

涡轮增压柴油机 MPC 增压系统优化设计

Optimum Design of Turbocharged Diesel Engine MPC System

杨守平 张付军

(北京理工大学军用车辆动力系统技术国防重点学科实验室, 北京 100081)

摘要: 为了充分利用柴油机的排气能量, 改善柴油机动力性能, 开展增压系统类型和排气管结构参数的优化设计研究具有明显的工程意义。采用 GT-POWER 软件建立某 V 型八缸涡轮增压柴油机模型, 并进行实验校核。使用试验设计模块 (DOE) 选取对柴油机动力性能影响最大的 MPC 增压系统结构参数, 并采用优化设计模块 (Optimizer) 确定结构参数。通过对采用定压、脉冲、MPC 三种增压系统的柴油机外特性的仿真计算与对比, MPC 增压系统能够实现柴油机全转速范围内油耗的最优化。从涡轮前排气压力波形可以看出, 设计的 MPC 增压系统改善了 1 缸和 2 缸之间的排气干涉。

关键词: 涡轮增压柴油机; MPC; 优化; GT-POWER

Abstract: In order to make full use of exhaust gas energy, to improve the power performance of diesel engine, the types of turbocharged system and exhaust pipe structural parameters optimum design is of obvious engineering importance. A V8 turbocharged diesel engine model is built using GT-POWER software, which is validated by experimental data. The most influencing MPC structural parameters on diesel engine power performance are chosen by using the design of experiment module (DOE), and the final structural parameters are decided by using its optimization module (Optimizer). Finally, the full load performance of the diesel engine using isotonic, pulse and MPC turbocharged systems are simulated and analyzed respectively, which indicates that its fuel economy within whole engine speed range is optimized. The exhaust gas interference between cylinder 1 and cylinder 2 is greatly improved from pressure wave before the turbine.

Key words: turbocharged diesel engine; MPC; optimize; GT-POWER

1 引言

废气涡轮增压器是利用发动机的排气能量来驱动的, 所以涡轮增压发动机的增压效果, 除了涡轮增压器的好设计以外, 在很大程度上还取决于发动机排气系统的设计, 因为排气系统的设计合理与否对发动机排气能量的利用有着重要的影响。此外, 车用涡轮增压柴油机受空间布局的限制, 对排气系统的紧凑性提出了更高的要求。在柴油机的性能提高与改善的研究中, 重视排气系统参数的合理设计与选择就显得十分必要。

传统的排气系统结构参数根据经验公式估算，并使用实验数据进行修正，对数据精度的依赖较大；另一方面，排气系统的结构参数较多，对性能的影响程度不一，其相互关系在经验公式计算中很难全面兼顾。随着现代发动机 CAD、CAE 软件的兴起及普及，为这一问题的解决提供了新的技术途径。本文采用 GT-POWER 软件的试验设计模块 DOE 确定对发动机性能影响最大的参数；使用优化计算模块 Optimizer 计算并确定参数，提高了工作效率。

2 MPC 增压系统模型的建立

2.1 MPC 增压系统的结构原理

MPC增压系统(Modular Pulse Converter System)又称组合脉冲转换系统，它在每个气缸排气口上安装一个脉冲转换器，这样它可以适合任意缸数的增压。排气的高速气流对邻近气缸只会产生一定的引射作用而不会产生不利的干扰。在排气总管中，混合气流以接近定压的状态进入涡轮，从而提高了涡轮的效率，故MPC增压系统既能充分利用排气脉冲能量，又能保持较高的涡轮效率，因此它兼有脉冲增压和定压增压的优点。此外，引射的效果还能抵消高速气流的流动阻力损失。

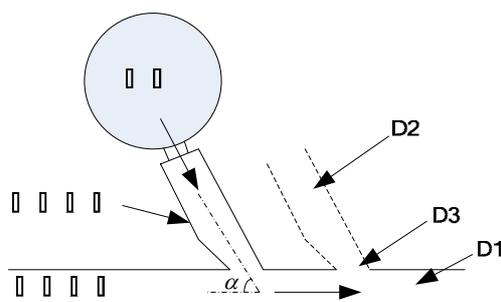


图 1 MPC 系统的物理模型

(D1—排气总管直径；D2—引射喷管进口直径；
D3—引射喷管出口直径； α —支管与总管夹角)

