

某型航空活塞发动机进排气系统 优化分析

徐 斌, 刘 波, 杨世春, 姬芬竹

(北京航空航天大学 交通科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 针对高空小型飞机的动力要求,对某型航空活塞发动机的进排气系统均匀性进行了分析,建立了某型航空活塞发动机的仿真模型,分析了进排气管路结构参数对发动机性能的影响.以进气质量流量不均匀度和进气压力波动效应为评价指标,对发动机的进排气系统结构参数进行了优化.通过改变进排气歧管和总管的长度,把不均匀度降低到 5% 以内,最大降幅为 38%,并且提高了发动机的扭矩和功率,最大提高幅度为 5%.

关 键 词: 航空活塞发动机; 进排气系统; 进气质量流量; 不均匀度; 压力波动; 涡轮增压
中图分类号: V234.02 **文献标志码:** A

Optimization analysis of a aircraft piston engine intake and exhaust system

XU Bin, LIU Bo, YANG Shi-chun, JI Fen-zhu

(School of Transportation Science and Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: To meet the power requirement of small high altitude aircraft, the intake and exhaust system flow uniform of a aircraft piston engine was analyzed. Simulation model of the aircraft piston engine was established, and the effects of intake and exhaust pipe structural parameters on engine performance were analyzed. The intake mass flow unevenness and pressure fluctuations were chosen as evaluating indicators to optimize the structural parameters of the engine's intake and exhaust system. By changing the length of intake manifold and duct, the unevenness is reduced to less than 5%, and the biggest decrease amplitude is 38%; the engine power and torque are improved by 5%.

Key words: aircraft piston engines; intake and exhaust system; intake mass flow; unevenness; pressure fluctuation; turbocharging

汽油机缸内的燃烧过程是预混燃烧,进入气缸的是可燃混合气.因此,各缸进气的不均匀即意味着各缸燃烧的不均匀,对多缸汽油机的动力性能和可靠性有着至关重要的影响^[1].航空活塞发动机进排气系统由于结构和质量的限制,其各缸进排气管路很难保证一致,导致发动机均匀性受

到很大影响,因而针对发动机进排气系统均匀性影响因素的研究是十分必要的.

本文针对某型航空活塞发动机进行研究,该发动机为四缸水平对置,采用单级涡轮增压,双膜片式化油器.为维持进气压力稳定,在压气机后加装稳压箱,在发动机两个化油器之间加装压力平

衡管,通过建立发动机工作过程仿真模型,对进排气管内气体的流动特性进行了一维非定常仿真研究,分析了进排气系统的均匀性和气体波动效应,对发动机进排气系统进行了优化,为二级增压管路系统的设计提供依据。

1 仿真模型的建立及验证

1.1 模型假设

在建立发动机仿真模型时,为了简化计算,对发动机工作过程进行如下假定:气缸内过程采用零维模型;管道内的流动采用一维非定常流动模型;燃烧模型采用以缸压实验数据拟合的韦伯函数;传热模型采用半经验公式 Woschni 模型;配气相位和气门正时通过气道稳压实验获得,具体数学模型见参考文献[2]。发动机的具体参数如表 1 所示。

表 1 发动机参数
Table 1 Engine parameters

项目	数值或说明
工作形式	四缸四冲程航空 活塞发动机
气缸布置	四缸水平对置
缸径/mm	79.5
冲程/mm	61
压缩比	9:1
点火顺序	1-4-2-3
最大扭矩/(N·m)	142
额定功率/kW	73.5
额定转速/(r/min)	5500
增压方式	废气涡轮增压

1.2 发动机工作过程仿真模型

发动机模型管路的连接是完全按照原机结构建立的,其中控制系统采用了 PID(比例-积分-微分)控制方式,由废气阀的开度控制稳压箱的压力。发动机仿真模型如图 1 所示。

图 2 和图 3 为在节气门开度为 100% 工况下,发动机功率、气缸压力的计算结果与原机手册数据和实验数据的对比^[3]。由图可知发动机功率和扭矩的仿真值与手册数据是准确一致的,最大误差不超过 3%,说明所建立的仿真模型与真实模型有较高的近似度。

