

某增压汽油机润滑系统计算

Lubrication System Simulation of a TC Gasoline Engine

刘系嵩 贺燕铭 李斌

北京汽车动力总成有限公司

摘要: 本文针对某款增压汽油机, 使用 GT-SUITE 软件建立了润滑系统模型, 分析了稳态不同油温下的油压、润滑油流量和轴承油膜厚度; 并进行了瞬态启动充油的计算, 分析了油压和油膜的建立时间, 以及润滑系统各处的充油速度。

关键词: GT-SUITE; 润滑系统; 稳态; 启动充油

Abstract: Lubrication system of a TC gasoline engine was built in GT-SUITE. Oil pressure, flow rate and oil film thickness at different temperature and different position were analyzed in steady simulation. Oil pressure and film thickness building velocity and system priming velocity at different position were also analyzed in priming simulation.

Key words: GT-SUITE; Lubrication System; Steady State; Priming

1 简介

润滑系统是发动机的几大关键系统之一, 对保障发动机安全、可靠运行起着至关重要的作用。在现代发动机中, 特别是增压发动机中, 润滑系统还更多肩负着冷却功能, 如冷却活塞; 张紧功能, 如链条张紧器; 以及执行功能, 如 VVT 相位器等液压执行器。发动机的各种验证试验中, 会对这些功能进行验证, 但往往受限于试验条件、成本等因素, 做到每一工况都进行验证并不现实, 且实验分析的内容也不够深入。因而需要结合仿真模拟进行分析。

本文便通过仿真模拟软件, 对一些苛刻的稳态工况, 如高油温, 和目前无法实现的实验, 如充油过程, 对润滑系统进行了稳态和瞬态计算分析。

2 模型建立与验证

根据润滑系统管路布局, 使用 GT-SUITE 建立润滑系统模型, 如图 1 所示。除常规的主轴承、连杆轴承和凸轮轴承外, 还包含平衡轴承、平挺柱式液压挺柱、活塞冷却喷嘴、涡轮增压器和链条张紧器。其中, 液压挺柱使用“AnLeakConn”模块; 机油滤清器、机油冷却器、活塞冷却喷嘴和涡轮增压器的“流量-压降”曲线由供应商提供, 使用“PressureLossConn”模块; 链条张紧器使用“OrificeConn”模块; 机油泵 MAP 由供应商提供; 缸压曲线为台架测试结果; 凸轮轴承受力曲线由使用 GT-SUITE 搭建的配气机构模型计算得到。

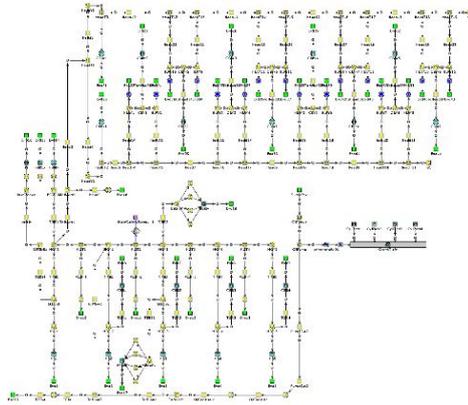


图 1 润滑系统模型

模型中使用最大轴承安装间隙，并根据温度对间隙进行修正；使用 5W-30 润滑油。模拟与实验测试对比如图 2 所示，泵后、缸体主油道和主轴承油压吻合较好，平衡轴承油压误差稍大。可以使用此模型进行下一步计算。

