

航空活塞汽油机燃烧特性优化

王 蕾¹, 赵振峰¹, 俞春存¹, 曹 艳²

(1. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081;

2. 中国兵器工业集团有限公司 北方通用动力集团有限公司 工艺中心, 山西 大同 037000)

摘 要: 为优化某二冲程航空活塞汽油机的燃烧特性,研究了火花塞位置、火花塞数量以及火花塞布置方式等对其燃烧的影响。利用 Pro-E 和 AVL Fire 软件对该汽油机燃烧室建立了仿真模型,选取缸内压力数据验证了该模型的正确性,对火花塞不同的布置位置以及不同数量的火花塞等方案进行了仿真,对结果进行分析。结果表明:双火花塞布置方案比单火花塞布置方案更有利于组织快速燃烧,促进燃烧放热,缩短燃烧持续期;火花塞非对称布置方案比对称布置方案对火焰的形成及传播扩散更有利。

关 键 词: 航空活塞汽油机; 火花塞; 三维仿真; 燃烧特性; 性能优化

中图分类号: V234; TK411.2

文献标志码: A

Optimization of combustion characteristics of aviation piston gasoline engine

WANG Lei¹, ZHAO Zhenfeng¹, YU Chuncun¹, CAO Yan²

(1. School of Mechanical Engineering,

Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Craft Center, North General Dynamics Company Limited,

China North Industries Group Corporation Limited, Datong Shanxi 037000, China)

Abstract: In order to optimize the combustion characteristics of a two-stroke aviation piston gasoline engine, the influence of spark plug position, spark plug number and spark plug arrangement on combustion was studied. The simulation model of the gasoline engine combustion chamber was established by using Pro-E and AVL Fire software. The correctness of the model was verified by the in-cylinder pressure data. The different spark plug positions and different spark plug numbers were simulated and the results were analyzed. The results show that the double spark plug arrangement scheme is more beneficial to the rapid combustion of tissue than the single spark plug arrangement scheme, helping to promote combustion and heat release, shorten the duration of combustion; spark plug asymmetric arrangement scheme is more favorable than the symmetrical arrangement scheme for flame formation and diffusion.

Key words: aviation piston gasoline engine; spark plug; 3-D simulation; combustion characteristics; performance optimization

收稿日期: 2017-10-10
作者简介: 王蕾(1992—),女,硕士生,主要从事航空活塞发动机的研究。

引用格式: 王蕾,赵振峰,俞春存,等. 航空活塞汽油机燃烧特性优化[J]. 航空动力学报,2018,33(6):1345-1353. WANG Lei,ZHAO Zhenfeng,YU Chuncun,et al. Optimization of combustion characteristics of aviation piston gasoline engine[J]. Journal of Aerospace Power,2018,33(6):1345-1353.

航空活塞发动机,因其具有质量少、尺寸小、耗油率低、成本低、结构简单、使用维护方便等优点,在小型低速飞行器,如滑翔机、超轻型无人机、动力翼伞、直升机及无人机中广泛使用^[1]。

火花塞在航空活塞直喷汽油机缸内工作过程中起着至关重要的作用^[2],尤其是火花塞个数与位置对汽油机燃烧特性有重要影响^[3-4]。地面车辆发动机出现熄火等意外停车情况^[5],对整车几乎没有影响,但是因为航空发动机工作环境的限制,如果在工作过程中出现意外停车,可能会出现坠机等危险情况^[6],此时发动机需要迅速重新点火,以减少不必要的损失。通过合理地布置火花塞位置,可以减小火焰传播的有效距离,提高燃烧速率^[7]。如果采用双火花塞布置方案,对航空发动机来说^[8],无疑是双保险策略,可以提高无人机的安全性和可靠性^[9]。例如 Rotax914 航空发动机,采用具有 RFI(抑制射频干扰)噪声抑制功能的双火花塞无触点电容器放电点火。怠速时,两个火花塞同时点火,正常运行时两个火花塞点火时间相差 4°曲轴转角点火,这样做可以加速火焰传播速度,使点火系统更加稳定可靠^[10]。

本文通过对某航空活塞汽油机的火花塞位置、火花塞数量及火花塞布置方式等方面进行仿真研究,进而优化适合额定飞行工况下的点火方案,这对航空活塞汽油机的动力性及安全性具有十分重要的意义。

1 模型建立及验证

1.1 试验台架

本文的研究对象为一台二冲程缸内直喷航空活塞汽油机。其结构参数如表 1 所示。

表 1 航空活塞汽油机结构参数

Table 1 Structural parameters of aviation piston gasoline engine

参数	数值
缸径/mm	82
冲程/mm	75.7
气缸数	2
排量/L	0.8

图 1 为航空活塞汽油机试验台示意图及实物图,该测试平台包括航空活塞式汽油机、电涡流测功机以及控制系统、空气流量计、燃油耗测试系统、燃烧数据采集系统与汽油机控制系统等。试

