

# 基于 GT-POWER 的柴油机高海拔进气和喷油参数的匹配研究

张晓琴<sup>1</sup>, 蔡忠周<sup>1</sup>, 李耀宗<sup>1</sup>, 李云广<sup>1</sup>, 黄云亮<sup>1</sup>

1. 中国北方发动机研究所, 天津 300400

**摘要:** 本文以 6V150 柴油机为例, 采用 GT-POWER 软件对柴油机高原环境下进气和喷油参数的匹配标定进行了仿真研究。首先通过建立模型, 分步阐述了涡轮增压系统的标定过程, 并通过与试验数据对比, 验证了增压匹配的可行性; 并对不同海拔高度下的进气压力和喷油正时进行了匹配。计算结果表明: 为保证柴油机在高原地区的动力性能, 随着海拔的升高, 柴油机对应最低进气压力逐渐减小, 海拔 4500m 时, 进气压力降低 12.6%; 随着海拔的升高, 柴油机对应喷油正时呈增大趋势。

**关键词:** 高原 GT-POWER 柴油机 匹配

## 1 前言

我国海拔超过 1000m 的高原分布广阔, 约占我国国土面积的 37%, 海拔 3000m 以上的高原占全国总面积的 26%<sup>[1]</sup>。高原大气条件与平原相比有很显著的差别, 随着海拔的升高, 大气压力下降, 空气密度和含氧量降低。海拔每升高 1000m, 则大气压力下降约 9%。柴油机在高原环境下运行, 动力性能下降, 油耗率升高, 燃烧过程较为粗暴<sup>[2,3]</sup>。本文针对高原环境下工作的增压柴油机, 采用 GT-POWER 建立并校核了柴油机模型, 对高海拔下不同进气与喷油参数的匹配进行研究。

## 2 模型的建立与标定

### 2.1 研究对象与计算模型

#### 2.1.1 研究对象

本文以 6V150 为原机, 对应的主要技术参数如表 1。

表 1 6V150 柴油机的技术参数

发动机型式	V 型 6 缸、增压中冷、直列机械泵
缸径(mm)	150
冲程(mm)	160
压缩比	13.5
排量(L)	2.83
标定转速(r/min)	2200

#### 2.1.2 计算模型的建立

本文利用发动机一维软件 GT-POWER 建立了大功率增压柴油机仿真模型。模型的建立满足如下假设条件: 工质为理想气体, 缸内工质均匀混合, 且完全燃烧; 气体流入和流出气缸的流动过程为准稳态流动过程; 进排气管进行一维简化, 满足质量守恒、能量守恒、动量守恒和气体状态方程<sup>[4]</sup>。

