

某航空活塞发动机进气系统优化设计

崔华盛¹, 赵振峰¹, 王恩华¹, 杨琼瑶², 刘宇航³

(1. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081;

2. 山西柴油机工业有限责任公司, 山西 大同 037000

3. 重庆宗申动力机械股份有限公司 重庆宗申航空发动机制造有限公司, 重庆 400054)

摘 要: 针对某型航空活塞发动机在节气门100%开度、5000 r/min工况下各缸排温差异较大的现象,分别建立一维性能仿真模型和三维CFD模型,通过联合仿真分析进气系统内部流动特点,并找出导致排温差异的原因。提出了一种进气系统,计算结果表明:采用改进后的进气系统,在5000 r/min、节气门100%开度下发动机整机进气不均匀性由原来的20%降低6%;当转速高于5000 r/min时,相比于原机,采用该进气系统后各缸进气量均有所增加,在发动机转速5500 r/min,外特性工况下平均循环进气量增加19%,单缸循环进气量最大增加34.1%,最小增加12.9%。

关 键 词: 航空活塞发动机; 进气不均匀性; 进气系统构造; 联合仿真; 进气系统优化

中图分类号: V234; TK411.2

文献标志码: A

Intake system optimization study and design for an aircraft piston engine

CUI Huasheng¹, ZHAO Zhenfeng¹, WANG Enhua¹,

YANG Qiongyao², LIU Yuhang³

(1. School of Mechanical Engineering,

Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Shanxi Diesel Engine Industry Company, Datong Shanxi 037000, China;

3. Chongqing Zongshen Aero Engine Manufacturing Company Limited,
Chongqing Zongshen Power Machinery Company Limited, Chongqing 400054, China)

Abstract: A one-dimensional thermal dynamic model and three dimensional CFD model about the intake pipe for a specific aero-piston engine were established respectively for analyzing intake uniformity. These models verified the phenomenon about intake uniformity when the engine worked under external characteristic condition and figured out the causality of this phenomenon. An intake system was designed. The intake uniformity phenomenon could be improved by taking this intake system. The calculation results showed that: by adopting the new intake system, the engine's intake air non-uniformity decreased from 20% to 6% when the engine was at 5000 r/min. By using this intake system, the average air intake quality increased by 19% when the engine was at 5500 r/min, the maximum air intake quality increased by 34.1% and the minimum by 12.9%.

Key words: aircraft piston engine; intake uniformity; intake system structure; collaborative simulation; intake system optimization

收稿日期: 2019-02-17

作者简介: 崔华盛(1992—),男,博士生,主要研究方向为动力机械及工程。

引用格式: 崔华盛,赵振峰,王恩华,等. 某航空活塞发动机进气系统优化设计[J]. 航空动力学报,2019,34(9):2063-2070. CUI Huasheng, ZHAO Zhenfeng, WANG Enhua, et al. Intake system optimization study and design for an aircraft piston engine [J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(9): 2063-2070.

进气系统作为发动机的重要组成部分,其主要作用是将燃料和空气的混合物送入气缸中。如何能将工质均匀的送入各气缸是检验发动机进气系统设计是否良好的重要条件。性能优良的进气系统要尽可能减少流道内的漩涡,减少流动损失的同时,增大各缸进气量,同时,保证各缸的新鲜空气尽可能均匀分配,保证整机的动力性、可靠性和排放性能^[1-2]。

由于进气系统对发动机性能非常重要,所以很多学者对进气系统的结构形式及对其影响因素进行了广泛而深入的研究,使用的研究方法和研究手段也是多种多样。蔡忆昔等^[3-4]建立了 G427 发动机的简化进气模型,并根据该模型编写计算程序,通过比较计算值与试验结果发现,简化进气模型和试验实测值有较好的吻合度,通过对整机进气均匀性的计算发现,G427 发动机各缸进气均匀,进气不均匀性小于 1%,满足工程实际需要。北京理工大学的杜巍等^[5-7]通过对某型柴油机的进气不均匀性进行分析,发现:发火顺序,排气管结构都会影响各缸的进气量,导致各缸进气的差异。江苏大学的王晗等^[8]利用 FLUENT 对 4102 的柴油机的进气系统和一种改进后的进气系统进行了比较,仿真结果发现:原机的进气不均匀性为 31.28%,进气均匀性较差;把进气管放置在进气腔中部后可以大幅改善整机的进气均匀性。武汉理工大学的江国华等^[9]利用 AVL-Fire 软件对 EQD180N-20 发动机的进气系统进行了分析,并研究了气道内压力波动对各缸进气的影响,发现:进气波动对整机的进气不均匀性影响较大。北京航空航天大学徐斌等^[10]利用完成标定的模型对某型航空活塞发动机的进气均匀性进行了分析,利用定质量流量观察出口压差的方式判断整机的进气均匀性,结果发现:原机在 4 500 r/min 时各缸进气不均匀程度较大,主要是由于歧管长度设计不合理导致。通过优化歧管的长度可以改善整机的进气均匀性,但是在 5 500 r/min 外特性工况时,发动机的进气均匀性依然存在一定的问题。中国北方发动机研究所的殷玉恩等^[11]成功的完成了 Start-CD 和 GT-Power 对某型天然气发动机的耦合仿真,仿真结果发现:第一个循环由于初始条件的影响,导致结算结果出现误差,但是迭代完成一次后,流量曲线平稳。随着稳压腔容积的增加,各缸的进气不均匀性先减小,后增加;而且随着稳压腔容积的增加,各缸的进气量逐渐减小。

