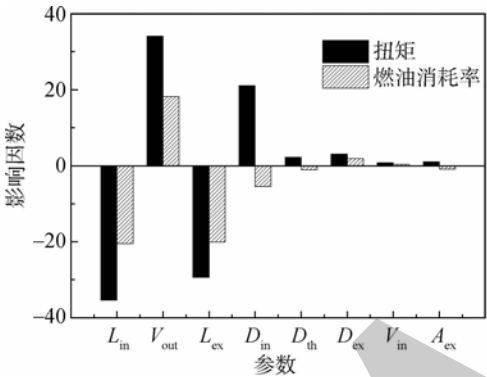


图 5 扭矩和燃油消耗率影响因数

Fig. 5 Influence factors of torque and fuel consumption rate

图 5 表明,进气管长度、空气滤清器后腔容积、排气管长度以及进气管直径对该发动机的扭矩和燃油消耗率的敏感性较大。结构参数的改变会同时影响扭矩与燃油消耗率,如进气管长度减小,会使该转速下的扭矩增加,但也会增加燃油消耗率。同时发动机各变量对发动机的性能影响耦合在一起,存在非线性关系,所以使用单变量优化的结果不够准确^[13]。因此,根据发动机实际进排气系统,本文选择以上 4 个结构参数作为优化变量对该发动机扭矩进行多参量遗传算法优化。

3 进排气系统多参量遗传算法优化

3.1 优化方案

通过发动机试验数据可以看出,该发动机在转速为 6 500 r/min 时,扭矩下降明显,且油耗会大幅度上升,不利于无人机的飞行稳定性和经济性。因此针对该问题,本文分别选取 6 500 r/min 转速,50%、90%、100%节气门开度下的最大扭矩为优化目标,并以排气温度、有效燃油消耗率以及

3 000 r/min 转速时的扭矩作为优化模型的约束条件,采用自适应遗传算法进行参数优化。

使用遗传算法优化时,最大值优化问题需转换成最小值优化,本文的优化方案可表示为

优化目标

$$f(D_{in}, L_{in}, L_{ex}, V_{out}) = -T_q(D_{in}, L_{in}, L_{ex}, V_{out})$$
 (1)

约束条件

$$T(D_{in}, L_{in}, L_{ex}, V_{out}) < 1100$$
 (2)

$$T_{q,3000}(D_{in}, L_{in}, L_{ex}, V_{out}) > 49$$
 (3)

$$B(D_{in}, L_{in}, L_{ex}, V_{out}) < 320$$
 (4)

$$45 < D_{in} < 55$$
 (5)

$$50 < L_{in} < 250$$
 (6)

$$300 < L_{ex} < 700$$
 (7)

$$2.5 < V_{out} < 4$$
 (8)

式中 T_q 为扭矩,是遗传算法优化的目标函数; $T_{q,3000}$ 是转速为 3 000 r/min 下的扭矩,在本文中设置的限制值为 49 N·m,以保持低转速时扭矩处在较高水平,维持发动机起动的平顺性; T 为排气温,本文将限制值设为 1 100 K; B 为有效燃油消耗率,本文选取限制值为 320 g/(kW·h);式(5)~式(8)分别表示进气管直径、长度、排气管长度、空滤器后腔容积的变化区间。

3.2 遗传算法优化过程

定义向量 $x = (D_{in}, L_{in}, L_{ex}, V_{out})$,表示遗传算法中的个体,个体中的 4 个变量为个体的染色体。图 6 为基于 GT-Power 与 Simulink 耦合的遗传算法流程图。遗传算法优化过程可以描述为:在特定的发动机转速下,遗传算法在个体向量的规定变化范围内随机产生种群,本文将初始种群设置为 25 个,进化代数设置为 50 代,GT-Power 计算遗传算法的个体所表示的工况点,计算完成后,通过 Simulink 与 GT-Power 耦合接口返回到自适应遗传算法中,利用 GT-Power 计算的扭矩进行个体适应度评价,扭矩最大的个体作为当前种群的最佳个体,并验证是否满足算法终止条件。若不能够满足终止条件,遗传算法通过选择、交叉、变异等算子对群体中的个体进行遗传操作得到下一代群体中的新个体,并重复上述操作,直到满足遗传算法终止条件。

