

航空活塞二冲程发动机的可变排气阀 换气过程

郭 栋¹, 蹇剑策¹, 赵振峰^{1,2}, 王 蕾¹, 俞春存¹
(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)

摘 要: 航空活塞二冲程发动机的换气过程直接影响发动机的性能,采用可变排气阀可以改善发动机的动力性能。通过 GT-Power 软件搭建发动机一维整机模型,进行可变排气阀的仿真研究,分析了发动机在不同转速、不同排气阀状态下的换气过程及排气阀状态对换气过程的影响。在此基础上,还对定速巡航工况下(6500 r/min 转速、50%节气门开度)的排气阀状态进行了优化。结果表明:不同的排气阀状态可以改变发动机排气过程压力波动的相位,从而影响发动机的换气品质及燃烧过程;在定速巡航工况下,排气阀为中等开度时(初级阀关闭、次级阀开启),其发动机动力性能达到最优。

关 键 词: 可变排气; 换气过程; 二冲程; 压力波动; 活塞发动机

中图分类号: V234; TK411.2 **文献标志码:** A

Ventilation process of variable exhaust valve of aviation piston two-stroke engine

GUO Dong¹, QIAN Jiance¹, ZHAO Zhenfeng^{1,2}, WANG Lei¹, YU Chuncun¹
(1. School of Mechanical Engineering,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. Shenzhen Institute of Technology,
Beijing Institute of Technology, Shenzhen Guangdong 518057, China)

Abstract: The ventilation process of the aviation piston two-stroke engine directly affects the engine performance, and the variable exhaust valve can improve the dynamic performance of engine. Through the GT-Power to build the one-dimensional engine model, simulation research about ventilation process of the engine at different speeds and different exhaust valve stages was carried out, and the influence of exhaust valve stage on the ventilation process was analyzed. On this basis, the stage of the exhaust valve under constant speed cruise conditions (speed of 6500 r/min, 50% throttle opening) was also optimized. The results show that different exhaust valve stage can change the phase of pressure fluctuations during engine exhaust process, thereby affecting the engine's ventilation quality and combustion process; under constant speed cruise conditions, when the exhaust valve is at medium stage (primary valve is closed, secondary valve is open), engine power performance is the best.

收稿日期: 2019-09-02
基金项目: 深圳市科技创新基金(JCYJ20170817114345260)
作者简介: 郭栋(1995—),男,硕士生,从事航空活塞发动机相关研究。
通信作者: 蹇剑策(1991—),男,硕士,主要从事内燃机相关研究。E-mail: rdjy_qjjcc@163.com

引用格式: 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.

Key words: variable exhaust; ventilation process; two-stroke; pressure fluctuation; piston engine

1917 年英国第一架无人机的出现,掀起了无人机的热潮,无人机凭借其体积小、隐蔽性好、操作方便等特点得到了广泛的应用,尤其是在军事领域,无人机可以完成航空侦察、远程攻击等任务且无人员伤亡。无人机系统在战争之中可发挥出的重要作用已经越来越引起世界各国的重视,并在许多国家获得了优先发展的地位^[1-4]。

目前,无人机的动力来源有太阳能、动力电池以及各种类型的内燃机。其中,活塞式发动机具有油耗低、结构简单、技术成熟、价格便宜、使用维护费用低以及寿命长等优点,所以在无人机动力装置领域,活塞发动机在数量上占据统治地位。活塞二冲程发动机与四冲程发动机的主要区别在于换气过程,活塞二冲程发动机的换气过程靠利用废气能量排气,并以曲轴箱或单独的扫气泵将新鲜充量压入气缸,扫除缸内残余废气。活塞二冲程发动机组织好换气过程便可以达到较高的功率密度及升功率,基于此特点,改善活塞二冲程发动机的换气过程已成为近年来无人机的研究热点^[5]。胡耀辉等研究发现活塞二冲程发动机扫气效率主要受扫气比时面值的影响,同时会由于废气倒流导致捕获率下降^[6]。董雪飞等的研究表明进排气压差对换气品质及捕获率有较大影响^[7-8]。李昌远等利用 Fire 对活塞二冲程汽油机换气过程进行了三维瞬态模拟,得出曲轴箱压力波动会对扫气过程有一定影响的结论^[9]。尚勇等进行了排气门开启角度对功率损失的影响分析^[10]。徐斌等通过改变排气管的结构,实现了发动机功率的提升^[11-12]。胡春明等使用自适应遗传算法对某型无人机的进排气系统进行优化,转矩和燃油消耗率得到了明显改善^[13]。

活塞二冲程发动机的换气品质与扫气口、排气口的位置有关,采用固定排气口高度的活塞二冲程发动机,未考虑到最佳的配气相位与转速、负荷之间的关系,不能保证各个工况下都处于最佳工作点,造成燃油消耗率的增加以及功率的损失^[14-17]。所以本文针对安装有可变排气阀的活塞二冲程汽油机进行换气过程的仿真研究,分析可变排气阀对换气过程的影响,并对定速巡航工况下的排气阀状态进行了优化。

1 模型创建

本文研究的样机为一台活塞二冲程两缸缸内

直喷机,样机主要参数如表 1 所示。

表 1 样机主要技术参数
Table 1 Main technical parameters of prototype

参数	数值
排量/mL	800
活塞行程/mm	75.7
缸径/mm	82
几何压缩比	12.5
扫气形式	曲轴箱扫气
标定功率/kW	108
标定转速/(r/min)	7 900
扫气口开	109°(上止点后)
扫气口关	251°(上止点后)
每缸排气口数目	3
辅排气口开	87.5°(上止点后)
辅排气口关	272.5°(上止点后)
主排气口形式	挡阀式可变气口

样机缸内排气口、扫气口平面展开图如图 1 所示,有 5 个扫气口,1 个主排气口和 2 个辅助排气口。在主排气口安装有闸门式挡阀作为排气口可变技术的执行机构,其结构及安装示意图如图 2 所示。排气阀有三种工作状态,如表 2 所示,这三种工作状态分别对应了不同的排气口开启角。

根据样机技术参数,将活塞二冲程直喷发动机分割为进气系统、气缸、排气系统、曲轴等模块,在 GT-Power 软件中选取相应元件模块与连接件模块,输入各部分结构与运行所需参数值建立一维仿真模型。