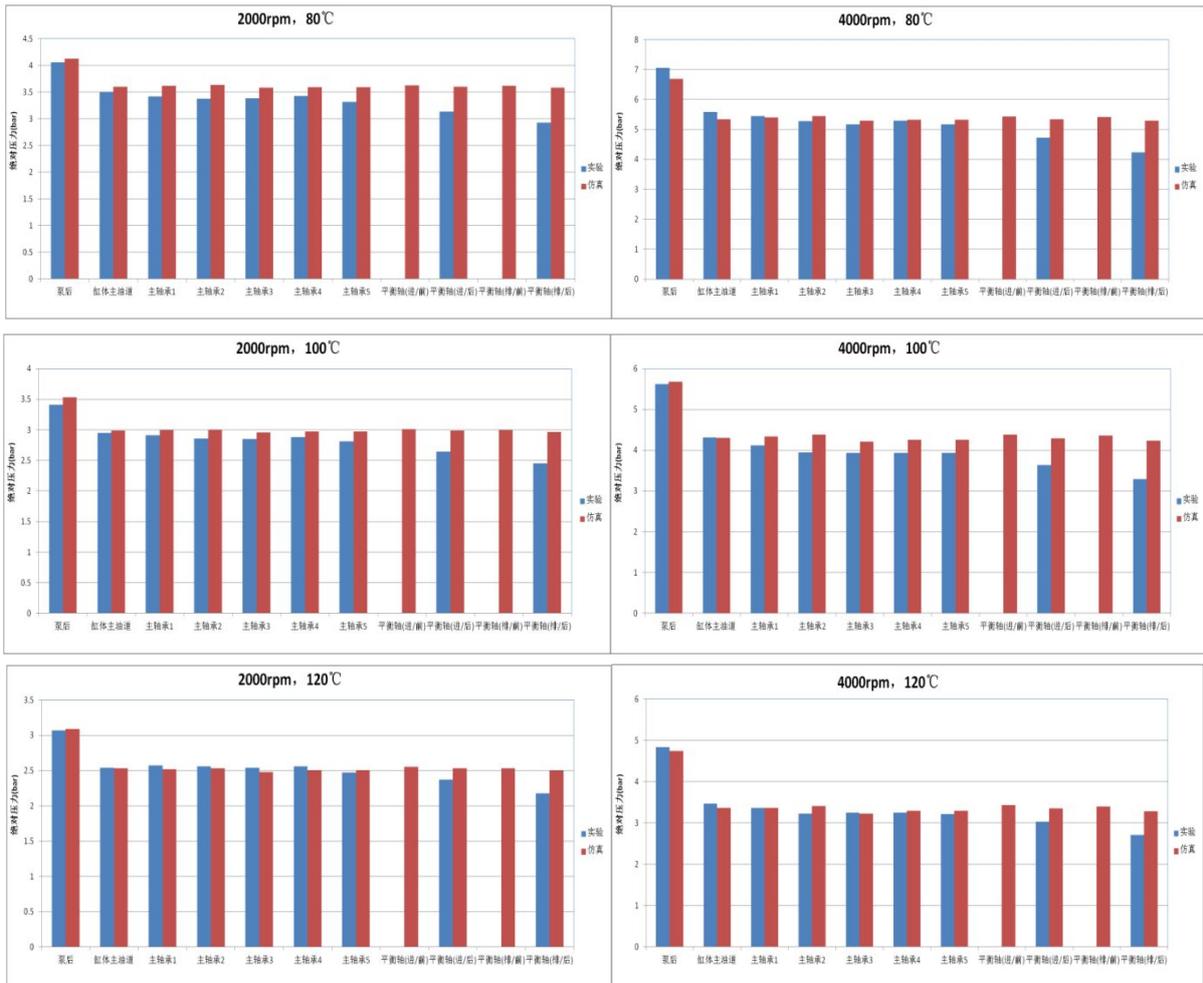
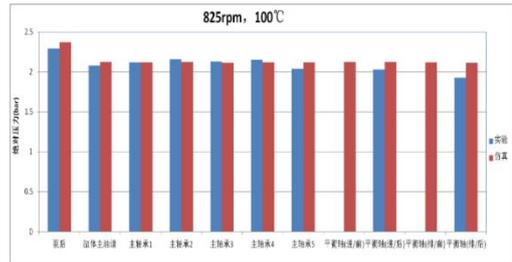


图 2 模拟与实验对比

3 不同温度稳态计算

在标定后模型的基础上，分别进行了 90℃、120℃、135℃ 和 150℃ 四个油温下的稳态计算，油压分布和流量分布结果如图 3，图 4 所示。随温度上升，润滑油粘度降低、变稀，使得油压下降；同时，润滑油总体流量增加，其中，主轴承流量增加最为明显，连杆轴承、凸轮轴承和平衡轴流量也有较大增加，而活塞冷却喷嘴流量则有明显降低。

