

喷油过程参数对极端环境条件下 柴油机性能影响的仿真分析

李蓝媚¹, 王 磊²

- (1. 成都经济技术开发区汽车产业投资服务局, 四川成都 610100;
2. 中国人民解放军 77105 部队修理连, 四川泸州 646102)

摘要: 采用一维仿真分析软件 GT-SUITE 对一台直喷式柴油机进行了整机模拟计算, 分析了在极端环境温度和极端环境压力条件下该柴油机的经济性、动力性和排放性能参数的变化情况。根据分析结果对柴油机在极端环境工况条件下运行时的喷油过程参数做优化调整。仿真结果表明, 在极端高温条件下, 通过调整喷油过程参数可使柴油机动力性、经济性能参数与常态温度条件下十分接近, 排放性能参数在一定程度上获得改善; 在极低环境压力条件下, 适当地增大喷油提前角, 降低喷油量, 可使标定工况下柴油机经济和排放性能得到不同程度的改善。

关键词: 柴油机; 喷油过程; 性能; 极端环境

中图分类号: TK421⁺.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2011)05-0023-04

Simulation Analysis of Injection Procedure Parameters on Diesel Engine Performances under Extreme Environment

Li Lanmei¹, Wang Lei²

- (1. Automotive Industry Investment & Service Bureau of Chengdu Economic & Technological Development Zone, Sichuan Chengdu 610100;
2. Repair Company of 77105 PLA Troops, Sichuan Luzhou 646102)

Abstract: One direct-injection diesel engine was simulated by one-dimensional software GT-SUITE. Its fuel economy, dynamic performance and emission parameters under extreme temperature or pressure environment were analyzed. According to the analysis results, the injection procedure parameters of diesel engine under extreme environment were optimized. Simulation results show that by adjusting injection parameters, the dynamical performance and fuel economy remains nearly the same under extreme high temperature condition as under common temperature environment, and emission parameters are improved to some degree. Under extreme low pressure condition, fuel economy and emission behavior of the diesel engine can be improved more or less by appropriately advancing injection angle and decreasing injection quantity.

Keywords: diesel engine; injection procedure; performance; extreme environment

0 引言

随着石油资源的日渐减少和排放法规的日趋严格, 节能减排已成为全球范围的共识。探讨如何降低柴油机油耗和减少废气排放中的有害成分成为了

当前内燃机工作者的主要研究方向^[1]。在极端环境条件下, 柴油机的进气过程受到环境气温和大气压力的影响, 与常温常压的运转情况相比, 其性能会出现极大的差异。高温或低气压条件下, 环境空气密度下降, 导致柴油机充气量下降, 如果不调整

供油量会造成燃烧时缸内缺氧, 燃烧速度缓慢或燃料燃烧不充分, 柴油机热效率下降, 热负荷升高, 甚至使柴油机不能正常运转^[2]。要改善极端环境状况下柴油机的性能, 主要还是靠改进燃烧。要改进极端环境条件下缸内燃烧, 或者靠改进增压器性能, 或者靠改变燃烧室结构, 但都需要对柴油机结构做较大改动。现代电控高压燃油喷射系统可以比较灵活地改变喷油过程参数(喷油压力、喷油提前角和喷油持续时间), 因此本文拟探讨通过优化喷油过程参数, 使极端环境条件下运转的柴油机的动力性、经济性和排放性能参数得到不同程度恢复的方法。

研究采用一维仿真分析, 利用软件 GT-SUITE 对一台直喷式柴油机进行整机模拟。首先分析该柴油机在极端环境温度和极低环境压力条件下经济性、动力性和排放性能的变化情况, 然后对柴油机性能下降的环境工况喷油过程参数进行优化调整, 旨在得到极端环境条件下较优的柴油机总体性能。

1 模型的建立

1.1 数学模型

计算建立在可压缩一维非定常流体流动和传热的理论基础上, 描述内燃机工作过程的主要偏微分方程^[4,6,8]如下:

