

废气再循环阿特金森汽油机经济性优化算法

朱忠攀^{1,2}, 林 瑞^{1,2}, 杜爱民¹

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

摘要: 基于一维整机模型在 $3\ 000\ \text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 部分负荷工况下对 Atkinson 汽油机性能进行仿真分析. 结果表明, 在保持节气门位置、空燃比与点火提前角不变的情况下, 随着废气再循环率提升或随着 LIVC (late intake valve closing) 增大, 发动机的油耗均呈现增大趋势. 为进一步优化 Atkinson 发动机燃油经济性, 在节气门全开条件下搭建了 GT-power 与 MATLAB 联合仿真模型, 通过改进的遗传算法, 对废气再循环率、进气门晚关角、点火提前角、空燃比等参数进行优化迭代, 并对历代种群进行了模糊聚类分析, 得出了不同负荷工况点的油耗最优值及对应的控制参数.

关键词: 汽油机; 阿特金森循环; 废气再循环; 进气门晚关; 优化方法

中图分类号: TK411.2

文献标志码: A

Economy Performance Optimization Algorithm of Exhaust Gas Recirculation Atkinson Gasoline Engine

ZHU Zhongpan^{1,2}, LIN Rui^{1,2}, DU Aimin¹

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

Abstract: The performance of Atkinson gasoline engine was simulated and analyzed based on the 1-D engine model at working condition of the part load of $3\ 000\ \text{r} \cdot \text{min}^{-1}$. The results show that with the increase of EGR rate or LIVC, the engine fuel consumption is increased in the case that the throttle position, air-fuel ratio, and ignition timing keep unchanged. In order to improve the Atkinson engine fuel economy, the united simulation model of MATLAB and GT-power was set up in the wide open throttle working condition. The values of EGR rate, LIVC, ignition timing, and air-fuel ratio were iteratively optimized by using a redesigned genetic algorithm. The fuzzy clustering method was adopted to analyze all the previous generations for obtaining the best fuel

consumption and the corresponding control parameters at different load points.

Key words: gasoline engine; Atkinson cycle; exhaust gas recirculation (EGR); late intake valve closing (LIVC); optimization methods

内燃机高效清洁燃烧、混合动力发动机技术被列入我国 2015~2030 年节能汽车技术路线规划的重点研究内容. 阿特金森 (Atkinson) 循环汽油机是高效内燃机的发展方向之一, 在混合动力汽车领域获得广泛应用^[1], 与传统 Otto 循环汽油机相比, Atkinson 汽油机可设计更高的几何压缩比, 在提高部分负荷工况下汽油机燃油经济性方面具有较大优势^[2-3]. 但 Atkinson 汽油机提高几何压缩比需要进一步推迟进气门关闭角来避免早燃或爆震等问题产生, 可能引发进气回流、充气效率下降等问题, 从而影响动力性^[4-5].

目前通过提高几何压缩比与配气相位可变量优化 Atkinson 汽油机获得了广泛的研究, 如徐宏明等通过仿真分析了不同几何压缩比 Atkinson 汽油机, 在保持有效压缩比不变的情况下, 膨胀比越高, 指示热效率越高, 但泵气损失增加^[6]. 赵华等针对 Atkinson 循环汽油机提出了 EIVC (early intake valve closing) 与 LIVC (late intake valve closing) 两种负荷控制策略, 研究表明两种策略与传统节气门负荷控制相比, 泵气损失均有明显改善, 其中 EIVC 策略比 LIVC 策略泵气损失小, 但燃烧持续期增加. 文章指出 LIVC 策略更适合引入冷却 EGR (exhaust gas recirculation), 实现燃烧与排放的优化^[7]. EGR 技术在 Atkinson 汽油机优化方面取得了不错的效果. Ratnak 等针对增压 PFI (port fuel injection) Atkinson 汽油机引入 10% 的冷却 EGR, 其理论热效

收稿日期: 2017-07-04

基金项目: 上海市科委重大科技攻关项目 (14DZ1104700)