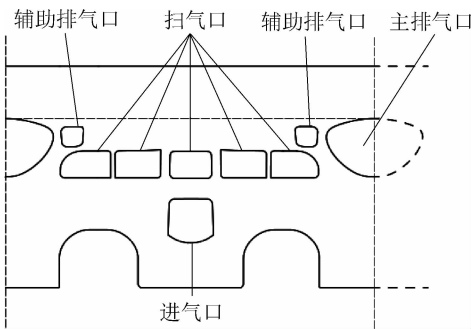


图 1 气口展开图

Fig. 1 Expansion diagram of gas port

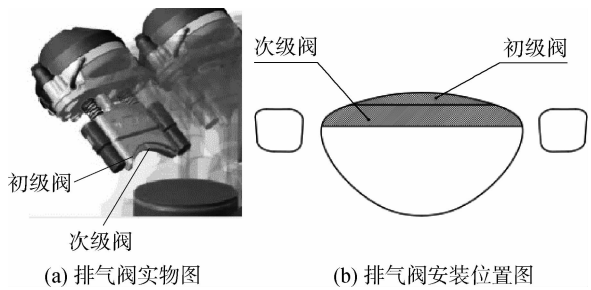


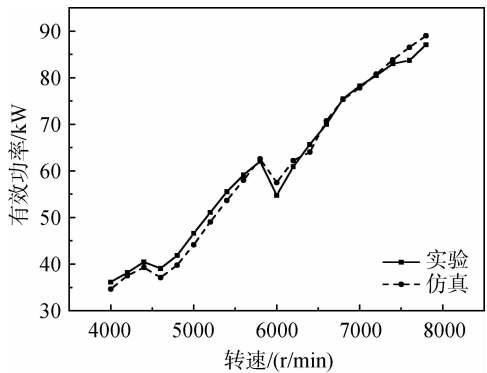
图 2 可变排气阀

Fig. 2 Variable exhaust valve

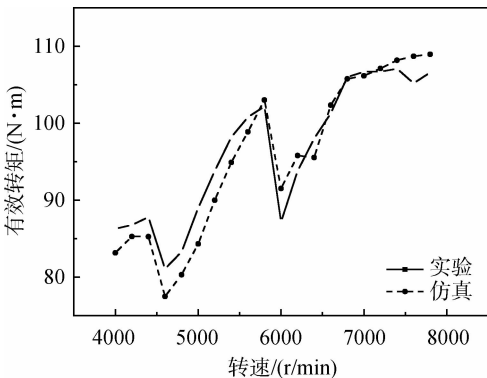
表 2 可变排气阀状态

状态序号	排气阀状态
1	初级阀关闭、次级阀关闭
2	初级阀关闭、次级阀打开
3	次级阀与初级阀均打开

为评价所建模型的正确性,对发动机的外特性和平原定速巡航工况点(节气门开度为 50%, 转速为 6 500 r/min)的缸压进行了实验值与仿真值的校核,如图 3 和图 4 所示。



(a) 实验与仿真有效功率对比



(b) 实验与仿真有效转矩对比

图 3 外特性校核

Fig. 3 Validation of external characteristic

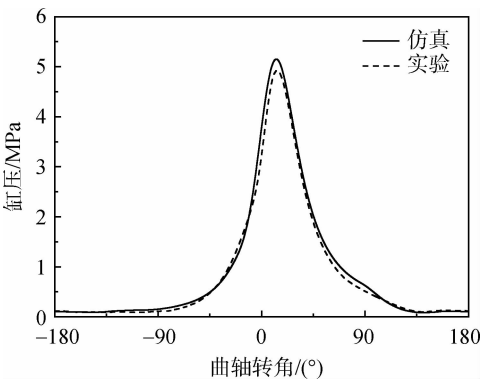


图 4 定速巡航工况缸压校核

Fig. 4 Validation of cylinder pressure under constant speed cruise condition

由图 4 可知,仿真模型与实验值符合程度较高,其各校核项中的最大偏差均低于 5%,符合工程计算精度要求,表明仿真模型计算结果具有足够的可信度。

2 压力波动对换气过程影响分析

与活塞四冲程发动机通过活塞做功推挤排气不同,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,排气背压的波动会对其换气过程与整机性能产生明显影响^[18],因此,需要对活塞二冲程发动机排气管路中的压力波动进行分析研究。如图 5 所示为本发动机排气管结构。其中入口段与发动机相连,尾管连通大气。在分析不同管段的压力波动时,由于尾管为等径直管,不会使气体在管内发生膨胀或被压缩的变化,因此尾管的影响可忽略不计。

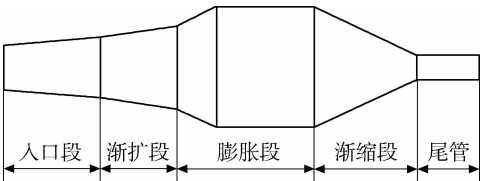


图 5 排气管结构形式

Fig. 5 Structure of exhaust pipe

图 6 所示为发动机在 4 600 r/min 转速全负荷工况下排气管内的压力波动情况。图上四条细线标示的是一缸的换气相位, t_{eo} 、 t_{ec} 表示主排气口的开启与关闭时刻,相对应 t_{io} 、 t_{ic} 为扫气口的开启与关闭时刻。由于两个气缸相位相差 180° 曲轴转角,换气过程互不干扰,因此在图上标识出的 t_{eo} 至 t_{ec} 范围内,排气管内的压力波动均由同一缸的排气引起。

定义废气流出发发动机的方向为正向,排气开始后,缸内废气冲入排气管,在排气管内形成正向的压缩波。随废气在流动中逐渐膨胀,压缩波峰值同步降低,并形成沿逆向传播的膨胀波;当压缩波抵达渐缩段后,因为排气管气流再次被压缩,压缩波被反射,转而向气流上游逆向传播。