MPC增压系统是集成了热力学、流体力学和机械的复杂系统，因此在进行MPC增压系统建模之前，需要对计算模型进行必要的简化。传统MPC增压系统常用计算模型有定压法和压力损失系数法。定压法不能预测夹角对气体流动及发动机性能的影响；压力损失系数法必须获得准确的压力损失系数才能得到正确的计算结果。要获得准确的压力系数，就必须针对具体的管路系统进行吹风试验，这就部分失去了性能预测的意义。

本文采用顾宏中教授提出的“修正容积法”计算模型，如图 1 所示。它将气门边界、脉冲转换边界和涡轮边界简化处理为喷嘴，整个系统表述为由喷嘴相连接的三部分容积。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。另外，在结构允许的条件下，支管与总管的夹角应尽可能小，夹角小有利于充分利用排气的动能，有利于气缸扫气，本文取 45° 。引射喷管的长度过长固然不好，但为了保证脉冲转换器的效果也不可太短，一般情况下长度不应小于总管直径的 0.3 倍，本文根据实际情况取 75mm。因此，本文 MPC 系统结构设计主要是确定图 1 中 D1~D3 三个直径。

2.2 柴油机模型主要技术参数

本文为某V型八缸柴油机进行MPC系统设计。柴油机主要技术参数如表1所示。

表1 发动机主要技术参数

名称	描述参数
发动机型式	V 型八缸增压中冷柴油机
缸径/mm	132
行程/mm	145
标定功率/kW	600
标定功率点转速(r/min)	2500
压缩比	15
发火顺序	1-8-4-5-7-3-6-2

2.3 柴油机仿真模型的建立

本文使用发动机性能仿真软件 GT-POWER 建立某 V 型八缸涡轮增压柴油机模型，如图 2 所示。MPC 系统中的引射喷管由两端直径不同的直管来表示。本文前期工作已经对模型进行了实验校核。

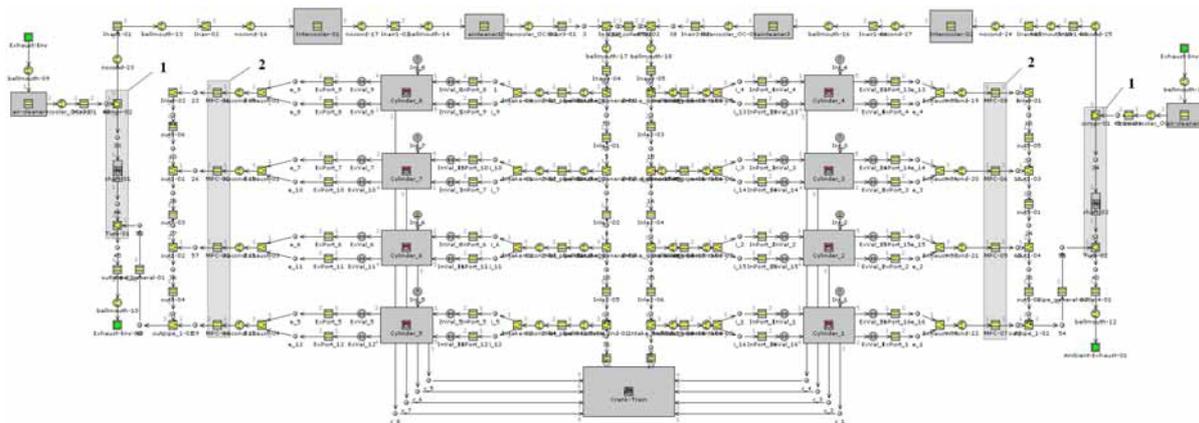


图 2 V 型八缸柴油机仿真模型

(1—涡轮增压系统；2—引射喷管)

