

高压压缩比甲醇燃料发动机整机性能仿真研究<sup>\*</sup>徐磊<sup>1</sup>, 程前<sup>1</sup>, 刘延<sup>1</sup>, 曾建<sup>2</sup>, 徐进<sup>3</sup>

(1. 中国汽车工程研究院股份有限公司, 重庆 401122; 2. 三峡大学 机械与动力学院, 湖北 宜昌 443002;

3. 重庆交通大学 交通运输学院, 重庆 400074)

**摘要:** 将某型汽油机仿真模型改进为高压压缩比甲醇发动机模型, 分析经济工况下甲醇发动机与汽油机在泵气特性、燃烧放热特性等方面的差异, 探究压缩比、点火提前角和空燃比对甲醇发动机泵气特性、燃烧放热特性、整机性能的影响。结果表明, 甲醇发动机通过进气晚关角调节负荷, 可提高进气压力, 减少泵气损失, 较好的抗爆性使其能匹配更高的几何压缩比以优化发动机性能; 高压压缩比甲醇发动机的燃烧放热速率更快, 输出转矩和有效热效率均优于汽油机; 压缩比、点火提前角、空燃比对甲醇发动机泵气特性、燃烧特性、整机性能的影响较大, 通过优化匹配这些因素, 可进一步优化甲醇发动机的工作性能。

**关键词:** 汽车; 甲醇发动机; 压缩比; 点火提前角; 空燃比

**中图分类号:** U464.9

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2020)06-0001-07

为应对石油资源短缺、环境污染等问题, 车用汽油替代燃料成为研究热点。易点燃、不易压燃、易制取、成本低、抗爆性好、燃烧完全的甲醇发动机具有好的发展前景。Pearson R. J.、Yuen P. K. P. 等对点燃式甲醇发动机进行研究, 发现热效率、整机性能和性能改善程度与甲醇燃料比例相关。Nakata K. 将汽油机改进为压缩比为 13 的纯甲醇发动机, 研究发现在 2 800 r/min 全负荷工况下甲醇发动机的热效率和转矩有所提高。Vancoillie J. 等将某汽油机改进为甲醇发动机, 发现甲醇发动机的动力输出功率和热效率均得到提升, 而 CO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 排放量降低。Ji C. W. 等研究发现随着氢含量的增多, 点燃式富氢甲烷发动机的排气损失减少, 火焰传播速度加快, 有效热效率提高。当前研究已取得一定成果, 但为提高甲醇发动机的热效率, 对高压压缩比技术和发动机工作性能协同优化等需进一步完善。该文基于 GT-Power 发动机仿真模型, 分析经济工况[(转速 2 000 r/min、60% 负荷、理论空燃比、点火提前角为 -16 °CA ATDC(进气上止点后)]下甲醇发动机性能与汽油机的差别, 探究压缩比、点火提前角和空燃比对甲醇发动机性能的影响, 通过优化匹配这些参数提升甲醇发动机的工作性能。

## 1 研究方案

建模分析路线与方法见图 1。

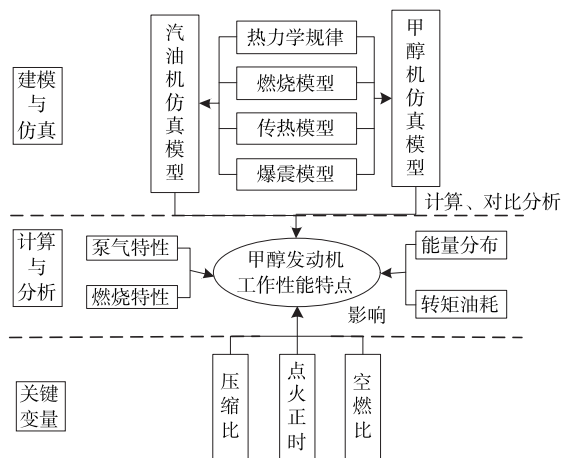


图 1 建模路线和方法

## 2 性能参数对甲醇发动机性能的影响

参考文献[7-8], 以仿真计算、理论分析为主, 依托 GT-Power 仿真软件, 基于样机参数建立汽油机仿真模型, 通过改变燃料、压缩比和负荷控制方式将原模型改进为高压压缩比甲醇发动机模型。在经济工况(转速 2 000 r/min, 60% 负荷)下对比分析甲醇发动机和汽油机的运行特性、进气特性、排气特性、缸内每循环进气量及泵气损失, 研究甲醇发动机和汽油机缸内环境、燃烧过程及放热规律的区别。结果显示:

(1) 在中小负荷时, 甲醇发动机进气压力、进气

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家重点研发计划课题(2018YFB1600500)

温度均大于汽油机。但在进气开始后,甲醇发动机的进气温度低于汽油机。

(2) 甲醇发动机的泵气损失比汽油机小,且在整个工作循环中甲醇发动机排气歧管中废气温度都低于汽油机排气温度。

(3) 甲醇发动机在进气门开启后新鲜混合气进入缸内的速度较快,在进气下止点时进入缸内的最大进气量比汽油机多 138.9 mg。在进气门关闭后,甲醇发动机进入气缸的混合气质量仅比汽油机多 18.1 mg。