验台相关参数如表 2 所示,试验用测功机为南峰 FST3 型电涡流测功机,可测试转速范围为 0~10 000 r/min。

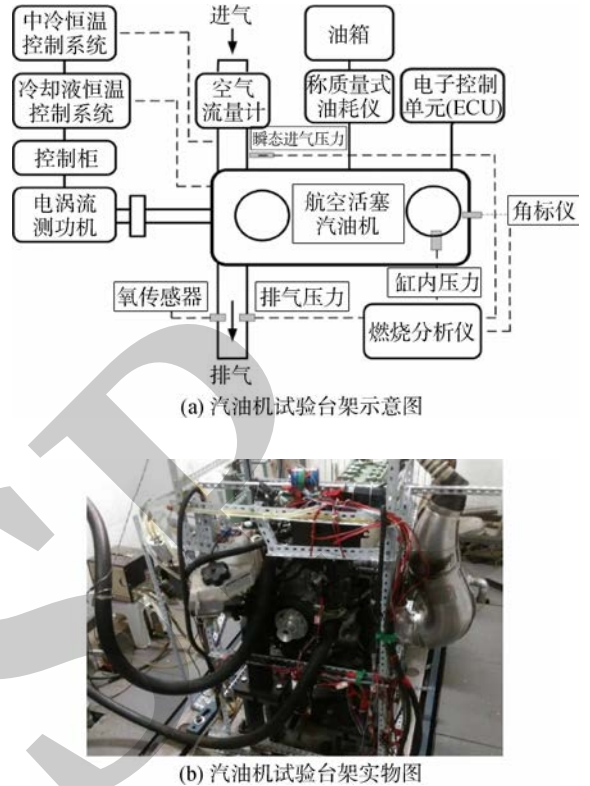


图 1 航空活塞汽油发动机试验台架
Fig. 1 Test bench of aviation piston gasoline engine

表 2 试验台架相关设备

Table 2 Test bench related equipment

设备名称	型号
燃烧分析仪	DEWE-5000-CA
油耗仪	ONO SOKKI MF2200
缸压传感器	KISTLER 6118BFD16
进气压力传感器	BOSCH O26130042
氧传感器	BOSCH LSU4.9
排气温度传感器	PT1000

1.2 模型建立

利用该汽油机绘制 Pro-E 模型,在 AVL Fire 软件中应用 FAME ENGINE+进行网格划分,进而进行火花塞点火过程的气体流动计算。由于二冲程航空活塞汽油机进、排气口附近的流动状态非常复杂^[11-12],为了计算得到精确的缸内流场,整体最大网格尺度为 2 mm。由于气口连通扫气系统与气缸,气口细化程度对气口流量系数计算有

着决定性的影响^[8],需要对气口附近的网格进行细化,以保证整体仿真的计算精度。在上止点时,进气道网格数为 245 416,排气道网格数为34 513,燃烧室体网格数为 33 316,总网格数为 314 245。图 2(a)为燃烧室三维实体化模型,图 2(b)为三维模型网格示意图。

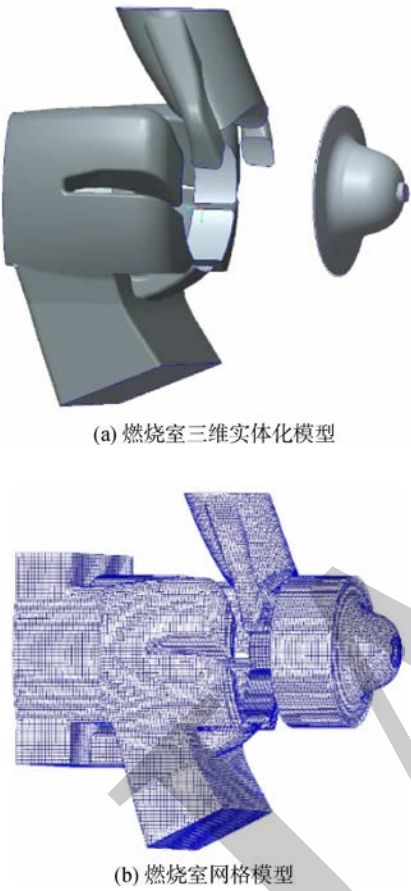


图 2 发动机仿真模型

Fig. 2 Engine simulation model

1.3 点火模型

航空活塞汽油机有三种燃烧模式:预混合燃烧、非预混合燃烧、不正常燃烧,汽油机的点火模型相应建立^[13]。AVL Fire 软件针对点燃式发动机提供了四种点火模型,由于本文暂不考虑爆震对航空活塞汽油机燃烧过程的影响,故采用电弧和内核跟踪点火模型(AKTIM)。该点火模型是基于物理概念提出来的,由于考虑到点火能量,火花的移动、热损失等对点火的影响,故该模型也是最准确的点火模型^[14]。

1.4 燃烧模型

发动机燃烧机理由湍流运动及化学反应动力学相互作用决定^[15],由于组分多样性的燃烧原

料,燃烧的化学反应特别复杂。点燃式发动机主要有四种湍流燃烧模型:相关火焰模型(CFM-2A)、修正相关火焰模型(MCFM)、扩展火焰相关模型(ECFM)、三区扩展相关火焰模型(ECFM-3Z),本文燃烧选用了 ECFM^[16]。

