

文章编号:1000-8055(2011)10-2274-07

活塞发动机高空最小点火能量计算及试验

许善珍^{1,2}, 魏民祥¹, 白洪林³

- (1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016;
2. 淮阴工学院 交通工程学院, 安徽 淮安 223003;
3. 天津大学 天津大学内燃机研究所, 天津 300072)

摘 要: 根据原型机结构,应用 AVL BOOST 建立了航空活塞式发动机的一维仿真模型,通过地面特性仿真计算与试验研究,验证了发动机仿真模型的可行性和正确性;在深入分析可燃混合气燃烧机理基础上,建立了发动机最小点火能量计算数学模型;在此基础上,采用 AVL BOOST 与 MATLAB 联合仿真的方法,计算了发动机在不同高空、不同空燃比稳定运行工况下的最小点火能量,得出不同高空最小点火能量 MAP 图,并进行了试验验证,结果表明,所建立的最小点火能量的仿真计算模型是正确可行的,能够满足后续性能预测与研究的要求。

关 键 词: 活塞发动机; 高空; 联合仿真; 最小点火能量; 仿真模型

中图分类号: V234

文献标志码: A

Calculation and experiment on minimum ignition energy at high altitude for a piston aero-engine

XU Shan-zhen^{1,2}, WEI Min-xiang¹, BAI Hong-lin³

- (1. College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. Faculty of Transportation Engineering,
Huaiyin Institute of Technology, Huai'an Anhui 223003, China;
3. Tianjin Internal Combustion Engine Research Institute,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A one-dimensional simulation model of a piston aero-engine was established with AVL BOOST according to the structure of the prototype engine. And the simulation model was validated by the ground performance experiment and simulation computation. A mathematical model was set up to calculate the minimum ignition energy based on thorough analysis of combustion mechanism of the engine combustible mixture. Then the minimum ignition energy at high altitude with different air-fuel ratios under stable operation condition was calculated by using AVL BOOST and MATLAB, and the minimum ignition energy MAP was provided. Experiment was conducted to validate the calculation results. The results show that the model of calculating the minimum ignition energy is correct and feasible, and also can meet the requirements of further research and performance prediction.

Key words: reciprocating aero-engine; high altitude; co-simulation; minimum ignition energy; simulation model

收稿日期:2011-04-06; 修订日期:2011-08-07

作者简介:许善珍(1977—),女,山东莱芜人,讲师,博士生,主要从事发动机建模与仿真、汽车电子控制技术等研究。

发动机点火能量的定量测量与分析,对改善发动机机动力性、提高经济性,降低废气排放和电磁干扰有重要的意义^[1].最小点火能量是指电火花点燃燃油-空气混合气时保证在火花塞附近形成稳定向外界传播的燃烧火球所需的点火能量,即最小火花塞电极间高压放电能量.它是提高发动机性能,综合评价火花点燃式发动机点火系统点火性能的重要依据之一^[2],也是衡量燃油-空气混合气能否被火花点燃以及难易程度的重要判据.文献[3-4]研究了发动机点火初始温度、压力、压缩比、废气再循环率等单一参数对最小点火能量的影响,并未建立完整的发动机模型,与发动机实际运行情况具有一定差距.

本文在深入分析可燃混合气燃烧机理基础上,建立发动机最小点火能量计算数学模型,对某型航空活塞式发动机在不同高空稳定工况、不同空燃比条件下最小点火能量进行联合仿真计算,并通过高空模拟试验台进行试验验证,研究成果为研究航空活塞式发动机在各种工况下所需的最佳点火能量并实现点火能量的自适应控制提供重要理论依据.

1 最小点火能量计算理论基础

为方便模型建立,对发动机火花点火的条件及过程作以下几点假设^[5-9]:

1) 缸内初始充量是均匀的,工质为理想气体,其比热容、内能、焓等参数仅与气体温度及气体成分有关;

2) 把火花模化成一团炽热的球形气体,把缸内分成火球区和火球外区两个区域,火球区内部和火球外区内部温度均匀分布,忽略燃烧室边界对火球区的影响;

3) 假设点火期间燃烧室内压力均匀,只随时间变化,Lewis 数等于 1,即热扩散率和质量扩散率相等;

4) 电火花已经点燃某一最小火球尺寸的混合气,并形成了稳定的火焰传播,并满足在传播的瞬间火球内混合气化学反应放出的热量等于火球表面散发的热量;

5) 设其燃烧过程中的反应为燃油和氧气的二级化学反应.