将柴油机简化成进气系统、排气系统、燃烧系统、喷油系统、增压系统、中冷器以及环境边界

及相应连接管路等模型组成的计算模型, 所建立的 6V150 柴油机计算模型如图 1 所示。

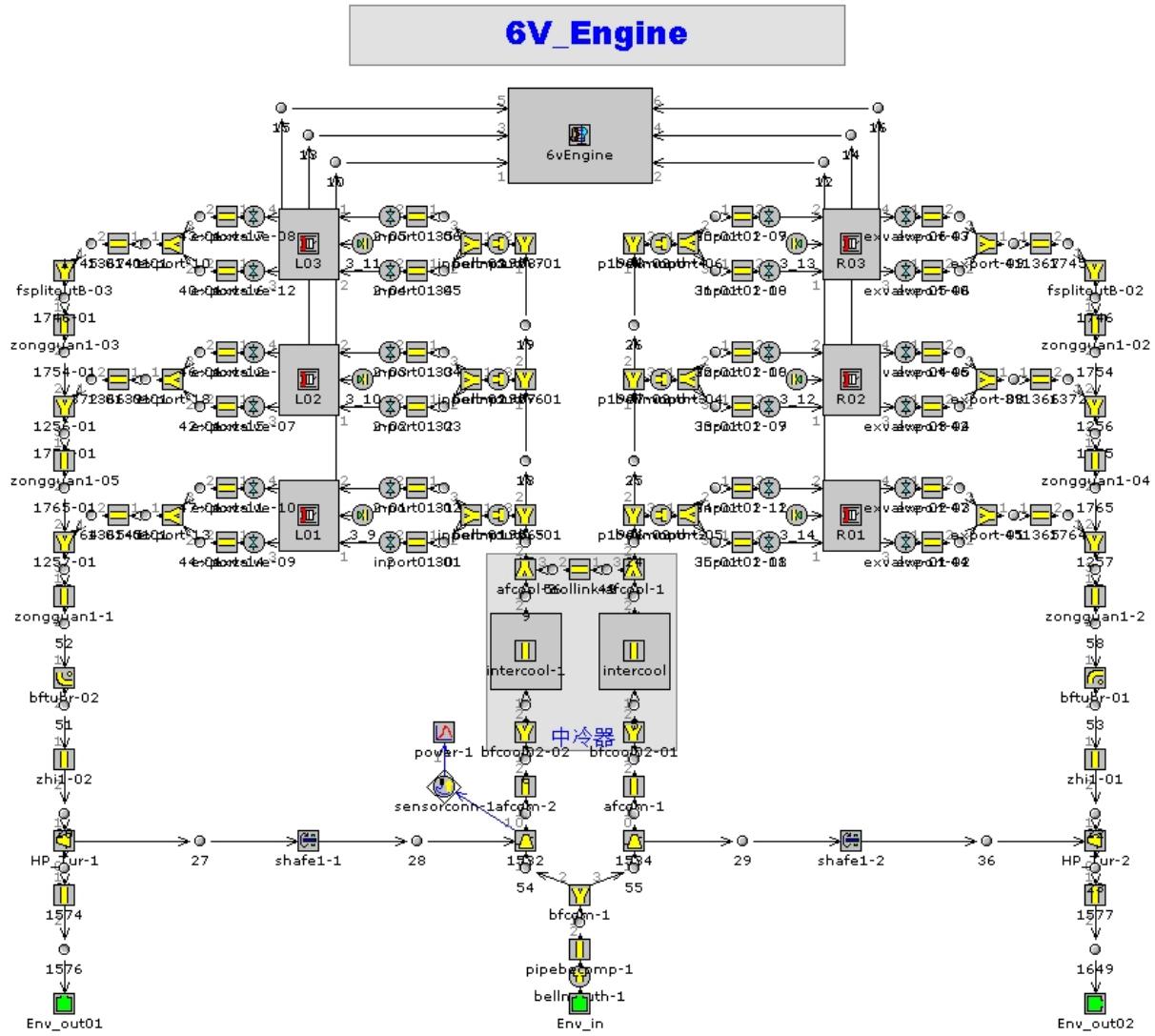


图 1 6V150 的柴油机计算模型

## 2.2 计算模型的标定

### 2.2.1 涡轮增压系统的标定

柴油机与增压器的匹配有三个方面内容<sup>[5]</sup>: 发动机与压气机的匹配、发动机与涡轮的匹配以及涡轮增压整机的匹配。

#### 1) 发动机与压气机的匹配

发动机调试完成后, 说明发动机工作正常。在柴油机模型中加入压气机模型, 进行发动机和压气机模拟增压调试。压气机增压模型如图 2 所示。在此过程中, 压气机转速给定, 目的是得到与转速对应的压比和流量。6V150 柴油机标定功率点时压气机转速设定为 93000 r / min。运行模型, 适当调整压气机转速, 使空气流量达到要求值, 同时不能超过各项限定指标。

