

高强化柴油机进排气系统性能仿真研究

Simulation of performance of intake and exhaust systems for high intensity diesel engine

王伟涛 刘扬

(北京交通大学机械与电子控制工程学院, 北京 100044)

摘要: 应用GT-POWER软件建立了高强化柴油机的工作过程仿真计算模型, 并应用GT-POWER自带的优化工具建立了以标定工况下柴油机动力性最优为目标的高强化柴油机性能优化的仿真模型。计算结果显示: 进行参数优化后, 该柴油机性能进一步提升。

关键词: 高强化柴油机 性能优化 GT-POWER 进气系统

Abstract: Referred to the related literatures and based on over-all structural analysis of domestic high intensify diesel engines, the thermodynamics simulation model of high intensify engine by GT-POWER is established. For further improving the performance, it is necessary to optimize operating and configuration parameters. After confirming constraint and parameters, an optimization model aim to obtain maximum power in rated condition is set up. The computation result indicated that the effect on optimization is satisfying.

Key words: high intensify diesel engine performance optimize GT-POWER intake system

1 引言

柴油机工作过程性能优化所采用的方法, 一般可以分为两大类: 一类是穷举法寻优, 另一类是数学优化方法。从目前的发动机工作过程及性能模拟程序的精度来看, 运用数学规划方法对增压柴油机某些参数进行优化选择是可行的, 具有很强的实用价值^[1,2,4]。

用数学优化方法通常包括两部分内容: 一是优化任务分析, 将优化任务转化成一个最优化问题, 建立数学模型; 二是选用恰当的最优化方法, 求解数学模型, 寻求最优解^[5,6]。前一部分工作的关键是要有一个计算精度能满足要求的柴油机工作过程和性能模拟的计算程序, 这是进行优化设计的基础; 后一部分工作是对不同参数的优化设计选择收敛速度快, 优化结果比较理想的最优化方法^[6,11]。

本文利用试验所得数据, 进行校准和扩展计算所需的输入数据, 主要是进气系统的结构参数。总的性能优化目标是: 根据提高功率、改进性能的技术要求, 更为有效地组织整机的热力过程、合理地选择工作过程参数以及与之相关的结构参数, 使高强化柴油机标定工况的性能进一步的提高。

2、高强化柴油机仿真模型的建立

根据试验数据和参照国外某型柴油机的主要技术参数, 为了计算方便, 将柴油机简化成由进气系统、排气系统、燃烧系统(气缸)、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，所建立的高强化柴油机计算模型如图1所示：

进、排气系统主要包括进排气阀、进气容积腔、进气总管、进排气歧管、排气总管等模块，可以参考同类机型初步确定其结构参数。燃油喷射系统主要是喷油器模型，需要输入的参数有油嘴孔数、直径、喷油规律、喷油量等，其中喷油规律由燃油系统相关计算软件和试验得到。增压器的压气机和涡轮机必须分别输入特性曲线，这些参数由增压器厂家提供。