根据假设,火花向临界气体体积内加入的能量能够使燃油-空气混合气的温度升高到已燃气体的温度,根据文献[10],最小点火能量公式为

$$E_{\min} = \frac{\pi}{6} d^3 \rho c_p (T_b - T_u) \quad (1)$$

其中 T_u 为点火时刻燃油-空气混合气的温度; T_b 为等压绝热理想条件下的理论燃烧温度; c_p 为比定压热容; ρ 为气体密度, $\rho \propto (p/T)$. d 为熄火距离, $d = \frac{2\lambda}{\rho c_p S_l}$, λ 为导热系数, S_l 为层流火焰速率.

1.1 理论燃烧温度 T_b 的计算

理论燃烧温度是指在等压绝热的理想条件下的燃烧温度.混合气等压绝热燃烧,燃烧前后的总焓值不变,满足

$$\sum n_i H_{T_u,i} = \sum n_j H_{T_b,j} \quad (2)$$

其中 i 表示燃烧前气体组分, j 表示燃烧后气体组分. n 为摩尔数,下标 T_u, i 为 i 组分在点火时刻的温度. $H_{T_b, j}$ 为 j 组分在燃烧后温度 T_b 下的焓值,计算式为

$$H_{T_b} = U_{T_b} + RT_b \quad (3)$$

式中 U_{T_b} 为工质的内能, R 为通用气体常数.

1.2 层流速度 S_l 的计算^[3]

$$S_l = \left[\frac{\lambda}{0.5 \rho^2 c^2 (T_m - T_r)} Q \cdot W_f \right]^{0.5} \quad (4)$$

其中 W_f 为平均化学反应速率, Q 为反应热.

2 发动机模型建立

AVL BOOST 是一个为建立整台发动机的模型而开发的一套模拟程序,主要应用于汽油、柴油等液态及气态燃料的内燃机.可以模拟包括燃烧在内的发动机的工作循环过程.使用该软件可以方便地对参数变化引起的发动机性能的影响进行研究,可设置不同的转速,进气温度、进气压力、空燃比、节气门开度等参数,得到不同条件下的仿真结果.根据文献[8]和文献[11],燃油的理化特性介于汽油和轻柴油之间,在相同条件下,与燃用汽油相比,循环功变化不大,对发动机的动力性影响不大.因此,汽油机建模的理论模型均可适用于本燃油发动机.

本文所研究的发动机的原型机为某航空四缸四冲程、活塞式、火花点燃式发动机,主要技术参数如表 1 所示.

保持结构参数不变,依据原型机结构,应用 AVL BOOST 建立的发动机仿真计算模型如图 1 所示.