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial (\nu)}{\partial x} + \nu \frac{\partial (\rho)}{\partial x} + \frac{\rho \nu \partial (A)}{A \partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\text{动量方程: } \frac{\partial \nu}{\partial t} + \nu \frac{\partial \nu}{\partial x} + \rho \frac{\partial p}{\partial x} + G = 0 \quad (2)$$

能量方程:

$$\left(\frac{\partial p}{\partial t} + \nu \frac{\partial p}{\partial x} \right) - \frac{k p}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial t} + \nu \frac{\partial p}{\partial x} \right) - (k-1) \rho (\dot{q} + \nu G) = 0 \quad (3)$$

$$\text{流体状态方程: } \frac{dp}{p} - \frac{d\rho}{\rho} - \frac{dT}{T} = 0 \quad (4)$$

$$\text{熵方程: } T \left(\frac{\partial s}{\partial t} + \nu \frac{\partial s}{\partial x} \right) - \dot{q} - G \nu = 0 \quad (5)$$

$$\text{声速方程: } \left(\frac{\partial p}{\partial t} + \nu \frac{\partial p}{\partial x} \right) - a^2 \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nu \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) = 0 \quad (6)$$

排放物 Soot 采用 Nagle and Strickland-Constable 模型近似计算^[7]:

$$\frac{w}{12} = \left(\frac{k_A p_{O_2}}{1 + k_Z p_{O_2}} \right) x + k_B p_{O_2} (1 - x) \quad (7)$$

式中, $x = \left(1 + \frac{k_T}{p_{O_2} k_B} \right)^{-1}$

排放物 NO_x 采用 Zeldovich 模型近似计算^[3]。

以上公式中: T 为温度, K; A 为截面积, m²;

p 为压力, Pa; ρ 为流体密度, kg/m³; ν 为速度, m/s; a 为声速, m/s; \dot{q} 为热交换率, J/(kg·s); k 为等熵指数, 无量纲; w 为 Soot 浓度, g/(cm²·s); G 为流体内部比摩擦力, N/kg; k_A 、 k_B 、 k_T 、 k_Z 为经验反应速率常数, 无量纲。

方程的求解采用有限体积法^[5]。

1.2 柴油机主要技术参数

模型以一台直喷式增压柴油机为基准建立, 其基本技术参数如表 1 所示。

表 1 柴油机主要技术参数

| 型式 | 立式、直列、水冷、四冲程 |
|-------------|--------------|
| 进气方式 | 增压(空-空)中冷 |
| 燃烧室形式 | 直喷式 |
| 气缸数 | 4 |
| 气缸直径/mm | 110 |
| 活塞行程/mm | 112 |
| 活塞总排量/L | 4.26 |
| 压缩比 | 17.5 : 1 |
| 发火顺序 | 1-3-4-2 |
| 排气温度(涡后)/°C | ≤580 |

1.3 物理模型结构示意图

依据柴油机内各部分流体流动空间的实际尺寸(长度、直径、弯曲角度、分叉数量及方向等)建立柴油机整机模型。模型中流体流动空间以圆截面通道为主, 对于不是圆截面的流体通道, 利用当量直径等效处理。整机结构示意图如图 1 所示。

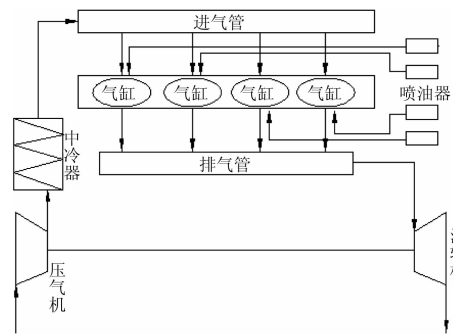


图 1 柴油机模型结构示意图

2 模型的验证

该柴油机标定工况点的相关参数为: 转速 $n = 2\,500$ r/min, 有效功率 $P_e = 113$ kW, 喷油速率 $m = 86.75$ mg/st, 喷油压力 $p_{rail} = 128$ MPa, 喷油持续时间 $t = 2.395$ ms, 喷油提前角 $\theta_i = -12.5$ °CA。将其带入所建立的计算模型。柴油机动性、经济性和其他参数的仿真计算结果与台架试验结果对比如表 2 所示。

