

基于多目标的二冲程发动机换气过程优化

胡春明^{1,2}, 田梦园^{1,2}, 刘娜¹, 宋玺娟¹

(1. 天津大学内燃机研究所, 天津 300072;

2. 天津大学机械工程学院, 天津 300072)

摘 要: 二冲程航空活塞发动机的换气过程直接影响燃烧效果和发动机性能, 以某二冲程航空活塞发动机为例, 建立仿真模型, 基于动力性能、经济性能、扫气性能进行多目标优化, 对扫气道、排气道结构参数的不同组合优化分析。另外, 还对不同海拔工况点下(转速为 5 600 r/min, 100% 节气门开度)的气道结构参数进行优化。结论表明: 使用 NSGA-II 算法对发动机气道结构的优化可以有效提高扫气效率和功率, 优化后(转速为 5 600 r/min)分别为 0.841 kW 和 2.712 kW, 燃油消耗率降低 22.08 g/(kW·h); 另外, 在不同海拔工况点中, 随着海拔高度的增加扫气道长度呈现出减短的趋势, 而排气道长度逐渐增加, 且在海拔高度大于 1 800 m 时趋势变化更加明显。

关 键 词: 多目标; 仿真性能优化; 二冲程; 换气过程; 压力波动

中图分类号: V234.1

文献标志码: A

Gas exchange process of two-stroke engine based on multi-objective optimization

HU Chunming^{1,2}, TIAN Mengyuan^{1,2}, LIU Na¹, SONG Xijuan¹

(1. Internal Combustion Engine Research Institute,

Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. School of Mechanical Engineering,

Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The gas exchange process of two-stroke aviation piston engine directly affects the combustion effect and the performance of the engine. Taking a two-stroke aviation piston engine as an example, a simulation model was established, and multi-objective optimization based on dynamic performance, economic performance, and scavenging performance was conducted. The optimization analysis of structure parameters of scavenging ducts and exhaust ducts was also performed. In addition, the parameters of the ducts structure under different altitude operating conditions (speed of 5 600 r/min, 100% throttle opening) were optimized. The conclusion showed that the optimization of the engine ducts structure using the NSGA-II algorithm can effectively improve the engine scavenging efficiency and power (speed of 5 600 r/min), by 0.841 kW and 2.712 kW respectively, and reduce the fuel consumption by 22.08 g/(kW·h); in addition, under different altitude operating conditions, as the altitude increased, the length of the scavenging

收稿日期: 2020-12-25

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, 博士, 主要从事内燃机及混合动力智能控制研究。

引用格式: 胡春明, 田梦园, 刘娜, 等. 基于多目标的二冲程发动机换气过程优化[J]. 航空动力学报, 2021, 36(11): 2241-2250. HU Chunming, TIAN Mengyuan, LIU Na, et al. Gas exchange process of two-stroke engine based on multi-objective optimization [J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(11): 2241-2250.

duct showed a trend of decrease, while the length of the exhaust duct gradually increased, and the trend changed more obviously when the altitude was greater than 1 800 m.

Key words: multi-objective; optimization of simulation performance; two-stroke; gas exchange process; pressure fluctuation

二冲程发动机具有较高的功质比和结构简单等优点,能够满足无人机对动力装置的要求, Sher^[1]在回顾二冲程扫气运动中指出,在奥托循环应用于四冲程发动机之前所有的发动机都是二冲程。目前二冲程发动机在无人机活塞式发动机中占到77%的份额,并且运用范围主要集中在低速、低空以及起飞质量较小的靶机以及侦察无人机领域^[2-3]。随着国内无人机市场的持续稳定增长,二冲程航空发动机在无人机领域的应用前景十分广阔。

二冲程航空活塞发动机中存在的换气损失是其研究难点之一。尤其是对于“气口-气口”式回流扫气结构,传统气道喷射方式在换气过程中会出现短路损失,导致经济性和排放性能较差。将直喷技术应用在二冲程发动机中能较好地控制喷油定时,避免传统的扫气损失,但在换气过程中新鲜空气与废气掺混,使废气无法排净,新鲜充量不足,从而影响换气效果。换气系统的结构参数对换气效果十分重要^[4],其合理设计可以有效地利用扫排气的动态特性,降低换气阻力,提高充气效率,从而提高发动机动力性、改善经济性。

Brynych等^[5]通过对进气口高度、排气门正时、进排气压力和发动机压降进行组合,通过将一维与三维仿真相结合,得出排气门开启时刻越晚,进气回流就越多,而且扫气曲线的变化对气门正时和发动机压降的优化极限依赖性小。天津大学张备等^[6]对二冲程船用发动机的稳态扫气流动特性进行了试验,利用立体粒子图像测速技术研究缸内扫气流场,发现气口开度对扫气性能的影响仅体现在扫气口开度较小时,扫气口附近的轴向速度均匀性较差,影响扫气性能。

通过分析可以看出,针对扫气过程的研究多为气口开度、高度^[7]等对换气过程的机理和规律性研究,不同于四冲程发动机依靠活塞做功将废气推挤排出,活塞二冲程发动机只能通过排气口内外的压力差进行排气,压力波动会对换气过程与整机性能产生明显影响。而对压力波周期影响最大的因素是管道长度和转速,如文中第2章所述,但目前研究中仅涉及转速,如郭栋等^[8]针对可

变排气阀进行仿真研究,分析不同转速下其对换气过程的影响,对排气阀状态进行优化使发动机动力性能达到最优。

在二冲程航空活塞发动机的进排气系统设计中^[9-10],要求组织合理的换气过程,吸入尽可能多的新鲜充量,尽量减少换气损失,获得尽可能高的输出功率和转矩。针对直喷发动机在扫气过程中存在进气充量不足的问题,选取不同扫气道、排气道长度对应的功率、燃油消耗率、扫气效率作为训练样本,利用多目标优化算法,对不同扫气道、排气道长度组合进行寻优。