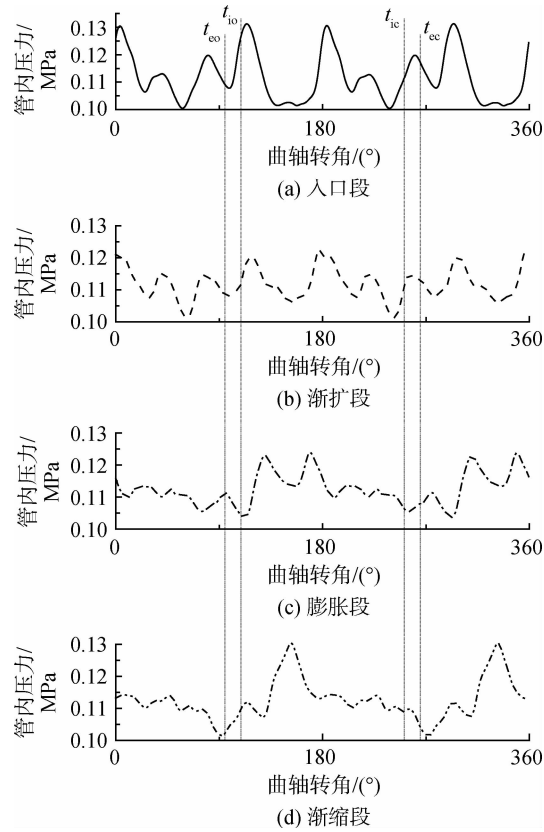


图 6 排气管压力波动

Fig. 6 Pressure fluctuation of exhaust pipe

从图 6 中可以看出在排气管膨胀段开启阶段存在“双波峰”压力波动,其原因就是因为管内正逆向压力波动的叠加。排气过程中,气体在排气管的膨胀段与渐缩段形成了逆向膨胀波和压缩波,其中逆向膨胀波可用于促进扫气过程进行,而逆向压缩波则可用于降低过后排气阶段缸内充量的短路损失;所以通过合理的排气管设计,在气口开度最大时令膨胀波抵达排气口,利用膨胀波促进扫气过程,提高扫气效率;令逆向压缩波在扫气过程后期到达排气口,利用压缩波的封堵作用降低新鲜充量的短路损失。

3 换气过程仿真分析

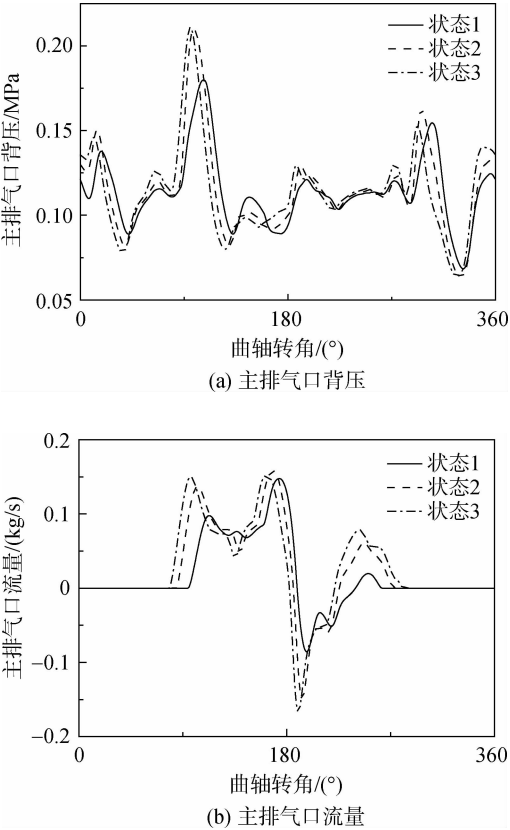
活塞二冲程发动机在不同转速下应匹配不同的排气正时以达到最优工作点。选取 4 600 r/min

及 7 800 r/min 转速点,代表低速与高速工况,从排气过程、扫气过程与缸内过程三个方面分析不同排气阀状态对活塞二冲程发动机换气过程的影响。

3.1 排气阀状态对排气过程的影响

图 7、图 8 为不同转速下三种排气阀状态对气缸排气过程影响的对比。如图 7 所示,随着排气阀开度的增加,排气口开启角也相应提前。在状态 2 与状态 3 下,主排气口的开启时刻早于辅助排气口的开启时刻,因此主排气口开启时,状态 2、状态 3 的排气压力高于状态 1,同时压力峰值相位相应提前。由于压力波在排气管内的绝对传播时间几乎不变,所以当发动机转速不变时,不同排气阀状态下排气压力波动相位的差别只由排气正时的差别引起。随排气阀状态由状态 1 到状态 3 变化,排气正时逐步提前,导致在整个循环中主排气口背压波动的相位整体前移;排气阀状态的变化同时导致主排气口流通面积改变,进而导致排气流量变化,排气阀开度越大,排气过程初期经过主排气口的废气流量越大。由于排气过程中,逆向压缩波在排气口关闭前传播到排气口,因此在排气阶段的中后期会出现排气倒流的现象,且排气口流通面积越大,倒流流量越大。

