

基于 DOE 的船用中速柴油机性能优化仿真

Optimized Simulation of Performance on Middle Speed Marine Diesel Engine Base on DoE

张东明 平涛 张文正 胡必柱

(中国船舶重工集团公司第七一一研究所)

摘 要: 将试验设计 (DoE) 方法应用于采用 EGR 技术的船用中速柴油机多参数多目标优化仿真分析过程中。通过 V-optimal 试验设计方法确定了仿真方案, 利用试验数据标定的 DiJet 模型及整机仿真模型保证了所建立的响应面模型的预测精度。并利用建立的响应面模型对柴油机性能进行了预测和全局优化, 确定了满足 Tier III 排放的目标机型运行边界参数的优化匹配关系。与 GT-power 软件计算对比结果表明, 基于 DoE 的船用柴油机性能优化设计过程, 可大幅缩减仿真方案的数量和缩短研究周期。

关键词: 船用中速柴油机、DoE、EGR、性能优化

Abstract: In this work the method of design of experiments (DOE) were applied on the process of multi-parameters optimization of middle speed marine diesel engine. Use V-optimal method makes the simulation plan, and validated the precision of response surface model by the calibrated DiJet model and multiple cylinder engine simulation models. The performance of marine diesel engine were predicted and optimized by the response surface model, and confirmed the optimized operation parameters to meet the IMO Tier III emission standard. The comparison between response surface model and the GT-power simulation results showed that the optimization process of marine diesel engine performance base on DoE could reduce simulation case number and period obviously.

Key words: Middle speed marine engine、DoE、EGR、Performance optimization

1 引言

随着国际海事组织 (IMO) Tier III 排放法规实施期限的日益临近, 世界各大船用柴油机生产商和研究机构都在加紧对满足排放法规要求的新机型进行研究。目前, 被证实满足此阶段排放法规的柴油机 NO_x 减排技术途径主要有两种: 选择性催化还原 (SCR) 技术和废气再循环 (EGR) 技术。

EGR 是降低 NO_x 排放的有效技术措施之一, 但该技术的应用会降低柴油机燃油经济性并增加颗粒物排放量。如果要改善 EGR 技术应用带来的以上问题, 就需要对柴油机的燃油、增压、配气系统参数进行综合优化。由于可控参数及优化目标较多, 传统的单目标设计方法已无法得到柴油机整体全

局最优解，所以此时需要借助科学的试验设计方法利用较少的试验或仿真次数，在较短时间内达到预期的效果，降低研发成本。

试验设计 (Design of experiments, DoE) 是一种以统计学理论为基础，对试验方案进行优化设计、以降低试验误差和生产费用，减少试验工作量并对试验结果进行分析的科学方法。本文在 GT-Power 软件平台上将 DoE 技术引入某款船用中速柴油机的多参数多目标优化匹配过程中，通过 V-optimal 试验设计方法制定仿真方案，并对仿真结果建立响应面预测模型；之后，利用预测模型研究不同参数对柴油机性能及排放指标的影响规律，并通过对预测模型的全局优化，从而得到在满足 Tier III 排放法规和保持动力性输出的前提下的多参数优化匹配方案。最终将响应面模型预测结果与仿真结果进行了对比验证。

本文中试验设计流程如图 1 所示。首先确定 DOE 的目的和因子的取值范围（样本空间），其次制定仿真方案并利用标定好的仿真模型进行模拟计算，接下来建立响应面模型并校核模型预测精度，最终利用响应面模型进行全局优化，确定多参数优化匹配关系并进行验证。