遗传算法产生新种群时,交叉算子与变异算子的选择是影响遗传算法行为和性能的关键,直接影响算法的收敛性。本文中选用自适应遗传算法,变异概率和交叉概率能够随着适应度值的大

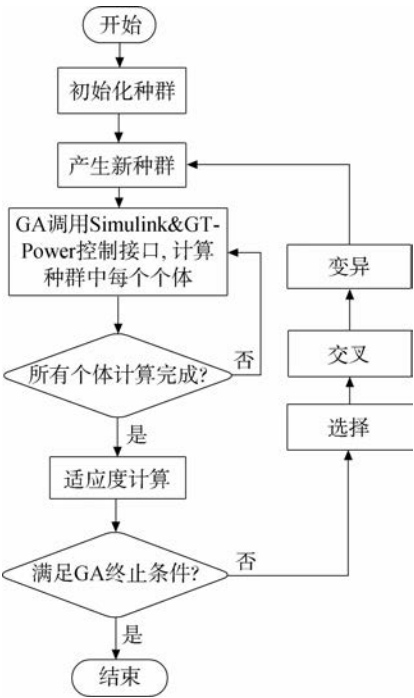


图 6 遗传算法流程图
Fig. 6 Flow chart of GA

小自动改变。当种群个体适应度值趋于一致时, 增加变异概率和交叉概率, 提高种群多样性, 便于寻找最优解; 反之, 减小变异概率和交叉概率。

自适应遗传算法中交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 的计算公式如下:

$$P_c = \begin{cases} \frac{k_1(f_{\max} - f)}{f_{\max} - f_{\text{avg}}} & f \geq f_{\text{avg}} \\ k_2 & f < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (9)$$

$$P_m = \begin{cases} \frac{k_3(f_{\max} - f')}{f_{\max} - f_{\text{avg}}} & f' \geq f_{\text{avg}} \\ k_4 & f' < f_{\text{ave}} \end{cases} \quad (10)$$

式中 $f_{\max}$ 为群体中的最大适应度值; f_{avg} 为群体平均适应度值; f 为要交叉的两个个体中较大的适应度值; f' 为要变异个体的适应度值; k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 为常数。本文中, $k_1 = 0.4$, $k_2 = 0.6$, $k_3 = 0.02$, $k_4 = 0.05$ 。

根据式(9)、式(10)可以看出, 当个体适应度高于群体平均值时, 使用较小的交叉概率和变异概率, 优秀的个体得以遗传到下一代; 当个体适应度低于群体平均值, 使用较高的交叉概率和变异概率淘汰该个体。因此, 使用自适应遗传算法能够提高遗传算法效率。

本文中的排气温度 T 、有效燃油消耗率 B 、转速为 3000r/min 下的扭矩 $T_{q,3000}$ 均为非线性约束条件, 对于这类优化问题, 需要对约束条件进行处理, 将优化目标函数转换为无约束条件的适应度

函数。目前, 最常用的方法是引入惩罚函数^[14-16]。为了减少惩罚参数的数量, 先对约束条件(式(2)~式(4))进行归一化处理, 得到下式:

$$h_1(x) = T(x)/1100 - 1 < 0 \quad (11)$$

$$h_2(x) = T_{q,3000}(x)/49 - 1 < 0 \quad (12)$$

$$h_3(x) = B(x)/320 - 1 < 0 \quad (13)$$

最终得到扭矩优化的适应度函数

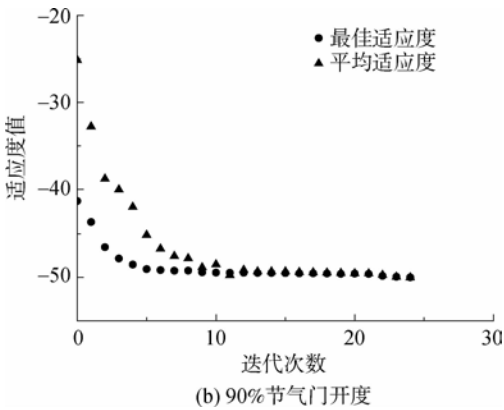
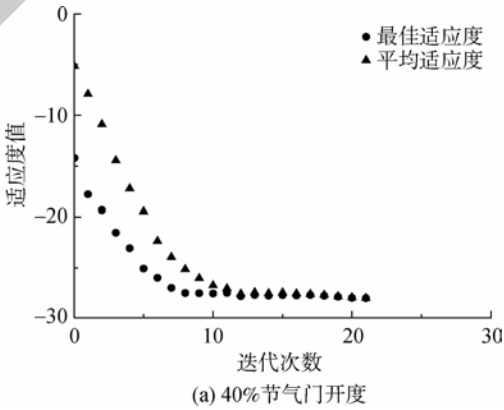
$$F(x) = f(x) + R \sum_{i=1}^3 \max[h_i(x), 0] \quad (14)$$

式中 R 为惩罚参数, 惩罚参数的选取对遗传算法优化结果有重要影响^[17]。选取较小的 R , 会降低非线性约束条件的权重, 无法在可行区域内搜索到最优解; 若选取的 R 过大, 则会造成搜索困难。本文中, 通过多次试验最终选取惩罚参数为 2000。

4 优化结果与试验验证

图 7 所示为发动机转速为 6500 r/min, 节气门开度分别为 50%、90%、100% 时, 以最大扭矩为优化目标的 GT-Power 与自适应遗传算法耦合的优化计算结果。自适应遗传算法分别在迭代了 21 代、24 代、25 代后满足了终止条件。

图 7 中的最佳适应度表示种群中的最佳个体



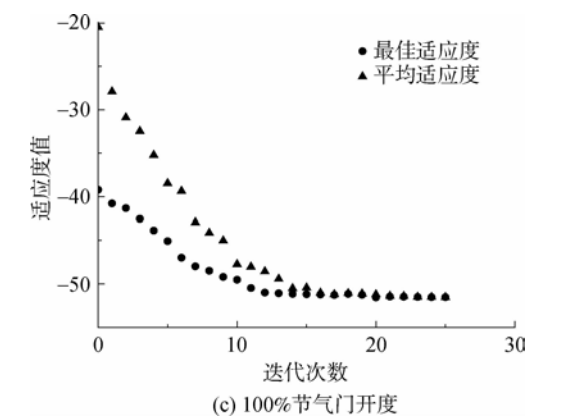


图 7 遗传算法扭矩优化进化结果

Fig. 7 Torque optimization results based on GA

所对应的目标值,平均适应度表示种群中所有个体的优化目标平均值。当迭代次数增加,个体中的染色体通过选择、交叉、变异不断地进化,保留较好的个体,淘汰较差的个体,使种群的平均适应度值逐渐接近最佳适应度值。经过一定次数的迭代后,群体中的个体都趋向于最佳。最终经过自适应遗传算法优化后,得到的进排气系统结构参数及优化结果如表 2 所示。

表 2 进排气系统参数优化结果

Table 2 Optimization result of intake and exhaust system

参数	节气门开度/%		
	50	90	100
迭代次数	21	25	24
进气管长度/mm	140.4	143.2	139.3
进气管直径/mm	52.3	52.1	52.4
排气管长/mm	322.6	347.1	352.4
空滤器后腔容积/L	3.42	3.53	3.35
扭矩/(N·m)	27.9821	50.0212	51.5231
燃油消耗率/(g/(kw·h))	301.421	308.231	313.342

考虑到发动机实际设计的可行性,需要对相应的结构参数进行折中取值,最终确定的进排气系统结构参数以及原机结构参数对比如表 3 所示。

将优化后的进排气系统安装在原发动机上,进行了优化结果试验验证。图 8 所示为试验台架系统示意图,系统采用了瑞士奇石乐仪器股份公司(KISTLER)的 6125CU20 缸压传感器,原始压力数据先通过电荷放大器 KISTLER5011B 进行放大,光电编码器与发动机飞轮相连,用于测量发动机曲轴信号,通过数据采集卡与上位机通信。

