

基于 GT-POWER 的柴油机参数灵敏度分析与优化研究

Research on the Parameter Sensitivity and Optimization of Diesel Engine Based on the GT-POWER

马强 韩树 骆清国 刘红彬

(装甲兵工程学院机械工程系, 北京, 100072)

摘 要: 采用 GT-POWER 软件建立柴油机的工作过程仿真模型, 并通过台架试验验证了模型的准确性; 通过 DOE 回归分析研究了不同工况下喷油提前角、进气门开启角和排气开启角对柴油机性能影响的灵敏度; 以功率最大为目标, 缸内最高爆发压力为限制条件, 在不同转速和负荷下对喷油提前角、进气门开启角和排气门开启角进行了优化, 提高了柴油机性能, 为柴油机设计参数匹配及优化研究提供理论依据和方向。

关键词: GT-POWER, 柴油机, 工作过程, 灵敏度, 优化

Abstract Used the GT-POWER to simulate the working process of the diesel engine, and checked the simulated model through the diesel engine bench test. The influence of fuel injection timing and valve opening timing on the diesel engine in different working conditions was studied based on regression analysis. The maximum power was the optimization objective; the maximum of pressure was the restrictive condition; the fuel injection timing and valve opening timing were optimized at the conditions of different speed and different load. The gist would be improved the engine in diffident operating conditions and provided theoretic guidance for diesel engine design and parameter optimization.

Key Words: GT-POWER; diesel engine; working process; sensitivity; optimization

柴油机的总体性能指标取决于工作及控制参数, 如转速、循环供油量、配气相位、燃烧过程的组织等, 各工作及控制参数的变化, 会使柴油机的性能指标发生较大的改变; 因此在柴油机设计研究阶段, 确定各参数对柴油机性能的影响程度, 分析柴油机各参数灵敏度并进行参数优化, 对柴油机的参数匹配及性能提高具有重要的意义^[1]。

本文采用 GT-POWER 软件建立了柴油机工作过程仿真模型并进行试验验证, 通过 DOE (Design Of Experiment) 模块进行试验设计和回归计算, 得到在不同工况下喷油提前角、进气门开启角和排气门开启角对柴油机缸内最高爆发压力和功率影响的灵敏度, 分析了灵敏度变化的原因, 对不同工况下柴油机参数进行了优化, 得到了参数的最优取值 MAP, 通过优化, 柴油性能得到提升。

1 柴油机缸内工作过程仿真

1.1 缸内过程基本微分方程

在进行缸内工作过程仿真分析时,缸内工作过程的能量守恒方程、质量守恒方程和气体状态方程为^[2]:

能量守恒方程:

$$\frac{dT}{d\varphi} = \frac{1}{mc_v} \left(\frac{dQ_B}{d\varphi} - \frac{dQ_w}{d\varphi} - p \frac{dV}{d\varphi} + h_s \frac{dm_s}{d\varphi} + h_e \frac{dm_e}{d\varphi} - u \frac{dm}{d\varphi} - m \frac{\partial u}{\partial \alpha_\varphi} \frac{d\alpha_\varphi}{d\varphi} \right) \quad (1-1)$$

质量守恒方程:

$$\frac{dm}{d\varphi} = \frac{dm_s}{d\varphi} - \frac{dm_e}{d\varphi} + \frac{dm_B}{d\varphi} \quad (1-2)$$

气体状态方程:

$$pV = mRT \quad (1-3)$$

1.2 燃烧模型

本文采用三元韦伯函数模拟高速柴油机的燃烧放热规律,其公式为^[3]:

$$x = 1 - e^{-a \left(\frac{\varphi - \theta_z}{\varphi_z} \right)^{m+1}} \quad (1-4)$$

$$\frac{dx}{d\varphi} = a \frac{m+1}{\varphi_z} \left(\frac{\varphi - \theta_z}{\varphi_z} \right)^m \cdot e^{-a \left(\frac{\varphi - \theta_z}{\varphi_z} \right)^{m+1}} \quad (1-5)$$