1 发动机模型

1.1 模型建立

本文以某双缸二冲程航空活塞直喷发动机为研究对象,发动机主要结构参数如表1。根据结构及性能参数建立发动机几何模型,包括发动机数值模型和计算网格,分别用Unigraphics和AVL-Fire软件完成,如图1所示。

表1 二冲程航空活塞发动机结构参数

Table 1 Structural parameters of two-stroke aviation piston engine

参数	数值及说明
缸径/mm	36
行程/mm	28
排量/mL	56
扫气方式	回流扫气
最大功率/kW ($n=8\ 850\text{ r/min}$)	3.9
最大扭矩/($\text{N}\cdot\text{m}$) ($n=5\ 600\text{ r/min}$)	4.5
喷油方式	压缩空气 辅助直喷
排气口开启时刻(t_{e0})曲轴转角/(°)	105
排气口关闭时刻(t_{ec})曲轴转角/(°)	255
主扫气口开启时刻(t_{t01})曲轴转角/(°)	122
主扫气口关闭时刻(t_{tc1})曲轴转角/(°)	238
后扫气口开启时刻(t_{t02})曲轴转角/(°)	119
后扫气口关闭时刻(t_{tc2})曲轴转角/(°)	241

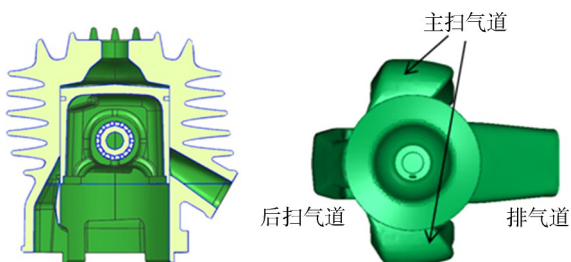


图1 发动机数值模型和计算模型

Fig.1 Engine numerical model and calculation model

研究模型的CFD计算区域包括气缸、两个主扫气道、一个后扫气道和排气道。根据上止点处曲轴转角(crank angle,量符号记为 A)为 0° ,计算过程从排气口开启至排气口关闭的整个工作过程,即上止点后曲轴转角 $105^\circ \sim 255^\circ$ 作为计算区域进行网格划分,动网格如图2所示。

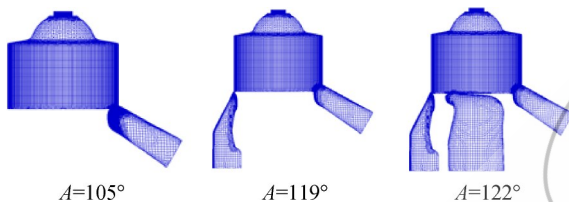


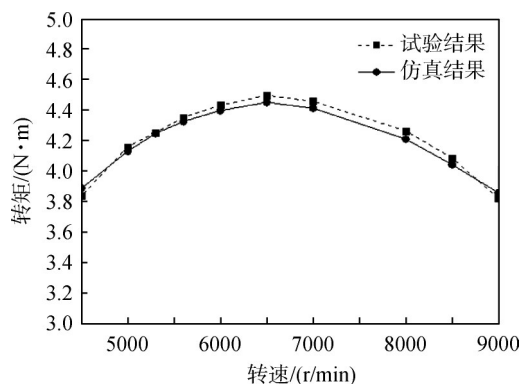
图2 发动机动网格

Fig.2 Engine dynamic grid

1.2 模型验证

为了评价仿真模型的准确性,对发动机的外特性和缸压进行校核。图3为发动机仿真模拟运行得到的外特性结果与台架试验结果对比图。通过对比可以发现,外特性曲线中功率和扭矩的仿真结果与试验结果趋势基本一致,功率的最大偏差值为2.3%,扭矩的最大偏差为2%。

选取最大扭矩时的转速5600 r/min,节气门开度为100%的缸压仿真结果与试验结果对比如图4所示,看出缸压曲线仿真结果与试验结果符



(b) 发动机有效扭矩对比

图3 外特性校核

Fig.3 Validation of external characteristic

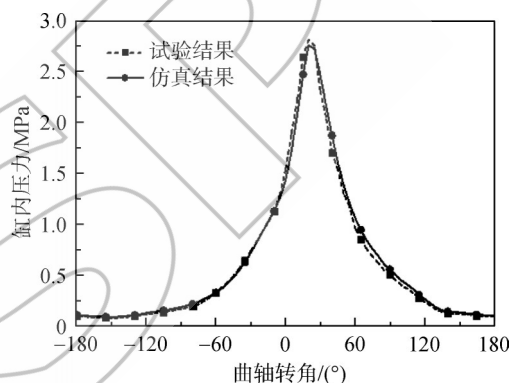


图4 发动机缸内压力仿真值与试验值对比

Fig.4 In-cylinder pressure comparison between simulation and experiment of engine