由于发动机实际工作过程十分复杂,为方便模型建立,对其工作过程进行以下简化^[12-13]:①忽

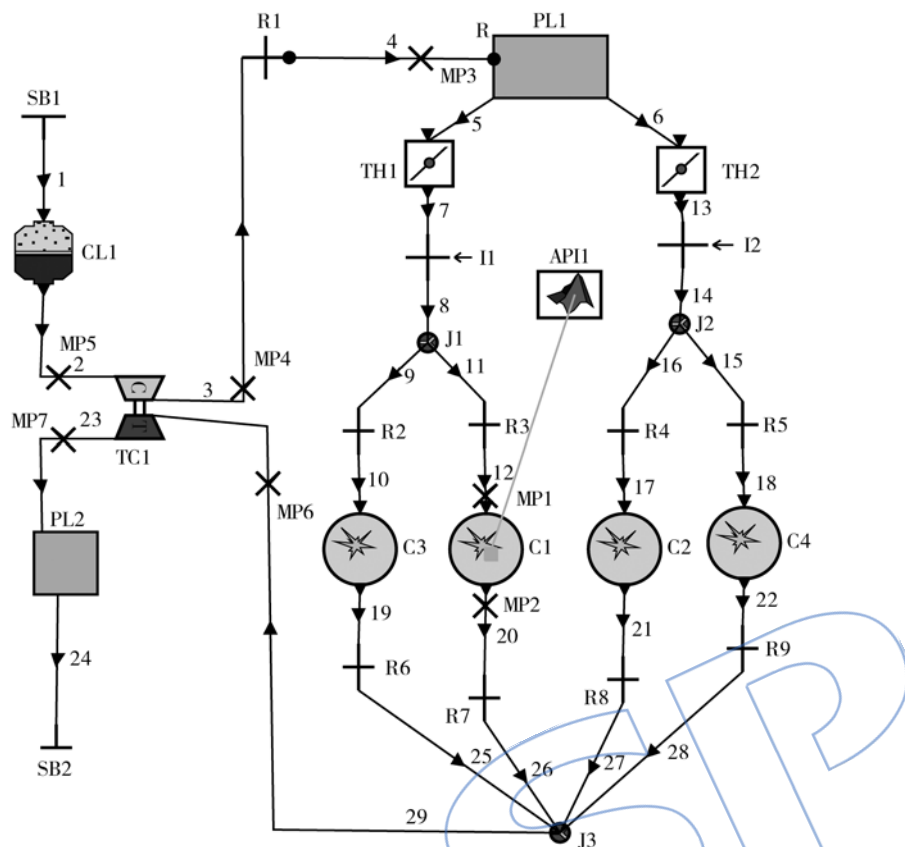


图1 发动机仿真计算模型

Fig. 1 Simulation and calculation model of aero-engine

略气缸内各点的压力、温度和摩尔分数的差异,燃烧时缸内气体完全混合均匀;②燃烧时缸内混合气空燃比为定值,工质为理想气体,其比热容、内能仅与气体的温度和气体组成有关;③气体流入或流出气缸为准稳定流动,忽略进气系统内压力和温度波动的影响。

2.1 缸内热力过程数值计算模型

缸内热力过程数值计算参数主要有缸内压力 p 、温度 T 、质量 m 和气体组成成分,可由能量守恒方程、质量守恒方程及气体状态方程求解,缸内能量平衡图如图2所示。

表1 发动机主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of engine

技术参数	参数值
排量/ cm^3	1211.2
活塞行程/mm	61
气缸直径/mm	79.5
压缩比	9.0
最大连续功率/kW	73.5
最大扭矩/($\text{N} \cdot \text{m}$)	144
理论空燃比	14.8

主要计算模型有缸内热力过程数值计算模型、Vibe 燃烧放热模型和缸内传热模型。

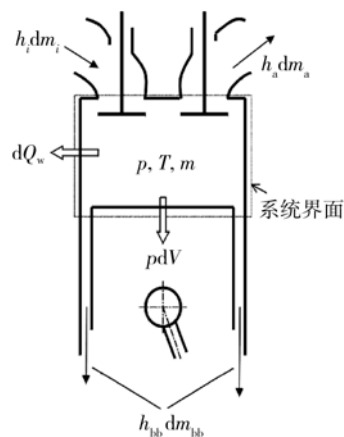


图2 气缸内能量平衡图

Fig. 2 Energy balance of cylinder

能量守恒方程为

$$dU = dW + \sum dQ + \sum hdm \quad (5)$$

式中 U 为系统的内能; W 为作用在活塞上的机械功; Q 为通过系统边界交换的热量, 主要包括燃料燃烧的放热量 Q_f 和工质向气缸盖底面、活塞顶面和气缸套的湿润表面等燃烧室诸壁面的换热量 Q_w ; hdm 为质量 m 带入(或带出)系统的能量。

质量守恒方程为

$$dm = \sum_i dm_i \quad (6)$$

气体状态方程为

$$p = \frac{1}{V} \cdot m \cdot R \cdot T \quad (7)$$

2.2 Vibe 燃烧放热模型

燃烧过程采用韦伯函数(代用放热率)描述^[5-7], 燃烧放热率可表示为

$$\frac{dQ_f}{dt} = 6.908 \cdot H_u \cdot g_f \cdot \eta_u \cdot \frac{\gamma+1}{T} \cdot \left[\frac{t-t_c}{T} \right]^\gamma \cdot \exp \left[-6.908 \left(\frac{t-t_c}{T} \right)^{\gamma+1} \right] \quad (8)$$