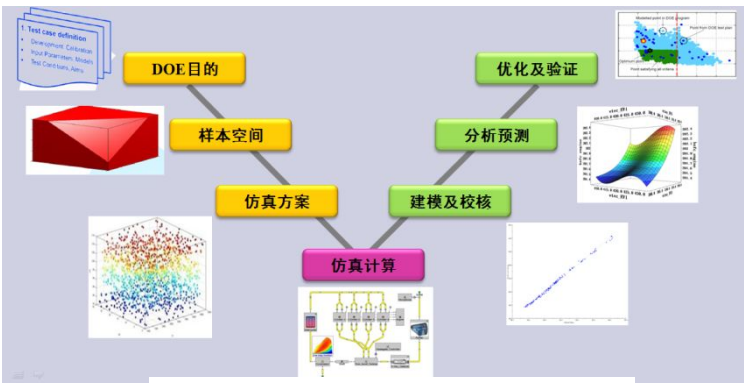


图 1 试验设计流程

2 仿真模型及 DoE 仿真方案

2.1 仿真模型标定

本文研究样机为一款应用 EGR 技术的船用中速柴油机，其基本参数如表 1 所示。本文中利用 GT-Power 软件进行仿真分析的流程如图 2 所示。仿真模型中的 Di jet 燃烧模型利用不同工况不同 EGR 率下单缸机试验数据进行标定。图 3 为部分工况点的 Di jet 燃烧模型的标定结果。从图中可以得知，不同工况下缸内压力和放热率曲线的试验结果与预测结果都能较好的吻合，满足工作过程仿真精度要求，所以认为经标定的燃烧预测模型可用于研究对象的性能及排放特性的预测。

表 1 柴油机基本参数

额定转速/r/min	1000
额定功率/kW	1320
缸数	6
缸径/mm	210
冲程/mm	320
单缸排量/L	11.08
燃油系统	高压共轨
EGR 型式	高压 EGR
用途	船用辅机