由 AVL Fire 提供的 ECFM^[16]是在 CFM-2A 和 MCFM 的基础上推导出来的,主要运用这两种的化学反应来解释燃烧反应的机理。ECFM 可以与喷雾模型相互进行耦合应用,可以模拟汽油直喷(GDI)发动机的燃烧放热过程。模型的控制方程如下。

火焰面密度的控制方程

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (U_j \Sigma) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_{\Sigma}} \cdot \frac{\partial \Sigma}{\partial x_j} \right) = \alpha K \Sigma - \beta \frac{\rho_{\text{fr}} S_1}{\rho_{\text{fu}}} \Sigma^2 \tag{1}$$

燃料质量分数的控制方程

$$\frac{\partial \rho_{\text{fu}}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (U_j \rho_{\text{fu}}) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_{\rho_{\text{fu}}}} \cdot \frac{\partial \rho_{\text{fu}}}{\partial x_j} \right) = - \rho_{\text{fr}} S_1 \Sigma \tag{2}$$

式中 Σ 是单位体积内平均湍流火焰面积, $\partial \Sigma$ 是火焰的湍流施密特数, μ_{eff} 是湍流的运动黏度, α 、 β 是调整火焰密度大小的常数, K 是火焰的平均延伸率, S_1 是层流火焰速度, ρ_{fr} 是新鲜气体的密度, ρ_{fu} 是燃料的密度, $\sigma_{\rho_{\text{fu}}}$ 是燃料的湍流施密特数, t 是时间, U_j 是流动速度, x_j 是位移。

1.5 初始条件与边界条件

初始条件:扫气系统和气缸部分采用压力边界条件,进气道和缸内初始压力采用试验采集数值,缸内初始废气再循环(EGR)为 1,湍动能和湍流长度尺度根据经验公式获得。

边界条件:模型所有壁面均采用温度边界条件,根据国内外大量研究发动机模型的经验和相关文献中的数据资料,设置进出口温度为 303 K,活塞壁面温度为 550 K,进气道、进气门和进气门座温度均为 340 K,气缸壁面温度为 475 K,气缸盖温度为 550 K。其中曲轴箱壁面和气缸壁面为移动壁面边界,其余壁面为固定壁面边界。

本文的边界条件大多为温度边界条件,根据国内外大量研究对二冲程航空活塞汽油机的经验和相关文献中的数据资料进行设定,具体见表 3。

1.6 模型校核

缸内压力作为反映缸内工作过程的重要数据,是校核验证模型时的重要参考,研究选取无人

表 3 仿真模型的边界条件设置

Table 3 Boundary condition setting of the simulation model

边界条件参数	数值
活塞顶面温度/K	590
气缸衬垫温度/K	500
气缸缸头温度/K	550
进气腔温度/K	303
排气背压/MPa	0.1

机巡航工况点(转速为 6 500 r/min, 节气门为 50%)的缸压试验数据校核仿真模型, 如图 3 所示。试验中的实际缸压值与仿真缸压值吻合度较高, 最大误差为 4.67%, 在容许范围内, 说明该模型能较准确地表达缸内过程。

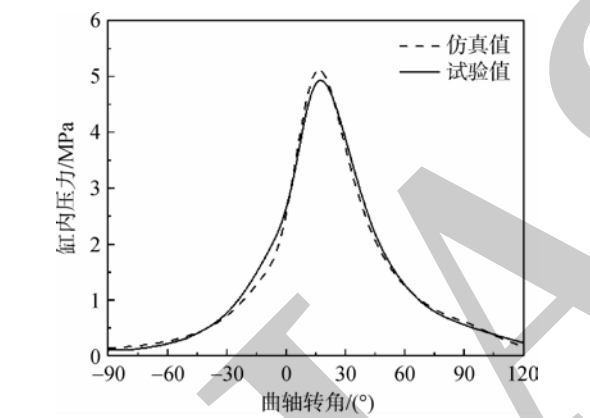


图 3 试验与仿真缸内压力对比

Fig. 3 Comparison of test and simulation of in-cylinder pressure

2 火花塞布置方案

随着火花塞安装位置的变化, 火焰传播距离和火焰面积扩散率均不同^[17]。在火焰传播距离相同的情况下, 由于燃烧室内气体扰动状态不同, 则其火焰传播也不同。传统汽油机火花塞的布置主要考虑: ①确保火花塞附近的残余废气充分扫除, 保证较好的低速性能和较小的循环变动; ②火花塞布置在排气门附近, 降低末端混合气的受热, 防止爆震; ③从火花塞传播开的火焰前锋面应逐渐扩大, 确保运转平稳; ④火焰传播距离应尽可能短, 以防止爆震和提高热效率。

在汽油机燃烧系统设计中, 火花塞的位置直接影响到火焰传播距离、火焰前锋面扩大率(燃烧质量比), 从而影响燃烧系统的抗爆性和热

效率^[18]。考虑到可以顺利点火, 应在火花塞附近形成一定的可燃混合气。仿真时采用 200°曲轴转角喷油时刻, 40°喷油锥角, 12 MPa 喷油压力的喷油策略。图 4 为缸内燃油当量比分布情况, 如图所示, 云图上端为进气侧, 下端为排气侧, 而缸内理想混合气主要分布在气缸左右两侧的壁面附近, 气缸中心区域到进气侧的气缸壁之间分布着燃油当量比较小的混合气。

