

Atkinson 循环汽油机

热力学性能模拟开发及试验研究

Thermodynamic Performance Simulation and Test Study on Atkinson Cycle Engine

刘岳兵, 龙永生, 何元章, 蔡志强, 王黎明, 杨扬, 王伟民, 汪俊君

(东风汽车公司技术中心 湖北武汉 430058)

摘要: 本文首先对阿特金森循环发动机的原理及特点作了详细介绍, 其次对东风汽车某自然吸气发动机的仿真模型进行了试验对标, 并在此基础上根据阿特金森循环的原理对该发动机模型进行了压缩比和配气相位的优化计算, 然后据此对原发动机进行了改装并开展了性能验证试验。结果表明, 改进后样机在满足动力性能要求的条件下, 中低转速的燃油消耗率较原机得到了较好改善, 其中部分负荷特征工况点的燃油消耗率降低约 2%-4%, 初步达到了改进的预期效果。

关键词: 发动机, 阿特金森循环, 压缩比, 配气相位, GT-Power

Abstract: Firstly, the characteristics of Atkinson cycle engine have been described in detail according to the principle of engine. Secondly, simulation model of a NA engine with Dongfeng Motor has been calibrated in accordance with the test data. Then with this model the compression ratio and valve timing have been optimized according to the Atkinson principle. On the basis, the engine is modified and its performance is tested on the bench finally. The results show that the modified engine meets the requirements of its dynamic performance, and the fuel consumption rate in low speed has been reduced well, moreover, the fuel consumption rate about the part load characteristic points have been reduced by 2%-4% than the original engine, which achieved the expected effect of the improvement basically.

Keywords: Engine, Atkinson cycle, Compression ratio, Valve timing, GT-Power

0 前言

随着世界经济的高速增长, 汽车的保有量越来越多, 同时环保和能源短缺等问题所面临的挑战也越来越严峻^[1]。为了满足日益严格的节能减排相关法规的需要, 开发出节能减排的环保汽车已经成为各大整车厂商的首要任务。由于纯电动汽车的开发当前还面临着一些瓶颈, 相比而言, 混合动力汽车技术相对较成熟。因此, 在政策倾向的引领下, 未来一段时间内混合动力汽车必将以其特有的优势成为汽车发展的一个重要方向。

传统的 Otto 循环发动机在部分负荷时由于节气门的影响, 泵气损失较大, 油耗偏高, 难以满足混合动力汽车对油耗的要求。因此, 研究出与混合动力汽车相匹配的发动机就显得

非常有必要。统计发现，国外目前大多数已经上市和正在研发的混合动力汽车如丰田的普锐斯系列、雷克萨斯-RX450h，奔驰的 S400 混合动力，日产的风雅混合动力，现代的起亚 optima，福特和马自达的混合动力等车型均采用了阿特金森循环技术。其中作为全球最畅销的混合动力车型，丰田全新普锐斯匹配 1.8L 阿特金森循环发动机后的百公里油耗约为 4.3L，非常具有诱惑力。国内方面，长安汽车和北京理工大学合作在这一领域也开展了大量工作，其研究成果显示，通过改进原发动机的压缩比和配气相位，使得发动机在仅牺牲约 10% 最大转矩的情况下，燃油消耗率降低了 12%~15%，与此同时发动机的成本基本保持不变^[2]。另外，奇瑞和东风也在相继开展这方面的研究。

本文以东风汽车某自然吸气发动机改为混合动力的开发为线索，介绍了利用 GT-Power 软件构建仿真模型并按照阿特金森循环的原理对发动机的相关参数进行优化的过程，最后结合台架试验对模拟优化方案的效果进行了验证分析。

1 阿特金森循环发动机的原理和特点介绍

1.1 阿特金森循环发动机的原理及优点介绍

对比图 1 和图 2 可知，阿特金森循环发动机是在传统的 Otto 循环发动机工作过程的基础上增加了一个进气反流的步骤，整个循环依次包括进气、反流、压缩、膨胀和排气五个工作过程^[3-7]。由图 3 可知，Atkinson 循环的节能效果比 Otto 循环好的特点主要体现在以下两个方面。