上述文献提供了多种方法可用于研究整机的

进气不均匀性。本文从实际试验出发,利用 AVL-Fire 和 GT-Power 软件进行联合仿真,通过对台架试验数据的复现,分析原机的排温差异较大的原因,并针对性的提出改进方案。

1 研究对象和研究方法

发动机台架试验过程中直接测量多缸机的各气缸的进气量非常困难,本文通过测量各缸外特性工况下功率和排温,采用 GT-Power 仿真软件计算发动机的功率和排温,完成仿真与试验的标定,研究各缸的进气量。在此基础上,通过 AVL-Fire 建立进气系统的 CFD 模型,结合发动机整机运转特性,分析气道内部气流的流动,找出原机出现进气不均匀现象的根本原因,为进气系统的优化提供依据。本文所用研究对象为 1 台对置四冲程航空活塞发动机,相关参数见表 1。

表 1 发动机基本参数
Table 1 Engine configuration

参数	数值及说明
气缸数	4
缸径×冲程/(mm×mm)	79.5×61
排量/L	1.2
压缩比	9:1
发火次序	1-4-2-3
燃油系统	气道单点喷射

试验过程中使用 4 个 K 型热电偶测量各缸的排气温度,热电偶安装在各缸的排气歧管上,使用 CW160 电涡流测功机测量发动机的整机功率。发动机台架示意图如图 1 所示。

台架试验中用到的试验仪器型号及测试精度如表 2 所示,表中 CA 为曲轴转角。

1.1 性能模型验证

利用 GT-Power 软件搭建发动机的一维模型:采用单韦伯放热模型模拟缸内燃烧过程;采用 Woschni 经验公式模拟工作过程中的壁面传热^[12]。一维性能模型如图 2 所示。

本文选取发动机外特性工况试验数据对模型进行标定,为了保证发动机的一维模型与实际情况吻合较好,同时对发动机的各缸排温和发动机的整机功率进行标定。发动机排温的仿真与试验结果如图 3 所示。当发动机转速为 5 500 r/min 时四缸排温的试验值与仿真值误差值约为 6.4%。