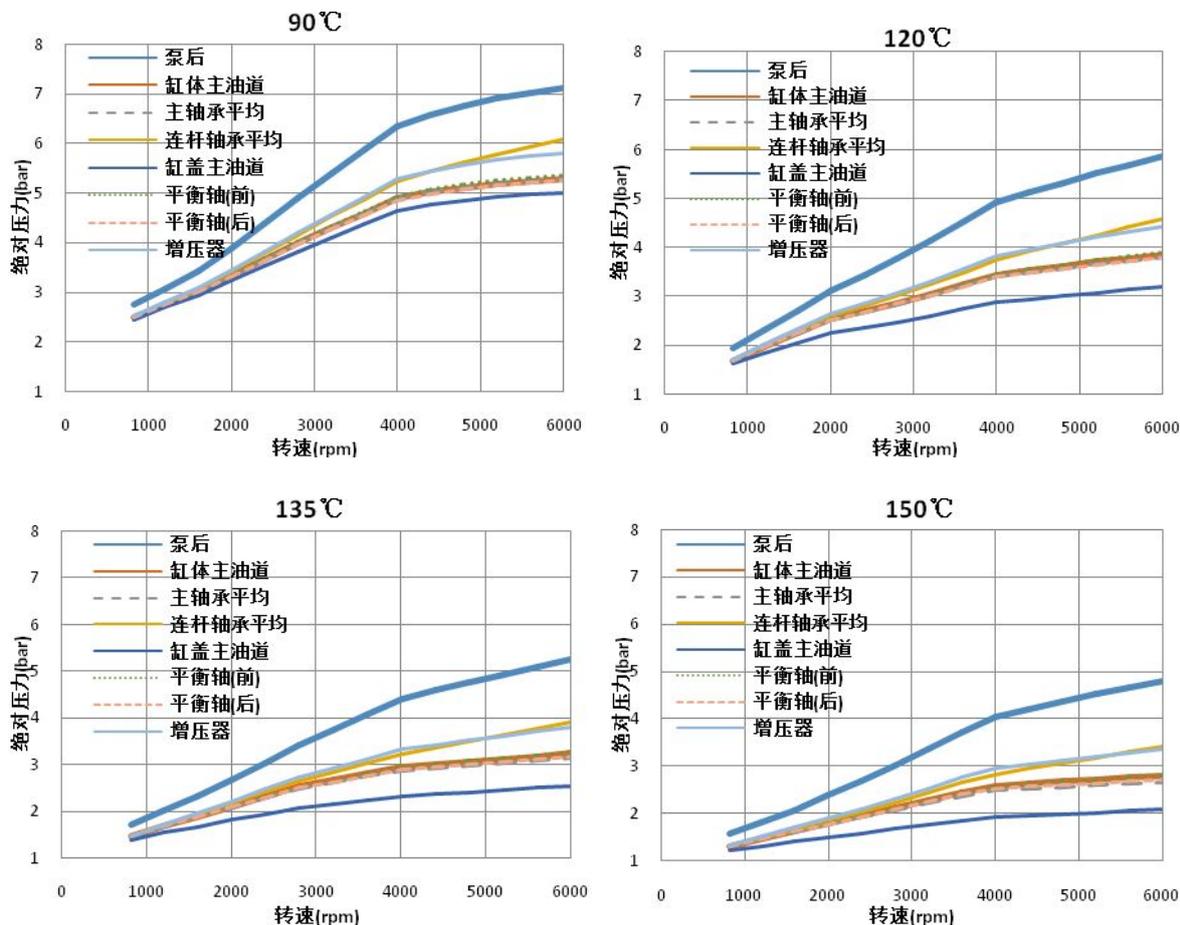
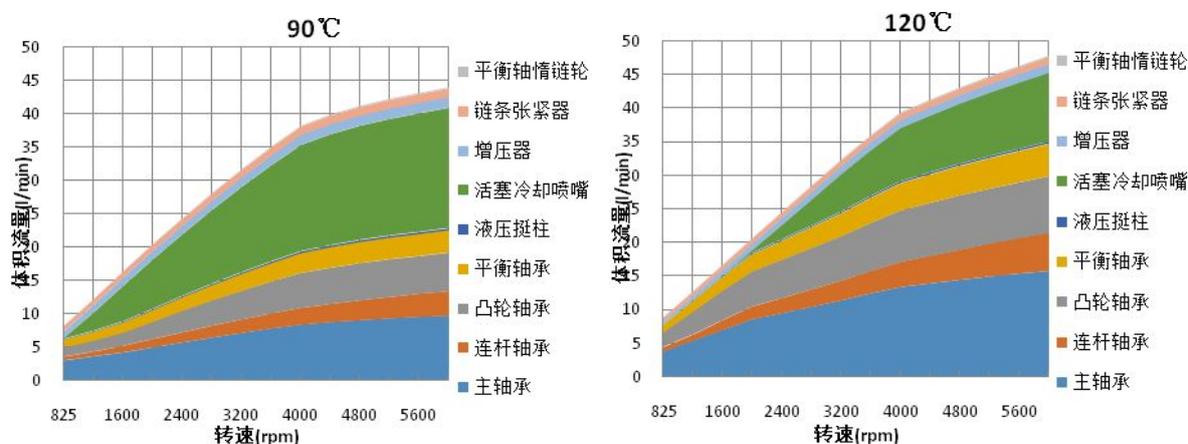