合程度较高,可以达到仿真计算的精度要求,其计算结果具有足够的可信度。

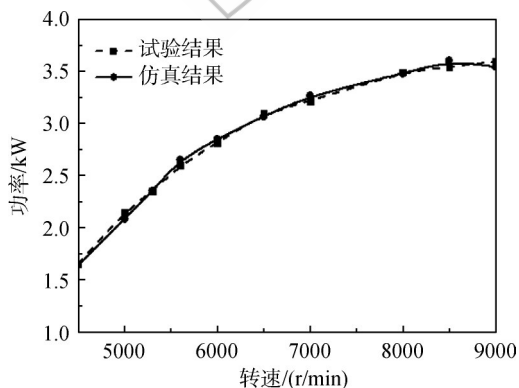
2 压力波动对换气过程影响

从扫气口和排气口开启产生扰动到反射波返回到气缸为止所经历的曲轴转角,即压力波在气管内往返一次所需的时间(以曲轴转角计),称为压力波周期^[11],可以表示为

$$\phi_p = \frac{2L}{c} \left(\frac{360n}{60} \right) \quad (1)$$

式中 n 为发动机转速(r/min), L 为管道长度(m), c 为有限波的速度(m/s)。压力波周期主要由管长 L 和转速 n 决定,转速一定时,其与管长成正比。研究中以转速5600 r/min为例,得到压力波周期,进而确定反射波的状态,并通过调整气道长度来改变这一状态,使发动机性能得到优化。

反射波对换气过程的影响中,气道长度决定反射波返回时刻,其与换气基本波叠加,反射波可



(a) 发动机有效功率对比

能增加基本波的波幅,增大换气速度,从而使换气节流损失增大;也可能减小基本波的波幅,减小换气速度,换气节流损失减少。

本研究中扫气道压力波曲线包括主扫气道和后扫气道如图5所示,在气缸的扫气口开启时,随即在扫气道发射一个膨胀波,使扫气道压力增加。但是由于反射膨胀波返回较早,并与扫气基本波叠加,增大了基本波的波幅,进气得到促进,增大扫气速度,如图6为缸内气体流动情况,对比扫气道压力降低至曲轴转角 210° 和扫气道压力再次升高到 230° ,扫气道的湍流速率增加,新鲜充量进入缸内的速率也增加。

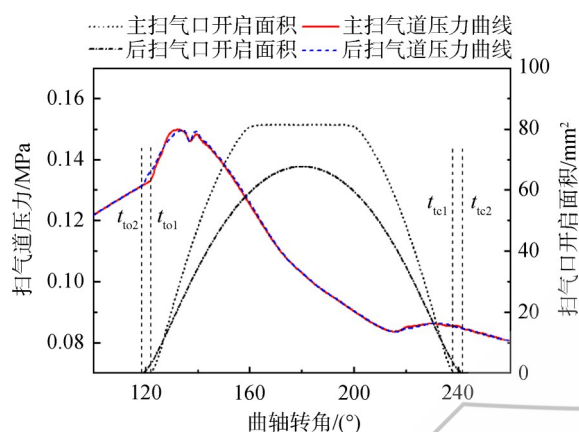


图5 扫气道压力波曲线

Fig.5 Scavenging duct pressure wave curve

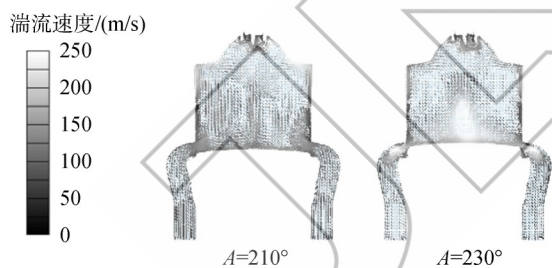


图6 扫气道气体湍流速度

Fig.6 Turbulence velocity of scavenging duct gas

反射波对排气过程的影响在于,其到达排气口时,气缸正处于扫气阶段,反射压缩波则会在排气门关闭之前与压缩基本波叠加,增大波幅,引起排气背压上升,妨碍气缸扫气。从图7排气管压力波曲线,可以看出排气口刚开启后,缸内压力波迅速向排气管内传播,排气管压力增加,迅速到达峰值。在排气口关闭时刻出现第二个波峰,是由于反射压缩波引起排气背压上升,对换气过程起到不利影响。图8为缸内残余废气分布图,可以看出在曲轴转角为 195° 时刻后排气背压增加,使

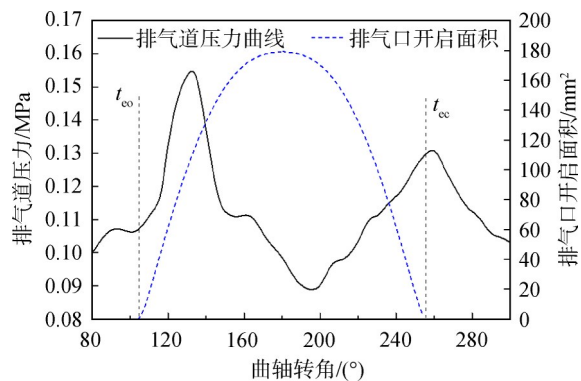


图7 排气管压力波曲线

Fig.7 Exhaust duct pressure wave curve

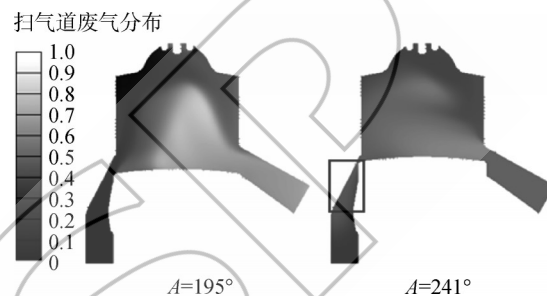


图8 缸内废气分布

Fig.8 Exhaust gas distribution in the cylinder

换气过程受到阻碍,在扫气口即将关闭时刻 241° 仍然发生废气倒流现象,将废气倒流回扫气箱。

反射压力波相位主要由进排气系统的长度决定,管径的改变只影响压力波强度的变化,不会改变压力波相位。所以研究压力波动特性对换气过程影响中,对气道长度进行优化是十分有必要的。