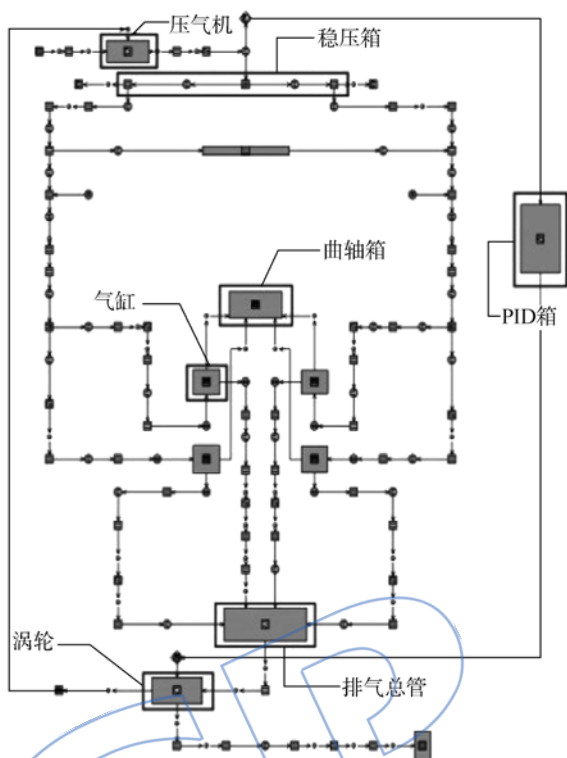


图 1 发动机仿真模型

Fig. 1 Engine simulation model

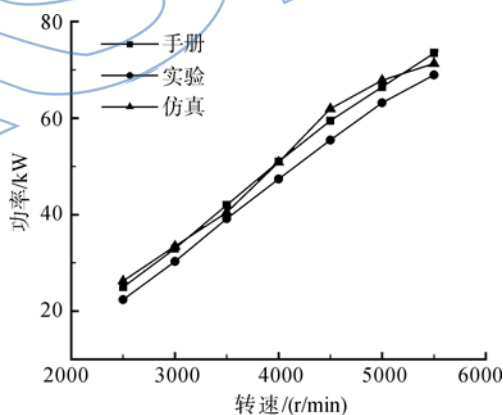


图 2 发动机功率

Fig. 2 Engine power

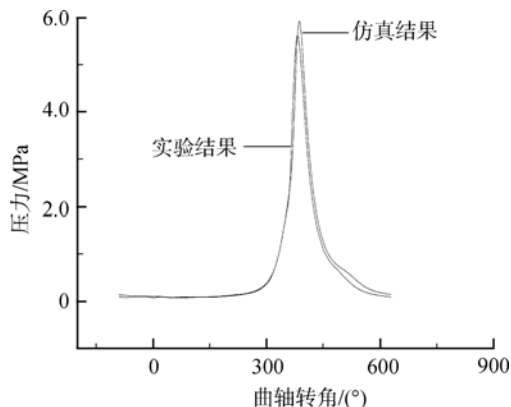


图 3 气缸压力

Fig. 3 Cylinder pressure

2 进气系统分析及优化

2.1 进气系统流通特性实验数据及分析

本文对发动机进气歧管进行流通特性实验,记录不同进气质量流量下各缸进气歧管进口和出口的气体压力,从而求得歧管的总压差随进气质量流量的变化趋势,如图4所示。

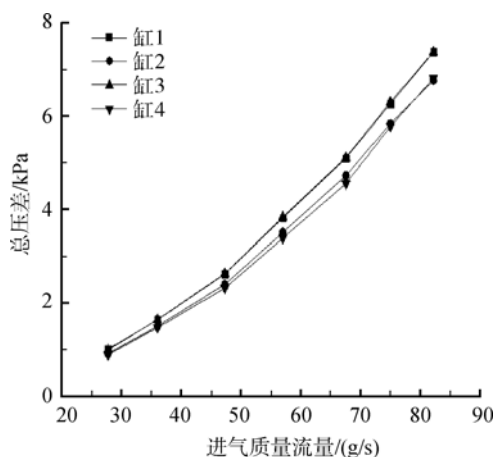


图4 进气系统总压差

Fig. 4 Intake system total pressure difference

通过对发动机进气歧管进行流通特性实验数据的分析,可以看出发动机进气系统在节气门开度为100%状态下进气确实存在不均匀性。缸1进气歧管和缸3进气歧管流动损失基本相同,缸2进气歧管和缸4进气歧管流动损失基本相同,且缸1、缸3进气歧管流动损失大于缸2、缸4进气歧管流动损失。这主要是由于水平对置发动机的缸1和缸3进气管路一致,缸2和缸4进气管路一致,且两组管路差异很大。