(4) 在燃烧过程中,甲醇发动机的缸压水平高于汽油机,缸温低于汽油机,缸内热负荷降低。

(5) 在经济工况和外特性工况下,甲醇发动机的整机有效燃油消耗率高于汽油机,散热能量比例比汽油机略高 1.7%。在经济工况下,甲醇发动机的排气能量比例比汽油机下降 11.6%,指示热效率提高 11.5%,输出转矩提高 21.8%。在外特性工况下,甲醇发动机的转矩和指示热效率也都优于汽油机。

### 3 压缩比对甲醇发动机性能的影响

探究压缩比为 9~13 时压缩比对甲醇发动机泵气特性、燃烧特性、整机性能的影响。

#### 3.1 压缩比对泵气特性的影响

压缩比对发动机进气歧管、排气歧管、气体压力的影响不大,不同压缩比下每循环缸内泵气压力损失都很少且变化不大。但不同压缩比下进气歧管温度、排气歧管温度及每循环缸内进气量有所差别,进而影响发动机的燃烧放热、动力输出、油耗、热效率(见图 2)。

由图 2 可知:1) 进、排气温度都随着压缩比的增大而降低,但压缩比对排气温度的影响大于对进气温度的影响。压缩比每提高 1,进气温度仅下降 0.1%~0.2%,而排气温度下降约 2.5%。进气温度的略微下降对每循环进气过程的影响不大,而排气温度的大幅下降有利于降低催化器等尾气后处理装置的热负荷,提高其工作稳定性。2) 进气正时缸温随着压缩比的增大逐渐降低,压缩比每增大 1,进气正时缸温降低 2.2%~2.7%,且缸内最终进气量减少程度低于 1%。

#### 3.2 压缩比对燃烧特性的影响

通过改变活塞顶隙改变压缩比后,燃烧室容积减小、面容比增大,燃烧室内混合气的气流运动和火焰传播过程有所改变。燃烧过程的变化同时使不同压缩比下缸内环境有所不同,整机的动力性、经济性