1) 膨胀比高

膨胀比大于压缩比是阿特金森循环发动机最大的特点。通常膨胀比与几何压缩比是紧密相关的，膨胀比的大小受几何压缩比的限制，膨胀比的最大值一般就是循环的几何压缩比。由于受机械强度、机械效率、爆燃倾向及排放等方面因素的限制，发动机的压缩比不能做得太高。而阿特金森循环发动机中将几何压缩比提高后，通过进气门晚关这一措施推迟实际压缩开始的时间，这样可以控制实际压缩比，使得膨胀比增加的同时，上述不利因素也在可接受的范围内。更长的膨胀行程可以更有效的利用燃烧后废气仍然存有的高压，所以阿特金森循环的热效率比 Otto 循环更高一些。

由内燃机原理知识可推知，阿特金森/米勒循环指示热效率为：

$$\eta_i = \frac{W_{\text{做功}}}{q_{\text{吸热}}} = 1 - \frac{q_{\text{放热}}}{q_{\text{吸热}}} = 1 - \frac{C_p \cdot \Delta T_1}{C_v \cdot \Delta T_2} = 1 - \kappa \cdot \frac{\rho^{\frac{\lambda}{\kappa-1}} - 1}{\lambda - 1} \quad (1)$$

式中， κ 为等熵指数； λ 为压力升高比， ρ 为膨胀比。

由上式可知，阿特金森循环的指示热效率与膨胀比成正比，膨胀比越大，对应的发动机热效率就越高，燃油经济性就越好。因此，研究工作的深入就是在考虑上述不利因素的同时，尽可能的去优化配气相位以提高膨胀比。

2) 泵气损失小

传统的 Otto 循环发动机在部分负荷工况下由于节气门的节流作用，能量损失较大，致

使燃油消耗率偏高，节气门开度越小，能量损失就越大^[8-11]。对于阿特金森循环发动机而言，通过进气门推迟关闭将多余的空气推入到进气管中来控制负荷，在大部分负荷范围内减弱甚至是取消了节气门的作用，泵气损失减小，所以燃油消耗率也得以降低。

1.2 阿特金森循环发动机的不足之处说明

自 19 世纪末至今，经历了 100 多年的发展，阿特金森循环的原理已被广大科技工作者所熟悉，特别是随着可变气门正时技术的成熟，使得该循环技术的实现变得简单可行。但由于该发动机本身也存在着下述问题，导致阿特金森循环技术未能被广泛应用。

1) 独特的进气方式让低速扭矩较差

在低速时，本来就稀薄的混合气在反流之后变得更少，这让该类发动机低速扭矩表现很差，用于车辆起步动力不够，这对于每天在路况复杂的城市交通中行驶的汽车来说是不可接受的，所以普通汽车不会使用这种技术，因此，为了保持产品的市场竞争力，各大厂商对此技术并不感兴趣。

2) 长活塞行程不利于高转速运转

对于在现有发动机上进行改型的发动机来说，几何压缩比提高后，较长的活塞行程确实可以充分的利用燃油的能量，提升经济性，但也因此限制了转速的升高，加速性能变差，并且升功率也会降低。这对于追求性能，尤其是追求高速性能的发动机来说是非常不利的。

综上所述，由于上述缺陷的存在，致使阿特金森循环发动机过去的处境非常尴尬。现如今，随着混合动力技术的发展与推进，目前上述缺陷可以很好地被电动机所弥补。在低速和高速两个阶段，由电动机在为车轮提供动力，发动机大多时段都是在发电，所以发动机可以在在油耗最优异的转速运转。用电动机的大扭矩弥补动力的缺陷，互补之后的动力总成，可以让混合动力汽车在不牺牲动力性的基础上很好地改善燃油经济性和排放性能。