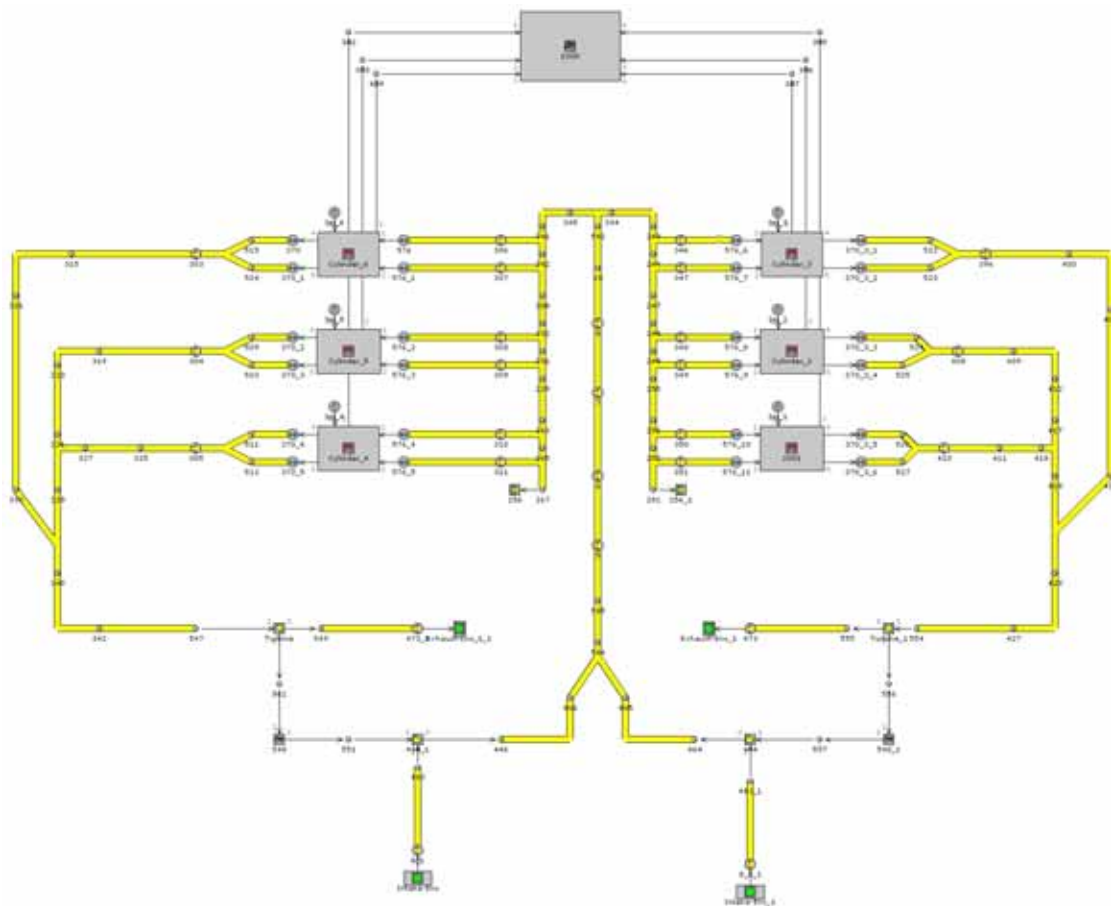


图 1 高强化柴油机工作过程仿真模型

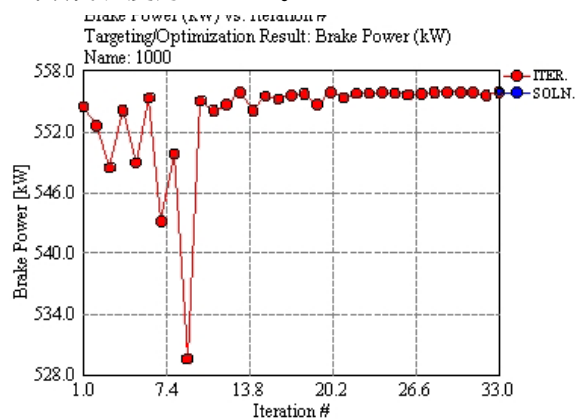
3 发动机进排气管路结构参数的优化

进排气系统的某些设计变量对柴油机的总体性能有决定性的影响，这些变量主要包括：管路的直径和管长，歧管和接头的容积和位置等。由于GT-POWER软件不能在三维层面描述进气系统的流动过程，因此笔者主要考虑进排气系统一些主要的结构参数（如管长、直径、容积等）的优化。其中进气系统的结构优化主要包括：进气容积腔容积、进气歧管长度和管径、压气机到中冷器的管长和管径的优化等^[6~10]。

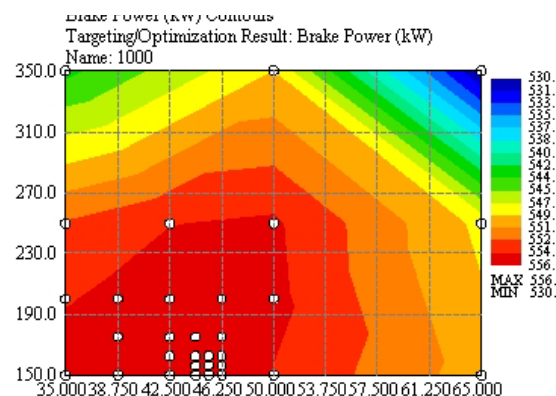
3.1 进气歧管直径和管长的优化

图2为进气歧管直径和管长的优化结果。从图中可以看出当进气歧管的管径在35mm - 50mm之间变化时，进气歧管直径对柴油机的功率最大，但当进气歧管直径大于50mm后，柴油机功率变小。通过优化计算这段管路的直径应该取45mm。

