

直线发动机起动及怠速燃烧特性仿真与优化

尹兆雷¹, 王哲¹, 邓俊², 章桐¹

(1. 同济大学 新能源汽车工程中心, 上海 201804; 2. 同济大学 汽车学院, 上海 201804)

摘要: 通过建立 GT-Power 发动机仿真模型研究直线发动机的起动及怠速过程的燃烧特性, 利用发动机台架实验获取的缸压数据和 GT-Power 仿真结果的对比, 验证了仿真模型的准确性, 分析不同点火时刻及过量空气系数对直线发动机起动定转速下燃烧特性的影响, 并对怠速控制参数进行寻优研究。结果表明: 在相同过量空气系数下, 推迟点火时刻从 -50° (上止点之前, 下同) 到 20° , 直线发动机后燃现象逐渐增多, 并在点火时刻为 -40° 时, 缸压峰值、瞬时放热率峰值最大以及累积放热总量均达到最大值; 在相同的点火时刻下, 减小过量空气系数从 1.62 到 0.62, 直线发动机缸内压力峰值先增后减, 在过量空气系数为 0.83 时, 直线发动机缸压峰值、瞬时放热率峰值最大, 累积放热总量较多。

关键词: 直线发动机; 仿真; GT-Power; 燃烧特性

中图分类号: TK441

文献标识码: A

Simulation and Optimization on Combustion Characteristics of Linear-Engine System in Starting and Idle Process

YIN Zhaolei¹, WANG Zhe¹, DENG Jun², ZHANG Tong¹

(1. Clean Energy Automotive Engineering Center, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. College of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The primary goal of this research is to build an engine simulation model through GT-Power to study the combustion characteristics of linear-engine system in starting and idle process. The cylinder pressure data collected from engine experiment were used to verify the simulation model. Based on this simulation model, the influence of the excess air coefficient and ignition advance angle on combustion characteristics of the linear-engine system in constant revolution was studied and the control parameter in idle process was optimized. The results show that the ignition time being advanced from -50° (before the top dead center) to 20° under a constant excess air coefficient, the cylinder

pressure, the instantaneous heat release rate and the total heat release all reach their largest peak value when the ignition advance angle is -40° . Reducing the excess air ratio from 1.62 to 0.62 under a constant ignition advance angle, the cylinder pressure and the instantaneous heat release rate all reach their largest peak value and the total heat release is large when the excess air ratio is 0.83.

Key words: linear-engine; simulation; GT-Power; combustion characteristics

在日益严峻的能源危机与环境问题的双重压力下, 汽车工业对传统的动力系统提出了更加严格的节能环保要求。混合动力汽车 (hybrid electric vehicle, HEV) 一方面可以充分利用传统汽车的技术成果和工业基础, 另一方面可以有效减少排放、降低油耗, 是传统发动机汽车向零排放电动汽车过渡的切实可行方案。直线发动机-发电机系统, 作为混合动力的解决方案之一^[1], 由于其具有效率高、质量轻、有害气体排放低和可使用多种燃料等特点^[2], 受到了国内外研究机构越来越多的关注^[3-5]。自 20 世纪 80 年代以来, 欧、美等科研机构纷纷在该领域投入大量的研究工作。美国 Sandia 国家实验室开发的与直线发电机有机结合的样机, 采用均质充量压燃 (HCCI) 的燃烧方式, 实现了高效、轻量、有害气体排放低, 并可适用于多种燃料^[6]; 美国西弗吉尼亚大学试制了可用于混合动力汽车的自由活塞发动机-发电机系统^[7]; 瑞典皇家理工学院在自由活塞发动机/发电机功率波动的影响因素方面做了研究。通过模型的仿真, 发现电磁力是影响功率波动的最主要因素。在国内, 上海交通大学利用 Matlab/Simulink、Chemkin、电磁场有限元法对 HCCI 自由活塞式内燃发电机建立了仿真模型, 分析了该系统的运动特征^[8]; 浙江大学对液压自由活塞发动机进行了大量

收稿日期: 2011-08-22

基金项目: 上海市科委基金项目(08DZ1207700)

第一作者: 尹兆雷(1987—), 男, 博士生, 主要研究方向为直线发动机混合动力系统。E-mail: yinzaolei2005@sina.com

通讯作者: 王哲(1963—), 男, 教授, 工学博士, 博士生导师, 主要研究方向为整车技术。E-mail: wangzhe@tongji.edu.cn

的研究工作,如液压自由活塞发动机的运动仿真,能量分析,原理样机的研制,压缩比的控制,点火系统的设计,能量回收的研究以及控制器的设计等^[9].