3 帕累托优化算法介绍与分析

发动机的换气过程是影响发动机性能的最主要因素之一^[12]。换气过程是典型的非定常流动,由于存在脉动和谐振,气体的流速和压力时刻都在发生变化^[13]。同时,气道长度会改变发动机进排气系统压力动态波动相位,进而对二冲程发动机换气过程以及动力性、经济性产生影响。

3.1 多目标优化函数

选取发动机输出功率 P 、燃油消耗率 b 、扫气效率 η_s 三个优化目标,通过对不同气道长度的参数组合寻优计算而得出Pareto最优解。使用算法优化过程中,最大值优化问题需转化成最小值,根据本研究的性能指标,多目标优化函数为

$$\min y = F(x) = [-P(L_{sc}, L_{ex}), b(L_{sc}, L_{ex}), -\eta_s(L_{sc}, L_{ex})]^T \quad (2)$$

其中 L_{sc} 和 L_{ex} 是设计变量,分别表示扫气道长度

和排气道长度。

扫气效率 η_s 定义了扫气过程的有效性, 其为排气门关闭后实际留在缸内传递的空气质量 m_{las} 与缸内所有充量的质量 m_{tr} 之比^[14]。留在缸内的所有充量包括新鲜空气 m_{las} 、未完全排出的废气 m_{ex} 和上循环留在缸内的未燃空气 m_{ar} 。对扫气效率的提高主要是增加 m_{las} , 减少 m_{ex} 。

$$m_{\text{tr}} = m_{\text{las}} + m_{\text{ex}} + m_{\text{ar}} \quad (3)$$

$$\eta_{\text{scav}} = \frac{m_{\text{las}}}{m_{\text{tr}}} = \frac{m_{\text{las}}}{m_{\text{las}} + m_{\text{ex}} + m_{\text{ar}}} \quad (4)$$

同时为了保证结构参数的应用场合, 考虑合理性及安全因素等, 结构参数需要在规定的范围内^[15], 其约束条件为

$$P(L_{\text{sc}}, L_{\text{ex}}) > 2.55 \quad (5)$$

$$b(L_{\text{sc}}, L_{\text{ex}}) < 390 \quad (6)$$

$$\eta_s(L_{\text{sc}}, L_{\text{ex}}) < 0.795 \quad (7)$$

$$28 \leq L_{\text{sc}} \leq 42 \quad (8)$$

$$20 \leq L_{\text{ex}} \leq 28 \quad (9)$$

式中功率 P 设置的限制值为 2.55 kW, 燃油消耗率的限制值为 390 g/(kW·h); 扫气效率 η_s 的限制值为 0.795; 式(8)和式(9)表示扫气道和排气道长度的变化区间。

3.2 多目标函数优化流程

针对换气过程的多目标优化设计采用第二代非劣解排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm, NSGA-II), 是目前应用最广的多目标遗传算法之一, 其由 Deb 等^[16]提出。在解决复杂的多目标优化问题时, 具有运算速度快、解集收敛性好、效率高的优点, 使计算复杂度降低, 并保持了种群多样性^[17-18]。

为了选取 P 、 b 、 η_s 都较优的气道组合, 其优化设计流程如图 9 所示。确定扫气道长度取值范围 [28, 42], 设置 10 个样本, 排气道长度取值范围 [20, 28], 设置 6 个样本, 共 60 个初始样本, 此为第一代种群 Q 。计算不同组合初始样本对应的目标函数值, 将其作为训练样本。采用二进制锦标赛法从种群 Q 中选择个体进行交叉和变异操作, 产生的新个体为种群 Q_1 。交叉的原则是将个体两两对比, 直到交叉后的种群达到指定个数; 变异率为 10%, 其原则是在种群 Q 中随机选择一部分个体, 进行变异操作生成新个体。对 Q_1 进行非支配排序, 并采用精英策略计算得到新种群 Q_0 。直至迭代次数达到设定要求值, 即能确定 Pareto 前沿最优集, 得到气道长度的优化组合。

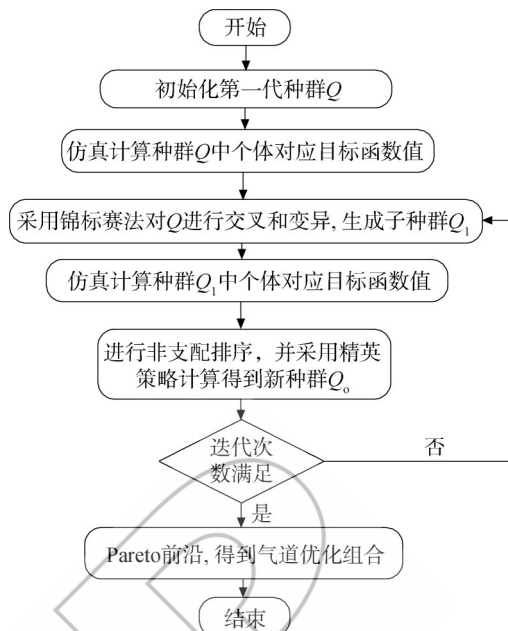


图 9 基于 NSGA-II 算法优化流程
Fig.9 Optimize process based on NSGA-II algorithm

4 优化计算结果

4.1 优化样本与验证

基于 NSGA-II 开展换气过程的多目标优化研究, 以 5 600 r/min、100% 开度和 8 500 r/min、100% 开度作为示例介绍优化设计流程及结果分析, 设置初始样本为 60 个, 遗传进化代数为 100 代。由于本研究针对换气过程进行优化, 故设计结果对扫气效率提出更高的要求, 图 10 为扫气效率优化预测值与仿真计算值的比较, 两者的误差越小, 该优化模型的拟合精度越高, 表现在图中就是数值更集中于中间的对角线处。图 10 中误差率最大为 0.1%, 总体预测情况良好, 可以为下文的优化设计计算提供准确的预测模型。