由表中数据可知, 与试验相比, 模拟所得有效

扭矩、有效功率、有效燃油消耗率以及空气流量的误差均在2%以内，排温和氮氧化物由于所使用的传热和预测排放模型不够精确导致误差较大，但未超出10%，可认为计算模型基本上满足了工程精度的要求。

表2 试验与计算结果数据比较

| 测试参数 | 试验结果 | 计算结果 | 相对误差/% |
|------------------------------|-------|--------|--------|
| 有效扭矩 $T/(N \cdot m)$ | 433.4 | 434.17 | 0.18 |
| 有效功率 P_e/kW | 113.5 | 113.66 | 0.15 |
| 转速 $n/(r/min)$ | 2 500 | 2 500 | 0.00 |
| 空气流量 $Q_k/(kg/h)$ | 440.3 | 434.4 | 1.34 |
| 有效燃油消耗率 $g_e/g/(kW \cdot h)$ | 229.4 | 229.38 | 0.03 |
| 排气温度 $t/^\circ C$ | 452 | 493 | 9.07 |
| $NO_x/g/(kW \cdot h)$ | 2.68 | 2.883 | 7.58 |

3 极端环境条件对柴油机性能的影响

通常情况下，环境温度越高或者环境压力越低，空气密度越小，空气含氧量也就越少，单位体积空气质量下降。在喷油量不变的条件下吸入密度小的空气会致使柴油机燃烧不充分，动力性、经济性性能下降，同时对柴油机的排放性能也会有一定的影响。下面就环境温度和压力两方面分析柴油机标定工况点性能的变化。

3.1 极端环境温度的影响

保持大气压力0.1 MPa、喷油过程参数不变，设定温度跨度在233~323 K (-40~50 °C)之间，分别选取了233、253、273、298、323 K五个温度工况点，对该柴油机工作过程进行仿真计算。标准大气压力条件下柴油机有效扭矩和有效燃油消耗率随环境温度的变化情况如图2所示，排放物碳烟(Soot)和氮氧化物(NO_x)随温度的变化情况如图3所示。

由图2、图3可知，以常温条件为基准，随着环境温度的降低，空气密度增加，吸入柴油机缸内的氧气增多，燃烧更充分，致使柴油机的有效扭矩增大，有效燃油消耗率降低，碳烟Soot排放量降低；但随着放热率增大，缸内最高温度升高，排放物 NO_x 生成量也逐渐增多。反之，随环境温度的升高，空气密度减小，柴油机动力性、经济性下降，排放物Soot增加， NO_x 减少。模拟结果表明，温度跨度在-40~50 °C之间，该柴油机有效扭矩和燃油消耗率变化幅度并不大，均在3%以内。对于排放物，在环境低温时， NO_x 有所增加但未超出限制标准；而环境高温时，碳烟Soot出现了大幅度增加，在常温的基础上增加了近一倍。因此，在优化柴油机喷油过程参数时，应着眼于极端高温状态。

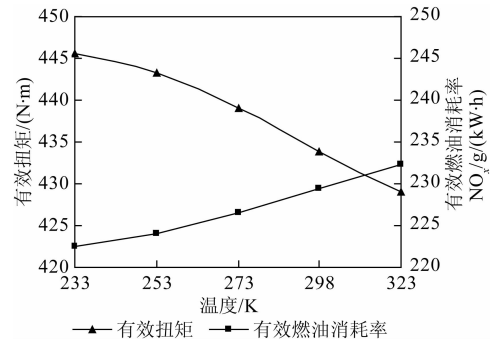
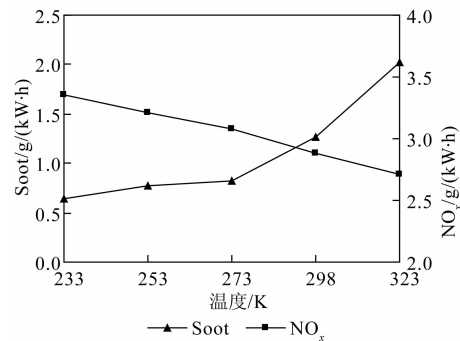