式中 g_f 为循环燃料供应量, H_u 为燃料的低热值, η_u 为燃料的完全燃烧率, T 为燃烧持续时间, t_c 为燃烧开始时间, γ 为燃烧品质指数。

2.3 缸内传热模型

Q_w 是工质向气缸盖底面、活塞顶面和气缸套的湿润表面等燃烧室诸壁面的换热量。单位曲轴转角的换热模型^[4-6]为

$$\frac{dQ_w}{d\varphi} = \frac{1}{6n} \sum_{i=1}^3 \alpha_w A_i (T_z - T_{wi}) \quad (9)$$

式中 n 为发动机转速(r/min); α_w 为瞬时平均传热系数($W/(m^2 \cdot K)$), 采用 Woschni 1978 换热模型; A 为换热面积(m^2); T_z 为气缸内工质的瞬

时温度(K); T_{wi} 为壁面的平均温度(K); $i=1, 2, 3$ 分别指气缸盖、活塞和气缸套。

2.4 仿真模型试验验证

为保证发动机最小点火能量仿真计算的正确性, 通过发动机缸内压力示功图及发动机负荷特性试验, 对所建立的发动机模型进行试验验证。试验环境条件为, 海拔高度为 0 km, 当地环境温度 15℃, 压力为 0.1 MPa。试验时按发动机负荷特性进行, 固定发动机转速, 调节节气门开度, 测量发动机各参数。以试验进行时的环境条件设置仿真模型的进排气边界条件, 得出模拟结果, 并与试验值进行比较。表 2 为仿真计算的发动机各工作点。

表 2 发动机仿真计算工作点

Table 2 Computation points of engine model

转速/(r/min)	节气门开度/%						
	15	30	50	70	90	100	115
2500	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
3000	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
3500	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
4000	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
4500	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲

本文给出了部分试验结果和仿真结果。表 3 不同转速下节气门开度为 30% 的试验与仿真结果的对比。图 3 为发动机在标定转速 $n=3000$ r/min 下缸内压力示功图的仿真计算和试验结果对比图。

由表 3 和图 3 可以看出, 仿真结果与试验结果基本一致, 误差在 5% 以内。因此, 本文建立的发动机模型能够较准确地反映实际发动机的工作

表 3 试验结果与仿真结果对比

Table 3 Results contrast of the simulation and experiment

转速/ (r/min)	仿真结果				试验结果			
	扭矩/ (N·m)	功率/ kW	燃油消耗量/ (kg/h)	空气流量/ (kg/h)	扭矩/ (N·m)	功率/ kW	燃油消耗量/ (kg/h)	空气流量/ (kg/h)
2500	40.5	11.3	4.91	63.7	41.9	11.9	5.20	64.1
3000	41.3	12.8	5.35	58.3	41.7	13.1	5.42	60.6
3500	34.6	12.6	5.30	60.4	34.5	12.7	5.46	61.6
4000	30.1	12.1	5.92	67.2	29.5	12.3	6.06	66.8
4500	27.2	12.6	6.11	70.5	27.1	12.8	6.12	70.9

过程,可以作为对该发动机性能分析和仿真计算的原机模型。

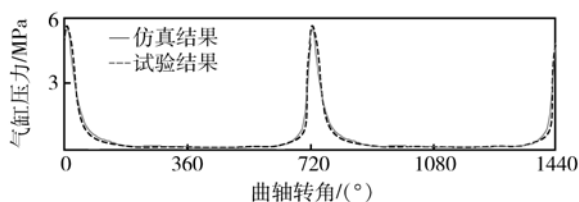


图3 缸内压力示功图对比

Fig. 3 Cylinder pressure indicator contrast diagram of simulation and experiment

在不同高空条件下,空气的温度和压力不同,则对于发动机,其进气温度和进气压力也发生变化,对于仿真计算模型,环境边界条件发生了变化.根据温度和压力随海拔高度的变化关系可计算出不同高空条件下的进气温度和进气压力.应用本文建立的发动机模型仿真计算时,需设置对应不同高空的进气温度和进气压力及不同空燃比等条件来实现不同高空不同空燃比条件下的仿真计算.利用该模型求解不同高空条件下发动机工作过程中的压力、温度、质量及气体的组分等参数,为计算最小点火能量提供有效计算模型。