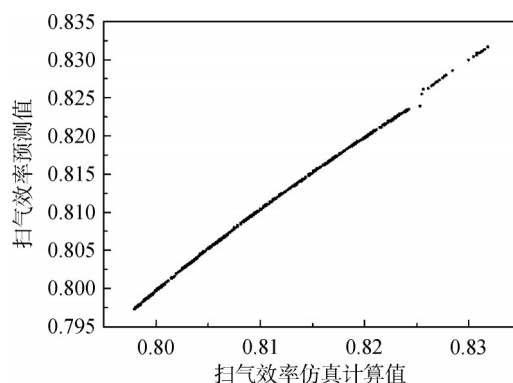


图 10 训练集与预测数值对比
Fig.10 Comparison of training set and predicted value

4.2 Pareto 优化前沿

在 5 600 r/min、100% 开度的算例优化设计中 P 、 b 、 η_s 三个优化目标函数集的空间分布图及 Pareto 前沿如图 11 所示,在图 11(a)、图 11(c) 中 Pareto 前沿分布在中上部,此处的扫气效率和功率都较大,而且在图 11(b) 中燃油消耗率也较小,符合对优化多目标函数的期望。

对比图 11(c) 可以看出扫气道长度的变化对功率的影响较小,这是因为反射膨胀波增大了扫气速度,从而增加 m_{res} ,但其对扫气作用的促进与扫气节流损失相当,故功率的变化较小,但扫气道长度过长导致节流损失与发动机泵气损失提高,影响发动机的经济性。另外,在图 11(a) 中扫气效率随着排气道长度的增长而逐渐增加,这是由于转速一定时,排气道长度的增加使压力波周期延长,反射压缩波对排气背压的增加效果减弱,利

于废气排出,减少 m_{ex} ,对扫气过程起到有利的影响,同时换气效果越好,发动机动力性能也得到提升。从本研究中的整体优化结果可以看出,扫气效率、功率和燃油消耗率优化效果都较好,其设计结果在 Pareto 前沿中选取如图 11(d) 所示。

图 12 为 8 500 r/min、100% 开度算例的优化计算结果,可以根据优化的效果及扫气道、排气道的实际状态,从 Pareto 前沿中选取合适的设计果。不同转速下优化参数对比如表 2 所示,可以看出扫气效率的优化程度都较高,分别为 5.39% 和 5.10%,燃油消耗率分别降低了 22.08 g/(kW·h) 和 18.38 g/(kW·h),而功率的提升效果不足,分析其原因,这主要是因为扫气道和排气道结构变化引起的节流损失增加,使功率的改善效果有限。整体来说,基于 NSGA-II 对气道长度组合优化的方法是可行的。