及能量分布特点也有所变化(见图 3、图 4)。

由图 3 可知:压缩比越大,点火后混合气更快形成火核,火焰传播速度较快,瞬时放热率越大;压缩比较大时,不仅放热率峰值较大,且峰值时刻更接近

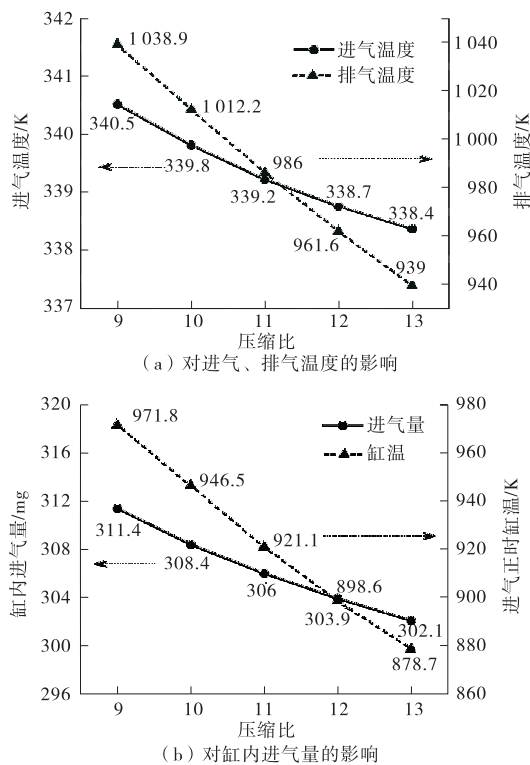


图 2 压缩比对泵气特性的影响

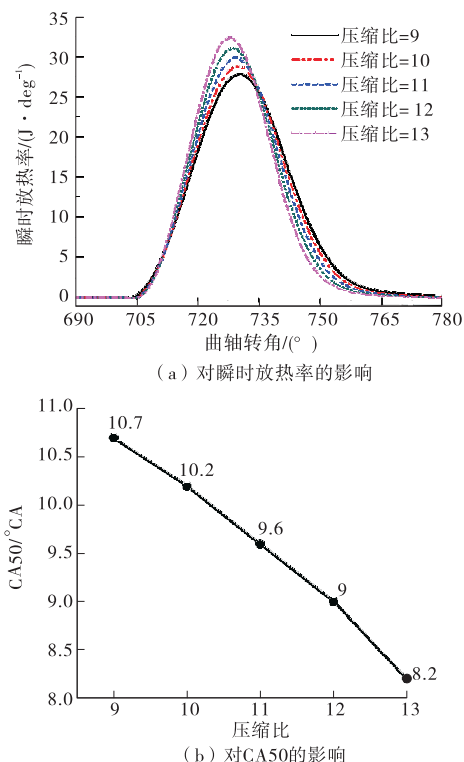


图 3 压缩比对瞬时放热率和 CA50 的影响

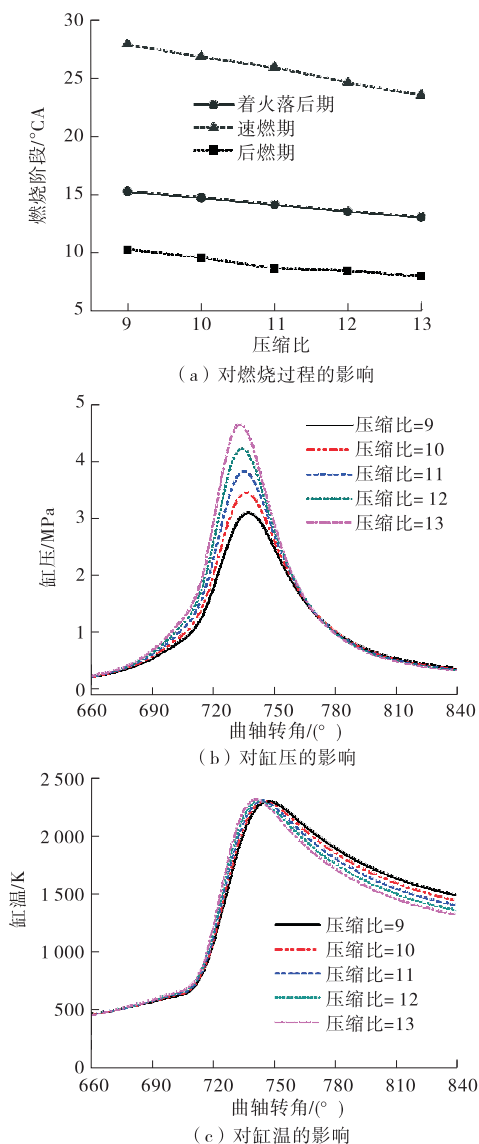


图4 压缩比对燃烧特性的影响

上止点,燃烧等容度越大,与CA50随压缩比的变化趋势一致;压缩比较大时,整个放热率曲线重心靠近上止点,放热率达到峰值后更快下降,燃烧后期放热速率低于压缩比较小时燃烧后期放热速率。

由图4可知:1)随着压缩比的增大,着火落后期、速燃期和后期燃期均缩短,即燃烧持续期缩短。压缩比每增长1,着火落后期缩短3.3%~4.1%,速燃期缩短3.4%~5%,后期燃期缩短2.3%~9.5%。着火落后期的缩短使燃烧发生更早,速燃期的缩短使放热率曲线重心离压缩上止点更近,后期燃期的缩短有利于降低排气温度。2)随着压缩比的增大,燃烧等容度增大、燃烧放热速率增快,压缩比较大时缸压、缸温水平较高且峰值时刻有所提前。与瞬时放热速率的变化趋势相似,压缩比较大时,缸压、缸温

达到峰值后较快下降到较低水平。这与不同压缩比时燃烧过程相关,较短的后燃期使压缩比较大时燃烧结束后缸温较低,排气温度较低。

### 3.3 压缩比对整机性能的影响

进气特性和燃烧特性的不同使不同压缩比下甲醇发动机表现出不同的动力水平、油耗水平和能量分布特点。输出转矩、有效燃油消耗率、能量分布随压缩比的变化见图5。

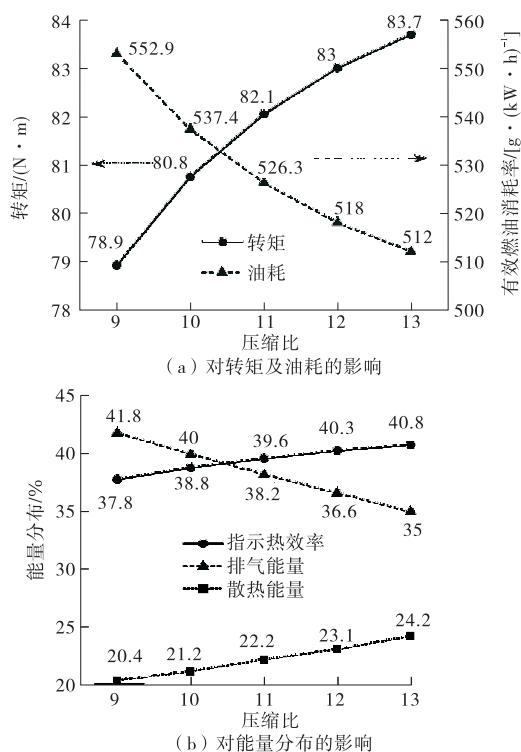


图5 压缩比对整机性能的影响

由图5可知:1)压缩比提高,甲醇发动机的有效转矩增大,有效燃油消耗率降低。压缩比由9增长至13,每增长1,有效转矩分别提高2.4%、1.6%、1.1%、0.8%,有效燃油消耗率分别降低2.8%、2.1%、1.6%、1.2%。压缩比增大,较快的燃烧放热速度、较大的燃烧等容度既改善了甲醇发动机的动力性,又改善了整机燃油经济性。但随着压缩比的增大,转矩和油耗的改善程度逐渐下降,加之压缩比过大时较小的活塞顶隙容易造成活塞与气门发生运动干涉,不可无限地提高几何压缩比。因此,改进甲醇发动机几何压缩比时选择13而没有进一步提高压缩比。2)随着压缩比的增大,散热能量比例逐渐增多,这是因为压缩比较大时燃烧室面容较大,且燃烧过程中缸温水平较高,增强了燃烧过程中缸内混合气与燃烧室壁面的对流换热强度,散热损失能