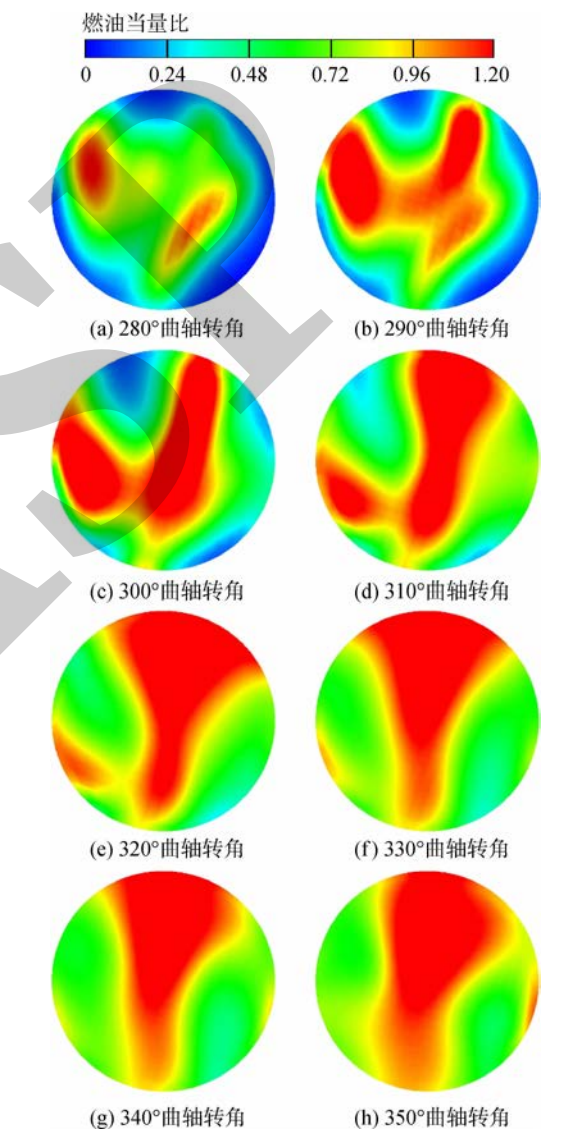


图 4 缸内燃油当量比分布

Fig. 4 In-cylinder fuel equivalent ratio distribution

考虑到 340°曲轴转角燃烧室混合气分布情况, 火花塞布置方案如图 5 所示, 位置 1 和位置 2 分布在气缸盖顶面半径为 20 mm 的圆上, 位置 1 位于进气侧, 靠近理想混合气区域; 位置 2 相对位置 1 关于缸盖中心对称。

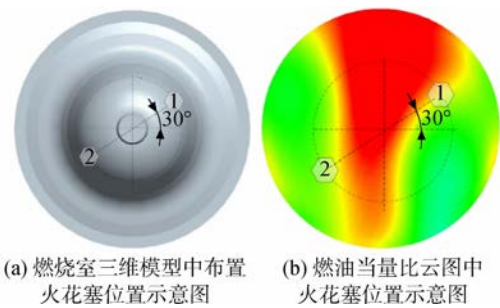


图 5 气缸盖上单火花塞布置方案
Fig. 5 Signal spark plug arrangement on the cylinder head

图 6 为火花塞附近(半径为 5mm 的球)燃油当量比比曲线,1 号火花塞附近燃油当量比在 300°曲轴转角后,数值接近 1,在 320°曲轴转角时,燃油当量比最大为 1.05,320°曲轴转角后逐渐下降,最小为 0.75。图 7 为火花塞附近混合气均匀度曲线,两个火花塞混合气均匀度在 330°曲轴转角后均在 0.9 以上,混合程度较好,适合点火。

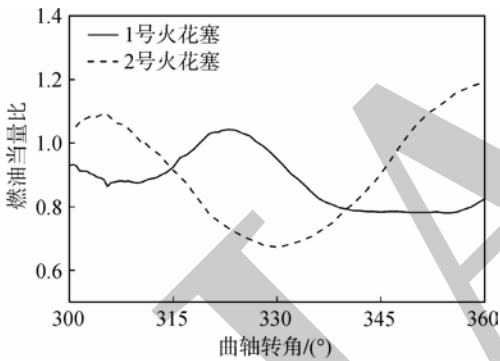


图 6 火花塞附近燃油当量比曲线
Fig. 6 Fuel equivalent ratio curve near the spark plug

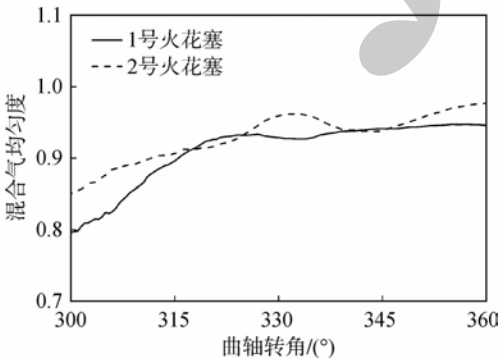


图 7 火花塞附近混合气均匀度曲线
Fig. 7 Mixed gas uniformity curve near the spark plug

3 单火花塞对燃烧特性的影响规律

火花塞放电后,能够正常点火,需要考虑两方

面:①火花塞附近的混合气质量;②点火系统自身的能量。当火花塞采用斜置的方式,使电极伸出比较长,火花塞的电极间隙位置会更靠近于燃烧室中心,但会在喷油器的下方。该布置火花塞和喷油器的布置方案主要有以下方面的考虑:一是在小负荷工况时,喷油量较少,火花塞离喷嘴较远的话,在火花塞附近形成一定燃油当量比较小的混合气是比较困难的,进而点火也会困难;另外火花塞距离喷嘴较近,可以保证在其周围形成一定燃油当量比的可燃混合气,能够到达点火条件。本文主要研究混合气分布及火花塞位置对燃烧特性影响规律,故选用高能量的火花塞。

