

提高四冲程点燃式重油航空发动机抗爆性措施

陈方超¹, 杨海青¹, 刘锐^{1,2}, 丁昌露¹, 杨 琦¹
(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016;
2. 南京工业大学 机械与动力工程学院, 南京 211800)

摘 要: 应用 GT-Power 软件,对某四冲程点燃式航空活塞增压发动机进行使用不同燃料的一维性能仿真分析,针对低辛烷值燃料易发生爆震的特性,分别采用添加抗爆添加剂、调整发动机的压缩比、增压压力、空燃比、缸径、点火提前角等参数,在抑制爆震的前提下尽可能实现发动机功率恢复。将原 93 号汽油燃料换成辛烷值为 61 的特种煤油燃料后,在不扩大气缸直径和扩大气缸直径两种方案下,发动机功率恢复分别达到原型机的 89% 和 95%,油耗率分别增加 5.4% 和 6.1%,排气温度分别提高 11.4% 和 13.4%。
关 键 词: 点燃式; 四冲程航空活塞发动机; 重油; 抗爆性; 一维性能仿真
中图分类号: V234⁺.1 **文献标志码:** A

Measures to improve anti-knock quality for four-stroke ignited kerosene aviation engine

CHEN Fangchao¹, YANG Haiqing¹, LIU Rui^{1,2}, DING Changlu¹, YANG Qi¹
(1. College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. College of Mechanical and Power Engineering,
Nanjing Tech University, Nanjing 211800, China)

Abstract: A one-dimensional performance simulation for a four-stroke ignited turbocharging aviation engine with different fuels was made by an engine performance simulation software GT-Power to optimize the anti-knock quality. Through the reasonable adjustment of the compression ratio, boost pressure, air-fuel ratio, cylinder diameter, ignition timing, knock tendency of the engine using the new fuel was optimized, and engine's main output parameters were roughly maintained. When replacing the No. 93 gasoline fuel with a new type fuel of 61 octane number, the power can reach 89% of the original power output after using the method without expanding the diameter of the cylinder and 95% after using the method of expanding the diameter of the cylinder; the specific fuel consumption increased about 5.4% and 6.1%, respectively; and the exhaust temperature increased about 11.4% and 13.4%, respectively.
Key words: ignition; four-stroke aviation engine; kerosene; anti-knock quality; one-dimensional performance simulation

基于使用过程的安全性、易储运性以及燃油经济性等方面的考虑,重油航空活塞发动机的研究与开发越来越受到国内外的重视^[1-3]。在特殊环境下,重油燃料更是发动机的最佳选择。

收稿日期:2016-09-08
作者简介:陈方超(1990—),男,硕士生,主要从事发动机试验和性能仿真研究。

引用格式:陈方超,杨海青,刘锐,等.提高四冲程点燃式重油航空发动机抗爆性措施[J].航空动力学报,2018,33(3):611-619.
CHEN Fangchao, YANG Haiqing, LIU Rui, et al. Measures to improve anti-knock quality for four-stroke ignited kerosene aviation engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(3): 611-619.

与四冲程发动机相比,虽然二冲程重油发动机结构简单,功质比高,且因其实际压缩比远小于名义压缩比,功率恢复性能较好,但由于未采用涡轮增压,严重限制了其飞行高度。四冲程发动机采用废气涡轮增压,能有效提高高空进气压力,改善发动机高空动力性和燃油经济性,达到更高的飞行高度。

四冲程发动机分为点燃式和压燃式。压燃式活塞发动机虽然能够使用重油燃料,但是为满足高压压缩比而使用的高强度大质量机体会使功质比降低。点燃式活塞发动机能够提供较好的功质比,但是在使用重油燃料时极易发生爆震,难以实现较大的功率恢复。四冲程点燃式活塞发动机爆震现象的存在严重限制了其进一步发展,因此提高四冲程点燃式重油发动机的抗爆性非常必要。

爆震是在火花塞点火之后远离点火中心的末端可燃气体自燃造成的非正常燃烧现象,强烈爆震会造成发动机机体过热、功率下降、油耗升高、排放恶化,还会伴随尖锐的敲缸声,严重的还可能造成机体损坏^[4-6]。

本文针对爆震出现原因,综合多种抑制爆震、提高功率恢复的措施,对某型四冲程进气道喷射点燃式发动机进行某特种煤油燃料下的一维性能仿真研究,在不进行较大结构改动的前提下,尽量能够维持发动机功率、油耗率等性能参数,实现良好的发动机性能恢复,拓展发动机的燃料适应范围。

1 仿真模型搭建及标定

发动机工作过程试验研究周期长、成本高,提供的信息量有限。在工程实际中,采用计算机仿真可在抽象的模型上反复进行“数值试验”,解决真实试验难以解决的问题。不受时间、经费、场地等客观环境的限制,可以多次重复计算,同时提供目前试验研究所不能提供的信息量,而且花费小、周期短^[7-9]。