量增多。燃烧等容度的增大使指示热效率随压缩比的增大而增大,压缩比每增长1,指示热效率增长1.2%~2.6%,与增大压缩比后转矩和油耗的改善程度一样。但随着压缩比的进一步提高,指示热效率改善程度逐渐下降。压缩比较大时指示热效率和散热能量比例的增大使相对较少的能量被排气带走,故排气能量比例随压缩比增大而减小。

#### 4 点火提前角对甲醇发动机性能的影响

点火提前角过大时,在远离压缩上止点时开始燃烧,阻碍活塞的上行运动,造成较多的压缩负功;点火提前角过小时,较多的热量在离上止点较远处才释放,造成燃烧等容度下降。车辆实际运行过程中,点火提前角需根据实际运行工况进行修正。下面在经济工况下探究不同点火提前角(-18、-16、-14、-12、-10 °CA ATDC)对甲醇发动机泵气特性、燃烧特性、整机性能的影响。

##### 4.1 点火提前角对泵气特性的影响

根据5个点火提前角下甲醇发动机的仿真结果,点火提前角对进气歧管、排气歧管压力及缸内泵气压损的影响非常小,但对进排气歧管平均温度、每循环缸内进气量有所影响。点火提前角对泵气特性的影响见图6。

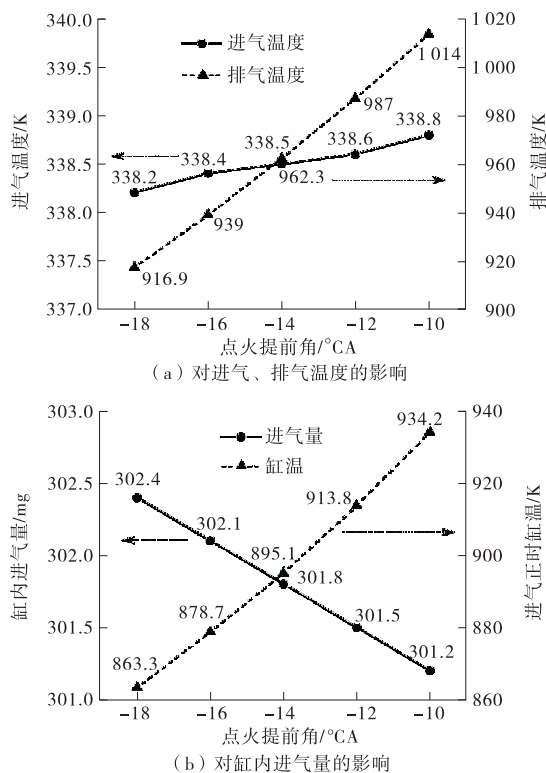


图6 点火提前角对泵气特性的影响

由图6可知:1)进、排气温度均随点火提前角的减小而升高,但点火提前角对排气温度的影响更大。点火提前角每减小2 °CA,进气温度提高程度均小于0.1%,而点火提前角从-18 °CA每减小2 °CA,排气歧管温度分别升高2.4%、2.5%、2.6%和2.7%。排气歧管温度显著升高与不同点火提前角下燃烧过程和缸内环境变化有关,排气温度的升高将影响排放物后处理装置的工作性能,若排气温度过高还需加浓混合气。2)点火提前角从-18 °CA每减小2 °CA,进气门开启时缸温升高1.8%~2.2%。由于点火提前角较小时进气温度和进气门正时缸内温度均较高,新鲜充量的密度减小,缸内每循环进气量较少。