本文采用单火花塞和双火花塞对比分析,分别是 1 号火花塞、2 号火花塞作为单火花塞布置方案,1、2 号火花塞同时点火作为双火花塞布置方案,分析缸内燃烧特性的影响规律。

由于燃烧放热的影响,缸内压力也会剧烈变化,燃油燃烧情况的好坏直接影响到汽油机的整机性能。图 8 为火花塞数量对缸内压力的影响规律。图 9 为火花塞数量对缸内温度的影响规律。相比单火花塞点火,双火花塞布置方案缸内最大爆发压力和最高温度均有较大提高,双火花塞点火后缸内燃烧火焰传播速度加快,使缸内混合气燃烧更加充分。

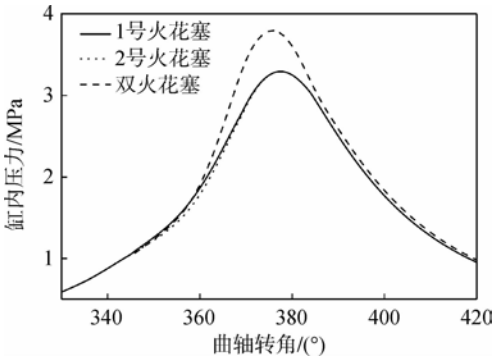


图 8 火花塞数量对缸内压力的影响
Fig. 8 Influence of spark plug number on in-cylinder pressure

图 10 为火花塞数量对缸内放热率的影响。图 11 为火花塞数量对累计放热量的影响。主要在急燃期和后燃期,双火花塞点火方案明显放热更多。

图 12 为火花塞数量对火焰前锋面密度的影响。由于增加了缸内的火花塞数目,使得缸内形成的各个火焰面之间的距离明显缩短,但各个火焰前锋面随着点火过程的不断推进,相邻的点火

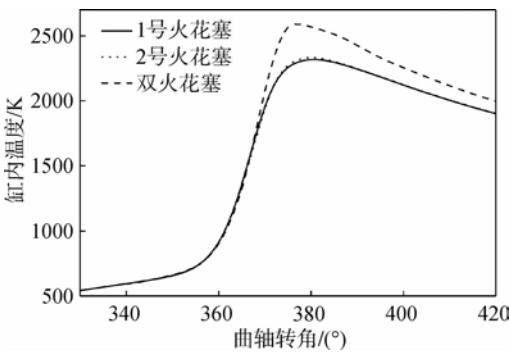


图 9 火花塞数量对缸内温度的影响
Fig. 9 Influence of spark plug number on in-cylinder temperature

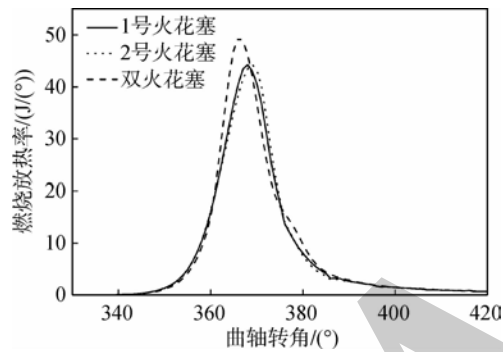


图 10 火花塞数量对缸内燃烧放热率的影响
Fig. 10 Influence of spark plug number on in-cylinder heat release rate

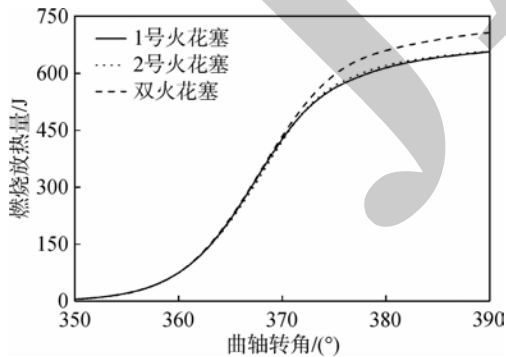


图 11 火花塞数量对缸内累计放热量的影响
Fig. 11 Influence of spark plug number on in-cylinder heat release

间隙的火焰会随之发生部分干涉,减小了火焰前锋面积,延缓了燃烧过程的速率。采用双火花塞点火方案主要考虑到相邻点火间隙火焰面的干涉面积比较少,同时也会缩短火焰由燃烧室中心区域向燃烧室壁面逐渐推进的距离,燃油可以迅速燃烧,整个燃烧速度比单火花塞点火时快。