本课题中的直线发动机样机已经开发完成,且直线发动机已经可以正常点火起动. 本文旨在采用 GT-Power 发动机仿真软件,建立直线发动机系统仿真模型,并利用直线发动机台架实验数据进行验证,在此基础上,深入分析直线发动机起动及怠速过程的燃烧特性,并对怠速控制参数进行寻优研究.

1 直线发动机系统介绍

课题组开发的直线发动机样机如图 1 所示,参数见表 1,测控系统如图 2 所示.

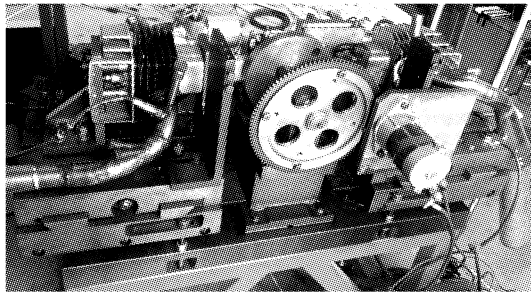


图 1 直线发动机样机

Fig.1 Experimental prototype of linear-engine

表 1 直线发动机参数

Tab.1 Parameters of linear engine

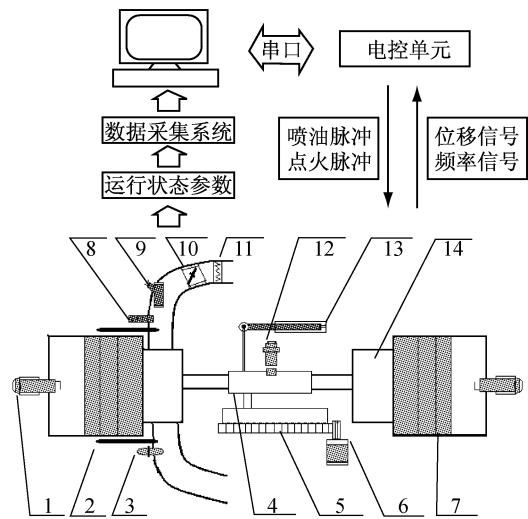
名称	参数
型式	二冲程单缸、风冷
外形尺寸/(mm×mm×mm)	315×295×385
气缸直径/mm	50
活塞行程/mm	50
气缸工作容积/mm ³	98
压缩比	6.6
供油方式	电控喷油
点火方式	电控点火系统
空载稳定转速/(r·min ⁻¹)	1 300

直线发动机系统采用了双活塞式结构,即有两个燃烧室和一个活塞组,活塞由连杆固定连接;与传统内燃机相比,直线发动机系统取消了曲柄连杆结构,零件数目减少,结构重量变轻,从而避免了传统内燃机中曲轴和轴承所消耗的大量摩擦热,以及由于曲柄连杆机构所引起的侧向力而造成的活塞上的摩擦,机械效率高且机器寿命长.

由于去除了曲柄连杆机构,课题组利用 AutoCAD 及 Pro/E 软件重新设计了扫气箱^[10],保证了改装后扫气箱的压缩比与原机曲轴箱的压缩比相等;样机的供油系统由原机的化油器式改装为进

气道喷射的电控喷油器式,点火系统由原机的磁电机驱动电容二极管点火(condenser diode ignite, CDI)点火系统改装为单片机控制的数字式电控点火系统,实现了对空燃比和点火时刻的精确控制.

直线发动机系统依靠课题组自主设计的偏心轮-滑块机构起动. 如图 2 所示,起动电机带动与偏心轮同轴的飞轮旋转,飞轮的旋转通过偏心轮-滑块机构转化为活塞连杆的直线往复运动,从而压缩可燃混合气,火花塞点火,直线发动机着火起动.