3 MPC 排气系统主要结构参数的 DOE 计算

试验设计 DOE(Design of Experiment)是以概率论和数理统计为理论基础,经济地、科学地安排试验的一项技术。通过试验设计,可以获得较好的方案进行优化计算;分析设计变量如何影响目标函数;了解设计变量中的主效应、交互效应,探索设计空间;通过确定最有影响力的设计变量,减少设计变量的个数,从而提高优化效率。在进行 DOE 计算前,大致确定设计变量的取值范围,可以减少计算时间。根据 MPC 系统的结构要求,在 MPC 系统中,一般选用以下数据:排气总管直径 $d_p=(0.5\sim 0.7)D$, D 为气缸直径;引射喷管的进口截面积 $A_1=0.15 F_z$, F_z 为气缸面积;引射喷管的出

口截面积 $A_2=0.10 F_z$ 。该柴油机缸径为 132mm，于是得到：排气总管直径为 66mm~92.4mm；引射喷管进出口直径分别是 51mm、41.7mm，以该数据为中心上下取 20mm 作为 DOE 计算范围。

本文采用 GT-POWER 软件中的 DOE 模块，使用全因子法(Full Factorial)，设计变量为三个直径，水平数为 5，因此要进行 125 次试验。DOE 计算结果中以有效功率作为响应参数。响应面分析方法是 DOE 设计的重要手段，其中描述设计变量与响应之间的关系有主效应和交互效应。主效应表示单个因子如何影响响应；交互效应是响应不变的情况下，一个因子是如何影响其它因子的。主效应图和交互效应图如图 3 所示。

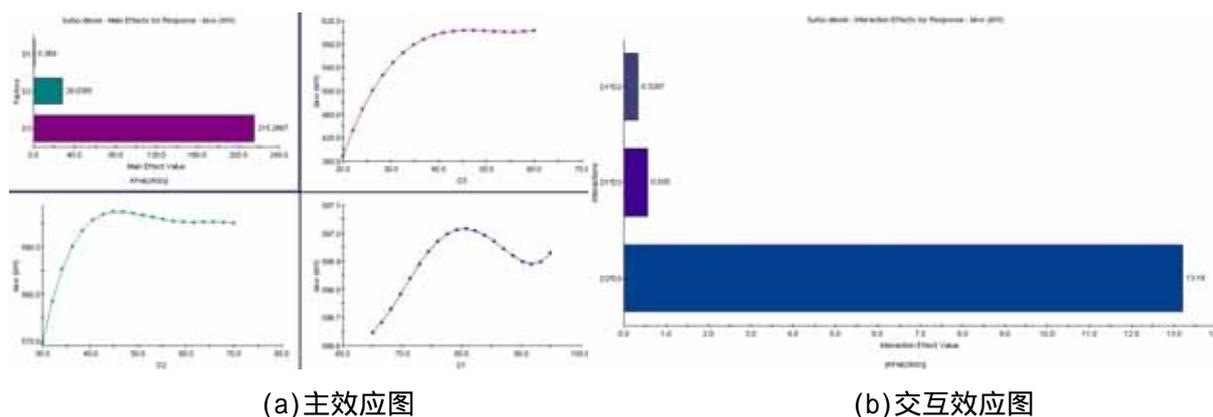


图 3 主效应和交互效应图

从主效应图上可以看出，引射喷管出口直径 D3 对发动机的功率影响最大，其次是引射喷管进口直径 D2。在下面的优化计算中，需要对 D3 进行精确的计算。从交互效应图上可以看出，引射喷管进出口直径 D2、D3 交互影响系数最大，其次是 D1、D3。在优化计算中，需要将 D2*D3 以及 D1*D3 进行双参数优化，从而确定其准确值。

回归设计也称响应面设计，是当参数间的交互影响较为重要时优化参数的一种方法，本文对数据进行三次多项式回归拟合。模型的校正决定系数 $R_{Adj}^2=0.9945$ ，说明该模型能解释 99.45% 响应值的变化，仅有 0.55% 的响应不能用此模型来解释；相关系数 $R=0.9952$ ，说明该模型拟合程度较好，可以用来分析和预测柴油机的有效功率。

从图 4 的响应曲面可以看出，D2 和 D3 选定的范围合适，在计算范围内能找到极值点。当 $D3>40\text{mm}$ ，有效功率均落在最优值区域内。D1 的参数敏感性较小。DOE 计算选取了对性能影响较大的参数，以及参数敏感性，初步确定寻优范围。优化计算的目的是根据选定的参数，在寻优范围内，缩短计算步长，精确计算并最终确定最优值。