图中的测功机为李期特内燃机及测试设备公司(AVL)的 132 kW 电力测功机,工作于速度模式以控制发动机在特定转速运转。

表 3 进排气系统参数优化对比

Table 3 Comparison of parameters optimization of intake and exhaust system

参数	数值		变化率/%
	原机值	优化值	
进气管长度/mm	175	150	-14.28
进气管直径/mm	50	52	4
排气管长度/mm	410	340	-17.07
空滤器后腔容积/L	2.5	3.5	40

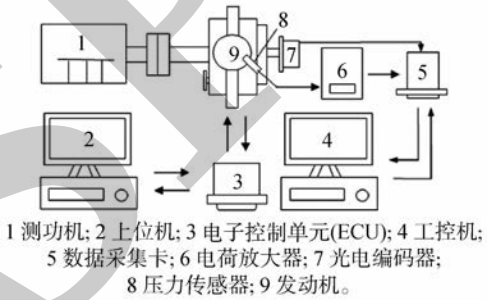


图 8 发动机试验台架系统示意图

Fig. 8 Schematic diagram of engine experiment rig

将发动机转速控制为 6 500 r/min,调节节气门开度至 50%、90%、100%,分别记录下扭矩与燃油消耗率。图 9 与图 10 分别为进排气系统优化前后的扭矩与燃油消耗率的试验对比,图中 Δ 表示变化率。从图中可以看出,经过遗传算法优化后,扭矩和燃油消耗率均得到了明显的改善,其

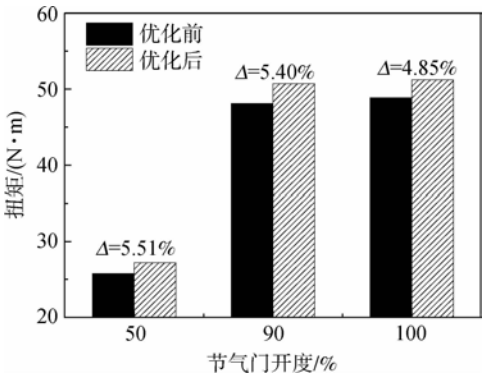


图 9 遗传算法优化前后扭矩的试验对比

Fig. 9 Experimental torque comparison before and after GA optimization

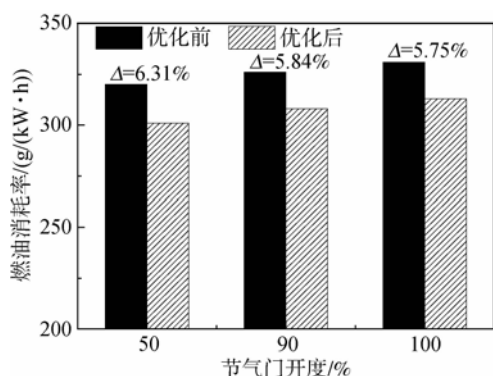


图10 遗传算法优化前后燃油消耗率的试验对比

Fig. 10 Experimental fuel consumption rate before and after GA optimization

中扭矩最大提高了 5.51%,燃油消耗率最多降低了 6.31%。

5 结论

1) 进排气系统的各子模块对发动机性能影响程度和作用区间存在非线性关系。本文通过试验设计的方式计算进排气系统各个结构参数对发动机扭矩和燃油消耗率的影响,确定了进气管长度、直径、空滤器后腔容积以及排气管长度为影响发动机扭矩和燃油消耗率的关键因素。

2) 提出了基于模型的自适应遗传算法进行进排气系统多参量优化方法,提高了优化效率与结果的可靠性。在 Matlab 中编写自适应遗传算法,通过 Simulink/GT-power 耦合接口直接驱动发动机 GT-Power 模型,进行进排气系统结构优化计算。通过折中取整,确定优化后的进气管长为 150 mm,进气管直径为 52 mm,排气管长为 340 mm,空滤器后腔容积为 3.5 L。将优化后的进排气系统安装在原发动机上,得到了该无人机发动机在飞行转速为 6 500 r/min 下扭矩与燃油消耗率的优化结果,与原发动机台架试验得到的扭矩和燃油消耗率结果对比后,扭矩最大可提高 5.51%,燃油消耗率最大改善 6.31%。优化方案为解决该无人机汽油机飞行转速下扭矩较低以及燃油经济性差的问题提供了有效措施。

参考文献:

- [1] HEYWOOD J B. Internal combustion engine fundamentals [M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1988.
- [2] 徐斌,刘波,杨世春. 某型航空活塞发动机进排气系统优化分析[J]. 航空动力学报, 2014, 29(3): 624-630.
XU Bin, LIU Bo, YANG Shichun. Optimization analysis of a aircraft piston engine intake and exhaust system[J].