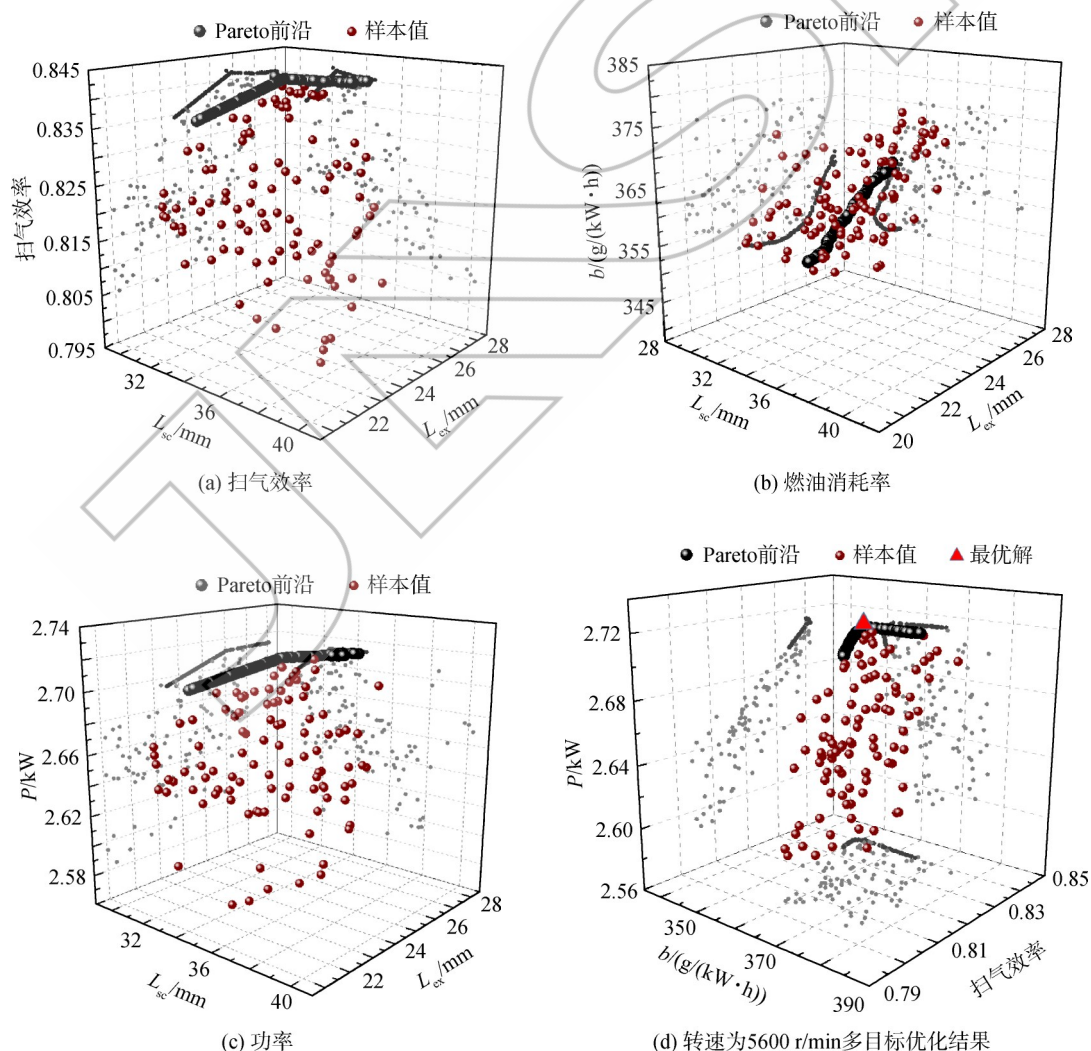


图 11 转速为 5 600 r/min 时各目标函数的 Pareto 前沿

Fig.11 Pareto frontier of each objective function at 5 600 r/min

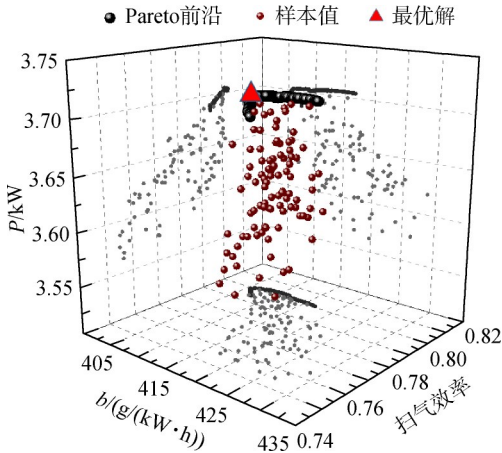


图 12 转速为 8 500 r/min 多目标优化结果
Fig.12 Multi-objective optimization results at 8 500 r/min

对比不同转速下的改善效果可以看出,扫气效率的改善都比较明显,且在 5 600 r/min 时发动

机动力性和经济性的提升都较高,下文的结果分析将基于 5 600 r/min 和 8 500 r/min 优化案例开展。

4.3 优化后性能对比及分析

图 13 为 5 600 r/min 时优化前后的后扫气道与排气道压力对比,可以看出后扫气道压力降低至曲轴转角为 210°时,气道流动速度出现明显增加如图 14 所示扫气道截面切片。图中 EC 为排气口关闭,TC2 为后扫气口关闭。这是由于扫气道长度变短,反射波到达时刻提前,增加基本波波幅,也使扫气速度提高,达到促进扫气的效果。在曲轴转角为 200°之后优化后排气道压力低于优化前,扫气口关闭时刻的排气道截面切片对比如图 15,此时处于过后排气阶段,排气背压的减小,利于废气的排出,从而对换气过程产生有利的影响,达到提高发动机性能的目的。

表 2 优化目标函数对比
Table 2 Optimization objective function comparison

参数	n=5 600 r/min			n=8 500 r/min		
	初始值	优化值	优化程度/%	初始值	优化值	优化程度/%
扫气效率/%	0.798	0.841	5.39	0.764	0.803	5.1
燃油消耗率/(g/(kW·h))	372.61	350.53	−5.93	424.07	405.69	−4.33
功率/kW	2.598	2.712	4.39	3.562	3.705	4.01

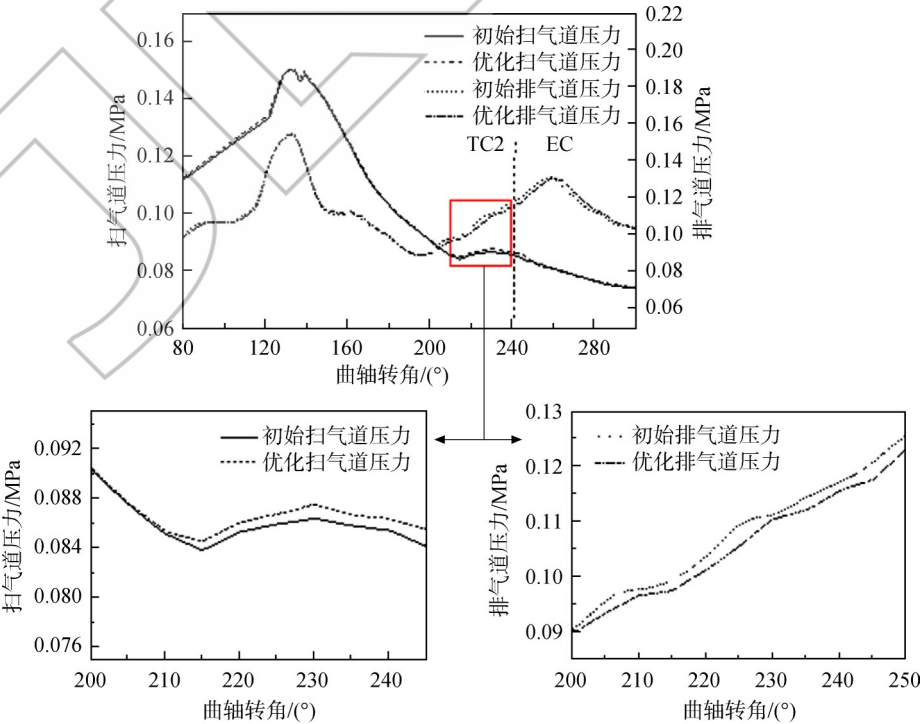


图 13 转速为 5 600 r/min 时扫气和排气压力波动优化结果
Fig.13 Optimization results of scavenging and exhaust pressure fluctuations at 5 600 r/min