由于下止点时,排气口流通面积最大,此时排



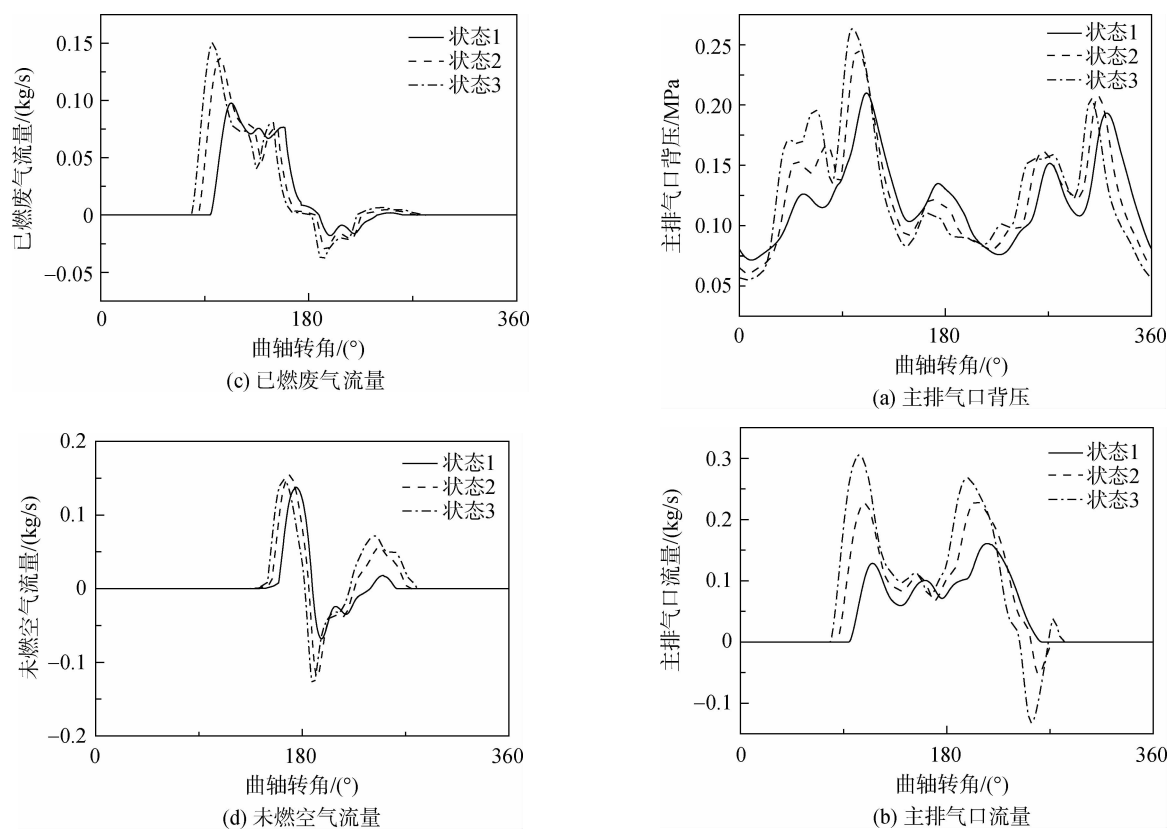


图7 4600 r/min 转速时不同排气阀状态对主排气口排气过程的影响

Fig. 7 Effect of exhaust valve stage on the exhaust process of the main exhaust port at speed of 4600 r/min

气口背压的升高不利于排气过程的进行,受主排气口背压升高影响,下止点处已燃废气流量明显降低并存在废气倒灌现象;在排气口关闭前,扫气过程已经结束,此时主排气口背压的降低不利于气缸对新鲜充量的封存,对比图 7(b)、图 7(d)两图可知,未燃空气为排气口关闭前流出气缸工质的主要成分,而在三种排气阀状态中,状态 1 通过排气口损失的新鲜空气总量最少。

与 4600 r/min 转速相比,图 8 所示高转速 (7800 r/min) 排气过程主要区别在于高转速下逆向压缩波到达排气口的相位明显推迟,主排气口出现倒灌现象的相位相应推迟,7800 r/min 转速时,状态 1、2、3 下排气逆向压缩波到达排气口的时刻分别比排气口关闭时刻提前 13° 曲轴转角、28° 曲轴转角和 43° 曲轴转角,由于状态 1 排气压缩波返回气缸时排气口已经基本关闭,因此 7800 r/min 转速时状态 1 的主排气口没有发生气体倒流;状态 2、状态 3 存在从排气口短路损失的新鲜充量被推回缸内的情况,且状态 3 返回缸内的未燃空气总量较多。

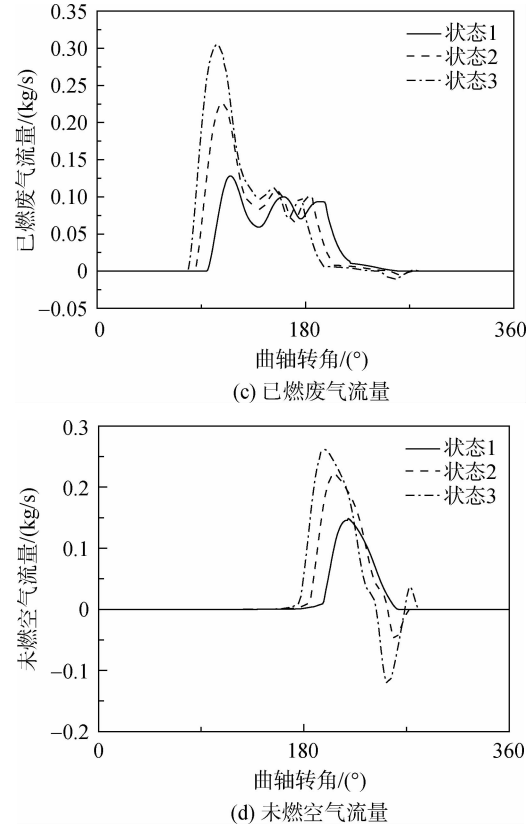


图8 7800 r/min 转速时不同排气阀状态对主排气口排气过程的影响

Fig. 8 Effect of exhaust valve stage on the exhaust process of the main exhaust port at speed of 7800 r/min

3.2 排气阀状态对扫气过程的影响

图 9 为 4 600 r/min 转速时不同排气阀状态对发动机扫气过程的影响对比。因为状态 2、状态 3 排气口开启时刻较早,扫气口开启时缸内压力较低,所以状态 2、状态 3 扫气口打开时缸内向曲轴箱内工质倒流的现象弱于状态 1。在排气逆向压缩波到达排气口之前的扫气过程中,状态 1 的扫气压力始终高于状态 2、状态 3;逆向压缩波到达排气口后,因状态 2、状态 3 排气口处工质倒流流量高于状态 1,导致状态 2、状态 3 扫气口处发生的倒流流量也高于状态 1,所以在上止点后 200°后出现的曲轴箱压力第二次升高过程中,状态 2、状态 3 曲轴箱压力高于状态 1,这一差别又导致扫气口关闭前,虽然三种状态下排气背压均下降,但只有状态 2、状态 3 两个状态发生气体工质再次由扫气口回流到缸内的现象。

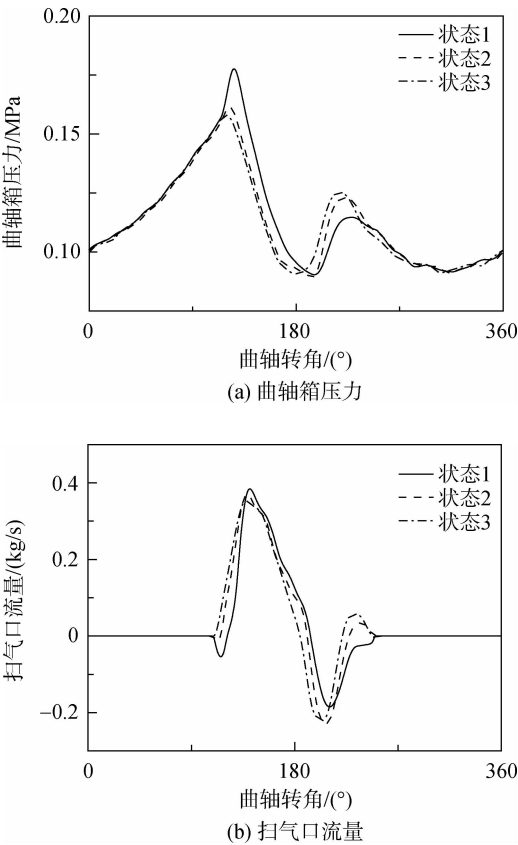


图 9 4 600 r/min 转速时不同排气阀状态对扫气过程的影响

Fig. 9 Effect of the exhaust valve stage on the scavenging process at speed of 4 600 r/min