图 3 油压分布



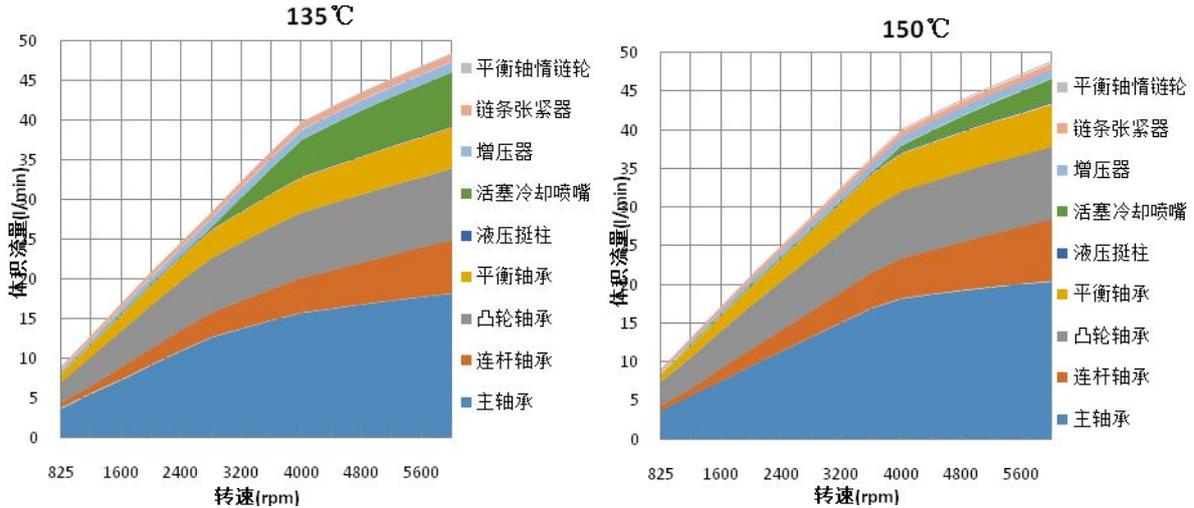


图 4 流量分布

随油温升高，主油道压力降低，导致活塞冷却喷嘴开启转速升高，且流量降低明显，如图 5 所示。活塞冷却喷嘴的润滑油流量对活塞冷却起着至关重要的作用，重点关注发动机的中高转速、中大负荷区间。从图 5 可以看出，120°C 时，活塞冷却喷嘴流量已低于要求限值，处于临界状态，而温度继续升高，流量已无法满足冷却要求。因而，从活塞冷却喷嘴流量角度考虑，应尽量避免润滑油温度高于 120°C；若油温高于 120°C，则不可长时间运转在中高转速、中大负荷区间。