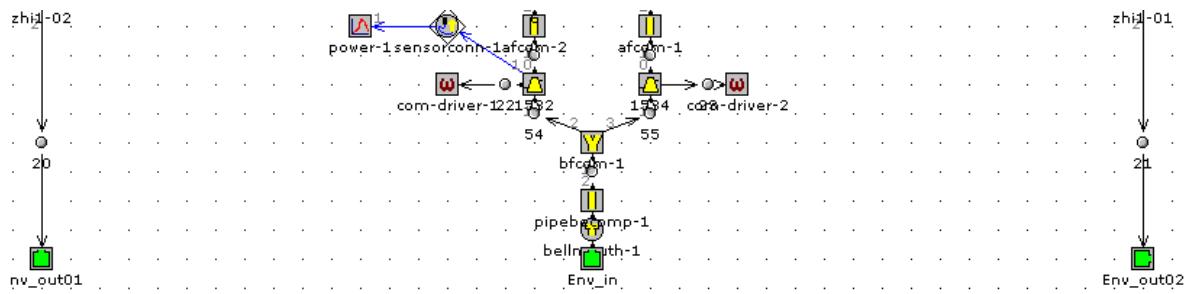


图 2 压气机增压模型

## 2) 发动机与涡轮的匹配

完成上一步建模和计算，发动机和压气机达到了匹配要求，之后匹配满足要求的涡轮。在前面模型的基础上加涡轮模型。涡轮增压模型如图 3 所示。匹配计算时涡轮和压气机转速与上一步最终压气机转速保持一致。运行模型，调整涡轮的流量乘数，使柴油机进气量达到要求，同时满足各项限定值。此时，压气机进口和涡轮的出口设定为环境状态值。

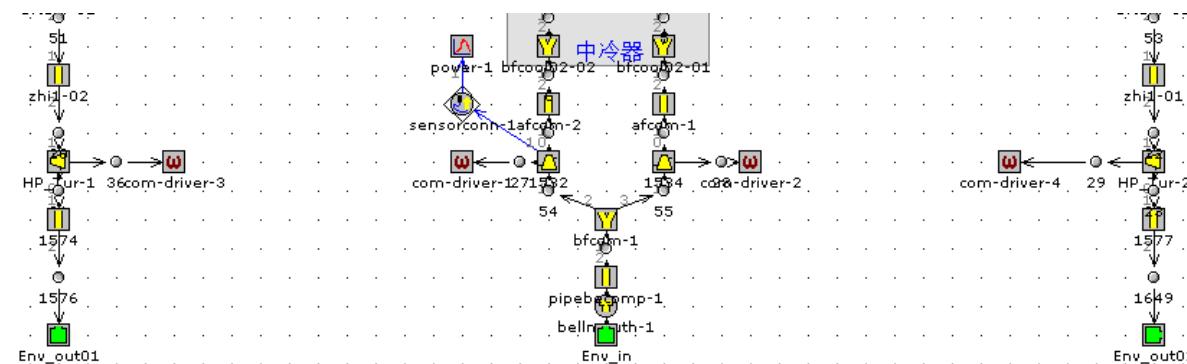


图 3 涡轮增压模型

### 3) 涡轮增压发动机整机匹配

在压气机和涡轮之间使用刚性轴连接并输入机械效率。通过调整涡轮效率乘数(Efficiency Multiplier)。使进气流量达到预定值。如果计算得到的空气流量小于目标流量，则增大涡轮效率乘数。由于增大涡轮流量乘数，排气能量更多转化为涡轮的动能，涡轮转速升高。压气机流量增大。反之，则减小涡轮效率乘数。这一步是为了使两者功率达到平衡。完整涡轮增压器模型如图 4 所示。

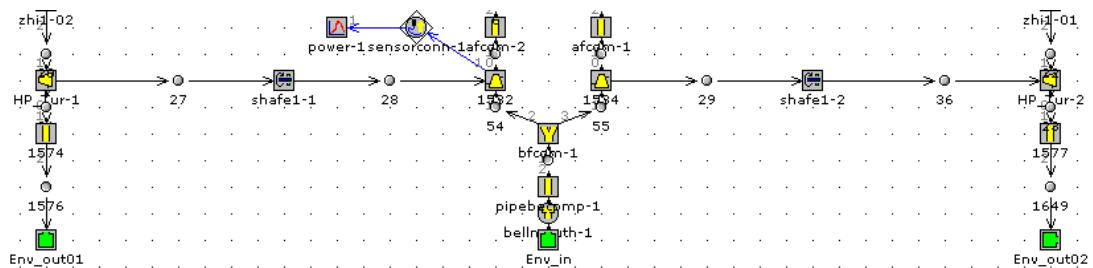


图 4 完整涡轮增压器模型

### 2.2.2 示功图的标定

为了确定计算所需初始条件, 对所选模型和计算方法进行验证, 将仿真计算出的标定点示功图与试验数据进行对比, 其吻合程度大致可以说明仿真计算的准确性。图 5 所示为平均缸内压力曲线仿真模型与试验结果的对比。图中可见, 仿真模型与试验结果吻合程度较好。