1.1 性能仿真的原理介绍

建立发动机数值模型,就是对实际发动机中气缸、管道等的工作过程进行数值模拟,采用适当的模拟理论和方法,确定计算边界^[8]。

本文仿真计算使用的 GT-Power 软件采用有限容积法对管内一维非定常流动的基本方程式进行数值计算。其中的流动模型同时满足质量守恒、能量守恒、动量守恒,并设定所有流体为均匀的,主要的参变量为:质量流量、密度、内能总

和^[10-13]。对于燃烧、传热等过程,GT-Power 设置了不同的模块对不同性质的工况进行模拟,而对于发动机的摩擦损失压力,则是使用专门的经验公式模块进行模拟^[11-12]。

1.2 原型机介绍

试验使用的原型机为进气道喷射式的四冲程点燃式涡轮增压发动机,发动机额定转速为 5 500 r/min,当增压压力为 1.23×10^5 Pa 时,最大可持续功率为 73.5 kW,当增压压力达到 1.35×10^5 Pa 时,其最大可持续功率为 81.3 kW。发动机基本参数如表 1 所示。

表 1 发动机基本参数
Table 1 Basic parameters of engine

参数	数值及说明
机型	四冲程点燃式 四缸水平对置
缸径×行程/(mm×mm)	79.5×61
连杆长度/mm	110
压缩比	9:1
工作容积/cm ³	1 211

1.3 仿真模型搭建

根据发动机数值仿真实理论以及相应的建模步骤^[9,13-14],利用 GT-Power 软件进行原型机整机模型搭建,模型的工作原理如图 1。其结构可以分为缸体,进/排气系统,涡轮增压器三大部分,每个部分包括诸多模块,每个模块都可以模拟一个发动机部件。发动机工作时工质按图中箭头所示方向完成工作循环。

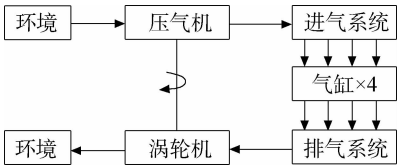


图 1 发动机模型仿真原理图

Fig. 1 Schematic diagram of engine model simulation

模型中主要的构成包括:进气和排气系统、燃烧模型、燃烧室结构、涡轮增压器、喷油模型、传热模型以及大气参数等。这些参数大多是通过样机手册确定,另外一些则通过对样机的实际测量。涡轮增压器由美国 Honeywell 公司生产,将其 map 图直接输入到模型中^[15]。此外,例如喷油器

模型、燃烧模型等功能作用模块的输入参数则来自于发动机台架试验的实测值。仿真模型截图如图 2。

为小、中、大三个油门开度,共 6 个工况点。

先采用韦伯燃烧模型对试验工况进行仿真,对发动机的气流部件进行标定,确定模型的气流

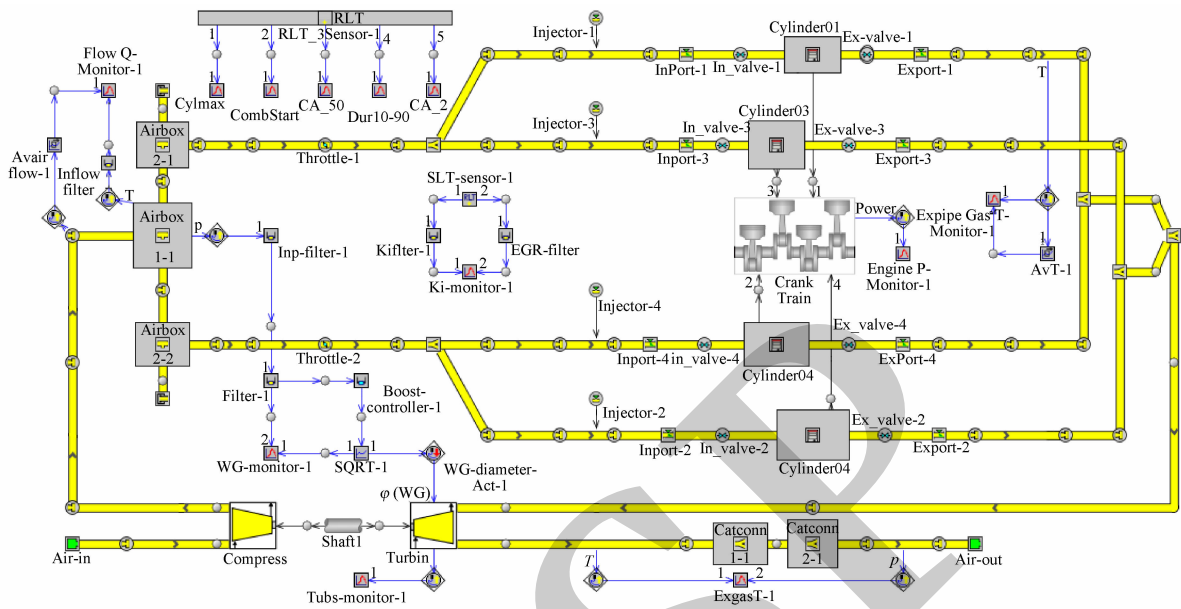


图 2 发动机一维性能仿真模型

Fig. 2 One-dimensional performance simulation model of engine

模型中部分参数存在一定的误差,误差的具体来源以及不确定参数如下:

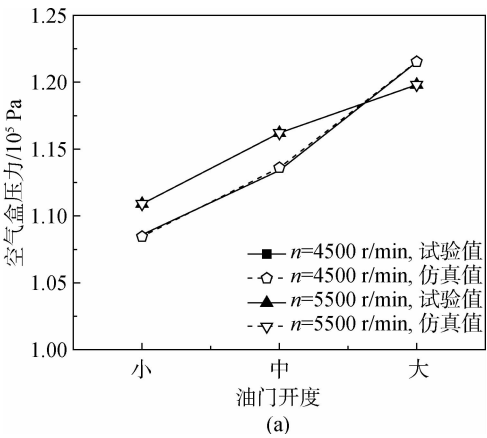
- 1) 进、排气系统结构参数。这些参数多应用的是最初模型的测量值、资料参考值和人工测绘值。
- 2) 传热过程。本文选取的是简化的传热模型。由于在本模型中传热状态并不是需要重点关注的,所以在整个进、排气过程中,工质与气道壁面的传热也是经过简化或者忽略的。
- 3) 混合气形成过程。重油燃料黏度大、挥发性差,雾化效果较差,文中采用缸头垫片加热等方式保证重油燃料充分雾化,仿真过程默认混合气形成良好。

4) 燃烧过程。仿真中对煤油燃烧过程的模拟是通过使用汽油燃料改变辛烷值和火焰传播速率等参数实现的。根据经验煤油的火焰传播速率为汽油的 2/3 左右,适当调整参数使得仿真值能够较好地与试验数据吻合,仿真结果较为可信。

1.4 仿真模型标定及改进

根据发动机台架试验所测的缸压数据,计算出对应的放热率曲线,并以此对模型进行标定。发动机实测缸压的工况点为:转速(n)为 4 500 r/min 和 5 500 r/min 下,分别取 27%、45%、76%

特性与样机一致。之后使用依据实际燃烧室结构所建立的湍流燃烧模型,在模型计算的过程中对个别参数进行调整,最终得到比较真实的发动机仿真模型以及仿真结果,如图 3 所示。空气盒压力、输出功率参数的误差在 3% 以内。但是进气流量、油耗率数据差距较大,经过分析,这是由于样机台架试验中的进气流量传感器为稳态流量传感器,测量发动机动态进气过程时造成进气流量数据误差较大,另外,空燃比数据统一简化为 13 以及测功机联轴节的较大功率损失,造成油耗数据误差偏大^[16]。考虑到本研究侧重定性的抗爆性措施研究以及仿真模型与试验条件存在一定的



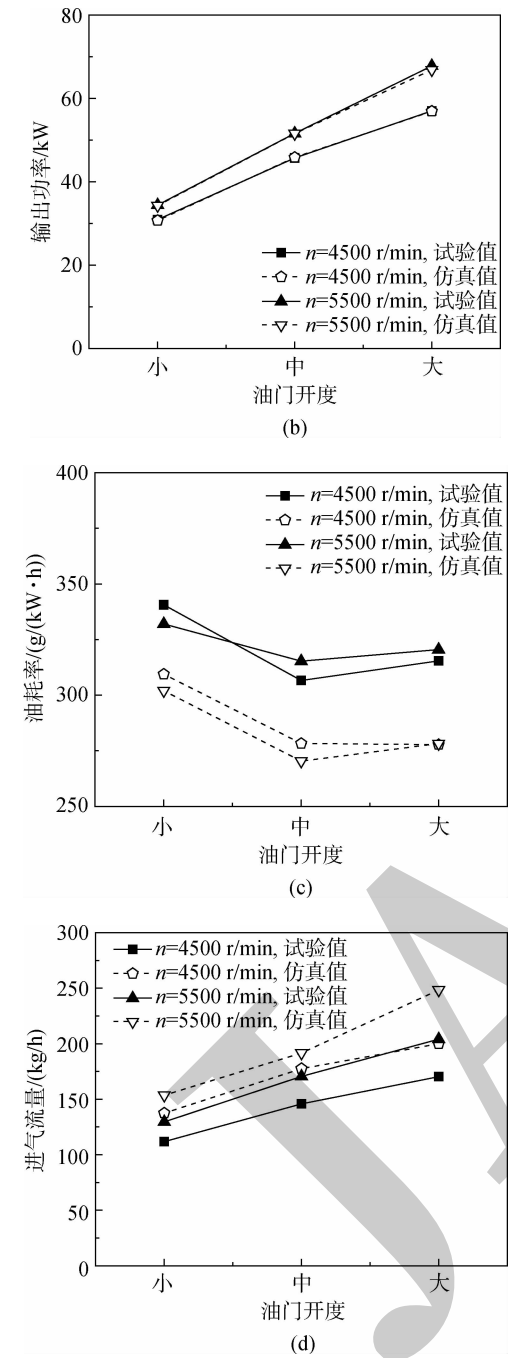


图 3 空气盒压力、输出功率、油耗率以及进气量的仿真和实测结果对比

Fig. 3 Results comparison of simulation and measurement in air box pressure, output power, fuel consumption rate and air intake mass flow rate