图 10 为 7 800 r/min 转速时不同排气阀状态对扫气过程的影响。随压力波动相位的延迟,扫气口关闭前扫气倒流的现象逐渐减弱,7 800

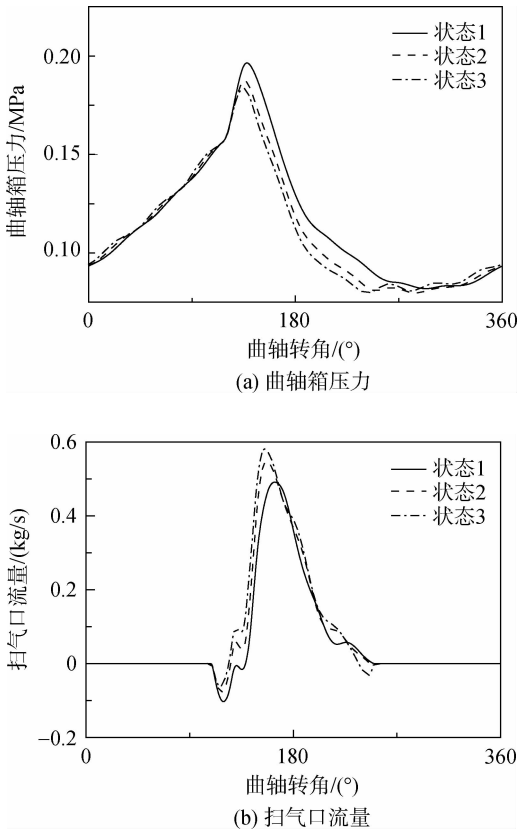


图 10 7 800 r/min 转速时不同排气阀状态对扫气过程的影响

Fig. 10 Effect of the exhaust valve stage on the scavenging process at speed of 7 800 r/min

r/min 转速时,由于三种排气阀状态下发动机排气过程的相位差异,扫气口关闭前三种状态在相同时刻扫气气流的流量依次递减,且状态 1、状态 2 在扫气过程结束前未发生扫气倒流,状态 3 有少量充量流回曲轴箱。

3.3 排气阀状态对缸内过程的影响

图 11 所示为 4 600 r/min 转速时排气阀状态对缸内工质质量变化和累计放热量的影响对比。结合对换气过程的分析可知,缸内捕获质量曲线上的两个峰值分别由扫气和逆向压缩波对排气的反向推挤作用产生。换气过程结束时,状态 1 缸内封存的工质质量为 0.291 4 g,是状态 2、状态 3 封存气量的 1.05 倍与 1.12 倍。造成封存气量差异的原因是虽然三种不同排气阀状态下扫气过程进入缸内的新鲜充量质量和逆向压缩波推回缸内的工质质量均相近,但由于 4 600 r/min 转速时排气管内逆向压缩波到达排气口的时刻较早,在排气阶段后期,主排气口外侧再次形成了低压,利于工质流出院缸。因为状态 1 排气口关闭时刻较早,所以在这一阶段中,状态 1 工质损失最少,缸

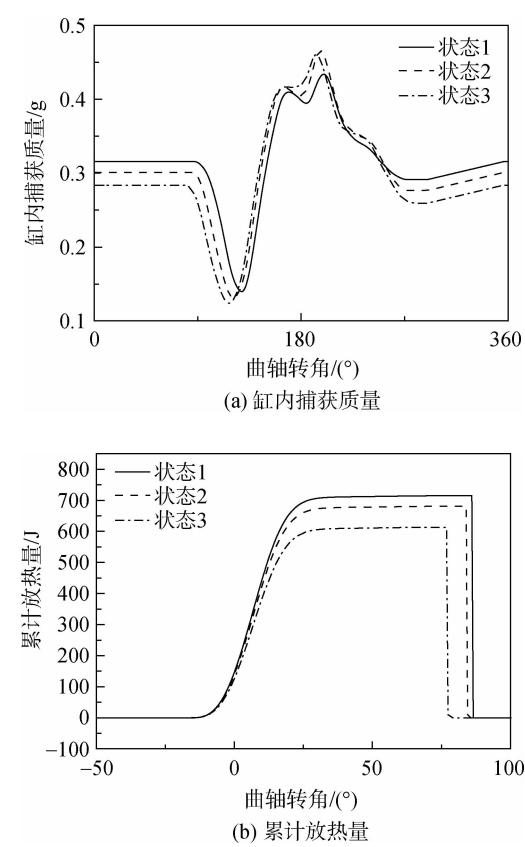


图 11 4600 r/min 转速时不同排气阀状态对缸内过程的影响

Fig. 11 Effect of the exhaust valve stage on the in-cylinder process at speed of 4600 r/min

内封存质量最多。缸内新鲜空气封存量的增加利于缸内燃油的充分燃烧。由图 11(b)可知,在循环供油量相同的条件下,状态 1 燃料的累计放热量最高,表明在该转速点下,状态 1 燃料的未燃损失最小。

图 12 为 7800 r/min 转速时不同排气阀状态对缸内捕获质量与累计放热量的影响。7800 r/min 转速时,排气压力波动的相位进一步延迟,逆向压缩波到达排气口时刻与排气口关闭时刻的最大相位差仅为 43°曲轴转角(状态 3 出现),排气

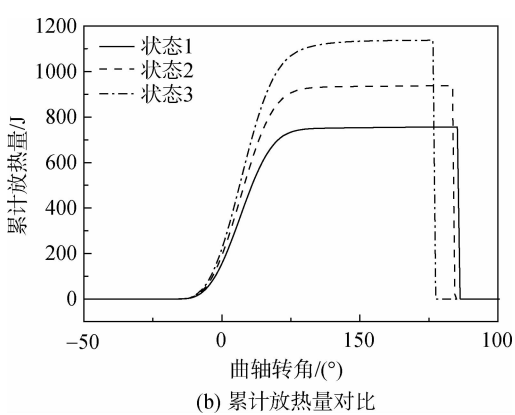
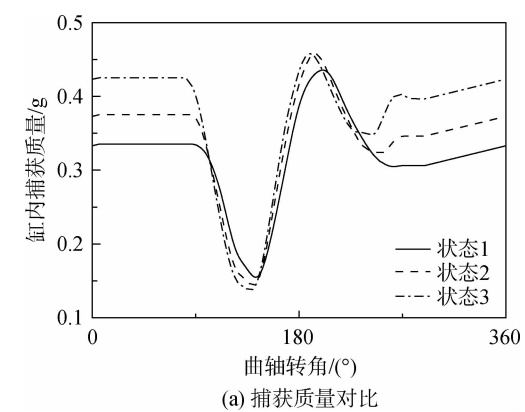