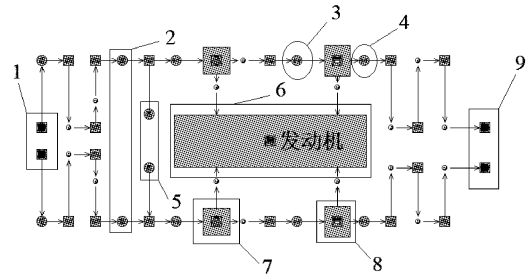
1-火花塞;2-热电偶;3-氧传感器;4-活塞组件;5-飞轮;6-起动电机;7-缸体;8-进气压力传感器;9-喷油器;10-节气门位置传感器;11-空气流量计;12-霍尔传感器;13-直线位移传感器;14-扫气箱

图 2 直线发动机台架测控系统示意图

Fig.2 Control system of linear engine prototype

2 直线发动机系统仿真模型及其验证

根据直线发动机系统样机参数建立直线发动机 GT-Power 仿真模型. 仿真模型主要由进气系统、喷射系统、扫气箱、气缸、排气系统组成,如图 3 所示.



1-进气外界环境模型;2-节气门模型;3-进气门模型;4-排气门模型;5-喷油器模型;6-发动机布置模型;7-扫气箱模型;8-气缸模型;9-排气外界环境模型

图 3 直线发动机系统 GT-Power 仿真模型

Fig.3 GT-Power simulation model of the linear engine

2.1 气缸几何形状定义

由于直线发动机取消了曲柄连杆机构,故不能用传统的方法定义气缸几何的参考对象 `cylgeom`,即不能用传统的方法定义直线发动机活塞的运动轨迹.本文中的直线发动机 GT-Power 仿真模型将气缸几何的参考对象 `cylgeom` 改为 `EngCylGeomUser`.在 `EngCylGeomUser` 中,可以通过输入改装的直线发动机活塞瞬时位移与仿真模型中发动机虚拟曲轴转角之间的对应关系来模拟直线发动机的正常运转.

2.2 直线发动机仿真模型中喷射系统定义

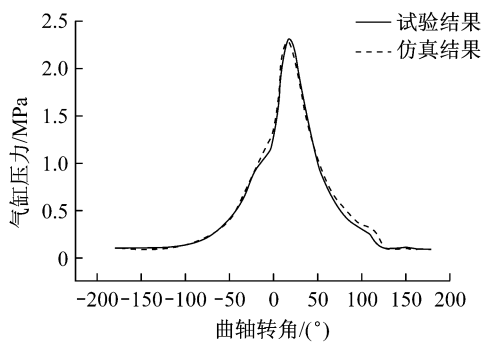


图 4 点火时刻为上止点前 1.0 mm (-16.26°) 时直线发动机气缸压力的模拟结果与实验结果对比

Fig. 4 Cylinder pressure data comparison between engine experiment and the simulation results of GT-Power linear engine model when the ignition time is 1.0 mm (-16.26°) before top dead center

从图 4,5 中可以看到,直线发动机气缸压力的模拟结果与实验结果相吻合.同时,对比进气系统的空气流量、进气压力、瞬时放热率、累积放热量等参数的模拟与实验结果,误差都在允许范围内,表明所建立仿真模型的计算结果与直线发动机系统相关参数有较好的一致性,可以满足后续性能预测和优化的需要.

3 计算结果与分析

3.1 点火时刻对直线发动机性能的影响

图 6—8 给出了转速为 $1\,300\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、过量空气系数 α 为 1.5 时点火时刻对直线发动机缸内压力、瞬时放热率及累积放热量的影响规律.由图可知,当点火时刻在上止点之前时,在点火之后,压力迅速升高,缸内压力的升高速度随点火时刻的提前逐渐加快,缸压峰值在点火时刻为 -40° 时达到最大

由于直线发动机采用电控喷油器式喷射系统.该喷油器单位时间喷油量一定,实验中通过改变喷油脉宽来调节空燃比.所以在 GT-Power 仿真中采用 `InjPulseConn` 模块来模拟样机的进气道喷射.

2.3 直线发动机仿真模型中燃烧模型定义

为了更好地预测发动机的燃烧状况,本文采用准维燃烧模型来模拟直线发动机的燃烧.