第一作者: 朱忠攀 (1988—), 男, 博士生, 主要研究方向为汽车节能技术. E-mail: 521bergsteiger@tongji.edu.cn

通讯作者: 林 瑞 (1973—), 女, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为新能源汽车技术. E-mail: ruilin@tongji.edu.cn

率仿真结果高达 48.2%^[8]. Kawamot 等研究表明第二代丰田普锐斯 Atkinson 汽油机引入 EGR 后,比第一代普锐斯 Atkinson 汽油机油耗降低 8.5%,相对于同种规格的传统汽油机油耗降低 10.2%^[9]. 因此,EGR 与 LIVC 对 Atkinson 汽油机的协同作用成为值得研究的问题.

由于影响 Atkinson 发动机性能的操作变量与设计参数较为复杂,且 EGR 与 LIVC 对发动机性能的协同作用与几何压缩比、进排气相位、点火提前角、空燃比等参数高度耦合相互影响,若通过大量样机试验进行研究,成本较高也较难实现. 即使通过商业仿真分析工具,也需大量反复繁琐的计算. 因此,本文提出了一种模糊聚类遗传算法,并通过编程实现了汽油机模型的自动化计算与全局优化,分析了 EGR 与 LIVC 对 Atkinson 汽油机的协同作用,为不同转速、不同负荷下的发动机多参数协同性能优化提供方法参考.

1 Atkinson 汽油机模型

1.1 研究对象

本课题组针对一款 1.8L PFI 汽油机作为原始机型,进行了 Atkinson 汽油机改进设计,原机改造前、后参数对比如表 1 所示. Atkinson 实现方法主要通过削缸法提高几何压缩比联合新凸轮型线设计增大凸轮包角实现 LIVC 功能,考虑到气门与活塞的运动干涉,原凸轮最大气门升程进一步减小. 具体设计过程详见文献^[10].

表 1 样机改造前、后参数对比

Tab. 1 Parameter comparison of prototype and redesign engines

参数名称	改造前数值	改造后数值
冲程/mm	91.4	91.4
缸径/mm	79	79
连杆长度/mm	146.65	146.65
几何压缩比	10	13
最大功率/kW	102	—
最大转矩/(N·m)	172	—
气门数	2 进 2 排	2 进 2 排
最大进气气门升程/mm	9.628	6.884
进气凸轮包角/(°)	241.6	250~280

1.2 汽油机建模

本文在 Atkinson 发动机一维仿真模型基础上增设了外部冷却 EGR 系统. 增加的 EGR 系统包括中冷器、EGR 管、EGR 阀. EGR 管路直径为 28 mm, EGR 中冷器换热面积 103 000 mm². 其他整机物理

参数与样机相同,如进排气管路、直径,空滤器容积,节气门直径,气缸几何参数等. 缸内工质与燃烧室壁面的热量交换采用 Woschni 传热模型. 汽油机爆震模型采用 Kinetics-fit 模型,Fontana 等描述了该模型的详细动力学反应机理^[11]. 另外,燃烧模型选择 SI-turb 模型替代原 wiebe 模型来分析 LIVC 与 EGR 对 Atkinson 汽油机部分负荷特性的影响.

增加 EGR 系统后的汽油机模型通过原机外特性曲线进行标定. 模型保持原型样机的物理几何参数,详见表 1. 其他边界参数由实际试验数值设置,部分参数见表 2.

表 2 不同转速下的仿真边界参数

Tab. 2 Simulation boundary parameters at different speeds

转速/(r·min ⁻¹)	空燃比	点火提前角/(°)	进气提前角/(°)	排气提前角/(°)
1 000	14.70	3.0	-11	47
1 500	14.70	6.5	-11	47
2 000	14.03	9.5	11	47
2 500	13.94	9.5	-5	47
3 000	13.94	9.5	-2	47
3 500	12.87	11.0	-4	47
4 000	12.87	11.0	-8	47
4 500	12.87	11.0	-11	47
5 000	12.87	11.0	-14	47
5 500	12.12	15.0	-11	47
6 000	11.17	16.0	-11	47

模型的仿真结果与原机外特性试验对比如图 1~3 所示. 误差控制在 5% 以内.