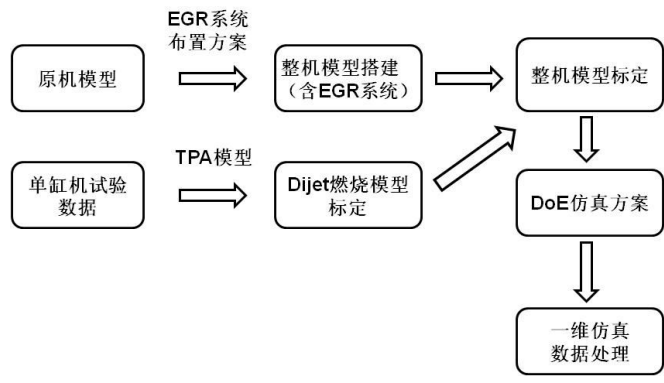


图2 一维仿真分析流程

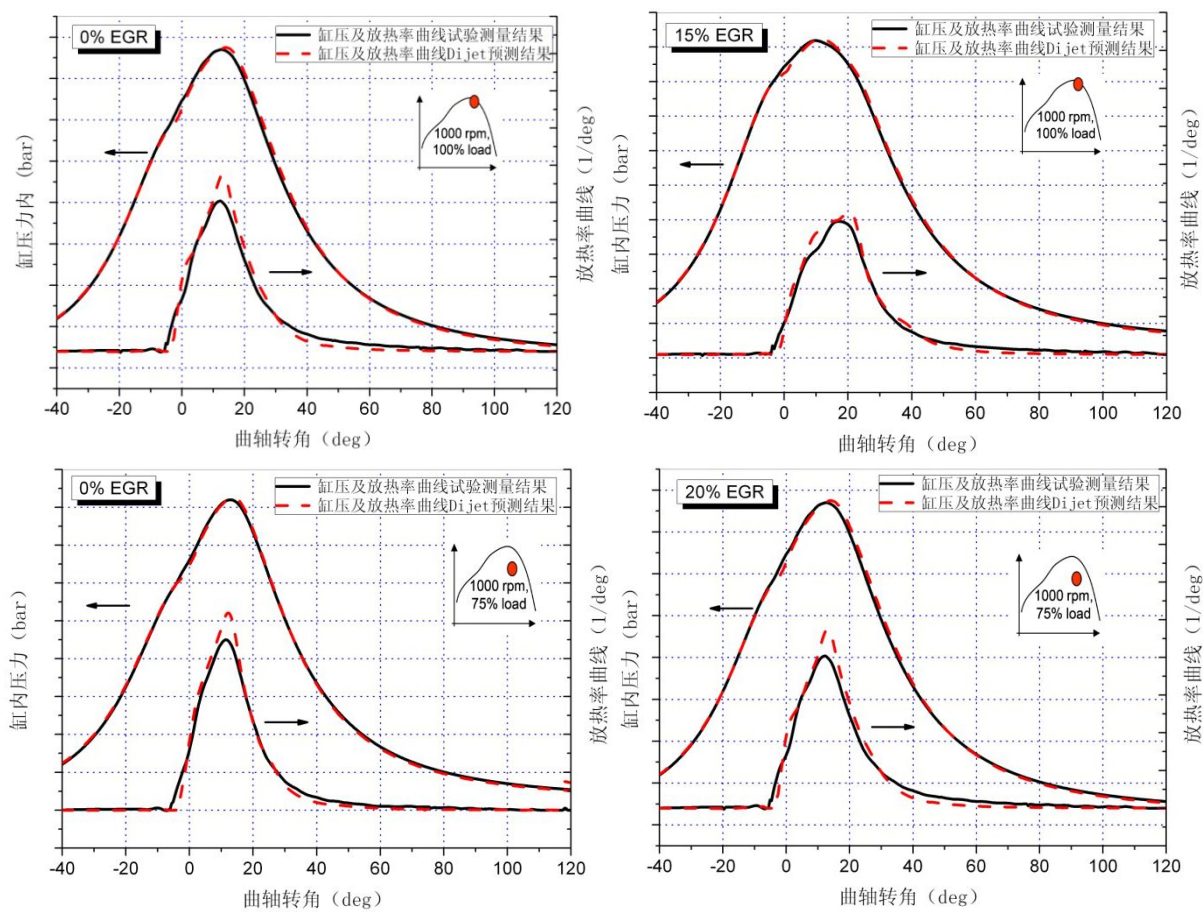


图3 Dijet 燃烧模型标定结果

2.2 DoE 仿真方案确定

通过少量的仿真结果建立的响应面模型进行准确预测的前提是建立正确的响应面预测模型，而 DoE 仿真方案的确定对响应面模型的质量具有决定性作用。本文研究的参数因子及其取值范围如表 2 所示。根据因子的水平设置，若采用全因子设计则需要进行 400000 ($10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 4$) 个工况点的仿真，数量巨大，所以本文选择可大大降低仿真次数的最优化试验设计方法进行仿真方案制定。适用于发动机的最优化设计方法为 D 最优化 (D-optimal) 和 V 最优化 (V-optimal) 方法。由于 V-optimal 方法以模型响应预测误差最小化为优化目标，且样本空间分布更为均匀，更适合于发动机多参数匹配优化，所以本文选择 V-optimal 的计算结果作为样本点的设计方案。最终通过 V-optimal

设计的仿真方案数为 98 个，其空间分布如图 4 所示。

表 2 因子水平数设置

参数	单位	最小值	最大值	水平数 (个)
NO _x 排放量 (NO _x)	g/kWh	2	5	10
喷油时刻 (SOI)	° CA	-10	0	10
喷油压力 (Pinj)	bar	800	1500	10
Miller 正时 (IVC)	° CA	510	540	10
EGR 冷却温度 (Tegr)	°C	70	150	10
负荷 (Load)	%	25	100	4