2.4 直线发动机仿真模型实验验证

图 4 和图 5 分别给出了 $1\,300\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、过量空气系数 α 为 1.5 时,不同点火位置下的左缸压力仿真与实验结果对比.

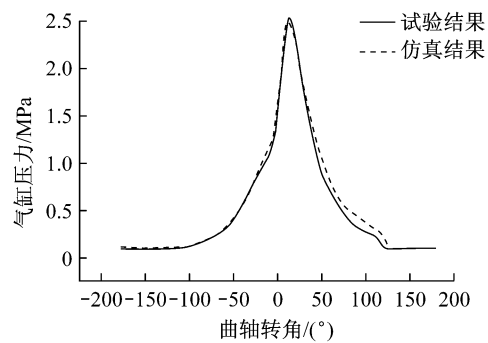


图 5 点火时刻为上止点前 1.5 mm (-19.95°) 时直线发动机气缸压力的模拟结果与实验结果对比

Fig. 5 Cylinder pressure data comparison between engine experiment and the simulation results of GT-Power linear engine model when the ignition time is 1.5 mm (-19.95°) before top dead center

值.当点火时刻在上止点或者上止点之后时,直线发动机后燃逐渐增多,缸内压力曲线出现双峰值,第一个缸压峰值为压缩压力峰值,第二个缸压峰值为燃烧压力峰值.随着点火时刻的延后,燃烧压力峰值逐渐推迟,峰值压力也依次降低.

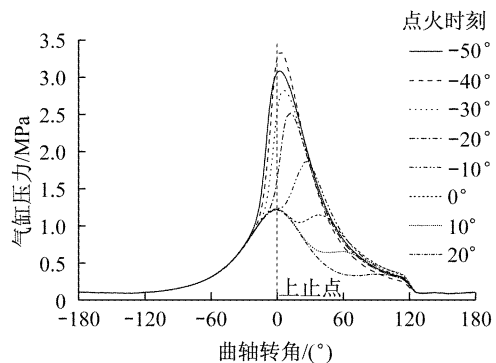


图 6 不同点火时刻下缸压波形对比

Fig. 6 Cylinder pressure at different ignition time

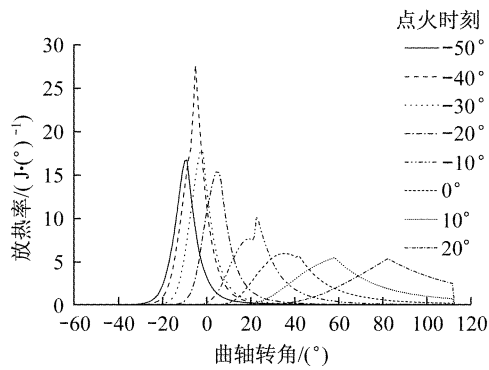


图 7 不同点火时刻下瞬时放热率波形对比
Fig.7 Heat release rate at different ignition time

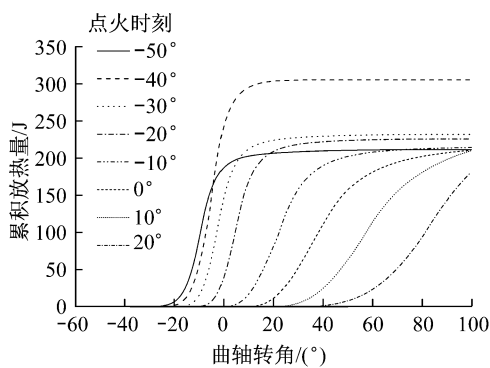


图 8 不同点火时刻下累积放热量波形对比
Fig.8 Accumulation heat release at different ignition time

由图 7 可知,随着点火时刻的推迟,瞬时放热率峰值并非依次降低,在点火时刻为 -40° 时,瞬时放热率峰值最大.当点火时刻在上止点时,瞬时放热率曲线有明显的双峰值现象,即在主放热后还会有有一定程度的热量释放.

由图 8 可知,虽然可燃混合气浓度较稀,但随着点火提前角的变化,可燃混合气的燃烧程度存在着不同,所以累积放热量存在着不同.累积放热量与瞬时放热率的变化相对应,在点火时刻为 -40° 时,累积放热总量最大.在点火时刻处于上止点之后时,点火时刻推迟对累积放热总量影响不大.

