

某柴油机变海拔增压系统研究

Research on the turbocharging system of a diesel engine in varying altitude

曹杰 刘胜 曲栓

(中国北方发动机研究所)

摘要: 建立了某增压非中冷柴油机整机模型,为实现发动机变海拔运行要求,设计了可调废气旁通涡轮增压系统,按照等过量空气系数的原则进行了变海拔条件下油气调节的计算,得到了满足要求的增压参数和供油量随海拔变化的调节规律;在原机加装中冷器试验基础上进行了增压中冷仿真计算,分析了影响中冷效果的因素,并提出发动机采用中冷后各系统的匹配调整方向。

关键词: 变海拔; 增压系统; 中冷; GT-Power; 匹配

Abstract: A model of the turbocharging non cooling diesel engine was set up, for the target of that the engine can operate at different altitude. Parameters of an adjustable bypass valve turbocharging system was estimated, the amount of the fuel and air was calculated at different altitude based on equal lambda, based on the examination of the original engine added cooling system, calculated and analyzed the factors affect the cooling effect, gained technique of turbocharging cooling engine system matching method.

Key words: Varying Altitude; Turbocharging System; Cooling; GT-Power; Matching

发动机在高海拔地区使用时,由于大气环境的改变,造成进入柴油机气缸内的空气量减少,柴油机缸内过量空气系数变小,导致柴油机燃烧恶化,热负荷增加;另一方面由于冷却风扇质量流量减小,导致冷却系统散热能力下降,使得柴油机容易出现过热,严重影响了工作可靠性。发动机涡前排气温度、增压器转速、最高燃烧压力、烟度和油耗率等其中任一指标都可能成为限制发动机发出正常功率的障碍。发动机在变海拔条件下工作时,需要兼顾高低海拔环境下的工作性能,提高发动机变海拔适应性。

1 模型建立与标定

某发动机为增压非中冷柴油机,根据发动机结构及性能参数建立了 GT-Power 仿真计算模型(图 1),通过高原模拟试验数据对计算模型进行了标定,见表 1。

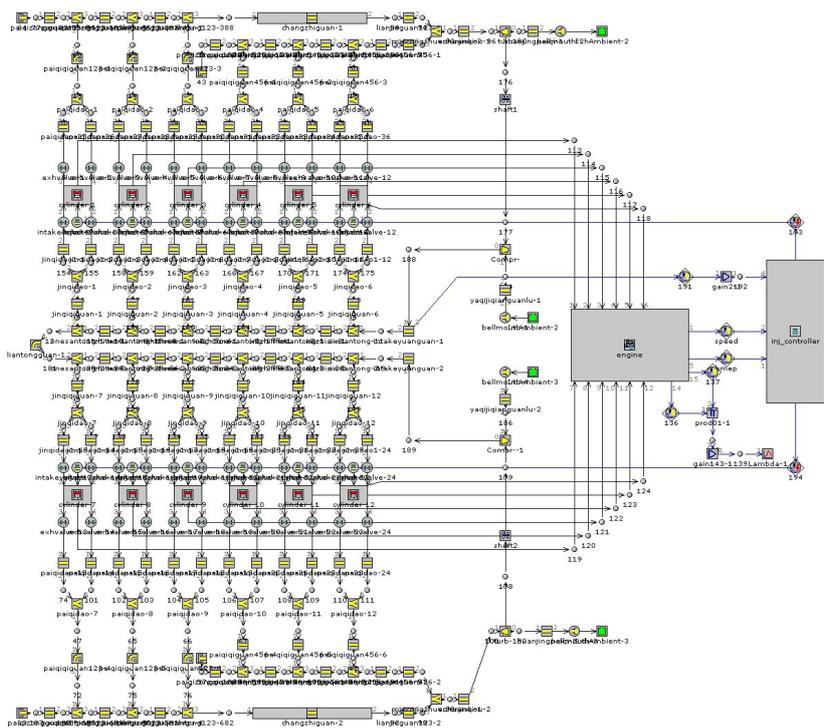


图 1 发动机仿真计算模型

表 1 模型标定

校核参数	试验值	计算值	试验值	计算值
发动机转速 r/min	2000	2000	1400	1400
功率 kW	576	580	480	480
空气流量 kg/h	3953	4014	2621	2505
最大爆压 bar	98.0	98.4	92.4	91.0
压后总压 kPa	183.1	183.8	150.6	149.0
压后温度℃	121	116	91	89
总压比	2.08	2.10	1.70	1.67
涡轮前压力（左）kPa	151.2	153.1	123.0	121.7
油耗率 g/kW.h	238	236	221	221
增压器转速（左）r/min	55800	55109	45600	45016