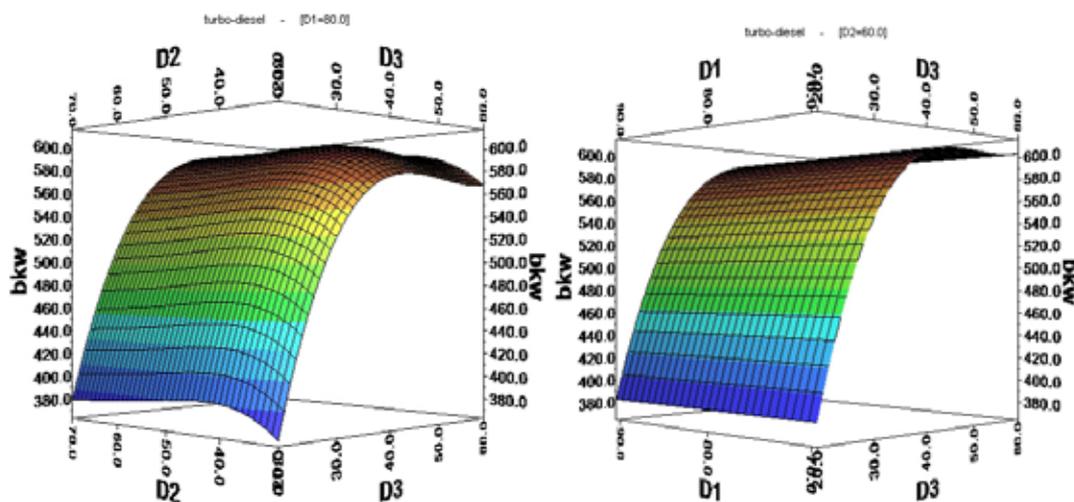


图 4 D2*D3 和 D1*D3 的响应曲面

4 MPC 排气系统结构参数的优化设计

4.1 优化数学模型的建立

GT-POWER 提供的优化模块 Optimizer 能进行单参数、多参数的组合优化。该优化算法是罚函数法，罚函数法又叫序贯无约束极小化方法(Sequential Unconstrained Minimization Technique)，是一种求解有约束非线性最优化问题的间接解法。

从柴油机的整机性能来看，当引射喷管收缩比较大时，废气能量的利用率高，但可能引起泵气功的增加，使有效燃油消耗率增加。本文的优化过程中保持循环喷油量不变，因此以有效功率最大为优化目标是合理的。MPC 增压系统结构参数优化数学模型如下：

$$(1) \text{ 目标函数: } \max f(X) = P_e(X)$$

$$(2) \text{ 设计变量: } X = [x_1, x_2, x_3]^T$$

$$(3) \text{ 约束条件: } \begin{cases} g_1(X) = [p_{\max}] - p_{\max} \geq 0 \\ g_2(X) = \left[\frac{dp}{d\varphi} \right] - \frac{dp}{d\varphi} \geq 0 \\ g_3(X) = [T_r] - T_r \geq 0 \end{cases}$$

$$(4) \text{ 寻优范围: } x_{i\min} \leq x_i \leq x_{i\max}, (i=1,2,3)$$

式中 $P_e(X)$ —有效功率； x_1 —排气总管直径； x_2 —喷管进口直径； x_3 —喷管出口直径； $[p_{\max}]$ —

缸内爆压许用值，为 170bar； $\left[\frac{dp}{d\varphi} \right]$ —缸内压力升高率许用值，本文为 4bar/CA； $[T_r]$ —涡轮前温度

许用值，本文为 750； $x_{i\min}, x_{i\max}$ —寻优范围如前所述。

4.2 D2、D3 的优化计算

根据前面 DOE 计算结果可知，选择的变量范围合适，试验点基本在响应曲面上。优化计算的目的是减小计算步长，确定最优值。引射喷管进出口直径 D2、D3 对柴油机性能影响最大，选定 D2、D3 为变量进行双参数优化，不同转速计算结果如图 5 所示。