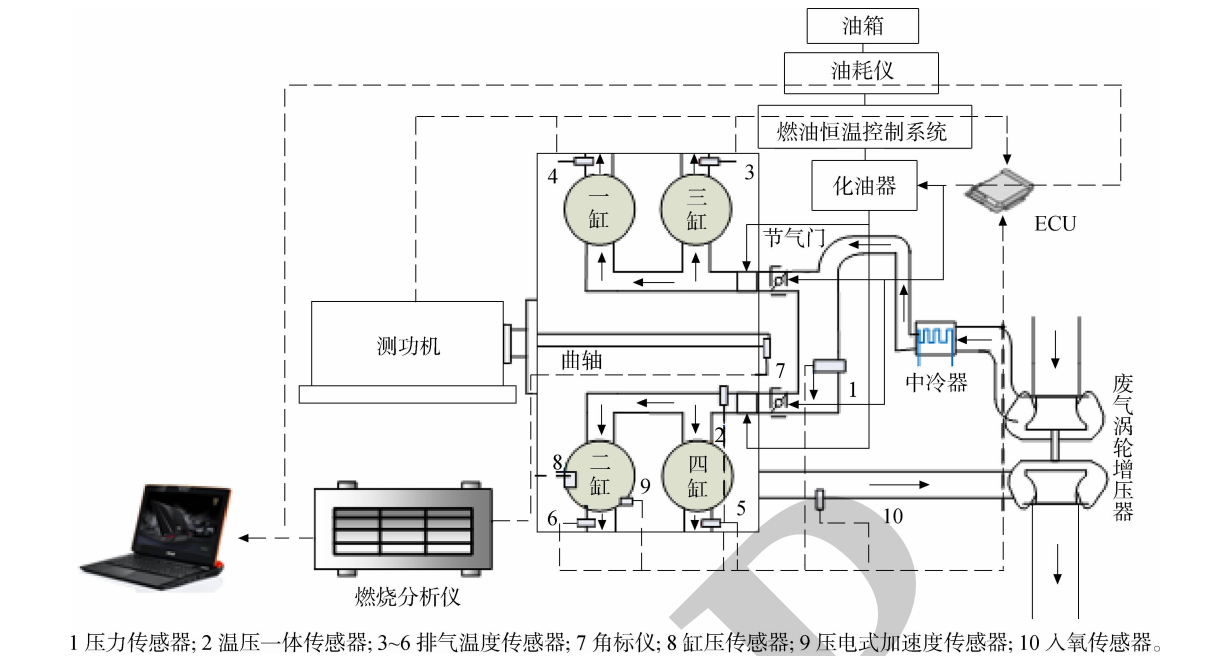


图 1 试验系统
Fig.1 Schematic of the experimental system

表 2 试验仪器		
Table 2 Experimental device		
测试设备	型号	精度
电涡流测功机	CW160	$\pm 0.5\%$
燃烧分析仪	Kibox2893	$<1\%$
缸压传感器	Kistler6115	$\pm 0.5\%$
瞬态油耗仪	MF-2200	$<1\%$
角标仪	Kistler 2614A	$\pm 0.1^{\circ}(\text{CA})$

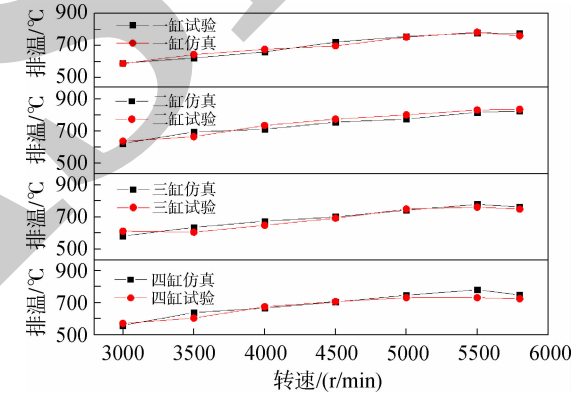


图 3 各缸排温试验与仿真数据对比
Fig.3 Exhaust temperature for each cylinder comparison between experiment and simulation

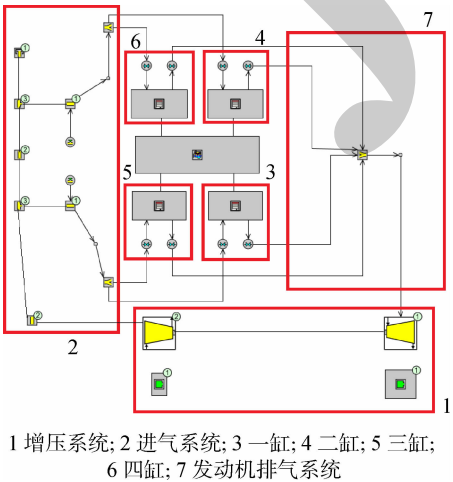


图 2 发动机一维仿真模型
Fig.2 One-dimensional engine simulation model

相同工况下发动机功率标定结果如图 4 所示,当发动机节气门全开、转速达到 3 000 r/min

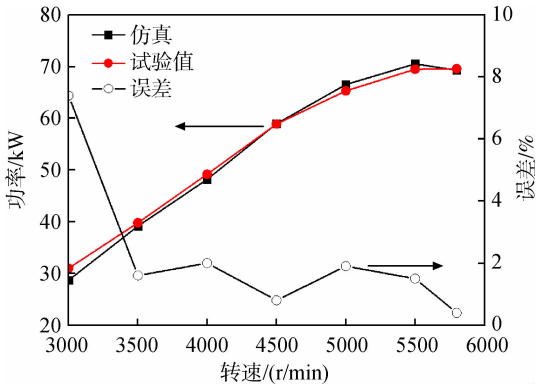


图 4 不同工况的功率对比
Fig.4 Comparison of power for different operating conditions

时试验数据与仿真数据误差最大,为 7.4%。当发动机转速达到 5000 r/min 时,试验数据与仿真数据的误差约为 2%;转速达到 5500 r/min 时,误差约为 1.5%。