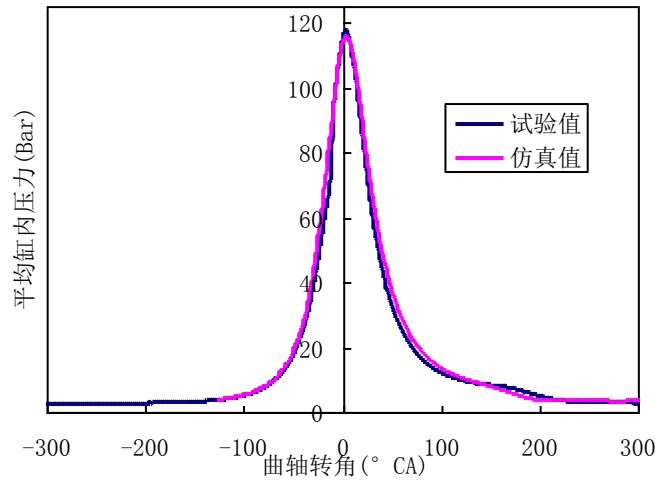


图 5 平均缸内压力曲线仿真模型与试验结果的对比

### 3 计算结果与分析

#### 3.1 进气压力的高海拔匹配

在高原环境下运行的大功率增压柴油机, 发动机的进气量随海拔的升高而减小, 柴油机在高海拔地区燃烧恶化, 后燃增加, 排温升高, 废气能量增大, 同时柴油机的排气背压减小, 共同造成增压器的转速升高, 容易出现超速现象, 因此, 为防止压气机增压压力过高以及涡轮增压器超速, 在保证发动机性能的前提下, 尽可能降低进气压力。

图 6 所示为不同海拔高度对应的最低进气压力。图中可见, 海拔 1000m 时满足标定点对应功率的最低进气压力为 950mmHg。随着海拔高度的升高, 进气压力逐渐减小。当海拔高度达到 4500m 时, 进气压力降低了 12.6%。

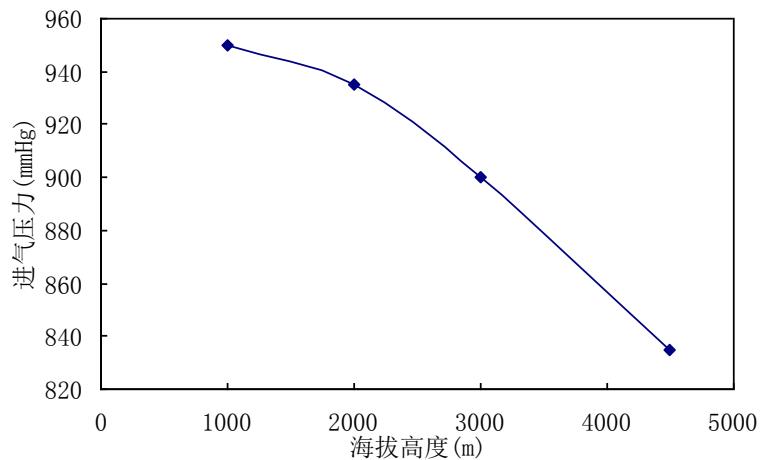


图 6 不同海拔高度对应的最低进气压力

表 2 所示为不同海拔高度最低进气压力时对应的各项性能指标。表中可见, 随着海拔高度的升高, 确定的最低进气压力所能达到的有效功率处于减小趋势, 有效燃油消耗率增大, 最高燃烧压力

降低, 涡前排温逐渐增大。这是因为随着海拔高度的升高, 大气压力下降, 空气密度降低, 柴油机进气量减少, 过量空气系数下降; 海拔高度 3000m 以下对应的柴油机有效功率基本不降低, 海拔高度为 4500m 时, 功率降低了 6%, 由于排气温度达到了限制指标, 此时对应的进气压力为最低, 增压压力不能再低。

表 2 不同海拔高度最低进气压力时对应的各项性能指标

海拔高度 (m)	进气压力 (mmHg)	有效功率 (kW)	有效燃油消耗率 (g/kW·h)	最高燃烧压力 (MPa)	涡前排温 (°C)
1000	950	389	236.2	12.2	572
2000	935	385.7	238.2	11.8	598
3000	900	379.6	242	11.2	620
4500	835	365.5	251.4	10.0	650