图 12 7800 r/min 转速时,不同排气阀状态对缸内过程的影响

Fig. 12 Effect of the exhaust valve stage on the in-cylinder process at speed of 7800 r/min

口对气流的节流作用明显,因此被压力波推回气缸的工质质量较少。随着排气口关闭时刻的推迟,压缩波返回时刻排气口的流通面积增大,被推回气缸的气体质量增加,因此 7800 r/min 转速时,状态 3 气缸在换气过程结束后捕获的工质质量最多,燃烧过程放出的热量也最多。

4 定速巡航工况点处排气阀状态的优化

海拔的升高会导致空气压力与温度的降低,从而影响发动机性能。以平原(海拔 $H=0$ m)与直升机工作海拔($H=2800$ m)为研究点(6500 r/min 转速,50%节气门开度),根据不同排气阀状态对换气过程的影响,分析不同海拔下排气阀状态对发动机性能的影响,并从中选择最佳方案。

图 13 与图 14 为海拔 $H=0$ m 与海拔 $H=2800$ m 下排气阀状态对发动机排气过程与扫气过程的影响对比。对于相同的排气阀状态,海拔升高后,扫气压力与排气压力均降低,且最大压降均约 70 kPa;不同海拔处,排气阀状态对发动机扫气压力与排气压力的影响规律相同,表明活塞二冲程发动机换气过程的压力波动形式不受海拔变化影响,只与排气系统的几何结构相关。由于换气过程中扫气压力与空气密度的降低,海拔升高后扫气口流量和排气流量均降低;平原时,排气口流量的第二个峰值在下止点处出现,但在海拔 2800 m 处排气流量却没有第二次上升的过程,造成这种差别的原因是这一阶段中虽然在膨胀波的作用下排气背压处于较低水平,但海拔的升高造成扫气压力的明显下降与扫气口流量的降低,扫气过程流入缸内的空气量减少,对废气的推挤作

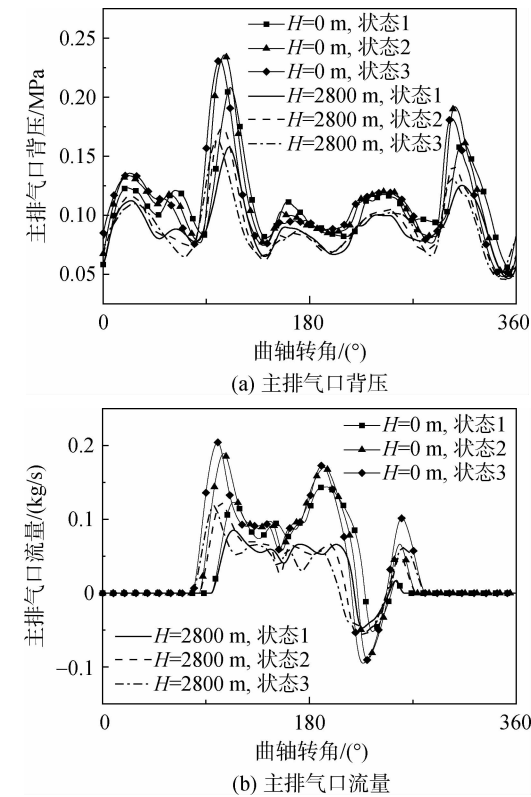


图 13 不同海拔下排气阀状态对排气过程的影响
Fig. 13 Effect of exhaust valve stages at different altitudes on exhaust process

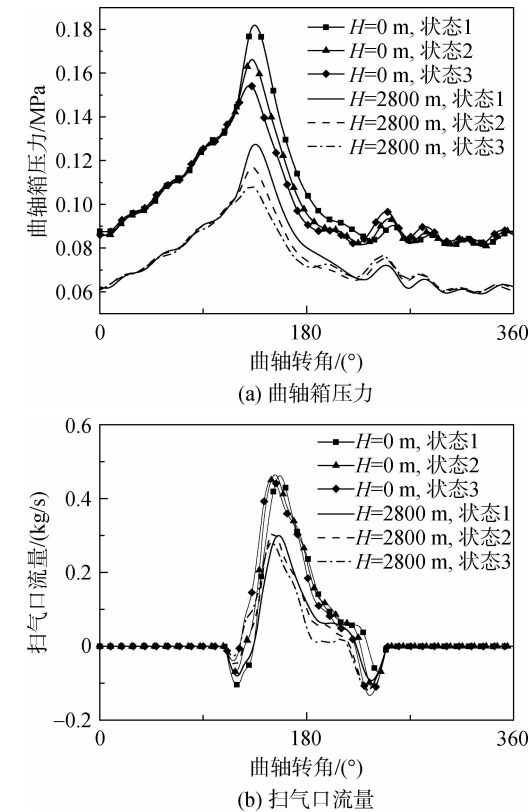
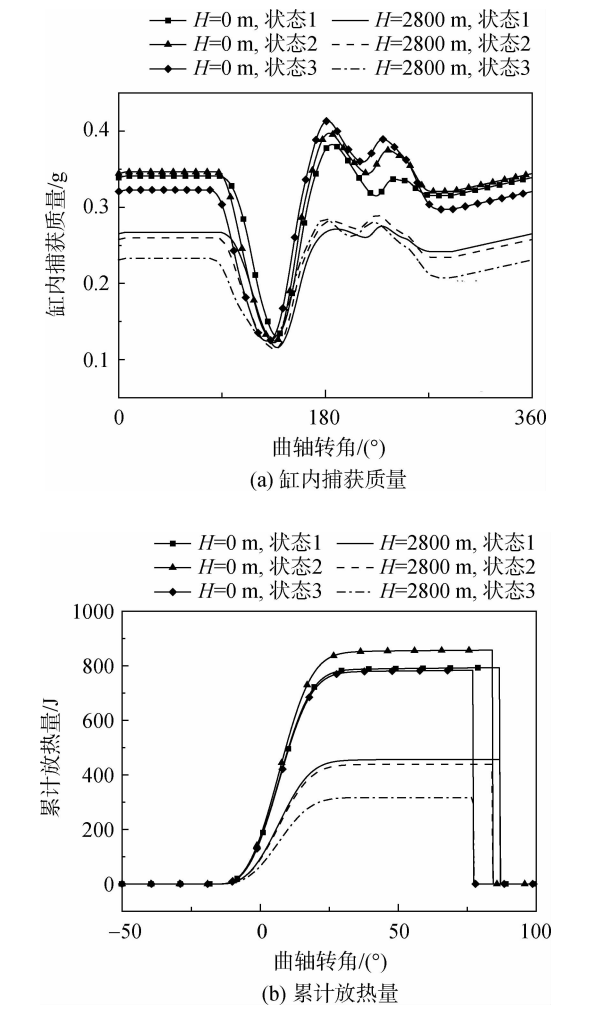