3.2 过量空气系数对直线发动机性能的影响

由于直线发动机供油方式为电控喷油器式,所以仿真模型通过控制循环喷油脉宽来改变气缸内混合气浓度.增加循环喷油脉宽,则气缸内混合气变浓,过量空气系数减小.图 9 给出了直线发动机转速为 $1300\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,点火位置为上止点前 20° 时,过量空气系数对气缸压力波形的影响规律.当循环喷油脉宽为 5 ms 时,过量空气系数 α 为 1.62 ,缸内混合气较稀,爆发压力较小.随着循环喷油脉宽的增

加,过量空气系数减小,混合气变浓,爆发压力逐渐升高,缸压峰值出现位置也逐渐提前.当喷油脉宽为 11 ms 即过量空气系数 α 为 0.83 时,缸压峰值达到最大值,然后随着喷油脉宽增加又有所降低.点火后缸压的升高速率也是随着过量空气系数的减小而依次加快.爆发压力峰值取决于燃烧放热量和放热时刻,放热量越大,主放热时刻越接近上止点,则产生的缸压峰值越高.

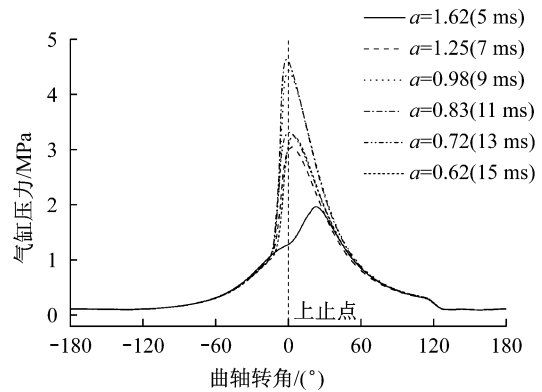


图 9 不同过量空气系数下缸压曲线对比
Fig.9 Cylinder pressure at different excess air ratio

图 10 给出了首循环在不同过量空气系数下瞬时放热率的对比.瞬时放热率峰值并不随过量空气系数的减小而单调升高,在喷油脉宽为 11 ms ($\alpha=0.83$)时,瞬时放热率峰值最大.

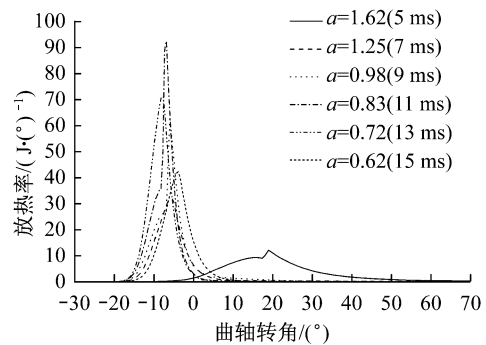


图 10 不同过量空气系数下瞬时放热率曲线对比
Fig.10 Heat release rate at different excess air ratio

瞬时放热率反映了缸内实时燃烧速度的快慢,累积放热量除了反映燃烧速度外,还反映出放热总量的变化,图 11 对比了不同过量空气系数下的累积放热量.累积放热量曲线切线斜率就是瞬时放热率,当瞬时放热率为零时,累积放热量趋于平稳.在燃烧初期,累积放热量曲线与瞬时放热率都反映出燃烧速度随着喷油脉宽增加而加快.但最终累积放热量并不是随过量空气系数的减小而单调增加,在喷油脉宽 13 ms ($\alpha=0.72$)时,累积放热总量最大,喷油脉

宽为 11 ms($\alpha=0.83$)时,累积放热总量仅次之.当过量空气系数较大时,可供燃烧的燃油较少,所以总的热量释放较少.当过量空气系数较小时,虽然燃烧初期燃烧速度快,但是在燃烧后期氧气不足加剧了不完全燃烧,因而累积放热总量也会降低.