图2 动力性和经济性指标

图3 排放物碳烟 Soot 和 NO_x

3.2 极端环境压力的影响

表3为保持大气环境常温(25 °C)，喷油过程参数不变，设定大气压力分别为0.06、0.075、0.1 MPa，对柴油机进行工作过程模拟计算所得结果。

表3 不同环境压力下柴油机的模拟计算结果

| 大气压力/MPa | 0.06 | 0.075 | 0.1 |
|------------------------------|--------|--------|-------|
| 有效燃油消耗率 $g_e/g/(kW \cdot h)$ | 297.9 | 249.8 | 229.4 |
| 有效扭矩 $T/(N \cdot m)$ | 338.8 | 401.9 | 433.4 |
| 有效功率 P_e/kW | 88.7 | 105.2 | 113.5 |
| 燃烧最高压力 p_{max}/MPa | 74.4 | 89.6 | 111.3 |
| 进气量 $Q_k/(m^3/h)$ | 267.0 | 333.2 | 434.4 |
| 空燃比 α | 13.0 | 16.4 | 21.5 |
| 排气温度 $t/^\circ C$ | 536.64 | 568.79 | 493 |
| $NO_x/g/(kW \cdot h)$ | 1.925 | 2.362 | 2.883 |
| Soot/ $g/(kW \cdot h)$ | 53.48 | 11.78 | 1.23 |

从计算结果可以看出，环境压力从0.1 MPa降至0.06 MPa，进气量急剧减少，从434.4 m³/h降至267 m³/h，喷油量未得到调整，从而使空燃比从21.5迅速降至13.0，较化学计量空燃比14.3还小，造成燃烧极为不充分，柴油机动力性、经济性和排放严重恶化。其中有效功率下降21.8%，油耗率上升30%，排放物Soot增加了数十倍，接近积炭状态，这在柴油机的使用上是绝对不允许的。

4 喷油过程参数的优化

结合上述分析，通过优化调整喷油过程参数，

探讨极端环境下柴油机性能的可能恢复情况。喷油参数优化采用 GT-SUITE 中的优化工具。

4.1 高温环境下的优化

环境温度越高,柴油在喷入气缸后会越易燃烧,在极端高温环境下,使用原常温喷油提前角和喷油量往往会使柴油燃烧变得粗暴,性能下降。表 4 为环境温度 323K 时喷油过程参数调整前后的柴油机性能模拟结果。

表 4 高温下喷油过程参数调整后柴油机性能结果

| 喷油参数和性能参数 | 调整前 | 调整后 |
|--|-------|-------|
| 喷油压力 p_{rail}/MPa | 128 | 128 |
| 喷油持续时间 t/ms | 1.84 | 1.82 |
| 喷油提前角 $\theta_t/^\circ\text{CA}$ | -12.5 | -15 |
| 有效燃油消耗率 $g_e/g/(\text{kW}\cdot\text{h})$ | 232.4 | 227.4 |
| 有效扭矩 $T/(\text{N}\cdot\text{m})$ | 429.1 | 432.5 |
| 有效功率 P_e/kW | 112.3 | 113.2 |
| 燃烧最高压力 p_{max}/MPa | 106.9 | 115.8 |
| 空燃比 α | 20.5 | 20.7 |
| $\text{NO}_x/g/(\text{kW}\cdot\text{h})$ | 2.711 | 4.48 |
| $\text{Soot}/g/(\text{kW}\cdot\text{h})$ | 2.023 | 1.46 |

仿真结果表明,通过适当的增大喷油提前角,缩短喷油持续时间,减少喷油量,该柴油机在极高环境温度条件下运行时的动力性和经济性指标已十分接近常态环境下的参数值;有害排放物虽与常态环境时仍有较大差距,但 Soot 减少了 27.8%。这主要是由于增大喷油提前角,减少喷油量在一定程度上提高了空气燃油混合的质量,改善了燃烧。另外, NO_x 与常态相比有所增加,这是由于缸内的最高燃烧温度过高且该点存氧富足所致,可通过改进增压中冷装置的方式进行优化。