2.2 进气均匀性评价参数

对于多缸活塞发动机各缸进气均匀性,主要采用进气质量流量不均匀度 $\Delta \dot{m}$ 来评价,计算方法如式(1)、式(2)所示

$$\dot{m}_{\text{mean}} = \frac{\sum_{i=1}^N \dot{m}_i}{N} \quad (1)$$

$$\Delta \dot{m} = \frac{\dot{m}_{\text{max}} - \dot{m}_{\text{min}}}{\dot{m}_{\text{mean}}} \quad (2)$$

式中 N 为气缸数; $\dot{m}_i$ 为第 i 缸的进气质量流量; $\dot{m}_{\text{mean}}$ 为 N 个气缸的平均进气质量流量; $\dot{m}_{\text{max}}$ 为各缸中最大的进气质量流量; $\dot{m}_{\text{min}}$ 为各缸中最小的进气质量流量^[4-5]。

2.3 发动机各工况进气均匀性

因为发动机的常用转速范围为中高速行驶,所

以针对发动机转速为3000~5500 r/min 进行研究。不同节气门开度时各缸进气质量流量不均匀度如表2所示。

表2 进气质量流量不均匀度(单位:%)

Table 2 Air mass flow unevenness(unit:%)

转速/ (r/min)	节气门开度/%			
	100	80	60	40
5500	2.03	2.57	3.17	4.23
5000	4.75	3.9	3.18	3.02
4500	5.85	5.74	5.73	5.68
4000	6.41	4.55	3.51	2.84
3500	2.77	0.43	3.34	3.12
3000	4.71	4.82	4.26	4.69

由表2可知,在常用转速范围内发动机的进气不均匀度比较大,当转速为4000 r/min,节气门开度为100%时,不均匀度最大,为6.41%。当转速为3500 r/min时,由于谐振增压效应,不均匀度大幅降低。

2.4 进气系统结构参数的优化

图5给出了进气质量流量不均匀度的模拟计算结果随进气歧管长度的变化趋势。由图5可知,在其他结构参数不变的情况下,改变进气歧管长度对发动机中转速区的影响很大。这主要是由于进气歧管加长,高速谐振点向低速移动,改善了发动机中转速及部分高转速的动力性能,但同时也会牺牲部分高转速的性能。结合发动机结构布置,选取缸3进气歧管长度范围为50~55 mm^[6]。

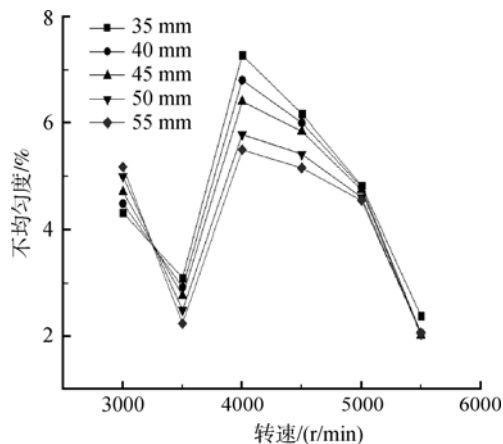


图5 进气歧管长度的影响

Fig. 5 Effect of intake manifold length

由图6可知,当其他结构参数不变时,改变进气总管的长度对发动机高转速区的影响不大,而对中、低转速区的影响比较明显,其中缩短进气总管的长度,有助于改善发动机低转速区的性能,这主要是由于随着进气总管长度的缩短,低速谐振点有向高转速移动的趋势.结合发动机的布置要求最终将进气总管长度定为250~275 mm^[7].