偏差,在不影响特性参数变化规律的前提下,仿真值与试验值之间存在一定的数值偏差也是可以接受的。

湍流燃烧模型“EngCylCombSITurb”为可添加爆震预测功能的预测性燃烧模型。此燃烧模型采用双区燃烧模型,需要对燃烧室结构进行测绘,输入燃烧速率以及相关化学反应动力学特性,对

燃烧以及爆震特性进行预测。

根据台架试验数据、手册参数,对仿真模型的额定工况(100%油门开度,5500 r/min 转速)进行核对,以得到更加真实的模型。结果如表 2 所示。其中的“爆震指数”表示发动机工作过程中的爆震强度^[10,12]。此处使用的燃料为 93 号普通汽油。由于缺少样机爆震特性的手册资料,按照经验取样机的起飞工况点为爆震极限工况点。

表 2 发动机额定工况点的结果			
Table 2 Results of engine's rated operating points			
参数	试验值	手册值	仿真值
空燃比	13 左右	13 左右	13
空气盒压力/ 10^5 Pa	1.21	1.23(1.35)	1.23(1.35)
爆震指数	0		0
功率/kW	71	73.5(81.3)	73.3(81.5)
油耗率/(g/(kW·h))	320.5	275(—)	284(277)
排气温度/K	1073		1119(1125)
曲轴转角/(°)	11.9		12.5
峰值压力/MPa	5.9		6.02

注:1. 括号内为增压压力为 1.35×10^5 Pa 条件下的参数;
2. 表中曲轴转角为 50% 放热时的数值。

至此,模型已经较为真实地反应样机的爆震特性,可以以此为基础进行改良研究。

2 低辛烷值燃料爆震预测和优化

在原汽油机模型中更改辛烷值、火焰传播速率等参数模拟 RP-3 航空煤油,由于 RP-3 航空煤油的辛烷值为 48,容易产生爆震,限制了发动机极限功率输出^[17]。通过添加抗爆添加剂、调整点火提前角、压缩比、增压压力、空燃比、缸径等参数,在不对发动机进行较大改动的前提下,尽量提高发动机额定工况点的爆震极限处(爆震指数低于 10 的最大点火提前角处)功率,同时兼顾油耗率、排气温度等指标,保证在使用重油燃料后发动机性能参数较原型机不出现明显恶化。

2.1 应用 EGR 原理优化爆震极限的假设

使用重油燃料,对发动机额定工况点以及起飞工况点进行仿真计算。结果中额定工况点的爆震指数达到 300 左右,起飞工况点的爆震指数更高达 800 左右。说明在燃烧过程中发生了严重的爆震。

EGR(exhaust gas recirculation)即废气再循环,在原型机模型中增加 EGR 模块,对额定工况点进行仿真计算。结果如图 4 所示,不同的点火提前角下,消除爆震所需的 EGR 率是不同的。过高的 EGR 率造成发动机输出功率明显下降,并且大幅提升油耗率。有关 EGR 原理的研究成果表明,EGR 的主要优势在于改善发动机的排放性能,在抑制爆震方面的效果有限,而且对发动机大负荷工况下的经济性和动力性影响明显。因此,根据仿真计算的结果以及以往经验,判断依靠 EGR 功能抑制爆震的作用不明显^[18]。

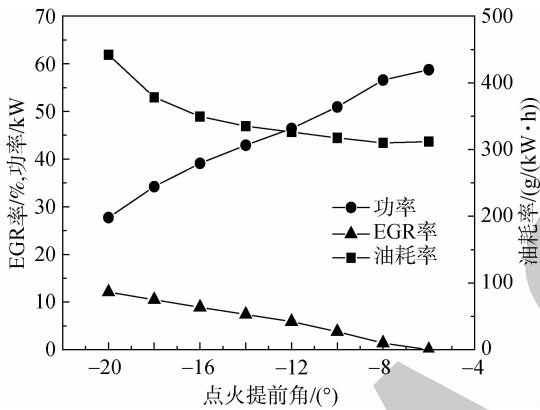


图 4 EGR 功能对于发动机经济型和动力性的影响
Fig. 4 Influence of EGR function on the economic and dynamic characteristics of engine

2.2 采用抗爆添加剂

本次试验中使用了由扬子石化提供的 RP-3 航空煤油和两种添加抗爆添加剂的特种煤油燃料 1# 和 2#。在某试验发动机上对三种燃料进行爆震试验,试验转速均为 2500 r/min,油门开度为 36%。

该工况下 RP-3 航空煤油在点火提前角为 -19° (上止点前 19° 曲轴转角,下同)达到爆震临界点;1# 特种煤油在 -17° 达到临界点;2# 特种煤油在 -30° 达到临界点。可知 2# 特种煤油抑制爆震能力优于 RP-3 航空煤油和 1# 特种煤油。在 GT-Power 中模拟该工况,对比试验结果和仿真结果,反推得 2# 特种航煤油的辛烷值约为 61。