图 14 不同海拔下排气阀状态对扫气过程的影响
Fig. 14 Effect of exhaust valve stages at different altitudes on scavenging process

用减弱。在海拔为 0 m 处状态 2、状态 3 由逆流压缩波导致的排气口处工质倒流流量相近,且均高于状态 1,但在排气口关闭前有缸内气体再次从排气口流出的现象,且随着排气口关闭时刻的推迟,流量增加。海拔 2800 m 时,因压缩波压力的降低,三种排气阀状态下排气口的倒流流量均减小,且最大倒流流量基本相同,排气口关闭前缸内气体再次流出气缸的现象仍存在,相比海拔 0 m 时这部分气体的流量略有降低,但排气阀状态对其流量的影响规律不变。

图 15 为海拔 0 m 和 2800 m 处不同排气阀状态对缸内过程的影响。随着海拔升高,扫气量减少,换气过程结束时气缸捕获的空气质量同步下降;在循环供油量不变的条件下,海拔 2800 m 处缸内燃烧的累计放热量与海拔 0 m 处相比大幅度下降,表明海拔 2800 m 时,发动机缸内可燃混合气总量过低,燃烧恶化,并由此导致循环指示功的大幅度减少。海拔 0 m 时,状态 2 因背压波动而被封堵回气缸的空气量较多,且在排气口关闭前流出气缸的工质损失较少,综合两方面影响后,状



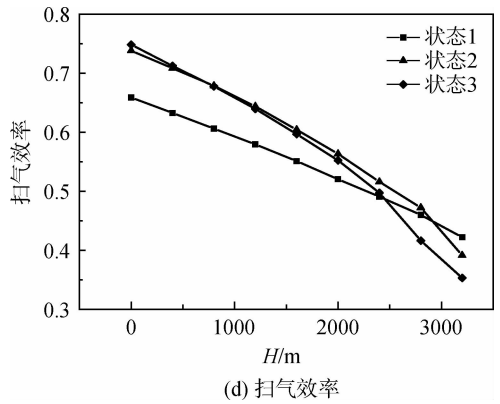
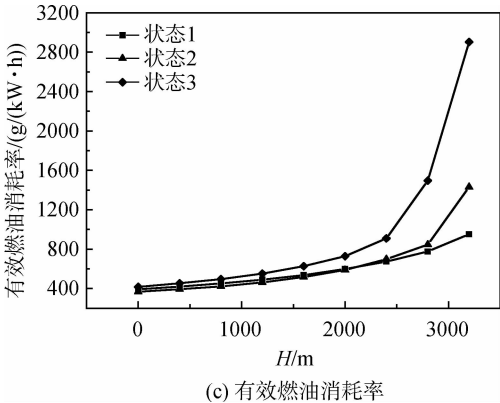
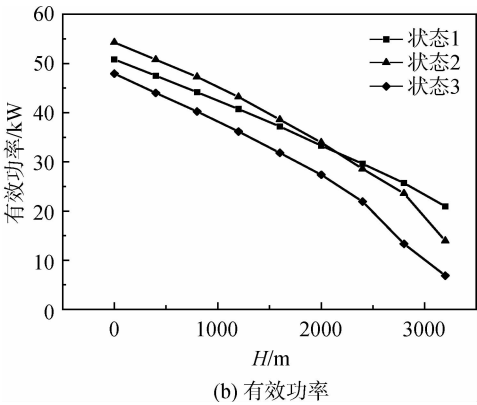
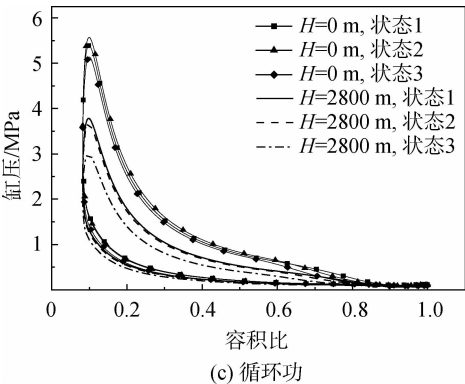
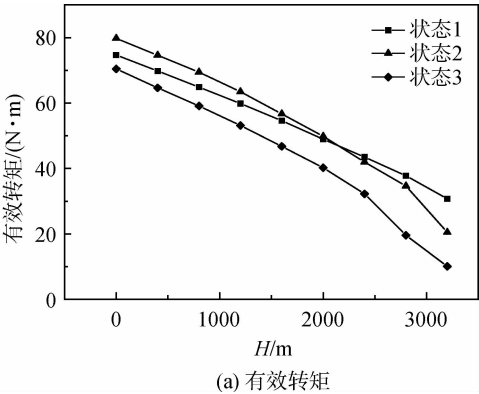


图 16 不同海拔下排气阀状态对发动机性能的影响
Fig. 16 Effect of exhaust valve stages at different altitudes on engine performance



能出现明显下降,表明此时发动机工作状态已开始恶化。从扫气效率的结果看,在海拔 2800 m 以下,在状态 2 下发动机的扫气效率高于状态 1,表明在大部分计算区间内,状态 2 发动机缸内的扫气过程进行得更彻底。

由于飞机设计巡航飞行高度为 2800 m,所以飞机主要工作的海拔区间为 0~2800 m,由分析可知在该海拔区间内状态 2 发动机动力性能最好,因此在定速巡航工况点处,发动机排气阀应维持在初级阀关闭、次级阀打开的中等开度状态。