2 可调废气旁通涡轮增压系统参数设计

由于该发动机要适应四千多米变海拔的环境条件，发动机流量和压比变化幅度大，为满足变海拔适应性要求，根据该发动机的强化程度，增压系统采用可调废气旁通涡轮增压系统，满足发动机在不同海拔环境下正常运行需求。

2.1 增压参数的估算及压气机图谱确定

根据发动机的功率要求、设计的油耗率和过量空气系数以及参考原机的扫气系数、充气效率等参数进行增压系统参数估算。

增压发动机所需空气流量:

$$G_c = \frac{N_e g_e \alpha \eta_s L_0}{3600} \times 10^{-3} \quad (1)$$

N_e —— 发动机功率, kW;

g_e —— 燃油消耗率, g/(kW·h);

α —— 过量空气系数;

η_s —— 扫气系数;

L_0 —— 理论空燃比。

进气总管压力:

$$P_s = \frac{G_c R T_s}{V_d \eta_v \frac{n}{120}} \quad (2)$$

R —— 气体常数, J/(kg·K);

T_s —— 进气总管空气温度, K;

V_d —— 发动机排量, m³;

η_v —— 充气效率;

n —— 发动机转速, r/min。

压比:

$$\pi_c = \frac{P_s}{P_c} \quad (3)$$

P_c —— 压气机前压力, bar。

通过估算得到在 4500m 海拔下, 满足功率为平原 85%, 过量空气系数为 2 时, 需要增压器压比 3.4, 空气流量 0.92kg/s, 超出了原机匹配增压器的流量和压比范围。根据需要的压比和流量范围, 选择增压器 H140 的压气机图谱, 见图 2。

2.2 涡轮当量流通面积确定

在高原模拟试验室进行了 1000m 和 4500m 发动机外特性试验, 4500m 相比 1000m 在标定点功率下降 20%, 最大扭矩点功率降低 31.5%。因此, 发动机增压匹配点选择 4500m 条件下最大扭矩点, 在标定转速时通过放气使发动机在 4500m 功率降低 ≤ 15%。匹配过程计算按照与平原条件下相等的过量空气系数进行, 因此海拔 4500m 时发动机功率和气量要实现表 2 的指标。

表 2 海拔 4500m 性能指标

	最大扭矩转速	标定转速
平均有效压力 bar	8.85	7.67
过量空气系数	1.7	2

原机 4500m 最大扭矩转速点的匹配计算，减小涡轮流通面积都无法满足过量空气系数的要求；最大扭矩点转速增加 200r/min 后，原涡轮当量流通面积缩小 27.4%，可以满足课题要求，见表 3。

表 3 涡轮当量流通能力的确定

海拔 4500m	最大扭矩转速	标定转速
涡轮当量流通面积	原涡轮当量流通面积的 72.6%	原涡轮当量流通面积的 72.6%
旁通流量比	0	5.2%
过量空气系数	1.7	2
压气机效率	0.74	0.78
压比	2.96	3.47
增压器转速/ (r/min)	62459	68000

3 变海拔油气调节计算

某柴油机可调废气旁通涡轮增压器参数设计，按照不同海拔等过量空气系数的原则（标定转速点 2，最大扭矩点 1.7），使该机在 4500m 功率降 $\leq 15\%$ ，3000m 功率与平原相同，在排温和最大燃烧压力约束下，进行了不同海拔放气阀开度计算，得到了变海拔各工况旁通阀开度和喷油量及运行参数，各海拔工况在增压器图谱上运行线见图 2，油气调节规律见图 3。