在额定工况下分别使用辛烷值为 48 的 RP-3 航空煤油和辛烷值为 61 的 2# 特种航空煤油燃料的仿真结果如图 5(图中实体符号标记处为未发生爆震工作点,空心符号标记处为爆震工作点,下同)。2# 特种煤油较 RP-3 航空煤油的爆震极限处点火提前角提前 10° 曲轴转角,性能提升明

显,爆震极限处功率、油耗率和排气温度的具体数值见表 3。可知采用合适的抗爆添加剂满足提高抗爆性、实现功率恢复的目的。

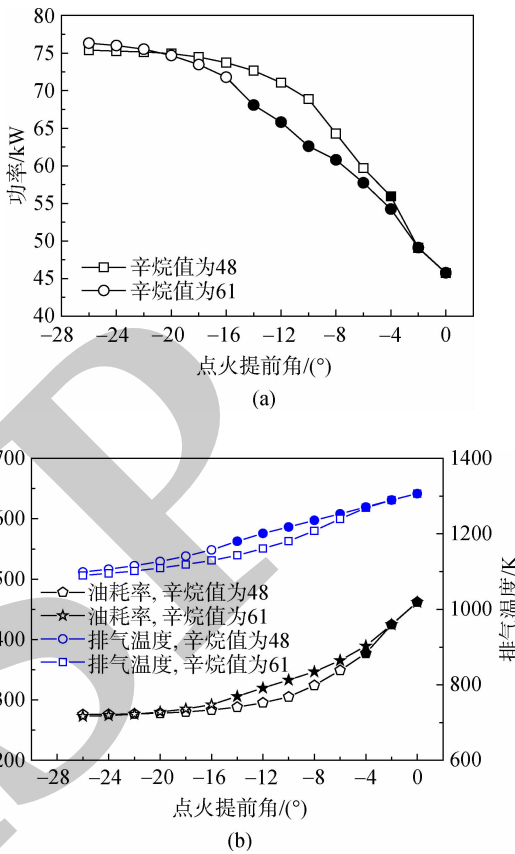


图 5 不同煤油燃料的发动机性能变化曲线
Fig. 5 Engine performance variation curves with different kerosene fuels

表 3 不同燃料爆震极限处性能参数
Table 3 Performance parameters in knock limit point with different fuels

参数	RP-3 航空煤油	2# 特种煤油
点火提前角/(°)	-4	-14
功率/kW	55.9	68
油耗率/(g/(kW·h))	377	306
排气温度/K	1269	1180

2.3 不同参数下的爆震极限优化

爆震的发生通常是因为气缸压缩比过高等因素造成压缩终了缸内气体温度和压力过高,因此为消除爆震,提高恢复功率通过分别改变压缩比、增压压力、空燃比、缸径等不同参数对发动机进行改进,通过调整不同方案的点火提前角,使发动机达到爆震极限,以找到实现重油发动机功率恢复

的有效措施。不同参数的可选范围如表 4 所示。

表 4 参数取值列表
Table 4 List of parameter values

参数	取值范围
增压压力/ 10^5 Pa	1.23,1.35
缸径/mm	79.5,84
空燃比	13,14
压缩比	9 : 1,8 : 1,7 : 1,6 : 1
点火提前角/ $^{\circ}$	-50~ 10

2.3.1 减小压缩比对爆震极限处性能的影响

减小压缩终了时气缸内的压力可以通过增加缸头垫片的方式减小压缩比实现。选择较小的压缩比 8 : 1、7 : 1、6 : 1 与原型机的 9 : 1 进行对比。图 6 为在增压压力 1.23×10^5 Pa, 气缸直径为 79.5 mm, 空燃比为 13, 不同压缩比的条件下, 发动机额定工况性能参数随点火提前角的变化曲

线。图中可以看出, 四个压缩比下得到的功率、油耗率和排气温度曲线随点火提前角的变化趋势是一致的, 随着点火提前角的后移功率下降, 油耗率和排气温度增高, 因此发动机在不发生爆震的情况下点火提前角应尽量提前。图中压缩比为 6 : 1 的工况在测试的点火提前角范围内并没有发生爆震, 压缩比为 7 : 1、8 : 1、9 : 1 的工况下都在一定的点火提前角范围内发生了爆震, 爆震极限处发动机性能参数见表 5。压缩比为 6 : 1 工况的最大点火提前角处发动机性能输出最大, 视为爆震极限处, 但其性能输出较其他压缩比工况处较差, 压缩比为 7 : 1、8 : 1、9 : 1 三种压缩比工况爆震极限处的功率、油耗率和排气温度均相差不大, 但是压缩比为 7 : 1 工况的爆震极限处点火提前角更加靠前, 可以为爆震极限的进一步优化提供更大的潜在空间, 因此在接下来的优化过程中选择压缩比为 7 : 1 作为固定条件。

表 5 不同压缩比下爆震极限处性能参数
Table 5 Performance parameters in knock limit point under different compression ratios