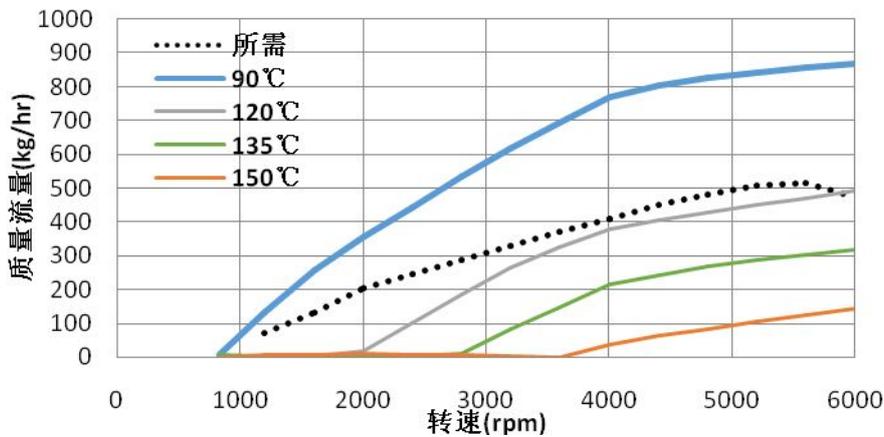
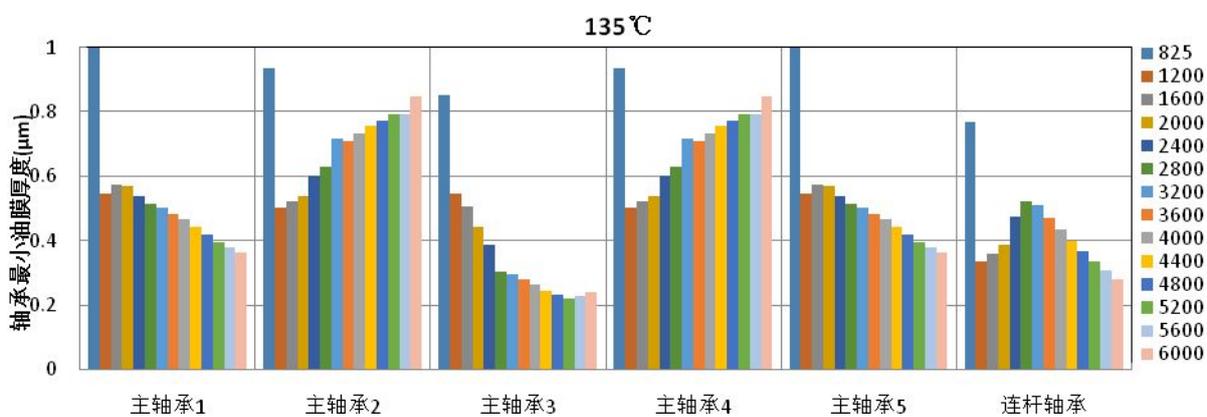
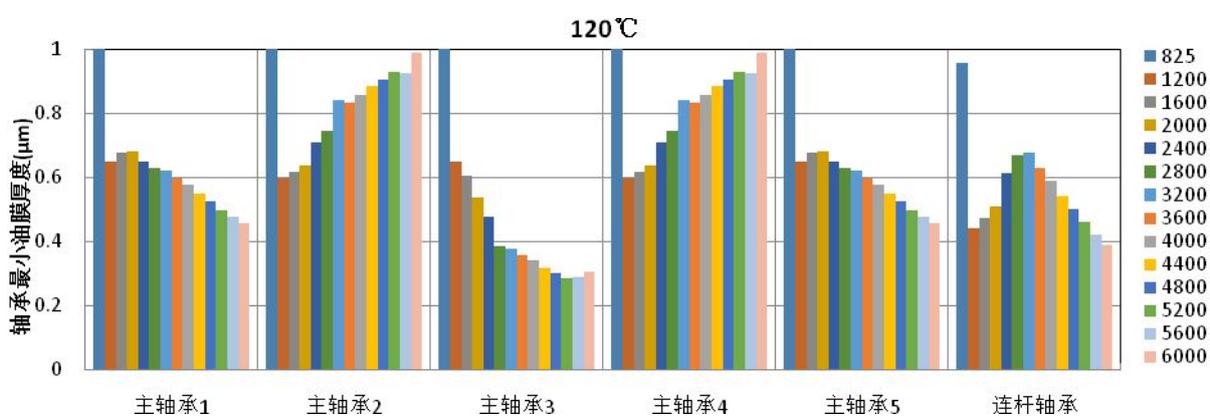
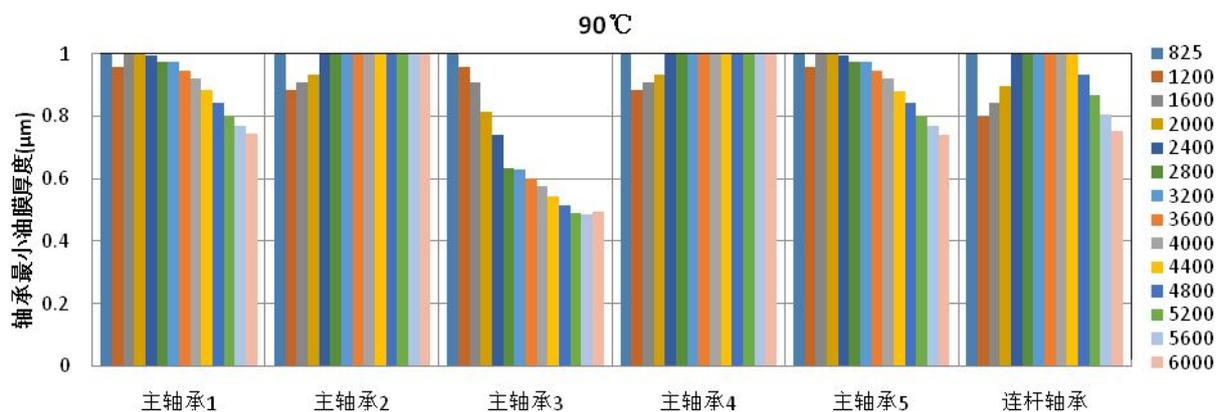