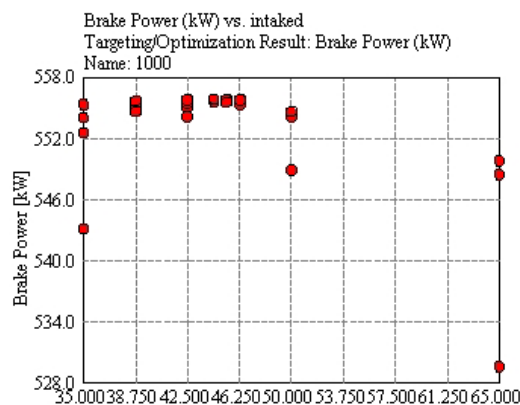
进气阀的开启使歧管中的气流产生流动，当气门关闭的时候，由于惯性作用，气流会继续涌向进气阀方向，并反射回去，形成正的压力波，继而在进气门处又产生一个负压。正负压力波在管道中以音速往复运动，假如每次进气门开启的时候正好是正压力波经过，就会提高充气效率；反之，充气效率则会减小。进气门开启的时候压力波的正负与否，取决于柴油机转速和进气歧管的长度，而转速固定在一定范围内，所以进气歧管的长度成为进气系统中影响充气效率最重要的因素之一。通过模拟计算的结果来看，在标定工况下，柴油机的功率随进气歧管的管长的增大而减小，这主要由于随着管长的减小，进气阻力减小，充气效率增大。因此由于我们这里主要优化的是标定工况的性能，所以尽量选择短的进气歧管，这里取进气歧管长度为：150mm。



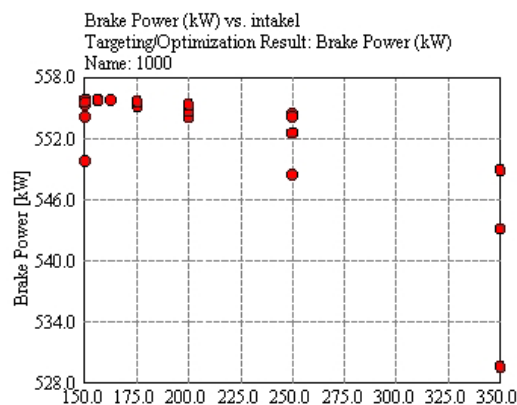
a. 优化计算的迭代收敛过程



b. 优化计算的结果



c. 管径对柴油机性能的影响



d. 管长对柴油机性能的影响

图2 进气歧管结构参数的优化

Fig.2 Optimization of structural parameters for intake manifold

3.2 压气机到中冷器之间管路管径和管长的优化

图3为压气机到中冷却之间管路管长和直径对发动机性能的影响规律。从图中可以看出，增大这段管路的直径对提高柴油机的功率的提高是有利的，这主要是因为该部分管路的直径决定了柴油机的总进气量，进而影响柴油机的动力性指标。但管径大于70mm后，性能提升比较缓，所以这段管路的直径推荐值在70 - 120mm之间。从图中亦可以看到，当这段管路的直径大于70mm以后，这段管路的长度对发动机性能基本没有影响，因此对于这段管路的长度，可以根据结构要求适当选取。对于该高强度柴油机这部分管路：直径取为80mm，管长取110mm。