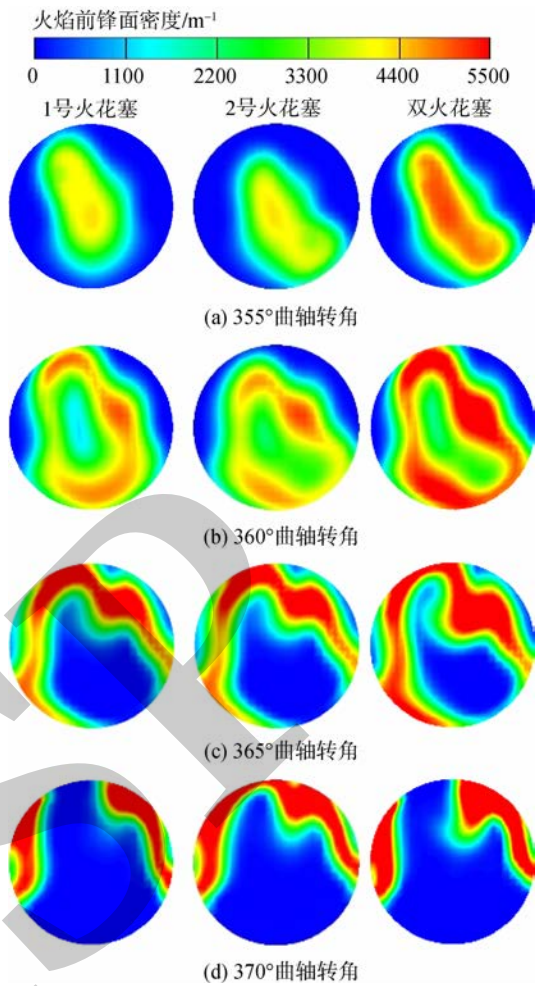


图 12 火花塞数量对火焰前锋面密度的影响
Fig. 12 Influence of spark plug number on flame front density

4 双火花塞对燃烧特性的影响规律

通过文中第 3 节对比单双火花塞对燃烧的影响,得知采用双火花塞对称分布方案较为合理,其缸压峰值比单火花塞布置方案提前 2°曲轴转角。奥地利的 Rotax914 为国外装备无人机的比较成熟的动力装置,本文参考 Rotax 发动机的点火布置方案,设计符合该发动机的双火花塞布置方案。本节主要研究双火花塞位置对缸内燃烧过程的影响规律,采用两种方案进行非对称布置形式,分别是其中一个火花塞相对原来火花塞位置向下延伸 10 mm,方案 1 为 1 号火花塞延伸,方案 2 为 2 号火花塞延伸。

图 13 为双火花塞布置对缸内压力的影响,火花塞深入的布置方案较原方案着火阶段速率基本相同,但其在急燃期非对称布置方案火焰传播速度明显高于原方案,最大爆发压力提高 0.3 MPa,并提前 2°曲轴转角。图 14 为双火花塞布置对缸

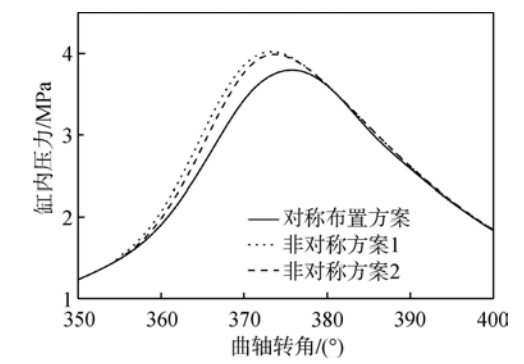


图 13 双火花塞布置对缸内压力的影响
Fig. 13 Influence of double spark plugs arrangement on in-cylinder pressure

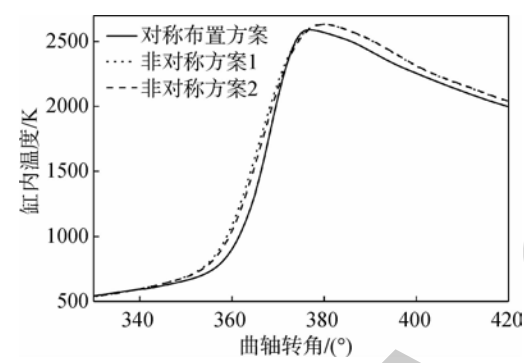


图 14 双火花塞布置对缸内温度的影响
Fig. 14 Influence of double spark plugs arrangement on in-cylinder temperature

内温度的影响,在上止点附近,火花塞非对称方案温度上升速度最快,在上止点后 20°曲轴转角后,温度变化速率趋于峰值,较原方案略有提高。

图 15 为双火花塞位置对燃烧放热率的影响。图 16 为双火花塞位置对燃烧放热量的影响规律。非对称布置火花塞方案中,点火后,在缸内迅速形成火焰,并且非对称方案 1 相对非对称方案 2 的放热率更多。累计放热量中,非对称布置方案持续高