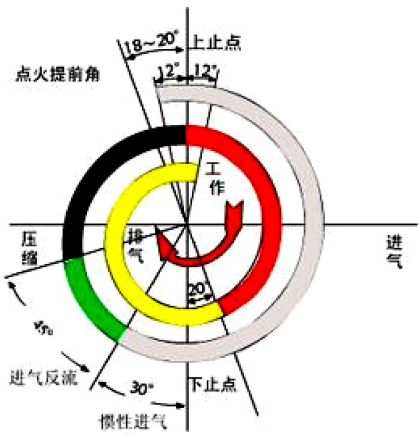


图 1 阿特金森循环发动机配气相位

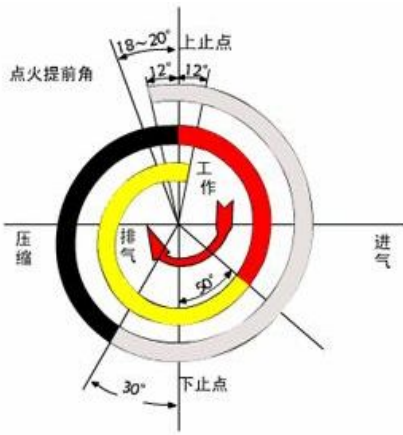


图 2 常规奥拓循环发动机配气相位

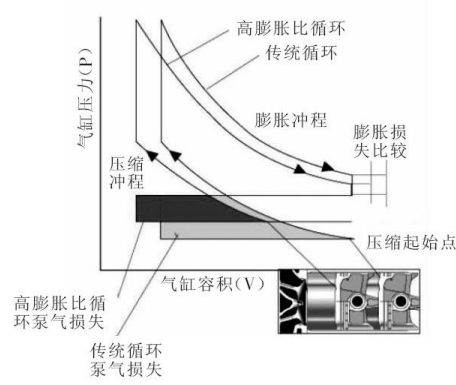


图 3 两种循环工作示意图^[8]

2 仿真模型的建立及验证

本文中应用的仿真工具为 **GT-Power**。该软件是一个模块化的仿真工具，包括了发动机的传热模型、燃烧模型及发动机的各个组成部分，如：管路、气缸、气阀、催化器等。其理论基础为管内一维流动和缸内容积法，各离散单元通过相连的边界进行质量、动量及能量的传递和交换。计算时需要满足的流动模型的基本方程简单介绍如下^[12]：

$$\text{连续性方程: } \frac{dm}{dt} = \sum_{\partial B} \rho A u \quad (2)$$

$$\text{动量方程: } \frac{d\rho A U}{dt} = \frac{dpA + \sum_{\partial B} \rho A u^2 - 4C_f \frac{\rho u^2}{2} \frac{dxA}{D} - C_p \frac{\rho u^2}{2} A}{dx} \quad (3)$$

$$\text{能量方程: } \frac{d(me)}{dt} = p \frac{dV}{dt} + \sum_{\partial B} (\rho A u H) - h_g A (T_{gas} - T_{wall}) \quad (4)$$

式中， m 为单元体积的质量， V 为体积， p 为压力， ρ 为密度， A 为流道截面积， e 为总内能， H 为总焓值， h_g 为热传递系数， U 为控制体积中心流速， u 为边界流速， C_f 为表面摩擦系数， C_p 为压力损失系数， D 为流动单元的等效直径， dx 为流动方向质量单元的厚度， ∂B 为单元的边界。

下表 1 为原发动机的主要技术参数，图 4 为利用 **GT-Power** 建立的该发动机的仿真模型，图 5 和图 6 均为仿真计算结果和试验结果的对比。由图 5 和图 6 可知，该仿真模型计算得到的外特性扭矩、比油耗和爆发压力与试验结果的误差约在 2% 左右，符合工程要求。因此可以认为该仿真模型是合理的，能够用于该款发动机后续的改进和优化。