1.2 三维模型的建立和网格划分

利用三维绘图软件完成进气系统的绘制后,将模型转换成 stl 格式导入到 AVL-Fire 中。由于 AVL-Fire 无法在计算过程中更改静网格的边界条件,而实际工作过程中各缸存在进气重叠,如图 5 所示,所以使用 fame engine plus 划分网格,使用多个相同的 stl 模型,每个模型对应不同的进气持续期,设置不同的边界条件名称,这样就可以在不同的曲轴转角区间内设置不同的边界条件。

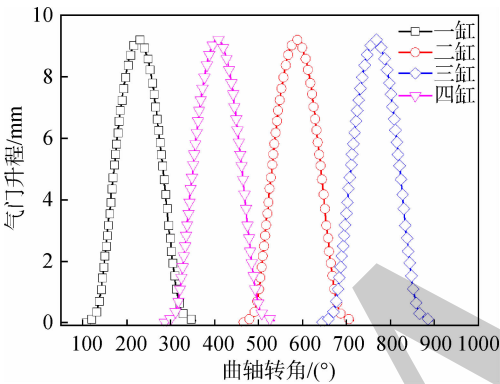


图 5 各缸进气门升程曲线

Fig. 5 Valve-lift curve of each cylinder

流体动力学计算是基于网格和算法的,因此结果的准确性与使用的软件和网格的数量均有关系^[13]。AVL-Fire 软件及其算法的可靠性已经在实际应用中得到了验证^[14],所以计算结果仅仅与网格有关。为了保证 CFD 的计算结果的网格无关性,在此分别使用网格大小 $n=5\text{ mm}$ 网格和 $n=3\text{ mm}$ 网格对计算结果进行了验证。由图 6 可知,两种网格对应的计算结果差异较小,在此选用 5 mm 网格划分 CFD 模型对于局部一些地方,如进气系统的入口和出口、进气总管和歧管的过渡,为了保证计算精度选用 2 mm 网格,完成网格划分的 CFD 模型如图 7 所示。

利用完成标定的 GT-Power 模型提供 CFD 所需边界条件。入口处可供选择的边界条件有:质量流量、进气总压、静压等,本文选用进气总压作为边界条件,这是因为:本文仿真对象主要是针对气体流动,采用质量流量时,在计算过程中可能会由于流道内部的压力不守恒导致计算发散;如果选择入口静压,无法考虑入口气流速度,从而导

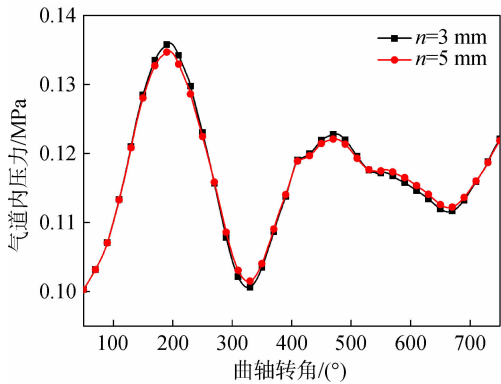


图 6 网格无关性检验

Fig. 6 Grid independence test of calculation model

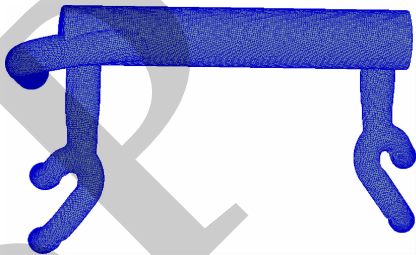


图 7 发动机进气系统 CFD 计算模型

Fig. 7 CFD model for engine's air intake system

致计算与实际过程的误差较大。出口处设置为静压,由于发动机的气门和活塞随着曲轴转角不断运动,所以静压非恒定值。

由于进气系统内部的气流运动为湍流运动,为了兼顾计算时长和计算精度,本文选用 $k-\epsilon$ 湍流模型,计算公式如下:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k \mu_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon \mu_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\epsilon_k} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \tag{2}$$

式(1)、式(2)中各变量含义见参考文献[15]。

AVL-Fire 提供了 Simple、Simplec、Simple/Piso、Simple/H 四种算法,由于本文研究对象为瞬态可压缩流,计算过程中容易发散,所以选用 Simple/Piso 算法^[16]。

2 数据处理方法

采用进气质量流量不均匀性对发动机各缸进气不均匀性进行量化,计算公式^[17]如下:

$$E = \frac{(\dot{m}_{\max} - \dot{m}_{\min})}{\dot{m}_{\text{mean}}} \tag{3}$$

式中 $\dot{m}_{\max}$ 为支管最大出口质量流量; $\dot{m}_{\min}$ 为支管最小出口质量流量; $\dot{m}_{\text{mean}}$ 为平均质量流量。