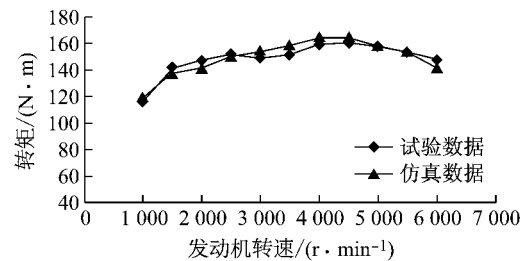


图 1 试验转矩与仿真转矩对比

Fig. 1 Comparisons of torque between test and simulation

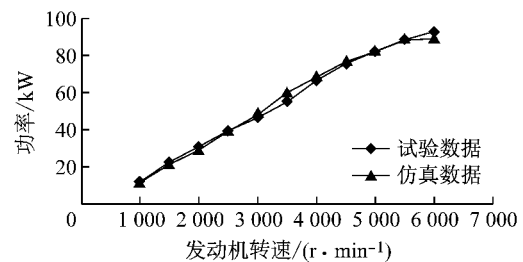


图 2 试验功率与仿真功率对比

Fig. 2 Comparisons of power between test and simulation

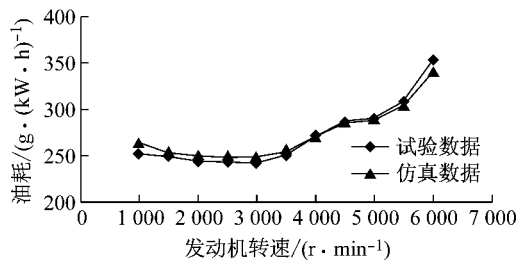


图 3 试验油耗与仿真油耗对比

Fig. 3 Comparison of BSFC (brake specific fuel consumption) between test and simulation

2 发动机一维仿真计算

2.1 仿真方法

在转速 $3\ 000\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的部分负荷工况下,保持节气门位置与进气门开启时刻、点火提前角等不变(节气门开度为 5° ,进气提前角为上止点前 10°),分别针对不同 LIVC 与 EGR 率构建了 30 个仿真算例,如图 4 所示.其中,横坐标 $50^\circ\sim 110^\circ$ 是不同 LIVC 角,即进气门关闭时刻所对应的下止点后曲轴转角,纵坐标是对应 $0\sim 20\%$ EGR 率的数值.

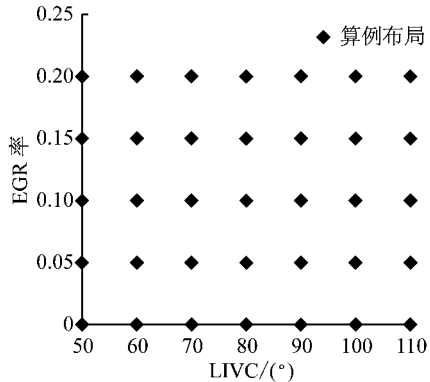


图 4 一维仿真算例设计

Fig. 4 Design of 1-D simulation cases

2.2 LIVC 与 EGR 对整机部分负荷特性影响

针对上述算例进行仿真计算,可得到不同 EGR 率下汽油机转矩随 LIVC 角度的变化趋势,如图 5 所示.同时,可得到不同 LIVC 策略下,汽油机转矩随着 EGR 的变化趋势,如图 6 所示.