式中: x 为燃烧过程中已燃的燃油量占喷入气缸燃油量的百分比; m 为燃烧品质指数,是表征放热率分布的参数, m 值越大则压力升高比越小,燃烧过程比较平稳; θ_z 为燃烧开始角,当其他参数固定而 θ_z 越大则会导致最高爆发压力越高; φ_z 为燃烧持续角; φ 为曲柄转角; a 为完全燃烧时,参数 $a=6.908$ 。

2 仿真计算及试验验证

2.1 仿真模型的搭建

利用 GT-POWER 软件建立了某废气涡轮增压柴油机工作过程仿真模型。该模型的主要模块包括:进排气管道、中冷器、涡轮增压器、气缸、进排气门和喷油器等。仿真模型如图 1 所示。

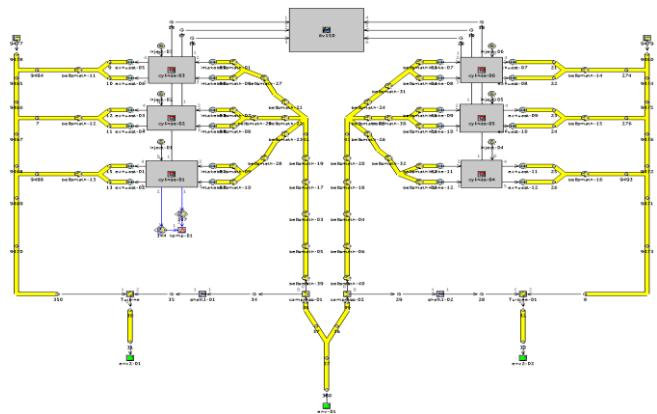


图 1 基于 GT-POWER 建立的仿真模型

2.2 仿真结果与试验结果对比

柴油机转速为 2200r/min 和 1500r/min 不同负荷时, 功率、燃油消耗率的仿真值与试验值的对比如图 2-图 5 所示。

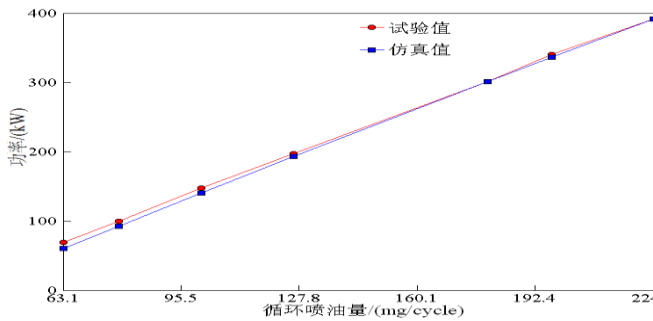


图 2 2200r/min 时功率仿真值与试验值

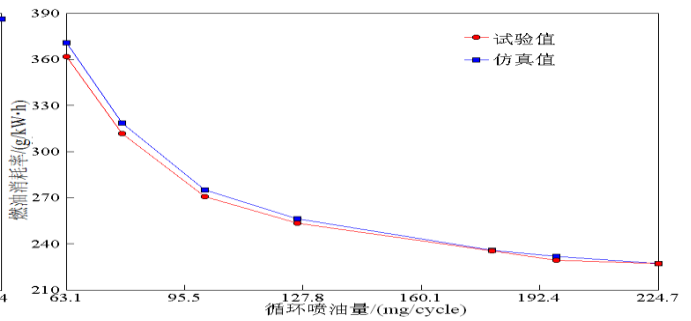


图 3 2200r/min 时燃油消耗率仿真值与试验值

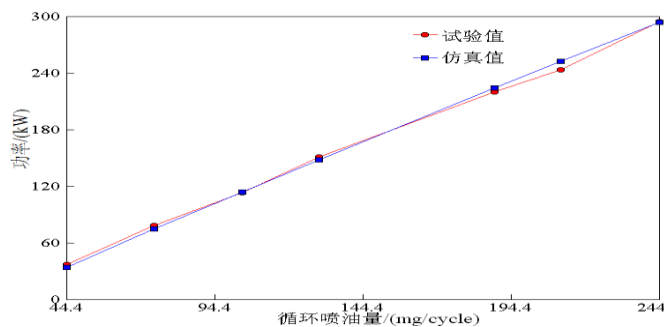