图 5 活塞冷却喷嘴质量流量

随油温升高，油压降低，主轴承和连杆轴承油膜厚度降低，如图 6 所示。120°C 开始，在高转速出现主轴承最小油膜厚度低于限值，且随温度升高，逐渐移向低转速；150°C 时，2800rpm 时最小油膜厚度开始低于限值。由于本文中的计算均是在外特性缸压曲线下，因此部分负荷时的油膜厚度会大于外特性时。从趋势判断，油温大于 120°C 时，发动机不可长时间工作中高转速、中大负荷区间；且油温越高，越要远离大负荷区，允许转速也越低。



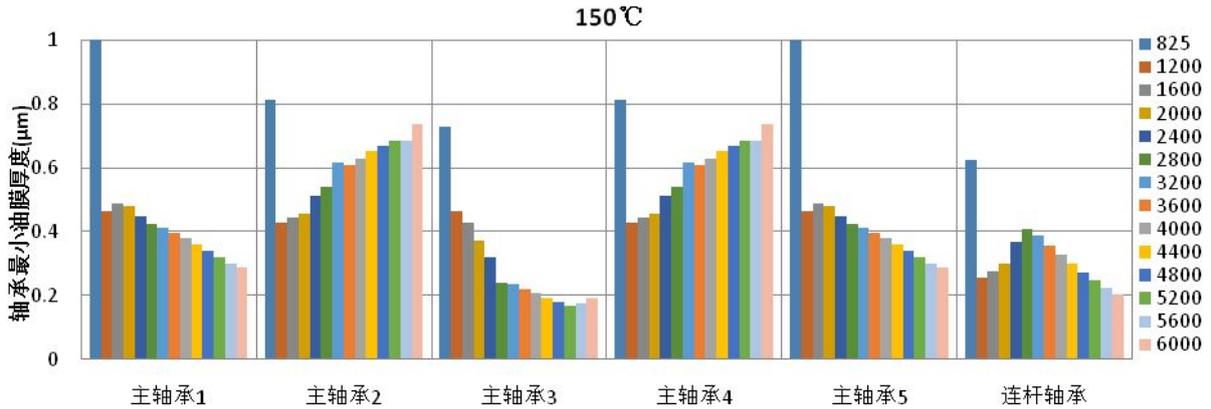


图 6 轴承最小油膜厚度

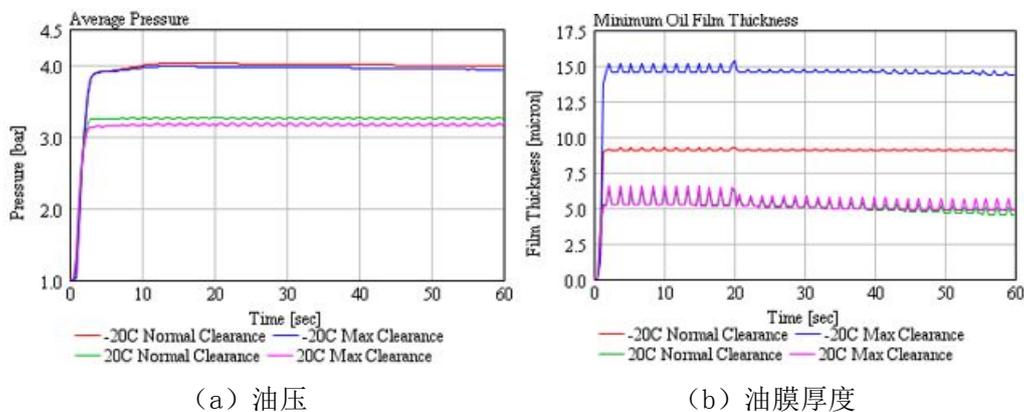
综合以上对活塞冷却喷嘴流量和轴承最小油膜厚度的和分析，不建议润滑油温度大于 120°C 。若油温大于 120°C 时，则发动机不可长时间工作中高转速、中大负荷区间；且油温越高，越要远离大负荷区，允许转速也越低。具体的允许持续运转时间以及允许工作转速、负荷区间，目前还无法定量分析。

4 启动充油

在稳态计算的基础上，进行了瞬态充油的计算，假设极端工况，启动时润滑系统油道内没有润滑油，全是气体。计算转速恒定在怠速 825rpm，计算时间设定为 60s，考虑油温随时间升高，轴承间隙随油温变化，计算初始油温 -20°C 和 20°C ，最大轴承间隙和平均轴承间隙 4 种工况下的启动充油特性。

4.1 主轴承

4 种不同工况下，各主轴承均能在 3s 内建立稳定的油压和油膜厚度，以第一主轴承为例，如图 7 所示。由于 60s 时间内油温较低，且为怠速工况，稳定后的油压和油膜厚度均在限值之上很多，因而不重点讨论这两个参数。