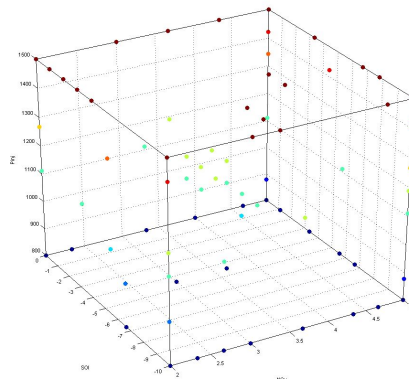


图 4 仿真方案空间分布

3 仿真数据处理

3.1 响应面模型建立

响应面模型的建立一般采用三阶多项式模型或者二阶多项式模型，有时也会采用神经网络模型。根据不同的目的、调节参数和试验工况点选择的模型也不同，通常需要根据模型的精度来判断哪个模型更适合一些。响应面模型精度一般通过决定系数 R^2 来判断， R^2 越接近 1 说明响应面模型拟合效果越好。本文采用二阶多项式模型对部分响应指标建立的响应面模型的决定系数如图 5 所示。从图中可以得知，各响应面模型的 R^2 都非常接近于 1，所以建立的响应面模型可用于研究样机的性能及排放参数的预测及多参数多目标的优化匹配。

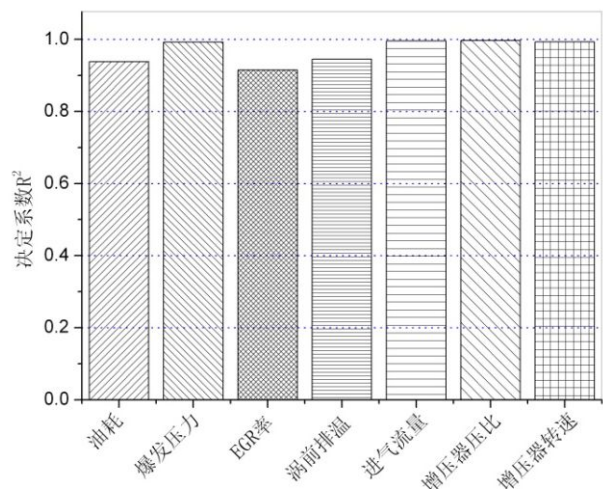


图 5 响应面模型决定系数

3.2 基于响应面模型性能预测

利用建立的响应面模型，只改变其中一个因子的取值即可离线预测该参数对性能指标的影响规律，而不需要再进行一维仿真，从而可大大降低仿真次数。图 6 分别为以喷油时刻和负荷两因素为

例介绍其对油耗和 EGR 率进行预测的结果。从图 6a 中可以得知, 不同的 NO_x 排放量下, 燃油消耗率随着喷油时刻的推迟而增加, 额定负荷工况喷油时刻在 -8° CA 之前喷油才能维持较好的燃油经济性; 从图 6b 中可知, NO_x 排放量越小, 则需要越大的 EGR 率。如欲使 NO_x 排放达到 Tier III (NO_x 综合排放小于 2.26g/kWh) 水平, 则额定负荷 EGR 率需要在 15-20% 之间, 而部分负荷工况的 EGR 率则需要在 20-25% 之间。