图 4 1500r/min 时功率仿真值与试验值

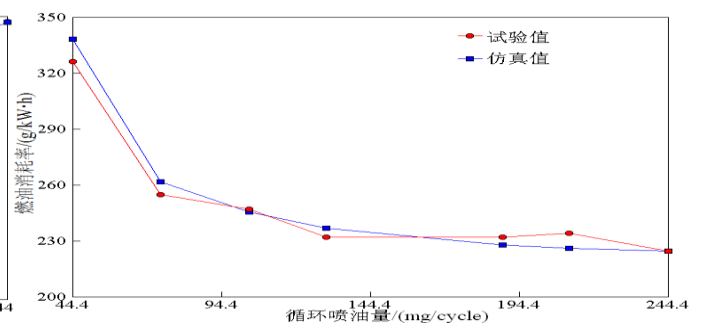


图 5 1500r/min 时燃油消耗率仿真值与试验值

图 2-图 5 为柴油机在 2200r/min 和 1500r/min 转速时功率和燃油消耗率仿真值与试验值的对比。通过比较可以看出, 柴油机功率和燃油消耗率仿真值与试验值之间吻合较好, 误差不超过 4%, 满足计算精度要求, 验证了仿真模型的准确性。

3 柴油机性能参数灵敏度分析

对于柴油机而言, 柴油机性能参数灵敏度可理解为柴油机性能指标 (最高爆发压力和功率等) 对柴油机参数 (喷油提前角和配气相位等) 的改变率^[4]。

采用 GT-POWER 中的 DOE 工具进行柴油机虚拟试验设计, 选取喷油提前角和进、排气门开启角作为实验设计的三个变量, 其中喷油提前角的取值范围为 $-30^{\circ} - -15^{\circ}$, 进气门开启角的取值范围为 $260^{\circ} \text{ CA} - 330^{\circ} \text{ CA}$, 排气门开启角的取值范围为 $100^{\circ} \text{ CA} - 130^{\circ} \text{ CA}$ 。通过 DOE 对生成的设计方案进行计算, 采用回归分析的方法得到各变量以及变量相互作用对柴油机功率和最高爆发压力影响的灵敏度。