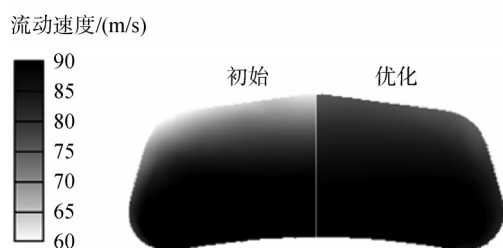


图14 曲轴转角为210°扫气道气体流动变化
Fig.14 Gas flow changes in scavenging duct of crank angle 210°

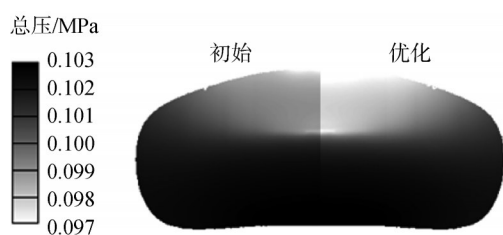


图15 曲轴转角为241°排气道压力
Fig.15 Exhaust duct pressure of crank angle 241°

8 500 r/min、100% 节气门开度下的扫气道压力和排气道压力对比如图16所示,优化后扫气道压力升高,排气道压力降低,从而达到提高换气效果的作用。与5 600 r/min转速相比,转速升高使得反射波到达扫气口和排气口的时刻明显推迟,分别比5 600 r/min推迟曲轴转角为23°和10°,扫气口反射波到达时刻,扫气口已基本关闭,扫气反射波对换气过程的促进作用减弱;排气口反射波到达时刻的推迟,使排气背压引起的第二个波峰降低,废气倒流现象减弱如图17扫气道纵向切片所示。

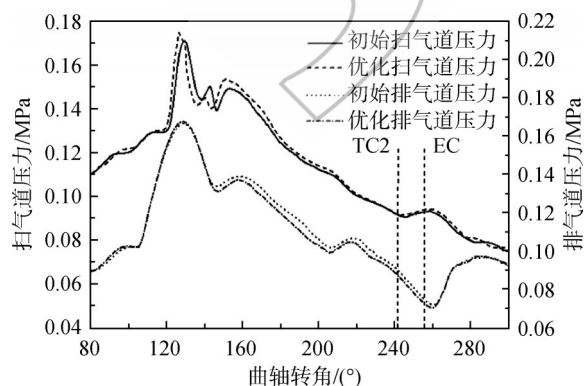


图16 转速为8 500 r/min时扫气和排气压力波动优化结果
Fig.16 Optimization results of scavenging and exhaust pressure fluctuations at 8 500 r/min

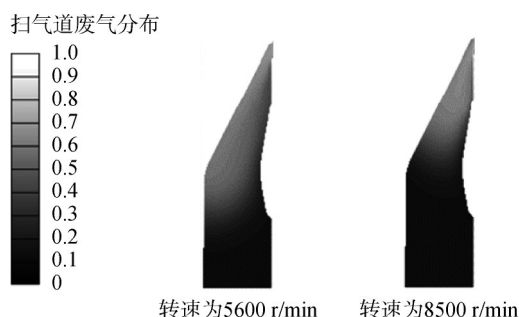


图17 扫气道废气分布
Fig.17 Exhaust gas distribution in the scavenging duct

4.4 不同海拔工况点计算结果

不同海拔高度导致进气压力和温度差异,从而影响换气效果。基于前文总结的气道长度多目标优化设计方法,从平原($H=0$ m)到工作海拔($H=3\ 000$ m)选择多个研究点(转速为5 600 r/min,100%节气门开度),通过对 P 、 b 、 η_s 三个目标参数的变化,研究气道长度对发动机扫气性能和排气性能产生的影响,并选择最佳的气道长度方案。

从图18可以看出,随着海拔高度的增加,扫气压力和空气密度降低,扫气道长度的优化结果呈现逐渐减小的趋势,排气道则逐渐增加。可见,不同海拔高度处,气道长度变化对进排气压力波动状态的影响规律不变。不过,当海拔高于1 800 m时,随着海拔高度的增加气道长度变化更加明显。

这是由于扫气口流量降低,此时反射波压力对扫气过程的促进作用减弱,只有较短的气道长度,减少节流损失,才能促进扫气过程。排气道长度在海拔升高时逐渐增加,这是由于海拔的升高

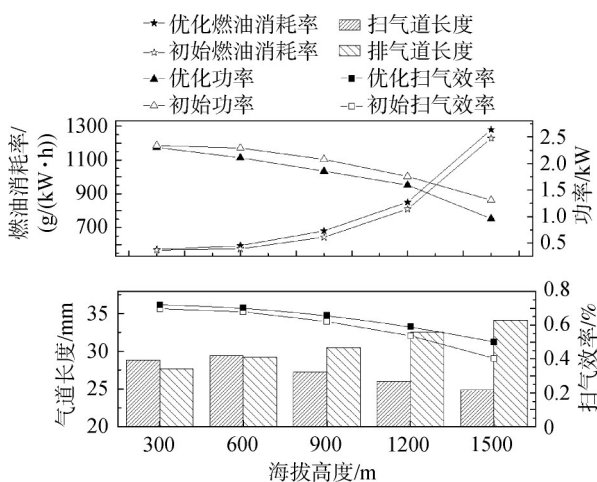


图18 巡航工况优化结果
Fig.18 Optimization results of cruise conditions

造成扫气过程中进入缸内的新鲜充量减少,对燃烧废气的推挤作用减弱,从而影响发动机换气效果、动力性及经济型。较长的排气道长度使压力波周期变长,反射波到达的时间推迟,反射压缩波对排气背压的影响减弱,更有利于换气过程。因而在本研究计算范围中,海拔高度升高时,排气道长度应该更长。