### 3.2 喷油正时的高海拔匹配

柴油机在高原运行时, 发动机工作时滞燃期增大, 导致燃料不能在上止点附近迅速燃烧, 造成发动机的动力性和燃油经济性下降, 而且还会使发动机过热、冒黑烟和启动困难。故在高原环境条件下, 需要对柴油机的喷油定时进行调整。

图 7 所示为不同海拔高度对应喷油提前角的变化。图中可见, 为保证功率的要求, 随着海拔高度的升高, 喷油提前角增大。燃烧始点的推迟, 需要喷油提前角的调整, 以补偿燃烧重心的后移。随海拔升高, 在全负荷工况对喷油参数进行调整, 能够使柴油机保持较好的空燃比范围, 改善缸内燃烧, 提高燃烧效率; 并有助于控制滞燃期、燃烧持续期等燃烧参数, 海拔高度和喷油参数的改变, 对柴油机的缸内燃烧过程产生影响。

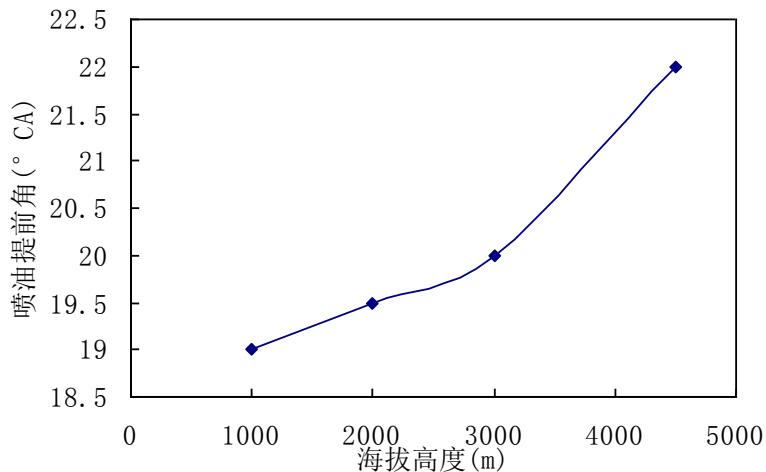


图 7 不同海拔高度对应的喷油提前角

表 3 所示为海拔 4500m 不同喷油提前角对应的性能指标。表中可见, 随着喷油提前角的增大, 为了提高功率, 循环油量增大, 有效燃油消耗率基本保持不变, 受最高燃烧压力的限值, 喷油提前角不能太大, 因为喷油提前角太大, 会导致滞燃期增大, 参与预混合燃烧的燃油份额增多, 压力升高较快, 容易造成压力震荡, 进而造成燃烧过程粗暴。

表 3 海拔 4500m 不同喷油提前角对应的性能指标

喷油提前角 (°CA)	有效功率 (kW)	有效燃油消耗率 (g/kW·h)	最高燃烧压力 (MPa)	涡前排温 (°C)
-19	303.6	251.8	8.9	580
-22	365.5	250.0	10.2	650

## 4 小结

本文以 6V150 增压柴油机作为研究对象, 对该增压柴油机的高原环境下进行了仿真分析和匹配研究。主要结果如下:

- 1) 应用 GT-Power 软件建立增压柴油机的工作过程的仿真模型, 通过计算结果与试验结果的对比分析, 验证了仿真模型的正确性;
- 2) 研究了进气以及喷油参数随海拔高度的优化匹配。结果为: 随着海拔高度的升高, 进气压力逐渐降低, 当海拔高度达到 4500m 时, 进气压力降低了 12.6%; 喷油正时随着海拔高度的升高而增大。

## 参考文献:

- [1] 王瑞林. 柴油机高原环境适应性研究 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2013.
- [2] 张海雷. 柴油机变海拔涡轮增压技术研究 [D]. 北京: 清华大学, 2008.
- [3] 骆清国, 刘红彬, 聂彬, 等. 基于 GT-POWER 的柴油机环境适应性研究 [J]. 装甲兵工程学院学报, 2009 (5): 31-34.
- [4] 刘杨. 增压柴油及进排气系统优化匹配的仿真研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- [5] 王强, 苏铁熊, 张俊跃. 柴油机涡轮增压系统在 GT-POWER 中标定方法的研究 [J]. 现代车用动力, 2012, 2 (1): 51-53.