对比图 5 与图 6 的结果发现,转矩随着进气门持续期的延长呈下降趋势,随着 EGR 率的提高也呈现下降趋势, LIVC 与 EGR 对汽油机转矩特性的作用近似,但 EGR 对转矩作用范围更大.如图 7 所示, LIVC 为 50° 曲轴转角时不同 EGR 对汽油机转矩的影响曲线以及 EGR 率为 0 时 LIVC 对汽油机的转矩影响曲线对比图. $0\sim 15\%$ EGR 率与 $50^\circ\sim 110^\circ$

LIVC 具有相同的转矩作用范围, EGR 对转矩的影响更为明显.

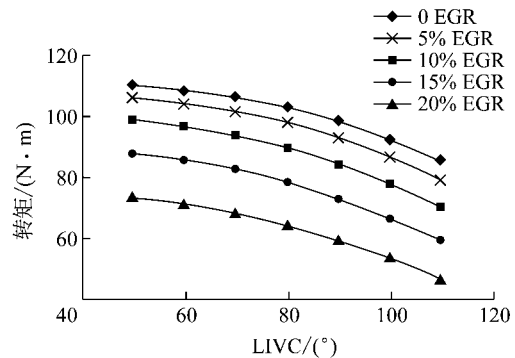


图 5 不同 EGR 率下 LIVC 对转矩影响

Fig. 5 Effects of LIVC on torque at different EGR rates

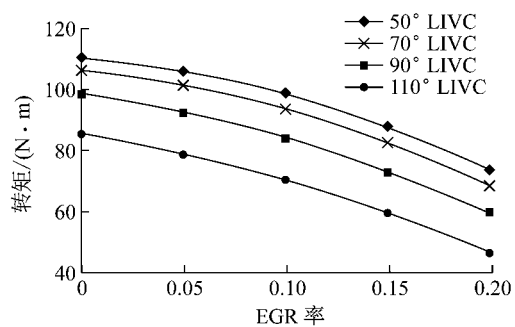


图 6 不同 LIVC 下 EGR 率对转矩影响

Fig. 6 Effects of EGR on torque at different LIVC angles

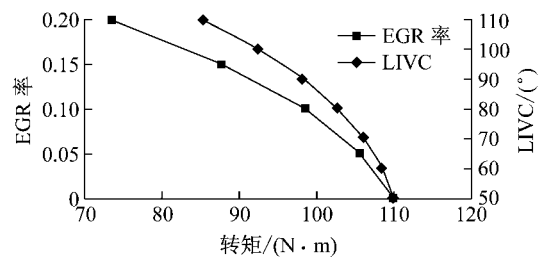


图 7 EGR 率与 LIVC 对转矩影响对比

Fig. 7 Effect comparison of EGR and LIVC on torque

不同 EGR 率下汽油机油耗随进气持续期的变化与不同 LIVC 策略下汽油机油耗随 EGR 率的变化趋势对比如图 8 与图 9 所示.油耗随着进气持续期的延长或随着 EGR 率的提高呈现上升趋势,但保持在较高的 EGR 率不变的情况下油耗随着进气持续期延长,其上升梯度更大,而在较小的 EGR 率下,油耗随着进气持续期延长上升梯度不明显;而保持在较大 LIVC 角情况下,油耗随着 EGR 率提升过程中,其上升梯度也增大.

相对于 LIVC 而言, EGR 对汽油机油耗的影响范围更大.如图 10 所示, LIVC 为 50° 曲轴转角下不

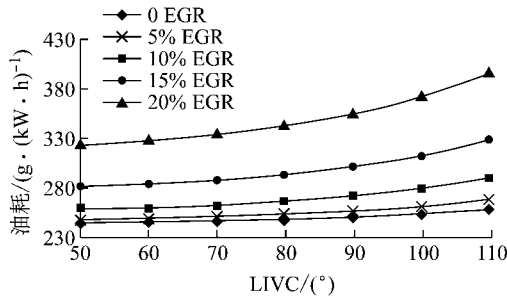


图 8 不同 EGR 率下 LIVC 对油耗影响趋势
Fig. 8 Effects of LIVC on BSFC at different EGR rates

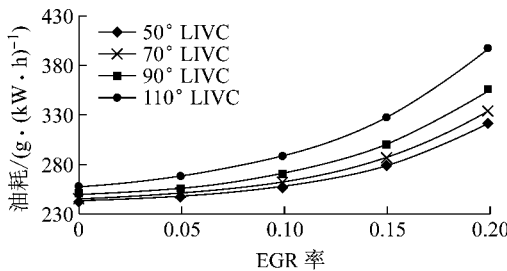


图 9 不同 LIVC 下 EGR 率对油耗影响趋势
Fig. 9 Effects of EGR on BSFC at different LIVC angles