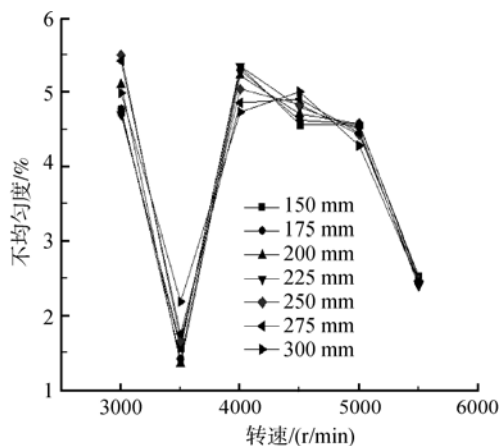


图6 进气总管长度的影响

Fig. 6 Effect of intake duct length

本次优化对象为发动机进气总管和进气歧管的长度,通过改变进气总管和进气歧管的长度,对发动机动力性能计算值进行对比分析,最终确定进气总管长度为270 mm,缸3和缸4进气歧管长度为55 mm.优化前后的进气不均匀度和功率如图7、图8所示.

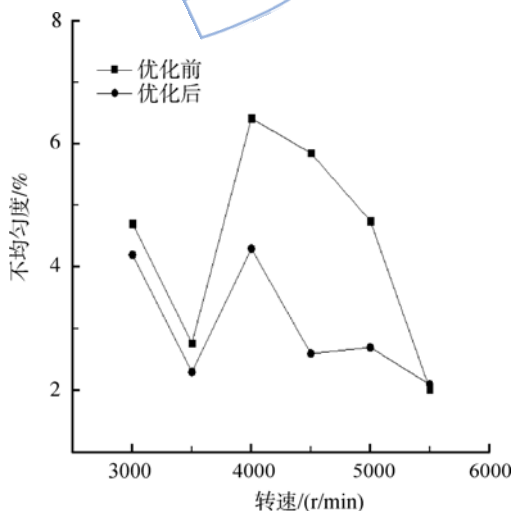


图7 进气不均匀度

Fig. 7 Intake unevenness

优化后发动机虽然在5500 r/min时功率略有降低(最大降低幅度仅为0.83%),但发动机其

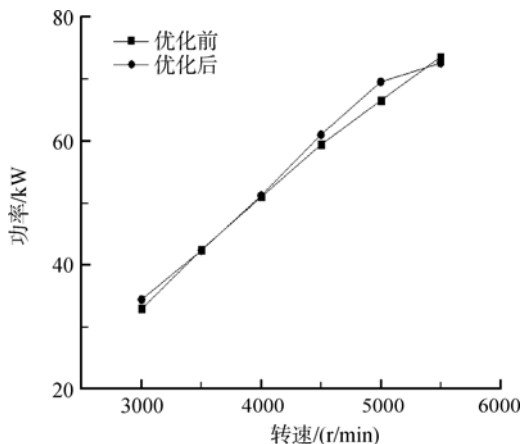


图8 进气系统优化前后发动机功率

Fig. 8 Engine power before and after optimization of intake system

他转速的动力性能和进气不均匀度均得到改善,其中4500 r/min时不均匀度提升幅度最大为38%,满足了预期要求.

3 排气系统分析及优化

本款发动机由于空间结构的限制,各缸排气歧管长度不一致,各缸排气歧管汇总之后形成谐振腔.因此,从各个气缸排出的压缩波脉冲将会在汇合处发生干涉.发动机在转速为5500 r/min,节气门开度为100%时的排气压力波动如图9所示.从图可见,在发动机的1个工作周期内,压力波动出现了4个较大的波峰和波谷.