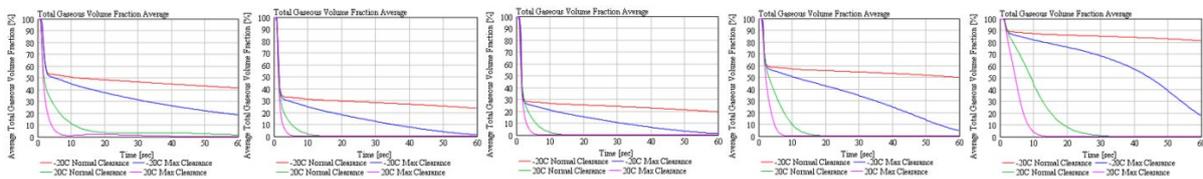


(a) 油压

(b) 油膜厚度

图 7 第一主轴承油压和油膜厚度

各主轴承充油速度随油温升高而升高，随轴承间隙增加而升高，如图 8 所示。以临近轴承处管路的气体体积百分比表示充油速度，“0”表示充满油，“100%”表示全是气体。从图 8 可以看出，充油速度由快到慢依次为 3 → 2 → 1 → 4 → 5，结合本发动机润滑油道的具体结构分析，第 2 和第 3 主轴承最接近供油油道，因而充油速度最快。同时，第 3 主轴承与后平衡轴轴承接近，增加了气体挤出面积，因而第 3 主轴承充油稍快。第 1 主轴承距供油道稍远，但与前平衡轴轴承接近，因而充油速度居中。第 4、第 5 主轴承距供油油道距离依次增加，且下游除轴承外，没有额外的气体挤出面积，并有气体堆积效果，因而充油速度最慢。同时从图中可以看出，各轴承的充油速度都有先十分迅速、后缓慢的趋势，分析原因是，刚开始时，轴承间隙处没有油，有利于气体挤出，因而充油十分迅速；而后，随着充油的增加，润滑油占据了一部分气体挤出面积，导致气体挤出变困难，因而充油速度变平缓。

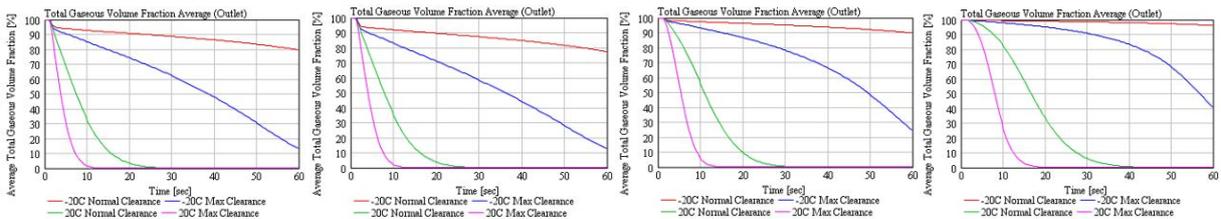


(a) 第 1 主轴承 (b) 第 2 主轴承 (c) 第 3 主轴承 (d) 第 4 主轴承 (e) 第 5 主轴承

图 8 主轴承气体体积百分比

4.2 连杆轴承

四个连杆轴承也均能在 3s 内建立稳定的油压和油膜厚度。四个连杆轴承依次由第 2 至第 5 主轴承供油，充油速度依次为 1 → 2 → 3 → 4，其中第 1 和第 2 连杆轴承速度相当，第 3 和第 4 连杆轴承则慢很多；四个连杆轴承与主轴承相比，充油速度都要慢很多。分析原因为，第 3 和第 4 连杆轴承处在整个润滑系统的末端，并且连杆轴承相对于主轴承，润滑油到达的油路更长。

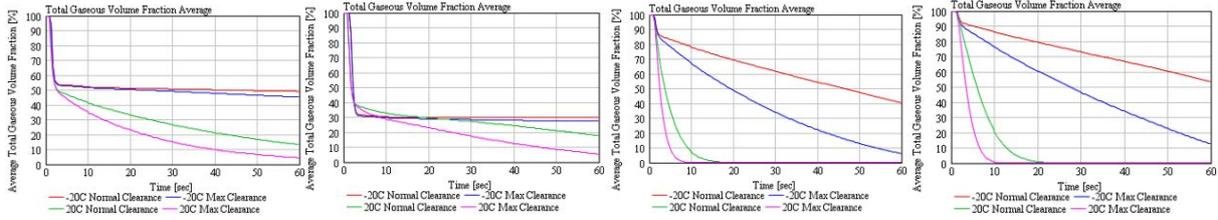


(a) 第 1 连杆轴承 (b) 第 2 连杆轴承 (c) 第 3 连杆轴承 (d) 第 4 连杆轴承

图 9 连杆轴承气体体积百分比

4.3 平衡轴承

四个连杆轴承也均能在 3s 内建立稳定的油压和油膜厚度。充油速度方面，进气侧快于排气侧，主要原因在于进气侧供油距离更短；后轴承快于前轴承，除了有供油距离的原因外，后轴承轴承间隙大于前轴承，增加了气体挤出面积，这是另一主要原因。