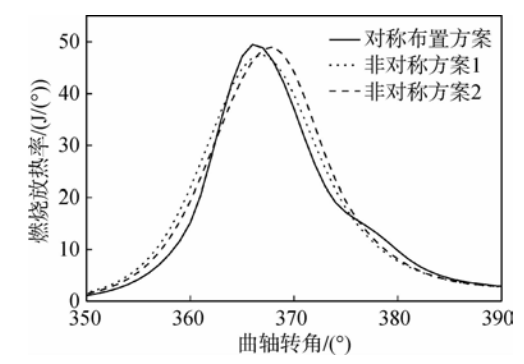


图 15 双火花塞布置对缸内燃烧放热率的影响
Fig. 15 Influence of double spark plugs arrangement on in-cylinder heat release rate

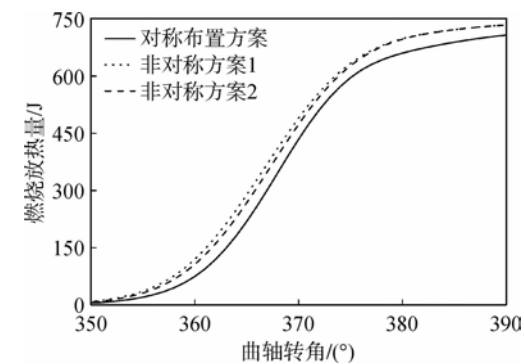


图 16 双火花塞布置对缸内燃烧放热量的影响
Fig. 16 Influence of double spark plugs on the in-cylinder heat release

于对称布置方案方式,最终燃烧放热量高出 40 J。
图 17 为非对称布置方案的火焰前锋面密度

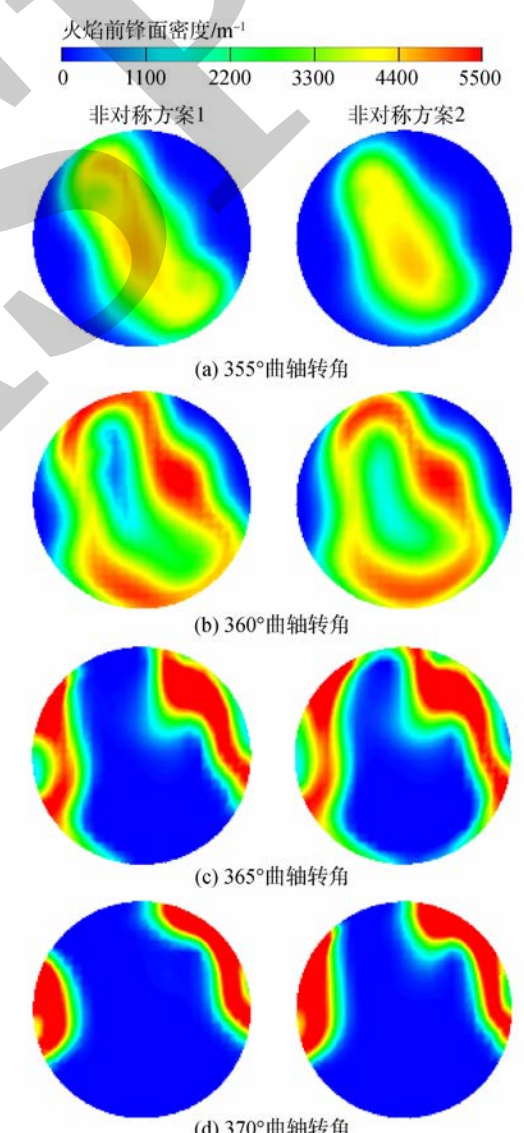


图 17 火花塞非对称布置方案的火焰前锋面密度的影响
Fig. 17 Influence of asymmetrical arrangement of the spark plug on flame front density

的影响规律。从切片云图可以得到,双火花塞点火后,在燃烧室中心区域分别以火花塞火花为圆心的两个初始球型状的火核向四周传播,在 355° 曲轴转角时,两个火核汇合形成一个大火核,并且扩散到气缸壁面,火焰面密度更大,说明燃烧更稳定。非对称方案1火核形成速度和火焰传播速度高于非对称方案2。在 365° 曲轴转角时,火焰扩散到壁面四周,方案2中火焰分布情况更加均匀,火焰面面积都在迅速增大,燃烧剧烈。

5 结 论

本文介绍了航空活塞汽油机的火花塞位置方案,通过研究火花塞位置、火花塞数量及火花塞布置方式等方面对航空活塞汽油机燃烧特性的影响,具体优化了在额定飞行工况下点火方案。主要研究结论如下:

1) 双火花塞布置方案比单火花塞布置方案更有利于组织快速燃烧,促进燃烧放热,缩短燃烧持续期,最高爆发压力点提前 $2^\circ\sim 3^\circ$ 曲轴转角,燃烧重心的提前可以避免汽油机的燃烧室容积膨胀速度过快而导致的膨胀功的减少。

2) 火花塞非对称布置方案比对称布置方案对火核的形成及传播扩散更有利,而采用1号火花塞延伸10mm后的点火方案,可以促进缸内混合气燃烧速率,在汽油机燃烧急燃期前,缩短了汽油着火阶段,增大火焰面密度,使缸内燃烧更稳定。