分别在 2200r/min、1800r/min 和 1500r/min 转速, 100% 的负荷的工况下, 计算喷油提前角、进

气门开启角和排气门开启角对柴油机最高爆发压力和功率影响的灵敏度。计算结果如图 6-图 11 所示。

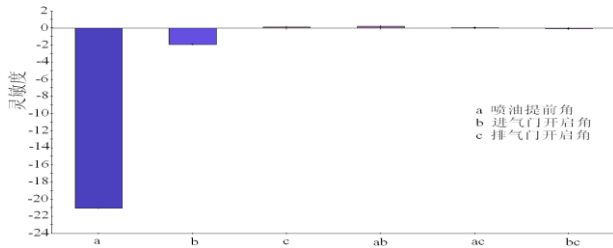


图 6 2200r/min 时参数对最高爆发压力影响的灵敏度

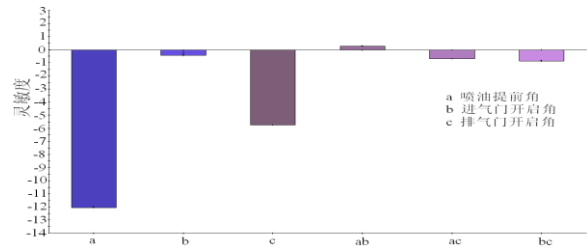


图 7 2200r/min 时参数对功率影响的灵敏度

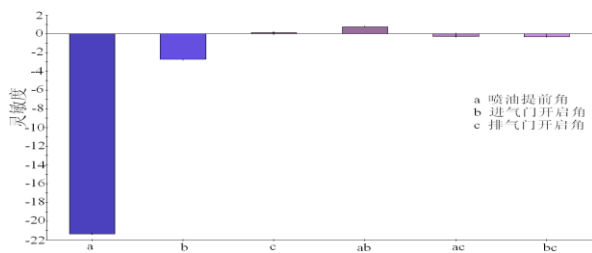


图 8 1800r/min 时参数对最高爆发压力影响的灵敏度

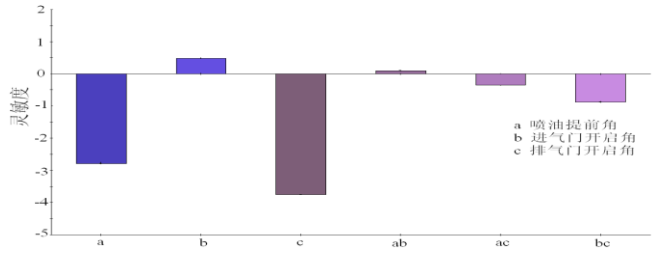


图 9 1800r/min 时参数对功率影响的灵敏度

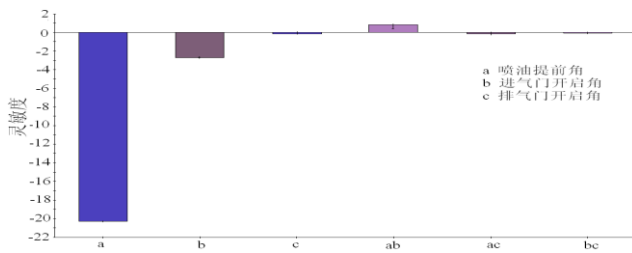


图 10 1500r/min 时参数对最高爆发压力影响的灵敏度

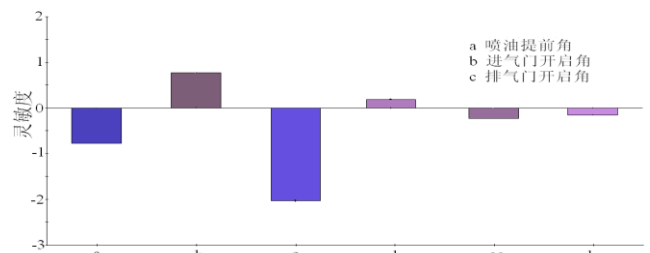


图 11 1500r/min 时参数对功率影响灵敏度

图 6、图 8 和图 10 分别为柴油机在 2200r/min、1800r/min 和 1500r/min 转速最大负荷时各参数对缸内最高爆发压力影响的灵敏度。从图中可以看出，对于缸内最高爆发压力指标来说，参数在一定范围内变化时，喷油提前角的影响强度较大，而进气门开启角和排气门开启角的影响强度较小。这主要是因为：影响缸内爆发压力的主要因素是滞燃期缸内燃烧过程的组织情况，喷油提前角决定了在滞燃期缸内可燃混合气的浓度，可燃混合气的浓度越大，着火后燃烧速度越快，缸内压力升高越快；进气门开启角主要影响燃烧开始之前缸内进气情况，进气越充分，参与燃烧的柴油越多，燃烧时柴油火焰传播速度越快，由于柴油机过量空气系数取值范围在 1.2-2.2 之间，进气门开启角对缸内空气含量在一定范围内影响不大；排气门开启角对滞燃期缸内燃烧过程组织情况几乎无影响。

图 7、图 9 和图 11 分别为柴油机在 2200r/min、1800r/min 和 1500r/min 转速最大负荷时各参数对功率影响的灵敏度。从图中可以看出，对于功率指标来说，参数在一定范围内变化时，喷油提前角和排气门开启角的影响强度较大，进气门开启角的影响强度较小，而且随着转速的降低，喷油提前角的影响强度逐渐减弱，排气门开启角的影响强度逐渐增大。这主要是因为：喷油提前角主要影