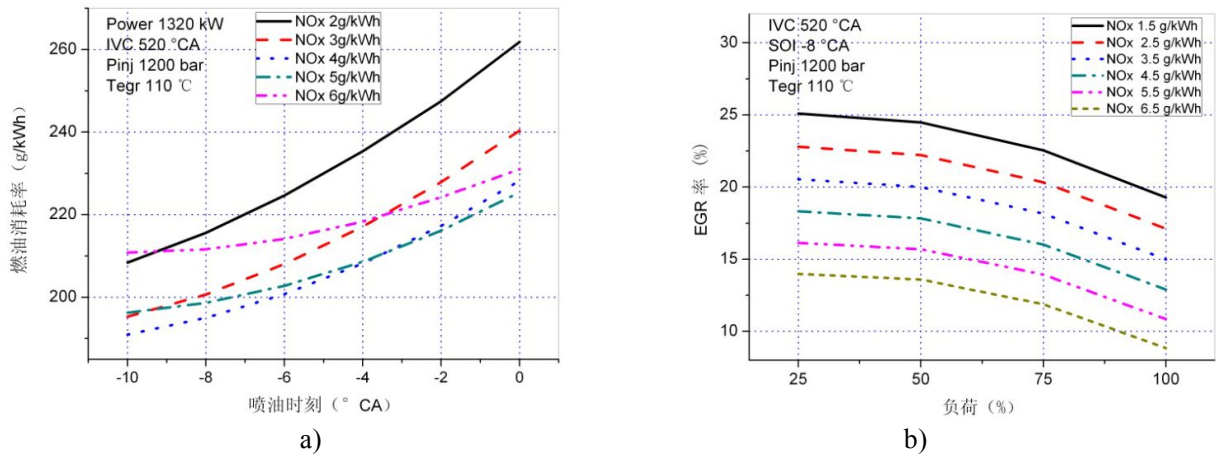


图 6 响应面模型预测结果

3.3 基于响应面模型的全局优化

利用上文中介绍的响应面模型初步预测的多参数的匹配方案作为优化算法的初始值进行寻优。本文以额定负荷多参数优化过程为例介绍多参数匹配过程。优化目标为: 额定负荷 NO_x 排放目标值为 3g/kWh, 且燃油消耗率最低, 缸内过量空气系数最高, 最高爆发压力、增压器压比及转速不超过设计限值。由于优化目标不唯一, 且目标之间存在 Trade-off 关系, 优化解不可能是单一解, 而是一个解集, 即 Pareto 最优解集。本文选择第二代非劣排序遗传算法 NSGA-II (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm) 的多目标优化算法对各响应面模型进行寻优来确定最佳参数匹配方案。图 7 为部分参数 (喷油时刻和进气阀关闭时刻) 对燃油消耗率的 Pareto 最优解集, 图中黑色点为可行解, 蓝色点为 Pareto 解, 绿色点为最优解。

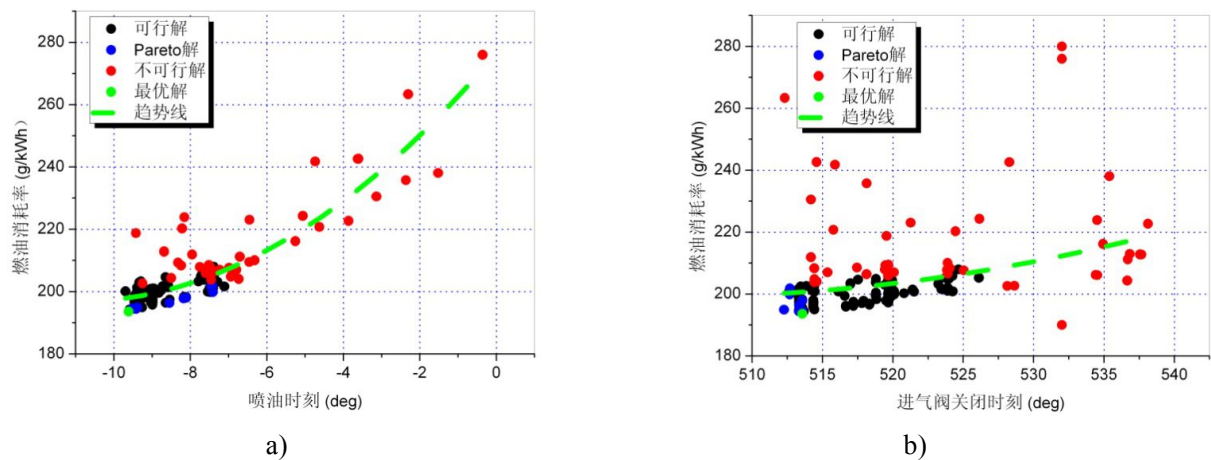


图 7 部分参数对燃油消耗率的 Pareto 解集

3.4 基于响应面模型优化结果验证

图 8 为部分响应指标利用响应面模型的优化结果与 GT-power 软件计算结果的比较。从对比结果

可知, 基于响应面模型的优化结果与仿真软件计算结果非常接近, 相对误差都小于 5%。这就证实了本文中采用的优化方法在大量减少仿真数量的同时, 也能保证优化结果的有效性。