由于该型航空活塞发动机的气缸布置方式为水平对置,本文计算整机进气不均匀性的同时还比较了发动机单侧的进气不均匀性。

3 计算结果与分析

3.1 一维计算结果分析

图 8 为一维模型在外特性工况下进气门关闭时刻各缸封存的新鲜空气。当发动机转速低于 3500 r/min 时,各缸的进气量最大相差 5.4 mg,各缸进气比较均匀,此时各缸排温差异并不明显;随着转速的增加,各缸的进气差异开始逐渐显现,当发动机转速达到 5000 r/min 时,各缸空气质量出现明显差异,最大相差 45.2 mg,此时最高排温与最低排温差 71 K;当转速达到 5800 r/min 时,各缸进气量最大相差 75.5 mg,最高排温与最低排温差 117 K。试验过程中,各缸的喷油正时和点火正时均保持一致,由此猜测,发动机台架试验过程中排温差异较大是由于各缸进气不均匀导致。

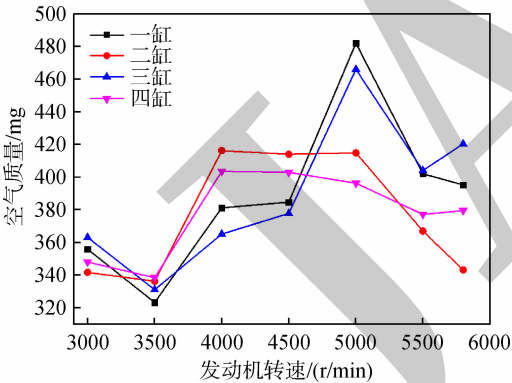


图 8 气门关闭时刻缸内空气质量
Fig. 8 Air mass trapped in-cylinder after intake valve closing

由图 8 可得气缸进气门处气流平均速度,利用式(1)处理获得该型发动机的进气不均匀性。由图 9 可知,发动机在转速达到 5000 r/min 时,整机的进气不均匀性最大,为 20%;发动机同侧气缸进气量相差不大;当发动机转速达到 5800 r/min 时,同侧气缸的缸内充量也有较大差异,第二、四缸进气量差异最大,差异达到 10%。虽然发动机在 5800 r/min,节气门 100%开度时各缸进气均匀性最差,但是由于航空发动机的使用特性,本文主要针对 5000 r/min、节气门 100%工况进行分析。

通过以上分析可知,当发动机各缸的点火与

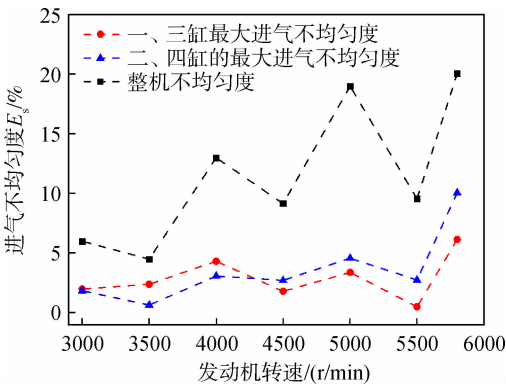


图 9 发动机进气不均匀性
Fig. 9 Unevenness of charging of engine

喷油正时一致时,发动机排气温度可以作为各缸进气是否均匀的判断指标,这一点在实际试验过程中应用非常方便。

3.2 三维计算结果分析

通过一维仿真结果可以确定:造成排温差异较大的原因是各缸进气不均导致,而各缸进气不均又与诸多因素有关。在此通过利用 CFD 研究进气流场,为后续进气系统优化做准备。

3.2.1 进气歧管的结构形式

由图 8、图 9 可知,发动机在节气门全开、5000 r/min 工况下稳定运行时,同侧气缸缸内质量会有大约 5% 的差异:一缸缸内气量比三缸多,二缸进气量比四缸多。出现上述现象可能是由进气歧管的结构形式和发火次序相互耦合作用导致。由图 5 可知,一缸和三缸的发火次序相差 180° (CA),所以一缸气门开启时刻比三缸晚 180° (CA)导致一缸开启一段时间后进气歧管逐渐由正压变为负压,而三缸更多的是利用气流惯性进行充气,进气道与缸内压差较小,所以导致缸内空气倒流回进气歧管,并向一缸开始流动,如图 10 所示。同理,二、四缸进气时也会出现相同的情况,而且,随着发动机转速和负荷的增加,增压器增压度逐渐增加,稳压腔内压力提升,活塞运行速