响缸内的燃烧过程，进而对柴油机功率产生影响；排气门开启过早，大量高温高压的气体排出气缸，用于活塞做功的能量就越少，排气门开启过晚，活塞上行时排气阻力越大，造成能量损失，这两种情况都对功率有较大的影响，因此排气凸轮定时对功率影响的灵敏度也较大。

4 柴油机性能优化

在 GT-POWER 的 DOE 模块中，以喷油提前角、进气门开启角和排气门开启角为优化变量，以柴油机功率最大为目标，以缸内爆发压力为限制条件，转速取 1500r/min、1600r/min、1800r/min、2000r/min、2200r/min，负荷变化分别为 100%、80%、60%、40%、20%，对喷油提前角、进气门开启角和排气门开启角进行优化，优化结果如图 12-图 14 所示。

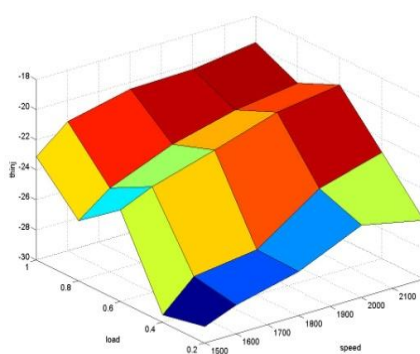


图 12 喷油提前角优化

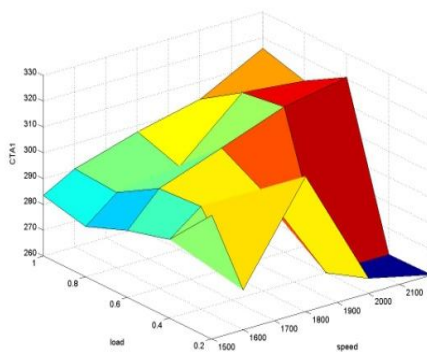


图 13 进气门开启角优化

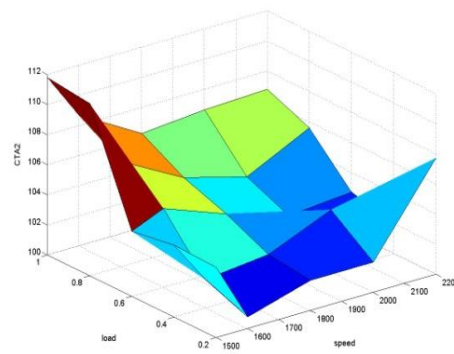


图 14 排气门开启角优化

5 结论

本文采用一维仿真软件 GT-POWER 建立了的柴油机工作过程仿真模型并进行了试验验证，通过 DOE 工具进行实验设计和回归分析，得到喷油提前角和进、排气门开启角对柴油机性能影响的灵敏度，并对不同工况下柴油机的参数进行了优化，主要结论如下：

(1) 对于最高爆发压力指标来说，参数在一定范围内变化时，喷油提前角的影响强度较大，而进气门开启角和排气门开启角的影响强度较小。对于功率指标来说，参数在一定范围内变化时，喷油提前角和排气门开启角的影响强度较大，进气门开启角的影响强度较小。通过灵敏度分析为柴油机参数的匹配提供了依据。

(2) 在不同工况下对柴油机进行优化，得到了不同工况下喷油提前角、进气门开启角和排气门开启角的最优取值 MAP，通过优化提升了柴油机的性能，为柴油机改进设计提供了依据。

6 参考文献

- [1] 徐中明, 胡云龙. 汽车动力性和燃油经济性的参数灵敏度[J]. 专用汽车. 1994, 1: 20-22.
- [2] 魏春源, 张卫正, 葛蕴珊. 高等内燃机学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2001.
- [3] 唐开元, 欧阳光耀. 高等内燃机学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [4] 崔志琴. 基于灵敏度分析的发动机机体动力修改[J]. 车用发动机. 2003, 145(3): 22-24.