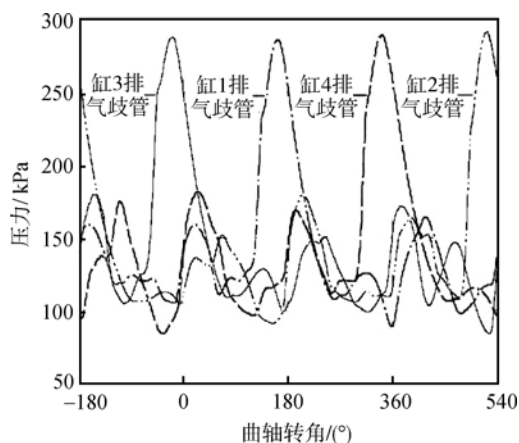


图9 排气压力波动

Fig. 9 Exhaust pressure fluctuations

3.1 排气歧管长度对发动机性能的影响

合理的排气歧管设计必须对管长合理匹配,才能尽量减小相邻工作缸排气压力波动对排气的影 响.确定排气歧管长度 L 的计算公式为

$$\frac{12Ln}{a_p} = \varphi_1 \quad (3)$$

其中

$$a_p = \sqrt{\kappa RT_p}$$

式中 a_p 为排气管中当地声速; κ 为等熵指数, $\kappa = 1.4$; R 为气体常数, $R = 287.1 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; n 为发动机转速; T_p 为排气管中气体的绝对温度; φ_1 表示排气门开启产生扰动到发射波返回气缸为止所经历的曲轴转角^[8-10].

由于结构布置要求, 发动机缸 1 至缸 4 的排气歧管长度分别为 290, 480, 350 mm 和 558 mm, 分别选取排气歧管长度在原长度的基础上 -60, -30, +30, +60 mm 进行计算. 缸 1 倒流随排气歧管长度的变化趋势如图 10 所示(图中 EVC 为排气门关闭时间).

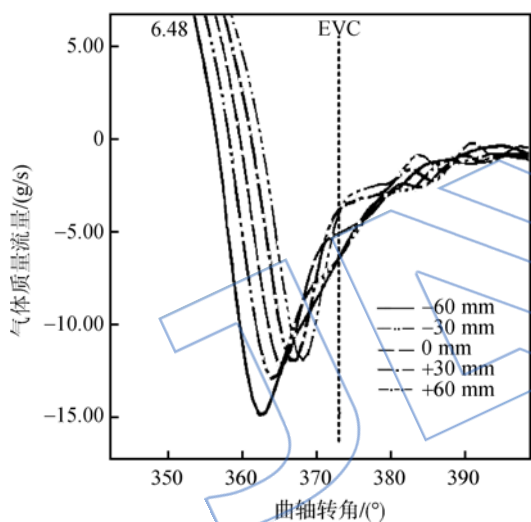


图 10 排气歧管长度对排气倒流的影响(缸 1)

Fig. 10 Effect of intake manifold length on exhaust backflow(cylinder No. 1)

由图 10 可知, 随着排气歧管长度的增加, 压力波动在排气管中的传播距离增加, 排气压力波动的最小值有增大的趋势且波峰逐渐向排气门关闭的方向移动, 能明显减少倒流. 因此选择缸 1 排气歧管的长度为 350 mm. 其余三缸采用同样的分析方法, 优化后缸 2~缸 4 的排气歧管长度分别为 430, 385, 558 mm.

3.2 排气谐振腔体积对发动机性能的影响

排气谐振腔是各缸歧管汇总后至涡轮进口处的排气管, 对涡轮进口处气体速度和缸内倒流产生影响. 图 11、图 12 分别给出了排气倒流和涡轮进口处压力随谐振腔体积变化的情况. 随着体积