##### 4.2 点火提前角对燃烧特性的影响

点火提前角 $\theta_{ig}$ 大小使燃烧始点、火焰传播速度有所不同。点火提前角对燃烧特性的影响见图7。

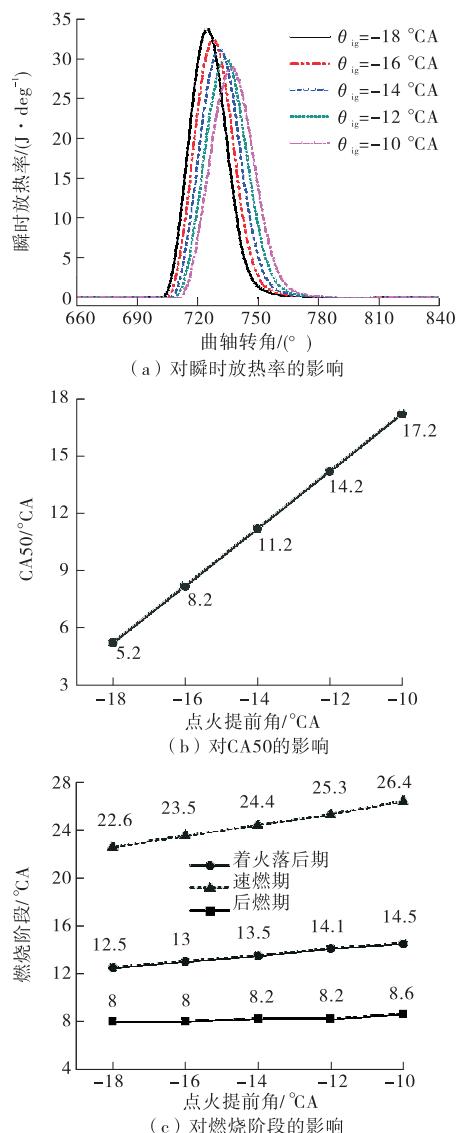


图7 点火提前角对燃烧特性的影响



由图7可知:1) 点火提前角越小,火核形成越晚,放热速度越慢,瞬时放热率峰值越小,峰值时刻越远离压缩上止点;点火提前角较大时,放热率曲线重心向上止点方向移动,在放热率达到峰值后下降速度更快,燃烧终点也更早。2) 不同点火提前角时瞬时放热率曲线的峰值时刻关系与不同点火提前角时CA50关系一致。3) 随点火提前角减小,着火落后期、速燃期均有所延长,后燃期虽然在不同点火提前角下存在相同的情况,但总体上仍然呈现随点火提前角减小而延长的趋势,故燃烧持续期随点火提前角减小而逐渐延长。点火提前角由 $-18^{\circ}\text{CA}$ 减小至 $-10^{\circ}\text{CA}$ ,着火落后期、速燃期、后燃期分别延长16%、16.8%、7.5%。

不同点火提前角工况下,缸内混合气不同燃烧过程决定缸内环境。点火提前角对缸压、缸温的影响见图8。由图8可知:随着点火提前角的减小,缸压峰值、缸温峰值逐渐减小,且峰值时刻离压缩上止点较远。由于点火提前角较小时燃烧放热速度较慢,后燃期较长,燃烧结束后,点火较晚时的缸压、缸温反而较高,排气阶段进入排气门的废气温度较高。

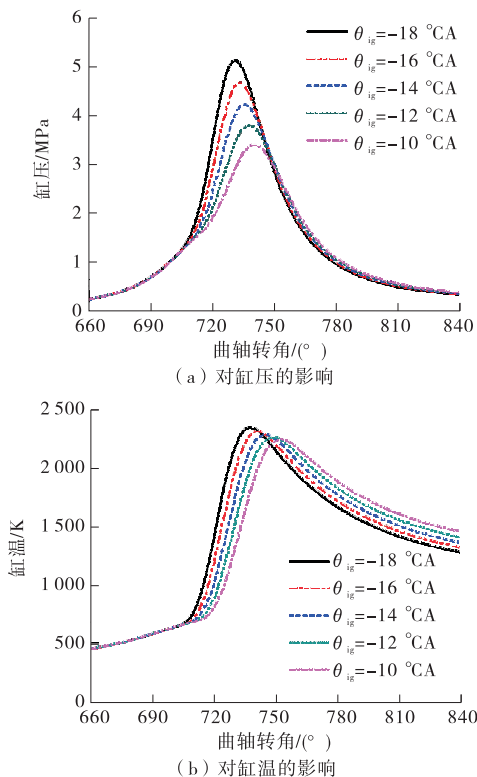


图8 点火提前角对缸压、缸温的影响

#### 4.3 点火提前角对整机性能的影响

虽然点火提前角较大时燃烧放热速度较快、缸压峰值较大,峰值时刻也更靠近压缩上止点,但并不

是点火提前角越大,发动机的动力性和经济性越好。点火提前角对整机性能的影响见图9。

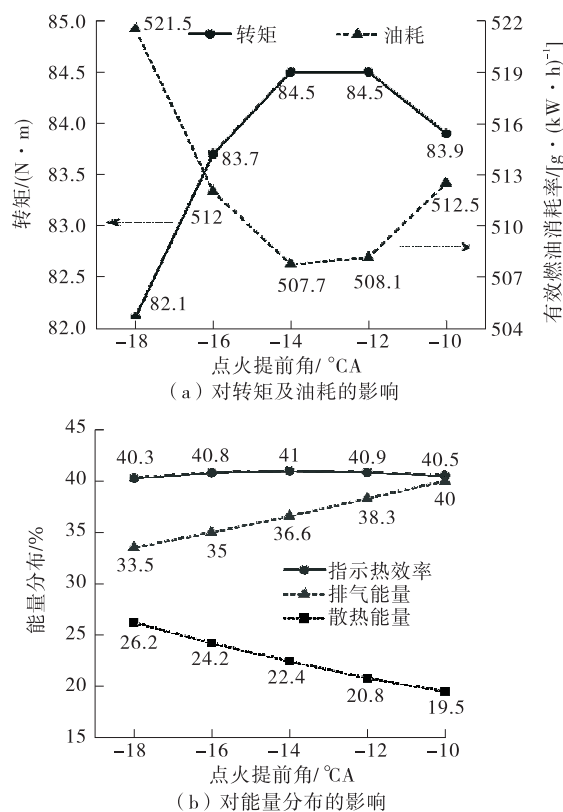


图9 点火提前角对整机性能的影响

由图9可知:1) 随着点火提前角的减小,发动机转矩先有所增长,在点火提前角为 $-14^{\circ}\text{CA}$ 和 $-12^{\circ}\text{CA}$ 时输出转矩达到最大值 $84.5\text{ N}\cdot\text{m}$ ;点火提前角进一步减小时,发动机转矩有所下降。有效燃料消耗率的变化趋势与转矩相反,随着点火提前角的减小,有效燃料消耗率先降低后增长,点火提前角为 $-14^{\circ}\text{CA}$ 时达到最低值 $507.7\text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。点火提前角为 $-14^{\circ}\text{CA}$ 时动力性、经济性最佳,这与不同点火提前角时缸内混合气燃烧放热后的能量分布特点有关。2) 随点火提前角减小,燃烧等容度减小,后燃期延长,排气温度升高,排气能量比例增大;点火提前角较大时,燃烧过程中缸温水平较高,缸内混合气和燃烧室壁面对流换热强度加强,散热能量比例较大。而散热能量比例和排气能量比例随点火提前角相反的变化趋势使指示热效率随点火提前角的减小先降低后增高,在点火提前角为 $-14^{\circ}\text{CA}$ 时指示热效率达到41%。