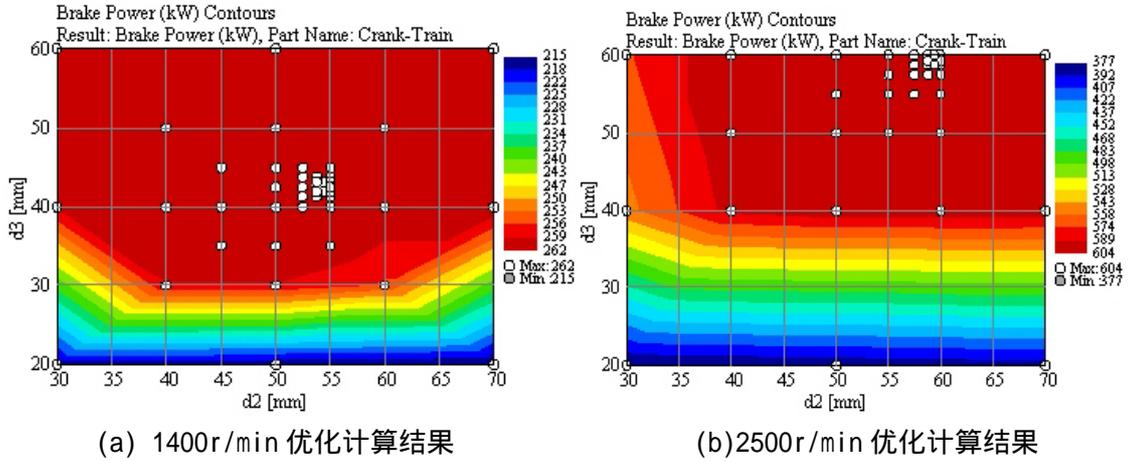


图 5 不同转速 D2、D3 优化计算结果

从图 5 可以看出，转速不同，D2、D3 优化结果差别很大。综合不同转速的计算结果并考虑柴油机的低速扭矩特性，取 1400r/min 时优化结果：D2=54mm，D3=42mm，为最终计算结果。根据确定的喷管参数计算得到收缩比为 0.6，在文献[5]推荐的范围内。

4.3 D1、D3 的优化计算

D1 与 D3 的交互效应系数仅次于 D2、D3，因此需要进行二者的优化计算。不同转速 D1、D3 计算结果如图 6 所示。

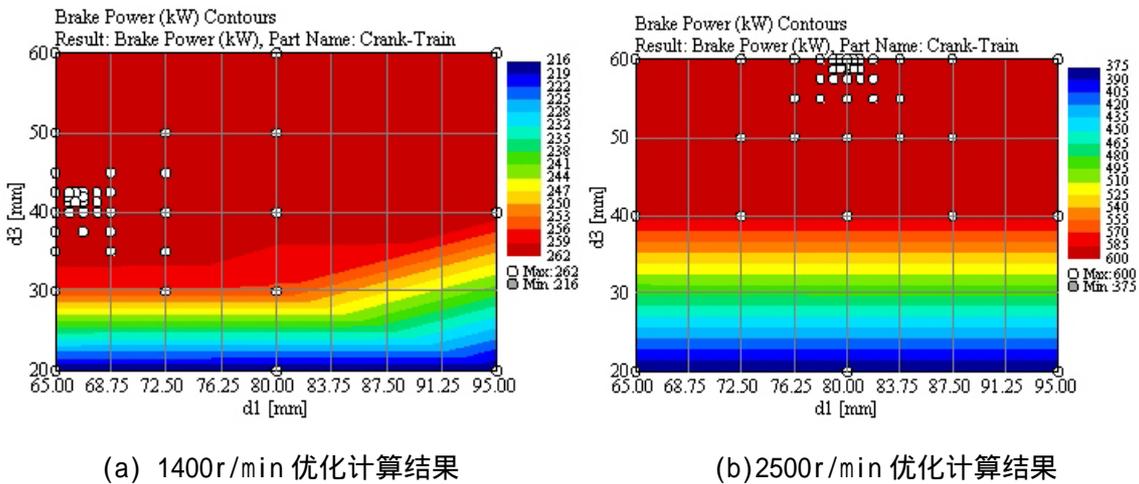


图 6 不同转速 D1、D3 优化计算结果

从图 6 可以看出，不同转速 D1、D3 计算结果不同。同样考虑到柴油机的低速扭矩特性，选定 D1=67mm，D3=42mm。

5 不同增压系统的计算结果对比

本文通过 MPC 增压参数的 DOE 和优化计算,确定了 MPC 增压系统主要结构参数。由于不同转速对应的结构参数最优值不同,需要综合考虑柴油机的动力性和经济性,为喷油系统标定及增压系统的匹配提供必要的依据。