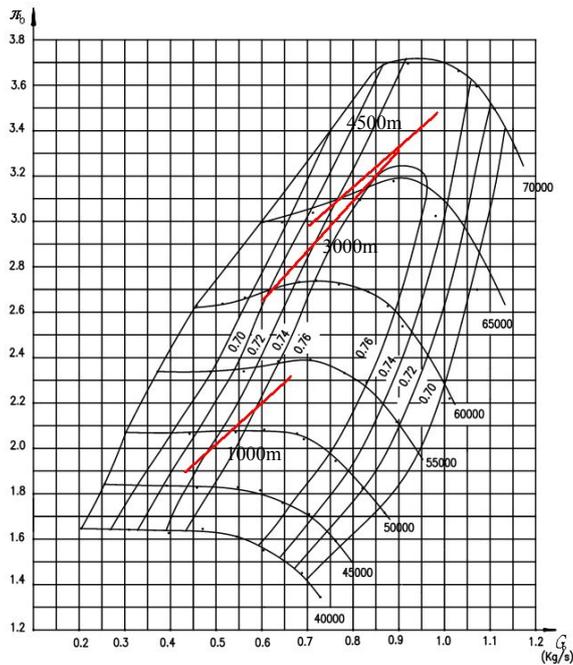


图 2 不同海拔条件下发动机运行线

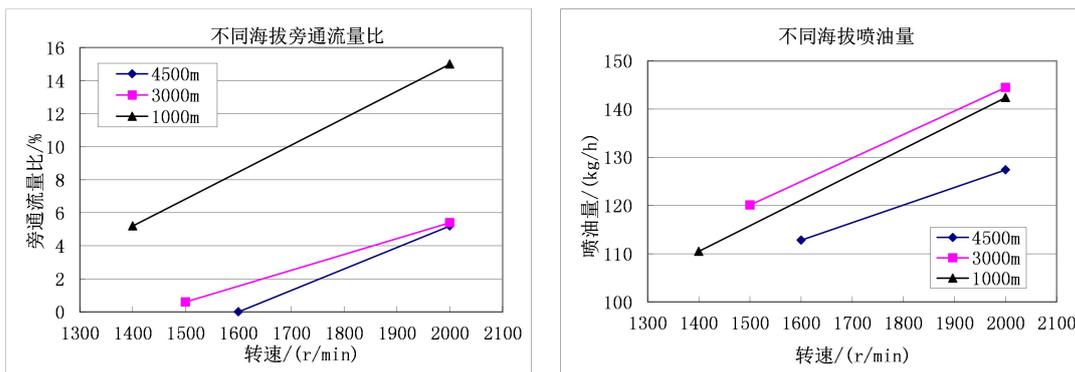


图 3 不同海拔条件下油气调节规律

4 中冷分析

某柴油机为增压非中冷柴油机，为增加充气密度，提高进气量，该增压发动机需要进行进气中冷，尤其是在高海拔环境发动机压比较高，压后温度较高，更有必要进行进气中冷。

在高原试验室进行了加装中冷器的试验，在原机进气管路上加装了中冷器，其他系统参数不做改动，试验结果：油耗升高，排温上升，加装中冷器反而造成发动机性能恶化，见图 4。对试验数据分析发现，虽然加装的中冷器及其联接管路对进气产生阻力损失，但是阻力损失在设计技术指标范围内，通过加装中冷器使进气温度大幅降低，但是发动机性能并没有收到中冷后预期的良好效果。