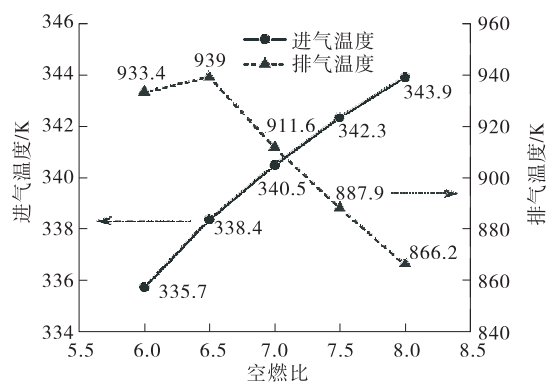
#### 5 空燃比对甲醇发动机性能的影响

针对不同行驶工况,需要不同浓度的燃油一空

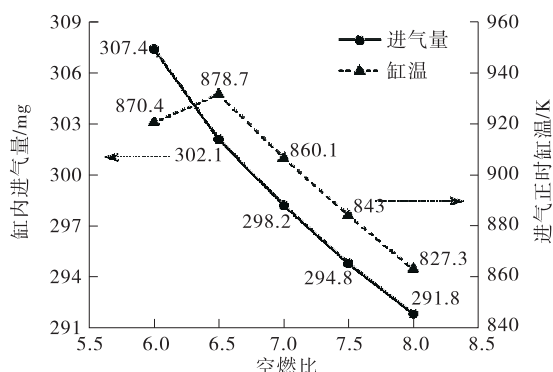
气混合气,如汽油机在起动工况、加速工况或高转速、高速负荷工况,需要较浓的功率混合气以满足动力输出;在中低转速、中低负荷工况,则可选择略稀的经济混合气以降低油耗。甲醇燃料的物化性质同样使甲醇发动机在各运行工况时需采用合适的空燃比以优化整机性能。下面研究不同空燃比(6~8.5,以0.5为间隔)对甲醇发动机泵气特性、燃烧特性、整机性能的影响。

### 5.1 空燃比对泵气特性的影响

根据不同空燃比下甲醇发动机的仿真计算结果,混合气浓度对进气歧管和排气歧管压力及因缸内进排气压差造成的压力损失影响都较小。另一方面,燃料喷入进气歧管会降低气体温度,而混合气浓度不同时进气歧管所喷燃料质量不同,故空燃比对进气歧管温度有所影响。不同浓度混合气燃烧放热规律的差别会使发动机缸内废气温度不同,排气歧管温度不同(见图10)。



(a) 对进气、排气温度的影响



(b) 对缸内进气量的影响

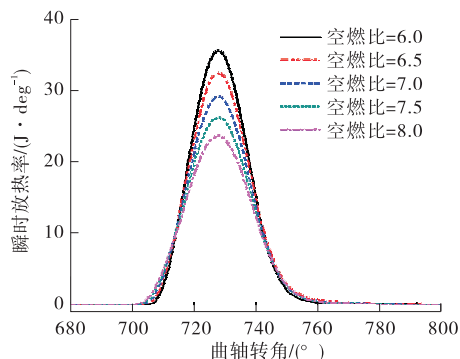
图10 空燃比对泵气特性的影响

由图10可知:1)随着空燃比的增大,进气温度逐渐升高,空燃比由6增大至8时,进气温度提高2.4%。随着空燃比的增大,排气歧管温度先增长后降低,空燃比为6.5时排气温度最高;空燃比大于6.5时,每增长0.5,排气歧管温度分别降低2.9%、

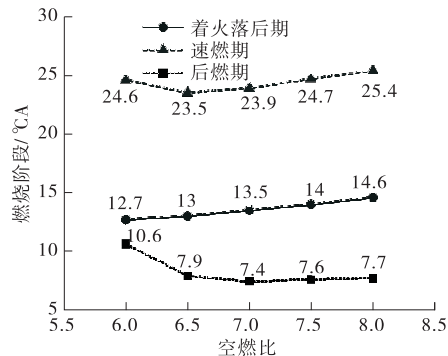
2.6%、2.4%。2)随着空燃比的增大,进气门开启时刻缸温先增长后降低。每循环缸内进气量随着空燃比的增大逐渐下降,空燃比由6增长至8,进气量降低5.1%。说明进气正时缸温对进入缸内新鲜充量的影响不及不同浓度混合气时燃油对进气歧管混合气温度的影响。