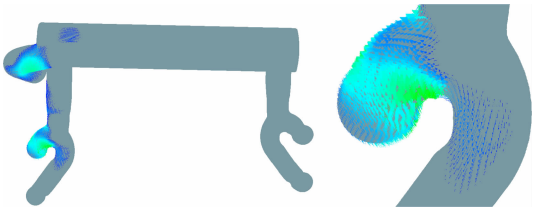


图 10 一、三缸进气时速度矢量图
Fig. 10 Velocity diagram as air is fed into first and third cylinders simultaneously

度加快,形成的真空度越大,造成倒流现象越严重,这样就可以说明原机在 5 800 r/min、节气门全开工况下同侧气缸最差。

3.2.2 沿程损失不同

发动机高速运转时,为增加缸内充量,一般需要降低进气管长度。由进气系统整体结构可知:二、四缸的进气长度要远远大于一、三缸进气长度,所以在发动机高速运转过程中,一、三缸的进气沿程阻力低于二、四缸,导致一、三缸的缸内气体质量多余二、四缸。

3.2.3 进气总管位置

前文已说明,同侧气缸同时进气可能发生缸内气体倒流现象,不同侧气缸进气时,也会出现相同的情况。当四缸进气时,一缸气流倒流,进入稳压腔,由于进气总管的气流速度和一缸对应的歧管的进气速度方向不同,会导致在此处形成涡旋,降低有效流通面积,造成节流,从而影响四缸的进气,如图 11 所示。由于二缸的进气正时与一缸相差较大(点火正时差 360°(CA)),所以上述提到的作用不会对二缸的进气产生影响。

一、三缸进气时,由于进气总管和歧管距离较近,气流从总管直接进入歧管,进气过程中无较大的涡旋产生,所以进气质量较好,如图 12 所示。



图 11 一、四缸进气重叠期气道内流线分布
Fig. 11 Streamline distribution as air is fed into first and forth cylinders simultaneously

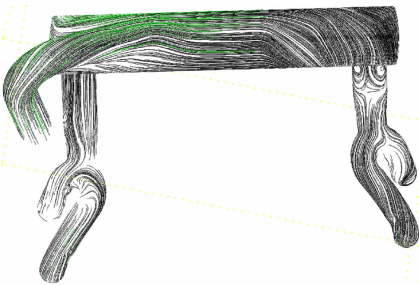


图 12 一、三缸进气重叠期气道内流线分布
Fig. 12 Streamline distribution as air is fed into first and third cylinders simultaneously

4 进气系统改进

通过以上分析得知,进气系统出现不均匀性主要有两点原因:①发火次序;②进气系统的结构。点火正时与整机的气缸布置形式、曲轴平衡等有关,无法轻易改变,所以只能通过更改进气系统改善进气不均匀性。为防止同排气缸发生抢气,将各缸的进气歧管与稳压腔直接相连,由于稳压腔容积较大,压力稳定,所以可以减缓抢气现象。通过参考目前市面上已有的水平对置活塞发动机的进气系统,提出改进的进气方案:直接在原机稳压腔的基础上对进气系统进行修改,稳压腔总容积不变,整体结构如图 13。

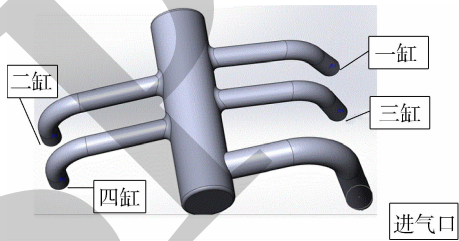
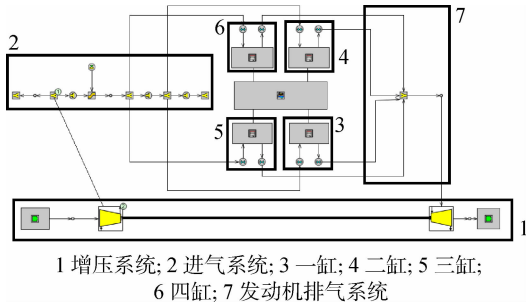


图 13 改进的进气系统
Fig. 13 Improved intake system

改变发动机性能模型,如图 14 所示,检验新的进气系统对发动机整机性能和进气不均匀性的影响。



1 增压系统; 2 进气系统; 3 一缸; 4 二缸; 5 三缸; 6 四缸; 7 发动机排气系统

图 14 修改后的一维模型
Fig. 14 Improved one dimensional engine simulation model

由图 15 可知,改进后的进气系统与原进气系统相比,转速达到 4 000 r/min 时,整机的进气不均匀性低于 5%,原机在 4 000 r/min 时,整机进气不均匀性略低于 15%,相比原机有较大的改进;随着发动机转速的增加,虽然改进后进气系统的进气不均匀性有所增加,但是整体依然低于原机,在转速 5 000 r/min 时,进气不均匀性约为 6%;改进后的进气系统在 5 800 r/min 时,进气不均匀性