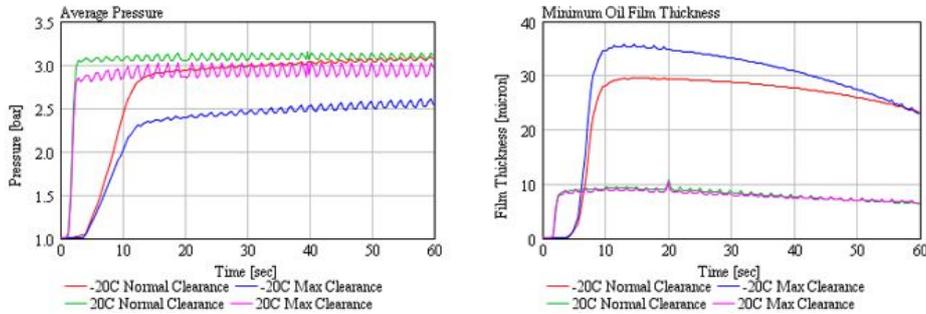


(a) 进气侧前轴承 (b) 排气侧前轴承 (c) 进气侧后轴承 (d) 排气侧后轴承

图 10 平衡轴承气体体积百分比

4.4 凸轮轴承

20℃时，十个凸轮轴承均能在 3s 内建立稳定的油压和油膜厚度。而-20℃时，由于润滑油粘度很高，且受缸体到缸盖油道的阻力效果影响，凸轮轴承油压和油膜建立时间变长，以第 5 凸轮轴承为例，如图 11 所示，约需要 13s 时间。

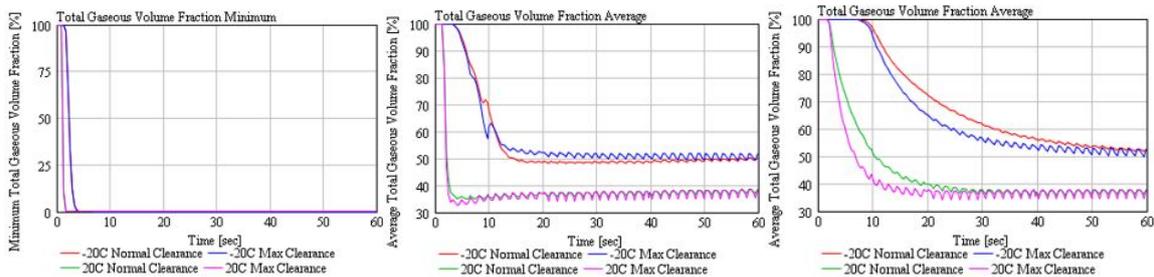


(a) 油压

(b) 油膜厚度

图 11 第 5 凸轮轴承油压和油膜厚度

充油速度方面，由第 1 至第 5 凸轮轴承，速度依次变慢，主要原因仍是末端凸轮轴承供油距离长，且有气体堆积效果，没有额外的气体挤出面积。



(a) 第 1 凸轮轴承 (b) 第 3 凸轮轴承 (c) 第 5 凸轮轴承

图 12 凸轮轴承气体体积百分比

5 总结

通过以上稳态和瞬态计算，可以得出以下结论：

- (1) 随油温升高，系统油压降低，润滑油流量增加，其中轴承处增加最为明显

(2) 随油温升高，活塞冷却喷嘴开启转速移向高转速，且流量降低，会影响活塞热负荷。

(3) 随油温升高，轴承油膜厚度降低

(4) 综合活塞冷却喷嘴流量和轴承油膜厚度考虑，针对此型号发动机，不建议润滑油温度大于 120℃，若油温大于 120℃时，则发动机不可长时间工作中速高速、中大负荷区间；且油温越高，越要远离大负荷区，允许转速也越低。具体的允许持续运转时间以及允许工作转速、负荷区间，目前还无法定量分析。

(5) 瞬态充油工况下，主轴承、连杆轴承和平衡轴承可以在 3s 内建立稳定的油压和油膜厚度，凸轮轴承稍慢，最慢需要约 13s 时间。

(6) 影响充油速度的主要原因有，在润滑系统中的位置，下游气体挤出面积以及轴承间隙。