本文前期进行了某 V8 增压柴油机定压增压和脉冲增压的仿真计算。为了方便地进行三种增压系统的对比,在仿真计算时喷油提前角和燃烧模型不变,通过调整循环喷油量,使功率趋于相等。三种不同增压系统柴油机外特性油耗及压气机压比如图 7 所示,图 8 为不同增压系统增压器匹配图。

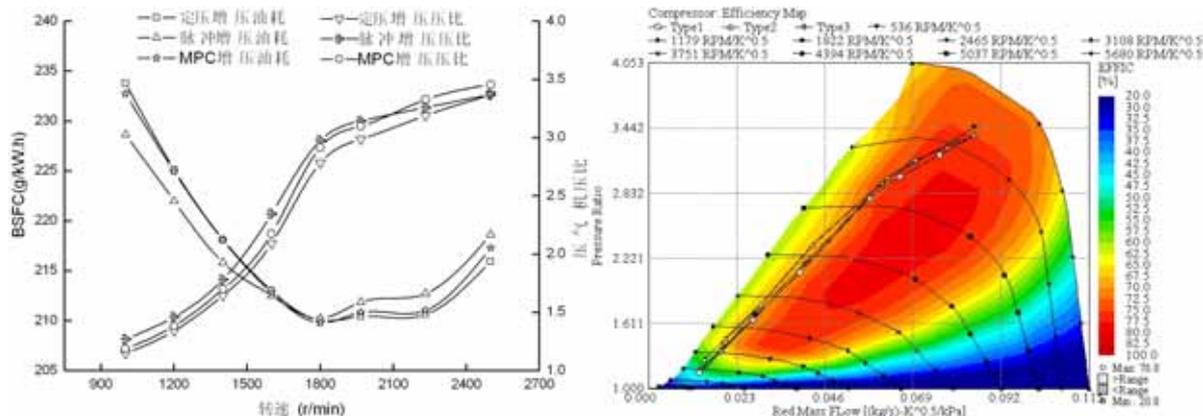


图 7 不同增压系统油耗及压气机压比 图 8 不同增压系统增压器匹配图 (Type1-Type 分别为定压增压、脉冲增压和 MPC 增压)

从图 7 可以看出,在柴油机低速时,相对于脉冲增压而言,定压增压脉冲能量的利用率低,因而增压器压比较脉冲增压低,相应进气量少,油耗较脉冲增压高。MPC 增压油耗位于两者之间。在柴油机高速时,定压增压排气能量的损失有所下降,同时增压器效率高的贡献增大,而脉冲能量在排气能量中所占比例随着减小,定压增压油耗反而较脉冲增压低。MPC 增压压比和油耗在二者之间。综上所述,采用 MPC 增压系统的柴油机全转速范围内油耗都能达到最优化。从图 8 可以看出,低速时 MPC 增压系统的匹配位于定压增压和脉冲增压之间,并且高速时增压压比最大。

本文柴油机发火顺序是 1-8-4-5-7-3-6-2,1、2 缸之间发火间隔角为 90°CA ,远远小于一个排气冲程的曲轴角度 240°CA ,必然造成这两缸之间排气干涉。从图 9 涡轮前排气压力波可以看出,1000r/min 时压力波形状基本一致,四缸均有独立的压力波形,这说明增压压力较小时 1、2 缸之间排气干涉不明显。2500r/min 时定压增压 1、2 缸间排气干涉严重,排气压力波严重叠加,而 MPC 增压由于排气的引射作用减小了这两缸之间的排气干涉,从而提高了增压器的效率。从图 10 看出,MPC 增压系统 1、2 缸的充气效率较定压增压高,最大相差 2%。因此,本文设计的 MPC 增压系统效果明显。