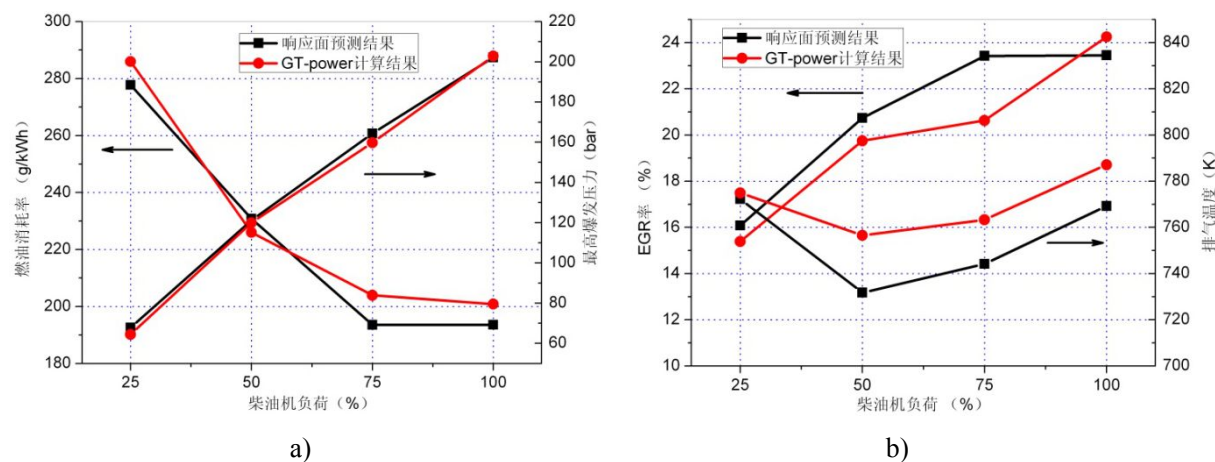


图 8 基于响应面模型的预测结果与仿真结果对比

4 结论

- 1) 本文结合采用 EGR 技术的船用中速柴油机多参数优化匹配过程, 介绍了利用 DoE 方法进行优化仿真的具体流程。
- 2) 针对本文研究的参数及水平设置, 采用更适合于柴油机多参数多目标优化的 V-optimal 试验设计方法制定仿真方案, 与全因子方法制定的方案相比, 只需进行 1/4000 的仿真量即可达到误差小于 5% 的预测结果。
- 3) 通过试验数据标定的 DiJet 燃烧模型和整机模型, 利用 V-optimal 试验设计方法确定仿真方案, 并利用决定系数 R^2 进行评价的响应面模型进行柴油机性能参数离线预测和全局优化, 可以实现以较少的仿真次数和较短研究周期内达到预期目标的效果。

5 参考文献

- [1] 倪计民. DoE 在高压共轨柴油机优化设计中的应用. 内燃机学报, 2009, 27 (3): 231~236
- [2] 尹自斌. 船舶柴油机 NOx 排放特性神经网络预测中的试验设计. 舰船科学技术, 2010, 32 (3): 32~35
- [3] 谢辉, 陈礼勇. 电控柴油机标定中空间填充试验设计的应用研究. 小型内燃机与摩托车, 2008, 37 (3): 66~68
- [4] 王继勇, 李助军. 均匀试验设计方法在柴油机多变量优化中的应用. 试验与研究, 2006, (1): 6~8
- [5] 余宏峰. 正交试验设计方法在柴油机燃烧系统参数仿真优化中的应用. 北京: APC 联合学术年会论文集, 2009
- [6] 闫伟. 直喷式柴油机燃烧系统的均匀试验设计研究. 机械工程学报, 2005, 41 (1): 212~215