5 结 论

本文基于某二冲程航空活塞发动机,结合三维 CFD 仿真和多目标优化算法,对气道长度进行多目标优化设计,并得出以下结论:

1) 使用 NSGA-II 算法对换气过程进行多目标优化研究,对扫气效率优化预测值与仿真计算值比较,最大误差率为 0.1%,模型拟合精度较高,总体预测情况良好,可以用于气道优化设计;

2) 从 Pareto 前沿中选取最优设计结果,在 5 600 r/min、100% 节气门开度和 8 500 r/min、100% 开度工况下扫气效率优化效果更加明显,发动机动力性和经济性提升较高,故以此为例分析,可以发现优化后扫气道长度减小,反射膨胀波提前到达,增大扫气速度,使扫气效果得到提高,但同时增加换气节流损失,使功率的优化效果较小,仅为 4.39% 和 4.01%;优化后的排气道长度增加,反射压缩波到达时刻推迟,排气背压降低,增加排气口内外压力差,对换气过程产生有利影响,使扫气效率从 0.798 升高至 0.841,以及从 0.764 升高至 0.803,燃油消耗率降低了 22.08 g/(kW·h) 和 18.38 g/(kW·h);

3) 在研究航空活塞发动机不同海拔工况点中,选取最优的气道长度方案,结果发现:扫气道长度呈现减短的趋势,而排气道长度则逐渐增加,且在海拔高度大于 1 800 m 时气道长度变化更加明显。

参考文献:

- [1] SHER E. Scavenging the two-stroke engine[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1990, 16(2):95-124.
- [2] MITTAL V. Design parameters for small engines based on market research[R]. SAE Technical Paper 2018-01-1717, 2018.
- [3] TURNER J W G, HEAD R A, CHANG J, et al. 2-Stroke engine options for automotive use: a fundamental comparison of different potential scavenging arrangements for medium-duty truck applications[J]. SAE Technical Paper 2019-01-0071, 2019.
- [4] 陈波, 刘玮, 张岩, 等. 气阀式二冲程柴油机扫气过程仿真[J]. 内燃机学报, 2019, 37(5):434-440.
CHEN Bo, LIU Wei, ZHANG Yan, et al. Simulation analysis on the scavenging process of a poppet valve two-stroke diesel engine[J]. Transactions of CSICE, 2019, 37(5):434-440. (in Chinese)
- [5] BRYNYCH P, MACEK J, NOVELLA R, et al. Representation of two-stroke engine scavenging in 1D models using 3D simulations[J]. SAE Technical Paper 2018-01-0166, 2018.
- [6] 张备, 王天友, 崔磊, 等. 二冲程船用柴油机稳态扫气流动特性[J]. 内燃机学报, 2019, 37(3):228-235.
ZHANG Bei, WANG Tianyou, CUI Lei, et al. Scavenging flow in a steady-state model of a two-stroke marine diesel engine[J]. Transactions of CSICE, 2019, 37(3):228-235. (in Chinese)
- [7] 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 Xue Tian, 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. (in Chinese)
- [8] 郭栋, 蹇剑策, 赵振峰, 等. 航空活塞二冲程发动机的可变排气阀换气过程[J]. 航空动力学报, 2020, 35(3):471-481.
GUO Dong, QIAN Jiance, ZHAO Zhenfeng, et al. Ventilation process of variable exhaust valve of aviation piston two-stroke engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(3):471-481. (in Chinese)
- [9] 王昌盛, 额日其太, 丁文豪. 高超声速轴对称进气道多目标优化设计[J]. 航空动力学报, 2020, 35(7):1392-1401.
WANG Changsheng, Eriqitai, DING Wenhao. Multi-objective optimization design of hypersonic axisymmetric inlet[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(7):1392-1401. (in Chinese)
- [10] 高翔, 李密, 王定奇. 发动机进排气系统对飞机气动特性影响的数值研究[J]. 航空动力学报, 2020, 35(5):1000-1008.
GAO Xiang, LI Mi, WANG Dingqi. Numerical study on the influence of aero-engine intake and exhaust system on aerodynamic characteristics of aircraft[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(5):1000-1008. (in Chinese)
- [11] 宋金瓯, 吕刚, 宋崇林. 内燃机中的流体运动[M]. 天津: 天津大学出版社, 2015.
- [12] 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)
- [13] 周龙保. 内燃机学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [14] 戈登·珀维斯·布莱尔. 二冲程发动机设计与模拟[M]. 贾滨, 秦静, 李树花, 等译. 天津: 天津大学出版社, 2018.
- [15] 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. (in Chinese)
- [16] DEB K D, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA - II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2):182-197.
- [17] 曾丽芳, 胡建新, 潘定一, 等. 亚声速无人机 S 弯进气道的多点多目标优化设计[J]. 推进技术, 2021, 42(3):495-504.
- ZENG Lifang, HU Jianxin, PAN Dingyi, et al. Multi-points and multi-objective optimization design of subsonic UAV S-shaped inlet[J]. Journal of Propulsion Technology, 2021, 42(3):495-504. (in Chinese)
- [18] 罗旭. 基于帕累托优化的电动汽车变流器设计研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- LUO Xu. Research on design of electric vehicle converter based on Pareto optimization[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016. (in Chinese)

(编辑: 张 雪)