4.2 低压环境下的优化

过低的环境压力使空气稀薄,柴油机由于缺氧致使燃烧恶化,造成性能低下。适当调整喷油过程参数,可使柴油机的性能得到部分恢复。表 5 为柴油机在环境压力为 0.075 MPa 时调节喷油参数前后的性能结果。

低环境压力状态运行时,通过降低喷油压力和缩短喷油持续时间减少喷油量、增加喷油提前角可以达到降低排放污染物的目的,但同时有可能降低了柴油机的动力性。模拟计算过程中发现,通过调整喷油过程参数可实现柴油机动力性、经济性和排放性能的同时改善。但改善后的排放性能仍然很差,从节能与环保出发,本文采取了牺牲部分动力性能取得良好排放性能的做法。在表 5 中所示的喷油过程参数的控制下,柴油机的动力性变化不大,经济性和排放性却得到了大幅度的好转, Soot 成倍减少,

降低到原来的 1/4 左右。原因在于减少喷油量就减轻了进气量的负担,适当增大喷油提前角又提高了燃油混合气的混合程度,从而使燃烧得到了改善。

表 5 低压下喷油过程参数调整后柴油机性能结果

| 喷油参数和性能参数 | 调整前 | 调整后 |
|--|--------|-------|
| 喷油压力 p_{rail}/MPa | 128 | 124 |
| 喷油持续时间 t/ms | 1.84 | 1.7 |
| 喷油提前角 $\theta_t/^\circ\text{CA}$ | -12.5 | -21 |
| 有效燃油消耗率 $g_e/g/(\text{kW}\cdot\text{h})$ | 249.8 | 234.7 |
| 有效扭矩 $T/(\text{N}\cdot\text{m})$ | 401.9 | 383.2 |
| 有效功率 P_e/kW | 105.2 | 100.3 |
| 燃烧最高压力 p_{max}/MPa | 89.6 | 113.4 |
| 进气量 $Q_k/(m^3/h)$ | 333.2 | 327.4 |
| 空燃比 α | 16.4 | 17.9 |
| 排气温度 $t/^\circ\text{C}$ | 568.79 | 521.4 |
| $\text{NO}_x/g/(\text{kW}\cdot\text{h})$ | 2.362 | 4.06 |
| $\text{Soot}/g/(\text{kW}\cdot\text{h})$ | 11.78 | 3.59 |

5 结 论

(1) 环境温度对柴油机性能恶化的影响主要集中在高温端,在极端高温环境条件下,柴油机排放性能下降,有效扭矩和有效燃油消耗率有小幅降低。通过适当增大喷油提前角,缩短喷油持续时间可使柴油机动力性、经济性和排放性能同时得到改善。

(2) 环境压力对柴油机性能影响巨大,在低压环境下,柴油机经济性、动力性和排放性能均出现恶化现象。合理地增大喷油提前角和减少喷油量,可在较优的动力范围内,使柴油机的经济性和排放性能同时得到大幅度的提高。从节能和环保的角度出发,有时甚至需要牺牲部分动力性为代价。

参考文献

- [1] Geellellw. Diesel-and-Benzindirek-teinspritzung [M]. IS-BN3-8169-1951-0,2001.
- [2] 任素慧,李人宪.高原条件下柴油机速度特性的计算模拟[J].内燃机,2007(2):25-28.
- [3] 周龙保.内燃机学[M].北京:机械工业出版社,1999.
- [4] 董尧清,张万平.共轨喷射系统参数对柴油机性能影响的模拟计算[J].车用发动机,2006(5):23-29.
- [5] 李人宪.有限体积法基础(第二版)[M].北京:国防工业出版社,2008.
- [6] 刘峥,张扬军.内燃机一维非定常流动[M].北京:清华大学出版社,2007.
- [7] John B. Heywood. Internal Combustion Engine Fundamentals [R]. McCraw-Hill Company,1988.
- [8] Keiichi Nakagome. Combustion and emission characteristics of premixed lean diesel Combustion Engine [C]. SAE paper 970893.