3 计算及分析

发动机最小点火能量计算流程如图4所示.图5~图7分别给出了空燃比为11.8,14.8和16.8,转速为3000 r/min时,发动机在海拔高度1~5 km,节气门开度为30%,50%和70%的最小点火能量仿真计算MAP图.仿真结果表明,在相

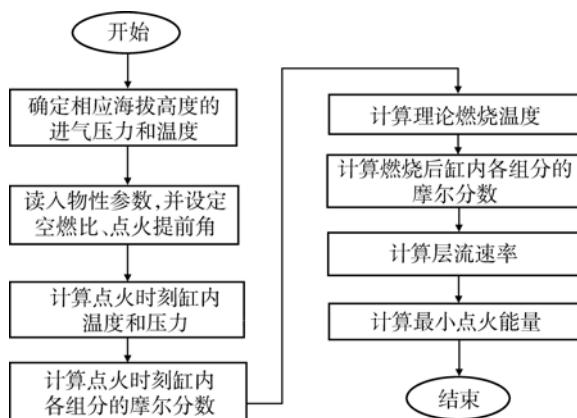


图4 发动机最小点火能量计算流程图

Fig. 4 Calculation flow chart of minimum ignition energy

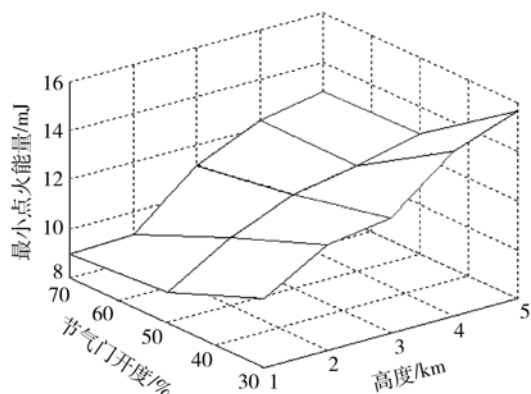


图5 空燃比为11.8时最小点火能量MAP图

Fig. 5 Minimum ignition energy MAP with air-fuel ratio of 11.8

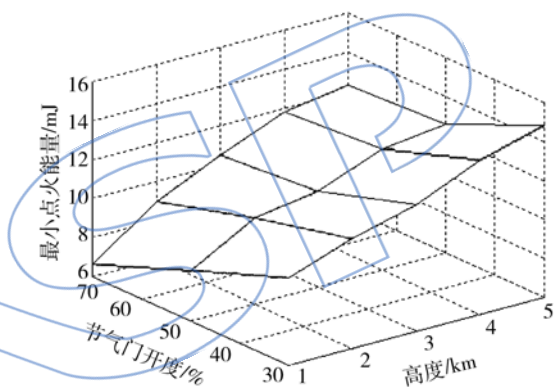


图6 空燃比为14.8时最小点火能量MAP图

Fig. 6 Minimum ignition energy MAP with air-fuel ratio of 14.8

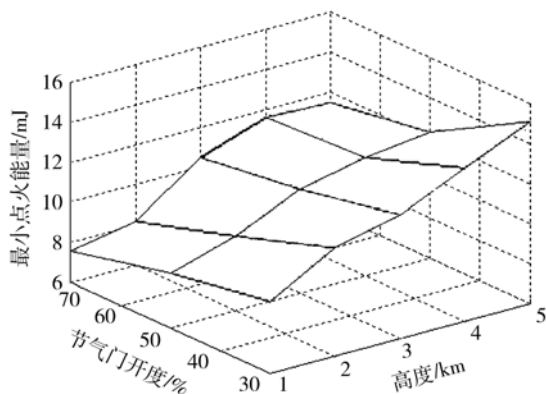


图7 空燃比为16.8时最小点火能量MAP图

Fig. 7 Minimum ignition energy MAP with air-fuel ratio of 16.8

同工作条件下,最小点火能量 $E_{\min}$ 随海拔高度的增加而增加,随节气门开度的增大而减小.在相同条件下,根据最小点火能量 $E_{\min}$ 的取值,最佳空燃