效果最差,为 9%。这可能是由于:在改进的进气系统中,两缸同时进气时依然会在稳压腔内形成涡旋,从而阻碍进气,这种现象可以通过增加稳压腔容积得到进一步的改善。

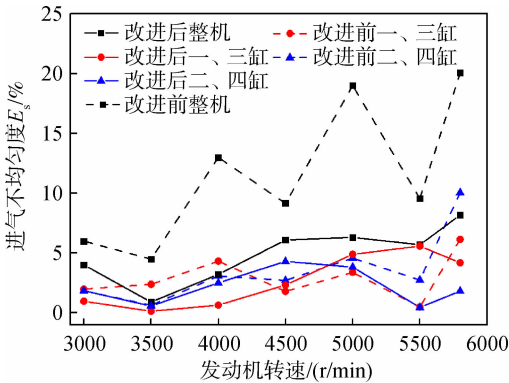


图 15 改进的进气系统和旧进气系统的进气不均匀性对比

Fig. 15 Comparison between improved and old air intake system

图 16 为两种进气系统缸内封存空气质量对比,改进后的进气系统可以在高速(转速大于 5000 r/min)时有效提升各缸冲量系数。与原进气系统相比,改进的进气系统在外特性工况 5000 r/min 时各缸的缸内充量质量差小于 20 mg,二、四两缸的进气质量增加了 14%;当发动机转速达到 5500 r/min 时,气缸平均进气量增加 19.7%,单缸进气量最大增加 34.1%,最小增加 12.9%,有效提升整机动力性能。出现这种情况主要是由于:与原机相比,改进的进气系统中的一、二两缸的进气歧管长度要明显低于原机的长度,在高速时,可以有效降低进气阻力,从而增加进气量;三、四缸进气量相比原机也有所增加,虽然进气总管长度与原机相差不大,但是由于改进的进气系统

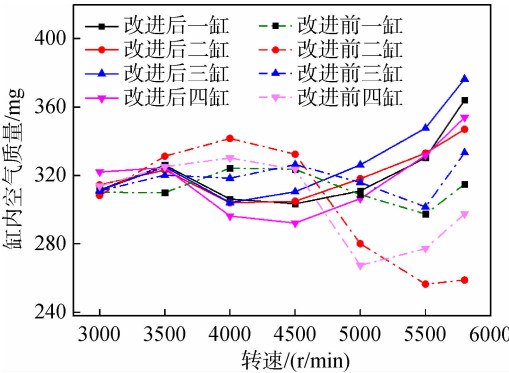


图 16 缸内空气质量对比

Fig. 16 Comparison of air mass trapped in-cylinder

抢气情况存在较弱,所以各缸进气量均增加。总体来说,改进的进气系统可以有效改善原机在最大可持续工况时的进气不均匀现象,同时有效提升发动机的动力性。

5 结 论

本文使用一、三维联合仿真方法对某水平对置航空活塞发动机的进气系统节气门全开、5000 r/min 工况下发动机排温相差较大现象进行了研究,得出了以下结论:

- 1) 在实际台架试验过程中,如果发动机各缸的点火和喷油正时均相同,可以使用各缸的排气温度作为辅助判断各缸进气是否均匀的参考。
- 2) 利用 CFD 研究结果发现,原机在转速较高时存在的进气不均主要是由进气系统的结构形式导致,原机在 5000 r/min 时进气不均匀性达到 20%,远高于工程经验值 5%,这说明原机存在较为严重的进气不均现象。
- 3) 设计改进的进气系统,与原机结果进行对比发现:新的进气系统可改善各缸的进气不均匀性,原机在 5000 r/min、节气门全开状态下的进气不均匀性由原来的接近 20%降低到 8%左右,二、四两缸的进气质量增加了 14%左右;发动机在 5500 r/min,节气门全开时各缸平均进气量增加了 19.7%,单缸进气量最大增加 34.1%,最小增加 12.9%。

参考文献:

[1] TUNESTAL P, HEDRICK J K. Cylinder air/fuel ratio estimation using net heat release data[J]. Control Engineering Practice, 2003, 11(3): 311-318.

[2] SUZUKI K, SHEN T, KAKO J, et al. Individual A/F estimation and control with the fuel-gas ratio for multi-cylinder IC engines[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(9): 4757-4768.

[3] 蔡忆昔, 申屠森. 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, 1993, 14(2): 19-25.