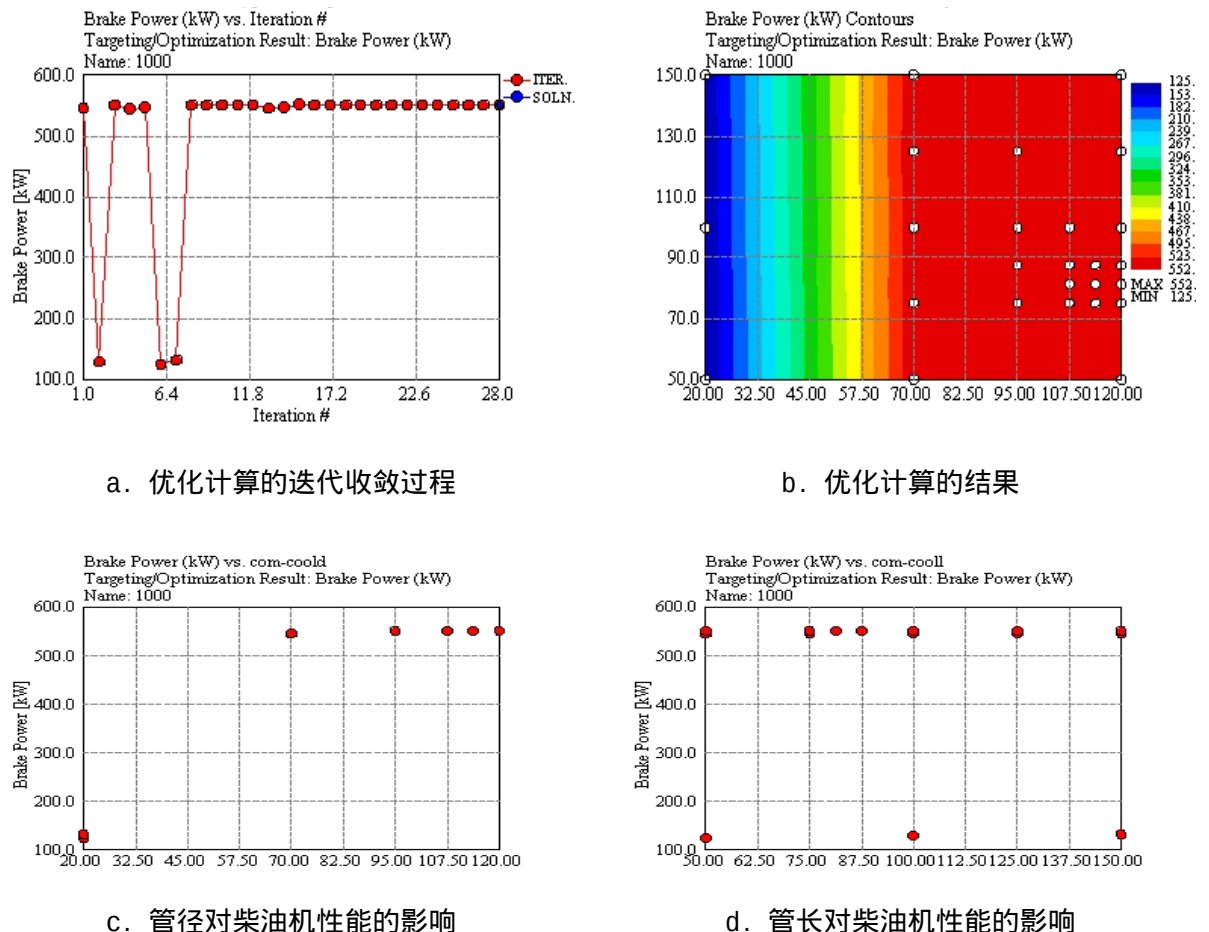


图3 压气机到中冷器之间管路结构参数的优化

Fig.3 Optimization of structural parameters for tubes between compressor and intercooler

3.3 进气稳压腔容积的优化

一般，增压柴油机进气管容积希望尽量大一些，以减少进气压力的波动，这对于和一台增压器相连的气缸数 $i \leq 4$ 时更为重要，一般进气管的容积与单缸容积之比应不小于3，以保证进气管的压力波动不大于平均值的5%。表1为进气稳压腔容积对柴油机性能的影响。从图中可以看到空燃比和缸内爆发压力都随稳压腔容积的增大而增大，涡前温度随进气稳压腔容积的增大而减小，而当进气稳压腔容积大于2L后，柴油机的功率变化不大。综合考虑以上因素，结合该柴油机自身结构要求，本文中稳压腔容积取3.8L。