### 5.2 空燃比对燃烧特性的影响

不同浓度混合气进入缸内后的气流运动、火核发展、火焰传播情况见图11。由图11可知:1)空燃比越小,混合气越浓,为防止混合气较早燃烧增大压缩负功,点火提前角应适当减小。空燃比较小时,点火时刻较晚,燃烧放热率峰值时刻离压缩止点较远,与表1中CA50与空燃比的关系一致。空燃比由6提高到8,CA50提前7.1%。但较浓的混合气意味着较多的燃料,故空燃比较小时放热率峰值仍然较高。2)随着空燃比的增大,混合气越稀,点火之后火核形成速度较慢,着火落后期越长,空燃比为8时的着火落后期比空燃比为6时延长15%。速燃期在空燃比为6.5时最短,相比理论空燃比,混合气较浓时燃烧过程中氧气不足,部分浓混合气燃烧不完全,反而减缓了燃烧放热速度;而混合气浓度较稀时,由于燃料较少,燃烧放热速度较慢,随着空燃比的增大,速燃期呈现先降低后升高的趋势,空燃比为



(a) 对瞬时放热率的影响



(b) 对燃烧阶段的影响

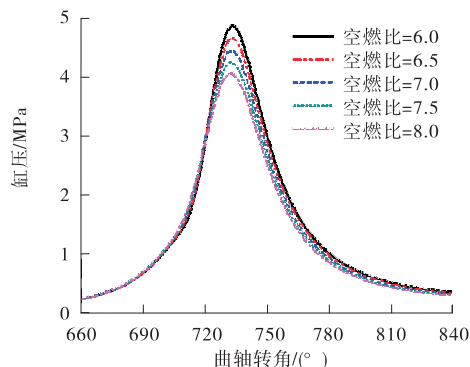
图11 空燃比对燃烧特性的影响

7 时后燃期最短;但过稀的混合气由于甲醇燃料较少,燃烧放热速度明显下降,空燃比大于 7 时后燃期又有所延长。

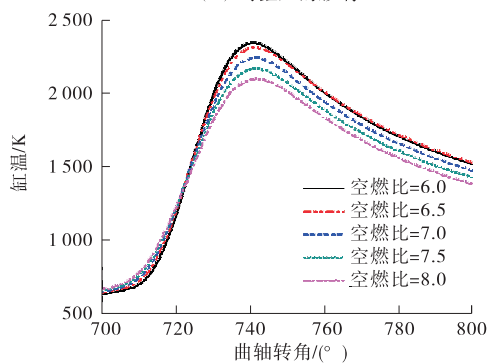
表 1 甲醇发动机 CA50 与空燃比的关系

空燃比	CA50/°CA	空燃比	CA50/°CA
6.0	8.5	7.5	7.9
6.5	8.2	8.0	7.9
7.0	8.0		

图 12 为不同空燃比时缸压和缸温曲线。由图 12 可知:空燃比较大时,由于混合气较稀,缸压、缸温峰值都较低,峰值时刻出现较早;整个燃烧过程中,缸压和缸温水平在混合气较稀时均处于较低水平。可见,甲醇发动机稀燃也可实现低温燃烧,既降低缸内热负荷,又降低排气温度。



(a) 对缸压的影响



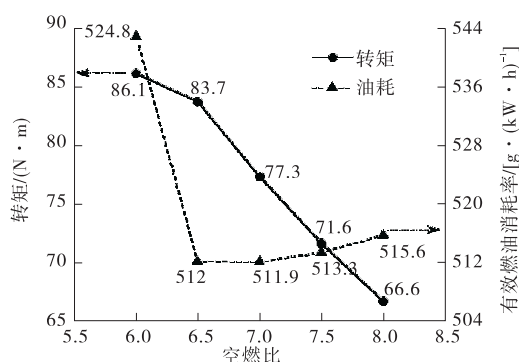
(b) 对缸温的影响

图 12 空燃比对缸压和缸温的影响

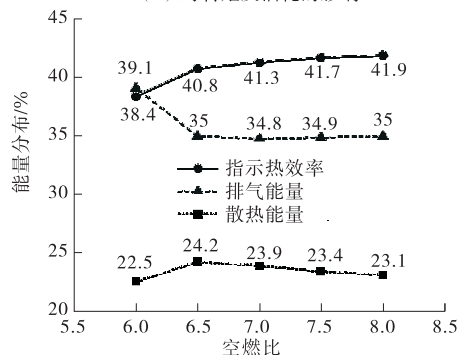
### 5.3 空燃比对整机性能的影响

针对不同运行工况,需根据实际需求匹配不同混合气浓度。空燃比对整机性能的影响见图 13。

由图 13 可知:混合气变浓后,转矩有所增长,有效燃油消耗率显著增大。空燃比由 6.5 减小至 6 时,转矩提高 2.9%,有效燃油消耗率增大 6%。相对于理论混合气,混合气略稀(空燃比为 7)时有效燃油消耗率变化不大,但混合气进一步变稀时,不仅动力性越差,燃油消耗率有所增长。



(a) 对转矩及油耗的影响



(b) 对能量分布的影响

图 13 空燃比对整机性能的影响

空燃比,混合气较浓时,因燃料燃烧不完全,未完全燃烧的燃料随废气排出,排气能量比例较高,相对于空燃比 6.5,空燃比为 6 时排气能量提高 11.8%。此外,混合气较浓时,燃料燃烧不完全,放热量减小,散热能量比例较小。