5 结 论

1) 排气管膨胀段中形成“双波峰”压力波动形式的原因是管内正逆向压力波动的叠加,逆向的膨胀波和压缩波分别在排气管的膨胀段与渐缩段形成,其中逆向膨胀波可用于促进扫气过程进行,而逆向压缩波则可用于降低过后排气阶段缸内充量的短路损失。

2) 排气阀的不同状态实质上是改变了发动机排气过程压力波动的相位,进而影响发动机的扫气过程与缸内封存的工质质量,最终对发动机的燃烧放热产生影响。由于活塞二冲程发动机在不同转速时排气压力波动的最佳相位不同,而压力波动的相位又和排气管几何结构相关,因此可变排气策略的存在可以拓宽排气管适用的转速范围。

3) 针对航空活塞发动机定速巡航工况点(转速 6 500 r/min,节气门开度 50%)利用仿真计算优选了发动机排气阀的最佳状态。结果表明:排气挡阀在初级阀关闭、次级阀打开的中等开度状态时发动机定速巡航工况下性能最好。

参考文献:

[1] 尹泽勇,李上福,李概奇. 无人机动力装置的现状与发展[J]. 航空发动机,2007,33(1):10-15.
YIN Zeyong, LI Shangfu, LI Gaiqi. Current status and development of unmanned aerial vehicle powerplants[J]. Aeroengine, 2007, 33(1): 10-15. (in Chinese)

[2] 王士奇. 中国无人机动力装置现状浅析[J]. 航空动力, 2019, 12(2): 9-12.
WANG Shiqi. Analysis of the status quo of Chinese unmanned aerial vehicle power plants[J]. Aviation Power, 2019, 12(2): 9-12. (in Chinese)

[3] 张奇,杜发荣. 小功率航空活塞发动机重油技术进展[J]. 小型内燃机与车辆技术, 2014, 43(4): 81-85.
ZHANG Qi, DU Farong. Progress in heavy oil technology of low power aviation piston engine[J]. Small Internal Combustion Engine and Vehicle Technology, 2014, 43(4): 81-85. (in Chinese)

[4] 卢东亮,郑君,胡崇波. 通用航空活塞发动机的发展现状研究[J]. 内燃机与配件, 2019, 10(8): 64-66.
LU Dongliang, ZHENG Jun, HU Chongbo. Study on the development status of general aviation piston engine[J]. Internal Combustion Engines and Parts, 2019, 10(8): 64-66. (in Chinese)

[5] 马玉龙,杨海青,徐光荣. 分层扫气二冲程汽油机的数值模拟[J]. 航空动力学报, 2019, 34(9): 2001-2009.
MA Yulong, YANG Haiqing, XU Guangrong. Numerical simulation of stratified scavenging two-stroke gasoline en-

gine[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(9): 2001-2009. (in Chinese)

[6] 胡耀辉,汪洋,耿鹤鸣,等. 二冲程液压自由活塞发动机换气过程影响因素的仿真研究[J]. 内燃机工程, 2019, 40(2): 118-124.
HU Yaohui, WANG Yang, GENG Heming, et al. Research on influencing factors of ventilation process of two-stroke hydraulic free piston engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2019, 40(2): 118-124. (in Chinese)

[7] 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 of ventilation process of two-stroke diesel engine with opposed piston[J]. Journal of Internal Combustion Engine, 2015, 33(4): 362-369. (in Chinese)

[8] 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 ventilation process and supercharged matching of opposed-piston two-stroke diesel engine[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015. (in Chinese)

[9] 李昌远,汤东,陈欢. 二冲程汽油机扫气过程瞬态模拟研究[J]. 车辆与动力技术, 2012(4): 33-37, 57.
LI Changyuan, TANG Dong, CHEN Huan. Transient simulation of scavenging process of two-stroke gasoline engine[J]. Vehicle and Power Technology, 2012(4): 33-37, 57. (in Chinese)

[10] 尚勇,刘福水,王亚丽. 排气门开启角度对内燃机换气过程的影响规律研究[J]. 内燃机工程, 2015, 36(2): 7-12.
SHANG Yong, LIU Fushui, WANG Yali. Study on the influence law of exhaust valve opening angle on combustion process of internal combustion engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2015, 36(2): 7-12. (in Chinese)

[11] 徐斌,刘波,杨世春,等. 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, et al. Optimization analysis of intake and exhaust systems for a certain type of aviation piston engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(3): 624-630. (in Chinese)

[12] 徐斌,刘显含,杨世春. 航空活塞发动机进排气管路改进设计研究[J]. 车辆与动力技术, 2014(2): 49-55.
XU Bin, LIU Yuhuan, YANG Shichun. Research on improvement design of intake and exhaust pipe of aviation piston engine[J]. Vehicle and Power Technology, 2014(2): 49-55. (in Chinese)

[13] 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. Optimization of intake and exhaust systems for UAV piston engines[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(4): 1009-1016. (in Chinese)

[14] 王蕾,赵振峰,俞春存. 航空活塞二冲程汽油机排气口高度

优化研究[J]. 航空动力学报,2019,34(2):442-450.

WANG Lei,ZHAO Zhenfeng,YU Chuncun. Study on the optimization of the exhaust port height of aero-piston two-stroke gasoline engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2019,34(2):442-450. (in Chinese)

[15] 裴建权. 可变进、排气系统对发动机动力性作用影响分析[D]. 吉林:吉林大学,2012.

PEI Jianquan. Analysis of the influence of variable intake and exhaust systems on engine dynamics[D]. Jilin:Jilin University,2012. (in Chinese)

[16] 丁秋明,苏小平,缪小冬. 某二冲程汽油机气口关键参数的优化[J]. 中国农机化学报,2015,36(1):210-214.

DING Qiuming,SU Xiaoping,MIAO Xiaoping,et al. Optimization of key parameters of a two-stroke gasoline engine port[J]. Chinese Journal of Agricultural Mechanization, 2015,36(1):210-214. (in Chinese)

[17] 刘博,邓康耀. 二冲程汽油机高空增压功率恢复计算研究[J]. 航空动力学报,2009,24(7):1570-1576.

LIU Bo,DENG Kangyao. Research on calculation of high-altitude supercharged power recovery of two-stroke gasoline engine[J]. Journal of Aerospace Power,2009,24(7):1570-1576. (in Chinese)

[18] 陈方超. 二冲程增压发动机气体流动及扫气品质的仿真研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2017.

CHEN Fangchao. Simulation study on gas flow and scavenging quality of two-stroke supercharged engine[D]. Nanjing:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2017. (in Chinese)

(编辑:陈 越)