表1 进气稳压腔容积对柴油机性能的影响

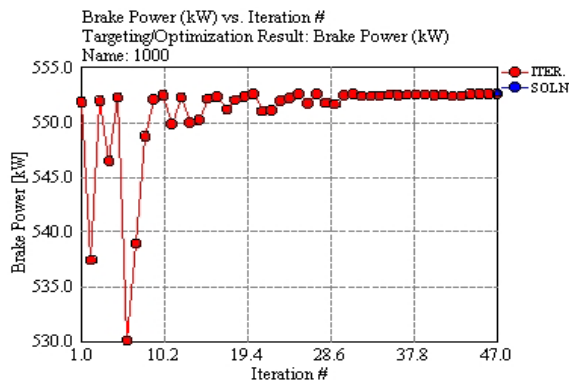
Tab.1 Effect of intake plenum on diesel engine performance

进气稳压腔容积 (L)	功率 (kW)	缸内爆发压力 (bar)	空燃比	涡前温度(K)
2	550.102	206.64	21.26	987
2.6	550.042	207.78	21.44	984
3.2	550.137	208.80	21.52	982
3.8	550.182	209.43	21.57	981
4.4	550.145	211.78	21.61	980

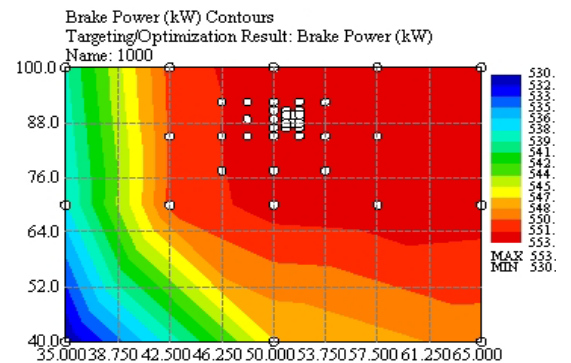
3.4 排气系统结构参数的优化

排气系统的结构参数,如排气总管直径、排气歧管的直径等对排气能量的传递、气缸泵气功、增压压力和有效燃油消耗率都会带来影响。对排气系统而言,一个较优的排气系统应该是排气能量传递效率高,即从排气口排出的废气能量,尽可能的在涡轮中得到有效利用,通常情况下可用涡轮功函数来加以评定^[1]。但从柴油机的整机性能来看,当排气歧管喉口收缩比较大时,废气能量的利用率是高的,但有可能引起气缸泵气功的增加,使有效燃油消耗率增加,所以比较合理的优化目标取有效燃油消耗率,而不是能量传递效率,但是由于在本文的优化过程中由于保持了气缸循环喷油量不变,因此以有效功率最大为优化目标是合理的。

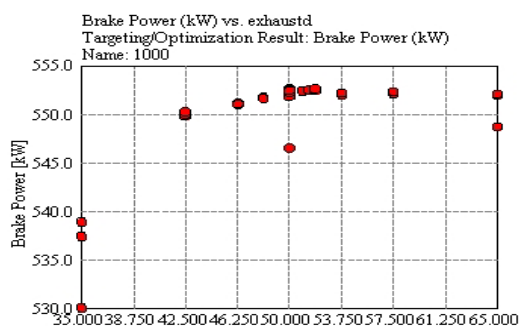
本文采用的排气系统是把所有气缸的排气分为两组,两根排气总管分别与1、2、3;4、5、6缸相连。排气系统结构的优化主要包括:排气管直径的优化和排气管管长的优化。图4为排气系统结构参数的优化结果。从图中可以看出当排气歧管直径低于35mm时,柴油机的性能很差,大于50mm后,柴油机的性能变化不大,排气管直径应该在50mm左右取值。当排气管歧管直径较小时,排气总管的直径对性能影响不大,当排气歧管直径大于42.5mm后,发动机的功率才随排气总管直径的增大而增加。由于GT-POWER不能计算气体的三维扰动对发动机性能的影响,排气管的管长的增加对柴油机的性能影响不大。因此根据气体动力学理论,减小排气管的管长对废气能量的利用和涡轮增压器的动态响应都有利,所以推荐尽量用短的排气管管长。经过优化后排气歧管直径为:52mm,排气总管的直径为90mm。