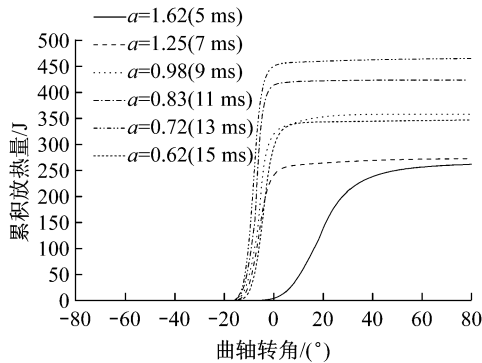


图 11 不同过量空气系数下累积放热量曲线对比
Fig. 11 Accumulation heat release at different excess air ratio

对比图 9 与图 11,在喷油脉宽为 9 ms($\alpha=0.98$)和 15 ms($\alpha=0.62$)时,虽然累积放热量接近,但是缸压差别很大,这是由于主要的燃烧热量释放时刻和燃烧持续期有较大差异造成的.喷油脉宽为 9 ms 时,燃烧速度较快,最大热量释放发生在定容燃烧阶段,所以爆发压力很高.而喷油脉宽为 15ms 时,燃烧速度慢,燃烧持续期长,所以爆发压力较低.

4 结论

本文基于 GT-Power 建立了直线发动机系统的仿真模型,在利用发动机台架实验结果验证模型准确性的基础上,研究直线发动机的燃烧特性,并对怠速控制参数进行寻优研究,为后续的直线发动机样机优化提供理论依据:

(1) 在相同过量空气系数下,点火时刻对直线发动机定转速下燃烧特性具有一定影响,直线发动机在点火时刻为 -40° 时,缸压峰值达到最大值,瞬时放热率峰值最大以及累积放热总量最多,表明此点火时刻下直线发动机燃烧特性最好.

(2) 在相同的点火时刻下,过量空气系数对直线发动机定转速下燃烧特性影响更加显著,在喷油

脉宽为 11 ms($\alpha=0.83$)时,直线发动机缸压峰值最大,瞬时放热率峰值最大,累积放热总量较多,表明此喷油脉宽下直线发动机燃烧特性最好.

参考文献:

- [1] 王哲, 钟艳. 基于直线发电/发电机组的新型混合动力系统[J]. 上海汽车, 2007(1): 32.
WANG Zhe, ZHONG Yan. New hybrid power system based on linear engine/generator[J]. Shanghai Auto, 2007(1): 32.
- [2] Mikalsen R, Roskilly A P. A review of free-piston engine history and applications[J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(14-15): 2339.
- [3] Aichlmayr H T, Kittelson D B. Miniature free-piston homogeneous charge compression ignition engine compressor concept[J]. Chemical Engineering Science, 2002, 57(19): 4161.
- [4] Johansen T A, Egeland O, Johannessen E A, et al. Dynamics and control of a free-piston diesel engine[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2003, 125(3): 468.
- [5] Achten P A J, Van Den Oever J P J, Potma J, et al. Horsepower with brains: the design of the chiron free piston engine[C]//International Off-Highway & Powerplant Congress & Exposition. Mitwallkee; SAE, 2000: 2000-01-2545.
- [6] Van Blarigan P, Paradiso N, Goldsborough S. Homogeneous charge compression ignition with a free piston: a new approach to ideal otto cycle performance[C]//International Fall Fuels and Lubricants Meeting and Exposition. San Francisco; SAE, 1998: 10.4271/982484.
- [7] Cawthorne W, Famouri P, Clark N. Integrated design of linear alternator/engine system for HEV auxiliary power unit[C]//Electric Machines and Drives Conference. Cambridge; IEEE, 2001: 267-274.
- [8] 李庆峰, 肖进, 黄震. 两冲程 HCCI 自由活塞式内燃发电机仿真[J]. 农业机械学报, 2009, 40(2): 41.
LI Qingfeng, XIAO Jin, HUANG Zhen. Simulation of Two stroke HCCI free piston linear alternator [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(2): 41.
- [9] LI Qingfeng, XIAO Jin, HUANG Zhen. Parametric Study of free piston linear alternator [J]. International Journal of Automotive Technology, 2010, 11(1): 111.
- [10] 栾延龙, 李理光, 王哲, 等. 自由活塞发动机关键设计参数及其性能的仿真优化研究[J]. 内燃机工程, 2010, 31(2): 15.
LUAN Yanlong, LI Liguang, WANG Zhe, et al. Key design parameters and performance optimization of a free-piston engine based on simulation[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2010, 31(2): 15.