比在理论空燃比 14.8 左右,当空燃比小于 14.8 时,空燃比越大,所需的最小点火能量就越小;当空燃比大于 14.8 时,空燃比越大,则所需的最小点火能量越大。

4 试 验

为验证仿真计算结果的正确性,在高空模拟试验装置进行试验验证. 试验装置示意图如图 8

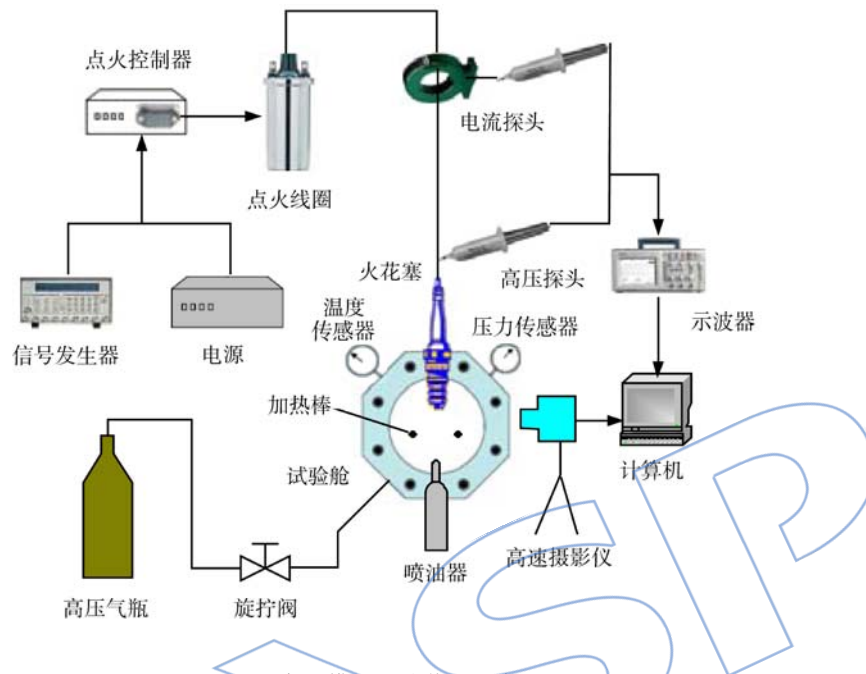


图 8 高空模拟试验装置示意图

Fig.8 Schematic diagram of high altitude experiment device

所示,高压探头和电流探头分别用来捕获点火线圈产生的次级高压击穿燃油-空气混合气时,火花放电的电压和电流波形;示波器为动态能量测试仪器,用于测试点火能量. 高速摄影仪用来记录燃油-空气混合气的燃烧过程. 温度传感器和压力传感器用来测量试验装置内的温度和压力. 试验时,按照试验要求的空燃比由高压气瓶向试验装置内冲入一定压力的空气,由加热棒对其进行加热,达到试验要求温度后由喷油器喷入一定质量的燃油. 当模拟试验装置内压力和温度达到所要求的点火时刻的温度和压力时,控制点火控制器打开点火开关,由点火线圈提供高压,火花塞点火. 由高压探头和电流探头获得电压和电流波形,示波器计算得到点火能量.

本文给出了部分试验结果与计算结果. 表 4 为空燃比为 11.8、转速为 3 000 r/min 时,发动机在海拔高度 1~5 km,节气门开度为 30%,50%和 70%的最小点火能量仿真计算结果与试验结果.