需要指出的是,本文将引射喷管简化成两端直径不同的直管,与实际情况有一定的差异。文献[3]指出,引射喷管是非圆、变截面的倾斜体,几何形状的差异势必对 MPC 增压系统的性能产生影响。作者正在开展引射喷管形状细化的工作。

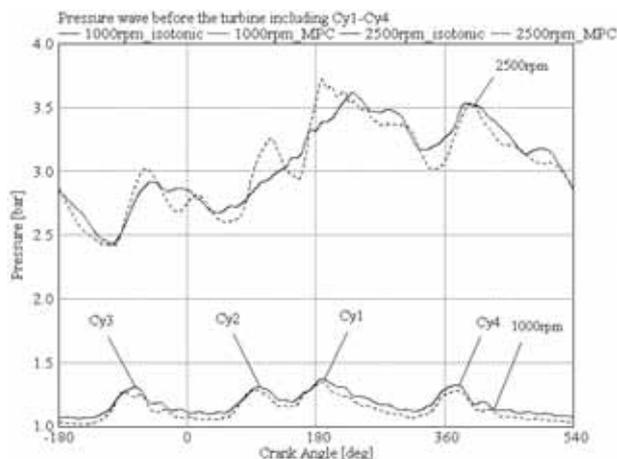


图 9 1000r/min 和 2500r/min 涡轮前排气压力波

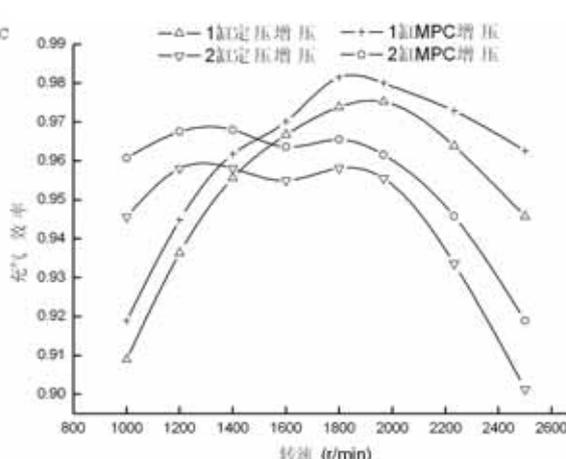


图 10 MPC 增压与定压增压 1、2 缸充气效率对比

6 结论

涡轮增压柴油机的增压效果，很大程度取决于排气系统的设计是否合理。本文在 GT-POWER 软件建立的某八缸增压柴油机模型基础上，首先进行 DOE 计算，确定了 MPC 系统中引射喷管进出口直径对柴油机性能影响最大。在此基础上，使用优化设计模块 Optimizer，对各结构参数进行优化计算，最终确定排气总管直径是：67mm；引射喷管进出口直径分别是：54mm、42mm。针对定压、脉冲、MPC 三种增压系统的外特性计算与对比，采用 MPC 增压系统的柴油机能实现全转速范围内的油耗最优化。从涡轮前排气压力波形看出，MPC 增压系统极大地改善了 1、2 缸间的排气干涉，提高了增压器的效率。

7 参考文献

- [1] 朱大鑫. 涡轮增压与涡轮增压器[M]. 北京:机械工业出版社,1992.
- [2] 王普凯,毕小平,张更云. 一种废气涡轮增压柴油机的动态仿真模型[J]. 装甲兵工程学院学报, 2007,21(6):54-57.
- [3] 张金伦. 8165 柴油机应用组合脉冲转换(MPC)增压的研究. 车用发动机[J],1990,2:33-34.
- [4] 顾宏中. 涡轮增压柴油机热力过程模拟计算[M]. 上海:上海交通大学出版社,1985.
- [5] 刘毅,黄佑生. 12V150 车用柴油机排气系统研究[J]. 燃烧科学与技术,1999,5(3):304-307.
- [6] 杨守平,张付军,赵长禄等. 基于 GT-POWER 的柴油机涡轮增压系统匹配方法研究[A]. 中国内燃机年会. 中国内燃机年会 2008 年学术年会暨大功率柴油机分会六届二次联合学术年会论文集[C]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2008.373-377.
- [7] 赵选民. 试验设计方法[M]. 北京:科学技术出版社,2006.