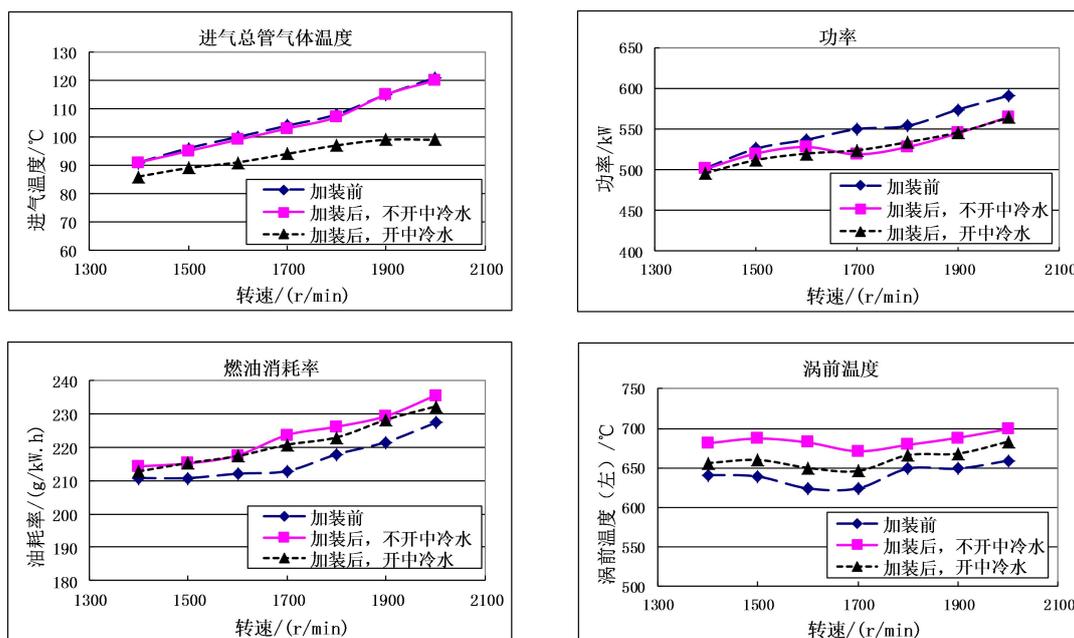


图 4 1000m 加装中冷器试验

为使发动机在增压中冷后达到良好的性能,分析发动机中冷后影响进气量的因素。通过 GT 模型中进行分析计算,选择 3000m 海拔 2000r/min 工况,分析进气温度降低、中冷器压力损失对整机性能的影响。计算过程进行了 5 个算例,见表 4,分别考虑中冷后温度降低与压降对进气流量的影响:算例 2 中冷后温度由算例 1 的 180℃降低到 90℃,算例 1 与算例 2 不考虑中冷器压降;算例 3~算例 5 中冷后温度 90℃,压降分别为 9kPa、12kPa、15kPa。

表 4 中冷温度及压降对增压中冷发动机的影响

算例	1	2	3	4	5
功率 kW	497	497	497	497	497
中冷前压力 kPa	183	175	172	169	167
中冷后压力 kPa	183	175	163	157	152
压力降 kPa	0	0	9	12	15
中冷后温度℃	180	90	90	90	90
爆压 MPa	8.85	9.0	8.5	8.3	8.1
空气流量 kg/h	3437	3655	3333	3167	3019
燃油耗量 kg/h	127	123	124.2	125	126
充气效率	1.07	0.95	0.93	0.92	0.9

$$G = \eta_v \rho_s V_d \frac{n}{120} = \eta_v \frac{P_s}{RT_s} V_d \frac{n}{120} \quad (4)$$

算例 2 在算例 1 的基础上仅仅降低了进气温度, 由算例 1 的 180℃ 降低到 90℃, 其他参数不变, 结果进气流量由 3437kg/h 增加到 3655kg/h, 增幅 6.3%, 增幅不大。分析原因, 从公式 (4) 可以看到, 一台发动机在一定转速下, 进气流量受进气管空气密度和充量系数影响。进气温度由 180℃ 降低到 90℃, 降低 20%, 在相同的进气管压力条件下, 进气密度相应比例增大, 进气量也应相应提高 20%, 但是从计算结果看到, 进气温度由 180℃ 降低到 90℃, 充气效率降低 11.2%, 另外由于进气温度降低, 导致排气温度降低, 涡前废气能量减小, 增压器压比降低, 增压后压力降低 4.4%, 因此中冷后进气量并没有预期的增加。中冷后温度降低导致充量系数降低、中冷带走能量导致增压压力降低两方面因素制约了中冷效果。

中冷器一般具有 10~15kPa 左右的压力损失, 算例 3、4、5 在算例 2 的基础上中冷温度不变, 增加了 9kPa、12kPa、15kPa 的压力降, 可以看到一方面进气压力降低, 另外充气效率降低, 空气量随之减小。

通过对中冷的计算分析, 可以知道, 增压空气流经中冷器及其联接管路时产生的压力下降、增压空气温度降低后充量系数降低以及中冷带走能量导致涡前废气能量减小增压压力降低, 上述三方面因素制约了增压中冷后进气量的有效增加, 影响了中冷效果。

通过分析可以得到, 增压非中冷柴油机改为增压中冷发动机, 需要选配中冷效率高、压力损失小的中冷器, 优化设计中冷连接管路减小管路阻力损失, 尤其是在高海拔条件下, 发动机空气体积流量大大增加, 流动阻力损失会比平原高; 发动机采用中冷后必须相应减小增压器涡轮流通截面, 同时对供油系统参数、气门重叠角等参数进行系统性优化才能收到增压中冷所预期的效果。

5 总结

为提高某增压非中冷发动机变海拔适应性, 通过建模计算, 设计了可调废气旁通涡轮增压器并确定了其主要参数, 计算得到了变海拔各工况变海拔油气调节规律, 满足了变海拔适应性指标要求。

结合原机加装中冷器试验, 进行了增压中冷仿真, 计算分析了影响中冷效果的因素, 结果表明非中冷发动机改为中冷发动机, 通过单一加装中冷器降低进气温度并不能大幅提高进气充量, 而要从系统的角度同时调整涡轮流通面积、优化中冷管路、供油系统、配气等参数才能收到增压中冷所预期的效果。

6 参考文献

- [1] 周龙保. 内燃机学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [2] 朱大鑫. 涡轮增压与涡轮增压器 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.