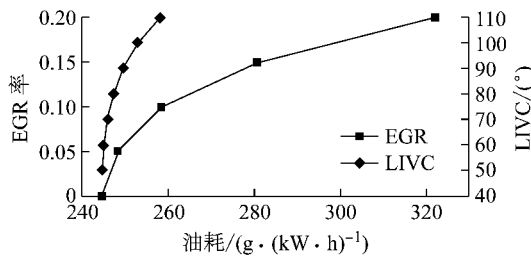


图 10 EGR 率与 LIVC 对油耗影响对比
Fig. 10 Effect comparison of EGR and LIVC on BSFC

同 EGR 率对汽油机的油耗影响曲线,以及 EGR 率为 0 时 LIVC 对汽油机的油耗影响曲线对比。

综上所述,LIVC 与 EGR 对发动机性能具备相同趋势的影响,但相对于 LIVC,EGR 对汽油机性能的影响范围较大.采用适当的 EGR 策略替代 LIVC 对 Atkinson 汽油机的作用具备可行性,但需要兼顾油耗问题.文献表明,EGR 可通过无节气门策略降低泵气损失,进而降低油耗^[12],在维持原发动机凸轮型线不变与节气门全开的前提下,本文提出了一种模糊聚类遗传算法对点火提前角、空燃比、进气相位、EGR 率等多参数进一步优化,进而在 3 000 r · min⁻¹不同负荷下获取了发动机的最优油耗,并总结了 EGR 对发动机性能的影响规律。

3 模糊聚类遗传算法优化

3.1 与 GT-power 联合优化模型

遗传算法作为一种多变量非线性全局优化算法可被应用于 Atkinson 发动机性能参数优化领域^[13].为进一步优化 LIVC 与 EGR 的协同策略,提高汽油机部分负荷燃油经济性,本文在原一维仿真模型基础上构建了 MATLAB 与 GT-power 联合仿真模型,该模型架构如图 11 所示。

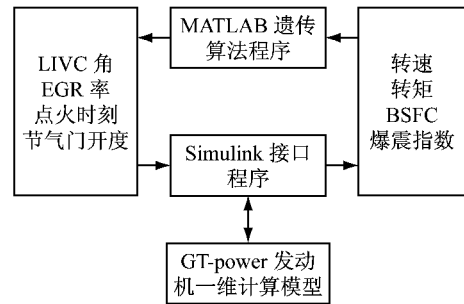


图 11 MATLAB 与 GT-power 联合仿真模型
Fig. 11 United simulation model of MATLAB and GT power

该模型包括通过 MATLAB 编写程序实现模糊聚类遗传算法,通过 Simulink 与 GT-power 仿真模型构建模型接口,从而实现 GT-power 发动机一维性能计算模型的调用计算.该模型以 MATLAB 软件作为程序运行主体,以 GT-power 软件作为被调用的程序,从而实现联合仿真优化模型设计。