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] 王豪. 对置活塞二冲程直喷汽油机缸内工作过程仿真研究[D]. 北京:北京理工大学,2016.
WANG Hao. Simulation research on the working process of an opposed-piston two-stroke GDI engine[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology,2016. (in Chinese)
- [3] ALTIN İ, BILGIN A. A parametric study on the performance parameters of a twin-spark SI engine[J]. Energy Conversion and Management,2009,50(8):1902-1907.
- [4] 夏怀成,安子军,孙泽,等. 双火花塞发动机性能的仿真分析[J]. 机械设计,2012,29(5):76-80.
XIA Huaicheng, AN zijun, SUN Ze, et al. Simulation of the performance of dual spark plug engine[J]. Mechanical Design,2012,29(5):76-80. (in Chinese)
- [5] 杨静,乔海涛. 关于汽车发动机自动熄火故障分析[J]. 中国科技投资,2013(A22):167.
YANG Jing, QIAO Haitao. Analysis on automatic shut-down failure of automobile engine[J]. China Venture Capital,2013(A22):167. (in Chinese)
- [6] 丁水汀,邱天. 航空发动机寿命限制件工作边界系统级分析模型[J]. 航空动力学报,2013,28(7):1666-1674.
DING Shuiting, QIU Tian. Systematic model for operation boundary analysis of aero-engine life limited parts[J]. Journal of Aerospace Power,2013,28(7):1666-1674. (in Chinese)
- [7] 刘国栋. 航空活塞发动机燃烧过程和特性的模拟研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2013.
LIU Guodong. Study on combustion process and characteristics of aviation piston engine[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2013. (in Chinese)
- [8] 贝太学,魏民祥,刘锐,等. 异步点火相位对二冲程发动机爆震燃烧的影响[J]. 航空动力学报,2017,32(2):322-329.
BEI Taixue, WEI Minxiang, LIU Rui, et al. Effect of asynchronous ignition phase on knocking combustion of two-stroke engine[J]. Journal of Aerospace Power,2017,32(2):322-329. (in Chinese)
- [9] 李兆乐. 小型航空点燃式重油活塞发动机点火及爆燃协同控制的模拟研究[D]. 北京:北京交通大学,2016.
LI ZhaoLe. Simulation study on ignition and deflagration coordination control of small air ignition heavy oil piston engine[J]. Beijing: Beijing Jiaotong University,2016. (in Chinese)
- [10] 秦德,马红玉. ROTAX 航空发动机 914UL/F 概述[J]. 小型内燃机与车辆技术,2014(5):88-91.
QIN De, MA Hongyu. General overviews of ROTAX aircraft engines 914UL/F[J]. Small Internal Combustion Engine and Vehicle Technique,2014(5):88-91. (in Chinese)
- [11] 曹娇坤,丁水汀,杜发荣,等. 气口布置对进气涡流及扫气品质的影响[J]. 航空动力学报,2013,28(8):1711-1718.
CAO Jiaokun, DING Shuiting, DU Farong, et al. Effects of porting arrangements on intake swirl and scavenging performance[J]. Journal of Aerospace Power,2013,28(8):1711-1718. (in Chinese)
- [12] 董雪飞,赵长禄,赵振峰. 进排气压力对增压对置活塞二冲程发动机的影响研究[J]. 内燃机工程,2016,37(4):28-32.
DONG Xuefei, ZHAO Changlu, ZHAO Zhenfeng. Study on influence of intake pressure on turbocharged opposed-piston two-stroke engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering,2016,37(4):28-32. (in Chinese)
- [13] 章振宇,赵振峰,张付军,等. 对置二冲程柴油机扫气口参数对扫气过程的影响[J]. 内燃机工程,2014,35(5):119-124.
ZHANG Zhenyu, ZHAO Zhenfeng, ZHANG Fujun, et al. Influence of scavenging port parameters on scavenging process in opposed-piston two-stroke diesel engine[J].

Chinese Internal Combustion Engine Engineering,2014,35 (5):119-124. (in Chinese)

[14] PETRANOVIĆ Z, EDELBAUER W, VUJANOVIĆ M, et al. CFD modelling of spray and combustion process using avl FIRE[R]. Seoul, Korea; International Symposium on Combustion,2016.

[15] 钟北京,姚通,郑东. 基于湍流燃烧的化学反应动力学机理 [R]. 成都:中国化学学会第一届全国燃烧化学学术会议, 2015.

[16] 史春涛,秦德,唐琦,等. 内燃机燃烧模型的发展现状[J]. 农业机械学报,2007,38(4):181-186.

SHI Chuntao, QIN De, TANG Qi, et al. Developments in combustion modeling in ICE[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural, 2007, 38 (4): 181-186. (in Chinese)

[17] 崔昊. 双火花塞对天然气定容燃烧影响的试验研究[D]. 长春:吉林大学,2016.

CUI Hao. Experimental study on the effect of the dual spark plug on the constant volume combustion of nature gas[D]. Changchun:Jilin University,2016. (in Chinese)

[18] 李立军,张力. 采用 VVT 技术的汽油机控制策略的研究 [J]. 汽车工程学报,2011,1(3):198-203.

LI Lijun, ZHANG Li. Study on the control strategy of petrol engine based on variable valve timing technology[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2011, 1 (3): 198-203. (in Chinese)

(编辑:陈 越)