参数	数值			
压缩比	6 : 1	7 : 1	8 : 1	9 : 1
点火提前角/ $^{\circ}$	-50	-32	-20	-14
功率/kW	65.1	68.3	68.5	68.1
油耗率/ (g/(kW · h))	325	308	307	306
排气温度/K	1207	1186	1184	1180

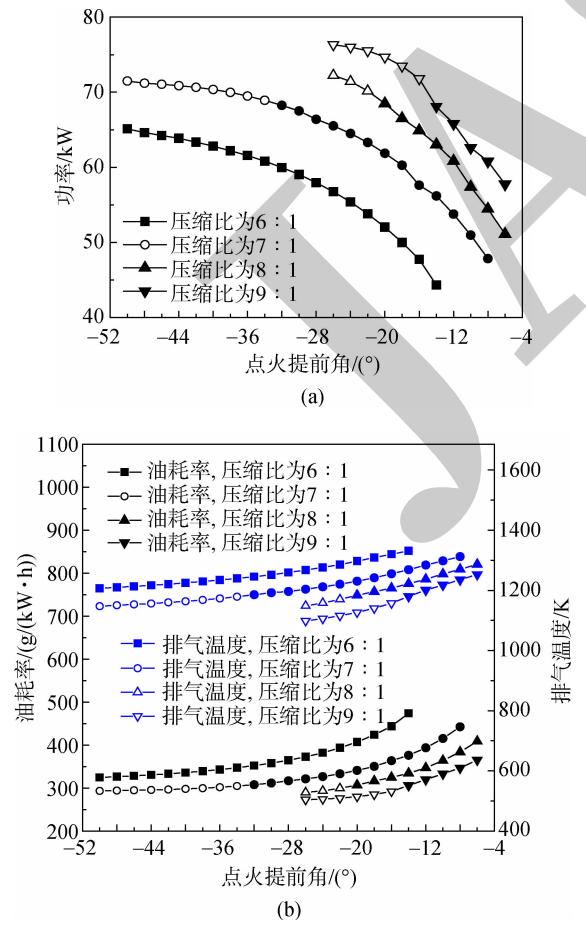


图 6 不同压缩比工况下发动机性能变化曲线
Fig. 6 Engine performance variation curves under different compression ratios

2.3.2 提高增压压力对爆震极限处性能的影响

发动机试验工况的增压压力为 1.23×10^5 Pa, 增压极限约为 1.35×10^5 Pa。在保持发动机缸径为 79.5 mm、压缩比为 7 : 1、空燃比为 13 的前提下, 分别设置增压压力为 1.23×10^5 Pa 和 1.35×10^5 Pa 两种工况, 发动机额定工况性能输出随点火提前角的变化如图 7。增压压力提升后爆震极限处点火提前角为 -24° , 爆震极限功率增大了 4 kW 左右, 增幅超过 6%, 油耗率相差不大, 排气温度有 30 K 左右的小幅提升。提高增压压力虽使得点火提前角后移, 排气温度升高, 但对新燃料发动机的功率恢复作用较大, 因此增压压力 1.35×10^5 Pa 的改造方案更有利于功率恢复, 功率恢复达到了额定功率的 89% 左右。

2.3.3 减小空燃比对爆震极限处性能的影响

保持发动机缸径为 79.5 mm, 压缩比为 7 : 1,

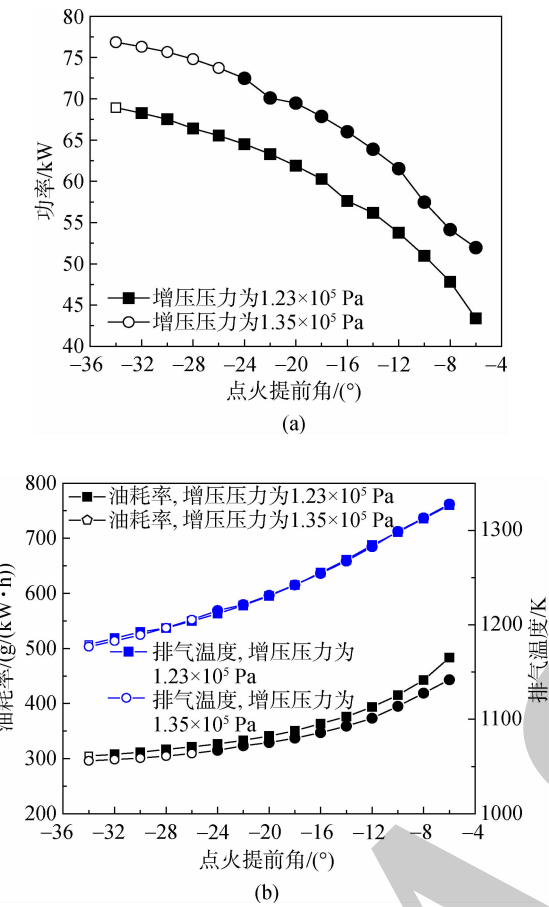


图 7 不同增压压力工况发动机性能变化曲线
Fig. 7 Engine performance variation curves under different boost pressures