3.2 GA 遗传算法改进

本遗传算法优化目标是在保证原发动机部分负荷动力性的同时降低燃油消耗率,同时避免发动机爆震现象的产生.其数学表达式如下:

$$B_{SFC} = \min(X_1, X_2, X_3, X_4)$$

约束条件

$$K_i = 0$$

式中: B_{SFC} 为发动机油耗,可由优化模型计算得出,优化目标是得到 B_{SFC} 最小值; X_1 为进气迟闭角,上止点后 50°~55°曲轴转角; X_2 为 EGR 优化范围为 5%~15%; X_3 为点火提前角范围为上止点前 -9.5°~10.0°曲轴转角; X_4 为空燃比 13.9~14.7; X_1, X_2, X_3, X_4 共同构成了单个个体的染色体组; K_i 为汽油机爆震指数(knock index),根据 Kinetics-fit 爆震模型计算,当发动机不发生爆震时 K_i 为零,因此约束条件为 $K_i = 0$ 。

本文采用基于二进制编码的遗传算法进行了 80 代迭代优化,每代种群包含 20 个个体,其中不满足

约束条件的个体则被淘汰,不参与下一代种群形成。在选择算法因子处理方面,采用了轮盘赌法与精英排序相结合的方法实现个体选择,既保证优秀个体被选择的同时,又保证了种群的多样性。另外,由于 MATLAB 与 GT-power 联合仿真耗时较长,为避免重复性计算或过早发生局部收敛的问题,在交叉与变异产生新种群之前,利用 MATLAB 的 unique 方法剔除了变异后的重复个体,并将随机产生的新个体补充形成下一代种群。在此基础上进一步存储历代种群形成种群库,最后通过模糊聚类分析进行全局优化与分析。其流程设计如图 12 所示。

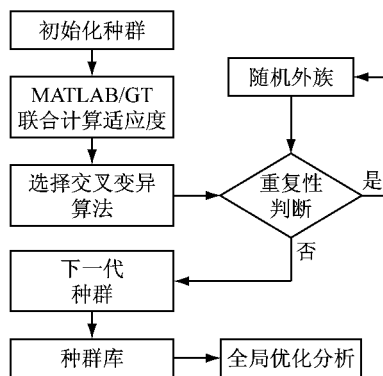


图 12 遗传算法优化流程

Fig. 12 GA optimization process

3.3 优化结果分析

经过 80 代种群迭代,生成了 1 600 个个体组成的种群库,基于油耗与转矩所对应的进气迟闭角、EGR 率、点火提前角、空燃比染色体组分布图如图 13~16 所示。其中,X 轴为油耗,Y 轴为转矩,Z 轴为对应染色体的实数值。相关参数布局基本涵盖了染色体的设定约束范围。

图 13 为染色体进气迟闭角分布图。在 OYZ 投射面上可知,不同数值的进气迟闭角在 80~150 N·m 转矩范围分布基本相同,在 120~150 N·m 转矩范围内个体比较集中,这主要是节气门全开发动机工作的负荷较高。在 OXZ 投射面上可知,不同数值的进气迟闭角在 200~400 g·(kW·h)⁻¹ 分布近似相同,在 200~300 g·(kW·h)⁻¹ 分布密度较高,表明进气迟闭角的选择范围比较合理。结合 OYZ 与 OXZ 面分析可知,小范围的进气迟闭角不会对种群产生关键影响。

图 14 为染色体 EGR 分布图,个体的转矩分布范围及油耗分布范围不变,但个体分布密集度随 EGR 变化而发生变化。在 OYZ 投射面分析可知,EGR 率越高,转矩带分布范围越广,转矩带有降低的趋势。这种结果表现除验证了与第 2 小节得出的

结论一致性(即在其他条件不变的情况下,EGR 率越高发动机转矩越小)外,还更突出地表明,可通过其他参数调节实现转矩的较大范围控制,而且 EGR 率越高,转矩可控范围越广。在 OXZ 投射面分析可知,EGR 率越高发动机油耗分布范围越广,油耗有上升的趋势,15% EGR 率下,油耗范围是 260~400 g·(kW·h)⁻¹,这更进一步表明其他参数调节对 EGR 率优化的重要性。