CAI Yixi, SHEN Tumiao. Study on volume efficiency and distribution evenness of intake charge in multi-cylinder gasoline engines[J]. Journal of Jiangsu Institute of Technology, 1993, 14(2): 19-25. (in Chinese)

[4] 蔡忆昔. 车用发动机进气过程和进气均匀性的数值计算[J]. 江苏大学学报, 1996, 17(2): 15-19.

CAI Yixi. Numerical calculation of intake process and uniform distribution in vehicle engines[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology, 1996, 17(2): 15-19. (in Chinese)

[5] 杜巍, 孙伟华, 刘福水. 增压多缸柴油机各缸进气不均匀性

- 的研究[J]. 内燃机工程, 2010, 31(2): 27-30.
- DU Wei, SUN Weihua, LIU Fushui. Study on intake air nonuniformity of turbocharged multi-cylinder diesel engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2001, 31(2): 27-30. (in Chinese)
- [6] 杜巍, 刘福水, 乔蕊蕊. 发火顺序对增压柴油机进气不均匀性影响的研究[J]. 内燃机工程, 2011, 32(4): 87-92.
- DU Wei, LIU Fushui, QIAO Weirui. Influence of firing order on intake air nonuniformity for turbocharged diesel engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2011, 32(4): 87-92. (in Chinese)
- [7] 杜巍, 单文诣, 刘福水. 排气管结构对多缸增压柴油机进气不均匀性的影响[J]. 北京理工大学学报, 2012, 32(6): 580-584.
- DU Wei, SHAN Wenyi, LIU Fushui. Influence of exhaust pipe structure on intake non-uniformity of turbocharged multi-cylinder diesel engine [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2012, 32(6): 580-584. (in Chinese)
- [8] 王晗, 蔡忆昔, 毛笑平. 发动机进气系统不均匀性的三维数值模拟[J]. 小型内燃机与车辆技术, 2007, 36(3): 41-44.
- WANG Han, CAI Yixi, MAO Xiaoping. 3D numerical simulation of intake unevenness for engines [J]. Small Internal Combustion Engine and Motorcycle, 2007, 36(3): 41-44. (in Chinese)
- [9] 江国华, 温苗苗. EQD180N-20 型发动机进气不均匀性分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2006, 30(6): 1008-1010.
- JIANG Guohua, WEN Miaomiao. Analysis of induction distribution non-evenness of EQD180N-20 engine [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering), 2006, 30(6): 1008-1010. (in Chinese)
- [10] 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 an aircraft piston engine intake and exhaust system [J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(3): 624-630. (in Chinese)
- [11] 殷玉恩, 刘胜, 田永海. 天然气发动机进气不均匀性仿真分析[J]. 内燃机, 2010(2): 14-15.
- YIN Yuen, LIU Sheng, TIAN Yonghai. Simulation analysis of air-intake unevenness in gas engine [J]. Internal Combustion Engines, 2010(2): 14-15. (in Chinese)
- [12] 陈红. 航空涡轮增压汽油机特性及其优化匹配研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- CHEN Hong. Study on characteristics of aviation turbo gasoline engine and optimization research [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.
- [13] OBERKAMPF W, TRUCANO T G. Validation methodology in computational fluid dynamics [R]. AIAA 2000-2549, 2000.
- [14] SARIC S, BASARA B. A hybrid wall heat transfer model for IC engine simulations [J]. International Journal of Engines, 2015, 8(2): 411-418.
- [15] 姜楠. 航空活塞发动机进气系统设计与分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- JIANG Nan. Design and analysis of a certain type of aircraft piston engine intake system [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2103. (in Chinese)
- [16] 王为术, 徐维晖, 翟肇江, 等. PISO 算法的实现及与 SIMPLE, SIMPLER, SIMPLEC 算法收敛性的比较[J]. 华北水利水电大学学报, 2007, 28(4): 33-36.
- WANG Weishu, XU Weihui, ZHAI Zhaojiang, et al. Realization of PISO algorithm and comparison convergence characteristics with SIMPLE series algorithms [J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2007, 28(4): 33-36. (in Chinese)
- [17] 罗马吉, 陈国华, 蒋炎坤, 等. 进气管内三维稳态流动特性的数值分析[J]. 小型内燃机与车辆技术, 2001, 30(2): 1-4.
- LUO Maji, CHEN Guohua, JIANG Yankun, et al. Numerical analysis of three-dimensional steady flow characteristics of intake manifold [J]. Small Internal Combustion Engine and Motorcycle, 2001, 30(2): 1-4. (in Chinese)

(编辑: 李岩梅、张 雪)