增压压力为 1.35×10^5 Pa, 将空燃比从 13 增大到 14, 发动机额定工况的性能输出随点火提前角变化曲线如图 8。发动机爆震极限处点火提前角提前至 -28° , 功率基本不变, 排气温度小幅升高 27 K, 油耗率下降 $23 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, 油耗率下降明显, 考虑燃油经济性, 发动机的空燃比选择 14 较为合理。

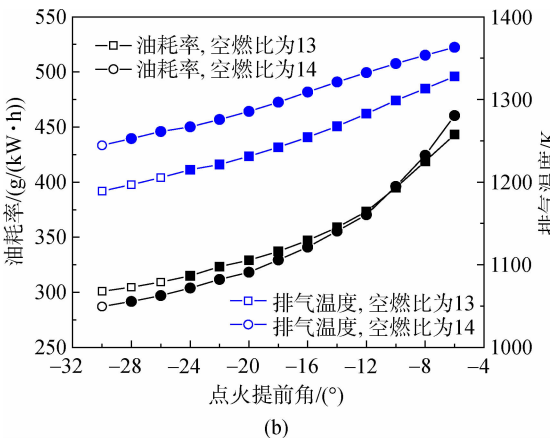
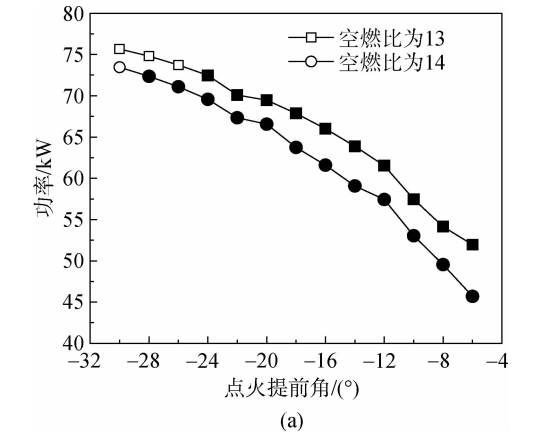


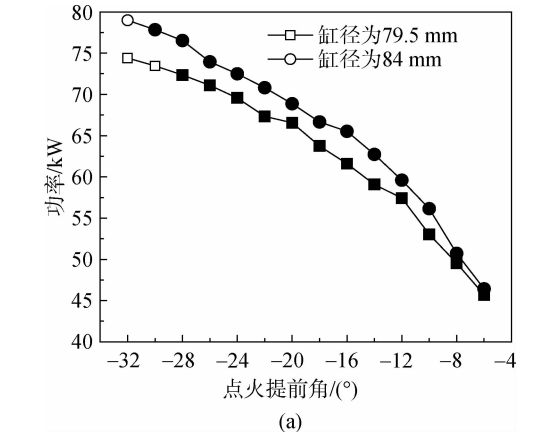
图 8 不同空燃比工况发动机性能变化曲线
Fig. 8 Engine performance variation curves under different air-fuel ratios

2.3.4 扩大缸径对爆震极限处性能的影响

改变发动机缸径对发动机的改动较大, 由于该款发动机有 79.5 mm 和 84 mm 两种缸径可选, 所以扩大气缸直径可以作为一项选择措施。保持发动机压缩比为 7 : 1, 增压压力为 1.35×10^5 Pa, 空燃比为 14, 分别对两种缸径工况进行仿真, 发动机额定工况性能输出随点火提前角变化如图 9。扩大缸径后的发动机爆震极限处的点火提前角提前至 -30° , 发动机功率提高 5.5 kW 左右, 增长明显, 油耗率基本保持不变, 排气温度升高 25 K 左右, 可以判断增大气缸缸径的方案符合提高爆震极限处发动机性能的要求。

2.4 方案选择

通过仿真结果分析 EGR 原理在抑制爆震方面效果非常有限, 且在一定程度上会造成大负荷工况下动力性和经济性的恶化; 采用抗爆添加剂的 2# 特种航空煤油抗爆性明显优于 RP-3 航空煤油; 压缩比减小, 爆震极限处功率、油耗率和排



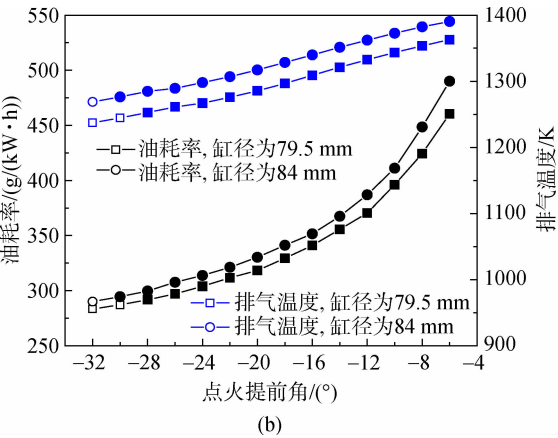


图 9 不同缸径工况发动机性能变化曲线

Fig. 9 Engine performance variation curves with different cylinder diameters

气温度基本不变,但能使点火提前角前移,明显降低爆震倾向;较高的增压压力能明显增加发动机的动力输出,但会推迟点火提前角,增加发动机的爆震倾向;空燃比增大会稀释混合气,爆震倾向降低,排气温度略有升高,功率变化不大,但燃油消耗率明显减少;扩大缸径后发动机的排气温度虽有一定程度提升,但发动机的输出功率明显提升,爆震倾向也会略有下降,考虑到扩大气缸缸径对发动机改动较大,可以将扩大缸径作为备选方案。综合考虑计算结果,采用的具体参数见表 6。