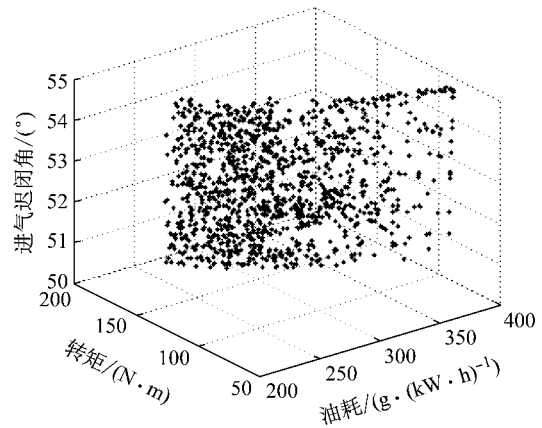


图 13 LIVC 染色体分布

Fig. 13 Distribution of LIVC chromosomes

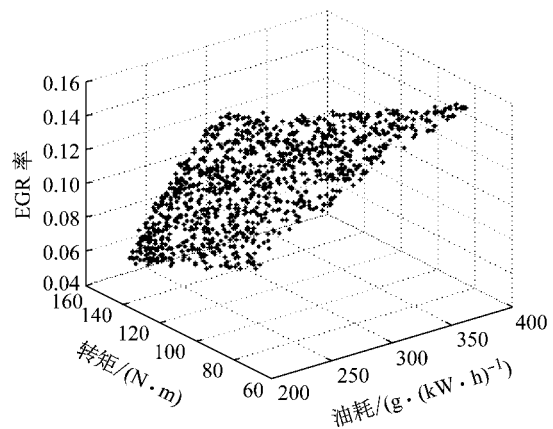


图 14 EGR 染色体分布

Fig. 14 Distribution of EGR chromosomes

图 15 为染色体空燃比分布图。空燃比分布与进气迟闭角分布近似,也较为均匀,不会对种群适应度产生关键影响,但混合气加浓会使得个体在较高转矩分布密集。

图 16 为染色体点火提前角的分布图。基于 OYZ 投射面分析可知,随着点火提前角加大,转矩有上升趋势,且转矩范围带宽有收窄趋势,这说明点火提前角增大有助于提高转矩,也因此较难调节负荷。基于 OXZ 投射面分析可知,随着点火提前角加大,油耗有降低趋势,且油耗范围带宽有明显收窄趋势,这表明点火角增大有助于加速燃烧,降低油耗,使得发动