表 1 原发动机主要技术参数

名称	对应参数
发动机类型、缸数及布置形式	直列四缸汽油机
缸径	74 mm
冲程	90.5mm
压缩比	10.3 : 1

排量	1.6 L
最大功率	85kW / 6000r/min
最大扭矩	145N·m / 4200r/min
备注	单 VVT（进气）

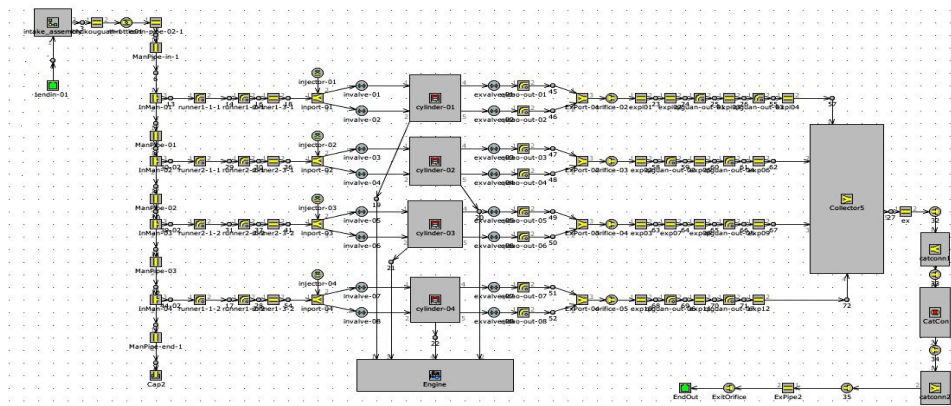


图 4 某 1.6L 四缸汽油机一维热力学性能仿真分析模型图

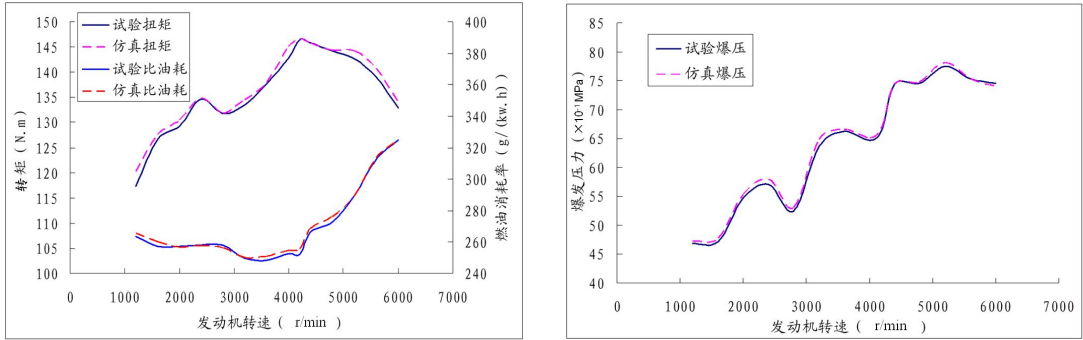


图 5 仿真与试验的扭矩和油耗结果对比 图 6 仿真与试验各转速下爆发压力结果对比

3 应用 Atkinson 循环原理进行压缩比与配气相位的优化

传统的 Otto 循环发动机为了抑制爆燃现象通常会采取推迟点火的措施，这样就会导致后燃趋势增加进而发动机的热效率下降、燃油经济性变差。对于应用阿特金森循环原理的发动机来说，是通过对压缩比和进气门关闭推迟同时配合运用来实现提高热效率、改善燃油经济性的同时有效控制住爆燃现象的。

本文中相关参数均参照原机模型，仅对压缩比和进气门关闭推迟角度进行组合优化。为了不影响机体的结构强度和 NVH 性能（计算表明，汽油机在中低转速情况下，燃烧噪声占主要成分，缸内最大爆发压力每增大 50%时，燃烧噪声约增加 3dB 左右。），计算时以原机对应工况点的最大爆发压力为约束条件来寻找满足该条件的压缩比和进气门推迟关闭角度的组合。由于发动机的最佳工作转速一般为 2000r/min~3000r/min 之间，本文中以 2400r/min 为例进行详细介绍。其中压缩比以 0.5 的间隔从 11 递增到 13.5，进气门关闭推迟角度以 5°CA 的间隔从原机对应角度的位置往后推迟至 60°CA（因为原机进气 VVT 最大可调角度为 60°CA）。

图 7 为 2400r/min 转速时发动机缸内最大爆压随压缩比和进气门关闭推迟角度变化的结果。由图可知，压缩比提高后随着进气门关闭角度的推迟，缸内最大爆发压力下降的速度越来越快（斜率逐渐增大），这主要是由于随着气体的回流一方面缸内的剩余空气不断减少，另一方面由于流动惯性的作用气体回流速率加快所导致的。图中横线为原机在 2400r/min 转速下节气门全开时的缸内最大爆发压力，以此为限制条件可以确定较优的压缩比和进气门关闭推迟的组合，具体情况如下表 2 中所示。

图 8 为各优化组合计算得到的燃油消耗率，图中所示压缩比为 12、进气门关闭角度推迟 35°CA 的优化组合在 2400r/min 转速下节气门全开时的燃油消耗率最低，由于该发动机不是可变压缩比的发动机，所以由此可知，将其压缩比提高到 12 较为合适。在确定最佳压缩比为 12 后再对其他转速进行进气门关闭推迟的优化计算，从而找到压缩比为 12 时各转速下满足爆压限制条件的进气门关闭推迟最优值，并以此指导试验。