表 6 最终改良方案
Table 6 Final improvement scheme

参数	数值
增压压力/ 10^5 Pa	1.35
缸径/mm	79.5(可选 84)
空燃比	14
压缩比	7 : 1
点火提前角/(°)	-30

优化后重油发动机的爆震极限性能指标以及汽油样机性能指标,如表 7 所示,其中重油优化方案 1 采用 79.5 mm 缸径,重油优化方案 2 采用 84 mm 缸径。可以看到,使用新燃料后,优化方案 1 的功率恢复达到汽油机功率的 89%,优化方案 2 的功率恢复达到 95%;两种方案的油耗率分别提高 5.4%和 6.1%,排气温度分别升高 11.4%和 13.4%。考虑到排气温度的升高可通过使用耐高温材料的排气系统来解决,因此重油机改良基本符合预期要求。

表 7 改良前后的爆震极限性能对比
Table 7 Comparison of knock limit performance before and after improvement

参数	汽油样机	重油方案 1	重油方案 2
功率/kW	81.5	72.4	77.8
油耗率/ (g/(kW·h))	277	292	294
排气温度/K	1125	1253	1276

3 结 论

- 通过上述的仿真分析及对比可以看出:
- 1) 应用 EGR 原理优化爆震极限的效果不明显。
 - 2) 采用添加适当的抗爆添加剂、减小压缩比、提高增压压力、适当减小空燃比、扩气缸缸径的方案,在不发生爆震的前提下,重油发动机有较好的性能恢复表现。
 - 3) 经过优化,重油发动机性能接近原型机水平,功率恢复较好,油耗率和排气温度稍有升高。

参考文献:

[1] KALGHATGI G T. Fuel anti-knock quality: Part I engine studies[J]. SAE Technical Paper 2001-3584, 2001.

[2] CHANG J, VIOLET Y, ALZUBAIL A, et al. Octane-on-demand as an enabler for highly efficient spark ignition engines and greenhouse gas emissions improvement[R]. SAE Technical Paper 2015-01-1264, 2015.

[3] ANDERSON E K, BROWN A C, BARANSKI J, et al. Performance of low-octane fuels in a Rotax 914 engine with advanced knock mitigation strategies[R]. SAE International Paper 2011-5725, 2011.

[4] SHUAI S J, WANG Y, LI X, et al. Impact of octane number on fuel efficiency of modern vehicles[J]. SAE International Journal of Fuels and Lubricants, 2013, 6(3): 702-712.

[5] ATTARD W P, TOULSON E, WATSON H, et al. Abnormal combustion including mega knock in a 60% downsized highly turbocharged PFI engine[R]. SAE Technical Paper 2010-01-1456, 2010.

[6] GERTY M D, HEYWOOD J B. An investigation of faso-line engine knock limited performance and the effects of hydrogen enhancement[R]. SAE Technical Paper 2006-01-0228, 2006.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 刘永长. 内燃机工作过程模拟[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1996.

[11] ZHONG Shaohua, JIN Guodong, XIE Tianfeng. Design and analysis method for internal combustion engine mufflers based on GT-Power software[J]. Automobile Technology, 2003, 7: 7-10.

[12] 李岳林. 汽油机多区燃烧模型的建立及应用研究[D]. 西安:长安大学, 2002.

LI Yuelin. Establishment and application of multi zone combustion model of gasoline engine[D]. Xi'an: Chang'an University, 2002. (in Chinese)

[13] 宋龙甫, 王建昕, 郑国世. B231 发动机性能优化及循环模拟计算[J]. 内燃机工程, 2006, 27(1): 76-80.

SONG Longfu, WANG Jianxin, ZHENG Guoshi. Performance optimization and simulation of B231 engine[J]. Internal Combustion Engine Engineering, 2006, 27(1): 76-80. (in Chinese)

[14] 刘永长. 内燃机原理[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2001.

[15] MORRIS I. Current developments in garrett turbochargers [R]. Melbourne, Australia; Turbochargers and Turbocharging Seminar, 1987.

[16] 任好. 汽车发动机相关传感器动态特性的研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2005.

REN Hao. Research on the dynamic characteristics of vehicle engine sensors[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2005. (in Chinese)

[17] ANDERSON E, BROWN A, BARANSKI J, et al. Performance of low-octane fuels in a Rotax 914 engine with advanced knock mitigation strategies [R]. AIAA-2011-5725, 2011.

[18] 朱涛. EGR 对汽油机排放和性能影响的研究[D]. 天津:天津大学, 2004.

ZHU Tao. Study on the effect of EGR on the emission and performance of gasoline engine[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004. (in Chinese)

(编辑:陈 越)