机工作在较优的经济工况。

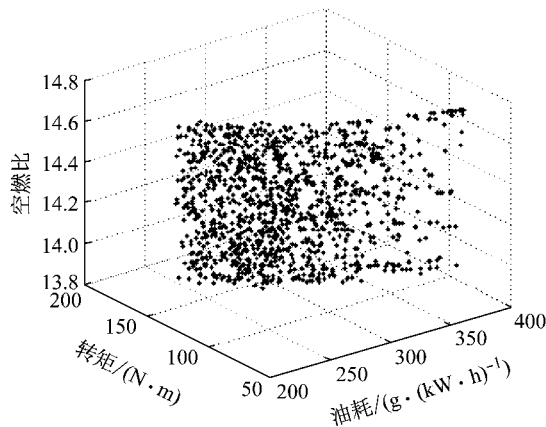


图 15 空燃比染色体分布

Fig. 15 Distribution of A/F chromosomes

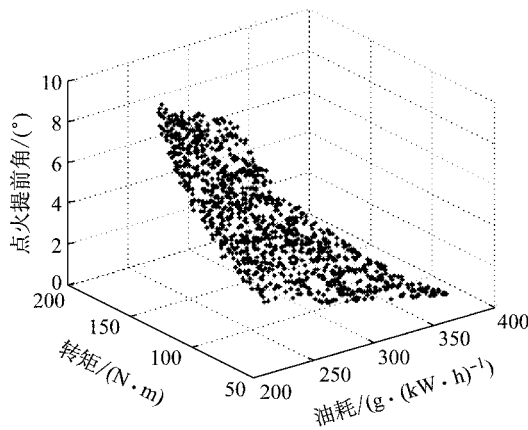


图 16 点火提前角染色体分布

Fig. 16 Distribution of spark advance angle chromosomes

图 13~16 的 OXY 投射面相同, 如图 17 所示, 为全部个体的染色体组对应的油耗-转矩工况点分布图。结果表明, 在节气门全开, 5%~15% 的 EGR 可实现 78~158 N·m 的转矩范围调节, 最优油耗为 229.2 g·(kW·h)⁻¹, 最大油耗为 389.2 g·(kW·h)⁻¹, 与原机油耗相比获得 8% 的改善。在基于扭转为坐标轴的种群个体分布来看, 油耗范围

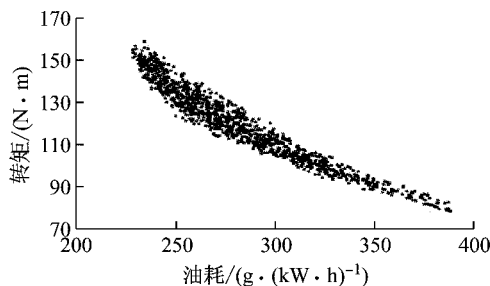


图 17 种群油耗-转矩分布

Fig. 17 Distribution of population fuel consumption-torque

带宽中间粗, 两边细, 随着转矩增大, 油耗有降低趋势, 这表明 5% EGR~15% EGR 主要可用于中高负荷工况, 且较低或较高的极限负荷工况下, 通过其他 3 个参数实现油耗调整度较小。

为进一步分析 3 000 r·min⁻¹ 下不同负荷的油耗最优值, 采用模糊聚类算法生成了 8 个不同负荷工况点, 各工况点对应的转矩及个体数如表 3 所示。

表 3 种群聚类表

Tab. 3 Clusters of population

工况点	个体数	转矩/(N·m)	工况点	个体数	转矩/(N·m)
1	163	79.650 8	5	252	122.293 9
2	161	92.741 1	6	236	131.321 3
3	233	103.138 5	7	182	141.797 9
4	234	113.132 3	8	139	154.690 5

各工况点对应种群的油耗分布如图 18 所示。图中同时对各工况点种群进行全局优化排序, 可获得单组最低油耗点, 并通过多项式拟合最低油耗曲线。各最低油耗点对应的 EGR 率分别为 14.9%、14.3%、14.5%、14.8%、14.3%、10.8%、7.1%、5%, 可用于无节气门负荷调节。

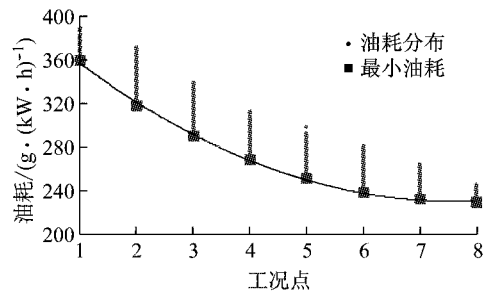


图 18 模糊聚类优化结果

Fig. 18 Optimization results of fuzzy cluster

4 结论

(1) 搭建带 EGR 的 Atkinson 汽油机模型, 在保持其他控制参数不变的情况下, 研究恒转速 3 000 r·min⁻¹ 下, LIVC 与 EGR 对汽油机性能的影响规律。随 LIVC 或 EGR 的增大, Atkinson 汽油机输出转矩下降, 油耗上升, 影响趋势相同, 但 EGR 影响梯度较大, 可通过 EGR 替代过大 LIVC 角来优化 Atkinson 汽油机, 且需要进一步解决油耗问题。

(2) 为探究 EGR 与 LIVC 的节能机理, 通过 MATLAB 实现遗传算法编程及优化流程设计, 联合 GT-power 仿真模型对点火提前角、空燃比、EGR、LIVC 进行了迭代优化, 深入分析了 EGR 优化方法, 通过历代种群的全局优化分析, 得出 EGR 对

(下转第 860 页)