由表 4 可以看出,在相同条件下,点火能量的试验结果比仿真计算结果高 6%左右,主要原因有:

1) 仿真计算是在燃油理想雾化条件下进行的,而在实际试验时燃油雾化效果不够理想,影响

表 4 不同高空最小点火能量仿真与试验结果

Table 4 High altitude minimum ignition energy of the simulation and experiment

海拔高度/ km	节气门开度/ %	最小点火能量 $E_{\min}$ /mJ	
		仿真结果	试验结果
1	30	10.83	11.49
	50	9.22	9.75
	70	8.96	9.46
2	30	12.30	12.99
	50	10.78	11.46
	70	9.06	9.67
3	30	12.71	13.45
	50	11.80	12.52
	70	11.16	11.82
4	30	14.71	15.54
	50	12.36	13.07
	70	12.31	12.98
5	30	15.67	16.63
	50	12.90	13.75
	70	12.80	13.64

其燃烧性能;

2) 模拟试验装置内不能完全模拟发动机缸内气体的流动,因此造成在点火时刻燃油-空气混合气混合不均匀,影响火焰传播速率;

3) 试验装置内燃油-空气混合气的温度和压力保持较困难,点火时刻的温度和压力较理论值偏小,导致所需点火能量增大。

仿真计算结果与试验结果基本一致,误差在允许范围内,因此仿真计算模型合理可行,计算方法及仿真结果可为后续研究打下基础。

5 结 论

1) 本文建立的航空活塞式发动机仿真模型模拟了该发动机的工作特性,并由地面特性试验进行了验证,可以作为研究该发动机性能的工具。

2) 在深入分析发动机可燃混合气燃烧机理基础上,建立了发动机最小点火能量计算数学模型;并以该发动机仿真模型为基础,通过设置不同的环境边界条件,计算得出了不同高空稳定运行工况下最小点火能量 MAP 图,并进行了试验验证,试验结果与仿真结果基本一致,为航空活塞发动机在各种工况下所需的最小点火能量的研究并实现点火能量的自适应控制提供重要理论依据和基础。

参考文献:

- [1] 马法成,张宝来,吴顺毅. 多功能汽油机点火测试系统及其应用[J]. 汽车技术,2003,34(11):17-20.
MA Facheng, ZHANG Baolai, WU Shunyi. A multi-function ignition test system for gasoline engines and its application[J]. Automobile Technology, 2003, 34(11): 17-20. (in Chinese)
- [2] 吴静波,郭志军,高建平. 汽油发动机点火控制系统述评[J]. 河南科技大学学报(自然科学版),2005,26(5):32-36.
- [3] 汪洋,史家涛,王静,等. 火花助燃 HCCI 燃烧最小点火能量的研究[J]. 车用发动机,2006,30(3):32-39.
WANG Yang, SHI Jiatao, WANG Jing, et al. An investigation on the minimum ignition energy of spark supporting HCCI combustion[J]. Vehicle Engine, 2006, 30(3): 32-39. (in Chinese)
- [4] Fenn J B. Lean flammability limit and minimum spark ignition energy [J]. Industrial and Engineering Chemistry, 1951, 43(12): 2865-2869.
- [5] 高孝洪. 内燃机工作过程数值计算[M]. 北京:国防工业出版社,1986.
- [6] 林杰伦. 内燃机工作过程数值计算[M]. 西安:西安交通大学出版社,1986.
- [7] 朱访君,吴坚. 内燃机工作过程数值计算及其优化[M]. 北京:国防工业出版社,1997.
- [8] 蒋德明. 内燃机燃烧与排放学[M]. 西安:西安交通大学出版社,2001.
- [9] 严传俊,范玮. 燃烧学[M]. 西安:西北工业大学出版社,2005.
- [10] Kondo S, Takahashi A, Tokuhashi K. Calculation of minimum ignition energy of premixed gases [J]. Journal of Hazardous Materials, 2003, 103(1-2): 11-23.
- [11] 陈林林. 二冲程柴油发动机性能数值模拟与喷油控制研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2010.
CHEN Linlin. Research on numerical simulation of performance and fuel injection control for two-stroke kerosene engine[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)
- [12] AVL List GmbH. AVL Boost user manual[M]. Austria: AVL List GmbH, 2006.
- [13] 林海英,龙向阳. 某型增压航空活塞发动机仿真研究[J]. 航空动力学报,2009,24(6):1332-1338.
LIN Haiying, LONG Xiangyang. Simulation study of an aero-piston engine with single stage turbocharger[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(6): 1332-1338. (in Chinese)