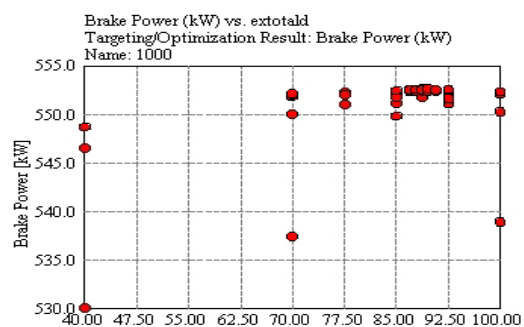
a. 优化计算的迭代收敛过程



b. 优化计算的结果



c. 排气歧管管径对柴油机性能的影响



d. 排气歧管管长对性能的影响

图4 排气系统结构参数的优化

Fig.4 Optimization of structural parameters of exhaust system

4 优化前后柴油机性能对比分析

表2 优化前后该高强化柴油机性能对比

Tab.2 Performance comparison between original engine and optimized engine

优化变量及性能参数	优化前	优化后
进气歧管直径(mm)	43	45
进气歧管长度(mm)	250	150
压气机到中冷器之间 管路直径(mm)	70	80
压气机到中冷器之间 管路长度(mm)	130	110
稳压腔容积(L)	3.2	3.8
排气歧管直径(mm)	55	52
排气总管直径(mm)	70	90
功率(kW)	541.5	553
空燃比	22.88	21.52
缸内最高爆发压力(bar)	218	207

涡前温度(K)	968	985
---------	-----	-----

从表2中可以看出优化前后高强化柴油机有效功率上升12kW，同时最高爆发压力也从218bar降低到207bar，满足该高强化柴油机的强度要求。虽然空燃比略有下降，涡前温度有所上升但都还在可以接收的范围内。可见运用最优化的数学模型和发动机工作过程仿真计算相结合的方法进行柴油机性能优化的研究效果是显著的。

5 结论

本章首先以高强化柴油机的标定工况的功率最大为优化目标，选取了适当的约束条件，建立了高强化柴油机性能优化的数学模型；在该模型基础上，对进排气系统主要结构参数进行了优化，将优化前和优化后的柴油机标定工况的性能进行对比可知，柴油机性能得到了改善，从而验证了最优化数学方法在对柴油机运行参数和结构参数进行优化的可行性，同时经过优化计算所得到的参数也为该高强化柴油机的设计的依据。

6 参考文献

- [1] 顾宏中. 涡轮增压柴油机性能研究[M]. 上海：上海交通大学出版社，1998
- [2] 朱访君, 吴间. 内燃机工作过程数值计算及其优化[M]. 北京：国防工业出版社，1997
- [3] 周龙保. 内燃机学[M]. 北京：机械工业出版社，2003
- [4] 施光燕等. 最优化方法. 北京，高等教育出版社，1999
- [5] 卢险峰. 最优化方法应用基础. 上海，同济大学出版社，2003
- [6] 李艳红，蔡忆昔，王玉昆. 柴油机工作过程参数优化方法及其应用[J]. 小型内燃机与摩托车, 2003, 32(5): 28-30
- [7] A. Ohata, Y. Ishida. Dynamic Cylinder Engine and Volumetric Efficiency of Four Cylinder Engine. SAE Paper 820407
- [8] W. Zucker, R. R. Maly. Evolution-Strategy Based, Fully Automatic Numerical Optimization of Gas-Exchange Systems for IC Engines. SAE TECHNICAL PAPER SERIES: 2001-01-0577
- [9] 吴锋, 胡金龙. 电喷汽油机进气管空气动态模型的仿真与试验研究, 内燃机工程, 2006(3)
- [10] 许元默, 帅石金, 王建昕. 进气歧管对电喷汽油机充气效率的影响[J]. 内燃机学报, 2004, 25(1): 28-34
- [11] 宋龙甫, 郑国世. B231 发动机性能优化及循环模拟计算[J]. 内燃机工程, 2006, 27(1): 76-80