## 6 结论

(1) 甲醇发动机通过进气晚关角调节负荷,可提高进气压力、减少泵气损失;较好的抗爆性能匹配更高的几何压缩比以优化性能。

(2) 高压比甲醇发动机燃烧放热速率更快,输出转矩和有效热效率均优于汽油机。

(3) 压缩比、点火提前角、空燃比对甲醇发动机泵气特性、燃烧特性和整机性能的影响较大,通过优化匹配这些因素,可进一步优化甲醇发动机的工作性能。

## 参考文献:

- [1] PEARSON R J, TURNER J W G. GEM ternary blends: Testing iso-stoichiometric mixtures of gasoline, ethanol and methanol in a production flex-fuel vehicle fitted with a physical alcohol sensor[R]. SAE Paper 2012-01-1279, 2012.

(下转第 23 页)

## 4 结语

针对区域支线网络,设计了在交叉口上无冲突交通流组织的双层规划模型及采用遗传算法对模型进行求解的算法。通过求解模型,得到区域支线网络上各交叉口上禁直或禁左决策方案,并实现总的车流运行时间最小化的目标,算例验证结果表明该模型与算法有效。

## 参考文献:

- [1] 陆化普. 交通规划理论与方法[M]. 北京:清华大学出版社,1998.
- [2] 晏克非. 城市交通需求管理研究[M]. 上海:同济大学出版社,2000.
- [3] 王伟,过秀成. 交通工程学[M]. 南京:东南大学出版社,2000.
- [4] 黄海军. 城市交通网络平衡分析:理论与实践[M]. 北京:人民交通出版社,1994.
- [5] 史峰,王英姿,陈群. 城市交通微循环网络设计优化模型[J]. 同济大学学报(自然科学版),2011,39(12):1795—1799.
- [6] MENG Q, YANG H. Benefit distribution and equity in road network design[J]. Transportation Research Part B(Methodological), 2002, 36(1):19—35.
- [7] YANG H. Heuristic algorithms for the bilevel origin-

destination matrix estimation problem[J]. Transportation Research Part B(Methodological), 1995, 29(4): 231—242.

- [8] YANG H, MENG Q. A note on highway pricing and capacity choice in a road network under a build-operate-transfer scheme[J]. Transportation Research Part A(Policy and Practice), 2002, 36(7):659—663.
- [9] YANG H, ZHANG X. The multi-class network toll design problem with social and spatial equity constraints[J]. Journal of Transportation Engineering, 2002, 128: 420—428.
- [10] YANG H, HUANG H J. The multi-class, multi-criteria traffic network equilibrium and systems optimum problem[J]. Transportation Research Part B(Methodological), 2004, 38(1):1—15.
- [11] 卢凯明,郭斌,蔡晓禹,等. 基于多源轨迹数据的信号交叉口运行评价研究[J]. 公路与汽运, 2019(3):24—32.
- [12] 王小平,曹立明. 遗传算法:理论、应用与软件实现[M]. 西安:西安交通大学出版社,2002.
- [13] 米凯利维茨 Z. 演化程序:遗传算法和数据编码的结合[M]. 北京:科学出版社,2000.
- [14] 晏克非,陈群,文雅. 基于遗传算法的停车诱导(PGIS)信息显示设施定位优化研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(7):104—108.

收稿日期:2020—04—20

\*\*\*\*\*

(上接第 7 页)

- [2] YUEN P K P, VILLALBA W, BECKETT J. Automotive materials engineering challenges and solutions for the use of ethanol and methanol blended fuels[R]. SAE Paper 2010-01-0729, 2010.
- [3] NAKATA K, UTSUMI S, OTA A, et al. The effect of ethanol fuel on a spark ignition engine[R]. SAE Paper 2006-01-3380, 2006.
- [4] VANCOILLIE J, DEMUYNCK J, SILEGJEM L, et al. Comparison of the renewable transportation fuels, hydrogen and methanol formed from hydrogen, with gasoline-engine efficiency study[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 37(99):14—24.
- [5] JI C W, YANG J X, LIU X L, et al. A quasi-dimensional model for combustion performance prediction of an SI hydrogen-enriched methanol engine[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(39):17676—17686.

- [6] 康见见,刘波,张超,等. 基于不同标准工况的甲醇发动机排放特性测试研究[J]. 客车技术与研究, 2019(1): 49—51.
- [7] 程前,刘延,曾建,等. 车用甲醇燃料发动机整机性能研究[EB/OL]. [2020—07—21]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1205.T.20200721.1403.002.html>.
- [8] 曾建. 高压比甲醇燃料发动机整机性能仿真研究[D]. 宜昌:三峡大学,2020.
- [9] 陈昊,李亚鹏,祁东辉,等. ZH1105W 柴油机燃用生物柴油—柴油—甲醇的性能研究[J]. 公路与汽运, 2012(5):22—25.
- [10] 文醉,吴迪,梁聪,等. 燃料电池发动机性能测试若干问题探讨[J]. 客车技术与研究, 2017(2):53—55.
- [11] 李翔宇,王建军,解方喜,等. 利用分层 EGR 提高甲醇发动机燃烧性能的研究[J]. 拖拉机与农用运输车, 2015, 42(4):46—50.

收稿日期:2020—07—07