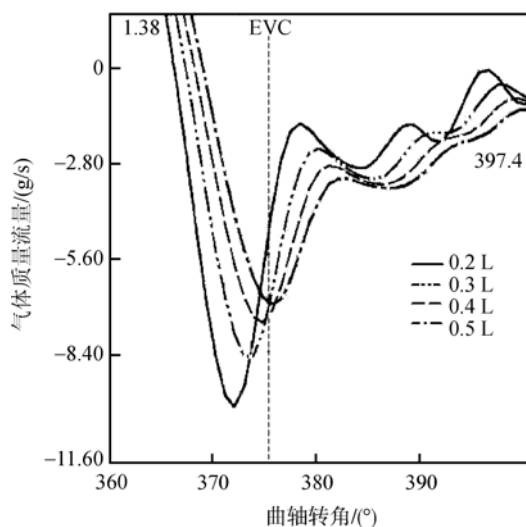


图 11 谐振腔体积对排气倒流的影响

Fig. 11 Effect of resonant cavity volume on exhaust backflow

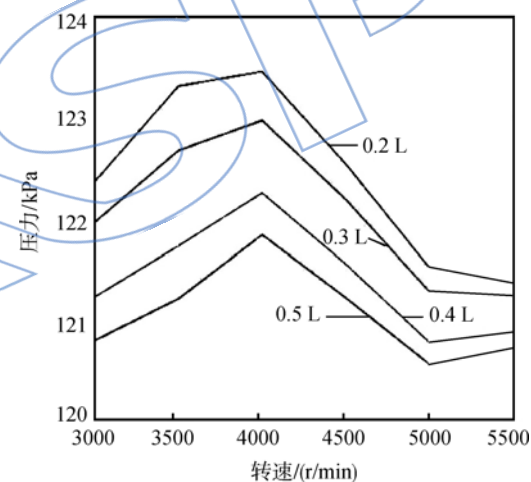


图 12 谐振腔体积对涡轮口进气压力的影响

Fig. 12 Effect of resonant cavity volume on turbine intake pressure

的增大, 谐振腔内的压力波动减小, 倒流质量流量减小, 波谷向排气门关闭的方向移动, 有利于进气充量的提高^[11-13].

随着谐振腔体积的增大, 流动损失减小, 涡轮进口处的气体的速度增加, 但是, 总管体积过大, 总管内压力波动减小, 会导致涡轮能量利用率下降^[14-15]. 为了减小排气倒流又能提高涡轮脉冲的能量利用率, 选取 0.4 L 作为排气谐振腔的体积.

3.3 排气系统参数的优化设计

缸 1~缸 4 排气歧管长度采用优化后的长度, 谐振腔的体积设定为 0.4 L, 优化前后发动机功率和扭矩对比如图 13 和图 14 所示.

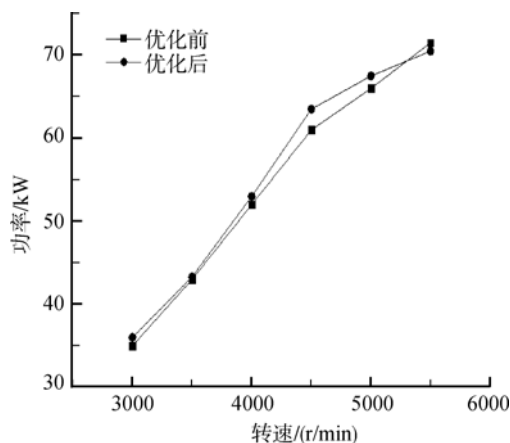


图 13 排气系统优化前后发动机功率

Fig. 13 Engine power before and after optimization of exhaust system

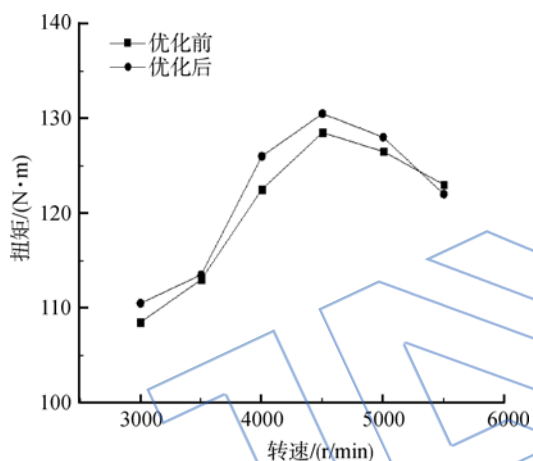


图 14 排气系统优化前后发动机扭矩

Fig. 14 Engine torque before and after optimization of exhaust system

优化后的模型除在 5 500 r/min 以外的所有转速范围内发动机的功率和扭矩均比优化前要高,其中,当转速为 4 000 r/min 时扭矩增加 5%,当转速为 5 500 r/min 时,扭矩和功率比优化前降低 2% 以内,优化后达到了预期效果。