Journal of Aerospace Power, 2014, 29(3): 624-630. (in Chinese)

- [3] KUTLAR O A, ARSLAN H, CALIK A T. Methods to improve efficiency of four stroke, spark ignition engines at part load[J]. Energy Conversion and Management, 2005, 46(20): 3202-3220.
- [4] WU B, PRUCKA R G, PHILIPPI Z S. Cam phasing optimization using artificial neural network as surrogate models-maximizing torque output[R]. Society of Automotive Engineers, SAE Paper No. 2005-01-3757, 2005.
- [5] NEWLYN H A. An analysis of the probable effects of engine geometry on the inlet pipe pressure, flow and engine volumetric efficiency [R]. Society of Automotive Engineers, SAE Paper No. 1994-12-01, 1994.
- [6] 牛有城, 李国岫. 基于遗传算法的直喷式柴油机燃烧系统参数优化分析[J]. 内燃机工程, 2010, 31(2): 37-40.
NIU Youcheng, LI Guoxiu. Optimization of combustion system parameters in direct injection diesel engine based on genetic algorithm[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2010, 31(2): 37-40. (in Chinese)
- [7] MARTÍNEZ-MORALES J, PALACIOS-HERNÁNDEZ E R, VELÁZQUEZ-CARRILLO G A. Modeling and multi-objective optimization of a gasoline engine using neural networks and evolutionary algorithms[J]. Journal of Zhejiang University, A, 2013, 14(9): 657-670.
- [8] TSOULOS I G. Solving constrained optimization problems using a novel genetic algorithm[J]. Applied Mathematics and Computation, 2009, 208: 273-283.
- [9] D'ERRICO G, CERRI T, PERTUSI G. Multi-objective optimization of internal combustion engine by means of 1D fluid-dynamic models[J]. Applied Energy, 2011, 88(3): 767-777.
- [10] SUN Y, WANG T, LU Z, et al. The optimization of intake port using genetic algorithm and artificial neural network for gasoline engines[R]. Society of Automotive Engineers, SAE Paper No. 2015-01-1353, 2015.
- [11] ZHAO J, XU M, ZHAO J, et al. Fuel economy optimization of an Atkinson cycle engine using genetic algorithm [J]. Applied Energy, 2013, 105(2): 348-357.
- [12] YANG X, CHENG L, LIU J. Harmonic analysis and optimization of the intake system of a gasoline engine using GT-power[J]. Energy Procedia, 2012, 14(1): 756-762.
- [13] 周龙保. 内燃机学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [14] 王勇, 刘敬平, 王正球, 等. 基于过程模拟技术和先进统计学方法的多参数发动机性能优化[J]. 燃烧科学与技术, 2015, 21(2): 141-149.
WANG Yong, LIU Jingping, WANG Zhengqiu, et al. Optimization of multiple parameters engine performance based on process simulations and advanced statistics methods [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2015, 21(2): 141-149. (in Chinese)
- [15] 蔡海鸾, 郭学萍. 一种新的自适应惩罚函数在遗传算法中的应用[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2015(6):

36-45.

CAI Hailuan, GUO Xueping. A new adaptive penalty function in the application of genetic algorithm[J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2015 (6):36-45. (in Chinese)

[16] MARCZYK A. Genetic algorithms and evolutionary computation[EB/OL]. [2004-04-23]. <http://www.talkorigins.org/faqs/genalg/genalg.html>.

[17] 赵金星, 许敏, 李冕, 等. 基于模型的 Atkinson 循环发动机燃油经济性遗传算法优化[J]. 内燃机工程, 2014, 35(5): 58-63.

ZHAO Jinxing, XU Min, LI Mian, et al. Model-based genetic algorithm optimization for fuel economy of Atkinson cycle engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2014, 35(5):58-63. (in Chinese)

(编辑:王碧琚)