图 9 为优化前后发动机整个外特性上的动力性和经济性情况对比，由图可知，采用阿特金森循环原理优化后，各转速最大爆发压力跟原机相当，对应扭矩均有所下降，幅度约在 5%-15%之间变化。另外，油耗方面，在 4000r/min 以下的时候油耗改善约在 2%-3%之间，4200r/min-5200r/min 时油耗跟原机相当，功率点附近油耗较原机稍有增加。相比文献[2]的改善效果来说，主要是由于此发动机的油耗水平较文献[2]中的基础机型好很多，改善的空间非常有限所致。综合考虑可知，对于该款主要运行在中低转速的混合动力专用发动机来说，采用阿特金森循环后仍然可以取得不错的节油效果。

表 2 不同优化点对应的压缩比和进气门关闭推迟角度

压缩比	进气门关闭推迟角度/°CA
11	25
11.5	30
12	35
12.5	40
13	45
13.5	50

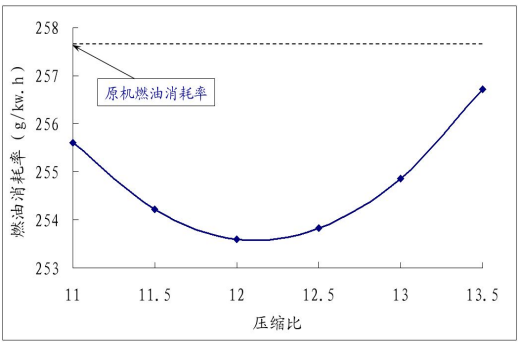
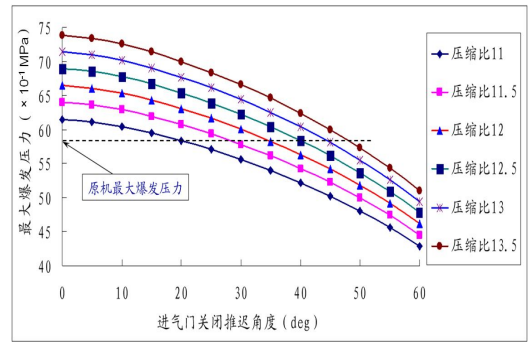


图 7 最大爆压随压缩比和进气门关闭角变化图 图 8 不同优化点对应的燃油消耗率对比

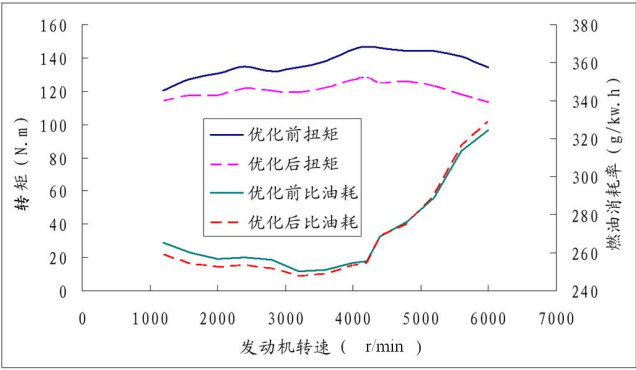


图 9 优化前后发动机外特性仿真扭矩和比油耗对比图

4 模拟优化方案试验效果分析

模拟优化计算结束后，结合所得到的相关优化参数对原发动机进行改装设置，然后在试验台架上进行性能验证试验，结果如表 3 和图 10 中所示。

由表 3 可知，改善后样机在如下部分负荷特征工况点的燃油消耗率较原机均有所改善，幅度约在 2%-4%之间；另外，由图 10 可知，改进后样机的外特性扭矩降低不多，全转速均在 10%以内（其中最大功率基本与原机相当），同时在 1600r/min-4000r/min 之间的外特性燃油消耗率较原机亦有所改善，这与仿真结果基本一致。

综上所述，采用阿特金森原理改进后的发动机成本基本不变、动力性稍有下降，但中低转速范围内的燃油经济性得到较好改善，因此，特别适合应用于混合动力总成。

表 3 改进前后发动机特征工况点的油耗状况对比

项 目	原机燃油消耗率	改进后样机	降低百分比（%）
	（g/kw·h）	燃油消耗率（g/kw.h）	
1500rpm/0.35MPa 工况	308	298	3.25
2000rpm/0.2MPa 工况	372	363	2.42
2000rpm/0.5MPa 工况	273	265	2.93
3000rpm/0.3MPa 工况	320	309	3.44
3000rpm/1.1MPa 工况	251	242	3.59