4 结 论

1) 本文建立了发动机仿真计算模型,模拟计算结果和实测结果有较好的一致性。

2) 对发动机的进气系统进行了优化,在降低不均匀度的同时提高了发动机的功率和扭矩。

3) 分析了排气歧管长度和排气谐振腔体积对发动机性能和涡轮工作性能的影响,优化了排气系统,提高了发动机的动力性能。

4) 本文提出的优化方法为发动机二级增压进排气系统的设计和改进了提供了依据;由于条件

所限,优化后的发动机未能进行实验验证,还需在以后的工作中加以完善。

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 state and development of the unmanned aerial vehicle powerplants[J]. Aeroengine, 2007, 33(1): 10-15. (in Chinese)
- [2] 胡延领. 基于螺旋桨特性的增压系统匹配研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2010.
HU Yanling. Research of turbocharging system based on the propeller characteristics[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)
- [3] BRP-Rotax GmbH & D. C. . Maintenance manual for ROTAX engine type 914F[M]. Astria: BRP-Rotax GmbH, 2007.
- [4] 方适应,邓康耀,顾宏中. 进排气管一维非定常流动计算方法的比较[J]. 车用发动机,2000(3):22-25.
FANG Shiyang, DENG Kangyao, GU Hongzhong. Comparison of computation of one dimensional unsteady flow in intake and exhaust pipes[J]. Vehicle Engine, 2000(3): 22-25. (in Chinese)
- [5] 谢永乐,谢三山. 多缸发动机各缸工作不均匀性分析[J]. 四川大学学报,2000,4(2):1-3.
XIE Yongle, XIE Sanshan. Operating characteristic of uniformity for multi-cylinder engine[J]. Journal of Sichuan University, 2000, 4(2): 1-3. (in Chinese)
- [6] 徐斌,史艳彬. 发动机进气系统流动模拟与优化[J]. 内燃机工程,2005,4(1):81-84.
XU Bin, SHI Yanbin. Imitation and optimization of gas flow in intake system of engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2005, 4(1): 81-84. (in Chinese)
- [7] 蔡忆昔,申屠森,高宗英. 多缸汽油机充气效率和进气均匀性研究[J]. 江苏工学院学报,1992,10(1):30-34.
CAI Yixi, SHEN Tumiao, GAO Zongying. Study on volume efficiency and distribution evenness of intake charge in multi-cylinder gasoline engines[J]. Journal of Jiangsu Institute of Technology, 1992, 10(1): 30-34. (in Chinese)
- [8] 朱大鑫. 涡轮增压与涡轮增压器[M]. 北京:机械工业出版社,1992.
- [9] 徐斌,夏绍军. 航空活塞发动机两级增压匹配方法研究[J]. 航空动力学报,2012,27(3):496-500.
XU Bin, XIA Shaojun. Matching of two-stage supercharging aircraft piston engines[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(3): 496-500. (in Chinese)
- [10] 陈妍,王洪明. 一种带涡轮增压器的活塞发动机调节及其特性[J]. 北京航空航天大学学报,1998,24(1):16-20.
CHEN Yan, WANG Hongming. Control and performance of a turbo supercharged piston engine[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1998, 24(1): 16-20. (in Chinese)

- [11] Renberg U. 1D engine simulation of a turbocharged SI engine with CFD computation in components [D]. Stockholm, Sweden: Royal Institute of Technology, 2008.
- [12] 施新, 马朝臣, 王樵. 491QE 汽油机涡轮增压系统设计及模拟计算[J]. 车用发动机, 2004(5): 8-10.
SHI Xin, MA Chaochen, WANG Qiao. Design and simulation of turbocharging system for 491QE gasoline engine [J]. Vehicle Engine, 2004(5): 8-10. (in Chinese)
- [13] HE Yituan, MA Chaochen, WEI Mingshan. Compressor performance of two-stage turbo-charging system[J]. Frontiers of Mechanical Engineering in China, 2008, 3(2): 218-221.
- [14] Reuter S, Koch A, Kaufmann A. Extension of performance maps of radial turbocharger turbines using pulsating hot gas flow[C]// Proceedings of the 9th International Conference on Turbochargers and Turbocharging. London: Institute of Mechanical Engineers, 2010: 263-280.
- [15] ZHANG Hong, MA Chaochen. Development of turbo-charger for improving diesel engine matching performance [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2002, 11(2): 146-149.