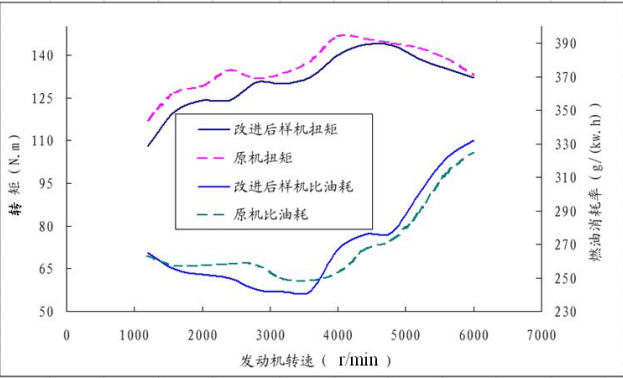


图 10 改进前后发动机外特性试验扭矩和比油耗对比图

5 结论

(1) 随着可变气门正时技术的成熟,阿特金森循环技术的实现变得简单可行;通过和电动机的配合,可使得其热效率高,燃油经济性和排放性能好的优势得以充分发挥。因此,采用该技术是非常有效的改善混合动力总成性能的途径,该技术的成熟及推广必将对国内新能源汽车的产业化产生重要影响。

(2) 本文对现有 Atkinson 发动机的原理及开发思路进行了详细介绍,在考虑机体的结构强度和 NVH 性能的基础上,提出了利用最大爆发压力作为计算约束条件的想法,可为以后同类机型的开发和技术改进提供参考。

(3) 模拟研究表明,依据阿特金森循环技术的原理,通过对原发动机的压缩比和配气相位的联合优化,可在基本不增加成本的情况下有效地降低中低转速的燃油消耗率。

(4) 试验证明,改进后样机在满足动力性能变化要求的条件下中低转速的燃油消耗率得到较好改善,其中部分负荷特征工况点的燃油消耗率较原机改善约在 2%-4%,初步达到了改进的预期效果。

参考文献

- [1] 王长园,刘福水,孙柏刚.长安 475Q 混合动力发动机的仿真开发[J].汽车工程,2011,33(4): 294-297.
- [2] 郝彦琴,龙宪军,杨海.基于 GT-POWER 的混合动力汽车用发动机的数值研究[J].设计与研究,2010(4): 5-7.
- [3] 田永祥,杜爱民,陈礼璠.混合动力汽车用 Atkinson 循环发动机的探讨[J].设计·研究,2007(4): 31-34.
- [4] 黄加胜.混合动力汽车用发动机的仿真与优化设计研究[D].北京:北京交通大学,2009.
- [5] 孙逢春,张承宁,祝嘉光.电动汽车-21 世纪的重要交通工具[M].北京:北京理工大学出版社,1997
- [6] 方景瑞.国内外混合动力汽车技术[J].拖拉机与农用运输车,2005,10(5): 1-3.
- [7] 车威,杨勇.混合动力汽车关键技术探讨[J].公路与汽运,2011(4): 8-11.
- [8] 张金柱.Prius 轿车的先进技术[J].汽车维修,2006(1): 4-6.
- [9] Alberto Boretti, Joseph Scalzo. Exploring the Advantages of Atkinson Effects in Variable Compression Ratio Turbo GDI Engines[C].SAE Paper 2011-01-0367.
- [10] Chongming Wang, Ritchie Daniel, Hongming Xu. Research of the Atkinson Cycle in the Spark Ignition Engine[C]. SAE Paper 2012-01-0390.
- [11] Lubomir Miklanek, Oldrich Vitek, Ondrej Gotfryd, Vojtech Klir. Study of Unconventional Cycles (Atkinson and Miller) with Mixture Heating as a Means for the Fuel Economy Improvement of a Throttled SI Engine at Part Load[C]. SAE

Paper 2012-01-1678.

- [12] P. Bertrand Hsing, Jia-Shiun Chen, H. Y. Isaac DU. An Engineering Method for Part-load Engine Simulation[C]. SAE Paper 2007-01-4102.